KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ORTA VE YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ DİJİTAL KAMERALARIN FOTOGRAMETRİK POTANSİYELLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Harita Yük. Müh. Fevzi KARSLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"Doktor"
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16.07.2004
Tezin Savunma Tarihi : 15.09.2004

136123

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Eminnur AYHAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Cemal BIYIK

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Celalettin KARAALİ

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Ömer PEKŞEN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

TRABZON 2004

ÖNSÖZ

Doktora tezi danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Eminnur AYHAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Doktora tez çalışmasının izlenmesi sırasında bilimsel desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım sayın Prof. Dr. Cemal BIYIK ve Yrd. Doç. Dr. Ömer PEKŞEN'e teşekkürlerimi arz ederim.

Tezin başlangıcında danışmanlığımı üstlenen ve daha sonra idari işlerinin yoğunluğu nedeniyle beraber çalışmayı sürdüremediğim, ancak sürekli desteğini gördüğüm saygıdeğer hocam sayın Prof. Dr. Türkay TÜDEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tezin belirli bir kısmını çalıştığım Hannover Üniversitesi, Fotogrametri Enstitüsü çalışanlarına ve özellikle bu sürede danışmanlığımı üstlenen Dr. Karsten Jacobsen'e, arazi ölçmelerinde yardımcı olan Dr. Manfred Wiggenhagen ve Karsten Raguse'ye, bu enstitüde çalışmama imkan veren desteklerinden dolayı TUBİTAK'a ve TUBİTAK BAYG çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Arazide yapılan jeodezik çalışmalar ve labaratuvar ortamı ölçülerinin yapılmasında katkıları olan ve tez süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm bölüm personeli meslektaşlarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca Devrim Akça'ya desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmanın resmi işlemlerinin sorunsuz yürümesinde katkıları olan K.T.Ü. Fen Bilimleri ve Öğrenci İşleri çalışanlarına, teze maddi kaynak sağlayan K.T.Ü. Araştırma Fonuna ve çalışanlarına çok teşekkür ederim. Ayrıca tez aşaması boyunca daima desteklerini gördüğüm değerli aileme, sevgili eşime, biricik oğlum ve kızıma şükranlarımı sunarım.

Fevzi KARSLI

Trabzon 2004

İÇİNDEKİLER

		Sayfa No
ÖNSÖZ		II
İÇİNDEKİLER		III
ÖZET		VI
SUMMARY		VII
ŞEKİLLER DİZİNİ		VIII
TABLOLAR DİZİNİ		XVII
SEMBOLLER DİZİNİ		XX
1.	GENEL BİLGİLER	1
1.1.	Giriş	1
1.2.	Çalışmanın Amacı	5
1.3.	Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kamera Sistemleri	6
1.3.1.	Dijital Kameralar	7
1.3.1.1.	Dijital Kameraların Çalışma Prensipleri	9
1.4.	Dijital Kamera Sistemleri	9
1.5.	Dijital Kamera Sistemlerinde Çözünürlük	10
1.5.1.	Geometrik Çözünürlük	11
1.5.2.	Radyometrik Çözünürlük	13
1.6.	Dijital Kameraların Film Kameralarına Göre Avantaj ve Dezavantajları	13
1.7.	Kamera Sistemlerinin Fotogrametrik Uygulamaları	14
1.8.	Dijital Kamera Sistemlerinin Uygulama Alanları	20
1.9.	Dijital Kamera Sistemlerinde Hata Kaynakları	21
1.9.1.	Geometrik Açıdan Hataların Değerlendirilmesi	21
1.9.2.	Geometrik Distorsiyon	23
1.9.2.1.	Mercek Distorsiyonu	23
1.9.2.2.	Kayıt Düzlemi Deformasyonu	27
1.9.2.3.	İç Yöneltme Elemanlarının İncelenmesi	29
1.9.3.	Radyometrik Açıdan Hataların Değerlendirilmesi	30
1.9.3.1	Dinamik Aralık (Dynamic Range)	31
1.9.3.2.	Doğrusal Olmama (Non Linearity)	32

1.9.3.3. Koyu Akım Gürültüsü (Dark Current Noise)..... 34
1.9.3.4. Fluluk (Blooming) 34
1.9.3.5. Gürültü (Noise) ve Sinyal Gürültü Oranı (SNR)..... 34
1.10. Dijital Kamera Sistemlerinin Kalibrasyonu..... 35
1.10.1. Geometrik Hataların Matematiksel Olarak Modellenmesi ve Düzeltilmesi..... 36
1.10.1.1. Fiziksel Modeller..... 38
1.10.1.2. Cebrik Modeller..... 40
1.10.1.3. Karışık Modeller..... 42
1.10.2. Geometrik Kalibrasyon ve Metotları..... 42
1.10.2.1. Bireysel Metotlar..... 43
1.10.2.2. Birleşik Metotlar..... 44
1.10.3. Radyometrik Kalibrasyon Yöntemleri..... 47
1.10.3.1. Cap-on Metot..... 48
1.10.3.2. Düzgün Gri Kart ve Gri Adım Metodu..... 48
1.10.3.3. Foto Duyarlıklı Düzensizlik (PRNU) ve Radyometrik Düzeltme..... 48
1.10.3.4. Radyometrik Test İçin İstatistiksel Hesaplamalar..... 49
1.11. Fotogrametrik Matematik Modeller..... 52
1.11.1. İç Yöneltme..... 53
1.11.1.1. Piksel Koordinat Sisteminden Görüntü Koordinat Sistemine Geçiş..... 55
1.11.2. Dış Yöneltme..... 56
1.11.2.1. Doğrusallık Şartı (Colinearity Condition) 60
1.11.2.2. Düzlemdeşlik Koşulu (Coplanarity Condition)..... 63
1.11.3. Çalışmada Kullanılan Matematik Modeller..... 66
1.11.3.1. İlave Parametreli Işın Demetleri Yöntemi..... 66
1.11.3.2. Direk Lineer Transformasyon Metodu (DLT)..... 73
1.11.3.3. BLUH (Bundle Block Adjustment) Yazılımı Matematik Modeli..... 79
1.11.3.4. Elcovision 10 Yazılımı Matematik Modeli..... 83
1.11.3.5. Kontrol Nokta Koordinatlarının Hesabı..... 85
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR..... 87
2.1. Giriş..... 87
2.2. Çalışmada Kullanılan Kamera Sistemleri..... 88
2.2.1. Nikon E2/E2s Dijital Kamerası..... 88

2.2.2.	Kodak DCS 460 Dijital Kamerası.....	89
2.2.3.	Rollei D7 Metric Dijital Kamerası.....	90
2.2.4.	Olympus E-10 Dijital Kamerası.....	90
2.2.5.	Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası.....	91
2.3.	Test Ağı ve Uygulama Alanlarının Seçimi.....	92
2.4.	Test Alanlarında Yapılan Jeodezik Ölçümler.....	95
2.5.	Resim Çekim Geometrisi ve Resim Koordinat Ölçüsü.....	96
2.6.	Veri İşleme Metotları ve Kalibrasyon Testleri.....	100
2.6.1.	Işın Demetleri Metodu İle Yapılan Çalışmalar.....	100
2.6.2.	DLT Metodu İle Yapılan Çalışmalar.....	101
2.6.3.	BLUH Metodu İle Yapılan Çalışmalar.....	102
2.6.4.	Elcovision Metodu İle Yapılan Çalışmalar.....	103
2.7.	Radyometrik Kalibrasyon İçin Yapılan Çalışmalar.....	103
3.	BULGULAR ve İRDELEME.....	106
3.1.	Nikon E2/E2s Dijital Kamerası Test Alanı 1 Bulguları.....	106
3.2.	Nikon E2/E2s Dijital Kamerası Test Alanı 3 Bulguları.....	148
3.3.	Kodak DCS 460 Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları.....	164
3.4.	Kodak DCS 460 Dijital Kamerası Test Alanı 4 Bulguları.....	183
3.5.	Aynı Test Alanlarında Farklı Kameralarla Elde Edilen Bulgular.....	194
3.5.1.	Olympus E-10 Dijital Kamerası Test Alanı 4 Bulguları.....	195
3.5.2.	Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları.....	197
3.5.3.	Rollei D7 Metric Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları.....	199
3.6.	Laboratuar Kalibrasyonu ile Arazide Kalibrasyonun Karşılaştırılması.....	205
3.7.	İlave Parametrelerin Anlamlılık Testi ve Sonuç Doğruluğuna Etkileri.....	208
3.8.	Radyometrik Kalibrasyon Bulguları.....	211
4.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	224
5.	KAYNAKLAR.....	233
	ÖZGEÇMİŞ.....	241

ÖZET

Dijital kameralar, dijital görüntü teknolojisi içinde önemli bir yer tutmaktadırlar. Bunun yanında bu kameralar, fotogrametrik ölçü amacıyla Fotogrametri ve Uzaktan Algılama bilim dallarında veri elde etme aracı olarak yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu kameraların, teknik performansları ve diğer teknolojilerle ilgili özelliklerinin belirlenmesi için, metrik performanslarının test edilmesi gerekmektedir. Genellikle kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak tanımlanan kalibrasyon işlemi, kamera sistemlerinin metrik potansiyellerini belirlemek ve bu sistemlerdeki sistematik hataları denetlemek, düzeltmek için gerçekleştirilir. Geometrik performans olarak da tanımlanan metrik performansların yanında, bu sistemlerin radyometrik performanslarının da belirlenmesi gerekir.

Bu çalışmada, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemlerinin geometrik ve radyometrik potansiyellerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Çalışma için, temel olarak orta çözünürlüklü Nikon E2/E2s ve yüksek çözünürlüklü Kodak DCS460 dijital kamera sistemleri seçilmiştir. Bu kameralara ilaveten, kameraların karşılaştırılması amacıyla yüksek çözünürlüklü Nikon Coolpix 990 ve Olympus E-10, orta çözünürlüklü Rollei D7 Metric kameraları kullanılmıştır. Bu kamera sistemleri ile hem laboratuar ortamında tesis edilmiş test alanları, hem de gerçek uygulama alanı olarak seçilen bina modellerine dayalı olarak geometrik testleri yapılmıştır. Bu işlemler sırasında, test alanlarında belirli sayıda kontrol noktası tesis edilerek bu noktalara jeodezik metotlarla koordinat verilmiştir. Aynı noktaların resim koordinatları, fotogrametrik amaçlı olarak resim koordinat ölçüsü yapan programlarla ölçülmüştür. Kameraların geometrik performanslarının belirlenmesi için dört farklı matematik temele dayalı modeller ile çalışılmıştır. Bu modeller, Elcovision 10 programına ait matematik model, Direk Lineer Transformasyon metodu (DLT), İlave Parametreli Işın Demetleri modeli ve BLUH yazılımına ait matematik modeldir. Kullanılan metotların tümü kollinarite eşitliklerini baz almakta, fakat içerdikleri sistematik hata kaynaklarını belirleme parametreleri bakımından farklı özelliktedirler. Bu modeller ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kameraların geometrik potansiyellerinin hangi metotla en iyi şekilde belirlenebileceği tespit edilmiştir. Ayrıca farklı geometrik çözünürlüğe sahip kameralar, sağladıkları geometrik doğruluk yönünden karşılaştırılmıştır. Kamera sistemlerinin radyometrik özelliklerini belirlemek için tam siyah ve tam beyaz ortamlardaki tepkileri tespit edilmiş ve kayıt yüzeylerindeki bozuk pikseller belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dijital Fotogrametri, Dijital Kamera, Kalibrasyon, Geometrik Doğruluk, Radyometrik Özellikler, DLT Metodu, Işın Demetleri Metodu

SUMMARY

Investigations into Photogrammetric Potentials of Medium and High Resolution Digital Camera Systems

Digital cameras have an important place in Digital Imaging Technologies. In addition, digital cameras are extensively used both in Remote Sensing and Photogrammetry science as a tool of data acquisition. So as to define the technical performance and compare with the other technologies digital cameras must be tested. Calibration that can be defined as introducing calibration parameters of any camera system is used to designate metric potential, investigate and correct the systematic errors of camera systems. In addition to their metric performance, the radiometric performance of these digital camera systems must be considered.

In this contribution, medium and high resolution camera systems' geometric and radiometric potentials were considered. The digital camera systems Nikon E2/E2s, which have medium and the Kodak DCS460 which have high resolution capacities have been taken into consideration for this study. In addition to the mentioned camera systems, high resolution camera systems Nikon Coolpix 990, Olympus-E10 and medium resolution camera system Rollei D7 Metric have been used in order to compare with each other. Geometric tests of these camera systems were carried out both for selected building models in real areas and for the control areas set up in laboratory. In the course of the study, adequate number of control points are situated and coordinated in the control areas by geodetic methods. The image coordinates of the same control points were measured by using photogrammetric software's. To evaluate geometric performance of the digital camera systems four different mathematical models were considered. These are the mathematical method of Elcovision 10 software, Direct Lineer Transformation Method (DLT), Bundle Adjustment with Additional Parameters Method and the mathematical method of BLUH software. All used models are based on colinearity equations, but differ from determining parameters in containing systematic error sources. By comparing the results gotten from these models the best model from the point of view geometric performance have been tried to be found out. Besides, the cameras, which have different geometric resolution, were compared with each other from the standpoint of geometric accuracy. To designate radiometric properties of the used digital cameras, reactions of the cameras to the absolute white and black environment were determined and then dead pixels were eliminated.

Key Words: Digital Photogrammetry, Digital Camera, Calibration, Geometric Accuracy, Radiometric Properties, DLT Method, Bundle Adjustment Method

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa No
Şekil 1.	Kamera sistemleri arasındaki ilişki	8
Şekil 2.	Dijital kamera bileşenleri ve dijital görüntü işleme	10
Şekil 3.	Pinhole Kamera Kavramı	22
Şekil 4.	Çapsal ve teğetsel distorsiyon	25
Şekil 5.	Çapsal Distorsiyon Eğrisi	25
Şekil 6.	Çapsal Mercek Distorsiyonu	26
Şekil 7.	Negatif ve Pozitif Distorsiyon	26
Şekil 8.	Mercek Sistemleri	27
Şekil 9.	Zoom mercek kullanılması durumunda asal noktanın değişimi	30
Şekil 10.	Koyu akım, durağanlık ve dinamik aralık	32
Şekil 11.	Bir piksel kümesinin genel algılama fonksiyonu	33
Şekil 12.	Birleşik kalibrasyon metotlarının genel yapısı	46
Şekil 13.	Piksellerin gri değerlerinin zamansal ortalaması	50
Şekil 14.	Normal Dağılım Fonksiyonu	52
Şekil 15.	Görüntü ve piksel koordinat sistemi	54
Şekil 16.	Dijital görüntü üzerinde resim koordinat sistemi	55
Şekil 17.	Koordinat sistemleri ve yöneltme açıları	57
Şekil 18.	X ekseni etrafındaki ω dönüklüğü	58
Şekil 19.	Z ekseni etrafındaki φ dönüklüğü	58
Şekil 20.	Y ekseni etrafındaki κ dönüklüğü	59
Şekil 21.	Cisim uzayı (X,Y,Z) ve görüntü uzayı (x,z) koordinat sistemleri	61
Şekil 22.	Düzlemdeşlik (Coplanarity) Koşulu	63
Şekil 23.	Referans sistemi ve kolinarite şartı	66
Şekil 24.	Piksel ve görüntü koordinat sistemi arasındaki ilişki	67
Şekil 25.	Distorsiyonlu resim geometrisi	74
Şekil 26.	Ebner katsayılarının etkisi ve matematik gösterimi	80
Şekil 27.	3×3'lük grid ağı	83
Şekil 28.	Klasik Önder Kestirme işleminin geometrisi	85
Şekil 29.	Nikon E2/E2s Dijital Kamerası	89

Şekil 30. Kodak DCS460 Kamerası ve CCD Algılayıcı 89
Şekil 31. Rollei D7 Metric Dijital Kamerası 90
Şekil 32. Olympus E-10 Dijital Kamerası 91
Şekil 33. Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası 92
Şekil 34. Test Alanı 1 (KTU Jeodezi Bölümü) 92
Şekil 35. Test Alanı 2 (HÜ Fotogrametri Enstitüsü) 93
Şekil 36. Kontol Noktası İşareti Örneği ve Boyutları 94
Şekil 37. Test Alanı 3 (Ayasofya Müzesi, Trabzon) 94
Şekil 38. Kontrol Noktası Örneği ve Boyutları 95
Şekil 39. Test Alanı 4 (Fotogrametri Enstitü Binası, Hannover) 95
Şekil 40. Test Alanı 1 Resim Geometrisi 96
Şekil 41. Test Alanı 3 Resim Geometrisi 97
Şekil 42. Test Alanı 2 Resim Geometrisi 98
Şekil 43. Test Alanı 4 Resim Geometrisi 99
Şekil 44. Bir görüntü üzerinde seçilen alt görüntüler 104
Şekil 45. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, DLT, 24 mm) 107
Şekil 46. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, 24 mm) 108
Şekil 47. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, 24 mm) 108
Şekil 48. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, 24 mm) 109
Şekil 49. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, DLT, 50 mm) 110
Şekil 50. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, 50 mm) 111
Şekil 51. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, 50 mm) 111
Şekil 52. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, 50 mm) 112
Şekil 53. 24 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Nikon E2) 113
Şekil 54. 50 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Nikon E2) 113
Şekil 55. 24 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Nikon E2) 114
Şekil 56. 50 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Nikon E2) 114

Şekil 57. 24 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Nikon E2)..... 115
Şekil 58. 50 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Nikon E2)..... 115
Şekil 59. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 ist., DLT, Nikon E2)..... 116
Şekil 60. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 ist., DLT, Nikon E2)..... 117
Şekil 61. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 ist., DLT, Nikon E2)..... 117
Şekil 62. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 ist., DLT, Nikon E2)..... 118
Şekil 63. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)..... 119
Şekil 64. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)... 120
Şekil 65. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)... 120
Şekil 66. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm).... 122
Şekil 67. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)... 122
Şekil 68. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)... 123
Şekil 69. 24 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)..... 124
Şekil 70. 50 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)..... 124
Şekil 71. 24 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2) 125
Şekil 72. 50 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)..... 125
Şekil 73. 24 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Nikon E2).... 126
Şekil 74. 50 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Nikon E2).... 126
Şekil 75. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Işın Demet., 24 mm) 128
Şekil 76. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm) 128
Şekil 77. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm) .. 129
Şekil 78. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm) .. 129
Şekil 79. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Işın Demet., 50 mm) 131
Şekil 80. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm) 131

Şekil 81. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm) .. 132
Şekil 82. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm) .. 132
Şekil 83. 24 mm mercek için çapsal distorsiyon (3 ve 5 istasyonlu)..... 133
Şekil 84. 50 mm mercek için çapsal distorsiyon (3 ve 5 istasyonlu)..... 134
Şekil 85. 24 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 5 istasyonlu ve tüm parametreli)..... 134
Şekil 86. 24 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 3 istasyonlu ve tüm parametreli)..... 135
Şekil 87. 50 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 5 istasyonlu ve tüm parametreli)..... 135
Şekil 88. 50 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 3 istasyonlu ve tüm parametreli)..... 136
Şekil 89. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 ist., Bluh, Nikon E2)..... 137
Şekil 90. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 ist., Bluh, Nikon E2)..... 137
Şekil 91. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 ist., Bluh, Nikon E2)..... 138
Şekil 92. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 ist., Bluh, Nikon E2)..... 138
Şekil 93. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Elcovision, 24 mm)..... 140
Şekil 94. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm)..... 140
Şekil 95. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm).... 141
Şekil 96. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm).... 141
Şekil 97. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Elcovision, 50 mm)..... 143
Şekil 98. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm)..... 143
Şekil 99. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm).... 144
Şekil 100. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm).... 144
Şekil 101. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)..... 145
Şekil 102. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)..... 146

Şekil 103. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)..... 146

Şekil 104. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)..... 147

Şekil 105. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)..... 147

Şekil 106. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)..... 148

Şekil 107. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (31 kontrol noktalı, DLT, 24 mm)..... 150

Şekil 108. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, DLT, 24 mm)..... 150

Şekil 109. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (19 kontrol noktalı, DLT, 50 mm)..... 152

Şekil 110. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, DLT, 50 mm) 152

Şekil 111. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm) 154

Şekil 112. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm) 155

Şekil 113. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (31 kontrol noktalı, Bluh, 24 mm) 157

Şekil 114. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Bluh, 24 mm) 157

Şekil 115. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (19 kontrol noktalı, Bluh, 50 mm) 158

Şekil 116. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Bluh, 50 mm) 159

Şekil 117. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm) 160

Şekil 118. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm) 161

Şekil 119. 6 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 24 mm)..... 162

Şekil 120. 12 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 24 mm)..... 163

Şekil 121. 6 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 50 mm)..... 163

Şekil 122. 12 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 50 mm)..... 164

Şekil 123. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (36 kontrol noktalı, DLT, Kodak) 166
Şekil 124. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 166
Şekil 125. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 167
Şekil 126. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 167
Şekil 127. 20 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Kodak)..... 168
Şekil 128. 20 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Kodak) 169
Şekil 129. 20 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Kodak)..... 169
Şekil 130. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, DLT, Kodak).. 170
Şekil 131. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (10 istasyon, DLT, Kodak) 171
Şekil 132. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak) 172
Şekil 133. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)... 173
Şekil 134. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)... 173
Şekil 135. 20 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Kodak)..... 174
Şekil 136. 20 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Kodak) 175
Şekil 137. 20 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Kodak)..... 175
Şekil 138. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (36 kontrol noktalı, Bluh, Kodak) 177
Şekil 139. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 177
Şekil 140. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 178
Şekil 141. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 178
Şekil 142. 20 mm mercek için çapsal distorsiyon (5 ve 10 istasyonlu, Bluh, Kodak). 179
Şekil 143. 20 mm mercek için global distorsiyon (5 istasyonlu ve tüm parametreli, Bluh, Kodak) 180
Şekil 144. 20 mm mercek için global distorsiyon (10 istasyonlu ve tüm parametreli, Bluh, Kodak) 180
Şekil 145. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (10 istasyon, Bluh, Kodak) 181
Şekil 146. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, Bluh, Kodak).. 181

Şekil 147. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)..... 182

Şekil 148. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)..... 182

Şekil 149. 15 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)..... 183

Şekil 150. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (45 kontrol noktalı, DLT, Kodak) 185

Şekil 151. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 185

Şekil 152. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 186

Şekil 153. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, Kodak) 186

Şekil 154. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak) 188

Şekil 155. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak) 188

Şekil 156. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak) 189

Şekil 157. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (45 kontrol noktalı, Bluh, Kodak) 190

Şekil 158. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 191

Şekil 159. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 191

Şekil 160. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Bluh, Kodak) 192

Şekil 161. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)..... 193

Şekil 162. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)..... 193

Şekil 163. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)..... 194

Şekil 164. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Olympus) 195

Şekil 165. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Olympus) 196

Şekil 166. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Olympus) 196

Şekil 167. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Coolpix 990) 198
Şekil 168. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Coolpix 990) 198
Şekil 169. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Coolpix 990) 199
Şekil 170. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Rollei) 200
Şekil 171. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Rollei) 201
Şekil 172. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Rollei) 201
Şekil 173. 5 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 202
Şekil 174. 10 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 203
Şekil 175. 15 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 203
Şekil 176. 5 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 204
Şekil 177. 10 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 204
Şekil 178. 20 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar..... 205
Şekil 179. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortlama konum hata değer dağılımı (5 denetleme noktalı) 206
Şekil 180. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortlama konum hata değer dağılımı (10 denetleme noktalı) 207
Şekil 181. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değer dağılımı (20 denetleme noktalı) 208
Şekil 182. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah) 212
Şekil 183. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah) 213
Şekil 184. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah) 213
Şekil 185. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz) 215
Şekil 186. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz) 216
Şekil 187. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz) 216
Şekil 188. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah) 219
Şekil 189. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah) 219

Şekil 190. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah) 220
Şekil 191. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz) 222
Şekil 192. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz) 222
Şekil 193. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz) 223

TABLOLAR DİZİNİ

		Sayfa No
Tablo 1.	Dijital yakın resim fotogrametrisi uygulama alanları	3
Tablo 2.	Dijital kamera çeşitleri	7
Tablo 3.	Dijital ve film kameralar	14
Tablo 4.	Dijital Yakın Resim Fotogrametrisi işlemlerinin doğruluğu ve hızları	19
Tablo 5.	Dijital kamera sistemi kalibrasyon projeleri için kullanılan fiziksel modeller	39
Tablo 6.	Çalışmada kullanılan kameraların teknik özellikleri	88
Tablo 7.	Işın demetleri metodu parametre değerlendirme grupları	100
Tablo 8.	DLT metodu parametre değerlendirme grupları	102
Tablo 9.	BLUH Metodu parametre grupları	102
Tablo 10.	Elcovision 10 Metodu parametre grupları	103
Tablo 11.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 24 mm)	107
Tablo 12.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 50 mm)	110
Tablo 13.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)	119
Tablo 14.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)	121
Tablo 15.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)	127
Tablo 16.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)	130
Tablo 17.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 24 mm)	139
Tablo 18.	Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 50 mm)	142
Tablo 19.	Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 24 mm)	149
Tablo 20.	Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 50 mm)	151
Tablo 21.	Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)	153

Tablo 22. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)..... 155

Tablo 23. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Nikon E2, 24 mm)..... 156

Tablo 24. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Nikon E2, 50 mm)..... 158

Tablo 25. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 24 mm)..... 160

Tablo 26. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 50 mm)..... 161

Tablo 27. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Kodak)..... 165

Tablo 28. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Kodak)..... 172

Tablo 29. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Kodak)..... 176

Tablo 30. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Kodak)..... 184

Tablo 31. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Kodak)..... 187

Tablo 32. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Kodak)..... 190

Tablo 33. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Olympus)..... 195

Tablo 34. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Coolpix 990)..... 197

Tablo 35. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Rollei)..... 200

Tablo 36. 5 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri..... 206

Tablo 37. 10 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri..... 207

Tablo 38. 20 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri..... 208

Tablo 39. Test Alanı 2 ve 4'de parametre değerleri ve anlamları..... 209

Tablo 40. Test Alanı 2'de bütün ve anlamlı parametreli çözüm durumunda ortalama hata değerleri..... 210

Tablo 41. Test Alanı 4'de bütün ve anlamlı parametreli çözüm durumunda ortalama hata değerleri..... 210

Tablo 42. Siyah görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)..... 211
Tablo 43. Siyah alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)..... 212
Tablo 44. Beyaz görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)..... 214
Tablo 45. Beyaz alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)..... 215
Tablo 46. Siyah görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)..... 218
Tablo 47. Siyah alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)..... 218
Tablo 48. Beyaz görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)..... 221
Tablo 49. Beyaz alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)..... 221

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Piksel ortalaması
B	: Baz
B_x, B_y, B_z	: Baz vektörleri
B_2, a	: Diklik faktörü
a_{ij}, b_{ij}	: Küresel harmonik fonksiyon katsayıları
c_i, f	: Odak uzaklığı (kamera sabiti)
c_x, c_y	: x ve y yönündeki asal uzaklık
g', g	: Pikselin orijinal ve düzeltilmiş gri değerleri
g_{siyah}, g_{beyaz}	: Pikselin ortalama siyah ve beyaz ortam değeri
g'_{siyah}, g'_{beyaz}	: Pikselin beyaz ve siyah görüntüdeki değeri
g_e, g_0	: Piksellerin eğim ve öteleme değeri
I	: Birim matris
k	: Kamera istasyonundaki çekim sayısı
K_i	: Çapsal distorsiyon katsayıları
L_i	: DLT katsayıları
m_{ii}	: Dönüklük matrisi elemanları
M	: Dönüklük matrisi
n	: Piksel sayısı
N	: Normal denklem
q	: Dizayn faktörü
P	: Ağırlık
P_i	: Teğetsel distorsiyon katsayıları
Ps_x, Ps_y	: x ve y yönündeki piksel boyutu
r	: Görüntü boyutu, çapsal uzaklık
R	: Görüntü boyutu (obje uzayında)
R_{CCD}	: CCD alıcı çözünürlüğü
R_F	: Film çözünürlüğü
R_{IM}	: Görüntü yürüme çözünürlüğü
R_L	: Mercek çözünürlüğü
R_T	: Toplam çözünürlük

S	: Objeden merceğe uzaklık
$S(i, j)$	: Zamansal ortalama
s_x, B_1	: x yönündeki ölçek faktörü
T	:Harmonik fonksiyon
U_i	: Cisim ışını uzay vektörü
x_0, y_0	: Asal nokta koordinatları
x_{ij}, y_{ij}	: Görüntü koordinatları
(x', y'), (u, v)	: Piksel koordinatları
X, Y, Z	: Obje uzayı koordinatları
X_0, Y_0, Z_0	: Perspektif merkezinin uzay koordinatları
σ	: Standart sapma
Δr	: Çapsal distorsiyon
Δs_h, Δs_y	: Yatay ve düşey piksel boyu arasındaki diferansiyel ölçek
Δt	: Teğetsel distorsiyon
Δx, Δy	: Kamera sistemindeki sistematik hatalar
Δx_0, Δy_0, Δc	: İç yöneltme elemanlarının değişimi
$\Delta\phi$	: Eksenler arasındaki diklik
ω, φ, κ	: Kamera dönüklük açıları
λ	: Ölçek faktörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hava kameraları uzun süreden beri genellikle topoğrafik harita yapım amaçlı olarak kullanılmaktadır. Fotoğrafik film kullanan bu kameralar, görüntülerden hassas bir geometrik doğrulukla veri üretme amacına yönelik olarak dizayn ve kalibre edilirler. Geometrik özellikleri, örneğin iç yöneltme elemanları, asal uzaklık, asal noktanın konumu ve lens distorsiyon modelleri ve ayrıca film duyarlılığını belirleyen radyometrik özellikleri, iyi bir şekilde bilinmekte ve yüksek hassasiyette belirlenebilmektedir. Hava kameralarının klasik analog ve analitik aletlerle birlikte yaygın kullanımı, topoğrafik harita uygulamaları için çok güçlü bir araç olduklarını göstermektedir. Yüksek çözünürlükleri, geometrik ve radyometrik kabiliyetleri ve bu kameralardan stereoskopik olarak 3 boyutlu bilgi üretebilme özelliği şu an kullanımda olan başka görüntüleme sistemleriyle eş değer tutulamamaktadır.

Hava fotogrametrisi ile harita üretim amaçlı ortaya çıkarılan fotogrametrik metot ve teknolojiler, yakın resim fotogrametrisinde endüstriyel ve çeşitli bilimsel amaçlarla kullanılmaktadır. Bir çok metodoloji, temelde hava fotogrametrisi ile aynı ya da benzer olmasına rağmen bu metot içerisinde ayrı bir teknoloji geliştirilmiş ve yüksek duyarlıklı küçük formatta kameralar ve spesifik fotogrametrik aletler (örneğin Zeiss Stereoautograf ve wild A40 Autograf) geliştirilmiştir.

Son yıllarda Yakın Resim Fotogrametri Birliği, öncelikli olarak endüstriyel alanda kullanılmak üzere CCD (Yük Bağlamalı Düzen=Charged Couple Device) teknolojisine dayalı dijital kamera gelişimi ve kullanımından sıkça söz etmektedir. Bu kameraların, çerçeve büyüklükleri ve geometrik çözünürlükleri açısından, hava kameralarına oranla çok düşük çerçeve boyutu ve çözünürlüğe sahip oldukları söylenebilir ancak, genelde endüstri, tıp ve mimari sahalarda kullanımları yaygın bir biçimde gelişmektedir. Uygulamada dijital görüntü eşleştirme tekniklerinin kullanımı ile yüksek otomasyonlu fotogrametrik operasyonlar gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple, bu kameralarla alınan görüntülerin dijital olması, farklı disiplinlerle entegrasyonunu sağlamaktadır (Büyüksalih, 1997).

Yakın resim fotogrametrisi dijital kamera teknolojisini kullanarak hızlı bir gelişme göstermektedir. Çünkü dijital kameralar taşınabilir (portable) ve güvenli olmakla birlikte,

otomatik görüntü ölçme ve hızlı veri işleme avantajına sahiptirler (Fraser ve Shortis, 1995). Bu kameralar, mimari objelerin ölçümü, yakın mesafeden haritalama, mühendislik uygulamaları ve uzay endüstrisi gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. Bu tür alanlarda kullanılmaları, kameraların yaygınlaşmasını, çözünürlüklerinin artırılmasını ve uygun fiyatta olmaları sonucunu ortaya çıkarmaktadır (Beyer, 1995).

Dijital kameralar yakın resim fotogrametrisi ve bilgisayarda görüntüleme (machine vision) uygulamalarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Veri depolama kolaylığı, taşınabilirlikleri ve hızlı veri işleme avantajlarına sahip olmalarından ötürü, bu kameralar endüstri teknolojisi ve yapısal hareketlerin izlenmesinde orta ölçekli film kameralarının yerini almışlardır. Bir çok fotogrametrik uygulamada olduğu gibi, elde edilecek verinin doğruluğu bir çok faktörden biri olan kamera kalibrasyon doğruluğuna bağlıdır. Doğruluğun fazla önemli olmadığı veya obje büyüklüğünün metrelerle ifade edildiği fotogrametrik uygulamalarda doğrusallık eşitliğini basit mercek distorsiyonu ile kullanmak yeterli olmaktadır. Buna karşın, dijital kamera ile söz konusu ölçü doğruluğunun tespiti için geniş anlamda distorsiyon ve diğer parametrelerin dikkate alınması gerekir (Shortis vd., 1999).

Fotogrametri, bilgisayarda görme (computer vision) ve robot üretimi alanlarındaki bir çok uygulama, dijital kameralarla çekilen görüntülerden geometrik anlamda güvenilir üç boyutlu bilginin elde edilmesine dayanmaktadır. Söz konusu dijital kameraların, geometrik özelliklerinin tam bilinmemesi ve ideal görüntüleme sitemlerindeki bazı kusurlar nedeniyle, hassas bilgi verebilmeleri için geometrik kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir (Brown, 1971; El-Hakim, 1986; Gruen ve Beyer, 1986; Luhmann vd., 1987).

Dijital yakın resim fotogrametrisi (DYRF) sürekli olarak gelişme göstermektedir. Hedeflerin yüksek hassasiyette ölçümü, nesneye dayalı düşük presizyonlu ölçü metodları, bilgisayarda görme (machine vision) ve dijital fotogrametrik iş istasyonlarındaki bir çok işlem DYRF'nin uygulama alanı içine girmektedir. Film kamera kullanan fotogrametri ile karşılaştırıldığında yakın resim fotogrametrisi yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Dijital görüntüleme sistemlerinin ortaya çıkması bu metodun daha da geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Uygulama alanlarına ilişkin özet bilgi Tablo 1'de verilmektedir (Zurich, 1993; Boston, 1994; Melbourne, 1994).

Tablo 1. Dijital yakın resim fotogrametrisi uygulama alanları

Uygulama Alanı	Yapılan İşlem	Geleneksel Fotogrametri İle Yapılabilirlik	Boyutlar (m)	Doğruluk (~mm)
Uçak	Kısmi Ölçme	Var	3×3×1	±0.15
Uzay Sanayii	Yer Navigasyonu	Yok	Değişken	Değişken
	Uydu Bileşenleri	Var	2.5	±0.08
Nükleer Sistemler	Kenar konumlama	Var	1×0.5×0.5	±0.06
Otomotiv Sanayii	Otomobil	Yok	3×2×1	0.12
Tıp ve Medikal	Hasta izleme	Yok	2×0.5×0.5	0.014
	Vücut yüzeyi	Var	0.7	0.1
	Cerrahi	Yok	0.5	1.5
Havacılık	Rüzgar tüneli	Yok	9	10
Robot Sanayii	Navigasyon	Yok	-	-
	Robot sürükleyici	Yok	-	-
	İzleme	Yok	-	-
	Kalibrasyon	Yok	0.3	0.03

Bir dijital kamera sistemi, bilgisayar donanım ve yazılımı, bir veya birden çok dijital kamera ve kart okuyucu gibi aletlerden oluşmaktadır. Bir dijital kamera ise, CCD ve genel amaçlı kamera gövdesinin oluşturduğu dijital görüntü sinyallerini bilgisayar ortamında rahatlıkla kullanılabilecek şekle dönüştürebilen sabit bir dijital görüntüleme cihazını içermektedir. Günümüzde dijital kameralar, film kameralarına oranla daha yoğun biçimde bir çok farklı uygulama alanında kullanım imkanı bulmaktadırlar. Bunun sebebi, yarı iletken ve mikro elektronik teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve dijital kameraların uygulamadaki kullanım avantajlarına sahip olmalarıdır. Gün geçtikçe, performansları artırılan ve bir takım özellikleri geliştirilen dijital kameralar gelecekte azalan fiyatları ve artan öznitelikleri ile daha da cazip bir konuma gelecekleri açıktır. Bir çok dijital kamera grubu arasında, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameralar popüler duruma gelmektedir. Çünkü, düşük fiyatları ve kullanım kolaylıkları söz konusudur. Sonuç olarak orta ve yüksek çözünürlüklü kameralar fotogrametri, mimarlık, endüstriyel ölçmeler, arkeoloji, tıp, gazetecilik ve grafik sanatı gibi alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Shortis vd., 1996; Li, 1999; Ahmad ve Chandler, 1999).

Fotogrametri, değişik objelerin biçim, büyüklük, konum ve hacimleri ile ilgili nicel bilgileri bu objelere ait resimler veya fotoğraflar üzerinden çıkarabilen önemli bir bilgi

teknolojisidir. Fotogrametrik amaçlar için üretilmemelerine rağmen, film kameralarına oranla çok yoğun bir uygulama avantajına sahip olan dijital kameralar fotogrametride güçlü ve etkin dijital veri elde etme aracı olarak kullanılmaktadırlar (Ahmad ve Chandler, 1999).

Fotogrametride kullanılan dijital kameralar genelde orta ve yüksek çözünürlüklü kameralardır. Bu kameralara, Rollei Chip Back (2048×2048 piksel) (Godding ve Woytowicz, 1995), Kodak DCS-200 (1500×1000 piksel) (Fraser ve Shortis, 1995; Peipe, 1995; Peipe ve Schneider, 1995), Kodak DCS-420 (1500×1000 piksel) (Beyer, 1995), DCS-460 (3060×2036 piksel) (Peipe, 1995; Beyer, 1995), Kodak Hawkeye M1 (1280×1020 piksel) (Edmundson vd., 1991), Videk Megaplus (1320×1035 piksel) (Bösemann vd., 1990), Nikon E2/E2s (1280×1000 piksel) (URL-1, 2002) gibi kameralar örnek verilebilir. Küçük ve orta ölçekli film kameralarıyla kıyaslanabilen bu kameralar kullanıldığında 1:30000 ile 1:80000 arasında bir rölatif doğruluğa erişilebilmektedir. Gün geçtikçe teknolojik yeniliklere paralel olarak hem fiyatlarının azalması hem de yaygın bir yelpazede kullanımları söz konusu olmaktadır.

Bu tür kameraların metrik özelliklerine yönelik detaylı bir çalışma fotogrametri alanında henüz gerçekleştirilmemiştir. Metrik olmayan 35-mm film kameraların çeşitli uygulamalar için metrik performanslarının bulunması gibi, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameraların da metrik açıdan hangi düzeyde olduklarının bilinmesi gereklidir. Optik elemanlı elektronik bir görüntüleme sistemi olan dijital kamera, sadece düşük ya da yüksek çözünürlüklü olması nedeniyle değil mercek distorsiyonu, alıcı (sensör) düzlemi deformasyonu ve elektronik transfer hataları gibi görüntülerin metrik kalitesini etkileyen bir takım sistematik bozulmalardan etkilenmektedir. Sonuçta görüntüleri metrik anlamda kullanılabilir hale getirmek için, söz konusu sistematik hataların belirlenmesi, modellenmesi ve düzeltilmesi gerekmektedir. Yukarıda sözü geçen dijital kameralar ile elde edilen dijital görüntülerdeki bozulmalar, film kameraları için geliştirilen mevcut algoritma ve yazılımlarla düzeltilebilmektedir (Chen ve Shenk, 1992; Curry vd., 1986; Fraser ve Shortis, 1995; Heipke vd., 1992; Peipe, 1995; Peipe ve Schneider, 1995; Stefanidis vd., 1990). Rölatif olarak istenilen doğruluğa ulaşılmasına rağmen, film kameralarından daha farklı sistematik bozulmalara sahip olmaları nedeniyle, bu kameralar kendilerinden beklenen teorik doğruluğu verememektedirler. Bu durum, bu tür dijital kamera sistemlerinin doğruluk potansiyellerinin tam olarak ortaya çıkarılmasını engellemektedir (Fraser ve Shortis, 1995).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, fotogrametrik metotları kullanarak bir çok alanda uygulama imkanı olan dijital kameraların metrik performanslarını belirlemek ve radyometrik özelliklerini incelemektir. Çalışmada orta ve yüksek çözünürlüklü sınıfta olan beş tip kamera gövdesi ve altı farklı mercek ile doğruluk araştırması yapılmıştır. 1280×1000 çözünürlüklü Nikon E2/E2s kamerasıyla 35 mm film formatında 24 ve 50 mm, 3060×2036 çözünürlüklü Kodak DCS460 dijital kamerasıyla 20 mm, 2240×1680 çözünürlüklü Olympus E-10 kamerasıyla 9 mm, 2048×1536 çözünürlüklü Nikon Coolpix 990 kamerasıyla 8.85 mm, 1280×1024 çözünürlüklü Rollei D7 Metric kamerasıyla 7.3 mm'lik mercekler kullanılmıştır. Nikon E2/E2s kamerası 35 mm standart formata göre 1/3 oranında CCD boyutuna sahiptir. Bu yüzden gerçekte kullanılan kamera asal uzaklık boyutu yaklaşık olarak 24 mm'lik mercekte 7 mm'ye, 50 mm'lik mercekte ise 15 mm'ye karşılık gelmektedir.

Dijital kamera performanslarının incelenmesi geometrik ve radyometrik olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Geometrik performans belirlenmesinde özellikle kamera mercek sistemini etkileyen ve mercek distorsiyonu olarak adlandırılan bozucu etkiler üzerinde durulmuştur. Bu etkiler farklı matematiksel yaklaşımlarla test edilmiş, etki eden parametrelerin sayıları araştırılarak hangi metodun kullanılması durumda daha iyi sonuçların elde edileceği incelenmiştir. Farklı kameralarla alınan görüntüler yardımıyla, kullanılan matematik modellerin karşılaştırılmasının yanında, kameraların birbirlerine göre üstünlükleri de ayrıca tespit edilmiştir.

Çalışmada, DLT (Direkt Lineer Transformasyon), İlave Parametreli Işın Demetleri Yöntemi (10 parametre), BLUH (Bundle Block Adjustment) Yazılımı ve Elcovision 10 Yazılımı olmak üzere 4 farklı matematik model, dijital kameraların geometrik kalibrasyonu ve doğruluklarının tespiti aşamasında kullanılmışlardır. Bütün matematik modeller temelde doğrusallık eşitliklerine dayanırken, bünyelerinde farklı sayıda ilave parametre barındırırlar. Burada söz konusu üç metot ilave parametre olarak polinom yaklaşımı kullanırken, sadece Bluh yazılımında kullanılan ilave parametreler kutupsal yapıdadır. Bu matematik modeller ile fotogrametrik performansın ya da doğruluğun araştırılmasında farklı yapı ve sayıda parametrelerin sonuca etkileri değerlendirilmiştir.

Fotogrametride dijital kameraların özellikle mimari alanda kullanılmaları nedeniyle, bu kameraların söz konusu alanda hangi doğrulukla ölçü yaptıklarının test edilmesi gerekir.

Bu sebeple, her bir matematiksel yaklaşım ile laboratuar test ağı ve seçilen bir uygulama alanında farklı kameralarla alınan görüntülerin değerlendirmesi yapılmıştır. Laboratuar ve seçilen uygulama alanında her bir kamera için iki farklı test alanı belirlenmiştir. Bu alanlarda tesis edilen noktaların jeodezik koordinatları hesaplandıktan sonra, farklı çekim noktalarından görüntü alımı yapılarak elde edilen veriler, çeşitli nokta kombinasyonları ile sözü edilen dört metotla değerlendirilmiştir.

Çalışmada test ağı olarak KTU Jeodezi ve Fotogrametri Bölümü Fotogrametri laboratuarında tesis edilmiş 49 noktalı bir ağ (Test Alanı 1), ve yine Hannover Üniversitesi Fotogrametri enstitüsünde tesis edilmiş 36 noktalı bir ağ (Test Alanı 2) kullanılmıştır. Uygulama alanı için her bir kamera ile değerlendirme yapmak üzere Hannover Üniversitesinde 45 (Test Alanı 4), KTÜ'de ise 31 noktalı bir alan (Test Alanı 3) tespit edilmiştir. Bütün test alanlarındaki noktaların obje uzayı koordinatları jeodezik önden kestirme metodu ile belirlenmiş ve bu noktalar matematiksel metotlar ile dengeleme aşamasında hatasız olarak kabul edilmiştir.

Dijital fotogrametride alınan görüntüler üzerinde ölçme işlemlerinin yapılabilmesi için detayların net bir biçimde belirlenmesi gerekir. Bu, ancak ölçü sisteminin radyometrik doğruluğu ile sağlanır. Radyometrik test aşamasında, her bir kameranın obje uzayında nesnelere ait kayıt edebilme duyarlıkları araştırılmıştır. Dinamik aralık ve gürültü gibi radyometrik çözünürlüğe etki eden faktörler sadece iki kamera (Kodak ve Nikon E2) için test edilmiş ve belirlenmiştir. Kameraların tam siyah ve beyaz ortamlara olan tepkisini araştırmak ve böylece kullanılan CCD yüzeyi üzerindeki bozuk pikselleri belirleyebilmek için görüntüler alınmış, bu görüntüler üzerinde sözü edilen tepkiler belirlenmeye çalışılmıştır.

1.3. Orta ve Yüksek Çözünürlüklü Kamera Sistemleri

Dijital kameralar artan performansları ve düşen fiyatları ile birlikte bir çok disiplin ve alanda artan taleple kullanılmaktadır. Fiyatları 200$ (USD) ile 40000$ arasında değişmekte ve bu modeller yoğun bir kullanıcı kitlesine sahiptirler. Yeni modeller kullanıma sunulurken eski modellerde daha da geliştirilmektedir. Şu an dünyada yaklaşık 10 milyonun üzerinde dijital kamera kullanılmaktadır. Fotoğrafla ilgilenen bir çok disiplin artık bu kameraları kullanmakta ve kullanıcılarına daha etkin ve hızlı hizmet sunabilmektedirler. Fotogrametrik amaçlı dizayn edilmemelerine rağmen, özellikle yakın

resim fotogrametrisi uygulamalarında dijital kameralar veri elde etme aracı olarak kullanılmaktadırlar. Bunun yanında, son 1-2 yıldır deneme aşamasında olan, havadan dijital kamera ile fotoğraf alımı artık kullanıma sunulmaya başlanmıştır. Böylece hava fotogrametrisi de görüntü alımı aşamasında tamamen dijital teknolojiyi kullanmaya başlamıştır. Dijital kameralar, alıcı piksel sayısı ve görüntüde ürettikleri piksel sayısına göre düşük, orta ve yüksek çözünürlüklü olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar (Tablo 2). Bu sınıflama fotogrametri ve görüntü endüstrisi için de geçerli olarak kabul edilir. Aslında bu gruplandırmanın, kameraların metrik performansları ve piksel boyutu açısından yapılması daha doğru olacaktır.

Tablo 2. Dijital kamera çeşitleri

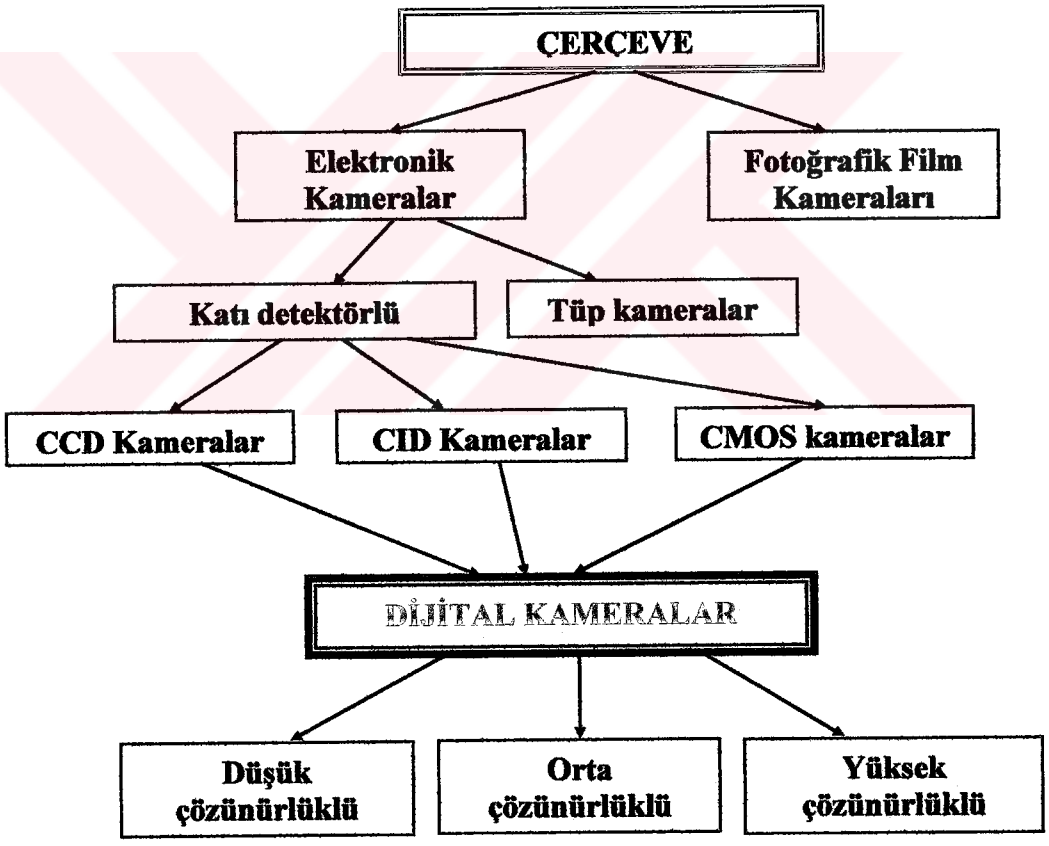
Çeşit	**Genel Tanımlamalar**
Düşük Çözünürlüklü Dijital Kameralar	- 1 milyon pikselden az - küçük ve ucuz - Hedefle ve çek modeli
Orta Çözünürlüklü Dijital Kameralar	- 1-2 milyon piksel arasında - çok geniş ayrıntılar - hedefle ve çek ve 35mm tek mercekli
Yüksek Çözünürlüklü Dijital Kameralar	- 2 milyon pikselden fazla - tek mercekli model, özellikle dijital fotoğrafçılık için üretilmiş - Bir çok aksesuar kullanılabilir.

1.3.1. Dijital Kameralar

Analog görüntü üreten film kameraların aksine, bir dijital kamera, bilgisayar ortamında işlenebilecek görüntü sinyallerini sayısal forma dönüştüren elektronik bir ölçme cihazıdır. Dijital kameralar, genel amaçlı kullanılan kamera gövdesi ve merceklerini kullanmalarına karşın görüntü kayıt düzlemi olarak CCD dedektör kullanırlar. CCD dedektörler, görüntünün uygun bir biçimde dijital formda alınmasını sağlar ve alınan görüntü üzerinde görüntü işleme operasyonlarının yapılmasını da kolaylaştırır. Bu yüzden dijital kameralar, özellikle yakın resim uygulamalarında, fotogrametrik işlemler için uygun veri alma aracı konumundadırlar. Bununla birlikte, dijital veri çıkışı sağlamak için kamera üzerinde analogdan dijitale dönüştürücüsü (A/D) olması gerekir. Kısmen veya tamamen iç yöneltme elemanlarının bilinmemesi ve görüntü üzerinde çerçeve işaretlerinin olmaması

nedeniyle, fotogrametrik açıdan dijital kameralar metrik olmayan kamera olarak adlandırılırlar.

Katı dedektörlü (Solid State), CCD, CID (Charged Injection Device), CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), video ve dijital kamera terimleri, fotogrametri, bilgisayar teknolojisi ve diğer görüntü ile ilgili disiplinlerde sıklıkla rastlanan ve birbirlerinden küçük farlılıkları olan terimlerdir. Bütün bu kameralar film kameralarının aksine tamamen elektronik araçlardır. Bununla birlikte, CCD kamera bu kameralar içinde en önemlisidir, çünkü bu kamera ışığı görüntüye dönüştüren katı hal alıcısı kullanmaktadır. CCD ve CID kameralar katı hal kameraların iki ana tipidir ve bu kameralar görüntüleme için CCD ve CID alıcılarını kullanırlar. Standart veya eski tip CCD ve CID kameralar üzerlerinde veri depolama ve analogdan dijitale dönüştürücüler bulundurmazlar.



Şekil 1. Kamera sistemleri arasındaki ilişki

Bu kameralarla alınan görüntüler, analog-dijital (frame grabber) dönüştürücü aracılığıyla dijital hale getirilip bilgisayar ortamına aktarılırlar. Dijital kameralar ise direkt olarak dijital sinyaller üretebilecek kapasiteye sahiptirler. Günümüzde bir çok dijital

kamera, still video kameralar gibi üzerinde analog-dijital dönüştürücü taşıdıklarından yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu kameralarda %90 oranında CCD alıcı kullanılmakta iken, az bir miktarda ise CMOS alıcısı görüntü kaydetme ünitesi olarak kullanılmaktadır. Bunun nedeni, CCD alıcıların diğer alıcılarla karşılaştırıldıklarında düşük maliyetli olmaları, az gürültülü görüntü kaydetmeleri, yüksek dinamik aralıklı olmaları ve güvenli olmaları şeklinde ifade edilebilir (Shortis ve Beyer, 1996). Şekil 1'de dijital kamera sistemleri arasındaki ilişki gösterilmektedir.

1.3.1.1. Dijital Kameraların Çalışma Prensipleri

Doğal bir obje sürekli olarak değişen gölge ve renklerle gösterilebilirken, dijital bir görüntü ayrı piksellerin gri değerlerini gösteren bir dizi olarak düşünülebilir. Dijital kameralarla görüntü işleme işlemi iki kısma ayrılabilir. İlk aşamada, dijital kamera ile film kameralarının işlevleri aynıdır. Mercekler, kamera açıklığı objeden gelen ışığı alırlar ve odaklanırlar. Odaklanan ışık, görüntünün oluşturulması için görüntüleme aracına ulaştığında ikinci aşamadaki farklılıklar oluşmaya başlar. Geleneksel film kameralarında gümüş halojen film parçaları, görülmeyen ışığı düzenlemek ve daha sonraki aşamalarda ışığı görülebilir ve kararlı hale getirmek için ışığa kimyasal reaksiyon verirler. Diğer taraftan, katı detektörlü algılayıcılar (genellikle CCD), sayısal kameralarda ışığa, elektriksel reaksiyon gösteren görüntüleyici olarak kullanılırlar.

Yarı iletken olan bir CCD, ışığa tutulduğunda her bir algılayıcı elementi bağımsız olarak gelen ışığın parlaklığına bağlı oransal büyüklüklerde elektronik uyarı oluşturur. Kamerada bulunan analogdan dijitale dönüştürücü içerisinde, analog elektrik sinyalleri, kamera içinde veya ek bir cihazda kayıt edilebilecek şekilde bir dizi sayısal kod serilerine dönüştürülür. Görüntü bir kez sayısal formda oluşturulduğunda, bilgisayar tarafından işlenebilir, başka bir bilgisayara aktarılabilir veya elektronik olarak transfer edilebilir. Şekil 2'de bir sayısal kameranın ana bileşenleri ve çalışma prensipleri gösterilmektedir.

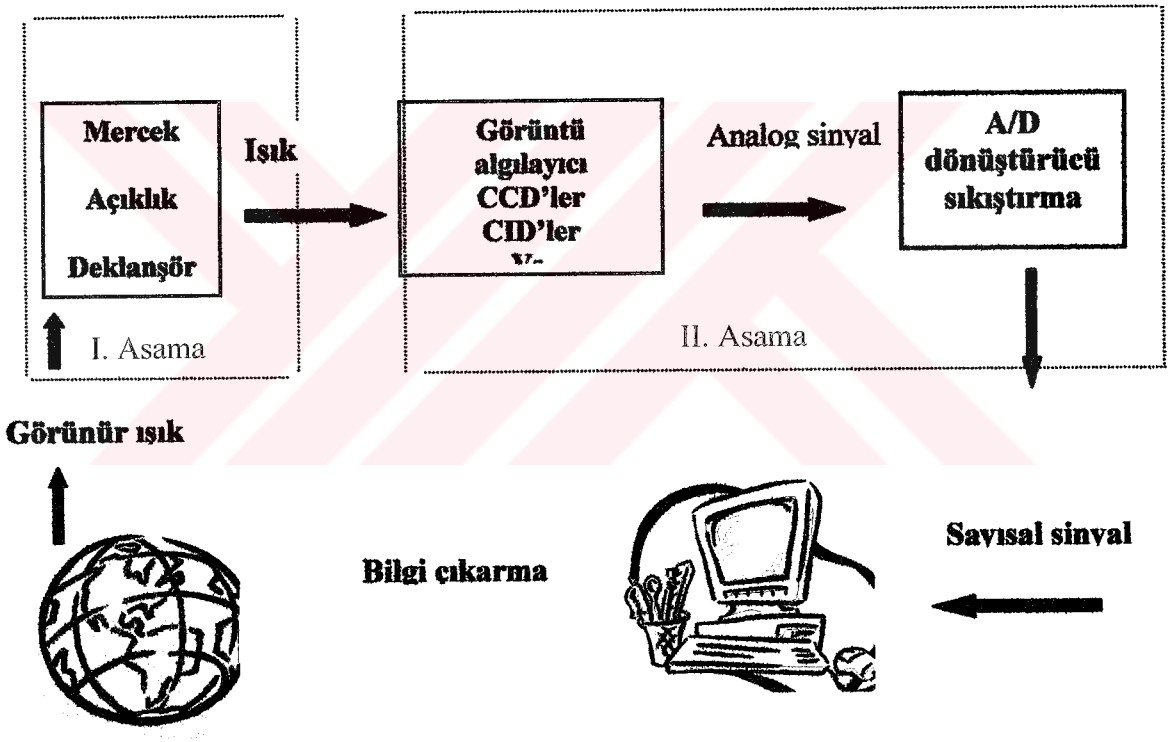
1.4. Dijital Kamera Sistemleri

Dijital kameraların benimsenmesi, fotogrametrinin analog ve analitik tekniklerden dijital teknolojiye geçişine önemli bir katkı sağlamıştır. Dijital kameralar, bu geçiş

aşamasında görüntüleme sisteminin bir parçası olmuşlardır. Herhangi bir amaç için bir dijital kamera kullanmak ve kameraların uygulamalarını desteklemek için bilgisayar yazılımı ve donanımı gereklidir. Böylece bir dijital kamera sistemi şekillendirilmiş olur.

Bilgisayar donanımı, dijital kamera ile çekilmiş resimleri görüntüleme, işleme, depolama ve transfer işlemleri için gereklidir. Buna ilave olarak sonuç görüntülerinden metrik bilgileri çıkarmak için bu değerlendirmeyi yapabilen yazılımlara (Pictran, Rollei Metric, Elcovision 10, Photo Modeler vb.) ihtiyaç vardır. Buradaki amaç görüntü ölçümü, görüntü yöneltmesi ve fotogrammetrik dengeleme gibi işlemlerin gerçekleştirilmesidir.

Tipik bir dijital kamera sistemi, orta veya yüksek çözünürlüklü bir dijital kamera, bir bilgisayar ve metrik bilgileri elde etme amacıyla üretilmiş bir yazılımdan oluşmaktadır.



Şekil 2. Dijital kamera bileşenleri ve dijital görüntü işleme

1.5. Dijital Kamera Sistemlerinde Çözünürlük

Dijital görüntü, dijital fotogrametri için temel veri kaynağıdır. Ayrıca, görüntü kalitesi verilerin değerlendirilmesinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Bir dijital kamera sisteminde, geometrik ve radyometrik olarak adlandırılan görüntü çözünürlüğü, görüntü

kalitesine etki eden mercek özelliklerine, görüntüleme ortamına, görüntü işleme ve kamera sistemine etki eden diğer faktörlere bağlıdır.

Çözünürlük, kamera, tarayıcı, yazıcı ve ekran gibi bir çok girdi ve çıktı cihazıyla ilgili olarak kullanılan bir terimdir. Bu çalışmada özellikle kameralarla ilgili çözünürlük terimi üzerinde durulacaktır. Genel tanımlama ile her hangi bir görüntüleme aletinin çözünürlüğü, gerçek detayı hangi doğrulukta gösterebilmesiyle ilgilidir. Bir dijital kamera sistemi, birbiri ile bağlantılı bir çok bileşenden meydana geldiği ve görüntüleme işlemi sırasındaki bir çok faktörden etkilendiğinden dolayı, bütün sistemin çözünürlüğü aşağıdaki parametrelere bağlı karmaşık bir fonksiyondur. Bu parametreler,

- Kamera mercek tipi ve kalitesi (örneğin odak uzaklığı, kullanılan malzeme),
- Görüntü kayıt ortamı (katı halli dedektör, duyarlılık),
- Görüntü veya obje ortamı (kontrast, hareket, kameraya olan uzaklık),
- Görüntü işleme (aydınlatma, kamera konumu),
- Görüntü transformasyonu (A/D dönüşümü, sıkıştırma/gevşetme) ve görüntüleme,

şeklinde özetlenebilir. Çözünürlük kavramı geometrik ve radyometrik çözünürlük olmak üzere iki ana guruba ayrılır. Bir dijital kamera sisteminin kalitesi geometrik ve radyometrik çözünürlüğü ile değerlendirilir.

1.5.1. Geometrik Çözünürlük

Geometrik çözünürlük ya da geometrik ve konumsal özellikleri ele alan konumsal çözünürlük, görüntüleme sisteminin detayları ne kadar doğru bir şekilde ayırt edebilmesinin ölçütüdür. İnsan gözü 50 gri tondan fazlasını algılayamadığından veya ayırt edemediğinden, analog tabanlı fotogrametrik uygulamalarda geometrik çözünürlük radyometrik çözünürlükten daha önemli rol oynar. Diğer yandan, dijital fotogrametride, görüntüler bilgisayar ortamında işlendiğinden radyometrik çözünürlük de dijital sistemler için önem arz etmektedir. Bununla birlikte, bir çok kamera 24 bit renk derinliğinde radyometrik çözünürlükte görüntü ürettiğinden, bu kameralar için geometrik çözünürlük daha önemli bir kriterdir. Bir dijital görüntünün uzaysal çözünürlüğünün belirlenmesi iki ayrı ölçümle ilişkilidir (Baxes, 1994):

- **uzaysal yoğunluk:** görüntüdeki piksel sayısının ölçümü.
- **optik çözünürlük:** görüntüleme sisteminin orijinal detayı ayırma gücüdür. Bu ölçüt, görüntüleme sisteminin optik kalitesi, piksel boyutu ve algılama sisteminin elektroniği ile ilgilidir.

Film tabanlı bir görüntüleme sisteminin toplam geometrik çözünürlüğü (1) bağıntısı ile belirlenir (Warner vd., 1996).

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_{IM}} \qquad (1)$$

Burada R_T, R_L, R_F ve R_{IM} sırasıyla, sistemin toplam çözünürlüğü, mercek çözünürlüğü, film çözünürlüğü ve görüntü yürüme çözünürlüğüdür. (1) bağıntısı dijital kamera sistemleri için de geçerlidir. Ancak burada R_F yerine dijital kameradaki CCD alıcının çözünürlüğü R_{CCD} kullanılır.

Yukarıda bahsedildiği gibi bütün dijital kameraların en önemli kısmı, ışığa duyarlı binlerce sayıda pikselin bulunduğu CCD elemanıdır. Kamerada üretilen görüntünün geometrik kalitesi, piksel sayısı ve piksel boyutuna bağlıdır. Mercek kalitesi, görüntü işleme, sinyal dönüşümü ve transferi de çözünürlüğe etki eden diğer parametrelerdir. Bir dijital kameranın uzaysal çözünürlüğü, esas olarak CCD alıcısındaki piksel büyüklüğünün CCD boyutuna oranına veya CCD'deki piksel sayısına bağlıdır (Fraser ve Shortis, 1995). Sadece, piksel sayısının çok olması geometrik çözünürlüğün çok daha iyi olması anlamına gelmemektedir. Bunun aksine, piksel boyutunun küçük olması geometrik çözünürlüğün yüksek olduğunu ifade etmektedir. Günümüzde bir çok dijital kamera yaklaşık 10 μm civarında piksel boyutuna sahiptir. Görüntüleme ile ilgili bir çok disiplin ve fotogrametride, dijital kameralar, bulundurdukları piksel sayısına göre düşük, orta ve yüksek çözünürlüklü gibi farklı kategorilere ayrılmaktadırlar (Bösemann vd., 1990; Godding ve Woytowicz, 1995; Peipe, 1995; Peipe ve Schneider, 1995).

Aşağıda farklı görüntüleme araçları ve ortamlarına ait geometrik çözünürlüklerle ilgili bir takım standartlar verilmiştir (Curtin, 1998). Bunlar,

- İnsan gözünün ayırma gücü veya çözünürlüğünün 120 milyon piksel olması,

- 35 mm'lik bir filmin çözünürlüğünün 20 milyon piksele karşılık gelmesi,
- Bir çok dijital kameranın 300000 ile 500000 piksel arasında çözünürlüğe sahip olması,
- Bazı profesyonel dijital kameraların yaklaşık 10 milyon piksel çözünürlükte olması,

şeklinde özetlenebilir.

1.5.2. Radyometrik Çözünürlük

Dijital görüntüdeki her bir piksel yerleştiği konuma ait gerçek detay ile ilgili yoğunlukları gösterir. Radyometrik çözünürlük, orijinal parlaklık ve renk değerinin görüntü üzerinde gerçeğe ne kadar yakın ve doğru gösterilebilirliğinin bir ölçütüdür. Bu yüzden, radyometrik çözünürlük parlaklık çözünürlüğü ve renk çözünürlüğü şeklinde ikiye ayrılır.

Parlaklık çözünürlüğü, gerçekteki parlaklığın piksel üzerinde ne kadar iyi gösterilebilirliği olarak tanımlanırken, renk çözünürlüğü dijital görüntüdeki renk derinliği olarak tanımlanabilir. Radyometrik çözünürlük bit sayısı ile gösterilir ve genelde her kamera için sabit bir değer alır. Günümüzde, çoğu orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera her bir renk bandı için (kırmızı, yeşil, mavi) 8 bit parlaklık yoğunluğu ile birlikte toplam 24 bitlik radyometrik çözünürlüğe sahiptir. Bunun yanında 30 bit renk derinliğinde görüntü üreten dijital kameralar da mevcuttur (Li, 1999). Son yıllarda renklerin önemi artmasına rağmen, yakın resim fotogrametrisi uygulamaları için parlaklık çözünürlüğü özellikle dikkate alınır. Bunun nedeni, dijital fotogrametrik ölçülerin pikselin gri değeri temeline dayanmasıdır.

1.6. Dijital Kameraların Film Kameralarına Göre Avantaj ve Dezavantajları

Bir çok benzerlikleri olmasına rağmen bir dijital kamera bir çok yönüyle de özellikle silikon alıcı yapısıyla film kameralarından farklıdır. Tablo 3 her iki kamera sistemleri arasındaki temel farklılıklar özetlenmektedir.

Tablo 3. Dijital ve film kameralar

Özellik	Dijital Kameralar	Film Kameralar
Görüntüleme ortamı	Katı detektör algılayıcıları (CCD, CID, CMOS vs)	Gümüş halojen film
Görüntü çözünürlüğü	Genellikle film kameralardan daha düşük	Yüksek çözünürlük
Görüntü kaydı	Magnetik veya katı detektör araçları	Filmler, slaytlar, baskılar vs.
Çıktı ürünü	Dijital görüntü	Kart baskı
Görüntü işleme ve değerlendirme	Sayısal görüntü işleme	Laboratuarlarda kimyasal işlemler
Görüntü aktarımı	Bilgisayar ağı, elektronik posta	Faks, posta vb.

Dijital kameraların film kameralar üzerindeki temel üstünlüğü, analogdan dijitale dönüştürücüsü ile bilgisayar ortamında kullanılabilir sonuç ürünleri sağlamasıdır. Sağladıkları üstünlükler aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Film banyosu yoktur.
- Film taranması yoktur.
- Kimyasal madde kullanılmaz.
- Görüntü hazır halde kayıt edilir, değerlendirilir ve işlenir.
- Daha düşük çalışma giderleri vardır.
- Görüntüler internet ve elektronik posta aracılığı ile kolayca iletilebilir.

Her bir ürünün olumlu ve olumsuz yönleri olabileceği düşünüldüğünde, dijital kameraların da yüksek fiyat, düşük çözünürlük ve küçük görüş alanları gibi bazı dezavantajları söz konusudur. Günümüzde, dijital kameralar için bu dezavantajlar gün geçtikçe ortadan kalmaktadır.

1.7. Kamera Sistemlerinin Fotogrametrik Uygulamaları

Bu bölümde, özellikle endüstri ve mühendislik alanlarında metrik amaçlarla kullanım kolaylığına sahip olan orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemlerinin fotogrametrik uygulamaları ile ilgili konular anlatılacaktır.

Bilgisayar ve dijital teknolojinin gelişimi ile birlikte, yakın resim fotogrametrisi de kendini bu teknolojiye paralel olarak geliştirmiştir. Görüntü ölçme bilimi (videometrics) olarak ta bilinen yakın resim fotogrametrisi, üç boyutlu bilgi elde etme aracı olarak uzay

sanayi, uçak sanayi, otomobil sanayii, gemi inşaatı, mimari obje ölçümü ve diğer mühendislik dallarında düzenli olarak artan taleple kullanılmaktadır. Endüstriyel ve mühendislik alanlarındaki dijital yakın resim fotogrametrisi uygulamaları,

- endüstriyel ve büyük ölçekli mühendislikte yüksek doğruluklu ölçmeler,
- mimari ve arkeolojik kayıt, dokümantasyon ve trafik kazalarında ölçüm uygulamaları,

şeklinde iki ana gurupta toplanabilir (Fraser, 1998).

Bir takım sınırlamalardan dolayı (küçük format, bilinmeyen veya değişen iç yöneltme elemanları, düşük çözünürlük) düşük çözünürlüklü dijital kamera sistemlerinde istenilen doğruluğa ulaşılamayabilir. Bu yüzden, uygulamalarda daha çok film, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameralar kullanılır. Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameralar, fotogrametrik sistemlerde gerçek zamanlı (online) kullanılabilirler. Ancak, bu kameralar daha çok gerçek zamanlı olmayan (offline) çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu tip dijital kamera sistemleri için, işaretleme, aydınlatma, zaman ve maliyet analizi, ağ dizaynı ve kalibrasyon konuları önemlidir.

a) İşaretleme ve Aydınlatma: Endüstriyel ve mühendislik alanındaki çoğu fotogrametrik uygulamalarda, bir referans sisteminde tanımlı obje üzerindeki noktaların veya işaretlerin üç boyutlu koordinatlarının belirlenmesi amaçlanır. Obje üzerinde bazı doğal noktalar işaret olarak kullanılabilmesine rağmen, bir çok durumda daha güvenli ve doğru sonuçların elde edilmesi için, ilave noktalar yada işaretler kullanılır. Geleneksel siyah beyaz kağıt işaretlerle karşılaştırıldığında, hassas çalışmalar için genellikle yansıtmalı hedefler kullanılmaktadır. Yansıtmalı hedeflerin yada işaretlerin en büyük avantajı, düzenli bir pozlanma ve aydınlatma durumunda ışığı iyi bir şekilde geri yansıtabilmeleridir. Bu işaretlerin kullanımı, görüntüler üzerinde rahatlıkla bulundukları platformdan ayrılmalarını sağlar ve otomatik yada manuel ölçüm için büyük ölçüde kolaylık sağlarlar. İşaretlerin yapıları ve renklerine ilaveten, büyüklükleri ve biçimleri de görüntü ölçüm doğruluğunu etkilemektedir. İşaret büyüklüğü görüntü ölçeği dikkate alınarak belirlenmelidir. Beyer 1992'de yaptığı çalışmada 6 piksel çapında dairesel işaretlerle iyi bir doğrulukta dijital görüntü ölçümü gerçekleştirmiştir. Yakın gelecek ve hatta günümüzde kodlu işaretler daha çok kullanılmaktadır (Beyer, 1992). Çünkü bu

noktalar manuel ölçüm yerine otomatik ölçüm tekniğine imkan sağlamaktadırlar (Fraser, 1997/2).

Aydınlatma, obje üzerindeki ışık yoğunluğunu belirler ve bunun sonucu görüntü ölçüm hassasiyetine etki eder. Eğer obje kağıt işaretlerle işaretlenmiş veya bütün obje işaretlemesiz olarak haritalanmak istenirse, görüntü işleme için düzgün ve düzenli bir aydınlatma önemli bir rol oynar. Yansıtmalı işaretler bu tür gereksinimleri yerine getirebilmektedir.

b) Fotogrametrik Ağ Oluşturma: Fotogrametrik üçgenlemenin doğruluğuna etki eden iki ana faktör kameranın açısal çözünürlüğü ve fotogrametrik ağın geometrisidir. Birinci faktör, görüntü ölçme hassasiyeti ve kamera yapısı ile sınırlandırılır. İkinci faktör ise, kameranın doğruluk potansiyelini artırmak için iyi bir ağ tasarımı yapılması gerektiğidir. Farklı ağ tasarımları ve aynı alıcılar üç boyutlu ölçme doğruluğunda farklı büyüklükler ortaya çıkarırlar (Fraser, 1996).

Ağ tasarım problemleri birbiriyle ilişkili 4 ayrı sınıfa ayrılmaktadır (Grafarend, 1974). Bunlar,

- 0. derece tasarım (ZOD) (datum problemi),
- 1. derece tasarım (FOD) (konfigürasyon problemi),
- 2. derece tasarım (SOD) (ağırlık problemi),
- 3. derece tasarım (TOD) (yoğunluk problemi)'dır.

Bunlardan 1. derece tasarım fotogrametrik projeler için gereklidir, diğerleri daha çok jeodezik ağlar için kullanılmaktadır (Fraser, 1996).

Yakın resim ölçüm uygulamalarında, fotogrametrik üçgenlemenin doğruluğu, obje uzayındaki röletif doğruluk ile tanımlanır. Çok istasyonlu fotogrametrik ağlar için, bir ağdaki üçgenlemenin kaba doğruluğu (2) eşitliği ile ifade edilir (Fraser, 1992).

$$\frac{\sigma_c}{R} = \frac{q}{\sqrt{k}} \frac{\sigma}{r} \qquad (2)$$

Burada, r görüntü boyutunu, R, r'nin obje yüzeyi üzerindeki karşılığını, σ görüntü koordinatının standart hatasını, q güçlü bir fotogrametrik ağı tarif eden tasarım faktörünü, k kamera istasyon noktasındaki ortalama çekim sayısını göstermektedir. Temel olarak, fotogrametrik ağ konfigürasyonu tasarımı, doğruluk gereksinimi, obje şekli, obje boyutu ve maliyet esasına bağlı olarak,

1. Kullanılan kamera tipi ve görüntü ölçüm metodu,
2. Kamera istasyon yerleşimi ve sayısı,
3. Kamera yüksekliği (optik eksenin yönü, kamera dönüklük açıları),
4. Her bir istasyonda çekilen görüntü sayısı,

işlemleri ile gerçekleştirilmelidir.

(2) eşitliğindeki r ve σ, 1. madde ile belirlenir, q 2. ve 3. maddelerle belirlenir, k ise 4. madde ile belirlenmektedir. Fotogrametrik ağ konfigürasyonunda bazı sınırlamalar söz konusudur. Bu sınırlamalar,

- görüntü ölçeği sınırlaması,
- çözünürlük sınırlaması,
- çalışma alanı sınırlaması,
- alan derinliği sınırlaması,
- geliş açısının sınırlaması,
- nokta sayısı ve dağılımı sınırlaması,
- görüş alanı sınırlaması,
- görünürlük sınırlaması,

şeklinde özetlenebilir (Mason, 1995). Bir dijital kamera sisteminde fotogrametrik ağın en önemli avantajı, gerektiğinden fazla sayıda görüntü alarak konfigürasyonu güçlendirebilmektir. Çünkü, hızlı ve otomatik ölçüm tekniği kullanılması nedeniyle, fazla görüntü alımı iş yoğunluğunu artırmamaktadır.

c) Kamera Sistem Kalibrasyonu: Film tabanlı kameraların iç yöneltme elemanlarının sabit veya bilinmesine karşın, dijital kamera sistemlerinin geometrik bir takım bozulmalardan dolayı iç yöneltme elemanları durağan değildir. Teorik ve uygulamalı çalışmalar, bu kameraların metrik amaçlı kullanılması durumunda kalibrasyona tabi tutulmaları gerektiğini göstermektedir.

Çeşitli avantaj ve dezavantajlarıyla birlikte, bir çok kamera sistemi kalibrasyon metotları mevcuttur. Kendi kendine kalibrasyon metodu, yakın resim fotogrametrisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Başarılı bir kendi kendine kalibrasyon yapabilmek için, görüntü ağı konfigürasyonunun kuvvetli olması gerekir (Li, 1999).

d) Zaman ve Maliyet Analizi: Zaman ve maliyette bir çok ölçme sistemi için önemli faktörlerdir. Yapılan bir fotogrametrik proje, problemin analizi, ağ dizaynı, obje hazırlama ve işaretleme, görüntü alımı, görüntü ölçümü, veri işleme ve sonuçların gösterimi adımlarından oluşmaktadır. Bir çok endüstriyel ve mühendislik ölçme uygulamaları sonuçların hızlı bir şekilde elde edilmesini gerektirir. Diğer yandan, bu uygulamaların ölçü yükü oldukça ağırdır, bazen binlerce noktayı içeren yüzlerce görüntü alımı bir proje için gerekli olmaktadır. Fotogrametride dijital kamera sistemlerinin ilk işi, hızlı görüntü alma, görüntü transferi ve gelişmiş en küçük kareler algoritmalarını içeren otomatik görüntü ölçme işlemleridir. Yakın resim fotogrametrisinin CAD ile entegrasyonu ağ dizaynı ve veri sunumunu oldukça hızlandırmakta ve kolaylaştırmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, dijital yakın resim fotogrametrisi projeleri büyük bir zaman tasarrufu ile yarı otomatik veya otomatik şekilde gerçekleştirilebilir.

Zaman faktörü dikkate alındığında, online ve offline dijital kamera sistemlerinden söz etmek gerekir. Online sistemler gerçek zamanlı ölçüm yapabilmektedirler. Bu yönüyle bu sistemler üretim ve izleme veya robot çalışmalarında yararlı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bununla birlikte, offline sistemlerle karşılaştırıldıklarında doğruluk, esnek olmama, maliyet ve donanım gereksinimleri bu sistemlerin dezavantajlarıdır. Dijital yakın resim fotogrametrisi sistemleri için offline basitçe sonuçların bütün resimlerin alımından sonra elde edilebileceği olarak tarif edilir. Diğer yandan offline sistemler geleneksel fotogrametride veri alımı, görüntü ölçümü ve işlemesi adımlarında kullanılırlar. Tablo 4, mevcut dijital kamera sistemlerinin potansiyel hızını göstermek için Fraser tarafından yapılan birkaç örnek çalışmayı özetlemektedir. Faklı doğruluk gereksinimi ve

farklı obje şartları veya değişik görüntü ağı konfigürasyonu nedeniyle değişik projelerin hızları birbirinden oldukça farklı olmaktadır (Fraser, 1996;1998).

Ölçme tekniği seçimi düşünüldüğü zaman, maliyet kullanıcılar için önemli bir diğer faktördür. Maliyet doğrulukla ilişkili olduğundan, maliyet ile doğruluk arasında bazı ayarlamalar yapılabilir. Yapılacak uygulama için maliyet ön planda tutulduğunda, düşük çözünürlüklü kameralardan oluşan sistemler daha uygundur. Sonuç olarak fazla maliyet yüksek doğruluklu sistemlerin kullanılmasını bir ölçüde engellemektedir.

Tablo 4. Bazı Dijital Yakın Resim Fotogrametrisi işlemlerinin doğruluğu ve hızları (Fraser, 1996; 1998)

Proje	Açıklamalar	Hız ve Doğruluk
15 m uzunluğunda helikopterin online ve offline ölçümü	5080 nokta kullanılmış (bu noktaların 80'i kodlu nokta, 3000 doğal nokta, 2000 ise kazıma noktasıdır) 160 görüntü alınmıştır.	17 nokta/dakika (işaretli nokta), 20-30 nokta/dakika (doğal nokta) 1:15000 rölatif doğruluk
Offline buhar kazanının boyutlarının ölçümü	200 nokta ölçülmüş 40 kamera istasyonun kullanılmış	1 nokta/dakika 0.08 mm konum doğruluğu
Kapı panelinin boyutlarının offline ölçülmesi	400 nokta ölçülmüştür. 20 görüntü alınmıştır.	5 nokta/dakika 0.025 mm konum doğruluğu
Türbün yüzeyinin offline ölçümü	127 nokta ölçülmüş 14 görüntü	2 nokta/dakika 0.01 mm konum doğruluğu

Fraser 1998'de yaptığı çalışmada dijital yakın resim fotogrametrisi sistemlerini maliyet ve doğruluk yönünden üç sınıfa ayırmıştır.

- **Üst sınıf sistemler:** Tamamen otomatik, yüksek doğruluk ve yüksek maliyete sahip sistemlerdir. Endüstriyel fotogrametrik uygulamalarda kullanılan bu sistemler, tek kameralı offline sistem veya çok kamera konfigürasyonlu gerçek zamanlı sistemlerdir.
- **Orta sınıf sistemler:** Orta derecede doğruluk ve orta ya da yüksek maliyetli olan geleneksel fotogrametrik iş istasyonlarıdır. Bu sistemler stereo görüş, üç boyutlu veri üretme ve otomatik işlem yapabilmektedirler.

- **Alt sınıf sistemler:** Düşük maliyet ve doğruluklu sistemlerdir. Bu sistemler fotogrametrik üç boyutlu veri elde etme çalışmalarında kullanılmaktadır.

1.8. Dijital Kamera Sistemlerinin Uygulama Alanları

Son yıllarda, dijital yakın resim fotogrametrisi dijital teknoloji ve algoritmalarla uyum içinde endüstriyel ve mühendislik alanlarındaki topoğrafik olmayan uygulamalar için yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemleri dijital yakın resim fotogrametrisinde önemli rol oynarlar. Bu sistemler, güçlü ve giderek azalan maliyetleri ile etkin ölçme araçlarıdırlar. Yüksek doğruluk ve orta dereceli maliyet söz konusu olduğu zaman, orta ve yüksek çözünürlüklü kamera sistemlerine gereksinim duyulur. Bu yönleri ile söz konusu kameralar bir çok uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

Son üretilen dijital kamera sistemleri, animasyon ve grafik gösterimi sağlayan, hatta sunum ve gösterimi kolaylaştıran CAD programları ile kolaylıkla entegre olabilen sistemlerdir. Bir çok güçlü yazılım (Vexcel firması Foto-FMS yazılımı, EOS firması Photomodeler yazlımı, PMS firması Elcovision 10 yazılımı gibi) ve dijital yakın resim fotogrametrisi otomasyonu ile, kullanıcılar görüntülerden hızlı ve kolay bir şekilde doğru ve hassas üç boyutlu bilgi elde edebilmektedirler. Bir çok durumda, uygun bir yazılımla donatılmış bilgisayar sistemi ile entegre bir orta veya yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemi, güçlü bir yakın resim fotogrametrisi aracı olarak farklı uygulamalarda kullanılabilmektedir.

Bir çok avantaja sahip olmalarından dolayı, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemleri, değişik alanlarda ölçüm tekniği olarak kullanılmaktadırlar. Bu alanlara,

- Endüstriyel ve mühendislik uygulamaları,
- Arkeolojik ve antropolojik uygulamaları,
- Trafik kazaları ve münazara sanatı uygulamaları,

örnek olarak verilebilir. Yukarıda belirtilen uygulama alanlarına ilaveten, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kamera sistemleri küçük alanların haritasının yapımı, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) için veri sağlama, bilgisayar grafikleri, film, video ve animasyon gibi alanlar için de kullanılabilmektedir.

1.9. Dijital Kamera Sistemlerinde Hata Kaynakları

Film kamerası ile alınan bir görüntü bir çok etkenden dolayı deformasyona uğrar. Bu etkenler, mercek ve film kalitesi, atmosferik kırılmanın etkisi olarak verilebilir. Son yıllarda, deforme olmuş görüntülerden doğru metrik bilgiyi çıkarmak için görüntü deformasyonuna neden olan hata kaynaklarının modellenmesi ve düzeltilmesine yönelik bir çok çalışma yapılmaktadır. Dijital kameraların ortaya çıkışı bir çok yararlar getirmiştir. Ancak, dijital kamera sistemlerinin de film kameralarda olduğu gibi görüntü deformasyonuna sebep olan hata kaynaklarının araştırılması gerekir.

Dijital fotogrametride, dijital görüntülerin geometrik ve radyometrik bilgileri bilgisayar ortamında işlenir. Genelde, dijital görüntüler, objelerin iki boyutlu uzayda temsil edildiği geometrik bilgileri ve görüntüdeki radyometrik özellikleri içerir. Sonuç olarak, ideal bir görüntü sisteminin amacı orijinal görüntüye ait geometrik ve radyometrik özellikleri değiştirmeden korumaktır.

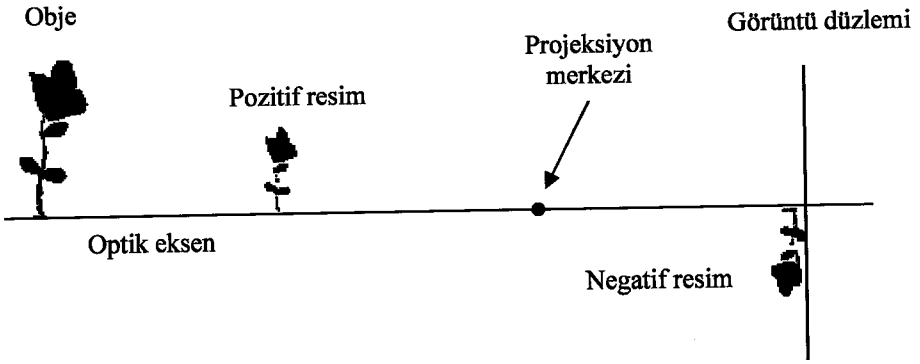
1.9.1. Geometrik Açıdan Hataların Değerlendirilmesi

Hava fotoğrafları için, araziden gelen ışın sapmadan doğru bir yol boyunca kameraya ulaşması zorunluluğu söz konusudur. Kamera kalitesinin yanında refraksiyon, hava türbülansı gibi faktörler görüntü noktalarının yerleşimini etkilerler. Bununla birlikte, orta ve yüksek çözünürlüklü dijital kameralar, sınırlı çözünürlükleri ve alıcı boyutları nedeniyle öncelikli olarak yakın mesafe görüntü alımları için uygundur. Bu yüzden refraksiyon ve hava türbülansı gibi faktörler, orta ve yüksek çözünürlüklü kameralar kullanıldığında dikkate alınmazlar.

Pinhole kamera modeli, distorsiyondan bağımsız ideal bir kamera geometrisini göstermede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde uygulanan sistem basit bir merkezi transformasyondur (Melen ve Balchen, 1994). Bu yüzden ideal bir görüntü geometrisi,

- projeksiyon merkezi bir nokta olmalıdır,
- Işık doğru bir şekilde yayılmalıdır,
- Görüntü ortamı, sistemin optik eksenine dik olan bir düzlem olmalıdır,

şeklinde özelliklere sahip olmalıdır. Bunlara ilave olarak, pikseller eşit büyüklükte ve düzgün bir biçimde alıcı yüzeyine dağılmış olmalıdır. Pinhole kamera kavramı Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3. Pinhole Kamera Kavramı

İdeal durumda, pozitif bir görüntüde resim koordinatı ile üç boyutlu obje uzayı koordinatları arasındaki ilişki (3) bağıntısı ile gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ -c_i \end{bmatrix} = \lambda_j \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_j - X_i^c \\ Y_j - Y_i^c \\ Z_j - Z_i^c \end{bmatrix} \tag{3}$$

Burada x_{ij}, y_{ij} resim koordinatlarını, λ_j j noktasındaki ölçek faktörünü, m (9 eleman) obje uzayı ile resim uzayı koordinat sistemleri arasındaki dönüklük matrisini, X_j, Y_j, Z_j değerleri j noktasının obje uzayı koordinatlarını, X_i^c, Y_i^c, Z_i^c ise i. perspektif merkezinin uzay koordinatlarını göstermektedir. Bütün görüntü noktaları perspektif merkezinden c_i odak uzaklığındaki görüntü düzleminde oluştuğundan, fotogrametride iyi bilinen kolinarite eşitliği (4) bağıntısı ile ifade edilir.

$$x_{ij} = -c_i \frac{m_{11}(X_j - X_i^c) + m_{12}(Y_j - Y_i^c) + m_{13}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

$$y_{ij} = -c_i \frac{m_{21}(X_j - X_i^c) + m_{22}(Y_j - Y_i^c) + m_{23}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)} \tag{4}$$

Analitik ve dijital fotogrametrinin temel matematik modelini oluşturan (3) ve (4) eşitlikleri, obje noktası, perspektif merkezi ve görüntü noktasının aynı doğru üzerinde olduğu ideal bir görüntü geometrisinin matematiksel ifadesidir.

1.9.2. Geometrik Distorsiyon

Dijital kamera sistemleri geometrik ve radyometrik açıdan bir takım kusurları içermektedir. Bu, alınan görüntülerin kesinlikle bir bozulmaya uğradığı anlamındadır. Görüntü deformasyonu, orijinal detay ile ilgili sonuç görüntüsü üzerinde yapılan metrik ölçmeler sonucunda belirlenebilir. Görüntü deformasyonu, sistemin kayıt ünitesinin fiziksel hareketinden, bu ünitenin kameraya iyi yerleştirilememesinden veya görüntü alımı sırasında CCD'nin elektronik yetersizliklerinden ortaya çıkmaktadır (Mcglone vd., 1989). El-Hakim vd. 1989'da yaptıkları çalışmada, bir dijital görüntüdeki geometrik distorsiyonun, mercek distorsiyonu, optik eksenin görüntü düzlemine dik olmaması, eksenler arasındaki dikliğin olmaması, alıcının iyi yerleşim ve yönlendirilememesi ve piksel büyüklüğü gibi faktörlerden meydana geldiği ortaya çıkarılmıştır. Bütün bu etkilerin toplamı, görüntü noktasını olması gereken konumdan uzaklaştırır ve sonuçta elde edilen metrik bilginin doğruluğunu etkiler (El-Hakim vd. 1989).

1.9.2.1. Mercek Distorsiyonu

Kromatik ve küresel mercek distorsiyonunu elimine etmek için, bir çok dijital kamerada, tek mercek sistemi yerine çoklu mercekten oluşan ve ışığı farklı şekillerde yansıtan mercek topluluğu kullanılır. Bu mercekler kusursuz olmadıklarından dolayı bütün sistemi etkilerler ve görüntü geometrisi üzerinde etkili olurlar. Bunun sonucunda, objeden gelen ışın teorik olarak gideceği yoldan saparak, mercek sisteminden geçer ve alıcı düzleme ulaşır. Genellikle, mercek distorsiyonu sebep oldukları etkilere göre çapsal ve teğetsel olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

a) Çapsal Distorsiyon: Çapsal distorsiyon, merceklerdeki açısal büyütme ile orantılı olarak merceğe aynı uzaklıktan ancak farklı açılara sahip hedeflerden gelen ışık ışınlarının izdüşüm düzleminin önünde yada arkasında odaklanması sonucu oluşan görüntü ötelemesi

şeklindeki distorsiyondur. Çapsal distorsiyon, izdüşen ışının izdüşüm merkezinin resim düzlemi önünde yada arkasında odaklanmasına göre pozitif veya negatif olarak adlandırılır. Çapsal mercek distorsiyonu matematiksel olarak bir polinom fonksiyonu ile şu şekilde ifade edilir (Clarke ve Wang, 1998; Külür, 2002).

$$\Delta r = K_0 r + K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \ldots\ldots \tag{5}$$

Burada r çapsal uzaklık ve K_i katsayıları ise çapsal distorsiyon katsayılarıdır. Açısal değişimin etkisinin resim koordinat sistemi içerisinde x ve y yönlerindeki bileşenleri ise,

$$\Delta r_x = \Delta r(x - x_0)/r$$
$$\Delta r_y = \Delta r(y - y_0)/r \tag{6}$$

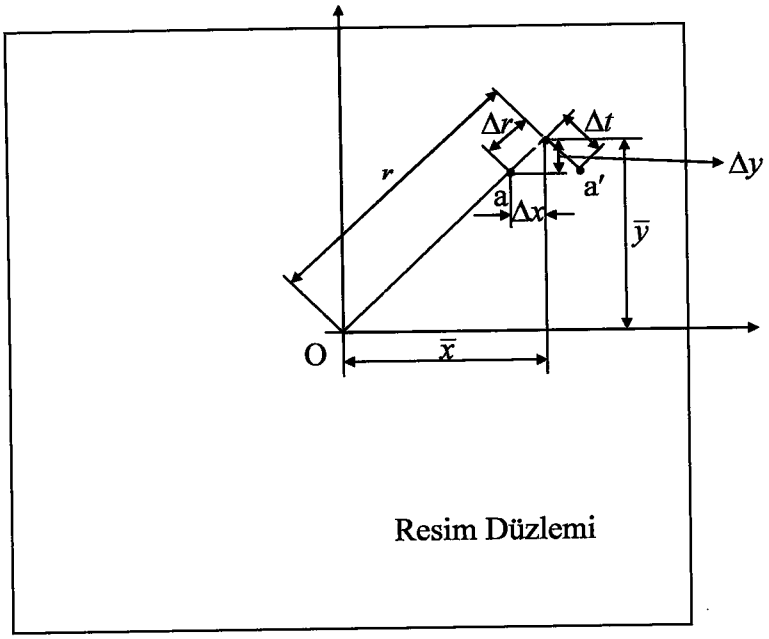
eşitlikleri ile belirlenir. r değeri ,

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_o)^2} \tag{7}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada; r çapsal uzunluğu, x ve y resim koordinatlarını, x_0 ve y_0 ise asal noktanın koordinatlarını göstermektedir. Düzeltilmiş yada gerçek çapsal uzaklık,

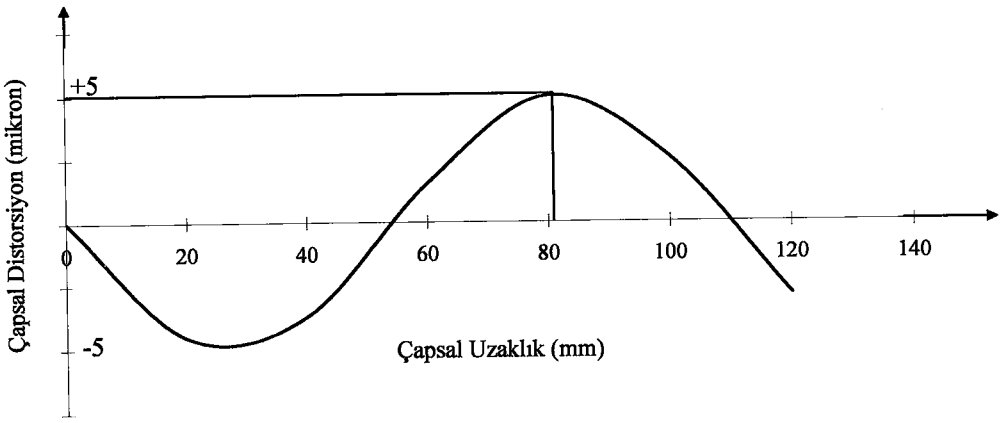
$$r' = r - \Delta r \tag{8}$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada r' düzeltilmiş çapsal uzaklığı ve Δr çapsal distorsiyonu göstermektedir.



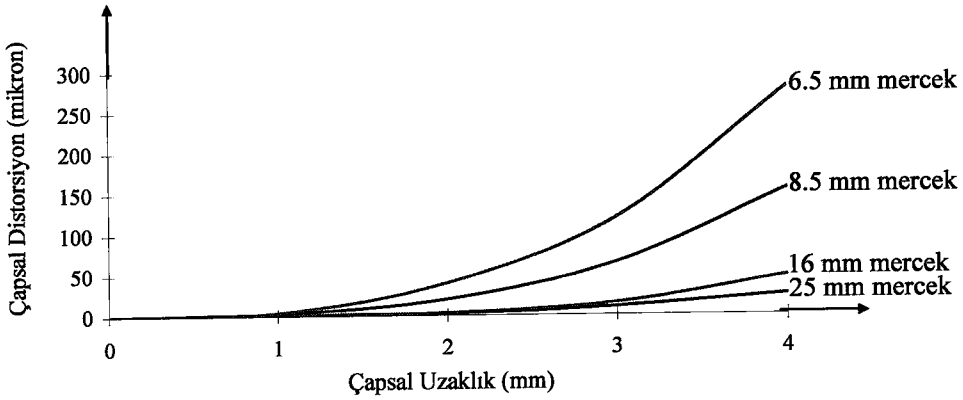
Şekil 4. Çapsal ve teğetsel distorsiyon (Wolf ve Dewitt, 2000)

Şekil 4'de görüldüğü gibi, görüntü üzerinde doğru konum a noktasını, distorsiyonun etkisi altındaki konum ise a' noktasını göstermektedir. Burada Δr ve Δt sırasıyla, çapsal ve teğetsel distorsiyonun büyüklüğünü göstermektedir. Çapsal ve teğetsel distorsiyonun düzeltilmesinin iki yolu vardır. Birincisi; çapsal distorsiyon eğrisinden gerekli değerler okunabilir (Şekil 5). İkincisi ise; polinom yaklaşımları ile sayısal değerler elde edilir (Wolf ve Dewitt, 2000).



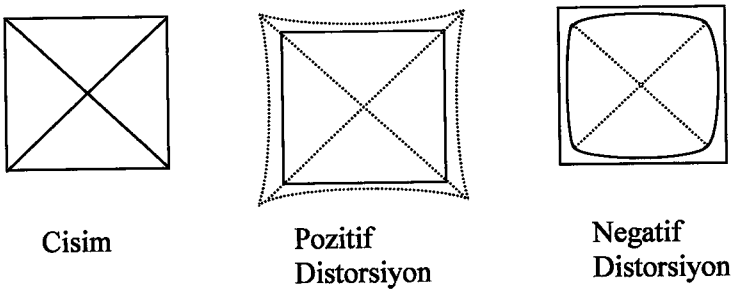
Şekil 5. Çapsal Distorsiyon Eğrisi

Şekil 6'da farklı mercek uzunlukları için çapsal distorsiyon değer ve eğrileri görülmektedir.



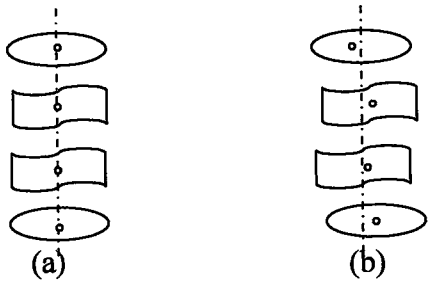
Şekil 6. Çapsal Mercek Distorsiyonu

Distorsiyon, pratik yönden ölçme işlerinde en önemli olan hata kaynağıdır. Diğer hata kaynakları optik sistem ile iz düşürülen görüntünün kalitesine etki etmektedir. Distorsiyon ise görüntünün yer değiştirmesine neden olur ki, bu yer değiştirmenin belirli bir değeri aşması sonucunda hassas ölçme yapma olanağı ortadan kalkar. Distorsiyon nedeniyle resim düzleminde ölçek değişimi ortaya çıkar. Bu değişim iki biçimde olur. Ölçek izdüşüm düzleminin kenarlarına doğru artar. Bu durumda pozitif bir distorsiyondan söz edilir ve bir kare biçimindeki cismin izdüşümü yastık (pin cushion) biçiminde olur. Eğer izdüşüm ölçeği kenara doğru azalacak olursa, distorsiyon negatif olur ve aynı kare biçimindeki cismin izdüşümü fıçı (barrel) şekline dönüşür (Şekil 7).



Şekil 7. Negatif ve Pozitif Distorsiyon (Sherr, 1979; Büyüksalih, 1997)

b) Teğetsel Distorsiyon: Kamera mercek sistemi içindeki her bir mercek ideal olarak optik eksen boyunca dizilmelidir. Merceklerin aynı doğru üzerinde bulunmamaları optik eksenden sapmalarına neden olur ve bunun sonucu olarak teğetsel distorsiyon etkisi ortaya çıkmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Mercek Sistemleri; a) Merkezlenmiş mercek sistemi, b) Merkez dışı mercek sistemi

Teğetsel distorsiyonun görüntü koordinatlarına etkisi ise (9) eşitliği ile ifade edilir.

$$\Delta x_s = (1-(c/S))\left[P_1\left(r^2+2(x-x_0)^2\right)+2P_2(x-x_0)(y-y_0)\right]$$
$$\Delta y_s = (1-(c/S))\left[P_2\left(r^2+2(y-y_0)^2\right)+2P_1(x-x_0)(y-y_0)\right] \quad (9)$$

Burada, Δx_s ve Δy_s görüntü noktasının x ve y bileşenlerine ait teğetsel distorsiyon elemanları, P_1 ve P_2 teğetsel distorsiyon katsayıları, r radyal uzunluk, c kamera sabiti ve S ise objenin merceğe olan uzaklığıdır (Büyüksalih, 1997; Fryer, 1996).

1.9.2.2. Kayıt Düzlemi Deformasyonu

Alıcı düzlemi deformasyonu açısından, CCD kameralar film kameraları ile karşılaştırıldığında önemli avantajlara sahiptirler. Bu kameralarda film distorsiyonu ve burkulma gibi etkiler olmamaktadır. Bununla birlikte, hiçbir mercek distorsiyonu olmadan, görüntü noktası alıcı düzlemi üzerine yerleşemez. Alıcı düzlemindeki bozulma, alıcı düzlemin geometrisindeki fiziksel özelliklere göre düzlem içi ve düzlem dışı değişimler olmak üzere iki grupta incelenir (Fraser, 1997/1; Curry vd., 1986).

a) Düzlem İçi Değişim (Deformasyon): Dijital kameralardaki alıcı sistemin üretiminde dikkat edilmesi gereken sınırlamalar,

- piksellerin düzensiz dağılımı sonucunda düzgün olmayan piksel boyutunda görüntünün ortaya çıkarılmaması,
- alıcı düzlemindeki eksenlerin biri birine dik olmaması,

olarak tarif edilebilir. Piksel dizininin geometrik doğruluğu yaklaşık olarak 0.1 μm düzeyindedir (Shortis ve Beyer, 1996). Bununla birlikte, yüksek doğruluk gerektiren çalışmalar için, 0.01 μm ve daha yüksek doğruluklu görüntü ölçüm hassasiyeti gerektiğinde, düzlem içi deformasyon bir hata kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda bahsedilen geometrik hatalara ilaveten, saat senkronizasyonu gibi elektronik etkiler de, birçok standart CCD kameralarda iç düzlem değişimine neden olmaktadır (Beyer, 1992/2; Lichti, 1996).

b) Düzlem Dışı Değişim (Deformasyon): Analitik fotogrametrinin matematik modeli, görüntü noktalarının aynı düzlemde olması temeline dayanmaktadır. Bu, dijital kamera alıcı düzleminin ideal olarak bir düzlem olması gerektiğini vurgulamaktadır (Fryer, 1992). Buna karşın alıcılar düzlem dışı deformasyona sahiptirler. Film kameralarındaki filmin pürüzlülüğü gibi, dijital kameralarda da odak düzlemi pürüzlülüğüne sebep olan üretim hatası söz konusudur. Ayrıca sistematik görüntü koordinat hatasına neden olan lineer alıcı hareketi, fotogrametrik ölçülerin sonuç doğruluğunu etkilemektedir. Fraser, 1997/1'de yaptığı çalışmada, alıcı düzlemi pürüzlülüğüne neden olan çapsal bozulmanın ışının geliş açısının bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, 45° ışın geliş açısında, düzlemden 10 μm'lik sapma aynı büyüklükte bir görüntü bozulmasına sebep olmaktadır. Böylece, uzun odak uzaklıklı ve dar açılı mercekler küçük odak uzaklıklı ve geniş açılı merceklerden düzlem dışı deformasyon etkisi bakımından daha az etkilenirler.

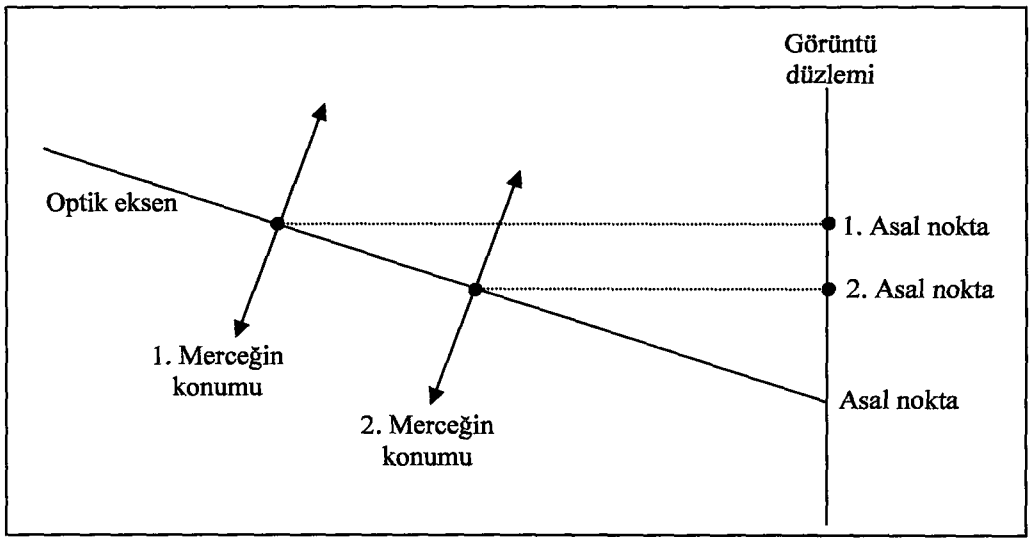
Tipik 35 mm film kamerası olan Canon AE-I'in (Donnely, 1988) film pürüzlülüğü 600 μm iken, KAF-1600 (14 mm×9 mm) ve KAF-1000 (24.6 mm×24.6 mm) CCD alıcı kullanan Kodak DCS serisi profesyonel dijital kameralar sırasıyla 1.7 μm ve 5 μm alıcı düzlemi pürüzlülüğüne sahiptirler. Bu yüzden bu kameralar, fotogrametriciler tarafından hassas çalışmalar için tercih edilmektedir (Fraser, 1997/1).

1.9.2.3. İç Yöneltme Elemanlarının İncelenmesi

Fotogrametrik uygulamalar için dizayn edilmiş metrik hava kameralarına oranla, hemen hemen bütün dijital kameralar metrik olmayan tiptedir. Bunun nedeni söz konusu dijital kameraların, asal nokta, asal uzaklık, mercek distorsiyonu ve düzlem deformasyonu gibi iç yöneltme elemanlarının bilinmemesi veya kısmen bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. Metrik amaçla dizayn edilmiş Kodak Megaplus serisi gibi birkaç metrik dijital kamera vardır.

a) Zoom Merceğin Etkisi: Zoom mercek belirli aralıkta değişebilen odak uzaklıkları olan mercektir. Bir çok dijital kamera zoom mercek kullanır. Zoom mercek ile farklı odak uzaklıklarında görüntü alımı, görüntüleme açısından kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Bu durum zoom merceklerin yüksek doğruluklu fotogrametrik uygulamalar için alternatif olduğunu göstermektedir (Wiley ve Wong, 1990). Zoom mercek ile görüntüleme, sabit merceklere oranla daha pratik bir işlemdir. Büyütme küçültme, mercek sisteminin döndürülmesi ile sağlanır. Büyütme işleminin sonucu, asal uzaklığın değişimi gözlenirken, sistemin geometrik yapısındaki bozulma nedeniyle asal noktanın yeri ve mercek distorsiyon değişimleri olabilmektedir.

b) Asal Noktanın Değişimi: İzdüşüm merkezinden geçen doğrunun görüntü düzlemini deldiği nokta olarak tanımlanan asal noktadaki değişimin ana nedeni, optik eksenin resim düzlemine tam dik olmamasıdır. Bir çok dijital kamera için optik eksenin sapması 0.5° olarak bulunmuştur (Burner vd., 1990). Şekil 9 bu kavramı abartılı bir biçimde göstermektedir. Wiley ve Wong 1990'da yaptıkları çalışmada, dijital kameralarda asal noktadaki değişimin 100 piksele kadar çıktığı, anlamlı bir değişimden bahsetmektedirler (Wiley ve Wong, 1990).



Şekil 9. Zoom mercek kullanılması durumunda asal noktanın değişimi

c) Mercek Distorsiyonunun Değişimi: Zoom mercekler için görüntü koordinatlarını etkileyen diğer faktörler, mercek distorsiyonundaki değişimlerdir. Bu değişimler, sonsuza odaklamanın yapıldığı durumdaki distorsiyonun bütün mesafeler için geçerli olmadığını göstermektedir. Çapsal ve teğetsel mercek distorsiyonları merceğin odaklanma durumuna göre değişmekte olup (Brown, 1971), en büyük değişim en büyük görüntü ölçeğinde olmaktadır (Fraser ve Shortis, 1992). Bu yüzden, distorsiyon değişimi zoom mercekli dijital kameraların kullanıldığı hassas yakın resim fotogrametrisinde dikkate alınmalıdır.

1.9.3. Radyometrik Açıdan Hataların Değerlendirilmesi

Dijital görüntü, dijital kamera ile ışığı algılama, sinyal işleme ve transformasyonu, analogdan dijitale dönüştürme, görüntü sıkıştırma ve gevşetme gibi bir dizi işlemlerden sonra, orijinal detaya ilişkin sürekli değişen renk ve tonların sayılarla ifade edildiği bir yapıdır. Alıcı kalitesi ve bir dizi işlem adımının gerçekleştirildiği görüntüleme işlemi, sonuç görüntüsünün radyometrik özelliklerini önemli derecede etkiler. İdeal bir dijital kamera sisteminin orijinal detaydaki radyometriyi en iyi derecede yansıtması gerekir. Fotogrametrik uygulamalar için ideal bir dijital kamera sistemi,

- Değişmez ve geniş spektral duyarlılık,
- Düşük gürültü,

- Kusursuz yansıtma gücü olmalı,
- Bozuk piksel olmamalı,
- Yüksek enerji ve etkin transfer gücü olmalı,
- Sistem performansı sabit olmalı.

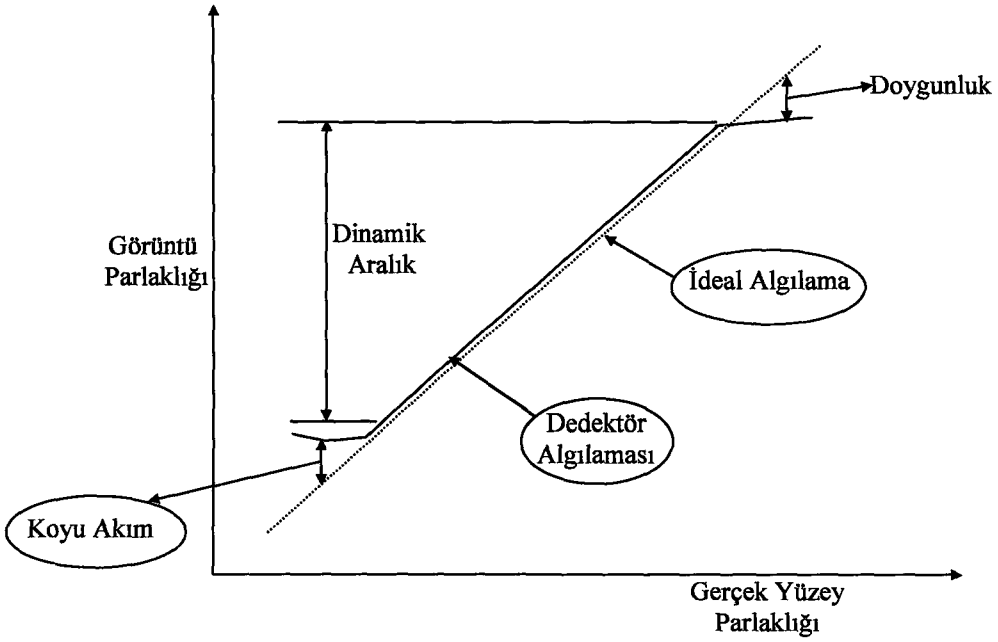
gibi kriterleri taşımalıdır (El-Hakim vd., 1989; Shortis ve Beyer, 1996).

Dijital kameraların radyometrik özellikleri, kamera performansını ve doğruluğunu etkileyen en önemli faktördür. Dinamik aralık, SNR (sinyal gürültü oranı), gürültü, sinyal düzensizliği (non-uniformities) ve çözünürlük dijital kameraların en önemli radyometrik özellikleridir. Kameraların radyometrik performansı bu parametreler ile belirlenir. Bütün bu parametreler düzeltilememesine rağmen, fotogrametrik ölçüm yapan görüntüleme sisteminin kapasitesini ortaya koymak için bu parametrelerin etkisi mümkünse belirlenmelidir. Bu parametrelerin etkisi bazı metotlarla minimize edilebilir (Peipe, 1994).

Dijital kamera sistemlerindeki geometrik distorsiyon görüntü noktasını ideal konumundan saptırırken, radyometrik distorsiyon da gerçek görüntü alındığında oluşturulan piksellerin sayısal değerlerinin bozulmasına neden olmaktadır.

1.9.3.1. Dinamik Aralık (Dynamic Range)

Alıcıdan iyi bir duyarlılık elde etmek için, görüntüleme sistemi obje yüzeyinden gelen sinyallerden yeteri kadar foton (ışık) toplaması gerekir. Düşük hassasiyette görüntüleme sistemi koyu akım (dark current) sinyallerinin alımına neden olur. Düşük parlaklıkta dedektör yüzeyinde görüntü üretilemez. Yüksek parlaklıkta ise dedektör belli bir seviyede parlak cisimleri kayıt eder ve bir durağanlık söz konusu olur. Bu özellik film kameralarında karakteristik eğri ile tanımlanır. Bir başka ifade ile bir görüntüleme sisteminin en düşük ve en yüksek parlaklıkta algılama duyarlılığı ve algılama aralığı orijinal obje parlaklığına göre belirlenmiş olmaktadır (Campbell, 1996). Doğru bir biçimde kayıt edilen parlaklık aralığı ya da algılama aralığı CCD'nin dinamik aralığı olarak tarif edilir (Şekil 10).



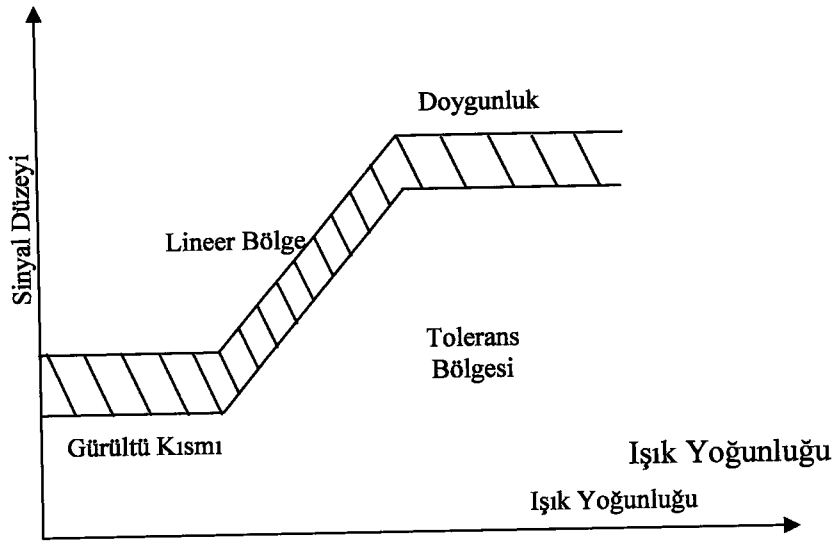
Şekil 10. Koyu akım, durağanlık ve dinamik aralık

1.9.3.2. Doğrusal Olmama (Non-Linearity)

Dijital görüntü işleme esnasında, gelen ışın A/D dönüştürücü ile genelde 0 (sıfır) - 255 arasında değişen ayrık sayısal numaralara dönüştürülür. İdeal olarak, bütün dönüşüm işlemi belirli bir dalga boyu bölgesi için lineer olmalıdır. Görüntüleme sisteminin lineer olmama (Non-linearity) etkisi, sonuç görüntüde elde edilen sayısal değerlerin orijinaldeki değerlerle aynı oranda ya da dağılımda olmamasıdır. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi, sensörün kendinden kaynaklanabilir, yani bütün piksellerdeki ışığa duyarlılık düzgün ya da aynı olmamaktadır. İkincisi ise, sinyallerin işlendiği elektronik devrelerden kaynaklanmaktadır. (Shortis ve Beyer, 1996). Şekil 11 bir piksel serisinin tipik transfer fonksiyon yapısını göstermektedir. Görüntüleme sistemlerinde sinyal düzensizliği,

- Foto Duyarlıklı Düzensizlik (Photo Response Non-Uniformitiy=PRNU)
- Siyah Sinyal Düzensizliği (Dark Signal Non-Uniformitiy=DSNU)

şeklinde iki gruba ayrılabilir.



Şekil 11. Bir piksel kümesinin genel algılama fonksiyonu

a) Foto Duyarlıklı Düzensizlik (Photo Response Non-Uniformitiy=PRNU): Gerçekte, görüntüleme işleminde, her bir pikselin duyarlılığı ile ilgilenilir. Görüntüleme sistemindeki her bir piksel, farklı şekilde algılama yaptığından, görüntü üzerinde arzu edilmeyen bir biçimde karışık bir doku ortaya çıkar. Bu doku veya düzensiz algılama, görüntüleme sisteminin düşük kontrastlı olmasına ve sistemin hassasiyetinin sınırlandırılmasına sebebiyet verir. İstenilen hassasiyete ulaşmak için dedektör duyarlılığı bu karmaşık doku düzeltilerek ve düzgün duyarlılığa ulaştırılarak düzeltilir (Hou vd., 1995).

b) Siyah Sinyal Düzensizliği (Dark Signal Non-Uniformitiy=DSNU): Kamera lens istemi kapalı durumda iken, yinede sinyal üretir ve bu durum koyu akım (dark current) olarak tanımlanır. Dedektörün farklı biçimlerde koyu akım üretmesi siyah sinyal düzgünsüzlüğü olarak tanımlanır. DSNU için birkaç görüntü alınır. Bu görüntülerde ortalama ve standart sapma piksel değerlerinden hesaplanır. DSNU hem kameralarda hem de analog-dijital dönüştürücülerde (frame graber) etkili bir faktördür (Büyüksalih, 1997; Beyer, 1992/2).

1.9.3.3. Koyu Akım Gürültüsü (Dark Current Noise)

Siyah gürültü olarak da bilinen koyu akım gürültüsü, kayıt ünitesinin elektronları üretme aşamasında sistematik olarak ortaya çıkan gürültüdür (Shortis ve Beyer, 1996). Hiç ışık olmaması durumunda, çıkıştaki bütün piksel değerleri sıfırdır. Bununla birlikte, koyu akım gürültüsü olması durumunda kayıt edilen görüntü tümüyle sıfır değeri taşımayacaktır. Termal olarak ortaya çıkarılan elektronlar birbirinden ayrılmasının zor olduğu durumda radyometrik kalibrasyonun yapılması şarttır.

1.9.3.4. Fluluk (Blooming)

Fluluk, bir piksele taşıması gerekenden fazla enerji yüklenmesi veya pikselin fazla enerjisini çevre piksellere yaymasıdır. Böyle durumda pikselin değeri gerçekte olması gereken değerden farklı olmaktadır. Bu etki, genelde ışık yoğunluğunun fazla olduğu mekanlarda görüntü alımı esansında veya hedef noktalarının çok fazla ışık altında görüntülerinin alınması durumunda ortaya çıkar (Shortis ve Beyer, 1996). CID alıcılar, CCD alıcılara oranla fluluktan fazla etkilenirler (Curry vd., 1986). Bununla birlikte, fluluk mevcut dijital kameralar için dikkate alınması gereken bir problemdir.

1.9.3.5. Gürültü (Noise) ve Sinyal Gürültü Oranı (SNR)

Her bir dedektör, orijinal parlaklıkla ilişkili olmayan yansıma değeri üretir. Buna gürültü denir ve dedektör yüzeyinde, bir takım etkilerden kaynaklanan hatalarla ortaya çıkar. Görüntüleme sistemlerinde, sistemin performansı gürültüden etkilenir ve gürültü radyometrik doğruluğu negatif yönde etkiler. Etkin kullanım için, görüntüleme sistemleri en düşük düzeyde gürültü üretecek şekilde dizayn edilmelidirler. Gürültü, sinyal gürültü oranı ile ölçülür, yani ölçülen yoğunluk değerinin gürültüye oranı ile belirlenir.

SNR ve dinamik aralık dedektör elemanının enerji yükleme kapasitesinin artırılması ile yükseltilebilir. Dedektör elemanın enerji yükleme kapasitesi her bir elemanın hassas alanı ile orantılıdır. Bu sebeple, büyük dedektör elemanı yüksek kapasite gerektirir fakat düşük hassasiyette geometrik çözünürlüğe sebep olur. Gürültü tespiti için üç farklı metot kullanılır (Beyer, 1992/2).

a) Metot 1: İlk aşamada birkaç tek görüntü kullanılarak her bir pikselin gri değerlerinden standart hataları hesaplanır. Bir bölgenin veya bütün görüntünün karesel ortalama hatası ile gürültü karakterize edilir. Bu değerler sayısal numara (DN =dijital number) ile temsil edilir. Bu metot tek piksel metodu olarak isimlendirilir.

b) Metot 2: Her bir görüntüden belirlenecek alt alanların piksellerine ait gri değerler kullanılarak standart sapmalar hesaplanır. Alt alanların boyutu görüntü alanının yaklaşık dörtte biri olarak seçilir. Bu metot, parça (patch) metodu olarak isimlendirilir.

c) Metot 3: Bir çok görüntü üzerindeki toplam pikseller kullanılarak standart sapma hesaplanır. Bu metot çerçeve ortalama metodu olarak bilinir.

1.10. Dijital Kamera Sistemlerinin Kalibrasyonu

Dijital görüntüleme, üç boyutlu gerçek uzaydan iki boyutlu görüntüye transformasyon işlemidir. Orijinal detaylar sonuç görüntüde geometrik ve radyometrik olarak ifade edilir. Kamera sistem kalibrasyonunun temel amacı, elde edilen görüntü üzerindeki noktaların geometrik olarak gerçek konumda olup olmadıklarının araştırılmasıdır (Moffitt ve Mikhail, 1980). Geleneksel anlamda, kamera sistem kalibrasyonu kamera sisteminin geometrik özelliklerinin belirlenmesi olarak tanımlanır. Pratikte, kamera sistem kalibrasyonu, kamera sisteminin hata kaynaklarının belirlenip, bunların kamera metrik performansına etkisinin araştırılmasıdır. Metrik anlamda yararlı bilgi çıkarmak ve dijital kamera sistemlerinin doğruluk potansiyelini ortaya çıkarmak için gerçek dünya ile dijital görüntüler arasında doğru bir ilişki kurulmalıdır. Dijital kamera sistemlerindeki değişik hata kaynakları bu ilişkinin doğru kurulmasını engellemektedir. Bu durumdan kaçınmak için iki yol söz konusudur. Birincisi, oluşabilecek hataları minimize edebilmek için kamera kalitesi yükseltilerek görüntüleme sistemi iyileştirilir, ikincisi ise, söz konusu hatalar matematiksel olarak belirlenir, modellenir ve düzeltilir. Uygulama açısından, birinci durum için çözüm tamamen üretici firmaların kontrolünde olması nedeniyle tercih edilmemektedir. İkinci durum ise fotogrametricileri yakından ilgilendirmekte olup, kamera sistem kalibrasyonu olarak adlandırılır.

Metrik olmayan film kameralarının kalibrasyonu, 1970'lerden beri önemini korumakta olup, yakın resim fotogrametrisi alanında bir çok metot ve sonuçlar yayınlanmıştır (Abdel-Aziz, 1975; Brown, 1971; Faig vd., 1990; Fryer, 1986, 1989, 1992, 1996). Bu çalışmada dijital kameraların tanıtımından sonra, bu kameraların kalibrasyonu

konusunda daha da yoğunlaşılacaktır. Bir çok kalibrasyon projesi çalışılmış olup, bir çoğu da değişik araştırmacı ve organizasyonlar tarafından devam etmektedir. Teorik olarak, ideal bir kamera sistem kalibrasyon şekli kamera sistemindeki geometrik ve radyometrik hataları düzeltecek biçimde,

- Sistemin merceklerinin performansının değerlendirilmesi (distorsiyon, ayırma gücü),
- Alıcının (kayıt ünitesi) performansının değerlendirilmesi (alıcı duyarlılığı, dark current (koyu akım), sinyal transfer gücü, piksel boyutu ve dağılımı, alıcı deformasyonu),
- Mercek ve alıcı sistem arasındaki ilişkinin belirlenmesi (merceğin alıcı düzlemine göre yönelmesi, asal nokta değişimi ve asal uzaklık)
- Görüntü transformasyonu, sıkıştırma ve gevşemesinin araştırılması,
- Kamera sisteminin stabilitesinin araştırılması (geometrik konfigürasyonun değişimi, sıcaklık etkisi),

amaçlarını içermelidir. Fotogrametri alanında genelde dijital kamera sistemlerinin kalibrasyonu daha çok geometrik kalibrasyon açısından ele alınmakta, radyometrik açıdan az sayıda kalibrasyon çalışması yapılmaktadır. Ayrıca, bir çok dijital kamera sistemi kalibrasyon projesi, film kamera sistemlerinin kalibrasyon metotlarıyla yapılmaktadır. Bunun birinci nedeni, dijital kameraların optik sistemlerinin film kameralar ile aynı veya çok yakın benzerlikte olması, ikinci nedeni ise dijital görüntü işlemenin çok karmaşık bir işlem ve dijital kamera sistemlerini araştırmanın oldukça zor bir iş olmasıdır. Bu yüzden, dijital kamera sistemlerindeki bütün sistematik hataları ortadan kaldıracak gerçekçi bir matematik model geliştirilememiştir.

Genel bir ifadeyle, bir çok kamera sistemi kalibrasyon metodunda ana prensip sistemin sistematik hatalarının modellenmesi ve düzeltilmesidir.

1.10.1. Geometrik Hataların Matematiksel Olarak Modellenmesi ve Düzeltilmesi

Bir dijital kamera sisteminin her hangi bir metrik uygulamasının başarısı büyük ölçüde kamera sisteminin sistematik hatalarının belirlenmesi, modellenmesi ve

düzeltilmesine bağlıdır. Geometrik kamera kalibrasyonu, kamera fiziksel özelliklerinin matematiksel modellerle tanımlandığı analitik metotlarla açıklanabilir. Örneğin, sistematik hatalar özel parametreli fonksiyonlarla modellenir. İdeal pinhole kamera modeli gerçek bir kamera sistemi için gerçeği yansıtmamaktadır. Geometrik açıdan, kamera modeline ilişkin temel doğrusallık eşitlikleri, ilave parametreleri de içeren sistematik hatalar dikkate alınarak aşağıdaki biçimde genişletilebilir.

$$x_{ij} - x_0 + \Delta x = -c_x \frac{m_{11}(X_j - X_i^c) + m_{12}(Y_j - Y_i^c) + m_{13}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)}$$

$$y_{ij} - y_0 + \Delta y = -c_y \frac{m_{21}(X_j - X_i^c) + m_{22}(Y_j - Y_i^c) + m_{23}(Z_j - Z_i^c)}{m_{31}(X_j - X_i^c) + m_{32}(Y_j - Y_i^c) + m_{33}(Z_j - Z_i^c)} \quad (10)$$

Burada, x_0, y_0 asal noktanın koordinatları, Δx ve Δy kamera sistemindeki sistematik hatalardan kaynaklanan görüntü koordinatlarına ait değişimlerdir. c_x ve c_y, sırasıyla x_{ij} ve y_{ij} görüntü koordinatlarından bulunan asal uzaklıklardır. Ancak genelde asal uzaklık sadece c değeri olarak ele alınır (Fryer, 1992). (4) eşitliklerinde, kalibrasyon terimleri, asal uzaklık c, asal nokta koordinatları x_0, y_0 ve görüntü koordinat düzeltmelerinin içinde bulunduğu Δx ve Δy'dir. Bazı koşullar dikkate alınarak ve basitleştirme yapılarak direk lineer transformasyon (DLT, Direct Linear Transformation) modeli oluşturulur. Bu modelin matematiksel ifadesi,

$$x_{ij} + \Delta x = \frac{L_1 X_j + L_2 Y_j + L_3 Z_j + L_4}{L_9 X_j + L_{10} Y_j + L_{11} Z_j + 1}$$

$$y_{ij} + \Delta y = \frac{L_5 X_j + L_6 Y_j + L_7 Z_j + L_8}{L_9 X_j + L_{10} Y_j + L_{11} Z_j + 1} \quad (11)$$

şeklindedir. Burada, L_1'den L_{11}'e kadar olan katsayılar obje koordinatları (X_j, Y_j, Z_j) ile görüntü koordinatları (x_{ij}, y_{ij}) arasındaki dönüşümün DLT parametreleridir (Abdel-Aziz ve Karara, 1971; Pourcelot vd., 2000).

Aynı fiziksel obje için, fotogrametri ve bilgisayar görüşünde (computer vision) bir çok kamera kalibrasyon modeli kullanılabilmektedir. Bu modeller, içerdikleri farklı ilave parametreler ve fonksiyonlar ile fiziksel, cebrik ve karışık model olmak üzere üç guruba ayrılırlar (Faig ve Shih, 1988).

1.10.1.1. Fiziksel Modeller

Her hangi bir fiziksel sistemi modellemenin en doğru yolu, sistemin fiziksel bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki matematiksel ilişkinin belirlenmesidir. Fiziksel modeller, kamera sisteminin çapsal ve teğetsel distorsiyonu, ölçek değişimi ve eksenlerin dik olmaması gibi bilinen fiziksel özelliklerine göre şekillendirilebilir. Gerçekte, bu gurup modeller, dijital kamera kalibrasyonunda görüntü deformasyonlarını modellemek için yaygın olarak kullanılırlar. Görüntü koordinatlarını düzeltmeye yönelik en yaygın fiziksel model (12) eşitliği ile verilmektedir (Fraser, 1997/1).

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f$$
$$\Delta x = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_u + \Delta y_f \qquad (12)$$

Burada, r indisi çapsal distorsiyonu, d indisi teğetsel distorsiyonu, u indisi düzlem dışı deformasyon etkisini ve f indisi düzlem içi görüntü distorsiyon etkisini göstermektedir. Dijital kamera sistem kalibrasyon projelerinde, farklı araştırmacılar, sistemlerin doğası ve sistematik hataların anlamına göre değişik şekillerde düzeltme fonksiyonları ve ilave parametre setleri kullanmışlardır. Tablo 5'de fotogrametri ve bilgisayar görüşünde, dijital kamera sistem kalibrasyon projelerinde kullanılan kalibrasyon parametrelerinin fiziksel anlamı ve kamera sistem kalibrasyonu fiziksel modelleri özetlenmektedir. Bu tabloda, farklı araştırmacıların yaptıkları bir çok kalibrasyon projesinin Kenefick vd. (1972)'nin film kamera sistemleri kalibrasyonu için geliştirdiği model ile uygun olduğu görülmektedir (Kenefick vd., 1972). Çoğu durumda, modellerde asal uzaklık (bir parametre), asal nokta koordinatları (iki parametre), çapsal distorsiyon (üç parametre) ve teğetsel distorsiyon (iki parametre) olmak üzere 8 ilave parametre kullanılmaktadır. Bunun yanında, ölçek değişimi ve eksenlerin dik olmaması parametreleri yukarıda bahsedilen sekiz parametreye ilave edilebilir.

Fiziksel modellerin ana avantajı, ilave parametrelerin direk olarak fiziksel yorumlanması iken, dezavantajları bazı sistematik hataların fiziksel olarak bilinmemesi ve böylece ilave parametrelerin bütünüyle modellenememesidir.

Tablo 5. Dijital kamera sistemi kalibrasyon projeleri için kullanılan fiziksel modeller

Proje Adı	Kullanılan Metamatik Model	Parametrelerinin Fiziksel Anlamı
Beyer (Beyer, 1992/2)	$\Delta x = \Delta x_0 - \frac{\bar{x}}{c}\Delta c - s_x\bar{x} + a\bar{y} + \bar{x}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_1\left(r^2 + 2\bar{x}^2\right) + 2p_2\bar{x}\bar{y}$ $\Delta y = \Delta y_0 - \frac{\bar{y}}{c}\Delta c + a\bar{x} + \bar{y}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_2\left(r^2 + 2\bar{y}^2\right) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$	k_1, k_2, k_3: çapsal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2: teğetsel distorsiyon katsayıları, s_x : x yönündeki ölçek faktörü a: diklik faktörü,
Burner (Burner vd., 1990)	$\Delta x = \Delta s_h\bar{x} + \Delta s_y\Delta\varphi\bar{y} + \bar{x}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_1\left(r^2 + 2\bar{x}^2\right) + 2p_2\bar{x}\bar{y}$ $\Delta y = \Delta s_y\bar{y} + \bar{x}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_2\left(r^2 + 2\bar{y}^2\right) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$	$\Delta s_h, \Delta s_y$: yatay ve düşey piksel boyu arasındaki diferansiyel ölçek, $\Delta\varphi$: eksenler arasında dik olmama
Edmunson (Edmunson vd., 1991)	$\Delta x = \bar{x}\left(a_1r^2 + a_2r^4\right) + a_3\left(r^2 + 2\bar{x}^2\right) + 2a_4\bar{x}\bar{y}$ $\Delta y = \bar{y}\left(a_1r^2 + a_2r^4\right) + a_4\left(r^2 + 2\bar{y}^2\right) + 2a_3\bar{x}\bar{y}$	a_1, a_2: çapsal distorsiyon katsayıları a_3, a_4: teğetsel distorsiyon katsayıları
Fraser (Fraser vd., 1997/1)	$\Delta x = -\frac{\bar{x}}{c}\Delta c + \bar{x}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_1\left(r^2 + 2\bar{x}^2\right) + 2p_2\bar{x}\bar{y} + b_1\bar{x} + b_2\bar{y}$ $\Delta y = -\frac{\bar{y}}{c}\Delta c + \bar{y}\left(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6\right) + p_2\left(r^2 + 2\bar{y}^2\right) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$	Δc : asal uzaklığın değişimi b_1, b_2: düzlem içi distorsiyon katsayıları (sırasıyla yatay ve düşey yönde pikseller arası diferansiyel ölçek ve eksenler arası dik olmama)
Heipke (Heipke vd., 1992)	$\Delta x = A_1\left(r^2 - r_0^2\right)\bar{x} + A_2\left(r^4 - r_0^4\right)\bar{x} + B_1\left(\bar{y}^2 + 3\bar{x}^2\right) + 2B_2\bar{x}\bar{y}$	A_1, A_2, r_0: çapsal distorsiyon katsayıları, B_1, B_2: teğetsel distorsiyon katsayıları,

Tablo 5'in devamı.

	$\Delta y = A_1(r^2 - r_0^2)\bar{y} + A_2(r^4 - r_0^4)\bar{y} + B_2(\bar{y}^2 + 3\bar{y}^2) + 2B_1\bar{x}\bar{y}$	
Li ve Faig (Li ve Faig, 1996)	$\Delta x = \bar{x}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y} + A\bar{y}$ $\Delta y = \bar{y}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}\bar{y} + B\bar{y}$	k_1, k_2, k_3: çapsal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2: teğetsel distorsiyon katsayıları, A: ölçek faktörü, B: diklik faktörü,
Lichti ve Chapman (Lichti ve Chapman, 1995,1997)	$\Delta x = \bar{x}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y}$ $\Delta y = \bar{y}(k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$	k_1, k_2, k_3: çapsal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2: teğetsel distorsiyon katsayıları,
Peterson (Peterson vd., 1993)	$\Delta x = \bar{x}(k_1r^2 + k_2r^4) + p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y}$ $\Delta y = \bar{y}(k_1r^2 + k_2r^4) + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}\bar{y}$	k_1, k_2: çapsal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2: teğetsel distorsiyon katsayıları,
Wong (Wong vd., 1990; Wiley ve Wong, 1990)	$\Delta x = \bar{x}(k + l_1r^2 + l_2r^4) + [p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2\bar{x}\bar{y}](1 + p_3r^2)$ $\Delta y = \bar{y}(l_1r^2 + l_2r^4) + [p_2(r^2 + 2\bar{y}^2) + 2p_1\bar{x}\bar{y}](1 + p_3r^2)$	k: x yönündeki ölçek, l_1, l_2: çapsal distorsiyon katsayıları, p_1, p_2, p_3: teğetsel distorsiyon katsayıları,

Açıklamalar:

$\bar{x}, \bar{y}$: görüntü koordinatları;

$\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0$;

$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, çapsal uzaklık;

$\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta c$: iç yöneltme elemanlarının değişimi

1.10.1.2. Cebrik Modeller

Cebrik modeller, sadece geometrik açıdan dikkate alınırlar (Shih, 1989). Fiziksel modellerle karşılaştırıldığında, cebrik modeller, görüntü deformasyonlarının etkilerini modellemek için kurulurlar. Bu çeşit modellerin en büyük problemi, model parametrelerinin fiziksel olarak yorumlanamamasıdır. Bir başka ifadeyle, kullanılan

parametrelerin fiziksel anlam taşımamalarıdır. Bu modele ilişkin tipik bir örnek, dijital kamera sistem kalibrasyonunda muhtemel distorsiyonlar için genel bir polinom kullanan küresel harmonik fonksiyonel model verilebilir. (13) eşitliği ile elde edilen bu model Faig ve Li (1997) tarafından verilmiştir.

$$\Delta x = T \times \bar{x}$$
$$\Delta y = T \times \bar{y} \tag{13}$$

T aşağıdaki biçimde ifade edilen bir harmonik fonksiyondur.

$$T = a_{00} + a_{11}\cos\lambda + b_{11}\sin\lambda + a_{20}r + a_{22}r\cos 2\lambda + b_{22}r\sin 2\lambda + a_{31}r^2\cos\lambda + b_{31}r^2\sin\lambda + \ldots \tag{14}$$

Burada,

$$\lambda = \arctan\frac{\bar{x}}{\bar{y}} \tag{15}$$

dır. a_{ij} ve b_{ij} küresel harmonik fonksiyonun katsayıları, $\bar{x}, \bar{y}$ görüntü koordinatları, r ise çapsal uzaklıktır. Brown (1976), kamera kalibrasyonu için kullanılan genel cebrik modeli,

$$\Delta x = a_1\bar{x} + a_2\bar{y} + a_3\bar{x}\bar{y} + a_4\bar{y}^2 + a_5\bar{x}^2\bar{y} + a_6\bar{x}\bar{y}^2 + a_7\bar{x}^2\bar{y}^2 + \frac{x}{c}\left[a_{13}\left(\bar{x}^2 - \bar{y}^2\right) + a_{14}\bar{x}^2\bar{y}^2 + a_{15}\left(\bar{x}^4 - \bar{y}^4\right)\right] + x\left[a_{16}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^2 + a_{17}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^4 + a_{18}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^6\right] \tag{16}$$

$$\Delta y = a_8\bar{x}\bar{y} + a_9x^2 + a_{10}\bar{x}^2\bar{y} + a_{11}\bar{x}\bar{y}^2 + a_{12}\bar{x}^2\bar{y}^2 + \frac{y}{c}\left[a_{13}\left(\bar{x}^2 - \bar{y}^2\right) + a_{14}\bar{x}^2\bar{y}^2 + a_{15}\left(\bar{x}^4 - \bar{y}^4\right)\right] + y\left[a_{16}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^2 + a_{17}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^4 + a_{18}\left(\bar{x}^2 + \bar{y}^2\right)^6\right] \tag{17}$$

eşitlikleriyle ifade etmiştir.

1.10.1.3. Karışık Modeller

Karışık modeller, adından da anlaşıldığı üzere fiziksel ve cebrik modellerin her ikisinin birleşiminden oluşur. Bu nedenle, bu modeller fiziksel ve cebrik açıdan desteklenirler. Chen ve Schenk 1992'de yaptıkları çalışmada, görüntü distorsiyonlarını düzeltmede, 8. dereceden polinom katsayıları, çapsal ve teğetsel distorsiyon katsayılarını içeren bir CCD kamera kalibrasyon sistemini modellemek için, karışık fonksiyonları kullanmışlardır. Bu fonksiyonun matematik modeli (18)'de verilmiştir (Chen ve Schenk, 1992).

$$\begin{aligned}\Delta x &= \bar{x}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) + \left(1 + p_3 r^2\right)\left[p_1\left(r^2 + 2\bar{x}^2\right) + 2p_2\bar{x}\bar{y}\right] \\ &\quad + m_1\bar{x} + m_2\bar{x}^3 + m_3\bar{x}^5 + m_4\bar{x}^7 \\ \Delta y &= \bar{y}\left(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6\right) + \left(1 + p_3 r^2\right)\left[2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2\left(r^2 + 2\bar{y}^2\right)\right]\end{aligned} \tag{18}$$

1.10.2. Geometrik Kalibrasyon ve Metotları

Geometrik kalibrasyonun amacı, görüntü noktalarının geometrik konumlarını etkileyen sistematik hataları belirlemek ve düzeltmektir. Genel bir ifade ile, diğer sistem etkilerine ilaveten, başlı başına bir geometrik kalibrasyon için aşağıda maddeler halinde belirtilen konular araştırılmalıdır.

- Asal nokta (PPP =Photogrammetric Principal Point, PPA=Principal Point of Autocollimation ve PPS=Principal Point of The Best Symmetry),
- Asal uzaklık veya kamera sabiti,
- Mercek distorsiyonu (çapsal ve teğetsel),
- Alıcı düzlemi geometrisi (piksel boyutu ve sayısı, düzgünlük, piksel koordinat eksenleri arasındaki diklik),
- Kamera sisteminin iç geometrik yapısındaki değişim, özellikle mercekteki değişim,
- Kalibrasyon parametrelerinin stabilitesi.

Bununla birlikte, çoğu dijital kamera sistemi geometrik kalibrasyon projeleri, esas itibariyle kameraların mercek sistemlerine uygulanmıştır (Chen ve Shenk,1992; Edmunson

vd., 1991; Kochi vd., 1995; Paqutte vd., 1990). Birkaç uygulama ise daha çok alıcı deformasyonunu incelemiştir (Curry vd., 1986; Burner vd., 1990).

Kamera sistemi geometrik kalibrasyon metotları aşağıda açıklandığı üzere genellikle üç kategoriye ayrılırlar (Clarke ve Fryer, 1998).

- **Laboratuar kalibrasyonu (Laboratory Calibration):** Genel kalibrasyonu ifade eden test alanı ve çubuğu ile yapılan kalibrasyondur. Bu tip kalibrasyon metodunun tipik özelliği kalibrasyon ve değerlendirme işleminin ayrı ayrı yapılmasıdır. Yani kalibrasyon laboratuar ortamında yapılır.
- **İş ortamında kalibrasyon (On the Job Calibration):** Kalibrasyon ve değerlendirme iş ortamında yapılır. Kalibrasyon parametreleri başlangıçta bilinmeyen olarak kabul edilir. Obje uzayı kontrol sistemi kalibrasyon parametrelerinin çözümü için gereklidir.
- **Kendi kendine Kalibrasyon (Self Calibration):** Bu yaklaşımda obje uzayı kontrolü de kullanılmaz. Geometrik konfigurasyonu güçlü resimlerden kalibrasyon parametreleri belirlenir. Diğer kalibrasyon yaklaşımlarında bir resim yeterli iken bu metotta en az iki bindirmeli resim olması şarttır.

Gerçekte içerdikleri kalibrasyon parametreleri bakımından bütün kamera kalibrasyon metotları iki ana guruba ayrılabilirler. Bunlar bireysel metot ve birleşik metot olarak adlandırılır.

1.10.2.1. Bireysel Metotlar

Bireysel metotlar özellikle dijital kamera sistemleri için kullanılmazlar. Bu metotlar daha çok film kameralarının kalibrasyonu için kullanılır. Bu metotta, kalibrasyon parametreleri keyfi bir biçimde seçilir. Bu parametrelerin belirlenmesinde hem sayısal ve hemde analitik metotlar ile lazer ışını, kolimator ve gonimetre gibi cihazlar kullanılır. Geleneksel laboratuar kalibrasyon metotları bu gurup içine girer. Bu tip metotlar ile mercek distorsiyon parametresi ve asal noktanın konumu ayrı ayrı belirlenir (Shortis vd., 1995).

Asal Nokta Konumu: Bir çok çalışmada belirtildiği gibi asal nokta PPP, PPA ve PPS terimleri ile temsil edilmektedir. Hassas doğruluk gerektiren çalışmalarda bu üç terim tek bir noktayı ifade eder. İdeal durumda PPP ve PPA aynı kavramı ifade etmektedir. Eğer

optik eksen alıcı düzlemine dik değilse, PPA ve PPS arasındaki fark olur. Bu fark, alıcı düzlemle optik eksenin iyi ayarlanamamasından kaynaklanır. CCD kameraların PPA'sı düşük güçte lazer ışınla bulunabilir (Burner vd., 1990).

Asal Uzaklığın Belirlenmesi: Asal uzaklık, kamera obje uzaklığı ile görüntü ölçeğinin bir fonksiyonu şeklinde belirlenebilir. İyi bir biçimde dağılmış hedef noktalarını içeren bir alana, farklı kamera uzaklıklarından görüntüler alınarak bu işlem gerçekleştirilir. İşlem süresince sabit bir mercek kullanılır. Belirlenen asal uzaklık kamera uzaklığından bağımsızdır (Wiley ve Wong, 1995).

Mercek Distorsiyonu: Mercek distorsiyonunu bulabilmek için, alıcı düzlemini kapsayacak şekilde dağılmış bilinen noktalara ihtiyaç vardır. Çapsal ve teğetsel mercek distorsiyon katsayıları görüntü noktalarının ölçülen konumları ile bilinen konumları arasındaki farklardan bulunur. Düşey çizgi metodu (Brown, 1971) mercek distorsiyonlarını düşey ve yatay çizgiler kullanılarak bulunmasını sağlayan en eski metotlardan biridir. Düşey ve yatay çizgilerden olan herhangi bir sapma mercek distorsiyonu olarak bilinir. Bu metotta, parametreler diğer parametrelerden bağımsız olarak belirlenir (Shortis vd., 1995).

Alıcının (Kayıt ünitesi) Değerlendirilmesi: Alıcı piksel boyutu hassas bir şekilde mikroskop ile ölçülebilir (Curry vd., 1986; Lenz, 1989). Burner vd. 1990'da yaptıkları çalışmada, bilinen resimden afin transformasyon temeline dayalı olarak pikselin düşey ve yatay boyutunu ve eksenler arasındaki dikliği belirleyen bir yöntem dizayn etmişlerdir. Alıcı topoğrafyasını ölçmek için, bir yüzey ölçüsü kullanılabilir. Benzer bir ölçü prensibi Fraser (1997/1) tarafından yüzey pürüzlülüğünü belirlemek için interferometre ile yapılmıştır. Alıcının diklik durumu ve yüzey pürüzlülüğü belirlendikten sonra, bu düzeltmelerin görüntü koordinatlarına etkisi verilebilir.

Bireysel metotların en güçlü yönü, sonuçların doğruluğuna etki eden kalibrasyon parametrelerinin rölatif olarak bağımsız olmalarıdır. Bireysel metotlarla kalibre edilen değerler birleşik metotlarla birlikle değerlendirilebilirler. Bireysel metotlar özel aletlere ihtiyaç duyulması ve çok fazla zaman almaları bakımından dezavantajlıdırlar (Shortis vd., 1995).

1.10.2.2. Birleşik Metotlar

Bu metotlar, asal noktanın konumu, asal uzaklık, mercek distorsiyonları ve alıcı bilgilerini (ölçek faktörü ve diklik) test alanı ile bu alana ait distorsiyonlu görüntü arasında

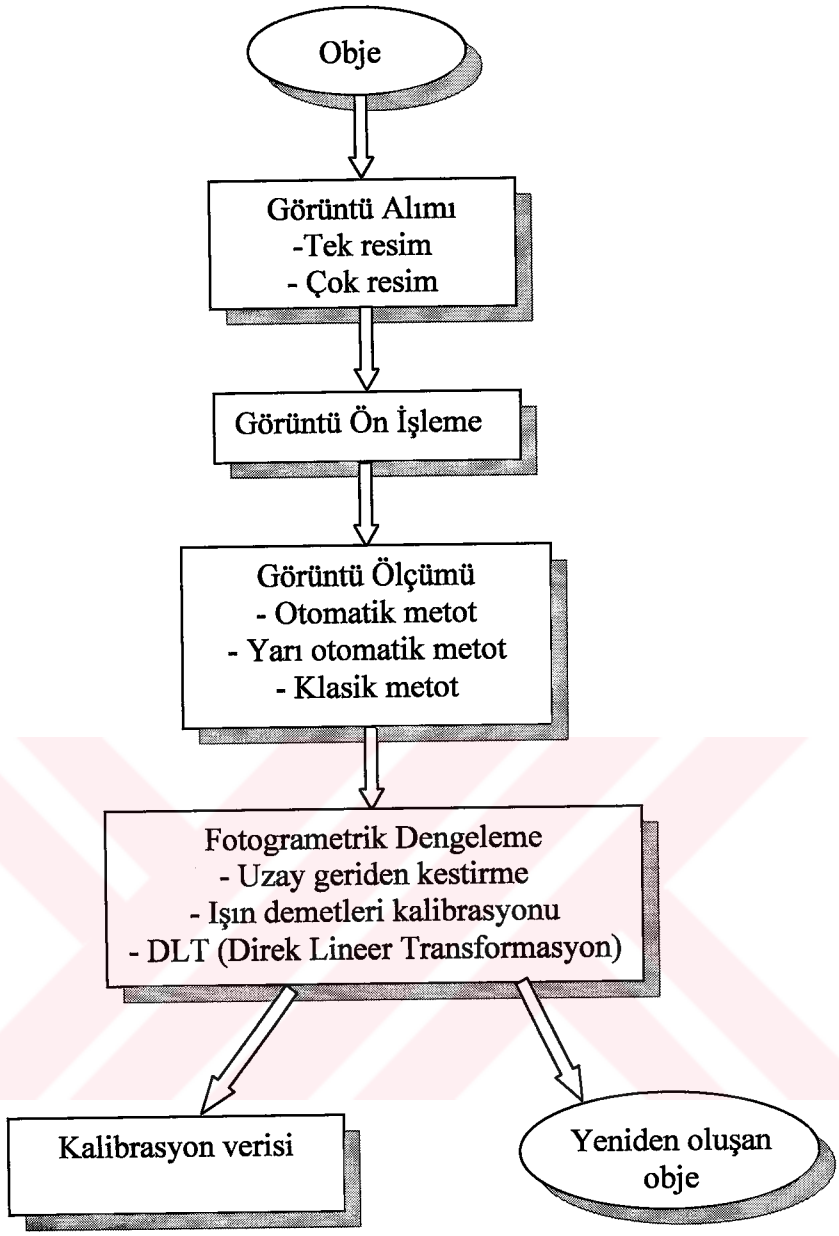
ilişki kurarak belirlemek için kullanılmaktadır. Bu metotlar ile test alanının güçlü bir geometrik yapıda olması durumunda, kalibrasyon parametreleri güvenli bir biçimde belirlenebilmektedir. Şekil 12, görüntü çekme, ölçüm ve fotogrametrik dengeleme aşamalarından oluşan birleşik metot prosedürünü göstermektedir. Yeteri sayıda kontrol noktası olması durumunda, hem tek ve hem de çoklu görüntüden kalibrasyon parametreleri çıkarılabilir. Dış yöneltme elemanları da obje koordinatlarından fotogrametrik dengelemeyle bulunabilir. Kontrol objesi kullanılması durumunda, iş ortamında kalibrasyon ile kendi kendine kalibrasyon birleşik metotlar olarak düşünülebilir. Dijital kameralarda kullanılan mercek sistemlerinin film kameralarından çok farklı olmaması nedeniyle, bir çok metot fazla bir değişikliğe uğramadan dijital kameraların geometrik kalibrasyonu için kullanılmaktadır. (Bösemann vd., 1990; El-Habrouk vd., 1996).

Görüntü Alımı: Görüntü konfigürasyonu, kalibrasyon parametrelerinin hesabı ve üç boyutlu bilgilerin elde edilmesinde performansı etkileyen en önemli faktördür. Başarılı bir kalibrasyon ve üç boyutlu objenin yeniden oluşturulması için, ideal bir fotogrametrik konfigürasyon,

- Çoklu konvergent görüntüler,
- Alan derinliğinin büyük olması,
- Değişik kamera dönüklük açıları,
- Belli miktarda ve uygun dağılmış hedef ve kontrol noktaları,

gibi özelliklere sahip olmalıdır.

İdeal bir fotogrametrik konfigürasyon için gerekli şartlar bir çok projede gerçekleştirilebilir. Uygulamada, konvergent bir blok için birden fazla noktadan test alanına görüntü alımı yapılır (El_Habrouk vd., 1996; Heipke vd., 1992; Peipe, 1995). Genellikle her bir istasyon noktasında birden çok kamera dönüklük açısında görüntü alınır, bu kalibrasyon işleminin serbestliğini artırır ve güvenli sonuçların ortaya çıkmasını sağlar. Görüntü ölçeği bütün görüntü alanını kapsayacak şekilde seçilir. Hedef noktalarının seçimi ve aydınlatması da resim kalitesine etki ederler. Değişik şekillerde nokta seçilebilir ancak genelde noktaların renkleri siyah, bulundukları ortamın rengi ise beyaz olmalıdır (Heipke vd., 1992; Lee ve Faig, 1996).



Şekil 12. Birleşik kalibrasyon metotlarının genel yapısı

Görüntü Ölçümü: Fotogrametrik projelerde hedef noktalarının görüntüdeki konumları önemli rol oynamaktadır. Dijital görüntüleri ölçmek için otomatik, yarı otomatik ve manuel olmak üzere üç ayrı metot kullanılır. Uygun nokta dağılımı ve aydınlatma altında, alınan görüntüler yüksek kontrasta görünürler. Böylece, görüntü noktaları piksel altı doğrulukta ölçüm yapan metotlar kullanılarak kolayca ölçülebilirler (Edmundson vd., 1991; Chen ve Schenk, 1992; Shortis vd., 1995; Stefanidis vd., 1990). En küçük kareler eşleştirmesi gibi bazı karmaşık görüntü ölçüm metotları yüksek doğruluklu çalışmalar için kullanılabilir (Heipke vd., 1992; Vösselmann ve Förstner, 1988). Yüksek gürültülü dijital

görüntülerde, otomatik ölçüm metodu yerine daha çok manuel ölçüm metodu tercih edilir (El-Habrouk vd., 1996; Faig vd., 1996). Görüntü noktalarının ölçümünden sonra, bu noktalar piksel koordinat sisteminden resim koordinat sistemine (metrik) dönüştürülürler. Çünkü fotogrametrik dengeleme işlemlerinde görüntü koordinatları kullanılmaktadır.

Fotogrametrik Dengeleme: Genişletilmiş kolinarite eşitliklerini esas alan çeşitli kendi kendine kalibrasyon dengelemeleri, kalibrasyon parametrelerini fonksiyonel modelle bulabilen metotlardır. Kontrol alanı sınırlamalarını yok etmek için, bu sınırlamaların daha az olduğu kendi kendine kalibrasyon metotları (Vösselmann ve Förstner, 1988) veya serbest ağ dengelemeli metotlar tercih edilir (Bösemann vd., 1990). Chen ve Schenk (1992) ile Faig ve Li 1997'de yaptıkları çalışmalarda kalibrasyon parametrelerini bulmak için fonksiyonel model olarak DLT yaklaşımını kullanmışlardır. Fotogrametrik dengelemeden sonra, kalibrasyon parametreleri ve doğrulukları bulunur, kamera sisteminin performansı bir dizi istatistiksel testlerle değerlendirilebilir. Genellikle, görüntü koordinat ölçmelerinin karesel ortalama hataları, kalibrasyonun ve objenin yeniden oluşturulmasında bir kalite göstergesidir. Birleşik metotların avantajları, kolay uygulanabilirlikleri ve veri değerlendirme ile kalibrasyon işleminin birlikte yapılabilmesidir.

1.10.3. Radyometrik Kalibrasyon Yöntemleri

Radyometrik kalibrasyon, dijital kamera sistemlerinin radyometrik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır. Örneğin, bir kamera sisteminin gerçek uzaydaki bir rengi ne kadar doğrulukta görüntüde gösterebildiği önemli bir radyometrik özelliktir. Dijital görüntü ölçümünde yüksek doğruluğun, yüksek radyometrik kalite ile sağlandığı ispatlanmıştır (Trinder, 1989). Aslında, ideal bir dijital kamera sisteminin geometrik ve radyometrik kalibrasyonunun birlikte yapılması gerekirken, uygulamada basitlik olsun diye ayrı ayrı ele alınmaktadırlar. Dijital veri alma ve işleme sisteminin komple bir kalibrasyonu geometrik ve radyometyrik kalibrasyona ilaveten sistemin performansını etkileyen nem ve sıcaklık gibi çevresel parametrelerinde dikkate alınması gerekir (El-hakim vd., 1989). Orta ve yüksek çözünürlüklü kameraların kullanıldığı bilgisayar görüşü ve yakın resim uygulamalarında, alıcı geometrisi metrik performans açısından en önemli etkendir ve radyometri genelde ikinci planda kalmaktadır (Shortis ve Beyer, 1996). Bu yüzden fotogrametri alanında radyometrik kalibrasyon ile ilgili sadece birkaç çalışma yapılmıştır (Curry vd., 1986; Stefanidis vd., 1990). Genellikle, radyometrik kalibrasyon

kameraların radyometrik özelliklerini ortaya çıkarabilmek için laboratuvar ortamında yapılır.

1.10.3.1. Cap On Metodu

Bu metot, koyu akım gürültüsünü belirlemek için kullanılan basit bir metottur. Kamera merceği kapalı durumda iken, hiçbir ışık algılamasının olmadığı durumda kaydedilen görüntüdeki piksellerin gri değerleri teorik olarak sıfır olmalıdır. Görüntüleme sistemi için sıfırdan farklı olan her değer için koyu akım gürültü kavramı sözkonusudur. Kayıt edilen değerlere dayanarak, bu etkiyi ortadan kaldırmak için bir maske kullanılır. Bazı dijital kameralar merceklerinin kapalı olması durumunda, radyometrik değerler açısından düzgün gri değerli bir fonksiyon üretemezler. Bu durumda, altertnatif metotlar kullanılır. Bu metotlarda düzgün siyah yüzeyler görüntülenerek işlem yapılır.

1.10.3.2. Düzgün Gri Kart ve Gri Adım Metodu

Bütün piksellere ait fonksiyon ve bu piksellerin algılama doğrusallığı düzgün gri kart ve gri adım metodu ile değerlendirilebilir. Bu metotta, gri değerleri ve yoğunluğu hassas biçimde bilinen bir kart uygun bir kalibrasyon için gereklidir. Piksellerin hataları kolaylıkla anormal gri düzey değişimlerinden belirlenir, ve bu pikseller görüntü işleme aşamasında devreden çıkarılır. Diğer yandan, gri adım karta çekilen görüntüden çıkarılan küçük bölgelerin ortalama yoğunlukları belirlenir. Ortalama yoğunlukların eğrisi alıcının doğrusallığını gösterir.

1.10.3.3. Foto Duyarlıklı Düzensizlik (PRNU) ve Radyometrik Düzeltme

Bu hatayı düzeltmek için iki görüntü alımı gereklidir. Bir görüntü kamera mercek sistemi açık iken beyaz bir ortama çekilir. Diğer bir görüntü ise mercek sistemi kapalı şekilde alınır. Bu durumda lineer olarak eğim (gain) ve öteleme (offset) değerleri hesaplanır. Bu hesaplama iki ayrı metotla gerçekleştirilir. Birinci metotla her pikselin eğim ve öteleme değerleri,

$$g_e = \frac{g_{beyaz} - g_{siyah}}{g'_{beyaz} - g'_{siyah}}$$

$$g_o = g_{siyah} - g_e \times g'_{siyah} \quad (19)$$

eşitliği ile belirlenir. Her bir piksel için düzeltilmiş değeri,

$$g = g_o + g_e \times g' \quad (20)$$

eşitliği ile bulunur. Burada, g` pikselin orijinal gri değerini, g pikselin düzeltilmiş gri değerini, $g_{siyah}$ ortalama siyah değeri, $g_{beyaz}$ ortalama beyaz değeri, $g`_{siyah}$ siyah görüntüdeki gri değeri, $g`_{beyaz}$ beyaz görüntüdeki gri değeri, g_e her bir pikselin eğim ya da artış değerini ve g_0 her bir pikselin öteleme değerini göstermektedir. İkinci metotta ise öteleme değeri sadece siyah görüntü kullanılarak bulunur. Böylece öteleme ve düzletilmiş görüntü değerleri,

$$g_o = g_{siyah} - g'_{siyah} \quad (21)$$

$$g = g_{siyah} + g_e \times (g' + g_o - g_{siyah}) = g_{siyah} + g_e \times (g' - g'_{siyah}) \quad (22)$$

eşitlikleri ile hesaplanır (Beyer, 1992/2; Heuvel, 1994).

1.10.3.4. Radyometrik Test İçin İstatistiksel Hesaplamalar

Her hangi bir görüntü, alt görüntü (quadrant) veya parça (patch) görüntü belirlendikten sonra, bu görüntülere ait piksellerin gri değer ortalamaları,

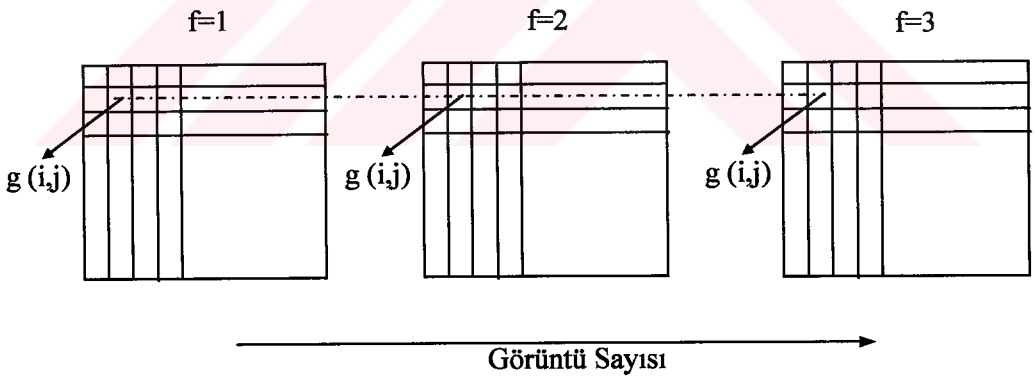
$$A = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{g(i,j)}{n \times m} \quad (23)$$

eşitliği ile belirlenir. Burada, A gri değer ortalamasını, n, x yönündeki piksel sayısını, m, y yönündeki piksel sayısını ve g(i, j) herhangi bir pikselin gri değerini göstermektedir. Standart sapma ise,

$$\sigma = \sqrt{\left\{\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}(A - g(i,j))^2\right] \Big/ [(n \times m) - 1]\right\}} \qquad (24)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, σ görüntü, alt görüntü veya yama görüntüdeki piksellerin standart sapmasını göstermektedir.

a) Görüntülerin Zamansal (Temporal) Ortalaması: Standart sapma ve ortalama değerlerinin hesabından sonra, piksellerin gri değerlerine ait zamansal ortalama belirlenir. Bu amaçla, öncelikle her bir görüntüdeki aynı piksellerin değerleri toplanır. Toplam değer, görüntü sayısına bölünür. Zamansal ortalama ile ilgili detaylı bir açıklama Şekil 14'de gösterilmektedir.



Şekil 13. Piksellerin Gri Değerlerinin Zamansal Ortalaması

Zamansal ortalama,

$$S(i,j) = \left[\sum_{k=1}^{f} g(i,j)\right] \Big/ f \qquad (25)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada, f görüntü sayısını, g(i, j) herhangi bir pikselin gri değerini, S (i, j) zamansal ortalamayı göstermektedir. Bu değer aynı zamanda öteleme (offset) değeri olarak ta bilinmektedir.

b) Konumsal Ortalama ve Gürültü: Her bir görüntü üzerindeki konumsal ortalama,

$$S' = \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} S(i,j)\right] \Big/ [n \times m] \tag{26}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada S', her bir görüntüye ait konumsal ortalamayı göstermektedir. Gürültü olarak tarif edilen konumsal ortalamanın standart sapması,

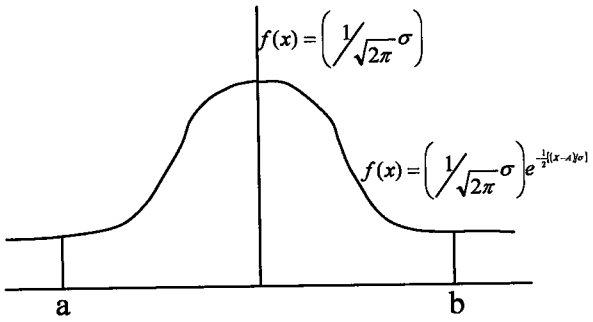
$$\sigma_{sp} = \sqrt{\left\{\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} (S' - S(i,j))^2\right] \Big/ [(n \times m) - 1]\right\}} \tag{27}$$

eşitliği ile belirlenir. Zamansal ve konumsal ortalama hesaplandıktan sonra, bu değerlerle eğim (gain) değerleri her piksel için hesaplanır ve düzgünsüzlük (non-uniformity) düzeltmesi değeri bulunur.

c) Görüntü Üzerinde Gri Değerlerin İstatistiksel Değerlendirilmesi: Her hangi bir görüntüdeki gri değerlerin dağılımı X, A ortalama değeri ve σ standart sapma ile normal dağılımdadır. Normal dağılım fonksiyonu,

$$f(x) = \left(1 \Big/ \sqrt{2\pi}\sigma\right) e^{-\frac{1}{2}[(X-A)/\sigma]} \tag{28}$$

dır. Bu dağılım fonksiyonu Gauss dağılım fonksiyonu olarak ta bilinir. Bu fonksiyon Şekil 14'de gösterilmektedir.



Şekil 14. Normal Dağılım Fonksiyonu

Bu dağılımın olasılık tablosu bilinmektedir. Aşağıdaki olasılıklar fotogrametrik uygulamalar için önemlidir.

$$P\{-\sigma \le (X-A) \le \sigma\} = 0.6827$$

$$P\{-2\sigma \le (X-A) \le 2\sigma\} = 0.9545 \qquad (29)$$

$$P\{-3\sigma \le (X-A) \le 3\sigma\} = 0.9973$$

(29) eşitliğine göre son olasılık değeri, piksellerin gri değerlerinin %99.73'ünün ortalama değerden 3σ uzaklıkta yayıldığını göstermektedir. Bu sebeple, 3σ hatalı olabilecek piksellerin tolerans sınırı olarak düşünülür. Eğer gri değer ortalama değerden 3 kattan daha fazla ise bu gri değerin ait olduğu piksel bozuk (blemished) yada ölü (dead) piksel olarak adlandırılır. Böylece alıcı yüzeyi üzerinde söz konusu piksellerin ışığa duyarlı olmadığı kanaatine varılır (Büyüksalih, 1997).

1.11. Fotogrametrik Matematik Modeller

Bu bölümde, genel olarak fotogrametrinin matematik modeli tanıtıldıktan sonra çalışmada kullanılan matematik modellerle ilgili ayrıntılı bilgiler verilecektir. Matematik model, bir takım fiziksel olaylar serisini açıklayan teorik bir sistem veya soyut bir kavram, bir başka ifade ile de gerçek fiziksel bir olayı matematik yolla tanımlayan bütün yöntemler olarak tanımlanabilir.

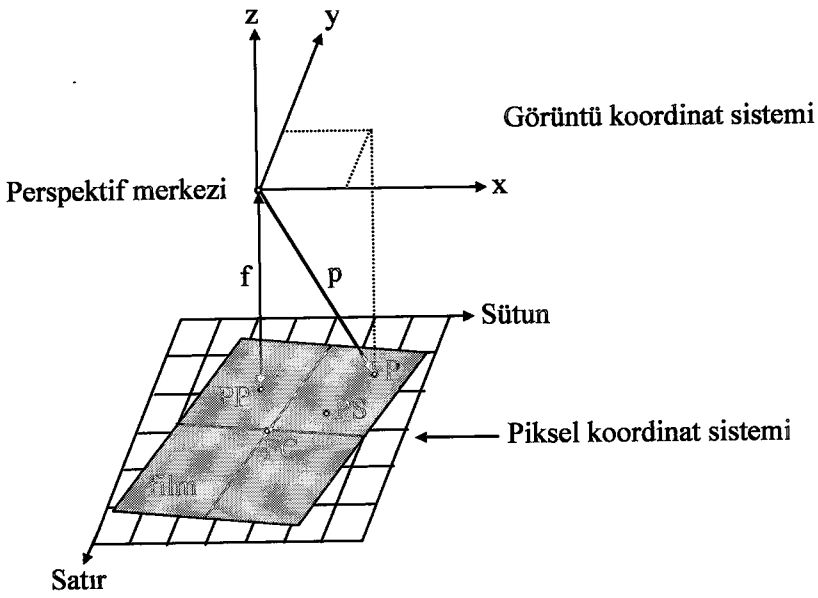
Fotogrametri için matematik model, farklı sistemlerde bulunan fiziksel büyüklükler arasındaki ilişkilerin matematik yolla ifade edilmesidir. Farklı sistemler, resim ve arazi, resim ve model (analitik fotogrametride), model ve arazide bulunan noktalar ve çizgiler arasındaki ilişkinin matematik olarak kurulmasını ifade eder. Matematik model kavramı kısaca "merkezi izdüşüm" olarak açıklanır. Bu da, obje uzayındaki noktaların bir izdüşüm merkezinden iz düşürülmesi olayıdır (Baş, 1993; Tüdeş, 1996).

Fotogrametrik değerlendirme işleminde ilk adım, kameranın (resim çekme makinesi) iç yöneltmesinin belirlenmesidir. İç yöneltme kavramı iki parametreyi içerir. Birincisi, kameranın kendisine ait geometrik parametreleri (asal uzaklık, asal nokta koordinatları gibi) içine alır. İkincisi ise birbirinden farklı düzenli hataları veya ideal matematik model ile sistemin fiziki realitesi arasındaki sapmalar olan distorsiyonları içine alır. Bu hatalardan bazıları (film deformasyonu veya mercek distorsiyonu gibi) kameranın özelliklerini ilgilendirirken, bir kısmı da fotogrametrik sistemin tamamını ilgilendirir.

Resimlerin değerlendirilmesinde ikinci adım dış yöneltmenin belirlenmesidir. Dış yöneltme işlemi, iç yöneltmesi gerçekleşen ışın konilerinin referans koordinat sisteminde yeniden elde edilmelerini sağlar. Yani herhangi bir görüntünün bir dış koordinat sistemindeki konum ve yöneltmesini verir. Bu ikinci adım, karşılıklı ve mutlak yöneltme olmak üzere iki aşamadan oluşur (Slama, 1980).

1.11.1. İç Yöneltme

İç yöneltmenin amacı, görüntü üzerindeki detaylara ait ölçülerin, başlangıcı kamera perspektif merkezi olan üç boyutlu bir kartezyen koordinat sistemine transformasyonudur. Bu sisteme görüntü koordinat sistemi denir. Kullanılan görüntünün dijital olması durumunda, piksel koordinat sistemi veya piksel sistemi olarak adlandırılır. Şekil 16'da bu iki koordinat sistemi gösterilmektedir. Görüntü koordinat sistemi, görüntü uzayındaki konumları gösteren bir sistem olarak adlandırılır. Bu sistemin başlangıcı perspektif merkezidir. Şekil 15'de film üzerinde gösterilen müşirler (resim çerçeve işaretleri) resim üzerinde bir merkez tanımlarlar (FC, fiducal center). FC ile asal nokta (PP, principle point of autocollimation) arasındaki fark kamera kalibrasyonu ile belirlenir. En iyi simetri noktası (PS, point of best symmetry) çapsal distorsiyon merkezidir, yani bu noktada distorsiyon sıfır değerini alır. Görüntü koordinat sisteminde yer alan x, y koordinat düzlemi, piksel koordinat sistemi ve uçuş eksenine paraleldir.



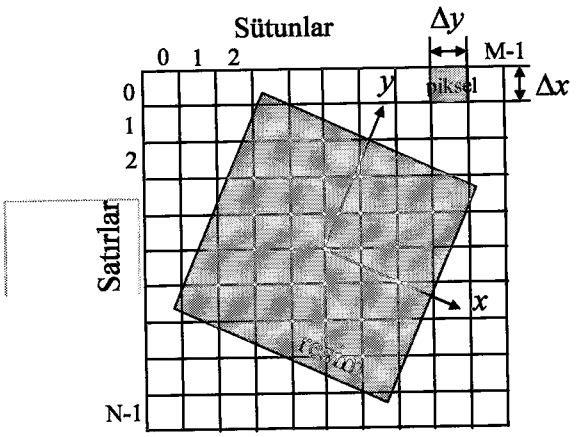
Şekil 15. Görüntü ve piksel koordinat sistemi (FC= müşir merkezi, PP= objektif merkezinden geçen doğrunun piksel sistemini deliği nokta, PS= çapsal distorsiyon sıfır noktası)

Görüntü üzerindeki konumlar nokta vektörleri ile açıklanmaktadır. Örneğin p nokta vektörü P görüntü noktasının piksel koordinat sistemindeki konumunu ifade eder. Şekil 15'den p vektörüne ilişkin bağıntı,

$$p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \tag{30}$$

şeklinde yazılır. p vektörünün içerdiği bilgiler P görüntü noktasına ait noktaya ait görüntü koordinatlarıdır. Burada f değerinin negatif yada pozitif olması resmin negatif yada pozitif olması ile ters orantılıdır. Görüntü koordinat sistemi ile obje uzayı koordinat sistemi arasındaki transformasyon yeniden oluşturma olarak adlandırılır. Bu transformasyonun en basit şekli, perspektif merkezi, görüntü noktası ve obje noktasının aynı doğru üzerinde kabul edildiği kolinarite modelidir (Schenk, 1999).

1.11.1.1. Piksel Koordinat Sisteminden Görüntü Koordinat Sistemine Dönüşüm



Şekil 16. Dijital görüntü üzerinde resim koordinat sistemi

Şekil 16'dan piksel koordinat sistemindeki bir P (r_p, c_p) noktasının resim koordinat sistemine basit bir transformasyonu (31) eşitlikleri ile yazılabilir.

$$\begin{aligned} x_p &= (c_p - c_0)p_c \\ y_p &= -(r_p - r_0)p_r \\ z_p &= -f \end{aligned} \tag{31}$$

Burada, r_0, c_0 asal noktanın piksel koordinatları, p_r, p_c her iki eksen yönündeki piksel boyutunu ifade etmektedir. Asal noktanın konumunun piksel koordinat sisteminde belirlenmesi önemlidir. Piksel ve görüntü koordinat sistemleri arasında paralellik söz konusu değilse, asal noktanın konumu iki boyutlu bir dönüşümle belirlenir. Piksel sisteminde ölçülen müşir koordinatları ile kamera kalibrasyon raporlarında verilen müşir koordinatları arasında bir transformasyon yapılır. Böylece, kalibrasyon raporlarında verilen müşirlere ait sisteme geçilir. Piksel koordinat sisteminden müşir koordinat sistemine geçişin genel formu,

$$\begin{aligned} x_p^f &= a_{11}r_p + a_{12}c_p + a_{13} \\ y_p^f &= a_{21}r_p + a_{22}c_p + a_{23} \end{aligned} \tag{32}$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Bu dönüşüm bağıntıları benzerlik transformasyonu ile sağlanır ve a_{ij} katsayıları,

$$\begin{aligned} a_{11} &= s\cos\alpha \qquad a_{12} = -s\sin\alpha \\ a_{21} &= -a_{12} \qquad a_{22} = a_{11} \end{aligned} \tag{33}$$

eşitlikleri ile bulunur. Burada s ölçek faktörü olup piksel boyutuyla ilişkilidir. x ve y yönündeki piksel boyu birbirine eşit değilse ($p_r \neq p_c$) iki ölçek faktöründen söz edilir. Hatta bu durumda afin transformasyon uygulanır. Bu transformasyonla ilgili katsayılar aşağıdaki şekildedir.

$$\begin{aligned} a_{11} &= s_x(\cos(\alpha - \varepsilon\sin\alpha)) \qquad a_{12} = -s_y\sin\alpha \\ a_{21} &= s_x(\sin(\alpha + \varepsilon\cos\alpha)) \qquad a_{22} = s_y\cos\alpha \end{aligned} \tag{34}$$

Burada, s_x, s_y iki eksen yönündeki ölçek faktörüdür. ε aşısı koordinat eksenleri arasındaki dik olmama durumunu göstermektedir. Son aşama müşir koordinat sisteminden resim koordinat sistemine geçiştir. Öteleme parametreleri x_0, y_0 kamera kalibrasyonundan belirlenerek, görüntü koordinatları,

$$\begin{aligned} x_p &= x_p^f - x_0 \\ y_p &= y_p^f - y_0 \\ z_p &= -f \end{aligned} \tag{35}$$

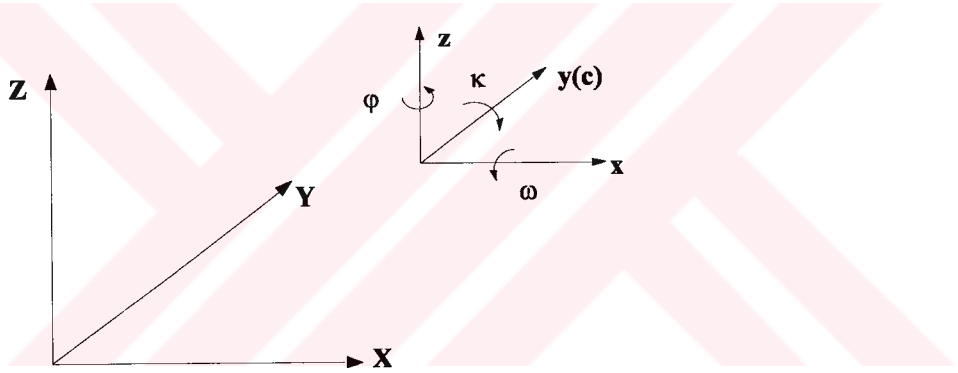
eşitliği ile elde edilir (Schenk, 1999).

1.11.2. Dış Yöneltme

Bir resmin dış yöneltme elemanları, altı parametreyi içeren iki gruptan oluşur. Birinci grup, üç boyutlu bir koordinat sisteminde kamera noktası konumunu belirleyen perspektif merkezine ait X_0, Y_0, Z_0 uzay koordinatlarıdır. İkinci grup parametre ise, görüntü koordinat sistemi ile arazi koordinat sistemi arasındaki dönüklüklerdir (ω, φ, κ) (Baş, 1993).

Dış yöneltme, görüntü alımı sırasındaki kamera konumunun belirlenmesini ve görüntü ile cisim uzayı koordinat sistemleri arasındaki açısal ilişkiyi ifade eder. Dış yöneltmede öncelikle koordinat sistemleri belirlenir.

Cisim uzayı ve görüntü koordinat sistemleri üç boyutlu dik koordinat sistemleridir. Görüntü koordinat sisteminde, x ve z eksenleri görüntü düzlemindeki eksenler, y ekseni ise bu düzleme dik eksendir. Pozitif yön alım ekseni yönündedir. Bir sağ el koordinat sistemine göre, yersel fotogrametrideki cisim uzayı koordinat sisteminde alım ekseni Z yönünde değil Y yönündedir ve genellikle alım ekseni etrafındaki dönüklük de κ dönüklüğü olarak alınır. Buna göre hava fotogrametrisindeki eksenler ve dönüklüklere benzer şekilde X-ekseni birinci eksen ve etrafındaki dönüklük ω, ikinci eksen Z-ekseni, etrafındaki dönüklük φ, üçüncü eksen alım ekseni Y ve etrafındaki dönüklük de κ olarak seçilebilir (Şekil 17).

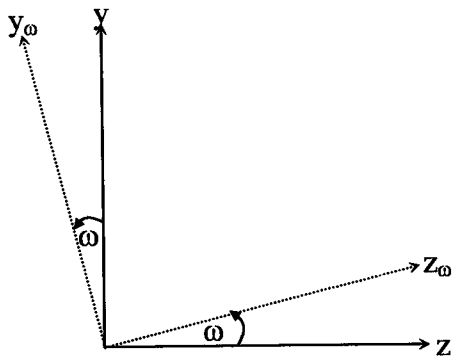


Şekil 17. Koordinat sistemleri ve yöneltme açıları

Görüntü ve cisim uzayı koordinat sistemleri arasındaki açısal ilişki, herbir koordinat eksen çifti arasındaki açıların kosünüsleri olan 3×3 lük bir ortogonal dönüklük matrisi ile belirlenir. Dönüklük matrisinin dokuz elemanı olmasına karşın, matrisi sadece üç bağımsız parametre belirler.

Dönüklük matrisinin şeklini, dönüklük açılarının seçilen pozitif yönleri ve yapılan ön kabullerle belirlemek mümkündür. Yakın resim fotogrametrisinde, kullanılmış sistemlerin çoğunda bu matris X, Z, Y eksenleri etrafındaki ardışık dönmeler yardımıyla belirlenebilir.

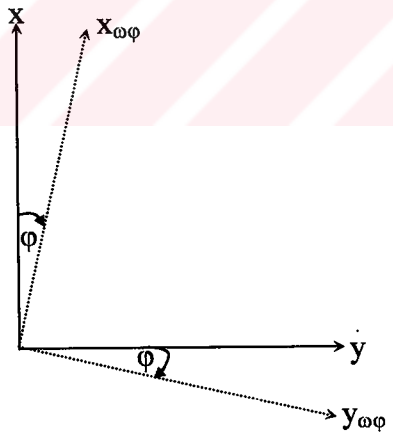
Birinci eksen olarak kabul edilen X ekseni etrafındaki ϖ dönüklüğü için dönüklük matrisi,



Şekil 18. X ekseni etrafındaki ω dönüklüğü

$$M\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}\,\omega & \text{Sin}\,\omega \\ 0 & -\text{Sin}\,\omega & \text{Cos}\,\omega \end{bmatrix} \tag{36}$$

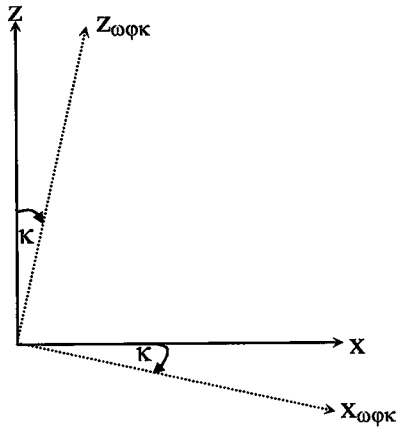
şeklinde (Şekil 18), ikinci eksen olarak seçilen Z ekseni etrafındaki φ dönüklüğü için dönüklük matrisi,



Şekil 19. Z ekseni etrafındaki φ dönüklüğü

$$M\varphi = \begin{bmatrix} \text{Cos}\,\varphi & 0 & -\text{Sin}\,\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{Sin}\,\varphi & 0 & \text{Cos}\,\varphi \end{bmatrix} \tag{37}$$

şeklinde (Şekil 19) ifade edilebilir. Üçüncü eksen olarak seçilmiş Y alım ekseni etrafındaki κ dönüklüğü için dönüklük matrisi,



Şekil 20. Y ekseni etrafındaki κ dönüklüğü

$$M\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \sin\kappa & 0 \\ -\sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

ifadesi ile yazılabilir (Şekil 20).

M dönüklük matrisi, bu alt matrislerin uygun ardışık sıra ile çarpımı sonucu elde edilir.

$$M = M\kappa \,.M\varphi \,.\, M\omega \quad (39)$$

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\varphi.\cos\kappa \\ m_{12} &= \sin\omega\,.\sin\varphi\,.\cos\kappa + \cos\omega\,.\sin\kappa \\ m_{13} &= -\cos\omega\,.\sin\varphi.\cos\kappa + \sin\omega\,.\sin\kappa \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} m_{21} &= -\cos\varphi\,.\sin\kappa \\ m_{22} &= -\sin\omega\,.\sin\varphi\,.\,\sin\kappa + \cos\omega\,.\cos\kappa \\ m_{23} &= \cos\omega\,.\sin\varphi\,.\,\sin\kappa + \sin\omega\,.\cos\kappa \end{aligned} \quad (41)$$

$$
\begin{aligned}
m_{31} &= \operatorname{Sin}\varphi \\
m_{32} &= -\operatorname{Sin}\omega \,.\operatorname{Cos}\varphi \\
m_{33} &= \operatorname{Cos}\omega \,.\, \operatorname{Cos}\varphi
\end{aligned}
\tag{42}
$$

Matris gösterimi ile toplam dönüklüklerin içinde bulunduğu M matrisi,

$$
M = \begin{bmatrix}
\cos\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa & -\cos\omega\sin\varphi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa \\
-\cos\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\sin\varphi\sin\kappa i + \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa\omega + \sin\omega\cos\kappa \\
\sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi
\end{bmatrix}
\tag{43}
$$

veya daha kısa bir ifade ile,

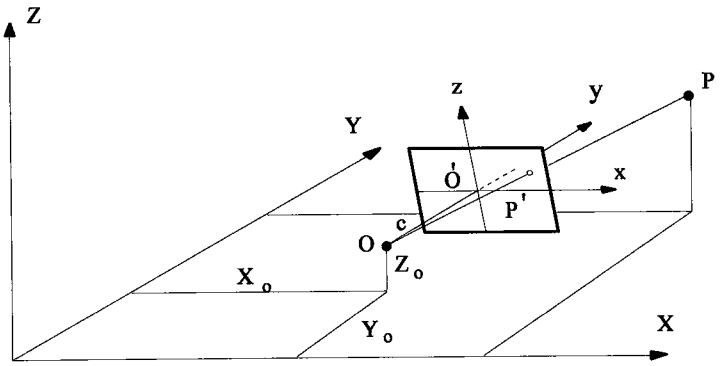
$$
M = \begin{bmatrix}
m_{11} & m_{12} & m_{13} \\
m_{21} & m_{22} & m_{23} \\
m_{31} & m_{32} & m_{33}
\end{bmatrix}
\tag{44}
$$

şeklinde 9 elemanlı bir matris ile gösterilir (Cooper ve Robson, 1996). Bu dönüşüm sırasında sistemde koordinatlarıyla tanımlanan bir nesnenin şekli değişmediği için, dönüşüm şekil koruyandır (konform). Eğer dönüklük matrisinin elemanları biliniyorsa, dönüklük açıları (45) eşitlikleri yardımıyla hesaplanabilir.

$$
\sin\varphi = m_{31},\quad \tan\omega = -\frac{m_{32}}{m_{33}},\quad \tan\kappa = -\frac{m_{21}}{m_{11}}
\tag{45}
$$

1.11.2.1. Doğrusallık Şartı (Colinearity Condition)

Pozitif resim üzerinde, bir P' noktasının resim koordinatları $(x_p, z_p, 0)$, izdüşüm merkezinin resim üzerindeki karşılığı olan O' noktası için resim koordinatları $(x_o, z_o, 0)$ olarak, O izdüşüm merkezinin, resim koordinat sistemindeki koordinatları ise $(x_o, z_o, -c)$ şeklinde gösterilebilir (Şekil 21).



Şekil 21. Cisim uzayı (X,Y,Z) ve görüntü uzayı (x,z) koordinat sistemleri

Bu tanımlamalara bağlı olarak, resim koordinat sisteminde P' noktasının konumunu tanımlayan vektör,

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x_p - x_o \\ z_p - z_o \\ 0 - (-c) \end{bmatrix} \tag{46}$$

şeklinde ifade edilebilir. Arazi koordinat sisteminde, O izdüşüm merkezinin koordinatları (X_o, Y_o, Z_o) ve P' görüntü noktasının arazideki karşılığı P noktasının koordinatları (X_p, Y_p, Z_p)'dir. Buradan P arazi noktasını belirleyen vektör ise,

$$\vec{R} = \begin{bmatrix} X_P - X_o \\ Z_P - Z_o \\ Y_P - Y_o \end{bmatrix} \tag{47}$$

şeklinde yazılabilir.

Resmin dış yöneltmesi yapıldığında, bu iki konum vektörü $\vec{r}$ ve $\vec{R}$ aynı doğru üzerinde olup doğrusaldır. Bu iki vektörün sadece uzunlukları farklıdır. Uzunlukların oranından ölçek faktörü ,

$$\lambda = \frac{|r|}{|R|} \tag{48}$$

eşitliği ile elde edilir. Üç boyutlu iki dik koordinat sistemi arasındaki bağıntının,

$$\begin{bmatrix} x \\ z \\ c \end{bmatrix} = \lambda \cdot M \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Z - Z_o \\ Y - Y_o \end{bmatrix} \tag{49}$$

şeklinde olduğu göz önünde tutulduğunda, pozitif bir resim için doğrusallık şartı resim koordinatları cinsinden,

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x_p - x_o \\ z_p - z_o \\ c \end{bmatrix} = \lambda \cdot M \cdot \begin{bmatrix} X_p - X_o \\ Z_p - Z_o \\ Y_p - Y_o \end{bmatrix} = k \cdot M \cdot \vec{R} \tag{50}$$

eşitliği ile, arazi koordinatları cinsinden ise,

$$\begin{bmatrix} X_p - X_o \\ Z_p - Z_o \\ Y_p - Y_o \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \cdot M^T \cdot \begin{bmatrix} x_p - x_o \\ z_p - z_o \\ c \end{bmatrix} \tag{51}$$

eşitliği ile yazılabilir. (50) eşitliğinde, matris çarpımı ve gerekli düzenlemeler yapıldığında,

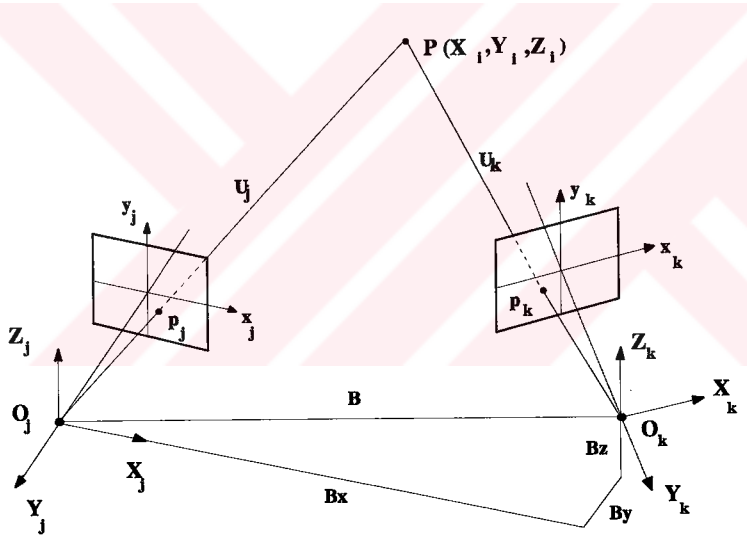
$$\begin{aligned} (x_p - x_o) &= c \frac{m_{11}(X - X_o) + m_{12}(Z - Z_o) + m_{13}(Y - Y_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Z - Z_o) + m_{33}(Y - Y_o)} \\ (y_p - y_o) &= c \frac{m_{21}(X - X_o) + m_{22}(Z - Z_o) + m_{23}(Y - Y_o)}{m_{31}(X - X_o) + m_{32}(Z - Z_o) + m_{33}(Y - Y_o)} \end{aligned} \tag{52}$$

eşitlikleri ile gösterilen resim koordinatları cinsinden izdüşüm denklemleri elde edilir (Finsterwalder ve Hofmann, 1983; Wolf ve Dewitt, 2000). Doğrusallık koşulunda cisim noktası (P), izdüşüm merkezi (O) ve görüntü noktası (P') aynı doğru üzerindedir. Söz konusu bu şart uygulamada hiçbir zaman gerçekleştirilemez. Değişik bozucu etkiler (mercek distorsiyonu, atmosferik kırılma vb.) gerçek ışının bir doğru üzerinde olmasını

engeller. Ancak, bu bozucu etkiler bilinir veya belirlenirse, doğrusallık şartında indirgenmiş veri kullanılır veya uygun düzeltmeler uygulanabilir.

1.11.2.2. Düzlemdeşlik Koşulu (Coplanarity Condition)

Doğrusallık eşitliği, her bir resmin ayrı ayrı yöneltilmesi ile ilgili olmasına karşın, en azından bir çift resmin olmasını gerektiren fotogrametrinin önemli bir diğer eşitliği de düzlemdeşlik eşitliğidir. Bu eşitlik, birden fazla resimde yer alan aynı noktaya ait cisim noktasından, her bir görüntüye giden görüntü ışınlarının bir düzlem içerisinde yer aldığı görüşüne dayanır. Bir stereo model düşünüldüğünde, iki görüntü noktası, iki izdüşüm merkezi ve cisim noktasının hepsi bir düzlem içerisindedir ve matematiksel olarak bu düzlemdeşlik eşitliği ile ifade edilir (Ayhan, 1996).



Şekil 22. Düzlemdeşlik (Coplanarity) Koşulu

Şekil 22'ye göre düzlemdeşlik şartının geometrisi, iki izdüşüm merkezi arasındaki B baz vektörü ve aynı cisim noktası için iki cisim ışın vektörleri U_j ve U_k'dan belirlenebilir. Analitik olarak bu vektörler, herhangi bir çift j ve k fotoğrafları için,

$$B = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{o_j} - X_{o_k} \\ Y_{o_j} - Y_{o_k} \\ Z_{o_j} - Z_{o_k} \end{bmatrix} \tag{53}$$

$$U_j = \begin{bmatrix} U_{x_j} \\ U_{y_j} \\ U_{z_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_{o_j} \\ Y_i - Y_{o_j} \\ Z_i - Z_{o_j} \end{bmatrix} \tag{54}$$

$$U_k = \begin{bmatrix} U_{x_k} \\ U_{y_k} \\ U_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_{o_k} \\ Y_i - Y_{o_k} \\ Z_i - Z_{o_k} \end{bmatrix} \tag{55}$$

eşitlikleri ile yazılabilir. U_j ve U_k vektörlerinin, M dönüklük matrisi, λ ölçek faktörü ve görüntü koordinatları cinsinden ifadesi,

$$U_j = \begin{bmatrix} U_{x_j} \\ U_{y_j} \\ U_{z_j} \end{bmatrix} = \lambda_{ij} \, [M]_j^T \begin{bmatrix} x_{ij} - x_{o_j} \\ y_{ij} - y_{o_j} \\ -c_j \end{bmatrix} \tag{56}$$

$$U_k = \begin{bmatrix} U_{x_k} \\ U_{y_k} \\ U_{zk} \end{bmatrix} = \lambda_{ik} \, [M]_k^T \begin{bmatrix} x_{ik} - x_{o_k} \\ y_{ik} - y_{o_k} \\ -c_k \end{bmatrix} \tag{57}$$

eşitlikleri ile gösterilir. Düzlemdeşlik eşitliğinin determinant şeklindeki ifadesi,

$$H = \begin{vmatrix} B_x & U_{x_j} & U_{x_k} \\ B_y & U_{y_j} & U_{y_k} \\ B_z & U_{z_j} & U_{z_k} \end{vmatrix} = \lambda_{ij} \lambda_{ik} \begin{vmatrix} B_x & u_{x_j} & u_{x_k} \\ B_y & u_{y_j} & u_{y_k} \\ B_z & u_{z_j} & u_{z_k} \end{vmatrix} = 0 \tag{58}$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

$$\begin{bmatrix} u_{x_j} \\ u_{y_j} \\ u_{z_j} \end{bmatrix} = [M]_j^T \begin{bmatrix} x_{ij} - x_{o_j} \\ y_{ij} - y_{o_j} \\ -c_j \end{bmatrix} \tag{59}$$

$$\begin{bmatrix} u_{x_k} \\ u_{y_k} \\ u_{zk} \end{bmatrix} = [M]_k^T \begin{bmatrix} x_{ik} - x_{o_k} \\ y_{ik} - y_{o_k} \\ -c_k \end{bmatrix} \tag{60}$$

şeklindedir. (59) ve (60) eşitliklerine görüntü distorsiyon parametreleri ilave edildiğinde, eşitlikler,

$$\begin{bmatrix} U_{x_j} \\ U_{y_j} \\ U_{z_j} \end{bmatrix} = [M]_j^T \begin{bmatrix} (x_{ij} - x_{o_j}) + dr_{x_j} + dp_{x_j} + dq_{x_j} \\ (y_{ij} - y_{o_j}) + dr_{y_j} + dp_{y_j} + dq_{y_j} \\ -c_j \end{bmatrix} \tag{61}$$

$$\begin{bmatrix} U_{x_k} \\ U_{y_k} \\ U_{zk} \end{bmatrix} = [M]_k^T \begin{bmatrix} (x_{ik} - x_{o_k}) + dr_{x_k} + dp_{x_k} + dq_{x_k} \\ (y_{ik} - y_{o_k}) + dr_{y_k} + dp_{y_k} + dq_{y_k} \\ -c_k \end{bmatrix} \tag{62}$$

şeklini alır. Genişletilmiş düzlemdeşlik eşitliği,

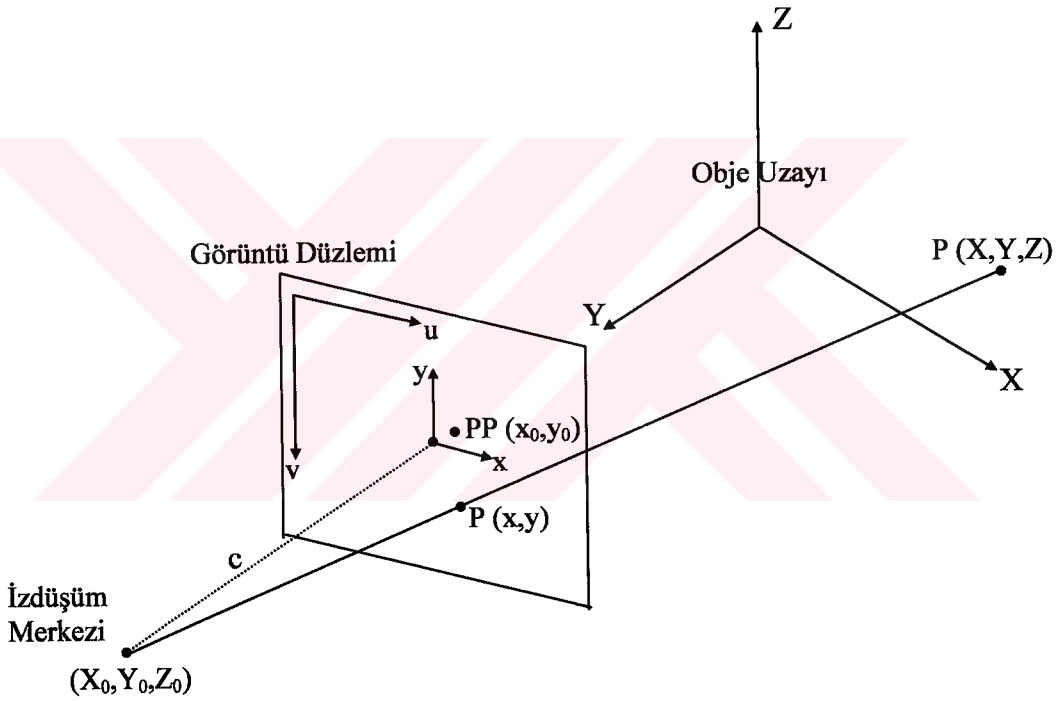
$$\begin{aligned} H = {} & (X_{o_j} - X_{o_k})(u_{y_j} u_{z_k} - u_{z_j} u_{y_k}) - (Y_{o_j} - Y_{o_k})(u_{x_j} u_{z_k} - u_{z_j} u_{x_k}) \\ & + (Z_{o_j} - Z_{o_k})(u_{x_j} u_{y_k} - u_{y_j} u_{x_k}) = 0 \end{aligned} \tag{63}$$

şeklinde yazılabilir (Ayhan, 1996).

1.11.3. Çalışmada Kullanılan Matematik Modeller

1.11.3.1. İlave Parametreli Işın Demetleri Yöntemi

Fotogrametrik olarak konum belirleme ve kalibrasyon metotlarında en yaygın olarak kullanılan metot ilave parametreli ışın demetleri yöntemidir (Grün ve Beyer, 2001; Remondino, 2002). Bu yöntemle, belirlenen parametreler obje noktalarının 3 boyutlu koordinatları ve kamera parametreleridir (iç ve dış yöneltmeler) (Wang ve Clarke, 2001). Işın demetleri yönteminin matematik temeli kolinarite şartına dayanır. Şekil 23'e göre standart kolinarite eşitlikleri aşağıdaki biçimde ifade edilir.



Şekil 23. Referans sistemi ve kolinarite şartı

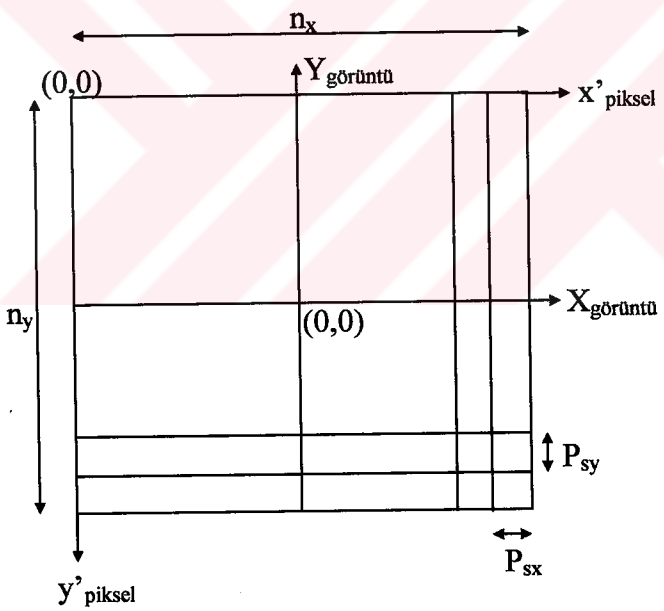
$$x - x_0 = -c\frac{m_{11}(X-X_0)+m_{21}(Y-Y_0)+m_{31}(Z-Z_0)}{m_{13}(X-X_0)+m_{23}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} = -c\frac{U}{W}$$

$$y - y_0 = -c\frac{m_{12}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{32}(Z-Z_0)}{m_{13}(X-X_0)+m_{23}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} = -c\frac{V}{W} \quad (64)$$

Burada;

- x, y: P noktasının görüntü koordinatları,
- x_0, y_0: asal noktanın (PP) görüntü koordinatları,
- c: kamera sabiti,
- X, Y, Z: P noktasının obje koordinatları,
- X_0, Y_0, Z_0: izdüşüm merkezinin obje uzayı koordinatları,
- m_{ij}: resim koordinat sistemi ile obje uzayı arasındaki dönüklük matrisinin (M) elamanlarıdır.

Dijital görüntü üzerinde yapılan bütün ölçmeler piksel koordinat (u,v) sistemindedir. Buna karşın kolinarite eşitliğinde, metrik koordinat sistemi olan görüntü koordinat sistemi (x, y) kullanılır. Piksel koordinatlarından görüntü koordinatlarına geçiş afin transformasyonla sağlanır. Şekil 25, piksel koordinat sistemi ile görüntü koordinat sistemi arasındaki transformasyonu göstermektedir (Remondino, 2000; D'Apuzzo, 2003).



Şekil 24. Piksel ve görüntü koordinat sistemi arasındaki ilişki

Piksel koordinatlarından görüntü koordinatlarına transformasyon,

$$x = \left(x' - \frac{n_x}{2}\right)p_{sx}$$
$$y = \left(y' + \frac{n_y}{2}\right)p_{sy} \qquad (65)$$

eşitlikleri ile sağlanır. Burada, x, y görüntü koordinatlarını, x', y' piksel koordinatlarını, n_x, n_y, x ve y yönündeki piksel sayısını, p_{sx} ve p_{sy} ise x ve y yönündeki piksel boyutunu göstermektedir (Beyer, 1992/2; Remondino, 2000; D'Apuzzo, 2003).

Piksel koordinat sistemi sol el koordinat sistemi olup başlangıcı sol üst köşedir. Satırlar x eksenine sütunlar ise y eksenine paraleldir. Görüntü koordinat sistemi ise sağ el koordinat sistemi olup başlangıcı görüntünün orta noktasıdır (Beyer, 1992/2).

Kolinarite modeli, fiziksel olarak gerçeği yansıtması açısından bazı sistematik hataları içerecek şekilde genişletilir. Bu sistematik hataların tümüne birden ilave parametre denir ve görüntü koordinatlarına düzeltme olarak getirilirler. Fotogrametride yaygın olarak kullanılan ilave parametre seti üç iç yöneltme parametresi (Δx_p, Δy_p, Δc), ölçek faktörü (B_1), resim koordinat eksenlerinin dik olmaması (B_2), çapsal distorsiyon parametreleri (K_1, K_2, K_3) ve teğetsel distorsiyon parametrelerinden (P_1, P_2) oluşur. Bu parametrelerle genişletilmiş kolinarite modeli,

$$F_x = x - x_0 = -c\frac{U}{W} + \Delta x$$
$$F_y = y - y_0 = -c\frac{V}{W} + \Delta y \qquad (66)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. (66) eşitliği matris biçiminde gösterilirse,

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \qquad (67)$$

şeklini alır. (66) eşitliğindeki Δx ve Δy,

$$\Delta x = -x_0 - \frac{\bar{x}}{c}\Delta c - \bar{x}A + \bar{y}B + \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + \left(2\bar{x}^2 + r^2\right)P_1 + 2P_2\overline{xy}$$

$$\Delta y = -y_0 - \frac{\bar{y}}{c}\Delta c - \bar{x}B + \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2P_1\overline{xy} + \left(2\bar{y}^2 + r^2\right)P_2 \qquad (68)$$

$$\bar{x} = x - x_0; \quad \bar{y} = y - y_0, r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$

şeklinde gösterilebilir (Beyer, 1992/2; Remondino, 2002).

Işın demetleri eşitliğinin çözümü ile ilave parametreler, kamera konum ve dönüklükleri ve obje koordinatları belirlenir. Her bir resim noktası için iki adet kolinarite eşitliği yazılır. Bütün noktalardaki eşitlikler bir bütün olarak ele alınır ve bilinmeyenler çözülür. (64) eşitlikleri bilinmeyenlere göre doğrusal değildir. Bu yüzden bilinmeyenlerin çözümü için doğrusallaştırma yapmak gerekir. Doğrusallaştırma için 1. derece Taylor serisi kullanılır. Sistemin çözümü en küçük kareler ilkesine (Gauss-Markov modeli) göre yapılır (Beyer, 1992/2; Remondino, 2002). En küçük kareler çözümünde bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerine ihtiyaç vardır. Bunun için çözüm öncesinde yaklaşık değerler belirlenmelidir.

İlave parametreli ışın demetleri çözümünde, yaklaşık değerlerin bulunması aslında bir geriden kestirme problemidir. Fotoğrafın dış yöneltmeleri için yaklaşık değerler test alanında belirlenen kontrol noktaları ve bunların karşılığı olan resim koordinatları yardımıyla tespit edilir. Geleneksel olarak, fotoğrafın dönüklükleri ve uzaysal konumu, çekim istasyonunun üç koordinatı (X_0, Y_0, Z_0) ve üç yöneltme parametresi (φ, ω, κ) ile gösterilir. Sonuç olarak, ışın demetleri dengelemesinde dış yöneltme elemanlarının bulunması için uygun yaklaşık değerlerin bilinmesi esastır.

Dış yöneltme elemanları için yaklaşık değer bulunmasına yönelik bir çok yaklaşım mevcuttur (Slama, 1980; Criminisi, 1999; Foerstner, 2000; Wolf ve Dewitt, 2000). Bu metot için yaklaşık değerlerin çözümü, kapalı form geriden kestirme yöntemi ile yapılmıştır. Yaklaşık değer probleminin çözümü iki ana kısımdan oluşmaktadır. İlk aşama, çekim noktası koordinatlarının bulunması, diğer aşama ise dönüklük parametrelerinin belirlenmesidir (Zheng ve Wang, 1992).

Kolinearite eşitlikleri ile ifade edilen ışın demetleri yöntemi için çözüm en küçük kareler ilkesine dayanan demet dengelemesi ile yapılır. Bilinmeyen parametrelerin her biri

için (iç ve dış yöneltme elemanları) kısmi türevler alınarak dengeleme modeli oluşturulur. İlave parametreli kolinearite matematik modeli (69) eşitlikleri ile gösterilir.

$$x = x_0 - c\frac{Z_x}{N} + AP_x, \qquad x_i = x - x_0$$
$$y = y_0 - c\frac{Z_y}{N} + AP_y, \qquad y_i = y - y_0 \tag{69}$$

Burada pay ve paydadaki terimlerin açık olarak gösterimi için aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$Z_x = r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0) \tag{70}$$

$$Z_y = r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0) \tag{71}$$

$$N = r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0) \tag{72}$$

İlave parametrelere ait matematik model ise,

$$AP_x = -x_i A + y_i B + x_i R^2 K_1 + x_i R^4 K_2 + x_i R^6 K_3 + \left(R^2 + 2x_i^2\right)P_1 + 2x_i y_i P_2 \tag{73}$$

$$AP_y = x_i B + y_i R^2 K_1 + y_i R^4 K_2 + y_i R^6 K_3 + \left(R^2 + 2y_i^2\right)P_2 + 2x_i y_i P_1 \tag{74}$$

şeklinde yazılabilir. Kolinearite eşitliklerine göre ilave parametreleri de içeren gözlem eşitlikleri,

$$x_i = f_x(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, x_0, y_0, A, B, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, X_i, Y_i, Z_i)$$
$$y_i = f_y(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, x_0, y_0, A, B, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, X_i, Y_i, Z_i) \tag{75}$$

şeklinde yazılır. Kurulan matematik modele göre bilinmeyenler,

$$x = \left(A^T P A\right)^{-1} A^T P l \tag{76}$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada x bilinmeyenleri, A dizayn veya katsayılar matrisi, P ölçülerle ilgili ağırlık matrisi ve l ölçüleri temsil etmektedir. x bilinmeyenleri,

$$x = (dX_0, dY_0, dZ_0, d\varpi, d\varphi, d\kappa, dc, dx_0, dy_0, dA, dB, dk_1, dk_2, dk_3, dp_1, dp_2)^T \tag{77}$$

eşitliği ile ifade edilir. P ağırlık matrisi,

$$P = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & & & \\ & 1/\sigma_1^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1/\sigma_1^2 \end{bmatrix} \tag{78}$$

eşitliği ile gösterilir. Düzeltmeler ise,

$$v = Ax - l \tag{79}$$

eşitliği ile ifade edilir. x ve y koordinatları için düzeltmelerin daha geniş bir biçimde ifadesi ise,

$$\begin{aligned} v_x = {} & \frac{\partial x}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial x}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial x}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial x}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial x}{\partial \kappa} d\kappa + \\ & \frac{\partial x}{\partial X} dX + \frac{\partial x}{\partial Y} dY + \frac{\partial x}{\partial Z} dZ + \frac{\partial x}{\partial c} dc + \frac{\partial x}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial x}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial x}{\partial K_1} dK_1 + \\ & \frac{\partial x}{\partial K_2} dK_2 + \frac{\partial x}{\partial K_3} dK_3 + \frac{\partial x}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial x}{\partial P_2} dP_2 + \frac{\partial x}{\partial A} dA + \frac{\partial x}{\partial B} dB - \left(x - x^0\right) \end{aligned} \tag{80}$$

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial y}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial y}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial y}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial y}{\partial \kappa} d\kappa +$$
$$\frac{\partial y}{\partial X} dX + \frac{\partial y}{\partial Y} dY + \frac{\partial y}{\partial Z} dZ + \frac{\partial y}{\partial c} dc + \frac{\partial y}{\partial x_0} dx_0 + \frac{\partial y}{\partial y_0} dy_0 + \frac{\partial y}{\partial K_1} dK_1 + \quad (81)$$
$$\frac{\partial y}{\partial K_2} dK_2 + \frac{\partial y}{\partial K_3} dK_3 + \frac{\partial y}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial y}{\partial P_2} dP_2 + \frac{\partial y}{\partial A} dA + \frac{\partial y}{\partial B} dB - \left(y - y^0\right)$$

formülleri ile ifade edilir. (80) ve (81) eşitliklerindeki kısmi türevler dengeleme aşamasında dizayn matrisinin çatısını oluştururlar. Birim ölçünün standart sapması,

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{r}} \quad (82)$$

ile hesaplanır. Burada r serbestlik derecesini göstermektedir. Bilinmeyen parametrelerin hesaplanmasından sonra yeni obje noktalarının koordinatları uzay önden kestirme ile bulunur. Hesaplanan koordinatlar ve dengeleme modelinden doğruluk ve duyarlık analizi yapılabilir. Hesaplanan kontrol noktalarının x, y ve z bileşenleri için standart sapmaları,

$$\sigma_{Xi} = \sigma_0 \sqrt{q_{XiXi}}, \sigma_{Yi} = \sigma_0 \sqrt{q_{YiYi}}, \sigma_{Zi} = \sigma_0 \sqrt{q_{ZiZi}} \quad (83)$$

eşitlikleri ile bulunur. Burada q_{XiXi} bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisinin köşegen elemanlarıdır. Bütün yönlerde kontrol noktalarının ortalama doğruluğu ise,

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{Xi}^2}{n_X}}, \sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{Yi}^2}{n_Y}}, \sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum \sigma_{Zi}^2}{n_Z}} \quad (84)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Eşitliklerde, n_x, n_y ve n_z denetleme nokta sayısıdır. Karesel ortalama hata bilinen nokta koordinatları ile hesapla bulunan nokta koordinat farklarından (85) formülleri ile bulunur.

$$\mu_X = \sqrt{\frac{\sum \left(X^r - X_i\right)^2}{n_X}}, \mu_Y = \sqrt{\frac{\sum \left(Y^r - Y_i\right)^2}{n_Y}}, \mu_Z = \sqrt{\frac{\sum \left(Z^r - Z_i\right)^2}{n_Z}} \quad (85)$$

Burada X^r, Y^r ve Z^r denetleme noktalarının referans koordinatlarıdır. Bu karşılaştırma resim koordinatları içinde (86) eşitlikleriyle yapılabilir.

$$\mu_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i^r - x_i)^2}{n_x}}, \mu_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i^r - y_i)^2}{n_y}}, \mu_z = \sqrt{\frac{\sum(y_i^r - y_i)^2}{n_y}} \qquad (86)$$

Burada x_i, y_i dengeli resim koordinatları, x_i^r, y_i^r denetlemem noktalarından hesaplanan resim koordinatlarıdır. n_x, n_y bütün görüntülerdeki referans koordinat sayısıdır (Beyer, 1992/1; 1992/2).

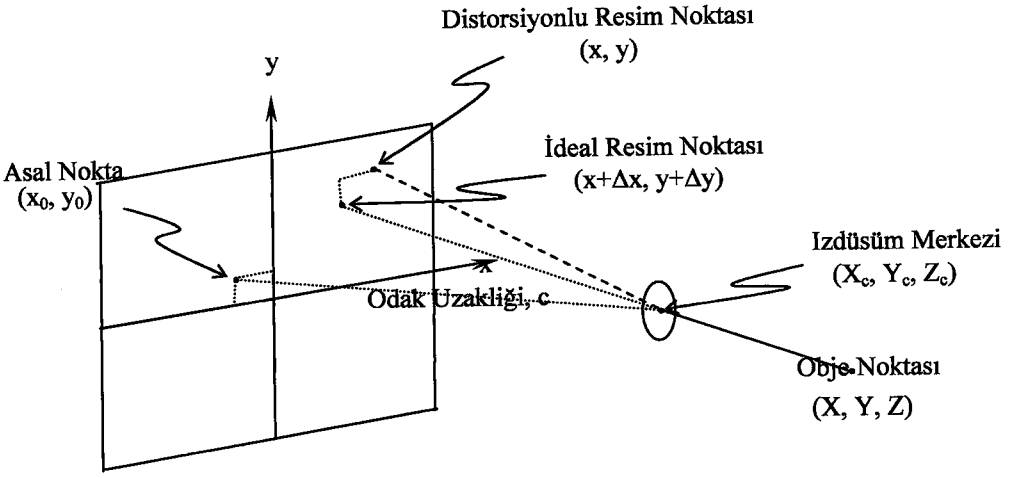
1.11.3.2. Direkt Lineer Transformasyon Metodu (DLT)

Kameraların geometrik testi için çalışmada kullanılan bir diğer metot DLT metodudur. Direkt lineer transformasyon metodu Abdel Aziz ve Karara tarafından önerilen doğrudan lineer dönüşüm yöntemidir (Abdel Aziz ve Karara, 1971; Marzan ve Karara, 1975). Bu yöntemin en büyük avantajı, çözümün lineer olması ve yaklaşık değer probleminin olmamasıdır. DLT eşitlikleri ile direkt olarak resim koordinatlarından uzay koordinatlarına ulaşmak mümkündür. 11 parametreli genel DLT eşitlikleri,

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \qquad (87)$$

$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \qquad (88)$$

şeklinde yazılır. Burada x, y resim koordinatlarını, X, Y, Z uzay koordinatlarını ve L_1, L_2, ..., L_{11} DLT katsayılarını göstermektedir.



Şekil 25. Distorsiyonlu resim geometrisi

(87) ve (88) formüllerine ilave parametreler eklenmesi durumunda, Şekil 25'deki distorsiyonlu resim geometrisi de dikkate alınarak, eşitlikler yeniden düzenlenirse,

$$x + \Delta x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \tag{89}$$

$$y + \Delta y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \tag{90}$$

şeklini alırlar. İlave parametrelere ilişkin formüller daha açık yazılırsa,

$$\Delta x = x'\left(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6\right) + P_1\left(r^2 + 2x'^2\right) + 2P_2x'y' \tag{91}$$

$$\Delta y = y'\left(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6\right) + 2P_1x'y' + 2P_2\left(r^2 + 2y'^2\right) + A_1x' + A_2y' \tag{92}$$

elde edilir. Burada $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$, $r^2 = x'^2 + y'^2$'dir. x_0, y_0 ve c iç yöneltme elemanlarını temsil etmektedir. Bu bağıntılara ilaveten iki eşitlik daha yazılabilir ki bunlar genişletilmiş DLT metodunda kullanılabilir. (93) ve (94) bağıntıları ortogonallik şartına dayalı olarak DLT katsayılarından üretilir.

$$\left(L_1^2+L_2^2+L_3^2\right)-\left(L_5^2+L_6^2+L_7^2\right)+\frac{\left(L_5L_9+L_6L_{10}+L_7L_{11}\right)^2-\left(L_1L_9+L_2L_{10}+L_3L_{11}\right)^2}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2}=0 \quad (93)$$

$$L_1L_5+L_2L_6+L_3L_7-\frac{\left(L_1L_9+L_2L_{10}+L_3L_{11}\right)\left(L_5L_9+L_6L_{10}+L_7L_{11}\right)}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2}=0 \quad (94)$$

Aynı formüllerden resim orta noktası ve kamera sabitinin belirlenmesine yönelik aşağıdaki biçimde hesaplanır.

$$x_0=\frac{L_1L_9+L_2L_{10}+L_3L_{11}}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2} \quad (95)$$

$$y_0=\frac{L_5L_9+L_6L_{10}+L_7L_{11}}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2} \quad (96)$$

$$c_x=\sqrt{\frac{L_1^2+L_2^2+L_3^2}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2}-x_0^2} \quad (97)$$

$$c_y=\sqrt{\frac{L_5^2+L_6^2+L_7^2}{L_9^2+L_{10}^2+L_{11}^2}-y_0^2} \quad (98)$$

$$c=\left(c_x+c_y\right)/2 \quad (99)$$

Dış yöneltme elemanları yani resim çekim istasyonu koordinatları ve dönüklük açıları hesaplanmak istendiğinde aşağıdaki formüller kullanılır.

$$\begin{bmatrix}X_c\\Y_c\\Z_c\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}L_1 & L_2 & L_3\\L_5 & L_6 & L_7\\L_9 & L_{10} & L_{11}\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}L_4\\L_8\\1\end{bmatrix} \quad (100)$$

$$\omega=\tan^{-1}\left(-\frac{L_{10}}{L_{11}}\right) \quad (101)$$

$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{-L_9}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}}\right) \tag{102}$$

$$\kappa = \cos^{-1}\left(\frac{(L_1 - x_0 L_9)}{c\cos\varphi\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}}\right) \tag{103}$$

DLT katsayıları ve diğer bilinmeyen parametrelerin çözümü için (asal nokta, distorsiyon vs.) (89) ve (90) formüllerin lineerleştirilmesi aşamasında aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır.

$$f = x + \Delta x - \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \tag{104}$$

$$g = y + \Delta y - \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \tag{105}$$

$$c_1 = \left(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2\right) - \left(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2\right) + \frac{\left(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}\right)^2 - \left(L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}\right)^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \tag{106}$$

$$c_2 = L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7 - \frac{\left(L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}\right)\left(L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}\right)}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \tag{107}$$

$$c_3 = x_0 - \frac{L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \tag{108}$$

$$c_4 = y_0 - \frac{L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \tag{109}$$

$$c_5 = c - \sqrt{\frac{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} - x_0^2} \tag{110}$$

$$c_6 = c - \sqrt{\frac{L_5^2 + L_6^2 + L_7^2}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} - y_0^2} \tag{111}$$

(104-111) formüllerinde bilinmeyenlere göre Taylor serisi açılarak katsayılar elde edilir. Burada bilinmeyenler $L_1 - L_{11}$ ve x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, B_1, B_2'dir. Parametrelerin hesabı için (112) eşitliğindeki dengeleme algoritması kullanılır. Bu algoritma için ölçü düzeltmelerinin minimize edildiği en küçük kareler ilkesi kullanılır. Çözüm algoritması,

$$\begin{bmatrix}
\frac{\partial f_1}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial L_{11}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_0} & \frac{\partial f_1}{\partial y_0} & \frac{\partial f_1}{\partial K_1} & \frac{\partial f_1}{\partial K_2} & \frac{\partial f_1}{\partial K_3} & \frac{\partial f_1}{\partial P_1} & \frac{\partial f_1}{\partial P_2} & \frac{\partial f_1}{\partial A_1} & \frac{\partial f_1}{\partial A_2} \\
\frac{\partial g_1}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial L_{11}} & \frac{\partial g_1}{\partial x_0} & \frac{\partial g_1}{\partial y_0} & \frac{\partial g_1}{\partial K_1} & \frac{\partial g_1}{\partial K_2} & \frac{\partial g_1}{\partial K_3} & \frac{\partial g_1}{\partial P_1} & \frac{\partial g_1}{\partial P_2} & \frac{\partial g_1}{\partial A_1} & \frac{\partial g_1}{\partial A_2} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
\frac{\partial f_N}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial f_N}{\partial L_{11}} & \frac{\partial f_N}{\partial x_0} & \frac{\partial f_N}{\partial y_0} & \frac{\partial f_N}{\partial K_1} & \frac{\partial f_N}{\partial K_2} & \frac{\partial f_N}{\partial K_3} & \frac{\partial f_N}{\partial P_1} & \frac{\partial f_N}{\partial P_2} & \frac{\partial f_N}{\partial A_1} & \frac{\partial f_N}{\partial A_2} \\
\frac{\partial g_N}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial g_N}{\partial L_{11}} & \frac{\partial g_N}{\partial x_0} & \frac{\partial g_N}{\partial y_0} & \frac{\partial g_N}{\partial K_1} & \frac{\partial g_N}{\partial K_2} & \frac{\partial g_N}{\partial K_3} & \frac{\partial g_N}{\partial P_1} & \frac{\partial g_N}{\partial P_2} & \frac{\partial g_N}{\partial A_1} & \frac{\partial g_N}{\partial A_2} \\
\frac{\partial c_1}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_1}{\partial L_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial c_2}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_2}{\partial L_{11}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial c_3}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_3}{\partial L_{11}} & \frac{\partial c_3}{\partial x_0} & \frac{\partial c_3}{\partial y_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial c_4}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_4}{\partial L_{11}} & \frac{\partial c_4}{\partial x_0} & \frac{\partial c_4}{\partial y_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial c_5}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_4}{\partial L_{11}} & \frac{\partial c_5}{\partial x_0} & \frac{\partial c_5}{\partial y_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{\partial c_4}{\partial L_1} & \cdots & \frac{\partial c_4}{\partial L_{11}} & \frac{\partial c_6}{\partial x_0} & \frac{\partial c_6}{\partial y_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\Delta L_1 \\ \vdots \\ \Delta L_{11} \\ \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta K_1 \\ \Delta K_2 \\ \Delta K_3 \\ \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta A_1 \\ \Delta A_2
\end{bmatrix}
= -
\begin{bmatrix}
f_1 \\ g_1 \\ \vdots \\ f_N \\ g_N \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6
\end{bmatrix}$$

(112)

eşitliği ile gerçekleştirilir (Chen, 1997). (112) eşitliği basitleştirilerek,

$$AX = L \tag{113}$$

şeklinde ifade edilir. Burada A, dizayn matrisini, X bilinmeyenleri ve L ölçüleri göstermektedir. (113) eşitliği genişletilirse,

$$(A^T A)X = A^T L$$

$$(A^T A)^{-1}(A^T A)X = (A^T A)^{-1}(A^T L) \tag{114}$$

$$X = (A^T A)^{-1}(A^T L)$$

olur. İteratif çözümle bilinmeyen parametrelerin hesabında anlamlı bir değişiklik olmayıncaya kadar iterasyona devam edilir. Parametrelerin her iterasyonda bulunan değerleri,

$$\begin{aligned}
L_1^{i+1} &= L_1^0 + \Delta L_1^i \\
&\vdots \\
L_{11}^{i+1} &= L_{11}^0 + \Delta L_{11}^i \\
x_0^{i+1} &= x_0^0 + \Delta x_0^i \\
y_0^{i+1} &= y_0^0 + \Delta y_0^i \\
K_1^{i+1} &= K_1^0 + \Delta K_1^i \\
K_2^{i+1} &= K_2^0 + \Delta K_2^i \\
K_3^{i+1} &= K_3^0 + \Delta K_3^i \\
P_1^{i+1} &= P_1^0 + \Delta P_1^i \\
P_2^{i+1} &= P_2^0 + \Delta P_2^i \\
A_1^{i+1} &= A_1^0 + \Delta A_1^i \\
A_2^{i+1} &= A_2^0 + \Delta A_2^i
\end{aligned} \tag{115}$$

eşitliklerinde olduğu gibi yaklaşık değere ilave edilerek yeniden çözüm yapılır. (115) eşitliğinde üst indis i, iterasyon sayısını, "0" ise yaklaşık değeri göstermektedir. Böylece DLT metodu için parametre çözümü gerçekleştirilmiş olur. Yeni noktaların koordinatlarının bulunması ve DLT metodunun konum doğruluğunun araştırılması için uzay önden kestirme işlemi yapılması gerekir.

Her bir resmin DLT parametrelerinin ve ilave parametrelerinin hesaplanmasından sonra (89) ve (90) eşitlikleri kullanılarak yeni noktaların koordinatları hesaplanabilir. (89) ve (90) eşitliklerinin tekrar düzenlenmesiyle,

$$\begin{bmatrix} L_1 - \bar{x}L_9 & L_2 - \bar{x}L_{10} & L_3 - \bar{x}L_{11} \\ L_5 - \bar{y}L_9 & L_6 - \bar{y}L_{10} & L_7 - \bar{y}L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - \bar{x} \\ L_8 - \bar{y} \end{bmatrix} \tag{116}$$

elde edilir. Burada $\bar{x} = x + \Delta x$, $\bar{y} = y + \Delta y$ 'dır. Δx ve Δy, (91) ve (92) eşitliklerinde açıklanmaktadır. Uzayda bir noktanın konumunun hesaplanabilmesi için en az iki resimde görüntülenmesi gerektiğinden (116) eşitliği ikiden fazla resim sayısı (m>2) için genişletilirse,

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - \bar{x}^{(1)}L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - \bar{x}^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - \bar{x}^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - \bar{y}^{(1)}L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - \bar{y}^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - \bar{y}^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(m)} - \bar{x}^{(m)}L_9^{(m)} & L_2^{(m)} - \bar{x}^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_3^{(m)} - \bar{x}^{(m)}L_{11}^{(m)} \\ L_5^{(m)} - \bar{y}^{(m)}L_9^{(m)} & L_6^{(m)} - \bar{y}^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_7^{(m)} - \bar{y}^{(m)}L_{11}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \bar{x}^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \bar{y}^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - \bar{x}^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \bar{y}^{(m)} \end{bmatrix} \tag{117}$$

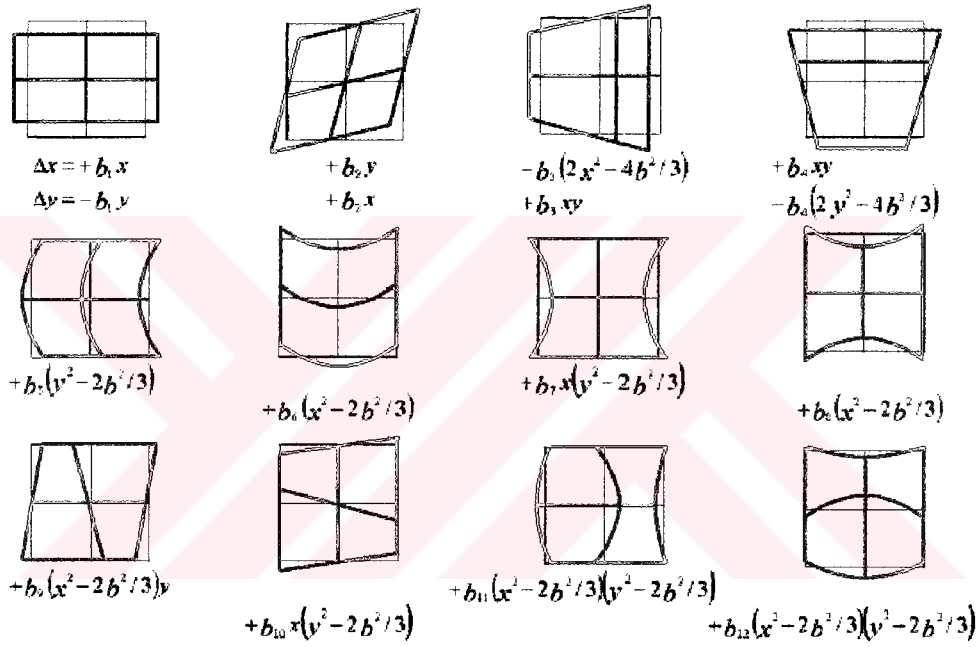
eşitliği elde edilir. Böylece çoklu geometrik yapı altında noktaların üç boyutlu koordinatları elde edilmiş olur (Kraus, 1997; Külür, 2002; Ergün, 2003).

1.11.3.3. BLUH (Bundle Block Adjustment) Yazılımı Matematik Modeli

BLUH, kolinearite eşitlikleri temeline dayanan blok dengeleme yazılımıdır. Programda resim koordinat ölçmeleri ve varsa kontrol noktası ölçümleri veri olarak kullanılır. Resimlerin iç yöneltmesi yaklaşık olarak bilinmelidir. Kalibrasyon işlemi ile bu yöneltmeler kesinleştirilir. Bilinmeyenler resim yöneltmeleri, obje koordinatları ve ilave parametrelerdir. Dengeleme aşamasında en küçük kareler ilkesi ile düzeltmelerin kareleri minimize edilir. Kolinearite eşitlikleri lineer olmadığından, Newton metodu iteratif çözüm için kullanılır. Bu durumda bilinmeyenlerin yaklaşık değerlerinin bilinmesi gerekir. Görüntü yöneltmeleri ile ilgili yaklaşık değerler programın RESEC modülü ile her bir resim için belirlenir. İlk iterasyonla yaklaşık görüntü yöneltmeleri ve görüntü koordinatlarından yaklaşık obje koordinatları hesaplanır.

Kalibrasyon ile blok geometri kullanılarak ilave parametreler belirlenir. Sonuçların doğruluğu, fotoğraf sayısına, görüntü nokta sayısı ve dağılımına, kontrol noktası sayısı ve dağılımına ve ayrıca muhtemel projeksiyon merkezi koordinatlarına bağlıdır. Yazılım

istatistik testleri kullanarak gerekli olan ilave parametreleri belirleyebilmektedir. 12 ilave parametre blok dengelemenin genel parametreleridir. Bu ilave seti istenildiğinde 29 parametreye kadar genişletilebilir. Kalibrasyon aşamasında ilave parametrelerinden sadece 15 adet kullanılır. BLUH yazılımında kullanılan ilave parametreler DLT ve ışın demetleri algoritmalarında kullanılan parametreler gibi polinomyal değildir. x ve y koordinat yönündeki ilave parametre seti eşitlikleri, orjinalde Ebner tarafından geliştirilen eşitliklere dayanmaktadır (Ebner, 1976). Bu eşitlikler ve resim geometrisine etkileri Şekil 26'da ayrı ayrı gösterilmektedir.



Şekil 26. Ebner katsayılarının etkisi ve matematik gösterimi (Cramer, 2002)

Buna göre bu yazılımda kullanılan ilave parametre eşitlikleri,

$$x' = x - yP_1, \quad y' = y - xP_1 \tag{118}$$

$$x' = x - xP_2, \quad y' = y + yP_2 \tag{119}$$

$$x' = x - x\cos 2b\, P_3, \quad y' = y - y\cos 2b\, P_3 \tag{120}$$

$$x' = x - x\sin 2b\, P_4, \quad y' = y - y\sin 2b\, P_4 \tag{121}$$

$$x' = x - x\cos b\, P_5, \quad y' = y - y\cos b\, P_5 \tag{122}$$

$$x' = x - x\sin b\, P_6, \quad y' = y - y\cos b\, P_6 \tag{123}$$

$$x' = x + yr\cos b\, P_7, \quad y' = y - xr\cos b\, P_7 \tag{124}$$

$$x' = x + yr\sin b\, P_8, \quad y' = y - xr\sin b\, P_8 \tag{125}$$

$$x' = x - x\left(r^2 - 16384\right)P_9, \quad y' = y - y\left(r^2 - 16384\right)P_9 \tag{126}$$

$$x' = x - x\sin(r\ 0.049087)P_{10}, \quad y' = y - y\sin(r\ 0.049087)P_{10} \tag{127}$$

$$x' = x - x\sin(r\ 0.098174)P_{11}, \quad y' = y - y\sin(r\ 0.098174)P_{11} \tag{128}$$

$$x' = x - x\sin 4b\, P_{12}, \quad y' = y - y\sin 4b\, P_{12} \tag{129}$$

$$x' = x + x\, P_{13}, \quad y' = y + y\, P_{13} \tag{130}$$

$$x' = x + x\, P_{14}, \quad y' = y \tag{131}$$

$$x' = x, \quad y' = y + y\, P_{15} \tag{132}$$

şeklinde yazılabilir (Jacobsen, 1998; 2002). Burada,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \; b = \arctan\frac{y}{x} \tag{133}$$

şeklinde ifade edilir. P_7 ve P_8 teğetsel distorsiyonu, P_9, P_{10} ve P_{11} çapsal distorsiyonu, P_{13} odak uzaklığını, P_{14} ve P_{15} asal noktanın sırasıyla x ve y koordinatının temsil etmektedir.

BLUH yazılımında parametrelerin anlamlı ve gerekli olup olmadıklarını test etmek için üç farklı istatistiksel metod kullanılmaktadır. Bunlar korelasyon, toplam korelasyon (güveninirlik) ve t (student) testidir. Öncelikli olarak program standart 12 parametre ile çalışır ve gerekli görülmeyen parametreler dışarı atılır. Bu testlerle ilgi matematik eşitlikler aşağıda gösterilmektedir. Korelasyon için,

$$B_i = I - \left(N_k N_k^{-1}\right)^{-1} \tag{134}$$

eşitliği yazılır. Burada B_i, 0 ile 1 arasında bir değer alan toplam korelasyon katsayısını göstermektedir. I, birim matris, N_k ise normal denkelem sistemi için kurulan matrisin köşegen elemanlarıdır. Yapılan araştırmalarda, toplam korelasyon katsayının sınır değeri 0.85 olarak bulunmuştur. Sınır değerin aşılması durumunda ilgili ilave parametre dengelemeden çıkarılır. Toplam korelasyon parametere gurupları arasında büyük farklılıklar olup olmadığını göstermektedir (Kraus, 1997; Jacobsen, 1998; 2002).

T testi için ise,

$$t_i = \frac{z_i}{\sigma_0 \rho_{ii}} \tag{135}$$

eşitliği yazılır. Burada z_i ilave parametre değerini, σ_0 birim ağırlıklı ölçünün standart sapması, ρ_{ii} bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisinin köşegen elemanı ve t_i, test değeridir. Her hangi bir ilave parametre için hesaplanan t testi değeri tablo değerinden büyük ise bu parametrenin anlamsızlığından söz edilir. Korelasyon hesabı için,

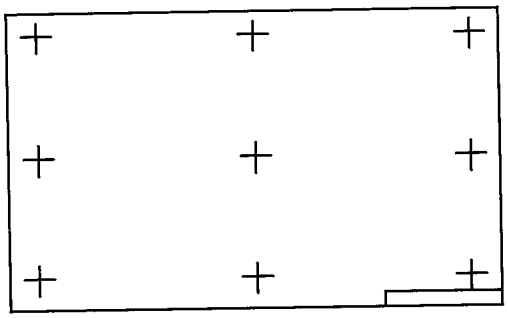
$$r_{ij} = \frac{\rho_{ij}}{\rho_{ii}\rho_{ii}} \tag{136}$$

eşitliği yazılır. ρ bilinmeyenlerin kofaktör matrisinin köşegen elemanı, r_{ij}, i ve j parametreleri arasındaki korelasyon katsayısıdır. Korelasyon katsayısı 0.85 değerini aşmamalıdır. Aksi durumda bu değeri aşan katsayının ait olduğu parametreler bir sonraki dengeleme iterasyonundan çıkarılır (Kraus, 1997; Jacobsen, 1998; 2002).

BLUH yazılımında kaba hatalı ve uyuşumsuz ölçülerin testi iki aşamada yapılır. İlk aşamada Data Snooping metodu ile kaba hatalar belirlenerek düzeltme yapılır ya da elimine edilir. Ardından demet dengelemesi aşamasında Robust Kestirim metodu kullanılır. Robust Kestirimi ölçülerin ağırlıklarında düzeltme değerleri oranında değişiklik yaparak kaba hatalı ölçülerin dengelemedeki etkisini sınırlandırır. Böylece hatalı koordinatların ağırlığı dengelemeye etkisi olmayana kadar işleme devam edilir (Jacobsen, 1980; 1997).

1.11.3.4. Elcovision 10 Yazılımı Matematik Modeli

Elcovision 10, PMS firması tarafından yakın resim fotogrametrisi için üretilmiş, analog ve dijital görüntüler üzerinden üç boyutlu bilgi üretebilen bir yazılımdır. Yazılım, bütün fotogrametrik çözümleri gerçekleştirebilmektedir. Yazılımda, fotogrametrik olarak iç yöneltme, karşılıklı ve mutlak yöneltme, ışın demetleri dengelemesi ve rektfikasyon işlemleri yapılabilmektedir. Yazılım, resim koordinatlarının okunmasından sonra obje koordinat sistemi ile ilişkiyi otomatik olarak kurabilmektedir. Veri girişi olarak dijital görüntü, kamera bilgileri ve kontrol noktası dosyası gereklidir. Bu kısımda yazılımın bileşenleri hakkında kısaca bilgi verildikten sonra matematik model için kullanılan ilave parametre seti üzerinde durulacaktır.



Şekil 27. 3×3'lük grid ağı

İç Yöneltme: Bu yazılımda iç yöneltme işlemi için Şekil 28'deki gibi 3×3'lük grid (reseu) levha kullanılır. Daha önceden kullanılan kamera için hazırlanmış grid ağı ile resim üzerinde bu grid ağının ölçülmüş noktaları yardımıyla iki boyutlu transformasyon yapılır.

İç yöneltme için dört farklı dönüşüm modeli kullanılır. Bunlar, benzerlik (Helmert), afin, projektif ve polinomyal transformasyondur. Bu metotlardan hangisinin kullanılacağına resim üzerinde ölçülen nokta sayısına göre karar verilir. Genelde afin transformasyonu kullanılır.

Model Yöneltme: Model yöneltme, karşılıklı ve mutlak yöneltme işlemlerinin gerçekleştirildiği aşamadır. Karşılıklı yöneltme için ön şart resimlerin iç yöneltmelerinin yapılmış olmasıdır. Karşılıklı yöneltme aşamasında model üzerinde seçilen en az 5 adet nokta ile yapılır. İşlemin doğruluğunu artırmak için nokta sayısı 10 ile 12 arasında seçilmelidir. Karşılıklı yöneltme ile model üç boyutlu yöneltilmiş olup keyfi bir koordinat sistemine oturtulur. Sonuç olarak her iki resme ait dış yöneltme parametreleri belirlenmiş olur.

Mutlak yöneltme, karşılıklı yöneltme ile üç boyutlu hale getirilmiş model lokal veya belirli bir obje koordinat sistemine dönüştürülür. İki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada obje koordinat sistemi oluşturulur. İkinci aşamada ise, bir modelden sonra yöneltilecek diğer modeller için yapılacak mutlak yöneltme işlemi için ışın demetleri yöntemi kullanılır. Mutlak yöneltmede koordinat sistemi tanımı için karşılıklı yöneltme aşamasında en az 4 kontrol noktası ölçülmelidir.

Işın Demetleri İşlemi: bu işlemde tek tek modellerin karşılıklı ve mutlak yöneltmesi yerine bütün resimleri içeren blok toptan ölçülerek dengelemeli olarak çözüm yapılır. Model hataları da dikkate alınarak tüm noktaların koordinatları ortak bir koordinat sistemine taşınır. Bütün resimlerin dış yöneltmeleri ve obje koordinatları hesaplanır (Ayhan vd., 2001; Elcovision 10, 1997). Işın demetlerinin yapılması için aşağıdaki şartların gerçekleşmesi gerekir.

- Bütün fotoğraflar yöneltilmelidir.
- Bütün eşlenik noktalar aynı numarayı içermelidir.
- Lokal koordinat sistemi kullanılması durumunda ilave birkaç uzunluk ölçekleme amacıyla girilmelidir.

Işın demetleri işleminde ayrıca 25 ilave uzunluk yazılıma girilebilmektedir. Bu uzunluklar x, y ve z yönündeki koordinat farkları olabileceği gibi, her hangi iki nokta arasındaki mesafe de olabilmektedir. Ne kadar fazla uzunluk tanımlanırsa o kadar iyi ölçek ve üç boyutlu bilgi elde edilir.

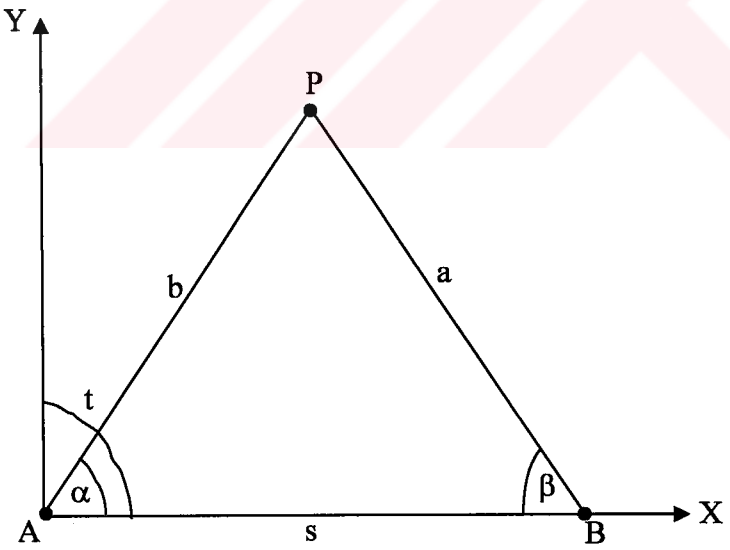
Elcovision 10 yazılımında her hangi bir detayın üç boyutlu bilgisini elde etmek için matematiksel yaklaşım olarak genel kolinarite eşitlikleir kullanılır. Diğer metotlarda olduğu gibi burada da kamera mercek sisteminde oluşabilecek bazı hataları ortadan kaldırmak için resim koordinatlarına ilave parametre seti ile düzeltmeler getirilir. Parametre seti polinomyal olup sadece çapsal distorsiyon katsayılarını içermektedir. İlave parametre seti,

$$dr = R_1\left(r^3 - r\, r_0^2\right) + R_2\left(r^5 - r\, r_0^4\right)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad (137)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, r çapsal uzaklığı, R_1, R_2 çapsal distorsiyon parametrelerini, r_0 ise çapsal distorsiyonun ikinci kez sıfır olduğu noktayı göstermektedir.

1.11.3.5. Kontrol Nokta Koordinatlarının Hesabı



Şekil 28. Klasik Önden Kestirme işleminin geometrisi

Kameralarla ilgili geometrik performans testlerinin yapılabilmesi için seçilen test alanlarında tesis edilen kontrol noktalarının jeodezik olarak koordinatlarının hesaplanması gerekir. Bu sebeple hem laboratuar ortamı ve hem de seçilen model alanlarındaki

noktaların koordinatları ölçümü klasik jeodezik önden kestirme metodu baz alınarak yapılmıştır. Önden kestirme işlemi geometrisi Şekil 28'de gösterilmektedir.

Önden kestirme metodunda seçilen bir baz ve bu bazın iki ucundaki noktalardan koordinatı hesaplanacak noktaya yatay ve düşey açı gözlemleri yapılır. Bu gözlemlerle kestirilecek noktanın üç boyutlu koordinatları hesaplanır. Şekil 29'da A ve B noktasının koordinatları hatasız kabul edildiğinde s uzunluğu da hatasız olmaktadır. Burada P noktasının koordinatları kontrollü bir biçimde bulunabilir. A noktası baz alınmak suretiyle, P noktasının koordinatları;

$$X_P = X_A + s\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}\sin(t-\alpha) \tag{138}$$

$$Y_P = Y_A + s\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}\cos(t-\alpha) \tag{139}$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Burada t (AB) semtini, α ve β, A ve B noktalarında ölçülen yatay açıları ifade etmektedir. B noktası içinde benzer eşitlikler yazılır (Öztürk ve Şerbetçi, 1989).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Orta ve yüksek çözünürlüklü kameralar, bir çok farklı alanda uygulama imkanı bulmaktadırlar. Bu kameralar çok güçlü görüntü kaydetme ünitelerine sahip olmalarına karşın, fotogrametrik olarak metrik açıdan doğruluk düzeylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, orta ve yüksek çözünürlüğe sahip dijital kameralar ile farklı matematik modeller kullanılarak, bu kameraların fotogrametrik amaçlı kullanılabilirliği ve metrik performanslarının ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu bölümde beş farklı kamera ile yapılan çalışmalar anlatılmaktadır. Çalışmada temel olarak Kodak DCS 460 ve Nikon E2/E2s kameraları kullanılmış, kameraların geometrik çözünürlüğü ve aynı test alanlarında ortaya çıkardıkları doğrulukların testi için diğer üç kamera (Nikon Coolpix 990, Rollei D7 Metric ve Olympus E-10) kullanılmıştır. Farklı metotlar incelenerek, fotogrametrik uygulamalarda kullanılabilirliği irdelenmiş ve hangi metodun ve kameranın daha iyi sonuç verdiği ortaya konmuştur.

2.1. Giriş

Önceki bölümde dijital kamera sistemlerinin yapısı, çalışma prensipleri, hata kaynakları, uygulama alanları ve fotogrametrik uygulamalarda kullanılmaları durumunda uygulanacak matematik modeller üzerinde detaylarıyla durulmuştur. Verilen teorik bilgiler ışığında, söz konusu kameraların metrik performanslarını belirlemek için farklı uygulamalar yapılmıştır. Laboratuar ve seçilen uygulama alanlarında bir dizi fotogrametrik projeler gerçekleştirilmiştir. Bu projelerde beş farklı kamera ve dört farklı matematik model kullanılmıştır. Bu işlemlerde hedeflenen amaçlar, orta ve yüksek çözünürlüklü kameraların fotogrametrik uygulamalardaki metrik performanslarını araştırmak, bu kameralarla ulaşılabilecek doğruluk düzeyini belirlemek, kullanılan farklı matematik metotlarla sistematik hataların etkilerini incelemek, kameraların stabilitesi ve güvenirliliğini tespit etmek, ayrıca kameraların birbirine göre üstünlüklerini belirlemektir. Bütün bu amaçları gerçekleştirebilmek için kameralar geometrik ve radyometrik özellikleri dikkate alınarak test edilmişlerdir.

2.2. Çalışmada Kullanılan Kamera Sistemleri

Bu çalışmada, orta ve yüksek sınıfta geometrik çözünürlüğe sahip beş farklı dijital kamera kullanılmıştır. Bu kameralar, optik dizaynları yönünden film kameralarıyla aynı olup, 35 mm standart film kamera alıcı boyutuna oranla küçük formatlı CCD algılayıcıya sahiptirler. Çalışma sırasında bu kameralarda sabit mercek sistemi kullanılmaktadır. Kullanılan kameraların genel olarak teknik özellikleri Tablo 6'da verilmektedir.

Tablo 6. Çalışmada kullanılan kameraların teknik özellikleri

	Adı	Geometrik Çözünürlük (piksel)	Piksel Sayısı	Piksel Boyutu (µm)	CCD Boyutu (mm)	Piksel Sayısı Oranı	Piksel Boyutu Oranı
Kameralar	Kodak DCS460	3060×2036	6230160	9.0	27.6×18.4	1	1
	Olympus E-10	2240×1680	3763200	3.9	8.8×6.6	1.66	2.31
	Nikon Coolpix 990	2048×1536	3145728	3.7	7.6×5.7	1.98	2.43
	Rollei D7 Metric	1280×1024	1310720	6.7	8.6×6.9	4.75	1.34
	Nikon E2/E2s	1280×1000	1280000	6.8	8.6×6.8	4.87	1.32

2.2.1. Nikon E2/E2s Dijital Kamerası

Nikon E2/E2s dijital kamerası, FUJI kamera gövdesini kullanan ayna yansıtıcılı bir dijital video kameradır. CCD boyutunun Nikon mercek sistemi ile adaptasyonu için optik sistemde bir indirgeme yapılmıştır. Kamera algılayıcı (CCD) boyutu, 35 mm'lik standart film kamera formatının 2/3 inch oranında indirgenmiş olup, 1280×1000 piksel çözünürlüğünde, 24 bit derinliğinde renkli görüntü üretmektedir. CCD boyutları 8.6×6.8 mm, piksel boyutu ise 6.8 µm'dir. Görüntüler, sıkıştırılmamış .tiff formatında 5 adet, sıkıştırılmış .jpeg formatında 84 adete kadar 15 MB (Mega Byte)'lik hafıza kartına kayıt edilebilmektedir. Kamera 35 mm film formatında değişik boyutlarda mercek kullanabilmektedir. Kamera üzerinde çeşitli ayarları yapmak amacıyla bir LCD (Liquit Cyristal Display) paneli bulunmaktadır. Çalışmada bu kamera ile test için 24 ve 50 mm'lik mercekler kullanılmıştır. Kamera ile çekilen görüntüler PCMCIA (hafıza) kartı yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir. Şekil 29'da Nikon E2/E2s dijital kamerası gösterilmektedir (Fraser ve Edmundson, 1996; Maas ve Niederöst, 1997).

Şekil 29. Nikon E2/E2s Dijital Kamerası

2.2.2. Kodak DCS 460 Dijital Kamerası

Kodak KAF6300
CCD Dedektör

Şekil 30. Kodak DCS460 Kamerası ve CCD Algılayıcı

Bu kamera 1995 yılından itibaren Kodak firması tarafından yüksek çözünürlüklü dijital kamera modeli olarak üretilmektedir. Kodak DCS460 kamerası, Nikon N90 kamera gövdesini kullanmaktadır. Kamera 3060×2036 çözünürlükte olup, kullandığı Kodak KAF6300 CCD boyutu 27.6×18.4 mm, piksel boyutu ise 9 μm'dir. Çeşitli boyutlarda mercek kullanabilmekte olan bu kamera ile çalışmada 20 mm'lik mercek kullanılmıştır. Kamera ile renkli ve siyah beyaz görüntü alımı yapılabilmektedir. Görüntü kayıt ünitesi

olarak PCMCIA kartı kullanılır veya direk bilgisayara bağlantı yaparak görüntüleri transfer etmek te mümkündür. Kamera gövdesi ve kullanılan CCD Şekil 30'da gösterilmektedir (Maas ve Niederöst, 1997; Mason vd., 1997).

2.2.3. Rollei D7 Metric Dijital Kamerası

Bu kamera Rollei Fototechnic firması tarafından sabit büyütme, sabit mercek ve tek mercek yansıtıcılı bir biçimde üretilmektedir. Kamera 1280×1024 çözünürlükte olup, kullandığı Rollei APOGON HFT CCD boyutu 8.6×6.9 mm, piksel boyutu ise 6.7 μm'dir. 35 mm standart film formatında 28 mm'ye karşılık sabit odak uzaklığı kullanmaktadır (7.3 mm). Çalışmada bu kameranın testi için 7.3 mm'lik mercek kullanılmıştır. Kamera ile renkli ve siyah beyaz görüntü alımı .bmp, . jpeg ve .raw formatında yapılabilmektedir. Ayrıca Rollei .rdc formatında görüntü kaydı yapabilmektedir. Görüntü depolama ünitesi olarak PCMCIA ve Compact Flash kart kullanılır veya direk bilgisayara bağlantı yaparak görüntüleri transfer etmek te mümkündür. Sabit odak uzaklıklı ve büyütmeli olmasından dolayı fotogrametrik uygulamalar için uygun bir kameradır. Kamera gövdesi Şekil 31'de gösterilmektedir (Pomaska, 1999).

Şekil 31. Rollei D7 Metric Dijital Kamerası

2.2.4. Olympus E-10 Dijital Kamerası

Olympus E-10 kamerası, Olympus firması tarafından üretilen orta çözünürlüklü bir kameradır. Kamera algılayıcı (CCD) boyutu, 35 mm'lik standart film kamera formatının 2/3 inch oranında indirgenmiş olup, 2240×1680 piksel çözünürlüğünde, 24 bit derinliğinde

renkli görüntü üretmektedir. CCD boyutları 8.8×6.6 mm, piksel boyutu ise 3.9 μm'dir. Görüntüler, .tiff, .jpeg ve .raw formatında Smart Media veya Compact Flash kartına kayıt edilmektedir. Kamera 35 mm film formatında, 35 ile 140 mm arasında değişik boyutlarda mercek kullanabilmektedir. Çalışmada bu kamera ile test için 8.9 mm mercek kullanılmıştır. Fotogrametrik uygulamalar için en önemli avantajı manuel çekim modunda olması ve görüntüleri sıkıştırmadan kayıt etmesidir. Şekil 32'de Olympus E-10 dijital kamerası gösterilmektedir (Wiggenhagen, 2002; URL-2, 2004).

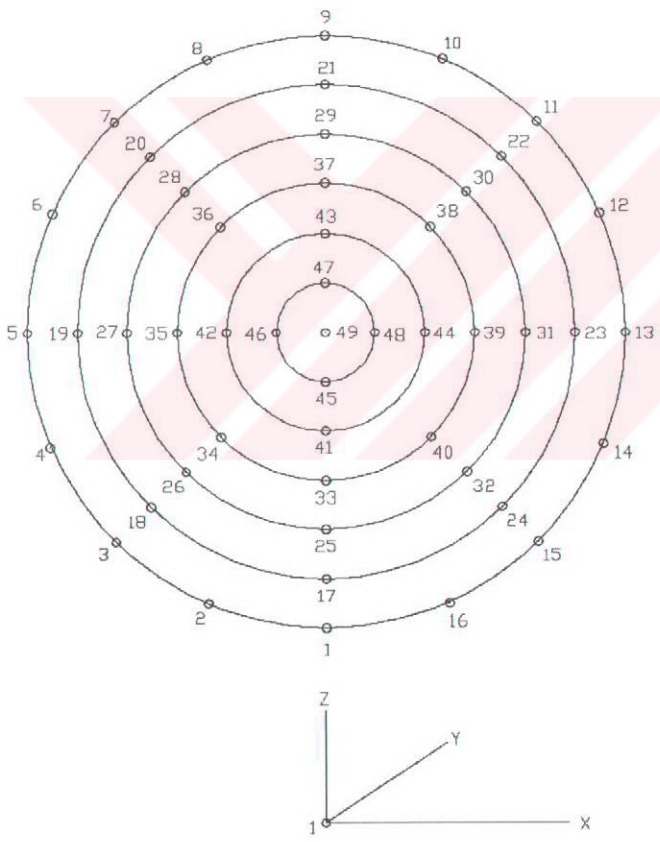
Şekil 32. Olympus E-10 Dijital Kamerası

2.2.5. Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası

Bu kamera, 3.34 mega pikselli alıcı ile üretilmiş olup maksimum görüntü depolama çözünürlüğü 2240×1680 pikseldir. Bu kamera da orta çözünürlüklü bir kamera sınıfına girmektedir. Kamera CCD boyutu, 35 mm'lik standart film kamera formatının 1/1.8 inch oranında indirgenmiş olup, 24 bit derinliğinde renkli görüntü üretmektedir. CCD boyutları 7.6×5.7 mm, piksel boyutu ise 3.7 μm'dir. Görüntüler, sıkıştırılmamış .tiff ve .jpeg formatında Compact Flash kartına kayıt edilmektedir. Kamera 35 mm film formatında, 38 ile 115 mm arasında değişik boyutlarda mercek kullanabilmektedir. Çalışmada bu kamera ile test için 8.85 mm mercek kullanılmıştır. Şekil 33'de Nikon Coolpix 990 dijital kamerası gösterilmektedir (Wiggenhagen, 2002; URL-3, 2004).

Şekil 33. Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası

2.3. Test Ağı ve Uygulama Alanlarının Seçimi

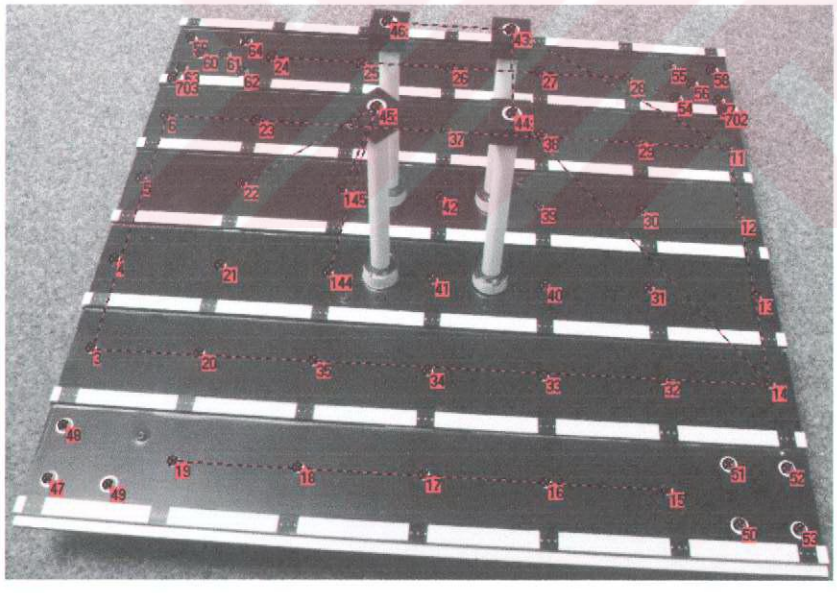


Şekil 34. Test Alanı 1 (KTU Jeodezi Bölümü)

Yukarıda detaylarıyla özellikleri verilen dijital kameraların, geometrik test ile 3 boyutlu koordinat bilgisini elde etmedeki doğruluklarının araştırılması için, her bir kameranın testine yönelik laboratuar ortamında ayrı ayrı iki adet test ağı kullanılmıştır. Bu

ağlardan bir tanesi KTU Jeodezi Bölümü Fotogrametri laboratuarında daha önceden tesis edilmiştir (Test Alanı 1) (Şekil 34). Ağ üzerinde 49 adet işaretli nokta bulunmaktadır. Ağ yaklaşık olarak 1.5 m × 1.5 m × 1 m boyutlarında olup küresel bir hacim oluşturmaktadır. Bu noktalar, üzerinde resim ölçüsünü kolaylaştıracak biçimde kodlu olarak hazırlanmıştır. Bu test ağı sadece Nikon E2/E2s kamerasının testi için kullanılmıştır. Koordinat sistemi olarak, yersel fotogrametri için kullanılan sistem seçilmiştir. Bu sistemde derinlik boyutu Y ekseni ile ifade edilmektedir.

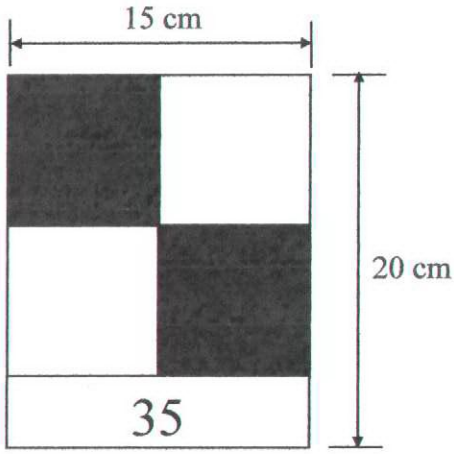
Laboratuar ortamında test işlemleri için ikinci bir test ağı daha kullanılmıştır. Bu test ağı Hannover Üniversitesi Fotogrametri Enstitüsünde inşa edilmiş ve üzerinde 36 nokta işaretlenmiştir (Test Alanı 2) (Şekil 35). Bu noktalar, özel olarak kodlu işaretlerle belirlenmiştir. Noktaların tümü bir düzlem üzerindedir. Sadece dört nokta yükseklik noktası olarak tesis edilmiştir. Bu ağ yaklaşık olarak 1 m × 1 m boyutlarında bir kare biçimindedir. Bu test ağı Kodak DCS460, Rollei D7 Metric ve Nikon Coolpix 990 dijital kameralarının geometrik testi için kullanılmıştır.



Şekil 35. Test Alanı 2 (HÜ Fotogrametri Enstitüsü)

Bilindiği gibi dijital kameralar çok çeşitli amaçlar için farklı alanlarda ölçüm aracı olarak kullanılmaktadırlar. Uygulama alanlarından bir tanesi de mimari ve tarihi objelerin üç boyutlu ölçümlerinin bu kameralarla yapılmasıdır. Bu nedenle, çalışmanın bir başka aşamasında, dijital kameraların uygulama alanlarında (obje uzayında) testi için iki ayrı test

alanı belirlenmiştir. Nikon E2/E2s dijital kamerasının testine yönelik olarak 36 noktalı bir bina modeli seçilmiştir (Test Alanı 3). Bina yüzeyi üzerinde noktalar belirli aralıklarla dağıtılmıştır. Kullanılan noktaların işaret ve boyutları Şekil 36'da görülmektedir.

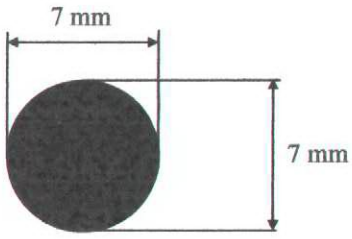


Şekil 36. Kontol Noktası İşareti Örneği ve Boyutları

Bu kamera için kullanılan bina modeli ve üzerinde işaretli kontrol noktaları Şekil 37'de gösterilmektedir.

Şekil 37. Test Alanı 3 (Ayasofya Müzesi, Trabzon)

Kodak ve Olympus E-10 kameralarının geometrik doğruluğunun testi için ayrı bir bina seçilmiş ve üzerinde 45 nokta işaretlenmiştir (Test Alanı 4). Bu noktalar da, belirlenen yüzeye dengeli bir biçimde dağıtılmaya çalışılmıştır. Burada kullanılan noktalar diğer modeldeki noktalardan farklı boyut ve biçimdedir (Şekil 38). Ayrıca model alanı Şekil 39'da görülmektedir.



Şekil 38. Kontrol Noktası Örneği ve Boyutları

Şekil 39. Test Alanı 4 (Fotogrametri Enstitü Binası, Hannover)

2.4. Test Alanlarında Yapılan Jeodezik Ölçümler

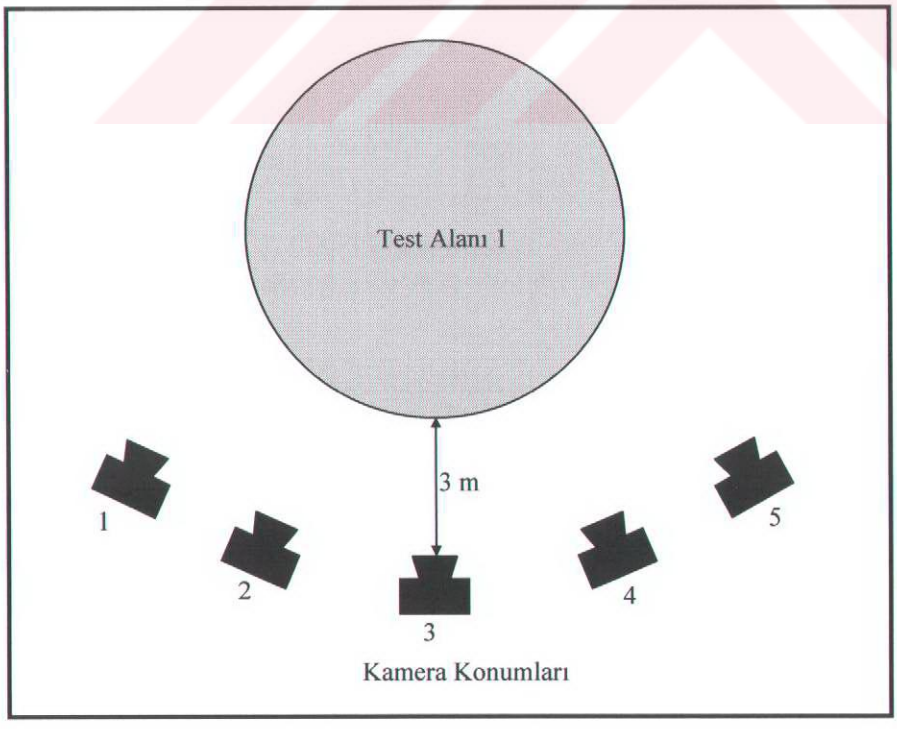
Fotogrametrik olarak değerlendirme yapabilmek için, laboratuvar ve uygulama alanında belirlenen test alanları yada ağları üzerinde işaretlenen kontrol noktalarının

jeodezik koordinatları ileriden kestirme metodu kullanılarak ölçülmüştür. Jeodezik kontrol noktalarının konumunun belirlenmesinde, özellikle bina üzerindeki kontrol noktalarının en az iki ağ noktasından gözlenebilmesine dikkate edilmiştir. Test Alanı 1 ve 3'te ölçüler Topcon GTS 311 elektronik takeometresi ile, Test Alanı 2 ve 4'te ise Geodimeter elektronik takeometresi ile yapılmıştır.

Her iki elektronik takeometre ile belirlenen doğrultulara göre aletsel uygulama hataları 1 saniyedir. Uygulamalarda jeodezik olarak hesaplanan noktalar hatasız olarak kabul edilmiştir.

2.5. Resim Çekim Geometrisi ve Resim Koordinat Ölçüsü

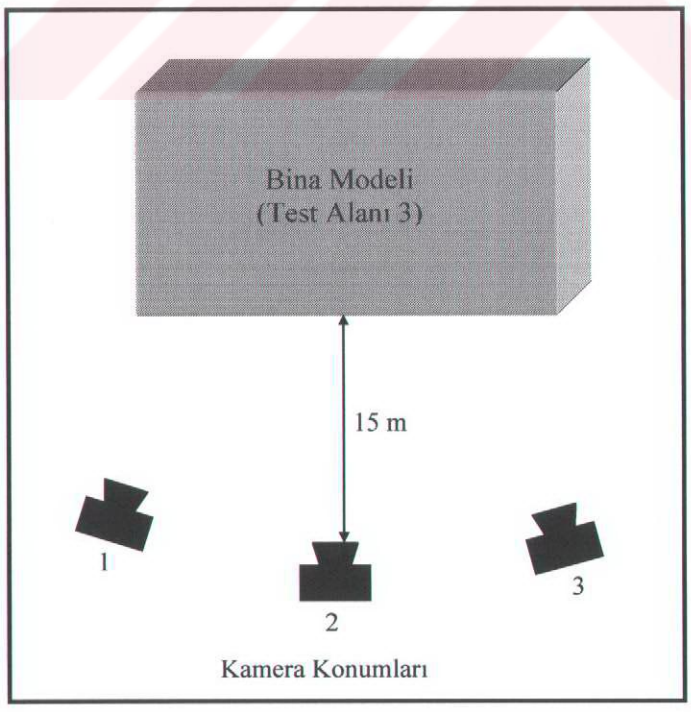
Görüntü konfigürasyonu fotogrametrik projelerde önemli rol almaktadır. Bu yüzden bu çalışmada değişik test alanlarında farklı geometrik kombinasyonlar için görüntü alımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada genelde 3'lü konvergent alımı yapılmıştır. Test Alanı 1 için 5 farklı istasyondan yaklaşık %90 bindirme ile alanın tümünü kaplayacak şekilde 24 ve 50 mm'lik standart merceklerle görüntü alımı yapılmıştır.



Şekil 40. Test Alanı 1 Resim Geometrisi

Çekim sırasında laboratuvar şartlarındaki ışıklandırmaya ilaveten bir aydınlatma yapılmamıştır. Bu test alanında Nikon E2/E2s dijital kamerası kullanılmıştır. Çekim geometrisi Şekil 40'da gösterilmektedir. Şekil 40'daki geometrik konfigürasyonda çekilen görüntüler 3 (1, 3 ve 5 nolu resim) ve 5 (1, 2, 3, 4 ve 5 nolu resim) istasyonlu olmak üzere ayrı ayrı değerlendirilerek geometrik olarak doğruluk incelemesi yapılmıştır. 5 istasyonda çekilen görüntüler Nikon kamerasının ürettiği en kaliteli format olan .tiff formatında kayıt edilerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Ham görüntüler üzerindeki ölçü noktalarının daha net bir biçimde görülebilmesi için görüntü zenginleştirme işlemlerine tabi tutulmuştur. İki farklı mercek ile 5 noktadan toplam 10 adet resim çekilmiştir. Bu resimler üzerindeki noktaların resim koordinatları Elcovision 10 yazılımı kullanılarak 0.5 piksel doğrulukla ölçülmüştür. Elcovision 10 yazılımında resim koordinat ölçüsü yarı otomatik bir biçimde, yöneltilmiş resimlerdeki epipolar çizgiler yardımıyla yapılmaktadır.

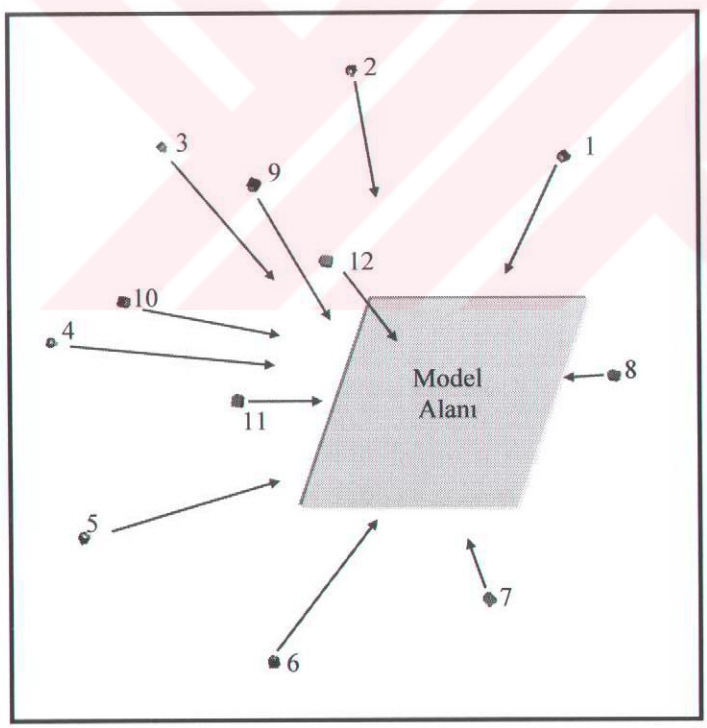
Test Alanı 3'deki bina modelinin resim çekim geometrisi 3'lü konvergent alım şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çekilen resimler nokta ağının tümünü kaplayacak şekilde ayarlanmıştır. Çekim mesafesinin noktaların tümünü görüntülemeyi engellemesinden dolayı, 50 mm mercek ile sadece objenin belirli bir kısmı görüntülenebilmiştir. Ancak resimle kaplanan alandaki nokta sayısı değerlendirme açısından yeterli olmuştur.



Şekil 41. Test Alanı 3 Resim Geometrisi

Burada çekilen resimler yine Elcovision 10 yazılımında daha önce bahsedildiği şekliyle değerlendirilerek resim koordinatları elde edilmiştir. Resim geometrisi Şekil 41'de gösterilmektedir.

Test Alanı 2 için Kodak DCS460 dijital kamerası ile 10 farklı istasyondan resim çekimi yapılmıştır. Burada 5 (1, 4, 7, 9 ve 12 nolu resim) ve 10'lu istasyon sayısı kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Aynı test alanına Nikon Coolpix 990 kamerası ile 4 (1, 2, 3 ve 4 nolu resim) ve 8 (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu resim) farklı istasyondan, Rollei D7 Metric kamerası ile ise 6 (2, 5, 7, 9 , 10 ve 12 nolu resim) ve 12 farklı istasyondan çekim yapılmıştır. Burada hedeflenen amaç, istasyon sayısındaki artışın geometrik doğruluk üzerinde ne kadar etkili olduğunun incelenmesidir. Ayrıca aynı test alanlarında farklı tip kameraların geometrik doğruluklarının irdelenmesi amaçlanmıştır. Çekilen resimler için 20 mm (Kodak), 8.85 mm (Nikon Coolpix) ve 7.3 mm (Rollei) boyunda mercekler kullanılmıştır. Çekim alanında resim geometrisi Şekil 42'de gösterilmektedir.

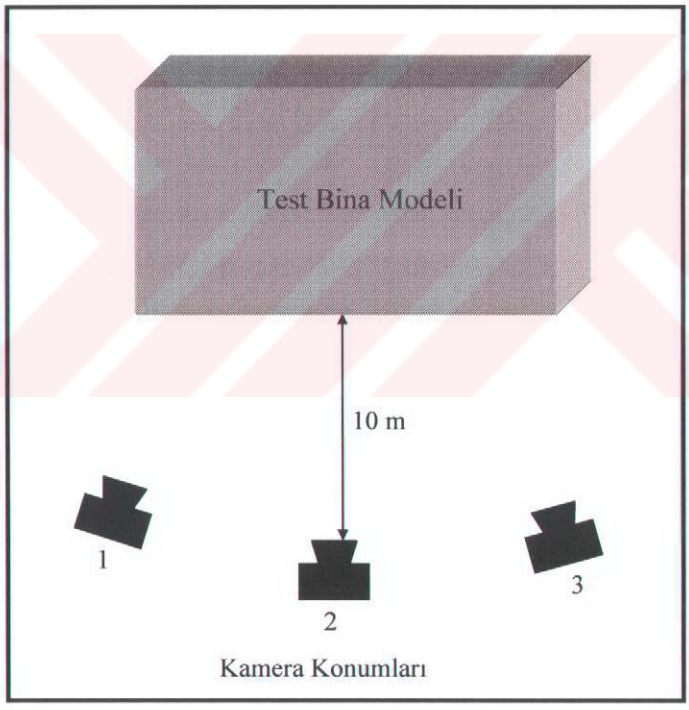


Şekil 42. Test Alanı 2 Resim Geometrisi

Alınan görüntüler SCSI port yardımıyla TWAIN yazılımı ve Compact Flash kart kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bütün noktaların resim koordinatları DPLX yazılımı ile otomatik olarak ölçülmüştür. Bu yazılım ile resim koordinatları piksel

koordinat sisteminde ölçülmekte ve BLUH yazılımına ait BLPRE modülü kullanılarak metrik sisteme (mm) dönüştürülmektedir. DPLX yazılımında piksel koordinatları manuel veya otomatik olarak ölçülebilmektedir. Otomatik ölçümde nokta üzerinde manuel işaretlemeden sonra, bir elips operatörü tanımlanarak piksel altı doğrulukla ölçüm yapılır. Böylece otomatik olarak noktanın merkezi işaretlenmiş ve koordinatı belirlenmiş olur.

Test Alanı 4 bina modeli üzerinde işaretli test alanın görüntüleri 3'lü konvergent şeklinde çekilmiştir. Resim koordinat ölçüsünün otomatik olarak yapılabilmesi için, noktalar dairesel bir biçimde işaretlenmiştir. Noktaların piksel koordinatları DPLX yazılımıyla ölçülmüştür. Ölçülen koordinatlar BLPRE ile metrik sisteme dönüştürülmüştür. Resimler Kodak DCS460 kamerasıyla 20 mm, Olympus E-10 kamerasıyla 8.9 mm mercek kullanılarak çekilmiştir. Resim çekim geometrisi Şekil 43'de gösterilmektedir.



Şekil 43. Test Alanı 4 Resim Geometrisi

Çekilen görüntüler üzerinde noktaların iyi bir şekilde görülebilmesi için görüntü iyileştirme ön işlemleri yapılmıştır. Böylece noktaların bulundukları ortamdan renk olarak ayrılmaları daha da kolaylaştırılmıştır.

2.6. Veri İşleme Metotları ve Kalibrasyon Testleri

Kamera sistemlerinde ve görüntü değerlendirme sistemlerindeki bazı sistematik hatalardan dolayı, elde edilen görüntüler bir takım bozulmalara uğrarlar. Bu bozulmalar sonuç doğruluğuna etki etmektedir. Bu doğruluğu araştırmak için önceki bölümlerde bahsedildiği gibi farklı metotlar kullanılmıştır. Çalışmada matematik modeli tarif edilen metotların farklı veri elde etme şemaları ile geometrik doğruluğa ne derece etki ettikleri araştırılmıştır. Alt bölümlerde her bir matematik model ile yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. Kalibrasyon işlemi, sadece temel olarak seçilen iki kamera (Kodak DCS 460 ve Nikon E2/E2s) ile yapılmış, kameraların çözünürlük ve piksel boyutu yönünden karşılaştırılmaları amacıyla diğer üç kamera çalışmaya ilave edilmiştir.

2.6.1. Işın Demetleri Metodu İle Yapılan Çalışmalar

Işın demetleri metodu temelde kolinarite eşitlikleri kullanan bir metottur. Bu yaklaşımda 10 ilave parametre kullanılmaktadır. Bu ilave parametre seti iç yöneltme elemanlarındaki değişim (x_0, y_0, c), ölçek faktörü (B_1), eksenler arasındaki diklik (B_2), çapsal (k_1, k_2, k_3) ve teğetsel (p_1, p_2) mercek distorsiyonlarını içermektedir.

Tablo 7. Işın demetleri metodu parametre değerlendirme grupları

Uygulama	Kullanılan Parametre	Açıklama
T1	x_0, y_0, c	Temel iç yöneltme parametreleri
T2	x_0, y_0, c, k_1	T1+ çapsal distorsiyon 1. terimi
T3	x_0, y_0, c, k_1, k_2	T2+ çapsal distorsiyon 2. terimi
T4	x_0, y_0, c, k_1, k_2, k_3	T3+ çapsal distorsiyon 3. terimi
T5	x_0, y_0, c, k_1, k_2, k_3, p_1	T4+ teğetsel distorsiyon 1. terimi
T6	x_0, y_0, c, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2	T5+ teğetsel distorsiyon 2. terimi
T7	x_0, y_0, c, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, B_1, B_2	T6+ölçek faktörü+eksenlerin dikliği

Bu metotta, sistematik hataların ve sonuç doğruluğunun tespiti için farklı sayıda ilave parametre seti fonksiyonel modele sokularak değerlendirme yapılmaktadır. Değerlendirme şeması Tablo 7'de gösterilmektedir.

Tablo 7'de verilen her bir uygulama durumu, bütün test alanlarına uygulanarak nokta konum doğruluğu temel olarak seçilen iki kamera için belirlenmiştir. Ayrıca parametre kombinasyonları her test alanında farklı sayıda resim geometrisi (3 veya daha fazla) için uygulanmış ve değerlendirmeler yapılmıştır. Her bir resim için seçilen parametre grupları dikkate alınarak bu parametreler hesaplanmış, istasyon sayısına göre yeniden noktaların üç boyutlu koordinatları fotogrametrik olarak belirlenmiştir. Farklı sayıda kontrol ve denetleme noktaları seçilerek noktaların fotogrametrik anlamda konum doğrulukları incelenmiştir. Laboratuar test alanlarında (Test Alanı 1 ve 2) çekilen görüntülerden, çapsal, teğetsel ve toplam distorsiyon eğrileri çizdirilmiş ve görüntüleme alanında ne derece distorsiyon olduğu grafik olarak gözlenmiştir. Ayrıca noktaların üç eksen yönünde jeodezik ve fotogrametrik değerlerinin fark vektörleri üç boyutlu olarak çizdirilmiştir. Işın demetleri yöntemi ile bütün kamera ve test alanlarında alınan görüntüler değerlendirilmiştir. Bunlara ilaveten sadece bu yöntemde ilave üç kamera kullanılarak geometrik değerlendirme yapılmıştır.

2.6.2. DLT Metodu İle Yapılan Çalışmalar

Değiştirilmiş DLT metodu, noktaların iki boyutlu görüntü koordinatları ile arazi koordinatları arasında direk bir transformasyon işlemini gerçekleştirir. Bu metotta bazı parametrelerin basitleştirilmesinden dolayı yaklaşık değer kullanılmasına gerek yoktur. Ayrıca sistematik hataları gidermek için bu hataları içeren distorsiyonlar ilave parametre olarak DLT eşitliklerine dahil edilmiştir. İlave parametre olarak kamera sabiti, asal noktanın konumu, çapsal ve teğetsel distorsiyon, ölçek faktörü ve eksenlerin dik olmama parametreleri dikkate alınmıştır. Bütün bu parametreler dikkate alındığında sistemde toplam 20 adet parametre bulunmaktadır. Bunların 11 tanesi L_i ile gösterilen DLT katsayılarıdır. Farklı parametre grupları için tasarlanan değerlendirme şeması Tablo 8'de gösterilmektedir.

Tablo 8'de verilen parametre grupları kullanılarak bütün test alanları için kameraların geometrik performansları irdelenmiştir. Bu yöntemle de nokta konumlarındaki

değişimler hem vektörel olarak ve hem de distorsiyon etkileri bakımından grafiklerle gösterilmiştir.

Tablo 8. DLT metodu parametre değerlendirme grupları

Uygulama	Parametre Sayısı	Açıklama
DLT1	11	Standart 11 DLT parametreleri (L_1..L_{11})
DLT2	13	DLT1+ asal noktanın konumu
DLT3	14	DLT2+ çapsal distorsiyon 1. terimi
DLT4	15	DLT3+ çapsal distorsiyon 2. terimi
DLT5	16	DLT4+ çapsal distorsiyon 3. terimi
DLT6	17	DLT5+ teğetsel distorsiyon 1. terimi
DLT7	18	DLT6+ teğetsel distorsiyon 2. terimi
DLT8	19+20	DLT7+ölçek faktörü+ eksenlerin dikliliği

2.6.3. BLUH Metodu İle Yapılan Çalışmalar

BLUH yazılımına ait matematik modelle bütün test alanları kullanılarak seçilen dijital kameralara ait performans tespiti yapılmıştır. Bu yazılımda kullanılan parametreler daha önceki bölümde bahsedildiği gibi toplam 15 adettir. Değerlendirme işlemi, tüm parametreler, çapsal distorsiyonu içeren parametreler ve teğetsel distorsiyonu içeren parametreler şeklinde üç grupta yapılmıştır. Bu parametre gruplarının, farklı istasyon ve nokta sayısı kombinasyonları kullanılarak nokta konum doğruluğuna etkileri belirlenmiştir. Bu metot için kullanılan parametre kombinasyon ve grupları Tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. BLUH Metodu parametre grupları

Test	**Parametre Sayısı**	**Açıklama**
Tüm Parametre	15	Bütün parametreler (P_1.....P_{15})
Çapsal Distorsiyon	11	1 ... 8+ P_9, P_{10} ve P_{11} çapsal distorsiyon parametreleri
Teğertsel Distorsiyon	8	1 ... 6+P_7 ve P_8 teğetsel distorsiyon parametreleri

Tablo 9'da verilen parametrelere göre her bir test alanı için değerlendirmeler yapılarak nokta konum doğrulukları hesaplanmıştır. Ayrıca laboratuar test alanlarındaki değerlendirmelerde her bir gruba ait distorsiyon eğrileri ve resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon etkileri grafik olarak gösterilmiştir. Bu metotta da farklı nokta ve çekim istasyon kombinasyonları için ayrı ayrı çözüm yapılmıştır.

2.6.4. Elcovision 10 Metodu İle Yapılan Çalışmalar

Elcovision 10 yazılım metodu ile sadece Test Alanı 1 ve 3 için değerlendirme yapılmıştır. Farklı istasyon sayıları ve kontrol noktası kombinasyonları kullanılarak noktaların konum doğruluğundaki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla, laboratuar test alanında 5 ve 3 istasyonda çekilen görüntüler yazılımda değerlendirilmiştir. Aynı şekilde uygulama test alanı için 3 istasyonlu çekilen görüntüler değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bu metotta ilave parametre olarak sadece çapsal distorsiyonun ilk iki terimi kullanıldığından, parametresiz, distorsiyonun 1. terim katsayısı (k_1) ve 2. terim katsayısı (k_2) olmak üzere toplam üç grupta değerlendirme yapılarak konum doğruluğu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu metot için kullanılan parametre kombinasyon ve grupları Tablo 10'da gösterilmektedir.

Tablo 10. Elcovision 10 Metodu parametre grupları

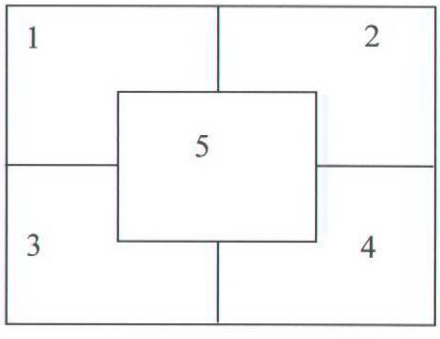
Uygulama	Parametre Sayısı	Açıklama
EL1	-	Distorsiyon parametresiz
EL2	1	A_1 1. çapsal distorsiyon katsayısı
EL3	2	EL2+ A_2 2. çapsal distorsiyon katsayısı

2.7. Radyometrik Kalibrasyon İçin Yapılan Çalışmalar

Bu çalışmanın esas olarak odaklandığı nokta dijital kameraların geometrik performanslarının irdelenmesidir. Bunun yanında çalışmada kullanılan kameralardan seçilen iki kameranın radyometrik olarak testleri de yapılmıştır. Dijital kameralar için radyometrik kalibrasyon, geometrik kalibrasyona oramla daha az önemlidir. Bu sebeple,

çalışmanın bu aşamasında dijital kameraların radyometrik özellikleri ile ilgili bazı temel işlemler gerçekleştirilmiştir. Radyometrik kalibrasyon Nikon kamerasına ait 24 mm mercek ve Kodak kamerasına ait 20 mm'lik merceklerin ayrı ayrı değerlendirilmesi ile yapılmıştır. Kalibrasyon için her bir mercek ile tam siyah ve tam beyaz ortamlara 10'ar adet görüntü alımı yapılmıştır. Tam siyah ortam kamera mercek sistemi kapatılarak elde edilmiştir. Beyaz ortam için ise renk dağılımı düzgün formda olan A4 kağıt ortamı seçilmiştir. Alınan görüntüler üzerinde radyometrik özellikleri belirlemeye yönelik işlemlerin yapılabilmesi için, MSDOS ortamında çalışan bir dönüştürücü yazılım (BMP2CONV) kullanılarak görüntüdeki her bir pikselin renk değerleri matris formunda elde edilmiştir. Bu yazılım, .bmp formatında siyah beyaz görüntülerle çalışmaktadır. Bu nedenle renkli görüntüler öncelikle siyah beyaz yapıya dönüştürülürler. Her iki ortamda çekilen bütün görüntüler dönüşüm işlemine tabi tutularak, istenilen görüntüdeki piksel değerleri elde edilmiş olur.

Piksellerin gri değerleri kullanılarak tam veya belli boyutlarda (CCD boyutunun dörtte biri) seçilen 5 farklı alt görüntünün piksel ortalamaları ve standart sapmaları hesaplanmıştır (Şekil 44). Bu değerler daha sonra ilgili görüntü veya alt görüntü üzerinde bozuk veya ölü piksel olup olmadığının tespitinde kullanılmıştır. Bilindiği gibi görüntülerde piksel değerlerinin standart sapması gürültü olarak adlandırılmaktadır. Ortalama değer ve standart sapma kullanılarak her bir pikselin değerinin istatistiksel olarak hangi aralıkta yer aldığı tespit edilmiştir. Yani piksel değerinin ortalama değerden standart sapmanın kaç katı kadar uzaklıkta olup olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 44. Bir görüntü üzerinde seçilen alt görüntüler

Seçilen kameraya ait biri siyah ve diğeri beyaz görüntü olmak üzere, bu iki görüntü kullanılarak her bir görüntü için PRNU (Photo Response Non Uniformities) değeri hesaplanarak düzeltilmiş görüntüler elde edilmiştir.

Siyah yada beyaz bir görüntüde piksel ortalaması ve standart sapması hesaplanırken, farklı sayıda (10 adet) görüntü ortalaması alınarak oluşturulan görüntüye ait pikseller üzerinde de ortalama ve standart sapma hesabı yapılmıştır. Bu veriler kullanılarak piksellerin istatistik analizi yapılmış ve normal dağılım fonksiyonunda hangi bölgeye düştükleri belirlenerek, bu durum çizdirilen resimler üzerinde gösterilmiştir.

3. BULGULAR ve İRDELEME

Dijital kameraların fotogrametrik potansiyellerinin araştırılması amacıyla yapılan bu çalışmada, seçilen dijital kameraların geometrik testleri için dört farklı metot ve test alanı kullanılmıştır. Söz konusu metotlarla, Nikon E2/E2s dijital kamerası testinde iki farklı mercek kullanılırken, Kodak DCS 460 dijital kamerası için sadece tek mercek (20 mm) kullanılmıştır. Bu iki temel kameranın dışında farklı geometrik çözünürlükteki kameraları karşılaştırmak amacıyla Olympus E-10, Nikon Coolpix 990 ve Rolle D7 Metric olmak üzere üç ayrı kamera da ilaveten kullanılmıştır. Bu üç kamera ile sadece tek bir test alanında ve Işın Demetleri metodu kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Test alanları laboratuar ve uygulama ortamı olmak üzere iki ayrı gruba ayrılmıştır. Laboratuar ortamında yapılan testlerde kameraların metrik potansiyellerinin hesaplanması sırasında, kalibrasyona yönelik olarak, sistematik hatalar etkilerinin dikkate alındığı distorsiyon eğrileri, alıcı düzleminde distorsiyon etkileri ve resim koordinat hata vektörleri büyüklüklerini içeren bilgiler elde edilmiştir. Uygulama alanındaki testlerde ise sadece obje uzayında hesaplanan noktaların nokta konum doğruluğu üzerinde durulmuştur.

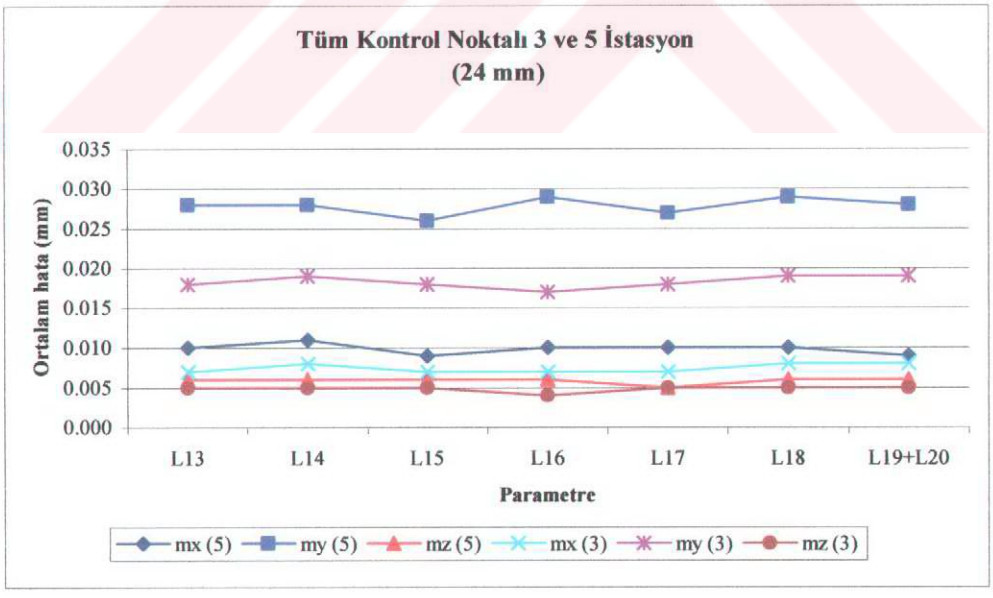
3.1. Nikon E2/E2s Dijital Kamerası Test Alanı 1 Bulguları

Bu kameranın geometrik doğruluğunun araştırılması için Test Alanı 1 kullanılmıştır. Söz konusu test alanı için DLT, İlave Parametreli Işın Demetleri, Bluh ve Elcovision 10 matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Matematik modeli kullanılan metotların her biri farklı sayıda parametre içermektedir. Farklı metotlar ile bütün kontrol noktaları ve farklı denetleme nokta sayısı (5, 10 ve 20) grupları kullanılarak doğruluk araştırması gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon bilgileri, bütün noktaların kontrol noktası olarak işleme katılması durumunda elde edilmiştir. Farklı çekim istasyon sayıları dikkate alınarak (3 ve 5 istasyon), 24 ve 50 mm'lik mercek için sistemdeki tüm kontrol noktaları (49 nokta) ve 5, 10, 20 adet denetleme noktası seçilmesi durumunda x, y ve z yönündeki ortalama konum hataları her bir metot için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

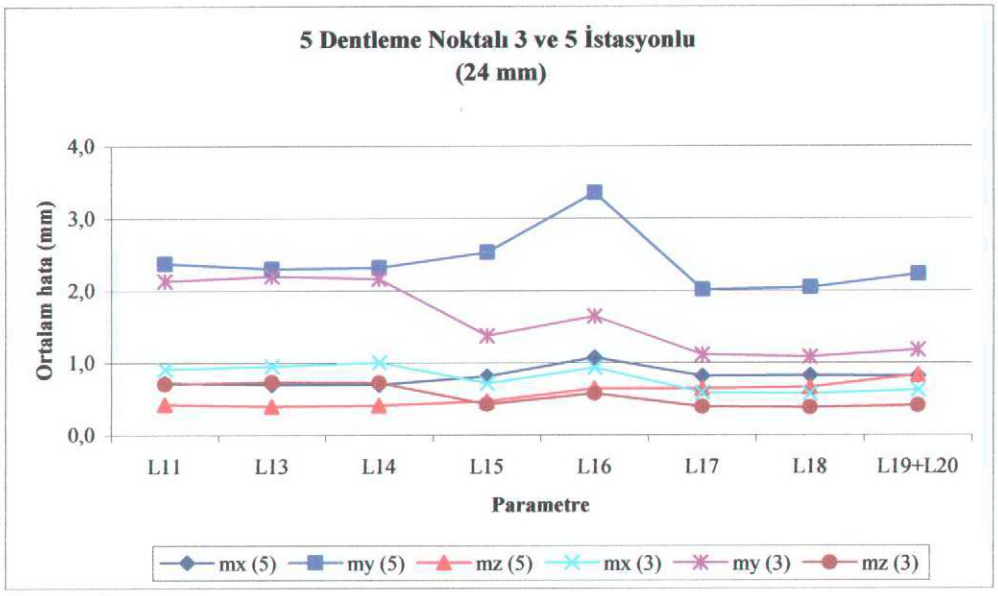
a) DLT Metodu Bulguları: 24 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hataları hesaplanarak grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 45-48). 3 ve 5 istasyonlu ve 5, 10, 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama hata değerleri Tablo 11'de gösterilmektedir.

Tablo 11. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 24 mm)

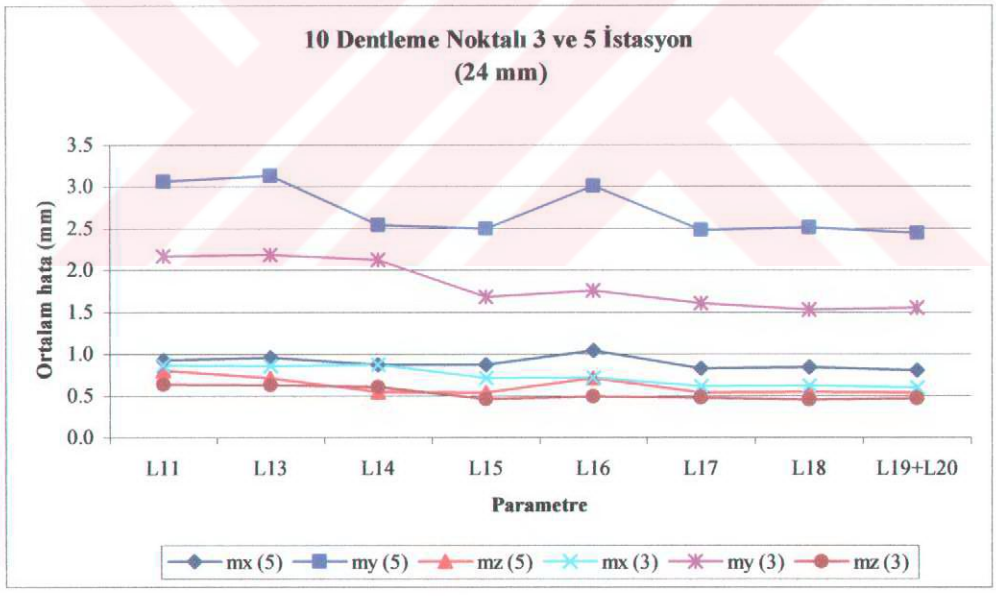
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	0.72	2.38	0.42	0.91	2.13	0.71	0.92	3.07	**0.80**	0.86	2.17	**0.64**	1.12	3.48	0.76	0.67	2.00	**0.59**
L13	0.70	2.30	0.40	0.95	**2.20**	**0.73**	0.96	**3.13**	0.71	0.86	**2.19**	0.63	**1.17**	**3.62**	**0.76**	0.69	**2.03**	0.58
L14	0.70	2.32	0.41	**1.00**	2.16	0.72	0.87	2.54	0.55	**0.87**	2.12	0.60	0.82	2.69	0.58	0.64	1.87	0.53
L15	0.81	2.53	0.47	0.72	1.38	0.43	0.88	2.50	0.53	0.71	1.68	0.46	0.88	2.75	0.59	0.68	1.68	0.45
L16	**1.08**	**3.35**	0.65	0.93	1.64	0.58	**1.04**	3.01	0.71	0.72	1.76	0.49	1.10	3.15	0.61	0.70	1.73	0.44
L17	0.82	2.01	0.65	0.59	1.12	0.40	0.82	2.49	0.54	0.61	1.61	0.47	0.86	2.65	0.57	0.71	1.75	0.48
L18	0.83	2.05	0.66	0.57	1.08	0.39	0.84	2.52	0.54	0.62	1.53	0.45	0.91	2.80	0.61	**0.71**	1.76	0.48
L19+L20	0.82	2.23	**0.84**	0.63	1.18	0.41	0.81	2.44	0.54	0.60	1.55	0.46	0.88	2.69	0.59	0.69	1.74	0.48



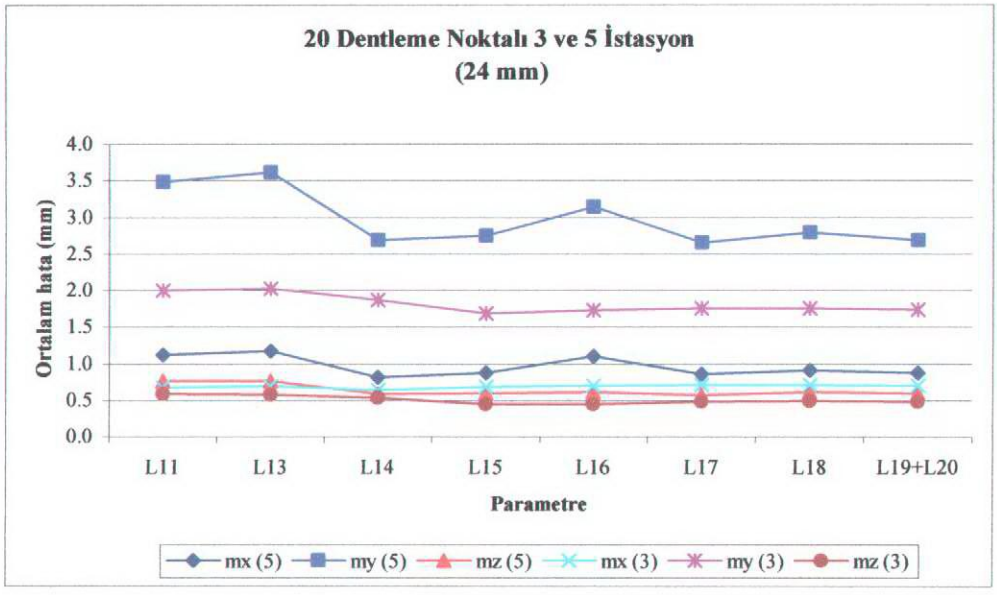
Şekil 45. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, DLT, 24 mm)



Şekil 46. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, 24 mm)



Şekil 47. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, 24 mm)



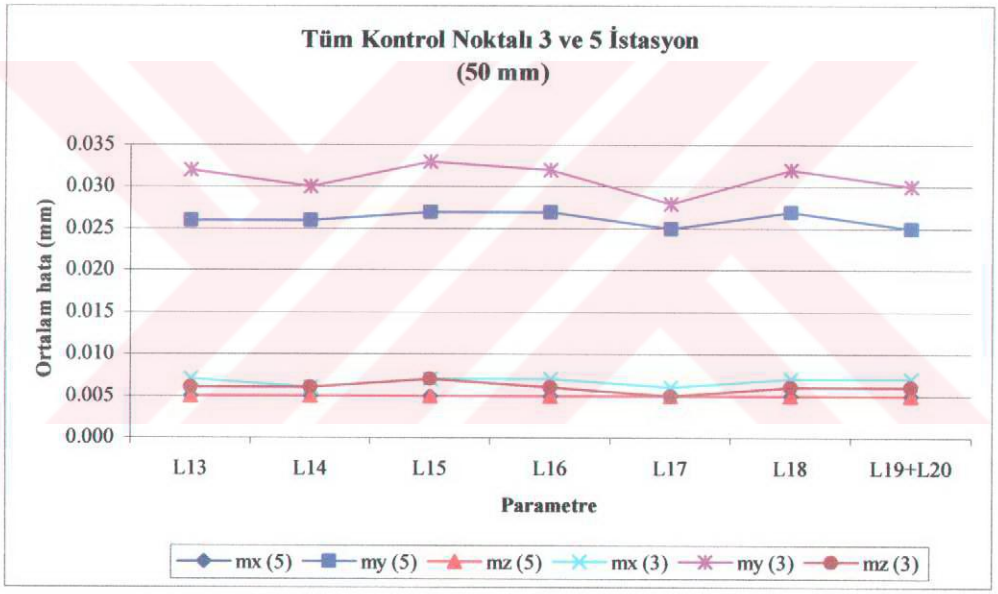
Şekil 48. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, 24 mm)

DLT metodu kullanılması durumunda 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan ortalama olarak 2 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Çekim istasyon sayıları bakımından irdeleme yapıldığında, 3 istasyonlu çekim daha iyi sonuç vermektedir. Ancak 3 ve 5 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında da çok belirgin bir fark gözlenmemektedir. DLT parametrelerinin sonuç doğruluğuna etkileri, farklı kombinasyonlar için çok değişim göstermemiştir. Ancak çapsal distorsiyonun 3. terimine karşılık gelen L16 parametresinin x, y ve z yönündeki hatalarda bir sıçramaya neden olduğu belirlenmiştir. 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.17 mm, 3.62 mm ve 0.84 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları ise sırasıyla 1 mm, 2.20 mm ve 0.73 mm'dir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 11, Şekil 45-48).

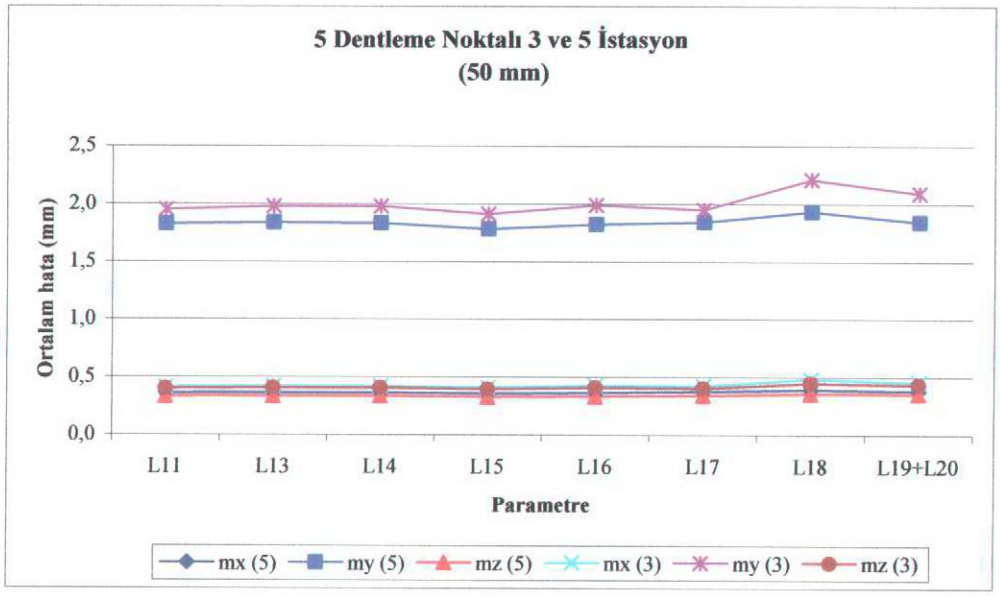
50 mm mercek için de 24 mm mercek için yapılan işlemlerin aynısı yapılmıştır (Şekil 49-52, Tablo 12).

Tablo 12. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 50 mm)

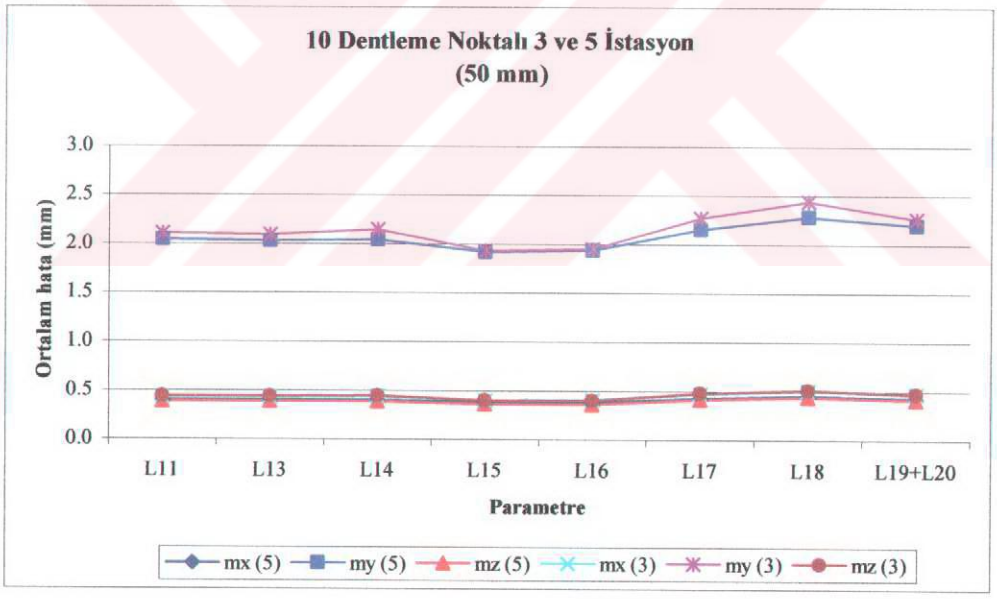
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	0.36	1.82	0.34	0.41	1.95	0.40	0.40	2.04	0.39	0.44	2.11	0.44	0.42	2.18	0.44	0.59	2.69	0.61
L13	0.36	1.84	0.34	0.42	1.98	0.41	0.40	2.03	0.38	0.43	2.10	0.44	0.42	2.19	0.44	0.59	2.71	0.62
L14	0.36	1.83	0.34	0.42	1.98	0.41	0.40	2.04	0.39	0.44	2.15	0.45	0.43	2.21	0.44	0.59	2.71	**0.62**
L15	0.36	1.78	0.33	0.41	1.91	0.40	0.38	1.92	0.36	0.40	1.93	0.40	0.42	2.23	0.43	0.59	2.68	0.59
L16	0.37	1.82	0.34	0.43	1.99	0.41	0.38	1.94	0.36	0.41	1.95	0.40	0.42	2.22	0.43	0.58	2.61	0.58
L17	0.38	1.84	0.34	0.43	1.95	0.40	0.43	2.15	0.42	0.47	2.28	0.48	0.44	2.29	0.45	**0.61**	**2.72**	0.61
L18	**0.39**	**1.93**	**0.36**	**0.48**	**2.21**	**0.45**	**0.45**	**2.29**	**0.44**	**0.50**	**2.44**	**0.51**	0.45	2.30	**0.46**	0.58	2.63	0.59
L19+L20	0.38	1.84	0.36	0.46	2.09	0.43	0.43	2.20	0.41	0.47	2.28	0.47	**0.45**	**2.39**	0.45	0.59	2.68	0.60



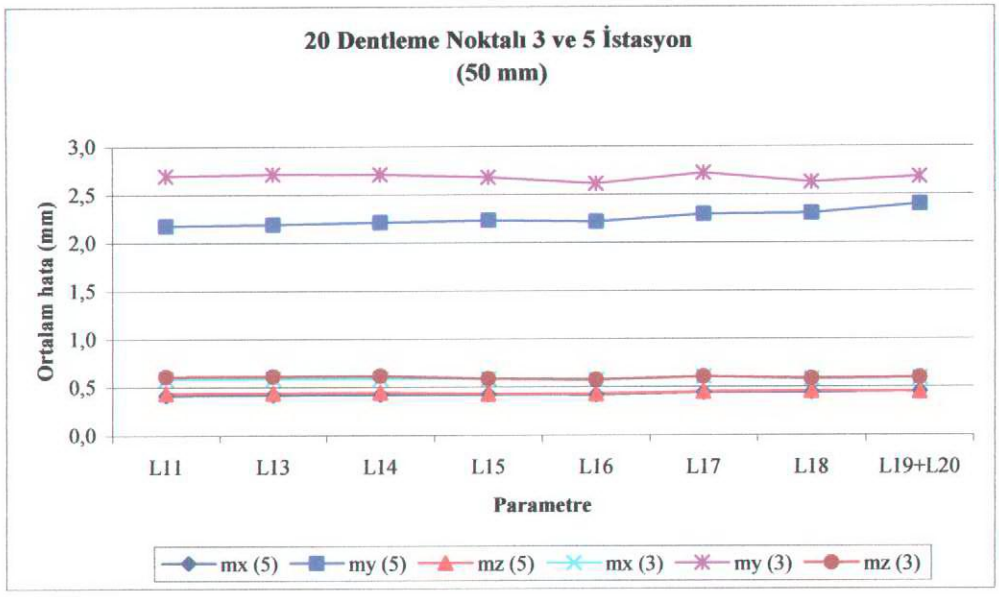
Şekil 49. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, DLT, 50 mm)



Şekil 50. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, 50 mm)



Şekil 51. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, 50 mm)

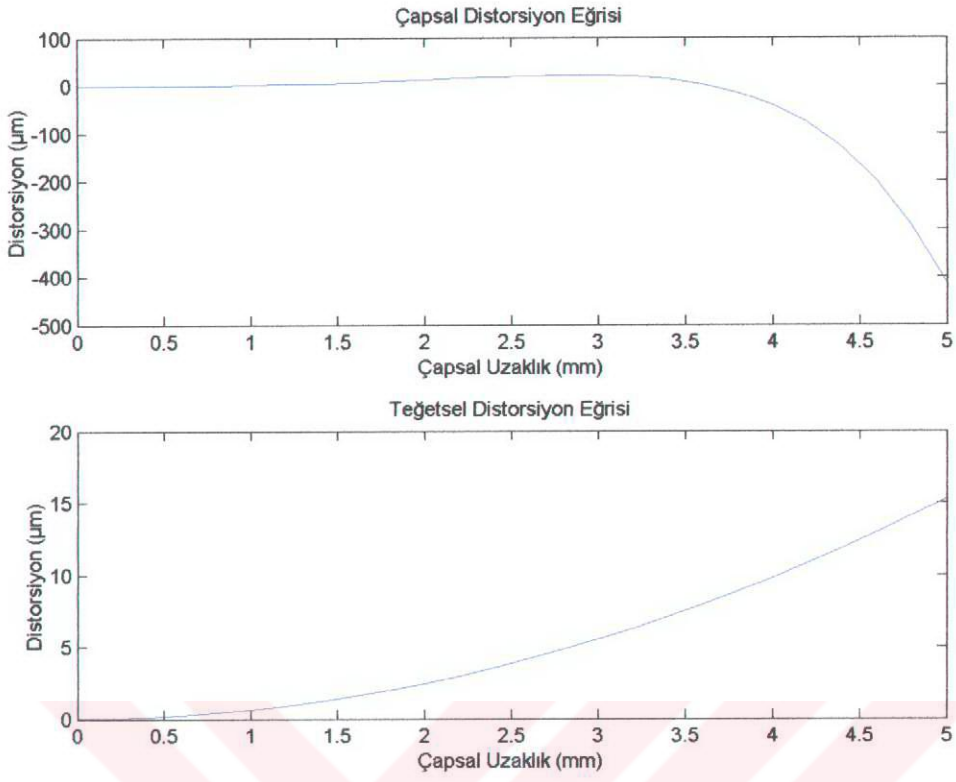


Şekil 52. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, 50 mm)

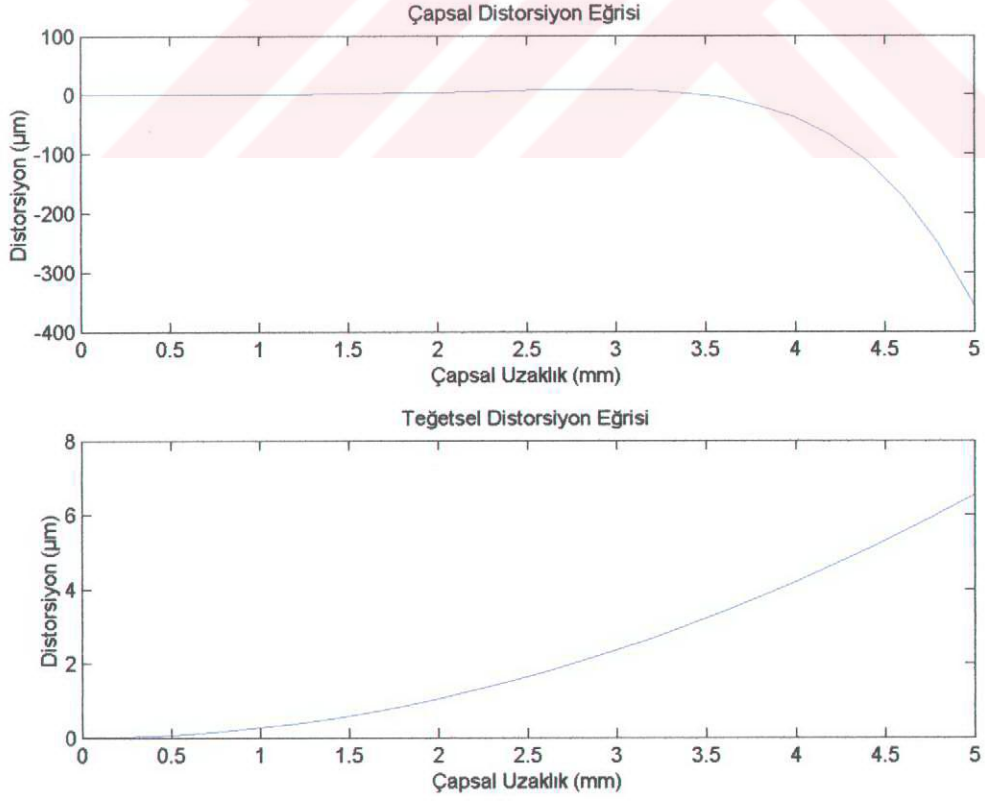
50 mm mercek kullanılarak yapılan çözümde bütün kombinasyonlarda ortaya çıkan sonuçlarda yine y ekseni (derinlik) yönünde hata miktarının diğer yönlere göre daha büyük olduğu gözlenmiştir. İstasyon sayılarına göre irdeleme yapıldığında, bu mercekte beklendiği gibi 5'li konvergent alım daha iyi sonuç vermektedir. 3 ve 5 istasyonlu çekimle elde edilen ortalama hata değerleri arasında çok küçük farklar gözlenmiştir (Tablo 12). Distorsiyon katsayılarını içeren farklı sayıda DLT parametrelerinden tümünün veya bir kısmının kullanılması sonucu fazlaca etkilememektedir. 5'li konvergent alımda x, y ve z yönündeki max konum hataları sırasıyla 0.45 mm, 2.39 mm ve 0.46 mm'dir. 3'lü konvergent alımda ise bu miktarlar sırasıyla 0.61 mm, 2.72 mm ve 0.62 mm'dir. Bu mercekte en iyi sonuç 5 denetleme nokta grubunda elde edilmiştir.

DLT metodunda 24 ve 50 mm mercekler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, 50 mm mercek kullanıldığında elde edilen sonuçların her yönüyle daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, bu merceğin dar açılı olması ve mercek distorsiyon etkilerinin 24 mm merceğe göre daha az olması şeklinde ifade edilebilir.

24 ve 50 mm'lik mercekler için, DLT metodu ile her bir resimde (5 resim) ayrı ayrı ilave parametre setinden hesaplanan çapsal ve teğetsel distorsiyon değerlerine ilişkin max etkiyi gösteren grafikler sırasıyla Şekil 53-54'de gösterilmektedir.



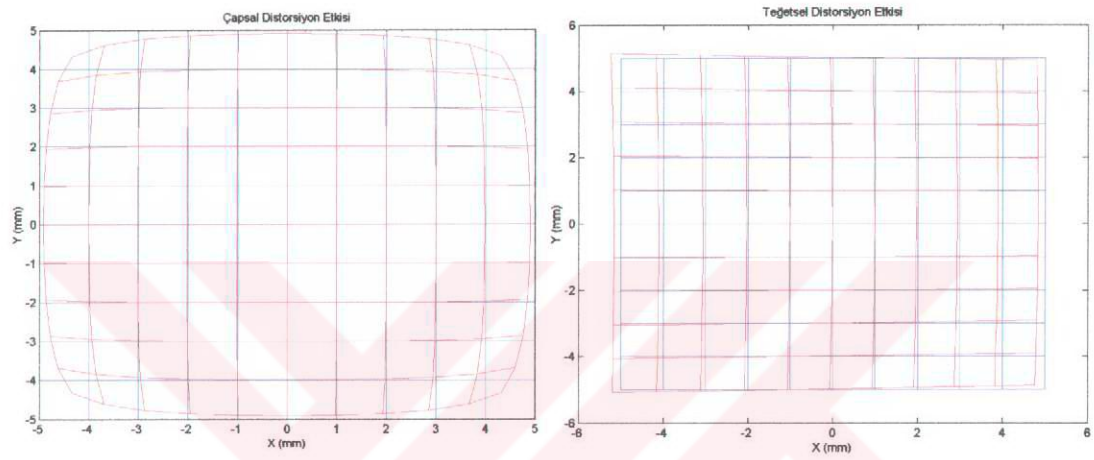
Şekil 53. 24 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Nikon E2)



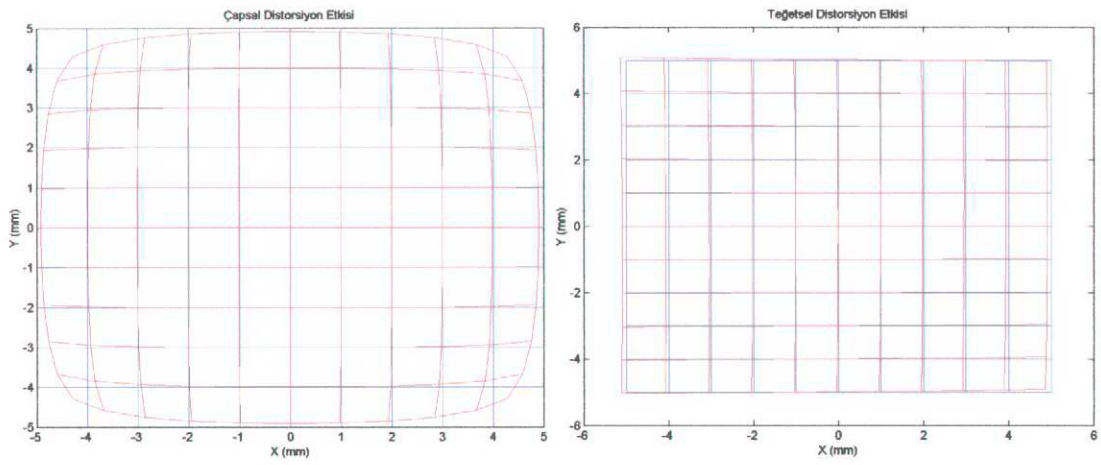
Şekil 54. 50 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Nikon E2)

Şekil 53-54 incelendiğinde çapsal ve teğetsel distorsiyon etkisinin 24 mm'lik mercekte daha fazla olduğu olduğu görülmektedir. Global olarak resim yüzeyi üzerindeki distorsiyon etkilerine bakıldığında aynı paralellikte bir etkinin olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 55-56).

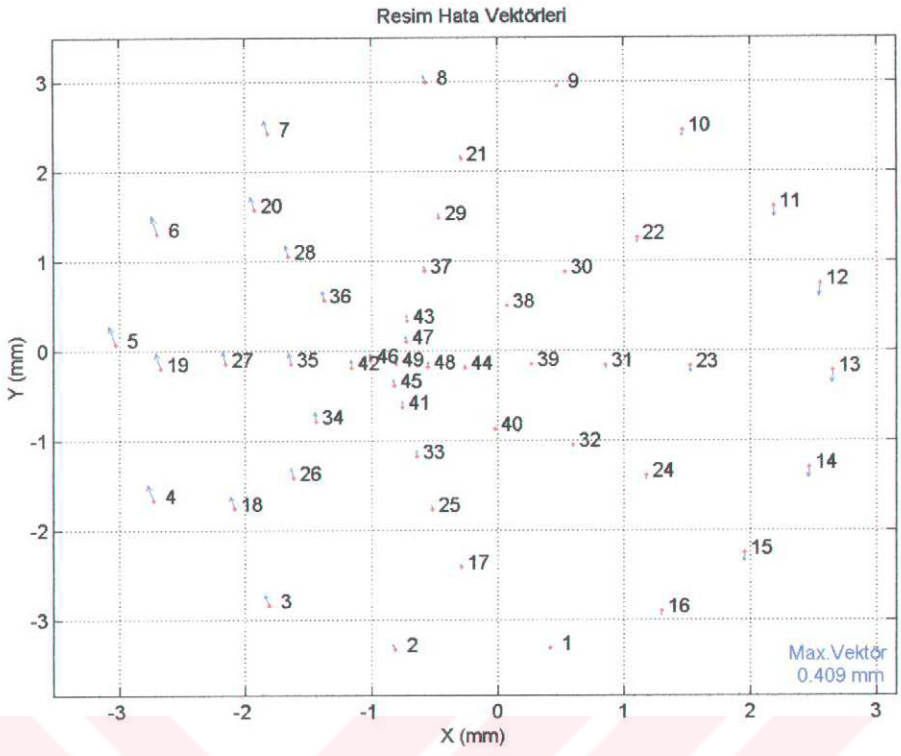
Her iki mercek için, her bir resim (5 resim) yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Bu grafikler max etkileri gösterecek biçimde sırası ile Şekil 55-56'da gösterilmektedir.



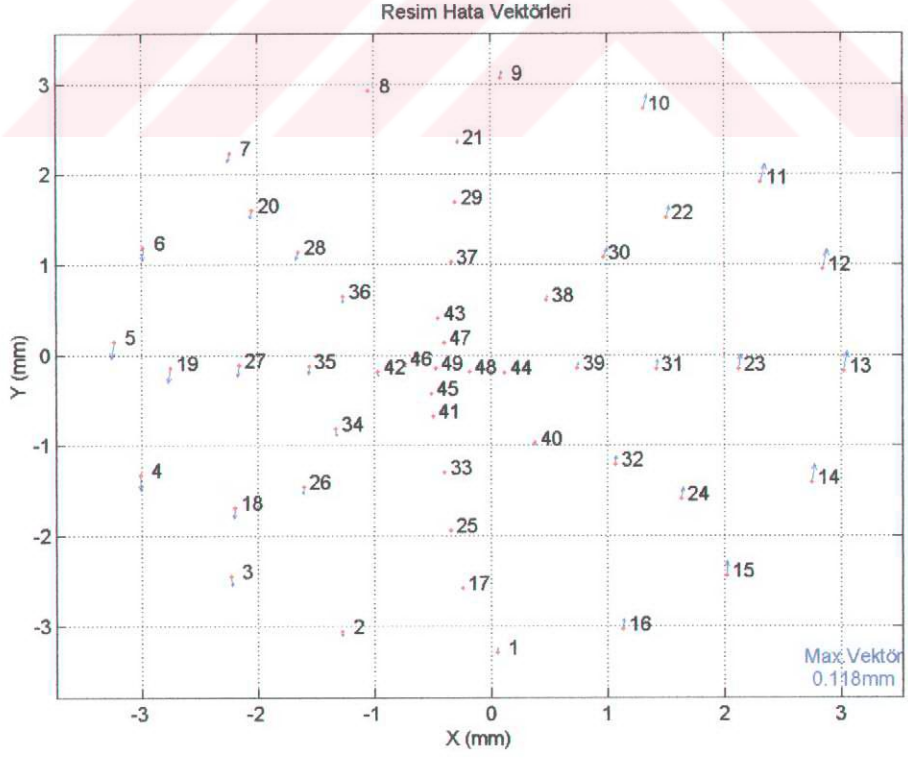
Şekil 55. 24 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Nikon E2)



Şekil 56. 50 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Nikon E2)



Şekil 57. 24 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Nikon E2)

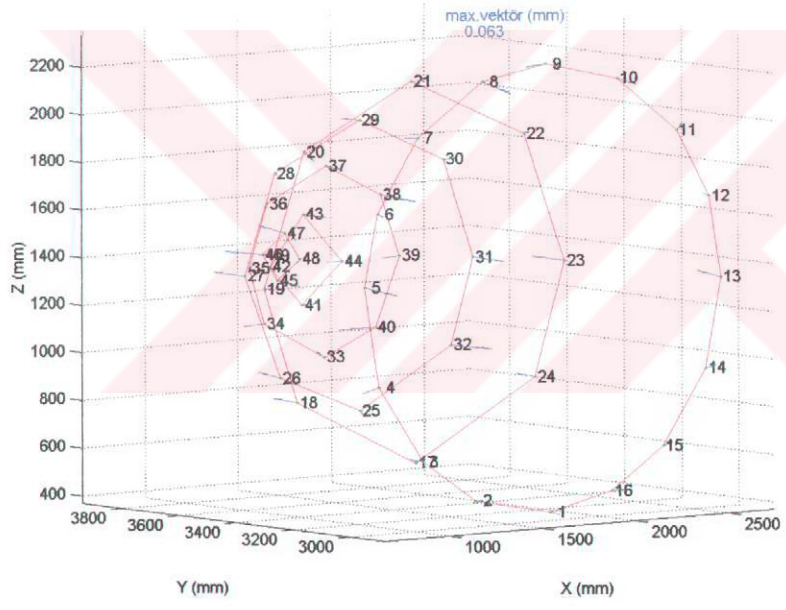


Şekil 58. 50 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Nikon E2)

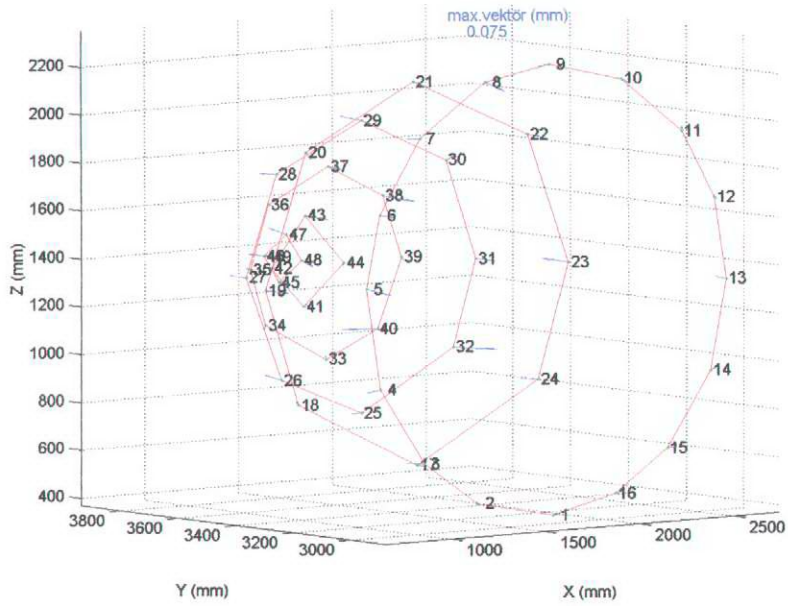
Test alanındaki tüm noktaların kontrol noktası olarak kullanıldığı çözümde, her bir resim (5 resim) için bütün noktalardaki resim koordinatı hata vektörleri hesaplanmıştır. Bu hata vektörlerinden max etkiyi gösteren grafikler her iki mercek için çizdirilmiştir. Hata vektörlerini gösteren grafikler sırasıyla Şekil 57-58'de gösterilmektedir.

Her iki mercek için hata vektör büyüklükleri incelendiğinde bütün noktalarda belirlenen hatalar 24 mm mercekli çözümde 50 mm mercekli çözümden daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Distorsiyon parametrelerinin etkilerinin hata vektör büyüklükleri üzerinde de etkisini gösterdiği açıkça görülmektedir (Şekil 57-58).

3 ve 5 istasyonlu çekimler için obje uzayındaki her bir noktanın hata vektörleri belirlenmiştir. 24 ve 50 mm'lik mercekler için her iki çekim istasyon sayısına göre çizdirilen hata grafikleri sırasıyla Şekil 59-62'de gösterilmektedir.

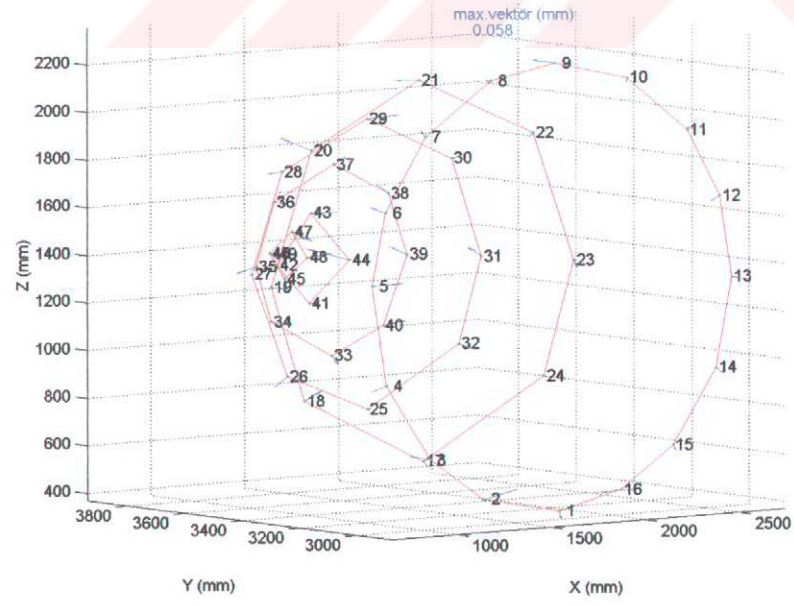


Şekil 59. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 istasyon, DLT, Nikon E2)

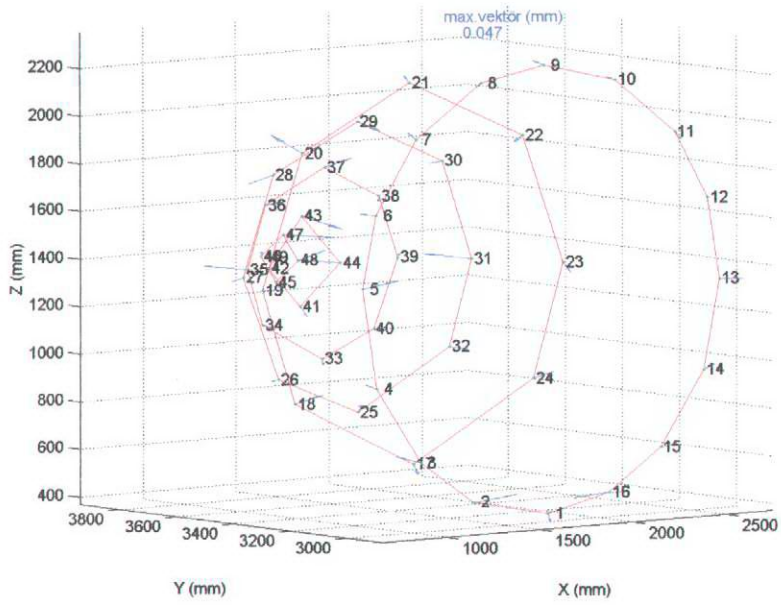


Şekil 60. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, DLT, Nikon E2)

Şekil 59 ve 60 incelendiğinde bütün noktalar için hesaplanan nokta konum hatası vektörleri 3 istasyonlu çekimde 5 istasyona göre daha iyi konum doğruluğu ortya koymaktadır.



Şekil 61. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 istasyon, DLT, Nikon E2)



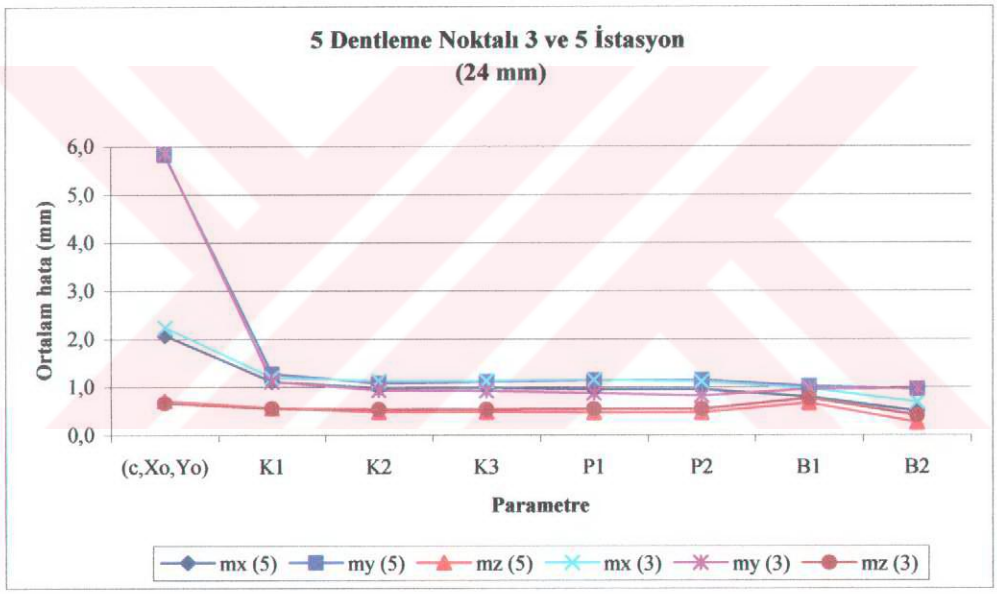
Şekil 62. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, DLT, Nikon E2)

Şekil 61 ve 62'den bütün noktalar için hesaplana nokta konum hatası vektörlerinin 5 istasyonlu çekimde daha iyi sonuç verdiği, obje uzayında her iki mercekle hesaplanan nokta konum doğrulukları arasında belirgin fark olmadığı tespit edilmiştir.

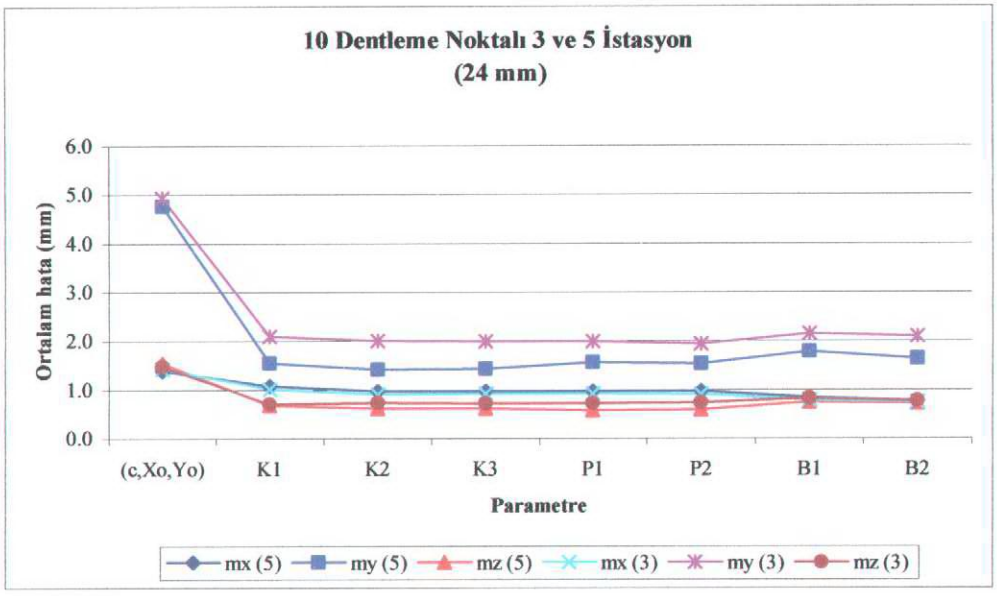
b) İlave Parametreli Işın Demetleri Metodu Bulguları : Bu metotta da DLT metodunda olduğu gibi iki farklı mercekle çalışılmıştır. 24 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 63-65). 3 ve 5 istasyonlu ve 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 13'de gösterilmektedir.

Tablo 13. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)

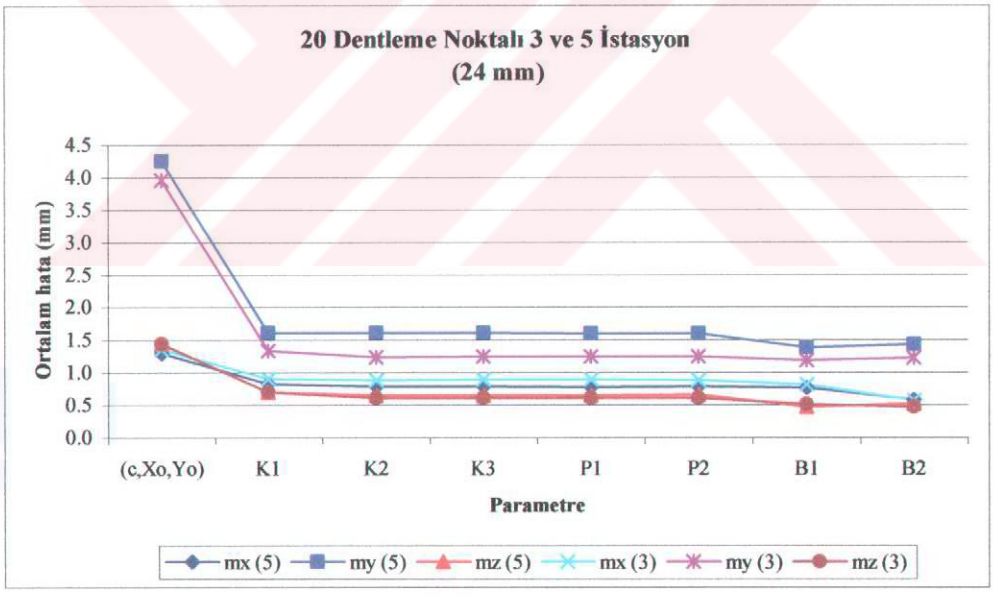
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	2.07	5.83	0.72	2.24	5.86	0.67	1.39	4.77	1.55	1.43	4.94	1.48	1.29	4.25	1.44	1.35	3.96	1.44
K_1	**1.11**	**1.28**	0.56	**1.20**	**1.12**	0.55	**1.08**	1.54	0.68	**1.01**	2.09	0.70	**0.83**	1.61	**0.70**	**0.90**	**1.34**	**0.70**
K_2	0.98	1.08	0.48	1.13	0.93	0.54	0.97	1.42	0.61	0.90	2.00	0.73	0.79	1.61	0.65	0.89	1.24	0.61
K_3	0.99	1.11	0.49	1.13	0.92	0.54	0.97	1.42	0.61	0.91	1.99	0.73	0.79	**1.62**	0.65	0.89	1.24	0.61
P_1	0.95	1.15	0.47	1.15	0.88	0.54	0.97	1.56	0.58	0.91	1.99	0.73	0.78	1.60	0.65	0.89	1.25	0.61
P_2	0.95	1.15	0.47	1.12	0.83	0.54	0.97	1.54	0.59	0.90	1.94	0.73	0.79	1.60	0.66	0.88	1.25	0.60
B_1	0.79	1.02	**0.67**	0.97	0.97	**0.77**	0.83	**1.78**	**0.74**	0.79	**2.15**	**0.83**	0.76	1.38	0.47	0.82	1.19	0.51
B_2	0.50	0.96	0.27	0.69	0.98	0.41	0.77	1.64	0.72	0.75	2.09	0.77	0.58	1.43	0.52	0.57	1.22	0.47



Şekil 63. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)



Şekil 64. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)



Şekil 65. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)

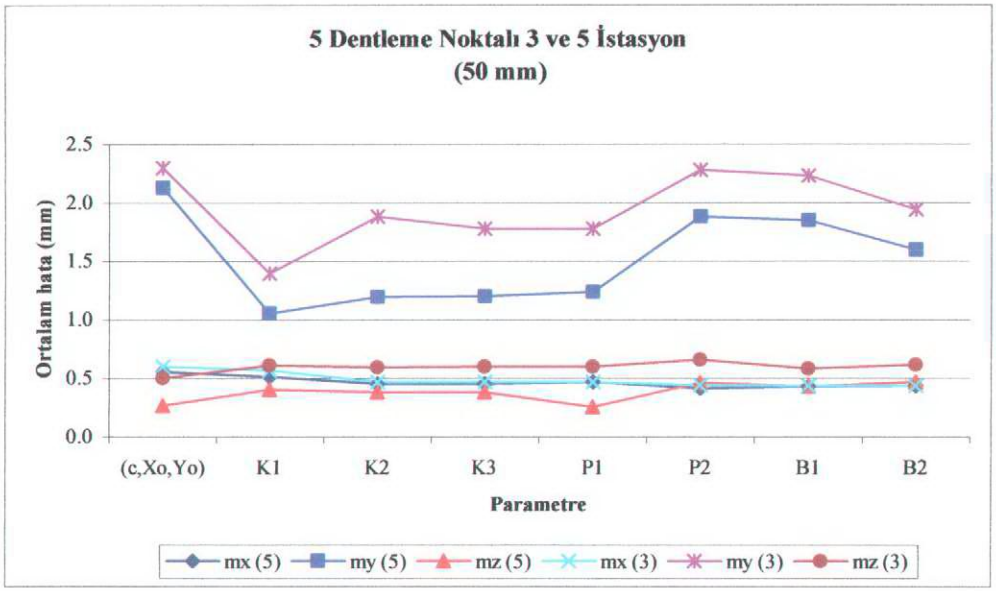
Işın Demetleri metodunda 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde, denetleme noktası grupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 13). Çekim istasyon sayıları bakımından irdeleme yapıldığında, 3 istasyonlu çekimin daha iyi sonuç

verdiği görülmektedir. Ancak 3 ve 5 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün ilave parametrelerin kullanılması durumunda x, y ve z yönündeki doğruluğun daha da arttığı gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.11 mm, 1.78 mm ve 0.74 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.20 mm, 2.15 mm ve 0.83 mm'dir. Ancak bazı parametrelerin sonuç doğruluğu üzerinde bozucu etkiler yaptığı, söz konusu genellemenin istisnası olarak kabul edilebilir. Bu bozucu parametrelerin kullanılması bir anlam ifade etmeyecektir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 13, Şekil 63-65).

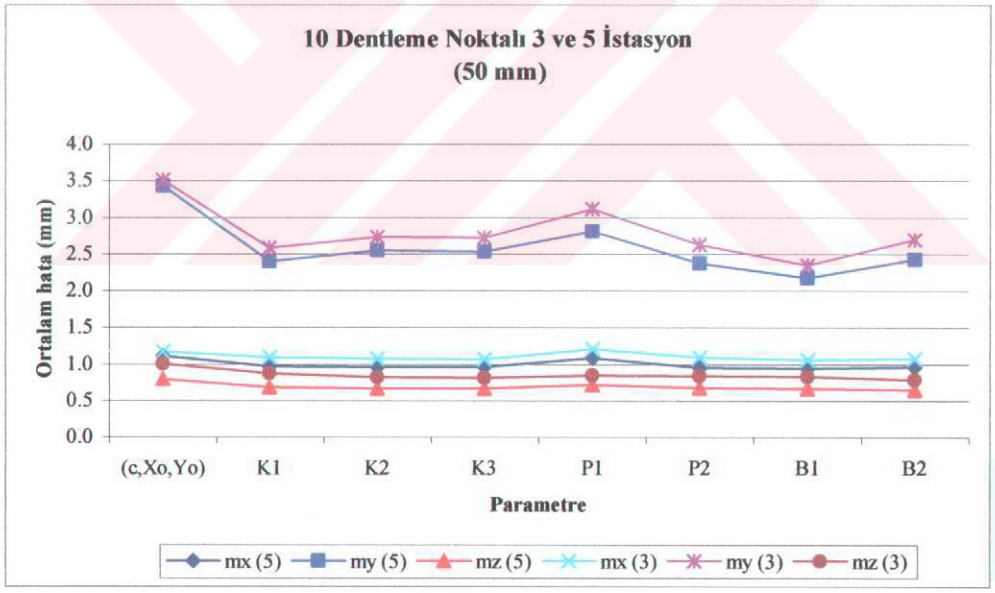
50 mm mercek ile benzer işlemler yapılmış olup, ilgili sonuçlar Şekil 66-68 ve Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)

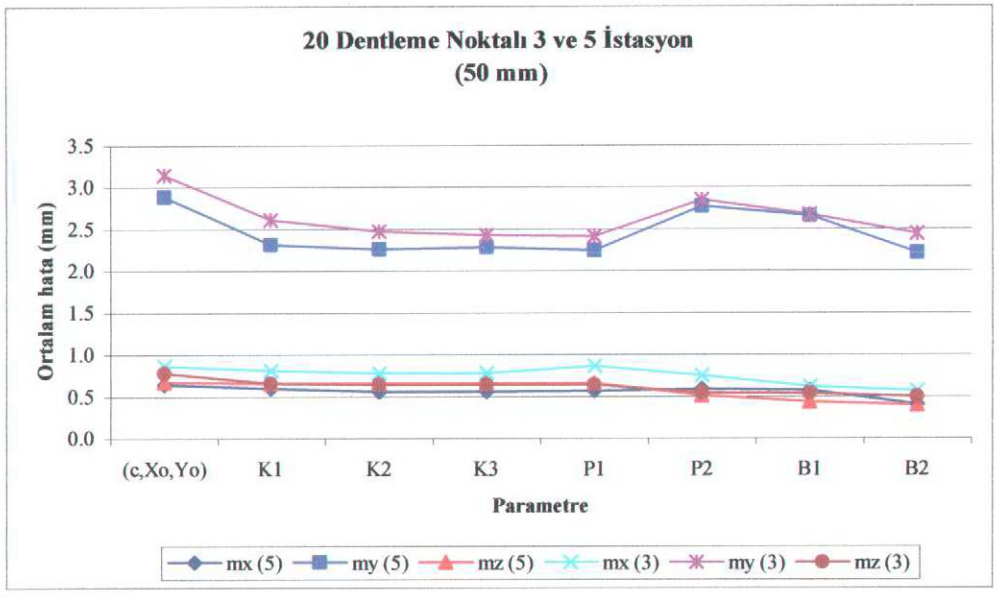
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_o, y_o	0.56	2.13	0.26	0.60	2.30	0.50	1.11	3.43	0.79	1.17	3.51	1.01	0.64	2.89	0.67	0.87	3.15	0.78
K_1	**0.52**	1.06	0.40	**0.56**	1.40	0.61	0.97	2.40	0.68	1.09	2.58	**0.88**	**0.60**	2.31	0.65	**0.81**	2.61	**0.66**
K_2	0.45	1.20	0.38	0.47	1.89	0.59	0.96	2.55	0.66	1.07	2.73	0.82	0.56	2.26	0.66	0.78	2.47	0.64
K_3	0.45	1.20	0.38	0.47	1.78	0.60	0.96	2.53	0.66	1.07	2.72	0.81	0.56	2.29	**0.66**	0.78	2.43	0.64
P_1	0.47	1.24	0.26	0.47	1.78	0.60	**1.09**	**2.81**	**0.72**	**1.20**	**3.12**	0.85	0.57	2.25	0.66	0.86	2.41	0.64
P_2	0.42	1.88	0.46	0.44	**2.28**	**0.66**	0.95	2.38	0.67	1.09	2.63	0.84	0.59	**2.78**	0.51	0.75	**2.85**	0.54
B_1	0.43	**1.85**	0.43	0.43	2.23	0.58	0.94	2.18	0.66	1.06	2.35	0.83	0.57	2.66	0.44	0.62	2.68	0.53
B_2	0.44	1.60	**0.47**	0.43	1.94	0.62	0.96	2.43	0.65	1.07	2.69	0.79	0.41	2.22	0.40	0.57	2.45	0.50



Şekil 66. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)



Şekil 67. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)

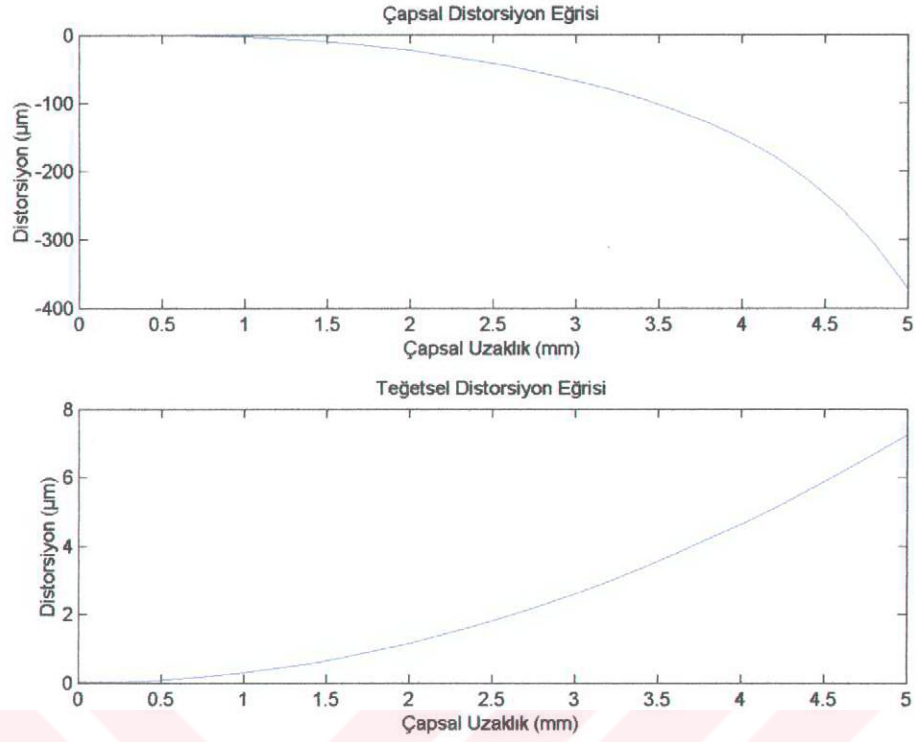


Şekil 68. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)

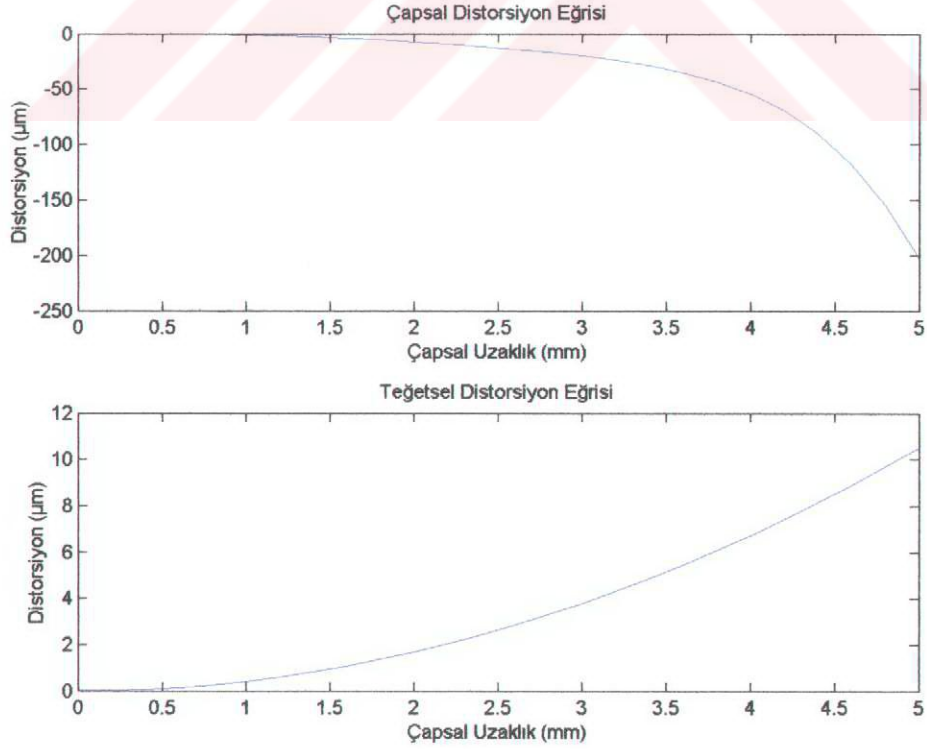
50 mm mercek kullanılarak yapılan çözümde bütün kombinasyonlarda ortaya çıkan sonuçlarda, yine y ekseni (derinlik) yönündeki hata miktarının diğer yönlere göre daha büyük olduğu tespit edilmiştir. İstasyon sayılarına göre irdeleme yapıldığında beklendiği gibi 5'li konvergent alım daha iyi sonuç vermektedir. 3 ve 5 istasyonlu çekimle elde edilen değerler arasında anlamlı bir fark gözükmemektedir (Tablo 14). 5'li konvergent alımda x, y ve z yönündeki max konum hataları sırasıyla 1.09 mm, 2.81 mm ve 0.72 mm'dir. 3'lü konvergent alımda ise bu miktarlar sırasıyla 1.20 mm, 3.12 mm ve 0.88 mm'dir (Şekil 66-68). Kontrol nokta sayısının doğruluğa etkisi incelendiğinde, 5 denetleme noktalı çözümün daha duyarlıklı sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Işın demetleri metodu ile 24 ve 50 mm mercekler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında 24 mm mercek ile elde edilen sonuçların daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

24 ve 50 mm'lik mercekler için, İlave Parametreli Işın Demetleri metodu ile her bir ilave parametre değeri için hesaplanan çapsal ve teğetsel distorsiyon değerlerine ait max etkiyi gösteren grafikler sırasıyla Şekil 69-70'de gösterilmektedir.

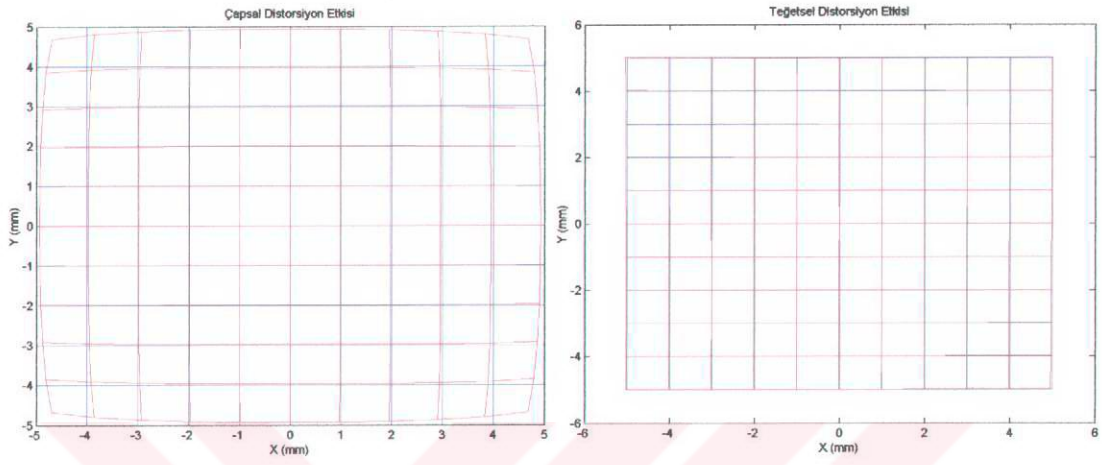


Şekil 69. 24 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)

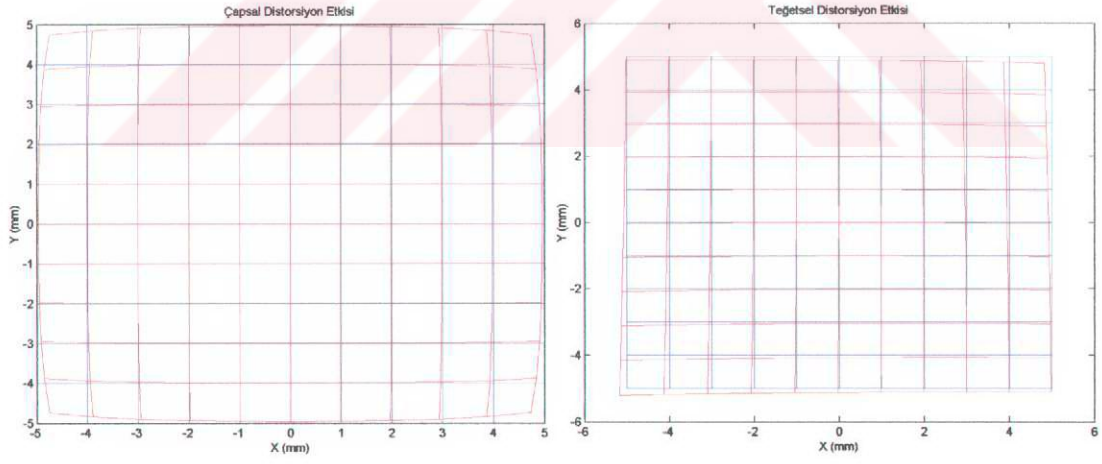


Şekil 70. 50 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)

Şekil 69-70 incelendiğinde, çapsal distorsiyon etkisinin 24 mm'lik mercekte daha fazla olduğu, teğetsel distorsiyon etkisinin ise her iki mercek için yaklaşık aynı düzeyde olduğu görülmektedir. Global olarak resim yüzeyi üzerindeki distorsiyon etkilerine bakıldığında aynı paralellikte bir etkinin olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 71-72).

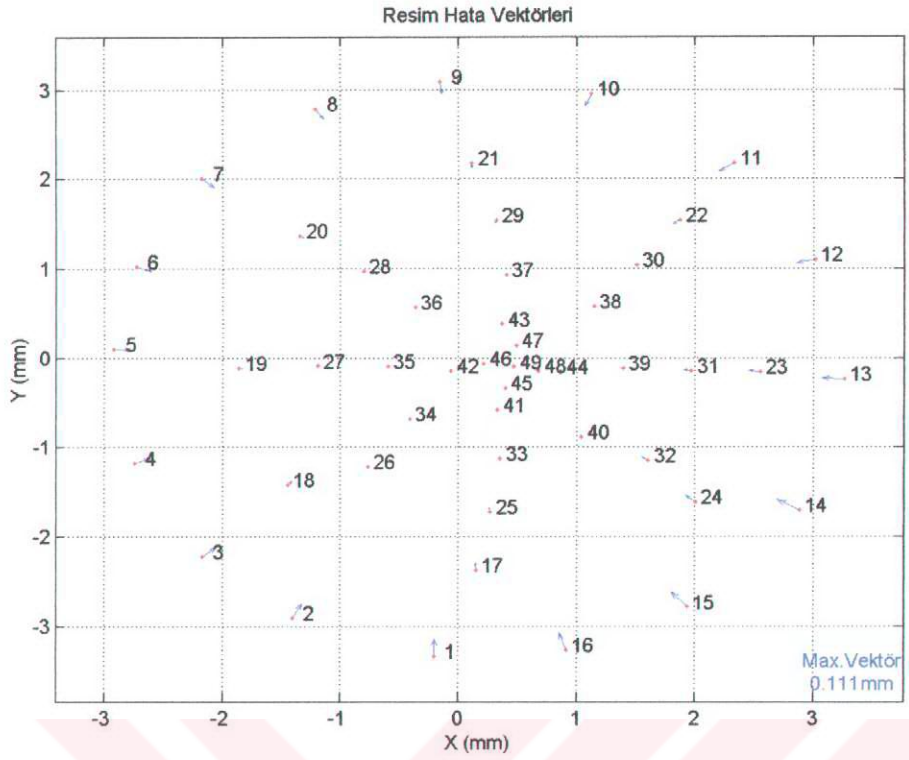


Şekil 71. 24 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)

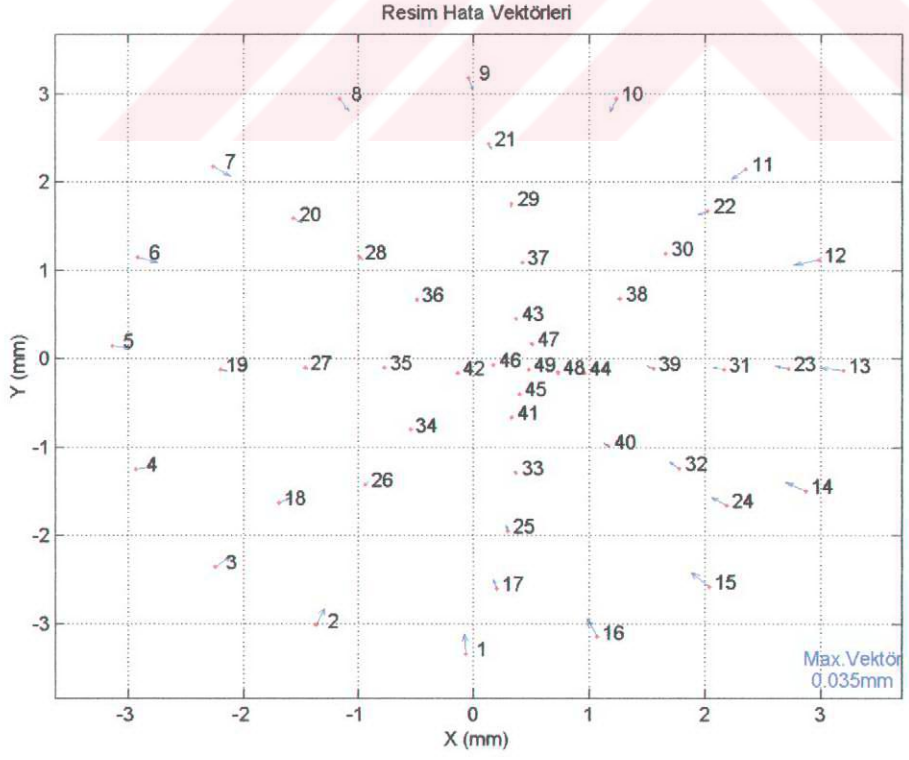


Şekil 72. 50 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Nikon E2)

Her iki mercek (24 ve 50 mm) için her bir resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Bu grafikler max etkiyi gösterecek biçimde sırası ile Şekil 71-72'de gösterilmektedir.



Şekil 73. 24 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Nikon E2)



Şekil 74. 50 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Nikon E2)

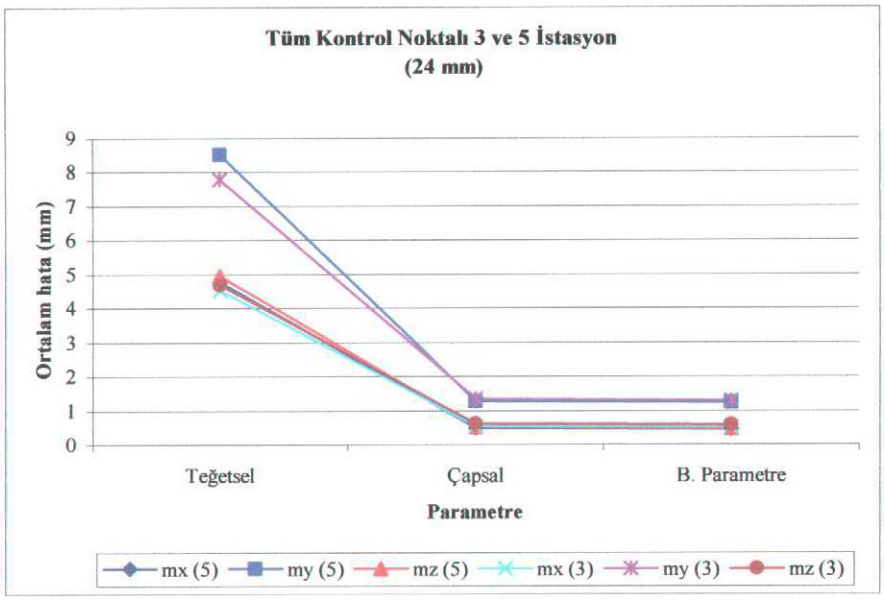
Test alanındaki bütün noktaların kontrol noktası olarak kullanıldığı çözümde her bir resim için bütün noktalardaki resim hata vektörleri hesaplanmıştır. Bu hata vektörlerinden max etkiyi gösteren grafikler her iki mercek için çizdirilmiştir (Şekil 73-74).

Her iki mercek için hata vektör büyüklükleri incelendiğinde bütün noktalarda belirlenen hatalar 24 mm mercekli çözümde 50 mm mercekli çözümden kısmen daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Distorsiyon parametrelerinin etkilerinin hata vektör büyüklükleri üzerinde de etkisini gösterdiği açıkça görülmektedir (Şekil 73-74). Söz konusu durum bu metot için sadece kontrol noktalarının tümünün kullanıldığı çözüm için geçerli olmaktadır. Ancak denetleme noktalı çözümlerde 50 mm ile yapılan çözümler daha kaba sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

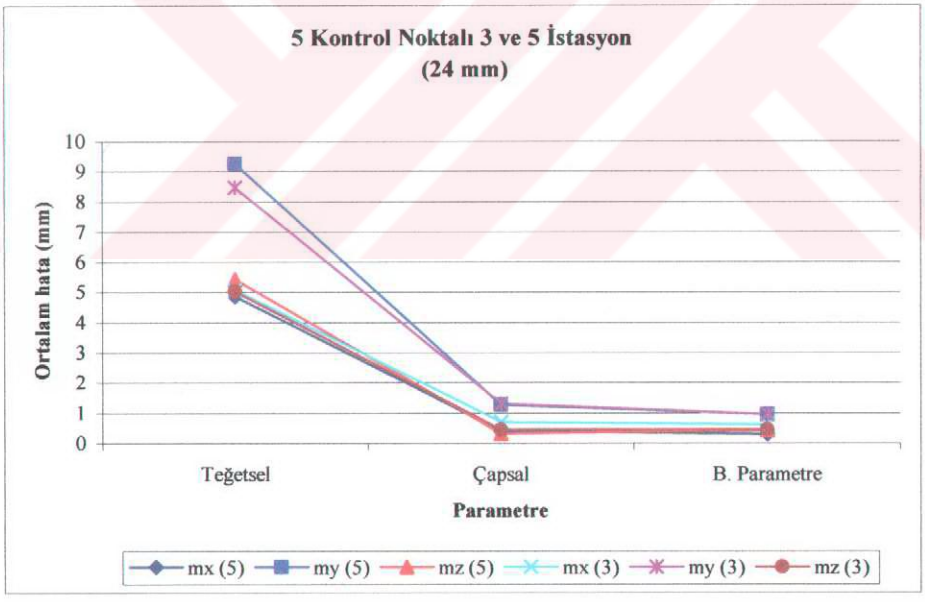
c) BLUH Metodu Bulguları: BLUH metodunda da DLT ve Işın Demetleri metotlarında olduğu gibi iki farklı mercekle çalışılmıştır. 24 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 75-78). 3 ve 5 istasyon noktalı 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama hatalar ayrıca Tablo 15'de verilmektedir.

Tablo 15. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)

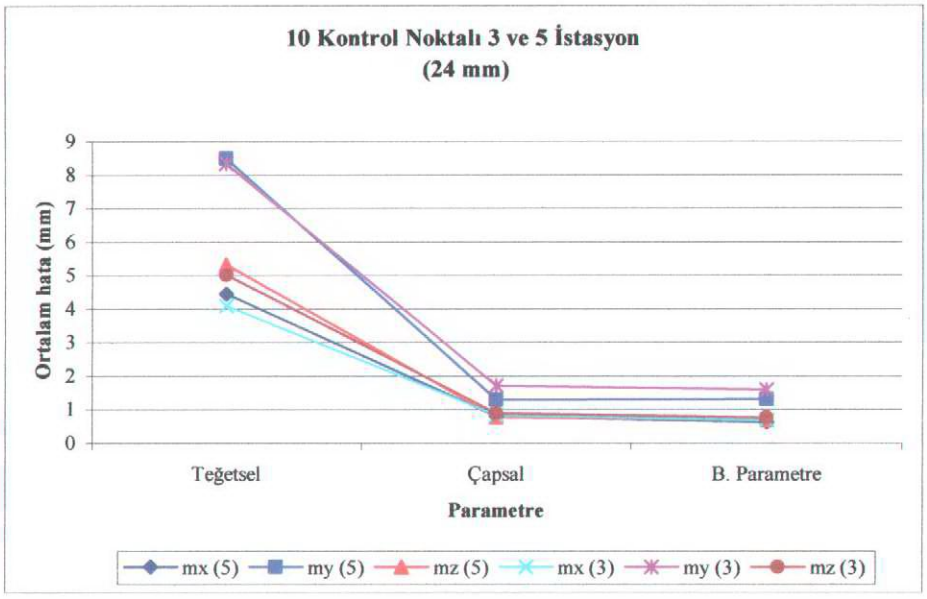
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	0.30	0.96	**0.42**	0.61	0.95	0.44	0.64	**1.32**	0.68	0.68	1.60	0.76	**0.45**	**1.46**	0.57	**0.54**	**1.49**	0.60
Çapsal	**0.40**	**1.27**	0.32	**0.70**	**1.31**	**0.44**	**0.80**	1.30	**0.78**	**0.83**	**1.71**	**0.89**	0.44	1.31	**0.68**	0.49	1.34	**0.82**
Teğetsel	4.86	9.26	5.42	5.08	8.49	5.03	4.46	8.49	5.33	4.10	8.34	5.02	5.14	8.45	4.57	4.87	7.92	4.26



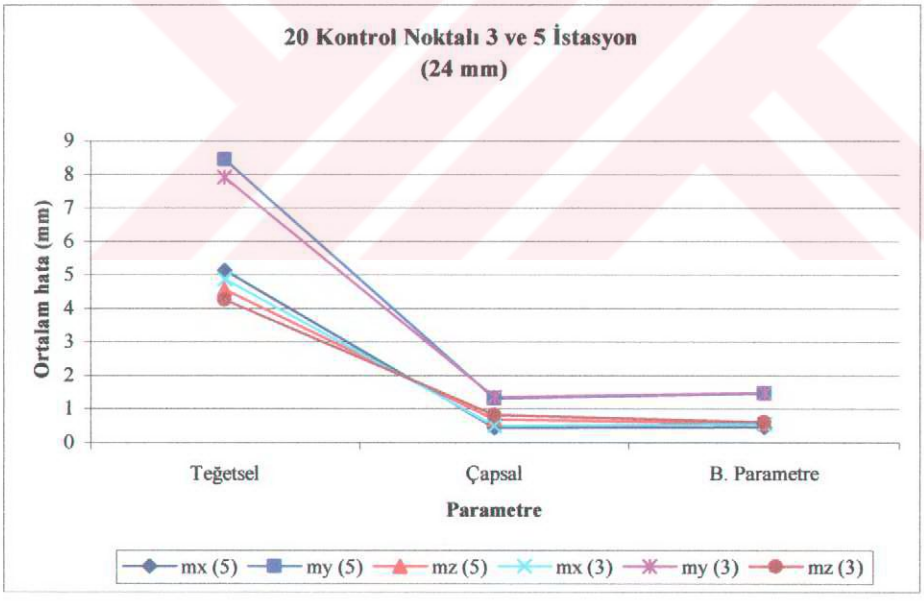
Şekil 75. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Işın Demet., 24 mm)



Şekil 76. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)



Şekil 77. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)



Şekil 78. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)

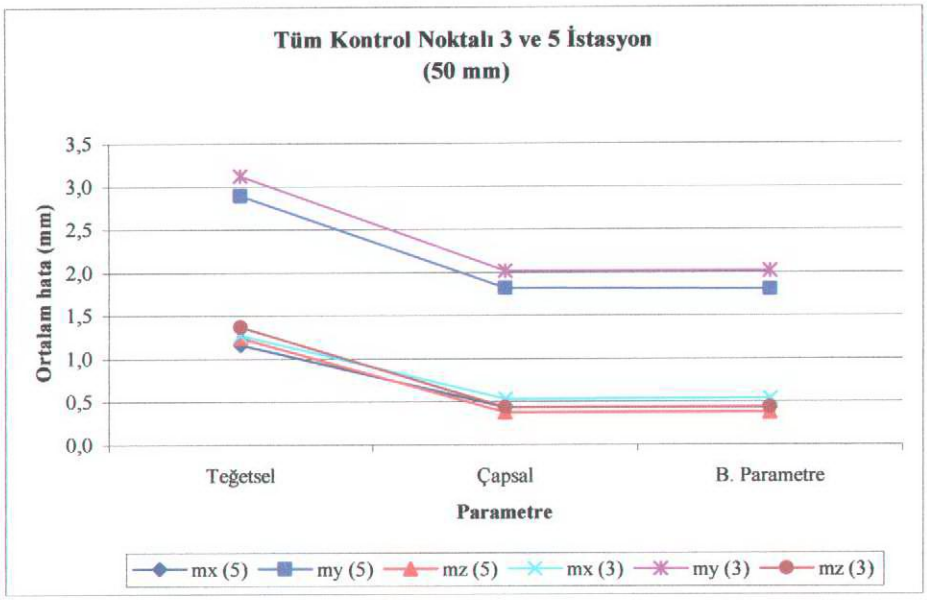
BLUH metodunda da 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu belirlenmiştir (Tablo 15). İstasyon sayılarına göre irdeleme yapıldığında, 5 istasyonlu çekimin daha iyi sonuç verdiği

görülmektedir. Ancak 3 ve 5 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında x ve z yönünde fark olmasına rağmen y yönünde belirgin bir fark gözlenmemektedir. Tüm parametre ve çapsal distorsiyonların etkisi dikkate alındığı çözümde, bu parametre gruplarının sonucu fazla etkilemediği gözlenmiştir. Ancak sadece teğetsel distorsiyonu içeren parametreler kullanılarak yapılan çözümde, x, y ve z yönündeki ortalama hata miktarının çok büyüdüğü görülmektedir (Tablo 15). Teğetsel distorsiyon katsayıları kullanılarak yapılan çözüm dikkate alınmaksızın, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.80 mm, 1.46 mm ve 0.78 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.83 mm, 1.71 mm ve 0.89 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 15, Şekil 75-78).

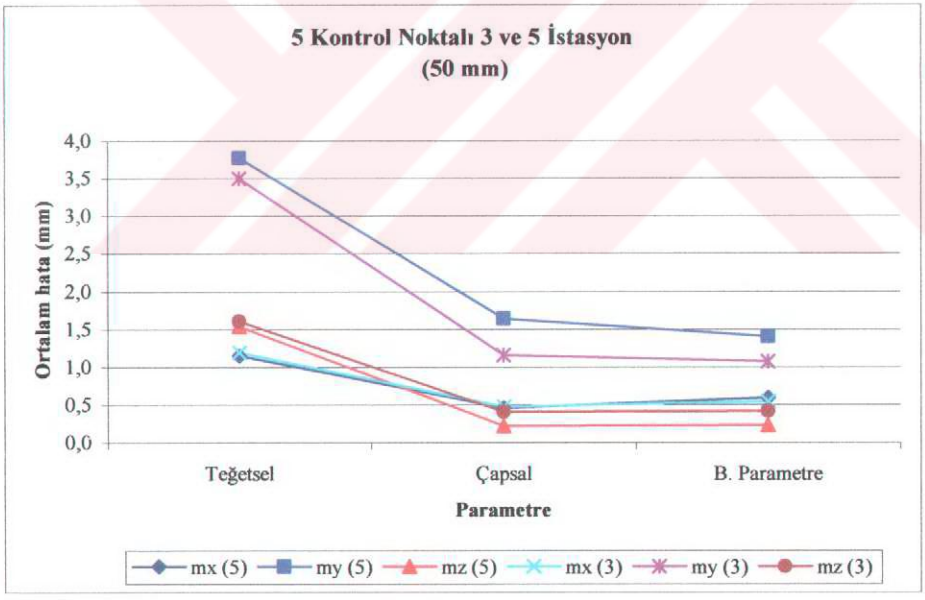
50 mm mercek için de aynı işlemler yapılmıştır (Şekil 79-82, Tablo 16).

Tablo 16. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)

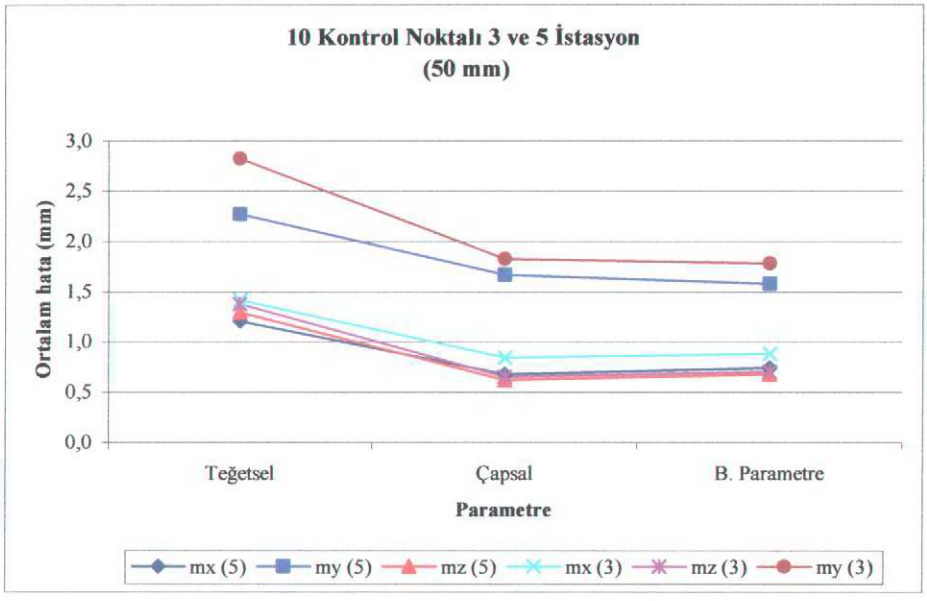
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	**0.60**	1.41	**0.23**	**0.54**	1.07	**0.41**	**0.74**	1.58	**0.68**	**0.88**	1.78	**0.71**	**0.74**	**2.04**	**0.45**	0.83	**2.21**	0.50
Çapsal	0.45	**1.64**	0.22	0.47	**1.16**	0.40	0.68	**1.67**	0.62	0.84	**1.83**	0.65	0.68	1.99	0.43	**0.86**	2.16	**0.51**
Teğetsel	1.15	3.77	1.54	1.19	3.50	1.61	1.20	2.27	1.29	1.42	2.82	1.38	1.80	3.91	1.37	1.83	4.34	1.49



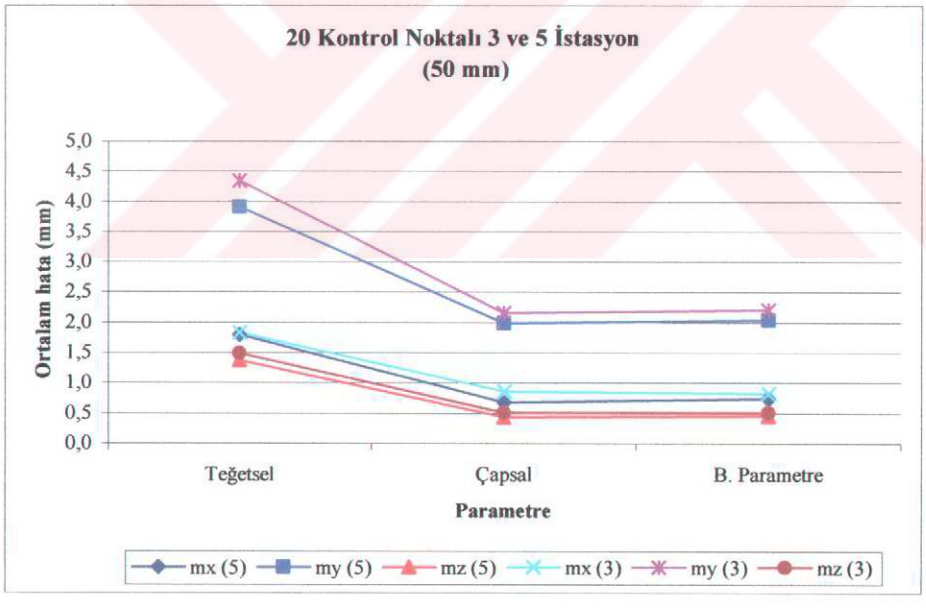
Şekil 79. 3ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Işın Demet., 50 mm)



Şekil 80. 3ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)



Şekil 81. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)

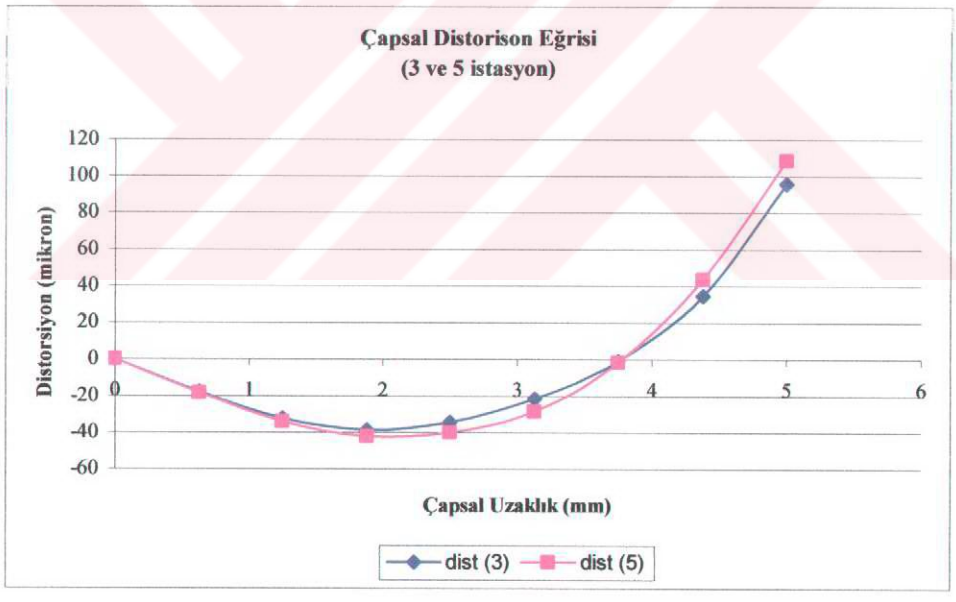


Şekil 82. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)

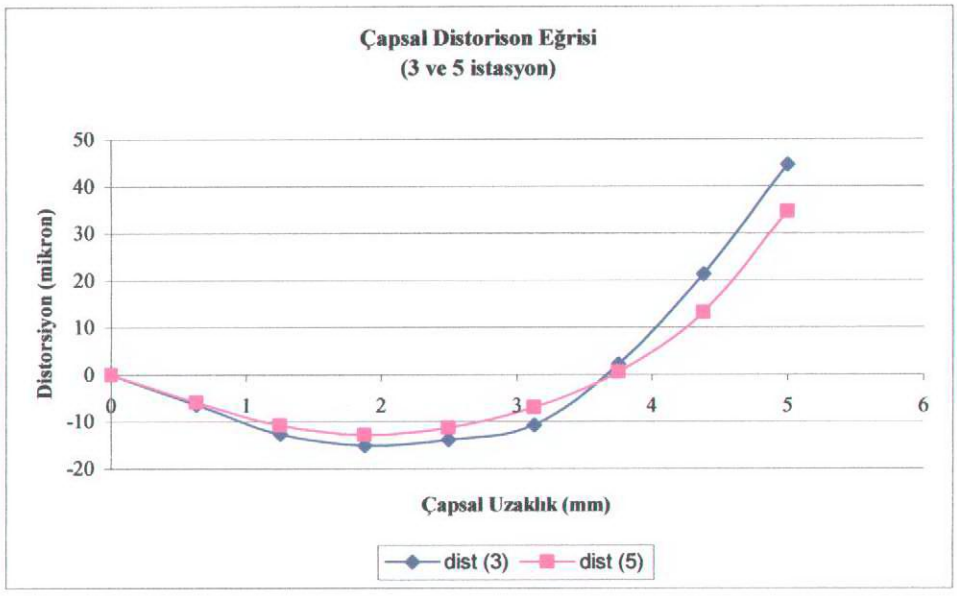
50 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 16). İstasyon sayılarına göre irdeleme yapıldığında, 3 ve 5 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında x, y ve z

yönünde belirgin bir fark gözlenmemektedir. Tüm parametre ve çapsal distorsiyon etkisinin dikkate alındığı çözüm sonuçları arasında önemli bir fark yoktur. Ancak sadece teğetsel distorsiyonu içeren parametreler kullanılarak yapılan çözümde x, y ve z yönündeki ortalama hata miktarının çok büyüdüğü görülmektedir (Tablo 16). Genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.74 mm, 2.04 mm ve 0.68 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.88 mm, 2.21 mm ve 0.71 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında farklı sayıda denetleme noktalı çözümler arasında belirgin bir fark olmadığı, ancak 5 denetleme noktalı çözümün daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir (Tablo 16, Şekil 79-82).

24 mm ve 50 mm'lik mercekler için, BLUH metodu ile 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda çapsal distorsiyon eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğriler sırasıyla Şekil 83-84'de gösterilmektedir.

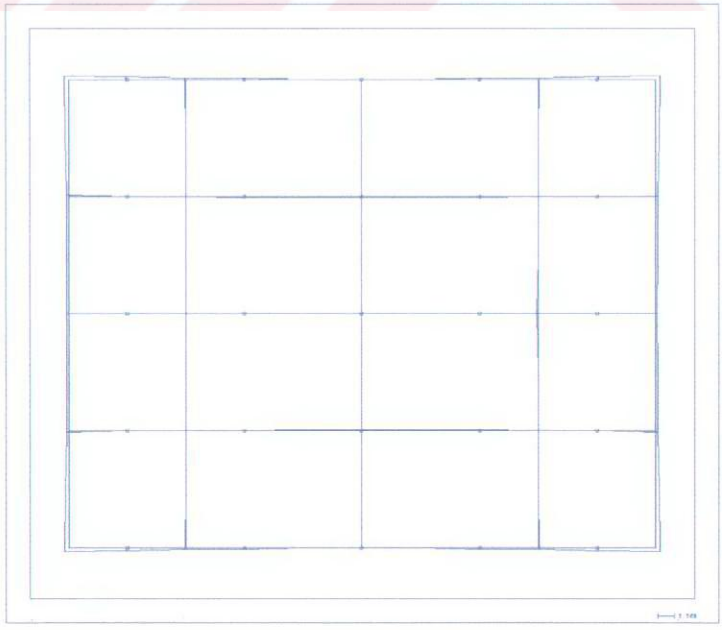


Şekil 83. 24 mm mercek için çapsal distorsiyon (3 ve 5 istasyonlu)

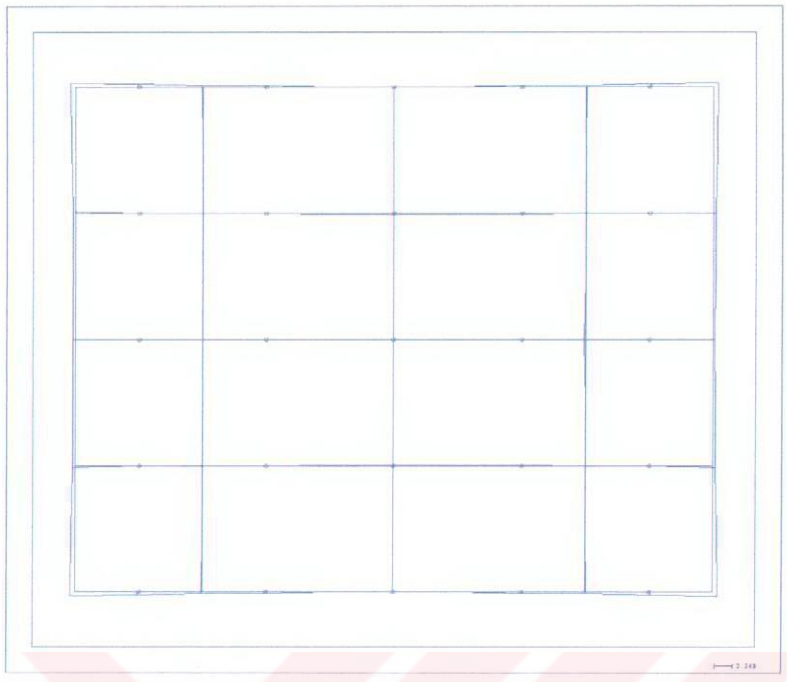


Şekil 84. 50 mm mercek için çapsal distorsiyon (3 ve 5 istasyonlu)

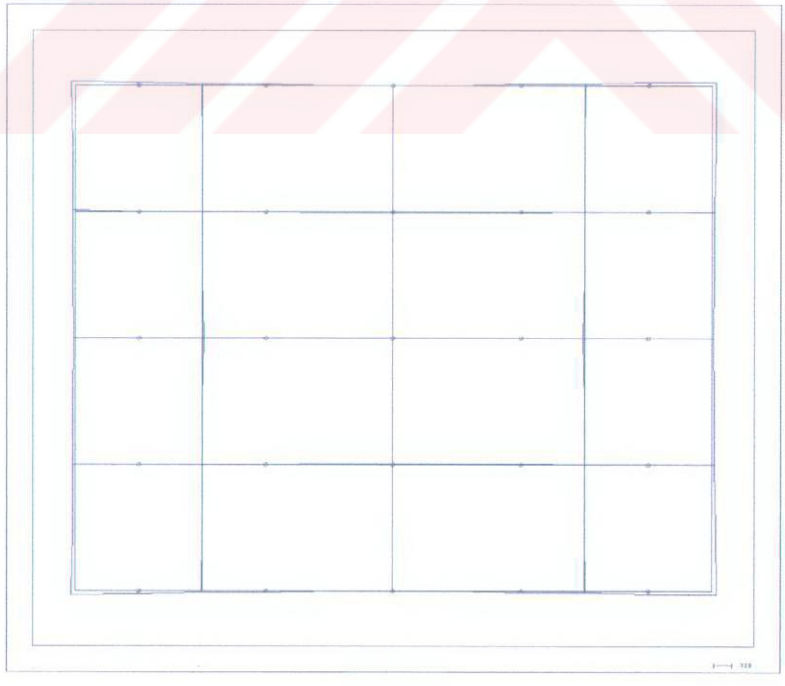
Şekil 83 ve 84 incelendiğinde, BLUH metodunda 3 ve 5 istasyonlu çekim ile elde edilen distorsiyon (çapsal) eğrilerinin ve büyüklüklerinin aynı karakterde olduğu ve birbirleri ile örtüştüğü gözlenmektedir. Bu durum nokta konum hatalarının büyüklüklerinin birbirine yakın olmasının bir göstergesidir.



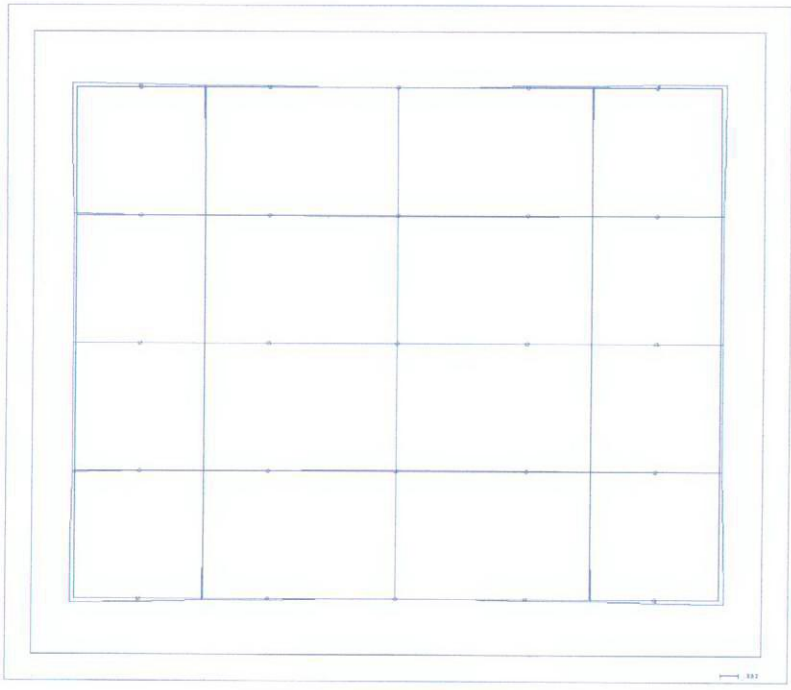
Şekil 85. 24 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 5 istasyonlu ve tüm parametreli)



Şekil 86. 24 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 3 istasyonlu ve tüm parametreli)



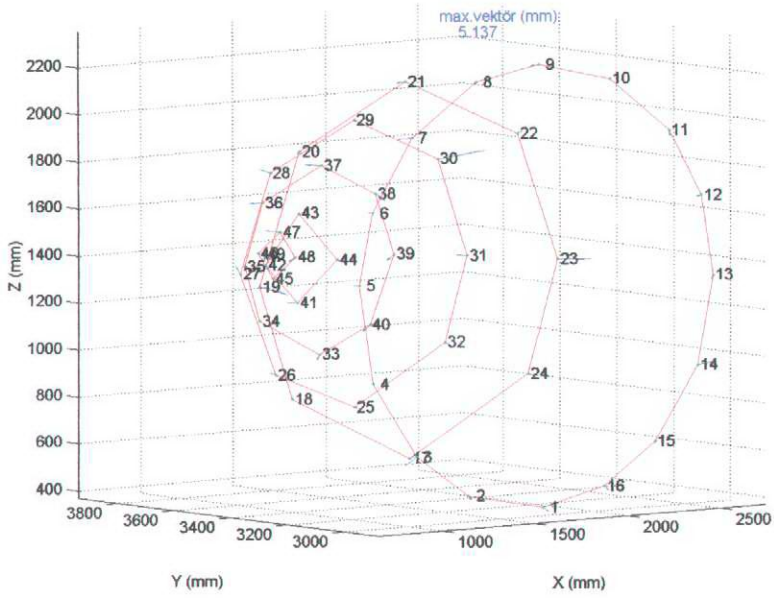
Şekil 87. 50 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 5 istasyonlu ve tüm parametreli)



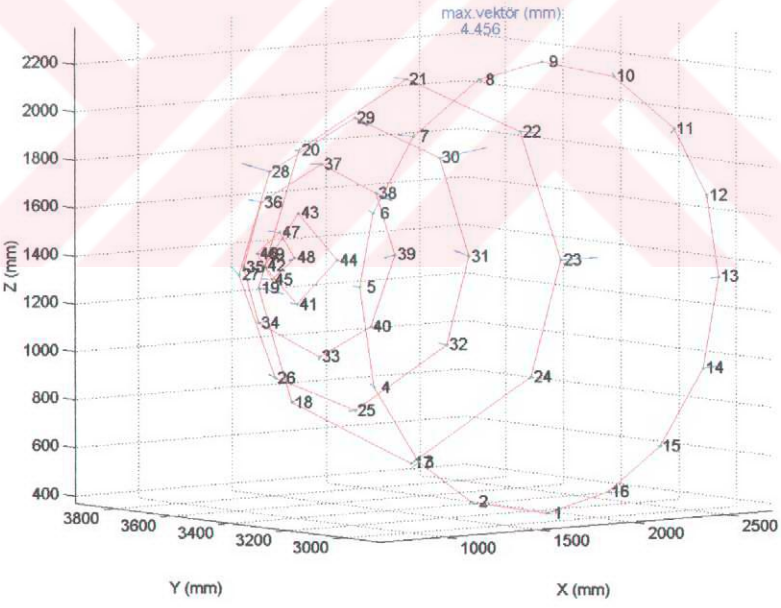
Şekil 88. 50 mm mercek için global distorsiyon (çapsal ve teğetsel, 3 istasyonlu ve tüm parametreli)

Her iki mercek (24 ve 50 mm) için, 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda her bir parametre setine ait resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Bu grafikler Şekil 85-88'de gösterilmektedir. Bu metotta resim hata vektörleri ile global distorsiyonlar aynı grafikte gösterilmektedir. 24 mm mercek kullanıldığında, Şekil 85-86'dan global distorsiyonun 3 ve 5 istasyonlu çekim için aynı büyüklükte olduğu gözlenmektedir. 50 mm mercek için de aynı durum söz konusudur.

3 ve 5 istasyonlu çekimler için obje uzayındaki noktalara ait hata vektörleri belirlenmiştir. 24 ve 50 mm'lik mercekler için her iki istasyon sayısına göre çizdirilen hata grafikleri sırasıyla Şekil 89-92'de gösterilmektedir.

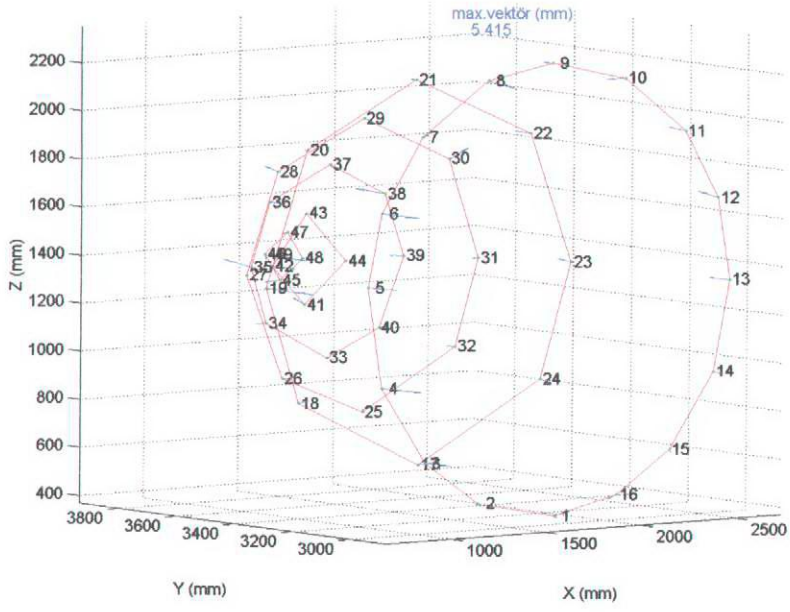


Şekil 89. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 istasyon, Bluh, Nikon E2)

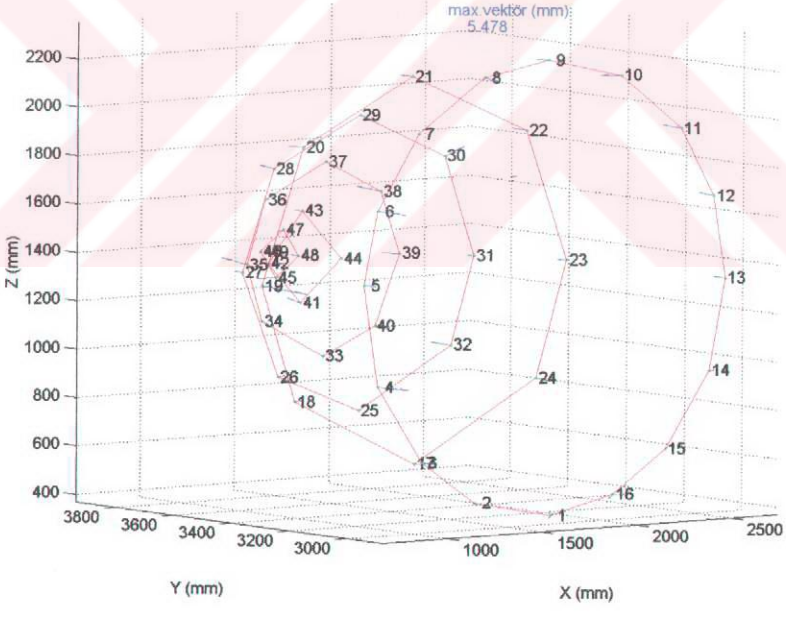


Şekil 90. 24 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, Bluh, Nikon E2)

Şekil 89 ve 90 incelendiğinde bütün noktalar için hesaplanan nokta konum hatası vektörleri 3 ve 5 istasyonlu çekimler için belirlenmiştir. 5 istasyonlu çekimde 3 istasyona göre daha iyi konum doğruluğu elde edilmiştir.



Şekil 91. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (3 istasyon, Bluh, Nikon E2)



Şekil 92. 50 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, Bluh, Nikon E2)

Şekil 91 ve 92'den bütün noktalar için hesaplanan nokta konum hatası vektörleri 3 ve 5 istasyonlu çekimler için belirlenmiştir. 5 ve 3 istasyonlu çekimde elde edilen doğruluk yönünden önemli bir fark gözlenmemektedir. Obje uzayında her iki mercekle hesaplanan

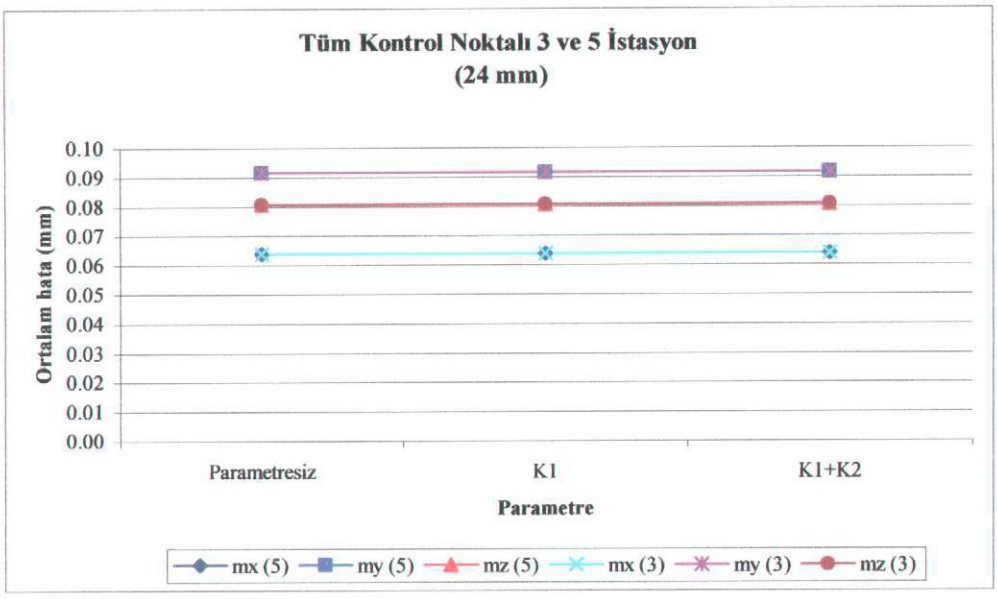
nokta konum doğrulukları arasında belirgin fark olmadığı tespit edilmiş olup, ancak kısmen 24 mm mercek ile daha iyi konum hataları elde edilmiştir.

d) Elcovision 10 Metodu Bulguları: Bu metotta da yine DLT , Işın Demetleri ve BLUH metotlarında olduğu gibi iki farklı mercekle çalışılmıştır. Kullanılan parametre sayısı K_1 ve K_2 çapsal distorisyon katsayıları ile sınırlıdır.

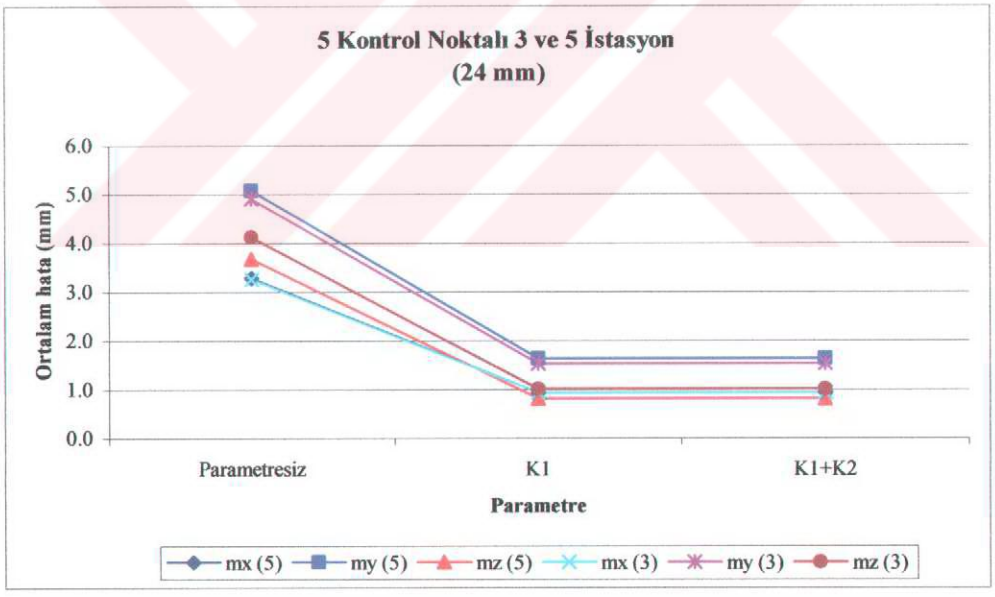
24 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 93-96). 3 ve 5 istasyon noktalı 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 17'de gösterilmektedir.

Tablo 17. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 24 mm)

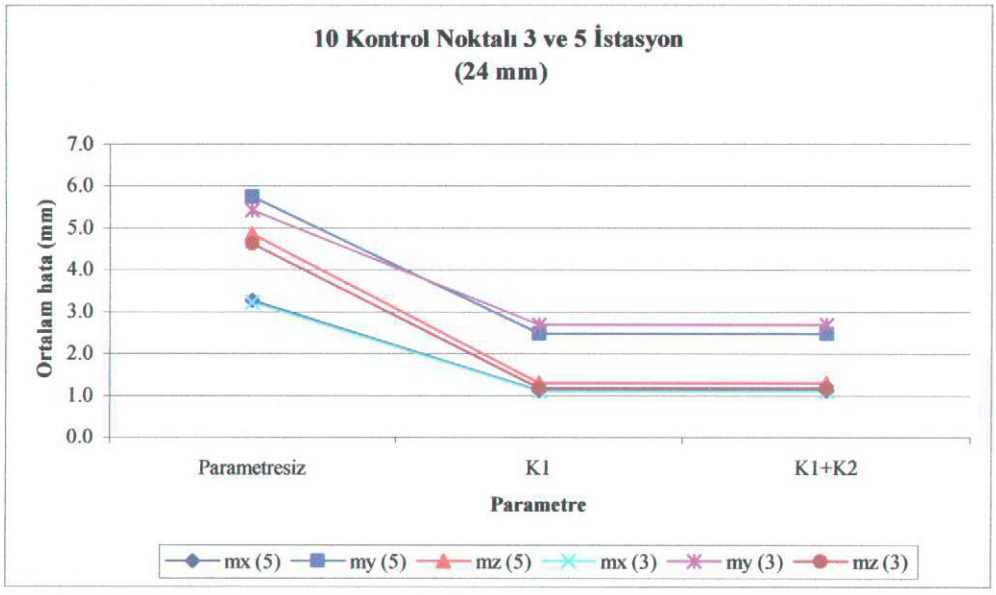
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Parametresiz	3.29	5.08	3.68	3.28	4.92	4.13	3.28	5.74	4.86	3.23	5.43	4.64	4.11	6.68	4.18	4.02	6.74	4.03
K_1	0.92	1.63	0.81	0.94	1.54	1.01	1.11	2.47	1.30	1.10	2.68	1.17	1.17	1.96	1.20	1.18	1.98	1.12
K_1+K_2	0.92	1.63	0.81	0.94	1.54	1.01	1.11	2.47	1.30	1.10	2.68	1.17	1.17	1.96	1.20	1.18	1.98	1.12



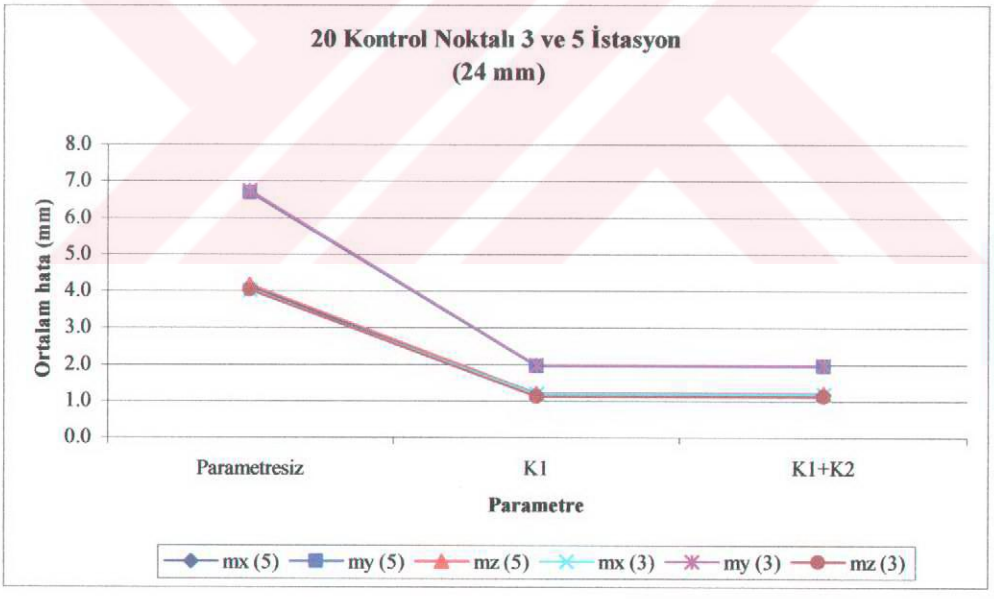
Şekil 93. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Elcovision, 24 mm)



Şekil 94. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm)



Şekil 95. 3ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm)



Şekil 96. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm)

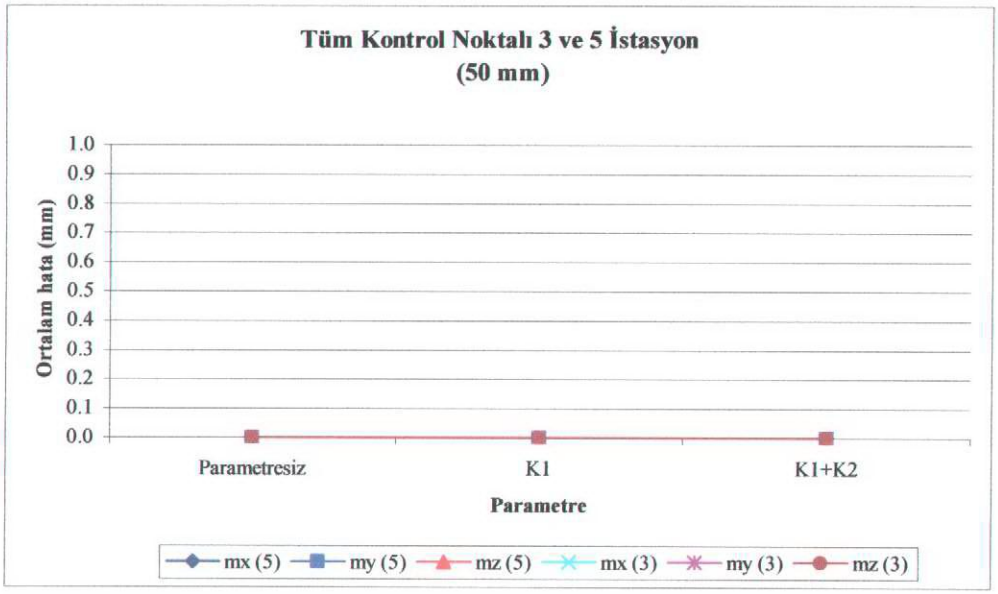
Elcovision 10 metodunda da 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 17). İstasyon sayılarına göre irdeleme yapıldığında, 5 istasyonlu

çekimin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak 3 ve 5 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında x, y ve z yönünde önemli bir fark olmamaktadır. Parametresiz çözümde nokta konum doğrulukları her üç eksen yönünde büyük sıçrama göstermektedir. Ancak yalnızca çapsal distorsiyonun 1. veya 1+2. teriminin birlikte kullanılması durumunda, konum doğrulukları aynı seviyede kalmaktadır. Parametresiz çözümü dikkate almaksızın, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.17 mm, 2.47 mm ve 1.30 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.18 mm, 2.68 mm ve 1.17 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında, en iyi sonuç 5 denetleme noktalı çözümde elde edildiği görülmektedir (Tablo 17, Şekil 93-96).

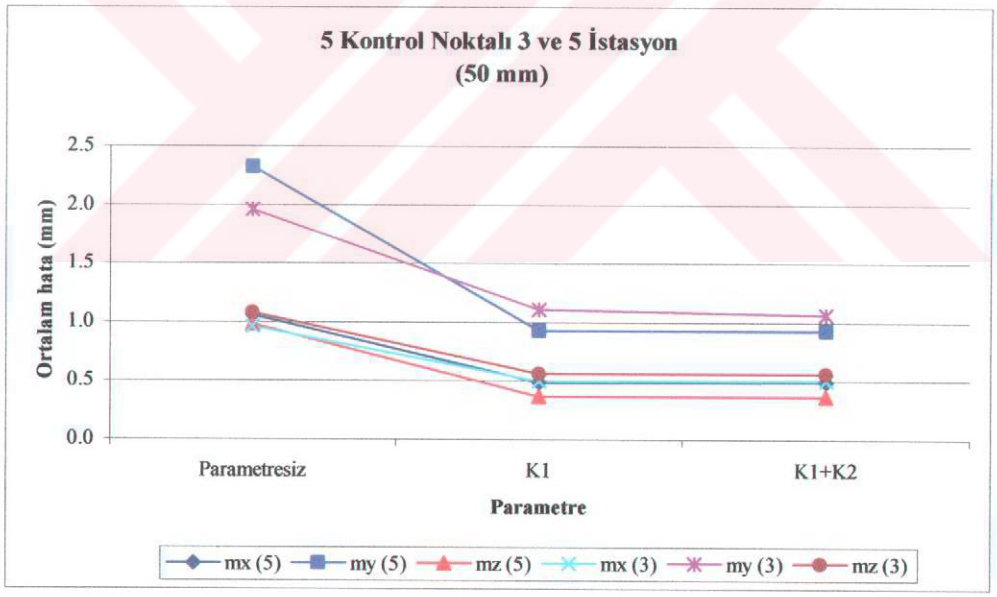
50 mm mercek ile aynı işlemler yapılmış olup ve ilgili sonuçlar Şekil 97-100 ve Tablo 18'de gösterilmektedir.

Tablo 18. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 50 mm)

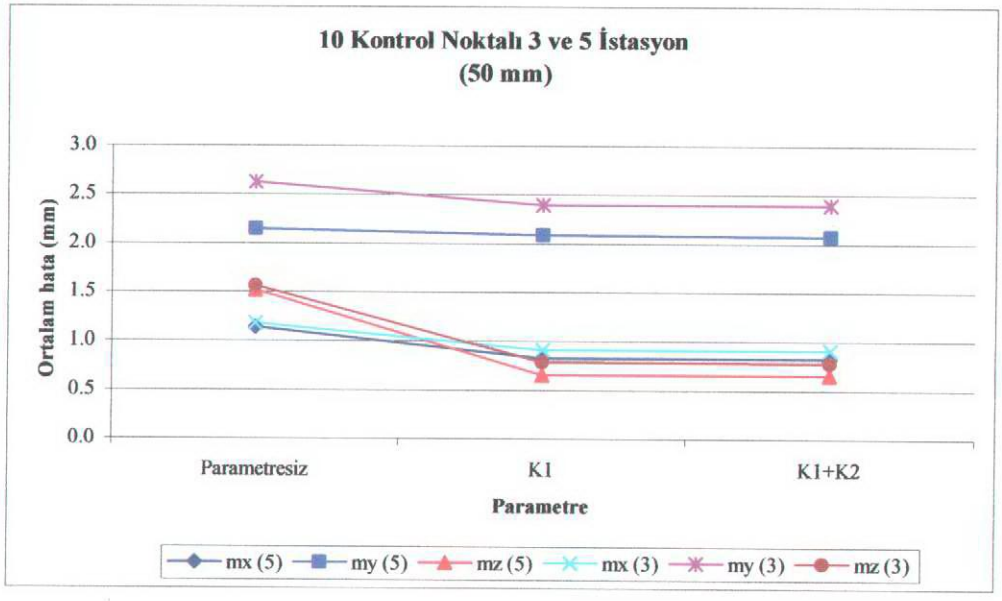
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						20 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon			5 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Parametresiz	1.06	2.32	0.98	0.96	1.96	1.08	1.14	2.15	1.52	1.18	2.63	1.56	1.48	3.42	1.47	1.54	3.76	1.52
K_1	0.49	0.93	0.37	0.50	1.11	0.56	0.83	2.09	0.66	0.91	2.40	0.78	0.62	2.13	0.70	0.71	2.44	0.73
K_1+K_2	0.49	0.93	0.36	0.50	1.06	0.56	0.82	2.08	0.65	0.91	2.40	0.78	0.62	2.13	0.70	0.72	2.44	0.73



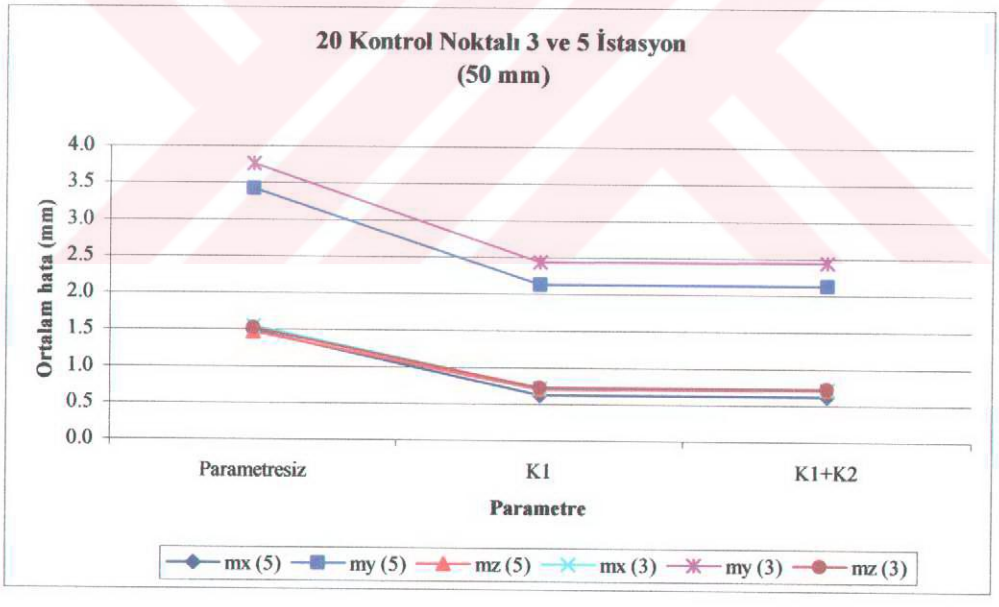
Şekil 97. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (49 kontrol noktalı, Elcovision, 50 mm)



Şekil 98. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm)



Şekil 99. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm)



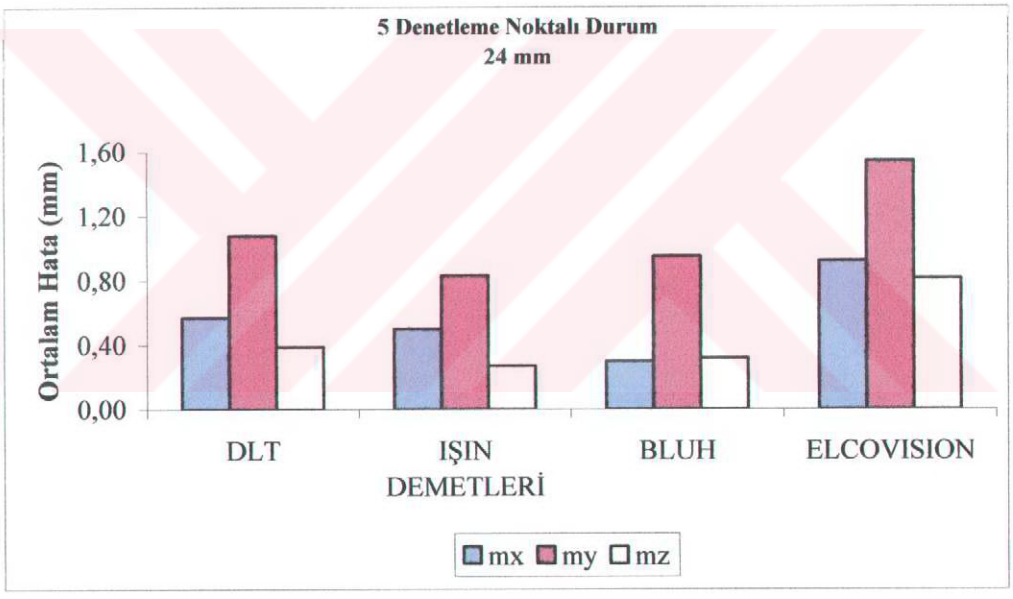
Şekil 100. 3 ve 5 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm)

50 mm mercekte de 24 mm mercekte olduğu gibi, bütün değerlendirme kriterlerine göre aynı sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir. Parametresiz çözümü dikkate almaksızın, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.83 mm, 2.13 mm ve 0.70 mm olmuştur. Aynı şekilde 3 istasyonlu çözümde x, y

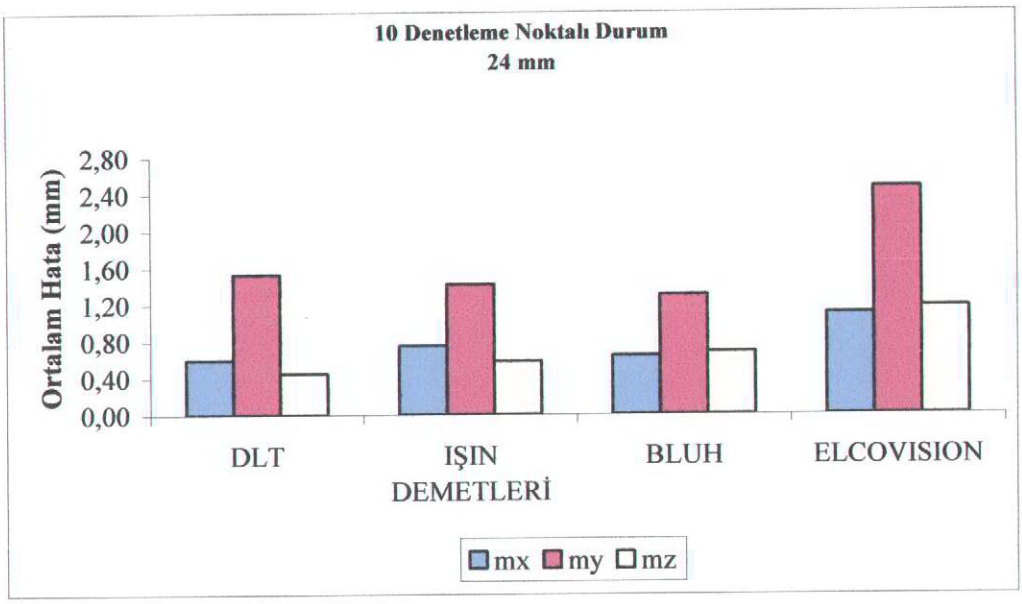
ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.91 mm, 2.40 mm ve 0.78 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında denetleme sayısı arttıkça konum hatasında büyüme olduğu gözlenmektedir (Tablo 18, Şekil 97-100).

Elcovision yönteminde, 24 ve 50 mm mercek ile elde edilen konum hataları irdelendiğinde 50 mm'lik mercekle hesaplanan konum doğruluklarının daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

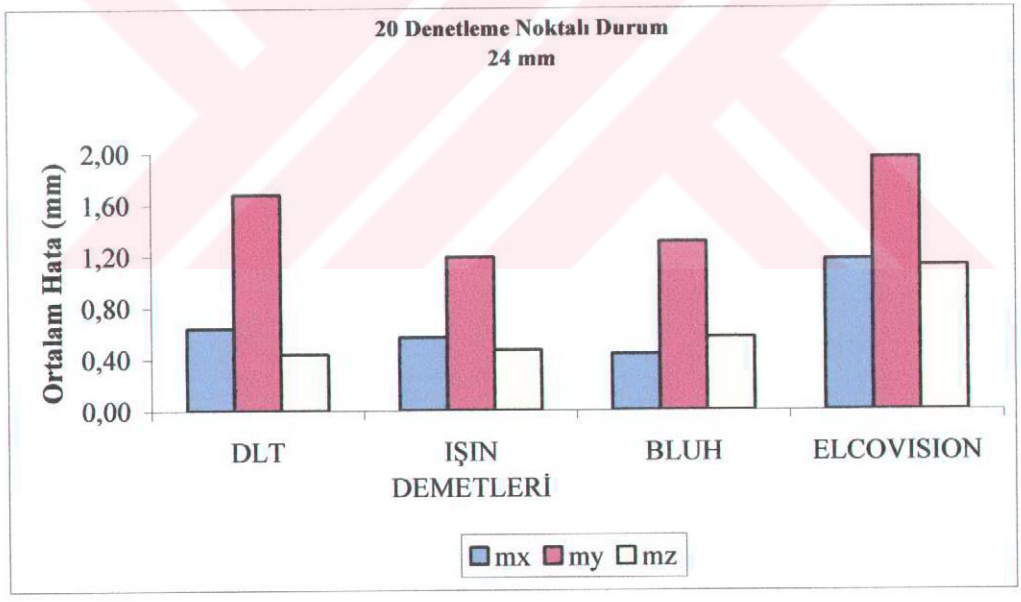
Test Alanı 1'de kullanılan dört farklı matematik modelle elde edilen doğruluk değerlerinin karşılaştırılması amacıyla, 24 mm mercek ile bu metotlar kullanılarak hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 101-103 grafiklerinde gösterilmektedir. Bu grafiklerde yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.



Şekil 101. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)

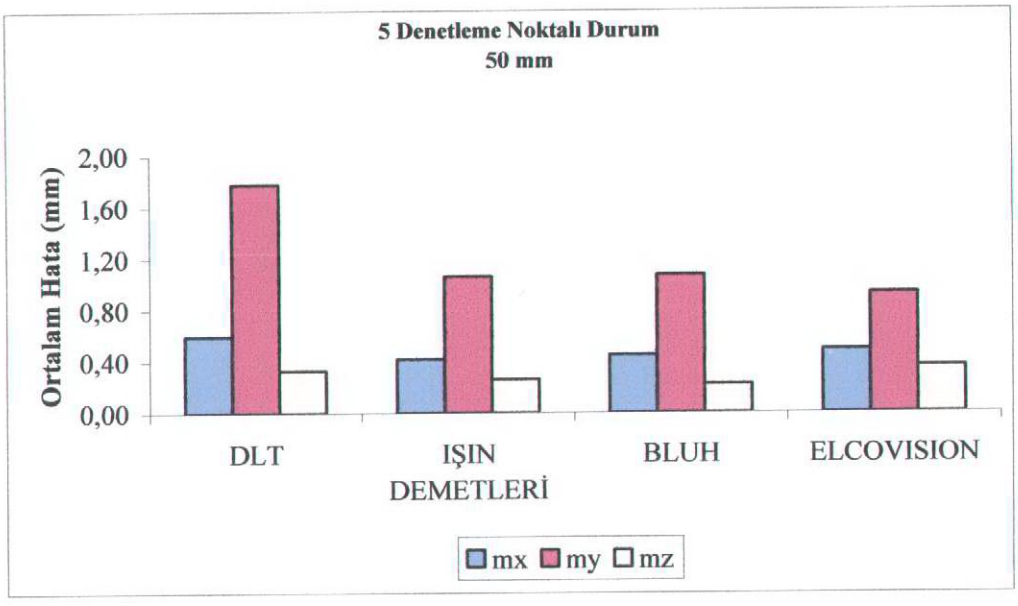


Şekil 102. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)

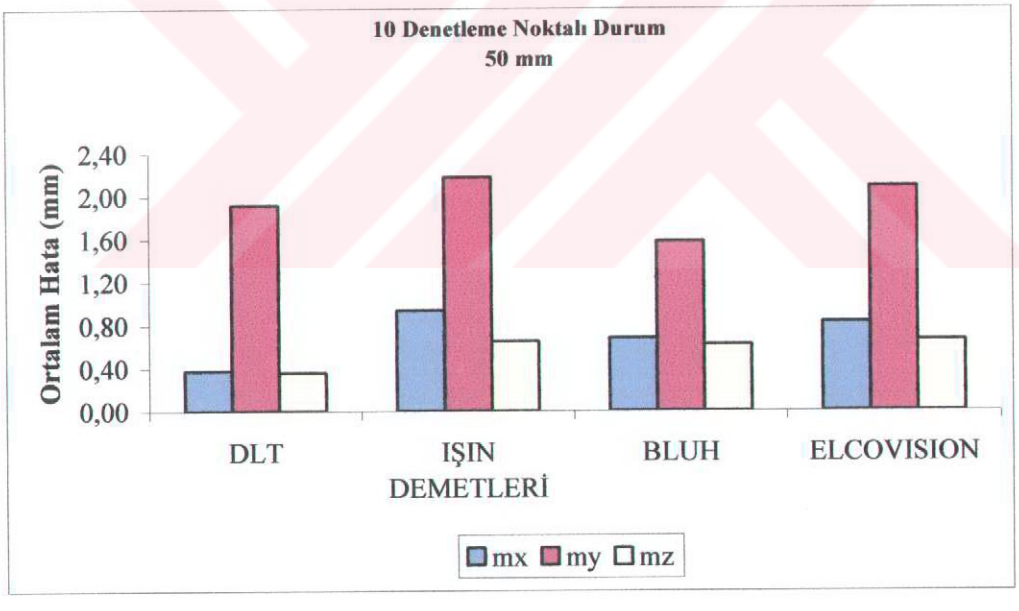


Şekil 103. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 24 mm)

Şekil 101-103 incelendiğinde bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre, Işın Demetleri ve Bluh matematik modelleri daha duyarlıklı sonuç verdikleri görülmektedir. Ancak, genel olarak kullanılan bütün metotlarla ortaya çıkarılan sonuçlar arasında önemli bir fark gözlenmemektedir.

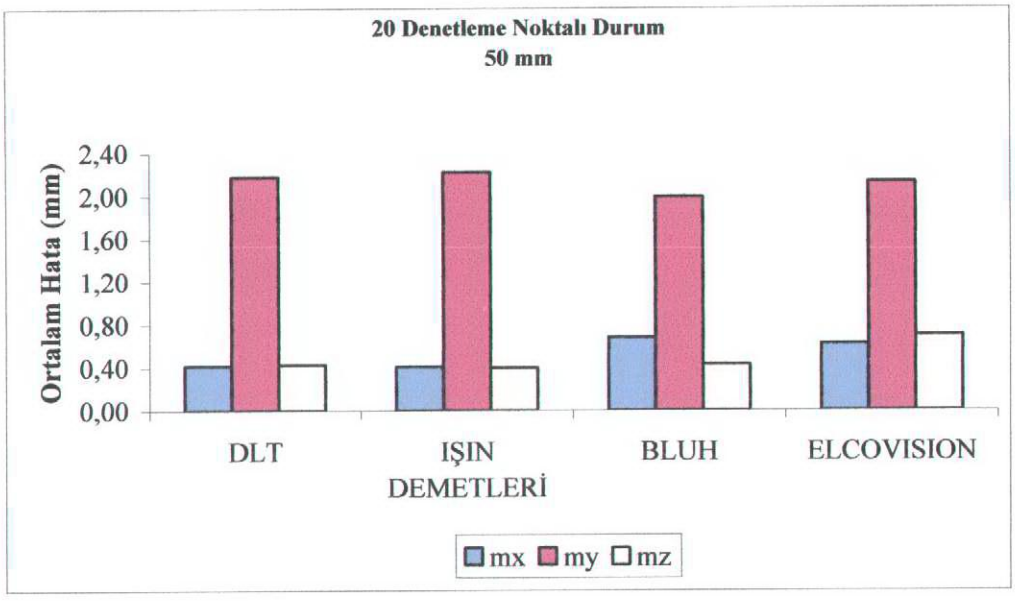


Şekil 104. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)



Şekil 105. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)

Aynı şekilde 50 mm mercek ile bütün metotlar kullanılarak x, y ve z eksenleri yönünde hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 104-106 grafiklerinde gösterilmektedir. Burada da yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.



Şekil 106. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 1, 50 mm)

Şekil 104-106 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarından hesaplanan ortalama hata değeri sonuçlarında metotlar arası bir üstünlük gözükmemekte, ancak özellikle y yönünde bütün metotlara göre hesaplanan ortalama hata değerleri 2.40 mm değerinin altında kalmaktadır. 5 denetleme noktalı durumda en iyi doğruluk Elcovision, 10 denetleme noktalı durumda Bluh ve 20 denetleme noktalı durumda en iyi doğruluk ise DLT metodu ile elde edilmiştir. Bütün metotlarla ortaya çıkarılan sonuçlar arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir.

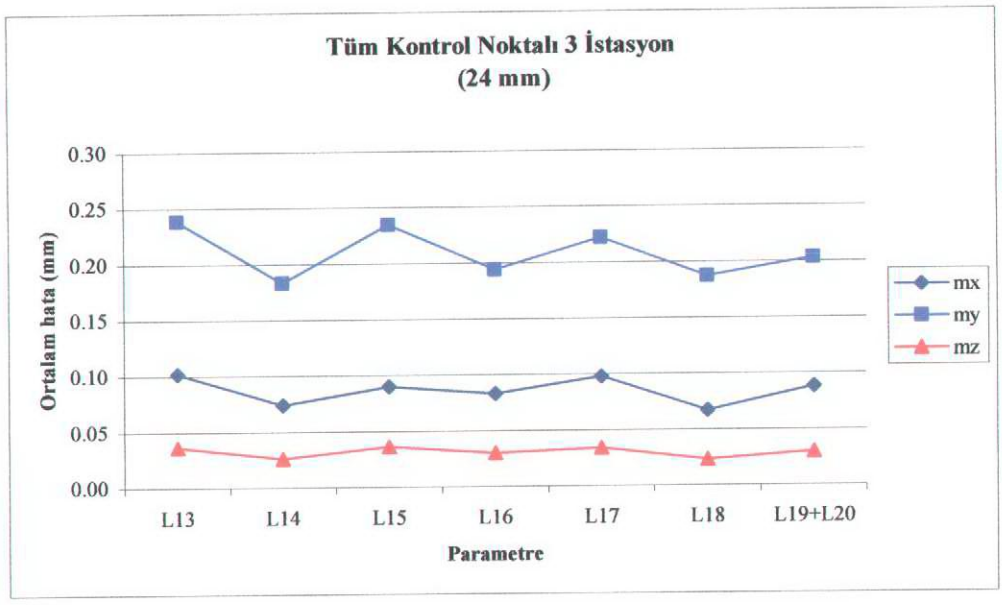
3.2. Nikon E2/E2s Dijital Kamerası Test Alanı 3 Bulguları

Bu kameranın geometrik testi için, KTU Jeodezi Bölümü Fotogrametri Laboratuarındaki testin yanında, seçilen bir bina modeli test alanı (Test Alanı 3) olarak kullanılarak kameranın geometrik potansiyeli araştırılmıştır. Test Alanı 3 için DLT, Işın Demetleri, Bluh ve Elcovision 10 matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Farklı metotlar ile çözüm, bütün kontrol noktalarının kullanılması yada farklı denetleme nokta sayısı (6 ve 12) grupları kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Bu test alanında 3'lü konvergent görüntü alımı yapılmıştır.

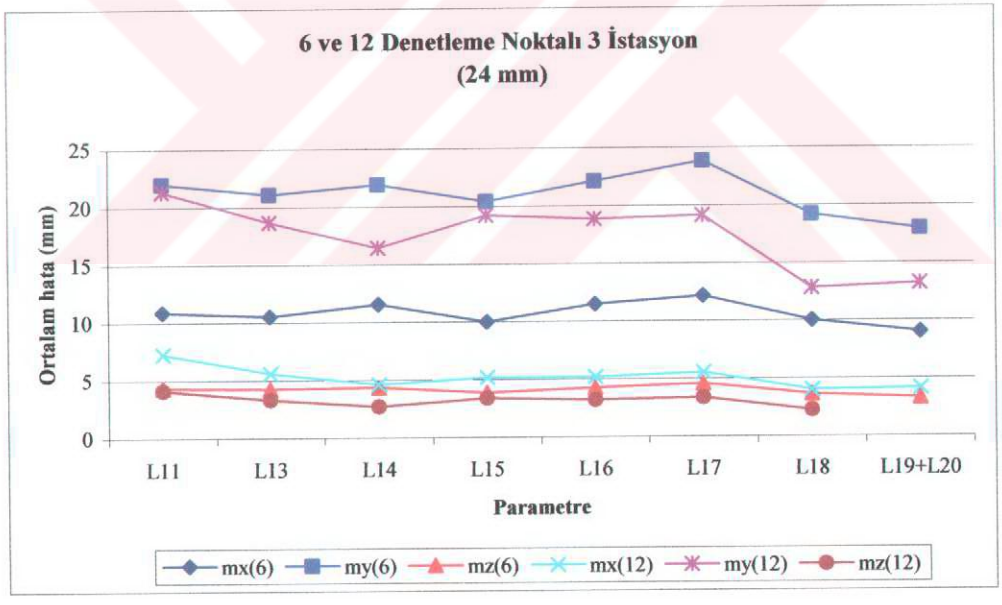
a) DLT Metodu Bulguları: 24 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hataları hesaplanarak grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 107-108). 3 istasyonlu ve 6 ve 12 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 19'da gösterilmektedir.

Tablo 19. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 24 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	**7.26**	**21.33**	**4.11**	10.91	21.98	4.35
L13	5.62	18.66	3.31	10.54	21.07	4.25
L14	4.62	16.43	2.72	11.56	21.91	4.36
L15	5.20	19.22	3.39	10.02	20.41	3.87
L16	5.21	18.85	3.20	11.50	22.14	4.26
L17	5.55	19.15	3.36	**12.15**	**23.84**	**4.60**
L18	4.00	12.83	2.26	10.04	19.20	3.65
L19+L20	4.14	13.23	2.36	9.04	17.94	3.30



Şekil 107. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (31 kontrol noktalı, DLT, 24 mm)



Şekil 108. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, DLT, 24 mm)

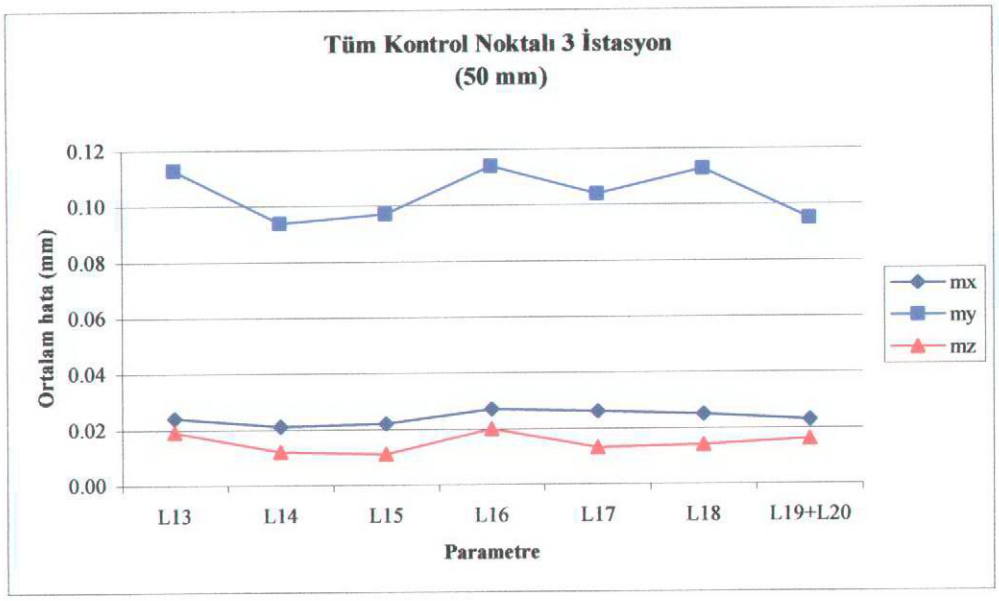
Bu test alanında DLT metodu kullanılarak 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 19). Bu test alanında sadece 3'lü konvergent alım

yapıldığından, istasyon sayısına göre irdeleme yapılamamaktadır. Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün parametrelerin kullanılması durumunda daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 12.15 mm, 23.84 mm ve 4.60 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 19, Şekil 107-108).

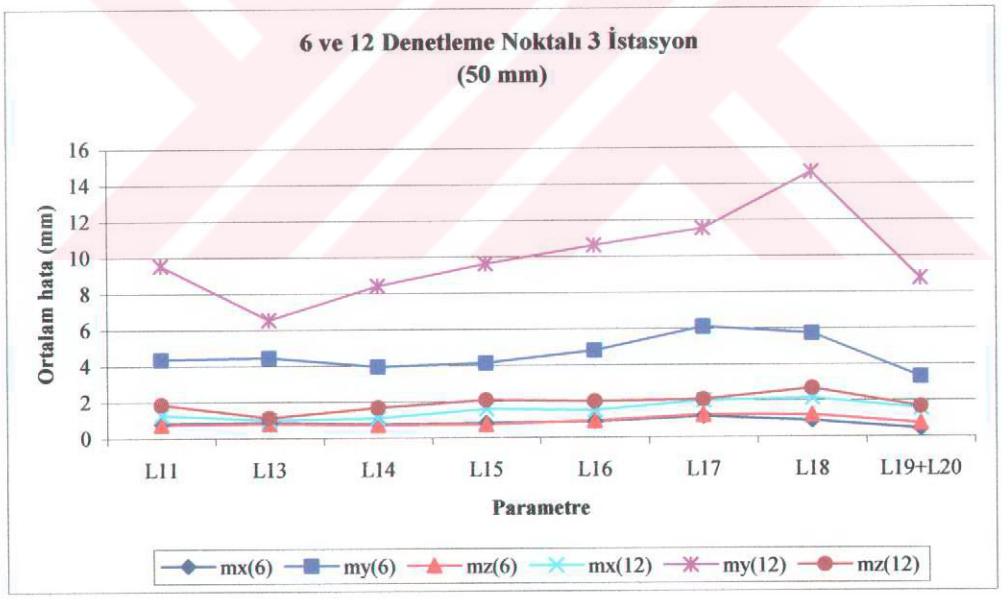
50 mm mercek ile de 24 mm mercekte olduğu gibi aynı işlemler yapılmıştır (Şekil 109-110, Tablo 20).

Tablo 20. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Nikon E2, 50 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	0.83	4.37	0.75	1.27	9.54	1.88
L13	0.86	4.46	0.82	1.02	6.54	1.13
L14	0.77	3.95	0.73	1.09	8.41	1.68
L15	0.82	4.14	0.74	1.60	9.61	2.10
L16	0.89	4.82	0.92	1.50	10.61	2.00
L17	**1.14**	**6.11**	**1.24**	2.02	11.53	2.08
L18	0.91	5.73	1.23	**2.15**	**14.66**	**2.69**
L19+L20	0.45	3.31	0.74	1.56	8.76	1.67



Şekil 109. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (19 kontrol noktalı, , DLT, 50 mm)



Şekil 110. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, DLT, 50 mm)

50 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 20). İlave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün

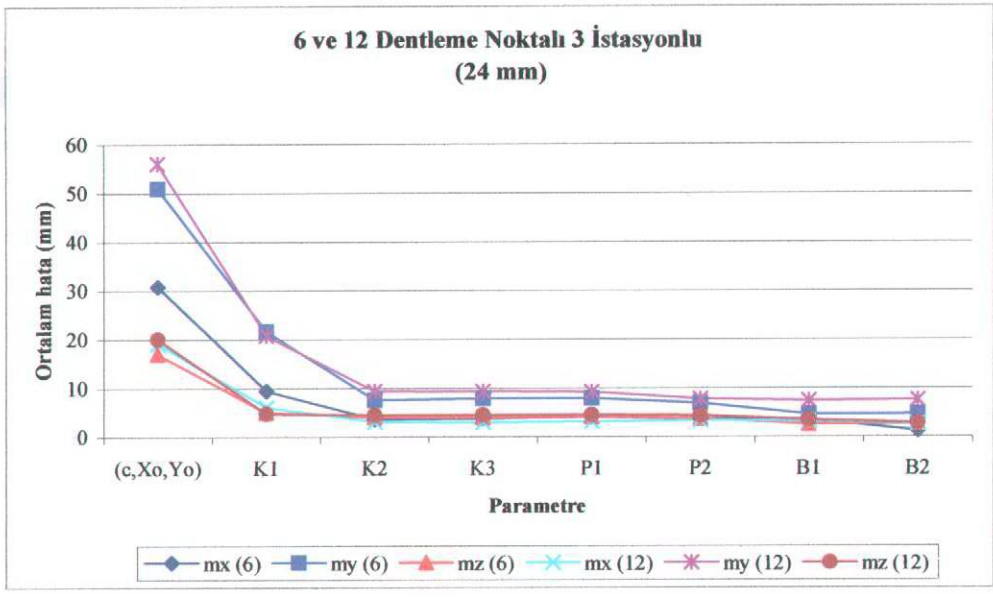
parametrelerin kullanılması durumunda daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 2.15 mm, 14.66 mm ve 2.69 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında, 6 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 20, Şekil 109-110).

İki farklı mercek ile ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırıldığında 50 mm mercek ile elde edilen ortalama konum doğruluğunun 24 mm'ye göre çok daha hassas olduğu gözlenmektedir. Burada doğruluklar arası fazla fark olması, obje uzayının özellikle 24 mm ile çekilen resimlerde çok geniş olmasından kaynaklanmaktadır.

b) İlave Parametreli Işın Demetleri Metodu Bulguları: 24 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 111). 3 istasyonlu ve 6, 12 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 21'de gösterilmektedir.

Tablo 21. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 24 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	30.81	50.97	17.01	19.09	56.06	20.09
K_1	**9.48**	**21.66**	**5.05**	**6.09**	**20.79**	**4.79**
K_2	3.65	7.59	4.04	3.12	9.39	4.52
K_3	3.84	7.91	3.99	2.99	9.35	4.51
P_1	4.14	7.91	4.11	3.15	9.23	4.51
P_2	3.66	6.91	3.73	3.34	7.80	4.38
B_1	3.62	4.63	2.60	3.22	7.42	3.50
B_2	1.21	4.68	2.73	2.70	7.60	2.83

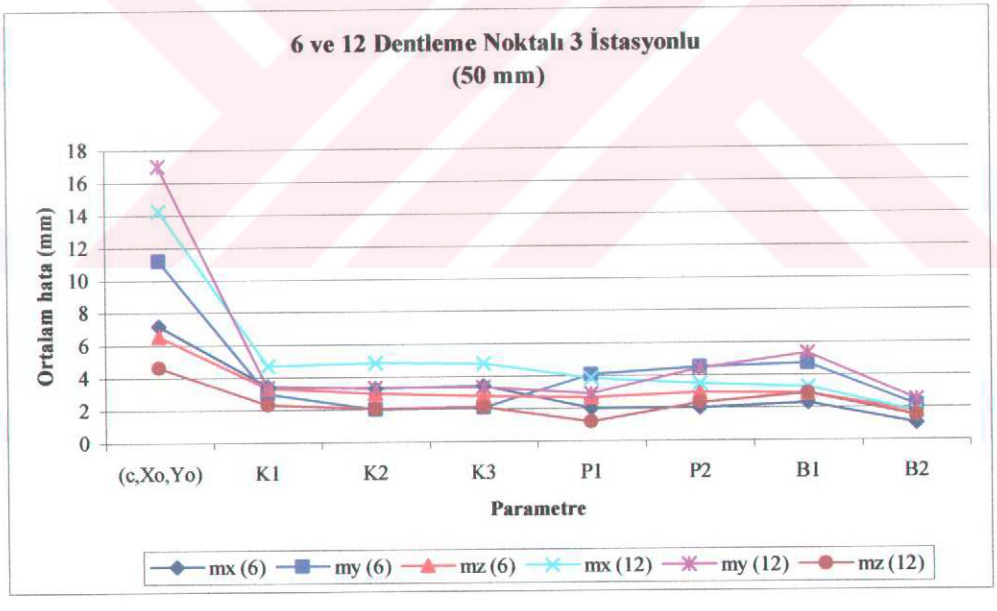


Şekil 111. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Işın Demet., 24 mm)

Işın Demetleri metodunda 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 21). Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri çapsal distorsiyonun 2. teriminden (k_2) sonra farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün ilave terimlerin kullanılması durumunda x, y ve z yönündeki doğruluğun daha da hassas olduğu gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 9.48 mm, 21.66 mm ve 5.05 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 21, Şekil 111).

Tablo 22. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Nikon E2, 50 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	7.17	11.20	6.57	14.26	17.01	4.62
K_1	**3.47**	2.98	**3.35**	4.71	3.39	2.34
K_2	3.30	2.00	2.98	**4.86**	3.34	2.03
K_3	3.41	2.08	2.81	4.79	3.33	2.13
P_1	2.00	4.09	2.69	3.85	2.89	1.19
P_2	2.02	4.51	2.94	3.50	4.44	2.34
B_1	2.30	**4.70**	2.85	3.27	**5.35**	2.88
B_2	1.02	2.11	1.71	1.72	2.47	1.50



Şekil 112. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Işın Demet., 50 mm)

50 mm mercek ile aynı işlemlerin yapılması sonucunda elde edilen veriler ve grafikler Tablo 22 ve Şekil 112'de gösterilmektedir.

50 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve

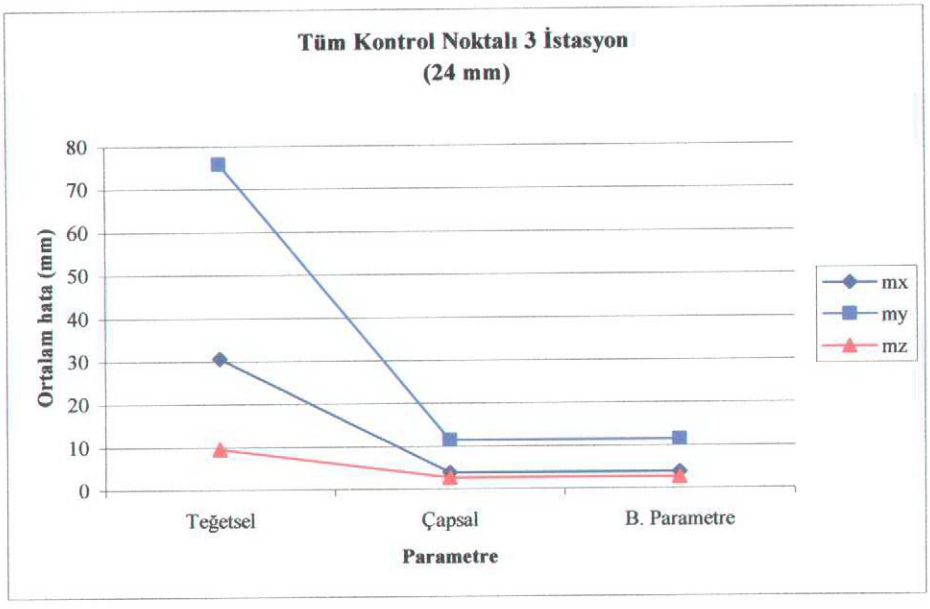
z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 22). Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri özellikle çapsal distorsiyonun 3. teriminden sonra farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün ilave terimlerin kullanılması durumunda x, y ve z yönündeki doğruluğun daha da hassas olduğu gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 4.86 mm, 5.35 mm ve 3.35 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında her iki denetleme noktası gurubu çözümleri arasında önemli bir fark olmadığı gözlenmektedir (Tablo 22, Şekil 112).

50 mm ile elde edilen sonuçların diğer merceğe göre daha hassas olduğu görülmektedir. Burada da yine kontrol uzayının geometrik yapısının önemi ortaya çıkmaktadır.

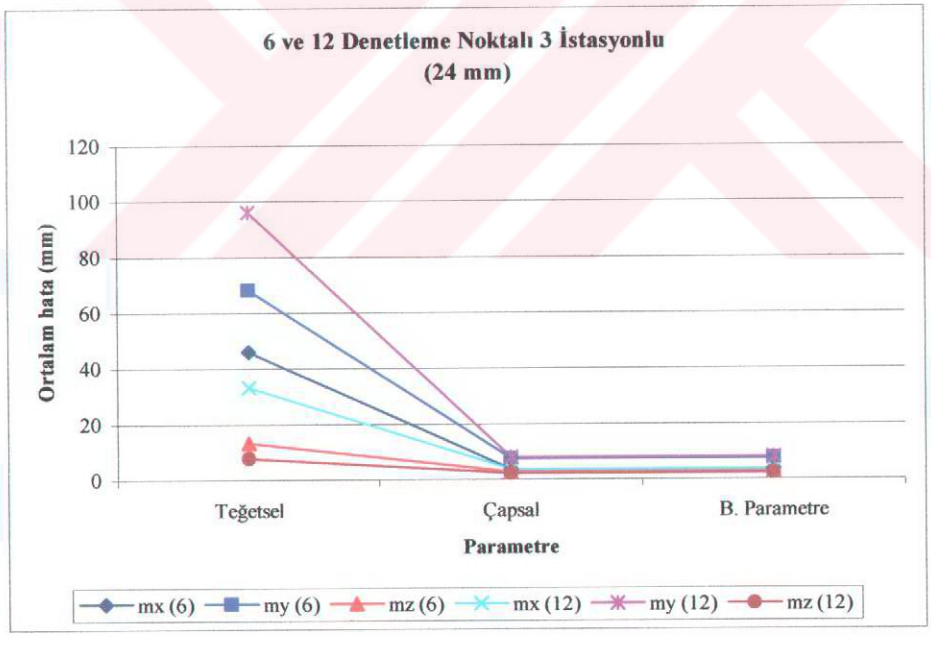
c) BLUH Metodu Bulguları: 24 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları ve bütün noktalar kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 113-114). 3 istasyon noktalı ve 6 ve 12 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hataları ayrıca Tablo 23'de gösterilmektedir.

Tablo 23. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Nikon E2, 24 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	**3.67**	7.51	**2.83**	**3.59**	**8.06**	2.33
Çapsal	3.66	**7.52**	2.82	3.58	8.03	**2.38**
Teğetsel	45.92	68.23	13.26	33.12	96.23	7.72



Şekil 113. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (31 kontrol noktalı, Bluh, 24 mm)



Şekil 114. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Bluh, 24 mm)

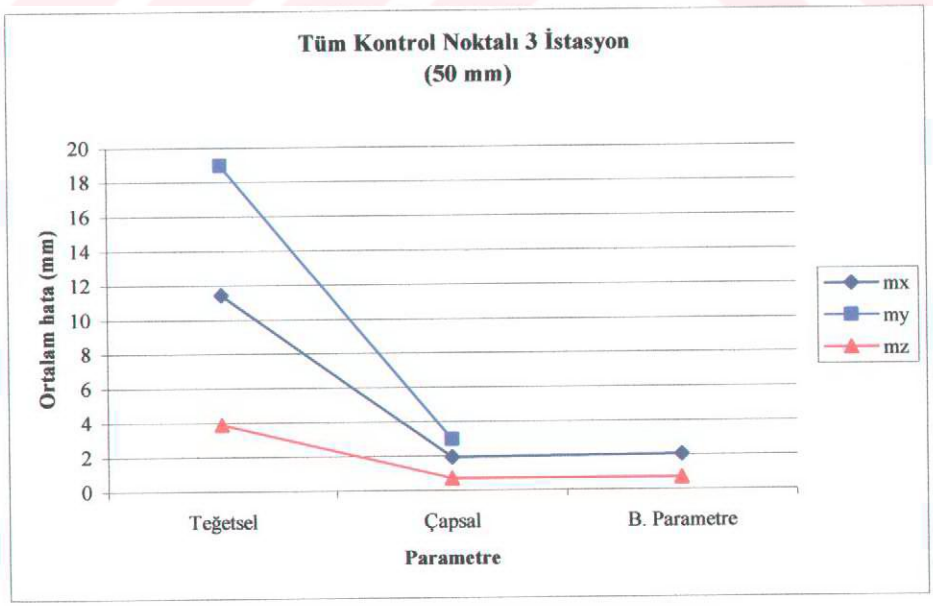
BLUH metodu ile 24 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu

gözlenmektedir (Tablo 23). İlave parametrelerin etkileri üç kombinasyon için fazla değişmediği, ancak yalnızca teğetsel distorsiyon parametrelerinin etkisi dikkate alınarak yapılan çözümde x, y ve z yönündeki hataların büyük bir sıçrama gösterdiği tespit edilmiştir. Teğetsel distorsiyon parametre gurubu ile yapılan çözüm dikkate alınmaksızın, genel olarak çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 3.67 mm, 8.06 mm ve 2.83 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 23, Şekil 113-114).

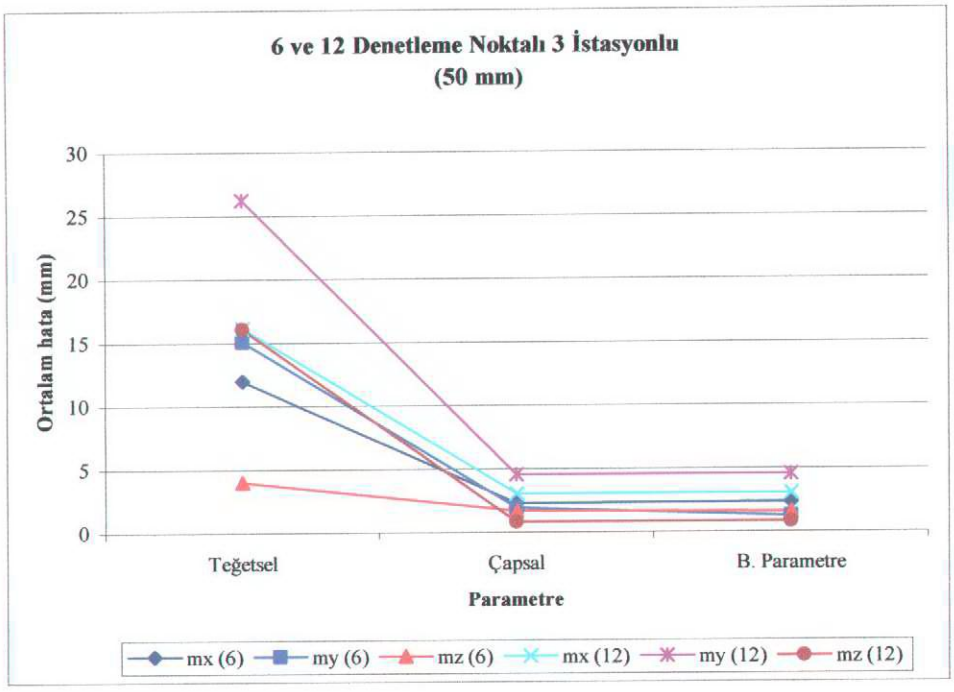
50 mm mercek ile aynı değerlendirmeler yapılmıştır (Şekil 115-116, Tablo 24).

Tablo 24. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Nikon E2, 50 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	**2.29**	1.21	1.56	3.01	4.51	0.80
Çapsal	2.24	**1.93**	**1.68**	**3.02**	**4.54**	**0.81**
Teğetsel	11.97	15.08	3.99	16.14	26.23	16.09



Şekil 115. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (31 kontrol noktalı, Bluh 50 mm)



Şekil 116. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Bluh, 50 mm)

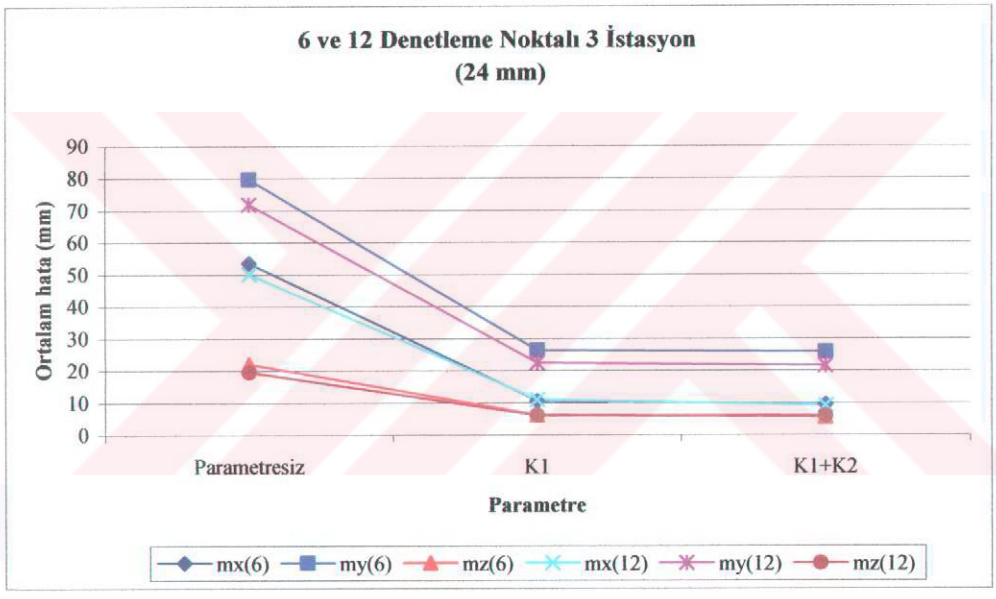
50 mm mercek ile de 24 mm mercekle elde edilen sonuçlara paralel değerler elde edilmiştir. Teğetsel distorsiyon parametre gurubu ile yapılan çözüm dikkate alınmaksızın, genel olarak 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 3.02 mm, 4.54 mm ve 1.68 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 24, Şekil 115-116).

Her iki merceğin karşılaştırılması durumunda, 50 mm'lik mercekle daha hassas sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir.

d) Elcovision 10 Metodu Bulguları: 24 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları ve bütün noktalar kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 117). 3 istasyon noktalı 6 ve 12 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 25'de gösterilmektedir.

Tablo 25. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 24 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Parametresiz	50.12	71.92	19.64	53.58	79.67	22.10
K_1	**11.00**	**22.49**	**6.12**	**10.61**	**26.37**	**6.32**
K_1+K_2	9.21	21.62	5.98	9.51	25.87	5.72



Şekil 117. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Elcovision, 24 mm)

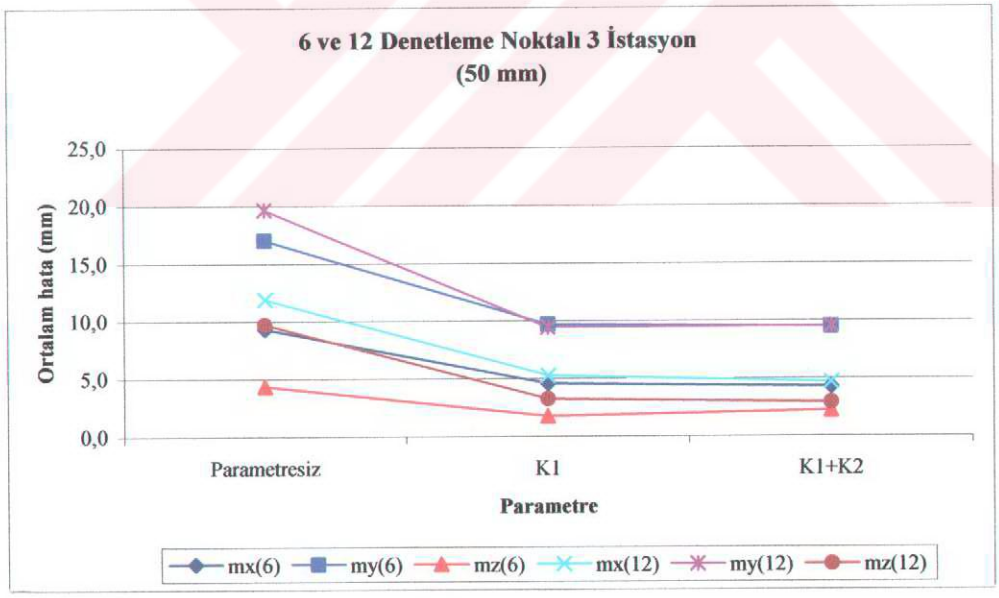
Bu metot ile 24 mm mercek kullanılarak yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 25). İlave parametrelerin etkileri üç kombinasyon için fazla değişmediği, ancak yalnızca parametresiz çözümde x, y ve z yönündeki hataların çok büyük miktarda olduğu görülmektedir. Parametresiz çözüm dikkate alınmaksızın, 3 istasyonlu çözüm için x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 11.00 mm, 26.37 mm ve 6.32 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 ve 12

denetleme noktalı çözümlerden ortaya çıkan sonuçlar arasında önemli bir fark gözükmemektedir (Tablo 25, Şekil 117).

50 mm mercek ile aynı işlemler yapılmış ve sonuçlar ilgili tablo ve grafikte gösterilmektedir (Tablo 26, Şekil 118).

Tablo 26. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Elcovision, Nikon E2, 50 mm)

Birim: mm	6 Denetleme Noktası			12 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Parametresiz	9.31	17.01	4.38	11.89	19.65	9.73
K_1	**4.58**	**9.72**	1.78	**5.28**	9.47	**3.25**
K_1+K_2	4.29	9.49	**2.25**	4.71	**9.53**	2.94



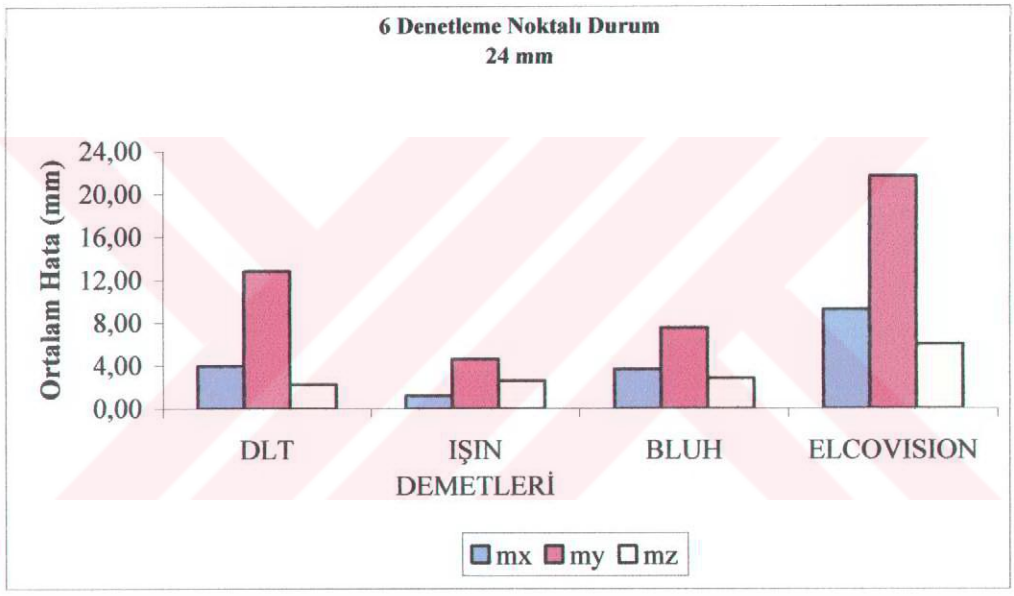
Şekil 118. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (6 ve 12 denetleme noktalı, Elcovision, 50 mm)

50 mm mercekle de 24 mm mercek ile bütün kriterlere göre elde edilen değerler aynı olmaktadır. Parametresiz çözüm dikkate alınmaksızın, 3 istasyonlu çözüm için x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 5.28 mm, 9.72 mm ve 3.25 mm olmuştur. Kontrol

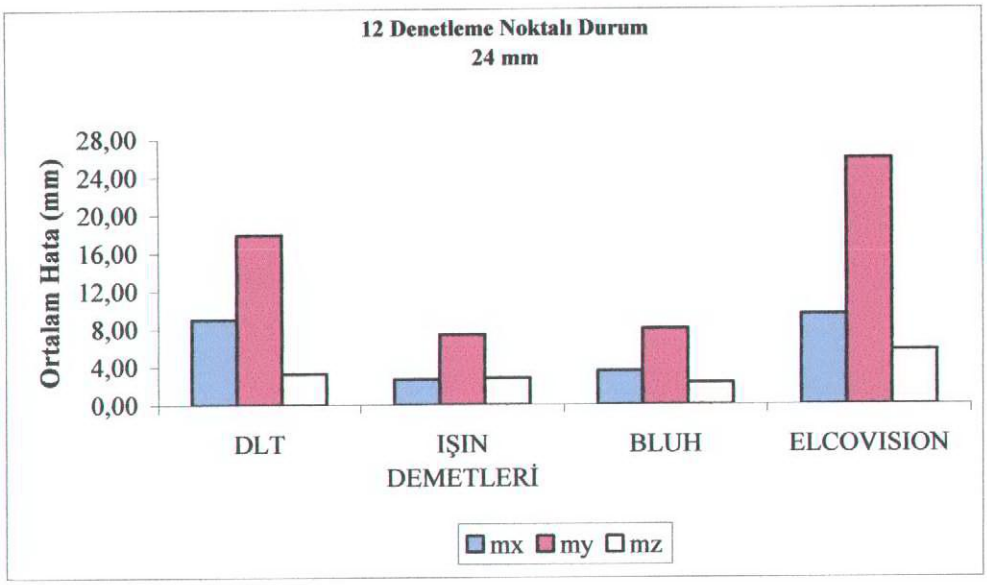
nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 6 ve 12 denetleme noktalı çözümlerden ortaya çıkan sonuçlar arasında önemli bir fark gözükmemektedir (Tablo 26, Şekil 118).

Her iki mercek ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılsa 50 mm'lik mercekle daha hassas sonuçların ortaya çıktığı görülecektir.

Test Alanı 3'de kullanılan dört farklı matematik modelle elde edilen doğruluk değerleri karşılaştırılması amacıyla, 24 mm mercek için bu metotlar kullanılarak hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 119-120 grafiklerinde gösterilmektedir. Bu grafiklerde yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.

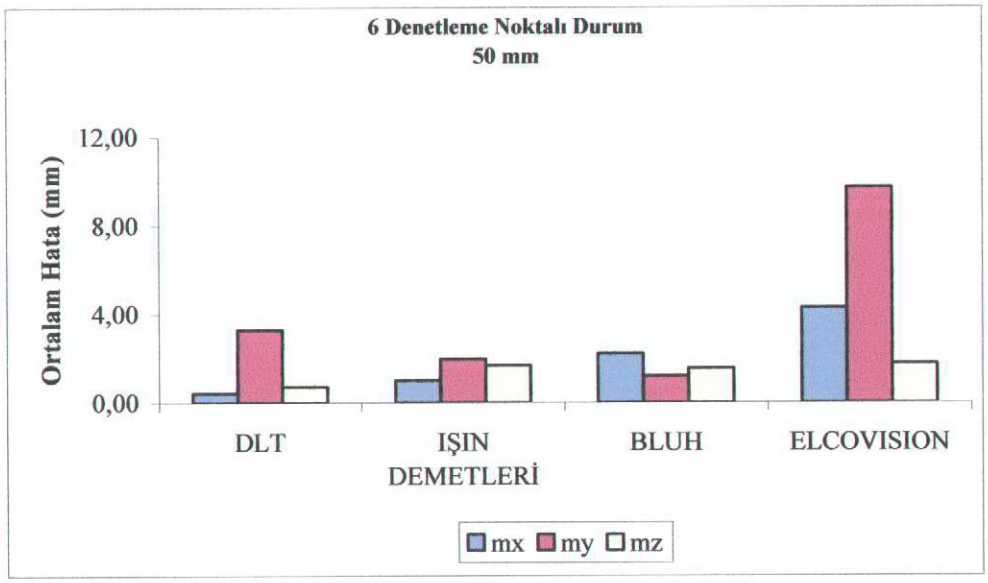


Şekil 119. 6 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 24 mm)

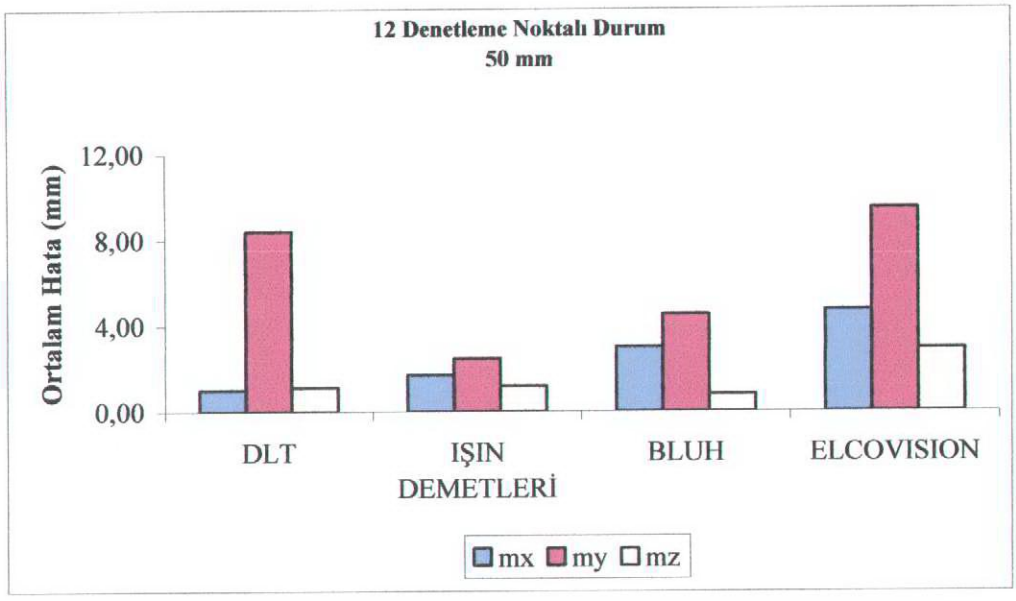


Şekil 120. 12 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 24 mm)

Şekil 119-120 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre Işın Demetleri matematik modelinin her üç eksen yönünde daha duyarlıklı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Bu modeli takiben Bluh metodunun ikinci derecede iyi sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir.



Şekil 121. 6 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 50 mm)



Şekil 122. 12 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 3, 50 mm)

50 mm mercek ile bütün metotlar kullanılarak x, y ve z eksenleri yönünde hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 121-122 grafiklerinde gösterilmektedir. Bu grafiklerde yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.

Şekil 121-122 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarından hesaplana ortalama hata değeri sonuçlarına göre bu mercekte de Işın Demetleri yöntemiyle diğer metotlara göre duyarlıklı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bluh ve DLT metotları ile elde edilen sonuçlar arasında belirgin fark gözlenmemektedir.

3.3. Kodak DCS 460 Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları

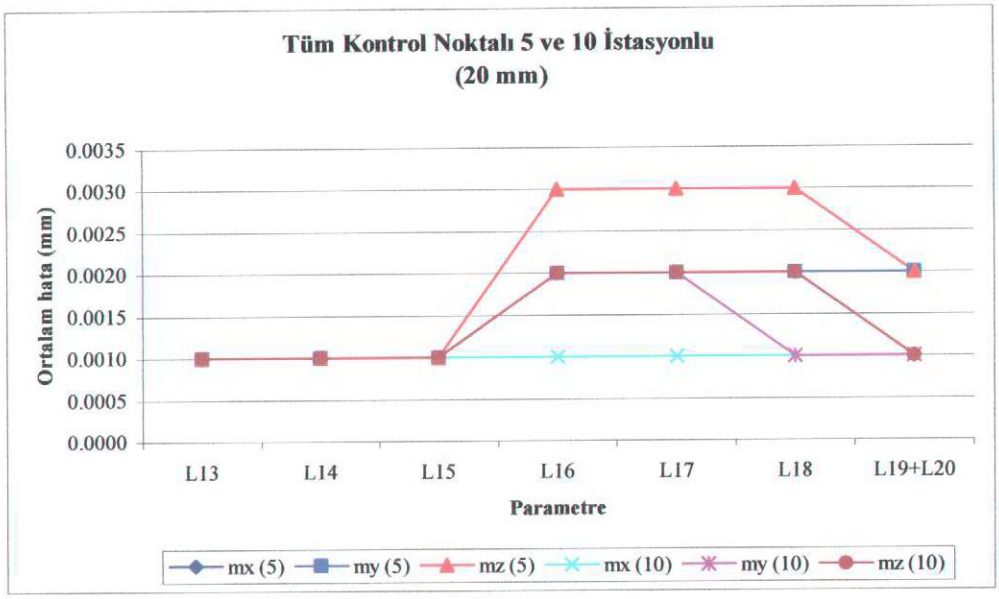
Bu kameranın testi için Hannover Üniversitesi Fotogrametri Enstitüsü Laboratuarındaki test alanı kullanılmıştır. Söz konusu test alanı için DLT, Işın Demetleri ve Bluh matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Farklı metotlar ile bütün kontrol noktalarının kullanılması yada farklı denetleme nokta sayısı (5, 10 ve 15) grupları kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Kalibrasyon bilgileri, test alanındaki bütün noktaların kontrol noktası olarak kullanılması durumunda elde edilmiştir. Farklı çekim istasyon sayıları dikkate alınarak (5 ve 10 istasyon), 20 mm'lik mercek için bütün

noktaların kontrol noktası ve 5, 10 ve 15 denetleme noktası olması durumunda hesaplanan x, y ve z yönündeki ortalama nokta konum hataları her bir metot için ayrı ayrı elde edilmiştir.

a) DLT Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hataları hesaplanarak grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 123-126). 5 ve 10 istasyonlu ve 5, 10 ve 15 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 27'de gösterilmektedir.

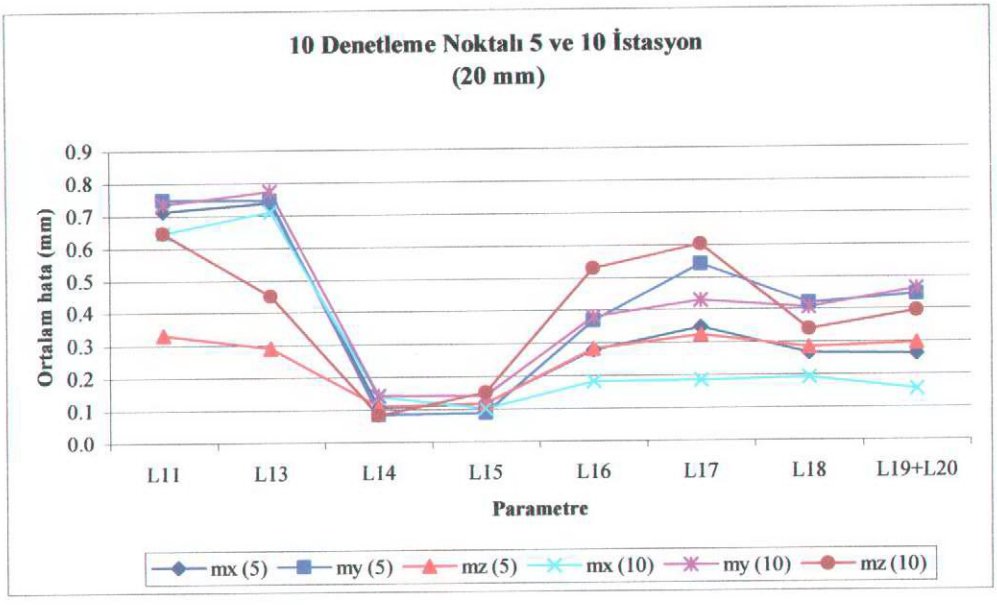
Tablo 27. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Kodak)

Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						15 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	**0.47**	**0.52**	0.37	0.40	0.46	0.37	**0.71**	**0.75**	**0.33**	0.65	0.73	**0.65**	0.77	0.73	**0.42**	0.69	0.84	**0.43**
L13	0.46	0.52	0.31	**0.42**	**0.49**	0.29	0.74	0.75	0.29	**0.71**	**0.78**	0.45	**0.79**	**0.76**	0.34	**0.73**	**0.87**	0.35
L14	0.12	0.08	0.11	0.14	0.08	0.15	0.11	0.08	0.11	0.14	0.14	0.08	0.08	0.13	0.08	0.10	0.25	0.11
L15	0.12	0.06	0.10	0.14	0.08	0.15	0.12	0.09	0.12	0.10	0.14	0.15	0.08	0.13	0.08	0.11	0.28	0.12
L16	0.19	0.10	0.47	0.30	0.16	0.45	0.28	0.37	0.28	0.18	0.38	0.53	0.34	0.35	0.40	0.34	0.37	0.32
L17	0.17	0.10	0.46	0.30	0.17	0.45	0.35	0.54	0.32	0.18	0.43	0.60	0.34	0.35	0.41	0.34	0.36	0.32
L18	0.17	0.11	0.43	0.20	0.15	0.41	0.27	0.42	0.28	0.19	0.41	0.34	0.35	0.36	0.29	0.32	0.38	0.23
L19+L20	0.14	0.16	**0.51**	0.19	0.17	**0.48**	0.26	0.45	0.30	0.16	0.46	0.40	0.32	0.34	0.28	0.29	0.37	0.21

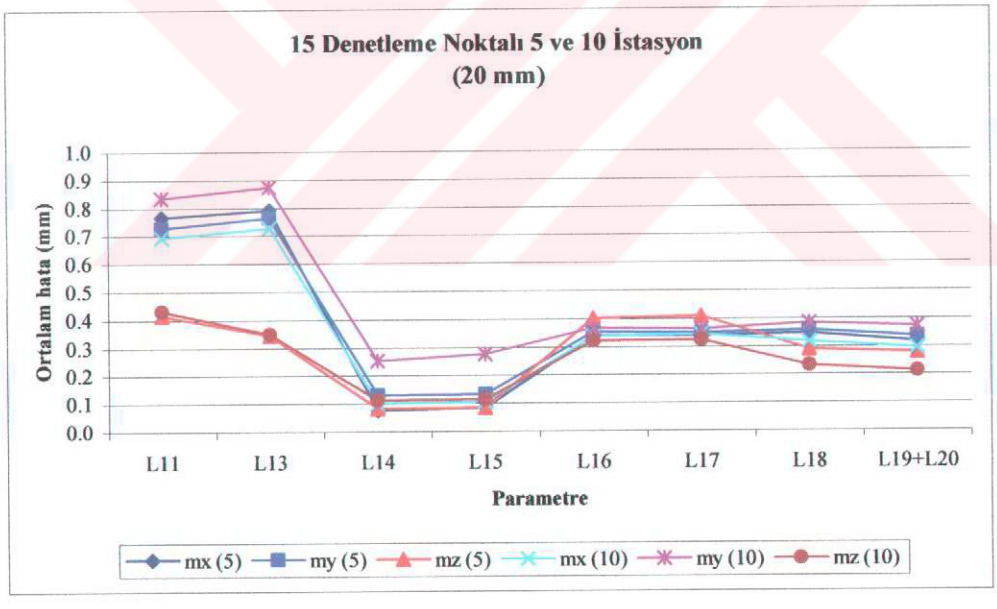


Şekil 123. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (36 kontrol noktalı, DLT, Kodak)

Şekil 124. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, Kodak)



Şekil 125. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, Kodak)

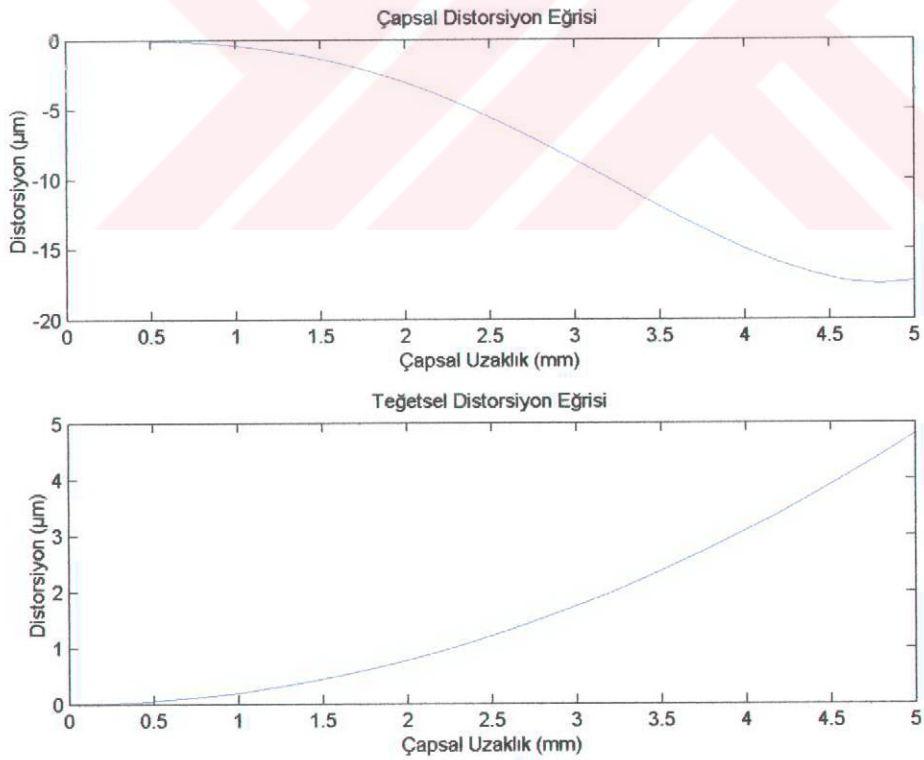


Şekil 126. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, DLT, Kodak)

DLT metodu ile 20 mm mercekle yapılan çözümlerde, bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlar x, y ve z eksenleri yönünde farklılık göstermemektedir. Kullanılan test alanının düzlem olması, DLT metodunun bu modeli çözmede duyarsız sonuçlar ortaya koymasına sebep olmaktadır. Bunun sebebi, 3 boyutlu

DLT metodu için seçilen test alanının bir hacim oluşturma gerekliliğidir. Çekim istasyon sayıları bakımından irdeleme yapıldığında, 5 ve 10 istasyonlu çekimlerden elde edilen sonuçlar arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Çözümde kullanılan DLT parametrelerinin sonuç doğruluğuna etkileri, farklı kombinasyonlar için çok değişim göstermemiştir. Ancak L15 parametresinden sonra doğruluklarda negatif yönde bir sıçrama olduğu görülmektedir. Genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max nokta konum hata miktarları sırasıyla 0.79 mm, 0.76 mm ve 0.51 mm'dir. Aynı şekilde 10 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max konum hata miktarları sırasıyla 0.73 mm, 0.87 mm ve 0.65 mm olduğu görülmektedir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 27, Şekil 123-126).

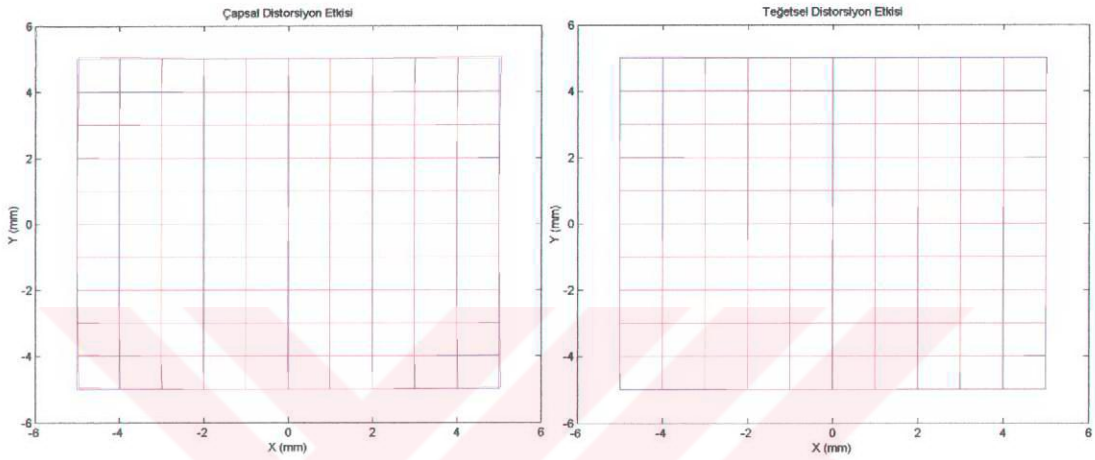
20 mm'lik mercek için, DLT metodu ile her bir resim (10 adet) için ayrı ayrı ilave parametre setinden hesaplanan çapsal ve teğetsel distorsiyon değerlerine ilişkin max etkiyi gösteren grafik Şekil 127'de gösterilmektedir.



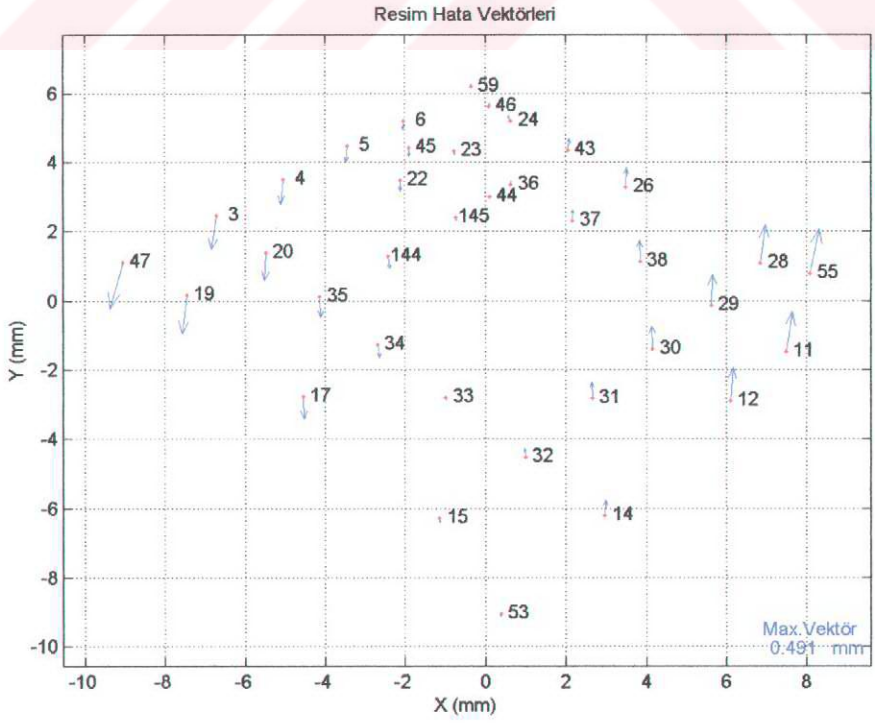
Şekil 127. 20 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (DLT, Kodak)

Şekil 127 incelendiğinde, çapsal distorsiyon etkisinin 20 mm'lik mercekte max 20 µm, teğetsel distorsiyonun ise max 4 µm civarında olduğu görülmektedir. Global olarak resim yüzeyi üzerindeki distorsiyon etkilerine bakıldığında aynı paralellikte bir etkinin olduğunu söylemek mümkündür (Şekil 128).

20 mm mercek için her bir resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini max düzeyde gösteren grafik çizdirilmiştir (Şekil 128).



Şekil 128. 20 mm mercek için max global distorsiyon (DLT, Kodak)

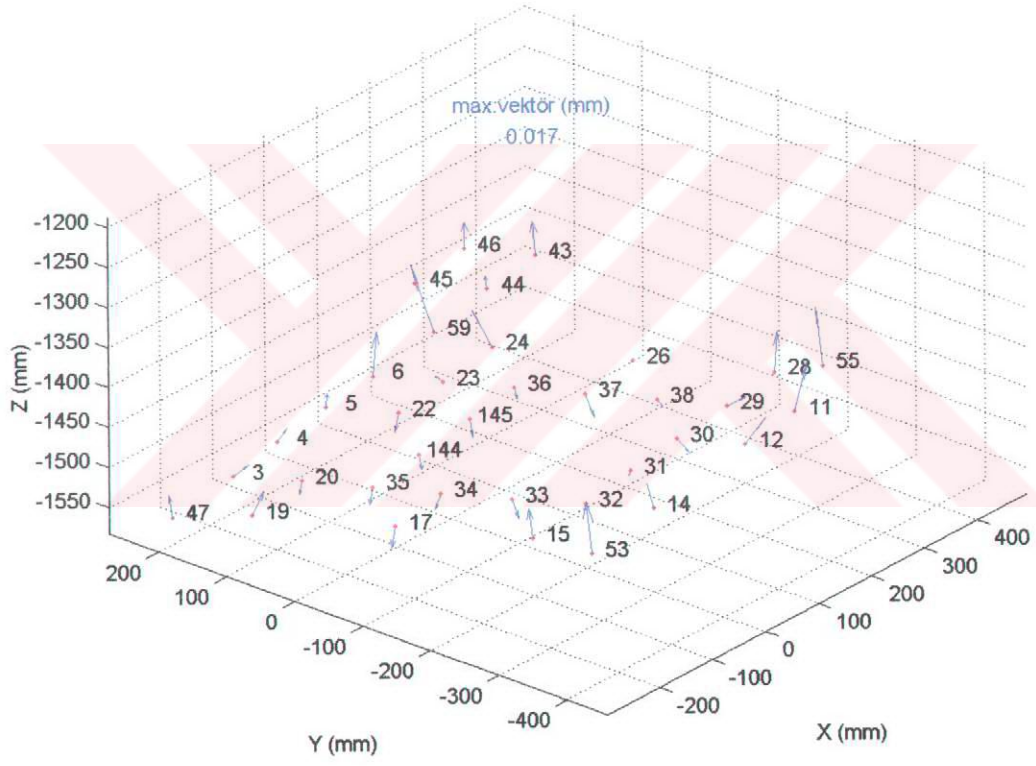


Şekil 129. 20 mm mercek için max resim hata vektörleri (DLT, Kodak)

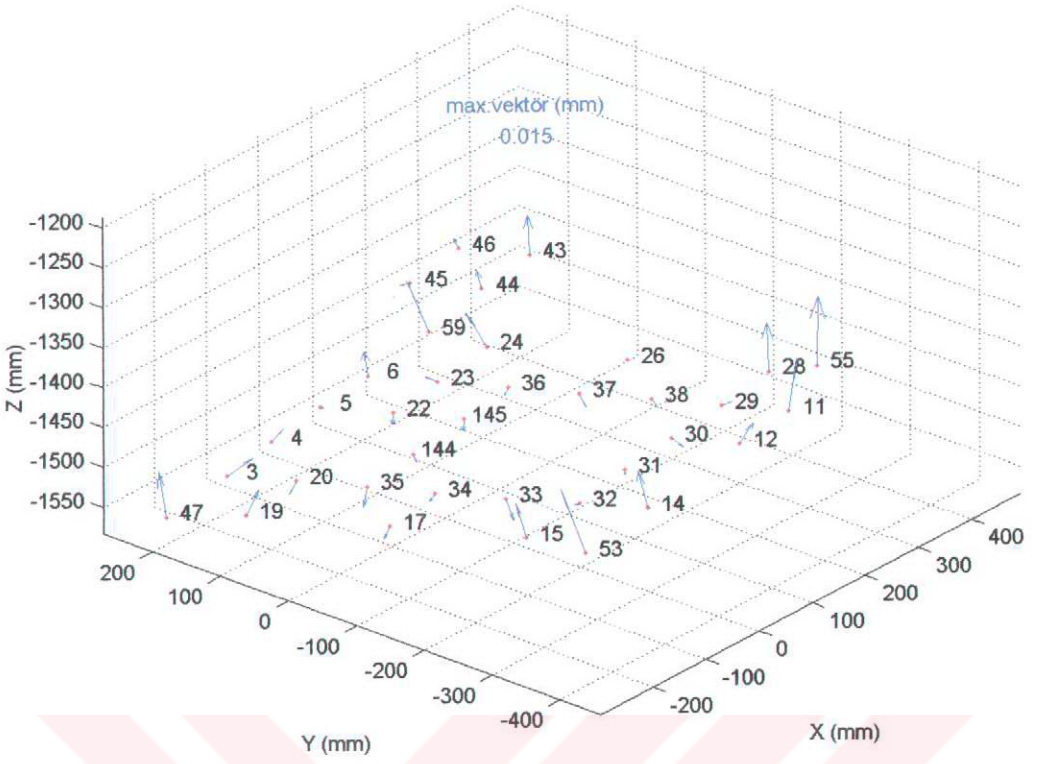
Test alanındaki bütün noktaların kontrol noktası olarak kullanıldığı çözümde, her bir resim için bütün noktalardaki resim hata vektörleri hesaplanmıştır. Bu hata vektörlerinden max etkiyi gösteren grafik çizdirilmiştir (Şekil 129).

Şekil 129'da, bu kamerada kullanılan mercek için hata vektör büyüklükleri incelendiğinde bütün noktalarda belirlenen hatalar görülmekte ve max hata 0.49 mm civarında olmaktadır.

5 ve 10 istasyonlu çekimler için obje uzayındaki her bir noktanın hata vektörleri belirlenmiştir. 20 mm'lik mercek için her iki istasyon sayısına göre çizdirilen hata vektörü grafikleri sırasıyla Şekil 130-131'de gösterilmektedir.



Şekil 130. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, DLT, Kodak)



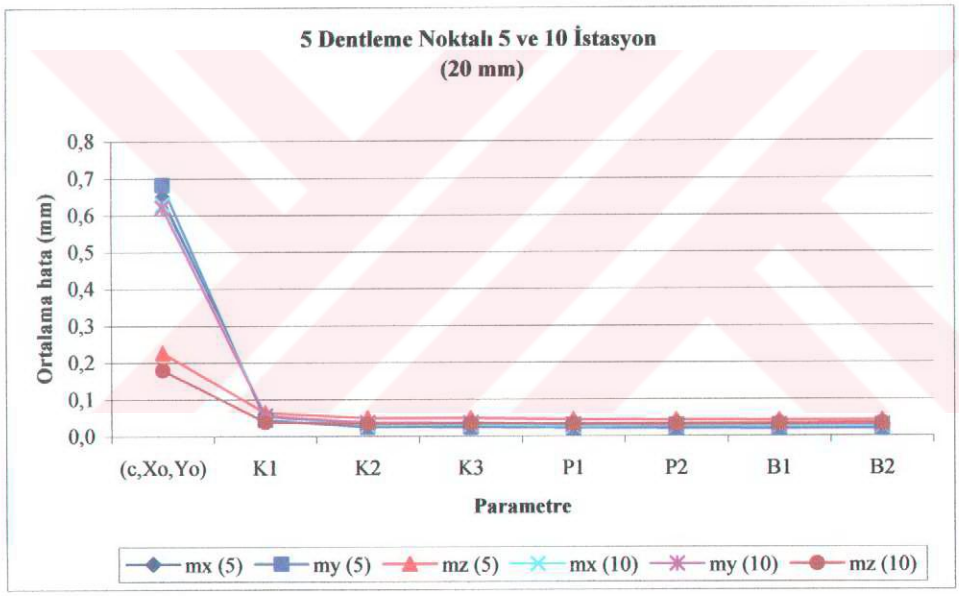
Şekil 131. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (10 istasyon, DLT, Kodak)

Şekil 130 ve 131'den bütün noktalar için hesaplanan nokta konum hatası vektörleri 5 ve 10 istasyonlu çekimler için belirlendiği görülmektedir. 10 istasyonlu çekimde 5 istasyonlu çekime göre daha iyi konum doğruluğu elde edilmiştir.

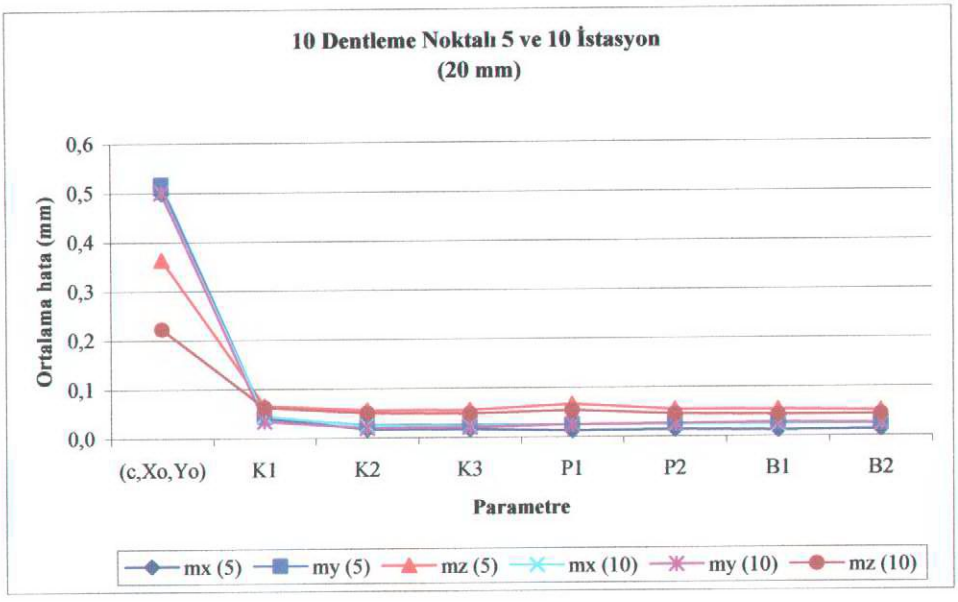
b) İlave Parametreli Işın Demetleri Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hatası değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 132-134). 5 ve 10 istasyonlu ve 5, 10 ve 15 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama hata değerleri Tablo 28'de gösterilmektedir.

Tablo 28. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Kodak)

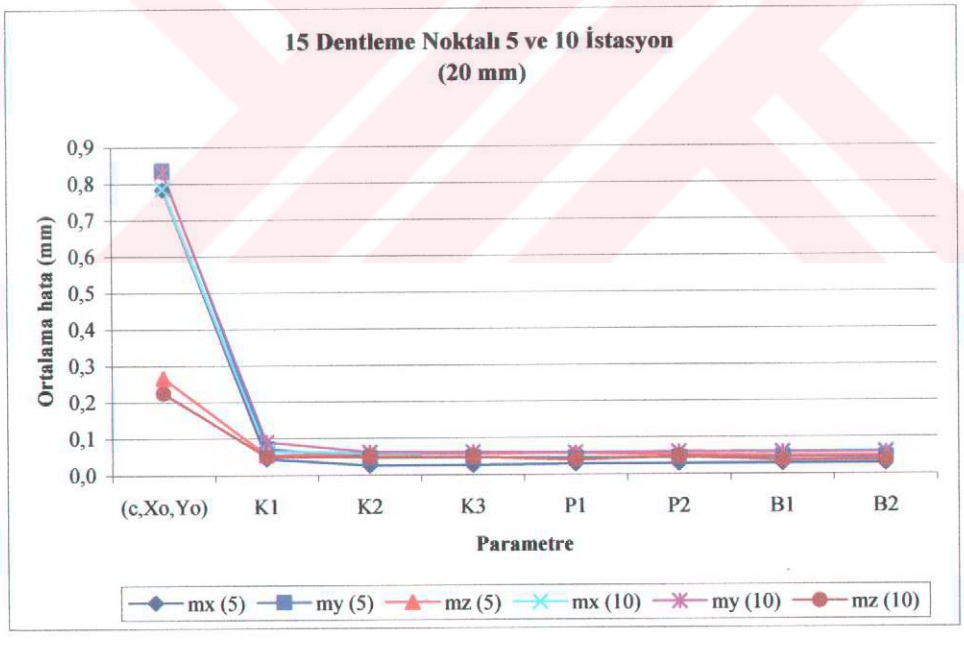
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						15 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	0.50	0.52	0.36	0.50	0.50	0.22	0.65	0.68	0.23	0.63	0.62	0.18	0.78	0.83	0.27	0.78	0.83	0.22
K_1	**0.05**	**0.04**	**0.06**	**0.05**	**0.03**	**0.06**	**0.04**	**0.04**	0.07	**0.06**	**0.05**	**0.04**	**0.04**	**0.07**	**0.05**	**0.06**	**0.09**	**0.05**
K_2	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0.02	0.03	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05
K_3	0.03	0.02	0.05	0.02	0.02	0.05	0.02	0.03	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05
P_1	0.03	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05	0.01	0.03	**0.07**	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.04
P_2	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.05	0.01	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.05
B_1	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04
B_2	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04



Şekil 132. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)



Şekil 133. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)

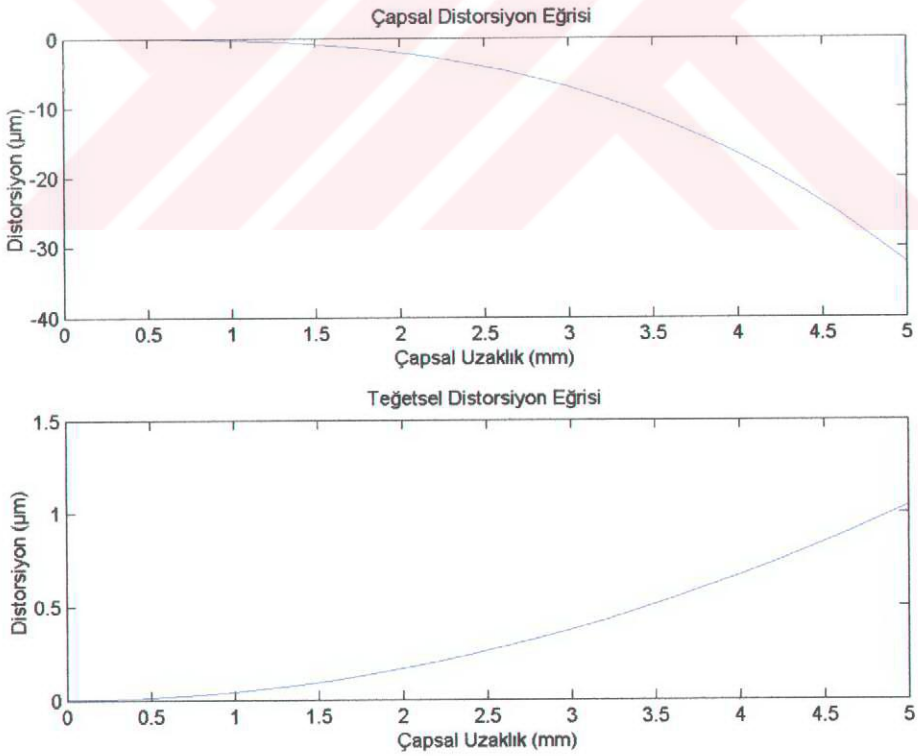


Şekil 134. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)

Işın Demetleri metodunda 20 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçların her üç eksen yönünde yaklaşık olarak aynı seviyede kaldığı görülmektedir (Tablo 28). Çekim istasyon sayıları

bakımından irdeleme yapıldığında, 10 istasyonlu çekimin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak 5 ve 10 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği gözlenmektedir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.05 mm, 0.07 mm ve 0.07 mm olmuştur. Aynı şekilde 10 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.06 mm, 0.09 mm ve 0.06 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bütün denetleme nokta guruplarıyla yapılan değerlendirme sonuçları arasında önemli bir fark görülmemektedir (Tablo 28, Şekil 132-134).

20 mm'lik mercek için, İlave Parametreli Işın Demetleri metodu ile her bir ilave parametre değeri için hesaplanan çapsal ve teğetsel distorsiyon değerlerine ait max etkiyi gösteren grafik Şekil 135'de gösterilmektedir.

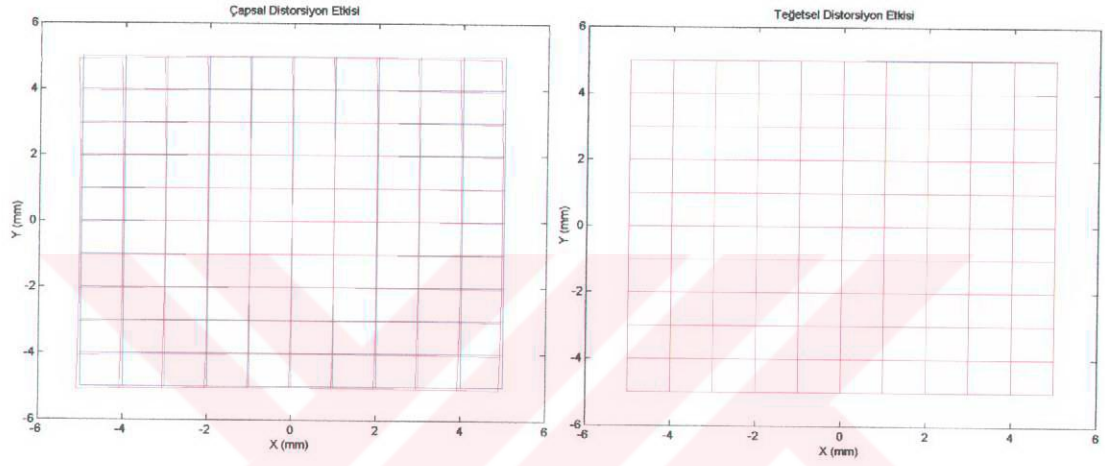


Şekil 135. 20 mm mercek için max. çapsal ve teğetsel distorsiyon (Işın Demet., Kodak)

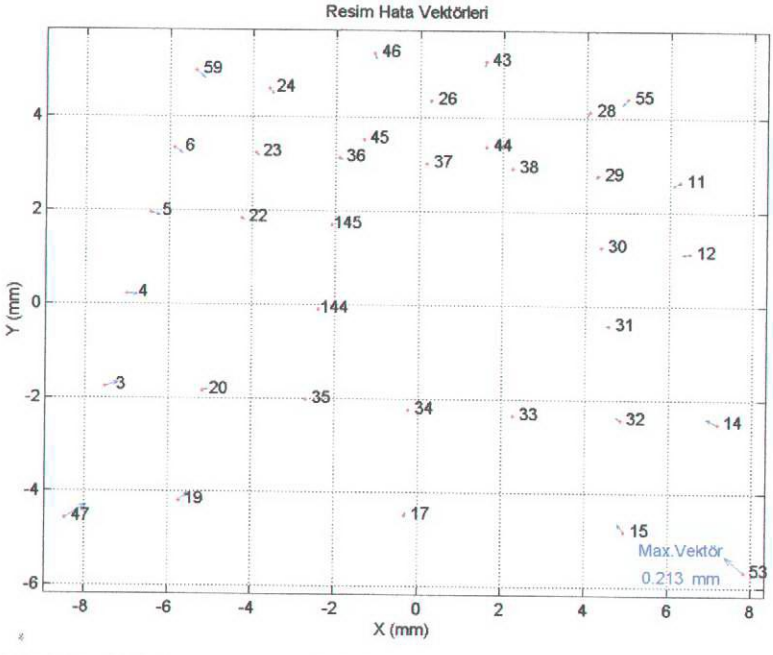
Şekil 135 incelendiğinde, 20 mm'lik mercekte çapsal distorsiyon etkisinin max 40 mikron, teğetsel distorsiyon etkisinin ise max 1.5 mikron civarında olduğu görülmektedir.

Global olarak resim yüzeyi üzerindeki distorsiyon etkilerine bakıldığında aynı paralellikte bir etkinin olduğu söylenebilir.

20 mm mercek için her bir resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini gösteren grafik çizdirilmiştir. Bu grafik max etkiyi gösterecek biçimde Şekil 136'da gösterilmektedir.



Şekil 136. 20 mm mercek için max global distorsiyon (Işın Demet., Kodak)



Şekil 137. 20 mm mercek için max resim hata vektörleri (Işın Demet., Kodak)

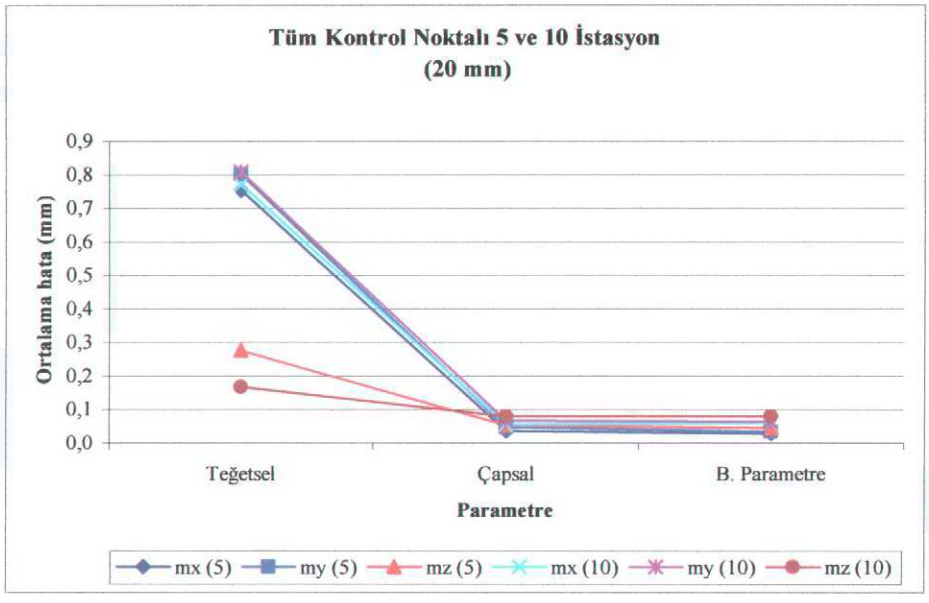
Test alanındaki bütün noktaların kontrol noktası olarak kullanıldığı çözümde her bir resim için bütün noktalardaki resim hata vektörleri hesaplanmıştır. Bu hata vektörlerinden max etkiyi gösteren grafik çizdirilmiştir (Şekil 137).

Resim hata vektör büyüklükleri incelendiğinde bütün noktalarda belirlenen hatalar max 0.21 mm olarak ortaya çıkmaktadır. Söz konusu durum bu metot için sadece kontrol noktalarının tümünün kullanıldığı çözüm için geçerli olmaktadır.

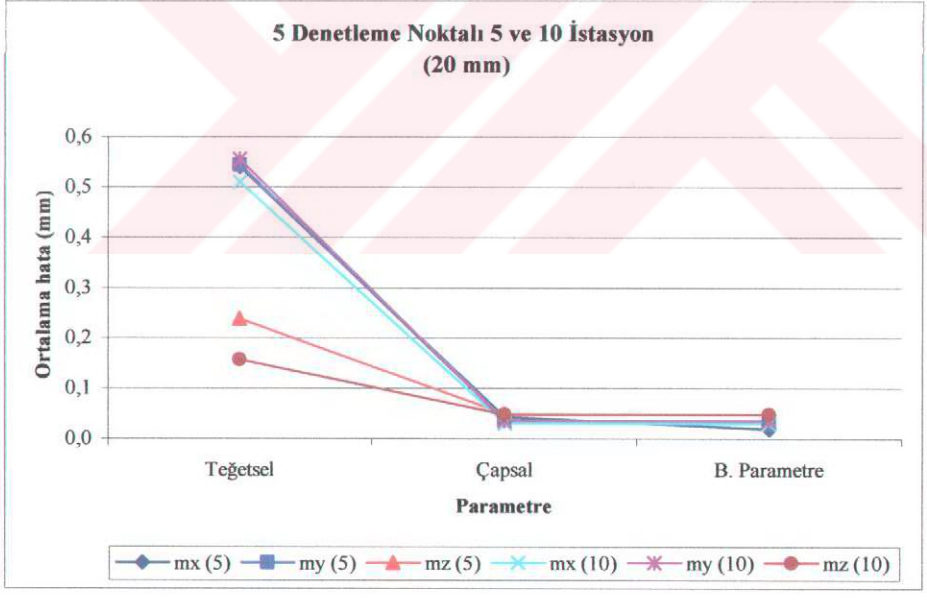
c) BLUH Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı istasyon ve denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 138-141). 5 ve 10 istasyon noktalı 5, 10 ve 15 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hatalar ayrıca Tablo 29'da gösterilmektedir.

Tablo 29. Denetleme noktası ve istasyon sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Kodak)

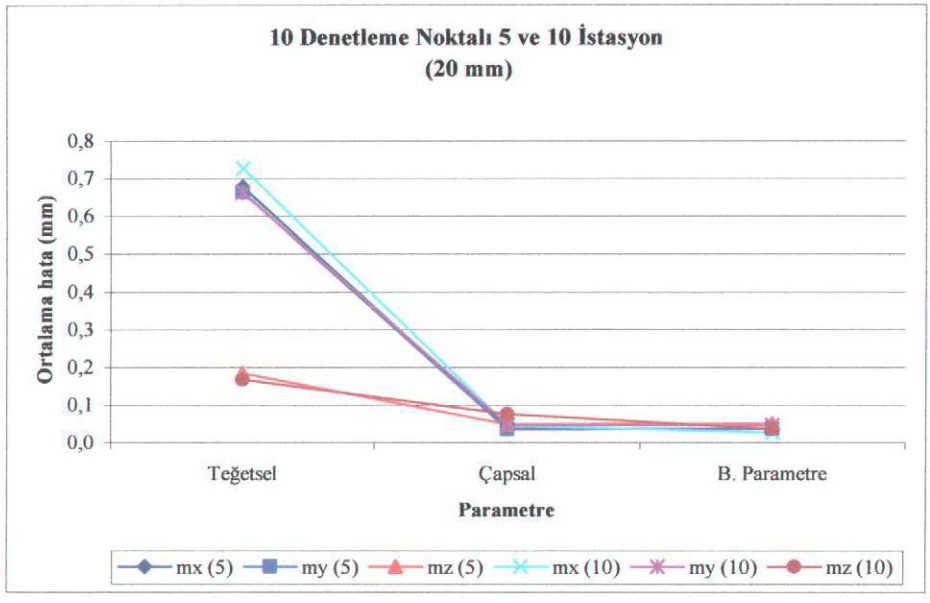
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						15 Denetleme Noktası					
	5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon			5 İstasyon			10 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	**0.02**	**0.03**	**0.06**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.04**	**0.04**	**0.05**	**0.03**	**0.05**	**0.04**	**0.03**	**0.04**	**0.05**	**0.06**	**0.07**	**0.04**
Çapsal	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04
Teğetsel	0.54	0.54	0.24	0.51	0.56	0.16	0.68	0.67	0.18	0.73	0.66	0.17	0.64	0.74	0.23	0.67	0.76	0.16



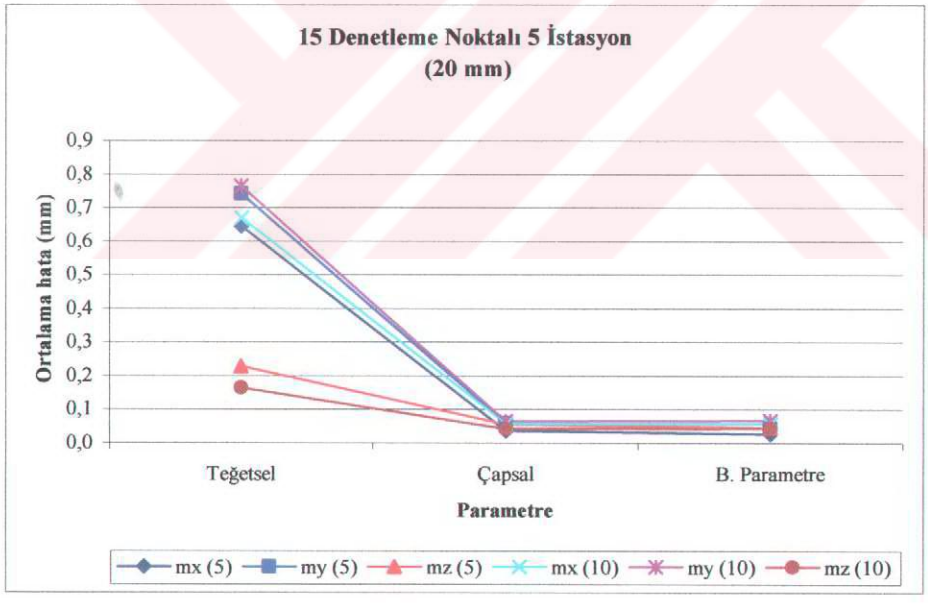
Şekil 138. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (36 kontrol noktalı, Bluh, Kodak)



Şekil 139. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)



Şekil 140. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)

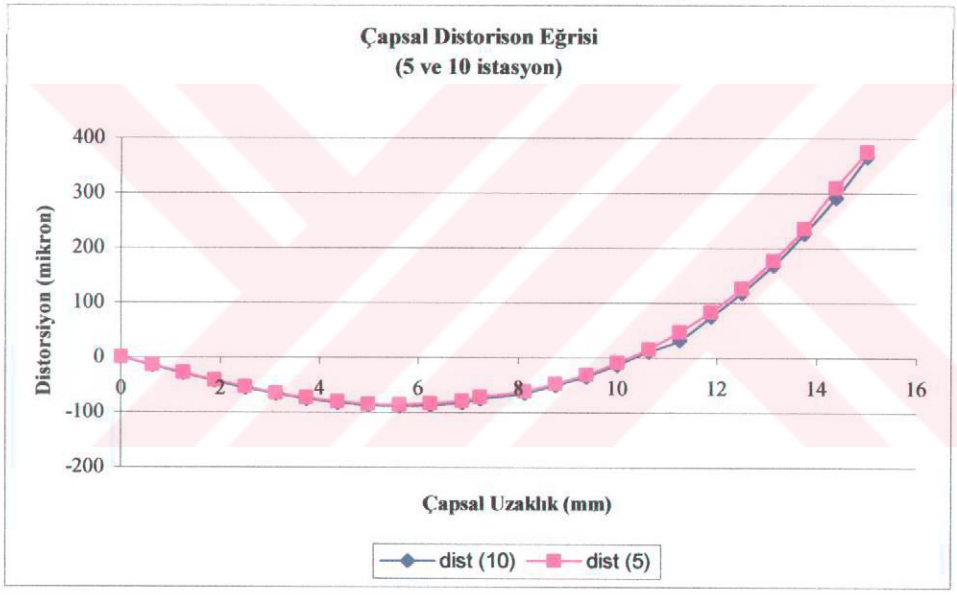


Şekil 141. 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)

BLUH metodu ile 20 mm mercek kullanılarak yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlar her üç eksen yönünde yaklaşık eşit hata değerleri ortaya çıkarmaktadır (Tablo 29). Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak yalnızca

teğetsel distorsiyon parametrelerinin etkisi dikkate alınarak yapılan çözümde x, y ve z yönündeki hataların büyük bir sıçrama gösterdiği tespit edilmiştir. Teğetsel distorsiyon parametre gurubu ile yapılan çözüm dikkate alınmaksızın, genel olarak 5 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.04 mm, 0.06 mm ve 0.06 mm olmuştur. 10 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları ise sırasıyla 0.06 mm, 0.07 mm ve 0.08 mm olmaktadır. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 29, Şekil 138-141).

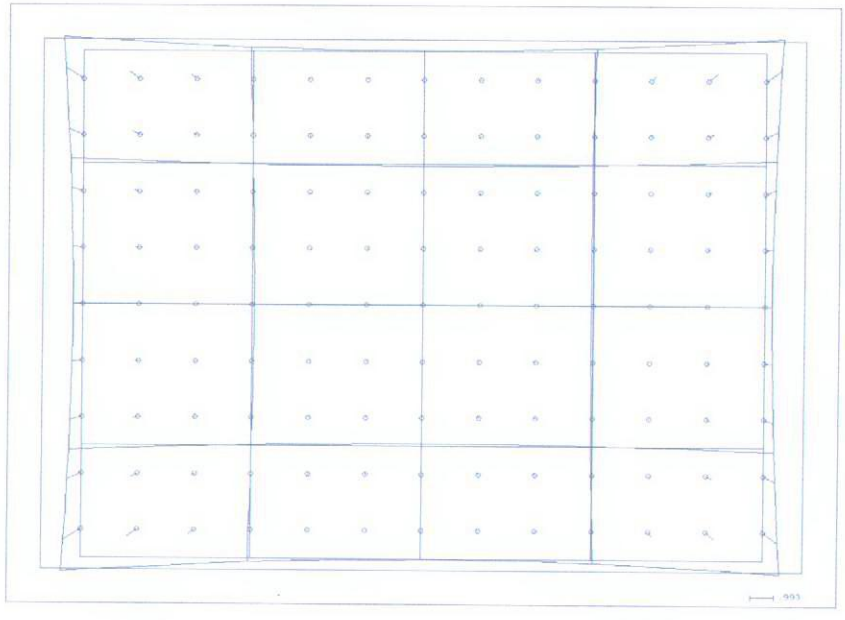
20 mm'lik mercek için, BLUH metodu ile 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda çapsal distorsiyon eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğriler sırasıyla Şekil 142'de gösterilmektedir.



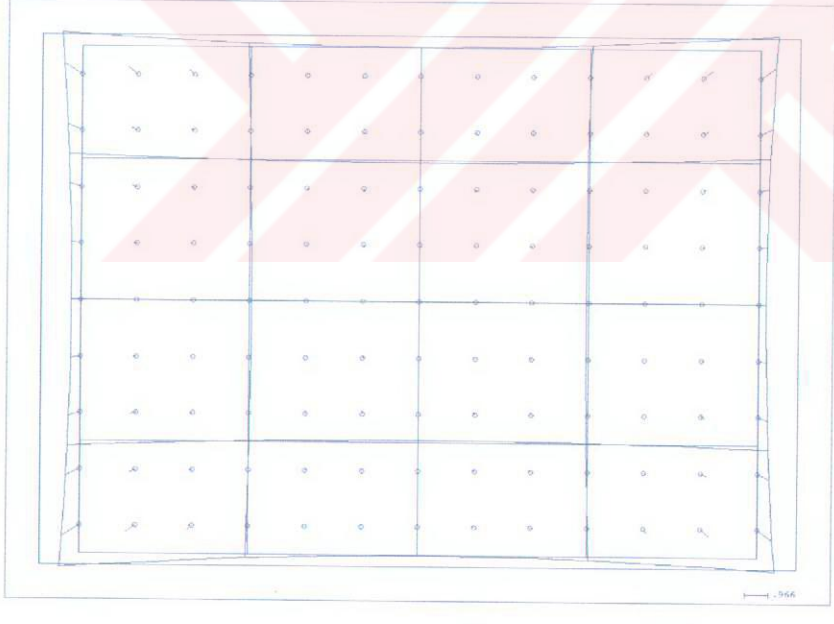
Şekil 142. 20 mm mercek için çapsal distorsiyon (5 ve 10 istasyonlu, Bluh, Kodak)

Şekil 142 incelendiğinde 5 ve 10 istasyonlu çekimlerden hesaplanan distorsiyon eğrileri arasında kayda değer bir fark olmadığı, max distorsiyon etkisinin 350 mikron civarında olduğu görülmektedir. Global distorsiyon etkisi ise her iki istasyon sayısı ile elde edilen sonuçlarda aynı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 143-144).

20 mm mercek için, 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda her bir parametre setine ait resim yüzeyi üzerindeki global distorsiyon (çapsal ve teğetsel) değişimini gösteren grafikler çizdirilmiştir. Bu grafikler Şekil 143-144'de gösterilmektedir.

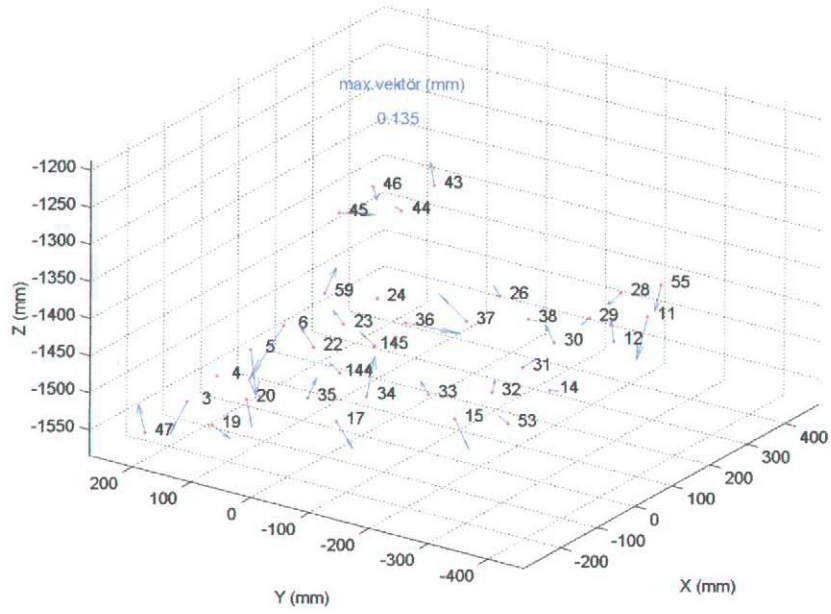


Şekil 143. 20 mm mercek için global distorsiyon (5 istasyonlu ve tüm parametreli, Bluh, Kodak)

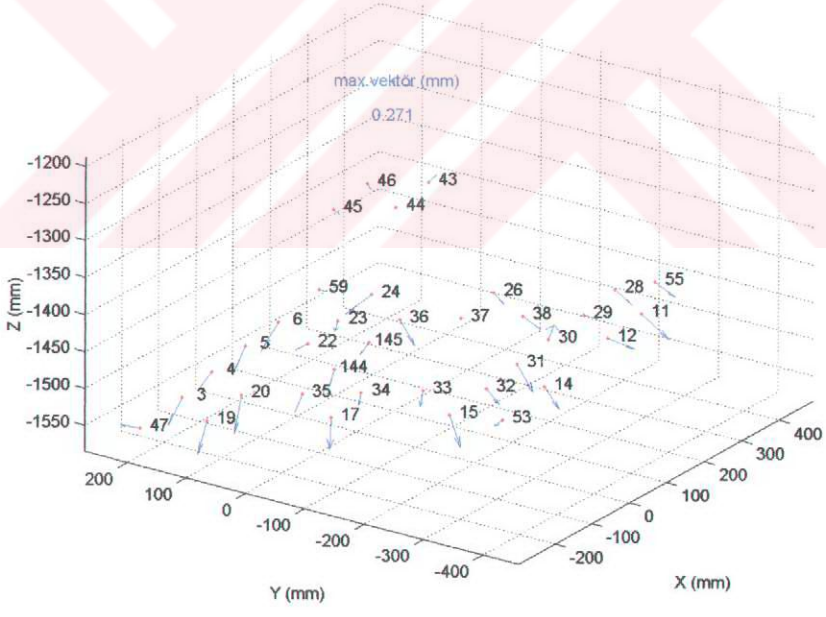


Şekil 144. 20 mm mercek için global distorsiyon (10 istasyonlu ve tüm parametreli, Bluh, Kodak)

5 ve 10 istasyonlu çekimler için obje uzayındaki noktalara ait hata vektörleri belirlenmiştir. 20 mm'lik mercek için her iki istasyon sayısına göre çizdirilen hata grafikleri sırasıyla Şekil 145-146'da gösterilmektedir.

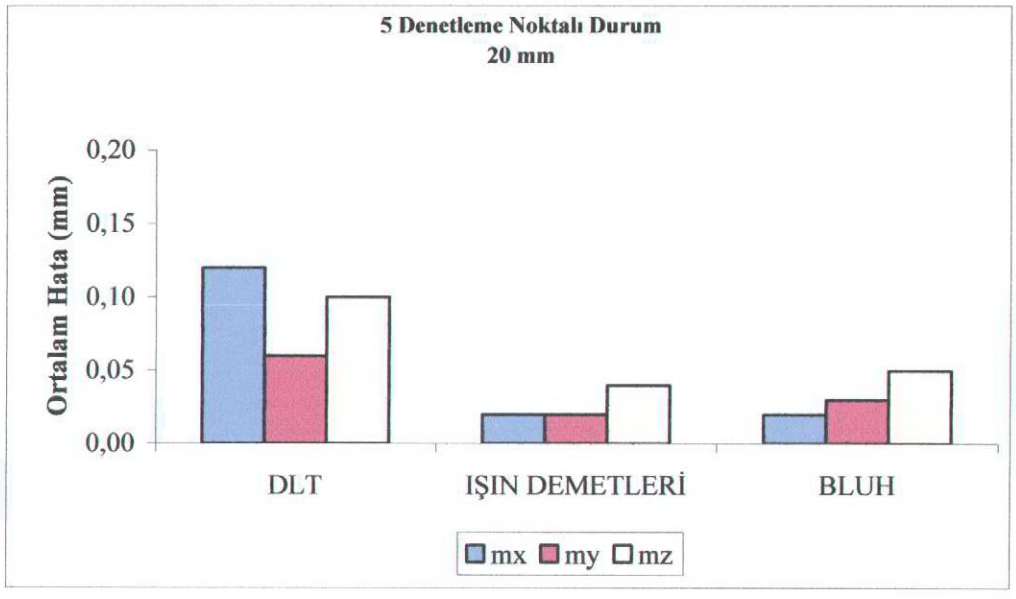


Şekil 145. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (10 istasyon, Bluh, Kodak)

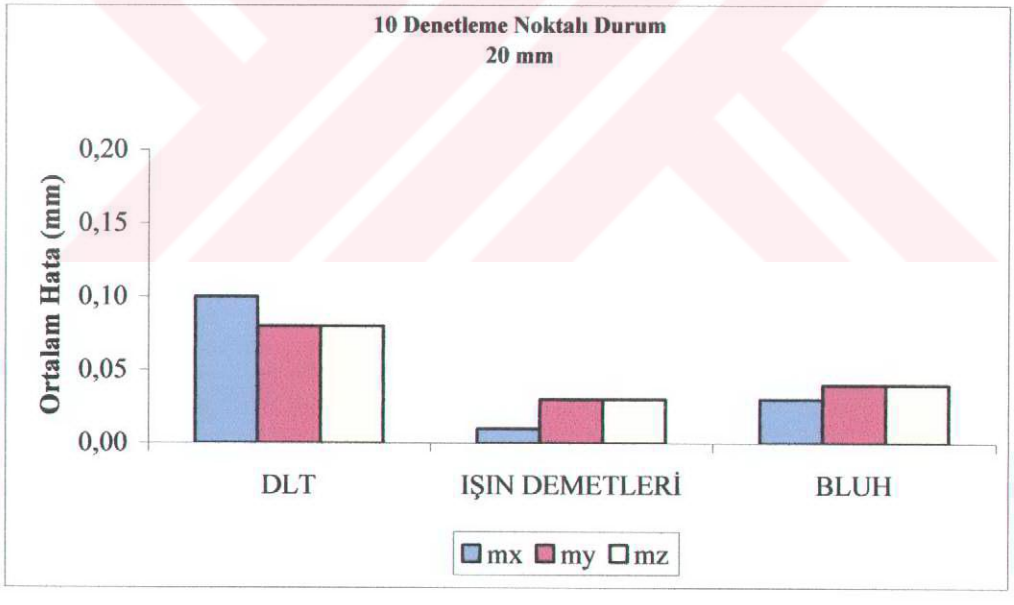


Şekil 146. 20 mm mercek için obje uzayı hata vektörleri (5 istasyon, Bluh, Kodak)

Şekil 145 ve 146'dan obje uzayında hata vektörlerinin 10 istasyonlu çekimde daha duyarlı sonuç verdiği görülmektedir. Bu istasyon sayısı ile yapılan çözümde max hata vektörü 0.135 mm'dir.



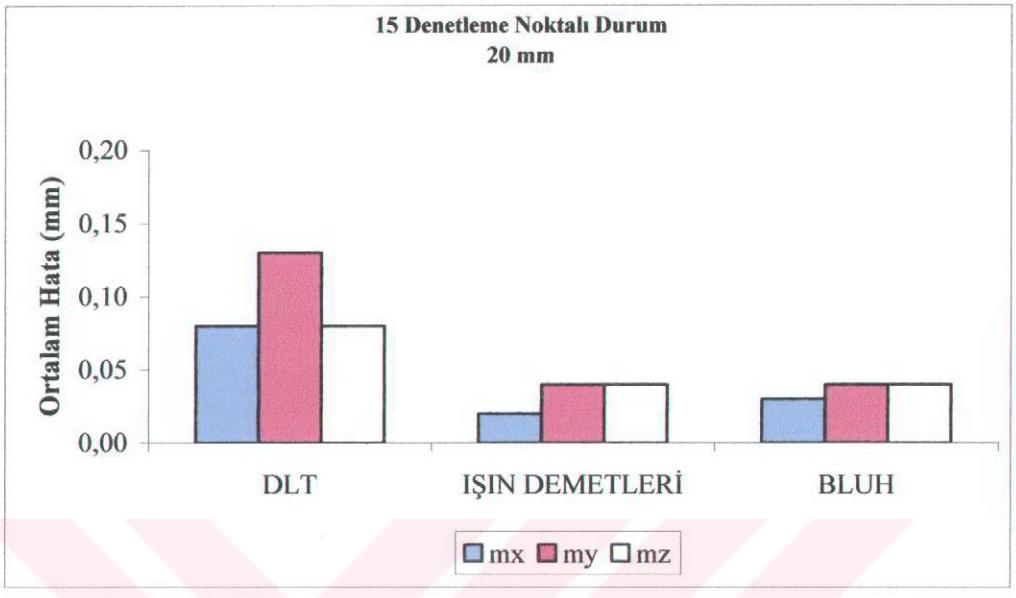
Şekil 147. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)



Şekil 148. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)

Test Alanı 2 için üç farklı matematik modelle elde edilen ortalama hata değerlerinin karşılaştırılması amacıyla, 20 mm mercek ile bu metotlar kullanılarak hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 147-149 grafiklerinde gösterilmektedir. Diğer test alanlarında

olduğu gibi, bu grafiklerde de yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta gruplarına göre irdelenmiştir.



Şekil 149. 15 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 2, Kodak)

Şekil 147-149 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre Işın Demetleri ve Bluh matematik modellerinin daha duyarlıklı sonuçlar ortaya koydukları görülmektedir. Ancak üç eksen yönünde elde edilen sonuçlardan Işın Demetleri yönteminin daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak kullanılan bütün metotlarla ortaya çıkarılan sonuçlar arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Tüm denetleme nokta gruplarında DLT metodu diğer iki metoda göre daha duyarsız sonuçlar vermiştir. Bu, seçilen test alanındaki noktaların bir düzlem oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

3.4. Kodak DCS 460 Dijital Kamerası Test Alanı 4 Bulguları

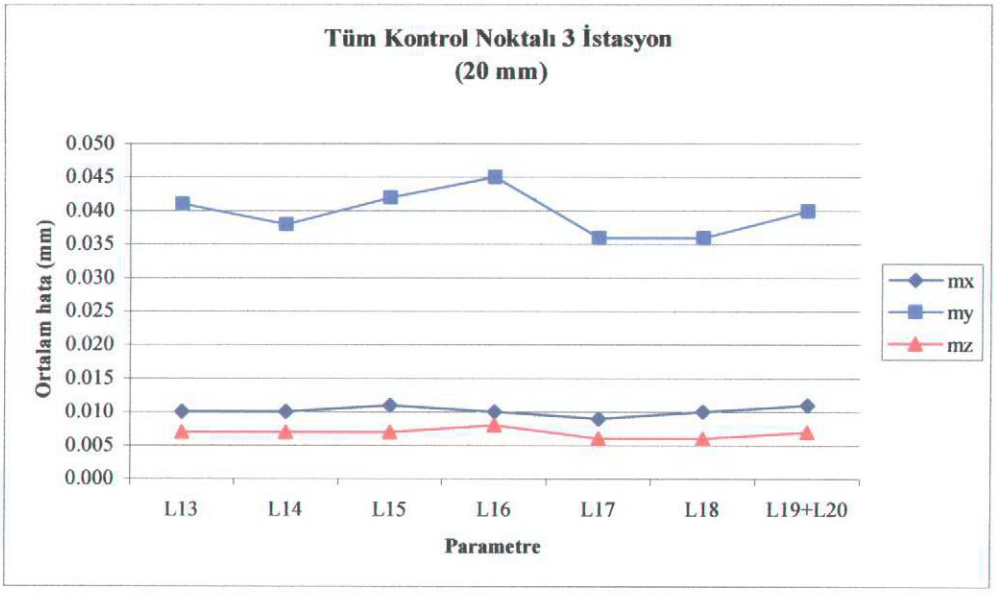
Bu kameranın uygulama alanındaki testi için Hannover Üniversitesi (Almanya) Fotogrametri Enstitüsü binası test alanı olarak kullanılmıştır. Söz konusu test alanı için DLT, Işın Demetleri ve Bluh matematik modeli ile çözümler yapılmıştır. Farklı metotlar ile bütün kontrol noktalarının kullanılması yada farklı denetleme nokta sayısı (5, 10 ve 20)

grupları kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Bu test alanında 3'lü konvergent ile görüntü alımı yapılmıştır.

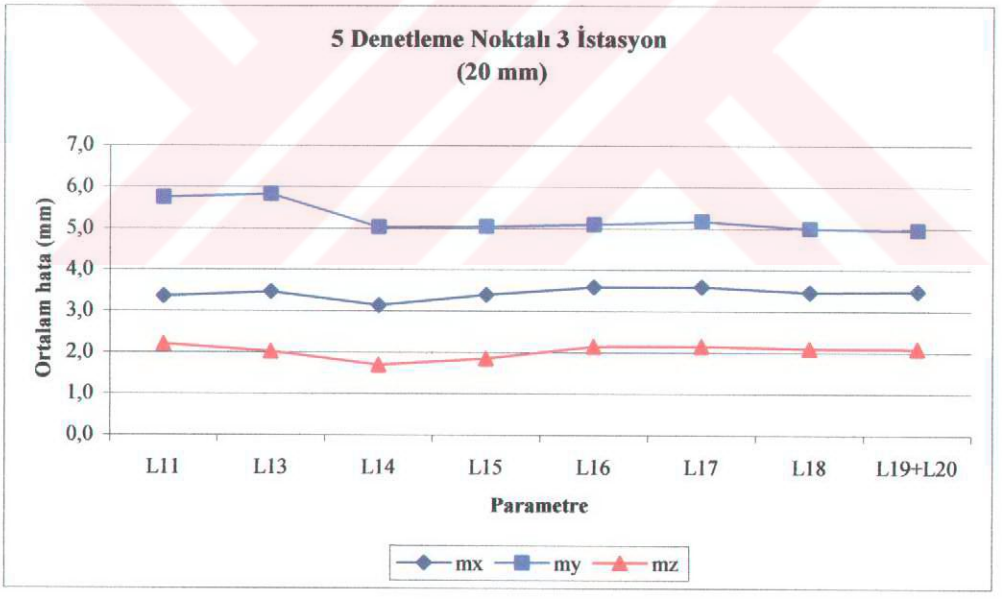
a) DLT Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hataları hesaplanarak grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 150-153). 3 istasyonlu ve 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama hata değerleri Tablo 30'de gösterilmektedir.

Tablo 30. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (DLT, Kodak)

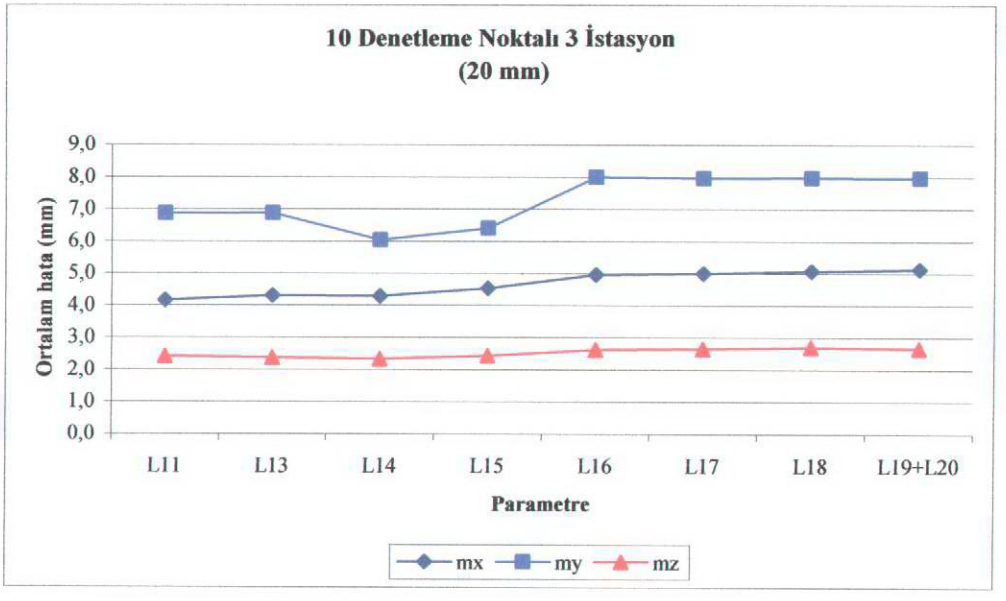
Birim: mm	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			20 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
L11	3.36	5.74	**2.20**	4.15	6.87	2.42	3.21	5.87	0.95
L13	3.46	**5.82**	2.02	4.30	6.88	2.37	3.63	8.07	1.00
L14	3.14	5.03	1.70	4.29	6.04	2.34	3.65	6.23	1.10
L15	3.40	5.04	1.86	4.54	6.40	2.44	3.61	6.30	1.02
L16	3.58	5.10	2.15	4.97	**8.00**	2.62	4.25	7.55	1.12
L17	**3.59**	5.18	2.16	5.00	7.97	2.66	4.51	8.23	**1.13**
L18	3.46	5.00	2.11	5.07	7.98	**2.71**	**4.57**	8.42	1.12
L19+L20	3.48	4.96	2.09	**5.13**	7.97	2.66	4.56	**8.42**	1.09



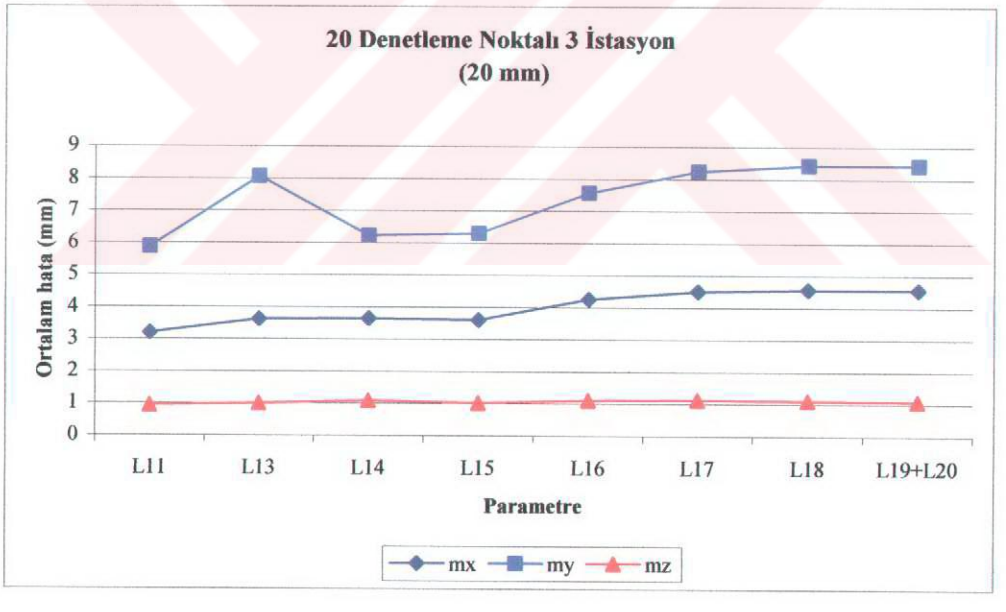
Şekil 150. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (45 kontrol noktalı, DLT, Kodak))



Şekil 151. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, DLT, Kodak)



Şekil 152. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, DLT, Kodak)



Şekil 153. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, DLT, Kodak)

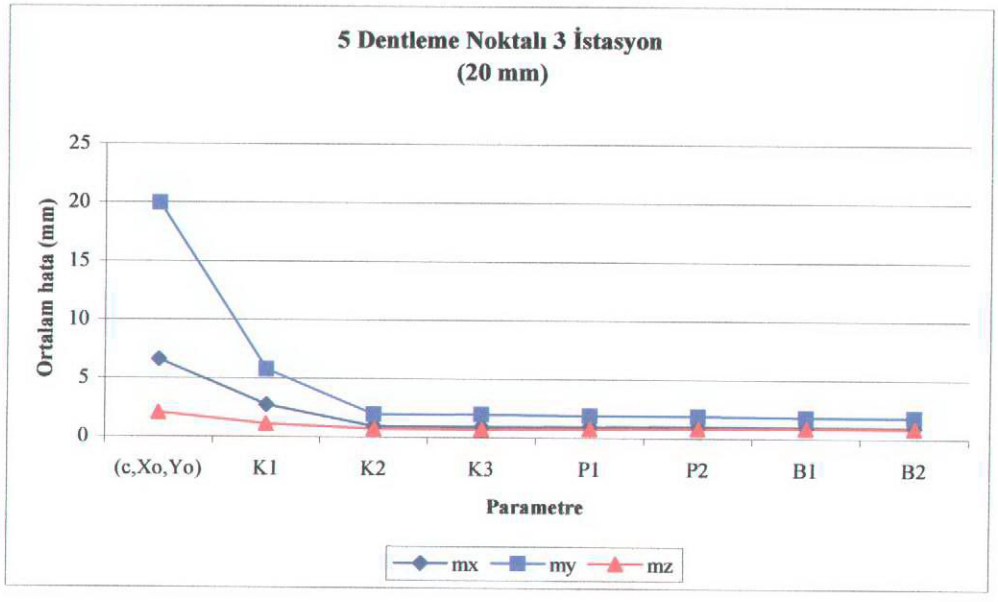
Bu test alanında DLT metodu kullanılarak 20 mm mercek ile yapılan bütün çözümlerde tüm kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 30). Sadece 3'lü konvergent alım

yapıldığından istasyon sayısına göre irdeleme yapılamamaktadır. Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak parametre sayısı arttıkça (L14 parametresinden sonra) bütün denetleme noktalı çözümlerde doğruluğun azaldığı tespit edilmiştir. Çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 5.13 mm, 8.42 mm ve 2.71 mm olarak bulunmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha hassas sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 30, Şekil 150-153).

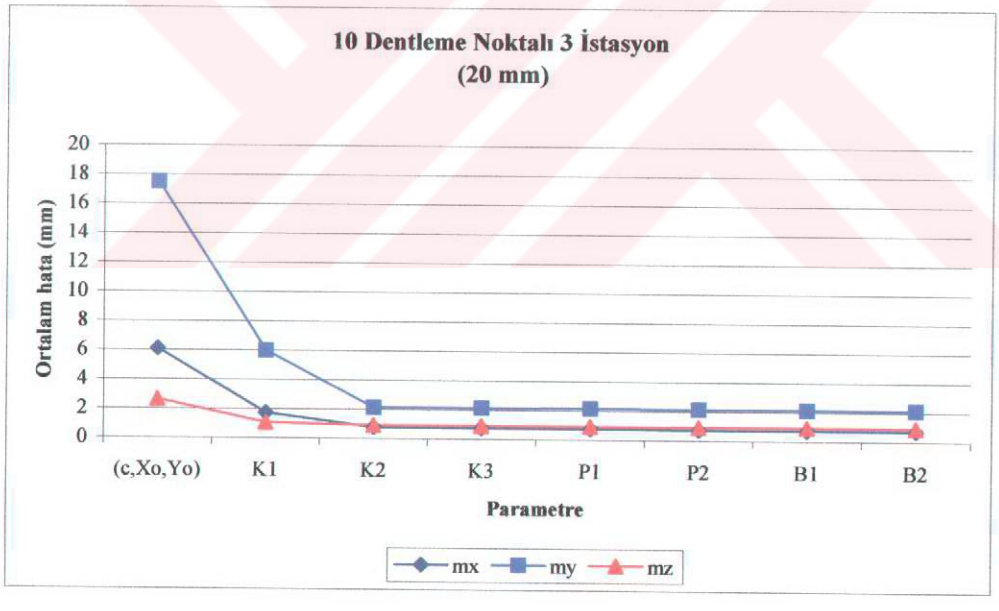
b) İlave Parametreli Işın Demetleri Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları için obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hata değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 154-156). 3 istasyonlu ve 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hata değerleri Tablo 31'de gösterilmektedir.

Tablo 31. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Işın Demet., Kodak)

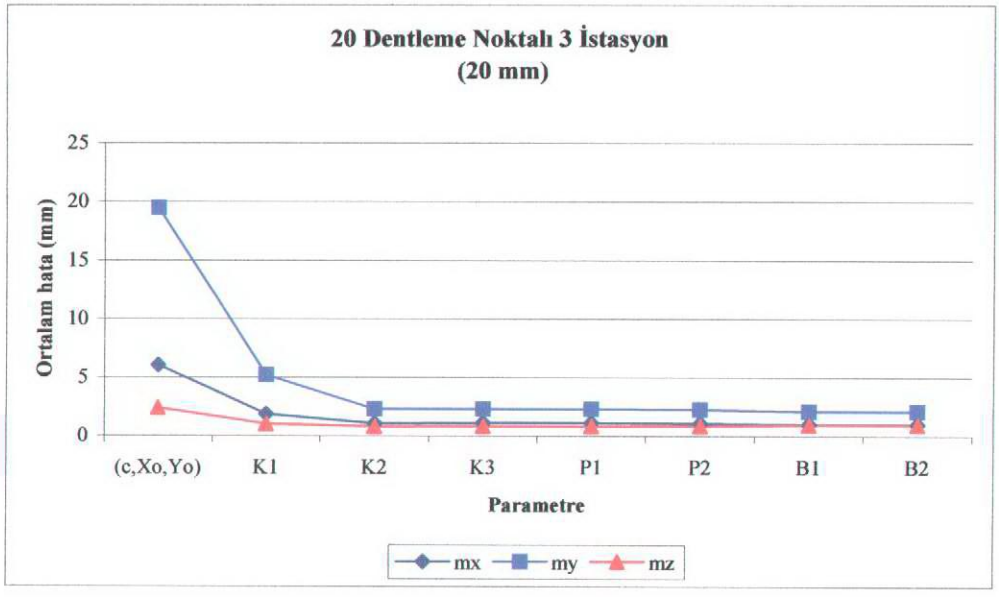
Birim: mm	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			20 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	6.61	19.97	2.07	6.11	17.51	2.64	6.05	19.47	2.40
K_1	**2.76**	**5.79**	**1.11**	**1.73**	**6.00**	**1.07**	**1.87**	**5.20**	**1.04**
K_2	0.94	1.96	0.74	0.79	2.13	0.91	1.08	2.30	0.82
K_3	0.92	1.98	0.71	0.76	2.13	0.91	1.13	2.32	0.85
P_1	0.95	1.90	0.78	0.76	2.16	0.92	1.13	2.31	0.85
P_2	1.02	1.91	0.84	0.74	2.13	0.92	1.09	2.28	0.88
B_1	0.96	1.82	0.90	0.74	2.14	0.93	1.02	2.11	0.97
B_2	0.97	1.82	0.90	0.74	2.14	0.93	1.02	2.11	0.97



Şekil 154. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak))



Şekil 155. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)



Şekil 156. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Işın Demet., Kodak)

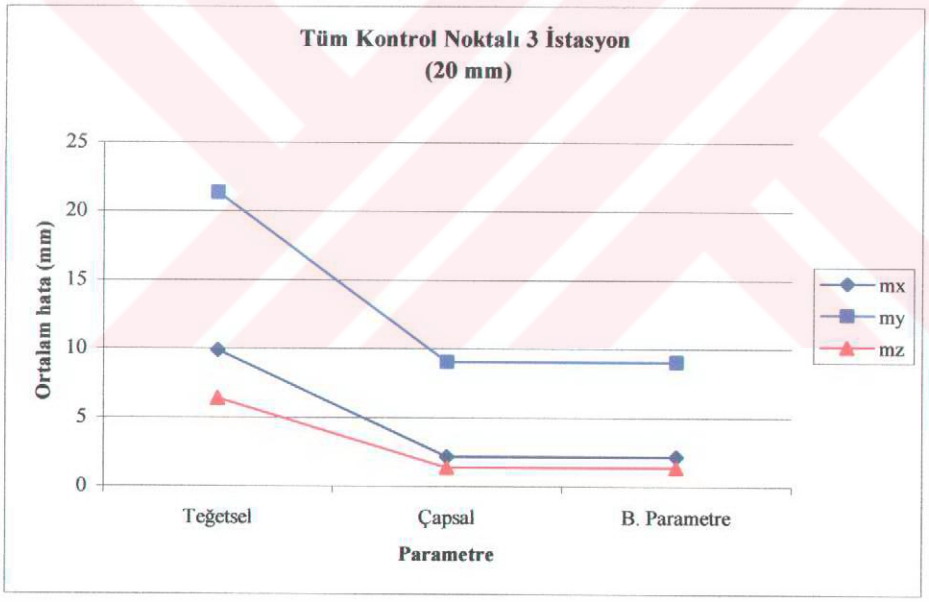
Işın Demetleri metodunda 20 mm mercek ile yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 31). İlave parametrelerin etkileri özellikle çapsal distorsiyonun 2. teriminden sonra farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak bütün ilave terimlerin kullanılması durumunda x, y ve z yönündeki doğruluğun daha da hassas olduğu gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 2.76 mm, 6.00 mm ve 1.11 mm olmuştur. Ancak çapsal distorsiyonun 2. teriminin dikkate alınması ile yapılan çözüm ve sonraki parametrelerin ilave edilmesiyle yapılan çözümlerde her üç eksen yönündeki ortalama nokta konum duyarlığı ciddi bir artış göstermektedir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 31, Şekil 154-156).

c) BLUH Metodu Bulguları: 20 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları ve bütün noktalar kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hatası değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 157-160). 3 istasyon noktalı ve 5,

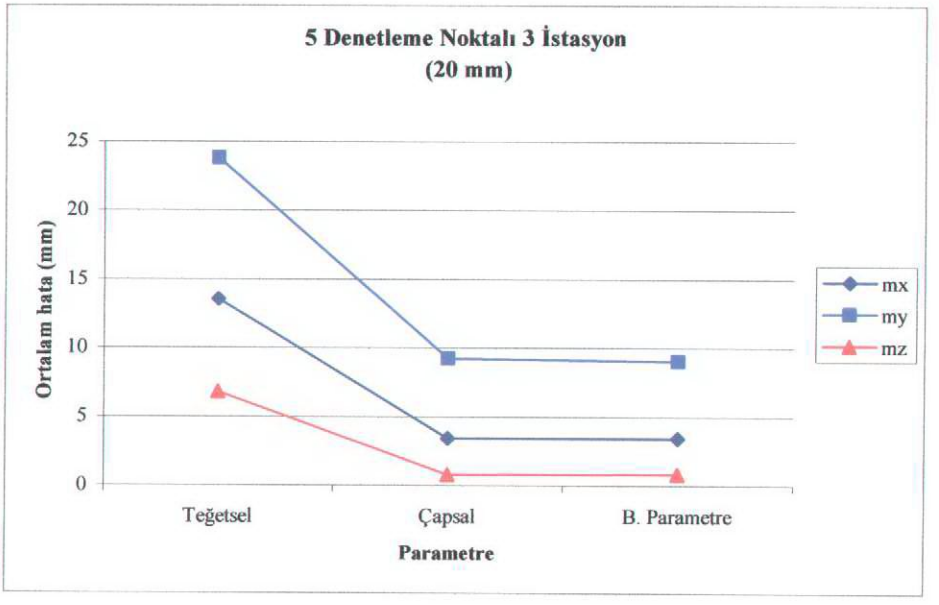
10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hataları ayrıca Tablo 32'de gösterilmektedir.

Tablo 32. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Bluh, Kodak)

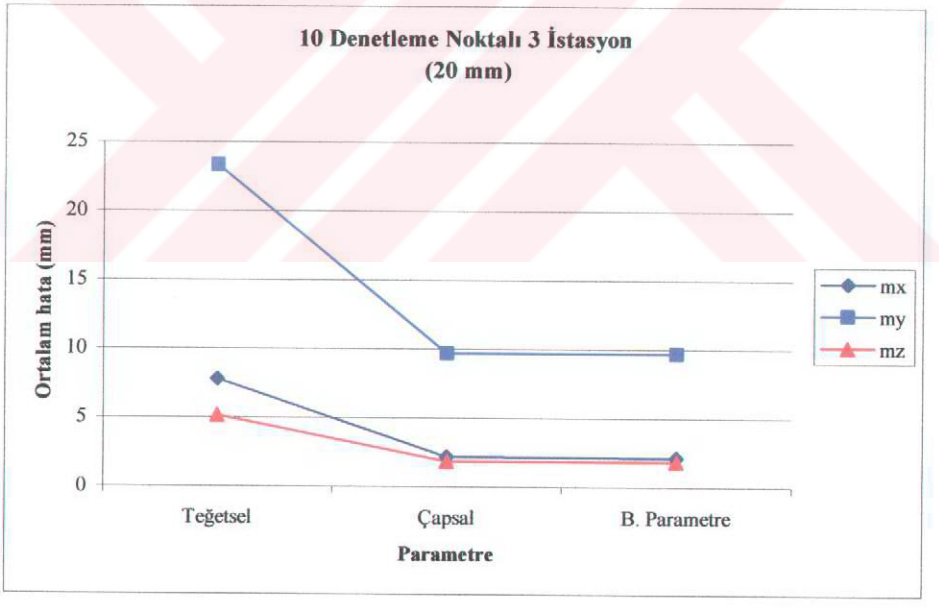
Birim: mm	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			20 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Tüm Parametre	**3.44**	9.06	**0.82**	2.14	**9.71**	**1.87**	**3.04**	10.87	1.23
Çapsal	3.42	**9.21**	0.80	**2.17**	9.67	1.86	3.04	**10.91**	**1.27**
Teğetsel	13.55	23.79	6.83	7.79	23.31	5.15	10.97	21.98	4.71



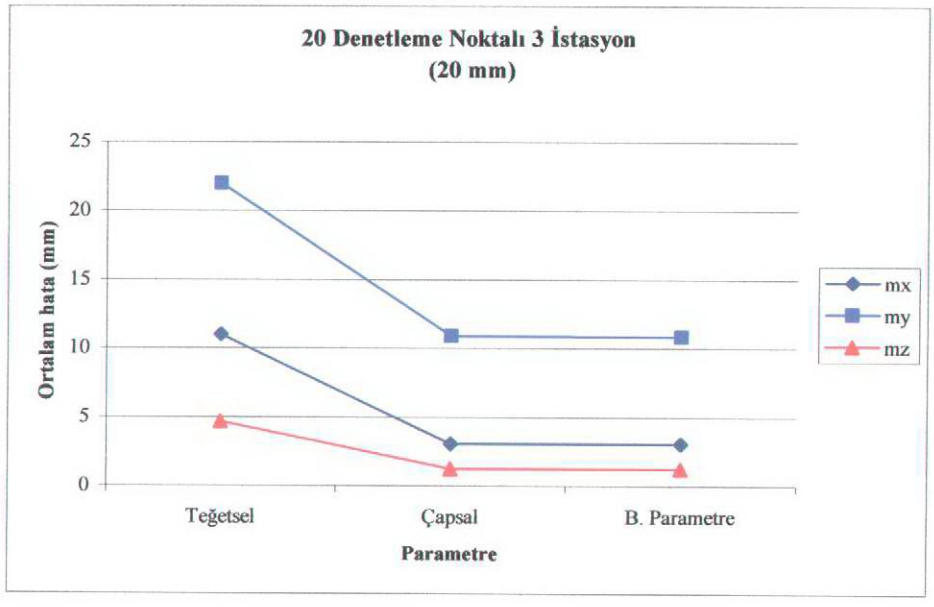
Şekil 157. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (45 kontrol noktalı, Bluh, Kodak)



Şekil 158. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)



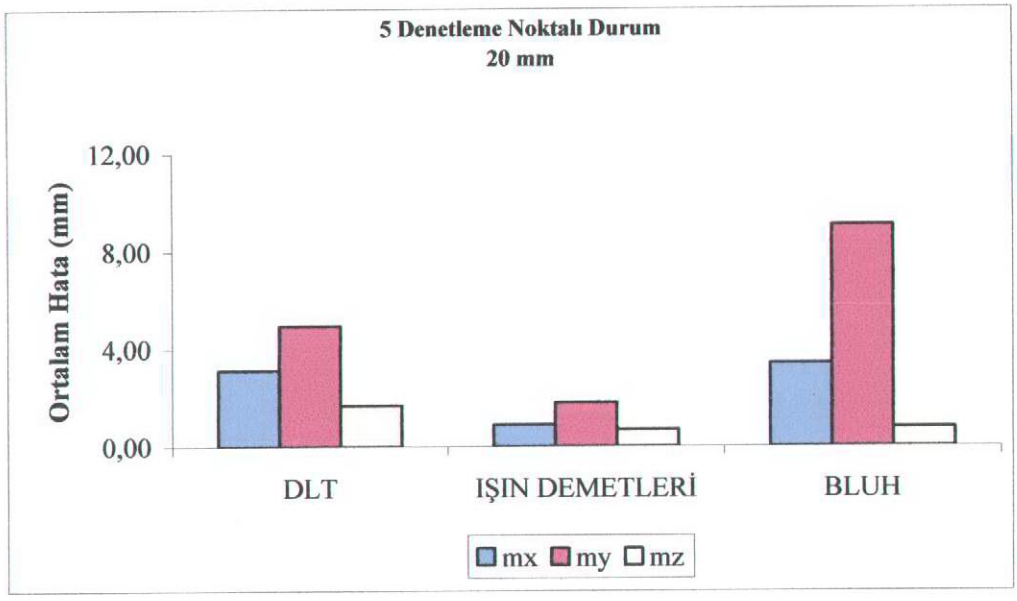
Şekil 159. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)



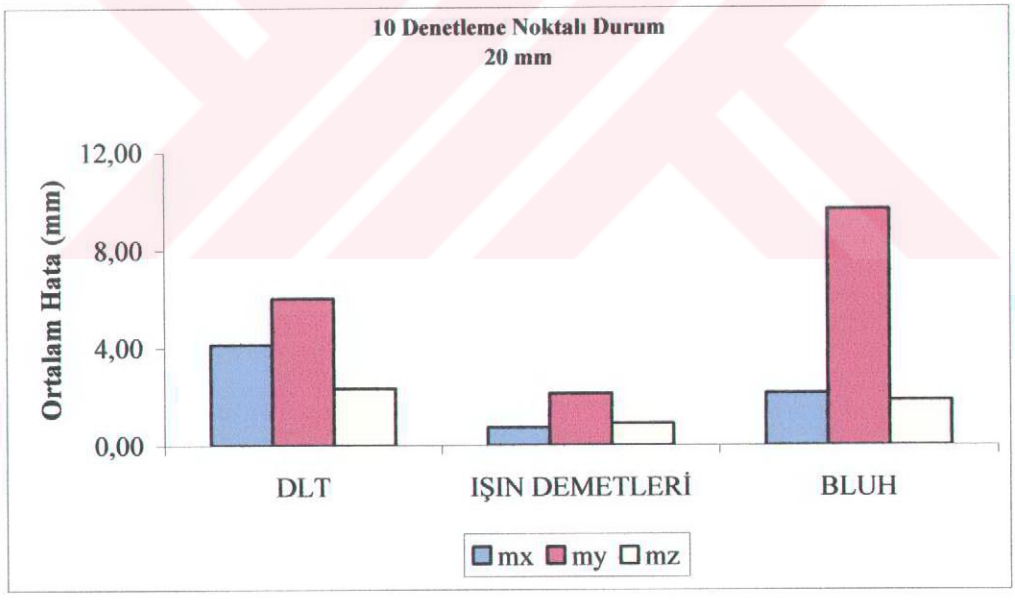
Şekil 160. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama nokta konum hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Bluh, Kodak)

BLUH metodu ile 20 mm mercek kullanılarak yapılan çözümlerde bütün kontrol noktaları ve denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu gözlenmektedir (Tablo 32). İlave parametrelerin etkileri farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak yalnızca teğetsel distorsiyon parametrelerinin etkisi dikkate alınarak yapılan çözümde x, y ve z yönündeki hataların büyük bir sıçrama gösterdiği tespit edilmiştir. Teğetsel distorsiyon parametre gurubu ile yapılan çözüm dikkate alınmaksızın, genel olarak 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 3.44 mm, 10.91 mm ve 1.87 mm olduğu tespit edilmiştir. Kontrol nokta sayıları incelendiğinde 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği, ancak bütün denetleme noktası gurupları ile ortaya çıkan sonuçlar arasında önemli bir fark olmadığı tespit edilmiştir (Tablo 32, Şekil 157-160).

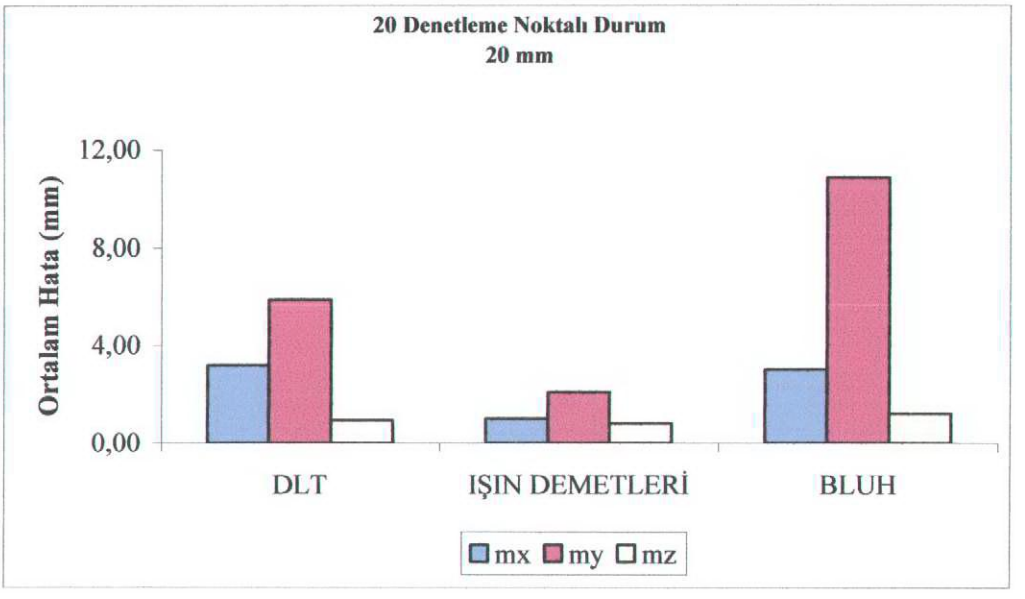
Test Alanı 4 için üç farklı matematik modelle elde edilen ortalama hata değerlerinin karşılaştırılması amacıyla, 20 mm mercek ile bu metotlar kullanılarak hesaplanan en iyi ortalama hata değerleri Şekil 161-163 grafiklerinde gösterilmektedir. Diğer test alanlarında olduğu gibi, bu grafiklerde de yöntemlerin doğrulukları seçilen denetleme nokta gruplarına göre irdelenmiştir.



Şekil 161. 5 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)



Şekil 162. 10 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)



Şekil 163. 20 denetleme noktalı durumda bütün metotlardan elde edilen en iyi doğruluklar (Test Alanı 4)

Şekil 161-163 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında ortaya çıkan sonuçlara göre Işın Demetleri matematik modelinin daha duyarlıklı ve üstün sonuçlar verdiği görülmektedir. Üç eksen yönünde de edilen sonuçlardan Işın Demetleri yönteminin çok daha hassas olduğu tespit edilmiştir. Tüm denetleme nokta gruplarında Bluh metodu diğer iki metoda göre duyarsız sonuçlar vermiştir.

3.5. Aynı Test Alanlarında Farklı Kameralarla Elde Edilen Bulgular

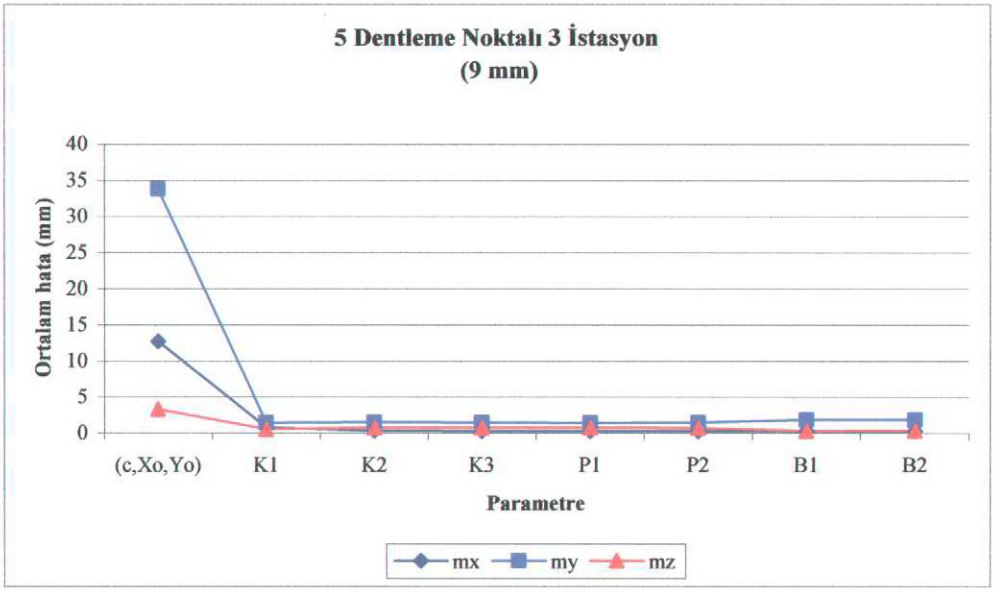
Geometrik çözünürlük ve piksel büyüklükleri farklı kameraların, bu özellikleri ve doğruluk yönünden karşılaştırılması için, laboratuar ve uygulamada seçilen alanlarda geometrik açıdan değerlendirmeler yapılmıştır. Bunun için Test Alanı 2 ve 4 kullanılarak dört ayrı kamera (Kodak DCS460, Olympus E-10, Nikon Coolpix 990 ve Rollei D7 Metric) ile çözümler yapılmıştır. Bu değerlendirmelerde, daha önceki değerlendirmelerde en iyi çözümü veren İlave Parametreli Işın Demetleri metodu kullanılmıştır.

3.5.1. Olympus E-10 Dijital Kamerası Test Alanı 4 Bulguları

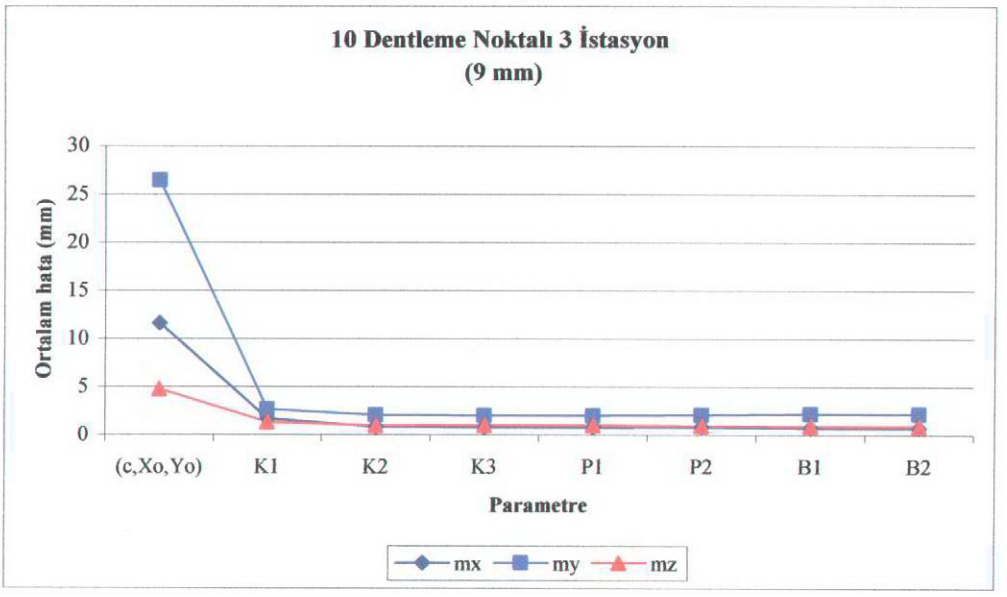
Bu kamerada 9 mm mercek ile farklı denetleme nokta sayıları kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hatası değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 164-166). 3 istasyon noktalı ve 5, 10 ve 20 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hataları ayrıca Tablo 33'de verilmektedir.

Tablo 33. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Olympus)

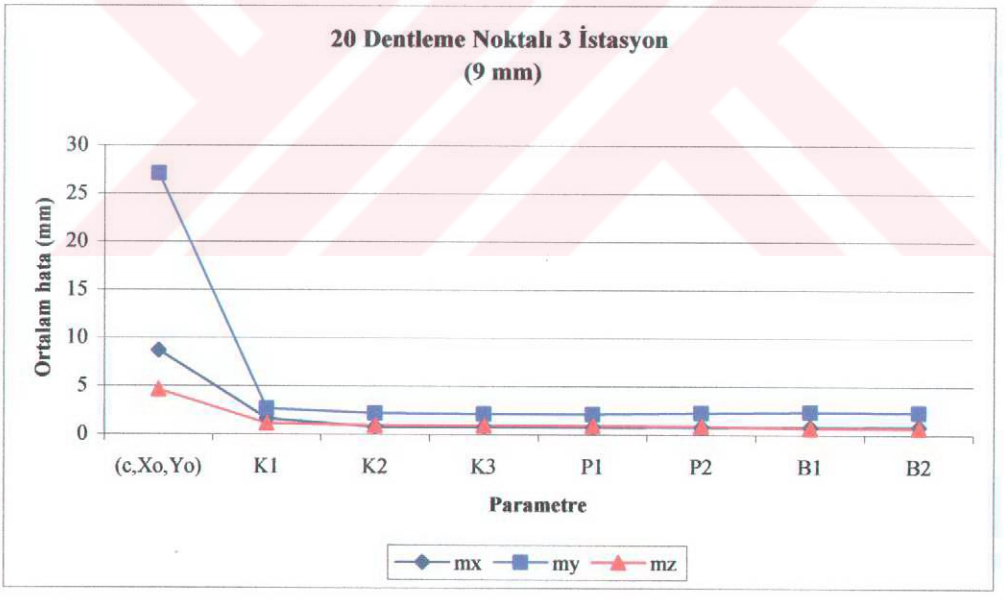
Birim: mm	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			20 Denetleme Noktası		
	3 İstasyon			3 İstasyon			3 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_0, y_0	12.76	33.80	3.33	11.62	26.46	4.79	8.69	27.06	4.60
K_1	**0.81**	1.47	0.58	**1.74**	**2.68**	**1.35**	**1.61**	**2.66**	**1.12**
K_2	0.35	1.56	0.80	0.85	2.11	1.01	0.77	2.21	0.94
K_3	0.31	1.50	0.80	0.82	2.06	1.01	0.77	2.13	0.94
P_1	0.31	1.45	**0.81**	0.82	2.05	1.01	0.77	2.13	0.94
P_2	0.30	1.51	0.74	0.86	2.13	0.97	0.81	2.25	0.89
B_1	0.29	**1.92**	0.37	0.76	2.22	0.94	0.80	2.34	0.71
B_2	0.29	1.92	0.38	0.77	2.21	0.94	0.84	2.31	0.70



Şekil 164. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Olympus)



Şekil 165. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Olympus)



Şekil 166. 3 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (20 denetleme noktalı, Olympus)

Olympus kamerası ile Işın Demetleri metodu kullanılarak yapılan değerlendirmelerde, denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle y ekseni (derinlik) yönündeki hataların x ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu belirlenmiştir (Tablo 33). Çözümde kullanılan ilave parametrelerin etkileri,

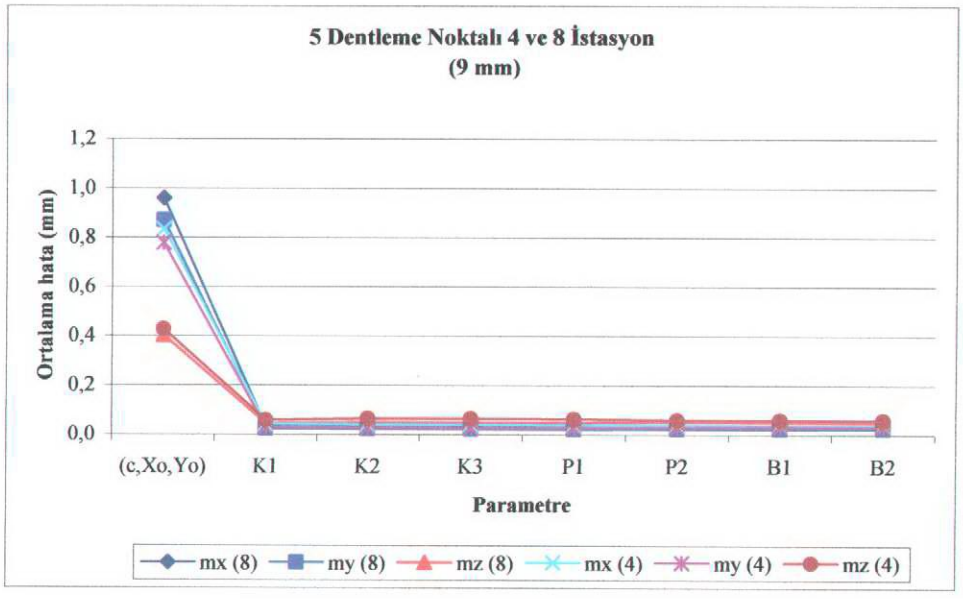
özellikle çapsal distorsiyonun 2. teriminden (k_2) sonra farklı kombinasyonlar için fazla değişmediği, ancak ölçek faktörü ve eksenler arasındaki dikliği temsil eden B_1 ve B_2 parametrelerinin dışındaki ilave terimlerin kullanılması durumunda, x, y ve z yönündeki doğruluğun daha da hassas olduğu gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, genel olarak 3 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 1.74 mm, 2.68 mm ve 1.35 mm olmuştur. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 33, Şekil 164-166).

3.5.2. Nikon Coolpix 990 Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları

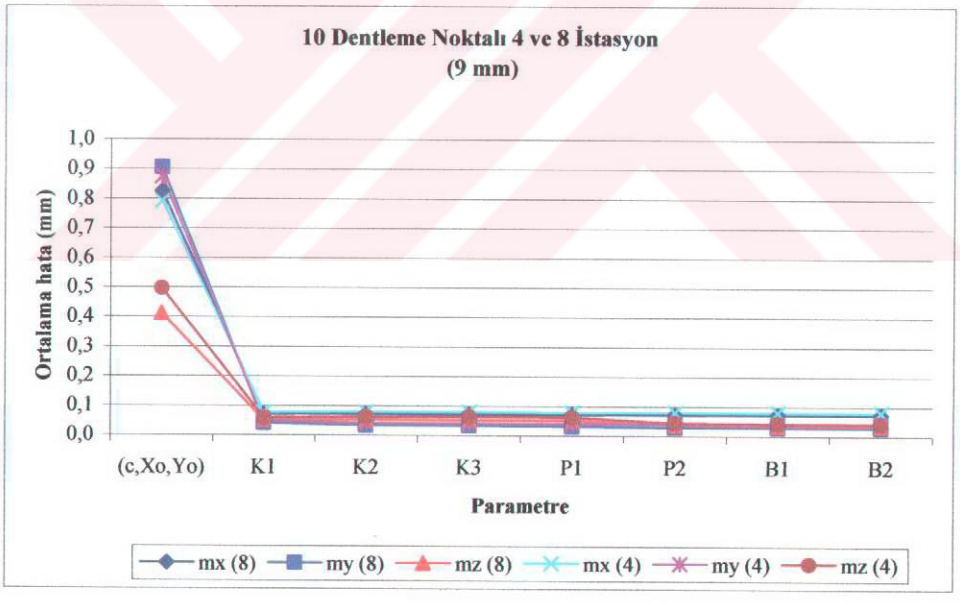
Bu kamera ile farklı denetleme nokta sayıları kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hatası değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir (Şekil 167-169). 4 ve 8 istasyon noktalı ve 5, 10 ve 15 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hataları ayrıca Tablo 34'de gösterilmektedir.

Tablo 34. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Coolpix 990)

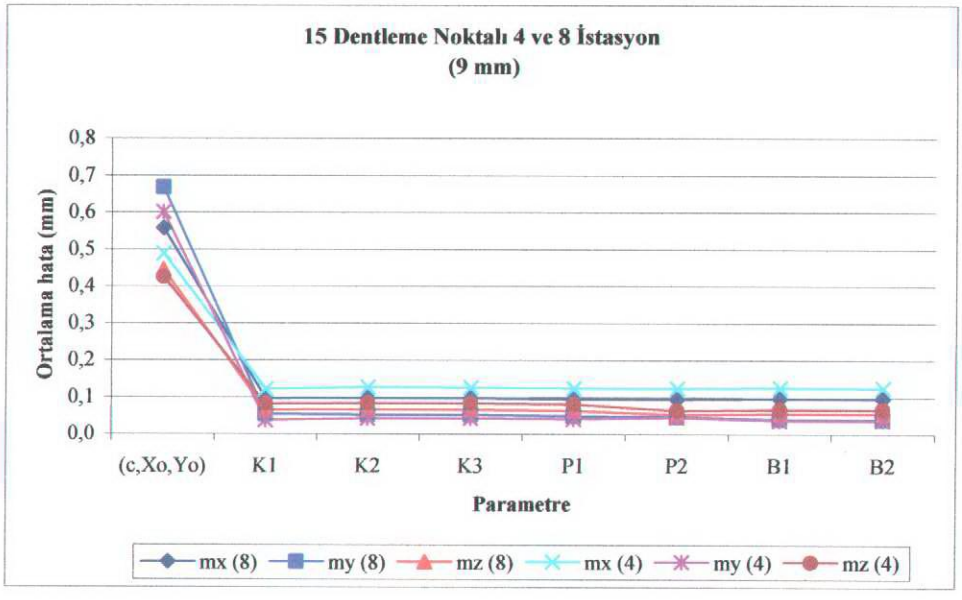
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						15 Denetleme Noktası					
	8 İstasyon			4 İstasyon			8 İstasyon			4 İstasyon			8 İstasyon			4 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
c, x_o, y_o	0.96	0.87	0.40	0.83	0.78	0.43	0.82	0.91	0.41	0.79	0.87	0.50	0.56	0.67	0.45	0.49	0.60	0.43
K_1	**0.03**	0.02	0.05	0.04	0.03	0.06	0.07	0.04	0.05	0.08	**0.05**	0.06	**0.10**	**0.05**	**0.07**	0.12	0.04	**0.08**
K_2	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	**0.07**	**0.07**	**0.03**	0.05	0.08	0.04	0.06	0.10	0.05	0.07	**0.13**	0.04	0.08
K_3	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.07	0.07	0.03	**0.05**	**0.08**	0.04	**0.06**	0.10	0.05	0.07	0.13	0.04	0.08
P_1	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.07	0.07	0.03	0.05	0.08	0.04	0.06	0.10	0.05	0.06	0.12	0.04	0.08
P_2	0.03	0.02	0.05	0.04	0.03	0.06	0.07	0.03	0.04	0.08	0.04	0.05	0.10	0.05	0.05	0.12	**0.05**	0.07
B_1	0.03	**0.03**	**0.05**	**0.04**	**0.03**	0.06	0.07	0.03	0.04	0.08	0.04	0.04	0.10	0.04	0.06	0.13	0.04	0.07
B_2	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.06	0.07	0.03	0.04	0.08	0.04	0.04	0.10	0.04	0.06	0.13	0.04	0.07



Şekil 167. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Coolpix 990)



Şekil 168. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Coolpix 990)



Şekil 169. 4 ve 8 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Coolpix 990)

Nikon Coolpix 990 kamerası ile Işın Demetleri metodu kullanılarak yapılan çözümlerde denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle x ekseni yönündeki hataların y ve z ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 34). İlave parametrelerin etkileri özellikle çapsal distorsiyonun 1. teriminden (k_1) sonra farklı kombinasyonlar için değişmediği gözlenmiştir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, 4 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.13 mm, 0.05 mm ve 0.08 mm, 8 istasyonlu çözümde ise max hata değerleri sırasıyla 0.10 mm, 0.05 mm ve 0.07 mm olmaktadır. Çekim istasyon sayıları bakımından irdeleme yapıldığında, 8 istasyonlu çekimin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak 4 ve 8 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 33, Şekil 167-169).

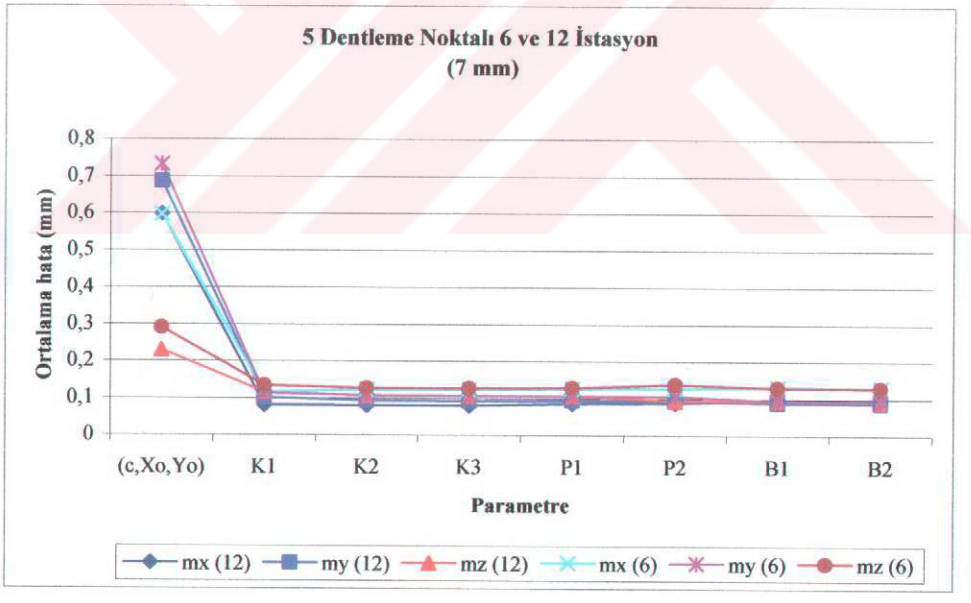
3.5.3. Rollei D7 Metric Dijital Kamerası Test Alanı 2 Bulguları

Bu kamera ile farklı denetleme nokta sayıları kullanılarak obje uzayında x, y ve z yönünde ortalama nokta konum hatası değerleri hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir

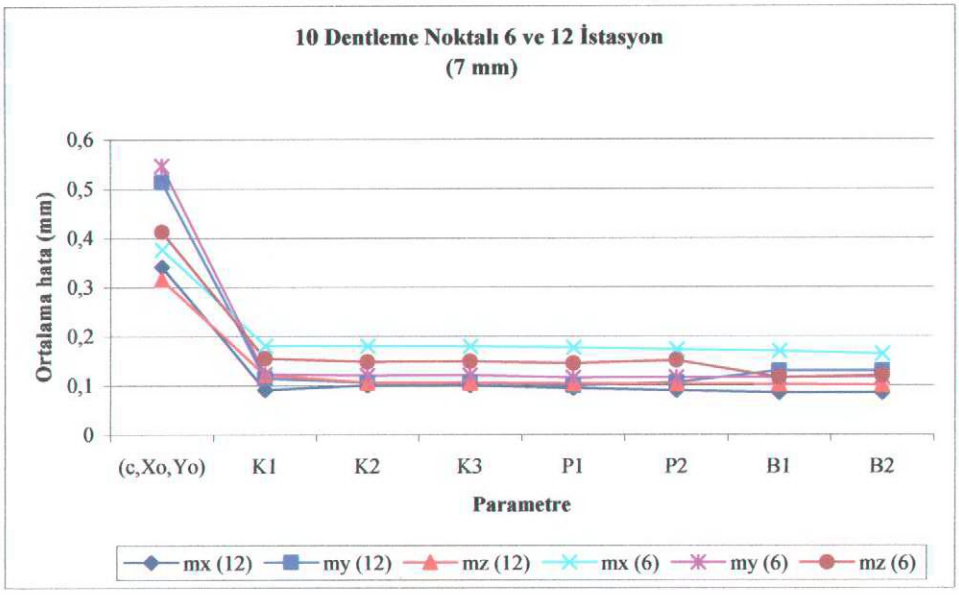
(Şekil 170-172). 6 ve 12 istasyon noktalı ve 5, 10 ve 15 farklı denetleme nokta grubuna göre hesaplanan ortalama konum hataları ayrıca Tablo 35'de gösterilmektedir.

Tablo 35. Denetleme noktası sayılarına göre x, y ve z yönündeki ortalama hata değerleri (Rollei)

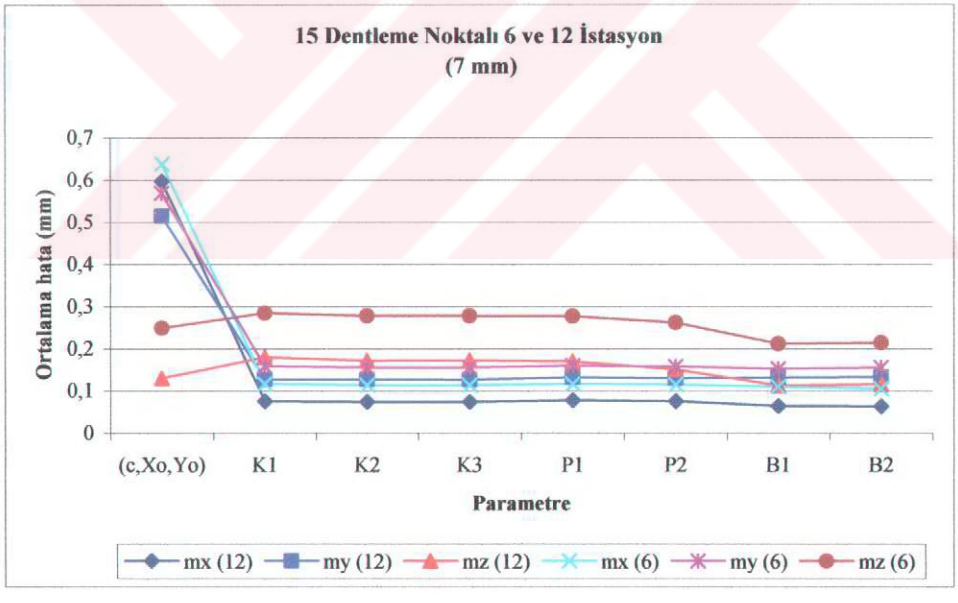
Birim: mm	5 Denetleme Noktası						10 Denetleme Noktası						15 Denetleme Noktası					
	12 İstasyon			6 İstasyon			12 İstasyon			6 İstasyon			12 İstasyon			6 İstasyon		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
C, x_o, y_o	0.60	0.69	0.23	0.60	0.73	0.29	0.60	0.51	0.13	0.38	0.55	0.41	0.34	0.51	0.32	0.64	0.57	0.25
K_1	0.08	**0.10**	**0.12**	0.12	**0.11**	0.13	**0.08**	**0.13**	**0.18**	**0.18**	**0.12**	**0.15**	0.09	0.12	**0.12**	**0.12**	**0.16**	**0.28**
K_2	0.08	0.09	0.11	0.12	0.11	0.13	0.07	0.13	0.17	0.18	0.12	0.15	**0.10**	0.11	0.11	0.11	0.16	0.28
K_3	0.08	0.09	0.11	0.12	0.11	0.13	0.07	0.13	0.17	0.18	0.12	0.15	0.10	0.11	0.11	0.11	0.16	0.28
P_1	0.09	0.09	0.11	**0.13**	0.11	0.13	0.08	0.13	0.17	0.18	0.12	0.15	0.09	0.10	0.10	0.12	0.16	0.28
P_2	0.09	0.09	0.09	0.13	0.11	**0.14**	0.08	0.13	0.15	0.17	0.12	0.15	0.09	0.11	0.10	0.12	0.16	0.26
B_1	**0.10**	0.09	0.09	0.13	0.09	0.13	0.06	0.13	0.11	0.17	0.12	0.12	0.09	**0.13**	0.10	0.11	0.15	0.21
B_2	0.10	0.09	0.09	0.13	0.09	0.13	0.06	0.13	0.12	0.16	0.12	0.12	0.09	0.13	0.10	0.11	0.16	0.21



Şekil 170. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (5 denetleme noktalı, Rollei)



Şekil 171. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (10 denetleme noktalı, Rollei)

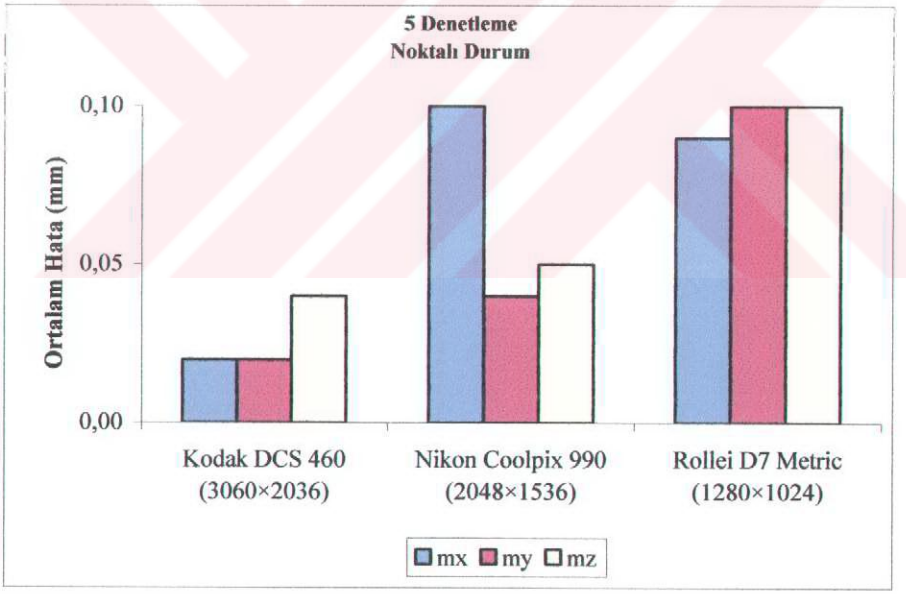


Şekil 172. 6 ve 12 istasyonlu çekim durumunda farklı parametrelere göre ortalama hata dağılımı (15 denetleme noktalı, Rollei)

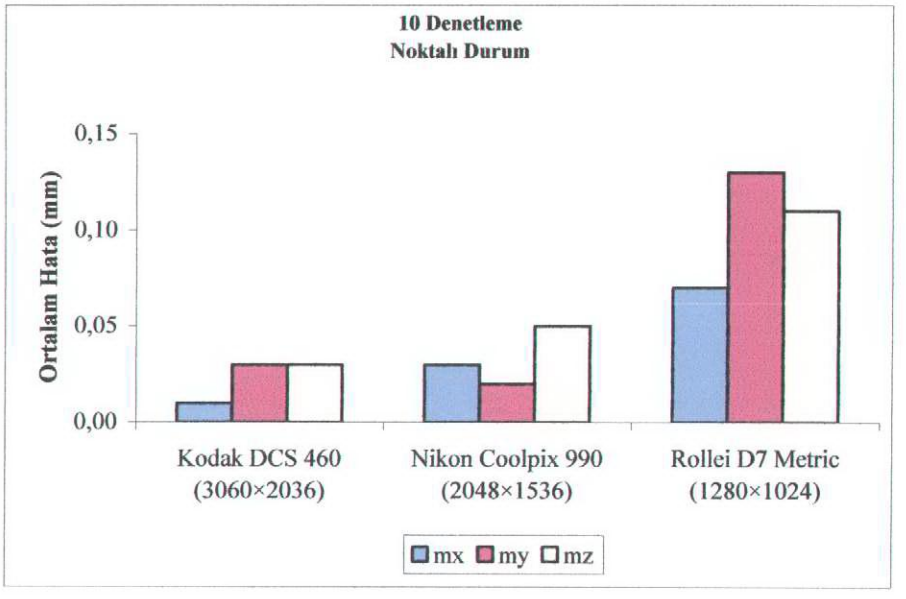
Bu kamera ile Işın Demetleri metodu kullanılarak yapılan çözümlerde denetleme noktası gurupları ile elde edilen sonuçlardan özellikle z ekseni yönündeki hataların x ve y ekseni yönündeki hatalardan daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 35). İlave parametrelerin etkileri, özellikle çapsal distorsiyonun 1. teriminden (k_1) sonra ortalama

hata değerlerinin değişmediği görülmektedir. c, x_o ve y_o parametrelerinin dikkate alınmadığı durumda, 6 istasyonlu çözümde x, y ve z yönünde max hata miktarları sırasıyla 0.18 mm, 0.16 mm ve 0.28 mm, 12 istasyonlu çözümde ise max hata değerleri sırasıyla 0.10 mm, 0.13 mm ve 0.18 mm olmaktadır. Çekim istasyon sayıları açısından irdeleme yapıldığında, 12 istasyonlu çekimin daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak 6 ve 12 istasyonlu çekimlerin sonuçları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Kontrol nokta sayıları açısından irdeleme yapıldığında 5 denetleme noktalı çözümde daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Tablo 35, Şekil 170-172).

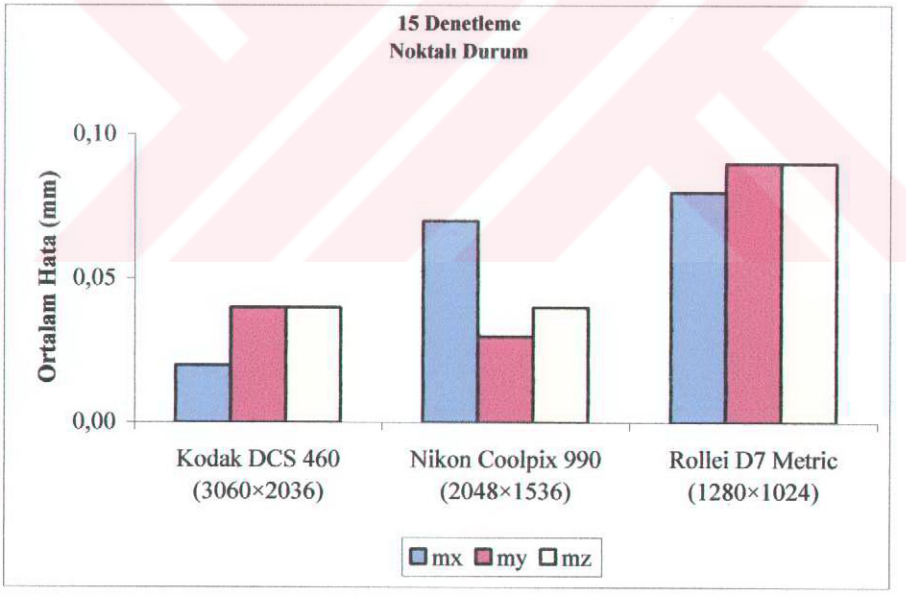
Test Alanı 2'de farklı kameralarla değerlendirme yapılarak bu kameraların doğruluk yönünden karşılaştırması yapılmıştır. Farklı denetleme nokta gruplarına göre, bu kameralarla üç eksen yönünde elde edilen en iyi doğruluklar Şekil 173-175 grafiklerinde gösterilmektedir. Bu grafiklerde kameraların doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.



Şekil 173. 5 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



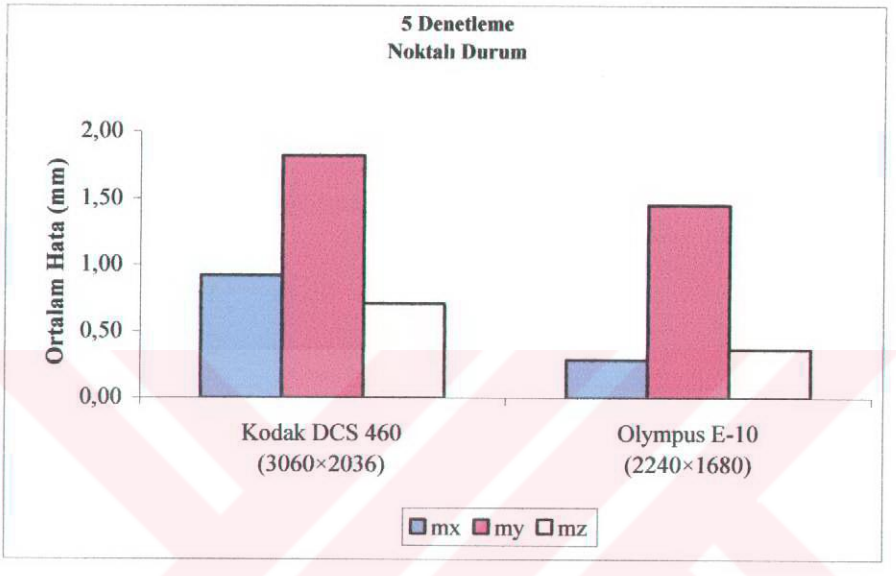
Şekil 174. 10 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



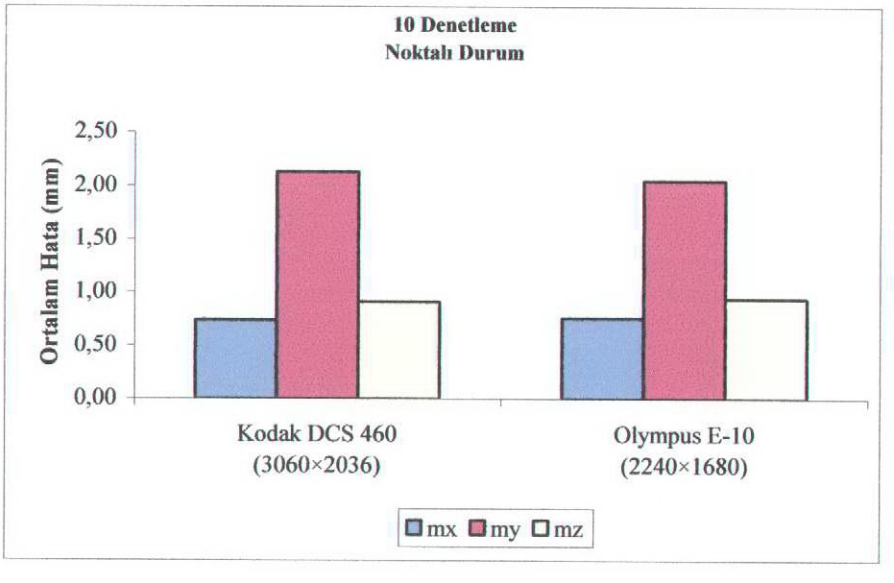
Şekil 175. 15 denetleme noktalı durumda üç farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar

Şekil 173-175 incelendiğinde, bütün denetleme gruplarında her üç eksen yönünde geometrik çözünürlüğü en büyük olan Kodak kamerasının daha duyarlıklı sonuçlar verdiği görülmektedir.

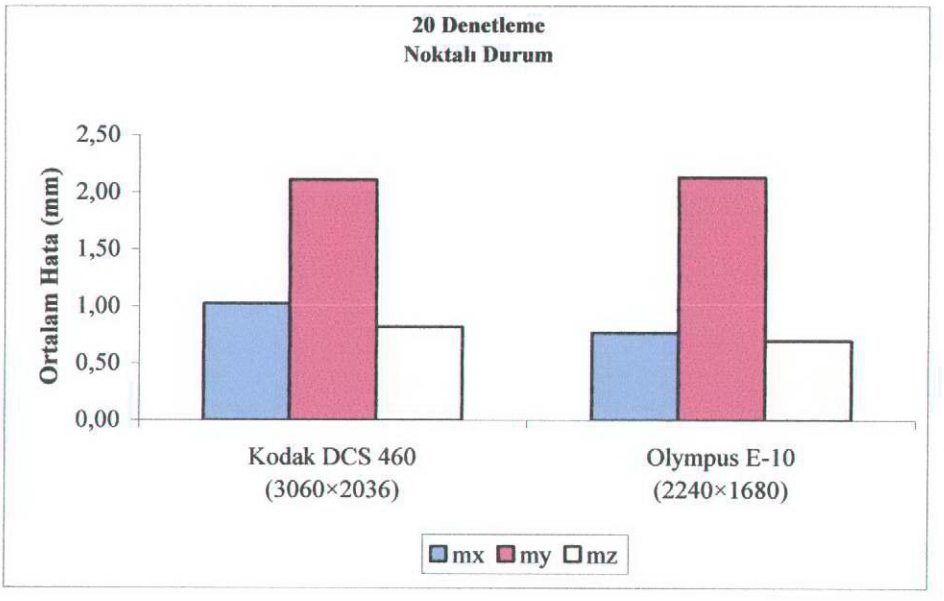
Test Alanı 2'de olduğu gibi, Test Alanı 4'de de iki farklı kamerayla değerlendirme yapılarak bu kameraların doğruluk yönünden karşılaştırması yapılmıştır. Farklı denetleme nokta gruplarına göre, bu kameralarla üç eksen yönünde elde edilen en iyi doğruluklar Şekil 176-178 grafiklerinde gösterilmektedir. Bu grafiklerde kameraların doğrulukları seçilen denetleme nokta grupları dikkate alınarak irdelenmiştir.



Şekil 176. 5 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



Şekil 177. 10 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar



Şekil 178. 20 denetleme noktalı durumda iki farklı kamera ile elde edilen en iyi doğruluklar

Şekil 176-178'deki grafikler incelendiğinde, bütün denetleme gruplarında her üç eksen yönünde, iki kameranın aynı düzeyde duyarlıklı sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir.

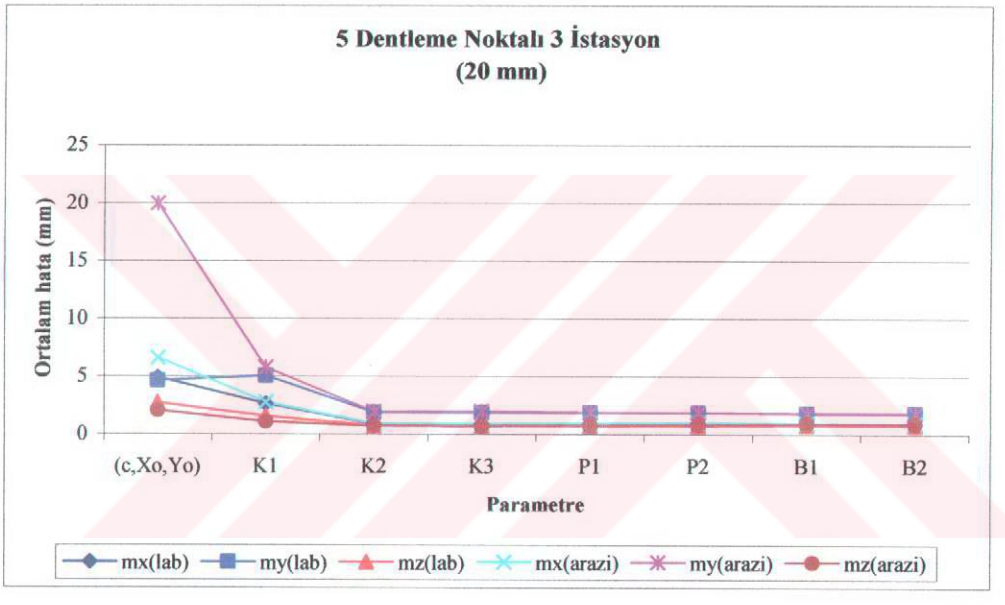
3.6. Laboratuar Kalibrasyonu ile Arazide Kalibrasyonun Karşılaştırılması

Kameraların metrik performanslarını belirlemek için kalibrasyon işlemine tabi tutulmaları gerekir. Ancak bu işlemin iş ortamında mı (arazi) yada laboratuarda mı yapılacağı sorusu ile karşılaşılmaktadır. Bu sorunun cevabını bulması açısından, Işın Demetleri metodu kullanılarak Kodak DCS 460 dijital kamerası ile biri laboratuar diğeri arazi olmak üzere Test Alanı 2 ve 4'de elde edilen verilerden yararlanmak suretiyle her iki ortamda nokta konum doğruluk bilgileri hesaplanmıştır.

5 denetleme nokta grubu ile hesaplanan konum ortalama hata değerleri ve farklar Tablo 36'da verilmektedir. Bu denetleme nokta grubuyla ortaya çıkan doğruluklar ayrıca Şekil 179'da gösterilmektedir.

Tablo 36. 5 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri

Birim: mm	Laboratuar Kalibrasyonu			Arazi Kalibrasyonu			Farklar (Lab-Arazi)		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	dm_x	dm_y	dm_z
(c,x_o,y_o)	4.932	4.633	2.743	6.607	19.973	2.071	-1.674	-15.340	0.671
K1	2.663	5.052	1.564	2.760	5.786	1.112	-0.097	-0.733	0.451
K2	0.908	1.895	0.762	0.943	1.961	0.741	-0.035	-0.066	0.021
K3	0.898	1.899	0.750	0.920	1.982	0.713	-0.021	-0.082	0.036
P1	0.886	1.898	0.752	0.954	1.903	0.775	-0.067	-0.004	-0.022
P2	0.887	1.919	0.782	1.017	1.907	0.841	-0.130	0.012	-0.059
B1	0.866	1.858	0.826	0.962	1.823	0.903	-0.096	0.035	-0.076
B2	0.910	1.857	0.841	0.974	1.821	0.904	-0.064	0.036	-0.063

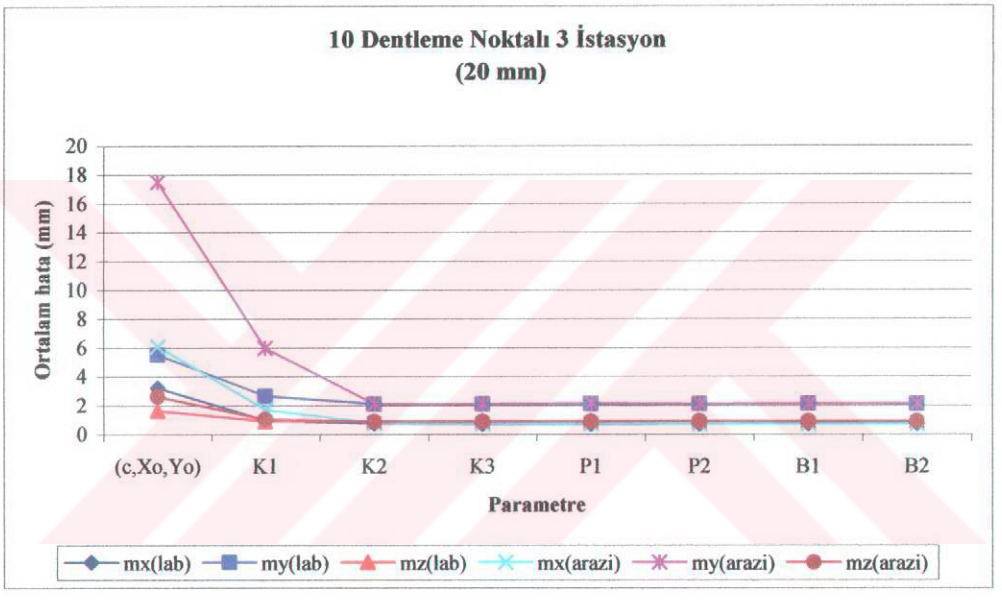


Şekil 179. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değer dağılımı (5 denetleme noktalı)

10 denetleme nokta grubu ile hesaplanan konum ortalama hata değerleri ve farklar Tablo 37'de verilmektedir. Bu denetleme nokta grubuyla ortaya çıkan doğruluklar ayrıca Şekil 180'de gösterilmektedir.

Tablo 37. 10 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri

Birim: mm	Laboratuar Kalibrasyonu			Arazi Kalibrasyonu			Farklar (Lab-Arazi)		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	dm_x	dm_y	dm_z
(c,x_o,y_o)	3.230	5.529	1.666	6.111	17.508	2.636	-2.881	-11.978	-0.969
K1	1.002	2.686	0.922	1.733	5.999	1.071	-0.730	-3.312	-0.149
K2	0.767	2.122	0.926	0.785	2.130	0.913	-0.018	-0.008	0.013
K3	0.737	2.120	0.923	0.763	2.129	0.911	-0.025	-0.009	0.011
P1	0.739	2.119	0.923	0.762	2.160	0.917	-0.022	-0.040	0.005
P2	0.738	2.119	0.923	0.740	2.131	0.924	-0.001	-0.012	-0.001
B1	0.748	2.135	0.921	0.737	2.138	0.927	0.010	-0.002	-0.006
B2	0.744	2.134	0.922	0.740	2.139	0.926	0.004	-0.005	-0.003

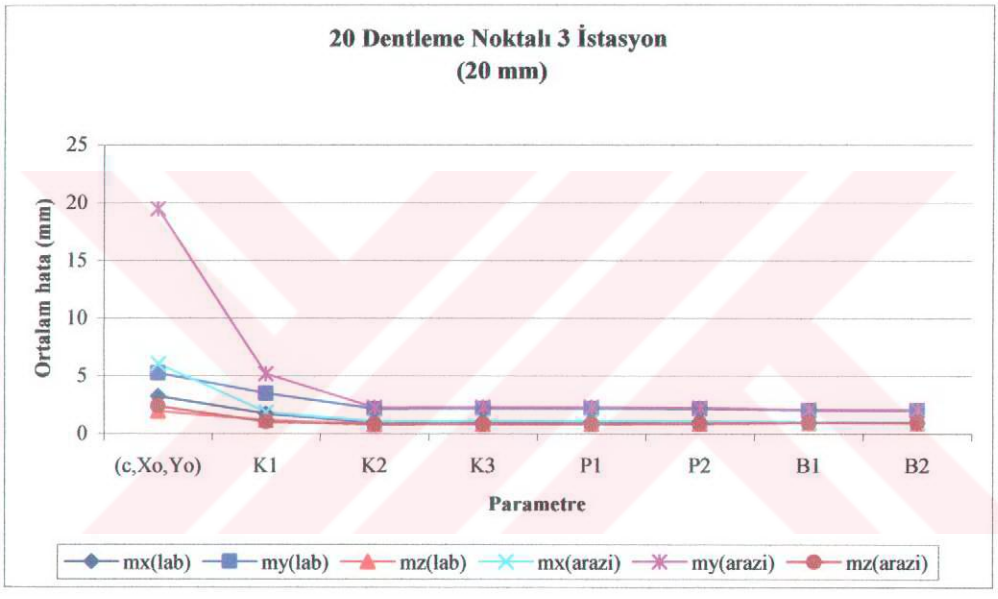


Şekil 180. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortlama konum hata değer dağılımı (10 denetleme noktalı)

20 denetleme nokta grubu ile hesaplanan konum ortalama hata değerleri ve farklar Tablo 38'de verilmektedir. Bu denetleme nokta grubuyla ortaya çıkan doğruluklar ayrıca Şekil 181'de gösterilmektedir.

Tablo 38. 20 denetleme noktalı laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değerleri

Birim: mm	Laboratuar Kalibrasyonu			Arazi Kalibrasyonu			Farklar (Lab-Arazi)		
Parametre	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	dm_x	dm_y	dm_z
(c,x_o,y_o)	3.260	5.264	1.961	6.054	19.472	2.403	-2.795	-14.208	-0.443
K1	1.747	3.501	1.175	1.874	5.198	1.040	-0.127	-1.697	0.136
K2	0.975	2.184	0.838	1.081	2.301	0.824	-0.106	-0.116	0.014
K3	1.011	2.203	0.862	1.127	2.323	0.846	-0.116	-0.120	0.016
P1	1.010	2.200	0.862	1.127	2.315	0.853	-0.117	-0.115	0.009
P2	1.033	2.186	0.878	1.093	2.278	0.879	-0.061	-0.093	-0.001
B1	0.958	2.039	0.968	1.016	2.113	0.967	-0.058	-0.074	0.001
B2	0.958	2.038	0.969	1.016	2.113	0.967	-0.058	-0.075	0.002



Şekil 181. Laboratuar ve arazi kalibrasyon ortalama konum hata değer dağılımı (20 denetleme noktalı)

Şekil 179-181 incelendiğinde, bütün denetleme nokta gruplarında laboratuar kalibrasyonu yada arazide kalibrasyon yapılması durumunda hesaplanan nokta konum doğrulukları arasında önemli bir değişimin söz konusu olmadığı görülmektedir.

3.7. İlave Parametrelerin Anlamlılık Testi ve Sonuç Doğruluğuna Etkileri

Parametrelerin anlamlılık testi için, en iyi çözüm metodu olarak belirlenen Işın Demetleri yöntemi ile Kodak kamerası kullanılarak Test Alanı 2 ve 4'deki veriler

değerlendirilmiştir. Parametreler, büyüklükleri ile ortalama hataları oranıyla elde edilen test büyüklük değerinin t-dağılım tablo değerinden büyük olması durumunda anlamlı, aksi durumda ise anlamsızdır (Öztürk ve Şerbetçi, 1992). Buna göre Test Alanı 2 ve 4'de hesaplanan parametre, ortalama hataları ve tablo büyüklükleri Tablo 39'da verilmektedir.

Tablo 39. Test Alanı 2 ve 4'de parametre değerleri ve anlamları

		Parametre Adı	Parametre Değeri (p) (mm)	Standart Sapma (m_i)	p / m_i	Serbestlik Derecesi	t-tablo Değeri	Anlam
Test Alanı 2	5 istasyon	c	20.620	8.8×10^{-3}	2342.472	320	1.97	ANLAMLI
		x_0	-0.094	8.1×10^{-3}	11.683	320	1.97	ANLAMLI
		y_0	0.047	7.4×10^{-3}	6.419	320	1.97	ANLAMLI
		k_1	-2.7×10^{-4}	1.0×10^{-5}	26.300	320	1.97	ANLAMLI
		k_2	3.7×10^{-7}	2.4×10^{-7}	1.537	320	1.97	**ANLAMSIZ**
		k_3	7.6×10^{-10}	1.6×10^{-9}	0.475	320	1.97	**ANLAMSIZ**
		p_1	4.9×10^{-5}	7.5×10^{-6}	6.465	320	1.97	ANLAMLI
		p_2	1.6×10^{-5}	6.3×10^{-6}	2.492	320	1.97	ANLAMLI
		B_1	1.3×10^{-4}	5.9×10^{-5}	2.271	320	1.97	ANLAMLI
		B_2	9.4×10^{-5}	2.4×10^{-5}	3.850	320	1.97	ANLAMLI
	10 istasyon	c	20.618	1.2×10^{-2}	1761.869	650	1.96	ANLAMLI
		x_0	-0.089	1.0×10^{-2}	8.564	650	1.96	ANLAMLI
		y_0	0.047	9.5×10^{-3}	4.942	650	1.96	ANLAMLI
		k_1	-2.6×10^{-4}	1.3×10^{-5}	19.445	650	1.96	ANLAMLI
		k_2	1.3×10^{-7}	3.1×10^{-7}	0.409	650	1.96	**ANLAMSIZ**
		k_3	2.5×10^{-9}	2.1×10^{-9}	1.190	650	1.96	**ANLAMSIZ**
		p_1	4.2×10^{-5}	9.6×10^{-6}	4.388	650	1.96	ANLAMLI
		p_2	1.5×10^{-5}	7.9×10^{-6}	1.876	650	1.96	**ANLAMSIZ**
		B_1	1.0×10^{-4}	8.1×10^{-5}	1.284	650	1.96	**ANLAMSIZ**
		B_2	5.5×10^{-5}	3.1×10^{-5}	1.737	650	1.96	**ANLAMSIZ**
Test Alanı 4	3 istasyon	c	20.559	7.6×10^{-3}	2687.743	242	1.97	ANLAMLI
		x_0	-0.135	1.9×10^{-2}	7.095	242	1.97	ANLAMLI
		y_0	-0.073	1.6×10^{-2}	4.707	242	1.97	ANLAMLI
		k_1	-2.2×10^{-4}	9.5×10^{-6}	23.064	242	1.97	ANLAMLI
		k_2	6.6×10^{-7}	1.5×10^{-7}	4.460	242	1.97	ANLAMLI
		k_3	-6.4×10^{-10}	7.0×10^{-10}	0.914	242	1.97	**ANLAMSIZ**
		p_1	7.2×10^{-6}	2.2×10^{-5}	0.334	242	1.97	**ANLAMSIZ**
		p_2	-1.1×10^{-5}	1.8×10^{-5}	0.622	242	1.97	**ANLAMSIZ**
		B_1	9.6×10^{-4}	8.4×10^{-5}	1.147	242	1.97	**ANLAMSIZ**
		B_2	1.0×10^{-5}	4.1×10^{-5}	0.248	242	1.97	**ANLAMSIZ**

Tablo 39 incelendiğinde, 2 nolu test alanında 5 istasyonlu çekimde k_2 ve k_3, 10 istasyonlu çekimde ise k_2, k_3, p_2, B_1 ve B_2 parametrelerinin anlamsız olduğu görülmektedir. 4 nolu test alanında k_3 ve sonrasındaki terimlerim anlamsız olduğu ortaya çıkmaktadır. Buna göre her iki test alanı için bütün parametreler ile çözüm ayrıca anlamsız parametreler sistemden çıkarılarak yapılan çözümlerden elde edilen nokta konum doğrulukları karşılaştırılmıştır. Her iki test alanında ortaya çıkan değerler Tablo 40 ve 41'de verilmektedir.

Tablo 40. Test Alanı 2'de bütün ve anlamlı parametreli çözüm durumunda ortalama hata değerleri

Birim: mm	Kullanılan Parametre	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			15 Denetleme Noktası		
		m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
5 İstasyon	Tüm	0.0138	0.0253	0.0520	0.0281	0.0200	0.0418	0.0282	0.0443	0.0482
	Anlamlı	0.0138	0.0253	0.0519	0.0281	0.0199	0.0418	0.0282	0.0445	0.0482
10 İstasyon	Tüm	0.0247	0.0261	0.0444	0.0269	0.0312	0.0344	0.0614	0.0587	0.0368
	Anlamlı	0.0247	0.0257	0.0446	0.0271	0.0312	0.0345	0.0613	0.0590	0.0369

Tablo 41. Test Alanı 4'de bütün ve anlamlı parametreli çözüm durumunda ortalama hata değerleri

Birim: mm	Kullanılan Parametre	5 Denetleme Noktası			10 Denetleme Noktası			20 Denetleme Noktası		
		m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
3 İstasyon	Tüm	0.9746	1.8218	0.9048	0.7404	2.1393	0.9262	1.0161	2.1130	0.9666
	Anlamlı	0.9726	1.8241	0.9016	0.7406	2.1393	0.9262	1.0187	2.1146	0.9676

Tablo 40 ve 41'de, her iki test alanında bütün denetleme noktaları kullanılması durumunda, tüm veya anlamsız parametrelerin çıkarılması neticesinde yapılan çözümlerde nokta konum hata değerlerinde bir değişim söz konusu olmamaktadır. Bu durumda anlamsız parametrelerin çözüme katılması durumunda bile çözüme etki etmedikleri ortaya çıkmaktadır.

3.8. Radyometrik Kalibrasyon Bulguları

Radyometrik kalibrasyon, kamera CCD yüzeyi üzerindeki piksellerin gerçek uzaydaki renkleri yansıtabilme oranı olarak tanımlanır. Farklı renkteki ortamlara (siyah ve beyaz) karşı kameraların tepkisi ölçülerek, radyometrik anlamda doğrulukları belirlenmektedir. Bu çalışmanın ana kısmını dijital kameraların geometrik performanslarını belirleme işlemi oluşturduğundan, bu aşamada radyometrik performansa yönelik basit teknikler kullanılarak doğruluk araştırması yapılmıştır. Doğruluk incelemesi için tam siyah ve beyaz görüntüler kullanılmıştır.

a) Kodak DCS 460 Dijital Kamerası Radyometrik Kalibrasyon Bulguları: Bu kameranın radyometrik testi için iki farklı ortama 10 adet görüntü alımı yapılmıştır. Kısaca siyah ve beyaz görüntüler çekilmiştir. Her bir görüntü için tek tek ve bütün görüntülerin ortalamasından elde edilen görüntünün ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanarak, bu görüntüler üzerinde gürültü ve bozuk (ölü) piksel bölgeleri tespit edilmiştir. Siyah görüntüler için hesaplanan ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak istatistiksel anlamda ortalama değerden standart sapmanın 1, 2 ve 3 katı dışında bölgeye düşen piksel değerlerine ait yüzdeler Tablo 42'de verilmektedir. Aynı işlemler, ortalama görüntü 5 adet alt görüntüye bölünerek elde edilen görüntüler üzerinde yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 43'de gösterilmiştir.

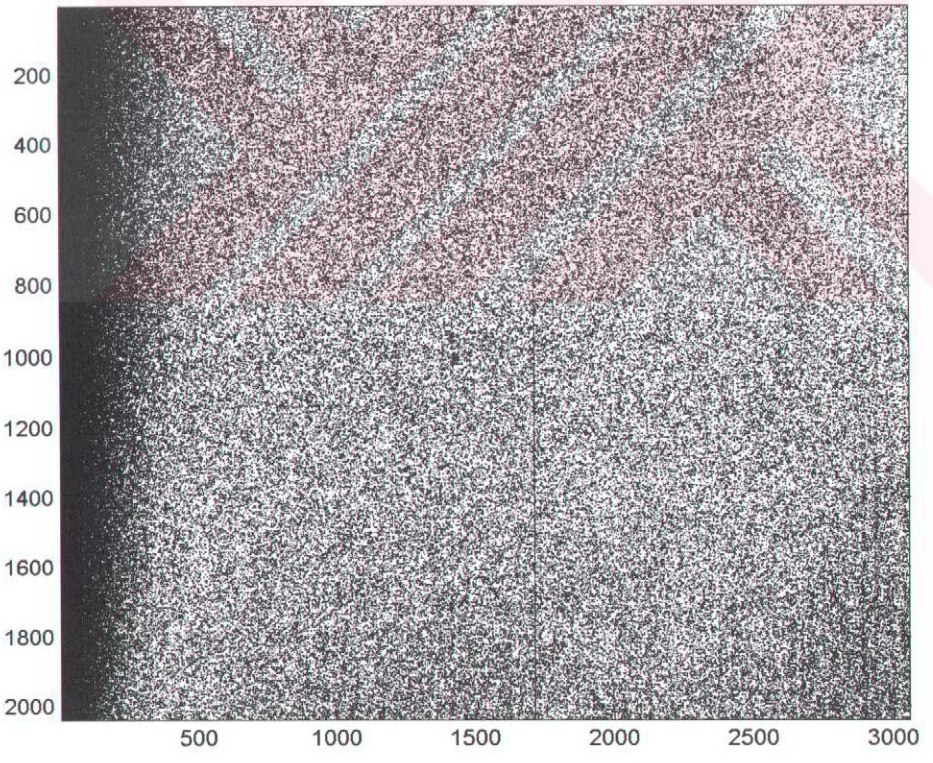
Tablo 42. Siyah görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)

	img1	img2	img3	img4	img5	img6	img7	img8	img9	img10	img_ort
Ortalama	1.63	1.59	1.53	1.45	1.07	1.25	0.96	1.00	0.99	0.86	1.23
Standart Sapma	2.24	2.23	2.20	2.16	1.94	2.06	1.86	1.90	1.89	1.79	0.81
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	185	181	185	182	189	192	192	195	190	196	188.7
-σ<piksel<+σ (%)	36.13	35.20	34.03	32.35	24.20	28.09	21.68	22.67	22.44	19.48	34.45
-2σ<piksel<+2σ (%)	1.67	1.62	5.66	5.18	6.17	4.12	5.38	5.73	5.65	4.73	3.04
-3σ<opiksel<+3σ (%)	0.14	0.13	0.12	0.11	0.83	0.09	0.70	0.77	0.75	0.60	0.59

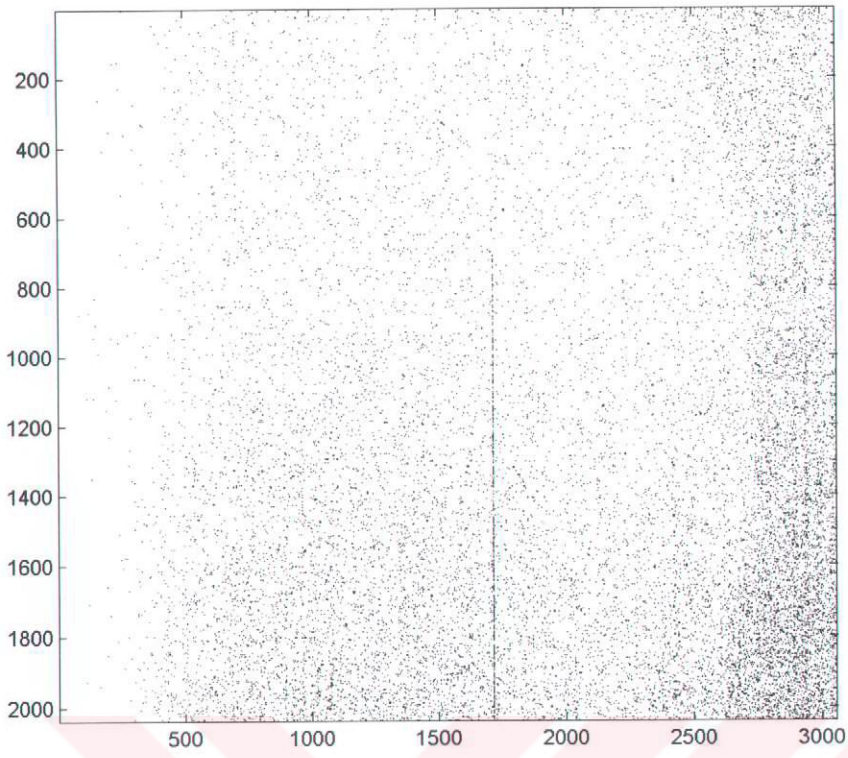
Tablo 43. Siyah alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)

	Alt1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Ortalama	1.32	1.77	1.51	1.93	1.69
Standart Sapma	2.04	2.35	2.13	2.38	2.19
Min	0	0	0	0	0
Max	185	165	37	108	165
-σ<piksel<+σ (%)	30.57	15.10	34.53	15.81	38.86
-2σ<piksel<+2σ (%)	4.79	3.24	6.10	3.21	4.22
-3σ<piksel<+3σ (%)	0.10	0.13	0.15	0.02	0.15

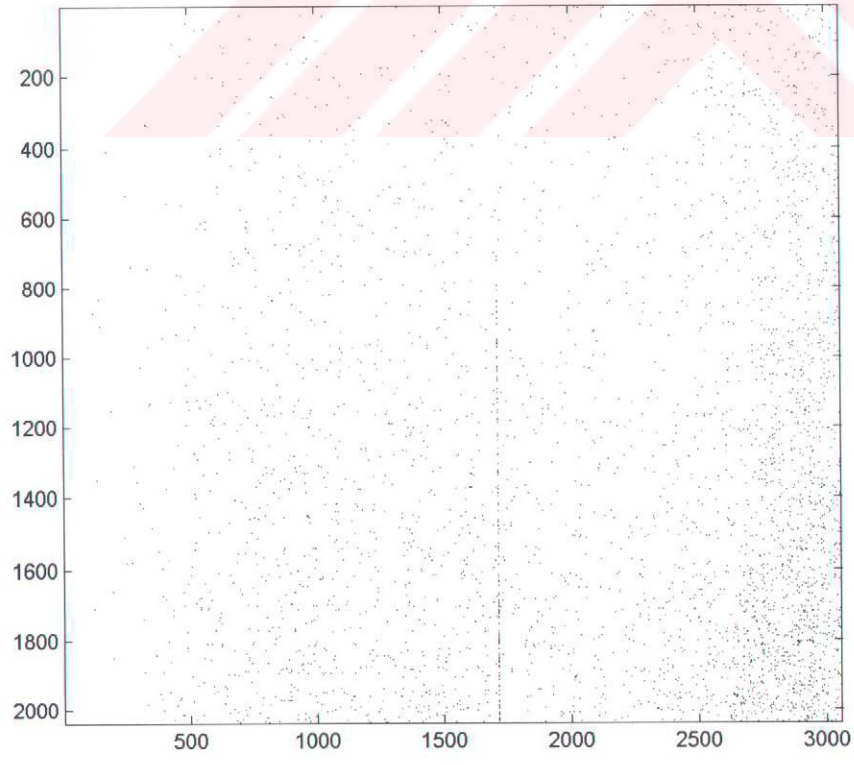
10 görüntü ortalamasından hesaplanan ortalama görüntünün piksel değerlerinin ortalama değerden σ, 2σ ve 3σ kat fazla olan pikseller bir görüntü üzerinde siyah gözükecek şekilde temsil edilerek çizdirilmiştir. Bu görüntüler Şekil 182-184'de gösterilmektedir.



Şekil 182. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah)



Şekil 183. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah)



Şekil 184. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Siyah)

Şekil 182-184 üzerinde siyah görülen pikseller gerçek görüntü üzerinde değerleri ortalama piksel renk değerinden sırasıyla en az σ, 2σ ve 3σ kadar büyük olan piksellerdir. Tablo 42 incelendiğinde, toplam 10 görüntü ortalama piksel değerinin 1.23 civarında olduğu ve gürültü değerinin ise ortalama 0.81 değerinde kaldığı görülmektedir. Bazı piksellerde tamamen bir bozulmanın olduğu siyah görüntüde piksel değerinin max 196 değerine çıkmasından anlaşılmaktadır. Ortalama değerden ±3σ bölgesi dışında kalan pikseller bozuk yada ölü piksel olarak adlandırılır. Bu bölge dışında kalan pikseller toplam piksellerin %0.59 'u kadardır.

Alt görüntüler incelendiğinde, gürültü oranı 2 ve 4 nolu görüntülerde yüksek iken, diğer alt görüntülerde bu değer daha düşük çıkmaktadır. Siyah görüntüler üzerindeki gürültüleri ortadan kaldırmak için, seçilen bir model görüntü üzerinde PRNU algoritması uygulandığında, ortalama piksel değerinin 1.63 ve standart sapma değerinin ise 0 (sıfır) olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler görüntü üzerindeki piksellerin düzeltilerek aynı bir değere getirildiğinin göstergesidir.

Benzer şekilde beyaz görüntülerdeki piksel ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak ortalama değerden standart sapmanın 1 ile 3 arasında katı dışındaki bölgeye düşen piksel değerlerine ait yüzdeler Tablo 44'de verilmektedir. Seçilen ortalama görüntü 5 adet alt görüntüye bölünerek tüm görüntüler üzerinde yapılan işlemler yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 45'de gösterilmektedir.

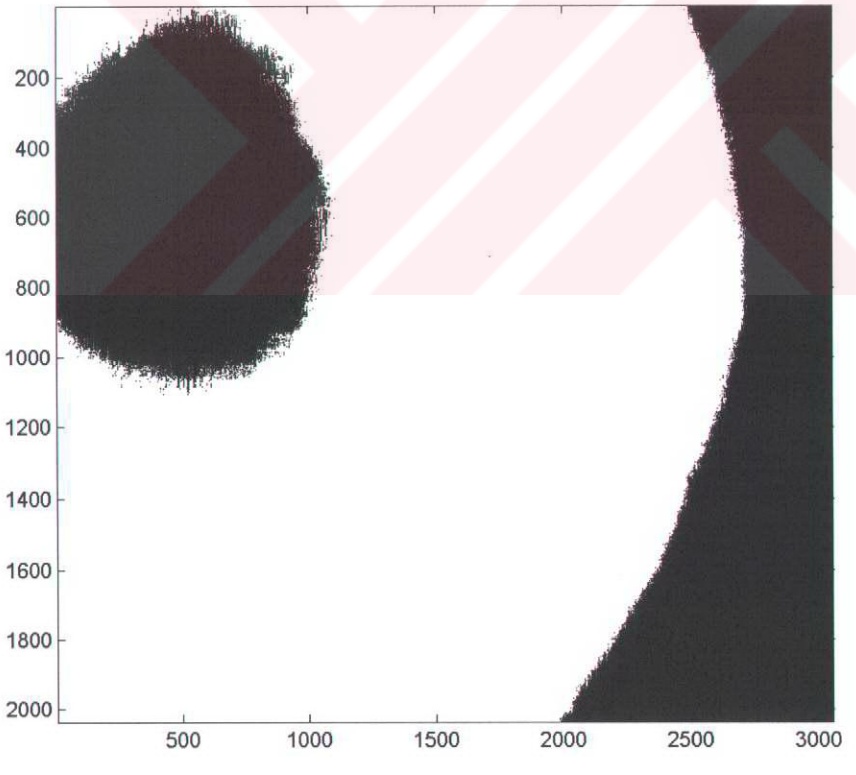
Tablo 44. Beyaz görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)

	img1	img2	img3	img4	img5	img6	img7	img8	img9	img10	img_ort
Ortalama	231.24	230.93	230.35	230.36	230.35	230.20	230.70	230.81	230.57	230.55	230.61
Standart Sapma	18.88	19.09	19.34	19.43	19.36	19.42	19.16	19.15	19.37	19.51	19.26
Min	142	136	131	130	132	131	135	135	129	128	134.5
Max	255	254	254	254	254	255	254	254	255	255	254
-σ<piksel<+σ (%)	31.46	30.06	32.51	31.69	31.74	31.52	33.33	33.37	33.16	29.52	31.95
-2σ<piksel<+2σ (%)	4.49	4.34	4.33	4.39	4.37	4.45	4.49	4.43	4.27	4.34	4.40
-3σ<opiksel<+3σ (%)	0.76	0.88	0.98	1.05	0.97	0.92	0.92	0.92	1.01	1.12	0.95

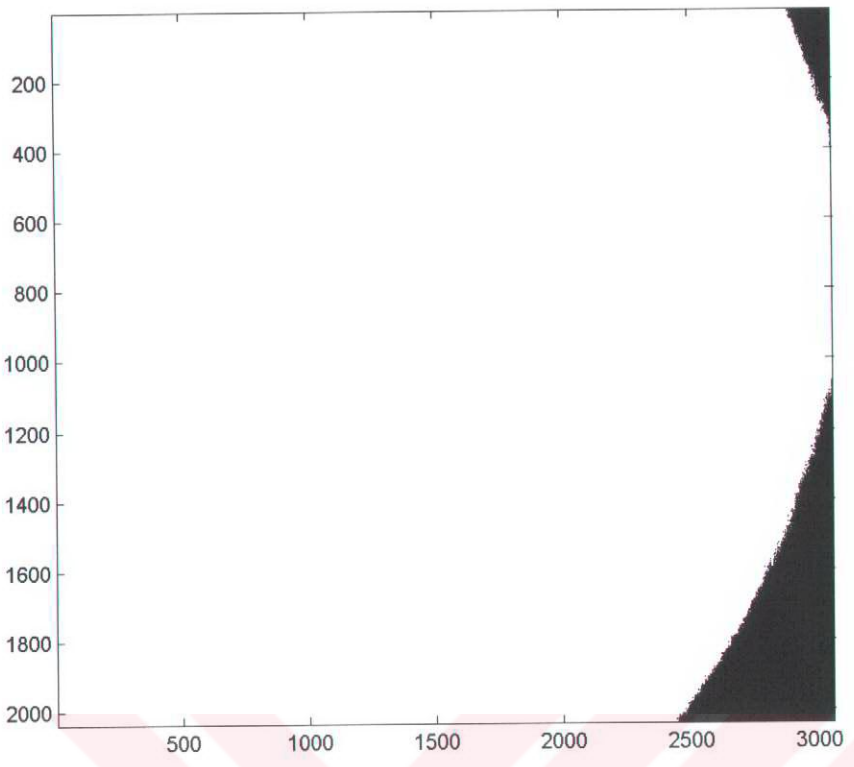
Tablo 45. Beyaz alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Kodak)

	Alt1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Ortalama	251.30	220.30	240.69	213.11	239.91
Standart Sapma	1.66	15.29	7.01	18.04	7.73
Min	244	178	219	142	216
Max	255	245	252	243	254
-σ<piksel<+σ (%)	44.02	42.00	40.04	34.40	38.80
-2σ<piksel<+2σ (%)	2.57	2.28	3.07	4.02	2.61
-3σ<piksel<+3σ (%)	0.73	0.00	0.00	0.32	0.00

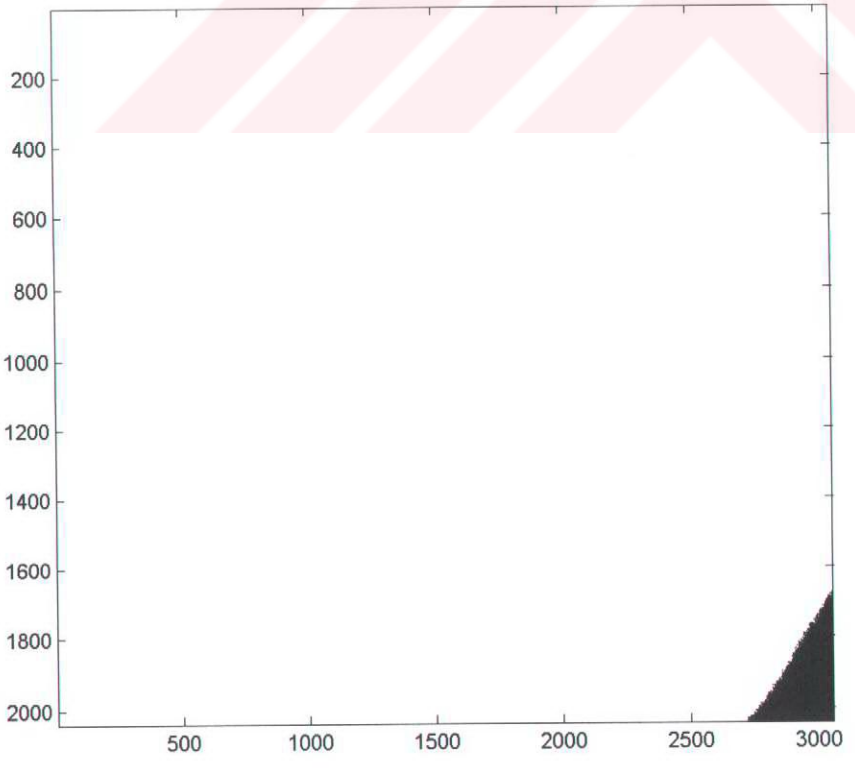
10 görüntü ortalamasından hesaplanan ortalama görüntünün piksel değerlerinin ortalama değerden σ, 2σ ve 3σ kat fazla olan pikseller bir görüntü üzerinde siyah gözükecek şekilde temsil edilerek çizdirilmiştir. Bu görüntüler Şekil 185-187'de gösterilmektedir.



Şekil 185. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz)



Şekil 186. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz)



Şekil 187. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (3060×2036, Beyaz)

Şekil 185-187'de görülen siyah bölgeler piksel değerinin ortalama değerden σ, 2σ ve 3σ kadar fazla değer alan piksellerdir. Tablo 44 incelendiğinde, toplam 10 görüntü ortalama piksel değerinin 230.61 olduğu ve gürültü değerinin ise ortalama 19.26 değerinde kaldığı görülmektedir. Max ve min değerlerden, bazı piksellerde 128 değerine kadar düşüşün olduğu gözlenmiştir. Bu durum bu değerde olan piksellerin beyaz rengi tam anlamıyla algılayamadığı kanaatini ortaya çıkarmaktadır. Ortalama değerden ±3σ bölgesi dışında kalan pikseller toplam piksellerin %0.95'i kadardır. Ortalama değerden ±3σ bölgesi dışında kalan bölge sadece görüntünün sağ alt köşesinde kümelenmektedir. Beyaz görüntüler üzerindeki gürültüleri ortadan kaldırmak için, seçilen bir model görüntü üzerinde PRNU algoritması uygulandığında, ortalama piksel değerinin 231.24 ve standart sapma değerinin ise 0 (sıfır) olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler görüntü üzerindeki piksellerin düzeltilerek aynı bir değere getirildiği anlamına gelmektedir.

Alt görüntüler incelendiğinde, ortalama değerden ±3σ bölgesi dışında kalmamalarına rağmen 2 ve 4 nolu görüntülerde yansıma değeri yüksek, diğer alt görüntüler özellikle 1 nolu alt görüntü çok düşük gürültü ve yüksek yansıma değeri vermektedir.

b) Nikon E2/E2s Dijital Kamerası Radyometrik Kalibrasyon Bulguları: Bu kameranın radyometrik testi için sadece 24 mm mercek kullanılarak iki farklı ortama (siyah ve beyaz) 10 adet görüntü alımı yapılmıştır. Her bir görüntü için tek tek ve bütün görüntülerin ortalaması alınarak elde edilen görüntünün ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanarak bu görüntüler üzerinde gürültü ve bozuk (ölü) piksel bölgeleri tespit edilmiştir.

Siyah görüntüler için hesaplanan ortalama ve standart sapma değerleri ile, istatistiksel anlamda ortalama değerden standart sapmanın 1, 2 ve 3 katı kadar dış bölgeye düşen piksel değerlerine ait yüzdeler Tablo 46'da verilmektedir. Tek tek görüntü üzerindeki pikseller için yapılan işlemler seçilen ortalama görüntü 5 adet alt görüntüye bölünerek elde edilen görüntüler üzerinde de yapılmış ve ortaya çıkan değerler Tablo 47'de gösterilmiştir.

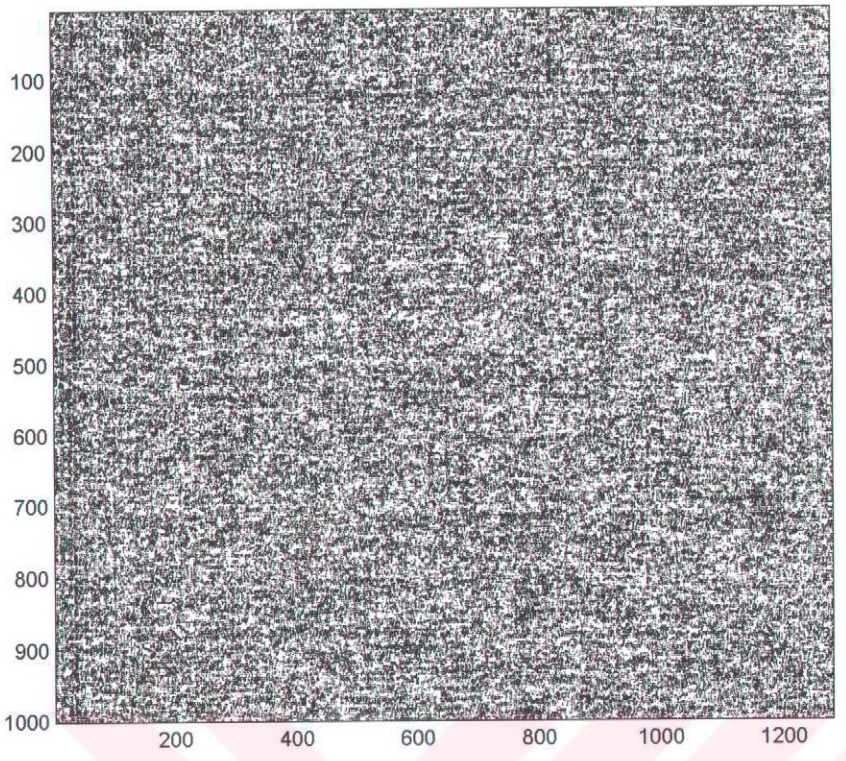
Tablo 46. Siyah görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)

	img1	img2	img3	img4	img5	img6	img7	img8	img9	img10	img_ort
Ortalama	8.34	8.20	8.19	8.19	8.24	8.11	7.92	7.94	7.86	7.81	8.08
Standart Sapma	6.55	6.44	6.44	6.48	6.50	6.43	6.34	6.42	6.34	6.31	2.96
Min	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	123	130	121	123	124	129	139	130	135	143	127.4
-σ<piksel<+σ (%)	33.32	32.38	32.51	32.74	32.81	32.89	32.21	33.03	32.59	32.53	33.11
-2σ<piksel<+2σ (%)	4.07	3.72	3.74	3.83	3.93	4.59	4.27	4.43	4.20	4.08	3.40
-3σ<opiksel<+3σ (%)	0.77	0.91	0.89	0.92	0.96	0.86	1.03	0.86	1.02	0.98	0.30

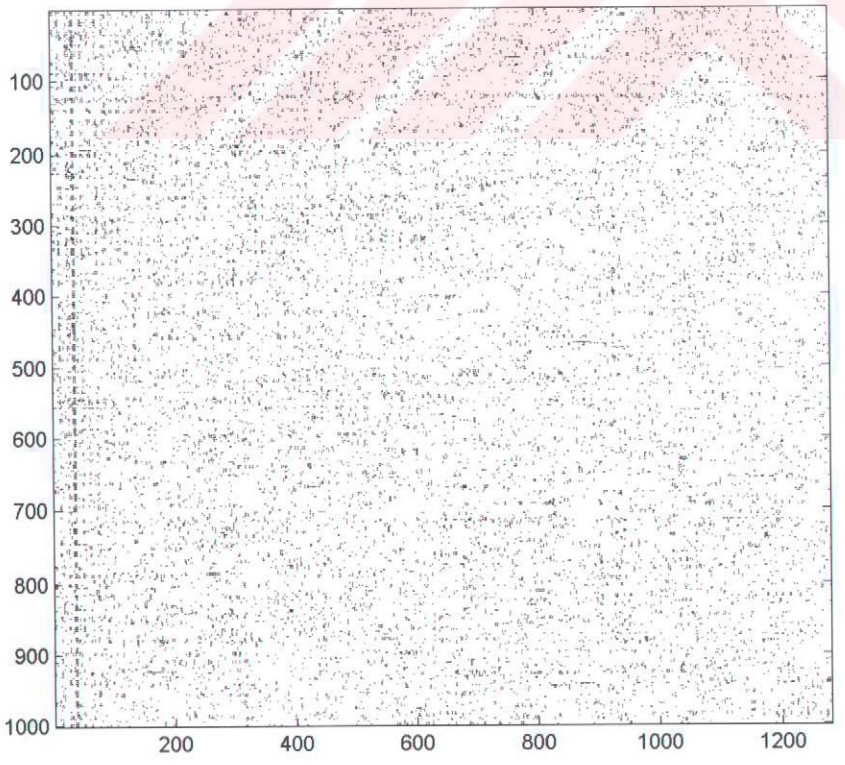
Tablo 47. Siyah alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)

	Alt1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Ortalama	8.62	8.29	8.35	8.10	8.13
Standart Sapma	6.74	6.52	6.56	6.39	6.42
Min	0	0	0	0	0
Max	55	74	123	53	74
-σ<piksel<+σ (%)	31.18	33.12	33.39	32.67	32.88
-2σ<piksel<+2σ (%)	3.79	3.94	4.05	4.49	4.59
-3σ<piksel<+3σ (%)	0.96	0.94	0.75	0.81	0.85

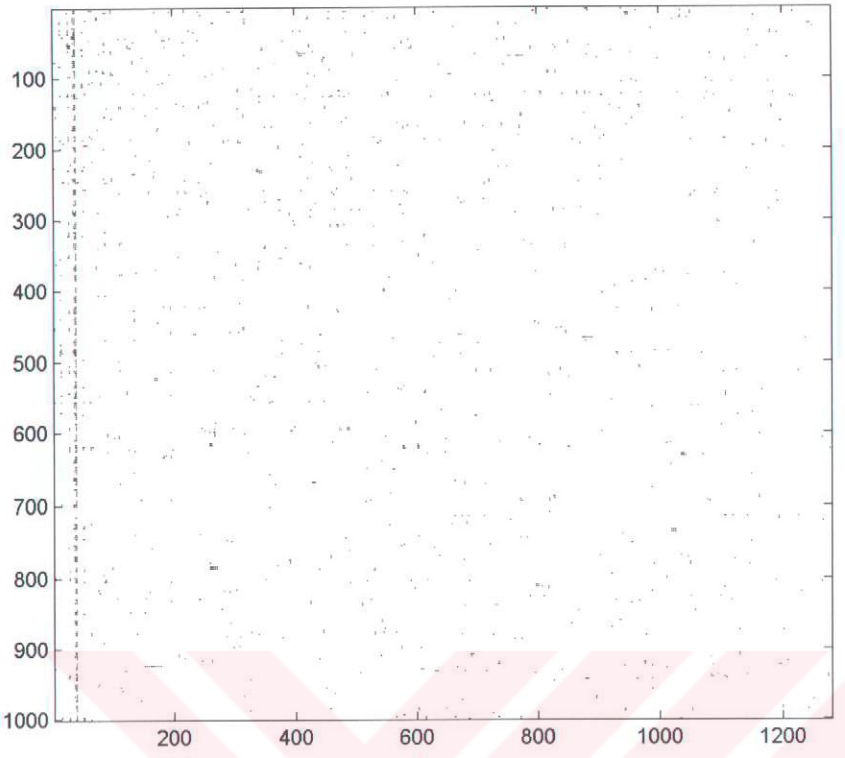
Tablo 46'da 10 görüntünün ortalaması alınarak hesaplanan ortalama görüntü piksel değerleri içinde ortalama değerden σ, 2σ ve 3σ kadar büyük olanlar bir görüntü üzerinde siyah gözükecek şekilde temsil edilerek çizdirilmiştir. Bu görüntüler Şekil 188-190'da gösterilmektedir.



Şekil 188. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah)



Şekil 189. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah)



Şekil 190. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Siyah)

Şekil 188-190 üzerinde görülen siyah bölgeler değeri ortalama değerden sırasıyla σ, 2σ ve 3σ daha büyük olan pikselleri ifade etmektedir. Tablo 46 incelendiğinde siyah görüntülerden elde edilen piksel ortalaması 8.08, gürültü oranı ise 2.96 değerini almaktadır. Bu görüntüler üzerinde de max ve min değerlerden bazı piksellerde algılama bozukluklarının olduğu tespit edilmiştir. Bozuk yada ölü piksel olarak nitelendirilen bölge toplam resim yüzeyinin max %1.03'nü oluşturmaktadır. Tablo 47 incelendiğinde alt görüntülerle hesaplanan ortalama ve standart sapma değerlerinin her bir alt görüntü için yaklaşık aynı düzeyde olduğu ve görüntü üzerinde gürültü oranının homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Görüntülerde özellikle satır başlangıcında düzenli bir bozuk piksel grubunun olduğu gözlenmiştir (Şekil 190-192). Siyah görüntüler üzerindeki gürültüleri ortadan kaldırmak için, seçilen bir model görüntü üzerinde PRNU algoritması uygulandığında, ortalama piksel değerinin 8.34 ve standart sapma değerinin ise 0 (sıfır) olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler görüntü üzerindeki piksellerin düzeltilerek aynı bir değere getirildiğinin göstergesidir.

Benzer şekilde beyaz görüntüler için hesaplanan piksel ortalama hata ve standart sapma değerleri ile istatistiksel anlamda ortalama değerden standart sapmanın 1-3 katı kadar büyük ve dışı bölgeye düşen piksel değerlerine ait yüzdeler Tablo 48'de verilmektedir. Seçilen ortalama görüntü 5 adet alt görüntüye bölünerek söz konusu işlemler yapılmış ve elde edilen değerler Tablo 49'da gösterilmektedir.

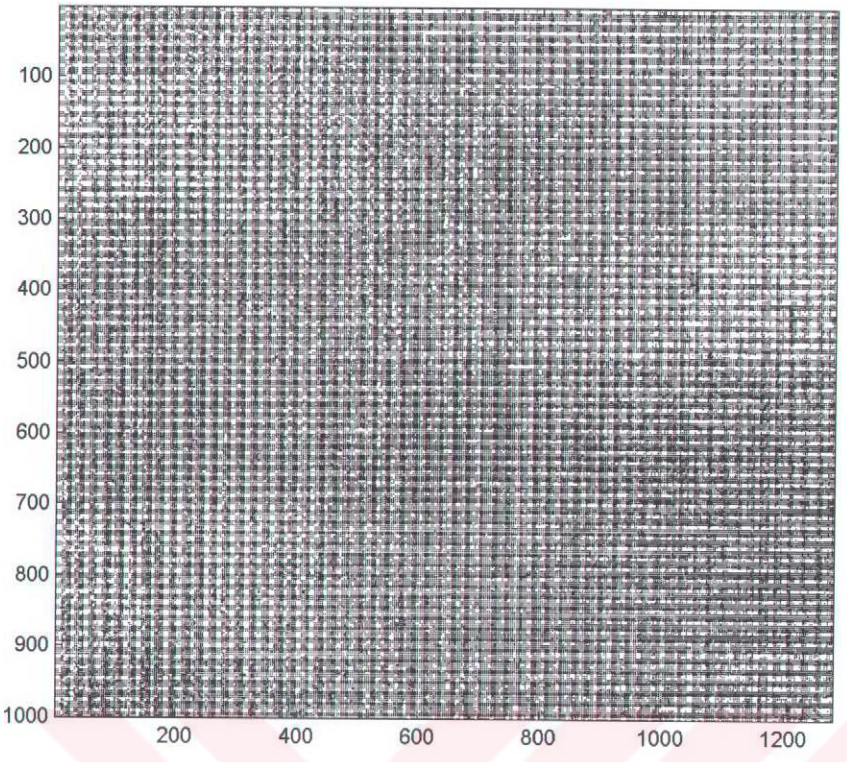
Tablo 48. Beyaz görüntü ile elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)

	img1	img2	img3	img4	img5	img6	img7	img8	img9	img10	img_ort
Ortalama	110.51	109.98	109.88	110.11	113.04	114.14	113.40	112.80	132.71	112.51	113.91
Standart Sapma	7.98	7.93	7.97	8.08	8.50	8.73	8.79	8.66	19.98	8.64	8.28
Min	75	74	76	74	77	77	72	74	71	73	85.2
Max	146	147	149	147	150	152	151	152	182	149	140.8
-σ<piksel<+σ (%)	31.44	34.26	31.04	32.64	32.15	33.78	31.48	33.28	40.09	30.06	34.84
-2σ<piksel<+2σ (%)	4.56	5.11	4.71	4.18	4.27	4.27	4.72	4.17	0.64	4.95	3.52
-3σ<opiksel<+3σ (%)	0.26	0.30	0.28	0.23	0.20	0.12	0.15	0.17	0.00	0.16	0.01

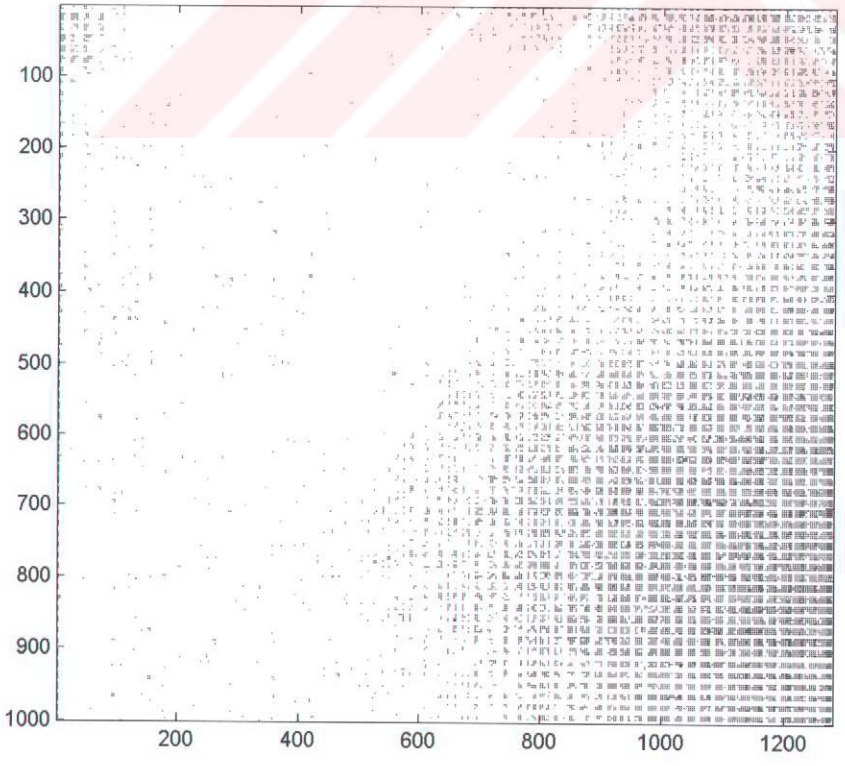
Tablo 49. Beyaz alt grup görüntülerle elde edilen istatistiksel değerler (Nikon)

	Alt1	Alt 2	Alt 3	Alt 4	Alt 5
Ortalama	108.94	112.30	108.52	112.27	109.88
Standart Sapma	7.09	8.05	6.95	8.87	7.62
Min	75	82	77	81	80
Max	139	145	139	146	142
-σ<piksel<+σ (%)	30.11	33.88	31.96	33.19	33.60
-2σ<piksel<+2σ (%)	3.60	4.06	4.17	3.44	3.76
-3σ<piksel<+3σ (%)	0.17	0.14	0.17	0.11	0.19

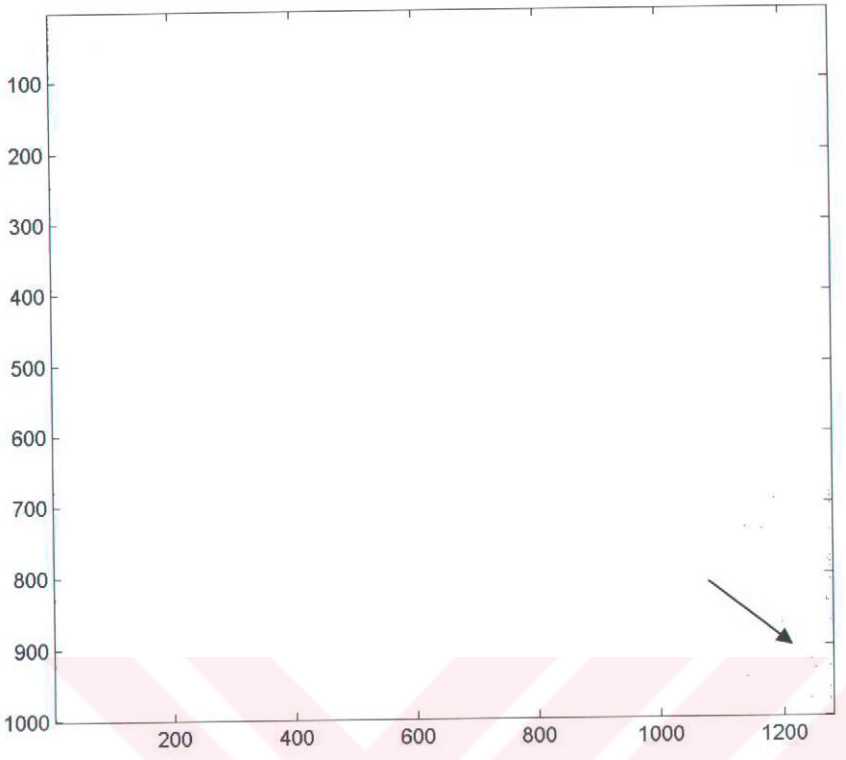
Tablo 48'de 10 görüntünün ortalaması alınarak elde edilen ortalama görüntü piksel değerlerinden ortalama değerden σ, 2σ ve 3σ kadar büyük veya bu bölge dışında kalanlar bir görüntü üzerinde siyah gözükecek şekilde temsil edilerek çizdirilmiştir. Bu görüntüler Şekil 191-193'de gösterilmektedir.



Şekil 191. Ortalama değerden ±σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz)



Şekil 192. Ortalama değerden ±2σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz)



Şekil 193. Ortalama değerden ±3σ uzaklıktaki pikseller (1280×1000, Beyaz)

Şekil 191-193 üzerinde görülen siyah bölgeler değeri ortalama değerden sırasıyla σ, 2σ ve 3σ daha büyük olan pikselleri ifade etmektedir. Tablo 48 incelendiğinde beyaz görüntülerden elde edilen piksel ortalaması 113.91, gürültü oranı ise 8.28 değerini almaktadır. Bu kamera bu yönüyle beyaz değeri algılama zorluğu çekmektedir. Orjinal olan 255 gri değerine yakın gri değerler türetilememiştir. Tablo 49 incelendiğinde alt görüntülerle hesaplanan ortalama ve standart sapma değerlerinin her bir alt görüntü için yaklaşık aynı düzeyde olduğu ve yine beyaz değerin yansıtılmasında bu alıcının etkin olmadığı gözlenmiştir. Beyaz görüntüler üzerindeki gürültüleri ortadan kaldırmak için, seçilen bir model görüntü üzerinde PRNU algoritması uygulandığında, ortalama piksel değerinin 110.51 ve standart sapma değerinin ise 0 (sıfır) olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler görüntü üzerindeki piksellerin düzeltilerek aynı bir değere getirildiğinin göstergesidir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dijital kameralar, doğrudan dijital veri üretme avantajına sahip olduklarından dolayı, günümüzde değişik disiplinlerce yaygın biçimde kullanılmaktadırlar. Genelde bir çok dijital kamera fotogrametrik ölçme amacıyla üretilmemektedir.

Fotogrametrik açıdan bakıldığında, dijital kamera sistemleri geometrik ve radyometrik özellikleri yönüyle bir takım eksiklikler içerdikleri için metrik değildirler. Geometrik eksiklik yada bozulma, görüntü noktasının olması gereken yerden sapması iken, radyometrik bozulma ise her bir pikselin taşıdığı renk değerinin, gerçek değerinden farklı olması olarak ifade edilir. Dijital kamera sistemlerinin metrik uygulamalarda kullanımı için, doğruluk gereksinimine bağlı olarak geometrik ve radyometrik hata kaynaklarının modellenip düzeltilmesi gerekmektedir. İçerdikleri matematik model, sistematik hata kaynakları ve kalibrasyon işlemleri bakımından değişik kalibrasyon metotları mevcuttur. Her metot belli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Fotogrametride kalibrasyon özellikle geometik alanda yoğunlaştırılır. Film kamera kalibrasyonu için geliştirilmiş bir çok analitik kalibrasyon metodu, dijital kamera sistemlerinin kalibrasyonu için de kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, fotogrametrik anlamda metrik potansiyellerinin belirlenmesi için, orta ve yüksek çözünürlüğe sahip beş farklı kamera sistemi dört farklı matematik model kullanılarak uygulama alanları ve laboratuar ortamında araştırılmıştır. Kameraların çalışma prensipleri, hata kaynakları ve bu hataların sonuç doğruluğuna etkileri detaylarıyla incelenmiştir. Ayrıca laboratuar ve uygulama alanlarında değişik sistematik hata gruplarının etkileri araştırılmıştır.

Fotogrametri önemli bir optik üçgenleme metodudur. Fotogrametrik sonuç doğruluğu, kullanılan kamera, görüntü konfigürasyonu, sistematik hata modeli ve obje özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Deneysel çalışmaların yanı sıra, pratik uygulamalarla da kameraların metrik potansiyelleri belirlenebilir. Bu amaçla bütün kameralar için hem laboratuar ortamı (deneysel) hem de pratikte uygulama alanında test alanları kurulmuştur.

DLT metodu ile 24 mm mercek kullanılarak Test Alanı 1'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, 5 istasyonlu çekimde x ve y eksenleri yönünde en hassas ortalama konum hatası 5, z ekseni yönünde ise 10 denetleme noktalı çözümde elde edilmiştir. 3 istasyonlu çekimde ise x, y ve z eksenleri yönünde en iyi doğruluk 5 denetleme nokta grubu ile hesaplanan değerlerden elde edilmiştir. Bu mercek ve metot ile

yapılan değerlendirmede en iyi sonuç 3 istasyonlu çözümde ortaya çıkmaktadır. Kullanılan parametre sayısı dikkate alınarak sonuç doğruluğu incelendiğinde, L18 (teğetsel distorsiyon 2. terim) parametresinin dahil edildiği çözümde en ideal sonucun elde edildiği görülmektedir. L19 ve L20 parametrelerinin doğruluğu artırıcı yönde bir etkisi olmamaktadır. Her iki (5 ve 3) istasyonlu çözümde elde edilen doğruluklar arasında önemli bir fark çıkmamasına rağmen, 5 istasyonlu çözümde beklenilen düzeyde doğruluk sağlanamamıştır. Bunun nedeni, 3'lü geometrik yapı içine sokulan diğer iki resmin sistemi kararsız bir yapıya dönüştürmesidir. 50 mm mercekli değerlendirmelerde, 5 ve 3 istasyonlu çekim durumunda x, y ve z eksenleri yönünde en iyi doğruluk 5 denetleme nokta grubu ile yapılan çözümlerde elde edilmiştir. Bu mercekle 5 istasyonlu çekimden elde edilen sonuçlar 3 istasyonlu çekime göre daha hassastır. 5 ve 3 istasyonlu çekimde en iyi doğruluk L15 (çapsal distorsiyon 2. terim) parametresinin de içinde bulunduğu çözümde elde edilmiştir. L16'dan L20'ye kadar olan parametreler doğruluk yönünden anlamlı değildirler. DLT metodunda, 3 istasyonlu çekimde 24 mm mercekle, 5 istasyonlu çekimde ise 50 mm mercekle daha iyi sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür.

Test Alanı 1 için, Işın Demetleri metodu ile 24 mm mercek kullanılarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, 5 ve 3 istasyonlu çekimlerde x, y ve z eksenleri yönünde en iyi doğruluk 5 denetleme nokta grubu ile yapılan çözümlerden elde edilmiştir. Resim geometrisi incelendiğinde, 5 istasyonlu çekimle daha hassas sonuçların elde edildiği görülmektedir. Parametre açısından bakıldığında, 3 istasyonlu çözümde en iyi doğruluk B_2'ye kadar olan (diklik) parametreler ile, 5 istasyonlu çözümde ise B_1 (ölçek faktörü) parametresinin de dahil edildiği parametre grubu ile sağlanmıştır. 50 mm mercek kullanılarak yapılan çözümde, hem 3 hem de 5 istasyonlu çekim durumunda x, y ve z eksenleri yönünde en iyi doğruluk 5 denetleme nokta grubu ile elde edilmiştir. Ayrıca bu mercek ile 5 istasyonlu çekimde 3 istasyonlu çözüme göre daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan parametre açısından en iyi sonuçlar K_1 parametresinin içinde bulunduğu çözümde elde edilmiştir. K_1'den sonraki parametrelerin çözüme doğruluk yönünden çok olumlu bir katkısı bulunmamaktadır. Her iki mercek ile yapılan değerlendirme sonucunda, 5 denetleme noktalı çözümde 50 mm mercekle, 10 ve 20 denetleme nokta grupları ile yapılan çözümlerde ise 24 mm mercekle daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.

Bluh metodu ile 24 mm mercek kullanılarak Test Alanı 1'de yapılan değerlendirmelerde, 3 ve 5 istasyonlu çekimlerde her üç eksen yönünde en iyi doğruluk 5

denetleme nokta grubu ile elde edilmiştir. Çekim istasyon sayısı irdelendiğinde, 5 istasyonlu çekimde bütün nokta gruplarına göre en iyi sonuçlar sağlanmıştır. Parametre grupları açısından bakıldığında, tüm parametrelerin kullanılması durumunda sonuç doğruluğunun max düzeyde olduğu gözlenmiştir. 50 mm mercek kullanıldığında, denetleme noktalarına göre doğruluk ve çekim istasyon sayılarıyla ilgili sonuçlar 24 mm'lik mercek sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir. Parametre grupları yönünden irdelendiğinde, x ve z yönündeki doğruluğun çapsal distorsiyon parametresinin içinde bulunduğu çözümde, y yönündeki en iyi doğruluğun ise tüm parametrelerin dikkate alındığı durumda gerçekleştiği görülmüştür. Merceklerin karşılaştırılmasında ise, 24 mm mercek ile ortaya çıkan sonuçların bütün denetleme nokta gruplarında daha hassas sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Test Alanı 1 için Elcovision 10 metodu irdelendiğinde, 24 ve 50 mm'lik mercekle elde edilen sonuçların her ikisinde de, 3 ve 5 istasyonlu çekimlerde x, y ve z eksenlerindeki en iyi doğruluk 5 denetleme nokta grubunda elde edilmiştir. Parametre grubu ele alındığında, yine her iki mercek için K_1 veya K_2 parametresinin çözüme katıldığı durumda sonuç doğruluğu en üst düzeye çıkmıştır. İki merceğin karşılaştırılmasında, 50 mm'lik mercek ile elde edilen sonuçların daha duyarlı olduğu gözlenmiştir.

Test Alanı 1'de, dört matematik model içerisinde her iki mercek ile de en iyi sonuçlar Işın Demetleri ve Bluh metodları ile elde edilmiştir. Bu metotları takiben DLT ve Elcovision 10 yöntemi gelmiştir. Elcovision 10 matematik modeli bütün mercekler ve denetleme nokta grupları ile yapılan değerlendirmelerde en düşük performansı göstermiştir.

DLT metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 2'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, 5 ve 10 istasyonlu çekimde y ekseni yönünde elde edilen en iyi doğruluk 5 noktalı denetleme grubunda olmuştur. x ve z eksenleri yönünde max doğruluğa, 5 istasyonlu çekimde 15, 10 istasyonlu çekimde ise 10 denetleme nokta grubu ile ulaşılmıştır. İstasyon sayıları incelendiğinde, 5 istasyonlu çekimin daha duyarlı sonuç verdiği, ancak elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark ortaya çıkmadığı görülmüştür. Parametre sayısı açısından sonuçlar irdelendiğinde, L15 parametresinin içinde bulunduğu çözümde en iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. L16-L20 parametrelerinin sonuç doğruluğu üzerinde önemli bir katkısı bulunmamaktadır.

Işın Demetleri metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 2'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda y ve z eksenleri

yönünde en doğru ve hassas sonuçlar 5 denetleme nokta grubunda ortaya çıkmaktadır. x ekseni yönündeki hatalarda en iyi doğruluk 5 istasyonlu çözümde 10, 10 istasyonlu çözümde ise 5 denetleme noktalı çözümde elde edilmiştir. Bu yöntemde de DLT metodunda olduğu gibi 5 istasyonlu çözüm daha doğru sonuç vermekte, ancak elde edilen sonuç değerleri arasında önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Işın Demetleri metodunda parametre sayısı bakımından en iyi sonuç P_2 parametresinin dikkate alındığı durumda gerçekleşmiştir. B_1 ve B_2 parametrelerinin çözümde etkisi olmamaktadır.

Bluh metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 2'de yapılan değerlendirmelerde, 5 ve 10 istasyonlu çekim durumunda üç eksen yönünde elde edilen sonuçlar 5 denetleme nokta gruplu çözümlerde en iyi doğrulukla sonuçlandırılmıştır. Sadece 10 istasyonlu çözümde, 10 denetleme nokta grubu ile z ekseni yönünde en iyi düzeyde doğruluk ortaya çıkmıştır. İstasyon sayıları açısından bütün denetleme noktalı çözümlerde en hassas sonuçlar 5 istasyonda elde edilmiştir. Sonuç değerleri bakımından 10 ve 5 istasyon değerleri arasında anlamlı bir fark ortaya çıkmamaktadır. Parametrelerin sonuçlara etkisi göz önüne alındığında, en hassas sonuçlar tüm parametrelerin kullanılması durumunda elde edilmektedir.

Test Alanı 2'de yapılan değerlendirmeler sonucunda her yönüyle Işın Demetleri yönteminin bütün nokta grubu ve eksen yönlerinde en iyi sonuçları ortaya koyduğu görülmektedir. Bu metoda yakın duyarlıkta sonuçlar Bluh metodu ile de elde edilmiştir.

Test Alanı 3 ve 4'de sadece 3 istasyonlu çekim yapıldığından istasyon sayılarına göre değerlendirme yapılmamıştır.

DLT metodu ile 24 ve 50 mm mercek kullanılarak Test Alanı 3'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, üç eksen (x, y, z) yönünde en hassas ortalama konum hatası 6 denetleme noktalı çözümde elde edilmiştir. Kullanılan parametre sayısı dikkate alınarak sonuç doğruluğu incelendiğinde, en iyi doğruluk, 24 mm mercek için L18 parametresini içine alan çözümde, 50 mm mercek için ise, 6 noktalı çözümde bütün parametrelerin kullanılması, 12 noktalı çözümde ise L13'e kadar olan parametrelerin kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu metotta 50 mm mercek 24 mm merceğe göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Buradaki sonuç değerleri arasındaki farkın nedeni obje alanı genişliğinin 50 mm'lik çekimde 24 mm'lik çekime oranla daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır.

Işın Demetleri metodu ile 24 ve 50 mm mercek kullanılarak Test Alanı 3'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, üç eksen (x, y, z) yönünde en iyi konum doğruluğu 6

denetleme noktalı çözümde elde edilmiştir. Kullanılan parametre sayısı dikkate alınarak sonuç doğruluğu incelendiğinde, bütün parametrelerin (10 parametre) çözüme katılması durumunda en iyi sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu metotta her iki mercek ile elde edilen değerlerden, 50 mm mercekte daha iyi sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Doğruluk değerlerinin özellikle DLT metodundan çok daha iyi düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Bu metodun DLT metoduna göre avantajı, obje alanı büyüklüğü ve diğer parametrelerin göz önüne alınmaksızın daha güçlü olmasından kaynaklanmaktadır.

Bluh metodu ile 24 ve 50 mm mercek kullanılarak Test Alanı 3'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, her üç eksen yönünde en iyi doğruluk 6 denetleme nokta grubu çözümünde elde edilmiştir. Parametre grupları açısından bakıldığında tüm (15 parametre) parametrelerin kullanılması durumunda sonuç doğruluğunun max düzeyde olduğu görülmektedir. Bu metotta kullanılan her iki mercek ile elde edilen sonuçlardan, 50 mm mercek ile ortaya çıkan sonuçların bütün denetleme nokta gruplarında daha hassas olduğu gözlenmiştir. Bluh metodu DLT metoduna göre daha doğru sonuç verirken, Işın Demetleri yöntemine göre doğruluk düzeyi açısından daha zayıf kalmaktadır.

Elcovision 10 metodu ile 24 ve 50 mm mercek kullanılarak Test Alanı 3'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, x, y ve z eksenleri yönünde en iyi doğruluk 6 denetleme nokta grubunda elde edilmiştir. Sadece 24 mm'lik mercekte, z yönünde en iyi doğruluk 12 denetleme nokta grubunda sağlanmıştır. Genel olarak, 6 denetleme noktalı çözümlerde daha hassas sonuçlar ortaya çıkmıştır. Tüm parametrelerin (K_1 ve K_2 dahil) dikkate alındığı durumda, sonuç doğruluğu en üst düzeye çıkmıştır. Her iki mercekle yapılan değerlendirmeler karşılaştırıldığında, 50 mm mercek ile elde edilen sonuçların daha duyarlı olduğu görülmektedir.

Bu test alanında bütün matematik modeller içerisinde her iki mercek ve kullanılan nokta grupları dikkate alındığında, en iyi çözüm Işın Demetleri yöntemiyle elde edilmektedir. Bu yöntemi takiben en iyi doğruluk Bluh ve DLT metoduyla sağlanmaktadır.

DLT metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 4'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, x ve y eksenleri yönünde elde edilen en iyi doğruluk 5 noktalı denetleme grubunda olmuştur. z ekseni yönünde max doğruluğa 20 denetleme nokta grubu ile ulaşılmıştır. Her üç eksen dikkate alındığında en duyarlı sonuçlar 5 denetleme noktalı grupta elde edilmiştir. Parametre açısından sonuçlara bakıldığında L14'e (çapsal distorsiyon 1. terim) kadar olan parametrelerin bulunduğu çözümde en iyi sonuçların elde

edildiği görülmektedir. Diğer parametrelerin sonuç doğruluğuna pozitif yönde bir etkisi olmamaktadır.

Işın Demetleri metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 4'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, y ve z eksenleri yönünde en doğru ve hassas sonuçlar 5 denetleme nokta grubunda ortaya çıkmaktadır. x ekseni yönündeki hatalarda en iyi doğruluk 10 noktalı çözümde elde edilmiştir. Bu yöntemde, DLT metodunda elde edilen sonuç değerlerinden çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Işın Demetleri metodunda parametre bakımından en iyi sonuç B_2 parametresinin de dikkate alındığı yani tüm parametrelerin kullanılması durumunda gerçekleşmiştir.

Bluh metodu ile 20 mm mercek kullanılarak Test Alanı 4'de yapılan değerlendirmeler sonucunda, üç eksen yönünde elde edilen sonuçlar 5 denetleme nokta gruplu çözümde en iyi doğrulukla sonuçlandırılmıştır. Parametrelerin sonuçlara etkisi göz önüne alındığında, en hassas sonuçlar tüm parametrelerin kullanılması durumunda elde edilmiştir.

Test Alanı 4'de bütün matematik modeller içerisinde en iyi sonuçları Işın Demetleri yöntemi vermektedir. Bu alanda DLT metodu Bluh metodundan daha duyarlı sonuçlar vermiştir.

Radyometrik değerlendirmeler sonucunda, Kodak kamerasının siyah ortamda görüntüleri ortalama algılama değeri 1.23 ve standart sapma değeri 0.81 iken, Nikon kamerasının aynı ortamda ortalama algılama değeri 8.08 ve standart sapması 2.96 olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde kameraların düzgün beyaz yüzeyleri algılamada, ortalama ve standart sapma yetenekleri değer olarak sırasıyla Kodak kamerası için 230.61 ve 19.26, Nikon E2 için ise 113.91 ve 8.28'dir. Bu değerler sonucunda, Kodak kamerasının radyometrik özellikleri yönüyle Nikon kamerasından daha üstün olduğu sonucuna varılmaktadır.

Nikon kamerası ile her iki ortamda elde edilen piksel değerlerinin birbirine yakın olduğu ortaya çıkmakta, bu durum ortalama değerden standart sapmanın 3 katı kadar uzak bölgeye düşen piksel sayısını da azaltmaktadır. Bunun sonucu olarak, Nikon kamerasıyla elde edilen görüntülerde bozuk piksel sayısının az olduğu, ancak gerçek değerin yansıtılma oranının düşük olduğu ifade edilebilir. Kodak kamerası ile tamamen tersi bir sonuç ortaya çıkmıştır. Yani kodak kamerası siyah ve beyaz ortamlarda yansıma değeri olarak çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

Detaylarıyla verilen sonuçların ışığında, aşağıda paragraflar halinde genel sonuçlar sunulmuştur.

- Bütün test alanlarında, kullanılan matematik değerlendirme metotları arasında en iyi sonuçlar Işın Demetleri yöntemiyle elde edilmiştir. Bluh matematik modeli özellikle laboratuar ortamında yapılan testlerde yüksek doğrulukta sonuçlar üretmiştir. Bu yönüyle bu metodun daha çok laboratuvar kalibrasyonu çalışmalarında kullanılması uygun olacaktır. DLT ve Elcovision 10 metotları diğer iki metoda göre daha duyarsız sonuçlar vermektedir.
- DLT çözümünde, sonuç doğruluğunun istenilen düzeyde olması için, kullanılan kontrol alanının iyi bir hacim oluşturması gerektiğinden, özellikle Test Alanı 2'de kontrol alanının düzlem olması nedeniyle elde edilen sonuçların diğer metotlara oranla daha kaba olduğu gözlenmiştir.
- Bütün matematik modellerde, kullanılan parametre setlerinin sonuçlar üzerinde doğrudan etki yaptığı gözlenmiştir. Bu parametreler içerisinde en büyük yada doğruluğu artırıcı etki, çapsal distorsiyonun 1. terimi (K_1) ile sağlanmıştır. Bu durum, K_1 parametresinin resim yüzeyi üzerindeki bozulmalarda etkili, en önemli parametre olduğunu göstermektedir.
- Matematik modellerde kullanılan ilave parametrelerin anlamlı olup olmadıklarının tespitinden sonra, anlamsız olan ilave parametrelerin çözüme etki etmediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yapılacak çalışmanın boyutuna ve niteliğine bağlı olarak, farklı sayıda anlamlı parametrenin değerlendirmede kullanılabileceği görülmüştür.
- Metrik doğruluğu etkileyen en önemli faktörlerden biri resim koordinat ölçüsüdür. Bu çalışmada resim koordinatları manuel ve otomatik olarak ölçülmüştür. Otomatik ölçülerin nokta konum doğruluğuna pozitif yönde etkileri saptanmıştır.
- Kameraların metrik performanslarını etkileyen bir diğer önemli faktör resim çekim geometrisidir. İyi bir geometrik yapı ile hassas sonuçlar elde edilebilir. Bu amaçla değişik kombinasyonlarda resim çekimi yapılarak, çekim geometrisinin doğruluğa etkisi incelenmiştir. İncelemelerden, çekim istasyon sayısının fazla olmasının metrik doğrulukta önemli bir ilerleme sağlamadığı gözlenmiş, bunun yerine ölçülecek objeyi iyi bir şeklide kapsayacak çekim geometrisinin yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Nitekim, yapılan değerlendirmelerden, 3 ile 5, 5 ile 10, 4 ile 8 ve 6 ile 12 gibi farklı çekim istasyonu sayı gruplarından elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Bu sonuç

maliyet, zaman ve doğruluk göz önüne alındığında yeterli sayıda çekim istasyonu kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

➢ Farklı büyüklük ve özelliklere sahip test alanlarında, değişik kameralarla yapılan değerlendirmeler sonucunda, obje alanı büyüklüğünün kameraların metrik performansına olumsuz yönde etki ettiği belirlenmiştir.

➢ Fotogrametrik olarak hesaplanan noktaların konum doğruluğu, denetleme nokta sayısının artması ve kontrol nokta sayısının azalması ile ters orantılı olarak değişmektedir. Genel olarak yapılan testlerde doğruluk artışının, denetleme nokta sayının azaltılması ile sağlandığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında denetleme nokta grupları ile elde edilen sonuç değerleri arasında önemli bir farkın olmadığı da gözlenmiştir.

➢ Uygulamada kameraların laboratuar yada iş ortamında kalibrasyonu yapılmasına dair yapılan testler sonucunda, her iki kalibrasyon işlemi ile hesaplanan parametrelerin kullanılması durumda, elde edilen nokta konum doğrulukları arasında önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Bu nedenle her iki durumda yapılacak kalibrasyonun, üç boyutlu koordinat bilgisi doğruluğuna aynı etkiyi yapacağı sonucuna varılmıştır. Ancak, iş ortamında kalibrasyonun kontrol noktası tesisi ve getireceği ilave iş yükü nedeniyle dezavantajlı olduğu söylenebilir.

➢ Yapılan değerlendirmeler sonucu, piksel büyüklüğü ile piksel sayısının geometrik doğruluk üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Aynı test alanlarında farklı kameraların kullanımı ile, piksel boyutu büyük olmasına rağmen piksel sayısının fazla olduğu Kodak kamerası, diğer kameralara göre daha iyi sonuç vermiştir. Buradan, piksel sayısının piksel boyutuna göre geometrik doğruluk üzerinde daha çok etkili olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

➢ Uygulamalarda kullanılan kameraların, kamera sabitleri yönünden ortaya koydukları sonuçlar incelendiğinde, kamera sabitinin büyük ya da dar açılı olmasının x, y ve z koordinat bilgisi elde etmede doğruluk üzerinde pozitif yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Nitekim çalışmada, özellikle 50 mm mercek ile yapılan çözümlerde sonuç doğruluğunun daha iyi olduğu gözlenmiştir.

➢ Uygulamalardan, dijital kameraların mimari ve tarihi objelerin rölevesi, arkeoloji, endüstri, tıp, köprü ve baraj deformasyonu belirleme ve uzay sanayi gibi farklı doğruluk gereksinimi olan tüm alanlarda kullanılabileceği sonucu ortaya konulmuştur. Bir çok alanda olduğu gibi, özellikle objelerin üç boyutlu modellerinin üretimi için temel veri

kaynağı olarak kullanılan dijital kameralar, sağladıkları doğruluk ile üç boyutlu model üretimi alanında da kullanılabilirler.

- Dijital kameralar klasik metotlara oranla fotogrametri alanında, kullanım kolaylığı, ölçü zamanının azaltılması, insan gücünden tasarruf sağlanması, hız ve doğruluk açısından önemli katkılar ortaya koymaktadır.
- Çalışma sonucunda, metrik olmayan ve kamera bilgileri (iç yöneltme elemanları) global anlamda verilen dijital kameraların, duyarlı ölçümlerde kullanılabilmeleri için mutlaka kalibre edilmeleri gerekliliği belirlenmiştir.
- Yapılan bu çalışma, test edilen orta ve yüksek çözünürlüğe sahip dijital kameraların fotogrametrik uygulamalar için son derece uygun olduğunu göstermiştir.

5. KAYNAKLAR

Abdel-Aziz, Y. I., 1975. Film Distortion in Non_Metric Cameras, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 41(3), 613-615.

Abdel-Aziz, Y. I. ve Karara, H. M., 1971. Direct Lineer Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates in Close-Range Photogrammetry, Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, Urbana, Illinois, 1-8.

Ahmad, A. ve Chandler, J. H., 1999. Photogrammetric Capabilities of the Kodak DC40, DCS420 and DCS460 Digital Cameras, Photogrammetric Record, 16(94), 601–615.

Ayhan, E., 1996. Dönel Yüzeylerin Yakın Resim Fotogrametri Yöntemiyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Ayhan, E., Karslı ve F., Friedrich, J., 2001. The Accuracy of 3D Point Fields Determined by a Nikon E2/E2S Digital Camera System, 5th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Oct. 1-4, Vienna.

Baş, H. G., 1993. Analitik Fotogrametri (Yersel), Sakarya Üniversitesi, SMYO Teknik Bölüm, Adapazarı.

Baxes, G. A., 1994. Digital Image Processing: Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., 37-68.

Beyer, H. A., 1992/1. Accurate Calibration of CCD Cameras, Proceedings of the IEEE Computer Society Conferenceon Computer Vision and Pattern Recognition, Champaign, Illinois, 96-101.

Beyer, H. A., 1992/2. Geometric and Radiometric Analysis of a CCD Camera Based Photogrammetric Close-Range System, PhD , No. 9701, ETH, Zurich.

Beyer, H. A., 1995. Digital Photogrammetry in Industrial Applications. Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 30, Part 5W1, 373-378.

Boston, 1994. Videometrics III, SPIE, 2350, 364 pp.

Bösemann, W., Godding, R. ve Richmann, W., 1990. Photogrammetric Investigation of CCD Cameras, SPIE Proceedings: Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1395, 119-126.

Brown, D. C., 1971. Close-Range Camera Calibration, Photogrammetric Engineering, 38(8), 855-866.

Burner, A. W., Snow, W. L, Shortis, M. R. ve Goad, W. K., 1990. Laborattory Calibration and Characterization of Video Cameras, SPIE Proceedings, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1395, 112-118.

Büyüksalih, G., 1997. Geometric ang Radiometric Calibration of Video Infrared Imagers for Photogrammetric Applications, PhD, Glasgow University, Faculty of Science, Glasgow.

Campbell, J. B., 1996. Introduction to Remote Sensing, 2nd Edition, The Guilford Press, London, 622 pp.

Chen, F. J., 1997. Application of Least-Squares Adjustment Technique to Geometric Camera Calibration and Photogrammetric Flow Visualization, ISA 43rd International Instrumentation Symposium, May 4-8, Orlando, Florida.

Chen, Y. ve Shenk, A. F., 1992. A Rigorous Calibration Method for Digital Cameras, Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 29, Part B1, 199-205.

Clarke, T. A. ve Fryer, J. G., 1998. The Development of Camera Calibration Methods and Models, Photogrammetric Record, 16(91), 51-66.

Clarke, T.A. ve Wang, X. 1998. Extracting High Precision Information from CCD images. Proc. ImechE Conf., Optical Methods and Data Processing for Heat and Fluid Flow, City University, 311-320.

Cooper, M. A. R. ve Robson, S., 1996. Theory of Close Range Photogrammetry, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson K. B. (Ed.), Whittles Publishing, UK, 9-50.

Cramer, M., 2002. Investigations on Long Term Stability of System Calibration for Direct Georeferencing, Final Report, Institute for Photogrammetry (IFP), University of Stuttgart.

Criminisi, A, 1999. Accurate Visual Metrology from Single and Multiple Uncalibrated Images, Ph.D. Diss., Oxford University.

Curry, S., Baumrind, S. ve Anderson, J. M., 1986. Calibration of Array Camera, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 52(5), 627-636.

Curtin, D. P., 1998. Digital Photography-An On-line Book.

D'Apuzzo, N., 2003. Surface Measurement and Tracking of Human Body Parts from Multi Station Video Sequences, PhD, No. 15271, ETH, Zurich.

Donnelly, B. E., 1988. Film Flatness in 35 mm Cameras, M.Sc Thesis, The University of Newcastle, New South Wales, No. 2308, 116 pp.

Ebner, H. ,1976. Self-Calibrating Block Adjustment, Congress of the International Society for Photogrammetry, Invited Paper of Commission III, Helsinki, Finland.

Edmundson, K. L., Novak, K. ve He, G., 1991. Analytical Calibration of a Stereo-Vision System, Technical Papers ACSM-ASPRS Annual Convention, USA, 5, 86-92.

El-Habrouk, H., Li, X. P. ve Faig, W., 1996. Determination of Geometric Characteristics of a Digital Camera by Self-Calibration, IAPRS, 31, Part B1, Vienna, Austria, 60-64.

El-Hakim, S. F., 1986. A Real Time System for Object Measurement wirh CCD Cameras, Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 26, Part 5, 363-373.

El-Hakim, S. F., Burner, A. W. ve Real, R. R., 1989. Video Technology and Real-Time Photogrammetry, Non-Topographic Photogrammetry, 2nd Ed., H. M. Karara (Ed.), ASPRS, 279-304.

Elvosion 10 Software Manuel, 1997.

Ergün, B., 2003, Yakın Resim Fotogrametrisinde Mikrofotogrametrik Uzman Sistem Tasarımı, Tesisi ve Kalibrasyonu, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Faig, W., El-Habrouk, H., Li, X. P. ve Hosny, M., 1996. A Comparrison of the Performances of Digital and Conventional Non-Metric Cameras for Engineering Applications, IAPRS, 31, Part B5, 147-151.

Faig, W. ve Li, X. P., 1997. An Accuracy Study of a Low-Cost Digital Camera, Proceedings of Geomatics in the Era of Radarsat, Ottawa, Canada.

Faig, W. ve Shih, T. Y., 1988. Functioanl Review of Additional Parameters, Proceedings of ACSM/ASPRS Annual Convention, St. Louis, 3, 158-168.

Faig, W., Shih, T. Y. ve Liu, X. S., 1990. A Non-Metric Stereo System and its Calibration, Prodeedings of ACSM/ASPRS Annual Convention, 5, 18-25, Denver, Colorado, USA.

Finsterwalder, R. ve Hofmann, W., 1983. Fotogrametri, (Çeviri: Aytaç, M., Örmeci, C., Altan, M. O.), İTÜ Kütüphanesi, Sayı 1242, İstanbul.

Foerstner, W., 2000. New Orientation Procedure. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33(3), pp. 297-304.

Fraser, C. S., 1992. Photogrammetric Measurement to One Part in a Million, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(3), 305-310.

Fraser, C. S., 1996. Industrial Measurement Applications, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson K. B. (Ed.), 329-361.

Fraser, C. S., 1997/1. Digital Camera Self-Calibration, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52(4), 149-159.

Fraser, C. S., 1997/2. Innovations in Automation for Vision Metrology Systems, Photogrammetric Record, 15(90), 901-911.

Fraser, C. S. ve Edmundson, K. L., 1996. The metric Impact of Reduction Optics in Digital Cameras, Photogrammetric Record, 15(87), 437-446.

Fraser, C. S. ve Shortis, M. R., 1992. Variation of Distortion within the Photographic Field, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(6), 851-855.

Fraser, C. S. ve Shortis, M. R., 1995. Metric Exploitation of Still Video Imagery. Photogrammetric Record, 15(85), 107-122.

Fraser, C. S.,1998. Some Thoughts on the Emergence of Digital Close-Range Photogrammetry, Photogrammetric Record, 16(9), 37-50.

Fryer, J. G., 1986. Distortion in Zoom Lens, Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry, and Surveying and Remote Sensing, 44, 49-59.

Fryer, J. G., 1989. Camera Calibration in Non-Topographic Photogrammetry, Non-Topographic Photogrammetry, 2nd Ed., H. M. Karara (Ed.), ASPRS, 59-69.

Fryer, J. G., 1992. Recent Developments in Camera Calibration Close-Range Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29, Part B5, Washington, USA, 594-599.

Fryer, J. G., 1996. Camera Calibration, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson, K. B. (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp. 156-179.

Godding, R. ve Woytowicz, D., 1995. A New Dijital High Resolution Recording System, Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 30, Part 5W1, 31-35.

Grafarend, E., 1974. Optimization of Geodetic Networks, Bollettino di Geodesia e Scienze Afini, 33(4), 351-406.

Grün, A. ve Beyer, H.A., 2001. System Calibration Through Self-Calibration, Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Springer Series in Information Sciences 34, Grün, Huang (Eds.)

Heipke, C., Stephani, M., Strunz, G. ve Lenz, R., 1992. Photogrammetric Calibration and Point Determination Using a Digital CCD Camera, Internatrional Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29, Part B1, 556-560.

Heuvel, F. A. V., 1994. Automated 3-D Measurement with the DCS200 Digital Camera, Optical 3-D Measurment Techniques II, ETH Zürich, 63-71.

Hou, E. S., Li, J. ve Kosonocky, W. F., 1995. Reai Time Implementation of the Two Point Non-Uniformity Correction for IR-CCD Camera, SPIE Proceedings, Videometrics IV, 2598, pp. 1-8.

Jacobsen, K., 1980. Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen, Doctor Thesis, University of Hannover.

Jacobsen, K., 1997. Operational Block Adjustment without Control Points, ASPRS, Seattle.

Jacobsen, K., 1998. Geometric Calibration of Space Remote Sensing Cameras for Efficient Processing, ISPRS Com I Symposium, Bangalore.

Jacobsen, K., 2002, Bluh User Manuel, Institute of Photogrammerty and GeoInformation, Hannover.

Kenefick, J. F., Gyer, M. S. ve Harp, B. F., 1972. Analytical Self-Calibration, Photogrammetric Engineering, 38(11), 1117-1126.

Kochi, N., Ohtani, H., Nakamura, S., Uchiyama, T., Chida, M., Sato, H. ve Noma, T., 1995. Development of a Metric CCD Camera and its Applications, IAPRS, 30, Part 5W1, From Pixels to Sequences, 254-258.

Kraus, K., 1997. Photogrammetry, Advanced Methods and Applications, Volume II, Dümmler Verlag, Bonn, Germany.

Külür, S., 2002. Fotogrametrik Veri Elde Etme Sistemlerinin Kalibrasyon Yöntemleri, Ders Notları, İTÜ, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fototogrametri Böl., İstanbul.

Lee, C. K. ve Faig, W., 1996. Vibration Monitoring with Video Camera, IAPRS, 31, Part B5, 152-159.

Lenz, R., 1989. Image Data Acquisition with CCD Cameras, Proceedings of the Congress on Optical3-D Measurement Techniques, 22-34.

Li, X. P. ve Faig, W., 1996. On Digital Camera Calibration, Geoinformatics '96 Wuhan, Wuhan, China, 251-258.

Li, X., 1999. Photogrammetric Investigation Into Low Resolution Digital Camera Systems. PhD, the University of New Brunswick, Canada.

Lichti, D. D., 1996. Constrained Finite Element Self Calibration, M.Sc Thesis, The University of Calgary.

Lichti, D. D. ve Chapman, M. A., 1997. Constrained FEM Self-Calibration, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 63(9), 1111-1119.

Luhmann, T. ve Wester-Ebbinghaus, W., 1987. On Geometric Calibration of Digitized Video Images of CCD Arrrays, ISPRS Intercommission Conference, Proceedings, 35-47.

Maas, H. G. ve Niederöst, M., 1997. The Accuracy Potential of Large Format Stil Video Cameras, Videometrics V, SPIE Proceedings Series, 3174, SPIE's 42nd Annual Meeting, San Diego.

Marzan, G. T. ve Karara, H. M., 1975. A Computer Program for Direct Linear Transformation Solution of Collinearity Condition, and Some Applications of It, Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetric Systems, Champaign, ASP, 420-476.

Mason, S., 1995. Conceptual Model of the Convergent Multistation Network Configuration Task, Photogrammetric Record, 15(86), 277-299.

Mason, S., Rüther, H. ve Smit, J., 1997. Investigation of the Kodak DCS460 Digital Camera for Small Area Mapping, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52, 202-214.

Mcglone, J. C., Mikhail, E. M. ve Paderes, F. C., 1989. Analytical Data Reduction Schemes in Non-Topographic Photogrammetry, Non-Topographic Photogrammetry, 2nd Ed., H. M. Karara, ASPRS, 37-57.

Melbourne, 1994. Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, XXX, Part 5, 495 pp.

Melen, T. ve Balchen, J. G., 1994. Modeling and Calibration of Video Cameras, ISPRS Commission III Symposium on Spatial Information from Digital Photogrammetry and Computer Vision, Munich, Germany.

Moffitt, F. H. ve Mikhail, E. M., 1980. Photogrammetry, 3rd Edition, Harper and Row Publishers, New York.

Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1989. Dengeleme Hesabı, K.T.Ü. Basımevi, Cilt II, Trabzon.

Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1992. Dengeleme Hesabı, K.T.Ü. Basımevi, Cilt III, Trabzon.

Paquette, L., Stampfler, R., Davis, W. A. ve Caelli, T. M., 1990. A New Camera Calibration Method for Robotic Vision, SPIE Proceedings, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1395, 656-663.

Peipe, J., 1994. Photogrammetric Calibration and Performance Test of Still Video Cameras, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 30 (1), 108-113.

Peipe, J., 1995. Photogrammetric Inbestigation of a 3000□2000 Pixel High Resolution Still Video Camera. Internatrional Archives of Photogrammetry and RemoteSensing, 30, Part 5W1, 31-35.

Peipe, J. ve Schneider, C. T., 1995. High Resolution Still Video Camera for Industrial Photogrammetry, Photogrammetric Record, 15(85), 135-139.

Pomaska, G., 1999. First Experiences with the New Digital Camera Rollei D7 Metric, CIPA International Symposium, CIPA Working Group II/V, October 3-6,Olinda, Brazil.

Pourcelot, P., Audigié, F., Degueurce, C., Geiger, D. ve Denoix, J. M., 2000. A Method to Synchronise Cameras Using the Direct Linear Transformation Technique, Journal of Biomechanics, 33, 1751-1754.

Remondino, F., 2000, Investigation and Calibration of Digital Camera Sony DCS F505 Cybershot, Internal Technical Report at IGP – ETH, Zurich.

Remondino, F., 2002. 3-D reconstruction of articulated objects from uncalibrated images, Three-Dimensional Image Capture and Application V, SPIE Electronic Imaging, Proc. of SPIE 4661, San Jose, USA.

Schenk, T., 1999. Digital Photogrammetry, Volume I, Terra Science, 428 pp.

Sherr, S., 1979. Electronic Displays, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 636 pp.

Shih, T. Y., 1989. Critical Evaluation of Stereophotogrammetric Methodology with Emphasis on Close-Range Applications, Ph.D., Department of Surveying Engineering, University of Brunswick, Canada.

Shortis, M. R. ve Beyer, H. A., 1996. Sensor Technology for Digital Photogrammetry and Machine Vision, Close Range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson K. B. (Ed.), Whittles Publishing, UK, 106-155.

Shortis, M. R., Robson, S. ve Short, T., 1996. Multiple Focus Calibration of a Still Video Camera, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 31(5): 534-539.

Shortis, M. R., Snow, W. L. ve Goad, W. K., 1995. Comparative Geometric Tests of Individual and Science CCD Cameras Using Plumb Line and Test Range Calibrations, IAPRS, 30, Part 5W1, From Pixels to Sequences, 53-59.

Shortis, R. M., Robson, S. ve Beyer, H. A., 1999, Extended Lens Model Calibration of Digital Still Cameras, ISPRS Commision V WG V/1, Close Range Imaging and Metrology.

Slama, C., 1980. Manual of Photogrammetry. ASPRS, Falls Church, Virginia.

Stefanidis, A., Agouris, P. ve Schenk, A. F., 1990. Evaluation of the Performance of a Digital Camera, Proceedings of ACSM-ASPRS Annual Convention, USA, 5, 109-118.

Trinder, J. C., 1989. Precision Digital Target Location, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55(6), 883-886.

Tüdeş, T., 1986. Yer Fotogrametrisi, KTÜ Basımevi, Fakülte Yayın No:34, Trabzon.

URL-1, http://www.elcovision.com, Digital Cameras, 17 Kasım 2002.

URL-2, http://www.dpreview.com/reviews/specs/Olympus/oly_e10.asp, Olympus E-10 digital Camera Specifications, 10 Haziran 2004.

URL-3, http://www.dpreview.com/reviews/nikoncp990/, Nikon Coolpix 990 Review, 01 Mayıs 2004.

Vösselman, G. ve Förstner, W., 1988. The Precision of a Digital Camera, IAPRS, 27, Part B1, 148-157.

Wang, X. ve Clarke, T. A., 2001. Separate Adjustment in Close-Range Photogrammetry, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 55, 289–298.

Warner, W. S., Graham, R. W. ve Read, R. E., 1996. Small Format Aerial Photography, Whittles Publishing, Latheronwheel, 121 pp.

Wiggenhagen, M., 2002. Calibration of Digital Consumer Cameras For Photogrammetric Applications, ISPRS Commision III, 34, Part 3B, Photogrammetric Computer Vision, Graz.

Wiley, A. G. ve Wong, K. W., 1990. Metric Aspects of Zoom Vision, SPIE Proceedings, Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1395, 112-118.

Wiley, A. G. ve Wong, K. W., 1995. Geometric Calibration of Zoom Lenses for Computer Vision Metrology, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 61(1), 69-74.

Wolf, P. ve Dewitt, B., 2000. Elements of Photogrammetry, McGraw Hill, New York.

Zheng, Z. ve Wang, X, 1992: A General Solution of a Closed-Form Space Resection, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(3), 327-338.

Zurich, 1993. Optical 3-D Measurement Techniques, II. Wichman, Karlsruhe, 626 pp.

ÖZGEÇMİŞ

1972 yılında Trabzon'un Yomra ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Yomra'da tamamladı. 1989 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümüne girdi. 1993 yılında aynı bölümden mezun oldu. Aynı yıl adı geçen bölümde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 1994 yılında Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1996 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve aynı yıl Doktora öğrenimine başladı. 1998 yılında Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü kadrosunda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. TÜBİTAK NATO-A2 bursunu kazanarak, Ekim-Aralık 2002 tarihleri arasında, Hannover Üniversitesi Fotogrametri Enstitüsünde (Almanya) misafir araştırmacı olarak çalıştı. Halen Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır. İyi derecede ingilizce bilmektedir.