

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİBER OPTİK BENEK DESENİ ÜZERİNDE SAGNAC ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Ege İNCE

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2025

Her hakkı saklıdır

ÖZET

FİBER OPTİK BENEK DESENİ ÜZERİNDE SAGNAC ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ege İNCE

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Seyrüsefer sistemleri bir aracın konumunu, hızını ve yönünü belirleyen bir konumdan başka bir konuma ulaşması için ideal rotayı belirleyen sistemlerdir. Hava, deniz ve yer altı platformlarında bu rotanın hesaplanması için aracın seyir sırasındaki açısal hızının ölçülmesi kritiktir ve bu ölçümler için jiroskop adı verilen ile yapılır. Jiroskop başlangıçta mekanik prensiplere dayanarak tasarlanan bir cihaz olmasına karşın ilerleyen yıllarda jiroskop tasarımlarında elektronik ve optik teknolojiler baskın hale gelmiştir. Bu jiroskop çeşitlerinden biri olan fiber optik jiroskop özellikle ölçüm hassasiyetleri ile öne çıkan bir jiroskop türü olmuştur.

Fiber optik jiroskopta, bir fiber sarmalında zıt yönde dolanan iki ışık demeti arasında açısal dönme neticesinde oluşan optik yol farkı nedeniyle girişim oluşur. Sagnac etkisi olarak bilinen bu teknik endüstride kullanılan geleneksel fiber optik jiroskobun genel çalışma prensibini oluşturur. Bu tez kapsamında geleneksel fiber optik jiroskoba alternatif yeni bir fiber optik jiroskop tasarımı sunulmuştur. Çok modlu fiberlerdeki benek desenin görüntülenmesi ile açısal dönmenin nasıl ölçülebileceği ilk defa bu tezde araştırılmıştır.

Şubat 2025, 68 sayfa

Anahtar Sözcükler: Jiroskop, Benek Deseni, Navigasyon, Dönü Ölçer, Fiber Spektogram Sensörleri

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE SAGNAC EFFECT ON FIBER OPTIC SPECKLE PATTERN

Ege İNCE

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. İsa NAVRUZ

Navigation systems are systems that determine the position, speed, and direction of a vehicle and identify the ideal route for reaching a destination. Calculating this route for aerial, marine, and underground platforms require measuring the angular velocity of the vehicle during navigation, and these measurements are performed using devices called gyroscopes. Although gyroscopes were initially designed based on mechanical principles, advancements over the years have shifted gyroscope designs toward electronic and optical technologies. One type of gyroscope that stands out for its measurement precision is the fiber optic gyroscope. In a fiber optic gyroscope, interference occurs due to the optical path difference created by angular rotation between two light beams traveling in opposite directions through a fiber coil. This technique, known as the Sagnac effect, forms the general working principle of conventional fiber optic gyroscopes used in the industry.

In this thesis, an alternative design to conventional fiber optic gyroscopes has been proposed. For the first time, this study investigates how angular rotation can be measured by imaging the speckle pattern in multimode fibers.

February 2025, 68 pages

Key Words: Gyroscope, Speckle Pattern, Navigation, Gyrosensor, Fiber Spectrogram Sensors

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilme sürecinde desteğini hiç esirgemeyen ve bana birçok şey katan danışmanım Sayın Prof. Dr. İsa Navruz'a, bilgisi ve deneyimleriyle bana çok yardımcı olan Dr. Hüsamettin Şerbetçi'ye ve her zaman manevi destekleri ile yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Ege İNCE
Ankara, Şubat 2025



İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGE DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. OPTİK JİROSKOP VE OPTİK FİBER.....	5
2.1 Halka Lazer Jiroskop	6
2.2 Fiber Optik Jiroskop	7
2.2.1 Fiber optik jiroskop gelişimindeki önemli çalışmalar	8
2.2.2 Sagnac etkisi	11
2.2.3 Fiber optik jiroskop gürültü kaynakları.....	15
2.2.3.1 Termal gürültüler	16
2.2.3.2 Faraday etkisi	16
2.2.3.3 Rayleigh geri saçılması	17
2.2.4 Fiber optik jiroskop bileşenleri.....	18
2.2.4.1 Işık kaynağı.....	18
2.2.4.2 Fiber optik kablo	18
2.2.4.3 Fiber optik kuplör	19
2.2.4.4 Fotodedektör.....	20
2.2.4.5 Optik polarizatör.....	20
2.2.4.6 Optik faz modülatörü	20
2.3 Fiber Optik Kablolar	21
2.3.1 Kademe indisli fiberler	23
2.3.2 Derece indisli fiberler.....	24
2.3.3 Fiberdeki mod sayısı	25
3. FİBER SPEKTOGRAM SENSÖRLERİ.....	26
3.1 Fiber Spektrogram Sensörleri Alanında Yapılan Önemli Çalışmalar.....	27
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	34

4.1 Tezin Ana Fikri	34
4.2 Tezin Teorik Altyapısı	35
4.3 Simülasyon Çalışması	36
4.3.1 Simülasyon senaryosu	36
4.3 Simülasyon Görüntülerinin Korelasyon Ölçümü	39
4.3.1 Veri kümesinin oluşturulması	40
4.3.2 Pearson korelasyon katsayısı	41
4.3.3 Segmentasyonel korelasyon katsayısı	42
4.3.4 Simülasyon sonuçlarının korelasyon ölçümünün yapılması	42
4.4 Deneysel Çalışma	44
4.4.1 Deney ortamı ve deney senaryosu	44
4.4.2 Görüntü ön işleme	46
4.4.2.1 Medyan filtresi	46
4.4.2.2 Gri tonlama filtresi	47
4.4.2.3 Gamma düzenlemesi	48
4.4.2.4 Ön işleme uygulaması	48
4.4.3 Laboratuvar sonuçlarının korelasyon ölçümünün yapılması	49
4.5 Görüntüler Üzerinde Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Eğitimi	51
4.5.1 XGBoost algoritması	51
4.5.2 LightGbm algoritması	53
4.5.3 CatBoost algoritması	54
4.5.4 Algoritma parametreleri	56
4.6 Ölçüm metrikleri	56
4.7 Makine öğrenmesi tahminleri	58
5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	61
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER DİZİNİ

C	Celsius
c	Işık hızı
dB	Desibel
Δ_ϕ	Sagnac Faz Farkı
Δ_L	Optik Yol Farkı
$\Delta_{L_{SY}}$	Saat Yönünde Oluşan Optik Yol Farkı
$\Delta_{L_{SYT}}$	Saat Yönünün Tersinde Oluşan Optik Yol Farkı
gr	Gram
Hz	Hertz
Kg	Kilogram
Km	Kilometre
λ	Işık dalga boyu
L_{sy}	Saat Yönündeki Optik Yol Uzunluğu
L_{syt}	Saat Yönünün Tersindeki Optik Yol Uzunluğu
mT	Militesla
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
μm	Mikrometre
nW	NanoWatt
Ω	Açısal hız
ω	Açısal frekans
t_{sy}	Saat Yönünde Geçen Optik Zaman
t_{syt}	Saat Yönünün Tersinde Geçen Optik Zaman

Kısaltmalar

CCD	Charge Coupled Device
ÇMF	Çok Modlu Fiber
DFOJ	Diferansiyel Fiber Optik Jiroskop
FOJ	Fiber Optik Jiroskop
FSS	Fiber Spektogram Sensörü
SVM	Support Vector Machine
GAKA	Gradyan Artırmalı Karar Ağacı

GTTÖ

Gradyan Tabanlı Tek Taraflı Örnekleme

HLJ

Halka Lazer Jiroskop

MÖ

Makine Öğrenmesi

SY

Saat Yönü

SYT

Saat Yönünün Tersi

TMF

Tek Modlu Fiber



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Halka lazer jiroskop şeması	7
Şekil 2.2 Fiber optik jiroskop şeması	8
Şekil 2.3 SY (a) ve SYT (b) yönlerinde oluşan optik yol farkının gösterimi	12
Şekil 2.4 Optik yol farkının olmadığı dalga grafiği	12
Şekil 2.5 Optik yol farkının olduğu durumda dalga grafiği	13
Şekil 2.6 Detektördeki ışık yoğunluğu grafiği	15
Şekil 2.7 Fiber optik sarmal	19
Şekil 2.8 2x2 Fiber optik kuplör	19
Şekil 2.9 Türüne göre fiber optik kablo şemaları	23
Şekil 3.1 Örnek benek deseni görüntüsü	27
Şekil 4.1 Deney düzeneği şeması	34
Şekil 4.2 Çok modlu fiber sarmalın sonunda oluşan benek deseni	35
Şekil 4.3 Simülasyon ortamı	37
Şekil 4.4 Simülasyon şeması	38
Şekil 4.5 Örnek simülasyon verileri	39
Şekil 4.6 Simülasyon sonuçlarından veri kümesi elde edilmesi	41
Şekil 4.7 Pearson korelasyonunun optik yol farkına göre değişim grafiği	43
Şekil 4.8 Segmente korelasyonun optik yol farkına göre değişim grafiği	43
Şekil 4.9 Deney düzenek şeması	44
Şekil 4.10 Laboratuvar düzeneği	46
Şekil 4.11 Medyan filtresi örneği	47
Şekil 4.12 Ön işleme şeması	49
Şekil 4.13 3.307 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği	49
Şekil 4.14 2.99 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği	50
Şekil 4.15 2.51 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği	50
Şekil 4.16 XGBoost ağaç şeması	53
Şekil 4.17 LightGbm ağaç şeması	54
Şekil 4.18 LightGbm tahmin grafiği	59
Şekil 4.19 Xgboost tahmin grafiği	59
Şekil 4.20 Catboost tahmin grafiği	60

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 4.1 Makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin sonuçları	58
Çizelge 5.1 Optik yol farkına göre elde edilen korelasyon değerleri.....	61
Çizelge 5.2 Modellerin ölçüm metrikleri karşısında elde ettiği skorlar.....	622



1. GİRİŞ

Tüm canlılar için bir noktadan başka bir noktaya ulaşırken doğru ve güvenli bir rota bulmak hayati bir önem taşır. Bu sebepten dolayı insanoğlunu erken zamanlardan beri seyahatlerinde etkili ve emniyetli bir rota bulmak için kendisine gereken yer ve yön bilgisini tayin edebilme amacıyla çeşitli metotlar ve araçlar geliştirmiştir. İlkel çağlarda insanlar gündüzleri güneşi, geceleri ise yıldızların hareketlerini kullanarak yollarını belirlemiştir. Gözlemsel metotların yanı sıra insanlığın ilk dönemlerinde, bir aracın tekerliğine bağlı bir dişlinin tam tur attığı zaman bir davula çarpıp ses çıkartmasına ve çıkan seslerin sayısı ile kat edilen mesafe tayinine dayanan basit odyometreler icat edilmiştir.

Pusulanın icadı ile navigasyon konusunda insanlık yeni bir döneme geçmiş ve hava koşullarından bağımsız bir görsel ve işitsel referansa ihtiyaç duymadan yönünü tayin etmiştir. Orta çağa gelindiğinde sekstant ve usturlabın icat edilmesi ile özellikle denizcilik alanında büyük gelişimler yaşanmış, uzun mesafe güvenli seyahat rotaları oluşturulabilmiş ve yeni kıtaların keşfine olanak sağlamıştır. Navigasyon, aslen Latince'den gelen denizcilik kökenli bir kelime olmasına karşın insanlığın yeni ulaşım araçları icat etmesiyle birlikte kara, hava ve uzay alanında da kullanılan bir kelime haline gelmiştir. Modern çağa gelindiğinde özellikle 2.Dünya savaşı ve sonraki soğuk savaş döneminin getirdiği askeri ihtiyaçlar navigasyon alanında ciddi atılımlara vesile olmuştur. Günümüzde navigasyon araçları büyük oranda elektronik cihazlara dayanmaktadır.

Modern çağdaki navigasyon sistemleri birden fazla cihazın farklı türden verileri ölçmesiyle oluşturulmuş yer yön ve konum bilgilerinin işlenmesine göre çalışmaktadır. Örneğin bir hava aracı küresel konumlama sistemi (GPS), ataletsel navigasyon sistemi (INS) , taktik hava navigasyon sistemi (TACAN) gibi farklı metodolojilerle geliştirilmiş sistemleri beraber kullanarak yer, yön ve konum bilgisini belirler. Bu metodolojilerden INS aracın hareket öncesi ilk konumunu referans alarak, aracın açısal hız ve ivme bilgileri ile yer ve yön tayininde bulunur. Bu açısal hız, aracın üzerindeki jiroskop sayesinde ölçülür.

Günümüz endüstrisinde çeşitli jiroskop türleri mevcut olsa da başlangıçta jiroskop hareketli parçalardan oluşan mekanik prensiplere dayalı bir cihazdı. Elektronik ve optik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, mekanik jiroskopların yerine fiber optik ve MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) jiroskoplar navigasyon sistemlerinde kullanılmaya başlandı. Her jiroskop türünün kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. MEMS jiroskop küçük ve düşük maliyetlere sahiptir. Ancak termal gürültüden fazlaca etkilenirler ve ölçüm hassasiyeti optik jiroskoba göre daha kötüdür. Optik jiroskop yüksek ölçüm hassasiyeti, mekanik ve elektromanyetik gürültülere karşı dirençleri ve dinamik ölçüm aralığının genişliği sayesinde birçok gerçek dünya problemi için ideal jiroskop türüdür.

Optik jiroskop Sagnac etkisi olarak bilinen bir fiziksel olguyu temel alarak geliştirilmişlerdir. Kendi içlerinde türlere ayrılan optik jiroskop, ilk olarak halka lazer jiroskop (HLJ) olarak bilinen tasarım ile geliştirilmiştir. Halka lazer jiroskop için tasarım çabaları, Honeywell gibi şirketlerin öncülüğüyle 1960'lı yılların başında başlamıştır. Başlangıçta bu cihazlar dönü hareketini ölçebilme yeteneği göstermişse de jiroskop tasarımının getirdiği "kilitlenme" adı verilen yan etkilerden dolayı tam anlamıyla verimli sonuçlar üretememiştir. Kilitlenme etkilerinin sebeplerinin incelenmesiyle bu sorunun çözümü adına yapılan araştırma geliştirme faaliyetleri sayesinde, halka lazer jiroskobun doğruluğunda iyileştirmeler sağlandı. İzotopik karışımlar ve mekanik titreşim dahil olmak üzere çeşitli teknikler, sürekli ve doğru dönüş ölçümüne olanak tanıyarak kilitlenme etkilerini en aza indirmeye yardımcı oldu.

1960'ların sonlarında, özel şirketler halka lazer jiroskobun ticari gelişimini başlattı ve bu durum HLJ'lerin havacılık ve askeri uygulamalar için navigasyon sistemlerinde yaygın kullanımının başlangıcı oldu (Heer 1984). HLJ açısal hızın hassas ölçümünü mümkün kılmış olsa da süper aynalar, helyum geçirmez düşük genleşmeli cam ve yüksek voltajlı deşarj bileşenleri gibi özel ve maliyetli bileşenler gerektirmeleri gibi dezavantajlara sahipti.

Gelişiminin başını telekomünikasyon endüstrisi çeken fiber optik teknolojisi, 1970'li yıllarda yeni nesil optik jiroskop için önde gelen bir teknoloji olarak ortaya çıktı. Bu

yıllarda HLJ’de kullanılan aynaların yerine fiber optik kabloların tercih edildiği jiroskop tasarımları ortaya çıktı. Daha sonrasında fiber optik jiroskop (FOJ) olarak adlandırılan bu tasarım HLJ gibi Sagnac etkisine dayanmaktaydı. HLJ’nin aksine FOJ tasarımında yüksek voltajlı gaz lazerleri yerine yarı iletken ışık kaynakları kullanıldı. Bu durum FOJ üretim maliyetini düşürürken HLJ’ye göre daha hafif olmalarını sağlamıştır. Bu durum özellikle havacılık sektörü gibi faydalı yük ağırlığının çok önemli olduğu endüstrilerde FOJ için büyük avantaj sağlamaktadır.

FOJ tasarımında ışık bir fiber optik sarmal aracılığıyla aynı anda saat yönünde (SY) ve saat yönünün tersine (SYT) gönderilir ve çıkışta yeniden birleştirilir. Sarmal hareketsiz olduğunda, her iki ışın da aynı optik yolu kat ederek fiber hattın sonunda girişim yapar. Sarmal dönerken, Sagnac etkisi bir ışının diğerinden daha uzun bir optik yol uzunluğu kat etmesine neden olur ve bu da aralarında açısal hıza orantılı bir faz farkı yaratır, bu durum sonucunda optik fiber sonunda oluşan ışık yoğunluğu faz değişimine bağlı olarak değişir. Bu ışık yoğunluğunun fotodedektör ile ölçülmesiyle açısal hız hesaplanmış olur.

FOJ kendi içerisinde temelde iki tasarıma ayrılır. Bunlar açık çevrim ve kapalı çevrim fiber optik jiroskoptur. Açık çevrim FOJ geri besleme sistemi içermez Açısal hız doğrudan ölçülür ve geri besleme sistemi olmadan işlenir. Kapalı çevrim FOJ’a göre daha düşük maliyete sahiptir. Kapalı çevrim FOJ, bir geri bildirim mekanizmasıyla dönüş hareketine eşit ve zıt bir faz kayması ekler. Bu durum Sagnac faz kaymasını telafi ederek açık devre sinyalini sıfırda tutar. Bunun için geri besleme sürecinde bir elektro-optik modülatör (EOM) devreye girer. EOM, fiber optik halkadaki ışık dalgalarının fazını aktif olarak değiştirir. Kapalı çevrim FOJ, uzun süreli ölçümleri kararlılıkla yerine getirebilir. Açık çevrim FOJ’a göre daha yüksek hassasiyet sunar. Ancak daha fazla elektronik karmaşıklık ve maliyet getirir.

Bu tez kapsamında bir FOJ için alternatif bir açısal hız ölçüm metodolojisi geliştirilmiştir. Bu ölçüm için FOJ’da kullanılan fiber optik kablo tek modlu değil çok modlu fiber optik kablodur. Bu jiroskopta dönme hareketinin ölçümü doğrudan Sagnac etkisine dayalı faz farkının hesaplanması yerine, çok modlu fiberde (ÇMF) gözlemlenebilen benek deseninin analizi ile hesaplanacaktır. Benek desenlerinin kaydedilmesi için fotodedektör yerine bir

CCD kamera kullanılacaktır. Bu çalışma için önce simülasyon ortamında bir tasarım ve test yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Benek deseni görüntülerdeki Sagnac etkisini gözlemlemek için FOJ'un içerisindeki fiber optik sarımın bir simülasyonu yapılmıştır. Bu kurulumda farklı optik yol uzunlukları için çok modlu fiber çıkışında oluşan benek deseni görüntüler kaydedilip analiz edilmiştir.

Tezin giriş kısmında seyrüsefer ve jiroskop sistemlerinin gelişim sürecinden bahsedilmiştir. Tezin ikinci bölümünde fiber optik jiroskobun temel çalışma prensipleri anlatılmış, Sagnac etkisi matematiksel olarak açıklanmıştır. Bu bölümde son olarak fiber optik kablolar hakkında temel bilgiler sunulmuştur. Üçüncü bölümde benek desenleri ve fiber spektogram sensörleri hakkında temel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde tez kapsamında önerilen jiroskop modeli anlatılmış, simülasyon ve laboratuvar ortamını tanıtılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuç kısmında çalışmanın bir özeti sunularak elde edilen bulgulardan ve literatüre getirdiği yeniliklerden bahsedilmiştir.

2. OPTİK JİROSKOP VE OPTİK FİBER

Jiroskobun kullanıldığı ataletsel navigasyon sistemleri bir mekanik terimi olan eylemsizliğe dayanır. Bir kara kutu içindeki referans noktasının hareketi direkt olarak gözlemlenemez iken üzerine etki eden ivme ve dönüş hareketi ölçülebilir. Aracın konum ve hareket bilgisi bilindiği takdirde bu bilgilerin üzerine araca etki eden ivme ve dönüş hareketlerinin eklenmesiyle aracın yer, yön ve konum bilgisi elde edilebilir. Bu sistemler uzun bir süredir geliştirilmekte olup havacılık, denizaltı ve uzay endüstrisindeki kritik rol oynamaktadır.

Optik jiroskop, bir fiber optik hat boyunca zıt yönlerde hareket eden ışık demetleri arasındaki iletim süresindeki farkı algılayarak çalışır. Dönme hareketi, fiber hat içerisinde zıt yönlerde hareket eden ışık huzmelerinin etkili yol uzunluklarında bir değişikliğe neden olarak zıt iki ışık huzmesi arasında bir faz farkı oluşturur. Dönmenin neden olduğu bu faz farkı, optik jiroskobun arkasındaki temel prensip olan Sagnac etkisi ile açıklanır.

1913 yılında George Sagnac herhangi bir hareketli mekanik parçası olmayan bir sistem ile dönü hareketinin tespit edilebileceğini deneysel olarak gösterdi. Halka şeklinde bir interferometrik sistemde ters yönde ilerleyen iki dalganın dönü hareketi sonrasında bir faz farkı oluşturduğunu açığa çıkardı. Ancak bu sistem oldukça kısıtlıydı. 1925 yılında Gale ve Michelson 2 kilometreye yakın bir halka interferometre ile dünyanın dönüş hızını ölçmeyi başardı. Mekanik bir parçası olmayan bir sistem ile dönüş hareketinin ölçülmesi ne kadar büyük bir etki yaratsa da bu tür bir jiroskop tasarımının pratik ve işlevsel hale gelmesi 1960'lı yıllarda mümkün hale geldi.

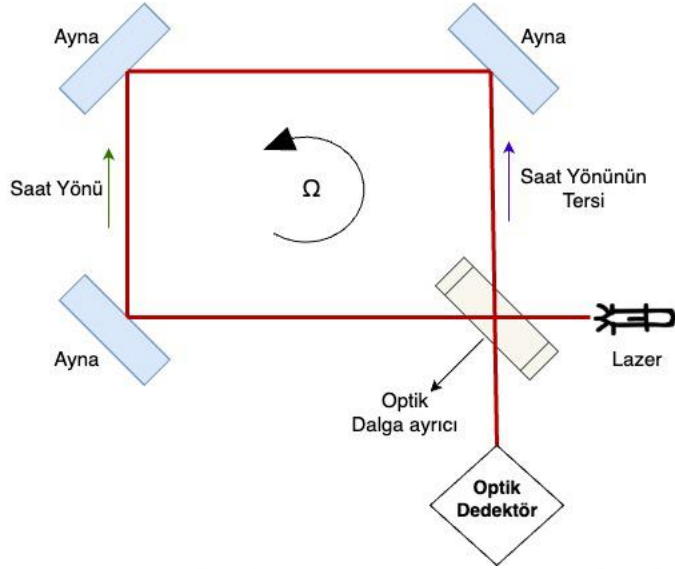
1966 yılında, lazer tabanlı bir açısal hız sensörünün tasarlanması konusunda çalışan bilim insanı E.O. Schulz-Du Bois, ışığın dairesel bir yol izlediği içi boş silindirik bir ayna şeklinde tasarlanmış bir halka lazer jiroskopu önerdi. Bu jiroskopta aynı dalga boyunda ancak ters yönlerde ilerleyen iki ışık, jiroskobun içerisindeki aynalar sayesinde yönlendirilerek jiroskop içerisindeki bir yolu takip etmesi sağlanır. Bu dolaşımın sonunda iki ışık aynı noktaya geldiğinde birbirine girişerek durağan ve kalıcı bir dalga üretir. Dönü

hareketi oluştuğunda bu sistem içerisindeki aynalar hareket eder ve ters yönde ilerleyen iki ışık arasında faz farkı oluşur. Pratik uygulamalarda halka lazer jiroskopta kullanılan aynalardaki kusurlar sistem içerisindeki ışık demetleri ile etkileşime geçerek ışığın saçılmasına ve enerjisini kaybetmesine neden olur. Bu durum jiroskobun hareketsiz durumda iken sistem çıkışında elde edilen ışık dalgasının kalıcı ve sabit olmamasına neden olur. Bunun sonuncunda jiroskop, gürültü şeklinde bir dönme hareketi sinyali üretir, bu etkiye kilitlenme (lock-in) etkisi denir.

1970’li yıllarda haberleşme endüstrisinde gerçekleşen yoğun çalışmalar sonucunda fiber optik kabloların maliyetleri oldukça düşmüştür. Bu durum Sagnac etkisine bağlı olarak çalışan sistemler için alternatif bir yöntemin yolunu açmıştır. 1976 yılında Vali ve Shorthill bir fiber optik sarmal ile Sagnac etkisini böyle bir sistemde gzlemlenebildiğini deneysel olarak göstermiştir. Bundan sonraki süreçte FOJ için yapılan birçok akademik ve endüstriyel çalışma sonucu, HLJ’den daha hassas ölçümler yapabilen daha efektif bir jiroskop tasarımı elde edilmiştir. FOJ’da HLJ’lerde görülen kilitlenme etkisinin görülmemesi, HLJ’ye göre daha hafif olması ve daha az g harcamasına rağmen daha düşük maliyetlerle üretilmesi sebebiyle endüstride hızlıca yaygınlaşmışlardır.

2.1 Halka Lazer Jiroskop

HLJ’lerin birbirinden farklı fiziksel tasarımları vardır. Temelde gen ya da dörtgen bir şase içerisine yerleştirilmiş aynalardan, fotodedektrden ve lazer kaynağından oluşan Sagnac etkisi ilkesine göre çalışan bir jiroskop sistemidir. Jiroskop içerisindeki lazer kaynağı, iki zıt yönde eř lazer ışınları oluşturur. Bu lazer ışınları, jiroskobun içerisindeki aynalar sayesinde yönlendirilerek, sistemin içerisinde belirli bir yolu tamamlar ve aynı noktaya ters yönlerden ulaşırlar. Sisteme etki eden dönü hareketi iki lazer ışını arasında bir optik yol farkı oluşturur ve Sagnac etkisini ortaya çıkarır. Bunun sonucunda oluşan faz farkı jiroskobun açısal hızı ölçmesine olanak sağlar. şekil 2.1’de basit bir HLJ tasarımı gösterilmiştir.

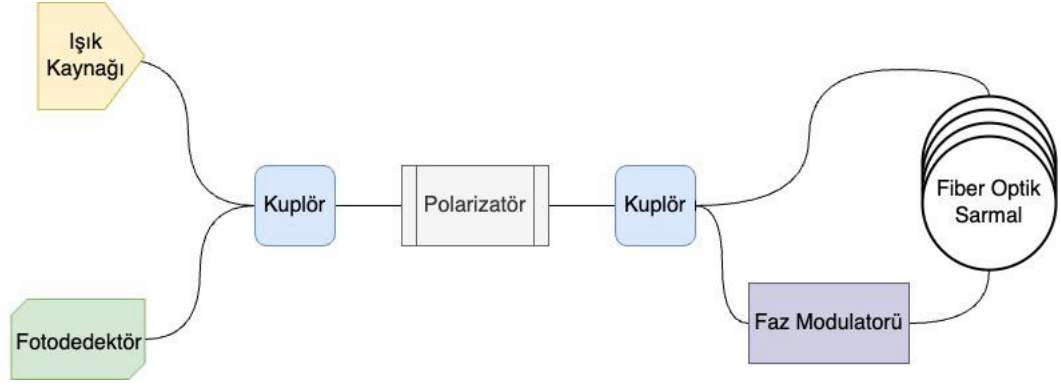


Şekil 2.1 Halka lazer jiroskop şeması

2.2 Fiber Optik Jiroskop

1967’de Pircher ve Hepner, Sagnac etkisinin optik fiber ile gözlemlenebileceğini önermiş olsa da bu durum 1976’da deneysel olarak Vali ve Shorthill tarafından ispatlanmıştır. 2000’lere doğru fiber optik kabloların, optik dedektörlerin ve optik bileşenlerin ucuzlamasıyla birlikte fiber optik jiroskobun gelişimi hızlanmıştır. HLJ gibi FOJ’da mekanik bir parça içermeyen düşük bakım maliyeti ile çok hassas ölçümler yapabilmektedir. Günümüzde FOJ ataletsel navigasyon sistemlerinin temel parçası olmuştur.

Fiber optik sarmal, fotodedektör, geniş bant ışık yayan bir ışık kaynağı ve optik kuplör FOJ’da kullanılan temel optik elemanlardır. Işık kaynağında üretilen ışık dalgası optik kuplör yardımıyla iki eşit parçaya ayrılır ve fiber optik sarmal içerisinde zıt yönde ilerler. Sistem üzerine etki eden bir dönme hareketi olursa fiber optik sarmalın iki zıt yönü arasında bir optik yol farkı oluşur ve sarmal içerisinde olan iki ışık dalgasının arasında bir faz farkı meydana gelir.



Şekil 2.2 Fiber optik jiroskop şeması

Bu iki ışın fiber optik hattın sonunda bir araya geldiğinde bir girişim oluşturur. Bu girişimin fotodetektör yardımıyla ölçülmesi ile açısal hız elde edilmiş olur. Şekil 2.2’de temel elemanlardan oluşturulmuş bir FOJ şeması gösterilmiştir.

2.2.1 Fiber optik jiroskop gelişimindeki önemli çalışmalar

Burns vd. (1983) yaptıkları çalışmada, jiroskop kararlılığı artırmak için kullanılan polarizatörlere ve depolarizatörlere olan ihtiyacı azaltmak veya ortadan kaldırmak için FOJ’da geniş bantlı kaynakların kullanılmasını önermiştir. Çalışmada geniş bant kaynak olarak süperlüminesan diyotlar (SLD’ler) gibi geniş bantlı, polarize olmayan kaynakların kullanılması önerilmiştir. Böylece, FOJ için önemli gürültü kaynaklarından olan polarizasyon gürültüsünü ve Rayleigh geri saçılım gürültüsünün önemli ölçüde azaltıldığı gösterilmiştir.

Killian vd. (1991) tarafından sunulan araştırmada yeni nesil yüksek performanslı fiber optik jiroskop tasarımı önererek bu tasarımın çok düşük gürültü seviyelerine sahip olup, güvenilir sonuçlar elde edebileceğini göstermiştir. Araştırmacılar Süperfloresan Erbiyum Katkılı Fiber Kaynakların FOJ’da kullanımının düşük gürültü ve yüksek kararlılığa katkıda bulunulacağı belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada bir FOJ için özel sinyal işleme devresini önerilmiştir. Bu devre tasarımı sayesinde FOJ’un performansının önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Çalışmada önerilen FOJ tasarımının yalnızca geleneksel mekanik ve halka lazer jiroskobun performansını yakalamakla kalmayıp bu performansın ötesine

geçerek uydu işaretleme ve navigasyon sistemleri gibi uygulamalarda büyük potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır.

Oho vd. (1995) çalışmasında otomobillerde kullanılabilecek bir prototip FOJ örneği sunulmuştur. Prototipin yoğun bozucu gürültülere sahip ortamlar veya harita verisi olmayan alanlar gibi zorlu koşullarda bile doğru araç konumlandırmasını ve yönünü koruyabildiği gösterilmiştir. Çalışmada, FOJ'un yüksek manyetik kararlılıkları ve hassasiyetleri sayesinde otomobil navigasyon sistemleri için uygun olduğu öne sürülmüştür.

Blin vd. (2006) yaptıkları çalışmada, FOJ'un termal etkilere olan hassasiyetlerinin azaltılmasına dair bir çalışma sunulmuştur. Bunun için FOJ'da o zamana kadar kullanılan geleneksel katı çekirdekli optik fiberler yerine hava çekirdekli fotonik bant aralıklı fiberlerin (PBF'ler) kullanılması önerilmiştir. Bu iyileştirme, öncelikle hava çekirdekli fiberlerin daha düşük kırılma indisine sahip olması ve azaltılmış Shupe sabiti ile daha üstün termal yalıtım kabiliyetleri olduğu vurgulanmış ve bu sayede FOJ için termal gürültülerden daha az etkilenebileceği vurgulanmıştır.

Schreiber vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, FOJ'un yapı mühendisliği problemlerinde kullanılabileceğini gösterilmiştir. Yapı mühendisliğinde binaya etki eden sismik ve rüzgâr yüklerinin ölçülebilmesi için bir FOJ kullanılması önerilmiştir. Depremler ve rüzgarların binalara yaptığı burulma hareketleri ve katlar arası kaymaların FOJ ile tespit edilebileceği gösterilmiştir. Çalışmada FOJ'un mekanik ivmeölçerlerin aksine harici bir referans gerektirmemesi, uzun süreler boyunca kararlılıkla çalışmaları ve yüksek hassasiyet ile ölçüm yapabilmeleri onların yapı mühendisliğindeki kritik verilerin elde edilebilmesinde iyi bir aday olduğu öne sürülmüştür.

Xuyou vd. (2009) yayınladıkları araştırmada, kapalı döngü fiber optik jiroskobun performansını iyileştirmek için uyarlanabilir bir Kalman filtresi tasarımı önermiştir. Bu filtre modeli sistemin matematiksel modeli ve gürültü etkileri kesin olarak bilinemediğinde geleneksel Kalman filtrelerine göre daha avantajlıdır. Çalışmada statik, dinamik ve rastgele gürültü senaryolarında filtre tasarımları test edilmiş ve özellikle

beyaz gürültü olmak üzere FOJ çıkış sinyallerindeki gürültüyü önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Çalışmanın sonucunda, önerilen filtreleme modelinin dijital kapalı devre FOJ'un performansına olumlu katkıda bulunduğu belirtilmiştir.

Mingwei Yang ve Yuanhong Yang (2013) yaptıkları çalışmada, çift öz frekanslı kare dalga ve aşırı yanlılık modülasyonu kullanan yeni bir yöntemin fiber optik jiroskopta öz frekansın son derece doğru ve düşük maliyetli ölçümünü sağlayabileceğini göstermiştir. Önerilen yöntemde, doğruluğu artırmak için ayarlanabilir faz derinliğiyle, öz frekansın iki katında kare dalga modülasyonu kullanılmıştır. Bu durumun karmaşık ya da pahalı ek donanıma olan ihtiyacı ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. Çalışmada yüksek hassasiyetli eylemsiz navigasyon sistemlerinde kullanılanlar da dahil olmak üzere çoğu FOJ için yeterli olan ± 5 Hz'den daha iyi bir öz frekans ölçüm doğruluğu elde edilmiştir. Ayrıca yeni yöntem, modülasyon faz derinliğini artırarak, modülasyon "ölü alanlarının" aralığı azaltmış ve ölçüm çözünürlüğü iyileştirmiştir. Çalışmada önerilen yöntemin FOJ için öz frekans ölçümünde uygulaması kolay, uygun maliyetli ve etkili olduğu belirtilmiştir.

Song vd. (2018) yaptıkları çalışmada çift eksenli dönme eylemsiz navigasyon sistemlerinde navigasyon performansını artırmak için FOJ ölçümlerini kullanan gelişmiş bir motor kontrol yöntemi sunmuşlardır. Sisteme FOJ çıktılarının entegre edilmesiyle, dik yuvarlanma hareketleri veya yön değişiklikleri gibi zorlu koşullar altında bile, sensörle ilgili sürüklenme ve bağlantı hatalarının etkilerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Çalışmada önerilen iyileştirilmiş motor kontrol yöntemi, çift dönme eylemsiz navigasyon sistemlerinde performansını artırmak için sağlam bir çözüm olduğu belirtilmiştir.

Yang vd. (2020) çalışmasında, ortak mod hatalarından kaynaklanan yanlılık kaymasını ve gürültüyü, geçici sıcaklık etkileriyle birlikte önemli ölçüde azaltmak için farklı dalga boylarına sahip iki geniş bant ışık kaynağı kullanan yeni bir diferansiyel fiber optik jiroskop (DFOJ) mimarisini önerdi. DFOJ, farklı dalga boylarında çalışan ancak aynı Sagnac interferometre kurulumunu paylaşan iki fiber optik jiroskobun birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Çıkış sinyallerinin diferansiyel olarak işlenmesi, polarizasyon karşılıklılığı ve geri saçılma gürültüsü gibi ortak mod hatalarını ortadan kaldırmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar ile DFOJ'un termal kararlılığının geleneksel jiroskoba oranla

çok daha iyi olduğu gösterilmiştir. Bu durum sayesinde, özellikle havacılık ve jeofizik çalışmaları gibi sıcaklık dalgalanmalarının çok olduğu ortamlarda yüksek performanslı navigasyon ve açısal hız ölçümü uygulamaları için DFOJ'un ideal bir tasarım olduğu önerilmiştir.

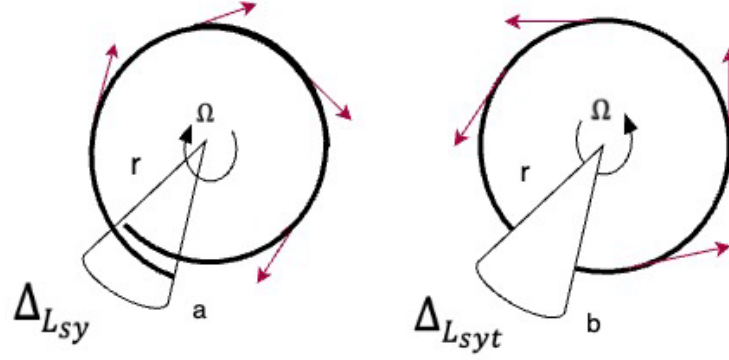
Wang vd. (2023) ortaya koydukları çalışmayla fiber optik jiroskoptaki sıcaklık kaymasını ve gürültüyü önemli ölçüde azaltmak için yeni bir yöntem önermiştir. Önerdikleri yöntem birden fazla algoritmanın birlikte çalışarak FOJ'daki gürültü filtrelemesi için etkili bir sonuç ortaya çıkarmıştır. Bu yöntem özel bir Support Vector Machine (SVM) algoritması, özelleştirilmiş bir adet çok boyutlu ampirik mod ayrıştırması tekniği ve uyarlanabilir Kalman filtresi içermektedir. -30 ve 60 derece arasında yapılan çalışmalarda önerilen yöntem FOJ'daki kuantalama gürültüsünü (Quantization noise) %98, açısal hızın rastgele değişimini %99.1 ve yanlılık kararsızlık faktörünü (Bias instability factor) %93.5 oranında azalttığı gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde FOJ'un doğruluğunu ve güvenilirliğini etkili bir şekilde artırılabilceği belirtilmiştir.

2.2.2 Sagnac etkisi

Sagnac etkisi, ışığın hareketi ile ilgili bir fiziksel olgudur. Etki ismini Fransız bir fizikçi olan George Sagnac (1869-1926)'dan alır. George Sagnac, Sagnac interferometrisi olarak bilinen bir yapı ile dairesel bir yörüngede zıt yönde ilerleyen iki ışık demetinin arasında dönü hareketi ile bir faz farkı oluşturabileceğini gösterdi. Temelinde bu etki şöyle açıklanabilir: İnterferometriye etki eden açısal hız Ω sonucunda sistemde zıt yönde ilerleyen ışık demetleri arasında bir optik yol farkı oluşur. Bu optik yol farkı sonucu ışık dalgaları interferometrinin sonuna farklı zamanlarda ulaşır: Bu zaman farkı iki ışığın birleştiği interferometrinin çıkış noktasındaki ışık dalgasında bir faz farkı yaratır. Bu faz farkı doğrudan açısal hız Ω ile doğru orantılıdır.

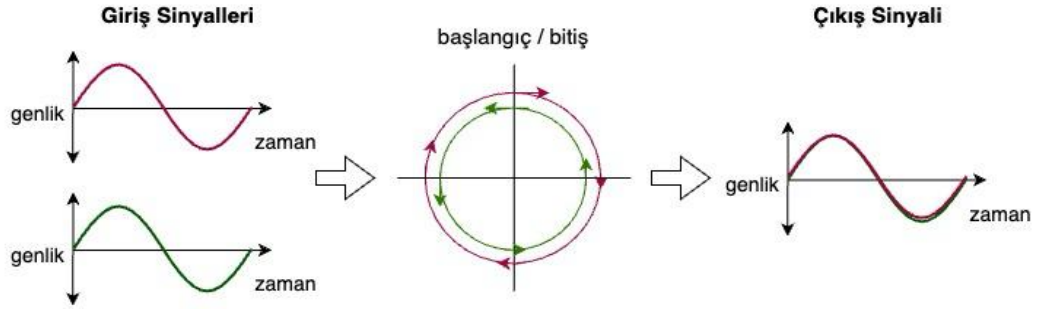
Fiber optik jiroskop temel olarak Sagnac etkisinin bir dairesel fiber optik hat içerisinde oluşturulması kurgusuna göre tasarlanmıştır. Bir optik kuplör yardımıyla iki kola bölünmüş ışık dalgalarından biri saat yönünde ilerlerken diğeri saat yönünün tersinde ilerler. FOJ'a etki eden açısal hız Ω sıfırdan farklı olduğunda, zıt yönde ilerleyen iki ışık

dalgasından birinin yolunu $\Delta_{L_{SY}}$ kadar uzarken, diğ erinin yolunu $\Delta_{L_{SYT}}$ kadar kısalmaktadır. Ş ekil 2.3'te SY ve SYT yönlerinde oluşan optik yol farkının ş ematik gösterimi verilmiştir.

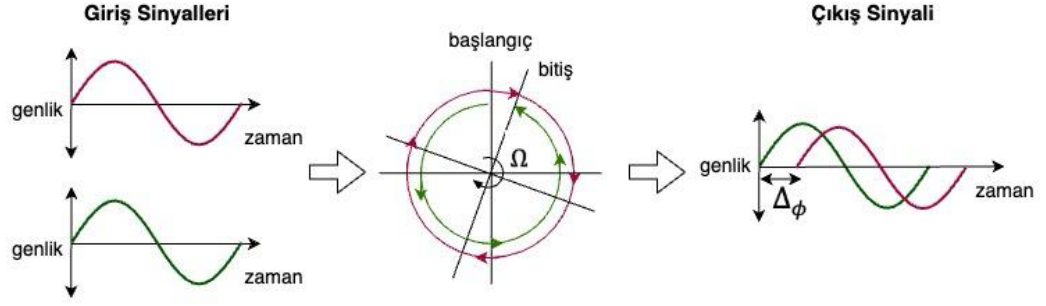


Ş ekil 2.3 SY (a) ve SYT (b) yönlerinde oluşan optik yol farkının gösterimi

Açısal hız Ω sonucu oluşan optik yol farkı SY ve SYT dalgaları arasında bir faz farkı yaratır. Optik sarmalın SY ve SYT yönlerinin arasında oluşan faz farkının ş ematik ve grafiksel gösterimi ş ekil 2.4 ve ş ekil 2.5'te gösterilmiştir.



Ş ekil 2.4 Optik yol farkının olmadığı dalga grafiği



Şekil 2.5 Optik yol farkının olduğu durumda dalga grafiği

Burada SY ve SYT için optik yol uzunluğu eşitlik 2.1 ve 2.2’de olduğu gibi ifade edilebilir;

$$L_{sy} = 2\pi r + \Delta_{L_{sy}} = 2\pi r + r\Omega t_{sy} \quad (2.1)$$

$$L_{syt} = 2\pi r - \Delta_{L_{syt}} = 2\pi r - r\Omega t_{syt} \quad (2.2)$$

Fiberin içindeki ışığın SY ve SYT ‘deki yol uzunluğunu tamamlaması için gereken zaman eşitlik 2.3 ve 2.4’te olduğu gibi gösterilebilir.

$$t_{sy} = \frac{L_{sy}}{c} = \frac{r(2\pi + \Omega t_{sy})}{c} \quad (2.3)$$

$$t_{syt} = \frac{L_{syt}}{c} = \frac{r(2\pi - \Omega t_{syt})}{c} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.3 ve eşitlik 2.4 kullanılarak toplam oluşan zaman fark gösterimi eşitlik 2.5 gibi olur.

$$\Delta_t = t_{sy} - t_{syt} = \frac{4\pi r}{c} \frac{(\Omega r)}{c} \quad (2.5)$$

N adet sarıma sahip olan bir fiber optik kablo için gösterim eşitlik 2.6'daki gibi olur.

$$\Delta_t = t_{sy} - t_{syt} = \frac{LR}{c^2} \Omega \quad (2.6)$$

Burada L toplam optik yol uzunluğu olan $2\pi rN$ 'dir. R ise sarmalın çapıdır. Sagnac etkisi ile oluşan toplam faz farkı ise eşitlik 2.7'de olduğu gibi ifade edilebilir;

$$\Delta_\phi = \frac{\omega LR}{c^2} \Omega \quad (2.7)$$

ω eşitlik 2.7'ye uygulanırsa Sagnac faz farkı denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta_\phi = \frac{2\pi LR}{\lambda c} \Omega \quad (2.8)$$

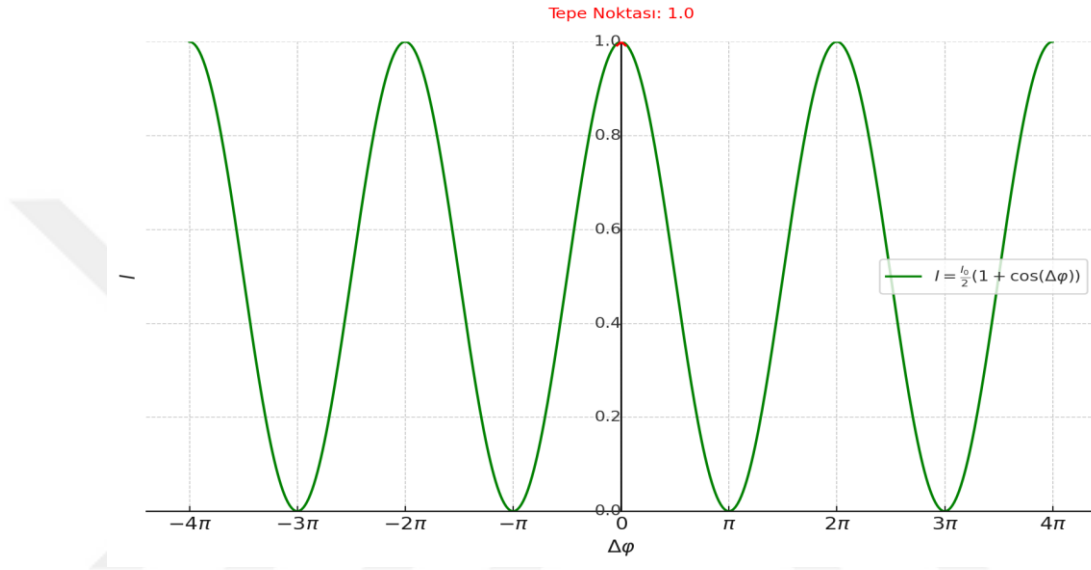
Eşitlik 2.8'den anlaşılaçağı üzere, Sagnac faz farkı ışık kaynağının dalga boyuna, fiber optik yol uzunluğuna ve açısal hıza doğrudan bağlıdır. FOJ'da fiber kablonun uzunluğunun çarpan etkisini artırması ve bu sayede daha hassas ölçümler elde edilebiliyor olması sebebiyle uzun fiber optik kablolar kullanılır. Bu çarpan etkisi yaratan önemli bir faktör ise fiber optik kablonun sarım sayısıdır. Sarmal haline getirilen fiber optik kablonun N adetlik sarım sayısı artıka FOJ'un hassasiyeti artar. Eşitlik 2.9'da görülebileceğı gibi, fiber optik sarmalın sarım sayısı faz farkıyla doğru orantılıdır.

$$\Delta_\phi = \frac{4\pi^2 r R \Omega}{\lambda c} N \quad (2.9)$$

Sagnac etkisi ile oluşan faz kayması, fiber optik sarmalda zıt yönlerde yayılan ışık dalgaları arasında oluşan yoğunluk farkının fotodedektör aracılığıyla algılanması ve ölçülmesi ile tespit edilir. Fotodedektör çıkışında oluşan ışığın yoğunluğu I , eşitlik 2.10 ile gösterilebilir.

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \Delta\phi) \quad (2.10)$$

Burada, I_0 yoğunluğun ortalama değeridir. Eşitlik 2.10'da $\Delta\phi = 0$ olduğu konumda I değişkeni en büyük değerini alır. Faz farkına göre ışık yoğunluğun grafiği şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Detektördeki ışık yoğunluğu grafiği

2.2.3 Fiber optik jiroskop gürültü kaynakları

Fiber optik jiroskobun performansına olumsuz etki edebilecek birçok gürültü kaynağı vardır. Termal gürültü, fiberden gelen geri saçılma gürültüsü, kuplör gürültüsü ve kaynak yoğunluğu gürültüsü bunlara örnek olarak verilebilir. Ayrıca bir FOJ'un maksimum performansı teorik olarak foton gürültüsüyle sınırlıdır. Bu gürültü kaynakları FOJ'un üzerine bir dönme hareketi uygulanmasa bile sistemin çıkışında bir sinyal üretilmesine sebep olur.

Bahsedilen gürültülere ek olarak, bir FOJ sistemi Rayleigh saçılması, Faraday etkisi ve optik Kerr etkisi nedeniyle fiber parametrelerinde çevresel olarak indüklenen dalgalanmalardan kaynaklanan gürültülere de maruz kalır.

2.2.3.1 Termal gürültüler

Jiroskopun fiber sarmalındaki sıcaklık değişimleri ve farklılıklar önemli faz farkı hataları üretir ve dolayısıyla sensörün hassasiyetini kısıtlar. Termal olarak indüklenen karşılıklı olmama (Nonreciprocity), fiber boyunca zamana bağlı bir sıcaklık farkından kaynaklanabilir.

Karşılıklı olmama, karşı yayılan dalgalar optik fiberin aynı bölümünden ayrı zamanlarda geçtiğinde, her biri farklı termal durumlara sahip olduğunda meydana gelir. Fiber optik yayılma sabiti optik hat boyunca farklı oranlarda değişir. Bu olgu, karşıt yönlerde yayılan iki dalganın dalga cephelerinin biraz farklı yollar izlemesine sebep olur. Bu durum FOJ sisteminde bir gürültü oluşturur ve herhangi bir dönü hareketi olmasa bile sistemin çıkışında bir sinyal üretilmesine neden olur. Bu durumun oluşmadığı sıcaklık aralığı çok dar olduğu için bu gürültünün ortadan kaldırılması için farklı yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden bazıları; düşük termal genleşme kat sayısına sahip bir fiber kullanmak, FOJ yazılımında kullanılan çeşitli sinyal işleme algoritmaları ve FOJ'daki fiber sarmalın termal kararlılığını arttıran özel sarım yöntemleri ile sarmaktır.

2.2.3.2 Faraday etkisi

Bir manyetik alanın fiber optik hat içerisine yaptığı etki sonucu fiberdeki polarizasyon düzleminin değişmesiyle Faraday etkisi olarak adlandırılan olgu ortaya çıkar. Bu olgu karşılıklı olmayan dairesel çift kırılmaya neden olur, bu kırılım FOJ içerisinde karşıt yönlerde yayılan ışık dalgalarını farklı şekilde etkiler. Bu etki, manyetik alanın büyüklüğü ve yönünün yanı sıra fiberin çift kırılmasından da etkilenir. İdeal bir kurulumda, manyetik alandan kaynaklanan faz kayması, ışık dalgaları döngüden yayıldıkça yok olur. Ancak, fiberde karşılıklı çift kırılmanın varlığı, bu durumu önleyerek manyetik alan yönelimi ve yoğunluğundaki değişikliklerle dalgalanan artık bir faz kayması ortaya çıkartır.

Bu oluşan gürültü sistem tarafından Sagnac etkisi olarak algılanır ve dönü hareketi olarak yorumlanır örnek olarak dünyanın manyetik alanından kaynaklanan gürültü FOJ'a standart olarak 10 derece/saat olarak etki eder. Bu etkiyi tamamen ortadan kaldırmak

oldukça güçtür ancak FOJ tasarımında bu etkiyi oldukça azaltan yöntemler vardır. Manyetik alana dirençli fiberler ve daha uzun dalga boyu kullanımı bu önlemlere örnek olarak verilebilir. Ayrıca FOJ tasarımında fiber polarizasyon kontrolü sağlanarak, polarizasyon değişikliklerinin ek faz farkları ortaya çıkarmasının önüne geçilebilir.

2.2.3.3 Rayleigh geri saçılması

Fiberdeki rastgele üretim kusurlarının bir sonucu olan Rayleigh geri saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışığın bir kısmını kaynağa doğru geri saçılması olgusudur. Bu geri saçılan ışık, karşıt yönlü birincil olarak yayılan dalgalarla etkileşime girerek faz hataları yaratan ikincil dalgalar üretir. Bu oluşan ikincil dalgalar, FOJ sisteminde önemli ölçüde gürültüye sebep olarak FOJ'un performansını olumsuz yönde etkiler. Bu gürültünün etkisini azaltmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. FOJ tasarımında süper radyant diyotlar gibi daha kısa tutarlılık uzunluklarına sahip ışık kaynakları kullanmak, tutarlı geri saçılmanın kapsamını en aza indirir. Bu durum faz bozulmalarını kabul edilebilir seviyelere indirir. Işık kaynağının yanı sıra çeşitli modülasyon teknikleri kullanılarak bu gürültü azaltılabilir. Belirli frekanslarda (örneğin 1 km'lik bir fiber döngüsü için 100 kHz'e yakın) modülasyon yapmanın geri saçılan gürültüyü etkili bir şekilde bastırdığı gösterilmiştir (Böhm vd. 1981 ve Bergh vd. 1981).

2.2.3.4 Kerr etkisi

Kerr etkisi, fiberin kırılma indisinin ışığın yoğunluğuna bağlı olduğu doğrusal olmayan bir optik olgudur. FOJ'da, fiber optik sarmal içerisinde karşıt yönlerde yayılan ışık dalgalarının optik güçlerindeki oluşabilecek bir farklılık, yoğunluğa bağlı bir kırılma indisi kaymasına neden olur, bu durum iki dalga arasındaki hafif bir güç dengesizliğinin bile önemli faz farkı hataları üretebilme potansiyelini ortaya çıkarır. Oluşan faz farkı hataları jiroskop sistemine gürültü olarak etki eder. Fiber optik kablolarında sıklıkla kullanılan doğrusal bir malzeme olan silikada 10 nW kadar küçük bir güç farkı, navigasyon gibi hassas uygulamalarda sisteme kabul edilemez gürültüler olarak yansır. Kerr etkisini azaltmak için kaynak gücünü modüle etme veya belirli spektral özelliklere sahip kaynaklar kullanma gibi yöntemler kullanılabilir. Ayrıca fiber optik hat

içerisinde ters yönlerde yayılan dalgaların güçlerini dengeleyen bir bağlantı oranı seçilerek, güç dengesizliklerinin etkileri en aza indirilebilir.

2.2.4 Fiber optik jiroskop bileşenleri

Bu bölümde FOJ’da kullanılan bileşenlerle ilgili temel bilgiler verilecektir. FOJ çeşitli bileşenlerin bir araya gelmesiyle üretilirler, bu cihazların üretim kalitesi ürettikleri çıktıların tutarlılığı jiroskobun performansına direkt olarak etki eder.

2.2.4.1 Işık kaynağı

Işık kaynağı FOJ için hayati bir önem taşır. Işık kaynağının tutarlı olması FOJ’un açısal hız ölçüm performansına direkt etki eder. FOJ’da temel olarak kullanılan iki çeşit ışık kaynağı vardır, bunlar lazer diyot ve LED ışık kaynağıdır. Optik Jiroskopta, fiber optik haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılan 1.55 mikrometre dalga boyuna sahip ışık kaynakları kullanılır.

Bu dalga boyu zayıflamanın en az olduğu verimliliği yüksek bir noktadır, bu da jiroskobun ihtiyaç duyduğu kararlılıkta ve güçte ışık dalgalarının üretilebilmesine yardımcı olur. Işık kaynağının tutarlılığının yanı sıra ışık kaynakları fiber optik hatta kolay entegre olabilen fiber “pigtailed” özelliğine sahip olmalıdır.

2.2.4.2 Fiber optik kablo

Fiber optik jiroskopta standart tek modlu fiber (TMF) optik kablolar kullanılır. Bu kabloların genel olarak bir gereksinim tablosu çıkartılamamıştır. Fiberin uygun şekilde tasarlanmış bir metalik kılıf ile kaplanmasıyla çevresel gürültülere karşı sistemin kararlılığı artırılır.



Şekil 2.7 Fiber optik sarmal

Bu kablolar N adet sarım ile bir sarmal şeklini alır. Jiroskobun sağlıklı ve performanslı çalışabilmesi için bu kablolar simetrik olarak sarılmalı ve düşük kayıplı malzemelerden üretilmelidir. Şekil 2.7’de bir Fiber optik sarmal görüntüsü verilmiştir.

2.2.4.3 Fiber optik kuplör

Optik jiroskopta kuplörler ışık kaynağından gelen ışık dalgasını fiber optik sarmalın iki girişine bölmek için kullanılır. Jiroskopta endüstride 50:50 olarak bilinen 3 dB kuplörler sıklıkla kullanılır. Bu kuplörler gelen ışığı fiber optik sarmalın iki girişine eşit derecede yönlendirmeyi sağlar. Şekil 2.8’de bir Fiber optik kuplör görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.8 2x2 Fiber optik kuplör

2.2.4.4 Fotodedektör

Fotodedektör, optik jiroskopta Sagnac etkisini ölçen optik sensörlerdir. Fiber sarmal içinde zıt yönlerde ilerleyen iki ışık dalgası, fiber optik hattın sonunda fotodedektöre ulaşır. Bu iki ışık dalgası, fotodedektör tarafından bir elektrik sinyaline çevrilerek ışık dalgaları arasındaki faz farkı ölçülmüş olur. Fotodedektör yüksek doğruluğa, düşük termal ve elektriksel gürültüye sahip olmalıdır.

2.2.4.5 Optik polarizatör

Fiber optik jiroskopta optik polarizatör, hassas ölçüm ve doğru yön belirleme sağlamak için kullanılır. Optik polarizör, fiber kuplör tarafından ikiye ayrılan ışık dalgalarının istenmeyen yollar üzerindeki polarizasyonunu engellemek amacıyla kullanılır.

Fiber içinde ışığın farklı polarizasyon bileşenleri, sistemin sıcaklık ve gerilme gibi çevresel değişkenlerden etkilenerek gürültü oluşturabilir. Optik polarizatör, ışık huzmelerinin tek bir yönde iletilmesi sağlanarak daha kontrollü bir sinyal iletiminin gerçekleştirilmesini sağlar.

2.2.4.6 Optik faz modülatörü

Elektro-optik modülatörler içlerinden geçen ışık dalgalarını modüle eden sinyal kontrollü cihazlardır. Elektro-optik modülatörler, ışık demetinin frekansını, fazını, genliğini veya polarizasyonunu değiştirebilir. FOJ’da Elektro-Optik faz modülatörünün ana fonksiyonu, optik fiber sarmalında saat yönünde ve saat yönünün tersine yayılan ışık dalgalarına faz modülasyonunun eklenmesidir. Harmonik veya kare dalga modülasyonu yoluyla bir faz yanlılığı (bias) uygulayarak çıkış tepkisini doğrusallaştırır. Bu durum, açısal hızın olmadığı durumda en yüksek hassasiyet seviyesini sağlar ve bu sayede düşük açısal hızlarda FOJ’un yüksek doğrulukta ölçüm yapabilmesine olanak tanır.

2.3 Fiber Optik Kablolar

1960'ların başında düşük kayıplı optik silica fiberlerin akademik literatüre girmesiyle birlikte 1970'lerde ışığın olağanüstü uzun mesafelerde yayılmasına izin fiber iletişiminin önünü açan ultra düşük kayıplı silika cam fiber optik kabloların endüstriyel üretimi gerçekleşmiştir. Yüksek bant genişliğine sahip iletişim hatlarının ihtiyacıyla birlikte fiber optik kablolarla duyulan talep ilerleyen yıllarda hızlıca artmıştır.

Fiber optik kablolar, hacim olarak az yer kaplamaları, hafif malzemelerden yapılmaları ve çok düşük kayıplarla veri iletmeleri gibi özellikleri sayesinde birçok endüstriyel uygulama için ideal bir çözüm olmuştur. Fiber optik kablolar temelinde çekirdek adı verilen iç katmanında daha düşük bir kırılma indisi olan bir hattın, daha yüksek kırılma indisine sahip bir katman ile çevrelenmesi ile elde edilir. Fiberin girişinden gönderilen ışık, çekirdek ve kaplama içerisinde toplam iç yansıma ile fiber hat içerisinde kalır.

Silica gibi düşük kayıplı malzemelerden yapılan fiber optik kablolar ışığın bir noktadan başka bir noktaya iletilmesiyle veri transferi sağlamış olur. Fiber optik kabloların ışığı çok düşük kayıpla iletebilmesi, fiber optik kablo kullanılarak çeşitli ölçüm araçlarının geliştirebilmesine olanak sağlamıştır. Son birkaç on yılda optik fiberlerin üretimindeki teknolojik gelişmeler, Işığın maksimum şeffaflık dalga boyunda $\approx 0.15 \text{ dB}$ ($\approx \%3.4$) kadar düşük bir kayıpla 1 km'lik silika-cam fiberden yönlendirilmesine olanak tanımıştır. Bu düşük kayıp nedeniyle, silika-cam optik fiberler uzun zaman önce karasal ve okyanus altı veri iletişimleri için tercih edilen iletişim teknolojisi olarak yer aldı. Son yıllarda, optik fiberler monolitik silika-cam kökenlerini aşmış ve sensör, güvenlik, ulaşım, savunma ve biyomedikal alanlarında merkezi bir rol oynamaya başlamıştır.

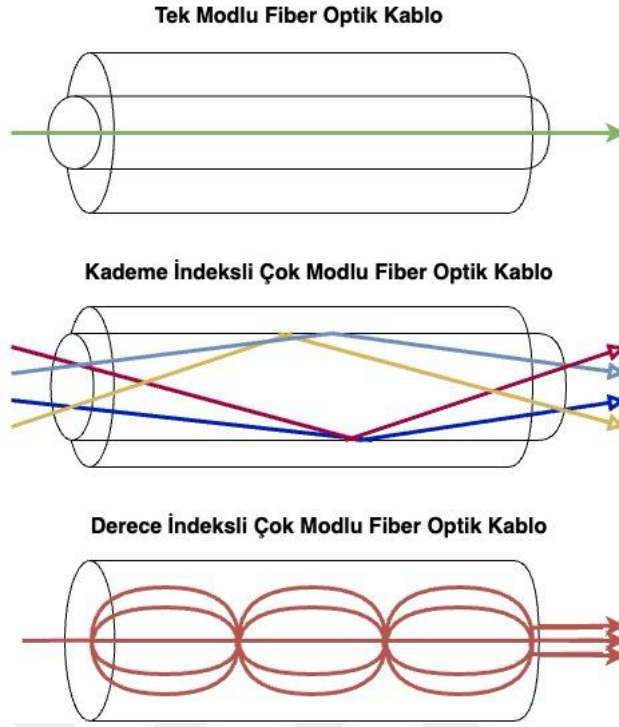
Fiber optik içerisinde ışık modlar halinde yayılır. Her mod, dalga kılavuzunun eksenine boyunca belirgin bir yayılma sabiti ve grup hızıyla hareket ederek enine uzaysal dağılımını ve polarizasyonunu korur. Fiberin çekirdek çapı küçük olduğunda, fiber içerisinde yalnızca tek bir mod desteklenir ve optik fiber tek modlu olarak adlandırılır.

Büyük çekirdek çaplarına sahip optik fiberler çok modlu fiber olarak adlandırılırlar. Çok modlu fiberlerde ışığın yayılmasıyla ilişkili zorluklardan biri, modların grup hızları arasındaki farklardan kaynaklanır. Bu, seyahat sürelerinin yayılmasına ve fiberden geçerken ışık darbesinin genişlemesine neden olur. Modal dispersiyon adı verilen bu etki, fiberin uzak ucunda darbe örtüşmesi olmadan bitişik darbelerin başlatılabileceği hızı sınırlar. Bu nedenle modal dispersiyon, çok modlu optik fiber iletişim sistemlerinin çalışabileceği hızı sınırlar.

Modal dağılım, fiber çekirdeğinin kırılma indisinin merkezindeki maksimumdan çekirdek-kaplama ara yüzündeki minimuma derecelendirilmesiyle hafifletilebilir. Değişen kırılma indisine sahip fiberler derece indisli fiberler veya GRIN fiberler olarak adlandırılırken, çekirdek ve kaplamada düzgün kırılma indisine sahip geleneksel fiberler kademe indisli fiberler olarak adlandırılır.

Derece indisli bir fiberde, kırılma indisindeki azalma nedeniyle yayılma hızı çekirdek ekseninden radyal mesafeyle artar. Fiber eksenine daha fazla eğime sahip ışınlar daha uzun bir mesafe kat etseler de daha yüksek bir hızda yayılırlar. Bu, çeşitli modlar arasında seyahat sürelerinin eşitlenmesini sağlar.

Optik fiberler şekil 2.9'da gösterildiği gibi kademe indisli çok modlu, derece indisli çok modlu ve tek modlu olarak sınıflandırılır.



Şekil 2.9 Türüne göre fiber optik kablo şemaları

İstenilen uygulama türüne göre seçilecek fiber optik kablo türü değişkenlik gösterir. Fiber optik kablolar sadece iletişim uygulamalarında değil çeşitli sensor tasarımlarında da kullanılır. Elektriksel ve manyetik gürültülerden az etkilenmeleri, yüksek hassasiyette ölçüm yapabilmeleri ve hafif malzemelerden üretilmeleri gibi birçok avantaja sahip olan fiber optik sensörler sıcaklık, titreşim, basınç gibi değerlerin ölçümünde kullanılabilir. Bu tür sensörler geliştirilirken hem tek modlu hem de çok modlu fiber optik kablolar kullanılabilir.

Fiber optik jiroskopta ise tek modlu fiber optik kablolar kullanılır. Tek bir ışık huzmesinin bir fiber optik kuplör yardımıyla iki eşit parçaya bölünmesi ve daha sonra bu parçalar arasında oluşan faz farkının hesaplanması ile çalışan fiber optik jiroskop, tek modlu fiber optik kablolar ile tasarlanır.

2.3.1 Kademe indisli fiberler

Kademe indisli fiberler, fiber çekirdeğinde düzgün bir kırılma indisli bir malzeme n_1 ve fiberin kılıf kaplamasında daha düşük kırılma indisli n_2 bir malzemenin kullanıldığı fiber

optik kablolardır. Endüstride kullanılan popüler standart çekirdek-kılıf çap oranlarına ($\mu\text{m} / \mu\text{m}$) bazı örnekler şunlardır; 8/125, 50/125, 62.5/125, 85/125 (Saleh vd. 2019).

Kademe indisli fiberlerde çekirdek-kaplama girişindeki optik ışının geliş açısı, eşitlik 2.11 ile belirlenen kritik açı açıdan büyükse, ışık demeti fiber çekirdeğinde iç yansımalar ile yönlendirilir ve fiber boyunca yayılır.

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_1/n_2) \quad (2.11)$$

Kademe indisli fiberlerde önemli parametrelerden biri de sayısal açıklıktır. Bu değer fiberin kabul açısını belirler. Eşitlik 2.12'deki gibi hesaplanır.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.12)$$

NA, fiberin kabul edebileceği ışık demetini belirler. Daha büyük NA değerleri fiberin daha fazla ışık toplayacağı anlamına gelir. θ_c 'den daha büyük açılarda gelen ışınlar fibere doğru kırılır ancak tam iç yansıma uğramadıkları için sadece kısa bir mesafeye yönlendirilirler.

2.3.2 Derece indisli fiberler

Derece yöntemi çok modlu bir fiber içindeki modların grup hızlarındaki değişikliklerden kaynaklanan darbe genişlemesini azaltmak için etkili bir tekniktir. Derece indisli (GRIN) bir fiberin merkezi bölgesi, dalgalanan bir kırılma indisine sahiptir, fiberin çekirdeğinde zirve yapar. Çekirdekten fiberin kaplamasına doğru gidildikçe kademeli olarak minimuma iner. Bu durumda çekirdek eksenine daha yakın olan ışınlar daha yavaş hareket eder (daha düşük faz hızı). Çekirdek ekseninden daha uzak olan ışınlar daha hızlı hareket eder ve daha uzun yolları kat etmiş olur. Bu sayede modal dağılımın azaltılması sağlanır. Fiberin içerisindeki kırılma indisi n_r eşitlik 2.13'teki gibi hesaplanır.

$$n_r = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^p \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

Burada $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 'dir. p ise profilin diklik kat sayısıdır.

2.3.3 Fiberdeki mod sayısı

Kademe indisli fiberin içerisindeki ışık elektromanyetik modlar yardımıyla yayılır. Fiberin bulundurduğu özelliklere göre bu mod sayısı değişkenlik gösterir. Bu fiberlerde desteklenen mod sayısı V parametresi olarak adlandırılır. V Parametresi eşitlik 2.14'teki gibi hesaplanır.

$$V = NA \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (2.14)$$

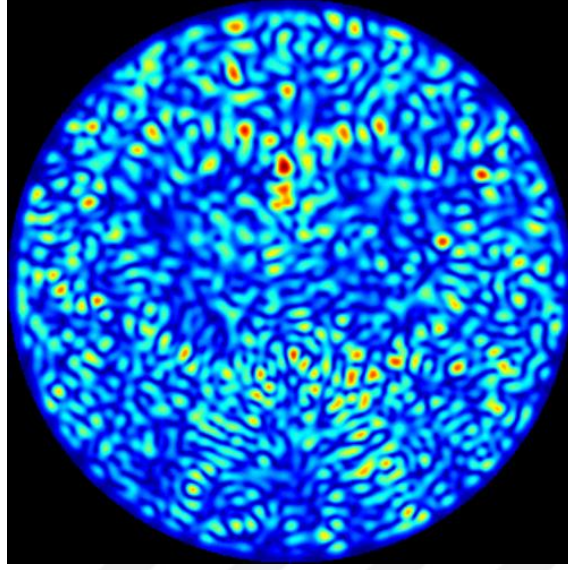
Buradaki a değeri fiber çekirdeğinin çapıdır. λ ise ışığın dalga boyudur.

Eğer V değeri 2.405'ten küçük olursa fiber tek modlu olarak isimlendirilir. Tek modlu fiberlerde fiber temel modda çalışarak modal dağılımı en aza indirir. Bu durum fiberin içerisindeki ışığın zayıflamasını oldukça azaltarak uzun mesafeli iletişim sistemlerinde tek modlu fiberleri avantajlı hale getirir.

3. FİBER SPEKTOGRAM SENSÖRLERİ

Fiber optik teknolojisinin gelişmesiyle fiber optik kablolar, sadece haberleşme alanında kullanılan bir teknoloji olmaktan çıkıp sensör uygulamalarında kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Hareketli parça içermemeleri, hafif malzemelerden üretilmeleri, elektromanyetik gürültüden az etkilenmeleri ve boyut olarak küçük olmaları sayesinde, mekanik ve elektriksel sensörlere avantajlara sahiptir (Grattan vd. 2000). Fiber optik sensörler, fiberin içindeki ışığın yoğunluğunun, modülasyon bilgisinin veya dalga boyu gibi nitelikleri kullanılarak ölçüm yapabilirler (Wu vd. 2017, Gong vd. 2011). Bu niteliklerin kullanılması elektriksel veya mekanik sensörlere göre fiber optik sensörlerin daha hassas ölçümler yapabilmesini sağlar. Bu sensörler başlıca olarak havacılık, biyomedikal ve robotik gibi hassas ölçümlerin kritik rol aldığı sektörlerde kullanılır.

Bu sensör çeşitlerinden biri olan fiber spektogram sensörleri (FSS) fiber optik bir olgu olan benek desenleri yardımıyla çalışır. Işık bir optik fiberden geçerken, mikro hatalar ve fiberin kırılma indisindeki küçük değişiklikler nedeniyle dalgalar çeşitli yönlerde dağılır. Dağılan ışık dalgalarının birbirine girişiminden kaynaklanan benzersiz görüntüler benek desenlerini oluşturur. Bu desenin görüntüsü optik fiberin çıkışında gözlemlenebilir. Benek deseninin yapısı, fiberin fiziksel özelliklerine, fiberin içindeki ışığın dalga boyuna ve fiberin merkezi geometrisine göre değişir. Bu desenleri analiz edilerek çeşitli ölçümlerin yapılması FSS'lerin ana prensibini oluşturur. Fiber optik sensörler çoğunlukla ışık dalgalarının zamansal niteliklerini kullanmaya dayanmaktadır, ancak FSS'ler ışığın uzamsal içeriğini kullanarak ölçüm yapan bir sensör çeşididir. Bu tip sensörlere literatürde modal sensör denmektedir. FSS'lerin başarımı, özellikle son 10 yıldaki gelişen görüntü analizi teknikleri ve kamera teknolojisi ile ciddi oranda artmıştır.



Şekil 3.1 Örnek benek deseni görüntüsü

3.1 Fiber Spektrogram Sensörleri Alanında Yapılan Önemli Çalışmalar

Crosignani, Daino ve Di Porto'nun (1974) çalışmaları, çok modlu fiberlerde, modların fiberin içindeki kısa mesafelerde tutarlı kaldığında, girişim meydana getireceğini ve bu durumda periyodik bir yoğunluk deseniyle sonuçlanacağını, daha uzun mesafelerde bu modların ilişkisiz hale geleceğini ve yoğunluk deseninin, fiber uzunluğundan bağımsız olarak sabit olacağını göstermiştir.

1990'lı yılların başında sanat eserlerindeki deformeleri benek desenlerini kullanarak tespit edilebilmesi için bir çalışma yürütülmüştür. Tek modlu bir fiber, CCD kamera ve görüntü işleme teknikleri ile fiber optik kablodan çıkan ışık eserin üzerine çarpıp yansırken oluşturdukları benek desenleri kamera yardımıyla yakalanıp bilgisayar üzerinde analiz edilmiştir. Bu şekilde elde edilen görüntüler ile eserler üzerindeki yapısal deformeler ve yüzey altı kusurları deneysel olarak tespit edildiği görülmüştür (Paoletti vd. 1993).

Zhang ve Ansari (2006) tarafından yapılan bir çalışmada, beton yapılarıdaki çatlak oluşumlarını tespit etmek ve çatlak boyutlarını analiz etmek için lazer benek yoğunluğu değişimine dayalı bir fiber optik sensör önerilmiştir. Önerilen sensör tasarımında çok

modlu bir fiber optik kablo kullanılmıştır. Gerilme veya yer değiştirme sebebiyle değişen benek deseninin görüntüsü kamera ile yakalanarak ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Bu görüntülerin analizi ile bir FSS'nin yapı sağlığı konusunda hizmet verebileceği ve çimentolu malzemelerde çatlak tespiti için tahribatsız ve hassas bir yöntem sağlayabileceği gösterilmiştir.

Rodriguez-Cobo vd. (2012) yaptıkları çalışmada titreşim ve sismik algılama için çok modlu fiber optik kabloları dayanan bir FSS önermiştir. Bu sensör tasarımı kurulum, fiber optik kabloya periyodik gerilmeyi indüklemek için radyal olarak titreşen bir piezoelektrik dönüştürücü (PZT) etrafına sarılmış üç farklı çekirdek çapındaki ($50\ \mu\text{m}$, $240\ \mu\text{m}$ ve $980\ \mu\text{m}$) ÇMF'leri içermektedir. Kurulumda bir CCD kamera, farklı titreşim frekanslarında (1–25 Hz) benek deseni değişimlerini kaydetmiştir. Çalışmada, daha büyük çaplara ($240\ \mu\text{m}$ ve $980\ \mu\text{m}$) sahip fiber optik kablolar hafif titreşimleri algılamak için uygun olduğu gösterilmiştir. $50\ \mu\text{m}$ gibi fiber optik kablolar, düşük frekanslı titreşimlere daha az duyarlı olduğu görülmüş ancak daha büyük ölçekli yapısal titreşimleri algılamak için daha uygun olabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada, ÇMF sensörlerinin titreşim tespiti için pratik olduğunu ve uygun çekirdek çaplarına sahip lifler seçilerek ve benek desenleri işlenerek hassasiyetin optimize edilebileceğini gösterilmiştir.

Redding vd. (2013) gerçekleştirdikleri araştırmada, kompakt, düşük maliyetli ve kararlı bir biçimde yüksek çözünürlüklü spektral analiz elde etmek için çok modlu optik fiberleri kullanan yeni bir spektrometre tasarımı sunmuştur. Bu tasarım, bir lazer ışığı ÇMF'e bağlamak için polarizasyonu koruyan tek modlu bir fiber ve fiberin çıkışındaki benek desenlerini yakalamak için bir kamera içerir. Çalışmada önerilen sistem, bilinen dalga boyları için benek desenlerini kaydederek ve bir iletim matrisi oluşturularak tasarlanmıştır. Bu matris sayesinde ölçülen benek desenlerine dayalı olarak bilinmeyen spektrumları yeniden oluşturulmuştur. Önerilen ÇMF spektrometresi kompakt boyutlarda, maliyet etkin ve düşük kayıp sağlayarak, saha çalışması veya biyomedikal teşhis gibi yüksek çözünürlüklü, taşınabilir spektral analiz gerektiren uygulamalarda iyi bir kullanım potansiyeline sahip olduğu savunulmuştur.

Valley, Seftler ve Shaw 2016 yılında, seyrek gigahertz bantlı RF sinyallerine sıkıştırılmış algılama (CS) yöntemini uygulamak için optik benek desenlerinin kullanılması amacıyla bir çalışma yaptı. Temel amaçları benek desenlerinin geleneksel Nyquist oranı örnekleme sistemlerine kıyasla verimli ve kompakt bir alternatif çözüm oluşturup oluşturamayacağını göstermekti. Bu çalışmada çok modlu fiber optik kablolar yardımıyla oluşturulan benek desenleri ile CS için çok kritik olan CS ölçüm matrisi (MM) türetilmiştir. Bu matris daha sonrasında simülasyonlara tabi tutularak, CS için gereken faz geçişlerini ve tutarlılığı sağlayıp sağlamadığı test edilmiştir. Çalışmanın çıktıları, optik teknolojilerin kullanımı ile kompakt ve verimli CS sistemlerinin yapılabileceğini göstermiştir.

Wang vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, sıcaklık, basınç ve kırılma indisi değişimlerini algılamak için benek deseni kullanan fiber optik bir sensör önerilmiştir. Sensör, benek desenleri oluşturmak için çekirdek ofseti olan tek modlu bir fibere çok modlu bir fiberin eklenmesiyle tasarlanmıştır. Bu bağlantı noktasına dönüşüm noktası adı verilmiştir. Çalışmada dönüşüm noktasına sıcaklık ve basınç uygulanmıştır. Sensör tasarımının sonuna eklenmiş çok modlu fiberin oluşturduğu dalga girişimleri fiberin çıkışında benek desenleri görüntüsü oluşturarak, dönüşüm noktasına etki edilen sıcaklık ve basınç büyüklüklerini ölçmeye olanak sağlamıştır. Kırılma indisi ölçümü sensörün etanol çözeltisine daldırılarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda kırılma indisi, sıcaklık ve basınç gibi büyüklüklerin benek desenleri kullanılarak ölçülebileceği gösterilmiştir.

Fujiwara vd. (2017) yaptığı çalışmada, benek desenlerinin analiz edilmesinde etkin bir yöntem önermiştir. Benek desen görüntüsünü ayrı analiz için alt görüntülere bölerek fiber optik benek desen sensörlerinin dinamik aralığını geliştirmeyi amaçlamıştır. Benek desenlerinin görüntüsü ızgaralara bölünerek, her bir görüntüye normalize edilmiş iç ürün korelasyonu (NIPC) yöntemi uygulanır ve yoğunluk değişiklikleri açısından ayrı ayrı analiz edilir. Bu yöntem sayesinde, ızgarayla bölünmüş görüntünün dinamik aralığı %200 oranında artırılmıştır. Bu çalışma ile benek deseni görüntülerinin dinamik aralığı artırılmış ve böylece gelecekteki FSS uygulamalarının başarısının artırılması için zemin hazırlanmıştır.

Jiao-jiao Wang, Shao-cheng Yan ve Fei Xu (2017) tarafından yapılan çalışmada, benek desenleri kullanılarak bir sıcaklık sensörü tasarımı önerilmiştir. Yazarlar, daha yüksek dereceli modlar oluşturmak için tek modlu bir fiber ile birleştirilmiş çok modlu bir fiber kullanan ve sıcaklığa duyarlı girişim desenleri veya benek grafikleri sağlayan bir FSS önermiştir. Çalışmada kullanılan sensör tasarımına farklı sıcaklıklar etki ettiğinde sensörün fiber optik benek desenlerindeki görüntüler değişir, sensör mevcut benek deseni ile bir referans desen arasındaki benzerliği korelasyon katsayısını kullanarak sıcaklık değişimini ölçmüş olur. Çalışmada kurulan düzenek, 1550 nm 'de ayarlanabilir bir lazer, çekirdek ofsetli bir TMF-ÇMF 'den oluşan bir fiber optik hat ve benek görüntülerini yakalamak için bir CCD kamera içermektedir. ÇMF, bir termal kontrolöre yerleştirilmiştir ve fiberin kontrollü sıcaklık değişimleri yaşamasına olanak tanımıştır. Çalışmada benek desenlerinin, her sıcaklık noktası için görüntüleri kaydedilir ve analiz edilir. Çalışmada, sıcaklık değişimleri ve korelasyon katsayısı arasında doğrusal bir sonuç görülmüştür. Sensör yaklaşık 0.00557° C'lik bir hassasiyetle ölçüm yapmıştır. Çalışmada önerilen FSS sisteminin, zorlu ortamlarda hassas ve düşük maliyetli sıcaklık ölçümü için pratik bir çözüm sunabileceği önerilmiştir.

Murray vd. (2019) sunulan araştırmada, gerinim algılaması gerçekleştirmek için geri saçılmış benek desenlerinin değişimini kullanan çok modlu fiber tabanlı bir gerinim sensörü gösterilmiştir. Gerinimi algılamak için çok modlu bir fiber içinde Rayleigh geri saçılımını prensibini kullanılmıştır. Sinyal solması yaşayabilen tek modlu sensörlerin aksine, çok modlu fiberin çeşitli mekansal modları, benek desenindeki genlik değişikliklerini yakalayarak kararlı ölçümler ortaya koymaya olanak sağlar. Bu durum çalışmada gerinimin yüksek çözünürlüklü olarak ölçülebilmesine imkân tanımıştır. Sensör geri saçılmış benek deseninin genlik dalgalanmalarını analiz ederek, 2.9 pε/ √ Hz 'lik bir gürültü tabanı, 1 kHz'de 74 dB'lik bir dinamik aralık ve 20 kHz'lik bir bant genişliği sunabildiğini göstermiştir. Bu elde edilmiş yüksek hassasiyet ve genişletilmiş dinamik aralık, önerilen sensörün hassas ve dağıtılmış gerinim ölçümleri gerektiren uygulamalar için uygunluğunu göstermiştir. Çalışma, sensöre geliştirilmiş gürültü direnci ve esneklik eklenildiğinde, gerçek dünya problemleri için geleneksel tek modlu gerinim sensörlerine karşı iyi bir alternatif olma potansiyelini vurgulamıştır.

Bennett vd. (2020) yaptıkları çalışmada kalp hızı, solunum hızı, nabız dalga hızı ve kan basıncı gibi hayati biyo-işaretleri kumaşla bütünleşmiş çok modlu optik fiber sensör sistemi kullanarak ölçmeye çalışmıştır. Sensör sistemi çok modlu fiber optik kablo, CCD kamera, lazer ve analiz için bir bilgisayar kullanılarak oluşturulmuştur. Kumaşa bütünleşmiş çok modlu fiber optik kablo kişinin göğse kalbin yakınına veya bileğe sarılmıştır. 10 saniye boyunca fiber optik kablonun çıkışında oluşan benek desenleri bilgisayar arayıcılığıyla kaydedilmiştir. Toplanan sonuçlar beş farklı kişiden elde edilip farklı sinyal işleme algoritmalarıyla analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda hayati biyometrik işaretleri giyilebilir bir FSS ile tutarlı şekilde ölçülebildiği gösterilmiştir.

Zhu vd. (2021) önerdikleri sensör modelinde, çok modlu fiber optik kablolar yardımıyla üretilen benek desenlerini kullanarak manyetik alan ölçümü yapılabileceğini öne sürmüştür. Çalışmada konik şeklinde çok modlu fiber optik kablo, manyetik sıvı ile dolu bir kılcal tüpe yerleştirilmiştir. Bu düzen, manyetik alanın fiber optik kabloyu etkilemesine ve benek deseninde ölçülebilir değişimler oluşturmasını sağlamıştır. Düzenekte farklı manyetik alan yoğunluklarını ve farklı sıcaklıklar altında oluşan benek deseni değişimlerini yakalamak için ayarlanabilir bir lazer ve bir kamera kullanılmıştır. Bu değişimler, referans ve ölçülen benek deseni arasındaki değişimleri değerlendirmek için Pearson korelasyonu kullanılarak, niceliksel olarak belirlenir. Sensör, 0,284 mT çözünürlükle 50–100 mT manyetik alan aralığında 0.00705 mT^{-1} hassasiyet göstermiştir. Çalışmada, önerilen sensörün kompakt ve uygun maliyetli olduğuna değinilmiş hem manyetik alan gücünü hem de yönünü ayırt etme potansiyeli olduğu vurgulanmıştır. Bu sayede bu tasarımın endüstriyel ve askeri navigasyon uygulamaları ve diğer alanlar için uygun olduğu öne sürülmüştür.

Pal vd. (2022) önerdikleri tasarımla, kan şekerinin ölçümünün bir FSS sistemindeki benek deseni analizi ile ölçülebileceğini gösterilmiştir. Sensör düzeneği, bir lazer kaynağı, bir ÇMF, bir dijital kamera ve bir AC manyetik alan jeneratörü ile kurulmuştur. Çalışmada ÇMF bir kişinin cildine dokundurulup, ışık hemoglobin de dahil olmak üzere kan bileşenleriyle etkileşime girmesine izin verilmiştir. Fiber lifinin kılıfı çıkarıldığında ışık doğrudan deriyle etkileşime girme şansı bulur, bu sayede ÇMF'nin oluşturulduğu benek desenleri kandaki glikoz sayesinde değişmiş olur. Çeşitli makine öğrenimi algoritmaları,

kaydedilen benek desenlerinden glikoz seviyelerini analiz etmek ve sınıflandırmak için kullanılmıştır. Benek desenlerinden gelen veriler, benek konumlarındaki kaymaları yakalayan bir çapraz korelasyon tekniği kullanılarak işlenmiştir. Makine öğrenimi modeli verilerin %60'ı üzerinde eğitilmiş, kalan %40 üzerinde doğrulanmıştır. Naif Bayes sınıflandırıcısı, glikoz seviyelerini ayırt etmede en yüksek doğruluğu (%90.1) göstermiştir. Yapılan çalışmada bu tasarımın, geleneksel glikoz ölçüm yöntemlerine ağrısız bir alternatif olabileceği vurgulanmıştır.

Philosof vd. (2023), ÇMF'lerin oluşturduğu benek desenleri ile borularda oluşan sızıntıların tespit edilebileceğine dair bir çalışma yürüttü. Çalışmadaki kurulumda, Farklı çekirdek boyutlarındaki (200 μm , 400 μm ve 600 μm) ÇMF, bir PVC borunun içine ve dışına yerleştirildi. Farklı sızıntı senaryoları oluşturularak benek desenleri bir kamera tarafından kaydedilmiştir ve sızıntıları sınıflandırmak için çeşitli makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda SVM ve K-En Yakın Komşu algoritmalarının en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Bu çalışmada önerilen sensörün, yer altı ortamlarında su sızıntılarını tespit etmek için boru hattı izlemede çok yönlü bir araç olabileceği vurgulanmıştır.

Zhao vd. (2023) yaptıkları araştırmada, Vernier etkisine dayalı bir fiber optik sensör önerisi sunmuşlardır. Bu sensör ile sıcaklık ve tuzluluğu ölçmek amaçlanmıştır. Önerilen sensör, iki farklı periyodik sinyali karşılaştırarak küçük ölçüm değişikliklerini büyüten Vernier etkisinden yararlanmıştır. ÇMF'lerde benekli desen analiziyle birleştirilen bu yaklaşım, hassas ve uygun maliyetli bir çözüm olmuştur. Sensör üzerine etki eden sıcaklık değişiklikleri ÇMF'lerin ürettiği benek desenlerinin dalga boylarını etkilemişken, tuzluluk değişiklikleri ise ışık yoğunluğuna etki etmiştir. Bu değişimler benek deseninin görüntüsünde değişikliğe sebep olarak analiz edilebilecek bir veri ortaya koymuştur. Benek desenleri sıfır ortalamalı normalleştirilmiş çapraz korelasyon kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada yapılan deneyler sıcaklık 25°C ila 70°C ve tuzluluk %0 ila %20 aralıkların için yürütülmüştür. Sensör, -0.0224 °C sıcaklık hassasiyeti ve -0.0439% tuzluluk hassasiyeti elde etmiştir. Yazarlar, Vernier etkisi ve benek deseni analizini birleştirerek bu fiber optik sensörün güvenilir, yüksek hassasiyetli ölçümler elde

edebileceğini ve karmaşık izleme senaryoları için umut verici bir araç haline geldiğini önermiştir.

Hyuek Jae Lee 2024 yılında yaptığı çalışmasıyla, benek desen oluşumlarını derin öğrenme algoritmalarıyla analiz ederek ağırlık ölçekbilen bir sensör tasarımı sunmuştur. Deneydeki kurulum, benek desenlerini yakalamak için bir Raspberry Pi kamerasına bağlı çok modlu bir fiber içermektedir. ÇMF'in yarattığı benek desenleri, derin öğrenmeden yararlanan kodsuz bir araç olan Google Teachable Machine tabanlı bir sınıflandırıcı tarafından işlenmiştir. Deneyde kurulan düzeneğe 0 kg ile 2.0 kg arasında bulunan ve her biri arasında 200 gr artış bulunan 11 adet ağırlık verilerek test edilmiştir. Çalışmada tasarlanan sensör modeli küçük ağırlık değişikliklerini bile algılayarak yüksek hassasiyete ulaşmıştır. Ancak yazar bu çözünürlüğün hassas ağırlık ölçümü için gereken doğruluktan yoksun olduğunu belirtmiş gelecek çalışmalar için daha büyük veri kümeleri kullanılarak derin öğrenme algoritmasının geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır.

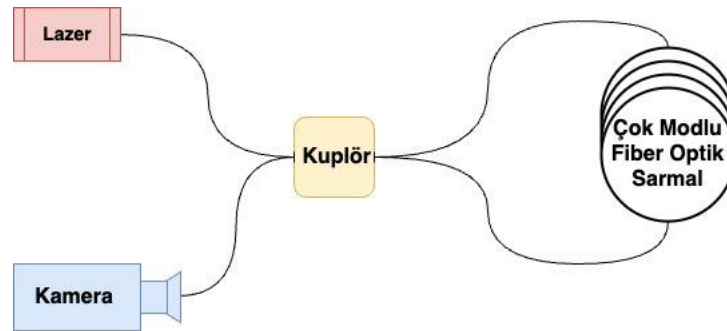
Şerbetçi vd. (2024), benek desenlerinin derin öğrenme tabanlı analizi ile bir fiber optik kırılma indisli (RI) sensörünü tasarımı önermiştir. Araştırmadaki kurulum, ışık kaynağı olarak 635 nm bir lazer diyot, çok modlu fiber (105/125 μm), RI varyasyonu için bir çözelti kabı ve benek desenlerini yakalamak için bir CCD kamera içermektedir. Değişen RI'lerin çözeltileri, damıtılmış suyun etanol veya dimetil sülfoksit (DMSO) ile karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Yakalanan benek deseni görüntüleri, ölçüm hassasiyetini artırmak için çeşitli görüntü işleme teknikleri ile işlenmiş, hassasiyeti azaltabilecek tüm görüntü karşılaştırmalarından kaçınmak için görüntüler 110x110 piksellik segmentlere bölünmüştür. Bu görüntüler ile çalışmadaki CNN tasarımı eğitilmiştir. Çalışmada önerilen sensörün performansı plazmonik sensörler ve fiber Bragg kafesleri gibi diğer RI sensörlerinin performansına eşit veya daha üstün olduğu gösterilmiştir.

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında önerilen fiber optik jiroskop modeli anlatılacaktır. Bu modelin geçerliliği için yapılan simülasyon çalışmaları, bu çalışmalardan elde edilen benek desenli görüntüler, ön işleme metotları ve analiz sonuçları gösterilecektir. Aynı zamanda tez kapsamında önerilen jiroskop konseptinin hem simülasyon hem de laboratuvar ortamında test edilebilmesi için kullanılan materyaller, yazılımlar ve algoritmalarından bahsedilmiştir.

4.1 Tezin Ana Fikri

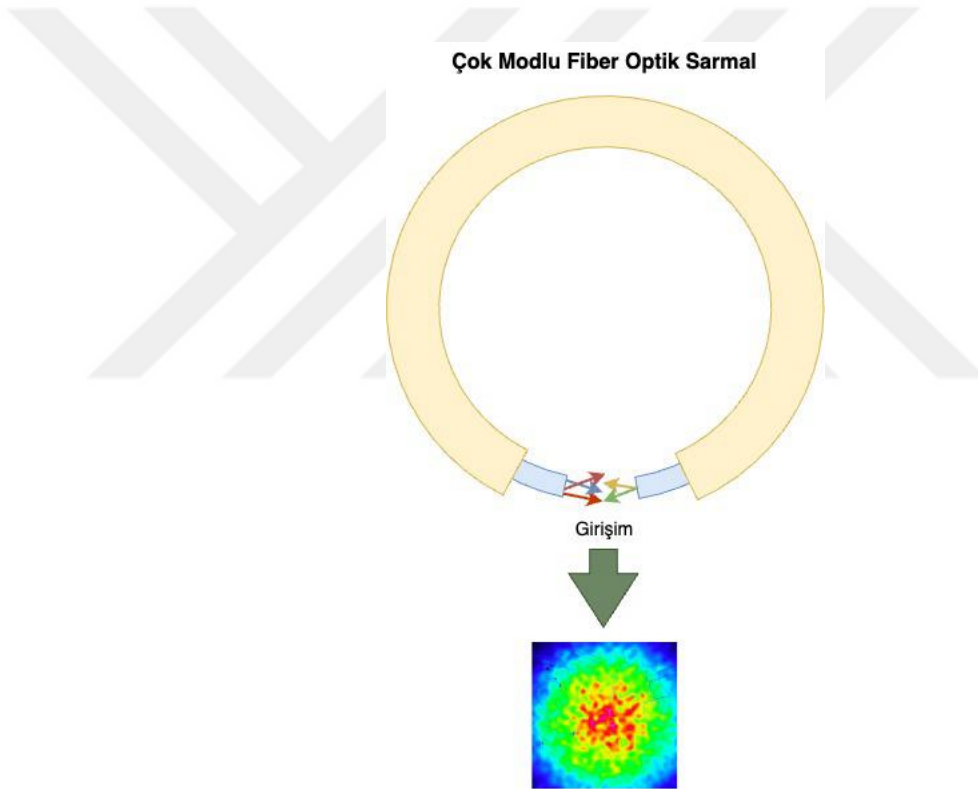
Tezin 2. Bölümünde bahsedilen fiber optik spektrogram sensörleri (FSS) hakkında son yıllarda literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Fiber optik benek desenini kullanılarak çeşitli metriklerin ölçülmesi fikri, birçok yeni sensör tasarımına fikir kaynağı olmuştur. Bu konsept ile FSS'lerin bir fiber optik jiroskopta açısal hızın analizi için kullanılma fikri bu tezin ana önermesi olmuştur. Bu önermedeki fiber optik jiroskop tasarımı geleneksel fiber optik jiroskop tasarımında kullanılan tek modlu fiber optik kablo yerine benek deseni oluşturabilen çok modlu fiber optik kablo kullanır ve açısal hızın analizi için fotodedektör yerine bir CCD kamera tasarımı yer almaktadır. Şekil 4.1'de çok modlu fiber optik kullanan jiroskop tasarımının basit bir gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.1 Deney düzeneği şeması

4.2 Tezin Teorik Altyapısı

Bölüm 4.1’de konsept olarak anlatılan çok modlu fiber optik jiroskop tasarımının teorik alt yapısı benek desenlerinin analiz edilmesiyle açısal hız ölçümü prensibine dayanmaktadır. Fiber optik sarmalın içerisinde SY ve SYT yönünde ilerleyen ışık demetleri sarmalın çıkışında bir araya geldiğinde bir girişim oluşturur. Ancak klasik FOJ’un aksine bu tasarımda kullanılan optik fiber tek modlu değil çok modludur. Bu sebepten dolayı SY ve SYT yönünde hareket eden ışık dalga modları fiber sarmalın sonunda bir girişim oluşturduğunda bir benek deseni görüntüsü elde edilir. Şekil 4.2’de bu durum görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Çok modlu fiber sarmalın sonunda oluşan benek deseni

Optik jiroskobun durağan olduğu durumda yani açısal hızın olmadığı durumda sarmalın çıkışında elde edilen benek deseni görüntüsü aynı kalır. Açısal hızın sıfır olduğu durumda elde edilen benek deseni görüntüsü referans görüntü olarak kabul edilir.

Optik jiroskoba uygulanan dönü hareketi sonrası SY ve SYT yönünde ilerleyen ışık huzmeleri arasında Sagnac etkisi dolayısıyla bir optik yol farkı oluşur. Bu oluşan optik yol farkı SY ve SYT yönünde ilerleyen ışık huzmelerinin oluşturduğu girişimi etkileyerek, fiber sarmalın çıkışında oluşan benek deseni görüntüsünü değiştirir. Benek deseninin referans görüntüyle olan değişim miktarı, oluşan optik yol farkıyla yani açısal hız ile doğru orantılıdır. Optik jiroskobun çıkışında elde edilen görüntünün referans görüntüyle olan değişim miktarının çeşitli teknikler ile ölçülmesi sayesinde çok modlu optik fiber kullanan bir optik jiroskop üzerinde açısal hız elde edilmiş olur.

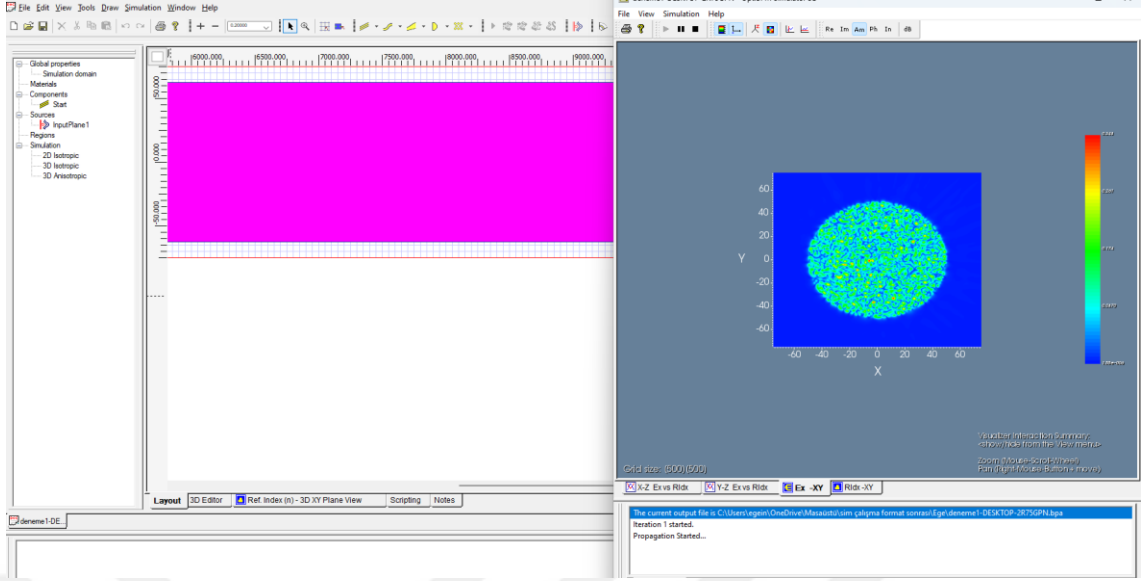
Teorik olarak açıklanan çok modlu fiber optik jiroskobun tasarlanması ve açısal hız ölçümünün gerçekleştirilmesi için çalışmalar simülasyon ortamında yapılmıştır. Tezin ilerleyen aşamalarında bu çalışmalar laboratuvar ortamına taşınarak benek deseni üzerinden açısal hızı ölçebilen gerçek bir fiber optik jiroskop tasarlanmış ve test edilmiştir. Daha sonra simülasyon ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlar analiz edilmiş ve bu sonuçların birbirleriyle olan tutarlılıkları tartışılmıştır.

4.3 Simülasyon Çalışması

Bu bölümde tez çalışması sırasında yapılan simülasyon çalışması ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Simülasyon çalışmasının nasıl yapıldığı, simülasyon ortam parametreleri ve elde edilen sonuçlardan oluşturulan veri kümesi detaylandırılmıştır.

4.3.1 Simülasyon senaryosu

Benek deseni görüntüsünü kullanan fiber jiroskop tasarımının bir benzetimini yapabilmek için ışığın fiber içinde yayılımını hesaplayan bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılımda ışığın kılavuzlandığı ortam bir adet çok modlu fiber olarak tasarlanmış ve girişine uygulanan ışığın fiber boyunca ışık yayılım yöntemi ile sayısal olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3 'de 21000 μm uzunluğunda bir adet çok modlu optik fiber boyunca ışığın yayılım simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

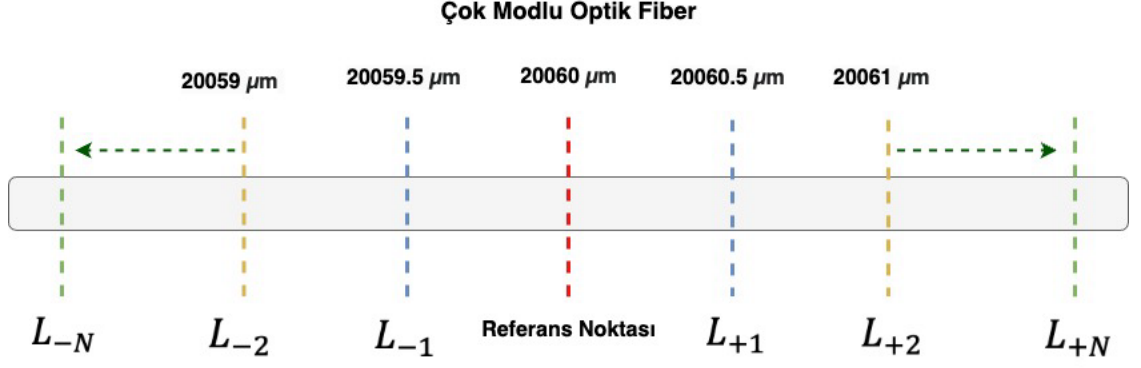


Şekil 4.3 Simülasyon ortamı

Optik fiberin girişine doğrudan bir lazer demeti uygulamak yerine, çok modlu fiberin çıkışında gözlemlenen benek deseni görüntüsünü oluşturan ışık demeti bir ışık kaynağı olarak uygulanmıştır. Bu ışık demeti optik fiberin desteklediği tüm modların girişimi sonucu ortaya çıkacağı için simülasyon öncesinde bir sayısal hesaplama yöntemi ile hesaplanmıştır (Saleh vd. 2019). Işık yayılım metodunu kullanan bu simülasyon ortamı, giriş sinyalinin oluşturduğu fiber optik benek deseninin fiber hattın istenilen noktasında görüntülenip kaydedilmesine olanak sağlar. Sagnac etkisi ile oluşan optik yol farkının bu tasarımda temsil edilebilmesi için bir referans noktası seçilmiştir. Bu referans noktası hattın 20060 μm noktasıdır ve optik yol farkının sıfır olduğu ($\Delta_L = 0$) olduğu durumu temsil eder.

Bu noktada oluşan benek deseni görüntüsü açılal hızın sıfır olduğu anda fiber optik jiroskobun çıkışında elde edilen görüntü olur. Bu referans noktasının ilerisinde kalan noktalar optik yolun fiberin içindeki ışık için uzadığı, gerisinde kalan noktalar ise optik yolun fiberin içindeki ışık için azaldığı durumları temsil eder. Bu noktalar fiber optik jiroskoptaki birbirine ters yönlerde ilerleyen iki fiber optik hattın temsili gösterimidir. Şekil 4.4'te simülasyon ortamında oluşturulmuş optik fiberin nasıl yorumlandığı gösterilmiştir. Şekildeki pozitif yöndeki L noktaları fiber optik yolun ışık huzmesi için

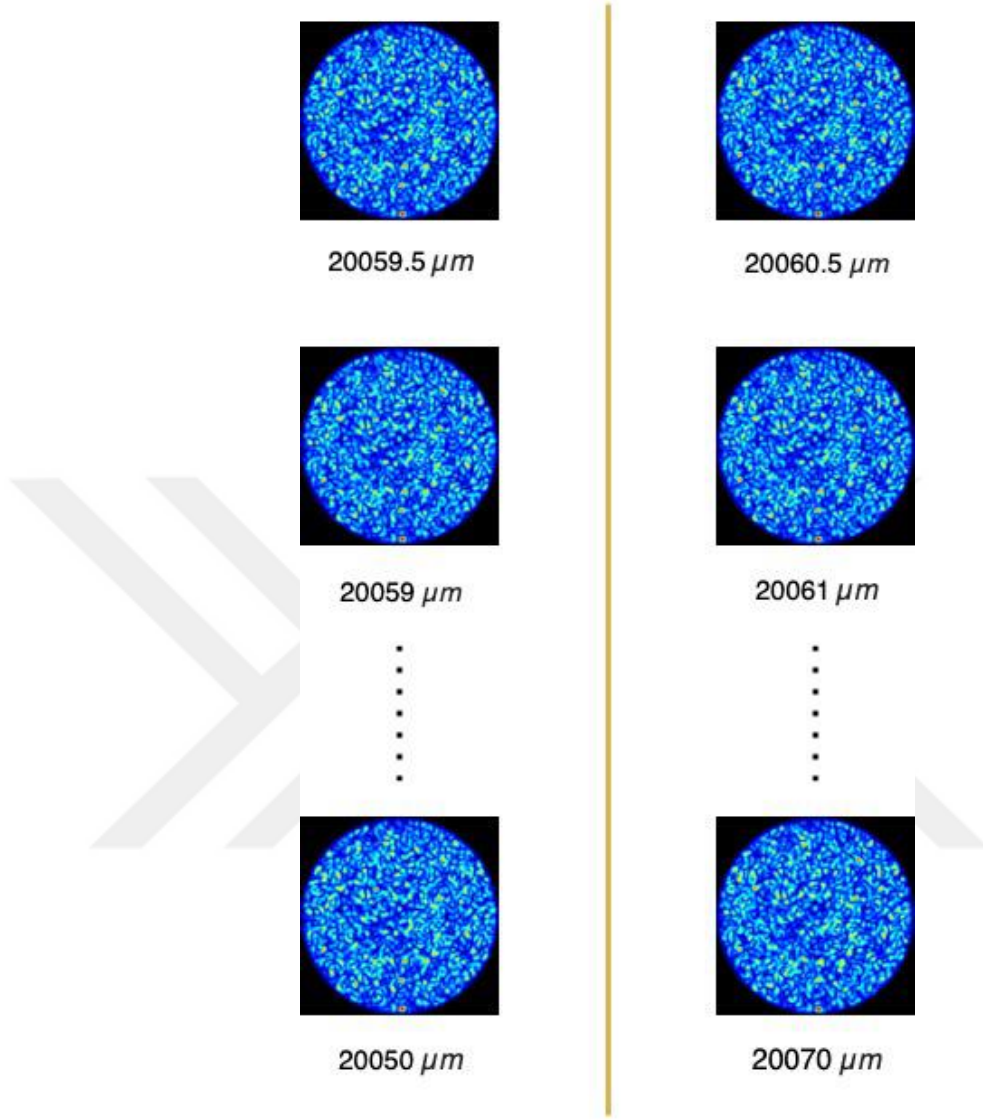
uzadığı yönü temsil ederken, negatif yöndeki L noktaları fiber optik yolun ışık huzmesi için kısaldığı yönü temsil eder.



Şekil 4.4 Simülasyon şeması

Bu çalışma sırasında, her birinin arasında $0.5 \mu m$ fark olacak şekilde referans noktasının ilerisinden 120 ve gerisinden 120 toplam 240 adet benek deseni görüntüsü elde edilmiştir. Her görüntü ve onun referans noktasına göre simetriği Sagnac etkisinin oluşturduğu Δ_L 'lık optik yol farkıyla oluşmuş benek deseni görüntülerini temsil eder. Örnek olarak referans görüntüsüne göre $20057 \mu m$ ve $20063 \mu m$ noktaları birbirine simetriktir. Bu görüntüler Sagnac etkisi sonucu birbirine ters yönde ilerleyen fiber optik hatların birinin $3 \mu m$ uzamasını diğerinin ise $3 \mu m$ kısalmasını temsil eder. Bu örnekte toplam optik yol farkı ($2\Delta_L$) $6 \mu m$ olmuş olur. Şekil 4.5'te oluşturulan veri kümesinin genel bir gösterimi verilmiştir.

Referans Noktasına Göre Simetrik Görüntüler



Şekil 4.5 Örnek simülasyon verileri

4.3 Simülasyon Görüntülerinin Korelasyon Ölçümü

Ön işlemeden sonra görüntüler üzerinde çalışılmaya uygun hale gelmiştir. Fiber jiroskop modelinin durağan anındaki referans görüntüsü ile jiroskoba uygulanan dönü hareketi sırasında elde edilen görüntülerin değişim miktarları Bölüm 4.3.2’de gösterimi yapılan Pearson korelasyon tekniği ile ölçülmüştür.

4.3.1 Veri kümesinin oluşturulması

Simülasyon yazılımı kullanarak referans noktası dışında farklı fiber uzunlukları sonunda şekillenen 240 adet benek desenli görüntü elde edilmiştir. Fiber optik sarmalının sonunda oluşan ışık girişimini modellemek için referans noktasına göre simetrik pozisyonlardan elde edilen görüntüler birbiri ile toplanmıştır. Buradaki toplama işlemi, ilk akla gelen basitçe görüntü piksellerin toplanması işleminden oldukça farklıdır. Bu işlem, fiber sarmalında saat yönünde ve saatin tersi yönünde dolanan iki ışığın çıkışta birleşmesi olarak ifade edilebilir. Başka bir ifadeyle, fiber optik kuplörün iki girişine ulaşan ışığın, kuplör çıkışında kompleks elektrik alanların toplanması olarak açıklanabilir. M adet mod taşıyan çok modlu bir fiberde optik alanlar kompleks genlik formunda eşitlik 4.1 ile hesaplanabilir.

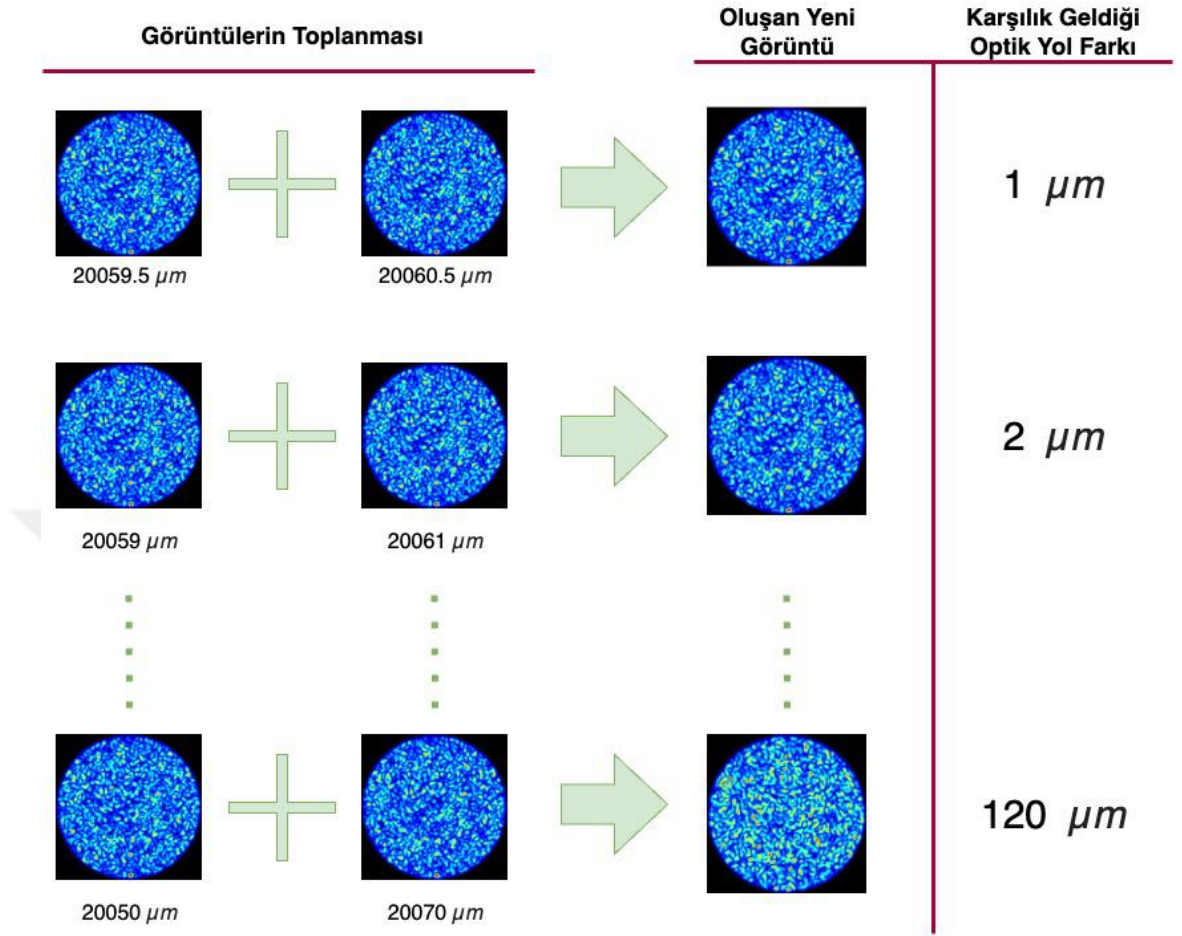
$$A(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m(x, y) \exp[j\varphi_m(x, y)] \quad 4.1$$

Eşitlik 4.1’de m’inci mod için a_m genliği ve φ_m faz değerini belirtir. Optik fiber çıkışında x-y ekseninde elde edilen görüntünün yoğunluğu eşitlik 4.2’de belirtilmiştir.

$$I(x, y) = [A(x, y)]^2 = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} a_m a_n \exp[j\varphi_m - j\varphi_n] \quad 4.2$$

Fiber çıkışındaki benek deseni görüntü için iki farklı yoldan ulaşan tüm optik modların fiber kesit yüzeyinde oluşturacağı ışık şiddeti eşitlik 4.2’de ile verilen $I(x, y)$ hesaplanarak elde edilebilir.

Bu işlem sonucu, $1 \mu m$ ’den $120 \mu m$ ’ye kadar değişen optik yol farkları için 120 adet benek deseni görüntüsü elde edilmiş olur. Şekil 4.6’da bu anlatım şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Simülasyon sonuçlarından veri kümesi elde edilmesi

4.3.2 Pearson korelasyon katsayısı

Örneklerde r ve popülasyonlarda ρ olarak gösterilen Pearson korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi niceliksel olarak belirler. Değeri -1 (mükemmel negatif korelasyon) ile +1 (mükemmel pozitif korelasyon) arasında değişir ve 0, korelasyon olmadığını gösterir (Sedgwick, P. (2012)). Pearson korelasyon formülü eşitlik 4.3 ile ifade edilir.

$$r = \frac{\sum_i \sum_j (A(i,j) - A')(B(i,j) - B')}{\sqrt{\sum_i \sum_j (A(i,j) - A')^2 \sum_i \sum_j (B(i,j) - B')^2}} \quad 4.3$$

Eşitlik 4.3'te $A(i, j)$ birinci matrisin i ve j konumundaki değerini, $B(i, j)$ ikinci matrisin i ve j konumundaki değerini, A' birinci matrisin tüm elemanlarının ortalaması B' ikinci matrisin tüm elemanlarının ortalamasını temsil eder.

4.3.3 Segmentasyonel korelasyon katsayısı

Benek desenli görüntüler genel bir bakışla birbirine oldukça benzer görüntülerdir. İki benek desenli görüntü ilişkisel yönden birbirinden oldukça farklı olmasına rağmen korelasyon katsayısı hesaplandığında bu katsayı 0.4 değerinin altına düşmemektedir. Bu aşamada, tam (bütün) bir görüntü yerine görüntüyü bölütlere ayırarak bölütler üzerinde korelasyonun hesaplanması, görüntüler arası farkı anlamlandırmak için daha iyi sonuçlar üretebilir. Bu teknik eşitlik 4.4'teki gibi, iki görüntüdeki karşılıklı bölütler arası korelasyon katsayılarının ayrı ayrı hesaplanarak ve aritmetik ortalamasını alarak kolayca uygulanabilir. Böylece daha geniş bir korelasyon değişim aralığında görüntüler arası değişimin ölçeklemesi yapılabilir (Şerbetçi vd. 2024). Bu sebepten dolayı, benek deseni görüntüler 100x100 piksellik bir çerçeve ile segmentasyon yöntemi kullanılarak taranmıştır. Aynı piksel değerlerine sahip segmentler eşitlik 4.4 kullanılarak hesaplanmış ve toplam korelasyon değeri duyarlılığı artırmak için segment sayısına bölünmüştür.

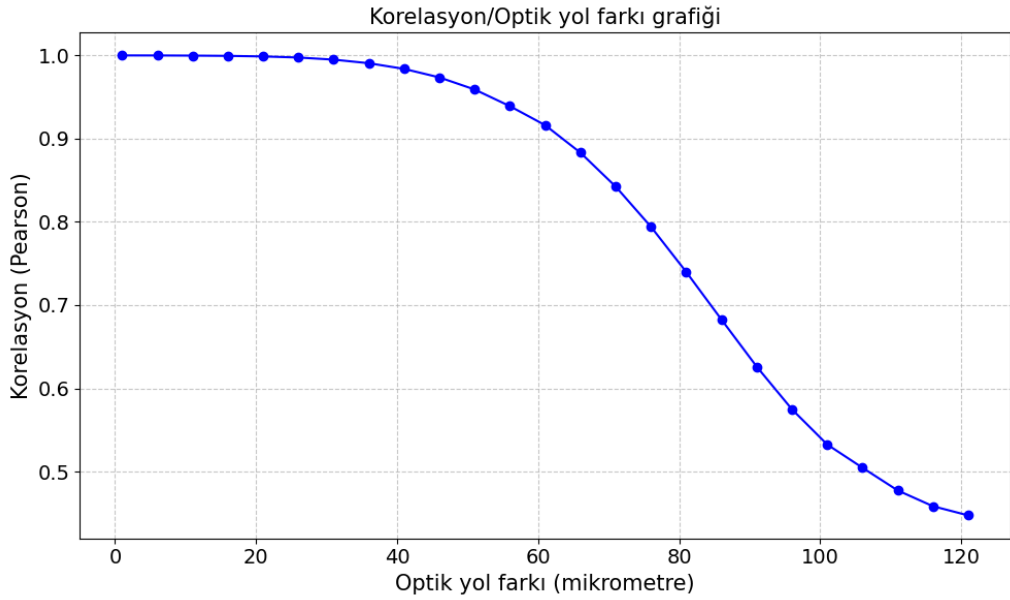
$$CC = \frac{\sum(M_i - M')(N_i - N')}{\sqrt{\sum(M_i - M')^2 \sum(N_i - N')^2}} \quad 4.4$$

Eşitlik 4.4'te M_i referans görüntüyü temsil ederken N_i ilişkilendirilecek diğer görüntüyü temsil eder. M' ve N' bu görüntülerin ortalamasını belirtir.

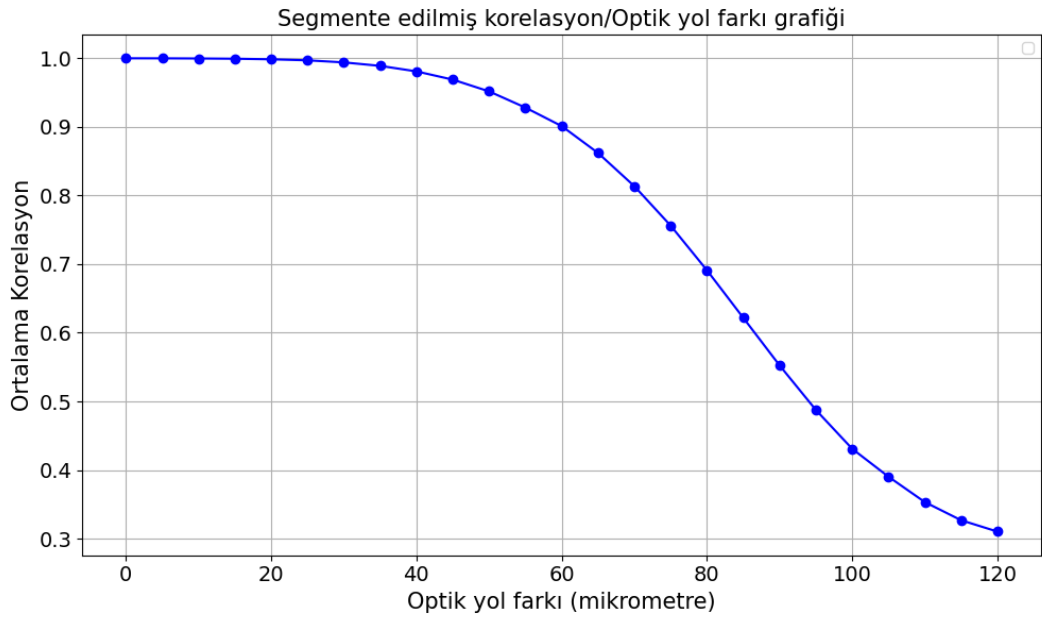
4.3.4 Simülasyon sonuçlarının korelasyon ölçümünün yapılması

1 μm 'den 120 μm 'ye kadar olan optik yol farklarına karşılık gelen benek deseni görüntüleri ile referans görüntü arasında korelasyon ölçümü yapılarak sonuçlar elde

edilir. Bölüm 4.2 tezin teorik kısmında beklenildiği gibi optik yol farkı arttıkça oluşan benek deseni görüntüsü referans görüntüden uzaklaşır. Bunun sonucunda optik yol farkı arttıkça korelasyon düşmüş olur. Korelasyondaki değişim şekil 4.7 ve şekil 4.8’de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Pearson korelasyonunun optik yol farkına göre değişim grafiği



Şekil 4.8 Segmente korelasyonun optik yol farkına göre değişim grafiği

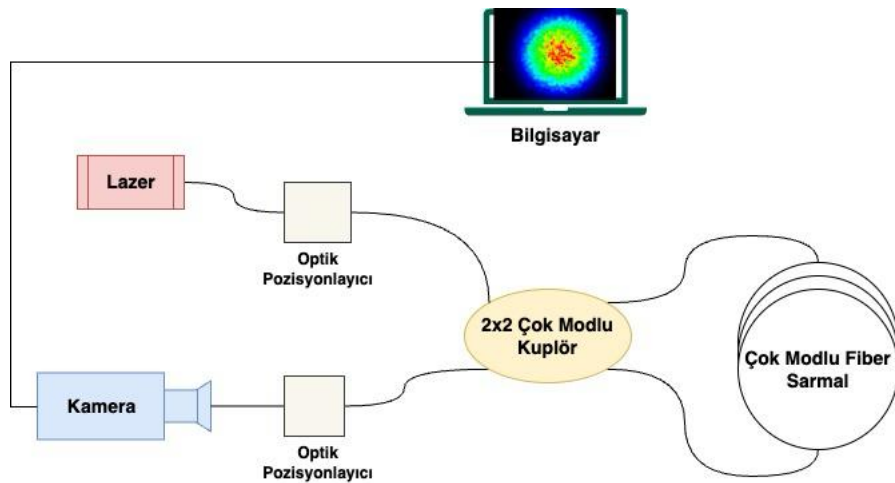
İki farklı korelasyon grafiği benzer şekiller üretmiştir. Ancak segmente edilmiş korelasyon tekniği, optik yol farkı artışını standart Pearson Korelasyonuna göre CC' nin daha geniş bir aralığında ölçeklemiştir. İki korelasyon tekniğinin detaylı sonuçları çizelge 5.1'de verilmiştir.

4.4 Deneysel Çalışma

Tezin ana fikri doğrultusunda, Bölüm 4.1'de detaylandırılan jiroskop tasarımının, gerçek bir jiroskop düzeneğinde teorik çalışmalarda öngörülen sonuçları sağlayıp sağlamadığını test edebilmek amacıyla bir optik jiroskop deney düzeneği kurulmuştur. Optik jiroskoba farklı hızlarda dönü hareketi uygulanarak çıkışında elde edilen benek deseninin görüntüsü kaydedilmiştir. Daha sonrasında bu benek desenleri analiz edilerek açısal hızın ölçülüp ölçülemeyeceği analiz edilmiştir.

4.4.1 Deney ortamı ve deney senaryosu

Deney ortamının oluşturulması için ilk olarak bir döner tabla mekanizması oluşturulmuştur. Bu mekanizma üzerine CCD kamera, lazer kaynağı, optik sabitleyiciler ve diz üstü bilgisayar yerleştirilmiştir. Bu yerleşim şekil 4.9'da şematik olarak gösterilmiştir.

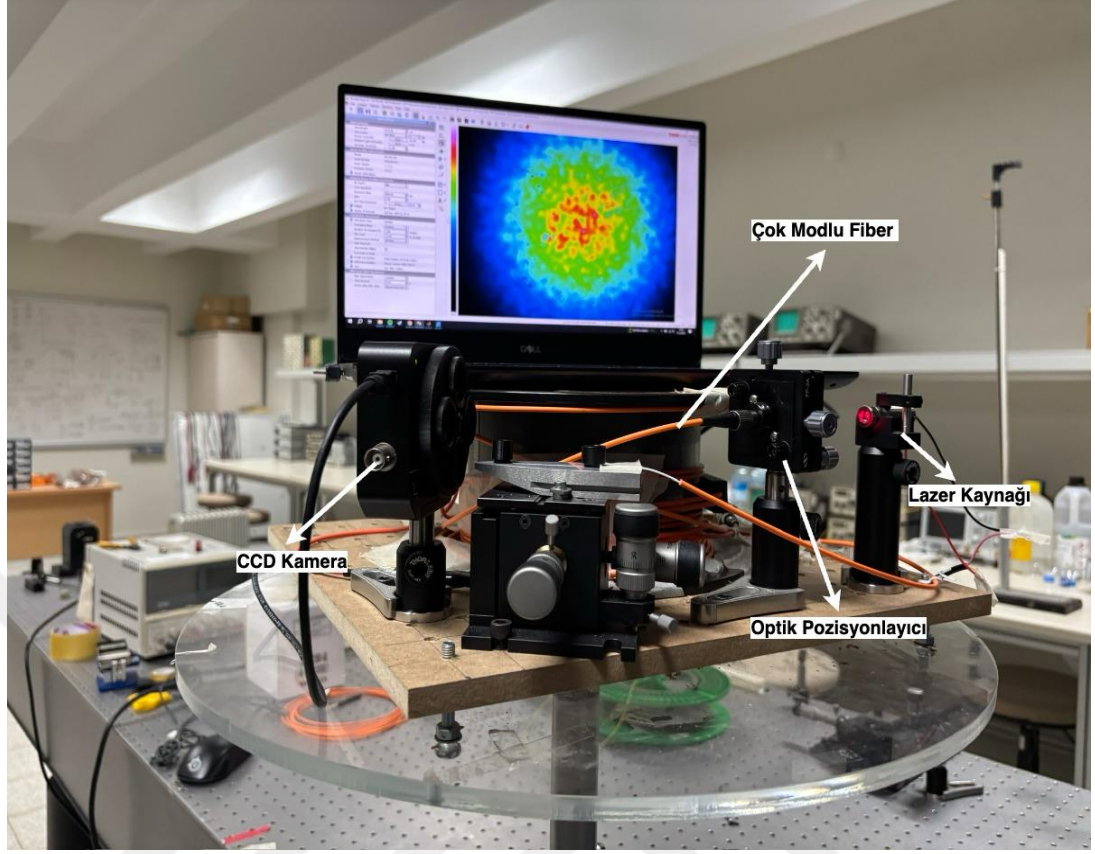


Şekil 4.9 Deney düzenek şeması

Bu deney düzeneğinin işleyiş senaryosu şöyledir; lazer kaynağından çıkan ışık 50:50 kuplör yardımıyla fiber optik sarmalın iki girişine aynı anda uygulanır. Fiber optik sarmalın çıkışında bir birilerine zıt yönlerde ilerleyen çok modlu ışık demetleri girişim yaparak, fiber kuplöre geri döner. Çok modlu fiberde modların girişimi sonucu bir benek deseni oluşur. Bu benek deseninin kamera yardımıyla yakalanması sonucu jiroskop sisteminin ham verisi olan görüntü elde edilmiş olur. Farklı açısal hızlarda değişen benek deseni görüntüler analiz edilerek açısal hızın ölçümü gerçekleştirilir. Sistemin durağan olduğu yani açısal hızın sıfır olduğu durumda kamera öncesi fiber çıkışında oluşan benek deseni görüntü referans görüntü olarak kabul edilir.

Laboratuvar ortamında kurulan bu jiroskop düzeneğinde 80 metre uzunluğunda Thorlabs FG LCA150 kodlu çok modlu fiber optik kablosu kullanılmıştır. Kullanılan fiber sarmalın yarıçapı 9 cm'dir. Bu fiber optik kablo 0.22 sayısal açıklık (numerical aperture) değerine ve düşük hidroksil içeriğine sahiptir. Fiberin çekirdek çapı $105 \mu m$ 'dir. Deney düzeneğinde lazerin odaklanmasını kolaylaştırmak için Newport FP-2A optik pozisyonlayıcı kullanılmıştır. Oluşan optik benek desenlerinin yakalanması için Thorlabs firmasının BC,lad106n-vis CCD kamerası kullanılmıştır. Deney kurulumundaki lazerin dalga boyu $635 nm$ 'dir. Şekil 4.10'da laboratuvar ortamındaki kurulum gösterilmiştir.

Deney sırasında jiroskop tablası 3 farklı hızda döndürülerek değişen benek deseninden 2 saniyede bir olmak üzere örnekler alınmıştır. Optik jiroskop 3.307 rad/s, 2.99 rad/s ve 2.51 rad/s ilk açısal hız ile döndürülüp, dönü hareketi boyunca optik sarmalın çıkışında oluşan benek deseni görüntüleri kaydedilmiştir. Platformun hız zaman grafiğinin elde edilmesi için 1 saniye aralıklarla hızı ölçülmüştür ve elde edilen değerlere eğri uydurma tekniği uygulanmıştır.



Şekil 4.10 Laboratuvar düzeneği

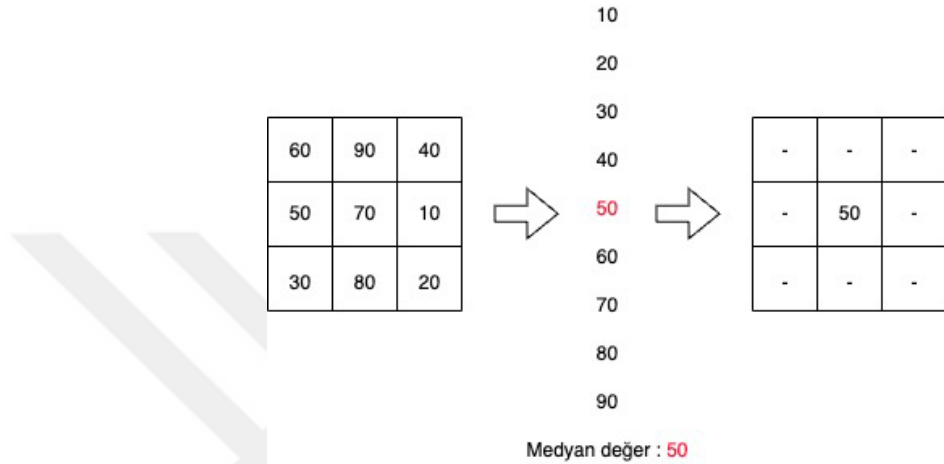
4.4.2 Görüntü ön işleme

CCD kamera ile elde edilmiş görüntüler üzerinde ön işleme prosedürü uygulanır. Ön işlemenin amacı kamera ile elde edilen görüntülerdeki içerik olarak zengin kısımları ortaya çıkarmak ve görüntüler üzerinde yapılacak diğer işlemler için verileri uygun hale getirmektir.

4.4.2.1 Medyan filtresi

Medyan filtresi bir görüntüdeki gürültüyü önemli ölçüde azaltmak için kullanılan doğrusal olmayan sıralı istatistiksel dijital filtreleme tekniğidir. Medyan filtresi, görüntüdeki her pikseli sırayla filtreler ve yakın komşu pikselleri, ilgili pikselin çevresini temsil edip etmediğine karar vermek için kullanılır. Normalde, piksel değerini komşu piksel değerlerinin ortalamasıyla değiştirmek yerine, medyan filtresi onu bu değerlerin

medyanı ile değiştirir. Yani, komşu piksellerden gelen değerler önce sayısal sıraya göre sıralanır ve ardından söz konusu pikselin değeri ortadaki (medyan) piksel değeriyle değiştirilir. Komşu piksellerin seçimi bir çerçeve ile olur ve bu çerçeveler çeşitli şekillere sahip olabilir (Boateng vd. 2012). Şekil 4.11’de 3x3 lük bir çerçevede medyan filtresi uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Medyan filtresi örneği

4.4.2.2 Gri tonlama filtresi

Renkli dijital resimlerin her bir pikseli kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere üç renk bileşeniyle oluşur ve bu bileşenlere karşılık gelen yoğunluk değeri ile tanımlanır. RGB bir görüntü eşitlik 4.5 şeklinde ifade edilebilir.

$$I_{RGB} = (F_R, F_G, F_B) \quad (4.5)$$

Buradaki $F_R(x, y)$ kırmızı kanaldaki (x, y) pikselinin yoğunluğu, $F_G(x, y)$, yeşil kanaldaki (x, y) pikselinin yoğunluğu ve $F_B(x, y)$, mavi kanaldaki (x, y) pikselinin yoğunluğudur. (Kumar vd. 2010). Gri tonlama filtresi ile RGB görüntüdeki üç renk kanalını tek bir parlaklık değerine indirger. Bu sayede görüntü üzerinde yapılacak işlemlerin performans maliyeti düşerken, görüntüde var olan gürültü ve ekstra detaylar filtrelenmiş olur. Gri tonlama filtresi genelde BT 601 isimli bir standart ile yapılır. Eşitlik 4.6’da gösterilen bu standart ile ilgili piksel değerindeki kırmızı, yeşil ve mavi değerleri belirli katsayılar ile

çarpılarak piksel değeri tek bir yoğunluk değeri şeklinde ifade edilir. İnsan gözünün en duyarlı olduğu renk yeşil olduğu için dönüşümdeki en büyük katsayı yeşil renge verilmiştir.

$$I_{Gri} = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (4.6)$$

4.4.2.3 Gamma düzenlemesi

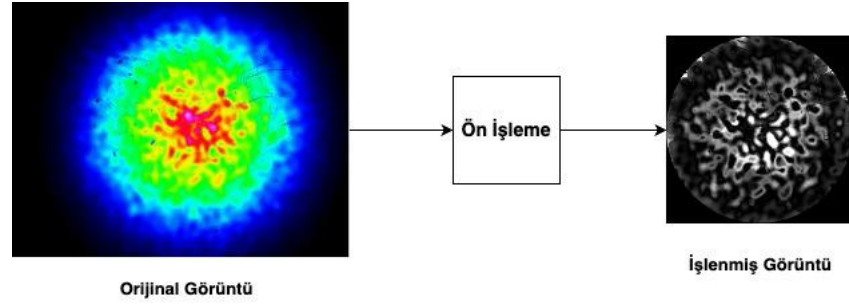
Kontrast artıma teknikleri görüntüdeki parlaklığı ve kontrastı değiştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik sayesinde görüntüdeki istenen noktaların daha belirgin hale gelmesi sağlanır. Bu teknik eşitlik 4.7’de gösterilmiştir.

$$I_{çıkış} = c. I_{giriş}^{\gamma} \quad (4.7)$$

Burada c ölçekleme katsayısıdır, γ ise kullanılan Gamma katsayısıdır.

4.4.2.4 Ön işleme uygulaması

Bu ön işleme sırasında elde edilmiş renkli görüntüler ilk önce gri tonlamaya çevrilir. Daha sonrasında görüntülere çapı 320 piksel olacak şekilde bir daire maskeleme uygulanır ve görüntü daire maske etrafında kırpılır. Kırpılan görüntü 500x500 piksel boyutlarına yeniden boyutlandırılır. En son işlem olarak yeniden boyutlandırılmış görüntüye medyan filtreni uygulanıp ardından görüntüye Gamma düzenlemesi işlemi uygulanır. Bu sayede kameradan kaydedilen benek deseni görüntülerinin önemli kısımları elde edilerek, bilgi içermeyen kısımları atılmış olur. Şekil 4.12’de ön işleme sonucu oluşan görüntü şematik olarak gösterilmiştir.



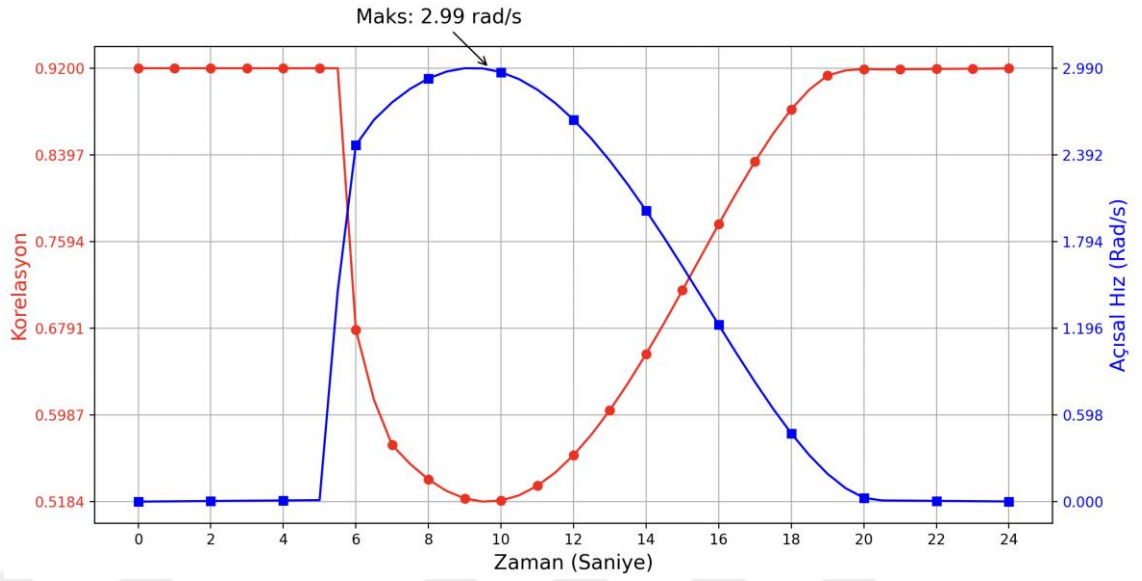
Şekil 4.12 Ön işleme şeması

4.4.3 Laboratuvar sonuçlarının korelasyon ölçümünün yapılması

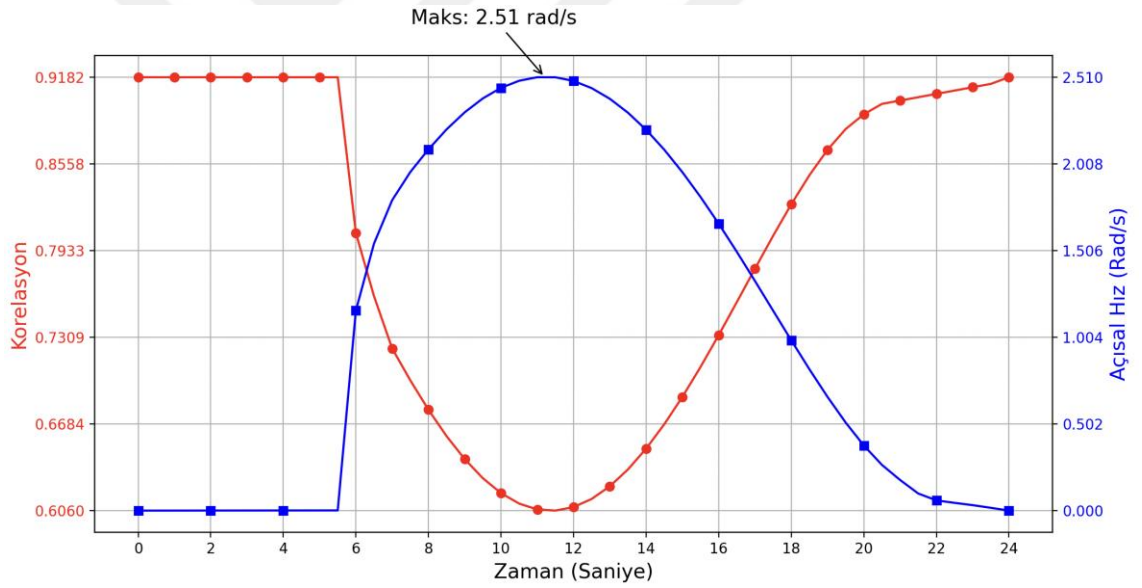
Ön işleme sonrası elde edilmiş görüntüler bölüm 4.3.2’de açıklanan Pearson korelasyonu yöntemiyle işlenmiştir. Açısal hızla bağlı olarak değişen benek deseninin, referans benek deseni görüntüsü ile olan korelasyon ölçüm grafikleri Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.13 3.307 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği



Şekil 4.14 2.99 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği



Şekil 4.15 2.51 rad/s maksimum açısal hız için korelasyon grafiği

Elde edilen sonuç grafiklerinden (şekil 4.13, şekil 4.14 ve şekil 4.15) görülebileceği gibi korelasyon açısal hız ile ters orantılı şekilde ölçülmüştür. Dönü hareketinin başlangıcında azalan korelasyon değeri, açısal hızın azalmasıyla artmış ve optik jiroskop düzeneği hareketsiz hale geldiğinde tekrar en baştaki değerini almıştır.

4.5 Görüntüler Üzerinde Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Eğitimi

Bu bölümde çalışma sırasında elde edilen benek deseni görüntülerinden makine öğrenmesi (MÖ) algoritmalarının eğitilmesi ve bu algoritmalarla açısal hızın ölçülmesi için yapılan çalışma açıklanmıştır. Laboratuvar ortamında elde edilen görüntülerin sayıca az olması ve mevcut laboratuvar ortamındaki fiziki altyapı sebebiyle yeni görüntüler elde etmenin çok zaman alması sebebiyle bu bölümdeki çalışma yalnızca simülasyon sırasında elde edilen benek deseni görüntüleriyle yapılmıştır.

Bölüm 4.3.1’de bahsedilen $1\ \mu m$ ’den $120\ \mu m$ ’ye kadar optik yol farkına karşılık gelen 120 adet benek deseni görüntüsü, bu çalışma için eğitim veri kümesi olarak kullanılır. Her görüntünün karşılık geldiği optik yol farkı ise eğitim etiketi olur (şekil 4.6). Bu 120 görüntünün 14 tanesi test için kalan görüntüler eğitim için kullanılacak şekilde iki kümeye bölünür. Eğitim için kullanılan 106 görüntü ile MÖ algoritmaları eğitilir. Kullanılan algoritmalar ve teorik arka planları Bölüm 4.5.1, Bölüm 4.5.2 ve Bölüm 4.5.3’te açıklanmıştır.

4.5.1 XGBoost algoritması

XGBoost, ilk olarak 2011 yılında Tianqi Chen ve Carlos Guestrin tarafından önerilen ve sonradan yapılan birçok çalışma ile sürekli olarak optimize edilen ve geliştirilen bir denetimli öğrenme modelidir. Temelinde rasgele orman ve gradyan artırma algoritması yatar. Karar ağaçları eğitim verisini belirli koşullara göre alt kümelerine bölerek bir modeli öğrenen yapılardır. Ağaç yapısı, kök düğüm ile başlar ve bu düğüme bağlı alt yaprak düğümlerinden oluşur.

XGBoost doğrudan hatalara odaklanmak yerine, fonksiyon uzayında gradyan inişi kullanarak bir kayıp fonksiyonunu optimize eder. XGBoost, ardışık bir şekilde bir karar ağaçları topluluğu oluşturur. Her ağaç, eğim artırma ilkesini izleyerek öncekilerin yaptığı hataları düzeltmek için modele eklenir. Yeni veri noktaları için tahminler, modeldeki tüm ağaçların çıktıları toplanarak yapılır.

$$y'_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i) \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8'te $f_k(x_i)$ k 'inci ağacı temsil eder. Her ağaç, girdi özelliklerinin bir alt kümesi için bir hesaplanan değer üretir.

Algoritma model doğruluğu ve karmaşıklığı arasında bir denge sağlamak için düzenlenmiş eşitlik 4.9'daki gibi bir amaç fonksiyonu kullanır.

$$L(\emptyset) = \sum_{i=1}^n l(y_i, y'_i) + \sum_{k=1}^K \Omega f_k \quad (4.9)$$

Burada l kayıp fonksiyonudur ve hesaplanan değer y'_i ile gerçek değer y_i arasındaki farkı hesaplar. Ortalama kare hatası kullanılan yaygın hata fonksiyonlarından biridir.

$$\Omega(f) = \gamma T + 0.5\lambda \|w\|^2 \quad (4.10)$$

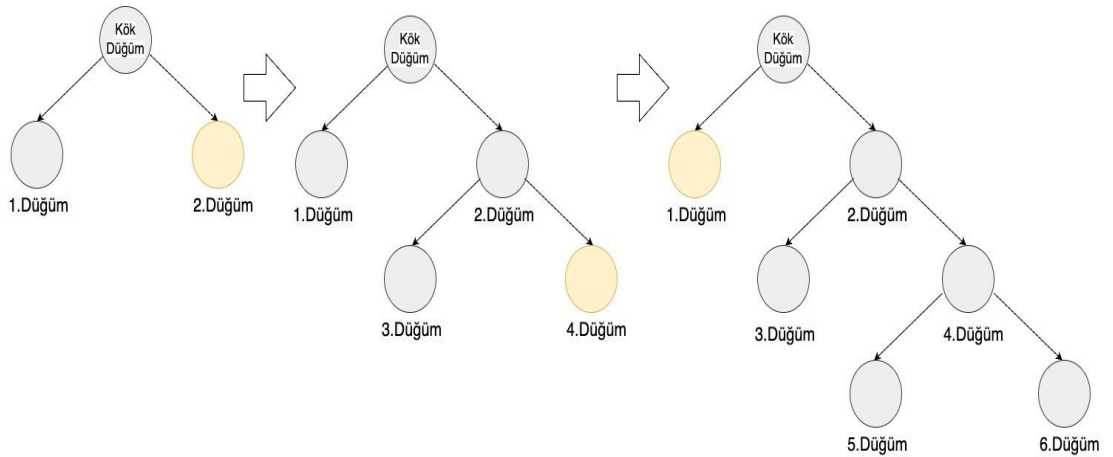
Eşitlik 4.10'da Ω düzeltme katsayısıdır ve aşırı öğrenmeyi engellemek için ağacın karmaşıklığını düşürür. Denklemden γ ağacın her bir yaprağı için (T) ceza katsayısıdır. λ ise her bir yaprağın ağırlığı (w) için L_2 düzeltme katsayısıdır. Karar ağaçlarındaki bölünmelerin bulunması için iki adet algoritma kullanılabilir.

Bunlardan ilki Kesin Açgözlü algoritma kesin sonuçlar için tüm olası bölünmeleri değerlendirir. Bu algoritmanın işlem maliyeti yüksektir ancak daha tutarlı sonuç üretir. Diğeri ise Yaklaşım algoritmasıdır. Bu algoritma hesaplamayı azaltarak, kantilleri kullanarak bölünmüş adaylar önerir. XGBoost gerçek dünya verilerinde oluşabilecek gürültüler ve eksik verilerin sağlıklı eğitimi için çeşitli önlemler kullanılır. Her düğüm, eğitim sırasında öğrenilen eksik değerler için varsayılan bir yön (sol veya sağ) kendisine belirler veya eksik değerler için hesaplamaları atlar ve yalnızca sağlıklı girdilere odaklanır.

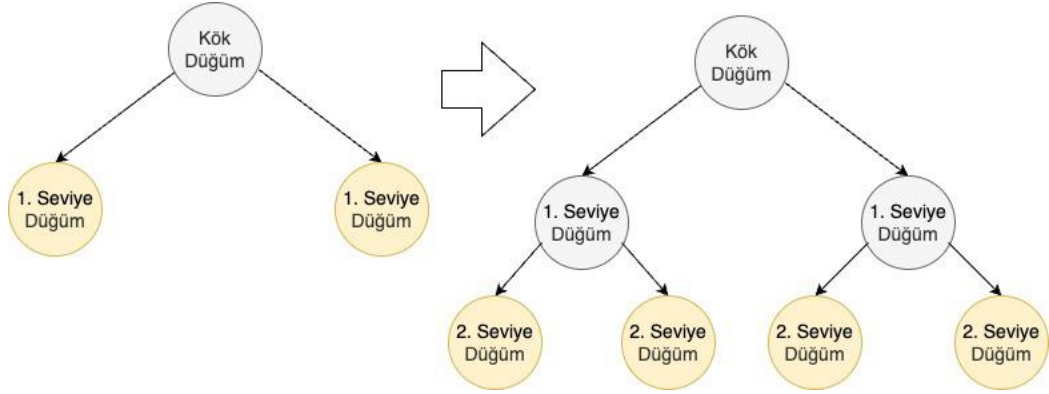
4.5.2 LightGbm algoritması

Ke ve diğerleri 2017 yılında, Rasgele Orman ve Gradyan Artırma tabanlı bir makine öğrenmesi algoritması önerdi. Bu algoritma iki yeni teknik kullanılarak dağıtılmış ve verimli olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu teknikler gradyan tabanlı tek taraflı örnekleme (GTTÖ) ve özel özellik paketleme olarak adlandırılır. Bu tekniklerden GTTÖ bilgi kazanımına daha fazla katkıda bulundukları için büyük gradyanlara (az eğitilmiş örnekler) sahip örneklerle odaklanır. Küçük eğimlere sahip örnekler rastgele örneklenir ve veri dağılımını korumak için ölçekleme faktörleriyle ayarlanır. Bu seçimler algoritmanın başarımından ödün vermeden hesaplama karmaşıklığını önemli ölçüde azaltır. İkinci teknik olan özel özellik paketleme; karşılıklı olarak birbirini dışlayan özellikleri (nadiren aynı anda sıfır olmayan değerler alan özellikler) bir araya getirerek yüksek boyutlu seyrek verileri hedefler. Hangi özelliklerin bir araya getirilebileceğini belirlemek için grafik tabanlı bir yaklaşım kullanır.

Özellikler bir grafikteki köşeler olarak ele alınır ve kenarlar karşılıklı olarak birbirini dışlamayan özellikleri birbirine bağlar. Bu işlem, bilgisayardaki bellek kullanımını azaltır ve işlenecek özellik sayısını azaltarak eğitim hızını iyileştirir. LightGBM algoritması, ağaçları derinliğe veya seviyeye göre büyüten XGBoost algoritmasının aksine, ağaçları yapraklara göre yatay olarak büyütür (şekil 4.16 ve şekil 4.17).



Şekil 4.16 XGBoost ağaç şeması



Şekil 4.17 LightGbm ağaç şeması

Algoritma her adımda kayıp fonksiyonunu en çok azaltabilen yaprağı böler, bu durum da genel kaybı seviye bazında bölmeden daha etkili bir şekilde azaltır. Bu sayede daha hızlı yakınsama ve daha iyi doğrulukla sonuçlanır. LightGBM algoritması hızlı eğitilebilmesi, düşük sistem kullanımı ve az veri ile iyi başarımlar sağlaması ile oldukça güçlü bir makine öğrenme algoritmasıdır.

4.5.3 CatBoost algoritması

CatBoost, kategorik verileri verimli bir şekilde işlemek ve aşırı öğrenmeden kaçınmak için özel olarak tasarlanmış tıpkı XGBoost ve LightGBM algoritmaları gibi ardışık bir şekilde bir karar ağaçları topluluğu oluşturan, gradyan artırma algoritması üzerine geliştirilmiş yeni bir algoritmadır. CatBoost, gradyan artırmalı karar ağacı (GAKA) algoritması ile yüksek kardinaliteli kategorik değişkenlerin daha iyi işlenmesi tekniği üzerine kuruludur. Her ağaç, bir kayıp fonksiyonunu en aza indirerek önceki ağaçlar tarafından yapılan hataları düzeltmeye çalışır. CatBoost geleneksel GAKA algoritmasının üstüne iki önemli iyileştirme sunar.

Geleneksel GAKA algoritmaları, eğitim sürecinde hedef hakkında bilgi sızdırabilen ve aşırı öğrenmeye sebep olabilen kategorik değişkenler için tek sıcak kodlama veya ortalama kodlama gibi teknikler kullanır. CatBoost bu durumu engellemek için sıralı hedef istatistikleri isimli bir metot kullanır. Bu metot kategorik özellikleri hedef istatistikleriyle değiştirir. Örnek olarak her kategori için hedef değişkenin ortalamasını kullanır. Veriler rastgele bir şekilde değiştirilmiş bir sırayla işlenir. Her veri noktası için

hedef istatistikleri yalnızca permütasyonda kendisinden önce gelen veri noktaları kullanılarak hesaplanır. Bu, bir veri noktasının hedef değerinin kendi kodlanmış değerini etkilememesini, sızıntıyı önlemeyi ve gerçekçi bir temsili korumayı sağlar.

İkinci iyileştirme “Sıralı Güçlendirme” olarak adlandırılan metot ile algoritmanın eğitimi sırasında, gradyan tahminlerinden kaynaklanan tahmin kaymasının önüne geçilir. Eğitim hesaplaması için tüm veri kümesini direkt olarak kullanmak yerine, CatBoost algoritması verileri ardışık permütasyonlar ile işler. Eğitimin her yinelenmesinde, her bir veri noktası için tahminler, permütasyonda kendisinden önce gelen tüm veri noktalarında eğitilen modeller kullanılarak hesaplanır. Bu işlem modelin eğitim sırasında geçerli veri noktasının hedef değerini "görmesini" önleyerek tahmin yanlılığını ortadan kaldırır.

CatBoost, temel öğrenme tekniği olarak karar ağaçları kullanır. Her ağaç seviyesi, tüm dallara aynı bölme koşulunu uygular. Bu, hesaplama açısından verimli ve aşırı öğrenmeye dirençli simetrik bir yapı oluşturur. CatBoost’daki gradyan işlemi modelin (örnek olarak, regresyon için ortalama değer) basit bir tahmin yapması ile başlar. Algoritma Sıralı Güçlendirme metodunu kullanarak artıkları veya gradyanları hesaplar. Artık hatalarını veya gradyan kayıp fonksiyonunu en aza indirmek için karar ağaçlarını eğitilir. Eğitim sırasında oluşan yeni ağaçlar modele eklenerek model güncellenmiş olur.

Modelin aşırı öğrenmesini engellemek için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan alt örnekleme yöntemi, algoritmanın eğitimi sırasında her yinelemede eğitim için kullanılan verilerin alt kümelerini rastgele seçer. Bunun dışında modele ağaç derinliği ve öğrenme oranı kısıtlamaları eklenerek model karmaşıklığı kontrol edilebilir.

CatBoost algoritmasının, manuel ön işlemeye ihtiyacı yoktur. Kendi başına yüksek kardinaliteli kategorik değişkenleri etkili bir şekilde işler. “Sıralı Güçlendirme” ve “Sıralı Hedef İstatistikleri” metotları sayesinde sağlam model genellemesini sağlar. Karar ağaçları ve optimize edilmiş gradyan hesaplamaları CatBoost’u hesaplama açısından verimli hale getirir. Bu özellikler sayesinde CatBoost sınıflandırma ve regresyon görevleri için etkili bir algoritma haline gelir.

4.5.4 Algoritma parametreleri

XGBoost, CatBoost ve LightGbm algoritmaları karar ağacı metoduna dayanan algoritmalarıdır. Bu sebepten ötürü bu üç algoritmanın başlangıç parametre çeşitleri aynıdır. Eğitimde bir yanlılık oluşturulmaması için tüm algoritma parametreleri her bir model için aynı tutulmuştur.

Parametreler;

- $n_estimators = 500$
- $max_depth = 6$
- $learning_rate = 0.01$ olacak şekilde seçilmiştir.

4.6 Ölçüm metrikleri

Bu bölümde simülasyon ortamında elde edilmiş görüntülerden eğitilen MÖ modellerinin test edilmesi sırasında kullanılacak metrikler tanıtılmıştır.

4.6.1 Hataların mutlak değerlerinin ortalaması (MAE)

Bu metrik tahmin edilen değerler ile gözlenen değerler arasındaki ortalama mutlak farkı ölçer.

$$MAE = \frac{\sum |A_i - P_i|}{n} \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11’de A_i gerçek değer P_i tahmin edilen değerdir n ise toplam tahmin sayısıdır. MAE’nin analizi kolaydır ancak yanlılığın yönünü belirleyemez. Model başarımı arttıkça bu metrik değeri azalır.

4.6.2 Hataların karesinin ortalaması (MSE)

Bu metrik tahmin edilen ve gerçekleşen değerler arasındaki kare farklarının ortalamasını hesaplamak için kullanılır.

$$MSE = \frac{\sum (A_i - P_i)^2}{n} \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12’da A_i gerçek değer P_i tahmin edilen değerdir n ise toplam tahmin sayısıdır. Bu metrik ölçümdeki büyük hataları vurgular. Bu sebepten dolayı aykırı değerlere karşı duyarlıdır. Model başarımı artıkça bu metrik değeri azalır.

4.6.3 Hataların karesinin ortalamasının karekökü (RMSE)

MSE metriğinin karekökü alınmış halidir. Bu sayede MSE’de olan büyük hatalara yapılan aşırı cezalandırmalar azalır. RMSE tipik hataların büyüklüğü hakkında doğrudan bir gösterim sağlar. RMSE’in matematiksel gösterimi eşitlik 4.13’te verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (A_i - P_i)^2}{n}} \quad (4.13)$$

RMSE’in metrik değeri model başarımı ile ters orantılıdır.

4.6.4 Ortalama mutlak yüzde hata (MAPE)

Bu metrik sayesinde tahmin edilen ve gerçekleşen değerler arasındaki ortalama yüzde farkı hesaplanır.

$$MAPE = \frac{100}{n} \frac{\sum |A_i - P_i|}{A_i} \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14’te ki metrik, reel değerler sıfır olduğunda tanımsızlığa düşer ve küçük reel değerlerden orantısız şekilde etkilenir.

4.6.5 Belirleme katsayısı (R^2)

Matematiksel gösterimi eşitlik 4.15’te gösterilen bu metrik bağımlı değişkendeki varyansın bağımsız değişkenlerden tahmin edilebilen oranını ölçer.

$$R^2 = \frac{\sum(A_i - P_i)^2}{\sum(A_i - A')^2} \quad (4.15)$$

Burada A' gerçek değerlerin ortalamasıdır. Bu metrik 0 ile 1 arasında bir değer alır ve 1'e yakın değerler daha yüksek başarıyı gösterir.

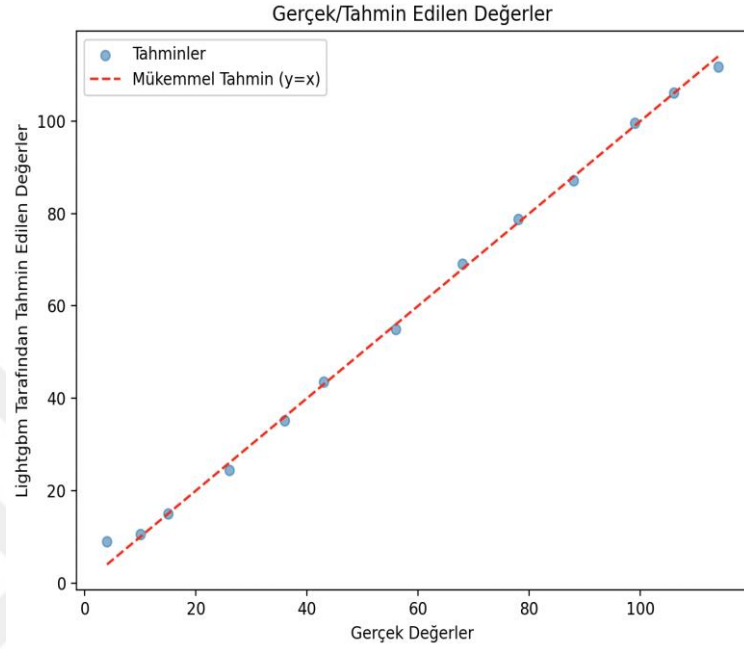
4.7 Makine öğrenmesi tahminleri

Bu kısımda eğitilen makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin sonuçları gösterilmiştir. Eğitilen modellere, test veri kümesindeki görüntüler verilmiştir ve bu görüntülere karşılık gelen optik yol farkının tahmin edilmesi beklenmiştir. 3 farklı algoritmanın gerçek değerlere karşılık gelen tahminleri çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

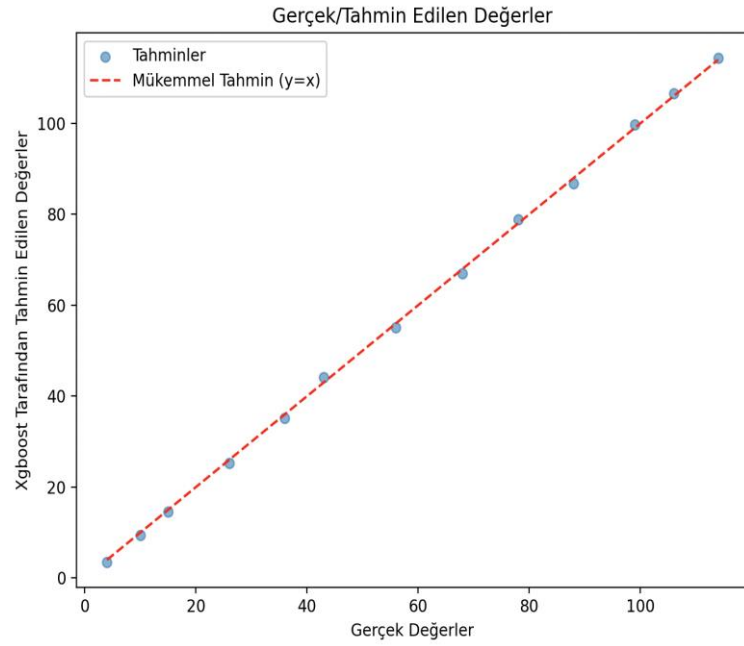
Çizelge 4.1 Makine öğrenmesi algoritmalarının tahmin sonuçları

Gerçek değer (μm)	Xgboost	LightGbm	CatBoost
4	3.481	8.975	6.404
10	9.421	10.507	11.52
15	14.563	15.031	15.298
26	25.271	24.425	26.32
36	35.208	35.175	37.392
43	44.139	43.507	43.645
56	55.04	54.973	56.30
68	66.95	69.042	67.887
78	78.844	78.772	77.474
88	86.78	87.153	86.951
99	99.696	99.612	97.625
106	106.613	106.206	105.745
114	114.387	111.753	112.968

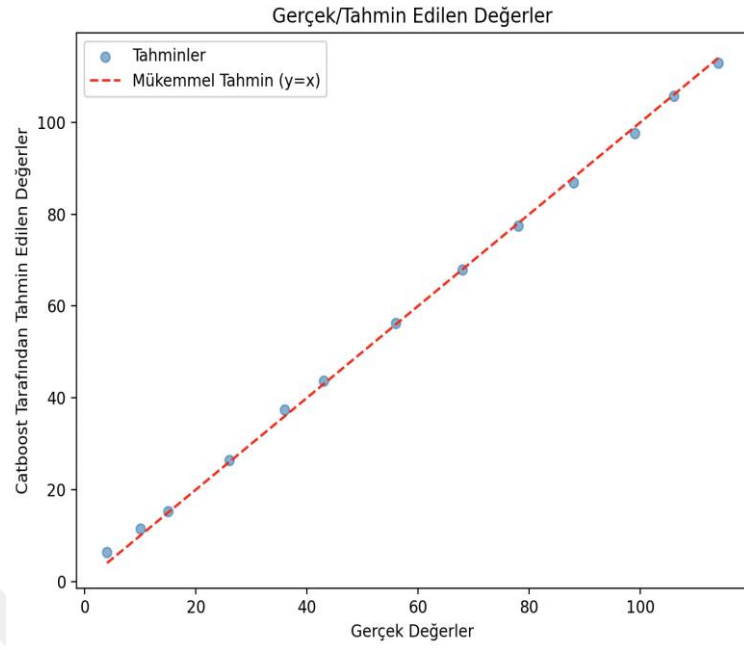
Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20 ‘de makine öğrenmesi modellerinin tahmin grafikleri verilmiştir. Çizelge 5.1’de ise modellerin ürettikleri tahminlerin sonuç metriklerine göre analizi gösterilmiştir.



Şekil 4.18 LightGbm tahmin grafiği



Şekil 4.19 Xgboost tahmin grafiği



Şekil 4.20 Catboost tahmin grafiği

5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, fiber optik benek deseni görüntülerinin kullanılmasıyla açısal hızın ölçülmesi amaçlanmıştır. Bunun için önce simülasyon ortamında bir optik jiroskop modeli tasarlanmış ve sonrasında laboratuvar ortamında bir optik jiroskop düzeneği kurulmuştur.

Tezin teorik altyapısının ele alındığı Bölüm 4.2'de belirtildiği üzere, önerilen jiroskop tasarımına uygulanan açısal dönme hızı arttıkça, jiroskobun çıkışında gözlemlenen benek deseni görüntülerde korelasyon katsayısı giderek azalmaktadır. Simülasyon sonuçlarında üretilen benek deseni görüntüler üzerinde yapılan çalışmalarda, optik yol farkı arttıkça yani jiroskoba uygulanan açısal dönme hızı arttıkça oluşan benek desenleri ile referans benek deseni arasındaki korelasyon katsayısı düşmektedir. Çizelge 5.1'de bu durum sayısal değerler ile gösterilmiştir. Optik yol farkı $1\ \mu m$ 'den $120\ \mu m$ 'ye doğru arttıkça iki korelasyon tekniğinde de korelasyon katsayısının azaldığı görülmektedir. Segmente korelasyon değerleri, optik yol farkının artmasıyla birlikte normal korelasyon değerlerine göre daha fazla düşüş göstermiştir. Ayrıca çizelge 5.1'de bu optik yol farkına karşılık gelen açısal hız değerleri, yarıçapı 50 cm, sarım sayısı 500 ve çekirdek kırılma indisi 1.5 olan bir fiber optik sarmal için eşitlik 2.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 Optik yol farkına göre elde edilen korelasyon değerleri

Optik Yol Farkı (μm)	Korelasyon Değeri	Segmente Korelasyon Değeri	Açısal Hız (rad/s)
1	0.99999659656958	0.99999607895055	0.0633
15	0.99944960201377	0.99934396079665	0.946
30	0.99493351223948	0.99401956573122	1.909
45	0.97356982605957	0.96888229941544	2.864
60	0.91617684725566	0.90117239629665	3.819
75	0.79413341197668	0.75613843044000	4.774
90	0.62609286100409	0.55243744134162	5.729
105	0.50464353246210	0.39022631690302	6.684
120	0.44739133803129	0.31030659191146	7.639

Laboratuvar ortamında üç farklı açısal hız için yapılan deneylerde şekil 4.13, şekil 4.14 ve şekil 4.15 görüldüğü gibi açısal hız arttıkça korelasyon değeri azalmaktadır. Yapılan üç deneyde de sistem hızlandıkça korelasyon katsayısının azaldığı ve yavaşlayıp durduğu anda korelasyon katsayısının başlangıç değerine (1) ulaştığı görülmektedir. Bu durum optik jiroskobun çıkışında elde edilen benek deseni görüntüsünün açısal hız azaldıkça giderek referans görüntüye benzediğini göstermektedir.

Son olarak, simülasyon ortamında elde edilen görüntüler kullanılarak, makine öğrenme algoritmalarının eğitimiyle doğrudan açısal hızın ölçülmesini amaçlayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamında elde edilmiş veri seti ile XgBoost, CatBoost ve LightGbm algoritmaları eğitilmiş ve test için ayrılan görüntüler üzerinde bir ölçüm çalışması yapılmıştır. Bu algoritmaların çeşitli regresyon başarımlarına göre elde ettikleri sonuçlar, çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Modellerin ölçüm metrikleri karşısında elde ettiği skorlar

	Xgboost	LightGbm	CatBoost
MSE	0.6526162	2.8731790	1.1649462
MAE	0.7664380	1.1672860	0.8644342
RMSE	0.8078466	1.6950454	1.0793267
R^2	0.9995100	0.9978431	0.9991255
MAPE	0.0282017	0.1133086	0.0684973

Çizelge 5.2’den görülebileceği gibi, en düşük hata oranlarına sahip algoritma XGBoost olmuştur. Başarımlar olarak ikinci sırada olan algoritma CatBoost olmuştur. CatBoost MAE ve RMSE metrikleri açısından XGBoost’a yakın bir sonuç üretmiş olsa da MSE metriği açısından XGBoost’a göre başarımları daha düşük kalmıştır. LightGbm başarımlar olarak bu üç algoritma içerisinde en zayıf algoritma olsa da daha hızlı eğitebilmesi ve hızlı sonuç üretmesi ile öne çıkmaktadır.

Laboratuvar ve simülasyon ortamlarında elde edilen sonuçlar, tezin ana önermesi olan benek deseninde Sagnac etkisinin oluştuğunu göstermektedir. Simülasyon ve laboratuvar

deneyleri tezin teorik alt yapısını doğrular niteliktedir. Bu durum, klasik optik jiroskopta kullanılan tek modlu optik fiber ve fotodedektör yerine çok modlu optik fiber ve kamera yardımıyla açısal hızın ölçülebileceğini göstermiştir. Bu çalışma gelecekte alternatif optik jiroskop tasarımlarına ve yeni açısal hız ölçüm metodolojilerine kapı aralayabilir. Farklı tipteki ve uzunluktaki çok modlu fiberlerde Sagnac etkisinin gözlemlemesi için araştırmalar yapılabilir. Jiroskop tasarımında yapılabilecek fiziki optimizasyonların yanında benek desenlerinin daha iyi analiz edilebilmesi için yazılımsal iyileştirmeler de yapılabilir. Bunlar içinde farklı görüntü işleme teknikleri ve farklı korelasyon ölçüm metodolojilerinin uygulanmasıyla benek deseninin değişimlerinin daha yüksek doğrulukta ölçülebilmesi üzerinde araştırmalar gerçekleştirilebilir. X,y,z düzleminde 3 fiber sarmalı kullanılarak jiroskop tasarımı oluşturulabilir ve tüm eksenlerde açısal hızın ölçümü gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Bennett, A., Beiderman, Y., Agdarov, S., Beiderman, Y., Hendel, R., Straussman, B., & Zalevsky, Z. (2020). Monitoring of vital bio-signs by analysis of speckle patterns in a fabric-integrated multimode optical fiber sensor. *Optics express*, 28(14), 20830-20844.
- Bentéjac, C., Csörgő, A., & Martínez-Muñoz, G. (2021). A comparative analysis of gradient boosting algorithms. *Artificial Intelligence Review*, 54, 1937-196.
- Bergh, R. A., Lefevre, H. C., & Shaw, H. J. (1981). All-single-mode fiber-optic gyroscope. *Optics letters*, 6(4), 198-200.
- Bergh, R., Lefevre, H., & Shaw, H. (1984). An overview of fiber-optic gyroscopes. *Journal of Lightwave Technology*, 2(2), 91-107.
- Blin, S., Kim, H. K., Digonnet, M. J., & Kino, G. S. (2007). Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 25(3), 861-865.
- Böhm, K., Russer, P., Weidel, E., & Ulrich, R. (1981). Low-noise fiber-optic rotation sensing. *Optics letters*, 6(2), 64-66.
- Boateng, K. O., Asubam, B. W., & Laar, D. S. (2012). Improving the effectiveness of the median filter.
- Burns, W., Chen, C. L., & Moeller, R. (1983). Fiber-optic gyroscopes with broad-band sources. *Journal of Lightwave Technology*, 1(1), 98-105.
- Crosignani, B., Daino, B., & Di Porto, P. (1974). Interference of mode patterns in optical fibers. *Optics Communications*, 11(2), 178-179.
- Fradkov, A. L. (2020). Early history of machine learning. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 1385-1390.
- Fujiwara, E., Marques dos Santos, M. F., & Suzuki, C. K. (2017). Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division. *Applied optics*, 56(6), 1585-1590.
- Gaber, M. M., & Atwal, H. S. (2013). An entropy-based approach to enhancing Random Forests. *Intelligent Decision Technologies*, 7(4), 319-327.
- Gong, Y., Zhao, T., Rao, Y. J., & Wu, Y. (2011). All-fiber curvature sensor based on multimode interference. *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(11), 679-681.
- Grattan, K. T., & Sun, T. (2000). Fiber optic sensor technology: an overview. *Sensors and Actuators A: Physical*, 82(1-3), 40-61.

- GuolinKe, Q. M., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, 30, 52.
- Killian, K. M., Burmenko, M., & Hollinger, W. (1994). High-performance fiber optic gyroscope with noise reduction. In *Fiber Optic and Laser Sensors XII*, November, Vol. 2292, 255-263, San Diego, USA.
- Kumar, T., & Verma, K. (2010). A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image. *International Journal of Computer Applications*, 7(2), 7-10.
- Lefevre, H. C. (2022). *The fiber-optic gyroscope*. Artech House.
- Lee, H. J. (2024). A Study on Intrusion Detection Using Deep Learning-based Weight Measurement with Multimode Fiber Speckle Patterns. *Current Optics and Photonics*, 8(5), 508-514.
- Murray, M. J., Davis, A., Kirkendall, C., & Redding, B. (2019). Speckle-based strain sensing in multimode fiber. *Optics express*, 27(20), 28494-28506.
- Navruz, I., Ari, F., & Şerbetçi, H. (2017). Design and Analysis of a Closed-Loop Fiberoptic Gyroscope. In *International Scientific and Vocational Studies Congress, October, 480-485, Kırıkkale, Turkey*.
- Naser, M. Z., & Alavi, A. (2020). A.H. Error Metrics and Performance Fitness Indicators for Artificial Intelligence and Machine Learning in Engineering and Sciences. *Archit. Struct. Constr.* 3, 499–517.
- Pal, D., Agadarov, S., Beiderman, Y., Beiderman, Y., Kumar, A., & Zalevsky, Z. (2022). Non-invasive blood glucose sensing by machine learning of optic fiber-based speckle pattern variation. *Journal of Biomedical Optics*, 27(9), 097001-097001.
- Paoletti, D., Spagnolo, G. S., Facchini, M., & Zanetta, P. (1993). Artwork diagnostics with fiber-optic digital speckle pattern interferometry. *Applied Optics*, 32(31), 6236-6241.
- Philosof, J., Beiderman, Y., Agdarov, S., Beiderman, Y., & Zalevsky, Z. (2023). Optical Multimode Fiber-Based Pipe Leakage Sensor Using Speckle Pattern Analysis. *Sensors*, 23(20), 8634.
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A.V. and Gulin, A. (2018) Catboost: Unbiased Boosting with Categorical Features. Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems, Canada, Montréal, 3-8 December 2018, 6639-6649.
- Redding, B., Popoff, S. M., & Cao, H. (2013). All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction. *Optics express*, 21(5), 6584-6600.

- Rice, J. A., & Rice, J. A. (2007). *Mathematical statistics and data analysis* (Vol. 371). Belmont, CA: Thomson/Brooks/Cole.
- Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M., Galindez, C., & Lopez-Higuera, J. M. (2012). Speckle characterization in multimode fibers for sensing applications. In *Speckle 2012: V International Conference on Speckle Metrology, September, 8413*, 376-381, Vigo, Spain.
- Sagnac, G. (1913). L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. *CR Acad. Sci.*, 157, 708-710.
- Saleh, B. E., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics*. John Wiley & Sons.
- Schreiber, K. U., Velikoseltsev, A., Carr, A. J., & Franco-Anaya, R. (2009). The application of fiber optic gyroscopes for the measurement of rotations in structural engineering. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B), 1207-1214.
- Sedgwick, P. (2012). Pearson's correlation coefficient. *BMJ*, 345. e4483-e4483.
- Shupe, D. M. (1980). Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer. *Applied optics*, 19(5), 654-655.
- Skalský, M., Havránek, Z., & Fialka, J. (2019). Efficient modulation and processing method for closed-loop fiber optic gyroscope with piezoelectric modulator. *Sensors*, 19(7), 1710.
- Song, T., Wang, X., Liang, W., & Xing, L. (2018). Improved motor control method with measurements of fiber optics gyro (FOG) for dual-axis rotational inertial navigation system (RINS). *Optics Express*, 26(10), 13072-13084.
- Şerbetçi, H., Navruz, I., & Ari, F. (2024). A fiber optic refractive index sensor with extremely high dynamic range utilizing deep learning-speckle pattern imaging. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(12), 103122.
- Valley, G. C., Sefler, G. A., & Justin Shaw, T. (2016). Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing. *Optics letters*, 41(11), 2529-2532.
- Wang, J. J., Yan, S. C., Ruan, Y. P., Xu, F., & Lu, Y. Q. (2017). Fiber-optic point-based sensor using specklegram measurement. *Sensors*, 17(10), 2429.
- Wang, X., Cui, Y., & Cao, H. (2023). Temperature drift compensation of fiber optic gyroscopes based on an improved method. *Micromachines*, 14(9), 1712.
- Wang, Y., Huang, X., Ren, X., Chai, Z., & Chen, X. (2022). In-process belt-image-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using CatBoost algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7), 2575-2591.

- Wei, L. (2023). Genetic Algorithm Optimization of Concrete Frame Structure Based on Improved Random Forrest. In *2023 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*, September, 249-253, Marseille, France.
- Wu, Y., Pei, L., Jin, W., Jiang, Y., Yang, Y., Shen, Y., & Jian, S. (2017). Highly sensitive curvature sensor based on asymmetrical twin core fiber and multimode fiber. *Optics & Laser Technology*, 92, 74-79.
- Xuyou, L., Zhou, H., Chen, Z., & Gang, W. (2009). Application of adaptive filtering to digital closed-loop fiber optic gyroscope. In *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, August, 443-447, Changchun, China.
- Yang, M., & Yang, Y. (2013). New measurement method for eigen frequency of a fiber optic gyroscope. *Optical Engineering*, 52(2), 024401-024401.
- Yang, Y., Li, S., Yang, F., & Jin, W. (2020). Differential fiber optic gyroscope driven by two broadband sources of different wavelengths. *IEEE access*, 8, 65443-65449.
- Zhang, Z., & Ansari, F. (2006). Fiber-optic laser speckle-intensity crack sensor for embedment in concrete. *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(1), 107-111.
- Zhao, F., Lin, W., Guo, P., Hu, J., Liu, Y., Liu, S., ... & Shao, L. (2023). Compact optical fiber sensor based on Vernier effect with speckle patterns. *Optics express*, 31(22), 36940-36951.
- Zhao, F., Lin, W., Guo, P., Hu, J., Liu, S., Yu, F., ... & Shao, L. (2023). Demodulation of DBR Fiber Laser Sensors With Speckle Patterns. *IEEE Sensors Journal*, 23(21), 26022-26030