T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMATİK TEST EKİPMANLARI İÇİN GRAFİKSEL PROGRAMLAMA TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME DESTEKLİ MODÜLER BİR LED TEST SİSTEM TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Evren BALCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Prof. Dr. Kadir ERKAN

Ekim, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMATİK TEST EKİPMANLARI İÇİN GRAFİKSEL PROGRAMLAMA TABANLI GÖRÜNTÜ İŞLEME DESTEKLİ MODÜLER BİR LED TEST SİSTEM TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Evren BALCI tarafından hazırlanan tez çalışması 14.10.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kadir ERKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin ÜVET, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Fatih ÇELEBİ, Üye
Marmara Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Kadir ERKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Otomatik Test Ekipmanları İçin Grafiksel Programlama Tabanlı Görüntü İşleme Destekli Modüler Bir LED Test Sistem Tasarımı ve Gerçeklenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı hâlinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Evren BALCI

İmza

Aileme

ve

Biricik eşime

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süreci boyunca yardımlarını ve destekleyici tutumunu hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Kadir ERKAN'a teşekkür ederim. Bu sürecin yoğunluğuna sabırla eşlik eden ve her koşulda anlayış gösteren sevgili eşime, verdikleri tüm emekler için anne ve babama, akademik yolculuğuma olumlu etkisi olan değerli ağabeyim; kuzenim Prof. Dr. Muharrem BALCI'ya ve tez çalışma sürecime doğrudan ya da dolaylı katkısı olan herkese teşekkür ederim.

Son olarak; her şeye rağmen, tüm zorluklara, engellere ve şartlara rağmen araştırmaktan, üretmekten ve çözüm arayışından vazgeçmeyen; ülkemiz ve insanlık için emek veren, aklıyla, azmiyle ve duruşuyla ilham kaynağı olan tüm insanlara teşekkür ederim.

Evren BALCI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ **vii**

KISALTMA LİSTESİ **viii**

ŞEKİL LİSTESİ **xi**

TABLO LİSTESİ **xv**

HARİTA LİSTESİ **xvi**

ÖZET **xvii**

ABSTRACT **xix**

1 GİRİŞ **1**

1.1 Üretimin Tarihsel Süreci.....1

1.2 Sanayi Devrimi.....4

1.3 Endüstri 4.0.....6

1.3.1 Endüstri 4.0'ın Teknolojik Bileşenleri.....6

2 TEST SİSTEMLERİ **11**

2.1 Endüstriyel Test Sistemleri.....11

2.2 Elektronik Üretim Testleri.....15

2.3 ICT/FCT Sistemleri.....18

2.3.1 ICT Sistemleri.....20

2.3.2 FCT Sistemleri.....21

2.3.3 ICT/FCT Sistemlerinin Yapısı.....22

2.3.4 ICT/FCT Sistemleri Fikstür ve Jig Teknolojisi.....33

3 LED TESTİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER 41

3.1 LED Teknolojisi.....41

3.2 LED Testi.....48

3.2.1 LED Test Hiyerarşisi.....49

3.2.2 LED Test Yöntemleri ve Ürünleri.....51

3.3 LED Testine Tez Çalışması Kapsamındaki Yaklaşım.....54

4 YÖNTEM 57

4.1 Amaç.....57

4.2 Projelendirme ve Ön Hazırlık.....58

4.2.1 Kullanılan Mühendislik Programları.....59

4.3 Prototip Tasarımı ve Üretimi.....63

4.4 Yazılım Geliştirme.....67

4.4.1 Kullanılan Fonksiyonlar.....68

4.4.2 Yazılım Mimarisi.....74

4.5 Final Ürün.....79

4.5.1 Ölçüm Analizi ve Tekrarlanabilirlik.....91

4.5.2 Maliyet Analizi.....104

4.5.3 Uygulama Alanları.....108

5 SONUÇ VE ÖNERİLER 109

KAYNAKÇA 111

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 117

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
R	Direnç
€	Euro
GaAlAs	Galyum Alüminyum Arsenit
GaAs	Galyum Arsenit
GaP	Galyum Fosfit
GaN	Galyum Nitrür
InGaAlP	İndiyum Galyum Alüminyum Fosfit
kΩ	Kiloohm
MΩ	Megaohm
mm	Milimetre
nm	Nanometre
N	Newton
V	Voltaj
W	Watt

KISALTMA LİSTESİ

3D	Three Dimensional
5G	5th Generation
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADC	Analog to Digital Converter
AI	Artificial Intelligence
AOI	Automatic Optical Inspection
AR	Augmented Reality
AR-GE	Araştırma-Geliştirme
ATE	Automated Test Equipment
B	Blue
CAD	Computer Aided Design
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAN	Controller Area Network
CCT	Correlated Color Temperature
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CNC	Computer Numerical Control
COB	Chip On Board
DAQ	Data Acquisition
DC	Direct Current
DIP	Dual In-line Package
DLL	Dynamic Link Library
DUT	Device Under Test
EGT	Elektriksel Güvenlik Test
EOL	End of Line
ERP	Enterprise Resource Planning
ESD	Electrostatic Discharge
FCT	Functional Test

FR4	Flame Retardant 4
G	Green
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HMI	Human Machine Interface
HSI	Hue-Saturation-Intensity
I/O	Input/Output
I^2C	Inter-Integrated Circuit
ICT	In-Circuit Test
IEC	International Electrotechnical Commission
IOT	Internet of Things
IR	InfraRed
ISP	In-System Programming
ISO	International Organization for Standardization
JTAG	Joint Test Action Group
LCR	Inductance (L-Lenz), Capacitance (C), Resistance (R)
LDR	Light Dependent Resistor
LED	Light Emitting Diode
LUM	Luminance
LV	LabVIEW
MAX	Measurement & Automation Explorer
MES	Manufacturing Execution System
MÖ	Milattan Önce
MSA	Measurement System Analysis
NI	National Instruments
OLED	Organic Light Emitting Diode
PCB	Printed Circuit Board
PCBA	Printed Circuit Board Assembly
PCI	Peripheral Component Interconnect
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller
PXI	PCI Extensions for Instrumentation
R	Red
R&R	Repeatability and Reproducibility
RGB	Red, Green, Blue
SAE	Society of Automotive Engineers

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SFS	Siber Fiziksel Sistemler
SMD	Surface Mount Device
SMEMA	Surface Mount Equipment Manufacturers Association
SMT	Surface Mount Technology
SPI	Solder Paste Inspection
TS	TestStand
TP	Test Point
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UUT	Unit Under Test
UV	Ultraviolet
VAS	Vision Acquisition Software
VDM	Vision Development Module
VI	Virtual Instrument
WL	Wavelength

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Antik çağda kullanılan bazı tarım aletleri **1**
Şekil 1.2 Sanayi devrimleri süreci **4**
Şekil 1.3 Endüstri 4.0 bileşenleri **6**
Şekil 2.1 Serum torbası sızdırmazlık testinin otomatik yöntemi **13**
Şekil 2.2 Serum torbası sızdırmazlık testinin manuel yöntemi **14**
Şekil 2.3 Test sistemleri bileşenleri **16**
Şekil 2.4 Yaylı test probu yapısı **18**
Şekil 2.5 PCBA üretim hattı **22**
Şekil 2.6 Flying prob test sisteminde problar ile elektronik kart teması **23**
Şekil 2.7 Raf şasi tipli bir ATE **25**
Şekil 2.8 Farklı ölçüm modülleri takılmış bir PXI kasa **25**
Şekil 2.9 ATE blok diyagramı **27**
Şekil 2.10 Manuel baskı tipli ICT/FCT sistemleri **28**
Şekil 2.11 Pnömatik baskı tipli ICT/FCT sistemleri **29**
Şekil 2.12 Servo baskı tipli bir ICT/FCT sistemi **29**
Şekil 2.13 Çift aşamalı prob temasları **30**
Şekil 2.14 Değiştirilebilir fikstür **31**
Şekil 2.15 Bir elektronik karta yerleştirilmiş strain gauge sensör **32**
Şekil 2.16 Test probları ve PCBA **33**
Şekil 2.17 Çeşitli temas hedefleri **34**
Şekil 2.18 Bazı sivri uçlu prob tipleri ile dokunulan test noktaları **34**
Şekil 2.19 Çeşitli delikli temas hedefleri ve prob seçimleri **35**
Şekil 2.20 Çeşitli komponent bacağı temas hedefleri ve prob seçimleri **35**
Şekil 2.21 Komponent bacağı temasında hatalı ve başarılı prob seçimleri **35**
Şekil 2.22 Çeşitli bombe tip temas hedefleri ve prob seçimleri **36**
Şekil 2.23 Test probları ve kovanlarının teknik kullanım detayları **36**
Şekil 2.24 Test probu çalışma stroku ve maksimum strok **37**
Şekil 2.25 Sarmal kablolama aracı ile kablolama **38**

Şekil 2.26 ICT/FCT fikstürü genel yapısı **39**
Şekil 3.1 DIP soket LED görünüşü ve LED sembolü **41**
Şekil 3.2 Silisyum karbür kristale gerilim uygulayarak ışık oluşturma deneyi **42**
Şekil 3.3 SNX-100 isimli bilinen ilk ticari LED **42**
Şekil 3.4 LED'in çalışma prensibi **43**
Şekil 3.5 LED'in iç yapısı **45**
Şekil 3.6 Çeşitli LED tipleri **45**
Şekil 3.7 CIE 1931 renk uzayı ölçüsel diyagramı **49**
Şekil 3.8 CIE 1976 renk uzayı ölçüsel diyagramı **50**
Şekil 3.9 Fiber optik kablolar takılmış bir LED analizörü **52**
Şekil 3.10 LED ışıkları transferi **52**
Şekil 3.11 Manuel baskı tipli bir FCT sisteminde LED analizör kullanımı **53**
Şekil 3.12 Tez kapsamındaki LED test sisteminin genel yapısı **54**
Şekil 4.1 Haftalık zaman planı **58**
Şekil 4.2 Prototip çalışmasında kullanılan UUT **63**
Şekil 4.3 Prototipin genel görünümü **64**
Şekil 4.4 Prototipin fikstür bölümünün alt jiginin yan görünüşü **65**
Şekil 4.5 Elektronik kartın fikstüre yerleştirildiği prototip görünümü **65**
Şekil 4.6 Mekanik referanslama ve yaylı test probu teması **66**
Şekil 4.7 Manuel pot manipülatörü ile komütatör anahtarın döndürülmesi **67**
Şekil 4.8 Case structure **68**
Şekil 4.9 Flat sequence **69**
Şekil 4.10 IMAQdx open camera VI **69**
Şekil 4.11 Wait (ms) **69**
Şekil 4.12 Property node **69**
Şekil 4.13 IMAQdx configure grab VI **70**
Şekil 4.14 IMAQ create VI **70**
Şekil 4.15 IMAQdx grab VI **70**
Şekil 4.16 IMAQ write file 2 VI **70**
Şekil 4.17 While loop **71**
Şekil 4.18 IMAQ extractsinglecolorplane VI **71**
Şekil 4.19 Build array **71**
Şekil 4.20 Array to cluster **71**
Şekil 4.21 IMAQ light meter (point) VI **72**
Şekil 4.22 Index array **72**

Şekil 4.23 Formula node **72**
Şekil 4.24 Add function **72**
Şekil 4.25 IMAQ getcolorpixelvalue VI **73**
Şekil 4.26 IMAQ integertocolorvalue VI **73**
Şekil 4.27 Cluster to array **73**
Şekil 4.28 IMAQdx close camera VI **73**
Şekil 4.29 Simple error handler VI **74**
Şekil 4.30 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 1 ..... **74**
Şekil 4.31 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 2 ..... **75**
Şekil 4.32 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 3 ..... **75**
Şekil 4.33 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 4 ..... **75**
Şekil 4.34 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 5 ..... **76**
Şekil 4.35 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 6 ..... **76**
Şekil 4.36 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 7 ..... **76**
Şekil 4.37 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 8 ..... **77**
Şekil 4.38 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 9 ..... **77**
Şekil 4.39 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 10 ..... **77**
Şekil 4.40 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 11 ..... **78**
Şekil 4.41 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 12 ..... **78**
Şekil 4.42 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 13 ..... **78**
Şekil 4.43 Birinci LED senaryosu test arayüzü **79**
Şekil 4.44 Birinci LED senaryosu optik blok görünümü **80**
Şekil 4.45 Birinci LED senaryosu parlaklık ve renk kamera görüntüleri **80**
Şekil 4.46 İkinci LED senaryosu test arayüzü **81**
Şekil 4.47 Üçüncü LED senaryosu test arayüzü **81**
Şekil 4.48 Üçüncü LED senaryosu B2 numaralı kanal renk ölçümü **82**
Şekil 4.49 Üçüncü LED senaryosu A5 numaralı kanal renk ölçümü **82**
Şekil 4.50 Dördüncü LED senaryosu test arayüzü **83**
Şekil 4.51 Beşinci LED senaryosu test arayüzü **83**
Şekil 4.52 Altıncı LED senaryosu test arayüzü **83**
Şekil 4.53 Yedinci LED senaryosu test arayüzü **84**
Şekil 4.54 Yedinci LED senaryosu fikstür ve optik blok görünümü **84**
Şekil 4.55 LED testi DLL'inin TestStand üzerindeki genel yapısı **85**
Şekil 4.56 LED testinin TestStand üzerindeki genel yapısı **87**
Şekil 4.57 LED testinin TestStand üzerindeki limit test detayları **88**

Şekil 4.58 LED testinin TestStand üzerindeki raporlama detayları **88**
Şekil 4.59 Başarılı ürünlerde açılan TestStand penceresi..... **89**
Şekil 4.60 Başarısız ürünlerde açılan TestStand penceresi **89**
Şekil 4.61 LED test sisteminin reel bir uygulaması **90**

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Tarım devrimi süreci ve etkileri....**3**
Tablo 3.1 Farklı renkteki LED'lerin dalga boyu ve çalışma voltajı değerleri **44**
Tablo 4.1 Kullanılan programlar ve kullanım amaçları **59**
Tablo 4.2 Çalışan ve çalışmayan iki ayrı LED'e ait ölçümler **82**
Tablo 4.3 LED testi parlaklık limit değerleri **86**
Tablo 4.4 Analiz için alınan LED1 ölçüm sonuçları....**92**
Tablo 4.5 Analiz için alınan LED2 ölçüm sonuçları....**92**
Tablo 4.6 Analiz için alınan LED3 ölçüm sonuçları....**92**
Tablo 4.7 Analiz için alınan LED4 ölçüm sonuçları....**93**
Tablo 4.8 Analiz için alınan LED5 ölçüm sonuçları....**93**
Tablo 4.9 Analiz için alınan LED6 ölçüm sonuçları....**93**
Tablo 4.10 Analiz için alınan LED7 ölçüm sonuçları....**94**
Tablo 4.11 Analiz için alınan LED8 ölçüm sonuçları....**94**
Tablo 4.12 Analiz için alınan LED9 ölçüm sonuçları....**94**
Tablo 4.13 Analiz için alınan LED10 ölçüm sonuçları....**95**
Tablo 4.14 Analiz için alınan LED11 ölçüm sonuçları....**95**
Tablo 4.15 Analiz için alınan LED12 ölçüm sonuçları....**95**
Tablo 4.16 Matematiksel modeldeki formüllerin açıklamaları....**96**
Tablo 4.17 Prototip çalışması doğrudan maliyetler **104**
Tablo 4.18 Prototip çalışması dolaylı maliyetler **105**
Tablo 4.19 Sistemin reel maliyeti **107**

HARİTA LİSTESİ

Harita 1.1 Bereketli Hilal haritası.....**2**

ÖZET

Otomatik Test Ekipmanları İçin Grafiksel Programlama Tabanlı Görüntü İşleme Destekli Modüler Bir LED Test Sistem Tasarımı Ve Gerçeklenmesi

Evren BALCI

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kadir ERKAN

Birinci Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar uzanan süreçte, makinelerin evrimiyle üretim sistemleri kökten değişmiştir. Hızla artan insan popülasyonu, kentleşme ve gelişen dünyanın bir etkisi olarak endüstriyel üretim ihtiyacı her geçen gün katlanarak artmıştır. Mekanik üretim sistemlerinden elektrikle çalışan hatlara, oradan da dijitalleşme çağının kapılarını aralayan Endüstri 4.0'a kadar uzanan bu dönüşüm, üretim verimliliği kavramını ve kalite standartlarını sürekli olarak yeniden tanımlamaktadır. Dolayısıyla bu süreç yalnızca üretim aşamalarını değiştirmekle kalmamış, aynı zamanda üretim sonrası kalite kontrol ve test proseslerini de daha akıllı, esnek, hızlı ve güvenilir hâle getirme ihtiyacını beraberinde getirmiştir.

Endüstriyel test sistemleri, üretim işlemleri tamamlanan ürünlerin gerekli kriterleri sağladığını doğrulamak adına kritik bir rol üstlenmektedir. Bu kriterler her üretim sektörü ve ürün tipi için farklılık göstermektedir. Dolayısıyla sektör ve test edilen ürünün ne olduğu, ürüne uygulanacak testi ve bu testin kapsamını belirlemektedir.

Bu endüstriyel testler genel olarak; fonksiyon testleri, elektriksel testler, yapısal testler, çevresel testler ve ömür testleri gibi başlıklarla ifade edilmektedir. Bu tez çalışmasında, bir fonksiyon test sistemi olarak görüntü işleme tabanlı LED kontrolü uygulaması geliştirilmiş ve bu uygulamanın etkileri incelenmiştir.

LabVIEW programlama dili kullanılarak geliştirilen sistem, LED'li elektronik kart ve ürün test süreçlerinde düşük maliyetle, yüksek performanslı, esnek bir çözüm sunmanın yanı sıra, insan faktörü kaynaklı hataları minimize ederek otomatik, güvenilir ve raporlanabilir bir test altyapısı sağlamayı hedeflemektedir.

Modern endüstriyel üretim sistemlerinde kalite ve güvenilirlik, rekabet avantajı açısından belirleyici unsurlardır. Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında geliştirilen görüntü işleme tabanlı test sisteminin, yenilikçi yaklaşımlar ile birleşerek kalite kontrol ve test süreçlerine değer katması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektronik kart test sistemleri, LabVIEW ile görüntü işleme, ICT / FCT sistemleri, LED test sistemleri, Otomatik test ekipmanları.

ABSTRACT

Design and Implementation of a Modular LED Test System with Graphical Programming Based Image Processing for Automated Test Equipment

Evren BALCI

Department of Mechatronics Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kadir ERKAN

From the First Industrial Revolution to the present day, production systems have undergone a fundamental transformation through the evolution of machinery. As a result of the rapidly growing human population, urbanization, and an ever-developing world, the need for industrial production has increased exponentially. This transformation, from mechanical production systems to electrically driven lines and finally to the digital era of Industry 4.0, has continuously redefined the concepts of production efficiency and quality standards. Consequently, this process has not only altered the stages of production but has also brought forth the necessity of making post-production quality control and testing processes smarter, more flexible, faster, and more reliable.

Industrial test systems play a critical role in verifying that products which have completed the manufacturing process meet the required criteria. These criteria vary depending on the production sector and product type. Therefore, the nature of the sector and the product under test determines the type and scope of the test to be applied.

In general, these industrial tests can be categorized as functional tests, electrical tests, structural tests, environmental tests, and lifetime tests. In this thesis, an image processing-based LED inspection application has been developed as a functional test system, and the effects of this application have been examined.

Using the LabVIEW programming language, the developed system aims to provide an automatic, reliable, and reportable test infrastructure that minimizes human-induced errors while offering a low-cost, high-performance, and flexible solution for testing LED-based electronic boards and products.

In modern industrial production systems, quality and reliability are decisive factors for maintaining a competitive advantage. In this context, the image processing-based test system developed within the scope of this thesis is intended to contribute to quality control and testing processes by combining innovative approaches with advanced test automation methods.

Keywords: Electronic board test systems, Image processing using LabVIEW, ICT / FCT systems, LED test systems, Automated test equipment.

1
GİRİŞ

1.1 Üretimin Tarihsel Süreci

İnsanoğlu, hayatta kalabilme içgüdüsünün de etkisiyle, bilinen en eski çağlardan beri tüketim alışkanlığına sahip olmuştur. Avcı-toplayıcı nesil olarak adlandırılan ve binlerce yıl önce yaşayan insanlar, doğadan avlanarak ve toplayarak geçinmekteydi. Bu insanlar yabani hayvanları avlamanın yanı sıra, doğada kendiliğinden yetişen yabani bitkileri tüketmekteydiler [1]. Dolayısıyla bu dönemlerde üretim yoktu, yalnızca tüketim vardı.

Zaman içerisinde insanlar mağaralardan çıkarak ovalara yerleşmeye başladılar ve yerleşik hayata geçiş başladı. Bu değişiklik tarım ve hayvancılıkla birlikte üretim faaliyetlerinin başlamasına zemin hazırladı. İnsanlar yabani bitkileri ve hayvanları evcilleştirmeye başladılar [1]. İnsanlığın kitlesel olarak ilk üretim faaliyetleri 'Tarım Devrimi' olarak adlandırılan bu dönemde başladı. Şekil 1.1'de, İspanya'nın doğusundaki 'La Bastida de les Alcusses' isimli İber yerleşiminde yapılan arkeolojik çalışmalarda bulunan, antik çağda kullanılan bazı tarım aletleri gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Antik çağda kullanılan bazı tarım aletleri [2]

Orta Doğu'daki 'Bereketli Hilal' olarak adlandırılan, ülkemizin de güneydoğu bölgesini içine alan bölge, Harita 1.1'de gösterilmektedir. Bereketli Hilal, tarihsel ve arkeolojik araştırmalarda; tarım ve hayvancılığın doğuşu, yerleşik hayata geçiş, yazının icadı gibi önemli gelişmelerin yaşandığı bölge olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu bölge, üç büyük dinin doğduğu topraklar olarak da önemini korumaktadır [1]. Dolayısıyla insanlığın değişimini kökten etkileyen tarihsel süreçler ilk olarak Türkiye topraklarının da içinde bulunduğu bu bölgede yaşanmıştır. Nitekim, Şanlıurfa'da bulunan, arkeolojik araştırmalar sonucu MÖ 9600'lü yıllara tarihlenen (bkz. Mısır piramitlerinden 6000 yıl daha eski), dünyanın bilinen en eski tapınak kompleksi ve yapısı olarak gösterilen Göbeklitepe de bu bölgede yer almaktadır [3]. 2018 yılında UNESCO Dünya Mirası Listesi'ne dâhil edilen Göbeklitepe, uygarlık tarihinin yeniden yazılmasına önemli katkılar sağlamıştır [4].



Harita 1.1 Bereketli Hilal haritası [5]

Tarım ve hayvancılık, daha sonra uzun yıllar içerisinde sırasıyla Balkanlar üzerinden Avrupa'ya, Hindistan'a, Afrika'ya ve Britanya'ya yayıldı. Çin ve Amerika kıtasında ise tarım bağımsız olarak gelişti [1]. Tarım ve hayvancılığın gelişimi ile tüketim toplumundan üretim toplumuna geçme noktasında büyük bir devrim gerçekleşmiş oldu. Günümüzde hâlâ tarım ve hayvancılığın ötesinde bir üretimsel sürece geçemeyen topluluklar olduğu gibi, [6] numaralı çalışmaya göre dünyanın farklı kıtalarının bakir kalmış topraklarının bazı nadir kabileleri hâlâ avcı-toplayıcı olarak yaşam sürdürmeye devam etmektedir.

Tablo 1.1'de Tarım devriminin süreci ve etkileri gösterilmektedir.

Tablo 1.1 Tarım devrimi süreci ve etkileri [1], yazar tarafından derlenmiştir.

Dönem / Aşama	**Gelişme / Yenilik**	**Toplumsal ve Ekonomik Etki**
M.Ö. 10.000 – İlk Tarım	Yerleşik yaşama geçiş, buğday ve arpa ekimi	Avcı-toplayıcılıktan köy yaşamına geçiş
M.Ö. 7000 – Hayvan Evcilleştirme	Koyun, keçi, sığır, domuz evcilleştirme	Et, süt, deri ve iş gücü kaynaklarının artması
M.Ö. 4000 – Sulama Sistemleri	Nil, Fırat-Dicle gibi bölgelerde sulama	Verimlilik arttı, ilk büyük yerleşimler oluştu
M.Ö. 3000 – Sabana Geçiş	Tahta / metal uçlu saban kullanımı	Daha büyük araziler işlenebildi
M.Ö. 2000 – Tekerlekli Araçlar	Tarımsal taşımacılık gelişti	Ticaret kolaylaştı, ürün dağılımı genişledi
Orta Çağ – Üçlü Tarım Sistemi	Dönüşümlü ekim sistemi	Verimlilik ve köylü nüfusu arttı

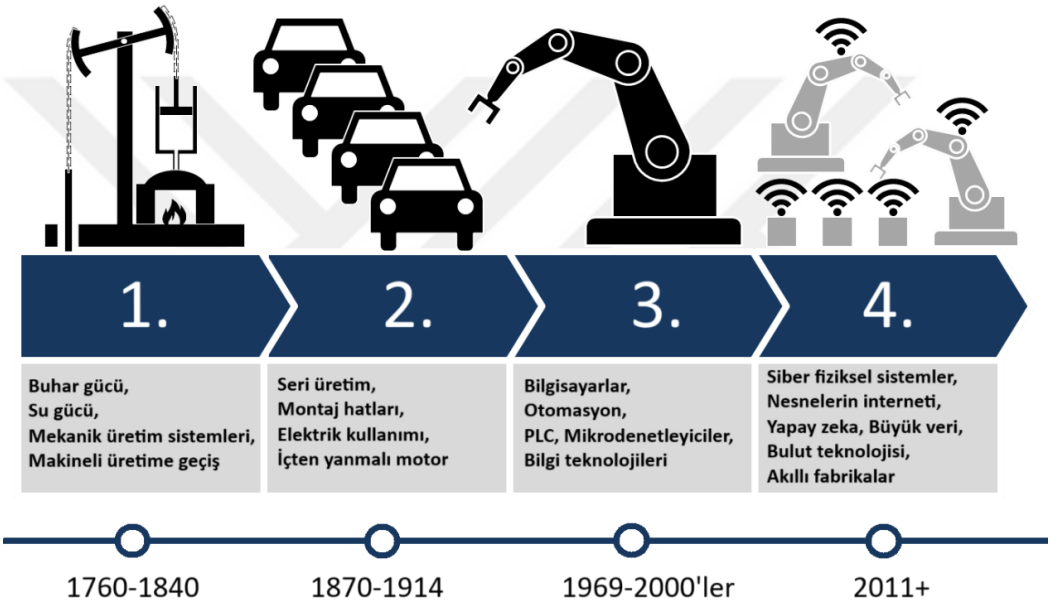
Sanayi toplumuna giden yolların taşlarını binlerce yıl içerisinde tarım ve hayvancılık süreci döşemiş oldu. Bu süreç, insanlara daha fazla yiyecek sağlayarak nüfus artışını mümkün kıldı. Köyler ve kasabalar kuruldu. Yerleşik hayat, tarımsal üretimin sürekliliğiyle birlikte gıda fazlası oluşturdu. Bunun sonucunda insanlık sadece yaşamı sürdürmeye değil, başka alanlara odaklanmaya da imkân buldu. Sanat, bilim, yazı, hukuk, din ve yöneticilik gibi kavramlar bu temelin üzerinde gelişti. Özel mülkiyet, toplumsal sınıflar ve yöneticiler ortaya çıktı.

Tarım toplumu sonrası yaşanan gelişmeler elbette ki sadece olumlu etkiler yaratmadı. Tarım sayesinde artan zenginlik, toprak mülkiyeti kavramını doğurdu ve bu da insanlar arasında eşitsizlik yaratmaya başladı. Toprak ve su kaynakları gibi stratejik öneme sahip doğal varlıklar için insanlar arasında çatışmalar çıktı, savaşlar başladı. Ormanlar kesildi, doğal alanlar tarıma açıldı ve çevre üzerinde insan etkisi artmaya başladı. Fakat bu olumsuz etkileri bile sanayileşme ihtiyacını tetiklemekteydi.

Tarım Devrimi, doğrudan Sanayi Devrimi'ni başlatmamıştır ancak onu mümkün kılan bütün toplumsal, ekonomik ve demografik dinamikleri uzun yıllar içerisinde tetiklemiştir. Eğer tarım keşfedilmeyip, yerleşik hayata geçilmemiş olsaydı, büyük medeniyetler, bilimsel gelişmeler ve nihayetinde sanayi toplumu oluşamazdı.

1.2 Sanayi Devrimi

Sanayi Devrimi, insanlık tarihinin en köklü dönüşümlerinden biridir. 18. yüzyılın ortalarında Büyük Britanya'da başlayan bu süreç, insan gücüne dayalı üretim biçimlerinin yerini makineleşmenin alması olarak tanımlanır. 'Birinci Sanayi Devrimi' denen ilk aşamada makineli üretime geçilmiştir. Özellikle tekstil sektöründe su gücü ve buhar makineleri kullanılarak üretim büyük ölçüde hızlandırılmıştır. Buhar makineleri sadece fabrikalarda değil, demiryolu taşımacılığında ve buharlı gemilerde de kullanılarak ulaşım ve ticareti derinden etkilemiştir. Şekil 1.2'de sanayi devrimlerinin süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Sanayi devrimleri süreci [7], yazar tarafından düzenlenmiştir.

İkinci Sanayi Devrimi, 19. yüzyılın sonlarına doğru başlayarak, teknolojik ilerlemelere daha da ivme kazandırmıştır. Elektrik enerjisinin sanayide kullanımı bu dönemde başlamıştır. Aynı zamanda çelik üretiminde kullanılan 'Bessemer Yöntemi' sayesinde demir-çelik sektörü büyük bir atılım gerçekleştirmiştir [8]. Petrole dayalı enerji sistemleri, içten yanmalı motorlar ve kimya sanayi bu devrimsel süreçte önemli rol oynamıştır. İletişim alanında da telgraf ve telefon gibi buluşlar sayesinde mesafeler kısalmış, bilgi akışı hızlanmıştır.

Henry Ford'un 1913 yılında geliştirdiği hareketli montaj hattı, seri üretim anlayışını devrimsel biçimde değiştirmiş ve İkinci Sanayi Devrimi'nin en önemli çıktılarından biri olmuştur [9]. Bu üretim hattı sayesinde otomobil üretimi hızlanmış ve maliyetler düşmüştür. Bu da kitlesel tüketim ve üretimin önünü açmıştır.

20. yüzyılın ortalarından itibaren başlayan ‘Üçüncü Sanayi Devrimi’ ise bilgi teknolojilerine dayalıdır. Elektronik sistemler, bilgisayarlar, mikroçipler ve dijitalleşme bu dönemin merkezindedir. İlk bilgisayarların sanayide kullanılmaya başlanmasıyla birlikte üretim süreçleri daha hassas, hızlı ve verimli hâle gelmiştir. Otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması, robotik kolların üretim hatlarında çalışmaya başlaması ve internetin gelişimi, bu devrimi şekillendiren temel faktörler arasında yer alır. Aynı zamanda yazılım destekli üretim sistemleri, yani CAD/CAM gibi teknolojiler, tasarım ve imalat süreçlerinin dijital ortama taşınmasına olanak sağlamıştır. Bu dönüşüm sadece üretimi değil, toplumu, iş gücünü ve günlük yaşamı da derinden etkilemiştir.

Şu an içinde bulunduğumuz dönem Üçüncü Sanayi Devrimi sonrası olup, günümüzde kullanılmakta olan birçok endüstriyel yöntem bu devrimin sonuçlarıyla örtüşmektedir. Bununla birlikte ‘Endüstri 4.0’ olarak da bilinen ‘Dördüncü Sanayi Devrimi’ yakın tarihte başlamış olarak kabul edilir. Aslında günümüzde insanlık bu iki sanayi devrimi arasındaki geçiş dönemini yaşamaktadır. Ancak ülkelerin ve endüstrilerinin gelişmişlik düzeyi ile Endüstri 4.0’a geçebilme hızları arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Endüstri 4.0 düzeyi, ülkelerin dijital altyapıları, sanayi politikaları, Ar-Ge yatırımları ve nitelikli iş gücü kapasiteleri doğrultusunda farklılık göstermektedir [10]. Almanya, Japonya, Güney Kore ve Amerika Birleşik Devletleri gibi gelişmiş ülkeler; yapay zekâ, nesnelerin interneti ve otomasyon teknolojilerinin entegrasyonu konusunda öncü konumda yer almaktadır. Çin, Hindistan ve Türkiye gibi yükselen ekonomiler ise dijital dönüşüm stratejileri geliştirerek sanayide dijitalleşme sürecine entegre olmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, ülkelerin Endüstri 4.0 seviyeleri; robot yoğunluğu, yüksek teknoloji yatırımları ve dijital iş gücü gibi çeşitli göstergelerle analiz edilmektedir [11]. Dolayısıyla üretimsel süreçler ve standartlar her ne kadar globalleşmiş olsa da tüm dünya için homojen bir Endüstri 4.0 geçiş süreci ve hızından söz edemeyiz.

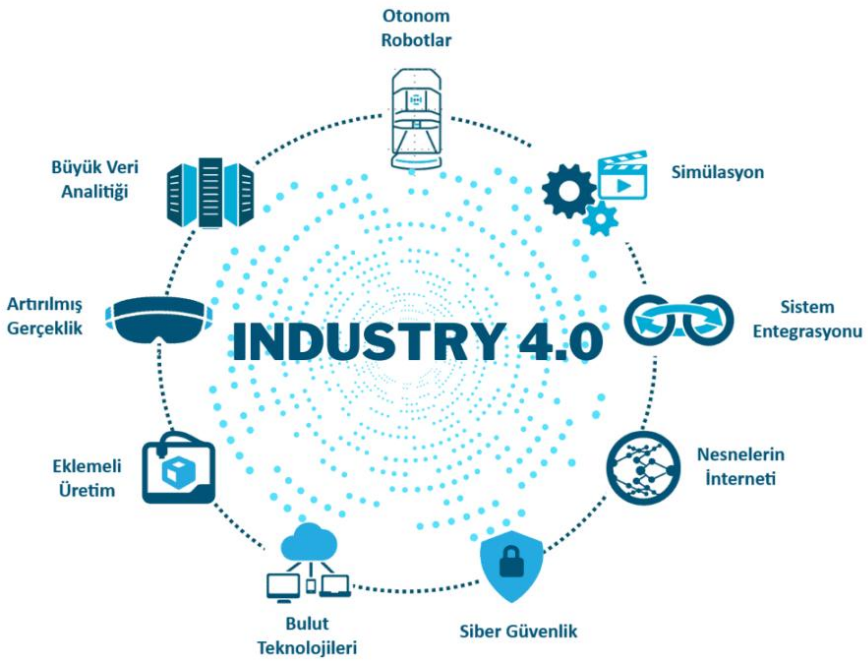
Ayrıca, Japonya tarafından 2016 yılında ‘Toplum 5.0’ kavramı ortaya atılmıştır. Bu kavram, genel anlamıyla bir gelişme vizyonu olarak ifade edilse de teknolojinin getirdiği sorunları çözme ve savunucuları tarafından Endüstri 4.0’ın odağa almadığı düşünülen insan ve değer yaratma boyutundaki eksiklikleri gidermeyi amaçlamaktadır [12].

1.3 Endüstri 4.0

Dördüncü Sanayi Devrimi ya da bilinen adıyla 'Endüstri 4.0', Almanya'nın karşı karşıya kaldığı yaşlanan nüfus ve azalan iş gücü gibi zorluklara yanıt olarak ortaya çıkmış bir dönüşüm hareketidir. Bu kavram ilk kez 2011 yılında dünyanın en önemli endüstri fuarı olarak gösterilen Hannover Ticaret Fuarı'nda dile getirilmiş ve içeriği burada kamuoyuyla paylaşılmıştır. Açıklamalarda, üretim tesislerinin dijitalleşmesi ve akıllı fabrikalar hâline gelmesiyle; daha az enerji, hammadde ve iş gücü kullanılarak daha yüksek verim elde edilmesinin hedeflendiği belirtilmiştir [13]. Bu dönüşümde; robot teknolojileri, makineler, sensör sistemleri ve yazılımlar temel bileşenler olarak öne çıkmaktadır. Gelişen teknolojilerle birlikte, fiziksel emeğin üretimdeki rolü azalırken, yapay zekâ, robotik sistemler ve yazılım tabanlı çözümler daha kritik hâle gelmiştir.

1.3.1 Endüstri 4.0'ın Teknolojik Bileşenleri

Endüstri 4.0 kavramı, yalnızca üretim teknolojilerinde bir yenilenmeyi değil, aynı zamanda tüm sanayi altyapısının dijital dönüşümünü ifade etmektedir. Bu dönüşümün gerçekleşebilmesi için birbirini tamamlayan çok sayıda teknolojik bileşenin bir arada çalışması gerekmektedir. Şekil 1.3'te bu bileşenler gösterilmektedir. Literatürde farklı kaynaklar, bu bileşenleri farklı şekillerde sınıflandırsa da temel yapı taşları benzerlik göstermektedir.



Şekil 1.3 Endüstri 4.0 bileşenleri [14], yazar tarafından düzenlenmiştir.

1.3.1.1 Otonom Robotlar

Otonom robotlar, sensörler ve yapay zekâ destekli yazılımlar aracılığıyla çevresel verileri algılayarak insan müdahalesi olmadan kendi kararlarını alabilen sistemlerdir. Bu robotlar, üretim hatlarında taşıma, montaj, kalite kontrol gibi görevleri üstlenebilir ve insanlarla güvenli şekilde birlikte çalışabilir. [15] numaralı çalışmaya göre bu robotların kullanımı, üretim sürelerini kısaltmakta, hata oranını azaltmakta ve iş güvenliğini artırmaktadır. Ayrıca, bu robotlar insan gücünün riskli ve tekrarlayıcı işlerden çekilmesini sağlayarak iş gücünün daha verimli alanlara yönlendirilmesine olanak tanır.

1.3.1.2 Simülasyon

Simülasyon, gerçek dünyadaki sistemlerin dijital ortamda modellenerek davranışlarının test edilmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Endüstri 4.0 kapsamında simülasyon, [16] numaralı çalışmaya göre özellikle üretim hatlarının, ürünlerin veya süreçlerin dijital ikizleri üzerinden sanal ortamda test edilmesini ve optimize edilmesini sağlar. Bu teknoloji sayesinde, bir üretim süreci başlamadan önce olası senaryolar analiz edilebilir, maliyetler azaltılabilir ve verimlilik artırılabilir. Özellikle karmaşık üretim sistemlerinin dijital ikizleriyle birlikte kullanılması, hata payını minimize ederek daha esnek ve uyarlanabilir üretim süreçlerine olanak tanır. Ayrıca, simülasyon yazılımları operatör eğitiminden bakım planlamalarına kadar birçok alanda kullanılmakta ve karar alma süreçlerini hızlandırmaktadır. Gerçek zamanlı verilerle entegre çalışabilen simülasyon sistemleri, üretim hattının anlık koşullarına göre sürekli olarak güncellenebilir yapıdadır.

1.3.1.3 Yatay ve Dikey Sistem Entegrasyonu

Yatay ve dikey entegrasyon, üretim sistemlerinin akıllı hâle gelmesinde kritik rol oynar. [17] numaralı çalışmaya göre dikey entegrasyon, üretim sahasından yönetim katmanına (örneğin ERP, MES) kadar tüm süreçlerin birbirine bağlı olmasını sağlar. Böylece, üretim hattı verileri üst düzey kararlara anlık olarak yansıtılabilir. Yatay entegrasyon ise farklı fabrikalar, tedarikçiler ve iş ortakları arasında veri ve süreç uyumunu hedefler. Bu çift yönlü entegrasyon yapısı, üretim zincirinin bütününde şeffaflık ve esneklik kazandırır.

1.3.1.4 Nesnelerin İnterneti

Nesnelerin interneti (IoT), fiziksel cihazların internet ağına bağlanarak birbirleriyle ve merkezi sistemlerle veri alışverişi yapabilmesini ifade eder. [18] numaralı çalışmaya göre IoT, üretim hattındaki makineler, sensörler ve kontrol sistemleri arasında sürekli bir veri iletişimi kurarak sürecin dijitalleştirilmesine olanak sağlar. Bu yapı sayesinde, üretim süreci içerisindeki her bir öge izlenebilir, kontrol edilebilir ve gerektiğinde uzaktan müdahale edilebilir hâle gelir. Bu durum sadece üretim verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bakım planlamasında öngörülebilirlik sağlar ve arıza sürelerini azaltır.

1.3.1.5 Siber Güvenlik

Endüstri 4.0'ın en kritik bileşenlerinden biri olan siber güvenlik, dijital sistemlerin ve verilerin kötü niyetli saldırılara karşı korunmasını sağlar. Üretim sistemlerinin internete bağlı hâle gelmesi, bu sistemleri siber tehditlere açık hâle getirmiştir [19]. Veri gizliliği, bütünlüğü ve sistemlerin sürekliliği için güçlü güvenlik protokollerinin uygulanması gerekmektedir. Aksi takdirde üretim süreçlerinin durması, verilerin ele geçirilmesi veya sistemin sabote edilmesi gibi ciddi sonuçlar doğabilir. Güvenli bir dijital altyapı, Endüstri 4.0 uygulamalarının sürdürülebilirliği için olmazsa olmazdır.

1.3.1.6 Bulut Teknolojileri

Bulut teknolojileri, verilerin fiziksel bir sunucuya bağlı olmadan internet üzerinden erişilebilen sanal ortamlarda depolanmasını ve işlenmesini sağlar. Endüstri 4.0 sistemlerinde bu teknoloji, [20] numaralı çalışmaya göre özellikle üretim verilerinin farklı lokasyonlardan gerçek zamanlı erişimini kolaylaştırır ve çoklu sistem entegrasyonuna olanak tanır. Ayrıca, yazılım ve donanım maliyetlerini azaltarak, firmaların yalnızca ihtiyaç duydukları kaynaklar kadar bilişim altyapısı kullanmasına imkân sağlar.

1.3.1.7 Eklemeli Üretim

[21] numaralı çalışma, Endüstri 4.0 bileşenlerinden olan eklemeli üretim ya da 3D baskı teknolojilerine dikkat çeker. Bu teknolojiler, nesnelerin dijital modeller üzerinden katman katman malzeme eklenerek üretilmesini sağlar.

Eklemeli üretim yöntemleri, geleneksel talaşlı imalat süreçlerine kıyasla daha az malzeme israfı ile çalışır ve karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretimini kolaylaştırır. Özellikle kişiselleştirilmiş ürün tasarımı, prototipleme ve küçük ölçekli üretimler için oldukça uygundur. Endüstri 4.0 çerçevesinde eklemeli üretim, tedarik zinciri maliyetlerini azaltmakta ve tasarım ile üretim arasındaki süreci hızlandırmaktadır.

3D yazıcı teknolojilerinin torna, freze, CNC tezgâhı gibi talaşlı imalat teknolojilerine kıyasla birtakım dezavantajları da vardır. Çalışma prensiplerinden dolayı talaşlı imalata nazaran daha yavaş çalışırlar. Hammaddeleri yalnızca belirli malzemelerdir ve bu malzemelerin mukavemeti birçok proses için endüstriyel gereklilikleri karşılayabilecek seviyede değildir. Elbette ki bu dezavantajlar günümüz için geçerli olup, gelecekte ortadan kaldırılabilir.

1.3.1.8 Artırılmış Gerçeklik

Artırılmış gerçeklik (AR), gerçek dünya görüntülerinin üzerine dijital bilgilerin bindirilmesi yoluyla kullanıcıya destek sunar. Bu teknoloji, özellikle üretim, bakım ve eğitim alanlarında önemli avantajlar sağlamaktadır [16]. Örneğin bir bakım teknisyeni, artırılmış gerçeklik gözlüğü aracılığıyla ekipmanın iç yapısını sanal olarak görebilir ve gerekli talimatlara anında erişebilir. Bu durum, teknik hataları azaltmakta ve üretim sürekliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda çalışan eğitimleri daha etkili ve interaktif hâle gelir.

1.3.1.9 Büyük Veri Analitiği

Büyük veri analitiği (Big data analytics), üretim süreçlerinden toplanan geniş veri kümelerinin işlenerek anlamlı bilgiler elde edilmesini sağlar. [22] numaralı çalışmaya göre büyük veri; hacim, hız ve çeşitlilik açısından geleneksel veri işleme yöntemleriyle yönetilemeyen veri kümelerini ifade eder. Endüstri 4.0 süreçlerinde her makineden, sensörden ve üretim adımından büyük miktarda veri toplanmaktadır. Bu verilerin anlamlı hâle getirilmesi için gelişmiş veri analitiği yöntemleri kullanılmaktadır. Büyük veri analitiği, bu bilgileri kullanarak üretim verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve karar alma süreçlerini iyileştirmek için stratejik bilgiler sunar. Örneğin, geçmiş üretim verilerine dayanarak üretim süreleri tahmin edilebilir, bakım planları optimize edilebilir ve kaynak kullanımı verimli hâle getirilebilir.

1.3.1.10 Siber Fiziksel Sistemler

Siber fiziksel sistemler, fiziksel üretim altyapılarının dijital sistemlerle bütünleşik çalışmasını sağlayan yapılardır. [23] numaralı çalışmaya göre, bu sistemlerde makineler yalnızca verilen komutları uygulayan pasif birer donanım olmaktan çıkar; çevresel verileri algılayarak durum analizi yapabilir ve belirli koşullar altında otomatik kararlar alabilir hâle gelirler. Bu, üretim süreçlerinin esnekliğini artırır ve daha karmaşık üretim senaryolarının gerçekleştirilmesini mümkün kılar. SFS, üretim sisteminin dijital ikizi gibi çalışarak gerçek zamanlı karar alma mekanizmalarıyla üretimin optimize edilmesine olanak tanır. Örneğin; bir montaj hattında, parça eksikliği gibi bir durumda SFS devreye girerek süreci durdurabilir ya da alternatif üretim yolunu devreye alabilir.

1.3.1.11 Yapay Zekâ

Yapay zekâ (AI), makinelerin insan benzeri düşünme, öğrenme ve karar verme yeteneklerini kazanmasını sağlayan teknolojiler bütünüdür. [24] numaralı çalışma, yapay zekânın özellikle büyük veri analitiği, öngörüsel bakım, kalite kontrol ve üretim planlaması gibi alanlarda kullanılmasına dikkat çeker. AI algoritmaları, üretimden elde edilen verileri analiz ederek hataları önceden tahmin edebilir, süreçleri optimize edebilir ve sistemin kendi kendini sürekli olarak geliştirmesine olanak tanır. Derin öğrenme, makine öğrenimi gibi alt alanlar sayesinde makineler geçmiş verilerden öğrenip gelecekte daha doğru kararlar alabilir hâle gelir. Bu durum; insan hatasını azaltırken, operasyonel verimliliği ise ciddi oranda artırır.

Son yıllarda yapay zekâ teknolojileri yalnızca uzmanlar tarafından endüstri ya da bilimsel çalışmalarda değil, birçok insan tarafından günlük yaşamda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Akıllı telefonlardaki, akıllı evlerdeki, otomobillerdeki veya bilgisayarlardaki yapay zekâ modelleri, insanların hayatlarını kolaylaştırma noktasında oldukça fazla kullanılmaktadır. En bilinen güncel örneklerden olan, ‘OpenAI’ firması tarafından geliştirilen; ‘ChatGPT’ gibi yapay zekâ modelleri, kullanıcıların günlük sorularına cevap verme, metin yazma ve bilgi edinme gibi işlemleri kolayca gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır. Bu gelişmeler, hem profesyonel hem de kişisel yaşamda verimliliği artırarak, dijitalleşen dünyada daha erişilebilir çözümler sunmaktadır.

2
TEST SİSTEMLERİ

2.1 Endüstriyel Test Sistemleri

Endüstriyel test sistemleri, bir ürün veya sistemin endüstriyel gereklilikler kapsamında ve endüstriye uygun yöntemlerle test edilmesi için geliştirilen sistemler olup, endüstriyel otomasyon süreçlerinin oldukça önemli bir aşamasıdır.

Endüstriyel otomasyon, üretim süreçlerinde insan müdahalesini en aza indirerek makineler, kontrol sistemleri ve bilgi teknolojileri aracılığıyla operasyonların daha verimli, tutarlı ve güvenli bir şekilde yürütülmesini sağlayan bir sistemler bütünüdür. Bu sistemler, üretim maliyetlerinin azaltılması, üretim hız ve kapasitesinin artırılması, kalite kontrolün iyileştirilmesi ve iş güvenliğinin artırılması gibi avantajlar sunar. Özellikle sanayileşmiş ülkelerde otomasyon sistemlerinin yaygınlığı, dijitalleşme ve Endüstri 4.0 vizyonunun da etkisiyle katlanarak artmaktadır [25].

Endüstriyel otomasyonun temel bileşenleri arasında sensörler, aktüatörler, elektropnömatik sistemler, kartezyen sistemler, kontrol sistemleri, görüntü işleme sistemleri, endüstriyel robotlar, haberleşme modül ve protokolleri, elektromekanik ürünler, gömülü donanım ve yazılımlar, PC tabanlı yazılımlar, PLC ve SCADA gibi bileşenler yer almaktadır.

Endüstriyel test sistemlerinin geliştirilmesi, kullanılması, iyileştirilmesi gibi görevlerde çalışan mühendisler genellikle ‘test mühendisi’ unvanıyla görev alır. Buna karşın yazılım test alanındaki mühendisler, geliştirilen yazılımlardaki hataları ayıklayıp, gerekli optimizasyon işlemlerini yaparak ‘test’ işlemini doğrudan kendileri sağlarlar. Dolayısıyla endüstriyel bir test sistemi geliştirmez veya kullanmazlar.

Son yıllarda bu ayrımı belirlemek amacıyla; farklı sektörlerde, endüstriyel test alanında çalışan mühendisler için görev aldıkları birimlere göre, ‘Donanım Test Mühendisi’, ‘Arge Test Mühendisi’, ‘Test Tasarım Mühendisi’, ‘Test ve Doğrulama Mühendisi, ‘Test Sistemleri Geliştirme Mühendisi’, ‘Test Sistemleri Mühendisi’, ‘Yapısal Test Mühendisi’, ‘Elektronik Test Mühendisi’, ‘Proses Test Mühendisi’, ‘Elektronik Kart Test Mühendisi’, ‘Test Sistemleri Mühendisi’, ‘Elektronik Sistem Mühendisi’, ‘Sistem Mühendisi’ vb. unvanlar kullanılmaktadır.

Endüstriyel test sistemlerinde amaç genellikle bir donanımı veya o donanımla ilgili yazılımsal süreçleri endüstriyel gereklilikler kapsamında test etmek üzerinedir. Bu test sistemleri bazen paketleme veya sevk öncesi final ürünlerde kullanılırken, bazen de yarı mamul testlerinde kullanılır.

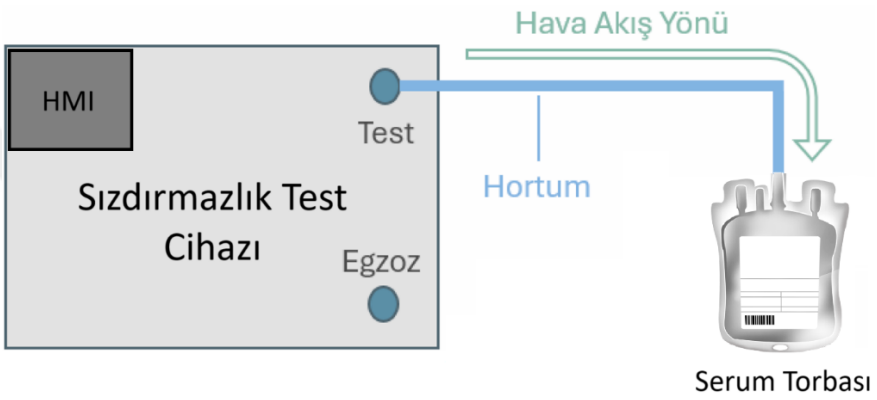
Endüstriyel test sistemleri, üretilen ürünün şartname kapsamında belirlenen özellikleri karşılayıp karşılamadığını, fonksiyonlarının doğru çalışıp çalışmadığını, üretim kalitesinin standartlara uygun olup olmadığını; çeşitli mekanik, elektriksel veya yazılımsal gereklilikleri taşıyıp taşımadığını, test limitleri içerisinde kalıp kalmadığını insan inisiyatifinden bağımsız bir şekilde güvenilir olarak denetler ve raporlar.

Bu test sistemleri sadece üretim süreçleri için değil, aynı zamanda bakım ve onarım süreçleri için de önem arz etmektedir. Çünkü bu sistemler, üretim esnasında oluşabilecek hata ve arızaların hızlıca belirlenmesine olanak tanıyarak, duruş sürelerinin en aza indirilmesini sağlar. Sonuç olarak bu teknolojiler raporlama ve izlenebilirliği sağlar, kalite güvence süreçlerini iyileştirir, maliyetleri azaltır ve üretim sürekliliğini artırır.

Endüstriyel testler genel olarak; elektriksel testler, yapısal testler, çevresel testler, ömür testleri, performans testleri, ICT/FCT testleri, EOL testleri vb. alt başlıklarla ifade edilmektedir. Her sektörün farklı tip test ihtiyaçlarına yönelik olarak bu başlıkları çoğaltmak veya kendi içerisinde alt başlıklara ayırmak mümkündür.

Test edilen ürünün fiziksel özelliklerine göre test ihtiyaçları da değişmektedir. Tamamen sarf malzemeden üretilmiş, elektronik aksamı veya yüksek teknolojik değeri olmayan bir ürün ile elektronik tabanlı bir ürünün seri üretim koşullarındaki test ihtiyaçları ve yöntemleri birbirinden farklıdır.

Örneğin, elektronik parçası olmayan bir ürün olarak medikal üretim sektöründe üretilen bir serum torbası; çeşitli fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve fonksiyonel testlerden; sterilizasyon doğrulama ve regülasyon uyum testlerinden geçer. Fiziksel testler olarak sızdırmazlık, dayanıklılık, kaynak kalitesi, boyut ve hacim testleri gibi testler uygulanır. Bu testlerden, sızdırmazlık testini serum torbası ürünü özelinde inceleyelim. Sızdırmazlık testleri için özel geliştirilmiş, endüstriyel tip sızdırmazlık test cihazları vardır. Bu cihazların kullanıcı arayüzünden test basıncı, dolum süresi, kaçak limiti gibi değerler parametrik olarak ayarlanabilir. Şekil 2.1'de bir serum torbasının sızdırmazlık testinin otomatik yöntemi temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Serum torbası sızdırmazlık testinin otomatik yöntemi

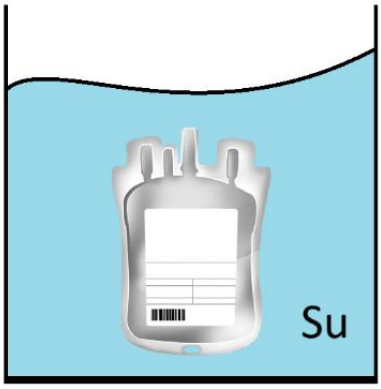
Bu sızdırmazlık test cihazları, pozitif basınç testi mantığıyla çalışır. Cihazın test hava çıkışı, test edilecek ürünün bir hava veya sıvı giriş/çıkış noktasına bağlanır. Test edilecek ürünün başka giriş/çıkış noktası varsa tamamen kapatılır. Cihaz, test edilen ürüne belirlenen basınçta hava basar ve bu basınç değeri ile test edilen ürün içerisinde oluşan basınç değerini ölçerek karşılaştırır. Bu basınç farkı, kaçak miktarıdır. Cihaz, test sonucunda kaçak miktarı ve test süresi gibi bilgileri de vererek, test edilen ürünün başarılı veya başarısız ürün olduğunu net olarak gösterir. Biriken hava, cihazın egzoz çıkışından otomatik olarak tahliye edilir.

Sızdırmazlık test cihazı, üzerindeki HMI ekranı ile kullanılabildiği gibi, PC'ye bağlanarak PC üzerindeki özel arayüzü ile de kullanılabilir. Burada karar verici test cihazının kendisidir ancak ürünü cihaza bağlama, testi başlatma, test sonucuna göre ürünü tahliye etme gibi prosesler operatör tarafından yapıldığı için bu gibi bir endüstriyel test sistemi yarı otomatik bir sistem olarak kabul edilir. Bu sistemi tam otomatik bir test sistemi hâline getirmek içinse diğer otomasyon teknolojileri devreye girer.

Sızdırmazlık test cihazları, çeşitli haberleşme ve bağlantı noktalarına sahip oldukları için bir otomasyon sistemine entegre olarak çalışabilirler. Yani bir PC veya PLC ile haberleşerek komut alabilir ve test durumunu bildirebilirler.

Serum torbasının üretim hattına entegre edilen bir otomasyon çözümüyle; sızdırmazlık test cihazı test hava çıkışı, serum torbası girişine otomatik olarak bağlanıp, serum torbasının diğer giriş/çıkışları otomatik olarak kapatılıp, cihaza gönderilen komut ve alınan dönüşlerle test sonucuna göre ürünün ilgili alan veya istasyona otomatik tahliyesi sağlanabilir. Böylelikle sistem tam otomatik bir test sistemi hâlini alır. Bununla birlikte; tüm test sonuçları, test ölçüm değerleri, test süreleri, test zamanı, varsa ürün barkodu, vardiya bilgisi, üretim adedi, hatalı/başarılı ürün oranı gibi veriler otomatik olarak raporlanabilir ve veri tabanına aktarılabilir.

Serum torbası sızdırmazlığının manuel olarak test edilmesi ise birçok yönüyle dezavantajlıdır. Şekil 2.2'de bir serum torbasının manuel sızdırmazlık test yöntemi temsili olarak gösterilmiştir. Operatör, ürüne hava doldurur ve tüm giriş/çıkışlarını kapatır. Ardından ürünü tamamıyla suya sokar. Baloncuk kontrolü yaparak kaçak durumunu gözle tespit etmeye çalışır. Bu yöntemde medikal bir ürün suya sokulmuş olur, hijyenik olmadığı gibi paketleneceği için steril bir şekilde kurutulması da gerekir. Medikal üretim proseslerine aykırıdır. Ayrıca operatör hata yapabilir. Sürekli benzer kontrolü yaptığı için bir süre sonra yeterli özeni göstermekte zorlanabilir. Özellikle çok küçük seviyedeki kaçakları tespit edemeyebilir. Kaçağın değeri sayısal olarak bilinmez. Otomatik bir raporlama olmaz. Sonuç olarak, bu örnek özelinde endüstriyel test sistemlerinin katma değeri ve önemi görülmektedir.



Şekil 2.2 Serum torbası sızdırmazlık testinin manuel yöntemi

2.2 Elektronik Üretim Testleri

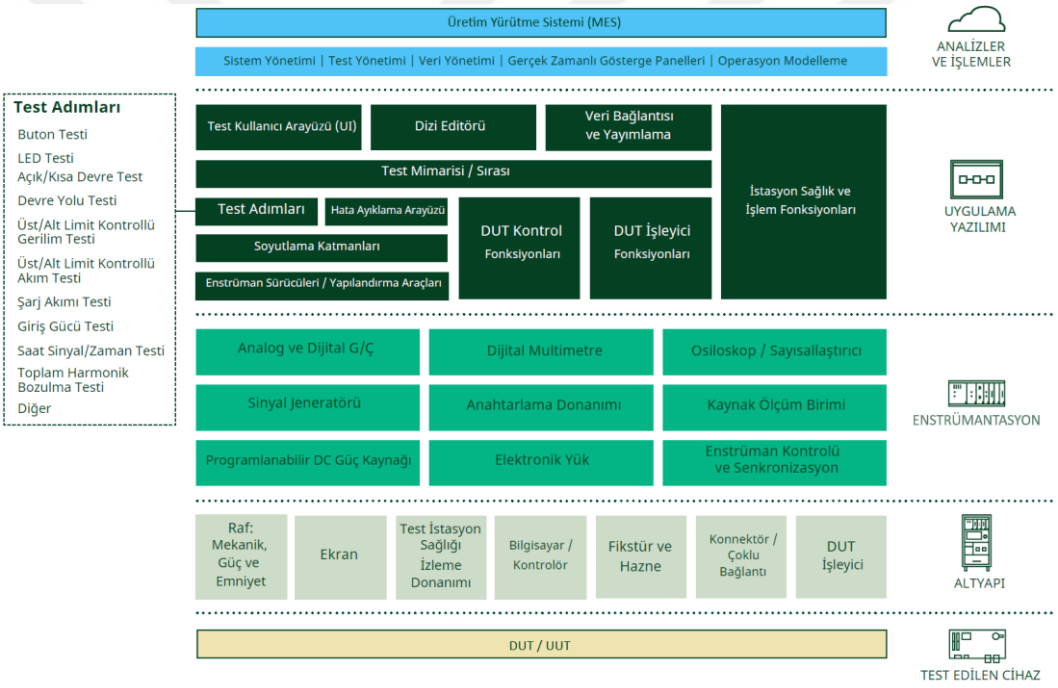
Elektronik tabanlı ürün ve sistemler, günümüzde savunma sanayi, beyaz eşya, otomotiv, medikal, telekomünikasyon, tüketici elektroniği, endüstriyel otomasyon ve enerji gibi farklı sektörlerin taşıyıcı gücü durumundadır. Pek çok alanda kullanılan elektronik bileşenler, küresel üretimin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. 2023 yılında, küresel elektrik ve elektronik pazarının büyüklüğü 3,74 trilyon ABD doları olarak gerçekleşmiş ve yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) %8,2 seviyesinde büyüme kaydetmiştir. Bu büyüme, pazarın her yıl istikrarlı bir şekilde genişlemesine katkıda bulunmuştur. Asya-Pasifik bölgesi bu sektördeki en büyük oyuncu konumundadır. Bölgedeki bu üstünlük, büyüyen üretim kapasitesi, gelişen teknoloji ve hızla artan iç pazar talebinden kaynaklanmaktadır. Küresel ölçekteki elektrik elektronik üretim hacminin 2027 yılına kadar yaklaşık 5 trilyon ABD doları seviyesine ulaşması beklenmektedir. Bu artış, yeni dijital teknolojilerin, özellikle IoT, 5G, ve yapay zekâ gibi alanlardaki yeniliklerin etkisiyle hızlanacaktır. Bu teknolojilerin, elektronik ürünlere olan talebi daha da artırması ve elektronik ekipman üretiminin büyümesine yol açması öngörülmektedir [26].

Elektronik üretimin bu denli karmaşık ve yüksek hacimli hâle gelmesi, üretim süreçlerinde işlevsellik ve kalite kontrol gibi test yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır. Ürünlerin sahaya sürülmeden önce belirli standartlara uygunluğunun doğrulanması, yalnızca teknik güvenilirliği sağlamakla kalmayıp, marka itibarı ve yasal uygunluk açısından da büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, elektronik üretim testleri, modern üretim hatlarında otomasyonla bütünleşmiş biçimde uygulanmakta ve üretim zincirinin ayrılmaz bir parçası hâline gelmektedir.

Elektronik üretim süreçlerine entegre edilen endüstriyel test sistemlerinin temel amacı, ürünün uygun şekilde çalıştığını doğrulamak ve olası üretim hatalarını erken aşamada tespit etmektir. Bu kapsamda, elektronik üretim testleri çeşitli düzeylerde uygulanmakta olup; bu düzeyler arasında elektronik kart üzerindeki komponent ve devre yollarının test edildiği In-Circuit Test (ICT) sistemleri, elektronik kartın veya elektronik kartlı ürünün fonksiyonlarını yerine getirip getirmediğini değerlendiren Functional Test (FCT) sistemleri iki temel test yaklaşımıdır.

Elektronik tabanlı ürünlerde kullanılan test sistemleri, ürün geliştirme sürecine geri bildirim sağlayarak üretim kalitesinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunmakta ve arıza oranlarının azaltılması suretiyle ekonomik kayıpların önüne geçmektedir. Dolayısıyla elektronik üretim test sistemleri hem teknik hem de ekonomik açıdan endüstriyel otomasyonun ayrılmaz bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 2.3'te elektronik üretimde kullanılan test sistemlerinin temel bileşenleri gösterilmektedir. Hiyerarşik bir sırayla bu bileşenleri ifade eden şekilde; test edilen ürün, test edilen ürünün sistemle bağlantısını sağlayan bir mekanik-elektrik-bilişim altyapısı, test ve ölçümleri gerçekleştiren çeşitli enstrümanlar, test sisteminin çeşitli aşamaları için görev alan uygulama yazılımları ve test süreçlerinin analizlerini yapan sistem bileşenleri bulunmaktadır.



Şekil 2.3 Test sistemleri bileşenleri [27], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Test sistemlerinde, test edilen ürüne 'test edilen birim' anlamına gelen 'UUT' veya 'test edilen cihaz' anlamına gelen 'DUT' gibi kısa isimler verilir. Her iki ifade de genel mantığıyla aynı anlama gelmek üzere sık kullanılır. Ancak teoride bu iki ifade arasında küçük bir fark vardır. DUT genellikle test edilen fiziksel donanımı ifade ederken, UUT hem donanım hem de yazılım içerebilen daha genel bir test birimini tanımlar. DUT/UUT bazen sadece bir elektronik kart olabilirken, bazen de bu elektronik kartın mekanik şasisi, kabloları, ekranı vb. olan bir final ürün de olabilir.

Test aşamalarında kullanılan ölçüm sistemlerinin doğruluğunu, tutarlılığını ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla 'MSA' olarak ifade edilen ölçüm sistemi analizi uygulanabilir. MSA'in temel amacı, ölçüm cihazlarından, operatörlerden veya ölçüm koşullarından kaynaklanan hata ve varyasyonları belirleyerek, ölçüm sonuçlarının gerçek ürün kalitesini doğru şekilde yansıtmasını sağlamaktır. Bu durum, ürünlerin doğru değerlendirilmesi ve üretim süreçlerinde hataların erken tespiti için kritik öneme sahiptir.

MSA uygulamalarında en çok kullanılan analiz yöntemleri arasında tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik çalışmaları yer alır. Tekrarlanabilirlik, aynı operatörün aynı cihazla aynı parçayı tekrar tekrar ölçmesi sonucu elde edilen ölçümlerin tutarlılığını ifade ederken, yeniden üretilebilirlik farklı operatörlerin aynı ölçüm cihazını kullanarak aynı parçayı ölçmesi sonucu oluşan varyasyonu gösterir. Bu iki faktörün analizi, ölçüm sisteminin toplam varyasyon içindeki payını ortaya koyar ve ölçüm sürecinin güvenilirliği hakkında önemli bilgiler sağlar.

Bunun yanında, MSA çeşitli istatistiksel yöntemler ve araçlarla desteklenir. Varyans analizi (ANOVA), 'Gage R&R' çalışmaları ve grafiksel yöntemler, ölçüm sistemindeki hataların kaynaklarının belirlenmesi ve iyileştirme faaliyetlerinin planlanmasında kullanılır. Bu sayede ölçüm sürecinde ortaya çıkan hata kaynakları minimize edilir ve üretim kalitesi artırılır.

MSA'in doğru uygulanması, ölçüm cihazlarının kalibrasyonu, ölçüm tekniklerinin standartlaştırılması ve operatör eğitimlerinin etkinliğinin artırılması gibi alanlarda da iyileştirmelere yol açar. Üretim süreçlerinde güvenilir ölçüm sonuçlarına dayanmak hem ürün kalitesinin sürekliliğini sağlar hem de maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlar. Ayrıca, müşteri memnuniyetinin artırılması ve rekabet gücünün korunması açısından da MSA'in önemi büyüktür.

Dolayısıyla, MSA sadece bir ölçüm cihazının doğruluğunu değil, tüm ölçüm sürecinin performansını değerlendirerek üretim kalitesine doğrudan katkı sağlar. Endüstriyel üretim ortamlarında düzenli olarak uygulanması, sürdürülebilir kalite yönetimi ve etkin karar alma süreçleri için önem arz etmektedir.

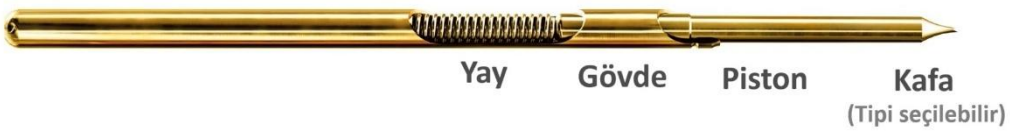
2.3 ICT/FCT Sistemleri

Baskılı devre kartı anlamına gelen ‘PCB’ terimi komponentsiz, dizgisiz boş bir baskılı devre kartını ifade eder. Montajlı baskı devre kartı ifadesinin kısaltımı ise ‘PCBA’ şeklindedir. Dizgisiz PCB’lerin devre yollarını test etmek için ICT testleri uygulanan test prosesleri olsa da, ICT/FCT testleri genellikle çalışır kapsamdaki dizgili PCBA’lere uygulanır. Ancak ülkemizde hem komponentsiz baskılı devre kartları için, hem de komponentli elektronik kartlar için ‘PCB’ ifadesi yaygın kullanım şeklidir. Komponentli, dizgili elektronik kartlar için ‘PCBA’ ifadesi teknik olarak doğru kullanım şekli olduğu için tez çalışmamız kapsamında bu ifade tercih edilmiştir.

ICT (Devre İçi Test) ve FCT (Fonksiyonel Test) sistemleri, elektronik kart ve elektronik kart tabanlı ürünlerin test süreçlerinde kullanılmaktadır. Bu test sistemleri, üretim hattından çıkan PCBA veya PCBA tabanlı elektronik ürünlerin doğruluğunu ve işlevselliğini otomatik olarak test etmek amacıyla kullanılır. Dolayısıyla ‘ICT/FCT sistemleri’ ifadesi yerine; ‘PCB test sistemleri’, ‘PCBA test sistemleri’, ‘Elektronik kart test sistemleri’, ‘Otomatik test sistemleri’, ‘Otomatik test ekipmanı’ gibi ifadeler de kullanılmaktadır.

Testler bazen tekil bir PCBA’e uygulanırken, bazense çoklu PCBA’lerden meydana gelen bir panel karta uygulanır. Ayrıca test edilen birim veya kısa adıyla UUT, her zaman bir PCBA veya PCBA panel olmak zorunda değildir. Elektronik kart tabanlı bir yarı mamul veya son ürün de olabilir.

Test işlemleri genellikle yüksek hassasiyete sahip özel test fikstürleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu fikstürler, PCBA üzerindeki test noktalarına temas eden çok sayıda yaylı prob içerir. Her bir prob, devre üzerindeki belirli bir test noktasına temas ederek ICT veya FCT operasyonunun gerçekleşmesine aracı olur. Şekil 2.4’te bir yaylı test probunun yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Yaylı test probu yapısı [28], yazar tarafından düzenlenmiştir.

ICT/FCT sistemleri sadece üretim sonrası kalite kontrol faaliyetlerinin bir parçası olmakla kalmayıp, aynı zamanda üretim sürecinin erken safhalarında hata tespiti ve süreç iyileştirme açısından da önemli katkılar sunmaktadır. Bu sistemler; lehim hataları, açık devreler, kısa devreler, eksik veya yanlış yerleştirilmiş komponentler, polarite hataları vb. birçok üretim kaynaklı kusurun hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Bu sayede, üretim bandında hatalı ürünlerin ilerlemesi önlenmekte, geri çağırma maliyetleri düşürülmekte ve genel ürün kalitesinde iyileşme sağlanmaktadır. Özellikle yüksek hacimli elektronik üretim yapan firmalar için, bu sistemlerin devreye alınması üretim verimliliği, kalite güvencesi ve izlenebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra, test sistemlerinin otomatikleştirilmiş yapısı, insan inisiyatifine dayalı hataların azaltılmasına olanak tanır ve üretimde tutarlılığın sağlanmasına katkıda bulunur.

Günümüzde ICT/FCT sistemlerinin tasarımı, yalnızca elektriksel test prensiplerine değil, aynı zamanda sistem mühendisliği, veri analitiği, yazılım otomasyonu ve üretim izleme sistemleri ile olan entegrasyona da odaklanmaktadır. Bu test sistemleri, esnek ve modüler mimarileri sayesinde farklı ürün gruplarına kolayca uyarlanabilmekte; aynı test altyapısı üzerinde farklı varyantlara sahip ürünlerin test edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu sistemlerde yer alan gelişmiş veri toplama ve analiz modülleri sayesinde, test sonuçları anlık olarak izlenebilmekte ve üretim performansına ilişkin istatistikler çıkarılabilmektedir. Bu veriler, üretim sürecinde sürekli iyileştirme ve kök neden analizi gibi kalite mühendisliği yaklaşımlarının uygulanmasına da olanak tanır. Bu yönüyle ICT/FCT sistemleri, yalnızca hata tespiti sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesi konusunda da görev almış olur.

Elektronik kart ve elektronik kart tabanlı ürün testlerini gerçekleştiren sistem ve makinelere kapsamına göre ICT makinesi, ICT cihazı, ICT sistemi, FCT makinesi, FCT cihazı, FCT sistemi, ICT/FCT makinesi, ICT/FCT cihazı, ICT/FCT sistemi, PCB/PCBA test makinesi, PCB/PCBA test cihazı, PCB/PCBA test sistemi, EOL test makinesi, EOL test cihazı, EOL test sistemi, elektronik kart test makinesi, elektronik kart test cihazı, elektronik kart test sistemi ve ATE (Otomatik Test Ekipmanı) gibi isimler verilir. Sonuç olarak bu makine tiplerinin her biri, test işlemlerini insan inisiyatifinden ve manuel proseslerden kurtararak otomatikleştirme görevi görür.

2.3.1 ICT Sistemleri

ICT sistemleri, elektronik devre kartları üzerindeki diyot, direnç, kapasitör gibi temel pasif komponentlerin yanı sıra bazı aktif komponentlerin de elektriksel açıdan test edilmesini sağlar. Bu sistemler, her bir komponentin doğru değerlerde ve doğru yönde devreye yerleştirilip yerleştirilmediğini kontrol eder. Testler, kartın enerjilendirilmediği bir aşamada gerçekleştirildiğinden, yalnızca elektriksel bağlantılar ve komponent değerleri analiz edilir. Bu sayede açık devre, kısa devre, eksik lehimleme, ters montaj veya tolerans dışı komponent kullanımı gibi üretim hataları tespit edilebilir.

ICT işlemleri özel olarak geliştirilmiş ICT ölçüm donanımları ve bu donanımlara ait yazılımlar aracılığıyla gerçekleşir. Bu donanımlarla yüzlerce test noktası üzerinden çok hızlı bir şekilde ICT işlemi gerçekleştirilebilir. Böylelikle seri üretimin şartı olan hız hedefleri yakalanabilir.

ICT sistemleri genellikle üretim hattının son aşamalarında, ürün enerjilendirilmeden önce devreye girer ve olası hataların erken safhada saptanmasına olanak tanır. Böylece sonraki aşamalarda meydana gelebilecek daha büyük arızaların önüne geçilerek hem zaman hem de maliyet açısından verimlilik sağlanır.

Test işlemi esnasında devreye düşük seviyeli gerilim ve akım sinyalleri uygulanarak komponentlerin elektriksel tepkileri ölçülür. Bu yaklaşım, testin hem güvenli hem de hassas biçimde yapılmasını mümkün kılar. Ayrıca test süresi genellikle saniyeler mertebesinde olduğundan, büyük hacimli üretim hatlarında üretim hızından ödün verilmeden kalite kontrol süreci sürdürülebilir.

Gelişmiş ICT sistemleri, yalnızca pasif komponentlerle sınırlı kalmayıp, bazı dijital entegre devrelerin temel mantık yapılarını da test edebilir. Sistemlerde kullanılan yazılımlar, farklı kart tasarımlarına özel test senaryoları oluşturulmasına olanak tanır. Buna ek olarak bazı modeller, boundary scan (JTAG) gibi teknolojilerle entegre şekilde çalışarak, özellikle yüksek yoğunluklu ve çok katmanlı kartlarda erişimi zor olan bölgelerde de test yapılmasını sağlar. Bu tür yetenekler, ICT sistemlerini karmaşık elektronik ürünlerin kalite kontrolü açısından vazgeçilmez hâle getirir.

2.3.2 FCT Sistemleri

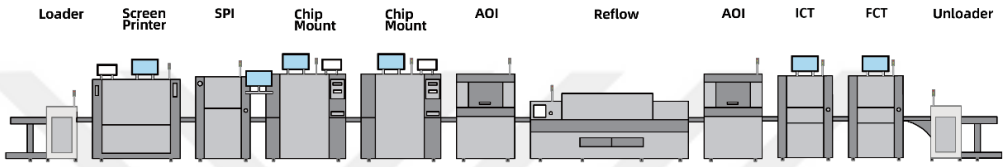
FCT sistemleri, elektronik kart veya ürünün fonksiyonlarını test etmek amacıyla kullanılır. Normal şartlar altında, ICT testlerini başarıyla geçen elektronik kartlara FCT testleri uygulanır. ICT'yi geçemeyen PCBA'ler devre olarak kusurlu olduğu için, tamiri sağlanıp ICT'yi geçmeden önce FCT'ye tabi tutulmaz. Bu yönüyle bu iki test yöntemi birbirini tamamlar. Fakat bu optimum test kurgusudur. Firmalar bazen üretim kalitelerine güvendikleri için, bazen böyle bir yatırım yapmak istemedikleri için, bazen de ürünlerinin elverişsiz olması gibi çeşitli nedenlerle ICT prosesini es geçip sadece FCT uygularlar. Ancak genellikle FCT mutlaka uygulanır. Çünkü PCBA'in doğru çalışıp çalışmadığını, nihai ürün beklentilerini karşılayıp karşılamadığını FCT belirler.

FCT sistemlerinin en ayırt edici yönlerinden biri, test sürecinde ürünün enerji altında çalıştırılması ve bu sırada fonksiyonel senaryoların simüle edilmesidir. Bu testler sayesinde, sadece komponentlerin doğru dizgisi değil, aynı zamanda ürünün beklendiği gibi çalışıp çalışmadığı da tespit edilir. Bu bağlamda, test sistemi genellikle ürünün gerçek kullanım koşullarını taklit edecek şekilde tasarlanır. Örneğin, bir otomotiv kontrol modülü test ediliyorsa; araca özgü sensör, aktüatör ve haberleşme yükleri sistem üzerinde taklit edilir. Böylece kart yalnızca bireysel sinyal seviyeleriyle değil, sistem bütünlüğü içinde değerlendirilmiş olur. FCT sistemleri çoğu zaman karmaşık donanım-yazılım entegrasyonları içerdiğinden, hem mühendislik hem de bakım süreçleri açısından daha yüksek uzmanlık gerektirir.

FCT sistemleri; yazılım fonksiyonlarının doğrulanması, sensör veya aktüatör tepkilerinin izlenmesi, akım, gerilim, güç gibi elektriksel değerlerin test edilmesi, iletişim protokollerinin (UART, CAN, I^2C vb.) test edilmesi ve buzzer, ekran, LED gibi elektronik ürünlerin fonksiyon kontrolü gibi test işlem ve görevlerini kapsamaktadır. Bu testler sayesinde, son kullanıcının karşılaşabileceği hataların henüz üretim aşamasında belirlenmesine olanak tanınmış olur. Böylelikle güvenilirlik ve kalite kontrol açısından yüksek standartlar elde edilir. Tez çalışmamız kapsamında üzerinde durduğumuz LED test yöntemleri de genellikle FCT sistemlerinde kullanılır. Çünkü üretim sektörlerinde bir LED'in fonksiyon testi çoğunlukla bir elektronik kart, elektronik kart tabanlı yarı mamul veya final ürün üzerinde gerçekleştirilir.

2.3.3 ICT/FCT Sistemlerinin Yapısı

ICT/FCT sistemleri; mekanik şasi, elektriksel veya yazılımsal altyapı, fikstür veya baskı teknolojisi gibi farklı yönleriyle çeşitlense de en temelde ‘inline’ ve ‘offline’ sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Inline test sistemleri; elektronik kart üretim dizgi hattına entegre olarak çalışan sistemlerken, offline test sistemleri; başka üretim makineleriyle genellikle doğrudan bağı olmayan, UUT’nin operatör veya nadiren bir robot tarafından test fikstür veya makinesine yerleştirildiği sistemlerdir. Şekil 2.5’te bir elektronik kart dizgi üretim hattı ve bu hat üzerinde çalışan inline ICT ve inline FCT makinelerinin temsili gösterimi bulunmaktadır.

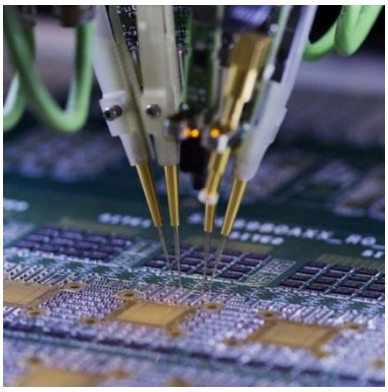


Şekil 2.5 PCBA üretim hattı [29], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Bir dizgi hattındaki tüm istasyonlar arasında konveyör bulunur ve kart, konveyörler üzerinden her bir istasyona aktarılarak üretim işlemi tamamlanır. Hat üzerindeki tüm makineler birbirleriyle ‘SMEMA’ gibi protokoller üzerinden haberleşir. İlk olarak dizgisiz PCB, üretim hattına ‘Loader’ makinesi ile beslenir. Ardından, ‘Screen Printer’ makinesi tarafından kart üzerine lehim pastası uygulanır. Sonrasında, uygulanan pastanın kalitesi ve doğruluğu, ‘SPI’ makinesi ile optik olarak kontrol edilir. Daha sonra, komponent dizme ve montaj aşamasına geçilir. Birinci ‘Chip Mount’ makinesi küçük ve hızlı yerleştirilebilen komponentleri, ikinci ‘Chip Mount’ makinesi ise daha büyük veya özel komponentleri kart üzerine yerleştirir. Bu elektronik komponent yerleşiminin doğruluğu, ‘AOI’ sistemi ile optik olarak olarak incelenir. Bu AOI, ‘lehim öncesi AOI’ olarak ifade edilir. Yerleştirilen komponentlerin lehimle tutturulması amacıyla kart, ‘Reflow’ fırınından geçirilerek lehimleme işlemi tamamlanır. Ardından, nihai montaj kalitesi ve lehim bağlantıları ikinci AOI ile tekrar optik olarak denetlenir. Bu AOI ise ‘lehim sonrası AOI’ olarak ifade edilir. Görsel kontrollerin ardından, kart üzerindeki elektriksel bağlantıların ve komponentlerin doğruluğu ICT makinesi ile test edilir. Son olarak, kartın reel çalışma koşullarındaki fonksiyonları FCT makinesi ile test edilir. Tüm bu işlemler tamamlandığında, üretim hattından çıkan PCBA’ler, ‘Unloader’ aracılığıyla toplanarak bir sonraki aşamaya aktarılır.

Inline sistemlerde PCBA, konveyör üzerinden test istasyonuna geldiğinde sensörlerle algılanır ve özel olarak tasarlanmış bir fikstür üzerine otomatik olarak yerleştirilir. Bu fikstürde yer alan yaylı test probları, PCBA üzerindeki tüm test noktalarına aynı anda temas edecek şekilde hizalanmıştır. Elektronik kart pozisyona geldiğinde, pnömatik veya elektrikli bir mekanizma ile üst tabla aşağıya veya alt tabla yukarıya hareket eder ve problar PCBA'e baskılanarak elektriksel temas sağlanır. Test ünitesi bu bağlantılar üzerinden sinyal gönderip ölçümler alarak testleri gerçekleştirir. Test tamamlandığında baskı mekanizması geri çekilir, PCBA tekrar konveyörle tahliye edilir; eğer test sonucu başarılı ise bir sonraki prosese yönlendirilir, hatalı ise operatör müdahalesi gerekebilir veya otomatik olarak hata hattına ayrılır. Bu çalışma prensibi küçük değişikler olabilmekle birlikte tüm inline sistemler için aynıdır. Dizgi hattının altyapısı ve çalışma mantığı sebebiyle çeşitli inline ICT/FCT sistemler arasında majör farklar olmaz. ICT/FCT sistemleri arasındaki yapısal farklılıklar daha çok offline sistemler için geçerlidir.

ICT/FCT sistemlerinde kullanılan bir diğer teknoloji ise uçan prob anlamına gelen 'flying probe' test sistemleridir. Bu sistemlerde, tüm test noktalarına aynı anda temas edebilen sabit yerleşimli probların olduğu değiştirilebilir fikstür teknolojisi yoktur. Bunun yerine sistemde iki veya daha fazla hareketli prob bulunur. Bu problar oldukça hızlı bir şekilde PCBA üzerindeki test noktalarını temas ederek gezer ve testlerin yapılmasını sağlarlar. Tüm koordinatlar ve yapılacak testler önceden programlanır. Böylelikle PCBA'e özel olarak fikstür üretimi ihtiyacı ortadan kalkar. Ancak özellikle çok fazla test noktasının olduğu elektronik kartların yüksek adetli üretimlerinde, tüm test noktalarına paralel temas edilebilen geleneksel fikstür teknolojisine göre daha yavaş kaldıkları için daha az tercih edilirler. Şekil 2.6'da flying problar ve test edilen bir elektronik kartın temas anı gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Flying prob test sisteminde problar ile elektronik kart teması [30]

ICT ve FCT makineleri ayrı olabildiği gibi, tek makinede her iki test yönteminin uygulandığı sistem tasarımları da mevcuttur. Buradaki kritik nokta, yüksüz kontrol yapan ve elektriksel dayanıklılığı düşük olan ICT ölçüm modüllerini, yük altında yapılan FCT testlerinden mutlaka izole etmek gerektiğidir. Çünkü fonksiyon testleri sırasında uygulanan gerilim ve çekilen akımlar, yükseklik değerine de bağlı olarak ICT modüllerine zarar verebilmektedir. Tıpkı bir manuel multimetrenin, direnç ölçüm modundayken gerilim ölçümü amaçlı kullanılmaya çalışıldığında zarar görebileceği gibi. Yani bu durum cihazın ölçüm prensibi ve devre yapısıyla ilgilidir.

Ayrıca, fonksiyon testinden çıkmış bir elektronik kart, deşarj edilmeden ICT sistemine sokulmamalıdır. Çünkü FCT sırasında kapasitörleri yüklenen elektronik kartın kapasitörlerindeki yük, ICT ölçüm modüllerine zarar verebilmektedir.

Savunma ve havacılık sanayisinde kullanılan test sistemleri genellikle raf şasi tipli ATE sistemler olurken; beyaz eşya, otomotiv, telekomünikasyon ve tüketici elektroniği gibi sektörlerde ise geleneksel dikey baskı tipli ICT/FCT sistemleri daha çok tercih edilmektedir. Bu ayrımın sektörler arası kullanım alışkanlıkları ve ticari sebeplerin haricinde teknik ve üretimsel sebepleri de vardır. Savunma sanayisindeki elektronik kart ve ürünler genellikle diğer sektörlere nazaran daha pahalıdır. Bununla birlikte, üretim adetleri de diğer sektörlere göre daha düşüktür.

Dolayısıyla test sisteminin olası bir arızayı tespit etmesi durumunda, test edilen ürüne test sistemi üzerinde yük altında müdahale edebilmek istenebilir. Aynı şekilde, kart üzerinde yapılacak bir geliştirme çalışması için de test sisteminin aktüel olarak kullanılabilmesi istenir. Bir başka deyişle test sisteminin, üretim hızı hedefini yakalaması beklentisinin yerine, bakım-onarım ve geliştirme süreçlerinde kullanılması beklentisi daha baskındır. Yani esasında test sisteminin birincil amacı üretim değil, laboratuar çalışmaları olabilmektedir.

UUT'nin sistemle teması otomatik bir yapıda olmayabilir. UUT'nin, üzerindeki konnektörler üzerinden kablolar ile manuel olarak sisteme bağlanması, testin bu şekilde gerçekleştirilmesi gerekebilir. Raf şasi tipli ATE sistemler bu gibi ihtiyaçlar için genellikle daha elverişli bir altyapıya sahiptir. Bununla birlikte, dikey baskı ihtiyacı olması durumunda da raf şasi tipli test sistemlerini kullanmak mümkündür. Sistemin, fikstür yerleşim alanı üzerine manuel baskı tipli bir dış ünite bağlanarak, UUT'yi manuel dikey baskı ile jigli bir yapıda test etmek de mümkündür.

Süreç içerisinde oluşabilecek farklı ihtiyaçlara istinaden sisteme eklenmesi gerekebilecek yeni ölçüm ve test donanımlarının modüler olarak eklenebilme kolaylığı gibi sebeplerle de raf şasi tipli sistemler tercih edilmektedir. Şekil 2.7'de raf şasi tipli bir ATE örneği gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Raf şasi tipli bir ATE [31], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Test sistemlerinin PCI yorumu olarak National Instruments (NI) şirketi tarafından geliştirilen, daha sonra başka global markaların da üretmeye başladığı, yıllar içerisinde de birçok farklı firmanın geliştirmeye başladığı PXI sistemlerin, raf şasi tipli ATE sistemlere entegrasyon elverişliliği de yüksektir. PXI modüller, tıpkı bir PC'ye takılan PCI kartları gibi bir kasa üzerinde birleştirilebilir. Böylelikle farklı PXI ölçüm ve test donanımlarının tek bir kasada modüler olarak birleştirilebilmesi mümkün olmaktadır. Neticede oluşturulan bu kasa, test sisteminin üst ölçüm sistemi hâlini alır. PC, tüm ölçüm ve test donanımlarının kontrolü için sadece bu kasa veya kasalarla haberleşir. Şekil 2.8'de tüm slotları dolu bir PXI kasa gösterilmektedir.



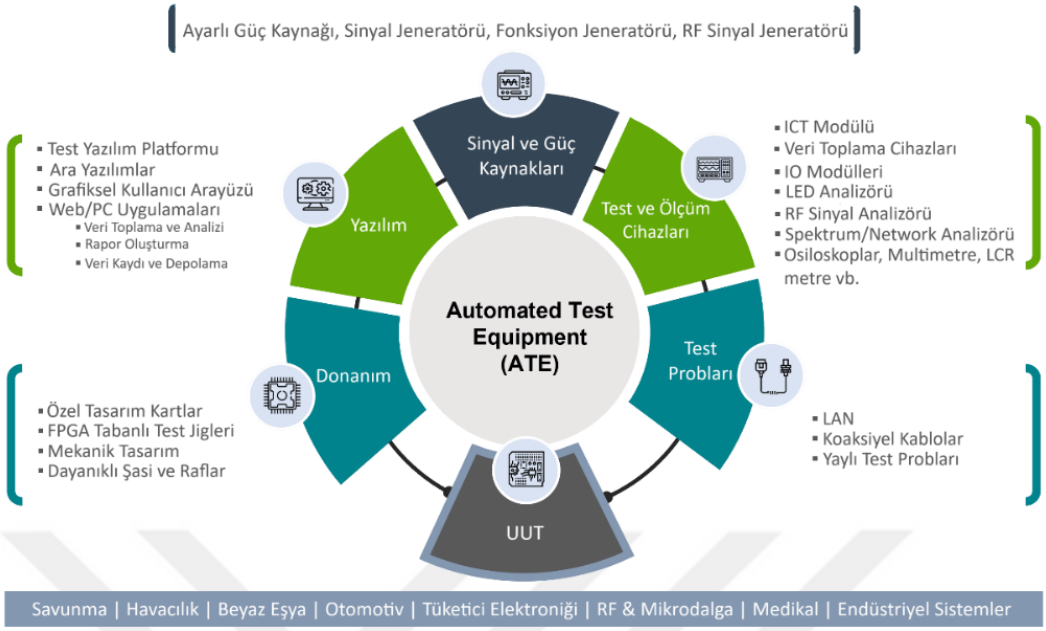
Şekil 2.8 Farklı ölçüm modülleri takılmış bir PXI kasa [32]

Dikey baskı tip şasili PCBA test sistemlerinde ise özel bir tasarım kurgulanmadıysa test sırasında UUT'e müdahale etmek genellikle mümkün olmamaktadır. Gerek PCBA dizgi hattıyla entegre çalışan inline sistemler olsun, gerekse de elektronik kartın sisteme operatör tarafından yerleştirildiği bağımsız çalışan offline sistemler olsun çoğu ICT/FCT sisteminde test sırasında ürüne erişebilmek mümkün olmaz. Özellikle PCBA'in ait olduğu ürünün şasisi içine montajlanarak bitmiş ürün hâlini aldığı durumlarda kullanılmak üzere tasarlanan EOL test makinelerinde, ürünün kablo veya konnektörü üzerinden manuel olarak sisteme bağlandığı senaryolar fazla olsa da ICT/FCT sistemleri genellikle jigli, otomatik temaslı yapıya sahiptir. Dolayısıyla baskı sistemli bu yapılar, aynı anda birden fazla test noktasına temas edebilmesi sebebiyle üretim adetlerinin çok yüksek olduğu sektörler için majör bir hız avantajı yaratmaktadır. Bu nedenle bu sistemler beyaz eşya, tüketici elektroniği ve otomotiv gibi sektörlerde sıklıkla tercih edilmektedir.

PCBA test sistemlerinin yapısı farklı bileşenlerden meydana gelmektedir. Bir elektronik kart test sistemi, PC veya nadiren PLC-HMI kontrolü tabanlı olabilir. PCBA test sistemlerinde gerek PCBA ile haberleşme ihtiyacı, gerek raporlama, gerek izlenebilirlik ve veri tabanı entegrasyonu, gerek yeni UUT ekleme isteği, gerekse de test adım ve limitlerine müdahale kolaylığından dolayı genellikle PC tabanlı sistemler tercih edilir. Dolayısıyla PC, sistemde 'master' olarak kurgulanır.

NI TestStand, NI LabVIEW, C#, .NET, Phyton gibi farklı yazılım dilleri ve platformları ile PC üzerinde test algoritması geliştirilir. Geliştirilen 'DLL' gibi ara yazılım paketleri test algoritması içerisinde ihtiyaca göre kullanılarak, test sistemi üzerindeki haberleşilebilir test ve ölçüm donanımları kontrol edilir. Test senaryosuna göre gerekli anahtarlamalar yapılır, gerekli noktalar gerekli değerlerde beslenir, gerekli komutlar PC üzerinden gönderilir, gerekli ölçümler alınır ve testler gerekli sınırlar içerisinde, gerekli olan sıralamaya göre yapılır. Sonucunda da gerekli olan raporlama yapılır.

Şekil 2.9'da bir ATE sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.9 ATE blok diyagramı [33], yazar tarafından düzenlenmiştir.

UUT'nin kapsamına göre değişmekle birlikte, çoğu endüstriyel test sisteminde olduğu gibi PCBA test sistemlerinde de sıklıkla otomasyon komponentleri kullanılmaktadır. Pnömatik ekipmanlar, motorlar, PLC veya diğer I/O modülleri, endüstriyel sensörler, endüstriyel konnektörler, elektromekanik devre elemanları, diğer pano ve şalt malzemeleri vb. ürünler PCBA test sistemlerinde sık kullanılır. PCBA test sistemleri, bu anlamıyla diğer otomasyon sistemlerinden çok farklı değildir. Keza çoğu endüstriyel otomasyon sisteminde bu komponentler bulunur.

Kullanılan donanımlar açısından test sistemlerini diğer otomasyon sistemlerinden ayıran ekipmanlar test ve ölçüm donanımlarıdır. Multimetre, güç kaynağı, sinyal jeneratörü, osiloskop, EGT cihazı, wattmetre, LCR metre gibi üçüncü parti ölçüm cihazları, çeşitli veri toplama (DAQ) modülleri, kameralar, özel sensörler, LED analizörü veya LDR kartları, ISP programlayıcı, özel tasarım arayüz kartları vb. donanımlar da test sistemlerinin ayırıcı bileşenlerindendir. Elbette ki bu ekipmanlar sadece test sistemlerinde kullanılmaz, daha az sıklıkta olmak üzere diğer otomasyon sistemlerinde de farklı görevler almak üzere kullanılabilirler.

Test işlemleri yalnızca elektriksel temasla gerçekleştirilmez. Çeşitli mekanik erişim ihtiyaçlarının da otomatik olarak sağlanması gerekir. Örneğin, UUT üzerinde bulunan butonlara test algoritmasına göre otomatik olarak basabilecek pnömatik silindirler sisteme eklenebilir. Anahtarların konumu otomatik olarak değiştirilebilir. Komütatör anahtarlar, motorlu yapılarla yine test algoritmasına göre otomatik olarak döndürülebilir. Konnektörlerin karşılıkları otomatik olarak takılabilir. PCBA üzerine, test sonucuna göre otomatik olarak markalama yapılabilir. PCBA üzerindeki barkod otomatik olarak okunabilir. Display veya LED testini yapmak için gerekli olan kamera veya analizör erişimi otomatik olarak sağlanabilir. Bu işlemlerden bazılarının operatör tarafından manuel olarak gerçekleştirildiği, çeşitli manipülatörler kullanılan sistemler de kurgulanmaktadır.

Test edilecek ürünlerin kapsamına göre bazen küçük yapıda masaüstü test sistemleri geliştirilirken, bazen de çok daha kapsamlı test makineleri geliştirilir. Makinenin baskı sistemi yine kapsama göre servo, pnömatik veya manuel tipli olabilir. Baskı tipi seçimi maliyet, kullanım tercihleri ve birtakım teknik ihtiyaçlar öngörülerek yapılır. Temelde tüm offline baskı sistemleri aynı işlevi görür ancak aralarında bazı farklar vardır.

Manuel tip baskı ünitesinde, operatör test edilecek kartı fikstüre yerleştirir ve üst baskıyı bir tost makinesi gibi manuel olarak aşağı indirir. Farklı üreticilerin hazır çözümleri olması sebebiyle manuel tip baskı üniteleri uygun maliyet, hızlı devreye alma ve kompakt tasarım gibi avantajlarından dolayı sık tercih edilir. Şekil 2.10'da manuel baskı tipli PCBA test sistemi örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Manuel baskı tipli ICT/FCT sistemleri (Yazar tarafından çekilmiştir.)

Pnömatik tip baskı ünitesinde, operatör kartı fikstüre yerleştirir ve genellikle çift el butonuna basılı tutarak üst baskıyı aşağı indirir. Bu sistemlerde güvenlik önlemi olarak genellikle ışık bariyeri de bulunur. Pnömatik tip baskı üniteleri, manuel sistemlere kıyasla daha otomatik kullanımlı olup sık tercih edilen sistemlerdendir. Şekil 2.11'de pnömatik baskı tipli PCBA test sistemi örnekleri gösterilmiştir.



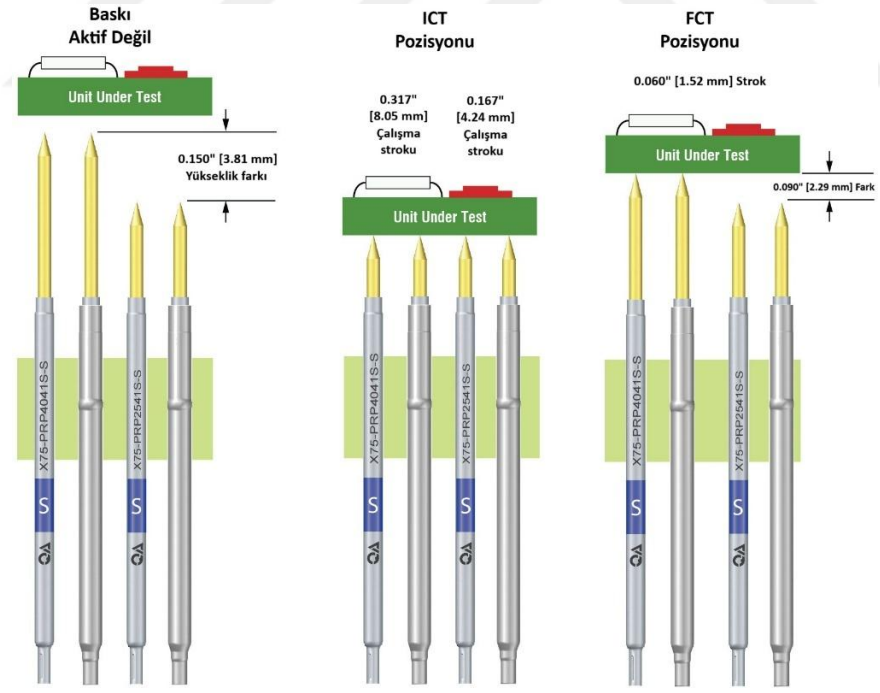
Şekil 2.11 Pnömatik baskı tipli ICT/FCT sistemleri (Yazar tarafından çekilmiştir.)

Servo motor tipli baskı ünitesinde, kartın yerleştirileceği çekmece yapısı dışarı çıkar; operatör, kartı çekmece üzerindeki çerçeveye yerleştirir; çekmeceyi kapatır ve arayüz üzerinden testi başlatır. Üst baskı; ayarlanan mesafeye, ayarlanan hız ve tork değerinde otomatik olarak ulaşır. Genel kullanımı bu şekildedir. Servo baskı üniteli offline modeller diğer baskı üniteli offline modellere göre daha otomatiktir. Ancak daha maliyetlidir. Ayrıca daha özel çözüm ihtiyaçları olan proseslerde kullanıldığı için manuel ve pnömatik presli offline modellere göre daha az tercih edilirler. Şekil 2.12'de servo baskı tipli bir PCBA test sistemi örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Servo baskı tipli bir ICT/FCT sistemi (Yazar tarafından çekilmiştir.)

Hem ICT hem de FCT sistemi olarak kullanılan bileşke makinelerde servo tipli baskı ünitesinin önemli bir avantajı vardır. ICT ölçüm modüllerine herhangi bir gerilim gitmemesi gerektiği için ICT testlerinin, FCT testlerinden izole olması gerekmektedir. Çoğu makinede elbette ki bu izolasyonu sağlayacak elektriksel önlemler alınır. Ancak muhtemel röle arızaları, makine/fikstür elektriksel altyapısı veya PCBA üzerindeki devre yapısı sebebiyle FCT probları üzerindeki gerilim ICT problarına gidebilir. Bu nedenle bu sistemlerde FCT probları daha uzun seçilirken, ICT probları daha kısa seçilir. Servo baskı önce ICT problarına temas edecek kadar aşağı iner. Bu esnada FCT problarında herhangi bir enerji yoktur. Servo baskı; ICT testi tamamlandıktan sonra, ICT problarına temas etmeyip sadece FCT problarına temas edecek seviyede yukarı kalkar. Ardından yük altında yapılan FCT testleri başlar. ICT problarına, dolayısıyla ICT modülüne elektronik kart artık temas etmiyordur. Diğer baskı tipli ünitelerde de bu kurguyu sağlamak mümkündür. Örneğin, çift aşamalı manuel baskı üniteleri vardır ve çoğunlukla bu amaçla kullanılırlar. Şekil 2.13'te çift aşamalı bir baskı sistemindeki ICT ve FCT prob temasları gösterilmiştir.

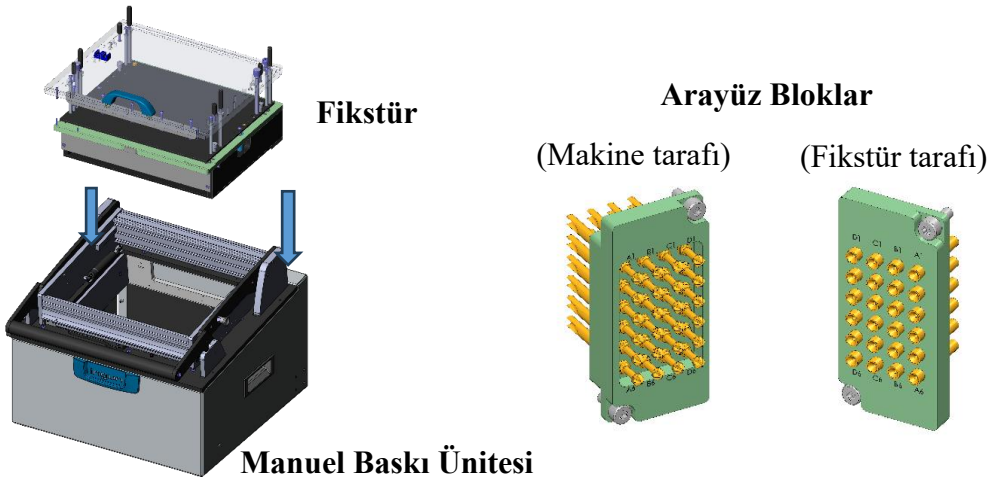


Şekil 2.13 Çift aşamalı prob temasları [34], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Servo baskı teknolojisinin bir diğer avantajı, test edilen ürünle alakalı olarak test esnasında oluşabilecek yalancı hatalarda baskı kısa mesafeli olarak otomatik şekilde yukarı kalkıp tekrar aşağı inebilecek şekilde test programı yazılabilir.

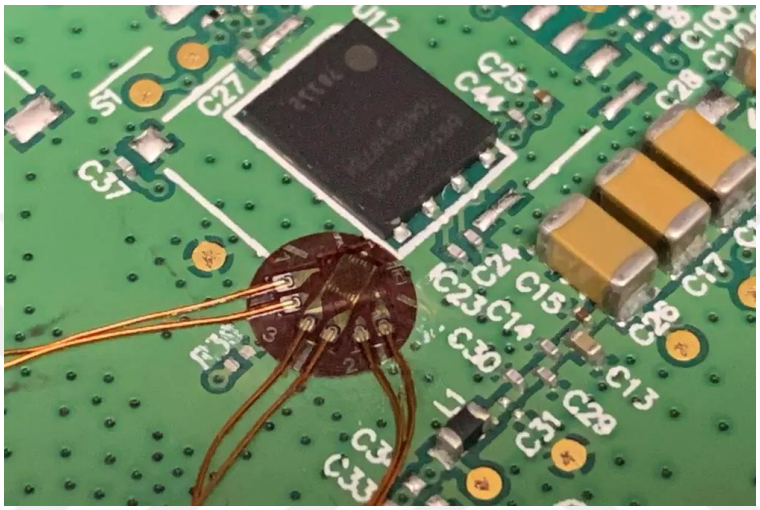
Test sonunda üst baskı otomatik olarak yukarı kalkar. Ayrıca, fikstür üzerindeki prob sayısı, yerleşimi ve bu probların güç değerlerine göre üst baskı tork değeri fikstür bazında parametrik olarak ayarlanabilir. Böylelikle operatör kaynaklı fikstür entegrasyonu veya panel yerleştirme hatalarında, fikstürün kırılmasının önüne geçilerek, ayarlanan tork değeri aşıldığında baskı otomatik olarak durur.

ICT/FCT sistemlerinin yapısı genellikle değiştirilebilir fikstürlü olarak kurgulanır. Her UUT'ye özel olarak makine veya sistem geliştirmek maliyet ve zaman açısından dezavantajlı olduğu gibi, çok fazla ürün tipinin üretildiği sektörlerde istenen esnekliği sağlamamaktadır. Dolayısıyla makinenin kapsamı, test edilmesi hedeflenen farklı UUT'lerin ihtiyaçları öngörülerek belirlenir. Birbirinden farklı her bir UUT için farklı bir test fikstürü üretilir. Aynı şekilde her bir UUT için ayrı bir test programı yazılır. Hangi ürün test edilmek isteniyorsa, o ürüne ait test fikstürü makineye kolaylıkla entegre edilir ve o ürüne ait test programı çalıştırılır. Bazı firmaların özel değiştirilebilir fikstür çözümleri olduğu gibi, özel tasarım olarak bu makine ve fikstürleri üretmek de mümkündür. Şekil 2.14'te, hazır bir manuel tip baskı ünitesi ve ham değiştirilebilir fikstür örneği gösterilmiştir. Bu fikstür, test edilecek ürüne göre tasarlanarak işlenir ve gerekli test prob, kovan ve diğer test ekipmanları montajlanarak kablolaması yapılır. Dış baskı ünitesi ise ister raf şasi tipli bir ATE'ye entegre edilir, istenirse de özel tasarım bir şaside kullanılır. Farklı UUT'ler için aynı makinede kullanılmak üzere farklı değiştirilebilir fikstürler üretilir. Fikstür, baskı sistemi içerisine yerleştirildiğinde, fikstür ve makine bağlantısı özel üretim elektriksel, pnömatik ve optik arayüz blokları ile otomatik olarak sağlanmış olur. Şekil 2.14'te elektriksel arayüz blokları örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Değiştirilebilir fikstür [35]-[38], yazar tarafından düzenlenmiştir.

ICT/FCT sistemlerinde; baskının uygulanması sırasında test edilen elektronik kartlara uygulanan mekanik kuvvetler, özellikle ince ve hassas yapıdaki kartlarda mikroskobik çatlaklara veya yapısal deformasyonlara neden olabilmektedir. Bu durum, devre kartlarının uzun vadeli dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Bu tür yapısal hasarların tespiti için en yaygın yöntemlerden biri 'strain gauge' (gerinim ölçer) testlerinin uygulanmasıdır. Şekil 2.15'te bir PCBA üzerine yerleştirilmiş strain gauge sensör örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Bir elektronik karta yerleştirilmiş strain gauge sensör [39]

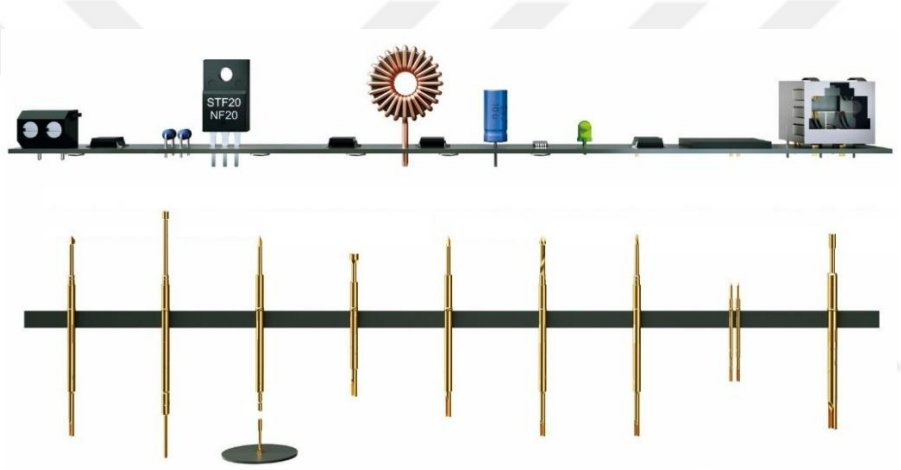
Strain gauge sensörleri, kart üzerindeki stratejik noktalara yerleştirilerek test jiglerinin uyguladığı mekanik gerilmenin miktarını gerçek zamanlı olarak ölçebilir. Sensörler bir DAQ modülüne bağlanarak, stresin oluştuğu an ve kök nedeni, grafik üzerinde tespit edilerek detaylı analiz sağlanabilir. Bu yöntemle kartın maruz kaldığı çekme, basma veya bükülme gibi mekanik kuvvetler tespit edilebilmektedir.

Strain gauge testleri sayesinde ICT/FCT sisteminin neden olabileceği olası hasarlar önceden belirlenebilir ve gerekli önlemler alınabilir. Örneğin, test probu yerleşimlerinin yeniden düzenlenmesi, fikstür baskı kuvvetlerinin optimize edilmesi veya çeşitli dayama ve destek noktalarının artırılması gibi çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. Özellikle yüksek katman sayısına sahip, ince ve kompleks PCBA tasarımlarında strain gauge verileri, test sürecinin güvenli aralıkta tutulup tutulmadığını değerlendirmek açısından kritik rol oynar.

Sonuç olarak, strain gauge testleri, elektronik üretim hattındaki ICT/FCT uygulamalarının kart yapısına zarar verip vermediğini anlamak için etkin ve hassas bir yöntem sunar.

2.3.4 ICT/FCT Sistemleri Fikstür ve Jig Teknolojisi

ICT/FCT sistemlerinde UUT ile sistemin bağlantısı UUT üzerindeki konnektörler üzerinden ara kablolarla manuel olarak gerçekleştirilebilir veya özel yaylı test problarının, PCBA üzerindeki test noktalarına otomatik teması ile sağlanabilir. Ancak PCBA'in tasarımı elverdiği ölçüde test problarıyla otomatik temas edilmesi optimum yöntemdir ve daha çok tercih edilir. Jigli yapıda olan bu sistemlerde, baskı tahriklendiğinde PCBA, bu yaylı test problarına doğru baskılanmış olur. Bu yaylı probların olduğu mekanik ve elektriksel altyapıya çoğunlukla fikstür, jig, iç ünite, değiştirilebilir kit gibi isimler verilirken, çivi yatağı anlamına gelen 'bed of nails' ifadesi de daha çok yurtdışında kullanılan ifadelerdendir. Şekil 2.16'da farklı tip test probları ile hizalanmış test edilecek bir PCBA temsili olarak gösterilmektedir.

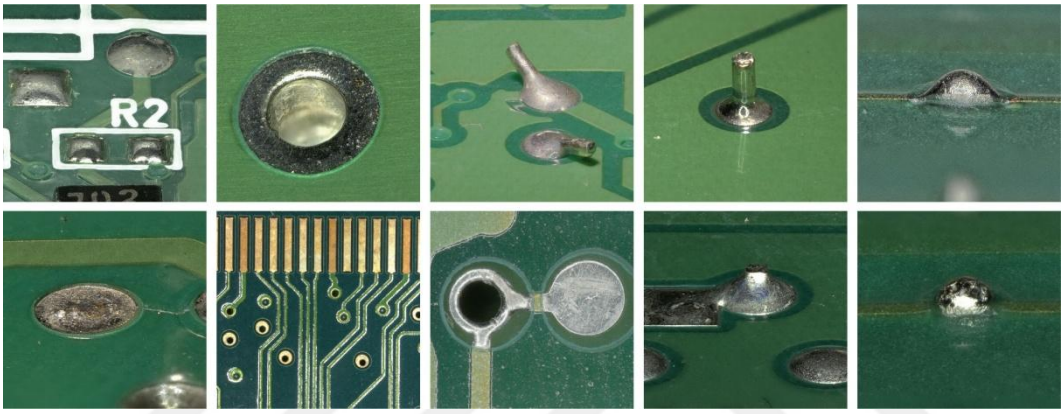


Şekil 2.16 Test probları ve PCBA [40], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Temas edilecek her bir nokta ve test edilecek ürünün fiziksel özelliklerine göre tipi özel olarak seçilen bu test probları, ICT/FCT sektörünün temel parçalarındandır. Test probları seçilirken dikkat edilmesi gereken önemli mekanik ve elektriksel kriterler vardır. Test probu seçimi hatalı olursa; temas problemleri, sık prob arızası, hatta UUT arızası gibi istenmeyen durumlar yaşanabilir.

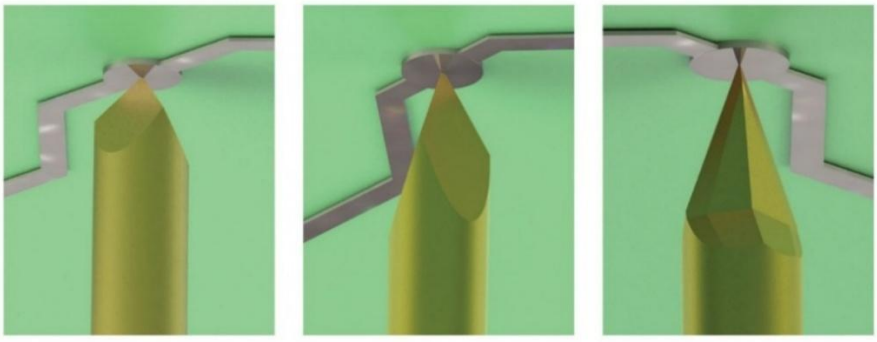
Temas edilecek test noktasının fiziksel özelliklerine göre test probunun kafa/uç/baş tipi seçilir. Sivri baş, lale baş, taç baş, tırtıklı baş, çukur baş vb. çok çeşitli uç tipleri vardır. Sivri tip problar en çok kullanılan problardır. Hatta ülkemizde test problarına bu sebeple 'test iğnesi' de denilir. Eğer PCBA üzerinde, kartın tasarımı aşamasında öngörülmüş bir test noktası (TP) varsa genellikle sivri uçlu problar tercih edilir. TP yüzeyi pürüzsüz ve düz olduğu için sivri baş prob kolaylıkla temas eder ve yüzeyde eğer flux varsa bu flux'ı da sivri ucu sayesinde delerek teması sağlar.

Temas edilecek test noktası her zaman için teste özel olarak ayırılmış bir test pedi veya düzgün bir TP olmayabilir. Bazen komponent bacaklarından, bazen deliklerden, bazen konnektör pim noktalarından, bazen de devre yolu üzerindeki herhangi bir noktadan temas sağlanması gerekebilir. Temas edilecek lehim ped düz yüzeyli olmayıp, tümsekli bir yapıda olabilir. Temas edilecek bölge analiz edilerek, uygun test prob uç tipinin titizlikle seçilmesi gerekmektedir. Aksi hâlde temas problemleri kaynaklı sistem duruşları yaşanabilir. Bu duruşlar, adeta zamanla yarışılan seri üretim şartlarında telafisi çok zor kayıplara yol açabilir. Şekil 2.17'de, PCBA üzerinde prob ile temas edilecek çeşitli temas hedefleri gösterilmektedir.



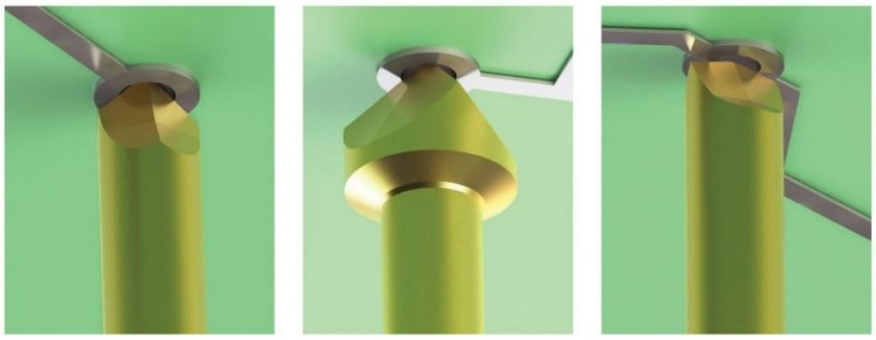
Şekil 2.17 Çeşitli temas hedefleri [41]

Şekil 2.18'de, PCBA üzerindeki TP'lere temas eden bazı sivri uçlu prob uç tipleri gösterilmiştir. PCBA'in delinmesi istenen bir durum değildir. Dolayısıyla düz veya oval uçlu problar da şekildeki gibi düzgün yüzeyleri olan test pedleri için kullanılabilir. Ancak PCBA üretiminde lehimleme aşamasında kullanılan flux malzemesi yalıtkandır. İletken olarak bilinen lehim pastasının içeriğinde de belirli bir oranda flux bulunur. Bu nedenle temas noktalarında flux varsa sivri uçlu problar tercih edilir. Sivri uçlu problarla flux delinerek sağlıklı bir temas sağlanmış olur.



Şekil 2.18 Bazı sivri uçlu prob tipleri ile dokunulan test noktaları [41]

Şekil 2.19'da, PCBA üzerindeki deliklere temas eden bazı prob uç tipleri gösterilmiştir.



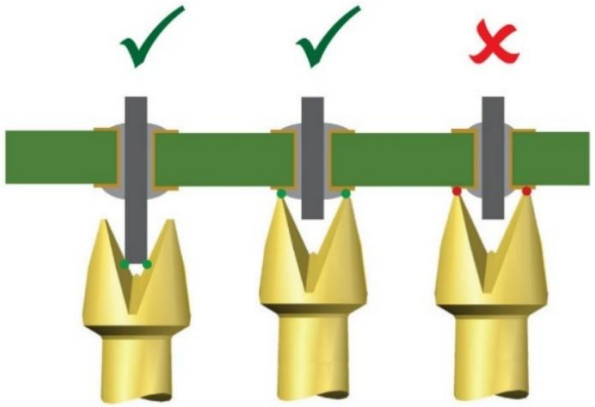
Şekil 2.19 Çeşitli delikli temas hedefleri ve prob seçimleri [41]

Şekil 2.20'de, PCBA üzerindeki komponent bacaklarına temas eden bazı prob uç tipleri gösterilmiştir.



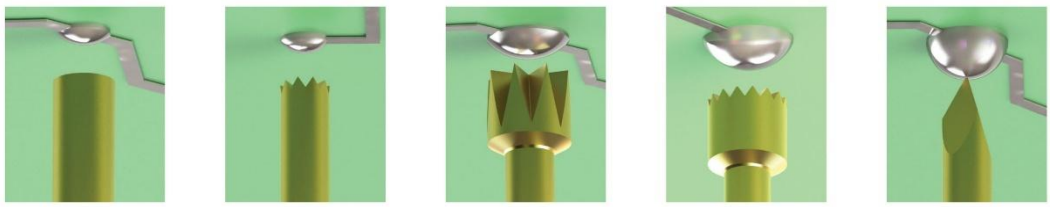
Şekil 2.20 Çeşitli komponent bacağı temas hedefleri ve prob seçimleri [41]

Komponent bacağı temasında, bacak uzunluğu ve bacak formu da prob kafa/uç tipi seçilirken dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Aynı şekilde, bacak etrafında temas edilebilecek ped varsa uygun bir test probuyla bu ped kısmı da temas için hedef alınabilir. Şekil 2.21'de uzun ve kısa bacaklar için bazı başarılı ve hatalı prob uç tipi seçimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.21 Komponent bacağı temasında hatalı ve başarılı prob seçimleri [41]

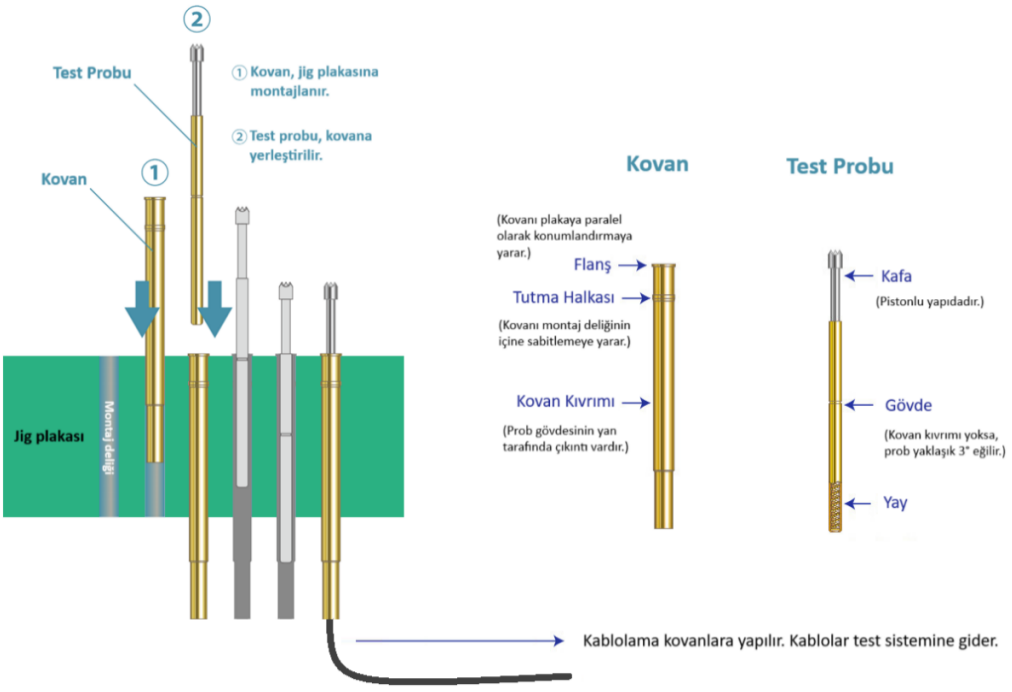
Şekil 2.22'de bombeli test noktaları için bazı prob uç tipi seçimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.22 Çeşitli bombe tip temas hedefleri ve prob seçimleri [41]

Test sisteminin verimli kullanımının sağlanması için; test problarının yerleştirildiği prob kovanları da vardır. Bu kovanlar, tıpkı test probları gibi temel parçalardandır. Kablolama test kovanlarına yapılır. Böylelikle, oluşabilecek bir prob arızasında kablaj müdahalesi gerekmeden prob değiştirilebilir. Bu kovanların test jig plakasına çakılması veya geri sökülmesi için kullanılan özel montaj aparatları, test prob kovanlarına kablolama yapacak özel kablaj aparatları gibi yardımcı ekipmanlar da vardır. Ayrıca, bir test fikstüründe PCBA'i fikstüre yerleştirirken yerleşimi kolaylaştıran ön merkezleme pimleri, PCBA'i test problarına baskılayan baskı pimleri, baskıya karşılık PCBA'e dayanan alt dayamalar, PCBA'i fikstüre referanslayan referans pimleri gibi parçalar da sıklıkla kullanılmaktadır.

Şekil 2.23'te test probları ve kovanlarının birbirlerine ve test jig plakasına montaj işlemleri aktarılmış, test sistemine giden kablolamanın mantığı gösterilmiştir.



Şekil 2.23 Test probları ve kovanlarının teknik kullanım detayları

Test prob ve kovanlarının farklı çap ölçüleri olan versiyonları vardır. Temas edilecek noktaya göre, doğru çapta prob ve kovan seçimi yapılmalıdır. Jig plakasına delinen deliğe kovan montajlandığı için belirleyici çap genellikle kovan çapıdır. Kovan çapı seçilirken sadece test noktası baz alınmaz. Birbirine çok yakın test noktaları için plaka üzerine delinecek kovan delikleri birbirini patlatabileceği için, test noktası çapı daha büyük olmasına rağmen küçük çapta prob ve kovan seçimi yapmak gerekebilir.

Test problarının uzunluğu ve yaylanma strok mesafeleri de kullanılacağı UUT ve fikstür yapısına göre dikkatle seçilmelidir. Elektronik kart üzerindeki komponent yükseklikleri, baskı sistemi ve fikstür yapısı, kartın tek yüzeyinde veya her iki yüzeyinde TP olması gibi parametreler belirleyici unsurlardır.

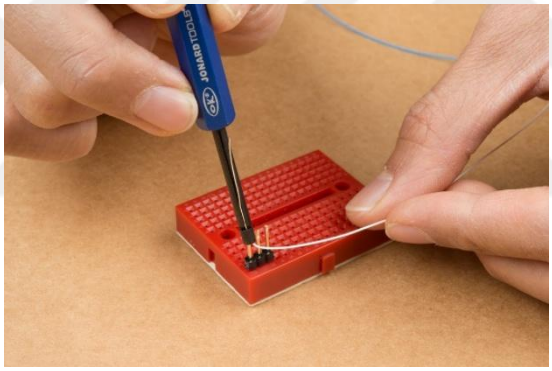
Test probları seçiminde test probunun yay kuvvetine de dikkat edilmesi gerekmektedir. Özellikle çok fazla prob olan fikstürlerde, tüm probların toplam yay kuvveti üst baskı kuvvetini geçebilir. Böyle bir durumda üst baskı, probların yay kuvvetini yenemez ve baskı gerçekleşemez. Bu nedenle test problarının sadece kuvvet özellikleri farklı olan versiyonları da vardır. Ayrıca fikstürdeki prob yerleşimiyle alakalı olarak ağırlık merkezi değişeceği için, baskı sistemi kuvveti ile toplam yay kuvvetini karşılaştırmak tek başına yeterli bir analiz değildir. Ek olarak, ürün bilgilerinde belirtilen yay kuvvetinin her zaman çalışma strokunu ifade ettiği unutulmamalıdır. Şekil 2.24'te test probunun temsili başlangıç pozisyonu, çalışma stroku ve maksimum stroku gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Test probu çalışma stroku ve maksimum strok [42]

Çalışma strokunun kesin bir tanımı olmayıp, en sık kullanılan problarda maksimum strokun %60-80'i arasındadır. Uluslararası standartlara göre ICT problarının çalışma stroku, maksimum strokun %67'si, yani üçte ikisidir [42].

Test prob kovanlarının, kablolama için ‘wire wrap’ olarak ifade edilen sarmal kovan ve lehimleme yapılabilen standart lehim kovan tipleri vardır. Sarmal kovanların kablolaması, özel sarmal kablolama araçları ile yapılır. Bu bağlantı tipinde lehim kullanılmaz; kablo, kovanın sarmal bağlantı ucuna kablolama aracı yardımıyla sıkıca sarılır. Sarmal kablolama araçlarının manuel olarak kullanılan tipleri olduğu gibi, elektrikle çalışan otomatik kullanımlı tipleri de vardır. Şekil 2.25’te bir erkek pin header’a, manuel bir kablolama aracı ile kablo sarılması işlemi örneği gösterilmektedir. Lehim kovan kullanımında ise kablo, kovanın lehim ucuna lehimlenir. Fikstürde test edilecek olan UUT’lerin elektriksel özellikleri veya kullanıcının kullanım tercihlerine göre kovanın bağlantı tipi seçimi yapılır. Örneğin ICT ve programlama işlemlerinde, lehim küçük bir direnç yaratabileceği için sarmal kablolama daha çok tercih sebebidir. Sarmal kovana sarılabilecek kablolar daha çok ince telli tek damarlı kablolar olduğu için, akım dayanıklılığı sağlanması amacıyla FCT uygulamalarında standart lehim kovan kablolama daha çok tercih edilir.

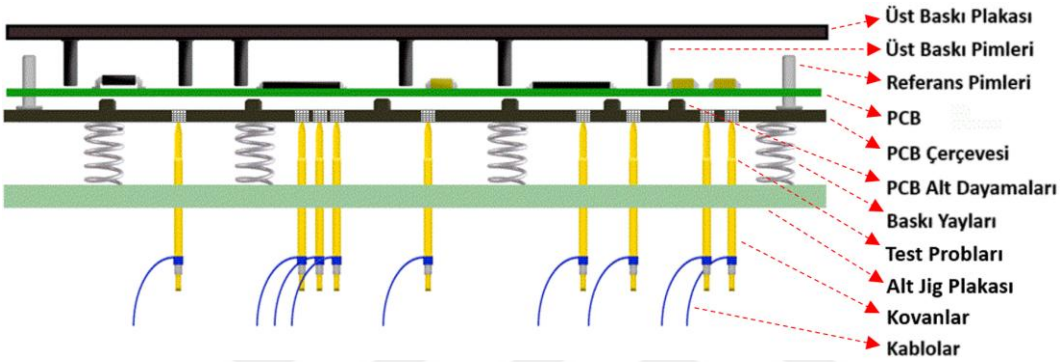


Şekil 2.25 Sarmal kablolama aracı ile kablolama [43]

Test prob ve kovan seçimindeki bir diğer önemli nokta ise elektriksel değerlerdir. Test probu ve kovanı çok hassas ölçümlerde kullanılacaksa direnç aralıklarına dikkat edilmelidir. Test edilecek noktadan geçecek akım değerine dayanıklı bir test prob ve kovan seçimi yapılmalıdır. Özellikle yüksek akım testleri için yüksek akıma dayanıklı prob ve kovanlar seçilmelidir. Aksi hâlde kısa sürede arızalar meydana gelecek, hatta iş güvenliği tehlikesi de oluşacaktır. Problarda akım kaynaklı olarak ilk görünen arıza, yaylanma mekanizmalarının bozulmasıdır. Bununla birlikte, her test noktası için yüksek elektriksel dayanımlı prob ve kovan seçimi yapmak ise maddi açıdan dezavantajlıdır. Yüksek akım prob ve kovanlar standart ürünlere kıyasla daha pahalı ürünlerdir. Ayrıca iç direnci yüksek olan bu probların örneğin programlama, haberleşme gibi testlerde kullanımı verimsizliğe neden olabilir.

Bir offline ICT/FCT sistemi kullanımında; genellikle operatör, PCBA'i fikstüre yerleştirip baskıyı tahrikler ve test başlar. Böylelikle, PCBA üzerindeki TP'ler ile test problarının teması sağlanmış olur. Test probları, test sistemi ile test edilen ürün arasında köprü görevi görür. Fikstür yapısı değiştirilebilir özellikli olabilir. Yani test edilecek ürüne göre fikstür değiştirilerek, aynı makinede birden fazla farklı UUT farklı zamanlarda test edilebilir. Dolayısıyla her farklı tip ürün için ayrı test programı algoritması da geliştirmek gerekir.

Şekil 2.26'da bir test fikstürünün genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.26 ICT/FCT fikstürü genel yapısı [44], yazar tarafından düzenlenmiştir.

PCBA, çerçeveye yerleştirilir. PCBA'de bulunan referans deliklerine hassas bir toleransla giren referans pimleri, PCBA'i fikstüre referanslar. Baskı sistemi tahriklendiğinde üst baskı aşağı inerek PCBA'i ayarlanan strok mesafesine kadar aşağı yöne doğru baskılar. Yaylı olan çerçeve mekanizması aşağı doğru yaylanır ve test probları ile PCBA üzerindeki test noktaları birbirlerine temas eder; test problarının çerçeve üzerindeki karşılıkları boşaltılmıştır.

Test probları yaylı özelliktedir. Alt plakaya test probları doğrudan montajlanmaz, plakaya test prob kovanları montajlanır ve kablolama bu kovanlara yapılır. Test probları bu kovanlara yerleştirilir. Böylelikle olası bir prob arızasında kablaja müdahale etmeden test probu kovandan çıkarılarak değiştirilebilir. Kablolar, test sistemi altyapısındaki çeşitli anahtarlama, ölçüm ve test modüllerininin ilgili kanallarına gider.

Test fikstürü üretiminde malzeme seçimi de oldukça önemlidir. Test sisteminin PCBA'e statik elektrik yüklememesi gerekmektedir. Ayrıca PCBA üzerinde oluşabilecek statik elektriğin PCBA'e zarar vermemesi için deşarj edilmesi gerekmektedir. Ancak bu deşarj oldukça düşük bir hızda gerçekleşmelidir. Yani bir başka deyişle hissedilemez boyutta çok düşük ve yavaş bir iletkenlik seviyesi gerekmektedir. Aksi hâlde PCBA bu hızlı deşarj esnasında zarar görebilir.

Elektrostatik deşarj özellikli ürünler, statik elektriği test edilen ürüne zarar vermeden oldukça yavaş bir hızda deşarj etme özelliğine sahiptir. Yani başka bir deyişle ESD özellikli ürünler aslında ne gerçek bir iletkendir, ne de tam anlamıyla yalıtkandır. Bu nedenle, özellikle PCBA yüzeyine sürtünerek temas eden çerçeve gibi parçalar başta olmak üzere, test fikstür ve sisteminin birçok parçası ESD özellikli olmalıdır. ESD özellikli plakalar farklı tip malzemelerden üretilebildiği gibi, çoğunlukla PVC malzemeden üretilir. Çoğunlukla siyah renkte olurlar. Şekil 2.26'da üst baskı pimi, alt dayama, çerçeve gibi ESD'li kısımlar siyah renkle gösterilmiştir. Bununla birlikte, elektronik üretimde sadece test sistemleri veya test fikstürleri ESD özellikli olmaz. Üretim alanında ESD özellikli önlük, ayakkabı ve kıyafetler giyilir. Operatörler ESD özellikli eldiven veya topraklama bilekliği kullanır. Elektronik kartlar ve komponentler ESD özellikli paket ve magazinlerde taşınır. Zemin, ESD özellikli halıyla kaplı olur. Havadaki nem oranı da elektrostatik birikimini etkilediği için ortamın nem kontrolü sağlanır. Üretim alanına girişte, giriş yapan kişinin vücudu ile ESD özellikli zemin arasında topraklama olduğunu kontrol eden turnikeler bulunur. Misafirler için bu topraklamayı sağlayan ESD'li ayakkabılar veya özel ESD ayak bantları sağlanır. Ayrıca, üretim ve test proseslerinde kullanılacak birçok ekipmanın ESD testleri yapılarak gerekli koşulları sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.

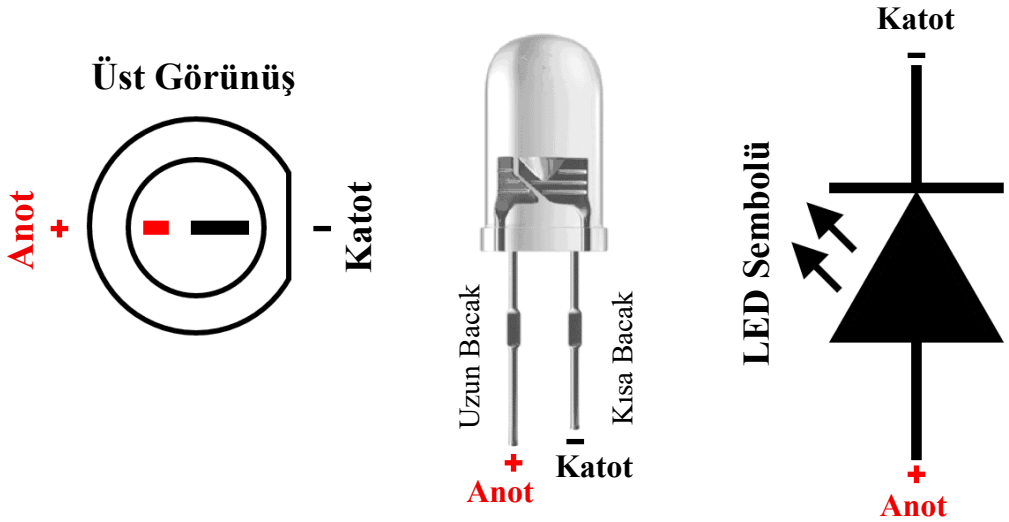
Şekil 2.26'da test prob kovanlarının çakılı olduğu alt plaka ise yeşil renkle ifade edilmiştir. Bu renk, genellikle FR4 malzemeyi ifade etmektedir. FR4, PCB üretiminde de kullanılan, cam elyafı olarak da bilinen oldukça dayanıklı, tam yalıtkan özellikli bir malzemedir. Test fikstürünün yüksek mukavemetli olması ve test probları arasında sıfır iletkenlik isteneceği için, prob kovanlarının çakılacağı plaka genellikle FR4 malzeme olarak tercih edilir. Bazen maliyet avantajı yaratmak, stok problemi vb. nedenlerle FR4 yerine farklı kompozit malzemelerin kullanıldığı durumlar da olmaktadır.

3
LED TESTİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

3.1 LED Teknolojisi

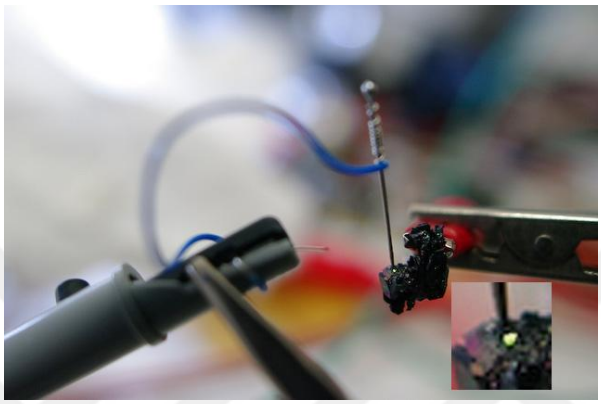
LED (Işık Yayan Diyot), elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştüren yarı iletken bir devre elemanıdır. Yarı iletken malzeme teknolojisinin gelişimiyle birlikte LED'ler, düşük enerji tüketimi, uzun ömür, küçük boyut ve yüksek güvenilirlik gibi avantajları sayesinde geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. LED'ler, ampul ve floresan gibi diğer yapay ışık kaynaklarından çok daha farklı bir fiziksel mekanizma ile ışık üretir ve bu yönüyle pek çok avantaja sahiptir [45].

Şekil 3.1'de geleneksel DIP soket LED görünüş detayları ve LED'in sembolü gösterilmiştir. DIP soket LED'lerde uzun bacak anot (+) besleme ucu iken, kısa bacak katot (-) besleme ucudur.



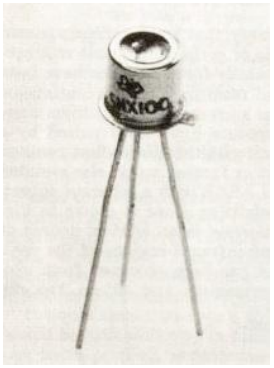
Şekil 3.1 DIP soket LED görünüşü ve LED sembolü [46], yazar tarafından düzenlenmiştir.

LED'lerde, p ve n tipi yarı iletkenlerin birleştiği noktadaki elektron alışverişi, ışık oluşmasına sebep olur. Bu olaya 'elektrolüminesans' denir. Elektrolüminesans olayı ilk kez 1907 yılında İngiliz mühendis Henry Joseph Round'un kristal dedektörler üzerinde yaptığı deneyler sırasında keşfedilmiştir. Round, silisyum karbür kristalleri ile çalışırken, kristalin belirli bölgelerine gerilim uyguladığında parıldamalar meydana geldiğini gözlemlemiştir [47]. Şekil 3.2'de Round tarafından gerçekleştirilen bu deneylerin replikasına ait bir fotoğraf gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Silisyum karbür kristale gerilim uygulayarak ışık oluşturma deneyi [48]

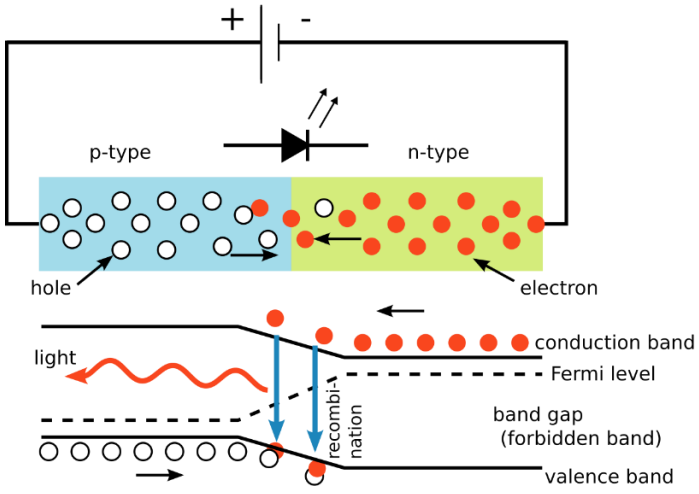
Kayıtlara geçen ilk LED, 1920'li yıllarda, Rusya'da bir radyo teknisyeni olan Oleg Vladimirovich Losev tarafından keşfedilmiştir. Losev, radyo alıcılarında kullanılan diyotlardan geçen akım sonucu ışık oluştuğunu gözlemlemiş ve 1927'de bu konudaki bulgularını bir Rus dergisinde yayımlamıştır [45]. Ancak devamında bu ürün ticari olarak herhangi bir uygulamada kullanılmamıştır. 1962 yılına gelindiğinde ise 'SNX-100' isimli ilk işlevsel ve ticari LED, 'Texas Instruments' firması tarafından Amerika'da üretilmiştir. Şekil 3.3'te SNX-100 isimli, piyasaya sürüldüğü bilinen ilk LED gösterilmiştir. SNX-100, 890 nm dalgaboyunda, yani kızılötesi ışık yaymaktaydı [49].



Şekil 3.3 SNX-100 isimli bilinen ilk ticari LED [49]

İlk LED'ler genellikle akkor ve neon gösterge lambalarının yerine ve yedi segmentli göstergelerde, önce laboratuvar ve elektronik test ekipmanları gibi pahalı ekipmanlarda, daha sonra televizyonlar, radyolar, telefonlar, hesap makineleri ve saatler gibi cihazlarda kullanıldı [49]. İlk nesil LED'ler yalnızca düşük parlaklıkta kırmızı ışık üretebilirken, günümüzde kullanılan modern LED'ler mavi, yeşil ve beyaz dâhil olmak üzere geniş bir renk yelpazesinde yüksek verimlilikte ışık üretebilmektedir. Ayrıca, LED'ler geleneksel akkor ve floresan aydınlatmalara göre çok daha az ısınır ve mekanik olarak daha dayanıklıdır. Bu özellikleri sayesinde LED teknolojisi, genel aydınlatma sistemlerinden elektronik cihaz göstergelerine, otomotiv sektöründen endüstriyel görüntüleme sistemlerine kadar pek çok alanda tercih edilmektedir. LED teknolojileri; özellikle ışık şiddeti, hızlı anahtarlama süresi ve farklı dalga boylarında ışık yayabilme özellikleri nedeniyle farklı alanlarda önemli roller üstlenmektedir [50].

Şekil 3.4'te LED'in çalışma prensibi temel olarak gösterilmiştir. LED'e doğru yönde ve değerde voltaj uygulandığında, şekilde kırmızıyla gösterilmiş olan elektronların, karşı taraftaki beyaz renkle gösterilmiş olan deliklere hareketiyle birlikte ortaya çıkan enerji, yarı iletken maddenin iç yapısındaki kimyasal özelliklerin etkisiyle foton olarak yayılır ve bu süreç sonucunda ışık oluşur. Bu yapının p tipi bölgesinde çoğunluk olan taşıyıcılar delikler, n tipi bölgesinde ise çoğunluk olan taşıyıcılar serbest elektronlardır. LED'e gerilim uygulandığında, n bölgesindeki elektronlar ve p bölgesindeki delikler birleşim bölgesine doğru hareket eder. Bu taşıyıcılar PN bağlantısında karşılaştıklarında, elektronlar deliklerle rekombinasyona girer [51].



Şekil 3.4 LED'in çalışma prensibi [51]

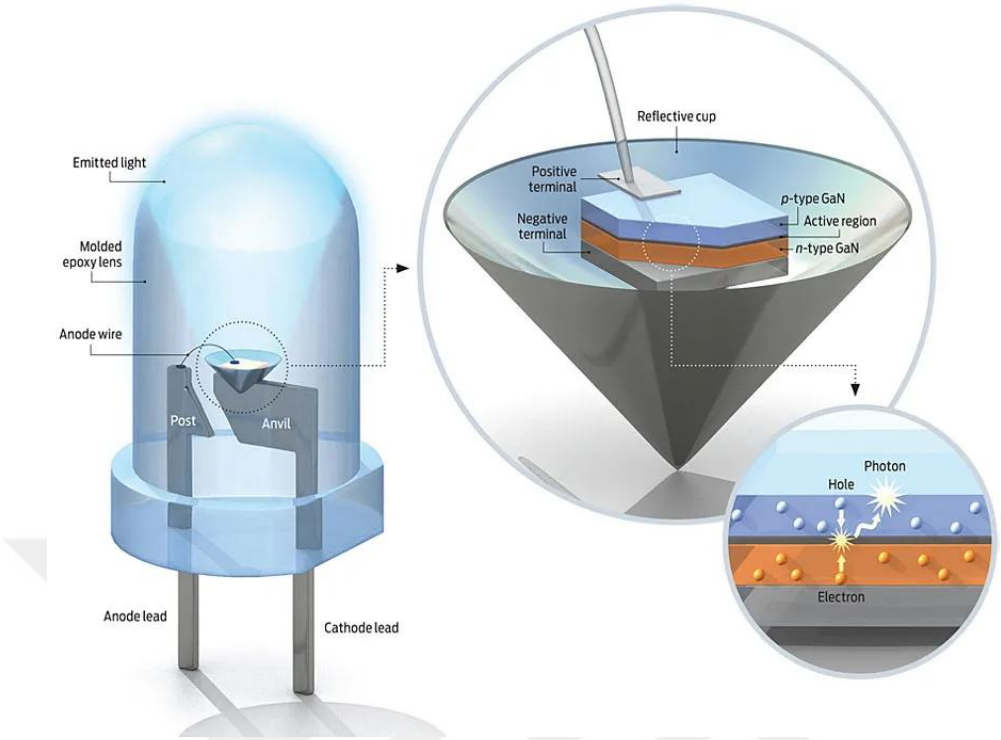
Rekombinasyon esnasında elektronlar daha düşük enerjili bir duruma geçerken sahip oldukları fazla enerjiyi serbest bırakırlar. Bu enerji, foton şeklinde yayılarak ışık oluşumuna neden olur. Bu fiziksel olay, aslında elektrolüminesansın daha teknik bir açıklamasıdır. Yayılan ışığın dalga boyu, yani rengi, yarı iletken malzemenin bant aralığına (band gap) bağlı olarak değişkenlik gösterir. Örneğin, geniş bant aralığına sahip yarı iletkenler daha kısa dalga boylarında (örneğin mavi) ışık üretirken, daha dar bant aralıklı malzemeler daha uzun dalga boylarında (örneğin kırmızı) ışık yayar [51]. Tablo 3.1'de farklı renk LED'lerin dalga boyu ve çalışma voltaj aralıkları değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3. 1 Farklı renkteki LED'lerin dalga boyu ve çalışma voltajı değerleri

Renk	Renk Adı	Dalga Boyu	Çalışma Voltajı
	Beyaz	395-530 nm	3 - 5 V
	Morötesi (Ultraviolet)	< 400 nm	3.1 - 4.4 V
	Mor	400 - 450 nm	2.8 - 4.0 V
	Mavi	450 - 500 nm	2.5 - 3.7 V
	Yeşil	500 - 570 nm	1.9 - 4.0 V
	Sarı	570 - 590 nm	2.1 - 2.2 V
	Turuncu	590 - 610 nm	2.0 - 2.1 V
	Kırmızı	610 - 760 nm	1.6 - 2.0 V
	Kızılötesi (Infrared)	> 760 nm	< 1.9 V

LED'lerin yaydığı ışığın rengi, çip içerisinde kullanılan yarı iletken malzemelere eklenen katkı maddelerine bağlıdır. İstenen ışık rengini elde edebilmek için yarı iletken yapıya uygun oranlarda galyum, arsenik, alüminyum, fosfor, indiyum ve nitrit gibi elementler eklenir (örneğin: GaAlAs, GaAs, GaP, InGaAlP, GaN). Bu katkılar, LED'in belirli bir dalga boyunda ışık yaymasını sağlar. Üretici firmalar LED'lerin kataloglarında genellikle dalga boyu bilgisine yer verir. Aynı renk aralığında olsa bile kullanılan katkı maddesine göre LED'in dalga boyu değişebilir [52]. Örneğin; InGaAlP katkılı LED 640 nm, GaAlAs katkılı olan 660 nm, GaP katkılı ise 700 nm dalga boyunda kırmızı ışık yayabilir. LED'ler, diğer ışık kaynaklarının aksine yalnızca tek bir renk üretir. Tüm renklerin karışımı da beyaz ışığı oluşturur.

Şekil 3.5'te bir LED'in iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5 LED'in iç yapısı [53]

LED teknolojisi, günümüzde birçok farklı alan ve uygulama için çeşitli tiplerde geliştirilen ışık kaynaklarını kapsamaktadır. Bu çeşitlilik, LED'lerin yapısal tasarımlarına, ışık üretim prensiplerine, kullanım amaçlarına ve performans özelliklerine göre sınıflandırılmalarına olanak tanır.

LED'ler fiziksel yapılarına göre sınıflandırıldığında; geleneksel DIP LED'ler, yüzeye montajlı SMD LED'ler, çok sayıda LED çipinin bir taban üzerine yerleştirildiği COB LED'ler ve yüksek ışık şiddeti ile çalışan POWER LED'ler gibi türler öne çıkmaktadır. Bu türler arasında SMD ve COB LED'ler, özellikle enerji verimliliği, boyut avantajı ve termal performans açısından daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 3.6'da farklı LED tipleri örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Çeşitli LED tipleri [54]

Geleneksel DIP LED'ler, belirli bir dalga boyunda sabit renk ışık yayarlar. Bu LED'ler düşük güç tüketimi ve basit yapıları nedeniyle temel gösterge lambalarında ve düşük güçlü aydınlatmalarda yaygın olarak kullanılırlar. Fiziksel olarak farklı boyutlarda ve şekillerde üretilebilirler [55].

Yüksek güçlü POWER LED'ler, geleneksel LED'lere kıyasla çok daha fazla ışık şiddeti sağlarlar ve genellikle 1W veya daha fazla güç tüketirler. Bu LED'ler; genel aydınlatma, sokak lambaları ve projektör gibi yüksek ışık yoğunluğu gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca bu LED'ler, ısının etkin bir şekilde azaltılması için soğutucu sistemleri gerektirirler [52], [55], [56].

SMD LED'ler, küçük ve düz yapılarıyla elektronik devre kartlarına yüzeyden monte edilen LED'lerdir. Bu LED'ler yüksek yoğunluklu aydınlatma panellerinde, televizyon ve monitörlerin arkadan aydınlatmasında ve otomotiv uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Boyutları ve güç kapasiteleri farklılık gösterebilir [55], [56].

COB LED'ler, çok sayıda LED çipinin tek bir modül üzerinde toplanmasıyla oluşur. Bu yapısı sayesinde daha homojen ve geniş bir ışık alanı sağlar. Spot aydınlatma, mimari aydınlatma ve genel aydınlatma uygulamalarında yaygın olarak tercih edilir. Yüksek verimlilik ve güçlü ışık sunar [55], [56].

Filament LED'ler, geleneksel akkor flamanlı lambaların görünümünü taklit eden LED'lerdir. Enerji verimliliği yüksek olan bu LED'ler, nostaljik ve dekoratif aydınlatmalarda popülerdir. Hem estetik hem de uzun ömürlü olması nedeniyle özellikle iç mekanlarda tercih edilir [55].

RGB LED'ler, kırmızı, yeşil ve mavi renkleri tek bir modülde birleştirerek geniş bir renk skalasında ışık üretirler. Bu özellikleri sayesinde dekoratif aydınlatma, renk değiştiren ekranlar ve dijital tabelalar gibi alanlarda yoğun şekilde kullanılmaktadır. Renk karışımı sayesinde kullanıcıların istedikleri renk tonlarını elde etmelerine olanak tanır [52], [55].

OLED teknolojisi, organik malzemeler kullanılarak üretilen ince ve esnek ışık kaynaklarını ifade eder. OLED'ler, ekran teknolojilerinde ve dekoratif aydınlatmalarda yaygın olarak kullanılır. Bu LED'ler, ince yapıları ve yüksek renk kalitesi ile modern cihazlarda önemli bir yer edinmiştir [52].

Infrared (kızılötesi) ve ultraviolet (morötesi) LED'ler, görünür ışık yerine farklı dalga boylarında ışık yayarlar. Kızılötesi LED'ler genellikle uzaktan kumanda ve sensör uygulamalarında kullanılırken, ultraviyole LED'ler sterilizasyon, tıbbi uygulamalar ve mürekkep kürleme gibi alanlarda tercih edilir [52], [55].

Mikro LED, çok küçük LED çiplerinin kullanıldığı yüksek çözünürlüklü ve yüksek parlaklık sunan bir LED türüdür. Bu teknoloji, özellikle ekran teknolojilerinde yeni nesil görüntü kalitesi sağlamak amacıyla geliştirilmiştir [56].

Bu LED çeşitleri, farklı teknik özellikler ve uygulama alanları sayesinde çok geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Kullanım amacına uygun LED tipinin seçilmesi, verimlilik ve performans açısından önem arz ermektedir.

Renk üretimi ve spektral özellikleri açısından ise LED'ler, tek renkli LED'lerin yanı sıra, farklı renklerin birleşimiyle çok renkli ışık üretebilen RGB LED'ler ve fosfor kaplama yöntemiyle elde edilen beyaz LED'ler şeklinde gruplanmaktadır. Ayrıca elektromanyetik spektrumun görünmez bölgesinde çalışan IR ve UV LED'ler de güvenlik sistemleri, optoelektronik algılama ve sterilizasyon uygulamaları gibi özel kullanım alanlarında önemli rol oynamaktadır.

LED teknolojisini uygulama alanlarına göre çeşitlendirmek de mümkündür. Örneğin, düşük güçlü göstergelerde kullanılan gösterge LED'leri, çoklu segment ekranlarda ve sinyal sistemlerinde yer alırken; dekoratif amaçlarla üretilen şerit LED, modül LED ve filament LED gibi türler; estetik ve atmosfer yaratma kaygısının ön planda olduğu tasarımlarda tercih edilmektedir. Öte yandan, yüksek verimlilik ve uzun ömür gereksinimi olan genel aydınlatma sistemlerinde ise COB ve yüksek güçlü LED çözümleri öne çıkmaktadır.

Sonuç olarak, LED teknolojisinin çeşitliliği sadece ışık üretimiyle sınırlı olmayan geniş bir mühendislik ve tasarım yelpazesine hitap etmektedir. Her bir LED türü, belirli teknik özellikleri ve uygulama avantajları doğrultusunda değerlendirilmekte ve uygun sistem tasarımlarında seçici bir biçimde entegre edilmektedir. Bu bağlamda, LED'lerin sınıflandırılması, yalnızca bir teknik ayırım değil, aynı zamanda optoelektronik sistemlerin verimliliği, fonksiyonu ve sürdürülebilirliği açısından da kritik öneme sahiptir.

3.2 LED Testi

LED'lerin endüstriyel uygulamalarda güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi, üretim sonrası gerçekleştirilen test süreçlerine bağlıdır. Bu testler hem ürün kalitesinin sağlanması hem de müşteri memnuniyetinin sürdürülebilirliği açısından oldukça önemlidir. LED testleri genellikle görsel kontrol, elektriksel parametre ölçümleri ve fonksiyonel testler şeklinde gerçekleştirilir.

Görsel kontrollerde LED'in fiziksel bütünlüğü, lens yapısı, lehimleme kalitesi ve konumlandırması değerlendirilir. Özellikle otomatik optik kontrol (AOI) sistemleri ile yapılan bu denetimlerde, insan hatasını minimize etmek ve üretim sürecini hızlandırmak hedeflenir.

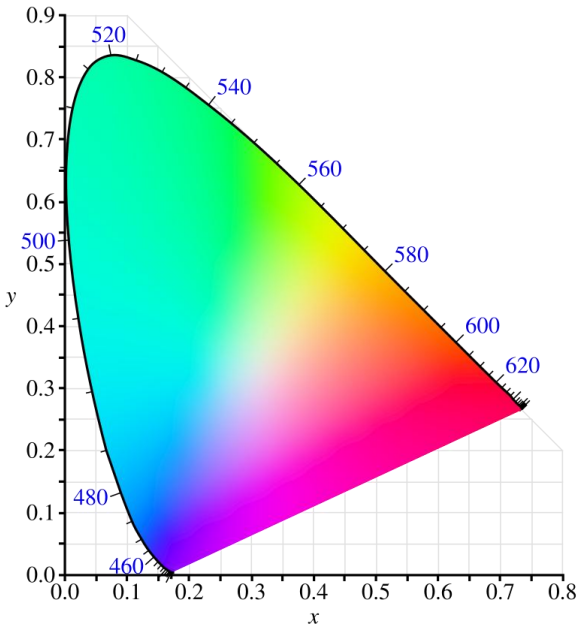
Elektriksel testlerde ise LED'in besleme gerilimi değeri, çektiği akım ve varsa akım sınırlayıcı dirençle olan etkileşimi ölçülür. Bu ölçümler genellikle dijital multimetreler ile ya da otomatik test sistemleri (ATE) aracılığıyla gerçekleştirilir. Ayrıca, belirli aralıklarla yapılan yaşam döngüsü testleri ile LED'in uzun süreli performansı ve termal dayanımı da değerlendirilir.

Fonksiyonel testler, LED'in belirli bir uygulamada çalışabilirliğini değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu testlerde temel olarak LED'in ışık yayma durumu, ışık şiddeti, renk sıcaklığı (CCT), dalga boyu ve renk homojenliği gibi optik parametreleri incelenir. Bu amaçla kullanılan LED analizörleri, optik ölçüm yapar; elektriksel ölçüm gerçekleştirmezler. LED analizörleri, entegre optik sensörleri aracılığıyla LED'den yayılan ışığın spektral özelliklerini algılayarak, her bir LED'in renk doğruluğu ve ışık yoğunluğu gibi değerlerini hassas bir şekilde tespit eder. Özellikle üretim hatlarında kullanılan bu sistemler, aynı anda birden fazla LED'in optik performansını değerlendirebildiğinden yüksek verimlilik sağlar.

Alternatif olarak, daha basit ve düşük maliyetli test sistemlerinde LDR tabanlı devreler kullanılarak LED'in ışık yayma durumu ölçülebilir. LDR'nin üzerine düşen ışık miktarına göre değişen direnç değeri, ölçülen gerilim ya da akım değişimleriyle değerlendirilerek LED'in yanıp yanmadığı belirlenebilir. Bu tür sistemler, LED analizörleri kadar hassas ve kapsamlı veri sunmasa da temel fonksiyonel kontroller için pratik ve uygulanabilir bir alternatif sağlar.

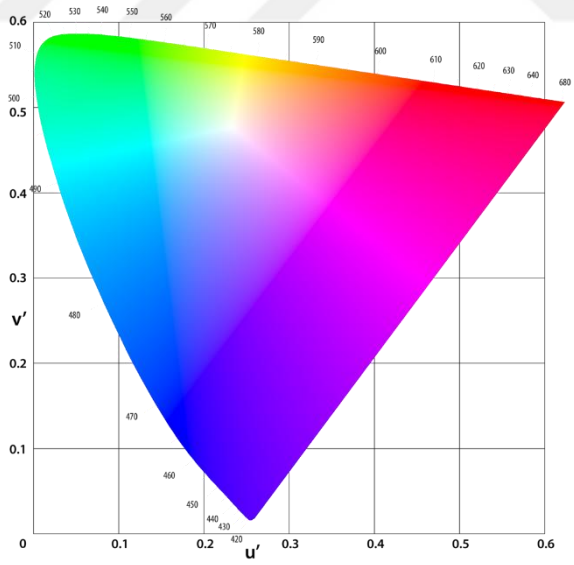
3.2.1 LED Test Hiyerarşisi

LED test süreçleri çok katmanlı bir yaklaşımla ele alınır. Bu süreçler, genellikle üretimden önce (pre-production), üretim sırasında (in-line), ve üretim sonrası (end-of-line) olmak üzere üç temel aşamada değerlendirilir. Fonksiyonel testler, LED test hiyerarşisinin en üst düzeyini temsil eder ve LED'in belirli bir uygulamada tanımlı işlevi yerine getirip getirmediğini ortaya koymayı amaçlar. Genel anlamıyla; LED'in yanıp yanmadığı, kısık veya şiddetli yanma gibi parlaklık farkları ve renk farkları kontrol edilir. Dolayısıyla bu testler, yalnızca LED'in ışık üretip üretmediğini değil, aynı zamanda bu ışığın istenilen fotometrik, kolorimetrik ve kromatik özellikleri taşıyıp taşımadığını da değerlendirir. Bu bağlamda, test sistemleri genellikle parlaklık, renk sıcaklığı, dominant dalga boyu ve renk koordinatları gibi parametreleri ölçer. Özellikle renk doğruluğunun ve tutarlılığının yüksek hassasiyetle test edilmesi gereken otomotiv, medikal ve diğer profesyonel aydınlatma uygulamalarında, kolorimetrik ölçümler ön plana çıkar. Renk koordinatlarının ölçülmesinde uluslararası standart olarak 'CIE' tarafından geliştirilen renk uzayları kullanılmaktadır. Bu bağlamda, özellikle 'CIE 1931' ve 'CIE 1976' renk uzayları, LED karakterizasyonunda referans alınan temel kolorimetrik sistemlerdir [57]. Şekil 3.7'de CIE 1931 renk uzayı ölçüsel diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.7 CIE 1931 renk uzayı ölçüsel diyagramı [57]

CIE 1931 renk uzayı, insan gözünün renk algısına ilişkin yapılan eşleştirme deneylerine dayanan ilk kolorimetrik modeldir. Bu modelde, X, Y ve Z tristimulus değerleri üzerinden renkler sayısal olarak temsil edilir. Bu değerler, görünür spektrum boyunca insan gözünün üç farklı koni hücresi ile algıladığı renk duyarlılıklarına karşılık gelir. CIE 1931 kromatiklik diyagramı, bir ışık kaynağının renk özelliklerinin grafiksel analizinde temel alınır. Ancak bu modelin en önemli sınırlılığı, renk farklarının algısal doğruluk açısından homojen olmamasıdır. Şekil 3.7'de gösterilen diyagramdaki en dıştaki sınır eğri, dalga boylarının nanometre cinsinden gösterildiği spektral lokustur. Kromatiklik diyagramı, bir rengin parlaklığından bağımsız olarak kalitesini belirtmek için bir araçtır. Örneğin gri, beyazla aynı kromatikliğe sahiptir veya turkuaz, camgöbeğiyle aynı kromatikliğe sahiptir. Çünkü aralarındaki tek fark parlaklıklarıdır, spektral saflıkları değildir. Yani diyagramın bazı bölgelerinde küçük koordinat değişimleri gözle görülür renk farklarına yol açarken, bazı bölgelerde aynı ölçüdeki değişiklik görsel olarak fark edilemez düzeydedir. Bu nedenle, özellikle insan gözüne daha yakın renk farklılıkları ölçümü yapabilmek amacıyla CIE 1976 renk uzayı geliştirilmiştir [58]. Şekil 3.8'de CIE 1976 renk uzayı diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.8 CIE 1976 renk uzayı ölçüsel diyagramı [58]

CIE 1976, renk farklarını daha doğrusal bir yapıda yansıttığı için LED renk ölçümlerinde daha hassas bir değerlendirme sağlar. Bu uzayda, u′, v′ koordinatları kullanılarak yapılan ölçümler, özellikle renk sapmalarının sınırlandırıldığı uygulamalarda daha güvenilir sonuçlar verir.

LED testlerinde genellikle referans olarak ele alınan bu renk uzayları; yalnızca üretim toleranslarının kontrolü için değil, aynı zamanda kullanıcı algısına uygunluk açısından da oldukça önemlidir. Örneğin otomotiv veya medikal aydınlatma gibi sektörlerde, LED'lerin hem bireysel hem de grup hâlinde renk tutarlılığı yüksek düzeyde önem arz etmektedir. Aynı ürün ailesine ait LED'lerin farklı tonlarda ışık yayması, estetik bütünlük ve işlevsellik açısından kabul edilemez bir kalite sorunu olarak değerlendirilir. Bu nedenle, kolorimetrik ölçümlerin CIE 1931 ve CIE 1976 gibi uluslararası standartlara uygun şekilde yapılması, LED test hiyerarşisinin önemli bir yönü olarak ele alınır. Sonuç olarak, LED test hiyerarşisinin üst düzeyinde konumlanan fonksiyonel testler, yalnızca temel ışık üretimiyle ilgili değil, aynı zamanda renk doğruluğu, tutarlılığı ve insan algısıyla uyum gibi ileri kalite parametreleri de kapsar. Bu bağlamda kolorimetrik değerlendirmelerin CIE 1931 ve CIE 1976 gibi standartlar doğrultusunda gerçekleştirilmesi hem teknik güvenilirliği hem de uluslararası karşılaştırılabilirliği mümkün kılarak, yüksek kaliteli LED ürünlerinin tasarım ve üretiminde kritik bir rol oynamaktadır.

3.2.2 LED Test Yöntemleri ve Ürünleri

LED test sistemleri genellikle üretim hattına entegre edilen test istasyonlarında, LED'lerin ışık üretim kapasitesinin ve kolorimetrik özelliklerinin değerlendirilmesiyle yapılır. Bu bağlamda kullanılan iki temel yaklaşım, yüksek hassasiyetli LED analizörleri ve düşük maliyetli LDR tabanlı test devreleridir.

LED analizörleri, optik sensörler aracılığıyla LED'lerden yayılan ışığı spektral veya kolorimetrik olarak değerlendiren hassas ölçüm sistemleridir. Tipik bir analizör sistemi, fiber optik kablolar ile LED ışığını algılayıcı birimlere yönlendirir ve burada yapılan ölçümler sonucu aşağıdaki vb. teknik parametreleri hesaplar:

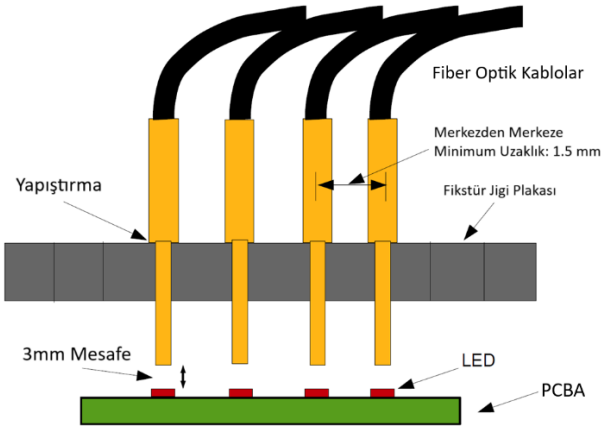
- RGB - Kırmızı, Yeşil, Mavi
- HSI - Ton, Doygunluk, Yoğunluk
- Dominant WL - Dominant dalga boyu
- CCT - Renk sıcaklığı
- CIE xy - CIE 1931 x, y renk koordinatları
- CIE u'v' - CIE 1976 u′, v′ renk koordinatları

LED analizörleri, farklı kanal sayılarına sahip yapılandırmalarla birden fazla LED'in eş zamanlı testine olanak tanır. Bu cihazlar genellikle RS232 veya USB gibi haberleşme port ve protokolleri üzerinden kontrol edilerek test istasyonlarına entegre edilebilirler. LabVIEW, TestStand gibi platformlarla kullanılabilir; yüksek hızlarda ve yüksek doğrulukta renk ölçümü yapabilirler. Bazı modeller, spektral tepki eğrilerine göre kalibre edilmiş renk filtrelerine sahiptir; bu sayede insan gözünün algıladığı spektruma daha yakın ölçümler alınabilir. Bu analizörler, test süreçlerinde sadece "LED çalışıyor mu?" sorusuna değil, "LED doğru renk ve parlaklıkta mı çalışıyor?" sorusuna da yüksek doğrulukla yanıt verir. Özellikle ISO 16760, SAE J578 gibi spesifik renk doğruluğu standartlarının uygulandığı otomotiv veya medikal sektörlerinde tercih edilir. Şekil 3.9'da fiber optik kabloları bağlanmış olan 20 kanallı bir LED analizörü örneği gösterilmektedir.



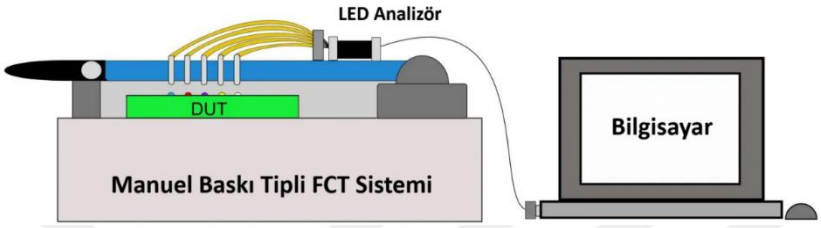
Şekil 3.9 Fiber optik kablolar takılmış bir LED analizörü [59]

Test sistemlerinde LED testleri tıpkı ICT/FCT test problarının jigli yapılardaki teması gibi baskı sistemiyle sağlanır. Baskı tahriklendiğinde; test probları ayarlanan stroğuna gelip temas hâlindeyken, LED'lere ise belirli bir mesafe uzaklıkta LED kovanları karşılık gelmiş olur. Bu kovanlar jig plakasına montajlıdır ve bu kovanlara fiber optik kablolar takılıdır. Şekil 3.10'da bir PCBA üzerinden LED ışıklarınının fiber optik kablolar aracılığıyla taşındığı yapı ifade edilmiştir.



Şekil 3.10 LED ışıkları transferi [59], yazar tarafından düzenlenmiştir.

Fiber optik kablolar aracılığıyla LED ışıkları, bir LED analizör veya LDR kartı gibi ölçüm modüllerine taşınır. Böylelikle UUT üzerindeki farklı bölgelerdeki LED'ler tek bir ölçüm modülüne taşınmış olur. Dolayısıyla paralel test gerçekleştirilerek, her bir LED'in test durum ve sonuçları raporlanabilir. Şekil 3.11'de üst baskısı indirilmiş ve teste hazır olan manuel baskı tipli bir FCT sisteminde LED testi yapısı ifade edilmiştir. Şekilde sarı renkle gösterilen fiber optik kablolar, test edilen ürün üzerindeki çeşitli konumlardaki LED'lere ait ışıkları analizöre taşımaktadır.



Şekil 3.11 Manuel baskı tipli bir FCT sisteminde LED analizör kullanımı

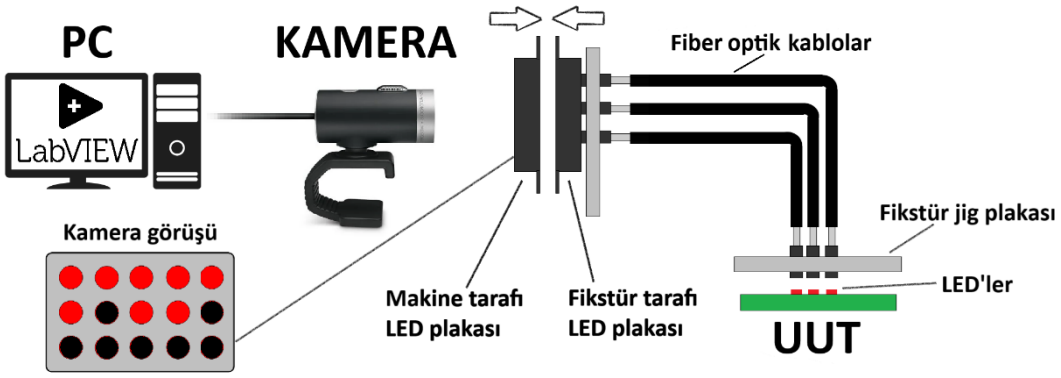
LDR tabanlı devreler, LED testlerinde düşük çözünürlüklü ve hızlı 'çalışıyor/çalışmıyor' doğrulaması yapmak amacıyla kullanılan basit sistemlerdir. LDR, üzerine düşen ışık miktarına bağlı olarak direnç değeri değişen pasif bir optoelektronik bileşendir. Karanlıkta tipik direnç değeri >1 MΩ iken, aydınlatıldığında bu değer birkaç kΩ seviyesine düşer. Bir LDR test devresinde, LDR bir voltaj bölücü devreye bağlanır ve çıkışı ADC birimi ile mikrokontrolcü tarafından okunur. Devrenin çıkışında görülen voltaj seviyesi, LED'in ışık yayma durumu ile orantılıdır. Bu değer, belirli bir eşik (threshold) ile karşılaştırılarak LED'in çalışıp çalışmadığı dijital olarak değerlendirilir. LDR çıkışı (3.1)'deki gibi hesaplanabilir. 'Vout', çıkış gerilimini; 'Vin', devreye uygulanan giriş gerilimini (örneğin 5V); 'RLDR', LDR'nin ışık miktarına bağlı olarak değişen direncini; 'Rsab', sabit direnç değerini (örneğin 10 kΩ civarında) ifade eder.

$$Vout = Vin \times (RLDR / (RLDR + Rsab)) \quad (3.1)$$

Bu yöntemle elde edilen ölçüm, renk ayrımı ve parlaklık doğruluğu açısından yetersizdir. Zira LDR'ler spektral olarak geniş ve kontrolsüz bir hassasiyete sahiptir; bu da renk analizi için gerekli olan dar bantlı tepkiyi sağlayamaz. Ayrıca sıcaklık değişimlerine ve ortam ışığına karşı oldukça duyarlıdırlar. Ancak, LDR tabanlı sistemlerin avantajları arasında düşük maliyet ve yüksek test hızı bulunmaktadır. Bu nedenle yalnızca "LED yanıyor mu?" gibi temel doğrulama işlemlerinde tercih edilirler.

3.3 LED Testine Tez Çalışması Kapsamındaki Yaklaşım

Bu tez çalışmasında, LED'lerin fonksiyonel kontrolünü gerçekleştirmek üzere görüntü işleme temelli bir test yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, ucuz maliyetli standart bir bilgisayar kamerası ve LabVIEW ortamında geliştirilmiş bir yazılım aracılığıyla LED'lerin yanıp yanmadığını, parlaklık seviyelerini ve renk değerlerini tespit edebilmektedir. Bu yaklaşım, klasik analizör sistemleri, basit LDR tabanlı devreler ve yüksek maliyetli endüstriyel kamera çözümleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sunmaktadır. Şekil 3.12'de sistemin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Tez kapsamındaki LED test sisteminin genel yapısı

Üst sistem olarak bir FCT makinesine kamera ve bu kameranın karşısına sabit konumlu bir 'makine tarafı LED plakası' üretilerek eklenir. Bu plakada istenen maksimum LED ölçüm sayısı kadar delik işlenmiştir. Örneğin, Şekil 3.12'de bu kanal adedinin 15 olduğu görülebilir. Bu deliklerde özel LED kovanlar takılıdır. Kamera, test bilgisayarına sürekli olarak bağlıdır.

Fikstür tarafındaki yapı ise mekanik olarak diğer LED test yöntemlerinde uygulanan yapılardan çok farklı değildir. Baskı tahriklendiğinde, test probları UUT üzerindeki test noktalarına temas eder. Aynı zamanda, LED'lerin karşılığına 2-3 mm uzaklıkta LED kovanlar denk gelir. Bu kovanlara fiber optik kablolar takılıdır. Fiber optik kabloların diğer ucu 'fikstür tarafı LED plakası'na gitmektedir. FCT makinesi, değiştirilebilir fikstür özelliğine sahip olabilir. Yani fikstür, makineye bağlandığında makine tarafı ve fikstür tarafı LED plakası birbirleriyle örtüşür. Bu yapı sayesinde sadece bir makine ve kamera ile farklı fikstürlerin, dolayısıyla farklı UUT'lerin LED testleri gerçekleştirilebilir.

LED testi sırası geldiğinde, test probları üzerinden otomatik olarak enerjilendirme yapılır ve LED'ler çalıştırılır. Test algoritması içerisinde, tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım çalıştırılır ve sistem tüm LED'leri 1-2 saniye içerisinde test ederek raporlar. LED sayısı onlarca, yüzlerce olabilir. Test süresi uzamaz. Çünkü kamera için hepsi tek bir 'capture' anlamına gelmektedir. Bu sistemin mekanik yapısı çok karmaşık değildir. Bu da son kullanıcı için kullanım kolaylığı sağlar. Sistemin katma değerli mühendislik tarafı esasen yazılım kısmıdır.

Endüstriyel LED analizörleri yüksek doğrulukla kolorimetrik ve fotometrik ölçümler yapabilmelerine rağmen, genellikle kanal sayısına bağlı olarak oldukça maliyetlidirler ve sadece kanal sayısı kadar LED adedi için ölçüm alabilirler. Geliştirilen görüntü işleme tabanlı sistem ise, sabit bir kamera görüntüsü üzerinden aynı anda onlarca, yüzlerce LED'in fonksiyonel testlerini gerçekleştirebilmektedir. Ölçüm yapılacak LED sayısının artması, sistemin ana maliyetini artırmamaktadır.

LDR tabanlı devreler yalnızca ışığın varlığına duyarlıdır ve renk ya da ışık yoğunluğuna ilişkin nitelikli veri sağlayamaz. Ayrıca ortam ışığından kolayca etkilenirler. Buna karşın bu tezde önerilen yaklaşım, sabit eşiklerle çalışan ışık algılayıcılardan farklı olarak, görüntü işleme algoritmalarıyla ortamla ilgili dezavantajları elimine ederek daha kararlı bir değerlendirme sunar. Böylece sadece 'yanıyor/yanmıyor' tespiti değil, LED'in beklenen parlaklık düzeyine yakın çalışıp çalışmadığı ve renk değeri de tespit edilir. Ayrıca LDR kartlar özel olarak geliştirildiği için yeni ürünlere geçişlerde ciddi bir tasarım ve üretim süresi gerektirir. Seri üretim şartlarında kaybedilen her saniyenin kritik olduğu kabul edilirse, bu tip bir geliştirme için harcanacak zamanı telafi etmek oldukça zordur. Ayrıca LDR sensörler hassas bileşenlerdir. Fiziksel olarak temas etmese de sürekli ışığa maruz kaldıkları uzun süreli kullanımlarda kararsız ölçüm, kalibrasyon kayması ve hatta donanımsal arızalar gözlemlenebilir. LDR'lerin spektral tepkisi LED'in renk sıcaklığına göre değiştiğinden, farklı LED tipleriyle tutarlı ölçüm almak zordur. Bu durum, sistemin sürdürülebilirliğini ve test güvenilirliğini olumsuz etkiler.

Pahalı endüstriyel kamera sistemleri, yüksek çözünürlükte görüntü yakalama ve entegre yapay zekâ algoritmaları ile karmaşık analizler yapabilir. Ancak bu tür sistemler hem donanım hem de yazılım açısından oldukça maliyetlidir ve genellikle yalnızca yüksek hacimli üretim tesislerinde ekonomik anlam ifade eder.

Bu çalışmada geliştirilen sistem ise daha standart ve uygun fiyatlı bir kamera donanımı ile çalışmakta ve de esnek bir şekilde özelleştirilebilmektedir. Bu durum, sistemin orta ölçekli üretim ortamlarında da ekonomik ve etkin bir çözüm olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Sistemin avantajları aşağıdaki gibi maddelendirilebilir:

- Maliyet/performans dengesi: Bu yöntem, düşük maliyetli bileşenlerle, yüksek düzey doğruluk sunmaktadır.
- Değiştirilebilir fikstür yapısı: Sistemin mekanik yapısı, değiştirilebilir fikstür teknolojisi için uygundur. Bu sayede aynı sistemde farklı ürünler test edilebilir.
- Çoklu LED analizi: Tek bir görüntü üzerinden birden fazla LED'in eş zamanlı testi yapılabilmektedir. Test süresi oldukça hızlıdır.
- Devreye alma kolaylığı: Yeni bir fikstür kullanılacağı zaman, fikstürün LED test sistemine öğretilmesi ve kullanılması çok zaman almamaktadır.
- Süreklilik: Elektronik komponentlerin istenen sürede piyasada bulunması her zaman mümkün olmamaktadır. Bu sistemdeki ölçüm modülü sadece bir kamera olduğu için, yeni test sistemleri üretilirken LED test donanımlarıyla ilgili tedarik problemleri yaşanmaz.
- Ölçeklenebilirlik ve esneklik: LabVIEW ortamındaki algoritmalar yazılımsal olarak kolay müdahaleye açıktır. Bu sayede farklı LED test senaryoları için konfigürasyon kolaylığı yüksek olmaktadır. Ayrıca diğer test donanımları ile ortak bir algoritma kurmak için bu sistem oldukça elverişlidir.
- Ortam ışığına karşı tolerans: Görüntü işleme yöntemleri, sabit ışık eşiği yerine bölgesel eşikleme ve filtreleme algoritmalarıyla daha kararlı sonuçlar verir. Sistemde mekanik olarak 'karanlık oda' yaratmak mümkün olsa da yazılımsal algoritmalar ile LED testinin ortam ışığı ve diğer olumsuz etkenlerden etkilenmemesi sağlanmaktadır.

4
YÖNTEM

4.1 Amaç

Bu tez çalışmasının temel amacı, otomatik test ekipmanlarında kullanılmak üzere LabVIEW tabanlı, kamera ile görüntü işleme destekli ve modüler yapıda bir LED test sistemi tasarlamak ve gerçekleştirmektir. Çalışma, elektronik üretim hatlarında yer alan elektronik kart ve elektronik tabanlı ürünler üzerindeki LED'lerin parlaklık ve renk gibi fonksiyonel doğrulama testlerinin, manuel müdahaleye veya insan inisiyatifine gerek kalmadan; hızlı, güvenilir, tekrarlanabilir ve raporlanabilir bir şekilde yapılmasını hedeflemektedir.

Geleneksel düşük maliyetli test yöntemlerinde, LED'lerin renk veya ışık şiddeti değerlendirmesi genellikle operatör gözüyle ya da basit sensörlerle yapılmaktadır. Bu durum, insan hatasına açık, zaman alıcı ve standart dışı sonuçlara neden olabilmektedir. Öte yandan, daha profesyonel bir yöntem olan LED analizörü kullanımı ise çoğu proses için beklentinin çok üzerinde bir ölçüm hassasiyeti sağlayabilmekte, dolayısıyla oldukça maliyetli olabilmektedir. Gerek analizör tabanlı sistemler gerekse de basit LDR sensör tabanlı sistemler olsun, hepsinin test edilecek LED adedi kadar minimum ölçüm kanalı kapasitesi olması gerekmekte, maliyetleri de bu doğrultuda artış göstermektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen sistem ile bu dezavantajların ortadan kaldırılması amaçlanmış ve alternatif bir test sistemi çözümü sunulmuştur.

Sistemin yazılım altyapısı NI LabVIEW ortamında geliştirilmiş olup, görüntü işleme algoritmaları kullanılarak LED'lerin parlaklık ölçümü ve renk tespiti ölçümü otomatik olarak yapılmaktadır. Donanım tarafında ise kamera tabanlı optik ölçüm birimi ve modüler test fikstürü entegre edilerek endüstriyel kullanım için ölçeklenebilir bir platform oluşturulmuştur.

4.2 Projelendirme ve Ön Hazırlık

Projelendirme aşaması planlama ve ön hazırlık süreciyle başlatılmıştır. Bu aşamada projenin uygulanabilirliği değerlendirilmiş, gerekli kaynaklar belirlenmiş ve sistemin temel gereksinimleri netleştirilmiştir. LED test sistemleri, görüntü işleme teknikleri ve benzer uygulamalara yönelik çalışmalar incelenerek, sistemin tasarımında karşılaşılabilecek olası teknik kısıtlar önceden belirlenmiş ve çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu parametreler ele alınarak projenin sürecine dair bir zaman planı oluşturulmuştur. Bu planlama sürecinde, hazırlık, tasarım, malzeme tedarik, talaşlı imalat, montaj, yazılım geliştirme, optimizasyon ve dokümantasyon aşamaları için ayrı zaman dilimleri tanımlanmış ve proje içi kilometre taşları belirlenmiştir. Bu zaman planı, sürecin izlenebilirliği ve aşamaların birbirine olan bağımlılığı açısından önemlidir. Şekil 4.1'de haftalık bazda zaman planı gösterilmektedir. Bu sadece haftalık zaman planıdır. Bu zaman planındaki her bir adımın kendi alt görev ve zaman hedefleri de vardır. Projeyi etkileyebilecek riskli alanlar için ayrıcalıklı planlamalar yapılmıştır. Yani haftalık plandan hariç olarak, detaylı planlama ve proje adımları da bu çalışma kapsamında belirlenmiştir.

PROJE ADI	GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI LED TEST SİSTEMİ																	
HAFTALIK ZAMAN PLANI	HAFTALAR																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
HAZIRLIK																		
TASARIM																		
MALZEME TEDARİK																		
TALAŞLI İMALAT																		
MONTAJ																		
YAZILIM GELİŞTİRME																		
OPTİMİZASYON																		
DOKÜMANTASYON																		

Şekil 4.1 Haftalık zaman planı

Sistemde kullanılabilecek uygun maliyetli, kalite ve marka bilinirliği iyi seviyede olan bir kamera araştırılmış ve belirlenmiştir. Tasarım, üretim ve yazılım geliştirme çalışmalarının yapılacağı, Windows10 işletim sistemine sahip bir bilgisayar sağlanmıştır. Tasarım çıktılarına istinaden, talaşlı imalatı yapılacak olan hammadde ve malzemeler belirlenmiştir. Talaşlı imalat işlemlerinin gerçekleştirileceği CNC, torna, freze gibi tezgâhlar ve bu tezgâhların ihtiyaç olan kullanım süreleri belirlenmiştir.

Montaj aşamasında kullanılacak el aletleri ve ekipmanlar belirlenmiş ve sağlanmıştır. Mekanik tasarım, mekanik üretim ve yazılım geliştirme aşamaları için kullanılacak mühendislik programları belirlenmiştir.

4.2.1 Kullanılan Mühendislik Programları

Tablo 4.1'de sistemin geliştirilmesinde, prototip tasarımı ve üretiminde kullanılan programlar ve bu programların kullanım amaçları gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan programlar ve kullanım amaçları

Program	**Kullanım Amacı**
NI LabVIEW	Yazılım mimarisinin oluşturulması
NI VDM	Görüntü işleme yazılım araç ve paketlerinin kullanılması
NI VAS	Kameranın tanımlanması ve görüntülerin alınması
NI MAX	Kamera görüntü konfigürasyonlarının yapılması
NI TestStand	Ürünün bütünleşik bir fonksiyon test sisteminde kullanımı
SolidWorks	Prototip için 3D mekanik tasarım işlemleri
AutoCAD	Prototip için 2D mekanik tasarım işlemleri
BobCAD-CAM	CNC üretimi öncesi CAM işlemlerinin gerçekleştirilmesi
Microsoft Excel	Limit değerlerinin parametrik ayarlanması ve raporlama

4.2.1.1 NI LabVIEW

NI LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), National Instruments şirketi tarafından geliştirilen, grafik tabanlı bir programlama dilidir. Veri toplama, ölçüm sistemleri, otomasyon ve test uygulamaları gibi mühendislik odaklı projelerde sıklıkla kullanılan bu yazılım, kullanıcıya sanal enstrümanlar (VI) oluşturma ve donanımla hızlı entegrasyon imkânı sunar. LabVIEW'in en önemli özelliklerinden biri, blok diyagramlar ve ön paneller kullanarak sistemin işleyişini görsel olarak tasarlamaya olanak tanımasıdır. Bu yönüyle, karmaşık algoritmaların ve donanım kontrollü işlemlerin sezgisel bir arayüz üzerinden kolayca geliştirilebilmesini sağlar.

Ayrıca, LabVIEW Runtime Engine, LabVIEW'de geliştirilen uygulamaların, LabVIEW yazılımının kurulu olmadığı bilgisayarlarda da çalıştırılabilmesini sağlayan bir bileşendir. Bu sayede, uygulamaların çalışması için tam LabVIEW kurulumuna gerek kalmaz. Gerekli kütüphaneleri içerdiğinden, test ve ölçüm sistemlerinde yalnızca Runtime kurulumu ile uygulamaların hızlı ve lisans gerektirmeden çalışmasına imkân sağlar.

Tez çalışmasında NI LabVIEW'in tercih edilmesinin başlıca nedeni, donanım ve yazılım etkileşimi gerektiren bu çalışmada yüksek düzeyde görsellik, entegrasyon ve modülerlik sağlamasıdır. LabVIEW, çeşitli eklenti NI yazılımlarının da aracılığıyla kamera gibi donanımlarla doğrudan haberleşme imkânı sunmaktadır. Geleneksel metin tabanlı programlama dillerine (C++, Python, vb.) kıyasla, LabVIEW ile geliştirilen sistemlerde görsel programlama yaklaşımı sayesinde hata ayıklama süreci daha kolay ve hızlıdır. Ayrıca, gerçek zamanlı izleme, kullanıcı arayüzü tasarımı ve verilerin anlık görselleştirilmesi gibi avantajlar, bu projenin gereksinimleri ile doğrudan örtüşmektedir.

4.2.1.2 NI Vision Development Module

NI Vision Development Module, temelde C++, Java, C# ve Python'daki OpenCV veya MATLAB'daki Image Processing Toolbox'a benzer işlevler sunan, LabVIEW'e özgü bir görüntü işleme kütüphanesidir. Görüntüler üzerinde renk ayrıştırma, parlaklık analizi, eşikleme, kenar bulma ve nesne tanıma gibi çok sayıda temel ve gelişmiş işlemi uygulamaya olanak tanır. Metin tabanlı yazılım geliştirme ortamlarında görüntü işleme için genellikle OpenCV gibi harici kütüphaneler kullanılırken, VDM sayesinde bu işlemler LabVIEW'in grafiksel blok diyagramları üzerinde doğrudan ve entegre biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu yönüyle VDM, donanım etkileşimli sistemlerde görüntü işleme yazılımı geliştirme sürecini önemli ölçüde hızlandırmaktadır. Ayrıca, LV VDM Runtime, tıpkı LV Runtime Engine'de olduğu gibi, VDM ile geliştirilen görüntü işleme tabanlı uygulamaların VDM yazılımı kurulu olmayan bilgisayarlarda da çalıştırılabilmesini sağlar. NI VDM, bu çalışmada çeşitli görüntü işleme algoritmalarını oluşturmak için kullanılmıştır.

4.2.1.3 NI Vision Acquisition Software

NI Vision Acquisition Software, LV ile donanım arasında köprü görevi görerek kamera bağlantısının kurulmasını ve canlı görüntü akışının elde edilmesini sağlar. Çalışmamızda kullanılan USB portlu kamera, bilgisayara bağlanarak NI VAS aracılığıyla otomatik olarak tanımlanmıştır. Böylelikle görüntü verisi LabVIEW ortamına aktarılmıştır. Görüntü edinim süreci, LV içindeki 'IMAQdx' VI ve fonksiyonlarıyla sağlanmıştır. Bu alınan görüntüler, NI VDM üzerinden işlenerek LED test algoritmalarına giriş verisi olarak kullanılmıştır.

4.2.1.4 NI Measurement & Automation Explorer

NI Measurement & Automation Explorer, kameranın sistem üzerinde tanımlanması, test edilmesi ve ayarlarının yapılandırılması amacıyla kullanılmıştır. NI MAX üzerinden kamera bağlantısı doğrulanmış, çözünürlük ve kare hızı gibi temel parametreler kontrol edilmiştir. Ayrıca kamera görüntüsünün ön izleme işlemi bu ortamda gerçekleştirilerek, yazılım tarafına geçmeden önce görüntü kalitesi ve donanım bağlantısı test edilmiştir. NI MAX, ayrıca sistemdeki diğer NI donanımlarının (örneğin DAQ kartları, modüller vb.) konfigürasyonu için de kullanılan genel bir platformdur. Bu çalışmada, görüntü işleme sistemine bağlı kamera için temel ayarlamaların yapılmasında önemli bir rol üstlenmiştir.

4.2.1.5 NI TestStand

NI TestStand, National Instruments tarafından geliştirilen, otomatik test sistemleri için yaygın olarak kullanılan bir test yönetim yazılımıdır. Özellikle üretim ve validasyon hatlarında, birden fazla test adımının sıralı ve kontrollü bir şekilde uygulanmasına olanak tanır. Tez çalışması kapsamında geliştirilen LED test sisteminin fonksiyonel test süreçlerine entegre edilebilmesi amacıyla, LabVIEW ortamında oluşturulan yazılım bir DLL formatında derlenmiş ve bu kütüphane NI TestStand ortamında kullanılmıştır. Böylelikle, tez kapsamında geliştirilen sistem yalnızca LED testiyle sınırlı kalmamış; farklı fonksiyonel testlerle birlikte çalışarak, bir ürüne ait çeşitli testlerin entegre şekilde yürütüldüğü endüstriyel bir test algoritması senaryosu oluşturulmuştur. NI TestStand üzerinden çağrılan LED test DLL'i sayesinde, geliştirilen görsel kontrol sistemi, genel bir fonksiyon test akışı içerisinde modüler bir test adımı olarak kullanılabilmektedir. Bu yaklaşım, gerçek üretim veya doğrulama ortamlarında kullanılabilir, ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir test altyapısının temellerini atmaktadır. Ayrıca NI TestStand'in raporlama, hata takibi ve kullanıcı arayüzü yönetimi gibi ileri düzey özellikleri, test sürecinin daha sistematik ve izlenebilir hâle gelmesine katkı sağlamıştır.

4.2.1.6 SolidWorks

Bu çalışmada sistemin mekanik tasarımı ve teknik çizim süreçlerinde SolidWorks ve AutoCAD yazılımlarından birlikte yararlanılmıştır. SolidWorks, sistemin üç boyutlu prototip modellemesi için kullanılmıştır. UUT'ye uygun test fikstürü, LED plakası, kamera yerleşimi, fiber optik kablo yönlendirmeleri ve UUT bileşenlerinin fiziksel konumlandırılması gibi detaylar, SolidWorks ortamında tasarlanarak sistemin genel yapısı görsel olarak ortaya konmuştur.

4.2.1.7 AutoCAD

AutoCAD, özellikle iki boyutlu teknik çizimlerin hazırlanmasında, talaşlı imalat ve lazer kesim gibi üretim süreçlerinde kullanılacak teknik dokümanların oluşturulmasında tercih edilmiştir. SolidWorks üzerinden oluşturulan üç boyutlu modellerin ölçüsel olarak sadeleştirilmiş iki boyutlu çizimleri AutoCAD ortamına aktarılarak, üretime yönelik net ve standartlara uygun teknik resimler elde edilmiştir. Bu iki yazılımın birlikte kullanımı sayesinde hem görsel prototipleme hem de üretim planlaması verimli ve uyumlu bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

4.2.1.8 BobCAD-CAM

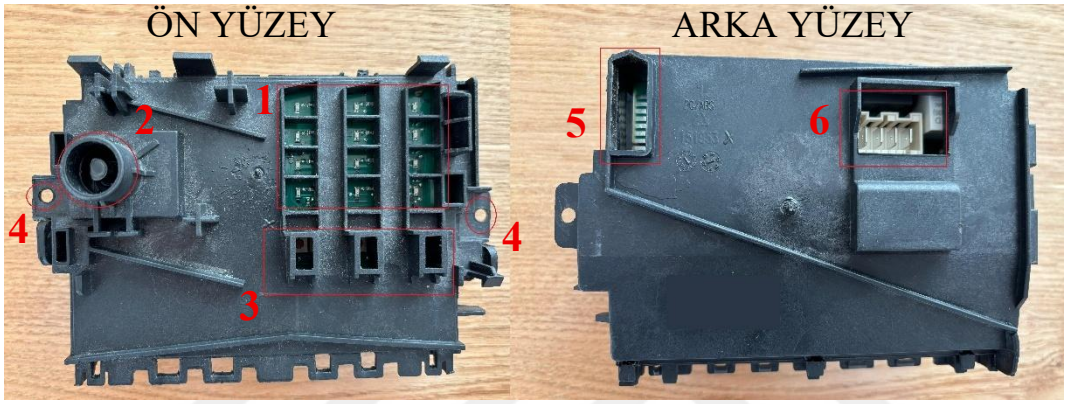
Tamamlanan mekanik tasarımların üretimi aşamasına geçmeden önce, CNC işleme süreci için gerekli olan CAM işlemleri BobCAD-CAM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu parçaların talaşlı imalatına yönelik takım yolları oluşturulmuş; kesme, delme ve frezeleme gibi işlemler için gerekli operasyonlar belirlenmiştir. Malzeme tipi, kesici takım geometrisi ve işleme parametreleri dikkate alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Hazırlanan G kodu çıktıları CNC tezgâhına aktarılmak üzere optimize edilmiş ve talaşlı imalat süreci sağlıklı bir şekilde tamamlanmıştır.

4.2.1.9 Microsoft Excel

Limit değerlerinin parametrik olarak ayarlanması için Microsoft Excel dosyaları kullanılabilmektedir. Yazılım mimarisi bu doğrultuda tasarlanmıştır. LED kanallarının parlaklık ve renk değerlerinin alt ve üst test limitleri bir Excel dosyasından ayarlanabilmektedir. Test sonuçlarının raporlanması aşamasında ise basit metin formatında olan '.txt' dosyaları tercih edilmiştir. '.txt' dosyaları düşük boyut ve hızlı erişilebilir yapısıyla temel raporlama ihtiyaçlarını karşılamaktadır.

4.3 Prototip Tasarımı ve Üretimi

Prototip çalışması için ilk olarak LED'li bir UUT belirlenmiştir. Belirlenen UUT; 12 adet SMD LED'e, 1 adet komütatör anahtara, 3 adet butona sahip, plastik dış şasisi olan bir elektronik karttır. Bu ürün, bir bulaşık makinesi güç kartıdır. Beyaz eşya sektöründe kullanılan çoğu ürün gibi üretim adetleri fazla olan bir üründür. Gizlilik ihlali olmaması amacıyla, tez çalışmamızda şasisiz çıplak bir elektronik kart tercih edilmemiştir. Şekil 4.2'de, prototip çalışmamızda test edilen ürün olarak kullanılan elektronik kartın ön yüzey ve arka yüzey görünümleri gösterilmiştir.



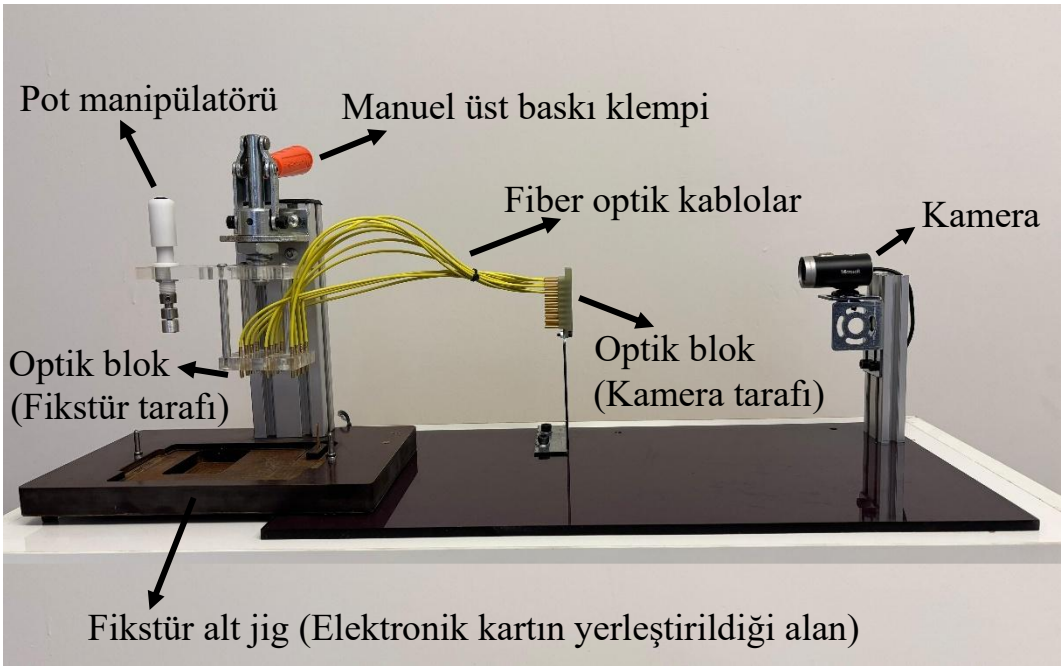
Şekil 4.2 Prototip çalışmasında kullanılan UUT

- Şekil 4.2'de gösterilen 1 numaralı alanda, 12 adet LED bulunmaktadır. Bu LED'lerin test işlemleri prototip çalışması kapsamında gerçekleştirilecektir.
- 2 numaralı alanda, komütatör tip anahtar bulunmaktadır. Bu komütatör, prototip çalışması kapsamında döndürülecektir.
- 3 numaralı alanda, 3 adet mekanik buton bulunmaktadır. Bu butonlar, prototip çalışmasında kullanılmayacaktır.
- 4 numaralı iki adet alanda, elektronik kartın bulaşık makinesi ilgili bölgesi için montaj delikleri bulunmaktadır. Bu delikler, prototip çalışması kapsamında UUT ve test fikstürünü referanslayan referans delikleri olarak kullanılacaktır.
- Arka yüzeyde bulunan 5 numaralı alanda, DC konnektör girişi bulunmaktadır. Bu konnektör pimleri üzerinde LED'lerin enerjilenmesini sağlayan 5V DC besleme hattı da mevcuttur. Prototip çalışmasında, bu hat üzerinden test probları ile LED'ler enerjilendirilecektir.
- Arka yüzeyde bulunan 6 numaralı alanda, yüksek voltajlı güç konnektörü bulunmaktadır. Bu konnektör, prototip çalışmasında kullanılmayacaktır.

LED test modülleri genellikle ICT/FCT sistemlerine dâhil edilerek, elektronik kartlar üzerinde bulunan LED'lerin test işlemleri için kullanılır. Bu sebeple prototip çalışması kapsamında; jigli, üst baskı tahrikli ICT/FCT sistemlerini simüle etmek amacıyla manuel bir test fikstürü uygulaması geliştirilmiştir. Yani geliştirilen prototipte otomatik temas sağlayan yaylı test probları bulunmaktadır. Bu problar, UUT'nin (test edilecek elektronik kartın) enerjilenmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, UUT'yi fikstüre referanslayan referans pimleri de fikstüre eklenmiştir.

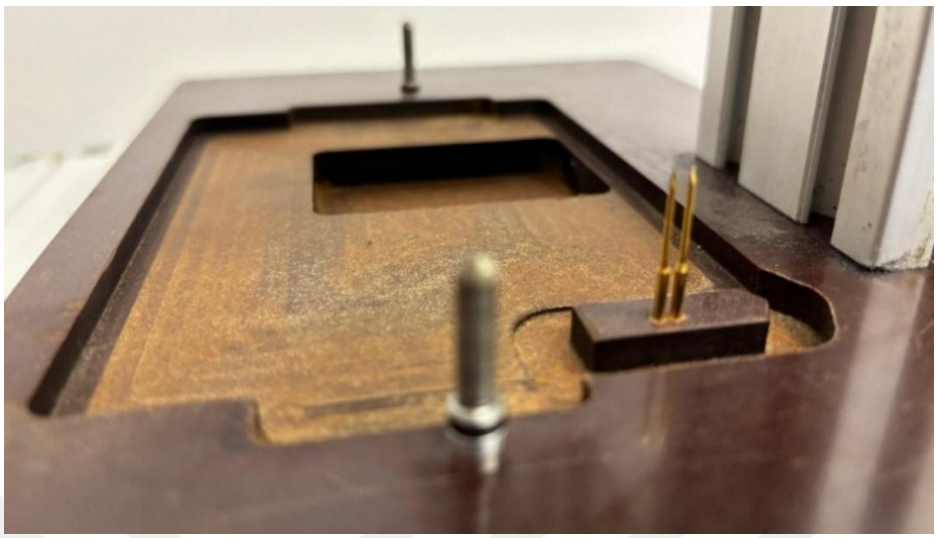
Üst baskı, bir klemp aracılığıyla manuel olarak kontrol edilebilmektedir. Elektronik kart fikstüre yerleştirilip; üst baskı aşağı indirildiğinde, yaylı test probları ilgili noktalara temas ederek elektronik kartı enerjilendirir ve LED ışıkları yanar.

Elektronik kartın farklı bölgelerindeki her bir LED'den çıkan ışığın fiber optik kablolar aracılığıyla bir LED plakasına taşınması sağlanmıştır. Bu LED plakası, 'optik blok' olarak da ifade edilebilir. Bu blok, tüm LED ışıklarının tek bir düzlemde toplanmasını sağlar. Optik blok karşısında konumlandırılan kamera, bu düzlemdeki ışıkları görüntüleyerek sisteme veri aktarır. Bloktaki hangi kanala, UUT üzerindeki hangi LED'in karşılık geldiği bilinir ve algoritma bu doğrultuda oluşturulur. Nihayetinde sistem, tek bir düzlemden yakaladığı görüntü ile testi gerçekleştirerek tüm LED'lerin test sonucunu ve ölçüm değerlerini bildirir. Üretilen prototipin genel görünümü ve çeşitli bölge tanımlamaları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



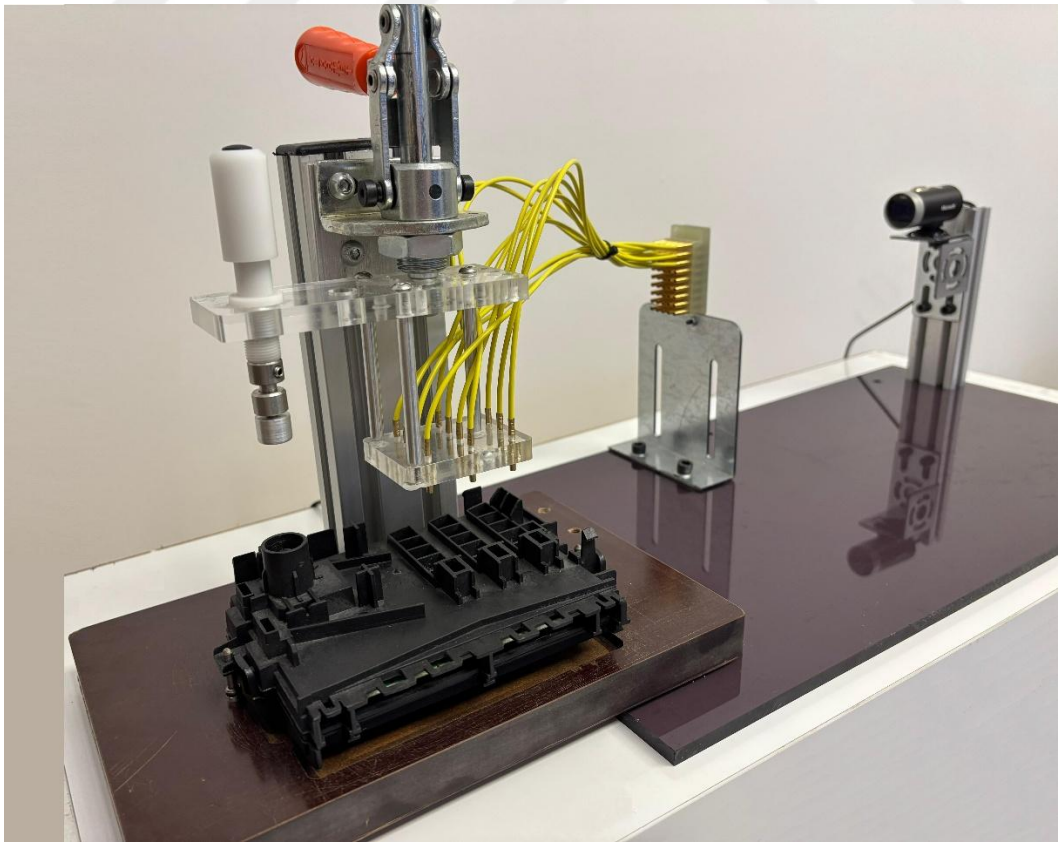
Şekil 4.3 Prototipin genel görünümü

Şekil 4.4'te fikstür alt jiginin yan görünüşü gösterilmiştir. Test probları ve referans pimleri de bu görselde gözükmektedir.



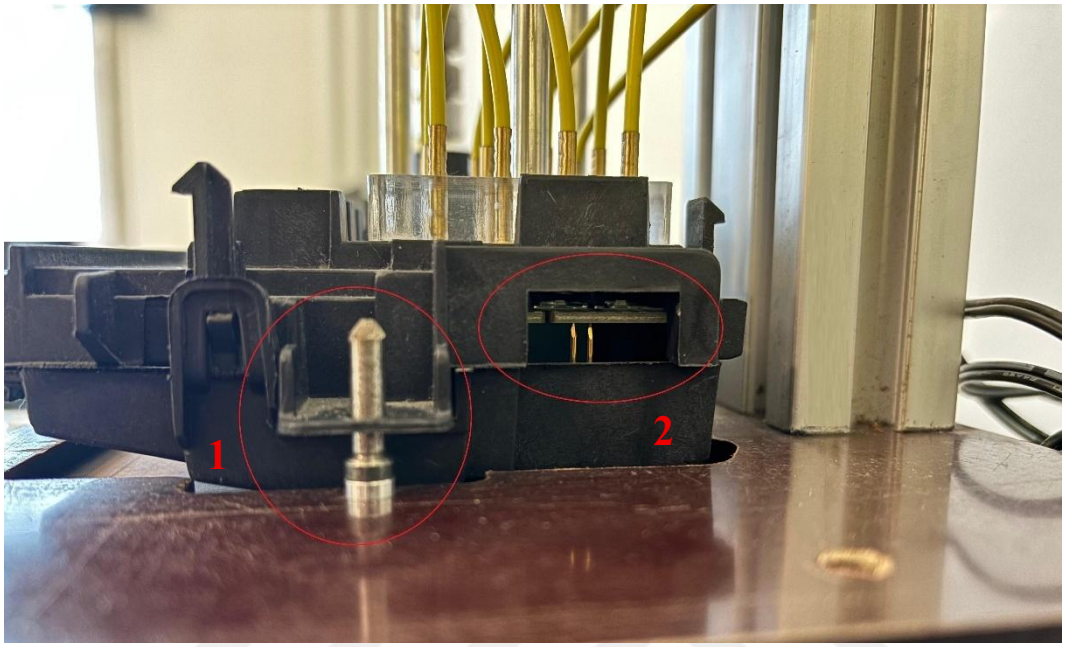
Şekil 4.4 Prototipin fikstür bölümünün alt jiginin yan görünüşü

Şekil 4.5'te elektronik kartın fikstüre yerleştirildiği durum gösterilmiştir. Kart şasisine ait bulaşık makinesi montaj deliklerine, fikstürde bulunan referans pimleri geçmektedir. Böylelikle fikstür ve elektronik kartın referanslaması sağlanmaktadır.



Şekil 4.5 Elektronik kartın fikstüre yerleştirildiği prototip görünümü

Şekil 4.6'daki 1 numaralı alanda; test sistemi prototipindeki referans pimlerinden birinin, elektronik kartın dış şasisinin montaj deliklerine girmesi yandan gösterilmiştir. 2 numaralı alanda ise üst baskı aşağı indirildikten sonra yaylı test problarının elektronik karta teması yandan gösterilmiştir.

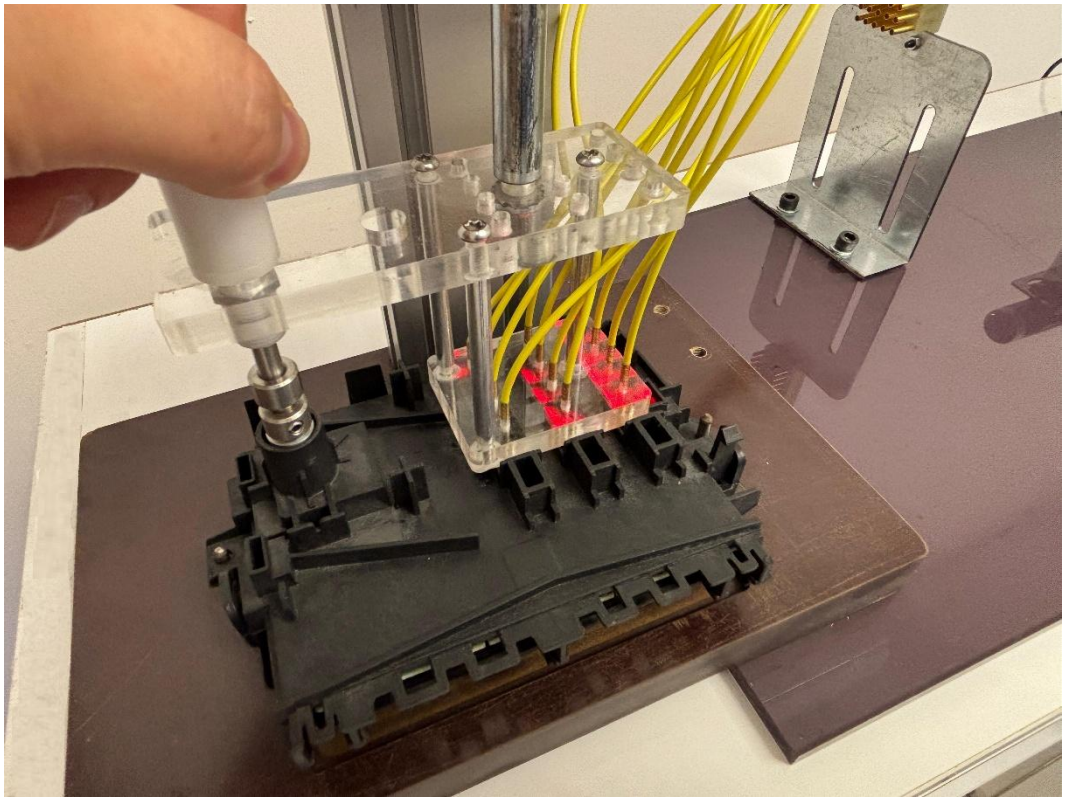


Şekil 4.6 Mekanik referanslama ve yaylı test probu teması

ICT/FCT sistemlerinde baskı indirilip temas sağlandığında UUT'e fiziksel erişim genellikle mümkün olmamaktadır. Ayrıca UUT enerjilendiği için, test sırasında ürüne fiziksel bir temas olması güvenli değildir. Bu sebeplerle, UUT test altındayken; test akışıyla alakalı olarak UUT üzerindeki buton, anahtar, konnektör gibi çeşitli komponentlere fiziksel temas gereken durumlarda kullanılması amacıyla üretilmiş olan özel test ekipmanları vardır. Bu ekipmanlar elektrikli, pnömatik veya manuel tahrikli olabilir.

Elektronik kartta bir komütatör tip anahtar bulunmaktadır. Bu komütatörün konumu değiştirildiğinde karttaki 12 adet LED'in yanma senaryosu değişmektedir. Her bir konumda farklı, belirli sayı ve sırada LED enerjilenmektedir. Elbette ki bu anahtar konumlarının amacı sadece LED senaryosunu değiştirmek değil, bulaşık makinesi fonksiyonlarındaki farklı davranışları oluşturmaktır. Ancak bu prototip çalışması kapsamında ilgilendiğimiz kısım LED çalışma senaryolarının değişimidir.

UUT üzerindeki komütatör tip anahtarı döndürmek amacıyla manuel bir pot manipülatörü belirlenmiş ve fikstüre eklenmiştir. Şekil 4.7'de manuel pot manipülatörünün prototip üzerinde kullanımı gösterilmiştir. UUT üzerindeki komütatör anahtar döndürülerek LED senaryoları değiştirilebilmektedir.



Şekil 4.7 Manuel pot manipülatörü ile komütatör anahtarın döndürülmesi

4.4 Yazılım Geliştirme

LabVIEW yazılım geliştirme ortamı, temel olarak iki ana bileşenden oluşur: Front Panel (Ön Panel) ve Block Diagram (Blok Diyagramı). Bu iki bileşen birlikte çalışarak hem kullanıcı arayüzünü hem de yazılımın mantıksal altyapısını oluşturur. Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım bileşenlerinin açıklanabilmesi için bu iki yapı arasındaki farkların net bir şekilde ortaya konması önemlidir.

Front Panel, kullanıcı ile etkileşimin sağlandığı görsel arayüzdür. Kontrol ve gösterge elemanları (örneğin düğmeler, grafikler, sayısal göstergeler) burada yer alır. Bu panel, kullanıcıdan veri almak veya işlem sonuçlarını görsel olarak sunmak amacıyla kullanılır. Kullanıcı arayüzü açısından kritik öneme sahip olsa da yazılımın işlevsel mantığını içermez.

Block Diagram ise yazılımın esas mantıksal yapısının oluşturulduğu alandır. LabVIEW'in grafiksel programlama yaklaşımı doğrultusunda burada çeşitli fonksiyon blokları, kontrol yapıları, veri akış bağlantıları ve VI bileşenleri yer alır. Veri akışı temelli bu yapı, yazılımın çalışma prensibini belirler ve tüm işlemler bu diyagram üzerinden gerçekleştirilir.

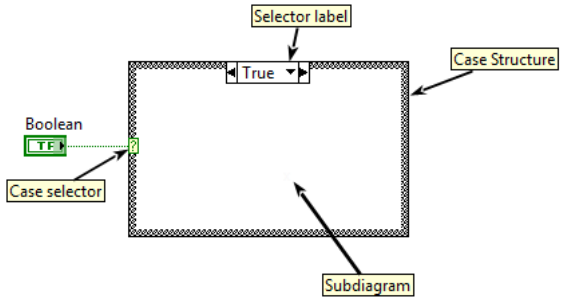
Bu bağlamda, tez kapsamında geliştirilen fonksiyon test sistemine ait esas yazılım yapısı ve mühendislik katkısı Block Diagram üzerinde şekillenmiştir. Bu nedenle yazılım geliştirme bölümünde, öncelikli olarak Block Diagram görüntülerine yer verilmiştir. Front Panel sadece kullanıcı etkileşimi için bir araç olup, yazılımın asıl mantıksal akışını temsil etmediğinden, yazılımın analizinde ikincil bir konumda değerlendirilmiştir.

4.4.1 Kullanılan Fonksiyonlar

LabVIEW, görsel programlama temelli bir yazılım geliştirme ortamıdır. Bu nedenle, tez çalışmamız kapsamında geliştirilen yazılımın yapısı ekran görüntüleri aracılığıyla sunulmuştur. Ancak, geleneksel metin tabanlı dillerde olduğu gibi kod satırları üzerinden yorumlama imkânı bulunmadığından; bu görsellerde yer alan blok ve yapıların ne anlama geldiğinin bilinmesi, yazılımın işleyişinin doğru şekilde anlaşılabilmesi açısından önemlidir. Bu gerekçeyle; yazılımda kullanılan temel LabVIEW fonksiyonları ve VI'ları görselleriyle birlikte bu bölümde kısaca açıklanmıştır. Bu fonksiyon ve sanal enstrümanlar haricinde, çeşitli LabVIEW indikatör ve kontrol araçları da kullanılmıştır.

4.4.1.1 Case Structure

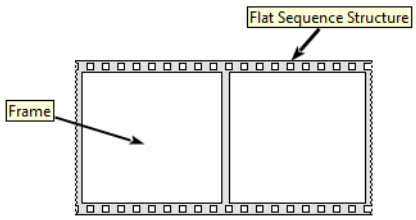
Koşula bağlı olarak farklı kod bloklarının çalıştırılmasını sağlar. Bir 'if-else' yapısına benzer şekilde, belirli bir girdiye göre farklı işlemler gerçekleştirilir. Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Case structure [60]

4.4.1.2 Flat Sequence

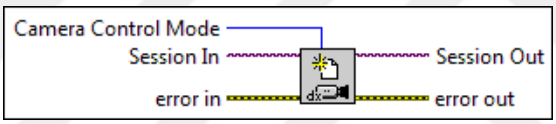
İşlem adımlarının belirli bir sırayla ve sıralı biçimde gerçekleştirilmesini sağlar. Zamanlamanın ve akışın kontrol altında tutulması gereken durumlarda kullanılır. Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Flat sequence [61]

4.4.1.3 IMAQdx Open Camera VI

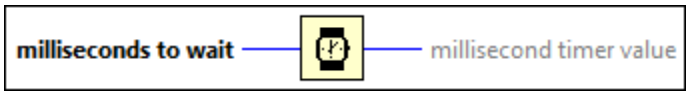
Bağlı olan bir kamera aygıtını açmak ve veri alımına hazır hâle getirmek için kullanılır. Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 IMAQdx open camera VI [62]

4.4.1.4 Wait (ms)

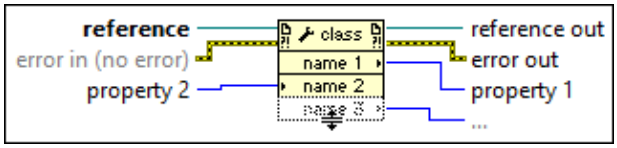
Verilen milisaniye süresi kadar programın beklemesini sağlar. Döngüler içinde işlem gecikmesi oluşturmak için kullanılır. Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Wait (ms) [63]

4.4.1.5 Property Node

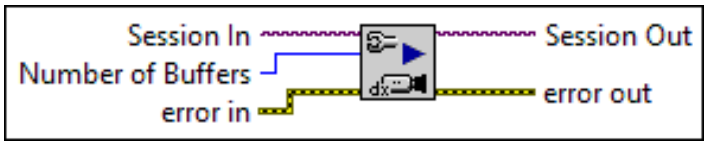
Bir nesnenin (örneğin bir kontrol, gösterge ya da kamera) özelliklerini okuma veya değiştirme imkânı sunar. Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Property node [64]

4.4.1.6 IMAQdx Configure Grab VI

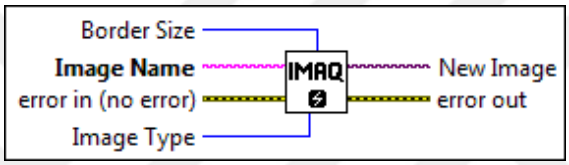
Kamera ile sürekli görüntü alma (grab) işlemi için gerekli yapılandırmayı yapar. Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 IMAQdx configure grab VI [65]

4.4.1.7 IMAQ Create VI

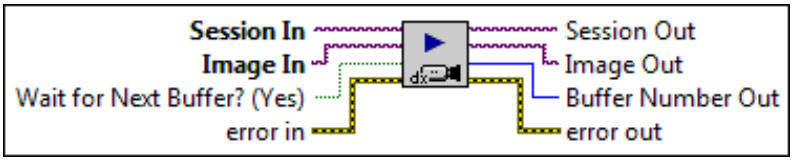
Bir görüntü tamponu oluşturur. Görüntü verilerinin saklanabilmesi için öncelikle bu tampon gereklidir. Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14 IMAQ create VI [66]

4.4.1.8 IMAQdx Grab VI

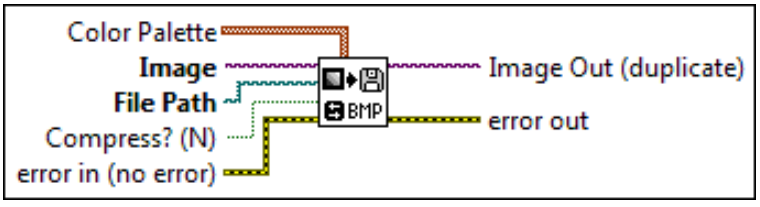
Kameradan bir kare (frame) yakalayarak daha önceden oluşturulmuş görüntü tamponuna aktarır. Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



Şekil 4.15 IMAQdx grab VI [67]

4.4.1.9 IMAQ Write File 2 VI

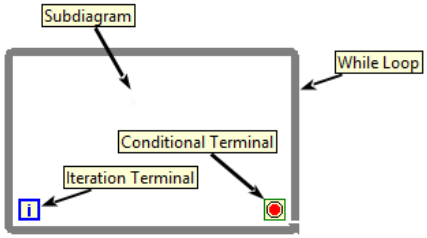
Alınan görüntüyü belirtilen formatta (örneğin BMP, JPEG veya PNG) dosya olarak kaydetmek için kullanılır. Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 IMAQ write file 2 VI [68]

4.4.1.10 While Loop

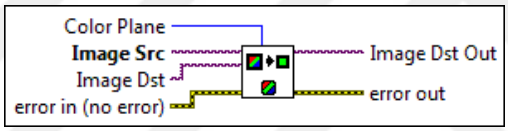
Belirli bir koşul sağlanana kadar kod blokunun sürekli olarak çalışmasını sağlar. Döngü yapısıdır. Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 While loop [69]

4.4.1.11 IMAQ ExtractSingleColorPlane VI

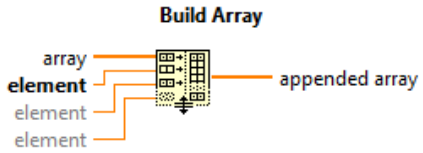
Bir renkli görüntüden yalnızca bir renk düzlemini (kırmızı, yeşil veya mavi) ayırarak çıkarır. Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 IMAQ extractsinglecolorplane VI [70]

4.4.1.12 Build Array

Farklı veri elemanlarını tek bir dizi hâlinde birleştirir. Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Build array [71]

4.4.1.13 Array to Cluster

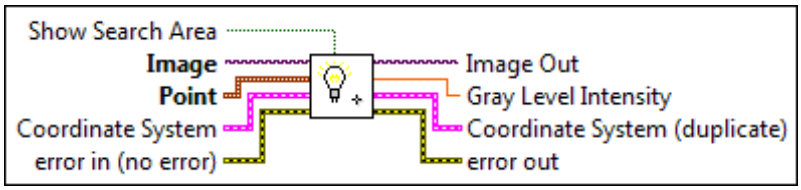
Bir dizi içindeki belirli sayıda ögeyi bir küme (cluster) yapısına dönüştürür. Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Array to cluster [72]

4.4.1.14 IMAQ Light Meter (Point) VI

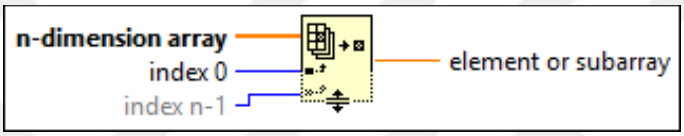
Belirtilen bir pikselin ışık yoğunluğunu ölçmek için kullanılır. Görüntü üzerinde noktasal aydınlık ölçümü sağlar. Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21 IMAQ light meter (point) VI [73]

4.4.1.15 Index Array

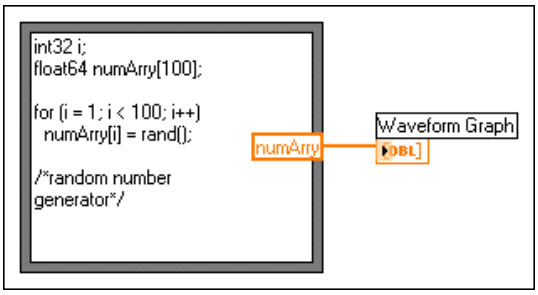
Bir dizinin istenen indeksindeki ögeye erişmeyi sağlar. Şekil 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.22 Index array [74]

4.4.1.16 Formula Node

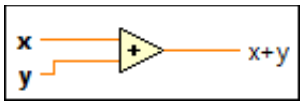
Matematiksel ifadelerin daha esnek ve geleneksel programlama tarzında yazılmasına olanak tanır. Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 Formula node [75]

4.4.1.17 Add function

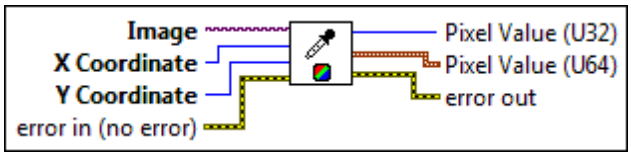
İki sayının toplanmasını sağlayan temel aritmetik fonksiyondur. Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24 Add function [76]

4.4.1.18 IMAQ GetColorPixelValue VI

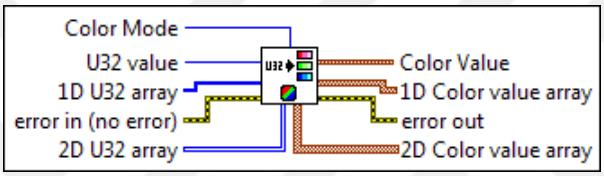
Bir görüntüdeki belirli bir pikselin renk bileşenlerini (RGB) elde etmek için kullanılır. Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25 IMAQ getcolorpixelvalue VI [77]

4.4.1.19 IMAQ IntegerToColorValue VI

Tamsayı değerlerini renk bileşenlerine (RGB gibi) dönüştürmek için kullanılır. Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.26 IMAQ integertocolorvalue VI [78]

4.4.1.20 Cluster To Array

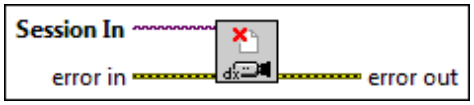
Bir küme yapısındaki ögeleri diziye dönüştürerek daha kolay işlenebilir hâle getirir. Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Cluster to array [79]

4.4.1.21 IMAQdx Close Camera VI

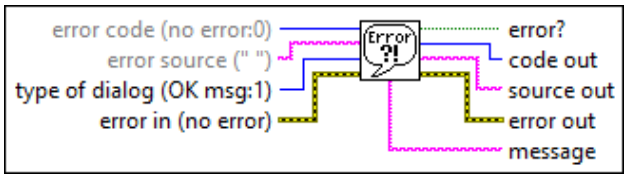
Kamerayla olan bağlantıyı sonlandırmak ve ayrılmış sistem kaynaklarını serbest bırakmak için kullanılır. Görüntü alma işlemleri tamamlandıktan sonra sistem performansı ve kaynak yönetimi açısından mutlaka çağrılması gereken bir fonksiyondur. Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 IMAQdx close camera VI [80]

4.4.1.22 Simple Error Handler VI

Bir hata durumu oluştuğunda, kullanıcıya bilgi vermek ve hata ayıklamayı kolaylaştırmak amacıyla standart bir hata mesajı gösterir. Şekil 4.29'da gösterilmiştir.

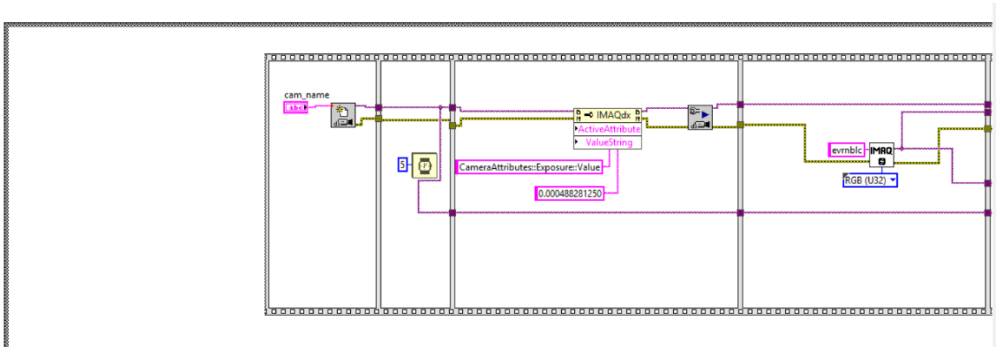


Şekil 4.29 Simple error handler VI [81]

4.4.2 Yazılım Mimarisi

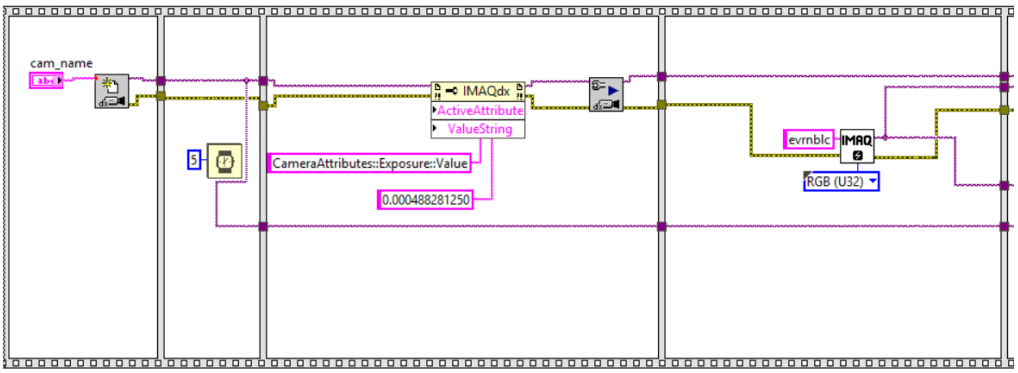
Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistemin temel mühendislik katkısı ve katma değeri, yazılım geliştirme sürecinde ortaya konmuştur. Donanım bileşenleri belirli standartlara dayanmakla birlikte, bu donanımların işlevsel hâle gelmesini ve hedeflenen test otomasyonu sürecini sağlayan asıl yapı, NI LabVIEW ortamında geliştirilen yazılımdır. Yazılım; görüntü işleme, kontrol, veri analizi ve karar mekanizmalarını entegre ederek sistemin bütünlüğünü sağlamış ve tez çalışmasına özgün bir mühendislik çözümü kazandırmıştır. Bu bölümde, geliştirilen yazılımın yapısını açıklamak amacıyla LabVIEW blok diyagramlarına ait ekran görüntülerine yer verilmiştir. Bu görüntüler, yazılım algoritması açısından mantıksal sıralamaya göre sunulmuştur.

Şekil 4.30'da LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 1. parça gösterilmektedir.



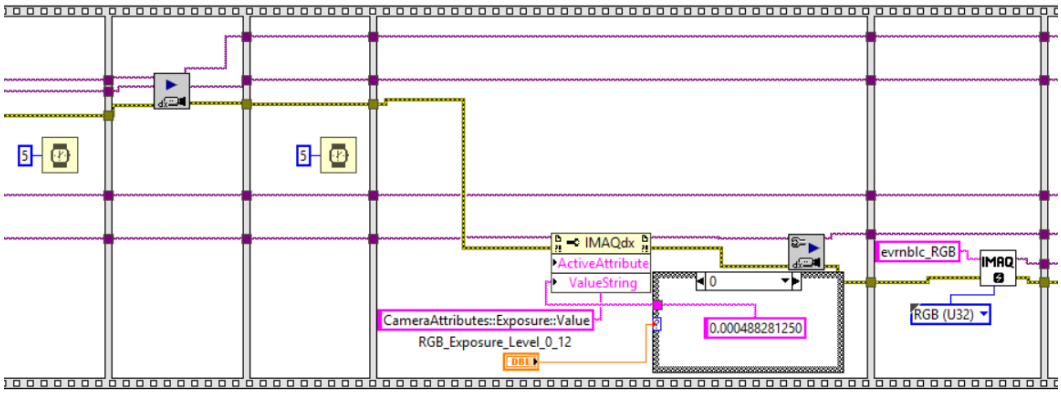
Şekil 4.30 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 1

Şekil 4.31'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 2. parça gösterilmektedir.



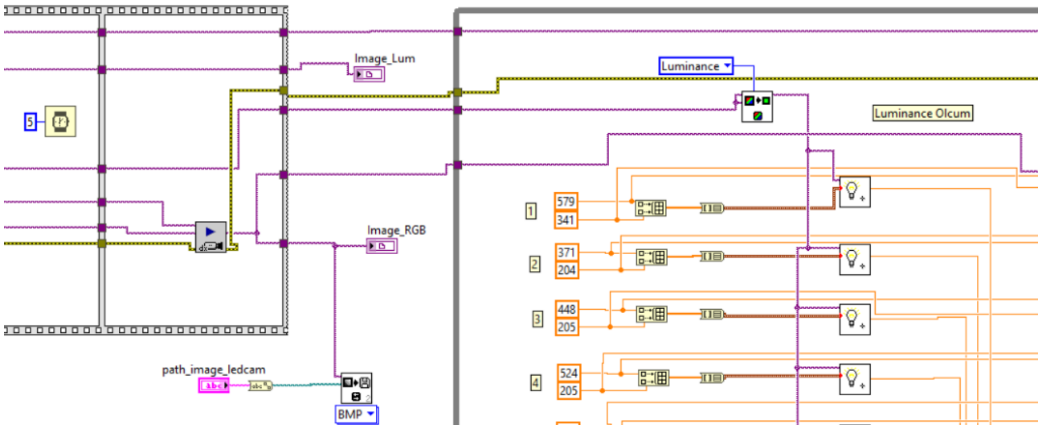
Şekil 4.31 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 2

Şekil 4.32'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 3. parça gösterilmektedir.



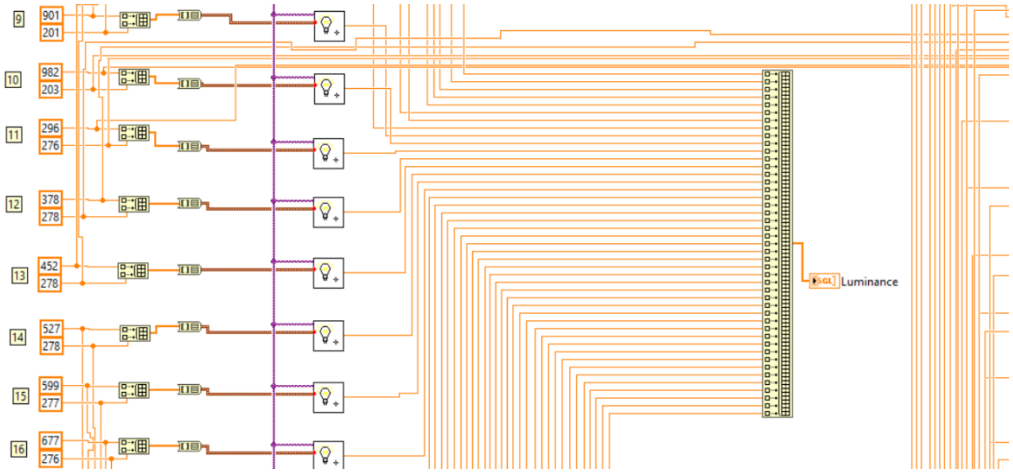
Şekil 4.32 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 3

Şekil 4.33'te LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 4. parça gösterilmektedir.



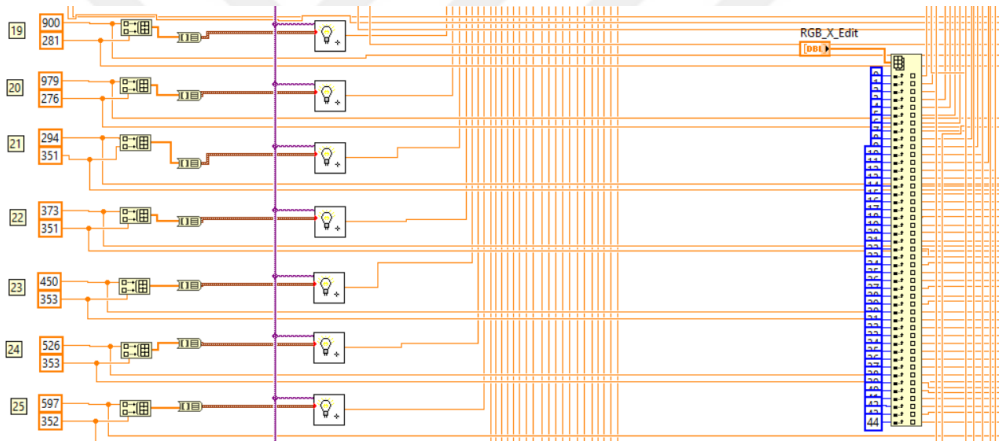
Şekil 4.33 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 4

Şekil 4.34'te LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 5. parça gösterilmektedir.



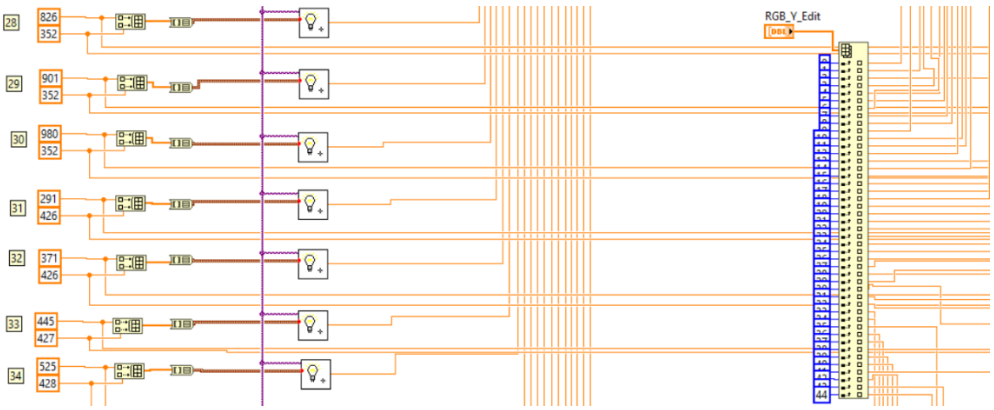
Şekil 4.34 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 5

Şekil 4.35'te LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 6. parça gösterilmektedir.



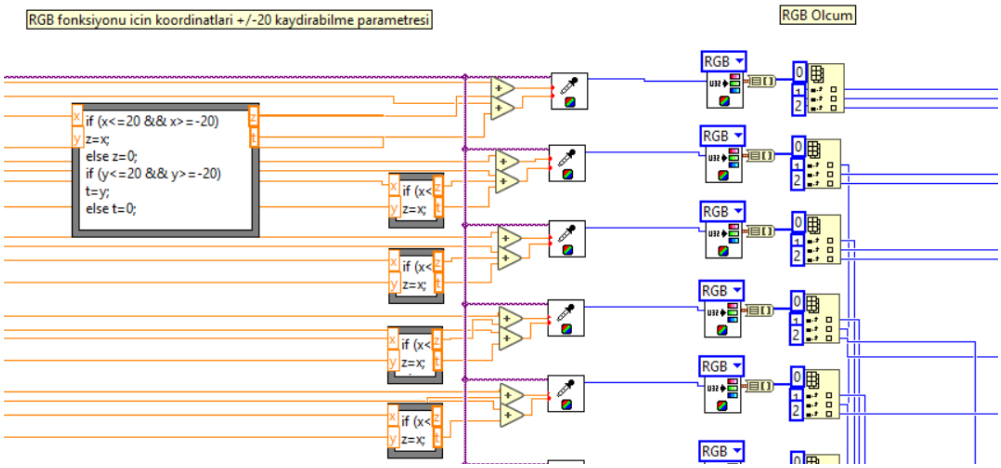
Şekil 4.35 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 6

Şekil 4.36'da LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 7. parça gösterilmektedir.



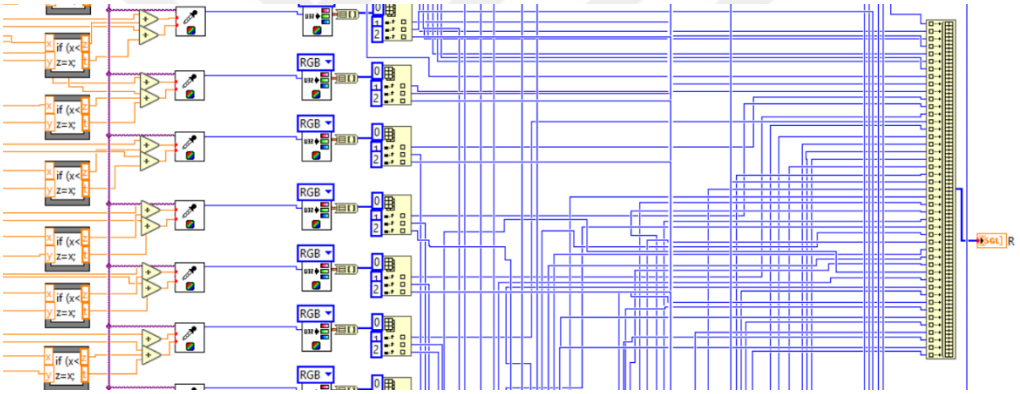
Şekil 4.36 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 7

Şekil 4.37'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 8. parça gösterilmektedir.



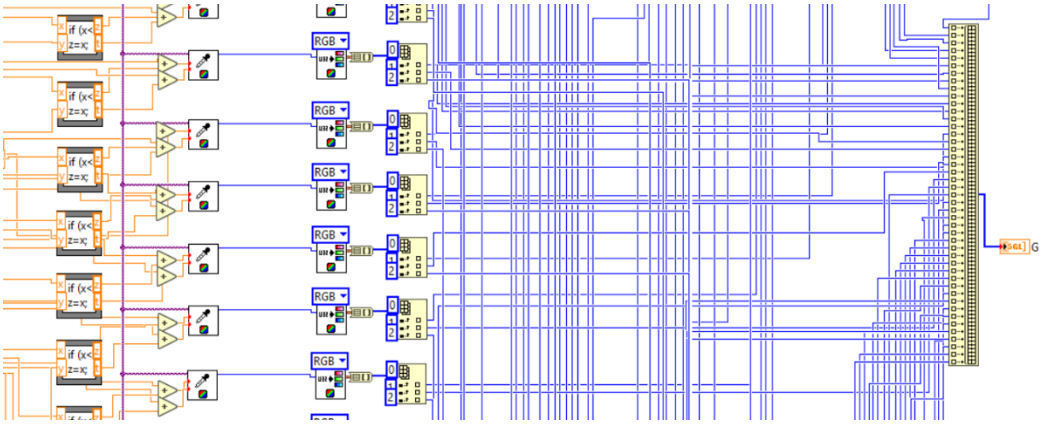
Şekil 4.37 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 8

Şekil 4.38'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 9. parça gösterilmektedir.



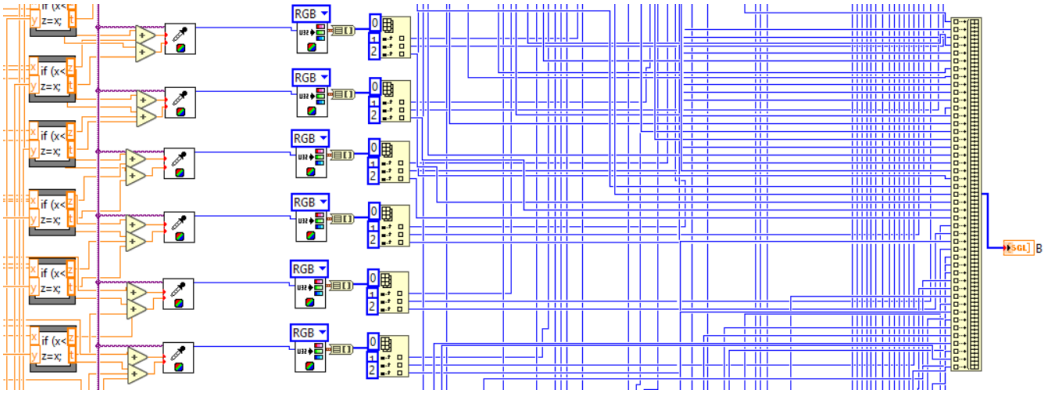
Şekil 4.38 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 9

Şekil 4.39'da LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 10. parça gösterilmektedir.



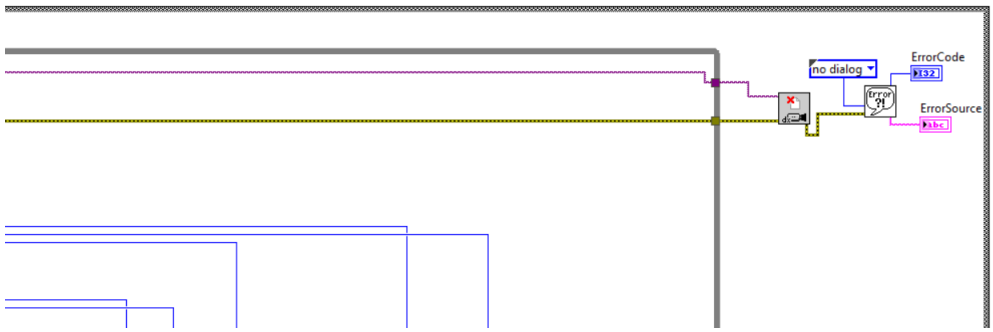
Şekil 4.39 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 10

Şekil 4.40'ta LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 11. parça gösterilmektedir.



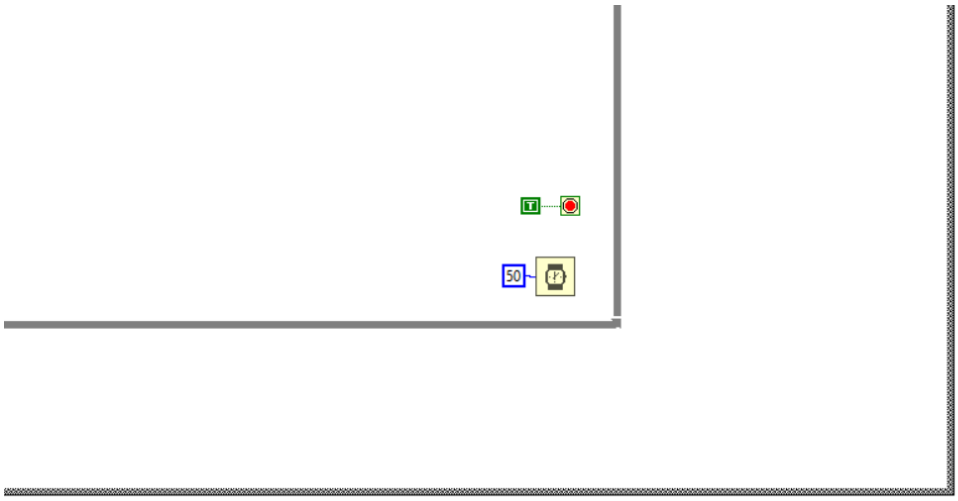
Şekil 4.40 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 11

Şekil 4.41'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 12. parça gösterilmektedir.



Şekil 4.41 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 12

Şekil 4.42'de LabVIEW yazılımı blok diyagramına ait 13. parça gösterilmektedir.



Şekil 4.42 LabVIEW yazılım blok diyagram parça 13

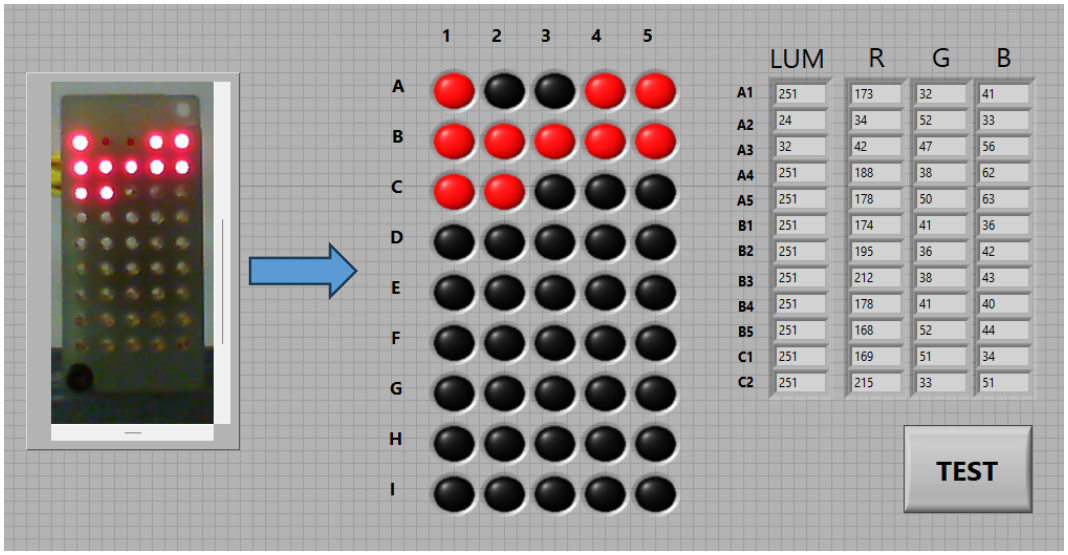
4.5 Final Ürün

Bu bölümde, geliştirilen görüntü işleme tabanlı LED kontrol sistemi yazılımının tamamlanmış hâli ve LabVIEW ön panel arayüzü, prototip uygulaması ile birlikte ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Prototip aşaması tamamlanan sistem, nihai hâliyle işlevsel olarak test edilebilir bir bütünlük kazanmıştır.

Prototip üzerindeki pot manipülatörünün döndürülmesiyle oluşan farklı LED senaryolarına yönelik anlık ölçümlerin arayüz görüntüleri bu bölümdeki çeşitli görsellerde ifade edilmiş ve detayları anlatılmıştır.

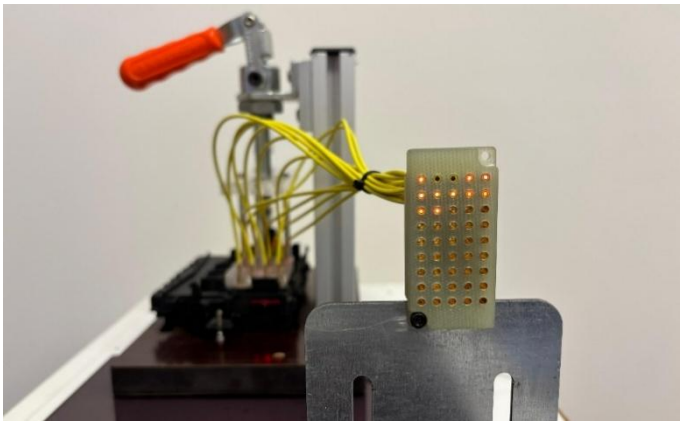
Şekil 4.43'te, birinci LED senaryosuna yönelik test durumu gösterilmiştir. Sol tarafta gerçek kamera görüntüsü varken; orta kısımdaki grafik LED görsellerini ise yazılım, testin sonucuna göre otomatik olarak oluşturmaktadır. En sağda bulunan LUM (Luminance-Parlaklık), R (Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil), B (Blue-Mavi) hücrelerinde ise her bir kanalın ölçüm değerleri bulunmaktadır. Dolasıyıyla LUM (parlaklık) ve RGB (renk) ölçümü gerçekleştirilip, değerleri gösterilmektedir.

Parlaklık testi mükemmel kararlılıkla çalışmaktadır. Yani bu sistem, LED'in yanıp/yanmadığını veya kısık yanıp/yanmadığını kesin olarak test edebilir. Renk testi kamera bazlı bir ölçüm olması sebebiyle daha yüzeysel bir seviyededir. Analizör seviyesinde aynı rengin farklı tonlarını yakalayabilecek bir renk ölçümü kamera bazlı bu sistemden beklenmemelidir. Buna karşın hangi renk olduğu bilgisini kesin olarak belirleyecek seviyede bir ölçüm bu sistemde sağlanmaktadır.



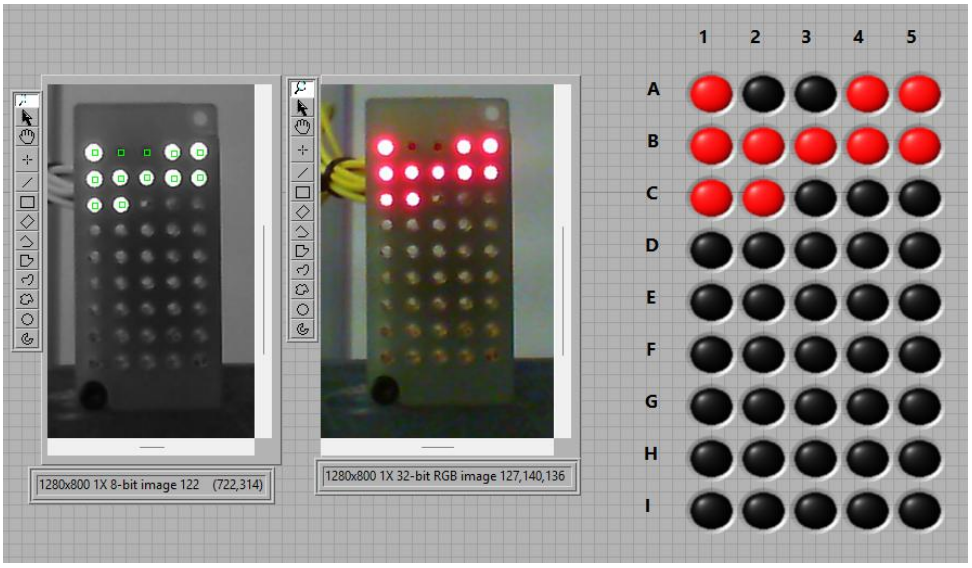
Şekil 4.43 Birinci LED senaryosu test arayüzü

Şekil 4.44'te birinci LED senaryosu sırasındaki optik blok görseline yer verilmiştir.



Şekil 4.44 Birinci LED senaryosu optik blok görünümü

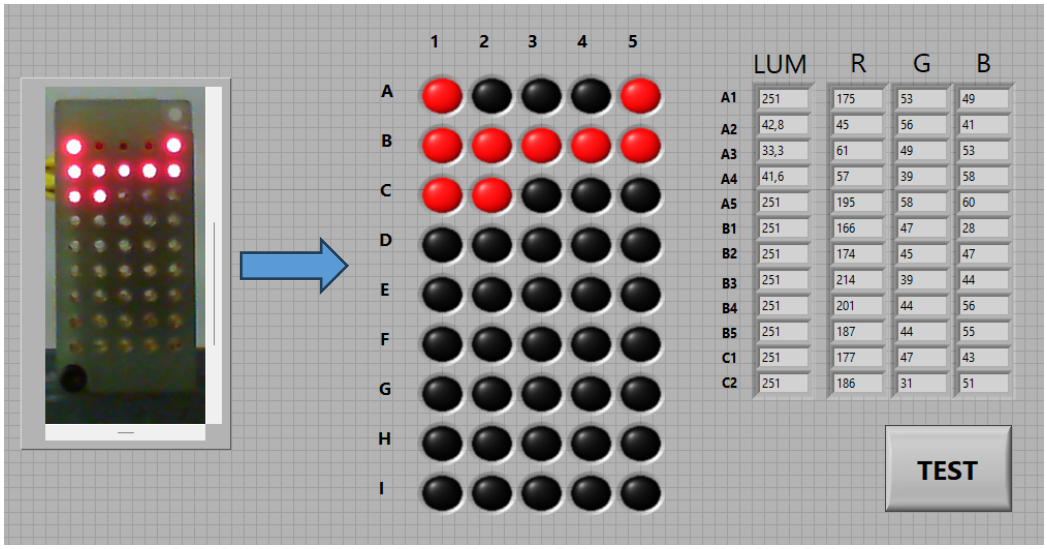
Normal şartlarda LED testleri, ortam ışığından etkilenmemek adına 'karanlık oda'ya alınarak yapılır. Bu bölümde gösterilen LED testlerinin tamamı, prototip görsellerinde olduğu gibi karanlık odaya alınmadan yapılmıştır. Bunun yerine, görüntü işleme yazılım fonksiyonlarıyla suni bir karanlık oda oluşturulmuştur. Ancak prototipe gerçek bir karanlık oda eklenmesi, ölçüm kalitesinin daha da iyi olmasını sağlayacaktır. Nitekim, özellikle renk testlerinde; yazılımsal müdahalelerle karanlık oda oluşturmanın birtakım dezavantajları olduğu için yazılımsal müdahaleyle ortam yeterince karartılmamıştır. Şekil 4.45'te, parlaklık ve renk ölçümleri için yazılımla oluşturulan karanlık odaları ifade edebilmek adına, kameranın yakaladığı parlaklık ve renk ölçümü görüntüleri verilmiştir. Rengin tonunun iyi algılanabilmesi için, yazılımsal karanlık oda düşük tutulmaktadır.



Şekil 4.45 Birinci LED senaryosu parlaklık ve renk kamera görüntüleri

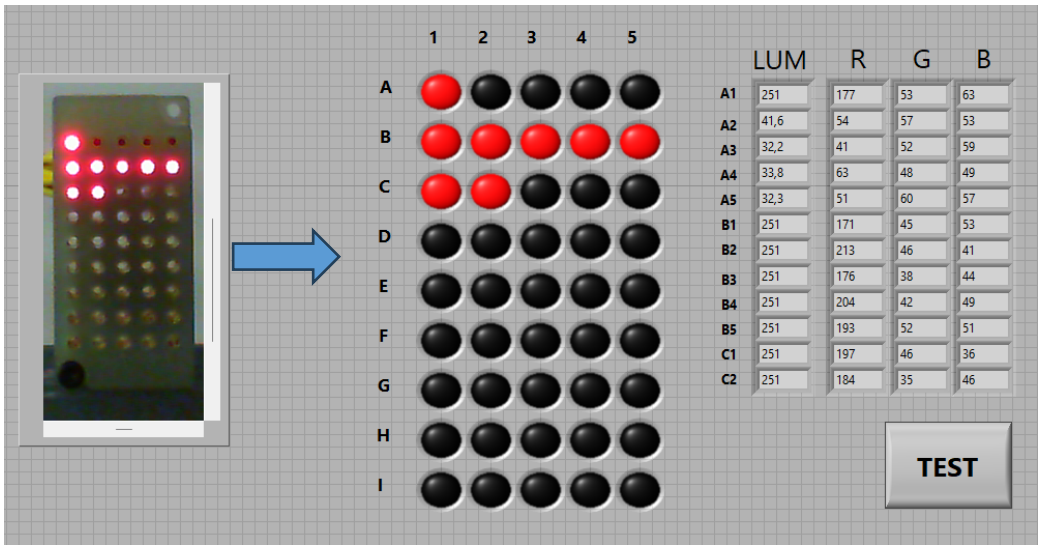
Şekil 4.46'da gösterilen ikinci LED senaryosunun testini incelersek;

A2, A3, A4 numaralı kanallar olmak üzere 3 adet LED çalışmamaktadır. Kalan 9 adet LED çalışmaktadır. Bu durum LED grafiğinde gözükmektedir. Ölçüm değerlerini incelediğimizde ise bu çalışmayan üç LED'e ait kanalda ortam ışığından kaynaklı minör bir parlaklık ölçümü varken, çalışan LED'lerde bu değer yüksek seviyededir. Aynı şekilde, çalışan LED'lerin kırmızı olduğu sonuçlara göre kesin olarak belliyken, çalışmayan LED'lerde siyah ve gri tonlarında bir renk ölçümü alınmıştır. Siyah ve gri tonlu renk ölçümü, ilgili kanalın karanlık olduğunu, doygun bir renk algılanmadığını, yani LED'in çalışmadığını göstermektedir.



Şekil 4.46 İkinci LED senaryosu test arayüzü

Şekil 4.47'de üçüncü LED senaryosunun testi gösterilmiştir.



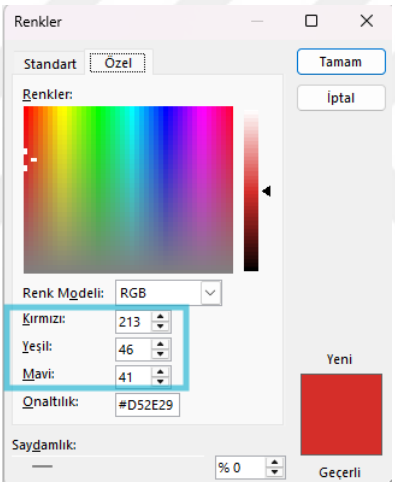
Şekil 4.47 Üçüncü LED senaryosu test arayüzü

Üçüncü LED senaryosunda; çalışan bir LED'e ait olan B2 kanalı ve çalışmayan bir LED'e ait olan A5 kanalının ölçümleri Tablo 4.2'de karşılaştırılmıştır.

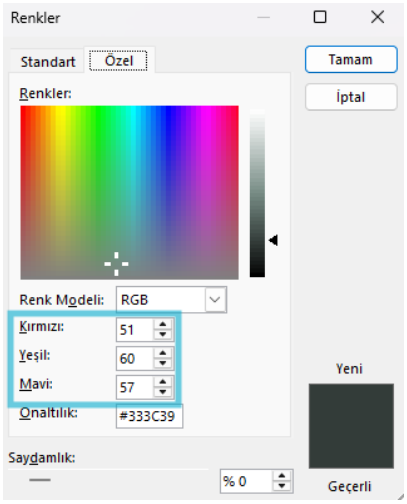
Tablo 4.2 Çalışan ve çalışmayan iki ayrı LED'e ait ölçümler

Kanal	**LUM**	**R**	**G**	**B**	**Çalışıyor mu?**	**Renk**
B2	251	213	46	41	EVET	
A5	32,3	51	60	57	HAYIR	

Bu tablodaki renk sütununda gösterilen renkler, test sisteminde ölçülen RGB değerlerine karşılık gelen renklerdir. Şekil 4.48'de çalışan LED'in ve Şekil 4.49'da çalışmayan LED'in, ölçülen RGB değerlerine karşılık gelen renkler gösterilmiştir.

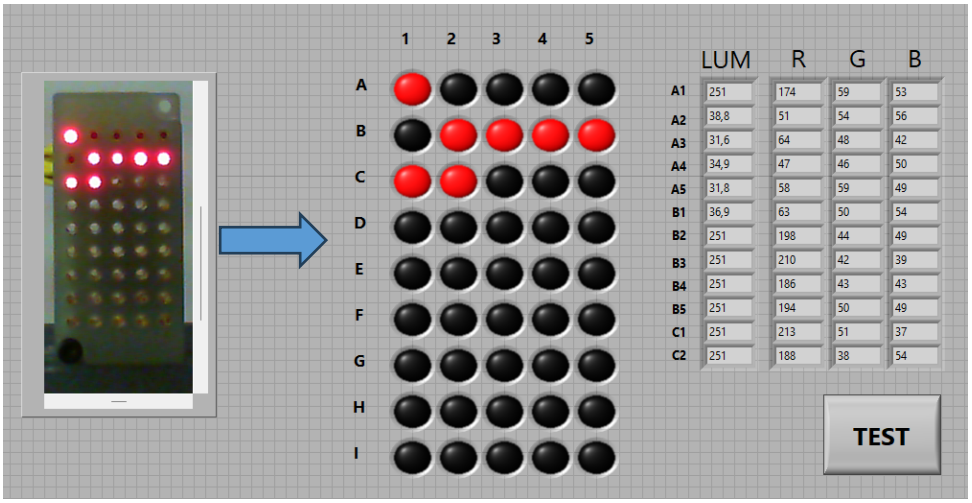


Şekil 4.48 Üçüncü LED senaryosu B2 numaralı kanal renk ölçümü

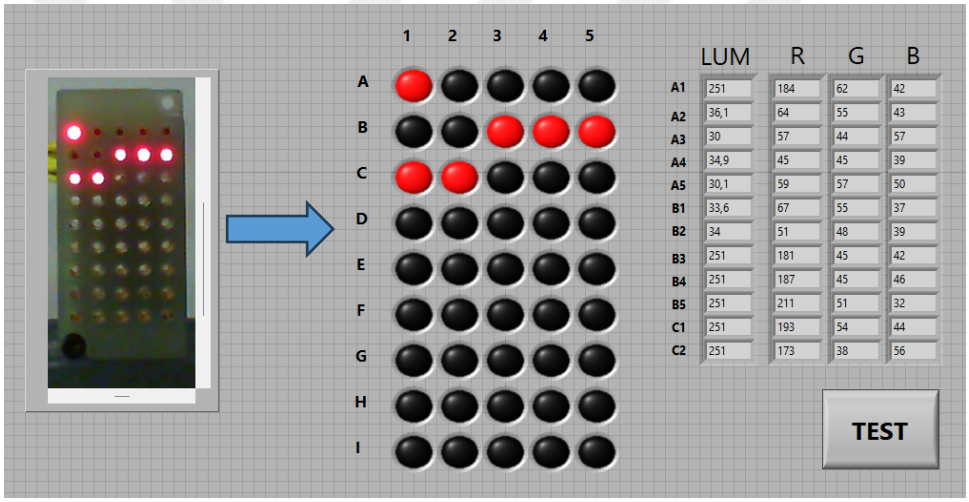


Şekil 4.49 Üçüncü LED senaryosu A5 numaralı kanal renk ölçümü

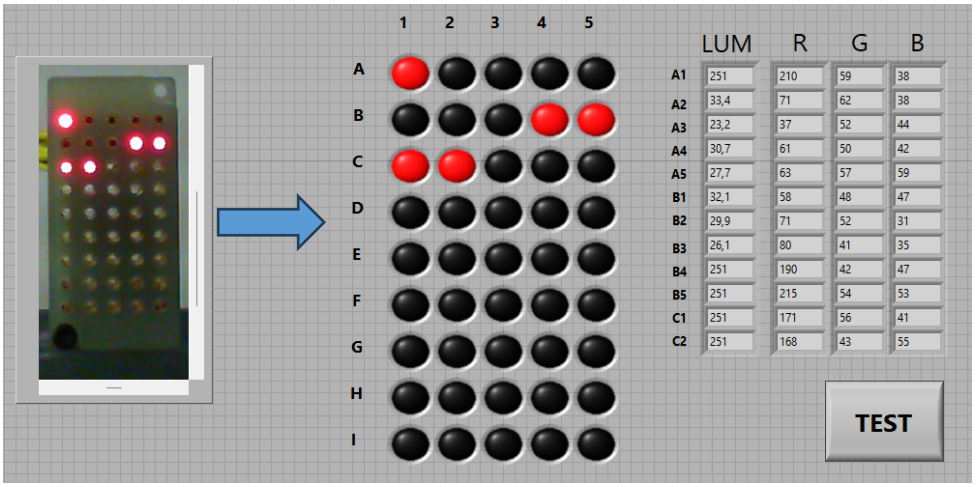
Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52'de çeşitli LED senaryosu testleri gösterilmiştir.



Şekil 4.50 Dördüncü LED senaryosu test arayüzü

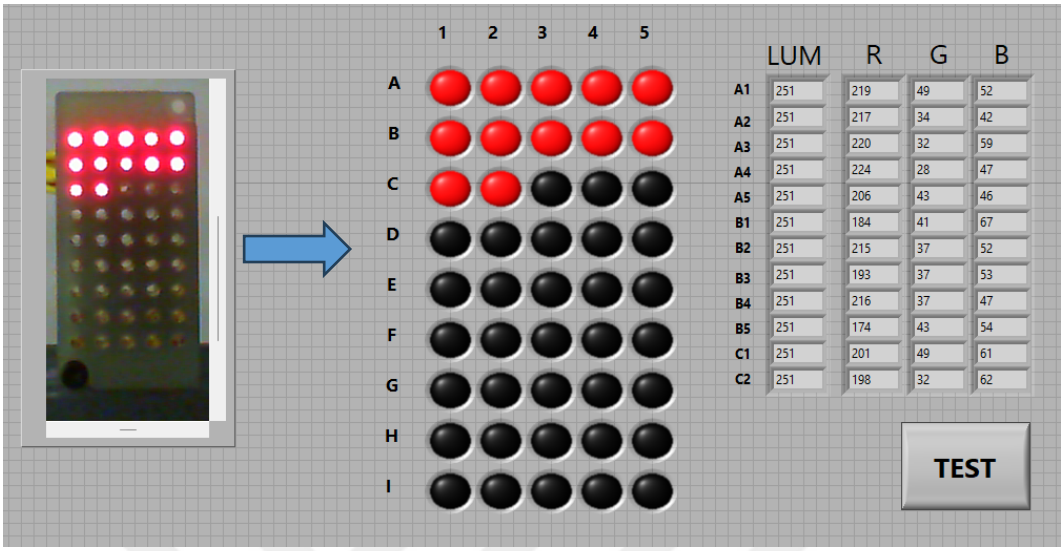


Şekil 4.51 Beşinci LED senaryosu test arayüzü



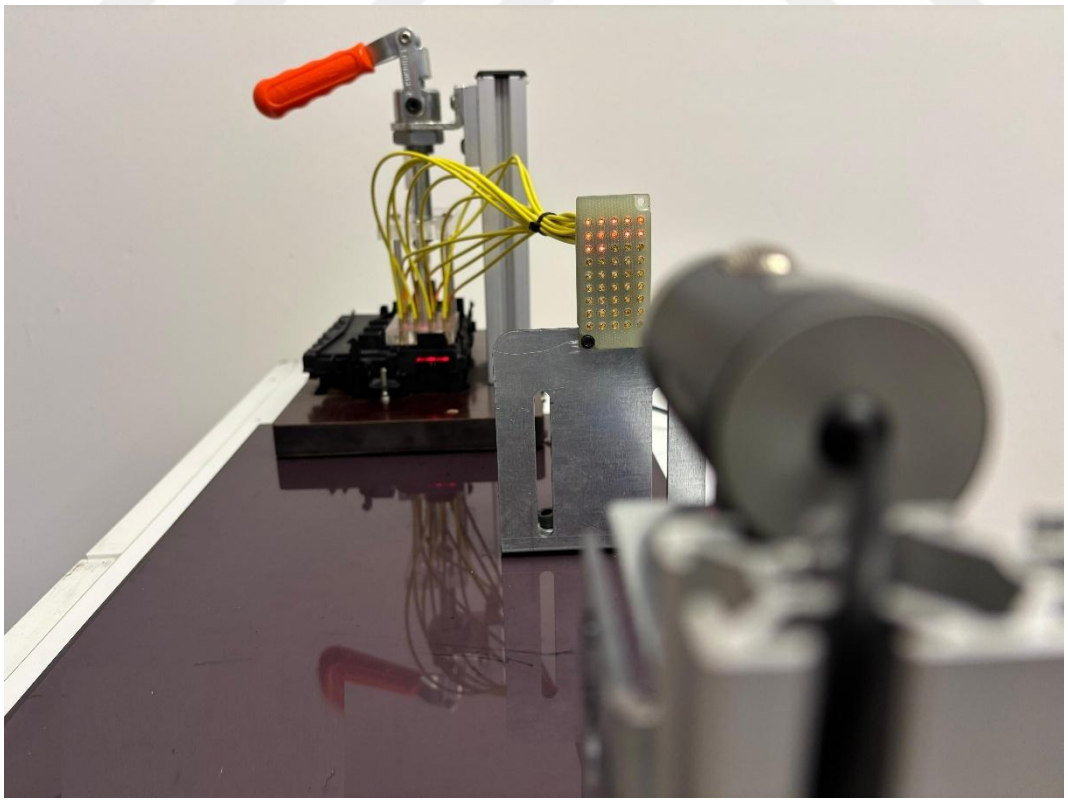
Şekil 4.52 Altıncı LED senaryosu test arayüzü

Şekil 4.53'te UUT üzerindeki tüm LED'lerin yandığı, yani bir başka deyişle UUT'nin LED testini başarıyla geçtiği yedinci senaryoya ait test arayüzü bulunmaktadır.



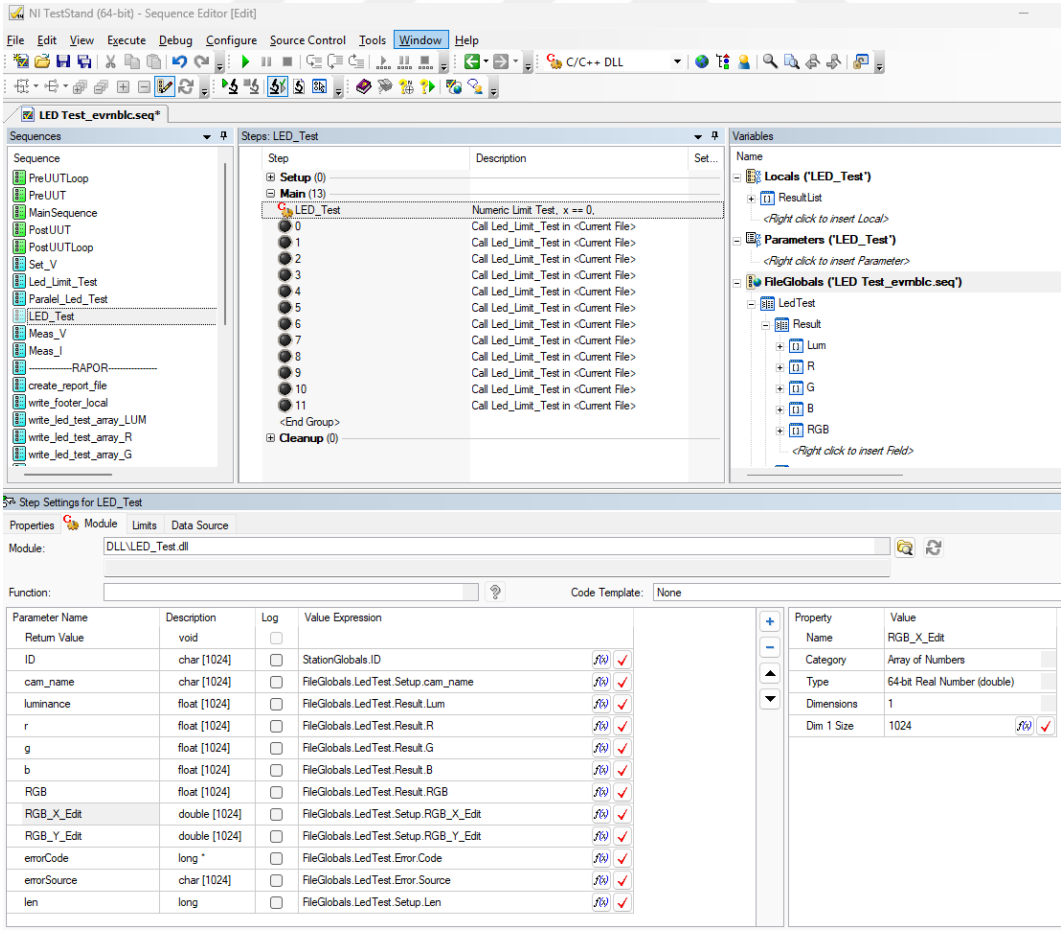
Şekil 4.53 Yedinci LED senaryosu test arayüzü

Şekil 4.54'te, kamera görüş açısından, tüm LED'lerin çalıştığı yedinci LED senaryosuna ait olan fikstür ve optik blok görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 4.54 Yedinci LED senaryosu fikstür ve optik blok görünümü

LabVIEW ortamında geliştirilen dinamik bağlantı kütüphanesi (DLL), National Instruments'ın test otomasyon yazılımı olan NI TestStand içerisine entegre edilerek test sekanslarının (sequence) bir parçası hâline getirilmiştir. DLL, fonksiyonel testin ilgili adımlarında doğrudan çağrılarak LED test işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bu sayede modüler, yeniden kullanılabilir, raporlanabilir ve parametrelerle kontrol edilebilir bir test altyapısı oluşturulmuştur. Tüm kanalların, dolayısıyla tüm LED'lerin LUM, R, G ve B değerleri için alt limit ve üst limit değerleri bir Excel dosyası üzerinden çekilmektedir. Limitler, TestStand programına müdahale etmeden, Excel üzerinden kolaylıkla değiştirilebilmektedir. TS üzerindeki algoritmaya göre LED test sırası geldiğinde DLL otomatik olarak çalışır ve ölçümler alınır. LED'e ait ölçüm değerleri, Excel dosyasına girilmiş olan limit aralığında ise ilgili LED başarılı, limit aralığında değilse başarısız olarak kabul edilir. Test tamamlandığında TS arayüzü ürünün başarılı veya başarısız olduğunu gösterir ve tüm test sonuçlarını bir '.txt' dosyasına raporlar. Şekil 4.55'te TestStand üzerindeki LED test yapısı ve DLL'in birtakım kullanım detayları gösterilmektedir.



Şekil 4.55 LED testi DLL'inin TestStand üzerindeki genel yapısı

Limit değerleri bir Excel dosyasında tanımlanmış olup, bu değerler TestStand sekansı başlatıldığında otomatik olarak okunmaktadır. Bu işlem, sistemin farklı ürün tiplerine esnek şekilde uyarlanabilmesini mümkün kılmaktadır. Tablo 4.3'te sadece parlaklık ölçümüne ait olan alt ve üst limit değerleri gösterilmiştir. R, G, ve B değerleri için de aynı Excel dosyası içerisinde bu limitler girilmekte ve TestStand bu değerleri testin en başında otomatik olarak çekmektedir.

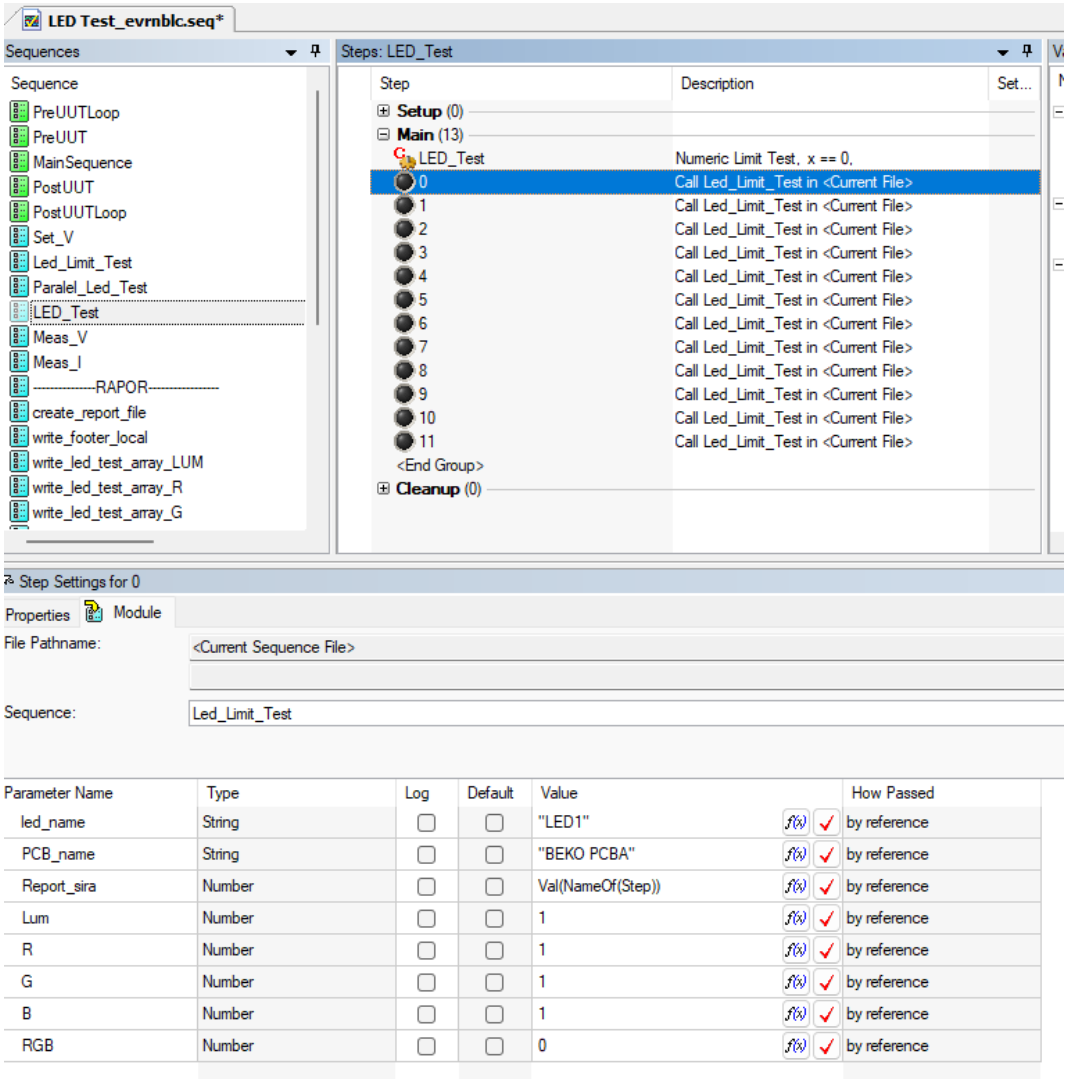
Tablo 4.3 LED testi parlaklık limit değerleri

BEKO PCBA			
<Step Name>			
<Locals>	Variable Value		
<FileGlobals>	Variable Value		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[0]	255	LUMINANCE	
LIMITS.LED.Lum.low_CH[0]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[1]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[1]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[2]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[2]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[3]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[3]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[4]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[4]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[5]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[5]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[6]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[6]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[7]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[7]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[8]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[8]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[9]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[9]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[10]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[10]	245		
LIMITS.LED.Lum.high_CH[11]	255		
LIMITS.LED.Lum.low_CH[11]	245		

TS aracılığıyla her bir test adımının çıktısı, bir '.txt' dosyasına otomatik olarak raporlanmaktadır. Aşağıda, ilk kanala karşılık gelen 'LED1' isimli LED'in bir test sonucuna ait rapor örneğine yer verilmiştir. Raporda, tüm LED'lerin test sonucuna göre UUT'nin başarılı veya başarısız olduğu, test tarih ve saati, UUT barkodu gibi bilgiler de bulunmaktadır. Rapor, TS aracılığıyla isteğe bağlı olarak düzenlenebilir.

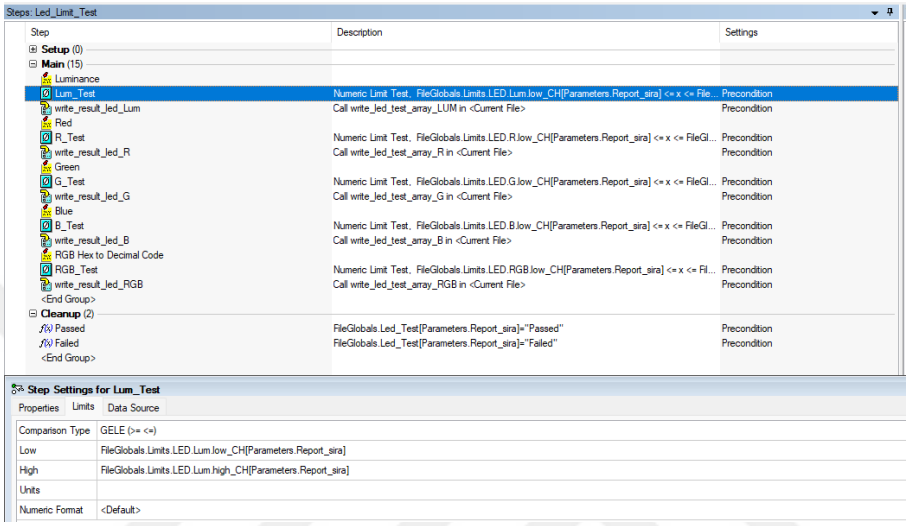
PCBA Adı_LED Adı_TEST Adı;ALT Limit;ÜST Limit:Sonuç ve Değer
BEKO_LED1_LUM;245;255:Passed 251
BEKO_LED1_R;120;255:Passed 158
BEKO_LED1_G;0;85:Passed 53
BEKO_LED1_B;0;85:Passed 41

DLL, arkaplanda LV ve VDM'in Runtime bileşenleri aracılığıyla LED test programını çalıştırır ve aldığı ölçümleri TS üzerindeki ayarlanan parametrelere basar. Dolayısıyla bu aşamada artık tüm ölçüm değerleri TS üzerindeki ilgili dizilere (array) gömülü hâldedir. Bu aşamadan sonra; limitleri çekip dizilerdeki ölçümlerle karşılaştırarak test işlemlerini gerçekleştirmek, TS arayüzüne sonuçları basmak ve raporlama yapmak için TS görev alır. Bu görevleri gerçekleştiren TestStand sekansı (sequence) Şekil 4.56'da genel olarak gösterilmiştir.



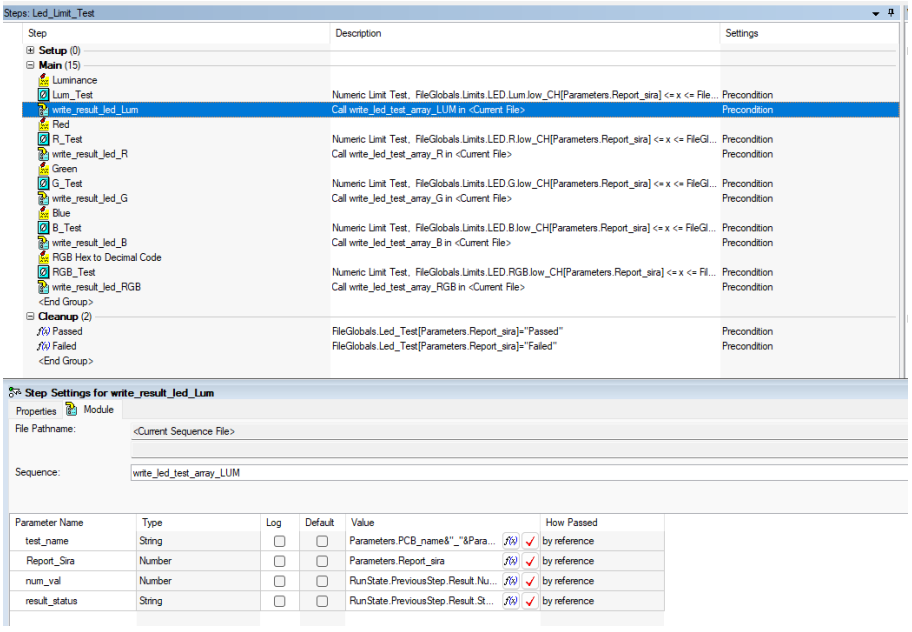
Şekil 4.56 LED testinin TestStand üzerindeki genel yapısı

Şekil 4.57'de LED testi için oluşturulan TestStand yapısı gösterilmektedir. 'Numeric Limit Test' fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilen yapının 'Data Source' kısmına, gerçekleştirilen ölçüm eşitlenmektedir. 'Low' ve 'High' limitler ise Excel formatındaki limit dosyasından çekilerek eşitlenmektedir. Sonuç olarak bu fonksiyon, 'Data Source' değerinin bu limitler arasında olup/olmama durumuna bakarak test sonucuna karar verir.



Şekil 4.57 LED testinin TestStand üzerindeki limit test detayları

Şekil 4.58'de LED testi raporlaması için oluşturulan TestStand yapısı gösterilmektedir. Bu sekans sayesinde, hangi LED'in test edildiği, limit değerleri, ölçüm değerleri, test sonucu gibi bilgiler rapora sağlıklı bir şekilde basılır.

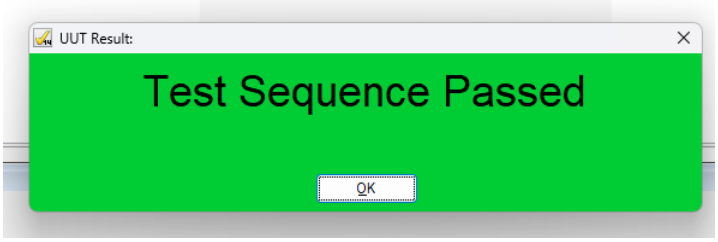


Şekil 4.58 LED testinin TestStand üzerindeki raporlama detayları

Endüstriyel test sistemlerinde renk kodlaması, operatörlerin test sonuçlarını hızlı ve hatasız şekilde yorumlayabilmesi açısından önemli bir görsel araçtır. Bu bağlamda, yeşil renk genellikle testten başarıyla geçmiş ürünleri, kırmızı renk ise hatalı veya testi geçememiş ürünleri temsil etmek üzere standartlaşmıştır. Ayrıca, test işlemleri devam eden ürünler genellikle sarı veya turuncu renkle gösterilmektedir. Aslında bu üç durum tıpkı trafik ışıkları gibidir. Bu renk kodlaması, görsel geri bildirimin net ve sezgisel olmasını sağlamaktadır. Farklı yazılım ortamlarında tasarlanabilen operatör arayüzlerinde, genellikle bu renk kodlamalarına dikkat edilir.

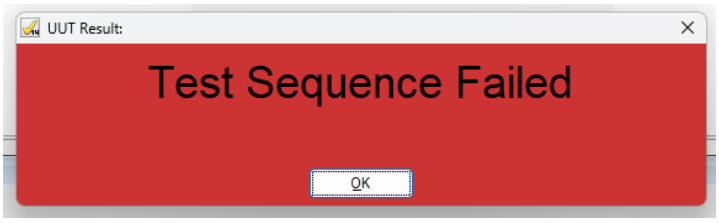
NI TestStand üzerinde testin başarıyla tamamlanması durumunda kullanıcıya yeşil renkli bir 'Passed' bildirimi gösterilmekte; testin başarısız olması hâlinde ise kırmızı renkli bir 'Failed' bildirimi gösterilmektedir. Bu renkli görsel bildirimler, operatörün müdahalesini en aza indirerek, süreç güvenilirliğini ve üretim verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Eğer istenirse bu bildirim pencerelerinin otomatik açılması işlemi iptal edilebilir.

Şekil 4.59'da 12 adet LED'in de başarılı olduğu testin sonucunda TS'de açılan pencere gösterilmektedir. Operatör, raporlara bakma ihtiyacı duymadan ürünü başarılı ürün magazinine alabilir.



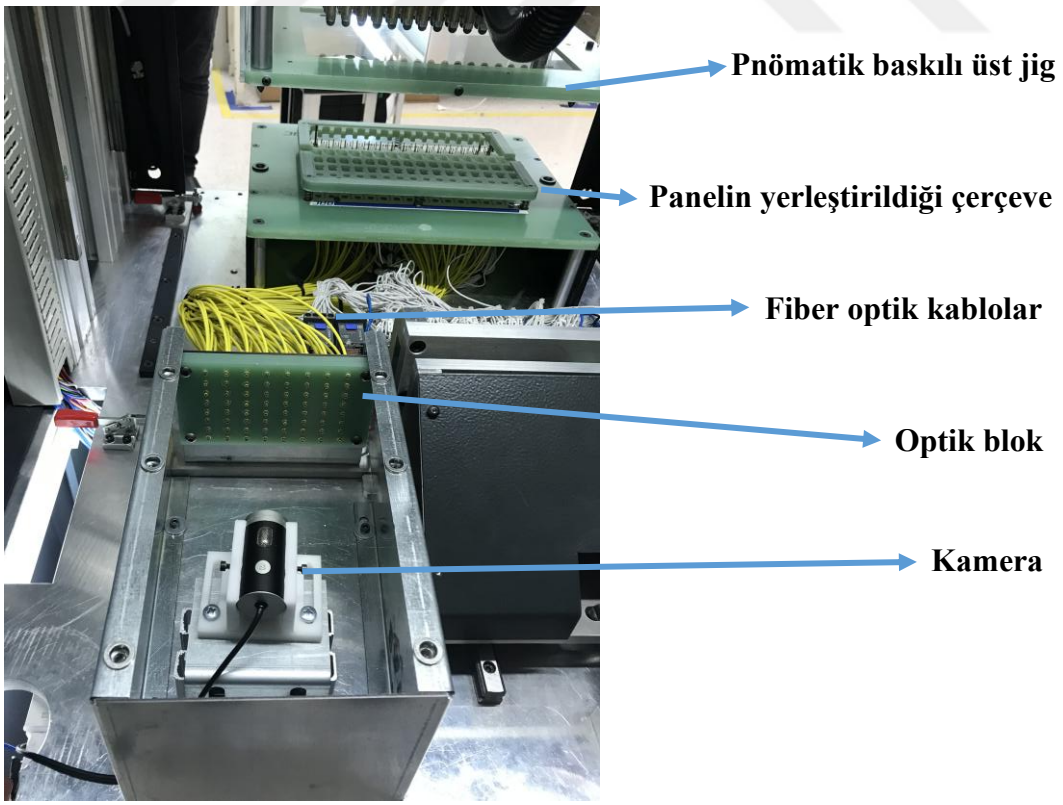
Şekil 4.59 Başarılı ürünlerde açılan TestStand penceresi

Şekil 4.60'da en az bir fonksiyon testinin başarısız olduğu testin sonucunda TS'de açılan pencere gösterilmektedir. Operatör, ürünü başarısız ürün magazinine alabilir veya bakıma gönderebilir. Tamir işleminde yönlendirici olması amacıyla arayüz ve rapor dosyaları incelenebilir.



Şekil 4.60 Başarısız ürünlerde açılan TestStand penceresi

Şekil 4.61'de tez kapsamında geliştirilen çözümün gerçek bir elektronik kart fonksiyon test makinesine entegre edilerek kullanım örneği gösterilmiştir. Pnömatik üst baskı tipli olan bu elektronik kart test makinesinde, davlumbaz grubu dokunmatik tuş kartları test edilmektedir. Panelli yapıda gerçekleşen bu test işleminde, aynı anda 16 adet PCBA test edilmektedir. Her bir PCBA'de 4 adet dokunmatik tuş ve LED bulunmaktadır. Dolayısıyla panelde toplam 64 adet LED ve dokunmatik tuş bulunmaktadır. Bu fonksiyon test sistemi üzerinde, panelde bulunan tüm elektronik kartların gerilim testi, röle testi, anahtar testi, dokunmatik tuş testi gibi farklı testleri çeşitli test ve ölçüm donanımları ile gerçekleştirilirken; LED testi, tez çalışmamız kapsamında geliştirilen sistem ile gerçekleştirilmektedir. Bu FCT sisteminde, değiştirilebilir fikstür özelliği vardır ve LED test sistemimiz bu yapı için elverişlidir. Optik blok, fikstür üzerindedir. FCT sistemine farklı fikstürler takılıp, farklı elektronik kartlar test edildiğinde de LED test sistemimiz kullanılabilecektir. Kamera ve optik blok karanlık odaya alınmıştır. Şekil 4.61'deki fotoğraf, karanlık odanın üst plakası sökülerek çekilmiştir. Bu sistemde 64 adet LED'in parlaklık ve renk testi 1-2 saniye içerisinde paralel olarak gerçekleştirilmekte ve anlık olarak raporlanmaktadır.



Şekil 4.61 LED test sisteminin reel bir uygulaması (Yazar tarafından çekilmiştir.)

4.5.1 Ölçüm Analizi ve Tekrarlanabilirlik

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilen LED test sisteminden elde edilen ölçüm sonuçlarının güvenilirliği analiz edilerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede, sistemde kullanılan kamera tabanlı görüntü işleme algoritması ile elde edilen luminance (parlaklık), red (kırmızı renk), green (yeşil renk), blue (mavi renk) ölçümleri temel alınmıştır. Bu ölçümler içinse, tez çalışması için geliştirilen fikstür prototipi ve test edilen UUT kullanılmıştır. UUT, 10 kez test edilmiştir. Toplamda 12 LED için her bir ölçüm tipinden 120'şer adet veri elde edilmiştir. Bu ölçümler için kamera ve LED ışıklarının bulunduğu optik blok karanlık odaya alınmıştır. Ölçümler, aynı test koşulları altında gerçekleştirilmiş ve çevresel faktörlerin (aydınlatma, mesafe, kamera pozisyonu) sabit tutulmasına özen gösterilmiştir.

Ölçüm belirsizliği değerlendirmeleri, ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM) standardında tanımlanan istatistiksel esaslara göre gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla sistemin ölçüm sonuçlarının güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği, yaygın olarak kullanılan belirsizlik temelli GUM yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Klasik Gage R&R tabanlı MSA analizi, çok operatörlü ve LED analizör seviyesi ölçüm hassasiyeti gerektiren endüstriyel sistemler için uygundur. Bu sistemin hedefi ise tutarlı bir fonksiyonel ölçümdür. Dolayısıyla LED'in parlaklık olarak tam yanma, kısık yanma, yanmama gibi durumlarını ölçüm sonucuna göre tespit edebilme ve LED'in rengini yüzeysel olarak yine ölçüm sonucuna göre tespit edebilme tutarlılığı esas beklentidir. Bu nedenle; ölçüm tipi başına tekrarlanabilirlik, çözünürlük belirsizliği ve stabilite bileşenleri birleştirilerek; bileşik belirsizlik ve genişletilmiş belirsizlik hesaplanmıştır.

Formüller üzerindeki çeşitli parametrelerin açıklama ve gösterimleri aşağıdaki gibidir.

LED'ler: $i;\ 1, \dots, 12$

Tekrar sayısı: $k;\ 1, \dots, 10$

Ölçüm tipi: C (LUM, RED, GREEN, BLUE)

Ölçüm: $y_{ik}^{(C)}$= LED i'nin, ölçüm tipi C'de, k. tekrardaki değeri

Tablo 4.4'ten, Tablo 4.15'e kadar, tüm LED'lerin analiz için alınan ölçüm sonuçları sırasıyla verilmiştir.

Tablo 4.4 Analiz için alınan LED1 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED1	251	193	46	37
2	LED1	251	201	55	55
3	LED1	251	184	48	33
4	LED1	250	190	67	67
5	LED1	251	203	34	56
6	LED1	251	195	49	70
7	LED1	251	188	60	39
8	LED1	251	187	30	38
9	LED1	248	205	50	33
10	LED1	251	191	67	54

Tablo 4.5 Analiz için alınan LED2 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED2	251	203	37	53
2	LED2	251	206	40	39
3	LED2	251	207	52	38
4	LED2	251	187	67	47
5	LED2	249	210	42	70
6	LED2	251	207	58	69
7	LED2	251	201	37	62
8	LED2	251	188	49	39
9	LED2	251	188	41	60
10	LED2	250	210	55	36

Tablo 4.6 Analiz için alınan LED3 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED3	251	190	53	39
2	LED3	250	194	51	53
3	LED3	251	187	68	35
4	LED3	251	203	44	63
5	LED3	251	205	64	63
6	LED3	251	208	44	41
7	LED3	251	188	57	48
8	LED3	249	184	42	67
9	LED3	251	180	49	51
10	LED3	251	181	59	43

Tablo 4.7 Analiz için alınan LED4 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED4	251	181	50	30
2	LED4	250	191	55	48
3	LED4	251	202	64	69
4	LED4	251	191	56	64
5	LED4	251	201	52	70
6	LED4	249	185	31	42
7	LED4	251	180	37	35
8	LED4	251	187	50	57
9	LED4	251	209	68	68
10	LED4	251	182	33	53

Tablo 4.8 Analiz için alınan LED5 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED5	251	196	31	39
2	LED5	251	198	70	35
3	LED5	247	207	55	34
4	LED5	251	187	70	68
5	LED5	251	188	41	60
6	LED5	251	192	67	48
7	LED5	251	189	32	48
8	LED5	251	183	55	67
9	LED5	251	198	39	69
10	LED5	247	190	51	71

Tablo 4.9 Analiz için alınan LED6 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED6	251	197	48	56
2	LED6	251	190	32	56
3	LED6	251	195	62	61
4	LED6	251	200	47	34
5	LED6	251	204	58	30
6	LED6	251	181	70	46
7	LED6	250	187	58	70
8	LED6	251	190	43	58
9	LED6	251	207	44	39
10	LED6	251	209	34	49

Tablo 4.10 Analiz için alınan LED7 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED7	251	201	40	69
2	LED7	251	186	56	48
3	LED7	251	201	36	42
4	LED7	250	209	47	62
5	LED7	251	181	61	33
6	LED7	251	201	37	43
7	LED7	251	196	36	49
8	LED7	251	188	66	48
9	LED7	251	182	49	58
10	LED7	251	188	32	39

Tablo 4.11 Analiz için alınan LED8 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED8	251	185	60	33
2	LED8	251	181	67	67
3	LED8	251	182	59	61
4	LED8	251	194	32	53
5	LED8	251	183	49	36
6	LED8	251	207	64	40
7	LED8	251	191	38	53
8	LED8	251	191	31	49
9	LED8	248	188	45	51
10	LED8	251	204	65	63

Tablo 4.12 Analiz için alınan LED9 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED9	251	189	33	56
2	LED9	251	194	61	68
3	LED9	251	182	38	43
4	LED9	251	207	52	32
5	LED9	250	210	38	53
6	LED9	251	201	49	33
7	LED9	251	205	42	31
8	LED9	251	196	36	57
9	LED9	251	182	42	61
10	LED9	251	189	71	62

Tablo 4.13 Analiz için alınan LED10 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED10	251	195	50	60
2	LED10	251	193	55	37
3	LED10	251	198	43	48
4	LED10	245	203	66	56
5	LED10	251	185	60	63
6	LED10	251	184	57	67
7	LED10	251	195	40	32
8	LED10	251	210	40	53
9	LED10	250	200	57	59
10	LED10	251	190	36	41

Tablo 4.14 Analiz için alınan LED11 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED11	251	188	69	53
2	LED11	251	196	59	43
3	LED11	251	185	56	49
4	LED11	251	184	67	60
5	LED11	251	206	51	54
6	LED11	251	203	39	65
7	LED11	250	198	47	65
8	LED11	251	202	57	31
9	LED11	251	196	32	43
10	LED11	251	199	38	33

Tablo 4.15 Analiz için alınan LED12 ölçüm sonuçları

Ölçüm No	LED	LUM	RED	GREEN	BLUE
1	LED12	251	186	59	58
2	LED12	251	196	61	33
3	LED12	251	192	47	37
4	LED12	250	210	60	62
5	LED12	251	184	54	55
6	LED12	251	192	43	41
7	LED12	251	199	38	51
8	LED12	251	181	65	59
9	LED12	250	197	48	62
10	LED12	251	201	38	44

4.5.1.1 Formül Tanımları ve Açıklamaları

Tablo 4.16'da, matematiksel modelde kullanılan formüllerin isimleri, açıklamaları ve sembolleri gösterilmiştir.

Tablo 4.16 Matematiksel modeldeki formüllerin açıklamaları

Adı	**Açıklama**	**Sembol**
LED bazlı ortalama	Her LED'in 10 ölçümünün ortalaması ve varyasyonu	$\bar{y}_i^{(C)}$
Örnek standart sapma	Her LED'in 10 ölçümünün varyasyonu	$s_i^{(C)}$
Kanal tekrarlanabilirliği	12 LED'in ortalama standart sapması	$u_r^{(C)}$
Çözünürlük belirsizliği	Ölçüm adımı 1 birim, uniform dağılım varsayımı	u_{res}
Stabilite belirsizliği	Zamanla ölçüm değişimi (0,3 birim)	u_{st}
Bileşik belirsizlik	Tüm belirsizlik bileşenlerinin kök-toplamı	$u_c^{(C)}$
Genişletilmiş belirsizlik	%95 güven aralığı için U=2u_c	$U^{(C)}$
Yüzde belirsizlik	U'nun 0–255 aralığına göre yüzdesi	$\%U^{(C)}$

LED bazlı ortalama ölçüm değeri, LED i'nin, ölçüm tipi C'de yapılan 10 tekrarlı ölçümünün aritmetik ortalamasıdır. Her LED için ölçüm ortalaması, sistemin o LED'deki ortalama parlaklık veya renk değerini temsil eder. (4.1) numaralı denklemde LED bazlı ortalama ölçüm değerinin formülü gösterilmiştir.

$$\bar{y}_i^{(C)} = \frac{1}{10}\sum_{k=1}^{10} y_{ik}^{(C)} \tag{4.1}$$

LED bazlı örnek standart sapma, LED i'nin, 10 tekrarlı ölçümündeki dağılımı gösterir. Büyük bir standart sapma değeri, o LED için ölçümlerin kararsız (değişken) olduğunu, küçük bir standart sapma değeri ise tutarlı ölçüm yapıldığını gösterir. (4.2) numaralı denklemde hesaplama formülü gösterilmiştir. Formülde paydadaki '9' (10-1) serbestlik derecesi düzeltmesidir; bu nedenle 'örnek standart sapma' adını da alır.

$$s_i^{(C)} = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{k=1}^{10} \left(y_{ik}^{(C)} - \bar{y}_i^{(C)}\right)^2} \tag{4.2}$$

Ölçüm tipi tekrarlanabilirliği, ilgili ölçüm tipinin (örneğin LUM, RED, GREEN veya BLUE) 12 LED üzerindeki ortalama standart sapmasıdır. Her LED'in varyasyon değeri ayrı ayrı hesaplanır ve bunların ortalaması alınır. Böylece sistemin genel olarak ne kadar tutarlı ölçüm yaptığı tek bir değerle özetlenmiş olur. Düşük bir değer, yüksek tekrarlanabilirlik anlamına gelir. (4.3)'te hesaplama formülü gösterilmiştir.

$$u_r^{(C)} = \frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12} s_i^{(C)} \tag{4. 3}$$

Çözünürlük belirsizliği, ölçüm cihazının sayısal çözünürlük adımına bağlı olarak belirlenir. Bu sistemde kamera tabanlı ölçüm 1 birim çözünürlükle (0–255 aralığında tam sayı) yapılmaktadır. Ölçüm adımı eşit olasılıkla herhangi bir noktada gerçekleşebileceği varsayımıyla uniform dağılım olarak kabul edilir. Uniform dağılımın standart sapması (4.4), çözünürlük belirsizliği olarak kabul edilir. Sonuç olarak (4.5)'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\frac{a}{\sqrt{12}} \tag{4.4}$$

$$u_{\text{res}} = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0{,}288675 \tag{4.5}$$

Stabilite belirsizliği, aynı LED'in farklı zamanlarda yapılan ölçümlerinde gözlenen tipik değişim miktarını temsil eder. Bu çalışmada farklı zamanlar için sistem kararlı olduğundan bu değer '0,3' birim olarak alınmıştır. Ölçüm sisteminin zamana bağlı kararlılığı bu bileşenle hesaba katılmış olur. (4.6)'da gösterilmiştir.

$$u_{\text{st}} = 0{,}3 \tag{4.6}$$

Bileşik standart belirsizlik, ölçümde etkili olan bağımsız belirsizlik bileşenlerinin (tekrarlanabilirlik, çözünürlük, stabilite) karelerinin toplamının kareköküdür. Her bir bileşen, ölçüm sisteminin farklı bir yönünü temsil eder. 'u_r' ölçüm tekrarlarındaki varyasyon, 'u_{res}' cihazın sayısal çözünürlük sınırı, 'u_{st}' uzun dönem kararlılık değeridir. (4.7) formülü, belirsizliklerin istatistiksel olarak birleşimini verir. 'u_c', bir 'σ' (standart sapma) düzeyinde güven aralığını temsil eder.

$$u_c^{(C)} = \sqrt{(u_r^{(C)})^2 + u_{\text{res}}^2 + u_{\text{st}}^2} \tag{4.7}$$

Genişletilmiş belirsizlik hesaplanırken; bileşik belirsizlik, %95 güven düzeyi için (4.8)'deki gibi 'k=2' çarpanı ile genişletilir. Böylece '±U' aralığı, ölçümün yaklaşık %95 olasılıkla beklenen değer aralığını gösterir. Örneğin '$U = 1{,}75$' ise, gerçek değerin ölçülen değere '±1,75' birim yakın olma olasılığı yaklaşık %95'tir.

$$U^{(C)} = 2\, u_c^{(C)} \tag{4.8}$$

Yüzde belirsizlik, ölçüm aralığı 0–255 arasında olduğundan, genişletilmiş belirsizlik 'U'nun toplam ölçüm aralığına oranı alınarak yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, sistemin hassasiyetini görsel olarak yorumlamak için kullanılır. Örneğin '$\%U = 0{,}68\,\%$' değeri, ölçüm sisteminin toplam aralığın sadece %0,68'i kadar hata payına sahip olduğunu gösterir. (4.9)'da gösterilmiştir.

$$\%U^{(C)} = \frac{U^{(C)}}{255} \times 100 \tag{4.9}$$

4.5.1.2 Matematiksel Model

LED1'in LUM ölçüm tipi için 10 adet ölçüm değeri (4.10)'daki gibidir.

$$\{251, 251, 251, 250, 251, 251, 251, 251, 248, 251\} \tag{4.10}$$

LED1'in ortalama LUM ölçümü (4.11)'deki gibi hesaplanır.

$$\bar{y}_1^{(\text{LUM})} = \frac{251+251+251+250+251+251+251+251+248+251}{10} \tag{4.11}$$

Sonuç (4.12)'deki gibi bulunur.

$$\bar{y}_1^{(\text{LUM})} = \frac{2506}{10} = 250{,}6 \tag{4.12}$$

(4.13)'te sapmaların kareleri tek tek hesaplanır.

$$\begin{aligned} 251 - 250{,}6 = +0{,}4 \Rightarrow (0{,}4)^2 = 0{,}16 \text{ (8 kez)} \\ 250 - 250{,}6 = -0{,}6 \Rightarrow (0{,}6)^2 = 0{,}36 \text{ (1 kez)} \\ 248 - 250{,}6 = -2{,}6 \Rightarrow (2{,}6)^2 = 6{,}76 \text{ (1 kez)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

(4.14)'te toplam kareler hesaplanır.

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 8 \times 0{,}16 + 0{,}36 + 6{,}76 = 8{,}40 \quad (4.14)$$

(4.15)'te LED1'in LUM ölçümü için standart sapması hesaplanır.

$$s_1^{(\text{LUM})} = \sqrt{\frac{8{,}40}{10-1}} = \sqrt{\frac{8{,}40}{9}} = \sqrt{0{,}9333} = 0{,}9661 \quad (4.15)$$

Aynı adımlar LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED10, LED11 ve LED12 için de uygulanır. Her LED için 10 tekrarın standart sapması '$s_i^{(\text{LUM})}$' elde edilir. Bu adımların tümü aynı matematiksel işlemleri gerektirdiğinden, yöntemin anlatımını daha okunabilir kılmak amacıyla temsili örnek olarak sadece LED1 ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. Diğer LED'ler de aynı matematiksel yöntemle hesaplanır.

LUM ölçüm tipinin standart sapma değerleri için tüm sonuçlar aşağıdaki gibidir.

LED1: 0,9661

LED2: 0,7379

LED3: 0,5164

LED4: 0,5680

LED5: 0,6749

LED6: 0,4216

LED7: 0,6749

LED8: 0,4216

LED9: 0,3162

LED10: 0,3162

LED11: 0,3162

LED12: 0,5680

12 adet standart sapma değeri üzerinden ortalama standart sapma değeri (4.16)'daki gibi hesaplanır. (4.17)'deki sonuç bulunur.

$$u_r^{(\mathrm{LUM})} = \frac{1}{12}\,(0{,}9661 + 0{,}7379 + 0{,}5164 + 0{,}5680 + 0{,}6749 + 0{,}4216 + 0{,}6749 + 0{,}4216 + 0{,}3162 + 0{,}3162 + 0{,}3162 + 0{,}5680) = \frac{1}{12}(9{,}2019) \tag{4.16}$$

$$u_r^{(\mathrm{LUM})} = 0{,}7668 \text{ birim} \tag{4.17}$$

Bu sonuç, sistemin parlaklık (LUM) ölçümündeki tekrarlanabilirlik düzeyidir. Ölçüm aralığı 0–255 olduğu için bu varyasyon çok küçüktür (%0,3 civarı). Yani aynı LED'i 10 kez ölçtüğümüzde sonuçlar neredeyse birebir tutarlı çıkmıştır.

Bu '$u_r^{(\mathrm{LUM})}$' değeri, çözünürlük ve stabilite bileşenleriyle birleştirilerek bileşik belirsizlik '$u_c^{(\mathrm{LUM})}$' hesaplaması (4.18)'deki gibi yapılır. (4.19)'daki sonuç bulunur.

$$u_c^{(\mathrm{LUM})} = \sqrt{(0{,}7668)^2 + (0{,}288675)^2 + (0{,}3)^2} \tag{4.18}$$

$$= \sqrt{0{,}5880 + 0{,}0833 + 0{,}0900} = \sqrt{0{,}7613} = 0{,}8725 \tag{4.19}$$

Bileşik belirsizlik değeri üzerinden genişletilmiş belirsizlik (4.20)'deki gibi hesaplanır.

$$U^{(\mathrm{LUM})} = 2 \times 0{,}8725 = 1{,}7450 \tag{4.20}$$

Yüzde olarak (4.21)'deki gibi hesaplanır.

$$\%U^{(\mathrm{LUM})} = \frac{1{,}7450}{255} \times 100 = 0{,}684\% \tag{4.21}$$

LUM ölçüm tipinde belirsizlik %0,684 düzeyindedir. Çok iyi bir belirsizlik değeri olup, parlaklık kararları için fazlasıyla yeterlidir. LUM kanalına ilişkin hesaplamalarda, tekrarlanabilirlik değeri '$u_r^{(\mathrm{LUM})} = 0{,}7668$', bileşik belirsizlik '$u_c^{(\mathrm{LUM})} = 0{,}8725'$ ve genişletilmiş belirsizlik '$U^{(\mathrm{LUM})} = 1{,}7450$' olarak elde edilmiştir. Bu değer, 0–255 ölçüm aralığına göre '$\%U^{(\mathrm{LUM})} = 0{,}684\%$' oranında bir genişletilmiş belirsizliğe karşılık gelmektedir. Bu sonuç, sistemin parlaklık ölçümünde yüksek düzeyde kararlılık ve tutarlılık sağladığını göstermektedir.

Luminance, RGB bileşenlerinin ağırlıklı bir birleşimi olduğundan (çalışılan LED'ler kırmızı olduğunda ağırlık büyük ölçüde kırmızı bileşenden etkilenir), sinyal seviyesi görece yüksektir ve sinyal/gürültü oranı da diğer renklere kıyasla daha elverişli hâle gelir. Elde edilen yaklaşık %0,68'lik genişletilmiş belirsizlik, fonksiyonel test seviyesi için çok iyi bir performanstır ve LED'lerin 'yanıyor/kısık/yanmıyor' benzeri parlaklık temelli sınıflandırmalarında güvenilir karar vermeyi destekler.

LED1-LUM ölçümüne ilişkin olarak 10 tekrarın tek tek sapmaları ve kareleri dâhil ayrıntılı hesaplama süreci örnek olarak sunulmuştur. LED2–LED12 arası LED'ler ile diğer ölçüm tipleri (RED, GREEN, BLUE) için gerçekleştirilen hesaplamalar, kullanılan denklemler ve tanımlanan yöntemlerle tamamen aynı şekilde yapılmıştır. Tüm LED ve ölçüm tipleri için bu işlemlerin ayrı ayrı gösterilmesi, tekrarlayan içerik oluşturacağından tercih edilmemiştir. Bu nedenle çalışmada yalnızca temsilî bir örnek ayrıntılı biçimde verilmiş, diğer LED ve ölçüm tiplerine ait hesaplamalar özet tablolar ve nihai sayısal sonuçlarla sunulmuştur. Böylelikle hem yöntemin izlenebilirliği sağlanmış hem de metnin okunabilirliği korunmuştur.

RED (Kırmızı) ölçüm tipi için hesaplama ve sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$u_r^{(\mathrm{RED})} = 8{,}8124 \tag{4.22}$$

$$u_c^{(\mathrm{RED})} = \sqrt{8{,}8124^2 + 0{,}288675^2 + 0{,}3^2} = 8{,}8223 \tag{4.23}$$

$$U^{(\mathrm{RED})} = 2 \times 8{,}8223 = 17{,}6445 \tag{4.24}$$

$$\%U^{(\mathrm{RED})} = \frac{17{,}6445}{255} \times 100 = 6{,}919\% \tag{4.25}$$

RED ölçüm tipine ilişkin hesaplamalarda, (4.22)'de hesaplanan tekrarlanabilirlik değeri '8,8124', (4.23)'te hesaplanan bileşik belirsizlik değeri '8,8223' ve (4.24)'te hesaplanan genişletilmiş belirsizlik değeri '17,6445' olarak bulunmuştur. Bu değer, 0–255 ölçüm aralığına göre (4.25)'te gösterildiği gibi '6,919%' oranında bir genişletilmiş belirsizliğe karşılık gelmektedir. Bu sonuç, sistemin kırmızı bileşen ölçümünde iyi düzeyde bir kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir. Ölçülen LED'ler fiziksel olarak kırmızı olduğundan, sistemin en yüksek parlaklık sinyalini bu kanalda algılaması beklenen bir durumdur. Dolayısıyla sinyal-gürültü oranı yüksek, ölçüm tekrarlanabilirliği de diğer kanallara kıyasla daha iyidir.

Yaklaşık %7'lik genişletilmiş belirsizlik, fonksiyonel test seviyesindeki uygulamalar için tatmin edici doğruluk sınırları içerisindedir. %10'un altındaki belirsizlik değerleri fonksiyonel olarak kabul edilebilir sınırlar içerisindedir.

GREEN (Yeşil) ölçüm tipi için hesaplama ve sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$u_r^{(\text{GREEN})} = 11{,}7662 \tag{4.26}$$

$$u_c^{(\text{GREEN})} = \sqrt{11{,}7662^2 + 0{,}288675^2 + 0{,}3^2} = 11{,}7736 \tag{4.27}$$

$$U^{(\text{GREEN})} = 2 \times 11{,}7736 = 23{,}5472 \tag{4.28}$$

$$\%U^{(\text{GREEN})} = \frac{23{,}5472}{255} \times 100 = 9{,}234\% \tag{4.29}$$

GREEN ölçüm tipinde (4.26)'da hesaplananan tekrarlanabilirlik değeri '11,7662', (4.27)'de hesaplanan bileşik belirsizlik değeri '11,7736' ve (4.28)'de hesaplanan genişletilmiş belirsizlik değeri '23,5472' olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 0–255 aralığına göre (4.29)'da gösterildiği gibi '9,23%' oranında genişletilmiş belirsizliğe karşılık gelmektedir. Yeşil ölçüm tipinin belirsizliğinin kırmızı ölçüm tipine göre daha yüksek olmasının temel nedeni, test edilen LED'lerin kırmızı renkte olmasıdır. Kırmızı LED'ler, yeşil spektrum bölgesinde yalnızca düşük seviyeli bir ışık yayımı yapmaktadır. Bu nedenle, ölçüm sistemi tarafından algılanan sinyal seviyesi düşmekte ve ölçümdeki göreli belirsizlik artmaktadır. Buna rağmen, yaklaşık %9'luk belirsizlik seviyesi, sistemin renk ayrımı için yeterli performansa sahip olduğunu göstermektedir.

BLUE (Mavi) ölçüm tipi için hesaplama ve sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$u_r^{(\text{BLUE})} = 12{,}5984 \tag{4.30}$$

$$u_c^{(\text{BLUE})} = \sqrt{12{,}5984^2 + 0{,}288675^2 + 0{,}3^2} = 12{,}6052 \tag{4.31}$$

$$U^{(\text{BLUE})} = 2 \times 12{,}6052 = 25{,}2104 \tag{4.32}$$

$$\%U^{(\text{BLUE})} = \frac{25{,}2104}{255} \times 100 = 9{,}886\% \tag{4.33}$$

BLUE ölçüm tipinde (4.30)'da hesaplanan tekrarlanabilirlik değeri '12,5984', (4.31)'de hesaplanan bileşik belirsizlik değeri '12,6052' ve (4.32)'de hesaplanan genişletilmiş belirsizlik '25,2104' olarak elde edilmiştir. Ölçüm aralığına göre (4.33)'te '9,886%' olarak hesaplanan bu oran, mavi ölçüm tipinin sistemde en yüksek belirsizlik düzeyine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu durum, kırmızı LED'lerin mavi spektrum bölgesinde çok düşük yoğunlukta ışık yayması nedeniyle; ölçülen sinyalin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, ölçüm belirsizliği sistemden değil, ölçülen LED'in fiziksel özelliklerinden doğmaktadır. '%9,886' seviyesindeki belirsizlik, fonksiyonel test amaçlı uygulamalarda kabul edilebilir bir değerdir ve sistemin renk bileşenlerini ayırt etme kabiliyetini olumsuz etkilememektedir.

4.5.1.3 Genel Değerlendirme

Yapılan analizler sonucunda, sistemin tüm ölçüm tiplerinde (LUM, RED, GREEN, BLUE) güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar ürettiği belirlenmiştir. LUM (parlaklık) ölçüm tipinde elde edilen genişletilmiş belirsizlik değeri '1,7450' olup, bu değer ölçüm aralığının yalnızca %0,684'üne karşılık gelmektedir. Bu sonuç, sistemin parlaklık ölçümünde yüksek doğruluk ve üst düzey kararlılık sağladığını göstermektedir.

Renk ölçümleri incelendiğinde, kırmızı LED'ler üzerinde yapılan ölçümlerde sistemin en düşük belirsizlik değerini RED ölçüm tipinde (6,92%) verdiği görülmüştür. Bu durum, LED'lerin fiziksel olarak kırmızı olması sebebiyle kırmızı bileşende algılanan sinyal seviyesinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. GREEN (9,23%) ve BLUE (9,89%) ölçüm tiplerinde ise, LED'lerin spektral özellikleri gereği daha zayıf ışık yayımı gerçekleştiğinden göreli belirsizlik değerleri artmıştır. Bu artış sistematik bir hatayı değil, LED'in renk spektrumuna bağlı fiziksel bir durumu temsil etmektedir.

Tüm ölçüm tipleri birlikte değerlendirildiğinde, genişletilmiş belirsizlik değerlerinin %0,7 ile %9,9 aralığında değiştiği görülmektedir. Bu aralık, fonksiyonel test seviyesindeki uygulamalar için kabul edilebilir bir performans düzeyidir. Dolayısıyla, geliştirilen LED test sistemi hem tekrarlanabilir hem de uygulama amacına uygun doğrulukta ölçümler gerçekleştirmekte; LED'lerin parlaklık ve renk bileşenlerini güvenilir biçimde ayırt edebilmektedir.

4.5.2 Maliyet Analizi

4.5.2.1 Prototip Maliyeti

Bu bölüm, geliştirilen sistemin prototip düzeyindeki donanım, yazılım ve üretim maliyetlerini içermektektedir. Maliyetler, sistemin fiziksel bileşenlerini oluşturan doğrudan maliyetler ile üretim sürecinde kullanılan dolaylı maliyetler olmak üzere iki ana grupta değerlendirilmiştir. Bütün maliyetler vergiler hariç olarak ve Euro döviz kuru bazında yazılmıştır. Tablo 4.17'de doğrudan maliyetler gösterilmiştir.

Tablo 4.17 Prototip çalışması doğrudan maliyetler

Ürün	**Marka-Model / Açıklama**	**Adet**	**Birim Fiyat (€)**	**Toplam Fiyat (€)**
Kamera	Microsoft 6CH-00002	1	50 €	50 €
Test probu	Ingun GKS-100 291 090 A 3000	2	1,1 €	2,2 €
Test prob kovanı	Ingun KS-100 30 G	2	0,4 €	0,8 €
Manuel pot manipülatörü	Ingun SBE-M-18-11-S3VD	1	105 €	105 €
Manipülatör uç	Özel üretim	1	0,05 €	0,05 €
Fiber optik kablo	Mitsubishi Eska, 25 cm uzunluk, 2.2 mm çap	12	0,5 €	6 €
Fiber optik kablo kovanı	Özel üretim	12	0,05 €	0,6 €
Optik arayüz blok	Ingun SB-P-LL-045-DM2,3	1	115 €	115 €
Manuel klemp	Kukamet	1	8,2 €	8,2 €
Sigma profil	Doğuş Kalıp 30x60x200 mm	1	2,5 €	2,5 €
Sigma profil	Doğuş Kalıp 20x40x200 mm	1	1,25 €	1,25 €
Pertinaks	300x300x20 mm	1	30 €	30 €
Pleksi Şeffaf	150x150x10 mm	1	4 €	4 €
Pleksi Siyah	300x600x10 mm	1	11 €	11 €
Referans pimi	2.8 mm çap, çelik malzeme	2	2 €	4 €
Lehim teli	10 mm	1	0,1 €	0,1 €
Cıvata	Çeşitli tiplerde	20	0,1 €	2 €
Distans	M3 dişi-dişi 30 mm	3	0,2 €	0,6 €
Alüminyum plaka	30x30x10 mm	1	2 €	2 €
Silikon	Kablo kamuflajı için az miktarda	1	0,1 €	0,1 €
Kablo klipsi	Kablo düzeni ve kamera montajı	3	0,2 €	0,6 €
Güç kaynağı	5V DC 1A güç adaptörü	1	4 €	4 €

Genel Toplam: 350 €

Tablo 4.17'de görüldüğü üzere, sistemin prototip üretiminde kullanılan bileşenlerin toplam maliyeti 350 € seviyesindedir. Maliyetlerin büyük bir bölümü optik ve mekanik alt bileşenlerden oluşmaktadır. Özellikle kamera, optik arayüz bloku ve manuel pot manipülatörü toplam maliyetin yaklaşık %50–55'ini oluşturmaktadır. Elektronik bileşenler toplam maliyetin yaklaşık %15'ini, mekanik elemanlar ise %35 civarını oluşturmaktadır.

Geliştirilen LED test sisteminin prototip üretimi sürecinde, doğrudan donanım bileşenleri dışında; yazılım geliştirme, bilgisayar kullanımı, mekanik işleme, işçilik ve montaj gibi dolaylı maliyet kalemleri de oluşmuştur. Bu maliyetler, sistemin geliştirme sürecinde kullanılan kaynakları temsil etmekte olup, sistemin toplam maliyetinin daha gerçekçi şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Tablo 4.18'de görüldüğü üzere, sistemin prototip üretimindeki dolaylı maliyetlerin toplamı 630 € seviyesindedir.

Tablo 4.18 Prototip çalışması dolaylı maliyetler

Ürün	**Açıklama**	**Fiyat (€)**
Bilgisayar	Windows 10, i5, 256 GB SSD, 8 GB RAM	350 €
LabVIEW	Geliştirilen test arayüzü için yazılım lisansı (kullanım payı, amortisman)	35 €
LabVIEW VDM	Görüntü işleme kütüphanesi (kullanım payı, amortisman)	35 €
UUT (Test edilen kart)	Beko bulaşık makinesi güç kartı (test amacıyla)	15 €
CNC tezgâh	3 eksen, ortalama 2 saat (kullanım payı, amortisman)	30 €
Freze tezgâh	3 eksen, ortalama 1 saat (kullanım payı, amortisman)	20 €
Torna tezgâh	Ortalama 30 dk (kullanım payı, amortisman)	10 €
Alyan takımı	Alyan başlı cıvata montajı için	8 €
Tornavida takımı	Çeşitli baş tiplerinde cıvata montajı için	10 €
Prob kovanı çakma aparatı	Test prob kovanlarının montajı için	15 €
Eğe	Talaşlı imalat sonrası yüzey düzeltmeleri için	4 €
Havya seti	Lehimleme için	30 €
Silikon tabancası	Silikonlama işlemleri için	13 €
Fiber optik kablo giyotin	Fiber optik abloların istenen boyda kesilmesi için	1 €
Şarjlı matkap seti	Vidalama işlemleri için	50 €
Yan keski	Kablo klipslerinin kesilmesi için	4 €

Genel Toplam: 630 €

Çalışmada kullanılan yazılımların maliyetleri, yıllık ortalama lisans bedelleri esas alınarak ve zaman bazlı oranlanarak hesaplanmıştır. Geliştirilen sistemin yazılım geliştirme sürecinde LabVIEW ve LabVIEW VDM yazılımları kullanılmış olup, her biri için yıllık lisans bedeli '3.000 €' olarak alınmıştır. Bu bedeller dönemsel olarak değişkenlik gösterebildiği için ortalama değerlerdir. Böylece toplam yıllık yazılım maliyeti '6.000 €' olmaktadır. Bir takvim yılının 8760 saat olduğu kabulüyle, yazılımların teorik saat başına maliyeti '6000 € / 8760 saat = 0,685 €' olarak belirlenmiştir. Zaman planı kapsamındaki 10 haftalık yazılım geliştirme sürecinde, LabVIEW'in haftada ortalama 10 saat aktif olarak kullanıldığı; dolayısıyla toplam kullanım süresinin 100 saat olduğu varsayılmıştır. Vision Development Module ise bu süreçte görüntü işleme modüllerinin entegrasyonu ve testlerinde tamamlayıcı olarak kullanılmıştır. Buna göre toplam maliyet '0,685 € x 100 saat = 68,5 €' olarak hesaplanmıştır. Bu değer yukarı yuvarlanarak '70 €' olarak kabul edilmiş ve bu bedel Tablo 4.3'te her iki yazılımın kullanım payı olarak yarı yarıya dağıtılmıştır. Bu yöntem, lisans bedellerinin tamamını maliyete yansıtmak yerine, yazılımların tez sürecindeki fiilî kullanım sürelerine orantılı olarak maliyetlendirilmesini sağlamaktadır. Böylelikle sistemin prototip geliştirme sürecinde yazılım araçlarının gerçek ekonomik katkısı daha doğru biçimde temsil edilmiştir. Kullanım süresi, yazılımların aktif olarak geliştirme, test ve veri analizi aşamalarında çalıştığı süreleri ifade etmekte olup, pasif bekleme veya açık kalma süreleri hesaba katılmamıştır. Bu maliyetlendirme yöntemi yalnızca yazılım bileşenleri için uygulanmıştır. Bilgisayar, el aletleri, test edilen ürün için benzer bir zaman bazlı oranlama yapılmamış; bu bileşenlerin doğrudan piyasa satış bedelleri esas alınmıştır. Bu tercih, el aletleri ve sarf malzemelerinin kullanım sürelerinin kısa, birim maliyetlerinin düşük ve projeye özgü amortisman etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, bu tür ekipmanlar doğrudan satın alma maliyeti üzerinden değerlendirilmiş, yalnızca yazılım lisansları için zaman bazlı paylaştırma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca CNC, torna ve freze tezgâhlarının kullanımına ilişkin maliyetler, bu ekipmanların doğrudan sahiplik maliyeti yerine kısa süreli kiralama bedelleri üzerinden hesaplanmıştır. Böylece, bu tür ekipmanların proje özelinde kullanım oranı dikkate alınarak gerçekçi bir maliyet yansıtılması sağlanmıştır. Sonuç olarak, yazılım bileşenleri için zaman bazlı lisans payı, el aletleri için doğrudan satış maliyeti, tezgâh kullanımları için ise kiralama bedeli yaklaşımı benimsenmiştir.

4.5.2.2 Sistem Maliyeti ve Karşılaştırma

Geliştirilen sistemin nihai hâli, prototip aşamasında kullanılan donanım ve üretim altyapısından bağımsız olarak; yalnızca kamera, yazılımlar ve minör entegrasyon bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu yapı, sistemin temel ölçüm fonksiyonlarını yerine getirmek için yeterli olup, mekanik fikstürler, tezgâh kullanımları ve el aletleri gibi bileşenler yalnızca prototip üretimi sürecinde gerekli olmuştur. Nihai sistemde bu tür ek üretim maliyetlerinin olmaması, toplam maliyeti önemli ölçüde düşürmektedir. Yazılım tarafındaki yapının geliştirilmesi tamamlandığı için, yeni bir ürüne yönelik LED test sistemi oluşturulurken harcanacak zaman da çok daha kısa olacaktır. Bu sebeple yaklaşık toplam yazılım maliyeti '20 €' olarak kabul edilmiştir. Buna göre, sistemin reel maliyet bilgisi Tablo 4.19'da ifade edilmiştir.

Tablo 4.19 Sistemin reel maliyeti

Ürün	**Açıklama**	**Fiyat (€)**
Kamera	Microsoft 6CH-00002	50 €
LabVIEW	Geliştirilen test arayüzü için yazılım lisansı (kullanım payı, amortisman)	10 €
LabVIEW VDM	Görüntü işleme kütüphanesi (kullanım payı, amortisman)	10 €
İlave maliyetler	Minör entegrasyon bileşenleri	20 €

Genel Toplam: 90 €

Sistem, ortalama 90 € seviyesinde bir maliyetle oluşturulabilmektedir. Bu maliyet, piyasada yaygın olarak kullanılan LED analizörleri ve LDR tabanlı sensör kartları ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. 20 kanallı bir ölçüm için LED analizörlerin ortalama fiyatı ortalama 1.700-3.000 €, LDR sensör kartlarının ise 500-750 € seviyesindedir. Bu sistemlerde ölçüm kanal sayısı sabit olup, test edilecek LED sayısı kadar ölçüm kanalına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, özellikle çoklu LED veya modül testlerinde maliyeti doğrudan artırmaktadır. Buna karşın, geliştirilen kamera tabanlı sistemde kanal sınırlaması bulunmamakta, aynı anda çok sayıda LED'in parlaklık ve renk ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu avantaj, sistemin hem ölçeklenebilirliğini artırmakta, hem de birim başına ölçüm maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir. Dolayısıyla geliştirilen sistem maliyetine eklenecek bir kâr marjıyla, bu sistemin ticari rekabet avantajının yüksek olduğunu söylemek mümkündür. Sonuç olarak bu sistem, çok daha düşük maliyetle çözüm sunabilen ekonomik ve yenilikçi bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

4.5.3 Uygulama Alanları

Geliştirilen LED test sistemi, modüler yapısı, görüntü işleme temelli ölçüm prensibi ve düşük maliyetli donanım mimarisi sayesinde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir. Sistem, farklı sektörlerdeki LED tabanlı aydınlatma elemanlarının, gösterge panellerinin, sinyal ve uyarı modüllerinin optik fonksiyonlarının; hızlı, tekrarlanabilir ve kullanıcıdan bağımsız biçimde değerlendirilmesini sağlayabilir. Örneğin, otomotiv sektöründe üretilen far, konsol ekranı kartı gibi ürünlerin LED test işlemlerinde veya beyaz eşya sektöründe üretilen bulaşık makinesi, çamaşır makinesi, buzdolabı, davlumbaz, klima arayüz kartları gibi ürünlerin LED test işlemlerinde kullanılabilir.

Diğer endüstriyel alanlarda, özellikle elektronik üretim ve test hatlarında, savunma sanayisinde; FCT, ATE vb. sistemlerde, LED içeren elektronik devre kartlarının parlaklık, renk ve çalışma durumu kontrolleri için kullanılabilir. Kamera tabanlı ölçüm yapısı, tek seferde birden fazla LED'in test edilmesine olanak tanıdığı için kanal sayısına bağlı donanım sınırlaması bulunmaz ve seri üretim hatlarında paralel test avantajı sağlar.

Laboratuvar ortamlarında, ürün geliştirme çalışmalarında kullanılabilir. LED sürücü devrelerinin, renk algoritmalarının veya optik malzemelerinin testlerinde, sistemin tekrarlanabilirlik kabiliyeti güvenilir veri sağlar. Ayrıca akademik araştırmalarda, görüntü işleme tabanlı ölçüm yöntemlerinin validasyonu, kamera kalibrasyon çalışmaları ve aydınlatma teknolojilerinde yeni test standartlarının geliştirilmesi için referans bir platform olarak değerlendirilebilir.

Bunun yanında, sistemin taşınabilir ve yeniden yapılandırılabilir tasarımı sayesinde bakım atölyeleri, servis istasyonları veya teknopark laboratuvarları gibi alanlarda da kullanılabilir. Farklı kamera tipleri, lensler veya filtrelerle kolayca uyarlanabilen yapısı, sistemin yalnızca LED değil, genel olarak ışık tabanlı komponentlerin testlerinde de kullanılmasına olanak tanıyabilir.

Sonuç olarak, geliştirilen sistem hem endüstriyel üretim ve test otomasyonu hem de akademik araştırma ve geliştirme uygulamaları için düşük maliyetli, ölçeklenebilir ve güvenilir bir test çözümü sunmaktadır. Bu özellikleriyle, LED içeren ürünlerin, üretimden kalite kontrol aşamasına kadar tüm yaşam döngüsünde kullanılabilecek yenilikçi bir ölçüm platformu olarak değerlendirilebilir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, elektronik üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılan fonksiyon test sistemlerine entegre edilebilecek, LabVIEW tabanlı görüntü işleme algoritmalarıyla çalışan bir LED test sistemi tasarlanmış ve uygulanabilir bir yazılım çözümü geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, özellikle fonksiyon test uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış olup; üretim hattı entegrasyonuna uygun, modüler ve esnek bir yapıda kurgulanmıştır. Bu yönüyle, ICT sonrası fonksiyonel kontrol gerektiren durumlarda; EOL, ATE veya FCT cihazlarında, görsel doğrulamanın otomatik biçimde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

LabVIEW ortamında geliştirilen yazılım sayesinde, LED'lerin yanıp yanmadığı ve renk doğrulukları, kamera görüntüleri üzerinden gerçek zamanlı olarak analiz edilebilmiştir. Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları, düşük ışık koşullarında dahi kararlı sonuçlar üretecek şekilde yapılandırılmıştır. Ayrıca, bu yazılım 'DLL' formatında derlenerek NI TestStand platformuna entegre edilmiştir. Böylece sistem, fonksiyonel test sekansları içerisinde doğrudan çağrılabilen bir yapı kazanmış ve otomatik test süreçlerinin bir parçası hâline gelmiştir.

NI TestStand ortamında tanımlanan test adımları belirlenen sırayla çalıştırılarak, elde edilen test sonuçları yapılandırılmış bir metin dosyasına otomatik olarak kaydedilmiştir. Buna ek olarak, test limitleri harici bir Excel dosyasından dinamik biçimde okunmuş ve sistemin farklı ürün varyantlarına kolayca uyarlanabilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım, esnek üretim hatlarında yeniden yapılandırma ihtiyacını en aza indirerek zaman ve maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Bununla birlikte, sistemin reel üretim ortamlarında uygulanması sırasında, operatör müdahalesi, kullanılan test makinesi kaynaklı veya fikstür değişimleri sırasındaki manuel süreçler gibi çeşitli mekanik kökenli nedenlerle LED koordinatlarında zaman zaman küçük konum kaymaları yaşanabildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda LED konumlarını otomatik olarak tespit ederek haritalayabilen bir algoritmanın geliştirilmesi önerilmektedir. Böyle bir iyileştirme, mekanik nedenlerle oluşabilecek minör koordinat kaymalarını elimine ederek sistemin verimliliğini artıracak, farklı ürün varyantlarına adaptasyon hızını yükseltecek ve genel test güvenilirliğini pekiştirecektir. Her bir konumdaki LED kanalının, test edilen ürün üzerindeki belirli bir LED'e karşılık gelmesi sebebiyle, haritalandırma işlemi koordinatlardan bağımsız olarak yapılmamalıdır. Sisteme; kullanılacağı test sistemi üzerinde bir seferlik yapılacak olan adaptasyon ve konfigürasyon işlemi esnasında, test edilecek kanal koordinatları öğretilmeli, haritalandırma ve aratma işlemi bu koordinatlar ekseninde yapılmalıdır.

Tez kapsamında geliştirilen kamera tabanlı LED test sistemi, parlaklık ölçümlerinde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik göstermiştir. Ancak renk testleri, parlaklık testlerine kıyasla daha yüzeysel düzeyde gerçekleştirilmiştir. Bu durum, sistemin temel olarak kamera çözünürlüğü, renk doğruluğu ve beyaz dengesi gibi optik parametrelerle kısıtlanmasından kaynaklanmaktadır. Renk ölçümünde kullanılan kamera tabanlı yaklaşım, genel renk tespiti açısından yeterli olsa da spektral doğruluk ve renk tutarlılığı gerektiren ileri seviye analizler için yüzeysel seviyede kalmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma parlaklık açısından yüksek performans sunarken, renk testlerinde yalnızca genel bir değerlendirme düzeyi sağlamaktadır.

Geliştirilen çözüm, LED testi gerektiren FCT uygulamalarında; doğruluk, hız ve tekrarlanabilirlik bakımından önemli kazanımlar sunmaktadır. Ayrıca sistem, geleneksel analizör tabanlı çözümlere kıyasla daha uygun maliyetli, LDR tabanlı yöntemlere göre ise daha verimli, esnek ve güvenilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasıyla birlikte, görüntü işleme tekniklerinin elektronik üretimde kullanılan test sistemlerine entegrasyonunun uygulanabilirliği gösterilmiş ve özellikle otomatikleştirilmiş test sistemlerine yönelik olarak uygun maliyetli, katma değerli bir sistem önerisi ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

[1] J. Diamond, *Tüfek, mikrop ve çelik: İnsan topluluklarının yazgıları*, Ü. İnce, çev. TÜBİTAK Yayınları, 2002. (Orijinal eser 1997'de yayımlanmıştır.)

[2] Wikimedia Commons, "Instrumental Agricola Bastida," 2008. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109210928/https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Instrumental_Agricola_Bastida.jpg

[3] K. Schmidt, "Göbekli Tepe – The Stone Age Sanctuaries: New results of ongoing excavations with a special focus on sculptures and high reliefs," *Documenta Praehistorica*, vol. 37, pp. 239–256, 2010. doi: 10.4312/dp.37.21

[4] UNESCO World Heritage Convention, "Göbekli Tepe," 2018. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251004102125/https://whc.unesco.org/en/list/1572

[5] S. Netchev, "Map of the Fertile Crescent," *World History Encyclopedia*, 2020. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109211432/https://www.worldhistory.org/image/12521/map-of-the-fertile-crescent

[6] C. Padilla-Iglesias, "The hunter-gatherers of the 21st century who live on the move," *Aeon*, 2024. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109211939/https://aeon.co/essays/the-hunter-gatherers-of-the-21st-century-who-live-on-the-move

[7] C. Roser, "Industry 4.0," *All About Lean*, 2022. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109211925/https://www.allaboutlean.com/industry-4-0-data-part-1

[8] K. Zahrádková, "The Bessemer Process," *Environment & Society Portal, Multimedia Library*, 2014. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109211944/https://www.environmentandsociety.org/mml/bessemer-process

[9] D. A. Hounshell, *From the American System to Mass Production, 1800–1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States.* Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins University Press, 1984.

[10] K. Schwab, *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, 2016.

[11] Y. Liao, F. Deschamps, E. d. F. R. Loures, and L. F. P. Ramos, "Past, present and future of Industry 4.0: A systematic literature review and research agenda proposal," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1308576.

[12] Z. E. Uğurlu, “Toplum 5.0 ve dijital dünyada toplumsal dönüşüm ve Eğitim 5.0,” *Dijital Dönüşüm ve Süreçler & Digital Transformation and Processes*, İstanbul Gelişim Üniversitesi Yayınları, 2020.

[13] E. Kaygın, Y. Zengin, and E. Topçuoğlu, “Endüstri 4.0’a akademik bakış,” *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, vol. 33, no. 4, pp. 1065–1081, 2019.

[14] S. Meloeny, “What is Industry 4.0?,” *Calsoft*, 2022. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212231/https://www.calsoft.com/what-is-industry-4-0

[15] Y. Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, pp. 1–10, 2017.

[16] R. Rosen, G. Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, “About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.

[17] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, “Design principles for Industrie 4.0 scenarios: A literature review,” in *Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 3928–3937, 2016, doi: 10.1109/HICSS.2016.488.

[18] L. D. Xu, E. L. Xu, and L. Li, “Industry 4.0: State of the art and future trends,” *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, 2018.

[19] W. He and L. D. Xu, “A state-of-the-art survey of cloud manufacturing,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 3, pp. 239–250, 2015.

[20] A. Botta, W. De Donato, V. Persico, and A. Pescapé, “Integration of cloud computing and internet of things: A survey,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, pp. 684–700, 2016.

[21] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, 2015.

[22] S. F. Wamba, S. Akter, A. Edwards, G. Chopin, and D. Gnanzou, “How ‘big data’ can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study,” *International Journal of Production Economics*, vol. 165, pp. 234–246, 2015.

[23] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, “A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems,” *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015.

[24] Y. Zhang, S. Ren, Y. Liu, T. Sakao, D. Huisingh, and Y. Dou, “A framework for big data driven product lifecycle management,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 159, pp. 229–240, 2017.

[25] M. P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 4th ed. Pearson, 2016.

[26] *GlobeNewswire*, “Electrical and electronics global market report 2023,” 2023. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212308/https://www.globenewswire.com/news-release/2023/04/21/2651998/0/en/Electrical-And-Electronics-Global-Market-Report-2023.html

[27] NI, *Electronics Manufacturing Test for Aerospace and Defense*, 2022. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20240408183147/https://www.ni.com/content/dam/web/pdfs/electronics_manufacturing_test_solutions_brochure.pdf

[28] Ingun, *spring-loaded test probe*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212447/https://ingun.com/en-GB/knowledge/glossary/ict-probe

[29] Kana, *SMT Solution*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110211230/https://www.kanatc.com/en/solutions/info.aspx?itemid=243&lcid=33

[30] Spea, *Ultra Positioning Accuracy*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212541/https://www.spea.com/en/product-category/flying-probe-test

[31] Göpel, *Function Test System for Small Batches in Medical Technology*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212547/https://www.goepel.com/en/industrial-function-test/test-systems/pcbs

[32] NI, *PXI Platform Power and Cooling*, 2025. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212632/https://www.ni.com/en/shop/pxi/pxi-platform-power-and-cooling.html

[33] Mistral, *Automated Test Equipment Block Diagram*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212719/https://www.mistralsolutions.com/product-engineering-services/solutions/automated-test-equipment

[34] QA Technology, *Long Stroke Probes for Dual-Level Testing*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109212951/https://www.qatech.com/en/resources-probe-selection/long-stroke-probes.html

[35] Ingun, *Manual Press Unit*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109220738/https://ingun.com/en-US/MA-2112-D-H-S-7-HG/33460

[36] Ingun, *Exchangeable Kit*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213112/https://ingun.com/en-US/ATS-MA12-S-7-CRS/108812

[37] Ingun, *Device under test side interface block*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213036/https://ingun.com/en-GB/SB-P-HS-024-30A-1-0/27620

[38] Ingun, *Test system side interface block*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213339/https://ingun.com/en-GB/SB-T-HS-024-30A/27628

[39] Elite Interfaces, *Strain Gauge Testing*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109222704/https://www.eliteinterfaces.com/test-services.html

[40] Ingun, *In-Circuit Test*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213158/https://ingun.com/en-US/knowledge/glossary/in-circuit-test

[41] QA Technology, *Tip Style Selection*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213315/https://www.qatech.com/pdfs/Resources/APP_Tip_Style_Selection_ANQ121-A.pdf

[42] Ingun, *Working Stroke*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213505/https://ingun.com/en-GB/knowledge/glossary/working-stroke

[43] Sparkfun, *How to Use a Wire Wrap Tool*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213329/https://learn.sparkfun.com/tutorials/working-with-wire/how-to-use-a-wire-wrap-tool

[44] Peak Test, *In-Circuit & Functional Testing*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213326/https://www.peaktest.co.uk/resources/technical-how-guides/circuit-funcional-testing-ate-test-probes

[45] *LED Teknolojisi*, ARED Yayınları, 2011, s. 3.

[46] Electrical Technology, *Symbol and Leads Identifications of Light Emitting Diode*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213745/https://www.electricaltechnology.org/2022/06/led-light-emitting-diode.html

[47] *Electroluminescence*, *Research Starters – Physics*, EBSCO Information Services, 2022. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109213750/https://www.ebsco.com/research-starters/physics/electroluminescence

[48] Wikimedia Commons, "SiC LED historic," 2009. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109210341/https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SiC_LED_historic.jpg

[49] Wikipedia, "History of the LED," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, 2025. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20250916163544/https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_LED

[50] S. Pimputkar, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "Prospects for LED lighting," *Nature Photonics*, vol. 3, no. 4, pp. 180–182, 2009.

[51] Wikipedia, *Light-emitting diode physics*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20250815212008/https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode_physics

[52] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2006.

[53] IEEE Spectrum, *The LED's Dark Secret*, 2009. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109214758/https://spectrum.ieee.org/the-leds-dark-secret

[54] iLed, *Why Do We Call LED as the Fourth Light Source, 2023.* [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109214837/https://iled-lights.com/why-do-we-call-led-as-the-fourth-light-source-green-lighting-a39.html

[55] P. Verma, S. K. Sharma, R. K. Singh, and A. Kumar, "LED Packaging Technologies and Applications," *Opto-Electronics Review*, vol. 25, no. 3, pp. 118-132, 2017.

[56] X. Zhang, Y. Wang, H. Li, and Z. Liu, "Recent Developments in COB and SMD LED Technologies," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 9, pp. 1689-1701, 2018.

[57] Wikipedia, *CIE 1931 color space*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251006040208/https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space

[58] Wikipedia, *CIELUV*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251006182239/https://en.wikipedia.org/wiki/CIELUV

[59] Feasa, *Feasa Automotive LED Headlight Testing*, 2016. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20240516124507/https://www.feasa.ie/PDFs/Feasa_Automotive_Led_Headlight_Testing.pdf

[60] LabVIEW Wiki, *Case Structure*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215222/https://labviewwiki.org/wiki/Case_structure

[61] LabVIEW Wiki, *Flat Sequence*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215203/https://labviewwiki.org/wiki/Flat_Sequence_structure

[62] NI, *IMAQdx Open Camera VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215223/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-imaqdx-vi-ref/page/ni-imaqdx_vi_reference/imaqdx_open_camera.html

[63] NI, *Wait (ms), 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109221237/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/wait-ms.html

[64] NI, *Property Node, 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215337/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/property-node.html

[65] NI, *IMAQdx Configure Grab VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215256/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-imaqdx-vi-ref/page/ni-imaqdx_vi_reference/imaqdx_configure_grab.html

[66] NI, *IMAQ Create VI, 2023.* [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110204845/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_create.html

[67] NI, *IMAQdx Grab VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110204045/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-imaqdx-vi-ref/page/ni-imaqdx_vi_reference/imaqdx_grab.html

[68] NI, *IMAQ Write File 2 VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215335/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_write_file_2.html

[69] LabVIEW Wiki, *While Loop*, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215508/https://labviewwiki.org/wiki/While_loop

[70] NI, *IMAQ ExtractSingleColorPlane VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110210250/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_extractsinglecolorplane.html

[71] LabVIEW Wiki, *Build Array*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215832/https://labviewwiki.org/wiki/Build_Array_function

[72] LabVIEW Wiki, *Array to Cluster*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215840/https://labviewwiki.org/wiki/Array_To_Cluster_function

[73] NI, *IMAQ Light Meter (Point) VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215906/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_light_meter_(point).html

[74] NI, *Index Array, 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215859/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/index-array.html

[75] NI, *Formula Node, 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215912/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview/page/formula-nodes.html

[76] NI, *Add function, 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215924/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/add.html

[77] NI, *IMAQ GetColorPixelValue VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215934/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_getcolorpixelvalue.html

[78] NI, *IMAQ IntegerToColorValue VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109215959/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-vision-labview-api-ref/page/imaqvision/imaq_integertocolorvalue.html

[79] NI, *Cluster To Array, 2025*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110210028/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/functions/cluster-to-array.html

[80] NI, *IMAQdx Close Camera VI, 2023*. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251110210033/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-imaqdx-vi-ref/page/ni-imaqdx_vi_reference/imaqdx_close_camera.html

[81] NI, *Simple Error Handler VI, 2025*. Mevcut: https://web.archive.org/web/20251109220041/https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/labview-api-ref/page/vi-lib/utility/error-llb/simple-error-handler-vi.html

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. E. Balcı and K. Erkan, “LabVIEW-Based Image Processing for LED Control in Functional Test Systems,” *9th International Conference on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches*, İstanbul, Türkiye, pp. 529, May 2025.