



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



DİNAMİK EĞİM SENSÖRÜ CİHAZININ
TASARLANMASI VE ÖLÇÜM
STABİLİTESİNİ ARTTIRMA AMAÇLI
ÇEŞİTLİ METOTLARIN KULLANILMASI

İsmail DERELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İsmail DERELİ tarafından hazırlanan “DİNAMİK EĞİM SENSÖRÜ CİHAZININ TASARLANMASI VE ÖLÇÜM STABİLİTESİNİ ARTTIRMA AMAÇLI ÇEŞİTLİ METOTLARIN KULLANILMASI” adlı tez çalışması 25/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Salih GÜNEŞ
(Konya Teknik Üniversitesi)

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Kemal ERDOĞAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DEMİRTAŞ
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İsmail DERELİ

Tarih: 25/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİNAMİK EĞİM SENSÖRÜ CİHAZININ TASARLANMASI VE ÖLÇÜM STABİLİTESİNİ ARTTIRMA AMAÇLI ÇEŞİTLİ METOTLARIN KULLANILMASI

İsmail DERELİ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kemal ERDOĞAN

2024, 60 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Salih GÜNEŞ
Dr. Öğr. Üyesi Kemal ERDOĞAN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet DEMİRTAŞ

MEMS teknolojisindeki gelişmeler ile bu teknolojiyi içeren IMU cihazlarının da kullanımı yaygınlaşmıştır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan IMU' ların kullanım alanına göre çok hassas olarak ölçüm yapması gerekebilmektedir. Bu hassas ölçümler gelişen IMU teknolojisi sayesinde ne kadar mümkün olsa da bazı dış faktörler IMU' ların ölçüm doğruluğunu etkileyebilmektedir. Bu dış faktörlerin en önemlileri harici ivme ve titreşimlerdir. Cihazın bağlı olduğu sistemdeki harici ivme ve titreşimler IMU içerisindeki mekanik yapıyı olumsuz etkilemektedir ve ölçüm hatalarına sebep olmaktadır. Buna çözüm olarak literatürde kalman filtresi, alçak geçiren filtre vb. filtreler kullanılarak bu hataların en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada içerisinde 6 eksen IMU içeren bir dinamik eğim sensörü cihazı tasarlanmıştır ve içerisine kalman filtresi, ortalama kayan filtre, alçak geçiren filtre yazılımsal olarak entegre edilmiştir. Hazırlanan test platformu ve veri kayıt sistemi ile harici ivmeli durumlarda tasarlanan eğim sensörü içerisindeki filtrelerin performansları bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. RMSE metodu kullanılarak yapılan analizlerde sensörün derece cinsinden ölçüm hata miktarları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise bu 3 filtrenin birlikte çalıştığı hibrit filtreleme metodu tasarlanmıştır. Hibrit filtreleme metodu literatürdeki çalışmalarda sıkça kullanılan bir metottur. Bu çalışmada ise kalman filtresi, alçak geçiren filtre ve ortalama kayan filtre bu hibritleştirme işlemine dahil edilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan bu özel hibrit filtreleme metodu sonucunda statik testlerde ortalama 0.017° , dinamik testlerde ise ortalama 1.177° hata değerleri alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre bu çalışmadaki hibrit filtreleme metodunun literatürdeki diğer hibrit filtreleme metotlarına yakın değerde ve başarılı sonuç verdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alçak Geçiren Filtre, Dinamik Eğim Sensörü, Eğim Sensörü, IMU, Kalman Filtresi, MEMS

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN OF A DYNAMIC INCLINOMETER DEVICE AND USE OF VARIOUS METHODS TO INCREASE MEASUREMENT STABILITY

İsmail DERELİ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronic Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Kemal ERDOĞAN

2024, 60 Pages

**Jury
Asst. Prof. Dr. Kemal ERDOĞAN
Prof. Dr. Salih GÜNEŞ
Asst. Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ**

With advancements in MEMS technology, the usage of IMU devices incorporating this technology has become widespread. In industrial applications, IMUs need to provide highly precise measurements depending on their area of use. While these precise measurements are made possible by the evolving IMU technology, some external factors can affect the measurement accuracy of IMUs. The most significant of these external factors are external acceleration and vibrations. The external acceleration and vibrations in the system to which the device is attached negatively impact the mechanical structure inside the IMU, leading to measurement errors. To mitigate these errors, the literature suggests using filters such as the Kalman filter, low-pass filter, etc. In this study, a dynamic tilt sensor device containing a 6-axis IMU has been designed and software-integrated with a Kalman filter, moving average filter, and low-pass filter. The performance of these filters within the designed tilt sensor under external acceleration conditions was analyzed in a computer environment using the prepared test platform and data recording system. In the analyses conducted using the RMSE method, the measurement error amounts of the sensor in degrees were compared. In the final stage of the study, a hybrid filtering method combining these three filters was designed. The hybrid filtering method is frequently used in literature. However, the novelty of this study lies in incorporating the designed moving average filter into the hybridization process along with the Kalman filter and low-pass filter. As a result of this specially designed hybrid filtering method within the scope of the study, average error values of 0.017° in static tests and 1.177° in dynamic tests were obtained. According to analysis of results, it is seen that the hybrid filtering method in this study provides successful and closer results compared to other hybrid filtering methods in the literature.

Keywords: Dynamic Inclinator, IMU, Inclinator, Kalman Filter, Low Pass Filter, MEMS

ÖNSÖZ

Bu çalışma çeşitli alanlarda kullanılan IMU' ların dış etkilerden korunması ve bu etkilerden dolayı oluşan hataların en aza indirilmesi amacıyla yapılmıştır.

Tez çalışmamın planlanmasında ve gerçekleştirilmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile çalışmama ışık tutan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kemal ERDOĞAN' a, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine, tez ile ilgili çalışma ortamı ve kaynak sağlayan Elfatek Elektronik firması yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan başta aileme ve tüm sevdiklerime teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İsmail DERELİ
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. MEMS ve IMU	5
3.2. Eğim Sensörü Kullanım Alanları.....	7
3.3. Eğim Sensörü Çeşitleri	8
3.4. Veri Kaynaklarının Tanıtılması	10
3.4.1. Statik Eğim Sensörü.....	11
3.4.2. Dinamik Eğim Sensörü.....	11
3.5. Test Düzenegi ve Metodu	11
3.5.1. Test Platformu.....	12
3.5.2. Veri Kaydedici Cihaz.....	13
3.5.3. CANBUS Haberleşme	15
3.5.4. Test Metotları.....	16
3.6. Veri Setlerinin Tanıtılması.....	18
3.7. Ölçüm Stabilesini Arttırmak İçin Kullanılan Algoritmalar	19
3.7.1. Ortalama Kayan Filtre	20
3.7.2. Kalman Filtresi	20
3.7.3. Alçak Geçiren Filtre.....	23
3.8. Açı Ölçüm Testleri.....	24
3.8.1. Test-1	24
3.8.2. Test-2	25
3.8.3. Test-3	26
3.8.4. Test-4	27
3.8.5. Test-5	27
3.8.6. Test-6	28
3.9. Test Sonuçlarının Analiz Edilmesi	28
3.9.1. RMSE.....	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	30
4.1. Test-1 Sonuçları.....	30
4.2. Test-2 Sonuçları.....	33
4.3. Test-3 Sonuçları.....	35

4.4. Test-4 Sonuçları	39
4.5. Test-5 Sonuçları	41
4.6. Test-6 Sonuçları	42
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
5.1 Sonuçlar	45
5.2 Tartışma ve Öneriler	47
KAYNAKLAR	49



SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

MEMS	: Mikro Elektromekanik Sistem
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
KF	: Kalman Filtresi
OKF	: Ortalama Kayan Filtre
IMU	: Atalet Ölçüm Birimi
PCB	: Baskı Devre Kartı
QUEST	: Kuaterniyon Tahmincisi
RMS	: Karekök Ortalama
RMSE	: Karekök Ortalama Hatası
OACP	: Yönelim Eksenleri Kesişimi



1. GİRİŞ

MEMS (Mikro Elektromekanik Sistem) teknolojisindeki gelişmeler sayesinde IMU (Atalet Ölçüm Birimi) cihazları daha hassas ölçüm yapabilir ve küçük yapısı sayesinde birçok uygulamada kullanılabilir bir hale gelmiştir. Buna ek olarak IMU'ların ölçüm kabiliyetleri de günden güne artmıştır (Qinglei 2007, Harindranath 2018).

Yaşanan bu gelişmeler ile birlikte IMU'ların kullanım alanları da genişleyerek biyomedikal, sağlık (Zhou 2008) (Tao 2012), Havacılık (Hong, 2003), robotik (Barshan 1995), konumlandırma (Titterton 2004) (Beauregard 2007), insan hareket analizi (Yun 2005) (Sonmezocak, Kurt 2022) gibi farklı uygulamalarda iyileştirme çalışmaları yapılmıştır.

Eğim sensörü cihazı, açı ölçümlerini ivmeölçerden aldığı verilere göre hesaplamaktadır. İvmeölçer mekanizması sensör içerisinde bulunan elektromekanik sistemin yerçekimi ivmesine maruz kalması ve maruz kaldığı yerçekimi büyüklüğünü tespit etmesi yöntemiyle çalışır. Harici ivme ve titreşimler de bu ivme ölçümlerine karışmakta ve ivmeölçeri bu harici ivmelerin ve titreşimlerin olumsuz anlamda etkisi altında bırakmaktadır. Bundan dolayı IMU barındıran ve açı ölçümü yapılan sistemlerde filtreleme teknikleri kullanılarak bu ölçüm hataları giderilmeye veya azaltılmaya çalışılır. (Ligorio 2015)

Bu alanda kullanılan filtrelerin başında alçak geçiren filtre ve kalman filtreleri gelmektedir. Birçok çalışmada bu filtreler veya bu filtrelerin farklı varyantları kullanılmaktadır ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır. (Hoang 2021)

Bu çalışmanın ilk bölümünde IMU'ların dış etkenler nedeniyle açı ölçüm sonuçlarında yaptığı hatalar üzerine literatür ve uygulama sahasında kaynak araştırması yapılarak mevcut çözümler incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde gömülü sistem tasarımı yapılarak anlık şok, titreşim vb. zorlu şartlar altında daha stabil eğim ölçüm sonuçları verebilecek dinamik eğim sensörü cihazının tasarımı yapılmıştır. Bu dinamik eğim sensörü cihazının içerisinde eğim ölçümlerini yapabilmek için 6 eksen IMU entegresi kullanılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ortalama kayan filtre, alçak geçiren filtre ve kalman filtresinin 3 farklı varyantı geliştirilerek eğim sensörü cihazına yazılımsal olarak entegre edilmiştir. Geliştirilen test platformu üzerinde ölçüm testleri yapılmıştır. Ardından bu aşamaya kadar test edilen tüm filtrelerin kullanıldığı bir hibrit filtre tasarlanmıştır. Bu hibrit filtredeki yenilik; içerisindeki tüm filtrelerin en iyi performans

gösterdiği bölgede çalışacak şekilde ayarlanması ve sırasıyla filtreleme işlemlerini gerçekleştirmesidir. Hibrit filtre testleri de aynı test platformu ve metotlar kullanılarak yapılmıştır.

Çalışmada son olarak hibrit filtre ve diğer filtrelerin eş zamanlı çıktı verileri, veri kaydedici cihaz yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler, RMSE hata ölçüm metodu ile analiz edilerek filtrelerin hata giderme performansları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen hibrit filtrenin diğer filtrelerle göre daha iyi performans göstermesinden dolayı, tasarlanan eğim sensörü cihazının ticari bir ürüne dönüştürülerek endüstriyel ortamlarda çalışabilmesi mümkün olabilecektir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde IMU cihazlarının ölçümlerinin harici ivme ve titreşimlerden etkilenmeden daha az hata yapması için farklı filtreler ve ölçüm metotları üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

(Hoang 2021) çalışmasında cihazın bağlandığı sistemdeki titreşimden dolayı oluşan hatalı ölçümlerin analiz edilmesi ve hataların en aza indirilmesiyle ilgili farklı filtre çeşitleri üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen ve ST Microelectronics firmasına ait LSM9DS1 özel kodlu IMU cihazını barındıran PCB (Baskı Devre Kartı), geliştirilen test platformu üzerine sabitlenmiştir. Test platformu farklı açı yönelimlerinde titreşimlere maruz bırakılarak stresli bir test ortamı oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında geleneksel filtre yöntemleri olan alçak geçiren filtre ve kalman filtreleri ile geliştirilen OACP (Yönelim Eksenleri Kesişimi) filtresi üzerine çalışmalar yapılarak bu yöntemlerin hata giderme performansları analiz edilmiştir. OACP metodu, titreşim miktarının ölçülmesi ve titreşim büyüklüğü ile orantılı olarak filtreleme performansının da değiştirilmesine dayanır. Geliştirilen bir diğer algoritma ise Sensör Füzyon algoritmasıdır. Bu algoritma OACP ve AGF (Alçak Geçiren Filtre) filtrelerinden alınan verilerin bir katsayıyla harmanlanmasına dayanır. Çalışma kapsamında elde edilen test sonuçları Çizelge 2.1’ deki gibidir. Test sonuçlarına bakıldığında çalışma kapsamında geliştirilen filtrelerden en iyi performans verenin OACP filtresinin olduğu görülmektedir. Yunus açısının ortalama 0.25° , yalpa açısının ise ortalama 0.4° hata yaptığı görülmektedir.

Çizelge 2.1: (Hoang 2021) Çalışmasındaki Teste Ait Sonuç Çizelgesi

	LP Filtre	OACP Filtre	Füzyon Filtre	Kalman Filtre
Yunus Ort. Hata ($^\circ$)	0.26	0.25	0.25	0.25
Yalpa Ort. Hata ($^\circ$)	0.55	0.4	0.46	0.47

(Xiaoping 2005) çalışmasında insan hareketlerini tespit edebilmek amacıyla filtreleme çalışmaları yapmıştır. Filtreleme sonucu olarak bilgisayar arayüzünde insan avatarı üzerinde gerçek zamanlı olarak görüntüleme sağlanmıştır. Çalışmada QUEST (Kuaterniyon Tahmincisi) algoritması ile birlikte kalman filtresi kullanılmıştır. QUEST algoritması ivmeölçerden aldığı verileri matematiksel olarak hesaplayarak cihazın takıldığı sistemin eğimini hesaplamaktadır. Ardından bu hesaplanan veri, açısal hız ile kalman filtresine aktarılarak bu filtrenin tahmin yapması sağlanmıştır.

(Sonmezocak 2022) çalışmasında hazırlanan test platformuna bağlanan ve MPU6050 MEMS ivmeölçer ve jiroskop içeren kontrol sistemi üzerinde ölçümler yaparak bu ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra analiz edilmesini sağlamıştır. Kullanılan kalman filtresi sayesinde ölçüm performansında iyileştirmeler yapılarak daha istikrarlı açı ölçüm sonuçları sağlanmıştır. Testler kapsamında kalman filtresinin R ölçüm gürültüsü parametresi sabit tutulup Q süreç gürültüsü için 0.1, 0.01, 0.001 olmak üzere 3 farklı değer kullanılmıştır.

(Sonmezocak, Kurt 2022) çalışmalarında biyomedikal alanıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında bruksizm hastalığının teşhisi üzerine bir mekanizma tasarlanmıştır. Bu çalışmadaki amaç, tasarlanan ve çeneye geçirilen mekanizma sayesinde çenedeki titreşimlerin IMU yardımıyla ölçüldükten sonra frekans bileşenlerinin analizine dayanmaktadır. Bu çalışmada sadece ivmeölçer ve kalman filtresi kullanılmıştır. Tasarlanan ve çeneye yerleştirilen mekanizma ile ölçülen çene aktiviteleri yapay sinir ağı kullanılarak %99 doğrulukta sınıflandırılmıştır. Çalışma sonucunda harcanan zaman ve maliyet hesaba katıldığında bu yaklaşımın bruksizm tanısı için pratik ve gelecekteki çalışmalarda kullanılabilecek bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

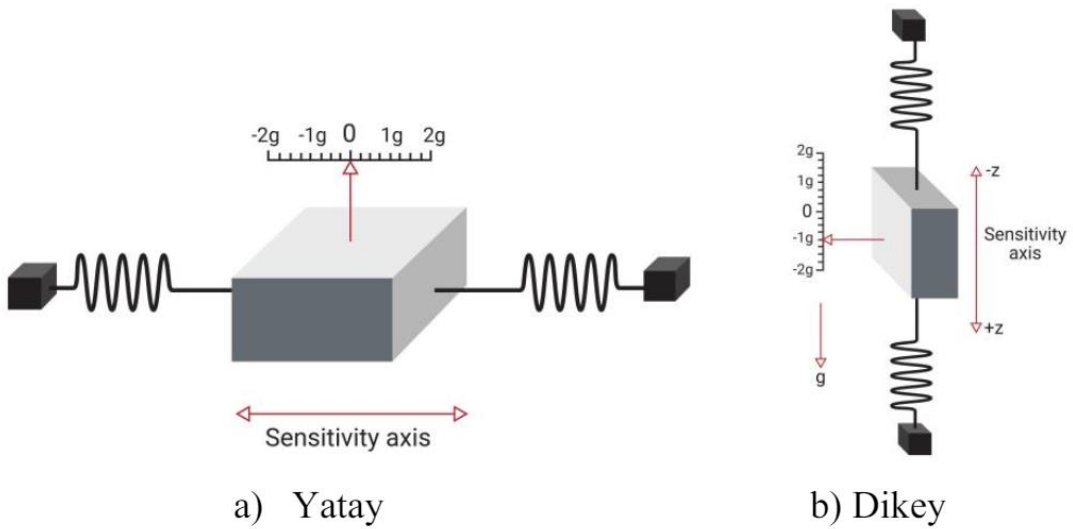
(Madgwick 2011) çalışmasında yine kalman filtresi kullanarak ölçümle ilgili iyileştirmeler yapmıştır. Statik harekette 0.8° , dinamik harekette ise 1.7° RMS (Karekök Ortalama) hata değerleri elde edilmiştir. Düşük hesaplama yükü ve küçük örnekleme oranlarında çalışabilme yeteneğinin getirdiği sonuçlar, giyilebilir eylemsizlik hareket izleme için gerekli donanım ve gücü önemli ölçüde azaltarak, uzun süre çalışabilen hafif, düşük maliyetli sistemlerin oluşturulmasını mümkün kılmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MEMS ve IMU

MEMS teknoloji alanına giren, mikro boyutlarda üretilebilen eğim sensörlerinin çalışma mantığı, elektronik ve mekanik sistemlerin bir araya getirilmesine dayanır. Eğim sensörünün içerisinde ölçüm yönlerinde bulunan yaylar mevcuttur. Bu yaylara bağlı olan ve ortaya yerleştirilen bir ağırlık bulunmaktadır. Eğim sensörünün bağlandığı cihaz yeryüzü ile herhangi bir yönde eğim açısı yaptığıında bu ağırlık yerçekimine yenik düşerek bağlı olduğu yaylarda dönme açısına bağlı olarak bir gerinim veya kapasitans oluşturacaktır. Yaylarda oluşan bu kapasitans değerlerinin farklarının ölçümü ve bu ölçümün sensör içerisinde bulunan elektronik ünite ile analiz edilmesi sonucunda dönme açısı değeri elde edilir. İvmeölçer içyapısını gösteren bir model Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.

MEMS teknolojisi ile daha düşük boyutlara indirgenerek üretilebilen, içerisinde ivmeölçer ve jiroskop donanımlarını içeren IMU bileşenleri, mobil ve giyilebilir pazarlar ile birlikte endüstriyel pazarda da önem kazanmıştır. Küçük boyutları ve yüksek uygulanabilirliği sayesinde pazarda dikkat çekici hale gelmiştir. (Valzasina 2022).



Şekil 3.1 İvmeölçer İçyapısı

İvmeölçer modelinde gösterilen elektromekanik sistem yardımıyla ölçülen veriler ilgili eksenlere etki eden yerçekimi ivmesine karşılık gelir. Ardından bu elde edilen veriler bir matematiksel model ile derece birimindeki açı fazına çevrilir.

Eşitlik 3.1 ile x eksenini için, Eşitlik 3.2 ile y eksenini için radyan cinsinden eğim açısı büyüklüğü hesaplanırken, Eşitlik 3.3 ile x eksenini, Eşitlik 3.4 ile y eksenini için eğim açısı ölçümü radyan cinsinden derece cinsine çevrilir. Eşitliklerdeki ANG_x ve ANG_y radyan cinsinden, $Angle_x$ ve $Angle_y$ ise derece cinsinden açı büyüklüğünü gösterir. Eşitlikteki değerlerden acc_x , acc_y , acc_z ise sırasıyla X, Y, Z eksenlerinde ölçülen yerçekimi ivmelerinin büyüklüğünü gösterir. (Nawrocka 2020)

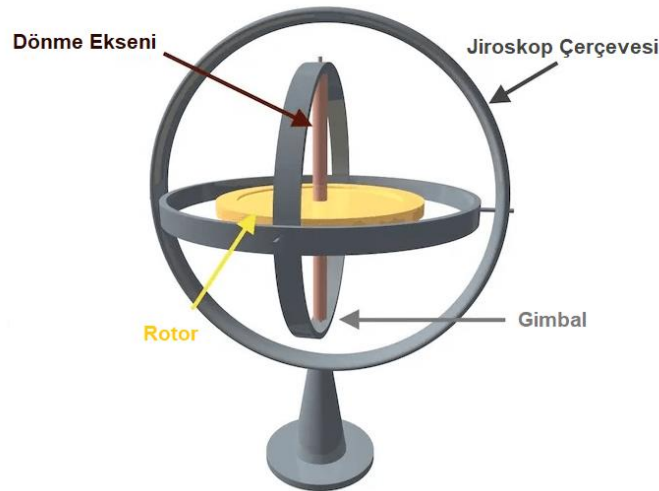
$$Angle_y = ANG_y / (2^{14}) \cdot 90 \quad (3.1)$$

$$Angle_x = ANG_x / (2^{14}) \cdot 90 \quad (3.2)$$

$$ANG_y = atan2\left(acc_y / \sqrt{(acc_x^2 + acc_z^2)}\right) \quad (3.3)$$

$$ANG_x = atan2\left(acc_x / \sqrt{(acc_y^2 + acc_z^2)}\right) \quad (3.4)$$

IMU sistemlerinin içerisindeki bir diğer yapı ise jiroskoptur. Bir jiroskopun çalışma prensibi, “dönme devamlılığı” olarak adlandırılan bir yönteme dayanır. Bir nesne döndükçe, dönme eksenini boyunca bir dönme momentumu oluşur. Bu momentum, dönen bir tekerleğin kendisinin dikine doğru bir kuvvet uygulamasına benzer bir etki yaratır. Bu nedenle, bir jiroskopun çalışması, dönme momentumunun korunumu prensibine dayanır. Jiroskop sayesinde nesnenin dönme hızı ve yönelimi belirlenebilir. Jiroskobun iç yapısına ait bir model Şekil 3.2’de verilmiştir. (Pazar 2023)

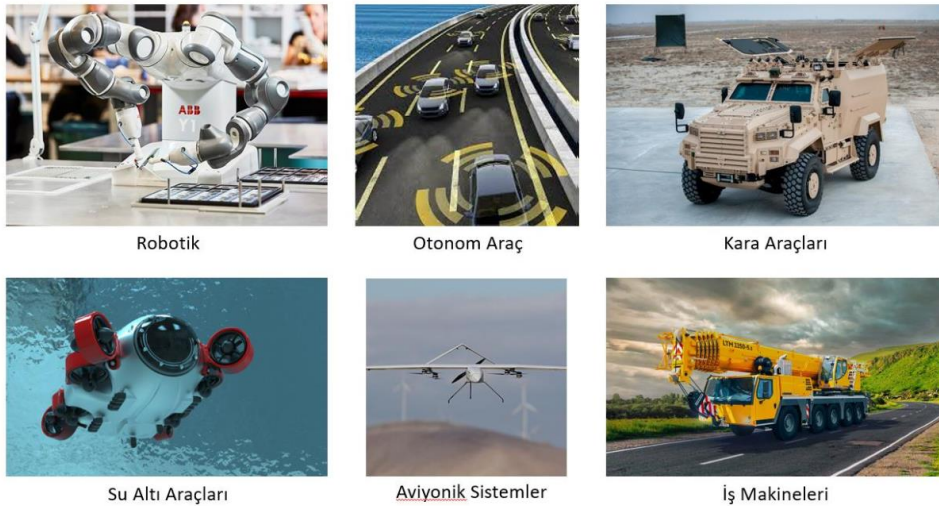


Şekil 3.2 Jiroskop İç yapısı

3.2. Eğim Sensörü Kullanım Alanları

Günümüzde kullanımı yaygın olan eğim sensörleri barındırdıkları MEMS teknolojisi sayesinde çok az yer kaplarlar ve birçok sisteme entegre edilebilirler. Gelişmiş olan ölçüm mekanizmaları sayesinde yüksek çözünürlükte eğim ölçümü yapabilen eğim sensörlerinin en çok kullanıldığı alanlara aviyonik sistemler, robotik uygulamaları (Nobili 2017) (Patel 2017), otonom araçlar (Hyty 2017) (Yazdkhasti 2018) kara aracı uygulamaları ve iş makineleri örnek gösterilebilir. Bu çalışma alanlarına ait görseller Şekil 3.3’ de gösterilmiştir.

Kara aracı ve robotik gibi birçok uygulamada kullanılan eğim sensörleri kimi zaman aracın şasesinin yeryüzü üzerindeki eğimini ölçmek amacıyla, kimi zaman da hareketli mekanizmalarının eğim açısını ölçmek için kullanılır. İş makinesi ve kara araçlarında yüksek ağırlıklı yükler kaldırıldığından dolayı bu uygulamalarda da eğim sensörlerinin görevi çok önemlidir. Eğim sensörleri ölçtükleri eğim verilerini sistemin kontrolcüsüne göndererek iş makinesinin hareketinin optimum ve güvenli bölgede tutularak aracın devrilmesi vb. durumları engelleyerek iş kazası riskini azaltır.

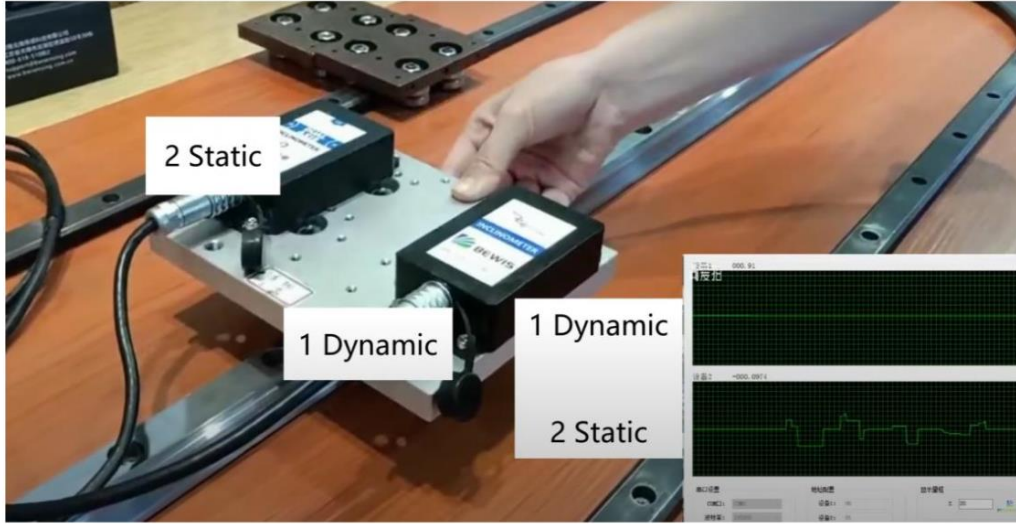


Şekil 3.3: Eğim Sensörü Kullanım Alanları

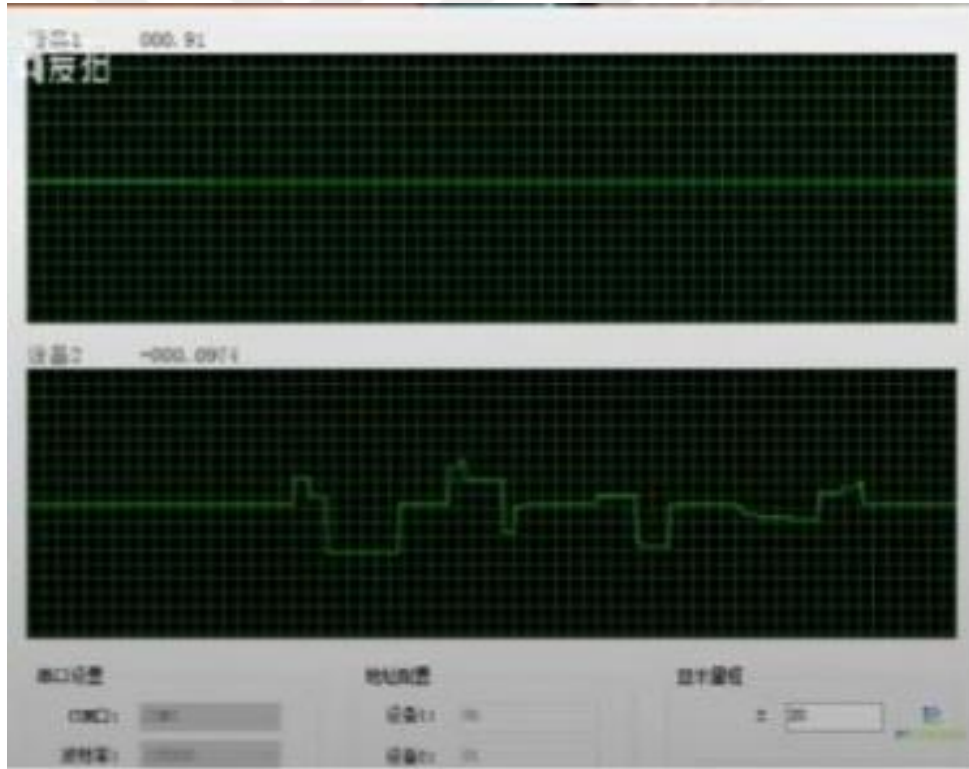
3.3. Eğim Sensörü Çeşitleri

Endüstriyel alanda kullanılan eğim sensörleri statik ve dinamik eğim sensörleri olmak üzere 2 sınıfa ayrılabilir. Statik ve dinamik eğim sensörleri arasındaki en büyük fark içlerinde barındırdıkları ölçüm teknolojileridir. Statik eğim sensörleri ölçüm için sadece ivmeölçer altyapısını kullanırken dinamik eğim sensörleri ivmeölçer ile birlikte jiroskop altyapısını da kullanmaktadır. Ölçüm mekanizmasındaki farklılık bu eğim sensörlerinin parametrelerinin ve kullanım alanlarının farklı olmasını sağlamıştır. Dinamik eğim sensörleri jiroskop ve ivmeölçer verilerini birleştirerek dinamik uygulamalarda daha doğru sonuç verirken statik eğim sensörleri ise sadece ivmeölçerden aldığı verileri kullanır ve dinamik eğim sensörüne göre nispeten daha statik uygulamalarda kullanılır.

Şekil 3.4’ te dinamik ve statik eğim sensörü ile yapılan bir teste ait görseldir. Testi yapan kişi statik ve dinamik eğim sensörlerinin bağlı olduğu plakayı lineer ray boyunca ivmeli bir şekilde hareket ettirmektedir. Görselin sağ altında gösterilen grafikte ise bu sensörlerden alınan eğim açısı sonuçları gösterilmiştir. İvmeli hareket esnasında yukarıda bulunan ve dinamik sensörden alınan verilerin çok istikrarlı olduğu görünürken altta bulunan ve statik eğim sensöründen alınan verilerin gösterildiği grafikteki eğrinin istikrarlı olmadığı, ivmeli hareketten etkilenerek anlık olarak hatalı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. (BWSENSING 2020) Test sonuçlarına ait grafik Şekil 3.5’ te verilmiştir. Altta bulunan grafik statik eğim sensöründen alınan açı verilerini zaman ekseninde gösterirken, üstteki grafik dinamik eğim sensöründen alınan açı verilerini zaman ekseninde gösterir. Grafikler karşılaştırıldığında dinamik eğim sensörünün harici ivmeli platformlarda daha istikrarlı ve doğru ölçümler yaptığı gözlemlenmektedir.



Şekil 3.4: (BWSENSING 2020)' deki Teste Ait Görsel



Şekil 3.5: (BWSENSING 2020)' deki Teste Ait Sonuç Grafiği

Bu tez kapsamında dinamik eğim sensörü cihazı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu dinamik eğim sensörü cihazının üzerinde, eğim açılarının alınabilmesi için 6 eksen IMU kullanılmıştır. Tasarlanan cihaz içerisinde yazılımsal olarak ortalama kayan filtre, kalman filtresi, alçak geçiren filtre gibi özel algoritmalar kullanılarak açı ölçümlerinin daha istikrarlı bir hale getirilmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan dinamik eğim sensörü cihazı üzerinde alınan ham veriler geliştirilen filtreleme algoritmalarının ürettiği veriler ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen algoritmaların performansları RMSE metodu kullanılarak analiz edilerek en verimli filtreleme yöntemi tespit edilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler literatürdeki farklı çalışmalarda alınan verilerle karşılaştırılarak geliştirilen yöntemin ne kadar verimli olup olmadığı ile ilgili çıkarımlar yapılmıştır.

Çalışmaya ek olarak literatürdeki çalışmalara katkıda bulunmak amacıyla statik eğim sensöründen alınan veriler de eklenerek dinamik ve statik eğim sensörü arasındaki farkın net bir şekilde görülebilmesi sağlanmıştır.

3.4. Veri Kaynaklarının Tanıtılması

Uygulama içerisinde analiz edilen açı verileri, bu tez kapsamında tasarlanmış olan dinamik eğim sensörü ve başka bir statik eğim sensörü cihazlarından alınmıştır. Kullanılan sensörlere ait görsel Şekil 3.6' da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Eğim Sensörü Cihazı

3.4.1. Statik Eğim Sensörü

Uygulamada kullanılan statik eğim sensörü cihazı Elfatek Elektronik firmasının tasarlamış olduğu ve endüstriyel alanda mobil araç uygulamalarında kullanılan bir cihazdır. Cihazın içerisinde 3 eksen ivmeölçer kullanılarak açı ölçümleri sağlanmıştır.

3.4.2. Dinamik Eğim Sensörü

Tezde kullanılan bir diğer veri kaynağı ise çalışma kapsamında tasarlanmış olan dinamik eğim sensörü cihazıdır. Bu cihaz, 6 eksen ivmeölçer ve jiroskop donanımlarına sahiptir. Cihazın içerisinde bulunan MEMS mekanizmasından alınan ölçüm değerleri, MEMS entegre üreticisi olan firma tarafından paylaşılan ve cihaz yazılımına entegre edilen Motion DI kütüphanesine gönderilerek burada tüm yunus, yalpa, dönüklük, açısal hız vb. parametrelerinin hesaplanması sağlanmıştır.

MotionDI kütüphanesinden alınan ölçüm verileri daha sonra bu tez kapsamında performanslarının karşılaştırılması amacıyla tasarlanan bazı yazılımsal filtrelerden geçirilmiştir. Bu filtrelerin çıktısı olarak alınan derece cinsinden eğim açısı değerleri de tasarlanan karttaki haberleşme donanımı sayesinde test düzeneğindeki diğer cihazlara gönderilmiştir.

3.5. Test Düzeneği ve Metodu

Tezin ana amacı olan dinamik eğim sensörünün ve açı ölçüm filtrelerinin tasarımından sonra performanslarının karşılaştırılması için test düzeneği hazırlanmıştır. Hazırlanan test düzeneğinde veri kaynaklarından alınan veriler veri kaydedici cihazda örneklenmiştir. Örneklenen veriler ise son olarak bilgisayar ortamında analiz edilerek açı ölçüm filtrelerinin performansları karşılaştırılmıştır. Test düzeneğine ait görsel Şekil 3.7' de gösterilmiştir.

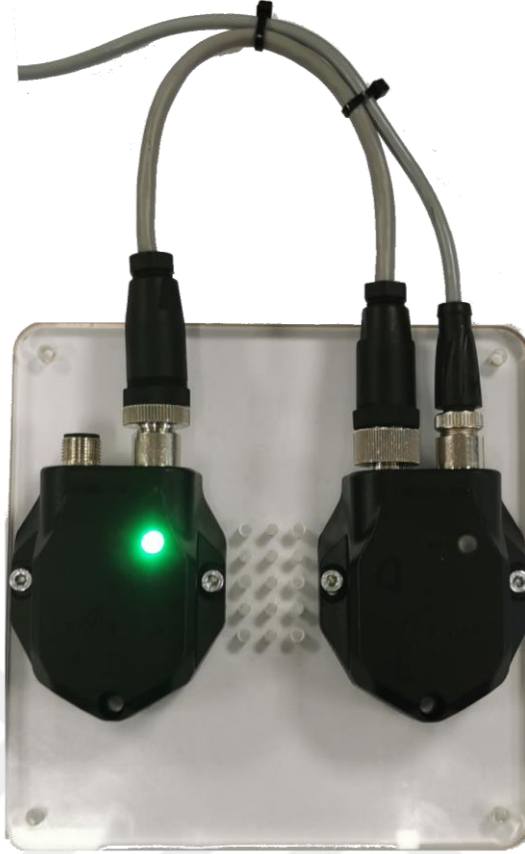
Test düzeneğinde statik ve dinamik eğim sensörü olmak üzere 2 adet veri kaynağı, 1 adet veri kaydedici cihaz ve cihazlar arası haberleşmeyi sağlayan CANBUS-USB dönüştürücü cihazlar kullanılmıştır.



Şekil 3.7: Test Düzeneği

3.5.1. Test Platformu

Test platformu olarak 10mm pleksi kullanılmıştır. Bu pleksi üzerine statik eğim sensörü ve tez kapsamında tasarlanan dinamik eğim sensörü montajlanabilecek şekilde bağlantı delikleri konumlandırılmıştır. Statik ve dinamik eğim sensörleri yan yana paralel bir şekilde, aynı açı değerlerini verebilecek şekilde konumlandırılmıştır. Elektriksel bağlantı olarak da bu eğim sensörleri üzerinde bulunan M12-5pin konnektörler yardımıyla +24V_{DC} besleme ve CANBUS pinlerine bağlantı yapılmıştır. Test platformuna ait görsel Şekil 3.8’ de verilmiştir.



Şekil 3.8: Test Platformu

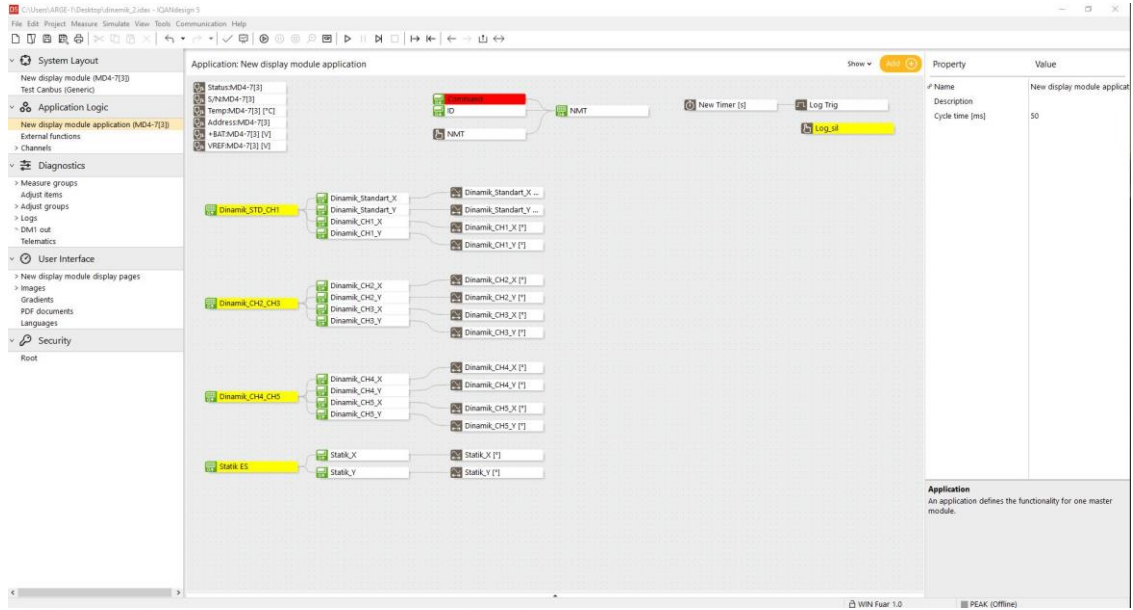
3.5.2. Veri Kaydedici Cihaz

Tez kapsamında hazırlanan düzenekteki veri kaydedici cihazın görevi, sistemdeki eğim sensörlerinden eğim açısı ölçüm değerlerini alarak bilgisayara göndermek ve kendi üzerinde bulunan ekranda tasarlanan arayüzde de anlık olarak eğim açılarını göstermektir. Bu uygulamada Parker firmasına ait IQAN-MD4-7-T1E2 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaza ait görsel Şekil 3.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Veri Kaydedici Cihazın Önden ve Arkadan Görünümü

Bu cihaz, üzerinde birçok haberleşme portu, dijital giriş ve çıkışlar içermektedir. Tez kapsamında bu cihaz üzerindeki CANBUS haberleşme kısmı ve ekran arayüzü kullanılmıştır. Veri kaydedici cihazı programlamak için IQANdesign bilgisayar arayüz programı kullanılmıştır. Ayrıca yazılan programı veri kaydedici cihaza gönderme işlemi de bilgisayarın USB portuna takılan Peak System firmasına ait PCAN-USB cihazı ile yapılmıştır. Veri kaydedici cihazın topladığı eğim açısı ölçümleri de anlık olarak bilgisayar arayüzüne bu aygıt üzerinden gönderilmiştir. IQANdesign program arayüzüne ait görseller Şekil 3.10’ da verilmiştir.



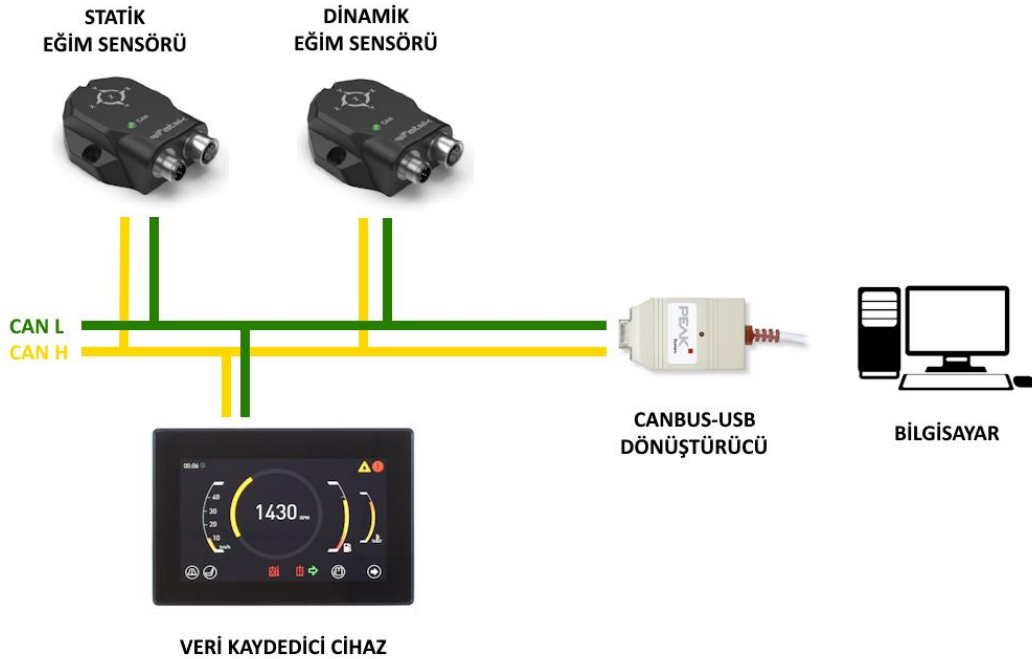
Şekil 3.10: IQANdesign Program Arayüzü

3.5.3. CANBUS Haberleşme

Test düzeneğinde bulunan veri kaydedici cihaz, veri kaynağı cihazlar ve bilgisayar arasında CANBUS haberleşmesi yapılmıştır. Haberleşme metodu olarak CANBUS' ın tercih edilme sebebi endüstriyel uygulamalar ve mobil araç uygulamaları için uygun olmasıdır.

CANBUS haberleşmesi 2 kablo üzerinden sağlanan bir haberleşme metodudur. Haberleşme hattı boyunca uzatılan CANH ve CANL kablolarına her bir cihaz da 2 kablo ile bağlanarak haberleşme hattında bulunan tüm cihazlar ile haberleşebilir. Bu uygulamada CANBUS haberleşme donanımı üzerine CANopen protokolü kullanılmıştır. CANopen protokolü cihazlar arasındaki veri alışverişinin belirli kural ve standartlara uygun olarak yapılmasını sağlayarak cihazların birbiri ile uyumluluğunu arttırmaktadır. Haberleşme hattında bulunan her bir cihaz düğüm (Node) olarak adlandırılır. CANopen protokolünde, maksimum 127 adet düğüm bulunabilir. Her bir düğümün kendine özel bir düğüm numarası (Node ID) vardır. Haberleşme hattında bulunan cihazlar kendisine gelen verileri analiz ederken düğüm numarası bileşenine göre verinin hatta bulunan hangi cihazdan geldiğini saptar. Benzer şekilde her bir cihaz haberleşme hattına veri gönderirken kendi düğüm numarasını da mesajın ilgili kısmına yazarak alıcı cihazların verinin hatta bulunan hangi cihazdan geldiğini saptamasını sağlar. (Quan 2020)

Uygulamada kullanılan ve CANOpen protokolüne sahip olan statik eğim sensörü düğüm numarası 0x08_h, dinamik eğim sensörü düğüm numarası ise 0x07_h olarak ayarlanmıştır. Bu veri kaynaklarından gönderilen verilerin toplandığı veri kaydedici cihaz ise yönetici (Master) cihaz olarak ayarlanmıştır. Veri kaydedici cihaz ile bilgisayar arayüz programı arasındaki bağlantı Peak System firmasına ait PCAN-USB cihazı ile sağlanmıştır. Bu dönüştürücü cihaz veri kaydedici cihazın eğim sensörü cihazlarından topladığı verilerin CANBUS hattından alınıp USB'ye dönüştürülmesiyle bilgisayar arayüzünde gösterilmesini ve kaydedilmesini sağlar. Bu sayede tüm test düzeneğinden toplanan veriler bilgisayar ortamına analiz edilebilecek formatta aktarılabilir. Ayrıca CANBUS hattındaki cihazların eşzamanlı haberleşebilmesi için veri hızı (Baud rate) değerlerinin de aynı olması gereklidir. Test düzeneğinde kullanılan tüm CANBUS haberleşmesine sahip olan cihazlar 250 kbps veri hızında çalışacak şekilde ayarlanmıştır. Test düzeneğindeki CANBUS hattının şeması Şekil 3.11' de gösterilmiştir.



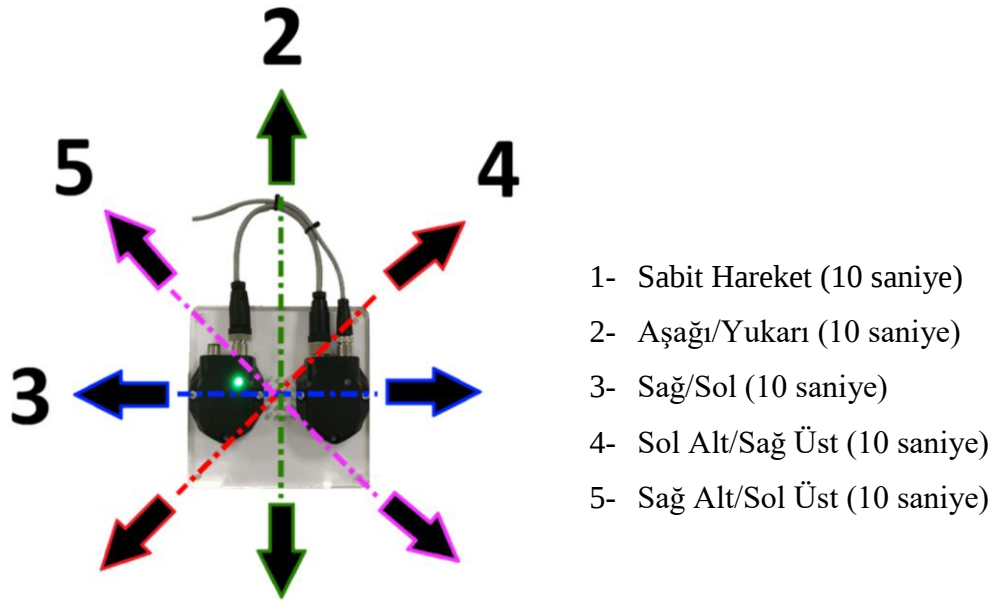
Şekil 3.11: CANBUS Hattı Şeması

3.5.4. Test Metotları

Tez kapsamında hazırlanan eğim sensörleri ve test platformları, geliştirilen özel filtrelerden geçirilerek çıktılarının performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmanın doğru sonuç vermesi için yapılan tüm testlerin eşdeğer olması sağlanmıştır. Eşdeğer olarak yapılan testlerin sonucu olarak hangi filtrenin daha performanslı çalışıp çalışmadığı analiz edilmiştir. Hazırlanan test platformuna farklı yönlerde ivmeli hareketler sağlanarak açı ölçümleri anlık olarak örneklenmiştir. Örnekleme işlemi her 50ms' de bir (20kHz) yapılmıştır ve örneklenen veriler test düzeneğinden bilgisayar ortamına PCAN-USB cihazı ile gerçek zamanlı olarak aktarılmıştır.

Test metodu 2 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada test platformu düz bir zeminde 10 saniye boyunca sabit olarak tutulur ve eğim sensörlerinden örnekleme frekansında alınan veriler anlık olarak bilgisayar arayüzüne aktarılır. Testin ikinci aşamasında ise eğim sensörlerinin bağlı olduğu test platformuna 4 farklı hareket ekseninde olmak üzere 10' ar saniye boyunca hareket verilir. Test metodu olarak belirlenen ve platforma verilen hareketlerin görseli Şekil 3.12' deki gibidir.

Tüm bu test aşamalarının sonunda elde edilen eğim açısı verileri, bilgisayar ortamında analiz edilerek geliştirilen filtrelerin çalışma performansları ve ölçüm hatalarını azaltma performansları incelenmiştir.



Şekil 3.12: Test Esnasında Platformun Hareket Eksenleri

3.6. Veri Setlerinin Tanıtılması

Tez çalışmasındaki veri setleri derece cinsinden eğim açısı ölçümlerini içerir. Bu eğim açısı ölçümleri ham ölçümler ve geliştirilen yazılımsal filtrelerden geçirilen eğim açılarının ölçümlerinden oluşur. Bu yazılımsal filtreler Bölüm 3.4'te daha ayrıntılı anlatılmaktadır.

Yapılan uygulamada CANBUS haberleşme metodu kullanıldığı için veri setleri CANBUS mesajlarının içerisine uygun olacak şekilde organize edilmiştir. CANBUS haberleşmesinde her bir mesaj 8 byte veriye ve mesaj numarasına (Mesaj ID) sahiptir. CANBUS veri içeriğine eğim açıları yazılır. Mesaj numarası kısmına da o mesajın içerisinde hangi algoritma çıktısı olarak alınan eğim açısı verilerinin olduğunu gösteren numaralar verilmiştir.

Eğim sensörü eğim açısı olarak 2 farklı veri sunmaktadır. Bunlardan birisi cihazın X eksenini ile diğeri ise Y eksenini ile yaptığı açının derece cinsinden karşılığıdır. Her bir eksen ile yapılan açılar $\pm 85^\circ$ skalasında 0.01° hassasiyet ile ölçülerek CANBUS mesajı içerisinde yerini alır. X eksenini eğim açısı CANBUS mesajı içerisinde 2 byte yer kaplarken, Y açısı da aynı şekilde 2 byte yer kaplar. Her bir algoritmanın açı ölçüm sonucu için toplam 4 byte yer kaplanmış olur. CANBUS mesajı maksimum 8 byte veri içerebileceğinden, tek bir CANBUS mesajında 2 farklı eğim açısı ölçümü yer almaktadır. CANBUS mesaj yapısı Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1: CANBUS Mesaj Yapısı

Mesaj ID	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri	Veri
	Byte[0]	Byte[1]	Byte[2]	Byte[3]	Byte[4]	Byte[5]	Byte[6]	Byte[7]

Tez kapsamında eğim sensörü cihazlarından dışarı gönderilecek CANBUS mesajlarının içeriği, her bir mesajda 2 farklı filtre sonucu gönderilebilecek şekilde ayarlanmıştır. Geliştirilen tüm filtrelerin çıktılarını aynı anda bilgisayara göndermek için 4 farklı CANBUS mesajı oluşturulmuştur. Bu mesajlara ait numaralar $0x188_h$, $0x187_h$, $0x287_h$, $0x387_h$ olarak yapılandırılmıştır. $0x188_h$ numaralı CANBUS mesajı statik eğim sensörü tarafından yayınlanırken, diğer mesajlar dinamik eğim sensörü tarafından yayınlanmaktadır.

CANBUS mesajları içerisinde eğim açıları içeren toplam 6 adet veri paketi yerleştirilmiştir. Bu veri paketlerinden ikisi statik ve dinamik eğim sensörlerinin ölçtüğü ham verileri içerir. Bu veri paketleri CHS ve CHD olarak adlandırılan veri kanallarından bilgisayar ortamına aktarılmıştır. CHS statik eğim sensörünün ham verilerini, CHD ise dinamik eğim sensörünün ham verilerini içerir. Kalan 4 veri paketi ise dinamik eğim sensörü içerisinde geliştirilen yazılımsal filtrelerin çıktılarını içermektedir. Bu veri paketleri ise CH1, CH2, CH3, CH4 olarak adlandırılan veri kanallarından bilgisayar ortamına gönderilir. Bu 6 farklı veri kanalının gönderildiği CANBUS mesajlarının yapısı Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir. Şekilde bulunan (-) işaretleri belirtilen alanın kullanılmadığını belirtmektedir.

Çizelge 3.2: 6 Farklı CANBUS Veri Kanalının Yapısı

Mesaj ID	Veri Byte[0]	Veri Byte[1]	Veri Byte[2]	Veri Byte[3]	Veri Byte[4]	Veri Byte[5]	Veri Byte[6]	Veri Byte[7]
0x188 _h	CHS Statik Eğim Sensörü Ham Veri				-	-	-	-
0x187 _h	CHD Dinamik Eğim Sensörü Ham Veri				CH1 Dinamik Eğim Sensörü CH1			
0x287 _h	CH2 Dinamik Eğim Sensörü CH2				CH3 Dinamik Eğim Sensörü CH3			
0x387 _h	CH4 Dinamik Eğim Sensörü CH4				-	-	-	-

3.7. Ölçüm Stabilesini Arttırmak İçin Kullanılan Algoritmalar

Eğim sensörü cihazları, içerisinde bulunan MEMS sensörleri sayesinde eğim açısı, açısal hız vb. parametrelerin ölçümlerini yapabilmektedir. MEMS sensörlerinin içyapısında elektronik bileşenlerin yanı sıra mekanik bileşenler de bulunmaktadır. Mekanik bileşenler üzerinde oluşan etkiler elektronik sinyallere dönüştürülerek ölçümler gerçekleştirilmektedir. IMU içerisinde bulunan jiroskop sayesinde açısal hız ölçümü yapılabilirken, ivmeölçer sayesinde ise eksenlerin yer çekimi kuvvetinin hangi boyutta etkisi altında kaldığı saptanmaktadır ve sonuç olarak eğim açısı ölçümü yapılmaktadır.

MEMS sensörlerindeki ivmeölçer, mekanik yapısı gereği sensör hareketli konumdayken yani harici ivmeli bir hareket yaparken hatalı ölçümler verebilmektedir. Bu da uygulamada dinamik platformlarda ölçüm yapılırken hatalı sonuçlara neden olmaktadır. Sonuç böyleyken eğim sensörleri içerisine filtre, özel algoritma vb. önlemler alınarak bu ölçüm hataları en aza indirgenmeye çalışılmaktadır. (Hoang 2021)

Bu tez çalışması kapsamında dinamik eğim ölçümlerinin yapılması amacıyla tasarlanan gömülü sistem içerisinde yazılımsal olarak bazı filtreler geliştirilmiştir. Bu filtreler farklı yöntemler ile çalışsa da asıl amaçları dinamik platformlarda eğim açı ölçümlerini daha istikrarlı bir hale getirmektir. Bu tez çalışmasının asıl amacı da geliştirilen bu filtrelerin performanslarının analiz edilip, hangi filtrenin daha performanslı çalıştığını tespit etmektir.

Uygulamada kullanılan filtreler ortalama kayan filtre, kalman filtresi, alçak geçiren filtre olarak sıralanabilir.

3.7.1. Ortalama Kayan Filtre

Dinamik hareketlerde oluşan anlık yanlış açı ölçümlerinin sonuca etkisini azaltmak için tasarlanan ortalama kayan filtresinde tek bir parametre bulunmaktadır. Bu parametre filtre uzunluğu olarak adlandırılmıştır. Filtrenin çalışma mantığı filtre uzunluğu kadar uzunlukta bir hafıza alanı oluşturulur. Bu alanda MEMS sensörden gelen ham eğim açısı değerleri saklanır. Yeni bir eğim açısı değeri geldiğinde en eski değer hafızadan çıkartılır ve yeni değer hafızada yerini alır. Filtre çıktısı olarak da hafızada bulunan eğim açılarının ortalaması dışarı aktarılır. Bu sayede anlık oluşan hatalı ölçümlerin etkisinin azaltılması hedeflenmiştir. Burada filtre uzunluğu arttıkça filtreleme performansının artması beklenmektedir.

3.7.2. Kalman Filtresi

Kalman filtresi, yapay zekâ alanındaki çalışmaların son senelerde ivmelenmesiyle önem kazanmıştır. Gerçek zamanlı sistemlere kolaylıkla entegre edilebilmesi ve verimli bir algoritma olması sayesinde tahmin uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. (Hoang 2021).

Bu tez çalışmasında kalman filtresinin birden fazla varyantı oluşturularak performansları test edilmiştir. Bu varyantların oluşturulma amacı, kalman filtresinin IMU kullanılan eğim sensörü uygulamaları için en uygun versiyonunu bulmaktır.

Tasarlanan tüm kalman filtresi varyantları temel olarak tahmin ve güncelleme kısmından oluşur. Farklı varyantların oluşma sebebi tahmin aşamasındaki algoritma farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Her bir varyant, eğim açısını tahmin etmek için önemli olan Q (Proses Gürültüsü) ve R (Ölçüm Gürültüsü) parametrelerine farklı yaklaşımlarda bulunmaktadır. Tüm varyantların güncelleme kısımları ise aynı algoritmaya sahiptir. Güncelleme kısmında tahminler ile ölçümler karşılaştırılarak durum çıktısına karar verilir ve bu durum çıktısı dinamik eğim sensörü cihazının nihai eğim açısı ölçümü olarak test düzeneğindeki diğer cihazlara gönderilir.

Kalman filtresinin ilk adımı olan hata parametresi, tahmin aşamasında P (Hata Kovaryans Değeri) Eşitlik 3.5' deki gibi hesaplanır. Burada P_k k ' inci zaman adımıdaki tahmin edilen hata kovaryans değeri, P_{k-1} önceki adımda güncellenmiş hata kovaryans değeri, Q ise süreç gürültüsüdür. Hata kovaryans değeri temel olarak kalman filtresinin tahmini hakkında kesinliği tanımlar. Bu değer ne kadar büyükse, gerçek durum hakkındaki belirsizlik büyüktür. Tersine daha küçükse gerçek durumda daha az belirsizlik mevcuttur. Süreç gürültüsü ise filtreleme vb. süreçlerin hepsindeki ortalama gürültüyü temsil eder ve hata kovaryans değerine eklenip hesaplamaya dâhil edilerek daha doğru bir ölçüm yapılmasını sağlar.

$$P_k = P_{k-1} + Q \quad (3.5)$$

Kalman filtresinin bir sonraki adımında K (Kalman Kazancı) değeri güncellenir. Bu güncelleme işlemi Eşitlik 3.6' daki gibi yapılır. Bu eşitlikte K_k k ' inci zaman adımıdaki kalman kazancını, R ölçüm gürültüsünü temsil etmektedir.

$$K_k = P_k (P_k + R)^{-1} \quad (3.6)$$

Kalman filtresinin sondan bir önceki adımında durum güncellemesi yapılarak bu uygulama için filtre çıktısı olarak dışarı gönderilecek eğim açısı tahmini hesaplanır. Bu hesaplama işlemi Eşitlik 3.7' ye göre yapılır. Eşitlikte X_k güncellenmiş durum değerini, Z_k k ' inci zaman adımıdaki ölçüm değerini, X_{k-1} bir önceki adımda tahmin edilen durum değerini temsil etmektedir.

$$X_k = X_{k-1} + K_k (Z_k - X_{k-1}) \quad (3.7)$$

Kalman filtresinin son aşamasında ise hata kovaryans değeri güncellenerek kalman döngüsünün bir sonraki adımında daha doğru tahminlerde bulunması amacıyla hazırlanır. Hata kovaryans değeri güncelleme işlemi Eşitlik 3.8' e göre yapılır. P_{k+1} bir sonraki zaman adımındaki hata kovaryans değerini temsil eder.

$$P_{k+1} = (1 - K_k)P_k \quad (3.8)$$

Yukarıda anlatılan kalman filtresi ile ilgili adımlar tekrarlanarak tüm parametreler sürekli olarak güncellenir ve anlık olarak eğim açısı ölçümleri cihaz dışına aktarılır.

3.7.2.1. Standart Kalman Filtresi

Yukarıda, tez çalışması kapsamında hazırlanan ilk yazılımsal kalman filtresi varyantına standart kalman filtresi adı verilmiştir. Bu kalman varyantında Q ve R parametreleri sabit değer olarak belirlenmiştir. Tüm hesaplamalar bu sabit belirlenen değerlere göre ilerletilmektedir.

3.7.2.2. Dinamik Kalman Filtresi

Hazırlanan ikinci kalman filtresi varyantı ise dinamik kalman filtresidir. Bu kalman varyantında Q değeri sabit tutulurken R değeri ise anlık olarak değişmektedir. R değerinin belirlenme işlemi ise IMU' dan gelen lineer ivme değerinin büyüklüğüne göre ölçeklendirilmiştir. Eğer lineer ivme değeri büyükse sensörün dinamik bir ortamda olduğu tespit edilerek kalman kazancı da o ölçüde arttırılmaktadır. Tam tersi durumda da sensörün daha statik bir ortamda olduğu tespit edilir ve lineer ivme büyüklüğüne göre kalman kazancı belirlenir. Bu varyantın tasarlanma amacı kalman filtresinin statik ortamlarda gereksiz yere aktif olmasını engellemek ve sensörün açılış ölçüm tepkisini yükseltmektir.

3.7.2.3. Kademeli Kalman Filtresi

Hazırlanan son kalman filtresi varyantı ise kademeli kalman filtresi olarak adlandırılmıştır. Bu varyantta ise Q değeri sabit olarak belirlenirken R değerinde 2 farklı değer belirlenmiştir. Bu değerlerden birisi 0.01 olarak belirlenirken diğeri ise 0.9 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin seçimi ise IMU' dan gelen doğrusal ivme ile belirlenmiştir. Eğer doğrusal ivme 0.2 m/s^2 ' den büyükse P değeri 0.9 olarak, küçükse de 0.01 olarak ayarlanmaktadır. Kalman tahmin ve durum güncelleme işlemleri de bu parametrelere göre devam etmektedir.

3.7.3. Alçak Geçiren Filtre

Alçak geçiren filtre belirli bir frekansın altındaki bileşenleri geçirmek, üstündekileri ise engellemek amacıyla kullanılan filtredir. Bu tür filtreler sinyal işleme başta olmak üzere birçok mühendislik alanındaki uygulamada kullanılmaktadır. Alçak geçiren filtrelerdeki en önemli parametreler kesim frekansı ve örnekleme frekansıdır. Yapılacak uygulamaya göre bu değerler dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

Kesim frekansı ve β (Filtre Katsayısı) arasındaki bağlantı Eşitlik 3.5' deki gibidir. Eşitlikteki f_c kesim frekansını belirtirken f_s ise örnekleme frekansını belirtir. Filtreleme işlemi ise Eşitlik 3.6' ya göre yapılmaktadır. X_{n-1} bir önceki ölçüm değerini, X_n ise şu andaki ölçüm değerini ve Y_n ise filtreleme sonucu ortaya çıkan değeri belirtir. (Hoang 2021)

$$\beta = 1 - e^{-2\pi f_c / f_s} \quad (3.5)$$

$$Y_n = (1 - \beta)X_n + \beta X_{n-1} \quad (3.6)$$

Bu tez çalışmasında örnekleme frekansı 200Hz, kesim frekansı ise 100Hz olarak ayarlanmıştır.

3.8. Açı Ölçüm Testleri

Tez çalışması kapsamında hazırlanan ve dinamik uygulamalarda eğim sensörlerinden daha istikrarlı ölçümler almak amacıyla tasarlanan filtrelerin çıktıları CANBUS-USB haberleşmesi yoluyla bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Aktarılan veriler veri kaydedici cihaz arayüzünde kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler daha sonra Excel programına aktarılarak bazı hata ölçüm metotları uygulanarak analiz edilir ve hangi algoritmanın daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Açı ölçüm testleri 5 aşamadan oluşur. Her bir açı testinde bu 5 adım uygulanmıştır. CANBUS mesaj içerikleri hazırlanan eğim sensörleri test platformuna sabitlenmiş ve düz bir zeminde konumlandırılmıştır. Ardından cihazlar enerjilendirilmiştir. Enerjilenen cihazlar açı ölçümlerini otomatik olarak 1 seferliğine eşitler. Bu eşitlemenin sebebi montajdan kaynaklı ufak ölçüm farkları oluşmasıdır. Bu farklılığı ortadan kaldırmak, ölçüm sonuçlarının daha iyi analiz edilmesini sağlamak için önemlidir. Ardından bilgisayar arayüzü üzerinden veri kaydı başlatılmıştır. Testin ilk adımında 10 saniye boyunca platform düz masa üzerinde olduğu gibi bırakılmış ve statik durumdaki ölçümler kaydedilmiştir. Sonraki adımda 10 saniye boyunca test platformu sağ ve sola hareket ettirilmiştir. Ardından 3. Adımda 10 saniye boyunca aşağı ve yukarı, 4. Adımda 10 saniye boyunca sol-alt' dan sağ-üst' e doğru, 5. ve son adımda ise 10 saniye boyunca sağ-alt' dan sol-üst' e doğru hareket ettirilmiştir. Tüm bu aşamalar boyunca eğim sensörlerinden alınan veriler bilgisayar arayüzünde kaydedilmiştir. Ardından kaydedilen veriler analiz etmek amacıyla Excel programına aktarılmıştır.

Yukarıdaki paragrafta anlatılan test metodu tez çalışması kapsamında yapılan 5 açı testi için de geçerlidir.

3.8.1. Test-1

Tez çalışması kapsamında yapılan 1. Test' de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen ortalama kayan filtrenin aktif ve pasif durumdaki ölçümleri ve filtre uzunluğu parametresinin açı ölçüm sonucuna etkisi üzerine çalışılmıştır. Test 1' de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.3' deki gibidir.

Çizelge 3.3: Test 1 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 150)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 300)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 500)

1. Test Filtre Uzunluğu parametresinin arttırılmasının iyi performans vermesi nedeniyle parametre değerleri biraz daha arttırılarak 2. kez yapılmıştır. Bu teste de “Test 1B” ismi verilmiştir. Test 1B’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.4’ deki gibidir.

Çizelge 3.4: Test 1B Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 500)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 1000)

3.8.2. Test-2

Tez kapsamında yapılan 2. Test’ de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen kalman filtresinin Q (Süreç Hatası Katsayısı) parametresinin açılı ölçüm sonucuna etkileri üzerine testler yapılmıştır. Diğer tüm parametreler sabit tutulurken Q parametresi değiştirilerek eğim açısı ölçümleri kaydedilmiştir. Test 2’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.5’ deki gibidir.

Çizelge 3.5: Test 2 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.1)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.3 R=0.1)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.6 R=0.1)

3.8.3. Test-3

Tez kapsamında yapılan 3. Test’ de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen kalman filtresinin R (Ölçüm Hatası Katsayısı) parametresinin açılı ölçüm sonucuna etkileri üzerine testler yapılmıştır. Diğer tüm parametreler sabit tutulurken R parametresi değiştirilerek eğim açısı ölçümleri kaydedilmiştir. Test 3’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.6’ daki gibidir.

Çizelge 3.6: Test 3 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.01)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.1)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.5)

3. Test R parametresinin arttırılmasının iyi performans vermesi nedeniyle parametre değerleri biraz daha arttırılarak 2. kez yapılmıştır. Bu teste de “Test 3B” ismi verilmiştir. Test 3B’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.7’ deki gibidir.

Çizelge 3.7: Test 3B Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.5)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.75)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.9)

3.8.4. Test-4

Tez kapsamında yapılan 2. Test’ de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen ve orijinal kalman filtresinin varyantı olarak konfigüre edilen dinamik kalman fitresi ve kademeli kalman filtresinin açı ölçüm sonucuna etkileri üzerine testler yapılmıştır. Test 4’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.8’ deki gibidir.

Çizelge 3.8: Test 4 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.9)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Dinamik Kalman Filtresi)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Kademeli Kalman Filtresi)

3.8.5. Test-5

Tez kapsamında yapılan 5. Test’ de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen OKF, KF, AGF ve OKF, KF, AGF’ nin birlikte kullanıldığı özel filtrenin açı ölçüm sonucuna etkileri üzerine testler yapılmıştır. Test 5’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.9’ daki gibidir.

Çizelge 3.9: Test 5 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – OKF Aktif (Filtre Uzunluğu 500)
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – KF Aktif (Q=0.025 R=0.9)
CH3	Dinamik Eğim Sensörü – AGF Aktif ($\beta=0.95$)
CH4	Dinamik Eğim Sensörü – OKF + KF + AGF

3.8.6. Test-6

Tez kapsamında yapılan 6. Test’ de dinamik eğim sensörü ve statik eğim sensörlerinin ham eğim ölçümleriyle birlikte dinamik eğim sensörü içerisine yazılımsal olarak eklenen hibrit filtre içerisindeki OKF, KF ve AGF’ nin kullanım sırasının açı ölçüm sonucuna etkileri üzerine testler yapılmıştır. Test 6’ de haberleşme kanallarında bulunan veriler Çizelge 3.10’ daki gibidir.

Çizelge 3.10: Test 6 Haberleşme Kanalı Yapısı

Kanal Kodu	Kanal Açıklama
CHS	Statik Eğim Sensörü – Ham Veri
CHD	Dinamik Eğim Sensörü – Ham Veri
CH1	Dinamik Eğim Sensörü – AGF + KF + OKF
CH2	Dinamik Eğim Sensörü – OKF + KF + AGF

3.9. Test Sonuçlarının Analiz Edilmesi

Yapılan farklı açı ölçüm testlerinin sonucunda kullanılan algoritmaların çalışma performansını değerlendirmek ve analiz etmek için bilgisayara gönderilip kaydedilen veriler, Excel ortamına alınır. Excel ortamında farklı haberleşme kanallarından gelen veriler zaman ekseninde sıralanır.

İlk olarak test platformunun yerleştirildiği ve tüm testlerin yapıldığı düzlemin eğim açısı tespit edilmelidir. Referans değer olarak tanımlanacak bu değer gerçek değer olarak tanımlanmıştır. Gerçek değer testin ilk aşaması olan 10 saniyelik statik hareket

anında statik ve dinamik eğim sensörlerinden alınan açı değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanır. Testin diğer aşamalarındaki eğim açısı değerleri de her bir kanal için alınır. Ardından her bir veri kanalı için RMSE (Kök Ortalama Kare Hatası) metodu uygulanarak statik ve dinamik aşamalardaki hatalar hesaplanır. Tabloda hesaplanan veriler son olarak grafik üzerinde gösterilerek filtreleme performansları analiz edilir.

3.9.1. RMSE

RMSE, tahmin modellerinin doğruluğunu ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir metottur. RMSE, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değer arasındaki farkın karelerinin ortalamasıdır. Bu uygulamada RMSE değeri, ölçüm stabilitesini artırmak amacıyla tasarlanan filtrelerin verdiği çıktılardaki hata miktarını belirlemek için kullanılmaktadır. RMSE değeri Eşitlik 3.9' daki gibi hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte X_g gerçek açı ölçüm değerini, X_t tahmin edilen açı ölçüm değerini, n ise örnekleme sayısını belirtir. Örnekleme sayısı testin ilk aşamasındaki statik ölçüm yapılan kısım için 201, testin kalanına kadar olan süre için ise 809' dur.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_g - X_t)^2} \quad (3.9)$$

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Uygulamada geliştirilen test düzeneği ve eğitim sensörleri ile beş farklı açı testi gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin sonucunda daha istikrarlı açı ölçümleri almak için cihazların içerisine yazılımsal olarak eklenen filtrelerin performansları ayrı ayrı incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarının gösterildiği çizelgelerdeki Kanal Kodu bölümü o satırdaki verinin hangi veri kanalından geldiğini belirtir. Eğitim sensörü bölümü o satırdaki verinin hangi eğitim sensöründen geldiğini belirtir. Algoritma bölümü o satırdaki verinin hangi tür filtrenin sonucu olarak kaydedildiğini belirtir. Eksen bölümü o ölçümün hangi eksenindeki ölçüm olduğunu belirtir. Statik Hareket RMSE bölümü, eğitim sensörleri statik durumdayken alınan verilerin hem ayrı eksenlerde hem de iki eksenin ortalaması alınmış şekilde derece cinsinden RMSE değerini belirtir. Dinamik Hareket RMSE bölümü, eğitim sensörleri dinamik hareket durumdayken alınan verilerin hem ayrı eksenlerde hem de iki eksenin ortalaması alınmış şekilde derece cinsinden RMSE değerini gösterir. Yeşil ile işaretleniş kısım ise hangi filtrenin daha istikrarlı açı ölçümleri sunarak daha iyi performans gösterdiğini belirtir.

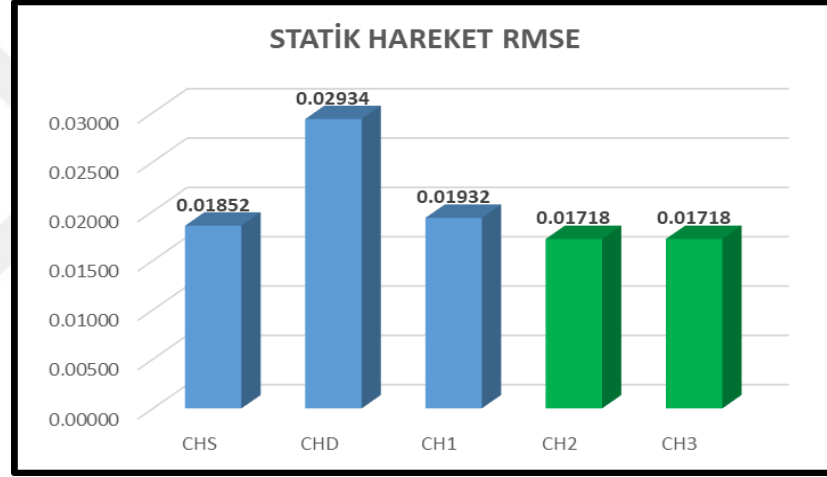
4.1. Test-1 Sonuçları

Uygulamada yapılan 1. Test' e ait açı ölçüm sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Çizelge 4.1 incelendiğinde en iyi performansı, CH3 kanalında ortalama kayan filtrenin aktif olduğu ve filtre uzunluğunun da 500 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.017° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri 1.41° olarak gözlemlenmiştir. Test-1 sonuçlarına göre ortalama kayan filtre aktif edildiğinde ve test içerisinde maksimum filtre uzunluğu olan 500' e ayarlandığında ham veriye göre statik harekette 0.012° , dinamik harekette ise 3.761° daha iyi sonuç vermektedir.

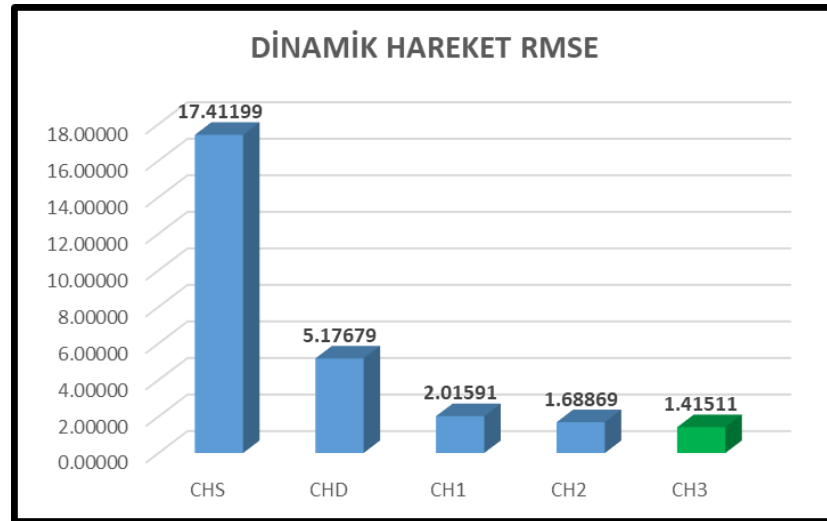
Çizelge 4.1' deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.1' deki gibi, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.2' deki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.1: Test 1 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02276	0,01852	17,11856	17,41199
			Y	0,01429		17,70543	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,03091	0,02934	5,09559	5,17679
			Y	0,02777		5,25798	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif Filtre Uzunluğu 150	X	0,02660	0,01932	2,05679	2,01591
			Y	0,01203		1,97502	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif Filtre Uzunluğu 300	X	0,02532	0,01718	1,69507	1,68869
			Y	0,00904		1,68230	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif Filtre Uzunluğu 500	X	0,02559	0,01718	1,39546	1,41511
			Y	0,00876		1,43476	



Şekil 4.1: Test 1 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

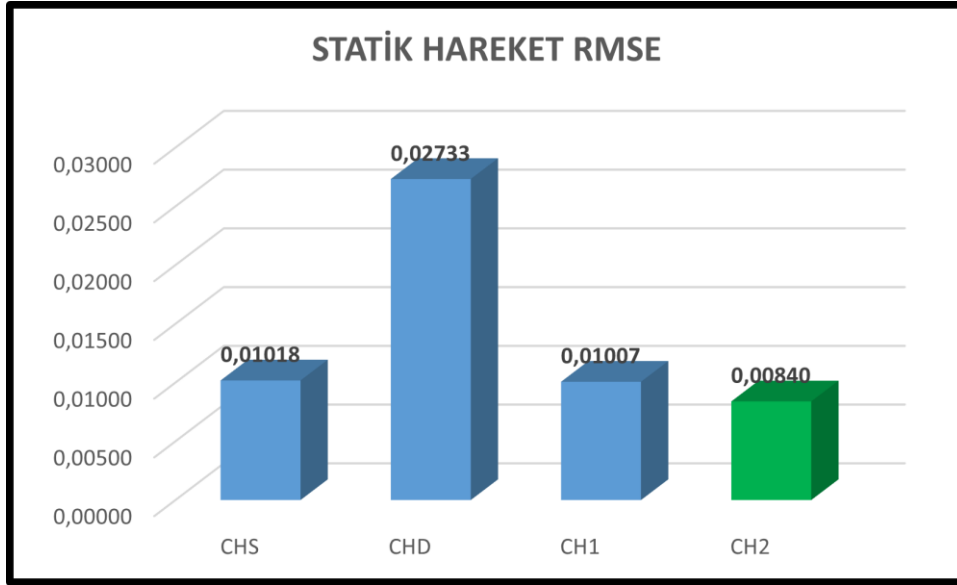


Şekil 4.2: Test 1 Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

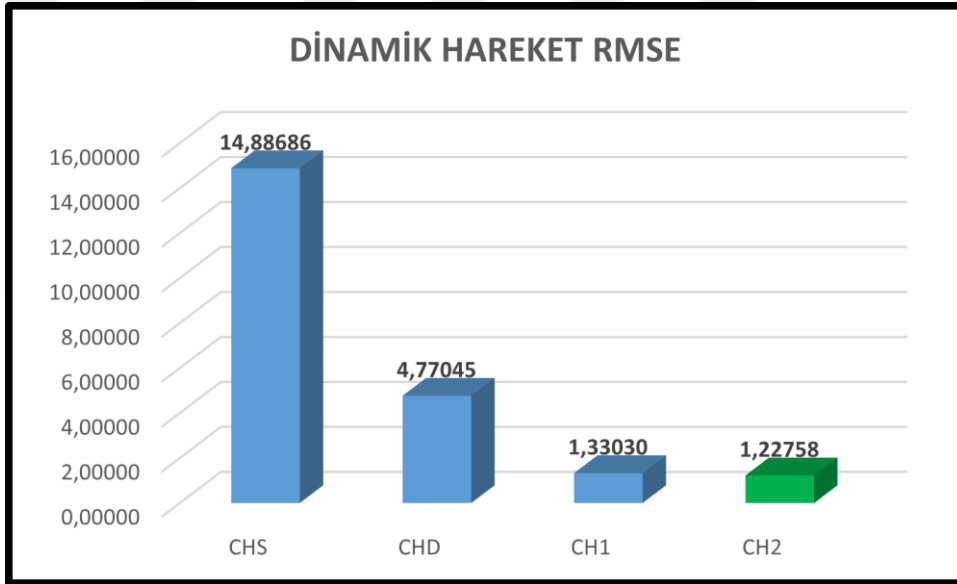
Test-1 sonuçlarına bakıldığında filtre uzunluğu değeri artırıldıkça ölçüm stabilitesinde bariz bir yükseliş görülmüştür. Bu sebeple bu test filtre uzunluğu parametresi maksimum 1000' e çıkacak şekilde konfigüre edilip tekrarlanmıştır. 1. Test' in tekrarına ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.2 elde edilmiştir. Çizelge 4.2 incelendiğinde en iyi performansı, CH2 kanalında OKF aktif olduğu ve filtre uzunluğunun 1000 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.008° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri 1.227° olarak gözlemlenmiştir. Bu testteki bir diğer gözlem ise filtre uzunluğu arttıkça sensörün açı ölçüm tepki süresinin de artmasıdır. Bu gözlemden sonra açı ölçümlerinin örneklediği tabloda süreler analiz edilmiştir. CH1 kanalındaki filtre uzunluğu 500 olan filtrenin 4.2 saniye, CH2 kanalındaki filtre uzunluğu 1000 olan filtrenin ise 8.2 saniye tepki süresine sahip olduğu ölçülmüştür. Çizelge 4.2' deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.3' deki gibi, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.4' deki gibidir. Grafiklerde dikey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.2: Test 1B RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Standart	X	0,01287	0,01018	14,47601	14,88686
			Y	0,00749		15,29770	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Standart	X	0,02829	0,02733	5,19463	4,77045
			Y	0,02637		4,34627	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif - Filtre Uzunluğu: 500	X	0,00811	0,01007	1,00423	1,33030
			Y	0,01203		1,65636	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif - Filtre Uzunluğu: 1000	X	0,00751	0,00840	0,87893	1,22758
			Y	0,00929		1,57624	



Şekil 4.3: Test 1B Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.4: Test 1B Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

4.2. Test-2 Sonuçları

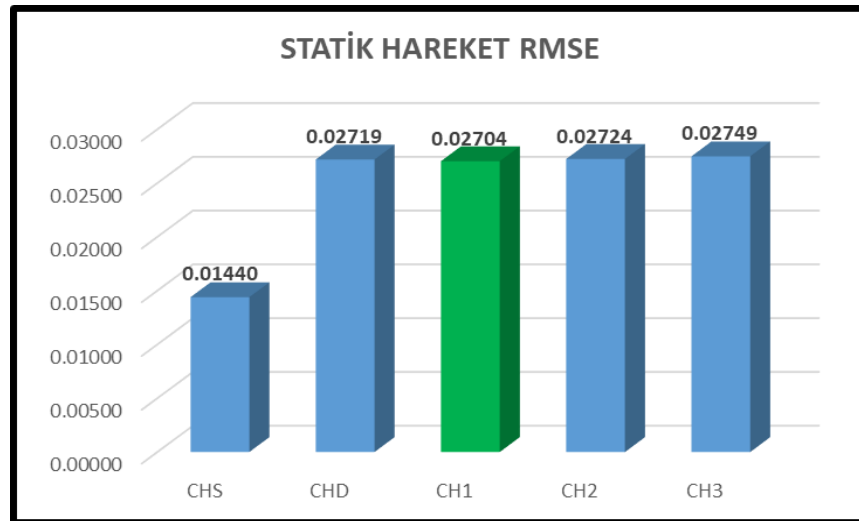
Uygulamada yapılan 2. Test' e ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.3 elde edilmiştir. Çizelge 4.3 incelendiğinde en iyi performansı CH1 kanalında kalman filtresinin aktif olduğu ve Q parametresinin 0.025, R parametresinin ise 0.1 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.027° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri 6.29° olarak gözlemlenmiştir. Test-2 sonuçlarına göre kalman filtresi aktif edildiğinde ve test içerisinde Q parametresi 0.025, R parametresi ise 0.1' e ayarlandığında ham veri

ile statik hareketteki veri hemen hemen aynı olmaktadır. Buna karşılık dinamik harekette ise bu filtre ham veriye göre 0.032° daha iyi sonuç vermektedir.

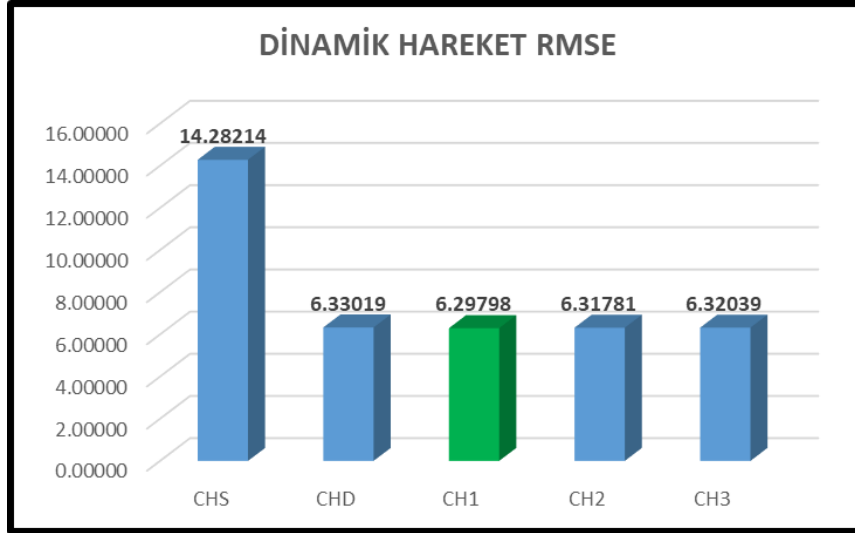
Çizelge 4.3’ deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.5’ deki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.6’ daki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.3: Test 2 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,01410	0,01440	14,28420	14,28214
			Y	0,01470		14,28008	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02472	0,02719	5,65619	6,33019
			Y	0,02967		7,00419	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.1	X	0,02456	0,02704	5,65023	6,29798
			Y	0,02951		6,94574	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.3 R=0.1	X	0,02516	0,02724	5,64974	6,31781
			Y	0,02933		6,98587	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.6 R=0.1	X	0,02539	0,02749	5,64990	6,32039
			Y	0,02749		6,99088	



Şekil 4.5: Test 2 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.6: Test 2 Dinamik HareketRMSE Sonuç Grafiği

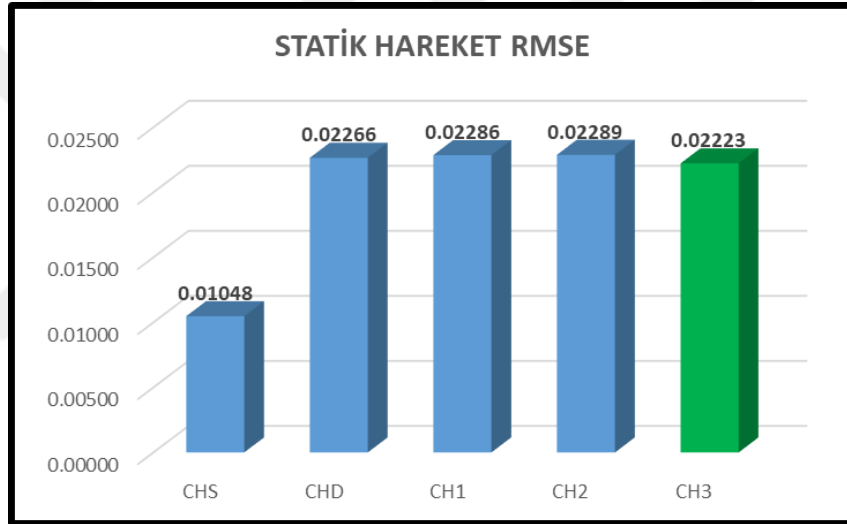
4.3. Test-3 Sonuçları

Uygulamada yapılan 3. Test' e ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.4 elde edilmiştir. Çizelge 4.4 incelendiğinde en iyi performansı CH3 kanalında kalman filtresinin aktif olduğu ve Q parametresinin 0.025, R parametresinin ise 0.5 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.022° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri $5,431^\circ$ olarak gözlemlenmiştir. Test-3 sonuçlarına göre kalman filtresi aktif edildiğinde ve test içerisinde R parametresi 0.025, R parametresi ise 0.5' e ayarlandığında ham veriye göre statik harekette 0.004° , dinamik harekette ise 0.108° daha iyi sonuç vermektedir.

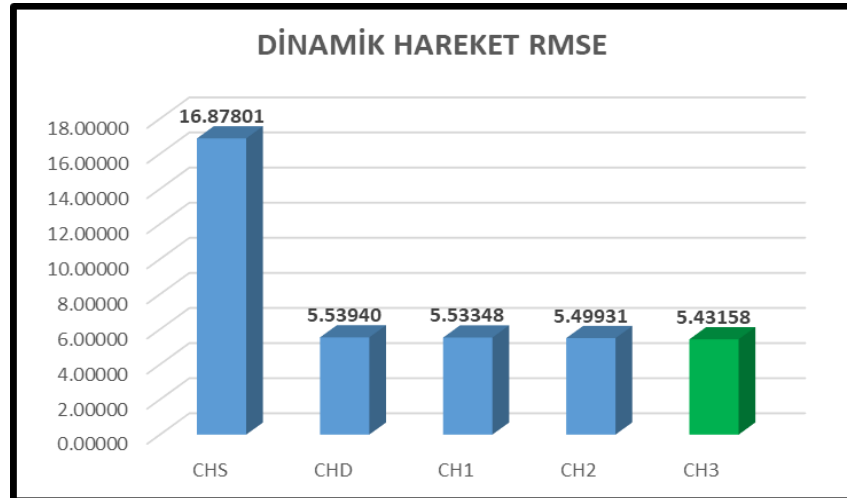
Çizelge 4.4' deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.7' deki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.8' deki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.4: Test 3 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,01085	0,01048	16,22038	16,87801
			Y	0,01011		17,53563	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02055	0,02266	5,59356	5,53940
			Y	0,02476		5,48524	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.01	X	0,02105	0,02286	5,58370	5,53348
			Y	0,02468		5,48325	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.1	X	0,02131	0,02289	5,51933	5,49931
			Y	0,02446		5,47929	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.5	X	0,02203	0,02223	5,40215	5,43158
			Y	0,2242		5,46101	



Şekil 4.7: Test 3 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

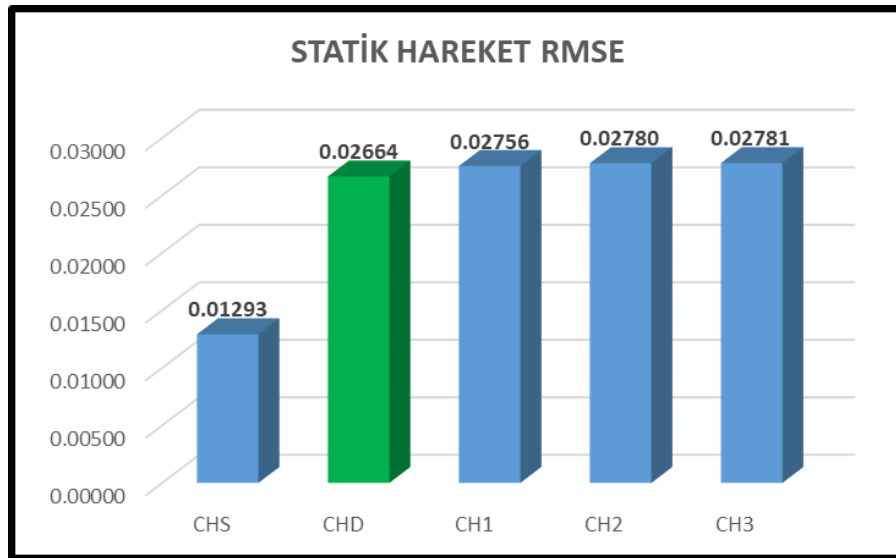


Şekil 4.8: Test 3 Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

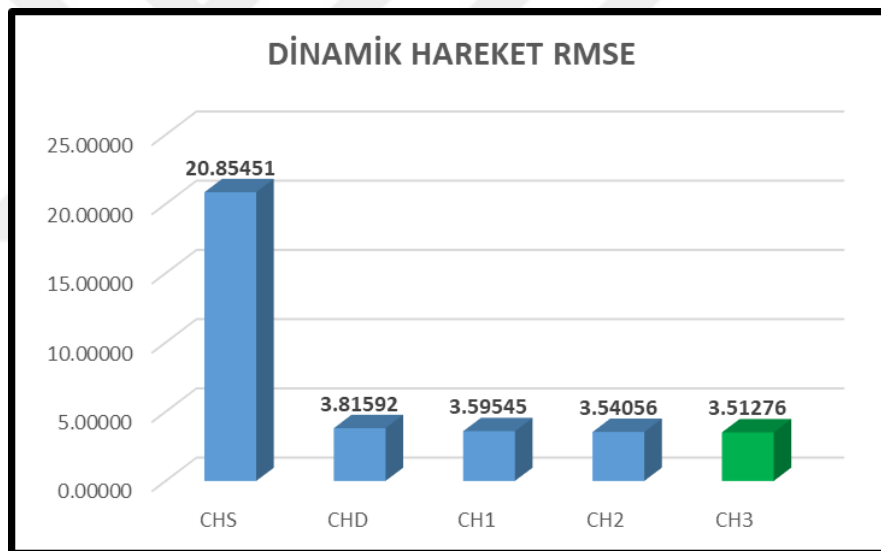
Test-3 sonuçlarına bakıldığında R değeri arttırıldıkça ölçüm stabilitesinde bariz bir yükseliş görülmüştür. Bu sebeple bu test R parametresi maksimum 0.9' a çıkacak şekilde konfigüre edilip tekrarlanmıştır. 3. Test' in tekrarına ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.5 elde edilmiştir. Çizelge 4.5 incelendiğinde en iyi performansı CH3 kanalında kalman filtresinin aktif olduğu ve Q parametresinin 0.025, R parametresinin ise 0.9 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.027° hata yaparken dinamik harekette ise bu hata değeri $3,512^\circ$ olarak gözlemlenmiştir. Test-3 sonuçlarına göre kalman filtresi aktif edildiğinde ve test içerisinde Q parametresi 0.025, R parametresi ise 0.9' a ayarlandığında ham veriye göre statik harekette 0.001 daha kötü°, dinamik harekette ise 0.303° daha iyi sonuç vermektedir. Çizelge 4.5' deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.9' daki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.10' daki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.5: Test 3B RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,00952	0,01293	20,42738	20,85451
			Y	0,01634		21,28163	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02282	0,02664	3,88804	3,81592
			Y	0,03047		3,74379	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.5	X	0,02356	0,02756	3,64715	3,59545
			Y	0,03156		3,54375	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.75	X	0,02296	0,02780	3,58569	3,54056
			Y	0,03265		3,49543	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.9	X	0,02296	0,02781	3,55407	3,51276
			Y	0,02781		3,47146	



Şekil 4.9: Test 3B Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.10: Test 3B Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

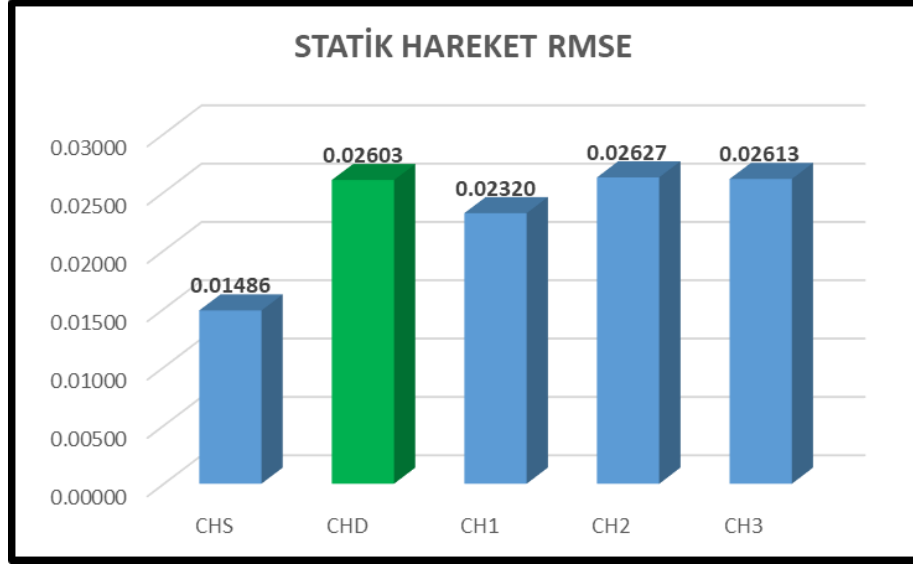
4.4. Test-4 Sonuçları

Uygulamada yapılan 4. Test' e ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.6 elde edilmiştir. Çizelge 4.6 incelendiğinde en iyi performansı CH1 kanalında kalman filtresinin aktif olduğu ve Q parametresinin 0.025, R parametresinin ise 0.9 olduğu filtre vermiştir. Statik harekette 0.025° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri $3,182^\circ$ olarak gözlemlenmiştir. Test-4 sonuçlarına göre kalman filtresi aktif edildiğinde ve test içerisinde Q parametresi 0.025, R parametresi ise 0.9' e ayarlandığında ham veriye göre statik harekette 0.003° , dinamik harekette ise 0.253° daha iyi sonuç vermektedir.

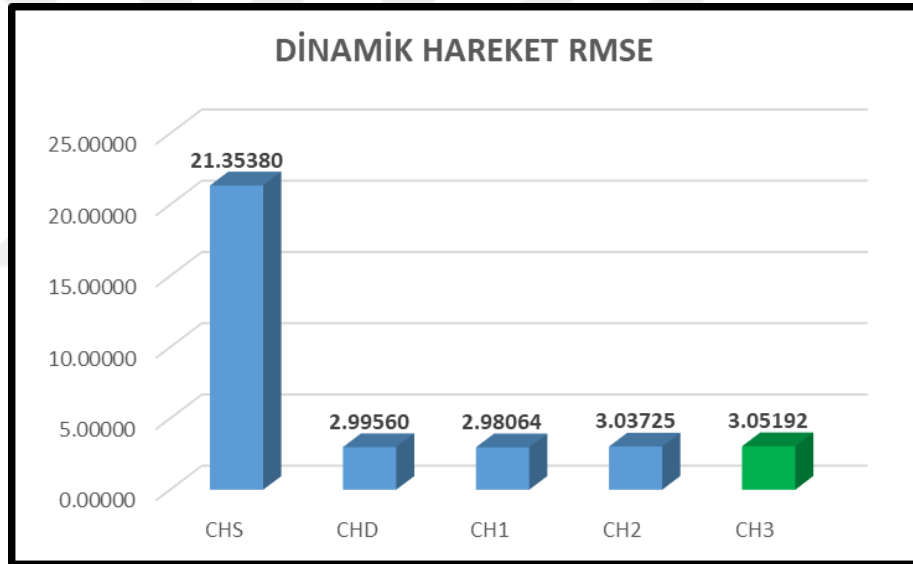
Çizelge 4.6' daki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.11' deki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.12' deki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.6: Test 4 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,01294	0,01033	19,40482	19,39957
			Y	0,00773		19,39432	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02567	0,02812	3,39406	3,43566
			Y	0,03057		3,47726	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.9	X	0,02413	0,02590	3,08821	3,18205
			Y	0,02767		3,27588	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Dinamik Q-R	X	0,02634	0,02789	3,34108	3,38929
			Y	0,02944		3,43750	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Kademeli Q-R	X	0,02634	0,02793	3,23290	3,32989
			Y	0,02952		3,42687	



Şekil 4.11: Test 4 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.12: Test 4 Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

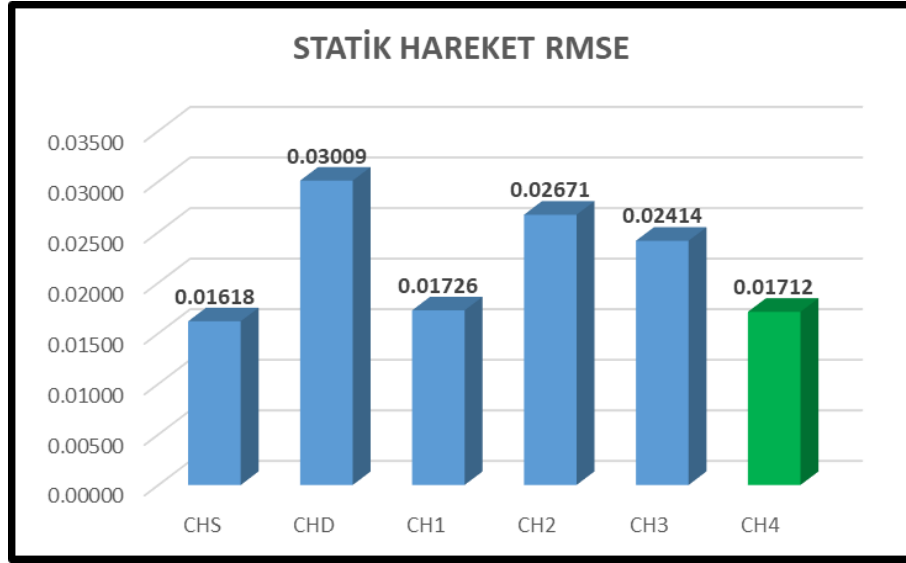
4.5. Test-5 Sonuçları

Uygulamada yapılan 5. Test' e ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.7 elde edilmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde en iyi performansı CH4 kanalında ortalama kayan filtre, kalman filtresi ve alçak geçiren filtrenin olduğu filtre vermiştir. CH4 kanalındaki ortalama kayan filtre uzunluğu 500, kalman filtresi parametrelerinden Q 0.025, R 0.9 ve alçak geçiren filtre β değeri 0.95 olarak ayarlanmıştır. Statik harekette 0.017° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri 1.177° olarak gözlemlenmiştir. Test-5 sonuçlarına göre CH4 kanalındaki filtre ham veriye göre statik harekette 0.013° , dinamik harekette ise 1.608° daha iyi sonuç vermektedir.

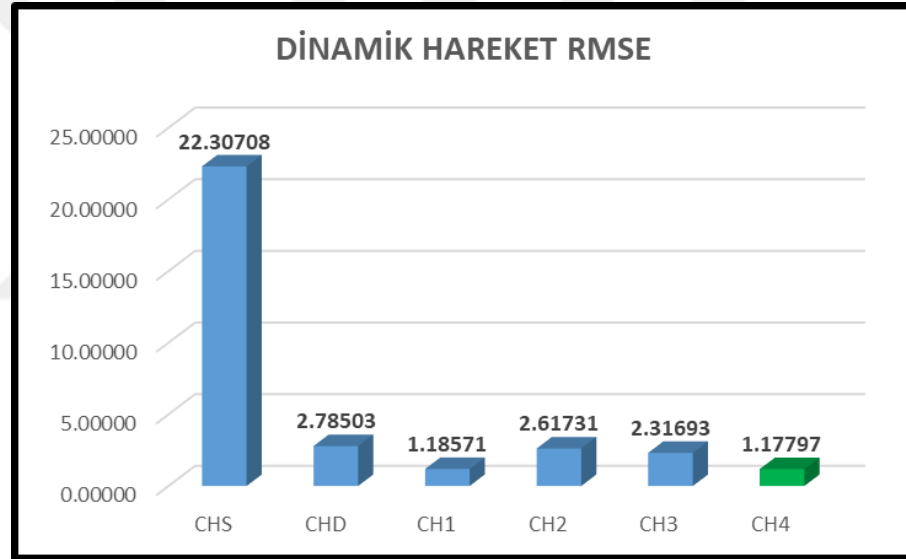
Çizelge 4.7' deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.13' deki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.14' deki gibidir. Grafiklerde düşey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.7: Test 5 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,00676	0,01618	21,51747	22,30708
			Y	0,02560		23,09669	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02238	0,03009	2,98990	2,78503
			Y	0,03780		2,58016	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif Filtre Uzunluğu 500	X	0,01128	0,01726	1,38168	1,18571
			Y	0,02324		0,98973	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif Q=0.025 R=0.9	X	0,02117	0,02671	2,68570	2,61731
			Y	0,03226		2,54893	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	AGF Aktif $\beta=0.95$	X	0,01893	0,02414	2,34222	2,31693
			Y	0,02935		2,29163	
CH4	Dinamik Eğim Sensörü	OKF+KF+AGF	X	0,01160	0,01712	1,36813	1,17797
			Y	0,02264		0,98782	



Şekil 4.13: Test 5 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.14: Test 5 Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

4.6. Test-6 Sonuçları

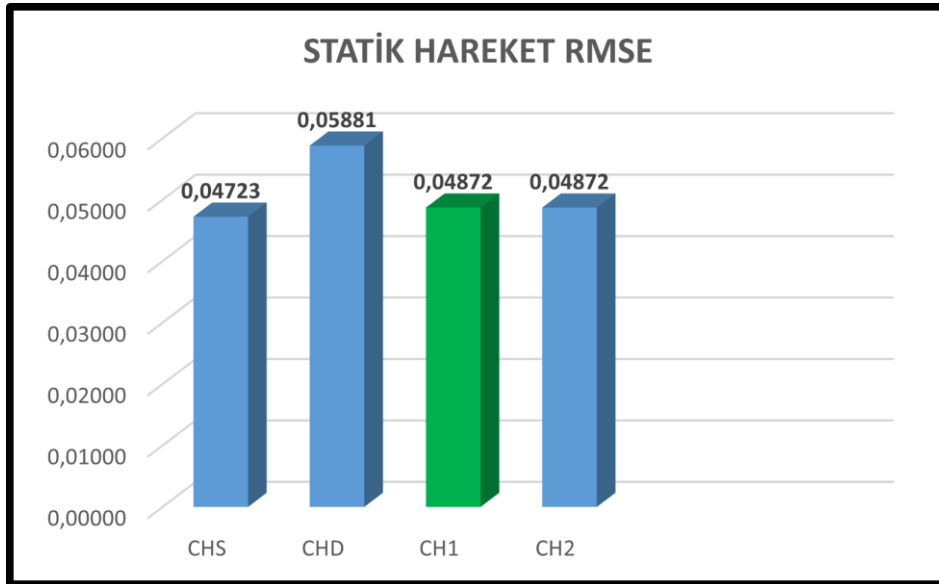
Uygulamada yapılan 6. Test' e ait açı ölçüm sonuçları ile Çizelge 4.8 elde edilmiştir. Çizelge 4.8 incelendiğinde en iyi performansı CH1 kanalındaki filtre vermiştir. CH1 kanalındaki hibrit filtrede kullanılan metotların sıralaması AGF+KF+OKF iken, CH2 kanalındaki hibrit filtrede kullanılan metotların sıralaması OKF+KF+OKF' dir. Her iki kanaldaki filtrelerin tüm parametreleri eşdeğerdir. Filtreler arasındaki tek fark sadece kullanım sıralarının farklı olmasıdır. Filtrelerin parametre değerlerine bakacak olursak; ortalama kayan filtre uzunluğu 500, kalman filtresi

parametrelerinden Q 0.025, R 0.9 ve alçak geçiren filtre β değeri 0.95 olarak ayarlanmıştır. Statik harekette 0.048° hata oluşurken dinamik harekette ise bu hata değeri 1.467° olarak gözlemlenmiştir. Test-6 sonuçlarına göre CH1 kanalındaki filtre CH2 kanalındaki filtre ile neredeyse aynı sonucu vermiştir.

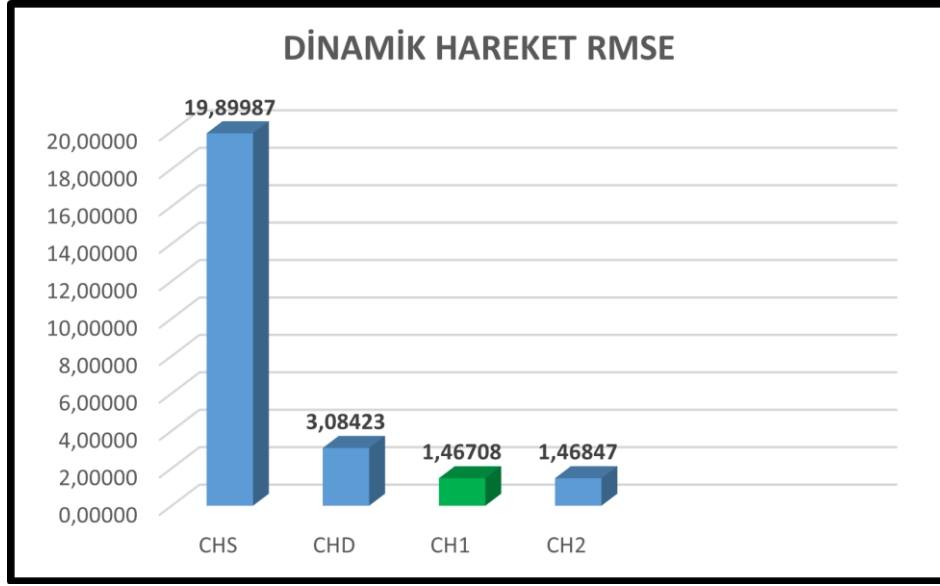
Çizelge 4.8’ deki verilerle oluşturulan; statik hareket RMSE grafiği Şekil 4.15’ deki, dinamik hareket RMSE grafiği de Şekil 4.16’ daki gibidir. Grafiklerde dikey eksen derece cinsinden RMSE değerini, yatay eksen ise RMSE değeri hesaplanan veri kanalını temsil etmektedir.

Çizelge 4.7: Test 6 RMSE Sonuç Çizelgesi

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Standart	X	0,07896	0,04723	21,01918	19,89987
			Y	0,01551		18,78056	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Standart	X	0,08354	0,05881	3,18014	3,08423
			Y	0,03408		2,98833	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	AGF+KF+OKF	X	0,08164	0,04872	1,42209	1,46708
			Y	0,01580		1,51207	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	OKF+KF+AGF	X	0,08164	0,04872	1,42202	1,46847
			Y	0,01580		1,51492	



Şekil 4.15: Test 6 Statik Hareket RMSE Sonuç Grafiği



Şekil 4.16: Test 6 Dinamik Hareket RMSE Sonuç Grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

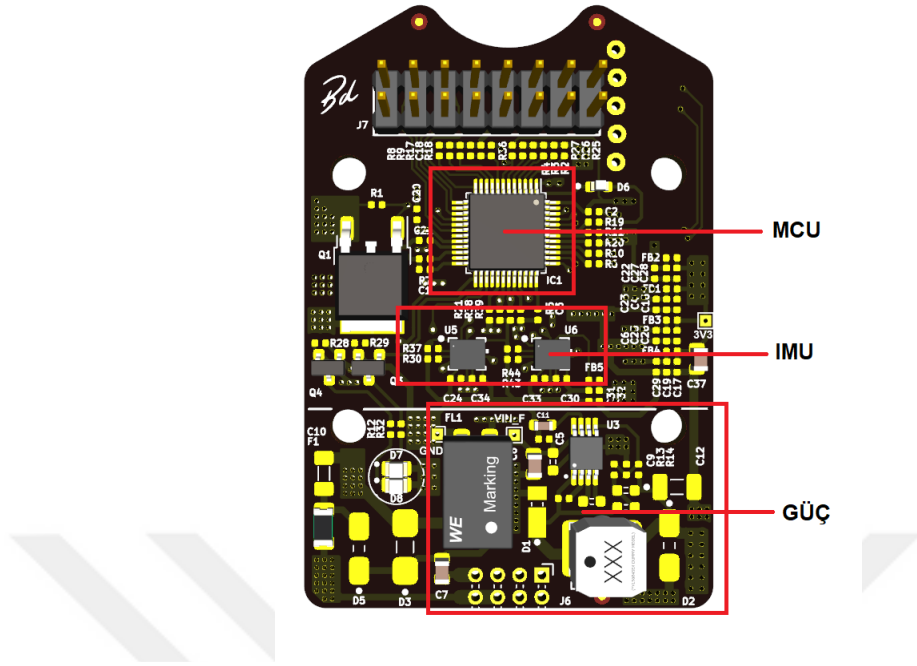
5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında harici ivmelerin IMU' ların içerisinde bulunan ve eğim ölçümünü sağlayan ivmeölçer mekanizmasını olumsuz anlamda etkilemesi sebebiyle bazı yazılımsal filtreleme teknikleri denenmiştir. Geleneksel filtreleme yöntemleri olan kalman filtresi ve alçak geçiren filtre tasarımları yapılmıştır. Buna ek olarak ortalama kayan filtre ve tüm filtrelerin kombinasyonundan oluşan bir hibrit filtre de tasarlanmıştır.

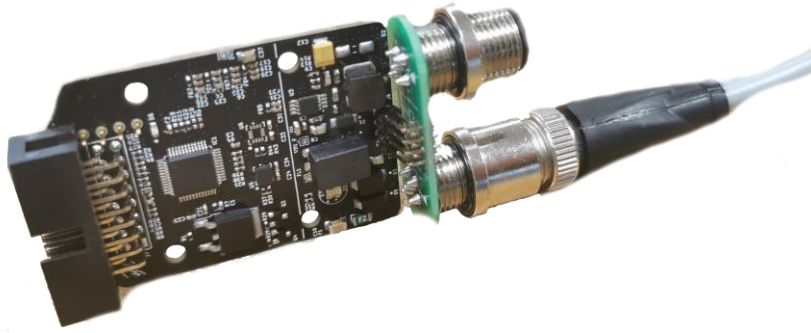
Çalışma kapsamında gömülü sistem tasarımı da yapılarak dinamik eğim sensörü cihazı da tasarlanmıştır. Eğim sensörü cihazı üzerinde ISM330DHCX kodlu 6 eksen IMU kullanılmıştır. İçerisindeki ivmeölçer ve jiroskop donanımları olması ve yeterli açı ölçüm çözünürlüğü olması sebebiyle bu IMU seçilmiştir. Ayrıca tasarlanan dinamik eğim sensörü cihazının, tezin deneysel çalışmalarına olanak sağlayan firma tarafından gelecekte ticari amaçla kullanılması hedeflenmesi sebebiyle seçilen entegrelerin bulunabilirlik ve fiyat/performans açısından da uygun olmasına önem verilmiştir. Tasarlanan cihaz içerisinde STM32G431 işlemci kullanılmıştır ve çalışma kapsamında tasarlanan filtreler bu mikroişlemci içerisine kodlanmıştır. Tasarlanan gömülü sisteme ait görsel Şekil 5.1' de gösterilmiştir. Şekil 5.2' de ise PCB' nin komponentlerinin montajlanmış fotoğrafı gösterilmiştir.

Test platformu olarak 10mm pleksi kullanılmıştır ve 2 adet eğim sensörü cihazı bu pleksi üzerine yan yana montajlanmıştır. Eğim sensörlerinden biri statik eğim sensörüken, diğeri ise çalışma kapsamında tasarlanan dinamik eğim sensörüdür. Test platformu üzerine bağlanan eğim sensörlerinden CANBUS haberleşmesi yoluyla alınan eğim açısı verileri, veri kaydedici cihaz yardımıyla 20Hz örnekleme frekansı ile bilgisayara aktarılmıştır.

Bilgisayar ortamına aktarılan veriler Excel üzerinde işlenmiştir. Çalışma kapsamında 5 farklı test yapılmıştır. Testler kapsamında OKF, KF, AGF ve OKF+KF+AGF filtrelerinin performansları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu filtrelerin parametrelerinin de filtreleme performansına etkileri gözlemlenmiştir. Bütün testler statik ve dinamik hareket olmak üzere 2 aşamadan oluşmaktadır. Statik ölçüm aşamasında test platformu hareketsiz olarak çalıştırılmıştır. Dinamik ölçüm aşamasında ise test platformuna belirlenen yönlerde hareketler verilmiştir.



Şekil 5.1: Tez Kapsamında Tasarlanan Dinamik Eğim Sensörü PCB' si



Şekil 5.2: Tez Kapsamında Tasarlanan Dinamik Eğim Sensörü Komponentlerinin Montajlanmış Fotoğrafı

Elde edilen test sonuçlarına göre filtrelerin performansları değerlendirildiğinde en iyi filtreleme performansını OKF+KF+AGF vermiştir. Bu filtre ile statik ölçümde 0.017° hata değeri hesaplanırken, dinamik harekette 1.177° hata değeri hesaplanmıştır. Tez kapsamında test edilen diğer filtreleme yöntemlerine bakıldığında ise en çoktan en aza doğru filtreleme performansları OKF, AGF, KF olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.1’ de test sonuçlarına ait sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Çalışma Sonuçlarını Gösteren Çizelge

Kanal Kodu	Eğim Sensörü	Algoritma	Eksen	Statik Hareket RMSE [°]		Dinamik Hareket RMSE [°]	
CHS	Statik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,00676	0,01618	21,51747	22,30708
			Y	0,02560		23,09669	
CHD	Dinamik Eğim Sensörü	Ham Veri	X	0,02238	0,03009	2,98990	2,78503
			Y	0,03780		2,58016	
CH1	Dinamik Eğim Sensörü	OKF Aktif Filtre Uzunluğu 500	X	0,01128	0,01726	1,38168	1,18571
			Y	0,02324		0,98973	
CH2	Dinamik Eğim Sensörü	Kalman Aktif $Q=0.025$ $R=0.9$	X	0,02117	0,02671	2,68570	2,61731
			Y	0,03226		2,54893	
CH3	Dinamik Eğim Sensörü	AGF Aktif $\beta=0.95$	X	0,01893	0,02414	2,34222	2,31693
			Y	0,02935		2,29163	
CH4	Dinamik Eğim Sensörü	OKF+KF+AGF	X	0,01160	0,01712	1,36813	1,17797
			Y	0,02264		0,98782	

5.2 Tartışma ve Öneriler

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda OKF, KF ve AGF arasında tekil olarak en verimli filtrenin OKF olduğu belirlenmiştir. Ayrıca füzyon filtreleme yöntemlerinin daha verimli sonuçlar verdiği (Hoang 2021) çalışmasına paralel bir şekilde bu çalışmada elde edilen verilerle doğrulanmıştır. (Hoang 2021) çalışmasında füzyon filtre 0.14° hata değerine sahip olarak, bu çalışmadaki OKF+KF+AGF füzyon filtresi statik harekette 0.017° ve dinamik harekette 1.177° sahip olarak yapılan çalışmalar kapsamında diğer filtreleme yöntemlerinden daha iyi sonuç vererek füzyon filtreleri göz önüne çıkarmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan testlerde ivmeölçer verileri ile jiroskoptan alınan veriler dış ivme ile ilişkilendirilerek kalman kazancının ayarlandığı dinamik kalman filtresi ortalama 3.38° hata değerine ulaşırken, sadece ivmeölçerden gelen

verinin kullanıldığı standart kalman filtresinde ortalama 3.18° hata değerine ulaşmıştır. Kalman filtresinde sensör füzyonu olmadan da iyi filtreleme performansları elde edilebildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında tasarlanan dinamik eğim sensörü ve literatürdeki dinamik eğim sensörleri içerisine entegre edilen çeşitli algoritmalar karşılaştırıldığında bu çalışma kapsamındaki yöntemler literatürdeki bazı çalışmaların önüne geçmiş, bazı çalışmaların ise gerisinde kalmıştır. Bu çalışmadaki en verimli filtreleme yöntemiyle 1.177° hata değeri elde edilirken, (Hoang 2021) çalışmasında 0.14° , (Madgwick 2011) çalışmasında ise 1.7° hata değeri elde edilmiştir. Literatürdeki çalışmalardaki ve tez çalışmasındaki test düzeneklerinin ve test yöntemlerinin eşit olmamasından dolayı filtre performanslarının başarı oranları algoritma farklılıklarıyla tam olarak açıklanamamaktadır.

KAYNAKLAR

- A. Harindranath, M. Arora, 2018, MEMS IMU sensor orientation algorithms comparison in a simulation environment, Int. Conf. Netw. Embedded Wireless Syst. IEEE Access.
- G. Qinglei, L. Huawei, M. Shifu, H. Jian, 2007, Design of a plane inclinometer based on MEMS accelerometer, Int. Conf. Inf. Acqui. , IEEE Access, 320-323.
- H. Zhou and H. Hu, 2018, Human motion tracking for rehabilitation—A survey, Biomed. Signal Process. Control, vol. 3, 1–18.
- W. Tao et al. , 2012, Gait analysis using wearable sensors, Sensors, vol. 12, 2255–2283.
- S. K. Hong, 2003, Fuzzy logic based closed-loop strapdown attitude system for unmanned aerial vehicle (uav), Sensors and Actuators A: Physical, vol. 107, no. 2, 109 – 118.
- B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, 1995, Inertial navigation systems for mobile robots, vol. 11, 328–342.
- D. H. Titterton and J. L. Weston, 2004, Strapdown inertial navigation technology. The Institution of Electrical Engineers.
- S. Beauregard, 2007, Omnidirectional pedestrian navigation for first responders, in Proc. 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication WPNC '07, 33–36.
- Xiaoping Yun, C. Aparicio, E. R. Bachmann and R. B. McGhee, 2005, Implementation and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 317-322
- Sonmezocak, T. , Kurt S. , 2022, Detection of lower jaw activities from micro vibration signals of masseter muscles using MEMS accelerometer, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. 11. 1-9.
- G. Ligorio and A. M. Sabatini, 2015, A Novel Kalman Filter for Human Motion Tracking With an Inertial-Based Dynamic Inclinometer, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 62, no. 8, 2033-2043.
- M. L. Hoang and A. Pietrosanto, 2021, A New Technique on Vibration Optimization of Industrial Inclinometer for MEMS Accelerometer Without Sensor Fusion, IEEE Access, vol. 9, 20295-20304.
- C. Valzasina et al. , 2022, A compact 6-axis IMU combining low-power operation with high stability and low noise, 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Avignon, France, 1-4.

- A. Nawrocka, M. Nawrocki and A. Kot, 2020, The use of Kalman Filter in Control the Balancing Robot, 2020 21th International Carpathian Control Conference (ICCC), High Tatras, Slovakia, 1-5.
- S. Nobili, M. Camurri, V. Barasuol, M. Focchi, D. G. Caldwell, C. Semini, M. Fallon, 2017, Heterogeneous sensor fusion for accurate state estimation of dynamic legged robots, Robotics Science and Systems.
- Sonmezocak T. , 2022, The Use of Kalman Filter in Control The PanTilt Two-Axis Robot With Wearable System. Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering. 10. 209-213.
- S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan, 2011, Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, Zurich, Switzerland, 1-7.
- Y. Quan, B. Li, W. Wang, Z. He and S. Zhang, 2020, Design and Implementation of Multi-axis Synchronous Motion Control System Based on CANopen, 2020 5th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC), Wuhan, China, 240-244.
- N. Patel, P. Krishnamurthy, Y. Fang, and F. Khorrami, 2017, Reducing operator workload for indoor navigation of autonomous robots via multimodal sensor fusion, Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, sf. 253–254.
- M. Hyhty, J. Huusko, M. Kiviranta, K. Solberg, and J. Rokka, 2017, Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges, International Conference on ICT Convergence.
- S. Yazdkhasti and J. Z. Sasiadek, 2018, Multi Sensor Fusion Based on Adaptive Kalman Filtering.
- L. Wang, L. Fu, X. Hu, and G. Zhang, 2016, Attitude Estimation for UAV with Low-Cost IMU/ADS Based on Adaptive-Gain Complementary Filter, Springer International Publishing.
- BWSENSING, 2020, BWSENSING Dynamic Inclinator Tilt sensor Vs Standard Inclinator Tilt sensor - BEWIS Sensing Tech <https://www.youtube.com/watch?v=piekMVhW0uE>. [Ziyaret Tarihi: 24 Mayıs 2024].
- Y. Quan, B. Li, W. Wang, Z. He and S. Zhang, 2020, Design and Implementation of Multi-axis Synchronous Motion Control System Based on CANopen, 2020 5th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC), Wuhan, China, 240-244.

Pazar, M., 2023, Jirokop Nedir? Nerelerde Kullanılır? [online], <https://malzemebilimi.net/jirokop-nedir-nerelerde-kullanilir.html> [Ziyaret Tarihi: 28 Mayıs 2024].

