



**T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**LAZERLİ ÜÇGENLEME YÖNTEM TABANLI  
MESAFE ÖLÇÜM SENSÖRLERİNİN  
DOĞRUSALLAŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**EREN KUMBAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BURSA-2010**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAZERLİ ÜÇGENLEME YÖNTEM TABANLI  
MESAFE ÖLÇÜM SENSÖRLERİNİN  
DOĞRUSALLAŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

EREN KUMBAY

Prof. Dr. ELDAR MUSA  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2010

T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZERLİ ÜÇGENLEME YÖNTEM TABANLI  
MESAFE ÖLÇÜM SENSÖRLERİNİN  
DOĞRUSALLAŞTIRMA YÖNTEMLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ

EREN KUMBAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez .../...../201... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Eldar MUSA Prof. Dr. Güneş YILMAZ Doç. Dr. Ahmet ALTUNCU  
Danışman

## ÖZET

Lazerli mesafe ölçüm sensörleri iki nokta arasındaki mesafeyi ölçebilen aygıtlardır. Işık kullanarak mesafeyi ölçmek için türlü optik yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden biri üçgenleme yöntemidir. Diğer yöntemler ise uçuş süresi ölçümü, faz kayması ölçümü ve mutlak interferometredir.

Yukarıda sayılan bütün yöntemler farklı donanımlar ve yerleşim şekilleri ile çalışmaktadırlar. Bu projenin temel amacı üçgenleme yöntemi ile çalışan lazerli mesafe ölçüm sensörlerinin doğrusallaştırma değişkenlerini inceleyip en kararlı ve verimli çalışan üçgenleme modelini teorik çalışmalar ve veri analizleri ile tespit edebilmektir. Projede diğer ölçüm teknikleri tanıtıldıktan sonra üçgenleme yönteminin tasarım değişkenlerini açıklanacaktır.

Üçgenleme yönteminin temel elemanları ışık kaynağı, hizalayıcı ve odaklayıcı mercekler ve foto-alıcıdır. Foto-alıcı olarak pozisyon hassasiyetli algılayıcı (PSD) kullanılmıştır. Hedeften yansıyan ışık odaklayıcı mercek üzerinden PSD aygıtının ışığa duyarlı yüzeyinde toplanır ve foto-akım üretilir. Üretilen foto-akım sayesinde mesafe bilgisi elde edilmektedir. Fakat foto-akım ile mesafe arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Yöntemin doğrusallaştırılmasını arttırmak için iki kanalda doğrusallaştırma yöntemleri incelenmiştir. Optik-geometrik kanalda PSD aygıtının farklı konumlarının analizleri yapılırken elektronik kanalda da işaret işleme yöntemleri kullanılmıştır. Optik-geometrik kanalda yapılan doğrusallaştırmalar göstermektedir ki kalibrasyon eğrisi doğrusal bir çizgiye yaklaşmaktadır. Fakat PSD aygıtının farklı konumlarında odaklayıcı mercek ile yaptığı  $\gamma$  açısı azaldığı için alıcının ışığa duyarlı yüzeyine gelen ışınlar belirli bir açıyla gelmektedir ve algılayıcının koruma camından geri yansımaktadır. Bu da ölçümlerde hatalara sebep olmaktadır. Optik-geometrik kanalda oluşan hatalar elektronik kanalda kullanılan doğrusallaştırma yöntemleriyle telafi edilebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sensör, Üçgenleme, Lazer, Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcı PSD, Doğrusallaştırma.

## ABSTRACT

Laser range-finder sensors are devices which can measure the distance between two distinct points. There are several optical-methods to measure the distance using light. One of these methods is the triangulation method.

The basis of this project is to analyze the linearization parameters of a laser range sensor working with the triangulation technique and to result the most efficient triangulation model with the theoretical explanations and data analyses.

The main elements of the triangulation method are light source, collimating and focusing lenses and photo-detector. As a photo-detector, position sensitive device (PSD) is used. When the light reflects from target to the PSD through focusing lens, PSD produces photo-current which give the distance information of the target. But there is a non-linear relationship between the photo-current and distance. To increase the linearization, linearization techniques are observed in two channels. In optic-geometric channel, the behaviors of different positions of the PSD are observed. In electronics channel, signal processing techniques are used. The linearization techniques applied on the optic-geometric channel shows that the calibration curve approaches to a linear line. With the different positions of the PSD, the angle  $\gamma$  between the PSD and the optical axis of the focusing lens decreases causing the light rays coming to the PSD photo-sensitive surface with an angle. Some of these light rays reflect from the protective glass of the PSD causing errors. The errors occurring because of the optic-geometric linearization methods can be compensated by the linearization methods used in the electronics channel.

**Key-Words:** Sensor, Triangulation, Laser, Position Sensitive Detector (PSD), Linearization.

## İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| TEZ ONAY SAYFASI.....   | II           |
| ÖZET.....   | III          |
| ABSTRACT.....   | IV           |
| İÇİNDEKİLER .....   | V            |
| KISALTMALAR DİZİNİ.....   | VIII         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....   | IX           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....  | XI           |
| SİMGELER DİZİNİ.....  | XV           |
| 1. GİRİŞ .....  | 1            |
| 1.1. Tezin Amacı .....  | 1            |
| 1.2. Teze Genel Bakış .....   | 2            |
| 2. LİTERATÜR .....  | 3            |
| 2.1. Mesafe Ölçüm Yöntemleri ve Uygulamaları .....                                  | 3            |
| 2.2. Optik Mesafe Ölçüm Teknikleri .....  | 3            |
| 2.3. Lazerli Mesafe Ölçüm Yöntemleri.....   | 5            |
| 2.3.1. Uçuş süresi ölçüm yöntemi .....  | 5            |
| 2.3.2. Faz kayması ölçüm yöntemi.....   | 6            |
| 2.3.3. Mutlak interferometre yöntemi .....  | 8            |
| 2.3.4. Üçgenleme yöntemi .....  | 9            |
| 3. LAZERLİ ÜÇGENLEME YÖNTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE<br>TASARIM DEĞİŞKENLERİ..... | 10           |
| 3.1. Işık Kaynağı .....   | 15           |
| 3.2. Hizalayıcı Mercek .....  | 16           |
| 3.3. Odaklayıcı Mercek .....  | 18           |
| 3.4. Optik Alıcı.....   | 18           |
| 3.4.1. CCD Alıcı .....  | 18           |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 3.4.2.   | PSD Alıcı .....  | 19 |
| 3.5.     | Lazer Sürücü ve Ara-yüz Devreleri .....  | 20 |
| 3.6.     | Doğrusallaştırma Yöntemleri .....  | 21 |
| 3.6.1.   | Optik-geometrik kanalda doğrusallaştırma .....   | 21 |
| 3.6.2.   | Elektronik kanalda doğrusallaştırma.....   | 23 |
| 3.6.3.   | Parçalı doğrusallaştırma yöntemi.....  | 23 |
| 3.6.4.   | Kalibrasyon eğrisi ile doğrusallaştırma yöntemi.....   | 24 |
| 4.       | ÜÇGENLEME YÖNTEMİNİN TASARIMI .....  | 25 |
| 4.1.     | Optik-Geometrik Tasarımın Doğrusallaştırmaya Etkisi .....  | 26 |
| 4.1.1.   | Hedef ve PSD aygıtı üzerine düşen ışık lekesi.....   | 27 |
| 4.1.2.   | Işık kaynağı ile PSD aygıtı arasındaki mesafe.....   | 31 |
| 4.1.3.   | PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenine yaptığı açı .....   | 31 |
| 4.1.3.1. | PSD aygıtının odaklayıcı mercek ile aynı açıya konumlandırıldığı<br>üçgenleme kurulumu .....   | 32 |
| 4.1.3.2. | PSD aygıtının düz konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu.....  | 39 |
| 4.1.3.3. | PSD aygıtı odaklayıcı merceğin optik eksenine ile geometrik hesaptan<br>çıkarılan açı değerine göre konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu ..... | 42 |
| 4.2.     | Elektronik Tasarımın Doğrusallaştırmaya etkisi.....  | 46 |
| 4.2.1.   | Parçalı doğrusallaştırma yöntemi değişkenleri .....  | 46 |
| 4.2.1.1. | Mikro-denetleyici algoritması .....  | 46 |
| 4.2.1.2. | Ölçme adım mesafesi .....  | 48 |
| 4.2.2.   | Kalibrasyon eğrisi yöntemi .....   | 51 |
| 4.2.2.1. | PSD aygıtının odaklayıcı mercek ile aynı açıda konumlandırıldığı<br>üçgenleme kurulumunun kalibrasyon eğrisi .....                             | 51 |
| 4.2.2.2. | PSD aygıtı düz konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunun<br>kalibrasyon eğrisi .....   | 53 |
| 4.2.2.3. | PSD aygıtının geometrik hesaptan çıkarılan açı değerine göre<br>konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunun kalibrasyon eğrisi .....               | 55 |
| 4.3.     | Optik-Geometrik Tasarım ile Elektronik Tasarımın Karşılaştırılması .....   | 57 |
|          | SONUÇ .....  | 60 |
|          | KAYNAKLAR .....  | 63 |
|          | EKLER.....   | 65 |

|  |    |
|--|----|
| EK1: Deney Sonuçları.....  | 65 |
| EK2: Lazer Diyot Veri Sayfası .....  | 84 |
| EK3: Plano-Konveks Odaklayıcı Lens Veri Sayfası .....                      | 87 |
| EK4: Lazer Diyot Hizalayıcı Lens Veri Sayfası .....                        | 88 |
| EK5: Tek Boyutlu Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcı (PSD) Veri Sayfası ..... | 89 |
| EK6: Kullanılan Mekanik ve Elektronik Donanımlar .....                     | 93 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 96 |
| TEŞEKKÜR.....  | 97 |



## **KISALTMALAR DİZİNİ**

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>CCD</b>           | : Charge-Coupled Device                                     |
| <b>CMOS</b>          | : Complementary Metal-Oxide Semi-Conductor                  |
| <b>F.O.V.</b>        | : Field of View   |
| <b>Lazer (LASER)</b> | : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation   |
| <b>LIDAR (LADAR)</b> | : Light Detection and Ranging (Laser Detection and Ranging) |
| <b>MOS</b>           | : Metal-Oxide Semi-Conductor                                |
| <b>PLC</b>           | : Programmable Logic Controller                             |
| <b>PSD</b>           | : Position Sensitive Detector                               |
| <b>RMS</b>           | : Root Mean Square  |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Çizelge 1 Işık lekesi ayarlanmamış kalibrasyon değerleri.....   | 65                  |
| Çizelge 2 Işık lekesi ayarlanmamış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....   | 66                  |
| Çizelge 3 Işık lekesi ayarlanmış kalibrasyon değerleri.....   | 67                  |
| Çizelge 4 Işık lekesi ayarlanmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....   | 68                  |
| Çizelge 6 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan).....                   | 69                  |
| Çizelge 7 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)..... | 70                  |
| Çizelge 8 PSD aygıtı mercek ile aynı hizadayken ölçülmüş geometrik değerler .....   | 71                  |
| Çizelge 9 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı) .....                        | 71                  |
| Çizelge 10 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri (Işık leke PSD aygıtı başına hizalı).....        | 72                  |
| Çizelge 11 PSD aygıtı düz konumdayken geometrik değerler .....  | 73                  |
| Çizelge 12 PSD aygıtı düz konumdayken alınmış kalibrasyon değerleri.....  | 73                  |
| Çizelge 13 PSD aygıtı düz konumdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata oranları .....  | 74                  |
| Çizelge 14 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı geometrik değerler.....   | 75                  |
| Çizelge 15 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı kalibrasyon değerleri.....  | 75                  |
| Çizelge 16 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....  | 76                  |
| Çizelge 17 Adım mesafesi 20mm alınmış kalibrasyon değerleri.....  | 77                  |
| Çizelge 18 Adım mesafesi 20mm alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....  | 77                  |
| Çizelge 19 Adım mesafesi 10mm alınmış kalibrasyon değerleri.....  | 78                  |
| Çizelge 20 Adım mesafesi 10mm alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....  | 78                  |
| Çizelge 21 Adım mesafesi 5mm alınmış kalibrasyon değerleri.....   | 79                  |
| Çizelge 22 Adım mesafesi 5mm alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.....   | 80                  |

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 23 Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı mercek ile aynı hizadayken).....    | 81 |
| Çizelge 24 Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken) .....              | 82 |
| Çizelge 25 Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken) ..... | 83 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 2.1 Darbeli Uçuş Süresi Ölçüm Yöntemi .....   | 6            |
| Şekil 2.2 Modüle Edilmiş Lazer Sinyalinin Faz Kayması .....                                 | 7            |
| Şekil 2.3 Faz Kayması Ölçüm Yöntemi.....  | 7            |
| Şekil 2.4 İnterferometrenin Işık Dalgaları .....  | 8            |
| Şekil 2.5 Lazerli Üçgenleme Yöntemi .....   | 9            |
| Şekil 3.1 Lazerli Üçgenleme Yöntemi Geometrik Yapısı .....                                  | 10           |
| Şekil 3.2 Üçgenleme Yöntemi Geometrik Modelin Sadeleştirilmiş Hali .....                    | 11           |
| Şekil 3.3 PSD Aygıtının Geometrik Sadeleştirilmiş Modeli .....                              | 14           |
| Şekil 3.4 Lazer Diyot İç Yapısı.....  | 16           |
| Şekil 3.5 Roithner Lasertechnik firmasına ait QL67D6SA modeli Lazer Diyot .....             | 16           |
| Şekil 3.6 Roithner Lasertechnik firmasına ait GS-8019A Hizalayıcı Mercek.....               | 17           |
| Şekil 3.7 Işın Saçılması .....  | 17           |
| Şekil 3.8 Hizalanmış Lazer Işını .....  | 17           |
| Şekil 3.9 Edmund Optics firmasına ait plano-konveks mercek değişkenleri.....                | 18           |
| Şekil 3.10 CCD Yapısı ve Çalışma Prensibi .....   | 19           |
| Şekil 3.11 Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcı Çalışma Prensibi .....                          | 20           |
| Şekil 3.12 Hamamatsu firmasının ait S3932 modeli PSD Aygıtı .....                           | 20           |
| Şekil 3.13 Lazer sinyali işleme devresi blok şeması.....                                    | 21           |
| Şekil 3.14 Üçgenleme Konumlandırması: PSD mercek ile aynı hizada.....                       | 22           |
| Şekil 3.15 Üçgenleme Konumlandırması: PSD düz konumda .....                                 | 22           |
| Şekil 3.16 Üç parçaya bölünmüş bir eğrinin doğrusal yaklaşım modeli.....                    | 23           |
| Şekil 3.17 PSD Üzerindeki Işık Pozisyonunun 100-200mm mesafe aralığındaki<br>değişimi ..... | 24           |
| Şekil 4.1 Sabit Taban Yöntemi .....   | 25           |
| Şekil 4.2 Sabit Açılı Yöntemi .....   | 26           |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.3 100mm'de Ayarlanmamış Işık Lekesi.....   | 28 |
| Şekil 4.4 200mm'de Ayarlanmamış Işık Lekesi...29   | 29 |
| Şekil 4.5 100mm'de Ayarlanmış Işık Lekesi .....  | 29 |
| Şekil 4.6 200mm'de Ayarlanmış Işık Lekesi .....  | 30 |
| Şekil 4.7 Lazer diyot kristali yatay konumdayken oluşan ışık lekesi a)100 b)200 .....  | 30 |
| Şekil 4.8 Farklı açılarda üçgenleme yönteminin incelenmesi (a) 35° (b) 45° (c) 60° ...   | 31 |
| Şekil 4.9 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken üçgenleme kurulumu (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan) .....      | 32 |
| Şekil 4.10 PSD aygıtı ve odaklayıcı mercek kurulumu (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan) .....                               | 33 |
| Şekil 4.11 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan) ..... | 34 |
| Şekil 4.12 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan) .....  | 34 |
| Şekil 4.13 123mm'de ölçülen mesafe verileri (Işık lekesi PSD başına hizalı).....   | 35 |
| Şekil 4.14 172mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hizalı).....  | 35 |
| Şekil 4.15 192mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hizalı).....  | 35 |
| Şekil 4.16 PSD Aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken üçgenleme kurulumu (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı).....            | 36 |
| Şekil 4.17 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı).....        | 37 |
| Şekil 4.18 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı).....         | 37 |
| Şekil 4.19 122mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hizalı) .....   | 38 |
| Şekil 4.20 172mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hizalı) .....   | 38 |
| Şekil 4.21 198mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hizalı) .....   | 38 |
| Şekil 4.22 PSD aygıtı düz konumdayken üçgenleme kurulumu.....  | 39 |
| Şekil 4.23 PSD aygıtı düz konumdayken üstü açık görünümü.....  | 40 |
| Şekil 4.24 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı düz konumdayken) .....                 | 40 |
| Şekil 4.25 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı düz konumdayken).....                   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.26 121mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken).....  | 41 |
| Şekil 4.27 177mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken).....  | 42 |
| Şekil 4.28 194mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken).....  | 42 |
| Şekil 4.29 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı üçgenleme<br>kurulumu .....                                 | 43 |
| Şekil 4.30 PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken üstü açık görünümü .....   | 43 |
| Şekil 4.31 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi<br>(PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)..... | 44 |
| Şekil 4.32 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (PSD<br>aygıtı düz konumdayken).....               | 44 |
| Şekil 4.33 118mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı<br>değerindeyken).....                                      | 45 |
| Şekil 4.34 177mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı<br>değerindeyken).....                                      | 45 |
| Şekil 4.35 198mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı<br>değerindeyken).....                                      | 46 |
| Şekil 4.36 Adım mesafesi 20mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata değerleri   | 49 |
| Şekil 4.37 Adım mesafesi 10mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata değerleri   | 50 |
| Şekil 4.38 Adım mesafesi 5mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata değerleri.   | 51 |
| Şekil 4.39 3. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı ile<br>Odaklayıcı Mercek Aynı Açıda).....                      | 52 |
| Şekil 4.40 5. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı ile<br>Odaklayıcı Mercek Aynı Açıda).....                      | 53 |
| Şekil 4.41 3. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı Düz<br>Konumdayken).....                                       | 54 |
| Şekil 4.42 5. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı Düz<br>Konumdayken).....                                       | 55 |
| Şekil 4.43 3. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD Aygıtı hesaplanan<br>açı değerindeyken).....                          | 56 |
| Şekil 4.44 5. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD Aygıtı hesaplanan<br>açı değerindeyken).....                          | 57 |
| Şekil 4.45 PSD aygıtı üzerine açıyla gelen ışınların koruma camından geri yansımaları   | 58 |

## SİMGELER DİZİNİ

|                        |  |
|------------------------|--|
| $t_r$                  | : Lazer ışınının bir tur boyunca kat ettiği süre   |
| $f$                    | : Faz kayması ölçüm yönteminin modüle edilmiş sinyal frekansı                            |
| $\Delta\Phi$ :         | : Faz farkı  |
| $\lambda_1, \lambda_2$ | : Dalga-boyları  |
| $\Delta D$             | : Nesnedeki pozisyon değişim miktarı   |
| $\alpha$               | : Odaklayıcı Merceğin Lazer Diyot ile yaptığı açı  |
| $\beta$                | : Sensörün ölçüm başlangıç noktasının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı açı |
| $\gamma$               | : PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı açı                       |
| $D'$                   | : Sensörün ölçüm aralığının başlangıç noktası  |
| $D$                    | : Odaklayıcı merceğin optik ekseninin sensörün ölçüm aralığında kesiştiği nokta          |
| $D''$                  | : Sensörün ölçüm aralığının bitiş noktası  |
| $F'$                   | : Sensörün ölçüm aralığının bitiş noktasının PSD aygıtı üzerine gelen konumu             |
| $F$                    | : Odaklayıcı merceğin optik ekseninin PSD üzerine gelen konumu                           |
| $F''$                  | : Sensörün ölçüm aralığının başlangıç noktasının PSD aygıtı üzerine gelen konumu         |
| $h$                    | : Sensörün ölçü bölgesi  |
| $S1, S2$               | : Odaklayıcı mercek yüzeyleri  |
| $I_{x1}, I_{x2}$       | : PSD üzerine düşen ışıkla oluşan akımlar  |

## 1. GİRİŞ

Lazerli mesafe ölçüm sensörleri ürettikleri lazer ışını sayesinde ölçülmek istenen yüzeyde temas oluşturmadan mesafe, kat edilen yol ve titreşimi ölçebilirler. Mesafe ölçüm tekniklerinin kökenleri derecelendirilmiş malzemelerin yardımıyla (zincir, şerit metre, düğümlenmiş ip vb...) yapılan ölçüm tekniklerine dayanmaktadır. Optik mesafe ölçüm teknikleri de uzun yıllara dayanan bir geçmişe sahiptirler. Birçoğu James Watt tarafından 1771 yılında yapılan çalışmaların devamı olarak nitelendirilir. Elektromanyetik ölçüm teknikleri de mesafe ölçüm yöntemleri arasında yer almaktadır. Radyo veya ışık dalgalarının kat ettiği süre hesaplanarak mesafe elde edilir.

James Watt tarafından geliştirilen yöntemlerden bu yana ışığın kullanımı ile mesafe ölçen sayısız aygıt üretilmiştir. Üretilen bu tip aygıtlar farklı çalışma prensiplerine sahiptirler. Bunlardan bir tanesi “Üçgenleme Yöntemi”dir.

### 1.1. Tezin Amacı

Üçgenleme yöntemi ile çalışan lazerli mesafe ölçüm sensörleri optik algılayıcı yardımı ile elektriksel işaretler üretirler. Üretilen elektriksel işaretler bir dizi işlemden sonra mesafe bilgisine dönüştürülür. Elektriksel bilgidan mesafeye dönüştürülene kadar ışık birçok adımdan geçer ve geçtiği adımların hepsi ürettiği mesafe bilgisini etkilemektedir. Işığın doğru ve kararlı bir şekilde mesafe bilgisi verebilmesi için doğrusallaştırma işlemleri uygulanmıştır.

Tezin amacı doğrusallaştırma işlemini etkileyen etkenleri tespit edip üçgenleme yönteminin en elverişli şartlarda çalışan doğrusallaştırma yöntemini tasarlamaktır.



## 1.2. Teze Genel Bakış

Bu çalışmanın ikinci bölümünde lazerli mesafe ölçüm teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Devamında üçgenleme yönteminin çalışma prensipleri ve tasarım değişkenleri sistemin içerdiği donanımlar ile beraber açıklanmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde üçgenleme yöntemi tasarimsal olarak ele alınmıştır. Söz konusu değişkenlerin doğrusallaştırma yöntemlerine olan etkileri teorik olarak açıklanmıştır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde Durmazlar Holding bünyesinde üretilen üçgenleme yöntemi ile çalışan lazerli mesafe ölçüm sensöründen alınmış verilerin analizleri yer almaktadır.

Çalışmanın sonuç bölümünde dördüncü bölümde yapılan analizlerden çıkarılan sonuçlar sayesinde en elverişli çalışan üçgenleme yöntemi modeli ortaya çıkarılmıştır ve önemli değişkenler belirtilmiştir.

## **2. LİTERATÜR**

### **2.1. Mesafe Ölçüm Yöntemleri ve Uygulamaları**

Bir nesnenin pozisyonunu, boyutlarını veya hareketini tayin etmek için mesafe ölçüm tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Mesafe ölçüm tekniklerinin kullanılabildiği muhtemel örnek uygulamalar şunlardır: Endüstrideki ürünlerin boyutlarını veya kalitesini kontrol etmek, hız veya ivme ölçmek, herhangi bir güvenlik bölgesini kontrol etmek, coğrafi saha ölçümleri yapmak, ordu uygulamaları veya bir uçağın veya uydunun uzaklığını ölçmek vb... daha birçok uygulama sayılabilir. Üç boyutlu görüntüleme ile ilgili uygulamalar nesne tanıma, nesne konumunu tanımlama veya mevcut nesnelerin sayısının hesaplanmasıdır. Üç boyutlu görüntüleme uygulamaları genelde robotların karmaşık işlerde yönlendirilmesinde veya robotun çalışma alanında yönünü bulmasında kullanılır.

Etkin, temassız mesafe ölçümü akustik olarak da sağlanabilir. Ultra-sonik sesler, RF (radyo frekansı) elektro-manyetik dalgalar veya optik olarak ışıkla akustik ölçüm sağlanabilir. Bütün yöntemlerde nesne üzerine bir işaret gönderilir ve işaretin nesne üzerinden geri yansıdıktan sonraki özellikleri incelenerek mesafe hesaplanır. Optik yöntemler kullanılan ara-katman (çoğunlukla hava) çok fazla parçacık içermiyorsa, toz veya duman gibi, mesafe ölçümlerinde en iyi çözünürlüğü ve hassasiyeti sağlamaktadırlar.

### **2.2. Optik Mesafe Ölçüm Teknikleri**

Optik mesafe ölçerler çoğunlukla LADAR veya LİDAR (LADAR = laser detection and ranging, LIDAR = light detection and ranging) olarak adlandırılırlar. Optik mesafe ölçüm yöntemleri birden fazla sınıflandırmaya sahiptirler. Bunlardan bir tanesi aktif ve pasif yöntemlerdir. Pasif yöntemler ışık kaynağına ihtiyaç duymazlar. Ortamdaki ışık kullanılarak hedeften mesafe bilgisi elde edilir (Kilpelä 2004).

Aktif yöntemler hedefi aydınlatmak için kendi ışık kaynaklarını kullanırlar. En önemli aktif yöntemler interferometrik yöntemler, geometrik yöntemler (üçgenleme) ve uçuş süresi ölçüm yöntemleridir.

Başka bir sınıflandırma şekli ise görüntü tabanlı yöntemler ve doğrudan yöntemler olarak yapılır. Doğrudan yöntemler hedef üzerindeki bir noktadan kesin mesafe bilgisi verirler. Görüntü tabanlı yöntemlerde hedefin farklı kısımlarındaki silüetler veya göreceli pozisyonlar bir algoritma ile kullanılarak mesafe bilgisi elde edilir. Diğer sınıflandırma şekli olarak da tek gözlü ve çok gözlü ölçüm olarak ayrılabilirler.

Pasif tek gözlü yöntemler CCD (charge coupled device), PSD (Position Sensitive Detector) veya CMOS (Complementary metal–oxide–semiconductor) görüntü algılayıcıları kullanılarak yaratılan görüntüden silüet, doku, hareket veya odak bilgileri elde ederler ve bu bilgiler kullanılarak hedefin şekli hesaplanır. Bu yöntemlerde en çok rastlanılan hatalar aydınlatmadaki küçük farklardan (özellikle dış ortamlarda) veya hedefin yansıtma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Çok gözlü yöntemlerde amaç iki alıcının (çoğunlukla kamera) oluşturduğu iki nokta ile hedef arasında oluşan açının ölçülmesidir. Alıcılar arasındaki mesafe büyüdükçe hassasiyet artar. Bununla beraber hedef nesnenin bir kısmının sönük ya da gölgede kalması ölçüm hatalarına sebep olacaktır.

Pasif yöntemlerin avantajı basit bir yapıya sahip olmaları ve hiçbir şekilde insan sağlığına zarar vermiyor olmalarıdır. Tek boyutlu CCD (veya CMOS) foto-diyot matrisler veya PSD aygıtları bu yöntemler için yeterlidir.

Aktif çok gözlü yöntemler hedef üzerinde etkin olarak kullanılan ışığın kontrolü sayesinde yapılan hesaplamaları kolaylaştırmaktadır. Işık kaynağı olarak lazer ışını kullanılır. Lazer kullanmanın avantajı lazerin az sapması ve hedef üzerine düşürülen ışık lekesinin ufak boyutlarda olmasıdır.

Lazerli üçgenleme yöntemi aktif, doğrudan ve tek gözlü bir optik mesafe ölçüm yöntemidir. Bunun yanında interferometrik yöntemler ve uçuş süresi ölçüm yöntemi de bu sınıflandırmadadır.

Günümüzde mesafe ölçümünde kullanılan birçok opto-elektronik sistemler ve yöntemler yer almaktadır. Radar, ultra-sonik ve lazer teknolojileri bu sistemler arasında en çok kullanılanlardandır.

### 2.3. Lazerli Mesafe Ölçüm Yöntemleri

Radar ve ultra-sonik yöntemler daha uzun dalga boyuna sahip oldukları için daha büyük mesafelerde ve daha az hassasiyet aranan uygulamalarda kullanılır. Lazerli yöntemler bu yöntemlerle karşılaştırıldığı zaman avantajları daha fazladır. Temassız ölçüm yapabilmeleri sayesinde ölçüm ortamı çeşitliliği sağlanır. En önemli avantajları ise yüksek ölçüm hızı, yüksek çözünürlük ve iyi bir tekrarlanabilirliğe sahip olmasıdır. Lazer tabanlı ölçüm yöntemlerinde ölçüm yapılan nesnede herhangi bir hasar veya aşınım meydana gelmemektedir. Söz konusu ölçüm tekniklerinin kendilerine özel ölçüm aralıkları, çalışma şartları ve sınıflandırılmaları vardır. Bu yöntemler:

- 1) Uçuş Süresi Ölçümü
- 2) Faz Kayması Ölçümü
- 3) Mutlak İnterferometre
- 4) Lazerli Üçgenleme

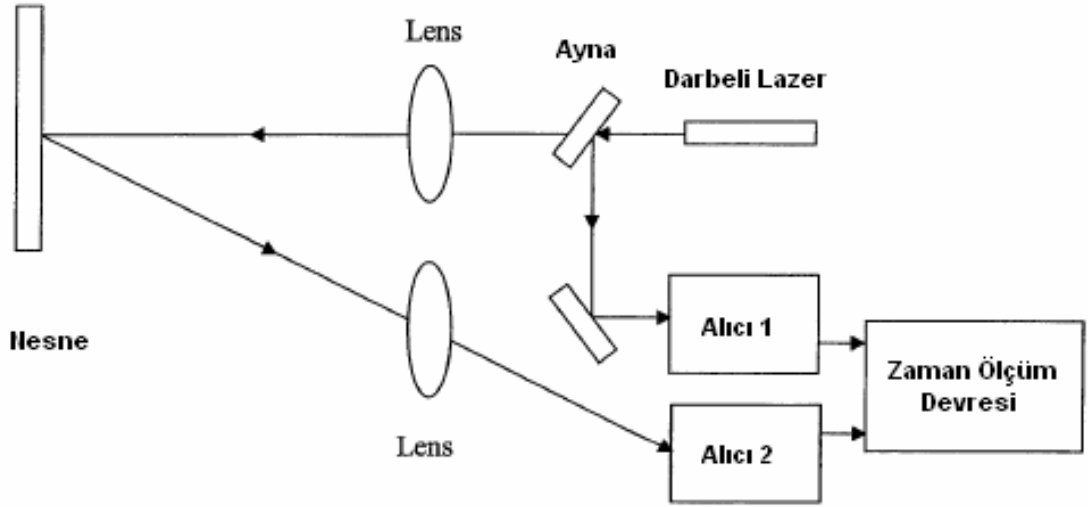
olarak sıralanabilir.

Tasarlanan temassız lazerli ölçüm sisteminde lazerli üçgenleme yöntemi kullanılmıştır. Lazerli üçgenleme yönteminin prensiplerini açıklamadan önce avantajlarını ve dezavantajlarını daha iyi belirtmek adına diğer yöntemler de açıklanmıştır.

#### 2.3.1. Uçuş süresi ölçüm yöntemi

Uçuş süresi ölçümünde, ışığın kat ettiği yol zaman ile doğru orantılıdır. Işığın kat ettiği yol ise ışığın vakumdaki hızından kolayca elde edilebilir. Bu yöntemin maliyeti ve karmaşıklığı elde edilmek istenen hassasiyete ve çözünürlüğe bağlıdır. Veri elde edebilme ve analiz elektroniği nano-saniyeler mertebesinde ele alınmalıdır.

Şekil 2.1'de lazer tabanlı uçuş süresi ölçüm yönteminin blok çizimi verilmiştir (Chen 2005). Sistem ışık kaynağı olarak darbeli bir lazerden, verici ve alıcı optikleri, başlama ve durdurma alıcı kanalları ve kat edilen yolu ölçmek için kullanılan devreden oluşmaktadır.



Şekil 2.1 Darbeli Uçuş Süresi Ölçüm Yöntemi

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 9.

Görünen nesneye 5-10ns arası kısa bir ışık darbesi iletilir. Yansıtılan darbenin alıcıya ulaşması durdurma darbesi olarak algılanır. İletilen darbe referans alınır. Başlangıç darbesi ve darbeler arası geçen zaman aralığı hesaplanır ve mesafeye dönüştürülür (Palojarvi ve ark. 1997).

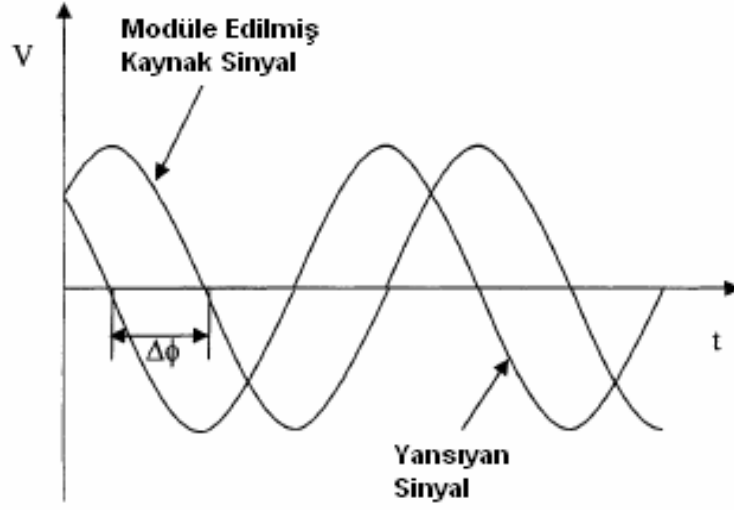
Işık hızı tozlu ve rutubetli ortamlarda farklılık göstermektedir. Bu yüzden yöntem bu gibi ortamlarda hassas sonuçlar verememektedir (Klose ve ark. 2009).

### 2.3.2. Faz kayması ölçüm yöntemi

Bu yöntem tipik olarak 10 metre ve birkaç katı olan mesafelerde kullanılmaktadır. Bu yöntemde etkin olarak modüle edilmiş lazer ışınının yankısı ölçülmektedir.

Şekil 2.2'de modüle edilmiş bir lazer ışınının yankısı gösterilmiştir.  $\Delta\Phi$  hedefe olan uzaklık olarak tanımlanmıştır. Yayılan ve iletilen sinyal arasındaki faz kayması kat edilen mesafe ile doğru orantılıdır. Aşağıda verilen denklem sayesinde faz kayması hesaplanabilir (Chen 2005):

$$t_r = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f} \quad (2.1)$$

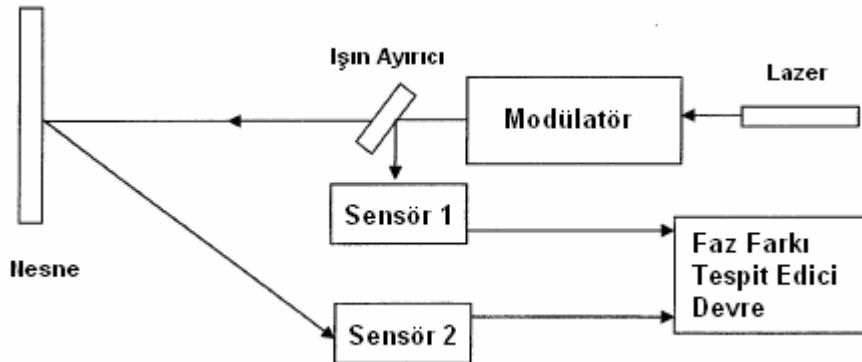


Şekil 2.2 Modüle Edilmiş Lazer Sinyalinin Faz Kayması

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 10.

$t_r$  lazer ışınının bir tur boyunca kat ettiği süre,  $\Delta\Phi$  faz farkı ve  $f$  modüle edilmiş sinyalin frekansdır.

Şekil 2.3'te sürekli dalga ile mesafe ölçümü yapan sistemin blok çizimi verilmiştir (Chen 2005). Sistemde akusto-optik aygıt lazer modülasyonunu sağlar. Orijinal sinyal uzaklaşmakta olan lazerin önüne koyulan ışın ayırıcı (bramsplitter) sayesinde elde edilir. Duyarga 2 dönen ışını algılar. Faz farkı tespit etme devresinde ise iki sinyalin fazları karşılaştırılır ve gidiş-dönüş süreleri hesaplanıp mesafeye dönüştürülür (Bazin ve Journet 1996).



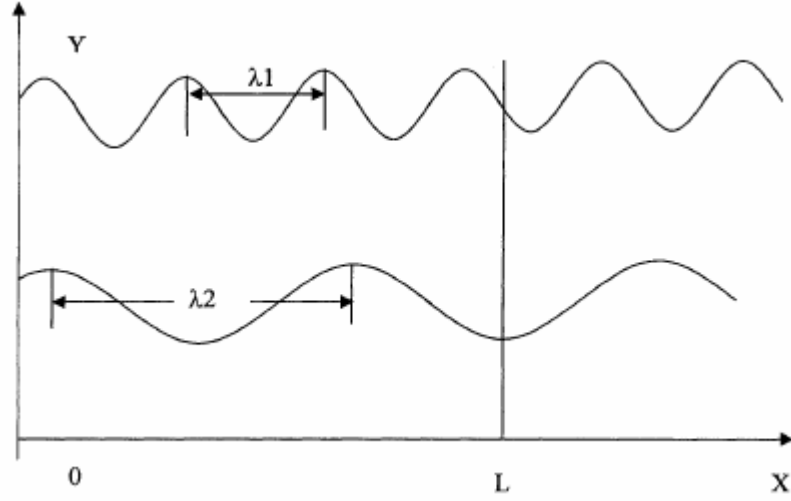
Şekil 2.3 Faz Kayması Ölçüm Yöntemi

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 11.

### 2.3.3. Mutlak interferometre yöntemi

İnterferometre hassasiyetin mikronlar mertebesinde istendiği durumlarda en iyi sonuç veren yöntemlerdendir. Yöntem harici kaviteli lazere gereksinim duyduğu için çok pahalıdır.

Şekil 2.4'te interferometrenin ışık dalgaları gösterilmiştir (Chen 2005). Belirli sayıdaki ışık dalgası ( $\lambda_1$ ) L uzaklığına denk gelmektedir. Eğer dalga boyu sürekli olarak  $\lambda_2$ 'ye ayarlanırsa dalga boyunun esnemesi olarak nitelendirilir. Bu uzama esnasında belirli sayıdaki dalgalar  $x=L$  noktasından geçerler. Bu sayı bir interferometre tarafından tespit edilir (Steel 1986).



Şekil 2.4 İnterferometrenin Işık Dalgaları

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 12.

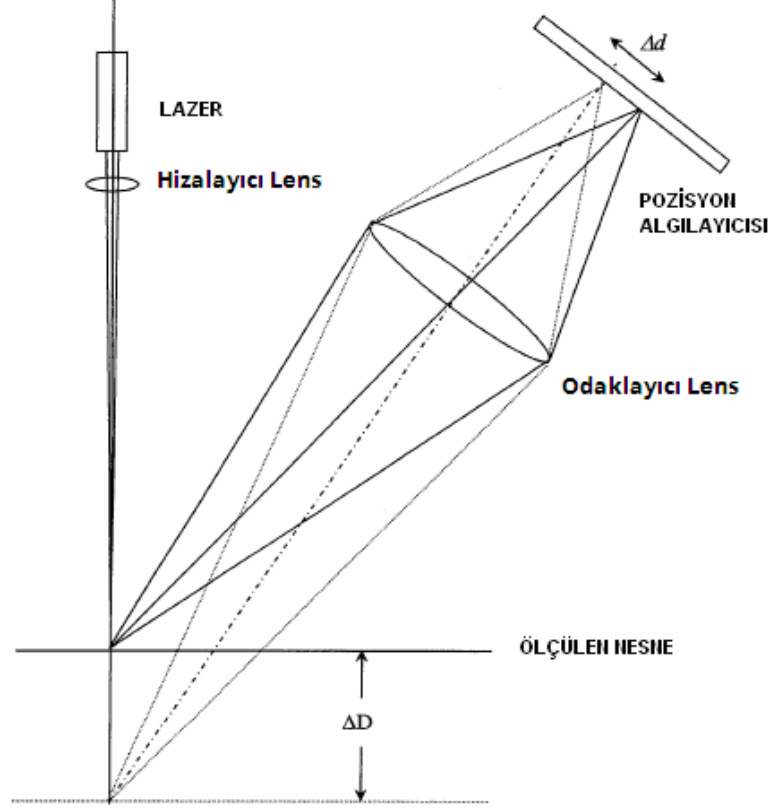
Dalga boyundaki değişimden dolayı ölçülebilir faz farkı  $\Delta\Phi$  denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$L = \frac{\Delta\phi}{2\pi} \times \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (2.2)$$

Michelson interferometresi kullanılarak  $\lambda_1$ 'den  $\lambda_2$ 'ye dalga boyu değişimi boyunca faz değişimi hesaplanabilir.

### 2.3.4. Üçgenleme yöntemi

Lazerli üçgenleme yöntemi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te lazer tabanlı bir üçgenleme yöntemi verilmiştir (Chen 2005).



Şekil 2.5 Lazerli Üçgenleme Yöntemi (Chen 2005)

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 14.

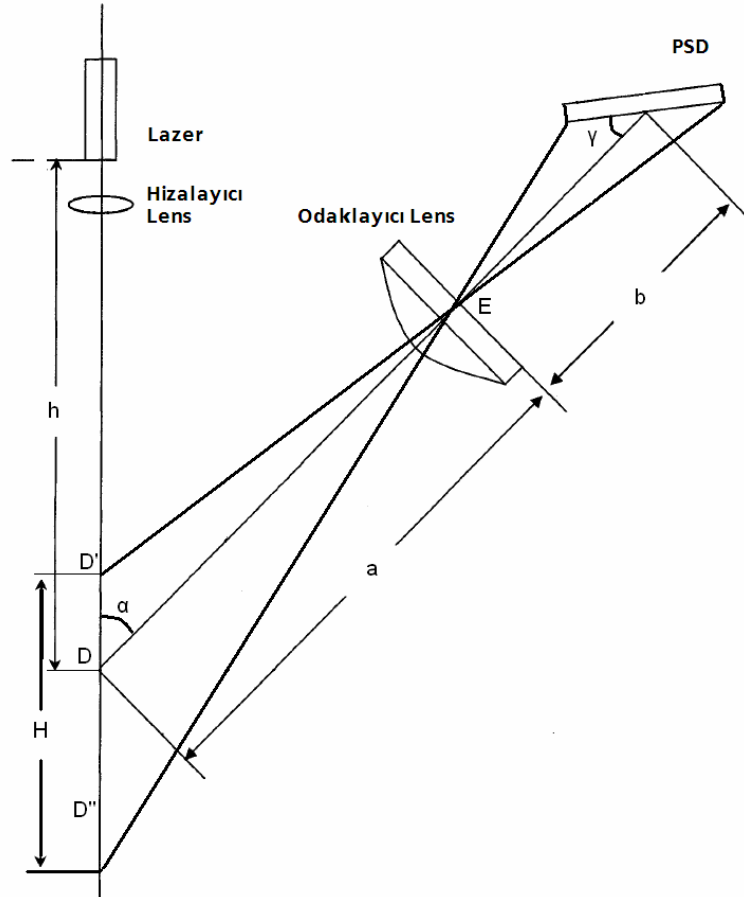
Lazer diyottan çıkan ışın nokta halinde ölçülmek istenen nesne üzerinde iletilir. Lazer ışınının nesne üzerindeki iz düşümünün bir kısmı saçılır ve yakınsama yapan mercek üzerinden pozisyon algılayıcısında görüntüsü oluşur. Ölçülen nesne yüzeyi değiştirilirse, ışık noktasının pozisyon algılayıcısındaki görüntüsü de yer değiştirir. Görüntünün yer değiştirme miktarı  $\Delta d$  kullanılarak nesnenin yer değiştirme miktarı  $\Delta D$  hesaplanabilir.

Lazerli üçgenleme yöntemi temassız yüksek ölçüm hızı ve yüksek ölçüm hassasiyetine sahiptir (Costa 1996). Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığı zaman ortamdan bağımsız, insan sağlığına ve hedefe zararsız ve daha ucuz elemanlara sahiptir. 10 metreden kısa mesafeleri ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.



### 3. LAZERLİ ÜÇGENLEME YÖNTEMİNİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ VE TASARIM DEĞİŞKENLERİ

Lazerli üçgenleme yöntemi ile çalışan mesafe aralığını ölçen optik sistem iki ana elemandan oluşmaktadır: Işık kaynağı ve görüntü oluşturma mekanizması, pozisyon algılama sistemi (Wiese 1989). Şekil 3.1’de yöntemin geometrik modeli verilmiştir (Chen 2005). Lazer ışını odaklayıcı merceğin optik eksenini ile D noktasında kesişmektedir. Yöntemin ölçüm aralığı D’ ve D’’ noktalarının arası olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Lazerli Üçgenleme Yöntemi Geometrik Yapısı

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 18.



$$\tan(\alpha) = \frac{AE}{h} \quad AE = h \times \tan(\alpha) \quad (3.2)$$

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{AE}{AD'} = \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{AD'} \quad AD' = \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (3.3)$$

$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{AE}{AD''} = \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{AD''} \quad AD'' = \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} \quad (3.4)$$

$$D'D = AD - AD' = h - \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} = h \cdot \left( 1 - \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \right) \quad (3.5)$$

$$DD'' = AD'' - AD = \frac{h \cdot \tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} - h = h \cdot \left( \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$D'D'' = D'D + DD'' = h \cdot \tan(\alpha) \cdot \left( \frac{1}{\tan(\alpha - \beta)} - \frac{1}{\tan(\alpha + \beta)} \right) \quad (3.7)$$

Basit trigonometrik ifadelerden  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $h$  değerleri biliniyorken sistemin ölçüm aralığı denklem 3.7'de verilmiştir. Yine aynı sabitler kullanılarak  $D''_{DE}D$  ve  $DD'_{DE}$  uzunlukları ifade edilebilir:

$$\cos(\alpha) = \frac{D''_{DE}D}{DD''} = \frac{D''_{DE}D}{h \cdot \left( \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} - 1 \right)} \quad (3.8)$$

$$DD'_{DE} = h \cdot \cos(\alpha) \cdot \left( 1 - \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \right) \quad (3.9)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{DD'_{DE}}{D'D} = \frac{DD'_{DE}}{h \cdot \left( 1 - \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)} \quad (3.10)$$

$$D''_{DE}D = h \cdot \cos(\alpha) \cdot \left( \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} - 1 \right) \quad (3.11)$$

$D''_{DE}E$  ve  $D'_{DE}E$  uzunlukları da yine  $\alpha, \beta$  ve  $h$  cinsinden ifade edilebilir:

$$D'_{DE}E = DE - DD'_{DE} = h \cdot \left( \frac{1}{\cos(\alpha)} - \cos(\alpha) \cdot \left( 1 - \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \right) \right) \quad (3.12)$$

$$D''_{DE}E = D''_{DE}D + DE = h \cdot \left( \cos(\alpha) \cdot \left( \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha - \beta)} - 1 \right) + \frac{1}{\cos(\alpha)} \right) \quad (3.13)$$

Şu ana kadar elde edilen trigonometrik ifadelerle ince lensler için geçerli olan;

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.14)$$

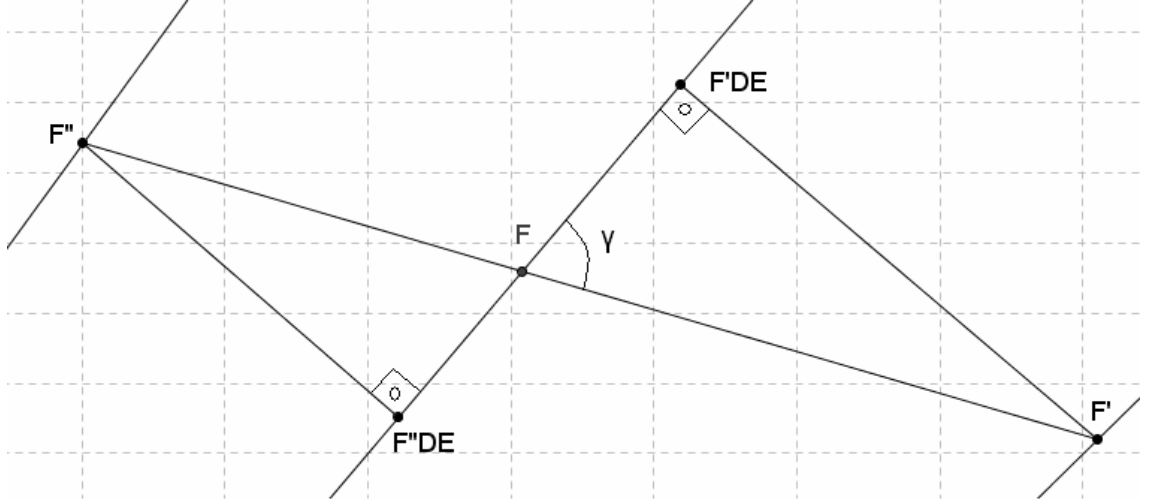
formülü de kullanılarak kullanılması gereken PSD aygıtı uzunluğunu bilinen değişkenler cinsinden ifade edilebilir. İnce lens formülüne göre  $a$ , nesne ile mercek arası mesafe;  $b$ , mercek ile PSD aygıtı arasındaki mesafe;  $f$  ise odaklayıcı merceğin odak uzaklığıdır. İnce lens formülünden yola çıkılarak sistemin geometrik modelinden üç farklı denklem elde edilebilir:

$$\frac{1}{D'_{DE}E} + \frac{1}{EF'_{DE}} = \frac{1}{f_E} \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{DE} + \frac{1}{EF} = \frac{1}{f_E} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{D''_{DE}E} + \frac{1}{EF''_{DE}} = \frac{1}{f_E} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemlere daha önce ifade edilen uzunluklar yerlerine konduğu zaman  $EF$ ,  $EF'_{DE}$  ve  $EF''_{DE}$  uzunlukları da ifade edilebilir:



Şekil 3.3 PSD Aygıtının Geometrik Sadeleştirilmiş Modeli

$$FF'_{DE} = EF'_{DE} - EF \quad F''_{DE}F = EF - EF''_{DE} \quad (3.18)$$

$$\tan(\beta) = \frac{F'_{DE}F'}{EF'_{DE}} \quad F''F''_{DE} = EF''_{DE} \cdot \tan(\beta) \quad (3.19)$$

$$\tan(\beta) = \frac{F''F''_{DE}}{EF''_{DE}} \quad F'_{DE}F' = EF'_{DE} \cdot \tan(\beta) \quad (3.20)$$

PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı  $\gamma$  açısını elde etmek için bu açıyı içeren üçgenlerden biri seçilerek devam edilebilir:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{F''F''_{DE}}{F''_{DE}F}\right) = \arctan\left(\frac{EF''_{DE} \cdot \tan(\beta)}{EF - EF''_{DE}}\right) \quad (3.21)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{F''F''_{DE}}{F''F} = \frac{EF''_{DE} \cdot \tan(\beta)}{F''F} \quad F''F = \frac{EF''_{DE} \cdot \tan(\beta)}{\sin(\gamma)} \quad (3.22)$$

$$\sin(\gamma) = \frac{F'_{DE}F'}{FF'} = \frac{EF'_{DE} \cdot \tan(\beta)}{FF'} \quad FF' = \frac{EF'_{DE} \cdot \tan(\beta)}{\sin(\gamma)} \quad (3.23)$$

Son olarak  $FF'$  ve  $F''F$  uzunlukları toplanarak gereken minimum PSD aygıtı uzunluğu elde edilebilir:

$$F''F' = F''F + FF' = \frac{\tan(\beta)}{\sin(\gamma)} \cdot (EF''_{DE} + EF'_{DE}) \quad (3.24)$$

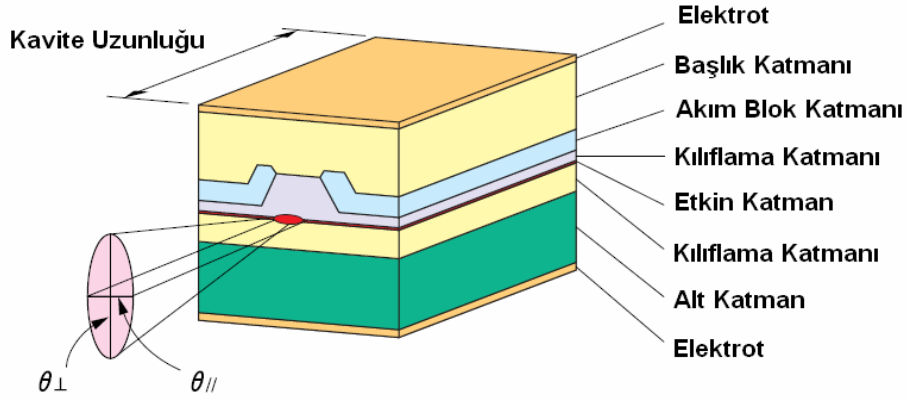
Yöntemin geometrik konumlandırılması dışında yöntemde kullanılan aygıtların özellikleri ve ayarlanma şekilleri sistemin çalışma hassasiyeti açısından büyük rol oynamaktadır. Bundan sonraki bölümlerde bu aygıtlar hakkında bilgi verilmiştir.

### 3.1. Işık Kaynağı

Lazerli üçgenleme yönteminde mesafenin ölçülmek istendiği yöne ışık ışını gönderilmelidir. Bu yüzden yöntem bir ışık kaynağına gerek duymaktadır. Lazerli ölçüm yöntemlerinde ışık kaynağının kuvvetli ve uzaksaması minimuma indirilmiş bir leke üretmesi gerekmektedir. Fon ışığının yarattığı etkileri engellemek için darbe modülasyonu ve optik filtreleme kullanılmalıdır. Yarı-iletken lazerler lazerli üçgenleme yönteminde kullanılabilir ışık kaynaklarıdır. Dalga boylarına, çıkış güçlerine, yayılım şekillerine (sürekli veya darbeli) ve şeffaflığına göre farklılık gösterirler (Hecht 1993).

Ölçülmek istenen nesne üzerindeki lazer lekesinin olabildiğince küçük yapılması ve ölçülmek istenen mesafe aralığında sabit tutulması gerekmektedir. Bu ayarlanmanın sebeplerinden biri nesnenin dokusu küçük bir lekeyi gerektiriyor olmasıdır. Diğer bir sebep ise eğer lazer lekesi küçük oluşturulursa, iyi bir üçgenleme doğrusalığı elde etmek kolaylaşacaktır. Büyük bir leke PSD yüzeyinin üzerinde normalden daha büyük bir görüntü oluşturacaktır. PSD aygıtı lekenin ağırlık merkezinden ölçüm yapacağından küresel sapmalardan dolayı hatalar oluşacaktır. Ölçülmek istenen mesafe aralığında lekenin nesne üzerinde aynı boyutta oluşturulması açıklanan sebeplerden dolayı gerekmektedir.

Lazer diyotların iç yapısı şekil 3.4'te verilmiştir. Etkin katmandan yayılmaya başlayan lazer ışını dar bir çıkıştan çıkar ve şekil 3.4'te gösterilen yayılma yolunu izler. Elips şeklinde bir yayılım yapan lazer ışını hizalayıcı mercek yardımıyla çizgi haline getirilir.



Şekil 3.4 Lazer Diyot İç Yapısı

**Kaynak:** Sanyo Databook, s. 1.

Lazer diyotün sistemde konumlandırılması yapılırken içyapısı göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Elips şeklinde yayılım yapan bir lazer ışını dik konuma getirilirse dar ve çizgi şeklinde bir lazer lekesi elde etmek kolaylaşacaktır.



Şekil 3.5 Roithner Lasertechnik firmasına ait QL67D6SA modeli Lazer Diyot

Tasarlanan sistemde 5mW'lık 670nm dalga boyuna sahip bir lazer diyot ışık kaynağı olarak kullanılmıştır.

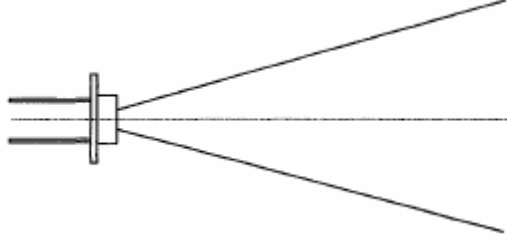
### 3.2. Hizalayıcı Mercek

Lazer diyottan çıkan lazer ışınının uzaksama sorunu vardır. Uzaklığı hassas bir şekilde ölçebilmek için paralel bir ışın gerekmektedir. Sistemde Roithner Lasertechnik firmasından alınmış, GS-8019A modeli, üç elemanlı 8mm odak uzaklı hizalayıcı mercek kullanılmıştır (Bkz. şekil 3.6).



Şekil 3.6 Roithner Lasertechnik firmasına ait GS-8019A Hizalayıcı Mercek

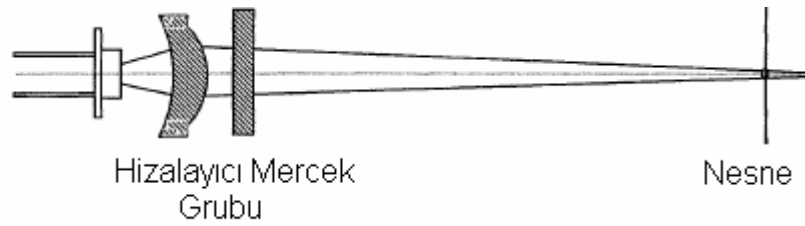
Şekil 3.7’de önüne hizalayıcı mercek konulmamış bir lazer diyottan çıkan ışının saçılması gösterilmiştir (Chen 2005).



Şekil 3.7 Işın Saçılması

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 27.

Şekil 3.8’de lazer diyot önüne konan mercek grubu ile hizalama sağlanmış bir lazer ışını gösterilmiştir (Chen 2005).



Şekil 3.8 Hizalanmış Lazer Işını

**KAYNAK:** Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials, 2005, p. 27.

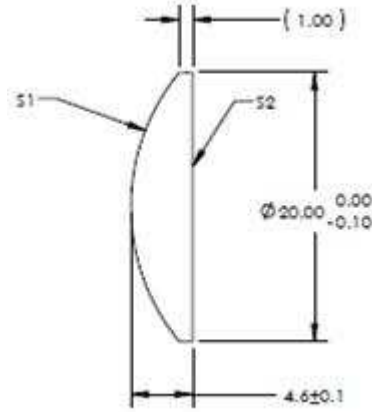
Hizalayıcı mercek grubu lazer diyotun mesafesi ölçülecek nesne üzerinde oluşturduğu ışık lekesinin şeklini ve boyutunu ayarlama büyük kolaylık sağlar. Işık lekesini ölçülecek mesafe boyunca aynı boyutlarda tutmak için hizalayıcı merceğin iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir.



### 3.3. Odaklayıcı Mercek

Sistemde plano-konveks tipinde bir odaklama merceği kullanılmıştır. 100-200mm arası ölçüm yapan bir sistemde ışık kaynağından gelen parlaklık yeterli seviyede olacaktır. Dolayısıyla nesne üzerindeki lekenin ışık yoğunluğunu arttırmaya gerek yoktur. 20-25mm çapında tek-parça plano-konveks mercek sistem için yeterlidir.

Şekil 3.9’da sistemde kullanılan ve “Edmund Optics” firmasından temin edilen plano-konveks merceğin tasarım değişkenleri verilmiştir. S1 ve S2 şekil bilgilerini belirtmektedir. S1 konveks, S2 ise düz (plano) yüzeyi temsil etmektedir.



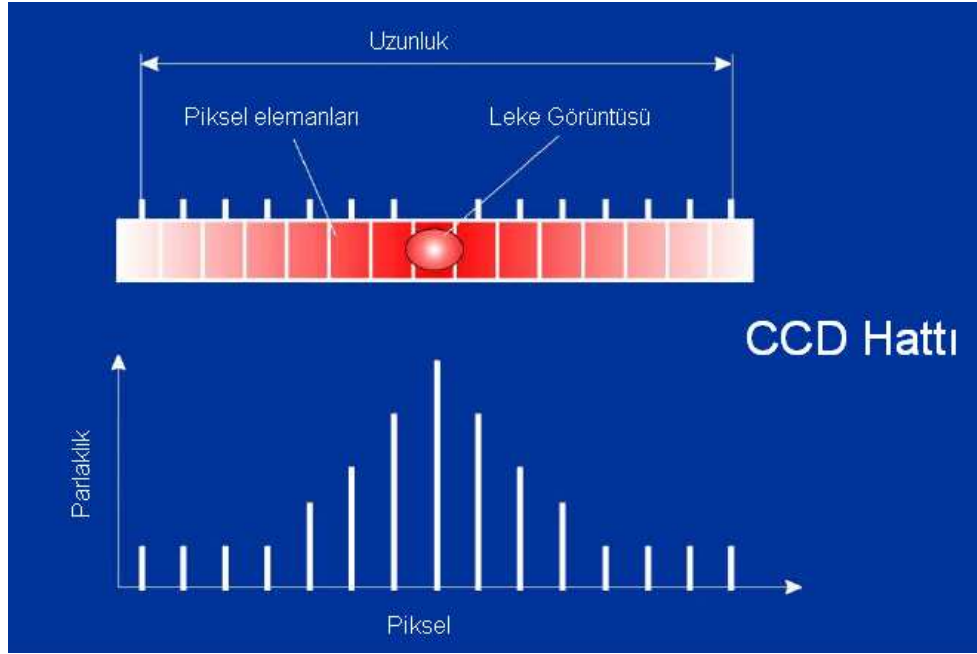
Şekil 3.9 Edmund Optics firmasına ait plano-konveks mercek değişkenleri

### 3.4. Optik Alıcı

İki çeşit pozisyon algılayıcı elemanı vardır. Bunlar Yük Çiftlenimli Aygıt (CCD, Charged Coupled Devide) ve Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcıdır (PSD, Position Sensitive Detector).

#### 3.4.1. CCD Alıcı

CCD aygıtlarında yük paketleri düzlemsel bir dizide MOS kapasitörleri boyunca yol alırlar ve yük paketlerindeki sayısal sinyal okunur. Kapasitör dizisine düşen ışık sırayla her kapasitörün, ışığın parlaklığı ile doğru orantılı olarak, elektrik yükü yığmasına sebep olur. Sıranın sonundaki kapasitör yükünü yük arttırıcıya devreder. Burada ise elektriksel yük voltaja çevrilir.



Şekil 3.10 CCD Yapısı ve Çalışma Prensibi

CCD aygıtlarının en büyük avantajı dijital bilgi çıkışını ışık lekesi ve ışığın odaklanmasından bağımsız halde vermesidir. Dezavantajları ise düşük hız oranlarıdır.

### 3.4.2. PSD Alıcı

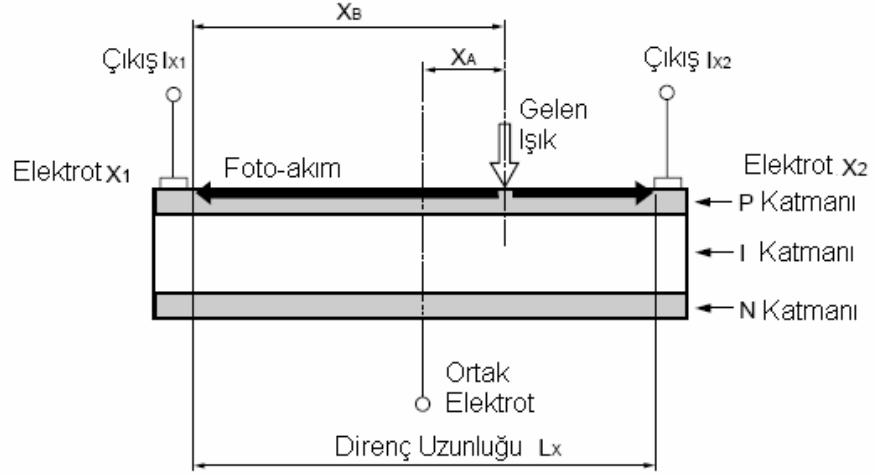
PSD aygıtları içindeki aralıklı elemanlar ile sürekli pozisyon bilgisi sağlayan bir aygıttır. Üzerindeki foto-diyot sayesinde yüzey direncini kullanarak pozisyon bilgisini sürekli güncel tutar. Tek boyutlu ve iki boyutlu PSD aygıtları mevcuttur. Söz konusu tasarımda tek boyutlu PSD aygıtı kullanılmıştır.

PSD aygıtının temel yapısı Şekil 3.11’de verilmiştir. P yüzeyi katmanı düzenli dağılmış dirence sahiptir. Işık P katmanına çarptığı zaman, boşalma bölgesinde foto-akım oluşur. İki adet elektrot tarafından üretilen foto-akım algılanır (Ohm Yasası).

Üretilen foto-akımlar ve PSD üzerinde X noktasında düşen ani ışık arasındaki ilişki eşitlik 3.25’te verilmiştir.

$$\frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x2} + I_{x1}} = \frac{2x}{Lx} \quad (3.25)$$

$I_{x1}$  ve  $I_{x2}$  akımları  $X1$  ve  $X2$  elektrotları ile algılanan çıkış akımlarıdır.



**Şekil 3.11 Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcı Çalışma Prensibi**

PSD aygıtlarının kullanıldığı muhtelif uygulamalar vardır. Bunlardan bazıları optik pozisyon ve açı tespiti, uzaktan kumandalı optik sistemler, mesafe ve titreşim analizleri, lazer ışını hizalama, otomatik mesafe bulma ve insan hareketlerinin analizleridir.



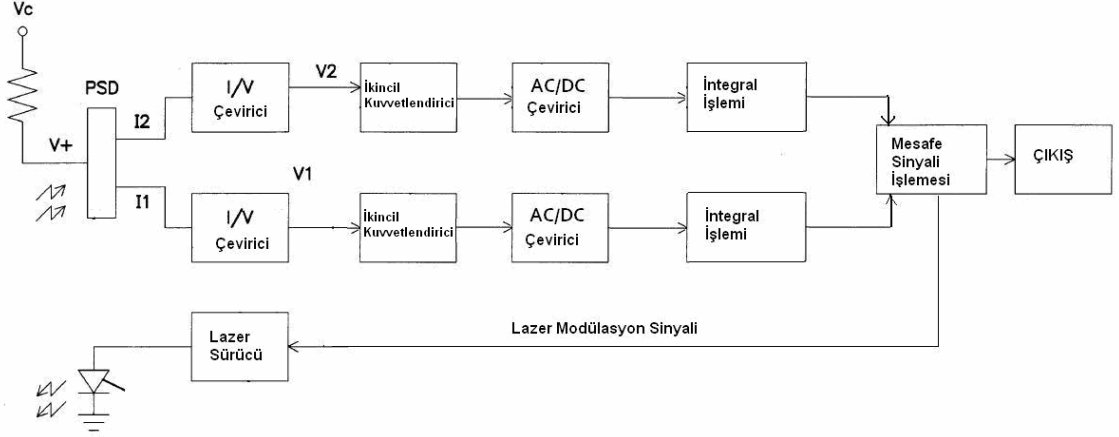
**Şekil 3.12 Hamamatsu firmasına ait S3932 modeli PSD Aygıtı**

Tasarlanan sistemde Hamamatsu firmasının 12mm uzunluğundaki tek boyutlu PSD aygıtı kullanılmaktadır (Bkz. şekil 3.12).

### 3.5. Lazer Sürücü ve Ara-Yüz Devreleri

Şekil 3.13'te sistemde kullanılan devre yapısı blok yapılar halinde verilmiştir. PSD aygıtı üzerinden çıkan foto-akımlar voltaja çevrildikten sonra güçlendirme devrelerinden geçerler.

DC'ye dönüştürülen sinyaller entegral işleminden geçip Mikro-Denetleyici elemana gelirler. Mikro-denetleyici eleman sayesinde PSD formülü kullanılarak (Denklem 3.25) lekenin PSD üzerindeki mesafe bilgisi elde edilir.



**Şekil 3.13 Lazer sinyali işleme devresi blok şeması**

PSD üzerindeki mesafe bilgisinin elde edilmesiyle bu bilginin gerçek mesafe bilgisine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlemi yapmak için kullanılabilir birkaç yöntem mevcuttur. Bunlar: Parçalı Doğrusallaştırma Yöntemi, Doğrusallaştırma Eğrisi Yöntemidir.

### 3.6. Doğrusallaştırma Yöntemleri

Üçgenleme yöntem tabanlı lazerli mesafe ölçüm cihazlarında kullanılan optik sistemler doğal olarak doğrusal olmayan bir yapıda çalışırlar. Alıcı sistem hedefi belirli bir açıda görmektedir ve iletilmiş lekenin boydaki değişimi ve hareketi PSD aygıtının yüzeyinde birebir bağıntılı olmayacaktır.

PSD yüzeyine düşen ışın lekesinin mesafe ile arasındaki doğrusallaştırma yöntemleri iki yöntemle yapılabilir:

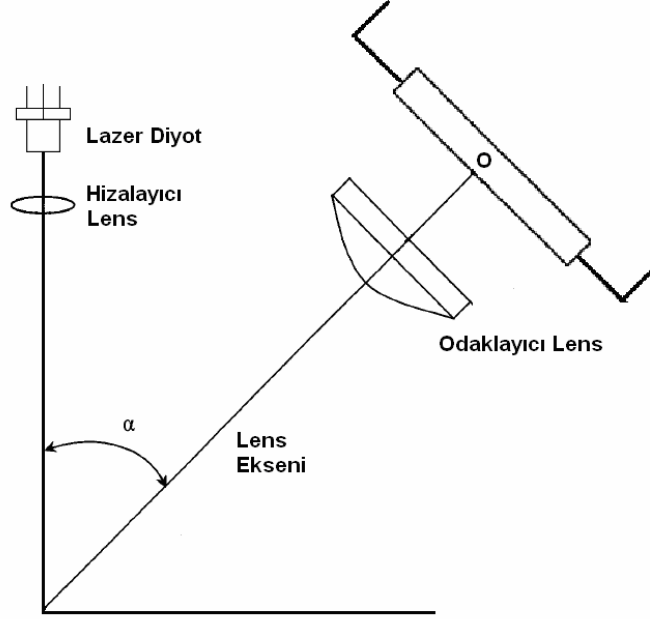
- 1) Optik – Geometrik kanalda doğrusallaştırma
- 2) Elektronik kanalda doğrusallaştırma

#### 3.6.1. Optik-geometrik kanalda doğrusallaştırma

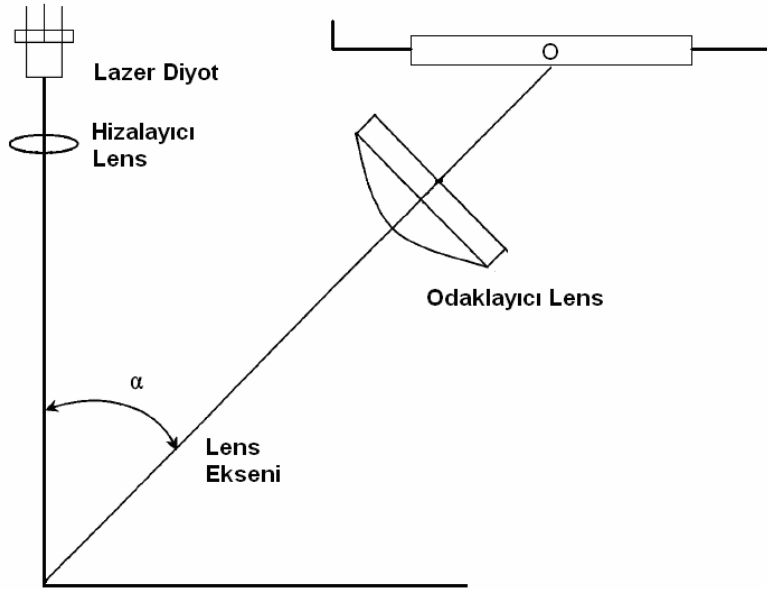
Optik-geometrik kanalda doğrusallaştırma denince sistemin içindeki optik elemanların geometrik konumlarının doğrusallaştırmaya etkisi incelenmektedir. Üçgenleme yönteminde geometrik konumlarının önemli rol oynadığı elemanlar PSD aygıtı ve odaklayıcı mercektir. PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı açı doğrusallaştırmaya doğrudan etkilidir.

PSD aygıtı üzerine düşen ışık lekesi yoğunluğu mesafenin artmasıyla değiştiği için PSD aygıtının odaklayıcı merceğinin optik eksenini ile yaptığı açı büyük önem taşımaktadır.

Şekil 3.14 ve 3.15'te PSD aygıtının mercek ile aynı hizada ve düz konulduğu kurulum resimleri verilmiştir. Kurulumların performans ve hata analizleri dördüncü bölümde incelenmiştir.



Şekil 3.14 Üçgenleme Konumlandırması: PSD mercek ile aynı hizada



Şekil 3.15 Üçgenleme Konumlandırması: PSD düz konumda

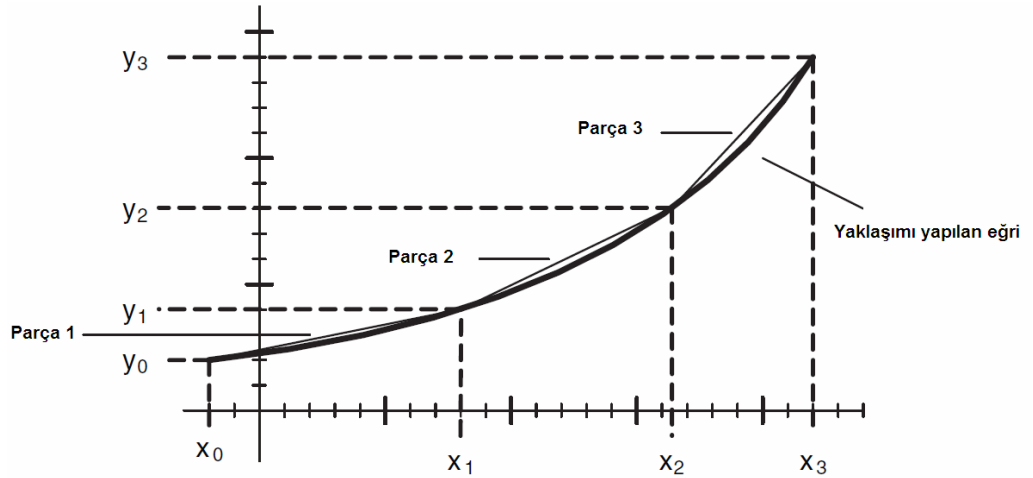
### 3.6.2. Elektronik kanalda doğrusallaştırma

Elektronik kanalda doğrusallaştırma işaret işleme yöntemleri sayesinde yapılabilmektedir. Bunlar parçalı doğrusallaştırma yöntemi ile kalibrasyon eğrisi yöntemleridir.

### 3.6.3. Parçalı doğrusallaştırma yöntemi

Parçalı doğrusallaştırma yöntemi endüstride kullanılan lazerli üçgenleme sensörlerinde en çok kullanılan doğrusallaştırma yöntemidir. Yöntemin karmaşıklığı uygulama kolaylığı açısından çok azdır ve çok iyi sonuçlar vermektedir.

Yöntemin temeli doğrusal olmayan bir eğriyi doğrusal parçalara bölmekten geçer. İstenen gerçek değere karşılık gelen parçanın alt ve üst noktalarının arası doğrusal kabul edilir. Yaklaşımı yapılmak istenen değeri hesaplamak için ilk önce karşılık gelen parça tespit edilir. Bu parçanın eğimi alt ve üst noktalarından alınan değerler ile hesaplanır ve basit bir doğru oranı ile yaklaşık değer elde edilir. Şekil 3.16'da üç parçaya bölünmüş bir eğrinin doğrusal yaklaşımı verilmiştir (Huddleston 2007).



Şekil 3.16 Üç parçaya bölünmüş bir eğrinin doğrusal yaklaşım modeli

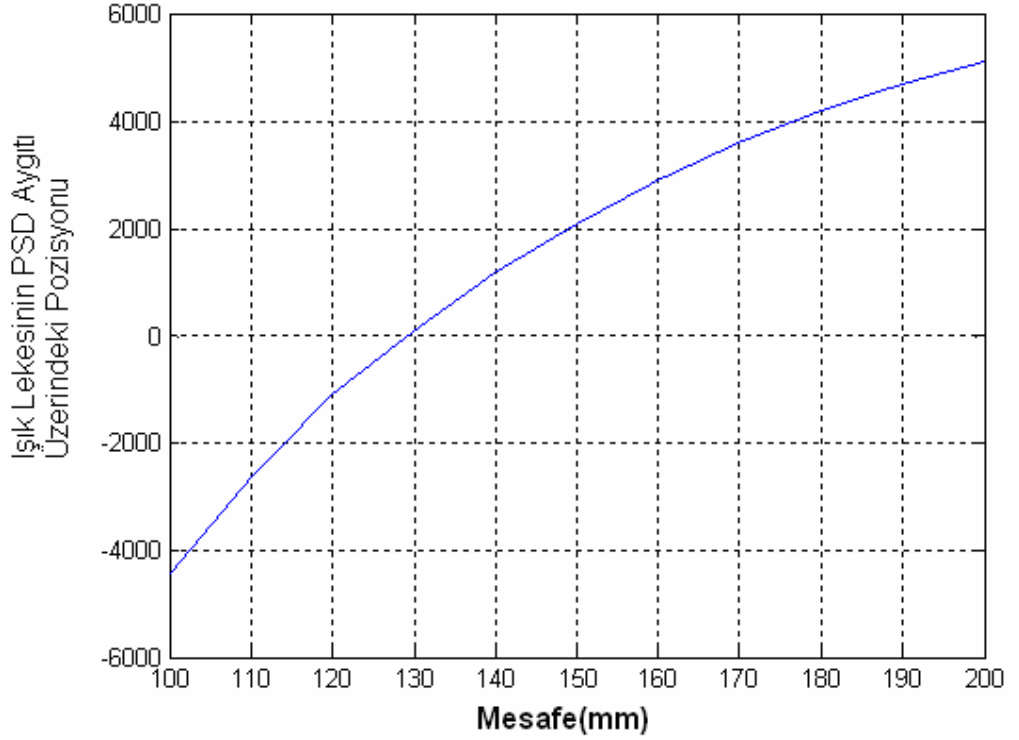
**KAYNAK:** Sensor Design Using the Microchip dsPIC®, 2007, p. 177.

Yöntemin verimliliği yaklaşımı yapılan eğrinin doğasına ve eğriyi bölecek parça sayısına bağlıdır. Parça sayısının artmasıyla eğride yapılan yaklaşımın hassasiyeti artacaktır. Fakat değer alınacak nokta sayısı arttığı için sistemi kalibre etmek için gereken zaman da doğru orantılı olarak artacaktır. Yöntemin performans ve hata analizleri dördüncü bölümde yapılmıştır.

### 3.6.4. Kalibrasyon eğrisi ile doğrusallaştırma yöntemi

Sistemi kalibre etmek için kullanılacak diğer bir yöntem kalibrasyon eğrisi yöntemidir. Yöntemin uygulanabilmesi için PSD aygıtından farklı mesafelerde sıkça alınmış ışık lekesinin pozisyon bilgileri gerekmektedir. Elde edilen PSD pozisyon bilgilerinden çıkış olarak mesafe elde edilecek şekilde matematiksel bir ifade oluşturulmalıdır. Şekil 3.17’de 10mm mesafe aralıklarıyla voltaj değerleri alınmış PSD üzerindeki ışık pozisyonu ve mesafe grafiği verilmiştir.

Şekilden de anlaşılacağı üzere eğimi azalarak artan bir grafik ortaya çıkmıştır. MATLAB programının “Curve Fitting Toolbox” özelliği kullanılarak eğrinin matematiksel ifadesi elde edilebilir. Dördüncü bölümde elde edilen ifadenin performans ve hata analizleri incelenmiştir.

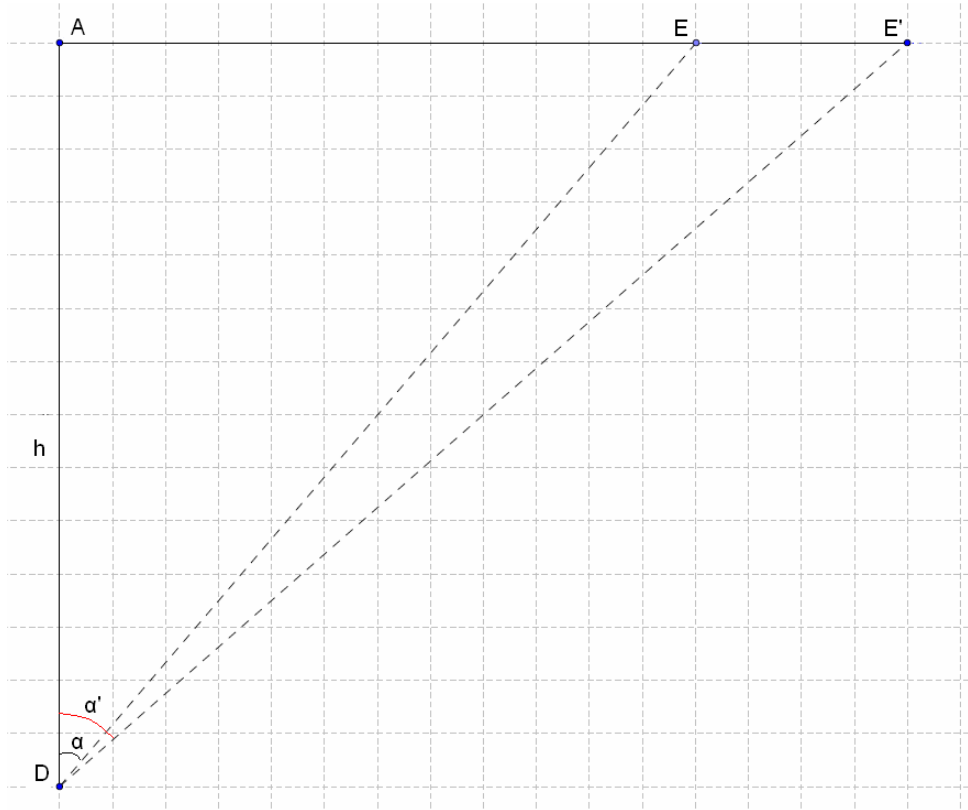


Şekil 3.17 PSD Üzerindeki Işık Pozisyonunun 100-200mm mesafe aralığındaki değişimi

#### 4. ÜÇGENLEME YÖNTEMİNİN TASARIMI

Lazerli üçgenleme yönteminin tasarımına sistemi oluşturan iki ana elemanın (Işık Kaynağı ve PSD aygıtı) konumları belirlenerek başlanmalıdır. Bu elemanların konumlarını belirlemek için iki yöntem mevcuttur. Yöntemlerin ikisi de lazerli mesafe ölçerlerin çoğunda geçerlidir. Yöntemlerden biri sabit taban kullanarak bu tabana karşılık gelen açığı tespit etmektir. Diğeri ise sabit açı kullanarak açığa karşılık gelen taban uzunluğunu belirlemektir (Smith 1970).

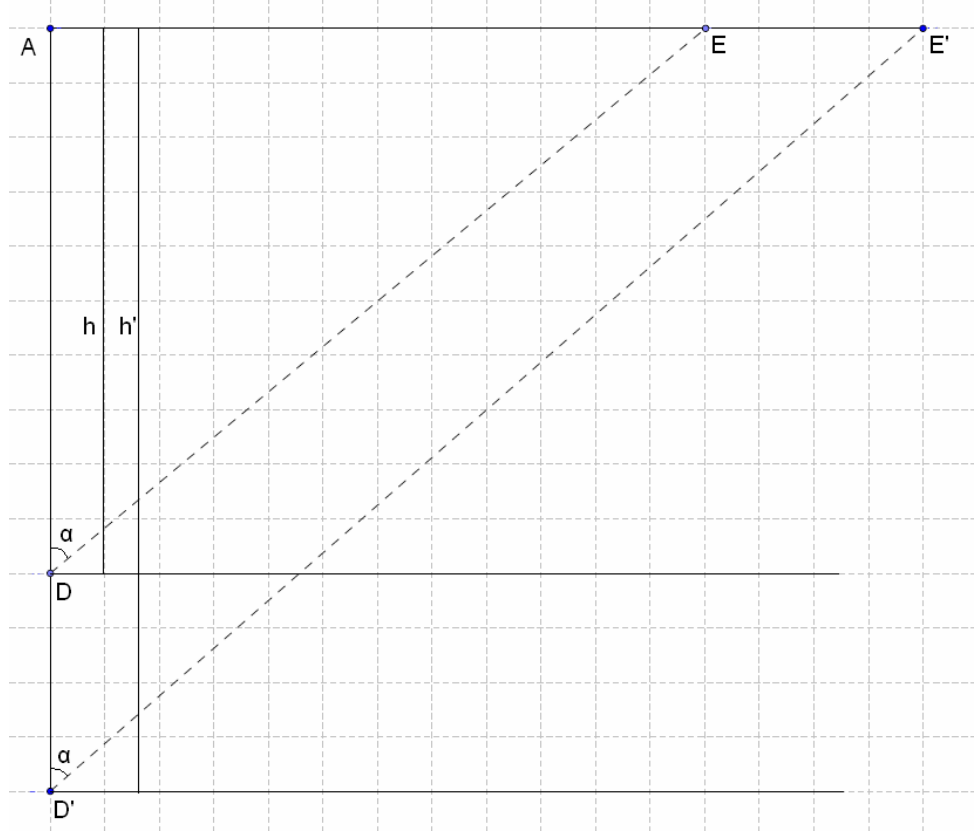
PSD aygıtı için en uygulanabilir yöntem “Sabit Taban” yöntemidir. Yöntem sabit bir  $AD = h$  uzunluğunda ve A noktasındaki sabit açı ile çalışır. D noktasındaki açı ise ölçülür. Hedefe olan uzaklık, AE, D noktasındaki açıdan ve h sabitinden yararlanılarak hesaplanır (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Sabit Taban Yöntemi



Diğer bir yöntem "Sabit Aç" yöntemidir. Yöntemde D noktasındaki  $\alpha$  açısı sabit tutulur ve AD arasındaki h uzaklığı değiştirilir. AD uzunluğu boyunca kaydırılan bir prizma sayesinde E ve E' hedefindeki iki kısmi görüntünün kesişme noktaları bulunur. Mesafenin uzaklığı sabit  $\sin(\alpha)$  değeri ile değişken h uzunluğunun çarpımından elde edilebilir (Bkz. Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Sabit Aç Yöntemi

PSD aygıtı ve odaklayıcı merceğin optik eksenle yaptığı açı  $20\text{-}30^\circ$  arası seçilmiştir ve seçilen bu açıya ve ölçülecek mesafe aralığına göre taban mesafesi ayarlanmıştır.

#### 4.1. Optik-Geometrik Tasarımın Doğrusallaştırmaya Etkisi

Optik-geometrik tasarım, sistemin içerdiği elemanların optik özellikleri ile geometrik konumları bir arada düşünülerek oluşturulmuştur. Sistemi oluşturan optik elemanların optik özellikleri oluşturulacak geometrik modelle doğrudan ilgilidir. Bu yüzden optik ve geometrik tasarım bir arada incelenmiştir.

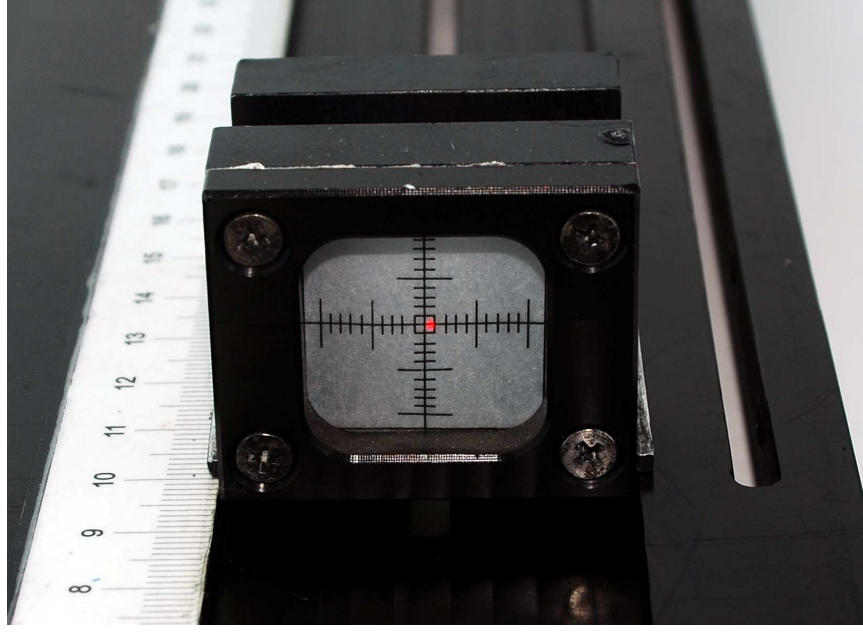
Optik-geometrik tasarımın birincil değişkenleri aşağıda verilmiştir:

- 1) Hedef ve PSD aygıtı üzerine dūřen ıřık lekesi
- 2) Işık Kaynağı ve PSD aygıtı arasındaki mesafe
- 3) PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenineyle yaptığı açı

#### **4.1.1. Hedef ve PSD aygıtı üzerine dūřen ıřık lekesi**

Sistemde kullanılan ışık kaynağı ve ışık kaynağının önüne konulan hizalayıcı mercek grubu hedef üzerine dūřen ışık lekesinin boyutlarını etkiler. Hedef üzerinde oluşturulan leke, odaklayıcı mercek üzerinden geğerek PSD aygıtı üzerine dūřer. PSD aygıtı üzerine dūřen lekenin ağırlık merkezinde (Bkz. Bölüm 2, PSD Alıcı) I1 ve I2 akımları oluşur. Hedef ve PSD aygıtı üzerine dūřen lekenin boyutları, ışık kaynağı ve hizalayıcı mercek ayarlanarak değiştirilebilir. PSD aygıtı üzerine dūřen leke boyutlarının mümkün olduğunca küçük ve ölçülecek mesafe boyunca aynı boyutlarda tutulması önemlidir. Lekenin ağırlık merkezi pozisyon bilgisini verdiği için pozisyon hassasiyetine etkisi yok denecek kadar azdır. Fakat kullanılan PSD aygıtının yüzeyini verimli kullanmak için PSD aygıtı üzerine dūřen lekenin boyutları küçük ve sabit tutulmalıdır. Leke boyutu büyük olursa PSD aygıtının yüzeyi üzerinde leke daha çok foto-alıcıyı tetikleyecektir. Leke ölçülmek istenen mesafenin değişimi ile PSD aygıtının başına ve sonuna doğru kayar ve sınır bölgelerinde hatalara sebep olur.

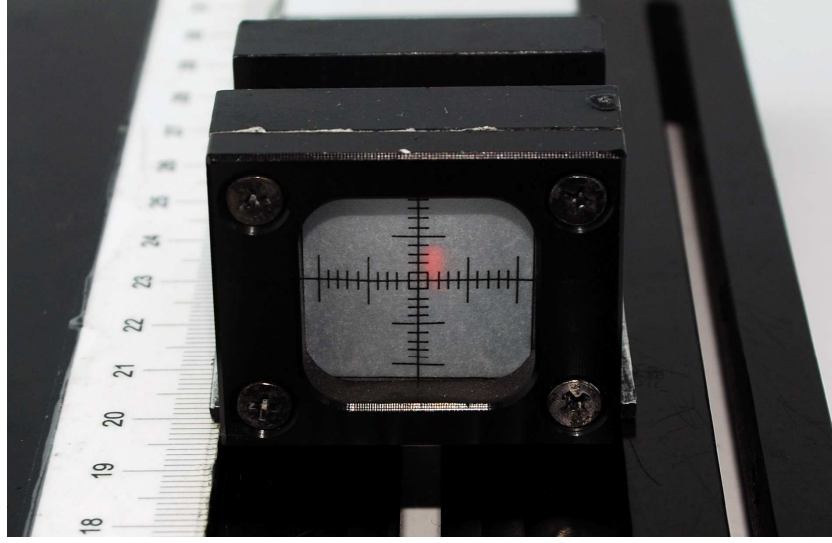
Çizelge 1’de leke boyutu ayarlanmamış 100-200mm arası ölçüm yapan sensörün PSD aygıtından ölçülmüş PSD pozisyon bilgileri yer almaktadır. Çizelge 2’de ise bu değerler kullanılarak ölçülen hata değerleri yer almaktadır.



**Şekil 4.3 100mm'de ayarlanmamış ışık lekesi**

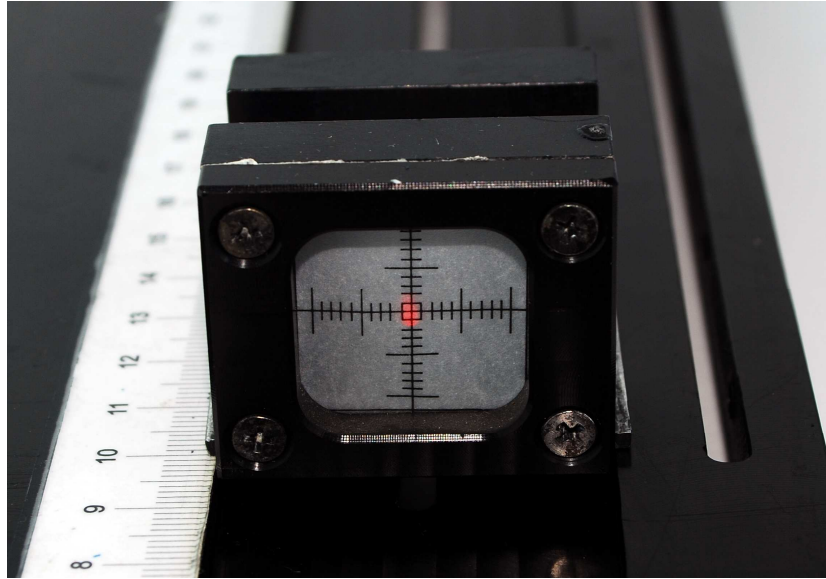
Çizelge 2’de görüldüğü üzere ara değerlerde pozisyon bilgisinin hassasiyetinde bir sorun oluşmazken sınırlara gelindiğinde lekenin bir kısmı PSD aygıtının dışına çıktığı gözlemlenmiştir. PSD aygıtının dışına çıkan leke, ışığın ağırlık merkezini doğrudan etkilemektedir ve pozisyon bilgisinin oluşmamasına sebep olmaktadır. Sağlıklı bir şekilde ölçüm yapılabilmesi için mesafe ölçümü yapılacak aralıkta ışık lekesinin merkezleme ayarının yapılması gerekmektedir. Merkezlemesi yapılan ışık lekesinin görüntüsü ölçüm aralığı boyunca mesafenin değişimiyle PSD aygıtı üzerinde oluşacaktır.

Leke boyutunu ayarlarken amaç her ne kadar lekeyi küçük tutmak olsa da ölçülecek mesafe aralığında leke boyutunun değişmemesi de önemlidir. 100-200mm arası ölçüm yapan sensörde 100mm’de ayarlanan leke 200mm’ye taşındığı zaman hedef üzerinde farklı bir leke oluşmaktadır (Bkz. şekil 4.3 ve 4.4).

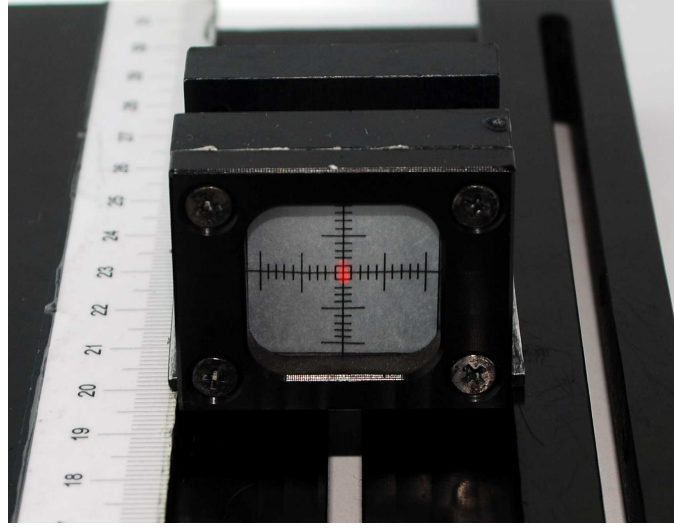


**Şekil 4.4 200mm'de ayarlanmamış ışık lekesi**

Dolayısıyla 100mm'de oluşan leke 200mm'de tekrar ayarlanmalıdır. 200mm'de ayarlanan ışık lekesi diğer bölgelerle karşılaştırılarak gerekirse tekrar ayarlanmalıdır. Şekil 4.5 ve 4.6'da boyutları ayarlanmış ışık lekesinin 100 ve 200mm'lerde görüntüleri vardır.



**Şekil 4.5 100mm'de ayarlanmış ışık lekesi**



**Şekil 4.6 200mm'de ayarlanmış ışık lekesi**

Çizelge 3'te ışık lekesi ayarlanmış sistemin kalibrasyon değerleri yer almaktadır. Çizelge 4'te ise bu değerlerin kullanıldığı hata değerleri yer almaktadır.

Sistemde kullanılan lazer diyot konumunun ışık lekesinin boyutlarına olan etkisinden üçüncü bölümde bahsedilmişti. Şekil 4.7 a ve b'de lazer diyotu dik konulmamış lazer diyotun ürettiği ışık lekesinin sırasıyla 100mm ve 200mm'de fotoğrafı verilmiştir. Oluşan leke yatay durumda PSD aygıtı üzerinde daha fazla fotoalıcıyı tetiklemektedir. Sınır bölgelerinde hata oranlarının çok artmasına sebep olmaktadır. Konumu kristaline göre dik ayarlanmış bir lazer diyotun ürettiği leke PSD aygıtı üzerinde enlemesine dar ve çizgi şeklinde bir leke oluşturacağı için sınır bölgelerde doğru sonuç verecektir.



**(a)**

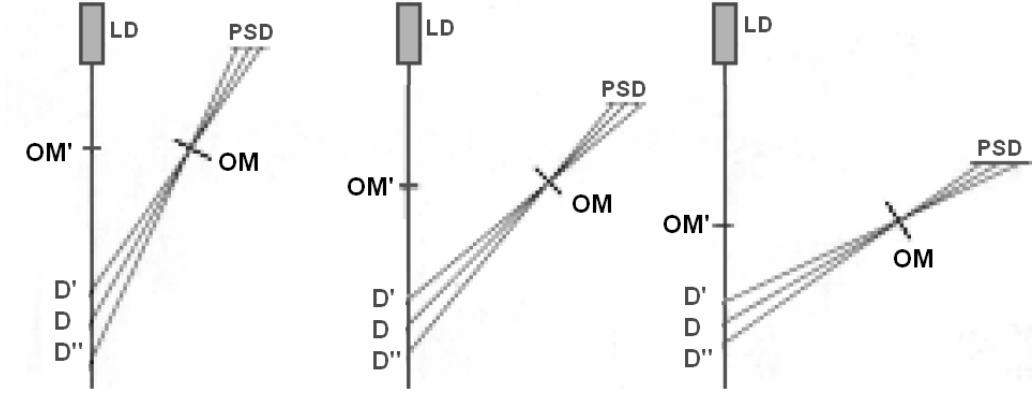
**(b)**

**Şekil 4.7 Lazer diyot kristali yatay konumdayken oluşan ışık lekesi a) 100mm b) 200mm**

#### 4.1.2. Işık kaynağı ile PSD aygıtı arasındaki mesafe

Bölümün başında sabit taban yöntemi ile PSD aygıtı ve merceği optik eksenle 20-30° arasında bir açıya getirerek taban mesafesinin bu açılara göre ayarlanacağı belirtilmişti. Şekil 4.8’de odaklayıcı mercek 35°-45°-60° açı değerlerinde konumlandırılarak üç adet üçgenleme modeli incelenmiştir. Odaklayıcı mercek (OM) diyaframı ve PSD aygıtı boyutu üç model içinde aynıdır.

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere en büyük ölçüm aralığı,  $D'DD''$ , (a) modelinde elde edilmiştir. Dolayısıyla PSD aygıtı ve ışık kaynağı arasındaki mesafe, açıya da bağlı olarak, sensörün ölçüm aralığını doğrudan etki eder.



Şekil 4.8 Farklı açılarda üçgenleme yönteminin incelenmesi (a) 35° (b) 45° (c) 60°

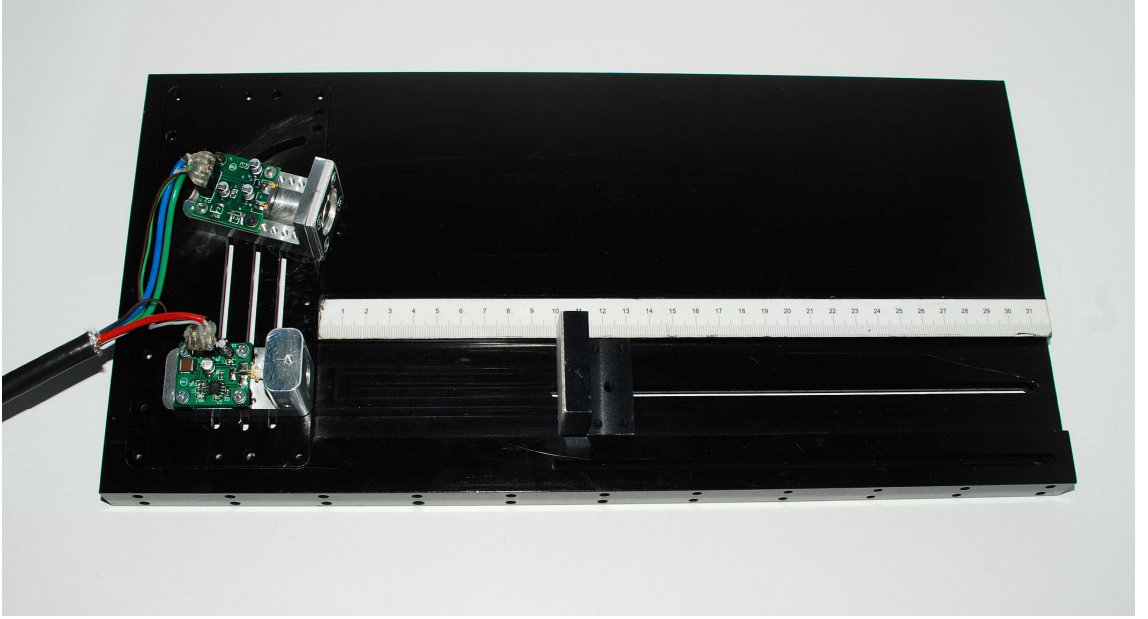
Karşılaştırılan üç modelde de PSD aygıtının, odaklayıcı merceğin lazer diyottan çıkan lazer ışınının kesiştiği noktanın gerisini (LD-OM' aralığı) ölçemediği gözlemlenmektedir. Kullanılan odaklayıcı mercek sistemin sıfır noktasına göre her zaman açılı durduğu için algılayıcı hiçbir zaman sıfır noktasını algılayamaz. Dolayısıyla üçgenleme yöntemi ölçüm aralığı hiçbir zaman lazer diyota göre sıfır noktasından başlayamamaktadır. Yöntemin ölçemediği bu aralığa “Ölü Bölge” denir. Ölü bölge yöntemin en büyük dezavantajlarından biridir. Sistemin ölü bölgesi 100mm’dir.

#### 4.1.3. PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenine yaptığı açı

Tasarımın bu kısmında PSD aygıtının değişik konumlardaki performans analizi yapılmıştır. Sistem PSD aygıtı üç farklı konumdayken incelenmiştir:

- 1) PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken;
- 2) PSD aygıtı lazer diyota göre düz konumdayken;
- 3) PSD aygıtı odaklayıcı merceğin optik eksenini ile geometrik hesaptan çıkarılan açı değerine göre konumlandırılmışken.

#### 4.1.3.1. PSD aygıtının odaklayıcı mercek ile aynı açığa konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu

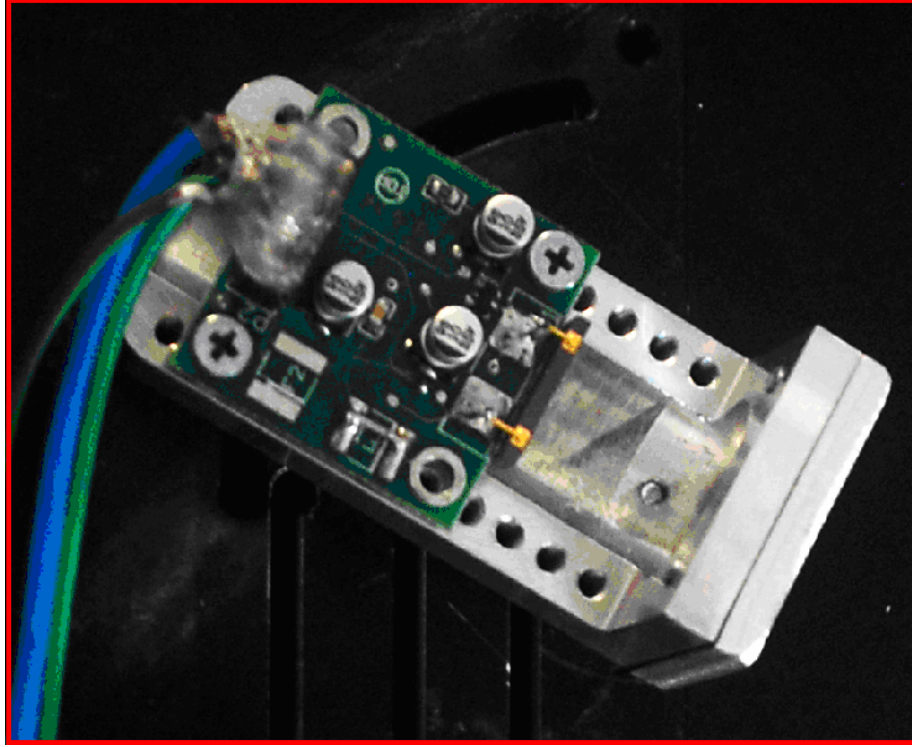


Şekil 4.9 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken üçgenleme kurulumu (Işık lekeli PSD aygıtı başına hizalanmadan)

Şekil 4.9'da ışık lekeli PSD aygıtının başına hizalanmadan hazırlanan üçgenleme kurulumu verilmiştir. PSD aygıtının üstü fondan gelen ışıktan etkilenmemesi için karton bir yüzeyle kapatılmıştır. PSD aygıtının üstü açık fotoğrafı şekil 4.10'da verilmiştir.

Kurulumun geometrik ölçüleri çizelge 5'te verilmiştir. PSD aygıtından alınan kalibrasyon değerleri ve hata analizleri sırasıyla çizelge 6 ve 7'de verilmiştir.

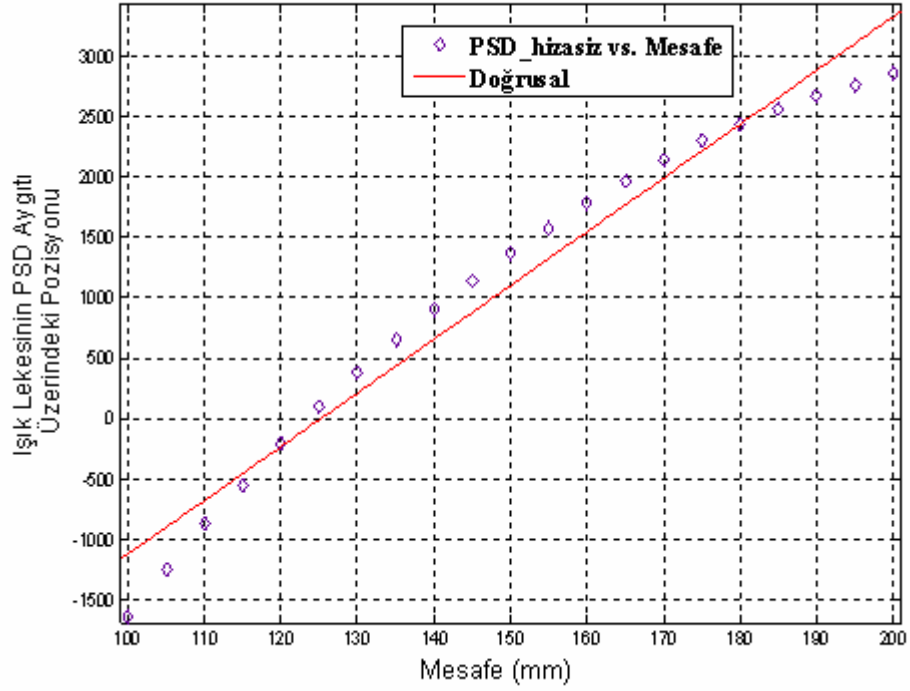
Şekil 4.11'de, elde edilen kalibrasyon değerlerinin doğrusallığının karşılaştırılması verilmiştir. Yapılan analizler sonucu doğrusal denklemin ortalama karekök hatası (RMSE) 262,2 olarak elde edilmiştir. Doğrusal uygunluk grafiğinden elde edilen hata değerlerinin mesafeye göre değişimi şekil 4.12'de verilmiştir.



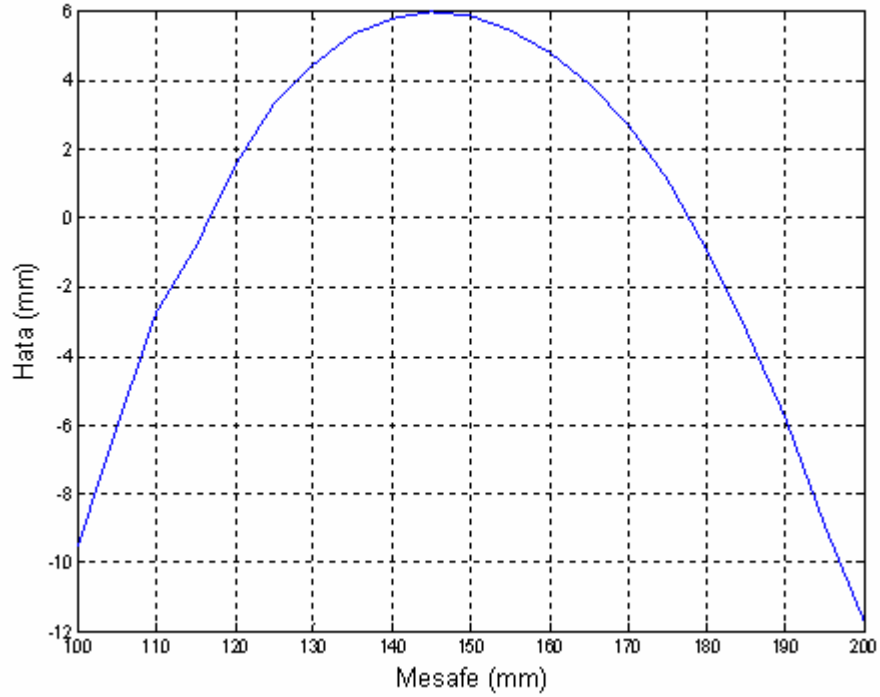
Şekil 4.10 PSD aygıtı ve odaklayıcı mercek kurulumu (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)

150mm'den sonra PSD aygıtı üzerinde oluşan ışık lekesi pozisyon aralıkları daha dardır. Oluşan yığılmalar adımlar arası doğrusallaştırmayı etkilemektedir ve PSD aygıtı üzerinden alınan pozisyon bilgilerinde sapmalar oluşmaktadır. Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'te 123mm, 172mm ve 191mm'de alınan mesafe bilgilerinin dağılımı verilmiştir. Yığılmaların oluşmaya başladığı bölgelerde sapmaların da arttığı gözlemlenmektedir. 123mm'de alınan değerlerde sapma miktarları 0,01mm civarlarındayken, 172mm'de 0,08mm, 191mm'de ise 0,15mm'lere kadar çıkmaktadır.

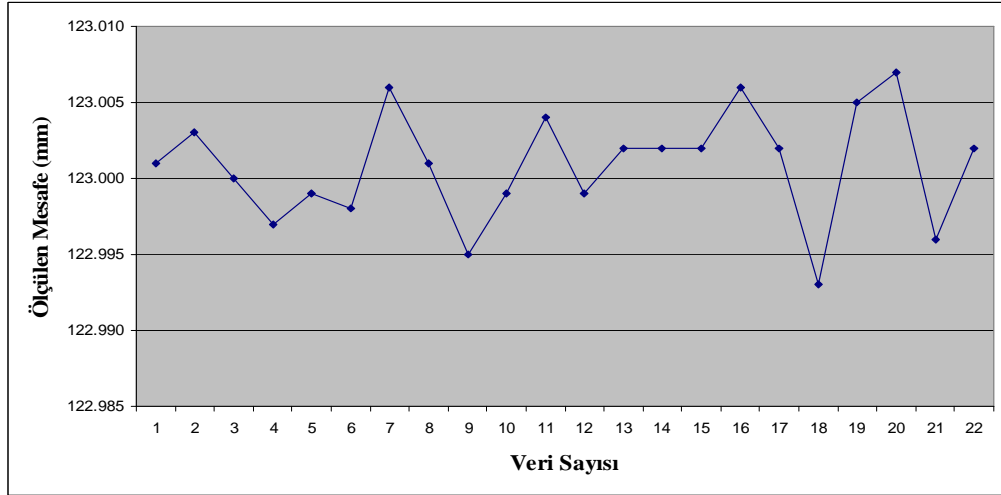




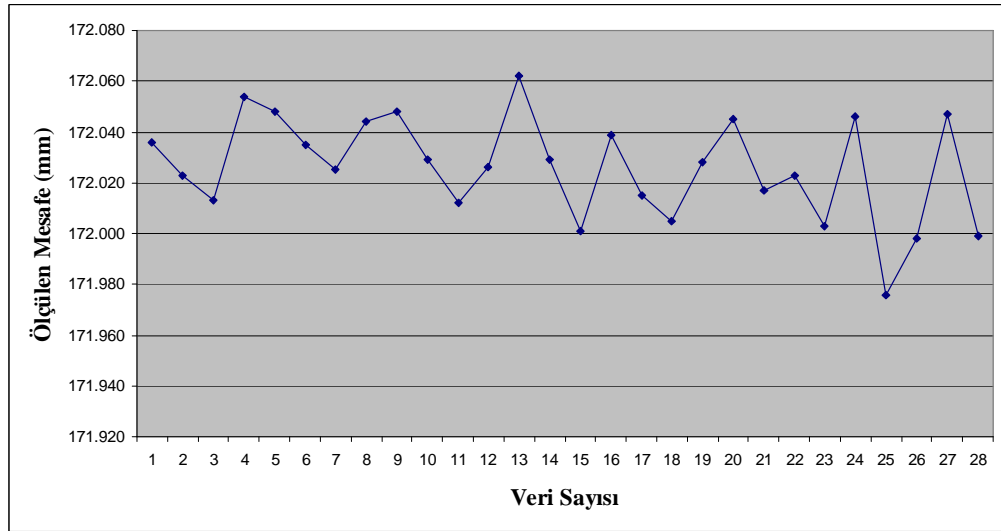
Şekil 4.11 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)



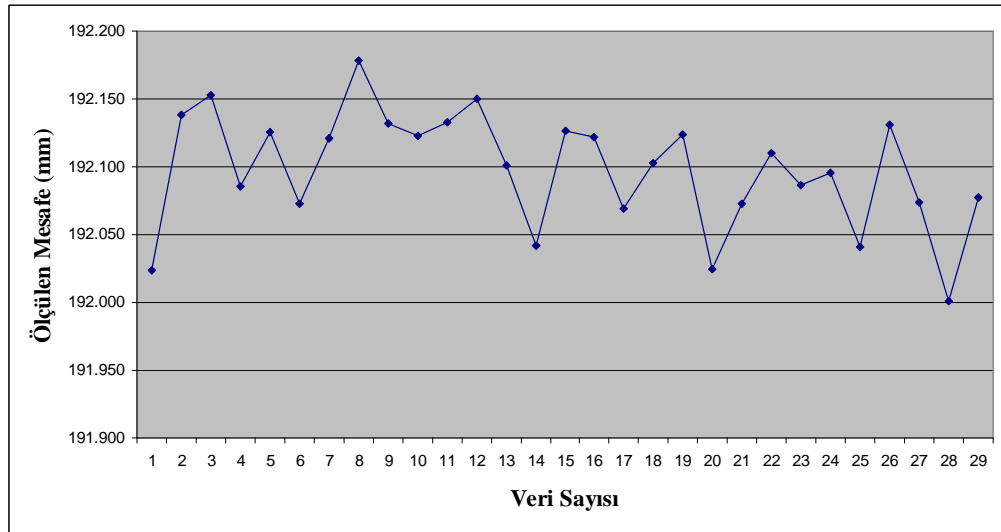
Şekil 4.12 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)



Şekil 4.13 123mm'de ölçülen mesafe verileri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)

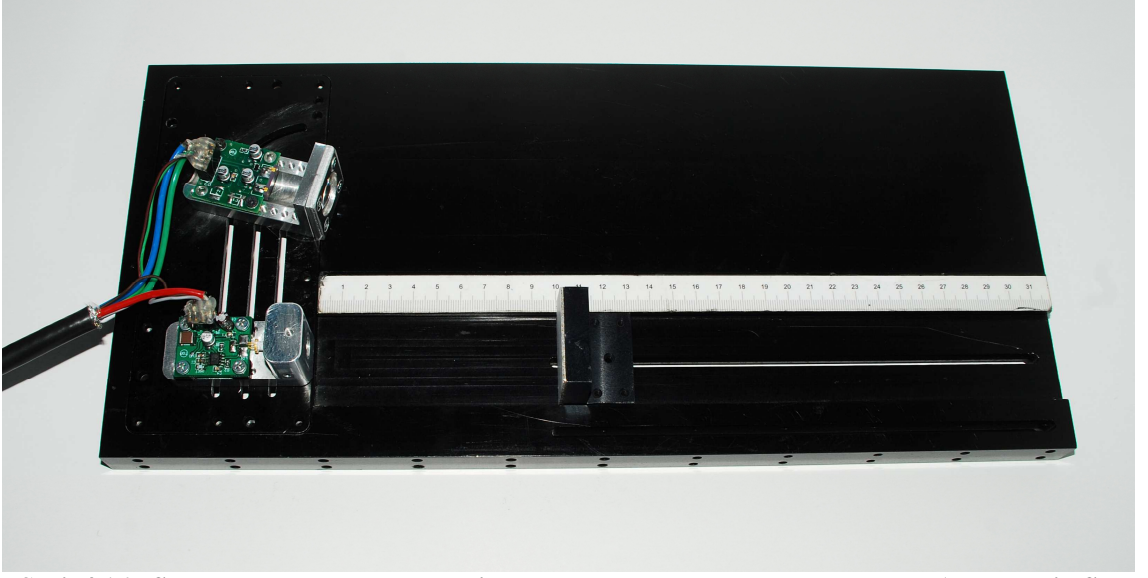


Şekil 4.14 172mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)



Şekil 4.15 192mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)

Oluşan yığılmalar yöntemin çalışma hassasiyetini etkilediği gibi sensörü kalibre etmeyi de zorlaştırmaktadır. Yığılmayı engellemek için kurulum 100mm'de ışık lekesi PSD aygıtının başına gelecek şekilde tekrar ayarlanmıştır. Sistemin  $\alpha$  açısı 30°'den 22°'ye düşürülmüştür.

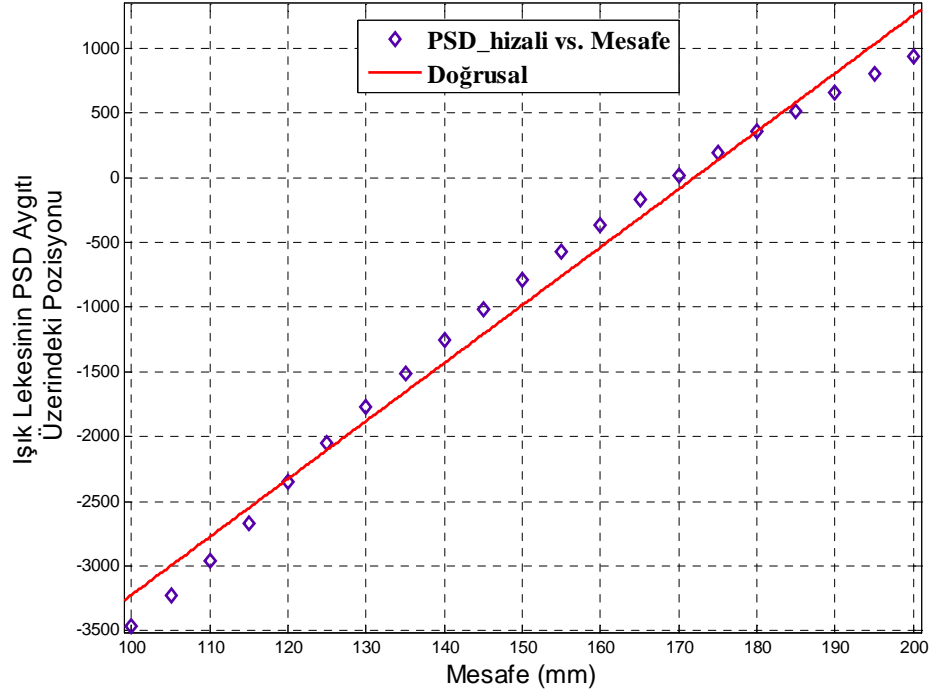


**Şekil 4.16 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken üçgenleme kurulumu (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı)**

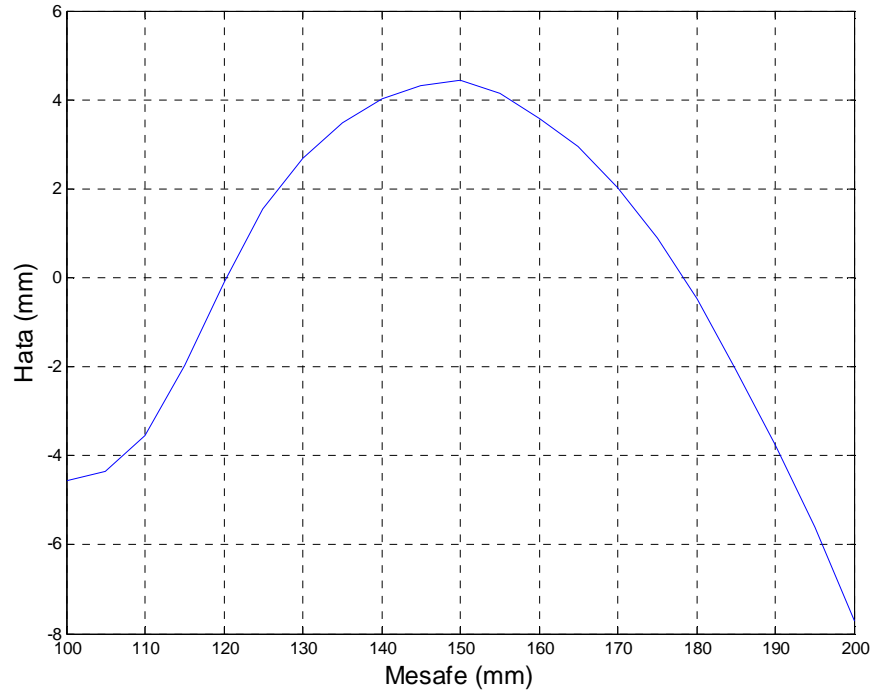
Şekil 4.16'da ışık lekesi PSD aygıtının başından başlayacak şekilde hazırlanan üçgenleme kurulumu verilmiştir. Kurulumun geometrik ölçüleri çizelge 8'de verilmiştir. PSD aygıtından alınan kalibrasyon değerleri ve hata analizleri sırasıyla çizelge 9 ve 10'da verilmiştir.

Şekil 4.17'de elde edilen kalibrasyon değerlerinin mesafeye göre değişim grafiği doğrusal uygunluğuyla beraber verilmiştir. Doğrusal uygunluk denkleminin RMS hatası 174,8 olarak elde edilmiştir. Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişim grafiği şekil 4.18'de verilmiştir.

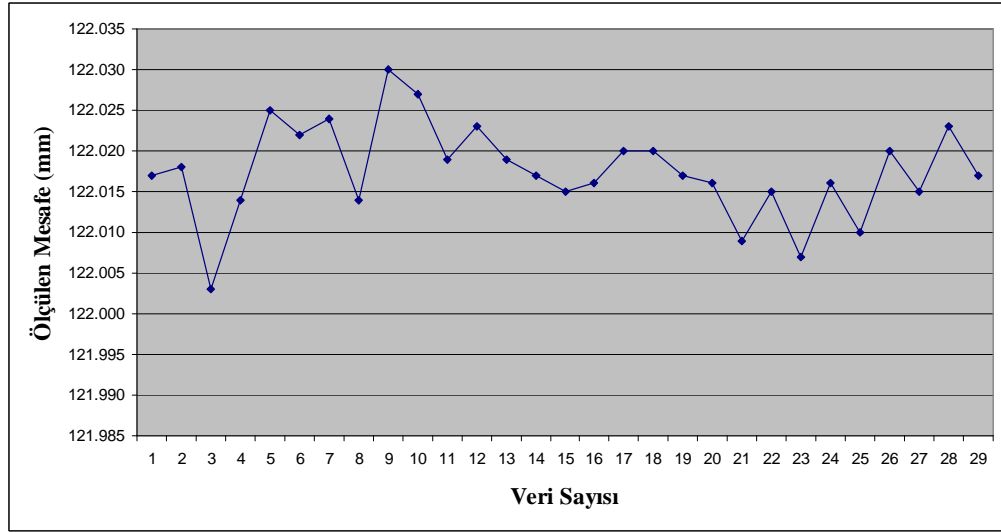
PSD aygıtının başına alınan ışık lekesi PSD aygıtının daha verimli kullanılmasını ve oluşan sapmaların azalmasını sağlamaktadır. Fakat yine de eğimi azalan bir grafik oluşmaktadır. Bu da az da olsa yığılmanın oluştuğunu göstermektedir. Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'da sırasıyla 122, 172 ve 198mm'lerde alınmış verilerin sapma miktarları verilmiştir. Sapma değerleri 122mm ve 172mm'lerde 0.03mm, 198mm'de ise 0.04mm'lere kadar düştüğü gözlemlenmiştir.



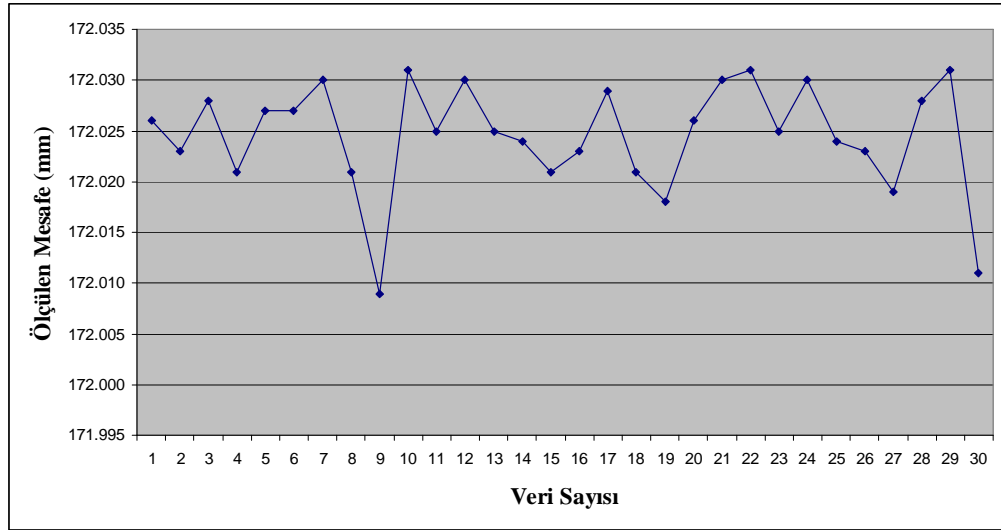
Şekil 4.17 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (Işık lekesi konumu PSD başına hizalı)



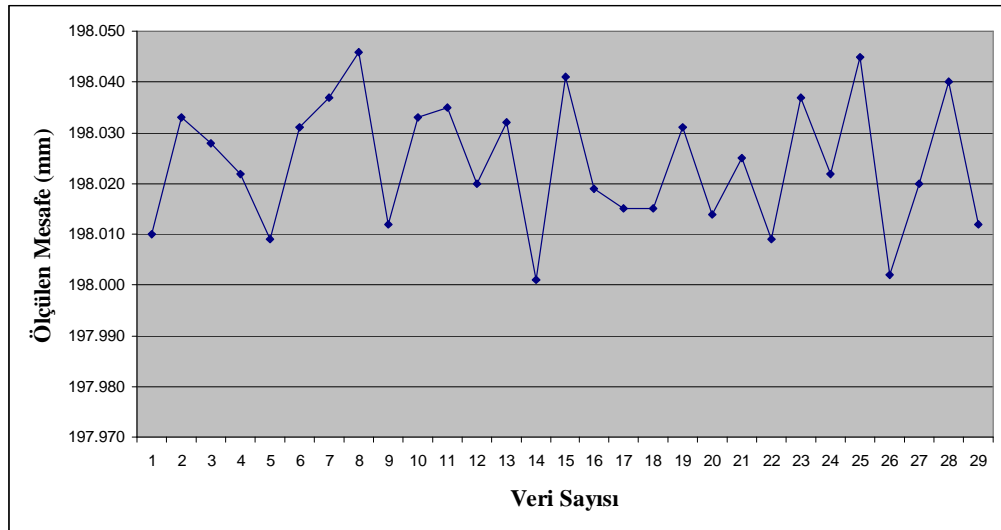
Şekil 4.18 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı)



Şekil 4.19 122mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hızı)



Şekil 4.20 172mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hızı)



Şekil 4.21 198mm'de ölçülen mesafe değerleri (Işık lekesi PSD başına hızı)

PSD aygıtının bu şekilde konumlandırılmasının en büyük avantajı hedeften PSD aygıtı üzerine gelen ışınların PSD aygıtının ışığa duyarlı yüzeyine dike yakın gelmesidir. Böylece daha fazla parlama enerjisi PSD aygıtı tarafından algılanabilmektedir (Song ve ark. 2006). Ayrıca sistemin mekanik kurulumu diğer kurulum şekillerine göre daha kolaydır.

#### 4.1.3.2. PSD aygıtının düz konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu

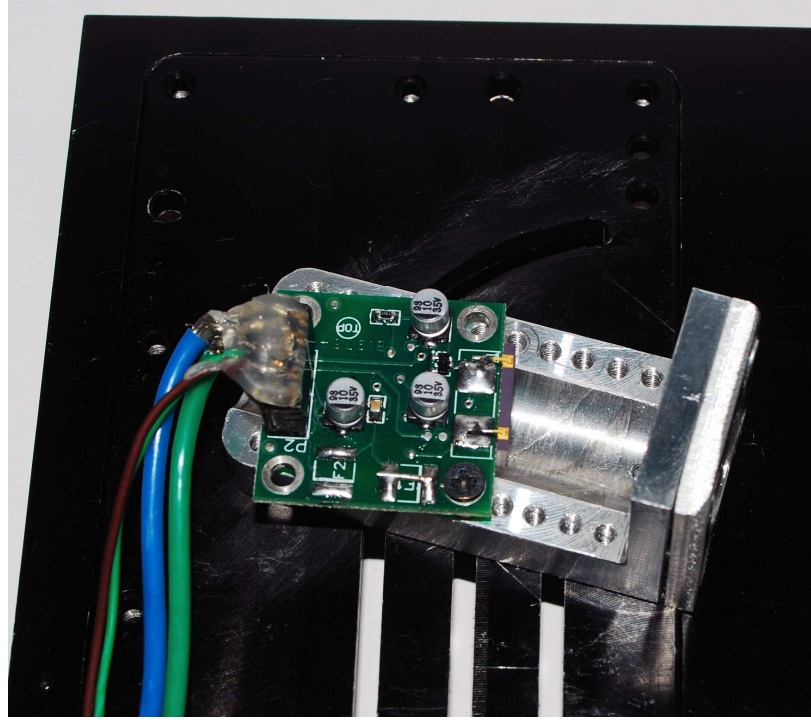


Şekil 4.22 PSD aygıtı düz konumdayken üçgenleme kurulumu

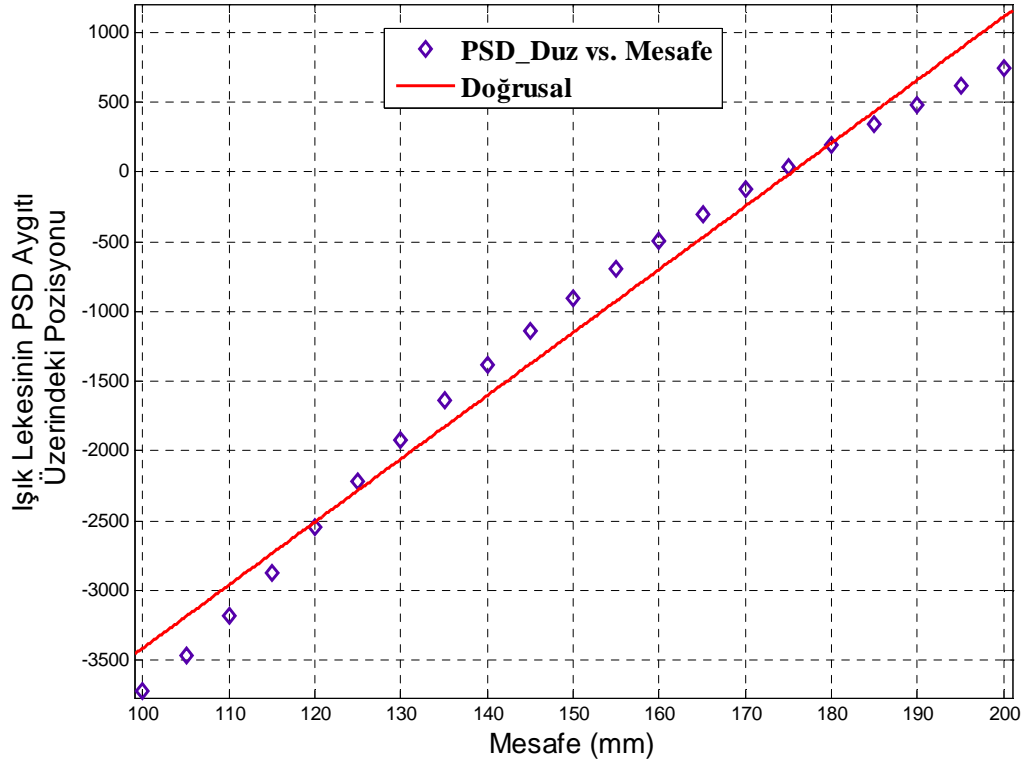
Şekil 4.22 ve 4.23'te PSD aygıtının düz konulduğu üçgenleme kurulumu verilmiştir. Kurulumun geometrik ölçüleri çizelge 11'de verilmiştir. PSD aygıtından alınan kalibrasyon değerleri ve hata analizleri sırasıyla çizelge 12 ve 13'te verilmiştir.

Şekil 4.24'te PSD aygıtı düz konumdayken alınmış ışık lekesi pozisyon bilgilerinin mesafeye göre değişim grafiği doğrusal uygunluk grafiğiyle beraber verilmiştir. Elde edilen doğrusal uygunluk denkleminin RMS hatası 212,4 olarak hesaplanmıştır. Doğrusal uygunluk modelinden elde edilen hata değerlerinin mesafeye göre değişim grafiği şekil 4.25'te verilmiştir. PSD aygıtının düz konduğu durumda da ışık lekesinin PSD aygıtının başına hizalanarak  $\alpha$  açısının ayarlanması önemlidir.

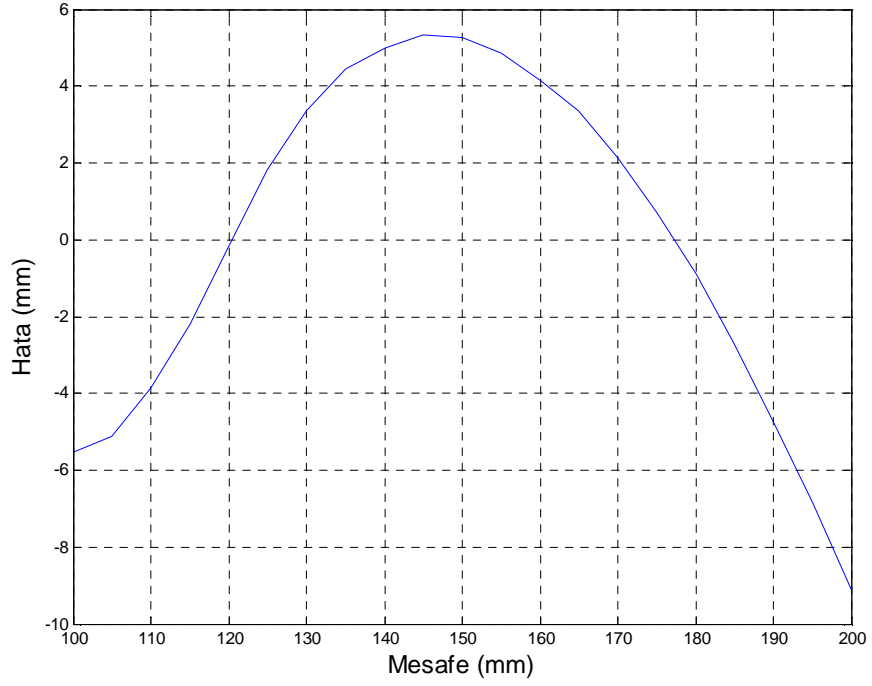
Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28'te 121,177 ve 194mm'lerde ölçülen mesafe verilerinin değişimi verilmiştir. Sapmalar 0,03 ve 0,04mm arası değişmektedir. Hedef üzerinden gelen ışık PSD aygıtı üzerine belirli bir açıyla geldiği için PSD aygıtı tarafından algılanan ışığın parlaklık enerjisi daha kuvvetsiz olmaktadır. Bu da sapmaların artmasına ve hata değerlerinin artmasına neden olmaktadır.



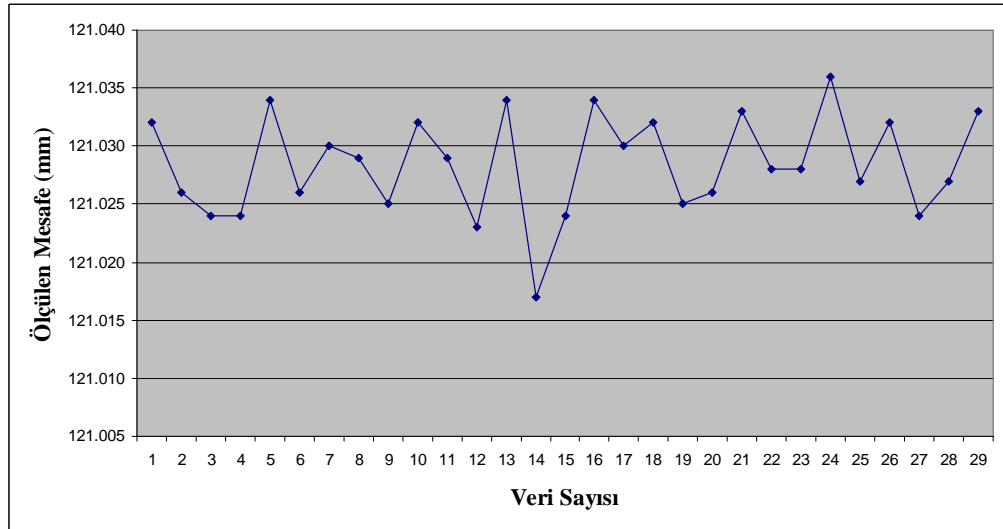
Şekil 4.23 PSD aygıtı düz konumdayken üstü açık görünümü



Şekil 4.24 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonun mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı düz konumdayken)

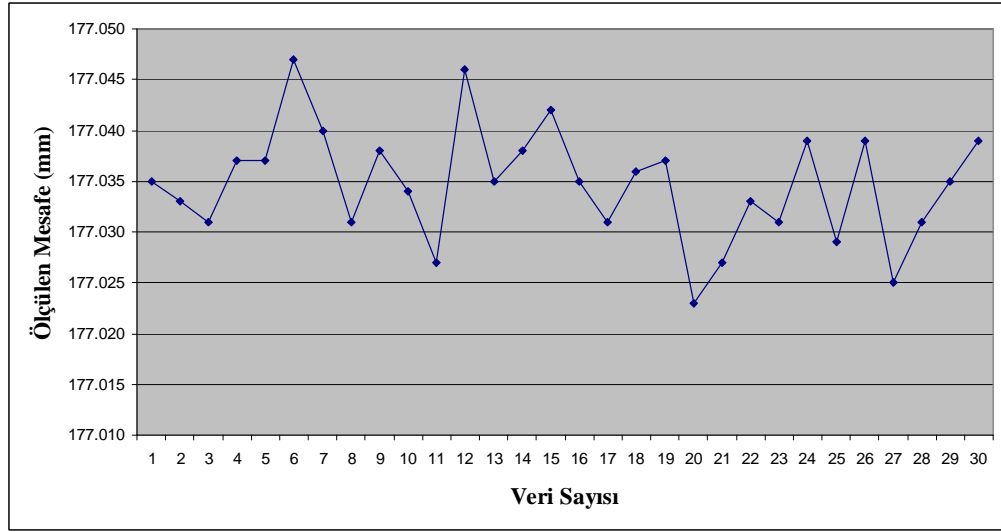


Şekil 4.25 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı düz konumdayken)

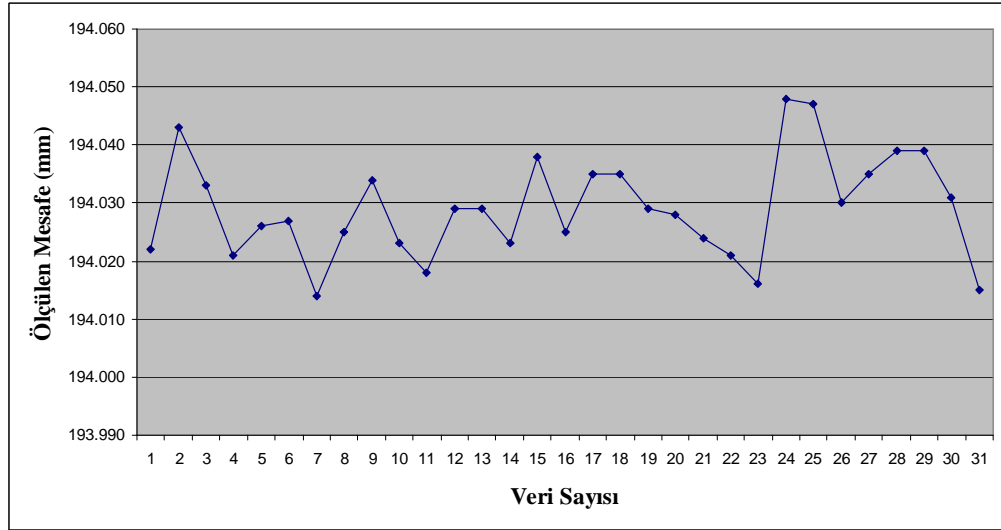


Şekil 4.26 121mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken)





Şekil 4.27 177mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken)

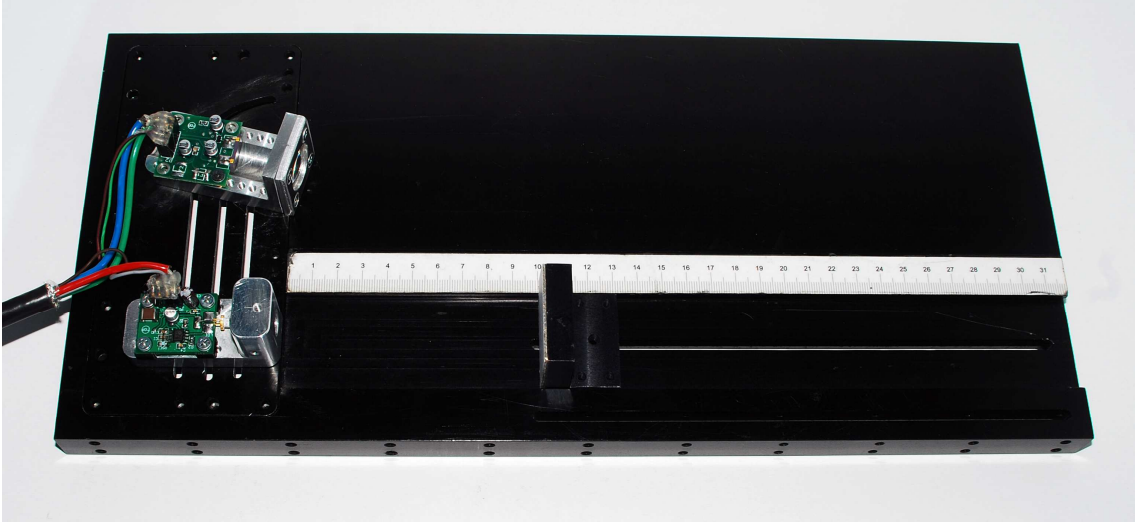


Şekil 4.28 194mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken)

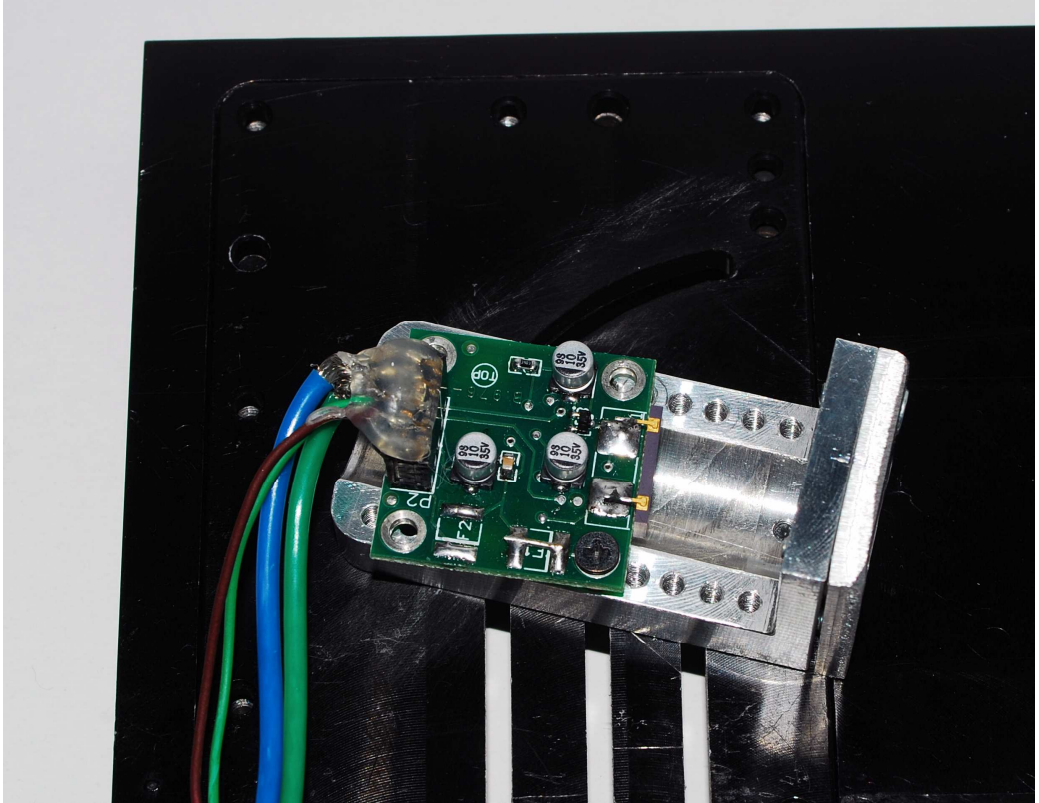
#### 4.1.3.3. PSD aygıtı odaklayıcı merceğin optik eksenini ile geometrik hesaptan çıkarılan açı değerine göre konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu

3. bölümde üçgenleme yönteminin bilinen değişkenlerinden yola çıkarak kullanılacak PSD aygıtının minimum uzunluğunun ve aygıtın odaklayıcı merceği ile yaptığı açının genel ifadeleri elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucu gerekli minimum PSD aygıtı uzunluğu 10,36mm ve  $\gamma$  açısı  $73^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu oluşturulan kurulumun fotoğrafları şekil 4.29 ve 4.30'da verilmiştir. Kurulumun geometrik parametreleri çizelge 14'te verilmiştir.

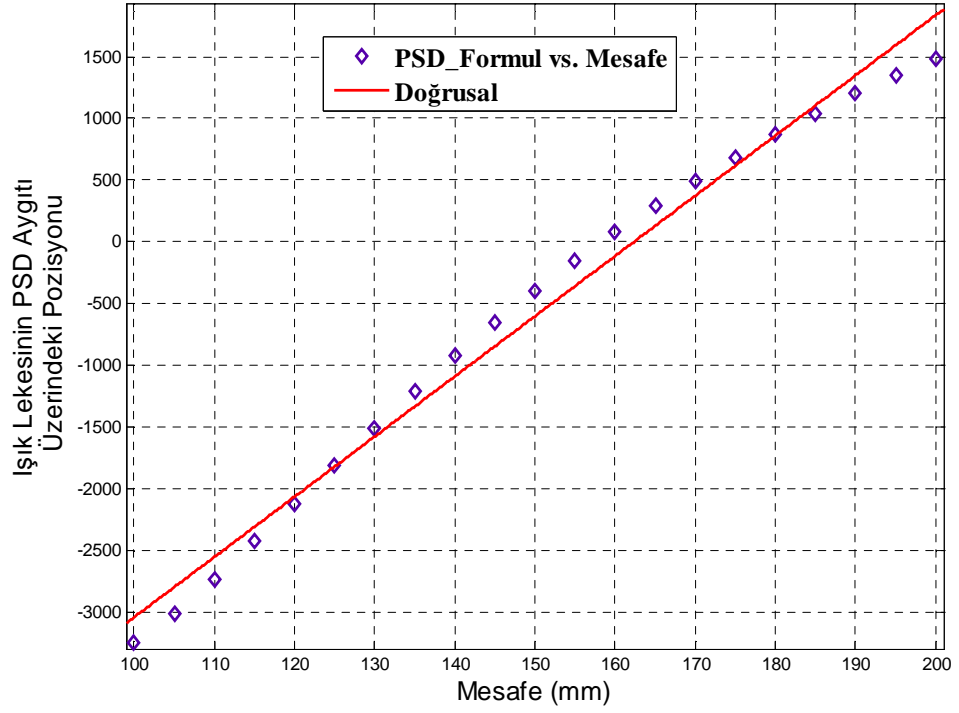
Oluşturulan kurulumdaki PSD aygıtı üzerinde oluşan ışığın pozisyon bilgileri Çizelge 15'te verilmiştir. Bu kalibrasyon değerlerinin kullanıldığı hata değerleri de çizelge 16'da verilmiştir.



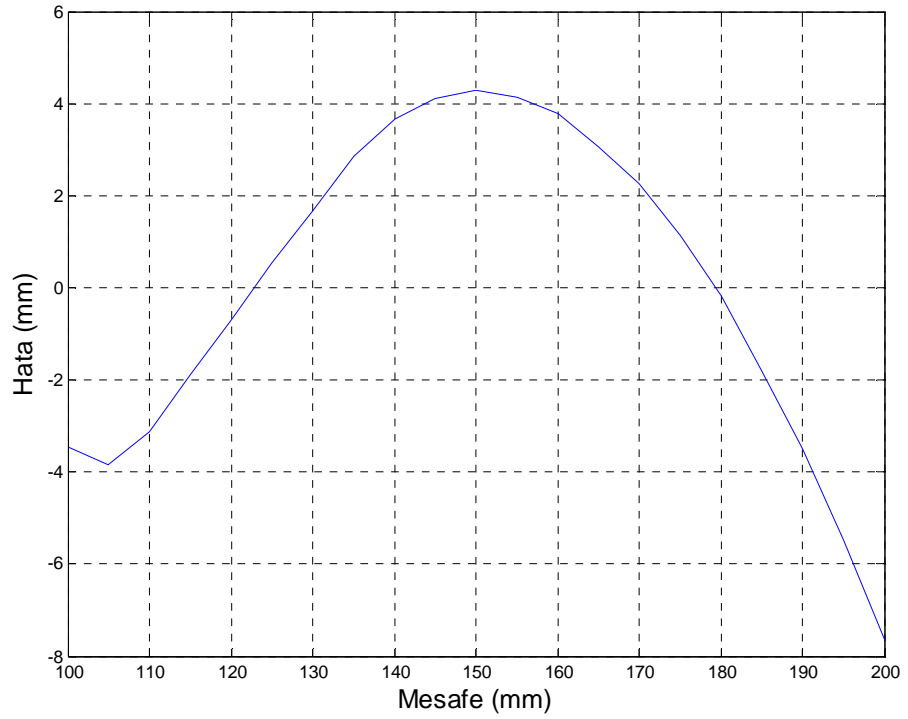
Şekil 4.29 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı üçgenleme kurulumu



Şekil 4.30 PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken üstü açık görünümü



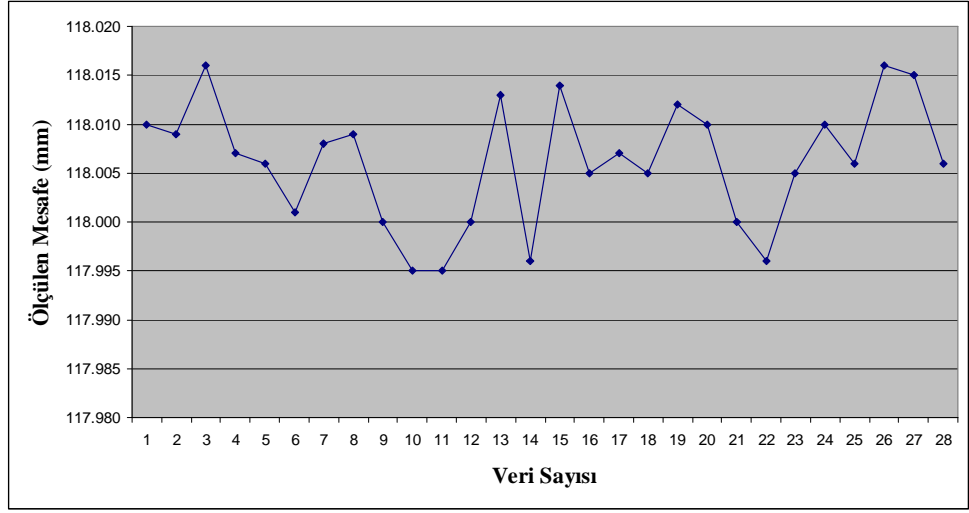
Şekil 4.31 Işık lekesinin PSD aygıtı üzerindeki pozisyonunun mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)



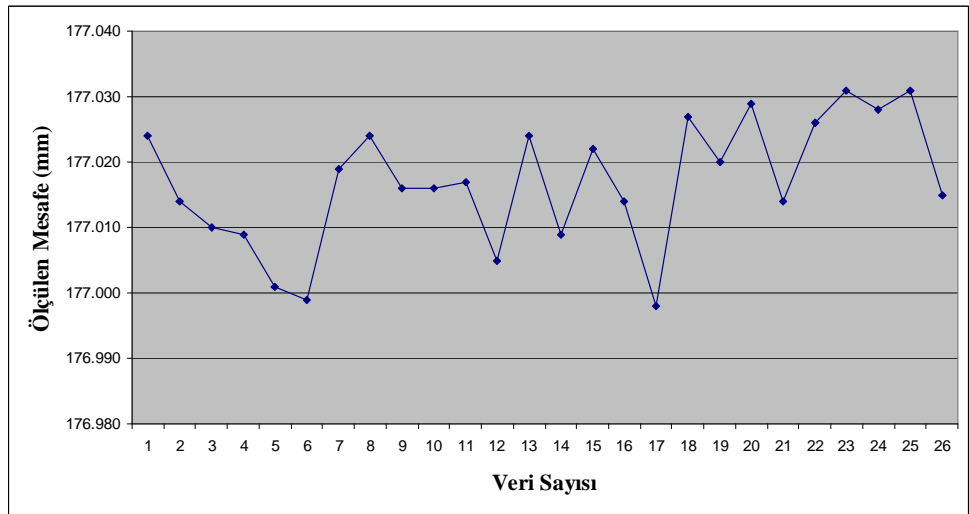
Şekil 4.32 Doğrusal uygunluk grafiğinin hata değerlerinin mesafeye göre değişimi (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)

Şekil 4.31’de ışık lekisi pozisyon bilgilerinin mesafeye göre değişim grafiği doğrusal uygunluk modeliyle beraber verilmiştir. Kalibrasyon eğrisinden elde edilen doğrusal uygunluk denkleminin RMS hata değeri 178,5 olarak elde edilmiştir. Doğrusal uygunluk grafiğinden elde edilen hataların mesafeyle değişim grafiği şekil 4.32’de verilmiştir. 180mm’den sonra yine yığılmaların olduğu gözlemlenmiştir. Fakat oluşan sapmaların miktarları daha azdır.

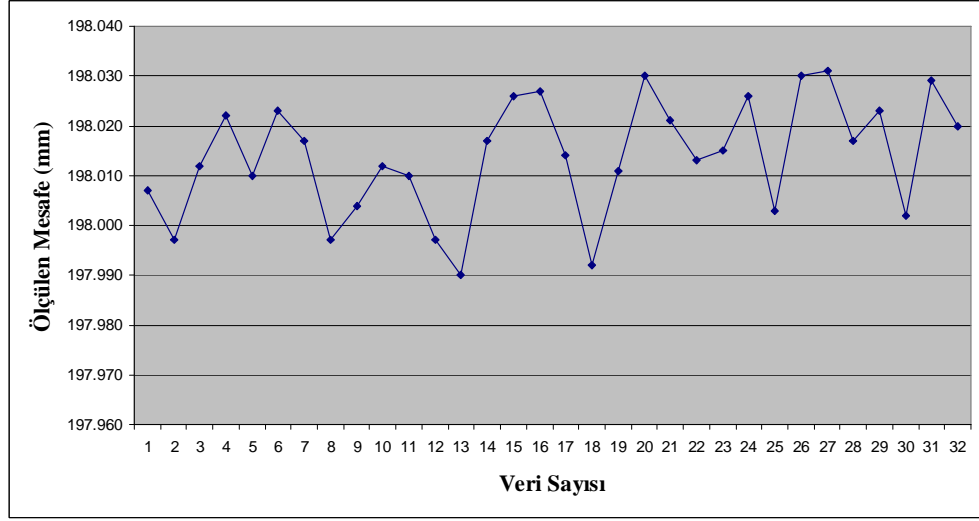
PSD aygıtı üzerinde oluşan lekenin dağılımı diğer kurulumlara göre daha homojendir. Bu da ışık lekesinin parlaklığındaki değişmeler sonucu oluşan sapmaların azalmasına neden olmaktadır. Şekil 4.33, 4.34 ve 4.35’te 118, 177 ve 198mm’lerde alınmış mesafe verileri verilmiştir. Sapmaların 0.02mm’lere kadar azaldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.33 118mm’de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)



Şekil 4.34 177mm’de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)



Şekil 4.35 198mm'de ölçülen mesafe değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)

## 4.2. Elektronik Tasarımın Doğrusallaştırmaya etkisi

Üçgenleme yönteminin optik-geometrik tasarımı sistemin kararlı çalışmasında en büyük etkene sahiptir. Elektronik tasarımda ise PSD aygıtından belirlenen adım mesafesinde alınan veriler sayesinde ölçülen mesafeye göre algoritmalar oluşturulmalıdır.

Optik-geometrik kanalda yapılan doğrusallaştırmaların verimli olabilmeleri için “Parçalı Doğrusallaştırma” ve “Kalibrasyon Eğrisi” yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde sistemin ölçüm aralığı mikro-denetleyici içerisinde tanımlanabilmekte ve alınan veriler üzerinde işlemlerin yapılabilmesi sağlanabilmektedir.

### 4.2.1. Parçalı doğrusallaştırma yöntemi değişkenleri

Yöntemin uygulanabilmesi için sensörün ölçüm yapacağı aralığın optik-geometrik tasarımda belirlenmiş olması gerekmektedir. Ölçülecek aralığın belirlenmesinden sonra veri alınacak adım mesafesi ve mikro-denetleyici algoritmanın oluşturulması gerekmektedir.

#### 4.2.1.1. Mikro-denetleyici algoritması

Mikro-denetleyici algoritmasının doğru çalışması için sensörün ölçüm aralığının belirli noktalarında okutulmuş PSD pozisyon bilgilerinin tablo halinde mikro-denetleyicinin içinde oluşturulması gerekmektedir (Liu ve ark. 2004).

Bu tabloya göre her adım mesafesinde PSD aygıtından pozisyon bilgisi 10 saniye boyunca alınıp ortalaması alınmıştır. Pozisyonu okutulan iki nokta arası bölüm 3'te anlatıldığı gibi doğrusal kabul edilmiştir.

Oluşturulan tablo mikro-denetleyici yazılımına eklenir. Tablonun oluşturulmasındaki temel amaç okunan ışık pozisyonu bilgisinin hangi mesafe aralığında olmasını tespit etmektir. Mesafe aralığı tespit edildikten sonra bu mesafelerde okutulan pozisyon değerlerine göre basit bir doğru orantı kurulur ve PSD aygıtından alınan voltaj bilgisi mesafeye dönüştürülmüş olur.

Algoritmanın oluşturulması için aşağıda verilen değişkenlerin oluşturulması gerekmektedir:

$$PSD\_tablo \left[ \frac{\max - \min}{step} + 1 \right] = \{PSD[\min], PSD[\min + step], \dots, PSD[\max]\}$$

$$Mesafe\_tablo \left[ \frac{\max - \min}{step} + 1 \right] = \{\min, \min + step, \dots, \max\}$$

min: Ölçülecek Minimum Mesafe

max: Ölçülecek Maksimum Mesafe

step: Ölçme Adım Mesafesi

PSD[...]: PSD aygıtı üzerinde lekenin pozisyon bilgisi

Değişkenlerin uzunluğunu ölçülecek mesafe aralığı ve ölçme adım mesafesi belirlemektedir. 100-200mm arası ölçüm yapan ve 10mm'de bir ölçümü alınan sistemin değişkenleri aşağıdaki gibi olur:

$$\min = 100$$

$$\max = 200$$

$$step = 10$$

$$Mesafe\_tablo[11] = \{100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200\}$$

$$PSD\_tablo[11] = \left\{ \begin{array}{l} -4070.53, -3513.81, -2959.14, -2487.23, -2067.63, \\ -1685.21, -1355.56, -1055.07, -784.506, -538.316, -319.897 \end{array} \right\}$$

Değişkenler tanımlandıktan sonra doğru orantının yapılabilmesi için ilk önce okunan ışık lekesi pozisyonun hangi mesafe aralığında olduğu tespit edilmelidir. Bunun için aşağıdaki kod parçasığı kullanılır:

```

While{PSD_read>=PSD_tablo[index]&&PSD_read>PSD_tablo[index+1]}
{
    index++;
}

```

Yukarıdaki kod parçacığında *PSD\_read*, PSD aygıtı üzerinde oluşan lekenin denklem 3.27’de verilen bağıntı sonucu elde edilen anlık pozisyon bilgisidir. Aralık tespit edildikten sonra ölçülmek istenen mesafe aşağıdaki eşitlikten elde edilir:

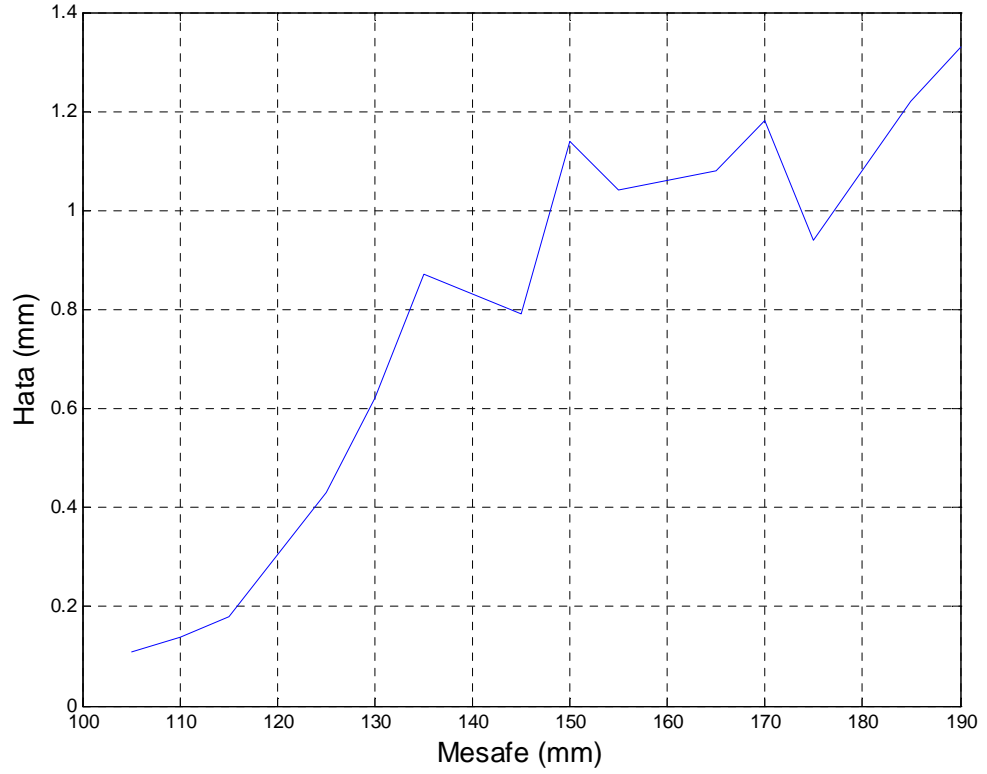
$$Dogrusal\_Mesafe = \left( \frac{(PSD\_read - PSD\_tablo[index]) \cdot (Mesafe\_tablo[index+1] - Mesafe\_tablo[index])}{PSD\_tablo[index+1] - PSD\_tablo[index]} \right)$$

$$Mesafe = Mesafe\_tablo[index] + Dogrusal\_Mesafe$$

#### 4.2.1.2. Ölçme adım mesafesi

Ölçme adım mesafesi ölçüm aralığının başından sonuna kadar PSD aygıtından alınan voltaj verilerinin miktarını belirlemektedir. Parçalı doğrusallaştırma yönteminin en önemli parametresidir.

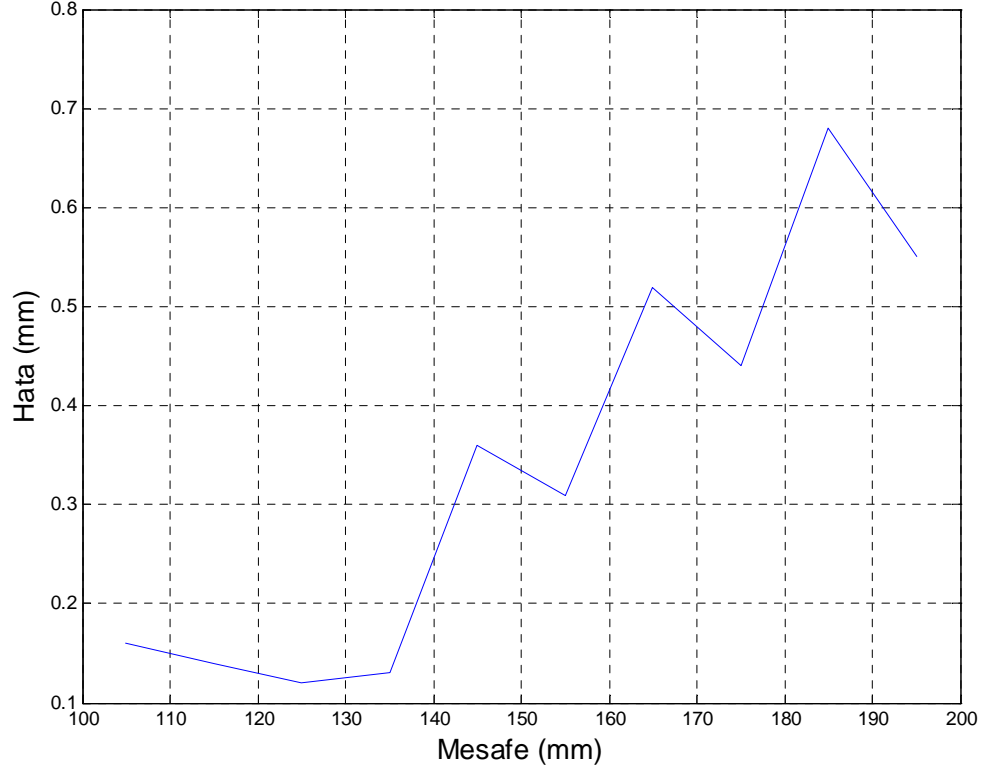
Çizelge 17’de adım mesafesi 20mm olarak alınmış PSD pozisyon bilgileri verilmiştir. Adım mesafesi büyük olduğu için doğrusal kabul edilen aralıklarda büyük olmuştur. Dolayısıyla çıkan hata değerleri de diğer kalibrasyon değerlerine göre daha fazladır. Çizelge 18’de bu değerlerin kullanılıp oluşturulduğu hata değerleri yer almaktadır. Şekil 4.36’da hata değerlerinin mesafe ile değişim grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.36 Adım mesafesi 20mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata grafiği**

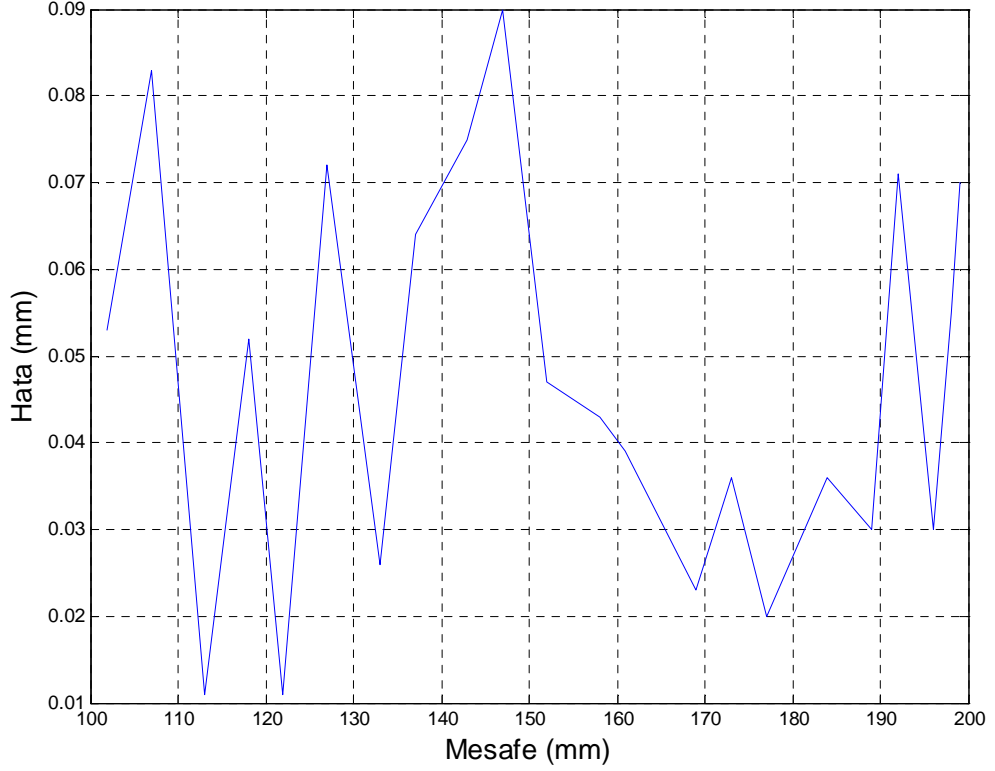
Çizelge 19’da adım mesafesi 10mm olarak alınmış PSD pozisyon bilgileri verilmiştir. Alınan veri sayısı daha fazla olduğu için doğrusal kabul edilen mesafeler daha kısa olmuştur ve doğru parçalarının sayısı 10’a çıkmıştır. Bu da hata değerlerinin 20mm aralıklarla alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerlerine göre daha az çıkmıştır (Bkz. Çizelge 20). Adım mesafesi 10mm olarak alınmış PSD değerlerinin hata değerlerinin mesafe ile değişimi şekil 4.37’de verilmiştir.





**Şekil 4.37 Adım mesafesi 10mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata grafiği**

Çizelge 21’de adım mesafesi 5mm olarak alınmış PSD pozisyon bilgileri verilmiştir. Şekil 4.38’de bu pozisyon bilgilerinin kullanıldığı kurulumdan alınan hata değerlerinin mesafe ile değişimi verilmiştir. Sistemde doğrusal kabul edilen parçaların arası 5mm’dir ve doğru parçalarının sayısı 20’ye yükselmiştir. Hata değerleri 20mm ve 10mm olarak alınan kalibrasyon değerlerine daha azdır (Bkz. Çizelge 22). Dolayısıyla ölçme adım mesafesi üçgenleme yöntemi ile çalışan bir sensörün çalışma hassasiyetini ve sistemin doğrusallığını doğrudan etkilemektedir.



Şekil 4.38 Adım mesafesi 5mm olarak alınan kalibrasyon değerlerinin hata grafiği

#### 4.2.2. Kalibrasyon eğrisi yöntemi

Yöntem parçalı doğrusallaştırma yöntemi gibi PSD aygıtından okunan pozisyon değerlerine göre oluşturulmaktadır. Matematiksel ifadeyi oluşturmak için MATLAB programının “Curve Fitting Toolbox” özelliği ile interpolasyon yapılmıştır. Yöntemin uygulanabilirliği analizleri incelenen üç model için de denenmiştir.

##### 4.2.2.1. PSD aygıtının odaklayıcı mercekle aynı açıda konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunun kalibrasyon eğrisi

PSD aygıtı mercek ile aynı hizadayken oluşturulan üçgenleme kurulumunun PSD pozisyon değerleri çizelge 23’te hata değerleri ile beraber verilmiştir. Bu değerlerin 1. ve 3. dereceden polinom denklemleri çıkarılmış matematiksel ifadesi, denklem 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Denklem uygunluk grafiği şekil 4.39’da verilmiştir.

$$Mesafe = p1 \cdot PSD + p2 \quad (4.1)$$

$$p1 = 0.02201 \quad (0.02071, 0.0233)$$

$$p2 = 171.7 \quad (169.5, 173.9)$$

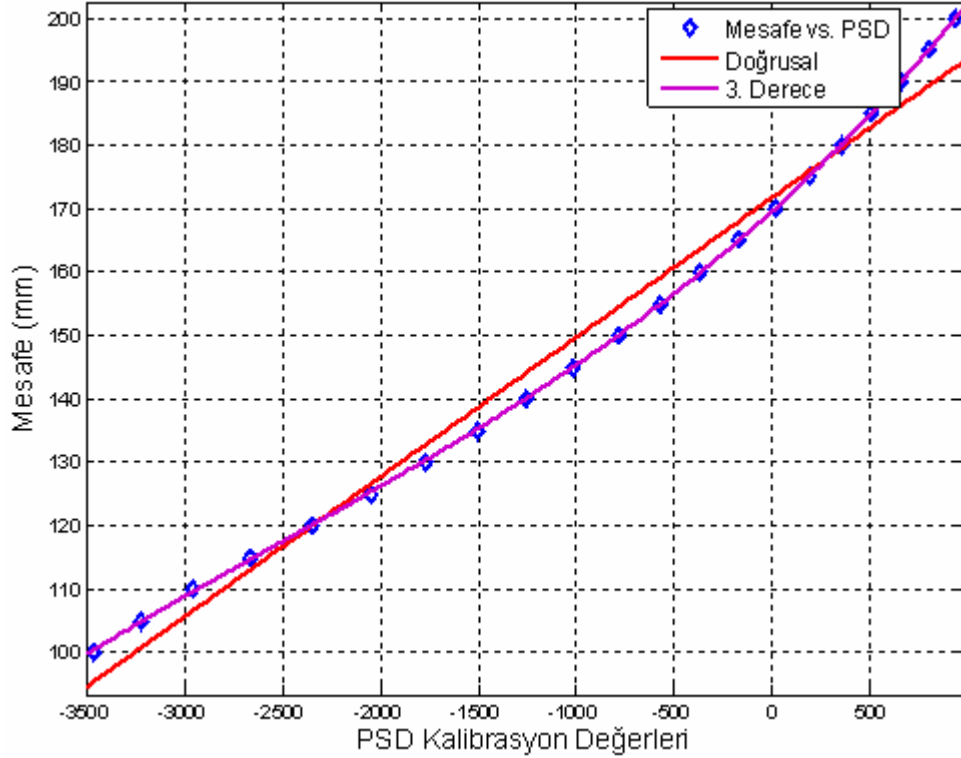
$$Mesafe = p1 \cdot PSD^3 + p2 \cdot PSD^2 + p3 \cdot PSD + p4 \quad (4.2)$$

$$p1 = 5.696e-010 \quad (5.118e-010, 6.274e-010)$$

$$p2 = 4.289e-006 \quad (4.067e-006, 4.512e-006)$$

$$p3 = 0.02797 \quad (0.02778, 0.02816)$$

$$p4 = 169.6 \quad (169.4, 169.7)$$



Şekil 4.39 3. Dereceden Polinom Denklemin Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı ile Odaklayıcı Mercek Aynı Açıda)

Oluşturulan 3. derece polinom denkleminde hata değerleri 0,5mm'lere kadar çıkmaktadır. Daha iyi uygunluk oluşturmak için 5. dereceden polinom denklem oluşturulmuştur. Oluşturulan 5. dereceden polinom denklemin ifadesi denklem 4.3'te verilmiştir. Denklemin uygunluk grafiği şekil 4.40'ta verilmiştir.

$$Mesafe = p1 \cdot PSD^5 + p2 \cdot PSD^4 + p3 \cdot PSD^3 + p4 \cdot PSD^2 + p5 \cdot PSD + p6 \quad (4.3)$$

$$p1 = 7.374e-017 \quad (5.809e-017, 8.938e-017)$$

$$p2 = 4.142e-013 \quad (3.154e-013, 5.13e-013)$$

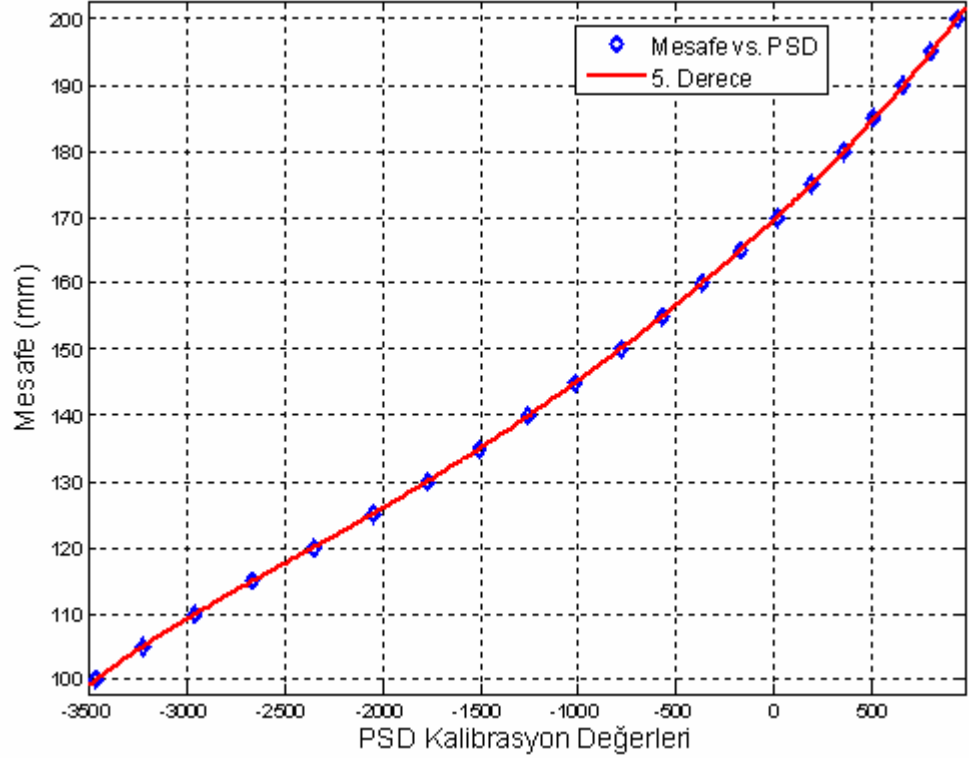
$$p3 = 1.058e-009 \quad (8.832e-010, 1.232e-009)$$

$$p4 = 3.907e-006 \quad (3.789e-006, 4.025e-006)$$

$$p5 = 0.02754 \quad (0.02738, 0.02769)$$

$$p6 = 169.7 \quad (169.6, 169.7)$$

Oluşturulan matematiksel ifadenin derecesi arttırıldığında hata değerlerinin 0.05mm'den az olduğu gözlemlenmiştir. 5. dereceden polinom denklem üçgenleme yöntemi ile çalışan bir sensör için yeterli olmaktadır. Hassasiyetin daha fazla arandığı durumlarda denklemin derecesi yükselttilerek hata değerleri daha da azaltılabilir.



Şekil 4.40 5. Dereceden Polinom Denklemin Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı ile Odaklayıcı Mercek Aynı Açıda)

#### 4.2.2.2. PSD aygıtının düz konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunun kalibrasyon eğrisi

PSD aygıtı düz konumdayken oluşturulan üçgenleme kurulumunun PSD pozisyon değerleri çizelge 24'te hata değerleri ile beraber verilmiştir.

Bu değerlerin 1. ve 3. dereceden polinom denklemi çıkartılmış matematiksel ifadeleri denklem 4.4 ve 4.5'te verilmiştir. Denklem uygunluk grafiği Şekil 4.41'de verilmiştir.

$$Mesafe = p1 \bullet PSD + p2 \quad (4.4)$$

$$p1 = 0.02163 \quad (0.0201, 0.02317)$$

$$p2 = 174.9 \quad (172.2, 177.7)$$

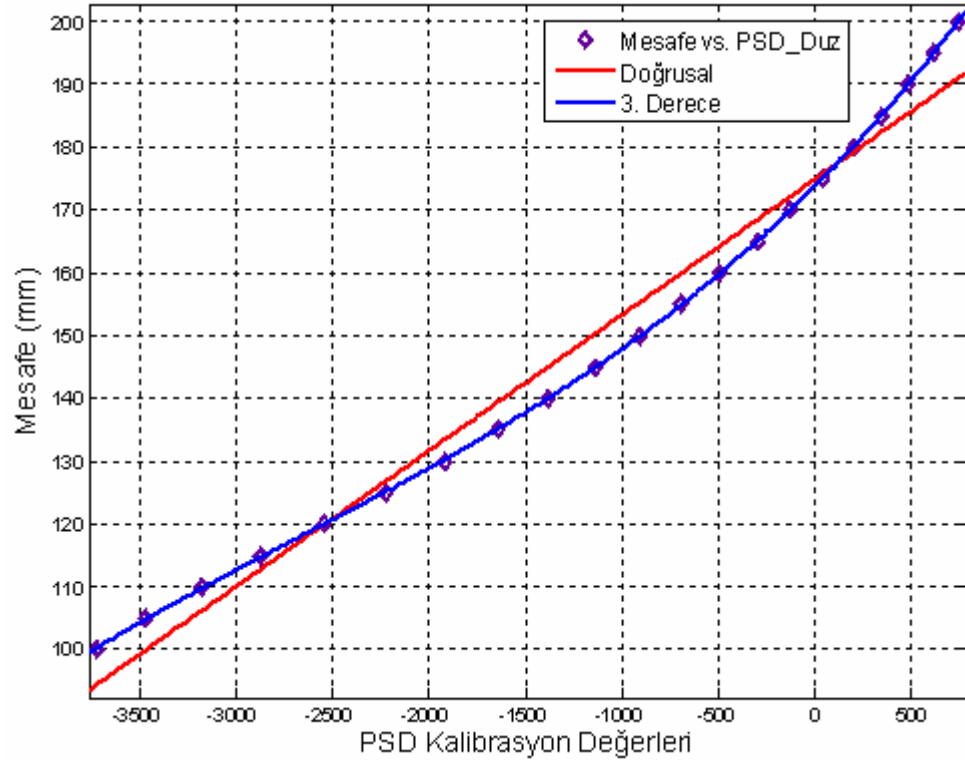
$$Mesafe = p1 \bullet PSD^3 + p2 \bullet PSD^2 + p3 \bullet PSD + p4 \quad (4.5)$$

$$p1 = 7.071e - 010 \quad (6.646e - 010, 7.497e - 010)$$

$$p2 = 5.616e - 006 \quad (5.426e - 006, 5.806e - 006)$$

$$p3 = 0.03087 \quad (0.03068, 0.03107)$$

$$p4 = 173.8 \quad (173.7, 174)$$



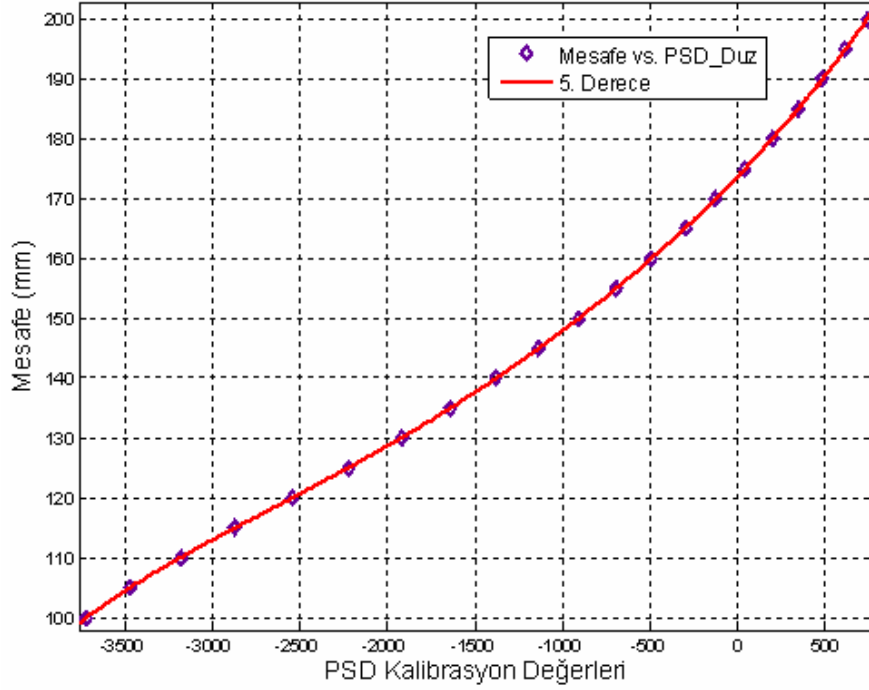
Şekil 4.41 3. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı Düz Konumdayken)

Oluşturulan 3. dereceden polinomun hata değerlerinin 0.6mm'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Denklem derecesi 5. dereceye yükseltilip interpolasyon tekrar yapılmıştır. 5. dereceden denklemin ifadesi denklem 4.6'da verilmiştir. Denklem uygunluk grafiği Şekil 4.42'de verilmiştir.

$$Mesafe = p1 \bullet PSD^5 + p2 \bullet PSD^4 + p3 \bullet PSD^3 + p4 \bullet PSD^2 + p5 \bullet PSD + p6 \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned}
p1 &= 5.189e - 017 \quad (4.133e - 017, 6.245e - 017) \\
p2 &= 3.444e - 013 \quad (2.662e - 013, 4.226e - 013) \\
p3 &= 1.299e - 009 \quad (1.122e - 009, 1.476e - 009) \\
p4 &= 5.598e - 006 \quad (5.472e - 006, 5.724e - 006) \\
p5 &= 0.03051 \quad (0.0304, 0.03061) \\
p6 &= 173.8 \quad (173.8, 173.9)
\end{aligned}$$

Oluşturulan 5. dereceden polinom ifadenin hata değerlerinin 0.05mm'den az olduğu gözlemlenmiştir. PSD aygıtı düz konumlandırıldığında da 5. dereceden polinom denklem üçgenleme yöntemi ile çalışan bir sensör için yeterli olmaktadır.



Şekil 4.42 5. Dereceden Polinom Denklem Uygunluk Grafiği (PSD aygıtı Düz Konumdayken)

#### 4.2.2.3. PSD aygıtının geometrik hesaptan çıkarılan açı değerine göre konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunun kalibrasyon eğrisi

PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı  $\gamma$  açısı bölüm 3'te elde edilen geometrik formüllerden hesaplanmıştır.  $\gamma$  açısı  $73^\circ$  olduğu zaman ışık lekesinin PSD aygıtı üzerine daha homojen dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde kurulan üçgenleme modelinin kalibrasyon değerleri ile 1. ve 3. dereceden polinomların ifadesinin hata analizleri çizelge 25'te verilmiştir. Denklemlerin uygunluk grafiği şekil 4.43'te, katsayıları denklem 4.7 ve 4.8'de verilmiştir.

$$Mesafe = p1 \cdot PSD + p2 \quad (4.7)$$

$$p1 = 0.02026 \quad (0.01914, 0.02138)$$

$$p2 = 162.2 \quad (160.4, 164)$$

$$Mesafe = p1 \cdot PSD^3 + p2 \cdot PSD^2 + p3 \cdot PSD + p4 \quad (4.8)$$

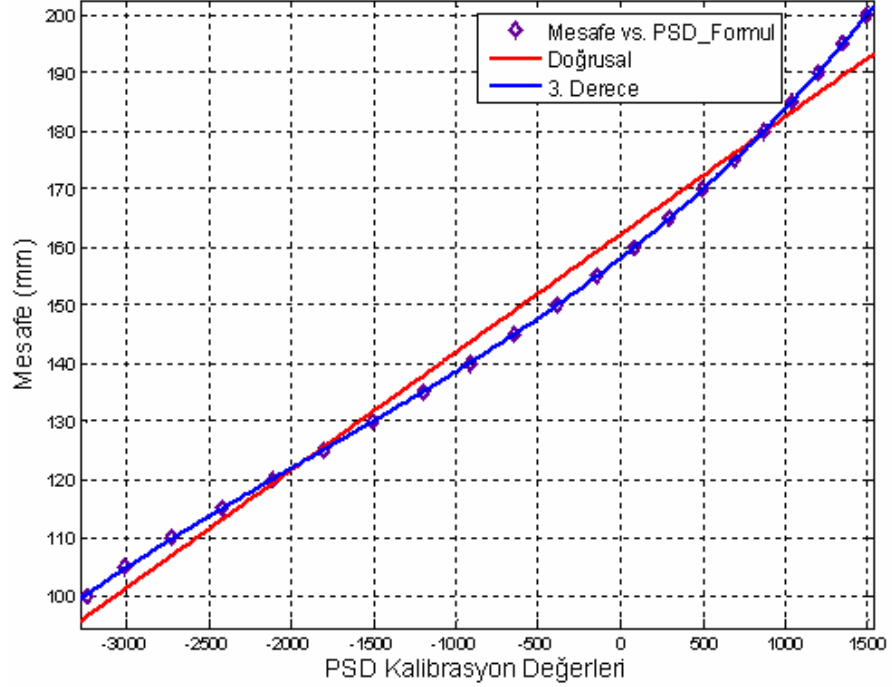
$$p1 = 5.604e - 010 \quad (5.265e - 010, 5.943e - 010)$$

$$p2 = 3.136e - 006 \quad (3.041e - 006, 3.231e - 006)$$

$$p3 = 0.02211 \quad (0.02201, 0.02221)$$

$$p4 = 158.1 \quad (158, 158.3)$$

Yığılmaların daha az olduğu halde hata değerlerinin 0,3mm'lere çıktığı gözlemlenmiştir. Diğer kurulumların 3. dereceden denklemlerine göre hata değerleri daha az çıkmıştır.



**Şekil 4.43 3. Dereceden Polinom Denklemin Uygunluk Grafiği (PSD Aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)**

Hata değerlerine daha da azaltmak için kalibrasyon değerleri ile yine 5. dereceden polinom ifadesi oluşturulmuştur. Oluşturulan ifade denklem 4.9'da katsayıları ile beraber verilmiştir. Denklemin uygunluk grafiği şekil 4.44'te verilmiştir. Hata değerlerinin 0,02mm'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir (Bkz. Çizelge 25).

$$Mesafe = p1 \cdot PSD^5 + p2 \cdot PSD^4 + p3 \cdot PSD^3 + p4 \cdot PSD^2 + p5 \cdot PSD + p6 \quad (4.9)$$

$$p1 = 3.7e - 017 \quad (2.35e - 017, 5.05e - 017)$$

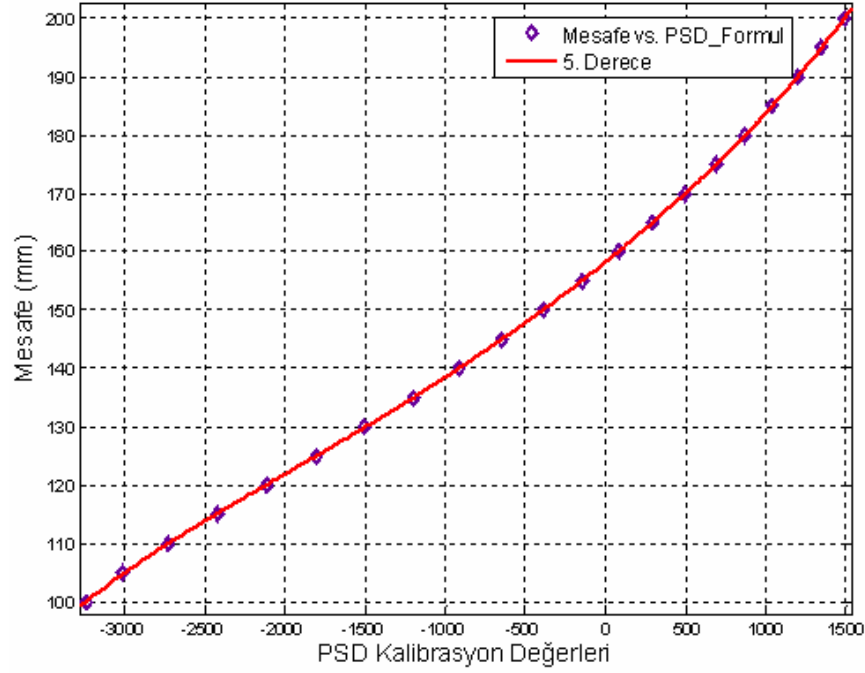
$$p2 = 1.469e - 013 \quad (8.708e - 014, 2.067e - 013)$$

$$p3 = 5.409e - 010 \quad (4.819e - 010, 6e - 010)$$

$$p4 = 2.744e - 006 \quad (2.587e - 006, 2.902e - 006)$$

$$p5 = 0.02208 \quad (0.02196, 0.02221)$$

$$p6 = 158.3 \quad (158.2, 158.4)$$

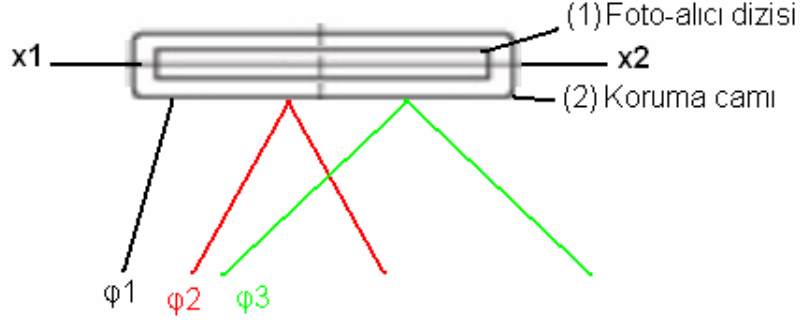


Şekil 4.44 5. Dereceden Polinom Denklemin Uygunluk Grafiği (PSD Aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)

### 4.3. Optik-Geometrik Tasarım ile Elektronik Tasarımın Karşılaştırılması

Optik-geometrik kanalda yapılan doğrusallaştırma analizleri sonucu RMS hata değerleri elde edilmiştir. PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken, hesaplanan açı değerindeyken ve ışık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmışken RMS hata değerleri diğer kurulumlara göre daha az çıkmıştır. Her iki kurulumda da elde edilen kalibrasyon eğrileri doğrusallığa yaklaşmaktadır. Ancak bununla birlikte PSD aygıtının odaklayıcı merceğin optik eksenini ile yaptığı  $\gamma$  açısı azaldıkça PSD aygıtının ışığa duyarlı yüzeyine büyük açı ile düşen ışınların bir kısmı PSD aygıtının koruma camından geri yansımaktadır. Bu da foto-alıcılar tarafından algılanan ışık miktarında azalmalara sebep olur. Açının daha da büyüdüğü durumlarda ise tamamen algılanamaz (Bkz. şekil 4.45).





Şekil 4.45 PSD aygıtı üzerine açıyla gelen ışınların koruma camından geri yansımaları

PSD aygıtının ışığa duyarlı yüzeyine düşen ışınların açısı artınca PSD aygıtının çıkışındaki foto-sinyalin genliği de düşmektedir. Foto-sinyalin genliğini arttırmak için lazer ışınının şiddetini arttırmak gerekir. Fakat lazer ışınının şiddeti standartlar gereği 5mW ile sınırlandırılmıştır. Lazer ışınının şiddeti arttırıldığında ise sensörün beslemeden çektiği güç de artmaktadır. Ayrıca PSD aygıtının bir tarafındaki foto-alıcılar doyuma girerken (örneğin x1 tarafı), diğer tarafındaki (x2) foto-sinyalin seviyesi düşmektedir.

Optik-geometrik kanalda yukarıda sayılan sorunların giderilmesi için seçilen PSD aygıtı, odaklayıcı mercekle ve bu aygıtların konumlarında değişiklikler yapılabilir. Bunlar:

- 1) PSD aygıtının uzunluğu oldukça küçük seçilmelidir.
- 2) Ölçülecek mesafe aralığı küçük seçilmelidir.
- 3) PSD aygıtı ile lazer diyot arasındaki mesafe oldukça küçük tutulmalıdır.
- 4) Odaklayıcı merceğin odak uzaklığı oldukça büyük seçilmelidir. Ancak odak mesafesi arttıkça sensörün ebatları da artmaktadır.

Sensörün ölçüm yapabileceği maksimum ölçüm aralığını optik-geometrik tasarım belirlemektedir. Elektronik tasarımın yardımıyla bu ölçüm aralığının içinde bir aralık seçilerek sınırları değiştirilebilir.

Optik-geometrik tasarımda PSD aygıtının konumu ve oluşturulan ışık lekesinin boyutları yöntemin çalışma hassasiyetini ve doğrusallığını etkilemektedir. Elektronik tasarımda yapılan işaret işleme yöntemleri sayesinde (parçalı doğrusallaştırma ve kalibrasyon eğrisi yöntemleri) PSD aygıtının konumundan ve ışık lekesine bağlı küresel sapmalardan dolayı oluşan hatalar engellenebilmektedir. Ancak bu yöntemler seri imalat halindeki her bir sensör için ayrı yapılmalıdır.

Optik-geometrik tasarımda doğrusallaştırmayı iyileştirmek için sistemde geometrik analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerle yöntemin geometrik kurulumu optimize edilmiştir. Elde edilen veriler sonucu ölçüm hatalarının azaldığı ve hassasiyetin de arttığı gözlemlenmiştir. Optik-geometrik kurulumun iyi sonuç verdiği kalibrasyon değerleriyle elektronik tasarımda matematiksel ifade elde edilmiştir. Kalibrasyon eğrisi ile çalışan yöntemin optik-geometrik tasarımda yapılan iyileştirmelere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle polinom derecesi arttırılan matematiksel ifadenin hassasiyetinin 0,01mm'lere kadar yükseldiği gözlemlenmiştir. Derecesi 5. dereceden de yüksek olan denklemlerin hassasiyetinin 1 $\mu$ m'lere kadar yükseleceği gözükmemektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada lazerli üçgenleme yöntem tabanlı mesafe ölçüm sensörlerinin doğrusallaştırma yöntemleri, ışığın ilk oluştuğu konumdan PSD aygıtına gelene kadar izlediği yol ve sistemi kalibre etmek için gereken elektronik tasarımın değişkenleri ele alınarak incelenmiştir. Yöntemin doğrusallaştırılmasını iyileştirmek için iki ana başlık altında inceleme yapılmıştır.

Optik-geometrik kanalda ilk olarak sistemi oluşturan lazer diyot ve PSD aygıtı-odaklayıcı mercek konumlarının belirlenmesinden başlanmıştır. Sabit taban yöntemi ile ana elemanların konumlarının belirlenmesinden sonra lazer diyotun nesne üzerinde oluşturduğu ışık lekesi boyutlarının yöntemin çalışma hassasiyetini ve doğrusallığını doğrudan etkilediği alınan verilerin analizlerinden ortaya çıkmıştır. Nesne üzerinde oluşan ışık lekesinin PSD aygıtı üzerinde oluşan görüntüsünün dar bir çizgi şeklinde oluşmasına ve ölçülmek istenen mesafe aralığında ışık lekesinin küçük ve sabit büyüklükte tutulmasına dikkat edilmelidir. Bu sayede PSD aygıtının yüzeyi daha verimli kullanılabilir. Işık lekesinin dar ve çizgi şeklinde oluşması için lazer diyot kristalinin bölüm 3.1’de anlatıldığı gibi dik konuma getirilmesi gerekmektedir.

Optik-geometrik tasarımda ışık lekesinin boyutları ayarlandıktan sonra PSD aygıtının üç farklı konumda doğrusallaştırılması incelenmiştir. PSD aygıtının odaklayıcı mercek ile aynı açıda bulunduğu durumda ışık lekesinin PSD aygıtının başından başlayacak şekilde  $\alpha$  açısının ayarlanması gerekmektedir. Aksi takdirde ölçülen mesafe arttıkça PSD aygıtı üzerinde yığılmalar meydana gelmektedir. Bu da PSD aygıtının yüzeyinin verimsiz kullanılmasına sebep olmaktadır. Lekenin PSD aygıtı başına hizalandığı düzenekte yığılmaların azaldığı ve mesafe ile PSD aygıtının ürettiği voltaj arasındaki doğrusallığın arttığı elde edilen RMS hata değerlerinden anlaşılmaktadır. Üçgenleme yönteminin bu kurulumu en basit ve en çok tercih edilen kurulumlardan biridir.

Optik-geometrik tasarımda seçilen malzemeler sistemin geometrisini doğrudan etkilediği için seçilecek olan PSD aygıtı ve odaklayıcı merceğin boyutlarında ve konumlandırılmalarında iyileştirmeler yapılabilir. Odaklayıcı merceğin odaklama mesafesi daha büyük seçilirse PSD aygıtı üzerinde düşen lekenin görüntü aralıkları daha fazla olacaktır. Bu da PSD aygıtı üzerinde oluşan yığılmaları azaltacaktır. PSD aygıtı ise daha küçük seçilerek aygıt üzerine düşen ışınların açı etkisi azaltılmış olur ve geri yansımalar azalır. PSD aygıtı ile lazer diyot arasındaki mesafe küçük tutulup ölçülecek mesafe aralığı da küçültülürse optik-geometrik kanalda oluşan hatalar azaltılabilir.

PSD aygıtı düz konumlandırıldığı üçgenleme kurulumunda yapılan doğrusal uygunlukta elde edilen RMS hatalarına göre doğrusallık azalmıştır. Farklı mesafelerde alınan çoklu verilerde sapmaların arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi nesne üzerinde oluşan ışık lekesinin odaklayıcı mercekten geçtikten sonra PSD üzerine açılı bir şekilde düşmesidir. Bu da PSD aygıtı üzerinde tetiklenen foto-alıcıların azalmasında sebep olmakta, açılı gelen ışığın bir kısmının PSD aygıtının koruma camından geri yansımından dolayı algılanan parlaklık enerjisinde azalmalara ve pozisyon bilgilerinde sapmaların oluşmasına neden olmaktadır. Daha fazla parlama enerjisi algılayan PSD aygıtı daha kararlı pozisyon bilgisi vermektedir.

PSD aygıtı 3. bölümde elde edilen geometrik ifadeler sonucunda odaklayıcı merceğin optik eksenini ile  $73^\circ$  açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. PSD aygıtı bu konumdayken alınan kalibrasyon değerlerinde sapmaların daha az olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen doğrusal uygunluk grafiğinde ise RMS hatalarının PSD aygıtının odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken elde edilen hata değerlerine yakın çıktığı gözlemlenmiştir.

Optik-geometrik tasarımda ışık lekesinin ve PSD aygıtının yöntemin doğrusallığına etkileri incelendikten sonra elektronik kanalda işaret işleme yöntemleriyle doğrusallaştırma yöntemleri incelenmiştir. Parçalı doğrusallaştırma yönteminin verimliliğini incelemek için farklı ölçme adım mesafelerinde veriler alınıp hata analizleri yapılmıştır. Ölçme adım mesafesinin kısa tutulmasıyla doğrusal kabul edilen doğru parçalarının sayısı ve dolayısıyla yöntemin hassasiyeti artmaktadır. Fakat ölçme adım mesafesinin artmasıyla sensörü kalibre etmek için harcanan süre artmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucu parçalı doğrusallaştırma yönteminin en önemli değişkeninin ölçme adım mesafesi olduğu ortaya çıkmıştır.

Parçalı doğrusallaştırma yönteminin doğru bir şekilde çalışması için mikro-denetleyici algoritmada PSD aygıtından alınmış değerlerin oluşturulduğu bir tablo olmalıdır. Bu tabloda ardı ardına olan değerler arası doğrusal kabul edildiği için aralarında kurulan basit bir doğru orantı sayesinde ölçülen mesafe bilgisi elde edilebilmektedir. Yöntemin basitliği çoğu üretici tarafından tercih sebebi olmasını sağlamaktadır.

Elektronik kanalda kullanılan bir diğer doğrusallaştırma yöntemi olan kalibrasyon eğrisi yöntemi analizleri yapılan üç farklı optik-geometrik kurulum için de denenmiştir. Analizleri yapılan bütün kurulumlar için elde edilen polinom ifadelerin dereceleri 5. dereceye yükseltildiğinde sensörün çalışma hassasiyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat sapmaların en az olduğu kurulum olan PSD aygıtının hesaplanan değerde konumlandırıldığı durumda hata değerlerinin 0,03mm'den az olduğu gözlemlenmiştir. Hassasiyetin  $\mu\text{m}$ 'lerde arandığı durumlarda elde edilen polinom ifadelerin dereceleri arttırılabilir.

Elektronik kanalda yapılan işaret işleme yöntemleri sayesinde optik-geometrik tasarımda ışık lekesinden dolayı oluşan küresel sapmalar, PSD aygıtı üzerinde oluşan yığılmalar ve geri yansımalarından oluşan hatalar telafi edilebilmektedir. Fakat bu yöntemler seri imalat halindeki her sensör için ayrı yapılmalıdır.

İleriye dönük çalışmalarda parçalı doğrusallaştırma yönteminin kalibrasyon tablosunu daha kısa sürede ve daha hassas oluşturmak amacıyla "Sensör Kalibrasyon Sistemi" oluşturulabilir. Sistem pozisyon ve motor kontrollü bir eksenden ve bunun denetimini yapan basit bir PLC aygıtı ile yapılabilir. Sistemin amacı sensörü kalibre ederken insan elinden oluşan hataları engellemek ve harcanan süreyi azaltmaktır. Kullanıcının sisteme gireceği mesafe ölçüm aralığı ve ölçme adım mesafesi bilgileri sayesinde PSD aygıtından okunan verilerin mikro-denetleyiciye gömülmesi insan eliyle yapılan süreçten 10 kat daha kısa sürecektir. Bu sayede ölçme adım mesafesi daha kısa tutulup daha hassas kalibrasyon sağlanabilir. Elde edilen kalibrasyon verileri ile oluşturulan kalibrasyon eğrisi denklemiyle hassasiyetin daha da artacağı tahmin edilmektedir.

## **KAYNAKLAR**

BAZIN, G., JOURNET, B., 1996. A New Laser Range-Finder Based on FMCW-Like Method. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol. 1, p. 90-93.

BRADSHAW, G., 1998/1999. Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques. Image Synthesis Group, Trinity College, Dublin. 25 p.

CHEN, Y., 2005. Integrated Laser 2-D Surface Imaging System for Thickness Measurement of Thermoplastic Pavement Marking Materials. UMI Microform, University of Houston. p. 9-30.

COSTA, M.F.M., 1996. Surface Inspection by an Optical Triangulation Method. Opt. Eng., 35(9), p. 2743-2747.

HECHT, J., 1993. Understanding Lasers: An Entry-Level Guide. IEEE Press, Understanding Science&Technology Series, New York. 478 p.

HUDDLESTON, C., 2007. Intelligent Sensor Design Using the Microchip dsPIC®. Elsevier Inc., Oxford. p. 176-179.

KIM, Y.C., RYOO, Y.J., SONG J.G., LEE J.S., 2005. Development of PSD Sensor Based Range Finder System Using Linearizing Function of Voltage-Distance Conversion. ICCAS2005 June 2-5, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea. 4 p.

KILPELA, A. 2004. Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications. Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, Finland. p. 16-18.

KLOSE, R., PENLINGTON, J., RUCKELSHAUSEN, A. 2009. Usability study of 3D Time-of-Flight cameras for automatic plant phenotyping, Workshop Image Analysis for Agricultural Products and Processes, Potsdam. p. 93-105.

LIU, R., CHEN Y., CHEN X., LI J., SUN W., XING H. 2004. Implementation of Laser Device for Highway Speed Macro-Texture Measurement. Subsurface Sensing Laboratory Department of Electrical and Computer Engineering University of Houston, Houston. 23 p.

MUSA, E. 2008. Optoelektronik Teori ve Uygulamaları. Nobel Yayın Dağıtım, Ankrara. 616 s.

MUSAYEV E. 2006. Conversion Method And System, Sensors And Actuators: A, 125, pp. 234-241.

MUSAYEV, E. 1999. Optoelektronik Devreler ve Sistemler. Birsen Yayın Evi, İstanbul. 202 s.

MUSAYEV E. 2001. Yeni Optoelektronik Algılayıcılar (Sensörler) ve Sistemler. 3. Ulusal Elektro-Optik Çalışma Toplantısı, ASELSAN, Ankara, s. 1-6.

PALOJARVI, P., MAATTA, K. and KOSTAMOVAARA, J., 1997. Integrated Time of Flight Laser Radar. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.46, p. 996-999.

SMITH, J.R., 1970. Optical Distane Measurement. Crosby Lockwood & Sons Ltd., London. 124 p.

SONG, H.X., WANG, X.D., MA, L.Q., CAI, M.Z. and CAO, T.Z., 2006. Design and Performance Analysis of Laser Displacement Sensor Based on Position Sensitive Detector(PSD). Journal of Physics: Conference Series 48, Beijing, p. 217-222  
Steel, W.H., 1986. Interferometry. Cambridge University Press, New York. 308 p.

THOMAS, P., 1999. An Infrared Laser Range Finder. Department of Electrical Engineering, University of Queensland, Brisbane. 2 p.

WIESE, D.R., 1989. Laser Triangulation Sensors: A Good Choice for High Speed Inspection. Chilton's Instrumentation and Control System, Vol. 62, Australia. p.27-29.

[http://www.sitek.se/the\\_psd\\_school.htm](http://www.sitek.se/the_psd_school.htm), Erişim Tarihi: 01.09.2010. Konu: The PSD School.

<http://www-cdr.stanford.edu/MADEFEST/catalogs/hamamatsu/psd-principle.html>, Erişim Tarihi: 10.08.2010. Konu: Hamamatsu – Large Area PSD Series.

[http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts\\_S/s3979\\_etc\\_kpsd1002e04.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/s3979_etc_kpsd1002e04.pdf), Erişim: 03.09.2010. Konu: One-Dimensional PSD S3979, S3931, S3932, S3270.

<http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/1microEpsilon.pdf>, Erişim: 01.09.2010. Konu: CCD Technology.

## EKLER

### EK1: DENEY SONUÇLARI

Çizelge 1 Işık lekesi ayarlanmamış kalibrasyon değerleri

| Mesafe (mm) | PSD Aygıtı üzerindeki Işık Pozisyonu |
|-------------|--------------------------------------|
| 100         | -311,862                             |
| 105         | -25,2414                             |
| 110         | 259,5965                             |
| 115         | 526,1754                             |
| 120         | 778,5439                             |
| 125         | 1005,81                              |
| 130         | 1232,644                             |
| 135         | 1437,621                             |
| 140         | 1630,75                              |
| 145         | 1817,017                             |
| 150         | 1982,8                               |
| 155         | 2140,567                             |
| 160         | 2287,016                             |
| 165         | 2418,797                             |
| 170         | 2544,614                             |
| 175         | 2657,525                             |
| 180         | 2759,186                             |
| 185         | 2859,86                              |
| 190         | 2950,592                             |
| 195         | 3042                                 |
| 200         | 3134,232                             |



**Çizelge 2 Işık lekesi ayarlanmamış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>Hata (mm)</b> |
|--------------------|------------------|
| <b>100</b>         | <b>0,012</b>     |
| <b>103</b>         | <b>0,08</b>      |
| <b>107</b>         | <b>0,13</b>      |
| <b>112</b>         | <b>0,84</b>      |
| <b>118</b>         | <b>0,11</b>      |
| <b>123</b>         | <b>0,09</b>      |
| <b>132</b>         | <b>0,15</b>      |
| <b>143</b>         | <b>0,07</b>      |
| <b>157</b>         | <b>0,14</b>      |
| <b>166</b>         | <b>0,16</b>      |
| <b>173</b>         | <b>0,13</b>      |
| <b>182</b>         | <b>0,16</b>      |
| <b>194</b>         | <b>0,12</b>      |

**Çizelge 3 Işık lekesi ayarlanmış kalibrasyon değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>PSD Aygıtı üzerindeki Işık Pozisyonu</b> |
|--------------------|---|
| <b>100</b>         | <b>-267,963</b>                             |
| <b>105</b>         | <b>-34,987</b>                              |
| <b>110</b>         | <b>333,6935</b>                             |
| <b>115</b>         | <b>605,5588</b>                             |
| <b>120</b>         | <b>852,8286</b>                             |
| <b>125</b>         | <b>1086,202</b>                             |
| <b>130</b>         | <b>1309,034</b>                             |
| <b>135</b>         | <b>1521,306</b>                             |
| <b>140</b>         | <b>1717,477</b>                             |
| <b>145</b>         | <b>1903,931</b>                             |
| <b>150</b>         | <b>2077,812</b>                             |
| <b>155</b>         | <b>2238,076</b>                             |
| <b>160</b>         | <b>2389,907</b>                             |
| <b>165</b>         | <b>2529,571</b>                             |
| <b>170</b>         | <b>2663,187</b>                             |
| <b>175</b>         | <b>2784,247</b>                             |
| <b>180</b>         | <b>2898,797</b>                             |
| <b>185</b>         | <b>3002,824</b>                             |
| <b>190</b>         | <b>3100,974</b>                             |
| <b>195</b>         | <b>3196,44</b>                              |
| <b>200</b>         | <b>3274,964</b>                             |

**Çizelge 4 Işık lekisi ayarlanmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>Ortalama Hata (mm)</b> |
|--------------------|---------------------------|
| <b>100</b>         | <b>0,018</b>              |
| <b>103</b>         | <b>0,12</b>               |
| <b>107</b>         | <b>0,02</b>               |
| <b>112</b>         | <b>0,08</b>               |
| <b>118</b>         | <b>0,07</b>               |
| <b>123</b>         | <b>0,13</b>               |
| <b>132</b>         | <b>0,101</b>              |
| <b>143</b>         | <b>0,109</b>              |
| <b>157</b>         | <b>0,17</b>               |
| <b>166</b>         | <b>0,14</b>               |
| <b>173</b>         | <b>0,13</b>               |
| <b>182</b>         | <b>0,18</b>               |
| <b>194</b>         | <b>0,17</b>               |
| <b>198</b>         | <b>0,22</b>               |
| <b>199</b>         | <b>0,19</b>               |

**Çizelge 5 PSD aygıtı mercekle aynı hizadayken ölçülmüş geometrik değerler (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)**

| $\alpha$ (°) | $\beta$ (°) | AF (mm) | EF (mm) | AD (mm) |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|
| 30           | 4,6         | 69      | 22,7    | 120     |

**Çizelge 5 PSD aygıtı odaklayıcı mercekle aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)**

| Mesafe (mm) | Işık Lekesinin PSD Aygıtı Üzerindeki Pozisyonu |
|-------------|--|
| 100         | -1643,25                                       |
| 105         | -1254,96                                       |
| 110         | -871,35  |
| 115         | -554,37  |
| 120         | -214,5   |
| 125         | 97,38  |
| 130         | 379,26   |
| 135         | 649,72   |
| 140         | 900,84   |
| 145         | 1141,06  |
| 150         | 1364,35  |
| 155         | 1576,22  |
| 160         | 1776,2   |
| 165         | 1965,44  |
| 170         | 2141,37  |
| 175         | 2297,81  |
| 180         | 2431,22  |
| 185         | 2557,37  |
| 190         | 2670,86  |
| 195         | 2756,2   |
| 200         | 2856,97  |

**Çizelge 6 PSD aygıtı odaklayıcı mercekle aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalanmadan)**

| <b>Ölçülen Mesafe<br/>(mm)</b> | <b>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 103                            | 0.016                          |
| 107                            | 0.012                          |
| 112                            | 0.018                          |
| 118                            | 0.002                          |
| 123                            | 0.001                          |
| 127                            | 0.005                          |
| 133                            | 0.018                          |
| 136                            | 0.025                          |
| 144                            | 0.002                          |
| 147                            | 0.005                          |
| 152                            | 0.051                          |
| 157                            | 0.043                          |
| 162                            | 0.019                          |
| 168                            | 0.016                          |
| 172                            | 0.026                          |
| 177                            | 0.021                          |
| 183                            | 0.055                          |
| 188                            | 0.073                          |
| 191                            | 0.036                          |
| 192                            | 0.098                          |
| 197                            | 0.086                          |
| 198                            | 0.103                          |

**Çizelge 7 PSD aygıtı mercek ile aynı hizadayken ölçülmüş geometrik değerler**

| $\alpha$ (°) | $\beta$ (°) | AF (mm) | EF (mm) | AD (mm) |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|
| 22           | 14-15       | 69      | 22-23   | 170-171 |

**Çizelge 8 PSD aygıtı odaklayıcı mercek ile aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerleri (Işık lekesi PSD aygıtı başına hizalı)**

| Mesafe (mm) | Işık Lekesinin PSD Aygıtı Üzerindeki Pozisyonu |
|-------------|--|
| 100         | -3464,64                                       |
| 105         | -3228,23                                       |
| 110         | -2963,85                                       |
| 115         | -2666,13                                       |
| 120         | -2353,23                                       |
| 125         | -2051,25                                       |
| 130         | -1773,06                                       |
| 135         | -1509,5  |
| 140         | -1258,31                                       |
| 145         | -1017,07                                       |
| 150         | -784,54  |
| 155         | -571,25  |
| 160         | -369,78  |
| 165         | -170,29  |
| 170         | 14,75  |
| 175         | 190,16   |
| 180         | 354,71   |
| 185         | 510,71   |
| 190         | 660,66   |
| 195         | 803,42   |
| 200         | 934,55   |

**Çizelge 9 PSD aygıtı odaklayıcı mercekle aynı açıdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri (Işık leke PSD aygıtı başına hizalı)**

| <b>Ölçülen Mesafe<br/>(mm)</b> | <b>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 103                            | 0.005                          |
| 108                            | 0.008                          |
| 113                            | 0.017                          |
| 117                            | 0.010                          |
| 122                            | 0.018                          |
| 127                            | 0.013                          |
| 132                            | 0.011                          |
| 138                            | 0.016                          |
| 143                            | 0.014                          |
| 148                            | 0.007                          |
| 152                            | 0.031                          |
| 157                            | 0.028                          |
| 163                            | 0.018                          |
| 167                            | 0.024                          |
| 172                            | 0.025                          |
| 177                            | 0.033                          |
| 182                            | 0.015                          |
| 187                            | 0.016                          |
| 191                            | 0.026                          |
| 193                            | 0.032                          |
| 196                            | 0.003                          |
| 198                            | 0.024                          |

**Çizelge 10 PSD aygıtı düz konumdayken geometrik değerler**

| $\alpha$ (°) | $\beta$ (°) | AF (mm) | EF (mm) | AD (mm) |
|--------------|-------------|---------|---------|---------|
| 16           | 19          | 69      | 18      | 170-171 |

**Çizelge 11 PSD aygıtı düz konumdayken alınmış kalibrasyon değerleri**

| Mesafe (mm) | Işık Lekesinin PSD Aygıtı Üzerindeki Pozisyonu |
|-------------|--|
| 100         | -3718,10                                       |
| 105         | -3468,10                                       |
| 110         | -3179,51                                       |
| 115         | -2870,09                                       |
| 120         | -2545,23                                       |
| 125         | -2222,34                                       |
| 130         | -1919,87                                       |
| 135         | -1639,53                                       |
| 140         | -1382,15                                       |
| 145         | -1136,37                                       |
| 150         | -907,38  |
| 155         | -695,58  |
| 160         | -497,45  |
| 165         | -301,54  |
| 170         | -127,52  |
| 175         | 37,45  |
| 180         | 195,04   |
| 185         | 341,70   |
| 190         | 479,23   |
| 195         | 612,8  |
| 200         | 738,11   |



**Çizelge 12 PSD aygıtı düz konumdayken alınmış kalibrasyon değerlerinin hata oranları**

| <b>Ölçülen Mesafe<br/>(mm)</b> | <b>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 102                            | 0.020                          |
| 107                            | 0.006                          |
| 112                            | 0.031                          |
| 118                            | 0.025                          |
| 121                            | 0.028                          |
| 127                            | 0.043                          |
| 133                            | 0.049                          |
| 137                            | 0.042                          |
| 144                            | 0.030                          |
| 148                            | 0.034                          |
| 152                            | 0.032                          |
| 157                            | 0.009                          |
| 162                            | 0.043                          |
| 166                            | 0.044                          |
| 173                            | 0.036                          |
| 177                            | 0.035                          |
| 182                            | 0.033                          |
| 188                            | 0.029                          |
| 192                            | 0.037                          |
| 194                            | 0.029                          |
| 197                            | 0.036                          |
| 199                            | 0.035                          |

Çizelge 13 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı geometrik değerler

| $\alpha$ (°) | $\beta$ (°) | $\gamma$ (°) | AF (mm) | EF (mm) | AD (mm) |
|--------------|-------------|--------------|---------|---------|---------|
| 22           | 12,6        | 73           | 69      | 22,44   | 170-171 |

Çizelge 14 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı kalibrasyon değerleri

| Mesafe (mm) | Işık Lekesinin PSD Aygıtı Üzerindeki Pozisyonu |
|-------------|--|
| 100         | -3240,47                                       |
| 105         | -3012,39                                       |
| 110         | -2731,29                                       |
| 115         | -2421,89                                       |
| 120         | -2117,4  |
| 125         | -1809,58                                       |
| 130         | -1507,53                                       |
| 135         | -1201,78                                       |
| 140         | -914,3   |
| 145         | -646,48  |
| 150         | -391,22  |
| 155         | -150,54  |
| 160         | 78,73  |
| 165         | 289,95   |
| 170         | 496,74   |
| 175         | 688,13   |
| 180         | 869,38   |
| 185         | 1036,89  |
| 190         | 1200,49  |
| 195         | 1347,85  |
| 200         | 1487,83  |

**Çizelge 15 PSD aygıtının hesaplanan açı değerine göre konumlandırıldığı kalibrasyon değerlerinin hata değerleri**

| <b>Ölçülen Mesafe<br/>(mm)</b> | <b>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 102                            | 0.008                          |
| 108                            | 0.004                          |
| 112                            | 0.001                          |
| 118                            | 0.006                          |
| 122                            | 0.009                          |
| 127                            | 0.013                          |
| 133                            | 0.017                          |
| 138                            | 0.012                          |
| 144                            | 0.020                          |
| 148                            | 0.012                          |
| 153                            | 0.029                          |
| 157                            | 0.023                          |
| 163                            | 0.019                          |
| 166                            | 0.023                          |
| 172                            | 0.032                          |
| 177                            | 0.017                          |
| 182                            | 0.024                          |
| 188                            | 0.031                          |
| 192                            | 0.021                          |
| 194                            | 0.018                          |
| 198                            | 0.014                          |

**Çizelge 16 Adım mesafesi 20mm alınmış kalibrasyon değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>PSD üzerindeki Işık Pozisyonu</b> |
|--------------------|--------------------------------------|
| <b>100</b>         | <b>-4085,33</b>                      |
| <b>120</b>         | <b>-2955,21</b>                      |
| <b>140</b>         | <b>-2061,62</b>                      |
| <b>160</b>         | <b>-1354,69</b>                      |
| <b>180</b>         | <b>-785,728</b>                      |
| <b>200</b>         | <b>-319,538</b>                      |

**Çizelge 17 Adım mesafesi 20mm alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>Hata (mm)</b> |
|--------------------|------------------|
| <b>105</b>         | <b>0,11</b>      |
| <b>110</b>         | <b>0,14</b>      |
| <b>115</b>         | <b>0,18</b>      |
| <b>125</b>         | <b>0,43</b>      |
| <b>130</b>         | <b>0,62</b>      |
| <b>135</b>         | <b>0,87</b>      |
| <b>145</b>         | <b>0,79</b>      |
| <b>150</b>         | <b>1,14</b>      |
| <b>155</b>         | <b>1,04</b>      |
| <b>165</b>         | <b>1,08</b>      |
| <b>170</b>         | <b>1,18</b>      |
| <b>175</b>         | <b>0,94</b>      |
| <b>185</b>         | <b>1,22</b>      |
| <b>190</b>         | <b>1,33</b>      |

**Çizelge 18 Adım mesafesi 10mm alınmış kalibrasyon değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>PSD üzerindeki Işık Pozisyonu</b> |
|--------------------|--------------------------------------|
| <b>100</b>         | <b>-4070,53</b>                      |
| <b>110</b>         | <b>-3513,81</b>                      |
| <b>120</b>         | <b>-2959,14</b>                      |
| <b>130</b>         | <b>-2487,23</b>                      |
| <b>140</b>         | <b>-2067,63</b>                      |
| <b>150</b>         | <b>-1685,21</b>                      |
| <b>160</b>         | <b>-1355,56</b>                      |
| <b>170</b>         | <b>-1055,07</b>                      |
| <b>180</b>         | <b>-784,506</b>                      |
| <b>190</b>         | <b>-538,316</b>                      |
| <b>200</b>         | <b>-319,897</b>                      |

**Çizelge 19 Adım mesafesi 10mm alınmış kalibrasyon değerlerin hata değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>Hata (mm)</b> |
|--------------------|------------------|
| <b>105</b>         | <b>0,16</b>      |
| <b>115</b>         | <b>0,14</b>      |
| <b>125</b>         | <b>0,12</b>      |
| <b>135</b>         | <b>0,131</b>     |
| <b>145</b>         | <b>0,36</b>      |
| <b>155</b>         | <b>0,31</b>      |
| <b>165</b>         | <b>0,52</b>      |
| <b>175</b>         | <b>0,44</b>      |
| <b>185</b>         | <b>0,68</b>      |
| <b>195</b>         | <b>0,55</b>      |

**Çizelge 20 Adım mesafesi 5mm alınmış kalibrasyon değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>PSD Aygıtı üzerindeki Işık Pozisyonu</b> |
|--------------------|---|
| <b>100</b>         | <b>-4098,36</b>                             |
| <b>105</b>         | <b>-3666,6</b>                              |
| <b>110</b>         | <b>-3302,79</b>                             |
| <b>115</b>         | <b>-3020,6</b>                              |
| <b>120</b>         | <b>-2730,65</b>                             |
| <b>125</b>         | <b>-2443,3</b>                              |
| <b>130</b>         | <b>-2157,35</b>                             |
| <b>135</b>         | <b>-1882,68</b>                             |
| <b>140</b>         | <b>-1626,75</b>                             |
| <b>145</b>         | <b>-1391,96</b>                             |
| <b>150</b>         | <b>-1152,44</b>                             |
| <b>155</b>         | <b>-938,49</b>                              |
| <b>160</b>         | <b>-733,17</b>                              |
| <b>165</b>         | <b>-537,99</b>                              |
| <b>170</b>         | <b>-353,25</b>                              |
| <b>175</b>         | <b>-187,78</b>                              |
| <b>180</b>         | <b>-14,66</b>                               |
| <b>185</b>         | <b>139,6</b>                                |
| <b>190</b>         | <b>289,3</b>                                |
| <b>195</b>         | <b>430</b>                                  |
| <b>200</b>         | <b>564,75</b>                               |

**Çizelge 21 Adım mesafesi 5mm alınmış kalibrasyon değerlerinin hata değerleri**

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>Hata (mm)</b> |
|--------------------|------------------|
| <b>102</b>         | <b>0.053</b>     |
| <b>107</b>         | <b>0.083</b>     |
| <b>113</b>         | <b>0.011</b>     |
| <b>118</b>         | <b>0.052</b>     |
| <b>122</b>         | <b>0.011</b>     |
| <b>127</b>         | <b>0.072</b>     |
| <b>133</b>         | <b>0.026</b>     |
| <b>137</b>         | <b>0.064</b>     |
| <b>143</b>         | <b>0.075</b>     |
| <b>147</b>         | <b>0.090</b>     |
| <b>152</b>         | <b>0.047</b>     |
| <b>158</b>         | <b>0.043</b>     |
| <b>161</b>         | <b>0.039</b>     |
| <b>169</b>         | <b>0.023</b>     |
| <b>173</b>         | <b>0.036</b>     |
| <b>177</b>         | <b>0.020</b>     |
| <b>184</b>         | <b>0.036</b>     |
| <b>189</b>         | <b>0.030</b>     |
| <b>192</b>         | <b>0.071</b>     |
| <b>196</b>         | <b>0.030</b>     |
| <b>198</b>         | <b>0.055</b>     |
| <b>199</b>         | <b>0.070</b>     |

Çizelge 22 Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı mercekle aynı hizadayken)

| Mesafe (mm) | PSD Aygıtı üzerindeki Işık Pozisyonu | 1. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm) | 3. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm) | 5. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm) |
|-------------|--------------------------------------|--|--|--|
| 100         | -3464,64                             | -4,556                                     | 0,460                                      | 0,067                                      |
| 105         | -3228,23                             | -4,353                                     | 0,214                                      | 0,040                                      |
| 110         | -2963,85                             | -3,534                                     | 0,419                                      | 0,005                                      |
| 115         | -2666,13                             | -1,981                                     | 0,306                                      | 0,018                                      |
| 120         | -2353,23                             | -0,094                                     | 0,029                                      | 0,030                                      |
| 125         | -2051,25                             | 1,551                                      | 0,314                                      | 0,028                                      |
| 130         | -1773,06                             | 2,674                                      | 0,303                                      | 0,013                                      |
| 135         | -1509,5                              | 3,475                                      | 0,302                                      | 0,018                                      |
| 140         | -1258,31                             | 4,004                                      | 0,093                                      | 0,034                                      |
| 145         | -1017,07                             | 4,314                                      | 0,095                                      | 0,034                                      |
| 150         | -784,54                              | 4,432                                      | 0,255                                      | 0,040                                      |
| 155         | -571,25                              | 4,126                                      | 0,120                                      | 0,011                                      |
| 160         | -369,78                              | 3,561                                      | 0,148                                      | 0,039                                      |
| 165         | -170,29                              | 2,951                                      | 0,096                                      | -0,016                                     |
| 170         | 14,75                                | 2,024                                      | 0,005                                      | 0,029                                      |
| 175         | 190,16                               | 0,885                                      | 0,135                                      | 0,018                                      |
| 180         | 354,71                               | -0,492                                     | 0,220                                      | 0,025                                      |
| 185         | 510,71                               | -2,059                                     | 0,064                                      | 0,035                                      |
| 190         | 660,66                               | -3,758                                     | 0,202                                      | -0,011                                     |
| 195         | 803,42                               | -5,616                                     | 0,205                                      | 0,037                                      |
| 200         | 934,55                               | -7,730                                     | 0,228                                      | 0,032                                      |



**Çizelge 23 Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı düz konumdayken)**

| <b>Mesafe<br/>(mm)</b> | <b>PSD Aygıtı<br/>üzerindeki Işık<br/>Pozisyonu</b> | <b>1. Dereceden<br/>Polinomun<br/>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> | <b>3. Dereceden<br/>Polinomun<br/>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> | <b>5. Dereceden<br/>Polinomun<br/>Hata Değerleri<br/>(mm)</b> |
|------------------------|---|---|---|---|
| 100                    | -3718,10  | -5,522  | 0,520   | -0,072  |
| 105                    | -3468,10  | -5,115  | -0,248  | -0,077  |
| 110                    | -3179,51  | -3,872  | -0,414  | -0,032  |
| 115                    | -2870,09  | -2,180  | -0,655  | -0,100  |
| 120                    | -2545,23  | -0,153  | 0,033   | -0,097  |
| 125                    | -2222,34  | 1,830   | 0,244   | -0,025  |
| 130                    | -1919,87  | 3,373   | 0,088   | -0,008  |
| 135                    | -1639,53  | 4,436   | 0,345   | -0,025  |
| 140                    | -1382,15  | 5,004   | 0,281   | -0,110  |
| 145                    | -1136,37  | 5,320   | 0,091   | -0,071  |
| 150                    | -907,38   | 5,273   | 0,022   | -0,044  |
| 155                    | -695,58   | 4,854   | -0,201  | -0,078  |
| 160                    | -497,45   | 4,140   | 0,018   | -0,132  |
| 165                    | -301,54   | 3,377   | 0,230   | 0,076   |
| 170                    | -127,52   | 2,141   | 0,041   | -0,002  |
| 175                    | 37,45   | 0,710   | 0,056   | -0,049  |
| 180                    | 195,04  | -0,881  | 0,041   | -0,026  |
| 185                    | 341,70  | -2,709  | 0,024   | -0,064  |
| 190                    | 479,23  | -4,734  | 0,062   | -0,130  |
| 195                    | 612,8   | -6,845  | 0,074   | -0,049  |
| 200                    | 738,11  | -9,134  | 0,095   | 0,005   |

**Çizelge 24** Matematiksel ifadesi mikro-denetleyiciye gömülen algoritmanın hata değerleri (PSD aygıtı hesaplanan açı değerindeyken)

| <b>Mesafe (mm)</b> | <b>PSD Aygıtı üzerindeki Işık Pozisyonu</b> | <b>1. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm)</b> | <b>3. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm)</b> | <b>5. Dereceden Polinomun Hata Değerleri (mm)</b> |
|--------------------|---|---|---|---|
| 100                | -3240,47                                    | -3,451  | 0,204   | 0,017   |
| 105                | -3012,39                                    | -3,831  | 0,148   | 0,010   |
| 110                | -2731,29                                    | -3,135  | -0,440  | 0,011   |
| 115                | -2421,89                                    | -1,867  | 0,311   | 0,017   |
| 120                | -2117,4                                     | -0,698  | -0,127  | 0,005   |
| 125                | -1809,58                                    | 0,537   | 0,618   | 0,013   |
| 130                | -1507,53                                    | 1,657   | 0,074   | 0,018   |
| 135                | -1201,78                                    | 2,851   | 0,481   | 0,014   |
| 140                | -914,3                                      | 3,676   | -0,308  | 0,005   |
| 145                | -646,48                                     | 4,102   | 0,109   | 0,021   |
| 150                | -391,22                                     | 4,273   | 0,018   | 0,010   |
| 155                | -150,54                                     | 4,150   | - 0,196   | 0,003   |
| 160                | 78,73                                       | 3,795   | 0,029   | 0,005   |
| 165                | 289,95                                      | 3,074   | 0,322   | 0,008   |
| 170                | 496,74                                      | 2,263   | 0,051   | 0,015   |
| 175                | 688,13                                      | 1,141   | 0,077   | 0,004   |
| 180                | 869,38                                      | -0,186  | 0,081   | 0,010   |
| 185                | 1036,89                                     | -1,792  | 0,107   | 0,012   |
| 190                | 1200,49                                     | -3,478  | 0,141   | 0,017   |
| 195                | 1347,85                                     | -5,492  | 0,228   | -0,026  |
| 200                | 1487,83                                     | -7,656  | 0,164   | 0,012   |

**EK2: Lazer Diyot Veri Sayfası**

**QL67D6SA**  
InGaAlP Laser Diode

2003 Rev 1

**◆ OVERVIEW**

**QL67D6SA** is a MOCVD grown 670 nm band gain-guided type *InGaAlP* laser diode with quantum well structure. It's an attractive light source, with a typical light output power of 5 mW for opto-electronic devices such as Bar Code Reader.

**◆ APPLICATION**

Optical Leveler  
Laser Module  
Bar Code Reader

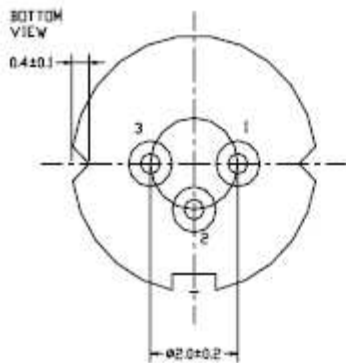
**◆ FEATURES**

Visible Light Output :  $\lambda_p = 670 \text{ nm}$

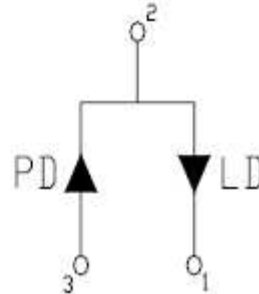
Optical Power Output : 5 mW CW

Package Type : TO-18 (5.6 mm $\phi$ )

Built-in Photo Diode for Monitoring Laser Output

**◆ ELECTRICAL CONNECTION**

Bottom View



Pin Configuration

◆ **ABSOLUTE MAXIMUM RATING at Tc = 25°C**

| Items                       | Symbols | Values     | Unit |
|-----------------------------|---------|------------|------|
| Optical Output Power        | P       | 5          | mW   |
| Laser Diode Reverse Voltage | V       | 2          | V    |
| Photo Diode Reverse Voltage | V       | 30         | V    |
| Operating Temperature       | Topr    | -10 .. +60 | °C   |
| Storage Temperature         | Tstg    | -40 .. +85 | °C   |

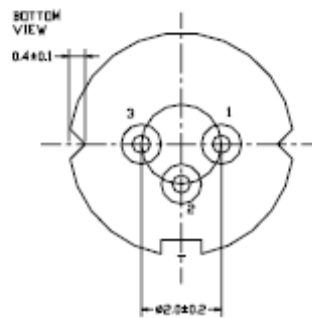
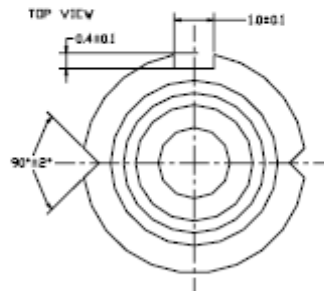
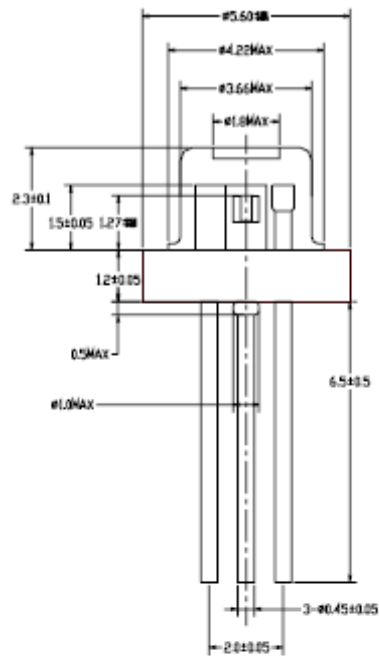
◆ **ELECTRICAL and OPTICAL CHARACTERISTICS at Tc = 25°C**

| Items                | Symbols                        | Min. | Typ. | Max. | Unit          | Condition |
|----------------------|--------------------------------|------|------|------|---------------|-----------|
| Optical Output Power | Po                             | -    | 5    | -    | mW            | -         |
| Threshold Current    | Ith                            | -    | 40   | 60   | mA            | -         |
| Operating Current    | Iop                            | -    | 50   | 70   | mA            | Po=5mW    |
| Operating Voltage    | Vop                            | -    | 2.3  | 2.6  | V             | Po=5mW    |
| Lasing Wavelength    | $\lambda_p$                    | 660  | 670  | 680  | nm            | Po=5mW    |
| Beam Divergence      | $\theta_{  }$                  | 8    | 11   | 15   | deg           | Po=5mW    |
|                      | $\theta_{\perp}$               | 24   | 32   | 35   | deg           | Po=5mW    |
| Beam Angle           | $\Delta\theta_{  }$            | -    | -    | 1.5  | deg           | Po=5mW    |
|                      | $\Delta\theta_{\perp}$         | -    | -    | 2.5  | deg           | Po=5mW    |
| Monitor Current      | I <sub>m</sub>                 | 0.1  | 0.2  | 0.5  | mA            | Po=5mW    |
| Optical Distance     | $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ | -    | -    | 60   | $\mu\text{m}$ |           |

**NOTICE : QL67D6SA to be operated on APC circuit**

**The above product specification are subject to change without notice**

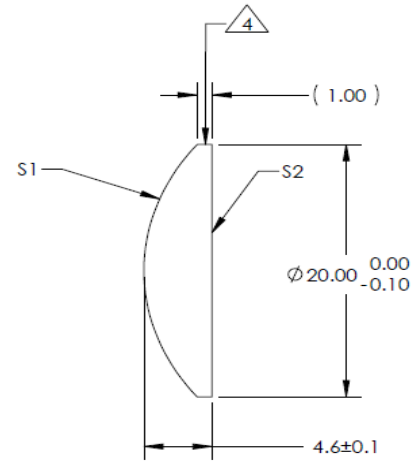
◆ PACKAGE DIMENSION (mm)



ROITHNER LASERTECHNIK, A-1040 Vienna, Austria, Schoenbrunner Strasse 7  
 Tel.: +43-1-586 52 43 - 0, Fax.: +43-1-586 52 43 44  
 e-mail: office@roithner-laser.com, <http://www.roithner-laser.com>

**EK3: Plano-Konveks Odaklayıcı Lens Veri Sayfası**

1. ALLOWABLE OPTICAL MATERIAL: GRADE A FINE ANNEALED  
SCHOTT: SF11 785/258
2. CENTERING TOLERANCE:  
BEAM DEVIATION: 3-5 arc min.
3. COATING (APPLY ACROSS COATING APERTURE)  
S1: 1/4 Wave MgF2@550nm  
Rave  $\leq 1.75\%$  400-700nm (BK7)  
S2: 1/4 Wave MgF2@550nm  
Rave  $\leq 1.75\%$  400-700nm (BK7)
4. FINE GROUND SURFACE
5. FOCAL LENGTH TOLERANCE:  $\pm 1\%$

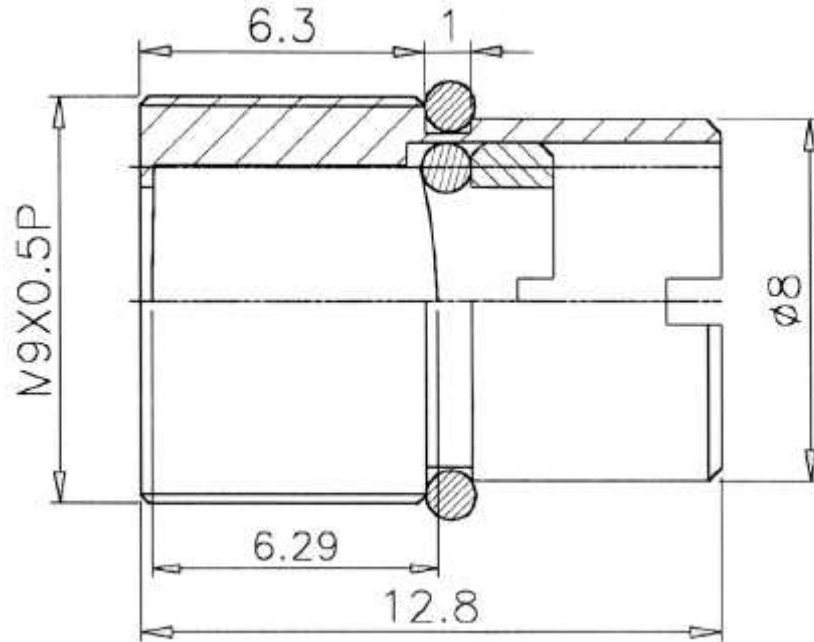


**FOR INFORMATION ONLY:  
DO NOT MANUFACTURE PARTS TO THIS DRAWING**

|                 |              |              |                  |       |        |       |
|-----------------|--------------|--------------|------------------|-------|--------|-------|
|                 | S1           | S2           |                  |       |        |       |
| SHAPE           | CONVEX       | PLANO        | EFL (AT 587.6nm) | 20.00 |        |       |
| RADIUS          | 15.7         | INFINITY     | BFL (AT 587.6nm) | 17.42 | DWG NO | 47884 |
| SURFACE QUALITY | 40-20        | 40-20        | ALL DIMS IN      | mm    |        |       |
| CLEAR APERTURE  | 19.00        | 19.00        |                  |       |        |       |
| BEVEL MAX FACE  | 0.25mm x 45° | 0.25mm x 45° |                  |       |        |       |

**EK4: Lazer Diyot Hizalayıcı Lens Veri Sayfası****GS-8019  
LASERDIODE COLLIMATOR***Technical Data:*

- effective focal length = 8.0 mm
- NA = 0.3
- F/# = 1/1.6
- spot size @ 10 m: 20 mm
- 3-element glass lens, AR coated
- designed for 670 nm  $\pm$  10 nm
- M 9 x 0.5 mm, length 12.8 mm
- divergence: 2 mrad, exit pupil = 5 mm

***ROITHNER LASERTECHNIK***


A-1040 VIENNA, SCHOENBRUNNER STRASSE 7, AUSTRIA

TEL: +43 -1- 586 52 43-0 FAX: +43 -1- 586 52 43-44

e-mail: [office@roithner-laser.com](mailto:office@roithner-laser.com) <http://www.roithner-laser.com>

## EK5: Tek Boyutlu Pozisyon Hassasiyetli Algılayıcı (PSD) Veri Sayfası

PSD



### One-dimensional PSD

# S3979, S3931, S3932, S3270

3 to 37 mm resistance length PSD for precision distance measurement

Hamamatsu provides various types of one-dimensional PSD (Position Sensitive Detector) designed for precision distance measurement such as displacement meters. S3979 has a 1 × 3 mm active area sealed in a TO-5 package. S3931 and S3932 have an active area of 1 × 6 mm and 1 × 12 mm respectively, and are mounted on a compact ceramic package with a transparent resin window. Variant types (S3931-01, S3932-01) with a visible-cut resin window are also available. S3270 offers an active area longer than 30 mm, allowing position detection at a long distance. S3270 has a visible-cut resin window, and S3270-01 with a transparent resin window is also available.

#### Features

- Superior position detection ability
- High reliability
- S3931, S3932: Easy to use 4-pin small ceramic package
- Long and narrow active area  
S3270: 1 × 37 mm

#### Applications

- Displacement sensing
- Distance measurement
- Proximity switching

#### ■ General ratings / Absolute maximum ratings

| Type No. | Package | Window material ** | Active area size (mm) | Absolute maximum ratings                |   |   |
|----------|---------|--------------------|-----------------------|---|---|---|
|          |         |                    |                       | Reverse voltage V <sub>R</sub> Max. (V) | Operating temperature T <sub>opr</sub> (°C) | Storage temperature T <sub>stg</sub> (°C) |
| S3979    | TO-5    | K                  | 1 × 3                 | 20                                      | -10 to +60                                  | -20 to +80                                |
| S3931    | Ceramic | R                  | 1 × 6                 |   |   |   |
| S3932    |         | R                  | 1 × 12                |   |   |   |
| S3270 ** |         | R (B)              | 1 × 37                |   |   |   |

#### ■ Electrical and optical characteristics (Typ. T<sub>a</sub>=25 °C, unless otherwise noted)

| Type No. | Spectral response range λ (nm) | Peak sensitivity wavelength λ <sub>p</sub> (nm) | Photo sensitivity S λ=λ <sub>p</sub> (A/W) | Interelectrode resistance R <sub>ie</sub> V <sub>b</sub> =0.1 V (kΩ) |      |      | Position detection error *3 E V <sub>R</sub> =5 V light spot φ200 μm (μm) |      | Saturation photocurrent *4 V <sub>R</sub> =5 V R <sub>L</sub> =1 kΩ (μA) | Dark current I <sub>d</sub> V <sub>R</sub> =5 V (nA) |      | Temp. coefficient of I <sub>d</sub> T <sub>ci0</sub> (times/°C) | Rise time t <sub>r</sub> V <sub>R</sub> =5 V R <sub>L</sub> =1 kΩ (μs) | Terminal capacitance C <sub>t</sub> V <sub>R</sub> =5 V f=10 kHz (pF) | Position resolution *5 (μm) |
|----------|--------------------------------|---|--|--|------|------|---|------|--|--|------|---|--|---|-----------------------------|
|          |                                |   |  | Min.   | Typ. | Max. | Typ.  | Max. |  | Typ.   | Max. |   |  |   |                             |
|          |                                |   |  | (kΩ)   | (kΩ) | (kΩ) | (μm)  | (μm) |  | (nA)   | (nA) |   |  |   |                             |
| S3979    | 320 to 1100                    | 920   | 0.55                                       | 100  | 140  | 180  | ±15   | ±60  | 40   | 0.1  | 5    | 1.15  | 2.5  | 20  | 0.1                         |
| S3931    |                                |   |  | 30   | 50   | 80   | ±30   | ±120 | 100  | 0.15   | 10   |   | 1.5  | 40  | 0.2                         |
| S3932    |                                |   |  | ±60  | ±240 | 0.2  | 20  | 3.0  | 80   | 0.3  |      |   |  |   |                             |
| S3270    | 700 to 1100                    | 960   | 0.55                                       | 10   | 15   | 20   | ±100  | ±400 | 300  | 0.5  | 20   | 1.0   | 100  | 2.8   |                             |

\*1: K: borosilicate glass, R: clear resin coating, R (B): visible-cut resin coating.

\*2: Works with microscopic spot light detection.

\*3: A range of 75 % of that from the center of the photosensitive surface to the edge.

\*4: The upper limit of linearity of photocurrent in response to the quantity of light is defined as the point where the linearity deviates by 10 %.

\*5: Position resolution

This is the minimum detectable light spot displacement. The detection limit is indicated by the distance on the photosensitive surface. The numerical value of the resolution of a position sensor using a PSD is proportional to both the length of the PSD and the noise of the measuring system (resolution deteriorates) and inversely proportional to the photocurrent (incident energy) of the PSD (resolution improves).

Light source: LED (900 nm)

Spot light size: φ 200 μm

Frequency range: 1 kHz

Photocurrent: 1 μA

Circuit system input noise: 1 μV (1 kHz)

Interelectrode resistance: Typical value (refer to the specification table)

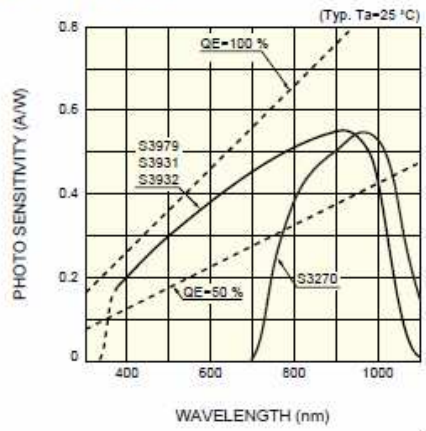
**SOLID STATE DIVISION**

**HAMAMATSU**

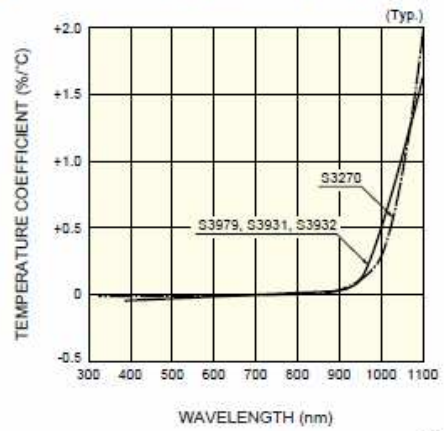


One-dimensional PSD **S3979, S3931, S3932, S3270**

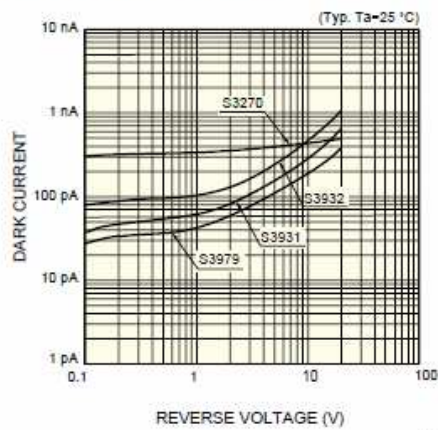
■ Spectral response



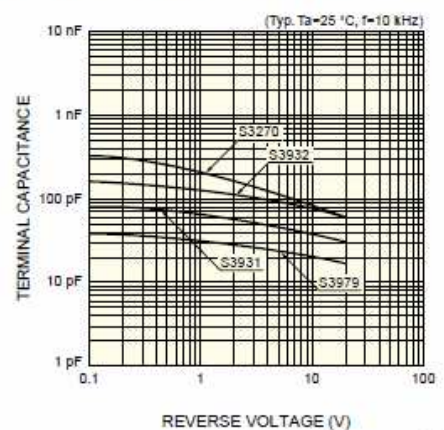
■ Photo sensitivity temperature characteristics



■ Dark current vs. reverse voltage

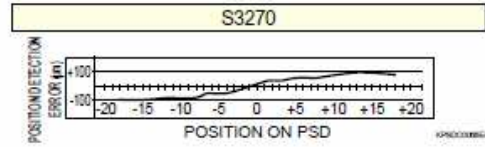
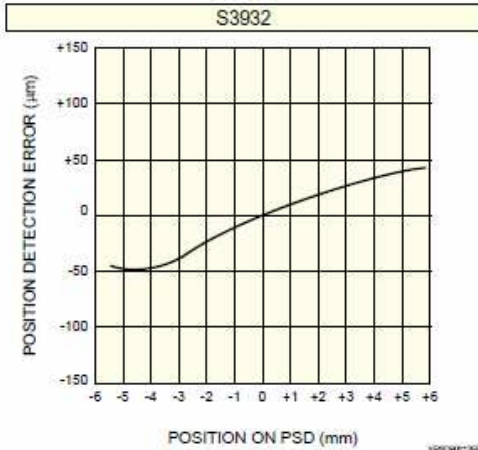
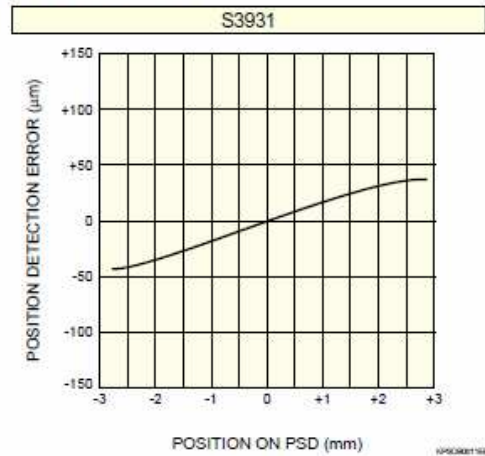
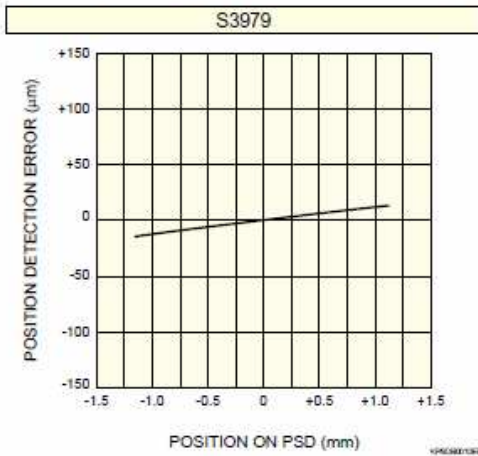


■ Terminal capacitance vs. reverse voltage

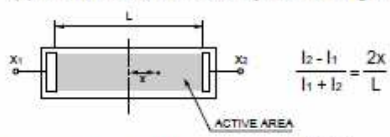


**One-dimensional PSD S3979, S3931, S3932, S3270**

■ Example of position detectability (Ta=25 °C, λ=900 nm, spot light size: φ0.2 mm)



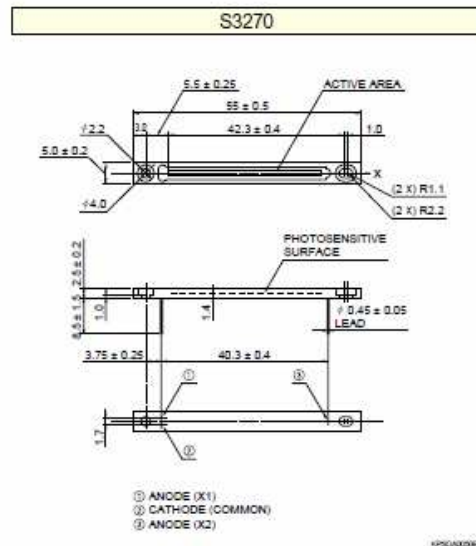
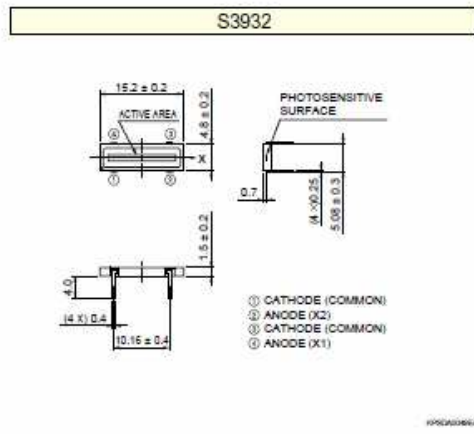
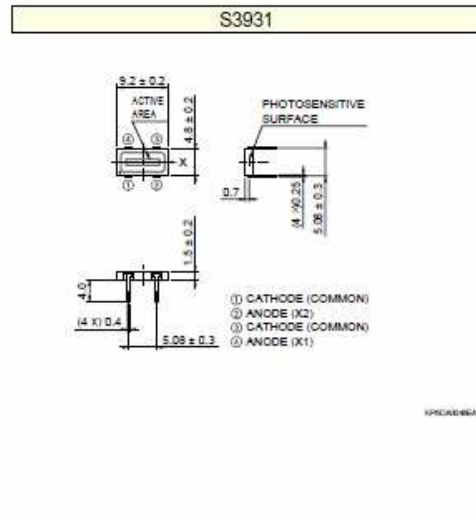
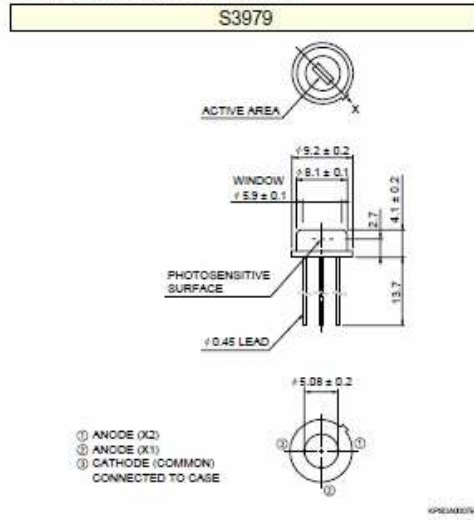
■ Conversion formula of spot light position on the PSD  
 If output signals (photocurrent)  $I_1$  and  $I_2$  are obtained from electrodes  $X_1$  and  $X_2$ , then the light spot position ( $x$ ) on the PSD can be found by the following formula.



■ Correction for position detection error  
 Position detection characteristics obtained by the above formula can be corrected to reduce position detection errors. For example, the maximum position detection error ( $\pm 120 \mu\text{m}$ ) of S3931 can be significantly reduced to  $\pm 9 \mu\text{m}$  by using the least square method.

One-dimensional PSD S3979, S3931, S3932, S3270

Dimensional outlines (unit: mm)

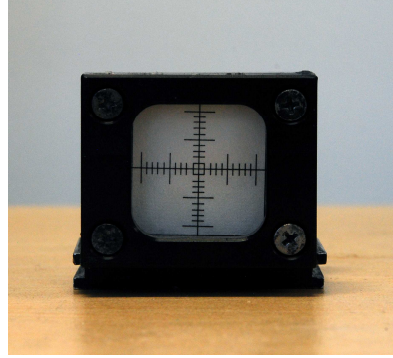
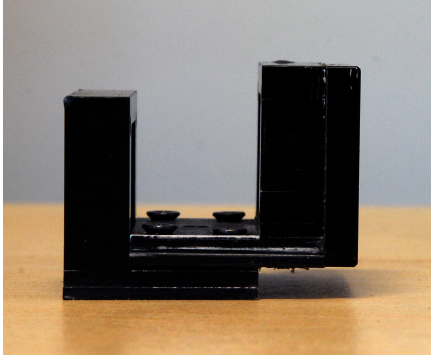
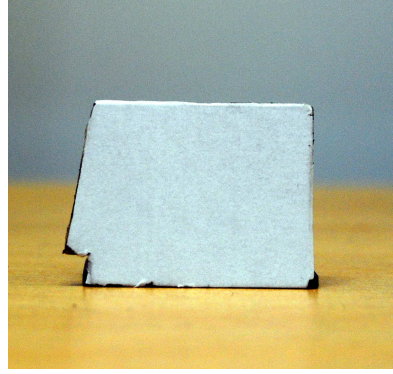
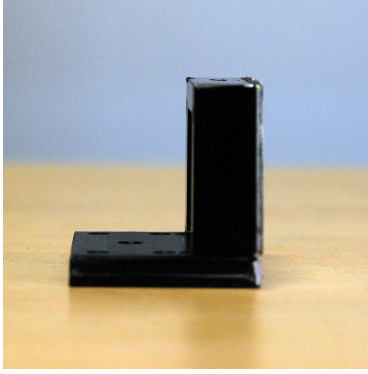
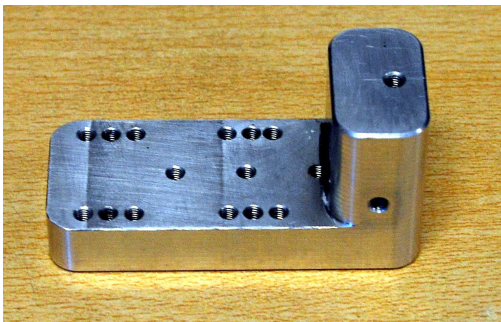
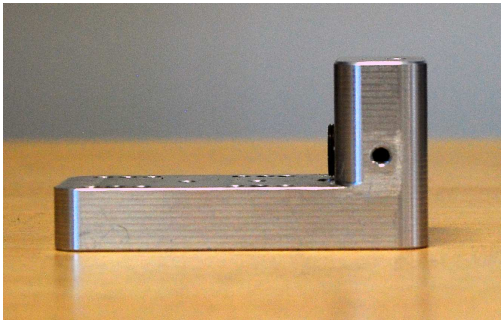


**HAMAMATSU**

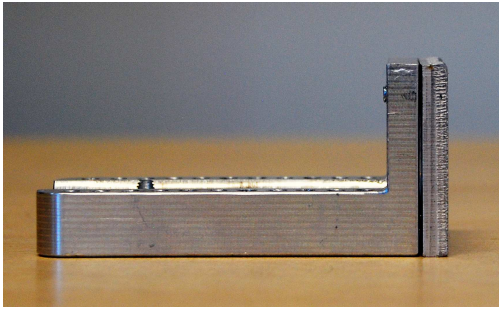
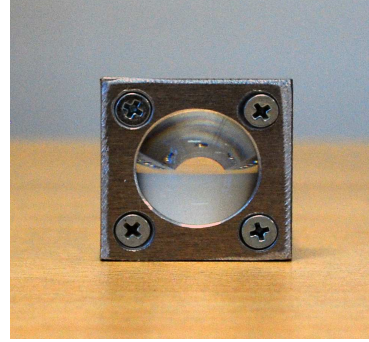
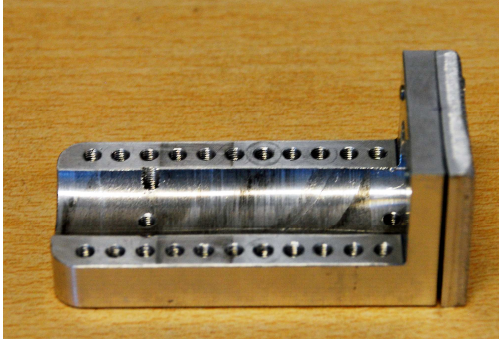
Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions. Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. ©2007 Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division  
 1125-1 Ichino-cho, Higashi-ku, Hamamatsu City, 435-8558 Japan, Telephone: (81) 53-434-3311, Fax: (81) 53-434-5184, www.hamamatsu.com  
 U.S.A.: Hamamatsu Corporation, 360 Foothill Road, P.O. Box 6910, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-291-0960, Fax: (1) 908-291-1218  
 Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Azzbegeleit, 10, D-82211 Hensching am Ammersee, Germany, Telephone: (49) 08152-3750, Fax: (49) 08152-2658  
 France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L., 19, Rue du Saule Trape, Parc du Moulin de Massey, 91862 Massey Cedex, France, Telephone: 33-(1) 69 53 71 00, Fax: 33-(1) 69 53 71 10  
 United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited, 2 Howard Court, 10 Tewkes Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire AL7 1BW, United Kingdom, Telephone: (44) 1707-294888, Fax: (44) 1707-325777  
 North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB, Sviddevägen 12, SE-171 41 Solna, Sweden, Telephone: (46) 8-609-031-00, Fax: (46) 8-609-031-01  
 Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L., Strada della Moia, 1/E, 20020 Anzese, (Milano), Italy, Telephone: (39) 02-935-81-733, Fax: (39) 02-935-81-741

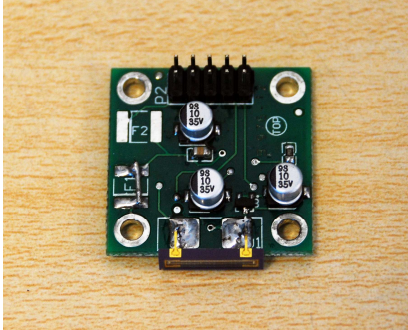
Cat. No. KPSD1002E04  
Nov. 2007 DN

**EK5: Kullanılan Mekanik ve Elektronik Donanımlar****Işık lekesi merkezleme aygıtı (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)****Mesafesi ölçülen nesne (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)****Kolimatör ve lazer diyot sürücü devresi tutucu aygıt (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**

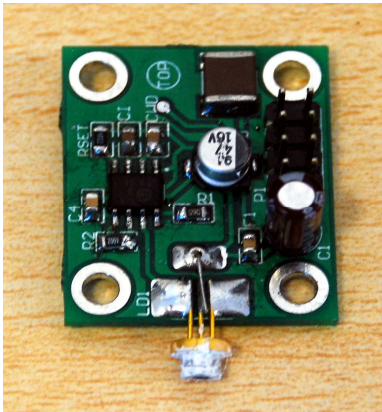
**Odaklayıcı mercek ve PSD aygıtı devre kartı tutucu aygıt (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**



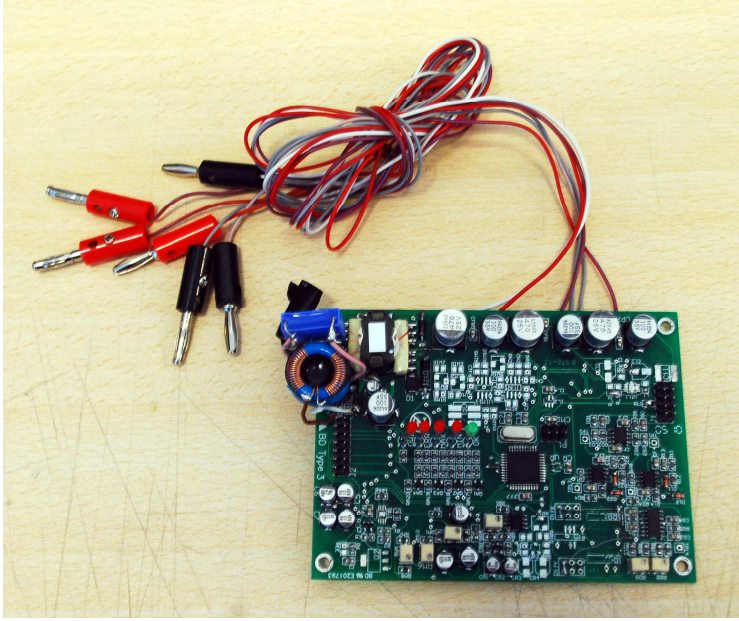
**PSD aygıtı devre kartı (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**



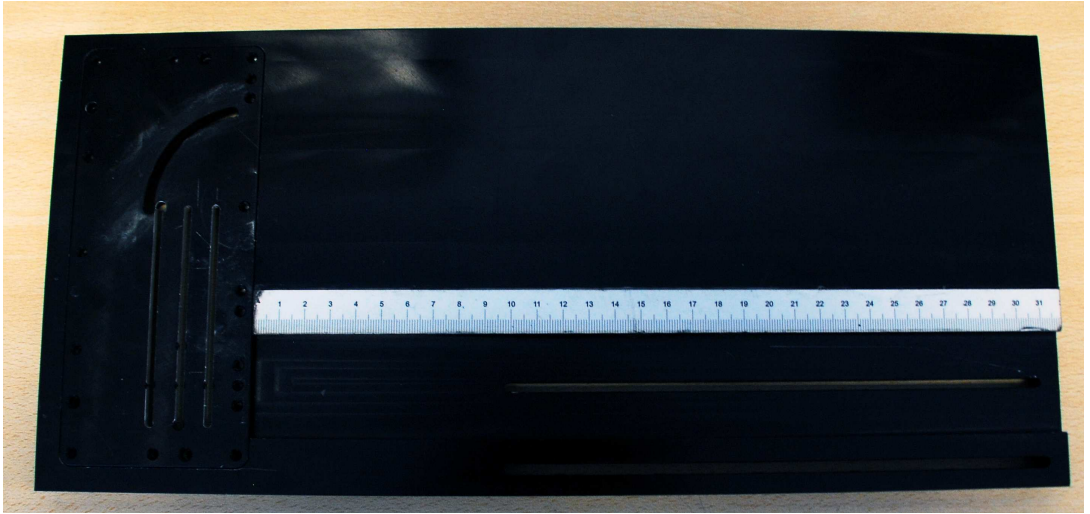
**Lazer diyot sürücü devre kartı (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**



**Haberleşme ve ara-yüzü devre kartı (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**



**Kalibrasyon tahtası (Tasarlayan Prof. Dr. Eldar MUSA)**



## **ÖZGEÇMİŞ**

Eren Kumbay 12 Haziran 1984'te Ankara'da doğmuştur. 1995 yılında Bursa Anadolu Lisesini kazandıktan sonra 2002 yılında Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü kazanmıştır. 2007 yılında mezun olduktan sonra Durmazlar Holding AR-GE bölümünde proje sorumlusu olarak görev yapmaya başlamıştır. 2007 yılının güz döneminde Uludağ Üniversitesi Elektronik Mühendisliğinde yüksek lisansa başlamıştır. Bekar olan Eren Kumbay Durmazlar Holding'te görevini sürdürmektedir.

## **TEŞEKKÜR**

Tez alıőması sűresince bilgi ve deneyimleriyle daima yol gűsteren, zorlukların aőılmasında ilgi ve desteęini esirgemeyen danıőmanım Sayın Prof. Dr. Eldar Musa'ya sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Sevgi ve desteęini her zaman yanımda hissettięim, beni yetiőtirip bugűnlere getiren anneme ve babama, canım ablam, meslektaőım ve hocam Őűlen'e ve bu hayatı bana daha anlamlı hale getiren sevgili Baőak'a teőekkűr ederim.