

**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİLİKÇİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI KAPASİTİF DÖNER**  
**ENKODER GELİŞTİRİLMESİ**

**Emrehan YAVŞAN**

**DOKTORA TEZİ**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Ekim - 2020**

**KONYA**

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Emrehan YAVŞAN tarafından hazırlanan "YENİLİKÇİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI KAPASİTİF DÖNER ENKODER GELİŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması 15/10/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Oktay ALTUN

\_\_\_\_\_

#### Danışman

Prof. Dr. Mehmet KARALI

\_\_\_\_\_

#### Üye

Doç. Dr. İlhan İLHAN

\_\_\_\_\_

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN

\_\_\_\_\_

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

\_\_\_\_\_

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN

FBE Müdürü

Bu tez çalışması Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 191419007 nolu proje ile TÜBİTAK tarafından 2211-C yurt içi öncelikli alanlar doktora burs programı kapsamında 1649B031907024 başvuru numarasıyla desteklenmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## **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.

---

Emrehan YAVŞAN

Tarih: 15/10/2020

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### YENİLİKÇİ VE YÜKSEK PERFORMANSLI KAPASİTİF DÖNER ENKODER GELİŞTİRİLMESİ

Emrehan YAVŞAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet KARALI

2020, 101 Sayfa

#### Jüri

Prof. Dr. Mehmet KARALI

Doç. Dr. İlhan İLHAN

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Oktay ALTUN

Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE

Enkoderler pozisyon bilgisine ulaşılması gereken uygulamalarda akla ilk gelen kritik geri besleme elemanlarıdır. Kapasitif algılayıcı teknolojisiyle çeşitli alanlara kolayca uyarlanabilen enkoderler geliştirilebilir. Böylece uygulamaya özel algılayıcı ihtiyacı azaltılabilir. Bu çalışmada minimalist tasarım, yüksek kazanç, esnek kullanım ve uygulanabilirlik kaygısıyla yenilikçi ve yüksek performanslı bir kapasitif enkoder geliştirilmiştir.

Kapasitif enkoder çalışmalarının çoğunda geliştirme sürecinin baştan sona işletilmediği ve aktarılmadığı görülmüştür. Yine bu çalışmalarda yüksek maliyetli düzenekler ve elektronik devre elemanları kullanılarak geliştirilen uygulanabilirlikten uzak kapasitif enkoderlere rastlanmıştır. Burada ise kapasitif enkoder geliştirme süreci, algılayıcı mekaniğinden elektroniğine genel bir mimari içinde değerlendirilerek ayrıntılarıyla sunulmuştur. Kapasitif enkoderin minimalist tasarımı

korunarak algılayıcı mekaniğinde yapılan yenilikle yüksek kazanç sağlanmıştır. Algılayıcı elektroniği olabildiğince dijitalleştirilerek kapasitif enkodere esneklik kazandırılmış ve enkoderin performansı artırılmıştır. Uygun fiyatlı düzeneklerle az sayıda analog devre elemanı kullanılarak maliyet düşürülmüş, sinyal-gürültü oranı artırılmış ve minimalist tasarım desteklenmiştir. Geliştirilen kapasitif enkoder, endüstriyel bir motorda test edilerek uygulanabilirlik sağlanmıştır.

Sunulan kapasitif enkoder geliştirme sürecinde ayrıntılı tasarım, başarılı modelleme, kombine üretim ve test aşamalarından geçilerek ticari ürüne yakın bir prototip ortaya konmuştur. Modelleme aşamasında mevcut çalışmalardaki yaygın kullanımın aksine elektrotlar arası boşluk parametresinde ilgi çekici sonuçlara rastlanmıştır. Bu parametrenin enkoder kazancını optimum yapan sıfırdan farklı bir değerinin olduğu, yapılan araştırmalara göre ilk defa bu çalışmayla gösterilmiştir. Kapasitif enkoder, sıfırdan kurulan uygun fiyatlı ve hassas test düzeneğinde çeşitli testlerden geçirilerek %0.26 doğrusallık hatası ve  $0.02^{\circ}$  çözünürlük değerlerine ulaşılmıştır. Doğrusallık hatası, önerilen hata indirgeme yöntemiyle %0.12'ye düşürülmüştür. Bu çalışmayla ulusal en performanslı kapasitif enkoderin geliştirilmesinin yanında benzer tip algılayıcıların geliştirilebilmesi için de rehber niteliğinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Açısal pozisyon ölçümü, modülasyon, kapasitif enkoder, kapasitans ölçümü, kapasitif algılayıcı tasarımı.

# **ABSTRACT**

## **Ph.D THESIS**

### **DEVELOPMENT OF INNOVATIVE AND HIGH-PERFORMANCE CAPACITIVE ROTARY ENCODER**

**Emrehan YAVŞAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE  
OF NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHATRONICS  
ENGINEERING**

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

**2020, 101 Pages**

#### **Jury**

**Advisor Prof. Dr. Mehmet KARALI**

**Assoc. Prof. Dr. İlhan İLHAN**

**Asst. Prof. Dr. Hüseyin DOĞAN**

**Asst. Prof. Dr. Hüseyin Oktay ALTUN**

**Asst. Prof. Dr. Barış GÖKÇE**

Encoders are critical feedback elements in applications where position information is required. Capacitive encoders can easily be adopted to various applications where other encoder types are currently in use. In this way, the use of application-specific sensors can be reduced. In this paper, an innovative and high performance capacitive encoder has been developed with the motivation of miniaturized design, high gain, flexibility and applicability. The flexibility and performance of the capacitive encoder have been increased by digitizing the sensor electronics as much as possible.

It is seen that a generic design method for the capacitive encoders is lacking in most of the studies in the literature. In this study, a generic design method is constructed to fill this gap. In the development process presented here, the capacitive encoder was evaluated within a general architecture from sensor mechanics to electronics. By protecting the miniaturized design of the capacitive encoder, high gain has been achieved with the innovation in sensor mechanics. By using affordable mechanical setups and a minimum number of analog circuit elements, the cost was reduced, the signal-to-noise ratio was increased, and miniaturized design was supported. The capacitive encoder developed in this study has been applied to an industrial motor to ensure applicability.

During the presented capacitive encoder development process, detailed design, successful modeling, combined production and testing phases were passed and a prototype close to a commercial product was achieved. In the modeling phase, non-intuitive results were obtained about the inter-electrode gap parameter contrary to the common belief based on recent research. According to the literature research, this study has shown for the first time that the inter-electrode gap parameter has a non-zero value that maximizes the gain. The capacitive encoder was tested in a low cost and precise test setup built from scratch and reached 0.26% non-linearity error and 0.02° resolution values. The non-linearity error has been reduced to 0.12% with the proposed error minimization algorithm. With this study, besides the development of the national highest performance capacitive encoder, a guide was carried out for the development of similar type sensors.

**Keywords:** Angular position measurement, modulation, capacitive encoder, capacitance measurement, capacitive sensor design.

## TEŞEKKÜR

Başta ailem olmak üzere lisansüstü eğitimim süresince beni yalnız bırakmayan ve yardımcı olan herkese teşekkür ederim. Bu süreci kolaylaştıran ve güzelleştiren, keyifli anlar paylaştığım tüm sevdiklerime de yanımda oldukları için ayrıca teşekkür etmek istiyorum. Burada beni destekleyen herkesin ismini vermem zor olsa da birkaçını belirtmek isterim.

Doktora sürecimin her aşamasında yanımda olan, yardımlarını esirgemeyen ve tecrübelerini paylaşmaktan çekinmeyen, birlikte çalışmaktan çok keyif aldığım ve her zaman memnuniyet duyacağım saygıdeğer danışmanlarım Prof. Dr. Mehmet KARALI ve Prof. Dr. Mehmet Akif ERİŞMİŞ'e kıymetli yönlendirmeleri ve içten yaklaşımları için teşekkür ederim. Tez izleme toplantılarımızda olduğu gibi bu toplantılar dışında da beni sabırla dinleyen ve istekli bir şekilde çalışmalarına katkıda bulunmaya çalışan Doç. Dr. İlhan İLHAN ve Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin DOĞAN'a bu tezin şu anki aşamaya gelmesini sağladıkları için teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte kendisiyle çalışma fırsatı bulduğum Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Oktay ALTUN'a ayırdığı kaliteli ve samimi zamanlar için teşekkür ederim. Yoğun ama bir o kadar keyifli çalışmalarımızı unutmayacağım. Gömülü sistem uygulamaları konusunda çokça faydalandığım, buradaki çalışmalarım dışındaki sorularına da ilgiyle cevap veren Dr. Öğr. Üyesi Barış GÖKÇE'ye teşekkür ederim.

Özellikle analog devre çözümleri konusunda bu tezin gelişimine katkı sağlayan ve ortak çalışmalar yürüttüğümüz Muhammet Rojhat KARA'ya, tez çalışmamın üretim ve test süreçlerinde olabildiğince bana eşlik etmeye çalışan ve keyifli bir çalışma ortamı sağlayan laboratuvar ekibimize teşekkür ederim.

Doktora tez projesi kapsamında 191419007 proje numarasıyla çalışmalarımı destekleyen Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne ve yurt içi öncelikli alanlar doktora burs programı kapsamında 1649B031907024 başvuru numarasıyla tarafıma burs sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu sürecin en yakın şahidi ve destekçisi eşim Zeynep Şeyda'ya sabırla ve sevgiyle yanımda olduğu için özellikle teşekkür etmek istiyorum. Abisi olmaktan her zaman gurur duyduğum ve ihtiyacım olduğu her an yanımda olan kardeşim Hasan'a, bugünlere ulaşmamdaki en büyük pay sahipleri, hayatlarını kardeşim ve bana adayan annem Fatma ve babam Nedim YAVŞAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	xv
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Kapasitif Enkoder Teknolojisi .....	1
1.2. Kaynak Araştırması .....	3
1.3. Kapasitif Enkoderlerin Sınıflandırılması .....	7
1.4. Rotor Plakaların Elektriksel Analizi .....	10
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	13
2.1. Kapasitif Enkoder Tasarımı .....	13
2.1.1. Kapasitif enkoder mekaniğinin belirlenmesi .....	13
2.1.1.1. Yenilikçi tip enkoder mekaniği .....	13
2.1.1.2. Önerilen rotor plakaları .....	15
2.1.1.3. Enkoder mekaniğinin modellenmesi .....	17
2.1.1.4. Önerilen rotor plakalarının şekil ve desen analizi .....	18
2.1.1.5. Sunulan enkoder mekaniği .....	19
2.1.2. Tetikleme sinyallerinin belirlenmesi .....	20
2.1.3. Demodülasyon devresinin belirlenmesi .....	23
2.2. Kapasitif Enkoder Modeli .....	24
2.2.1. Açısal dönüşüm işlem modeli .....	28
2.2.2. Performans kriterleri .....	28
2.2.2.1. Kazanç .....	29
2.2.2.2. Doğrusallık hatası .....	29
2.2.3. Anahtar parametrelerin kapasitif enkoder performansına etkileri .....	30
2.3. Kapasitif Enkoder Üretimi .....	34

2.3.1. Analog devrenin gerçekleştirilmesi .....	35
2.3.1.1. Analog ön devrenin kurulumu .....	36
2.3.1.2. Analog son devrenin kurulumu .....	37
2.3.2. Kapasitif enkoder mekaniğinin gerçekleştirilmesi .....	37
2.3.2.1. Kapasitif enkoder plakalarının tasarımı ve üretimi .....	39
2.3.2.2. Kapasitif enkoder test düzeneğinin kurulumu .....	43
2.3.3. Dijital devrenin gerçekleştirilmesi .....	50
2.3.3.1. Demodülasyon devresinin uygulanması .....	51
2.3.3.2. Açısal dönüşüm işlemlerinin uygulanması .....	54
<b>3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>57</b>
3.1. Kapasitif Enkoder Testleri .....	57
3.1.1. Dinamik test.....	57
3.1.1.1. Hız testleri ve doğrusallık hatasının ölçümü .....	57
3.1.1.2. Doğrusallık hatasının analizi ve indirgenmesi .....	59
3.1.2. Durağan test.....	60
3.2. Üretim ve Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....	62
3.2.1. Sunulan kapasitif enkoder modeli üzerinden değerlendirme .....	62
3.2.2. Hedeflenen kriterler üzerinden değerlendirme .....	63
<b>4. SONUÇLAR .....</b>	<b>70</b>
<b>5. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>75</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>82</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Çeşitli kapasitif enkoderler .....	2
1.2 Kapasitif enkoderler için genel algılama süreci .....	3
1.3 Tip-1 kapasitif enkoderin üstten görünüşü .....	7
1.4 Kapasitif enkoder tipleri .....	9
1.5 Kapasitif enkoderlerde kullanılan çeşitli rotor plakaları .....	10
1.6 Elektriksel geçirgenlikleri farklı olan rotorların üç katmanlı kapasitif enkoder yapılarında kullanılması .....	11
1.7 Elektriksel geçirgenlikleri farklı olan rotorların karşılaştırılması .....	12
2.1 Kapasitif enkoderlerin stator plakalarına yerleştirilen elektrot dizilerinin rotor desenleriyle örtüşmeleri .....	14
2.2 Yenilikçi tip kapasitif enkoder plakaları arasında oluşan kapasitanslar .....	14
2.3 Yenilikçi tip kapasitif enkoder için önerilen çeşitli desenlerdeki rotor plakaları ...	16
2.4 Temel rotor parametreleri .....	17
2.5 Kapasitif enkoder plakalarının örtüşme alanlarının kutupsal koordinatlardaki eğrilerle sınırlandırılan alanlarla ifade edilmesi .....	18
2.6 Genel hatlarıyla yenilikçi kapasitif enkoder mekaniği .....	20
2.7 Yenilikçi tip enkoderin kapasitans eş devresi .....	21
2.8 Çoklu tetikleme sinyallerinin avantajı .....	22
2.9 Senkron demodülasyon yönteminin blok şeması .....	24
2.10 Kapasitif enkoder plakalarının karşılıklı yüzeylerinin örtüşmeleri .....	25
2.11 Modellenen kapasitif enkoderin plakaları arasındaki kapasitansların rotor hareketine bağlı değişimleri .....	26
2.12 Modellenen kapasitif enkoderin çıkış sinyalleri .....	27
2.13 Modellenen kapasitif enkoderin çıkışları üzerinden elde edilen bilgi sinyalleri ....	28
2.14 Modellenen kapasitif enkoderin bir tam turu için hesaplanan açı değerleri .....	29
2.15 Modellenen kapasitif enkoderden elde edilen açı değerleri ve beklenen açı değerleri .....	30
2.16 Kutup sayısının kazanç ve doğrusallık hatası üzerindeki etkisi .....	31
2.17 Kutup sayısının ve elektrotlar arası boşluğun hatalar üzerindeki etkileri .....	33

2.18	Çeşitli kutup sayıları için elektrotlar arası boşluk parametresinin kazanç üzerindeki etkisinin doğrulanması .....	34
2.19	Kapasitif enkoder mimari bileşenlerinin uygulanış biçimlerine göre ayrılması ....	35
2.20	Analog ön devrenin blok şeması .....	36
2.21	Analog ön devrenin geliştirilmesi sürecinde elde edilen tetikleme sinyalleri .....	37
2.22	TLV906 opamp entegreleri kullanılarak kurulan analog devre .....	38
2.23	Kapasitif enkoder plakalarının üretiminde denenilen yöntemler .....	40
2.24	Kapasitif enkoder mekaniği için sunulan prototip tasarımlar ve bu tasarımların gerçekleştirilmesi .....	41
2.25	Kapasitif enkoderin stator ve rotor plakalarının çizimleri ve PCB tasarımları .....	42
2.26	Hassas üretim teknolojileriyle üretilen kapasitif enkoder plakaları .....	43
2.27	Kapasitif enkoder test düzeneğinin kurulum süreci .....	44
2.28	Kapasitif enkoder test düzeneğinde kullanılan tahrik elemanları .....	45
2.29	Kapasitif enkoder test düzeneğinin enkoderin çıkış sinyalleri üzerinden gelişimi .	46
2.30	Kapasitif enkoder çalışmalarındaki test düzeneklerinden bazıları .....	47
2.31	Geliştirilen kapasitif enkoderin çıkış sinyallerinin literatürdeki diğer bir çalışmayla karşılaştırılması .....	48
2.32	Kapasitif enkoder test düzeneği ve bileşenleri .....	49
2.33	Kapasitif enkoderin çıkış sinyallerindeki gürültülerin enkoderin iletken muhafaza içerisine alınıp topraklanmasıyla düşürülmesi .....	50
2.34	Demodülasyon devresi gerçekleştirilirken uygulanan işlem adımları .....	51
2.35	Kapasitif enkoder çıkışındaki AM sinyallere BPF uygulanması .....	52
2.36	BPF çıkışındaki AM sinyallere LPF uygulanması ve kalibrasyon işlemleriyle sinyaller arasındaki uyumun sağlanması .....	53
2.37	Dijital elektronik devrenin zaman diyagramı .....	55
2.38	Üretilen kapasitif enkoderle 50 rpm'deki motordan ölçülen açı değerleri .....	55
2.39	Açısal dönüşüm işlemlerinde takip edilen akış şeması .....	56
3.1	Çeşitli motor devirlerinde yapılan hız testleri .....	58
3.2	Üretilen kapasitif enkoderle 150 rpm'deki motorun bir tam turu için ölçülen ve beklenen mekanik açı değerleri .....	59
3.3	Dinamik testle doğrusallık hatasının ölçümü .....	60
3.4	Doğrusallık hatasının indirgenmesi .....	61

3.5	Durağan haldeki motor üzerinden kapasitif enkoderle ölçülen mekanik açı değerleri .....	62
3.6	Üretilen kapasitif enkoder ile modellenen kapasitif enkoderin karşılaştırılması ...	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yenilikçi tip kapasitif enkoder için önerilen rotor plakalarının karşılaştırılması ...	19
2.2 Kapasitif enkoder mimarisinin modellenmesinde kullanılan rotor plakası ve tasarım parametrelerinin başlangıç değerleri .....	25
2.3 Kapasitif enkoder modeli üzerinden yapılan performans analiziyle güncellenen ve enkoderin üretiminde kullanılacak olan parametreler .....	33
3.1 Sunulan kapasitif enkoderin çeşitli enkoderlerle karşılaştırılması .....	67

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

- $A$  : Kapasitansı oluşturan plakaların örtüşme alanı
- $A_1$  : Kutupsal koordinatlarda tek eğriyle sınırlanan kapalı alan
- $A_2$  : Kutupsal koordinatlarda çift eğriyle sınırlanan kapalı alan
- $A_e$  : Tetikleme sinyal genliği
- $A_{rc}$  : Rotor eğri genliği
- $\alpha$  : Alfa açısı
- $\beta$  : Beta açısı
- $C$  : Kapasitans
- $C_{AB}$  : Stator plakaları arasında oluşan kapasitans
- $C_{AR}$  : Stator ile rotor plakası arasında oluşan kapasitans
- $C_A$  :  $A$  indisli değişken kapasitans
- $C_B$  :  $B$  indisli değişken kapasitans
- $C_C$  :  $C$  indisli değişken kapasitans
- $C_D$  :  $D$  indisli değişken kapasitans
- $C_O$  :  $O$  indisli sabit kapasitans
- $C_i$  : İletken rotorlu kapasitif enkoderin plakaları arasındaki eş değer kapasitans
- $C_R$  : Yalıtkan rotor plakasının oluşturduğu kapasitans
- $C_{RB}$  : Rotor plakasıyla stator plakası arasında oluşan kapasitans
- $C_t$  : Topraklanmış rotorlu kapasitif enkoderin plakaları arasındaki eş değer kapasitans
- $C_y$  : Yalıtkan rotorlu kapasitif enkoderin plakaları arasındaki eş değer kapasitans
- $\Delta C$  : Kapasitans değişimi
- $d$  : Kapasitansı oluşturan plakalar arasındaki mesafe
- $E_O$  : Alıcı elektrot kalınlığı
- $\epsilon$  : Dielektrik sabiti
- $\epsilon_r$  : Rotor plakasının dielektrik sabiti
- $\epsilon_o$  : Havanın dielektrik sabiti
- $f_c$  : Tetikleme sinyal frekansı
- $f_s$  : Örnekleme frekansı
- $G$  : Kazanç performans kriteri
- $g$  : Elektrotlar arası boşluk

$i_{ac}$	: Stator-1 ile rotor arasındaki kapasitif devre akımı
$i_{bd}$	: Stator-2 ile rotor arasındaki kapasitif devre akımı
$i_t$	: Toplam akım
$K$	: Sabit katsayı
$L$	: Kapasitif enkoderin plaka uzunluğu
$N$	: Kutup sayısı
$pp$	: Tepeden tepeye genlik
$\phi$	: Rotor dönme açısı
$\phi_a$	: Artık açısı
$\phi_e$	: Elektriksel açısı
$\phi_{em}$	: Elektromekanik açısı
$R$	: Rotor eğri yarıçapı
$r(\theta)$	: Tek eğrili rotor desen konturu
$r_1(\theta)$	: Çift eğrili rotor deseninin dış konturu
$r_2(\theta)$	: Çift eğrili rotor deseninin iç konturu
$R_f$	: Geri besleme direnci
$r_i$	: İç yarıçap
$r_o$	: Dış yarıçap
$s(t)$	: Kapasitif enkoder çıkış sinyali
$t$	: Zaman değişkeni
$t_{ts}$	: Toplam işlem süresi
$t_{gs}$	: Güvenlikli çalışma süresi
$\theta$	: Kutupsal koordinat değişkeni
$V$	: Gerilim
$v_{ac}$	: Stator-1 üzerinden alınan çıkış gerilimi
$v_{bd}$	: Stator-2 üzerinden alınan çıkış gerilimi
$v_o$	: Çıkış gerilimi
$w$	: Omega
$w_e$	: Enkoder plaka genişliği
$x$	: Rotor plakasının birim ilerlemesi
$x(t)$	: Orijinal bilgi sinyali
$y(t)$	: Demodüle edilmiş bilgi sinyali

### **Kısaltmalar**

AC (Alternate Current)	: Alternatif Akım
ADC (Analog-Digital Converter)	: Analog-Dijital Dönüştürücü
AM (Amplitude Modulation)	: Genlik Modülasyon
BPF (Band Pass Filter)	: Bant Geçiren Filtre
CNC (Computer Numerical Control)	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
DC (Direct Current)	: Doğru Akım
DAC (Digital-Analog Converter)	: Dijital-Analog Dönüştürücü
DMA (Direct Memory Access)	: Doğrudan Hafızaya Erişim
DSB (Double Sideband)	: Çift Yan Bant
FPGA (Field Programmable Gate Array)	: Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
LPF (Low Pass Filter)	: Alçak Geçiren Filtre
MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)	: Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler
PCB (Printed Circuit Board)	: Baskı Devre Kartı
PPR (Pulses Per Revolution)	: Devir Başına Düşen Darbe Sayısı
PWM (Pulse Width Modulation)	: Darbe Genişlik Modülasyonu
REF (Reference)	: Referans
SNR (Signal to Noise Ratio)	: Sinyal Gürültü Oranı
TIM (Timer)	: Zamanlayıcı

# 1. GİRİŞ

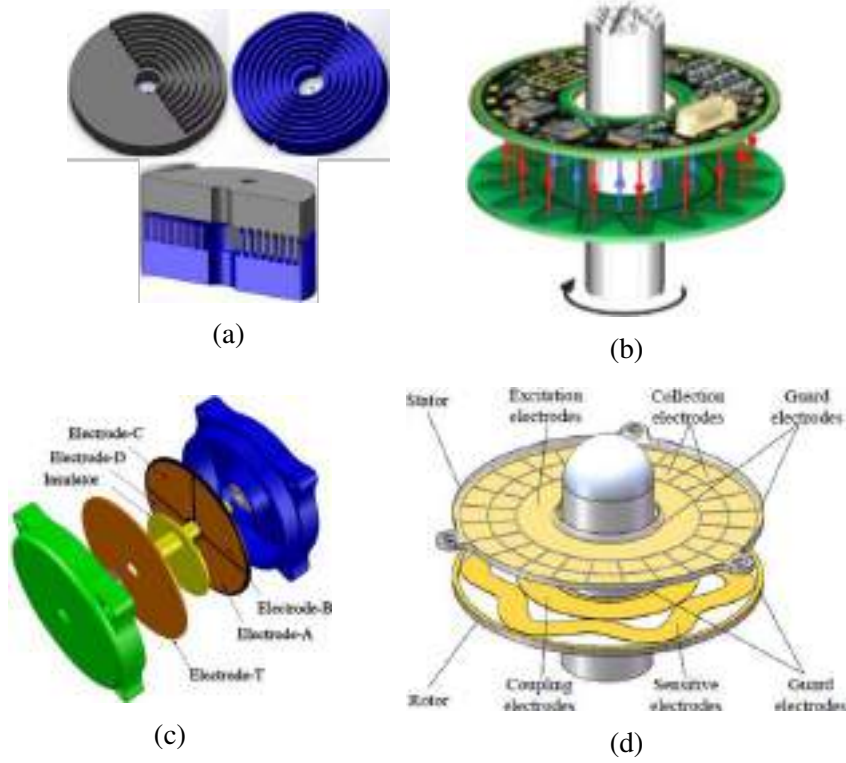
## 1.1. Kapasitif Enkoder Teknolojisi

Enkoderler, bağılı oldukları milin dönme açısıyla orantılı bir çıkış sinyali üretirler. Bu özelliklerinden dolayı dönme hareketinin gerçekleştiği ve açısal pozisyon ya da hız bilgisine ihtiyaç duyulan hemen hemen her uygulamada geri bildirim elemanı olarak kullanılabilirler [1, 2]. Üç farklı döner enkoder teknolojisi bulunmaktadır. Bunlardan ilki 1930'lu yıllarda ortaya çıkmış olan manyetik enkoder teknolojisidir [3–6]. 1950'li yıllara gelindiğinde optik enkoderler üretilmeye başlanmıştır [7–10]. Kapasitif enkoder teknolojisi ise 2000'li yıllarda ortaya atılmıştır.

Kapasitif enkoder teknolojisi enkoder teknolojileri arasında en güncel, gelişime açık ve halen geliştirilmekte olan bir teknolojidir [11, 12]. Kapasitif teknolojiyle enkoderler çözünürlük değerlerinden ödün verilmeden çok küçük boyutlarda veya çeşitli şekillerde üretilebilir [13–16]. Bu sayede farklı uygulama alanlarına kolayca uyarlanabilen ve esnek kullanıma sahip enkoderler geliştirilebilir. Aynı durum optik ve manyetik enkoder teknolojileri için geçerli değildir. Kapasitif enkoderler diğer teknolojilere göre elektromanyetik alandan ve sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenirler. Güç tüketimleri ve maliyetleri daha düşüktür. Üretimleri nispeten daha kolaydır ve kullanım ömürleri uzundur. Robotik, otomotiv, aviyonik, sağlık ve savunma gibi farklı alanlara kolayca uyarlanabildiklerinden çalışma sahaları geniştir [17–22].

Kapasitif enkoderlerdeki algılama, enkoder plakaları arasında oluşan kapasitansların ölçülmesine dayanır. Kapasitif enkoderlerin hareketsiz şekilde sabit duran plakalarına stator, hareketli plakalarına ise rotor adı verilir. Çeşitli stator ve rotor plakaların kullanıldığı kapasitif enkoderler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 1.1'de verilmiştir.

Kapasitif enkoderlerdeki algılama süreci, tetikleme sinyallerinin enkoder plakalarına uygulanması sonrasında enkoder çıkışında oluşan genlik modülasyonlu sinyalin demodülasyonunun yapılması şeklinde özetlenebilir. Süreç, tetikleme sinyallerinin kapasitif



**Şekil 1.1. Çeşitli rotor desenlerinin ve katman sayılarının tercih edildiği kapasitif enkoderler. (a) Stator ve rotor plakalarından oluşan çok katmanlı [14], (b) Çift katmanlı, iletken rotorlu ve çok kutuplu [23], (c) Üç katmanlı, yalıtkan rotorlu ve tek kutuplu [24], (d) Çift katmanlı, iletken rotorlu ve çok kutuplu [25] kapasitif enkoderler**

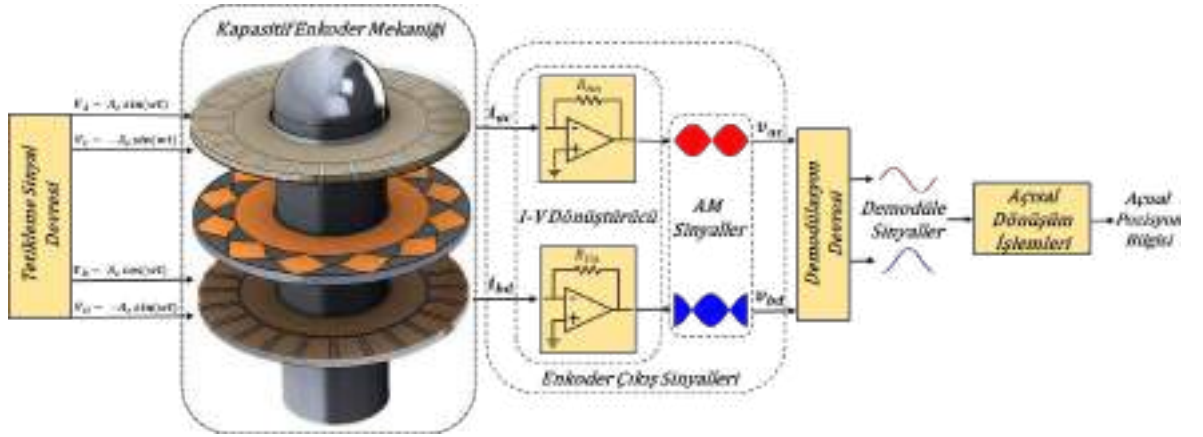
enkoderin genelde sabit plakası üzerine yerleştirilmiş olan elektrotlara uygulanmasıyla başlar. Enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans değerleri, Denklem 1.1'deki temel kapasitans denkleminde anlaşılacağı gibi plakaların birbirlerine bakan yüzeylerin örtüşme alanlarına, plakalar arası mesafelere ve plakalar arasındaki maddenin dielektrik katsayısı ile elektriksel geçirgenliğine bağlı olarak değiştirilebilir.

$$C = \epsilon \frac{A}{d}, \quad (1.1)$$

temel kapasitans denkleminde  $C$  kapasitif enkoder plakaları arasındaki kapasitansı,  $\epsilon$  dielektrik sabitini,  $d$  plakalar arası mesafeyi ve  $A$  plakaların örtüşme alanlarını temsil etmektedir.

Kapasitif enkoderlerdeki kapasitans değişimi çoğunlukla enkoder plakalarının örtüşme alanlarının değiştirilmesiyle sağlanır. Örtüşme alanları rotor döndükçe farklılaşır. Çeşitli şekil, desen ya da elektriksel geçirgenlikteki rotorların, stator plaka ya da plakaları karşısında dönmesiyle plakaların örtüşme alanları değişir ve plakalar arasındaki kapasitans

ya da kapasitanslar üzerinden rotorun bağlı olduğu döner elemanın açısız pozisyonuyla orantılı akımlar akar. Enkoder plakalarının arasındaki kapasitans üzerinden akan akım, dönüştürücü bir devreyle gerilim sinyaline dönüştürülür. Bu aşamada elde edilen sinyal kapasitif enkoderin çıkış sinyalidir ve genlik modülasyonlu bir sinyaldir. Kapasitif enkoderin çıkışında genlik modülasyonlu sinyallerin görülmesinin nedeni rotor elemanının dönüşünden kaynaklanan düşük frekanslı açısız pozisyon bilgisinin enkoderin plakaları arasındaki kapasitanslara bağlı olarak yine enkoderin plakalarına uygulanan yüksek frekanslı tetikleme sinyalleriyle modülasyona uğramasındandır [26]. Buradaki modülasyon kapasitif enkoderin iç yapısının ve çalışma prensibinin bir gereğidir. Algılayıcı çıkışındaki genlik modülasyonlu sinyallerin uygun demodülasyon işleminden geçirilmesi sonrasında rotorun açısız pozisyon bilgisine erişilir.



**Şekil 1.2. Çift stator ve tek rotor plakasıyla oluşturulan üç katmanlı kapasitif enkoder mekaniği üzerinden açısız pozisyon algılama süreci. Stator plakaları arasında motor miline bağlı rotor plakası bulunmaktadır. Stator plakaları sabitken rotor plakası motor miliyle hareket eder.**

Şekil 1.2'de üç katmanlı bir kapasitif enkoder mekaniği üzerinden bu tip algılayıcılar için pozisyon algılama süreci genellenmiştir. Ayrıca buradan yola çıkılarak kapasitif enkoderler için genel bir mimari de tanımlanmıştır. Buna göre kapasitif enkoder mimarisi; 1) Tetikleme sinyal devresi, 2) Enkoder mekaniği, 3) Akım-gerilim (I-V) dönüştürücü, 4) Demodülasyon devresi ve 5) Açısız dönüşüm işlemleri bileşenlerinden oluşmaktadır.

## 1.2. Kaynak Araştırması

Kapasitif enkoderlerle ilgili ilk çalışmalar genelde otomotiv alanına yöneliktir. İlk çalışmaların çoğunda ratiometrik ölçüm prensibi benimsenmiştir. Bu prensiple geliştirilen enkoderlerin ölçüm aralıkları 2-4 tur arasında kısıtlıdır ve yapılan ölçümler yavaş olduğundan günümüzde tercih edilmemektedir [27, 28]. İlerleyen dönemde ölçüm prensibinde olmasa da algılayıcı mekaniklerinde yapılan değişimlerle kapasitif enkoderler geliştirilmeye devam edilmiştir. Kapasitif enkoderle ilgili bilgi birikimi arttıkça inceleme çalışmaları yapılmış ve kapasitif enkoder için tasarım esasları sunulmuştur [29, 30]. Fakat geçmiş zamanda sunulan bu tasarım esaslarının ve benimsenen ölçüm prensibinin günümüz şartlarında değiştirilmeye ihtiyacı vardır.

Zangl ve Bretterklieber kapasitif algılayıcıların rotor elemanlarının belirlenmesi üzerine akılcı bir benzetim çalışması yürütmüştür. Sundukları benzetim çalışmasında iki farklı kapasitif algılayıcı için ayrı ayrı en iyi rotor şekline ulaşılmaya çalışılmıştır. Rotor şekli belirlenmeye çalışılan algılayıcılardan biri kapasitif enkoderdir. Fakat tek tip kapasitif enkoder üzerine yoğunlaşmış ve sadece rotorun şekli değerlendirilmiştir [31]. Halbuki birden fazla kapasitif enkoder tipi ve rotorun şekli dışında elektriksel karakteristiği ve deseni gibi çeşitli özellikleri de bulunmaktadır. Bu özellikler de sürece dahil edilerek genel bir geliştirme önerisinde bulunulabilir.

Gasulla ve arkadaşları geliştirdikleri kapasitif enkoder için rotor plakasının sadece elektriksel karakteristik özelliğini geliştirme süreçlerine dahil ederek uygulamalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında standart baskı devre (PCB) teknolojisinden farklı bir teknolojiyle ürettikleri rotor plakalarını üç katmanlı kapasitif enkoder mekaniklerinde test etmişlerdir [32]. Bu çalışmaya iletken ve yalıtkan rotorun yanında topraklanmış rotor plakası da dahil edilebilir. Rotor plakaları şekil ve desen bakımında da incelenerek çalışma zenginleştirilebilir.

Kapasitif enkoder mekaniğinin belirli bir kısmının analitik yöntemlerle belirlendiği bir diğer çalışma Ferrari ve arkadaşları tarafından yürütülmüştür. Burada da sadece rotor elemanı üzerinden gidilmiştir. Rotorun elektriksel özelliklerinin tamamı incelenmesine rağmen rotorun şekil ve desen özellikleri geliştirme sürecine dahil edilmemiştir. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi burada da ratiometrik ölçüm prensibi benimsenmiştir [33].

Bu zamana kadar geliştirilen kapasitif enkoderlerin tamamında üç ya da iki katmanlı

benzer yapılara rastlanırken Krklješ ve arkadaşları tarafından alışılmışın dışında bir kapasitif enkoder mekaniği sunulmuştur. Bu alışılmadık yapıda levhasal enkoder plakaları yerine esnek elektrotlar kullanılarak silindir şeklinde rotor ve stator plakaları tercih edilmiştir [13]. Farklı mekanikteki bu kapasitif enkoderin belirli uygulamalar için kullanılabilir olduğu düşünülebilir fakat alışılmışın dışındaki elektrot kullanımı, şekil ve boyut özellikleriyle uygulanabilirliği düşüktür.

Yuchen ve arkadaşları da farklı bir mekanik tercih ederek çok katmanlı kapasitif bir enkoder yapısı elde etmişlerdir. Bu gibi farklı mekaniklerle kapasitif enkoder plakaları arasındaki kapasitanslardan kazanç sağlanabilir ve bu kapasitanslar daha etkin bir şekilde artırılabilir. Fakat alışılmışın dışındaki enkoder mekaniğinden kaynaklanan özellikle büyük hacim gibi kullanım alanını daraltan kısıtlar bu çalışma için de geçerlidir [14].

Zheng ve arkadaşları tarafından yakın zamanda yapılan çalışmada alışılmış enkoder mekaniğine benzerlik göze çarpmaktadır. Bu alışılmış mekanikte iki katmanlı enkoder yapısı tercih edilmiştir. Bu sayede üretim kolaylığından faydalanılmaya çalışılmış fakat rotor plaka eğimine karşı duyarlılık üç katmanlı yapılara göre artırılmıştır. Ayrıca enkoderin elektronik devresinde paralel işlem yapan bir denetleyici ve fazladan analog devre elemanı kullanımı, maliyetin yanında analog eleman kaynaklı gürültüleri de artırabilir [34, 35].

Hou ve arkadaşları tarafından bir önceki çalışmaya benzer yapıda fakat plaka desenleri farklı olan kapasitif bir enkoder sunulmuştur. Benzerlik, enkoder plaka desenleriyle değiştirilmesine rağmen fazladan analog eleman kullanımı burada da görülmektedir. Tetikleme sinyal tercihinden dolayı burada da fazladan fark alıcı analog entegreler kullanılmıştır [36]. Aynı çalışma enkoderin sadece rotor plakasının şekli değiştirilerek iyileştirilmiştir [25]. Rotor plakasındaki değişimden olumlu sonuçlar alındıktan sonra enkoderin sabit plakası da değiştirilerek yeni bir kapasitif enkoder sunulmuştur [37]. Benzer test düzenekleri ve enkoder yapısı üzerinden ilerleyen bu çalışmaların tamamında uygulanabilirlik kaygısı duyulmadan pahalı test düzenekleri ve uygulamaya özel yüksek maliyetli elektronik kartlar kullanılmasına rağmen enkoderden okunan açısız pozisyon verisindeki hatalar öne çıkarılmıştır. Hataların üretim ve montajdan kaynaklanabileceği söylenmiş ve çeşitli algoritmalarla indirgenmeye çalışılmıştır [38–41]. Hatalar tam anlamıyla giderilemese de ciddi oranda azaltılmıştır. Fakat hata indirgeme işleminin eş zamanlı yapıldığıyla ilgili net bir açıklamaya yer verilmemiştir.

Kapasitif enkoderlerdeki hataların algılayıcı mekanikleri üzerinden düşürüldüğü

çalışmalar da bulunmaktadır [42–46]. Bunların bir kısmında enkoderin plaka şekilleri değiştirilerek hatalar düşürülmüş, bir kısmında ise aynı mekaniğin tekrar tekrar kurulmasıyla düşük hata seviyeleri yakalanmıştır.

Karalı ve arkadaşları tarafından algılayıcı mekaniğinden çok enkoderin elektronik devresine yoğunlaşmıştır. Yalıtkan, tek kutuplu ve merkezi kaçık daire şeklindeki bir rotor plakasıyla iki adet stator plakasından oluşan üç katmanlı temel bir kapasitif enkoder yapısı tercih edilmiştir. Üç katmanlı temel kapasitif enkoder, analog elektronik tabanlı bir devreyle desteklenmiştir [24]. Elektronik devre dijitalleştirilerek enkodere esneklik kazandırılabilir. Buradan yola çıkılarak aynı algılayıcı mekaniğine sahip enkodere ayarlanabilir darbe/tur özelliği kazandırılmıştır [47]. Fakat enkoderin halen mekanik kısmının yanında elektroniğinde de ciddi değişikliklere ihtiyacı vardır.

Algılayıcı mekaniği, kapasitif enkoder performansını belirleyen en etkili bileşenlerden biri olmasına rağmen bu zamana kadar incelenen çalışmalarda enkoderin mekanik bileşenlerinin tümüyle ele alınmadığı ve bu bileşenlerin kapasitif ölçüme etkilerinin tam anlamıyla analiz edilmediği görülmüştür. Bununla birlikte kapasitif enkoder geliştirme süreci, mekaniğin yanında elektroniğin de ciddi öneme sahip olduğu çok aşamalı ve disiplinler arası bir süreçtir. Enkoderin mekanik ve elektronik kısımları, alt bileşenleriyle birlikte uyum içinde çalıştırılmalıdır. Uygulamaya özel analog devreler veya paralel işlem yapan denetleyicilerle bu uyum kolayca sağlanabilir [24, 48]. Fakat bu şekilde geliştirilen bir kapasitif enkoder kullanım esnekliğinden uzak, maliyet açısından yüksek, analog eleman kaynaklı aksaklık ve gürültülere büyük oranda açık olacaktır. Aynı zamanda analog eleman sayısının fazlalığı enkoder boyutlarını artırıp potansiyel hataların tespitini de zorlaştırabilir.

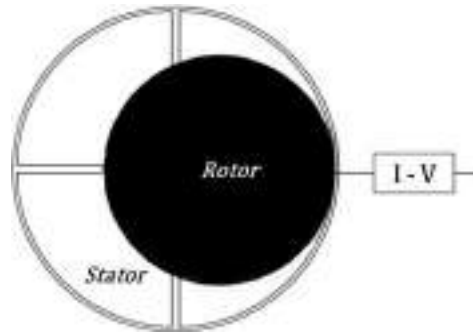
Bu çalışmada yenilikçi ve yüksek performanslı kapasitif bir döner enkoder geliştirilmiştir. Kapasitif enkoderin geliştirilmesi sürecinde kullanım esnekliği, maliyet ve analog eleman gürültülerinin azaltılması gözetilerek seri işlem yapan uygun fiyatlı bir denetleyiciyle enkoder elektroniğinin olabildiğince dijital olarak uygulanması hedeflenmiştir. Denetleyicinin çevre birimlerinin genişletilmiş özellikleri kullanılarak enkoder mekaniği ile elektroniği arasındaki uyum sağlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca oluşabilecek sinyal uyumsuzluklarına karşı etkili bir demodülasyon yöntemiyle önlem alınmıştır. Bunların yanında algılayıcı boyutları düşük tutularak enkoderin kullanım alanının genişletilmesi, enkoder mekaniğinde yapılan yenilikle kapasitansın artırılması ve

kapasitif ölçümün rahatlatılması, pahalı düzenekler ve harici elemanlar kullanılmadan kurulan enkoder mekaniğiyle maliyete katkı yapılması, enkoder mekaniğinin uygulamada karşılığı olan bir elektrik motoru üzerine kurularak test düzeneğinin oluşturulması ve uyarlanabilirliğin sağlanması hedeflenmiştir.

### 1.3. Kapasitif Enkoderlerin Sınıflandırılması

Yenilikçi ve yüksek performanslı bir kapasitif enkoderin geliştirilebilmesi için mevcut olanların incelenmesi gerekliliğinden yola çıkılarak kapasitif enkoderlerin genel bir sınıflandırması verilmiştir. Kapasitif enkoderler katman sayılarına, plakalarının şekil, desen ve cinslerine göre belirlenen sınıflar altında toplanarak incelenmiştir [49].

Şekil 1.3'te bir adet stator ve merkezi kaçık daire şeklinde bir adet rotor plakasından oluşan iki katmanlı kapasitif enkoder verilmiştir. Bu kapasitif enkoder, Tip-1 olarak adlandırılır. Stator plakası üzerindeki çeyrek daire dilimi şeklindeki elektrotlara aralarında 90° faz farkı bulunan tetikleme sinyalleri uygulandıktan sonra iletken rotor ile statordaki elektrotların oluşturduğu kapasitanslardan bu plakalarının örtüşme alanlarıyla orantılı akımlar akar. Kapasitanslar üzerinden geçen akım, hareketli rotor elemanı üzerinden alınır ve dönüştürücü bir devreyle gerilim sinyaline dönüştürülür [50].



**Şekil 1.3. Tip-1 kapasitif enkoderin üstten görünüşü. I-V iletken rotor plakasına bağlı akım-gerilim dönüştürücü devreyi temsil etmektedir [50].**

Tip-1 ile beraber diğer tiplerin kesit görünüşleri Şekil 1.4'te gösterilmiştir [50, 51]. Burada tetikleme sinyallerinin uygulandığı elektrotlara verici elektrotlar, enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans üzerinden geçen akımın alındığı elektrotlara ise alıcı elektrot adı verilmiştir. Bu elektrotlar plakalara farklı düzen ve şekillerde yerleştirilebilir. Fakat uygulama kolaylığı açısından verici elektrotlar genelde sabit plaka üzerine yerleştirilir. Aksi

halde hareketli plakaya tetikleme sinyallerinin doğrudan uygulanması zordur. Fiziksel temas gerektirir. Fiziksel temas rotorun dönüşünü kısıtlar ve sürtünmeden kaynaklı sorunlar oluşabilir. Bu nedenle rotor elemana temasın olmadığı, rotorun serbest şekilde dönebildiği enkoder mekanikleri tercih edilmelidir.

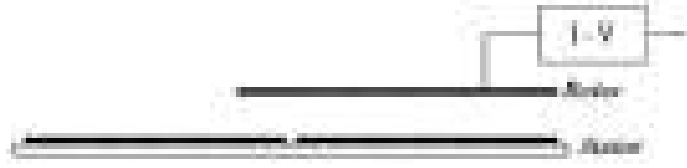
Tip-2 enkoder, iki adet stator ve bir adet rotor plakasından oluşan üç katmanlı kapasitif enkoder tipidir [24, 52]. Üç katmanlı tipler iki katmanlı tiplere göre rotor salınımından daha az etkilenir. Bu tipin rotor plakası yalıtıcıdır. Verici elektrotlar stator-1 üzerindedir. Alıcı elektrot diğer statordadır. Rotora temas yoktur.

Tip-3 ve Tip-4 kapasitif enkoderleri sırasıyla, Tip-2 enkoderin rotor plakasının topraklanmış ve iletken elektrotla kaplanmış halleridir [32, 53]. Bunlar rotor plakalarının elektriksel iletkenliklerine göre ayrılmışlardır. Buradaki farklılık Bölüm 1.4'te ayrıntısıyla ele alınmıştır.

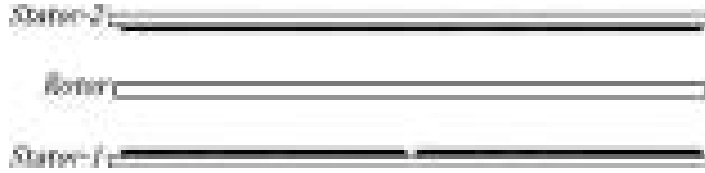
Tip-5 enkoder, Tip-1 enkoder gibi birer adet stator ve rotor plakasından oluşan iki katmanlı enkoder tipidir [34, 36, 54]. Üç katmanlı tiplere göre mekaniği basittir. Bu tipler iki katmanlı olduklarından plakaları arasındaki mesafeler kolayca ayarlanıp sabit tutulabilir. Kolayca kurulabildikleri için uygulamadaki karşılıkları düşünülmeden çoğu çalışmada tercih edilmişlerdir. Rotorlarının stator plakalarına bakan yüzleri iletkenidir. Verici ve alıcı elektrotları stator yüzeyindedir. Bu tip üzerindeki verici elektrotlara uygulanan sinyaller rotorun iletken yüzeyinden alıcı elektroda bağlanır.

Tip-6 enkoder, Tip-5 enkodere bir adet stator plakası daha eklenerek oluşturulur. Rotorun her iki yüzü de iletkenidir. Plakalar arasındaki mesafelerin eşit ayarlanması ve plakaların düzgün hizalanması zordur. Fakat iki katmanlı enkoder tiplerine kıyasla rotor eğimine daha dirençlidir. Tip-6 enkodere verilebilecek en yakın örnek bu çalışmada sunulan yenilikçi tip kapasitif enkoderdir. Yenilikçi tip enkodere Tip-6 enkoderin stator plakalarındaki elektrotların farklı dizilimleriyle ulaşılmıştır. Bu sayede enkoder plakaları arasındaki kapasitanstan kazanç sağlanmış ve aynı zamanda üç katmanlı yapının rotor eğimine karşı sağladığı avantajdan faydalanılmıştır.

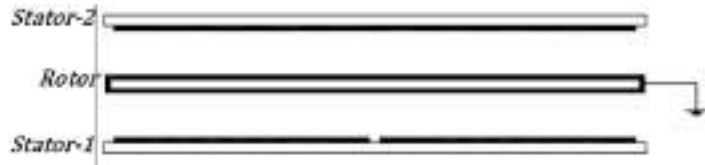
Enkoder tiplerindeki verici elektrot dizilerinin tamamı dört adet elektrottan oluşmaktadır. Bu şekildeki verici elektrot dizilerine mevcut çalışma içerisinde dört segmentli verici elektrot dizileri adı verilmiştir. Stator plakalarına, Tip-1 enkoderdeki gibi ya dört adet çeyrek daire diliminden oluşan bir adet elektrot dizisi ya da yine dörderli gruplanmış çok sayıda verici elektrot dizisi yerleştirilebilir. Rotor plakaları da Tip-1'deki tek



(a)



(b)



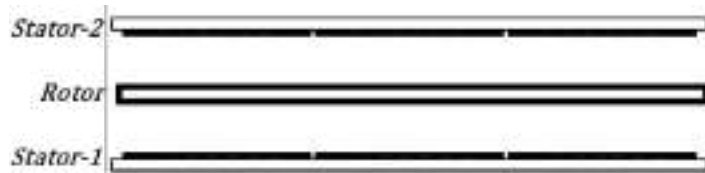
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 1.4. Kapasitif enkoder tipleri. (a) Tip-1, (b) Tip-2, (c) Tip-3, (d) Tip-4, (e) Tip-5 ve (f) Tip-6 kapasitif enkoderler**

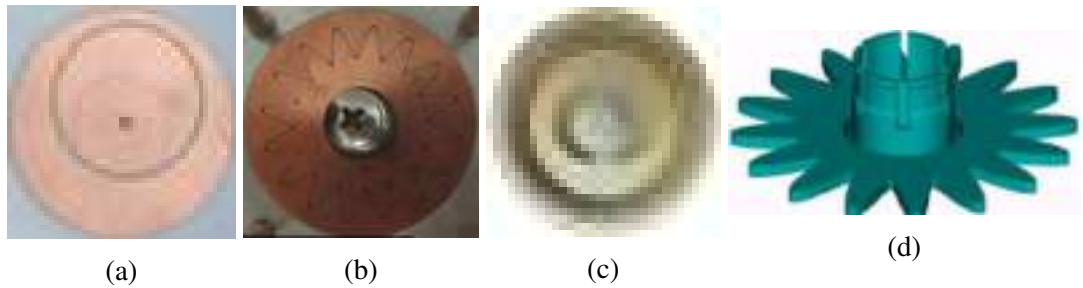
kutuplu rotordan farklı olabilir. Çok kutuplu rotorlar tercih edilebilir. Fakat verici elektrot dizilerinin sayısı rotorun kutup sayısıyla orantılı olmalıdır. Her kutbun karşısına bir adet verici elektrot dizisi gelmelidir.

Kapasitif enkoderler genel olarak sayılan altı tipte toplanmıştır. Fakat tetikleme sinyallerinin uygulanması, farklı demodülasyon devrelerinin enkoder mekaniğine ilave edilmesi ve elektrotların enkoder plakalarına yerleştirilmesi çeşitlendikçe bu tipler dallanabilir. Ayrıca sayıları az da olsa farklı mekaniklere sahip kapasitif enkoderler de bulunmaktadır [13, 14].

#### 1.4. Rotor Plakaların Elektriksel Analizi

Kapasitif enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans değerlerinin büyük olması kapasitif ölçümü rahatlatır, çözünürlüğü ve sinyal-gürültü oranını (SNR) artırır [55, 56]. Bu nedenle enkoder mekaniği başta olmak üzere mimarideki diğer bileşenlerin ve elemanların seçiminde enkoder plakaları arasında oluşan kapasitansın büyüklüğü en etkili kriterlerden biridir.

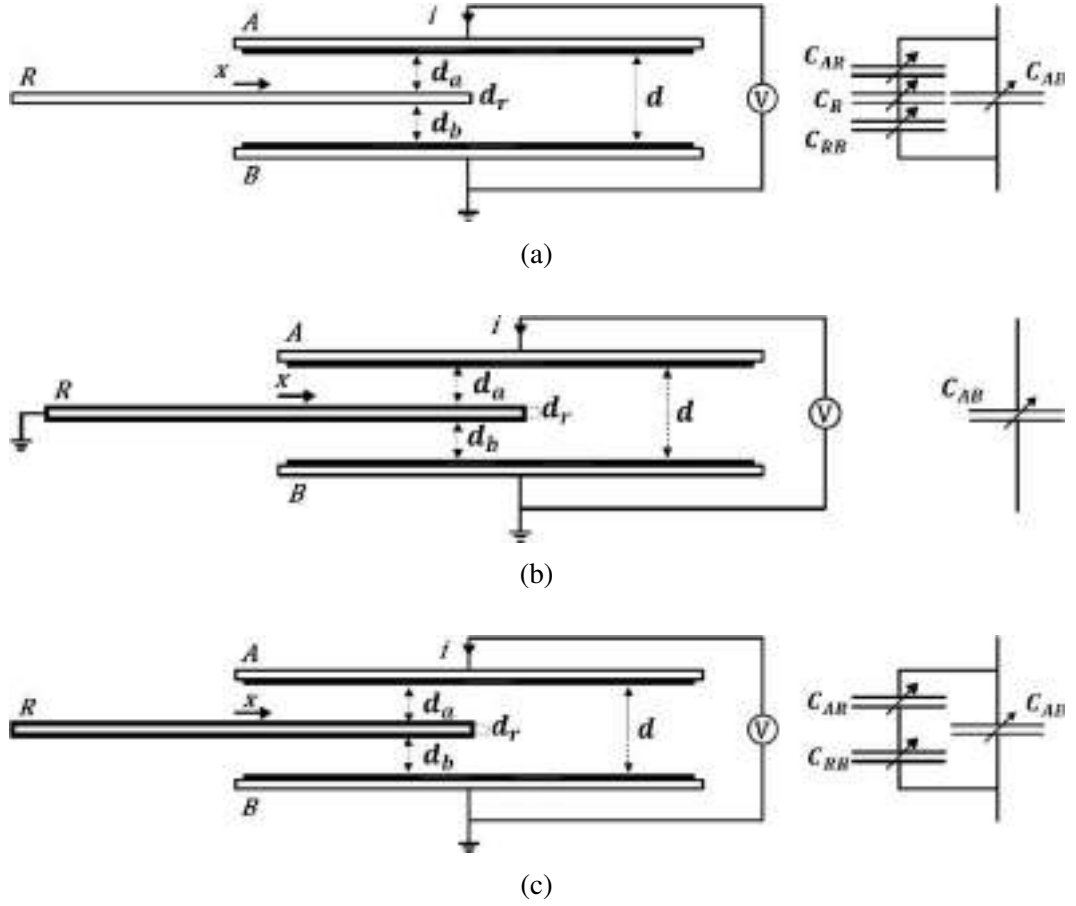
Kapasitif enkoderler için çeşitli rotor elemanları tercih edilmiştir. Bunlardan bazıları Şekil 1.5'te verilmiştir. Enkoder plakalarının örtüşme alanlarının rotor hareketiyle değiştiği düşünüldüğünde rotor plakalarının şekil, desen ve elektriksel özelliklerinin enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans üzerinde ciddi etkileri vardır. Bu nedenle yenilikçi kapasitif enkoderin rotor plakasının seçimine, rotorun elektriksel özelliğinin belirlenmesiyle başlanmıştır.



**Şekil 1.5. Kapasitif enkoderlerde kullanılan çeşitli rotor plakaları. (a) Tek kutuplu iletken rotor [44], (b) Çok kutuplu iletken rotor [34], (c) Çok kutuplu iletken rotor [57], (d) Çok kutuplu yalıtkan rotor [53]**

Rotorun elektriksel özelliğinin kapasitif ölçüme etkisini görebilmek için üç katmanlı

bir kapasitif enkodere elektriksel geçirgenlikleri farklı olan üç adet rotor ayrı ayrı uygulanmıştır [33, 51]. Sırasıyla yalıtkan, topraklanmış ve iletken özellikteki rotor plakaları aynı tip enkoderde kullanılarak Şekil 1.6'daki enkoderler oluşturulmuştur. Her enkoderin plakaları arasında oluşan kapasitans devreleri çıkarılmış ve bu devreler kapasitans eş devreler olarak adlandırılmıştır. Kapasitans eş devrelerin matematiksel olarak çözümlenmesiyle enkoderler modellenmiştir. Böylece yenilikçi kapasitif enkoderin modellenmesi için ilk adımlar atılmıştır.



**Şekil 1.6. Üç katmanlı kapasitif enkoder yapılarında (a) Yalıtkan, (b) Topraklanmış ve (c) İletken rotor plakalarının kullanımı ve bu yapıların kapasitans eş devreleri [33, 51]**

Şekil 1.6'da stator plakaları  $A$  ve  $B$  ile rotorlar  $R$  ile gösterilmiştir.  $A$  plakalarına  $V$  tetikleme gerilimi uygulandıktan sonra plakalar arasında  $C_{AB}$ ,  $C_{AR}$ ,  $C_{RB}$  ve  $C_R$  kapasitansları oluşmaktadır.  $d_a$ ,  $d_b$  ve  $d$  plakalar arası boşlukları,  $d_r$  rotor plaka kalınlığını göstermektedir.  $x$  ile rotorların birim ilerlemeleri temsil edilmiştir. Plaka uzunlukları  $L$ , genişlikleri  $w_e$  ile gösterilmiştir.  $\epsilon_r$ , rotorların dielektrik sabitini göstermektedir. Yalıtkan rotor için dielektrik sabiti sembolik olarak  $\epsilon_r$ , topraklanmış rotor için  $\epsilon_r = 0$ , iletken rotor

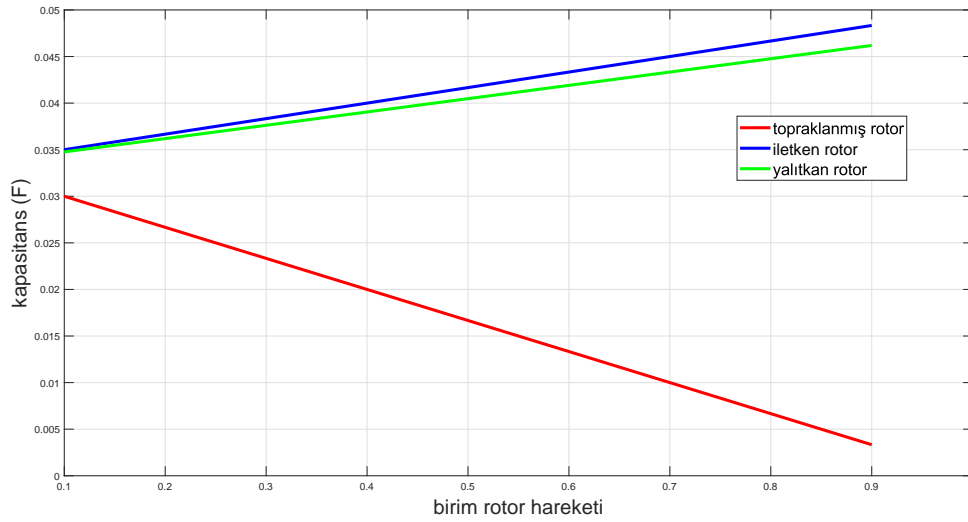
için  $\epsilon_r = \infty$  kabul edilmiştir. Havanın dielektrik sabiti,  $\epsilon_o$  ile temsil edilmiştir. Enkoderlerin kapasitans eş devreleri üzerinden sırasıyla yalıtkan, topraklanmış ve iletken rotorlar için Denklem 1.2, Denklem 1.3 ve Denklem 1.4 elde edilerek enkoderler modellenmiştir.  $C_y$  yalıtkan,  $C_t$  topraklanmış ve  $C_i$  iletken rotorun kullanıldığı Şekil 1.7'deki üç katmanlı kapasitif enkoder plakaları arasındaki eş değer kapasitansları ifade etmektedir.

$$C_y = \frac{1}{\frac{d_a}{\epsilon_o w_e x} + \frac{d_b}{\epsilon_o w_e x} + \frac{d_r}{\epsilon_o w_e x}} + \frac{\epsilon_o w_e (L - x)}{d}, \quad (1.2)$$

$$C_t = \frac{\epsilon_o w_e (L - x)}{d}, \quad (1.3)$$

$$C_i = \frac{1}{\frac{d_a}{\epsilon_o w_e x} + \frac{d_b}{\epsilon_o w_e x}} + \frac{\epsilon_o w_e (L - x)}{d}. \quad (1.4)$$

Denklem 1.2, Denklem 1.3 ve Denklem 1.4'e göre rotorların birim hareketlerine karşılık enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans değişimleri Şekil 1.7'de verilmiştir. Mavi, yeşil ve sarı renklerle sırasıyla iletken, yalıtkan ve topraklanmış rotorlu kapasitif enkoder tipleri gösterilmiştir. Rotor hareketine karşılık kapasitans değerindeki en yüksek artış iletken rotorda görülmektedir. Bu nedenle yenilikçi kapasitif enkoder için iletken özellikte bir rotor tercih edilmiştir.



**Şekil 1.7. İletken, topraklanmış ve yalıtkan rotor plakalarının kullanıldığı üç katmanlı enkoder yapılarının birim rotor hareketlerine karşılık enkoder plakaları arasında oluşan eş değer kapasitanslar [51]**

## **2. MATERYAL VE YÖNTEM**

### **2.1. Kapasitif Enkoder Tasarımı**

Kapasitif enkoderlerle ilgili çalışmaların çoğunda enkoder elemanlarının ve özelliklerinin belirlenmesiyle ilgili açıklamalar eksik bırakılmıştır. Halbuki kapasitif bir enkoderin katman sayısı, rotor plakası, tetikleme sinyalleri ve elektronik devresi gibi bileşenler enkoder mekaniğini ve mimarisini şekillendiren başlıca faktörlerdir. Mimarideki en ufak değişim algılayıcı performansını doğrudan etkileyecektir. Bu nedenle kapasitif enkoder bileşenleri titizlikle belirlenmelidir.

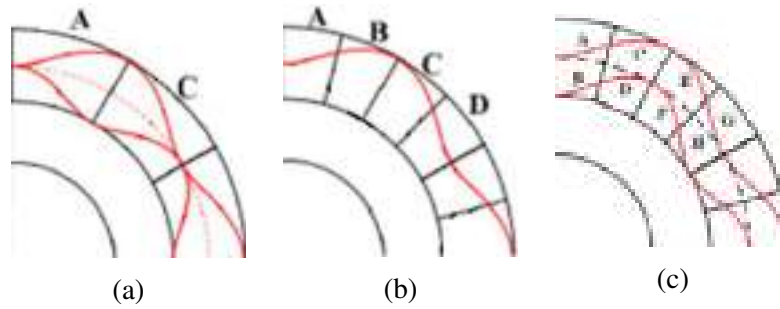
Bu çalışmada sunulan kapasitif enkoder için enkoderlerin sınıflandırılması üzerinden iki katmanlı yapılara kıyasla rotor eğimine karşı daha dirençli olduğu tespit edilen üç katmanlı yapıya ve rotor plakaların elektriksel özelliğinin kapasitif ölçüme etkilerinin incelenmesi üzerinden enkoder plakaları arasındaki kapasitansı artırdığı belirlenen iletken rotora karar verilmiştir. Kapasitif enkoderin katman sayısı ve rotorun elektriksel özelliği belirlendikten sonra sunulan kapasitif enkoder mimarisi üzerinden adım adım ilerlenerek mimari bileşenler şekillendirilmiştir.

#### **2.1.1. Kapasitif enkoder mekaniğinin belirlenmesi**

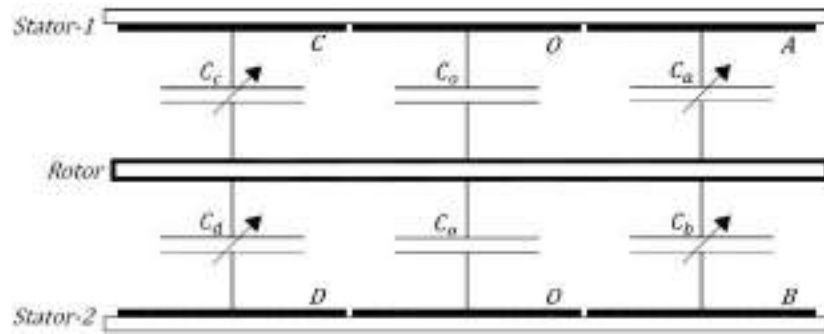
Kapasitif enkoder mimarisinin şekillendirilmesine enkoder mekaniğinden başlanmıştır. Üç katmanlı yapının ve iletken rotorun kullanılacağı kapasitif enkoder mekaniğinin alt bileşenleri ve bu bileşenlerin özellikleri belirlenmiştir. Kapasitif enkoder mimarisinin enkoder mekaniği üzerine kurulduğu söylenebilir. Bu nedenle mimarideki ağırlığı en fazla olan bileşen enkoder mekaniğidir.

### 2.1.1.1. Yenilikçi tip enkoder mekaniği

Sunulan kapasitif enkoder mimarisindeki yenilik, ağırlıklı olarak enkoder mekaniğinde yapılmıştır. Standart dörderli gruplandırılmış verici elektrot dizileri yerine ikili gruplandırılmış verici elektrot dizileri kullanılarak enkoder plakaları arasındaki kapasitanslar artırılmıştır. Şekil 2.1’de farklı segmentte elektrot dizilerinin tercih edildiği çalışmalardan kesitlerle yenilikçi enkoder yapısı karşılaştırılmıştır. Rotor deseni kırmızıyla, stator yüzeyleri siyah renkle gösterilmiştir.



**Şekil 2.1. Kapasitif enkoderlerin stator plakalarına çeşitli sayılarda gruplandırılarak yerleştirilen elektrot dizilerinin rotor desenleriyle örtüşmeleri. (a) Tip-6 türevi yenilikçi enkoderin stator plakalarından biri için stator yüzeyinde ikili gruplandırılmış elektrot dizisinin kırmızı renkli rotor deseniyle örtüşmesi, (b) Dörderli ve (c) Sekizerli gruplandırılmış elektrot dizilerinin tercih edildiği kapasitif enkoderler için siyah renkli stator plakalarının kırmızı renkli rotor plaka desenleriyle örtüşmeleri**



**Şekil 2.2. Üç katmanlı, iletken rotorlu ve ikişerli gruplandırılmış verici elektrot dizisinin kullanıldığı yenilikçi tip kapasitif enkoder ve enkoder plakaları arasında oluşan kapasitanslar**

Tip-6 türevi yenilikçi yapıda rotor kutupları karşısındaki elektrotlar Şekil 2.1a’daki gibi ikişerli gruplandırılmıştır. Bu sayede verici elektrotlar ile rotor plakasının örtüşme alanları üzerinden hesap edilen kapasitans değerlerinden Şekil 2.1b’deki dörderli

gruplandırılmış çalışmalara kıyasla neredeyse iki, Şekil 2.1c'deki sekizerli gruplandırılmış çalışmalara kıyasla neredeyse dört kat fazla kazanç sağlanmıştır. Üç katman ve iletken rotor özelliklerinden sonra iki segmentli verici elektrot dizi özelliği de eklenen yenilikçi tip kapasitif enkoderin plakaları arasında oluşan kapasitanslar Şekil 2.2'de verilmiştir. Burada  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  ve  $O$  ile stator plakalarındaki elektrotlar gösterilmiştir. Elektrotlar arasında elektriksel iletim yoktur ve statorlar üzerine rotorun kutup sayısı kadar  $A$ ,  $B$ ,  $C$  ve  $D$  elektrodu yerleştirilecektir.  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_d$  ve  $C_o$  ile plakalar arasında oluşan kapasitanslar verilmiştir.  $C_o$  ile sabit kapasitans, diğerleriyle değişken kapasitanslar temsil edilmiştir.

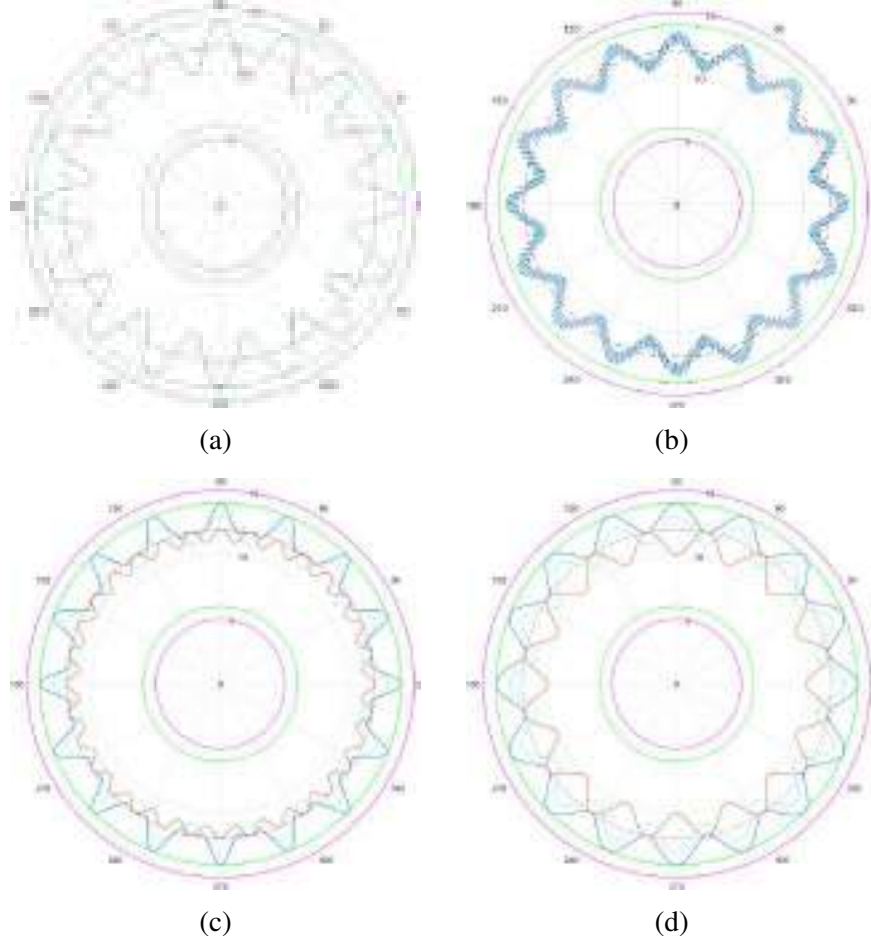
### 2.1.1.2. Önerilen rotor plakaları

Kapasitif enkoderlerdeki rotor plakaları hareketli elemanla beraber döndükçe enkoder plakalarının örtüşme alanları değişir. Değişim, rotor plakasının stator plaka yüzeyinden farklı desene sahip olmasından kaynaklanır. Bu nedenle kapasitif enkoderler için belirlenen rotor plakaların desenlerinin de kapasitif ölçüm üzerinde etkileri vardır.

Bu çalışmada sunulan kapasitif enkoderin tetikleme sinyalleri için daha az harmonik barındırması nedeniyle sinüzoidal şekilli sinyaller tercih edilmiştir. Yine kapasitif enkoder için önerilen rotor desenleri de sinüzoidal şekillidir. Bu sayede rotor deseninin stator plakalarındaki elektrot sınırlarıyla kesiştiği noktalarda oluşan anlık kapasitans kaybı, daha keskin hatlara sahip rotor plaka desenlerin tercih edildiği çalışmalara göre çok daha az olacaktır [32, 33]. Ayrıca sinüzoidal şekilli tetikleme sinyallerinde az da olsa harmonikler bulunmaktadır. Bu harmonikleri bastıracağı ve enkoder plakaları arasındaki kapasitans değerini artıracacağı düşünülerek çeşitli sinüzoidal desenlere sahip rotor plakaları önerilmiştir.

Kapasitif enkoderlerde çok kutuplu rotorların kullanımı, çoğunlukla üretim ve montaj hatalarından kaynaklanan enkoder çıkışındaki doğrusallık hatasını düşürmektedir [53]. Bu nedenle yenilikçi tip kapasitif enkoder için önerilen Şekil 2.3'teki rotor plakaların tamamı çok kutuplu seçilmiştir. Kutup sayısının doğrusallık hatası üzerindeki etkisi Bölüm 2.2.3'te ayrıntısıyla açıklanmıştır.

Şekil 2.3'teki mavi ve turuncu eğrilerle rotor desenleri gösterilirken yeşil çizgilerle rotor plaka sınırı temsil edilmiştir. Kırmızı ve turkuaz kesikli çizgiler yardımcı çizgilerdir, rotor eğrilerin doğru konumlandırılması ve rotor eğri parametrelerinin anlaşılması için kullanılmıştır. Eflatun düz çizgiler, koruma halkalarıdır. Koruma halkaları enkoder plakaları



**Şekil 2.3. Yenilikçi kapasitif enkoder için önerilen çeşitli desenlerdeki rotor plaka tasarımları [51]. (a) Rotor-1, (b) Rotor-2, (c) Rotor-3, (d) Rotor-4 plakaları**

arasında oluşan parazitik kapasitansları en aza indirmek için rotor ve stator plakaların en dış ve iç kısımlarına yerleştirilen elektrotları temsil eder. Arka fondaki gri çizgi ve sayılarla sembolik olarak kutupsal koordinat sistemi gösterilmiştir.  $r(\theta, \phi)$  ve  $r_1(\theta, \phi)$  ile mavi renkli rotor eğrileri,  $r_2(\theta, \phi)$  ile turuncu renkli rotor eğrileri temsil edilmiştir. Şekil 2.4'te rotor-1 üzerinden bazı rotor parametreleri ve değerleri verilmiştir. Burada gösterilen parametreler yukarıdaki açıklamalar dahilinde diğer rotor modelleri için de geçerlidir.

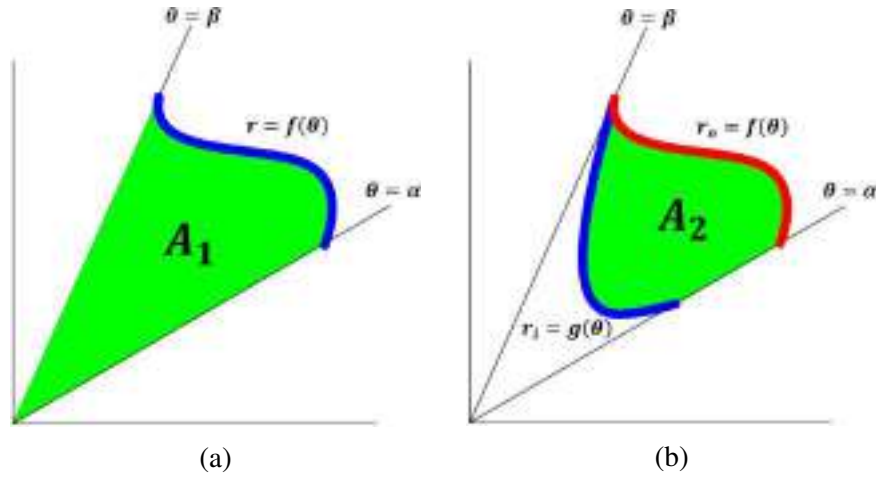
Şekil 2.3'teki rotor desenleri sırasıyla Denklem 2.1, Denklem 2.2, Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 ile çizilmiştir. Denklem 2.1 ile rotor-1, Denklem 2.2 ile rotor-2, Denklem 2.3 ile rotor-3 ve Denklem 2.3 ile rotor-4 oluşturulmuştur.

$$r(\theta, \phi) = R + A_{rc} \cos(N(\theta + \phi)), \quad (2.1)$$

$$r(\theta, \phi) = R + ((r_o - R - A_{rc}) \cos(N^2(\theta + \phi))), \quad (2.2)$$



plakaları arasında oluşan kapasitanslar, plakalar arasındaki mesafe ve dielektrik sabitin değişmediği kabul edilerek örtüşme alanları üzerinden modellenmiştir. Rotor desenini oluşturan eğri denklemi ve statora yerleştirilen elektrot sınırları bilindiğinde plakaların örtüşme alanları belirli integrallerle hesaplanabilir. Şekil 2.5a'daki kutupsal koordinat eksenine stator plaka yüzeyi, mavi renkle rotor eğrisi, yeşil renkli alanla plakaların örtüşme alanları temsil edilmiştir. Statordaki elektrot sınırları  $\theta = \beta$  ve  $\theta = \alpha$  ile, rotor desenini oluşturan eğri denklemi  $r = f(\theta)$  ile, örtüşme alanı  $A_1$  ile ifade edilmiştir.



**Şekil 2.5. Kutupsal koordinatlarda (a) Tek, (b) Çift eğriyle belirli aralıklarla sınırlandırılan kapalı alanlar. Mavi ve kırmızı eğrilerle rotor desenleri, siyah renkli sınırlarla stator plakalarının üzerindeki elektrotların sınırları ve yeşil renkli kapalı alanlarla kapasitif enkoder plakalarının örtüşme alanları temsil edilmiştir.**

Şekil 2.5b'deki rotor deseni birden fazla eğriden oluşmaktadır. Burada rotor desenini oluşturan mavi ve kırmızı renkteki eğriler sırasıyla  $r_i = g(\theta)$  ve  $r_o = f(\theta)$  ile verilmiştir.  $A_2$  ile eğrilerle sınırlanan örtüşme alanı temsil edilmiştir.  $A_1$  ve  $A_2$  alanları Denklem 2.5 üzerinden hesaplanabilir.

$$A_1 = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} (f^2(\theta)) d\theta, \quad A_2 = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{2} (f^2(\theta) - g^2(\theta)) d\theta. \quad (2.5)$$

Kapasitif enkoder plakaları arasında oluşan parazitik kapasitanslar ve üretim-montaj hataları ihmal edilerek yenilikçi enkoder mekaniğinin matematiksel modeli plakaların örtüşme alanları üzerinden çıkarılmıştır. Çıkarılan model sayesinde yenilikçi tip enkoder için önerilen rotor tasarımları karşılaştırılmış ve rotor plakaların kapasitif ölçüme etkileri incelenmiştir.

#### 2.1.1.4. Önerilen rotor plakalarının şekil ve desen analizi

Rotor plakaların şekil ve desen özelliklerinin kapasitif ölçüme etkilerinin incelenmesi ve yenilikçi tip enkoderin rotor plakasının belirlenmesi için Şekil 2.3'teki rotor plakaları karşılaştırılmıştır. Her bir rotor bu çalışmada sunulan enkoder mekaniğine uygulanmıştır. Sunulan enkoderin kapasitans eş devresi çıkarılarak enkoder plakaları arasında oluşan eş değer kapasitans hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} C_{Stator-1} &= \sum_{i=1}^N C_o \frac{(C_{ai} - C_{ci})}{C_o + (C_{ai} + C_{ci})}, \\ C_{Stator-2} &= \sum_{i=1}^N C_o \frac{(C_{bi} - C_{di})}{C_o + (C_{bi} + C_{di})}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

eş değer kapasitans denklemlerinde  $C_{Stator-1}$ , stator-1 ile rotor arasındaki,  $C_{Stator-2}$ , stator-2 ile rotor plakası arasındaki eş değer kapasitansı göstermektedir.

Yenilikçi tip kapasitif enkoderin eş devresi üzerinden çıkarılan kapasitans formülü Denklem 2.6'da verilmiştir. Rotor desenleri değiştikçe plakalar arasında oluşan kapasitans değerleri de örtüşme alanlarına bağlı olarak değişmektedir. Önerilen rotorların her biri için enkoder plakaları arasında oluşan eş değer kapasitanslar hesaplandıktan sonra rotorların birim hareketine karşılık enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans değişimleri hesaplanmıştır. Rotorlar, kapasitans değişimlerine göre değerlendirilmiştir.

$$\Delta C = N \left( \frac{C_{Stator-1}}{360^\circ} \right) = N \left( \frac{C_{Stator-2}}{360^\circ} \right). \quad (2.7)$$

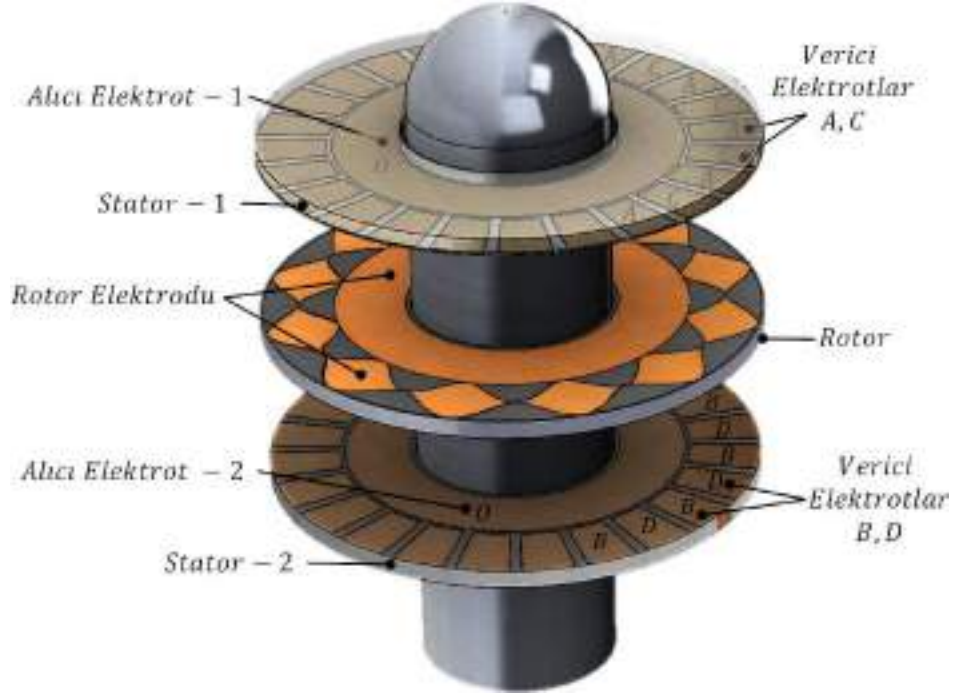
Çizelge 2.1'de yenilikçi kapasitif enkoder mekaniğine uygulanan rotorlar için Denklem 2.7 ile hesaplanan kapasitans değerleri verilmiştir. Bu değerlere göre Şekil 2.3d'de gösterilen rotor-4 plakasında karar kılınmıştır.

**Çizelge 2.1. Yenilikçi tip kapasitif enkoder için önerilen rotor plakalarının enkoderin plakaları arasındaki parazitik kapasitanslar ihmal edilerek karşılaştırılması**

Kapasitans Değişimi	Rotor Plakaları			
	Rotor-1	Rotor-2	Rotor-3	Rotor-4
$\Delta C$	21.960 fF	11.623 fF	21.902 fF	34.701 fF

### 2.1.1.5. Sunulan enkoder mekaniği

Rotor-4 ile yenilikçi tip enkoder mekaniği birleştirilerek kapasitif enkoder mekaniği genel hatlarıyla tamamlanmıştır. Şekil 2.6'da üç katmanlı, iletken ve çok kutuplu rotor plakasıyla bu çalışmada sunulan yenilikçi tip kapasitif enkoder mekaniği bulunmaktadır.



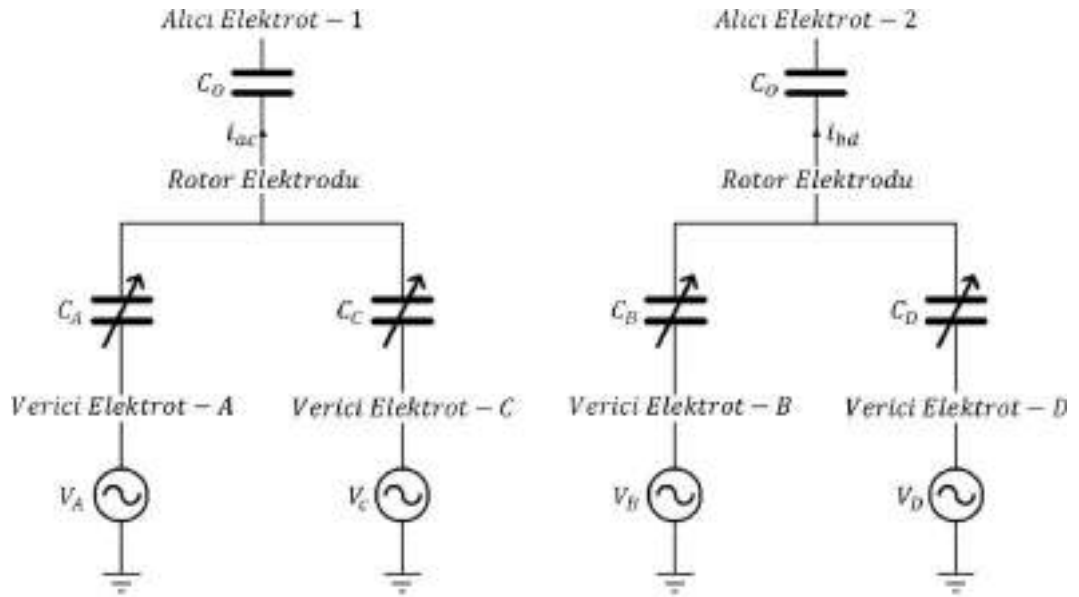
Şekil 2.6. Genel hatlarıyla yenilikçi kapasitif enkoder mekaniği

Yenilikçi enkoder mekaniğinin ara katmanı, motor miline bağlı rotor plakasıdır. Diğer iki katman sabit stator plakalarıdır. Motor mili stator plakalarından bağımsızdır. Stator plakalarına ikişerli gruplandırılmış verici elektrot dizileri yerleştirilmiştir. Bu diziler stator plakalarına Şekil 2.6'da gösterildiği gibi ardışık olarak konumlandırılmıştır. Stator plakaların iç kısmında halka şeklinde alıcı elektrotlar bulunmaktadır. Bunlar enkoder plakaları arasında oluşan kapasitanslar üzerinden geçen akımın toplandığı elektrotlardır. Akımlar bu elektrotlar üzerinden alınarak I-V dönüştürücü devreye verilmektedir. Stator plakalarındaki her elektrot birbirinden yalıtılmıştır. Rotor plakasının iki yüzü de özdeş desene sahiptir. Rotor yüzeyinde sinüzoidal desenli ve çok kutuplu rotor deseni tercih edilmiştir. Bakır renkli bu desen tek parça halindeki rotor elektrodudur. Stator yüzeylerindeki verici elektrotlar *A, B, C, D* ile, alıcı elektrotlar ise *O* ile gösterilmiştir.

## 2.1.2. Tetikleme sinyallerinin belirlenmesi

Kapasitif enkoderlerin plakaları arasında oluşan değişken kapasitanslarda sabit kapasitans bileşenleri bulunmaktadır. Tek tetikleme sinyalin kullanıldığı kapasitif enkoderlerde sabit kapasitans bileşenlerinin kaldırılması için enkoder çıkışlarına analog fark alıcı ya da alternatif devreler entegre edilmelidir [24, 36]. Aksi halde değişken kapasitans etkisi ortadan kalkacak ve açısal pozisyon bilgisi elde edilemeyecektir. Fakat kapasitif enkoder mimarilerine entegre edilen her analog eleman kapasitif enkoder hacmini artırmanın yanında yeni bir analog devre elemanı gürültüsü de getirir. Çoklu tetikleme sinyalleriyle analog fark alıcı devre ihtiyacı ortadan kaldırılabilir.

Bu çalışmada aralarında  $90^\circ$  faz farkı bulunan eş frekanslı dört adet tetikleme sinyaliyle fazladan analog devre eleman kullanımına gerek kalmadan sabit kapasitans bileşenlerinden kurtulunmuştur. Kare dalga şekillerine göre daha az harmonik barındırdıklarından sinüzoidal dalga şekilli sinyaller tercih edilmiştir.

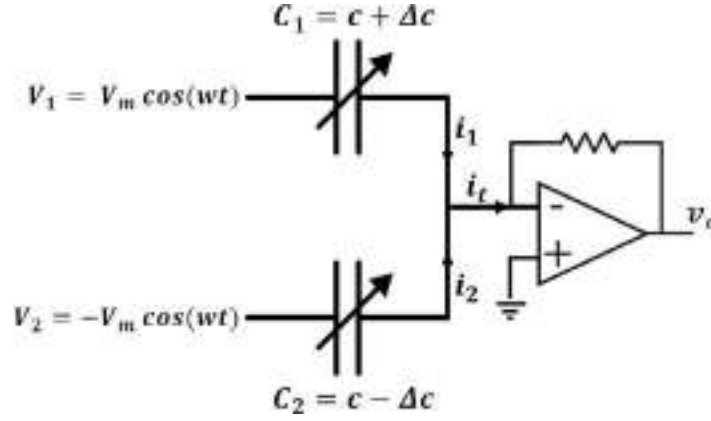


Şekil 2.7. Yenilikçi tip enkoderin kapasitans eş devresi

Denklem 2.8'de matematiksel olarak ifade edilen  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  ve  $V_D$  tetikleme sinyalleri yenilikçi tip kapasitif enkoderin verici elektrotlarına uygulandıktan sonra Şekil 2.7'de gösterilen kapasitanslar üzerinden belirtilen yönlerde akımlar akmaktadır.

$$\begin{aligned} V_A &= A_e \sin(\omega t), & V_B &= A_e \cos(\omega t), \\ V_C &= -A_e \sin(\omega t), & V_D &= -A_e \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (2.8)$$

tetikleme sinyal denklemlerinde  $A_e$  sinyallerin genliğini,  $\omega$  açısal frekansı ve  $t$  zamanı simgelemektedir. Şekil 2.8’de kapasitif enkoderin stator plakalarından biriyle rotor arasında oluşan kapasitanslardan sadece değişken olanları gösterilmiştir. Diğer kapasitanslar ihmal edilerek çoklu tetikleme sinyallerinin avantajı anlatılmaya çalışılmıştır.



**Şekil 2.8. Çoklu tetikleme sinyallerinin kullanımıyla fark alıcı devre ihtiyacının ortadan kaldırılması. Değişken kapasitanslara uygulanan ve aralarında 180° faz farkı bulunan tetikleme sinyalleriyle fark alıcı analog devreler kullanılmadan değişken kapasitanslardaki sabit bileşenler ortadan kaldırılabilir.**

Aralarında 180° faz farkı bulunan  $V_1$  ve  $V_2$  tetikleme sinyalleri stator plakasına uygulandıktan sonra stator ve rotor arasında  $C_1$  ve  $C_2$  değişken kapasitansları oluşmaktadır. Rotor dönüşünden kaynaklanan kapasitans değişimi " $c \pm \Delta c$ " ile ifade edilmiştir.  $c$ , sabit kapasitans bileşenini göstermektedir. Fakat rotorun açısal pozisyon bilgisi değişken kapasitanslarda saklıdır ve sabit bileşen ortadan kaldırılmalıdır. Kapasitanslar üzerinden akan  $i_1$  ve  $i_2$  akımları tek bir elektrot üzerinde toplanır. Şekil 2.8’deki akımların toplandığı nokta bu elektrodu temsil eder. Tetikleme sinyallerinin simetrik olması, değişken kapasitanslardaki sabit bileşenlerin toplama işlemi sonucunda ortadan kaldırılmasını ve  $\Delta c$  değişken kapasitansların korunmasını sağlamaktadır. Böylece  $v_o$  çıkış sinyali elde edilmeden önce harici bir fark alıcı analog entegreye ihtiyaç duyulmadan sabit bileşenler kaldırılabilir.

$$\begin{aligned}
 V_1 &= V_m \cos(\omega t), \\
 V_2 &= V_m \cos(\omega t + \alpha), \quad \alpha = 180^\circ, \\
 V_2 &= -V_m \cos(\omega t) = -V_1,
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Denklem 2.10’da  $V_1$  ve  $V_2$  ile verilen tetikleme sinyal gerilimlerinin zamana bağlı değişimleri, kapasitansların zamana bağlı değişimlerinden çok fazla olduğundan

kapasitansların zamana bağlı değişimleri ihmal edilmiştir. Değişken kapasitansların sadece rotorun açılmal pozisyonuyla değiştiği kabul edilerek Denklem 2.10 sadeleştirilebilir. Burada  $i_t$  kapasitanslar üzerinden geçen akımlar toplamını ifade etmektedir. Çoklu tetikleme sinyallerinin kullanımında sinyaller arasındaki faz farkı istenen şekilde tam olarak sağlanmalıdır. Aksi halde tetikleme sinyallerinin arasında uyumsuzluklar oluşacak ve bu uyumsuzluklar enkoder çıkışına hata olarak yansıtacaktır.

$$\begin{aligned} i_1 &= C_1 \frac{dV_1}{dt} = (c + \Delta c) \frac{dV_1}{dt}, \\ i_2 &= C_2 \frac{dV_2}{dt} = (c - \Delta c) \frac{dV_2}{dt} = -(c - \Delta c) \frac{dV_1}{dt}, \\ i_t &= i_1 + i_2 = 2\Delta c \frac{dV_1}{dt}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

### 2.1.3. Demodülasyon devresinin belirlenmesi

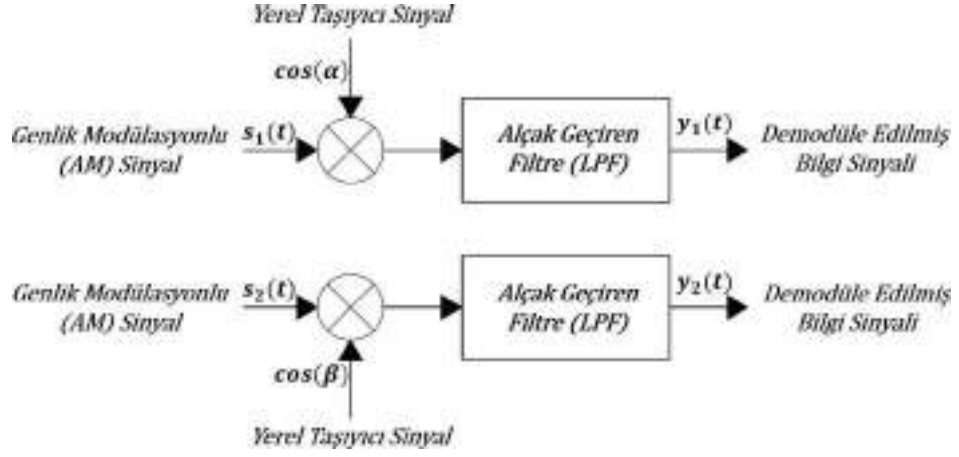
Yenilikçi kapasitif enkoder mekaniği modellendikten sonra enkoder çıkışlarının Denklem 2.11'de matematiksel olarak ifade edilen çift yan bant genlik modülasyonlu (DSB AM) sinyaller şeklinde olduğu görülmüştür.

$$\begin{aligned} s_1(t) &= x_1(t)K_1A_e \cos(\alpha), \\ s_2(t) &= x_2(t)K_2A_e \cos(\beta). \end{aligned} \quad (2.11)$$

$s_1(t)$  ve  $s_2(t)$ , stator-1 ile 2 üzerinden alınan çıkış sinyalleridir.  $K_1$  ve  $K_2$  sabit katsayılardır ve tetikleme sinyallerinin türevinden gelen katsayılar ile enkoder plakaları arasındaki sabit kapasitans bileşenlerini içermektedir.  $A_e \cos(\alpha)$  ve  $A_e \cos(\beta)$  taşıyıcı sinyalleri ifade eder ve aralarında  $90^\circ$  faz farkı vardır.  $\beta = \alpha + \pi/2$ 'dir.  $A_e$ , taşıyıcı sinyal genliğidir.  $x_1(t)$  ve  $x_2(t)$  bilgi sinyalleridir.

DSB AM sinyallerin demodülasyonu senkron ya da bir diğer adıyla "coherent" demodülasyon tekniğiyle etkili bir şekilde yapılabilir [58, 59]. Bu nedenle yenilikçi tip kapasitif enkoderin demodülasyon devresinde senkron demodülasyon tekniği kullanılmıştır. Demodülasyon devresinin blok diyagramı Şekil 2.9'da verilmiştir.

Enkoder çıkışındaki AM sinyallerin yerel taşıyıcı sinyallerle çarpımı Denklem 2.12'de verilmiştir. " $\frac{1}{2}x_1(t)K_1A_e \cos(4\alpha)$ " ve " $\frac{1}{2}x_2(t)K_2A_e \cos(4\beta)$ " ile ifade edilen çarpım sonuçlarında yüksek frekans bileşenleri bulunmaktadır.



**Şekil 2.9. Kapasitif enkoder mimarisinin modellenmesi aşamasında demodülasyon devresinde uygulanan senkron demodülasyon yöntemi ve işlem adımları**

$$\begin{aligned}
 s_1(t) \cos(\alpha) &= (x_1(t)K_1A_e \cos(\alpha)) \cos(\alpha), \\
 s_2(t) \cos(\beta) &= (x_2(t)K_2A_e \cos(\beta)) \cos(\beta), \\
 &= x_1(t)K_1A_e \cos^2(\alpha), \\
 &= x_2(t)K_2A_e \cos^2(\beta), \\
 &= \frac{1}{2}x_1(t)K_1A_e (\cos(4\alpha) + 1), \\
 &= \frac{1}{2}x_2(t)K_2A_e (\cos(4\beta) + 1), \\
 &= \frac{1}{2}x_1(t)K_1A_e + \frac{1}{2}x_1(t)K_1A_e \cos(4\alpha), \\
 &= \frac{1}{2}x_2(t)K_2A_e + \frac{1}{2}x_2(t)K_2A_e \cos(4\beta).
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

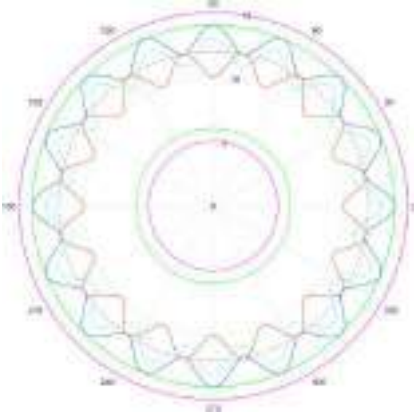
Yüksek frekans bileşenleri " $\frac{1}{2}x_1(t)K_1A_e \cos(4\alpha)$ " ve " $\frac{1}{2}x_2(t)K_2A_e \cos(4\beta)$ ", çarpım sonuçlarına alçak geçiren filtrelerin uygulanmasıyla ortadan kaldırılmıştır. Yüksek frekans bileşenlerin ortadan kaldırılmasıyla  $y_1(t)$  ve  $y_2(t)$  ile gösterilen demodüle edilmiş bilgi sinyalleri elde edilmiştir.

## 2.2. Kapasitif Enkoder Modeli

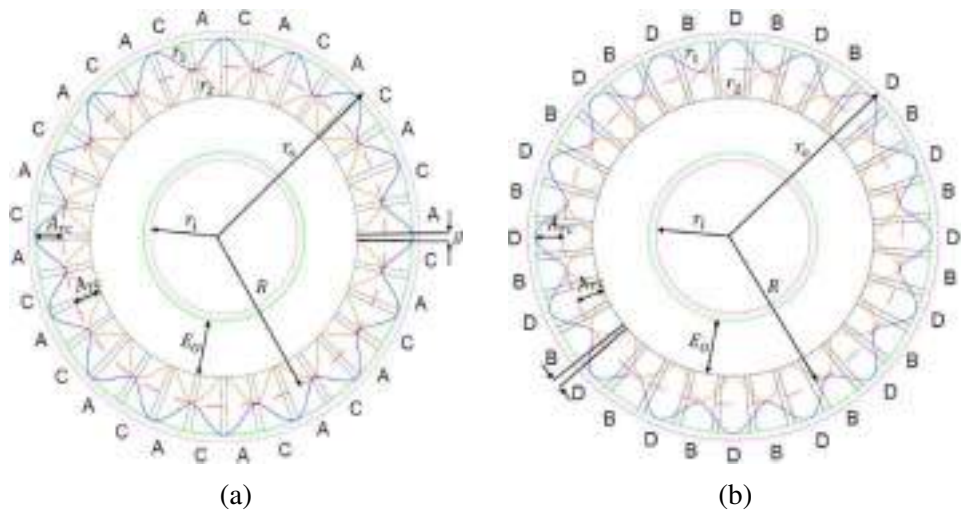
Genel hatlarıyla karar verilen kapasitif enkoder mekaniğine demodülasyon devre modeli ve açısız dönüşüm işlemleri de eklenerek kapasitif enkoder mimarisi modellenmiştir. Mevcut çalışmalar göz önüne alınarak ve minimalist bir tasarım hedeflenerek kapasitif enkoderin tasarım parametre ve değerlerine ilk aşamada Çizelge

2.2'deki gibi karar verilmiştir. Kapasitif enkoder mimarisi başlangıçta bu değerler üzerinden modellenmiş ve yenilikçi tip enkoderin algılama süreci adım adım kontrol edilmiştir.

**Çizelge 2.2. Kapasitif enkoder mimarisinin modellenmesinde kullanılan rotor plakası ve tasarım parametrelerinin başlangıç değerleri. Başlangıç değerleri algılayıcının performans analizi yapıldıktan sonra güncellenmiştir.**

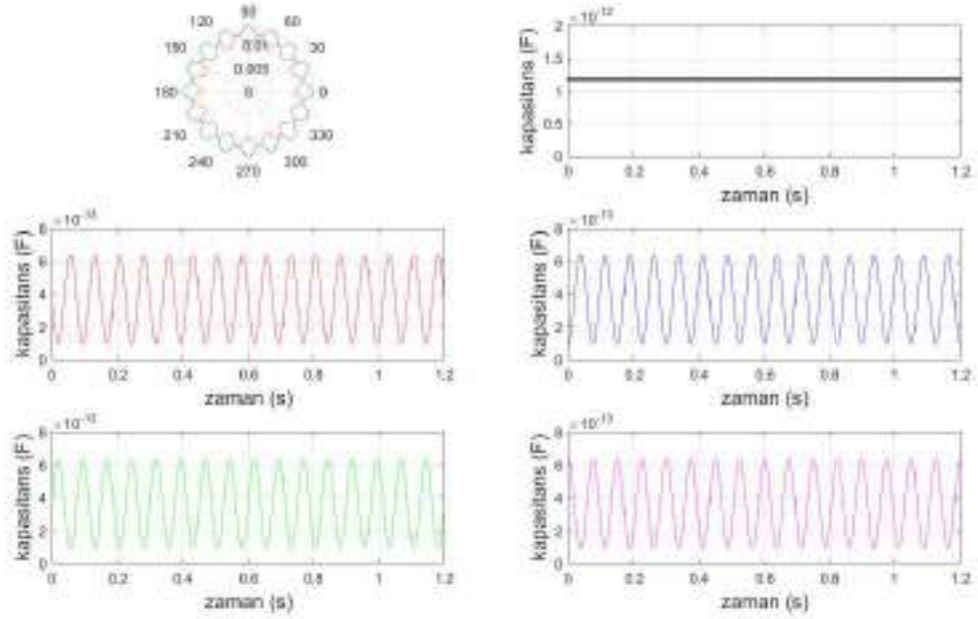
Rotor-4	Parametre Adı (sembol)	Parametre Değeri
	Dış yarıçap ( $r_o$ )	14 mm
	İç yarıçap ( $r_i$ )	6 mm
	Rotor eğri yarıçapı ( $R$ )	12 mm
	Rotor eğri genliği ( $A_{rc}$ )	1 mm
	Kutup sayısı ( $N$ )	16
	Elektrotlar arası boşluk ( $g$ )	1°
	Plakalar arası mesafe ( $d$ )	1.5 mm
	Tetikleme sinyal frekansı ( $f_c$ )	6 kHz
	Örnekleme frekansı ( $f_s$ )	24 kHz
	Motor Hızı	50 rpm
	Tetikleme sinyal genliği ( $A_e$ )	1.5 V
	Dielektrik sabiti ( $\epsilon$ )	$8.85 \cdot 10^{-12} F/m$

Şekil 2.10a'da üzerinde  $A$  ve  $C$  verici elektrotları bulunan stator-1 plakasıyla rotor plakasının örtüşmesi, Şekil 2.10b'de üzerinde  $B$  ve  $D$  verici elektrotları bulunan stator-2 plakasıyla rotor plakasının örtüşmesi gösterilmiştir.  $R$  rotor eğri genliğini,  $A_{rc}$  rotor eğri yarıçapını,  $g$  stator plakaları üzerindeki verici elektrotlar arasındaki derece cinsinden mesafeyi,  $r_o$  ve  $r_i$  sırasıyla plakaların iç ve dış yarıçaplarını göstermektedir.



**Şekil 2.10. Kapasitif enkoderin rotor ve stator plakalarının karşılıklı yüzeylerinin örtüşmeleri.  $r_1(\theta)$  ve  $r_2(\theta)$  kontur çizgileriyle temsil edilen rotor plaka deseninin (a) Stator-1, (b) Stator-2 plakalarıyla örtüşmesi**

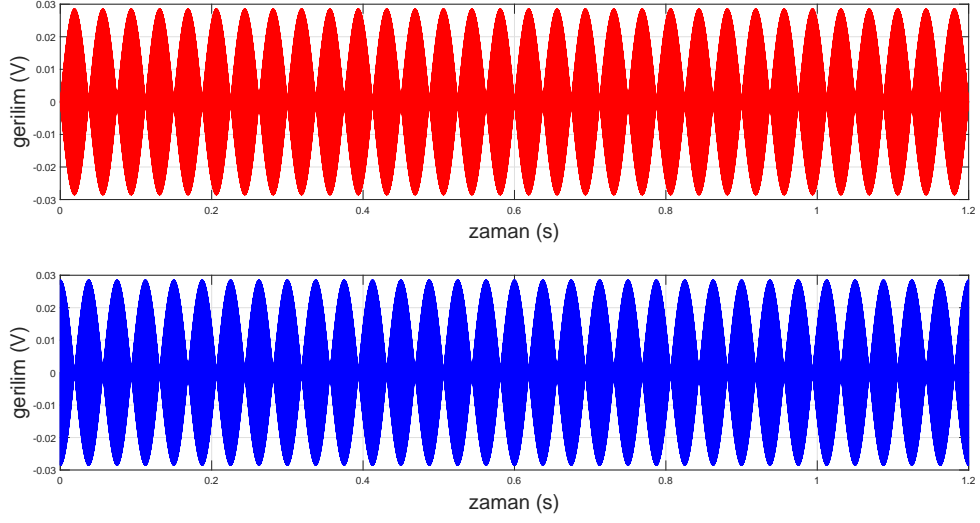
Verici elektrotlar ile rotor plakası arasında değişken kapasitanslar, alıcı elektrotlar ile rotor plakası arasında sabit kapasitanslar oluşmaktadır.  $C_O$  sabit kapasitansı, diğerleri değişken kapasitansları göstermektedir.  $E_O$  alıcı elektrot kalınlığıdır.  $r_1(\theta)$  ve  $r_2(\theta)$  ile mavi ve turuncu renkli rotor desen konturları temsil edilmiştir. Rotor desen konturlarının denklemleri Denklem 2.4'te, enkoder plakaları arasında oluşan kapasitans denklemleri Denklem 2.13'de verilmiştir.



**Şekil 2.11.** Deseni verilen rotorun bir tam turu süresince kapasitif enkoderin plakaları arasındaki kapasitansların değişimleri. Sırasıyla siyah, kırmızı, mavi, yeşil ve eflatun renklerle sabit  $C_O$  ve değişken  $C_A, C_B, C_C, C_D$  kapasitansların değişimleri gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}
 C_A &= N \frac{\epsilon}{d} \int_{\frac{\pi}{N} - \frac{g}{2}}^{\frac{g}{2}} \frac{1}{2} (r_1^2(\theta) - r_2^2(\theta)) d\theta, \\
 C_B &= N \frac{\epsilon}{d} \int_{\frac{3\pi}{2N} - \frac{g}{2}}^{\frac{\pi}{2N} + \frac{g}{2}} \frac{1}{2} (r_1^2(\theta) - r_2^2(\theta)) d\theta, \\
 C_C &= N \frac{\epsilon}{d} \int_{\frac{2\pi}{N} - \frac{g}{2}}^{\frac{\pi}{N} + \frac{g}{2}} \frac{1}{2} (r_1^2(\theta) - r_2^2(\theta)) d\theta, \\
 C_D &= N \frac{\epsilon}{d} \int_{\frac{5\pi}{2N} - \frac{g}{2}}^{\frac{3\pi}{2N} + \frac{g}{2}} \frac{1}{2} (r_1^2(\theta) - r_2^2(\theta)) d\theta, \\
 C_O &= \epsilon \frac{\pi((2A_{rc} - R)^2 - r_i^2)}{d}.
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Kapasitif enkoder mimarisi rotorun bir tam turu için Çizelge 2.2'deki değerlere göre modellenmiş ve enkoder plakaları arasındaki kapasitans değişimleri Şekil 2.11'deki gibi elde



**Şekil 2.12. Modellenen kapasitif enkoderin çıkış sinyalleri. Kırmızıyla  $v_{ac}$ , maviyle  $v_{bd}$  temsil edilmektedir.**

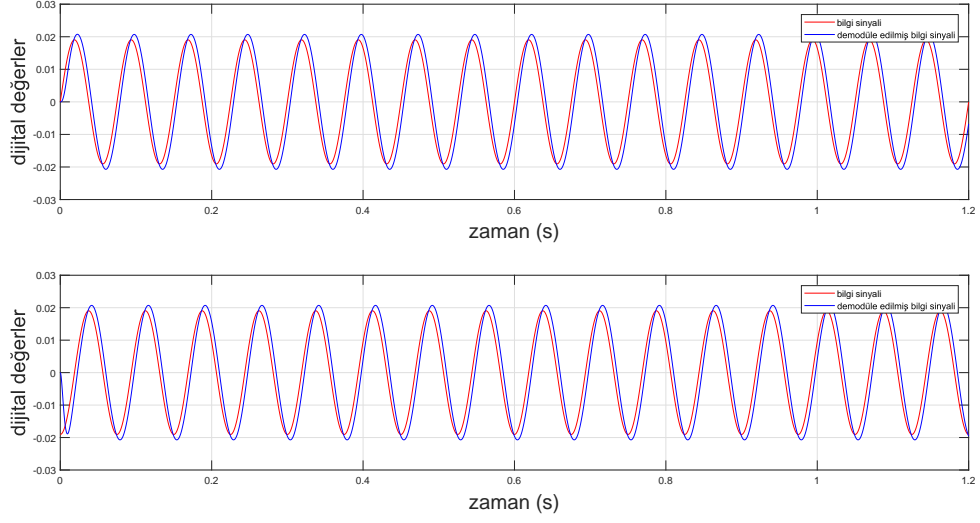
edilmiştir. Enkoder çıkışındaki akım sinyallerinin matematiksel ifadeleri Denklem 2.14’de verilmiştir. Burada  $i_{ac}$  ve  $i_{bd}$  sırasıyla stator-1 ve stator-2 üzerinden alınan akım sinyallerini göstermektedir.

$$\begin{aligned} i_{ac} &= A_e \omega \cos(\omega t) \frac{C_O(C_A - C_C)}{C_O + C_A + C_C}, \\ i_{bd} &= -A_e \omega \sin(\omega t) \frac{C_O(C_B - C_D)}{C_O + C_B + C_D}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Enkoder çıkışındaki akım sinyalleri üç bileşene ayrılabilir. Bunlardan ilki tetikleme sinyal türevinden gelen katsayı, ikincisi sabit kapasitans bileşeni ve sonuncusu değişken kapasitansların farkıdır. Deklem 2.13’deki kapasitans formülleri Denklem 2.14’de yerlerine konup akım sinyalleri gerilim sinyallerine dönüştürüldüğünde  $v_{ac}$  ve  $v_{bd}$  elde edilmiştir.  $v_{ac}$  ve  $v_{bd}$  dönüştürücü çıkışındaki gerilim sinyalleridir.

$$\begin{aligned} v_{ac} &= \frac{8A_e A_{rc} \epsilon R R_f \omega \pi (4A_{rc}^2 - 4A_{rc}R + R^2) \cos(\frac{Ng}{2}) \sin(N\phi) \cos(\omega t)}{d(4\pi A_{rc}^2 - 4NgA_{rc}R + \pi R^2 - r_i^2 \pi)}, \\ v_{bd} &= -\frac{8A_e A_{rc} \epsilon R R_f \omega \pi (4A_{rc}^2 - 4A_{rc}R + R^2) \cos(\frac{Ng}{2}) \cos(N\phi) \sin(\omega t)}{d(4\pi A_{rc}^2 - 4NgA_{rc}R + \pi R^2 - r_i^2 \pi)}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Parazitik kapasitanslar ile üretim ve montaj hataları ihmal edildiğinde  $v_{ac}$  ve  $v_{bd}$  Şekil 2.12’deki tam modülasyonlu DSB sinyaller şeklinde gözlenmiştir. Burada I-V dönüştürücü için geri besleme direnci  $R_f$ ,  $1.5 M\Omega$  alınmıştır.  $v_{ac}$  ve  $v_{bd}$  demodüle edilerek Şekil 2.13’teki bilgi sinyallerine ulaşılmıştır. Şekilde orijinal bilgi sinyalleriyle demodüle



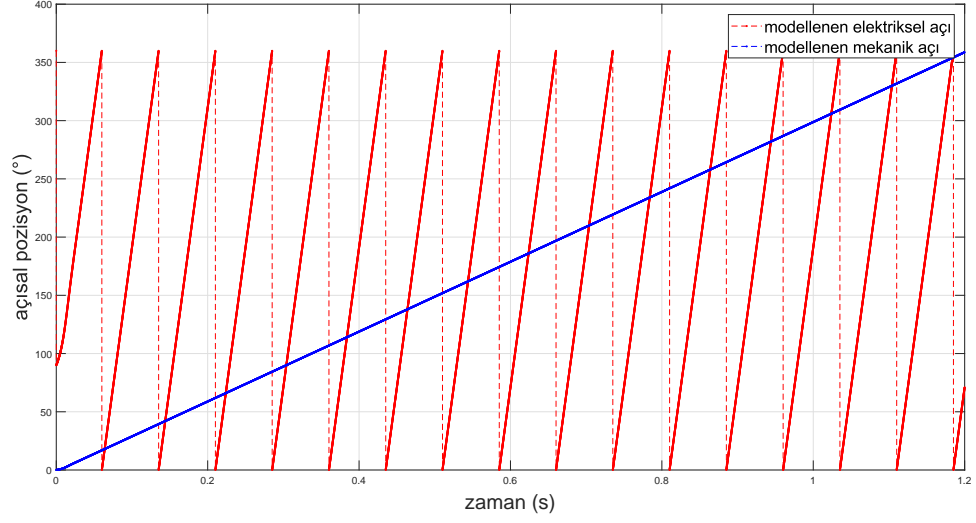
**Şekil 2.13. Modellenen kapasitif enkoderin orijinal ve demodüle edilmiş bilgi sinyalleri. Kırmızıyla orijinal bilgi sinyalleri, maviyle demodüle edilmiş bilgi sinyalleri gösterilmektedir.**

edilmiş bilgi sinyalleri birlikte verilmiştir. Üst grafikte  $v_{ac}$  sinyalindeki bilgi ve bu sinyalden elde edilen demodüle bilgi sinyalleri verilirken alt grafikte  $v_{ac}$  sinyalindeki orijinal bilgi ve bu sinyalin demodülasyonu sonucunda ulaşılan bilgi sinyali verilmiştir. Her iki grafikte de orijinal bilgi sinyalleri kırmızı renkle, demodüle edilmiş bilgi sinyalleri mavi renkle temsil edilmiştir.

### 2.2.1. Açısal dönüşüm işlem modeli

Demodüle edilmiş bilgi sinyalleri açısal dönüşüm işlemlerinden geçirildikten sonra Şekil 2.13'teki mavi renkli mekanik açı değerleri elde edilmiştir. Demodüle edilmiş bilgi sinyalleri öncelikle  $\arctan$  işleminden geçirilerek elektriksel açı değerine ulaşılmıştır. Elektriksel açı kutup sayısına bölünmüştür. Bölme işlem sonuçları her kutup için toplanmış ve bir önceki kutup toplamı bir sonrakine eklenerek mekanik açı hesaplanmıştır.

Kapasitif enkoder mimarisinin matematiksel modeli sayesinde enkoderin fiziksel olarak gerçekleştirilmesine gerek kalınmadan enkoder çıkışları analiz edilmiş ve anahtar parametreler üzerinden algılayıcı performansı değerlendirilmiştir.



**Şekil 2.14. Modellenen kapasitif enkoder üzerinden 50 rpm ile dönen rotorun bir tam turu için hesaplanan elektriksel ve mekanik açı değerleri**

## 2.2.2. Performans kriterleri

Kapasitif enkoder performansının değerlendirilebilmesi için performans kriterleri sunulmuş ve bu kriterlere göre kapasitif enkoderin anahtar parametreleri analiz edilmiştir. İlk performans kriteri enkoder çıkış sinyalleri üzerinden hesaplanan kazanç ölçütüdür. İkinci kriter mekanik açı üzerinden hesaplanan doğrusallık hatasıdır.

### 2.2.2.1. Kazanç

Kazanç ölçütü, enkoder çıkış sinyallerinin büyüklükleri üzerinden hesaplanmaktadır. Kapasitif enkoderin rotor plakasının birim hareketine karşılık enkoder çıkış sinyal büyüklüklerinde meydana gelen değişim kazanç olarak adlandırılmıştır. Kazanç, matematiksel olarak Denklem 2.16'de ifade edilmiş ve  $G$  ile temsil edilmiştir [37].

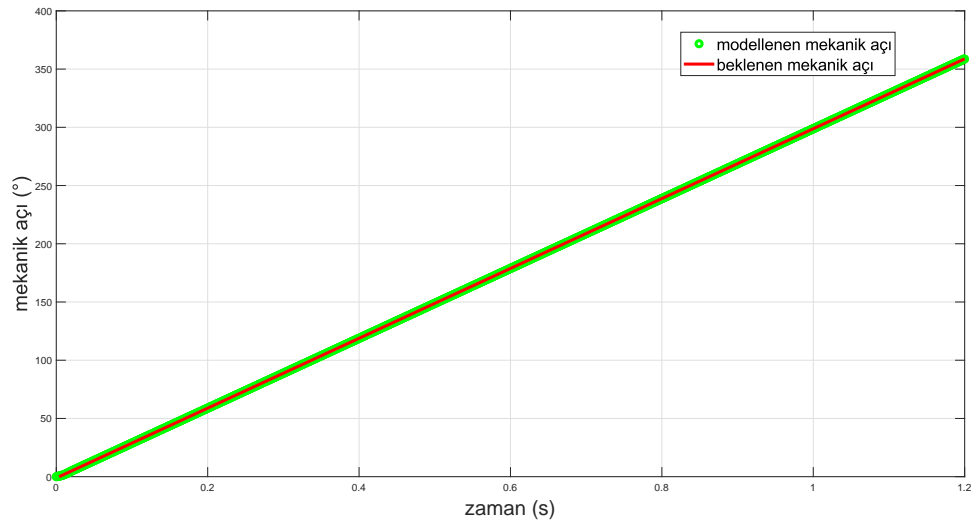
$$v_o^{pp} = v_{ac}^{pp} = v_{bd}^{pp}, \quad (2.16)$$

$$G = N \left( \frac{v_o^{pp}}{360} \right),$$

kazanç denklemindeki  $pp$  enkoder çıkış sinyallerinin tepeden tepeye genliğini ifade etmektedir.

### 2.2.2.2. Doğrusallık hatası

Kapasitif enkoderin modeli üzerinden algılayıcının bir tam turu için Şekil 2.15'te yeşille gösterilen mekanik açı değerleri hesaplanmıştır. Bu mekanik açı değerlerine en uygun doğru bulunarak beklenen açı değerlerine ulaşılmıştır. Beklenen açı değerleri Şekil 2.15'te kırmızıyla gösterilmiştir. Beklenen ve modellenen açı değerleri arasındaki farklar alınarak doğrusallıktan sapmalar hesaplanmıştır. Sapmaların tepeden tepeye genliği doğrusallık hatasını vermektedir [34, 36, 44, 46, 60, 61].



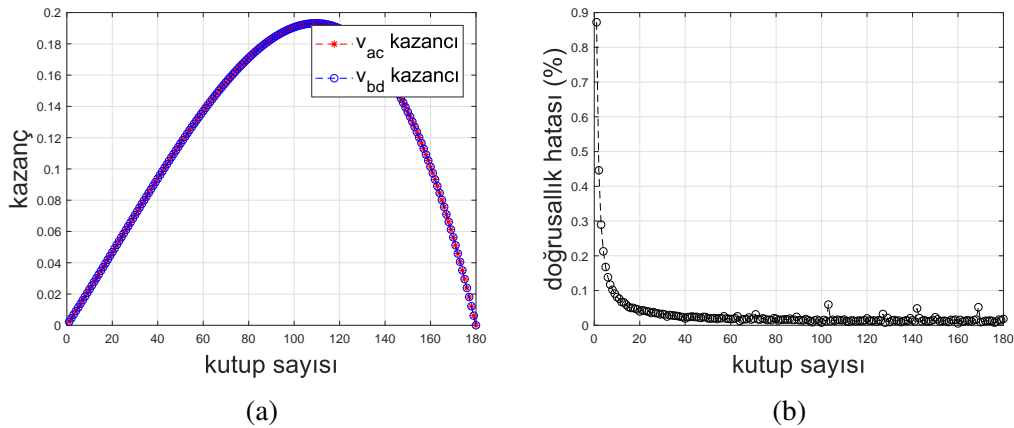
Şekil 2.15. Kapasitif enkoder modeli üzerinden rotor plakasının bir tam turu için elde edilen ve beklenen açı değerleri. Modelden elde edilen açı değerleri yeşil, beklenen açı değerleri kırmızı renkle verilmiştir.

### 2.2.3. Anahtar parametrelerin kapasitif enkoder performansına etkileri

Sunulan kapasitif enkoderin anahtar parametrelerine; enkoderin plaka yarıçapları  $r_i$  ve  $r_o$ , enkoderin plakaları arasındaki mesafe  $d$ , verici elektrotlar arasındaki boşluk  $g$ , kutup sayısı  $N$ , örnekleme frekansı  $f_s$  ve tetikleme sinyal frekansı  $f_c$  olarak karar verilmiştir. Kapasitif enkoderin plaka boyutları ve plakalar arasındaki mesafe minimalist tasarım ve üretim sınırları gözetilerek mevcut çalışmalara kıyasla olabildiğince düşük seçilmeye çalışılmıştır.

Örnekleme frekansı ile tetikleme sinyallerinin frekansları denetleyicinin çalışma frekansına ve denetleyicide gerçekleştirilen dijital işlemlerin yoğunluğuna göre belirlenmiştir. Denetleyici üzerinden tetikleme sinyallerinin üretimiyle birlikte demodülasyon ve açışal dönüşüm işlemleri de yürütülmektedir. Bu işlemler için Seri işlem yapan uygun fiyatlı bir denetleyici tercih edilmiştir. Böylece düşük maliyete katkı sağlanmıştır. Elektronik devre işlemlerinin büyük oranda dijital olarak uygulanması sayesinde enkodere esneklik kazandırılmış ve algılayıcı performansı artırılmıştır. Tetikleme ve örnekleme frekanslarının belirlenme süreci Bölüm 2.3.3'te ayrıntısıyla verilmiştir.

İlk olarak kutup sayısının kapasitif enkoderin kazancı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 2.2'deki kutup sayısı haricindeki diğer parametreler sabit tutularak kutup sayısı artırılmış ve kazanç gözlemlenmiştir. Kazancın kutup sayısına bağlı değişimi Şekil 2.16a'dan görülmektedir. Burada üretim sınırları gözetilmeden kutup sayısı artırılmış ve kazanç gözlenmiştir. Kutup sayısı ile beraber verici elektrotların ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki boşlukların artmasıyla kazanç belirli bir tepe noktasında sınırlanmıştır. Kutup sayısının artmaya devam etmesiyle elektrot yüzeylerinden kayıplar başlamış ve kazanç düşüşe geçmiştir.



**Şekil 2.16. Kutup sayısının (a) Kazanç ve (b) Doğrusallık hatası üzerindeki etkisi**

Kutup sayısının demodülasyon devresinden bağımsız olarak doğrusallık hatası üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için orijinal bilgi sinyalleri, demodüle edilmiş bilgi sinyalleri olarak kabul edilmiştir. Bu sayede demodülasyon devre işlemlerinden gelebilecek hatalar ihmal edilerek mükemmel bir demodülasyonun yapıldığı varsayılmıştır. Pratikteki üretim ve montaj hatalarının kapasitif enkoder modeline yansıtılabilmesi için demodüle edilmiş bilgi sinyallerine faz ve genlik uyumsuzlukları eklenmiştir. Bu sayede uygulamada

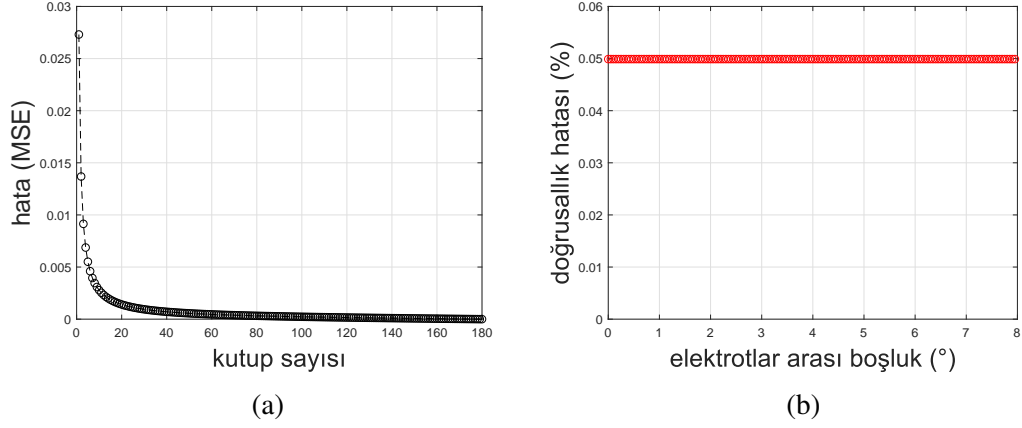
karşılaşılabilecek hataların bir kısmı suni olarak modele yansıtılabilmektedir. Buradaki analiz süreciyle özellikle kapasitif enkoder mekaniğindeki parametrelerin pratikteki olası hatalar üzerindeki etkilerini görebilmek ve bu parametrelerin hataları giderici ya da azaltıcı etkileri varsa enkoder mekaniğini hataları düşürecek yönde iyileştirmek amaçlanmıştır.

Şekil 2.16b'de kutup sayısının kapasitif enkoder modeli üzerinden hesaplanan doğrusallık hatalarını azaltıcı etkisi görülmektedir. Kutup sayısı üretim sınırları gözetilmeden artırılmış ve rotorun bir tam turu için mekanik açı üzerinden hesaplanan doğrusallık hatalarında ciddi düşüş gözlenmiştir. Burada doğrusallık hatalarındaki sıçramaların açısız dönüşüm işlemlerindeki numerik hesaplamalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle açısız dönüşüm işlemleri de kutup sayısı-hata analizi sürecinden çıkarılarak sadece kapasitif enkoder modeline suni olarak yansıtılan pratikteki hatalara bakılmıştır. Pratikteki hataların kareleri toplamının ortalaması alınarak analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna göre kutup sayısının pratikteki hatalar üzerindeki etkisi numerik hesaplamalardan olabildiğince arındırılmış haliyle Şekil 2.17a'da görülebilir.

Kutup sayısının kazanç ve doğrusallık hatası üzerindeki etkilerini analiz etmek için işletilen süreç verici elektrotlar arasındaki boşluk parametresi için de uygulanmıştır. Elektrotlar arasındaki boşluk diğer parametreler değiştirilmeden artırılmış ve doğrusallık hatası ile kazanç değişimleri gözlenmiştir. Elektrotlar arası boşluktaki artışın hata getirip kazancı düşürmesi beklenirken boşluk parametresinin modellenen hatalar üzerinde bir etkisinin olmadığı ve mevcut çalışmaların aksine, olabildiğince düşük seçilmesi gereken elektrotlar arası boşluğun aslında kazancı artırıcı optimum bir değeri olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 2.17b'de modellenen doğrusallık hatasının elektrotlar arası boşluktan bağımsız olduğu görülmektedir.

Elektrotlar arası boşluğun kazanç kriteri üzerindeki etkisi Şekil 2.18'de verilmiştir. Yenilikçi tip enkoderde kullanılan rotor plakasının çeşitli kutup sayıları için elektrotlar arası boşluk parametresine bağlı kazançlar hesaplanmıştır. Elektrotlar arası boşluğun optimum değerlerinde kazancın tepe yaptığı gözlenmiştir. Bu gözlem alternatif bir elektronik devre benzetim programı üzerinden doğrulanmıştır.

Doğrulama işlemi için öncelikle elektrotlar arası boşluğun en düşük ve optimum olduğu noktalarda enkoder plakaları arasındaki kapasitans değerleri hesaplanmıştır. Her iki durum için hesaplanan kapasitans değerleri, elektronik devre benzetim programında modellenen yenilikçi enkoderin kapasitans eş devresindeki kapasitanslara değer olarak

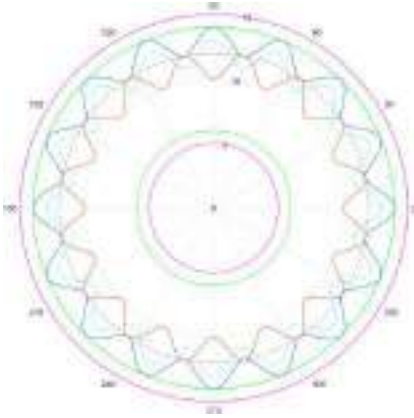


**Şekil 2.17. Kutup sayısı ve elektrotlar arası boşluğun sırasıyla (a) Pratik ve (b) Doğrusallık hataları üzerindeki etkileri**

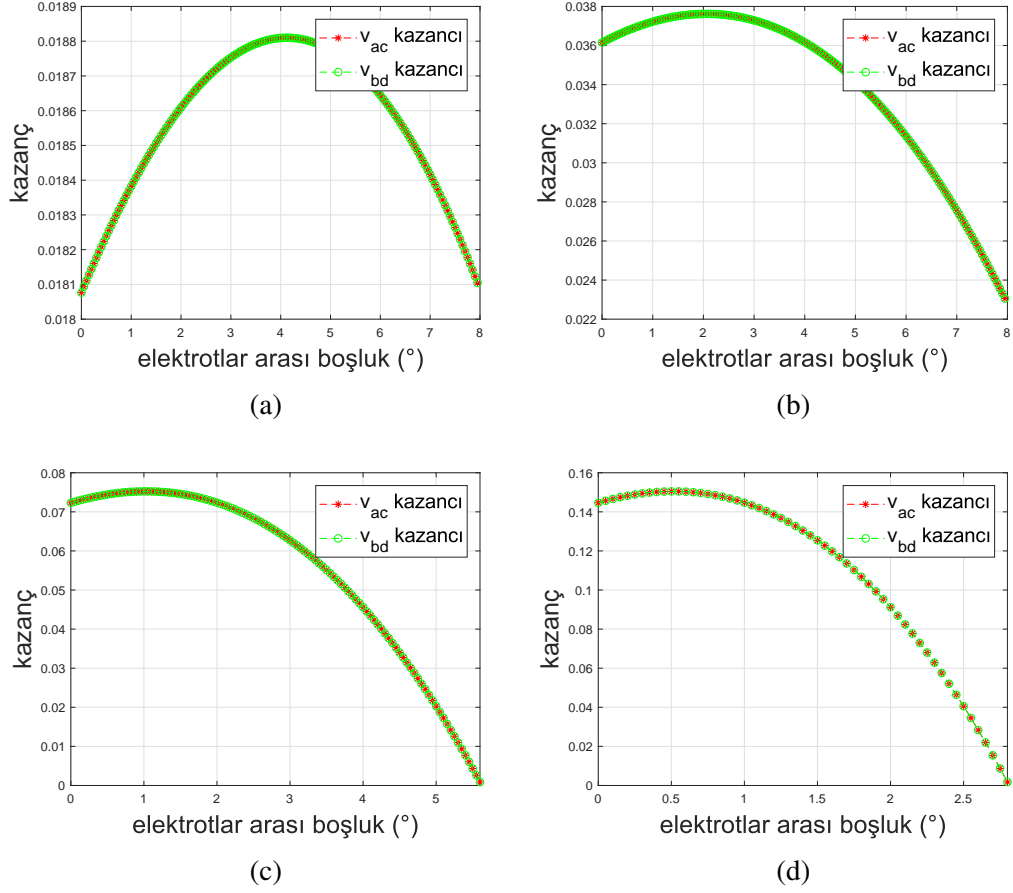
girilmiş ve kazançlar ayrı ayrı ölçülmüştür. Elektrotlar arası boşluğun en düşük olduğu noktadaki kapasitans değerleri daha yüksek olmasına rağmen kazanç, elektrotlar arası boşluğun farklı bir değerinde yüksek çıkmıştır.

Elektrotlar arası boşluğun artmasıyla enkoder plakaları arasındaki tüm kapasitanslar azalmaktadır. Fakat kapasitansların azalma oranları aynı değildir. Sabit kapasitansın değişken kapasitanslara oranla daha fazla azalması, kazancın yükselmesine neden olmuştur. Kazancı optimuma ulaştıran sıfırdan farklı bir boşluk değerinin olduğu yapılan araştırmalara göre ilk defa bu çalışmayla gösterilmiştir.

**Çizelge 2.3. Kapasitif enkoder modeli üzerinden yapılan performans analiziyle güncellenen ve enkoderin üretiminde kullanılacak olan parametreler**

Rotor-4	Parametre Adı (sembol)	Parametre Değeri
	Dış yarıçap ( $r_o$ )	14.59 mm
	İç yarıçap ( $r_i$ )	5.5 mm
	Rotor eğri yarıçapı ( $R$ )	12.05 mm
	Rotor eğri genliği ( $A_{rc}$ )	1 mm
	Kutup sayısı ( $N$ )	16
	Elektrotlar arası boşluk ( $g$ )	2°
	Plakalar arası mesafe ( $d$ )	0.2 mm
	Tetikleme sinyal frekansı ( $f_c$ )	6 kHz
	Örnekleme frekansı ( $f_s$ )	24 kHz
	Tetikleme sinyal genliği ( $A_e$ )	$\frac{v_{ref}}{2}$ , $v_{ref} = 2.9 \text{ V}$ -3.3 V
	Alıcı elektrot kalınlığı ( $E_O$ )	4 mm
	Dielektrik sabiti ( $\epsilon$ )	$8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

Kapasitif enkoderin anahtar parametrelerinin değerleri, genişletilmiş arama (extensive search) algoritması kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır [62, 63]. Anahtar



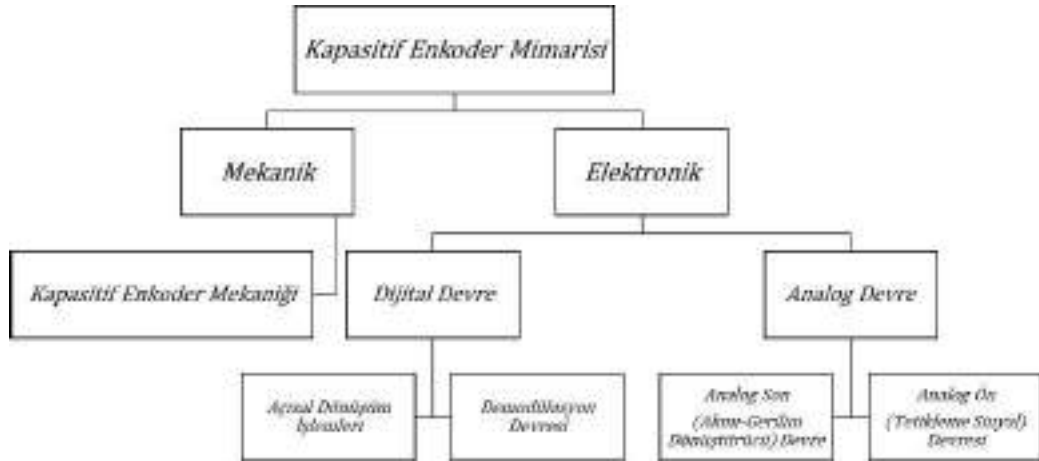
**Şekil 2.18. Çeşitli kutup sayıları için elektrotlar arası boşluk parametresinin kazanç üzerindeki etkisinin doğrulanması. (a)  $N = 8$ , (b)  $N = 16$ , (c)  $N = 32$  ve (d)  $N = 64$  kutuplu yenilikçi tip kapasitif enkoderler için elektrotlar arası boşluk anahtar parametresinin kazanç üzerindeki etkileri**

parametrelerin belirlenmesi esnasında kutup sayısının kazanç üzerindeki ağırlığının diğer parametrelere göre fazla olduğu saptanmış ve kutup sayısının artırılmasıyla kazancın yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu artış üretim sınırlarına bağlıdır ve Şekil 2.16b'den de anlaşıldığı gibi sürekli değildir. Buradan yenilikçi tip kapasitif enkoder özelinde benzer tip enkoderler için genel tasarım adımları önerilmiştir. Buna göre kapasitif bir enkoderin katman sayısı ve genel hatlarıyla rotor plakası belirlendikten sonra ilk olarak kutup sayısına karar verilmelidir. Kutup sayısı, üretim sınırlarına ve plaka boyutlarına göre belirlendikten sonra elektrotlar arası boşluk hesaplanmalıdır. Bu iki parametrenin ardından diğer parametreler belirlenebilir. Geliştirilen kapasitif enkoder için burada önerilen tasarım adımları takip edilerek daha önce Çizelge 2.2'de verilen başlangıç parametre değerleri güncellenmiş ve Çizelge 2.3'teki yeni değerlere karar verilmiştir. Çizelge 2.3'teki yeni değerler üzerinden kapasitif enkoderin üretimine geçilmiştir.

## 2.3. Kapasitif Enkoder Üretimi

Kapasitif enkoder mimarisi, bileşenlerinin uygulanış biçimlerine göre analog, dijital ve mekanik olmak üzere 3'e ayrılmıştır. Analog ve dijital uygulamalar elektronik başlığı altında toplanmıştır. Analog devrede tetikleme sinyallerinin üretimi ve enkoder çıkış sinyallerinin I-V dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Tetikleme sinyal üretiminin gerçekleştirildiği kısım analog ön, I-V dönüşümünün yapıldığı kısım analog son devre olarak adlandırılmıştır. Enkoder mekaniği, rotor ve stator plakalarıyla algılayıcı mekaniğinin kurulduğu kısımdır. Dijital devrede enkoder mekaniğinden elde edilen AM sinyaller demodüle edilip rotor plakasına ait açısız pozisyon verisi hesaplanmaktadır.

Tetikleme sinyallerinin üretimi, demodülasyon ve açısız dönüşüm işlemleri aynı denetleyici üzerinden yürütülmüştür. Şekil 2.19'da kapasitif enkoder mimarisinin uygulanma şekillerine göre ayrılan bileşenleri verilmiştir.



Şekil 2.19. Kapasitif enkoder mimari bileşenlerinin uygulanış biçimlerine göre ayrılması

### 2.3.1. Analog devrenin gerçekleştirilmesi

Analog devre iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısım kapasitif enkoderin tetiklendiği ön devredir. İkinci kısım enkoder çıkışındaki akım sinyallerinin gerilim sinyallerine dönüştürüldüğü son devredir. Her iki devre de analog olarak uygulandığından analog ön ve son olarak adlandırılmıştır. Analog devre kurulumunda kapasitif enkoderin tetikleme frekans aralığına uygun kazanç bant sabitine (GBW) sahip LMH6646, AD8605 ve TLV906

opamp entegreleri denenmiştir. Bu entegreler arasından fiyatı ve çalışma gerilimi düşük olan, ikili ve dörtlü tipleri bulunan TLV906 opamp entegreleri tercih edilmiştir. Algılayıcı maliyeti ve boyutları göz önüne alındığında uygun fiyatla düşük maliyet desteklenmiş, ikili ve dörtlü tip opamp seçenekleriyle minimalist tasarıma katkı yapılmış ve algılayıcıya esneklik kazandırılmıştır. Denetleyici üzerinden gerçekleştirilen işlemler göz önüne alındığında düşük besleme gerilimiyle denetleyici üzerinden çalışma desteklenmiştir.

### 2.3.1.1. Analog ön devrenin kurulumu

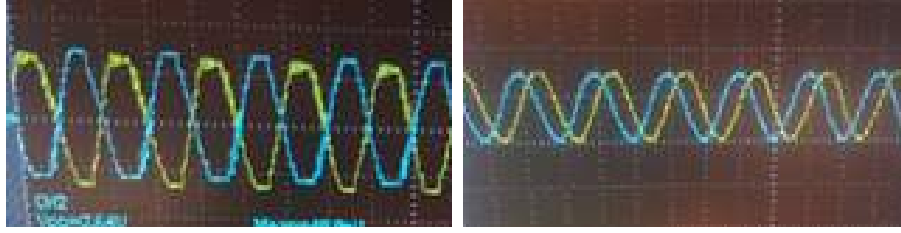
Analog ön devrede tetikleme sinyal üretimi yapıldığından bu devreye tetikleme sinyal devresi de denebilir. Tetikleme sinyal üretimi ve dijital devre işlemleri aynı denetleyici üzerinden yürütülmüştür. Kullanılan denetleyicinin DAC (dijital-analog dönüştürücü) biriminde iki adet çıkış bulunmaktadır. Dört adet tetikleme sinyalin üretilebilmesi için analog devre elemanlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle DAC çıkışlarına tampon devreler kurulmuştur. Böylece denetleyici harici analog devreden yalıtılmıştır. Aksi halde tetikleme sinyallerinde Şekil 2.21a'daki bozulmalar görülmüştür. Tampon çıkışlarına ikişer adet tampon ve eviren yükseltgeç daha bağlanarak çoklu tetikleme sinyalleri istenen faz, frekans ve genlikte Şekil 2.21b'deki gibi üretilebilmiştir. Tetikleme sinyal devresinin kurulumuna ait blok şema Şekil 2.20'de verilmiştir.



**Şekil 2.20. Analog ön devrenin blok şeması. Çoklu tetikleme sinyallerinin üretimi için kullanılan harici devrelerin kurulum sırası**

Analog ön devrenin blok şemasında tetikleme sinyallerinin üretimi için kullanılan DAC birimi; kaynak katmanı, denetleyiciyle harici devrenin yalıtılması için kullanılan tampon devreler; yalıtım katmanı, çoklu tetikleme sinyallerinin oluşturulmasında kullanılan tampon devreler ve eviren yükseltgeçler; uyum katmanı olarak adlandırılmıştır. Blok şemada her katman sonrası elde edilen sinyaller belirtilmiştir.

Şekil 2.21'de tetikleme sinyallerinin üretildiği analog ön devrenin kurulum ve test aşamalarında elde edilen sinyaller gösterilmiştir. Bu süreçte Şekil 2.21b'deki beklenen tetikleme sinyallerine ulaşıldıktan sonra analog ön devrenin üretimine geçilmiştir. Kapasitif



(a)

(b)

**Şekil 2.21. Analog ön devrenin geliştirilmesi sürecinde elde edilen tetikleme sinyalleri. (a) Tampon yükseltgeçler kullanılmadan kurulan tetikleme sinyal devresinden elde edilen sinyaller, (b) Tampon yükseltgeçlerin kullanımıyla elde edilen sinyaller**

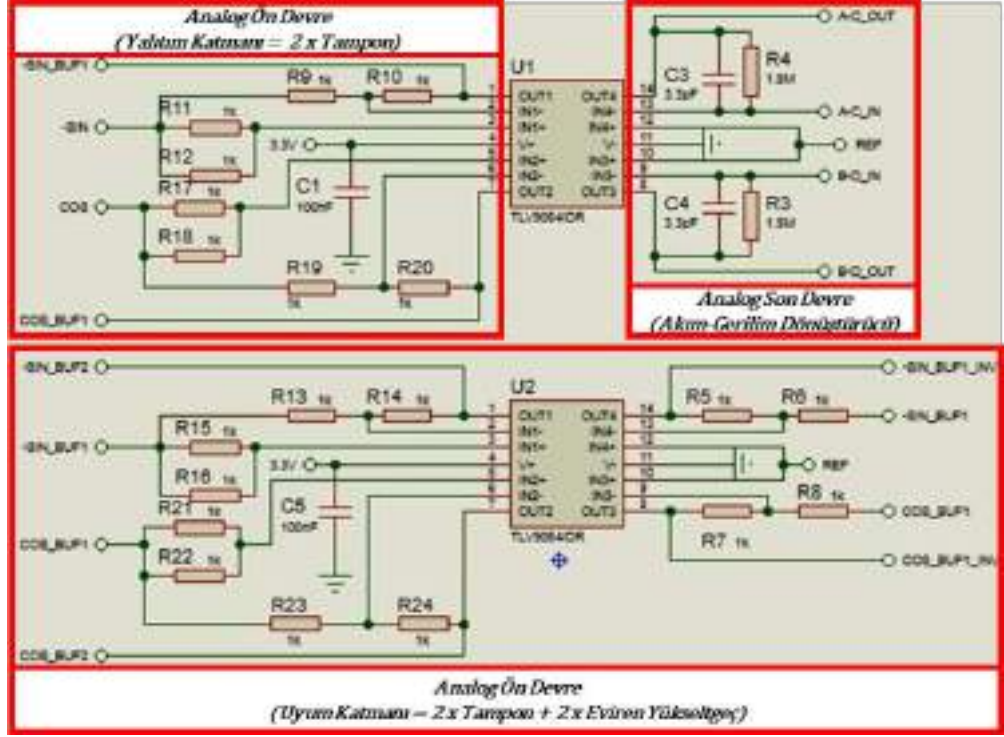
enkoderin minimalist tasarımı göz önünde bulundurularak analog ön ve son devreler aynı PCB üzerine basılmıştır. Böylece minimalist tasarım desteklenmiştir.

### 2.3.1.2. Analog son devrenin kurulumu

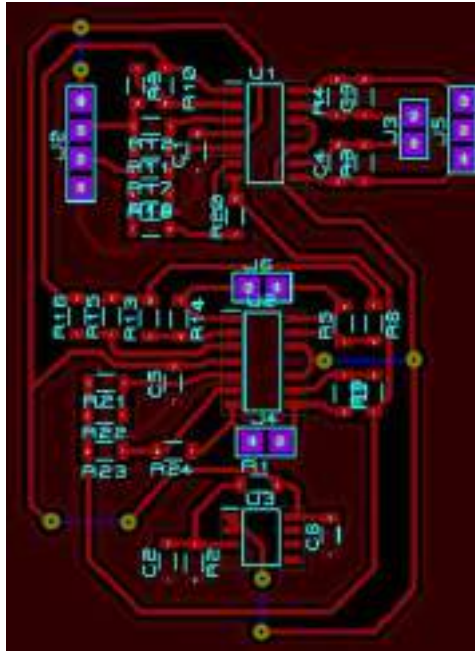
Kapasitif enkoderin stator plakalarından alınan akım sinyallerinin gerilime dönüşümü analog son devrede yapılmıştır. Bu nedenle analog son devreye I-V dönüştürücü devre de denebilir. I-V dönüşümü için ilk olarak AD8605 opamp kullanılmıştır. Daha sonra AD8605 yerine TLV9062 opamp tercih edilerek analog son devre güncellenmiştir. TLV906 opamp entegrelerin cevap hızları (slew rate) AD8605 entegrelerine göre daha yüksek, çalışma gerilimleri daha düşüktür.

I-V devre dinamiklerinin belirlenmesi için çeşitli denemeler ve benzetim çalışmaları yapılmış, konuyla ilgili çalışmalardan faydalanılmıştır[64, 65]. Buradan elde edilen kazanımlarla I-V devresinin geri besleme direncine  $R_f = 1.5 M\Omega$ , kapasitansına  $C_f = 3.3 pF$  şeklinde karar verilmiştir. Analog devre elemanlarına karar verilip ön testler yapıldıktan sonra her iki devre de aynı PCB üzerine basılmıştır. Analog devreye ait PCB tasarımları ve baskı devre Şekil 2.22’de gösterilmiştir.

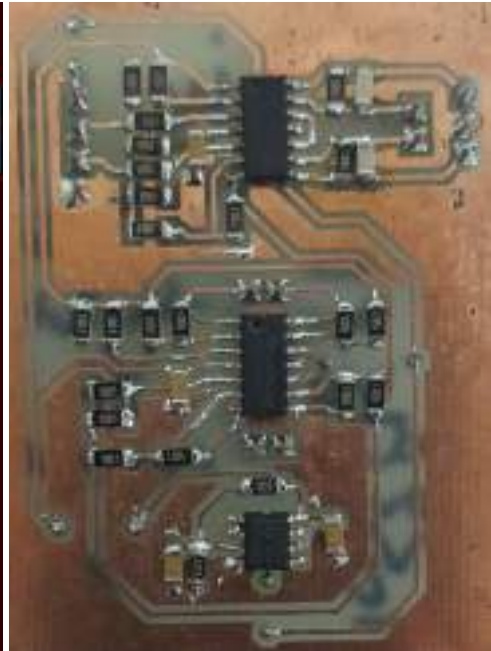
TLV906 yükseltgeçlerin besleme gerilimleriyle Şekil 2.22a’da REF ile gösterilen referans giriş gerilimleri denetleyici üzerinden karşılanmıştır. Referans giriş gerilimleri için denetleyici üzerinden alınan besleme gerilimi bir gerilim bölücünden geçirilerek yine bir tampon devre üzerinden analog devreye verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.22. TLV906 opamp entegreleri kullanılarak kurulan analog devrenin (a) PCB şematığı, (b) PCB düzeni, (c) Baskı devresi. Analog devre tetikleme sinyal devresi ve I-V dönüşüm devresinden oluşmaktadır. Her iki devre de aynı PCB üzerindedir.

## **2.3.2. Kapasitif enkoder mekaniğinin gerçekleştirilmesi**

Kapasitif enkoder mekaniği için rotor eğimine karşı dirençli üç katmanlı yapı tercih edilmiştir. Stator plakaları arasından geçen motor miline rotor plakası bağlanarak enkoder mekaniği tahrik sistemi üzerine kurulmuştur. Kapasitif enkoder mekaniği; stator ve rotor plakaların yanında enkoderi tahrik sistemi üzerine kurmak, plakaları hizalamak ve plakalar arası mesafeleri ayarlamak için kullanılan mekanik elemanlardan oluşmaktadır.

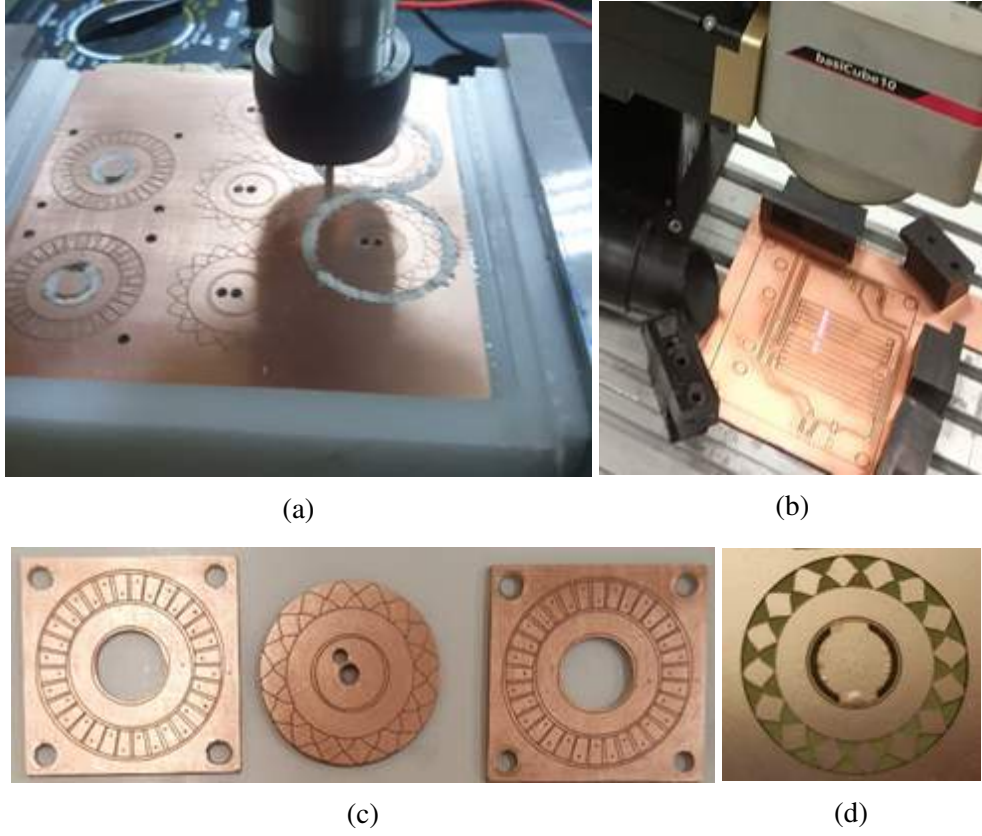
### **2.3.2.1. Kapasitif enkoder plakalarının tasarımı ve üretimi**

Kapasitif enkoder plakalarının üretimi için çeşitli üretim yöntemleri ve teknolojiler denenmiştir. Enkoder plakalarının üretimi sürecinde denenilen yöntemler ve alınan sonuçlardan bir kaçı Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Burada gösterilen yöntemlerin dışında da endüstriyel lazer kesim cihazları ve laboratuvar imkanlarında baskı devre teknolojileriyle denemeler yapılmış fakat lazer cihazların PCB yüzeyinden yansıma yapması ve genel olarak lazer cihazlarda kesim ve geniş alan tarama işlemlerinin tam anlamıyla gerçekleştirilememesinden dolayı lazer cihazlı üretimlerden vazgeçilmiştir. Standart baskı devreyle üretimde ise istenen hassasiyet yakalanamamıştır.

Şekil 2.23a'da PCB işleme verilen CNC (bilgisayarlı sayısal kontrol) router tezgahında referanslamadan kaynaklı homojen derinlikte kazımanın yapılamaması ve işleme ucunun kırılması gibi mekanik kısıtlarla karşılaşmıştır. Bu kısıtların yanında denenilen tüm yöntemlerde çift kat PCB için referans almadaki sorunlar enkoder plakalarının laboratuvar ortamında üretilmesini sınırlandırmıştır. Fakat CNC router tezgahıyla laboratuvar ortamında üretilen Şekil 2.23c'deki tek taraflı PCB plakalar kapasitif enkoder mekaniğinin ilk kurulumunda kullanılmıştır.

Enkoder prototipin plakaları arasındaki mesafelerin eşit ve sabit tutulabilmesi, rotor plakasının hareketli elemana sağlıklı bir şekilde bağlanabilmesi ve rotorun salınım yapmadan dönebilmesi için çeşitli tasarımlar önerilmiştir. Bilgisayar destekli tasarım programlarıyla gerçekleştirilen bu tasarımlardan ikisine Şekil 2.24b'de yer verilmiştir. Her iki tasarım da CNC router tezgahında üretilen aynı ölçüdeki PCB plakalarla gerçekleştirilmiştir.

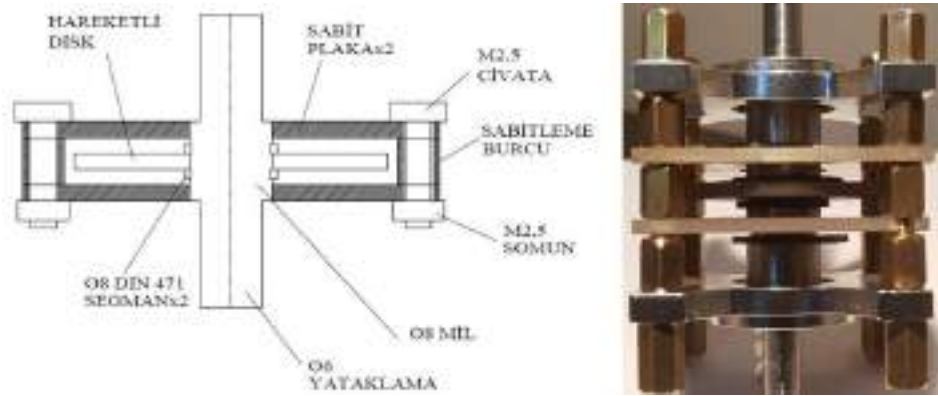
Şekil 2.24a'daki tek milli tasarımda hareketli rotor elemanı segmanlarla tek parça halindeki mile tutturulmuştur. Tek parça halindeki mil torna tezgahında kademeli olarak



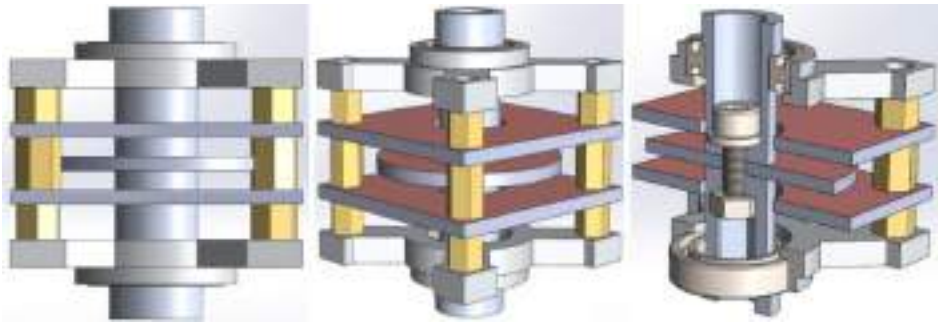
**Şekil 2.23. Kapasitif enkoder plakalarının üretiminde denenilen yöntemlerden bazıları. (a) Laboratuvar ortamında CNC router tezgahıyla yapılan kazıma, (b) Lazer etiketleme cihazıyla yapılan tarama işlemi, (c) CNC router tezgahında, (d) Lazer etiketleme cihazında işlenen plakalar**

işlenmiştir. Mildeki aksnel kaymaları önlemek için rulmanlar kullanılmıştır. Çift milli prototip tasarımın kurulumunda ise üç boyutlu yazıcıdan iki parça halinde silindirik bir mil basılmış ve rotor elemanı Şekil 2.24b'deki gibi iki mil arasına vida-somun bağlantısıyla sıkıştırılmıştır. Enkoder plakalarının hizalanması için stator plakaları aynı tek milli tasarımdaki gibi dört köşeden sabitlenmiştir. Hareketli mile bağlı rotor plakasında oluşabilecek salınımın önüne geçmek için stator plakaları üzerine mini rulmanlar yerleştirilmiştir. Bu sayede plakalardaki potansiyel eksen kaçıklıkların engellenmesi hedeflenmiştir.

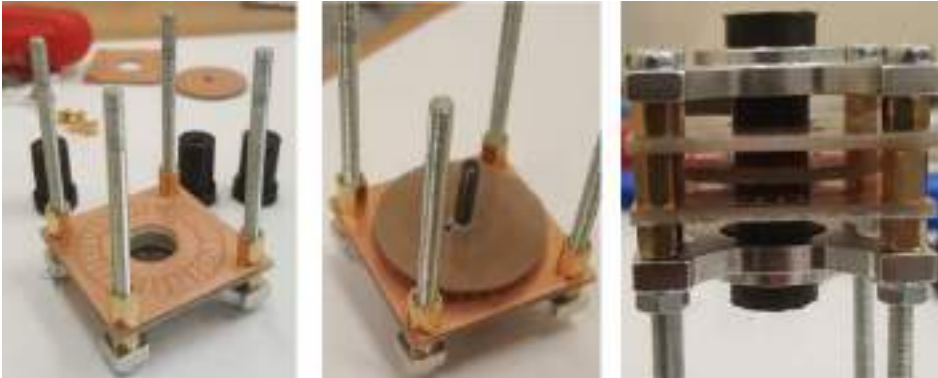
Şekil 2.24'teki prototip tasarımlar, laboratuvar imkanlarıyla tek katlı PCB plakalarla oluşturulduğundan enkoder mekaniğine tetikleme sinyalleri uygulanamamış ve elektronik kısım entegre edilememiştir. Fakat kapasitif enkoder prototipi için sunulan tasarımlar karşılaştırılabilmiş ve tasarımların mekanik sınırları görülebilmektedir. Böylece mekanik açıdan daha kararlı ve sağlam olduğu görülen Şekil 2.24b'deki tasarımla test düzeneğinin kurulumuna geçilmiştir.



(a)

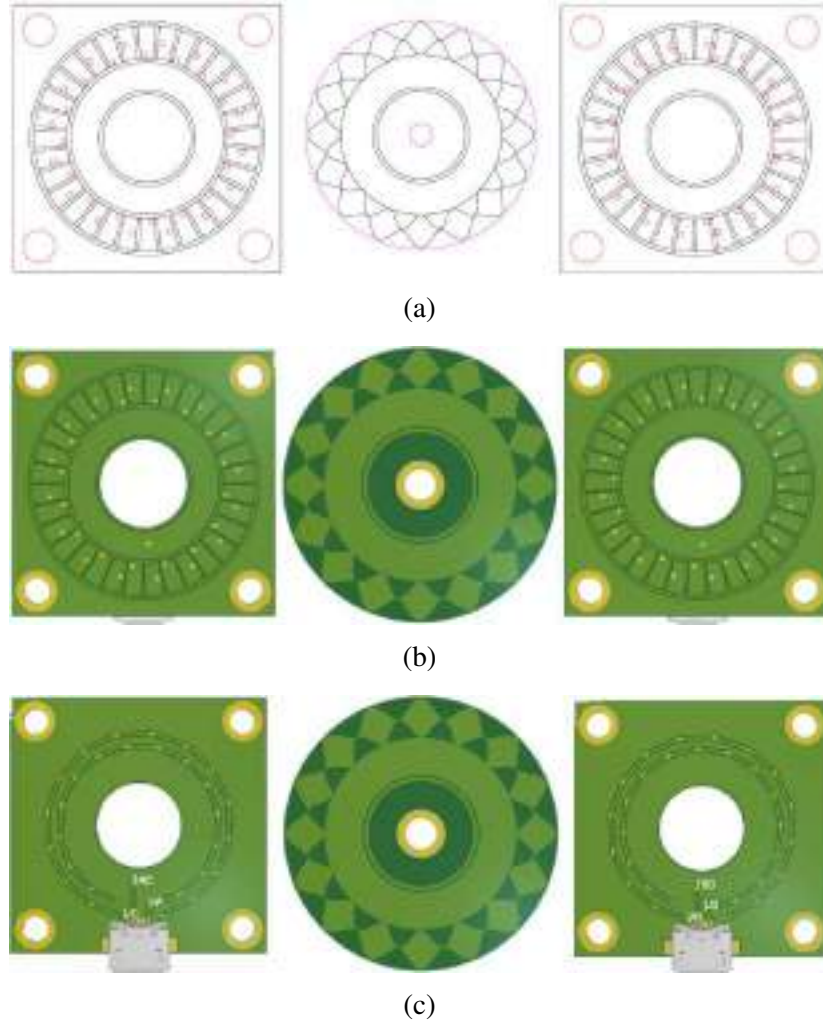


(b)



(c)

**Şekil 2.24. Kapasitif enkoder mekaniği için sunulan (a) Tek milli prototip tasarım ve tasarımın gerçekleştirilmesi, (b) Çift milli prototip tasarım ve (c) Çift milli prototip tasarımın gerçekleştirilmesi. Sunulan tasarımlar gerçekleştirilirken laboratuvar ortamında CNC router tezgahıyla üretilen 33.3 x 33.3 mm'lik stator plakaları ve dış yarıçapı 14.6 mm olan rotor plakası kullanılmıştır. Stator plakalarının iç delik yarıçapları 5.5 mm'dir.**



**Şekil 2.25. Kapasitif enkoderin stator ve rotor plakalarının çizimleri ve PCB tasarımları. Sırasıyla stator-1, rotor ve stator-2 plakaların (a) Ön yüz çizimleri ve (b) Ön yüz, (c) Arka yüz PCB tasarımları. Stator plakalarının PCB tasarımlarının arka yüzlerinde mikro USB konnektörler bulunmaktadır.**

Kapasitif enkoder plakalarına tetikleme sinyallerinin uygulanabilmesi ve enkoder çıkış sinyallerinin bu plakalar üzerinden alınabilmesi için enkoder plakalarının çift katlı PCB tasarımları yapılmıştır. PCB tasarımları üretime gönderilerek daha hassas üretim sınırları yakalanmıştır. Bunun için öncelikle bilgisayar destekli çizim programı üzerinden enkoder plakaları çizilmiş, daha sonra yapılan çizimler elektronik devre tasarım programında çift katlı PCB tasarımları haline getirilmiştir. Böylece alışılmadık dışında bir elektronik kart tasarımı gerçekleştirilerek çeşitli tasarım programları üzerinden Şekil 2.25'teki enkoder plaka tasarımlarına ulaşılmıştır. Bu şekildeki stator plaka görsellerinin arka yüzlerinde mikro-B tip USB konnektörlere yer verilmiştir. Konnektörler vasıtasıyla plakalar üzerindeki elektrotlara tetikleme sinyalleri uygulanmakta ve enkoder çıkış

sinyalleri alınmaktadır. Rotor plakasının her iki yüzü de aynı desene sahiptir.

Kapasitif enkoder plakalarının üretilebilmesi için bilgisayar destekli çizim ve elektronik devre tasarım programları birleştirilerek standart PCB tasarımının dışına çıkmıştır. Bu sayede daha önceki üretim denemelerinden çok daha hassas ve kaliteli üretim teknolojileriyle plakalar üretilebilmiştir. Şekil 2.26'da çift katlı PCB şeklinde üretilen kapasitif enkoder plakalarına yer verilmiştir.



(a)



(b)

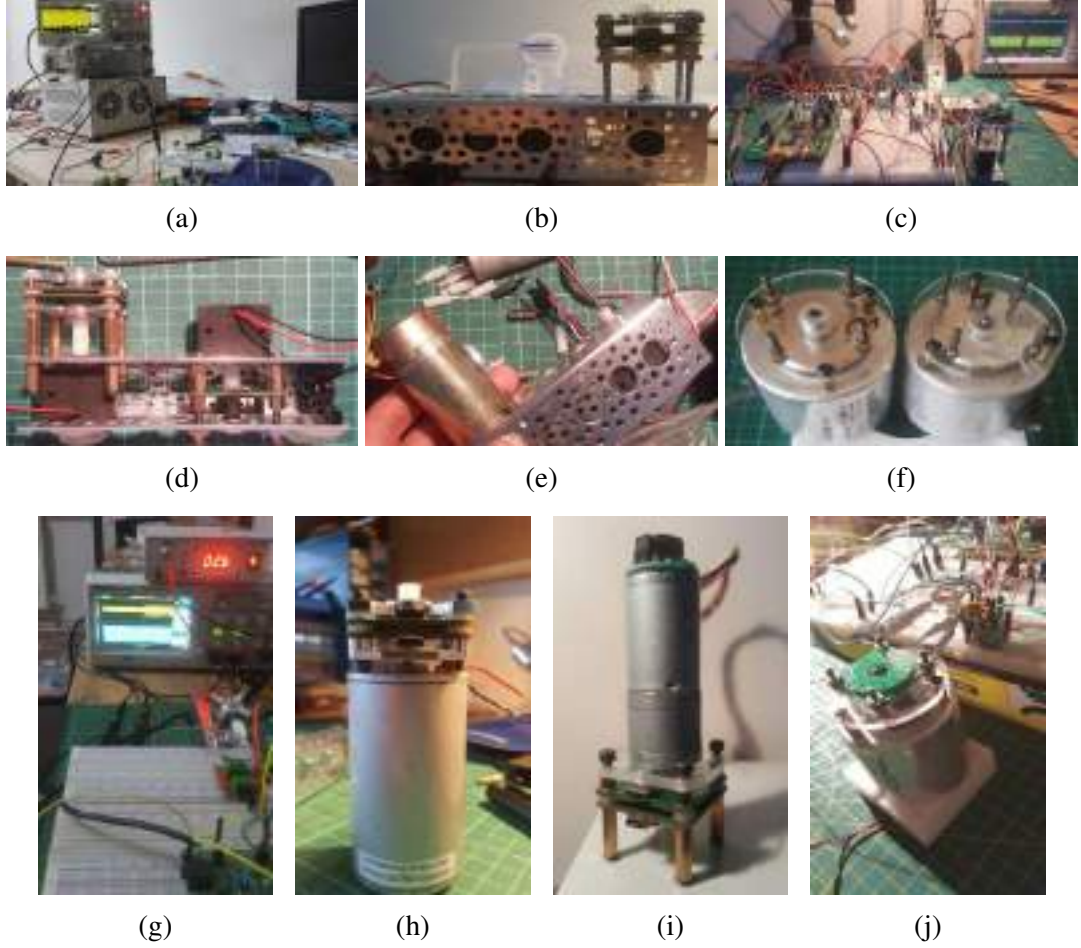
**Şekil 2.26. Hassas üretim teknolojileriyle üretilen stator-1, rotor ve stator-2 plakalarının (a) Ön ve (b) Arka yüzleri**

### **2.3.2.2. Kapasitif enkoder test düzeneğinin kurulumu**

Sunulan kapasitif enkoder mekaniğinin sağlıklı bir şekilde test edilebilmesi için hassas bir test düzeneğine ihtiyaç vardır. Aksi halde kapasitif enkoderin değil, test düzeneğinin hataları ölçülmüş olacaktır. Ayrıca geliştirilen kapasitif enkoderin uygulanabilirlikten uzaklaşmaması için enkoderlerin genel kullanımına uygun bir test düzeneği kurulmalıdır.

Bu çalışmada düşük maliyet ve kısıtlı laboratuvar imkanlarıyla sıfırdan bir test düzeneği kurulmuştur. Test düzeneğinin enkoderlerin genel kullanımına uygun ve özellikle

hassas olabilmesi için çeşitli ölçü, özellik ve tiplerdeki motorlar denenmiştir. Çeşitli motorlarla kurulan test düzenekleri üzerinden bu çalışmada sunulan kapasitif enkoder mekaniğiyle yapılan ölçümler gözlenerek test düzeneklerinin hassasiyet ve kararlılıkları artırılmaya çalışılmıştır. Kapasitif enkoder test düzeneğinin geliştirilmesi aşamasında kurulan düzeneklerden bir kaçı Şekil 2.27’de verilmiştir.



**Şekil 2.27. Kapasitif enkoderin sağlıklı bir şekilde test edilebildiği, düşük maliyetli ve hassas bir test düzeneğinin kurulması sürecinde geçilen safhalardan bazıları. (a)-(j) İlk test düzeneğinden başlanarak çeşitli elemanlarla kurulan test düzeneklerinden kesitler**

Kapasitif enkoder mekaniği için kurulan ilk test düzeneklerinden biri Şekil 2.27a’da gösterilmiştir. Burada enkoder motor bağlantısı olmadan elle döndürülmekte ve enkoderin tek stator plakası üzerinden çıkış sinyali alınarak osiloskoptan takip edilmektedir. Şekil 2.27b’de kapasitif enkodere redüktörlü bir mikro DC (doğru akım) motor entegre edilerek test düzeneği oluşturulmuş ve rotor plakası motor beslemesiyle döndürülmüştür. Çıkış sinyalleri Şekil 2.27g’de gözlenmektedir.

Tetikleme sinyal devresi basıldıktan sonraki ilk denemeler Şekil 2.27c’deki

redüktörlü mikro DC motorlu düzenekle yapılmıştır. Burada enkoderin her iki stator plakasından alınan çıkış sinyalleri gözlemlenmektedir. Şekil 2.27d’de redüktörlü mikro DC motorların farklı yerleşim kombinasyonlarıyla kurulan düzenekler verilmiştir. Şekil 2.27e’de ise vidalı milli redüktörlü mikro DC motor ve enkoderli DC motor kullanılarak test düzenekleri oluşturulmuştur. Küçük boyutlu motorlarla kurulan düzeneklerle istenen hassasiyet yakalanamayınca Şekil 2.27f ve Şekil 2.27h’deki redüktörsüz DC motorlar ile Şekil 2.27i’deki redüktörlü ve enkoderli daha büyük ölçekli motorlarla yeni test düzenekleri kurulmuştur. Buradaki test düzeneklerinde hassasiyetin artırılması ve kararlılığın sağlanması için laboratuvar imkanlarıyla şeffaf pleksi levhalardan motor bağlantı elemanları üretilmiştir. Şekil 2.27j’de bu bağlantı elemanlarının kullanıldığı test düzeneklerinden biri gösterilmiştir.



(a)



(b)

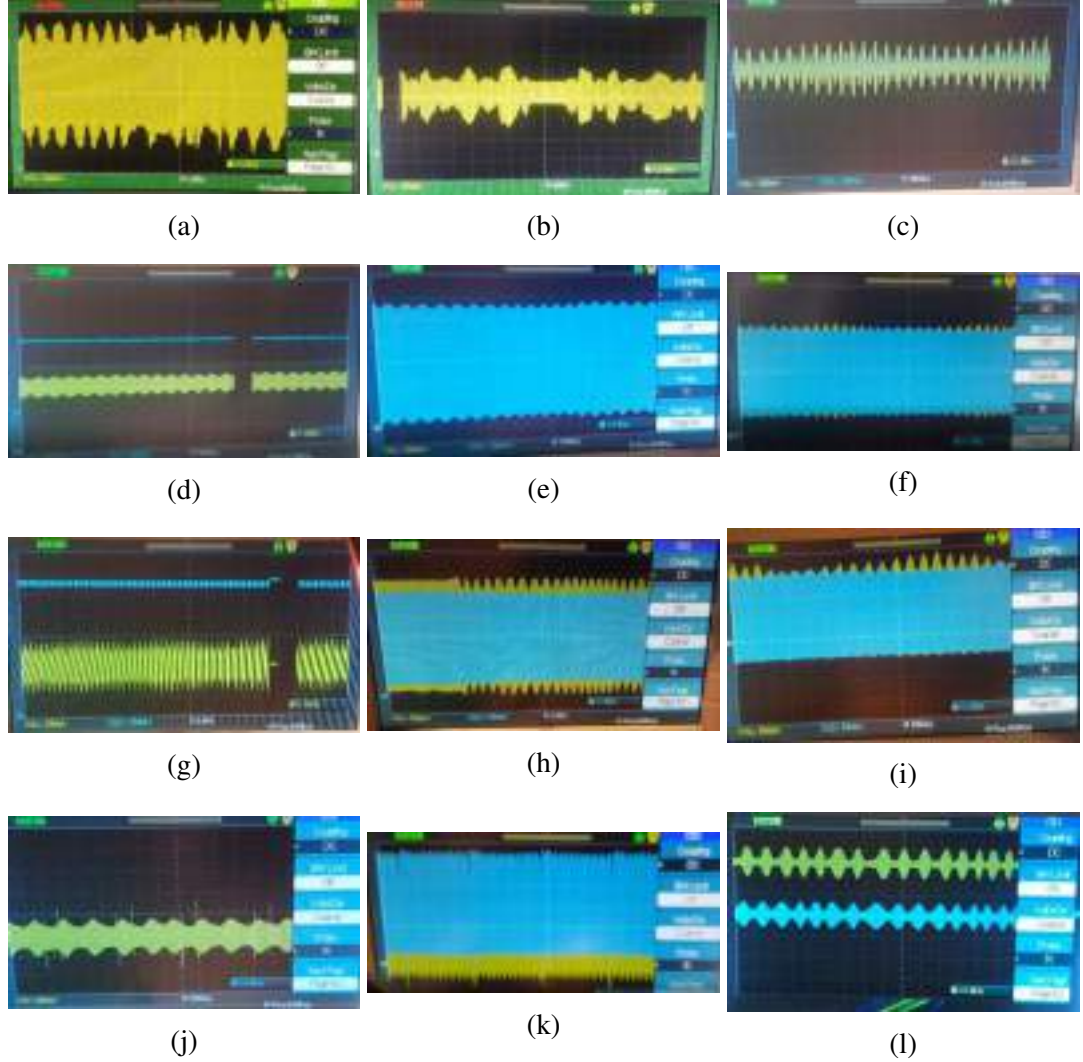
(c)

(d)

**Şekil 2.28. Kapasitif enkoder test düzeneğinin kurulumu sürecinde kullanılan (a) Çeşitli motorlar ve enkoder plakaları, (b) Orta, (c) Büyük ve (d) Küçük boy servo motorlar**

Şekil 2.28’de test düzeneğinin geliştirilmesi sürecinde denenilen tahrik elemanları ve

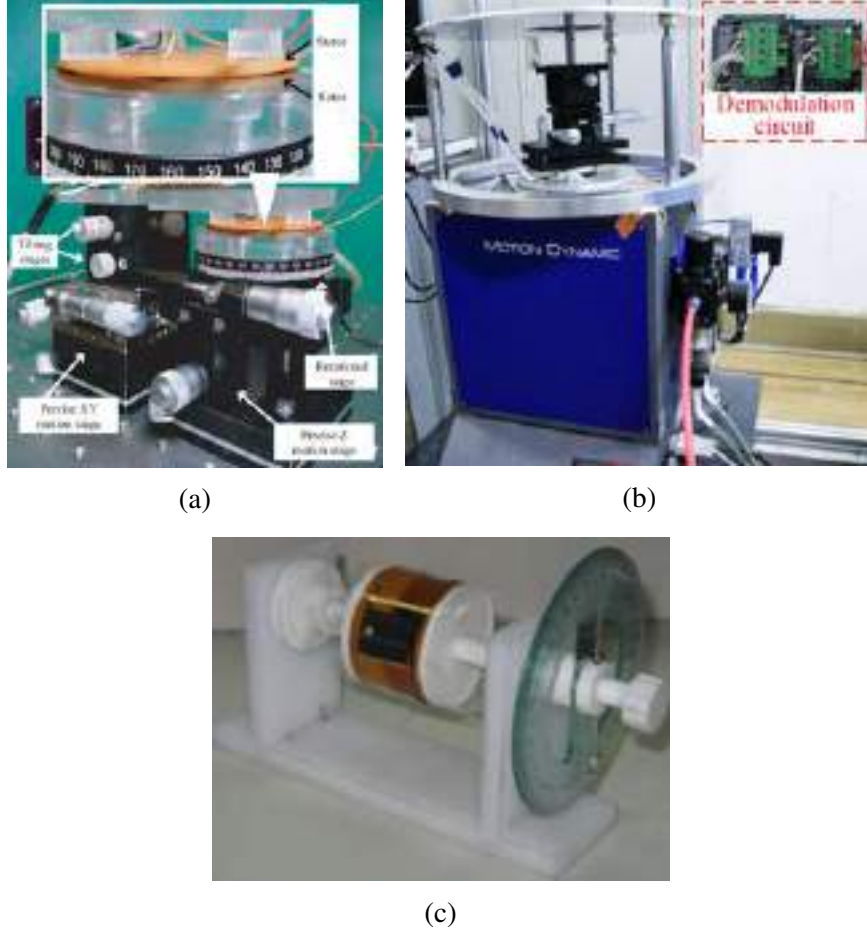
üretileen kapasitif enkoder plakaları verilmiştir. Buradaki AC servo motorlarla test düzeneğindeki hassasiyet ve kararlılık sağlanmış, enkoderlerin genel kullanımına uygun bir test düzeneği kurulmuştur. Şekil 2.28'de üç farklı AC servo motor görölmektedir. Bunlar arasından boyutunun küçük olması ve uyumlu bir sürücüsünün bulunması dolayısıyla Şekil 2.28d'deki 400 W'lık motor tercih edilmiştir.



**Şekil 2.29. Kapasitif enkoder test düzeneğinin gelişimi süresince kurulan test düzeneğinden ölçülen enkoder çıkış sinyalleri. (a) İlk kurulan test düzeneğinden başlanarak (l) beklenen sinyaller yakalanıncaya kadar test düzeneğinin geliştirilmesine devam edilmiştir.**

Şekil 2.29'dan kapasitif enkoder test düzeneğinin gelişimi takip edilebilir. Burada ilk test düzeneğinden Şekil 2.28d'deki motorun kullanıldığı test düzeneğine kadar, sunulan kapasitif enkoder üzerinden ölçülen sinyaller özetlenmiştir. Şekil 2.29l'deki düzgün ve tam modülasyona yakın enkoder çıkış sinyallerinden hassas bir test düzeneğinin kurulduğu anlaşılmaktadır. Buradaki sinyaller kapasitif enkoderin, motor sürücü aktif edilmeden elle

döndürülmesiyle elde edilmiştir. Kapasitif algılayıcı çalışmalarında algılayıcı çıkış sinyallerinin herhangi bir ön işlemten geçirilmesin ya da geçirilmesin doğrudan paylaşıldığı çalışma sayısı çok azdır [4, 25, 44]. Halbuki kapasitif bir enkoderin elektronik devre işlemlerinin tamamı bu sinyaller üzerinden yapılmaktadır.

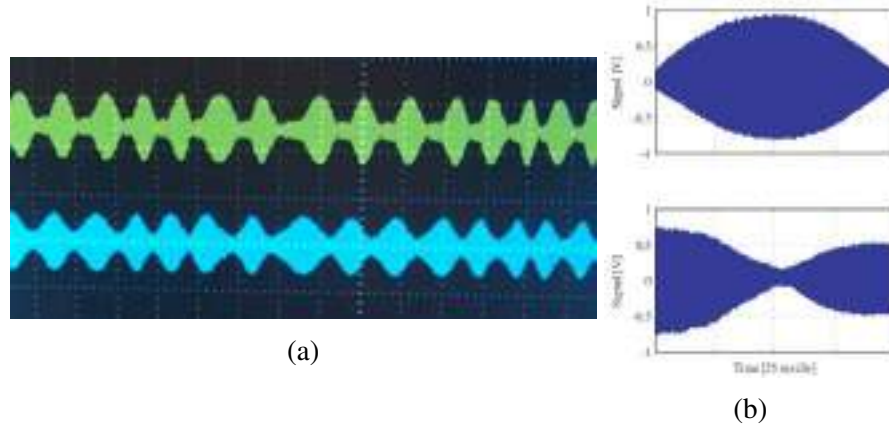


**Şekil 2.30. Kapasitif enkoder çalışmalarındaki test düzeneklerinden bazıları. (a) Çift katmanlı enkoder için mikrometre platformlarla kurulan ve elle döndürülen enkoder [44], (b) Çift katmanlı enkoder için mikrometre platformlarla döner tabla üzerine kurulan ve bu döner tablayla döndürülen enkoder [41], (c) Esnek elektrotlu enkoderin elle döndürüldüğü test düzeneği [13]**

Kapasitif enkoder çalışmalarında düşük maliyet ve uygulanabilirlik gözetilmeden oluşturulan test düzeneklerine ve kurulumu kolay olduğundan genelde iki katmanlı enkoder yapılarına rastlanmaktadır. Bu çalışmaların genelinde enkoder plakalarının hassas bir şekilde hizalanabilmesi ve plakalar arası mesafelerin ayarlanabilmesi için mikrometrelerle hareket ettirilen yüksek maliyetli platformlar kullanılmıştır [40, 44]. Yine bu çalışmalarda kapasitif enkoderlerin rotor plakaları, motor milleri yerine mikrometrelili hassas platformlar ve döner tablalar gibi düz zeminler üzerine yerleştirilerek rotor plaka eğiminden

kaynaklanabilecek olası hatalar ihmal edilmiştir. Bunlar gibi yüksek maliyetli ve hassas düzeneklerle kurulan test düzeneklerinde hassas ölçümler yapılabilir fakat bu çalışmalarda sunulan enkoderler uygulanabilirlikten uzaklaşabilmektedir. Aynı durum enkoderlerin elle döndürüldüğü çalışmalar için de geçerlidir [13, 40, 44, 48].

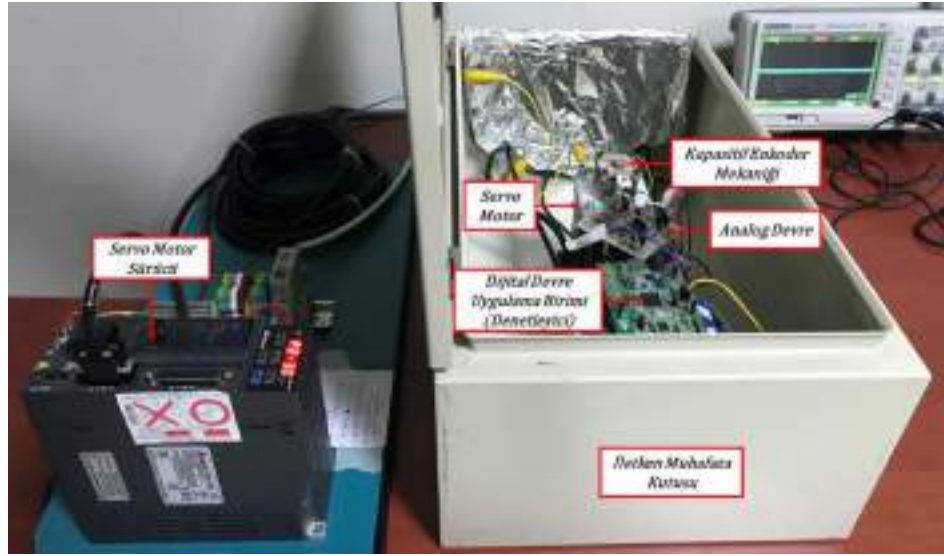
Şekil 2.30a'da iki katmanlı kapasitif bir enkoder için mikrometreli hassas platformlarla kurulan ve enkoderin elle döndürüldüğü bir test düzeneği verilmiştir. Şekil 2.30b'de ise yine iki katmanlı kapasitif enkoder için ve yine mikrometreli platformların kullanıldığı bir test düzeneği görülmektedir. Fakat buradaki iki katmanlı kapasitif enkoder diğerinden farklı olarak yüksek maliyetli endüstriyel döner tablayla döndürülmüştür. Şekil 2.30c'de ise diğer 2 kapasitif enkoder test düzeneğine nazaran maliyetin ciddi oranda düşürüldüğü fakat elle döndürmeyle uygulanabilirlikten uzaklaşılacak bir test düzeneği görülmektedir.



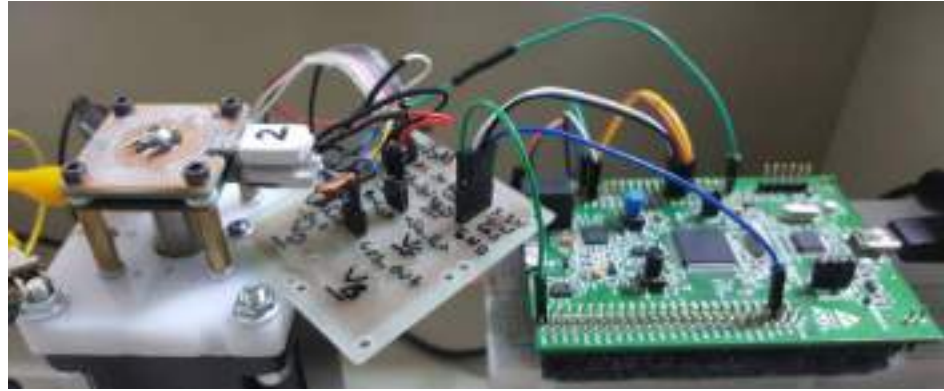
**Şekil 2.31. Geliştirilen kapasitif enkoderin çıkış sinyallerinin literatürdeki diğer bir kapasitif enkoder çalışmasından alınan çıkış sinyalleriyle karşılaştırılması. (a) Bu çalışmada sunulan kapasitif enkoderin çıkış sinyalleri, (b) Bu çalışmadakine benzer şekilde elle döndürülen literatürdeki diğer bir çalışmadan alınan çıkış sinyalleri [44]**

Şekil 2.30a'daki çalışmadan alınan algılayıcı çıkış sinyalleriyle bu çalışmadaki kapasitif enkoder üzerinden ölçülen Şekil 2.291'deki çıkış sinyalleri Şekil 2.31'de karşılaştırılmıştır. Her iki sinyal de elle döndürmeyle elde edilmesine rağmen Şekil 2.31b'de verilen çıkış sinyali, mikrometreli platformların kullanıldığı test düzeneğinden alınmış olup sadece belirli bir bölümü paylaşılmıştır. Buradaki çalışmada ise yüksek maliyetli elemanlar kullanılmadan düzgün ve tam modülasyona yakın sinyaller yakalanmıştır.

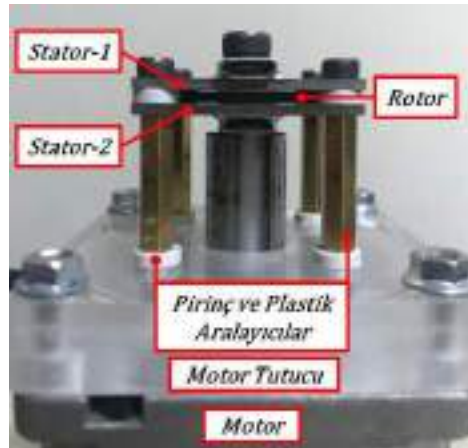
Bu çalışmada geliştirilen üç katmanlı kapasitif enkoderin elle döndürülmesinden



(a)



(b)



(c)

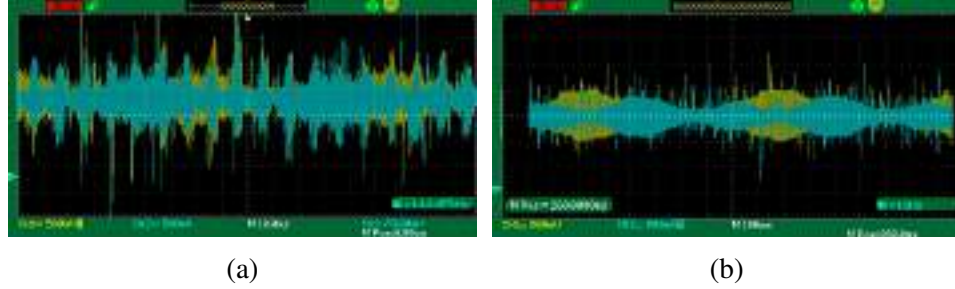


(d)

**Şekil 2.32. Kapasitif enkoderin test düzeneği ve bileşenleri. (a) Kapasitif enkoder test düzeneği, (b) Gerçekleştirilen kapasitif enkoder mimarisi, (c) Kapasitif enkoder mekanizmasının bileşenleri ve (d) Enkoder mekanizmasının izometrik görünüşü**

olumlu sonuçlar alındıktan sonra enkoderi döndüren motor ile sürücü bağlantısı yapılarak sunulan enkoderin test edilebileceği hassasiyette, uygulanabilirliği yüksek ve düşük maliyetli bir test düzeneğine ulaşılmıştır. Şekil 2.32’de bu test düzeneğine yer verilmiştir.

Şekil 2.32b’deki kapasitif enkoder mimarisi muhafaza kutusu içerisine alınmadan önce sürücü aktif edilerek motor döndürülmüş ve enkoder çıkışlarında Şekil 2.33a’daki gürültüler gözlenmiştir. Bu gürültüler, kapasitif enkoder mimarisinin iletken muhafaza içerisine alınması ve topraklanmasıyla Şekil 2.33b’deki seviyeye indirilmiştir. Şekil 2.33a’daki enkoder çıkışlarında görülen gürültüler iletken muhafazayla bir miktar düşürülse de tamamen ortadan kaldırılamamıştır. Gürültüleri ortadan kaldırmak için elektronik devreye dijital filtreler eklenmiştir.



**Şekil 2.33. Kapasitif enkoder test düzeneğindeki motor sürücü aktif edildiğinde enkoderin çıkış sinyallerinde gözlenen gürültülerin enkoderin iletken muhafaza içerisine alınıp topraklanmasıyla düşürülmesi. (a) Kapasitif enkoderin iletken muhafaza içerisine alınmadan önceki, (b) Kapasitif enkoderin iletken muhafazayla topraklanmasından sonraki çıkış sinyalleri**

Kapasitif enkoderi döndüren motor, sürücüsü üzerindeki tuş takımıyla boşa çalışma modunda sürülmüştür. Tuş takımıyla motor devri ayarlanabilmektedir. Rotor hareketinin daha rahat anlaşılıp takip edilebilmesi için test düzeneğindeki stator-1 plakası üzerine harici bir plaka, motor miline de Şekil 2.32b’de görülen gösterge elemanı bağlanmıştır. Bu eklemeler kapasitif ölçümden bağımsızdır. Sadece görsel takibi kolaylaştırmak için yapılmıştır.

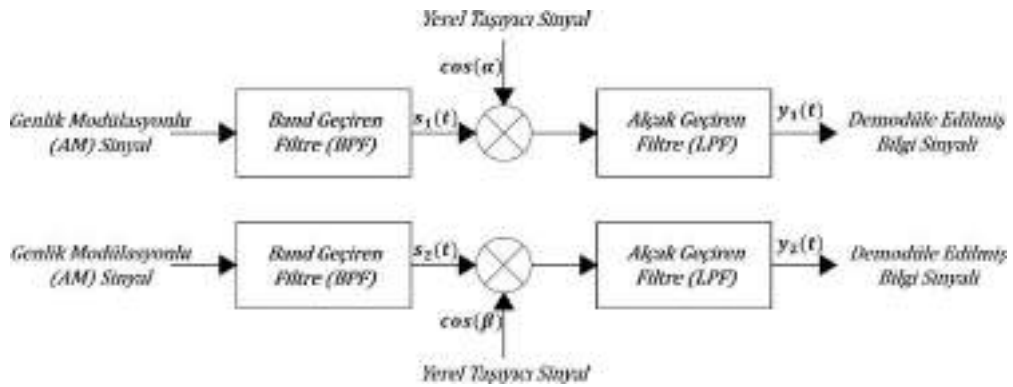
### 2.3.3. Dijital devrenin gerçekleştirilmesi

Dijital devre, demodülasyon devresi ve açısal dönüşüm işlemlerinden oluşmaktadır. Demodülasyon devresinde kapasitif enkoder çıkışındaki AM sinyaller demodüle edilirken açısal dönüşümde demodüle edilmiş bilgi sinyallerinden açısal pozisyon bilgisi

hesaplanmaktadır. Buradaki işlemlerin tamamı uygun fiyatlı bir denetleyici üzerinde dijital olarak gerçekleştirilmiştir.

### 2.3.3.1. Demodülasyon devresinin uygulanması

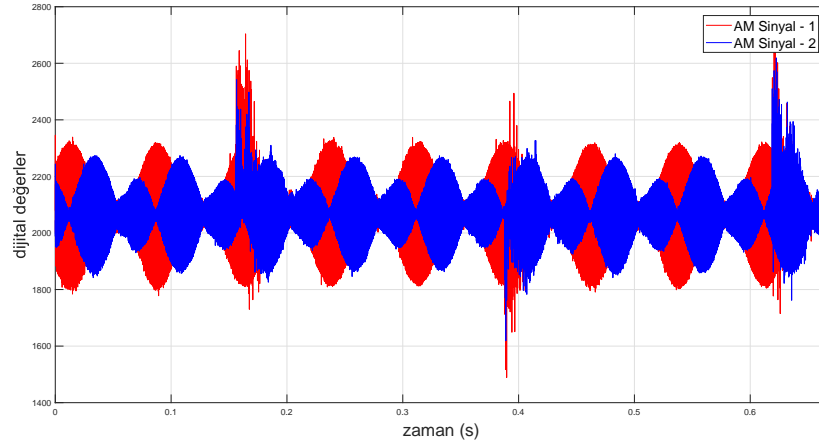
Demodülasyon devre işlemleri, genlik modülasyonlu enkoder çıkış sinyallerinin analog dijital dönüştürücü (ADC) birimiyle eş zamanlı okunduktan sonra yerel taşıyıcılarla çarpılmasını ve çarpım sonuçların alçak geçiren filtrelerden (LPF) geçirilmesini içermektedir. Demodülasyon devresindeki işlemler Şekil 2.34'teki blok diyagramla verilmiştir.



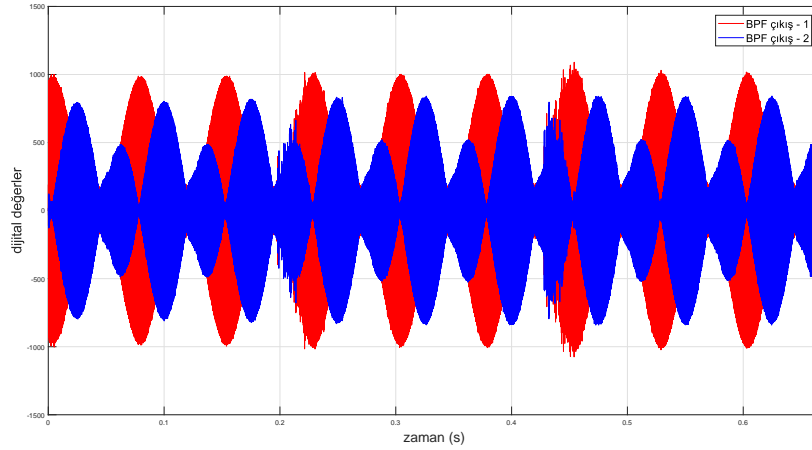
**Şekil 2.34. Demodülasyon devresi gerçekleştirilirken uygulanan işlem adımları. İşlemlerin tamamı uygun fiyatlı ve seri işlem yapan bir denetleyicide dijital olarak uygulanmıştır.**

Enkoder çıkış sinyallerindeki gürültülerin bastırılması için demodülasyon devresine bant geçiren filtreler (BPF) eklenmiştir. Şekil 2.35'te bant geçiren filtre giriş ve çıkışındaki sinyaller verilmiştir. Kapasitif enkoderin iletken muhafazayla topraklanmasından sonra tam anlamıyla giderilemeyen gürültüler, BPF sayesinde yüksek oranda bastırılmıştır.

BPF çıkışlarındaki sinyaller yerel taşıyıcılarla çarpılıp alçak geçiren filtrelerden geçirilerek sinyallerdeki yüksek frekans bileşenleri ortadan kaldırılmıştır. LPF sonunda elde edilen sinyallerin ofsetleri alınmalı ve genlikleri olabildiğince eşitlenmelidir. Aksi halde bu uyumsuzluklar motor miline bağlı rotorun açısal pozisyon verisine hata olarak yansıtacaktır. LPF çıkışlarındaki uyumsuzlukların giderilebilmesi için açısal dönüşüm işlemlerinden önce kalibrasyon işlemi uygulanmıştır. Kalibrasyon işlemiyle sinyallerdeki genlik uyumsuzlukları giderilmiş ve ofsetler kaldırılmıştır. Şekil 2.36'dan LPF çıkışları ve kalibrasyon sonucundaki sinyaller görülebilir.



(a)

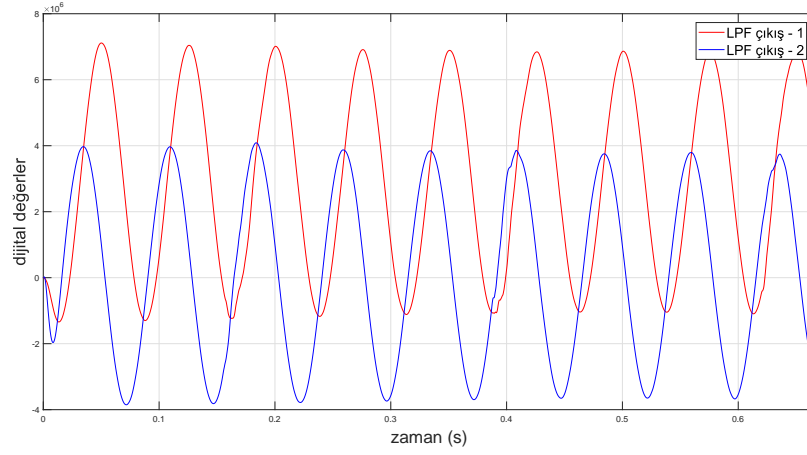


(b)

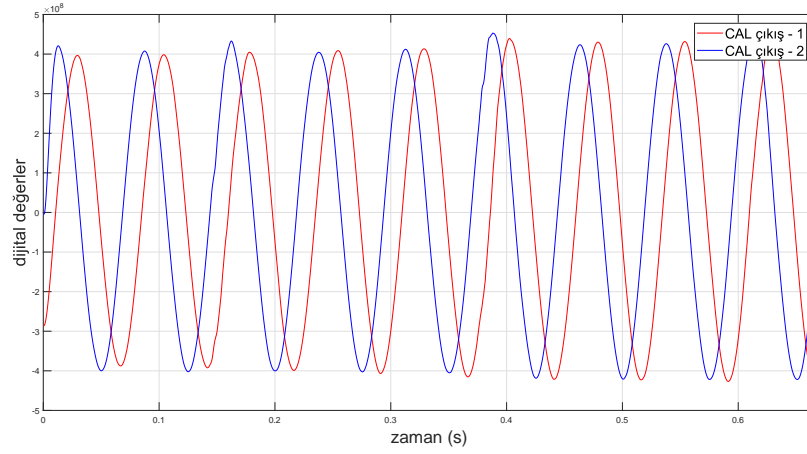
**Şekil 2.35. Kapasitif enkoder çıkışındaki AM sinyallere BPF uygulanması. (a) BPF girişindeki, (b) BPF çıkışındaki sinyaller**

Bu bölümde 50 *rpm* devirle döndürülen motor üzerinden yenilikçi kapasitif enkoderle okunan AM sinyaller için demodülasyon devresindeki işlemler adım adım uygulanmıştır. Şekil 2.35a'dan başlanarak Şekil 2.36b'ye kadar sunulan grafiklerde uygulanan demodülasyon devresindeki işlem adımlarının öncesi ve sonrasındaki sinyaller gösterilmiştir. Şekil 2.36b'deki sinyaller, 50 *rpm* devirle dönen motor üzerinden yenilikçi kapasitif enkoderle okunan AM sinyallerinin demodülasyon devresinden geçirilmesiyle elde edilen demodüle edilmiş bilgi sinyalleridir. Demodülasyon devre işlemlerinin öncesini ve sonrasını göstermek için toplanan sinyal verileri seri port terminalleri vasıtasıyla alınmıştır.

Demodülasyon devresindeki işlemler, tetikleme sinyallerinin üretiminde kullanılan



(a)



(b)

**Şekil 2.36. BPF ıkışındaki AM sinyallere LPF uygulanması ve kalibrasyon işlemleriyle sinyaller arasındaki uyumun sağlanması. (a) LPF çıkışındaki sinyaller, (b) Kalibrasyon işlemleri sonucunda elde edilen uyumlu sinyaller. Kalibrasyon işlemi öncesindeki LPF'nin kesim frekansı 50 Hz'dir.**

aynı denetleyici üzerinden yürütülmüştür. Denetleyicinin DAC birimi üzerinden eş zamanlı üretilen tetikleme sinyallerinden ikisi çarpma işlemlerinde yerel taşıyıcı olarak kullanılmıştır. Bu nedenle demodülasyon işlemleriyle tetikleme sinyal üretimleri senkron olmalıdır. Buradaki senkronizasyon denetleyicinin zamanlayıcı (TIM) birimleriyle sağlanmıştır. DAC ve ADC birimleri, zamanlayıcı üzerinden aynı frekansta tetiklenmiş ve tetikleme sinyal rimiyle dijital devre işlemleri paralel hale getirilmifitir. Denetleyici performansını en verimli Şekilde kullanmak için ADC ve DAC birimleri doğrudan hafızaya erişim (DMA) vre birimi üzerinden çalıştırılmıştır.

STM32F4 denetleyicisindeki ADC ve DAC birimleri çok özellikli ve esnek

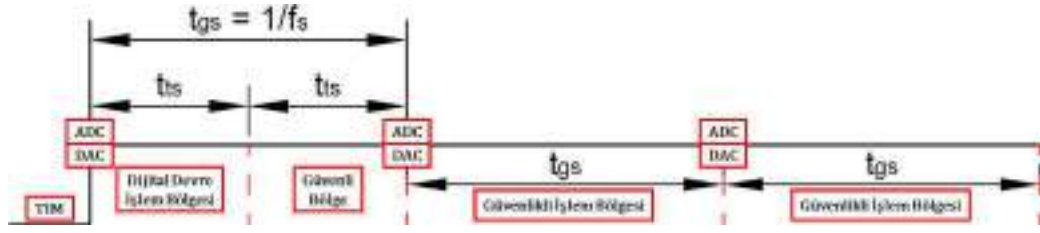
kullanıma sahip çevre birimleridir. Fakat yapılan araştırmalar sonucunda bu özelliklerin tamamının kullanımını destekleyen hazır kütüphane veya fonksiyonlara rastlanmamıştır. Bu nedenle STM32F4 ve benzer denetleyicilerle gerçekleştirilen mevcut uygulamaların çoğunda donanımdan bağımsız, evre birimlerin tek başlarına ve sadece temel özellikleriyle kullanıldığı uygulamalara denk gelinmiştir.

Bu çalışmada sunulan kapasitif enkoder performansını artırmak için denetleyici ve evre birimleri en verimli şekilde kullanılarak donanımla i içe ve geçici hafıza birimleri (register) seviyesinde bir gömülü sistem programlama gerçekleştirilmiştir. ADC ve DAC birimlerinin genişletilmiş özellikleri kullanılarak seri işlem yapan uygun fiyatlı denetleyicide paralel işlem yapan iki evre birimi çalıştırılmıştır. evre birimleri arasındaki uyum harici bir zamanlayıcıyla sağlanarak senkron dijital demodülasyon yürütülmüştür.

Senkron dijital demodlasyonda kullanılan zamanlayıcı birimin tetikleme frekansı, dijital devredeki işlemlerin süreleri toplamı gz önüne alınarak belirlenmiştir. Zamanlayıcının tetikleme frekansı aynı zamanda ADC biriminin örnekleme frekansıdır. DAC biriminden üretilen tetikleme sinyallerinin frekansı ( $f_c$ ) da örnekleme frekansına ( $f_s$ ) göre belirlenmiştir. Dijital devrede gerçekleştirilen işlemlerin toplam süreleri ( $t_{ts}$ ) lldkten sonra bu srenin üzerine en az bir o kadar daha süre eklenerek güvenlikli çalışma süresi ( $t_{gs}$ ) hesaplanmıştır. Güvenlikli alışma süresi kapasitif enkoderdeki dijital işlemlerin tümü için ayrılan genel süredir. Buradaki süre sınırı Denklem 2.17 ile genellenmiş olup  $f_s$  bu sınıra göre belirlenmiştir.

$$2t_{ts} \leq t_{gs}, \quad t_{gs} = \frac{1}{f_s}. \quad (2.17)$$

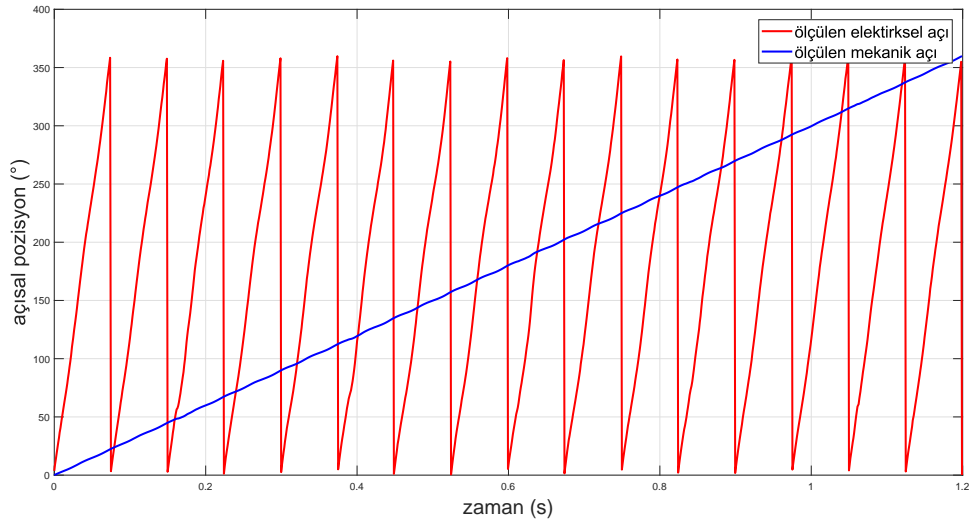
şekil 2.37'deki zaman diyagramı üzerinden zamanlayıcı birimiyle ADC ve DAC birimlerin tetiklenmesi ve dijital devre işlemleri için ayrılan süreler anlatılmaya çalışılmıştır. Sunulan kapasitif enkoder mimarisi için toplam işlem süresi  $t_{ts}$ , yaklaşık  $20 \mu s$  llmştr. Güvenlikli alışma süresi  $t_{gs}$ , yaklaşık  $40 \mu s$  olarak belirlenmiş ve buna göre  $f_s = 24000 Hz$ , tetikleme sinyal frekansı  $f_c = 6 kHz$  seçilmiştir. Dijital devre işlemleri için kullanılan denetleyici ve evre birimlerinin çalışma frekansları da bu süreleri karşılayacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 2.37. Dijital elektronik devrenin zaman diyagramı

### 2.3.3.2. Açısal dönüşüm işlemlerinin uygulanması

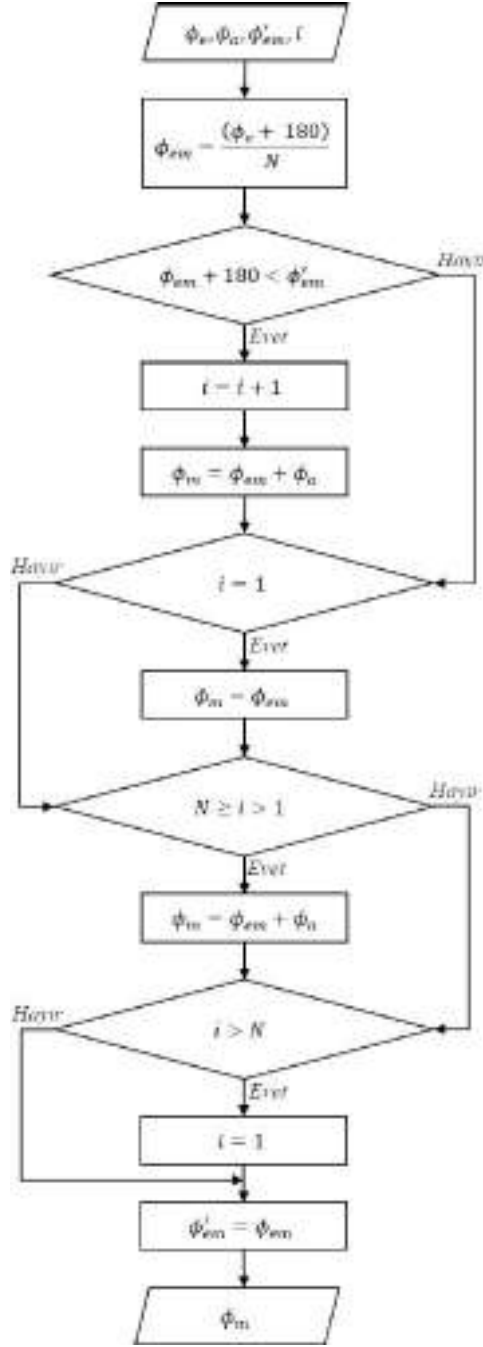
Demodülasyon devre çıkışlarındaki demodüle edilmiş bilgi sinyalleri arctan işleminden geçirilerek Şekil 2.38'deki kırmızı renkli elektriksel açı değerlerine ulaşılmıştır. Elektriksel açı değerlerinden Şekil 2.39'daki akış şeması takip edilerek Şekil 2.38'de maviyle gösterilen mekanik açı değerlerine geçiş yapılmıştır. Elektriksel açı, enkoderin bir tam turunda her kutup için tepe değerine ulaşır. Bu nedenle kutup açısı olarak nitelendirilebilir. Elektriksel açının kutup sayısına bölünerek biriktirilmesiyle mekanik açı hesaplanır. Mekanik açı, dijital devre işlemleri sonunda elde edilen nihai açısal pozisyon verisidir.



Şekil 2.38. Üretilen kapasitif enkoderle 50 rpm'deki motordan ölçülen elektriksel ve mekanik açı değerleri. Elektriksel açı değerleri kırmızıyla, mekanik açı değerleri maviyle gösterilmiştir.

Demodülasyon devresi ve açısal dönüşüm işlemlerinin tamamı STM32F4 denetleyicisi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Açısal dönüşümün akış şemasında  $\phi_e$  ile elektriksel açı, sırasıyla  $\phi_{em}$  ve  $\phi_a$  ile açı geçişlerinde kullanılan elektromekanik ve artık

açılar,  $i$  ile kutup döngü değişkeni ve  $N$  ile kutup sayısı ifade edilmiştir.  $\phi'_{em}$ , elektromekanik açının önceki değerini saklamak için kullanılmıştır.



Şekil 2.39. Açısal dönüşüm işlemlerinde elektriksel açıdan mekanik açığa geçişte takip edilen akış şeması

## 3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 3.1. Kapasitif Enkoder Testleri

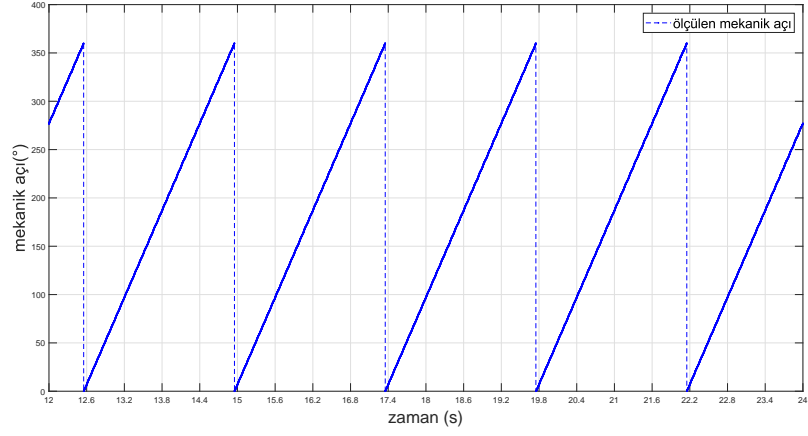
Üretilen kapasitif enkoder çeşitli testlerden geçirilerek enkoderin doğrusallık hatası ve çözünürlük değerleri hesaplanmıştır. Testlerde enkoderin bağlı olduğu motorun miline ait açısız pozisyon verisi ölçülmüştür. Ölçülen açısız pozisyon verisi mekanik açı değeridir. Mekanik açı değerleri seri port terminalleri vasıtasıyla kullanıcıya gönderilmiştir.

#### 3.1.1. Dinamik test

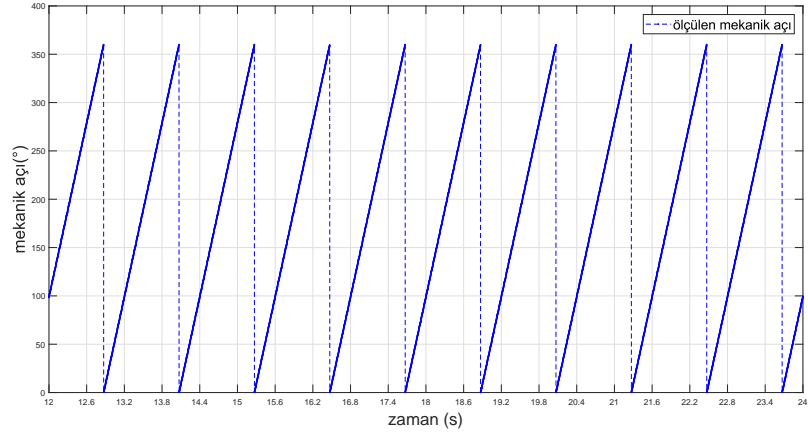
Kapasitif enkoderin bağlı olduğu motor farklı devirlerde ve sabit ivmeyle döndürülerek motorun anlık açısız pozisyon verisi ölçülmüştür. Ölçülen açısız pozisyon verilerine Şekil 3.1’de yer verilmiştir. Buradaki mekanik açı değişimlerinden motorun açısız pozisyonu ve tur sayıları takip edilebilmektedir. Motorların tam tur süreleri ölçülen açısız pozisyon verisiyle orantılıdır.

##### 3.1.1.1. Hız testleri ve doğrusallık hatasının ölçümü

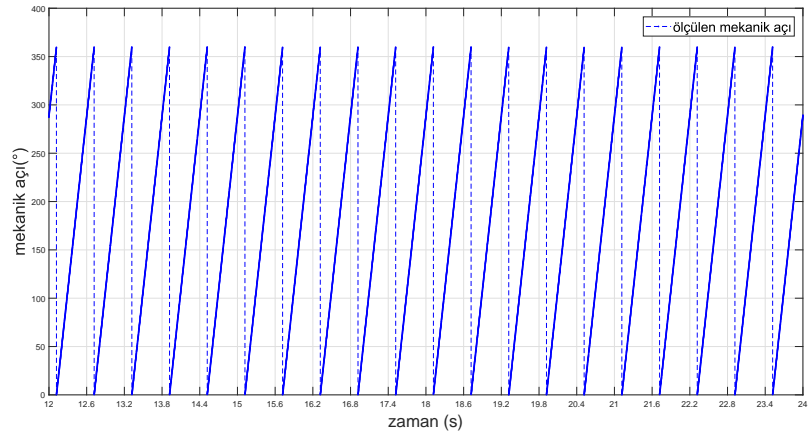
Dinamik testle kapasitif enkoderin doğrusallık hatası hesaplanmıştır. Rotorun bir tam turu için ölçülen mekanik açı değerlerine en uygun doğru çizdirilerek beklenen açı değerleri oluşturulmuştur. Şekil 3.2’de 150 *rpm*’deki motora bağlı kapasitif enkoderin bir tam turu süresince ölçülen ve beklenen mekanik açı değerleri verilmiştir. Ölçülen açılar maviyle beklenen açılar kırmızıyla gösterilmiştir. Şekil 3.3’te rotorun bir tam turu için ölçülen ve beklenen açı değerleri arasındaki farklar verilmiştir. Eğrinin genliği kapasitif enkoderin derece cinsinden doğrusallık hatasıdır.



(a)

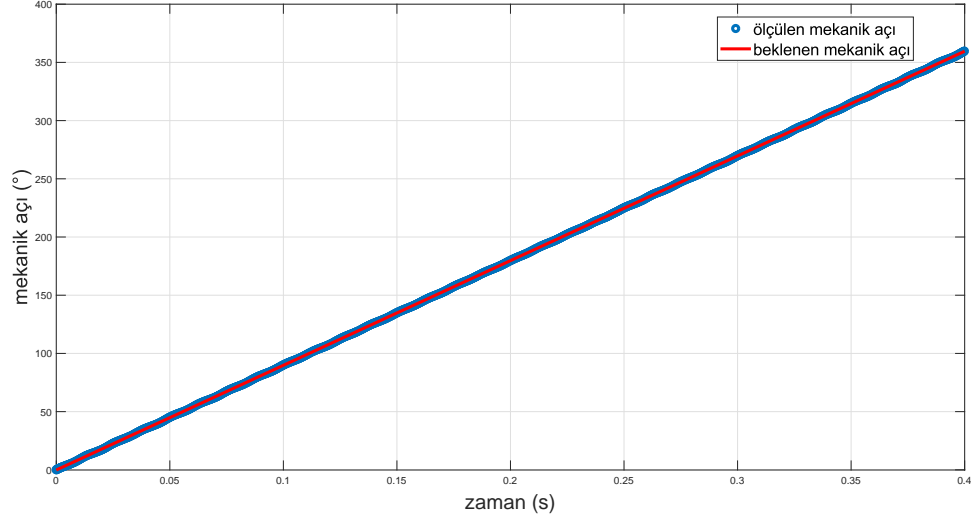


(b)



(c)

**Şekil 3.1. Çeşitli motor devirlerinde yapılan hız testleri. (a) 25 rpm, (b) 50 rpm ve (c) 100 rpm dönme hızlarındaki motor üzerinden üretilen kapasitif enkoderle ölçülen mekanik açı değerleri. Motorun (a) 2.4 s, (b) 1.2 s, (c) 0.6 s'lik tam tur sürelerinin motor devirleriyle orantılı olması geliştirilen kapasitif enkoderin doğruluğunu göstermektedir.**



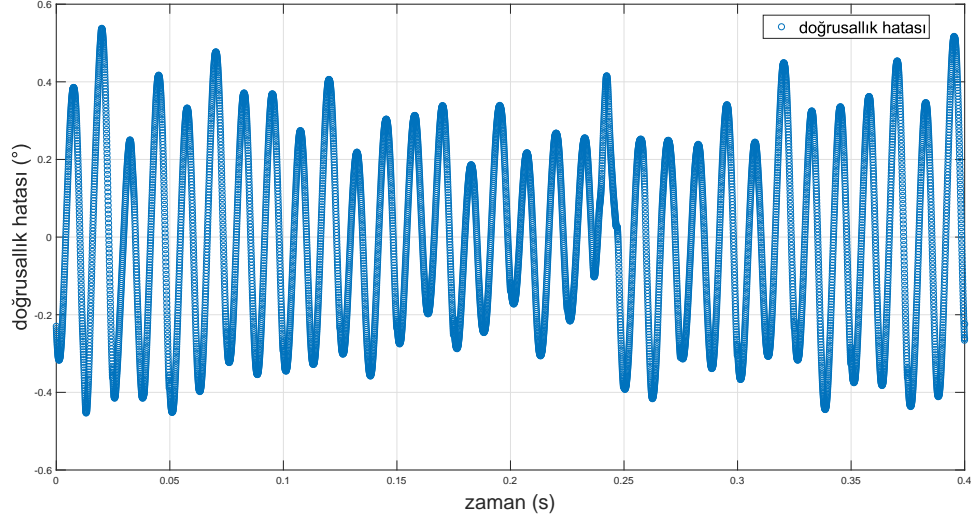
**Şekil 3.2. Üretilen kapasitif enkoderle 150 rpm'deki motorun bir tam turu için ölçülen ve beklenen mekanik açı değerleri. Ölçülen değerler maviyle beklenen değerler kırmızıyla gösterilmiştir.**

Bu çalışmada %1'in altında doğrusallık hatası hedeflenmiş ve gerçekleştirilen kapasitif enkoderle yapılan ölçümlerde hedeflenen değer çok altında sonuçlar alınmıştır. Kapasitif enkoderin doğrusallık hatasında %0.26 değerine ulaşılmıştır. Çeşitli devirlerde de ölçüm tekrarlanmış ve hedeflenen değer altında benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Kapasitif enkoderlerdeki doğrusallık hataları ağırlıklı olarak enkoder plakalarının doğru hizalanamamasından, rotorun dönmesi esnasındaki yalpalardan, rotor plakasının eğiminden, enkoder plakaları arasındaki mesafelerin doğru ayarlanamaması ya da sabit tutulamaması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır [32, 45, 46, 66]. Bunlar genel olarak enkoder mekaniği ve test düzeneğinden gelen üretim ve montaj hatalarıdır.

### 3.1.1.2. Doğrusallık hatasının analizi ve indirgenmesi

Sunulan on altı kutuplu kapasitif enkoderin bir tam turu için hesaplanan doğrusallık hataları periyodik ve sinüzoidal bir desen oluşturmaktadır. Bu desen 150 rpm devirle dönen motor için Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir. Benzer desen, sunulan kapasitif enkoderle çeşitli hızlardaki motorlar üzerinden yapılan doğrusallık hata ölçümlerinde de gözlenmiştir. Bu ölçümlerde Şekil 3.4'a da kesikli çizgilerle bölünerek gösterilen kapasitif enkoderin kutup sayısı kadar sinüzoidal ve periyodik desenlerle karşılaşılmıştır. Fakat her kutup için oluşan

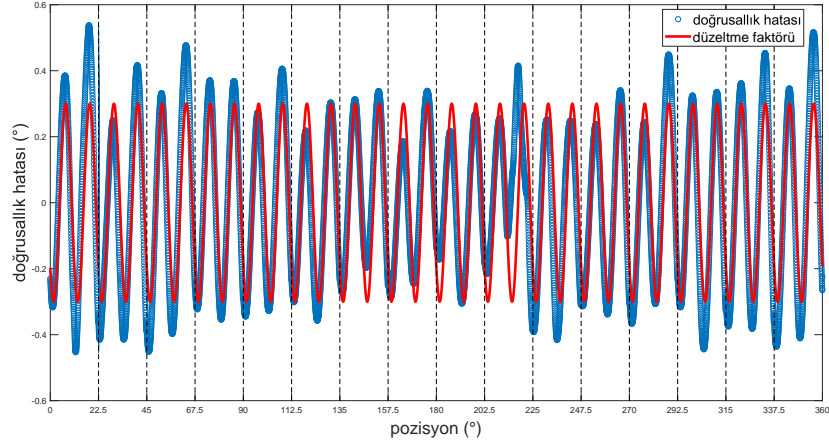


**Şekil 3.3. Devri 150 rpm olan motorun bir tam turu için üretilen kapasitif enkoderle ölçülen mekanik açı değerlerindeki derece cinsinden doğrusallık hataları**

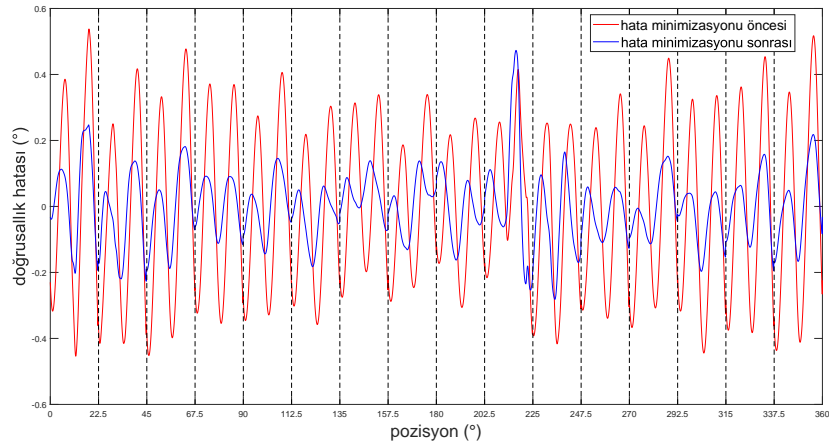
sinüzoidal desenin genliği düzensizdir. Bunun nedeni çoğunlukla üretim ve montaj hatalarından kaynaklanan rotor eğimi gibi istenmeyen durumlardır. Genlik düzensizliklerine sebep olan bu hataların yazılımsal olarak giderilmesi zor olsa da periyodik ve sinüzoidal desene sahip doğrusallık hataları ofset hataları gibi düşünülüp indirgenebilir.

Şekil 3.4a'da mavi renkle gösterilen sinüzoidal desenli ve periyodik doğrusallık hatasını azaltmak için yine aynı şekil üzerinde kırmızıyla gösterilen sinüzoidal desenli bir eğri oluşturulmuş ve bu eğriye düzeltme faktörü adı verilmiştir. Düzeltme faktörü mevcut doğrusallık hatalarından çıkarılarak doğrusallık hataları indirgenmiştir. Hata indirgeme öncesi %0.26 olan doğrusallık hata değeri yarıdan fazla düşürülerek %0.12 değerine indirgenmiştir. Hata indirgeme sonrası doğrusallık hatalarındaki genel düşüş Şekil 3.4b'de verilmiştir. Burada 150 rpm ile dönen rotorun bir tam turu için hesaplanan ve indirgenen doğrusallık hataları gösterilmiştir.

Şekil 3.4'te verilen hataların genlik dağılımları düzensiz olduğundan sunulan hata indirgeme yöntemiyle doğrusallık hataları tamamen giderilemez. Bu nedenle geliştirilen kapasitif enkoder için ilerleyen süreçte eş zamanlı ve çıkış geri beslemeli bir hata indirgeme yöntemi düşünülmektedir.



(a)



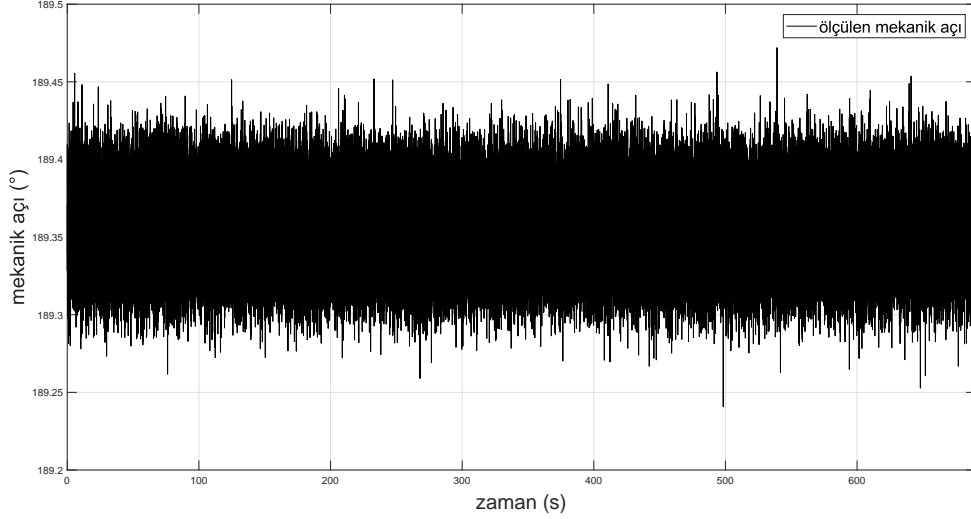
(b)

**Şekil 3.4. Hataların indirgenmesi (a) Mavi renkli doğrusallık hatalarından çıkarılacak olan kırmızı renkli düzeltme faktörü (b) Kırmızı renkli doğrusallık hatalarından düzeltme faktörü çıkarılarak indirgenen mavi renkli hatalar**

### 3.1.2. Durağan test

Durağan testle standart gürültü hesabı üzerinden kapasitif enkoderin çözünürlüğü hesaplanmıştır [67]. Durağan test için enkoderin bağlı olduğu motor döndürülmeden, belirli bir süre motor milinin sabit pozisyonuna ait açısal veri ölçülmüştür. Ölçüm süresince biriktirilen mekanik açı dizisinin standart sapması alınarak kapasitif enkoderin çözünürlüğü  $0.02^\circ$  olarak bulunmuştur. Çözünürlük hesabı çeşitli süreler için yapılarak benzer sonuçlar alınmış ve durağan test doğrulanmıştır. Şekil 3.5'te durağan haldeki motor miline bağlı rotorun yaklaşık 12' süresince ölçülen mekanik açı değerleri verilmiştir.

Sunulan kapasitif enkoder için durağan testle hesaplanan çözünürlük değeri,



**Şekil 3.5. Durağan haldeki motor üzerinden kapasitif enkoderle ölçülen mekanik açı değerleri**

çoğunlukla optik enkoderler için kullanılan devir başına düşen darbe sayısı (PPR) ifade edilecek olursa, burada geliştirilen kapasitif enkoder 18000 PPR çözünürlüğe sahiptir. Bu değer genel kullanımda olan çoğu ticari optik enkoderin üzerinde bir çözünürlük değeridir ve bu çözünürlük değerine mevcut ticari optik enkoderlerin çoğuna kıyasla küçük boyutlarda ve düşük maliyetle ulaşılmıştır.

## 3.2. Üretim ve Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmanın başında verilen modele bağlı kalınarak üretilen kapasitif enkoder ile sunulan model karşılaştırılmıştır. Üretim adımları üzerinden üretim-model uyumu kontrol edildikten sonra geliştirilen kapasitif enkoder çeşitli enkoderlerle kıyaslanmıştır. Kıyaslama ölçütlerine hedeflenen kriterler de eklenerek sunulan kapasitif enkoder için genel bir performans değerlendirmesi yapılmıştır.

### 3.2.1. Sunulan kapasitif enkoder modeli üzerinden değerlendirme

Yenilikçi ve yüksek performanslı kapasitif enkoderin matematiksel modeli üzerinden elde edilen sinyaller ile gerçekleştirilen kapasitif enkoderden alınan sinyaller Şekil 3.6'da karşılaştırılmıştır. Bu sayede kapasitif enkoder mimarisi bütünüyle

değerlendirilmiş ve sunulan model doğrulanmıştır.

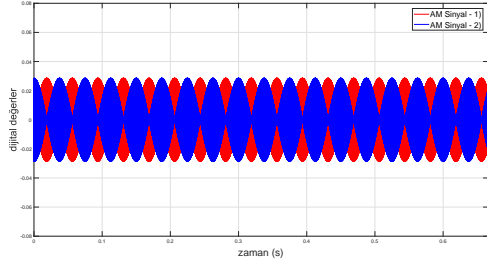
Kapasitif enkoder modelindeki çıkış sinyalleri parazitik kapasitanslar, üretim-montaj hataları, enkoder mekaniğindeki uyumsuzluklar ve tahrik elemanından gelen gürültüler ihmal edilerek hesaplandığından enkoder çıkışında temiz ve tam modülasyonlu DSB sinyaller görülmüştür. Gerçekleştirilen kapasitif enkoderden alınan çıkış sinyallerinde ise sayılan nedenlerden kaynaklı parazitler bulunmaktadır. Fakat bu parazitler elektronik devrenin dijital olarak uygulanmasının getirdiği avantajla ortadan kaldırılmıştır.

Dijital elektronik devreye çeşitli filtreler (BPF, LPF) eklenerek Şekil 3.6d'deki bilgi sinyalleri elde edilmiştir. Burada modelden çıkarılan demodüle edilmiş bilgi sinyalleri arasında uyumsuzluk görülmezken gerçekleştirilen kapasitif enkoderden elde edilen demodüle bilgi sinyallerinde uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. Bu uyumsuzluklar büyük oranda üretim-montaj hatalarından kaynaklanmakta ve mekanik açıya doğrusallık hatası olarak yansımaktadır.

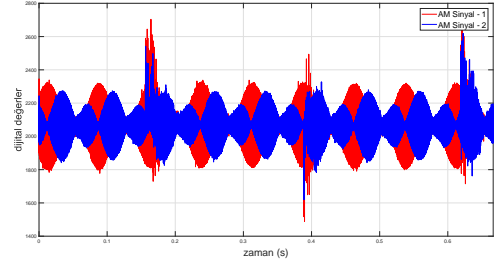
Model üzerinden elde edilen mekanik açı için de doğrusallık hata ölçümü yapılmış ve burada da bir miktar hataya rastlanmıştır. Bu değerlendirmeye kapasitif enkoderlerdeki hataların sadece mekanik kusurlardan kaynaklanmadığı, bu kusurların yanında kapasitif enkoderlerin elektronik devresindeki doğrusal olmayan işlemlerin de bir miktar doğrusallık hatası getirdiği gösterilmiştir.

Kapasitif enkoderlerin elektronik devre işlemlerden gelen hatalar, mekanikten gelen hatalara kıyasla çok küçüktür ve çoğunlukla ondalık sayıların ve doğrusal olmayan fonksiyonların kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu hatalar ihmal edilebilir olmalarına rağmen düşük seviyelerde tutulabilir. Kapasitif enkoderlerin elektronik devre işlemleri olabildiğince tam sayılarla yapıp çarpma ve bölme gibi işlem kullanımları en aza indirilirse buradaki hatalar düşürülebilir.

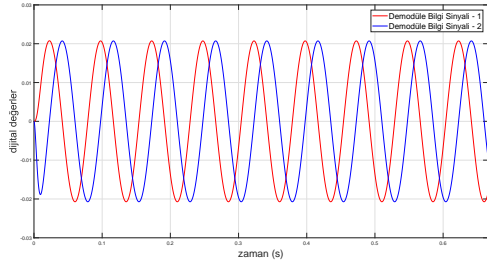
Bu çalışmada kapasitif enkoderin elektronik devresinin dijital olarak uygulanmasının getirdiği avantajla, elektronik devre işlemleri hazır fonksiyonlardan uzak ve olabildiğince toplama, çıkarma veya bit kaydırma gibi işlemler kullanılarak register seviyesinde ve tam sayılarla yapılmıştır. Bu sayede elektronik devre hataları en düşük seviyelerde tutulmaya çalışılmıştır.



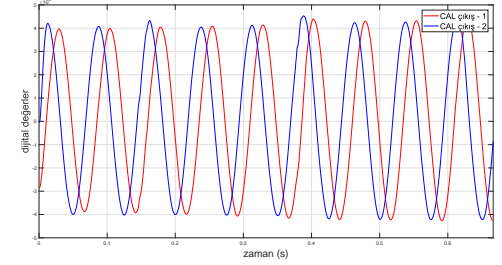
(a)



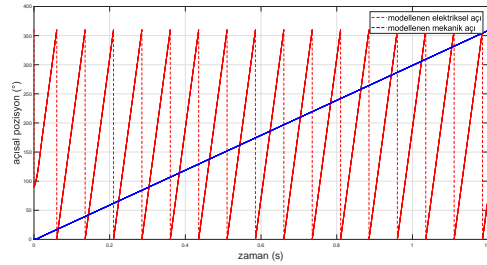
(b)



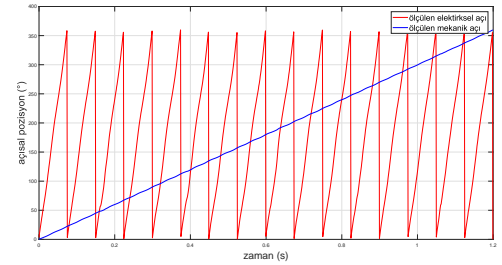
(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 3.6. Modelleme süreci sonunda elde edilen kapasitif enkoder modeliyle, üretim süreci sonunda elde edilen kapasitif enkoderin; çıkış sinyalleri, demodüle edilmiş bilgi sinyalleri ve açısal pozisyon verileri üzerinden karşılaştırılması. (a) Modellenen, (b) Üretilen enkoder çıkışındaki AM sinyalleri, (c) Modellenen, (d) Üretilen enkoderin demodülasyon devre çıkışındaki bilgi sinyalleri ve (e) Modellenen, (f) Üretilen enkoderden alınan mekanik açı değerleri**

### 3.2.2. Hedeflenen kriterler üzerinden değerlendirme

Bu çalışmada minimalist ve yenilikçi bir tasarım hedeflenerek düşük maliyetle, uygulanabilir ve esnek kullanıma sahip kapasitif bir enkoder geliştirilmiştir. Geliştirilen enkoder, çoğunlukla benzer üretim teknolojilerine sahip mevcut artımsal enkoderlerle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaya birer adet manyetik ve optik enkoder ile birlikte bir adet ticari kapasitif enkoder de eklenmiştir.

Bu çalışmada hedeflenen kriterlerin dışında enkoderlerin doğrusallık hataları ve çözünürlük değerleri de birer karşılaştırma kriteri olarak değerlendirilmiştir. Doğrusallık hatası, çözünürlük, boyut ve kapasitans kazancı kriterleri Çizelge 3.1'de sayısal olarak ifade edilirken maliyet, uygulanabilirlik ve esneklik kriterleri sembolik olarak ifade edilmiştir. Karşılaştırma kriterleri aşağıdaki açıklamalar dahilinde yorumlanarak Çizelge 3.1'deki enkoderler değerlendirilmiştir.

Boyut kriteri için enkoder mekanikleri silindir şeklinde düşünülerek enkoder plaka ölçüleri üzerinden hacim hesabı yapılmıştır. Plakaların dış yarıçapları ve plakalar arası mesafeler değerlendirmeye alınmıştır. Hacim değeri  $cm^3$  cinsinden verilmiştir. Çizelgedeki enkoderler arasında en küçük boyutlu enkoder burada sunulan enkoderdir. Minimalist tasarım, kapasitif enkoderin çeşitli uygulamalar için tercih edilebilirliğini artırmaktadır. Tercih edilebilirlik esneklik kriteri altında değerlendirilmiştir.

Sunulan enkoderin yenilikçi tasarımıyla enkoder plakaları arasında oluşan kapasitanslardan kazanç sağlanmaktadır. Değerlendirme kriterlerine kapasitans kazancı dahil edilmiştir. Buradaki kazanç, enkoderlerin stator plakalarındaki verici elektrot dizileri üzerinden hesap edilmiştir. Kazançlar ikili verici elektrot dizileri için yaklaşık dört kat, dörtlü verici elektrot dizileri için yaklaşık iki kat şeklinde ifade edilmiştir.

Maliyet, düşük maliyet etiketi altında enkoder mekaniği ve elektronik devre elemanları üzerinden 1-5 arasında "\*" sembolüyle derecelendirilmiştir. Fazladan analog eleman ve yüksek fiyatlı denetleyicilerin kullanımı maliyeti artırmaktadır.

Uygulanabilirlik, uygulama etiketi altında enkoderlerin genel kullanımına uygun olarak test edilmesi/döndürülmesi şeklinde yorumlanmıştır. Mikrometreli hassas platformlar veya döner tabla gibi yüksek fiyatlı test düzenekleriyle ayakta duran enkoder mekaniklerin gerçek uygulamalara uyarlanmaları zordur. Uyarlansanlar bile yüksek maliyetli test düzeneklerinden elde edilen düşük doğrusallık hatası ve yüksek çözünürlük

değerleri gerçekte uyuşmayabilir. Kapasitif enkoderlerin genel kullanımdan uzak elle veya döner tabla gibi tahrik elemanlarıyla döndürülmesi yanıltıcı bir uygulanabilirlik etkisidir. Bu yanıltıcı uygulanabilirliklere düşük "\*" verilmiştir.

Uygulamaya özel denetleyici tercihi, analog eleman fazlalığı veya elektronik devre işlemlerinin tamamen analog uygulanması geliştirilen kapasitif enkoderin kullanım esnekliğini azaltmaktadır. Dijital olarak uygulanan elektronik devrelerde istenen değişiklikler denetleyici üzerinden rahatlıkla yapılabilir. Elektronik devreye farklı demodülasyon yöntemleri veya filtreler kolayca entegre edilebilir. Bu nedenle dijital veya dijital yakın elektronik devrelere kullanım esnekliği açısından yüksek puan verilmiştir.

Açısal pozisyon algılayıcıları özelinde, aslında tüm algılayıcılar için doğruluk ve doğrusallık kriterleri karıştırılmaması gereken iki farklı kavramdır. Doğruluk, mutlak olarak doğruluğu herkesçe kabul edilen, yüksek güvenilirlikli ve geliştirilen algılayıcıyla aynı fiziksel büyüklüğün ölçüldüğü harici bir ölçüm cihazından yapılan ölçümlerin, geliştirilen algılayıcıyla yapılan ölçümlerle karşılaştırılmasıyla elde edilir. Doğrusallık ise harici bir mutlak referansa ihtiyaç duyulmadan sadece geliştirilen algılayıcının kendisiyle yapılan ölçümler üzerinden hesaplanabilir. Doğrusallık hesabı, bu çalışmada doğrusallık hatası adı altında daha önceki bölümlerde ayrıntısıyla açıklanmış ve geliştirilen kapasitif enkoder için Çizelge 3.1'in son satırındaki gibi bulunmuştur.

Bu çalışmada geliştirilen kapasitif enkoder için maliyeti yükselteceği ve test düzeneği kurulumuna fazladan yük getireceği düşünülerek doğruluk kriteri harici mutlak bir referans üzerinden hesaplanmamıştır. Kapasitif enkoder ile ölçülen pozisyon bilgisinin, enkoderi döndüren motorun adım aralıklarıyla karşılaştırıldığı ya da enkoderin elle döndürülerek gönye benzeri harici bir ölçek üzerinden doğruluk hesabının yapıldığı seçenekler de güvenilirliklerinin düşük olması sebebiyle tercih edilmemiştir. Doğruluk ölçümü için burada sayılan seçeneklerin yanında mevcut geliştirme ortamının kısıtlı imkanları da göz önüne alındığında doğrusallık hatasının ölçümü, genel olarak kapasitif enkoder çalışmalarında olduğu gibi bu çalışma özelinde de doğruluk ölçümüne kıyasla daha geçerlidir. Ayrıca sunulan kapasitif enkoderin dinamik test sürecinde çeşitli motor devirleri için tam turlarını devir sayılarıyla orantılı sürelerde tamamlamaları, sunulan kapasitif enkoderin doğruluğunu gösteren geçerli bir seçenektir.

Çizelge 3.1'in ilk satırındaki optik enkoder, adım motoruyla test edilmiştir. Optik enkoderin sunulduğu çalışmadan adım motorunun 7.5°'lik adımlarla döndürüldüğü ve bu

adımların referans kabul edilerek optik enkoderin doğruluğunun hesaplandığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada doğrusallık hesabı yapılmadığından Çizelge 3.1'in doğrusallık hatası sütununda optik enkoderin doğruluk değeri verilmiştir [9]. Buradaki optik enkoder örneğinde olduğu gibi doğrusallık hata hesabı yapılmayan diğer çalışmalar için de Çizelge 3.1'in doğrusallık hatası sütununun altında ilgili enkoderlerin doğruluk değerleri verilmiştir.

**Çizelge 3.1. Sunulan kapasitif enkoderin çeşitli enkoderlerle karşılaştırılması**

Satır No	Enkoder Tipi	Doğrusallık Hatası (°)	Çözünürlük (°)	Boyut (cm <sup>3</sup> )	Kapasitans Kazancı	Düşük Maliyet	Uygulama	Esneklik
1	Optik Enkoder [9] <sup>1</sup>	2	0.1	73.8	-	-	****	-
2	Manyetik Enkoder [4] <sup>2</sup>	1	0.005	22.6	-	-	****	-
3	Kapasitif Tip-5 [34]	1	0.002	2.4	2	****	****	**
4	Kapasitif Tip-4 [32]	0.16	0.00028	6.9	2	****	***	**
5	Kapasitif Tip-5 [36]	0.3	0.0009	2.3	2	*	*	*
6	Kapasitif Tip-2 [46] <sup>3</sup>	0.86	0.11°/bit	3.6	2-3	***	***	*
7	Kapasitif Tip-2 [24]	14.4	0.125	127.2	2	***	****	*
8	Kapasitif Tip-2	0.6	0.35	94.2	2	-	*****	-
9	Kapasitif Tip-5 [44]	8	0.35	2	-	**	*	*
10	Kapasitif Esnek Tip [13]	1.75	-	78.5	-	***	*	*
11	Sunulan Yenilikçi Tip	0.96	0.02	1.3	4	*****	****	***

<sup>1,2</sup> Doğrusallık hatası hesaplanmadığından doğruluk değeri verilmiştir.

<sup>3</sup> Çözünürlük değeri ilgili çalışmanın yazarları tarafından "°/bit" ile ifade edilmiştir.

Çizelge 3.1'deki 2 numaralı satırda manyetik enkoder teknolojisiyle çalıştırılan bir açısal pozisyon algılayıcı verilmiştir. Bu algılayıcı harici bir robot kol eklemine test edilmiştir. Algılayıcı, robot kol eklemine entegre edilerek döndürüldüğünden uygulanabilirliği yüksektir [4].

Çizelge 3.1'in 3 numaralı satırındaki kapasitif enkoder endüstriyel bir AC servo motorla döndürülmüştür. Başlangıçta 1° olarak hesaplanan bu enkoderin doğrusallık hatası mekanik iyileştirmeler sonrasında 0.8°'ye indirilmiştir. Aynı enkoderin çözünürlük değerinin çalışmada paylaşılan grafiklerden 0-0.2 s'lik çok kısa bir zaman dilimi için hesaplandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca enkoderin elektronik devresinde paralel işlem yapan bir denetleyici (FPGA) tercih edilmiştir. Paralel işlem yapan denetleyici haricinde fazladan analog eleman kullanımı maliyeti artırmaktadır [34].

Çizelge 3.1'de 4 numaralı satırdaki kapasitif enkoderin sunulduğu çalışmadan, enkoderin motor kullanılmadan harici farklı bir enkodere bağlanarak elle döndürüldüğü anlaşılmaktadır. Sunulan enkoderin, elle döndürülmesine rağmen çalışmadaki test düzeneği görsellerinden uygulanabilirlik kaygısı duyulduğu söylenebilir. Ayrıca uygun fiyatlı elektronik bileşenlerin kullanımıyla maliyetin düşürüldüğü belirtilmiştir. Bunun yanında çalışmada verilen grafiklerden enkoderin çözünürlük değerinin 3 numaralı satırdaki

enkoderden daha kısa bir süre aralığı (0-10 *ms*) için hesaplandığı görülmektedir [32].

Çizelge 3.1'in 5'nci satırındaki çalışmayla birlikte aynı altyapıya sahip birden fazla çalışma gerçekleştirilmiş ve çalışmaların tamamında enkoderler yüksek maliyetli endüstriyel döner tablalarla döndürülmüştür. Bu çalışmadan türetilen diğer çalışmaların ise tamamına yakınında enkoder plakalarının hizalanması ve plakalar arası mesafelerin ayarlanması için mikrometrelili hassas platformlar, mevcut döner tablolara dahil edilmiştir. 5 satır numarasıyla verilen enkoderde kullanılan uygulamaya özel işlemci (ADS1210 Decoder Resolver Chip), fazladan harici analog elemanlar, mikrometrelili hassas düzenekler ve döner tabla maliyeti ciddi oranda yükseltmektedir. Bu çalışma için hata indirgeme algoritmasının eş zamanlı uygulandığı açıklanmadığından Çizelge 3.1'de 5'nci satırdaki enkoderin hata minimizasyonu öncesi doğrusallık hata değeri verilmiştir [36].

Çizelge 3.1'de 6'ncı satırdaki enkoderin adım motoruyla döndürüldüğü söylenmiş fakat sunulan çalışmada test düzeneğinin görseli paylaşılmamıştır. Sunulan kapasitif enkoderin mekanik kurulumu ve devre elemanları hakkında net bir bilgi verilmemesine rağmen çalışmadaki enkoder plaka görsellerinden tercih edilen üretim yöntemiyle maliyetin düşürüldüğü söylenebilir [46].

Çizelge 3.1'in 7'nci satırındaki enkoderin sunulduğu çalışmadaki görsellerden enkoderin adım motoruna uygulandığı görülmektedir. Bu enkoderin doğrusallık hatası ölçülürken hatanın sürekli mekanik açının  $30^\circ$  olduğu bölgede tepe yaptığı ve doğrusallık hatasının en büyük kaynağının bu bölgeye denk gelen mekanik sorunlar olduğu belirtilmiştir. Daha sonra doğrusallık hatasının tepe yaptığı bu bölge ihmal edilerek doğrusallık hatası hesaplanmış ve yeni hata  $5.4^\circ$  bulunmuştur. Buradaki enkoder mekaniğinin üretim maliyeti düşük tutulmasına rağmen enkoderin elektronik devresinin tamamen analog uygulanması maliyeti artırmıştır. Analog devre elemanlarının maliyeti yükselttiği ve kullanım esnekliğini düşürdüğü söylenebilir. [24].

Çizelge 3.1'in 8 numaralı satırında ticari olarak kullanımda olan kapasitif bir enkoder verilmiştir. Bu enkoder aktif kullanımda olduğundan çizelgedeki enkoderler arasında uygulanabilirliği en yüksek olanıdır. Bunun gibi aktif kullanımda olan sadece bir kaç kapasitif enkoder daha bulunmaktadır. Bu stratejik algılayıcıların üretimleri şuan için sadece yurt dışında ve çok az sayıdaki üretici tarafından yapılmaktadır.

Çizelge 3.1'de 9'ncü satırdaki enkoderin sunulduğu çalışmada enkoderin harici bir tahrik elemanı kullanılmadan test edildiği görülmektedir. Buradaki enkoder elle

döndürülmüştür. Çalışmada düşük maliyetin gözetildiği söylenmesine rağmen test düzeneğinde kullanılan mikrometreli platformlar ve analog elektronik devre maliyeti artırmaktadır. Fakat çalışmada paylaşılan enkoder plaka görsellerinden enkoderin algılayıcı mekaniği kısmında üretim maliyetinin düşürüldüğü söylenebilir [44].

Çizelge 3.1'in 10'ncu satırındaki enkoder, 9 numaralı satırdaki enkodere benzer şekilde harici tahrik elemanı kullanılmadan elle döndürülmüştür. Elle döndürülen bu enkoderin mekaniğinde çizelgedeki diğer kapasitif enkoderlerden farklı olarak esnek elektrotlar kullanılmıştır. Bu nedenle karşılaştırma çizelgesinde esnek tip olarak adlandırılmıştır. Esnek tip enkoderin sunulduğu çalışmadaki test düzeneği görsellerinden düşük maliyetin gözetildiği anlaşılmaktadır [13].

## 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yenilikçi ve yüksek performanslı bir kapasitif döner enkoder geliştirilmiştir. Kapasitif enkoderin algılama teknolojisinden tasarımına, matematiksel model çıkarımından üretimine ve testlerine kadar çeşitli aşamalardan geçilerek disiplinler arası bir süreç yürütülmüştür. Çok aşamalı geliştirme sürecinin sonunda ticari ürüne yakın bir prototip ortaya konmuştur. Sıfırdan kurulan test düzeneğinde yapılan testlerle kapasitif enkoder prototipinin çözünürlük değeri  $0.02^\circ$ , doğrusallık hatası  $\%0.12$  olarak belirlenmiştir.

Kapasitif enkoderin geliştirilmesine, kapasitif enkoderler için genel bir algılama süreci ve bu süreç üzerinden genel bir mimari sunularak başlanmıştır. Algılayıcı mekaniğinin belirlenmesi için kapasitif enkoderler mekanik bileşenlerine göre analiz edilmiş ve sınıflara ayrılmıştır. Yenilikçi tip enkoderde kullanılmak üzere rotor plakaları önerilmiştir. Önerilen rotor plakaları enkoder mekaniğine uyarlanarak şekil, desen ve elektriksel özelliklerine göre değerlendirilmiştir. Rotor plakasının belirlenmesiyle sağlam ve kapasitans kazancı yüksek, yenilikçi enkoder mekaniği tamamlanmıştır. Algılayıcı mekaniğinin ardından enkoderin tetikleme sinyal ve demodülasyon devre bileşenleri de belirlenerek kapasitif enkoder mimarisi tümüyle şekillendirilmiş ve mimarinin matematiksel modeli çıkarılmıştır.

Kapasitif enkoder modeli üzerinden algılayıcı çıkışları gözlenmiş ve sunulan performans kriterleriyle enkoderin performansı değerlendirilmiştir. Kapasitif enkoderin tasarım parametreleri belirlenerek anahtar parametrelerin algılayıcı performansına etkileri analiz edilmiştir. Burada elektrotlar arası boşluk parametresinde ilgi çekici sonuçlara rastlanmıştır. Elektrotlar arasındaki boşluk parametresinin enkoder plakaları arasındaki kapasitans kazancını artıran, optimum bir değerinin olduğu yapılan literatür araştırması çerçevesinde ilk defa bu çalışmayla gösterilmiştir. Bu ilgi çekici sonucun yanında algılayıcı performans analizinden elde edilen diğer sonuçlarla beraber tasarım parametre değerleri netleştirilmiş ve kapasitif enkoderler için genel geliştirme önerilerinde bulunulmuştur. Buna göre kapasitif bir enkoder geliştirilirken genel olarak algılayıcı mekaniğine karar verildikten

sonra üretim sınırları göz önünde bulundurulmalı ve enkoderin kutup sayısı bu sınırlara göre belirlenmelidir. Kutup sayısının ardından elektrotlar arası boşluk mesafesi, enkoder kazancıyla ayarlanmalıdır.

Başarılı bir tasarım ve modelleme sürecinin ardından kapasitif enkoderin üretimine ve test düzeneğinin kurulumuna geçilmiştir. Sunulan kapasitif enkoder mimarisinin gerçekleştirilmesi için çeşitli üretim teknikleri, bilgisayar destekli çizim, tasarım ve üretim programlarının yanında elektronik devre tasarım programları kullanılmıştır. Kapasitif enkoder plakaları, bilgisayar destekli çizim ve elektronik devre tasarım programları birleştirilerek üretilmiştir. Kombine bir üretim sürecinden geçirilen plakalarla enkoder mekaniği oluşturulmuş ve algılayıcı mekaniğine uygun elektronik devre gerçekleştirilmiştir.

Kapasitif enkoderin elektronik devresindeki tetikleme sinyallerinin bir kısmı, demodülasyon ve açısız dönüşüm işlemlerinin ise tamamı uygun fiyatlı ve seri işlem yapan bir denetleyicide dijital olarak uygulanmıştır. Bu sayede elektronik devrenin tamamına yakını dijitalleştirilmiştir. Dijital elektronik devreyle kapasitif enkodere kullanım esnekliği kazandırılmasının yanında fazladan analog eleman ihtiyacı ortadan kaldırılarak minimalist tasarım, düşük maliyet ve yüksek SNR teşvik edilmiştir. Minimalist tasarımla sunulan kapasitif enkoderin kullanım alanı genişletilmiş, enkoderin çeşitli uygulamalarda tercih edilmesinin önü açılmıştır.

Elektronik devre işlemleri donanımla iç içe, olabildiğince ondalıklı sayılardan uzak ve hazır fonksiyonlar kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Böylece bu işlemlerden gelebilecek hatalar en düşük seviyelerde tutulmaya çalışılmıştır. Buradaki işlem süreleri üzerinden örnekleme ve tetikleme sinyal frekansları belirlenmiştir. Dijital elektronik devredeki işlemlerin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için güvenli işlem süre sınırı önerilmiştir.

Elektronik devre alt bileşenlerin senkron çalışmasının sağlanması için seri işlem yapan STM32F4 denetleyicisinin ilgili çevre birimleri, genişletilmiş özellikleriyle paralel çalışma modlarında kullanılmıştır. Çevre birimlerinin paralel çalıştırılması STM32F4 gibi uygun fiyatlı bir denetleyicide hızdan kazanç sağlamış ve denetleyicinin işlem kapasitesini genişletmiştir. Böylece elektronik devrenin dijital olarak uygulanmasına katkı sağlanarak algılayıcı performansı artırılmıştır.

Sağlam ve yüksek kazançlı kapasitif enkoder mekaniği endüstriyel bir motorda test edilerek uygulanabilirlik endişesi ortadan kaldırılmıştır. Kapasitif enkoderin doğruluk

hatası ve çözünürlük değerleri laboratuvar imkanlarıyla sıfırdan kurulan uygun fiyatlı ve hassas test düzeneğinde ölçülmüştür. Buradan elde edilen sonuçlar çeşitli enkoderlerle karşılaştırılmıştır. Buna göre geliştirilen kapasitif enkoderin yüksek çözünürlük ve düşük doğrusallık hatası sunduğu söylenebilir. Ayrıca yapılan karşılaştırmayla bu çalışmanın başında hedeflenen kriterlerin sağlandığı gösterilmiştir.

Sunulan geliştirme süreci, kapasitif enkoderlerin yanında benzer algılama teknolojisini kullanan tüm algılayıcıların gelişimine katkı sağlayacak niteliktedir. Bu çalışmayla sadece uluslararası alanda ve az sayıda üreticisi bulunan stratejik bir ürün geliştirilmiş olup prototip üretimi yapılmıştır. Ortaya konan enkoder ulusal kapsamda geliştirilen en performanslı kapasitif açısal pozisyon algılayıcısıdır.

## 5. ÖNERİLER VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Mevcut doktora programı kapsamında çok aşamalı ve disiplinler arası bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sunulan kapasitif enkoder geliştirme sürecinin her aşaması, yeni çalışma konularına kapı aralamaktadır. Buradaki enkoder mekaniği üzerinden analog anahtarlamalı senkron demodülasyon yönteminin uygulandığı ve yakın zamanda tamamlanmış olan bir yüksek lisans çalışması bulunmaktadır. Ayrıca kapasitif algılayıcılarda sıklıkla kullanılan ve bu çalışmada I-V dönüşümü için tercih edilen devrenin parametrelerinin belirlenmesi ve gürültü seviyesinin ölçülmesi üzerine yüksek lisans ve doktora çalışmaları yapılmış olup çalışmalar devam etmektedir.

Sunulan enkoder mekaniği gelişime açıktır. Açısal pozisyon verisinin enkoder plakalarının örtüşme alanları dışında plakalar arasındaki mesafe veya dielektrik sabitiyle değiştirildiği buradakinden daha farklı enkoder mekanikleri tasarlanabilir. Kapasitif enkoder plakaları ve elektronik devreler çok katlı PCB üretim teknikleriyle tek PCB üzerinde birleştirilebilir. Kapasitif enkoder mimarisi minimalist tasarım korunarak algılayıcı boyutlarına göre tasarlanan muhafaza içerisine alınabilir. Ayrıca kapasitif enkoder için mikro-elektro-mekanik sistem (MEMS) teknolojileriyle üretim yapılabilir. Bu sayede çok daha küçük boyutlarda üretim gerçekleştirilebilir.

Kapasitif enkoderin açısal dönüşüm işlemlerindeki doğrusal olmayan hesaplamalar için koordinat döndüren sayısal bilgisayar algoritmalarına (CORDIC) alternatif çözümler sunulabilir veya mevcut algoritmalar geliştirilebilir [52, 68]. Bu sayede dijital elektronik devrenin işlem yükü hafifletilebilir.

Kapasitif enkoder çıkış sinyallerindeki uyumsuzlukların ve demodülasyon hatalarının daha aşağıya çekilebilmesi için eş zamanlı kalibrasyon ve hata indirgeme algoritmaları uygulanabilir. Çıkış geri beslemeli hata indirgeme işlemleriyle doğrusallık hataları daha çok bastırılabilir. Buraya kadar verilen önerilerin her biri çeşitli proje veya tezlerde değerlendirilebilecek potansiyeli yüksek çalışma konularıdır.

İlerleyen süreçte bu çalışmadaki enkoder mekaniği üzerinden dijital olarak uygulanan elektronik devreyle bahsi geçen yüksek lisans çalışmasında gerçekleştirilen

analog anahtarlama devrenin karşılaştırılması düşünülmektedir. Bunun dışında çalışmanın anahtar parametre analizinde teorik olarak gösterilen elektrotlar arası boşluk parametresindeki sonuçların sunulan enkoder mekaniği üzerinde uygulamalı olarak gösterilmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] A. Kuijpers, G. J. Krijnen, R. J. Wiegerink, T. S. Lammerink, and M. Elwenspoek, "A micromachined capacitive incremental position sensor: Part 1. analysis and simulations," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 16, no. 6, p. S116, 2006.
- [2] A. Kuijpers, G. J. Krijnen, R. J. Wiegerink, T. S. Lammerink, and M. Elwenspoek, "A micromachined capacitive incremental position sensor: part 2. experimental assessment," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 16, no. 6, p. S125, 2006.
- [3] C. Dufour, J. Belanger, and V. Lapointe, "Fpga-based ultra-low latency hil fault testing of a permanent magnet motor drive using rt-lab-xsg," *Simulation*, vol. 84, no. 2-3, pp. 161–171, 2008.
- [4] Z. Zhang, F. Ni, Y. Dong, C. Guo, M. Jin, and H. Liu, "A novel absolute magnetic rotary sensor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4408–4419, 2015.
- [5] Q. Wang, B. Zhang, Y. Tian, M. M. Sun, *et al.*, "An absolute magnetic rotary encoder based on kalman filter," in *The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2015.
- [6] H.-S. Hsiao, L.-Q. Chen, C.-K. Sung, and J.-Y. J. Chang, "Characteristics of magnetic sensor with assembly errors in a rotary recording system," *Microsystem Technologies*, pp. 1–6, 2019.
- [7] S. Paul and J. Chang, "Design of absolute encoder disk coding based on affine n digit n-ary gray code," in *2016 IEEE international instrumentation and measurement technology conference proceedings*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [8] H. Wang, J. Wang, B. Chen, P. Xiao, X. Chen, N. Cai, and B. W.-K. Ling, "Absolute optical imaging position encoder," *Measurement*, vol. 67, pp. 42–50, 2015.

- [9] S. Das and B. Chakraborty, "Design and realization of an optical rotary sensor," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 2675–2681, 2018.
- [10] X. Du and Q. Chen, "Dual-laser goniometer: A flexible optical angular sensor for joint angle measurement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020.
- [11] L. K. Baxter, "Capacitive sensors," *Design and Applications*, 1997.
- [12] E. Terzic, J. Terzic, R. Nagarajah, and M. Alamgir, "Capacitive sensing technology," in *A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*, pp. 11–37, Springer, 2012.
- [13] D. Krklješ, D. Vasiljević, and G. Stojanović, "A capacitive angular sensor with flexible digitated electrodes," *Sensor Review*, vol. 34, no. 4, pp. 382–388, 2014.
- [14] Y. Fu, W. Fan, H. Jin, and Q. Chen, "A new capacitance angle sensor of concentric ring multi-layer differential," *Measurement*, vol. 158, p. 107625, 2020.
- [15] H. Wang, K. Peng, X. Liu, Z. Yu, and Z. Chen, "Design and realization of a compact high-precision capacitive absolute angular position sensor based on time grating," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020.
- [16] B. Hou, Z. Bin, L. Yi, B. Xing, X. Li, W. Qi, and R. Zhang, "High-precision incremental capacitive angle encoder developed by micro fabrication technology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020.
- [17] G. Brasseur, "A robust capacitive angular position sensor," in *Quality Measurement: The Indispensable Bridge between Theory and Reality (No Measurements? No Science! Joint Conference-1996: IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference and IMEKO Tec*, vol. 2, pp. 1081–1086, IEEE, 1996.
- [18] T. Fabian and G. Brasseur, "A robust capacitive angular speed sensor," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 47, no. 1, pp. 280–284, 1998.

- [19] D. M. Aukes, B. Heyneman, J. Ulmen, H. Stuart, M. R. Cutkosky, S. Kim, P. Garcia, and A. Edsinger, "Design and testing of a selectively compliant underactuated hand," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 5, pp. 721–735, 2014.
- [20] R. Bednar, "Stability characteristics of a nonlinear direct current servo with proportional, integral, derivative controller: comparison with simulation and experimentation," *Simulation*, vol. 91, no. 10, pp. 888–897, 2015.
- [21] N. K. Bhaskarrao, C. S. Anoop, and P. K. Dutta, "A linear direct-digital converter for sinusoidal encoders," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 7, pp. 2570–2578, 2018.
- [22] K. Junge, R. Slaney, J. Jiang, P. Woo, B. Zhang, Z. Lambert, and J. Suchánek, "Robocup rescue 2020 team description paper cur rescue," 2020.
- [23] R. M. Kennel *et al.*, "New developments in capacitive encoders for servo drives," in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 190–195, IEEE, 2008.
- [24] M. Karali, A. T. Karasahin, O. Keles, M. Kocak, and M. A. Erismis, "A new capacitive rotary encoder based on analog synchronous demodulation," *Electrical Engineering*, vol. 100, no. 3, pp. 1975–1983, 2018.
- [25] B. Hou, Z. Tian, C. Li, Q. Wei, B. Zhou, and R. Zhang, "A capacitive rotary encoder with a novel sensitive electrode," in *2017 IEEE SENSORS*, pp. 1–3, IEEE, 2017.
- [26] W. Tomasi, *Advanced electronic communication systems*. Prentice Hall PTR, 1993.
- [27] G. Brasseur, "A capacitive 4-turn angular-position sensor," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 47, no. 1, pp. 275–279, 1998.
- [28] G. Brasseur, "A capacitive finger-type angular-position and angular-speed sensor," in *IMTC/98 Conference Proceedings. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Where Instrumentation is Going (Cat. No. 98CH36222)*,

vol. 2, pp. 967–972, IEEE, 1998.

- [29] G. Brasseur, “Design rules for robust capacitive sensors,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 4, pp. 1261–1265, 2003.
- [30] G. Brasseur, B. Brandstatter, and H. Zangl, “State of the art of robust capacitive sensors,” in *1st International Workshop on Robotic Sensing, 2003. ROSE’03.*, pp. 4–pp, IEEE, 2003.
- [31] H. Zangl and T. Bretterklieber, “Rotor design for capacitive sensors,” in *SENSORS, 2004 IEEE*, pp. 520–523, IEEE, 2004.
- [32] M. Gasulla, X. Li, G. C. Meijer, L. van der Ham, and J. W. Spronck, “A contactless capacitive angular-position sensor,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 607–614, 2003.
- [33] 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*, vol. 55, no. 2, pp. 514–520, 2006.
- [34] D. Zheng, S. Zhang, S. Wang, C. Hu, and X. Zhao, “A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 1, pp. 143–153, 2014.
- [35] L. Zhang, D. Zheng, and S. Zhang, “Realization of Absolute Capacitive Rotary Encoder System Based on Capacitive Gate Technology,” vol. 4, pp. 30–35, 2016.
- [36] B. Hou, B. Zhou, M. Song, Z. Lin, and R. Zhang, “A novel single-excitation capacitive angular position sensor design,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1196, 2016.
- [37] B. Hou, C. Li, Z. Gao, Q. Wei, B. Zhou, and R. Zhang, “Design, optimization, and compensation of high-precision single-excitation absolute-capacitive rotary encoder with nonlinearity error of up to  $\pm 4$ ,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 8161–8171, 2018.

- [38] Z. Gao, B. Zhou, B. Hou, C. Li, Q. Wei, and R. Zhang, "Self-calibration of angular position sensors by signal flow networks," *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2513, 2018.
- [39] B. Hou, Z. Gao, C. Li, Q. Wei, B. Zhou, and R. Zhang, "Application of signal flow network on calibration capacitive rotary encoder," in *2018 IEEE SENSORS*, pp. 1–4, IEEE, 2018.
- [40] B. Hou, B. Zhou, X. Li, B. Xing, L. Yi, Q. Wei, and R. Zhang, "Periodic nonlinear error analysis and compensation of a single-excited petal-shaped capacitive encoder to achieve high-accuracy measurement," *Sensors*, vol. 19, no. 10, p. 2412, 2019.
- [41] B. Hou, B. Zhou, X. Li, L. Yi, Q. Wei, and R. Zhang, "Nonlinear error compensation of capacitive angular encoders based on improved particle swarm optimization support vector machines," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 124265–124274, 2020.
- [42] R. Wolffenbuttel and R. Van Kampen, "An integrable capacitive angular displacement sensor with improved linearity," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 27, no. 1-3, pp. 835–843, 1991.
- [43] E. Mohammed and M. Rehman, "Digital capacitive angular-position sensor," *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 150, no. 1, pp. 15–18, 2003.
- [44] F. Kimura, M. Gondo, A. Yamamoto, and T. Higuchi, "Resolver compatible capacitive rotary position sensor," in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 1923–1928, IEEE, 2009.
- [45] D. Zheng, S. Zhang, S. Wang, C. Hu, and X. Zhao, "A capacitive rotary encoder based on quadrature modulation and demodulation," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 1, pp. 143–153, 2014.
- [46] S. Das, T. S. Sarkar, and B. Chakraborty, "Simple approach to design a capacitive rotary encoder," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 500–506, 2018.
- [47] A. T. Karaşahin, "Development of capacitive rotary encoder for robotic applications,"

Master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Science of Necmettin Erbakan University, Mechanical Engineering, Konya, 2018.

- [48] B. Hou, B. Zhou, X. Li, Z. Gao, Q. Wei, and R. Zhang, "An analog interface circuit for capacitive angle encoder based on a capacitance elimination array and synchronous switch demodulation method," *Sensors*, vol. 19, no. 14, p. 3116, 2019.
- [49] E. Yavşan, M. Kara, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, "Robust sensor mechanics for capacitive encoders," *European Journal of Science and Technology*, pp. 47 – 53, 2020.
- [50] Y. Netzer, "Capacitive displacement encoder," Dec. 10 2002. US Patent 6,492,911.
- [51] E. Yavsan, M. Karali, B. Gokce, and M. A. Erismis, "The effect of rotor plates on capacitive measurement in capacitive encoders," in *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, pp. 1–4, IEEE, 2020.
- [52] D. Zheng, S. Zhang, Y. Zhang, and C. Fan, "Application of cordic in capacitive rotary encoder signal demodulation," in *2012 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT) Proceedings*, pp. 61–65, IEEE, 2012.
- [53] Y. Netzer, "Rotary electric encoder technology," tech. rep., Netzer Precision Motion Sensors Ltd., Israel.
- [54] Z. Yu, K. Peng, X. Liu, Z. Chen, and Y. Huang, "A high-precision absolute angular-displacement capacitive sensor using three-stage time-grating in conjunction with a remodulation scheme," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 9, pp. 7376–7385, 2018.
- [55] R. Puers, "Capacitive sensors: when and how to use them," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 37, pp. 93–105, 1993.
- [56] M. Kirchhoff, C. Boese, J. Güttler, M. Feldmann, and S. Büttgenbach, "Innovative

- high-precision position sensor systems for robotic and automotive applications,” *Procedia chemistry*, vol. 1, no. 1, pp. 501–504, 2009.
- [57] X. Fan, Z. Yu, K. Peng, Z. Chen, and X. Liu, “A compact and high-precision capacitive absolute angular displacement sensor,” *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [58] G. Chen and S. Lin, “Design, implementation and comparison of demodulation methods in am and fm,” 2012.
- [59] H. Klein, N. A. of Broadcasters. AM Improvement Committee, Hammett, and I. C. E. Edison, *Modulation, Overmodulation, and Occupied Bandwidth: Recommendations for the AM Broadcast Industry*. National Association of Broadcasters, 1986.
- [60] R. Casanella, O. Casas, and R. Pallàs-Areny, “Differential synchronous demodulator for modulating sensors and impedance measurements,” *Measurement Science and Technology*, vol. 16, pp. 1637–1643, jul 2005.
- [61] N. K. Bhaskarrao, C. S. Anoop, and P. K. Dutta, “A novel linearizing signal conditioner for half-bridge based tnr angle sensor,” *IEEE Sensors Journal*, 2020.
- [62] L. K. L. Estorque and M. A. A. Pedrasa, “Utility-scale dg planning using location-specific hosting capacity analysis,” in *2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia)*, pp. 984–989, IEEE, 2016.
- [63] W. Racheh, N. Ghrada, and M. F. Zhani, “Profit-driven resource provisioning in nfv-based environments,” in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [64] H. Arslan, “Development of transimpedance amplifiers for different input frequency values,” Master’s thesis, The Graduate School of Natural and Applied Science of Necmettin Erbakan University, Electrical and Electronics Engineering, Konya, 2018.
- [65] M. Demirtaş, M. A. Erişmiş, and S. Güneş, “Analysis and design of a transimpedance amplifier based front-end circuit for capacitance measurements,” *SN Applied Sciences*,

vol. 2, no. 2, p. 280, 2020.

- [66] B. Hou, B. Zhou, M. Song, Z. Lin, and R. Zhang, “A novel single-excitation capacitive angular position sensor design,” *Sensors*, vol. 16, no. 8, p. 1196, 2016.
- [67] M. A. Erişmiş, “Mems accelerometers and gyroscopes for inertial measurement units,” Master’s thesis, The Graduate School of Natural and Applied Science of Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering, Ankara, 2004.
- [68] M. Kara, E. Yavşan, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, “Arctangent function implementation with cordic for a capacitive angular position sensor,” *European Journal of Science and Technology*, pp. 160 – 164, 2020.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı :** Emrehan YAVŞAN

**Uyruğu :** T.C.

**Doğum Yeri ve Tarihi :** TEKİRDAĞ / MALKARA, 27.09.1989

**Telefon :** + 90 555 597 23 03

**Faks :** -

**e-mail :** eyavsan@erbakan.edu.tr

## EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Lise	Kırklareli Fen Lisesi	2007
Lisans	FÜ Mekatronik Müh. Böl.	2012
Yüksek Lisans	FÜ Mekatronik Müh. ABD	2014
Doktora	NEÜ Mekatronik Müh. ABD	2020

## İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013 - Devam ediyor	NEÜ Müh. Mim. Fak.	Öğretim Elemanı

## YABANCI DİLLER

İngilizce

## YAYINLAR

E. Yavsan, M. Karali, B. Gokce, and M. A. Erisimis, "The Effect of Rotor Plates on Capacitive Measurement in Capacitive Encoders," in *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, pp. 1-4, IEEE, 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

E. Yavşan, M. Kara, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, "A Robust Sensor Mechanics for Capacitive Encoders," *European Journal of Science and Technology*, pp. 47-53, 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

M. Kara, E. Yavşan, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, "Arctangent Function Implementation with CORDIC for a Capacitive Angular Position Sensor," *European Journal of Science and Technology*, pp. 160-164, 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

E. Yavsan, M. R. Kara, M. Karali, and M. A. Erisimis, "Development Processes of a Capacitive Rotary Encoder," *5th International Conference on Computational Mathematics and Engineering Sciences (CMES-2021)*, (kabul edildi), 2021. (Doktora tezinden yapılmıştır)

E. Yavşan, M. R. Kara, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, "A Robust Sensor Mechanics for Capacitive Encoders," *1st International Conference on Computer, Electrical and Electronics Sciences (ICCEES)*, 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

M. R. Kara, E. Yavşan, M. Karalı, and M. A. Erişmiş, "Arctangent Function Implementation with CORDIC for a Capacitive Angular Position Sensor," *1st International Conference on Computer, Electrical and Electronics Sciences (ICCEES)*, 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

E. Yavşan, M. Karalı, B. Gökçe, and M. A. Erişmiş, "Rotor Selection for Capacitive Encoders," *3th International Defence Industry Symposium (IDEFIS)*, (kabul edildi), 2020. (Doktora tezinden yapılmıştır)

E. Yavşan, and A. Uçar, "Gesture imitation and recognition using Kinect sensor and extreme learning machines," *Measurement*, 94, pp. 852-861, 2016. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

E. Yavşan, and A. Uçar, "Teaching human gestures to humanoid robots by using Kinect sensor," in *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1208-1211. IEEE, 2015. (Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır)

A. Uçar, and E. Yavşan, "Behavior learning of a memristor-based chaotic circuit by extreme learning machines," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(1), pp. 121-140, 2016.