

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FİBEROPTİK JİROSKOPLAR İÇİN KAPALI DÖNGÜ KONTROL
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Hüsamettin ŞERBETÇİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2019**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Hüsamettin ŞERBETÇİ tarafından hazırlanan “Fiberoptik Jiroskoplar İçin Kapalı Döngü Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 20/12/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. İsa NAVRUZ
Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Murat YÜCEL
Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Hakkı Gökhan İLK
Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Doç. Dr. İsa NAVRUZ
Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

20/12/2019



Hüsamettin ŞERBETÇİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FİBEROPTİK JİROSKOPLAR İÇİN KAPALI DÖNGÜ KONTROL SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Hüsamettin ŞERBETÇİ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsa NAVRUZ

Bu tez çalışmasında açısız hız ve yönde meydana gelen değişimleri doğru ve hassas bir şekilde ölçebilmek amacıyla fiberoptik jiroskop tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmaya açık döngü fiberoptik jiroskop yapısını analiz edilerek başlanmıştır ve sonrasında kapalı döngü fiberoptik jiroskop tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan fiberoptik jiroskobun açısız yön değişimi sonucu geri besleme döngüsünde meydana gelen hata işareti PID kontrolcü yardımıyla kompanze edilmiştir. Fiberoptik jiroskobun geri besleme döngüsünü yapılandırırken PID kontrolcü katsayılarını belirleme aşamasında ilk defa yerçekimi arama algoritmasından faydalanılmıştır. Yerçekimi arama algoritması için iterasyon sayısının belirlenmesinden sonra geri besleme döngüsünde meydana gelen hata işareti incelenmiştir. 0.05 rad/s'lik basamaklı açısız hız değişiminin neden olduğu hata işaretinin sıfır faz dengesine ulaşma süresi yaklaşık olarak 1 ms olmuştur. Ayrıca sistemden ölçülen açısız hızın, sisteme uygulanan açısız hızı başarıyla takip ettiği görülmüştür. Sistem durağan haldeyken ölçümü yapılan kararlılık testi sonucunun $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s'nin altında olduğu belirlenmiştir. Yapılan tüm tasarım ve simülasyon çalışmaları ile PID kontrolcü ile kontrol edilen kapalı döngü fiberoptik jiroskobun yüksek tepki ve hassas ölçüm kabiliyetinde olduğu değerlendirilmiştir.

Aralık 2019, 50 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Fiberoptik jiroskop, dönü sensörü, yerçekimi arama algoritması, PID kontrolcü

ABSTRACT

Master Thesis

DEVELOPMENT OF CLOSED-LOOP CONTROL SYSTEM FOR FIBEROPTIC GYROSCOPES

Hüsamettin ŞERBETÇİ

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İsa NAVRUZ

In this thesis, a fiberoptic gyroscope design was performed in order to accurately and precisely measure the changes in angular velocity and direction. The study was started by analyzing the open loop fiberoptic gyroscope structure, and then the closed loop fiberoptic gyroscope design was realized. The error signal which occurs in the feedback loop of the designed fiberoptic gyroscope in consequence of the angular deflection was compensated with the help of PID controller. In the determination process of the coefficients of the PID controller to configure the feedback loop of fiberoptic gyroscope, gravity search algorithm has been used for the first time. After determining the number of iterations for the gravity search algorithm, the error signal occurring in the feedback loop was examined. It takes approximately 1 ms for the error signal caused by angular velocity change with the step of 0.05 rad/s to reach zero phase equilibrium. In addition, it is observed that the angular velocity measured from the system follows the angular velocity applied to the system successfully. It has been observed that the result of zero-bias stability, which was measured while the system is stationary, is below $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s. In the result of all design and simulation studies, it has been seen that the closed loop fiberoptic gyroscope controlled by the PID controller has high response and precise measurement capability.

December 2019, 50 Pages

Key Words: Fiberoptic gyroscope, rotation sensor, gravity search algorithm, PID controller

TEŐEKKÖR

Tez alıőması sűresince yardımlarını, öneri ve bilgilerini esirgemeyen, alıőmamın başarıya ulaşmasına büyük katkı sağlayan değerli danıőman hocam Sayın Do. Dr. İsa NAVRUZ'a (Ankara Őniversitesi Elektrik-Elektronik Műhendislięi Anabilim Dalı) teőekkűrlerimi sunarım.

Son olarak hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme ve sevgili eőim Őzlem ŐERBETÇİ'ye en içten duygularımla teőekkűr ederim.

Hűsamettin ŐERBETÇİ
Ankara, Aralık 2019



İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER	5
2.1 Kaynak Özetleri	5
2.1.1 Jiroskop sistemlerinin tarihsel gelişimi.....	5
2.1.2 Fiberoptik jiroskoplar konusunda yapılan bilimsel çalışmalar.....	8
2.1.3 Yerçekimi arama algoritması konusunda yapılan bilimsel çalışmalar	12
2.2 Kuramsal Temeller	13
2.2.1 Sagnac etkisi	13
2.2.2 Açık döngü fiberoptik jiroskoplar	15
2.2.3 Kapalı döngü fiberoptik jiroskoplar	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	19
3.1 Materyal.....	19
3.1.1 Işıma kaynağı.....	19
3.1.2 Optik kuplör	20
3.1.3 Optik kutuplayıcı	21
3.1.4 Fiberoptik bobin.....	21
3.1.5 Optik faz modülatörü	21
3.1.6 Fotodedektör.....	21
3.1.7 A/D dönüştürücü	22
3.1.8 PID kontrolcü	22
3.1.9 Alçak geçiren filtre.....	25
3.1.10 Nicemleyici.....	25

3.1.11 Yerçekimi arama algoritması.....	25
3.2 Yöntem	29
3.2.1 Açık döngü fiberoptik jiroskop tasarımı.....	29
3.2.2 Kapalı döngü fiberoptik jiroskop tasarımı.....	33
3.2.3 Yerçekimi arama algoritması ile PID katsayılarının bulunması.....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1 İterasyon Sayısı	37
4.2 Açısal Hız Takibi.....	40
4.3 Dinamik Ölçüm Aralığı	41
4.4 Sıfır-Sapma (Zero-Bias) Testi	43
4.5 Basamak Cevabı.....	44
5. SONUÇ.....	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	50

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

K_p	PID Oransal Katsayısı
K_i	PID İntegral Katsayısı
K_d	PID Türevsel Katsayısı
$LiNbO_3$	Lityum Niyobat
c	Işık Hızı
Ω	Açısal Hız
D	Fiber Bobin Çapı
ω	Açısal Frekans
f	Frekans
f_m	Modülasyon Frekansı
$\Delta\Phi_s(t)$	Sagnac Etkisi
$\Delta\Phi_m(t)$	Faz Modülasyonu Bias Faz Değişimi
$\Phi_m(t)$	Bias Faz Modülasyonu
$e(t)$	Hata İşareti
P_d	Fotodedektör Çıkış İşareti
λ	Dalga Boyu
m	Kütle
F	Yerçekimi Arama Kuvvet Büyüklüğü
G	Yerçekimi Sabiti
n	İterasyon Sayısı

Kısaltmalar

ADFOJ	Açık Döngü Fiberoptik Jiroskop
DTG	Dinamik Olarak Ayarlanmış Mekanik Jiroskop (Dynamically Tuned Gyroscope)
FOJ	Fiberoptik Jiroskop
FPGA	Sahada Programlanabilir Kapı Dizisi (Field Programmable Gate Array)

KDFOJ	Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop
MEMS	Mikro Elektro-Mekanik Sistem
PID	Oransal İntegral Türevsel (Proportional Integral Derivative)
RLG	Ring Lazer Jiroskop (Ring Laser Gyroscope)
YA	Yerçekimi Arama



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 George Sagnac Deney Düzeneği	6
Şekil 2.2 Açık Döngü Fiberoptik Jiroskop Blok Diyagramı.....	15
Şekil 2.3 Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemi Blok Diyagramı.....	17
Şekil 3.1 Işık Spektrumu	20
Şekil 3.2 PID Kontrolcü Blok Diyagramı	23
Şekil 3.3 İki Kütle Arasındaki Newton Yerçekimi Yasası Gösterimi	26
Şekil 3.4 Yerçekimi Arama Algoritması Akış Şeması	28
Şekil 3.5 ADFOJ Simulink Modeli.....	30
Şekil 3.6 ADFOJ Sıfır Dönme Durumu Fotodedektör Çıkış İşareti	30
Şekil 3.7 ADFOJ Farklı Açısal Hız Girişleri İçin Fotodedektör Çıkış Gücü İşareti	31
Şekil 3.8 ADFOJ Açısal Hız Takibi ve Dinamik Ölçüm Aralığı.....	32
Şekil 3.9 Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Simulink Modeli.....	33
Şekil 3.10 KDFOJ Sistemine Uygulanan Açısal Hız Değişimi	34
Şekil 4.1 Farklı İterasyon Sayıları İçin Jiroskop Sistem Cevabı (a) $n=10$; (b) $n=50$; (c) $n=50$ ve 100	39
Şekil 4.2 Jiroskop Sisteminin Basamaklı Değişen Açısal Hız Takibi	40
Şekil 4.3 Jiroskop Sisteminin Basamaklı ve Rampa Değişen Açısal Hız Takibi	41
Şekil 4.4 Farklı İterasyon Sayılarına Karşılık KDFOJ Dinamik Ölçüm Aralığı (a) $n=10$; (b) $n=50$	43
Şekil 4.5 PID Kontrolcünün Basamak Cevabı.....	44

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 YA Algoritması Sonucu Elde Edilen PID Katsayıları	36
---	----



1. GİRİŞ

Yön bilgisi, insanlığın ilk zamanlarından günümüze kadar geçen zamanda tüm insanlığın ortak ihtiyacı olmuştur. Navigasyon aletlerinin keşfinden önce insanlar, yön tayin etmek için birçok yöntem geliştirmişlerdir. Gündüz yolculuğu yapacak olanlar Güneş'in bulunduğu konumu ya da doğuş ve batış yönlerini gözlemleyerek yön tayinini gerçekleştirmişlerdir. Gece yolculuğunda ise sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisi, belirli birkaç yıldız kümesine bakarak yön tayinini sağlamaktır. Fakat bu iki yöntemin de hava koşullarına bağlı olmasından dolayı her zaman başarılı bir şekilde yön tayininde bulunmak mümkün olmamıştır.

Bu iki yönteme ek olarak daha birçok yön belirleme yöntemi mevcuttur. Bir çubuk yardımıyla yön tayininde bulunmak bu yöntemlerden biridir. Çubuk toprakla dik açı yapacak şekilde yere dikilerek gölgesi incelenir. Çubuğun en kısa gölge boyu, güneş tepe noktasına ulaştığında oluşacaktır. Bu zaman aralığında çubuğun gölge yönü kuzeyi gösterir. Yön belirlemede kullanılan bir diğer yöntem ise yosunların bulunduğu yüzeyin yönünü incelemektir. Yosunlar buldukları ağaç ya da kayaların kuzey yönüne bakan taraflarında büyümektedirler.

Denizci pusulası, yön belirlemede kullanılan insan yapımı ilk navigasyon aletlerinden biridir. Denizci pusulasında, pusula iğnesi bir mıknatısa sürülerek yön belirleme işlemi gerçekleştirilir. Fakat bu yöntemde pusulanın, gerçek kuzey yerine manyetik kuzeyi göstermesinden dolayı yetersiz kalmıştır. Bu nedenle yeni navigasyon araçlarının geliştirilmesine duyulan ihtiyaç devam etmiştir.

Yön belirlemede kullanılan bir diğer yöntem olan ilk harita örnekleri denizci pusulasından elde edilen veriler ışığında geliştirilmiştir. Günümüz pusularına benzer ilk pusula olan manyetik pusulaların icadına kadar yön belirleme işlemleri haritalar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Manyetik pusulanın icadıyla dünyanın manyetik alanından yararlanılarak yön tayini işlemi gerçekleştirilmiştir.

Günümüz teknolojisinde de ilk zamanlarda olduğu gibi açısız yön değışimi bilgisinin bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Açısız yön değışim bilgisi günümüzde jiroskop ismi verilen sistemlerle belirlenmektedir. Uzay araçlarında, kara, hava ve deniz araçlarında, denge sistemlerinde, sanayi uygulamalarında olduğu gibi daha birçok alanda açısız yön değışimi bilgisi jiroskoplar ile belirlenir.

Literatürde birçok jiroskop yapısı mevcuttur. Bunlardan başlıcaları ring lazer jiroskop (RLG), mekanik jiroskop (DTG), mikro-elektromekanik (MEMS) jiroskop ve fiberoptik jiroskoplardır (FOJ). Her bir jiroskop türü bir diğeri jiroskoba kıyasla avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Örneğın mikro-elektromekanik jiroskoplar minyatürizasyon açısından büyük katkı sağlamasına rağmen, fiberoptik jiroskoplara kıyasla dayanıklılığı az ve ömrü kısadır. Geliştirilen tüm jiroskoplar arasında fiberoptik jiroskoplar sağladığı yüksek ölçüm hassasiyeti, dinamik ölçüm aralığının yüksekliğı, tepkime hızı, darbe ve titreşime karşı dayanıklılığı ile ön plana çıkmaktadır.

Fiberoptik jiroskopların temelini oluşturan Sagnac etkisi ilk kez Fransız bilim adamı George Sagnac tarafından ortaya atılmıştır. Sagnac etkisi, kapalı bir yol üzerinde birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti arasında faz farkına sebep olur. Açısız hızda meydana gelen değışim bilgisi bu faz farkından yola çıkılarak hesaplanabilmektedir.

Lazer ışık kaynağına dayalı ilk jiroskop, Rosenthal tarafından önerilen ring lazer jiroskoptur. Rosenthal ilk kez ring lazer jiroskop ile ışık demetlerinin bobin içerisinde birden fazla kez döndürülmesiyle ölçüm hassasiyetinin artırılmasını sağlamıştır. Geliştirilen ring lazer jiroskop sisteminin sağladığı yüksek hassasiyet ile jiroskop sistemleri önem kazanmış ve Sagnac etkisinin gerçekleştirilmesi kolaylaşmıştır. Böylece yeni geliştirilecek optik jiroskop sistemlerine ışık tutulmuştur. İlerleyen süreçte Howe ve Savet tarafından mekanik jiroskop yapısı geliştirilmiştir. Fiberoptik kablonun keşfi ile birlikte fiberoptik jiroskop fikri öne atılmıştır. Fiberoptik jiroskop yapısı ilk kez Vali ve Shorthill tarafından yetmişli yıllarda gerçekleştirilmiştir. Fakat fiberoptik kablonun henüz gelişimini tam tamamlamamış olması nedeniyle fiberoptik jiroskoplar, ring lazer jiroskopların gerisinde kalmıştır. Doksanlı yıllarda fiberoptik kabloların

gelişmesi ve yaygınlaşması ile birlikte FOJ yapısı da önem kazanmıştır ve gelişimini günümüzde hala devam ettirmektedir. İlerleyen süreçte Piyabongkarn, Rajamani ve Greminger tarafından MEMS jiroskop geliştirilmiştir.

Jiroskop alanında yapılan çalışmalar yukarıda bahsedilen jiroskop türleriyle sınırlı kalmamıştır. Her bir jiroskop türü için daha düşük maliyetli, yüksek hassasiyetli, gürültüye karşı dayanıklı, yüksek dinamik ölçüm aralıklı ve uzun ömürlü olabilmesi için birçok çalışma yapılmıştır.

Fiberoptik jiroskoplar iki farklı konfigürasyonda tasarlanabilirler. Bunlar açık döngü fiberoptik jiroskop (ADFOJ) ve kapalı döngü fiberoptik jiroskop (KDFOJ) yapısıdır. Her iki konfigürasyonun da birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. ADFOJ daha düşük maliyetli, ısınmaya karşı daha duyarlı olmasına rağmen yüksek dönüş hızlarında yüksek hassasiyetli ölçüm gerektiren durumlarda kapalı döngü fiberoptik jiroskoplara göre istenilen hassasiyeti gösterememektedir. Ayrıca dinamik ölçüm aralığı, bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde de gösterildiği gibi, yeterince yüksek değildir. Bu durum KDFOJ ihtiyacını doğurmuştur.

ADFOJ'dan farklı olarak KDFOJ'da Sagnac etkisinden kaynaklanan faz farkı geri beslemeli kontrolcü ile belirlenir. Daha sonra sistemin denge durumunda çalışmasını sağlayacak kontrol işareti üretilerek faz modülatörüne uygulanır. Böylece sistemin sıfır dönme durumuna yakın çalışması amaçlanmaktadır. Sagnac etkisi ve kontrol işareti ile sistemin dengede çalıştırılması kontrolcü yardımı ile gerçekleştirilir.

Kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop sistemi için kontrolcü tasarımı bir diğer önemli aşamadır. KDFOJ sistemlerinin geri besleme döngüsünü kontrol etmek için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan başlıcaları PID kontrolcü, serrodin modülasyonu ve FPGA tabanlı kontrolcü olarak sıralanabilir. Tasarlanacak kontrolcünün, Sagnac etkisinden kaynaklanan faz farkını hızlı bir biçimde takip ederek, faz modülatörüne uygulanacak kontrol işaretini yüksek hassasiyette üretmesi beklenmektedir. Geri beslemeli kontrol sistemi içeren uygulamalarda kontrolcünün belirlenmesi, sistem

tasarımının en kritik aşamalarından biridir. Bu çalışmada KDFOJ sistemi için PID kontrolcü seçilmiştir.

Bu tez çalışmasında öncelikle kaynak özetleri kısmında jiroskop sistemlerinin tarihsel gelişiminden bahsedildikten sonra araştırma konusu olarak belirlenmiş kapalı döngü fiberoptik jiroskoplar ve yerçekimi arama algoritması için literatürde daha önceden yapılmış akademik çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmaların getirdiği yenilikçi yaklaşımlar açıklanmıştır. Kuramsal temeller kısmında ise, yapılan çalışmanın temelini oluşturan Sagnac etkisi ve PID kontrolcünün incelemesi yapılmıştır.

Materyal bölümünde KDFOJ konfigürasyonunun daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle, gerçekleştirilen ADFOJ yapısı açıklanmıştır. Devam eden süreçte tasarlanan ADFOJ yapısına bir geri besleme bloğu eklenerek KDFOJ yapısının tasarımı ve çalışma prensibi açıklanmıştır. Tasarlanan sistemde kullanılan kontrolcü türü PID ve bu kontrolcünün katsayılarının bulunmasında kullanılan yöntem olarak seçilen yerçekimi arama (YA) algoritması hakkında bilgi verilmiştir.

Yöntem bölümünde öncelikle açık ve kapalı döngü fiberoptik jiroskop konfigürasyonlarının tasarımının nasıl gerçekleştirildiği açıklandıktan sonra kapalı döngü konfigürasyonunun geri besleme döngüsünü kontrol eden PID kontrolcüsünün K_p , K_i ve K_d katsayılarının YA algoritması ile belirlenmesi işlemleri açıklanmıştır.

Bulgular ve tartışma kısmında tez çalışması sonucu elde edilen simülasyon sonuçları ile teorik çalışmanın tutarlılığı tartışılmıştır. Sonuç kısmında ise yapılan tez çalışması hakkında kısa bir özet sunulduktan sonra çalışmanın literatüre getirdiği yeniliklerden bahsedilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KURAMSAL TEMELLER

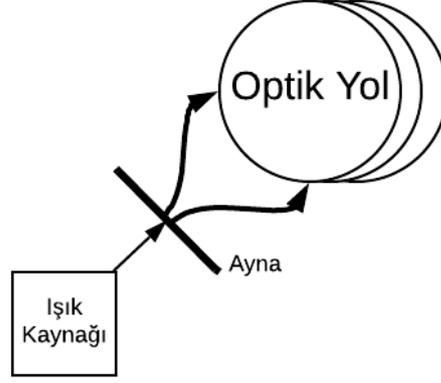
2.1 Kaynak Özetleri

Açısal yön değişim bilgisi günümüz teknolojisinde birçok sistem için büyük önem arz etmektedir. Geliştirilen kara, su, hava ve uzay araçları, denge sistemleri, yeni nesil navigasyon cihazları ve savunma sanayi gibi alanlarda açısal yön değişim bilgisi kullanılmaktadır. Açısal yön değişimine duyarlı olan jiroskoplar üzerine literatürde birçok akademik çalışma yapılmıştır. Bu bölümde özellikle optik jiroskoplar konusunda yapılan bilimsel araştırmalardan bir özet sunulmuştur.

2.1.1 Jiroskop sistemlerinin tarihsel gelişimi

Jiroskop sistemlerinin çalışma prensibi, ilk kez Sagnac (1913) tarafından öne sürülen ve ayrıca kendi adıyla da anılan Sagnac etkisine dayanmaktadır. George Sagnac, çalışmasında iki ışık demetinin kapalı bir yol boyunca birbirlerine zıt yönlerde yol almasını sağlamıştır. Bu ışık demetlerinin ilerledikleri yolda herhangi bir dönme meydana geldiğinde çıkış noktasında gözlemlenen ışık demetleri arasında bir faz farkı olması gerektiği ön görülmüştür. Sagnac, çıkışta oluşacak ışık demetleri arasında meydana gelecek faz farkından yola çıkarak açısal yön değişim bilgisinin elde edilebileceğini göstermiştir.

Aşağıda verilen şekil 2.1'de George Sagnac tarafından kurulan deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.1 George Sagnac Deney Düzenegi

Şekil 2.1’de Sagnac tarafından kurulan deney düzenegi 50 cm çapında dairesel bir masaya sabitlenmiştir. Dairesel masa saniyede iki tur atacak şekilde ayarlanarak deney gerçekleştirilmiştir. Dönme yönü olarak saat ve saatin tersi yönü seçilmiştir. Kapalı bir yol boyunca ilerleyen ışık demetlerinin, dairesel masanın döndürülmesiyle alacakları yol değişecek ve buna bağlı olarak da aralarında bir faz farkı oluşacaktır.

Sagnac etkisi ışığın aldığı yolun uzunluğuna, fiber bobinin yarıçapına, açısal yön değiştirme hızına ve ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Eğer fiber bobinin sarım sayısı artırırsa ışığın alacağı yol artacaktır. Böylece jiroskobun hassasiyetinin artırılması sağlanacaktır. Sagnac etkisi ilerleyen süreçte geliştirilen jiroskop sistemlerinin temelini oluşturmuştur.

Lazer ışık kaynaklarının yaygınlaşması ile birlikte Sagnac etkisinin incelenmesi daha kolay bir hale gelmiştir. Lazer ile geliştirilen Sagnac etkisine dayalı ilk jiroskop Rosenthal (1962) tarafından öne sürülmüştür. RLG ismi verilen bu jiroskop, kapalı bir yol süresince birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen ışık demetlerinin birden fazla kez döndürülmesi ile ölçüm hassasiyetinin artırılabilceğini göstermiştir. Aynı George Sagnac’ın gerçekleştirdiği deney düzenegi gibi RLG’ler de gerçekleştirilen deney düzeneginde ayna kullanmaktadır.

Lazerlerin keşfi ile birlikte yüksek doğruluk ve hassasiyette ölçümler yapılabilmektedir. Böylece jiroskop sistemleri önem kazanmış ve geliştirilecek yeni jiroskop sistemlerinin önünün açılması sağlanmıştır. İlk olarak altmışlı yıllarda geliştirilmesine rağmen ring lazer jiroskoplar yıllar içerisinde sürekli olarak geliştirilmeye devam edilmiştir ve günümüzde hala fiberoptik jiroskoplarla birlikte jiroskoplar arasında önemini korumaktadır.

Junqueira ve Barros (2004) tarafından yapılan çalışmada, Howe ve Savet'in (1964) çalışma prensibi bir atalet rotoruna dayanan DTG yapısını geliştirdikleri belirtilmiştir. Yine Junqueira ve Barros'un çalışmasında mekanik jiroskoplarda bükülme yayı sertliği dönüş oranından bağımsız olduğu ve dinamik atalet dönüş hızının karesiyle orantılı negatif bir yay sertliği sağladığı belirtilmiştir.

Yetmişli yıllarda fiberoptik kabloların keşfi ile birlikte RLG sistemlerinde olduğu gibi Sagnac etkisinin fiber kablolarla gerçekleştirilebilirliği düşüncesi ortaya çıkmıştır. Fiber kabloların keşfini takip eden yıllarda Vali ve Shorthill (1976) tarafından ilk kez fiberoptik jiroskoplar (FOJ) geliştirilmiştir. İlk zamanlar fiberoptik jiroskopların ring lazer jiroskoplar ile kıyaslanamayacağı, RLG'lerin çok daha ilerde olduğu fikri hakim olmasına rağmen, özellikle doksanlı yıllarda fiber kabloların gelişmesi ile birlikte fiberoptik jiroskop yapısı jiroskop sistemleri arasında çok önemli bir konuma yerleşmiştir. Fiberoptik kabloların sağladığı yüksek hızlarda iletim, iletilen işaretle bozulmaya karşı dayanıklılık, yüksek bant genişliği, güvenilirliği, ucuz oluşu ve yüksek hassasiyet gibi sağladığı avantajlar sayesinde fiberoptik kablolar sadece jiroskop sistemleri için değil, haberleşme sistemlerinin birçoğunda kullanılmaya başlanmıştır.

İlerleyen yıllarda Piyabongkarn vd. (2005) tarafından mikro-elektromekanik jiroskop yapısı geliştirilmiştir. Mikro-elektromekanik jiroskop, jiroskop yapılarının minyatürizasyonuna büyük katkı sağlamıştır.

Jiroskop yapılarının gelişiminin tarihsel gelişimi yukarıda bahsedildiği gibidir. Bu çalışmada jiroskop olarak fiberoptik jiroskop seçildiği için diğer jiroskop yapılarının derinlemesine incelemesi yapılmamıştır. Devam eden bölümlerde fiberoptik jiroskoplar

için ve bu jiroskopları kontrol eden kontrolcü yapılarının literatür incelemesi yapılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmanın kontrolcüsü olarak seçilen PID kontrolcünün parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan YA algoritması için yapılan akademik çalışmalar incelenmiştir.

2.1.2 Fiberoptik jiroskoplar konusunda yapılan bilimsel çalışmalar

Hotate ve Harumoto (1997) tarafından yapılan çalışmada giriş ışık dalga frekansını kontrol edebilmek adına dijital serrodin modülasyonuna dayanan bir rezonatör fiber optik jiroskop önerilmiştir. Çalışmada fazladan optik eleman kullanılmadan gürültü etkisinin azaltılabileceği öne sürülmüştür. Fiberoptik jiroskop sisteminin performansı hem açık döngü hem de kapalı döngü konfigürasyon için test edilmiştir.

Noureldin vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada fiberoptik jiroskobun bias kaymasına (dönüş hızındaki sapma), gürültüye, titreşim ve şoka karşı sistem performansı analiz edilmiştir. Simülasyonlar sonucu bias kaymasının elektronik kazanç ve fiber bobin uzunluğunun artırılması ile sistemin kararlılığını arttığı, yükselme zamanını azaldığı ve hassasiyetin arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara karşılık elektronik kazancın artırılması beyaz gürültü oranını artırırken, gürültü ve titreşime karşı duyarlılığı artırdığı belirtilmiştir.

Han vd. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kapalı döngü fiberoptik jiroskoplar için dinamik ve stokastik olmak üzere iki model geliştirilmiştir. İlk olarak doğrusal olmayan dinamik model bir dizi yaklaşım sonucu doğrusal dinamik bir modele basitleştirilmiştir. Basitleştirilmiş dinamik modelin teorik çalışmaları yapıldıktan sonra simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Stokastik modelleme ise rasgele gürültüyü simüle etmek için kullanılmıştır. İki modellemenin de simülasyon sonuçları teorik modelleme ile uyum içerisindedir.

Ge vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada faz rampa geri besleme tekniğine dayalı dijital sinyal işleme ve FPGA tabanlı bir KDFOJ sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Jiroskobun dinamik ve basitleştirilmiş doğrusal ayrık modeli oluşturulmuştur. Gerçek zamanlı sistemde rasgele gürültü oranının azaltılması için FIR (Finite Impulse Response) filtrelerden yararlanılmıştır. Sıfır-sapma test sonucu kararlılık $0.5^\circ/h$ olarak hesaplanmıştır.

Çelikel ve San (2009) tarafından yapılan çalışmada erbium katkılı fiber amplifikatörlü dijital bir kapalı döngü fiberoptik jiroskop önerilmiştir. Sistem performansı ölçümü için ölçek faktörü ve bias kararlılığı kriterleri seçilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tasarlanan fiberoptik jiroskop sisteminin metroloji alanı için uygun olduğu önerilmiştir.

Wang vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geleneksel rezonans fiberoptik jiroskop sistemlerinde kullanılan analog kontrolcülerden kurtulmak, minyatürizasyonu ve yüksek hassasiyeti sağlamak amacıyla dijital serrodin modülasyonuna dayanan bir rezonans fiberoptik jiroskop sistemi tasarlanmıştır.

Xuyou vd. (2009) tarafından yayımlanan makalede, fiberoptik jiroskop sisteminin çıkış işareti üzerinde Kalman ve uyarlamalı filtrelemenin etkileri incelenmiştir. Belirli durumlarda Kalman filtreleme avantajlı olmasına rağmen jiroskop sisteminin matematiksel modeli ve gürültü istatistiksel özellikleri çok doğru olmadığında Kalman filtreleme yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada Kalman filtrelemeye dayalı bir uyarlamalı filtreleme modeli geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu uyarlamalı filtrelemenin fiberoptik jiroskop sisteminin çıkış sinyalini iyileştirebileceği ve özellikle rasgele beyaz parazit üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Xuyou vd. (2009) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise fiberoptik jiroskop sistemleri için yeni bir modülasyon türü olan beş noktalı modülasyon yöntemi incelenmiştir. Makalede geleneksel fiberoptik jiroskop sistemlerinin kullandığı basamak ve kare dalga modülasyonlarının sağladığı giriş ve çıkış sinyallerinin örtüşmesinin avantajından bahsedilmiştir. Fakat bu durumun devrede çapraz girişime neden olacağına değinilmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için yenilikçi bir yaklaşım olarak modülasyon noktası olarak beş noktanın seçilmesi önerilmiştir.

Nasiri-Avanaki vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada fiberoptik jiroskop sisteminin kapsamlı bir formülizasyonu yapılmıştır. FIR filtreleri kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca fiberoptik jiroskop akım denklemlerinden yola çıkarak Sagnac faz kayması formülizasyonu elde edilmiştir. Son olarak çalışmada daha yüksek hassasiyetli FIR filtreleri kullanıldığında daha iyi jiroskop sistemlerinin elde edilebileceğinden bahsedilmiştir.

Ma vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada doğrusallığı ve dinamik aralığı artırmak amacıyla kapalı devre bir rezonans fiberoptik jiroskop önerilmiştir. Jiroskop faz modülatörü olarak $LiNbO_3$ kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda yazar, tasarlanan sistemin çalışmanın yapıldığı yıla kadar olan yapılmış tüm rezonans fiberoptik jiroskop sistemleri içerisinde en iyi sonuçların alındığını belirtmiştir.

Khoshki ve Ganesan (2014) tarafından yayımlanan makalede geri besleme Erbium katkılı fiberoptik jiroskop (EF-FOG) geliştirilmiş ve kapsamlı bir biçimde incelenmiştir. Geliştirilen sistemde düşük tutarlılıklı bir ışık kaynağı kullanılmış ve simülasyonları PSCAD yazılımı ile yapılmıştır. Geri besleme döngüsündeki zayıf sinyalin güçlendirilmesi Erbium katkılı fiber amplifikatör tarafından sağlanmıştır. Sistem Sagnac etkisini belirlemede ve saat ve saatin tersi yönündeki dönüş miktarlarını algılamada başarılı olmuştur.

Sun vd. (2014) diğerleri tarafından yapılan çalışmada fiberoptik jiroskop sisteminin geri besleme döngüsünün kontrolü için FPGA tabanlı bir model geliştirilmiştir. FPGA kullanarak jiroskop sisteminin minyatürizasyonu sorunu giderilmeye çalışılmıştır. Ayrıca çalışma sıfır-sapma durumu kararlılığı geliştirebilmek için iki kapalı döngü modelini sunmuştur. Bu teknik sonucu $0.075 \text{ }^\circ/\text{h}$ 'nin altında sıfır-sapma testi sonucu alınmıştır.

Yang (2016) tarafından yapılan çalışmada FPGA kontrolcüsüne dayalı kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop önerilmiştir. Kontrolcü olarak FPGA seçilerek jiroskop sisteminin minyatürizasyonu ve düşük bütçe hedeflenmiştir.

Pérez vd. (2016) tarafından yayımlanan makalede kapalı döngü konfigürasyonlu bir fiberoptik jiroskobun prototipinin ve teoriğinin tam bir analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada faz modülatörü olarak serrodin faz modülatörü kullanılmıştır. Fiberoptik jiroskobun prototipi optik ve elektronik bloklar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ve gerçekleştirilen jiroskopta, standart tek modlu optik fiber kullanılmıştır. Bu nedenle jiroskop düşük hassasiyete sahip olmasına rağmen sağladığı düşük maliyet sebebiyle piyasada kullanılan ticari jiroskop yapılarına kıyasla büyük avantaj sağlamaktadır.

Huang ve Liu (2016) tarafından yapılan çalışmada MATLAB programına dayalı fiberoptik jiroskop tasarımı ve bu jiroskop sistemini kontrol edecek bir kontrolcü tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada dijital fiberoptik jiroskop yapısının teorik modellemesi gerçekleştirildikten sonra jiroskop sisteminin gerçekte verilen rampa hızını takip edebilmesi için değişik kontrolcü türleri denenmiştir. Yapılan teorik araştırmalardan sonra kontrolcü verimliliğini göstermek için fiberoptik jiroskobun simülasyonları MATLAB programı ile gerçekleştirilmiş ve jiroskop sisteminin verilen rampa sinyalini izleme hatası azaltılmıştır.

Babu vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada basit yapılı bir ADFOJ ve KDFOJ tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem simülasyonları MATLAB/Simulink programı yardımıyla yapılmıştır. Makalenin teorik kısmında Sagnac etkisi Bessel fonksiyonları yardımı ile belirlenmiştir. KDFOJ sisteminde geri besleme döngüsünü basit bir kontrolcü yardımıyla kontrol edilmiştir. Simülasyon çalışmaları sonucu açılal yön değışim bilgisi başarılı bir şekilde belirlenmiştir.

Navruz vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada ADFOJ tasarımından yola çıkarak kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop geliştirilmiştir. Öncelikle bir ADFOJ yapısı tasarlanarak MATLAB/Simulink ortamında simülasyonları yapılmıştır. Sisteme giriş açılal hız olarak sırasıyla 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 rad/s'lik açılal hızlar uygulanmıştır. Sistem 0 rad/s'lik açılal hız ile dönerken zıt yönlerde ilerleyen ışık demetleri çıkışa aynı sürede ulaşacaklarından fotodedektörde gözlemlenen işarete girişim deseni gözlemlenmemiştir. Başka bir deyişle ışık demetleri üst üste binmişlerdir ve sinüzoidal bir işaret oluşturmuşlardır. Sisteme uygulanan açılal hız arttıkça, ışık dalgaları arasında

uygulanan hıza bağılı olarak faz farkı meydana gelmiştir ve bir girişim deseni oluştuğı gözlemlenmiştir. Daha sonra ADFOJ yapısına bir geri besleme bloğı eklenerek sistem KDFOJ yapısına dönüştürülmüştür. KDFOJ sisteminde amaç oluşan Sagnac etkisini gidermek ve sistemin sıfır dönme durumundaymış gibi çalışmasını sağlamaktır. Bu etkinin giderilmesi KDFOJ yapısında kontrolcü yardımıyla gerçekleştirilir. Bu nedenle Sagnac etkisi giderecek yenilikçi bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolcü yardımıyla sistem, saat ve saatin tersi yönündeki açısal hız değışimleri sonucu meydana gelen faz kaymasını hızlı bir şekilde gidermiştir.

Smolovik vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada tasarlanan fiberoptik jiroskop yapısının PID katsayılarını belirleme çalışmaları yapılmıştır. PID katsayılarının belirlemek için dönme açısındaki hata, açısal hız kayması ve sabit durum modundaki açısal rasgele yürüyüş olmak üzere üç ana kriter seçilmiştir. Bu kriterlerden yola çıkılarak PID katsayıları hesaplanmıştır.

2.1.3 Yerçekimi arama algoritması konusunda yapılan bilimsel çalışmalar

Nezamabadi-pour vd. (2009) tarafından ilk kez ortaya atılan yerçekimi arama (YA) algoritmasının temelinde Newton'un yerçekimi yasası bulunmaktadır. Önerilen yeni algoritmada ajanlar Newton yerçekimi ve hareket yasalarına dayanarak birbirleriyle etkileşime giren birer kütle olarak kabul edilir. YA algoritması izole bir sistemdir. Bu sebeple sistem kütle olarak kabul edilen her bir ajan diğeri bir ajanın durumunu görebilmektedir. Böylece ajanlar arasında bilgi alışverişi mümkün olabilmektedir. İlk kez ortaya atılan bu algoritma birçok birbirine bağılı etkenin etki ettiği sistemlerde minimum hata değerini yakalayabilmek için en iyi kombinasyonları sağlamıştır. İlerleyen süreçte PID parametrelerinin belirlenmesinde de kullanılmıştır.

Duman vd. (2012) yaptıkları çalışmada YA algoritmasını optimum reaktif güç gönderimi için kullanılmıştır. Voltaj profilini ve kararlılığını artırmak ve aktif güç kayıplarını en aza indirmek için çalışmalar yapılmıştır. Simülasyon sonuçları literatürde daha önce bildirilen en iyi sonuçlarla karşılaştırıldığında YA algoritmasının daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yalçın vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada doğru akım motor denetimi için YA algoritmasına dayanan bir PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. YA algoritması ile belirlenen PID katsayılarına ait simülasyon sonuçları literatürde daha önce belirlenen yöntemlerin bir kısmından daha iyi sonuç vermiştir.

2.2 Kuramsal Temeller

2.2.1 Sagnac etkisi

Fiberoptik jiroskopların çalışma prensibi Sagnac etkisine dayanmaktadır. Sagnac etkisi, kapalı bir yol üzerinde birbirlerine zıt yönlerde hareket eden iki ışın demeti arasında oluşan faz farkından kaynaklanır. Sagnac etkisi açısal dönme hızı ile orantılı olarak ifade edilir.

Sagnac etkisinin anlaşılabilmesi için ilk olarak tek sarımlı ve r yarıçaplı bir fiber bobin ele alınır. Tek sarımlı ve r yarı çaplı fiber bobinin içine optik kuplör yardımı ile aynı anda birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti gönderilir. Fiber bobinin hareketsiz olduğu durumda ışık demetleri çıkışa aynı sürede varacağından ışık demetlerinin çıkışa varış süreleri,

$$t = \frac{2\pi r}{c} = \frac{L}{c} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir, burada c ışık hızı L ise ışığın aldığı yoldur.

Fiber bobin saat yönünde Ω rad/s 'lik bir açısal hız ile döndürülürse ışınların giriş ve çıkış noktaları değişeceğinden, saat yönünün tersinde ilerleyen ışığın alacağı yol azalır ve buna bağlı olarak da çıkışa erken ulaşır. Saat yönünün tersinde ilerleyen ışık demetinin sistemi terk etme süresi,

$$t_{ccw} = \frac{L - r \cdot \Omega \cdot t_{ccw}}{c} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Benzer şekilde saat yönünde ilerleyen ışığın alacağı yol artacağından çıkışa daha geç sürede varır. Saat yönünde ilerleyen ışık demetinin sistemi terk etme süresi,

$$t_{cw} = \frac{L + r \cdot \Omega \cdot t_{cw}}{c} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir. Zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti arasındaki zaman farkı,

$$\Delta t = t_{cw} - t_{ccw} = \frac{4\pi r^2 \Omega}{c^2} = \frac{LD\Omega}{c^2} \quad (2.4)$$

şeklinde ifade edilir, burada $D=2r$ fiber çapı, $L=2\pi r$ ışığın tek sarımlı fiber bobinde alacağı yoldur. t_{cw} saat yönünde ilerleyen ışığın, t_{ccw} ise saat yönünün tersi yönünde ilerleyen ışığın çıkışa ulaşma süreleridir.

Fiber bobinin sarım sayısını artırmak ışık demetlerinin alacağı yolu artıracaktır. N sarımlı bir fiber bobin için ışıklar N kat daha fazla yol alır, buna bağlı olarak da Sagnac faz farkı artar. Böylece fiberoptik jiroskobun duyarlılığı artırılmış olur ve ışığın alacağı yol $L=2\pi r N$ şeklinde ifade edilir.

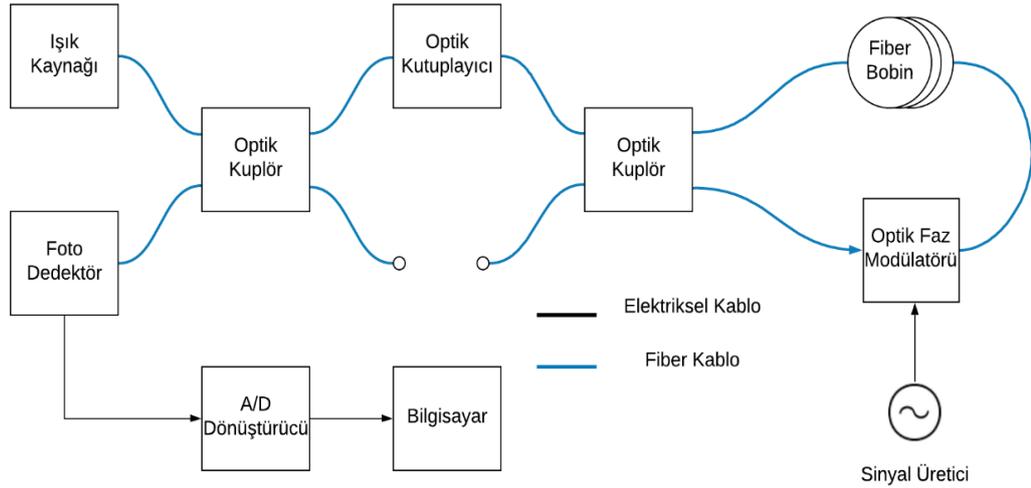
Δt zaman farkının, açısal frekansı $\omega=2\pi f$ olan bir sürekli dalga için oluşturacağı Sagnac faz farkı,

$$\Phi_s = \omega \Delta t = \frac{\omega LD\Omega}{c^2} = \frac{2\pi LD\Omega}{\lambda c} \quad (2.5)$$

ile hesaplanır. Eşitlik 2. 5'den anlaşılacağı üzere Sagnac etkisi ışığın aldığı yola, fiber bobinin yarıçapına, ışığın dalga boyuna ve açısal dönüş hızına bağlı olarak değişmektedir.

2.2.2 Açık döngü fiberoptik jiroskoplar

ADFOJ'un temeli bölüm 2.2.1'de açıklanan Sagnac etkisine dayanır. Şekil 2.2'de ADFOJ'un blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.2 Açık Döngü Fiberoptik Jiroskop Blok Diyagramı

Işık kaynağından gelen ışık demetleri bir 3 dB optik kuplör yardımıyla birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen iki ışık dalgasına ayrıştırılır. Daha sonra ayrıştırılan bu ışık demetleri optik kutuplayıcı yardımıyla kutuplanarak almaları istenilen yolun dışında polarize olması engellenirken ışık demetlerinin tek bir yönde iletimi sağlanmış olur. Optik kutuplayıcıda kutuplanan ışık dalgaları fiber bobinde yol almaya başlar.

Fiber bobinde saat ya da saatin tersi yönünde bir dönme meydana gelirse açısal dönüş hızına bağlı olarak ışık demetleri arasında Sagnac etkisinden kaynaklı bir faz farkı meydana gelecektir. Oluşan faz farkı optik faz modülatörü yardımıyla hesaplanır. Aynı zamanda oluşan faz farkının genlik dalgalanmaları şeklinde gösterimi sağlanmış olur. Faz modülatöründen çıkan sinyal fotodedektör yardımı ile algılanır. Bir ADFOJ sisteminin fotodedektör çıkış işareti

$$P_d = 0.5P_0(1 + \cos(\Delta\Phi_s(t) - \Delta\Phi_m(t))) \quad (2.6)$$

formülü ile hesaplanabilir. Burada $\Delta\Phi_s(t)$ Sagnac etkisini, $\Delta\Phi_m(t)$ faz modülasyonundaki bias faz değişimini ifade etmektedir. Sinüs biçimli bias faz modülasyonu $\Phi_m(t)$

$$\Phi_m(t) = \Phi_0 \sin(\omega_m t) \quad (2.7)$$

ile ifade edilir. Burada $\omega_m = 2\pi f_m$ olup f_m modülasyon frekansıdır. Jiroskop sisteminin fiziksel dönmesi neticesinde oluşan Sagnac faz kaymasına ilave olarak faz modülasyonundan dolayı bias faz değişimi meydana gelecektir. Bias faz değişimi $\Delta\Phi_m(t)$,

$$\Delta\Phi_m(t) = \Phi_0 [\sin(\omega_m t) - \sin(\omega_m t - \omega_m \tau)] \quad (2.8)$$

ile hesaplanabilir. Jiroskop fiber bobininde zıt yönde dolanan ışık demetlerinden biri t zamanında modülatörden geçerken, $t - \tau$ anında diğer ışık ile modülatörde karşılaşır. Burada

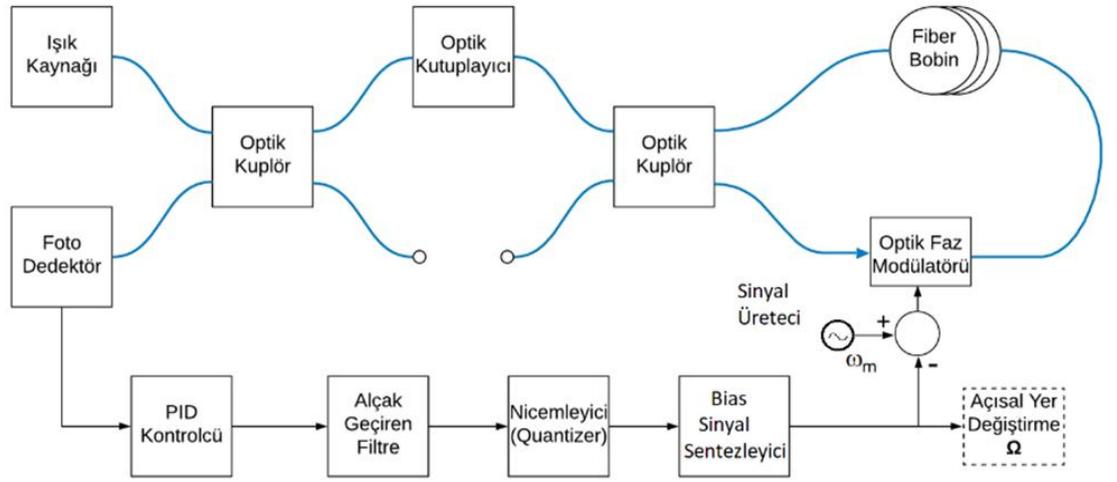
$$\tau = \frac{NL}{c} \quad (2.9)$$

ışığın fiber bobini dolanma süresidir.

Eğer fiber bobinde herhangi bir açısal dönme meydana gelmiyorsa zıt yönlerde ilerleyen ışık dalgaları, çıkışa aynı sürede varacaklarından fotodedektör çıkışında üst üste binmiş bir şekilde gözlemlenecektir. Fiber bobinde meydana gelen herhangi bir açısal dönme sonucunda ise ışık demetlerinden biri diğerine göre çıkışa erken ya da geç varacaktır. Böylece fotodedektör çıkışında gözlemlenen çıkış gücü işaretinde bir girişim deseni gözlemlenecektir.

2.2.3 Kapalı döngü fiberoptik jiroskoplar

KDFOJ sisteminde ADFOJ sisteminden farklı olarak fotodedektörden algılanan işaret PID kontrolcüye verilerek Sagnac etkisini kompanse edecek sinyalin üretilmesi sağlanır. Üretilen kontrol işareti sırasıyla alçak geçiren filtre ve nicemleyiciden geçirilerek optik faz modülatörüne uygulanır. Şekil 2.3'de KDFOJ sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.3 Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemi Blok Diyagramı

KDFOJ sistemi için PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirlenmesi için birçok yöntem mevcuttur. Bu çalışmada PID katsayılarının belirlenmesi YA algoritması ile gerçekleştirilmiştir.

YA algoritmasında durdurma kriteri olarak iterasyon sayısı seçilmiştir. İterasyon sayısı girildikten sonra YA algoritması her iterasyon sayısında her bir PID katsayısı için elli adet değer üretmektedir. K_p , K_i ve K_d katsayılarının her biri için üretilen ellişer değer KDFOJ sisteminde PID bloğuna gönderilerek simülasyon başlatılır.

Devam eden süreçte geri besleme bloğundaki hata işareti hesaplanır. Hesaplanan hata işaretinden yola çıkılarak en iyi ve en kötü PID katsayı aralıkları belirlenir. Belirlenen

en iyi ve en kötü PID katsayıları, yeniden üretilecek olan rasgele ellışer sayının hangi aralıkta değeri alması gerektiği bilgisini vermektedir.

Her bir iterasyon adımımda bu işlemler gerçekleştirilir. YA algoritması için belirlenen durdurma koşulu olan iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma, ulaşılan en iyi K_p , K_i ve K_d PID katsayılarını belirlemektedir.

PID katsayılarının belirlenmesinden sonra KDFOJ sistemi çalıştırıldığında, sistemin Sagnac etkisinden kaynaklanan hata işaretinin hızlı bir biçimde giderip sıfır dönme durumundaymış gibi çalışması beklenmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde KDFOJ'un daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle ADFOJ yapısı açıklanmıştır. Daha sonra ADFOJ'dan KDFOJ yapısına geçişte nasıl bir yöntem izlendiğinden bahsedilmiştir. Devam eden süreçte KDFOJ'u kontrol edecek PID kontrolcü ve son olarak da PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan yöntem olan yerçekimi arama algoritması açıklanmıştır.

3.1 Materyal

Fiberoptik jiroskoplar temelde iki farklı konfigürasyona ayrılırlar. Bunlar açık döngü fiberoptik jiroskop ve kapalı döngü fiberoptik jiroskoplardır. KDFOJ yapısı, ADFOJ yapısına bir geri besleme döngüsü eklenmesi ile elde edilmektedir. KDFOJ sistemleri bir geri besleme döngüsüne sahip oldukları için hata sinyalini kontrol edecek bir kontrolcüye ihtiyaç duyarlar. Kontrolcünün tasarımı, jiroskop sistem tasarımında büyük öneme sahiptir. Materyal kısmında açık ve kapalı döngü fiberoptik jiroskop tasarımlarında kullanılan optik ve elektriksel elemanlar açıklanmıştır.

Kuramsal temeller bölümünde genel işleyişi anlatılan ADFOJ ve KDFOJ yapılarının tüm optik ve elektriksel elemanlarının detaylı incelemesi aşağıda yapılmıştır.

3.1.1 Işıma kaynağı

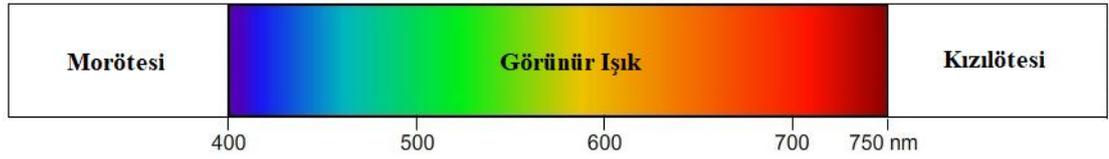
Fiberoptik haberleşme sistemlerinde iki tip ışık kaynağı kullanılmaktadır. Bu ışık kaynakları lazer diyot ve ışık yayan diyot olarak bilinen LED ışık kaynağıdır. LED ve lazer diyotun birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Kullanılacağı sisteme göre lazer ya da LED ışık kaynağı tercih edilir.

Işık kaynağı seçerken dikkat edilecek en önemli noktalardan birisi ışık dalga boyudur. λ sembolüyle gösterilen dalga boyu;

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

formülizasyonu ile ifade edilir, burada $c = 3 \cdot 10^8$ sabit ışık hızı ve f frekanstır. Bu formülden anlaşılacağı üzere ışık hızı sabit olduğu için dalga boyu arttıkça frekans azalacaktır.

Şekil 3.1’de dalga boyuna karşılık gelen ışık spektrumunun belirli bir bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Işık Spektrumu

Fiberoptik haberleşmede genellikle kızılötesi bölgesinde iletim sağlanır. 850 nm – 1330 nm – 1550 nm band aralığı fiberoptik haberleşme sisteminde en yaygın kullanılan aralıktır. Tasarlanan açık ve kapalı döngü jiroskoplarda ışık kaynağı olarak telekom fiberlerde sıklıkla kullanılan zayıflamanın en az olduğu 1550 nm dalga boyu kullanılmıştır.

3.1.2 Optik kuplör

Optik kuplörlerin temel görevi iki farklı devrenin birbirinden ayrılmasını sağlamaktır. FOJ sistemlerinde kullanılan optik kuplör yapısı ışık kaynağından alınan ışığı iki farklı ışık demetine ayırarak iletilmesi için kullanılır. Optik kuplör olarak 3 dB kuplör yapısı kullanılmıştır. 50:50 olarak da bilinen 3 dB kuplör gelen ışığı iki ışık demetine ayırarak birbirlerine zıt yönlerde iletilmesini sağlamaktadır.

3.1.3 Optik kutuplayıcı

Işığın algılanması aşamasında belirli bir yönde kutuplanmış ışık dalgaları, kutuplanmamış ışık dalgalarına oranla daha iyi soğurulmaktadır. Bu nedenle optik kutuplayıcı fiberoptik haberleşme sistemlerinde büyük öneme sahiptir. FOJ sistemlerinde optik kutuplayıcı, optik kuplör tarafından ikiye ayrılan ışık dalgalarının iletilmesi istenilen yolun dışında polarize olmasını engellemek için kullanılır. Böylece ışık demetleri tek bir yönde iletilmesi sağlanır.

3.1.4 Fiberoptik bobin

Fiberoptik bobin, FOJ sistemlerinde optik kuplör tarafından birbirlerine zıt yönlerde ilerleyecek şekilde ikiye ayrılan ışık demetlerinin aldıkları yolu ifade eder. Zıt yönlerde ilerleyen ışık demetlerinin aralarında oluşan faz farkı ve Sagnac etkisi fiberoptik bobinde meydana gelir. Tasarlanan ADFOJ ve KDFOJ yapılarında fiber bobinin çevre uzunluğu $L=50$ cm ve fiberoptik kablo sarım sayısı $N=2000$ olarak seçilmiştir.

3.1.5 Optik faz modülatörü

Optik faz modülatörü birbirlerine zıt yönlerde ilerleyen ışık demetleri arasındaki faz farkını belirlemek için kullanılmaktadır. Aynı zamanda optik faz modülatörü ile Sagnac etkisinden kaynaklanan faz kaymasını genlik dalgalanmalarına dönüştürmek için kullanılır. Fotodedektör çıkış işaretinin güç formülünden yola çıkarak zıt yönlerde ilerleyen ışık demetlerinin faz farkı gözlemlenebilir.

3.1.6 Fotodedektör

Zıt yönlerde ilerleyen iki ışık demeti fiber bobindeki yolu tamamladıktan sonra optik kuplör yardımıyla fotodedektör tarafından algılanmaktadır. Işık demetleri aldıkları yol boyunca birbirleri arasında meydana gelen Sagnac etkisi ve faz kaymasının etkileri fotodedektör sayesinde görülebilmektedir.

3.1.7 A/D dönüştürücü

A/D dönüştürücü fotodetektör tarafından algılanan optik işaretin dijital ortama dönüştürülmesini sağlar. Böylece bilgisayar ortamında fiberoptik jiroskop sisteminin incelenmesi mümkün olmaktadır. Ayrıca açısal hız ve yöndeki değişim bilgileri de kolaylıkla elde edilebilmektedir.

3.1.8 PID kontrolcü

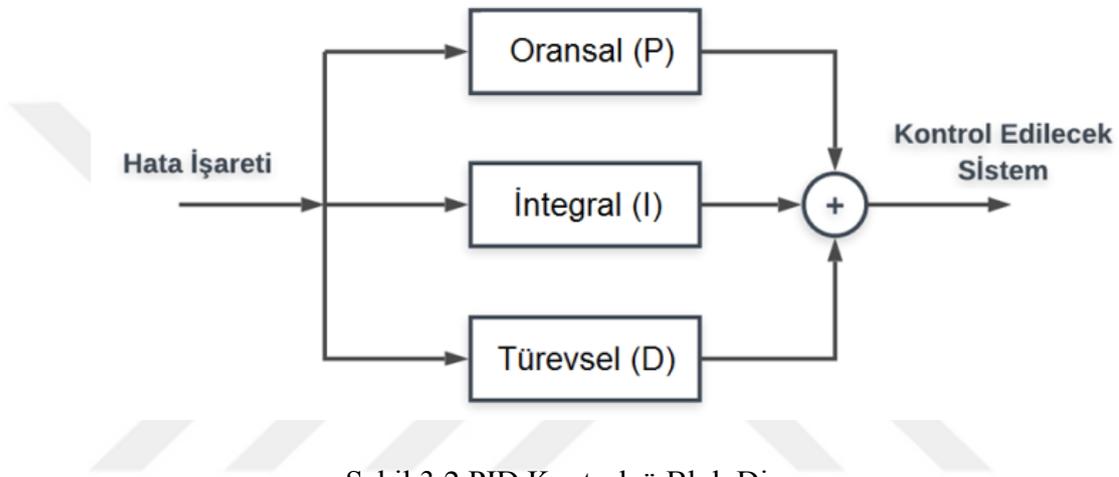
Kapalı döngülü bir sistemde kontrolcünün esas görevi, kontrol edilecek parametrenin geri besleme bloğuna verilen hata işareti ile referans olarak sisteme verilen işaretin sisteme yaptığı etkiyi karşılaştırmaktır. Kontrolcü geri besleme bloğundaki sinyal ile referans sinyal arasında oluşan farktan yola çıkarak hatayı en aza indirgeyecek olan kontrol işaretini üretir ve sistem denetimini tekrar gerçekleştirir. Böylece hata istenilen değere indirgeninceye kadar bu işlem tekrarlanır.

Kapalı döngü kontrol sistemlerinde, tasarlanan sisteme uygun bir kontrolcü seçimi yapılmalıdır. Uygulanabilirliği, yüksek hassasiyeti, tepkime süresi ve gürültüye karşı duyarlılığı gibi sağladığı avantajlardan dolayı PID kontrolcü, son yıllarda en yaygın kullanılan kontrolcü türlerindedir.

Literatürde PID konusunda birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları hız performans eğrisinden yola çıkılarak PID parametrelerinin gerçek zamanlı belirlenmesi (Coşkun ve Terzioğlu 2011), PID parametrelerinin bulanık mantık ile belirlenmesi (Gaurav ve Kaur 2012), genetik algoritmaya dayanan bir PID kontrolcü tasarımı (Vatansever ve Şen 2013), birim basamak cevabının çoklu ölçüt performansı analiz edilerek en iyi PID kontrolcü tasarımı (Deniz vd. 2014), kontrol edilecek sistemlerin doğrusal ve pratik olmaması durumunda PID parametrelerin belirlenmesi için Fuzzy uygulamaları (Upalanchiwar ve Sakhare 2014) ve kesir dereceli sistemler için referans modele dayalı bir PID kontrolcü tasarımıdır (Doğruer vd. 2017). Yapılan

literatür çalışmalarından PID katsayılarının belirlenebilmesi için birçok yöntem geliştirildiği görülmektedir.

PID kontrolcü sırasıyla oransal, integral ve türevsel katsayıları ifade eden K_p , K_i ve K_d parametrelerini içermektedir. Bu parametrelerin doğru seçimi, bir geri beslemeli kontrol sistemi için oldukça önemlidir. Şekil 3.2’de bir PID kontrolcünün temel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2 PID Kontrolcü Blok Diyagramı

Oransal olarak ifade edilen K_p parametresi kontrol edilen sisteme, alınan hata işaretinin belirli bir kazançla çarpımı kadar etki eder. Bu etki, hatanın K_p parametresi ile doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilir. PID içerisindeki oransal bloğunun formülizasyonu,

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.2)$$

ile gösterilir, burada $e(t)$ hata işaretidir.

İntegral olarak ifade edilen K_i parametresi kontrol edilen sisteme, sistemin başlangıç anından sonuna kadar geçen süreçte toplam hatayla orantılı olarak etki eder. Bu etki, tüm sistem çalışma süresi boyunca oluşan hata birikiminin fonksiyonu olarak ifade edilir. İntegral bloğunun formülizasyonu,

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.3)$$

ile gösterilirken burada $e(\tau)$ ifadesi toplam hatayı ifade etmektedir.

Türevsel olarak ifade edilen K_d parametresi kontrol edilen sisteme, sistemde oluşan hata değişim hızına bağlı olarak etki eder. Bu etki, hata değişim miktarı ile K_d 'nin doğrusal fonksiyonu olarak ifade edilir. Türevsel bloğunun formülizasyonu ise

$$u_d(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

ile gösterilir.

PID bloğunu oluşturan bu üç bloğun oluşturduğu etkilerin toplamı kontrol sinyali olarak ifade edilir ve

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (3.5)$$

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

şeklinde gösterilir.

KDFOJ yapısında temel amaç sistemin sürekli olarak denge (sıfır dönme) durumunda çalışmasıdır. Bu amaç bir kontrolcü yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Yapılan tez çalışmasında KDFOJ sistemini kontrol edecek kontrolcü olarak PID seçilmiştir.

Fiber bobinin dönmesiyle meydana gelen Sagnac etkisinden kaynaklı faz farkı PID kontrolcünün ürettiği kontrol sinyali ile kompanse edilir. Böylece Sagnac etkisi giderilirken aynı zamanda faz kaymasından kaynaklanan açısal hız değişim bilgisi de elde edilir.

3.1.9 Alçak geçiren filtre

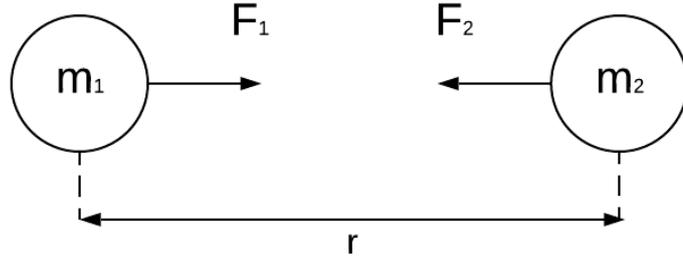
Alçak geçiren filtre, belirli bir frekansın altını geçirirken istenen frekansın dışında kalan frekans bölgesini bastırır. Ölçümlerin alınmasında, gürültünün bastırılmasında ve demodülasyon sonrası taşıyıcı bastırılmasında alçak geçiren filtreler kullanılabilir. Tasarlanan KDFOJ sisteminde Sagnac etkisini bastıran PID kontrolcünün kontrol işareti bir alçak geçiren filtreden geçirilerek nicemleyiciye gönderilir.

3.1.10 Nicemleyici

Nicemleme işlemi bir sinyali sonlu ve eşit sayıda aralıklara bölerek her bir aralığa bir değer atama işlemidir. Nicemleme işleminin daha iyi anlaşılabilmesi için sürekli zamanlı bir sinüzoidal işaret ele alınabilir. Sinüs işareti her biri eşit aralıklara bölünür ve her bir aralığa bir değer atanır. Belirlenen aralık ne kadar küçük olursa sürekli zamanlı sinüs işaretine o kadar yakın bir işaret elde edilir. Böylece işareti belirli aralıklarla ifade edilmesi daha kolay olur.

3.1.11 Yerçekimi arama algoritması

Yerçekimi arama (YA) algoritmasının çalışma prensibi Newton'un yerçekimi yasasına dayanmaktadır. Newton'un yerçekimi yasasına göre evrende bulunan her bir parçacık diğer bir parçacığı kütlelerinin çarpımıyla doğru orantılı, aralarında bulunan mesafenin karesiyle ters orantılı bir şekilde çekmektedir. Newton'un yerçekimi yasası gösterimi şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 İki Kütle Arasındaki Newton Yerçekimi Yasası Gösterimi

Aralarında r kadar uzaklık bulunan m_1 ve m_2 kütleleri arasındaki yerçekimi kuvveti büyüklüğü;

$$F_1 = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \quad (3.6)$$

$$F_2 = -G \frac{m_1 \times m_2}{r^2} \quad (3.7)$$

$$F_1 = -F_2 \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir, burada G yerçekimi sabitini ifade etmektedir.

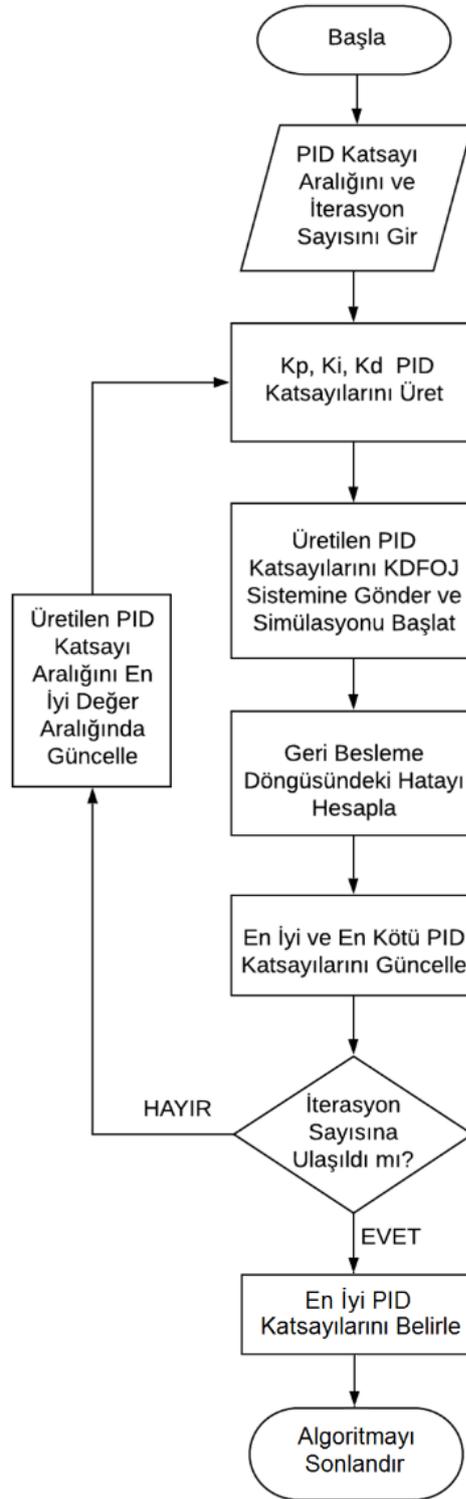
SI birimine göre F ile ifade edilen kuvvetin birimi Newton (N), m_1 ve m_2 kütlelerinin birimi kilogram (kg), kütlelerin arasındaki uzaklık metre (m) ve yerçekimi büyüklüğü ise $N m^2 kg^{-2}$ ile ifade edilmektedir. Bu formülizasyona göre iki kütle birbirlerinden uzaklaştıkça aralarındaki çekim kuvveti azalacaktır. Aynı zamanda $F_1 = -F_2$ formülizasyonundan da görüleceği üzere kütlelerin birbirlerine uyguladıkları çekim kuvveti eşit büyüklükte fakat zıt yönlüdür.

YA algoritmasında ajanlar Newton yerçekimi yasasına dayanarak birbirleriyle etkileşime giren birer kütle olarak kabul edilir. Sistem izole bir sistem olduğu için ajanlar diğer ajanlarla etkileşim içerisindedir. Bu nedenle ajanlar arası bilgi alışverişi mümkün olabilmektedir.

Tasarlanan fiberoptik jiroskop sistemindeki PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayıları YA algoritması içerisinde birer kütle olarak yer almaktadır. Şekil 3.4'de jiroskop sistemi için tasarlanan YA algoritmasının akış şeması görülmektedir.

YA algoritması çalıştırılmadan önce ilk olarak başlangıç ve durdurma kriterlerinin seçilmesi gerekir. Kütle olarak seçilecek değer sayısı, bu kütlelerin ağırlık aralığı ve her bir iterasyon sayısı için algoritmanın üreteceği değer sayısı başlangıç koşulu olarak seçilmiştir. İterasyon sayısı ise algoritmanın durdurma kriteri olarak belirlenmiştir.





Şekil 3.4 Yerkimi Arama Algoritması Akış Şeması

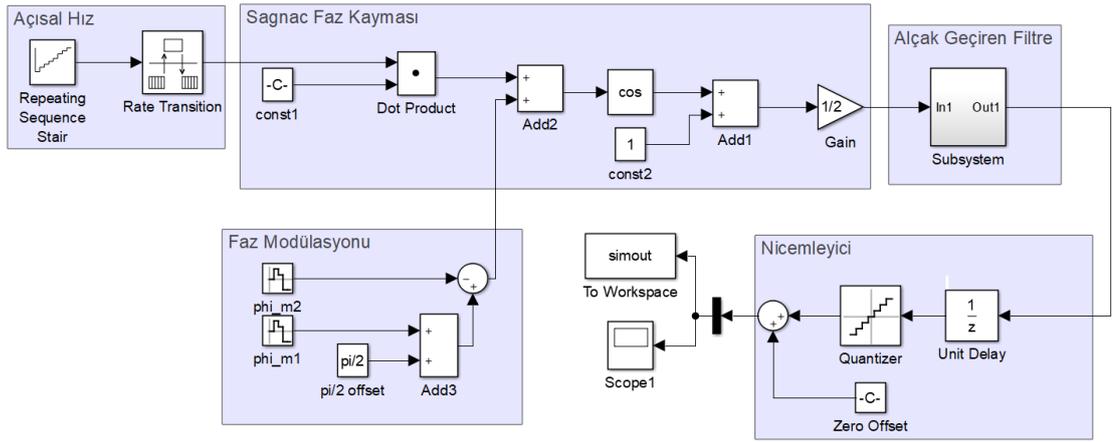
Başlangıç ve durdurma kriterlerinin belirlenmesinin ardından algoritma koşturulur. Başlangıçta her bir PID katsayısı için belirlenen ağırlık aralığında, belirlenen sayıda değer üretilerek ilk iterasyon gerçekleştirilir. İlk iterasyonun bitiminde sistem hatası algoritma tarafından analiz edilerek en iyi ve kötü PID katsayı aralığı belirlenir ve algoritma içerisindeki ağırlık aralığı belirlenen en iyi PID katsayı aralığına göre güncellenerek ikinci iterasyona geçilir. Durdurma koşulunu sağlayacak iterasyon sayısına ulaşılan kadar bu işlem her bir iterasyon sayısı için tekrar tekrar gerçekleştirilir. Aralığın sürekli güncellenmesi ile en iyi sonucu verecek PID katsayıları hassas bir şekilde belirlenir.

3.2 Yöntem

Bu bölümde materyal kısmında açıklanan ADFOJ, KDFOJ, PID kontrolcü ve YA algoritması yapılarının tasarımı ve geliştirilmesi açıklanmıştır. Bahsedilen tüm yapıların tasarımı ve geliştirilmesi MATLAB / Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bir KDFOJ sisteminde PID kontrolcü katsayılarının hesaplanmasında ilk defa YA algoritma yöntemi kullanılmıştır.

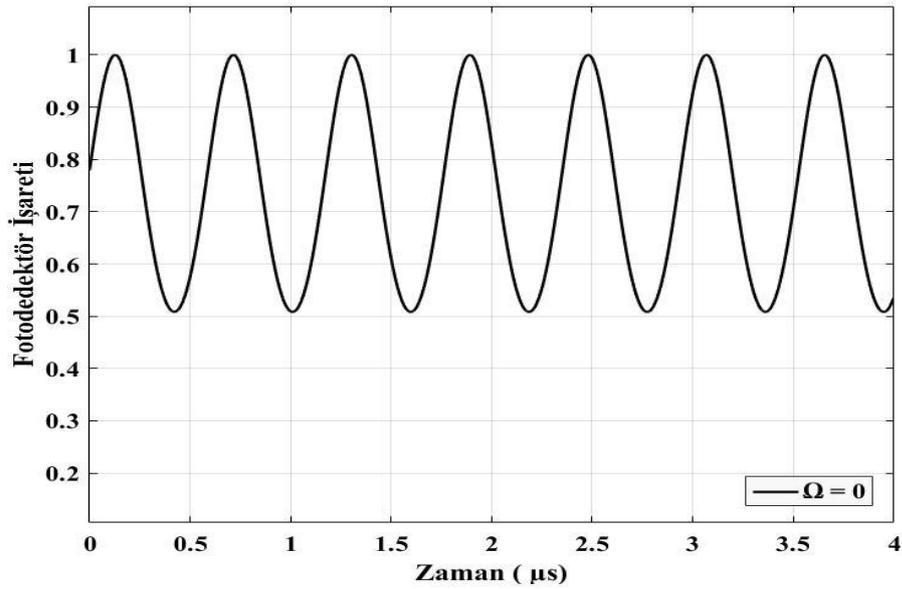
3.2.1 Açık döngü fiberoptik jiroskop tasarımı

ADFOJ sisteminin tasarımı hem MATLAB ortamında kod ile hem de Simulink ortamında oluşturulan model aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’de tasarlanan ADFOJ sisteminin Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 3.5 ADFOJ Simulink Modeli

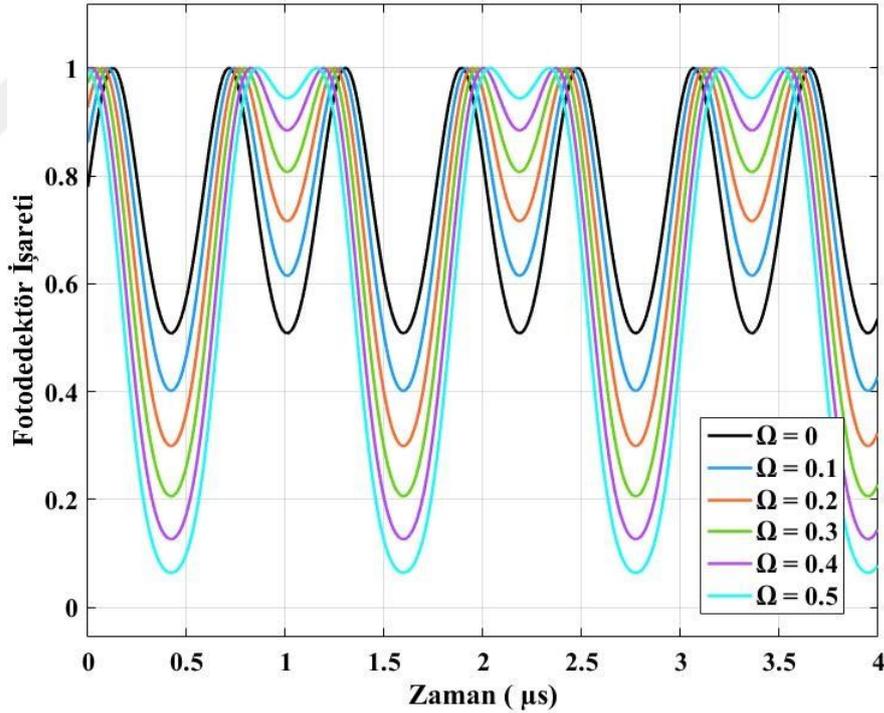
ADFOJ Simulink modelinin tasarımı eşitlik 2.6'ya göre gerçekleştirilmiştir. Fiber bobinde herhangi bir dönme hareketi olmadığında fotodedektör çıkışında gözlemlenen çıkış gücü işaretinin bir sinüzoidal dalga olması beklenmektedir. Fiber bobinde dönme hareketi olmayacağı için zıt yönlerde ilerleyen ışık demetleri çıkışı aynı sürede ulaşacaklardır. Bu nedenle çıkışta bir girişim deseni gözlemlenmeyecektir. Şekil 3.6'da ADFOJ sisteminin fotodedektör çıkış işaretinin sıfır dönme durumunda meydana gelen sinyal gösterilmiştir.



Şekil 3.6 ADFOJ Sıfır Dönme Durumu Fotodedektör Çıkış İşareti

ADFOJ sisteminde girişe açısal hız olarak eğer 0 rad/s'den 0.1 rad/s aralıklarla 0.5 rad/s'ye kadar hız artışı verilirse fotodedektör çıkışında bir girişim deseni gözlemlenmesi beklenir. Bunun nedeni fiber bobinde meydana gelen dönmeye bağlı olarak ışık demetlerinin çıkışa farklı zamanlarda ulaşmasıdır. Başka bir deyişle aralarında meydana gelen faz farkıdır. Sisteme verilen açısal hız iki boyutlu düzlemde pozitif ve negatif yönlüdür.

Işık demetleri çıkışa farklı zamanlarda ulaştıkları için ışık demetleri sıfır dönme durumunda olduğu gibi bire bir üst üste binmeyecek, bir girişim deseni oluşturacaktır. Şekil 3.7'de ADFOJ sistemi girişine verilen 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 rad/s'lik açısal hız değişimlerine karşılık fotodedektörde gözlemlenen çıkış gücü işaret grafiği gösterilmiştir.

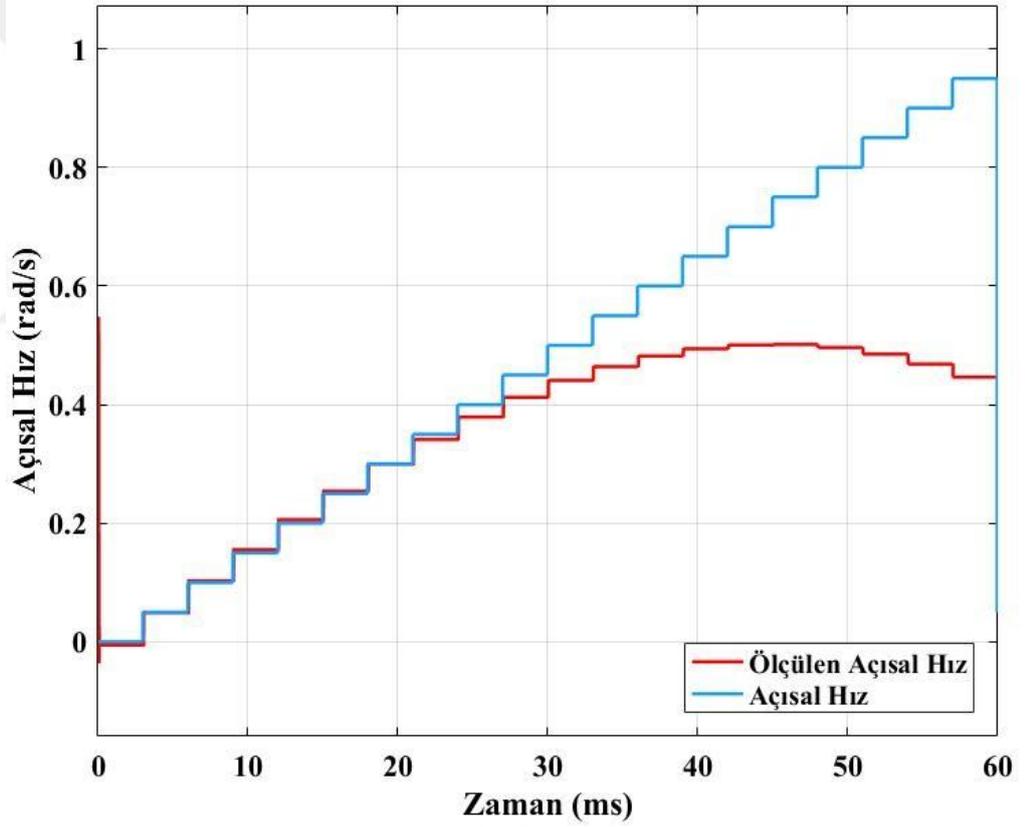


Şekil 3.7 ADFOJ Farklı Açısal Hız Girişleri İçin Fotodedektör Çıkış Gücü İşareti

Şekil 3.7'deki grafikten anlaşıldığı üzere sinyal tepe genliği, sabit nominal 1 olarak kalmaktadır ve açısal hızdan bağımsızdır. Ayrıca açısal hızdaki değişim ile birlikte

grafiğin minimum değerinin değiştiği görülmektedir. Sinyal seviyesinin minimum değerini takip ederek açısal hız ölçümü yapmak mümkündür, fakat bu işlemi gerçekleştirmek kolay değildir.

ADFOJ'lar sistem girişine verilen düşük açısal hız değişimlerini yakından takip edebilmektedir. Fakat yüksek dönüş hızlarında ADFOJ'un dinamik ölçüm aralığının yüksek olmaması sebebiyle sistem, verilen açısal hızı takip edememektedir. Şekil 3.8'den de görüleceği üzere belirli bir açısal hız değişimine kadar sistemin verilen açısal hızı yakından takip ettiği görülürken, ilerleyen süreçte açısal hızın artmaya devam etmesiyle doğrusallığın bozulduğu görülmektedir.



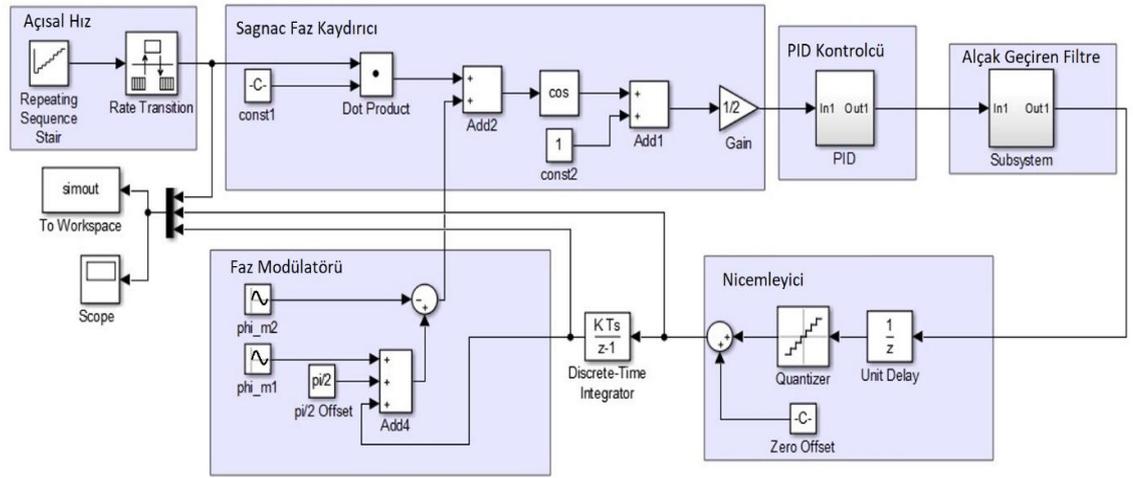
Şekil 3.8 ADFOJ Açısal Hız Takibi ve Dinamik Ölçüm Aralığı

ADFOJ sistemlerinin doğrusallığı problemini çözmek ve dinamik ölçüm aralığındaki sınırlamaları kaldırma ihtiyacı KDFOJ gereksinimini doğurmuştur.

3.2.2 Kapalı döngü fiberoptik jiroskop tasarımı

KDFOJ sistemi daha önce bahsedildiği gibi ADFOJ'a bir geri besleme bloğu eklenerek elde edilmektedir. ADFOJ'dan farklı olarak KDFOJ yapısında geri besleme bloğunda meydana gelen hata işaretini kompanze edecek bir kontrolcü bulunmaktadır. KDFOJ tasarımının yanında kontrolcü tasarımı da büyük önem arz eder.

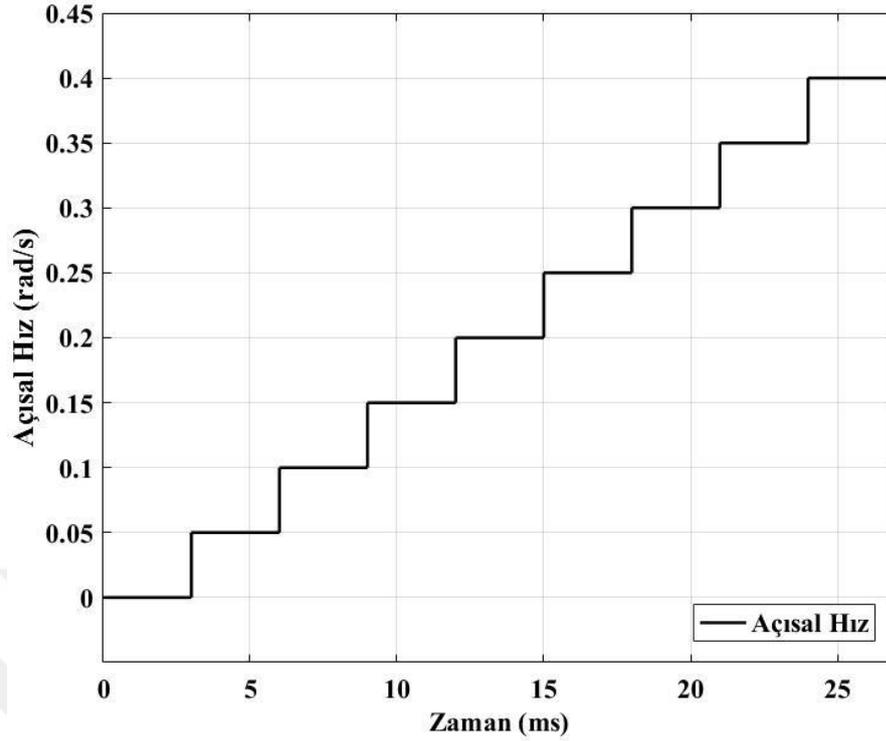
KDFOJ sistem tasarımı MATLAB / Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da KDFOJ yapısının Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 3.9 Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Simulink Modeli

Aynı ADFOJ sisteminde olduğu gibi tasarım ilk başta “Sagnac Faz Kaydırıcı” bloğunda eşitlik 2.6'nın gerçekleşmesiyle başlar. “Sagnac Faz Kaydırıcı” bloğunda fiberoptik jiroskobun optik kısmında meydana gelen faz kaymaları ($\Delta\Phi_s(t)$, $\Delta\Phi_m(t)$) modellenmiştir.

Açısal hız olarak belirli adımlarla artan bir basamaklı fonksiyon uygulanır. 0 rad/s'den başlayarak 0.05 aralıklarla 0.4 rad/s'ye kadar artan bir açısal hız mevcuttur. Bu açısal hız değişimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 KDFOJ Sistemine Uygulanan Açısal Hız Değişimi

“Sagnac Faz Kaydırıcı” bloğunun devamına “PID Kontrolcü” bloğu eklenmiştir. PID kontrolcü, geri besleme bloğunda meydana gelen hata işaretini kompanze edecek bir işaret üretmektedir.

Devam eden süreçte PID tarafından üretilen işaret sırasıyla “Alçak Geçiren Filtre”, “Nicemleyici” ve “Faz Modülatörü” içeren geri besleme bloğuna uygulanmaktadır. Şekil 3.9’da “Nicemleyici” bloğunun çıkışına bağlanmış “Discrete-Time Integrator” bloğunun çıkışından alınan işaret ile KDFOJ sisteminin açısal hız takibi işlemi gerçekleştirilmektedir.

“Faz Modülatörü” bloğunda bulunan “phi_m1” ve “phi_m2” işaretleri, eşitlik 2.8 ile verilen ifadedeki sinüs biçimli osilatörleri sentezlemek için kullanılır. Maksimum açısal hız duyarlılığı için jiroskopun durağan durumda iken $\pi/2$ faz ötelemesini gerçekleyen “pi/2 Offset” değeri Faz Modülatörü bloğunda sağlanmıştır.

Nicemleyici bloğundaki “Zero Offset” değeri jiroskopun durağan durumunda ürettiği DC seviyeyi sıfırlamak için uygulanmaktadır. Nicemleyici çıkışındaki hata işaretini minimize etmek için PID kontrolcünün katsayıları YA algoritması ile belirlenmiştir. Sistemin örnekleme zamanı $5 \cdot 10^{-7}$ olarak seçilmiştir.

3.2.3 Yerçekimi arama algoritması ile PID katsayılarının bulunması

YA algoritmasında kütle olarak seçilecek değer sayısı, bu kütlelerin ağırlık aralığı ve her bir iterasyon sayısı için algoritmanın üreteceği değer sayısı başlangıç değeri olarak seçilmiştir. İterasyon sayısı ise algoritmanın durdurma kriteri olarak belirlenmiştir.

PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayıları arandığı için kütle sayısı 3 seçilmiştir. KDFOJ sistemi için PID katsayılarının sırasıyla $[0, 1]$, $[0, 1]$ ve $[0, 10^{-7}]$ aralıklarında değişebileceği öngörülmüştür. Bu nedenle kütle ağırlık aralıkları yukarıdaki gibi belirlenmiştir. Algoritmanın her bir PID katsayısı için her iterasyonda ellışer adet değer üretmesi uygun görülmüştür.

Algoritmanın durdurma kriteri olarak belirlenen iterasyon sayısı sırasıyla 10, 25, 50, 75 ve 100 olarak seçilmiştir. Her bir iterasyon sayısı onar kez çalıştırılarak algoritmanın doğruluğu test edilmiştir.

PID katsayılarının istenilen aralıkta belirlenmesinden sonra her bir parametre için üretilen rasgele sayılar MATLAB/Simulink ortamına tasarlanan KDFOJ yapısındaki PID kontrolcü bloğuna gönderilir. PID bloğu içerisindeki K_p , K_i ve K_d katsayıları güncellenerek simülasyon başlatılır.

Simülasyon bittikten sonra KDFOJ’un geri besleme döngüsündeki hata değeri Şekil 3.9’da görülen “To Workspace” bloğu yardımıyla alınarak MATLAB ortamında çalışan YA algoritmasına gönderilir. Alınan hata değerlerinin karşılaştırılması yapılarak hata değerlerine karşılık gelen en iyi ve en kötü PID katsayıları belirlenir. Üretilen PID katsayı aralığı en iyi değer aralığında güncellenerek bu işlem tekrarlanır.

İterasyon sayısının artması ile birlikte simülasyon süresi de adım sayısı ile doğru orantılı olarak artarken aynı zamanda daha hassas cevaplar alınmaktadır. Her bir iterasyon sayısında doğru sonuca daha da yaklaşılmaktadır. Fakat belirli bir iterasyon sayısından sonra hata değerindeki iyileşmenin çok düşük olduğu ve simülasyon süresinin gereksiz uzadığı çizelge 1'den görülmektedir. Bu nedenle iterasyon sayısının 50 seçilmesine karar verilmiştir. KDFOJ yapısındaki PID kontrolcünün katsayıları çizelge 1'de 50 iterasyon sayısında görülen K_p için 0.62432, K_i için 0.01372 ve K_d için $1.99555 \cdot 10^{-6}$ olarak seçilmiştir ve KDFOJ için tüm simülasyonlar bu değerler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 YA Algoritması Sonucu Elde Edilen PID Katsayıları

İterasyon Sayısı	10	25	50	75	100
K_p	0.67244	0.66336	0.62432	0.65883	0.65636
K_i	0.27586	0.12478	0.01372	0.04568	0.06292
K_d	$8.84070 \cdot 10^{-6}$	$8.28791 \cdot 10^{-6}$	$1.99555 \cdot 10^{-6}$	$7.48106 \cdot 10^{-6}$	$7.20027 \cdot 10^{-6}$
Ortalama Hata	228.8147	228.3536	226.1376	225.7441	224.1979

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, Materyal ve Yöntem bölümünde açıklanan KDFOJ yapısının deneysel sonuçları açıklanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, tasarım işleminin de geliştirildiği MATLAB / Simulink programı aracılığıyla elde edilmiştir.

Bulgular ve Tartışma bölümünde KDFOJ sistemine etki eden iterasyon sayısı, açısal hız takibi, dinamik ölçüm aralığı, sıfır-sapma testi, basamak cevabı analizleri incelenmiş ve sunulmuştur.

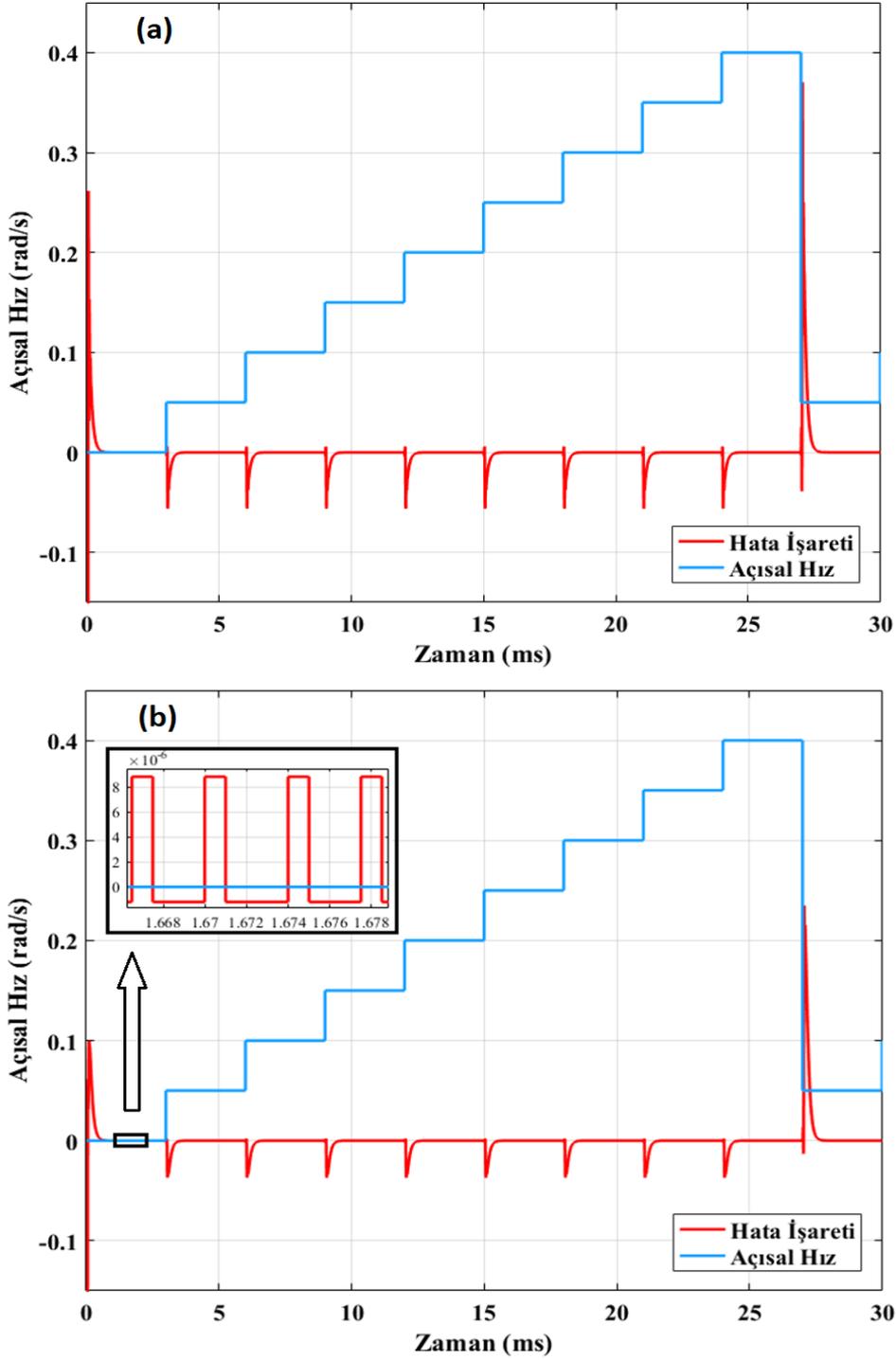
4.1 İterasyon Sayısı

Bu bölümde YA algoritmasının durdurma kriteri olan iterasyon sayısının, KDFOJ sisteminin geri besleme döngüsündeki hata işareti üzerinde nasıl bir etki yaptığı incelenmiştir. İterasyon sayısı keyfi olarak seçilebilmektedir. Fakat uygun bir değer seçilmesi ile algoritmanın hızlı bir şekilde çalışması sağlanabilirken aynı zamanda yeterince hassas değerler üretmek de mümkün olmaktadır.

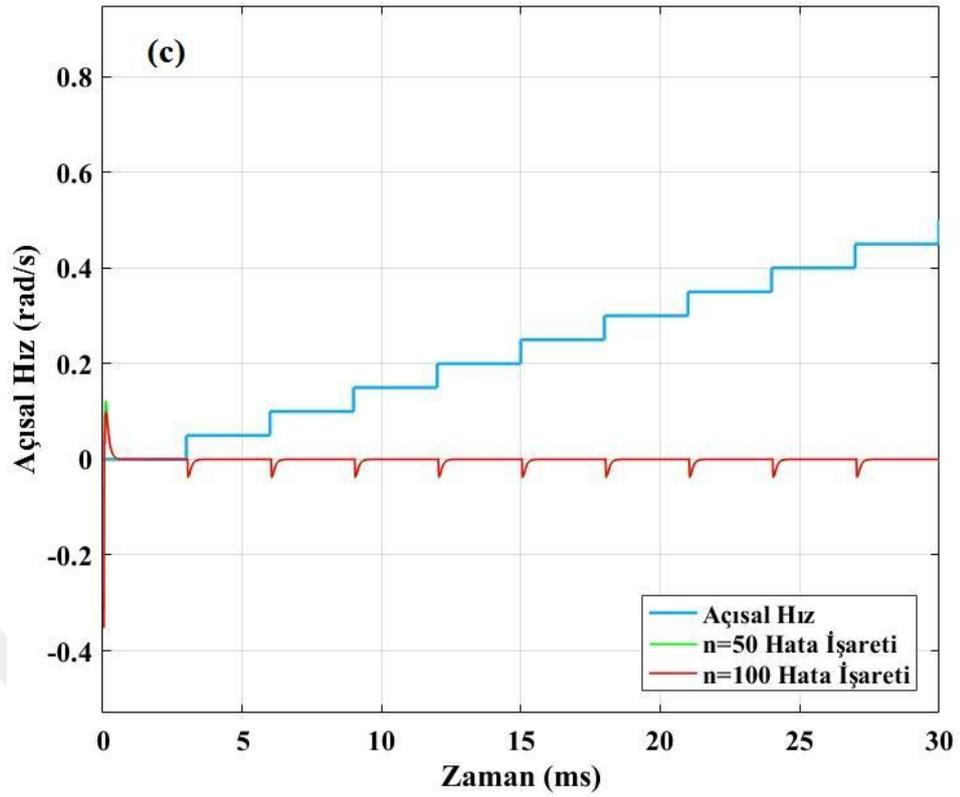
Şekil 4.1.a ve 4.1.b'de, sırasıyla 10 ve 50 iterasyon sonucunda üretilen hata işaretlerinin, jiroskop girişine uygulanan açısal hız değişimine göre 30 ms boyunca zamanla değişimi görülmektedir.

Şekil 4.1'de jiroskop düzeneğinin dönmesiyle oluşan Sagnac faz kaymasının kısa sürede kompanze edildiği açıkça görülmektedir. Tasarlanan kontrol sisteminde, açısal hızın 0.05 rad/s (2.8648°/s)'lik ani değişimine karşılık 10 iterasyon ile belirlenen PID kontrol sisteminde 0.057 rad/s genlikli bir ani hata işareti oluşurken, 50 iterasyonla bu genliğin 0.037 rad/s ye düştüğü gözlenmiştir. Bu hata işaretinin sıfırlanarak sistemin sıfır faz dengesine getirilmesi ise yaklaşık 0.96 ms sürmektedir.

Açısal hızdaki 0.35 rad/s'lik anlık bir hız değişiminin olduğu $t=27$ ms anında ise sisteminin 0.235 tepe genliğinde oluşan hata işaretini sıfır faz dengesine getirmesi yaklaşık 1.1 ms sürmektedir.



Şekil 4.1 Farklı İterasyon Sayıları İçin Jiroskop Sistem Cevabı (a) $n=10$; (b) $n=50$; (c) $n=50$ ve 100



Şekil 4.2 Farklı İterasyon Sayıları İçin Jiroskop Sistem Cevabı (a) n=10; (b) n=50; (c) n=50 ve 100

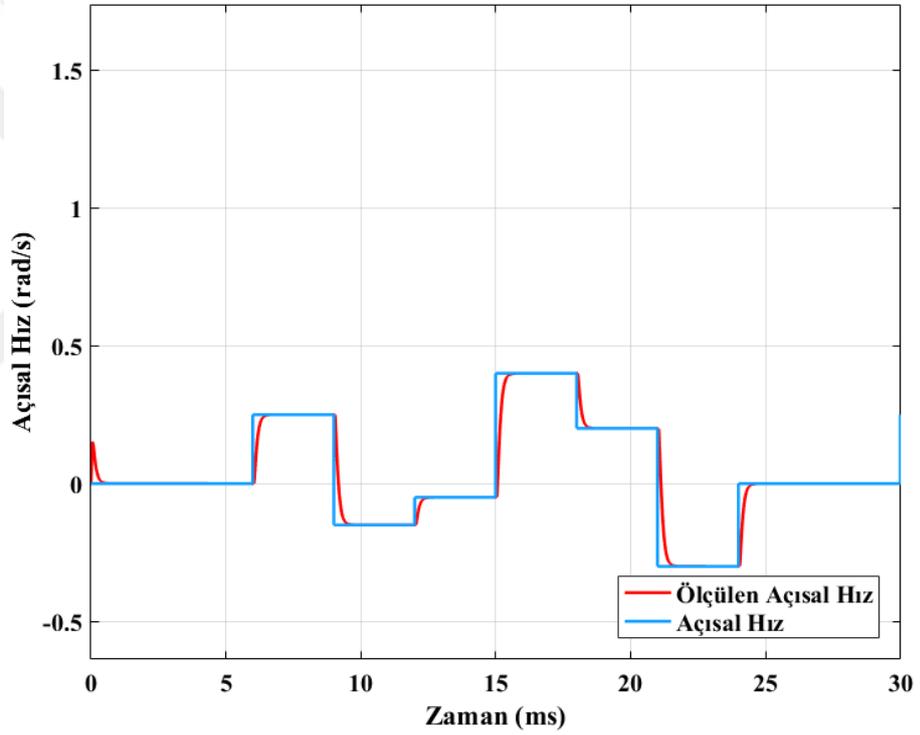
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi iterasyon sayısındaki artış fiberoptik jiroskobun geri besleme döngüsündeki hata işaretinin iyileşmesini sağlamaktadır. Açısal hızın değişim anlarında 10 iterasyon sayısı için geri besleme döngüsündeki hata işareti tepe genlik değeri, 50 iterasyon sayısının oluşturduğu tepe genlik değerine kıyasla daha yüksek çıkmaktadır.

Çizelge 3.1'de 100 iterasyon sonucu hata değerinin 50 iterasyon sonucu oluşan hata değerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat şekil 4.1.c'de görüleceği üzere 50 ve 100 iterasyon sonucu oluşan sistem cevabı neredeyse bire bir örtüşmektedir. İterasyon sayısının iki kat artırılması simülasyon süresini de iki kat artıracığından iterasyon sayısının 50 olarak seçilmesi uygun görülmüştür. Böylece sistem cevabı hem istenilen hassasiyette hem de hızlı bir şekilde elde edilebilmiştir.

4.2 Açısal Hız Takibi

KDFOJ sistem girişine uygulanan açısal hız değişimiyle sistemden ölçülen açısal hız değişiminin karşılaştırılması jiroskop sisteminin doğruluğunu kontrol etmede önemli ölçütlerden biridir.

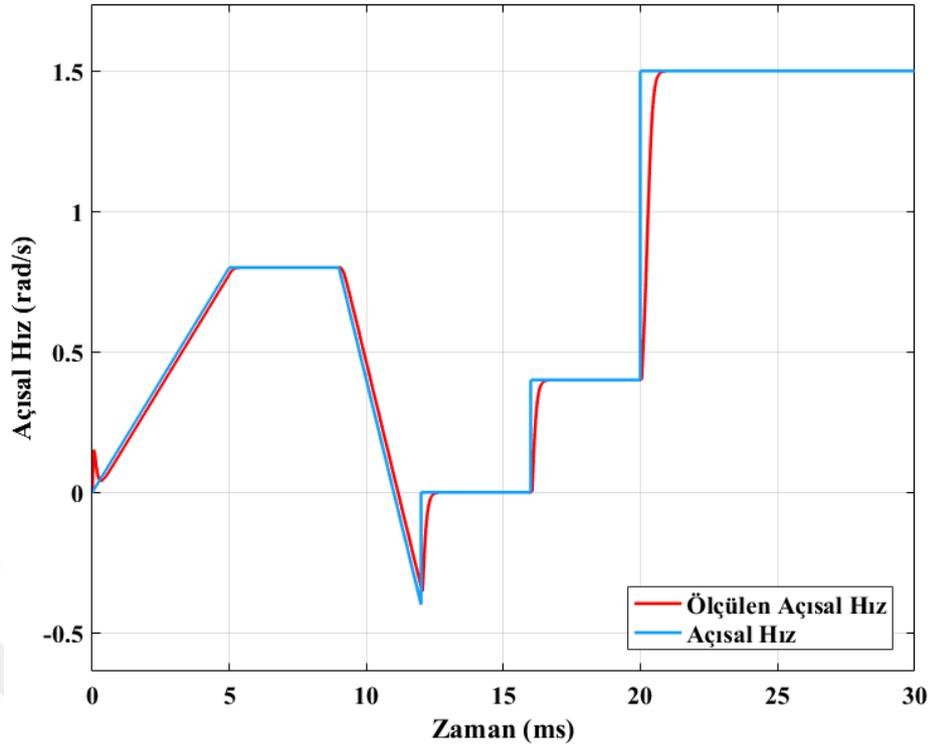
Bu bölümde fiberoptik jiroskoba verilen açısal hızın sistemden ölçülen açısal hızı yakından takip edip edemediği araştırılmıştır. Sisteme verilen iki farklı açısal hız değişimine karşılık jiroskoptan ölçülen açısal hız değişim işaretleri şekil 4.2 ve 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Jiroskop Sisteminin Basamaklı Değişen Açısal Hız Takibi

Şekil 4.2’de, pozitif ve negatif yönde basamaklı değişken rastgele bir açısal hız değişimine karşılık jiroskoptan ölçülen hız bilgisi karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.3’de ise yine pozitif ve negatif yönde rampa ve basamaklı değişken bir açısal hız değişimine karşılık sistemin ölçüm cevabı gösterilmektedir.



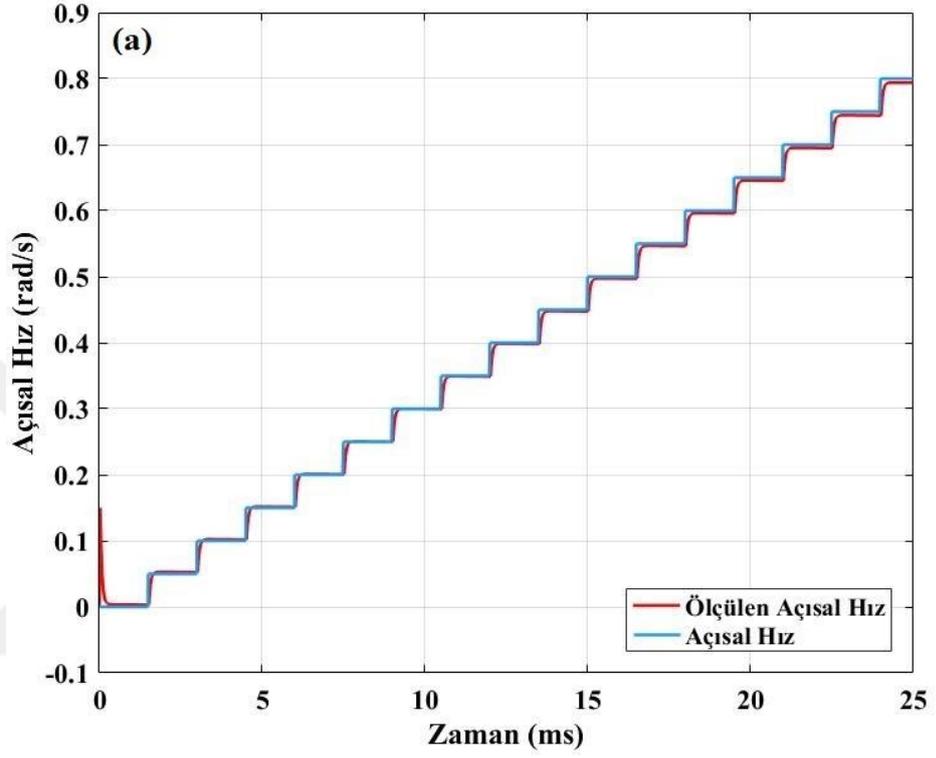
Şekil 4.4 Jiroskop Sisteminin Basamaklı ve Rampa Değişen Açısal Hız Takibi

Her iki grafikten de görüleceği üzere ölçülen hız bilgisinin, sisteme uygulanan mekanik dönü hareketini ifade eden açısal hız işaretini her iki yönde de yakından takip edebildiği anlaşılmaktadır. Sistemin geri besleme kolunda yer alan nicemleyici adım sayısının artırılmasıyla, sisteme uygulanan açısal hız ile ölçülen açısal hızın örtüşümü iyileştirilebilir.

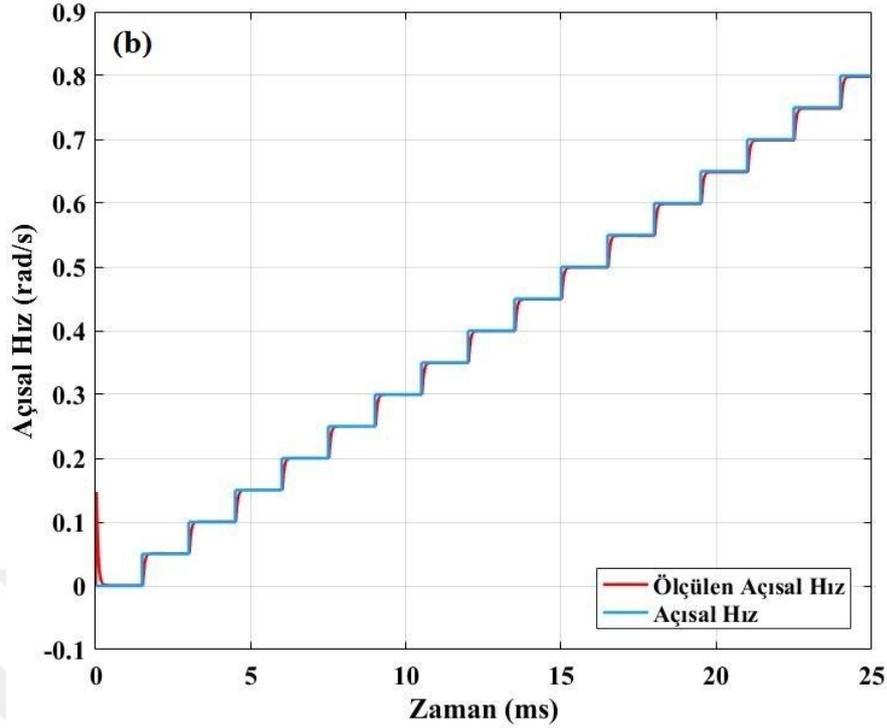
4.3 Dinamik Ölçüm Aralığı

Jiroskop sistemlerinin önemli ölçütlerinden bir diğeri de dinamik ölçüm aralığıdır. Dinamik ölçüm aralığının geniş olması, açısal hız değişimleri yüksek olan kara ve hava taşıtlarının kontrolünde önemli bir gereksinimdir. Bölüm 3.2.1'de ADFOJ için dinamik ölçüm aralığı incelenmiştir. ADFOJ dinamik ölçüm aralığı KDFOJ ile kıyaslandığında düşük kalmaktadır. Bu KDFOJ ihtiyacının doğmasına sebep olmuştur. Bölüm 3.2.1'de incelenen ADFOJ'un dinamik ölçüm aralığının gösterildiği şekil 3.8'de sistem, düşük dönüş hızlarında başarılı bir şekilde açısal hız takibi yapabiliyorken açısal hızın artmaya devam ettiği bölgelerde doğrusallığını kaybetmektedir.

Bu sorunların çözümü için KDFOJ sistemi geliştirilmiştir. Aşağıda verilen şekil 4.4’de bu tez çalışmasında tasarımı gerçekleştirilen KDFOJ’un dinamik ölçüm aralığı 10 ve 50 iterasyon için incelenmiştir. Böylece iterasyon sayısının dinamik ölçüm aralığı üzerindeki etkisi de incelenmiştir.



Şekil 4.5 Farklı İterasyon Sayılarına Karşılık KDFOJ Dinamik Ölçüm Aralığı (a) n=10; (b) n=50



Şekil 4.6 Farklı İterasyon Sayılarına Karşılık KDFOJ Dinamik Ölçüm Aralığı (a) n=10; (b) n=50

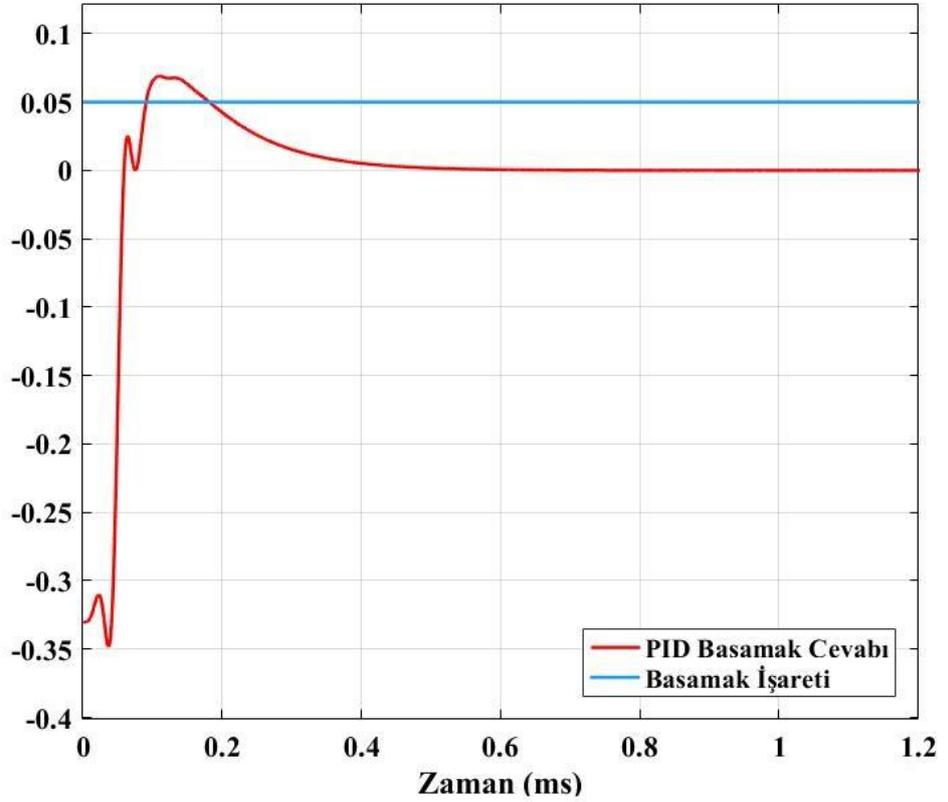
Şekil 4.4'den de görülebileceği gibi iterasyon sayısındaki yetersizlik, açısal hızdaki değişimi yüksek doğrulukla takip edememeye ve dinamik ölçüm aralığının daralmasına sebep olmaktadır. 10 iterasyon sonucu elde edilen katsayılara göre ayarlanmış olan KDFOJ'un dinamik ölçüm aralığı, 50 iterasyon sayılı KDFOJ'a kıyasla düşük kalmıştır. Buna kıyasla 50 iterasyon sayılı KDFOJ sistemi, açısal hızın düşük, orta ve yüksek seviyelerinde açısal hızı yakalamada başarılıdır. Bu durum tasarlanan FOJ'un dinamik ölçüm aralığının yüksek olduğuna işaret etmektedir.

4.4 Sıfır-Sapma (Zero-Bias) Testi

KDFOJ sistemlerinin performansında önemli ölçütlerden birisi de sıfır-sapma testidir. Bu testte sistemin durağan hali yani girişine 0 rad/s açısal hız verilerek geri besleme döngüsü işareti gözlemlenir. Sıfır-sapma testinde sistemin geri besleme döngüsünden elde edilen işaretin hata değerinin sıfıra yakın bir değer olması beklenmektedir. Bu çalışmada tasarlanan KDFOJ sisteminin sıfır-sapma cevabı, şekil 4.1.b'de görüldüğü gibi sıfıra oldukça yakın bir değer olan $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s olarak belirlenmiştir.

4.5 Basamak Cevabı

Kontrol sistemlerinin performansını belirlemede bir diğer önemli ölçüt ise sistemin basamak cevabıdır. Maksimum aşım, yerleşme zamanı ve yükselme zamanı basamak cevabının başlıca kriterleridir. Şekil 4.5’de KDFOJ sistemi için tasarlanan PID kontrolcünün, sistem girişine uygulanan basamak işaretine karşılık elde edilen basamak cevabı görülmektedir. Tasarlanan PID kontrolcünün maksimum aşım miktarı 0.069 birim genlik değerindedir. Yerleşme zamanı 0.5 ms olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.7 PID Kontrolcünün Basamak Cevabı

Yapılan analizler sonucunda, tasarlanan kapalı döngü fiberoptik jiroskobun 0.05 rad/s ani açısal hız değişimlerinde hata sinyalini yaklaşık 1 ms' de sıfırladığı gözlenmiştir. Ayrıca 0.4 rad/s ani açısal hız değişimlerinde yaklaşık 0.7 ms' lik ve 1.1 rad/s ani açısal hız değişiminde ise yaklaşık 0.8 ms takip süresiyle sistemin hızlı cevap verdiği ve açısal dönüş hızıyla doğrusal ilişkili yüksek hassasiyetli çıkış işareti ürettiği görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında hareketsiz bir zeminden herhangi bir referans almadan açısal yön ve hızda meydana gelen değişimleri hassas ve doğru bir şekilde ölçebilmek amacıyla bir kapalı döngü fiberoptik jiroskop konfigürasyonu ve bu konfigürasyonun geri besleme döngüsünü başarılı bir şekilde kontrol edecek bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Bu amaçla öncelikle kapalı döngü konfigürasyonun daha iyi anlaşılabilmesi için açık döngü fiberoptik jiroskop tasarlanmıştır. Tasarlanan açık döngü yapısına bir geri besleme bloğu eklenmesiyle kapalı döngü bir fiberoptik jiroskop sistemi tasarlanmış ve sistemin geri besleme döngüsü PID kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir.

PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirlemek için yerçekimi arama algoritmasından faydalanılmıştır. Bu algoritma yöntemi, fiberoptik jiroskop sistemleri içerisinde kullanılan PID kontrolcünün K_p , K_i ve K_d katsayılarını belirlemede ilk defa kullanılmıştır. Algoritma iterasyon sayısının belirlenmesinden sonra rampa ve basamaklı açısal hız değişimlerine karşı sistemin geri besleme kolunda meydana gelen hata işareti incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen veriler ışığında 0.05 rad/s'lik basamak açısal hız değişiminin neden olduğu hata işareti yaklaşık 1 ms'de sıfır faz dengesine geldiği şekil 4.1.b'de görülmektedir. Jiroskop sistemden ölçülen açısal hızın, sistem girişine uygulanan açısal hızı başarıyla takip ettiği görülmektedir.

Fiberoptik jiroskop sistemlerinin performans ölçütlerinden biri olan sıfır-sapma testi, tasarlanan jiroskop sisteminin durağan durumundayken çıkış tepkisini ölçmek için kullanılır. Tasarlanan jiroskop sisteminde sıfır dönme durumunda sistemin çıkış işareti gürültü düzeyi $8.8 \cdot 10^{-6}$ rad/s ve altında olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda PID ile kontrol edilen fiberoptik jiroskobun, 1 ms' nin altında bir cevap süresinde ve 10^{-5} rad/s ölçüm hassasiyetinde açısal hızın ölçülebileceği gösterilmiştir.

Bunun yanında tasarlanan jiroskop sisteminde geri besleme bloğunda bulunan nicemleyici adım sayısının başka bir ifadeyle örnekleme frekansının artırılması ile alınan sonuçların doğruluk ve hassasiyet bakımından iyileştirilmesi sağlanabilir.

Kapalı döngü fiberoptik jiroskop sisteminin tasarımı öncesinde belirlenen; Sagnac etkisinin hızlı ve hassas bir şekilde kompanze edecek kontrol işaretini üretecek kontrolcü tasarımının yapılabilmesi, sistemin denge durumunda yani sıfır dönme durumunda gibi çalışabilmesi, sistemden ölçülen açısal hız değişiminin sisteme verilen açısal hız değişimini yakından ve doğru bir şekilde takip edebilmesi ve tasarlanan jiroskop sisteminin hızlı ve hassas bir şekilde çalışması hedeflerine büyük ölçüde ulaşılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda bu tez kapsamında elde edilen teorik sonuçların, deneysel çalışmalarla uyum içerisinde olup olmadığı incelenecektir.

KAYNAKLAR

- Babu, G. H., Anuhya, A. V. ve Venkatram, N., 2016. Digital Signal Processing Scheme for Open Loop and Closed Loop IFOG using MATLAB/SIMULINK, Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(11).
- Coşkun, İ. ve Terzioğlu, H., 2011. Hız Performans Eğrisi Kullanılarak PID Parametrelerinin Gerçek Zamanda Belirlenmesi, Selçuk-Teknik Dergisi, Cilt 10, Sayı 2, 169-183.
- Çelikel, O. ve San, E., 2009. Construction of All Digital Closed-Loop Interferometric Fiber Optic Gyroscope with Erbium Doped Fiber Amplifier, Indian Journal of Pure & Applied Physics Vol. 47, 491-500
- Deniz, F. N., Keleş, C., Alagöz, B. B. ve Tan, N., 2014. Kapalı Çevrim PID Kontrolör Tasarımında Birim Basamak Cevabı Çoklu Ölçüt Performans Haritalaması, SAÜ Fen Bil Der, 18. Cilt, 3. Sayı, 157-165.
- Doğruer, T., Yüce, A. ve Tan, N., 2017. Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinde Referans Modele Dayalı PID Kontrolör Tasarımı, Bilge International Journal of Science and Technology Research, Special Issue 1, 52-58.
- Duman, S., Sönmez, Y., Güvenç, U. ve Yörükeren, N., 2012. Optimal Reactive Power Dispatch Using a Gravitational Search Algorithm, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 6, Issue 6, 563-576.
- Foster, E. J., 1965. Active Low-Pass Filter Design, IEEE Transactions on Audio, Vol. 13, 104-111.
- Gaurav ve Kaur, A., 2012. Conventional PID controller and Fuzzy logic controller for Liquid flow control: Performance Analysis Using MATLAB/Simulink, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 1 Issue 3.
- Ge, S., Han, J., Shen, Y., Bian, Z. ve Wang, H., 2008. Research and Implementation of Digital Detection System for Closed-Loop FOG, 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 6739-6744.
- Han, J., Ge, S., Shen, Y. ve Li, X., 2006. Modeling and Simulation of Digital Closed-loop Fiber Optic Gyroscope, 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 1659-1663.
- Hotate, K. ve Harumoto, M., 1997. Resonator Fiber Optic Gyro Using Digital Serrodyne Modulation, Journal of Lightwave Technology, 15(3), 466-473.

- Howe, E. W. ve Savet, P. H., 1964. The Dynamically Tuned Free Rotor Gyro, *Control Engineering*, 11(6), 67-72.
- Huang, W. ve Liu, C., 2016. Design and Simulation of the Digital Controller of digital Closed Loop Fiber Optic Gyroscope based on Matlab, 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 387-391.
- Junqueira, F. C. ve Barros, E., 2004. Development of a dynamically tuned gyroscope-DTG, *ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 1*, 470-478
- Khoshki, R. M. ve Ganesan S., 2014. Investigation on Closed-loop Fiber Optic Gyroscope Structure and Operation, *International Journal of Hybrid Information Technology* Vol. 7, No. 5, 23-32
- Ma, H., Jin, Z. ve Yu, X., 2013. Closed-Loop Resonant Fiber Optic Gyro with an Improved Digital Serrodyne Modulation, *Optical Society of America*, Vol. 21, No. 22.
- Nasiri-Avanaki, M. R., Soleimani, V. ve Mazrae-Khoshki, R., 2012. Comparative Assessment on the Performance of Open-Loop and Closed-Loop IFOGs, *Optics and Photonics Journal*, Vol. 2, 17-29.
- Navruz, İ., Arı, F. ve Şerbetçi, H., 2017. Design and Analysis of a Closed-Loop Fiberoptic Gyroscope, *I. International Scientific and Vocational Studies Congress*, 480-485.
- Nezamabadi-pour, H., Rashedi, E. ve Saryazdi, S., 2009. GSA: A Gravitational Search Algorithm, *Information Sciences*, Vol. 179, Issue 13, 2232-2248.
- Noureldin, A., Mintchev, M., Halliday, D. I. ve Tabler, H., 1999. Computer Modelling Of Microelectronic Closed Loop Fiber Optic Gyroscope, 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 633-638.
- Perez, R. J., Alvarez, I. ve Enguita, J. M., 2016. Theoretical Design of a Depolarized Interferometric Fiber-Optic Gyroscope (IFOG) on SMF-28 Single-Mod Standard Optical Fiber Based on Closed-Loop Sinusoidal Phase Modulation with Serrodyne Feedback Phase Modulation Using Simulation Tools for Tactical and Industrial Grade Applications, *Sensors*, Vol. 16, No. 604.
- Piyabongkarn, D., Rajamani, R. ve Greminger, M., 2005. The Development of a MEMS Gyroscope for Absolute Angle Measurement, *IEEE Trans. Cont. Syst. Tech.*, 13(2), 185-195.
- Rosenthal, A. H., 1962. Regenerative Circulatory Multiple-Beam Interferometry for the Study of Light Propagation Effects, *J. Opt. Soc. Am.*, 52(10), 1143-1147.

- Sagnac, G., 1913. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relative d'ether dans un interferometer en rotation uniforme, *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, 95, 708-710.
- Smolovik, M. A., Pogorelaya, D. A., Volkovskiy, S. A., Mikheev, M. A., Aleynik, A. S. ve Strigalev, V. E., 2017. Adjustment of PID Controller in Fiber-Optic Gyro Feedback Loop, *Gyroscopy and Navigation*, Vol. 8, No. 3, 235–239.
- Sun, Q., Shao, Y., Zuo, J., Wang, L. ve Gui, L., 2014. Circuit Design of Digital Closed Loop Control System for FOG, *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol. 12, No. 7, 5174-5184.
- Upalanchiwar, T. ve Sakhare, A. V., 2014. Design and Implementation of the Fuzzy PID Controller Using MATLAB/SIMULINK Model, *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, Vol. 3, Issue 3, 369-372.
- Vali, V. ve Shorthill, R. W., 1976. Fiber Ring Interferometer, *Appl. Opt.*, 15(5), 1099-1100.
- Vatansever, F. ve Şen, D., 2013. Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülâtörü Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, Sayı 2, 7-18.
- Wang, W., He, Z. ve Hotate, K., 2009. Resonator Fiber Optic Gyroscope with Digital Serrodyne Scheme Using a Digital Controller, *The International Society for Optical Engineering*, Vol. 7314, 731402
- Xuyou, L., Zhou, H., Chen, Z. ve Gang, W., 2009. Application of Adaptive Filtering to Digital Closed-loop Fiber Optic Gyroscope, *2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 443-447.
- Xuyou, L., Yong, Z. ve Chen, Z., 2009. Five Points Modulation in closed loop Fiber Optic Gyroscope, *5th International Conference On Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 1975-1977
- Yalçın, N., Çakır, S., Kesler, M. ve Kazak, N., 2012. Yerçekimsel Arama Algoritması ile PID Denetleç Parametrelerinin Tespiti, *ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 725-729.
- Yang, D. S., 2016. Digital Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope Design Based on the FPGA, *13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüsamettin ŞERBETÇİ
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 13.08.1992
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Fethiye Kemal Mumcu Anadolu Lisesi (2010)
Lisans : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği (2016)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği (Şubat 2017 – Aralık 2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Krahe Bilişim Teknolojileri (Ocak 2017 – Mart 2018)

Çankırı Karatekin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Araştırma Görevlisi (Nisan 2019 – Devam ediyor)

Hakemli Dergiler

Şerbetçi, H. ve Navruz, İ. 2019. Kapalı Döngü Fiberoptik Jiroskop Sistemleri için Yerçekimi Arama Algoritmasına Dayalı PID Kontrolcü Tasarımı, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 695-704.

Uluslararası Kongre Sunum

Navruz, İ., Arı, F. ve **Şerbetçi, H.** 2017. Design and Analysis of a Closed-Loop Fiber optic Gyroscope, I. International Scientific and Vocational Studies Congress, 480-485.