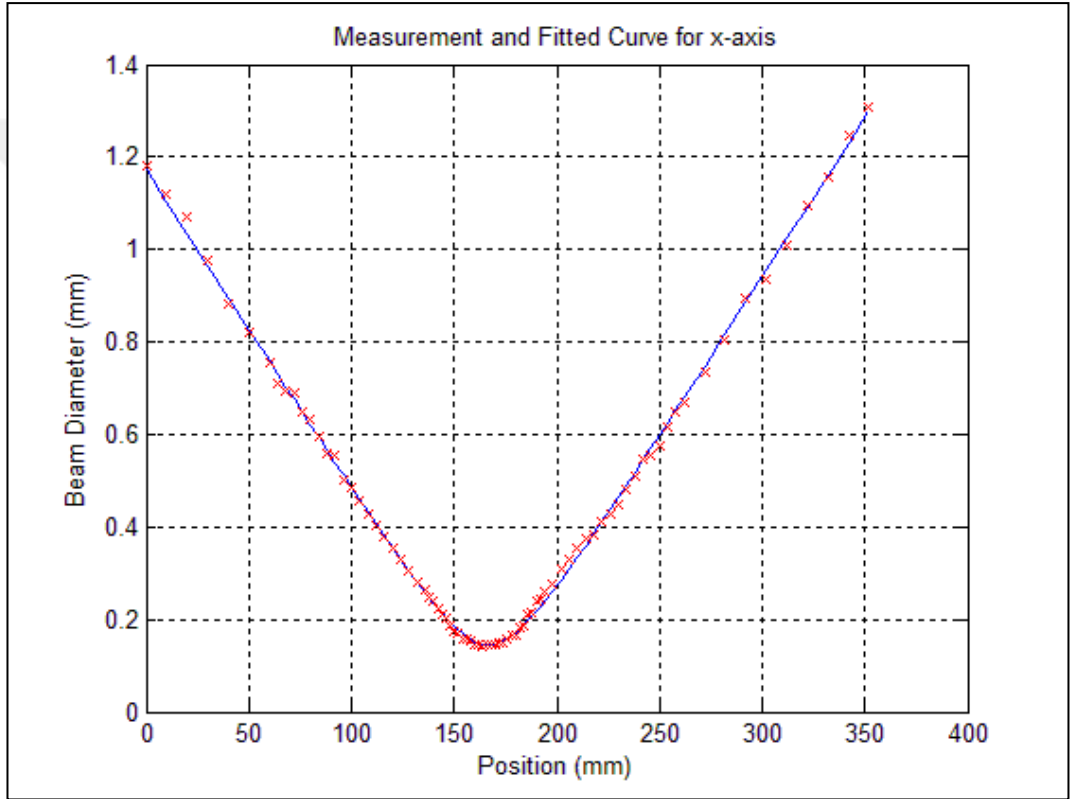


$$a = \frac{d_{\sigma 0}^2(z_0^2 + z_R^2)}{z_R^2} \quad (6.10)$$

Denklem (6.2) üç bilinmeyen içermektedir. Elimizde çok daha fazla sayıda veri olduğundan, bu bilinmeyenleri en küçük kareler metodu ile elde etmek gerekir. İlk olarak, üç deneysel $z_i, d_{\sigma i}$ veri ile başlangıç a,b,c değerleri elde edilir. Elde edilen a, b, c değerleri en küçük kareler metodu (least square curve fitting) için başlangıç tahmin değerleri olarak kullanılır.



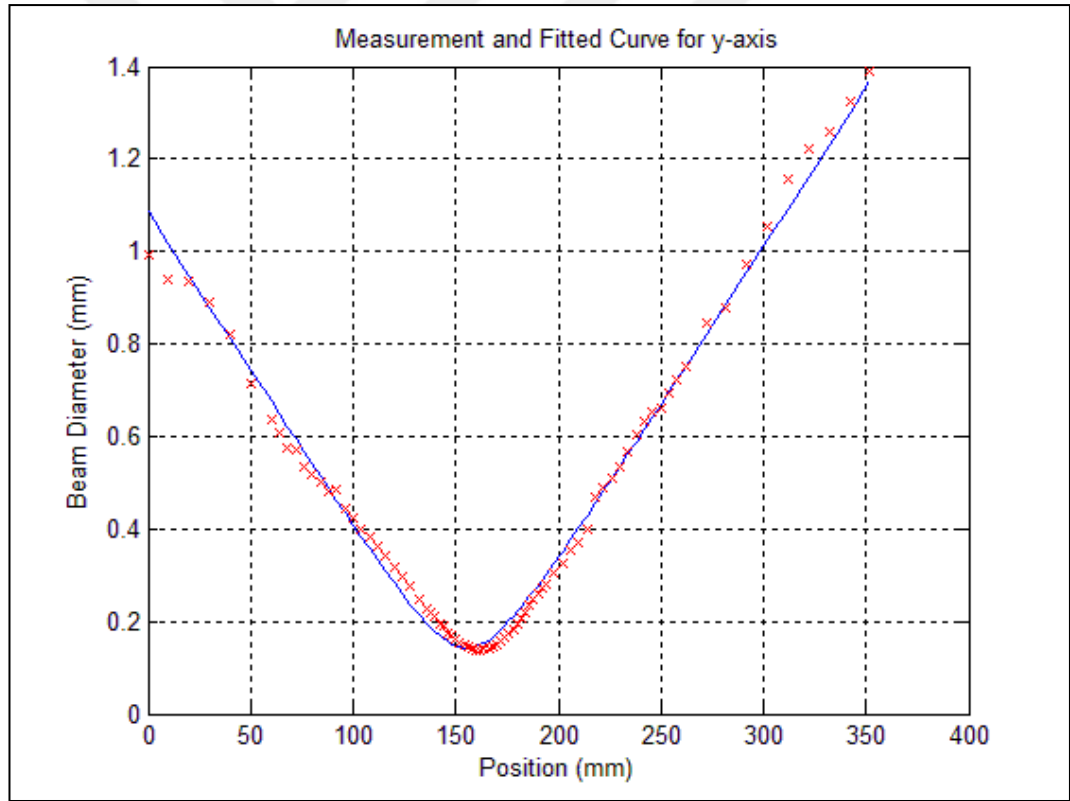
Şekil 6.3: x eksenli çap ölçümleri ve uydurulmuş hiperbolik eğri.

```

Initial guessed Laser Beam Parameters
Spot position  z0      = 167.747
Spot size      dSigma  = 0.121515
Rayleigh Range zR      = 17.2196
Divergence Angle divAngle = 0.00705679
Beam M2 Parameter M2    = 1.06429
*****
Initial guessed hyperbolic coefficients
Hyperbola a = 1.41604
Hyperbola b = -0.016707
Hyperbola c = 4.97983e-005
*****
LS Calculated hyperbolic coefficients
Hyperbola a_fitted = 1.37088
Hyperbola b_fitted = -0.0162024
Hyperbola c_fitted = 4.86095e-005
*****
LS Calculated Lazer Beam Parameters
Spot position fitted  z0_fit    = 166.658
Spot size fitted      dSigma_fit = 0.144057
Rayleigh Range fitted  zR_fit   = 20.6621
Divergence Angle fitted divAngle_fit = 0.00697205
Beam M2 Parameter fitted M2_fit  = 1.24658
*****

```

Şekil 6.4. x eksenini için MATLAB ölçüm sonuçları.



Şekil 6.5: y eksenini çap ölçümleri ve uydurulmuş hiperbolik eğri.

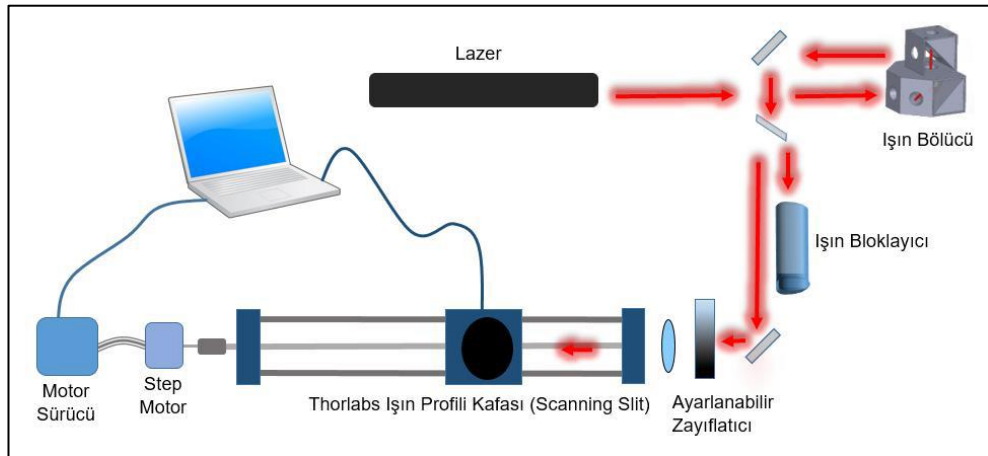
```

Initial guessed Laser Beam Parameters
Spot position  z0      = 147.158
Spot size      dSigma  = 0.159555
Rayleigh Range zR      = 23.6784
Divergence Angle divAngle = 0.00673841
Beam M2 Parameter M2    = 1.33442
*****
Initial guessed hyperbolic coefficients
Hyperbola a = 1.00875
Hyperbola b = -0.0133638
Hyperbola c = 4.54062e-005
*****
LS Calculated hyperbolic coefficients
Hyperbola a_fitted = 1.17794
Hyperbola b_fitted = -0.0148937
Hyperbola c_fitted = 4.78959e-005
*****
LS Calculated Laser Beam Parameters
Spot position fitted  z0_fit = 155.48
Spot size fitted      dSigma_fit = 0.141782
Rayleigh Range fitted  zR_fit = 20.4867
Divergence Angle fitted divAngle_fit = 0.00692068
Beam M2 Parameter fitted M2_fit = 1.21785

```

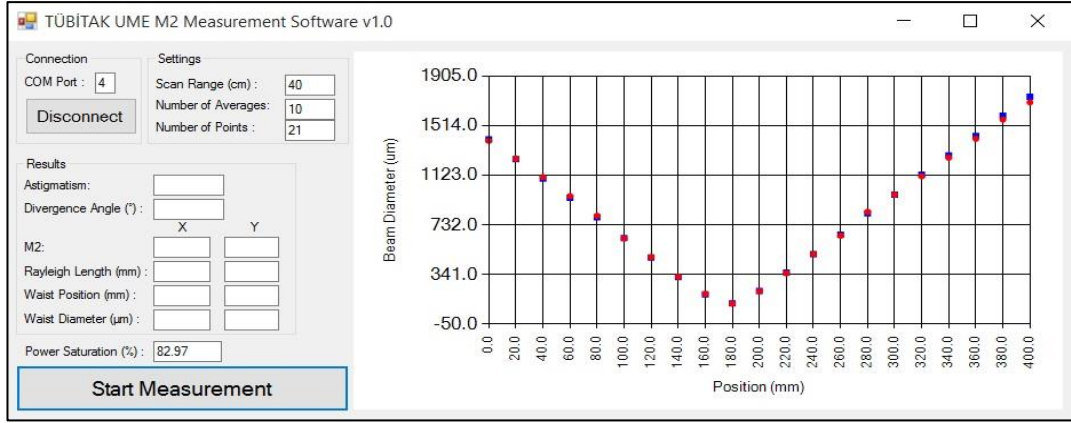
Şekil 6.6: y eksenini için MATLAB ölçüm sonuçları.

İlk denemelerde alınan sonuçlarda, CCD kamera olarak DataRay cihazının kullanılması ve hareketli tablanın milindeki problem yüzünden M^2 değerleri cihaz ölçümlerine göre fazla çıkmış bu sebeple, sistem tekrar revize edilmiştir. DataRay yerine Thorlabs ışın profil kafası (scanning slit) kullanılmış ve mil düzeltilmiştir.



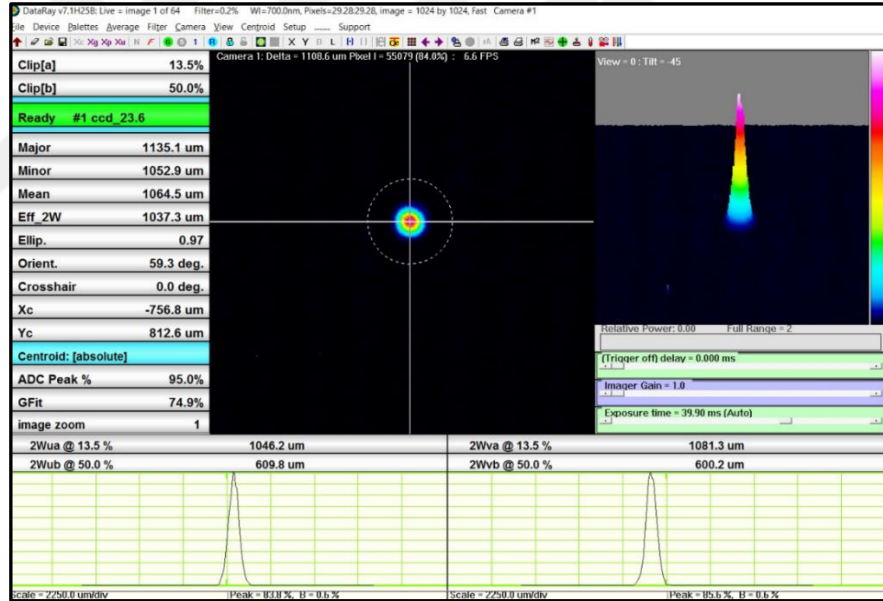
Şekil 6.7: Revize edilen M^2 ölçüm sisteminin şematik gösterimi.

Yukarıdaki sistemde, thorlabs cihazının ışın profil kafasına ek olarak ışın bölücülerin yer aldığı (beam dump) kullanılmıştır. Bu sayede lazer ışınının gücünün azaltılması hedeflenmiştir. Bu ölçümlerin tamamen yazılım kontrollü olarak yapılmasına yönelik geliştirilen M^2 programının ön yüzü Şekil 6.8 da verilmiştir.

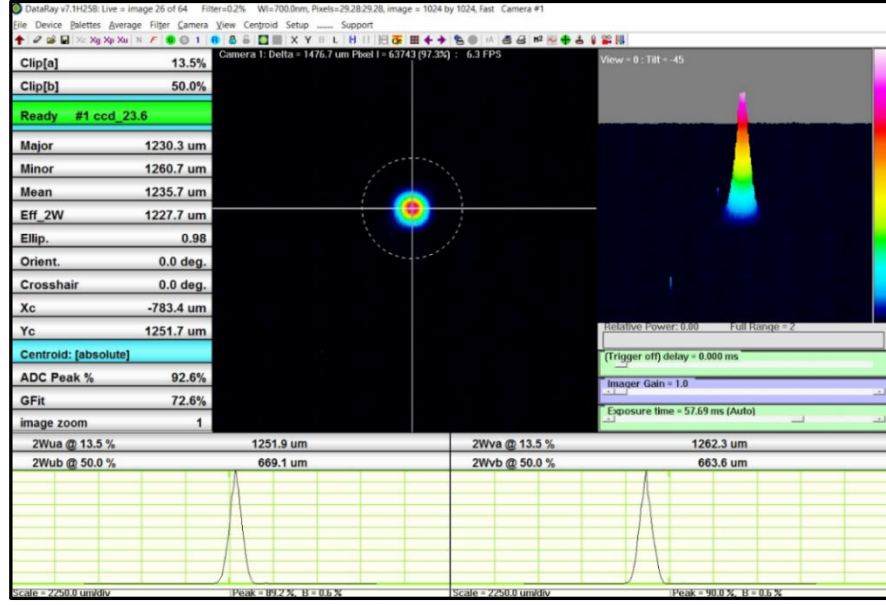


Şekil 6.8: M^2 Ölçümü için kullanılan yazılımın ekran görüntüsü.

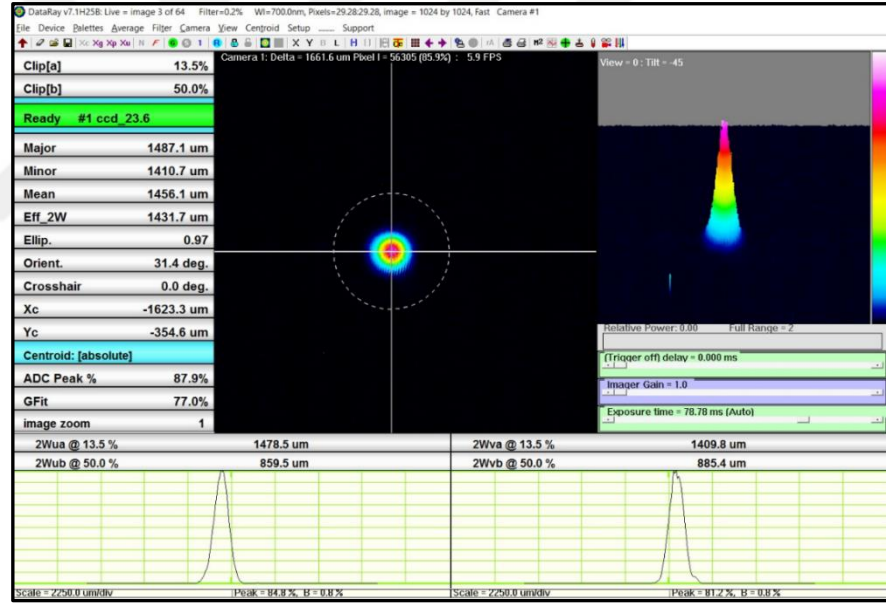
M^2 ölçümlerinde tekrarlanabilirlik çalışmalarına yönelik yapılan ölçüm sonuçları aşağıda listelenmiştir. İlk olarak DataRay kamera tabanlı ışın analizör kafası ile çap ölçüm tekrarlanabilirlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.



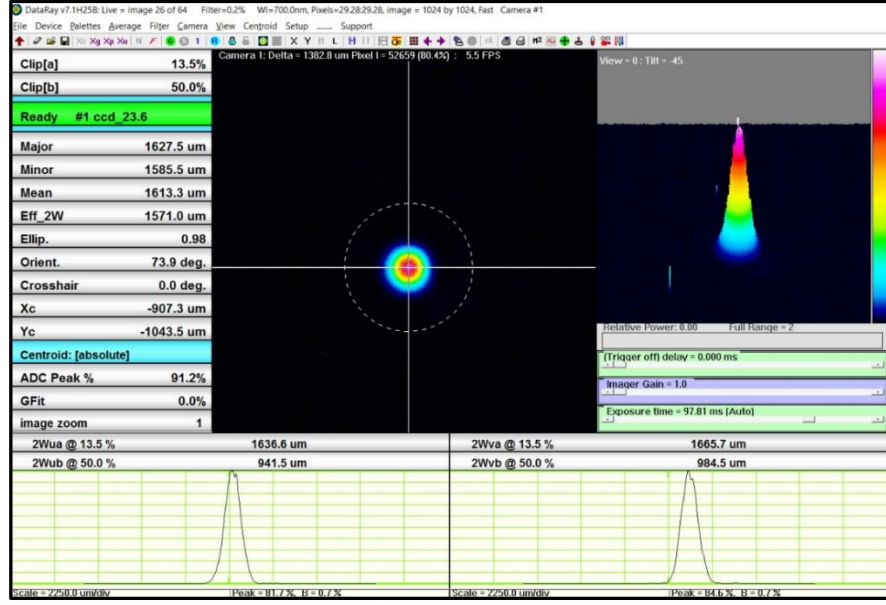
Şekil 6.9: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ile 20 cm’de alınan ölçüm ekranı.



Şekil 6.10: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ile 40 cm’de alınan ölçüm ekranı.



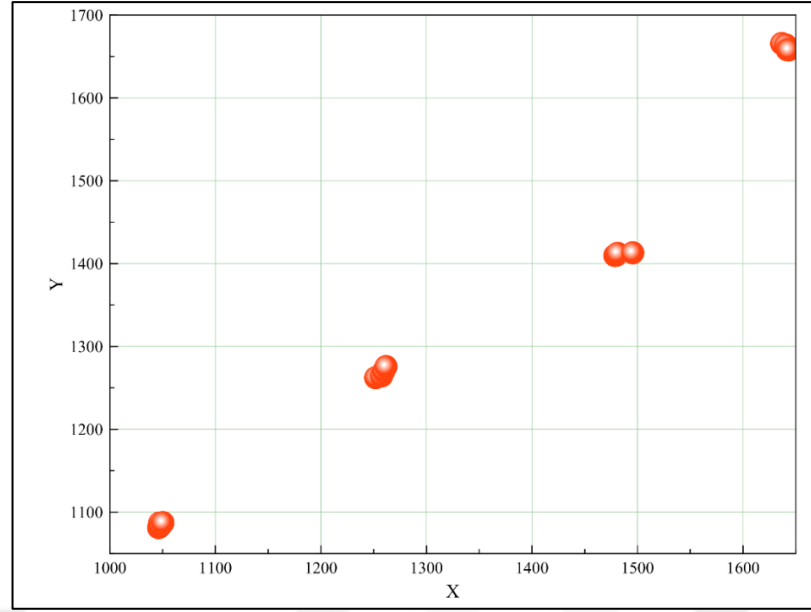
Şekil 6.11: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ile 60 cm’de alınan ölçüm ekranı.



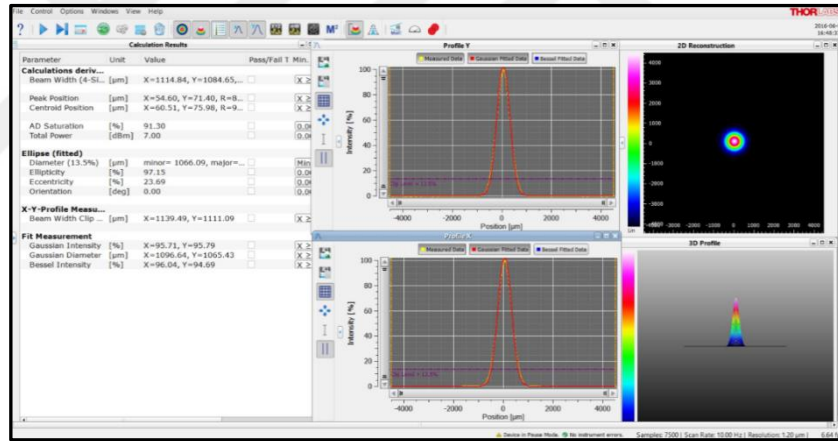
Şekil 6.12: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ile 80 cm’de alınan ölçüm ekranı.

Tablo 6.1: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ölçüm tekrar verileri.

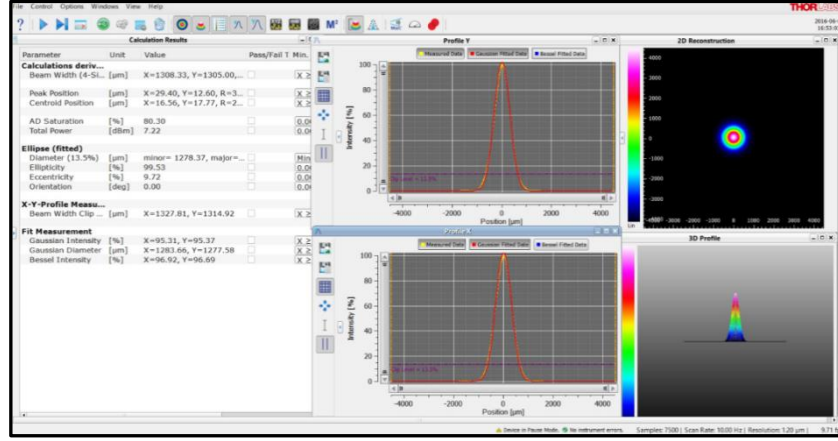
DATARAY (µm)							
20cm (1.Ölçüm)		20cm (2.Ölçüm)		20cm (3.Ölçüm)		20cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1046.2 µm	1081.3 µm	1047.2 µm	1086.9 µm	1048.2 µm	1083.7 µm	1050.3 µm	1087.3 µm
40cm (1.Ölçüm)		40cm (2.Ölçüm)		40cm (3.Ölçüm)		40cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1251.9 µm	1262.3 µm	1257.5 µm	1264.4 µm	1259.6 µm	1270.3 µm	1261.7 µm	1275.7 µm
60cm (1.Ölçüm)		60cm (2.Ölçüm)		60cm (3.Ölçüm)		60cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1478.5 µm	1409.8 µm	1479.5 µm	1409.9 µm	1481.1 µm	1412.4 µm	1495.5 µm	1413.1 µm
80cm (1.Ölçüm)		80cm (2.Ölçüm)		80cm (3.Ölçüm)		80cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1636.6 µm	1665.7 µm	1640.5 µm	1664.0 µm	1641.8 µm	1658.2 µm	1643.2 µm	1657.9 µm



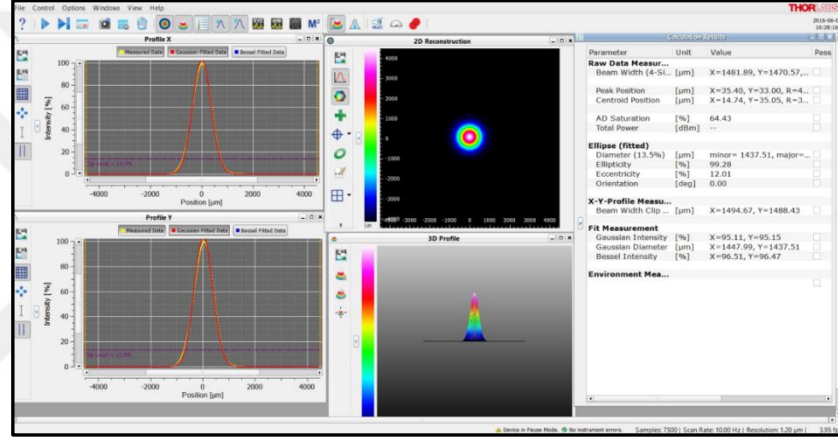
Şekil 6.13: Dataray kamera tabanlı ışın analizör kafası ölçüm tekrar grafiği. Diğer bir ölçüm cihazı olan BP209-VIS/M Scanning Slit ışın analizör kafası ile çap ölçümü yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.



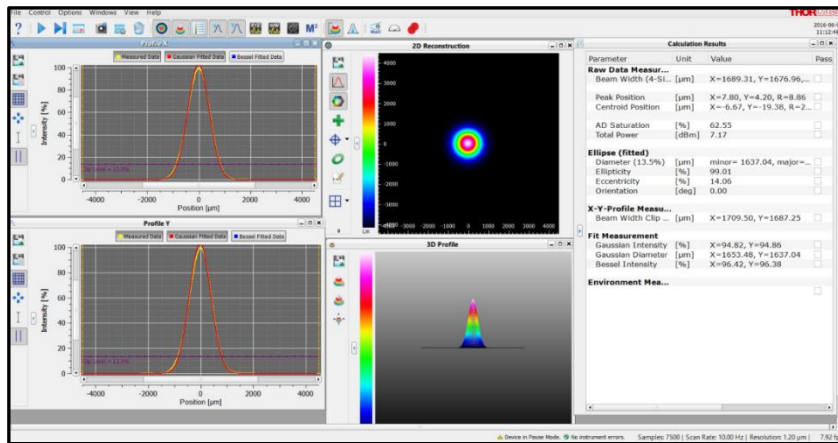
Şekil 6.14: BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ile lazer ışınına 20 cm uzaklıkta alınan ölçüm ekranı.



Şekil 6.15: BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ile lazer ışınına 40 cm uzaklıkta alınan ölçüm ekranı.



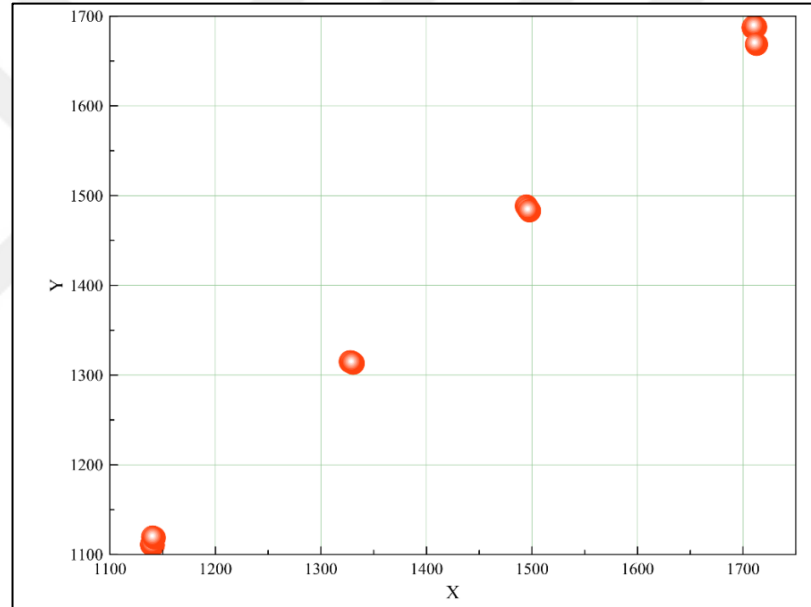
Şekil 6.16: BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ile lazer ışınına 60 cm uzaklıkta alınan ölçüm ekranı.



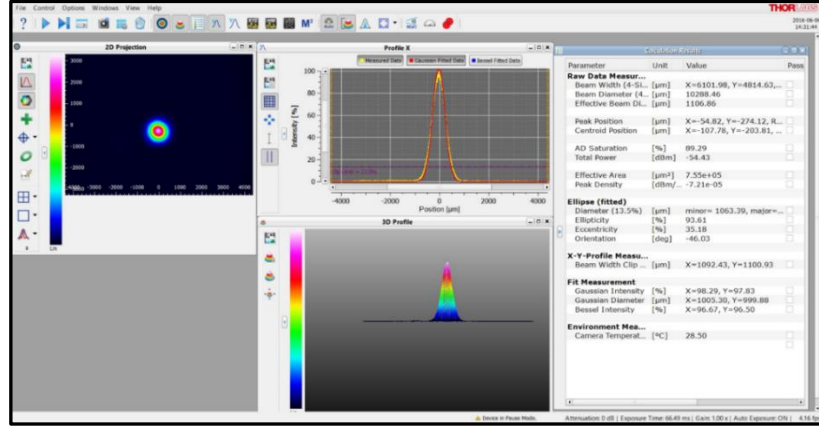
Şekil 6.17:BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ile lazer ışınına 80 cm uzaklıkta alınan ölçüm ekranı.

Tablo 6.2: BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ölçüm tekrar verileri.

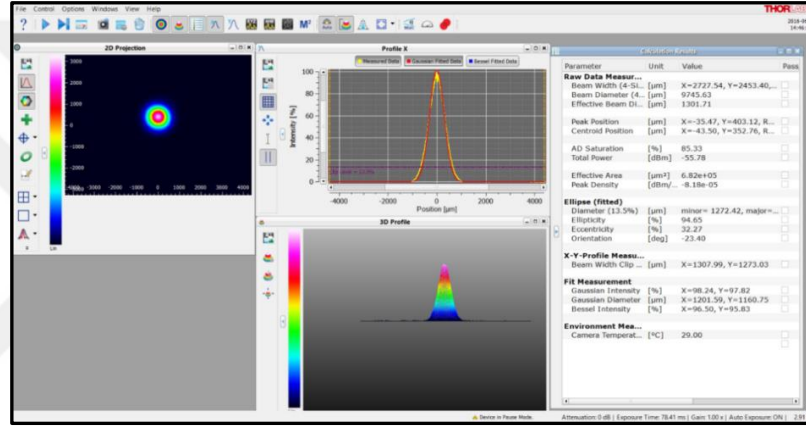
BP209-VIS/M IŞIN PROFİL KAFASI (µm)							
20cm (1.Ölçüm)		20cm (2.Ölçüm)		20cm (3.Ölçüm)		20cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1139.5 µm	1111.1µm	1140.5 µm	1119.5 µm	1141.3 µm	1110.6 µm	1142.1µm	1118.7 µm
40cm (1.Ölçüm)		40cm (2.Ölçüm)		40cm (3.Ölçüm)		40cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1327.8 µm	1314.9 µm	1328.7 µm	1314.7 µm	1329.5 µm	1314.1 µm	1330.6 µm	1313.2 µm
60cm (1.Ölçüm)		60cm (2.Ölçüm)		60cm (3.Ölçüm)		60cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1494.7 µm	1488.4 µm	1495.4µm	1487.2 µm	1496.3µm	1485.2 µm	1497.7 µm	1482.9 µm
80cm (1.Ölçüm)		80cm (2.Ölçüm)		80cm (3.Ölçüm)		80cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1709.5 µm	1687.3 µm	1710.3 µm	1688.6µm	1711.9 µm	1687.8 µm	1712.7 µm	1668.4 µm



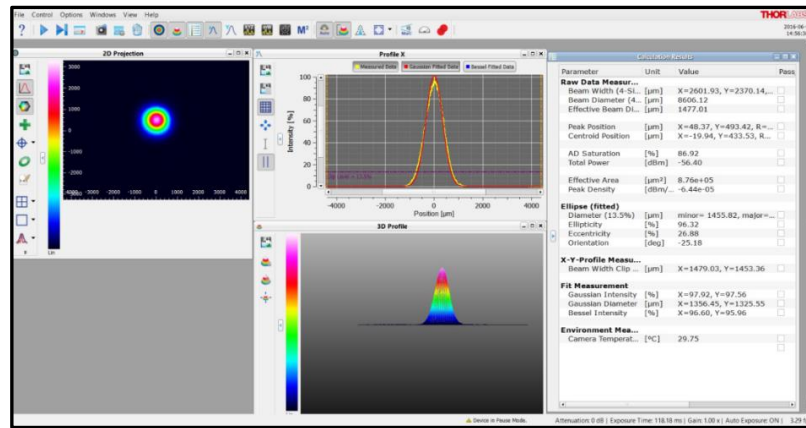
Şekil 6.18. BP209-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ölçüm tekrar grafiği.
Diğer bir ölçüm cihazı olan BC106N-VIS/M Scanning Slit ışın analizör kafası ile çap ölçümü yapılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.



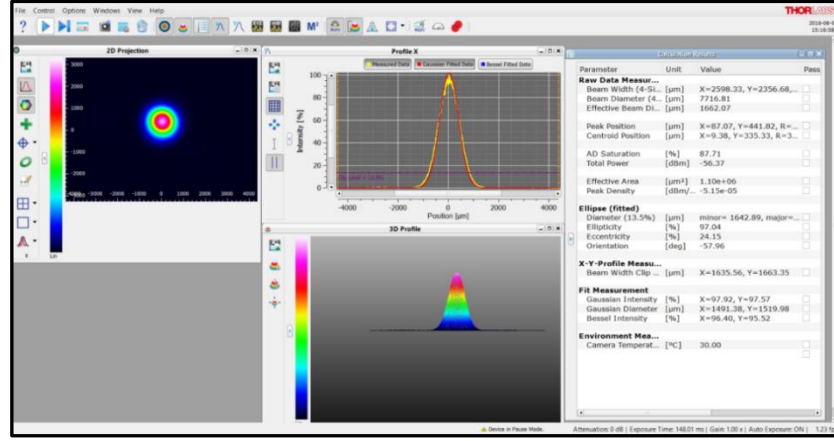
Şekil 6.19: BC106N-VIS/M Kamera tabanlı ışın analizör kafası ile Lazer Işımına 20cm Uzaklıkta Alınan Ölçüm Ekranı.



Şekil 6.20: BC106N-VIS/M Kamera tabanlı ışın analizör kafası ile Lazer Işımına 40cm Uzaklıkta Alınan Ölçüm Ekranı.



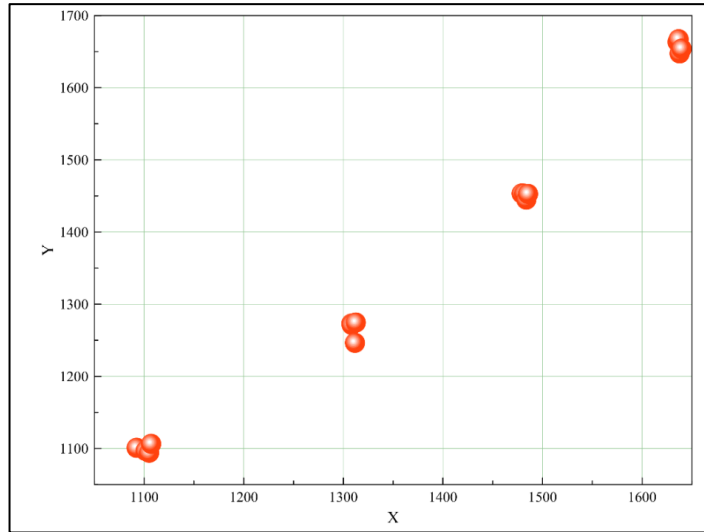
Şekil 6.21: BC106N-VIS/M Kamera tabanlı ışın analizör kafası ile Lazer Işımına 60cm Uzaklıkta Alınan Ölçüm Ekranı.



Şekil 6.22: BC106N-VIS/M Kamera tabanlı ışın analizör kafası ile Lazer Işımına 80cm Uzaklıkta Alınan Ölçüm Ekranı.

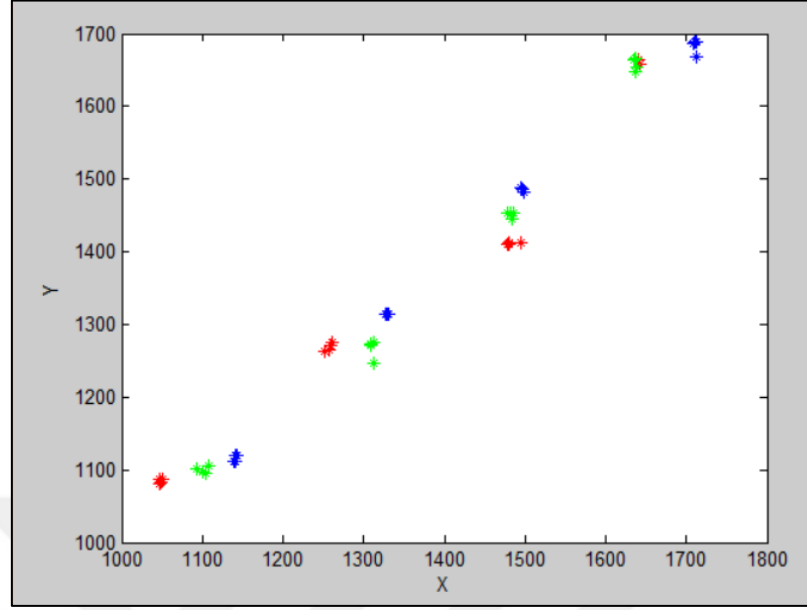
Tablo 6.3: BP106N-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ölçüm tekrar verileri.

BC106N-VIS/M IŞIN PROFİL KAFASI (µm)							
20cm (1.Ölçüm)		20cm (2.Ölçüm)		20cm (3.Ölçüm)		20cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1092.4 µm	1100.9 µm	1101.3 µm	1096.7 µm	1105.0 µm	1094.1 µm	1107.0 µm	1106.4 µm
40cm (1.Ölçüm)		40cm (2.Ölçüm)		40cm (3.Ölçüm)		40cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1307.9 µm	1273.0 µm	1308.3 µm	1271.3 µm	1311.6 µm	1246.4 µm	1312.5 µm	1274.5 µm
60cm (1.Ölçüm)		60cm (2.Ölçüm)		60cm (3.Ölçüm)		60cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1479.0 µm	1453.3 µm	1481.6 µm	1453.1 µm	1483.7 µm	1444.9 µm	1485.4 µm	1452.8 µm
80cm (1.Ölçüm)		80cm (2.Ölçüm)		80cm (3.Ölçüm)		80cm (4.Ölçüm)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1635.5 µm	1663.3 µm	1636.6 µm	1667.1 µm	1637.6 µm	1647.5 µm	1639.6 µm	1654.0 µm



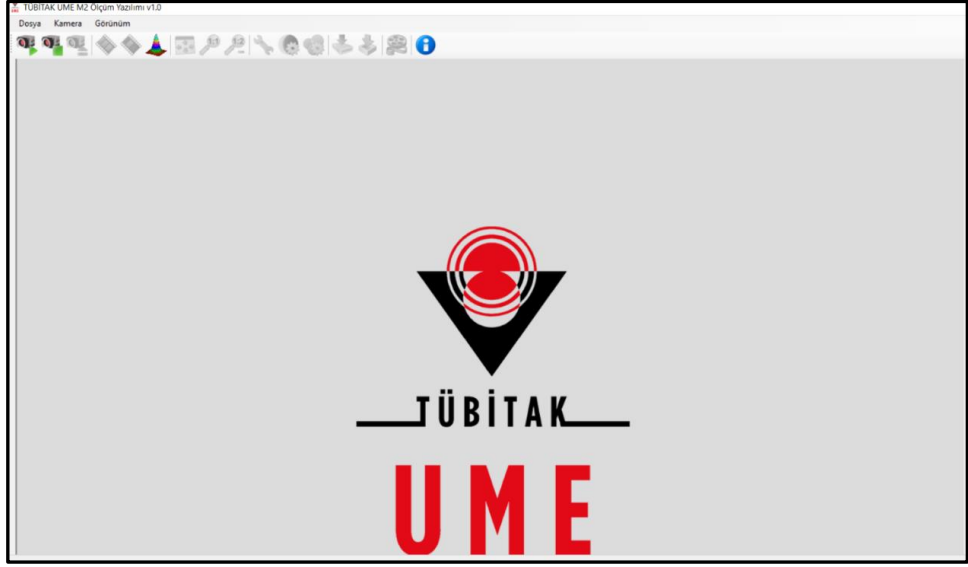
Şekil 6.23. BC106N-VIS/M Scan Slit ışın analizör kafası ölçüm tekrar grafiği.

Üç cihazdan alınan verilen, aşağıdaki şekilde tek grafikte gösterilmiştir.

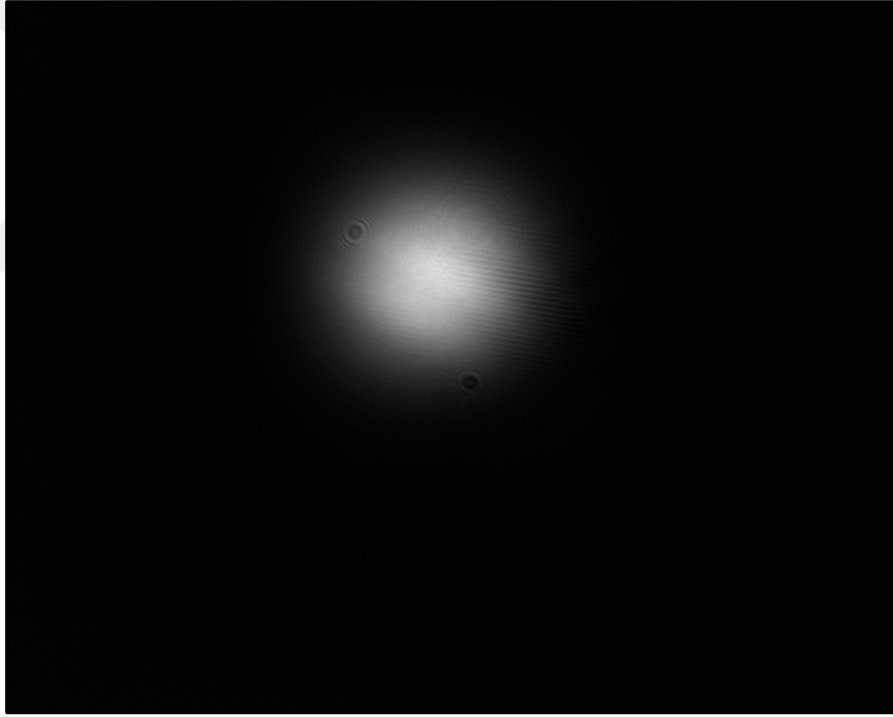


Şekil 6.24: Üç cihazdan alınan ışın çapı verilerinin karşılaştırılması.(kırmızı:dataray ile alınan ölçümler, mavi: scan slit ışın profili ile alınan ölçümler, yeşil: kamera tabanlı ışın profili ile alınan ölçümler.)

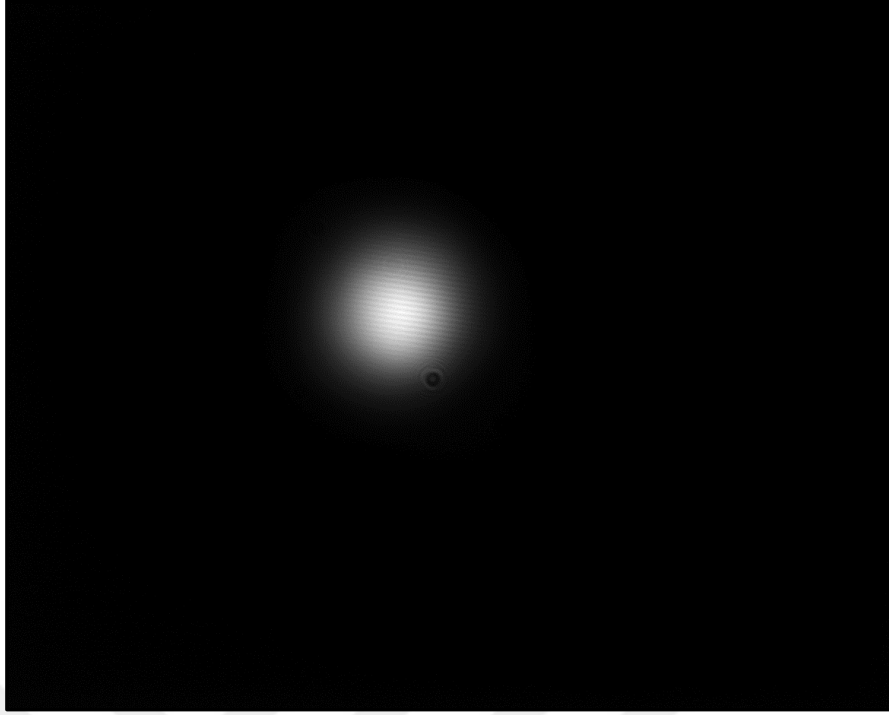
Yapılan bir diğer çalışma ise, Thorlabs DCC3240N USB 3.0 Near IR Sensor CMOS kamera lazer karakterizasyonu için devreye alınmıştır. Bu amaçla kamera ile veri iletişimi ve kamera görüntüsünden, lazer merkezi ve lazer çapını elde edecek yazılımlar hazırlanmıştır. Kamera M^2 ölçüm sistemine yerleştirilmiş ve ölçümler alınmıştır. Ölçüm yazılımının ara yüzü ve lazere 40 cm uzaklıktaki ışın profili görüntüsü aşağıda verilmiştir.



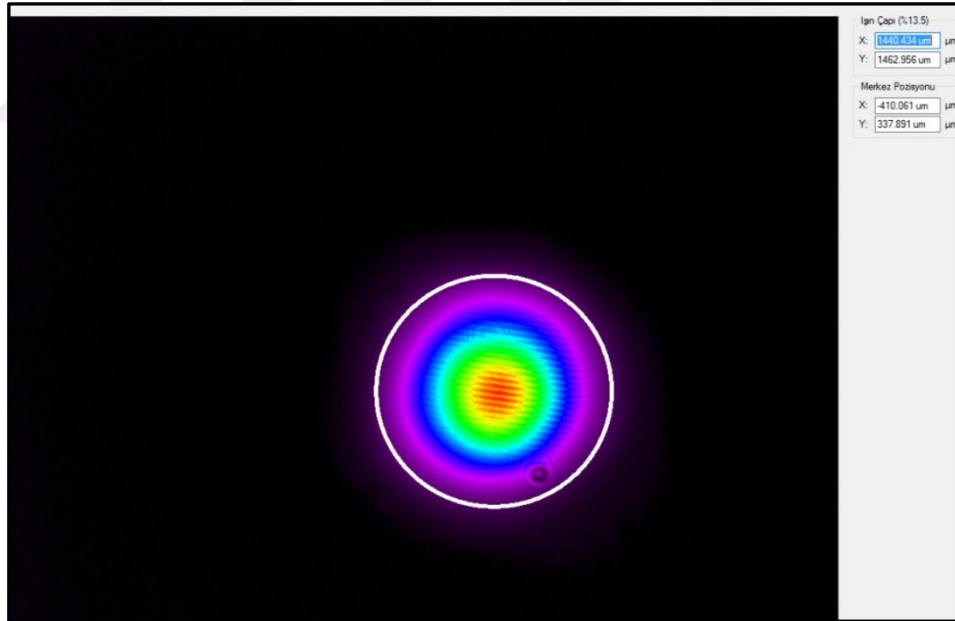
Şekil 6.25: Ölçüm yazılımı arayüzü.



Şekil 6.26: Kamera yazılımı ile alınan ham görüntü.



Şekil 6.27: Ham verinin normalize görüntüsü.

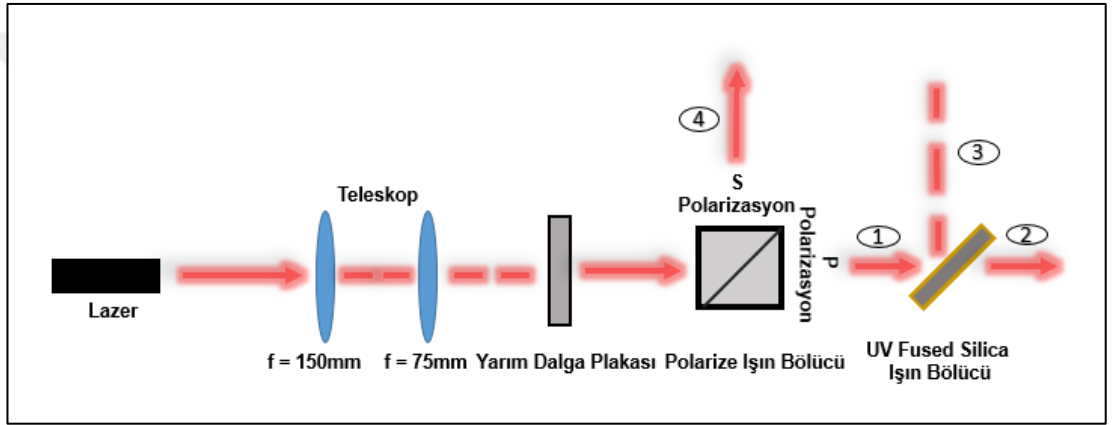


Şekil 6.28: Datalar sonucu oluşturulan lazere 40 cm uzaklıktaki ışın profili.

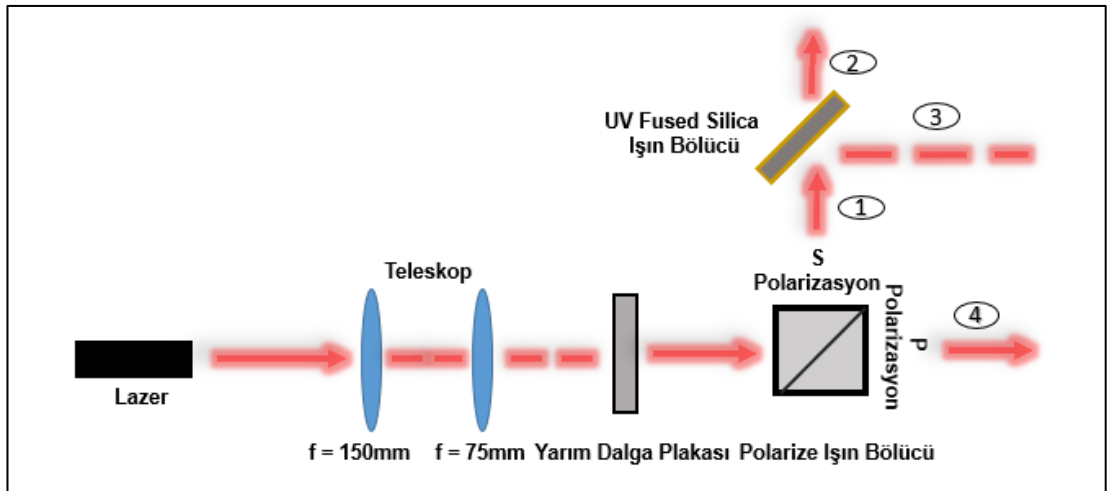
6.2. Lazer Işın Güç Ölçümleri

6.2.1. UV Fused Silica Camda Işın Bölme Oranı Ölçümü

5. bölümde, lazer ışın güç ölçümleri anlatılmıştı, bu kapsamda, yapılan ilk çalışma ışın bölme yöntemi kullanılarak güç ölçmek için yapılan çalışmalardır. Bu çalışma için 1 Watt çıkış gücünde, 1064 nm dalga boyunda sürekli dalga olan Nd:YAG lazer kullanılmıştır. Işın çapı yaklaşık olarak 1.5 mm'dir ve M^2 değeri 1.5'tan küçüktür.

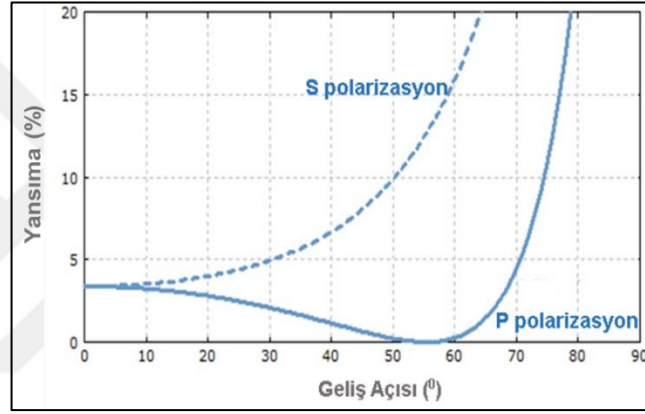


Şekil 6.29: Ölçüm düzeneği, paralel eksen.



Şekil 6.30: Ölçüm düzeneği dik eksen.

Şekil 6.29 ve 6.30’da, güç ölçümü için iki düzenek kurulmuştur. Nd:YAG lazerden çıkan ışının mesafesinin uzamasıyla büyümesinden dolayı 150 mm ve 75 mm lik mercekler ile yapılan teleskop sayesinde küçültülerek dalga plakasına gönderilmiştir. PBS103 kodlu polarize ışın bölücünün üzerine düşen ışığın gücü, dalga plakası ile maksimum güce getirilmiştir. Bu sebepten şekil 6.27’de yere paralel devam eden ışığın gücü maksimum haldeyken, dik olarak devam eden ışığın gücü minimumdur. Şekil 6.29’a göre fused silika ışın bölücüye gelen ışığın gücü 1 konumunda 881 mW’tır. Fused silika ışın bölücüden geçtikten sonra 2 durumundayken ki gücü 874 mW’tır. P-polarizasyonu ve s-polarizasyonunun geliş açılarına göre yansıma yüzdeleri gösterilmiştir.



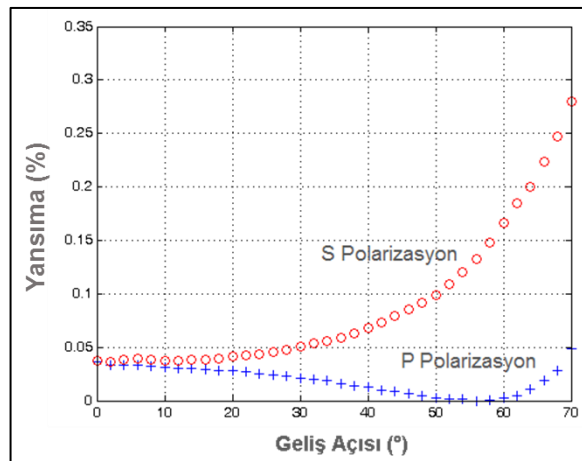
Şekil 6.31: 1064 nm dalgaboyunda, havadan geliş açısına göre fused-silika yüzeyin literatürdeki fresnel yansıma grafiği.

Fused-Silika ışın bölücü ölçüm düzeneklerinde 45° ‘ lik açı ile yerleştirilmiştir. Yukarıdaki grafikten alınan verilere göre toplam yansıma yüzdesi hesaplandığında, s polarizasyonu için toplam yansıma %15,7 olurken, p polarizasyonu için toplam yansıma %1,3 ‘tür. Güç ölçümleri, Thorlabs PM200 güç ölçüm cihazı ve Melles Griot 13PEM001 güç ölçüm cihazı ile ayrı ayrı ölçülerek tekrarlanmıştır. Alınan sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 6.4: Güç ölçüm sonuçları.

Güç Ölçümü (mW)	THORLABS PM200				MELLES GRIOT 13PEM001			
	1	2	3		1	2	3	
P polarizasyon	880 mW	866 mW	5.6 mW	5.6 mW	884 mW	871 mW	5.2 mW	5.6 mW
	876 mW	868 mW	4 mW	4 mW	880 mW	870 mW	4.5 mW	5 mW
	887 mW	872 mW	6.2 mW	6.2 mW	890 mW	880 mW	2 mW	8 mW
S polarizasyon	886 mW	756 mW	80 mW	50 mW	870 mW	752 mW	60 mW	50 mW
	900 mW	768 mW	70 mW	60 mW	820 mW	760 mW	30 mW	20 mW
	880 mW	768 mW	80 mW	40 mW	860 mW	786 mW	40 mW	50 mW

Işın bölme oranı ölçümleri, göreceli ölçümlerdir ve bu yüzden ölçümde kullanılan dedektörlerin mutlak doğruluğu ölçümler için önemli değildir. Bu tür bir ölçümde en önemli belirsizlik kaynağı, ölçüm dedektörünün doğrusallığından gelen hatadır. Bu hata özellikle ölçüm dedektörünün 1 ve 3 konumları arasında önemli olacaktır. Ölçüm dedektörü belirsizliğine gelen diğer katkılardan, dalga boyu bağımlı davranış ve bu davranışta dalgalanmalar gibi etmenlerin katkısı etkisi bu ölçümlerde son derece azdır. Geliş açısına göre yansıma değerlerinin verildiği grafik, laboratuvarında yapılan ölçümler sonucunda da elde edilmiştir. Hareketli tabla üzerine konulan fused silica ışın bölücünün farklı açılarda taranması sonucunda benzer ölçüm sonucuna ulaşılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen grafik;



Şekil 6.32: Ölçümlerde kullanılan 1 watt gücündeki 1064 nm dalgaboyundaki Nd:YAG lazerle alınan sonuçlar, literatürdeki 1064 nm lazer için verilen grafiği doğrulamaktadır.

6.2.2. Düşük Güç Lazer Kalorimetre İmalatı ve Kalibrasyonu

Bir diğer güç ölçme yöntemi olan kalorimetre için Ek B’de anlatılan doğrusal kalorimetre kuramından faydalanarak aşağıdaki soğuma ve ısınma denklemlerine ulaşılabileceği anlatılmıştı.

$$\Delta T = \Delta T(0) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (6.11)$$

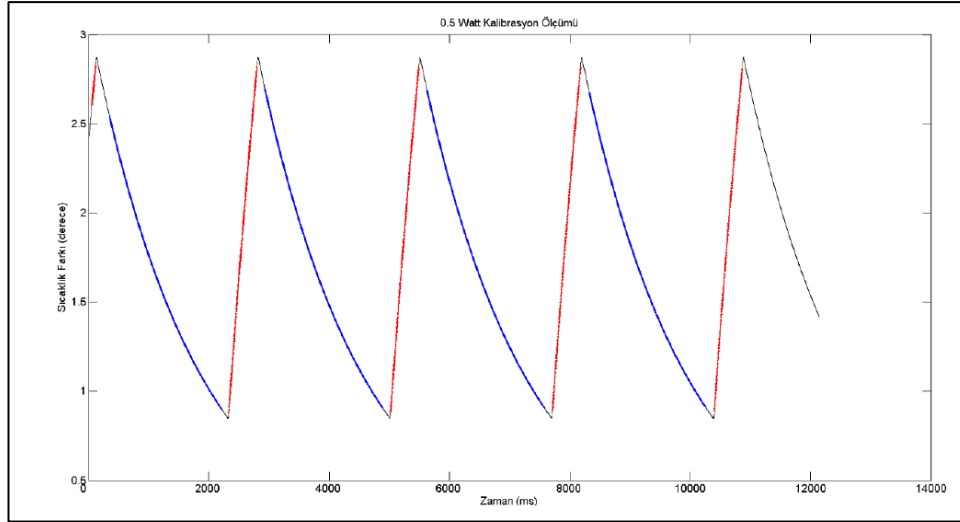
$$\Delta T = \frac{P_i \tau}{mc} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)\right) + \Delta T(0) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (6.12)$$

$$\Delta T = \left(\Delta T(0) - \frac{P_i \tau}{mc}\right) * \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + \frac{P_i \tau}{mc} \quad (6.13)$$

Yukarıdaki formüllerde dikkat edilirse, soğuma denkleminde soğuma zaman sabiti ve ısınma denkleminde ise mc çarpımı bilinmeyen değerlerdir. Soğuma eğrilerinde soğuma zaman sabiti ve ısınma eğrisinden ise mc çarpımı elde edilir. Bu denklemlerde soğuma zaman sabiti τ aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Bu birimin tersini ise soğuma katsayısı olarak adlandıralım.

$$\frac{hA}{mc} = \frac{1}{\tau} = \text{soğuma katsayısı} \quad (6.14)$$

Düşük güç lazer kalorimetresinde 0.5 Watt, 1 Watt, 2 Watt, 2.5 Watt, 3.5 Watt, 4 Watt ve 4.5 Watt ısıtıcı güçlerinde ölçümler alınmıştır. Bu ölçümler sırasında, sıcaklık 21 derecenin altına düştüğünde ısıtıcıya güç uygulanmakta, sıcaklık 22.5 derecenin üzerine çıkıldığında güç kesilmektedir. Peş peşe çok sayıda ölçüm alabilmek amacı ile, elektronik kutuya bir röle birimi eklenmiş ve bu güç uygulama ve kesme işlemi otomatik olarak yapılmıştır. Aşağıda ısıtıcıya 0.5 Watt güç uygulanıp daha sonra güç uygulanması durdurularak elde edilen bir dizi ölçüm aşağıdaki tabloda verilmiştir. Grafikte siyah görülen bölgeler hesaplamalarda kullanılmayan ısınmadan soğumaya veya soğumadan ısınmaya geçiş bölgeleridir.



Şekil 6.33: Kalorimetrenin ısınma ve soğuma eğrileri.

Şekil 6.33’de verilen eğrilerde, her bir soğuma bölgesinden (mavi renkli kısımlar) soğuma zaman sabiti ve her bir ısınma bölgesinden, ısınma gücü hesabı yapılmaktadır. Böylece kalorimetrenin istatistiksel olarak değerlendirilmesine yönelik çok sayıda veri elde edilebilmektedir. Aşağıda 7 farklı deneyden elde edilen soğuma katsayıları tablo halinde sunulmuştur. Bu deneylerde farklı ısıtma güçleri kullanıldığında sistem soğuma katsayısının ısıtma gücüne bağlı olarak değişip değişmediği kontrol edilmiştir.

Tablo 6.5: Farklı ısıtma güçlerinde soğuma katsayıları, ortalamaları ve standart sapmaları.

Elektrik Güç-W	Soğuma Katsayısı ($1/\tau$)($\times 10^{-3}$)								Ortalama ($\times 10^{-3}$)	Std Sapma ($\times 10^{-3}$)
0.4997	0.5612	0.5603	0.5608	0.5603					0.5606	0.0004319
1.001	0.5507	0.5534	0.5558	0.5569	0.5592				0.5552	0.003244
2.065	0.5555	0.5578	0.5587	0.56	0.559				0.5582	0.001725
2.509	0.5585	0.5599	0.5624	0.5635	0.5645	0.5646	0.5654	0.5661	0.5631	0.002676
3.5	0.5644	0.5654	0.567	0.569	0.5693	0.5691			0.5674	0.002119
4.003	0.5618	0.5623	0.5594	0.56	0.5612				0.5609	0.001207
4.508	0.5709	0.5708	0.5708	0.5713					0.5709	0.0002661

Tüm setlerin ortalama değeri ve birleşik standart sapması aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\bar{y} = \frac{n_1 * \bar{y}_1 + n_2 * \bar{y}_2 + \dots + n_m * \bar{m}}{n_1 + n_2 + \dots + n_m} \quad (6.15)$$

$$s = \sqrt{\frac{n_1 * s_1^2 + n_1 * (\bar{y}_1 - \bar{y})^2 + n_2 * s_2^2 + n_2 * (\bar{y}_2 - \bar{y})^2 + \dots + n_1 * s_m^2 + n_m * (\bar{y}_m - \bar{y})^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_m}} \quad (6.16)$$

Buna göre birleştirilmiş ortalama soğuma katsayısı 5.62351 e-004 ve birleştirilmiş standart sapma 2.07987e-006 olarak elde edilir. Bu standart sapma değeri ortalama etrafında yaklaşık % 0.37'lik (100 x (2.07987e-006 / 5.6203e-004) bir dağılımı göstermektedir. Elde edilen bu ortalama değer ısınma denkleminde uygulanarak ısınma eğrilerinden mc çarpımı elde edilir.

Tablo 6.6: Isınma eğrilerinden elde edilen mc çarpımı, ortalamaları ve standart sapmaları.

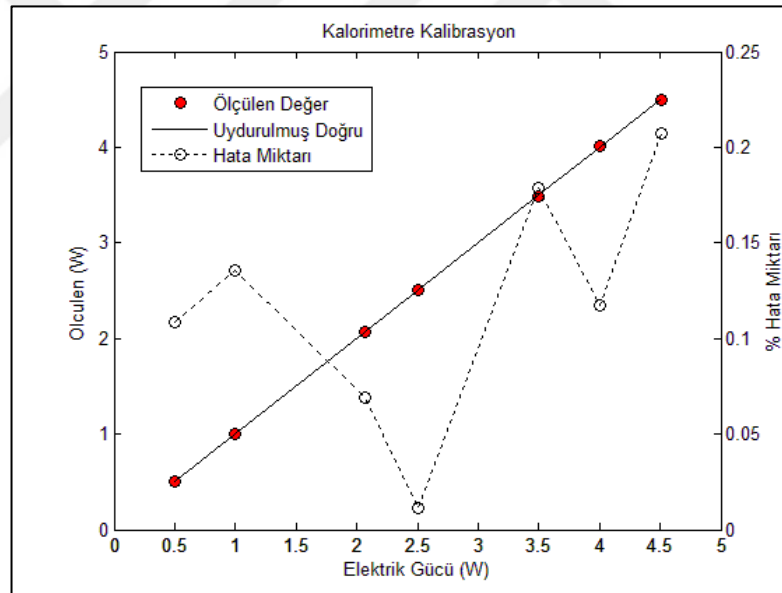
Elektrik Güç-W	Mc çarpımı (x10 ⁻³)								Ortalama (x10 ⁻³)	Std Sapma (x10 ⁻³)
0.4997	54.04	54.03	54.03	54.02					54.03	0.006793
1.001	53.96	54	54.02	54.05	54.06				54.02	0.03838
2.065	54.01	54.1	54.03	54.01	54.12				54.05	0.05106
2.509	54.08	54.14	54.01	54.14	54.07	54.07	54.13	54.13	54.1	0.04692
3.5	54.23	54.09	54.08	54.13	54.28	54.34			54.19	0.1069
4.003	54.12	54.04	54.45	53.36	54.19				54.03	0.4046
4.508	54.58	54.38	54.28	53.58					54.21	0.4329

Yukarıdaki sonuçlardan, birleştirilmiş mc ortalama, 0.054092 ve birleştirilmiş mc standart sapma 2.127545e-004 elde edilir. Elde edilen ortalama soğuma katsayısı ve ortalama mc değerinden ısıtıcıya uygulanan güç çözümleri bulunabilir. mc çarpımı değerleri ortalama değer etrafında %0.4 lük bir dağılım göstermektedir.

Tablo 6.7: Sonuçlar, ortalamaları ve standart sapmaları.

Elektrik Güç-W	Çözümler								Ort.	Std. Sapma	% Hata
0.4996	0.5001	0.5001	0.5002	0.5002					0.5002	0.0001	0.1085
1.0014	1.0038	1.0031	1.0028	1.022	1.0021				1.0028	0.0007	0.1356
2.0653	2.0684	2.065	2.0675	2.0686	2.0643				2.0668	0.0019	0.0688
2.5086	2.5093	2.5062	2.5123	2.5065	2.5095	2.5097	2.5067	2.5068	2.5084	0.0021	0.0112
3.4999	3.4913	3.5003	3.5009	3.4974	3.488	3.4842			3.4937	0.0068	0.1788
4.0032	4.0011	4.007	3.9771	4.058	3.996				4.0079	0.0302	0.1171
4.508	4.4679	4.4837	4.4925	4.5507					4.4987	0.0361	0.2069

Yukarıdan da görülebileceği gibi ısıtma gücü hata değerleri binde 2.1'den küçüktür. Buna göre kalibrasyon sonucu elde edilen soğuma katsayısı ve ortalama mc değerleri gerçek fiziksel değerlerine çok yakındır. Bu değerler yapılacak güç ölçümlerinde baz olarak alınıp ölçüm sonuçları kolayca elde edilebilir. Aşağıdaki grafikte elde edilen güç değerleri ve yüzde hata miktarları görülmektedir.

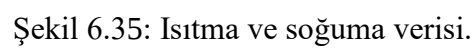


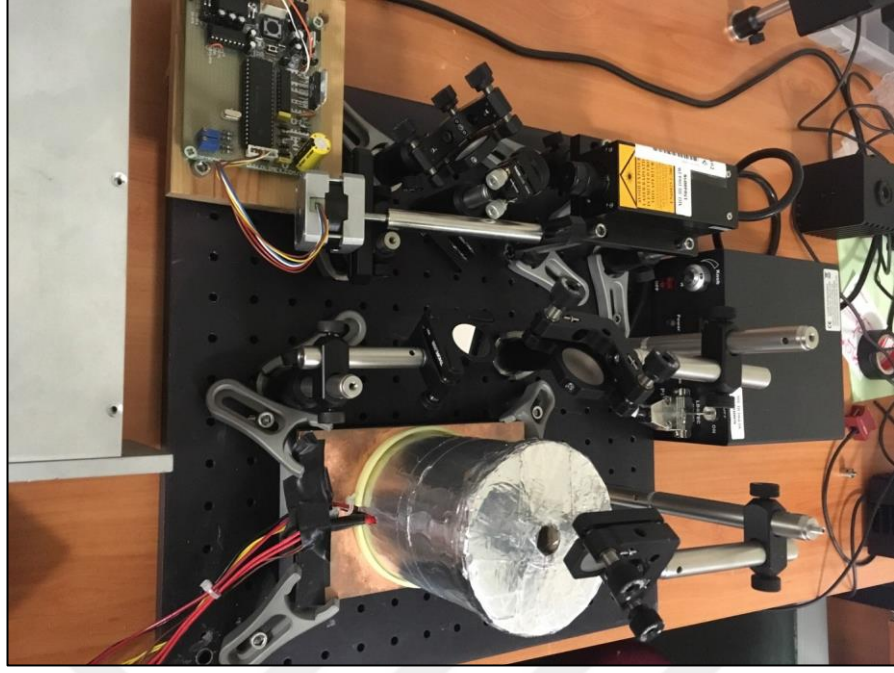
Şekil 6.34: Güç değerleri ve hata miktarları.

Lazer kalorimetresi 1 Watt civarında Nd:YAG lazerin güç ölçümünde kullanılmıştır. Sistemik bir hata olup olmadığının kontrolü için, kalorimetre ile ölçülen değerler diğer optik güç ölçerlerle de kontrol edilmiştir.

Lazer gücünün tam olarak ölçülmesi için, kalorimetre içerisine giren gücün tamamının kalorimetre tarafından emildiğinden emin olmak gereklidir. Bu amaçla kalorimetre üst açıklığını kapatacak şekilde, üstü delik yüzükler yaptırılmıştır. Her

Lazer gücü kalorimetre içerisine belirli zaman aralıklarında düşürülmektedir. Bu amaçla elektronik kutu içerisine bir adım motor kontrolcü birimi eklenmiştir. Adım motor kontrollü bir ayna aracılığı ile lazer ışığı kalorimetre içerisine verilmekte, daha sonra ışığın kalorimetre içerisine girişi engellenmektedir. Bu işlem istenilen miktarda tekrar edilerek, bir dizi ısıma soğuma eğrisi elde edilmektedir. Aşağıda alınan ısıtma soğuma verisi ve düzeneğin resmi görülmektedir.





Şekil 6.36: Kalorimetre düzeneği.

Bu ısıtma soğuma eğrilerinden lazer gücü 1.1590028 Watt ölçülmüştür. Eğrilerden bulunan çözümlerin standart sapması 0.00046 Watt tır. Bu standart sapma ölçülen değerin, %0.04 (on binde dördü) ne karşılık gelmektedir. Kalibrasyon ölçümlerinden ise %0.2 (binde iki) standart sapma elde edilmişti. Kullanılması gereken standart sapma kalibrasyondan gelen standart sapmadır. Buna göre k=2 kapsam faktörü kullanıldığında ölçüm sonucu,

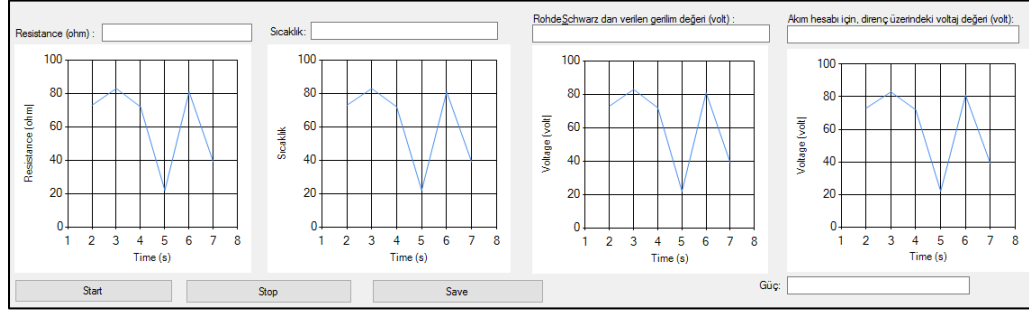
$$P = P_{ölçüm} \pm 2\sigma P_{ölçüm} = 1.15900 \pm 0.0046 \text{ Watt} \quad (6.17)$$

Ölçümleri kesin garanti altına almak amacı ile standart belirsizlik değerini biraz daha yüksek değerde alabiliriz. Bu amaçla standart belirsizlik değerini, elde edilen belirsizlik değerinin 2.5 katı alırız. Bu durumda k=2 faktörü için belirsizlik değeri $\pm\%1$ olur. Buna göre ölçüm sonucu için son değer,

$$P = P_{ölçüm} \pm \frac{P_{ölçüm}}{100} = 1.15900 \pm 0.0115 \text{ Watt} \quad (6.18)$$

olarak verilir.

Kalorimetre kalibrasyonu için kullanılan yazılımın arayüzü aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.37: Kalorimetre ısıtma ve soğuma eğrilerinin elde edildiği yazılımın arayüzü.

7. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında, lazer ışınının karakterize edebilmek için ışın kalitesi ve güç gibi lazer için önemli parametreler göz önüne alınarak, çeşitli çalışmalar yapılmış ve bunlar üzerine belirli sistemler kurulmuştur.

Birinci kısımda, lazer ışınının kullanıldığı alanlar ile ilgili bilgilere yer verilmiş ve tezin içeriğinden bahsedilmiştir.

İkinci kısımda, lazer ışınının en derinine inilerek, ışık ve ışığın dalga yapısı ile ilgili kısa bir özet bilgi sunulmuştur.

Üçüncü kısımda, lazerlere giriş yapılarak, en temelden bir lazer ışınması nasıl oluşur, üç seviyeli lazer sistemleri ve dört seviyeli lazer sistemleri anlatılmış olup, dezavantajları ve avantajları tartışılmıştır.

Dördüncü kısımda, uzaysal alanda lazer ışınının tanımı yapılarak, ışın profili türetilmiş ardından Gausiyen, Hermite Gausiyen ve Laguerre Gausiyen ışınlar hakkında geniş bilgiler verilmiştir. Burdan oluşturulan alt yapı ile ışın kalite faktörü teorik ve deneysel olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, lazer ışın kalitesi ölçüm yöntemleri hakkında da kısa bilgiler verilmiştir.

Beşinci kısımda, lazer güç ölçümü ile ilgili tanımlamalar yapılmış olup, yapılan çalışmaların kuramlarına değinilmiştir.

Son kısım olan deneysel çalışmalar kısmında, M^2 ölçümlerini gerçekleştirebilecek, bilgisayar ile kontrol edilebilen hareket sistemi kurulmuş ve bu hareket sistemi üzerine ticari ışın profili ölçüm kafaları yerleştirilmiştir. Ölçüm kafasının hareketli tabladaki hareketi ile, kafanın üzerine düşürülen lazer ışınının çap ve pozisyon bilgilerini okuyacak bir yazılım geliştirilerek, otomatize bir M^2 ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Alınan bu çap ve pozisyon bilgilerinden MATLAB programında M^2 değerleri hesaplanmış ve ölçümlerin tekrarlanabilirliği elimizde bulunan 3 ticari ışın profili kafası ile test edilmiştir. Diğer bir çalışma, genel amaçlı bir CCD kamera ile lazer ışınının çap ölçümünü gerçekleştirecek yazılım hazırlanmıştır. Işın gücü ölçümlerinde, doğrudan ya da ışının gücünü bölerek güç ölçümleri yapılmıştır. Güç bölme yönteminde kullanılan, UV fused silica bir camın geçirgenlik ve yansıma ölçümleri yapılmıştır. Düşük belirsizlikle güç ölçmeye yönelik olarakta, 1-5 watt arası güçlerde kullanılabilecek bir lazer kalorimetre imal edilmiş ve kalibrasyonları yapılmıştır.

KAYNAKLAR

Erdoğan C., (2004), “532 ve 1064 nm Dalga Boylarında Optik Frekans Standardının Oluşturulması ve Endüstriyel Uygulamaları ”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Wilson J., Hawkes J. F. B., (2000), “Optoelectronics“, 3rd Edition, Prentice Hall Europe.

Hawkes J. F. B., Latimer I. D., (1995), “Lasers Theory and Practice“, 1st Edition, Prentice Hall, Inc.

Siegman A. E., (1986), “Lasers“, 10th Edition, University Science Books.

Born M., Wolf E., (1999), “Principles of Optics“, 7th Edition, Cambridge University Press.

Milloni P., Eberly J. H., (1988), “Laser Physics“, 1st Edition, Wiley.

Svelto O., (2010), “Principles of Lasers“, 5th Edition, Springer.

Saleh B. E. A., Teich M. C., (2007), “Fundamental of Photonics“, 2nd Edition, Wiley.

Hodgson N., Weber H., (2003), “Laser Resonators and Beam Propagation“, 2nd Edition, Springer.

Gradshteyn Iand I. S., Ryzhik I. M., (2007), “ Table of Integrals, Series and Products“, 7th Edition, Elsevier.

Arfken G., Weber H. J., (2003), “ Mathematical Methods for Physicists“, 5th Edition, San Diego Academic Press.

Malacara D., (2007), “Optical Shop Testing“, 3rd Edition, Wiley.

Tyson R. K., “Principles of Adaptive Optics“, 2nd Edition, Academic Press.

Fox A. G., Li T., (1961), “Resonant modes in a maser interferometer“, The Bell System Technical Journal, 40, 453-488.

Kogelnik H., Li T., (1966), “Laser beams and resonators“, Proc. IEEE, 54, 1312-1329.

Carter W. H., (1980), “Spot size and divergence for Hermite Gaussian beam of any order“, Applied Optics, 19, 1027-1029

Durnin J., (1987), “Exact solutions for nondiffracting beam. I. The scalar theory,” Optical Society America, 4, 651-654.

Gori F., Guattari G., Padovani C., (1987), “Bessel-Gauss Beams,” Optical Community, 64, 491-495.

Wright D., Greve P., Fleischer J., Austin L., (1992), “Laser beam width, divergence and beam propagation factor – an international standardization approach,” Opt. Quantum Electron. 24, 993-1000.

Jeong T. M., Ko D. K., Lee J., (2008), “Deformation of the focal spot of an ultrashort high-power laser pulse due to chromatic aberration by a beam expander,” Journal of the Korean Physical Society, 52, 1767-1773.

Jeong T. M., Lee J., (2009), “Accurate determination of the beam quality factor of an aberrated high-power laser pulse,” Journal of the Korean Physical Society, 55, 488-494.

Web 1, (2014), <https://prezi.com/ebzxmpah6jel/lazerler-ve-calisma-prensipleri/>, (Eriřim Tarihi: 06/09/2016).

Web 2, (2014), <https://www.frmtr.com/fizik-kimya/5995764-nufus-terslenmesi-osilasyon-ve-geri-besleme.html>, (Eriřim Tarihi: 10/09/2016).

Web 3, (2013), <http://laseristblog.blogspot.com.tr/2013/01/gaussian-beam-size.html>, (Eriřim Tarihi: 20/112016).

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İstanbul’da doğdu. 2010 yılında başladığı Gebze Teknik Üniversite’si (GTÜ) Fen Fakültesi Fizik Bölümünü 2013 yılında bölüm birincisi olarak tamamlayarak, 2014 yılı Şubat ayında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında başladı. 2014 yılı Şubat ayından 2016 yılı Aralık ayına kadar TÜBİTAK UME’de yüksek lisans proje bursiyeri olarak çalıştı. Şu anda TÜBİTAK BİLGEM’de Elektro Optik ve Lazer Sistemler Laboratuvarı’nda araştırmacı olarak çalışmaktadır.



EKLER

Ek A: ISO 11146 Standardı

Bu standart, lazer ışınlarına ait ışın genişliklerinin (çap), ıraksama açılarının ve ışın yayılım oranlarının ölçülmesi ile ilgili metotları kapsar. Bu standart, 11146.1'de stigmatik ve basit astigmatik ışınlar için uygulanmıştır. Bu standart kapsamında stigmatik ışının tanımı, serbest yayılımda, bütün düzlemlerde dairesel güç dağılımına sahip olan ve bir silindirik mercekten geçtikten sonrada mercekten aynı oryantasyona veya eski oryantasyona sahip olan ışın olarak tanımlanmıştır. Basit astigmatik ışın, serbest yayılımda, azimut açısı sabit bir oryantasyona sahip olan stigmatik olmayan ışın ve silindirik ekseni, ışının ana eksenlerinden birine paralel olan silindirik mercekten geçtikten sonra oryantasyonunu koruyan ışın olarak tanımlanmıştır. Bu tezde, stigmatik ve basit astigmatik ışınların özellikleri incelenmiştir.

ISO 11146 standardının birinci kısmı olan 11146.1'nin test prensipleri, yalnızca stigmatik ve basit astigmatik ışınlar için uygundur. z konumunda (noktasında) ışının genişlemesi veya çapının belirlenmesi için, lazer ışınının şiddet dağılımı z konumunda, x-y düzleminde ölçülmelidir. Ölçülen şiddet dağılımından birinci derece ve merkezlenmiş ikinci derece momentler hesaplanır. İkinci derece momentlerden, ışın genişlikleri, $d_{\sigma x}(z)$, $d_{\sigma y}(z)$, elipsliği, ε , ve eğer uygulanabilirse ışın çapı, $d_{\sigma}(z)$, belirlenir. Odaklanan elemanın, odak düzleminde ışın çapı veya ışın genişliği ölçümlerinden sonra ıraksama açısı belirlenir. Basit astigmatik ışın için, ışın genişlikleri, $d_{\sigma xf}$ ve $d_{\sigma yf}$, odaklanan elemanın arka ana düzleminden uzakta bir odak uzaklığı, f , ölçülür. Sapma açıları, $\Theta_{\sigma x}$ ve $\Theta_{\sigma y}$ aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır.

$$\Theta_{\sigma x} = \frac{d_{\sigma xf}}{f} \quad (A1.1)$$

$$\Theta_{\sigma y} = \frac{d_{\sigma yf}}{f} \quad (A1.2)$$

Stigmatik ışınlar için, ışın çapı, $d_{\sigma f}$, ölçülür ve sapma açısı, $\Theta_{\sigma y}$, aşağıdaki ilişki kullanılarak belirlenir.

$$\Theta_{\sigma} = \frac{d_{\sigma f}}{f} \quad (A1.3)$$

Işın kalitesi (ışın yayılım) oranları olan M_x^2, M_y^2 veya M^2 'nin belirlenebilmesi için, ışın beli genişlikleri olan $d_{\sigma x0}, d_{\sigma y0}$ veya ışın beli çapı $d_{\sigma 0}$ ve ilgili ışın sapma açıları $\Theta_{\sigma x}, \Theta_{\sigma y}$ veya Θ_{σ} 'nin belirlenmesi gereklidir. Stigmatik ve basit astigmatik ışınlar için, M^2 değeri aşağıdaki ilişki kullanılarak belirlenir.

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \frac{d_{\sigma 0} \Theta_{\sigma}}{4} \quad (A1.4)$$

Merceğin tam odak uzaklığında ışın çapı ölçümü yapıldığı zaman, sapma açıları hesaplanabilir. Dolayısıyla bu açılardan doğrudan M^2 faktörleri bulunabilir. Tam ışın odak düzlemini bulmak zor olduğundan, bunun yerine ışının genişlemesi bir seri düzlemde ölçülerek M^2 hesabı yapılır. Bu ölçümün nasıl yapılacağı ISO 11146.1 standardının 9. bölümünde aşağıdaki gibi anlatılmıştır.

Eğer ölçümlerde, ışın beli (waist) elde edilebiliyorsa, ışın beli konumu, ışın genişlikleri, sapma açıları ve ışın yayılım oranları, z ekseni boyunca ışın genişliğinin farklı ölçümlerine hiperbolik fit uygulanarak belirlenebilir. Böylece, z pozisyonunda en azından 10 farklı ölçüm alınmalıdır. Ölçümlerin yaklaşık olarak yarısının ışın beli (beam waist) ile ışın belinden bir Rayleigh mesafesi arasında alınması ve ölçümlerin diğer yarısında ışın belinden iki Rayleigh mesafesinden fazla mesafelerde alınmış olması gerekir.

Ölçülen verilere, genel astigmatik için bir ön test uygulanacaktır. Her ölçülen profil için, ışın genişlikleri $d_{\sigma x}, d_{\sigma y}$ ve laboratuvar sistemine göre azimut açısı ϕ hesaplanacaktır. z ilerleme mesafesi boyunca ölçülen d_{σ} çaplarına, aşağıdaki formül ifade ile hiperbolik fit uygulanabilecektir.

$$d_{\sigma}(z) = \sqrt{a + bz + cz^2} \quad (A1.5)$$

a, b, c (ya da $a_x, a_y, b_x, b_y, c_x, c_y$) hiperbolünün katsayıları, uygun sayısal veya istatistiksel eğri uydurma teknikleri (curve fitting) ile belirlenecektir. Işın yayılım parametrelerinin değerleri, aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilir.

$$z_0 = \frac{-b}{2c} \quad (\text{A1.6})$$

$$d_{\sigma 0} = \frac{1}{2\sqrt{c}} \sqrt{4ac - b^2} \quad (\text{A1.7})$$

$$\Theta_{\sigma} = \sqrt{c} \quad (\text{A1.8})$$

$$z_R = \frac{1}{2c} \sqrt{4ac - b^2} \quad (\text{A1.9})$$

$$M^2 = \frac{\pi}{8\lambda} \sqrt{4ac - b^2} \quad (\text{A1.10})$$

Eğer ışın beli elde edilemiyorsa, aynı işlem,

$$z_{0,1} = V^2 x_2 + f \quad (\text{A1.11})$$

x_2 (veya y_2) aşağıdaki denklem kullanılarak tanımlanır.

$$x_2 = z_{0,2} - f \quad (\text{A1.12})$$

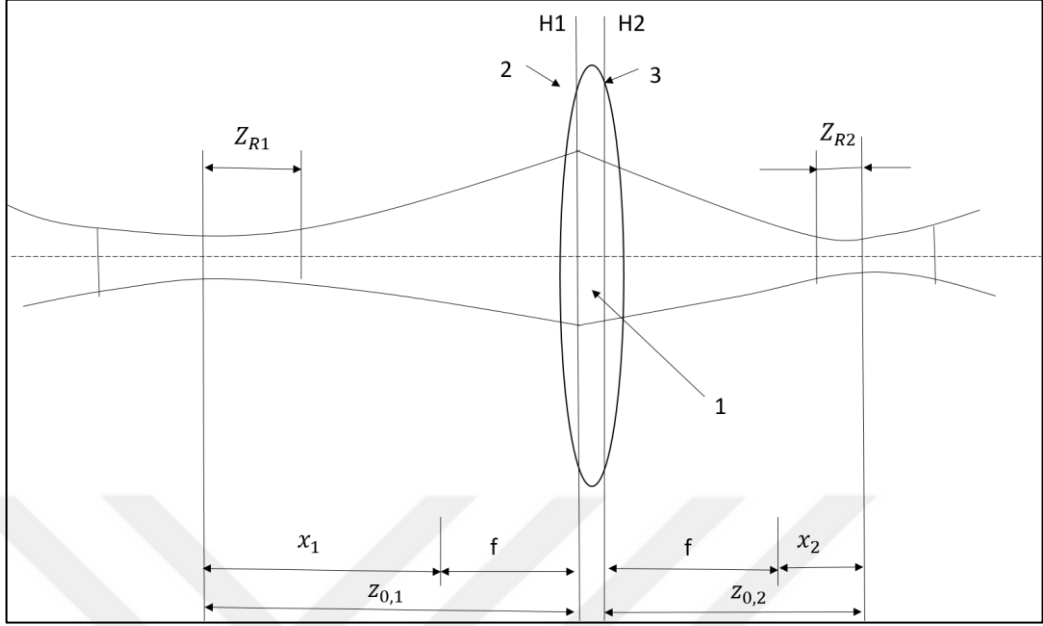
$$V = \frac{f}{\sqrt{z_{R2}^2 + x_2^3}} \quad (\text{A1.13})$$

$-f$: Merceğin odak uzaklığı.

$-z_{R2}^2$: Sanal ışın belinin Rayleigh uzunluğu.

Işın belinin çapı veya genişlikleri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$d_{\sigma 1} = V. d_{\sigma 2} \quad (A1.14)$$



Şekil A1.1: Işın beli pozisyonları (konumları) için verilen şema.

Ek B: Doğrusal Kalorimetre Kuramı

Isıl fizik problemlerinin çoğu, doğrusal olmayan diferansiyel denklemleri içerir. Bu tür problemlerin dikkatli bir analizi, bazı şartlar altında bu denklemlerin doğrusal diferansiyel denklemler ile tarif edilebilmesine olanak verebilir.

İlk olarak basit bir ısı iletim problemini ele alalım. A alanına d kalınlığına sahip bir plaka üzerine plakanın bir tarafından ışık düşürülsün ve bu ışığın tamamının blok üst yüzeyi tarafından emildiğini varsayalım. Bloğun alt ve üst yüzeyi arasındaki sıcaklık farkını da bir ısı çift (thermo couple) ile ölçtüğümüzü varsayalım. Blok üzerine düşen ışık gücü P_i ve blok içerisinde oluşan ısı enerjisi Q ile gösterilsin. Buna göre bu blok için ısı denklemi,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = P_i - q \quad (\text{B1.1})$$

ifadesi ile verilir. q bloğun, iletim (conduction), yayınım (convection) ve ışıma (radiation) yoluyla birim zamanda kaybettiği ısıyı gösterir. Bir fiziksel sistemde ısı enerjisi yüksek sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine doğru akar. Bu akış sistem sıcaklığının tamamı aynı denge değerini alıncaya kadar devam eder. Bu nedenle q ısı kaybı fonksiyonu T_2 ve T_1 parametrelerini içerir. Isı transferi problemi genelde doğrusal olmayan bir problemdir ve bu nedenle oldukça zor hesaplamaları içerir.

- Işıma yoluyla ısı iletimi, Stefan Boltzmann kanunu ile tanımlanır.

$$q_{rad} = \sigma A \varepsilon (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{B1.2})$$

Bu denklemde σ , Stefan-Boltzmann sabiti, A ışıma yapan cismin yüzey alanı, ε ışıma yapan yüzeyin toplam yayınım katsayısı değeridir.

- Konveksiyon yolu ile ısı iletimi ise, bir akışkan hareketi olarak tanımlanır. Bir akışkan hareketi, ekstra bir zorlamayla (forced convection) veya akışkanın sıcaklığına bağlı olarak yoğunluk değişimi ile (natural convection) oluşabilir. Genel bir kural olarak konveksiyon yolu ile ısı iletiminin oldukça detaylı matematiksel analiz gerektirdiği söylenebilir. Konveksiyon yolu ile ısı transferi, en basit

durumunda ise, T_2 sıcaklığında, akışkan ile temas eden bir yüzeyden, T_1 sıcaklığında bir akışkana ısı aktarması olarak düşünülebilir ve küçük sıcaklık farkları için ($\Delta T = T_2 - T_1$), ısı akış miktarı Newton soğurma kanunu ile açıklanabilir.

$$q_{conv} = h_{conv} A (T_2 - T_1) = h_{conv} A \Delta T \quad (B1.3)$$

Konveksiyon ısı transfer katsayısı $h_{conv} (W m^{-2} K^{-1})$, çeşitli parametrelerin bir fonksiyonudur, fakat ΔT 'den bağımsızdır.

Üçüncü mekanizma *iletim mekanizmasıdır* ve ısıнын katılar ve koyu sıvılar içerisinde, mikroskobik sıcaklık difüzyonu yolu ile aktarılması olarak anlaşılabilir. Bir katı içerisinde, bir yönde ısı akışı Fourier ısı akış kanunu ile ifade edilir.

$$q_{cond} = k A \nabla T \quad (B1.4)$$

Isıl iletkenlik katsayısı $k (W m^{-1} K^{-1})$, birim alandan, birim zamanda, birim sıcaklık Gradyenti için iletilen ısı miktarı olarak ifade edilebilir. Isı kaybı mekanizmalarını kısaca tartıştıktan sonra şimdi yeniden asıl ısı denkleminimize ve bir yönden ışıyı emen bloğumuza dönebiliriz.

İlk olarak, yüzey üzerinde emilen ısıнын blokta oluşturduğu sıcaklık artışını hesaplayalım.

$$Q = \rho c V \Delta T \quad (B1.5)$$

Bu denkleminde ρ , bloğun yoğunluğu, V , bloğun hacmi, c , bloğun yapıldığı malzemenin özgül ısısını gösterir.

Yukarıdaki denklemin zamana göre türevini alalım ve ısı denkleminimize koyalım.

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{q}{\rho c V} - \frac{P_i}{\rho c V} = 0 \quad (B1.6)$$

Burada q terimi, ışıma, konveksiyon ve iletim yolu ile oluşan soğuma miktarlarının toplamıdır. Yukarıda anlatıldığı gibi, düşük sıcaklık farkları için konveksiyon ile ısı iletimi doğrusal bir eşitlik olarak kabul edilebilmesine rağmen, ışıma ve iletim

terimleri doğrusal olmayan tiptedir. Bu eşitlikleri kullanarak analitik bir çözüm yapmak çoğu durumda olanaklı değildir. Biraz daha derinlemesine bir analiz, konuyu önemli ölçüde sadeleştirebilir. Işıma yolu ile ısı transferi problemlerinde, ışıma dolayısı ile oluşan sıcaklık artışı veya azalışı, genelde ortam sıcaklığından (T_1) çok daha düşüktür (Mutlak sıcaklıklar, farklı birimlerde farklı değerlere sahip olsalar da, sıcaklık farkları her zaman aynıdır. Örneğin 20^0 bir sıcaklık artışı, 300K (27^0) ile karşılaştırıldığında oldukça küçük kabul edilebilir).

Buna göre eğer sıcaklık farkı düşük oluyorsa, ışıma ile ısı transferi (5.2), T_1 etrafında Taylor serisine açılabilir.

$$q_{rad} \approx \sigma A \varepsilon T_1^3 (T_2 - T_1) = h_{rad} A \Delta T \quad (B1.7)$$

Bu eşitlik konveksiyon yolu ile ısı transferi eşitliği ile karşılaştırılırsa, $h_{rad} = \sigma A \varepsilon T_1^3$, ışıma yolu ile ısı transfer katsayısı olarak adlandırılabilir. Konveksiyon ile ısı transferi yukarıda da belirtildiği gibi temelde doğrusaldır. İletim yolu ile ısı transferi ise, yalnızca belli geometriler için doğrusal hale getirebilir. Örneğin, bir boyutlu, izotropik ve küçük sıcaklık farkları içeren iletim yolu ile ısı transferi için, Fourier ısı transfer denkleminin integrali alınarak bir kartezyen boyut için,

$$q_{cond} = k A \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\Delta T}{R_T} = h_{cond} A \Delta T \quad (B1.8)$$

elde edilir. Bu eşitlikte, h_{cond} , iletim yolu ile ısı transfer katsayısı olarak adlandırılabilir. İletim yolu ile ısı transferi yalnızca belirli geometriler için geçerli olduğundan, karmaşık geometriler de yapılan kalorimetrelerde bu terimi ihmal edecek kadar küçük yapmak önemlidir.

(B1.3), (B1.7), ve (B1.8) eşitlikleri, eşitlik (B1.6) da yerine konulduğunda temel kalorimetre denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{hA}{\rho c V} \Delta T - \frac{P_i}{\rho c V} = 0 \quad (B1.9)$$

Bu eşitlik doğrusal, sabit katsayılı, sıradan, birinci dereceden bir diferansiyel denklemdir.

Burada h , toplam ısı transfer katsayısı olarak tanımlanabilir.

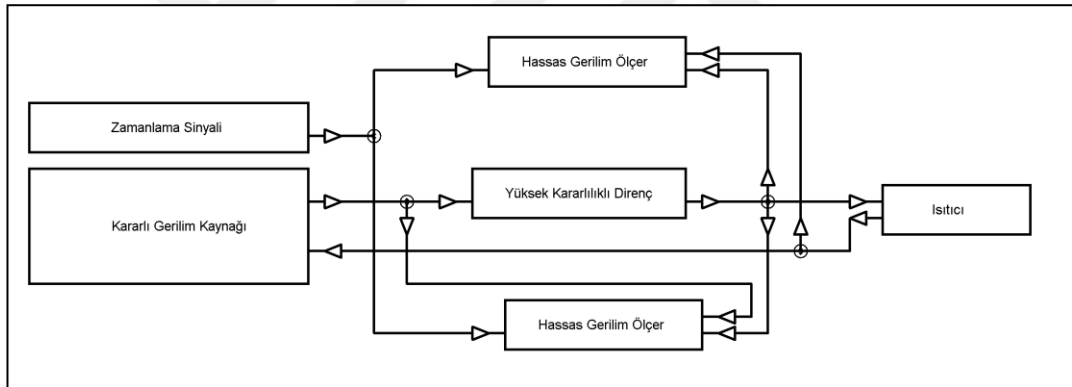
$$h = h_{rad} + h_{conv} + h_{cond} \quad (B1.10)$$

Boşalma zaman sabitinin deneysel olarak belirlenmesi; Kalorimetre üzerine periyodik olarak ısıtma ve soğuma döngüleri uyguladığımızı varsayalım. Bu durumda ısınma sırasında, sistemi tarif eden diferansiyel denklem, yukarıda elde ettiğimiz gibi

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{hA}{\rho c V} \Delta T - \frac{P_i}{\rho c V} = 0 \quad (B1.11)$$

eşitliği ile, soğuma durumunda ise, sistem denklemi aşağıdaki ifade ile verilir.

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \frac{hA}{\rho c V} \Delta T = 0 \quad (B1.12)$$



Şekil B1.1: Kalorimetre deneysel düzenek.