



**T.C.**

**NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ROBOTİK UYGULAMALAR İÇİN KAPASİTİF ROTARY  
ENKODER GELİŞTİRİLMESİ**

**Ali Tahir KARAŞAHİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz - 2018**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ali Tahir KARAŞAHİN tarafından hazırlanan ”*ROBOTİK UYGULAMALAR İÇİN KAPASİTİF ROTARY ENKODER GELİŞTİRİLMESİ*” adlı tez çalışması 25/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**İmza**

**Başkan**

**Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA**

\_\_\_\_\_

**Danışman**

**Prof. Dr. Mehmet KARALI**

\_\_\_\_\_

**Üye**

**Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ**

\_\_\_\_\_

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARALI

FBE 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.

---

Ali Tahir KARAŞAHİN

Tarih: 25/07/2018

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### ROBOTİK UYGULAMALAR İÇİN KAPASİTİF ROTARY ENKODER GELİŞTİRİLMESİ

Ali Tahir KARAŞAHİN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2018, 68 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ

Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA

Bu projede, endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılan rotary enkoderlere uygulamaya özel değiştirilebilir darbe/tur esnekliği kazandırılmıştır. Genellikle endüstriyel uygulamalarda yüksek çözünürlüklü sensörler tercih edilmekte ve bu sensörler genellikle kapasitelerinin çok altında kullanılmaktadır. Bu proje; düşük maliyetle yapılabilecek uygulamaların, esnek olmayan ve maliyetli ürünlerle gerçekleştirilmesinden dolayı ortaya çıkmıştır. Bu şekilde esnek olmayan kullanımı önlemek adına; düşük maliyet ve yüksek hassasiyetli kapasitif rotary enkodere değişken darbe/tur özelliği eklenerek, sayısal elektronik tabanlı kontrol algoritması geliştirilmiştir.

Kapasitif rotary enkoder geliştirilmesinde sayısal elektronik tabanlı teknikler denenmiştir. TÜBİTAK projesinde analog elektronik tabanlı tasarım sonuçları değerlendirildikten sonra; çift yan bant demodülasyon ve arctan fonksiyonu gibi aşamalar sayısal elektronik tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Belirtilen süreçler mikrodenetleyiciye uygulanmadan önce MATLAB ortamında simüle edilmiştir. Algoritmanın her aşaması birbirinden bağımsız olarak test edildikten sonra mikrodenetleyiciye aktarılmıştır.

Gerçekleştirilen testler sonucunda, açısız pozisyon bilgisini analog olarak çıkışa aktarabilen ve enkoderin bir turdaki darbe/tur oranı değıştirilebilen opsiyonel bir tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarım sayesinde kullanıcı, uygulamasına göre bir turda kaç darbe çıkışı alması gerekiyorsa o değere set etmesine imkan sağlanmıştır. Bu esneklik başta robotik olmak üzere pek çok endüstriyel alanda kullanım kolaylığı sunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Rotary Enkoder, Kapasitif Sensör, Değişken Darbe Tur, Mikrodenetleyici, MATLAB



# **ABSTRACT**

**M.S. THESIS**

**DEVELOPMENT OF CAPACITIVE ROTARY ENCODER FOR ROBOTIC  
APPLICATIONS**

**Ali Tahir KARAŞAHİN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL  
ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Mehmet KARALI**

**2018, 68 Pages**

**Jury**

**Advisor Prof. Dr. Mehmet KARALI**

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ**

**Dr. Hulusi KARACA**

In this project, customized pulse/rotation flexibility is provided for application to rotary encoders which are widely used in industrial applications. Generally, high resolution sensors are preferred in industrial applications and these sensors are usually used far below their capacities. This project has emerged due to the fact that applications that can be done at low cost are realized with products with inflexible and cost. In this way, a digital electronic based control algorithm has been developed by adding variable pulse/rotation characteristics to low cost and high precision capacitive rotary encoders to prevent the use of inflexible.

In the development of capacitive rotary encoders, digital electronics based techniques have been tried. After evaluating which in the TUBITAK project analogue electronics based design results, steps such as double side-band demodulation and arc-tan function were realized with digital electronics based. The specified processes were

simulated in the MATLAB environment before the microcontroller was implemented. Each stage of the algorithm is tested independently of each other, and then the microcontroller is transferred.

As a result of the tests carried out, an optional design has been developed in which the angular position information can be analog generated and the encoders pulse / turn ratio can be changed. This design allows the user to determine the number of pulse required for a turn based on the application. This flexibility offers ease of use in many industrial fields, especially robotic.

**Keywords:** Rotary Encoder, Capacitive Sensor, Variable Pulse Rotation, Microcontroller, MATLAB



# ÖNSÖZ

Lisans eğitiminde başlayıp günümüze kadar gelen süreçte bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet KARALI'ya teşekkür ederim. Ekip olarak TÜBİTAK projesi yapma fırsatı sunarak elektronik alanında yeni bir bakış açısı kazanmama vesile olan kıymetli hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e teşekkür ederim. Akademik çalışma disiplini ve bakış açısını kazanmama vesile olan kıymetli babam sayın Doktor Öğretim Üyesi Muhammet KARAŞAHİN'e şükranlarımı sunarım. TÜBİTAK projesi ve sonrasında ortak çalışma kültürünü geliştirmeye destek veren Mustafa KOÇAK, Oğuzhan KELEŞ ve Sadettin Sami DÜRÜYEN'e teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans eğitim süreci ve önceki dönemlerde yapmış olduğum laboratuvar çalışmalarında yanımda olan Asistan Mekatronik ekibine teşekkür ederim. Maddi ve manevi desteğini benden hiç esirgemeyen annem, kardeşlerim ile aileme sevgi ve saygılarımı sunarım. Akademik çalışmalarında her zaman yanımda olan, teşvik ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim ve oğluma teşekkürü borç bilirim.

Ali Tahir KARAŞAHİN

KONYA-2018

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
ÖNSÖZ .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	4
3. MATERYAL VE METOT .....	8
3.1. Enkoder Mekanik Tasarımı .....	8
3.1.1. Mekanik tasarım simülasyonu .....	10
3.2. Analog Elektronik Tasarımı .....	12
3.3. Sayısal Elektronik Mikrodenetleyici Tabanlı Tasarım .....	15
3.3.1. Mikrodenetleyici mimarisi ve özellikleri .....	16
4. KONTROL ALGORİTMASI .....	22
4.1. Algoritma Simülasyonu .....	22
4.2. Algoritmanın Mikrodenetleyiciye Uygulanması .....	34
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI .....	49
5.1. Analog Elektronik Tabanlı Tasarım Test Sonuçları .....	49
5.2. Sayısal Elektronik Mikrodenetleyici Tabanlı Tasarım Test Sonuçları .....	53
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	63
6.1. Sonuçlar .....	63
6.2. Öneriler .....	64
KAYNAKLAR .....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	68

# ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1	Enkoder Mekanik Tasarımı ..... 9
3.2	İletken Plakalar Arasında Oluşan A, B, C ve D Kapasitör Değerleri ..... 11
3.3	Oluşan Kapasitörlerin Fark İşlemi ..... 12
3.4	Rotorun Açılı Tespitinde Arctan (A-C,B-D) Fonksiyon Grafiği ..... 12
3.5	Senkron-Demodülasyon İle Kapasitans Ölçümü ..... 13
3.6	Analog Elektronik Tabanlı Senkron-Demodülasyon Elektronik Devresi . 14
3.7	Çift Yan Bant Demodülasyonu Kapasitans Ölçüm Blok Diyagramı ..... 16
3.8	Mikrodenetleyici Blok Diyagramı ..... 17
3.9	ARM Mimari Ailesi ..... 18
3.10	STM32F4 Discovery Geliştirme Kiti ..... 19
3.11	STM32F4 Discovery Geliştirme Kiti Donanımları ..... 21
4.1	Elektrotlar Üzerinde Oluşan Sinyal ..... 22
4.2	Elektrotlar Arasındaki Fark Alma İşlemi ..... 23
4.3	Çift Yan Bant Sinyalin Modülasyon Şematik Gösterimi ..... 24
4.4	MATLAB Ortamında Gerçekleştirilen Modülasyon İşlemi ..... 24
4.5	Çift Yan Bant Sinyalin Demodülasyon Şematik Gösterimi ..... 25
4.6	MATLAB Ortamında Çarpma İşlem Sonucu ..... 25
4.7	MATLAB Filtre Tasarım Aracı ..... 26
4.8	MATLAB Ortamında Alçak Geçiren Filtre İşlem Sonucu ..... 27
4.9	MATLAB Arctan Fonksiyonu İşlem Sonucu ..... 28
4.10	STM32F4 Pin Ayarları ..... 35
4.11	STM32F4 Clock Ayarları ..... 36
4.12	STM32F4 Konfigürasyon Ayarları ..... 36
4.13	STM32F4 ADC Ayarları ..... 37
4.14	STM32F4 ADC Kesme Ayarları ..... 38
4.15	STM32CubeMX Kod Üretme Ayarları ..... 39
5.1	Kapasitif Rotary Enkoder Elektronik Devresi ..... 49
5.2	A-C ve B-D Fark Alma İşlem Çıkış Grafiği ..... 50
5.3	Enkoderin Karşılaştırmalı Sıcaklık Testi ..... 51
5.4	Enkoderin 5 Dakikalık Açılı Ölçüm Testi ..... 52
5.5	Enkoderin Dönme Testi ..... 52

5.6	Enkoder Doğrusal Olmayanlık Hesabı .....	53
5.7	STM32F4 PWM, ADC ve DAC Çevresel Birimleri Testi .....	54
5.8	STM32F4 Alçak Geçiren Filtre Çıkışı .....	55
5.9	STM32F4 Algoritma Testi .....	56
5.10	STM32F4 Karşılaştırma Testi .....	56
5.11	STM32F4 20 kHz Genlik Testi .....	57
5.12	STM32F4 40 kHz Genlik Testi .....	57
5.13	Rotor Konumuna Göre Üretilen Analog Çıkış Değeri .....	58
5.14	Enkoder ve Kontrol Kartı .....	59
5.15	1600 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması .....	60
5.16	1600 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi .....	60
5.17	2500 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması .....	61
5.18	2500 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi .....	61
5.19	3500 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması .....	62
5.20	3500 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi .....	62

# TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo

Sayfa



# SİMGELER VE KISALTMALAR

## Kısaltmalar

- PCB : Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
- FPGA : Field Programmable Gate Array  
(Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
- CORDIC : Coordinate Rotational Digital Computer  
(Koordinatlı Rotasyonel Dijital Bilgisayar)
- ADC : Analog to Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
- ARM : Acorn RISC Machine
- USART : Universal Synchronous Asynchronous Receiver Trasmitter  
(Evrensel Senkron Asenkron Alıcı Verici)
- UART : Universal Asynchronous Receiver Trasmitter  
(Evrensel Asenkron Alıcı Verici)
- SPI : Serial Peripheral Interface (Seri Çevresel Arayüz)
- CAN : Controller Area Network (Kontrol Alan Ağı Veri Yolu)
- RAM : Random Access Memory (Rastgele Erişim Belleği)
- DAC : Digital to Analog Converter (Dijital Analog Dönüştürücü)
- GPIO : General Purpose Input Output (Genel Amaçlı Giriş Çıkış)
- DMA : Direct Memory Access (Direkt Bellek Erişimi)
- RCC : Reset and Clock Control (Resetleme ve Saat Kontrolü)
- NVIC : Nested Vectored Interrupt Controller  
(İç İçe Geçmiş Vektör Kesme Kontrolcüsü)
- DC : Direct Current (Doğru Akım)
- OPAMP : Operational Amplifier (İşlemsel Yükselteç)
- FPU : Floating Point Unit (Kayan Nokta Birimi)
- CPU : Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)

# 1. GİRİŞ

Açısal konum ve hız bilgisi, robotik otomasyon sistemleri ve endüstriyel üretim gibi çok çeşitli uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstrideki teknolojik gelişmelerle beraber, yüksek hassasiyetli, yüksek doğruluk oranına sahip, düşük maliyetli ve çevreye duyarlı açısal konum sensörlerine olan talep büyük ölçüde artmıştır.

Optik açısal sensörler ve manyetik enkoderler yaygın olarak kullanılan açısal yer değiştirme sensörleridir. Optik sensörler, yüksek çözünürlükte açısal pozisyon bilgisi üretmesine rağmen; performansları mekanik titreşim, aşırı sıcaklık değişimleri veya toz kirliliği gibi zorlu dış ortam koşullarında bozular. Manyetik enkoderler ise zorlu ortam şartlarında daha iyi performans göstermektedir. Ancak, yeterli çözünürlükte açısal konum bilgisini sağlayamamaktadırlar. Ayrıca, hem optik sensörler hem de manyetik enkoderler nispeten pahalı ve üst düzey uygulama senaryolarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Kapasitif açısal konum sensörleri, optik enkoderler ve çözücülere göre bazı önemli avantajlara sahiptir. Kapasitif açısal konum sensörlerinin, ana bileşenleri, standart Printed Circuit Board (PCB) teknolojisinden imal edilen elektrot plakaları olduğundan, elektromanyetik çözücülerle karşılaştırıldığında, kapasitif açısal sensörün düşük maliyetli ve basit yapıda olmasından dolayı önemli avantajlar elde etmektedir. Nem ve yağ gibi endüstriyel kirliliğe olan duyarlılığa rağmen kapasitif açısal konum sensörleri yüksek hassasiyetli, düşük maliyetli ve basit bir yapıya sahip olduğundan hala kritik bir cihaz olarak karşımıza çıkmaktadır.

Son yıllarda kapasitif açısal konum sensörleri üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Brasseur vd. (1998) çeşitli uygulama taleplerini karşılayan kapasitif enkoderler geliştirmişlerdir. Brasseur tarafından geliştirilen sensörler neticesinde, dört farklı uyarım sinyalinin uygulanması gerektiğini göstermiştir. Dört farklı uyarım sinyali enkoderlerin çok düşük hızlarda tespit edebilmesini sağlamıştır [1]. Kimura vd. (2009) basit ve çok yönlü duyarlılık yapısı tasarımıyla bir çözücü uyumlu kapasitif rotary enkoder önermiştir. Fakat doğruluk ve çözünürlük noktasında daha fazla geliştirmeye ihtiyaç duyulmuştur [2]. Zheng vd. (2015), İsraili

bilim insanı Netzer (2009) tarafından geliştirilen sensör yapısından esinlenerek, yüksek doğruluk ve yüksek çözünürlük oranına sahip bir kapasitif enkoder geliştirilmiştir. Geliştirilen sensörde çözünürlük değeri olarak  $0.006^\circ$ 'ye ulaşılmıştır. Bununla birlikte geliştirilen sensörün demodülasyon devresi karmaşıktır, genlik ve faz üzerindeki iki uyarım sinyali arasındaki eşleştirme hatalarında sınırlıdır. Gerçek zamanlı açı izleme performansı zayıf kalmakla beraber çoklu uyarımların eşleşme hatalarını ortadan kaldırmak için çaba gösterilmelidir [3].

Yüksek lisans bursiyeri olarak dahil olunan ve takip eden süreçte tez konusuna dönüşen TÜBİTAK projesinde kapasitif rotary enkoder geliştirilmiştir. Proje kapsamında; açısal sensörün mekanik tasarımı ve analog elektronik tabanlı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Enkoder konusunda literatür araştırması, mekanik tasarım ve imalat süreçlerine yüksek lisans bursiyeri olarak katkı sağlanmıştır. Gerçekleştirilen mekanik tasarıma uyumlu bir şekilde elektronik devre tasarımı da geliştirilmiştir. Analog elektronik tabanlı tasarım süreci üç lisans bursiyeri tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasında, TÜBİTAK projesindeki sensörün mekanik ve elektronik tasarımına konu bütünlüğünden dolayı yer verilmiştir. Sensörün mekanik yapısı birbirine paralel üç plakadan oluşmaktadır. Dıştaki plakalarda kapasitörleri oluşturan elektrotlar bulunurken, içteki plaka da ise açı ile değişen kapasitörleri oluşturan yalıtkan parça bulunmaktadır. Sensör elektroniği olarak analog tabanlı bir tasarım üzerine odaklanılmıştır. Bu tasarım elektronik alanında bilgi birikimi ve becerisini arttırmaya yönelik bir fayda sağlamıştır. Bu tasarımla elde edilen prototip 2880 darbe/tur performansına ulaşmıştır. Elektronik tasarımda sayısal ağırlıklı bir yöntem de başvurulmuştur. Analog tasarımda elektronik devre elemanlarıyla gerçekleştirilen modülasyon, demodülasyon ve ikinci dereceden alçak geçiren filtre işlemleri sayısal tasarımda FPGA içerisinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal elektronik FPGA tabanlı tasarım geliştirilmesi TÜBİTAK projesi kapsamında hizmet alımıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal elektronik alanında farklı bir bakış açısı kazanılmasına fayda sağlamıştır.

Yüksek lisans kapsamında mikrodenetleyici tabanlı tasarım tercih edilmiştir. Sayısal tabanlı tasarımda STM32F4 geliştirme kiti kullanılmıştır. Mikrodenetleyici üzerinde koştan gömülü yazılım önce MATLAB ortamında test edilerek gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamında kapasitörler üzerinde oluşan sinüs sinyallerinin oluşturulması, 100 kHz taşıyıcı sinyal frekansına sahip sinyalle modülasyon

yapılması, modüle eden sinyalin çift yan bant demodülasyon yapılması ve en son işlem olan arctan fonksiyonu işlemlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir.



## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kapasitif rotary enkoderin başlıca avantajlarından olan basit, sade ve kararlı yapısını göstermek amacıyla Brasseur (1998) kapasitif 4 turlu açısal pozisyon sensör prototipini tasarlamıştır. Prototip 10-bit A/D dönüştürücü ve 16-bit 80C166 mikrodenetleyici ile kontrol edilerek, çalışmanın yapıldığı zaman açısından kabul edilebilir yaklaşık  $0.35^\circ$  doğruluk ve yaklaşık  $0.02^\circ$  çözünürlük oranıyla gerçekleştirilmiştir [1].

Dönme hareketi sırasında oluşan kapasitansı arttırmak ve mekanik yapının getirmiş olduğu dezavantajları ortadan kaldırmak adına farklı tasarımlar ortaya atılmıştır.

Gasulla vd. (2003) literatürde yaygın bir şekilde kullanılan iki plakalı ve üç plakalı yapıdan üç plakayı yapıyı tercih etmişlerdir. Üç plakalı yapıda ise iki plaka sabit ve diğer plaka hareketli olacak şekilde üretilmektedir. Sabit plakalardan birisi tamamen iletken olmakla beraber diğer plaka yirmi dört parçaya bölünerek farklı bir tasarım oluşturmuşlardır. Ortada kalan hareketli plakanın tasarımı da doğrudan oluşan kapasitansı etkilemektedir. Gasulla vd. hareketli plaka tasarımı ile de farklı bir tasarım ortaya çıkartmışlardır. Ayrıca hareketli plaka malzemesindeki farklı denemeler ile kapasitans değişimine etkisini gözlemlemişlerdir [4].

Fabian vd. (1998) otomotiv uygulamalarında kullanılmak üzere kapasitif açısal hız sensörü geliştirmişlerdir. Geliştirilen sensör, iki sabit iletken elektrot plakaları arasında hareketli ve diğer plakalardan farklı tasarıma sahiptir. Çeşitli sensör pozisyonlarında farklı karaktere sahip oluşan kapasitans değeri dönme hızının belirlenmesinde bir girdi olarak kullanılmıştır. Sensörün matematiksel modeli, spesifik uygulamalarda sensör karakteristiğini optimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Hız ölçmek için tasarlanmış prototipin sonuçları; hız ölçümünde yaklaşık % 4 ve sensör çözünürlüğü  $1^\circ/s$ 'den daha az olarak gözlemlenmiştir [5].

Mekanik tasarımdaki farklılıklarla beraber kapasitif rotary enkoderin elektronik tasarımında da literatürde farklı çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle modülasyon ve demodülasyon işleminde farklı teknikler ve algoritmalar uygulanmaktadır.

Zheng vd. (2015) açısız pozisyon ve açısız hız ölçümünde karesel modülasyon ve demodülasyon temelli kapasitif rotary enkoder geliştirilmiştir. Enkoder temel olarak üç parçadan oluşmaktadır: 1) yansıtıcı plaka; 2) verici elektrot; 3) alıcı elektrot. İletici bölüm karesel taşıyıcı voltaj ile birlikte modüle edilmiş bir elektrik alanı sağlar. Sinüzoidal desenli olan verici elektrot, karesel modülasyona dayalı faz/frekans modüle sinyali açısız pozisyona göre kodlamasını yapmaktadır. Modüle edilmiş sinyal daha sonra, karesel demodülasyon ve CORDIC (koordinatlı rotasyonel dijital bilgisayar) algoritmasına dayanan bir FPGA (alanda programlanabilir kapı dizileri) ile dijital olarak açısız pozisyona çevrilmiştir [3].

Bir evrensel seri yolu vasıtasıyla, dijital açı bilgisi LabVIEW yazılımında analiz edilmek için bilgisayara iletilmiştir. Kapasitif enkoder prototipi,  $0.006^\circ$  doğruluk ve  $0.002^\circ$  çözünürlük değerlerini göstermiştir.

Hou vd. (2016) yüksek bir doğrulukta kapasitif açısız pozisyon sensörü geliştirmişlerdir. Kapasitif açısız pozisyon sensörü literatürde kullanılan iki plakalı yapı tercih edilmiştir. Sensör çoklu uyarımların eşleşme hatalarını ortadan kaldırmak için tek bir voltajla uyarılmak üzere tasarlanmıştır. Temel olarak uyarım elektrotları, kuplaj elektrotları, alıcı elektrotları ve bir dizi toplama elektrotlarından oluşmaktadır. Bir sinüzoidal gerilim uyarım elektrotlarına uygulanır daha sonra kuplaj elektrotları ve alıcı elektrotlar arasında temas olmadan bir gerilim çifti oluşmaktadır. Alıcı elektrotlar, toplama elektrotlarıyla birlikte açısız pozisyonu genlik modülasyonlu sinyale kodlar ve ölçüm hassasiyetini arttırmak için alıcı elektrotlar sinüzoidal daireler şeklinde düzenlenmektedir. Bir çözücü demodülasyon yöntemi kullanılarak, genlik modülasyonlu sinyallerden açısız pozisyonu elde etmek için dijital olarak çözülmektedir. Kapasitif açısız pozisyon sensörü prototip olarak üretilmiş ve test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları, sensör doğruluğunun  $0.0036^\circ$ , çözünürlüğünün  $0.0009^\circ$  ve tam aralıkta doğrusal olmayanlığın  $0.008^\circ$  sensör olduğunu göstermiştir. Kapasitif açısız pozisyon sensörünün düşük maliyetli ve yüksek hassasiyetli uygulamalarda kullanılmasında büyük bir potansiyele sahip olduğunu gözlemlenmiştir [6].

Zheng vd. (2012) kapasitif rotary enkoderler, yüksek hız ve yüksek hassasiyetli açı hesaplamasının gerekli olduğu motor hız ve açısız konum kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada motor hızını ve konumunu elde etmek için FPGA ile kapasitif rotary enkoder sinyal demodülasyonunda CORDIC (koordinatlı rotasyonel dijital bilgisayar) algoritmasına dayalı arctangent işleminin

uygulanması gösterilmiştir. CORDIC algoritmasındaki bazı işlem basamakları atılarak, algoritmanın hesaplama doğruluğu geliştirilmiştir. Deney sonuçlarında artık açı hatasında nerdeyse yarı yarıya bir azalma gözlemlenmiştir. Böylelikle CORDIC algoritması optimize edilmiş ve kapasitif rotary enkoderin gereksinimleri tamamen karşılanmıştır [7].

Ferrari vd. (2006) çalışmalarında elektriksel olarak temassız bir iletken rotor ve performans/maliyet oranını en üst düzeye çıkarmak üzere tasarlanmış bir arabilim elektronik devresine sahip bir kapasitif açısal pozisyon sensörü geliştirilmiştir. Sensör aynı açıyı algılayan ve kritik uygulamalarda yedeklilik sağlayan iki ayrı ve bağımsız ölçüm bölümünden oluşmaktadır. Elektronik arayüz iki bölüm içinde gevşeme osilatörüne dayanmaktadır. Kapasitans oranını açısal pozisyona çeviren ölçüm yapılır ve besleme gerilimine göre oranlı olarak değişen bir dc çıkış gerilimi sağlamıştır. Sensör her bölüm için yaklaşık  $11^\circ$  ölçüm aralığına sahip bir versiyonda üretilmiştir. Deneysel sonuçlara göre sensör % 1'den daha az bir doğrusalılık göstermiştir [8].

Kennel vd. (2008) hız ve konum enkoderleri elektrik sürücülerinde temel bileşenlerdir. Yüksek çözünürlüklü enkoderler kabul edilebilir bir hız kontrol uygulaması için temel gerekliliktir. Bundan dolayı optik enkoderler, servo sürücülerde hız ve konum geri bildirim almak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yaygın kullanımlarının aksine özellikle elektrik motorlarındaki mekanik şok ve/veya titreşim gibi sert çevresel etkiler genellikle enkoder içindeki optik diske zarar vermektedir. Resolver (çözücü) kullanmak daha iyi mekanik sağlamlık sağlmasına rağmen, çözücülerin çözünürlüğü iyi bir hız kontrol uygulaması için yeterli gelmemektedir. Kapasitif enkoderler yüksek çözünürlükle iyi bir sağlamlığı bir araya getirmiştir. İlk ticari ürünle elde edilen teknik sonuçlar, bu alanda daha fazla araştırma ve geliştirmeye devam etmeyi teşvik etmiştir [9].

Kimura vd. (2009) ticari çözücülerle benzerlik gösteren kapasitif rotary konum sensörü anlatılmıştır. Sensör temelde iki elektrot plakasından oluşmaktadır. Her iki parça da basit dairesel elektrotlardan oluşmaktadır. Sensör çözücülerin uyarılma gerilimleriyle aynı olan iki sinüzoidal gerilim tarafından uyarılmıştır. Bu uyarım voltajı statordaki iletici elektrotlara uygulanmıştır. Daha sonra bu gerilimler, rotor elektrotlarında kapasitif kuplajlarla ortaya çıkmıştır. Stator toplayıcı elektrotları, rotor pozisyonuna bağlı kapasitans değişikliklerinden dolayı genlik modülasyonlu rotor üzerindeki sinyalleri tespit etmiştir. Bu sinyallerin

özellikleri çözücülerle aynı karakteriğe sahiptir. Bundan dolayı rotor konumu, çözücülerdeki gibi benzer yollarla hesaplanmıştır. Çözücülerle benzerlikler (uyarım sinyalleri, üretilen sinyaller ve konum hesaplama yöntemi) nedeniyle, kapasitif rotary enkoder ticari bir çözücünün yerini kolaylıkla alabilmiştir [2].

Netzer (2018) hız ve konum enkoderleri, bir milin dönüş açısına orantılı olarak bir çıkış sinyali sağlamıştır. Makine bileşenlerinin hareketlerini kontrol etmede veya izlemede sıklıkla kullanılmıştır. Açısal konum enkoderlerinin çıkışları, artımsal veya mutlak olabilmektedir. Artımsal pozisyon bilgisi, sensör çalıştırıldığındaki başlangıç konumuna göre artan ölçme yöntemidir. Mutlak okuma yapabilmek için, önceden bilinen referans konumlarına hareket etmelidir. Sensörün uygulamadaki yerine göre tipinin de değişmesi beklenmiştir [10].

Brasseur (2003) kapasitif teknolojiler endüstriyel ve otomotiv sensörleri alanında artmakta olan önemli bir rol oynamaktadırlar. Bu sensörlerin temassız çalışma prensibi ana avantajları olarak karşımıza çıkmıştır. Bir diğer yandan ise sensörün elektromanyetik bozulmalara karşı duyarlı olmasıyla karşılaşmıştır. Zorlu endüstriyel ve otomotiv ortamlarında güvenilir bir şekilde kullanılabilen kapasitif sensörleri başarılı bir şekilde geliştirmek için yöntemler açıklanmıştır. Bir değerlendirme algoritması ve frekans atlama stratejisi ile birleştirilmiş bir taşıyıcı frekans sistemiyle, kapasitif sensörlerin güvenli çalışmasını garanti edebileceği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir [11].

### 3. MATERYAL VE METOT

TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilen sensörün mekanik yapısı, analog elektronik ve sayısal elektronik tabanlı tasarımlara uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Sensörün mekanik tasarımına ve analog elektronik tabanlı tasarımına konu bütünlüğünden dolayı yer verilmiştir. Ardından tez çalışmasında gerçekleştirilen sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarım ön plana çıkartılmıştır.

#### 3.1. Enkoder Mekanik Tasarımı

İki paralel plaka arasında oluşan kapasitans değeri aşağıdaki formülle ifade edilmektedir.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.1)$$

Formülde;

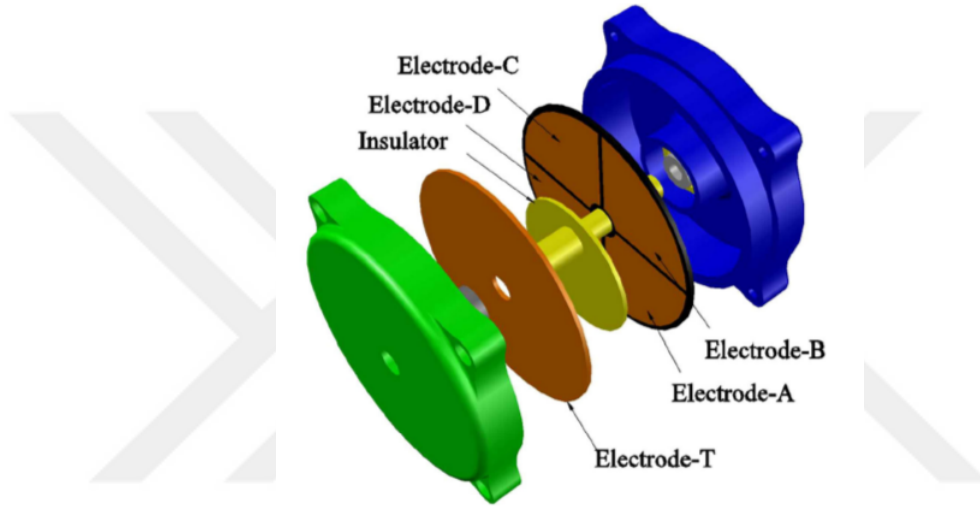
A: plakaların alanlarını,

d: iki plaka arasındaki mesafeyi,

$\epsilon$ : dielektrik katsayısını belirtmektedir.

Mekanik tasarımda, iki paralel plaka arasında oluşan kapasitans değerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Tasarım olarak kapasitans değerini arttıran seçenekleri değerlendirmek gerekmektedir. Kapasitans değerinin artması, ortaya çıkan sensörün çözünürlüğü arttırıcı bir unsur olarak karşımıza çıkmıştır [12]. Formül 3.1'de belirtilen A değerini arttırmak, kapasitans değerini arttıracak bir unsur gibi görünse de kapasitif sensörün ölçülerini büyüttüğü için tercih edilen bir yöntem değildir. Bunun yerine kapasitansı oluşturan elektrotlar ile dönen rotor arasındaki mesafeyi azaltmak daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Ayrıca dielektrik katsayısı büyük olan malzemeler tercih edilerek kapasitans değerine etki edilmiştir. Mekanik tasarımda dikkat edilmesi gerekenler arasında imalat hatalarını minimize edecek

bir elektrot ve rotor tasarımı oluşturulmuştur. Burada imalat hatalarından kasıt, iletken dairesel plakaların üretim aşamasında paralelliğinin bozulmasıdır. Mekanik tasarımda dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise kapasitif sensörün diferansiyel ölçüme olanak sağlayabilmesidir. Sıcaklık, nem ve yağ gibi dış etkenler dielektrik sabitini değiştireceği için oluşan kapasitans değeri de değişmektedir. Bu durumu engellemek için tasarımdaki kapasitans değişimlerinin diferansiyel olması ve birbirlerini yok etmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtilen hususlara dikkat edilerek mekanik tasarım gerçekleştirilmiştir. Belirtilen hususlara dikkat edilerek ortaya çıkan tasarım Şekil 3.1’de gösterilmiştir [13].



**Şekil 3.1. Enkoder Mekanik Tasarımı**

Kapasitif rotary enkoder, iki iletken plaka ve bir merkezi kaydırılmış yalıtkan plakadan oluşmaktadır. Elektrot T daire şeklinde iletken bir plakadan oluşmaktadır. Aynı zamanda Elektrot T taşıyıcı sinyalin uygulanacağı plakadır. İki iletken plakanın diğeri Elektrot A, Elektrot B, Elektrot C ve Elektrot D’den oluşmaktadır. Dört çeyrek daire dilimini oluşturacak şekilde plaka tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki iletken plaka arasında çapı diğer plakalardan küçük olan bir merkezi kaydırılmış plaka bulunmaktadır [14]. Böylelikle iletken-hava-yalıtkan malzeme dizilişi tercih edilerek havanın dielektrik katsayısıda kapasitansa etki edecektir. İki iletken plaka arasında, Elektrot T-A, Elektrot T-B, Elektrot T-C ve Elektrot T-D eşleşecek şekilde dört kapasitör oluşacaktır. Bu kapasitörlere sırasıyla A, B, C ve D denilecek olursa merkezi kaydırılmış yalıtkan plakanın dönme hareketiyle A- C ve B-D kapasitans farklarından rotorun konumu hesaplanacaktır. Kapasitans farklarının sürekli dönme hareketiyle aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan iki sinüzoidal dalga şeklini alacağı ve

bu sinyallerin arctangent fonksiyonu alınırsa rotorun o anki açı değerine ulaşılmıştır.

Kapasitif rotary enkoderin tasarımı imalat aşamasında meydana gelebilecek hataları minimize edilecek şekildedir. Merkezi kaydırılmış yalıtkan plakanın, alt ve üstünde bulunan iletken plakalara mekanik olarak bir teması bulunmamaktadır. Yani Elektrot T ile Elektrot A, Elektrot B, Elektrot C ve Elektrot D arasında hava-yalıtkan-hava yapısı oluşturulmuştur. Yalıtkan rotorun paralelliğinin tam sağlanamaması durumunda dönerken yalpalanma oluşacaktır ve hava-yalıtkan-hava üçlü yapısındaki kalınlıklar sabit kalmayacaktır. Buna rağmen toplam hava maddesinin kalınlığı ile yalıtkan plakanın kalınlığı sabit olacağından oluşacak yalpalanma kapasitansa çok fazla etki etmeyecektir.

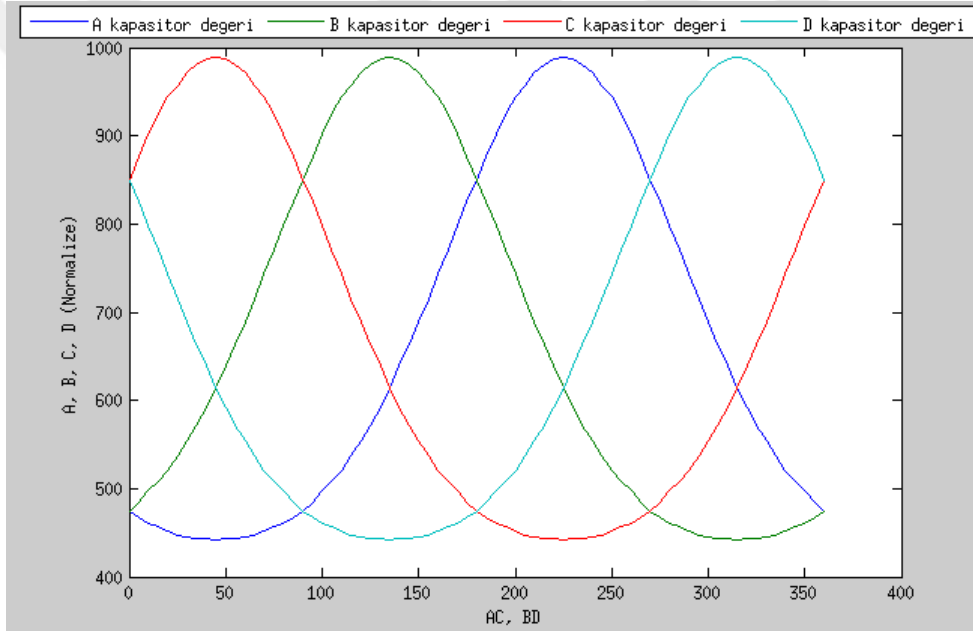
İki iletken plaka arasında oluşan A, B, C ve D kapasitörleri ve bu kapasitörlerin farklarının alınması paralelliğin bozulması durumunda oluşacak hataları minimize edecek bir yapıya sahiptir. Çalışmada dört çeyrek daire dilimi oluşturularak belirtilen imalat hataları minimize edilmek istenmekle beraber daha fazla daire dilimleri oluşturularak bu tarz hatalar daha etkili bir şekilde minimize edilebilir [15]. Daha fazla daire dilimleri oluşturulması elektronik devre tasarımıyla doğrudan ilişkili olmakla beraber devrenin karmaşıklığını da arttırmaktadır.

A, B, C ve D kapasitans değerlerinin farklarının alınması, endüstriyel etki dediğimiz sıcaklık, nem ve yağ gibi etkileri minimize edecek şekilde diferansiyel ölçüm avantajı sağlamıştır. Belirtilen endüstriyel etkilere karşı yine daire dilimlerinin artırılmasıyla daha etkili diferansiyel ölçüm avantajı sağlanabilmektedir. Geliştirilen tasarımın bir diğer etkinliği ise, merkezi kaydırılmış yalıtkan dönen plaka ile dört çeyrek daire dilimli iletken plakanın dönme esnasında hiçbir zaman doğrusal olarak üst üste gelmemesidir. Parazitik saçak kapasitanslar (fringing field capacitance) en fazla elektrotların bittiği yerde oluşmuştur. Elektrot T iletken plakanın çapı, dört çeyrek daire dilimli iletken plakanın çapından büyük olduğu için Elektrot T'nin oluşturacağı parazitik etkiler minimize edilmiştir. Merkezi kaydırılmış yalıtkan daire ile dört çeyrek daire dilimli iletken plakanın her zaman tek noktada kesişmesi oluşan parazitik etkileri minimize etmiştir.

### 3.1.1. Mekanik tasarım simülasyonu

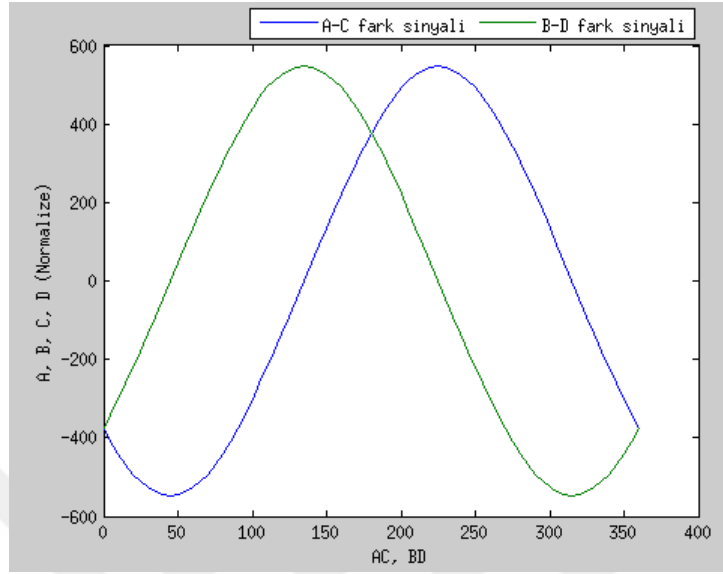
Kapasitif rotary enkoderin mekanik simülasyonu MATLAB ortamında TÜBİTAK proje yürütücüsü tarafından gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tez çalışmasına konu bütünlüğü oluşturmasından ve proje kapsamında mekanik tasarıma sunulan katkıdan dolayı paylaşılmıştır. Merkezi kaydırılmış yalıtkan dairenin dönmesiyle ortaya çıkan A, B, C ve D kapasitans değerleri bulunmuştur. Ayrıca A-C ve B-D kapasitans farkları da hesaplanarak aralarında  $90^\circ$  faz farkı olan sinüzoidal sinyale ulaşılmıştır.

Kapasitif rotary enkoderin dönme hareketiyle, iki iletken plaka arasında meydana gelen kapasitans değerleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



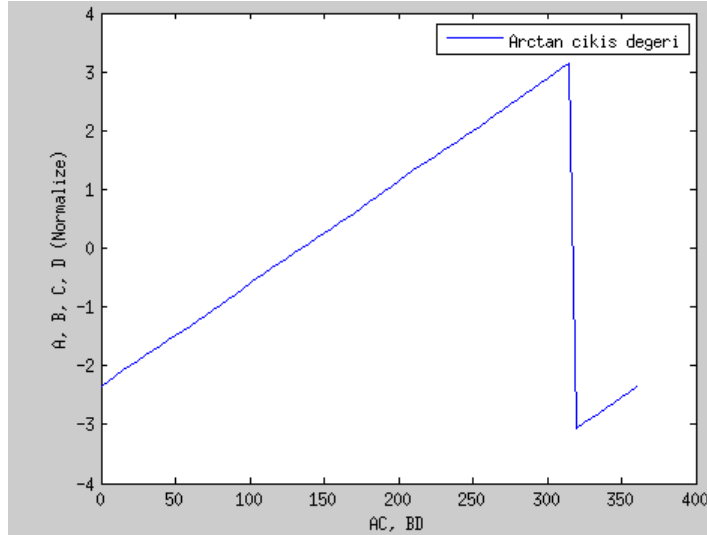
Şekil 3.2. İletken Plakalar Arasında Oluşan A, B, C ve D Kapasitör Değerleri

Meydana gelen kapasitans değerlerinin fark alma işlemi sonucunda, aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan A-C ve B-D kapasitans değerleri Şekil 3.3 'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.3. Oluşan Kapasitörlerin Fark İşlemi**

Kapasitans farklarının alınmasıyla rotorun o anki açı değerine ulaşmak için arctan fonksiyonunu kullanmak gerekmektedir. Şekil 3.4’de rotorun farklı noktadaki açı değeri gösterilmiştir.



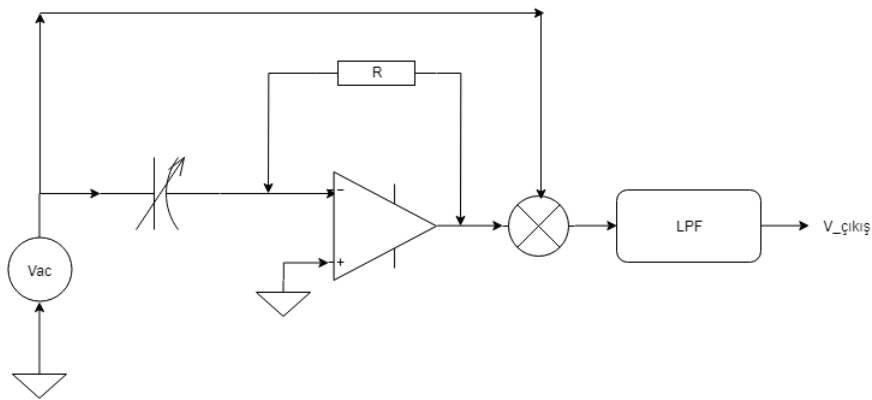
**Şekil 3.4. Rotorun Açı Tespitinde Arctan (A-C,B-D) Fonksiyon Grafiği**

## 3.2. Analog Elektronik Tasarımı

Kapasitif rotary enkoderin elektronik tasarımında üç farklı yöntem uygulanmıştır. TÜBİTAK projesi kapsamında; analog elektronik tabanlı tasarım üç lisans bursiyeri tarafından gerçekleştirilirken, sayısal elektronik FPGA tabanlı tasarımı bu konuda çalışan bursiyer eksikliğinden dolayı hizmet alımıyla tamamlanmıştır. TÜBİTAK projesi sonrasında ortaya çıkan sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarım konusu ise tez çalışması kapsamında geliştirilmiştir. TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilen elektronik tasarımlara konu bütünlüğünden dolayı yer verilmiştir.

Analog elektronik tabanlı tasarımda literatürde senkron-demodülasyon olarak bilinen yöntemden bahsedilmiştir.

Kapasitif rotary enkoderin analog elektronik tabanlı tasarımında senkron-demodülasyon yöntemi kullanılmıştır. Senkron-demodülasyon yöntemine ait blok diyagram Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Senkron-demodülasyon yönteminde kapasitans ölçümü için kapasitörün bir ucu taşıyıcı sinyale, diğer ucu ise trans-empedans yükselticisine bağlanır [16]. Geri besleme kolundaki direnç gerilime dönüşerek bu akım taşıyıcı sinyal frekansında modülasyon işlemine uğramıştır. Çift yan bant demodülasyon işlemi için taşıyıcı sinyalle çarpılması ve alçak geçiren filtreden geçtikten sonra kapasitörün anlık gerilimiyle orantılı bir gerilim elde edilmiş olunur.



Şekil 3.5. Senkron-Demodülasyon İle Kapasitans Ölçümü

Senkron demodülasyon ile elektronik devremizde kapasitans ölçmek için, Elektrot T’ye taşıyıcı sinyal uygulanmıştır [17]. Dört çeyrek daire dilimli iletken plakada oluşan A, B, C ve D kapasitans değerleri üzerinden akan akım trans-



tabanlı tasarım hizmet alımı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Gömülü sistem olarak FPGA kullanıldığında, temel mantık yine trans-empedans yükseltecinden sonra ADC yardımıyla A, B, C ve D kapasitans değerlerini içeren modüle olmuş sinyalleri sayısal olarak okumak, daha sonra demodülasyon işlemlerinden geçirmektir. Gömülü sistem olarak FPGA tabanlı bir sayısal tasarım kullanmak mikrodenetleyiciye kıyasla birçok avantaj getirmiştir. Özellikle ADC'den okunan sinyalin örnekleme oranı FPGA tabanlı bir çözümde MHz seviyelerine çıkmıştır. Bu seviyelerde DAC ile bir sinüzoidal sinyal üretmek ve ADC ile okuma işlemlerini yapmak sinyallerin dış ortam gürültüsünden kurtulma seviyesine getirmiştir. Belirtilen dış ortam şartlarından arınmanın yanı sıra faz farkının etkilerini minimize etmek ve sinyal gücünü arttırmak için FPGA tabanlı tasarımda quadrature demodülasyon yöntemi kullanılmıştır.

### **3.3. Sayısal Elektronik Mikrodenetleyici Tabanlı Tasarım**

Kapasitif rotary enkoderin geliştirilmesinde analog tasarım ve sayısal tasarım yöntemlerinde tecrübe edinmiştir. Sayısal tasarım yönteminde ise FPGA tabanlı ve mikrodenetleyici tabanlı iki farklı tasarım yöntemine başvurulmuştur. FPGA tabanlı tasarım TÜBİTAK destekli proje kapsamında hizmet alımıyla geliştirilmiştir. Mikrodenetleyici tabanlı tasarım ise yüksek lisans kapsamında gerçekleştirilmiştir.

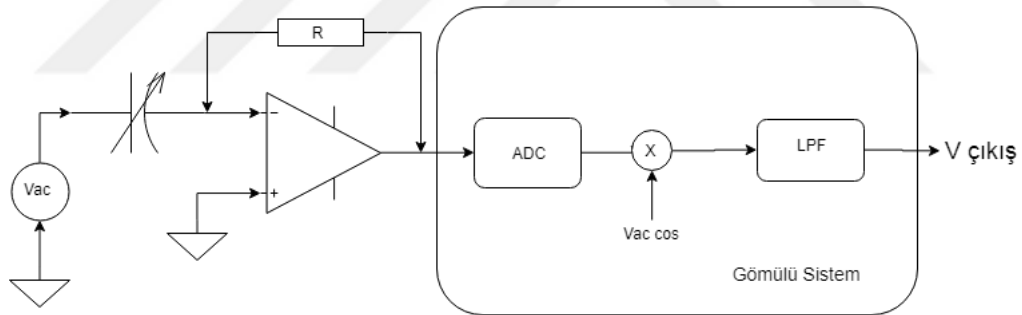
Kapasitif rotary enkoder geliştirilmesinde gömülü sistem olarak mikrodenetleyici kullanıldığında, FPGA programlanırkenki süreçler geçerli olmaktadır. Trans-empedans yükseltecinden sonra ADC yardımıyla iki iletken plaka arasında meydana gelen kapasitans değerleri okunmaktadır. Mikrodenetleyici tabanlı tasarımda ADC örnekleme oranı 160 kHz olarak programlanmıştır. Bilgi sinyalinin taşıyıcı sinyalle modülasyon işlemi için bir sinüzoidal sinyal üretilmesi gerekmektedir. Yüksek lisans proje kapsamında üretilen sinyalin frekansı 20 kHz olarak belirlenmiştir. Literatürde üretilen sinüzoidal sinyalle örnekleme oranı arasında farklı oranlar tercih edilmiştir. Bu oran belirlenirken yapılan çalışma kapsamında kullanılan donanım özellikleri belirleyici olmaktadır.

Zheng vd. (2015) yaptıkları çalışmada FPGA kullandıklarından dolayı DAC kanalıyla ürettikleri sinüzoidal sinyalin örnekleme oranını 800 kHz gibi yüksek bir frekans seçilmiştir. 16 bit ADC kanalının örnekleme oranını ise 400 kHz olarak,

modülasyon işlemi için gerekli olan taşıyıcı sinyalin frekansı 20 kHz olarak tercih edilmiştir [3].

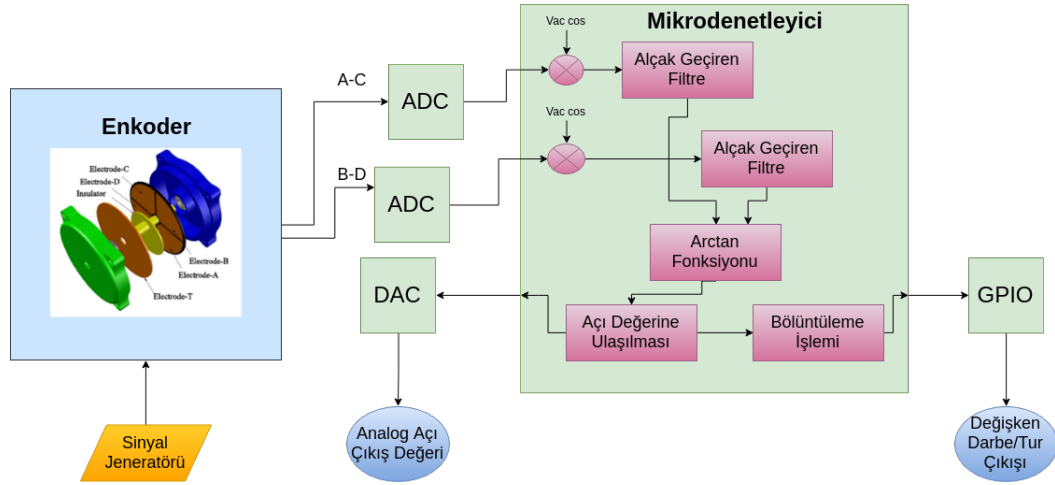
Hou vd. (2016) yaptıkları çalışmada Analog Devices firmasının Blackfin gömülü işlemcisini kullanmışlardır. İşlemci 600 MHz işlem kapasitesine sahip yüksek performanslı bir üründür. İşlemcinin DAC kanalıyla 10 kHz frekansında bir taşıyıcı sinüzoidal sinyal üretilmiştir. Modülasyon işleminden sonra iki iletken plaka arasında oluşan kapasitans değerlerini ADC kanalıyla 400 kHz örnekleme oranıyla okuma belirlenmiştir [6].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde FPGA kullanılan çalışmalarda taşıyıcı sinyal ile ADC okuma oranı arasında 20 katlık bir orana kadar çıkılabilmektedir. DAC kanalıyla üretilen sinüzoidal sinyalin kalitesi açısından bu gibi yüksek değerler kapasitif rotary enkoderin çözünürlüğünü arttıran parametreler olarak karşımıza çıkmıştır. Aynı şekilde oluşan kapasitans değerlerinin yüksek örnekleme oranıyla ADC kanalıyla okumak kapasitif rotary enkoderin çözünürlük ve doğruluk oranlarını arttırmıştır [18]. Çift yan bant demodülasyon yöntemiyle kapasitans ölçüm blok diyagramı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.7. Çift Yan Bant Demodülasyonu Kapasitans Ölçüm Blok Diyagramı**

Mikrodenetleyici içerisinde gerçekleştirilen süreçlerin diyagrama çevrilmiş hali Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Enkoderden A-C ve B-D sinyalleri ADC çevresel birimleri ile okunarak çift yan bant demodülasyon işlemine geçilmiştir. ADC okuma sonuçlarının cosinüs ile çarpılması ve alçak geçiren filtreden geçirilmesiyle demodülasyon işlemi tamamlanmıştır. Rotorun anlık açı değeri analog çıkış bilgisiyle dış ortama aktarılmıştır. Arctan işlemi sonucunda ulaşılan açı değeri kullanıcı tarafından set edilen darbe/tur sayısına göre bölüntüleme algoritması sonucunda GPIO toggle işlemiyle çıkış darbesi üretilmiştir.



Şekil 3.8. Mikrodenetleyici Blok Diyagramı

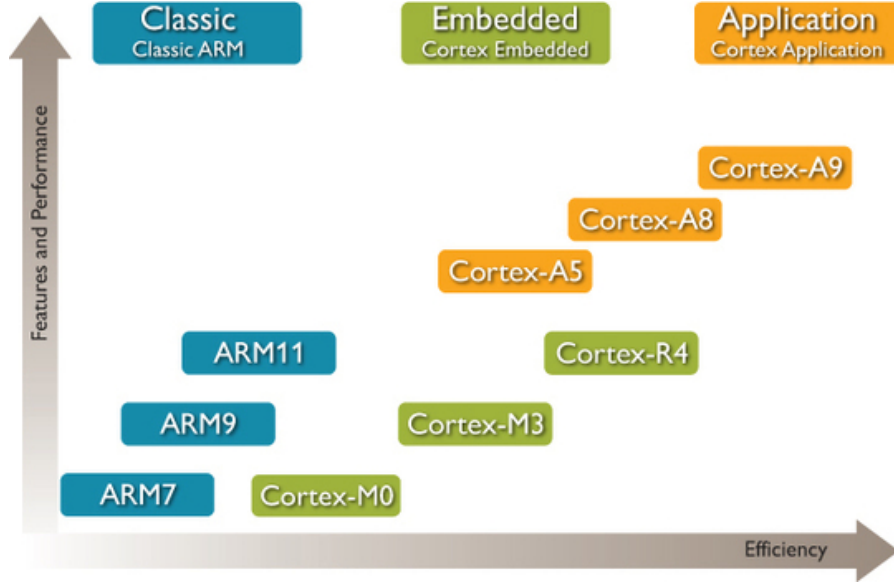
### 3.3.1. Mikrodenetleyici mimarisi ve özellikleri

Kapasitif rotary enkoderin geliştirmesinde, ST firmasının geliştirmiş olduğu ARM Cortex M4 tabanlı 168 MHz işlem kapasitesine sahip STM32F4 Discovery kiti kullanılmıştır. Geniş kullanım alanlarına sahip olması, detaylı dökümantasyon desteği ve endüstriyel uygulamalarda karşılığı olan bir mikrodenetleyici serisi olduğu için tercih edilmiştir. Yüksek lisans projesi kapsamında kullanılan mikrodenetleyici donanım özelliklerine geçmeden önce ARM mimarisinden bahsedilmiştir.

Advanced RISC Machine (Gelişmiş RISC Makinesi) kısaltması olan ARM mimarisi, RISC işlemci yapısına uygun olarak tasarlanmış bilgisayar işlemci ailesini ifade etmektedir. Bu mimarinin geliştiricisi ismini de verdiği ARM firmasıdır. Bu firma elektronik işlemci üreten bir firma değildir. Yalnızca işlemci üreten firmalara işlemci mimarisi tasarlamaktadır. 1980 yılından beri geliştirilen ARM mimarisi günümüzde yaygın olarak 32 bit işlemcilerde kullanılmaktadır. ARM işlemcilerin yapısı düşük güç tüketimi, yüksek performans gibi özelliklerden dolayı sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle düşük güç tüketimine sahip olması cep telefonları ve taşınabilir cihazlarda tercih edilme nedeni olmuştur.

NXP, Samsung, ST, NEC, Texas Instruments ve Atmel mimarisi ile işlemci üreten büyük firmalardan bazılarıdır. Şekil 3.9'da ARM mimari ailesi gösterilmiştir [19].

ARM mimarisinde üç temel grup bulunmaktadır:



**Şekil 3.9. ARM Mimari Ailesi**

### 1. Klasik ARM işlemciler

Bu grupta ARM7, ARM9 ve ARM11 yer almaktadır. ARM7 serisi daha çok motor kontrolü ve sinyal işlemeye yönelik uygulamalarda kullanırken ARM9 ve ARM11 serileri genellikle mobil cihazlarda kullanılmaktadır. Günümüzde klasik ARM çekirdekleri yerlerini daha çok M, R ve A serilerine bırakmıştır [20].

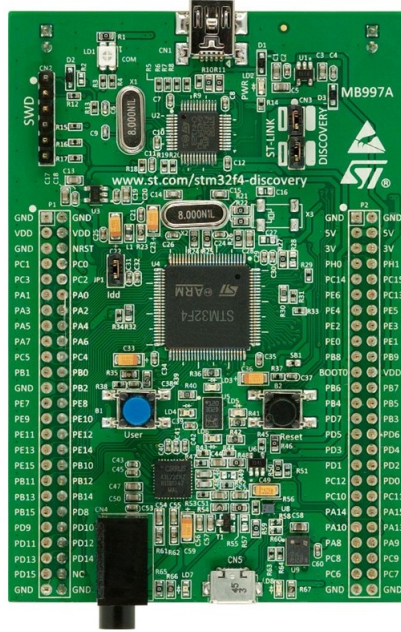
### 2. Gömülü sistemlere yönelik ARM işlemciler

Cortex M ve R serilerinden oluşmaktadır. Daha çok matematiksel formüllere dayalı çalışan, düşük güç tüketimi gerektiren, gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilir. Cortex R serisi yazıcılarda, modemlerde, kameralarda, sabit disk sürücülerinde, ev tipi elektronik cihazların birçoğunda (mutfak robotları, çamaşır makinaları, buzdolapları, klimalar vs.), otomotiv sektöründe yer alan elektronik cihazların bazılarında, hastanelerdeki tıbbi cihazlarda ve endüstride tercih edilmektedir [21]. Cortex-M serisi rakip mikrodenetleyici firmalarının ürettiği 8 ile 16 bitlik mikrodenetleyici ailelerine karşı yüksek işlem kapasitesi ve düşük maliyeti ile 32 bitlik işlem yapabilen mikrodenetleyici ailesidir. Günümüzde içerisinde analog dijital çevirici, dijital analog çevirici, zamanlayıcı, kesmeler, haberleşme üniteleri, gerçek zamanlı saat, genel giriş çıkış uçları barındıran M3 serisi yaygın olarak kullanılmaktadır. M4 serisinin içerisine de dijital sinyal işleme özelliği eklenmiştir [22].

### 3. Uygulama seviyesindeki ARM işlemciler

Akıllı telefon, tablet bilgisayar gibi yüksek performans gerektiren son kullanıcı ürünlerinin birçoğunda uygulamalara yönelik platformlarda kullanılmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan, son tüketiciye yönelik akıllı elektronik cihazlardan olan iPhone ve iPad gibi ürünlerde Cortex-A serisi ARM tabanlı mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır. Bunların dışında SecurCore olarak adlandırılan işlemci ailesi, günümüzde güvenliğin ön planda olduğu yüksek güvenli akıllı kart uygulamalarında tercih edilmektedir [20].

Kapasitif rotary enkoder sayısal elektronik mikrodenetleyici tasarım yöntemi kapsamında kullanılan STM32F4 geliştirme kiti Şekil 3.10'da gösterilmiştir [23].



Şekil 3.10. STM32F4 Discovery Geliştirme Kiti

STM32F4 geliştirme kiti özellikleri:

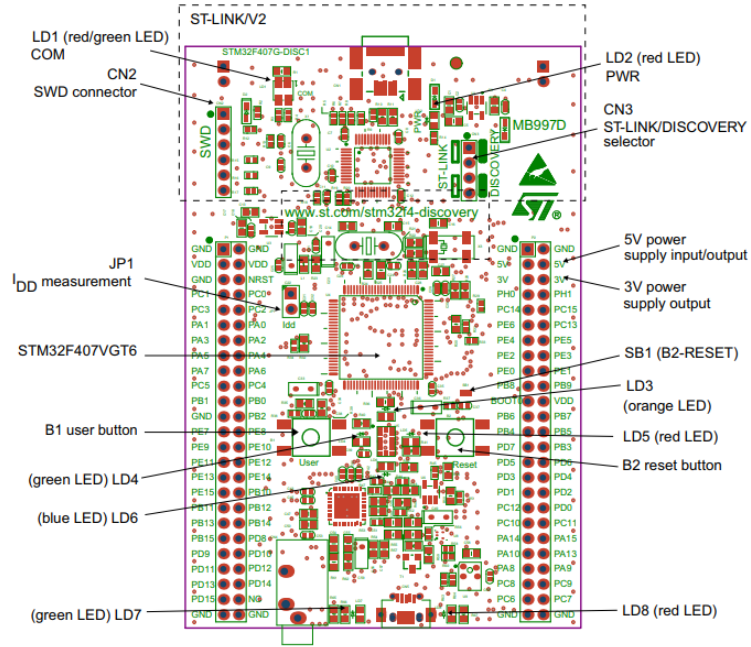
- 32-bit ARM Cortex-M4 çekirdeğine sahip STM32F407VGT6 mikrodenetleyicisi, 1 MB Flash, 192 KB RAM
- Dahili ST-LINK/V2 JTAG Debugger
- USB ve harici 5V DC güç kaynağı ile çalışabilme
- 3V ve 5V DC çıkış pinleri

- 3 eksen dijital ivme ölçer
- 8 adet LED
- Reset ve kullanıcı butonu
- Mikrodenetleyiciye ait 100 pin'i kullanabilme imkanı tanıyan çıkışlar

STM32F4 geliştirme kitinden kullanılan ST firması tarafından üretilen STM32F407VG serisi mikrodenetleyicinin özellikleri:

- İşlemci: ARM 32-bit Cortex-M4 CPU ile FPU, 168 MHz işlemci frekansı, DSP özellikleri
- Hafıza: 1 MB Flash hafıza, 192 KB SRAM
- LQFP, WLCSP ve UFBGA mikrodenetleyici kılıf seçenekleri
- 1.8 V ile 3.6 V giriş ve çıkış gerilimleri
- 4 ile 26 MHz kristal osilatör seçeneği
- 8 adet LED
- 3x12 bit, 2.4 MSPS ADC kanalı
- 2x12 bit DAC kanalı
- Derleme modu: SWD (Serial wire debug) & JTAG arayüzü
- Çeşitli haberleşme protokol desteği: I<sup>2</sup>C, USART, UART, CAN, SPI
- 140 giriş/çıkış portuna kadar kesme oluşturabilme

STM32F4 geliştirme kiti üzerinde bulunan 3V ve 5V gerilim çıkışları, kullanıcı led çıkışları, kullanıcı ve yeniden başlatma butonu, mikrodenetleyici programlama seçim uçları ve dijital giriş/çıkış pinleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir [24].

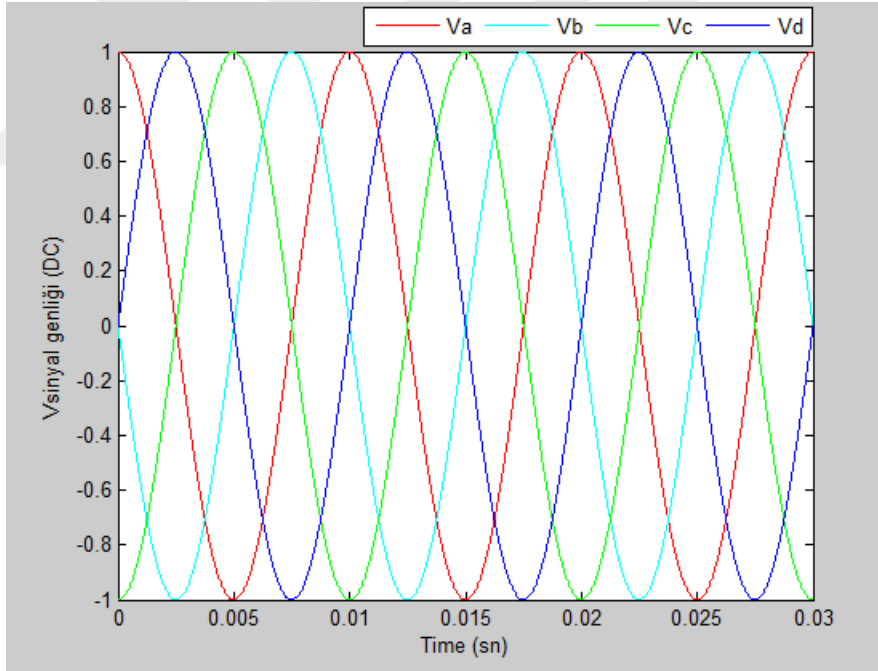


Şekil 3.11. STM32F4 Discovery Geliştirme Kiti Donanımları

## 4. KONTROL ALGORİTMASI

### 4.1. Algoritma Simülasyonu

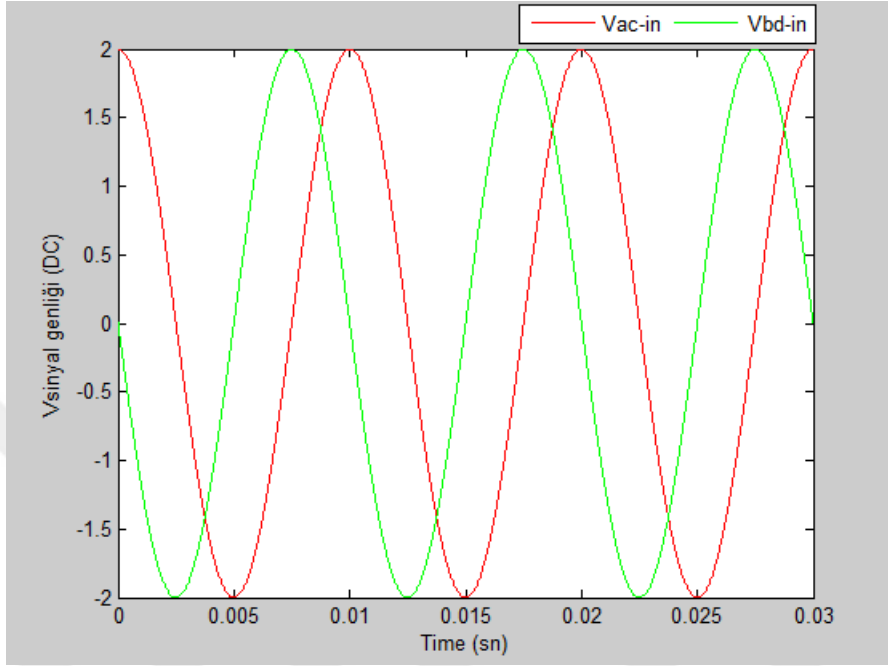
Kapasitif rotary enkoder geliştirilmesinde kullanılacak olan algoritma mikro-denetleyiciye uygulanmadan önce MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamında, iki iletken plaka arasındaki merkezi kaydırılmış yalıtkan plakanın döndürülmesiyle oluşan sinüzoidal sinyalin üretilmesiyle simülasyon çalışmalarına başlanmıştır. Şekil 4.1’de kapasitif rotary enkoderin dönme hareketiyle elektrotlar üzerinde oluşan sinüzoidal sinyal gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Elektrotlar Üzerinde Oluşan Sinyal

Modülasyon işlemine geçmeden önce aralarında  $180^\circ$  faz farkı bulunan Elektrot A ve C ile Elektrot B ve D sinyallerinin fark alma işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Kapasitif rotary enkoderin dört çeyrek daire dilimli tasarımı gereği birbirlerine çapraz yerleştirildikten dolayı elektrotlar arasında  $180^\circ$ lik faz farkı meydana gelmiştir. Bu faz farkından dolayı çapraz yerleştirilen elektrotların bir-

birlerinden çıkarılmasıyla başlangıçta elde edilen sinyal genliği fark alma işlemiyle iki katına çıkmıştır. Bunun nedeni ise A-C örneğini ele alacak olursak; Elektrot A pozitif bölgede iken, Elektrot C'nin aradaki faz farkından dolayı negatif bölgede olmasından kaynaklanmıştır [25]. Fark alma işlemiyle aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan sinyaller Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2. Elektrotlar Arasındaki Fark Alma İşlemi**

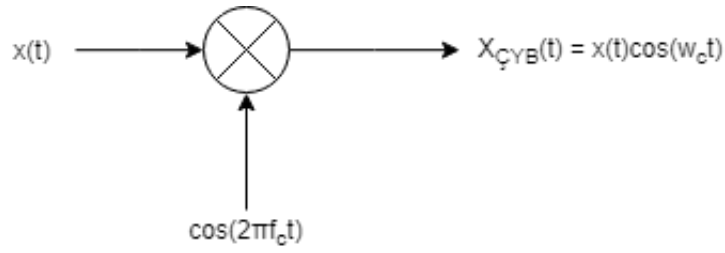
Ardından fark alma işlemi de tamamlanan 100 Hz bilgi sinyali ile 100 kHz taşıyıcı sinyalin modülasyon işlemine geçilmiştir. Genlik modülasyonun kullanılan taşıyıcı işaret Formül 4.1'de belirtilmiştir.

$$X_c(t) = A_c \cos(\omega_c t) \quad (4.1)$$

Sinüzoidal taşıyıcı işaret ile bilgi işaretinin zaman alanında çarpılmasıyla çift yan bant modülasyon işareti elde edilmiştir [25].

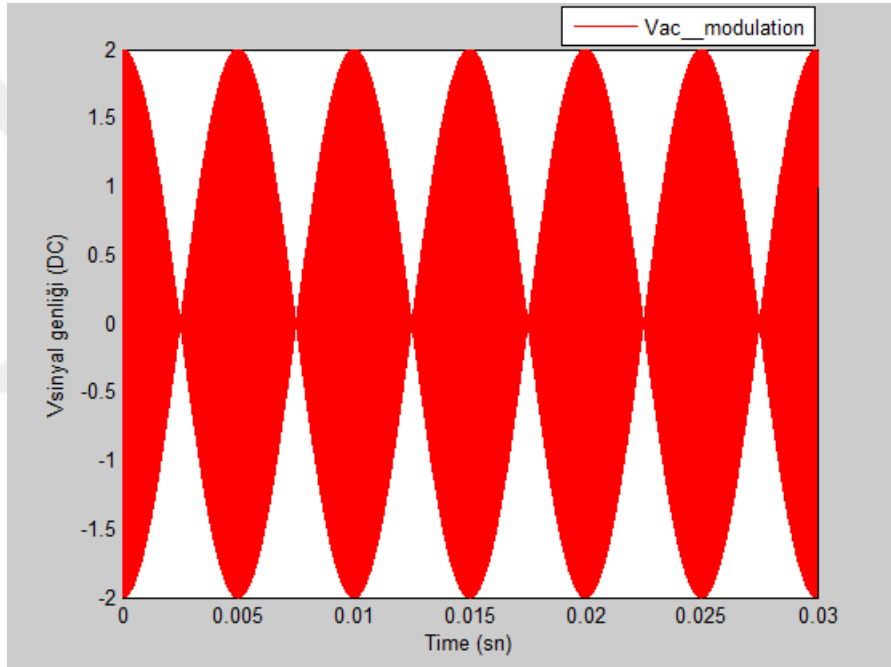
$$X_{ÇYB}(t) = x(t)x_c(t) = x(t) \cos(\omega_c t) \quad (4.2)$$

Formül 4.2'de belirtilen ifadenin şematik gösterimi Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



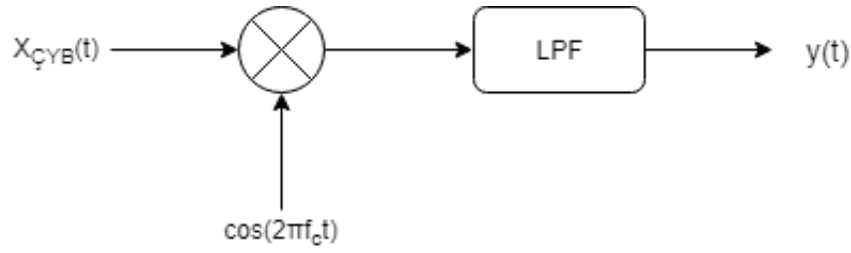
**Şekil 4.3. Çift Yan Bant Sinyalin Modülasyon Şematik Gösterimi**

Kapasitif rotary enkoderin MATLAB ortamında gerçekleştirilen modülasyon işlem sonucu Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Taşınmak istenen düşük frekanstaki 100 hz değerindeki bilgi işareti, yüksek frekanstaki 100 kHz değerindeki taşıyıcı işaret ile modüle edilmiştir.



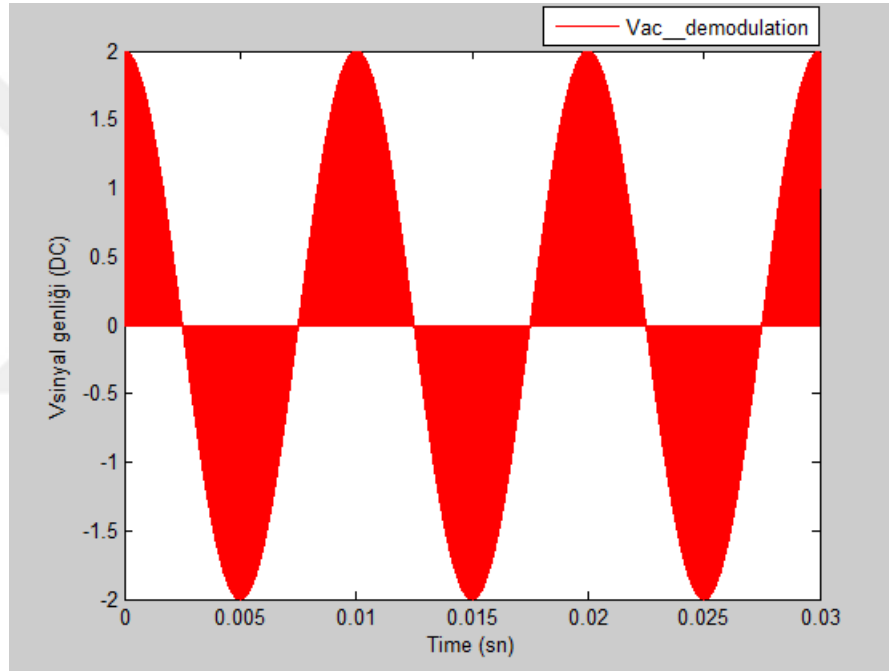
**Şekil 4.4. MATLAB Ortamında Gerçekleştirilen Modülasyon İşlemi**

Kapasitif rotary enkoder sayısal tabanlı elektronik tasarımında taşınan bilgi işaretine ulaşabilmek için modülasyon işlemi sonrasında sinyalin demodülasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Demodülasyon işlemini tarif eden şematik gösterim Şekil 4.5'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.5. Çift Yan Bant Sinyalin Demodülasyon Şematik Gösterimi**

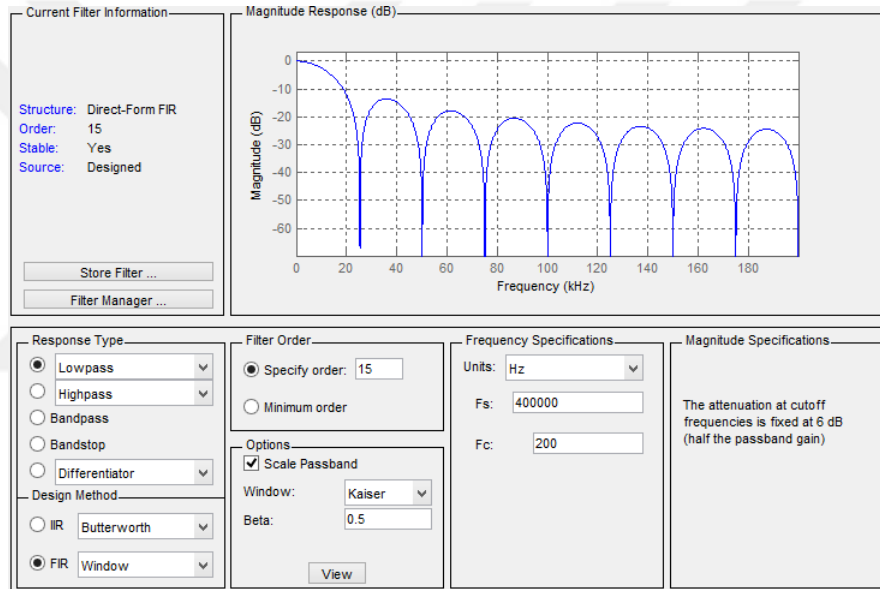
Bilgi işareti çift yan bant sinyalli işaretin taşıyıcı sinyal ile tekrardan çarpılması sonucunda ortaya çıkan sinyalin alçak geçiren filtreden geçirilmesiyle elde edilmektedir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen çarpma işlem sonucu Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.6. MATLAB Ortamında Çarpma İşlem Sonucu**

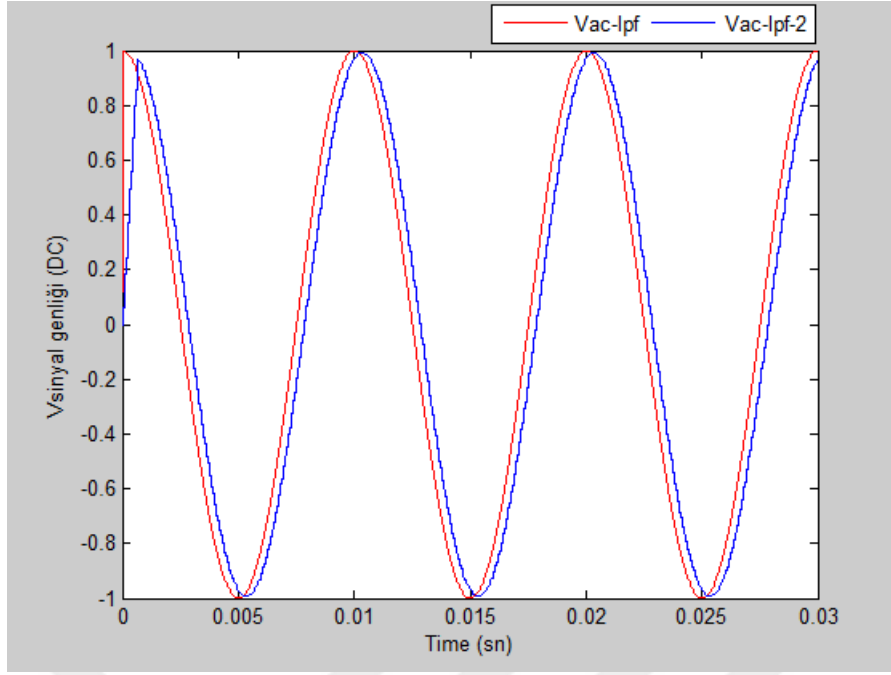
Çarpma işlemi sonucunda, bilgi işaretinin sahip olduğu kosinüs dalga formuna yaklaşıldığı Şekil 4.6'da görülmektedir. Kapasitif rotary enkoder sayısal elektronik tasarım projesinde, elektrotlar üzerinde oluşan sinyallerin üretilmesi, elektrotlar üzerinden oluşan sinyal ile taşıyıcı sinyalin modülasyon işleminin gerçekleştirilmesi, modüle edilen sinyalden bilgi işaretli sinyale ulaşmak için çift yan bant demodülasyon işlemleri MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamından ayrıca ikinci dereceden alçak geçiren filtre işlemi de gerçekleştirilmiştir. Her iki alçak geçiren filtre sonuçlarını karşılaştırmak için gerekli işlemler tamamlanmıştır. Alçak geçiren filtre tasarımında

MATLAB eklentisi olan “Filter Design & Analysis Tool” kullanılmıştır. Alçak geçiren filtre 16 katsayılı olarak tasarlanmıştır. Filtre katsayılarını, girilen giriş parametrelerine göre “Filter Design & Analysis Tool” üretmiştir. Girilen giriş parametreleri uygulamaya özel olarak değişkenlik göstermektedir. ADC örnekleme oranı gibi kritik parametreler özenle tasarım aracına girilmiştir. Frekans özelliklerinde bulunan  $F_s$  parametresine sinyalin ADC örnekleme değeri olan 400 kHz,  $F_c$  parametresine sinyalin kestirim frekansının iki katı olan 200 Hz değeri girilmiştir. Taşıyıcı sinyalin frekans değeri; kestirim noktalarına gelecek şekilde filtre tasarımı yapılarak filtrenin cevap tipi alçak geçiren, tasarım metodu ise FIR-Window olarak seçilmiştir. MATLAB eklentisi “Filter Design & Analysis Tool” ’da gerçekleştirilen filtre sonuçları Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. MATLAB Filtre Tasarım Aracı

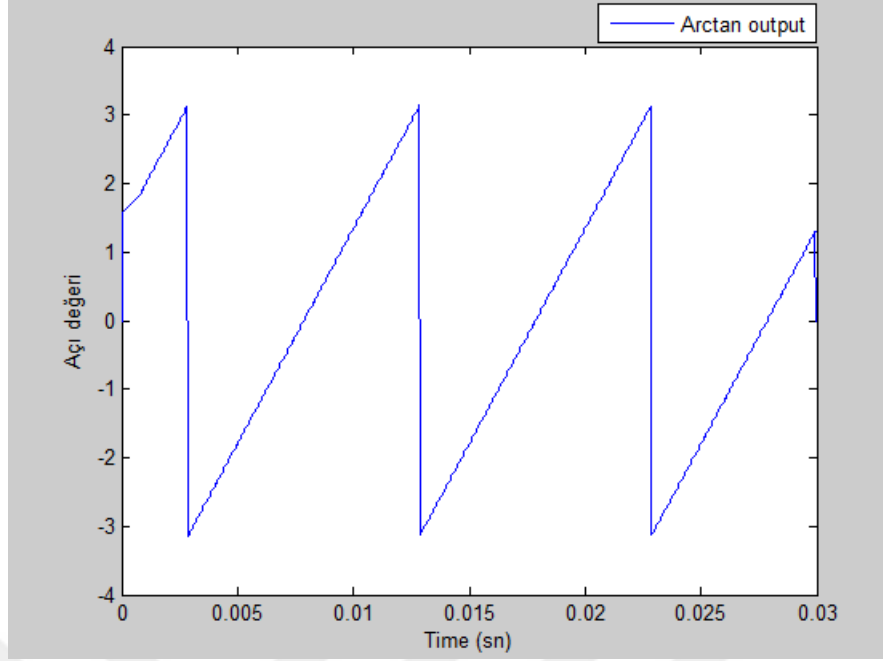
Filtrelerin karşılaştırılmalı sonucu Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8. MATLAB Ortamında Alçak Geçiren Filtre İşlem Sonucu**

Alçak geçiren filtre işlemi sonucunda, bilgi işareti olan 100 Hz sinyale başarıyla ulaşılmıştır. Modülasyon işlemi sonucunda sinyalin genliği iki katına çıkarken, alçak geçiren filtre işlemiyle iki katına çıkan genlik tekrardan ilk başta üretilen haline geri gelmiştir. Bilgi işareti ulaşıldığında sinyalde herhangi bir DC ofset görülmemiştir.

Kapasitif rotary enkoderin merkezi kaydırılmış olan yalıtkan rotorunun o anki açı değerine ulaşabilmek için modülasyon, çift yan bant demodülasyon işlemlerinden geçen sinyalin arctan fonksiyonuna ihtiyaç duyulmuştur. MATLAB ortamında gerçekleştirilen arctan fonksiyonu işlem sonucu Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.9. MATLAB Arctan Fonksiyonu İşlem Sonucu**

MATLAB ortamında gerçekleştirilen giriş sinyallerinin üretilmesi, modülasyon işlemi, çift yan bant demodülasyon işlemi ve rotorun o anki açı değerinin bulunması için yazılan kod aşağıda belirtilmiştir:

Belirtilen MATLAB kodunda 400 kHz ADC örnekleme oranı referans alınarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Modülasyon, çift yan bant demodülasyon ve arctan fonksiyonunda kullanılacak değişkenler tanımlanmıştır. MATLAB filtre tasarım aracı kullanılarak alçak geçiren filtre katsayıları da değişken olarak üretilmiştir.

```
t=0:2.5e-6:30e-3; %1/400 khz'den dolayı
2.5 us artis secildi.
Num=[0.060128,0.061069,0.061881,
0.062562,0.063109,0.063521,
0.063796,0.063934,0.063934,0.063796,
0.063521,0.063109,0.062
562,0.061881,0.061069,0.060128];

lpf1=zeros(1,length(t));
lpf2=zeros(1,length(t));
lpf3=zeros(1,length(t));
```

```

lpf4=zeros(1,length(t));
cosKatsayi=zeros(1,length(t));

coef_factor=zeros(1,length(Num));%lpf
parametre dizisinin olusturulmasi ve 0 atanmasi
coef_factor_2=zeros(1,length(Num));%lpf
parametre dizisinin olusturulmasi ve 0 atanmasi
adc_low_Srate=zeros(1,length(Num));%lpf
parametre dizisinin olusturulmasi ve 0 atanmasi

adc_real_Srate=zeros(1,length(Num));
adc_low_Srate_2=zeros(1,length(Num));%lpf
parametre dizisinin olusturulmasi ve 0 atanmasi
adc_real_Srate_2=zeros(1,length(Num));

coefLimit=length(Num);
coefLimit_2=length(Num);
coefLimit_3=length(Num);
coefLimit_4=length(Num);

```

Demodülasyon işlemi için gerekli olan cosinüs çarpma dizisi oluşturulmuştur.

```

for h=1:4:length(t)
cosKatsayi(1,h)=1;
end
for l=3:4:length(t)
cosKatsayi(1,l)=-1;
end

```

Kapasitörler üzerinde oluşacak ve aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan sinyaller üretilmiştir. Modülasyon işlemleri için zıt köşelerde olan kapasitörler üzerinden oluşan sinyaller birbirinden çıkartılmıştır.

```

Va= cos(2*pi*100*t);
Vb= cos(2*pi*100*t+(pi/2));
Vc= cos(2*pi*100*t+(pi));

```

```
Vd= cos(2*pi*100*t+(3*pi/2));
```

```
Vin=Va-Vc; % A-C fark isleminin gerçekleştirilmesi
```

```
Vbd_in=Vb-Vd; % B-D fark isleminin gerçekleştirilmesi
```

Modülasyon işlemi için kapasitörler üzerinde oluşan sinyallerin 100 kHz taşıyıcı sinyalle çarpılmıştır. Demodülasyon işlemine hazır hale gelen sinyal tekrardan çarpılarak sinyal sinüs formuna çevrilmiştir.

```
Vin_mod = Vin.*cos(2*pi*100000*t); %Cift yan bant  
modulasyon isleminin uygulanması
```

```
Demul = Vin_mod.*cos(2*pi*100000*t); %sinyallerin  
demodulasyonu
```

```
%B-D giris sinyalinin uretilmesi
```

```
Vbd_mod=Vbd_in.*cos(2*pi*100000*t);
```

```
Bd_demul=Vbd_mod.*cos(2*pi*100000*t);
```

```
%Hesaplama sonuclarinin cizdirilmesi
```

```
subplot(4,2,1)
```

```
plot(t,Vin,'r')
```

```
hold on
```

```
subplot(4,2,1)
```

```
plot(t,Vbd_in,'g')
```

```
subplot(4,2,2)
```

```
plot(t,Va,'r')
```

```
hold on
```

```
subplot(4,2,2)
```

```
plot(t,Vb,'c')
```

```
hold on
```

```
subplot(4,2,2)
```

```
plot(t,Vc,'g')
```

```
hold on
```

```
subplot(4,2,2)
```

```
plot(t,Vd,'b')
```

```
hold on
```

```

subplot(4,2,3)
plot(t,Vin_mod,'r')
legend('Vac_modulation')
xlabel('Time_(sn)')
ylabel('Vsinyal_genligi_(DC)')
subplot(4,2,4)
plot(t,Vbd_mod,'g')
legend('Vbd_modulation')
subplot(4,2,5)
plot(t,Demul,'r')
legend('Vac_demodulation')
subplot(4,2,6)
plot(t,Bd_demul,'g')
legend('Vbd_demodulation')

```

Çarpma işlemi sonucunda sinüs formuna dönüştürülen sinyal, MATLAB filtre tasarım aracının üretmiş olduğu katsayılar ile çarpılarak bilgi sinyaline ulaşılmıştır. MATLAB ortamında alçak geçiren filtre işlemleri birinci ve ikinci dereceden gerçekleştirilmiştir. Her iki işlemin karşılaştırılmasının ardından mikrodenetleyici tabanlı tasarım sınırları ve birinci dereceden alçak geçiren filtre sonuçlarının yeterli görülmesinden dolayı kullanılması uygun görülmüştür.

```

normalRate=0;
for y=1:length(t)
for tersDizi=1:15
coef_factor(1,coefLimit-(tersDizi-1)) =
coef_factor(1,coefLimit-tersDizi);
end
for i=1:15
coef_factor_2(1,coefLimit_2-(i-1)) =
coef_factor_2(1,coefLimit_2-i);
end
coef_factor(1,1) = Demul(y);
coef_factor_2(1,1) = Bd_demul(y);
if mod(y,17)~= 0

```

```

normalRate=normalRate+1;
adc_low_Srate(1,normalRate)=Demul(y);
adc_low_Srate_2(1,normalRate)=Bd_demul(y);
else
%ikinci dereceden alcak geciren filtre asamasi
for x=1:15
adc_real_Srate(1,coefLimit_3-(x-1)) =
adc_real_Srate(1,coefLimit_3-x);
adc_real_Srate_2(1,coefLimit_4-(x-1)) =
adc_real_Srate_2(1,coefLimit_4-x);
end
normalRate=0;
adc_real_Srate(1,1) = sum(adc_low_Srate)/16;
adc_real_Srate_2(1,1) = sum(adc_low_Srate_2)/16;
arctan=atan2(lpf3,lpf4);
end

%Birinci dereceden Alcak geciren filtrenin uygulanmasi
lpf1(y)=coef_factor(1,1)*Num(1,1)+
coef_factor(1,2)*Num(1,2)+ coef_factor(1,3)*
Num(1,3)+coef_factor(1,4)*Num(1,4)+
coef_factor(1,5)*Num(1,5)+coef_factor(1,6)*
Num(1,6)+coef_factor(1,7)*Num(1,7)+
coef_factor(1,8)*Num(1,8)+ coef_factor(1,9)*
Num(1,9)+coef_factor(1,10)*Num(1,10)+
coef_factor(1,11)*Num(1,11)+coef_factor(1,12)*
Num(1,12)+coef_factor(1,13)*Num(1,13)+
coef_factor(1,14)*Num(1,14)+coef_factor(1,15)*
Num(1,15)+coef_factor(1,16)*Num(1,16);

%Birinci dereceden Alcak geciren filtrenin uygulanmasi
lpf2(y)=coef_factor_2(1,1)*Num(1,1)+
coef_factor_2(1,2)*Num(1,2)+coef_factor_2(1,3)*

```

```

Num(1,3)+coef_factor_2(1,4)*Num(1,4)+
coef_factor_2(1,5)*Num(1,5)+coef_factor_2(1,6)*
Num(1,6)+coef_factor_2(1,7)*Num(1,7)+
coef_factor_2(1,8)*Num(1,8)+coef_factor_2(1,9)*
Num(1,9)+coef_factor_2(1,10)*Num(1,10)+
coef_factor_2(1,11)*Num(1,11)+coef_factor_2(1,12)*
Num(1,12)+coef_factor_2(1,13)*Num(1,13)+
coef_factor_2(1,14)*Num(1,14)+coef_factor_2(1,15)
*Num(1,15)+coef_factor_2(1,16)*Num(1,16);

```

*%ikinci dereceden Alcak geciren filtrenin uygulanmasi*

```

lpf3(y)=adc_real_Srate(1,1)*Num(1,1)+
adc_real_Srate(1,2)*Num(1,2)+adc_real_Srate(1,3)*
Num(1,3)+adc_real_Srate(1,4)*Num(1,4)+
adc_real_Srate(1,5)*Num(1,5)+adc_real_Srate(1,6)*
Num(1,6)+adc_real_Srate(1,7)*Num(1,7)+
adc_real_Srate(1,8)*Num(1,8)+adc_real_Srate(1,9)*
Num(1,9)+adc_real_Srate(1,10)*Num(1,10)+
adc_real_Srate(1,11)*Num(1,11)+adc_real_Srate(1,12)*
Num(1,12)+adc_real_Srate(1,13)*Num(1,13)+
adc_real_Srate(1,14)*Num(1,14)+adc_real_Srate(1,15)*
Num(1,15)+adc_real_Srate(1,16)*Num(1,16);

```

*%ikinci dereceden Alcak geciren filtrenin uygulanmasi*

```

lpf4(y)=adc_real_Srate_2(1,1)*Num(1,1)+
adc_real_Srate_2(1,2)*Num(1,2)+adc_real_Srate_2(1,3)*
Num(1,3)+adc_real_Srate_2(1,4)*Num(1,4)+
adc_real_Srate_2(1,5)*Num(1,5)+adc_real_Srate_2(1,6)*
Num(1,6)+adc_real_Srate_2(1,7)*Num(1,7)+
adc_real_Srate_2(1,8)*Num(1,8)+adc_real_Srate_2(1,9)*
Num(1,9)+adc_real_Srate_2(1,10)*Num(1,10)+
adc_real_Srate_2(1,11)*Num(1,11)+adc_real_Srate_2(1,12)*
Num(1,12)+adc_real_Srate_2(1,13)*Num(1,13)+

```

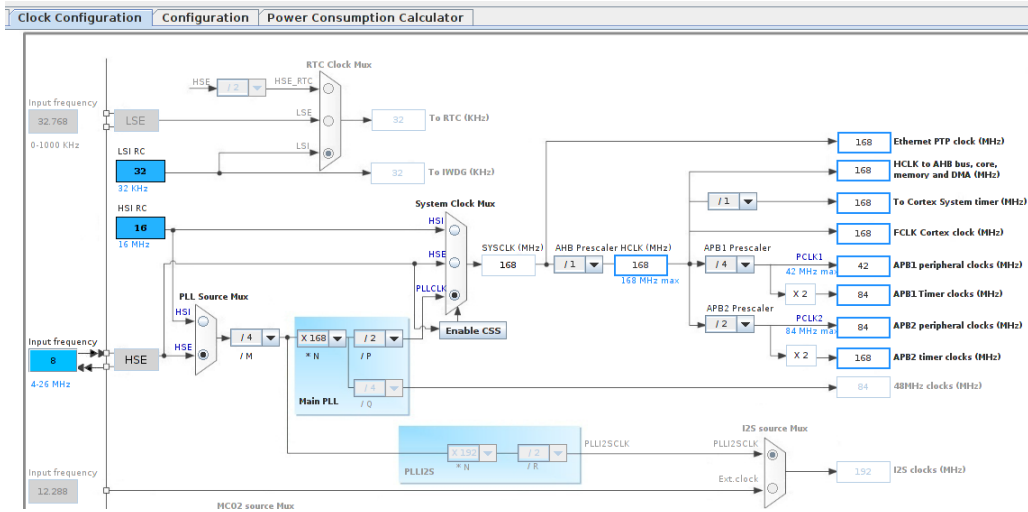
```
adc_real_Srate_2(1,14)*Num(1,14)+adc_real_Srate_2(1,15)*  
Num(1,15)+adc_real_Srate_2(1,16)*Num(1,16);  
end  
subplot(4,2,7)  
plot(t,lpf1,'r')  
hold on  
plot(t,lpf3,'b')  
subplot(4,2,8)  
plot(t,arctan,'b')  
legend('Arctan_output')
```

## 4.2. Algoritmanın Mikrodenetleyiciye Uygulanması

Kapasitif rotary enkoderin sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımında kullanılan STM32F407VG serisi mikrodenetleyicinin programlanmasında ST firmasına ait STM32CubeMX ve Atollic TrueSTUDIO programları kullanılmıştır. STM32CubeMX programı seçilen mikrodenetleyiciye göre kullanıcı tarafından belirlenen derleyici programı için konfigürasyon ayarları tamamlanmış bir şekilde kod üretmektedir. Kullanılan derleyici programında mikrodenetleyici için konfigürasyon ayarlarını yapmadaki süre kayıplarını azalttığı için STM32CubeMX programı tercih edilmiştir. STM32CubeMX programında, mikrodenetleyici de bulunan pinlerin konfigürasyon ayarları, mikrodenetleyicinin clock frekansının ayarlanması, mikrodenetleyicide kullanılan çevresel birimlerin ayarlarının yapılması gibi temel başlangıç ayarları yapılmıştır. Şekil 4.10'da STM32F407VGTX mikrodenetleyicisinde kullanılan çevresel birimlerin bağlı olduğu pinler gösterilmiştir.

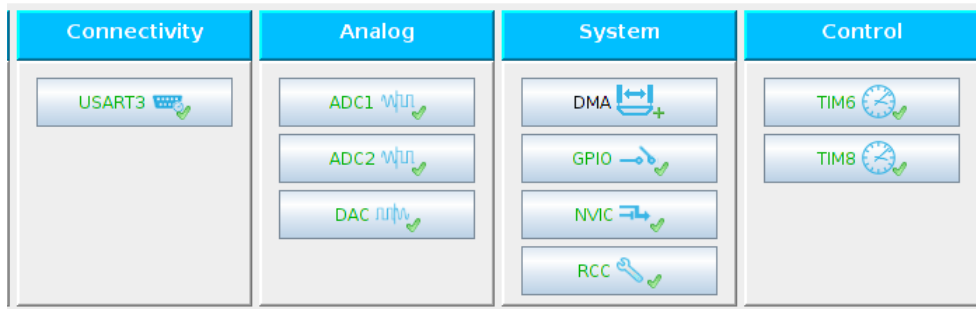
Mikrodenetleyicinin çevresel birimlerinin çalışabilmesi için bir clock kaynağına ihtiyaç duyulmuştur. STM32F4 serisi mikrodenetleyici de üç farklı clock kaynağı bulunmaktadır. Main PLL osilatörü, HSE(High Speed External) osilatör ve HSI (High Speed İnternal) osilatörü olarak kullanılmaktadırlar. Kapasitif rotary enkoder projemizde, geliştirme kitinde harici olarak bulunan HSE 8 MHz kristal seramik rezonatör kullanılmıştır. Şekil 4.11'de STM32F4 serisi mikrodenetleyici clock kaynağı ayarları gösterilmiştir. Projede kullanılan STM32F4 serisi mikro-





Şekil 4.11. STM32F4 Clock Ayarları

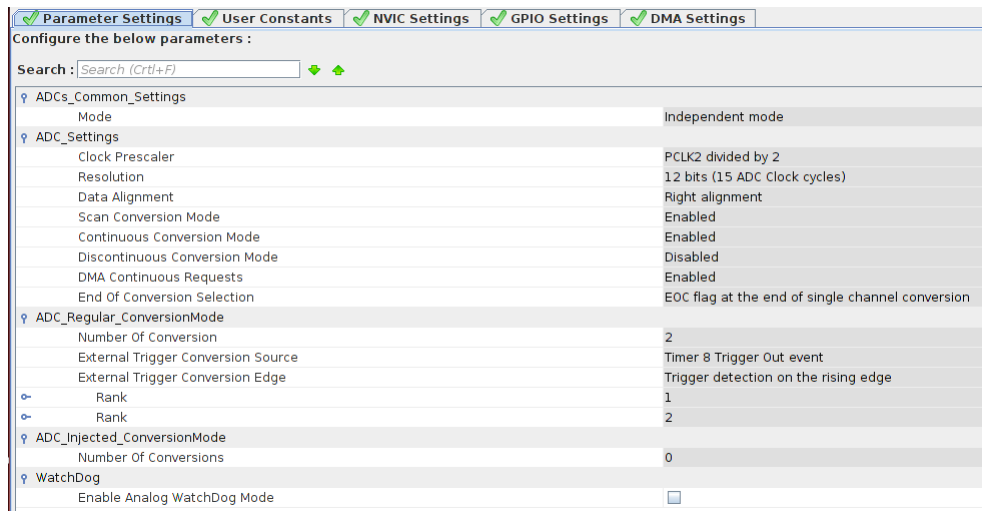
Şekil 4.12’de STM32F407 serisi mikrodenetleyicinin kullanılan çevresel birimlerinin konfigürasyonları gösterilmiştir.



Şekil 4.12. STM32F4 Konfigürasyon Ayarları

Konfigürasyon menüsünde kullanılan çevresel birimler birbirleriyle ilişkili olarak sınıflandırılmıştır. Çevresel birimler Multimedia, Connectiviy, Analog, System ve Security başlıklarına ayrılmıştır. DMA (Direct Memory Access), GPIO (General Purpose Input Output), NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller) ve RCC (Reset and Clock Control) gibi birimler System başlığında sınıflandırılırken, zamanlayıcı(TIM3,TIM6 ve TIM8) birimleri Control başlığı, ADC1 (Analog-to-Digital Converter) ve DAC (Digital-to Analog Converter) ise Analog başlığı altında ilişki durumlarına göre bir sınıflandırılma yazılım tarafından tercih edilmektedir. Şekil 4.13’de analog başlığı altında sınıflandırılan ADC1’e ait konfigürasyon ayarları gösterilmiştir. Proje isterlerine uygun olacak şekilde ADC1 konfigürasyonları tamamlanmıştır. ADC çalışma modülleri arasında olan Independent modülü tercih edilmiştir. ADC1 çevresel biriminin bağlı olduğu APB2 veri yolunun clock prescaler değerine bölünmesiyle beraber ADC örnekleme frekansı

tercih edilmektedir. APB2 veri yolu frekansı 72 MHz ve clock prescaler değerimizi 2 seçerek ADC1 örnekleme frekansını 36 MHz olarak belirlenmiştir. STM32F407 ürün dokümanındaki verilere göre ise ADC1 maksimum örnekleme frekansı 35 MHz olarak ayarlanabilmektedir. Bu seçimimizle beraber ADC1 örnekleme hızını maksimum olacak şekilde ayarlanmıştır. Resolution parametresinde ise ADC1 çevresel biriminin çözünürlük ayarlarının yapılması gerekmektedir. STM32F4 serisi mikrodenetleyicinin sağlamış olduğu en yüksek çözünürlük değeri olan 12-bit seçilmiştir. Scan Conversion Mode aktif edilerek ADC1 çevresel biriminde birden fazla analog giriş kullanıldığı belirtilmiştir. ADC1 çevresel biriminde bir analog giriş kullanılması durumunda Scan Conversion Mode pasif edilebilmektedir. ADC1 çevresel biriminin çalışması bir zamanlayıcıya veya bir kesme gibi bir olayla tetiklenecekse Continuous Conversion mode aktif iken Discontinuous Conversion Mode pasif yapılması gerekmektedir. DMA Continuous Requests, ADC1 çevre biriminde birden fazla analog giriş kullanılması durumunda aktif edilmesi gerekmektedir. Bunun nedeni ADC1 çevresel biriminde okunan veri tek bir register adresine yazılmaktadır. ADC1 çevresel biriminde birden fazla analog okuma yapılacaksa ve okuma sonuçlarının kaybolmaması için DMA Continuous Requests özelliğinin aktif hale getirilmesi gerekmektedir.

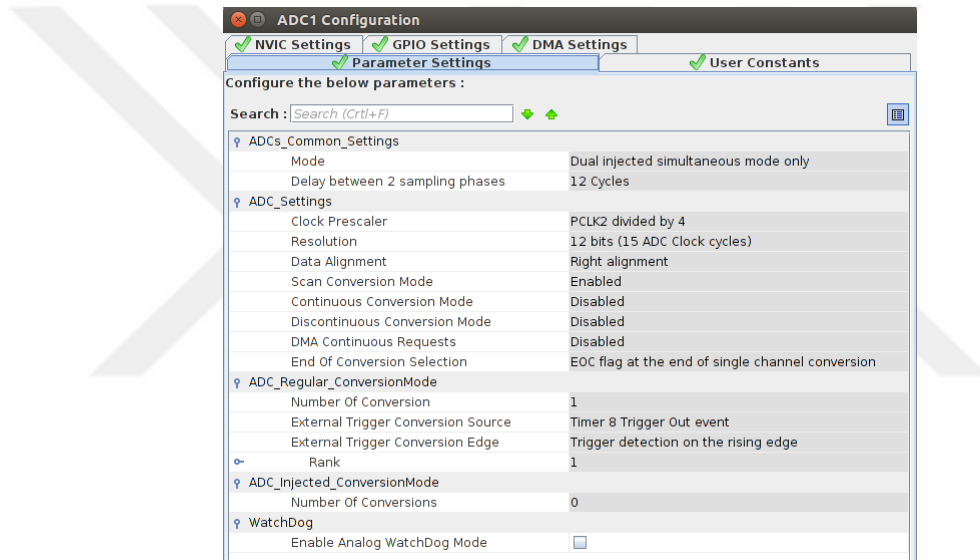


**Şekil 4.13. STM32F4 ADC Ayarları**

Konfigürasyon ayarlarında gösterildiği gibi ADC1 çevresel biriminin çalışması TIM8 zamanlayıcısının tetiklemesine bağlanmıştır. Yani ADC1 çevresel birimi belirli aralıklarla okunmaktadır. ADC1 çevresel biriminin belirli aralıklarla okunması mikrodenetleyici için geliştirilen kodda önemli bir kabul noktası olarak belirlenmiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen simülasyonda da zaman aralığı

olarak ifade edilen bu parametre mikrodenetleyici tarafında ADC1 çevresel biriminin okuma aralığı olarak karşımıza çıkmaktadır.

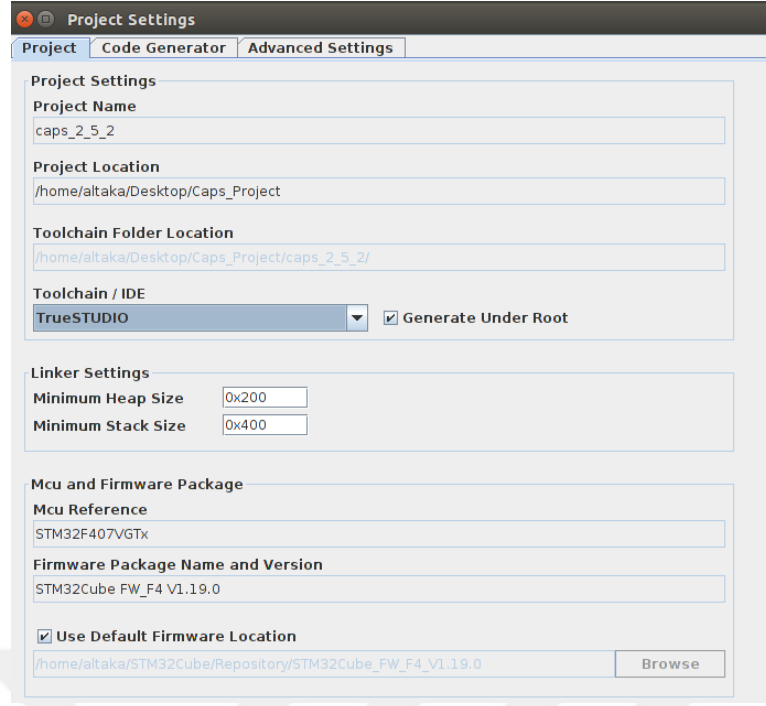
MATLAB ortamında simülasyonlar gerçekleştirilirken ADC örnekleme oranı 400 kHz, taşıyıcı sinyal frekansı 100 kHz olarak belirlenmiştir. Simülasyon ortamında geliştirilen kodun mikrodenetleyiciye aktarma aşamasında ADC örnekleme oranının mikrodenetleyici tabanlı karşılanamayacağı sonucuna varılmıştır. Bundan dolayı örnekleme oranı test işlemlerinden geçirilerek 20 kHz değerine çekilmiştir. Şekil 4.13’de belirtilen DMA modülü kullanmadan farklı bir ADC ayarları yapılmıştır. DMA ile ADC okumasında karşılaşılan sorunlar nedeniyle ADC farklı okuma modlarıyla test edilmiştir. ADC okuması TIM8 ile tetiklenerek sonuçların ADC kesmesinde yapılmıştır. Düzenlenen ADC ayarları Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.14. STM32F4 ADC Kesme Ayarları**

STM32CubeMX yazılımında; seçilen mikrodenetleyicinin pinlerinde kullanılacak çevresel birimlerin belirlenmesi, mikrodenetleyici çalışma frekansının ayarlanmasındaki clock ayarlarının yapılması, çevresel birimlerin konfigürasyon ayarlarının yapılmasıyla ilk aşama tamamlanmıştır. İkinci aşama ise ayarlanan konfigürasyonların mikrodenetleyiciye gömülecek koda çevrilmesidir. STM32CubeMX kod üretme menü ayarları Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

STM32CubeMx kod üretme ayarlarında mikrodenetleyiciye aktarılacak kodun hangi derleyici vasıtasıyla yapılacağı belirlenmesi gerekmektedir. STM32CubeMX yazılımı; Linux, Windows ve macOS gibi farklı işletim sistemlerine ve TrueSTUDIO, Eclipse eklentisi, Keil ve IAR gibi farklı derleyicilere kod üretebilmektedir. Projemizde derleyici olarak Atollic TrueSTUDIO kullanılmıştır.



**Şekil 4.15. STM32CubeMX Kod Üretme Ayarları**

Mikrodenetleyici firmware paketi ve versiyonunu da belirterek kod üretmeye hazır hale gelinmiştir.

Atollic TrueSTUDIO derleyici için üretilen kod ve projemizde kullanılacak olan gerekli kod satırlarının yazılmasıyla beraber nihai kod satırları aşağıda gösterilmiştir.

Çift yan bant demodülasyon, arctan fonksiyon, analog çıkış bilgisi ve değişken darbe/tur değişkenleri tanımlanmıştır.

```
#include "main.h"
#include "stdio.h"
#include "stm32f4xx_hal.h"
#include "arm_math.h"
#include "math_helper.h"

uint16_t adc_data1[2]={0};

uint8_t adc_Complete=0;
uint8_t adc_Period=0;
uint8_t adc2_Complete=0;
```

```

uint8_t modCount=1;

float32_t Demul;
float32_t Demul_bd;

float_t pi = 3.14;

uint32_t analogAci=0;

float32_t srcB_buf_f32[16] =
{
0.060110, 0.061057, 0.061875, 0.062561, 0.063113,
0.063528, 0.063806, 0.063945, 0.063945, 0.063806,
0.063528, 0.063113, 0.062561, 0.061875, 0.061057,
0.060110
};

int16_t cosKatsayi[4]=
{
    1, 0, -1, 0
};

float32_t kayanData[16]={0};
float32_t kayanData_2[16]={0};

float32_t lpf1=0;
float32_t lpf1_bd=0;
float32_t caps_atan=0;

float32_t aci_Degeri=0;
float32_t arctan=0;
uint8_t aci_Count=1;

```

```

float32_t aci_Array[64]={0};
float32_t aci_Mean=0;

uint8_t deneme=0;
int32_t bolme=0;
int32_t aciBolme=0;

int count=1;
uint16_t cosT=1;

uint32_t testIndex=0;

ADC_HandleTypeDef hadc1;
ADC_HandleTypeDef hadc2;

DAC_HandleTypeDef hdac;

TIM_HandleTypeDef htim1;
TIM_HandleTypeDef htim6;
TIM_HandleTypeDef htim8;

UART_HandleTypeDef huart3;

```

Mikrodenetleyici içerisinde çalışan ve işlem sonuçlarını takip etmeye olanak sağlayan UART modülü için gerekli olan kod satırları eklenmiştir.

```

int _io_putchar(int ch)
{
    uint8_t c[1];
    c[0] = ch & 0x00FF;
    HAL_UART_Transmit(&huart3 , &*c , 1, 10);
    return ch;
}

```

```

int _write(int file ,char *ptr , int len)
{
    int DataIdx ;
    for(DataIdx= 0; DataIdx< len; DataIdx++)
    {
        --io_putchar(*ptr++);
    }
    return len ;
}

```

Kod satırları içerisinde STM32F4 serisinin kullandığı kütüphaneye ait fonksiyon tanımlaması yapılmıştır.

```

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_DAC_Init(void);
static void MX_TIM6_Init(void);
static void MX_USART3_UART_Init(void);
static void MX_TIM8_Init(void);
static void MX_ADC2_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);

void HAL_TIM_MspPostInit(TIM_HandleTypeDef *htim);

```

Mikrodenetleyici içerisinde çalışan çevresel birimlerin başlangıç ayarları yapılmıştır. Kapasitörler üzerinde oluşan AC - BD sinyallerini okumak için ADC1 birimi, değiştirilebilir darbe/tur sayısının ayarlanması için kullanılan LCD modülü ve diğer işlemler için kullanılan GPIO birimi, değişkenleri bilgisayar terminal ekranına göndermek için USART3 birimi kullanılmıştır. ADC1 üzerinden belirli aralıklarla okuma yapabilmek TIM8 zamanlayıcısı, DAC çevresel birimini kullanabilmek için TIM3 zamanlayıcısı tercih edilmiştir.

```

int main(void)
{
    HAL_Init ();

    SystemClock_Config ();

    MX_GPIO_Init ();
    MX_ADC1_Init ();
    MX_DAC_Init ();
    MX_TIM6_Init ();
    MX_USART3_UART_Init ();
    MX_TIM8_Init ();
    MX_ADC2_Init ();
    MX_TIM1_Init ();

    LCD1602_Begin4BIT (GPIOE, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_1,
    GPIOB, GPIO_PIN_9, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_5,
    GPIO_PIN_3);

    LCD1602_clear ();
    LCD1602_1stLine ();
    LCD1602_print ("Enkoder_Pulse");
    LCD1602_2ndLine ();
    LCD1602_print ("Degeri:");

    HAL_ADC_Start_IT (&hadc1);
    HAL_TIM_Base_Start (&htim8);
    HAL_TIM_Base_Start (&htim6);
    HAL_DAC_Start (&hdac, DAC_CHANNEL_1);

    while (1)
    {

```

```
}  
}
```

ADC1 çevresel birimi tarafından oluşan kesme içerisinde sayısal işlemler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle set edilen zamanlayıcı değeri olan aralıkta kesme içerisine girilip girilmediğini kontrol etmek için gpio toggle özelliği kullanılmıştır. Böylelikle oluşan sinyalin frekansından kesme içerisine girme süresi test edilmiştir. Kesme içerisindeki işlemler; belirli aralıkta ADC1 çevresel biriminin okunması ve ilgili değişkenlere atamalarının yapılması, ADC1 çevresel biriminden okunan sinyallere çift yan bant demodülasyon uygulanması (çarpma ve alçak geçiren filtreden geçirilmesi), rotorun bulunduğu açı değerine ulaşmak için alçak geçiren filtre çıkış değerine arctan fonksiyonu uygulanması, rotorun açı değerinin dış ortama analog çıkış olarak üretmemizi sağlayan DAC çevresel birimi ile çıkışa aktarılması, değişken darbe/tur sayısının belirlendikten sonra darbe/tur bölüntüleme işlemleri olarak gerçekleştirilmiştir.

```
void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef* hadc)  
{  
    adc_data1[adc_Complete] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);  
    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_6);  
  
    adc_Complete = adc_Complete+1;  
    adc_Periyeod = adc_Periyeod+1;  
  
    if(adc_Complete == 2)  
    {  
        adc_Complete=0;  
    }  
  
    if (adc_Periyeod %2 == 0)  
    {  
        Vin = adc_data1[0];  
        Vbd = adc_data1[1];  
    }  
}
```

```

if (cosT == 1)
{
    Demul = Vin * cosKatsayi [0];
    Demul_bd = Vbd * cosKatsayi [0];
}
if (cosT == 2)
{
    Demul = Vin * cosKatsayi [1];
    Demul_bd = Vbd * cosKatsayi [1];
}
if (cosT == 3)
{
    Demul = Vin * cosKatsayi [2];
    Demul_bd = Vbd * cosKatsayi [2];
}
if (cosT == 4)
{
    Demul = Vin * cosKatsayi [3];
    Demul_bd = Vbd * cosKatsayi [3];
    cosT=0;
}
cosT = cosT+1;

kayanData [0]=Demul; // pot
kayanData_2 [0]=Demul_bd;

for    (int  i=1;i <16;i++)
{
kayanData [(15 -(i -1))] = kayanData [15 - i ];
kayanData_2 [(15 -(i -1))] = kayanData_2 [15 - i ];
}
kayanData [0]=0;

```

```

lpf1 = (kayanData[0] * srcB_buf_f32[0])+
(kayanData[1]*srcB_buf_f32[1]) +
(kayanData[2] * srcB_buf_f32[2]) +
(kayanData[3] * srcB_buf_f32[3]) +
(kayanData[4] * srcB_buf_f32[4]) +
(kayanData[5] * srcB_buf_f32[5]) +
(kayanData[6] * srcB_buf_f32[6]) +
(kayanData[7] * srcB_buf_f32[7]) +
(kayanData[8]*srcB_buf_f32[8]) +
(kayanData[9] * srcB_buf_f32[9]) +
(kayanData[10] * srcB_buf_f32[10])+
(kayanData[11] * srcB_buf_f32[11])+
(kayanData[12] * srcB_buf_f32[12]) +
(kayanData[13] * srcB_buf_f32[13]) +
(kayanData[14] * srcB_buf_f32[14]) +
(kayanData[15] * srcB_buf_f32[15]);

```

```

lpf1_bd = kayanData_2[0]*srcB_buf_f32[0]+
kayanData_2[1]*srcB_buf_f32[1]+
kayanData_2[2]*srcB_buf_f32[2]+
kayanData_2[3]*srcB_buf_f32[3]+
kayanData_2[4]*srcB_buf_f32[4]+
kayanData_2[5]*srcB_buf_f32[5]+
kayanData_2[6]*srcB_buf_f32[6]+
kayanData_2[7]*srcB_buf_f32[7]+
kayanData_2[8]*srcB_buf_f32[8]+
kayanData_2[9]*srcB_buf_f32[9]+
kayanData_2[10]*srcB_buf_f32[10]+
kayanData_2[11]*srcB_buf_f32[11]+
kayanData_2[12]*srcB_buf_f32[12]+
kayanData_2[13]*srcB_buf_f32[13]+
kayanData_2[14]*srcB_buf_f32[14]+
kayanData_2[15]*srcB_buf_f32[15];

```

```

caps_atan = atan2f(lpfl ,lpfl_bd );
aci_Degeri = (caps_atan * 180) / pi;

HAL_DAC_SetValue(&hdac ,DAC_CHANNEL_1,
DAC_ALIGN_12B_R, analogAci);

aciBolme = aci_Degeri;

bolme = (sabit * aciBolme )/360;
analogAci=(4095*aciBolme)/360;

count = bolme /8;

for (int i=1; i < count; i++)
{
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOD, GPIO_PIN_0);

}
}

```

Değişken darbe/tur sayısının belirlenmesinde kullanılan, giriş butonu kesme fonksiyonu belirtilmiştir. GPIOD portuna bağlı olan PIN2 ve PIN4 butonuna her basmada gerçekleşecek olan artış miktarları ve her artış sonrasında değerlerin LCD ekrana yazdırılması ayarlanmıştır.

```

void EXTI2_IRQHandler( void )
{
if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, GPIO_PIN_2) == GPIO_PIN_SET)
{
if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, GPIO_PIN_2))
{
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOD, GPIO_PIN_12);
sabit = sabit+100;
LCD1602_2ndLine();
}
}
}

```

```

LCD1602_setCursor(2,8);
LCD1602_PrintInt(sabit);
}
}
HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_2);
}

void EXTI4_IRQHandler(void)
{
if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, GPIO_PIN_4) == GPIO_PIN_SET)
{
if (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOD, GPIO_PIN_4))
{
HAL_GPIO_TogglePin(GPIOD, GPIO_PIN_12);
sabit = sabit+1;
LCD1602_2ndLine();
LCD1602_setCursor(2,8);
LCD1602_PrintInt(sabit);
}
}
}
HAL_GPIO_EXTI_IRQHandler(GPIO_PIN_4);
}

```

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

### 5.1. Analog Elektronik Tabanlı Tasarım Test Sonuçları

TÜBİTAK destekli proje kapsamında gerçekleştirilen kapasitif rotary enkoder devresi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

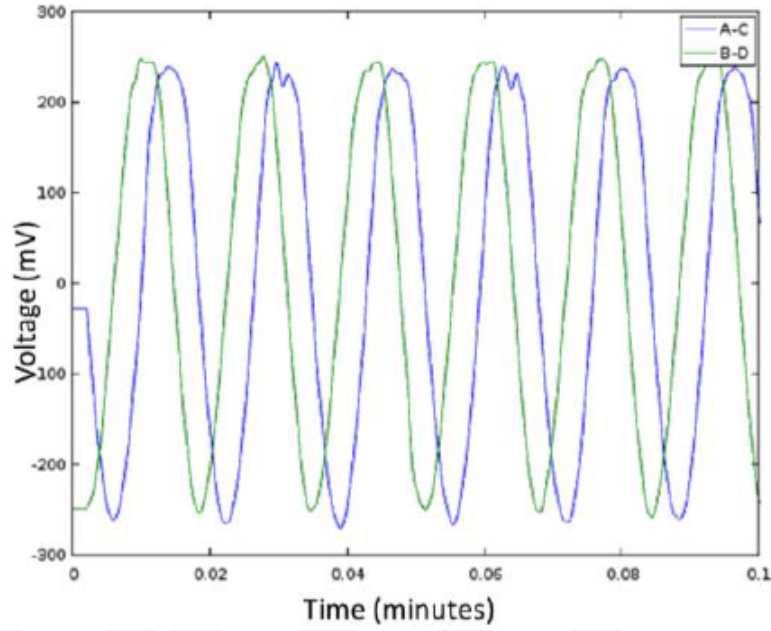


**Şekil 5.1. Kapasitif Rotary Enkoder Elektronik Devresi**

Elektronik devre, çift taraflı baskılı devre kartından imal edilmiştir. Elektronik devre iki katmandan oluşmuştur. Birinci katmanda STM32F4 serisi mikrodenetleyici ve kazanç devresinden meydana gelmiştir. Kazanç devresinde, negatif ve pozitif gerilimler üretilerek devrenin güç kaynağı ihtiyacı karşılanmıştır. İkinci katmanda ise analog devre bloğu yer almıştır.

Analog devre bloğu, kapasitif rotary enkoder şaftına bağlı küçük bir DC motor ile test edilmiştir. Rotorun dönme hareketiyle beraber analog devre A-C ve B-D sinyallerini üretmiştir. Üretilen sinyaller STM32F4 serisi mikrodenetleyicinin analog girişlerine bağlanmıştır. Kapasitif rotary enkoderin rotorunun dönmesiyle birlikte oluşan ve aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan iki sinüzoidal sinyal Şekil 5.2’de

gösterilmiştir. Bu testte analog devre bloğunun çalışıp çalışmadığı test edilmiştir [13].

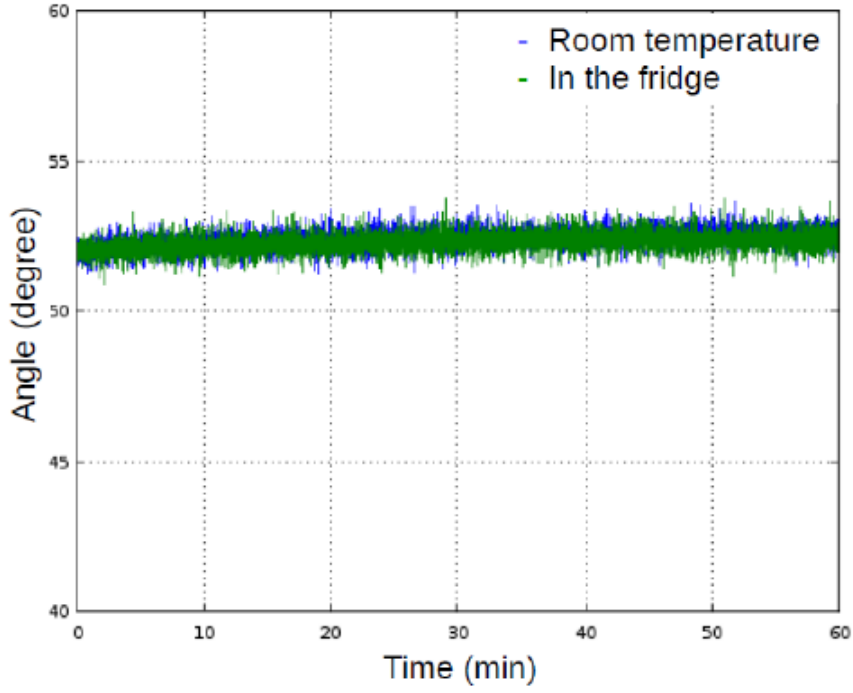


Şekil 5.2. A-C ve B-D Fark Alma İşlem Çıkış Grafiği

Şekil 5.2’de görüldüğü üzere A-C ve B-D sinyalleri arasında bir DC ofset bulunmaktadır. Analog çarpma işlemi yapan devre elemanlarının DC ofset geriliminden olumsuz etkilendiği bilinmektedir. Bu etkilenme alçak geçiren filtre işleminde DC ofset olarak ortaya çıkmıştır. Oluşan bu DC ofset doğrusal olmayan bir arctan fonksiyon hesaplamasına neden olabilir ve kapasitif rotary enkoder prototipinin doğruluğu engelleyebilir. Bundan dolayı DC ofset dijital alanda arctan fonksiyonu hesaplanmadan önce engellenir.

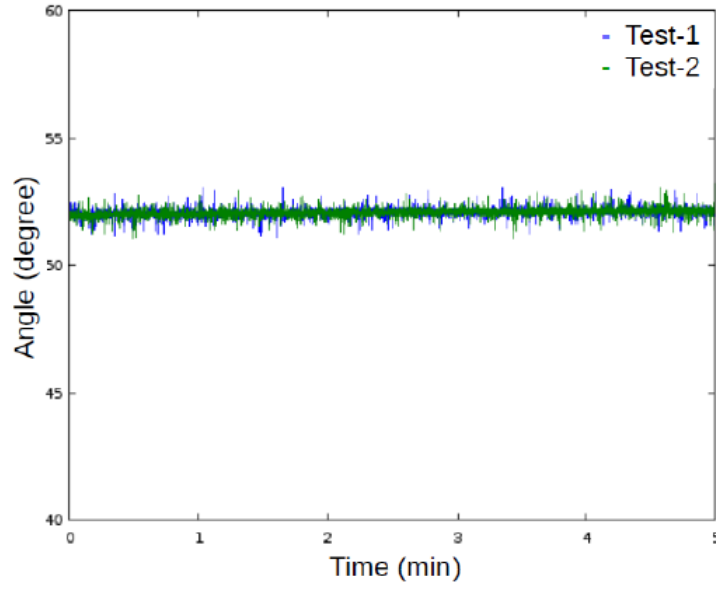
Ortalama algoritması, dijital alanda düşük frekansta analog sinyal gürültüsünü minimize etmek için kullanılmıştır.

Kapasitif rotary enkoder sensörüne enerji verildiğinde, kazanç devresi yaklaşık 10 °C kadar ısınmıştır. Bu eşit olmayan sıcaklık değişimi enkoderin içinde eşit olmayan bir sıcaklık yoğunluğuna neden olabilir ve bu da OPAMP’lar gibi analog blokların farklı çevre sıcaklıklarında çalışmasına neden olmuştur. Bu durum çıkışta bir sapmaya neden olabilir. Fakat Şekil 5.3’de gözlemlendiği gibi bu kaymanın her bir analog bloğun simetrik yerleşimlerine bağlı olarak minimize edildiği görülmüştür. Dahası kapasitif rotary enkoder buzdolabında çalıştırılırken bile, oda sıcaklığındaki açı ölçüm hatası arasında zamanla sapma miktarı birbirine yakın değerlerde olduğu gözlemlenmiştir [13].



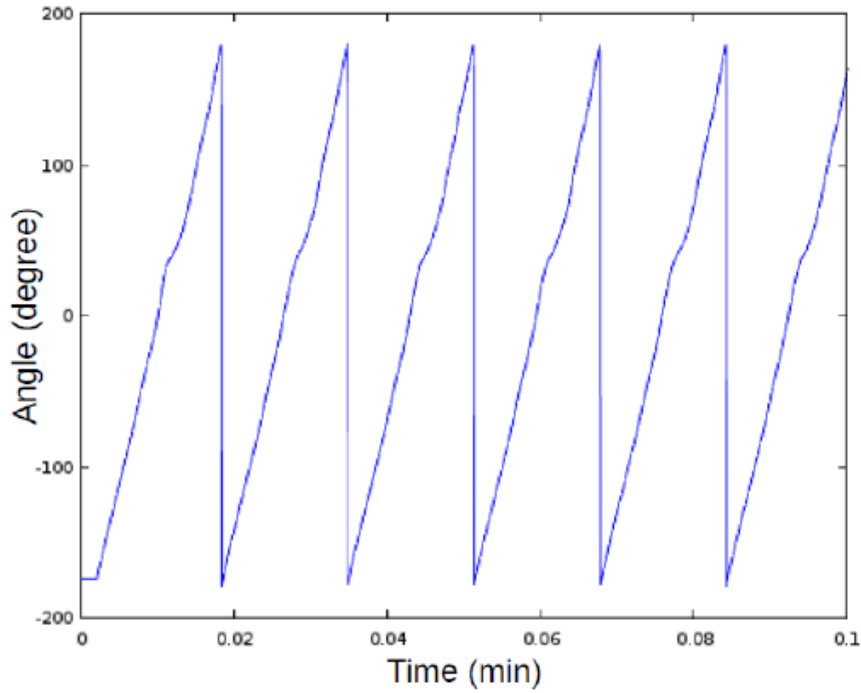
**Şekil 5.3. Enkoderin Karşılaştırmalı Sıcaklık Testi**

Kapasitif rotary enkoder, ikinci testinde sensör açılır ve kısa bir süre çalıştırılır ardından daha sonra birkaç kez kapatılır. Bu testi yapmaktaki amaç, kapasitif rotary enkoderin her açma-kapama çevrimi arasında bir sapma olup olmadığını görmektir. Şekil 5.4’de test sonuçları gösterilmiştir. Aslında bu test, ilk testten sonra gerçekleştirilir ve bu iki test arasında kapasitif rotary enkoder miline bağlı olan motor sürekli olarak enerjili halde kalması gerekmektedir. Kapasitif rotary enkoderin açı ölçüm verilerinin tekrarlanabilir ve güvenilir olduğu görülmüştür. Test sırasında kapasitif rotary enkoder alüminyum folyo ile sarıldığında açı değerinde gürültünün azaldığı gözlemlenmiştir. Gerçek prototipte mekanik gövde metalik bir kasadan oluşacağı için dış ortam gürültüsü azaltılacaktır [13].



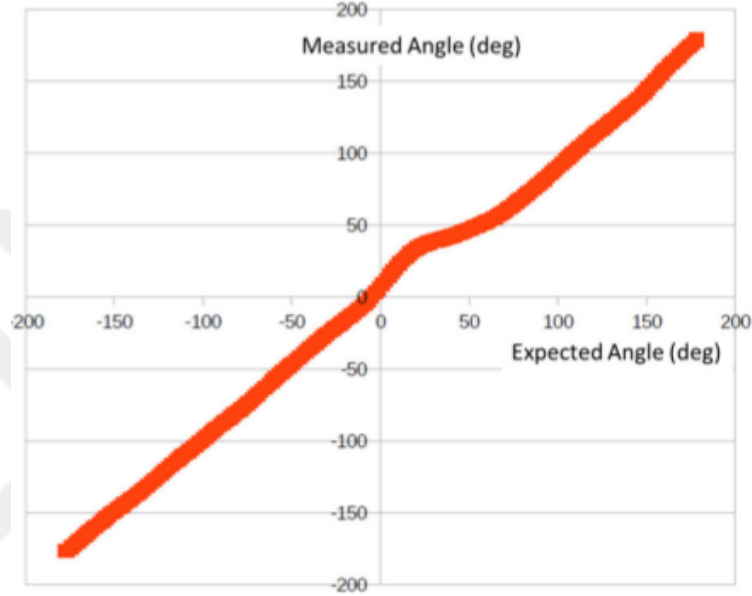
**Şekil 5.4. Enkoderin 5 Dakikalık Açı Ölçüm Testi**

Kapasitif rotary enkoder üçüncü testte ise döndürülür ve enkoderin açı ölçüm sonuçları kaydedilir. Şekil 5.5’de kapasitif rotary enkoderin açı ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Grafikten de görüleceği üzere kapasitif rotary enkoder  $30^\circ$  bölgesinde iken doğrusal olmayan bir durumla karşılaşmaktadır. Bu doğrusal olmayan bölgenin sebebi kapasitif rotary enkoder plakalarının imalat aşamasındaki paralelliğinin kaybedilmesi olarak düşünülmektedir.



**Şekil 5.5. Enkoderin Dönme Testi**

Kapasitif rotary enkoderin doğrusal olmayanlık sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Kapasitif rotary enkoderin  $30^\circ$  bölgesinde bir doğrusal olmayan durum söz konusudur. Bu bölgedeki hatada bile kapasitif rotary enkoderin doğrusal olmayanlığının %0.3'ten az olduğu hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan bölgedeki hata, kusurlu sinüzoidal A-C ve B-D sinyal oluşumundan kaynaklanmıştır. Elektrot A, Elektrot B, Elektrot C ve Elektrot D üzerinden dönen merkezi kaydırılmış yalıtkan plakanın imalat kalitesi artırılarak bu hata daha da azaltılacaktır [13].



Şekil 5.6. Enkoder Doğrusal Olmayanlık Hesabı

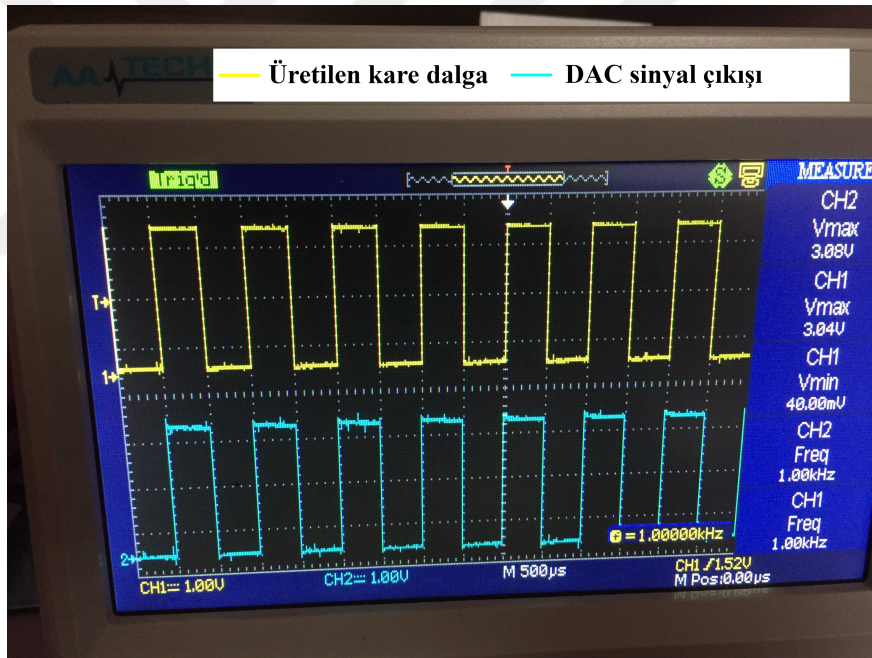
## 5.2. Sayısal Elektronik Mikrodenetleyici Tabanlı Tasarım Test Sonuçları

Kapasitif rotary enkoder geliştirilme sürecinde analog ve sayısal elektronik tabanlı tasarımlara yönelilmiştir. Sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarım üzerinde ilerlenirken, analog elektronik için geliştirilen mekanik yapı kullanılmıştır. Aynı mekanik yapı sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımda da kullanıldığı için analog elektronik tabanlı tasarımda gerçekleştirilen bazı deneyler tekrarlanmamıştır. Mekanik yapı değişmediği için analog tabanlı tasarımda gerçekleştirilen; karşılaştırmalı sıcaklık testi ve doğrusallık testi sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımda gerçekleştirilmemiştir.

Sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımda ise analog elektronik

tabanlı tasarıma göre farklı testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sürecin tamamını kapsayacak şekilde planlanmıştır. Testler ilk aşamadan son aşamaya gelene kadar gerçekleştirilmiştir. Özellikle mikrodenetleyiciye kod geliştirme süreçlerinde önce MATLAB ortamında simülasyonlar yapılmıştır. Mikrodenetleyici üzerinde çalışacak algoritma MATLAB ortamında gerçekleştirildikten sonra STM32F4 serisi mikrodenetleyiciye uygulanmıştır.

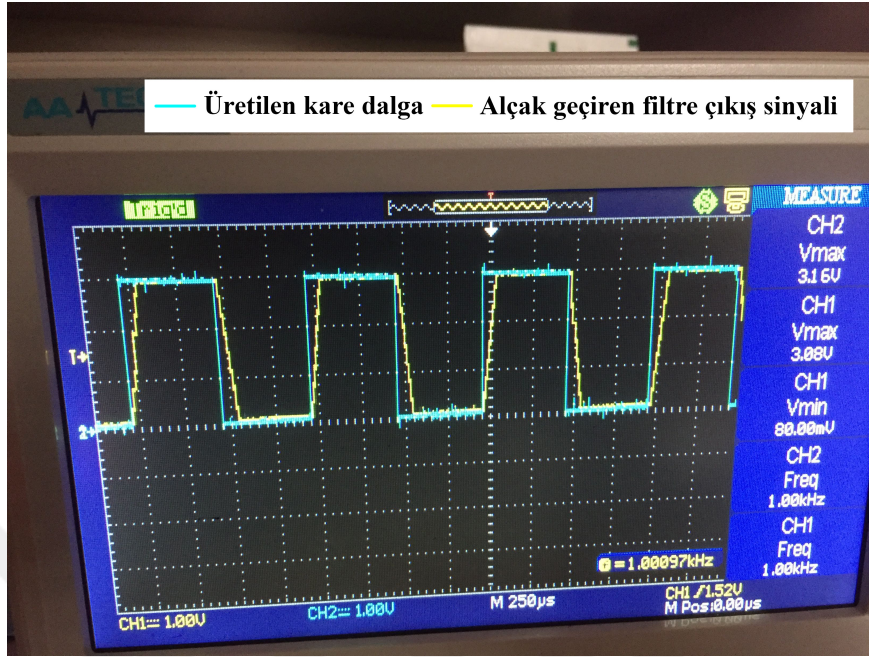
Sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarım çalışmasında, çift yan bant demodülasyon, arctan fonksiyonu, analog çıkış değerinin oluşturulması ve değişken darbe/tur bölüntüleme gibi her aşamanın testi yapılmıştır. İlk başta STM32F4 mikrodenetleyici de 1 kHz frekansı bir kare dalga üretilmiştir. Ardından ADC1 çevresel biriminden, üretilen kare dalga okunmuştur. Okuma işlemi tamamlandıktan sonra DAC çevresel birimi ile okuna kare dalga dışarıya aktarılmıştır. Üretilen ve dışarıya DAC ile aktarılan sinyal Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. STM32F4 PWM, ADC ve DAC Çevresel Birimleri Testi

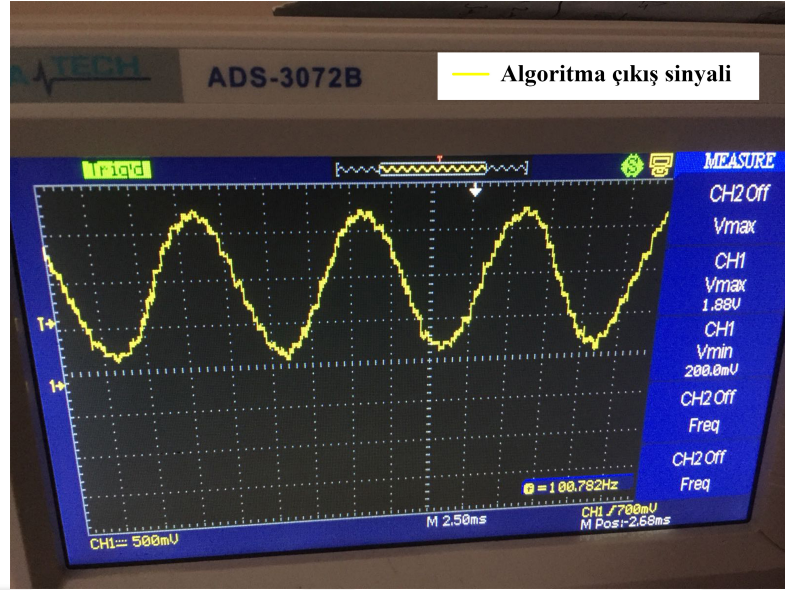
Böylelikle PWM aracılığıyla kare dalga üretilmesi, belirli periyotlarda ADC1 çevresel biriminin okunması, analog girişten elde edilen bilginin DAC çevresel birimiyle dışarıya aktarılma testleri yapılmıştır. Böylelikle PWM, ADC1 ve DAC modüllerinin sağlıklı bir şekilde çalıştığından emin olunmuştur. Alçak geçiren filtre algoritmasının testini yapmak içinde PWM aracılığıyla üretilen ADC1 ile okunan sinyal alçak geçiren filtreden geçirilmiştir. Filtre çıkışında elde sinyal çıkışları osiloskop ile gözlemlenmiştir. Test sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

Test sonuçlarından gözlemleneceği üzere PWM ile üretilmesinin ardından alçak geçiren filtreden geçirilen ve DAC ile dışa aktarılan kare dalga alçak geçiren filtre çıkışındaki sinyal formuna dönüştüğü gözlemlenmiştir.



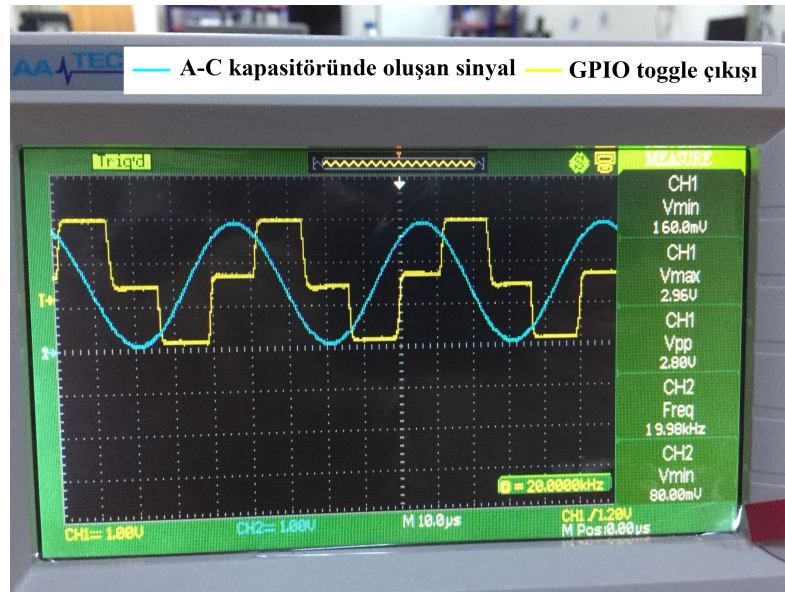
Şekil 5.8. STM32F4 Alçak Geçiren Filtre Çıkışı

Sinyal jeneratöründe üretilen iki adet 100 Hz frekansında sinüzoidal sinyal Elektrot A-C ve Elektrot B-D bölgelerinde oluşuyormuş varsayımı ile hareket edilerek geliştirme çalışmalarına devam edilmiştir. Yani merkezi kaydırılmış hareketli plakanın dönmesiyle elektrotlar üzerinde oluşacak sinüzoidal sinyal, algoritmayı test etmek için sinyal jeneratöründe üretilmiştir. Üretilen sinyaller arasında mekanik yapı gereği bir faz farkı oluşmaktadır. Faz farkı mekanik yapıda bulunan dört çeyrek daireye bölünmüş olan sabit plakadan ve birbirinin zıt köşesinde olan çeyrek daire dilimlerinin birbirinden çıkarılmasından kaynaklanmaktadır. Aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan sinyallerin ADC1 çevresel biriminde TIM8 zamanlayıcısında belirlenen  $2.5 \mu s$  periyodunda okunması, 400 kHz örnekleme frekansında okunan sinyale modülasyon ve demodülasyon işleminin gerçekleştirilmesi, ardından alçak geçiren filtre ile taşınan bilgi işaretine gürültüsüz bir şekilde ulaşılması, elde edilen sinyalin DAC dışarıya aktarılmasına kadar geçen süreç test edilmiştir. İfade edilen süreç sonucunda elde edilen sinüzoidal çıkış sinyali Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Test sonuçlarına göre girişte 100 Hz olarak ADC1 çevresel birimine uygulanan sinyal işaretine ulaşılmıştır.



Şekil 5.9. STM32F4 Algoritma Testi

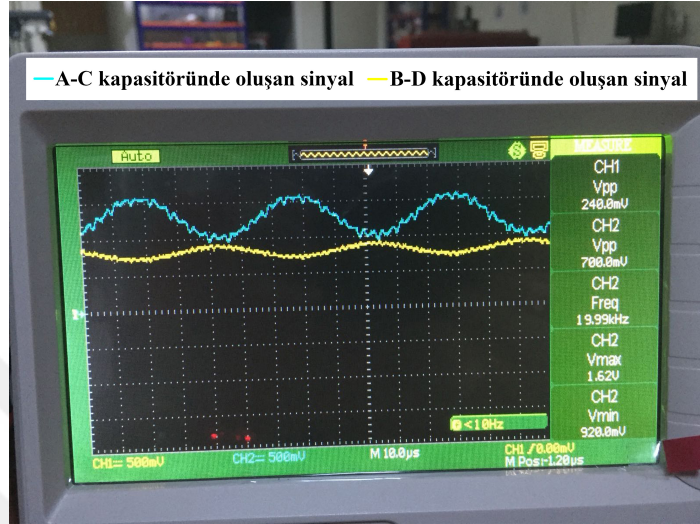
Kapasitörler üzerinde oluşan sinyalleri, sinyal jeneratörüyle üretip ADC ile okunması, sayısal işlemlerin yapılması ve DAC ile çıkışa aktarılmasında herhangi bir sorunlar karşılaşılmış gibi görülmüş referans bir GPIO toggle işlemiyle test edildiğinde çıkışlar arasında bir faz farkının olduğu gözlemlenmiştir. Her ADC kesmesi oluştuktan sonra GPIO toggle ile çıkış durumu değiştirilen sinyallerin karşılaştırılması Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



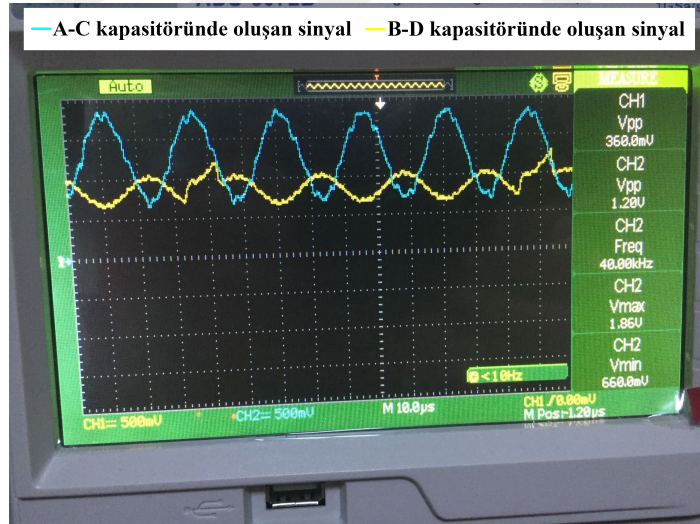
Şekil 5.10. STM32F4 Karşılaştırma Testi

ADC1 okuma işlemlerinde faz farkının meydana geldiği anlaşıldıktan sonra taşıyıcı sinyal frekansı 100 kHz’den 20 kHz değerine çekilmiştir. Taşıyıcı sinyal

frekansının bu seviyelerde kullanıldığı literatür çalışmasında karşılaşılsa da bazı kayıplar meydana gelmektedir [3]. Taşıyıcı sinyal frekans değişimlerinde meydana gelen genlik kayıplarını göstermek adına enkoderin rotoru sabitken farklı frekans değerlerinde sinyaller uygulanmış ve değerler Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de gözlemlenmiştir.



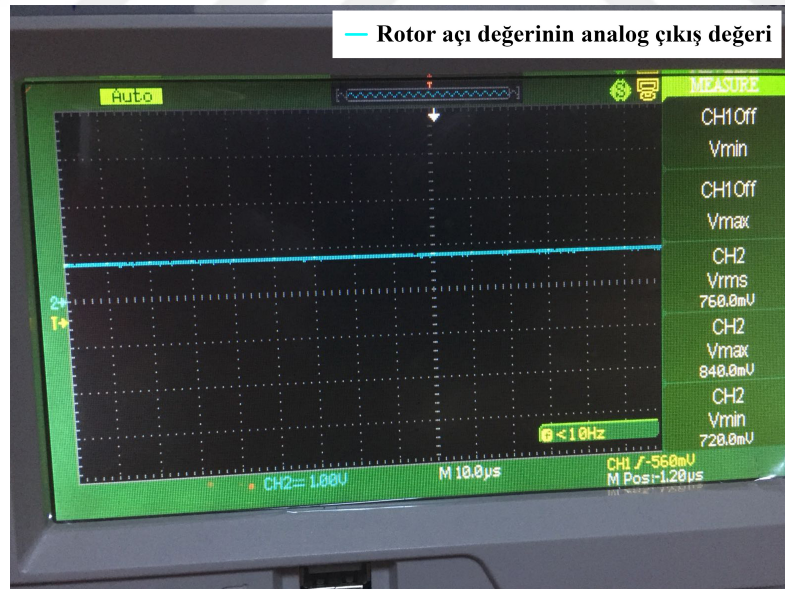
Şekil 5.11. STM32F4 20 kHz Genlik Testi



Şekil 5.12. STM32F4 40 kHz Genlik Testi

Karşılaştırmalı frekans testinde 20 kHz değerinde; sinyal genlikleri 240 mV ve 700 mV olarak tespit edilmiştir. Sinyal frekansını 40 kHz değerine yükseltince; sinyal genlikleri 360 mV ve 1.20 V değerlerine beklenildiği yükselmesi gözlemlenmiştir. Sinyal genlik düşmesine, trans-empedans devresindeki direnç oranlarının değişmesiyle tekrardan yükseltilebileceği çözümü sunulmaktadır.

ADC okumasındaki faz farkı sorunuyla ilgili olarak, farklı ADC okuma yöntemleriyle yapılacak testler sonraki çalışmalarda gerçekleştirilecektir. ADC1 çevresel biriminden alınan sonuçların doğru kabul edilerek değişken darbe/tur özelliği enkodere kazandırılmıştır. Analog elektronik tabanlı tasarımda kazanılan özelliklerin haricinde, sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımda da yeni özellikler geliştirilmiştir. Mevcut kapasitif rotary enkoder üreticileri açısız pozisyon bilgisini kullanıcılara çeşitli çıkış formlarında vermektedirler. Bazı üreticiler analog pozisyon bilgisini SSI (Serial Synchrony) veya BISS (Bidirectional Serial Synchronous) gibi dijital bir haberleşme protokolüyle verirken bazıları ise analog çıkış bilgisini tercih etmektedirler. Genellikle üreticiler açısız pozisyon bilgisini alternatifli şekilde kullanıcıya sunmaktadırlar. Ürünün kullanıcısı uygulamasına göre açısız pozisyon bilgisini ne şekilde alacağına karar vermektedir. Analog elektronik tabanlı tasarımda açısız pozisyon bilgisi kullanıcıya bilgisayar ortamında verilirken, sayısal elektronik tabanlı tasarımda ise açısız pozisyon bilgisi kullanıcıya analog çıkış ile verilmiştir. Şekil 5.13’de rotorun anlık açı bilgisi DAC çevresel birimiyle 0-3 V arasını 360° ile ölçeklendirerek dış ortama aktarılmıştır. 90°’de olan rotor konumu DAC çevresel birimiyle dış ortama 760 mV olarak aktarılmıştır.

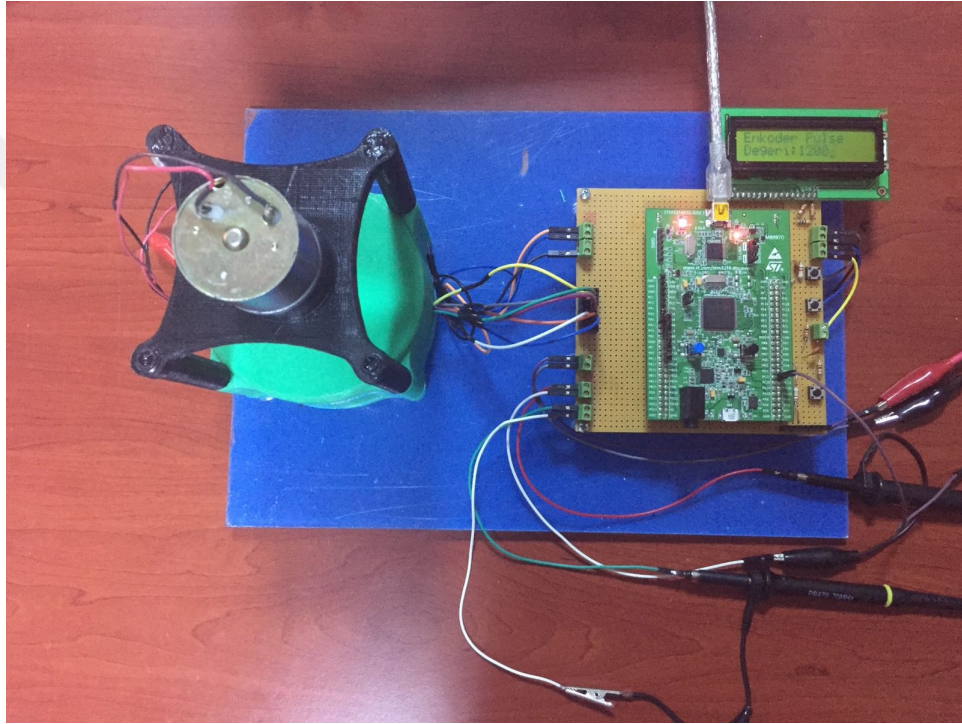


Şekil 5.13. Rotor Konumuna Göre Üretilen Analog Çıkış Değeri

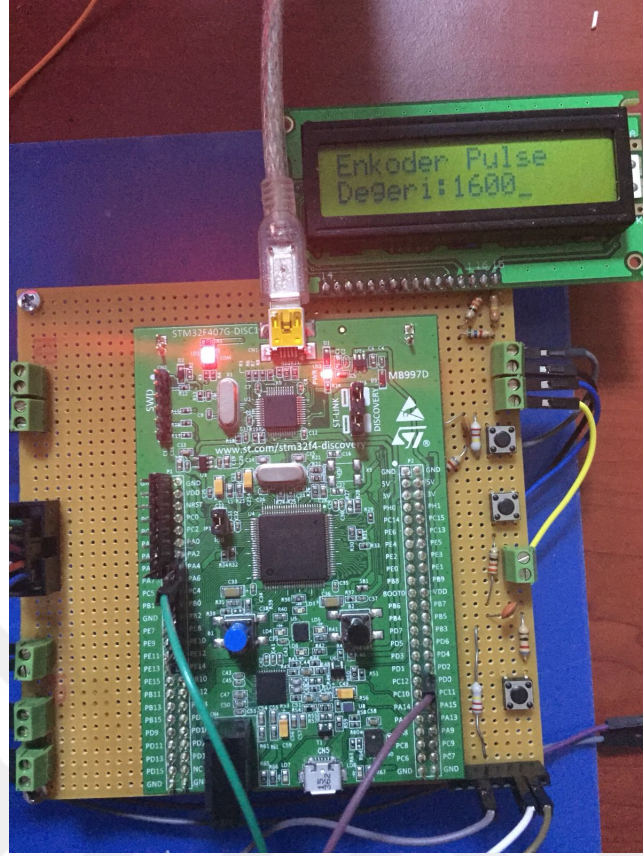
Sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarım ile mevcut sensörlere, opsiyonel bir özellik olan sensörün bir turda ürettiği darbe/tur sayısının değiştirilebilir olması kazandırılmıştır. Mevcut sensörlerin bir turdaki vermiş oldukları darbe/tur sayısı sabit olacak şekilde üretilmektedir. Sabit üretilen darbe/tur sayısı genel-

likle uygulama ihtiyacını fazlasıyla karşılayarak verimsiz kapasite kullanımı ortaya çıkmaktadır. Kapasitif rotary enkoderin bir turdaki darbe/tur sayısı 0-3500 arası değiştirilebilir şekilde sunulmuştur. Enkoderin kullanılacağı uygulama isteklerine göre darbe/tur sayısı kullanıcı butonlarıyla istenen değere set edebilme opsiyonelliği kazandırılmıştır.

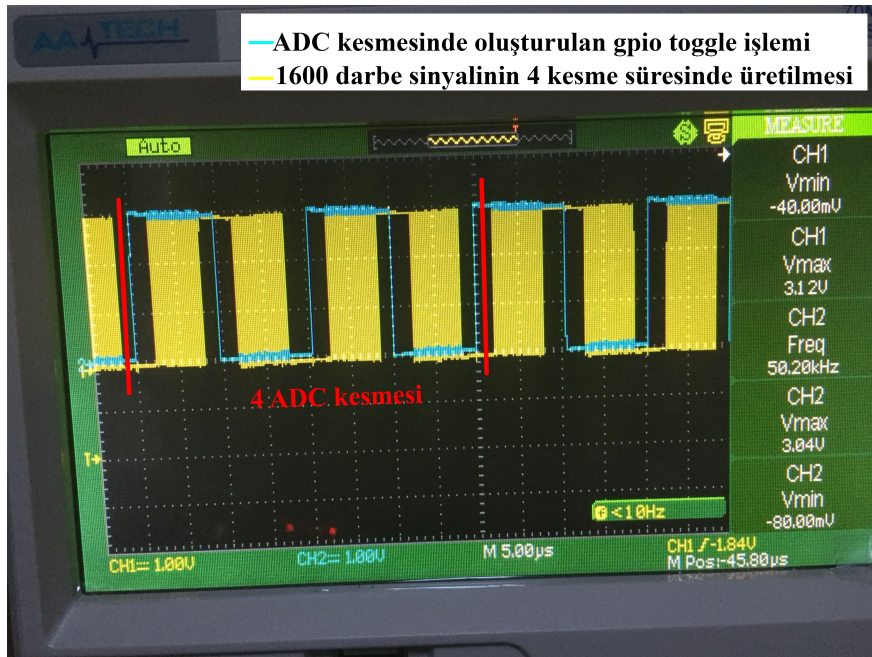
Yüksek lisans kapsamında geliştirilen enkoder kontrol kartı ve mekanik yapı olarak kullanılan kapasitif rotary enkoder Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Farklı değerlere set edilen darbe/tur sayısı test sonuçları Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



**Şekil 5.14. Enkoder ve Kontrol Kartı**



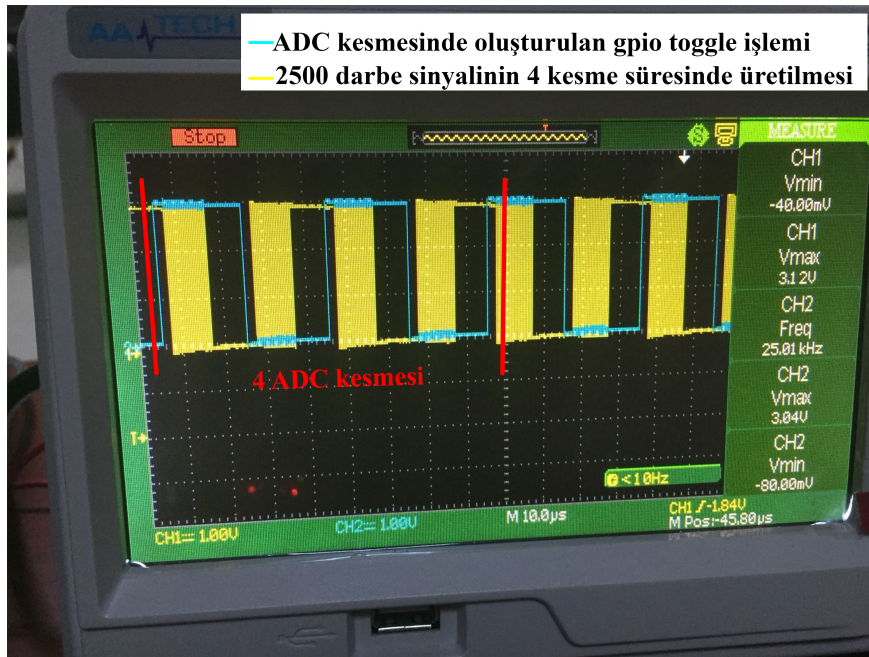
Şekil 5.15. 1600 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması



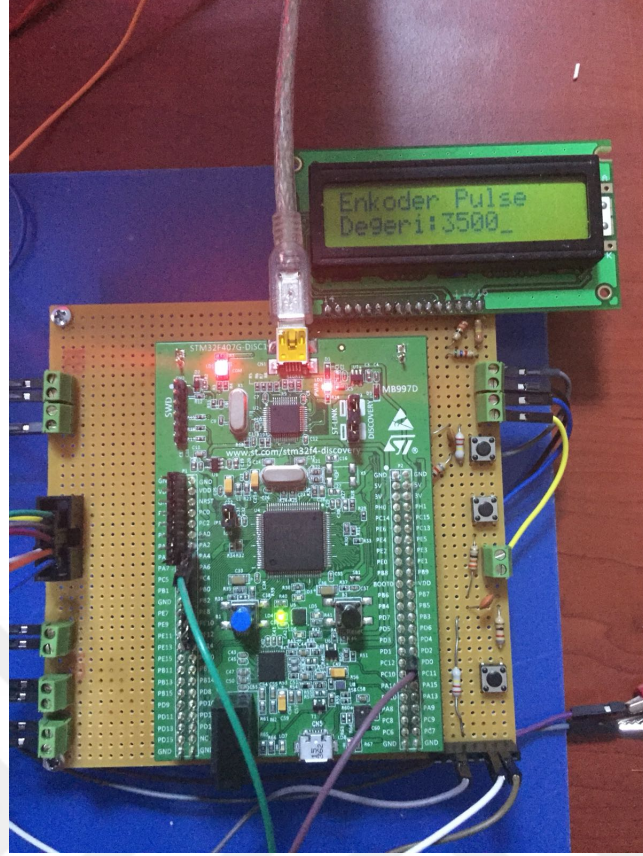
Şekil 5.16. 1600 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi



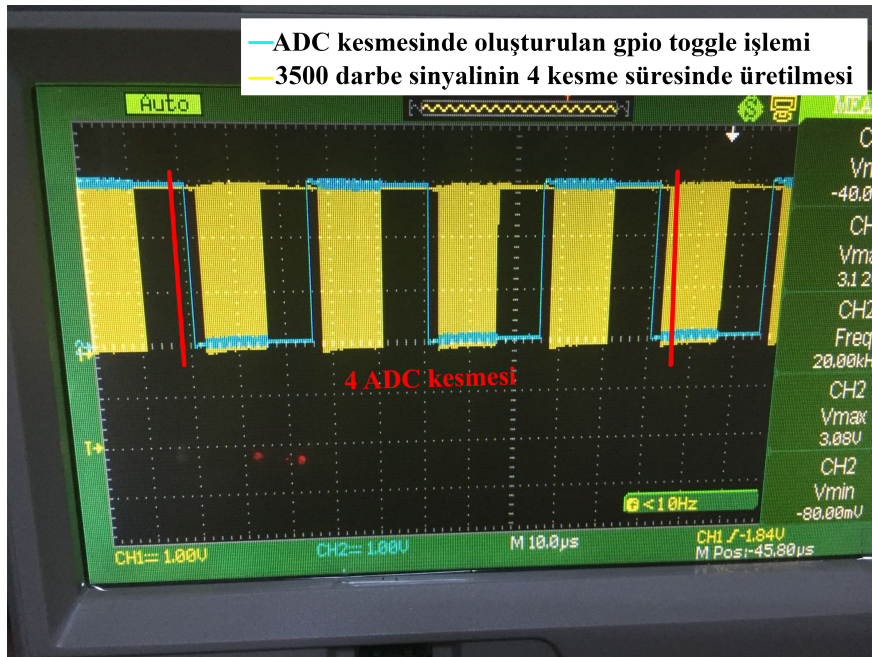
Şekil 5.17. 2500 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması



Şekil 5.18. 2500 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi



Şekil 5.19. 3500 Darbe/Tur Değerine Ayarlanması



Şekil 5.20. 3500 Darbe/Tur Değerinin Osiloskop Ekranında Gösterilmesi

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1. Sonuçlar

Analog elektronik tabanlı tasarım TÜBİTAK destekli olarak tez çalışmasından önce tamamlanmıştır ve bu projede aktif olarak görev alınmıştır. Proje kapsamında ortaya çıkan bilgi ve birikim tez çalışması için bir girdi oluşturmuştur. Kapasitif rotary enkoderin hem analog elektronik tabanlı tasarımı hem de sayısal elektronik tabanlı tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir.

MATLAB ve mikrodenetleyici tabanlı tasarım sonucunda, açısal pozisyon bilgisini analog çıkış olarak üretebilen ve enkoderin bir turdaki darbe/tur oranının 0-3500 arası değişken olarak kullanılabilceği opsiyonel bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım sayesinde kullanıcı, uygulama yapılacak alanın ihtiyacına binaen bir turda kaç pals çıkış alması gerekiyorsa o değerleri set etmesine imkan sağlanmıştır. Bu esneklik başta robotik olmak üzere pek çok alanda kullanım zenginliği sunmuştur.

Bu projenin sonunda başka akademik çalışmalar için zemin teşkil edecek olan kazanımlar da elde edilmiştir. Bunlar; analog elektronik tabanlı tasarım süreçlerinde karşılaşılan problemlere getirilen çözümler sayısal elektronik tabanlı tasarımın önünü açacak nitelikte olmuştur. Nitekim analog elektronik tabanlı tasarımın mekanik yapısı ve 24 V gerilimden +5, -5, +12 ve -12V gibi gerilim dönüştüren devre tasarımının kullanılması sayısal elektronik tabanlı tasarım süreçlerine fayda sağlamıştır. Sayısal elektronik tabanlı tasarımda ADC1 çevresel biriminde karşılaşılan problem farklı bakış açılarıyla ele alınarak başka çalışmalara yönlendirmiş ve benzer süreçler ile öngörüle bulunmaya fayda sağlamıştır.

Sayısal elektronik mikrodenetleyici tabanlı tasarımda sensör geometrisi ve elektrot tasarımlarından ziyade yazılım temelli konulara odaklanılmıştır. MATLAB ortamında elektrotlar üzerinde oluşan sinyallerin üretilmesi, elektrotların fark alma işlemlerinin yapılması, modülasyon, çift yan bant demodülasyon gibi algorit-

mayla alakalı testler tamamlanmıştır. MATLAB ortamında elde edilen sonuçlarda sonra geliştirilen yazılımı STM32F4 serisi mikrodenetleyiciye uygulanma süreci başlamıştır. Mikrodenetleyici için kod üreten STM32CubeMX yazılımı hakkında gerekli tecrübeler kazanılmıştır. Mikrodenetleyicinin çevresel birimlerinin kullanımına dair tecrübe ve kazanımlar elde edilmiştir. Genel amaçlı olarak yer alan ADC, DAC, PWM, TIM gibi çevresel birimler kapasitif rotary enkoder projesi için özelleştirilerek uygulanmıştır. Donanım üzerindeki gelişmelere ilave olarak yazılım alanında modülasyon, çift yan bant demodülasyon gibi süreçlerde de geliştirmeler sağlanmıştır.

## 6.2. Öneriler

ADC örnekleme oranlarının MHz'ler seviyesine çıkması nedeniyle yüksek çözünürlük, hassasiyet ve hız gerektiren dönüşümlerde FPGA tabanlı tasarımlar oldukça makul sonuçlar verdiği için FPGA tabanlı uygulamaların sayısal elektronik tabanlı uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılması bir öneri olarak sunulabilir.

Açısal pozisyon bilgisini kullanıcıya aktarma alanında, yapılacak çalışmalar için rotary enkoderler için bir standart haline gelen SSI haberleşme protokolünün kullanılması yararlı olacaktır.

Kapasitif rotary enkoder süreçlerinden olan demodülasyon yöntemi olarak ise literatür araştırmaları neticesinde quadrature demodülasyon tercih edilmesiyle bazı avantajların elde edileceği öngörülmüştür. Özellikle üretim aşamalarında meydana gelen hataların ve dış ortam şartları etkisini azaltmada fayda sağlayabileceği düşünülmektedir.

Kapasitif rotary enkoder demodülasyon ve alçak geçiren filtre yöntemlerine ek olarak literatürde karşılaşılmaya başlanan bir algoritma ise CORDIC(Coordinate Rotational Digital Computer) algoritmasıdır. Alçak geçiren filtrenin uygulanmasından sonra arctan fonksiyonu kullanmak yerine CORDIC algoritması ile dış ortama açısal pozisyon bilgisini aktarmak bir öneri olarak sunulabilir.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda; özellikle doktora alanında, sayısal elektronik FPGA tabanlı tasarıma, quadrature demodülasyon tekniğine, açısal pozisyon bilgisini üretmek için CORDIC algoritmasının kullanılmasına ve açısal pozisyon bilgisinin endüstriyel bir haberleşme standardı olan SSI ile üretilmesi

alanına odaklanılması hedeflenmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] G. Brasseur. A capacitive 4-turn angular-position sensor. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 47(1):275–279, 1998.
- [2] F. Kimura, M. Gondo, A. Yamamoto, and T. Higuchi. Resolver compatible capacitive rotary position sensor. In *Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE*, pages 1923–1928. IEEE, 2009.
- [3] D. Zheng, S. Zhang, S. Wang, C. Hu, and X. Zhao. A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 64(1):143–153, 2015.
- [4] M. Gasulla, X. Li, G. C. Meijer, L. Van der Ham, and J. W. Spronck. A contactless capacitive angular-position sensor. *IEEE Sensors journal*, 3(5):607–614, 2003.
- [5] T. Fabian and G. Brasseur. A robust capacitive angular speed sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 47(1):280–284, 1998.
- [6] B. Hou, B. Zhou, M. Song, Z. Lin, and R. Zhang. A novel single-excitation capacitive angular position sensor design. *Sensors*, 16(8):1196, 2016.
- [7] D. Zheng, S. Zhang, Y. Zhang, and C. Fan. Application of cordic in capacitive rotary encoder signal demodulation. In *Instrumentation and Control Technology (ISICT), 2012 8th IEEE International Symposium on*, pages 61–65. IEEE, 2012.
- [8] V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, and A. Taroni. Capacitive angular-position sensor with electrically floating conductive rotor and measurement redundancy. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 55(2):514–520, 2006.
- [9] R. Kennel et al. New developments in capacitive encoders for servo drives. In *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2008.

*SPEEDAM 2008. International Symposium on*, pages 190–195. IEEE, 2008.

- [10] Application notes. <http://netzerprecision.com/wp-content/uploads/2016/07/Electrical-Encoder-concept-2016-03.pdf>. Accessed: 2018-05-05.
- [11] G. Brasseur. Design rules for robust capacitive sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(4):1261–1265, 2003.
- [12] M. Kirchhoff, C. Boese, J. Güttler, M. Feldmann, and S. Büttgenbach. Innovative high-precision position sensor systems for robotic and automotive applications. *Procedia chemistry*, 1(1):501–504, 2009.
- [13] M. Karali, A. Karasahin, O. Keles, M. Kocak, and M. Erismis. A new capacitive rotary encoder based on analog synchronous demodulation. *Electrical Engineering*, pages 1–9, 2018.
- [14] A. Yamamoto, T. Niino, and T. Higuchi. Modeling and identification of an electrostatic motor. *Precision Engineering*, 30(1):104–113, 2006.
- [15] N. Gaurav and S. Pal. Design, development and testing of a semicircular type capacitive angular position sensor. *Sensors & Transducers*, 129(6):16, 2011.
- [16] D. Karaçor. *Uydulararası ve Uydudan Yere Laser İle İletişim İçin Tasarım Parametreleri*. PhD thesis, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [17] A. Heidary. *A low-cost universal integrated interface for capacitive sensors*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2010.
- [18] Z. D. Z. S. Zhang, L. Realization of absolute capacitive rotary encoder system based on capacitive gate technology. *Communications in Control Science and Engineering (CCSE)*, 4(1):30–35, 2016.
- [19] Arm processors. <https://www.arm.com/products/processors>. Accessed: 2018-06-05.

- [20] İ. KIRBAŞ and M. E. YÜKSEL. Arm tabanlı gömülü sistemlere yönelik açık kaynak kodlu bulut bilişim uygulaması: mbed platformu. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2):74–81, 2015.
- [21] J. W. Valvano. *Embedded microcomputer systems: real time interfacing*. Cengage Learning, 2011.
- [22] J. W. Valvano. *Embedded Systems*. Jonathan W. Valvano, 2015.
- [23] Stm32f4 discovery board. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>. Accessed: 2018-04-05.
- [24] Stm32f4 discovery board top layout. <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>. Accessed: 2018-04-05.
- [25] A. T. Karasahin and M. Karali. Çift yan bant modülasyon ve demodülasyona dayalı kapasitif rotary enkoder. *International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies SETSCI Conference Indexing System*, 2(1):456–459, 2018.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı : ALİ TAHİR KARAŞAHİN**

**Uyruğu : T.C.**

**Doğum Yeri ve Tarihi :KONYA 1992**

**Telefon :+905547517907**

**Faks :**

**e-mail : atahirkarasahin@gmail.com**

## EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	Selçuklu Anadolu Teknik Lisesi	2010
Üniversite	Karabük Üniversitesi,	2015
Yüksek Lisans	Karabük Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya	2015-

## İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-halen	Konya Büyükşehir Belediyesi	Trafik Sinyalizasyon

## UZMANLIK ALANI

Robotik, Gömülü yazılım geliştirme, Yapay zeka optimizasyon algoritmaları

## YABANCI DİLLER

İngilizce (Orta)

## YAYINLAR

- Karasahin A.T, Balcı B., 2013, Üç Faz Sürücü ile Bir Fazlı 3 Asenkron Motorun Plc Denetimli Çalıştırılması, Atılım Üniversitesi 4. Ulusal Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi. 27-32.
- Karasahin A.T, Menşur C., Ünlü E., Tekin Ö., Karakaya S., Şentürk S., 2014, Ukap: Akıllı Atış Platformu Mekanik Tasarımı ve İmalatı, Atılım Üniversitesi 5. Ulusal Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi. 23-30.
- Karasahin A.T, Yürük Y.H., 2015, Modüler Ürün Ayrıştırma Otomasyonu, Atılım Üniversitesi 6. Ulusal Mekatronik Mühendisliği Öğrenci Kongresi, 164-168.
- M. Karali, A. T. Karasahin, O. Keles, , M. Kocak, M. A. Erismis, 2018, “A new capacitive rotary encoder based on analog synchronous demodulation”, Electronics & Electrical Engineering, (DOI: ELEN-D-17-00552R1)
- Karasahin A.T, Karalı M., 2018, Çift Yan Bant Modülasyon ve Demodülasyona Dayalı Kapasitif Rotary Enkoder, 1. Uluslararası Bilimsel Çalışmalarda Yenilikçi Yaklaşımlar Sempozyumu, 410-414(Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır).