

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**LİNEER CCD SENSÖR İLE ÜRETİM HATTINDA
GERÇEK ZAMANLI KABLO ÇAP ÖLÇÜMÜ VE
OVALLIK KONTROLÜ**

**Hazırlayan
Ömer Enes YILDIZ**

**Danışman
Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2025
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**LİNEER CCD SENSÖR İLE ÜRETİM HATTINDA
GERÇEK ZAMANLI KABLO ÇAP ÖLÇÜMÜ VE
OVALLIK KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Ömer Enes YILDIZ**

**Danışman
Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN**

**Ağustos 2025
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ömer Enes YILDIZ

İmza

“Lineer CCD Sensör İle Üretim Hattında Gerçek Zamanlı Kablo Çap Ölçümü Ve Ovallık Kontrolü” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Ömer Enes YILDIZ

Danışman

Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

İmza



Elektrik – Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Enis GÜNAY

İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, bu çalışmanın fikir aşamasından itibaren her aşamasında bilgisini ve önerilerini esirgemeyen ve her konuda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince Ar-Ge merkezinin kaynaklarını kullanmama olanak sağlayan ve desteklerini esirgemeyen Hasçelik Kablo Tic. San. A.Ő. Ar-Ge Merkezi departmanı yöneticilerine ve değerli çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca ve bu zorlu süreçte maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, bana her zaman yol gösteren babam Sebahattin YILDIZ ve annem Ayten YILDIZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışmanın ortaya çıkmasında katkısı bulunan, fikir veren, kaynak sağlayan bütün herkese teşekkür ederim.

Ömer Enes YILDIZ

Ağustos 2025, KAYSERİ

LİNEER CCD SENSÖR İLE ÜRETİM HATTINDA GERÇEK ZAMANLI KABLO ÇAP ÖLÇÜMÜ VE OVALLIK KONTROLÜ

Ömer Enes YILDIZ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2025
Danışman: Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

ÖZET

Bu tez çalışması, kablo imalat endüstrisindeki yüksek maliyetli ve ithalata dayalı çap ölçüm sistemlerine yerli ve maliyet etkin bir alternatif geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, ürünlerin çap ve ovallik değerlerini anlık olarak denetleyebilen, yüksek hassasiyetli, iki eksenli bir optik ölçüm sistemi prototipi tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistem, birbirine dik konumlandırılmış iki adet Toshiba TCD1304DG lineer CCD(Charge-Coupled Device) sensörüne, STM32 mikrodenetleyicilerle yönetilen bir kontrol mimarisine ve özgün olarak tasarlanmış güç, kontrol ve sinyal koşullandırma devrelerine dayanmaktadır. Gömülü yazılım, sensörlerden gelen veriyi ADC(Analog Digital Converter) ve DMA(Direct Memory Access) kullanarak yüksek hızda işleyip çap bilgisini hesaplarken, C# tabanlı kullanıcı arayüzü sonuçları görselleştirmektedir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler, geliştirilen prototipin hatasız kablo kesitlerini doğru bir şekilde ölçtüğünü ve farklı boyutlardaki tek ve çift eksenli yapay hataları başarıyla tespit ettiğini doğrulamıştır. Bu çalışma, endüstriyel kalite kontrol süreçleri için güvenilir ve ekonomik bir çözüm sunarak yerli sanayiye katkı sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kablo Çap Ölçümü, Hata Tespiti, CCD Sensör, Optik Ölçüm

REAL-TIME CABLE DIAMETER MEASUREMENT AND OVALITY CONTROL ON THE PRODUCTION LINE WITH LINEAR CCD SENSOR

Ömer Enes YILDIZ

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, August 2025
Supervisor: Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN**

ABSTRACT

This thesis aims to develop a domestic and cost-effective alternative to the high-cost and import-dependent diameter measurement systems in the cable manufacturing industry. Within this scope, a high-precision, two-axis optical measurement system prototype capable of instantly monitoring the diameter and ovality values of products has been designed and produced. The system is based on two perpendicularly positioned Toshiba TCD1304DG linear CCD sensors, a control architecture managed by STM32 microcontrollers, and originally designed power, control, and signal conditioning circuits. The embedded software processes the data from the sensors at high speed using ADC and DMA to calculate the diameter, while a C#-based user interface visualizes the results. Experiments conducted in a laboratory environment have confirmed that the developed prototype accurately measures flawless cable sections and successfully detects single and dual-axis artificial defects of various sizes. This study demonstrates the potential to contribute to the domestic industry by offering a reliable and economical solution for industrial quality control processes.

Keywords: Cable Diameter Measurement, Defect Detection, CCD Sensor, Optical Measurement

İÇİNDEKİLER

LİNEER CCD SENSÖR İLE ÜRETİM HATTINDA GERÇEK ZAMANLI KABLO ÇAP ÖLÇÜMÜ VE OVALLIK KONTROLÜ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Görüntü Sensör Teknolojisi	4
1.1.1. Gömülü Fotodiyotlar	5
1.2. CCD Sensörler	6
1.2.1. CCD Sensörlerin Çalışma Prensipleri.....	6
1.2.2. Piksel Sıfırlama ve Elektronik Deklanşör	8
1.2.3. CCD Sensör Tipleri	9
1.2.4. CCD ve CMOS Sensörlerin Karşılaştırılması	11
1.2.5. Sensör Verisi İçin Gerekli Zamanlayıcı Sinyalleri	13
1.2.6. Toshiba TCD1304DG Sensörü	14
1.2.7. Analog Çıkış Sinyali ve Veri Aktarımı	16
1.3. Işık Kaynağı.....	16

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Güç Kaynağı Tasarımı.....	20
--------------------------------	----

2.2. CCD Sensör Kontrol Devresi	20
2.3. Mikrodenetleyici Seçimi ve Yapılandırma.....	22
2.4. STM32 Gömülü Yazılım Geliştirme.....	24
2.4.1. CCD Sensör Kontrol Sinyallerinin Hesaplanması	25
2.4.2. Kontrol Sinyallerinin Mikrodenetleyici ile Elde Edilmesi.....	28
2.4.3. Sensör Verisinin Okunması	31
2.4.4. Veri Haberleşmesi	33
2.5. Arayüz Tasarım.....	33

3. BÖLÜM BULGULAR

3.1. Mekanik Tasarım ve Deney Düzeneği.....	35
3.2. Deney Çalışmaları	37
3.2.1. Hatasız Kablo Kesitinin Ölçümü	38
3.2.2. Tek Eksenli Büyük Hata Tespiti	38
3.2.3. Tek Eksenli Küçük Hata Tespiti.....	39
3.2.4. İki Eksende Hata Tespiti ve Ovallık Kontrolü	40
3.2.5. Sistem Doğruluk ve Hassasiyet Değerlendirilmesi	40
3.2.6. Sistem Performans Değerlendirmesi	42

4. BÖLÜM TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma	46
4.2. Sonuç ve Öneriler	47
KAYNAKÇA	49
ÖZGEÇMİŞ.....	53

KISALTMALAR

ADC	: Analog-Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
CCD	: Charge-Coupled Device (Yük Kuplajlı Cihaz)
CDC	: Communication Device Class (İletişim Cihaz Sınıfı)
CMOS	: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Tamamlayıcı Metal-Oksit-Yarıiletken)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DMA	: Direct Memory Access (Doğrudan Bellek Erişimi)
FF	: Full Frame (Tam Kare)
FT	: Frame Transfer (Kare Transferi)
HAL	: Hardware Abstraction Layer (Donanım Soyutlama Katmanı)
ICG	: Integration Clear Gate (Entegrasyon Temizleme Kapısı)
IDE	: Integrated Development Environment (Bütünleşik Geliştirme Ortamı)
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
NVIC	: Nested Vectored Interrupt Controller (İç İçe Vektörlü Kesme Denetleyicisi)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SH	: Shift Pulse (Kaydırma Darbesi)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
USB	: Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veri Yolu)
ϕM	: Master Clock (Ana Saat Sinyali)

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	CCD ve CMOS görüntü sensörlerinin karşılaştırılması	13
Tablo 1.2.	Toshiba TCD1304DG sensör çalışma gereksinimleri	14
Tablo 2.1.	TCD1304DG sensörünün karakteristik değerleri	26
Tablo 3.1.	Sistem performans sonuçları.....	43
Tablo 4.1.	Ölçüm sonuçlarının TSE dokümanındaki değerler ile kıyaslanması.....	47



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Temel fotodiyot yapısı	5
Şekil 1.2.	CCD piksel yapısında potansiyel çukurların oluşturulması.....	7
Şekil 1.3.	CCD sensörlerinde yatay ve dikey yük transferi	7
Şekil 1.4.	Reset Gate kullanarak pikseldeki yükün boşaltılması	8
Şekil 1.5.	FF CCD sensör mimarisi	9
Şekil 1.6.	FT CCD sensör mimarisi	10
Şekil 1.7.	Mikrolens kullanımı.....	11
Şekil 1.8.	Toshiba TCD1304DG sensörü.....	14
Şekil 1.9.	Sensör spektral duyarlılık eğrisi	18
Şekil 2.1.	Sistem blok diyagramı	19
Şekil 2.2.	TCD1304DG sensörünün tipik uygulama devresi.....	21
Şekil 2.3.	Sensör devre kartı ve sensör	22
Şekil 2.4.	STM32F429ZI Discovery geliştirme kartı	23
Şekil 2.5.	Gömülü yazılı algoritması	24
Şekil 2.6.	Zamanlama grafiği.....	25
Şekil 2.7.	Elektronik denkleştirme ile zaman grafiği.....	26
Şekil 2.8.	Kontrol sinyalleri zamanlama grafiği	27
Şekil 2.9.	Zamanlayıcı atamaları.....	28
Şekil 2.10.	Master kontrol sinyal konfigürasyonları.....	29
Şekil 2.11.	SH kontrol sinyal konfigürasyonları.....	30
Şekil 2.12.	ICG Kontrol Sinyal konfigürasyonları	31
Şekil 2.13.	500 KHz PWM kontrol sinyal konfigürasyonu	32
Şekil 2.14.	ADC konfigürasyonu.....	33
Şekil 2.15.	Arayüz tasarımı.....	34
Şekil 3.1.	İki eksenli çap ölçer sisteminin mekanik tasarımı	36
Şekil 3.2.	Laboratuvar ortamı deney düzeneği	37
Şekil 3.3.	Deneylerde kullanılan hatalı kablo örneği	37
Şekil 3.4.	Hatasız kablo kesitinin ölçüm sonuçları	38
Şekil 3.5.	Tek ekseninde büyük hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları	39
Şekil 3.6.	Tek ekseninde küçük hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları.....	39
Şekil 3.7.	İki ekseninde hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları	40

Şekil 3.8.	“6.7 mm” çapındaki hatasız kablo kesit ölçümü.....	41
Şekil 3.9.	“11 mm” çapındaki hatasız kablo kesit ölçümü.....	42
Şekil 3.10.	Birinci numune ölçüm denemesi	44
Şekil 3.11.	İkinci numune ölçüm denemesi	44
Şekil 3.12.	Beşinci numune ölçüm denemesi	44
Şekil 3.13.	Yedinci numune ölçüm denemesi.....	44
Şekil 3.14.	Onuncu numune ölçüm denemesi.....	45
Şekil 3.15.	On birinci numune ölçüm denemesi	45
Şekil 3.16.	On ikinci numune ölçüm denemesi	45
Şekil 3.17.	On üçüncü numune ölçüm denemesi	45

GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde, ürün kalitesi ve üretim verimliliği, rekabet avantajı sağlamanın temel unsurları haline gelmiştir. Özellikle kablo ve tel imalat sektöründe, üretilen ürünlerin çap ve ovallik gibi kritik geometrik özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi büyük önem taşımaktadır. Kablo çapındaki küçük sapmalar dahi, nihai ürünün elektriksel performansını, mekanik dayanıklılığını ve dolayısıyla güvenliğini doğrudan etkileyebilir [1, 2]. Standartlara uygun olmayan çap ve ovallik değerleri, ürün iadelerine, üretim kayıplarına ve ciddi maliyet artışlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, üretim hattında anlık ve doğru çap ölçümü yapabilen sistemlere olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

Piyasada bu ihtiyacı karşılayan çeşitli ticari çap ölçüm sistemleri bulunmakla birlikte, bu sistemlerin önemli bir kısmı ithal ürünlerdir ve yüksek maliyetleri nedeniyle yerli üreticiler için erişilebilirlikleri sınırlıdır. Ayrıca, bakım ve yedek parça temininde yaşanan zorluklar, bu sistemlerin kullanımını daha da karmaşık hale getirebilmektedir. Bu tez çalışmasının temel amacı, yerli imkanlarla, maliyet etkin ve yüksek hassasiyete sahip bir iki eksenli kablo çap ölçer ve ovallik kontrol sistemi geliştirmektir. Geliştirilen sistem, ürün kalitesini güvence altına almayı ve üretim verimliliğini artırmayı hedeflemektedir [3]. İki eksenli ölçüm kabiliyeti sayesinde, kablonun sadece çapını değil, aynı zamanda ovalliğini de tespit ederek, üretim süreçlerindeki potansiyel hataların erken aşamada belirlenmesine olanak tanıyacaktır. Bu sayede, hem hammadde israfının önüne geçilecek hem de nihai ürünün kalitesi optimize edilecektir. Projenin yerli üretim olması, dışa bağımlılığı azaltma ve ulusal sanayiye katkı sağlama açısından da stratejik bir öneme sahiptir.

Kablo ve tel endüstrisinde çap ölçümü, uzun yıllardır çeşitli yöntemlerle ele alınan kritik bir konudur. Literatürde, mekanik, ultrasonik, kapasitif ve optik tabanlı olmak üzere farklı çap ölçüm teknikleri bulunmaktadır. Mekanik ölçüm yöntemleri, temaslı olmaları nedeniyle kablo yüzeyine zarar verebilmekte ve sürekli ölçüm için uygun olmamaktadır

[4]. Ultrasonik yöntemler yüksek doğruluk sunsalar da, ortam koşullarından (sıcaklık, nem) etkilenebilirler ve genellikle daha karmaşık sinyal işleme gerektirirler [5]. Kapasitif yöntemler ise belirli iletkenlikteki malzemeler için uygun olup, geniş bir uygulama alanına sahip değildir [6].

Son yıllarda, temassız ölçümün avantajları ve optik sensör teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte, optik tabanlı çap ölçüm sistemleri ön plana çıkmıştır. Bu sistemler genellikle lazer ışınları veya paralel ışık demetleri kullanarak, kablonun oluşturduğu gölgeyi analiz etme prensibine dayanır. Özellikle CCD sensörler, yüksek çözünürlükleri ve hızlı okuma yetenekleri sayesinde optik çap ölçüm uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Literatürde, tek eksenli CCD tabanlı çap ölçüm sistemlerine yönelik birçok çalışma bulunsa da, kablonun ovalliğini de kontrol edebilen iki eksenli sistemler, daha kapsamlı bir kalite kontrolü sağlamaktadır [8]. Örneğin, bazı çalışmalar tek bir CCD sensör kullanarak kabloyu döndürme veya sensörü hareket ettirme yoluyla ovallik ölçümünü ele almıştır; ancak bu yaklaşımlar, dinamik üretim ortamlarında gerçek zamanlı ölçüm için pratik zorluklar yaratabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, ikinci bölümünde, projenin teorik altyapısını oluşturan CCD (Charge-Coupled Device) sensör teknolojisi ve ilgili optik kavramlar incelenmiştir. Üçüncü bölümde, sistemin güç kaynağı, sensör kontrol ve sinyal koşullandırma devrelerini kapsayan donanım tasarımı ve uygulama süreçleri detaylandırılmıştır. Dördüncü bölümde, mikrodenetleyici programlama, veri işleme algoritmaları ve kullanıcı arayüzünün geliştirilmesini içeren yazılım tasarımı ele alınmıştır. Beşinci bölümde, geliştirilen prototipin performansının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen kontrollü deneyler ve elde edilen bulgular sunulmuştur. Son bölümde ise çalışmanın genel bir değerlendirmesi yapılmış, projenin literatüre olan özgün katkıları vurgulanmış ve gelecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur. Geliştirilen prototip cihazın ölçüm performansını değerlendirmek amacıyla, Türk Standartları Enstitüsü tarafından belirlenen standartlara göre bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu tezde, Toshiba TCD1304DG lineer CCD sensörünü kullanarak, iki eksenli ve tamamen temassız bir ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Literatürdeki birçok çalışmada farklı tip ve modellerdeki CCD sensörler kullanılsa da Toshiba TCD1304DG, yüksek piksel sayısı (3648 piksel) ve hızlı tepki süresi gibi özellikleriyle projenin gerektirdiği hassasiyet

ve hız ihtiyaçlarını karşılamaktadır [9]. Projede, iki adet TCD1304DG sensörün birbirine dik yerleştirilmesiyle eş zamanlı iki eksenli ölçüm yapılması, kablo üretim hattındaki anlık ovalık kontrolünü mümkün kılmaktadır. Ayrıca, standart bir mikrodenetleyici (STM32) tabanlı kontrol sistemi, özel olarak tasarlanmış güç ve sinyal koşullandırma devreleri ile birlikte, sistemin donanımsal ve yazılımsal entegrasyonunu sağlamaktadır [10]. Literatürdeki benzer ticari veya akademik çözümlerle karşılaştırıldığında, bu tez çalışması yerli üretim felsefesiyle, optimize edilmiş maliyetle yüksek performans sunan bir prototip geliştirmesiyle öne çıkmaktadır. Özellikle güç kaynağı, sensör kontrol devreleri ve kullanıcı arayüzünün tamamının özgün olarak tasarlanması ve üretilmesi, projenin özgün katkılarını pekiştirmektedir. Bu yaklaşım, benzer sistemlerin yurt içinde geliştirilmesine yönelik önemli bir adım teşkil etmektedir.

1. BÖLÜM

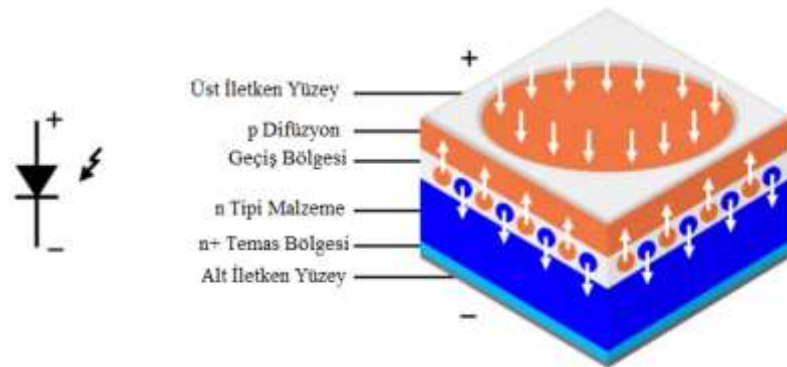
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bu bölümde, geliştirilen iki eksenli kablo çap ölçer ve ovallık kontrol sisteminin temel yapı taşı oluşturulan CCD sensörlerinin çalışma prensipleri ve ilgili optik kavramlar teorik olarak detaylandırılmıştır. Burada, ışığın algılanmasından dijital veriye dönüşümüne kadar olan süreçte rol oynayan fiziksel unsurlar, sensörün dahili mimarisi ve temel kontrol sinyallerinin işlevleri bilimsel bir çerçevede incelenmektedir. Bu bölüm, projenin sonraki donanım ve yazılım tasarımı kararlarının altında yatan teorik altyapıyı oluşturarak, sistemin mühendislik yaklaşımını ve elde edilen sonuçların dayanağını açıklamaktadır.

1.1. Görüntü Sensör Teknolojisi

Görüntü sensörleri, ışık enerjisini elektrik sinyallerine dönüştürerek çevresel optik bilgilerin dijital verilere çevrilmesini sağlayan elektronik cihazlardır. Bu dönüşüm, endüstride kalite kontrol, otomasyon, güvenlik ve sağlık gibi çok çeşitli alanlarda kritik rol oynamaktadır [11]. Temelde, ışığın taşıdığı fotonların yarıiletken malzeme içinde elektron-delik çiftleri oluşturması prensibine dayanır. Oluşan bu yükler, algoritmalar aracılığıyla işlenerek görüntüyü veya ilgili optik özelliği temsil eden sayısal verilere dönüştürülür.

Görüntü sensörlerinin temel bileşeni, ışığa duyarlı elemanlar olan fotodiyotlardır[12]. Şekil 1.1’de gösterildiği gibi p-n eklem yapısına sahip olan fotodiyotlar, üzerlerine düşen ışık şiddetiyle orantılı olarak elektrik akımı üretirler[13]. Genellikle silikon tabanlı üretilen fotodiyotlar, farklı spektral hassasiyetler ve uygulama alanları için çeşitli yarıiletken malzemelerle de geliştirilebilir. Bu elektrik sinyalleri, sonrasında biriktirilerek veya anlık olarak okunarak görüntü verisine dönüştürülür.



Şekil 1.1. Temel fotodiyot yapısı

Görüntü sensör teknolojileri, tarihsel gelişimleri ve mimarilerine göre başlıca CCD ve CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) sensörler olmak üzere iki ana kategoride incelenir. Her iki sensör tipi de ışığı algılama prensibini paylaşıyor da, yük transferi, sinyal işleme ve üretim süreçleri açısından önemli farklılıklar gösterirler. Bu tez çalışmasında, kablo çap ölçüm uygulaması için kritik öneme sahip olan hassasiyet ve gürültü performansı göz önünde bulundurularak CCD sensör teknolojisi tercih edilmiştir[14]. Aşağıdaki bölümlerde bu sensör teknolojileri daha detaylı ele alınacaktır.

1.1.1. Gömülü Fotodiyotlar

Gömülü fotodiyotlar, görüntü sensörü teknolojilerinde, özellikle CCD ve modern CMOS sensörlerin performansını artıran önemli bir gelişmedir. 1980'lerde, standart fotodiyotlarda yaşanan yük transfer gecikmeleri ve karanlık akım sorunlarını çözmek amacıyla geliştirilmiştir[15]. Gömülü fotodiyotun yapısı, standart bir "p-n" eklemli fotodiyota ek olarak, yüksek katkılanmış bir "p+" katmanı içerir. Bu "p+" bölgesi, p-tipi yarıiletken ile n-tipi yarıiletken arasında bir bariyer oluşturarak fotodiyotun daha hızlı ve verimli bir şekilde yük toplamasını sağlar. Gömülü fotodiyotların sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

- Yüksek Kuantum Verimliliği: Gelen ışığın büyük bir kısmını elektrik yüküne dönüştürme yeteneği, özellikle düşük ışık koşullarında daha net ve detaylı görüntüler elde edilmesini sağlar.
- Düşük Gürültü Performansı: Yapısal özellikleri sayesinde özellikle düşük ışık seviyelerinde daha az gürültü üretir, bu da yüksek kaliteli görüntülerin elde edilmesine olanak tanır.

- Düşük Karanlık Akım: Sensörün ışık olmadığı zaman üretilmesi istenmeyen elektron akımı olan karanlık akımı minimize eder[16]. Bu durum uzun pozlama sürelerinde görüntü netliğini artırır.
- Gelişmiş Dinamik Aralık: Geniş bir ışık spektrumunda doğru ölçümler yapabilme yeteneği sağlar, bu özellik yüksek kontrastlı ortamlarda daha iyi sonuçlar alınmasına olanak tanır.
- Hızlı Yük Transferi: Yüklerin daha hızlı bir şekilde transfer edilmesini sağlayarak görüntüleme hızını artırır ve yüksek hızlı uygulamalarda avantaj sunar.

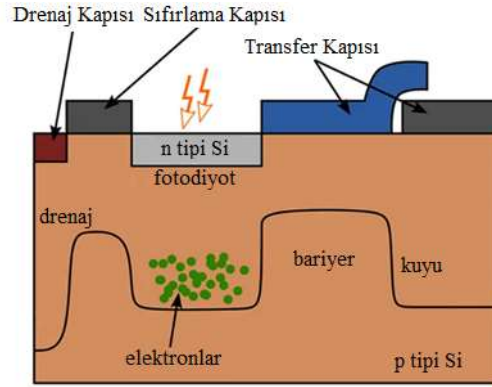
Günümüzde, neredeyse tüm modern CCD ve CMOS görüntü sensörleri, bu avantajları nedeniyle gömülü fotodiyot yapısını kullanmaktadır[17]. Bu durum, geliştirilen sistemin hassasiyet ve performans gereksinimlerini karşılama konusunda önemli bir donanımsal temel oluşturmaktadır.

1.2. CCD Sensörler

CCD sensörler, görüntüleme teknolojisinde bir dönüm noktası olarak kabul edilen ilk yarıiletken tabanlı görüntüleme cihazlarından biridir. Willard Boyle ve George E. Smith tarafından 1969 yılında temelleri atılan CCD'ler, ışıkla üretilen analog sinyalleri dijital ortama aktarma yeteneği ile modern kamera ve görüntüleme sistemlerinin gelişimine öncülük etmiştir[18]. Günümüzde CCD sensörler, yüksek hassasiyet ve düşük gürültü gerektiren sağlık, güvenlik, savunma sanayii, bilimsel araştırma ve endüstriyel kalite kontrol gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2.1. CCD Sensörlerin Çalışma Prensibi

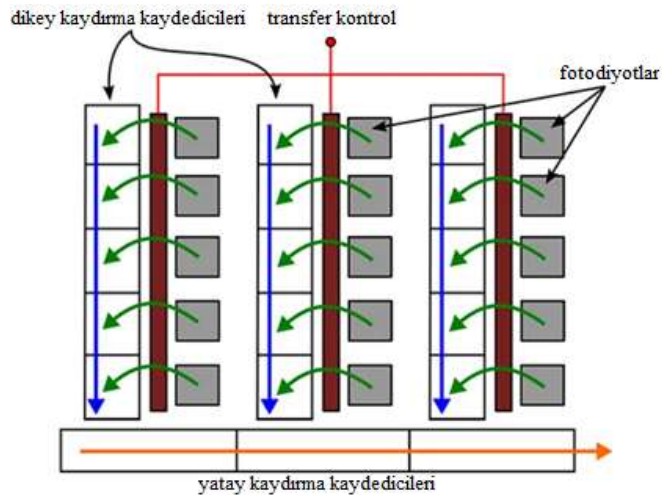
Bir CCD sensörünün temel çalışma prensibi, fotonların silikon yarıiletken malzeme içerisinde elektron oyuk çiftleri oluşturması ve bu elektron yük paketlerinin elektriksel olarak kontrollü bir şekilde sensör çıkışına aktarılmasına dayanır. Işığa maruz kalan her bir piksel, üzerine düşen ışığın şiddetiyle orantılı miktarda elektron yükü toplar. Bu yükler, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi, diyotun altındaki p-tipi silikon içinde oluşturulan "potansiyel çukur" adı verilen bölgelerde biriktirilir[13]. Potansiyel çukurlar, kapı elektrotlarına uygulanan pozitif voltajlarla oluşturulur; negatif veya sıfır voltaj ise potansiyel bariyerleri kontrol ederek elektron hareketini engeller.



Şekil 1.2. CCD piksel yapısında potansiyel çukurların oluşturulması

Işıklı üretilen yük paketlerinin sensör çıkışına aktarılması, “yük bağılılığı” olarak adlandırılan bir süreçle gerçekleşir. Bu süreçte, kapıya uygulanan sıralı saat sinyalleri ile potansiyel çukurlar ve bariyerler kontrollü bir şekilde hareket ettirilir[19]. Bu sayede, her bir pikselde biriken elektron yük paketleri, bir sonraki piksele aktarılır ve bu aktarım, tüm piksel sırası boyunca devam ederek yüklerin sensörün çıkış terminaline ulaşmasını sağlar.

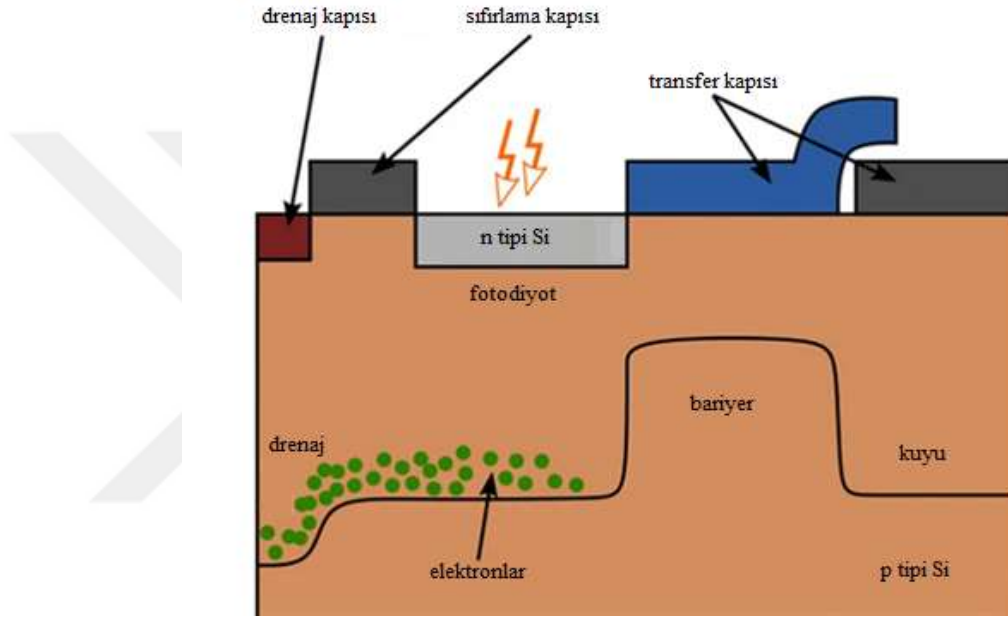
Şekil 1.3’te görüldüğü üzere, CCD sensörlerinde yük paketi aktarımı, analog kaydırmalı kaydedici (analog shift registers) adı verilen bir ağ yapısı ile sağlanır[13]. Öncelikle, yatay (seri) kaydırma kaydedicileri, yük paketlerini bir hat üzerinden sensör çıkışına taşır. Bir hat üzerindeki tüm yükler aktarıldığında, dikey (paralel) kaydırma kaydedicileri, tüm hatlardaki yük paketlerini eş zamanlı olarak yatay hatta aktarır. Bu döngü, tüm piksellerdeki veriler okunana kadar tekrarlanır. Okuma sonrasında bu analog yük paketleri, sinyal işleme devrelerine iletilerek voltaj sinyallerine dönüştürülür ve sayısal hale getirilir[20].



Şekil 1.3. CCD sensörlerinde yatay ve dikey yük transferi

1.2.2. Piksel Sıfırlama ve Elektronik Deklanşör

CCD sensörlerinde, her bir pikselde biriken yükün temizlenmesi ve yeni bir pozlama döngüsüne hazırlanması için Reset Gate (Sıfırlama Kapısı) kullanılır[21]. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, Reset Gate'e pozitif bir voltaj uygulanmasıyla, pikselde depolanan elektron yükleri "Drenaj" adı verilen bir bölgeye akıtılarak temizlenir[13]. Bu işlem, pikselin saturasyonunu önler ve bir sonraki ölçüm için temiz bir başlangıç sağlar.



Şekil 1.4. Reset Gate kullanarak pikseldeki yükün boşaltılması

Reset Gate'in bu özelliği, CCD sensörlerinde elektronik deklanşör işlevi de görür. Geleneksel kameralardaki mekanik deklanşörlerin aksine, elektronik deklanşör fiziksel bir kapak gerektirmez. Reset Gate'e uygulanan pozitif voltaj, sensörün ışık algılamasını durdurur; çünkü ışıkla oluşan tüm yükler drenaj üzerinden anında uzaklaştırılır. Bu durum, sensörün sanki ışık yokmuş gibi davranmasını sağlar. Pozlama işlemi, Reset Gate'e uygulanan voltajın sıfıra veya negatife çekilmesiyle başlar, bu sayede potansiyel bariyer oluşturularak yüklerin fotodiyot altında birikmesi sağlanır. Elektronik deklanşör, mekanik deklanşörlere kıyasla daha hızlı, daha hassas ve sistemin genel güvenilirliğini artıran bir çözüm sunar.

Elektronik deklanşör ayrıca, aşırı pozlamadan kaynaklanan "Blooming" (çiçeklenme) etkisinin önlenmesinde de rol oynar[22]. Aşırı parlak ışık alan bir pikselde toplanan elektron yükü, pikselin kapasitesini aştığında komşu piksellere taşarak görüntüde kirliliğe

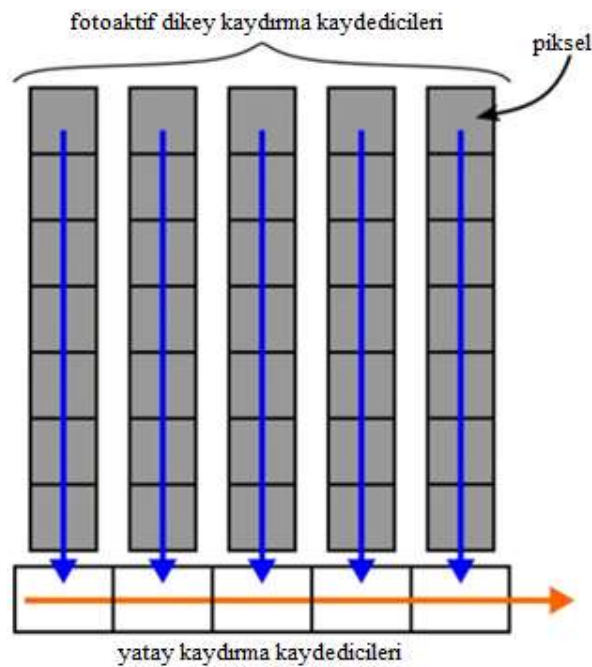
yol açabilir. Reset Gate'e uygulanan voltaj, potansiyel bariyerin yüksekliğini belirleyerek pikselin yük kapasitesini sınırlar. Aşırı yükler, bu bariyer üzerinden drenaja yönlendirilerek Blooming etkisi minimize edilir.

1.2.3. CCD Sensör Tipleri

CCD görüntü sensörleri, fotoaktif alanların ve yük transfer yapılarının mimarisine göre farklı tiplere ayrılır. Bu mimariler, sensörün performansı (hız, gürültü, kuantum verimliliği) ve uygulama alanları üzerinde belirleyici rol oynar. Başlıca üç CCD sensör tipi şunlardır:

- FF (Full Frame) CCD Sensörler:

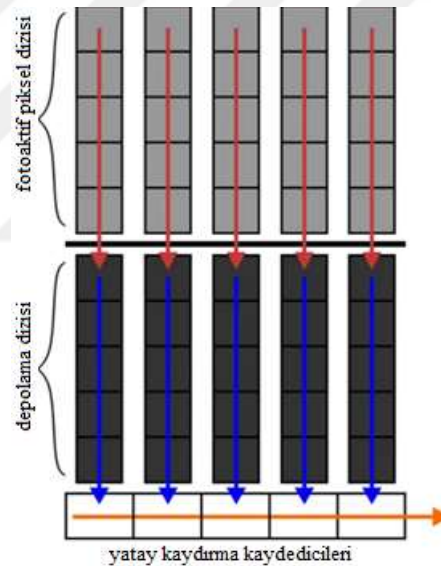
FF CCD'erde, yarıiletken yüzeyin tamamı hem ışık algılama hem de yük transferi için kullanılır. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi, ışıkla etkileşime giren piksellerde toplanan yükler, dikey olarak yatay kaydırma kaydedicisine doğru hareket eder[13]. Bu tasarım, her piksel alanının tamamen ışığa duyarlı olması sebebiyle maksimum ışık hassasiyeti ve yüksek piksel yoğunluğu sağlar. Ancak, okuma işlemi sırasında piksel alanları hala ışığa duyarlı kaldığından, harici bir mekanik deklanşöre veya senkronize edilmiş bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulur. Bu durum, özellikle yüksek hızlı uygulamalarda dezavantaj oluşturabilir.



Şekil 1.5. FF CCD sensör mimarisi

- FT (Frame Transfer) CCD Sensörler:

FT CCD sensörler, Full Frame mimarisinin deklanşör sorununu çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi, sensör yüzeyi iki ana bölüme ayrılmıştır: ışığa duyarlı görüntüleme dizisi ve ışıkla korunmuş depolama dizisi[13]. Pozlama tamamlandığında, görüntüleme dizisindeki tüm yük paketleri son derece hızlı bir şekilde depolama dizisine aktarılır. Bu aktarım sırasında görüntüleme dizisi tekrar ışığa maruz kalırken, depolama dizisindeki yükler okunur. Bu yapı, elektronik deklanşör kullanımına olanak tanır ve yüksek okuma hızları sağlar. Ancak, yük aktarımı sırasında görüntüleme dizisinden depolama dizisine sızan ışık nedeniyle dikey lekelenme riski mevcuttur. Ayrıca, sensör yüzeyinin yarısının depolama için ayrılması, üretim maliyetini artırabilir ve görüntüleme alanı verimliliğini düşürebilir.

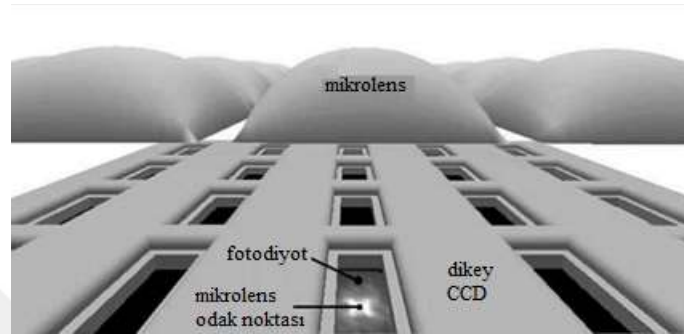


Şekil 1.6. FT CCD sensör mimarisi

- IT (Interline Transfer) CCD Sensörler:

IT CCD sensörler, lekelenme sorununu minimize etmek ve daha kompakt bir yapı sunmak amacıyla geliştirilmiştir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi, her bir ışığa duyarlı pikselin bitişiğinde, ışıkla korunmuş bir dikey kaydırma kaydedicisi (depolama alanı) bulunur. Pozlama tamamlandığında, her pikseldeki yük paketleri eşzamanlı olarak kendi bitişiğindeki dikey kaydırma kaydedicisine aktarılır. Bu paralel aktarım, oldukça hızlı gerçekleştiğinden, lekelenme etkisi önemli ölçüde azalır. IT CCD sensörler, elektronik deklanşöre sahip olup yüksek okuma hızları sunar ve okuma sırasında etkileşimde

kalabilirler. Ancak, her pikselin altında hem fotodiyot hem de depolama alanı bulunması nedeniyle, pikselin ışığa duyarlı alanı (doluluk oranı) daha küçüktür, bu da verimliliği düşürebilir. Bu durum, Şekil 1.7’de görüldüğü gibi her pikselin üzerine yerleştirilen mikrolensler aracılığıyla telafi edilmeye çalışılır; mikrolensler, gelen ışığı daha verimli bir şekilde fotodiyota yönlendirir [23].



Şekil 1.7. Mikrolens kullanımı

1.2.4. CCD ve CMOS Sensörlerin Karşılaştırılması

Görüntüleme teknolojilerinde en yaygın kullanılan iki sensör türü olan CCD ve CMOS sensörler, farklı mimarileri nedeniyle kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Aşağıda belirtilen avantaj ve dezavantajlar Tablo 1.1’de kısaca bahsedilmiştir.

CCD Sensörlerin Avantajları:

- Yüksek Görüntü Kalitesi: Genellikle daha yüksek sinyal/gürültü oranı, daha düşük karanlık akım gürültüsü ve daha geniş dinamik aralık sunarak üstün görüntü kalitesi sağlar.
- Homojen Piksel Performansı: Yük transferi seri olduğu için, tüm pikseller aynı çıkış devresi üzerinden okunur, bu da pikselden piksele tutarlılıkta avantaj sağlar.
- Yüksek Kuantum Verimliliği: Işığı elektrığe dönüştürme verimlilikleri genellikle daha yüksektir.
- Daha Az Sabit Desen Gürültüsü: Üretim süreçlerindeki farklılıklardan kaynaklanan pikselden piksele varyasyonlar daha düşüktür.

- Uzun Pozlama Sürelerine Uygunluk: Düşük karanlık akım seviyeleri sayesinde astronomi ve bilimsel görüntüleme gibi uzun pozlama gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

CCD Sensörlerin Dezavantajları:

- Yüksek Güç Tüketimi: Yük transferi için yüksek voltajlı saat sinyalleri gerektirmesi nedeniyle genellikle CMOS sensörlere kıyasla daha fazla enerji harcar.
- Düşük Okuma Hızı: Seri yük transferi, özellikle yüksek çözünürlüklü sensörlerde okuma hızını sınırlayabilir.
- Yüksek Maliyet: Üretim süreçleri daha karmaşık ve dolayısıyla daha maliyetli olabilir.
- Ekstra Donanım Gereksinimi: Bazı tiplerinde mekanik deklanşör veya harici ADC gibi ek bileşenler gerektirebilir.

CMOS Sensörlerin Avantajları:

- Düşük Güç Tüketimi: Her pikselde entegre amplifikatör ve okuma devresi sayesinde daha az enerji tüketir, bu da mobil cihazlar için idealdir.
- Hızlı Okuma: Piksellerin paralel olarak okunabilmesi, çok yüksek kare hızlarına olanak tanır.
- Entegre Devreler: ADC, sinyal işleme birimleri gibi diğer devreler aynı çip üzerine entegre edilebilir, bu da sistem maliyetini ve boyutunu azaltır.
- Düşük Maliyet ve Kompakt Tasarım: Standart yarıiletken üretim süreçleriyle uyumlu olması nedeniyle daha ekonomiktir ve küçük form faktörlü cihazlara kolayca entegre edilebilir[24].

CMOS Sensörlerin Dezavantajları:

- Daha Yüksek Gürültü ve Düşük Dinamik Aralık: Her pikselde ayrı bir amplifikatör bulunması nedeniyle pikselden piksele varyasyonlar (sabit desen gürültüsü) daha belirgin olabilir ve dinamik aralıkları CCD'lere göre daha düşük olabilir[25].

- Daha Düşük Kuantum Verimliliği: Pikselin bir kısmının transistör ve devreler tarafından işgal edilmesi, ışığa duyarlı alanın küçülmesine neden olabilir.
- Panjur Etkisi (Rolling Shutter Effect): Piksellerin sıra sıra okunması, hızlı hareket eden nesnelere bozulmalara yol açabilir[26].

Tablo 1.1. CCD ve CMOS görüntü sensörlerinin karşılaştırılması

Özellik	CCD Sensörler	CMOS Sensörler
Görüntü Kalitesi	Yüksek (Düşük gürültü)	Genellikle daha düşük (Yüksek gürültü)
Güç Tüketimi	Yüksek	Düşük
Okuma Hızı	Düşük (Seri transfer)	Yüksek (Paralel okuma)
Maliyet	Yüksek	Düşük
Entegrasyon	Harici ADC ve işleme gerekebilir	Çoğu devre çip üzerinde entegre edilebilir
Boyut	Genellikle daha büyük	Kompakt
Deklanşör	Çoğu zaman harici/mekanik	Elektronik deklanşör (Rolling/Global)
Gürültü	Düşük sabit desen gürültüsü	Daha yüksek sabit desen gürültüsü
Blooming	Daha yatkın (IT'de azaltılmış)	Daha az yatkın

Bu tez çalışmasında geliştirilen kablo çap ölçüm sistemi için yüksek görüntü kalitesi, düşük gürültü seviyesi ve homojen piksel performansı kritik öneme sahiptir. Özellikle milimetrenin altındaki hassasiyetlerde çap ölçümü ve ovallik kontrolü, net ve gürültüsüz sinyal alımını zorunlu kılmaktadır. Bu gereksinimler göz önüne alındığında, gürültüye daha az duyarlı ve daha yüksek görüntü kalitesi sunma potansiyeline sahip olan CCD sensörler tercih edilmiştir.

1.2.5. Sensör Verisi İçin Gerekli Zamanlayıcı Sinyalleri

CCD sensörlerinin doğru çalışabilmesi için hassas zamanlamaya sahip kontrol sinyallerine ihtiyaç duyulur. Bu zamanlayıcı sinyalleri, genellikle kare dalga formunda olup, potansiyel çukurların ve bariyerlerin oluşturulmasını, yük paketlerinin pikseller arasında aktarılmasını ve sensör çıkışına ulaşmasını düzenler.

Standart CMOS lojik devrelerinde kullanılan 0V ve 3.3V veya 5V gibi voltaj seviyelerinin aksine, bazı CCD sensörler daha geniş bir voltaj aralığında çalışabilirler. Örneğin, bazı CCD'lerin yüksek (ON) voltaj seviyeleri CMOS lojikten daha yüksek olabilirken, düşük (OFF) voltaj seviyeleri ise 0V'un altında, yani negatif olabilir. Bu

durum, CCD sensörleri sürmek için özel sürücü devreleri veya mikrodenetleyiciden gelen sinyallerin voltaj seviyesini ayarlayan çeviriciler kullanılmasını gerektirebilir. Bu sebeple tez çalışmasında Şekil 1.8’de görülen Toshiba TCD1304DG lineer CCD sensörü; hassas ölçüm kabiliyeti, düşük gürültü performansı ve kolay sürülmesi sebebiyle tercih edilmiştir.



Şekil 1.8. Toshiba TCD1304DG sensörü

1.2.6. Toshiba TCD1304DG Sensörü

CCD tabanlı TCD1304DG lineer sensör, tek sıra halinde dizilmiş 3694 adet ışığa duyarlı piksele sahiptir. Kararlı olmayan(Dummy) pikseller hariç tutulduğunda 3648 adet kullanılabilir piksel mevcuttur. Her bir pikselin boyutu $8 \times 200 \mu\text{m}$ olarak belirtilmiştir. Toplamda 22 adet pine sahip bu sensörün çalışma değerleri Tablo 1.2’de verilmiştir[27].

Tablo 1.2. Toshiba TCD1304DG sensör çalışma gereksinimleri

Characteristic	Symbol	Rating	Unit
Master clock pulse voltage	$V_{\phi M}$		
Shift pulse voltage	V_{SH}		
Integration clear pulse voltage	V_{ICG}	-0.3 to +7.0	V
Digital power supply voltage	V_{DD}		
Analog power supply voltage	V_{AD}		
Operating Temperature	T_{opr}	-25 to +60	°C
Storage temperature	T_{stg}	40 to +100	°C

TCD1304 sensörü, düzgün çalışabilmesi ve biriken yük paketlerinin dışarı aktarılabilmesi için Tablo 1.2’de gösterilen üç temel kontrol sinyaline ihtiyaç duyar:

1. ϕM (Master Clock): Sensörün genel operasyon hızını belirleyen ana kontrol sinyalidir. TCD1304’ün Master Clock frekansı Tablo 2.1’de görüldüğü üzere 0.8 MHz ile 4 MHz arasında değişmektedir ancak tipik olarak 2 MHz değeri kullanılmaktadır[28]. Bu kontrol sinyali, dahili kaydırma kaydedicilerindeki (shift registers) yük paketlerinin

adım adım ilerlemesini senkronize eder. Her bir pikselin verisi, “Master Clock”un belirli bir döngüsü içinde işlenir ve çıkışa gönderilir. Sensörün veri okuma hızı, Master Clock frekansının dörtte biri kadardır. Bu durumda 2 MHz’lik bir Master Clock için veri çıkış hızı 500 kHz olacaktır.

2. SH (Shift Pulse): Kaydırma darbesi olarak da bilinen SH sinyali, fotodiyotlarda biriken yük paketlerinin dikey kaydırma kaydedicilerine aktarılmasını sağlar[29]. Entegrasyon süresi sona erdiğinde (veya elektronik deklanşör kullanıldığında), SH sinyali aktif hale gelerek, her bir pikselde depolanan tüm yükleri eş zamanlı olarak ilgili dikey transfer hattına taşır. Bu, anlık bir fotoğraf çekme eylemine benzetilebilir. SH sinyalinin zamanlaması ve genişliği, elektronik deklanşör fonksiyonunu kontrol etmek için de kullanılabilir. Entegrasyon süresinin başlangıcını ve sonunu belirleyerek sensörün ne kadar süreyle ışık topladığını ayarlar. SH sinyali, ICG sinyali ile belirli bir faz ilişkisi içinde çalışır.
3. ICG (Integration Clear Gate): Entegrasyon Temizleme Kapı sinyali, iki temel işlevi yerine getirir:
 - Piksel Sıfırlama/Temizleme: ICG sinyali, piksellerde biriken yükleri boşaltarak yeni bir entegrasyon döngüsüne başlamadan önce sensörün temizlenmesini sağlar. Bu işlem, önceki pozlamadan kalan hayalet görüntüleri veya artıkları önler.
 - Elektronik Deklanşör Kontrolü: TCD1304’ün önemli özelliklerinden biri olan elektronik deklanşör fonksiyonu, ICG sinyali aracılığıyla kontrol edilir. ICG sinyali, lojik olarak “OFF” değerinde iken fotodiyotlardan drenaj adı verilen bir bölgeye yüklerin akmasına izin verir, böylece piksellerde yük birikimi olmaz. Diğer bir durumda ICG sinyali, lojik olarak “ON” değerinde iken fotodiyotların yani pikselleri altında yük birikimi başlar. Bu, fiziksel bir mekanik deklanşöre olan ihtiyacı ortadan kaldırarak daha hızlı ve güvenilir bir çalışma sağlar.

Kontrol sinyalleri sayesinde, her bir pikselde oluşan analog yük paketleri, öncelikle dikey kaydırma kaydedicilerine (SH ve ICG sinyallerinin senkronize çalışmasıyla) aktarılır[30]. Ardından, bu dikey yazmaçlardaki yükler, Master Clock sinyaliyle senkronize olarak yatay (seri) kaydırma kaydedicisine sırayla beslenir. Yatay kaydırma kaydedicisi, her bir

pikselin yükünü ardışık olarak sensörün tek bir analog çıkış pinine doğru kaydırır. Bu “seri okuma” işlemi, tüm piksellerin tek tek okunmasını sağlar.

1.2.7. Analog Çıkış Sinyali ve Veri Aktarımı

TCD1304’ün ana analog çıkış pini, her bir pikselden okunan yük miktarına karşılık gelen bir voltaj sinyali üretir. Bu sensörde ışık şiddeti arttıkça çıkış voltajı azalır (ters polarite). Yani, karanlık bölgeler (kablunun gölgesi gibi) daha yüksek voltaj çıkışı verirken, parlak bölgeler (ışık alan pikseller) daha düşük voltaj çıkışı verir. Tamamen doygunluğa ulaşmış (çok parlak) bir piksel, sensörün doygunluk çıkış voltajına (V_{sat}) yaklaşırken, hiç ışık almayan (karanlık) bir piksel daha yüksek bir ofset voltajı (V_{os}) üretir. V_{sat} değeri tipik olarak 600 mV olmakla birlikte bu değer sensör ışığa en üst düzey seviyede maruz kaldığı süreçte tüm piksellerde gözlemlenmektedir.

Bu ham analog çıkış sinyali, mikrodenetleyicinin işleyebileceği dijital verilere dönüştürülmeden önce genellikle bir sinyal koşullandırma devresinden geçer. Sensör devresinde, işlemsel kuvvetlendiriciler (Op-Amp) kullanılarak sinyaldeki DC ofset ortadan kaldırılarak sinyalin genliği mikrodenetleyicinin ADC giriş aralığına uygun hale getirilmiştir. Sensörün 0.6V ile 2.5V arasında değişebilen ham çıkış sinyali, bir işlemsel kuvvetlendirici ile 0V-3.3V gibi standart bir ADC giriş aralığına ölçeklendirilebilir. Bu çalışmada mikrodenetleyiciyi korumak amacıyla maksimum voltaj değeri 3V’un altında tutulmuştur.

Sinyal koşullandırıldıktan sonra, mikrodenetleyicinin ADC birimi tarafından dijital verilere dönüştürülür. Bu dijital veriler, her pikselin aldığı ışık miktarını sayısal olarak temsil eder. Çap ölçümü için, bu dijital piksel verileri analiz edilerek ışık alan ve gölgeye düşen pikseller ayırt edilir, ardından gölge piksellerinin sayısı kullanılarak kablunun çapı hesaplanır.

1.3. Işık Kaynağı

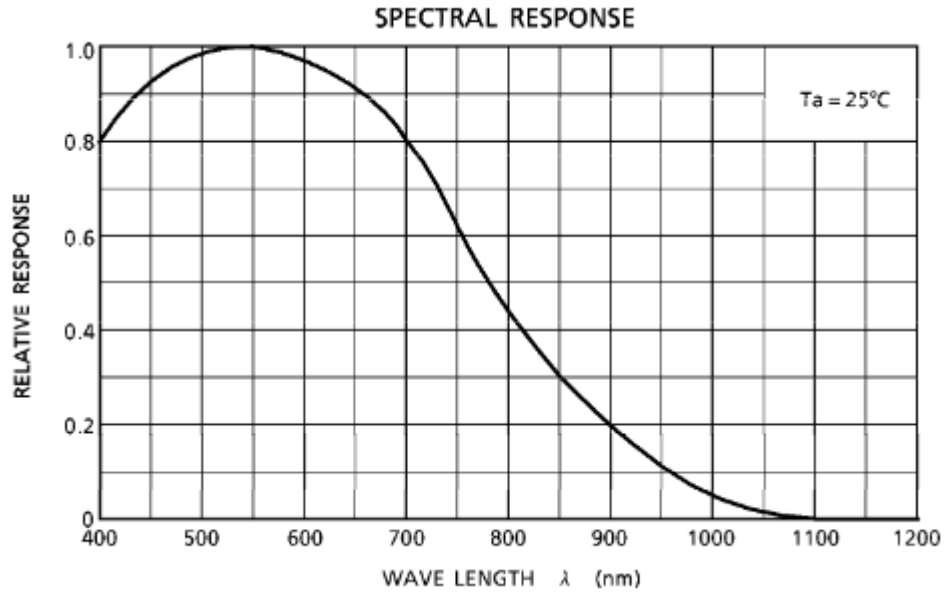
Çap ölçüm sistemlerinin optik prensiplere dayanması nedeniyle, ışığın temel özellikleri ve çevresel etkileşimleri, ölçüm doğruluğu üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Işık, elektromanyetik spektrumun insan gözüyle algılanabilen dar bir bölümünü oluşturan bir dalga olarak kabul edilir. Bu dalga boyu, ışığın rengini ve enerji seviyesini belirler. Bir

optik ölçüm sisteminde ışık kaynağının dalga boyu seçimi, kullanılan görüntü sensörünün spektral duyarlılığı ile uyumlu olmalıdır[31]. CCD sensörler, belirli dalga boyu aralıklarındaki ışığa daha hassas tepki vermektedirler.

Kullanılan Toshiba TCD1304DG lineer CCD sensörü, datasheet bilgilerine göre geniş bir spektral yanıt aralığına sahiptir ve özellikle görünür ışık spektrumunda (yaklaşık 380 nm – 780 nm) yüksek duyarlılık gösterir. Bu aralık, mor ötesinden kırmızı ötesine yakın bantlara kadar uzanır. Ancak en yüksek duyarlılığa sahip olduğu bölge genellikle yeşil ve yakın kırmızı ötesi bölgeleridir.

Bu tez çalışmasında ışık kaynağı olarak yeşil güç LED (Light Emitting Diode) tercih edilmiştir[32]. Bu seçimin temel nedenleri şunlardır:

- **CCD Sensör Duyarlılığı ile Uyum:** Şekil 1.9’da TCD1304DG sensörünün teknik dokümanında gösterildiği üzere yeşil ışık, spektral duyarlılık eğrisinin tepe noktasına yakın bir dalga boyunda bulunmaktadır[27]. Bu durumda sensör, yeşil ışıktan maksimum verimle sinyal üretmesini sağlayarak daha güçlü ve net bir gölge sinyali elde edilmesine olanak tanır.
- **Maliyet Etkinliği:** Lazer diyotlar veya diğer yüksek güçlü ışık kaynakları, milimetrenin altındaki hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılabilir de, genellikle daha yüksek maliyetlidirler. Projenin yerli ve maliyet etkin bir çözüm sunma hedefi doğrultusunda, benzer performansı daha uygun maliyetle sunabilen yeşil güç LED’ler tercih edilmiştir.
- **Tasarım Kolaylığı ve Ömür:** Güç LED’ler, lazerlere göre daha basit sürüş devreleri gerektirir ve daha uzun çalışma ömrüne sahiptirler. Bu durum, sistemin genel güvenilirliğini ve bakım maliyetlerini olumlu yönde etkiler.
- **Kararlılık:** Akım regülatörleri ile sürülen güç LED’ler, kararlı bir ışık çıkışı sağlayarak ölçüm şartlarını sabit tutar.



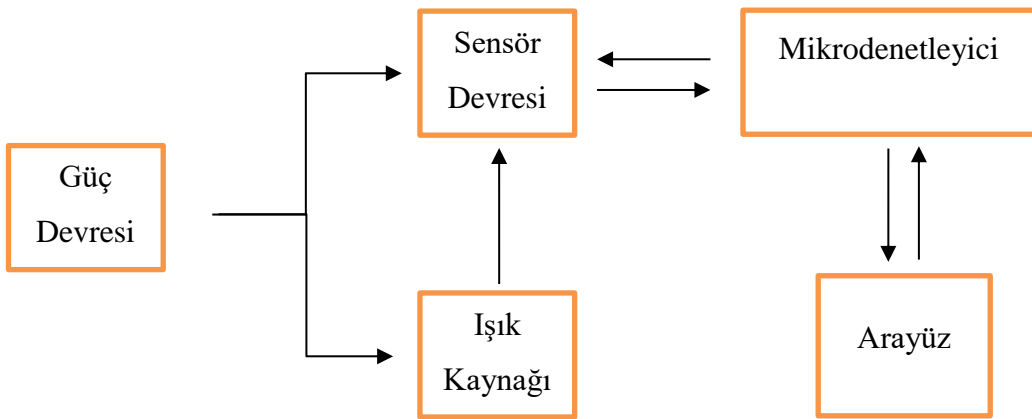
Şekil 1.9. Sensör spektral duyarlılık eğrisi

Her eksen için bir adet yeşil power LED kullanılmış ve ışığı bir çizgi lazer gibi iletmek amacıyla ortası çizgi halinde kesik plastik engeller yerleştirilmiştir. Bu optik düzenleme, ışık hüzmesinin kablo üzerine paralel ve ince bir çizgi halinde düşmesini sağlayarak, kablonun keskin bir gölge profili oluşturmasına yardımcı olur. Bu sayede, sensör üzerindeki piksel sayımı yöntemiyle çap ölçümü için gerekli olan netlik ve hassasiyet elde edilir.

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Bu bölümde, Şekil 2.1’de blok diyagramı gösterilen sistemin elektronik devrelerinin tasarlanması ve fiziksel olarak üretilme süreci verilmiştir. Devre kartları; PSpice’ta simülasyon, Altium Designer’da PCB tasarımı, FlatCAM’de G-kodu üretimi ve CNC makinesinde kazıma adımları izlenerek prototiplenmiştir. Geliştirilen iki eksenli kablo çap ölçer ve ovallık kontrol sisteminin işlevselliği, büyük ölçüde yazılım katmanının etkinliğine bağlıdır. Donanım tarafından elde edilen analog sensörü verisi, yazılım algoritmaları aracılığıyla anlamlı çap ve ovallık bilgilerine dönüştürülerek kullanıcıya sunulmuştur. Bu bölüm donanım ve tasarımla birlikte mikrodenetleyici düzeyindeki gömülü yazılımdan, bilgisayar tabanlı kullanıcı arayüzüne kadar tüm yazılım tasarım ve geliştirme süreçlerini kapsamaktadır.



Şekil 2.1. Sistem blok diyagramı

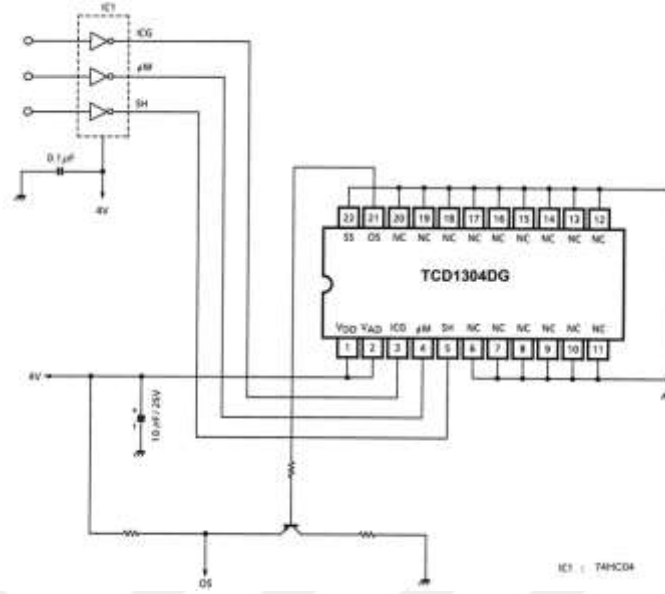
2.1. Güç Kaynağı Tasarımı

Geliştirilen iki eksenli kablo çap ölçer ve ovallık kontrol sisteminin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için, sistemin farklı bileşenlerinin gereksinim duyduğu farklı voltaj seviyelerini sağlayan hassas bir güç kaynağı tasarımı kritik öneme sahiptir. Projede, Toshiba TCD1304DG CCD sensörleri için +4V DC(Direct Current), işlemsel kuvvetlendirici entegre devreleri için $\pm 12V$ DC ve yeşil güç LED ışık kaynakları için sabit akım çıkışları sağlayan entegre bir güç kaynağı devresi tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu regülatörler, LED'lerin üzerindeki akımı sabit tutarak, ışık şiddetinin kararlı olmasını sağlamıştır. Kararlı ışık şiddeti, çap ölçümünde piksellerin üzerine düşen gölgenin tutarlılığı ve dolayısıyla ölçüm tekrarlanabilirliği için hayati öneme sahiptir.

2.2. CCD Sensör Kontrol Devresi

Toshiba TCD1304DG CCD sensörlerinin optimum performansta çalışabilmesi için, teknik dokümanında belirtilen hassas zamanlama ve voltaj seviyelerine sahip kontrol sinyallerine ihtiyaç vardır. Kontrol sinyallerinin hassas bir şekilde üretilmesi, tutarlılık ve ölçüm doğruluğu için zorunlu bir etkidir. Teknik doküman incelemeleri sonucunda, bu sinyallerin voltaj seviyeleri ve zamanlama diyagramları belirlenmiştir. Özellikle, bu sinyallerin “High” (ON) seviyesi tipik olarak 4.0V iken, “Low” (OFF) seviyesi 0V şeklinde belirtilmiştir.

Şekil 2.2’de teknik dokümanda belirtildiği gibi kontrol sinyallerinin mikrodenetleyiciden üretimi sonrası gerekli voltaj seviyesine ayarlanması için kontrol sinyalleri “Not Gate” lojik elemanları üzerinden geçirilmektedir[27]. Gerekli genlik seviyelerine ayarlanan kontrol sinyalleri sensöre gönderilmektedir.

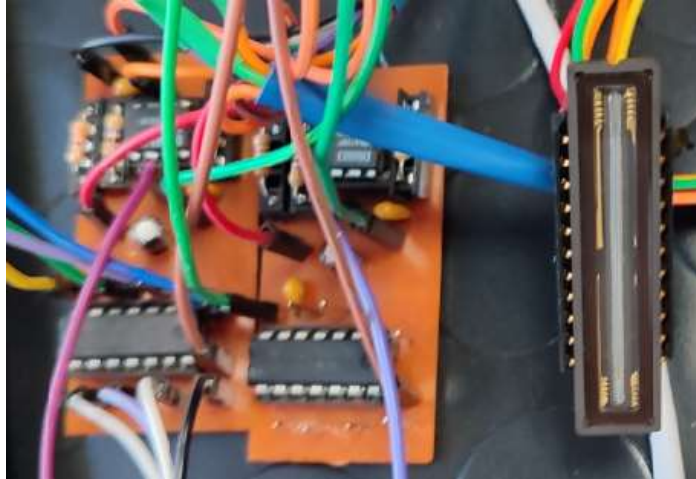


Şekil 2.2. TCD1304DG sensörünün tipik uygulama devresi

Şekil 2.2 dikkate alınarak sensör devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. “Not Gate” için kullanılan entegre, güç devresinden alınan 4V ile beslenerek kontrol sinyallerinin voltaj değerlerinin 4V(High) ile 0V(Low) olması sağlanmıştır. Sensörün birinci ve ikinci pinleri de güç devresinden alınan 4V ile beslenmiştir. Gürültüyü önlemek amaçlı besleme voltajına paralel bir adet kapasitör eklenmiştir.

Sensör çıkış sinyali, teknik dokümanda gösterilenden farklı olarak bir işlemsel kuvvetlendiricinin evirmeyen ucuna iletilmiştir. Sensörün ürettiği sinyalin V_{SAT} değerini 600mV’tan 0V’a indirmek amacıyla işlemsel kuvvetlendiricinin eviren ucuna 600mV DC gerilim verilmiştir. Bu durumda sensör verisinin maksimum genliği de 600 mV aşağıya çekileceği için sinyal tepe değeri tipik olarak 2.5V iken 1.9V değerlerine düşmektedir. Bu sebeple çıkış sinyali tepe değeri, işlemsel kuvvetlendirici üzerinden kuvvetlendirme en fazla(sensör tamamen karanlıkta iken) 3V’u göreceğ şekilde kuvvetlendirilmiştir. Seçilen mikrodenetleyicinin maksimum voltaj girişi 3.3V olduğu için önlem amaçlı tepe değeri 3V olarak belirlenmiştir.

Devre kartı her eksen için birer adet olarak toplamda 2 adet üretilmiştir. Şekil 2.3’te gösterilen devre kartı üzerinde lehimleme işlemleri ile kısa devre testleri gerçekleştirilmiştir. Sensörler bir mekanik aksam üzerinde duracağı için devre kartına dahil edilmemiştir. Kablolama ile sensör ve devre kartı arasında gerekli bağlantılar sağlanmıştır.



Şekil 2.3. Sensör devre kartı ve sensör

2.3. Mikrodenetleyici Seçimi ve Yapılandırma

Sistemin merkezi kontrol birimi olarak, projenin gerektirdiği performans ve işlevsellik kriterleri doğrultusunda mikrodenetleyici seçimi titizlikle yapılmıştır. Bu kapsamda, yüksek işlem hızı, esnek PWM (Pulse Width Modulation) sinyal yapılandırma yetenekleri, ADC ile verimli veri okumayı sağlayan DMA desteği, yüksek ADC çözünürlüğü ve gelişmiş hata ayıklama (debugging) olanakları gibi kritik özellikler göz önünde bulundurulmuştur. Bu değerlendirmeler sonucunda, Şekil 2.4’te gösterilen “STM32F429ZI Discovery” geliştirme kartının kullanılmasına karar verilmiştir [33].

Geliştirilen sistemin iki eksenli ölçüm mimarisi, iki adet Toshiba TCD1304DG sensörünün eş zamanlı olarak çalışmasını gerektirmektedir. Her bir sensörden gelen veri akışını kesintisiz ve gecikmesiz bir şekilde işleyerek gerçek zamanlı paralel okuma performansını garanti altına almak amacıyla, her bir sensör eksenini için ayrı bir mikrodenetleyici atanmıştır. Bu yapılandırma, bir eksendeki veri işleme yükünün diğer eksenini etkilemesini önleyerek sistemin kararlılığını ve güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmaktadır.

Bu çerçevede, her bir mikrodenetleyiciye çeşitli temel görevler yüklenmiştir. Bu görevler; CCD sensörün çalışması için gereken hassas zamanlamalı kontrol sinyallerinin PWM ile üretilmesi, sensörden gelen analog sinyalin ADC ve DMA aracılığıyla yüksek hızda okunması, okunan ham piksel verilerinin işlenerek anlamlı çap bilgisine dönüştürülmesi ve son olarak, hesaplanan bu verinin kullanıcı arayüzü ile haberleşme protokolü üzerinden bilgisayara aktarılması olarak özetlenebilir.



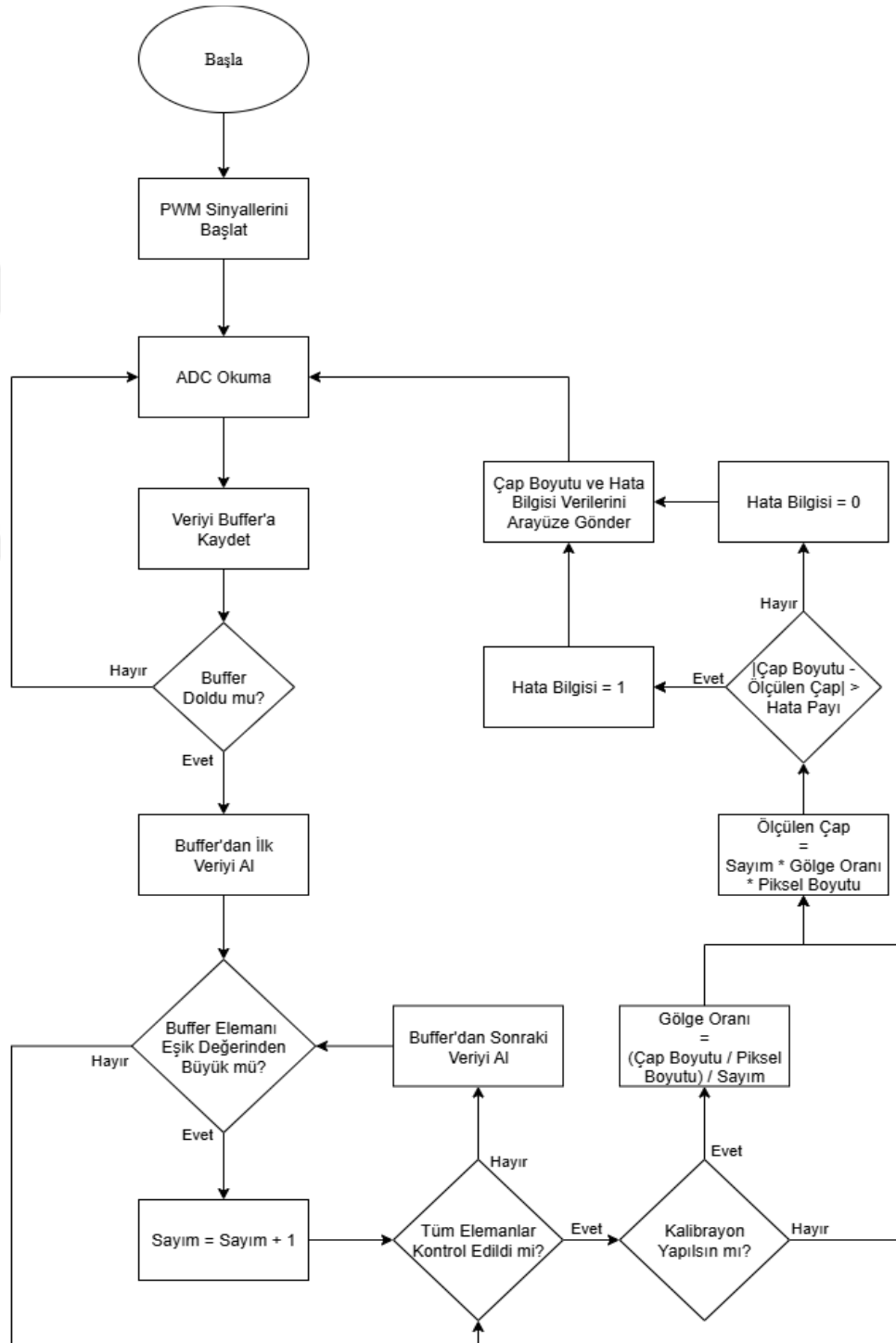
Şekil 2.4. STM32F429ZI Discovery geliştirme kartı

Projenin gömülü yazılım geliştirme süreci, verimli ve hatasız bir iş akışı sağlamak üzere birbirini tamamlayan araçlar ve platformlar kullanılarak yürütülmüştür. Bu doğrultuda, temel yazılım geliştirme ortamı olarak STM32 mikrodenetleyicileri için özel olarak tasarlanmış iki ana bileşen tercih edilmiştir: donanım yapılandırması ve kod başlangıcı için “STM32CubeMX” ve uygulama kodu geliştirme, derleme ve hata ayıklama için “Keil uVision Geliştirme Ortamı”. Geliştirme sürecinin ilk ve en kritik adımı olan donanım konfigürasyonu, STM32CubeMX'in sağladığı grafik arayüz aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu araç; pin konfigürasyonlarının, sistem saat hızlarının, kullanılacak çevresel birimlerin (Zamanlayıcı, ADC, DMA, USB(Universal Serial Bus)) başlangıç ayarlarının ve kesme yöneticisi olan NVIC(Nested Vectored Interrupt Controller) yapılandırılmasına olanak tanımıştır. Bu sayede, geliştirme sürecinin temelini oluşturan donanım ayarlarındaki olası yapılandırma hataları en başından minimize edilmiştir. Yapılandırma tamamlandıktan sonra, Keil uVision IDE(Integrated Development Environment) ortamında projenin derleme ve hata ayıklama işlemleri yürütülmüştür. Geliştirilen kodun mikrodenetleyiciye yüklenmesi ise “ST-Link” programı aracılığıyla sağlanmıştır.

Kodlama aşamasında, geliştirme sürecini hızlandırmak ve kodun okunabilirliğini artırmak amacıyla STM32'nin sağladığı Donanım Soyutlama Katmanı (HAL - Hardware Abstraction Layer) kütüphaneleri kullanılmıştır. HAL kütüphaneleri, geliştiricinin düşük seviyeli donanım kaydedicilerinden soyutlanmasını sağlayarak, donanımdan bağımsız bir yazılım katmanı sunar[34]. Bu yaklaşım, kodun farklı STM32 serileri arasında taşınabilirliğini artırmış ve sonuç olarak hızlı prototipleme ve etkili hata ayıklama süreçlerine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

2.4. STM32 Gömülü Yazılım Geliştirme

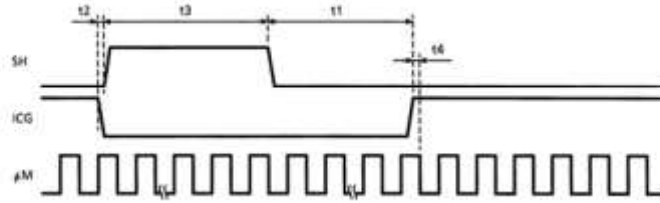
STM32 mikrodenetleyici üzerinde çalışan gömülü yazılım, CCD sensörlerin kontrol sinyallerini üretmek, analog veriyi dijital hale getirmek, çap hesaplamasını yapmak ve veriyi bilgisayara aktarmak gibi temel görevleri yerine getirmiştir. Şekil 2.5'te gömülü yazılım algoritması gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Gömülü yazılı algoritması

2.4.1. CCD Sensör Kontrol Sinyallerinin Hesaplanması

CCD sensörünün veri toplama ve aktarma fonksiyonlarını hatasız bir şekilde yerine getirebilmesi, üç temel kontrol sinyalinin hassas bir şekilde üretilmesine bağlıdır: Ana Saat Sinyali (Master Clock, ϕM), Yük Aktarım Darbesi (Shift Pulse, SH) ve Entegrasyon Temizleme Kapısı (Integration Clear Gate, ICG). Bu kritik zamanlama sinyalleri, projede kullanılan STM32 mikrodenetleyicisinin esnek “Darbe Genişlik Modülasyonu” çıkışları aracılığıyla üretilmiştir. Sinyallerin frekans ve görev döngüsü (duty cycle) gibi parametreleri, sensörün teknik dokümanında yer alan ve Şekil 2.6’da gösterilen zamanlama grafiği dikkatle analiz edilerek belirlenmiştir[27]. Bu analizde, kontrol sinyallerinin birbirleriyle olan senkronizasyon gereksinimleri ve zamanlama ilişkileri esas alınarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

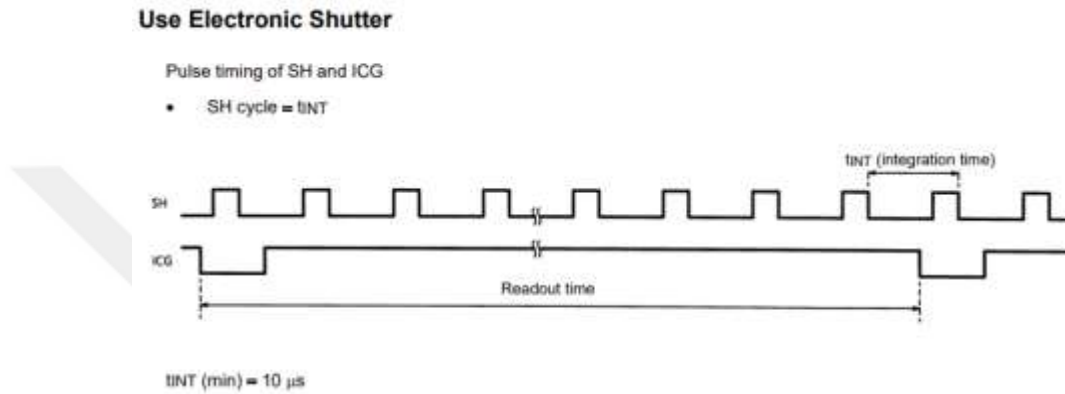


Characteristic	Symbol	Min	Typ.	Max	Unit
ICG pulse delay	t1	1000	5000	—	ns
Pulse timing of ICG and SH	t2	100	500	1000	ns
SH pulse width	t3	1000	—	—	ns
Pulse timing of ICG and ϕM	t4	0	20	*	ns

Şekil 2.6. Zamanlama grafiği

Sinyal parametrelerinin belirlenmesinde, sensörün teknik dokümanında sunulan zamanlama grafiği, ICG ve SH sinyalleri arasındaki kritik zamansal ilişkileri tanımlamaktadır. Bu grafiğe göre, “t2” olarak belirtilen süre, ICG sinyalinin “Low” seviyesine düşerek pikselleri sıfırlama sürecini başlatmasının ardından, SH sinyalinin yük aktarımını başlatmak üzere “High” seviyesine ulaşması için tanınan maksimum gecikmeyi ifade eder ve bu değer en fazla 1000 ns olmalıdır. “t3” süresi ise, SH sinyalinin “High” konumda kalarak yük aktarımını gerçekleştirdiği minimum süreyi temsil eder ve bu sürenin en az 1000 ns olması gerektiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, ICG sinyalinin “Low” seviyede kaldığı toplam süre olan “t1 + t2 + t3” toplamının minimum 6500 ns olması gerektiği hesaplanmıştır.

Elektronik deklanşör fonksiyonunun kullanıldığı durumda ise sensörün ışığa maruz kalma süresi olan entegrasyon zamanı (“ t_{INT} ”), SH sinyalinin periyoduna doğrudan eşitlenmektedir. Teknik dokümanda, Şekil 2.7’de gösterildiği üzere bu entegrasyon süresinin minimum $10 \mu s$ olması gerektiğini belirtmektedir[27]. Bu kritik gereklilik, SH kontrol sinyali için minimum periyot süresinin $10 \mu s$ olarak belirlenmesini zorunlu kılmaktadır.



Şekil 2.7. Elektronik denklanşör ile zaman grafiği

Sinyal periyotlarının belirlenmesindeki bir diğer belirleyici faktör, sensörün tüm piksellerini taramak için ihtiyaç duyduğu minimum sürenin hesaplanmasıdır. Sensörün teknik dokümanında Tablo 2.1’de belirtildiği üzere, tavsiye edilen tipik veri okuma hızı 500 kHz ’dir. Bu hız, her bir pikselin veri okuması için $2 \mu s$ ’lik bir süre ayrıldığı anlamına gelmektedir[27]. Bu doğrultuda, TCD1304DG sensöründe bulunan toplam 3694 adet pikselin verisinin baştan sona okunması için gereken toplam süre, “ $3694 \text{ piksel} * 2 \mu s/\text{piksel}$ ” işlemi sonucunda $7388 \mu s$ olarak hesaplanmaktadır. Bu süre, bir tam okuma döngüsünün asgari zaman ihtiyacını temsil etmektedir.

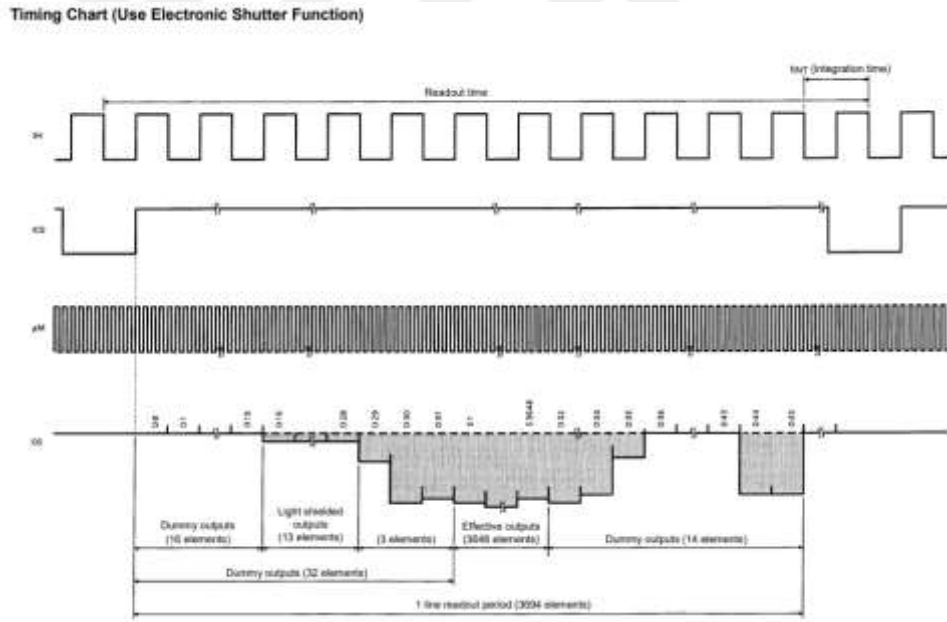
Tablo 2.1. TCD1304DG sensörünün karakteristik değerleri

Karakteristikler	Sembol	Min.	Tipik	Maks.	Birim
Master saat darbe frekansı	$f_{\phi M}$	0.8	2.0	4.0	MHz
Veri oranı	f_{VERI}	0.2	0.5	1.0	MHz

Kontrol sinyallerinin nihai periyot değerlerinin belirlenmesinde, sensörün teknik dokümanında yer alan ve elektronik deklanşör fonksiyonunu detaylandıran Şekil 2.8 ile gösterilen zamanlama grafiği önemli bir dayanak oluşturmaktadır[27]. Bu grafikte, ICG

kontrol sinyalinin toplam periyodunun, tüm piksellerin okunması için gereken süreden daha uzun olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumun temelinde, ICG sinyalinin çift yönlü işlevi yatmaktadır: Sinyal “High” seviyesindeyken, fotodiyotlarda oluşan yüklerin piksellerin altında birikmesini sağlar; “Low” seviyesindeyken ise bu birikmiş yüklerin drenaj adı verilen bir kanala akıtılarak sensörün sıfırlanmasını temin eder.

Bu bağlamda, ICG sinyalinin bir tam periyodu, hem veri okuma işlemi hem de ardından gelen sıfırlama işlemi kapsayacak kadar uzun olmalıdır. Daha önce 7388 μs olarak hesaplanan piksel okuma süresine, bu sıfırlama fazının süresi de eklendiğinde, ICG kontrol sinyali için gerekli toplam periyot süresi pratik bir değer olarak 7500 μs olarak belirlenmiştir. Bu süre, tüm piksellerin hatasız bir şekilde okunmasını ve bir sonraki pozlama döngüsü için sensörün güvenilir bir şekilde temizlenmesini garanti altına almaktadır.



Şekil 2.8. Kontrol sinyalleri zamanlama grafiği

Öncesinde bahsedildiği üzere SH kontrol sinyalinin minimum periyot süresi 10 μs olmalıdır. SH kontrol sinyali sensörlerin maruz kaldığı pozlama süresini kontrol etmektedir. Bu sinyalin periyoduna 20 μs olarak karar verilmiştir. Şekil 2.6’da ICG kontrol sinyalinin “Low” olduğu süre SH kontrol sinyalinin periyot süresine denk olarak verilmiştir. Bu sebeple toplam periyot süresi 7500 μs olan ICG sinyalinin “Low” kısmı 20 μs iken “High” kısmı 7480 μs olarak hesaplanmıştır.

“Master Clock” sinyalinin üretimi için gerekli olan PWM dalgasının yapılandırılması, CubeMx programı kullanılarak Şekil 2.10’da gösterildiği üzere gerçekleştirilmiştir. Bu yapılandırmada, PWM sinyalinin frekansını belirleyen “Counter Period” değeri, 41’e (arayüzde 42-1) ayarlanmıştır. Zamanlayıcının 84 MHz’lik temel saat frekansıyla 0’dan 41’e kadar, yani toplamda 42 adım sayması sağlanmıştır. Bu durum, PWM sinyalinin periyot frekansını “84 MHz / 42 = 2 MHz” olarak hassas bir şekilde belirlemektedir. Sinyalin görev döngüsünü ayarlayan “Pulse” değeri ise 20 (arayüzde 21-1) olarak yapılandırılmıştır. Bu ayar, 42 adımlık periyot içinde 21 adımlık bir "High" süresi oluşturarak, hedeflenen simetrik %50 görev döngüsünü elde etmeyi sağlamıştır.

Counter Settings	
Prescaler (PSC - 16 bits value)	0
Counter Mode	Up
Counter Period (AutoReload Register - 1.. 42-1)	42-1
Internal Clock Division (CKD)	No Division
auto-reload preload	Disable
Trigger Output (TRGO) Parameters	
Master/Slave Mode (MSM bit)	Disable (Trigger input effect not delayed)
Trigger Event Selection	Reset (UG bit from TIMx_EGR)
PWM Generation Channel 1	
Mode	PWM mode 1
Pulse (16 bits value)	21-1
Output compare preload	Enable
Fast Mode	Disable
CH Polarity	High

Şekil 2.10. Master kontrol sinyal konfigürasyonları

SH kontrol sinyalinin üretim süreci, CubeMx programı kullanılarak Şekil 2.11’de gösterilen PWM yapılandırması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sinyalin periyodu, zamanlayıcının temelini oluşturan 84 MHz’lik saat frekansı esas alınarak hesaplanmıştır. Her bir saat darbesi yaklaşık 11.9 nanosaniye sürdüğünden, hedeflenen 20 mikrosaniyelik periyodu elde etmek için zamanlayıcının “20.000 ns / 11.9 ns” işlemi sonucunda yaklaşık 1680 adım sayması gerekmektedir. Bu doğrultuda, zamanlayıcının “Counter Period” değeri 1679 olarak ayarlanarak 0’dan 1679’a kadar sayım yapması sağlanmıştır.

Sinyalin görev döngüsü ayarlanırken, PWM çıkışının harici bir “NOT Gate” (evirici) üzerinden geçeceği dikkate alınmıştır. Sensörde %80’lik bir "High" süresi hedeflendiği için, evirici devreden dolayı mikrodenetleyiciden %20 görev döngüsüne sahip bir sinyal üretilmesi gerekmiştir. Bu sebeple, “Pulse” değeri, toplam periyot adımının (1680)

%20'si olan 336 olarak hesaplanmış ve yapılandırılmıştır. Ayrıca, SH ve ICG sinyallerinin başlangıç anlarını eşleştirmek ve tam bir senkronizasyon temin etmek amacıyla, ilgili zamanlayıcının “Trigger Mode” özelliği aktif edilmiştir.

<ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> Prescaler (PSC - 16 bits value) Counter Mode Counter Period (AutoReload Register - 32 bits val... Internal Clock Division (CKD) auto-reload preload Slave Mode Controller <ul style="list-style-type: none"> Master/Slave Mode (MSM bit) Trigger Event Selection <ul style="list-style-type: none"> Mode Pulse (32 bits value) Output compare preload Fast Mode CH Polarity 	<ul style="list-style-type: none"> 0 Up 1680-1 No Division Disable Trigger Mode Disable (Trigger input effect not delayed) Reset (UG bit from TIMx_EGR) PWM mode 1 336-1 Enable Disable High
---	---

Şekil 2.11. SH kontrol sinyal konfigürasyonları

ICG kontrol sinyalinin PWM dalgası üretim süreci, CubeMx programı kullanılarak Şekil 2.12'de gösterilen zamanlayıcı yapılandırması ile gerçekleştirilmiştir. Bu sinyal için hedeflenen 7500 μ s'lik periyot süresi, teknik bir zorluğu beraberinde getirmiştir. 11.9 ns'lik işlemci sayım süresiyle bu periyodu elde etmek için, zamanlayıcının toplamda yaklaşık 630,000 adım sayması gerekmektedir. Ancak bu değer, kullanılan zamanlayıcının 16-bitlik “Counter Period” kaydedicisinin alabileceği maksimum değer olan 65,535'i aşmaktadır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek amacıyla, zamanlayıcının “Prescaler” (Ön Ölçekleyici) özelliği kullanılmıştır. Prescaler, zamanlayıcının sayım hızını yavaşlatarak çok daha uzun periyotların elde edilmesine olanak tanır. Bu doğrultuda, hedeflenen 630,000 adımlık sayım değerine ulaşmak için “Prescaler” değeri 9 (arayüzde 10-1 olarak) ve “Counter Period” değeri 62,999 (arayüzde 63000-1 olarak) şeklinde ayarlanmıştır. Bu yapılandırma, “ $(9+1) * (62999+1) = 630,000$ ” adımlık bir sayım döngüsü oluşturarak istenen 7500 μ s'lik periyodu hassas bir şekilde üretir. Ayrıca, ICG sinyalinin SH sinyali ile tam senkronize bir şekilde başlayabilmesi için ilgili zamanlayıcının “Trigger Mode” ayarları da yapılandırılmıştır.

<ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> Counter Settings Prescaler (PSC - 16 bits value) 10-1 Counter Mode Up Counter Period (AutoReload Register - 16 bits value) 63000-1 Internal Clock Division (CKD) No Division Repetition Counter (RCR - 8 bits value) 0 auto-reload preload Disable <ul style="list-style-type: none"> Trigger Output (TRGO) Parameters Master/Slave Mode (MSM bit) Enable (Trigger delayed for mas Trigger Event Selection Enable (CNT_EN) <ul style="list-style-type: none"> Break And Dead Time management - BRK Configuration BRK State Disable BRK Polarity High <ul style="list-style-type: none"> Break And Dead Time management - Output Configuration Automatic Output State Disable Off State Selection for Idle Mode (OSSI) Disable Lock Configuration Off <ul style="list-style-type: none"> PWM Generation Channel 4 Mode PWM mode 1 Pulse (16 bits value) 840-1 Output compare preload Enable Fast Mode Disable CH Polarity High CH Idle State Reset

Şekil 2.12. ICG Kontrol Sinyal konfigürasyonları

2.4.3. Sensör Verisinin Okunması

Sensör çıkış pininden alınan analog sinyal işlemsel kuvvetlendirici üzerinde ofseti silindikten ve kuvvetlendirildikten sonra mikrodenetleyicinin ADC modülü tarafından dijital verilere dönüştürülmüştür. Sensörün teknik dokümanından alınan Tablo 2.1'deki "Veri oranı" değerleri dikkate alınarak Master kontrol sinyalinin beslemesi 2 MHz olarak tercih edildiği için sinyal çıkışını da 500 KHz frekans değerine göre okumamız gerekmektedir. Bu frekans değeri her pikseldeki yükün çıkışa ulaştırılması için gereken süreyi temsil etmektedir.

Bu durumda 500 KHz tetikleme ile analog sinyali okumamız gerekmektedir. Her tetikte okunan değer bir pikseldeki yük değerini göstermektedir. Yüksek sıklıkta tüm süreç boyunca tekrar edecek analog değer okuma durumu işlemciye büyük yük bindirecektir ve yapılması gereken bazı matematiksel işlemlerden dolayı okuma işlemi kesintiye uğrayacaktır. Bu sebeple "STM32429ZI Discovery" mikrodenetleyicisinde bulunan DMA modülü, ADC modülü ile birlikte kullanılmıştır.

DMA modülünün ADC ile birlikte kullanılması durumunda okunan yük değerleri işlemciyi meşgul etmeden bir "buffer"a aktarılmaktadır. Analog sinyalin okunması

tamamlandığında gerekli fonksiyonların kullanımı ile bir kesme işlemi çağırılmıştır. Bu kesme işleminin içerisinde belirtilen işlemler işlemci tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu kısımda “buffer” a kaydedilen yük değerlerinin kaç tanesinin belirlenen eşik değerini geçtiği hesaplanmıştır. Hesaplanan değer piksel boyutu ile çarpılarak kablonun gölge kesiti tespit edilmiştir. Kullanılan ışık kaynağının LED olması sebebiyle ışık kaynağı, kablo ve sensörün konumuna bağlı olarak gölge kesiti kablo kesitinden daha büyük olmaktadır. Bu sebeple bir katsayı ile gölge kesitinin çarpılması sonucu çap değeri elde edilmiştir.

Mikrodenetleyici ile 500 KHz tetikleme üzerinden analog değer okuma işlemi için Şekil 2.13’te gösterilen PWM sinyal konfigürasyonları yapılmıştır.

✓ Counter Settings	
Prescaler (PSC - 16 bits value)	0
Counter Mode	Up
Counter Period (AutoReload Register - 16 bits value)	168-1
Internal Clock Division (CKD)	No Division
auto-reload preload	Disable
✓ Trigger Output (TRGO) Parameters	
Master/Slave Mode (MSM bit)	Disable (Trigger input effect not delayed)
Trigger Event Selection	Reset (UG bit from TIMx_EGR)
✓ PWM Generation Channel 4	
Mode	PWM mode 1
Pulse (16 bits value)	42-1
Output compare preload	Enable
Fast Mode	Disable
CH Polarity	High

Şekil 2.13. 500 KHz PWM kontrol sinyal konfigürasyonu

Şekil 2.14’te gösterilen ADC konfigürasyonunda “External Trigger Conversion Source” kısmında tetik kaynağı olarak 500KHz PWM sinyali üreten “Timer 4” seçilmiştir. Tetikleme seçiminde yükselen kenar tercih edildiği için Timer 4 konfigürasyonunda “Duty Cycle”ın bir önemi kalmamaktadır.

▼ ADCs_Common_Settings	
Mode	Independent mode
▼ ADC_Settings	
Clock Prescaler	PCLK2 divided by 4
Resolution	12 bits (15 ADC Clock cycles)
Data Alignment	Right alignment
Scan Conversion Mode	Disabled
Continuous Conversion Mode	Disabled
Discontinuous Conversion Mode	Disabled
DMA Continuous Requests	Enabled
End Of Conversion Selection	EOC flag at the end of single channel conversion
▼ ADC_Regular_ConversionMode	
Number Of Conversion	1
External Trigger Conversion Source	Timer 4 Capture Compare 4 event
External Trigger Conversion Edge	Trigger detection on the rising edge
> Rank	1
▼ ADC_Injected_ConversionMode	
Number Of Conversions	0
▼ WatchDog	
Enable Analog WatchDog Mode	<input type="checkbox"/>

Şekil 2.14. ADC konfigürasyonu

2.4.4. Veri Haberleşmesi

Hesaplanan çap ve ovallık verilerinin kullanıcıya gerçek zamanlı olarak sunulması ve daha ileri analizler için bilgisayara aktarılması gerekmektedir. Bu amaçla, STM32 mikrodnetleyicinin dahili USB çevre birimi kullanılarak bilgisayarla seri haberleşme sağlanmıştır. STM32 CubeMX'te USB CDC(Communication Device Class) yapılandırılarak, mikrodnetleyicinin bilgisayar tarafından sanal bir seri port olarak algılanması sağlanmıştır. Hesaplanan çap ve hata değerleri, belirli bir veri protokolü (örn. ASCII formatında virgülle ayrılmış değerler) kullanılarak USB üzerinden bilgisayara sürekli olarak gönderilmiştir. Bu sayede, ölçüm verileri, bilgisayar tabanlı kullanıcı arayüzü tarafından işlenmek üzere hazır hale getirilmiştir. Arayüz geliştirilmeden önce, gönderilen verilerin doğruluğunu ve formatını teyit etmek için hazır bir terminal programı kullanılarak testler yapılmıştır.

2.5. Arayüz Tasarım

Geliştirilen sistemin kullanıcı ile etkileşimini sağlamak, ölçüm sonuçlarını anlamlı bir şekilde görselleştirmek ve analiz etmek amacıyla, Şekil 2.15'te gösterilen özel bir bilgisayar arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüz, Microsoft Visual Studio geliştirme ortamı kullanılarak C# programlama dili ile hayata geçirilmiştir. Arayüzün temel görevi, her bir STM32 mikrodnetleyiciden USB üzerinden sanal seri port aracılığıyla gelen anlık çap verilerini alarak kullanıcıya sunmaktır.

Arayüz, sadece ham verileri göstermekle kalmaz, aynı zamanda kablonun geometrik yapısı hakkında kritik bilgiler sunan analizler de gerçekleştirir. Bu doğrultuda, kablonun ovallık durumunun anlık olarak gözlemlenebilmesi için iki temel metrik hesaplanarak ekrana yansıtılır:

- **Çap Farkı:** İki eksen den alınan çap değerleri arasındaki mutlak farkı gösterir. Bu değer, kablonun dairesellikten ne kadar saptığının doğrudan bir ölçüsüdür.
- **Çap Oranı:** İki eksen çapının birbirine oranını ifade eder ve ovallık hakkında normalleştirilmiş bir bakış açısı sunar.

Bu iki gösterge sayesinde, operatörün kablonun kesit geometrisini sürekli olarak izlemesine olanak tanınmaktadır. Ayrıca, mikrodenetleyiciler tarafından işlenerek gönderilen hata durumu bilgisi, arayüzdeki “Hata Durumu” alanında gösterilir. Bu alanda, kablonun durumuna göre “hatasız”, “bir eksen hatalı” veya “iki eksen hatalı” gibi bilgilendirme metinleri yer alarak, üretim kalitesi hakkında anında geri bildirim sağlanır.

Şekil 2.15. Arayüz tasarımı

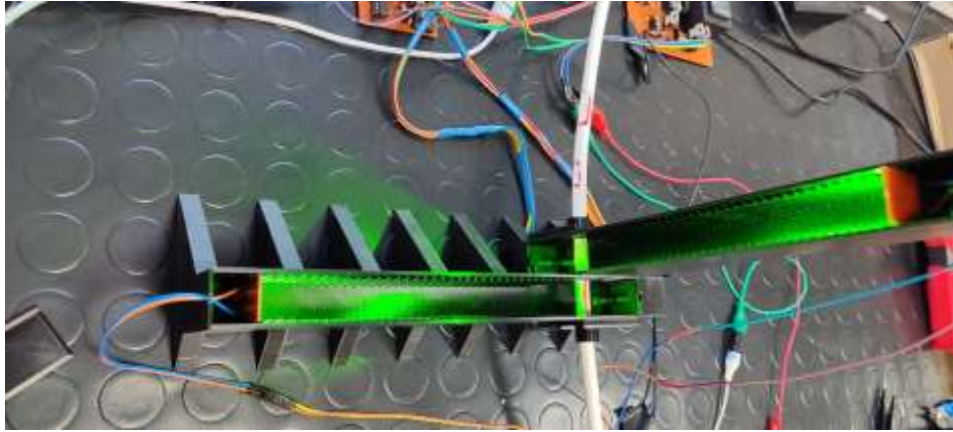
3. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında tasarlanan ve üretilen iki eksenli kablo çap ölçer ve ovallık kontrol sisteminin performansı, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kontrollü denemelerle değerlendirilmiştir. Sistemin teorik prensiplere uygun olarak çalışıp çalışmadığı, hedeflenen doğruluk ve tekrarlanabilirlik seviyelerine ulaşım ulaşmadığı bu deneyler aracılığıyla gözlemlenmiştir. Farklı hatalar üzerinde yapılan testlerde elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmuştur.

3.1. Mekanik Tasarım ve Deney Düzenegi

İki eksenli kablo çap ölçümünün hassasiyetini ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla, sistemin optik ve elektronik bileşenlerini sabitleyecek özel bir mekanik tasarım geliştirilmiştir. Bu tasarım, sensörlerin ve her bir eksen için kullanılan ışık kaynaklarının birbirine dik ve optik olarak hizalı bir şekilde konumlandırılmasını güvence altına almıştır. Mekanik tasarım, dış etkenlerden kaynaklanabilecek titreşimleri ve hizalama hatalarını minimize ederek, kararlı ölçüm koşulları oluşturmayı hedeflemiştir. Mekanik parçaların prototipleri 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.1'de, bu mekanik tasarımın genel görünümü verilmiştir.

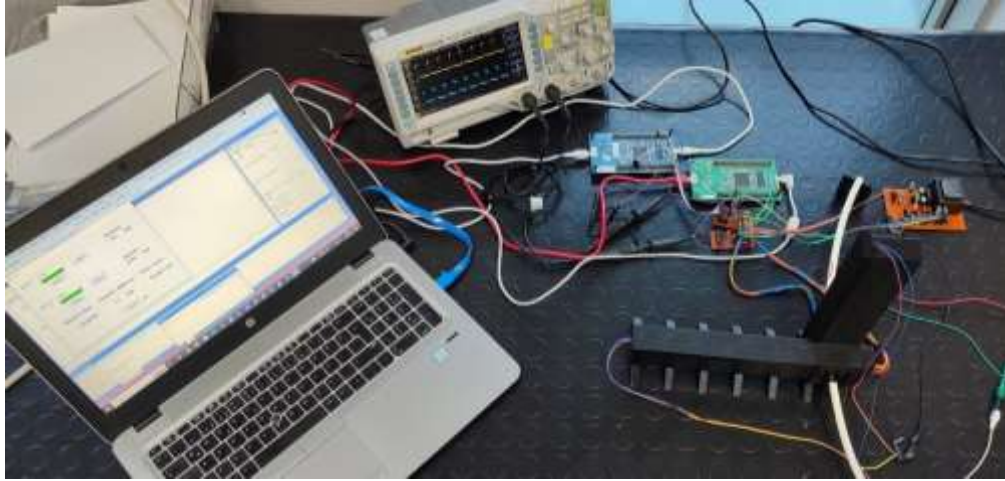


Şekil 3.1. İki eksenli çap ölçer sisteminin mekanik tasarımı

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde, geliştirilen sistemin işlevselliğini ve performansını doğrulamak için çeşitli ölçüm ve analiz ekipmanları kullanılmıştır. Deney düzeneği, sistemin kararlı bir çalışma sergilemesi ve ölçüm sonuçlarının güvenilir bir şekilde alınabilmesi için uygun bir zemine kurulmuş, çevresel ışık etkileşimleri minimize edilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan başlıca cihazlar ve işlevleri aşağıda belirtilmiştir:

- Dijital Osiloskop: Sensörlerden gelen analog sinyallerin (piksel verileri), kontrol sinyallerinin (Master Clock, SH, ICG) zamanlama diyagramlarının ve sinyal koşullandırma devresi çıkışlarının incelenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede, sinyal bütünlüğü, gürültü seviyeleri ve voltaj profilleri gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmiştir.
- Dizüstü Bilgisayar: Geliştirilen C# tabanlı kullanıcı arayüzü yazılımının çalıştırılması ve STM32 mikrodenetleyicilerinden USB üzerinden alınan anlık çap ve ovalik değerlerinin görselleştirilmesi ve analiz edilmesi için kullanılmıştır.
- Multimetre: Güç kaynağı devresinin farklı noktalarındaki DC voltaj ve akım değerlerinin (özellikle LED akım regülatörleri ve sensör beslemeleri) hassas bir şekilde ölçülerek tasarım değerleriyle uyumunun doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.

Deneylerin yapıldığı laboratuvar ortamının genel kuruluşu, Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Bu düzenek, sistemin kontrollü koşullar altında performansını değerlendirmek için gerekli altyapıyı sağlamıştır.



Şekil 3.2. Laboratuvar ortamı deney düzeneği

3.2. Deney Çalışmaları

Geliştirilen iki eksenli kablo çap ölçüm sisteminin gerçekçi koşullardaki performansını değerlendirmek amacıyla, laboratuvar ortamında çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde, 8.5 mm nominal çapa sahip bir tesisat kablosu kullanılmış ve Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bu kablo üzerinde farklı boyutlarda ve açılarda yapay hatalar oluşturulmuştur. Bu yapay hatalar, sistemin hem hatasız kablo üzerindeki temel ölçüm doğruluğunu hem de çeşitli büyüklüklerdeki hataları tespit etme yeteneğini test etmek için kullanılmıştır. Sonraki aşamada farklı çaptaki kablo kesitleri birbiri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan hatalı kablo örneği

3.2.1. Hatasız Kablo Kesitinin Ölçümü

Sistemin temel işlevselliğini ve kararlılığını doğrulamak amacıyla, ilk olarak kablunun hatasız kısımları ölçüm düzeneğindeki sensörlere hizalanmıştır. Bu konumlandırma ile elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.4’te sunulmuştur. Bu kısımda sistemin kullanıcı arayüzünde hem X hem de Y eksenini için kararlı ve nominal çapa yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bu durum, sistemin hatasız bir kablo kesitini doğru ve tutarlı bir şekilde ölçebildiğini ve optik hizalamanın başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir. Arayüzde “Hata Durumu” kısmında herhangi bir hatanın raporlanmaması, sistemin tolerans dahilindeki ölçümleri normal olarak algıladığını teyit etmektedir.

The screenshot shows a software window titled 'Form1' with the following data:

Cihaz	Port	Çap (mm)
Cihaz 1	COM6	8.508
Cihaz 2	COM10	8.520

Çap Oranı	Çap Farkı	Kusur Durumu
1,001410	0,01 mm	KUSURSUZ

Şekil 3.4. Hatasız kablo kesitinin ölçüm sonuçları

3.2.2. Tek Eksenli Büyük Hata Tespiti

Kablunun üretim esnasında karşılaşılabileceği tek yöne bağlı kalınlaşma veya incelme gibi büyük hataları simüle etmek amacıyla, kablunun bir ekseninde belirgin bir hata oluşturulmuştur. Bu hata için sistemden elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.5’te gösterilmiştir. Söz konusu hata, kablo kesitinde yaklaşık 0.6 mm’lik belirgin bir çap değişimine sebep olmuştur. Kullanıcı arayüzünde, bu çap değişimi anında ve net bir şekilde gözlemlenmiştir. “Hata Durumu” bölümünde, ilgili eksen üzerinde hata tespiti gösterilmiştir. Bu sonuç, geliştirilen sistemin önemli boyutlardaki tek eksenli hataları güvenilir bir şekilde algılama yeteneğine sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Cihaz 1	COM6	Kalibrasyon	Çap
			8.496 mm
Cihaz 2	COM10	Kalibrasyon	Çap
			7.907 mm
Çap Oranı	0,930673	Çap Farkı	0,59 mm
		Kusur Durumu	Bir Eksen!
			Başlat

Şekil 3.5. Tek eksende büyük hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları

3.2.3. Tek Eksenli Küçük Hata Tespiti

Sistemin hassasiyet sınırlarını test etmek amacıyla, kablonun bir ekseninde daha küçük bir hata oluşturulmuştur. Bu küçük hata için elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.6'da sunulmuştur. Yaklaşık 0.06 mm boyutundaki bu nispeten küçük çap değişimi, arayüzde değer olarak gözlemlenmekle birlikte, yazılımda önceden belirlenen tolerans değeri sebebiyle "Hata Durumu" kısmında doğrudan bir hata olarak işaretlenmemiştir. Bu durum, sistemin belirli bir tolerans değeri altında kalan küçük sapmaları normal kabul edebilme kabiliyetini ve yazılımda ayarlanabilen hata eşiği mekanizmasının işleyişini göstermektedir. Bu özellik, kullanıcının uygulama gereksinimlerine göre hassasiyet eşiğini ayarlamasına olanak tanır.

Cihaz 1	COM6	Kalibrasyon	Çap
			8.508 mm
Cihaz 2	COM10	Kalibrasyon	Çap
			8.446 mm
Çap Oranı	0,992713	Çap Farkı	0,06 mm
		Kusur Durumu	KUSURSUZ
			Başlat

Şekil 3.6. Tek eksende küçük hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları

3.2.4. İki Eksende Hata Tespiti ve Ovallık Kontrolü

Sistemin ovallık kontrol yeteneğini test etmek için kablonun her iki ekseninde de (X ve Y) eş zamanlı hatalar oluşturulmuştur. Bu senaryo için elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Arayüzde, her iki eksenden gelen çap değerlerinde sapmalar açıkça gözlemlenmiştir. “Hata Durumu” kısmında hem X hem de Y eksenini için hata tespiti belirtilmiştir. “Çap Oranı” kısmında belirtilen değer üzerinden kablonun iki eksenini karşılaştırılarak üretimde ovallık hatası tespit edilmektedir. Bu deney, sistemin sadece tek eksenli hataları değil, aynı zamanda kablonun farklı açılarında oluşan hataları da eş zamanlı olarak algılayabildiğini ve gerekli geri bildirim sağlayabildiğini kanıtlamaktadır. Bu yetenek, üretim hattında kablonun dairesellikten sapmalarını gerçek zamanlı olarak izlemek ve düzeltici eylemleri başlatmak açısından kritik bir fonksiyondur.

Cihaz	COM	Çap (mm)
Cihaz 1	COM6	7.474
Cihaz 2	COM10	7.885

Çap Oranı	Çap Farkı (mm)	Kusur Durumu
1,054990	0,41	İki Eksen!

Şekil 3.7. İki eksende hatalı kablo kesit ölçüm sonuçları

3.2.5. Sistem Doğruluk ve Hassasiyet Değerlendirilmesi

Geliştirilen ölçüm sisteminin sadece belirli bir nominal çapta değil, farklı boyutlardaki kablolar üzerinde de tutarlı ve doğru ölçümler yapabilme kabiliyetini test etmek amacıyla, çalışma aralığını temsil eden farklı kesitlerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, sistemin esnekliğini ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyel kullanım alanını göstermesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda, ana deneylerde kullanılan 8.5 mm'lik kablodan daha ince (6.7 mm) ve daha kalın (11 mm) olmak üzere iki farklı kablo ölçülmüştür.

İlk olarak, nominal çapı 6.7 mm olan hatasız bir kablo ölçülmüştür. Şekil 3.8’de sunulan sonuçlara göre, sistemin hem X hem de Y ekseninde nominal çapa oldukça yakın ve kararlı değerler ürettiği görülmektedir. Bu durum, sistemin referans olarak kullanılan çaptan daha küçük kablolarda dahi yüksek doğrulukla çalışabildiğini doğrulamaktadır.

Cihaz 1	Çap	
COM6	6.712 mm	
Cihaz 2	Çap	
COM10	6.730 mm	
Çap Oranı	Çap Farkı	Kusur Durumu
1,002682	0,01 mm	KUSURSUZ

Şekil 3.8. “6.7 mm” çapındaki hatasız kablo kesit ölçümü

Ardından, sistemin ölçüm aralığının üst sınırlarına yakın bir değeri test etmek amacıyla 11 mm çapında hatasız bir kablo ile ölçüm yapılmıştır. Şekil 3.9’daki arayüz çıktısı incelendiğinde, ölçümlerin kararlı olduğu ancak nominal değere kıyasla sapma miktarının 6.7 mm’lik kabloya göre bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, optik sistemlerde beklenen bir sonuç olup, sensörün görüş alanının kenarlarına yaklaşıldıkça veya ölçülen nesne büyüdükçe milimetre başına düşen piksel oranındaki değişimlerden kaynaklanan minimal bir hata artışına işaret edebilir.

Bu iki deney, geliştirilen sistemin geniş bir çap aralığında güvenilir bir şekilde çalıştığını, ancak en yüksek hassasiyeti ve doğruluğu nominal tasarım çapına yakın değerlerde sergilediğini ortaya koymuştur. Gözlemlenen minimal sapmalar, endüstriyel toleranslar dahilinde kabul edilebilir düzeydedir ve sistemin farklı üretim hatlarına adapte olabilme potansiyelini göstermektedir.

Çap Oranı	Çap Farkı	Kusur Durumu
0,997104	0,03 mm	KUSURSUZ

Şekil 3.9. “11 mm” çapındaki hatasız kablo kesit ölçümü

3.2.6. Sistem Performans Değerlendirmesi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen çap ölçer test düzeneğinin performansı, bir dizi deneysel ölçüm ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Şekil 3.10 ile Şekil 3.17 arasında sunulan verilerde detaylandırıldığı üzere, yüzeyinde tanımlı geometrik hatalar bulunan kablo numuneleri üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hatalı bölgeleri tespit ettiğini, ancak bu esnada kalibre edilmiş referans (hatasız) çap değerine göre daha belirgin sapmalar kaydettiğini göstermiştir.

Tablo 3.1’de gösterildiği üzere yapılan analizler, kablonun nominal çapı ile hata anında ölçülen sapma büyüklüğü arasında pozitif bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur. Diğer bir deyişle, daha büyük çapa sahip kablolardaki hataların ölçümü sırasında meydana gelen hata payının, daha ince kablolara kıyasla oransal olarak daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.1. Sistem performans sonuçları

Hatasız Numune Ölçümü (Mikrometre cihazı - mm)	Hatasız Numune Ölçümü (Tasarlanan Cihaz - mm)	Hatasız Numune Ölçüm Doğruluğu (Tasarlanan Cihaz)	Hatalı Numune Ölçümü (Mikrometre cihazı - mm)	Hatalı Numune Ölçümü (Tasarlanan Cihaz - mm)	Cihaz Hata Ölçüm Doğruluğu
1,4	1,408	99,432%	0,825	0,798	96,727%
2,1	2,120	99,057%	1,549	1,498	96,708%
2,3	2,307	99,697%	1,627	1,574	96,742%
2,9	2,892	99,724%	2,263	2,188	96,686%
3,3	3,306	99,819%	2,584	2,496	96,594%
4,35	4,340	99,770%	3,607	3,484	96,590%
5,95	5,958	99,866%	4,574	4,415	96,524%
6,1	6,107	99,885%	4,916	4,745	96,522%
6,7	6,712	99,821%	5,529	5,334	96,473%
8,8	8,793	99,920%	6,686	6,442	96,351%
13	13,006	99,954%	10,749	10,339	96,186%
14,3	14,308	99,944%	11,958	11,489	96,078%
18,4	18,392	99,957%	15,679	15,032	95,873%

Gözlemlenen bu ölçüm sapmalarının altında yatan temel fiziksel ve teknik faktörler üç ana başlık altında toplanmaktadır:

- **Işık Kaynağı Karakteristiği:** Ölçüm sisteminde kullanılan ışık kaynağının, teorik olarak varsayılan ideal bir nokta kaynak olmaması ve tam paralel bir ışık demeti üretememesi. Özellikle LED kaynağının doğası gereği oluşturduğu kısmi dağınık aydınlatma, gölge sınırlarında belirsizliklere yol açarak ölçüm doğruluğunu olumsuz etkilemektedir.
- **Mekanik Hizalama ve Pozisyonlama:** Ölçüm esnasında kablonun, optik sensörlerin odak düzlemine olan mesafesinin ve eksenel hizalamasının ideal düzeyde sabit tutulamaması, mekanik kararsızlıklardan kaynaklanan ek ölçüm belirsizlikleri doğurmaktadır.
- **Sistemik Hata:** Yukarıda belirtilen faktörlerin birleşimi, özellikle artan çap değerleriyle birlikte daha belirgin hale gelen sistemik bir ölçüm hatasına neden olmaktadır.



Şekil 3.10. Birinci numune ölçüm denemesi



Şekil 3.11. İkinci numune ölçüm denemesi



Şekil 3.12. Beşinci numune ölçüm denemesi



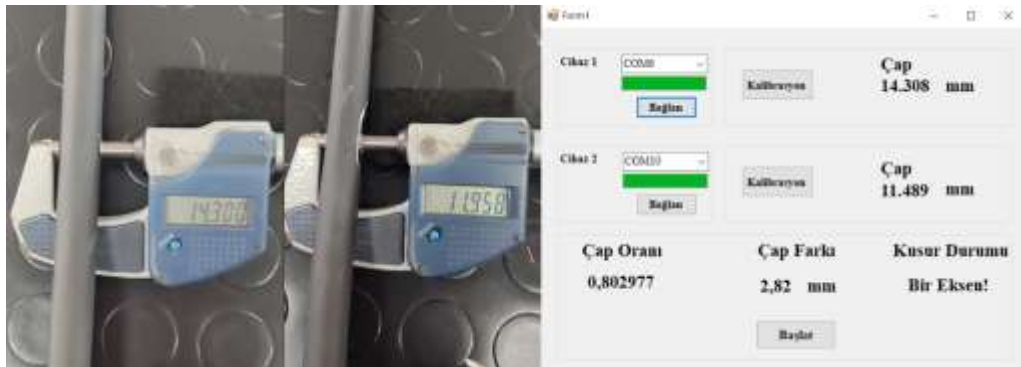
Şekil 3.13. Yedinci numune ölçüm denemesi



Şekil 3.14. Onuncu numune ölçüm denemesi



Şekil 3.15. On birinci numune ölçüm denemesi



Şekil 3.16. On ikinci numune ölçüm denemesi



Şekil 3.17. On üçüncü numune ölçüm denemesi

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma

Bu tez çalışması kapsamında, kablo üretim hatları için lineer CCD sensör tabanlı, iki eksenli bir çap ölçüm ve ovallık kontrol sistemi prototipi başarıyla geliştirilmiş ve test edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, piyasadaki yüksek maliyetli ve ithal sistemlere yerli ve maliyet-etkin bir alternatif sunmaktır. Laboratuvarında yapılan deneyler, prototipin hatasız kablo kesitlerini her iki ekseninde de kararlı ve doğru bir şekilde ölçtüğünü göstermiştir. Bu sonuç, seçilen donanım ve yazılım bileşenlerinin birbiriyle uyumlu çalıştığını doğrulamaktadır.

Sistemin yapay hataları tespit etme performansı, bu tez çalışmasının başarısının en önemli göstergesidir. Büyük boyutlu tek eksenli hataların anında tespit edilmesi, sistemin ciddi üretim hatalarını yakalayabildiğini kanıtlamıştır. Daha küçük hataların sayısal olarak gözlemlenip, tanımlı tolerans dahilinde kaldığı için bir hata olarak raporlanmaması ise, sistemin ayarlanabilir hassasiyet eşiğinin doğru çalıştığını göstermektedir.

Tez çalışmasının en önemli çıktılarından olan iki eksenli ölçüm kabiliyeti sayesinde ovallık kontrolü mümkün kılınmıştır. Her iki ekseninde eş zamanlı oluşturulan hataların başarıyla algılanması, sistemin sadece çapı değil, kablo geometrisindeki dairesellikten sapmaları da denetleyebildiğini kanıtlamıştır.

Geliştirilen sistemin hata tespit performansı, Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından yayımlanan TS EN 50525-3-31 standardında belirtilen gereklilikler referans alınarak değerlendirilmiştir. Belirli bir kablo firmasının numuneleri üzerinden yapılan analizler, sistemin ölçüm doğruluğunun ilgili standartta tanımlanan kabul edilebilir tolerans sınırları içerisinde olduğunu göstermektedir. TSE dokümanındaki belirtilen değerlere

sahip olan kabloların deneysel ölçüm sonuçları ile standartta belirtilen referans değerler, Tablo 4.1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.1. Ölçüm sonuçlarının TSE dokümanındaki değerler ile kıyaslanması

İletkenlerin anma kesit alanı (mm ²)	Ortalama dış çap alt sınır (mm)	Ortalama dış çap üst sınır (mm)	Çap sınır aralığı (mm)	Hatasız Numune Ölçümü (Tasarlanan Cihaz - mm)
1,5	2,6	3,2	0,6	2,892
2,5	3,2	3,9	0,7	3,306
6	4,1	5	0,9	4,340
10	5,3	6,4	1,1	5,958
16	6,4	7,8	1,4	6,107
25	8,1	9,7	1,6	8,793
70	12,1	14,6	2,5	13,006
95	14,1	17,1	3	14,308

Bu tez çalışması, literatürdeki benzer çözümlerden farklı olarak, güç devresinden kullanıcı arayüzüne kadar tüm bileşenlerinin özgün ve yerli imkanlarla geliştirilmesiyle öne çıkmaktadır. Bu bütüncül yaklaşım, dışa bağımlılığı azaltan, maliyet etkin ve sürdürülebilir bir kalite kontrol çözümü sunma potansiyeli taşımaktadır.

4.2. Sonuç ve Öneriler

Bu tez çalışması sonucunda, lineer CCD sensör teknolojisi kullanılarak üretim hatları için tasarlanmış, iki eksenli, gerçek zamanlı kablo çapı ve ovallık denetimi yapabilen yüksek hassasiyetli bir optik ölçüm sistemi prototipi başarıyla geliştirilmiştir. STM32 mikrodenetleyici tabanlı kontrol mimarisi, özgün sinyal koşullandırma devreleri ve C# tabanlı kullanıcı arayüzü ile desteklenen sistemin, laboratuvar ortamında yapılan testlerde hatasız kablo kesitlerini doğru bir şekilde ölçtüğü ve farklı boyutlardaki tek ve çift eksenli yapay hataları başarıyla tespit ettiği doğrulanmıştır. Bu çalışma, kablo imalat endüstrisindeki pahalı ve ithal sistemlere karşı güvenilir, tekrarlanabilir ve maliyet etkin yerli bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Bu başarılı prototip çalışmasının ardından, sistemin endüstriyel olgunluğa eriştirilmesi için gelecek çalışmalara yönelik aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Endüstriyel Entegrasyon ve Mekanik İyileştirme: Geliştirilen prototipin, 3B yazıcı ile üretilen mekanik parçalar yerine, endüstriyel ortamın zorlu koşullarına (titreşim, toz, sıcaklık değişimleri) dayanıklı, daha sağlam ve kompakt bir metal gövde içine entegre edilmesi gerekmektedir. Bu, sistemin gerçek bir üretim hattına montajı için ilk adımdır.
- Kalibrasyon Algoritmalarının Geliştirilmesi: Mevcut sistemde kalibrasyon katsayı ile yapılmaktadır. Farklı çap ve malzemelerdeki kablolar için otomatik veya yarı otomatik kalibrasyon rutinleri geliştirilebilir. Bu, kullanıcı dostu bir arayüz üzerinden standart master (kalibrasyon çubuğu) okutularak sistemin kendini hızlıca kalibre etmesini sağlayabilir.
- Yazılım ve Arayüzün Geliştirilmesi: Kullanıcı arayüzü, ölçüm sonuçlarını daha sonra incelemek amacıyla bir veritabanına otomatik olarak kaydedecek şekilde geliştirilebilir. Ayrıca, üretim kalitesindeki uzun vadeli değişimleri ve eğilimleri takip etmeyi kolaylaştırmak için arayüze istatistiksel analiz grafikleri eklenebilir. Bununla birlikte, belirlenen toleransların dışına çıktığında operatörü sesli veya görsel olarak uyaracak bir alarm sistemi entegre edilerek sistem daha işlevsel hale getirilebilir.

KAYNAKÇA

1. Lentz, B., Kwiek, P., Sioma, A. 2018, October. Quality control automation of electric cables using machine vision. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018* (Vol. 10808, pp. 236-244). SPIE.
2. Serroukh, I., Martinez-Anton, J. C., Bernabeu, E. 2000. Evaluation of the wire diameter obtained by conventional laser diffraction technique using an interferometric method. **Optics and Lasers in Engineering**, **33**: 116–120.
3. Zhao, Y., Brown, R., Kramer, T., Xu, X. 2011. Dimensional metrology for manufacturing quality control. In *Manufacturing Engineering Handbook* (pp. 275–307).
4. Lin, Y., Zheng, X. 2022. Design of non-contact low-voltage distribution cable inspection system. In *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS)* (pp. 661–665). IEEE.
5. Hong, X., Lin, J., Zhou, J., Yang, D. 2023. Array ultrasonic guided wave spiral focusing detection method for inner damage of messenger cable in covered area. **Mechanical Systems and Signal Processing**, **188**: 109977. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.109977>
6. Kim, M., Moon, W., Yoon, E., Lee, K.-R. 2005. A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range. **Sensors and Actuators A: Physical**, **130–131**: 135–141.
7. Su, B., Duan, G. 2011. Research on high accuracy diameter measurement system with CCD. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, **8194**: xx–xx.
8. Yang, M., Zhao, M., Guo, F., Wang, H. 2014. Research of diameter measurement based on CCD image sensor. **Applied Mechanics and Materials**, **602–605**: 1984–1987.
9. Ya, Z., Guangxing, Z. 2012, October. Design of Linear CCD High-Speed Signal Acquisition System with Electronic Shutter. In *Proceedings of the 2012*

International Conference on Electronics, Communications and Control (pp. 344-347).

10. Jeong, D. H., Lee, K., Jin, K., Song, C. 2008. The design and implementation of a linescan camera based real-time image scanning system. (Web Sayfası: <https://www.researchgate.net/profile/Dong-Hyun-Jeong/publication/250223868>)
11. Janesick, J. 2001. Scientific charge-couple devices. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, xvi, 906 p. SPIE Press monograph, PM 83.
12. Sze, S. M., Ng, K. K. 2006. Physics of semiconductor devices. Wiley & Sons, New York, 374 p.
13. Keim, R. 2023. CCD image sensor types: Full-frame, interline-transfer, and frame-transfer CCDs. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/types-of-ccd-image-sensors-interline-transfer-frame-transfer-full-frame-ccd/>
14. Fossum, E. R. 1993, July. Active pixel sensors: Are CCDs dinosaurs?. In *Charge-Coupled Devices and Solid State Optical Sensors III* (Vol. 1900, pp. 2-14). SPIE.
15. Teranishi, N., Kohono, A., Ishihara, Y., Oda, E., Arai, K. 1982. No image lag photodiode structure in the interline CCD image sensor. In *1982 International Electron Devices Meeting* (pp. 324–327).
16. Fossum, E. R., Hondongwa, D. B. 2014. A review of the pinned photodiode for CCD and CMOS image sensors. **IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2**: 33–43.
17. Guidash, R. M., Lee, T. H., Lee, P. P. K., Sackett, D. H., Drowley, C. I., Swenson, M. S., et al. 1997. A 0.6 μm CMOS pinned photodiode color imager technology. In *International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest* (pp. 927–929).

18. Boyle, W. S., Smith, G. E. 1970. Charge coupled semiconductor devices. **The Bell System Technical Journal**, **49**: 587–593.
19. Collet, M. G., Esser, L. J. M. 1973. Charge transfer devices. In Queisser, H. J. (Ed.), *Festkörper Probleme* (pp. 337–358). Pergamon.
20. Hendrickson, A., Haefner, D., Chan, S., Shade, N., Fossum, E. 2024. PCH-EM: A solution to information loss in the photon transfer method. **IEEE Transactions on Electron Devices**, 1–8.
21. Theuwissen, A. J. 1995. Solid-state imaging with charge-coupled devices. London, Springer, 396 p.
22. Beynon, J. D. E., Eng, C. 1976. Introduction to charge-coupled devices. **Microelectronics Reliability**, **15**: 273–283.
23. Nichols, D., Stevens, E., Burkey, B., Stancampiano, C., Lee, Y. R., Lee, T. H., et al. 2005. High-resolution interline image sensors using two-phase CCD technology. **International Journal of Imaging Systems and Technology**, **5**: 323–329.
24. Fossum, E. R. 1997. CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip. **IEEE Transactions on Electron Devices**, **44**: 1689–1698.
25. Bigas, M., Cabruja, E., Forest, J., Salvi, J. 2006. Review of CMOS image sensors. **Microelectronics Journal**, **37**: 433–451.
26. Carlson, B. 2002. Comparison of modern CCD and CMOS image sensor technologies and systems for low resolution imaging. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, **1**: xx–xx.
27. T. E. D. S. Corporation. 2023. TOSHIBA CCD linear image sensor CCD (Charge Coupled Device). Available: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TCD1304DG_Web_Datasheet_en_20250219.pdf?did=13709&prodName=TC D1304DG

28. Morrissey, Q., Bell, S., Jones, L., Torbet, M., Waltham, N., Clapp, M. 2016, October. A multi-channel CCD clock driver ASIC for space-based applications. In *2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD)* (pp. 1-8). IEEE.
29. Xu, T., Xiong, X., Li, M. 2009, August. Design of FPGA based on linear array CCD driver circuit. In *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 2-766). IEEE.
30. Senarathna, D., Paththinige, U., Jayalath Arachchige, C., Jayawardhana, S. 2020. Development of an economical, linear CCD based spectrometer. **Vidyodaya Journal of Science**, **23**: 23–30.
31. Batchelor, B., Waltz, F. 2012. Intelligent machine vision: techniques, implementations and applications. London, Springer Science & Business Media, 376 p.
32. Schubert, E. F. 2006. Light-emitting diodes (2nd edition). E. Fred Schubert.
33. Zhang, H.-f., Kang, W. 2013. Design of the data acquisition system based on STM32. **Procedia Computer Science**, **17**: 222–228.
34. Fitriyan, R., Syafii, S. 2024. Development design of an IoT-based smart home monitoring system with security features. **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, **34**: 788.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ömer Enes YILDIZ

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Müh.	2020
Lise	Ahmet Eren Anadolu Lisesi, Kayseri	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Halen	Hasçelik Kablo Tic. San. A.Ş.	3 Yıl

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- Ö. E. YILDIZ, K. DANIŞMAN (2024). Silindirik malzemelerde boyutsal ve geometrik hataların tespiti için bir optik algılama sistemi tasarımı. *8th International Halich Congress On Multidisciplinary Scientific Research*, ss: 425-426