

**TAM FİBER OPTİK AKUSTİK VEKTÖR ALGILAYICI
SİSTEMLERİNİN SİMÜLASYONU VE SİSTEMLERİN
HASSASİYET ANALİZİ**

**SIMULATION OF ALL FIBER OPTIC ACOUSTIC
VECTOR SENSOR AND ANALYSIS OF SYSTEM
SENSITIVITY**

BİLGE KARATAŞ SORANLAR

PROF. DR AKIN BACIOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2023

ÖZET

TAM FİBER OPTİK AKUSTİK VEKTÖR ALGILAYICI SİSTEMLERİ SİMÜLASYONU VE SİSTEMLERİN HASSASİYET ANALİZİ

Bilge KARATAŞ SORANLAR

Yüksek Lisans, Fizik Mühendisliği Bölümü

Danışman: Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

Haziran 2023, 90 Sayfa

Akustik vektör algılama için geliştirilen tam fiber optik algılayıcı sistemler yüksek hassasiyet, küçük hacimsel yük, düşük maliyet ve elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi sebebiyle akustik dalga ölçümlerinde kullanılmaktadır. Fiber optik tabanlı akustik sistemler, limanlarda su altı güvenliğinin sağlanmasından, denizaltı yan dizin sonarlarına, deniz dibi doğal gaz aramasına, balık tespit edilmesine kadar pek çok alanda mevcut yöntemlere alternatif oluşturmaktadır.

Fiber optik tabanlı akustik algılayıcı tasarımlarında Fiber Bragg Izgarası (Fiber Bragg Grating, FBG) teknolojisi ile mandrel tabanlı girişim sistemleri üzerine çalışmalar yürütülmektedir. FBG yapısının küçük ebatlarda uygulanabilirliği nedeniyle, mevcut ticari ürünlerin yanında, literatürdeki yüksek hassasiyetli algılayıcı tasarımları ile de yarışabilmesi yönünden umut vericidir.

Bu tez kapsamında FBG tabanlı optik algılama yöntemi ile ataletsel ivme ölçer tasarımı yapılmıştır. Merkezi dalga boyundaki kaymaya göre, sistemin simülasyonu yapılmış ve analiz sonuçları gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmaları, alüminyum alaşımı ve poli laktik asit (PLA) malzemeleriyle tamamlanmış; kolay üretilabilirliği nedeniyle PLA ile düşük frekanslarda çalışabilen bir sensör üretilmiştir. Bunun yanında, PLA ile üretilmiş ataletsel vektör sensörün, akustik sinyalin geliş yönüne verdiği tepki incelenmiştir. Farklı geometrik parametre setlerine göre simülasyon çalışmaları yapılmış ve elde edilen sonuçlar, ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: ataletsel vektör sensör, tam fiber optik algılayıcılar, FBG, mandrel tabanlı sensörler, su altı akustik sensörler, ataletsel ivmeölçer

ABSTRACT

SIMULATION OF ALL FIBER OPTIC ACOUSTIC VECTOR SENSOR AND ANALYSIS OF SYSTEM SENSITIVITY

Bilge KARATAŞ SORANLAR

Master of Science, Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

June 2023, 90 Pages

Fiber optic sensor systems developed for acoustic vector detection are utilized in acoustic wave measurements due to their high sensitivity, small volume, low cost and insensitive to electromagnetic interference. Fiber optic based acoustic systems offer alternative methods in various fields ranging from underwater security in ports, submarine flank array sonars, underwater natural gas exploration, to fish detection. Research studies have been conducted usually on the mandrel-based interferometric systems with Fiber Bragg Grating (FBG) technology in fiber optic-based acoustic sensor designs. The applicability of FBG structure in small dimensions holds promising prospects, as it can compete with existing commercial products as well as high-sensitivity sensor designs found in the literature.

This thesis presents the design of an inertial accelerometer which uses the FBG-based optical sensing method. The simulation of the system was performed based on the central

wavelength shift. The simulation studies were conducted using aluminum alloy and polylactic acid (PLA) materials. As it is quite easy to process, PLA was used to produce an acoustic sensor which is capable of operating at low frequencies. Additionally, the directional response of the inertial vector sensor made of PLA to the incident acoustic signal was investigated. The simulation studies were done for different sets of geometric parameters. The simulation results were compared to actual measured values.

Keywords: inertial vector sensor, full fiber optic sensors, FBG, mandrel based sensors, underwater acoustic sensors, inertial accelerometer.

TEŐEKKÜR

Çalıőmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Akın BACIOğLU' na; kıymetli tecrübelerinden faydalandığım, tez konusunu belirlemede desteğini esirgemeyen ve yanımda olan Sayın Dr. İbrahim Levent BUDUNOğLU' na çok teőekkür ederim.

Tez yazım sürecinde motivasyon ve destekleriyle yanımda olan eőim Emre SORANLAR' a ve kızım Suna SORANLAR' a teőekkürü borç bilirim.

Destekleriyle bugüne kadar edindiğim bilgi birikimime katkısı olan ve çalıőmalarımı gerçekleőtirebilmem için yazılım, donanım ve test cihazlarını kullanmama olanak sağlayan METEKSAN SAVUNMA A.Ő.' ye; yine aynı őirkette bulunan Elektro-Optik Sistem Tasarım Mühendisliği Grubu'na teőekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Su Altı Akustik Vektör Sensörleri	5
2.1.1 Transdüser	5
2.1.2 Mikro Elektro Mekanik Tabanlı Sensörler.....	7
2.1.3 Gerinim Ölçer Sensörler.....	8
2.1.4 Fiber Optik Sensörler	9
2.2. Su Altı Akustik Vektör Sensörler için Çoklama Yöntemleri	15
2.2.1 Zamansal Çoklama Yöntemi	16
2.2.2 Dalga boyu Çoklama Yöntemi	17
2.2.3 Frekans Çoklama Yöntemi	17
2.2.4 Hibrit Çoklama Yöntemi	18
2.3. Su Altı Akustik Vektör Sensörlerinin Tasarım	19
3. ATALETSEL İVMEÖLÇER VEKTÖR TASARIMI	22
3.1. Sensör Tasarımı.....	22
3.1.1. Tasarım Gereksinimleri.....	22
3.1.2. Teorik Analiz.....	23
3.1.3. Nümerik Analiz	28
3.1.4. FBG tasarımı	43
3.2. Sensör Optimizasyonu.....	45
3.3. Sensör Sisteminin Karakterizasyonu	47
4. SONUÇ	65

5. KAYNAKLAR	69
EKLER.....	77
EK1- Literatür Araştırmaları Detayları.....	77
EK 2 – FBG OS1100 Bilgi Notu Özellikleri	83
EK 3 – Thorlabs S144C Güç Dedektörünün Özellikleri	84
EK 4 – Thorlabs Optik Spektrum Analizör Özellikleri	85
EK 5 – Optik Elemanların Özellikleri - Hibrit ve FBT Bağdaştırıcı	86
EK 6 – Optik Elemanların Özellikleri – 980 nm pompa lazeri	87
EK 7 – Optik Elemanların Özellikleri – Aktif Kazanç Fiberi	88
EK 8 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu.....	89
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Su altı sensörlerin çalışma prensibi [58]	6
Şekil 2.2 Su altı sistemler için tasarlanmış piezoelektrik tabanlı bir vektör sensör [60] ..	6
Şekil 2.3 MEMS tabanlı ivmeölçerin çalışma prensibi [61]	7
Şekil 2.4 (a) TDK Elektronik firmasına ait AXO215 MEMS ivmeölçer modeli, (b) STM Elektronik firmasına ait LPS33HW MEMS ivmeölçer modeli	8
Şekil 2.5 Gerinim Ölçer Sensörler için Wheatstone köprü devresi [62]	8
Şekil 2.6 Mach-Zender İnterferometresinin blok diyagramı.....	10
Şekil 2.7 Michelson İnterferometresinin blok diyagramı.....	10
Şekil 2.8 Mandrel yapısı [43]	11
Şekil 2.9 İnterferometrenin genlik şematik gösterimi	12
Şekil 2.10 Fiber Bragg Izgara yapısı ile gelen, yansıyan ve geçen dalga şiddetlerinin dalga boyu ile değişimi [16]	14
Şekil 2.11 Fiber Bragg Izgara yapısından gelen optik sinyalin lineer filtre kullanılarak dalga boyuna karşılık genlik modülasyon gösterimi [78]	15
Şekil 2.12 Zamansal çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]	16
Şekil 2.13 Dalga boyu çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]	17
Şekil 2.14 Frekans çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]	18
Şekil 2.15 Hibrit çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [81]	18
Şekil 2.16 Tasarım adımlarının şematik gösterimi.....	19
Şekil 2.17 Su altı ve su üstü için gürültü kaynakları [82]	20
Şekil 3.1 Canlı/cansız algılama için gerekli çalışma frekans aralıkları [83]	22
Şekil 3.2 Sensöre kütle yerleşmiş hali (m: ataletsel kütle, s: montaj deliği).....	23
Şekil 3.3 Sistemin yandan kesit görünüşü.....	24
Şekil 3.4 Basitleştirilmiş hali (Fiber uzunluğu, L0)	24
Şekil 3.5 Fiberin kuvvet ile boyunun değişimi (Fiber uzunluğu, L1)	25
Şekil 3.6 SpaceClaim Modeler aracının görünüşü	28
Şekil 3.7 Sensörün açılı görünüşü	29
Şekil 3.8 ANSYS Modal aracının ara seçimler ile görüntüsü.....	30
Şekil 3.9 Alüminyum alaşımı kullanılan sensör için değişen kütleyle göre doğal titreşim frekansının değişimi	33

Şekil 3.10 Polietilen malzemesi kullanılan sensör için değişen kütleyle göre doğal titreşim frekansının değişimi.....	34
Şekil 3.11 ANSYS Workbench içindeki görüntüsü.....	35
Şekil 3.12 Fiber üzerindeki kütle yer değişiminin zamana bağlı grafiği	36
Şekil 3.13 Fiberin dalga boyunun zamana bağlı değişim grafiği	36
Şekil 3.14 Stp1 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	37
Şekil 3.15 Stp2 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	37
Şekil 3.16 Stp3 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	38
Şekil 3.17 Stp4 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	38
Şekil 3.18 Stp5 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	39
Şekil 3.19 Stp6 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	39
Şekil 3.20 Stp7 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	40
Şekil 3.21 Stp8 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	40
Şekil 3.22 Stp9 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	41
Şekil 3.23 Stp10 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	41
Şekil 3.24 Stp11 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi	42
Şekil 3.25 FBG' nin dalga boyuna göre verdiği tepki (Merkezi dalga boyu: 1550 nm)	44
Şekil 3.26 Sensör kolu uzunluğunun doğal titreşim frekansına etkisi	46
Şekil 3.27 Sensör kolu uzunluğunun hassasiyete etkisi.....	46
Şekil 3.28 Yay sabitinin sensör parametrelerine etkisi.....	47
Şekil 3.29 (a) İleri yönlü besleme ile fiberdeki sinyalin güçlendirilmesi	49
Şekil 3.29 (b) Geri yönlü besleme ile fiberdeki sinyallerin güçlendirilmesi	49
Şekil 3.30 980 nm diyot için Akım-Güç grafiği	50
Şekil 3.31 Aktif fibere kadar oluşturulan optik deney kurulumu	51
Şekil 3.32 1550 nm dalga boyunda çalışan ASE ışık kaynağının aktif fiberinin uzunluk optimizasyonu	52
Şekil 3.33 Spektrum analizörden alınan verinin Gaussian eğri ile uyarlaması	53
Şekil 3.34 Optik algılama kurulumunda iki adet FBG yaklaşımı.....	54
Şekil 3.35 Sirkülatör optik elemanın sinyal geçiş yönleri	54
Şekil 3.36 Sensör yapısında kullanılan optik algılama birimi	56
Şekil 3.37 PLA malzemesi ile üretilen stp3 geometrisinin k_{yay} ile etkileşimi	58
Şekil 3.38 PLA malzemeli sensör için ölçüm düzeneği	60
Şekil 3.39 Sensörün yay ile bütünleşmiş görüntüsü	60

Şekil 3.40 Sensöre ait ölçüm düzeneği.....	61
Şekil 4.1 Gelen akustik dalgaya göre FBG'lerin davranışı; sırasıyla +x (0°) ve +y (90°) ve +x (45°) ve +y (45°)	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Geometrik Parametre Setleri	29
Çizelge 2. Polietilen malzeme özellikleri	31
Çizelge 3. Alüminyum alaşımlı malzeme özellikleri	32
Çizelge 4. Seçilen kütlenin geometrik parametre setlerine ilişkin hesaplanan hassasiyet değerleri	43
Çizelge 5. Fiber Bragg Izgara için simülasyon parametreleri	44
Çizelge 6. Fiber Bragg Izgara simülasyonu sonucunda hesaplanan dalga boyu değişimleri	45
Çizelge 7. Pompa lazer diyot için akım-güç verileri	50
Çizelge 8. ASE ışık kaynağının aktif fiber uzunluk optimizasyonu.....	52
Çizelge 9. FBG’lerden geri dönen sinyalin dalga boyları	55
Çizelge 10. FBG’lerden geri dönen sinyalin güç değerleri	55
Çizelge 11. FBG’lerin firma tarafından verilen karakteristik özellikleri	56
Çizelge 12. Optik algılama birimindeki FBG’lerin dalga boyları	57
Çizelge 13. Optik algılama birimindeki FBG’lerin güç özellikleri	57
Çizelge 14. Simülasyon için kullanılan PLA malzemesinin özellikleri	58
Çizelge 15. Stp3 geometrisine göre PLA malzemesinden üretilen parçanın doğal titreşim frekansları	59
Çizelge 16. Stp3 geometrisine göre PLA malzemeli sensör için simülasyon hassasiyet değerleri	59
Çizelge 17. Stp3 geometrisine göre PLA malzemeli sensör için alınan ölçüm sonuçları	61
Çizelge 18. Simülasyon ve ölçüm verilerinin karşılaştırılması	66
Çizelge 19. Seçilen geometrilerin öngörülen değerleri	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	Işığın boşluktaki hızı
P	Basınç
t	Zaman
λ	Dalga boyu
ω	Açısal frekans
m	Ataletsel kütle
L	Sensör kol uzunluğu
Δx	Sensör kolunun x eksenindeki yer değiştirmesi
Δy	Sensör kolunun y eksenindeki yer değiştirmesi
L_0	Fiberin başlangıç uzunluğu
L_1	Fiberin kuvvet uygulandıktan sonraki uzunluğu
Δl	Fiber boyunun kuvvet uygulandıktan sonraki değişimi
x	Sensörün yere göre aldığı yol
y	Kütlenin dış kabuğa göre aldığı yol
z	Kütlenin yere göre aldığı yol
f	Sistemin frekansı
$\Delta\lambda_B$	Fiber Bragg Izgara'nın dalga boyu değişimi
λ_B	Fiber Bragg Izgara'nın merkezi dalga boyu
α_f	Fiberin termal katsayısı
ζ	Termal optik katsayısı
P_e	Fiberin esneklik katsayısı
ΔT	Sıcaklık değişimi

$\Delta\varepsilon$	Fiberin gerilim değişimi
S	Sistemin hassasiyeti
E_f	Young modülü
A_f	Fiberin ara kesit alanı
L_{FBG}	Fiberdeki ızgaranın uzunluğu
T_B	Geçirgenlik oranı

Kısaltmalar

PGC	Faz Kaynaklı Taşıyıcı (Phase Generated Carrier)
FBG	Fiber Bragg Izgara (Fiber Bragg Grating)
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
Stp	Geometrik Parametre Setleri

1. GİRİŞ

Akustik dalganın taşıdığı bilgiyi algılamak ve analiz etmek pek çok sektör için araştırma konusu olmuştur. Algılayıcı tasarımı, su altındaki canlıların çoğaltılmasından ya da belli bir türün tespitinden, savunma alanındaki insanlı/insansız deniz aracı ya da tespit edilmesi gereken herhangi bir tehdit gibi pek çok alanı kapsayan nitelik taşımaktadır. Bu alanların yanı sıra sismik araştırmalar için son zamanlarda kullanılmaya başlanan erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinde büyük rol oynamaktadır [1-3]. Özellikle fiber optik akustik sensör modelleri son zamanların en çok araştırma yapılan konularından biri haline gelmiştir. Yaygın ve çoklu kullanım alanı sayesinde geniş yelpazesi bulunmaktadır [2].

Akustik dalga ile gelen bilgi fiber tabanlı ölçüm sistemlerinden yararlanılarak titreşim algılama modellerinin geliştirilmesiyle hassasiyeti arttıran, çalışma frekans aralığını genişleten ya da darlaştıran, daha uygun maliyetli, daha az yer kaplayan algılayıcı modelleri tasarlanmaktadır. Bu algılayıcı modellerini genel olarak diyafram tipi, membran tipi, gömülü yapıya sahip olan, rulman tipi (ing. bearing) ya da manivela (ing. cantilever) tipi olarak sınıflandırmak mümkündür [3,4].

Fiber optik tabanlı algılama yöntemleri üzerine yapılan araştırmalara göre Fiber Bragg Izgarası (FBG)'nin sensör içine ya da yüzeyine farklı birleştirmeler sonucunda ortaya çıkan tasarımlar mevcuttur. FBG'nin merkezi dalga boyunun değişiminden yararlanarak tasarlanan algılayıcıların bazılarında dirsek yapıları çizgisel [5-7] iken bazılarında üçgene [8-10] benzeyen yapılar kullanılmıştır. FBG yapıları algılama yapılmak istenen sensör eksenlerine ya da ölçüm metotlarına bağlı olarak tekli, çiftli ya da çoklu olarak kullanılmıştır [11-13].

Literatürde yapılan benzeri çalışmalar incelendiğinde algılama yapabilecek boyut sayısına, doğal titreşim frekansına bağlı olarak çalışma frekans aralığına ve hassasiyet değerine göre sınıflandırmak mümkündür [5-8, 9-12] Bütün algılayıcı tasarımlarında optik tabanlı bir algılama yapılmak isteniyorsa, interferometre ölçüm yöntemi ya da FBG ölçüm yöntemi kullanılmıştır. FBG ölçüm yöntemlerinde kütle - yay, membran - kütle,

sensör referans kolu - kütle gibi metotlar ile ataletsel kütle biriminin hareketinden faydalanarak, yönsel ölçüm ya da ivme ölçümü yapılmıştır [14-19, 23-28, 32-36, 40- 43].

Algılayıcı birime uygulanmış olan sistem karakteristikleri, birbirine benzeyen çalışmaları gruplandırabiliriz. Tek boyutta algılama yapabilenler incelendiğinde, en çok seçilen geometri modeli manivela tipli tasarımlar olmuştur [1, 2, 3, 14]. Bu yaklaşımların sonuçlarında ise rezonans frekansı en yüksek 1000 Hz, en düşük 12 Hz sonuçları elde edilmiştir. Hassasiyet değeri ise maksimum 450 pm/*g*'dir. Çalışmalardaki algılayıcı tasarımlarında, sensör kolunun üzerinde bir konuma sabitlenmiş bir adet FBG ile kullanılmıştır. Manivela tipli ancak iki FBG yapısı ile hassasiyet arttırmaya yönelik geliştirilen modeller de bulunmaktadır [8, 15-18, 19-20]. Bu araştırmaların elde edilen sonuçlarına göre 150 Hz doğal titreşim frekansı ve 1711 pm/*g* hassasiyete ulaşan Li vd. [16], düşük - orta frekans aralıkları için optimize edilmiş sensör tasarımını rapor etmiştir. Dörtgen yapısı ile farklı bir bakış getiren, düşük çalışma frekans aralığına ve yüksek hassasiyete sahip bir başka çalışma ise, 30 Hz doğal titreşim frekansı ile 1110 pm/*g* değerleri ile dikkat çekmektedir [8].

Tek boyutta algılayıcı tasarım çalışmalarının arasında diyafram tipi [9, 12, 21-24, 25] yaklaşımlar da mevcuttur. Bu çalışmalar yaklaşık 0,3 mm ile 1 mm aralığında daha esnek olan membran malzemeler kullanarak, algılayıcı hassasiyetin artırılması amaçlanmıştır. Bu yaklaşımlarda rezonans frekansının düşük olması nedeniyle çalışma aralıkları 68 Hz [9], 10 Hz [21], 100 Hz [22], 28 Hz [23] mertebesinde iken hassasiyet değerleri 81 pm/*g* [9], 410,7 pm/*g* [21], 108,6 pm/*g* [22], 2131,5 pm/*g* [23]'dir. Son yıllarda yapılmış olan bir çalışmada, farklı diyafram geometri ve malzemesi sayesinde rezonans frekansı yüksek, hassasiyeti yüksek optimize bir tasarım geliştirilmiştir [26]. Bu çalışmadaki algılayıcı için hassasiyet 763,2 pm/*g* ve en fazla çalışabileceği frekans ise 754,3 Hz olarak verilmiştir [26].

“L” veya “H” şeklindeki geometriler ile algılayıcı tasarımlarında [11, 27-30, 31-33], kütlelerin algılayıcı sensör birimi ile bütünleşmiş farklı geometri formları bulunur. Bu incelemelerde çalışma frekans aralıkları, diyafram tipi ile tasarlanmış algılayıcılara göre daha geniştir, ancak hassasiyet oranları düşmektedir. Örneğin, 1700 Hz'e kadar çalışma

frekans aralığı tanımlanan çalışma için hassasiyet değeri 18.9 pm/ g olarak elde edilmiştir. Algılayıcı hassasiyetinin en yüksek olduğu çalışmalardan birinde ise, çalışabilir en fazla frekans değeri 110 Hz iken, hassasiyeti 106.5 pm/ g ' dir [33].

Menteşe ya da rulman tipli [30, 34-35, 36] yapılarda da hem çalışma frekans aralıklarını yüksek tasarımlar çalışılmıştır. Hareketli mekanizma sistemi kullanılarak FBG' nin boy değişiminden yararlanarak, dalga boyu ölçümleri ile ivmeölçer tasarımları mevcuttur. Frekans çalışma aralıkları 2300 Hz'e kadar uzanabilirken [35], hassasiyet değerleri en fazla 29 pm/ g ' ye kadar çıkabildiği görülmüştür. Farklı bir çalışmada ise çalışma frekans değeri 40 Hz'e kadar çıkabiliyorken, hassasiyeti 577 pm/ g değerine ulaşmıştır [36].

Benzer modellemeler genişletilerek iki ve üç boyutlu çözüm sunabilecek algılayıcı tasarımları da bulunmuştur [37-40, 41-43]. Bu boyutlarda algılama yapabilmek için ikili, dörtlü, altılı FBG yapıları kullanılmıştır. Yapılarda tek eksen boyunca en az iki FBG kullanılarak hassasiyet iki katına çıkarılmıştır.

Kullanım yeri, hassasiyetleri ve rezonans frekans aralıklarına göre pek çok tasarım örneği literatürde bulunmaktadır. Ancak tamamen fiber tabanlı ölçüm yapabilen sensörler genellikle tek boyutta çalışılmıştır. Çoklu boyutlara gidildikçe algoritma ve çoklama metotları ile algılama yapma yetisinin sisteme entegrasyonu şart olmaktadır [44-45, 46-47].

FBG' nin ticari olarak oldukça fazla uygulama alanları mevcuttur [48,49,50,51]. Kullanım yerine ve ihtiyacına göre üretici tarafından FBG yapılarının merkezi dalga boyu, geçirgenliği ve yansıtıcılığı, ızgaralı alanın büyüklüğü, dalga boyu bant genişliği gibi karakteristik özellikleri değiştirilebilmektedir [51]. Bu konu ile ilgili son yıllarda yapılan oldukça geniş araştırmalar mevcuttur [52- 54, 55,-56].

Bu tez çalışmasının amacı yüksek frekanslarda (<1000 Hz) rezonans durumundan uzakta kararlı bir ataletsel ivmeölçer tasarımı yapabilmektir. Ataletsel vektör sensör tasarımı için gerekli genlik bilgisi verisi fiber optik tabanlı algılama yöntemi olan mandrel tipi tasarım yöntemi ile alınacaktır. Yönsel veri ise tamamen optik fiber tabanlı ölçüm yapabilecek FBG yöntemi ile alınacaktır. Tasarlanan sistemin hassasiyeti muadil sayılabilecek literatür araştırmalarda elde edilen değerlere göre daha yüksek olması amaçlanmıştır. Sistemin su altı insanlı/insansız deniz araçları ve sahil güvenlik gibi kritik sektör alanlarında yer bulabilmesi için maliyetinin düşük tutulması ve yenilikçi olmasına özen gösterilmiştir. Tasarlanan sistemin su altı aygıtlar ile deniz seviyesinin korunduğu bir yükseklikte çalışabileceği ön görülmüştür. Bu kapsamda iki boyutlu yönsel ölçüm yapabilecek deniz suyunun sıcaklık değişiminden bağımsız algılama yapabilen bir tasarım geliştirilmiştir. Çalışma içeriğinde üçüncü bölümde sensör tasarımı için farklı geometrik parametre setlerine sahip algılayıcı modelleri geliştirilmiş, nümerik analizleri ve ölçüm düzenekleri sunulmuştur. Elde edilen geometrik parametre setlerinin çalışabileceği frekans aralıkları ve hassasiyetleri çalışmanın dördüncü bölümünde sonuçlandırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

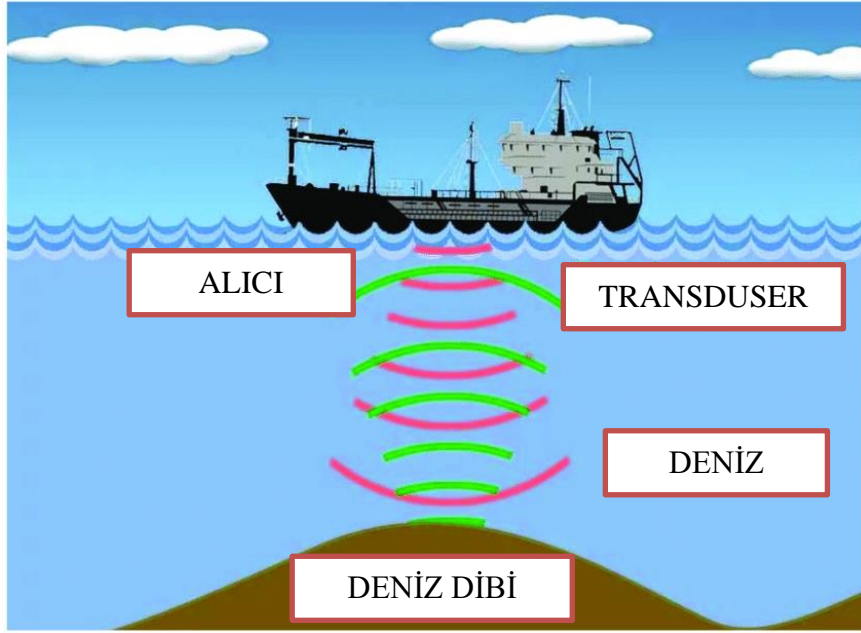
Çalışma kapsamında kullanılacak olan temel nicelikler hakkında bilgi verilecek ve güncel çalışmaların teze ışık tuttuğu konulara yer verilecektir.

2.1. Su Altı Akustik Vektör Sensörleri

Akustik vektör sensörler, akustik basınç hakkında bilgi verdiği gibi akustik partikül hareketini de algılayan yapılardır. Akustik partikülün ivme, hız ve yer değiştirme hareketlerini ölçmeye dayalıdır. Vektör sensörlerin malzemeleri, ölçüm metotları ve yapılarına göre çeşitli isimlendirmeler mevcuttur. Akustik basınç bilgisi, piezoelektrik seramik tabanlı ya da mandrel tabanlı yöntemler ile elde edilebilir. Bu bölümde partikül hareket ölçümü için kullanılan yöntemler sınıflandırılmıştır.

2.1.1 Transdüser

Alıcı ve verici özelliği bulunan elektronik birimler ile arayüzleri oluşturulan elektromanyetik sensör gruplarına transdüser ya da sonar aygıtları denir [57, 58]. Bu aygıtlar kabaca elektriksel sinyali ses dalgasına dönüştürmek için kullanılır. Elektrik enerjisi bir çeşit mekanik enerji olan akustik enerjisine dönüşerek ortama iletilir. Deniz ortamındaki akustik enerji ses dalgası olarak ortamda yayılırken bir cisme çarparsa, kaynak üzerinden geri yansiyacaktır. Kaynaktan dönen bu bilgi transdüser yardımıyla yeniden elektriksel sinyale dönüşecektir. Bu yöntem ile su altındaki kaynak ya da platformların konumları konusunda bilgi elde edilir [57].



Şekil 2.1 Su altı sensörlerin çalışma prensibi [58]

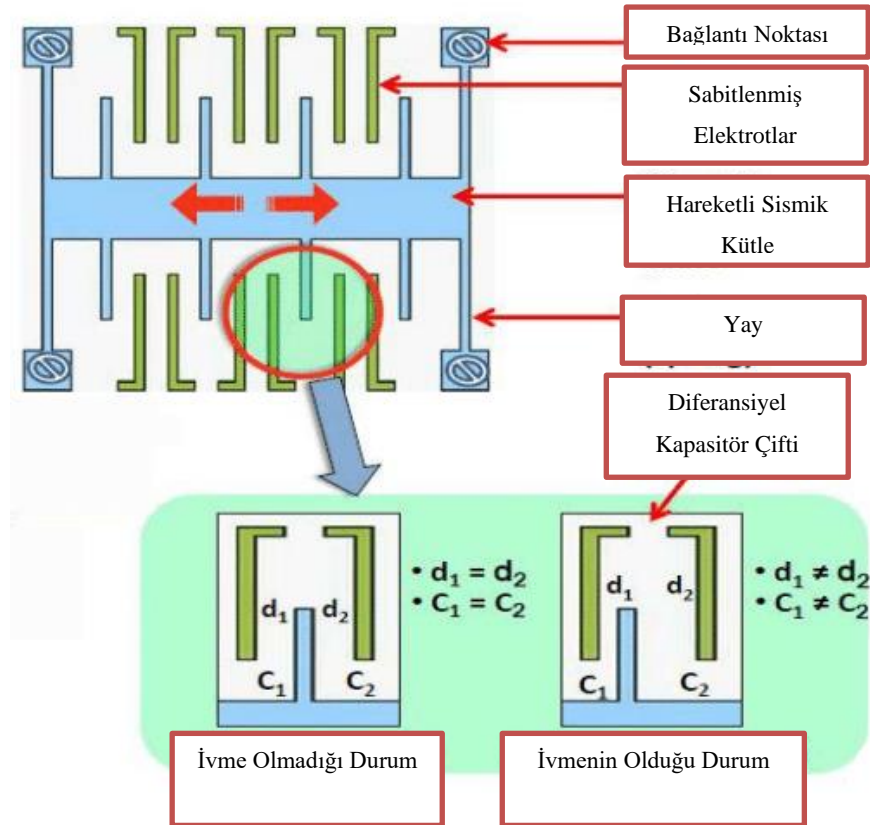
Belirli frekanslardaki akustik dalganın su altı koşullarında yayılmasını ve algılanmasını sağlamak için, transdüser gibi elektromanyetik cihazlar kullanılır. Enerji dönüşümleri bu cihazlar ile sağlanmış olur. Enerji dönüşümünün performansı, malzemenin magnetostriksiyon ve piezoelektrik özelliklerine bağlıdır. Piezoelektrik malzemeler, belli bir basınç altındaki yüzeye elektrik yükü kazandırır ve gerilime uğratılır. Voltaj grafiği değişikçe gelen akustik bilgi hakkında edinilen bilgi değişiklik gösterir. Benzer şekilde magnetostriktif malzemeler, belli bir basınç altındaki yüzeyin manyetik alanını değiştirir ve polarizasyon yönelimleri ile değerleri değişiklik gösterir [59]. Magnetostriktif malzemeler yüksek frekans aralığı ve geniş çalışma sıcaklığı imkanı sağlar iken, piezoelektrik seramikler geniş bant aralığında, düşük çalışma sıcaklığını mümkün kılar.



Şekil 2.2 Su altı sistemler için tasarlanmış piezoelektrik tabanlı bir vektör sensör [60]

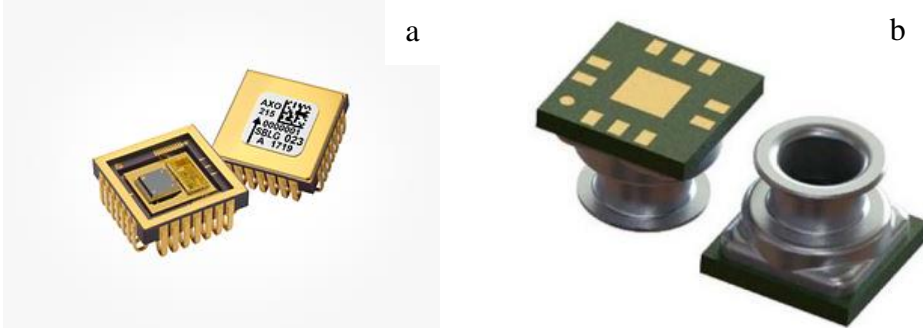
2.1.2 Mikro Elektro Mekanik Tabanlı Sensörler

Yapı üzerine çoğunlukla litografik yöntemler ile oluşturulan akustik basıncı algılamak için üzerine düşen gerinimden, mekanik titreşimden, sıcaklıktan ya da elektriksel duyarlılığından yararlanan sensör gruplarıdır [61]. Gerinim ölçer ile benzer metotlar göstermektedir. Şekil 2.3'te Mikro elektro mekanik tabanlı bir ivmeölçerin çalışma prensibi ile ilgili görsel yer almaktadır. Sabitlenmiş elektrotlar ve hareketli sismik kütle elementi dış ortamda oluşan bir hız değişimine bağlı olarak, aralarındaki mikrometre mertebesindeki boşluklarda kapasitif özellik göstermektedir. MEMS içerisindeki kapasitansın değişimi, dış ortamdan gelen hız değişimi ile doğru orantılı olarak değişir. Bu değişim algoritma yardımıyla çözümlenir [61].



Şekil 2.3 MEMS tabanlı ivmeölçerin çalışma prensibi [61]

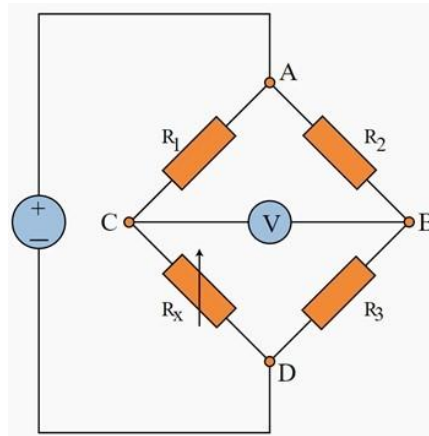
Ticari olarak oldukça geniş bir alanda ihtiyaca yanıt verebilecek özelliklere sahip, çeşitli türde sensörlere ticari olarak ulaşılabilir. Bunlardan bazıları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 (a) TDK Elektronik firmasına ait AXO215 MEMS ivmeölçer modeli, (b) STM Elektronik firmasına ait LPS33HW MEMS ivmeölçer modeli

2.1.3 Gerinim Ölçer Sensörler

Yapı üzerinde akustik basıncın oluşturduğu gerinimleri bir direnç yardımıyla ölçen sensörlerdir [62]. Metal bir yüzeyin test edilen nesneden yalıtılmasına hizmet eden esnek bir alt tabaka üzerine metal levha ya da folyo modeli monte edilir. Bu modelde harici bir kuvvet ile uzunluk değişimi meydana gelir. Bu değişim dijital değerlere dönüştürülebilen, görüntülenen, toplanabilen ve analiz edilebilen bir elektrik sinyaline dönüştürülür. Folyo deseninden geçen akım, paralel ekseninde gerildiğinde sapma miktarına bağlı olarak direnç değişikliği meydana getirir [62]. Wheatstone köprü devresi kurulan bu sistemde, değişen direnç ile ölçüm sağlanmış olur.



Şekil 2.5 Gerinim Ölçer Sensörler için Wheatstone köprü devresi [62]

Bir iletken sıkışma miktarına ve gerilme miktarına göre direnç değişikliği göstermektedir. Şekil 2.5' te gösterilen köprü devresine bilinmeyen bir R_x direnci eklenir. Diğer bilinen direnç değerlerinden yararlanılarak bilinmeyen direnç tespit edilir. R_x 'den herhangi bir akım akmadığında dengelendiği anlamına gelir. Bu dört direnç ile tek eksenindeki gerinim

değişiminin ölçümünü yapabilmek, bilinmeyen R_x direncinin değerinin bulunması ile olur. Direnç değişimine karşılık gelen fiziksel nicelikler elde edildikten sonra, sistemin maruz kaldığı gerinim ölçülmüş olur [62].

2.1.4 Fiber Optik Sensörler

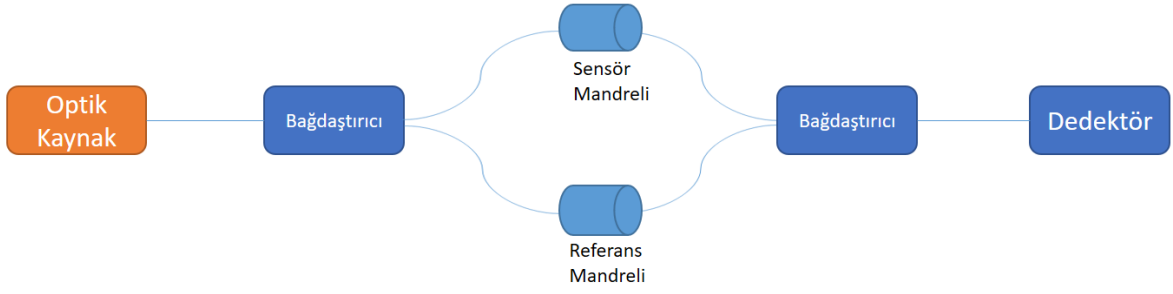
Fiber optik düşük bütçe, küçük ebatlar ve yüksek hassasiyeti sağlaması nedeniyle sensör olarak kullanıma uygun bir teknolojidir [63, 64]. Aynı zamanda elektromanyetik girişimlerden etkilenmemesi nedeniyle akustik ölçümlerde, sıcaklık ve basınç ölçümlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Sızıntı analizi, hava/uzay alanlarında basınç analizi, titreşim analizi, gerinim analizi, ivme analizi yapmak için tercih edilen metotlardandır [48,49,50].

İvmeölçer ve ataletsel vektör sensör için fiber tabanlı yapılar son yıllarda farklı tasarımlar ile geliştirilmektedir [1-5, 6-9, 10-13, 20-25, 28-32, 35-40, 41-44]. Bu sensörlerin algılama yapabilmesi için geliştirilen yaklaşımlar interferometri tabanlı algılama ve FBG tabanlı algılama olarak sıralanabilir [65].

2.1.4.1 İnterferometri Tabanlı Algılama

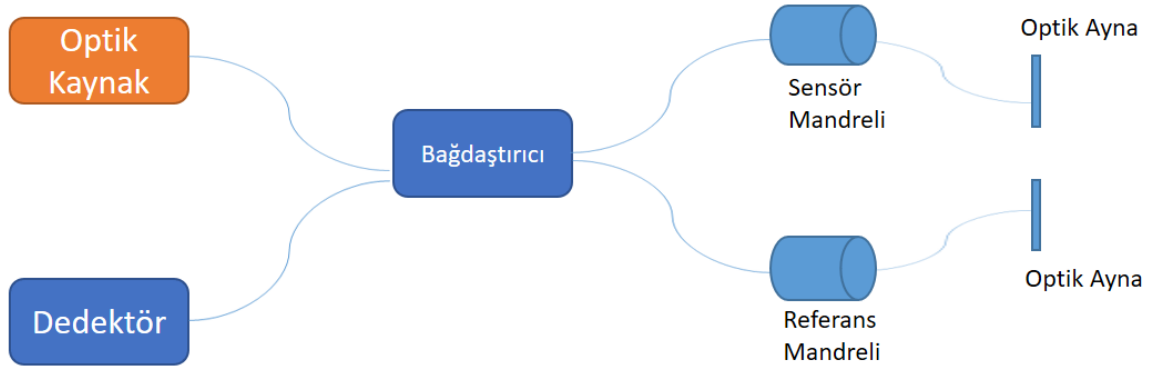
Bu algılama metodu, farklı geometrilerde türetilen mandrel tasarımları ve algılama için en az iki koldan gelen sinyallerin interferometri hesapları ile faz algılamaya dayalı bir teknolojiyi barındırır [65, 66].

Mach-Zender interferometri ölçümleri için, biri sensör ve diğeri bir referans kolundan olmak üzere iki farklı sinyalin dedektör üzerine gelmesi gerekir [65, 66]. Şekil 2.6' da Mach-Zender interferometresi için çizilmiş bir blok diyagram verilmiştir. Sensör kolundan gelen sinyal, maruz kaldığı akustik basıncın bilgisini taşıırken, referans kolundan gelen sinyal izlediği optik yolu tamamlayarak sensör kolundaki faz bilgisini anlamlandırmak için kullanılır. Akustik titreşimlerin fiber üzerinde oluşturduğu gerilme ile fiberin boyu değişir. Bu da sinyalin izlediği optik yolu değiştirir. Algılayıcı üzerinden gelen iki kol arasındaki faz farkı, bir dedektör yardımıyla elektrik sinyaline çevrilir. Algoritma ile desteklenen bu veriler sayesinde ne kadarlık bir akustik basınca hangi yönden maruz kaldığı belirlenebilir.



Şekil 2.6 Mach-Zender İnterferometresinin blok diyagramı

Michelson interferometresini kullanan diğer yöntemde ise, her iki kolun sonuna birer düzlem ayna yerleştirilir. Böylece ışık dalgasının aynı akustik basınca iki kere maruz kalması sağlanmış olur. Sinyal kolu üzerinde, akustik bilgiyi taşıyan dalga ile geri dönen dalga girişim oluştururlar. Girişim sinyali dedektör aracılığıyla algılanır [67]. Optik yolda almış olduğu akustik sinyale ait faz bilgisi, algoritmanın desteğiyle çözümlenir. Şekil 2.7’ de Michelson interferometresinin blok diyagramı çizilmiştir.

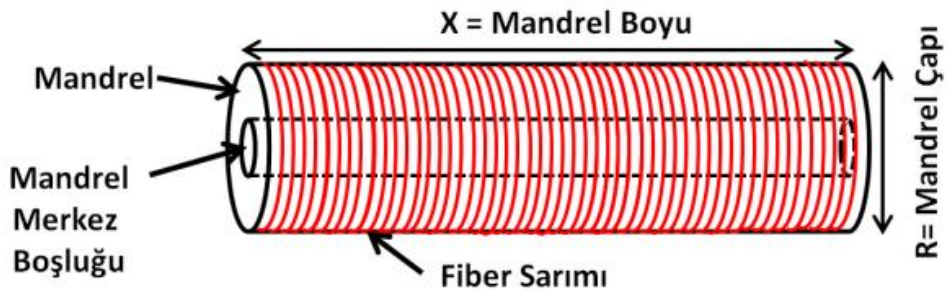


Şekil 2.7 Michelson İnterferometresinin blok diyagramı

İnterferometre tabanlı algılama yöntemi için mandrel en kritik elemandır. Mandrel akustik algılamayı yapan esas eleman olduğundan malzemesini ve geometrisini doğru çalışma ortamları için belirlemek gerekir. Şekil 2.8’ de mandrel yapısı verilmiştir. Mandrel geometrisi ile sistemin çalışma frekansı belirlenirken, sarım sayısı ve metodu ile sistemin hassasiyeti, mandrelin iç ve dış malzemesi ile doğal titreşim frekansı gibi önemli sensör parametreleri belirlenir. Ayrıca mandrel malzemesinin seçimi mandrelin

sağlamlığı ve hassasiyetini yüksek ölçüde etkilemektedir. Mandrel yapısı için metal, alüminyum veya kompozit malzemeler seçilebilir. Mandrel malzemesinin esneklik değerinin artması basınç değişimine göre radyal esnemenin artmasına ve hassasiyetin yükselmesine neden olur. Ancak, esneklik değerinin artması mandrelin sağlamlığını azaltmasının yanında, doğal titreşim rezonans değerlerini de etkiler [68].

Mandrel tabanlı ölçüm sisteminde, sensörün su altında kullanılması durumunda, etrafına Young modülü daha düşük bir polimer ile kaplama yapılması gerekir. Bu durumda mandrel ve su yüzeyi arasında empedans eşleştirmesi yapılmış olur. Akustik sinyalin fiber ile etkileşiminin artırılması sağlanır.



Şekil 2.8 Mandrel yapısı [43]

Bir algılayıcı modellemesini geliştirebilmek için mandrelin temel bazı özelliklerin tanımlanması gerekir. Mandrel sarılacak fiberin boyu, sarım sayısı, gerdirme parametresi ve aynı zamanda mandrel malzemesi de çalışma frekansını belirler. Δl , mandrelin üzerine sarılan fibrin boyundaki değişimi göstermektedir. Bu ifade,

$$\Delta l = N2\pi\Delta R = \left(\frac{x}{r}\right) 2\pi\Delta R \quad Eş.1$$

Eşitlik 1 ile verilir. N fiber sarım sayısını, x mandrel uzunluğunu, r fiber çapını ve ΔR mandrelin çapındaki oluşacak değişimi göstermektedir. Fiberin boy değişimi ile oluşan optik yol farkının oluşturacağı faz farkı $\Delta\phi$,

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

İle verilir. Eşitlik 2’de f gönderilen ışığın frekansını, v ışığın fiber içindeki hızını ifade eder. Faz farkını dB re rad/μPa cinsinden de Eşitlik 3’teki yazılabilir:

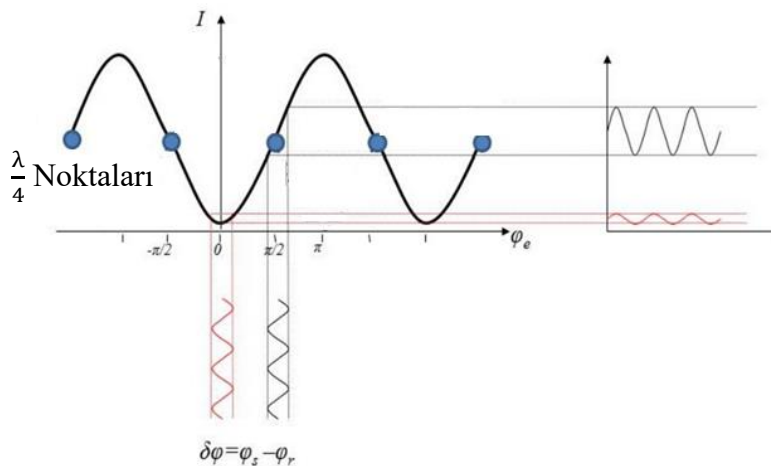
$$\Delta\phi_{dB} = 20\log\left(\frac{\left(2\pi f\left(\frac{\lambda}{v}\right)2\pi\Delta R\right)}{P}\right) \quad Eş.3$$

Birim basınç altındaki mandrelin çap değişimi (ΔR), mandrelin geometrisine ve esneklik oranı gibi değerlerine bağlıdır.

Her ikisi de yaygın ölçüm düzenekleri olarak kullanılmalarına karşın, Mach-Zender interferometresi, Michelson’a kıyasla biraz daha fazla tercih edilebilmektedir. Çünkü, Michelson interferometrisinde sensör ve referans kolları aynalar ile sonlandırıldığından, paketleme konusunda sıkıntı yaşanabilmektedir [70-72, 73-74].

Vektör sensör tasarımı sırasında hem genlik bilgisine hem de yönsel bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Mandrel ile yapılan tasarımlar genlik bilgisi konusunda oldukça yüksek doğruluklar vermektedir. Sistemin tasarım parametreleri için bu bilginin oluşumu konusuna değinmek gerekir.

İnterferometri için genlik gösterimi Şekil 2.9 ‘daki gibi gösterilmiştir. Dalga boyunun dörtte biri noktaları şekil üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 2.9 İnterferometrenin genlik şematik gösterimi

Faz değişimi akustik basınç ile doğrusal olarak değişse bile Eşitlik 5' te yer alan kosinüs etkisiyle bu davranışı değişmektedir [75]. Şekil 2.9'deki gösterime göre faz bilgisi mavi ile belirtilen $\frac{\lambda}{4}$ noktalarında, sensör ve referans kolu arasındaki faz farkı doğrusal davranış göstermektedir. Ancak fazı 0, π , 2π ve katlarına geldiğinde iki kol arasındaki faz farkı interferometride sönümlenmektedir.

$$I_{out} = I_0[1 + V \cos(\delta\varphi)] \quad Eş.4$$

$$I_{out} = I_R + I_S + 2\sqrt{I_R I_S} \cos(\varphi_R - \varphi_S) \quad Eş.5$$

Eşitlik 5' te verilen ifadelerden I_R , I_S ve φ_R , φ_S interferometrenin referans kolundan ve sensör kolundan gelen genlik ve faz bilgilerini göstermektedir.

Bu sönümlenmenin önüne geçebilmek için kullanılan metotlardan biri PGC (Phase Generation Carrier) metodudur. Bu metot ile algılanmak istenen akustik bilginin frekans bandı dışında belirlenen bir frekans yardımıyla interferometri girdisinin fazı modüle edilir. İlgili PGC sinyali, algılanmak istenen frekansı başka frekans düzeyine kaydırır. Böylece frekansın yan bantları olarak okunabilmesini sağlar. İstenmeyen frekanslardan kaynaklı gürültüden de uzaklaşmaya yardımcı olur [76].

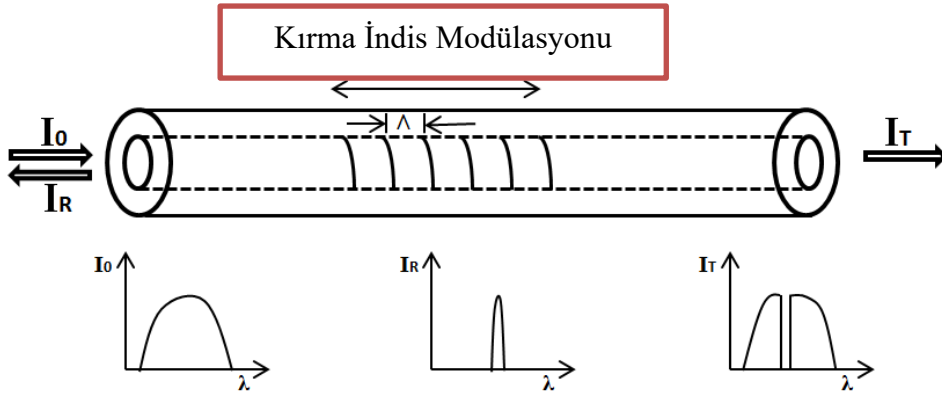
2.1.4.1 FBG Tabanlı Algılama

Bu algılama metodu için öncelikle FBG çalışma yapısından söz edilmelidir.

FBG (Fiber Bragg Grating), herhangi bir nadir toprak elementi ile katkılanmamış (aktif olmayan) bir fiberin kırma indisinin periyodik olarak değiştirilmesi sonucu elde edilir [77]. Periyodik değişimi sağlayabilmek için hassas işlem yapabilen kuvvetli lazer sistemleri kullanılmaktadır. FBG yapıları belirlenen frekans bandında bir filtre gibi çalışır ve Bragg merkezi dalga boyundaki ışığı geri döndürür. Bragg dalga boyu (λ_B), oluşturulan etkin kırma indisine (n_e) ve değişim periyoduna (Λ) bağlı olarak yazılabilir [77].

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda \quad Eş.6$$

Geniş bant aralığına sahip bir lazer kaynağına sahip olduğumuzu düşünürsek, λ_B etrafındaki dar bant aralığındaki ışık geri yansır, geri kalan kısmı ise fiber yolu boyunca devam edecektir. Şekil 2.10' da FBG yapısının geniş bantta gelen dalga ile davranışı gösterilmiştir. Dalga boyu için spektral kısıtlama söz konusu değildir.



Şekil 2.10 Fiber Bragg Izgara yapısı ile gelen, yansıyan ve geçen dalga şiddetlerinin dalga boyu ile değişimi [16]

FBG merkezi dalga boyu, ızgaralar arası mesafeye ve kırılma indisine bağlı olduğundan gerilme, basınç ve sıcaklık ile değişim gösterir [77].

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \left(\frac{n_e^2}{2} (\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})) \right) \right) \quad Eş.7$$

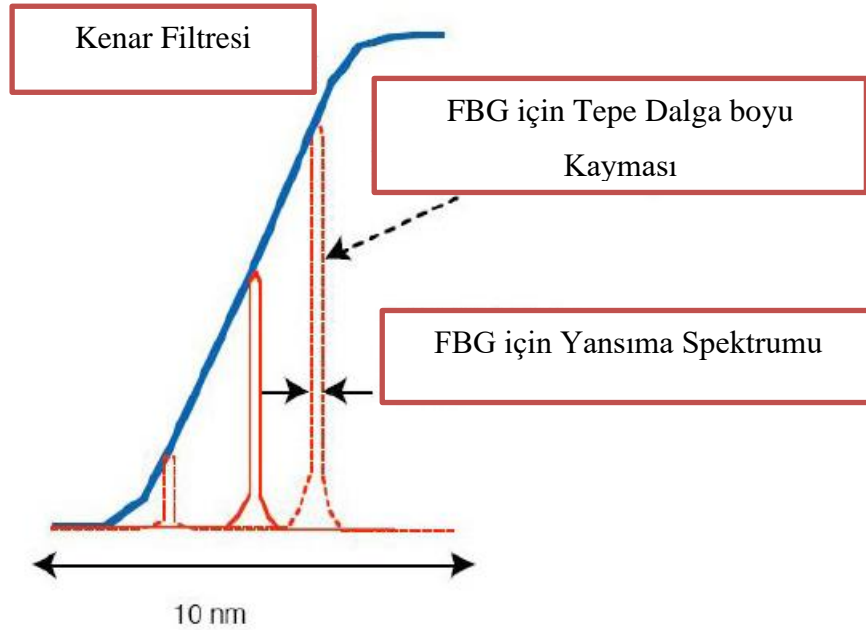
Burada ν Poisson katsayısını, ρ_{11} ve ρ_{12} fiber optik esneklik tensör katsayılarını ifade etmektedir. Örneğin; germanyum katkılı optik fiber için $\nu = 0.16$, $\rho_{11} = 0.113$, $\rho_{12} = 0.252$ ve $n_e = 1.482$ değerleri ve 1550 nm dalga boyu için gerinim-dalga boyu hassasiyeti 1.15 pm/ $\mu\epsilon$ ' dir. Fiber üzerindeki basınç değişimi ile gerilmenin yanında kırılma indisi de değişime uğrar. Kırılma indisinin değişimi de göz önüne alındığında FBG üzerindeki basınç değişimine bağlı olarak merkezi dalga boyu kayması Eşitlik 8' deki gibi ifade edilir.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{(2\nu-1)}{\epsilon} - \frac{n_e^2}{2\epsilon} (1 - 2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right) \Delta P \quad Eş.8$$

Burada ϵ değişkeni Young modülü değerini gösterir. Örneğin; germanyum katkılı fiberin Young modülü değeri 72 GPa olarak alındığında $\Delta\lambda_B/\Delta P$ hassasiyeti, 1550 nm dalga boyunda lazer kullanılması durumunda 3×10^{-3} nm/MPa olarak bulunur. Fiberin bulunduğu pozisyon, ölçüm yöntemleri, sabitlenen geometri ve malzeme tercihleriyle hassasiyeti arttırmak mümkündür.

FBG tabanlı algılama yapabilmek için, akustik bilginin basınca bağlı yansıyan dalga boyundaki değişikliği doğrusal filtre kullanarak genlik modülasyonuna dönüştürmek gerekir. Şekil 2.11' de doğrusal filtre ya da kenar filtresi olarak isimlendirilen optik

elemanın genlik bilgisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Burada istenilen dalga boylarının genlikleri daha düşük seviyede filtreleme yaparken, istenmeyen dalga boyları için genlik bilgisini daha yüksek seviyede filtreleme yaparak akustik bilgiyi elde etmemizi sağlar. Akustik bilginin değişimi optik sinyal olarak aktarıldığında genlik modülasyonu sayesinde bir dedektör aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülür. Algoritma üzerinde bu sinyali çözümlenmek kolaylık sağlamaktadır.



Şekil 2.11 Fiber Bragg Izgara yapısından gelen optik sinyalin lineer filtre kullanılarak dalga boyuna karşılık genlik modülasyonu gösterimi [78]

2.2. Su Altı Akustik Vektör Sensörler için Çoklama Yöntemleri

Bu bölümde fiber optik tabanlı sensör yöntemlerinde yer alan sensörler için çoklama yöntemlerinden bahsedilecektir. Uygulama alanlarına uyumlu bir algılama yapabilmek, algılama alanını genişletmek, daha yüksek hassasiyet elde etmek gibi sebepler ile sensörler ardışık olarak ya da düzlemsel olarak eklenebilir. Ekleme metotlarına göre çoklama yöntemleri değişiklik göstermektedir [44, 45].

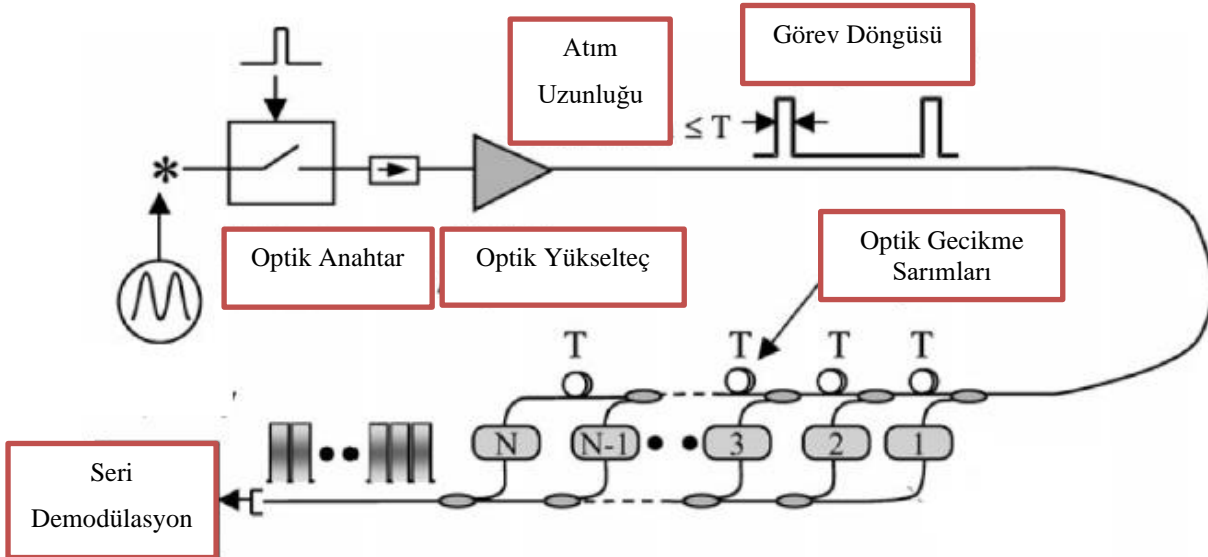
Çoklu algılayıcı yapısı oluşturmak için zaman, dalga boyu ve frekans ölçümlerini çoklama yöntemine gidilir. Bu yapılar maliyet, kolaylık ve yetenek bakımından farklı özellikler sunmaktadır [46, 47].

2.2.1 Zamansal Çoklama Yöntemi

Bu yöntemde algılayıcı dizini içerisindeki sensörler, akustik/optik bilginin geri dönüş zamanına göre algoritma üzerinde adreslenir. Algılayıcı dizini bir lazer kaynağı ve bir dedektör üzerinden algılama yapılır. Sinyaller arasındaki gecikmeye dayalı bir yöntemdir. Akustik bilginin aynı zamanda gelmemesi ve karışma olasılığını ortadan kaldırmak için zamanı sayabilmek ve optik sinyalin geliş zamanını belirleyebilmek için gecikme fiber sarımları yapılarak tarama yapılması gerekir. Şekil 2.12’ de zamansal çoklama yönteminin blok gösterimi verilmiştir.

Lazer kaynağından oluşturulan atım dizini algılayıcılara gönderilir ve dönen akustik bilgi yüklü sinyal seri şekilde dedektöre aktarılır. Atım genişliği ve atımlar arası sınırlayıcı süre, sensörler üzerindeki fiber sarım uzunluğuna göre belirlenir. İki algılayıcı arasındaki algılama süresinin ne kadar olması hedefleniyor ise, fiber içindeki ışığın hızı göz önünde bulundurularak fiber gecikme sarım uzunluğunun belirlenmesi gerekir.

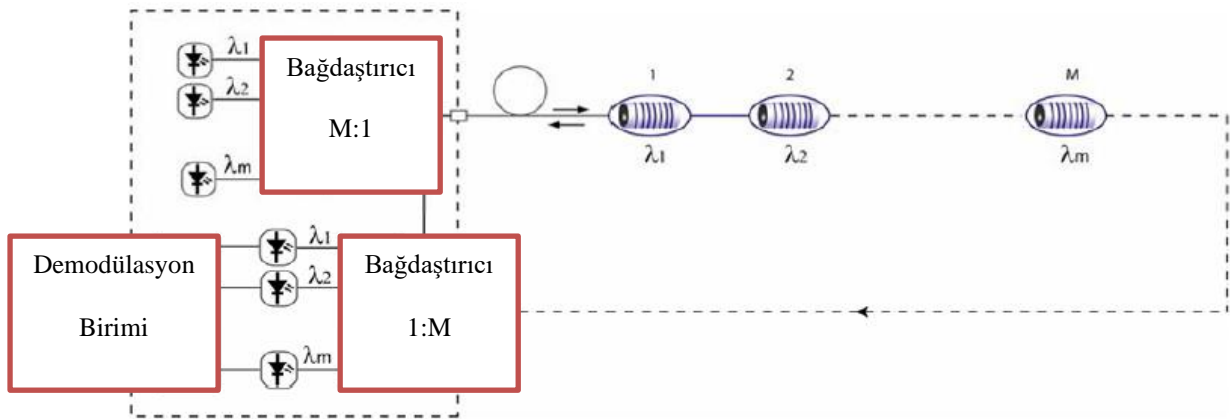
Bu çoklama yönteminde tek lazer kaynağı ile sinyal gönderilmektedir. Gecikme sarımları ile sinyaller kolayca ayrışabildiğinden tek dedektör kullanılmaktadır. Bu ortak kullanım zamansal çoklama yöntemini avantajlı kılar. Dezavantajı ise sensör sayısının kısıtlı olmasına neden olmaktadır [44, 45, 47, 79].



Şekil 2.12 Zamansal çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]

2.2.2 Dalga boyu Çoklama Yöntemi

Bu yöntemde algılayıcı dizini içerisindeki sensörler, farklı dalga boyları ile adreslenir. Her bir sensör bir dalga boyuna hassas olacak şekilde tasarlanır. Farklı dalga boylarındaki kaynak lazerler ve bu dalga boylarına hassas dedektörler tercih edilir. Şekil 2.13'te λ_1 'den λ_m 'e farklı dalga boylarına sahip algılayıcılar gösterilmiştir. Dalga boyu çoklama yöntemi kolay olmasının yanı sıra, zamansal çoklamaya kıyasla maliyeti yüksek bir metottur [46, 47, 79, 80].

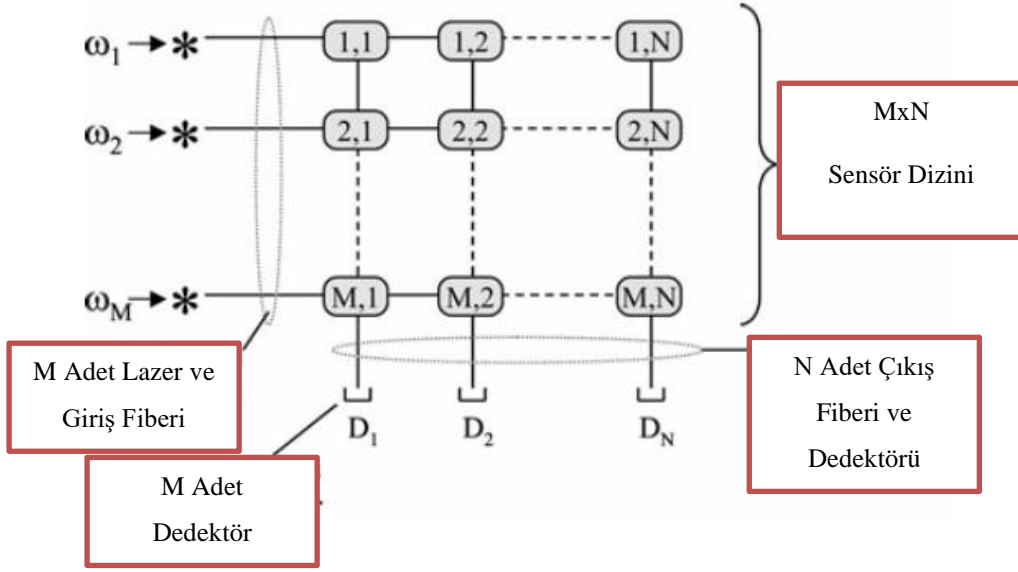


Şekil 2.13 Dalga boyu çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]

2.2.3 Frekans Çoklama Yöntemi

Bu çoklama yönteminde algılayıcı dizini içerisindeki sensörler farklı modülasyon frekansları ile algılama yapacak elektronik alt yapıya sahiptir. Şekil 2.14'te ω_1 'den ω_m 'ye kadar gösterilen frekans modüle ediciler vardır. Algılayıcılar N kadar gruba bölünerek gruplandırılır; her algılayıcı dizini için bir modülasyon adreslenir.

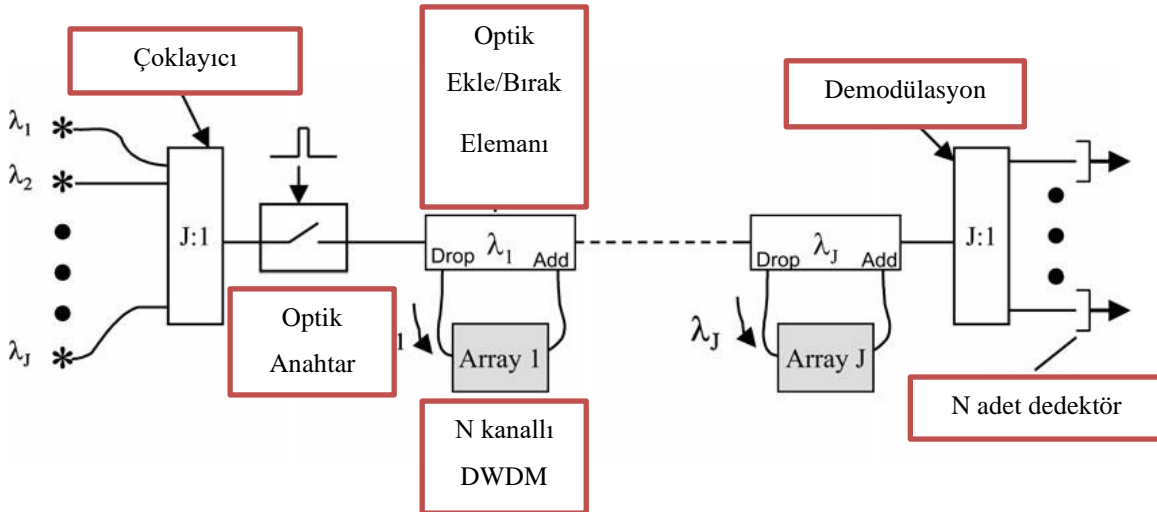
Çoklanabilen sensör miktarı diğer yöntemlere göre daha fazladır. Modüle edilmek istenen sensör sayısı ve elektronik yapısı nedeniyle daha karmaşık bir metottur. Çoklanacak sensör sayısı kadar frekans modüle edici ve dedektör ihtiyacı artacağı için maliyetli bir sistemdir [46, 47, 79, 80].



Şekil 2.14 Frekans çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [79]

2.2.4 Hibrit Çoklama Yöntemi

Bu yöntemde iki çoklama yönteminin birlikte kullanılmasıyla oluşabilecek metottur. Literatürde maliyet etkin olması açısından zamansal çoklamanın yeterli olmadığı durumlarda dalga boyu çoklama yönteminden de yararlanılmış ve hibrit bir sistem oluşturulmuştur [81].

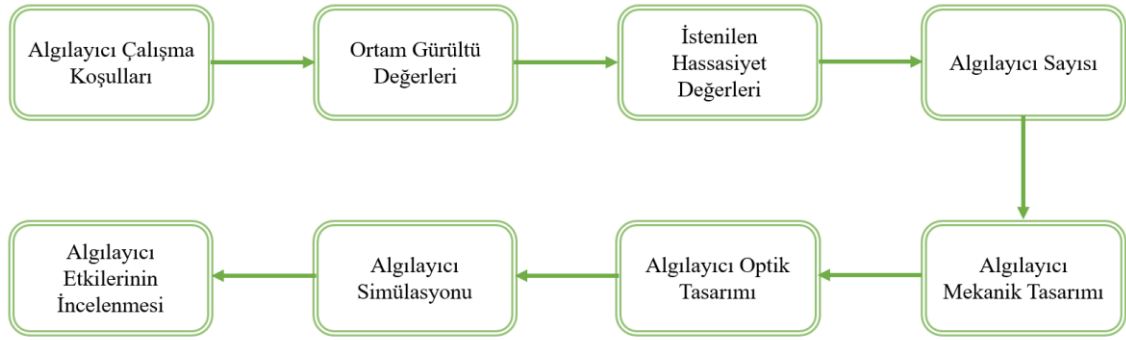


Şekil 2.15 Hibrit çoklama yöntemiyle sensör çoklama modeli [81]

2.3. Su Altı Akustik Vektör Sensörlerinin Tasarım

Bu bölümde çalışma kapsamında izlenen vektör tasarımı adımları tanımlanmıştır.

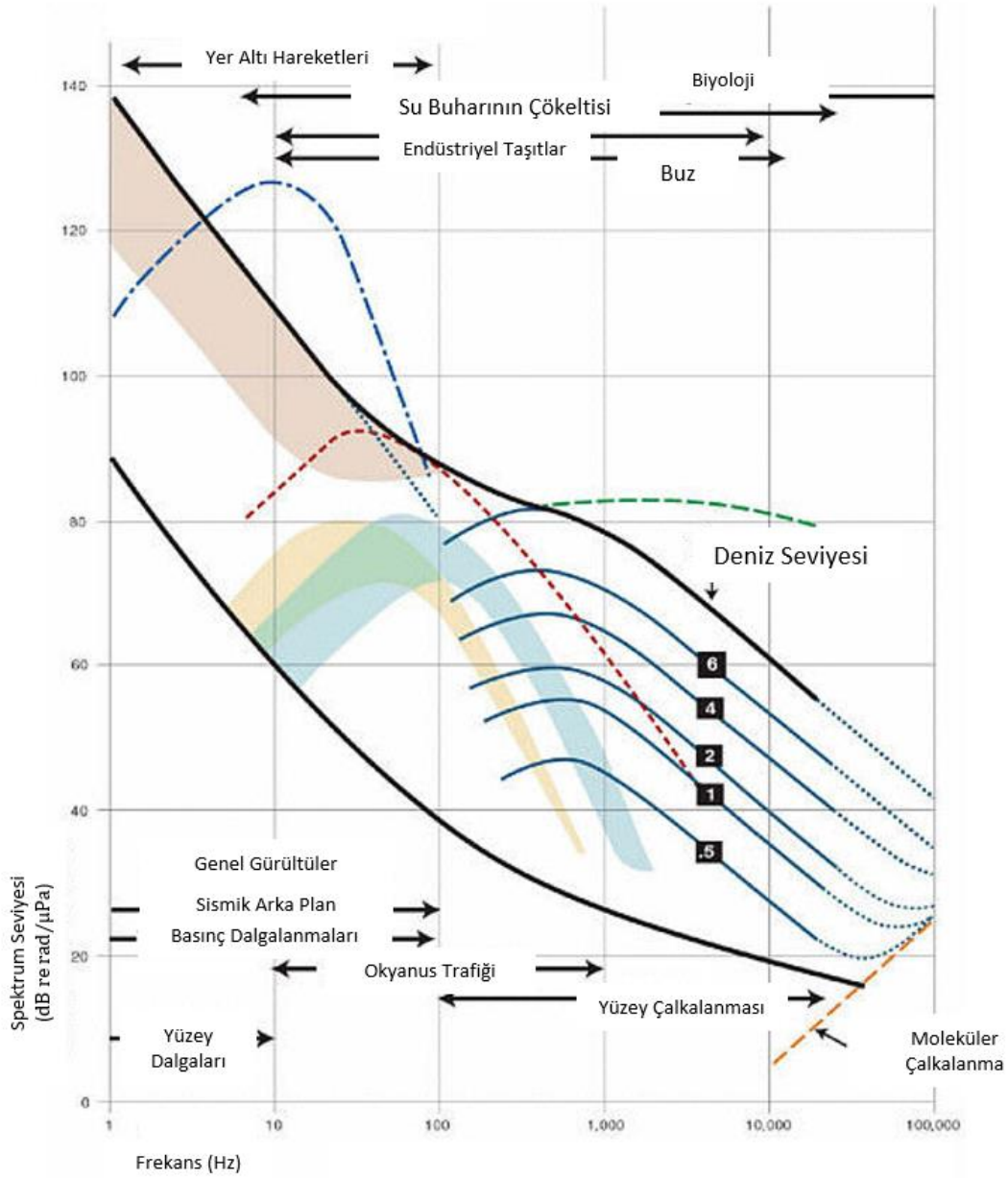
Genel olarak çalışmanın nasıl bir algoritma içerdiği Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Vektör sensörün nerede ve neyi algılamayı amaçladığı ile başlangıç çalışma koşullarının belirlenmesi konusunda ilk adım olacaktır.



Şekil 2.16 Tasarım adımlarının şematik gösterimi

Şekil 2.17'de gösterilen grafikte, farklı deniz seviyelerine göre su altında ve su üstündeki canlı/cansız nesnelerin yaydıkları gürültü değerleri gösterilmiştir. Bu gürültü değerleri sismik araştırma yapanlar için algılama bandının 1-100 Hz olduğunu, su üzerinde hareket eden gemi, kayık ve benzeri deniz araçlarının yaydıkları gürültünün 10-10.000 Hz aralığında olduğunu, su üzerindeki rüzgar fırtına ve benzeri durumlarda ortaya çıkan su dalgalarının ve kabarcıklarının 100-10.000 Hz aralıklarında gürültü yaydıklarını göstermektedir [82].

Bu gürültü kaynaklarının bilinmesi ortam gürültü değerlerini anlamak ve algılayıcı tasarımındaki optik ve mekanik tasarım limitleri belirlemek açısından önemlidir.



Şekil 2.17 Su altı ve su üstü için gürültü kaynakları [82]

Algılayıcı tasarımı için doğal titreşim frekanslarının analiz edilmesi ve algılama limitlerinin belirlenmesi, çalışma koşulları ile bağlantılıdır.

Algılamanın nasıl yapılacağını belirlemek ve optik tasarıma başlayabilmek için, çalışma koşullarına bağlı olarak mekanik limitler belirlenmelidir. Hem çalışma koşullarına uygun konumlanabilmesi hem de algılama hassasiyetini belirleme konusunda önemli bir yeri bulunmaktadır.

Kullanılacak fiberin geometrisi ve FBG uzunluğunun yanında, sensörlere nasıl monte edileceğini ve algılama yapabilmek için kullanılacak kütlelerin bu montaja karşı davranışlarını incelemek gerekir.

Tasarım koşulları ve döngüsü bu çalışmaya özgü olacağı için, sensör tasarımı kısmında tez kapsamındaki aşamalarından detaylı bahsedilecektir.

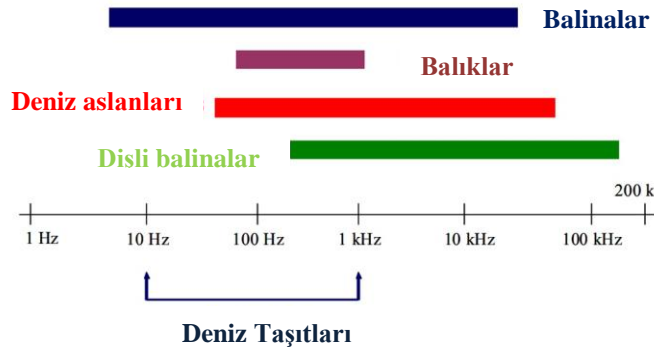
3. ATALETSEL İVMEÖLÇER SENSÖR TASARIMI

3.1. Sensör Tasarımı

Bu çalışma kapsamında ataletsel ölçüm yapabilen bir ivmeölçer sensörün yüksek hassasiyet ile tasarlanması amaçlanmıştır. Sensör tasarımı için öncelikle çalışma frekansı seçilecektir. Belirlenen sensör modeline ait teorik ve nümerik analiz yapılacaktır. Nümerik analiz için ANSYS programı kullanılmıştır.

3.1.1. Tasarım Gereksinimleri

Çalışma kapsamında yapılacak olan sensörün insanlı ve/veya insansız deniz araçlarında kullanıma uygun olması, kıyı ve liman güvenliği konusunda mevcut sistemlere destek sağlaması hedeflenmiştir. Bu kullanım alanlarına ait tasarım gereksinimlerini belirlemek için çalışma frekans aralıklarını, çalışma sıcaklıklarını, uygun malzeme seçimlerini ve malzemenin geometrisini belirlemek gerekir.



Şekil 3.1 Canlı/cansız algılama için gerekli çalışma frekans aralıkları [83]

Sistemin tasarımı için birinci adım çalışma frekans aralığını belirlemektir. Algılama yapılmak istenen canlı ya da cansız nesnelerin yaydıkları akustik frekans aralığına göre belirlenir. Nadir balık türlerinin tespit edilmesi, petrol/doğal gaz sızıntılarının tespiti gibi sivil uygulamalarının yanı sıra, insanlı/insansız deniz araçlarının tespiti, gemi pervane gürültülerinin algılanması gibi askeri uygulamalarda kullanılmak üzere çalışma kapsamında kullanılacak olan bir sensör Şekil 2.17' ye ve Şekil 3.1' e göre 400-1000 Hz aralığında etkin çalışması gerekmektedir. Çalışma kapsamında kullanılacak olan alüminyum alaşıma sahip sensör için frekans aralığı 400-1000 Hz olacak bir sistem tasarlanmıştır.

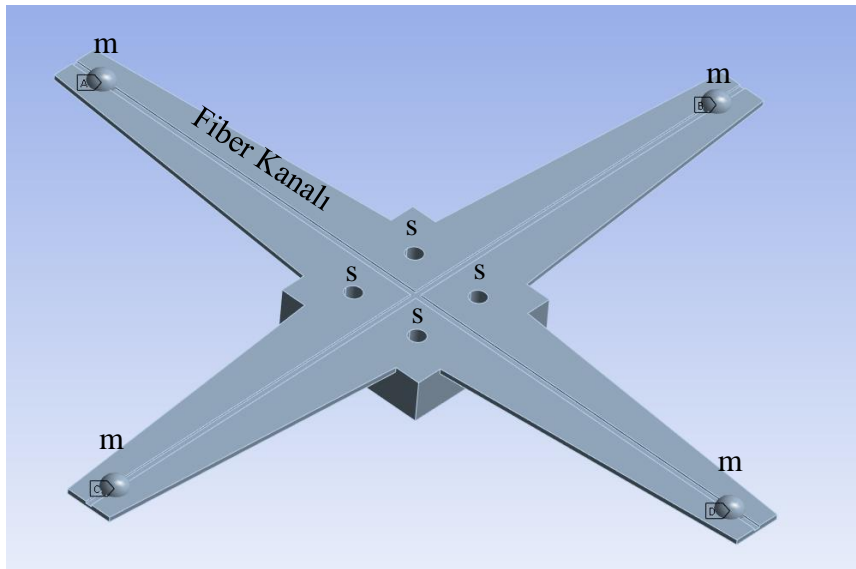
Sistemin su altında çalışacağı göz önüne alındığında, mevcut konumunu koruyabilmesi için suyun öz kütlesine yakın bir öz kütleye sahip olması gerekir. Ataletsel akustik ölçüm sisteminde kullanılan alüminyum alaşımının etrafına köpük ile sarım yapılarak suyun öz kütlesine yakın bir sistem elde edilir [84].

Bu çalışmada, mevcut ivmeölçer yapılarında oldukça fazla kullanılan MEMS teknolojisi ile rekabet edebilmek için küçük ebatlarda ve yüksek hassasiyet ile sensör tasarımı yapılmıştır.

Tamamen fiber ile algılama yapmaya dayanan bu sistemde Fiber Bragg Izgarası (FBG, Fiber Bragg Grating) optik elemanı kullanılmıştır. Bu elemanın kullanılması yer konusunda büyük bir avantaj sağlamıştır. Farklı uygulama alanlarına göre ticarileşen bu optik elemandan yüksek hassasiyetli çözüm elde edilmiştir.

3.1.2. Teorik Analiz

Sistemin hassasiyetinin, frekansının ve boyutlarının bağlı olduğu parametreleri anlamak için teorik çıkarımları gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Sensöre kütle yerleşmiş hali (m: ataletsel kütle, s: montaj deliği)

Sensörün su altında kullanımında algılama yaparken farklı derinliklerde sabit kalması göz önüne alındığında, iki boyutta algılama yapabilecek bir tasarım yeterli olacaktır. Şekil

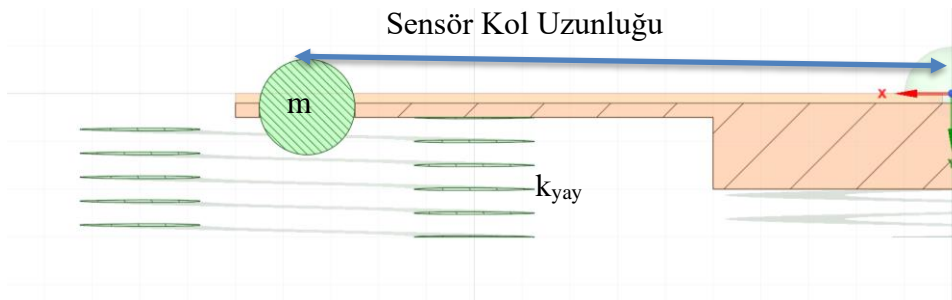
3.2’ de yer alan sensör modelinde s ile belirtilen noktasal alanlar montaj deliklerini, m ataletsel kütleyle göstermektedir. Aynı zamanda sensör kolları üzerinde fiber kanalları da yer almaktadır. Sistem için gerekli yay ve kütle geometrisi Şekil 3.3’ te verilmiştir.



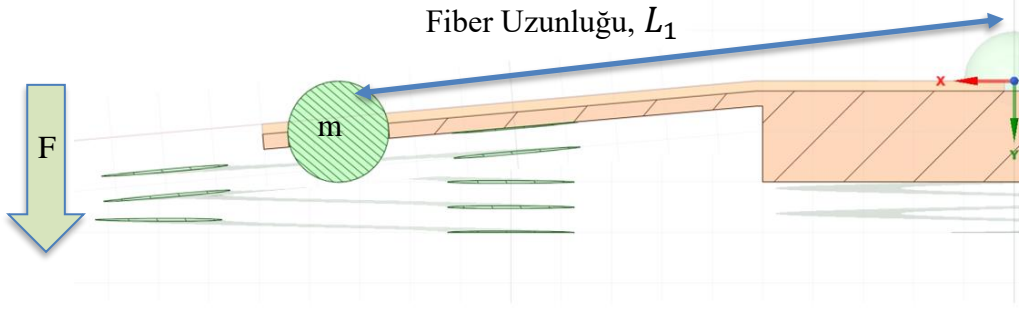
Şekil 3.3 Sistemin yandan kesit görünüşü

Sensörün tasarımını basitleştirmek için Şekil 3.4 ‘te bulunan tanımlamalar ile çıkarımlar yapılır. “m” sensör koluna yerleştirilmiş kütle, “L” sensör kolunun uzunluğunu, “ Δx ” sensör kolunun x eksenindeki yer değiştirmesini, “ Δy ” sensör kolunun y eksenindeki yer değiştirmesini, “ $F(\omega)$ ” sensör koluna uygulanan frekansa bağlı kuvveti, “ k_{yay} ” sistemi doğal titreşim frekansından uzakta tutacak ve aldığı titreşim sonrası zorlamalı salınım yaparak sönümlenmesini sağlayacak yayın yay sabitini gösterir. Sensör tasarımında algılama yapmamızı sağlayacak olan fiberin kuvvet uygulanmadan önceki hali Şekil 3.5 ile kuvvet uygulandıktan sonraki hali Şekil 3.5’ te gösterilmiştir. Böylece fiberin ilk uzunluğu Eşitlik 9’ da olduğu gibi tanımlanır.

$$L_0 = L_1 - \Delta l \quad Eş.9$$



Şekil 3.4 Basitleştirilmiş hali (Fiber uzunluğu, L_0)



Şekil 3.5 Fiberin kuvvet ile boyunun değişimi (Fiber uzunluğu, L_1)

Burada sistemin bir koluna uygulanan, F büyüklüğünde bir kuvvetin olduğu varsayılmıştır. Fiberin boyunun Δl kadar değişmesiyle, fiberin kütle üzerinde uyguladığı eşit büyüklükte bir N kuvveti söz konusu olacaktır.

$$F_{fiber} \cdot L_0 = N \cdot \Delta l \quad Eş.10$$

Sensör kolunun merkezinin yer değiştirmesini Δx_1 , kütlenin yer değiştirmesini ise Δx_2 olarak aldığımızda, fiberin uyguladığı kuvvet;

$$F_{fiber} = k_{fiber} \cdot \Delta x_1 = 2k_{fiber} \cdot \Delta x_2 \quad Eş.11$$

bulunur. Fiberin esneklik katsayısı;

$$k_{fiber} = \frac{A_{fiber} \cdot \epsilon_{fiber}}{L_{fiber}} \quad Eş.12$$

yazılarak, Eşitlik 11' de yerine yazılırsa;

$$F_{fiber} = 2 \frac{A_{fiber} \cdot \epsilon_{fiber}}{L_{fiber}} \cdot \Delta x_2 \quad Eş.13$$

elde edilir. L_{fiber} sistemdeki fiberin çalışma uzunluğunu, A_{fiber} fiberin kesit alanını ve ϵ_{fiber} fiberin Young modülünü göstermektedir.

Sisteme bir kuvvet etki ettiğinde kullanılacak yayın etkisini incelediğimiz zaman;

$$m \cdot a_{sistem} = (Yayın etkisi) + (Fiberin etkisi) \quad Eş.14$$

$$m \cdot a_{sistem} = k_{yay} \cdot \Delta x_1 + k_{fiber} \cdot \Delta x_2 \quad Eş.15$$

Δx_2 ve Δx_1 arasındaki matematiksel ifade;

$$\Delta x_2 = 2 \cdot \Delta x_1 \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l} \quad E\text{ş.16}$$

olarak yazılabilir. Eşitlik 15'te yer alan Δx_2 ifadesini Eşitlik 16 'daki gibi yazdığımızda;

$$m \cdot a_{sistem} = k_{yay} \cdot \Delta x_1 + 2 \cdot k_{fiber} \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l} \cdot \Delta x_1 \quad E\text{ş.17}$$

elde edilir.

Sistemin ivmesini çözümlmek için eksenlerden x: sensörün yer zeminine göre değişimini, y: kütlenin sensörün dış kabuğuna göre yer değişimini, z: kütlenin yer zeminine göre yer değişimi olacak şekilde adresleme yapılır. Bu yer değiştirme arasındaki ilişki ;

$$y = z - x \quad E\text{ş.18}$$

Bu denklemin her iki tarafı da ikinci dereceden türevleri alındığında;

$$m\ddot{y} = m\ddot{z} - m\ddot{x} - c(\dot{z} - \dot{x}) - k(z - x) \quad E\text{ş.19}$$

elde edilir. Yapılan çalışmada doğrusal olmayan davranış sıfır olarak alınırsa, F kuvveti de x eksenini boyunca ω frekansı ile zamana bağlı bir etkileşimi olduğunda, z eksenindeki harekete bağlı ivmelenmesi olmayacaktır. Eşitlik 19, bu bakış açısıyla yeniden yazıldığında;

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{x} = F \cdot \cos \omega t \quad E\text{ş.20}$$

elde edilir. Eşitlik 20'deki esneklik sabiti "k" için;

$$k_{yay} + 2 \cdot k_{fiber} \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l} = k \quad E\text{ş.21}$$

yazılabilir. Eşitlik 21 kullanılarak, Eşitlik 17 ve Eşitlik 20 yeniden yazılabilir,

$$m \cdot a_{sistem} = k_{yay} \cdot \Delta x_1 + 2 \cdot k_{fiber} \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l} \cdot \Delta x_1 = k \cdot \Delta x_1 \quad E\text{ş.22}$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + (k_{yay} + 2 \cdot k_{fiber} \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l})y = -m\ddot{x} = F \cdot \cos \omega t \quad E\text{ş.23}$$

Basit harmonik hareketli sistemlerde bu ifadenin çözümünden,

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{yay} + 2 \cdot k_{fiber} \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l}}{m}} \quad E\text{ş.24}$$

elde edilir. Eşitlik 24' te belirtilen ifade sistemin doğal titreşim frekansının bağlı olduğu parametreleri göstermektedir. Buradaki ataletsel ölçüm kütlesi m 'nin artmasıyla rezonans frekansının azalması beklenmektedir.

Tez kapsamında optik algılama, FBG tabanlı olacağından merkezi dalga boyunun etkileşimine ve sistemin hassasiyet mekanizmalarına bakmak gerekir.

Eşitlik 7' deki ifade daha genel formda,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \zeta) \cdot \Delta T + (1 - P_e) \cdot \Delta \varepsilon \quad Eş.25$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikte α_f termal katsayısını, ζ termal optik katsayısını, P_e esneklik-optik katsayısını, ΔT sıcaklık değişimini, $\Delta \varepsilon$ gerilim değişimini ifade etmektedir.

Bu çalışmada FBG tabanlı ölçümün sıcaklık değişimine bağlılığı göz ardı edilecektir. Su altı ortamında sabit bir yükseklikte çalışılacak olmasından sıcaklık değişimi göz ardı edilebilir seviyelerde kalacaktır.

P_e , germanyum katkılı silika fiber için 0,22 olarak alınır. Fiberin gerilim değişimi ise kütledeki yer değişim ve fiberin çalışma uzunluğu ile ifade edilir. Eşitlik 16 kullanılarak bu ifade genişletildiğinde;

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta x_2}{L_{fiber}} = \frac{2 \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l}}{L_{fiber}} \cdot \Delta x_1 \quad Eş.26$$

Δx_1 için Eşitlik 22' deki ifade ile Eşitlik 12'deki k_{fiber} ifadesi çekildiğinde gerilim değişimi,

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta x_2}{L_{fiber}} = \frac{2 \cdot \frac{L_0}{L_0 + \Delta l}}{L_{fiber} \cdot k} \cdot m \cdot a_{sistem}$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta x_2}{L_{fiber}} = \frac{2 \cdot L_0 \cdot m \cdot a_{sistem}}{L_{fiber} \cdot k_{yay} \cdot (L_0 + \Delta l) + 2 \cdot A_{fiber} \cdot \varepsilon_{fiber} \cdot L_0} \quad Eş.27$$

olarak yazılır. Teorik olarak bu ifade yardımıyla sistemin hassasiyeti termal etkiler göz ardı edildiğinde, S,

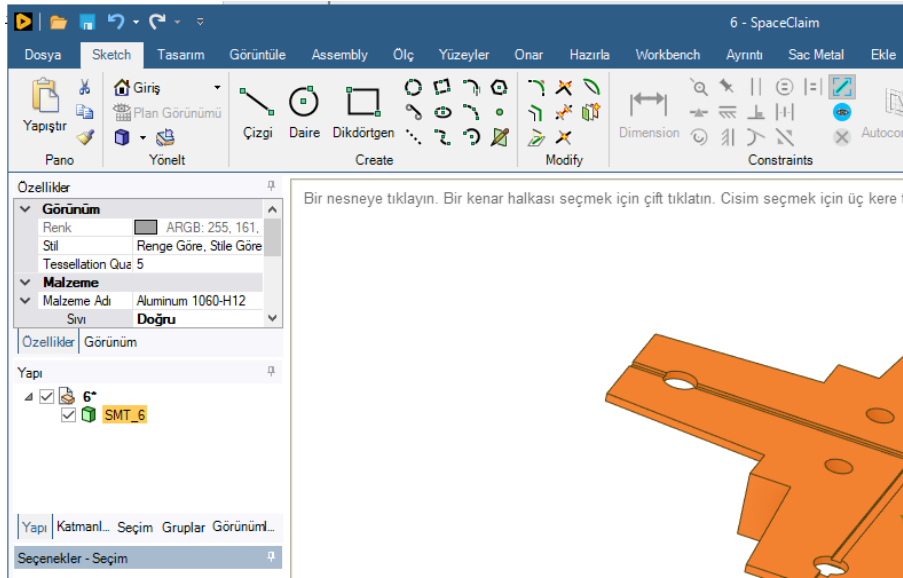
$$\Delta \lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \cdot \Delta \varepsilon$$

$$S = \frac{\Delta \lambda_B}{a_{sistem}} = \lambda_B (1 - P_e) \cdot \frac{2 \cdot L_0 \cdot m \cdot a_{sistem}}{L_{fiber} \cdot k_{yay} \cdot (L_0 + \Delta l) + 2 \cdot A_{fiber} \cdot \varepsilon_{fiber} \cdot L_0} \quad Eş.28$$

gibi verilir. Sistemde aynı eksen yönüne bakan iki adet fiber olması, hassasiyeti iki katına çıkarır. Bu nedenle ilerleyen bölümlerde Eşitlik 28’ de yer alan hassasiyet ifadesi iki katı alınarak hesaplanmıştır.

3.1.3. Nümerik Analiz

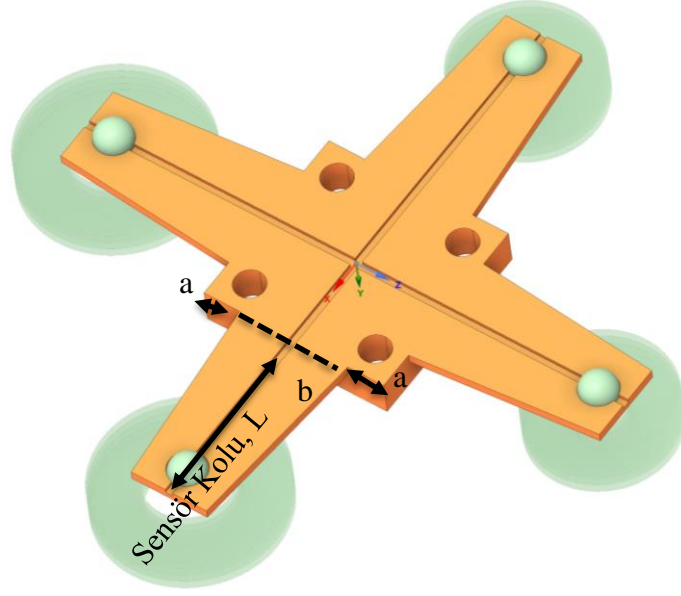
Sistemin çalışma frekans aralığının belirlenmesi için doğal titreşim frekansını belirlemek, modelleme yaparken etkilendiği parametreleri bulmak ve çalışabileceği ivme aralıklarını hesaplamak için genellikle nümerik yöntemler kullanılır. Ayrıca nümerik hesaplamalar kullanılarak sistemlerin genel fiziksel özelliklerini belirlemek ve algılama yapılmak istenen frekans altındaki davranış biçimini incelemek için de kullanılabilir.



Şekil 3.6 SpaceClaim Modeler aracının görünüşü

Nümerik analizler için, bu çalışmada kullanmış olduğumuz ANSYS programında, ANSYS Workbench (WB) Modal aracını kullanarak doğal titreşim frekansları elde edildi. Modal aracı kullanılmadan önce ANSYS WB SpaceClaim Modeler aracı ile sensörün mekanik tasarımı yapıldı. SpaceClaim Modeler aracı, üç boyutlu tasarım yapmak için kullanılan bir arayüzdür. Şekil 3.6’da SpaceClaim Modeler aracının bir ekran görüntüsü verilmiştir.

Sensörün mekanik tasarımı farklı geometrik parametre setlerine göre tasarlanır. Şekil 3.7’ de sensörün ilgili geometrisine atanan değişken isimleri, Çizelge 1’ de ise bu değişkenlere karşılık gelen sayısal değerler verilmiştir.



Şekil 3.7 Sensörün açılı görünüşü

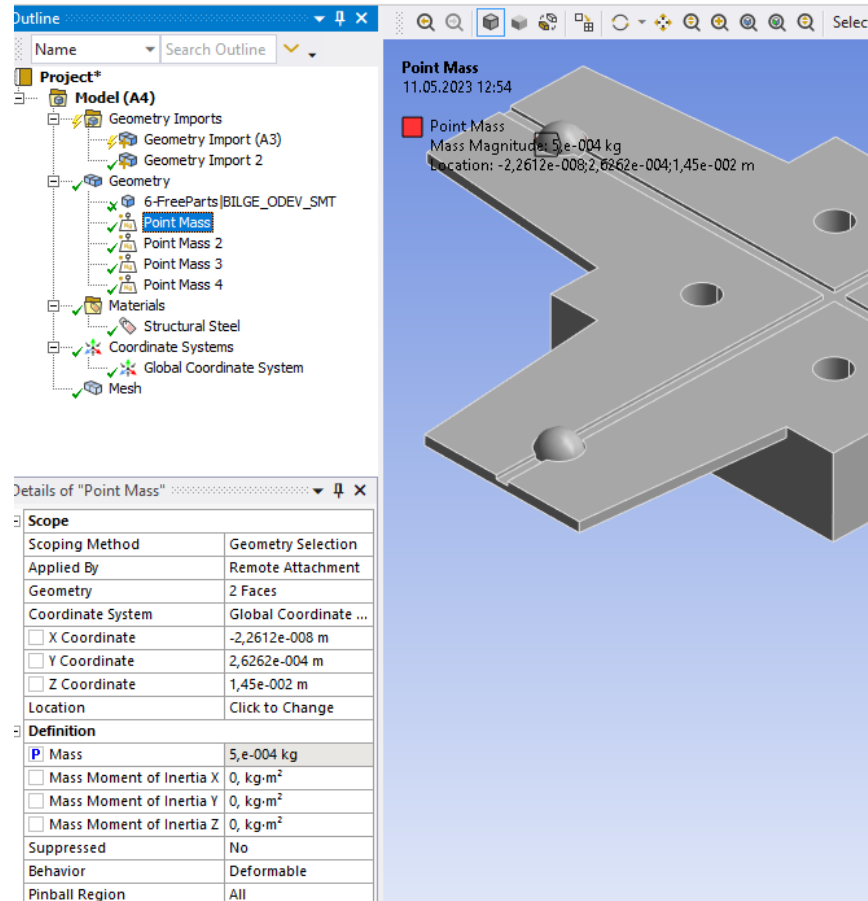
Çizelge 1. Geometrik Parametre Setleri

İsmlendirme	a, mm	b, mm	L, mm
Stp1	3,5	8	10
Stp2	3,5	8	12
Stp3	3,5	8	15
Stp4	3,5	8	20
Stp5	3,5	8	25
Stp6	2,5	10	10
Stp7	2,5	10	12
Stp8	2,5	10	15
Stp9	2,5	10	20
Stp10	2,5	10	25
Stp11	2,5	10	30

Mekanik tasarım aşamasından sonra yapılan modeller ANSYS Workbench 'e aktarılır. WB içinde bulunan "Mechanical" aracından "Modal" aracına geçiş yapılır. SpaceClaim Modeler dan aktarımı yapıldıktan sonra "Modal" aracı açılır. Modal aracında sensörün mekanik geometrisiyle algılama yapabilmesi amaçlandığından aşağıdaki adımlar tamamlanır.

Şekil 3.8’de ANSYS Modal aracının bir ekran görüntüsü verilmiştir.

- 1- Sensörün geometrisi Workbench e çekilir,
- 2- Sensörün malzeme seçimini yapabilmek için “Engineering Parameters“ sekmesinden ilgili malzemeler ve özellikleri seçilir,
- 3- Sensör Modal aracına tanımlanır,
- 4- Modal aracı içinde sensörün malzeme seçimi yapılır,
- 5- Algılama için kullanılacak kütlelerin yerleri belirlenir,
- 6- Kütle için parametrik tanımlama yapılır,
- 7- Sensörün sabit ve hareketli yüzeyleri tanımlanır,
- 8- Simülasyon için uygun mesh değerleri tanımlanır,
- 9- Simülasyon çalıştırılır.



Şekil 3.8 ANSYS Modal aracının ara seçimler ile görüntüsü

Bu aracı kullanırken, sensörün doğal titreşim frekansının algılama kütlelerine, farklı sensör kolu uzunluklarına bağlılığı analiz edilmiştir.

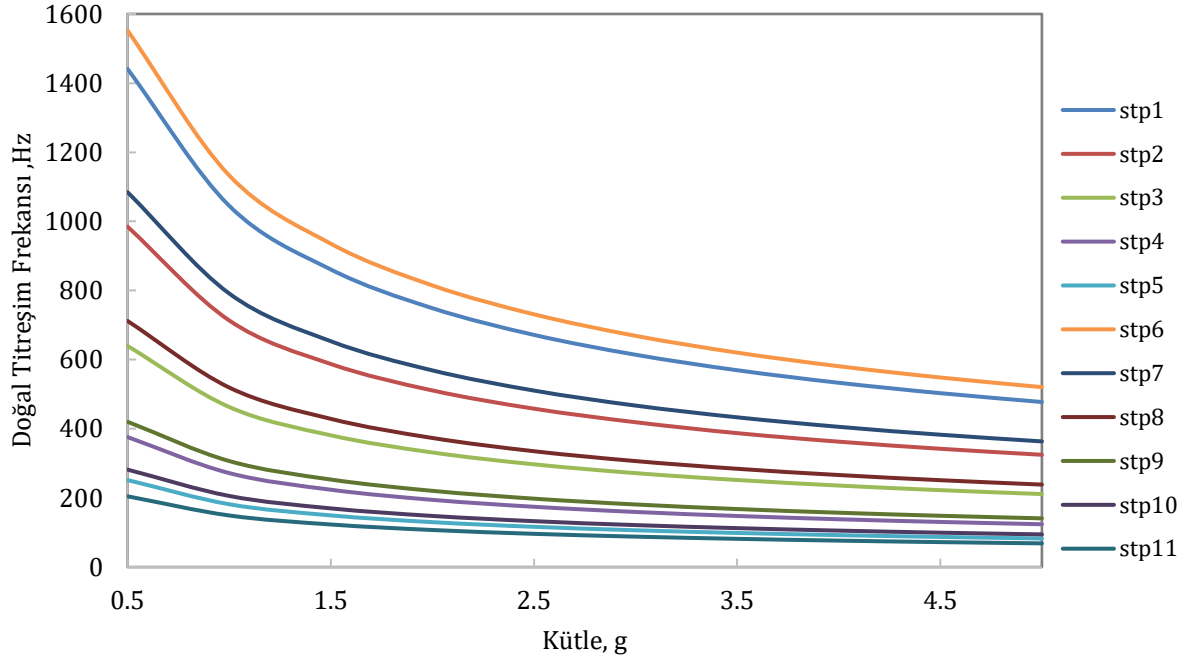
Sensör malzemesi için tez kapsamında alüminyum alaşımlı malzeme ve polietilen malzemesi tercih edilmiştir. Simülasyon içinde kullanılan ilgili malzemelerin özellikleri Çizelge 2’ de ve Çizelge 3’ te gösterilmiştir.

Çizelge 2. Polietilen malzeme özellikleri

Özellikler	Değerler	Birimler
Yoğunluk	950	kg.m ⁻³
Termal Genleşme Katsayısı	0,00023	°C ⁻¹
Young Modülü	1,2 × 10 ⁹	Pa
Poisson Oranı	0,42	
Yığın Modülü	2,2917 × 10 ⁹	Pa
Kayma Modülü	3,8732 × 10 ⁸	Pa
Gerilme Dayanım Gücü	2,5 × 10 ⁷	Pa
Sıkıştırma Dayanım Gücü	0	Pa
Çekme Mukavemeti	3,3 × 10 ⁷	Pa
Basınç Mukavemeti	0	Pa
İzotropik Termal İletkenlik	0,28	W.m ⁻¹ . °C ⁻¹
Özgül Isı	2300	J.kg ⁻¹ . °C ⁻¹

Çizelge 3. Alüminyum alaşımlı malzeme özellikleri

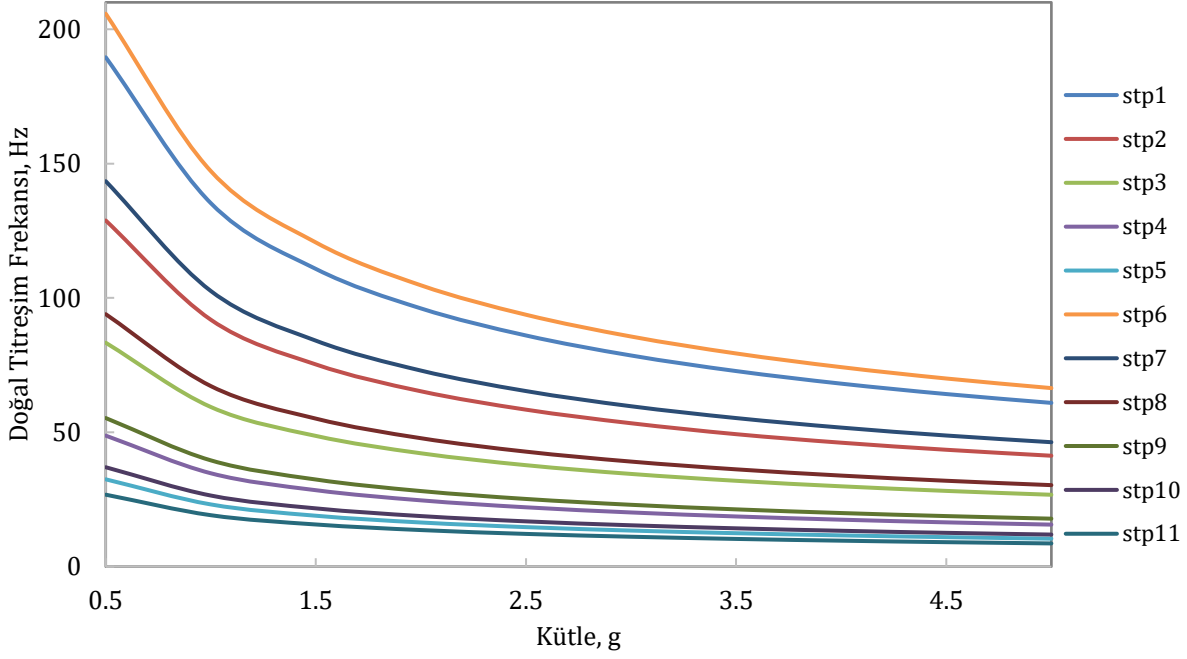
Özellikler	Değerler	Birimler
Yoğunluk	2770	kg.m ⁻³
Termal Genleşme Katsayısı	$2,3 \times 10^{-5}$	°C ⁻¹
Young Modülü	$7,1 \times 10^{10}$	Pa
Poisson Oranı	0,33	
Yığın Modülü	$6,9608 \times 10^{10}$	Pa
Kayma Modülü	$2,6692 \times 10^{10}$	Pa
Gerilme Dayanım Gücü	$2,8 \times 10^8$	Pa
Sıkıştırma Dayanım Gücü	$2,8 \times 10^8$	Pa
Çekme Mukavemeti	$3,1 \times 10^8$	Pa
Basınç Mukavemeti	0	Pa
İzotropik Termal İletkenlik	0,1	W.m ⁻¹ . °C ⁻¹
Özgül Isı	875	J.kg ⁻¹ . °C ⁻¹



Şekil 3.9 Alüminyum alaşımı kullanılan sensör için değişen kütleyle göre doğal titreşim frekansının değişimi

Malzemesi alüminyum alaşımı olarak seçilen sensörün, sensör koluna yüklenen kütle miktarı arttıkça doğal titreşim frekansının azaldığını Şekil 3.9’ da gösterilmiştir. Bu sonuç bir önceki teorik analiz kısmında çıkardığımız matematiksel denklemler ile uyumludur. Seçilen geometrik parametre setlerinden Şekil 3.9’ da elde edilen verilere göre stp6, stp1, stp7 ve stp2 alüminyum alaşımlı sensör için rezonans frekansı en yüksek olanlardır. Sonuçlar, 1 gram ataletsel ölçüm kütlesi için doğal titreşim aralığının 750 – 1200 Hz olduğunu göstermektedir.

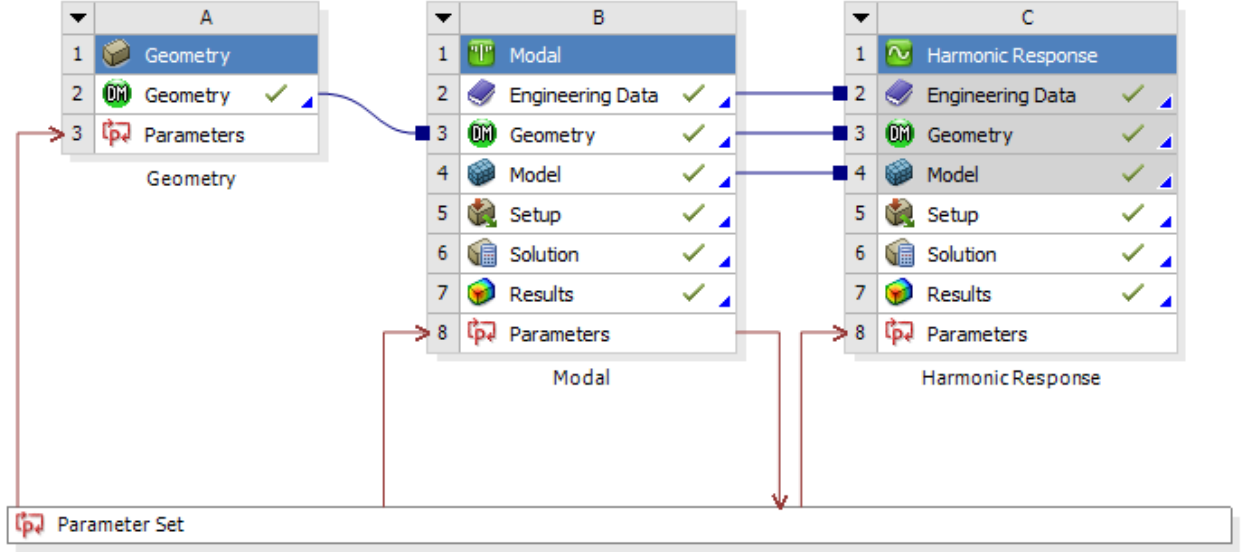
Polietilen malzemesi için aynı analizler yapıldığında, doğal titreşim frekanslarının alüminyum alaşımlı sensör yapısına kıyasla oldukça düşük çıktığı, sensör kolundaki kütle artmasıyla doğal titreşim frekansının azaldığı sonucuna varılmıştır. Polietilen malzemesinin doğal titreşim frekansının kütle ile değişimi Şekil 3.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Polietilen malzemesi kullanılan sensör için değişen kütleyle göre doğal titreşim frekansının değişimi

Çıkan analiz sonuçlarına göre polietilen malzemesi için stp6, stp1, stp7 ve stp2 geometrik parametre setleri, en yüksek rezonans frekanslarını vermektedir. Bu parametrik geometri setlerine göre Şekil 3.10'da elde edilen veriler 1gram ataletsel ölçüm kütlesi için, doğal titreşim frekans aralığı 100 – 150 Hz olduğunu göstermektedir. Bu yapılar düşük frekans çalışma koşulları gerektiren alanlarda kullanılabilir.

Sistemi ANSYS Modal aracından ANSYS Harmonic Response aracına geçiş yaparak, Sistemin frekans etkileşimini ve hassasiyet etkileşimleri incelenecektir. Şekil 3.11'de ANSYS Modal aracı ile Harmonic Response aracının birlikte yer alabildikleri WorkBench platformunun ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11 ANSYS Workbench içindeki görüntüsü

ANSYS Harmonic Response aracının içindeki simülasyon için aşağıdaki adımlar takip edilmelidir:

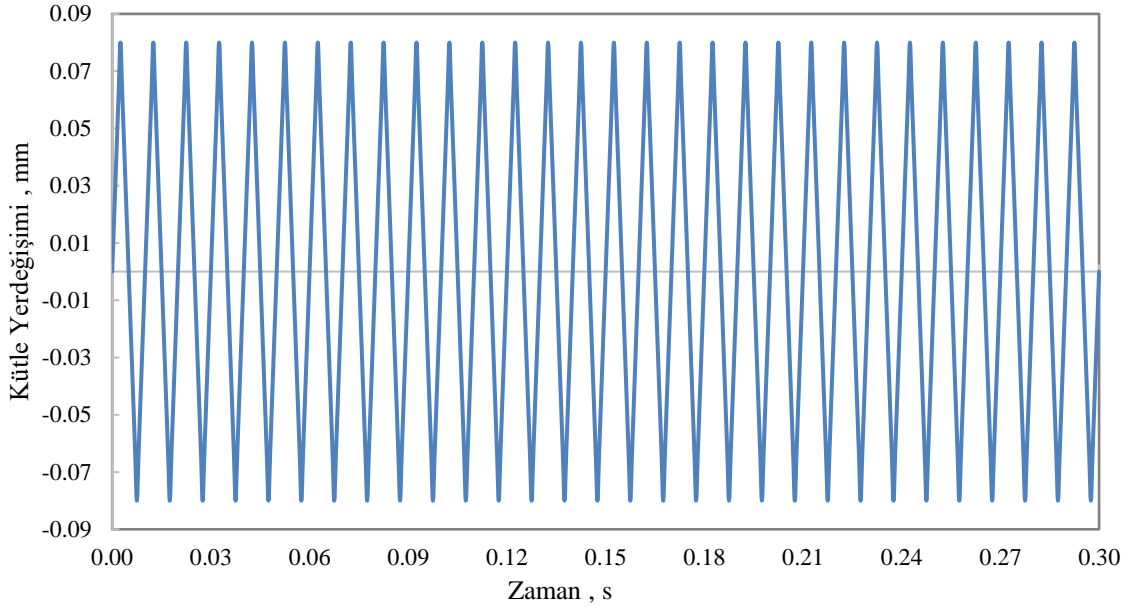
- 1- Sensörün geometrisi Workbench e çekilir,
- 2- Sensörün malzeme seçimini yapabilmek için “Engineering Parameters” sekmesinden ilgili malzemeler ve özellikleri seçilir,
- 3- Sensör Harmonic Response aracına tanımlanır,
- 4- Harmonic Response aracı içinde sensörün malzeme seçimi yapılır,
- 5- Algılama için kullanılacak kütlelerin yerleri belirlenir,
- 6- Kütleler için parametrik tanımlama yapılır,
- 7- Sensörün sabit ve hareketli yüzeyleri tanımlanır,
- 8- Simülasyon için uygun mesh değerleri tanımlanır,
- 9- Simülasyon boyunca uygulanacak ivme yönü belirlenir,
- 10- İvme miktarı için parametrik tanımlama yapılır,
- 11- Sensöre uygulanmak istenen dalga yönü belirtilir,
- 12- Uygulanacak frekans için parametrik tanımlama yapılır,
- 13- Simülasyon girdi ve çıktıları parametrik opsiyonlar ile bağlanır,
- 14- Simülasyon çalıştırılır.

Çıkan simülasyon sonuçlarına göre veriler üzerinden hassasiyet hesaplaması yapılır. Tez kapsamında kullanılan hassasiyet,

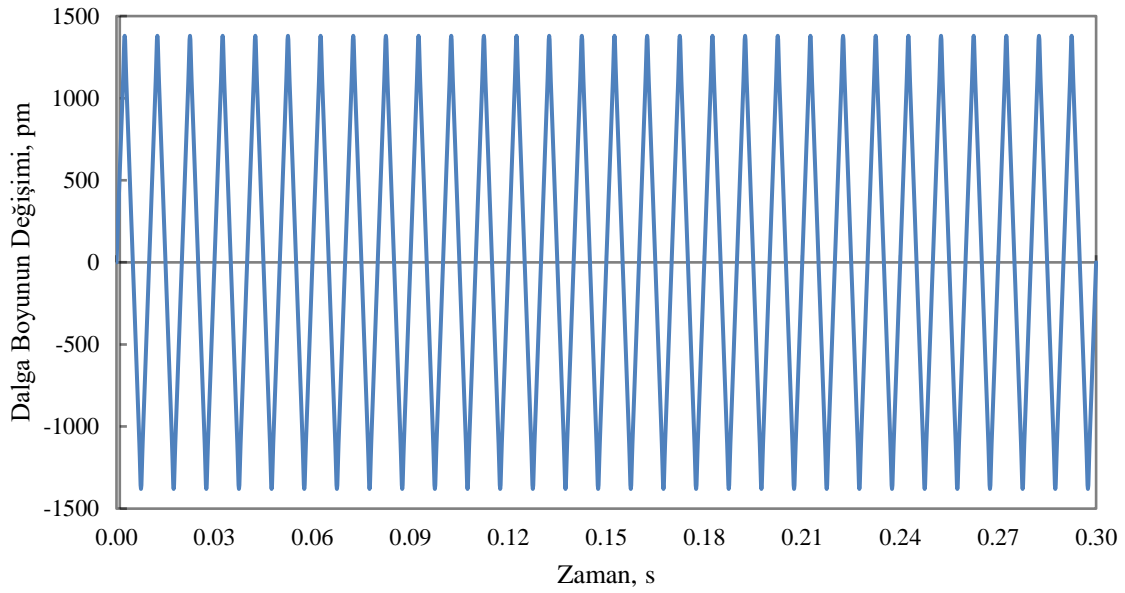
$$S = \frac{\Delta\lambda}{a_{sistem}}$$

Eş.29

eşitliği ile hesaplanmıştır. Simülasyonda fiber üzerindeki kütlein zamana bağlı değişimi ile fiber üzerindeki dalga boyu kayması Şekil 3.12’ de ve Şekil 3.13’ te çizilmiştir. Bu grafikler yardımıyla ataletsel kütlein 1 mm’lik yer değiştirmesinin dalga boyuna yaptığı değişim miktarı elde edilir.

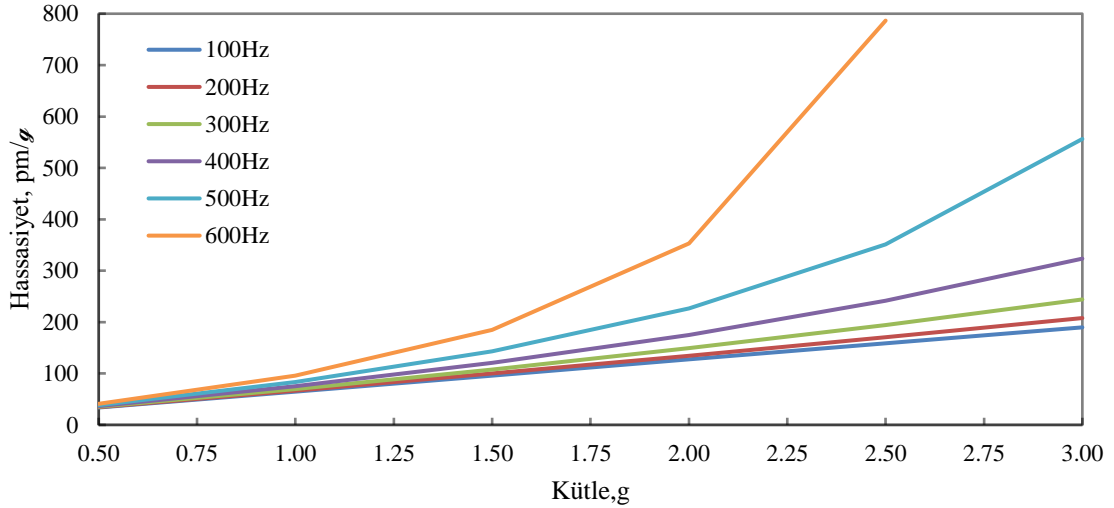


Şekil 3.12 Fiber üzerindeki kütle yer değişiminin zamana bağlı grafiği



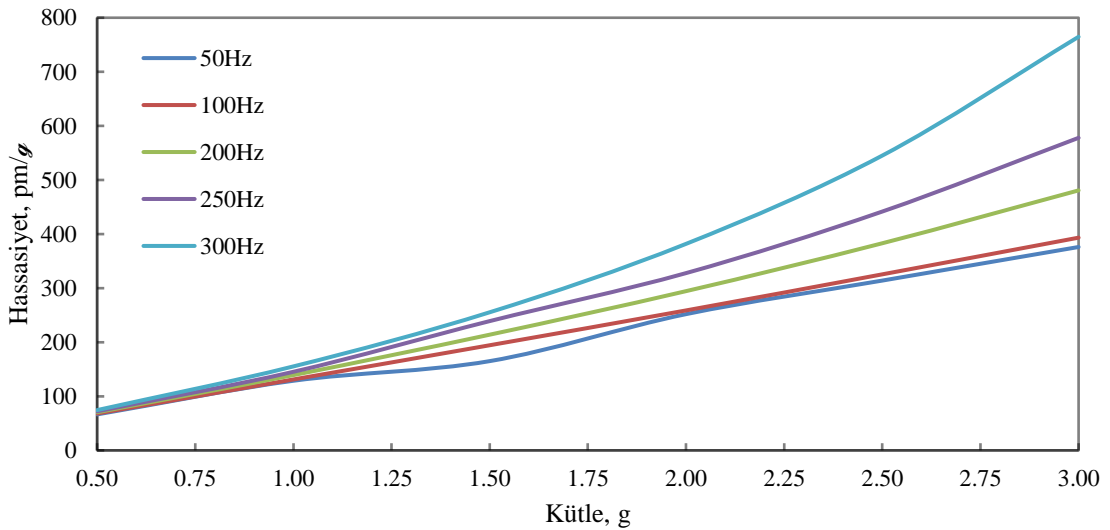
Şekil 3.13 Fiberin dalga boyunun zamana bağlı değişim grafiği

Dalga boyunun zaman ile değişimi grafiklerinden, kütleye bağlı hassasiyet değişimi çizilebilir. Hassasiyet grafikleri ilgili her geometrik parametre setinin, ayrı ayrı analizi sonucunda çıkarılır. Hassasiyet analizi sonuçları Şekil 3.14 – Şekil 3.24 arasında verilmiştir.



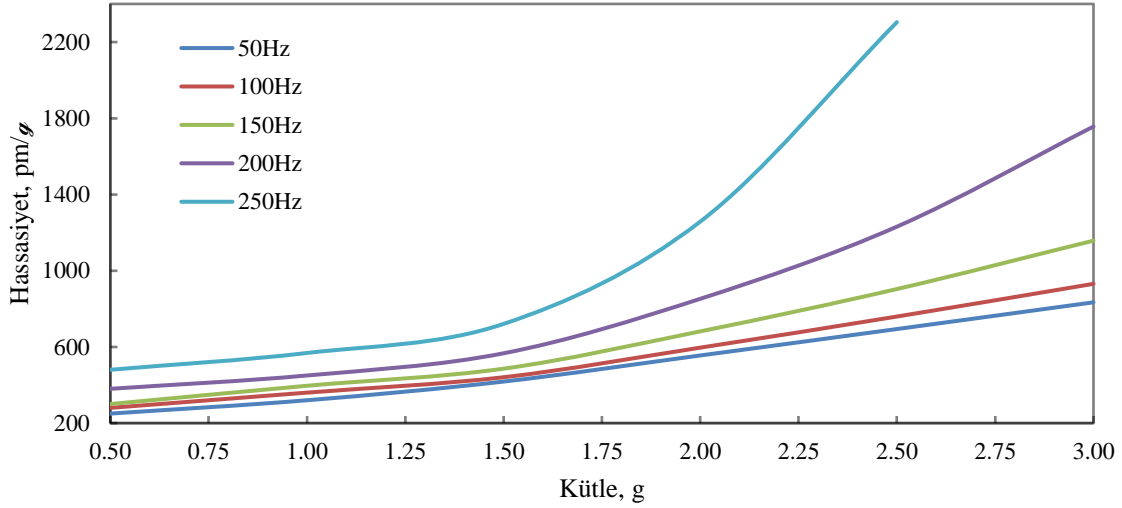
Şekil 3.14 Stp1 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden biri olan stp1’de, farklı ataletsel kütlere göre hassasiyet değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.14’ te yer alan verilere göre, ataletsel kütlelerin farklı uygulama frekanslarına karşı hassasiyete değişimi incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle değeri için 100 Hz’ den 600 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 65 pm/g ‘den 96 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir.



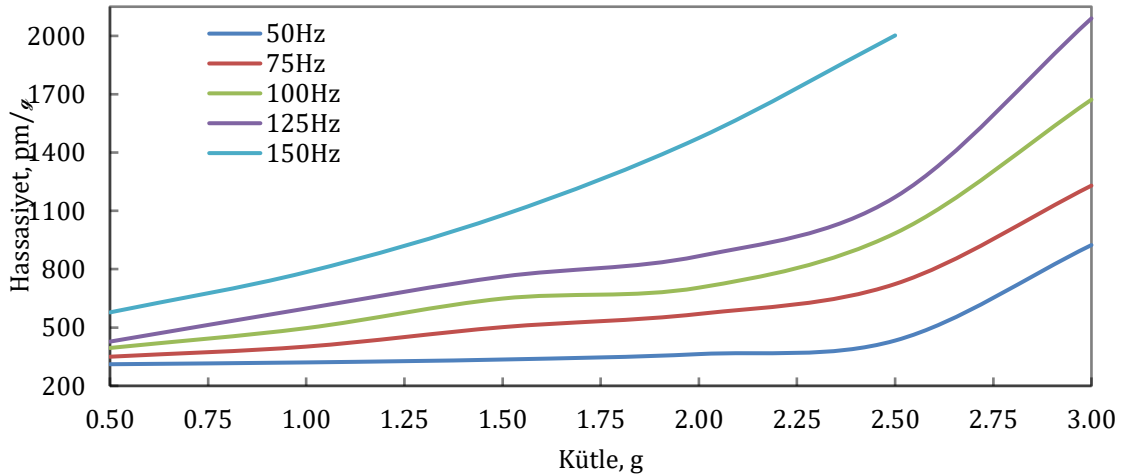
Şekil 3.15 Stp2 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden stp2 için Şekil 3.15’ te değişen ataletsel kütlelerin farklı uygulama frekanslarına karşı hassasiyete değişimi incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle değeri için 50 Hz’ den 300 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 129 pm/g’ den 155 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir. Stp1 ile hassasiyet değerleri benzer frekanslarda karşılaştırıldığında, stp2’nin hassasiyet konusunda daha iyi olduğu görülmüştür.



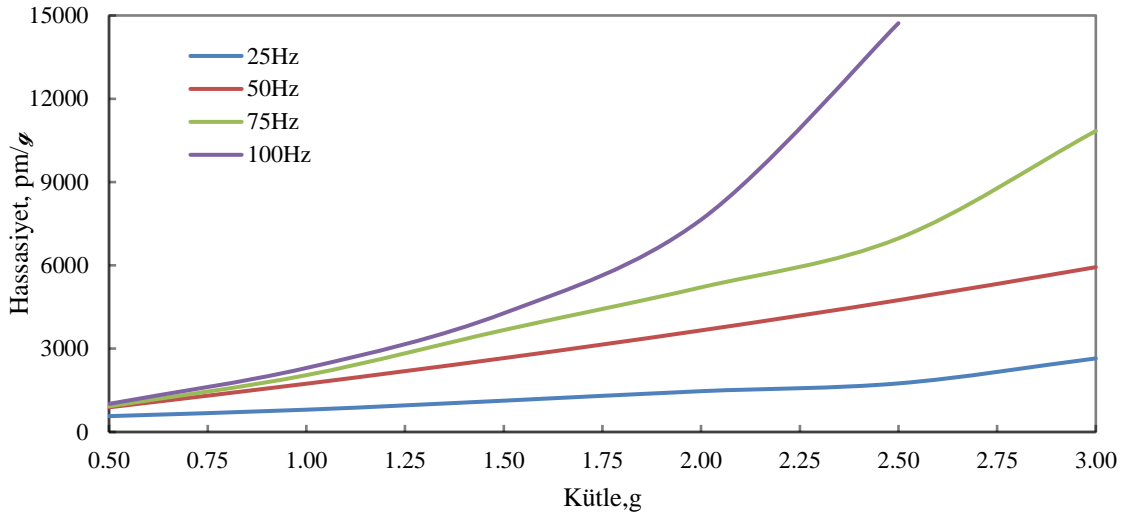
Şekil 3.16 Stp3 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden stp3 için Şekil 3.16’ da farklı ataletsel kütle değerlerinin frekansa göre hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 50 Hz’ den 250 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 320 pm/g’ den 566 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir. Stp1 ve stp2 ile hassasiyet değerleri benzer frekanslarda karşılaştırıldığında, stp3’ ün hassasiyet konusunda daha iyi olduğu görülmüştür.



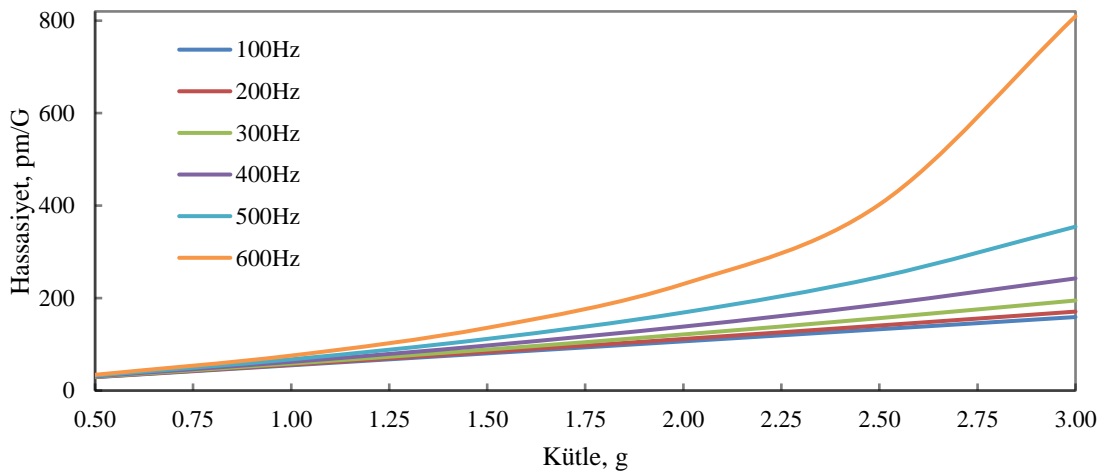
Şekil 3.17 Stp4 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden stp4 için Şekil 3.17’ de, farklı ataletsel kütle değerlerinin hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 50 Hz’ den 250 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 321 pm/g ‘den 785 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir.



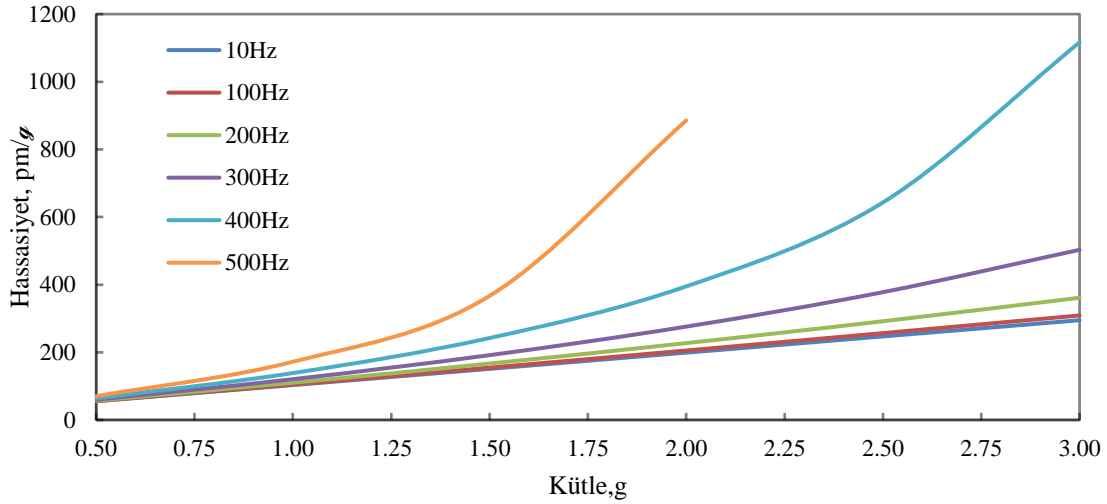
Şekil 3.18 Stp5 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden stp5 için farklı ataletsel kütle değerlerinin hassasiyet değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.18’ de 1 gram ataletsel kütle için 25 Hz’ den 100 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 800 pm/g ‘den 2306 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir.



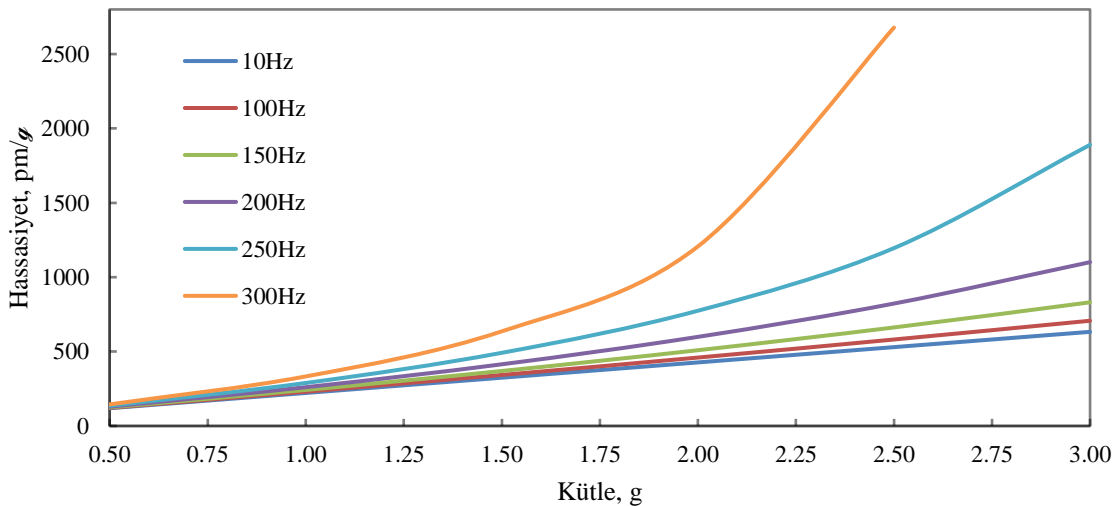
Şekil 3.19 Stp6 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinden stp6 için farklı ataletsel kütle değerlerinin hassasiyet değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.19’ da 1 gram ataletsel kütle için 100 Hz’ den 600 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 56 pm/g ‘den 68 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir.



Şekil 3.20 Stp7 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

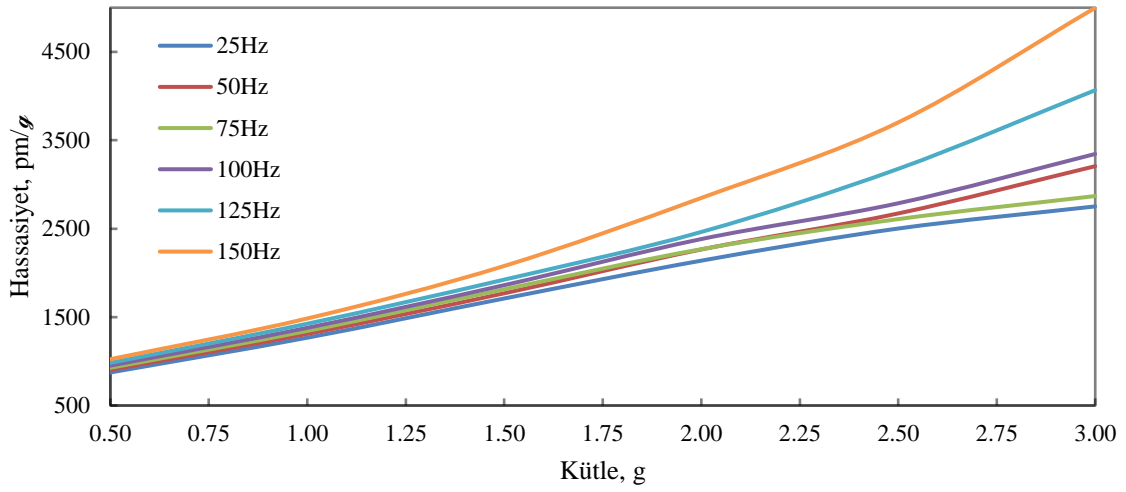
Stp7 için farklı ataletsel kütle değerlerinin değişen uygulama frekansları altındaki hassasiyet değişimleri incelenmiştir. Şekil 3.20’ de 1 gram ataletsel kütle için 10 Hz’ den 500 Hz’ e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 103 pm/g ‘den 172 pm/g’ ye kadar değişim göstermiştir.



Şekil 3.21 Stp8 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

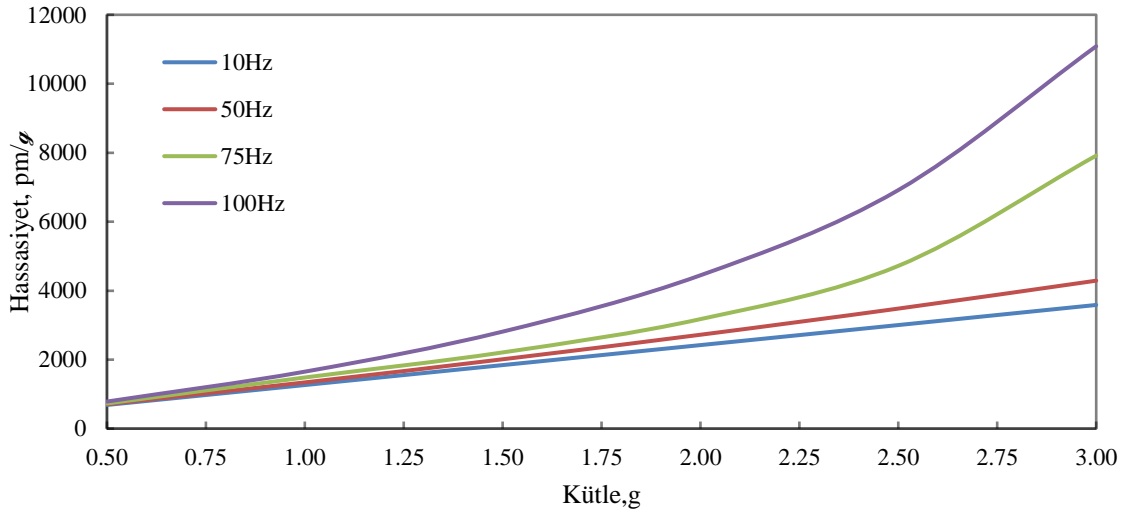
Şekil 3.21’ de stp8 için farklı ataletsel kütle değerlerinin değişen uygulama frekansları altındaki hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 10 Hz’ den 300

Hz' e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 220 pm/g 'den 332 pm/g' ye kadar değişim göstermiştir.



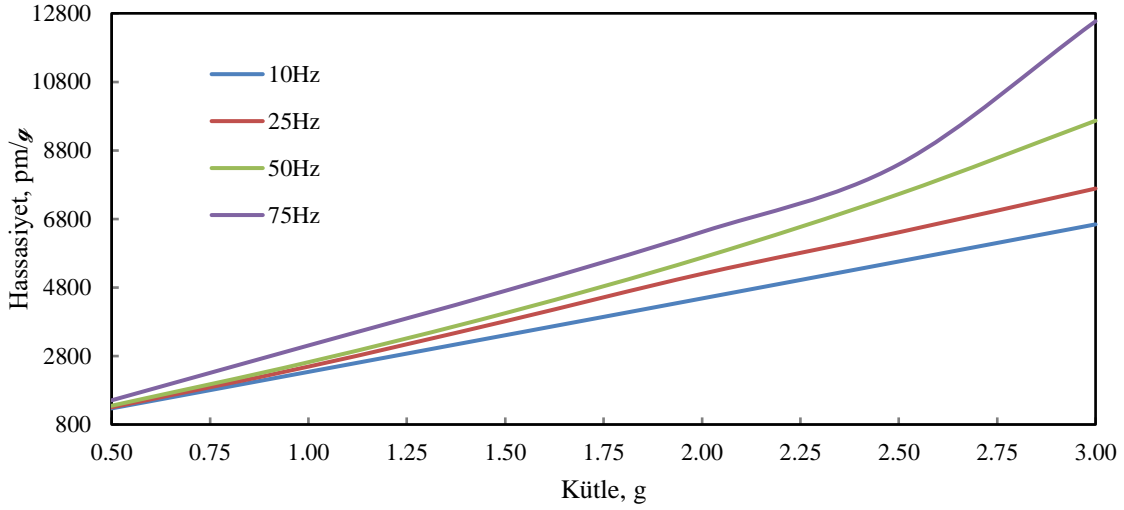
Şekil 3.22 Stp9 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Şekil 3.22' de stp9 için farklı ataletsel kütle değerlerinin değişen uygulama frekansları altındaki hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 25 Hz' den 150 Hz' e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 1267 pm/g 'den 1485 pm/g' ye kadar değişim göstermiştir.



Şekil 3.23 Stp10 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinde stp10 için Şekil 3.23' te farklı ataletsel kütle değerlerinin değişen uygulama frekansları altındaki hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 10 Hz' den 100 Hz' e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 1264 pm/g 'den 1653 pm/g' ye kadar değişim göstermiştir.



Şekil 3.24 Stp11 için frekansa bağlı kütle-hassasiyet değişimi

Geometrik parametre setlerinde stp11 için Şekil 3.24' te farklı ataletsel kütle değerlerinin değişen uygulama frekansları altındaki hassasiyet değişimleri incelenmiştir. 1 gram ataletsel kütle için 10 Hz' den 75 Hz' e kadar olan frekans aralığında, hassasiyet 2336 pm/g 'den 3108 pm/g' ye kadar değişim göstermiştir.

Kütlenin hassasiyet ile değişim grafikleri her bir geometrik parametre setine göre elde edilmiştir. Her bir geometrik parametre setine ait sistemler uygulanan değişken frekans altında farklı hassasiyet değişimleri göstermektedir. Sistemler arasındaki hassasiyet farklılıklarını daha net görebilmek için 1.5 g ataletsel kütle ile Çizelge 4' te özet verilmiştir.

Çizelge 4. Seçilen kütlelerin geometrik parametre setlerine ilişkin hesaplanan hassasiyet değerleri

İsimlendirme	Hassasiyet, pm/g
Stp1	96 - 185
Stp2	160 - 250
Stp3	420 - 720
Stp4	340 - 1070
Stp5	1120 - 4020
Stp6	80 - 135
Stp7	150 - 240
Stp8	350 - 800
Stp9	1500 - 2000
Stp10	1800 - 2800
Stp11	3400 - 4700

Grafik çizimi sırasında sınırlayıcı parametrelerden en önemlisi doğal titreşim frekansı oldu. Doğal titreşim frekansı dolaylarında gelen bir akustik dalganın, sistemi rezonans frekansından uzaklaştırmak için bir yay ile sönümlü hareket yapması gerekir. Kullanılması hedeflenen yay özellikleri ise seçilen geometrik parametre setine göre analiz edilecektir. Bu analiz, sistemin optimizasyonu bölümünde verilecektir.

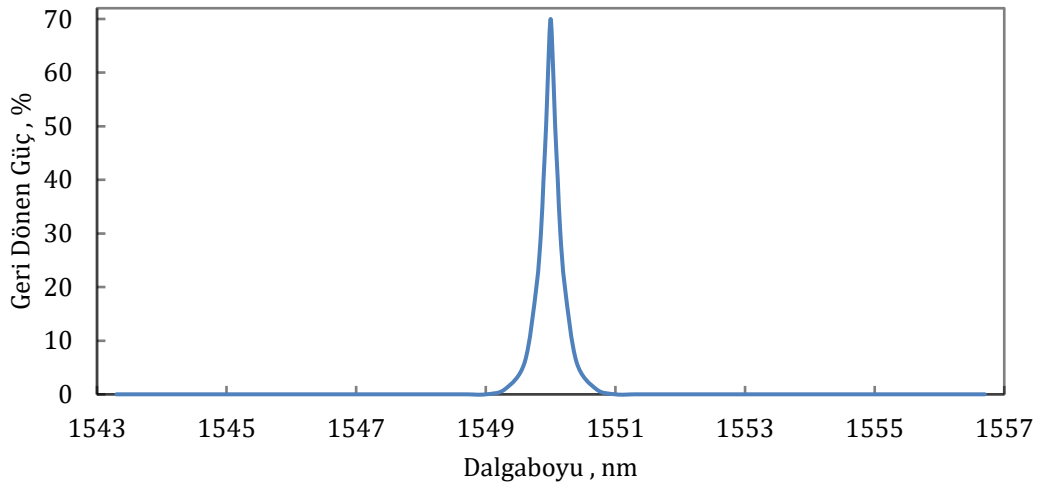
3.1.4. FBG tasarımı

Sistemin hassasiyetinin yüksek olmasını sağlayabilmek için kullanılacak optik eleman FBG' nin tepkisinin yüksek olması gerekir. Tez kapsamındaki simülasyon çalışmalarında bu yapının tepkisini simüle edebilmek için hangi parametrelerin kullanıldığı bilgisi Çizelge 5' te verilmiştir.

Çizelge 5. Fiber Bragg Izgara için simülasyon parametreleri

Tanım	Sembol	Değerler
Young Modülü	E_f	$72,9 \times 10^9 Pa$
Fiberin ara kesit alanı	A_f	$1,227 \times 10^{-8} m^2$
Fiber Bragg Izgara uzunluğu	L_{FBG}	10 mm
Etkin esneklik- optik katsayı	P_e	0,22
Dalga boyu	λ_B	1550 nm
Geçirgenlik oranı	T_B	0,70

Simülasyon için ızgara kısımlarında gerçek ile uyumlu yüzde 70 yansıtıcılık oranına sahip ayna modeli uygulanmıştır. Bu dalga boyuna göre fiberin tepkisi Şekil 3.25’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.25 FBG’ nin dalga boyuna göre verdiği tepki (Merkezi dalga boyu: 1550 nm)

Fiberdeki dalga boyu değişiminin frekansa ve ivmeye bağlılığını anlamak için Çizelge 6 oluşturulmuştur. İvme aynı frekans değişimlerinde sabit tutulmuş ve frekans değişimi 100 Hz’ lik aralıklar ile incelenmiştir.

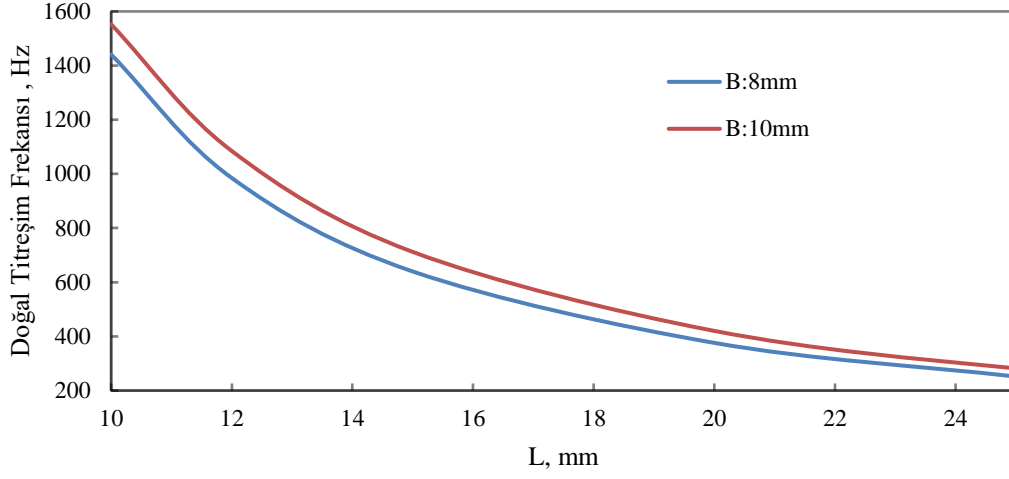
Çizelge 6. Fiber Bragg Izgara simülasyonu sonucunda hesaplanan dalga boyu değişimleri

İvme, g	Frekans, Hz	Dalga boyu Değişimi, pm
0.5	600	824,1
0.5	700	836,5
0.5	800	847,0
1.0	600	1148
1.0	700	1201
1.0	800	1247
1.5	600	1526
1.5	700	1548
1.5	800	1583
2.0	600	1920
2.0	700	1955
2.0	800	1978

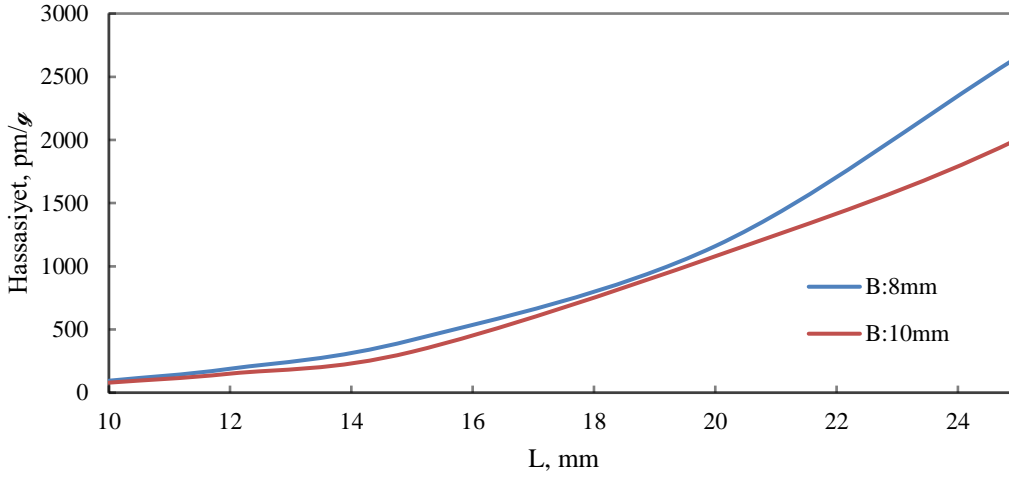
Elde edilen bu değerler ile değişen ivmenin, FBG' nin dalga boyu kaymasındaki etkisi görülmektedir. Dalga boyu değişimlerinden ivme bilgisinin alınabildiği açıktır.

3.2. Sensör Optimizasyonu

Tezin bu bölümünde mevcut geometrilerin etkilerini nümerik analiz yöntemleriyle yapısal optimizasyonu yapılacak ve detaylı incelenecektir. ANSYS programında elde edilen veriler ile alüminyum alaşım malzemesine sahip sensörün, sensör kol uzunluğuna göre doğal titreşim frekans etkileşimi Şekil 3.26'da gösterilmiştir. Sensörün kol uzunluğu arttıkça doğal titreşim frekansının azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda sensörün hassasiyet değişimleri 100 Hz' de 1.5 g kütleyle sahip sensör modeli temel alınarak Şekil 3.27' de gösterilmiştir. Bu şekil üzerinden teorik analiz sonuçlarıyla paralel olarak sensör kolunun uzunluğunun artmasıyla sistemin hassasiyetinin arttığı gösterilmiştir.

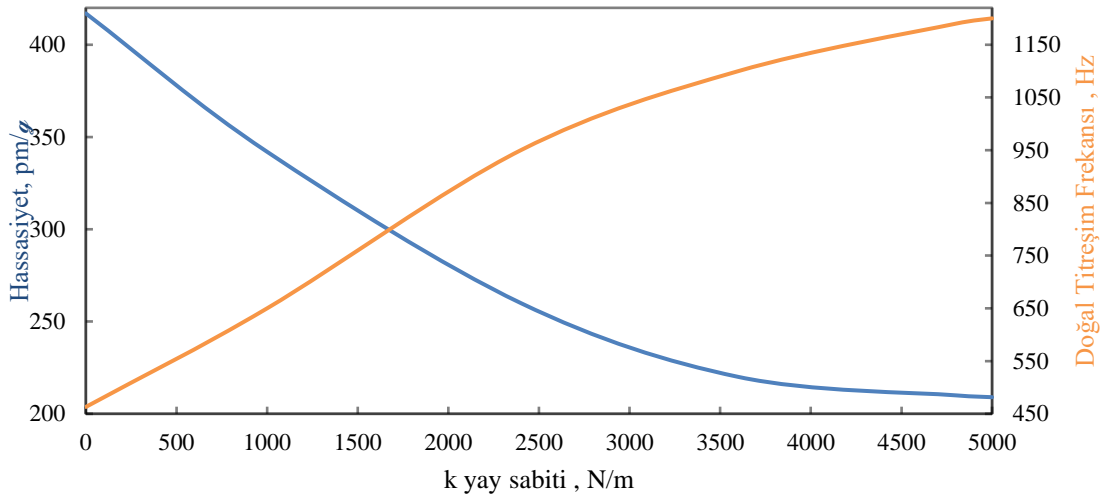


Şekil 3.26 Sensör kolu uzunluğunun doğal titreşim frekansına etkisi



Şekil 3.27 Sensör kolu uzunluğunun hassasiyete etkisi

Sistemdeki zorlamalı salınımın sağlanabilmesi için kullanılacak yayın parametrelerini anlamak gerekir. Mevcut geometrilere göre sensör kolunun hassasiyet ve doğal titreşim frekansları göz önüne alındığında stp3 parametrik geometri üzerinde yay sabiti çalışması yapılmıştır. Şekil 3.28'e göre k_{yay} sabitinin artmasıyla doğal titreşim frekansı artacak, hassasiyet azalacaktır.



Şekil 3.28 Yay sabitinin sensör parametrelerine etkisi

3.3. Sensör Sisteminin Karakterizasyonu

Sistemin tam fiber optik algılama yapabilmesi için FBG kullanılır. FBG’ den geçen ışığın istenilen dalga boylarını kapsaması için merkezi dalga boyları çalışılan FBG’ ler ile uyumlu en az iki farklı diyot kullanılabilir. Ancak kullanılacak olan diyot maliyetleri yüksek olduğundan farklı bir tasarım tercih edilmiştir.

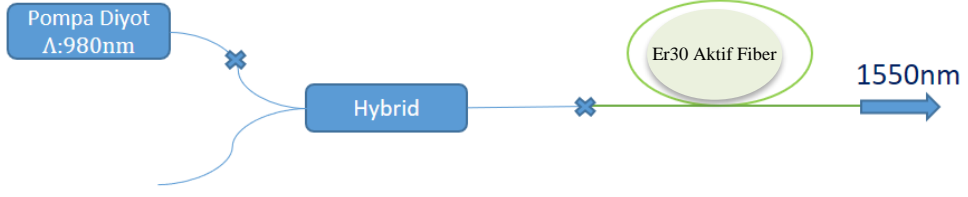
Kullanılacak olan ışık için kendiliğinden ışıma yapabilecek kararlı bir sistem tasarlanmıştır. “Amplified Spontaneous Emission (ASE)” olarak ifade edilen kuvvetlendirilmiş kendiliğinden ışıma yapan sistem, kazanç ortamlarını pompalama yaparak uyarılmış enerji seviyesinde taban enerji seviyesine göre daha fazla iyon biriktirerek kendiliğinden ve uyarılmış ışıma yapabilir. Kendiliğinden ışıma ile ortaya çıkan ışıma (ing. spontaneous) fotonlar uyarılmış ışıma (ing. stimulated) ile kuvvetlendirilir (85).

ASE ışması sayesinde frekans alanı geniş bant aralıklarına ve düşük bağdaşım boyuna (ing. coherence length) sahip olan kaynaklar edilir. ASE ışık kaynağından yararlanarak meydana gelecek çok küçük faz farklarını bile interferometri yöntemlerini kullanarak algılamamıza yardımcı olacaktır. ASE ışık kaynaklarının gürültü seviyesinin düşük olması da ölçümde yüksek hassasiyet sağlamaktadır (86).

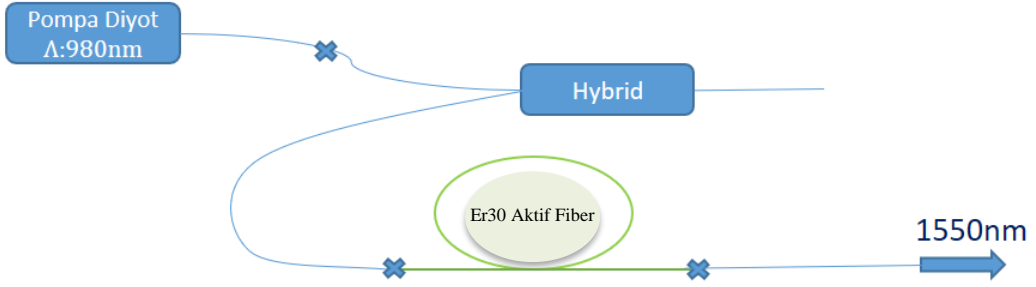
ASE ışık kaynağını oluşturabilmek gerekli optik bileşenler ve özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Pompa Lazer Diyodu: Aktif kazanç fiberi kuvvetlendirmek için sistemi pompalayacak olan diyot lazerdir. Erbiyum katkılı fiber için soğurma dalga boyu 980 nm'dir. Diyotun gücünün ve fiberin iyi optimizasyonu sağlanarak doyumda çalıştırmak maksimum verimi sağlayacaktır.
- Aktif Kazanç Fiberi: Erbiyum katkılı aktif kazanç fiberi sayesinde ortamda oluşan ışığın merkezi dalga boyu 1550 nm dolaylarındadır. Erbiyumun spektroskopik yapısı nedeniyle fiber boyunca terslenme seviyesi (ing. inversion level) değişimi ile merkezi dalga boyu değişmektedir. Tipik olarak bu değerler 1530 -1560 nm aralığındadır.
- Yalıtıcı: Bu optik eleman sayesinde ışığın tek yönlü olmasını sağlarken, geri dönen ve istenmeyen sinyallerin modüle olmamasını da sağlamaktadır.
- Pompa-Sinyal Çiftleyici +Yalıtıcı (ing. hybrid): Bu optik eleman hem pompa-sinyal çiftleyici hem de yalıtıcı olarak görev alır. ASE ışık kaynağında fazladan eleman olmasını ve hacimsel olarak küçük bir yapı olmasını sağlamak için kullanılır. Aynı fiber ile hem 980 nm pompa lazer hem de 1550 nm sinyal taşınabilir. ASE ışık kaynağında bu iki dalgayı birleştirmek ve istenilen koldan istenilen dalga boyunu taşıyabilmek için kullanılır (87).

Fiber içindeki sinyali güçlendirebilmek için iki farklı metot kullanılabilir. Şekil 3.29 (a)'da ileri yönlü besleme, (b)'de geri yönlü besleme metotlarını gösterilmiştir. İleri yönlü beslemede pompalama yönü ile sinyal yönü aynı doğrultuda, geri yönlü beslemede ise pompalama yönü ile sinyal yönü ters doğrultudadır [88]. İkisi arasında performans olarak büyük bir fark olmamasına rağmen, geri yönlü beslemede sinyal doğrultusunda fazladan kalan pompa olmaması nedeniyle sistemin gürültüsünü olumsuz etkilememesi açısından önemlidir. Kullanılacak ASE ışık kaynağının tasarımında geri yönlü besleme tercih edilmiştir.

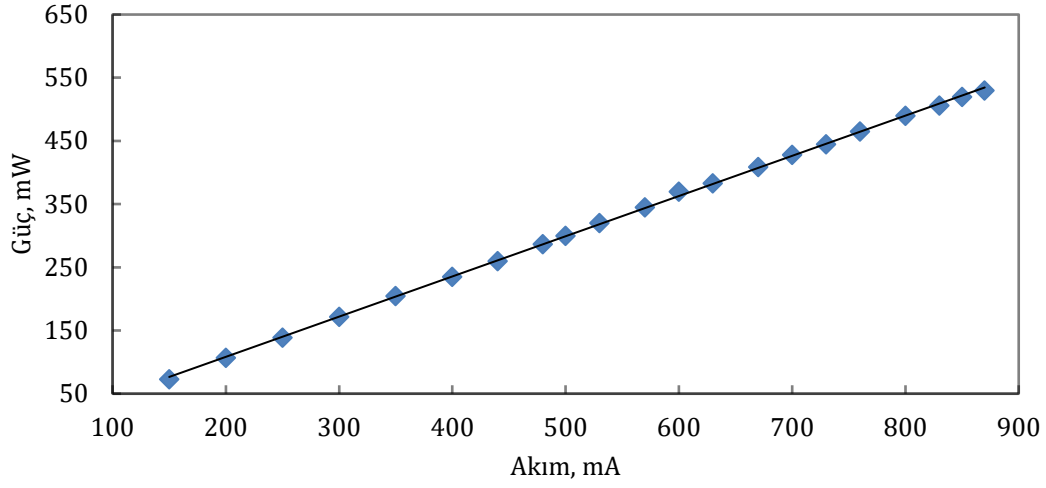


Şekil 3.29 (a) İleri yönlü besleme ile fiberdeki sinyalin güçlendirilmesi



Şekil 3.29 (b) Geri yönlü besleme ile fiberdeki sinyallerin güçlendirilmesi

Geri yönlü besleme yapabilecek optik deney düzeneği yapabilmek için 980 nm diyot lazeri belirlenip, sürücüsü yardımıyla karakteristik özelliklerine uygun şekilde aktif hale getirilmesi gerekir. Karakteristik özelliklerine uygun olarak çalıştırılan bu diyot için elde edilen akım-güç grafiği Şekil 3.30'da çizilmiştir. Burada belirtilen grafikte akımın artırılmasıyla gücün de arttığı görülmektedir. Çizelge 7' de pompa lazer diyot için ölçülmüş veriler yer almaktadır.

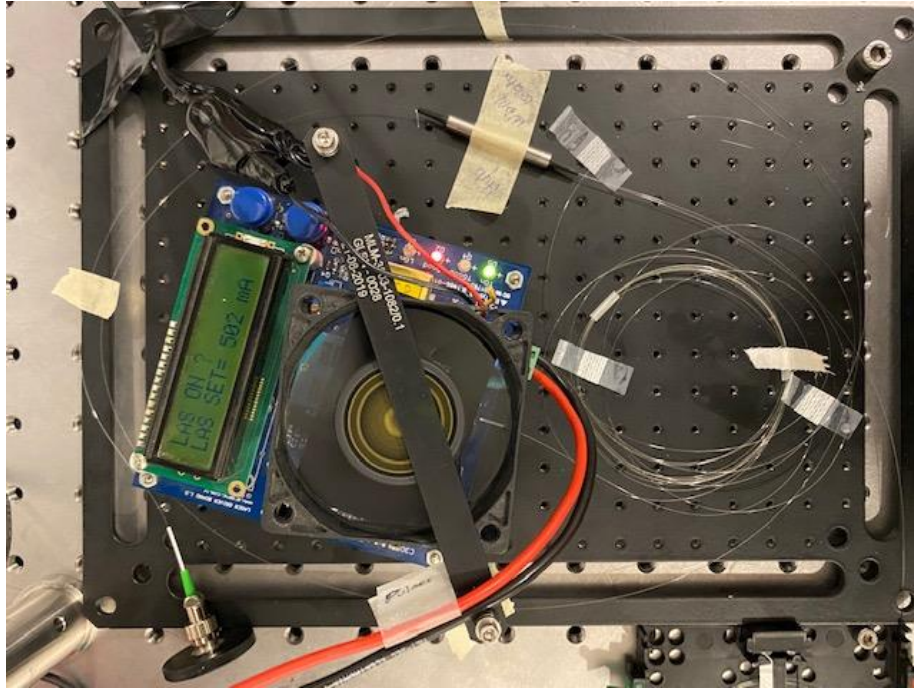


Şekil 3.30 980 nm diyot için Akım-Güç grafiği

Çizelge 7. Pompa lazer diyot için akım-güç verileri

Akım, mA ($\pm 0,5$)	Güç, mW ($\pm 0,05$)
150	73
200	107
250	139
300	172
350	205
400	235
440	260
480	287
500	300
530	320
570	345
600	370
630	383
670	409
700	428
730	445
760	465
800	490
830	506
850	520
870	530

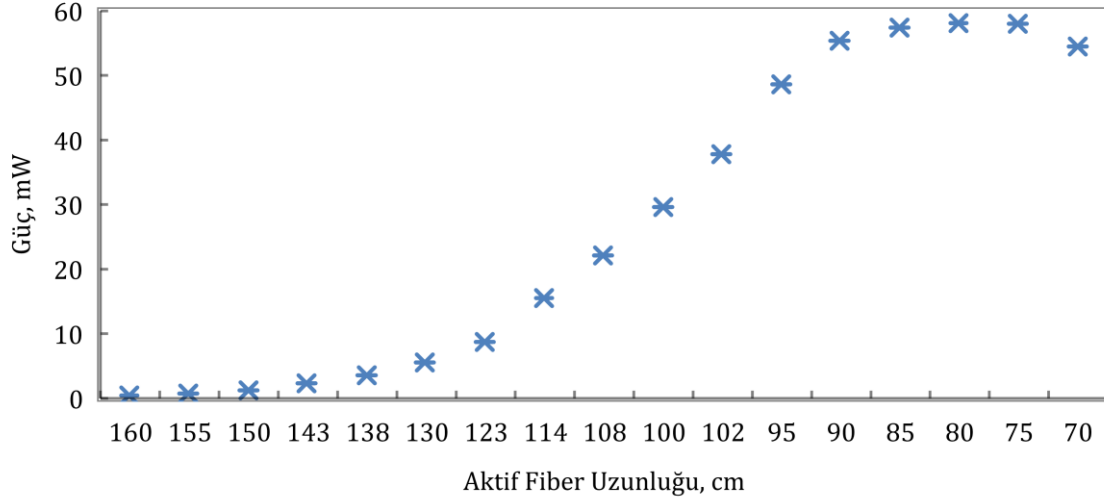
Geri yönlü besleme için Şekil 3.31’ de bir fotoğrafı verilen optik deney düzeneği kuruldu. ASE ışık kaynağının maksimum verimlilik ile çalışabilmesi için aktif fiberin uzunluğunu optimize edilmelidir. Bunun için kullanılan 980 nm pompa lazer diyot gücüne göre, aktif fiber uzundan çıkan sinyalin gücü optimize edildi.



Şekil 3.31 Aktif fibere kadar oluşturulan optik deney kurulumu

ASE ışık kaynağından yüksek güç çıkışı alabilmek için, 980 nm diyotu 850 mA’de sürerek aktif kazanç fiberin doyuma ulaşması sağlandı. Doyuma ulaştığını, aktif fiber uzunluğunu kısalttıkça artık gücün artmadığı durum olarak tanımlayabiliriz. Çalışacağımız akımı belirlemek ve hep aynı pompa lazer diyot gücünde çalışmak, ASE ışık kaynağının kararlı çalışmasını sağlamak ve verileri karşılaştırmak açısından önemlidir.

ASE ışık kaynağının önceki deneyimlere göre yüzde 10’luk verimlilik ile çalışması fiberin doyuma yakın noktalar olduğunu gösterir. 850 mA’ de çalışan diyot için çıkan güç 520 mW’ tır. Elde edilen Şekil 3.32’ye göre aktif fiber uzunluğu 90-80 cm aralığında iken maksimum verimlilik ile çalıştığını görüyoruz. ASE ışık kaynağının Çizelge 8’de verildiği gibi 58 mW ile bu akım değeri için tepe değerine ulaşır.

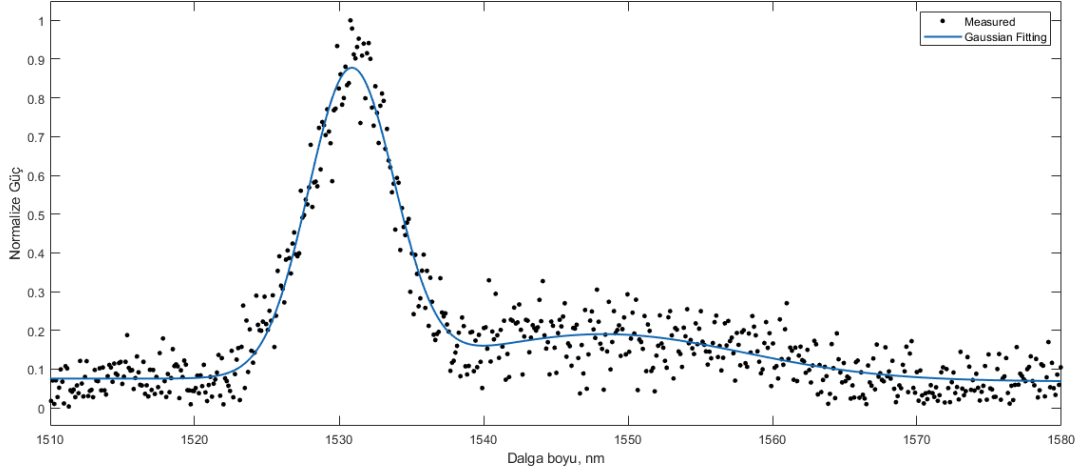


Şekil 3.32 1550 nm dalga boyunda çalışan ASE ışık kaynağının aktif fiberinin uzunluk optimizasyonu

Çizelge 8. ASE ışık kaynağının aktif fiber uzunluk optimizasyonu

Aktif Fiber Uzunluğu, cm ($\pm 0,5$)	Güç, mW ($\pm 0,05$)
160	0,42
155	0,73
150	1,20
143	2,32
138	3,65
130	5,50
123	8,72
114	15,52
108	22,10
102	29,64
100	37,86
95	48,60
90	55,40
85	57,45
80	58,10
75	58,01
70	54,52

Oluşan ASE ışık kaynağının hangi bantta aktif olduğunu görmek için spektrum analizörü yardımıyla Şekil 3.33'te yer alan dağılımı ölçüldü. Bu spektrum ölçümünü alabilmek için 1.0-12 µm dalga boyu aralığını algılayan, -30 dB/m hassasiyeti bulunan, 1 ppm doğruluk ile ölçüm alabilen, Thorlabs OSA 207C model numaralı ölçüm cihazı kullanılmıştır.

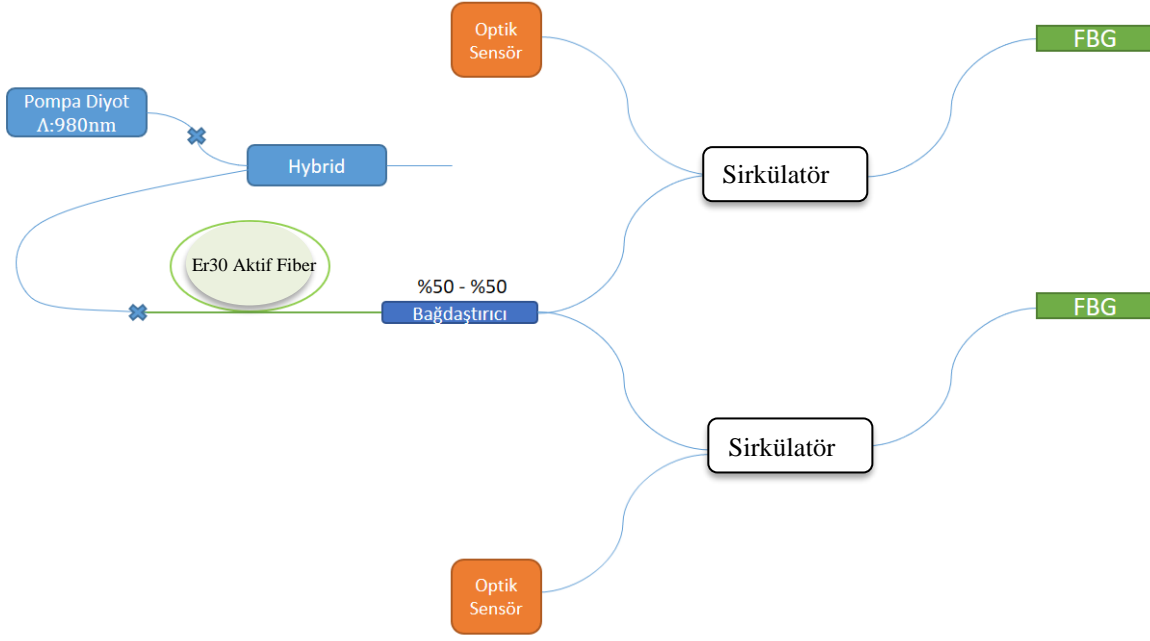


Şekil 3.33 Spektrum analizörden alınan verinin Gaussian eğri ile uyarlaması

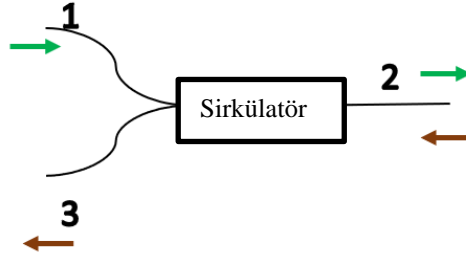
Ölçüm sonuçları normalize edilmiş ve MATLAB ile çoklu Gaussian eğri uyarlaması yapılmıştır. ASE için tepe dalga boyu 1547,82 nm' de ölçülmüştür.

ASE ışık kaynağının sonraki optik elemanlar ile birleştirilmesi FBG ile ölçüm yapabilmek için gerekli kurulumu gösterecektir. FBG tabanlı ölçüm yapabilmek için oluşturulan ASE ışık kaynağının çıktısı öncelikle iki adet FBG yapısı ile kurgulanmıştır.

Şekil 3.34' te gösterilen optik kurulum, ASE ışık kaynağını ikiye bölmesiyle başlar. Kullanılan optik elemanların karakteristik özellikleri ile uyumluluğu her adımda kontrol edilerek devam edilir. FBG den geri dönen ışığın gücünü ve spektral özelliklerini anlamak için sirkülatör ya da devrettirici (ing. circulator) denilen optik eleman kullanılır. Sirkülatör optik elemanı Şekil 3.35' te belirtildiği gibi 1 numaralı koldan gelen sinyali 2 numaralı kola; 2 numaralı koldan gelen sinyali 3 numaralı kola ileten tamamen fiber tabanlı bir elemandır.



Şekil 3.34 Optik algılama kurulumunda iki adet FBG yaklaşımı



Şekil 3.35 Sirkülatör optik elemanın sinyal geçiş yönleri

Kurulumda bahsedilen bağdaştırıcı (ing. coupler) ASE ışık kaynağında oluşan sinyali ikiye bölmektedir. Sirkülatör optik elemanı ise FBG den geriye dönen sinyalin spektrumunu ve güç ölçümlerini yapabilmemize olanak sağlamaktadır. Bu kurulumda kullanılan FBG'lerin merkezi dalga boyları ITU 47 olarak bilinen 1539,77 nm'dir. ASE ışık kaynağının geniş spektrumda olması, bu dalga boyunda çalışabilmede olanak sağlar.

Çizelge 9. FBG'lerden geri dönen sinyalin dalga boyları

Fiber Durumları	FBG-1 Dalga boyu, nm ($\pm 0,01$)	FBG-2 Dalga boyu, nm ($\pm 0,01$)
Fiber Serbest	1539,60	1540,37
Fibere 1 gram kütle ile ön stres uygulanıyor	1540,39	1541,14
Fibere 2 gram kütle ile ön stres uygulanıyor	1541,17	1541,93

FBG'lerden gelen sinyallerin dalga boyları, ASE ışık kaynağının ikiye ayırdığımız için birbirine yakın olmakla birlikte, optik elemanların farklı kollardaki kayıpları ve sinyalin sirkülatör gibi elemanlar üzerinden farklı yollar izlemesi nedeniyle biraz farklıdır. Tüm güç ölçümleri Thorlabs S144C ile yapılmıştır. Bu sensör, 5 mm optik açıklığa sahip, 1 μ W – 500 mW güç aralığında çalışabilen, InGaAs fotodiyot tabanlı algılama yapan, 0,80 – 1,70 μ m dalga boyları aralığında ölçüm yapabilen ticari bir güç ölçerdir.

Çizelge 10. FBG'lerden geri dönen sinyalin güç değerleri

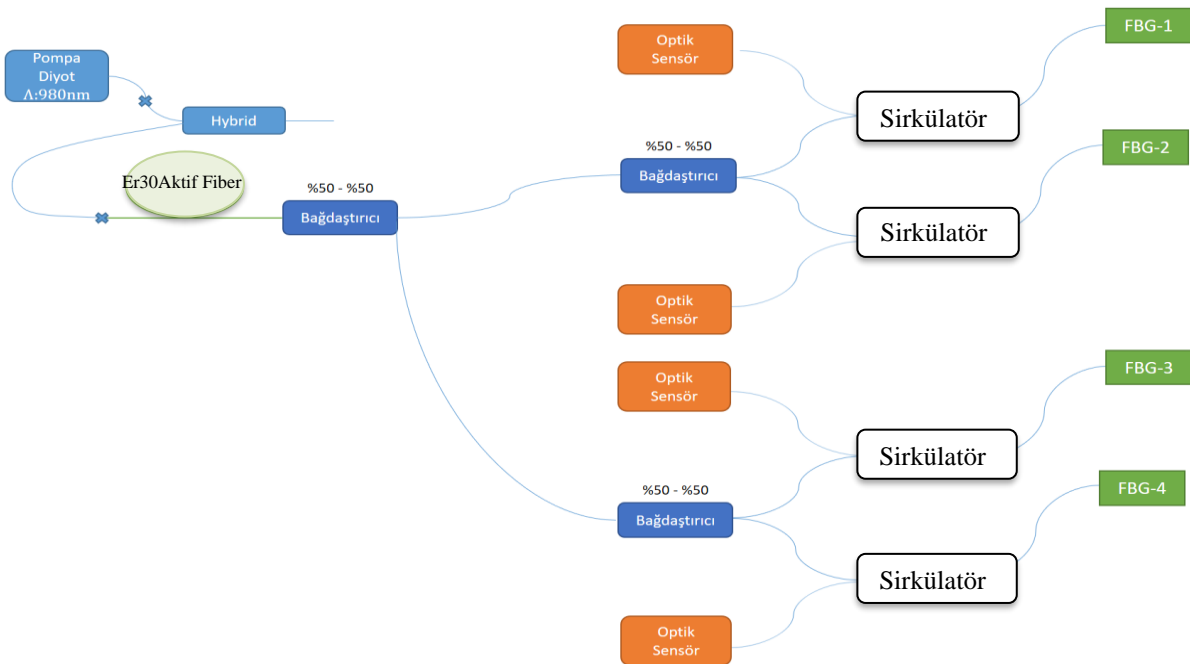
Fiber Durumları	FBG-1 Güç, mW ($\pm 0,05$)	FBG-2 Güç, mW ($\pm 0,05$)
Fiber Serbest	3,75	4,01
Fibere 1 gram ile ön stres uygulanıyor	2,80	3,12
Fibere 2 gram ile ön stres uygulanıyor	2,11	2,33

Kullanılan FBG'ler Luna Inc. Tarafından OS1100 model numarasına sahip Çizelge 11'deki özelliklere sahip özel dalga boyları ile üretilmiş optik elemanlardır.

Çizelge 11. FBG' lerin firma tarafından verilen karakteristik özellikleri

Özellikler	Değerler	Birim
FBG uzunluğu	10	mm
Zorlanım limiti	5,00	$\mu\epsilon$
Zorlanım hassasiyeti	1,2	pm/ $\mu\epsilon$
Çalışma Sıcaklığı	-40'den +120'ye	$^{\circ}\text{C}$
Fiber tipi	SMF-28	-
Fiber Kaplaması	Poliamid	-
Fiber Yeniden Kaplama Çapı	145-165	μm
Optik Tepe Geri Yansıması	>70%	-
FWHM (-3dB)	0,25	nm
Yalıtım Performansı	>15	dB

Sensör tasarımının optik ölçümünün tamamlanabilmesi için kurgulanan iki FBG' li yapı, dört FBG ile yeniden kurulmuştur. Burada iki bağdaştırıcı art ardına kullanıldı. Şekil 3.36' da bu optik algılama yapısına ilişkin blok diyagram çizilmiştir.



Şekil 3.36 Sensör yapısında kullanılan optik algılama birimi

Fiberlerin yönsel algılamasını kolaylaştırmak için ASE ışık kaynağının diğer dalga boylarına denk gelen FBG' ler kullanılır. Böylece her bir yön için farklı algılama yapabilen ve gelen akustik sinyalin hangi yönde olduğunu bilgisini veren bir optik algılama birimi oluşur.

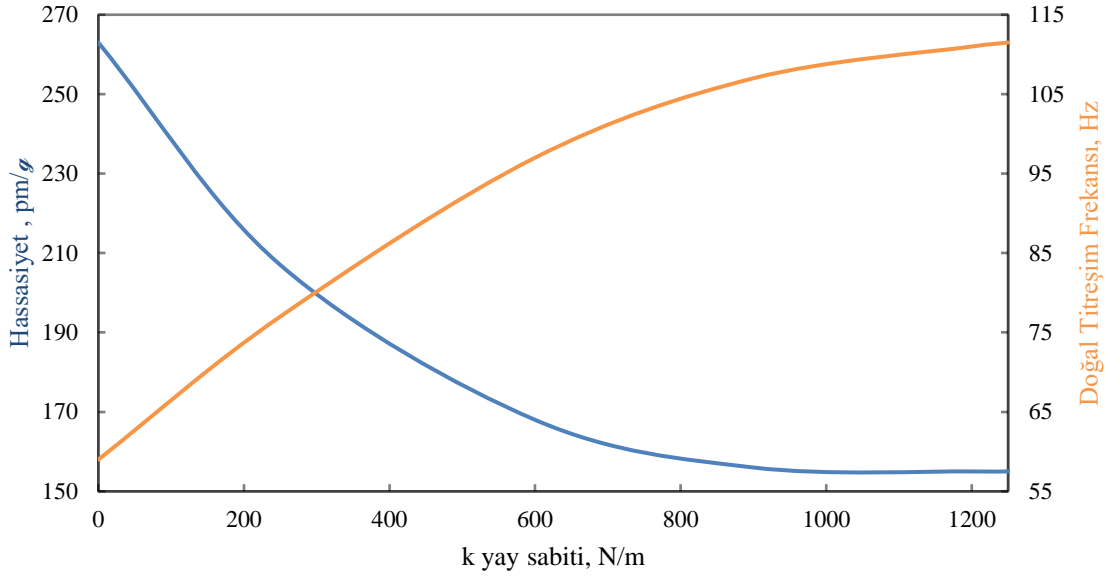
Çizelge 12. Optik algılama birimindeki FBG' lerin dalga boyları

Fiber Durumları	Dalga boyu, nm ($\pm 0,01$)			
	FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
Fiber Serbest	1539,60	1540,37	1536,67	1536,73
Fibere 1 gram ile ön stres uygulanıyor	1540,39	1541,14	1537,45	1537,49
Fibere 2 gram ile ön stres uygulanıyor	1541,17	1541,93	1538,24	1538,26

Çizelge 13. Optik algılama birimindeki FBG' lerin güç özellikleri

Fiber Durumları	Güç, mW ($\pm 0,5$)			
	FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
Fiber Serbest	3,75	4,00	7,20	8,40
Fibere 1 gram ile ön stres uygulanıyor	2,80	3,10	5,40	6,30
Fibere 2 gram ile ön stres uygulanıyor	2,10	2,33	4,07	4,73

Sistemin optik algılama yaparken hassasiyetinin incelenebilmesi için üç boyutlu yazıcıdan poli laktik asit (PLA) adlı bir malzeme kullanılmıştır. Bu malzeme kolay üretimi sağlanabildiği için tercih edilmiştir. Alüminyum alaşım için yapılan tüm simülasyonlar bu malzeme tipi için de yapılmıştır. Şekil 3.37 kullanılacak yay sabitlerine karşılık PLA malzemeli bu geometrinin tepkisinin simüle edilmiş halini göstermektedir. Ataletsel kütle değeri 1 gram olarak alınmıştır.



Şekil 3.37 PLA malzemesi ile üretilen stp3 geometrisinin k_{yay} ile etkileşimi

PLA malzemesinden üretilen stp3 geometrisi için simülasyonda kullanılan malzeme özellikleri listelenmiştir.

Çizelge 14. Simülasyon için kullanılan PLA malzemesinin özellikleri

Özellikler	Değerler	Birimler
Eğilme Sıcaklığı	52	°C
Yoğunluk	1,24	g/cm ³
Çekme Direnci	50	MPa
Bükülme Dayanımı	80	MPa
Çarpma Dayanımı	96,1	J/m
Büzülme oranı	0,37-0,41	%

Simülasyon sonuçlarına göre doğal titreşim frekansları Çizelge 15' te gösterilmektedir.

Çizelge 15. Stp3 geometrisine göre PLA malzemesinden üretilen parçanın doğal titreşim frekansları

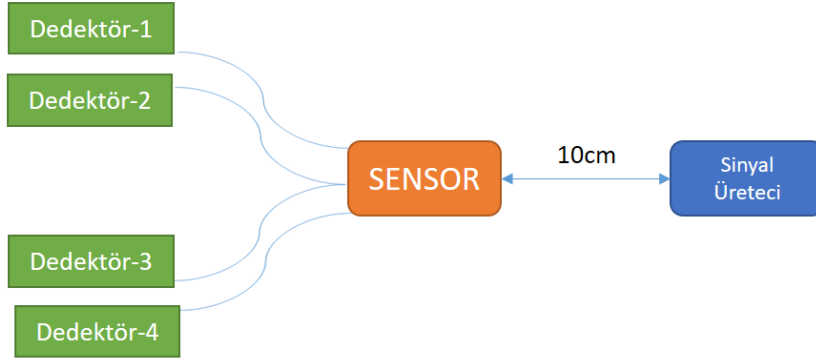
Kütle, g	İvme, g	Doğal Titreşim Frekansı, Hz
0,5	1	83,33
1,0	1	59,42
1,5	1	48,66
2,0	1	42,20
2,5	1	37,77
3,0	1	34,51
3,5	1	31,96
4,0	1	29,91
4,5	1	28,20
5,0	1	26,76

Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre hassasiyet eğrisi $1g$ altındaki sistemler için incelendi. Sistemlerden 10 Hz altında 1 gram kütle ile yapılan simülasyon, 263 pm/ g hassasiyete sahip olduğunu gösterdi. Benzer şekilde farklı frekanslar altında Çizelge 16’da listelenen hassasiyet değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 16. Stp3 geometrisine göre PLA malzemeli sensör için simülasyon hassasiyet değerleri

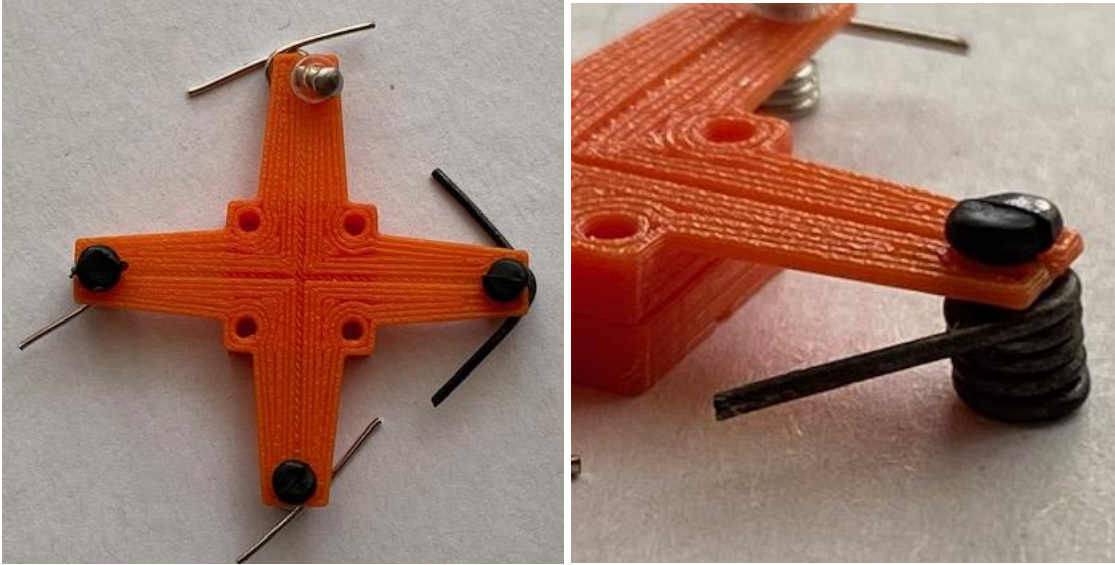
Frekans, Hz	Hassasiyet, pm/ g
10	263
20	326
30	378
40	425
50	509

PLA malzemesinden üretilen stp3 geometrisine Şekil 3.38’ deki gibi ölçüm düzeneği kuruldu. Bu düzenek ile hava ortamında sensörün bulunduğu ortama belirtilen frekanslar verilerek gerçek sensörün sonuçları elde edilmiştir.

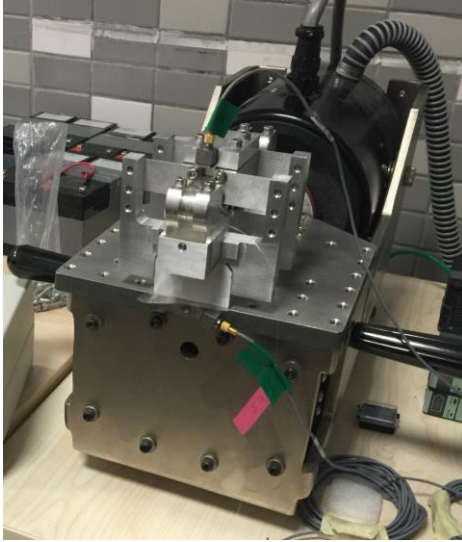


Şekil 3.38 PLA malzemeli sensör için ölçüm düzeneği

Sistemin ölçümleri sırasında 1 gram ataletsel ölçüm kütlesi, 1g altındaki etkileşimi ve 580 N/m sabitine sahip yay ile ölçüm yapılmıştır. Kullanılan sensör sistemine ait fotoğraf Şekil 3.39’ da gösterilmektedir. Sensörün hazırlanan ölçüm düzeneğine ait görüntüsü Şekil 3.40’ da gösterilmektedir.



Şekil 3.39 Sensörün yay ile bütünleşmiş görüntüsü



Şekil 3.40 Sensöre ait ölçüm düzeneği

Sensörün dört kolunda bulunan FBG optik elemanından elde edilen güç değerleri ve dalga boyu değişimleri Çizelge 17’ de verilmiştir.

Çizelge 17. Stp3 geometrisine göre PLA malzemeli sensör için alınan ölçüm sonuçları

(a) Akustik Dalga +x (0°) ve +y (90°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 <i>g</i> , Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz	Güç Değişimi, μW ($\pm 0,5$) FBG-1	Dalga Boyu, nm ($\pm 0,001$)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	106	1539,705	1540,392	1536,664	1536,759
20	113	1539,804	1540,420	1536,671	1536,786
30	120	1539,906	1540,452	1536,679	1536,814
40	123	1540,011	1540,482	1536,685	1536,846
50	117	1540,110	1540,510	1536,691	1536,876

(b) Akustik Dalga +x (45°) ve +y (45°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz (± 0,5)	Ortalama Güç Değişimi, μW (± 0,5) FBG-1+ FBG-2	Dalga Boyu, nm (± 0,001)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	110	1539,632	1540,412	1536,665	1536,739
20	113	1539,680	1540,460	1536,673	1536,746
30	125	1539,731	1540,508	1536,679	1536,754
40	122	1539,782	1540,565	1536,686	1536,761
50	123	1539,832	1540,616	1536,695	1536,769

(c) Akustik Dalga +x (90°) ve +y (0°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz (± 0,5)	Güç Değişimi, μW (± 0,5) FBG-2	Dalga Boyu, nm (± 0,001)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	96	1539,615	1540,460	1536,687	1536,735
20	102	1539,645	1540,562	1536,717	1536,738
30	94	1539,674	1540,655	1536,745	1536,746
40	95	1539,702	1540,748	1536,775	1536,754
50	101	1539,734	1540,850	1536,804	1536,760

(d) Akustik Dalga -x (0°) ve -y (90°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz (± 0,5)	Güç Değişimi, μW (± 0,5) FBG-3	Dalga Boyu, nm (± 0,001)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	108	1539,595	1540,394	1536,765	1536,760
20	102	1539,603	1540,423	1536,867	1536,788
30	95	1539,610	1540,454	1536,960	1536,818
40	96	1539,619	1540,484	1537,056	1536,847
50	105	1539,627	1540,512	1537,161	1536,878

(e) Akustik Dalga -x (45°) ve -y (45°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz (± 0,5)	Ortalama Güç Değişimi, μW (± 0,5) FBG-3+ FBG-4	Dalga Boyu, nm (± 0,001)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	117	1539,596	1540,372	1536,705	1536,783
20	120	1539,605	1540,379	1536,756	1536,834
30	129	1539,613	1540,388	1536,819	1536,882
40	130	1539,621	1540,397	1536,873	1536,942
50	120	1539,630	1540,404	1536,921	1536,993

(f) Akustik Dalga -x (90°) ve -y (0°) yönünde geldiği durum

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g					
Frekans, Hz (± 0,5)	Güç Değişimi, μW (± 0,5) FBG-4	Dalga Boyu, nm (± 0,001)			
		FBG-1	FBG-2	FBG-3	FBG-4
0	-	1539,587	1540,364	1536,657	1536,732
10	102	1539,635	1540,372	1536,702	1536,834
20	105	1539,683	1540,379	1536,759	1536,939
30	106	1539,740	1540,388	1536,842	1537,041
40	98	1539,791	1540,397	1536,893	1537,137
50	111	1539,848	1540,404	1536,941	1537,248

Çizelge 17' de yer alan ölçüm sonuçları farklı FBG' ler için aynı koşullardaki dalga boyu ve güç değişimlerinin akustik dalganın yönelimine göre farklı olduğunu göstermektedir. Simülasyon sonuçları ile karşılaştırmaları sonuç bölümünde irdelenecektir.

4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, su altı koşullarında kullanılabilmesi amacıyla, iki boyutta algılama yapabilecek bir ataletsel ivmeölçer tasarımı yapılmıştır. Çalışma frekans aralığının, savunma, medikal, sismik araştırmalar ve benzeri pek çok alanda yer bulabileceği düşüncesiyle 400 – 1000 Hz bandında olması istenmiştir. Fiber tabanlı algılama metodu ile yenilikçi yaklaşımı bulunan, yüksek hassasiyetli, düşük maliyetli bir ataletsel vektör sensör tasarımı yapılmıştır. Vektör sensör tasarımı için ihtiyaç duyulan akustik dalga genliği değişiminin bilgisi, kuramsal kısımda ayrıntılı anlatılan mandrelin özellikleri ile kontrol edilebilmektedir. İvmeölçer olarak tasarımı tamamlanmış olan algılayıcının sabit derinlikte kullanılması düşünüldüğünden, sıcaklık değişimlerinin tasarıma getireceği etki hesaplamalara katılmamıştır.

Sensörün, çalışma frekansı aralığının 400 – 1000 Hz arasında olması ve aynı zamanda, rezonansa girmeden kararlı bir şekilde algılama yapabilecek bir sistem tasarlanması hedeflenmiştir. Sensör sisteminin özellikleri, simülasyon çalışmaları ile ayrıntılarıyla incelenmiştir. Rezonans frekansı belirleyici olduğundan hassasiyetten ödün vererek, stp1, stp2, stp7 ve stp8 geometrik parametre setleri ile çalışmanın uygun yaklaşım olacağı sonucuna varılmıştır. Stp1, stp2, stp7 ve stp8 setlerinin, 1 gramlık ataletsel ölçüm kütlesi ile yapılan çalışmaların sonucuna göre doğal titreşim frekansları 1045, 714, 792 ve 520 Hz olduğu hesaplanmıştır. Ortalama bir değer olarak 400 Hz' deki bir ortam gürültüsünü algılama hassasiyetleri ise sırasıyla 75,5, 182,4, 139,2, 545,8 pm/g olarak bulunmuştur.

Simülasyon değerleri ile gerçek ölçüm değerlerini karşılaştırmak bu aşamada oldukça kritiktir. Çalışma kapsamında geometri setlerinin ebatları alüminyum alaşımlı malzeme üretimi için kullanılan cihazlar için küçük kalmıştır. Bununla birlikte, simülasyonda kullanılan malzeme özelliklerine sahip alaşım tercih edilmek istenmiş ancak, malzeme özelliklerine sahip ham maddenin temini için minimum sipariş miktarlarının yüksek olması bu malzemeye erişimi kısıtlamıştır. Üretici firmalardan düşük miktarlar için yüksek termin süreleri alınmıştır. Bu sorunlardan dolayı, alüminyum alaşımlı algılayıcının üretimi gerçekleştirilememiştir. Seçilen bir geometri üzerinde yoğunlaşp, kolayca üretimi yapılabilecek PLA malzemesi ile 3B yazıcıda üretim yapılmıştır. PLA

kullanılarak yapılan sensör ile yönsel deneyler yapılmıştır. Simülasyon verisi ile ölçülen, frekansa bağlı güç değişimi ve dalga boyu değişimi verisi Çizelge 18’ de verilmiştir.

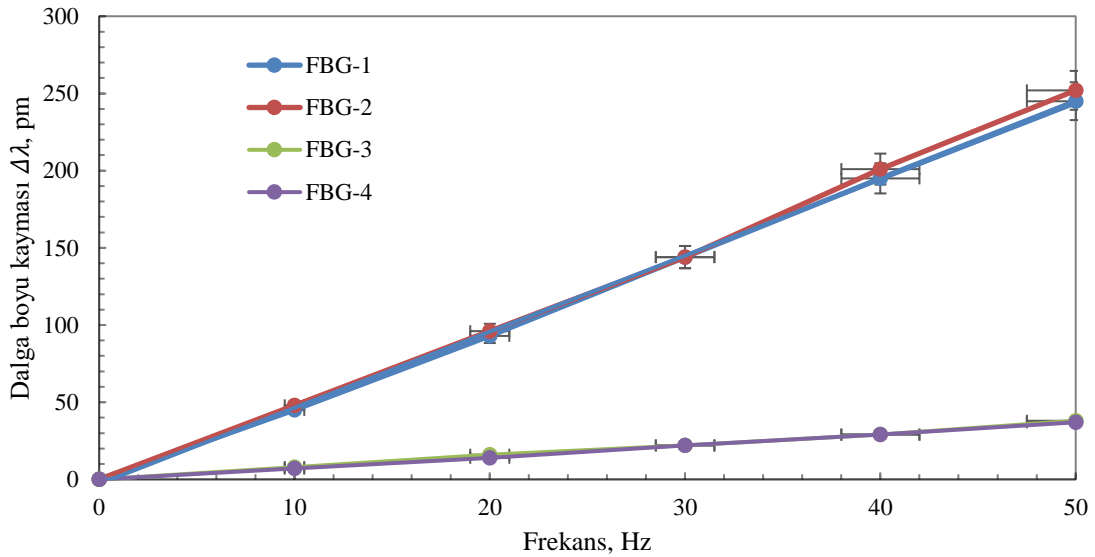
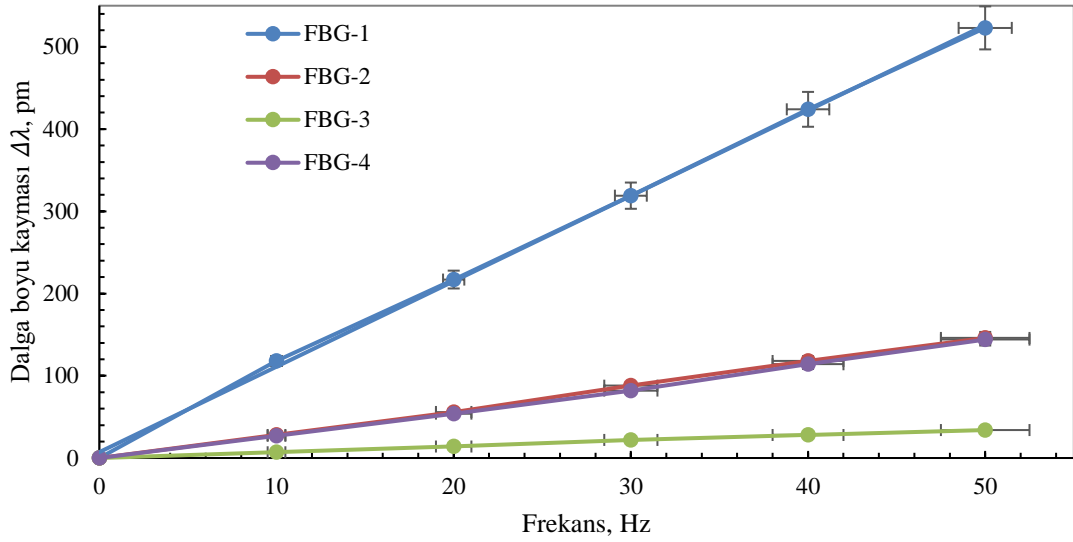
Çizelge 18. Simülasyon ve ölçüm verilerinin karşılaştırılması

İvmesi 1 g, Ataletsel Kütle Değeri 1 g				
Frekans Değişimi, Hz	Simülasyon Verileri		Ölçüm Verileri	
	Dalga Boyu Değişimi, pm	Güç Değişimi, μ W	Dalga Boyu Değişimi, pm ($\pm 1,0$)	Güç Değişimi, μ W ($\pm 0,5$)
10	165	185	103	107
20	228	278	204	216
30	290	354	304	327
40	337	411	406	438
50	421	514	509	551

10 Hz frekansta, ölçülen güç ve dalga boyu değişimi değerleri ile simülasyon değerleri arasındaki farkın yüksek görünmesine rağmen, rezonans frekansından uzaklaştıkça uzakta alınan ölçümlerin simülasyon değerleri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Frekans değişimi 50 Hz değerinde; dalga boyu değişimi sapması % 21; güç değişimi için %7 kadardır. Sapma miktarını etkileyen önemli simülasyon parametreleri arasında yay sabiti değerinin hesaplanandan daha büyük olması ve PLA’ nın malzeme özelliklerinin simülasyon değerlerine kıyasla farklılık göstermesi sayılabilir. Sapma değerini göz önüne alarak, alüminyum alaşımlı sensörün simülasyon değerleri ile olası gerçek sonuçları hakkında bir ön-değerlendirme yapmak mümkündür.

Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre herhangi bir yönden gelen akustik dalganın geliş yönünü belirlemek tam fiber optik ölçüm düzeneği ile mümkündür. FBG’ lerin gelen akustik dalganın frekansına göre verdiği tepki doğrusal artmaktadır. Ölçüm sonuçlarından

iki tanesi kullanılarak Şekil 4.1 oluşturulmuştur. FBG'lerin verdiği tepkinin geliş yönüne bağlı olarak doğrusal değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.1 Gelen akustik dalgaya göre FBG'lerin davranışı; sırasıyla +x (0°) ve +y (90°) ve +x (45°) ve +y (45°)

Doğal titreşim frekansları ve hassasiyet dengesi nedeniyle geometrik parametre setleri arasında bir seçime gidildiğinde, stp1, stp2 ve stp7 geometrilerinin yüzde 20'lik sapma değeri düşünülerek modifiye edilen yay sabiti ile elde edilen hesaplama sonuçları Çizelge 19' da verilmiştir.

Çizelge 19. Seçilen geometrilerin öngörülen değerleri

İvmesi 1 g , Ataletsel Kütle Değeri 1 g			
Frekans Değişimi, Hz		Simülasyon Verileri	Olası Gerçek Sonuçlar
		Dalga Boyu Değişimi, pm	
Stp1	400	48	58
	500	101	121
	600	162	194
Stp2	400	119	143
	500	280	336
	600	562	675
Stp7	400	89	106
	500	198	237
	600	352	423

Bu frekans aralığında yapılan tasarımlar, literatürde yayınlanan benzer tasarım sonuçları ile karşılaştırıldığında hem çalışabileceği frekans aralığı hem de hassasiyet eğrisi olarak en iyi sonuçlardan biri elde edilmiştir.

Tasarımın bundan sonraki aşaması ise çalışma koşullarındaki optimizasyonu olmalıdır.

Ölçümlerde kullanılan büyük hacimsel cihazlardan kurtulup, daha küçük boyutlarda çalışan bir güncelleme yapmak gerekir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Xu,S., Xing, F., Wang, R., Li, W., Wang, Y. and Wang,X., Vibration sensor for the health monitoring of the large rotating machinery: Review and outlook, *Sensor Rev.*, (2018), 38(1), 44–64.
- [2] Todd,M.D., Johnson,G. A., Althouse, B.A. and Vohra,S.T., Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers, *IEEE Photon Technol. Lett.*, (1998), 10(11), 1605–1607.
- [3] Hong, C., Zhang, Y., Zhang, M., Leung, M.L. and Liu, L., Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques, *Science Direct Sens. Actuators A, Phys.*, (2016), 244, 184–197.
- [4] Liu, X., Jin, B., Bai, Q., Wang, Y., Wang, D. and Wang,Y., Distributed fiber-optic sensors for vibration detection, *Sensors*, (2016), 16(8), p.1164.
- [5] Liu, Q., Jia, Z., Fu, H., Yu,D., Gao, H. and Qiao, X., Double cantilever beams accelerometer using short fiber Bragg grating for eliminating chirp, *IEEE Sensors J.*, (2016), 16(17), p. 6611–6616.
- [6] Basumallick,N., Chatterjee, I., Biswas, P., Dasgupta, K. and Bandyopadhyay, S., Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity, *Science Direct Sens. Actuators A, Phys.*, (2012), 173(1), p.108–115
- [7] Di, H., Xin, Y. and Jian, J., Review of optical fiber sensors for deformation measurement, *Science Direct Optik*, (2018), 168, p.703–713.
- [8] Fan, W., Zhou, R., Li, H., Yu, D., Aiao, X., Low-frequency temperature compensation FBG accelerometer based on double-arched beam, *Science Direct Optics Communications*, (2023), 528(1), p.129 058.
- [9] Luo, X., Qiao, X., Jia, Z., Gao, H., Xiao, M. and Chen, G., Study on fiber Bragg grating vibration acceleration sensor of low frequency, *Instrum. Techn. Sensor*, (2013), 12, p.7–8.
- [10] García, Y. R., Corres, J. M. and Goicoechea, J., Vibration detection using optical fiber sensors, *Journal of Sensors*, (2010), p.12, Article ID, 936487.

- [11] Khan, M. M., Panwar, N. and Dhawan, R., Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation, *Science Direct Sens. Actuators A, Phys.*, (2014), 205, p. 79–85.
- [12] Wu, Z., Song, A., Yan, D., & Li, Z. (2008), Distributed FBG accelerometer based on signal reconstruction. In *Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors and Instruments, Computer Simulation, and Artificial Intelligence*, SPIE, vol. 7127, pp. 28-33.
- [13] Li, K. Y., Chan, M. H. and Tommy, H. T., Fiber Bragg grating strain modulation based on nonlinear string transverse-force amplifier, *Optics Letters.*, (2013), 38(3), p.311–313.
- [14] Tan, I.Y., Xia, P. and Zhou, Z., Paralleled structure-based stringtype fiber Bragg grating acceleration sensor, *IEEE Sensors J.*, (2017), 17(5), p. 1325–1332.
- [15] Xiang, L., Jiang, Q., Li, Y. and Song, R., Design and experimental research on cantilever accelerometer based on fiber Bragg grating, *SPIE Optical Engineering*, (2016), 55(6), Article Number, 066113.
- [16] Li, Y., Ma, Q., Chen, F., Wang, R., Qiao, X., A felxible hinge accelerometer based on dual short FBG, *Science Direct Sensors and Actuators:A physical*, (2022), 344, p.113-695.
- [17] Feng D., Qiao, X., Yang, H., Rong, Q., Wang, R., Du, Y., Hu, M., Feng, Z., A fiber Bragg grating accelerometer based on a hybridization of cantilever beam, *IEEE Sensors J.*, (2015), 15(3), p. 1532–1537.
- [18] Zhang, Y., Yin, Z., Chen, B., Cui, H. and Ning, J., Fiber Bragg grating based seismic geophone for oil/gas prospecting, *Proceedings of SPIE*, (2005), 5765, p. 1112–1121.
- [19] Boccione, M., Bucca, G., Cigada, A., Collina, A. and Comolli, L., 2010, An application of FBG accelerometers for monitoring pantographs of underground trains. In *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, SPIE, vol. 7653, pp. 625-628.
- [20] Linessio, R.P., Sousa, K.M., Silva, T., Bavastri, C.A., Antunes,P.F.D.C. and Cardozo, J. C., Induction motors vibration monitoring using a biaxial optical fiber accelerometer, *IEEE Sensors J.*, (2016), 16(22), p. 8075–8082.

- [21] Zhang, J., Qiao, X., Hu, M., Feng, Z., Gao, H., Yang, Y. And Zhou, R., Flextensional fiber Bragg grating-based accelerometer for low frequency vibration measurement, *Chinese Optics Letters*, (2011), 9(9), Art. num. 090607.
- [22] Jiang, Q., A novel fiber Bragg grating accelerometer based on fiber vibrating wire, in *Proc. 8th Int. Conf. Sens. Technol.*, (2014), p. 1–5
- [23] Liang, Q., Yu, L. and Zhang, M., 2012, A new fiber optic accelerometer based on fiber Bragg grating. In *Photonics and Optoelectronics Meetings (POEM) 2011: Optoelectronic Sensing and Imaging*, SPIE, vol. 8332, pp. 95-102.
- [24] Muller, M.S., Buck, T.C. and Koch, A.W., Fiber Bragg grating-based acceleration sensor, *International Symposium on Optomechatronic Technologies Istanbul*, (2009), p.127-132, ISOT.2009.532611.
- [25] Liu, Q., Qiao, X., Jia, Z., Fu, H., Gao, H. and Yu, D., Large frequency range and high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double diaphragms, *IEEE Sensors J.*, (2014), 14(5), p. 1499–1504.
- [26] Yao, K., Lin, Q., Jiang, Z., Zhao, N., Peng, G.D., Tian, B., Jia, W., Yang, P., (2019), Design and analysis of a combined strain-vibration-temperature sensor with two FBGs and Trapezoidal beam, *Sensors MDPI*, 19(16), p35.
- [27] Weng, Y., Qiao, X., Guo, T., A robust and compact fiber Bragg grating vibration sensor for seismic measurement, *IEEE Sensors J.*, (2012), vol. 12, no. 4, pp. 800–804.
- [28] Qiu, Z., Sun, R., Hong, L., Chen, Y., Yu, R., Qiang, G., Acceleration sensor of medium-high frequency dual FBG based on L-shaped support sensitization structure, *US-SAGE*, (2022), 55, p 869-877.
- [29] Zhang, F., Jiang, S., Wang, C., Ni, J. And Zhao, Q., (2020), Broadband and high sensitivity FBG accelerometer based on double diaphragm and h-shaped hinges, *IEEE Sensors Journal*, 21(1), pp.353-359.
- [30] Wang, X., Guo, Y., (2018), High frequency optical FBG accelerometer, *IEEE Sensors Journal*, 18(12), pp.4954-4960.
- [31] Antunes, P., Varum, H. and André, P., Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity, *Science Direct Measurement*, (2011), 44(1), p. 55–59.

- [32] Qu, Z., Lu, P., Zhang, W., Xiong, W., Liu, D. And Zhang, J., Miniature tri-axis accelerometer based on fiber optic Fabry-Perot interferometer, *Optic Express*, (2022), 30(13), pp.23227-23237.
- [33] Weng, Y., Qiao, X., Feng, Z., Hu, M., Zhang, J., Yang, Y., Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam, *Chinese Optics Letters*, (2011), 9(10), Art. Number,100604.
- [34] Wei, L., Jiang, D., Yu, L., Li, H. and Liu, Z., A novel miniaturized fiber Bragg grating vibration sensor, *IEEE Sensors J.*, (2019), 19(24), p. 11932–11940.
- [35] Qiu, L., Liang, L., Li, S. and Xu, G., Theoretical and experimental study on FBG accelerometer based on multi-flexible hinge mechanism, *Science Direct Optical Fiber Technology*, (2017), 38, p. 142–146.
- [36] Li, J., Shen, B., Zhao, D., Zhang, W. And Sun, B., (2022), A high sensitivity FBG accelerometer based on a bearing, *Journal of Lightwave Technology*, 40(1), pp.228-236.
- [37] Kim, B.K., Jang, M., Kim, J.S., Kang, K., Kim, A.E., and Kim, J., Investigation of FBG Linear/Angular Acceleration Sensor for Novel Type Inertial Measurement, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (2022), 70(6), p.6377-6385.
- [38] Antunes, P.F.C., Marques, C.A., Varum, H. and Andre, P. S., Biaxial optical accelerometer and high-angle inclinometer with temperature and cross-axis insensitivity, *IEEE Sensors J.*, (2012), 12(7), p. 2399–2406.
- [39] Masek, V., Cada, M., Cook, A., Nan, W. and Li, D., Fibre optic based 3-D accelerometer design, in *Proc. IEEE Sensors Appl. Symp.*, (2011), p. 123–126.
- [40] Gagliardi, G., Salza, M., Lam, T.T.Y., Chow, J.H. and De Natale, P., 2009, 3-axis accelerometer based on lasers locked to π -shifted fibre Bragg gratings. In *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, SPIE, vol. 7503, pp. 570-573.
- [41] Wei, L., Yu, L., Wang, J., Jiang, D., Liu, Q., Liu, Z., (2019), An FBG sensing two dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge, *IEEE Sensors Journal*, 19(10), pp.3698-3710.
- [42] T. Li, Y. Tan, Y. Liu, Y. Qu, M. Liu, and Z. Zhou, A fiber Bragg grating sensing based triaxial vibration sensor, *Sensors MDPI*, (2015), 15(9), p. 24214–24229.

- [43] J. Qi and Y. Meng, Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull–push mechanism, *Meas Sci. Technol.*, (2013), 24(11), Article Number, 115105.
- [44] Dandridge, A., Multiplexing of interferometric sensors using phase carrier techniques, *Journal of Lightwave Technology*, (1987), 5 947–52.
- [45] Davis, A.R., 64 Channel All-Optical Deployable Acoustic Array, *OSA Technical Digest Series*, (1997), 16, p 616–21.
- [46] Meng, Z., Hu, Y., Ni, M., Xiong, S., Zhang, R., Li, X., Stewart, G., Dong, F. and Culshaw, B., Development of a 32-element fiber optic hydrophone system, *International Society for Optics and Photonics*, in *Optics East*, (2004), p.114–119.
- [47] Zhang, W., Li, F. and Liu, Y., 2012, Field test of an eight-element fiber laser hydrophone array. In *OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors*, SPIE, vol. 8421, pp. 1669-1672.
- [48] Buck, T.C., Müller, M.S., Koch, A.W., Reutlinger, A., Boesz, A., Froevel, M., McKenzie, I., Structural monitoring of launchers with fiber optic sensors, *Photonics 2010: 10th International Conference on Fiber Optics&Photonics*, 2010.
- [49] Uyar, F., Kartaloğlu, T., Özdür, İ., Özbay, E., Fiber optik dağıtık sensör teknolojisi: prensipler ve örnek sistemler, *ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı*, 2022.
- [50] Anonim, Applications and Advances of Fiber Optic Sensors, <https://www.fiberopticshare.com/applications-and-advances-of-fiber-optic-sensors.html> (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [51] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html , (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [52] Bao, W., Rong, Q., Chen, F. and Qiao, X., 2018, All-fiber 3D vector displacement (bending) sensor based on an eccentric FBG, *Optics Express*, 26(7), pp.8619-8627.
- [53] Berri, P.C., Vedova, M.D.L., Maggiore, P., Scolpito, T., Feasibility study of FBG-based sensors for prognostics in aerospace applications, (2019), *IOP Conference Series*, 1249.

- [54] Li, X., Zheng, M., Hou, D. and Wen, Q., 2023, Advantageous Strain Sensing Performances of FBG Strain Sensors Equipped with Planar UV-Curable Resin. *Sensors*, 23(5), p.2811.
- [55] Chen, S., Yao, F., Ren, S., Wang, G., Huang, M., (2022), Cost-effective improvement of the performance of AWG-based FBG wavelength interrogation via a cascaded neural network, 30(5), pp.7647-7663.
- [56] Yüksel, K., Jason, J., Kocal, E.B., Sainz, M.L.A. and Wuilpart, M., 2020, July. An overview of the recent advances in FBG-assisted phase-sensitive OTDR technique and its applications. In 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON) , IEEE, pp. 1-7.
- [57] Urick, J., Principles of Underwater Sound, 3rd edition, Mc. Graw Hill, Inc. ISBN 0-07-066087-5, 1983
- [58] Kamolov, A.A. and Park, S., 2021, Prediction of depth of seawater using fuzzy C-means clustering algorithm of crowdsourced SONAR data. *Sustainability*, 13(11), p.5823.
- [59] Jensen, F.B., Kuperman, W.A., Porter, M.B. ve Schmidt, H., Computational Ocean Acoustics. American Institute of Physics, ISBN 1-56396209-8, 1994
- [60] Meteksan Savunma, Su altı Akustik Sistemler, <https://www.meteksan.com/tr/urunler/su-alti-akustik-sistemler/avs-akustik-vektor-sensor> (Erişim Tarihi: 5 Mayıs 2023)
- [61] Amerini, I., Bestagini, P., Bondi, L., Caldelli, R., Casini, M., Tubaro, S., Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics, *Electronic Imaging 28*, Conference, San Francisco, pp. 1-8, 2016
- [62] Anonim, Gerinim ölçer Wheatstone, <https://rnc.com.tr/strain-gage-gerinim-olcer-ile-gerinim-ve-basinc-olcumu> (Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2023)
- [63] Kashyap, R., Fiber Bragg Gratings, Academic Press, Kelly, P.L., Kaminov, I., Agrawal, G., (Editors), Chapter 3- 4- 6- 9, 1999
- [64] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/fiber_optic_sensors.html, (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [65] Yin, S., Ruffin, P.B., Yu, F.T.S., Fiber Optic Sensors, CRC Press , International Standard Book Number-13:978-1-4200-5365-4, Chapter 2-4-7-9, 2008

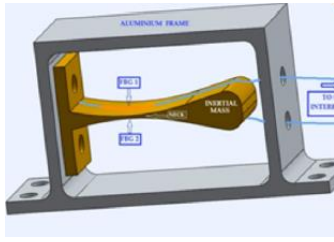
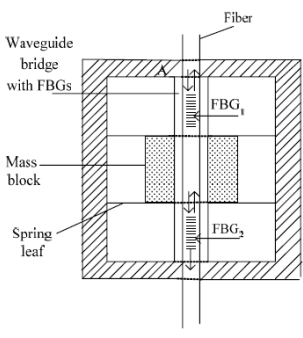
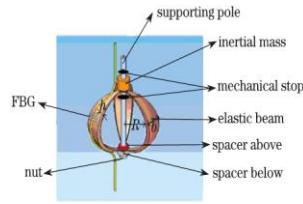
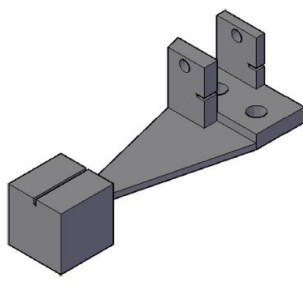
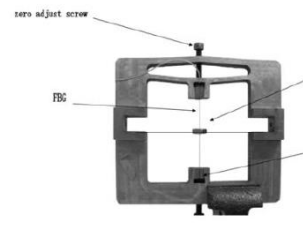
- [66] Lee, B.H., Kim, Y.H., Park, K.S., Eom, J.B., Kim, M.J., Rho, B.S. and Choi, H.Y., 2012, Interferometric fiber optic sensors. *sensors*, 12(3), pp.2467-2486.
- [67] Miliou, A., 2021, In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances. In *Photonics* (Vol. 8, No. 7, p. 265). MDPI.
- [68] Im, J., Roh, Y., A Finite Element Analysis of an Interferometric Optical Fiber Hydrophone with a Concentric Composite Mandrel Including a Foaming Layer, *Journal of Acoustical Society*, (1999), 106(3), p1.
- [69] Meteksan Savunma, Mandrel tabanlı algılama, https://www.meteksan.com/files/makale_yeni/mandrel_tabanlı_algilama.pdf (Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2023)
- [70] Nash, P., Review of interferometric optical fiber hydrophone technology, *IEE Proceedings of Radar and Sonar Navigation*, (1996), 143(3), 204-208.
- [71] Bucaro, J.A., Lagakos, N., Houston, B.H. and Dandridge, A., High frequency response of fiber-optic planar acoustic sensors, *Journal of Lightwave Technology*, , (1991), 9(9), 1195–1199.
- [72] Hodgson, C.W., Large-scale interferometric fiber sensor array incorporating multiple optical switches, *Science Direct, Optical Fiber Technology*, (1998), 4(3), 316-327.
- [73] Bucaro, J.A., Fiber-optic air-backed hydrophone transduction mechanisms, *Journalist of Acoust. Soc. Am.*, (1991), 89(1), 451- 453.
- [74] Zhongsheng, L., The characteristics analysis of semiconductor laser under low-frequency direct modulation and relevant technology research of all optical fiber hydrophone, *Shanghai Jiaotong Univ.*, 1999
- [75] Kirkendall, C.K., Dandridge, A., (2004), Overview of high performance fiber-optic sensing, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(18), p.R197-216.
- [76] Dandridge, A., Tveten, A.B. and Giallorenzi, T. G., Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, (1982), 30(10), p. 1635– 1641.
- [77] Azmi, A.I., Development of Fiber Grating-Based Sensing Techniques and Application in Mechanical Engineering, PhD Thesis at UNSW, 2012

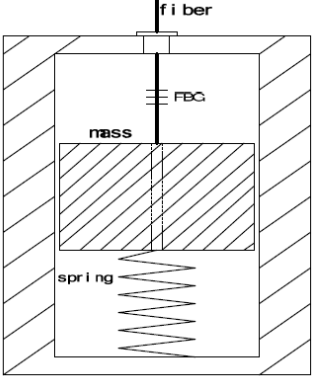
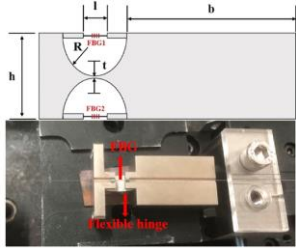
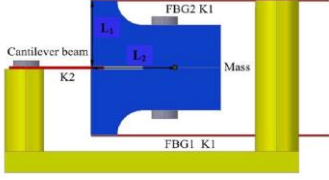
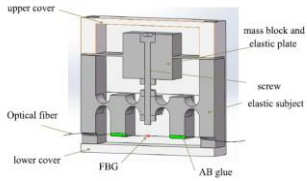
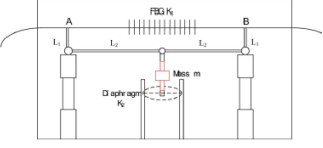
- [78] Mendoza, E.A, Esterkin, Y., Kempen,C., Sun, S., (2010), Monolithic Integrated Optic Fiber Bragg Grating Sensor Interrogator, In Photonics in the Transportation Industry: Auto to Aerospace III, 7675, pp.201-210.
- [79] Udd, E., Spillman, W.B., Fiber Optic Sensors, Second Edition, Wiley, Chapter 2-3-4-6-10-11-15, 2011.
- [80] Kirkendall, C., Barock, T., Tveten, A. and Dandridge, A., (2007), Fiber optic towed arrays, NRL Review, pp.121-123.
- [81] Fuhr, P.L., Spillman Jr, W.B., Kline, B.R. and Lord, J.R., 1990, Self-referencing frequency division multiplexing technique for fiber optic sensors. Optical Engineering, 29(2), pp.148-153.
- [82] Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals, The National Academies Press - Ocean Noise and Marine Mammals, 2003
- [83] Tasker, M.L., Amundin, M., Andre, M., Hawkins, A., Lang, W., Merck, T., Scholik-Schlomer, A., Teilmann, J., Thomsen, F., Werner, S. and Zakharia, M., 2010, Marine Strategy Framework Directive Task Group 11 Report Underwater noise and other forms of energy. Report No. EUR, 24341, p.2010.
- [84] B. Kumar, A. Kumar and R. Bahl, "Comparative Study of P-P and P-U Based Acoustic Vector Sensors for Underwater Application," 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO), Kobe, Japan, 2018, pp. 1-9, doi: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559423.
- [85] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/tutorial_fiber_amplifiers4.html (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [86] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/amplified_spontaneous_emission.html (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [87] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/fiber_amplifiers.html (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).
- [88] Anonim, Fiber Bragg Gratings, https://www.rp-photonics.com/tutorial_fiber_amplifiers5.html (Erişim Tarihi: 21 Mayıs 2023).

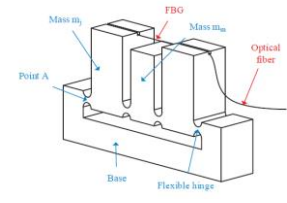
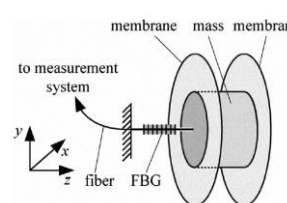
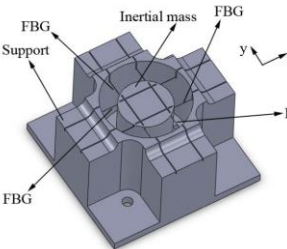
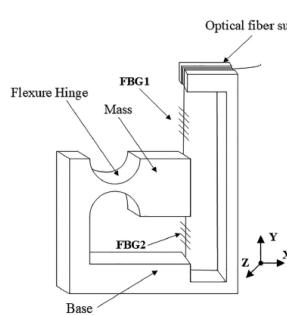
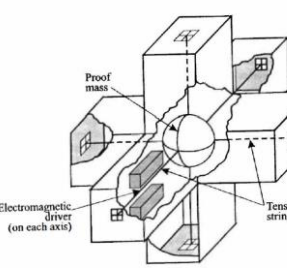
EKLER

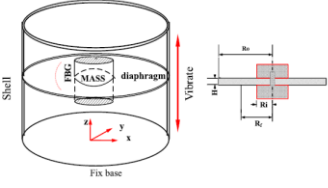
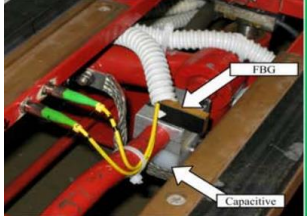
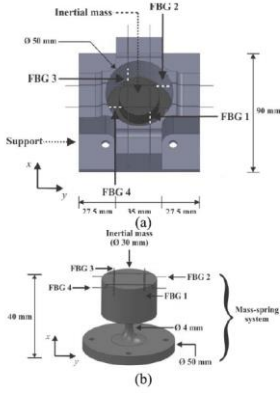
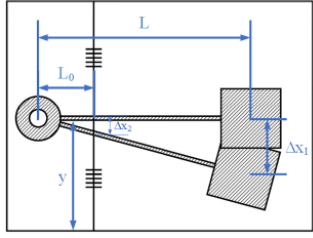
EK1- Literatür Araştırmaları Detayları

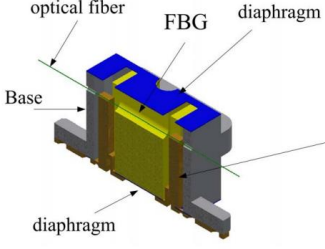

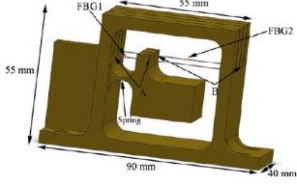
Araştırma Ekibi	Rezonans Frekansı, Hz	Hassasiyet Değeri, pm/G	Sistem Karakteristiği	Algılayıcı Tipi	Algılama Boyutu
Todd ve Ekibi [2]	1000	212	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Liu ve Ekibi [5]	40	8	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Nandini ve Ekibi [6]	12	450	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Fan ve Ekibi [8]	30	1110	Dörtgen iki fiberli yapı		1D
Luo ve Ekibi [9]	20	21	Üçgen diyafram yapısı		1D

Mohd ve Ekibi [11]	5	306	L şeklinde iki fiberli yapı		1D
Li ve Ekibi [13]	255	36	Diyaframlı yapı		1D
Zhang ve Ekibi [21]	16	410	Esneklik yapı		1D
Xiang ve Ekibi [15]	125	75	Gömülü Yapı		1D
Jiang ve Ekibi [22]	50	108	İkili fiber yapısı		1D

Liang ve Ekibi [23]	28	2131	İkili fiber yapısı		1D
Li ve Ekibi [16]	150	1711	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Feng ve Ekibi [17]	150	218,4	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Wei ve Ekibi [34]	1525	12	Menteşe		1D
Weng ve Ekibi [27]	220	106	L şeklinde iki fiberli yapı		1D

Qui ve Ekibi [35]	2300	29	Menteşe		1D
Muller ve Ekibi [24]	6000	1	Diyafram		1D
Antunes ve Ekibi [38]	846	87.88	Menteşe tipli 4 lü fiber yapısı		2D
Qiu ve Ekibi [28]	1700	18.9	L şeklindeki ikili fiber yapısı		1D
Masek ve Ekibi [39]	100	-	Altılı fiber yapısı		3D

Liu ve Ekibi [25]	1240	45	Diyafram		1D
Bocciolne ve Ekibi [19]	100	-	Düzlemsel Manivela Yapısı		1D
Linessio ve Ekibi [20]	757	-	Düzlemsel Manivela Yapısı		3D
Li ve Ekibi [36]	100	575.8	Rulman tipli iki fiberli yapı		1D

Zhang ve Ekibi [29]	1600	15	h-mentşe tipli tek fiberli yapı		1D
Wang ve Ekibi [30]	3806	4.01	Çatal Tipli iki Fiberli Yapı		1D
Autunes ve Ekibi [31]	340	1	L-şeklinde iki fiberli yapı		1D

EK 2 – FBG OS1100 Bilgi Notu Özellikleri

Properties

Performance Properties	
Physical Properties	os1100
Number of FBGs	1
FBG Length	10 mm
Strain Limit	5,000 $\mu\epsilon$
Strain Sensitivity	$\sim 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$
Operating Temperature Range	- 40 to 120 C
Thermal Response	$\sim 9.9 \text{ pm}/\text{C}$
Fiber Lead Length	1 m ($\pm 10 \text{ cm}$), each end
Fiber Type	SMF28-Compatible
Fiber Coating	Polyimide
Fiber Re-Coating Diameter	145 - 165 μm
Buffer Tube	1 mm loose tube included with optional FC/APC connector
Fiber Bend Radius	$\geq 17 \text{ mm}$
Optical Properties	
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%
FWHM (- 3 dB point)	0.25 nm ($\pm .05 \text{ nm}$)
Isolation	> 15 dB (@ $\pm 0.4 \text{ nm}$ around center wavelength)

Ordering Information

os1100-**www**-1xx-1yy

www Wavelengths for (+/- 1 nm)
Standard - 1460 to 1620 nm in 4 nm intervals

xx Termination type
1xx Fiber Lead 1, Length &
1 Connector
UT Standard Lead Length, 1 m
FC Underminated FC/APC Connector

yy Termination type
1yy Fiber Lead 2, Length &
1 Connector
UT Standard Lead Length, 1 m
FC Underminated FC/APC Connector

Ordering Information Example

os1100-1560-1FC-1UT

EK 3 – Thorlabs S144C Güç Dedektörünün Özellikleri

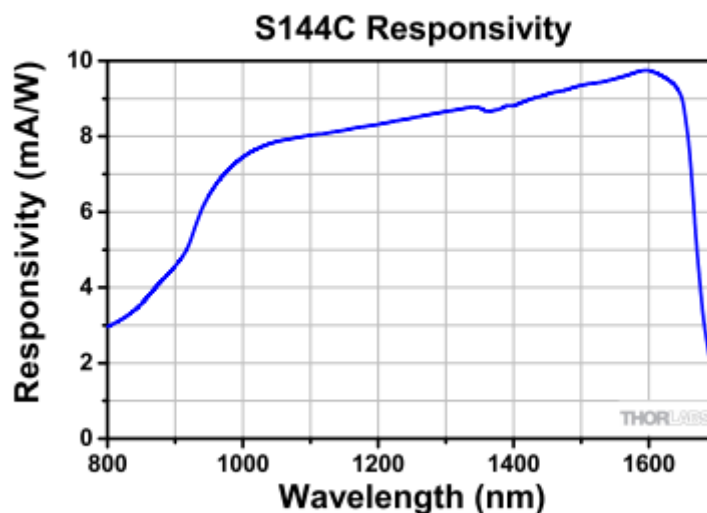
S144C	
Detector Type	InGaAs Photodiode
Wavelength Range	800 - 1700 nm
Optical Power Working Range	1 μ W - 500 mW
Max Average Power Density	1 kW/cm ²
Max Pulse Energy Density	1 J/cm ²
Linearity	\pm 0.5%
Resolution ^a	1 nW
Measurement Uncertainty ^b	\pm 5%
Typical Application	Fiber Lasers / Low and Mid Power Lasers
Laser Types	Diode, Ti-Sapphire, He-Cd, Argon Ion, Krypton Ion, Dye
Coating / Diffuser	Zenith [®] PTFE Integrating Sphere (\varnothing 1")
Cooling	Convection
Head Temperature Measurement	NTC Thermistor 4.7k Ω
Console Compatibility	PM100D, PM100A, PM100USB, PM200, PM320E
Response Time	<1 μ s
Sensor Dimensions	\varnothing 45 x 30.5 mm
Active Detector Area	3.6 mm x 3.6 mm
Input Aperture	\varnothing 5 mm
Cable Length	1.5 m
Connector	Sub-D 9-Pin Male
Weight	0.2 kg
Post Mounting	8-32 & M4 Tapped Holes
Aperture Thread	External SM1-Threaded (1.035"-40) Removable Adapter
Fiber Adapters (Optional)	FC (Included), SC, LC, SMA, ST

a. Measured with PM100D console in a low bandwidth setting.

b. Beam diameter > 1 mm

Please note that the S144C power meter head is not compatible with the older Thorlabs power meter consoles (PM100, PM30, PM300, PM300E, S100).

Typical Response Graph



EK 4 – Thorlabs Optik Spektrum Analizör Özellikleri

General Specifications		
Item #	OSA20xC	
Spectral Resolution ^b	7.5 GHz (0.25 cm ⁻¹) See <i>Resolution in Spectrometer Mode</i> Graph Below	See Re
Spectral Accuracy ^c	±2 ppm ^d	
Spectral Precision ^e	1 ppm ^d	
Wavelength Meter Resolution		0.1 ppm ^d
Wavelength Meter Display Resolution ^f		9 Decimals
Wavelength Meter Accuracy ^d	±1 ppm ^d	
Wavelength Meter Precision ^g		0.2 ppm ^d
Input Power (Max)		10 mW (10 dBm)
Input Damage Threshold ^h		20 mW (13 dBm)
Power Level Accuracy ⁱ	±1 dB	
Optical Rejection Ratio ^j	30 dB	
Polarization Dependence	±1 dB	
Internal Source Specifications		
Source Type	Frequency-Stabilized Laser (Alignment and Reference Laser)	Alignm
Wavelength	633 nm	633
Maximum Output Power	<80 μW	<10
Beam Divergence	0.2 rad	0.2
Trigger Specifications		
Trigg, AUX In	N/A	Schmitt Trig Positive-C Negative-t Hy
Acquiring Data, AUX Out	N/A	LOW-I HIGH-
Interlock Specifications		
Interlock Switch Requirements	N/A	M Apply
Type of Connector	N/A	
Open Circuit Voltage	N/A	
Short Circuit Current	N/A	
Physical Specifications		

EK 5 – Optik Elemanların Özellikleri - Hibrit ve FBT Bağdaştırıcı




WDM/Isolator Hybrid

WDM – Isolator Hybrid

➔ Specifications

Parameter	980/1550 nm + Isolator		1480/1550 nm + Isolator	
	Single Stage	Dual Stage	Single Stage	Dual Stage
Signal Wavelength Range	1530-1565 nm		1530-1565 nm	
Pump Wavelength Range	950-1010 nm		1450-1490 nm	
Insertion Loss in Reflection	≤ 0.6 dB			
Insertion Loss in Transmission	≤ 1.0 dB	≤ 1.2 dB	≤ 0.8 dB	≤ 1.0 dB
Signal Isolation (at 23° C)	≥ 28 dB	≥ 38 dB	≥ 28 dB	≥ 43 dB
Return Loss	≥ 45 dB			
Maximum Power	300 mW			
PDL	≤ 0.10 dB	≤ 0.15 dB	≤ 0.10 dB	≤ 0.15 dB
Directivity	≥ 50 dB			
Operating Temperature	0° C ~ + 65° C			
Storage Temperature	- 40° C ~ + 85° C			
Package Dimensions	5.5 mm (Φ) x 35 mm (L)			



FBT Coupler

Dual Window Wideband Coupler

➔ Specifications (50/50)

Parameter	Premium	A Grade
Operating Wavelength Range	1310 & 1550 nm ± 40 nm	
Insertion Loss (Max)	≤ 3.6 dB	≤ 3.8 dB
Uniformity (Typical)	≤ 0.7 dB	≤ 1.0 dB
Return Loss	≥ 55 dB (1x2)	≥ 65dB (2x2)
PDL	≤ 0.15 dB	≤ 0.20 dB
TDL	≤ 0.2dB	
Operating & Storage Temperature	- 40° C ~ + 85° C	
Package Dimensions	Light Duty (B)	3.0mm (Φ) x 55.0mm (L)
	Medium Duty (L)	3.0mm (Φ) x 60.0mm (L)
	Heavy Duty (K, R)	100.0mm x 12.0mm x 8.0mm

➔ Tap Coupler

Coupling Ratio	Max Insertion Loss	
	Premium	A Grade
40/60	4.7/ 2.7 dB	5.0/2.9 dB
30/70	6.0/1.9 dB	6.4/2.2 dB
20/80	7.9/1.2 dB	8.5/1.4 dB
10/90	11.3/0.6 dB	12.7/0.8 dB
5/95	15.0/0.4 dB	16.0/0.5 dB
1/99	23.5/0.3 dB	24.0/0.4 dB

Note1: All values specified are without connectors.

Note2: Higher performance specifications are available upon request.

Note3: Fiber Type – Corning SMF-28e.

➔ Tree Couplers

*Port #	Max IL		Uniformity	
	Premium	A Grade	Premium	A Grade
1 x 4	7.2 dB	7.6 dB	1.3 dB	1.8 dB
1 x 8	11.0 dB	11.3 dB	2.0 dB	2.4 dB
1 x 16	14.4 dB	15.2 dB	2.7 dB	3.2 dB

*Other port numbers upon request.

EK 6 – Optik Elemanların Özellikleri – 980 nm pompa lazer diyodu



980nm Pump Laser Module Grating Stabilized, 750mW LC962U P

Features:

- Fiber Bragg grating wavelength stabilization
- High output power, up to 750mW kink free
- Polarization maintaining fiber pigtail
- Internal thermoelectric heatpump and monitor photodiode
- Hermetically sealed 14 pin butterfly package
- Telcordia GR-468-CORE compliant
- Field-proven high reliability
- RoHS compliant 

Applications:

- Low noise EDFA
- Dense wavelength division multiplexing EDFA
- CATV



These lasers are designed as pump sources for erbium doped fiber amplifier (EDFA) applications. Processes and techniques of coupling the fiber to the laser allow high output powers that are very stable with both time and temperature. The grating is located in the pigtail to stabilize the wavelength.

The LC962U P series pump module utilizes a fiber Bragg grating design for enhanced wavelength and power stability performance. This product has been designed to ensure superior wavelength locking over drive current, temperature and optical feedback changes.

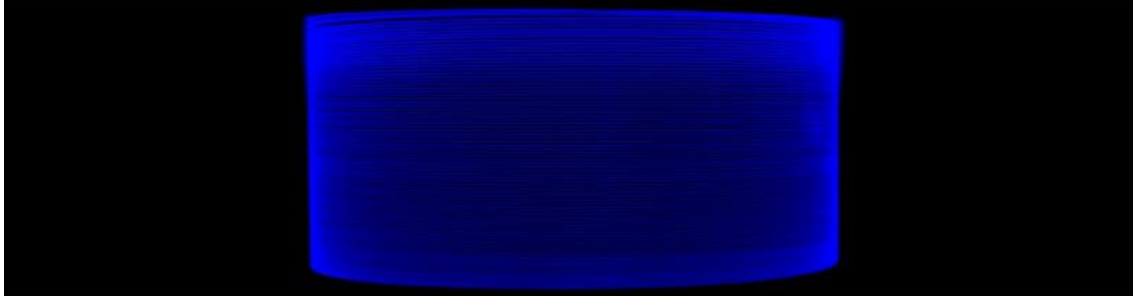
Devices are available with kink free output powers to 750mW.

EK 7 – Optik Elemanların Özellikleri – Aktif Kazanç Fiberi

LIEKKI®

Er30-4/125

Single Mode Single Clad Erbium Doped Fiber



Features

- **Direct Nanoparticle Deposition:** Industry leading fiber deposition process
- **Performance:**
Wide spectrum designed for C- and L-band amplifiers
Low polarization mode dispersion, typical value <25 fs/m
Suitable for both 980nm and 1480nm pumping
- **Reliability:** Telecom grade dual layer UV-cured acrylate coating
- **Compatibility:**
Telecom-like geometry with good spliceability to standard SM fibers
Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified

Applications

- C- and L-band DWDM, Metro and CATV
- ASE sources
- Pre-amplifier for high power LIDAR

Typical Fiber Specifications

Fiber	LIEKKI® Er30-4/125	
Optical	Units	
Mode Field Diameter at 1550 nm ⁽¹⁾	µm	6.5 ± 0.5
Peak Core Absorption at 1530 nm	dB/m	30.0 ± 3.0
Core Numerical Aperture (nominal)		0.2
Cut-off wavelength ⁽²⁾	nm	890 ± 90
Geometrical and mechanical		
Core Concentricity Error, ≤	µm	0.7
Core Ellipticity Error, ≤	%	5.0
Cladding Diameter	µm	125 ± 2
Cladding Geometry		Round
Coating Diameter		245 ± 15
Coating Material		Dual coated high index acrylate
Proof Test, ≥	kpsi	100

⁽¹⁾ Near-field Mode Field Diameter

⁽²⁾ Calculated value

EK 8 - Tez Çalışması Orijinallik Raporu

ÖZGEÇMİŞ

