

**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EVİRİMSEL HESAPLAMA TABANLI KAMERA  
KALİBRASYONU**

**Hazırlayan  
Yük. Müh. Mehmet Akif GÜNEN**

**Danışman  
Prof. Dr. Erkan BEŞDOK**

**Doktora Tezi**

**Ocak 2021  
KAYSERİ**



**T.C.  
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**EVİRİMSEL HESAPLAMA TABANLI KAMERA  
KALİBRASYONU**

**(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan  
Yük. Müh. Mehmet Akif GÜNEN**

**Danışman  
Prof. Dr. Erkan BEŞDOK**

**Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)  
tarafından 2211-C Kodlu Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Bursu ile  
desteklenmiştir.**

**Ocak 2021  
KAYSERİ**

## **BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK**

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

Mehmet Akif GÜNEN



## YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“Evrimsel Hesaplama Tabanlı Kamera Kalibrasyonu” adlı Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

### Tezi Hazırlayan

Yük. Müh. Mehmet Akif GÜNEN

### Danışman

Prof. Dr. Erkan BEŞDOK

### Harita Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Abdurrahman EYMEN

**Prof. Dr. Erkan BEŞDOK** danışmanlığında **Mehmet Akif GÜNEN** tarafından hazırlanan “**Evrimsel Hesaplama Tabanlı Kamera Kalibrasyonu**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

..... / ..... / 2021

**JÜRİ:**

Danışman : Prof. Dr. Erkan BEŞDOK .....

Üye : Prof. Dr. Bahriye AKAY .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ümit Haluk ATASEVER .....

Üye : .....

Üye : .....

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ..... tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / ..... / .....

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında ve doktora eğitimi sürecinde değerli bilgi ve tecrübelerini aktaran, akademik çalışmalarında yol gösteren ve desteğini hiç bir zaman esirgemeyen değerli tez danışmanın ve hocam Prof. Dr. Erkan BEŞDOK'a, akademik çalışmalarında bilimsel desteklerini ve bilgilerini benimle paylaşan Dr. Öğr. Üyesi Ümit Haluk ATASEVER ve Prof. Dr. Pınar ÇİVİCİOĞLU'na, tez izleme komitesinde yer alan ve tez çalışmasında yol gösteren sayın Prof. Dr. Bahriye AKAY'a, yakın zamanda kaybettiğimiz aile büyüğü Jeoloji Yük. Müh. Hasan TAŞOLAR'a, tez çalışmam boyunca manevi desteklerini benden hiç bir zaman esirgemeyen kıymetli eşim Banu GÜNEN ve canım kızım Gökçe GÜNEN'e, ayrıca bu günlere gelmemde büyük payları olan değerli annem, babam ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Bursu ile maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na teşekkürlerimi sunarım.

**Mehmet Akif GÜNEN**

**Ocak 2021, KAYSERİ**

# **EVİRİMSEL HESAPLAMA TABANLI KAMERA KALİBRASYONU**

**Mehmet Akif GÜNEN**

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi, Ocak 2021**

**Danışman: Prof. Dr. Erkan BEŞDOK**

## **ÖZET**

Robotik, oto-navigasyon, fotogrametrik harita üretimi, görme-tabanlı örüntü tanıma, eş-zamanlı çevresel algılama ve haritalama ve çeşitli ters-mühendislik araştırmaları gibi optik-görme tabanlı verilerin yoğun kullanıldığı mühendislik uygulamalarında yüksek konumsal doğruluğa sahip veriler üretmek için kamera kalibrasyon parametreleri gürbüz olan metrik kamera kullanımı zorunludur. Aksi halde kamera iç ve dış yöneltme parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi karmaşık, çok çözümlü ve lineer olmayan bir süreç olduğu için çok sayıda yöntem ilgili problemin çözümü için geliştirilmiştir. Gradyan tabanlı çalışan klasik kamera kalibrasyon yöntemleri mevcut çok fazla çözümden bir tanesine takılabilmektedir. Çoğu klasik kamera kalibrasyon metodu, iyi-tanımlı ışın demetleri tabanlı dengeleme yönteminin çeşitli versiyonlarının serilere açılarak lineerleştirilmiş formlarınca tanımlanan matematiksel modeller kullanır. Işın demetleri tabanlı orijinal matematik modelin, serilere açılmasıyla elde edilmiş analitik lineer eşleniği, hesaplama süreçlerinin iteratif doğasının performansını arttırsa da belirli ölçüde lineerleştirme sonunda ancak sınırlandırılmış sayıda seri-açılımı katsayısının kullanılmasından kaynaklanan bilgi kaybı oluşur. Evrimsel hesaplama algoritmaları sayısal problemlerin çözümünde yerel çözümlerden kaçınabildiğinden, yüksek hassasiyetli optik-görme uygulamaları için gerekli kamera kalibrasyon parametrelerini doğru bir şekilde hesaplama potansiyeline sahiptir. Tez çalışmasında, 6 evrimsel hesaplama algoritması (WDE, ABC, PSO, COBIDE, DE, CS) kullanılarak iki farklı test alanlarına ait videolardan çıkartılan görüntüler kullanılarak kamera kalibrasyon parametreleri hesaplanmıştır. İlgili deneylerin tarafsız değerlendirilebilmesi için gradyan tabanlı iki geleneksel kamera kalibrasyon yöntemi (Zhang ve Bouguet) kullanılmıştır. İğne deliği kamera modeline ait kamera kalibrasyon parametrelerinin klasik ve evrimsel hesaplama algoritmaları ile hesaplanmasında Zhang kamera model, kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde evrimsel hesaplama yöntemlerinin elde ettiği çözümlerle klasik yöntemlerle elde edilen

ilgili çözümler arasındaki farklar istatistiksel araçlar ve görsel sunumlar kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, test alanlarına ait videolardan elde edilen çoklu görüntüler NIQE görüntü kalite belirleme yöntemi kullanılarak ayıklandıktan sonra Structure from Motion yöntemi kullanılarak sahnelerin 3D nokta bulutları oluşturulmuştur. Nokta bulutlarının karşılaştırılması için yersel lazer tarayıcı ile referans nokta bulutu yakalanmıştır. Gerçekleştirilen istatistiksel testler ve görsel sunumlar sonucunda WDE algoritmasının karşılaştırma yöntemlerinden daha başarılı olduğu ve istatistiksel olarak anlamlı farkın olduğu görülmüştür

**Anahtar Kelimeler:** Kamera Kalibrasyonu, Evrimsel hesaplama algoritmaları, Nokta Bulutu, SfM Fotogrametrisi

# **EVOLUTIONARY COMPUTING BASED CAMERA CALIBRATION**

**Mehmet Akif GÜNEN**

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Ph.D. Thesis, January 2021**

**Supervisor: Prof. Dr. Erkan BEŞDOK**

## **ABSTRACT**

Metric camera with robust camera calibration parameters is mandatory to produce high spatial accuracy data in engineering applications where optical vision-based data is used extensively, such as robotics, auto-navigation, photogrammetric map production, vision based pattern recognition, simultaneous environmental detection and mapping, and various reverse engineering research. Otherwise, the camera intrinsic and extrinsic orientation parameters must be obtained. Since the determination of these parameters is a complex, multi-solution and non-linear process, many methods have been developed for the solution of the problem. Gradient based classic camera calibration methods can trap one of the many solutions available. Most classic camera calibration methods use mathematical models defined by linearized forms of various versions of the well-defined bundle-based adjustment method. Although the analytical linear conjugation of the bundle-based original mathematical model with the expansion to the series increases the performance of the iterative nature of the computational processes, there is a loss of information resulting from the use of a limited number of series-expansion coefficients at the end of linearization. Since evolutionary computing algorithms can avoid local solutions in the solution of numerical problems, it has the potential to accurately compute camera calibration parameters required for high-precision optical-vision applications. In the thesis study, camera calibration parameters were computed using the images extracted from the videos of two different test areas using 6 evolutionary computing algorithms (WDE, ABC, PSO, COBIDE, DE, CS). Two gradient-based traditional camera calibration methods (Zhang and Bouguet) were used to evaluate the relevant experiments impartially. Zhang camera model was used to compute the camera calibration parameters of the pinhole camera model using traditional and evolutionary computing algorithms. In the experiments conducted, the differences between the solutions obtained by the evolutionary computing algorithms and the related solutions obtained by traditional methods were compared by using statistical tools and visual

presentations. In addition, after the multiple images obtained from the videos of the test areas were extracted using the NIQE image quality measurement method, 3D point clouds of the scenes were created using the Structure from Motion method. As a result of the statistical tests and visual presentations, the WDE algorithm was found to be more successful than the comparison methods and there was a statistically significant difference.

**Keywords:** Camera Calibration, Evolutionary computing algorithms, Point Cloud, SfM  
Photogrammetry



# İÇİNDEKİLER

## EVİRİMSEL HESAPLAMA TABANLI KAMERA KALİBRASYONU

|                                  |          |
|----------------------------------|----------|
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK .....    | i        |
| YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI ..... | ii       |
| KABUL VE ONAY .....              | iii      |
| TEŞEKKÜR .....                   | iv       |
| ÖZET .....                       | v        |
| ABSTRACT .....                   | vii      |
| İÇİNDEKİLER .....                | ix       |
| TABLOLAR LİSTESİ .....           | xiii     |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....           | xv       |
| <b>GİRİŞ .....</b>               | <b>1</b> |

### 1. BÖLÜM

#### LİTERATÜR ÖZETİ

|  |          |
|--|----------|
| <b>1.1. Genetik Algoritma (GA) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....</b>                     | <b>5</b> |
| <b>1.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Yöntemi (PSO) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....</b> | <b>6</b> |
| <b>1.3. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....</b>         | <b>7</b> |
| <b>1.4. Diferansiyel Evrimsel Algoritma (DE) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....</b>       | <b>8</b> |
| <b>1.5. Diğer Yöntemler Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....</b>                            | <b>8</b> |

### 2. BÖLÜM

#### 3D GERİ ÇATIM ve GÖRÜNTÜ KALİTESİ BELİRLEME

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.1. Structure From Motion .....</b>                    | <b>10</b> |
| <b>2.1.1. SfM Tabanlı Ölçme Sürecinin Planlanması.....</b> | <b>12</b> |
| <b>2.1.1.1. Platform Seçimi.....</b>                       | <b>12</b> |
| <b>2.1.1.2. Kamera Seçimi .....</b>                        | <b>14</b> |
| <b>2.1.1.3. Kamera Yönelimi ve Bindirme Oranı .....</b>    | <b>16</b> |
| <b>2.1.1.4. Görüntü Eşleme Problemi .....</b>              | <b>19</b> |

|   |    |
|---|----|
| 2.2. Görüntü / Video Kalitesi.....                      | 24 |
| 2.2.1. Objektif Kalite Belirleme.....                   | 26 |
| 2.2.1.1. Doğal Görüntü Kalite Hesaplayıcısı (NIQE)..... | 28 |
| 2.3. Video Kodlama .....                                | 31 |
| 2.4. Georeferanslama .....                              | 33 |
| 2.4.1. Doğrudan Georeferanslama .....                   | 34 |
| 2.4.2. Dolaylı Georeferanslama .....                    | 35 |
| 2.5. 3D Geri Çatım .....                                | 36 |

### 3. BÖLÜM

#### EVİRİMSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Yapay Arı Kolonisi Algoritması.....   | 42 |
| 3.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması.....  | 44 |
| 3.3. Guguk Kuşu (Cuckoo) Arama Algoritması .....   | 45 |
| 3.4. Diferansiyel Evrimsel Arama Algoritma (DE).....   | 46 |
| 3.5. Kovaryans Matrisi Öğrenmeye ve İki Modlu Dağılım Parametre<br>Ayarına Dayalı Diferansiyel Gelişim Algoritması (COBIDE)..... | 47 |
| 3.6. Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Evrimsel Arama Algoritması (WDE).....   | 48 |

### 4. BÖLÜM

#### KAMERA KALİBRASYONU

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Kamera Modeli.....                      | 55 |
| 4.2. Amaç Fonksiyonu.....                    | 61 |
| 4.3. Zhang Kamera Kalibrasyon Yöntemi.....   | 62 |
| 4.4. Bouguet Kamera Kalibrasyon Yöntemi..... | 63 |

### 5. BÖLÜM

#### UYGULAMA

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Test Alanı 1 .....                                   | 66 |
| 5.1.1. Nokta Bulutlarının Çakıştırılması.....             | 80 |
| 5.1.2. İstatistiksel Değerlendirme ve Görselleştirme..... | 83 |
| 5.1.3. Kesit Çıkartımı .....                              | 87 |
| 5.2. Test Alanı 2 .....                                   | 91 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5.2.1. Nokta Bulutlarının Çakıştırılması.....</b>             | <b>105</b> |
| <b>5.2.2. Georeferanslama .....</b>                              | <b>108</b> |
| <b>5.2.2. İstatistiksel Değerlendirme ve Görselleştirme.....</b> | <b>109</b> |

## **6. BÖLÜM**

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| <b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b> | <b>116</b> |
|-------------------------------|------------|

|                        |            |
|------------------------|------------|
| <b>KAYNAKLAR .....</b> | <b>120</b> |
|------------------------|------------|

|                      |            |
|----------------------|------------|
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b> | <b>134</b> |
|----------------------|------------|



## KISALTMALAR VE SİMGELER

| <u>Sembol</u> | <u>Anlamı</u>  | <u>Birimi</u> |
|---------------|--|---------------|
| 3D            | 3 Boyut  |               |
| ABC           | Yapay Arı Kolonisi Algoritması   |               |
| AR            | Azaltılmış Referanslı  |               |
| CAD           | Bilgisayar Destekli Tasarım  |               |
| CAM           | Bilgisayar Destekli Üretim   |               |
| COBiDE        | Kovaryans Matrisi Öğrenmeye ve İki Modlu Dağılım Parametre Ayarına Dayalı Diferansiyel Gelişim Algoritması |               |
| CS            | Guguk Kuşu Arama Algoritması   |               |
| DE            | Diferansiyel Evrimsel Algoritma  |               |
| ICP           | İteratif En Yakın Nokta  |               |
| İHA           | İnsansız Hava Aracı  |               |
| PSO           | Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması  |               |
| RS            | Referanssız  |               |
| ToF           | Time of Flight   |               |
| TR            | Tam Referanslı   |               |
| WDE           | Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Evrimsel Algoritma   |               |
| YGE           | Yoğun Görüntü Eşleme   |               |
| YKN           | Yer Kontrol Noktası  |               |
| YLT           | Yersel Lazer Tarayıcı  |               |

## TABLOLAR LİSTESİ

|  |    |
|--|----|
| Tablo 1. Kameralara Ait Teknik Özellikler.....   | 15 |
| Tablo 2. Evrimsel hesaplama algoritmalarına ait kontrol parametreleri .....  | 66 |
| Tablo 3. İlgili yöntemlerle elde edilen iç yöneltme parametreleri ve amaç fonksiyon değeri için temel istatistikler..... | 69 |
| Tablo 4. WDE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                                  | 70 |
| Tablo 5. ABC algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                                  | 71 |
| Tablo 6. PSO algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                                  | 72 |
| Tablo 7. COBIDE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                               | 73 |
| Tablo 8. DE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                                   | 74 |
| Tablo 9. CS algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                                   | 75 |
| Tablo 10. Zhang algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                               | 76 |
| Tablo 11. Bouguet algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı).....                             | 77 |
| Tablo 12. Test Alanı 1'e ait Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları .....   | 80 |
| Tablo 13. Referans nokta bulutunun çakışma hatası .....  | 81 |
| Tablo 14. Referans Kontrol Noktalarının Konum Bilgisi .....  | 82 |
| Tablo 15. Test Alanı-1 için elde edilen dönüşüm parametreleri .....  | 83 |
| Tablo 16. $d_i^{(1)}$ Mesafelerinin istatistiksel değerleri .....  | 84 |
| Tablo 17. $d_i^{(2)}$ Mesafelerinin istatistiksel değerleri .....  | 85 |
| Tablo 18. İlgili yöntemlerle elde edilen iç yöneltme parametreleri ve amaç fonksiyon değeri.....                         | 94 |
| Tablo 19. WDE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                                  | 95 |

|  |     |
|--|-----|
| Tablo 20. ABC algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                        | 96  |
| Tablo 21. PSO algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                        | 97  |
| Tablo 22. COBIDE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                     | 98  |
| Tablo 23. DE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                         | 99  |
| Tablo 24. CS algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                         | 100 |
| Tablo 25. Zhang yöntemleri ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri.....                                      | 101 |
| Tablo 26. Bouguet algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı).....                    | 102 |
| Tablo 27. Test Alanı 2'ye ait Wilcoxon işaretli sıralar testi sonucu.....                                      | 105 |
| Tablo 28. Referans nokta bulutunun çakışma raporu.....   | 107 |
| Tablo 29. Yer kontrol noktaları ile YLT verisinin georeferanslanmasında meydana gelen nokta konum hatası ..... | 108 |
| Tablo 30. SfM yöntemi ile georeferanslama için kullanılan yer kontrol noktalarında meydana hatalar .....       | 109 |
| Tablo 31. $d_i^{(1)}$ Mesafelerinin istatistiksel değerleri .....  | 109 |
| Tablo 32. $d_i^{(2)}$ Mesafelerinin istatistiksel değerleri .....  | 110 |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Şekil 1.  | Kamera Hareketinden (Motion) Topografyanın (Structure) oluşumu .....   | 11 |
| Şekil 2.  | Genel SfM İşlem Adımları.....  | 11 |
| Şekil 3.  | Görüntü elde etmek için kullanılan çeşitli platformlar .....   | 13 |
| Şekil 4.  | 3 Eksenli elektronik gimbal .....  | 14 |
| Şekil 5.  | Ölçme tasarımında kamera yönelimi .....  | 16 |
| Şekil 6.  | Baz ve bindirme kavramlarının gösterimi.....   | 17 |
| Şekil 7.  | Farklı FoV'lara sahip kameralar ile elde edilen görüntülerin eşlenik noktaları.....  | 20 |
| Şekil 8.  | Tekrarlı yüzeylere sahip yüzeyler. ....  | 21 |
| Şekil 9.  | Aynı kolondan elde edilen sıralı görüntüler.....   | 22 |
| Şekil 10. | Tekil yüzeye sahip yüzeylerde nokta eşleme problemi.....   | 23 |
| Şekil 11. | Aşırı doygunluk sonucu görüntülerde meydana gelen bozulmalar.....  | 23 |
| Şekil 12. | Yansıma ve sahne ışıklandırmasının görüntü üzerine etkisi.....   | 24 |
| Şekil 13. | Zamansal ve Uzamsal Örneklemenin Video görüntülerinde gösterimi .....  | 31 |
| Şekil 14. | a) Intra-frame b) Inter-frame Sıkıştırma .....   | 32 |
| Şekil 15. | a) Lokal koordinat sistemi ve b) ECEF koordinat sistemi .....  | 34 |
| Şekil 16. | Epipolar geometri.....   | 37 |
| Şekil 17. | Görüntü koordinatlarının normalize edilmesi. ....  | 38 |
| Şekil 18. | Piksel basıklık oranı ve piksel boyutları arasındaki ilişki.....   | 57 |
| Şekil 19. | Mutlak konik ve mutlak koniğin görüntüsü.....  | 59 |
| Şekil 20. | SURF noktalarının kalibrasyon düzlemine görüntüsü üzerinde gösterimi; (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, (f) #6, (g) #7, (h) #8, (i) #9, (j) #10..... | 67 |
| Şekil 21. | Test Alanı 1 uygulamasında evrimsel hesaplama algoritmalarının performans gösterimi .....  | 78 |
| Şekil 22. | Evrimsel hesaplama algoritmalarının çalışma süre performansı .....   | 79 |
| Şekil 23. | Farklı oturumlardan elde edilen panoramik görüntüler a) Birinci oturum b) İkinci oturum c) Üçüncü oturum .....   | 81 |

|  |     |
|--|-----|
| Şekil 24. Referans nokta bulutu, kontrol noktalarının dağılımı ve tarama istasyonlarının gösterimi .....   | 82  |
| Şekil 25. $d_l^{(2)}$ mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi .....  | 86  |
| Şekil 26. $d_l^{(2)}$ mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi (devam) .....  | 87  |
| Şekil 27. a) Düşey Kesit 1, b) Yatay Kesit ve c) Düşey Kesit 2 .....   | 88  |
| Şekil 28. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi..... | 89  |
| Şekil 29. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi..... | 90  |
| Şekil 30. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi..... | 91  |
| Şekil 31. Yer Kontrol Noktalarının Test-2 Alanında Gösterimi .....   | 92  |
| Şekil 32. SURF noktalarının Test Alanı-2 sahnesine ait kalibrasyon düzlemi görüntüsü üzerinde gösterimi; (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, (f) #6, (g) #7, (h) #8, (i) #9, (j) #10.....  | 93  |
| Şekil 33. Test Alanı 2 uygulamasında evrimsel hesaplama algoritmalarının performans gösterimi .....  | 103 |
| Şekil 34. Evrimsel hesaplama algoritmalarının çalışma süre performansı .....   | 104 |
| Şekil 35. YLT verisi ile üretilen nokta bulutu.....  | 105 |
| Şekil 36. Farklı oturumlardan elde edilen renkli panoramik görüntüler .....  | 106 |
| Şekil 37. $d_l^{(2)}$ mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi a) WDE b) PSO c)DE d) Zhang .....  | 111 |
| Şekil 38. $d_l^{(2)}$ mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi a) ABC b) COBiDE c) CS d) Bouguet .....  | 112 |

- Şekil 39. Test ağ yüzey ile referans ağ yüzey arasındaki farkların gösterimi a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e)DE, f)CS, g) Zhang, d) Bouguet. .... 114
- Şekil 40. Test ağ yüzey ile referans ağ yüzey arasındaki farkların gösterimi a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e)DE, f)CS, g) Zhang, d) Bouguet. .... 115



## GİRİŞ

Optik kamera sistemi kullanan; robotik uygulamalar [1], otonom sistemler [2], navigasyon uygulamaları [3], fotogrametrik uygulamalar [4], örüntü tanıma çalışmaları [5], mobil haritalama [6] ve tersine mühendislik uygulamaları [7] ile üretilen verilerin 3D doğruluğu kamera kalibrasyon parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Kamera kalibrasyonu optik görüntüleme kullanılan donanıma ait sistem modelini ve kameranın nasıl işlediğini açıklayan analitik modele ait içsel parametreleri belirler [8, 9]. Fiziksel olarak kamera davranışı oldukça kompleksdir. Mercek sisteminin ayrık ve yapısal özellikleri ışın yolları üzerinde dejenerasyona neden olduğundan, görüntüde konuma bağlı değişken genlikte geometrik deformasyonlar gözlemlenir. Görüntüleme için kullanılan algılayıcının fiziksel/kimyasal özellikleri ve spektral algılama aralığındaki gürbüzlüğü, bir şekilde varlıkları ve etkileri önceden kontrol edilemeyen ama algılayıcı malzeme ve algılama ortamının stabilitesini etkileyen faktörler nedeniyle değişkendir. Kamera sistemlerinin yapısal özellikleri, fiziksel bir 3D nesne noktasına karşılık gelen ışının optik yol boyunca ilgili 2D görüntü düzlemi üzerinde bırakacağı izin uzamsal konumunda geometrik bir bozulmaya neden olur. Sonuç olarak optik görüntüler geometrik ve radyometrik deformasyon etkilerine maruz kalırlar. Görüntülerin metrik mühendislik uygulamalarında kullanımını sağlamak için ilgili deformasyonların görüntü üzerindeki etkilerinin analitik olarak modellenmesi gerektirir. Kamera kalibrasyonu, görüntüleme donanımının fiziksel özellikleri nedeniyle görüntü üzerinde oluşan deformasyonların baskılanmasında kullanılacak analitik modele ait parametre değerlerini sağladığından, hesaplamalı-görü, fotogrametri ve optik-otonom-haritalama gibi uygulamalarda kullanımı kaçınılmaz bir süreci tanımlar. Elde edilen optik görüntülerinde geometrik ve radyometrik deformasyonlara neden olmayan fiziksel bir kamera üretiminde yaşanan güçlük, elde edilen kameraların neden olduğu deformasyonları pratik ihtiyaçları karşılayacak doğruluk düzeyinde modelleyebilen kamera kalibrasyon metodları geliştirme ihtiyacını ortaya çıkartmıştır.

Görüntü kaynaklı metrik bilgi üretimi, eldeki gözlemlerin veri kaynağının doğasına, veri işleme süreçlerinin yapısına ve veri içeriğini bozan diğer etkilerden arındırılmasına dayanır. Görüntü yakalama sürecini tanımlayan parametreler, kamera sistem modeli parametreleri ve kamera konum-yönelim parametrelerinden oluşur. Kamera sistem parametreleri, diferansiyel görüntü elemanlarının uzamsal geometrik niteliklerini ve görüntü tensor matris değerlerini doğrudan etkiler.

Bu tez çalışması eldeki kamera sistem modelinin ilgili diferansiyel görüntü elemanlarının uzamsal geometrik nitelikleri üzerine etkisini analitik olarak açıklayan sınırlı sayıda parametrenin hesaplanmasına odaklanmıştır.

Metrik veri işleme süreci, geometrik-anlamlı veya geometrik-anlamsız parametreler kullanarak kamera sistem modelini açıklamayı gerektirir. Metrik veri, görüntü içeriğindeki nesnelerin Öklid özellikleriyle ilgilenirken, içerik analizine odaklanan topolojik görüntü işlemede metrik veri işlemeye ihtiyaç duyulmaz. Öklid geometri, ölçek uzayında deneyimlenen ölçüler ve sayısal büyüklüklerle ilgilenir ve pratik ihtiyaçları gürbüz olarak karşılar. Ayrıca tek anlamlı çözümler sunduğundan insan doğası için anlaşılması kolaydır. Topolojik görüntü işlemede ise görüntü tanıma gibi görüntü içeriklerinin anlaşılmasına ve analizine odaklanılır. Çoklu görüntülerin ışın demetleri ile dengelenerek sahneye ait 3D dünya koordinatlarının ve kamera poz bilgilerinin elde edilmesi için kamera kalibrasyon parametrelerine ihtiyaç vardır. Kamera kalibrasyon parametreleri iç yöneltme bilinmeyenleri (distorsiyon bilinmeyenleri, odak uzaklığı, piksel çarpıklık katsayısı ve asal nokta konumları) ve dış yöneltme bilinmeyenlerinden (dönüklük ve öteleme) oluşmaktadır. İç yöneltme bilinmeyenleri doğrudan kameranın iç geometrisi ile ilgili bilgi sağlarken dış yöneltme parametreleri kameranın dünya koordinat sistemine göre çekim anındaki yönelimi ve konumu ile ilgili bilgi sağlar [10, 11].

Kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenebilmesinde kullanılan eşlenik görüntü ve dünya koordinatlarını elde edebilmek için kullanılan kalibrasyon yüzeyleri farklılık gösterebilmektedir. İlgili yüzeyler kullanılarak maliyet, hız ve doğruluk açısından farklılıklar gösteren çeşitli kamera kalibrasyon yöntemleri geliştirilmiştir [12].

Görüntü üzerinde belirgin olan öznitelik noktalarını (anahtar noktalar) tanımlayan dünya ve görüntü koordinatları belirlendikten sonra, kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilebilmesinden kullanılan matematiksel modelin çözümünde

lineer/kapalı form çözüm ve iki aşamalı yöntemler kullanılmaktadır. Lineer yöntemlerde distorsiyon katsayıları hesaba katılmadan işlem yapıldığından dolayı hızlı çalışmasına rağmen yeterli doğrulukta ve hassasiyette sonuç elde edilememektedir. Çünkü lineer yöntemler gürültüye karşı oldukça hassastır, çözüm aşamasında başlangıç değerine aşırı bağımlıdır ve hesaplama yükleri fazladır. Bu bağlamda iki aşamalı çözümler geliştirilerek kamera kalibrasyon parametrelerinin yaklaşık başlangıç çözüm değerleri lineer olarak belirlendikten sonra lineer olmayan yöntemlerle optimum çözüm aranmaktadır. Gürültü seviyesi arttıkça eşlenik noktalar yanlış geometrik konumda tespit edilir ve lineer yöntemler çözüm için yaklaşık başlangıç değerlerini hatalı üretir [13, 14]. Sayısal-türev tabanlı optimizasyon metotlarının problem çözme başarısı, ilgili problemin başlangıç çözümünün kalitesine duyarlıdır, sayısal-türevin lokal değerinin ilgili arama sürecini durdurma-limitine uyumlu olma olasılığından dolayı yerel çözümlere yakalanma eğilimindedir ve hesaplama sürecinin sonlandırılması için önceden tanımlı bir sınır değere ihtiyaç duyarlar. Çoklu çözümlerden birçoğu ilgili arama sürecinin durdurma-limitine uyumlu sonuç üretse dahi multimodal çözümlerin arama uzayında belirli bir alana yığılma olasılığı vardır. Bu durum kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesinde eldeki serilere açılarak lineerleştirilmiş analitik modeli çözmek için kullanılan türev-tabanlı klasik en-iyileyici çözüm araçlarının yerel çözümlere takılma olasılığını tanımlar. Geometrik görüntü deformasyonlarının en-iyi modellenmesi için geliştirilen çoğu kamera kalibrasyon metodu, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda kompleks ve lineer-olmayan yapısından dolayı, birbirinden farklı sayıda analitik model katsayısına sahiptir. Kamera kalibrasyon probleminin ilgili analitik modelinde parametre sayısının artması, ilgili parametrelerin fiziksel gerçekliğe uyumluluğu ve analitik modele katkılarının derecelendirilmesindeki zorluklar, klasik en-iyileme araçlarının yerel bir çözüme takılmaksızın çözüm bulmasını güçleştirir [13, 14].

Yapay genetik operatörler kullanan sayısal evrimsel arama algoritmaları, klasik en-iyileme metotlarının aksine analitik modelin türevine ihtiyaç duymaz, yerel çözümlerden kaçabilme yetenekleri görece daha yüksektir ve başlangıç çözümünün kalitesine genellikle aşırı-duyarlılık göstermezler. Bahsedilen avantajlarından dolayı, kamera kalibrasyonunun yüksek doğrulukta gerçekleştirilmesi gereken çalışmalarda, tasarlanan ilgili analitik modeli en-iyi çözümlenmek amacıyla modern sayısal evrimsel arama metotlarından yararlanmak bir gerekliliktir. Bundan dolayı, klasik yöntemler ile

global minimum yerine lokal minimum elde etme ihtimali oldukça fazladır. Son zamanlarda kamera kalibrasyon parametrelerinin çözülmesi için evrimsel tabanlı çok sayıda yöntem önerilmiştir. Her yöntemin global arama yeteneği, yakınsama hızı, problem çözüm başarısı ve kullandığı parametreleri birbirinden farklıdır.

Nokta bulutları günümüzde birçok fotogrametrik uygulamanın temel veri kaynağını oluşturmaktadır. Farklı uzamsal konumlarda önceden belirlenmiş bindirme oranları sağlanacak şekilde yakalanan görüntülerin, birbirine karşılık gelen noktaları kullanılarak, ilgili nesneye ait 3D nokta bulutu elde edilebilir. İlgili nokta bulutunu yüksek doğruluk seviyesinde elde etmeyi etkileyen faktörlerden olan kamera kalibrasyon parametrelerinin gürbüz bir yöntemle, yeterince hızlı ve ilgili uygulama için gerekli hassasiyet ve doğruluk seviyesinde elde edilebilmesi gerekir. Yüksek doğrulukla elde edilmeyen iç yöneltme parametreleri nedeniyle, görüntü distorsiyonları istenilen seviyede giderilemeyebilir. Benzer şekilde yüksek doğrulukla elde edilmeyen dış yöneltme parametreleri nedeniyle de homolog ışın kesişimi işlemlerinde başarı düşer.

Bu tez çalışmasında, bir iğne deliği kamera modeline ait kamera kalibrasyon parametrelerinin Zhang metoduna göre hesaplanması için, Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Arama Algoritması (WDE), Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Diferansiyel Gelişim Algoritması (DE), ve İki Modlu Dağılım Parametre Ayarına Dayalı Diferansiyel Evrimsel (COBiDE) ve Guguk Kuşu Arama Algoritması (CS) kullanılmıştır. Deneyler sırasında, Zhang ve Bouguet klasik çözüm metotları kullanılarak söz konusu kamera modeli için kamera kalibrasyon parametreleri elde edilmiştir. Evrimsel ve geleneksel metotlarla elde edilen sonuçlar, hesaplama maliyetleri açısından istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. İlgili test sahnelerine ait nokta bulutlarının oluşturulması için video-akıdan çıkartılan görüntüler arasından, NIQE indeksi kullanarak en kaliteli test-imgeleri seçilmiştir. Ardından, evrimsel ve klasik yöntemlerle elde edilen iç yöneltme parametreleri, ilgili sahneye ait Structure from Motion (SfM) tabanlı 3D nokta bulutunu oluşturmak için kullanılmıştır. Oluşturulan nokta bulutlarının doğruluklarının metrik olarak karşılaştırılması için, görece yüksek doğruluklu bir Yersel Lazer Tarayıcı (YLT) ile elde edilen nokta bulutu, referans nokta bulutu olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar hem istatistiksel metotlarla hem de ayrıntılı görsel-değerlendirmeye analiz edilmiştir.

# 1. BÖLÜM

## LİTERATÜR ÖZETİ

İlgili literatürde, kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde evrimsel hesaplama metotlarının kullanıldığı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu bölümde, günümüze kadar kamera kalibrasyonu probleminin çözümünde kullanılan metotlar sunulmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle önerilen yöntemlerin klasik ve evrimsel hesaplama algoritmaları ile karşılaştırmalı sonuçlarıyla birlikte sunuldukları görülmüştür.

### 1.1. Genetik Algoritma (GA) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar

Guermeur ve Louchet [15] yaptıkları çalışmada GA kullanarak kamera kalibrasyon parametrelerini hesaplamışlardır. Distorsiyon katsayılarının, amaç fonksiyon değerini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişler ve asal nokta konumunu otokolimasyonla belirlemişlerdir. GA'nın stabil sonuç üretmediğini, ancak amaç fonksiyon değerinin minimize etme açısından Tsai kamera kalibrasyon yönteminden daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada GA'yı kullanmışlardır. 3D kübik kalibrasyon yüzeyindeki anahtar noktalar; dayanak noktası koordinatlarını jeodezik olarak elde etmişlerdir. Tsai kamera kalibrasyonu ile elde ettikleri sonuçları başlangıç değeri olarak kullanmışlar ve böylece amaç fonksiyonu değerini daha da düşürdüklerini belirtmişlerdir.

Li ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada hibrid yöntem olarak GA ile Newton yönteminin birleştirilmesini önermişlerdir. GA'nın başlangıç değerlerinin belirlenmesi için; lineer olmayan kamera modelinin çözümünde Newton yöntemini kullanmışlardır.

Böylece, GA'nın ilgili sonuca yakınsama hızının ve elde edilen sonucun doğruluğunun arttığını belirtmişlerdir.

Ji ve Zhang [18] yaptıkları çalışmada çözüme-yakın bir başlangıç değerine gerek olmadan, az sayıda dayanak noktasıyla kamera kalibrasyon parametrelerini Tsai metodunu kullanarak belirlemek için GA'yı kullanmıştır. Sonuç olarak kalibrasyon yüzeyine ait en-az yedi anahtar nokta ile etkili sonuç ürettiklerini belirtmişlerdir.

Bourhooicha ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada GA'nın gürbüzlüğünü belirlemek için anahtar noktalar çeşitli seviyede Gaussian gürültü eklemişlerdir. Ayrıca istatistiksel karşılaştırma için kamera modelinin Newton-Raphson lineer olmayan optimizasyon yöntemi çözmüşlerdir.

Bilal ve Qureshi [20] yaptıkları çalışmada Uyarlanabilir Benzetilmiş Tavlama, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) ve GA yöntemlerinin kamera kalibrasyon parametrelerini çözebilme başarısını incelemişlerdir. Parametrelerin elde edilmesinde iki aşamalı bir kamera modeli kullanmışlardır. Ayrıca sonuçlarını Heikkila, Zhang ve Tsai kamera modelleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak GA'nın en iyi sonucu verdiğini belirlemişlerdir.

## **1.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Yöntemi (PSO) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar**

Song ve arkadaşları [21] yaptıkları çalışmada; kübik bir yüzeye ait anahtar noktaların 3D koordinatlarını ve eşlenik görüntü koordinatlarını kullanarak, PSO ile kamera kalibrasyon parametrelerini belirlemişlerdir. İç yöneltme parametrelerinin belirlenmesi için önerilen yöntemde otuz beş eşlenik noktanın otuzunu eğitim için geri kalanı test için kullanmışlardır. Test noktaları için asal noktaları yaklaşık pikselin beşte biri kadar hatayla elde etmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri parametrelerle 3D geri çatım yapmışlardır.

Deng ve arkadaşları [22] yaptıkları çalışmada; Diferansiyel Gelişim (DE) tabanlı PSO ile kamera kalibrasyon parametrelerini elde etmişlerdir. On, seksen ve sekiz yüz görüntü için PSO, DE ve Zhang kamera kalibrasyonu yöntemiyle ilgili parametreleri belirlemiş ve yöntemleri istatistiksel olarak karşılaştırmışlardır. Ayrıca kullandıkları on görüntü için dış yöneltme parametrelerini de sunmuşlardır.

Deep ve arkadaşları [23] yaptıkları çalışmada çeşitli sayıda görüntü kullanmışlar ve ilgili verilere farklı seviyelerde Gaussian gürültü ekleyerek PSO ile elde ettikleri sonuçları GA ile karşılaştırmışlardır. Lineer olmayan kamera modelini kullanmışlardır ve geleneksel yöntemlerin aksine, başlangıç değerine ihtiyaç duyulmadığını belirtmişlerdir.

Zhang ve arkadaşları [24] yaptıkları çalışmada distorsiyon parametrelerini hesaba katmadan kapalı çözüm modeli önererek parametreleri geliştirilmiş bir PSO ile belirlemişlerdir. Song ve arkadaşlarının [21] hazırlamış olduğu veri setini kullanmışlardır. İlgili başlangıç değerlerini rastgele değerlerden başlatarak lineer olmayan modeli çözmüşler ve amaç fonksiyonunu minimize etmişlerdir.

Zhang ve arkadaşlarının [25] yaptığı çalışmada PSO algoritmasının başlangıç değerinin belirlenmesi için öz-kümeleme yöntemini önermişlerdir. Lineer olmayan modeli, önerdikleri başlangıç değeri belirleme yöntemiyle çözdükten sonra klasik yöntemlerle karşılaştırma yaparak önerdiklerinin daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Xu ve Deng [26] yaptıkları çalışmada oto-kalibrasyon tabanlı Kruppa eşitliğini yeniden düzenleyerek kamera parametre çözümünü PSO ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada görüntüler arasındaki fundemantal matrisi optime etmişlerdir. Sonuç olarak GA ve eşlenik gradyan algoritmasıyla karşılaştırarak kendi çözümlerinin en az hata ile ilgili sonucu tespit ettiğini belirtmişlerdir.

Huang-bin ve arkadaşları [27] yaptıkları çalışmada paralel olarak çalışabilen PSO yöntemiyle farklı gruplara ait görüntüleri kullanarak, oto kalibrasyon yöntemiyle kamera kalibrasyon parametrelerini elde etmişlerdir. Sonuçlarının Zhang kamera modelinden daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

### **1.3. Yapay Arı Koloni Algoritması (ABC) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar**

Bendeş ve Özkan [28] yaptıkları çalışmada iki aşamalı kamera modeli kullanmışlardır. İlk olarak tek görüntü kullanarak algoritmaların başlangıç değerlerini yaklaşık belirlendikten sonra, bütün görüntüleri kullanılarak kamera kalibrasyon parametrelerini belirlemişlerdir. ABC, DE, PSO, GA ve LM yöntemleri ile istatistiksel performans

karşılaştırması yapmışlar ve en düşük karesel ortalama hatayı ABC'nin verdiğini belirtmişlerdir.

Bendeş ve Özkan [29] yaptıkları çalışmada lineer kamera modeli kullanarak kamera kalibrasyon parametrelerini ABC ve DE ile belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda ABC yönteminin istatistiksel olarak daha iyi olduğunu ifade etmişlerdir.

#### **1.4. Diferansiyel Evrimsel Algoritma (DE) Kullanılarak Yapılan Çalışmalar**

Frage ve Schütze [30] yaptıkları çalışmada kübik şekilli geometrik nesnenin altı adet köşe noktasını manuel olarak belirledikten sonra lineer ve lineer olmayan kamera modelleri kullanarak ilgili parametreleri belirlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları LM yöntemiyle karşılaştırarak, DE yönteminin daha iyi sonuç verdiğini söylemişlerdir.

Wu-ming ve Xian [31] yaptıkları çalışmada iki aşamalı kamera kalibrasyon modeli kullanmışlardır. DE'nin istatistiksel olarak oldukça başarılı sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Fraga ve Silva [32] yaptıkları çalışmada, DE'yi ve iki aşamalı bir kamera modelini kullanarak ilgili kamera kalibrasyon parametrelerini belirlemişlerdir. Ardından, elde ettikleri parametreleri ve test alanına ait çoklu görüntüleri kullanarak ilgili sahnenin 3D geri çatımını yapmışlardır. DE'nin robust ve etkili sonuç ürettiğini; ancak geri çatım için yalnızca optik eksenlerin paralel olması durumunda, veri ürettiklerini belirtmişlerdir.

#### **1.5. Diğer Yöntemler Kullanılarak Yapılan Çalışmalar**

Assad ve Deep [33] yaptıkları çalışmada; iki aşamalı kamera modeli kullanarak, Harmonik Arama Algoritması ile kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesini incelemişlerdir. Benzetilmiş Tavlama Algoritması ile karşılaştırma yapmak için anahtar noktalara çeşitli seviyede Gaussian gürültü eklemişlerdir. Sonuç olarak; Harmonik Arama Algoritmasının hız ve objektif fonksiyon değerini minimize etme açısından üstün olduğunu belirtmişlerdir.

Xiaozhi ve Didi [34] yaptıkları çalışmada; lineer olmayan kamera modeli kullanmışlardır. Parametre belirlemek için Self Adaptif Cuckoo Search algoritmasını

başlangıç değerine ihtiyaç duymadığı için tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Geri projeksiyon hatasını, ortalama karesel hata ile minimize etmek için amaç fonksiyonunu modifiye ettiklerini belirtmişlerdir.

Garg ve Deep [35] yaptıkları çalışmada Laplasian Bio-coğrafik Tabanlı Evrimsel Hesaplama Algoritması ile lineer olmayan kamera modelini çözmüşlerdir. Başarılarını modifiye ettikleri iki farklı yöntemle karşılaştırmışlardır.

Safaei ve Fazlı [36] yaptıkları çalışmada; RGB-D sensörlerden elde ettikleri görüntülerle iki aşamalı bir kamera modeli kullanarak ilgili kamera kalibrasyon parametrelerini belirlemişlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak homografi çıkarımında ve parametrelerin elde edilmesinde, ayrı-ayrı evrimsel hesaplama algoritmalarını kullanarak sonuçlarını tartışmışlardır. GA, PSO, LM, Sömürge Rekabet Algoritması ve Kurbağa Sıçrama Algoritmalarını kullanmışlardır. Sonuç olarak; evrimsel hesaplama yöntemlerin klasik yöntemlerden daha iyi parametre belirlediğini belirtmişlerdir.

Qishen ve arkadaşları [37] yaptıkları çalışmada GA ve LM algoritmalarını hibrid hale getirmişler ve lineer olmayan kamera modelini çözmüşlerdir. LM ile başlangıç değerlerini belirledikten sonra, GA'yı kullanarak modelin daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

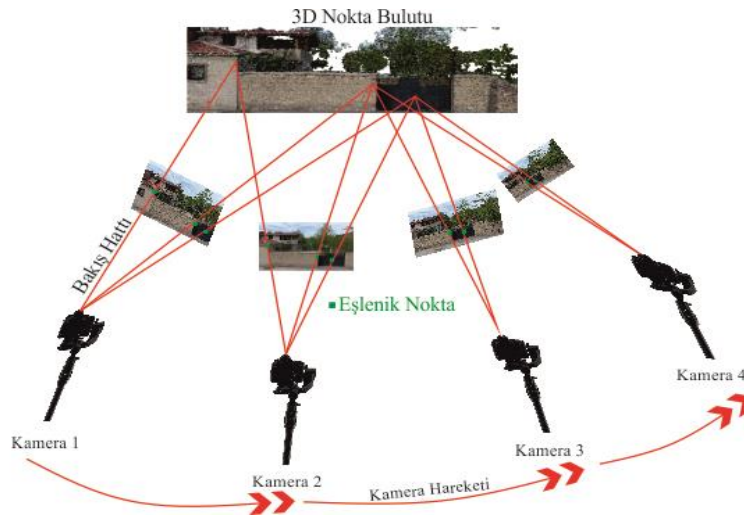
## 2. BÖLÜM

### 3D GERİ ÇATIM ve GÖRÜNTÜ KALİTESİ BELİRLEME

#### 2.1. Structure From Motion

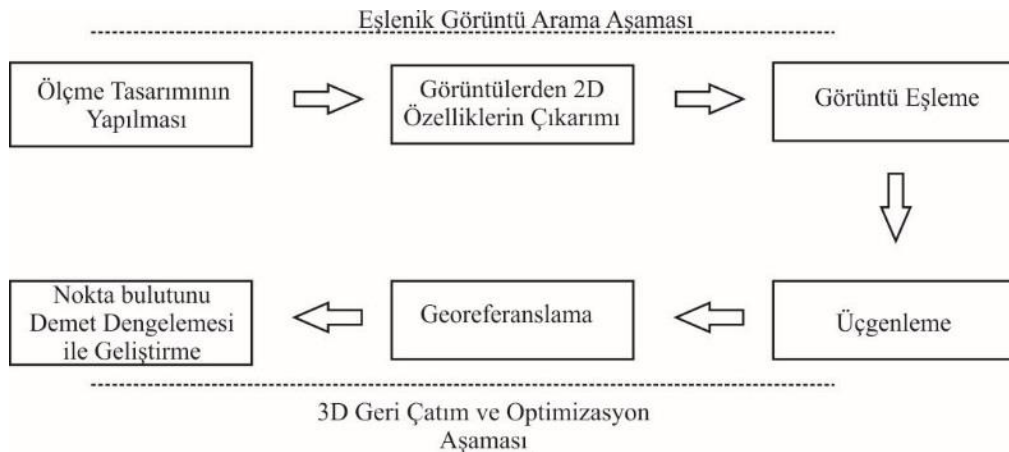
Bilgisayar grafik birim işlemcilerin (GPU) gelişmesiyle birlikte metrik olmayan kameralarla elde edilen çoklu görüntüler kolayca işlenerek, ilgili sahneye ait 3D model üretilebilmektedir. İlgili 3D modelin elde edilmesinde kullanılan analitik modeller; genel olarak modern fotogrametrinin aktif araştırma alanlarından birisi olan hareketten-yapıya (Structure from Motion; SfM) metotlarına dayanır. SfM GPU'ların son zamanlarda artan popülerliği sayesinde farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır [38]. Bunlar; topoğrafik harita üretimi [39], zamansal ve mekânsal jeomorfolojik çalışmalar [40], kültürel mirasların dokümantasyonu [41], volkan ve erozyon çalışmaları [42], buzul kütlelerin analizi [43], kar derinlik ölçümleri [44], bio-kütle çalışmaları ve habitat analizleridir [45].

Geleneksel fotogrametride olduğu gibi; SfM yönteminde de 3D koordinatların elde edilmesi için, çoklu bakış açılarından ve belirli bindirme oranıyla elde edilmiş görüntüler kullanılır. Ancak, geleneksel fotogrametriden farklı olarak; kamera ve yer kontrol noktalarının bilgisi olmadan, model geometrisi ve kamera yöneltme parametreleri eş zamanlı olarak çözülür. SfM yöntemiyle nokta bulutu üretilirken; eşlenik noktaların olmaması durumunda, veri üretilmemektedir. Çünkü, 3D nokta bulutu çoklu görüntülerin eşlenik noktaları kullanılarak elde edilmektedir [46]. Görüntü eşlemede çoklu görüntü kullanımı ve görüntü bindirme oranı, SfM'nin çalışmasını etkilediğinden elde en az üç görüntünün olması gerekmektedir. Bundan dolayı, SfM ile nokta bulutunun minimum hata, iş gücü ve maliyet, maksimum kazanç, doğruluk ve hassasiyetle elde edilmesi için; platform tasarımı oldukça önemlidir [47]. Şekil 1'de sahneye ait farklı açılardan elde edilen görüntülerin eşlenik noktaları ve bu eşlenik noktalardan nokta bulutuna nasıl geçiş yapıldığının gösterimi yapılmıştır.



Şekil 1. Kamera Hareketinden (Motion) Topografyanın (Structure) oluşumu

Optimum ölçme planı, ilgili 3D model üretme aşamasının temelini oluşturur. Bu nedenle, yapılan çalışmalarda en yüksek doğruluğa sahip sonuca en kısa sürede ulaşılması için, görüntü yakalama sistematığının ve tekniğinin iyi planlanmış olması gerekir. Günümüzde kullanılan SfM amaçlı ticari ve açık-kaynaklı yazılımların çoğu, ilgili görüntü öznelik-noktaları çıkartım aşamasından sonra ilgili görüntülere ait kamera parametrelerini hesaplamaktadır. Genellikle ilgili görüntülerde anahtar noktaların geometrik konumlarını belirlemek için; SIFT veya SURF gibi öznelik belirleme algoritmaları kullanılır. Anahtar noktaların belirlenmesi süreci gürültüye karşı oldukça hassastır; ancak kaliteli ve yüksek çözünürlüklü görüntülerde oldukça başarılı çözümler üretilebilmektedir [48, 49]. Temel olarak SfM tabanlı ticari ve açık kaynak kodlu yazılımların çoğu Şekil 2’de gösterilen işlem adımlarını takip ederler.



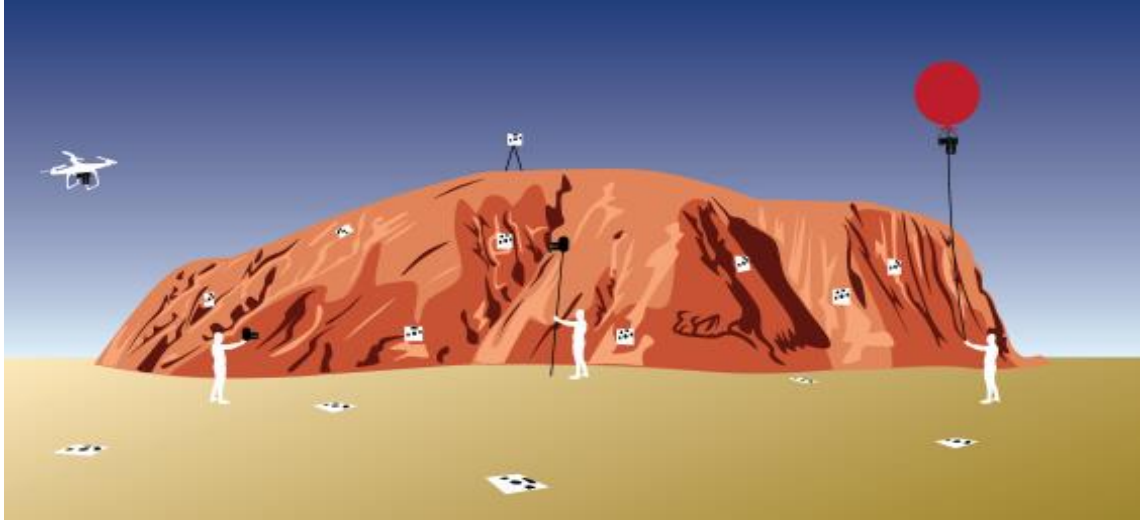
Şekil 2. Genel SfM İşlem Adımları

### **2.1.1. SfM Tabanlı Ölçme Sürecinin Planlanması**

SfM tabanlı ölçme sürecinin planlanması çok sayıda bileşen içeren karmaşık bir süreçtir. Günümüzde GPU teknolojisinin ilerlemesi ve SfM yazılımlarının oldukça gelişmesi nedeniyle, kullanıcılar ölçme sürecinin planlanması aşamasını genellikle göz ardı etmektedir. Bu nedenle ilgili uygulamalarda gereğinden fazla görüntü elde edilip ekonomik olmayan bir süreç işletilmektedir. Genellikle ilgili uygulamalar donanım ve metot bağımlı süreçler içerdiğinden; ilgili görüntüler elde ederken kullanılacak donanımların seçilmesi, veri toplama süresinin planlanması, toplanacak verinin özniteliklerinin planlanması, veri formatı, veri saklama ve işleme yönteminin standartlarının seçimi gibi faktörler yapılan çalışmanın niteliğine bağımlılık gösterir. İyi bir ölçme süreci planına sahip olmak ticari ve hesaplama ekonomisi açısından önemli yararlar sağlar.

#### **2.1.1.1. Platform Seçimi**

Çeşitli uygulama alanlarında kullanılmak üzere birçok görüntü yakalama platformu geliştirilmiştir. SfM fotogrametrisinde imge yakalamak için görece sık kullanılan donanımlar; balon, İHA (multikopter, helikopter, kanatlı uçak) [39], uçurtma, monopod veya el kameralarıdır (Gimballı ve Gimballsız) [50]. Şehir yapıları, kayaç ve morfolojik kalıntılar, küçük nesnelere ve tarihi eserlerin el kameraları ile ölçülmesi görece daha ekonomik bir ölçme tekniğidir. Kamera çekim açısına paralel yapılan çalışmalar (halihazır çalışmalar, arkeolojik yapılar, maden ölçmeleri, enerji sahalarının ölçümü vs.) için; kameraya entegre edilmiş monopod kullanılması verimli olmaktadır. Görece geniş veya problemlili topoğrafik yüzeylerin SfM tabanlı haritalanmasında gerekli imgeleri elde etmek için; genellikle İHA donanımları kullanılmaktadır. Platformlardan bağımsız olarak, asıl amacın nesneye dair görüntü elde etmek olduğu düşünüldüğünde, platformların faydalı yük taşıyabilme kapasiteleri daha çok gözetilmelidir. Şekil 3'de farklı platformlarla imge yakalama süreçleri görselleştirilmiştir.



Şekil 3. Görüntü elde etmek için kullanılan çeşitli platformlar [51]

Platform seçiminde bir diğer önemli nokta; platformun eş-zamanlı çoklu kamera sistemlerini desteklemesidir. İlgili kameralar, aynı anda farklı operatörler tarafından yönetilebilmelidir. Bazı çalışmalarda farklı kamera operatörleri tarafından eş-zamanlı veri toplanmak; görece daha verimli olmaktadır.

Tez çalışmasında olduğu gibi, imge yakalamak için video çekimi yapan bir platform tercih edildiğinde, hareketten dolayı meydana gelen titreşimi sönmölemek için gimbal adı verilen sensörler platforma entegre edilmelidir. Gimbal, Türkçe ifadesi ile dengeleme halkası, 2 (X, Y) veya 3 (X, Y, Z) eksenli çalışan bir donanımdır. Genellikle profesyonel çekimler için kullanılan Z eksenli gimballar (Pitch) maliyeti arttırır. Z eksenli gimballer özellikle; hareket sırasındaki ani durum değişikliklerinin, çukurtümsek gibi dikey yönlü engellerin ve kaynağı belirsiz küçük salınımların neden olduğu titreşimleri minimize eder [52]. Elektronik gimballar, her eksenin bağımsız dengesini sağlayan 2 veya 3 motordan oluşur. Bu motorlar hareketten dolayı meydana gelen aksiyonun tersi yönde etki oluşturarak, kameranın kararlı inersiyal eksenlerde çekim yapılmasını sağlar. Şekil 4'de 3 eksenli bir gimbal gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 Eksenli elektronik gimbal

Gimballer video ve görüntü yakalamada, titreşimden kaynaklı görüntü bozukluklarını azalttığından SfM tabanlı nokta bulutu üretim sürecinde imge eşleme gibi çeşitli süreçlerde verimi arttırmaktadır. Gimbal motorlarının bağlı olduğu jiroskop sensörleri, hareket yönünü algılayarak ters yönde hareket sağlar. Mekanik olarak bunu sağlamak mümkün olsa da günümüz gimballerinde elektronik jiroskoplar gücünü ana bataryadan alarak çalışmaktadır. Alt sınıf gimballar, maliyeti görece yüksek olan mekanik SteadyCam cihazlarla neredeyse aynı kalitede sonuç üretmektedir [53]. Gimballar özellikle İHA teknolojisinde de büyük kolaylık sağlamaktadır.

#### 2.1.1.2. Kamera Seçimi

Ölçme sürecinin planlanmasının asıl amacı; önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, ilgili nesneye ait net, yeterli çözünürlükte ve düşük gürültü seviyeli imgeler elde etmektir. Görüntüler, genellikle single-lens reflex (SLR) veya digital single-lens reflex (DSLR) kameralarla elde edilmektedir. SLR kameralar, objektifi değişebilen filmli makinalarken, DSLR kameralar CCD veya CMOS sensörlerden oluşan dijital kameralardır. Günümüz modern fotogrametrik çalışmalarında, tekil veya video (sürekli) görüntüler genellikle metrik olmayan DSLR kameralarla yakalanmaktadır. SLR kameralar her ne kadar daha az gürültülü ve yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etse de; görüntülerin sayısallaştırılması oldukça zordur [54]. SfM yöntemi ile oluşturulan nokta bulutunun nokta sıklığı ve ilgili algoritma performansı, yakalanan görüntünün çözünürlüğüyle doğrudan ilişkilidir. Çözünürlük arttıkça, nesnelerin ayırt edilebilirliği artar ve veri kayıt aşamasındaki işlem süresi uzar. Bundan dolayı görüntüler, kamera işlemcisine ve kullanılan depolama sistemine bağlı olarak, farklı formatlarda kaydedilir. İlgili formatlar, elde edilecek çerçeve görüntünün karakteristiğini doğrudan etkiler.

Uygulama niteliğine göre görüntü veya videolar; RAW formatında veya sıkıştırılmış olarak saklanır.

Bu tez kapsamında kullanılan Sony Alfa A6000 fotoğraf makinası ve DJI Phantom 4 Pro insansız hava aracı kamerasının sahip olduğu teknik özellikler Tablo 1’de verilmiştir [55, 56].

Tablo 1. Kameralara Ait Teknik Özellikler

|                |                           | <b>Sony Alfa A6000</b>   | <b>DJI Phantom 4 Pro</b>  |   |
|----------------|---------------------------|--|---|---|
| <b>Özellik</b> | <b>Boyut</b>              | 23.5 x 15.6 mm   | 13.2 x 8.8  |   |
|                | <b>Sensör</b>             |  |   |   |
|                | <b>Sensör Tipi</b>        | CMOS   | CMOS  |   |
|                | <b>Piksel Çözünürlüğü</b> | 24.30 Mp   | 20Mp  |   |
|                | <b>ISO</b>                | 100~25600  | 100~12800   |   |
| <b>Lens</b>    | <b>Odak Uzaklığı</b>      | 24 mm /75 mm<br>(35 mm format karşılığı)   | 8.8 mm/24 mm (35 mm format karşılığı)   |   |
|                | <b>FoV</b>                | 74°  | 84°   |   |
| <b>Video</b>   | <b>Çözünürlük</b>         | 6000x4000<br>4240x2832<br>3008x2000<br>2160x5536   | 4096x2160 (24/25/30/48/50p)<br>3840x2160 (24/25/30/48/50/60p)<br>2720x1530 (24/25/30/48/50/60p)<br>1920x1080 (24/25/30/48/50/60/120p)<br>1280x720 (24/25/30/48/50/60/120p)                                  |   |
|                | <b>Video Kodlama</b>      | AVCHD, H.264   | MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)   |   |
|                | <b>Video Çözünürlüğü</b>  | AVCHD: 1920x1080<br>(60p-28Mbps)<br>AVCHD: 1920x1080<br>(60p-24Mbps)<br>AVCHD: 1920x1080<br>(60p- 17Mbps)<br>AVCHD: 1920x1080<br>(24p- 24Mbps)<br>AVCHD: 1920x1080<br>(24p- 17Mbps)<br>H.264: 1440x1080<br>(30p- 12Mbps)<br>H.264: 640x480<br>(30p- 3Mbps) | <b>H.265</b><br>C4K:4096x2160<br>(24/25/30p)<br>4K:3840x2160 (24/25/30p)<br>2.7K:2720x1530<br>(24/25/30/48/50/60p)<br>FHD:1920x1080<br>(24/25/30/48/50/60/120p)<br>HD:1280x720<br>(24/25/30p/48/50/60/120p) | <b>H.264</b><br>C4K:4096x2160<br>(24/25/30/48/50/60p)<br>4K:3840x2160<br>(24/25/30/48/50/60p)<br>2.7K:2720x1530<br>(24/25/30/48/50/60p)<br>FHD:1920x1080<br>(24/25/48/50/60/120)<br>HD:1280x720<br>(24/25/48/50/<br>120p) |

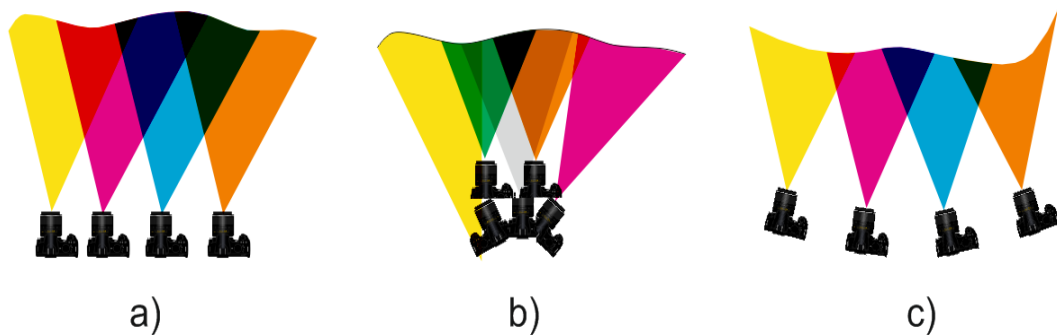
Genellikle, ölçme platformları sahip oldukları GPS/GNSS sensörlerinden aldıkları uzamsal konum bilgisini, imgeye ait EXIF meta verisi içine gömmektedir. SfM metotlarında fotogrametrik triyagülasyon süreçlerinde ilgili analitik modelin görece yüksek doğrulukla çözülerek stereo modellerin oluşturulması için, resim çekim anlarına ait kamera iz düşüm merkezi koordinatlarını bilmek çok önemlidir. Videogrametri uygulamalarında ilgili EXIF meta veri yapısına, GPS/GNSS tabanlı uzamsal veri

eklemek yüksek maliyetli donanım ihtiyacı oluşturduğundan, sonradan kullanılmak istenen ilgili video imge-çerçeveleri için zaman senkronizasyonlu uzamsal konum enterpolasyon tekniğiyle uzamsal konum bilgisi üretilebilir.

Bu tez kapsamında yapılan uygulamalarda; jeodezik standartlarda uzamsal konum verisi üreten video donanımlar, aşırı maliyetleri nedeniyle kullanılmamıştır.

### 2.1.1.3. Kamera Yönelimi ve Bindirme Oranı

Ölçme sisteminin tasarımı esnasında kameranın nesneye göre yönelimi oldukça önemlidir. Temiz, keskin, minimum gürültüdeki görüntülerin optimum sürede ve boyuna-enine bindirme oranının planlamaya uygun şekilde elde edilmesi kamera yönelimine de bağlıdır. Yapılan çalışmalar ölçme planlamasının SfM ile model üretmeye etkisinin olduğunu göstermektedir [57]. Nokta bulutu oluşturulacak nesnelere kamera çekim noktalarının planlaması en az görüntü kalitesi kadar önemlidir. Görüntüler nesneye paralel olarak elde edildiğinde radyal distorsiyonun etkisi görülmekte ve nokta bulutu oluşumunda homolog ışınların kesişmemesine neden olmaktadır. Aynı şekilde sabit bir noktadan panoramik görüntü yakalarcasına kameranın hareket ettirilmesi de yeterli bindirme oranı sağlanamadığından dolayı SfM yönteminin veri üretmemesine neden olmaktadır. En doğru çekim noktası arazi ve nesne rölyefini takip ederek çekim yapmaktır. Yani bir uçuş planı veya yersel planlama yapılırken sayısal arazi modelini takip ederek platformun sürekli, aynı yükseklikten ve nesnenin bütününe kapsayacak şekilde veri toplanmalıdır [51]. *Şekil 5*'de gösterilen ölçme tasarımı konuyu özetler niteliktedir.



*Şekil 5.* Ölçme tasarımında kamera yönelimi

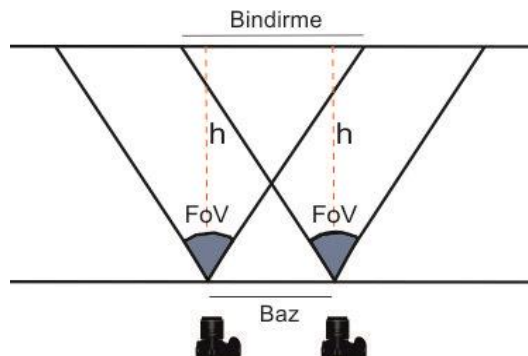
*Şekil 5.a* ve *Şekil 5.b*'de gösterilen imge yakalama kombinasyonları yanlış model üretmeye neden olurken, *Şekil 5.c*'de gösterilen kombinasyonla nesneyi saracak biçimde

imge yakalama görece daha doğru veri üretmeyi sağlar. Monopod kullanarak veya el kamerası ile çekim yürüyerek yapıldığı için, nesne boyunca ilerlerken ilgilenilen nesnenin bütün detaylarının en iyi bakış açısıyla yakalanması zorlaşır. İHA'larla görüntü yakalamada görüntü sayısını kontrol etmek için ilgili görüntü örtü oranlarını teknik ihtiyaçlara ve eldeki teknik imkanlara göre planlamak gerekir.

Planlama yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli noktalar bir araya toplanırsa:

1. Planlamaya göre yakalanacak görüntü sayısı, yedek batarya, bindirme oranları (en az %60-80), yeterli depolama alanı, ek teçhizatlar, arazi koşullarına göre rota ve doğrultü belirlenmelidir.
2. Yersel çalışmalar için baz-yükseklik oranı korunacak şekilde plan yapılmalıdır.
3. SfM yönteminin doğru sonuç üretmesi için hangi koşullarda veri üreteceği bilgisi unutulmadan, çalışma bölgesinin morfolojik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.
4. Kamera bakış açısına (FoV) göre plan hazırlanmalıdır.
5. Çekim yapılacak süreye göre, çalışma alanında meydana gelen ışık değişimleri dikkate alınmalıdır [50].

İnsan algısında görme; 15 cm'den başlamaktadır ve kişiye göre değişen ancak sonsuzda olmayan bir noktaya kadar görme devam eder. Fotogrametrik çalışmalarda lens uzaklığı sabit olması gerektiği için, nesneden platforma yaklaştıkça baz/bindirme oranı artmaktadır. Diğer bir ifade ile derinlik algısı artmaktadır. Baz ardışık görüntülerin çekim noktaları arasındaki mesafeyi, bindirme ise iki görüntünün örtüşen alanların oransal ifadesidir. Baz ve bindirme kavramları Şekil 6. Baz ve bindirme kavramlarının gösterimi ile gösterilmiştir.



Şekil 6. Baz ve bindirme kavramlarının gösterimi

Baz/bindirme oranı, yersel çalışmalarda gereğinden fazla veri toplanmamasına yardımcı olur ve eğer video gibi sürekli görüntüler yakalandıysa model üretmeye yetecek çerçeve görüntülerin çıkartılmasında oldukça kullanışlıdır.

Eşitlik 1, iki görüntü arasındaki bazın hesaplanmasını göstermektedir.

$$\begin{aligned}
 d_{baz} &= 2h \tan\left(\frac{\alpha_{fov}}{2}\right) \times (1 - \omega) \\
 &= 2h \tan\left(\frac{\alpha_{fov}}{2}\right) - 2h\omega \tan\left(\frac{\alpha_{fov}}{2}\right) \\
 &= 2h \tan\left(\frac{\alpha_{fov}}{2}\right) [1 - \omega]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Burada,  $\alpha_{fov}$  kameranın bakış açısını,  $\omega$  bindirme oranını,  $h$  ise kamera ile nesne arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Eşitlik 1 fotogrametrik matematiksel modelden çıkartılabilmektedir. Tez kapsamındaki uygulamada Tablo 1’de verilen kameralara ait bakış açısı değerleri kullanılmıştır. Baz mesafesinin hesaplanmasından sonra video görüntülerinden kaçınıcı saniyedeki çerçeve görüntünün çıkartılacağı Eşitlik 2 ile hesaplanmaktadır.

$$t = \frac{V}{d_{baz}} sn \tag{2}$$

Yersel örnekleme aralığı (YÖA): komşu piksellerin orta noktaları arasındaki mesafeyi ifade eder ve ölçme doğruluğunu doğrudan etkiler. Uçuş yüksekliği, sensör boyutları ve odak uzaklığına doğrudan bağlı olan YÖA, iki farklı eşitlikle hesaplanabilir. Genellikle eşitliklerin ürettiği en büyük değer YÖA olarak kabul edilir. YÖA, sensör eni ve görüntü eni kullanarak Eşitlik 3’le hesaplanır;

$$YÖA = \frac{SensörEni \times h}{GörüntüEni \times f} cm \tag{3}$$

Eşitlik 4, sensör boyu ve görüntü boyuna bağlı olarak ile YÖA’nın belirlenmesi için kullanılmaktadır.

$$YÖA = \frac{SensörBoyu \times h}{GörüntüBoyu \times f} cm \tag{4}$$

Tez kapsamında kullanılan sensör boyutları Tablo 1’de verilmiştir.

Eşitlik 3-4’te görüleceği gibi uçuş yüksekliği azaldıkça YÖA artmaktadır. Ancak bu durumda daha fazla görüntü elde edilmekte, arazide geçirilen zaman artmakta ve ek batarya ihtiyacı doğmaktadır. Bundan dolayı çalışma alanı içerisinde ne kadarlık yüksekliğin yeterli olacağı uzman görüşü ile belirlenebilmektedir.

Tez kapsamındaki uygulama alanlarında, kamera ile nesne arasındaki mesafe; Test 1 alanı için 2-3 m aralığı ve Test 2 alanı için 8-10 m aralığı tercih edilerek; YLT verisinin sağladığı nokta yoğunluğuna ve yüksek model doğruluğuna yaklaşılmak istenmiştir.

Çalışmada Test 1 alanı için hareket etme hızı olarak 0.5 m/s ve bindirme oranı olarak %80 olarak kabul edilmiştir. Böylece YÖA 0.03 cm ve video görüntülerden çıkartılacak görüntüler için 0.8 sn. İmge örnekleme aralığı elde edilmiştir. 60 saniyelik video görüntüsünden, 75 adet görüntü elde edilmiş, ardından ilgili imge kalite ölçütü kriterinin altında kalanlar ve benzer trigonometrik açıdan elde edilen görüntüler göz ardı edildikten sonra kalan 36 adet görüntü model oluşturmak için kullanılmıştır.

Test 2 alanı için gerekli imgeleri yakalamak kullanılan DJI Phantom Pro’nun uçuş hızı 3 m/s olarak belirlenmiş ve ileri bindirme oranı %80 olarak seçilmiştir. Böylece, YÖA 0.32 cm ve video-akıdan çıkartılacak imgeler için 0.9 sn. örnekleme aralığı elde edilmiştir. 608 saniyelik video-akıdan 678 adet görüntü elde edilmiş, görüntü kalite ölçüt kriterinin altında kalanlar ve benzer trigonometrik açıdan elde edilen imgeler göz ardı edildikten sonra 383 adet görüntü model oluşturmak için kullanılmıştır.

#### **2.1.1.4. Görüntü Eşleme Problemi**

Görüntü eşleme algoritmaları farklı açıdan, farklı zamanda veya farklı sensörlerle elde edilen görüntülerin geometrik olarak kaynaştırılması için kullanılır. Görüntü çiftleri arasındaki eşlenik özelliklerin belirlenmesi oldukça zorlayıcı bir konudur. Doğal sahne içeriği, özellikle yapay kalibrasyon düzlemlerinde olduğu gibi, kolayca ayırt edilebilen çok sayıda veri içermediğinden ilgili öznelik noktalarının elde edilmesi önemli bir problemdir [58].

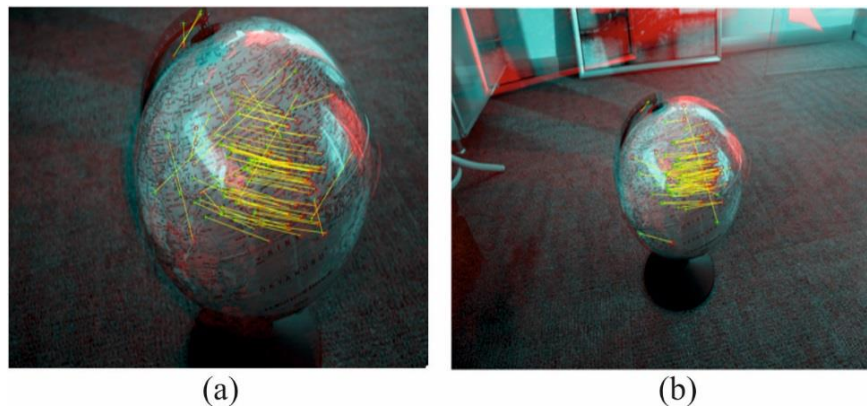
Görüntü eşleme yöntemleri genellikle üç ana başlıkta incelenir. Bunlar sinyal bazlı eşleme, yapısal eşleme ve özellik bazlı eşlemedir. Sinyal bazlı/alan bazlı eşlemede iki

görüntüde karşılık gelen alanlar çapraz korelasyon veya en küçük kareler yöntemiyle eşleştirilir. Yapısal eşlemede görüntü morfolojisi kullanılarak eşleme yapılmaktadır. Özellik bazlı yöntemler görüntü özelliklerini kullanır. İlgili görüntü özellikleri için genellikle görüntü öznitelik noktaları kullanılmaktadır [59]. Görüntü eşleme yöntemlerinin doğru sonuç üretebilmesi için görüntüler arasındaki ortak özelliklerin tespit edilmesi gerekir.

#### 2.1.1.4.1. Bakış alanı (FoV)

Bakış alanı, optik sensörün yakalanacağı alanı tarif eder. FoV fotoğraf makinasının lensine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Örneğin; balık gözü lensler çok büyük bakış alanı sağlarken, standart 50 mm'lik bir lens daha az bakış alanı sağlar. SfM yönteminde; seyrek ve yoğun nokta bulutu üretim aşamasındaki görüntü eşleme sürecinde, en az iki görüntü arasında örtüşmeli bir alan olmalıdır; derinlik haritaları, bu alan kullanılarak oluşturulmaktadır. Aynı sahneden elde edilen görüntülerin aynı konum ve bakış açısından elde edilmesi, SfM yönteminin hatalı sonuç üretmesine neden olur. Ancak, görüntü çiftlerinin eşlenik olabilmesi için, sahneden elde edilen görüntülerin benzer bir alana sahip olması gerekir. FoV açısı arttıkça, model üretmek için gereken görüntü sayısı ve işlem yükü azalır. FoV lens tipine bağlı değişkenlik gösterdiğinden odak uzaklığı arttıkça daha dar alanlar yakalanır [60].

Şekil 7'de, aynı konumdan farklı FoV değerlerine sahip makinalarla elde edilen görüntüler gösterilmiştir.



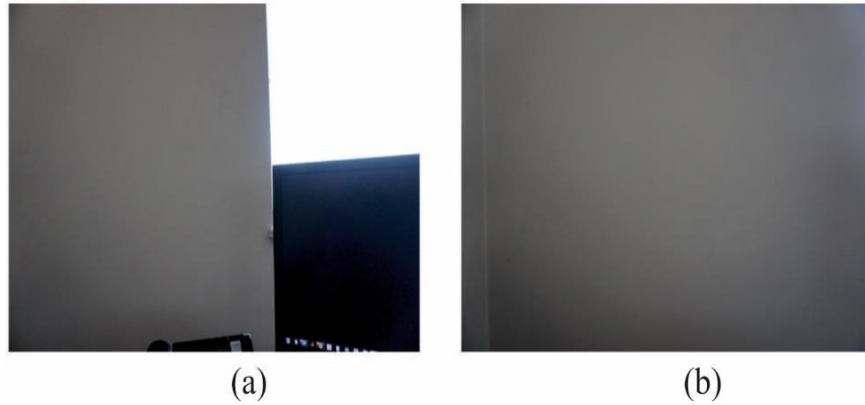
Şekil 7. Farklı FoV'lara sahip kameralar ile elde edilen görüntülerin eşlenik noktaları

Şekil 7.a’da gösterilen eşlenik görüntüler 30mm lens ile elde edilmiştir. İlgili imgeler arasında 59 adet eşlenik SIFT öznitelik noktası belirlenmiştir. Şekil 7.b ise 16 mm lensle elde edilmiştir ve 83 adet SIFT öznitelik noktası belirlenmiştir.

#### 2.1.1.4.2. Tekrarlı Yüzeyler

Sürekli ve homojen desene sahip yüzeylerde eşlenik nokta araması yapmak, görüntüler arasında piksel eşleşmesini zorlaştırır. Tekrarlı yüzeylerde bitişik piksellerin birbirine benzer spektral imzalara sahip olması, görüntü eşleme algoritmalarının başarısız olmasına ve yanlış eşleme yapmasına neden olur. Birbirine karşılık gelen ilgili piksel değerleri arasında küçük farklılıklar olsa da her iki görüntünün aynı nesneye ait olduğu gerçeği değişmez. Özellikle duvar, toprak ve sık orman gibi piksel değerlerinin birbirine çok yakın olduğu alanlarda, iki görüntü arasında eşlenik nokta bulmak önemli bir problemdir [61].

Şekil 8’da bindirmeli çekilen görüntüler görülmektedir. Ancak, sürekli desenlerin varlığından dolayı SIFT ve SURF öznitelik belirleme algoritmaları görüntülerdeki anahtar noktaların belirlenmesinde etkili olamamıştır.



Şekil 8. Tekrarlı yüzeylere sahip yüzeyler.

#### 2.1.1.4.3. Görüntü Bulanıklığı

Bulanıklık; görüntü içerisindeki nesnelerin keskin kenara sahip olamaması veya görüntüde yüksek uzamsal frekansların zayıflamasıdır. Bulanıklığın temel sebepleri, yetersiz uzamsal çözünürlük, algılayıcının hızlı hareket etmesi, kullanılan veri sıkıştırma yönteminin etkileri, görüntü işleme sırasında kullanılan filtreleme yöntemleri, kötü/çoklu odaklanma ve çekim yapılan nesnenin hareket etmesidir. Örnekleme

teorisine göre, imgedeki yatay ve düşey uzamsal frekanslar örnekleme oranı (piksel/cm biriminde) ifade edilir. Düşük çözünürlüklü görüntüler yüksek uzamsal frekans içermez. Ayrıca, alan derinliği olan sahnelerde, kameralar ana objeden farklı bölgeye odakladığında, sahne bulanıklaşır. Kameranın diyaframından giren ışığı ayarlayan shutter açılıp kapanırken, nesnenin veya kameranın rölatif ani hareketleri sensörün yeteri kadar foton yükü toplanmasının önüne geçerek bulanıklığa neden olur. Uzun süreli pozlama yapılarak sürekli ışık girişine izin verilmesi durumunda nesnelere merkezden dışarıya doğru bulanıklaşmaya başlar [54, 62, 63].

Şekil 9'da aynı kolonda sıralı iki görüntü verilmiştir. Şekil 9.a'da görüntü oldukça net bir şekilde elde edilmişken, Şekil 9.b'de hava koşulları İHA sisteminin yalpalama hareketi yapmasına neden olarak, görüntünün bulanık elde edilmesine neden olmuştur. İki görüntü, %70 oranında ileri bindirmeli olarak yakalanmış olmasına rağmen eşlenik nokta tespiti yapılamadığı için SfM yöntemi çalışmamıştır.

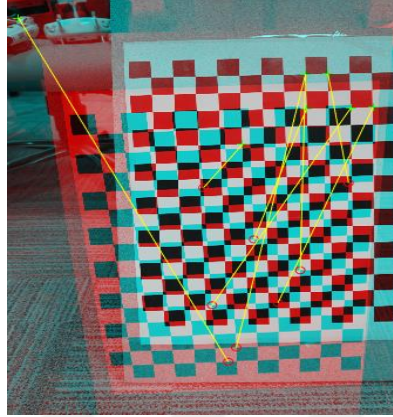


Şekil 9. Aynı kolondan elde edilen sıralı görüntüler

#### 2.1.1.4.4. Tekil Yüzeyler

Nesneler süresiz bir yüzeye sahip olsalar bile, aynı dokunun tekrar etmesi görüntü eşleme için oldukça büyük bir problemdir. Satranç tahtası desenli kalibrasyon yüzeyi tekil yüzeyler için iyi bir örnektir. Entropinin oldukça yüksek olduğu ve ilgili köşe noktalarının belirgin olduğu bu tip yüzeylerde, köşe noktaları oldukça kolay ayırt edilebilmektedir. Ancak, ikinci görüntü elde edilirken görüntü çekim şartları yeteri kadar iyi sağlanamamışsa eşlenik noktaları belirlemek zordur. Yüzey belli bir açıyla döndürüldüğünde kamera konum bilgisi elde edilemiyorsa eşlenik noktaları belirleme yeteneği zayıflar.

*Şekil 10*'da tekil yüzeye sahip iki patern için SURF öznitelik noktaları tespit edilmiş, ancak yanlış eşlemeden dolayı görüntüler eşlenememiştir.



*Şekil 10.* Tekil yüzeye sahip yüzeylerde nokta eşleme problemi

#### 3.1.1.4.5. Doygunluk

Kamera sensörleri diyafram açık olduğu süre boyunca ışığa maruz kalırlar. Sensörler bu süre boyunca foton toplarlar ve aşırı foton birikimi sonucunda görüntülerde ışık patlaması meydana gelir. Sensör dizisindeki her bir hücre limitinden daha fazla foton yükü ile yüklendiği zaman, farklı nesnelere birbirine benzer piksel parlaklık değeri atanır. *Şekil 11*'de, iki farklı doygunluk örneği görselleştirilmiştir. *Şekil 11.a*'da, Tuz Gölü aşırı parlak bir yüzeye sahip olduğu için sensör çok fazla foton toplayarak görüntüde parlaklığa neden olmuştur.

*Şekil 11.b*'deyse, görüntü üzerinde güneşten dolayı meydana gelen bir renk patlaması görülmektedir. Görüntü eşikleme işlemi yapılarak bu tip parlaklık problemleri kısmen çözülebilmektedir, ancak bindirmeli görüntülerde farklı eşik değeri kullanılması, yanlış eşlemelere neden olmaktadır.



(a)



(b)

*Şekil 11.* Aşırı doygunluk sonucu görüntülerde meydana gelen bozulmalar.

### 2.1.1.4.6. Yansımalar

Sahne ışıklandırması ve nesnenin sahip olduğu karakteristik yapı nokta eşleme sürecini etkileyen diğer bir etkidir. Yansıma yapan sahnelerde, orijinal nesnenin belirlenmesi insan algısı için kolay olsa da sezgisel olmayan bilgisayarlar için görece zordur. Özellikle ayna, göl kenarı, cam yüzeyler ve yansıtma özelliği yüksek olan nesnelere ait görüntülerde, karşılık gelen eşlenik noktanın aranacağı ikinci görüntüde, eşlenik piksellerin belirlenmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, yansımalar sahneye ait olmayan bilgiler içereceğinden eldeki imgeye gereksiz bilgi ekler.

Şekil 12’de, yansıma ve sahne ışıklandırmasının görüntü üzerindeki renk bilgisini bozarak; görüntülerin eşlenmesinin önüne geçtiği görüntüler sunulmuştur.



Şekil 12. Yansıma ve sahne ışıklandırmasının görüntü üzerine etkisi

## 2.2. Görüntü / Video Kalitesi

Görüntü kalitesinin belirlenmesi; görüntü işleme uygulamaları için oldukça önemlidir. Sayısal görüntüler sıkıştırma, iletim, depolama, edinme, ön-işleme ve çoğaltma aşamalarında görsel kalitenin etkilenmesine neden olan çeşitli bozulmalara maruz kalır. Bozulmalar görüntü üzerinde yönü, şiddeti, konumu önceden belirlenemeyen ve keskinlik, dinamik aralık, kontrast gibi tanımlayıcıların değişmesine neden olan kusurlardır. Analog görüntülerden sayısal görüntülere geçişle birlikte, görüntü üzerinde görsel detayların belirlenmesinde bahsedilen tanımlayıcılar belirleyici rol oynar. Görüntü yakalayıcıların doğası gereği kusursuz veri üretmediğinden bulanıklık, ringing ve gürültü gibi etkiler tanımlayıcıların farklılaşmasına ve görüntülerin yanlış yorumlanmasına neden olur [54, 62, 63].

Ringin kusurları, görüntülerde ani kenar geçiş sinyallerinin yanında sahte sinyaller olarak meydana gelen kusurlardır. Yüksek frekanslı sinyallerin kaybolması veya düşük frekanslı sinyallere maruz kalındığında keskin kenarlardaki salınımlar olarak da bilinir (*Gibbs etkisi*). Ringin kusurları MR görüntüleri, aşırı keskin kenarlara sahip cisimler, analog kanallar ile iletilen sinyaller ve sıkıştırılmış görüntülerde meydana gelir. JPEG görüntüler 8x8 bloklar halinde Ayrık Kosinüs Transformasyonu (DCT) ile sıkıştırılır ve piksel parlaklık değerleri yerine DCT katsayıları ile temsil edilir. İmge sinyalleri frekans uzayına dönüştürüldüğünde imge içerisindeki bazı bilgiler kayba uğrar. Özellikle kenar bölgelerinde kendini gösteren bu kusur, yüksek frekanslı verilerin kaybına neden olur. DCT katsayılarının yeterince iyi örneklenememesi sonucunda, 8x8'lik blok sınırları boyunca yapay sınır efektiyle gözlemlenen kusurlar oluşur [54, 64, 65].

Gürültüler, görüntü kalitesini önemli ölçüde etkileyen ve görüntülerde çoğu zaman istenmeyen bilgilerin oluşmasına neden olan diğer bir faktördür. Gürültüler görüntüde, düşük genlikte ve yüksek frekansta rastgele dalgalanma halinde oluşur ve piksel parlaklık değerinin yanlış kaydedilmesine neden olur.

Analog kameralarda metalik gümüş veya boyar maddelerin varlığından dolayı meydana gelen gürültüler; sayısal kameralarda görüntü üzerinde tanecik olarak meydana gelirler. Sayısal kameralarda filmin fiziksel karşılığı olan görüntü sensörleri (*CCD, CMOS*) ne kadar küçük boyuta sahip olursa; o kadar yüksek çözünürlükte görüntü üretilir. Görüntü üzerinde gözlemlenen gürültülere; foto-elektrik sensörler, sayısal kamera devre sistemleri ve görüntü sıkıştırmaları da neden olabilmektedir. Meydana gelen gürültü tipleri elektronik dalgalanmalar sonucu oluşan Gaussian beyaz gürültü, genellikle radar görüntülerinde oluşan tuz&biber gürültü, düşük sinyal seviyesine sahip sıçramalı gürültü ve görüntü sıkıştırma sonucunda oluşan kuantalama gürültüsüdür [66-69].

Görüntü kalitesi; kişisel deneyimler ve insan görme sistemindeki farklılıklara bağlı olarak, sübjektif veya çeşitli istatistiksel araçlar kullanılarak objektif olarak belirlenebilir. Sübjektif görüntü kalitesi kullanıcı deneyimine (yaş, kültür, eğitim, cinsiyet vs.) bağlıdır. Objektif olarak anlamlı bir değerlendirme yapabilmek için bazı test yöntemleri, puanlama skalası ve işlem adımları ITU-T Recommendation BT.500-11 tarafından sunulmuştur [70]. Bu değerlendirme, bireylerin görüntü kalitesini adil puanlaması için geliştirilmiştir. Bireyler arasındaki fizyolojik farklılıklardan dolayı

kalite belirlemede önemli rol oynayan görsel dikkat, görsel hafıza, bilişsel seçim ve geçici maskeleye gibi faktörler kişiden kişiye değişir. Fiziksel nesnelerin duyu organını uyarmasıyla sinir sisteminde meydana gelen değişimin sonucunda bireyler aynı görüntüye baktıklarında farklı kullanıcı deneyimlerine sahip oldukları için farklı seviyede uyarılabilmektedir. Bunların yanında, kullanıcı deneyimine bağlı bir estetik skalası kullanılarak imge kalitesi belirlenir [71, 72].

### 2.2.1. Objektif Kalite Belirleme

Görüntü işleme uygulamalarında, her imge için sübjektif bir kalite değeri üretmek olası değildir. Bu nedenle her görüntünün belirli kurallar dahilinde değerlendirilerek, otomatik, hızlı, adil ve objektif olarak kalite açısından derecelendirilmesi gerekir. Sübjektif imge kalite değerlendirme süreci zaman alıcı, hantal ve pahalı olduğundan gerçek dünya uygulamalarına uygulanması zordur. Ancak görüntü kalitesi belirlemek insan doğasıyla alakalı olduğu için objektif değerlendirme yapılabilmesi için bir referansa ihtiyaç vardır. Bundan dolayı, objektif kalite belirleme yöntemleri geliştirilmiş, adil, ön yargısız insan düşüncesiyle paralel sonuçlar üreten sayısal imge kalite ölçütleri önerilmiştir. Böylece, bilgisayarlar tarafından algılanan görüntülerin kalitesinin otomatik olarak tahmin edilip nicel skorlar üretilmesi sağlanır. Objektif görüntü kalite değerinin, sübjektif kalite değeriyle korelasyonlu olması beklenir. Objektif görüntü kalite değeri belirleme metriklerinin iyi sonuç verip vermediğine, elde edilen objektif skorla ve sübjektif test sonuçlarının korelasyonuna bakılarak karar verilir. Genellikle kullanılan korelasyon katsayıları; Pearson lineer korelasyon katsayısı, Spearman rank-sıralama katsayısı, kurtosis ve outlier oranıdır [73, 74].

Objektif görüntü kalite değeri belirleme algoritmaları genellikle orijinal (referans/yer gerçeklik/ground truth) görüntünün varlığına bağlı olarak sınıflandırılırken Tam Referanslı (TR), Azaltılmış Referanslı (AR) ve Referanssız (RS) metrikler olarak 3'e ayrılırlar.

TR'ler, orijinal görüntüyü oluşturan piksellerle orijinal görüntüye karşılık gelen test görüntüsünü oluşturan her bir piksel arasındaki farkın bir fonksiyonunu hesaplar. TR metriklerin kullanılabilmesi için referans görüntünün var olması gerekir. Ancak, yer gerçeklik görüntülerinin elde edilmesi zaman alıcı ve pahalı bir işlemdir. Bu nedenle,

TR metrikleri birçok uygulamada yer gerçeklik verisinin elde edilmesi mümkün olmadığından görüntü kalite değeri belirlemede kullanılmaz. TR metrikler ile görüntü kalitesi belirlemenin en temel metodolojisi referans ve test görüntülerinin karşılık gelen her bir pikselinin karşılaştırılmasıdır. TR metriklerde en fazla kullanılan yöntemler; Sinyal Gürültü Oran (PSNR), Ortalama Karesel Hata (MSE) ve Yapısal Benzerlik İndeksi (SSIM)'dir.

PSNR, Eşitlik 5'te tanımlandığı üzere, maksimumu sinyal gücünün (8 bitlik görüntü için 255) karesel ortalama hataya oranının logaritmasıdır[54, 74].

$$PSNR = \log \left( \frac{255^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

Eşitlik 5'te, MSE hesaplanırken görüntüyü oluşturan piksel sayısı  $N_1 \times N_2$ , çerçeve uzunluğu  $N_3$ , test görüntüsü  $l[n_1, n_2, f]^T$  ve referans videosu/görüntüsü test görüntüsü ile aynı boyutlarda olmak koşulu ile  $l[n_1, n_2, f]^R$  şeklinde tanımlanırsa Eşitlik 6;

$$MSE = \frac{1}{N_1 N_2 N_3} \sum_{n_1=0}^{N_1} \sum_{n_2=0}^{N_2} \sum_{f=0}^{N_3} (l[n_1, n_2, f]^R - l[n_1, n_2, f]^T)^2 \quad (6)$$

elde edilir. Bazı çalışmalarda PSNR indeksinin kullanılmasının uzamsal ve zamansal maskeleye efekti gibi insan algılama sistemini içeren bazı özellikleri hesaba katmadığı için görsel kaliteyi ölçmediğini belirterek kullanılmasının doğru olmadığını belirtmektedir. Bundan dolayı insan görme modelinden esinlenerek PSNR'e bir alternatif olarak SSIM sunulmuştur. SSIM referans görüntüye göre test görüntüsünün benzerliğini ölçerken  $N \times N$  bloklar içerisindeki referans ve test görüntüsüne ait ortalamalar  $\mu_R, \mu_T$ , standart sapmalar  $\sigma_R, \sigma_T$  ve çok küçük sayısal ifadelere yakınsamamak için kullanılan sabit terimler  $c_1, c_2$  olmak üzere;

$$SSIM(R, T) = \frac{(2\mu_R\mu_T + c_1)(2\sigma_{RT} + c_2)}{(\mu_R^2 + \mu_T^2 + c_1)(\sigma_R^2 + \sigma_T^2 + c_2)} \quad (7)$$

ile tanımlanır. Bunların yanı sıra TR metrikler arasında sayılan ve referans ile test görüntüsünün zamansal çakışması yapıldıktan sonra insan bakışının bunu

değerlendirilmesi ile elde edilen ve sübjektif bir kalite değerlendirmesi olan, ortalama bir skor ile 1-5 arasında puanlanarak hesaplanan, Video Kalitesinin Algısal Olarak Belirlenmesi (PEVQ) indeksi de görüntü kalite değeri üretmek için sıkça kullanılmaktadır. Video Kalite Modeli (VQM), kalibrasyon teknikleriyle ilişkili analitik bir modele dayanan ve sübjektif görüntü kalitesini tahmin etmeye yarayan bir AR metriğidir. Bu yöntemde gürültü, bulanıklık, renk kusurları ve hareketten kaynaklı kaymalar gibi imge kalitesini etkileyen tüm faktörler tek bir sayısal ifade ile sunulmaktadır. AR metriği; referans görüntünün bazı özelliklerini ve imge kalitesi belirlenmek istenilen görüntüyü giriş verisi olarak kullanmaktadır. AR, azaltılmış bilgi kullandığı için TR ve RS'ye göre görece daha hızlı çalışmaktadır [71-73].

RS metriklerse, herhangi bir referans görüntüsü olmadan test görüntülerinin kalitesini belirlemeye yarar. Genellikle internet üzerinden sunulan görüntülerle, sıkıştırılmış görüntülerin kalitesini belirlemede kullanılan RS metrikler, tez kapsamında fotogrametrik amaçlar için çekilen videolardan elde edilen görüntülerin kalitesini belirlemede kullanılmıştır. RS metrikler genellikle gürültü ve ringing-blok kusurlarının miktarını ölçmek için kullanılmaktadır.

Referanssız görüntü kalitesini ölçmek için; Image Verity and Integrity Evaluation (DIIVNE) [75], Codebook-Based Blind Image Quality (CBIQ) [76], Blind Image Integrity Notator Using DCT Statistics (BLIINDS) [77], Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE) [78] ve Natural Image Quality Evaluator (NIQE) [79] gibi yöntemler geliştirilmiştir.

Uygulama kolaylığı, hızı, hafızada az yer kaplaması ve başarılı sonuç üretmesinden dolayı tez kapsamında NIQE kalite hesaplayıcısı tercih edilmiştir.

#### **2.2.1.1. Doğal Görüntü Kalite Hesaplayıcısı (NIQE)**

Objektif görüntü kalite belirleme yöntemleri, insan algı sistemini dikkate almadan, bozulmaya uğramış görüntülerin kalitesini otomatik olarak belirler. Sosyal medyanın hızlı büyümesi ile milyonlarca görüntünün çeşitli platformlarda yayınlanması, insanları kaliteli görüntüleri bilgisayar sistemleri ile otomatik olarak ayırt etmede yeni yollar aramaya zorlamıştır [79]. Her ne kadar kameralar yüksek çözünürlüklü ve kaliteli ham görüntü oluşturmak için görüntüleri birçok ön işlemde geçirse de, imgeler rastsal

hatalardan kurtulamamışlardır. Görüntü kalitesinin belirlenmesi için doğaya ait görüntüler kullanılarak oluşturulan TR model ile görüntü kalitesi belirlenebilir. TR modellerin aksine, RS modellerde görüntü kalite belirlemede insanların görüntüleri puanlaması ile oluşturulan modelden yalnızca distorsiyona uğramış görüntülerin değerlendirilmesi yapılmaktadır. Bundan dolayı bu tür modeller belirli distorsiyonları hesaba katarak eğitildikleri için kısıtlı kapasiteleri vardır. NIQE, insanların görüntüye puan vermediği, distorsiyona uğramış görüntünün kullanılmadığı, görüntülere ait herhangi bir ön bilgi kullanmayan, popüler PSNR ve SSIM indekslerinden daha iyi sonuç veren istatistiksel bir indekstir [75].

NIQE, kalite belirleme yapılırken kalitenin belirlenebilmesi için görüntülerden doğal sahne istatistiği özellikleri lokal görüntü bloklarından çıkartılır. Çıkartılan özellikler çok değişkenli Gauss modele uydurulur. Görüntü kalitesinin belirlenebilmesi için model ile test görüntüsü arasındaki mesafe hesaplanır. Doğal sahne istatistiğinin belirlenebilmesi için lokal ortalamalar çıkartılarak standart sapma ile Eşitlik 8’de olduğu gibi normalize edilir.

$$\hat{I}(i, j) = \frac{I(i, j) - \mu(i, j)}{\sigma(i, j) + 1} \quad (8)$$

Burada,  $i \in \{1, 2, \dots, M\}$  ve  $j \in \{1, 2, \dots, N\}$  görüntü boyutlarını ifade eder. Lokal ortalama ve standart sapma sırasıyla Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 kullanılarak tahmin edilir.

$$\mu(i, j) = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L w_{k,l} I(i+k, j+l) \quad (9)$$

Ortalaması alınan görüntü ( $\mu(i, j)$ ), Eşitlik 6’da görüldüğü üzere Gaussian filtre uygulanmış görüntüdür.

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L w_{k,l} [I(i+k, j+l) - \mu(i, j)]^2} \quad (10)$$

Burada,  $w$  Gaussian ağırlık fonksiyonu olup,  $3\sigma$  için örneklenmiş ve ölçeklenmiş olur.

Doğal görüntüler kullanılarak katsayılar hesaplandığında (Eşitlik 8) ile Gaussian dağılıma uyduğu tespit edilmiştir. İlgili katsayılar hesaplandıktan sonra, imge PxP bloklara ayrılarak her bir blok için doğal sahne istatistiği özellikleri katsayılarından hesaplanır. Bloklar, görüntünün bazı bölgelerinde oluşan lokal bulanıklık ve netlik problemini modelleyebildiğinden dolayı kullanılır. İnsan algısı görüntü kalitesini belirlerken; genellikle keskin görüntüleri kendisine referans alır. Bu sebepten dolayı görüntü bloklara ayrılır ve her blok içerisinde kaliteli alanlar ve distorsiyona uğrayan alanlar ayrı ayrı değerlendirilip tek bir sonuç üretilir. PxP bloklar  $b = \{1, 2, \dots, B\}$  ile indekslenirse, b blokları için ortalama lokal değişim, Eşitlik 11 kullanılarak hesaplanır;

$$\delta(b) = \sum_{(i,j) \in \text{blok}b} \sigma(i,j) \quad (11)$$

Burada,  $\delta$  lokal keskinliği ifade eder ve belirlenen eşik değerinin altında kalan keskinlik değerleri işleme katılmaz. Uygulama için eşik değeri sıfır olarak belirlenmiştir. Görüntü bloklarının istatistikleri her bir bloğun doğal sahne istatistiği özellikleri ile tanımlanır. Bunun için Eşitlik 12'de verilen sıfır ortalamalı Gaussian dağılım kullanılabilir.

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{2\beta\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left(\frac{|x|}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (12)$$

Bloklardan elde edilen doğal sahne istatistiği özellikleri 2 farklı ölçekte örneklendirilerek 36 belirleyici özellik hesaplanır. Doğal sahne istatistiği özelliklerinden hesaplanan değişkenler Eşitlik 13'te tanımlanan çok değişkenli Gaussian modele uydurularak;

$$f(x; \nu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (x-\nu)^T \Sigma^{-1} (x-\nu)\right) \quad (13)$$

elde edilir. Burada,  $\Sigma$  çok değişkenli Gaussian 'in kovaryans matrisini  $\nu$  ise ortalama matrisini ifade eder ve maksimum olabilirlik yöntemi ile tahmin edilir. Model ve test görüntüsü için ortalama ve standart sapma değerleri elde edildikten sonra iki görüntü arasındaki skoru belirlemek için Maholonobis mesafesi kullanılır.

$$d(v_1, v_2, \Sigma_1, \Sigma_2) = \left( \sqrt{(v_1 - v_2)^T \left( \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right)^{-1} (v_1 - v_2)} \right) \quad (14)$$

Burada,  $v_1, v_2, \Sigma_1, \Sigma_2$  sırasıyla çok değişkenli Gaussian ve test görüntülerinin ortalama ve standart sapma vektörlerini ifade etmektedir [79].

### 2.3. Video Kodlama

Yüksek çözünürlüklü video yakalama donanımlarında meydana gelen gelişmelerin bir sonucu olarak multimedya sistemlerinin hayatımızın her alanına girmesiyle birlikte, veri depolama ve veri iletiminde kullanılan bant genişlikleriyle kullanılan sistemlerin güç gereksinimleri artmıştır. Oluşturdukları büyük hacimli veriden dolayı, art arda dizilmiş imge çerçevelerden oluşan video-akı verisinin verimli şekilde sıkıştırılması günümüzde halen aktif bir araştırma alanıdır. Video sinyallerinin kayıplı veya kayıpsız olarak sıkıştırılması ve sinyallerin tekrar çözülmesi işlemine video kodlama-dekodlama denilmektedir. Sayısal videolar, sahnelerin zamansal ve uzamsal olarak örneklenerek çerçeve veya alan haline dönüştürülmüş formudur. Piksellerin bir araya gelmesiyle oluşan çerçeve uzamsal örnekleme sonucuyken, art arda gelen çerçeveler bir periyod halinde tekrar ederek zamansal örnekleme oluşturur [54].

Zamansal ve uzamsal örnekleme ile oluşturulan örnek çerçeveler *Şekil 13*'de gösterilmektedir.

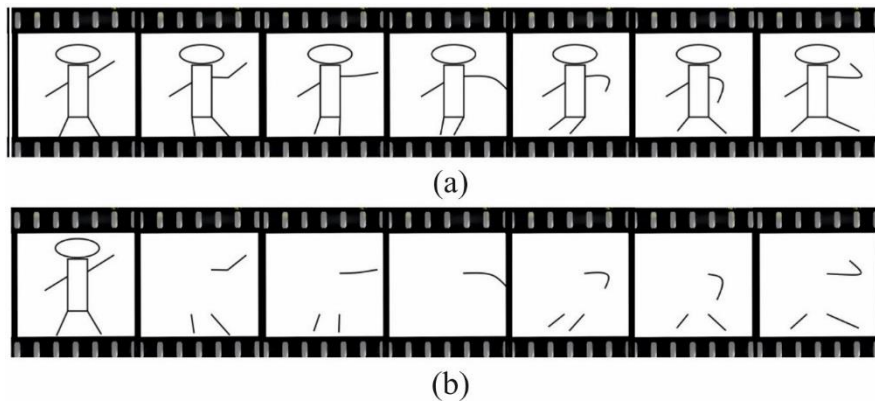


*Şekil 13.* Zamansal ve Uzamsal Örneklemenin Video görüntülerinde gösterimi

Bir görüntü veya video kodeği, üç kritik işlemi yerine getirmek için tasarlanır; sıkıştırma, kalite ve düşük-karmaşıklık. Sıkıştırma, veri azaltma veya orijinal görüntüye kıyasla ilgili görüntünün kaç bite ihtiyacı olduğu cevaplamak anlamına gelir. Görüntü dizileri veya video akışları için sıkıştırma, aktarım için bit/sn. veya depolama için bayt/saat olarak ifade edilen veri hızı anlamına gelir. Kalite, sıkıştırılmış bir görüntünün orijinaline ne kadar yakın olduğunu belirler. Karmaşıklık, bir görüntü karesini veya sırasını sıkıştırmak veya açmak için kaç tane aritmetik işlemin hesaplanması gerektiği ile ilgilidir.

Sıkıştırılmamış olarak depolanan videolarda zamansal örnekleme arttıkça, video verisinin kapladığı alanda artış meydana gelir. Aynı zamanda kamera sensör teknolojisinin gelişmesinin doğal sonucu olan yüksek çözünürlüklü verinin, hızlı ve mekânsal detayların kaybedilmeden kodlanması için sıkıştırma yapılmalıdır. Hareketli görüntülerde sıkıştırma işlemini zamansal örneklemlerden seçilen çerçevelerin her birinin kendi başına sıkıştırılması (intra-frame) veya farklarının kodlanması (inter-frame) ile yapılır. Çerçeveler arasındaki benzer alanların belirlenerek hesaba katılmadığı sıkıştırma yöntemi intra-framedir. Bu durumda, her çerçeve bağımsız olarak enkod edilmektedir. Ardışık çerçeveler arasında sadece hareketli alanların belirlenerek tekrarlı alanların hesaba katılmadığı sıkıştırma yöntemi ise inter-frame'dir. Bu durumda, sadece çerçeveler arasındaki farklar enkod edilir. Her iki sıkıştırma yöntemi, çerçeve içerisinde fazla bilgi olduğu kabulüne dayanır [54, 80].

Intra-frame ve Inter-frame sıkıştırma yöntemlerinin birer örneği Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14. a) Intra-frame b) Inter-frame Sıkıştırma

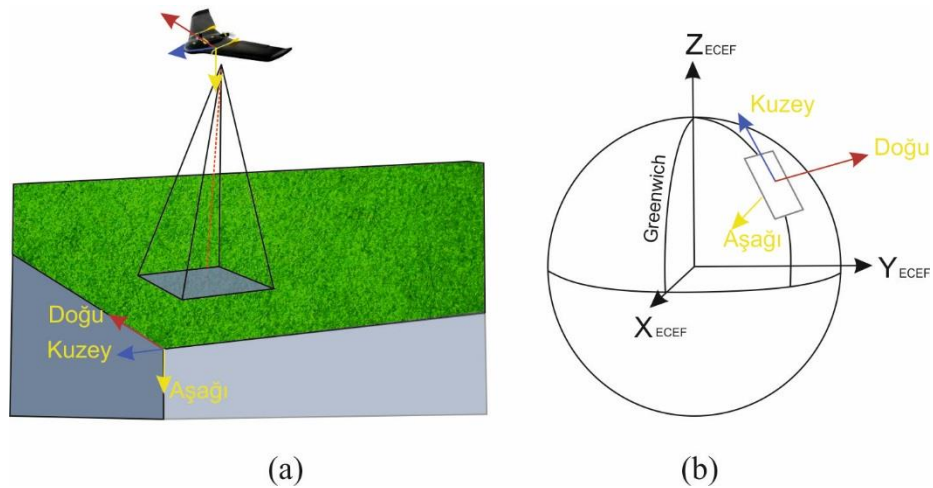
Tez kapsamında test alanlarına ait video görüntüleri oluşturulurken, 4K videolarda daha verimli sıkıştırma yaptığından dolayı intra-frame yöntemlerden olan H.265/264 kodlaması tercih edilmiştir.

#### **2.4.Georeferanslama**

Veri kaynaştırması için lokal koordinat sisteminde üretilen verinin, dünya koordinat sisteminde üzerinde karşılık geldiği mekânsal koordinatlara dönüştürülmesine, georeferanslama denilmektedir. Georeferanslama; koordinat dönüşümü olarak tanımlanabilmektedir [81]. Koordinat dönüşümünün temel sebebi farklı koordinat sisteminde bulunan verilerin birlikte değerlendirilmesi gerekliliğidir. Ayrıca, işlenen verinin koordinat sistemi bozulmuş, deforme olmuş ve yanlış parametrelerle tanımlanmışsa, ilgili verinin bilinen bir referans koordinat sisteminde ifade edilmesi gerekir [82].

Fotogrametrik yöntemlerle elde edilen görüntüler, nokta bulutları, topoğrafik haritalar veya jeomorfolojik haritalar, çoğu zaman gerçek lokal koordinat sisteminde saklanmaktadır. Ancak, coğrafi bilgi sistemi uygulamalarında, verilerin önceden tanımlanan koordinat sisteminde ifade edilmesi gerekir. Bu nedenle, fotogrametrik ve jeodezik alanlarda yapılan çalışmalarda güçlü ve doğru ortorektifikasyon/georeferanslama sağlayan metotlar geliştirmeye olan ilgi artmıştır. Georeferanslamada asıl problem; ilgili dönüşümün nasıl yapılacağıdır. Fotogrametrik görüntülerin georeferanslı elde edilme zorunluluğu yoktur. Ancak, görüntüler georeferanslı elde edildiğinde, görüntü eşleme aşamasında SfM yönteminin hızlı sonuç üretmesine ve üretilen veriler tanımlanan koordinat sisteminde oluşmasını sağlar. Ayrıca, üretilecek model doğruluğu da artar [83].

Şekil 15.a'da fotogrametrik ürünlerin üretiminde İHA'ların lokal koordinat sisteminde gösterimi, Şekil 15.b'deyse Yer Merkezli Yer Sabit (ECEF) koordinat sisteminde gösterimi yapılmıştır.



Şekil 15. a) Lokal koordinat sistemi ve b) ECEF koordinat sistemi

Georeferanslama işlemi iki farklı şekilde yapılmaktadır; doğrudan georeferanslama ve dolaylı georeferanslama.

#### 2.4.1. Doğrudan Georeferanslama

Doğrudan georeferanslama, kamera/tarayıcı konum ve dönüklüklerinin bağımsız bir sistem tarafından kaydedilmesiyle gerçekleştirilir. Güncel fotogrametrik çalışmalarda ilgili işlem IMU/GNSS kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Doğrudan georeferanslamada, kamera konum/dönüklük (roll, pitch, yaw, yükseklik, enlem, boylam) bilgilerine, log-kaydı veya görüntü EXIF bilgisi kullanılarak ulaşılır. Fotogrametrik uygulamalarda, görüntü koordinat sisteminden kamera koordinat sistemine (lokal koordinat) daha sonra da ECEF koordinat sisteminde dönüşüm yapılmaktadır. Bu dönüşümlerin yapılabilmesi için kamera iç ve dış yöneltme parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Doğrudan georeferanslamada; atmosferik koşullar, kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesindeki sıkıntılardan ve GPS\GNSS verilerinin sağlıklı toplanamamasından kaynaklanan zorluklar yaşanabilmektedir. Özellikle gürültülü kaydedilen dış yöneltme parametreleri; homolog ışınların kesiştirilememesi problemine neden olur. Günümüzde çoğu İHA sisteminde entegre IMU\INS\GPS sistemi vardır. Çoğu CBS yazılımı ortofoto\DEM üretebilmek için EXIF\log bilgisini kullanır. Havai triyagülasyon, GPS\INS verileri kullanılarak yapıldığından; bloklar arasında geometrik doğruluk yetersiz kalabilir. Bu nedenle kullanılan harici konumlandırma sistemlerinin kalibrasyonu sürekli kontrol edilmelidir. Doğrudan georeferanslama; yer kontrol noktası

kullanımını azaltmasından dolayı arazide geçirilen zamanı kısaltır. Günümüz koşullarında, doğrudan georeferanslama sistem maliyetleri görece yüksektir [84-86].

Doğrudan georeferanslama için İHA'lar; GNSS verilerini veya Real Time Kinematik (RTK)-Post Process Kinematik (PPK) sistemini kullanır. RTK eş zamanlı çalıştığından, doğruluğu anlık uydu konumu ve atmosferik şartlara bağlıdır ve konum/hız düzeltmelerini anlık alır. PPK, sisteminde veriler büro ortamında üçüncü parti yazılımlar ile görüntü yakalama konumları dengelenmektedir. RTK İHA'lar konumu bilinen baz istasyonları ile eş zamanlı data işlediğinden, PPK kullanan İHA'ların aksine referans istasyondan fazla uzaklaşamazlar. PPK sisteminde de referans istasyonuna ihtiyaç vardır; ancak çoğu zaman çalışılan bölgeye tesis edilen sanal ağ istasyonları ihtiyacı karşılar [86, 87].

#### **2.4.2. Dolaylı Georeferanslama**

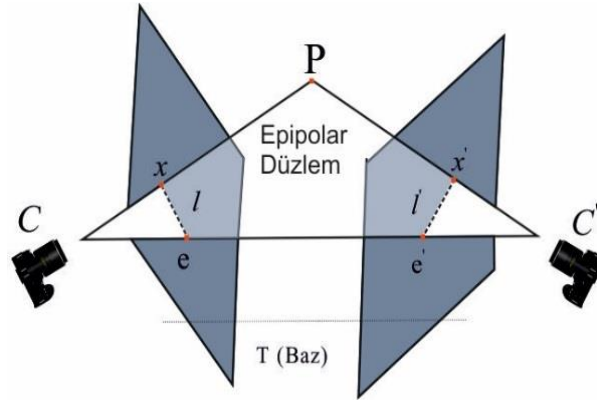
Fotogrametrik çalışmalarda georeferanslama işlemi, görüntü alımı sırasında bağımsız bir sistem tarafından kaydedilen konum bilgisi kullanılarak doğrudan yapılabileceği gibi, yer kontrol noktaları (YKN) veya bağlama noktaları kullanılarak dolaylı georeferanslama yöntem ile de yapılabilir. YKN'ler, arazi yüzeyinde belirgin olarak gözle seçilebilen yapay veya doğal nesnelere olabilirler. Veri işleme sırasında imge üzerindeki YKN'ler, elle veya otomatik olarak belirlenir. YKN konumları, ilgili fotogrametrik nirengi dengeleme sürecinde kullanılır. Engebeli ve bozuk arazi şartlarından dolayı ulaşımın mümkün olmadığı alanlara YKN tesis etmek zordur. Dolaylı georeferanslamada YKN tesisi; zaman ve maliyet açısından yükündür ve her zaman mümkün olmaz. Ancak, fotogrametrik çalışmalarda dolaylı georeferanslama, doğrudan georeferanslamaya göre seçilen YKN sayesinde daha yüksek konum doğruluğunu üretir [88, 89]. Ayrıca, yeterli sayıda YKN olmadığı durumlarda, üretilen ortofoto ve nokta bulutu gibi sonuç ürünler birçok mühendislik uygulaması için gerekli doğruluğu sağlamaz. Bu durumun üstesinden gelmek için görüntülerden yeterli sayıda bağlama noktası seçilerek görüntü eşleme sürecini etkin hale getirmek gerekir [90].

Nokta bulutuna dolaylı georeferanslama işlemi 3 farklı şekilde yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan ilgili referans nokta bulutu bir YLT kullanılarak üretilmiştir. Dönüşüm yapılacak ilgili nokta bulutu ise fotogrametrik yöntemle (SfM yöntemi) üretilmiştir.

1. Referans nokta bulutunu oluşturan ve farklı oturumlar sonucunda oluşturulan bağımsız nokta bulutları lokal koordinat sisteminde üretildiğinden her bir bağımsız nokta bulutu ortak bir jeodezik koordinat sistemine dönüştürülür. Dönüşümün yapılabilmesi için her bir tarama verisinde en az 3 adet YKN olması gerekmektedir. Ancak, her bir taramada YKN bulunması zorunluluğu zaman ve maliyet açısından yük getirmektedir.
2. Farklı veya aynı koordinat sisteminde belirli bindirme oranıyla üretilen nokta bulutları arasından rastgele seçilen örneklemeler kullanılarak hesaplanan dönüşüm parametreleri yardımıyla ilgili veriler aynı koordinat sistemine taşınıp kaynaştırılabilir. Bunun için sıklıkla en yakın nokta yöntemi (ICP) [91] veya en küçük kareler yüzey yöntemi (EKK) [92] kullanılır. Başlangıçta seçilen referans nokta bulutu eğer belirli bir jeodezik koordinat sisteminde ise bütün nokta bulutları belirlenen koordinat sistemine dönüştürülmüş olur. Aksi durumda bütün nokta bulutları karşılaştırılarak YKN'ler yardımıyla jeodezik koordinat sistemine dönüşüm yapılır.
3. Son olarak, ikinci yöntemde bahsedilen karşılaştırma yöntemleri yerine, her bir nokta bulutu içerisinde tanımlanabilen en az 3 bağlantı noktası yardımıyla nokta bulutları kendi içlerinde kaynaştırılır. Daha sonra nokta bulutu içerisinde seçilen en az 3 YKN kullanılarak jeodezik bir koordinat sistemine dönüşüm yapılır.

## 2.5. 3D Geri Çatım

SfM yönteminin temelinde, iki veya daha fazla görüntü kullanılarak, ilgili 3D cisim nokta koordinatlarının, stereo- üçgenleme ile elde edilmesi vardır [93]. Stereo görüde, epipolar geometrinin cebirsel ilişkisini fundamental matrisle tanımlamak mümkündür. Fundamental matris; genel olarak epipolar çizgi ve onu tanımlayan noktalar yardımıyla tanımlanır [94]. Aynı sahneyi yakalayan iki kameranın eşlenik görüntü koordinatları  $(x, x')$  olmak üzere, Şekil 16'da epipolar geometrinin gösterimi verilmiştir. Fundamental matris yardımıyla 3D nokta bulutu verisinin elde edilmesi konusunda çeşitli yaklaşımlar vardır, ancak çalışmanın bu bölümde en genel hali ele alınmıştır.



Şekil 16. Epipolar geometri.

Kamera iç yönelme parametrelerinin bilinmesi durumunda  $x^T Fx = 0$  eşitliği, bilinmemesi durumunda ise  $x^T Ex = 0$  eşitliği kullanılır. Burada E matrisi temel matris olarak isimlendirilir. F matrisi ve E matrisi arasındaki ilişki Eşitlik 15 ile gösterilir.

$$\begin{aligned}
 x^T K_r^{-T} E K_l^{-1} x &= 0 \\
 x^T (K_r^{-T} E K_l^{-1}) x &= 0 \\
 x^T (F) x &= 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

Fundamental matris, temel matrisin genelleştirilmiş halidir ve her ikisi de stereo görüntü çiftleri arasındaki geometrik ilişkiyi tanımlar. Eğer iç yönelme parametreleri biliniyorsa E, bilinmiyorsa F matrisi kullanılır. E matrisi kameralar arasındaki dönüklük ve ötelemeden hesaplanabilir [95]. Stereo görüntüler arasındaki eşlenik noktalar arasındaki ilişki F matrisi ile Eşitlik 16 ve Eşitlik 17 ile tanımlanır.

$$[x' \ y' \ 1] \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_4 & f_5 & f_6 \\ f_7 & f_8 & f_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \tag{16}$$

$$Af = [x'x \ x'y \ x' \ y'x \ y'y \ y' \ x \ y \ 1]f = 0 \tag{17}$$

Burada  $f = (f_{11}, f_{12}, \dots, f_{33})^T$ , F matrisinin elemanlarından oluşan 9 elemanlı matristir. Ölçek faktörü bilinmediği için eşlenik 8 nokta elde edilirse F matrisi lineer bir eşitlik ile çözülebilmektedir. Burada ölçek faktörü önemli olmadığı için serbestlik derecesi azalacaktır. Bu denklem sisteminin sıfır olmayan bir çözümünün olduğunu varsaymak, A matrisini rank eksikliği ile tanımlamaktır. Ölçme sistemleri kusursuz yapıda

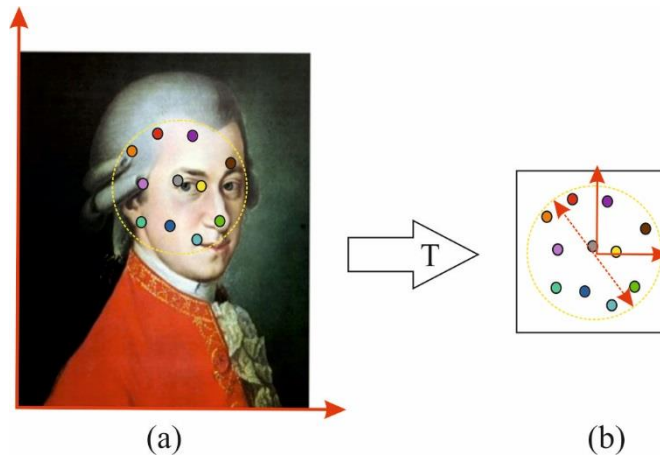
olmadıkları ve gürültüsüz veri üretemedikleri için, eşlenik noktaların doğru hesaplanması mümkün değildir. Bu durumda 8 eşlenik noktadan daha fazlası sistem çözümü için gerekmektedir. Eşlenik 8 noktadan daha fazla nokta tespit edilmesi durumunda en küçük kareler ile çözüm aranır. Burada,  $\min \|Af\|$  amaç fonksiyonunu ifade ederken çözüme getirilen kısıtlama  $\|f\| = f^T f = 1$ 'dir [96]. F matrisinin hesaplanması sonrasında, 3D geri çatım işleminin nasıl yapıldığı aşağıda adım-adım açıklanmıştır;

1) Normalize edilmiş koordinatlarla F matrisinin başlangıç değerinin tahmini;

a) n; eşlenik nokta sayısını belirtmek üzere,  $\hat{x} = Tx, \hat{x}' = T'x'$  normalize edilmiş görüntü koordinatlarıdır. Normalleştirme aşamasında her görüntüdeki noktaların merkezleri tespit edilir ve bütün noktalar [0,1] aralığına normalize edilir. Burada

dönüşüm matrisi;  $T = \begin{bmatrix} a_x & 0 & d_x \\ 0 & a_y & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  ile ilgili veri ölçeklenir ve döndürülür.

Aynı sahneye ait elde edilen çoklu görüntülerin farklı çözünürlükte olma ihtimalinden dolayı normalizasyon yapılır. Böylece sayısal stabilizasyon sağlanmış olur. Görüntü koordinatları normalize edilmeden önce; Şekil 17.a'da gösterildiği gibidir. Ancak T dönüşüm matrisi ile normalize edildikten sonra Şekil 17.b'de görüldüğü gibi eksen ağırlık merkezi görüntü koordinatlarının merkezine gelmiştir.



Şekil 17. Görüntü koordinatlarının normalize edilmesi.

- b) Her görüntünün normalizasyonu diğer görüntülerden bağımsız olarak yapıldıktan sonra  $Af$  eşitliği ile  $\hat{F}'$  matrisi belirlenir.
- c) SVD yöntemi ile rank kısıtlamasını uygulanır,  $\det(F)=0$ .
- d) Daha sonra veri denormalize edilir  $F=T^T\hat{F}'T$ .

2)  $(\hat{x}, \hat{x}')$  değerleri başlangıç değer tahminine oldukça bağımlıdır ve hesaplanması aşağıdaki gibi yapılır;

a) Epipol noktaları,  $P = [p_1, p_2, p_3]$  eşitliği ile hesaplanır.

b) İlk görüntü kamera projeksiyon matrisi  $P = [I|0]$  olmak üzere

$$P' = \begin{bmatrix} e' \\ F|e' \end{bmatrix} = [M|e'] \text{ ile hesaplanır.}$$

c) Cisim koordinatı ( $X$ ) triyngülasyon yöntemi ile tahmin edilmektedir. Görüntü koordinatı cisim koordinatı arasındaki eşitlik  $x = PX$ 'dir. Burada  $P = [p_1, p_2, p_3]$  ve  $P' = [p'_1, p'_2, p'_3]$  olmak üzere triyngülasyon Eşitlik 18 ile ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} x(p_3^T X) - p_1^T X \\ y(p_3^T X) - p_2^T X \\ x'(p_3'^T X) - p_1'^T X \\ y'(p_3'^T X) - p_2'^T X \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

Burada,  $AX = 0$  eşitliği kolaylıkla yazılabilir;  $A = \begin{bmatrix} xp_3^T - p_1^T \\ yp_3^T - p_2^T \\ x'p_3'^T - p_1'^T \\ y'p_3'^T - p_2'^T \end{bmatrix}$  'dir

d)  $A$  matrisi Tekil Değer Ayırıştırma (SVD) yöntemi kullanılarak ayrıştırılır;

$$[U \ S \ V] = svd(A) \quad (19)$$

$$X = V(:, end); X = X / X(:, 3)$$

3) Işın demetleriyle dengeleme bölümünde, Levenberg-Marquard algoritması kullanılarak amaç fonksiyonunun minimize edilmesinde Eşitlik 20 kullanılır.

$$\sum d(x, \hat{x})^2 + d(x', \hat{x}')^2 \quad (20)$$

Burada toplam parametre sayısı  $3n+12$ 'dir.  $3n$  ifadesi  $X$  cisim koordinatlarından gelen 3D koordinatlarını, 12 ise  $P'$  kamera matrisinin bilinmeyen sayısıdır. Görüntü

koordinatlarından 3D koordinatlara geçişi sağlayan kamera projeksiyon matrisinin tanımını Eşitlik 21'de verilmiştir.

$$\hat{x} = PX \text{ ve } \hat{x}' = P' X \quad (21)$$

4) Son aşamada ise,  $F, e, e', P, P'$  ve  $X$  değerleri itarasyon sũresince veya hata koşuluna ulaşılıncaya kadar gũncellenir [97].



### 3. BÖLÜM

#### EVİRİMSEL OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

En-iyileme anlamına gelen optimizasyon terimi; bir problemin belirli koşullar için ideal çözümünü elde etmeyi ifade eder. İlgili sayısal problemlerin çözümü için; çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Genel olarak geliştirilen optimizasyon metotları aranan problem çözümüne, bir kazanç fonksiyonunu en-iyilenerek erişilir. Bir optimizasyon probleminin varlığından söz edilebilmesi için; öncelikle bir amaç fonksiyonunun tanımlanmış olması gerekir. Gelişen teknolojinin bir sonucu olarak çözülmesi gereken yeni ve görece daha karmaşık sayısal en-iyileme problemleriyle daha sık karşılaşılmaktadır. En-iyileme problemlerinin analitik modeli her noktasında tanımlı, sürekli ve türevlenebiliyorsa; ilgili problem çözümüne türev tabanlı klasik bir yöntemle (Newton Raphson, Levenberg Marquardt, Resilient Backpropagation vs.) kolayca yakınsanabilir. Ne yazık ki, türev tabanlı metotlar genellikle çok iyi başlangıç çözümlerine ihtiyaç duyar ve iyi bir başlangıç çözümü elde etmek çözüm uzayındaki parametre sayısı arttıkça zorlaşır. Ayrıca ayrık yapıli analitik model çözümlerinde evrilme-adım büyüklüğünü belirleme problemi klasik optimizasyon metotları içinde geçerlidir [98, 99]. Klasik optimizasyon metotlarında arama sürecini durdurmak için kullanılan kriteri belirlemek her zaman çok kolay değildir. Pek çok arka-bahçe problemine sahip olmalarına rağmen klasik optimizasyon metotları analitik model yeterince iyi tanımlanmak koşuluyla hızlı çalışır, oldukça güvenilir sonuçlar üretir ve amaca uygun bir eşik altında kalan çözüm elde edildiğinde kolayca arama süreci sona erdirilebilir. Yine de klasik optimizasyon metotlarının arka-bahçe problemlerinden kurtulmak zordur; bir ara çözüm olarak stokastik gradyan metotlar geliştirilmiştir. Oysa evrimsel algoritmalar genellikle çok iyi bir ilk çözüme ihtiyaç duymaksızın birçok farklı tipteki sayısal problemi çözebilir. Optimizasyon literatüründe en-iyi evrilme adım büyüklüğünü belirleme ve en-iyi evrilme doğrultusunu belirleme problemleri tam olarak çözülmüş değildir. Bu nedenle yeni optimizasyon metotları geliştirmeye olan aktif ihtiyaç sürmektedir [98, 100]. Evrimsel hesaplama yöntemleri; sınırlamalı/sınırlamasız, sürekli/ayrık, lineer/nonlineer, tek/çok çözümlü ve türevlenemez türdeki reel veya tamsayı değerli sayısal problemlerin çözümünde

kullanılan stokastik metotlardır. Stokastik evrimsel hesaplama metotları sezgisel arama metotları olarak adlandırılabilir; sezgisel metotlarla klasik metotların katışık formları meta-sezgisel metotları oluşturur. Meta-sezgisel metotlar klasik metotlar gibi deterministik bileşenler içerir. Ancak, evrimsel hesaplama metotları önemli ölçüde -sistem denklemleri hariç- stokastik yapıdadır [99].

Bu Tez kapsamında evrimsel hesaplama yöntemlerinden; Yapay Arı Kolonisi Algoritması (ABC), Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması (PSO), Cuckoo Arama Algoritması (CK), Diferansiyel Evrimsel Arama (DE), Kovaryans Matrisi Öğrenmeye ve İki Modlu Dağılım Parametre Ayarına Dayalı Diferansiyel Evrimsel (COBiDE), ve Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Evrimsel Arama Algoritması (WDE) kullanılmıştır.

### 3.1. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Sürü zekâsı doğadaki canlıların topluluk davranışlarını canlıların topluluk davranışlarını analogik olarak taklit eden bir yapay zekâ tekniğidir. Bal arılarının besin aramak için sergiledikleri davranışlardan esinlenerek oluşturulan yapay arı kolonisi algoritması (ABC), arıların kendilerine özgü zeki davranışlarını örnek alır [101]. ABC'nin bir kolonisinde işçi arı, gözcü arı ve kâşif arı olmak üzere üç tip arı vardır. İlgili arıların araştırma yaptıkları nektar kaynağının kalitesi kovana yakınlığına, nektarın sahip olduğu özüte ve doluluğuna bağlıdır. Yiyecek kaynakları olası çözümleri ifade eder. İşçi arılar nektar kaynaklarını araştırır ve elde ettiği sonuçları kovana taşırlar. Gözcü arılar ise işçi arıların yaptığı dansı izleyerek nektar araştırması yapar ve nektar kaynağı seçerler. Kâşif arılar ise rastgele yeni kaynaklara giderek yeni nektar kaynağı aramakla görevlidir. Bu işlem rastgele yapıldığı için düşük maliyetli olmaktadır. Popülasyonda işçi sayısı gözcü sayısına eşit olup kaynak sayısı görevli arıların toplamına eşittir. Nektarda yeterince iyi çözüm bulunamadığı zaman işçi arılar kâşif arıya dönüşür, bu işlem limit parametresi ile yapılmaktadır. Çözüm limit deneme sonunda olası çözüm geliştirilememişse işçi arılar nektarı terk ederek kâşif arılara dönüşürler ve kaynak terk edilir [102]. Evrimsel algoritmalar  $K$  problem boyutunu ifade etmek üzere, problem ile ilgili herhangi bir ön bilgi bulunmaması durumunda başlangıç popülasyonunu genellikle Eşitlik 22 ile rastgele oluşturulur.

$$x_{i,Y} = x_{i(L)} + \text{rand}_i[0,1](x_{i(U)} - x_{i(L)}) \quad (22)$$

. Burada,  $x_{i(U)}$  K boyutlu vektörün üst sınırını  $x_{i(L)}$  ise arama uzayının alt sınırını temsil etmektedir. ABC’de işçi arılar nektar kaynağının araştırmasını Eşitlik 23 ile yapmaktadır.

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (23)$$

Burada,  $k \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$ ,  $j \in \{1, 2, 3, \dots, K\}$  olmak üzere N nektar kaynak sayısı, K problem boyutunu,  $x$  mevcut nektar kaynağını ve  $v$  yeni belirlenen nektar kaynağını ifade etmektedir. Arılar daha verimli çözümlere/kaynaklara ulaştıkları zaman yeni çözümü hafızalarında tutarlar. İşçi arıların hepsi arama işlemlerini bitirdikleri zaman kaynak pozisyonları/olası çözümleri gözcü arılarla paylaşırlar. Gözcü arılarda işçi arılardan gelen bilgilere göre nektar miktarlarını değerlendirir ve yeni kaynaklar seçer. Her bir  $i$  kaynağın seçilme olasılığı  $p_i$  seçilen kaynağın toplam kaynaklardan elde edilen uygunluk değerine bölünmesi ile Eşitlik 24 ile gösterildiği gibi elde edilir [103, 104].

$$p_i = \frac{fit}{\sum_n^N fit_n} \quad (24)$$

ABC algoritmasının temel adımları aşağıda verilmiştir.

1. Başlangıç için işçi arı sayısı kadar rastgele popülasyon (P) oluştur.

#### **Başla**

- 
2. Nektara giden her işçi arı için kaynak civarında çözüm bul ve kalite değeri hesapla.
  3. Gelen bilgilere göre kaynakların seçilme olasılıklarını belirle.
  4. Gözcü arıları belirlenen olasılığa göre arama yapması için kaynaklara gönder.
  5. Tüketilen kaynakları terk et, kâşif arıları kullanarak yeni kaynaklar bul.
  6. En iyi çözümü hafızada tut.

---

#### **-e kadar (Durdurma kriteri)**

### 3.2. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu Algoritması

Sürü hareketlerinden esinlenerek geliştirilen diğer algoritma; Parçacık Sürüsü Optimizasyonu algoritması (PSO)'dır. PSO algoritması; J.Kennedy ve R.C.Eberhart tarafından 1995 yılında kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş stokastik ve popülasyon tabanlı bir algoritmadır [105]. Çok değişkenli ve lineer olmayan problemlerin çözümü için geliştirilen PSO, GA gibi evrimsel hesaplamalı yöntemlerine çok benzer. Sürü halinde hareket eden kuşlar yiyecek araması yaparken kendisine en yakın olan kuşu örnek alır. Parçacık olarak ifade edilen çözüm sürüyü oluşturan kuşu sembolize etmektedir. Her parçacık yeni bir hareket sağladığında uygunluk değeri oluşturur ve parçacıkların hızı, koordinatları ve o ana kadarki en iyi uygunluk değeri hafızaya kaydedilir. Çözüm uzayının her boyutundaki uygunluk değeri sürünün ve kendinin en iyi uygunluk değerinin veren hız ve koordinat değerleri ile belirlenmiş olur. Algoritmik olarak rastgele çözümler üretilir, her iterasyonda lokal ( $pbest$ ) ve global ( $gbest$ ) olarak isimlendirilen koordinatlar hafızada tutularak en iyi iki çözümler belirlenir. Burada, D problem parametre sayısını ifade etmek üzere i. parçacığın konumunu veren vektör  $pbest_i = [p_{i1} \ p_{i2} \ \dots \ p_{iD}]$  ve hızı veren vektör  $v_i = [v_{i1} \ v_{i2} \ \dots \ v_{iD}]$ 'dir. Tüm parçacıkların en iyi konumunu veren  $gbest = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_D]$  vektörü tektir. Her iterasyonda en iyi parametreyi bulmak için parçacığın hızı ve konumu Eşitlik 25 ile elde edilir.

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \times rand_1^k \times (pbest_i^k - x_i^k) + c_2 \times rand_2^k (gbest^k - x_i^k) \quad (25)$$

Eşitlikte  $c_1, c_2$  öğrenme katsayılarıdır. Bu katsayılar parçacık konumlarının en iyilenmesinde etkili olarak stokastik hızlanmayı sağlamaktadır.  $c_1$  katsayısı bireysel tecrübeler göre parçacıkların hareket etmesini sağlarken  $c_2$  sürüde bulunan diğer parçacıkların tecrübelerinden faydalanarak hareket etmeyi sağlamaktadır. Bu katsayıların iyi belirlenmesi arama uzayındaki arama adım büyüklüğünü belirlediği için algoritma performansını etkilemektedir. Algoritmanın güncelleme işlemi Eşitlik 26 ile yapılmaktadır [106].

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (26)$$

### 3.3. Guguk Kuşu (Cuckoo) Arama Algoritması

Guguk kuşlarının yumurtlama süreçlerinin bio-esinlenmesi ile oluşturulan evrimsel hesaplama tabanlı Cuckoo Arama Algoritması (CS) Xin-She ve Suash-Deb tarafından geliştirilmiştir. Guguk kuşları yavrularının büyütülmesi için kendi yumurtalarını başka kuşların yuvalarına bırakarak onların büyütmesini sağlarlar. Guguk kuşlarının bu içgüdüsel hareket ile (brood parasitism) yumurtayı bıraktıkları yuva sahibi yumurtaları iki farklı şekilde değerlendirebilmektedir. Eğer yumurtanın kendine ait olmadığını anlarsa yumurtayı aşağı atabilmekte veya kendisi yuvayı terk edebilmektedir. Diğer bir ihtimal ise ev sahibi yumurtayı ayırt edememekte ve kendi yavrusuymuşçasına kuluçkaya yatmaya devam etmektedir. Yeni doğan guguk kuşları yumurtadan çıktıkları zaman yuvaya gelen yiyeceğin büyük çoğunluğunu yemekte ve ev sahibi diğer kuşların yavrularına zarar vermektedir [107, 108]. Farklı tipteki problem çözümü için geliştirilen CS algoritmasının genel kural bütünü;

- Guguk kuşu rastgele belirlediği yuvaya yalnızca bir adet yumurta bırakabilir,
- Yuva sayısı değişkenlik göstermeyip sabit olarak kabul edilmektedir,
- Yuvada daha önceden bırakılan bir yumurta var ve sonradan bırakılan yumurtadan daha iyi ise soy devamlılığı kaliteli olan yumurtadan devam edecektir,
- Ev sahibi kendine ait olmayan yumurtayı  $p \in [0,1]$  olasılığı ile tanıyacak veya yuvadan gidecek ya da yumurtayı yuvadan aşağı atacaktır.

Arama stratejisi olarak Levy Flight uçuşu kullanarak rastsal arama işlemini bölgesel ve global yürüyüşün dengelenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu arama işlemi parametrelere bağlı olarak yapılmaktadır. Lokal arama işlemi için Eşitlik 27'da gösterilen denklemi kullanmaktadır.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \alpha s \otimes H(p - \epsilon) \otimes (x_j^k - x_i^k) \quad (27)$$

Burada,  $\alpha > 0$  Gauss dağılımı ile belirlenen rastsal ölçek faktörü,  $s$  adım büyüklüğü,  $x_j^k$  ve  $x_i^k$  çözümlerin rastsal permüt edilmiş çözümleri,  $\otimes$  Hadamard çarpımı,  $H$  Heaviside adım fonksiyonu,  $\epsilon$  uniform dağılımdan gelen rastsal bir sayıdır. Rastsal çözümlerin belirlenmesinde kullanılan küresel aramada stratejisi Eşitlik 28 kullanılmaktadır.

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \alpha L(s, \lambda) \quad (28)$$

L fonksiyonu Eşitlik 29 ile elde edilmektedir [104].

$$L(s, \lambda) \sim \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin(\pi \lambda / 2)}{\pi} \frac{1}{s^{1+\lambda}} \quad (s \gg 0) \quad (29)$$

### 3.4. Diferansiyel Evrimsel Arama Algoritma (DE)

Price ve Storn tarafından 1955 yılında geliştirilen Diferansiyel Evrimsel Algoritma (DE) lineer olmayan problemlerin çözümü için tasarlanmış popülasyon tabanlı stokastik bir arama algoritmasıdır. Gerçek hayat problemlerinde GA'nın parametre çözümünde yetersiz kalmasından dolayı DE algoritması geliştirilmiştir. DE algoritması global optimizasyon için sade yapısı, kolay anlaşılabilirliği ve basit yapısından dolayı özellikle sürekli verilerin olduğu problemlerde çözüm sağlamakta ancak kararsız yakınsama davranışı göstermektedir. Böylece yerel çözümlere kolaylıkla takılabilmektedir. İteratif olarak arama yapan DE algoritması yapısal olarak GA gibi mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerini kullanmaktadır. GA'da olduğu gibi ilgili operatörler rastgele oluşturulan popülasyona sırasıyla uygulanmamaktadır. Burada farklı üç kromozom rastgele popülasyondan seçilir ve yeni bireyler oluşturulur (mutasyon ve çaprazlama). Operatörlerin uygulanması ile oluşturulan yeni kromozomlar bir önceki kromozomdan daha iyi birey oluşturursa (uygunluk değeri daha iyi bireyler) bir sonraki popülasyona aktarılmaktadır (seçim). Arama uzayını genişletmek için kullanılan mutasyon operatörü Y'inci nesilde  $x_{i,Y}$  vektörü ile yeni bir mutant  $v_{i,Y+1}$  vektörü oluşturur.

$$v_{i,Y+1} = x_{r_1,Y} + \alpha(x_{r_2,Y} - x_{r_3,Y}) \quad (30)$$

Burada,  $i, r_1, r_2, r_3$  popülasyondan rastgele seçilen birbirinden farklı tamsayılardır.  $\alpha$  adım büyüklüğü  $[0,2]$  aralığında olan ölçek faktörüdür. Ölçek büyüklüğü arttıkça global arama yeteneği artarken, ölçek faktörü azaldıkça yakınsama hızı artmaktadır. DE algoritmasında yeni nesillerin oluşması için popülasyon sayısı en az 4'tür ve yeni oluşacak nesillerin birbirinden farklılaşması için çaprazlama operatörü kullanılmaktadır. Çaprazlama operatörü;

$$u_{j,i,Y+1} = x_{j,i,Y} \begin{cases} x_{j,i,Y+1} & \text{eğer } rand_{j,i} \leq CR \text{ veya } j = I_{rand} \\ x_{j,i,Y} & \text{eğer } rand_{j,i} > CR \text{ ve } j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (31)$$

ile tanımlanır. Burada,  $j = [1, 2, \dots, K]$ ,  $rand_{j,i} \in [0, 1]$  aralığında üretilen rastgele sayı olmak üzere  $CR \in [0, 1]$  aralığında belirlenen çaprazlama operatörünü,  $I_{rand} \in [1, 2, \dots, K]$  ise aralığında seçilmiş indistir. DE algoritmasında bir sonraki neslin oluşturulması açgözlü seçim ile gerçekleştirilir. Aç gözlü seçim ile deneme vektörü olan  $u_{j,i,Y+1}$  ile elde edilen amaç fonksiyon değeri bir önceki nesilden daha iyi ise yeni nesillere aktarılır.

### 3.5. Kovaryans Matrisi Öğrenmeye ve İki Modlu Dağılım Parametre Ayarına Dayalı Diferansiyel Gelişim Algoritması (COBIDE)

Wang ve arkadaşları tarafından 2014 yılında geliştirilen Kovaryans Matrisi Öğrenmeye ve İki Modlu Dağılım Parametre Ayarına Dayalı Diferansiyel Gelişim Algoritması (COBiDE) algoritması, DE algoritmasının modifiye edilmiş ve geliştirilmiş bir versiyonudur. DE algoritmasının yapısı gereği popülasyon büyüklüğü dışında çaprazlama operatörü (CR) ve adım büyüklüğü ( $\alpha$ ) olmak üzere iki adet kontrol parametresi vardır. CR operatörünün sayısal değeri arttıkça deneme vektörüne mutant vektörden daha fazla bilgi aktarılacağından çeşitlilik artmaktadır. CR operatörünün daha küçük sayısal değeri yerel sömürüye odaklanır, çünkü hedef vektör deneme vektörüne daha fazla katkıda bulunur. DE'nin yaygın olarak kullanılan çaprazlama operatörleri, esas olarak koordinat sistemine bağlıdır ve rotasyondan bağımsız süreçler değildir. Temel olarak COBiDE algoritması kovaryans matris öğrenme ve bimodal dağılım parametre ayarı olmak üzere iki bileşenden oluşur. Kovaryans matris popülasyonu oluşturan bireylerin kullanılması ile oluşturulmaktadır. COBiDE'de, kovaryans matrisi öğrenmesi, mevcut popülasyon dağılımına göre bir koordinat sistemi kurar ve daha sonra çaprazlama operatörü ve deneme vektörünü oluşturmak için oluşturulan koordinat sistemine göre uygulanır. Dahası, COBiDE'de küresel keşif ve evrim sırasında yerel sömürüyü dengelemek için hem  $\alpha$  hem de CR'nin sayısal değerlerinin üretilmesi aşamasında Cauchy dağılımından oluşan iki modlu bir dağılım kullanır. COBiDE algoritması pb ve ps olmak üzere iki kontrol parametresinden oluşmaktadır. Burada ps  $[0, 1]$  aralığındadır ve kovaryans matrisi hesaplamak için popülasyondaki minimum objektif fonksiyon değerlerine sahip bireylerin çarpılmasında kullanılır. Yani, mevcut popülasyondaki üst bireylerinin kovaryans matrisini hesaplamak için kullanılır. Böylece, eigen koordinat sistemi rastsallığa uygun olarak makul düzeyde oluşturulur.

Kovaryans matris öğrenmenin asıl amacı DE'nin koordinat sistemine bağımlılığını ve değişkenlerin etkileşimini azaltmaktır. CR'nin orijinal koordinat sistemine uygulanması ile sistemin çeşitliliğinin artırılarak performansının ayarlanması için [0, 1] aralığında olan pb parametresi kullanılır [109].

### 3.6. Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Evrimsel Arama Algoritması (WDE)

Ağırlıklandırılmış Diferansiyel Arama Algoritması (WDE) sürekli-ayrık, doğrusal-doğrusal olmayan, tek modlu-multimodal veya klasik problemlerin çözümü için geliştirilmiştir ve yapısal olarak klasik DE'ye dayanmaz. WDE Çivicioğlu, Beşdok, Günen ve Atasever tarafından geliştirilmiştir. DE birçok problemin çözümünde kullanılan güçlü bir evrimsel hesaplama algoritmasıdır. Pek çok problem tipinin çözümü için DE'nin global arama özelliği yeterlidir. Ancak, arama uzayı büyüklüğü arttıkça DE algoritmasının hızı yeterli gelmemekte ve problem çözümünde etkisiz kalmaktadır. DE gürbüz, uygulanması kolay ve yapısal olarak basit olmasına karşın lokal arama özelliği bazı problem tipleri için yetersizdir. Oluşturduğu popülasyonun çeşitliliğini hızlı değiştirme eğiliminde olması DE'nin evrimsel yön ve adım büyüklüğünün etkin belirlenmesinde yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, sahip olduğu kontrol parametrelerinin belirlenmesi uzmanlık isteyen, zor, zaman alıcıdır ve problem tipine bağlı olmasından dolayı problem çözümü ilgili kontrol parametrelerine karşı oldukça hassastır. DE algoritmasının ilgili sorunlara karşı zayıflıklarının üstesinden gelmek için geliştirilen ve problem çözüme başarısı problem tipine bağlı olmayan WDE algoritmasının kontrol parametresi yoktur. WDE yinelemeli olmayan, aç gözlü seçim yapan, iteratif çalışan ve eşgüdümlü işlemleri çok etkin sürdüren bir algoritma olmasından dolayı lokal çözümlere kolaylıkla takılmamaktadır. Çaprazlama ve mutasyon süreci DE algoritmasından çok daha basit ve verimlidir. Rastgele çaprazlama tabanlı strateji izleyerek daha iyi deneme paternleri oluşturulurken ilgili paterni oluşturan bireylerin bazısını veya bütünü rastgele seçip değiştirmektedir. WDE her problem tipi için DE gibi farklı bir mutasyon seçimine dayanmaz ve popülasyon çeşitliliğinde ani değişime izin vermez. Bu nedenle, DE'nin aksine, ilerleyen iterasyonlarda etkili aramalar yapmaya devam edebilir [110]. WDE'de başlangıç popülasyonunu ( $P$ ) üretme Eşitlik 32 ile tanımlanmıştır;

$$P_{(i_0, j_0)} \sim \mathbf{U}(low_{(j_0)}, up_{(j_0)}) \mid \begin{pmatrix} 2N, & D \\ \text{rows} & \text{columns} \end{pmatrix} \leftarrow size(P) \quad (32)$$

Burada,  $i_0 = [1: 2N]$ ,  $j_0 = [1: D]$ , ayrıca  $i, i_0, j_0 \in \mathbb{Z}^+$ . Eşitlik 32'de  $N$  ve  $D$  sırasıyla pattern vektör sayısı ve problem boyutunu,  $low_{j_0}, up_{j_0}$  sırasıyla alt ve üst arama limitlerini,  $U(\cdot)$  sürekli düzgün dağılımı belirtmektedir. Amaç fonksiyon değeri  $P_{i_0}$  Eşitlik 33 ile hesaplanır;

$$fitP_{(i_0)} = \mathcal{F}(P_{(i_0)}) \quad (33)$$

$\mathcal{F}$  amaç fonksiyonunu göstermektedir. İlk seçim aşaması başlangıç popülasyonu olan  $P$ 'den  $SubP$ 'yi üretme ile başlanmaktadır. Her iterasyonda  $N$  pattern vektörü  $P$ 'den rastgele seçilerek  $SubP$ 'yi üretir. Burada,  $\begin{pmatrix} N, & D \\ \text{rows} & \text{columns} \end{pmatrix} \leftarrow size(SubP)$ 'dir.  $SubP$  permüt edilerek işleme devam edilir;

$$SubP = P_{(k)} \mid \{k = j_{(1:N)} \mid j = permute(1: 2N)\} \quad (34)$$

Eşitlik 34'te  $permute(\cdot)$  permüt etme fonksiyonunu ifade eder. WDE başlangıç pattern vektör sayısının iki katını kendi içinde oluşturarak işleme başladığı için  $SubP$  oluşturulurken başlangıç pattern vektörü sayısı kadarı işleme alınır.  $SubP$ 'nin patern vektörünün amaç fonksiyon değeri  $fitSubP$  Eşitlik 35 ile gösterilmiştir.

$$fitSubP = fitP_{(k)} \quad (35)$$

Geliştirilen yeni mutasyon süreci yeni patern vektörler ( $TempP$ ) üretmeyi amaçlar. Her

$$\text{iterasyonda WDE'nin } TempP_{index=1:N} = \begin{bmatrix} TempP_1 \\ \dots \\ TempP_N \end{bmatrix} \text{ vektörünü yeniden üretmesi Eşitlik 36}$$

ile gösterilmiştir.

$$TempP_{(index)} = \sum (w \circ P_{(l)}) \mid l = j \setminus k \text{ (} j \text{ ve } k \text{ için Eşitlik 34'e bakınız)} \quad (36)$$

Burada, ‘ $\circ$ ’ sembolü eleman eleman çarpımı ifade eden Hadamard operatörüdür. Ayrıca,  $index = 1 : N \in \mathbb{Z}^+$ ,  $w^* = \kappa_{(N)}^3$  |  $[N, 1] = size(w^*)$  ve rastsal oluşturulan  $\kappa_{(N)}^3$  değerinin normalleştirilmesi  $w^* := \frac{w^*}{\sum w^*}$  işlemi ile gerçekleştirilir. Elde edilen patern vektörün sütun sayısı problem boyutu ile aynı olması gerektiği için;  $w = w^* \times \Delta$  ve  $\Delta = [1]_{(1, D)}$ ’dır. WDE’de mutasyon süreci güncellenen  $M_{(1:N, 1:D)} = 0$  matrisi ile kontrol edilir. Her iterasyonda güncelleme işlemi Eşitlik 37 ile yapılır.

$$M_{(index, J)} := 1 \quad (37)$$

Burada,  $J = V(1 : \lceil K \times D \rceil)$  |  $V = \text{permute}(j0)$ ’dir.  $K$  koşullu şart ifadesi;

$$\text{If } \kappa_{(1)} < \kappa_{(1)} \text{ then } K = \kappa_{(1)}^3 \text{ else } K = 1 - \kappa_{(1)}^3 \quad (38)$$

Eşitlik 38’de,  $\alpha, \beta, \kappa \sim U(0, 1)$ ,  $(\cdot) = size(\kappa_{(\cdot)})$ ’dir.  $\kappa_{(\cdot)}$  her kullanıldığında gerçek değerli uniform rastgele  $(\cdot)$  boyutlu sayı üretir. WDE’de, evrimsel adım büyüklüğü (ölçek faktörü) Eşitlik 39’da verilen kurala göre üretilir.

$$\begin{aligned} \text{if } \kappa_{(1)} < \kappa_{(1)} \text{ then } F &= [\lambda_{(D)}^3]' \quad | \quad \begin{matrix} [ 1 , D ] = size(F) \\ \text{rows columns} \end{matrix} \\ \text{else } F &= (\lambda_{(N)}^3 \times \Delta) \quad | \quad \begin{matrix} [ N , D ] = size(F) \\ \text{rows columns} \end{matrix} \end{aligned} \quad (39)$$

Deneme vektörü ( $T$ ) daha sonra Eşitlik 40 kullanılarak üretilir.

$$T = \text{SubP} + F \times M \circ (\text{TempP} - \text{SubP}_{(m)}) \quad | \quad m = \text{permute}(i) \mid m \neq [1 : N] \quad (40)$$

Problem tipine bağlı olarak; arama uzayında elde edilen çözümlerin alt ve üst sınırlarda kalması istendiğinde ilgili  $T \notin [low \ up]$  değerler, Eşitlik 41 ve Eşitlik 42 kullanılarak güncellenir.

$$\text{if } (T_{(i, j0)} < low_{(j0)}) \text{ then } T_{(i, j0)} = low_{(j0)} + \kappa_{(1)}^3 (up_{(j0)} - low_{(j0)}) \quad (41)$$

$$\text{if } (T_{(i, j0)} > up_{(j0)}) \text{ then } T_{(i, j0)} = up_{(j0)} + \kappa_{(1)}^3 (low_{(j0)} - up_{(j0)}) \quad (42)$$

$T_{i=1:N}$  vektörlerinin maliyet fonksiyonu değerleri Eşitlik 43 kullanılarak üretilir.

$$fitT = \mathcal{F}(T) \quad (43)$$

$\text{SubP}$  ve  $fit\text{SubP}$  değerleri  $T$  ve  $fitT$  kullanılarak aç gözlü seçim kuralına göre güncellenir.

$$\text{if } \left( \text{fit}T_{(i^*)} < \text{fitSub}P_{(i^*)} \right) \text{ then } [\text{Sub}P_{(i^*)}, \text{fitSub}P_{(i^*)}] := [T_{(i^*)}, \text{fit}T_{(i^*)}] \quad | \quad i^* \in i \quad (44)$$

Güncellenmiş  $\text{Sub}P$  ve  $\text{fitSub}P$  değerleri  $P_{(i)}$  ve  $\text{fit}P_{(i)}$  değerini güncellemek için kullanılır.

$$[P_{(i)}, \text{fit}P_{(i)}] := [\text{Sub}P, \text{fitSub}P] \quad (45)$$

WDE, global bir çözüm için Eşitlik 46'yı kullanır.

$$[\text{gmin}, \text{gbest}] = [\text{fit}P_{(\gamma)}, P_{(\gamma)}] \quad | \quad \text{fit}P_{(\gamma)} = \min(\text{fit}P) \quad , \quad \gamma \in i \quad (46)$$



## 4. BÖLÜM

### KAMERA KALİBRASYONU

Kamera Kalibrasyonu, optik görüntüleme sistemlerinin doğasından kaynaklanan, geometrik ve radyometrik deformasyonların etkilerinin giderilmesi zorunluluğundan dolayı hesaplamalı-görü uygulamalarında kaçınılmaz bir süreçtir. Geometrik deformasyon; piksellerin uzamsal pozisyonunu bozduğundan, ilgili görüntülerden doğru metrik bilgi elde edilemez. Optik görüntülerden yüksek doğruluklu metrik bilgi elde etmek için, geometrik deformasyona neden olan kamera sistemi parametrelerinin elde edilmesi gerekir. Metrik bilgi çıkarımında kullanılan iç yöneltme parametreleriyle (odak uzaklığı, distorsiyon bilinmeyenleri, basıklık ve asal nokta konumları) kamera pozisyonu ve yönelimlerinin tahmininde kullanılan dış yöneltme parametreleri (dönüklük ve öteleme bilgileri) kamera kalibrasyonu ile elde edilir. Yüksek doğrulukta fotogrametrik ürünler üretmek için, iç ve dış kamera kalibrasyon parametreleri yüksek doğruluk seviyesinde elde edilmelidir [111-113]. Kamera Kalibrasyon problemini çözmek için çok sayıda matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modeller genellikle; görüntü piksel koordinatlarını girdi, ilgili cisim koordinatını ise çıktı olarak kullanmaktadır. Kamera kalibrasyon problemi çok çözümlü bir problem olduğundan optimum çözümünün aranması oldukça özen gerektirir. Literatürde sunulan kamera kalibrasyon yöntemlerinde, piksel koordinatlarının elde edildiği algoritmalar, cisim koordinatlarının elde edildiği yaklaşımlar ve kullanılan ilgili kalibrasyon yüzeyleri birbirinden farklılık göstermektedir [114, 115].

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, kamera kalibrasyon probleminin çözümü; ilgili kamera-matematiksel modelinin çözümü (lineer ve iki aşamalı) ve ilgili kalibrasyon yüzey boyutu (3D, 2D ve 1D) göz önüne alınarak incelenmiştir.

Kamera kalibrasyonu için ilgili kamera modelinin çözümünde lineer metotlar kullanan yöntemler, cisim ve görüntü uzayları arasındaki dönüşüm matrisinin doğrudan

hesaplanmasına dayanır. Cisme ait çoklu görüntülerden elde edilen 3D cisim koordinatlarıyla bu noktaların eşlenik olduğu 2D projekte edilmiş görüntü koordinatları arasındaki dönüşüm matrisi; genellikle çok sayıdaki referans noktasını kullanarak dengelemeli çözüm sağladığı için en küçük kareler yöntemi ile çözülmektedir. İlgili yöntemde iki uzay arasındaki ilişki kamera projeksiyon matrisi (P) ile sağlanmaktadır. P matrisi  $3 \times 4$  boyutlarında olup, elde edilmesi için homojen cisim koordinatlarına ihtiyaç vardır. En küçük kareler yöntemi lineer kamera kalibrasyon modelini hızlı bir şekilde çözebilmektedir. Ancak, ilgili kalibrasyon modeli lens distorsiyonlarının çözümünde yetersizdir ve kaba sonuçlar üretir. P matrisi ayrıştırılarak iç yönelme elemanlarının elde edilmesi yöntemi, ancak kaba sonuçlar üretebildiğinden metrik veri üretim süreçlerinde kullanımı uygun değildir [8, 116-119].

Lineer kamera kalibrasyonu ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde; P matrisinin tahmin edilmesinde ve tahmin edilen matrisin ayrıştırılmasında farklılıklar görülür. Lineer kamera kalibrasyonları ile ilgili çalışmalar ilgili makalelerden görülebilir [117, 120, 121].

Lineer kamera kalibrasyon yöntemlerinin hesaplama hızının yüksek olmasına karşın, ilgili lens distorsiyonlarını hesaba katmadığından yüzey geri çatımında ve iç yönelme elemanlarının elde edilmesinde ancak kaba sonuçlar sağlarlar. Lineer olmayan yöntemler kamera kalibrasyon probleminin çözümünde; genellikle iki aşamalı çözüm sunar. İlk aşamada; lineer bir yöntemlerle ilgili kamera kalibrasyon parametrelerinin başlangıç-çözümü elde edilirken, ikinci aşamada çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilen başlangıç-çözümü geliştirilir. İlk aşamada elde edilen yaklaşık parametre değerlerinin kalitesi, optimizasyon sürecinin verimli ilerlemesi açısından önemlidir. İlgili lineer yöntemler gürültülü verilere karşı çok duyarlı olduğundan; gürültü seviyesinin belirli değerin üzerine çıkması başlangıç-çözümün düşük kalitede elde edilmesine neden olur. Lineer olmayan kamera kalibrasyon yöntemleri genellikle, ilgili kamera sistem modeli parametreleriyle ifade edilen kamera analitik modelini gradyan tabanlı optimizasyon yöntemlerinden (Newton, Gauss-Newton ve Levenberg-Marquardt vs.) yararlanarak çözer. En küçük kareler yöntemiyle çözüm yapılmadan önce ilgili veride var olan gürültünün bastırılması gerekir [10, 19, 122, 123]. İki aşamalı yöntemlerle kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesinde karşılaşılan en büyük problem lokal minimuma takılma ve çözüme yakınsayamamadır. Başlangıç çözümü ne

kadar iyi belirlenirse optimum sonuca yakınsama ihtimali de o kadar artar. İki aşamalı çözümler kullanılarak yapılan çalışmalar ilgili makalelerde bulunabilir [8, 114, 118, 124].

Kamera kalibrasyon parametrelerin kalitesi etkileyen bir diğer faktör; kamera kalibrasyon yüzeyinin boyutudur. 3D kalibrasyon yüzeylerinde ilgili cisim-koordinatları doğrudan jeodezik metotları ve aletleriyle belirlenir. Kalibrasyon yüzeyinin hareket ettirilmesi halinde her pozisyonda yeniden konum ölçüsü almak zorunluluğu ek maliyet ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bu yöntemde kalibrasyon yüzeyi olarak genellikle kübik yüzeyler tercih edilir ve her yüzeyden farklı bakış açılarında görüntü elde edilir [8, 14, 121].

1D yüzeylerinin kullanıldığı kamera kalibrasyon yöntemlerinde çoklu görüntüler arasındaki eşlenik anahtar noktaların koordinatları kullanılarak ilgili kamera kalibrasyon parametreleri elde edilir. Oto-kalibrasyon olarak da bilinen bu yöntemlerde, herhangi bir kalibrasyon yüzeyi kullanılmamaktadır. İlk olarak Maybank ve Faugeras tarafından tanıtılan yöntem [125], farklı yaklaşımlarla geliştirilmiştir [126-130]. Yöntem, kamera kalibrasyon parametrelerini elde ederken kamera konumuna bağlı olarak çeşitli epipolar dönüşümleri kullanır. İlgili yöntem herhangi bir kalibrasyon yüzeyine ihtiyaç duymaz, hatalı ölçümlerde işlem tekrarını kaldırır, kasıtlı-kasıtsız odak uzaklığının değişimi veya ani ısı değişiminin meydana getirdiği etkileri modelleyebilir. İlgili yöntemle kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi ve 3D sahne geri çatımının yapılması için sahneye ait en az farklı bakış açılarından elde edilmiş 3 görüntü gereklidir [131]. Yöntem temelde mutlak koniğin belirlenmesine dayanır ve bilinen nesne soyut geometrik yapı olan mutlak konik ile değiştirilir. Mutlak konik kamera konum ve dönüklüğünden bağımsızdır. Mutlak koniğin konumu tam olarak bilinmektedir ancak mutlak konik hayalidir ve gerçekte olmadığından her görüntü için ayrı-ayrı mutlak konikler oluşturulmaktadır ve bir görüntüden diğer görüntüye homografi eşitliği ile mutlak konik transferi mümkündür. Homografi ise eşlenik görüntü koordinatlarından hesaplanmaktadır. Dolayısıyla iç yöneltme elemanları mutlak konikten elde edilebilmektedir. Kruppa eşitliğinden yararlanarak, mutlak koniğin epipolar kısıtlamalarını yerine getirmesi sağlanır [132, 133].

Pratik uygulamalar için kamera kalibrasyonu probleminin çözülmesinde genellikle bir 2D kalibrasyon yüzeyinden elde edilen koordinat bilgileri kullanılır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde; sağladığı kullanım kolaylığı, üretim ve taşınabilirlik gibi avantajlarından dolayı dama tahtası desenli 2D kalibrasyon yüzeyi kullanılmıştır.

İlgili kamera kalibrasyon yüzeyi dama tahtası deseninde, sıralı karelerden oluşan ve tek düzlemlidir. Cisim ve görüntü anahtar noktalarının koordinatlarının elde edilmesi için kenar yakalayıcılar kullanıldığından ek donanıma ihtiyaç duyulmadığından oldukça pratiktir. Ayrıca, köşe bulma algoritmalarının daha iyi performans göstermesinden, kenar bilgisinin daha rahat belirlenmesinden ve kenar keskinlik farkının belirgin olmasından dolayı dama tahtası desenli yüzey tercih edilmiştir [134]. Kamera kalibrasyonu probleminde farklı desenlere sahip yüzeyler de kullanılmaktadır [12, 135]. Ayrıca, kalibrasyon yüzeyinin tasarımı da farklılık gösterebilmektedir; ortogonal iki-üç düzlemliler [136] veya tek düzlemliler [114, 118]. 2D yüzeyin iki farklı görüntüden elde edilen anahtar noktalar ve komşu piksellerin koordinatları bir özellik uzayı oluşturur. Özellik uzayının elemanı olan bir anahtar-nokta şekil, ölçek ve dönüklüklerden bağımsız olarak belirlenebilmelidir. Özellik uzayı ayırt edilebilir, gürültüye karşı gürbüz ve deformasyonlara karşı etkili olmalıdır. Homolog ışınların kesiştirilerek stereo modellerin oluşturulması aşamasında anahtar noktalar kullanıldığından çok sayıda anahtar nokta bulma algoritması geliştirilmiştir [137-140].

Tez kapsamında hızlı ve gürbüz sonuç üretmesinden dolayı SURF anahtar nokta yakalayıcı kullanılmıştır.

#### **4.1. Kamera Modeli**

Bu bölümde optime edilecek kamera kalibrasyon parametrelerinin yaklaşık değerlerinin elde edilmesinde kullanılan kamera modeli tanıtılmıştır. Kamera kalibrasyon parametrelerinin doğru hesaplanması, kantitatif geometrik ölçüm yapabilmenin ön koşuludur. Gerçek projeksiyon parametreleri çok fazla unsura bağlı olduğu için lens üretici firmaları tarafından genellikle son kullanıcıya sunulmaz. Fotogrametrik ve bilgisayarlı görü uygulamalarında en sık kullanılan ve kamera modelinin çözümünde iki aşamalı yöntemleri kullanan Zhang kamera modeli tez kapsamındaki uygulamalarda kullanılmıştır. Kullanılan kamera modelinde görüntü ve cisim/uzay koordinat sistemi arasındaki ilişkinin kurulması oldukça önemlidir.

Sahneye ait elde edilen 2D görüntü piksel koordinatları  $m = [u, v]^T$  ve 3D cisim koordinatları  $M = [X, Y, Z]^T$  olarak ifade edilmektedir. Modelin matematiksel çözümünün ilk aşamasında konum vektörlerinin son satırına 1 eklenmesi ile  $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$  ve  $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$  şeklinde homojen koordinatlar elde edilmiş olur. Homojen koordinatlar projektif dönüşüm yapılırken hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. Dönüşümde kullanılan kamera projeksiyon matrisi,  $P = [KR|T]$ , kamera iç ve dış yöneltme parametrelerini içerir. Homojen cisim koordinat sistemi ile homojen görüntü koordinat sistemi arasındaki ilişki Eşitlik 47’de verilmiştir.

$$\gamma \tilde{m} = P\tilde{M} \quad (47)$$

Burada  $\gamma$  rastgele seçilen ölçek parametresi,  $(R, T)$  cisim ve görüntü koordinat sistemleri arasındaki sırayla dönüklük ve öteleme bilgisini içeren dış yöneltme parametreleridir. Dönüklük bilgisini içeren R matrisinin her bir doğrultu vektörü ortogonal olma şartını yerine getirmek zorundadır. Vektörlerin ortogonalitesini sağlamak için genellikle tekil değer ayrıştırma (SVD) yöntemi kullanılmaktadır.  $(\alpha, \beta, \phi)$  açıları, kameranın resim çekim anındaki cisme göre dönüklük açılarıdır ve saat yönünde tanımlanmaktadır. Her bir eksenin dönüklük matrisi Eşitlik 48’de ifade edilmiştir.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\ R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \\ R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (48)$$

Eşitlik 48’de verilen rotasyon matrislerinin Z-Y-X sıralamasına göre tanımladıkları dönme matrisi  $R = R_z(\phi)R_y(\beta)R_x(\alpha)$ , Eşitlik 49’da tanımlanmıştır;

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \beta & \cos \phi \sin \beta \sin \alpha - \sin \phi \cos \alpha & \sin \phi \sin \alpha + \cos \phi \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \phi \cos \beta & \cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \beta \sin \alpha & \sin \phi \sin \beta \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \\ \sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (49)$$

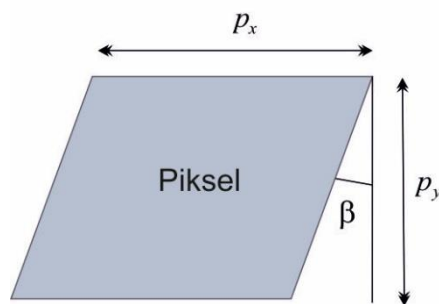
Kamera projeksiyon matrisi  $P$ ;  $P=[K \cdot R | T]$ 'de ifade edilen iç yöneltme parametreleri, Eşitlik 50'de verilen  $K$  matrisinde verilmiştir;

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$F$  dünya biriminde (mm) odak uzaklığı olmak üzere  $(f_x, f_y)$  ifadelerinin oldukça iyi yaklaşık değerleri Eşitlik 51 ile elde edilir.

$$\begin{aligned} f_x &= F / p_x \\ f_y &= F / p_y \end{aligned} \quad (51)$$

Eşitlik 51'de;  $(p_x, p_y)$  ilgili kamera sensör boyutlarının görüntü boyutlarına bölünmesiyle hesaplanan piksel fiziksel-boyutlardır. Eşitlik 50'de;  $(u_0, v_0)$  asal nokta koordinatlarını ve  $s$  ise iki görüntü eksenleri arasındaki çarpıklık değerini açı ile tanımlayan piksel basıklık oranını tanımlayan parametredir. Şekil 18'de piksel basıklık oranı ve piksel boyutları arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 18. Piksel basıklık oranı ve piksel boyutları arasındaki ilişki

Piksel basıklık oranı,  $s$ , Eşitlik 52 kullanılarak hesaplanır.

$$s = f_y \tan(\beta) \quad (52)$$

Görüntü eksenleri birbirine dik ise  $s=0$ , aksi halde  $s \neq 0$ 'dır. Zhang kamera modelinde, epipolar geometriyi doğrudan kullanmak yerine kamera kalibrasyon bilinmeyenlerinin belirlenmesinde kolaylık sağlaması nedeni ile homografi temelli bir yaklaşım benimsenmiştir. Homografi yardımıyla farklı bakış açılarından elde edilmiş görüntüler arasındaki ilişki kurulabileceği gibi, cisim koordinatları ile görüntü koordinatları arasında da ilişki kurulabilmektedir. 2D kalibrasyon yüzeyinden elde edilen en az 4 görüntü koordinatıyla ilgili cisim koordinatları arasındaki homografik ilişki Eşitlik 47'nin tekrar düzenlenerek açıkça yazılması ile Eşitlik 53'te ifade edilmiştir;

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Burada, düzlem bir kalibrasyon yüzeyinde  $Z=0$  olduğundan  $r_3$ 'ün sonuca etkisi olmadığı için denkleme katkısı yoktur. Eşitlik 53 yeniden düzenlenerek,  $\tilde{M} = [X, Y, 1]^T$  olmak üzere görüntü ile cisim koordinatı arasındaki homografi,  $H$ , Eşitlik 54 ile gösterilir.

$$\gamma \tilde{m} = H \tilde{M}, \quad H = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (54)$$

İşlem yükünü azaltmak amacıyla iç yöneltme elemanlarının elde edilmesinde denklem çözümlerine bazı kısıtlamalar getirilmektedir. Burada, Eşitlik 54 yardımıyla elde edilen  $[h_1 \ h_2 \ h_3] = \lambda K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$  homografi denklemi  $r_1, r_2$  ortonormal baz vektörleriyle de ifade edilebilir.  $\lambda$ , keyfi seçilen skalar ölçeği ifade etmek üzere, ilgili eşitlik yeniden düzenlenirse Eşitlik 55 ve Eşitlik 56 elde edilir;

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \quad (55)$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \quad (56)$$

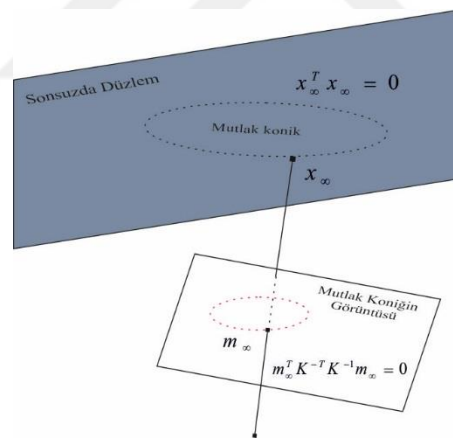
Homografi, 8 serbestlik derecesine sahiptir. Bunların 6 tanesi dış yöneltme parametrelerinden (3 dönüklük açısı, 3 öteleme) oluştuğu için yalnızca 2 iç yöneltme parametresine kısıtlama getirilir.

Afin dönüşüm sonucunda 2D uzayda paralel çizgiler korunur. 3D uzaydaysa doğrular ancak sonsuz düzlem ( $\pi_\infty$ ) üzerinde kesişiyorsa paraleldir. Eşitlik 55'teki  $B = K^{-T} K^{-1}$  ifadesi mutlak koniğin görüntüsünü tanımlar. Görüntü yer gerçekliği bulunmaması durumunda homografi elde etmek için mutlak konik kullanılabilir [141]. 3D uzayda bir  $x$  noktasının projektif koordinatları  $\tilde{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$  ve sonsuzdaki düzlem eşitliğine göre  $x_4 = 0$  olmak üzere mutlak koniğin tanımlanması için Eşitlik 57'deki kısıtlama yerine getirilmelidir.

$$\begin{aligned} x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 &= 0 \\ x_4 &= 0 \end{aligned} \quad (57)$$

$\tilde{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  mutlak konik üzerinde bir nokta olmak üzere; tanımlamalara göre  $x_\infty^T x_\infty = 0$  eşitliği elde edilmektedir. Ayrıca,  $x = x_1 / x_3, y = x_2 / x_3$  olmak üzere çember yarıçapı imajiner olarak  $\sqrt{-1}$ 'dir [142].

Şekil 19'da mutlak konik gösterilmiştir.



Şekil 19. Mutlak konik ve mutlak koniğin görüntüsü

İki aşamalı kamera modelinde kamera kalibrasyon parametrelerinin başlangıç değerlerinin yaklaşık değerlerinin doğru belirlenmesi parametre çözüm aşamasında oldukça önemlidir. İlgili parametrelerin başlangıç değerleri, lineer çözümler ile elde edilir. Daha sonra lineer olmayan optimizasyon yöntemleri veya evrimsel hesaplama algoritmaları kullanılarak en iyileme aşamasına geçilir. Mutlak konik Eşitlik 58'de ifade edilmiştir.

$$B = K^{-T} K^{-1} \equiv \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \quad (58)$$

Burada, B simetrik bir vektör olup;

$$b = [B_{11}; B_{12}; B_{22}; B_{13}; B_{23}; B_{33}]^T \quad (59)$$

ile tanımlanır. Buradaki, H vektörünün  $i$ . sütun vektörü  $h_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$  olsun. Buradan Eşitlik 60 ile;

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b \quad (60)$$

Elde edilen temel kısıtlamalar;

$v_{ij} = [h_{i1}h_{j1}; h_{i1}h_{j1} + h_{i2}h_{j1}; h_{i2}h_{j2}; h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3}; h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \ h_{i3}h_{j3}]^T$  'dır. Temel olarak ifade edilir. İlgili temel kısıtlamalara bağlı kalarak homografi;

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (61)$$

$$V_{2n \times 6} b = 0$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik 61'in çözümü için SVD yöntemi kullanılır; en küçük öz değere karşılık gelen öz vektör ilgili b çözüm vektörü olarak kullanılır. b vektörü elde edildikten sonra ise K matrisi hesaplanır;

$$\begin{cases} u_0 = s v_0 / \beta - B_{13} f_x f_x / \lambda \\ v_0 = (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23}) / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2) \\ \lambda = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0 (B_{12} B_{13} - B_{11} B_{23})] / B_{11} \\ f_x = \sqrt{\lambda / B_{11}} \\ f_y = \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11} B_{22} - B_{12}^2)} \\ s = -B_{12} f_x f_x f_y / \lambda \end{cases} \quad (62)$$

K matrisi elde edildikten sonra her bir görüntünün dış yöneltme parametreleri hesaplanır;

$$\begin{cases} r_1 = \lambda K^{-1} h_1 \\ r_2 = \lambda K^{-1} h_2 \\ r_3 = r_1 \times r_2 \\ t = \lambda K^{-1} h_3 \end{cases} \quad (63)$$

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda radyal distorsiyonun görüntü üzerine etkisinin teğetsel distorsiyondan daha fazla olduğu gösterilmiştir [143]. Düz çizgilerin yakalanmasındaki eksiklik olarak bilinen radyal distorsiyon görüntülerde cisimlerin kubbe şeklinde oluşmasına neden olur [143]. Standart kamera lensleri ile görüntü elde edildiğinde, radyal distorsiyon etkisinin azaltılması için ikinci dereceye kadar radyal bozulmaların hesaba katılması hesap yükünün azaltılması ve görüntü distorsiyonunu giderilmesi için yeterlidir.  $(u, v)$  ideal-distorsiyon içermeyen görüntü piksel koordinatları,  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  gerçek gözlemlenen görüntü koordinatları ve  $(x, y)$  ise normalize edilmiş ideal-distorsiyon içermeyen görüntü koordinatları (cisim koordinatlarının dönüklük ve öteleme matrisi ile çarpılması sonucu elde edilerek normalize edilmiş eşlenikleri) olmak üzere iğne deliği kamera modeline göre iz düşüm denklemleri yardımıyla Eşitlik 64 elde edilmektedir.

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= u + (u + u_0) \left[ k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2 \right] \\ \tilde{v} &= v + (v + v_0) \left[ k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2 \right]\end{aligned}\tag{64}$$

Eşitlik 64'te gözlemlenen görüntü koordinatlarının  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  normalize edilmesi, sayısal olarak daha başarılı bir sonuç elde etmeyi sağlar. İlgili eşitliğe 3 veya 4'nc dereceden radyal distorsiyon parametreleri veya teğetsel distorsiyon parametreleri eklenmek mümkündür.

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada ilgili katsayıların başlangıç değerlerinin iyi belirlenememesi sayısal kararsızlığa neden olduğundan sonucu çok ciddi seviyede etkilediği belirlenmiştir. Kamera Kalibrasyonu algoritmalarının karşılaştırılması deneylerinde pratik uygulamalar için yeterli doğrulukta sonuç sağlandığından ilgili deneylerde sadece ikinci dereceden radyal distorsiyon parametreleri kullanılmıştır.

#### 4.2. Amaç Fonksiyonu

Evrimsel hesaplama algoritmaları görsel konumlandırma ve kamera kalibrasyonu uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [144-147]. Kamera kalibrasyon parametrelerinin sayısal değerlerinin hesaplanması için, yeterince iyi ilk-üzümlere ihtiyaç vardır.

Parametrelerin hesaplanması aşamasında erken yakınsama veya efektif olmayan sonuç üretme kullanılan algoritmaya göre değişmektedir [148]. Kamera iç ve dış yönelme parametrelerinin evrimsel hesaplama yöntemleri ile elde edilmesi için bir amaç fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Amaç fonksiyonunda,  $n$  kalibrasyon yüzeyine ait elde edilen görüntü sayısını,  $m$  ise her kalibrasyon yüzeyinden elde edilen köşe noktası sayısıdır. Gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleri veya evrimsel hesaplama algoritmaları ile optimum sonuç aranırken kamera kalibrasyon parametrelerinin başlangıç değerleri Eşitlik 62-64 ile elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde kullanılan amaç fonksiyonu Eşitlik 65'te verilmiştir;

$$\arg \min_{(\alpha, \beta, \phi, f_x, f_y, u_0, v_0, s, k_1, k_2, T)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|p_{ij} - \hat{p}(\alpha_i, \beta_i, \phi_i, f_x, f_y, u_0, v_0, s, k_1, k_2, T_i, M_j)\| \quad (65)$$

Eşitlikte 65'te  $p_{ij}$ ,  $i$ . kalibrasyon düzlemindeki  $j$ . görüntü koordinatını temsil eder.  $\hat{p}$  cisim koordinatlarının görüntü düzlemine projekte edilmiş koordinatlarıdır.  $M_j$ ,  $i$ 'inci kalibrasyon düzlemindeki  $j$ 'inci dünya koordinatını temsil etmektedir.

### 4.3. Zhang Kamera Kalibrasyon Yöntemi

İki aşamalı çözümden oluşan Zhang kamera kalibrasyon yönteminde parametrelerin yaklaşık değerleri lineer olarak belirlendikten sonra amaç fonksiyonunu çözmek için Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmaktadır. Nonlineer problemlerin çözümlerinde sıklıkla kullanılan Levenberg-Marquardt algoritması için iyi bir yaklaşık çözüm verilmediği zaman istenilen kalitede çözüm üretmemektedir.

Zhang kamera modelinde  $k$  adet kalibrasyon yüzeyinin her birinden elde edilen  $r$  adet görüntü koordinatı ve projekte edilmiş cisim koordinatları arasındaki mesafenin minimize edilmesi amaçlanır [114]. Zhang kamera kalibrasyon yöntemine ait amaç fonksiyonu Eşitlik 66'da verilmiştir.

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \|m_{ij} - \hat{m}(K, R_i, T_i, M_j)\| \quad (66)$$

Burada,  $M_j$  cisim koordinatlarının projekte edilmiş koordinatları  $\hat{m}(K, R_i, t_i, M_j)$  olmak üzere  $m_{ij}$  görüntü koordinatlarını ifade etmektedir.

#### 4.4. Bouguet Kamera Kalibrasyon Yöntemi

Bouguet kamera kalibrasyon metodu, Zhang kamera kalibrasyonundan esinlenerek geliştirilmiştir. İki metodunda homografi tahmin yöntemleri benzerlik göstermekle birlikte, en belirgin farklılık homografiden kamera distorsiyon parametrelerinin belirlenmesi ve iç yöneltme parametrelerinin tahmininde ortaya çıkmaktadır.

İki görüntü arasında yeterli bindirme oranı varsa Bouguet yöntemi kolaylıkla uygulanabilir. Farklı bakış açılarından yakalanan düzlemsel 2D kalibrasyon yüzeyiyle iç ve dış kamera kalibrasyonu parametreleri tek aşamada çözülebilmektedir. Bouguet kamera iç yöneltme parametreleri tanımlarken Eşitlik 67'yi kullanmaktadır.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s \cdot f_x & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (67)$$

Bouguet kamera kalibrasyon metodunda iç yöneltme parametrelerinin hesaplanması aşamasında iki aşamalı bir çözüm kullanılır. Önce distorsiyonlu görüntü koordinatları ile normalize edilmiş görüntü koordinatları arasında analitik bir ilişki kurularak radyal distorsiyon parametreleri Eşitlik 68 yardımıyla elde edilir.

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= x \times [1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \tilde{v} &= y \times [1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (68)$$

Bouguet orijinal yayınında teğetsel distorsiyon katsayılarını da hesaba katmaktadır. Ancak, tez kapsamında aynı parametre değerlerini kullanarak sonuca gitmek istenildiği için teğetsel distorsiyonlar göz önünde bulundurulmamıştır. Distorsiyon katsayıları çözüme eklendikten sonra Eşitlik 69 ile ideal görüntü koordinatları elde edilmeye çalışılmaktadır.

$$\begin{aligned} u &= f_x(\tilde{u} + s \cdot f_y) + u_0 \\ v &= f_y \cdot \tilde{v} + v_0 \end{aligned} \quad (69)$$

Bouguet önerdiği modelde asal noktaları optimize ederken az sayıda görüntü kullanıldığı durumlarda çarpıklık ve distorsiyon değerlerinin dikkate alınamayabileceği gibi asal nokta koordinatlarının da görüntü merkezi olarak kabul edilebileceğini

önermiştir. Böylece, optimizasyon aşamasında asal noktaların koordinatlarını aramak için; görüntü boyutlarından birer çıkartıp ikiye bölerek asal noktaları aramak için bir başlangıç alt-üst limiti tanımlamayı önermiştir. Bu metotta parametre en-iyileme için Zhang kamera kalibrasyonu yönteminde olduğu gibi Levenberg-Marquardt en-iyileme yöntemi kullanılmaktadır [149].



## 5. BÖLÜM

### UYGULAMA

Bu tez çalışmasında, önerilen kamera kalibrasyon modelinden iç yöneltme ve dış yöneltme parametrelerinin elde edilmesi için evrimsel hesaplama algoritmaları kullanılmıştır: WDE, ABC, PSO, COBiDE, DE ve CS.

Evrimsel hesaplama algoritmaları genel olarak yapay seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon olmak üzere üç temel metot kullanılır. Popülasyonu oluşturan bireylerin elde ettiği amaç fonksiyon değerleri ilgili bireylerin eldeki problemin çözümünde ne ölçüde başarılı olduğunu gösterir. Sınırlandırılmış arama sürecinde popülasyondaki bireylerin ilk-parametre değerleri probleme özel tanımlanan alt ve üst sınır değerleri arasında rastgele belirlenir. Parametrelerin ilk değerlerinin belirlenmesi sürecinde evrimsel hesaplama algoritmaları bir rastgele sayı üreticisine ihtiyaç duyar. Bu kapsamda tez çalışmasında Mersenne Twister uniform rastgele sayı üretici [150] kullanılmıştır. Evrimsel hesaplama algoritmalarının adil karşılaştırılması için gerçekleştirilen bu sürecin sonunda elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri ve amaç fonksiyon değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. İlgili evrimsel hesaplama algoritmaları ile elde edilen ortalama iç yöneltme parametre değerleri kullanılarak SfM yöntemi aracılığıyla test alanlarına ait nokta bulutları oluşturulmuştur. Evrimsel hesaplama algoritmalarının başarısının farklı çevresel ve donanımsal etkenlere karşı başarısının test edilmesi için farklı tipte sensörlere sahip kameralar laboratuvar ortamında iç mekân haritalama (Test 1) ve dış mekânda çevresel haritalama (Test 2) için kullanılmıştır. Test nokta bulutları olarak isimlendirilen evrimsel hesaplama algoritmaları ile oluşturulan nokta bulutlarının doğruluklarının karşılaştırılması için referans nokta bulutları Yersel Lazer Tarayıcı (YLT) ile yakalanmıştır. İlgili kıyaslamalar gerçekleştirilerek evrimsel hesaplama yöntemlerinin başarıları görsel ve istatistiksel olarak sunulmuştur. Uygulamaların gerçekleştirilmesi için ilgili süreç

Windows 7 işletim sisteminde Matlab 2015a programlama dili ile 2.50 GHz, 64Gb RAM, Quadro K5000 ve Tesla 20c grafik kartına sahip olan iş istasyonunda yürütülmüştür.

Evrimsel hesaplama algoritmalarının başarıları sahip oldukları kontrol parametrelerine oldukça bağlıdır. Bu parametrelerin belirlenmesi zor, zaman alıcı ve problem tipine bağlıdır. Ayrıca, ilgili kontrol parametreleri uzman görüşüyle; geçmiş çalışmalar, sezgisel veya deneysel olarak empirik yaklaşımla belirlenir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan evrimsel hesaplama metodlarının kontrol parametre değerleri Tablo 2’de verilmiştir. İlgili kamera kalibrasyon probleminin amaç fonksiyonu söz konusu evrimsel hesaplama metodlarıyla 10,000 epok boyunca en-iyilenmiştir.

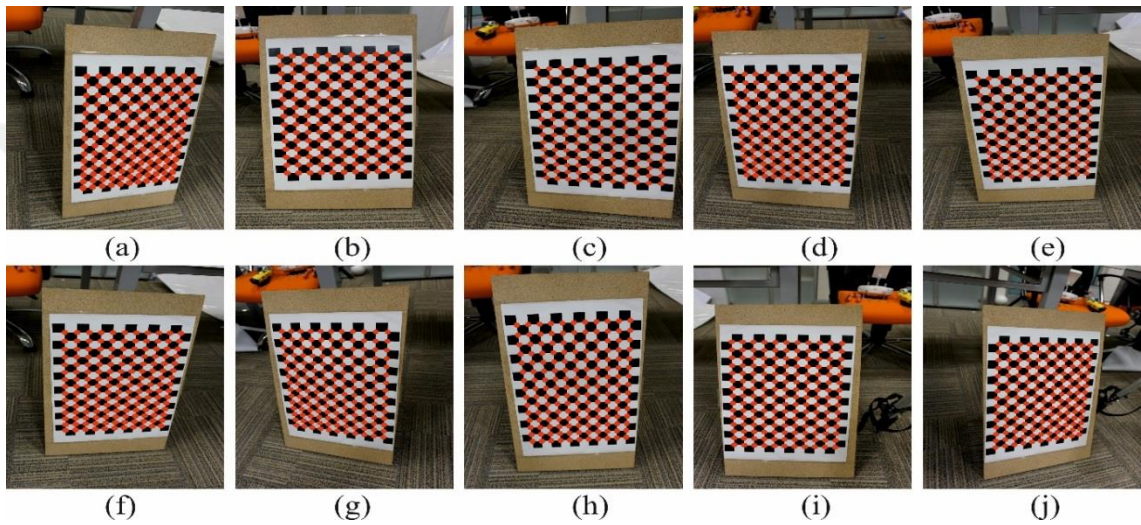
Tablo 2. Evrimsel hesaplama algoritmalarına ait kontrol parametreleri

| Algoritma | Kontrol Parametreleri                        |
|-----------|--|
| WDE       | -  |
| ABC       | limit = 50                                   |
| PSO       | $c_1 = 1.80, c_2 = 1.80, \omega = 0.60$      |
| COBIDE    | $ps = 0.5, pb = 0.4 \cdot K   K \sim U(0,1)$ |
| DE        | $Cr = 0.90, F = 0.50$                        |
| CS        | $\beta = 2, p_0 = 0.35$                      |

### 5.1. Test Alanı 1

Bu bölümde Test Alanı 1 için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. İlk önce kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi için kalibrasyon yüzeyine ait videolardan 10 adet farklı bakış açılarından yakalanan görüntüler çıkartılmıştır. Test 1 alanında kalibrasyon yüzeyine ait görüntülerin elde edilmesinde ve test nokta bulutunun üretilmesi için Sony Alfa A6000 fotoğraf makinası kullanılmıştır. Kalibrasyon yüzeyine ait görüntüler elde edildikten sonra kalibrasyon parametrelerinin değişiminin minimum olması için fotoğraf makinası kapatılmadan Şekil 24’de YLT ile taranmış nokta bulutu sunulan sahneye ait video çekilmiştir. Test Alanı 1’de keskin kenarlarda değişimleri incelemek için dikdörtgen ve kare formdan oluşan masa ile tahta obje, oval kenarda deformasyonu incelemek için ise bir küre kullanılmıştır. İlgili test alanına ait YLT verisinden elde edilen nokta bulutu Şekil 24’de gösterilmiştir. SfM yöntemi ile etkili sonuç üretmek için platform tasarımına dikkat edilerek sabit bakış alanında, sürekli

yüzey kullanılmadan, kamera ile cisim arasındaki mesafe sabit tutularak ortamda yansıyan cisim olmamasına dikkat edilmiştir. Kalibrasyon yüzeyindeki anahtar noktalarının koordinatlarının belirlenmesi için dönüklük ve ölçekten bağımsız olan SURF nokta yakalayıcı kullanılmıştır. Kalibrasyon yüzeyindeki köşe noktalarının hepsi nokta yakalayıcı tarafından tespit edilebilmiştir. Şekil 20’de SURF noktalarının kalibrasyon yüzeyi üzerinde gösterimi yapılmıştır. Her görüntüden 165 adet anahtar nokta görüntü koordinatı hesaplanmıştır.



Şekil 20. SURF noktalarının kalibrasyon düzlemine görüntüsü üzerinde gösterimi; (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, (f) #6, (g) #7, (h) #8, (i) #9, (j) #10.

SURF anahtar nokta yakalayıcısı hızlıdır ve görece kolay uygulanabilmektedir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ilgili evrimsel hesaplama algoritmalarıyla elde edilen iç yönlendirme parametre değerleri ve amaç fonksiyon değeri için hesaplanan temel istatistikler (ortalama ve standart sapma değerleri) Tablo 3. İlgili yöntemlerle elde edilen iç yönlendirme parametreleri ve amaç fonksiyon değeri için temel istatistikler.

| #                            |         | Yöntemler |           |         |            |           |         |             |           |
|------------------------------|---------|-----------|-----------|---------|------------|-----------|---------|-------------|-----------|
|                              |         | WDE       | ABC       | PSO     | COBID<br>E | DE        | CS      | BOUGU<br>ET | ZHAN<br>G |
| İç Yönlendirme Parametreleri | $k_1$   | -         | -0.06137  | -       | -          | -0.06130  | -       | -0.06138    | -         |
|                              |         | 0.05888   | ±         | 0.06086 | 0.06138    | ±         | 0.05935 |             | 0.06142   |
|                              |         | ±         | 2E-05     | ±       | ±          | 0.00018   | ±       |             |           |
|                              | $k_2$   | 0.00078   |           | 2E-05   | 2E-05      |           | 0.00023 |             |           |
|                              |         | 0.04798   | 0.04770   | 0.04794 | 0.04769    | 0.04776   | 0.04778 | 0.04855     | 0.04765   |
|                              |         | ±         | ±         | ±       | ±          | ±         | ±       |             |           |
|                              | $f_x$   | 0.00294   | 3E-05     | 0.00014 | 4E-05      | 0.00027   | 0.00108 |             |           |
|                              |         | 4019.63   | 4019.4824 | 4019.48 | 4019.48    | 4019.4817 | 4019.71 | 4021.99     | 4019.48   |
|                              |         | 743       | 1         | 239     | 242        | 1         | 838     | 521         | 236       |
|                              | ±       | ±         | ±         | ±       | ±          | ±         |         |             |           |
|                              | 0.25138 | 2E-05     | 0.00014   | 0.00185 | 0.00185    | 0.25613   |         |             |           |

|                            |   |                                    |                                    |                                    |                                      |                                       |                |                |
|----------------------------|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| $f_y$                      | 4022.89<br>852<br>$\pm$<br>0.24178                      | 4023.6488<br>897<br>$\pm$<br>3E-05 | 4023.64<br>883<br>$\pm$<br>0.00013 | 4023.64<br>888<br>$\pm$<br>0.00617 | 4023.6496<br>5<br>$\pm$<br>0.00617   | 4023.25<br>669<br>$\pm$<br>0.26950    | 4026.14<br>379 | 4023.64<br>883 |
| $s$                        | -<br>5.20822<br>$\pm$<br>0.07955                        | -4.59232<br>$\pm$<br>3E-05         | -<br>4.59231<br>$\pm$<br>0.00012   | -<br>4.59233<br>$\pm$<br>0.00041   | -4.59245<br>$\pm$<br>0.00041         | -<br>4.91113<br>7<br>$\pm$<br>0.17890 | 0.0000         | -<br>4.59237   |
| $u_0$                      | 3004.73<br>237<br>$\pm$<br>0.03536                      | 3004.7508<br>0<br>$\pm$<br>3E-05   | 3004.75<br>086<br>$\pm$<br>0.00014 | 3004.75<br>082<br>$\pm$<br>0.00253 | 3004.7512<br>8<br>$\pm$<br>0.00253   | 3004.78<br>146<br>$\pm$<br>0.03493    | 3001.77<br>800 | 3004.75<br>077 |
| $v_0$                      | 2003.76<br>612<br>$\pm$<br>0.02410<br>56                | 2003.7602<br>4<br>$\pm$<br>3E-05   | 2003.76<br>020<br>$\pm$<br>0.00015 | 2003.76<br>023<br>$\pm$<br>0.00091 | 2003.7606<br>330<br>$\pm$<br>0.00091 | 2003.77<br>730<br>$\pm$<br>0.06589    | 1995.38<br>420 | 2003.76<br>018 |
| <b>Amaç<br/>Fonksiyonu</b> | <b>2377.62</b><br><b>123</b><br>$\pm$<br><b>0.64953</b> | 2384.9845<br>6<br>$\pm$<br>0.39025 | 2413.91<br>922<br>$\pm$<br>0.13195 | 2448.53<br>283<br>$\pm$<br>0.88992 | 2431.9941<br>9<br>$\pm$<br>3.52452   | 2380.81<br>362<br>$\pm$<br>0.69890    | 2507.89<br>902 | 2454.13<br>691 |

Önerilen kamera modeli çözümünde kamera dönüklük ve öteleme bilgilerini de optimize edilmektedir. Kamera dış yöneltme parametreleri kameranın sahneye göre yönelim bilgilerini içermektedir. R matrisi dönüklük matrisini T matrisi ise öteleme değerlerini ifade etmektedir. Evrimsel hesaplama algoritmaları olan WDE ve ABC algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme parametreleri ortalaması Tablo 4 ve Tablo 5'te, PSO ve COBiDE algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme parametreleri ortalaması Tablo 6 ve Tablo 7'de ve DE ve CS algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme parametreleri ortalaması Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir. Ayrıca, klasik kamera kalibrasyon yöntemleri olan Bouguet ve Zhang'a göre belirlenen dış yöneltme parametreleri Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 3. İlgili yöntemlerle elde edilen iç yöneltme parametreleri ve amaç fonksiyon değeri için temel istatistikler.

| #                         | Yöntemler                                |                              |                            |                            |                            |                              |                            |            |            |
|---------------------------|--|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|------------|
|                           | WDE                                      | ABC                          | PSO                        | COBIDE                     | DE                         | CS                           | BOUGUET                    | ZHANG      |            |
| İç Yöneltme Parametreleri | $k_1$                                    | -0.05888<br>±<br>0.00078     | -0.06137<br>±<br>2E-05     | -0.06086<br>±<br>2E-05     | -0.06138<br>±<br>2E-05     | -0.06130<br>±<br>0.00018     | -0.05935<br>±<br>0.00023   | -0.06138   | -0.06142   |
|                           | $k_2$                                    | 0.04798<br>±<br>0.00294      | 0.04770<br>±<br>3E-05      | 0.04794<br>±<br>0.00014    | 0.04769<br>±<br>4E-05      | 0.04776<br>±<br>0.00027      | 0.04778<br>±<br>0.00108    | 0.04855    | 0.04765    |
|                           | $f_x$                                    | 4019.63743<br>±<br>0.25138   | 4019.48241<br>±<br>2E-05   | 4019.48239<br>±<br>0.00014 | 4019.48242<br>±<br>0.00185 | 4019.48171<br>±<br>0.00185   | 4019.71838<br>±<br>0.25613 | 4021.99521 | 4019.48236 |
|                           | $f_y$                                    | 4022.89852<br>±<br>0.24178   | 4023.6488897<br>±<br>3E-05 | 4023.64883<br>±<br>0.00013 | 4023.64888<br>±<br>0.00617 | 4023.64965<br>±<br>0.00617   | 4023.25669<br>±<br>0.26950 | 4026.14379 | 4023.64883 |
|                           | $\delta$                                 | -5.20822<br>±<br>0.07955     | -4.59232<br>±<br>3E-05     | -4.59231<br>±<br>0.00012   | -4.59233<br>±<br>0.00041   | -4.59245<br>±<br>0.00041     | -4.911137<br>±<br>0.17890  | 0.0000     | -4.59237   |
|                           | $u_0$                                    | 3004.73237<br>±<br>0.03536   | 3004.75080<br>±<br>3E-05   | 3004.75086<br>±<br>0.00014 | 3004.75082<br>±<br>0.00253 | 3004.75128<br>±<br>0.00253   | 3004.78146<br>±<br>0.03493 | 3001.77800 | 3004.75077 |
|                           | $v_0$                                    | 2003.76612<br>±<br>0.0241056 | 2003.76024<br>±<br>3E-05   | 2003.76020<br>±<br>0.00015 | 2003.76023<br>±<br>0.00091 | 2003.7606330<br>±<br>0.00091 | 2003.77730<br>±<br>0.06589 | 1995.38420 | 2003.76018 |
| <b>Amaç Fonksiyonu</b>    | <b>2377.62123</b><br>±<br><b>0.64953</b> | 2384.98456<br>±<br>0.39025   | 2413.91922<br>±<br>0.13195 | 2448.53283<br>±<br>0.88992 | 2431.99419<br>±<br>3.52452 | 2380.81362<br>±<br>0.69890   | 2507.89902                 | 2454.13691 |            |

Tablo 4. WDE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92317 & 0.05821 & -0.37995 & -133.08122 \\ 0.04742 & 0.96367 & 0.26286 & -225.84291 \\ 0.38145 & -0.26068 & 0.88687 & 652.69491 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93251 & 0.02158 & -0.36050 & -119.29798 \\ 0.03203 & 0.98934 & 0.14208 & -202.71447 \\ 0.35973 & -0.14404 & 0.92187 & 615.68842 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94536 & -0.01985 & -0.32541 & -98.84125 \\ -0.02900 & 0.98907 & -0.14458 & -132.01099 \\ 0.32473 & 0.14611 & 0.93445 & 564.49736 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94001 & -0.06721 & -0.33446 & -106.32409 \\ -0.04001 & 0.95192 & -0.30373 & -108.40226 \\ 0.33879 & 0.29889 & 0.89212 & 517.61049 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98278 & 0.00711 & -0.18466 & -115.44857 \\ -0.04354 & 0.98004 & -0.19396 & -205.25713 \\ 0.17960 & 0.19866 & 0.96347 & 481.54228 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98501 & -0.01692 & 0.17164 & -297.80319 \\ -0.05144 & 0.92107 & 0.38598 & -144.94929 \\ -0.16463 & -0.38903 & 0.90640 & 736.17077 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99063 & 0.02320 & 0.13458 & -310.08202 \\ -0.01946 & 0.99939 & -0.02903 & -105.87847 \\ -0.13517 & 0.02614 & 0.99048 & 647.23251 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05096 & -0.31116 & -142.25954 \\ -0.04653 & 0.99868 & 0.02165 & -138.26408 \\ 0.31185 & -0.00606 & 0.95011 & 545.11049 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94499 & -0.15177 & -0.28975 & -136.89070 \\ -0.00347 & 0.88113 & -0.47285 & -140.81403 \\ 0.32707 & 0.44785 & 0.83214 & 423.22580 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09537 & -244.36098 \\ -0.03140 & 0.99948 & -0.00717 & -183.95588 \\ 0.09510 & 0.01012 & 0.99542 & 621.79053 \end{bmatrix}$  |

Tablo 5. ABC algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92318 & 0.05820 & -0.37993 & -133.08131 \\ 0.04739 & 0.96369 & 0.26278 & -225.84072 \\ 0.38143 & -0.26060 & 0.88690 & 652.69635 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93251 & 0.02158 & -0.36050 & -119.29807 \\ 0.03201 & 0.98934 & 0.14203 & -202.71242 \\ 0.35972 & -0.14398 & 0.92188 & 615.68418 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94537 & -0.01987 & -0.32538 & -98.84100 \\ -0.02898 & 0.98907 & -0.14460 & -132.01534 \\ 0.32470 & 0.14614 & 0.93446 & 564.50273 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94002 & -0.06722 & -0.33443 & -106.32459 \\ -0.03999 & 0.95191 & -0.30374 & -108.40757 \\ 0.33877 & 0.29890 & 0.89213 & 517.61286 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98278 & 0.00711 & -0.18464 & -115.44860 \\ -0.04354 & 0.98003 & -0.19401 & -205.25850 \\ 0.17957 & 0.19871 & 0.96347 & 481.53917 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98502 & -0.01693 & 0.17160 & -297.80202 \\ -0.05142 & 0.92105 & 0.38603 & -144.94834 \\ -0.16459 & -0.38907 & 0.90638 & 736.16906 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99064 & 0.02320 & 0.13455 & -310.08372 \\ -0.01947 & 0.99939 & -0.02899 & -105.87878 \\ -0.13514 & 0.02610 & 0.99048 & 647.23254 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05095 & -0.31116 & -142.25848 \\ -0.04654 & 0.99868 & 0.02159 & -138.26351 \\ 0.31185 & -0.00601 & 0.95011 & 545.10310 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94501 & -0.15178 & -0.28968 & -136.89247 \\ -0.00344 & 0.88111 & -0.47291 & -140.81971 \\ 0.32702 & 0.44790 & 0.83213 & 423.23213 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09536 & -244.36306 \\ -0.03140 & 0.99948 & -0.00715 & -183.95618 \\ 0.09509 & 0.01011 & 0.99542 & 621.78681 \end{bmatrix}$  |

Tablo 6. PSO algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92318 & 0.05821 & -0.37994 & -133.0813201 \\ 0.04741 & 0.96368 & 0.26283 & -225.8407291 \\ 0.38144 & -0.26065 & 0.88688 & 652.6963488 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93250 & 0.02159 & -0.36051 & -119.2980572 \\ 0.03202 & 0.98934 & 0.14207 & -202.7124292 \\ 0.35974 & -0.14403 & 0.92187 & 615.6841716 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94537 & -0.01986 & -0.32540 & -98.84100446 \\ -0.02898 & 0.98907 & -0.14456 & -132.0153193 \\ 0.32472 & 0.14609 & 0.93446 & 564.502745 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94001 & -0.06721 & -0.33445 & -106.3245863 \\ -0.03999 & 0.95193 & -0.30370 & -108.4075686 \\ 0.33879 & 0.29886 & 0.89213 & 517.6128547 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98278 & 0.00711 & -0.18466 & -115.4485809 \\ -0.04354 & 0.98004 & -0.19395 & -205.2585009 \\ 0.17960 & 0.19865 & 0.96347 & 481.5391742 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98501 & -0.01692 & 0.17165 & -297.8020323 \\ -0.05144 & 0.92106 & 0.38601 & -144.9483452 \\ -0.16463 & -0.38905 & 0.90639 & 736.1690717 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99063 & 0.02320 & 0.13455 & -310.0837146 \\ -0.01947 & 0.99939 & -0.02901 & -105.8787738 \\ -0.13514 & 0.02612 & 0.99048 & 647.232535 \end{bmatrix}$   |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05096 & -0.31117 & -142.2584631 \\ -0.04654 & 0.99868 & 0.02162 & -138.2635295 \\ 0.31186 & -0.00604 & 0.95011 & 545.1030862 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94500 & -0.15176 & -0.28974 & -136.8924765 \\ -0.00346 & 0.88115 & -0.47283 & -140.8197132 \\ 0.32706 & 0.44783 & 0.83216 & 423.2321133 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09537 & -244.3630615 \\ -0.03141 & 0.99948 & -0.00714 & -183.9561812 \\ 0.09510 & 0.01010 & 0.99542 & 621.7867939 \end{bmatrix}$  |

Tablo 7. COBIDE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92318 & 0.05820 & -0.37993 & -133.08131 \\ 0.04739 & 0.96369 & 0.26277 & -225.84072 \\ 0.38143 & -0.26059 & 0.88691 & 652.69635 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93251 & 0.02159 & -0.36050 & -119.29807 \\ 0.03201 & 0.98934 & 0.14203 & -202.71242 \\ 0.35972 & -0.14399 & 0.92188 & 615.68418 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94537 & -0.01987 & -0.32538 & -98.84100 \\ -0.02898 & 0.98907 & -0.14460 & -132.01533 \\ 0.32470 & 0.14613 & 0.93446 & 564.50273 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94002 & -0.06722 & -0.33443 & -106.32459 \\ -0.03999 & 0.95191 & -0.30374 & -108.40757 \\ 0.33877 & 0.29890 & 0.89213 & 517.61286 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98278 & 0.00711 & -0.18464 & -115.44859 \\ -0.04353 & 0.98003 & -0.19401 & -205.25850 \\ 0.17958 & 0.19870 & 0.96347 & 481.53916 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98502 & -0.01693 & 0.17160 & -297.80202 \\ -0.05142 & 0.92105 & 0.38603 & -144.94834 \\ -0.16459 & -0.38907 & 0.90638 & 736.16906 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99064 & 0.02320 & 0.13455 & -310.08372 \\ -0.01947 & 0.99939 & -0.02899 & -105.87878 \\ -0.13514 & 0.02610 & 0.99048 & 647.23254 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05095 & -0.31115 & -142.25848 \\ -0.04654 & 0.99868 & 0.02159 & -138.26351 \\ 0.31184 & -0.00601 & 0.95011 & 545.10310 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94501 & -0.15178 & -0.28968 & -136.89248 \\ -0.00345 & 0.88111 & -0.47291 & -140.81971 \\ 0.32702 & 0.44790 & 0.83213 & 423.23213 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09536 & -244.36306 \\ -0.03141 & 0.99948 & -0.00714 & -183.95618 \\ 0.09509 & 0.01010 & 0.99542 & 621.78681 \end{bmatrix}$  |

Tablo 8. DE algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92318 & 0.05821 & -0.37994 & -133.08131 \\ 0.04739 & 0.96369 & 0.26279 & -225.84072 \\ 0.38144 & -0.26060 & 0.88690 & 652.69636 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93251 & 0.02159 & -0.36051 & -119.29806 \\ 0.03202 & 0.98934 & 0.14205 & -202.71241 \\ 0.35973 & -0.14401 & 0.92188 & 615.68417 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94537 & -0.01986 & -0.32539 & -98.84100 \\ -0.02898 & 0.98907 & -0.14457 & -132.01532 \\ 0.32471 & 0.14611 & 0.93446 & 564.50271 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94002 & -0.06722 & -0.33442 & -106.32458 \\ -0.03999 & 0.95192 & -0.30374 & -108.40756 \\ 0.33876 & 0.29890 & 0.89213 & 517.61285 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98278 & 0.00710 & -0.18464 & -115.44855 \\ -0.04353 & 0.98003 & -0.19401 & -205.25850 \\ 0.17958 & 0.19870 & 0.96347 & 481.53914 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98502 & -0.01693 & 0.17162 & -297.80202 \\ -0.05143 & 0.92105 & 0.38604 & -144.94836 \\ -0.16461 & -0.38908 & 0.90638 & 736.16904 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99064 & 0.02320 & 0.13454 & -310.08372 \\ -0.01947 & 0.99939 & -0.02898 & -105.87878 \\ -0.13513 & 0.02609 & 0.99048 & 647.23256 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05095 & -0.31116 & -142.25847 \\ -0.04654 & 0.99868 & 0.02160 & -138.26351 \\ 0.31185 & -0.00602 & 0.95011 & 545.10309 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94501 & -0.15179 & -0.28968 & -136.89249 \\ -0.00344 & 0.88111 & -0.47291 & -140.81971 \\ 0.32702 & 0.44790 & 0.83213 & 423.23214 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09537 & -244.36304 \\ -0.03140 & 0.99948 & -0.00714 & -183.95616 \\ 0.09510 & 0.01010 & 0.99542 & 621.78680 \end{bmatrix}$  |

Tablo 9. CS algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92318 & 0.05821 & -0.37995 & -133.08128 \\ 0.04741 & 0.96367 & 0.26284 & -225.84213 \\ 0.38144 & -0.26066 & 0.88688 & 652.69471 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.93250 & 0.02160 & -0.36051 & -119.29822 \\ 0.03203 & 0.98933 & 0.14211 & -202.71388 \\ 0.35974 & -0.14406 & 0.92186 & 615.68730 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94535 & -0.01986 & -0.32544 & -98.83908 \\ -0.02899 & 0.98907 & -0.14457 & -132.01194 \\ 0.32475 & 0.14611 & 0.93445 & 564.48959 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.94001 & -0.06721 & -0.33446 & -106.32372 \\ -0.04001 & 0.95192 & -0.30373 & -108.40278 \\ 0.33880 & 0.29889 & 0.89212 & 517.60759 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98277 & 0.00711 & -0.18468 & -115.44802 \\ -0.04354 & 0.98004 & -0.19395 & -205.25708 \\ 0.17961 & 0.19865 & 0.96347 & 481.53930 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98501 & -0.01692 & 0.17166 & -297.80219 \\ -0.05144 & 0.92107 & 0.38599 & -144.94902 \\ -0.16464 & -0.38904 & 0.90639 & 736.17299 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.99063 & 0.02321 & 0.13458 & -310.08265 \\ -0.01947 & 0.99939 & -0.02905 & -105.87788 \\ -0.13518 & 0.02616 & 0.99048 & 647.23186 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94899 & 0.05096 & -0.31116 & -142.25899 \\ -0.04653 & 0.99868 & 0.02165 & -138.26529 \\ 0.31186 & -0.00606 & 0.95011 & 545.10569 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94499 & -0.15178 & -0.28976 & -136.88879 \\ -0.00348 & 0.88112 & -0.47288 & -140.81068 \\ 0.32708 & 0.44787 & 0.83212 & 423.21916 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99497 & 0.03058 & -0.09540 & -244.35998 \\ -0.03140 & 0.99948 & -0.00713 & -183.95700 \\ 0.09513 & 0.01009 & 0.99541 & 621.78740 \end{bmatrix}$  |

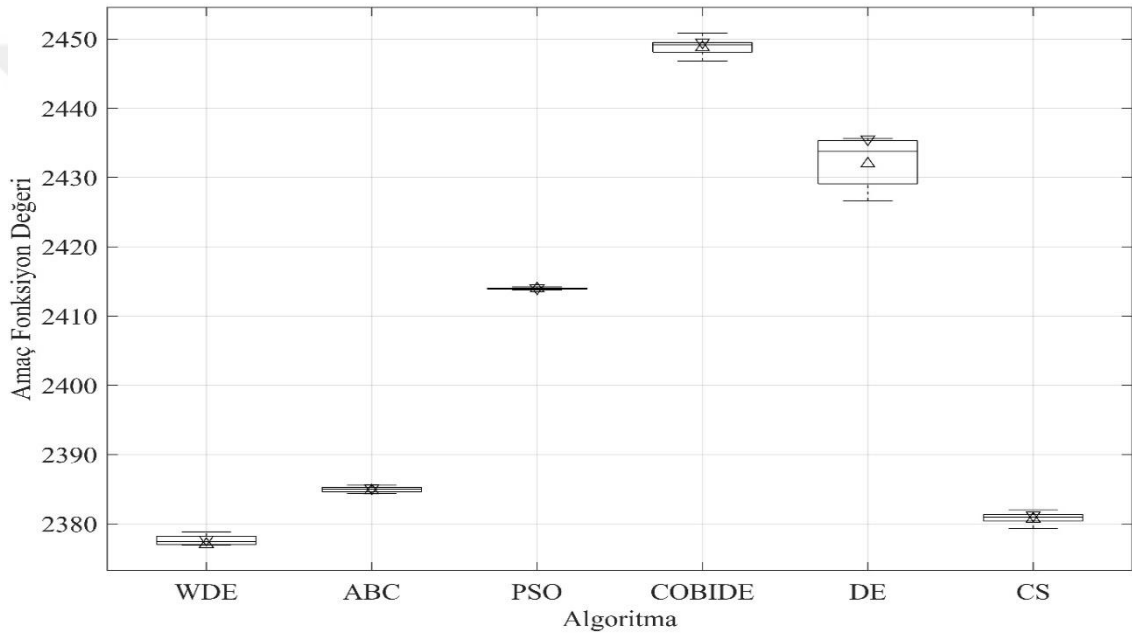
Tablo 10. Zhang algoritması ile elde edilen dış yöneltme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T]  |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92144 & 0.04959 & 0.38534 & -132.68760 \\ 0.06039 & 0.96148 & -0.26814 & -225.30961 \\ -0.38379 & 0.27035 & 0.88296 & 654.49094 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.92979 & 0.03394 & 0.36653 & -118.82016 \\ 0.02357 & 0.98821 & -0.15130 & -202.06266 \\ -0.36735 & 0.14932 & 0.91802 & 616.20649 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94154 & -0.02939 & 0.33563 & -98.33345 \\ -0.02054 & 0.98933 & 0.14425 & -131.51797 \\ -0.33628 & -0.14271 & 0.93088 & 562.82422 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.93669 & -0.04140 & 0.34771 & -105.86305 \\ -0.06888 & 0.95180 & 0.29889 & -108.06339 \\ -0.34333 & -0.30392 & 0.88869 & 516.16841 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98048 & -0.04333 & 0.19180 & -115.04779 \\ 0.00747 & 0.98293 & 0.18384 & -204.93988 \\ -0.19649 & -0.17882 & 0.96406 & 483.98030 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98161 & -0.05512 & -0.18279 & -296.95166 \\ -0.02143 & 0.91956 & -0.39237 & -144.57021 \\ 0.18971 & 0.38907 & 0.90146 & 741.32781 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.98719 & -0.01900 & -0.15844 & -309.11627 \\ 0.02381 & 0.99931 & 0.02849 & -105.36648 \\ 0.15779 & -0.03190 & 0.98696 & 652.19131 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94716 & -0.04600 & 0.31745 & -141.89258 \\ 0.05119 & 0.99866 & -0.00801 & -138.06585 \\ -0.31666 & 0.02384 & 0.94824 & 545.92306 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94428 & -0.00259 & 0.32913 & -136.77123 \\ -0.15170 & 0.88400 & 0.44219 & -140.90977 \\ -0.29210 & -0.46748 & 0.83435 & 426.33951 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99603 & -0.03071 & 0.08353 & -244.66642 \\ 0.03082 & 0.99952 & -0.00005 & -184.20446 \\ -0.08349 & 0.00262 & 0.99651 & 628.90376 \end{bmatrix}$  |

Tablo 11. Bouguet algoritması ile elde edilen dış yönlendirme parametreleri (Test-1 Alanı)

| #görüntü | Dış Yönlendirme Parametreleri [R   T]   |
|----------|---|
| #1       | $\begin{bmatrix} 0.92137 & 0.05065 & 0.38537 & -131.90061 \\ 0.05938 & 0.96149 & -0.26835 & -223.87106 \\ -0.38412 & 0.27014 & 0.88288 & 654.67420 \end{bmatrix}$   |
| #2       | $\begin{bmatrix} 0.92972 & 0.03493 & 0.36661 & -118.09490 \\ 0.02255 & 0.98822 & -0.15136 & -200.71522 \\ -0.36758 & 0.14899 & 0.91798 & 616.38992 \end{bmatrix}$   |
| #3       | $\begin{bmatrix} 0.94152 & -0.02857 & 0.33575 & -97.73611 \\ -0.02145 & 0.98930 & 0.14433 & -130.30592 \\ -0.33628 & -0.14309 & 0.93083 & 562.99854 \end{bmatrix}$  |
| #4       | $\begin{bmatrix} 0.93668 & -0.04065 & 0.34782 & -105.32297 \\ -0.06968 & 0.95175 & 0.29887 & -106.95403 \\ -0.34318 & -0.30418 & 0.88865 & 516.32019 \end{bmatrix}$ |
| #5       | $\begin{bmatrix} 0.98048 & -0.04265 & 0.19193 & -114.43354 \\ 0.00675 & 0.98292 & 0.18393 & -203.89394 \\ -0.19650 & -0.17905 & 0.96402 & 484.18912 \end{bmatrix}$  |
| #6       | $\begin{bmatrix} 0.98155 & -0.05480 & -0.18321 & -296.24908 \\ -0.02203 & 0.91928 & -0.39300 & -143.03298 \\ 0.18996 & 0.38978 & 0.90110 & 741.81848 \end{bmatrix}$ |
| #7       | $\begin{bmatrix} 0.98718 & -0.01861 & -0.15853 & -308.53554 \\ 0.02340 & 0.99932 & 0.02839 & -104.01678 \\ 0.15789 & -0.03174 & 0.98695 & 652.64560 \end{bmatrix}$  |
| #8       | $\begin{bmatrix} 0.94717 & -0.04512 & 0.31755 & -141.28795 \\ 0.05024 & 0.99871 & -0.00795 & -136.88833 \\ -0.31678 & 0.02349 & 0.94821 & 546.09767 \end{bmatrix}$  |
| #9       | $\begin{bmatrix} 0.94425 & -0.00195 & 0.32922 & -136.25421 \\ -0.15228 & 0.88400 & 0.44199 & -139.98115 \\ -0.29189 & -0.46748 & 0.83442 & 426.47862 \end{bmatrix}$ |
| #10      | $\begin{bmatrix} 0.99605 & -0.03005 & 0.08357 & -243.96737 \\ 0.03016 & 0.99955 & -0.00001 & -182.87862 \\ -0.08353 & 0.00253 & 0.99650 & 629.23643 \end{bmatrix}$  |

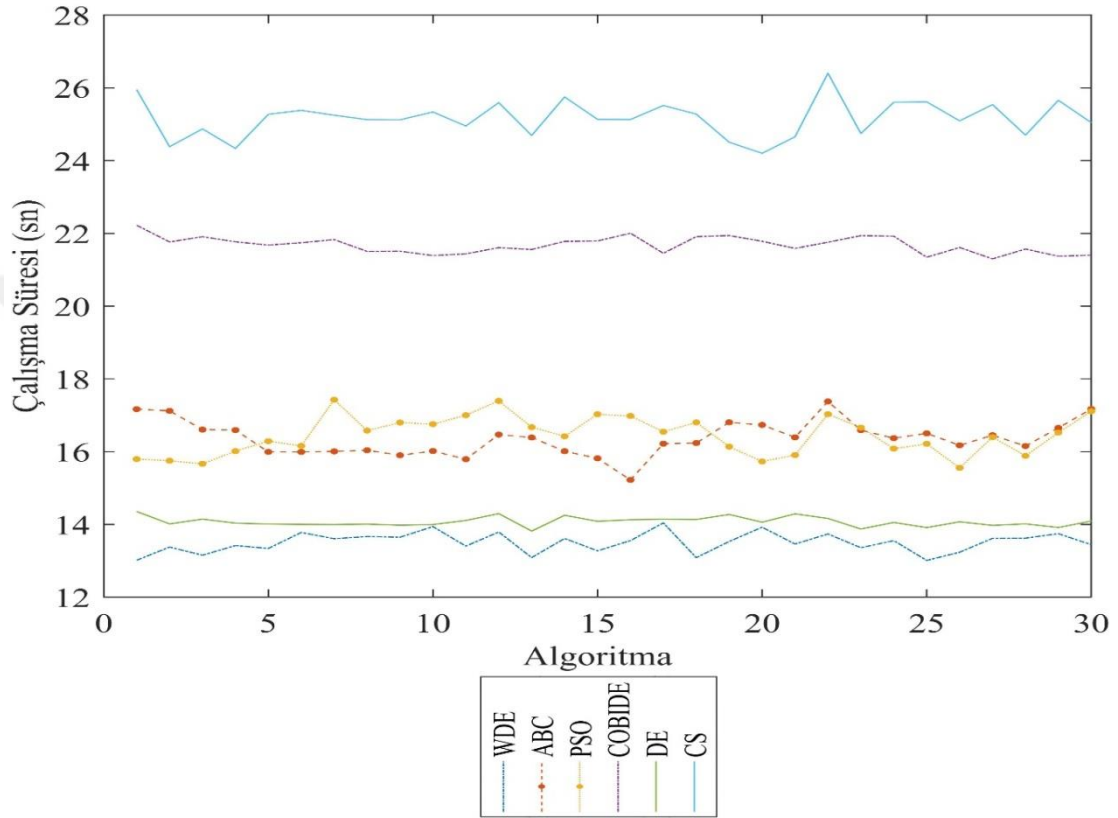
Evrimsel yöntemlerin başarılarının karşılaştırılması için kullanılan en etkili yöntemlerden birisi de kutu grafik gösterimidir. Kutu grafiği birinci ve üçüncü kuartil değerleri, medyan ve aykırı değerlerin basit ve anlaşılır bir şekilde gösterildiği grafiklerdir. Kamera modelinin çözümünde kullanılan evrimsel hesaplama algoritmalarının elde ettiği amaç fonksiyon değerine göre kutu grafik çizdirilmiştir. Her evrimsel hesaplama algoritmasının 30 kere koşturulması ile elde edilen amaç fonksiyon değerine ait ortalama ve standart sapmanın kutu grafik gösterimi Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. Test Alanı 1 uygulamasında evrimsel hesaplama algoritmalarının performans gösterimi

Şekil 21 incelendiği zaman WDE algoritmasının en düşük medyanı ve en düşük amaç fonksiyon sonucu verdiği görülmektedir. WDE, ABC ve PSO algoritmaları birlikte incelendiğinde birinci ve üçüncü kuartil değerleri arasındaki mesafe olan çeyrekler arası mesafe oldukça düşüktür. DE algoritması gürbüz sonuç üretmediğinden kartiller arası mesafe fazladır. Aykırı değerler sıra dışı şekilde düşük veya yüksek değerler alabilen noktalardır. Eğer birinci kuartilin 1.5 katı altı, üçüncü kuartilin 1.5 katı üstü kadar çeyrekler arası mesafe uzak noktalar aykırı değerler olarak kabul edilmektedir. DE algoritması incelendiğinde aykırı değerler ürettiği görülmektedir. Tek iterasyonlu çözümlerde bu aykırı değerlere yakın sonuç üretilmesi olasıdır. Bundan dolayı 30 farklı çözümün ortalaması kullanılmaktadır. CS ve WDE algoritmaları kıyaslandığında CS

algoritmasında medyan 1. Kuartile yakın çıkmasına rağmen daha uzun bıyıklara (whisker) sahiptir. PSO algoritması her iterasyonda oldukça yakın sonuçlar üretmiştir ve bu gürbüz bir algoritma olduğunu göstermektedir. Şekil 22’de evrimsel hesaplama algoritmalarının her iterasyondaki çalışma süreleri gösterilmiştir.



Şekil 22. Evrimsel hesaplama algoritmalarının çalışma süre performansı

Şekil 22 incelendiğinde WDE algoritmasının en hızlı yöntem olduğu görülmektedir. Öğrenci t-testinin parametrik olmayan alternatifi olan Wilcoxon işaretli sıralar testi, evrimsel hesaplama algoritmaları arasındaki farkların anlamlılık seviyesini belirlemek için kullanılmıştır. Wilcoxon işaretli sıralar testi için popülasyonun sürekli ve olasılık yoğunluk fonksiyonunun simetrik olması gerekmektedir. Verilerin farklarının normal dağılıma uygunluğunun incelenmesi için evrimsel hesaplama algoritmalarından elde edilen 30 farklı amaç fonksiyonu değerleri önerilen yöntem olan WDE algoritmasının ürettiği değerlerden çıkartılmıştır. Normal dağılıma uygunluğunu incelemek için Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır. Algoritmalar arasındaki farkın normal dağılıma uygunluğu incelenirken  $H_0$  hipotezi olarak verinin normal dağıldığı kabul edilmiştir.  $\alpha = 0.05$  önem seviyesinde verinin normal dağılmadığı belirlenmiştir. WDE

ile elde edilen test sonuçları eşlenik olarak diğer evrimsel hesaplama algoritmalarına karşılaştırılarak elde edilen Wilcoxon test sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

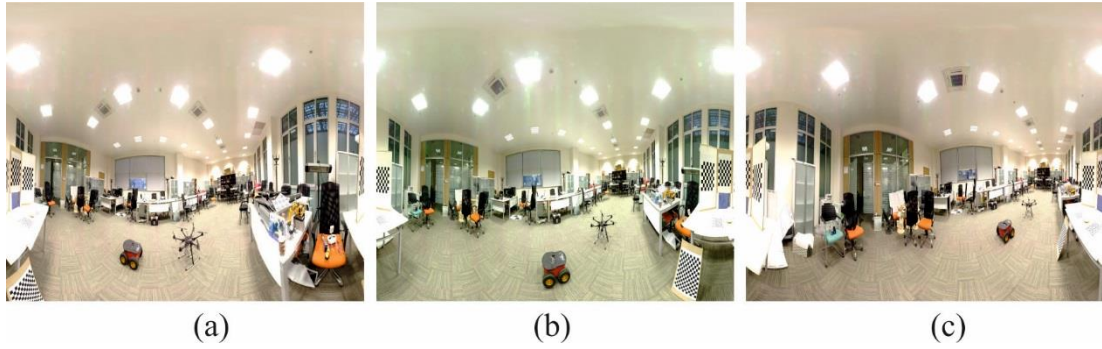
Tablo 12. Test Alanı 1’e ait Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları

| Algoritma | p-değeri   | z-değeri | Ranksum | Kazanan |
|-----------|------------|----------|---------|---------|
| ABC       | 3.0199e-11 | -6.6456  | 465     | WDE     |
| COBIDE    | 3.0199e-11 | -6.6456  | 465     | WDE     |
| CS        | 3.0199e-11 | -6.6456  | 465     | WDE     |
| DE        | 3.0199e-11 | -6.6456  | 465     | WDE     |
| PSO       | 3.0199e-11 | -6.6456  | 465     | WDE     |

Wilcoxon testi için  $H_0$  hipotezi fark verilerinin aynı eşit medyandan geldiği kabul edilmiştir ve  $\alpha = 0.05$  önem seviyesinde test uygulanmıştır. Test uygulanırken evrimsel hesaplama algoritmalarının sonuçları sıralanmış ve Tablo 12’de gösterilen ranksum değeri ilgili sıralama sonucunda WDE algoritmasının elde ettiği sonucun bulunduğu sıra numarasının toplamını vermektedir. Z-değeri z istatistik değerini, p-değeri ise  $H_0$  hipotezi ile örnek arasındaki uyumsuzluğun gücünü ölçen ve 0-1 arasında değer alan p istatistik sonucunu vermektedir [151]. Tablo 12 incelendiğinde p değerinin 0’a çok yakın olduğunu yani  $H_0$  gerçekleşme olasılığının düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, WDE algoritmasının diğer algoritmalar ile aynı medyandan gelmediği anlaşılmaktadır.

### 5.1.1. Nokta Bulutlarının Çakıştırılması

Farklı koordinat sisteminde üretilen nokta bulutlarının görsel ve istatistiksel olarak karşılaştırılmasının yapılabilmesi için aynı koordinat sisteminde tanımlanması gerekmektedir. Test nokta bulutları lokal koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Benzer şekilde YLT ile üretilen nokta bulutları ortak bir koordinat sisteminde üretilmemişse, her biri bir lokal koordinat sistemindedir. Bundan dolayı her iki veri de çakıştırılarak aynı koordinat sisteminde tanımlanmalıdır. YLT verisi ile Test-1 alanına ait nokta bulutu üretilirken 3 farklı oturumda tarama yapılmış ve bunlar kendi içerisinde çakıştırılmıştır. Tarama işlemi renkli olarak yapılmıştır. Her bir oturumdan ilgili sahneye ait elde edilen panoramik görüntü Şekil 23’de verilmiştir.



Şekil 23. Farklı oturumlardan elde edilen panoramik görüntüler a) Birinci oturum b) İkinci oturum c) Üçüncü oturum

YLT ile her oturumda edilen nokta bulutu ICP yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi için nokta bulutlarının belirli oranda bindirimli olması gerekmektedir. Yeterli örtüşme sağlanamazsa nokta bulutları karşılaşmamakta veya yüksek hata oranı ile karşılaşmaktadır. Karşılaştırılan bölge içerisinde referans nokta bulutuna maksimum nokta hatası, ortalama nokta hatası ve minimum karşılaşma oranları belirlenir. Bu bilgiler Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Referans nokta bulutunun karşılaşma hatası

| Referans Tarama Noktası | Maksimum Nokta Hatası (mm) | Ortalama Nokta Hatası (mm) | Minimum Karşılaşma Oranı (%) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Şekil 23.a              | 0.7                        | 0.6                        | 89.9                         |
| Şekil 23.b              | 0.7                        | 0.6                        | 89.9                         |
| Şekil 23.c              | 0.6                        | 0.6                        | 91.2                         |

Tablo 13 incelendiğinde maksimum hatanın 0.7 mm, ortalama hatanın 0.6 mm ve minimum örtüşmelerin %80'in üzerinde olduğu görülmüştür. Referans nokta bulutunun hangi nokta bulutu ile minimum ve maksimum koşulları sağladığının bilinmesi önemli olmadığı için ayrıca verilmemiştir. Her evrimsel hesaplama algoritması ile elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak oluşturulan Test nokta bulutu referans nokta bulutuna dönüşümü yapılmadan istatistiksel ve görsel analizler yapılamamaktadır. İlgili nokta bulutlarının karşılaştırılması için ICP gibi rastgele örnekleme olarak bütün modeli karşılaştırmak yerine belirlenen kontrol noktalarına göre karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Çünkü ICP yöntemi gürültüye duyarlıdır ve her test nokta bulutu farklı seviyede gürültü içermektedir. Kontrol nokta sayısı arttığı zaman iki nokta bulutu arasındaki farkların

anlamli seviyede belirlenemediği için deneysel olarak 5 kontrol noktası kullanılarak donüşüm yapılmıştır. Donüşüm yapılacak noktalar homojen dağılımlı olacak şekilde nokta bulutlarının içerisinden el ile belirlenmiştir. Tablo 14’da referans nokta bulutundan aynı noktayı 30 farklı kez denenerek elde edilen kontrol noktalarının ortalama konumları verilmiştir.

Tablo 14. Referans Kontrol Noktalarının Konum Bilgisi

|           | <b>X</b> | <b>Y</b> | <b>Z</b> |
|-----------|----------|----------|----------|
| <b>P1</b> | 0.034    | 1.566    | 68.655   |
| <b>P2</b> | 0.243    | 1.462    | 68.333   |
| <b>P3</b> | 0.547    | 0.990    | 68.644   |
| <b>P4</b> | 0.535    | 0.740    | 68.324   |
| <b>P5</b> | -0.345   | 1.256    | 67.839   |

Kontrol noktalarının dağılımları ve sayısı model doğruluğu oldukça etkilemektedir. Bunun için en iyi dağılımda, burulmayı ve ölçek faktörünü aşırı değiştirmeyecek sayıda nokta seçilmiştir. Kontrol noktalarının referans nokta bulutu üzerinde YLT tarama konumları ile şekil 24’de verilmiştir.



Şekil 24. Referans nokta bulutu, kontrol noktalarının dağılımları ve tarama istasyonlarının gösterimi

İki farklı koordinat sisteminde üretilen verilerin donüşümünü yapmak için benzerlik donüşümü kullanılmıştır. Benzerlik donüşümü 3 öteleme, 3 donüklük ve 1 ölçek olmak

üzere 7 parametreden oluşmaktadır. Benzerlik dönüşümü sonunda şekiller korunur, kenar ve uzunluklar belirli oranda ölçeklenir ve açıların mutlak değerleri sabit kalmaktadır. Referans nokta bulutu ile test nokta bulutu arasındaki dönüşüm sonrası elde edilen dönüklük matrisi, öteleme matrisi ve ölçek faktörü Tablo 15’da verilmiştir.

Tablo 15. Test Alanı-1 için elde edilen dönüşüm parametreleri

|           |         | Dönüklük (R)   | Öteleme (T)   | Ölçek (s) |
|-----------|---------|--|---|-----------|
| YÖNTEMLER | WDE     | $\begin{bmatrix} 0.162 & 0.001 & -0.003 \\ -0.003 & 0.079 & -0.141 \\ 0.000 & 0.141 & 0.079 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.153 \\ -0.019 \\ 68.667 \end{bmatrix}$ | 0.162     |
|           | ABC     | $\begin{bmatrix} 0.173 & 0.001 & -0.002 \\ -0.003 & 0.084 & -0.151 \\ 0.000 & 0.151 & 0.084 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.156 \\ -0.021 \\ 68.667 \end{bmatrix}$ | 0.173     |
|           | PSO     | $\begin{bmatrix} 1.680 & 0.065 & -0.149 \\ -0.162 & 0.082 & -0.147 \\ 0.011 & 0.209 & 0.104 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0.499 \\ 0.389 \\ 68.403 \end{bmatrix}$ | 0.239     |
|           | COBIDE  | $\begin{bmatrix} 0.156 & 0.001 & -0.002 \\ -0.002 & 0.076 & -0.137 \\ 0.000 & 0.137 & 0.076 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.157 \\ -0.021 \\ 68.667 \end{bmatrix}$ | 0.156     |
|           | DE      | $\begin{bmatrix} 0.159 & 0.001 & -0.002 \\ -0.002 & 0.077 & -0.139 \\ 0.000 & 0.139 & 0.077 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.157 \\ -0.022 \\ 68.668 \end{bmatrix}$ | 0.159     |
|           | CS      | $\begin{bmatrix} 0.185 & 0.041 & -0.096 \\ -0.105 & 0.082 & -0.166 \\ 0.005 & 0.192 & 0.092 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} -0.340 \\ 0.277 \\ 68.384 \end{bmatrix}$ | 0.213     |
|           | Zhang   | $\begin{bmatrix} 0.176 & 0.001 & -0.002 \\ -0.003 & 0.085 & -0.154 \\ 0.000 & 0.154 & 0.085 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.156 \\ -0.021 \\ 68.667 \end{bmatrix}$ | 0.176     |
|           | Bouquet | $\begin{bmatrix} 0.172 & 0.001 & -0.002 \\ -0.002 & 0.083 & -0.150 \\ 0.000 & 0.150 & 0.083 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0.157 \\ -0.021 \\ 68.668 \end{bmatrix}$ | 0.172     |

### 5.1.2. İstatistiksel Değerlendirme ve Görselleştirme

Dönüşüm sonrası aynı koordinat sisteminde tanımlanan nokta bulutlarının analizi ve değerlendirilmesi için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntemde test nokta bulutunu oluşturan her bir test noktası için en yakın 3 referans noktası hesaplanarak bu

referans noktalarına düzlem uydurulmuştur. Ardından test noktasının ilgili düzlemi oluşturan noktaların ağırlık merkezi olan noktaya Öklid mesafesi hesaplanmıştır. Bu amaçla  $test_i \in \mathbb{R}^3$  i. test noktalarını,  $ref \in \mathbb{R}^3$  ise  $test_i$  noktalarına en yakın 3 noktayı ifade etmektedir. Referans düzlemin belirlenmesi için ilgili  $ref = \langle x_{\eta=1:3} \mid x_{\eta} \in ref \rangle$  noktaları kullanılarak;

$$\vec{n}_{düzlem} \cdot \left( x_0 - \frac{1}{3} \cdot \underbrace{\sum_{\eta=1}^3 x_{\eta}}_{\mu} \right) = 0 \quad (70)$$

Burada,  $\vec{n}_{düzlem} = \frac{(x_{\eta=2} - x_{\eta=1}) \times (x_{\eta=3} - x_{\eta=1})}{|(x_{\eta=2} - x_{\eta=1}) \times (x_{\eta=3} - x_{\eta=1})|}$  referans düzleme ait normal vektördür.  $\mu$ ,  $ref$  noktalarının ağırlık merkezini belirtmek üzere,  $test_i$ 'den ilgili düzleme olan mesafe;

$$d_i^{(1)} = \vec{n}_{düzlem} \cdot (test_i - \mu) \quad (71)$$

Referans nokta bulutu verisine lokal düzlemler 3 komşuluk için uydurulmuş ve her test nokta bulutu verisinin ilgili düzleme en yakın noktanın gerçek mesafesi ( $d_i^{(1)}$ ) elde edilmiştir. Gerçek mesafelerin ortalama (Ort.) ve standart sapma (SS) değerleri Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16.  $d_i^{(1)}$  Mesafelerinin istatistiksel değerleri

|                      | WDE            | ABC     | PSO     | COBiDE  | DE      | CS      | Zhang   | Bouguet |
|----------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Ort.<br/>(mm)</b> | <b>0.00406</b> | 0.00408 | 0.00411 | 0.00408 | 0.00410 | 0.00409 | 0.00411 | 0.00412 |
| <b>SS.<br/>(mm)</b>  | <b>0.01091</b> | 0.01134 | 0.01189 | 0.01134 | 0.01171 | 0.01134 | 0.01189 | 0.01135 |

Tablo 16 incelendiği zaman en küçük ortalama ve standart sapmayı WDE algoritması kullanılarak elde edilen kamera kalibrasyon parametresiyle oluşturulan test nokta bulutunun elde ettiği görülmektedir. Nümerik olarak diğer yöntemler ile üretilen sonuçlarda birbirine oldukça yakın değerlerdedir.

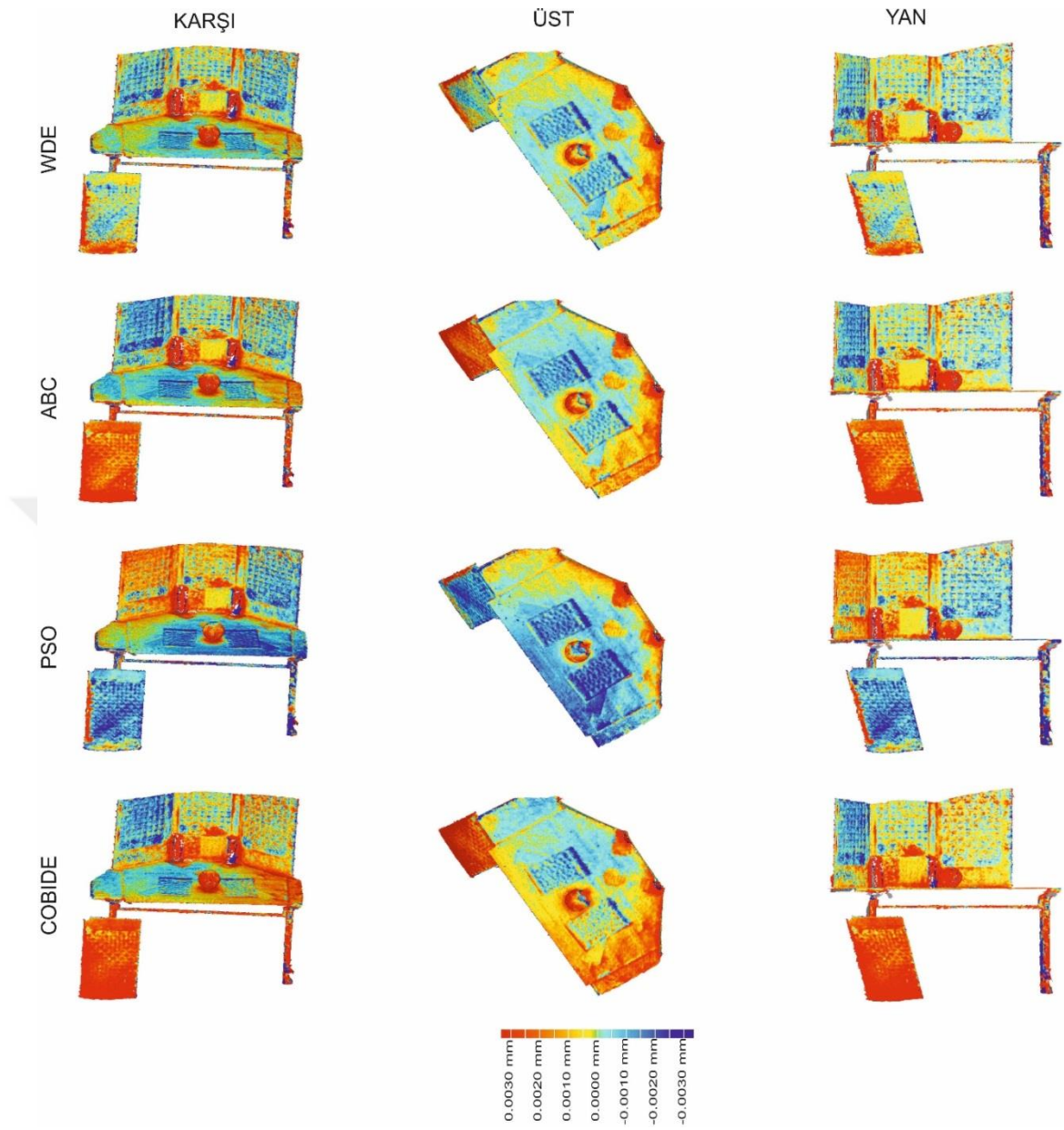
Analiz için kullanılan ikinci yöntemde test noktalarına uydurulan düzlemleri oluşturan noktalar ile referans noktalarına uydurulan düzlemleri oluşturan noktaların ağırlık

merkezlerini oluşturan noktalar arasındaki mesafeler ( $d_i^{(2)}$ ) hesaplanmıştır. İlgili düzlemlerin elde edilmesi için test ve referans nokta bulutlarına en yakın 3 nokta kullanılmıştır. Tablo 17 'de referans ve test nokta bulutlarına uydurulan düzlemler arasındaki mesafelerin basit istatistiği verilmiştir.

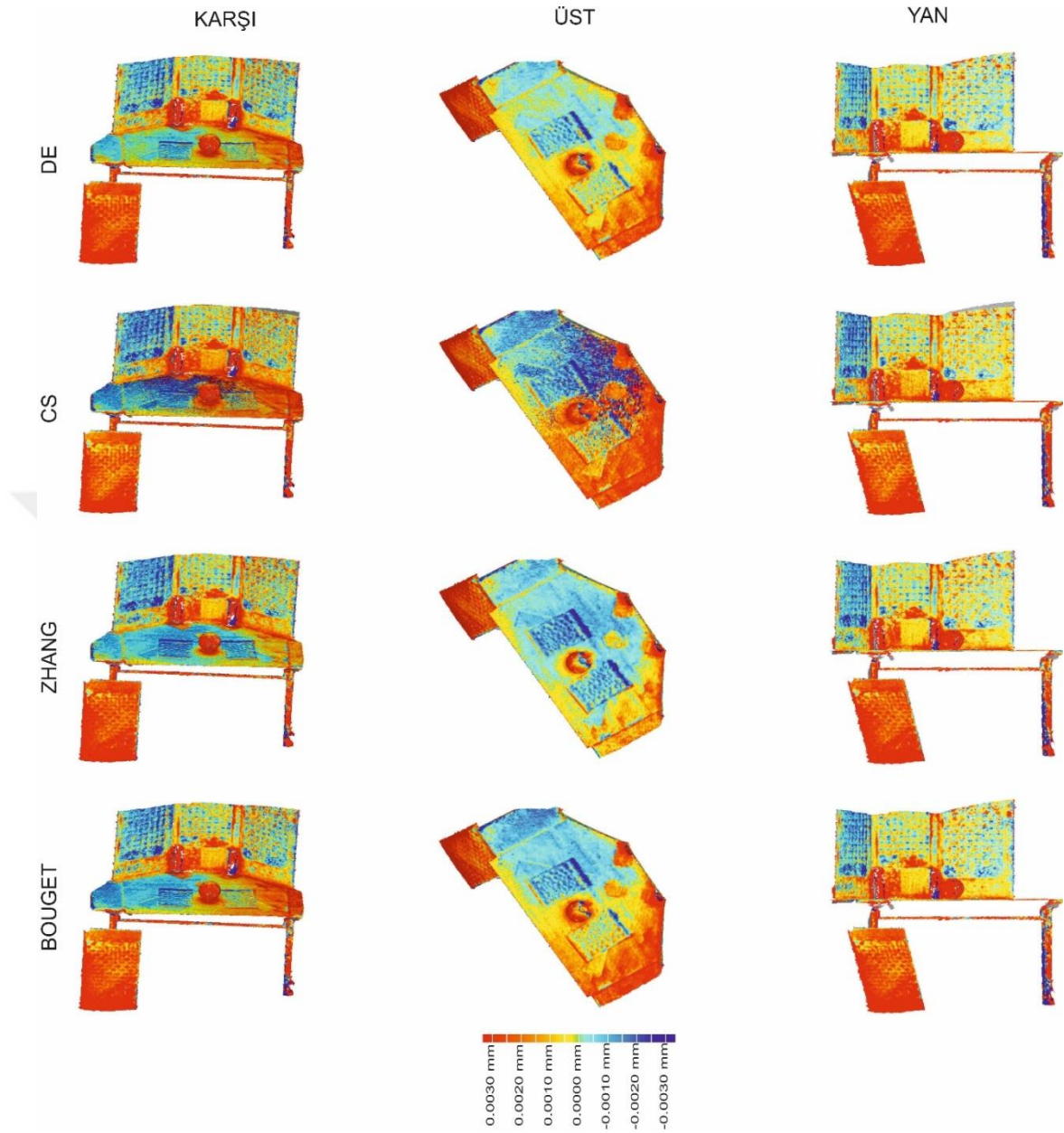
Tablo 17.  $d_i^{(2)}$  Mesafelerinin istatistiksel değerleri

|                             | <b>WDE</b>                       | <b>ABC</b>         | <b>PSO</b>         | <b>COBIDE</b>      | <b>DE</b>          | <b>CS</b>          | <b>Zhang</b>       | <b>Bouguet</b>     |
|-----------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Ort.</b><br><b>(mm)</b>  | <b>0.0014/-</b><br><b>0.0009</b> | 0.0017/-<br>0.0010 | 0.0017/-<br>0.0015 | 0.0020/-<br>0.0013 | 0.0018/-<br>0.0010 | 0.0016/-<br>0.0012 | 0.0022/-<br>0.0013 | 0.0019/-<br>0.0011 |
| <b>SS.</b><br><b>(mm)</b>   | <b>0.0020</b>                    | 0.0022             | 0.0031             | 0.0026             | 0.0023             | 0.0022             | 0.0026             | 0.0023             |
| <b>MAKS.</b><br><b>(mm)</b> | -0.00430                         | 0.00377            | 0.00593            | 0.00334            | 0.00498            | <b>0.00311</b>     | 0.00347            | 0.00550            |
| <b>MİN.</b><br><b>(mm)</b>  | -0.00536                         | -0.00350           | -0.00621           | -0.00368           | -0.00343           | -0.00324           | <b>-0.00309</b>    | -0.00313           |

Tablo 17 incelendiği zaman WDE algoritması kullanılarak üretilen test nokta bulutunun referans test nokta bulutuna uzaklığının standart sapma ve ortalamasının daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca Tablo 17'de referans nokta bulutunun altında (MİN) ve üstünde olan noktaların (MAX) ortalaması da verilmiştir. Test nokta bulutu üretirken kullanılan kamera kalibrasyon parametrelerinin farklı olmasından dolayı maksimum ve minimum noktalar farklılıklar göstermektedir. İkinci yöntem ile nokta bulutları arasındaki farklar belirlendikten sonra farkların görsel sunumu için hesaplanan mesafeler [0 255] tamsayı aralığına ölçeklenmiştir. Daha sonra ölçeklenen mesafe değeri referans nokta bulutu üzerine yakıştırma-renk olarak atanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 25 ve Şekil 26'de verilmiştir. Şekilde referans yüzeyinin altında kalan yüzeyler negatif değer alırken üzerindeki pozitif değer almaktadır. Görsel olarak daha iyi yorumlanabilmesi için 3 farklı açıdan sunumu yapılmıştır.



Şekil 25.  $d_l^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi

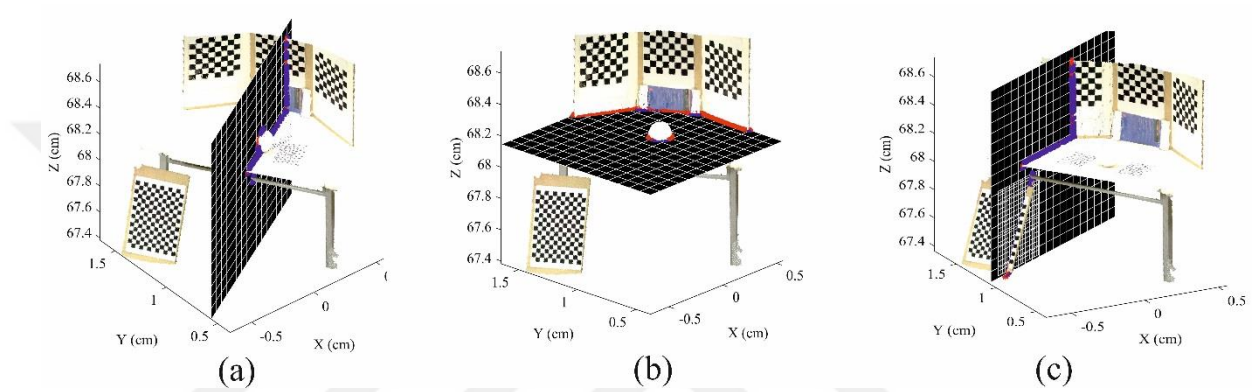


Şekil 26.  $d_i^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi (devam)

### 5.1.3. Kesit Çıkartımı

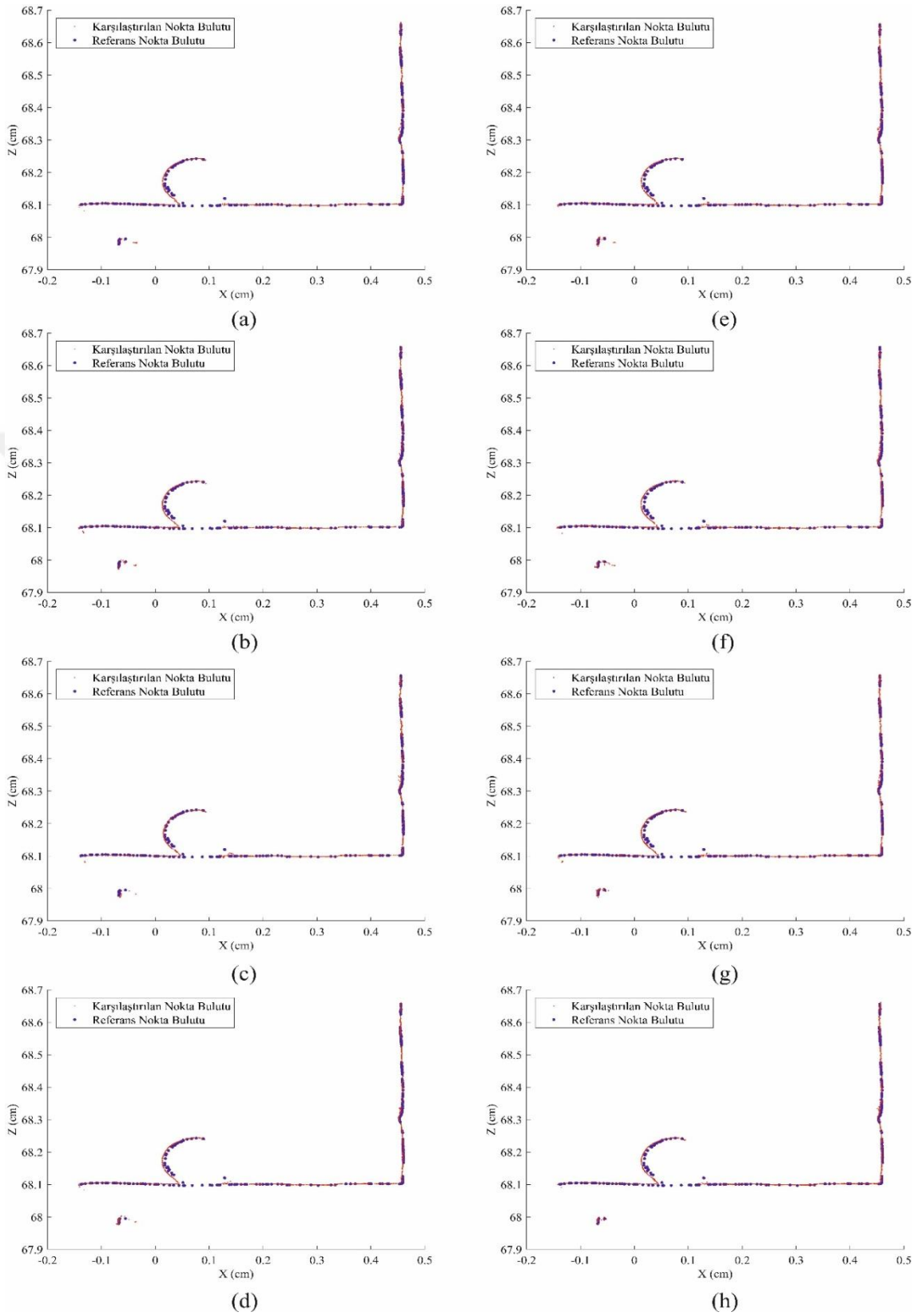
Nokta bulutlarının analizinde kullanılan diğer bir yöntem belirli konum ve dönüklükte tanımlanan düzleme belirli kriterlere göre dik iz düşürülen nokta bulutlarının karşılaştırılmasıdır. Bu yöntem ile 3D grafiklerde detay olarak bilinen ancak göz ile kolaylıkla seçilemeyen ayrıntı bölgeleri görünür hale getirilir ve daha anlaşılır analizler yapılabilir. Yatay düzlemler kullanarak sahneye ait nokta bulutundan arakesit planları elde edilirken, düşey düzlemler kullanılarak cephe planları elde edilir. Konveks ve konkav poligonlarda meydana gelen deformasyonların daha ayrıntılı incelenebilmesi

için belirli bölgelerden kesitler alınarak analizlerin yapılması nokta bulutları arasındaki farkın daha anlaşılır olması için önemlidir. Bundan dolayı Test Alanı 1 için farklı konum ve dönüklüklerde kesitler oluşturulmuştur. Uygulama için çeşitli açılardan elde edilen kesitler Şekil 27’de gösterilmektedir. Düşey kesitler elde edilirken X-Z eksenli kesitler kullanılırken, yatay kesitin oluşturulması için Y-X eksenli düzlem kullanılmıştır. Kırmızı nokta test nokta bulutunu, mavi nokta ise referans nokta bulutunu temsil etmektedir.

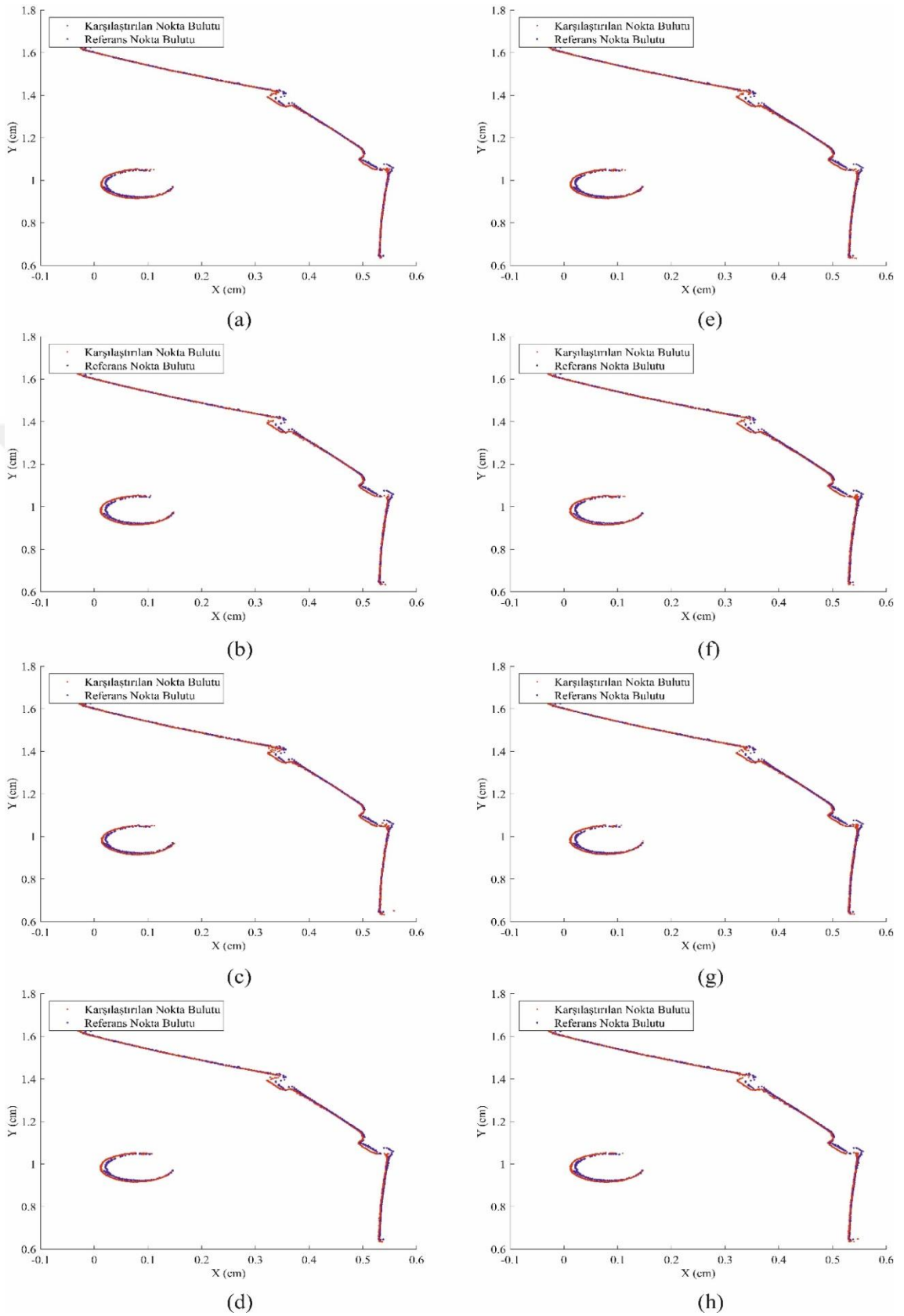


Şekil 27. a) Düşey Kesit 1, b) Yatay Kesit ve c) Düşey Kesit 2

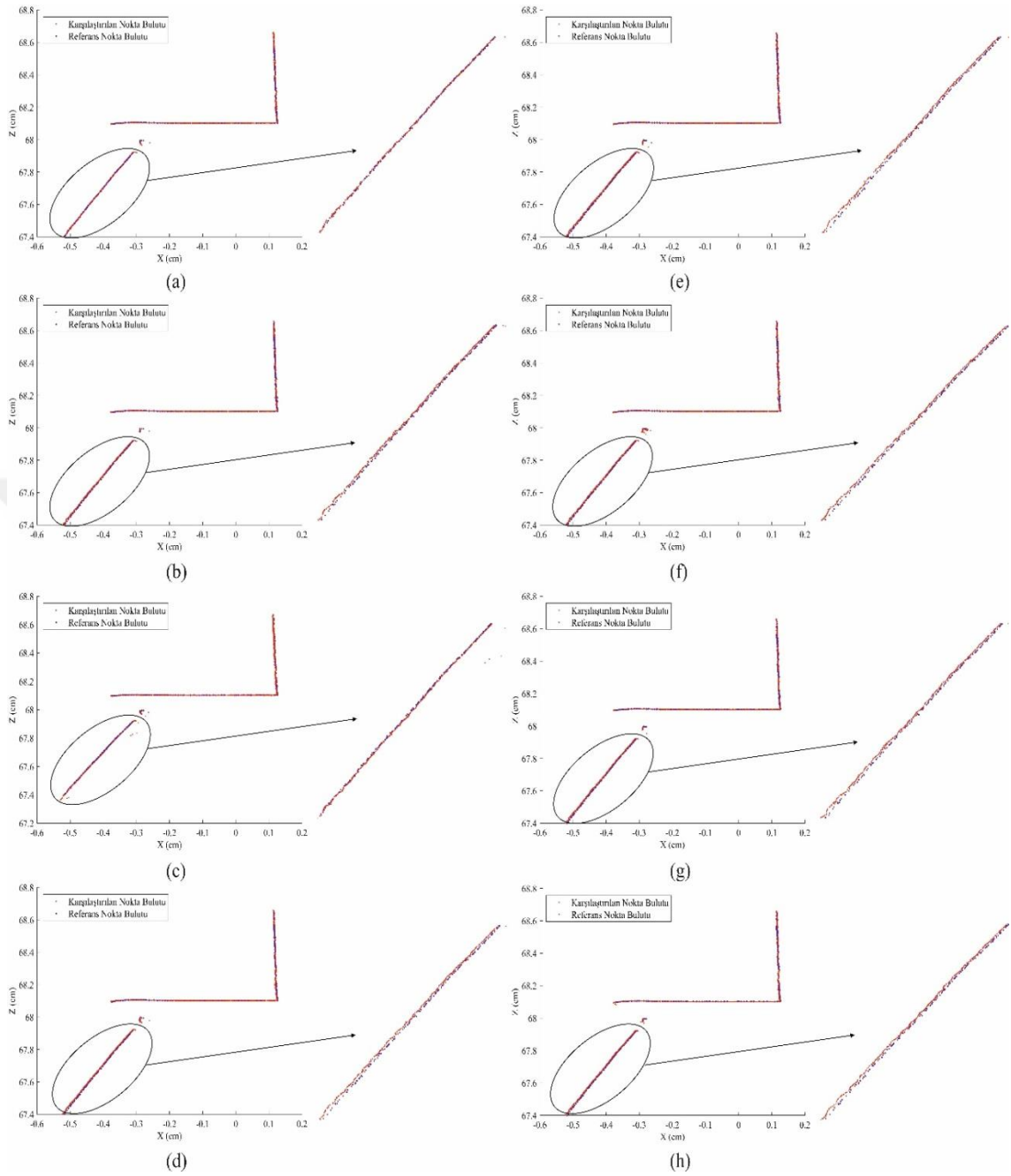
Şekil 27.a’da gösterilen düzleme dik iz düşürülen referans ve test nokta bulutları Şekil 28’de, Şekil 27.b’de gösterilen düzleme dik iz düşürülen nokta bulutları Şekil 29’de ve Şekil 27.c’de gösterilen düzleme dik iz düşürülen nokta bulutları Şekil 30’de büyütülerek gösterilmiştir.



Şekil 28. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yöneltme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi.



Şekil 29. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yönlendirme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi.

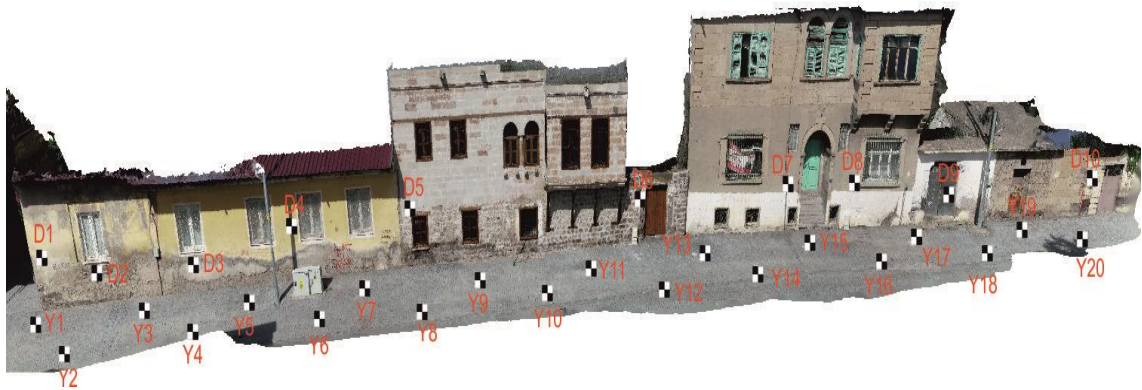


Şekil 30. a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, h) Bouguet yöntemleriyle elde edilen iç yönelme parametreleri kullanılarak üretilen test nokta bulutu ile referans nokta bulutu arasındaki farkın gösterimi.

## 5.2. Test Alanı 2

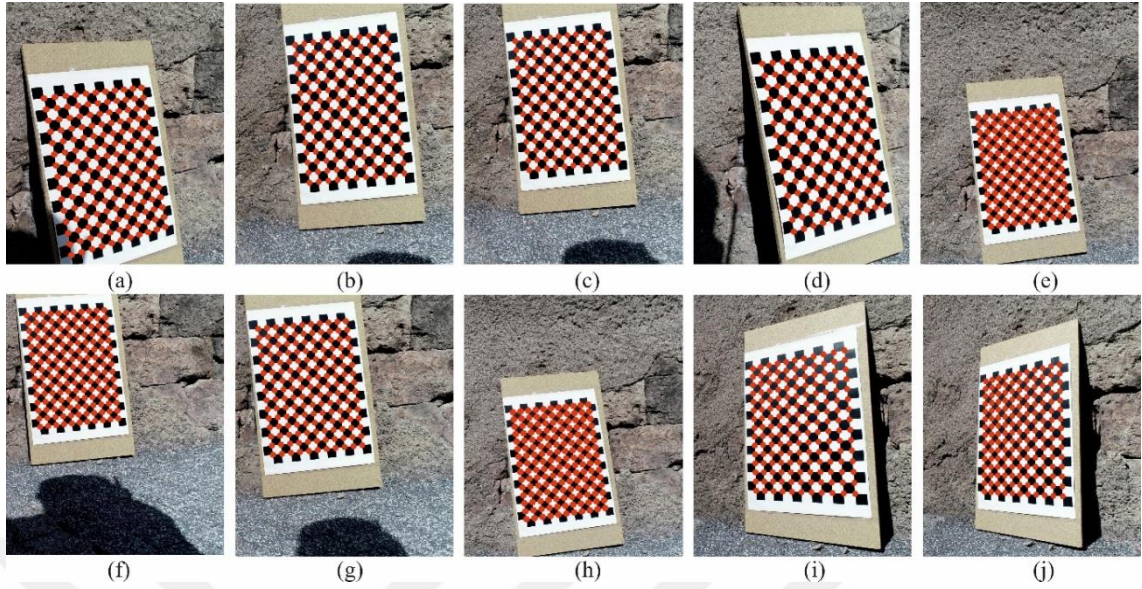
Çevresel haritalama için Kayseri Talas'ta restorasyonu yeni yapılmış Sabiha Arısoy Evi uygulama alanı olarak belirlenmiştir. Bundan sonraki bölümde Test-2 alanı olarak isimlendirilecektir. Test-1 alanı laboratuvar ortamında gerçekleştirildiği için atmosferik değişimler ve ışıklandırma koşullarına bağlı gürültü kaynaklarının üretilen nokta

bulutuna etkisi büyük oranda azaltılmıştır. Ancak, bazı yüzeylerin tekrarlı yüzeye sahip olması, dış mekandaki öngörülemeyen koşulların görüntü yakalamayı zorlaştırması, topoğrafik şartlardan kaynaklı zorluklar ve değişen gün ışığı gibi sebeplerden dolayı dış mekân tercih edilmiştir. Test-2 alanını oluşturan test ve referans nokta bulutlarının aynı koordinat sisteminde tanımlanması için gerçek dünya koordinatlarına dönüşümleri sağlanmıştır. İlgili dönüşümleri sağlamak için elde edilen yer kontrol noktaları Spectra Precision ProMark 800 GNSS alıcısı ile CORS sistemine bağlı olarak 30 sn. süre ile ölçülmüştür. Çalışma alanında toplam 20 adet yer kontrol noktası tesis edilmiştir. Yer kontrol noktaları tesis edilirken çapraz, homojen ve farklı yüksekliklerde olmasına dikkat edilmiştir. Çalışma alanında kullanılması amaçlanan yer kontrol noktalarının Şekil 31’de dağılımı verilmiştir.



Şekil 31. Yer Kontrol Noktalarının Test-2 Alanında Gösterimi

Standart fotoğraf makinaları ile hareket halinde video çekiminde gimbal kullanılmaması durumunda videodan çıkartılan görüntülerde çeşitli bozulmalar oluşmaktadır. Özellikle yüksek yapıların çekimi sırasında dikey ve yatay hareketler daha önceki bölümlerde bahsedilen görüntü bozulmalarına sebep olmaktadır. Bundan dolayı gimbal destekli İHA kamerası kullanılarak istenilen açıdan, en az titreşimle ve sahne ile kamera arasındaki mesafeyi sabit tutarak video çekilmiştir. İHA'nın ayarlanabilen kamera nadir açısı ile eğik görüntü edebilme ve belirlenen hızda hareket video çekebilme yeteneği tercih sebepleri arasındadır. Video çekimi yapılmadan önce hazırlanan uçuş planlamasında 4 kolon uçuşun yeterli olacağı belirlenmiştir. Video çekimine başlanmadan önce kalibrasyon yüzeyine ait görüntüler elde edilmiştir. SURF ile belirlenen noktaların çeşitli açılardan elde edilen kalibrasyon yüzeyi üzerinde gösterimi Şekil 32’dedir.



*Şekil 32.* SURF noktalarının Test Alanı-2 sahnesine ait kalibrasyon düzlemi görüntüsü üzerinde gösterimi; (a) #1, (b) #2, (c) #3, (d) #4, (e) #5, (f) #6, (g) #7, (h) #8, (i) #9, (j) #10.

Önerilen kamera modeli kullanılarak iç yöneltme parametreleri her bir algoritma kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan algoritmaların amaç fonksiyonu değeri başarısına göre WDE algoritması (1572.26) en iyi sonucu vermiştir. Hesaplanan kamera iç yöneltme parametrelerinin ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 18’de verilmiştir.

Tablo 18. İlgili yöntemlerle elde edilen iç yöneltme parametreleri ve amaç fonksiyon değeri

| #                            | Yöntemler                          |                            |                             |                            |                            |                            |                             |         |         |
|------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------|
|                              | WDE                                | ABC                        | PSO                         | COBIDE                     | DE                         | CS                         | BOUGUET                     | ZHANG   |         |
| İç Yöneltme Parametreleri    | $k_1$                              | -0.01907<br>±<br>0.00049   | -0.01762<br>±<br>2.7E-05    | -0.01803<br>±<br>4.6E-05   | -0.01762<br>±<br>3.1E-05   | -0.01773<br>±<br>0.00013   | -0.01868<br>±<br>0.00043    | -0.018  | -0.0176 |
|                              | $k_2$                              | -0.01969<br>±<br>0.00112   | -0.02332<br>±<br>2.8E-05    | -0.02201<br>±<br>0.0002025 | -0.02333<br>±<br>2.9E-05   | -0.02297<br>±<br>0.00045   | -0.02031<br>±<br>0.00103    | -0.023  | -0.0233 |
|                              | $f_x$                              | 2783.59850<br>±<br>0.10567 | 2783.69252<br>±<br>2.9e-05E | 2783.69253<br>±<br>0.00024 | 2783.69253<br>±<br>2.7E-05 | 2783.69350<br>±<br>0.00506 | 2783.51468<br>±<br>0.13858  | 2785.90 | 2783.69 |
|                              | $f_y$                              | 2781.12505<br>±<br>0.16013 | 2780.62754<br>±<br>3.1E-05  | 2780.62757<br>±<br>0.00024 | 2780.62754<br>±<br>2.9E-05 | 2780.62843<br>±<br>0.01107 | 2780.92134<br>±<br>0.17144  | 2782.51 | 2780.63 |
|                              | $s$                                | 0.17843<br>±<br>0.14968    | 0.83912<br>±<br>2.8E-05     | 0.83915<br>±<br>0.00022    | 0.83912<br>±<br>2.9E-05    | 0.83921<br>±<br>0.00065    | 0.51024<br>±<br>0.20660     | 0.00    | 0.839   |
|                              | $u_0$                              | 2023.58636<br>±<br>0.03161 | 2023.54215<br>±<br>2.9E-05  | 2023.54217<br>±<br>0.00025 | 2023.54215<br>±<br>2.8E-05 | 2023.54171<br>±<br>0.00470 | 2023.58647<br>±<br>0.04430  | 2782.51 | 2023.54 |
|                              | $v_0$                              | 1066.64275<br>±<br>0.02967 | 1066.65550<br>±<br>3.1E-05  | 1066.65550<br>±<br>0.00022 | 1066.65550<br>±<br>2.9E-05 | 1066.65409<br>±<br>0.00606 | 1066.62361<br>±<br>0.029270 | 1065.61 | 1066.66 |
| <b>Amaç Fonksiyon Değeri</b> | <b>1572.26</b><br>±<br><b>0.44</b> | 1573.38<br>±<br>0.11       | 1590.53<br>±<br>0.13        | 1614.99<br>±<br>0.65       | 1595.96<br>±<br>1.64       | 1573.41<br>±<br>0.55       | 1621.49                     | 1622.16 |         |

Kameranın öteleme ve dönüklük bilgisi kamera kalibrasyon sürecinde ekstra kısıtlamalar sağlar. WDE ve ABC algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme bilinmeyenlerinin ortalaması Tablo 19 ve Tablo 20’te, PSO ve COBiDE algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme bilinmeyenlerinin ortalaması Tablo 21 ve Tablo 22’de ve DE ve CS algoritmaları ile belirlenen dış yöneltme bilinmeyenlerinin ortalaması Tablo 23 ve Tablo 24’de verilmiştir. Ayrıca, Bouguet ve Zhang modeline göre belirlenen dış yöneltme bilinmeyenleri Tablo 25 ve Tablo 26’da verilmiştir.

Tablo 19.WDE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | WDE                                |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12865                            | -0.98739 | -0.09220 | 199.08962  |
|          | 0.97623                            | 0.10975  | 0.18690  | -57.59541  |
|          | -0.17442                           | -0.11405 | 0.97804  | 1286.10544 |
| #2       | 0.12829                            | -0.98798 | -0.08628 | 183.28760  |
|          | 0.97519                            | 0.10985  | 0.19217  | -55.21722  |
|          | -0.18038                           | -0.10879 | 0.97756  | 1285.32003 |
| #3       | -0.06144                           | -0.67872 | 0.73182  | 468.50383  |
|          | 0.98117                            | 0.09346  | 0.16905  | -170.05202 |
|          | -0.18314                           | 0.72842  | 0.66020  | 966.42192  |
| #4       | -0.01711                           | -0.78326 | 0.62145  | 487.54778  |
|          | 0.98570                            | 0.09101  | 0.14184  | -190.77502 |
|          | -0.16766                           | 0.61499  | 0.77050  | 893.31799  |
| #5       | 0.10652                            | -0.99090 | -0.08228 | 430.24980  |
|          | 0.99338                            | 0.10247  | 0.05194  | -384.37689 |
|          | -0.04303                           | -0.08727 | 0.99525  | 1137.39246 |
| #6       | 0.10482                            | -0.99393 | -0.03326 | 416.19215  |
|          | 0.99301                            | 0.10278  | 0.05810  | -307.45342 |
|          | -0.05432                           | -0.03912 | 0.99776  | 1009.29166 |
| #7       | 0.09736                            | -0.99473 | 0.03215  | 465.33919  |
|          | 0.99354                            | 0.09904  | 0.05548  | -289.53031 |
|          | -0.05837                           | 0.02655  | 0.99794  | 960.66897  |
| #8       | 0.09372                            | -0.99231 | 0.08089  | 489.40392  |
|          | 0.99360                            | 0.09837  | 0.05556  | -271.20159 |
|          | -0.06309                           | 0.07516  | 0.99517  | 909.06701  |
| #9       | 0.15297                            | -0.91352 | -0.37694 | 350.39254  |
|          | 0.98823                            | 0.14077  | 0.05989  | -115.58755 |
|          | -0.00165                           | -0.38167 | 0.92430  | 891.61198  |
| #10      | 0.16427                            | -0.93069 | -0.32687 | 505.25663  |
|          | 0.98601                            | 0.14544  | 0.08142  | -190.53945 |
|          | -0.02824                           | -0.33567 | 0.94156  | 838.48331  |

Tablo 20. ABC algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | ABC                                |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12859                            | -0.98717 | -0.09468 | 199.00934  |
|          | 0.97638                            | 0.10930  | 0.18639  | -57.54221  |
|          | -0.17365                           | -0.11641 | 0.97790  | 1285.71711 |
| #2       | 0.12805                            | -0.98800 | -0.08641 | 183.31973  |
|          | 0.97527                            | 0.10961  | 0.19194  | -55.15278  |
|          | -0.18017                           | -0.10885 | 0.97759  | 1285.34013 |
| #3       | -0.06163                           | -0.67954 | 0.73105  | 468.78177  |
|          | 0.98110                            | 0.09336  | 0.16949  | -170.02381 |
|          | -0.18343                           | 0.72767  | 0.66094  | 966.66888  |
| #4       | -0.01676                           | -0.78360 | 0.62104  | 487.58951  |
|          | 0.98573                            | 0.09111  | 0.14155  | -190.76556 |
|          | -0.16750                           | 0.61455  | 0.77089  | 893.34346  |
| #5       | 0.10621                            | -0.99092 | -0.08250 | 430.34456  |
|          | 0.99340                            | 0.10213  | 0.05217  | -384.36230 |
|          | -0.04327                           | -0.08750 | 0.99522  | 1137.68288 |
| #6       | 0.10493                            | -0.99390 | -0.03383 | 416.21754  |
|          | 0.99301                            | 0.10287  | 0.05780  | -307.49809 |
|          | -0.05397                           | -0.03966 | 0.99775  | 1009.43298 |
| #7       | 0.09742                            | -0.99472 | 0.03214  | 465.34007  |
|          | 0.99359                            | 0.09907  | 0.05442  | -289.55885 |
|          | -0.05732                           | 0.02664  | 0.99800  | 960.53248  |
| #8       | 0.09370                            | -0.99233 | 0.08065  | 489.40338  |
|          | 0.99363                            | 0.09831  | 0.05513  | -271.20339 |
|          | -0.06264                           | 0.07497  | 0.99522  | 909.00107  |
| #9       | 0.15250                            | -0.91327 | -0.37774 | 350.39909  |
|          | 0.98830                            | 0.14074  | 0.05873  | -115.54686 |
|          | -0.00047                           | -0.38228 | 0.92405  | 891.57772  |
| #10      | 0.16446                            | -0.93051 | -0.32726 | 505.16591  |
|          | 0.98600                            | 0.14581  | 0.08091  | -190.58708 |
|          | -0.02757                           | -0.33598 | 0.94146  | 838.51559  |

Tablo 21. PSO algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | PSO                                |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12861                            | -0.98715 | -0.09480 | 199.00941  |
|          | 0.97628                            | 0.10924  | 0.18692  | -57.54230  |
|          | -0.17416                           | -0.11659 | 0.97779  | 1285.71716 |
| #2       | 0.12812                            | -0.98795 | -0.08687 | 183.32002  |
|          | 0.97521                            | 0.10956  | 0.19224  | -55.15291  |
|          | -0.18040                           | -0.10935 | 0.97750  | 1285.34017 |
| #3       | -0.06226                           | -0.67955 | 0.73099  | 468.78193  |
|          | 0.98093                            | 0.09343  | 0.17041  | -170.02333 |
|          | -0.18410                           | 0.72766  | 0.66077  | 966.66874  |
| #4       | -0.01733                           | -0.78344 | 0.62122  | 487.58956  |
|          | 0.98564                            | 0.09100  | 0.14226  | -190.76555 |
|          | -0.16798                           | 0.61477  | 0.77061  | 893.34356  |
| #5       | 0.10637                            | -0.99089 | -0.08257 | 430.34449  |
|          | 0.99337                            | 0.10225  | 0.05263  | -384.36248 |
|          | -0.04371                           | -0.08762 | 0.99519  | 1137.68273 |
| #6       | 0.10500                            | -0.99389 | -0.03389 | 416.21742  |
|          | 0.99301                            | 0.10294  | 0.05769  | -307.49782 |
|          | -0.05385                           | -0.03971 | 0.99776  | 1009.43303 |
| #7       | 0.09751                            | -0.99471 | 0.03220  | 465.34006  |
|          | 0.99358                            | 0.09916  | 0.05453  | -289.55880 |
|          | -0.05743                           | 0.02668  | 0.99799  | 960.53237  |
| #8       | 0.09373                            | -0.99232 | 0.08068  | 489.40335  |
|          | 0.99362                            | 0.09833  | 0.05517  | -271.20322 |
|          | -0.06268                           | 0.07499  | 0.99521  | 909.00098  |
| #9       | 0.15274                            | -0.91343 | -0.37724 | 350.39932  |
|          | 0.98827                            | 0.14060  | 0.05970  | -115.54723 |
|          | -0.00149                           | -0.38193 | 0.92419  | 891.57749  |
| #10      | 0.16455                            | -0.93050 | -0.32726 | 505.16601  |
|          | 0.98597                            | 0.14576  | 0.08133  | -190.58709 |
|          | -0.02797                           | -0.33606 | 0.94143  | 838.51547  |

Tablo 22. COBIDE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | <b>COBIDE</b>                      |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12857                            | -0.98717 | -0.09466 | 199.00934  |
|          | 0.97637                            | 0.10929  | 0.18643  | -57.54219  |
|          | -0.17369                           | -0.11639 | 0.97790  | 1285.71718 |
| #2       | 0.12808                            | -0.98799 | -0.08643 | 183.31972  |
|          | 0.97526                            | 0.10963  | 0.19197  | -55.15283  |
|          | -0.18019                           | -0.10888 | 0.97759  | 1285.34012 |
| #3       | -0.06165                           | -0.67956 | 0.73102  | 468.78178  |
|          | 0.98110                            | 0.09334  | 0.16951  | -170.02379 |
|          | -0.18342                           | 0.72766  | 0.66096  | 966.66894  |
| #4       | -0.01675                           | -0.78356 | 0.62109  | 487.58954  |
|          | 0.98573                            | 0.09113  | 0.14155  | -190.76554 |
|          | -0.16751                           | 0.61460  | 0.77085  | 893.34343  |
| #5       | 0.10623                            | -0.99091 | -0.08252 | 430.34452  |
|          | 0.99340                            | 0.10215  | 0.05220  | -384.36223 |
|          | -0.04329                           | -0.08752 | 0.99522  | 1137.68288 |
| #6       | 0.10493                            | -0.99390 | -0.03379 | 416.21748  |
|          | 0.99301                            | 0.10288  | 0.05780  | -307.49803 |
|          | -0.05397                           | -0.03962 | 0.99776  | 1009.43300 |
| #7       | 0.09743                            | -0.99472 | 0.03215  | 465.34007  |
|          | 0.99359                            | 0.09908  | 0.05445  | -289.55887 |
|          | -0.05735                           | 0.02664  | 0.99800  | 960.53242  |
| #8       | 0.09366                            | -0.99233 | 0.08063  | 489.40334  |
|          | 0.99363                            | 0.09826  | 0.05512  | -271.20337 |
|          | -0.06262                           | 0.07495  | 0.99522  | 909.00106  |
| #9       | 0.15254                            | -0.91327 | -0.37772 | 350.39911  |
|          | 0.98830                            | 0.14077  | 0.05874  | -115.54688 |
|          | -0.00047                           | -0.38226 | 0.92406  | 891.57772  |
| #10      | 0.16447                            | -0.93049 | -0.32733 | 505.16586  |
|          | 0.98600                            | 0.14581  | 0.08093  | -190.58704 |
|          | -0.02758                           | -0.33605 | 0.94144  | 838.51560  |

Tablo 23. DE algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | <b>DE</b>                          |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12862                            | -0.98715 | -0.09478 | 199.00919  |
|          | 0.97639                            | 0.10933  | 0.18631  | -57.54248  |
|          | -0.17356                           | -0.11650 | 0.97791  | 1285.71798 |
| #2       | 0.12814                            | -0.98795 | -0.08675 | 183.31971  |
|          | 0.97518                            | 0.10959  | 0.19241  | -55.15250  |
|          | -0.18058                           | -0.10926 | 0.97747  | 1285.33925 |
| #3       | -0.06188                           | -0.67984 | 0.73074  | 468.78180  |
|          | 0.98107                            | 0.09318  | 0.16976  | -170.02433 |
|          | -0.18350                           | 0.72742  | 0.66121  | 966.66856  |
| #4       | -0.01706                           | -0.78359 | 0.62105  | 487.58946  |
|          | 0.98570                            | 0.09095  | 0.14183  | -190.76513 |
|          | -0.16762                           | 0.61459  | 0.77083  | 893.34391  |
| #5       | 0.10637                            | -0.99091 | -0.08234 | 430.34345  |
|          | 0.99336                            | 0.10225  | 0.05270  | -384.36228 |
|          | -0.04380                           | -0.08740 | 0.99521  | 1137.68150 |
| #6       | 0.10504                            | -0.99390 | -0.03361 | 416.21712  |
|          | 0.99301                            | 0.10299  | 0.05766  | -307.49794 |
|          | -0.05385                           | -0.03943 | 0.99777  | 1009.43280 |
| #7       | 0.09747                            | -0.99471 | 0.03244  | 465.33992  |
|          | 0.99357                            | 0.09914  | 0.05463  | -289.55824 |
|          | -0.05756                           | 0.02690  | 0.99798  | 960.53221  |
| #8       | 0.09371                            | -0.99231 | 0.08083  | 489.40356  |
|          | 0.99362                            | 0.09833  | 0.05518  | -271.20357 |
|          | -0.06271                           | 0.07514  | 0.99520  | 909.00154  |
| #9       | 0.15248                            | -0.91316 | -0.37800 | 350.39926  |
|          | 0.98831                            | 0.14045  | 0.05938  | -115.54679 |
|          | -0.00113                           | -0.38263 | 0.92390  | 891.57722  |
| #10      | 0.16460                            | -0.93053 | -0.32714 | 505.16566  |
|          | 0.98596                            | 0.14575  | 0.08149  | -190.58735 |
|          | -0.02815                           | -0.33596 | 0.94145  | 838.51593  |

Tablo 24. CS algoritması ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri (Test-2 Alanı)

| #görüntü | CS                                 |          |          |            |
|----------|------------------------------------|----------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |          |          |            |
| #1       | 0.12865                            | -0.98738 | -0.09240 | 199.08649  |
|          | 0.97649                            | 0.10988  | 0.18545  | -57.63178  |
|          | -0.17296                           | -0.11408 | 0.97830  | 1285.77707 |
| #2       | 0.12828                            | -0.98794 | -0.08675 | 183.29547  |
|          | 0.97526                            | 0.10978  | 0.19187  | -55.20110  |
|          | -0.18004                           | -0.10921 | 0.97758  | 1285.32647 |
| #3       | -0.06172                           | -0.67862 | 0.73189  | 468.55674  |
|          | 0.98106                            | 0.09363  | 0.16954  | -170.04059 |
|          | -0.18359                           | 0.72850  | 0.65999  | 966.58098  |
| #4       | -0.01725                           | -0.78325 | 0.62147  | 487.54751  |
|          | 0.98567                            | 0.09099  | 0.14204  | -190.76262 |
|          | -0.16780                           | 0.61501  | 0.77046  | 893.32533  |
| #5       | 0.10658                            | -0.99086 | -0.08272 | 430.30475  |
|          | 0.99339                            | 0.10254  | 0.05156  | -384.39671 |
|          | -0.04261                           | -0.08767 | 0.99524  | 1137.51466 |
| #6       | 0.10479                            | -0.99392 | -0.03388 | 416.21438  |
|          | 0.99302                            | 0.10272  | 0.05798  | -307.43365 |
|          | -0.05415                           | -0.03972 | 0.99774  | 1009.36823 |
| #7       | 0.09737                            | -0.99472 | 0.03230  | 465.38794  |
|          | 0.99356                            | 0.09904  | 0.05499  | -289.52984 |
|          | -0.05789                           | 0.02674  | 0.99796  | 960.66096  |
| #8       | 0.09373                            | -0.99231 | 0.08080  | 489.44829  |
|          | 0.99362                            | 0.09835  | 0.05526  | -271.19945 |
|          | -0.06278                           | 0.07510  | 0.99520  | 909.13237  |
| #9       | 0.15291                            | -0.91346 | -0.37711 | 350.38799  |
|          | 0.98824                            | 0.14075  | 0.05977  | -115.57641 |
|          | -0.00152                           | -0.38181 | 0.92424  | 891.60834  |
| #10      | 0.16421                            | -0.93069 | -0.32689 | 505.27079  |
|          | 0.98602                            | 0.14540  | 0.08134  | -190.53120 |
|          | -0.02818                           | -0.33568 | 0.94155  | 838.52614  |

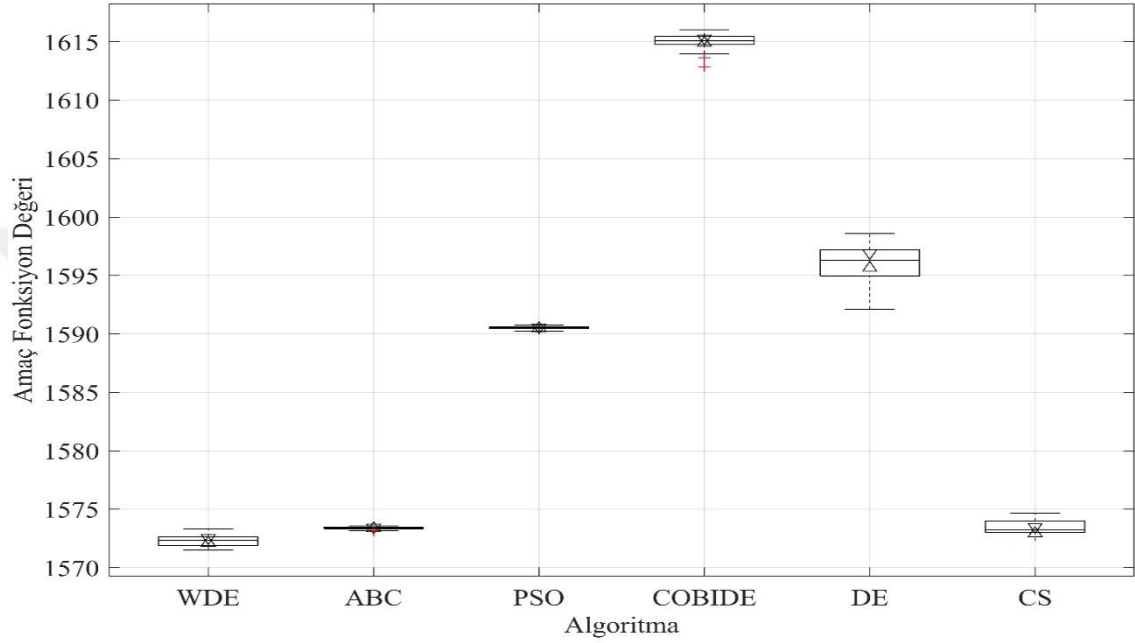
Tablo 25. Zhang yöntemleri ile hesaplanan dış yöneltme parametreleri

| #görüntü | <b>ZHANG</b>                       |         |          |            |
|----------|------------------------------------|---------|----------|------------|
|          | Dış Yöneltme Parametreleri [R   T] |         |          |            |
| #1       | 0.12935                            | 0.97520 | -0.17957 | 199.61580  |
|          | -0.98576                           | 0.10684 | -0.12985 | -57.44634  |
|          | -0.10745                           | 0.19381 | 0.97514  | 1290.27119 |
| #2       | 0.12856                            | 0.97505 | -0.18097 | 183.73838  |
|          | -0.98709                           | 0.10824 | -0.11804 | -55.11721  |
|          | -0.09550                           | 0.19380 | 0.97638  | 1288.52358 |
| #3       | -0.05457                           | 0.98279 | -0.17646 | 469.68655  |
|          | -0.69409                           | 0.08970 | 0.71428  | -170.29013 |
|          | 0.71782                            | 0.16146 | 0.67725  | 973.34270  |
| #4       | -0.01726                           | 0.98504 | -0.17145 | 487.89959  |
|          | -0.79512                           | 0.09044 | 0.59967  | -190.63452 |
|          | 0.60621                            | 0.14667 | 0.78166  | 900.94469  |
| #5       | 0.10749                            | 0.99281 | -0.05257 | 430.84910  |
|          | -0.98849                           | 0.10107 | -0.11256 | -384.51297 |
|          | -0.10644                           | 0.06407 | 0.99225  | 1145.26900 |
| #6       | 0.10585                            | 0.99298 | -0.05272 | 416.17282  |
|          | -0.99320                           | 0.10299 | -0.05429 | -307.41272 |
|          | -0.04848                           | 0.05811 | 0.99713  | 1014.50913 |
| #7       | 0.09814                            | 0.99341 | -0.05922 | 465.43469  |
|          | -0.99512                           | 0.09860 | 0.00488  | -289.52364 |
|          | 0.01068                            | 0.05845 | 0.99823  | 967.54284  |
| #8       | 0.09489                            | 0.99349 | -0.06310 | 489.80847  |
|          | -0.99417                           | 0.09783 | 0.04529  | -271.22537 |
|          | 0.05116                            | 0.05843 | 0.99698  | 917.65661  |
| #9       | 0.15124                            | 0.98844 | 0.01070  | 349.91332  |
|          | -0.90930                           | 0.14336 | -0.39066 | -115.47771 |
|          | -0.38767                           | 0.04935 | 0.92047  | 892.58200  |
| #10      | 0.16472                            | 0.98627 | -0.01215 | 504.28475  |
|          | -0.92045                           | 0.14928 | -0.36124 | -190.29406 |
|          | -0.35446                           | 0.07069 | 0.93240  | 845.17775  |

Tablo 26. Bouguet algoritması ile hesaplanan dış yönlendirme parametreleri (Test-2 Alanı)

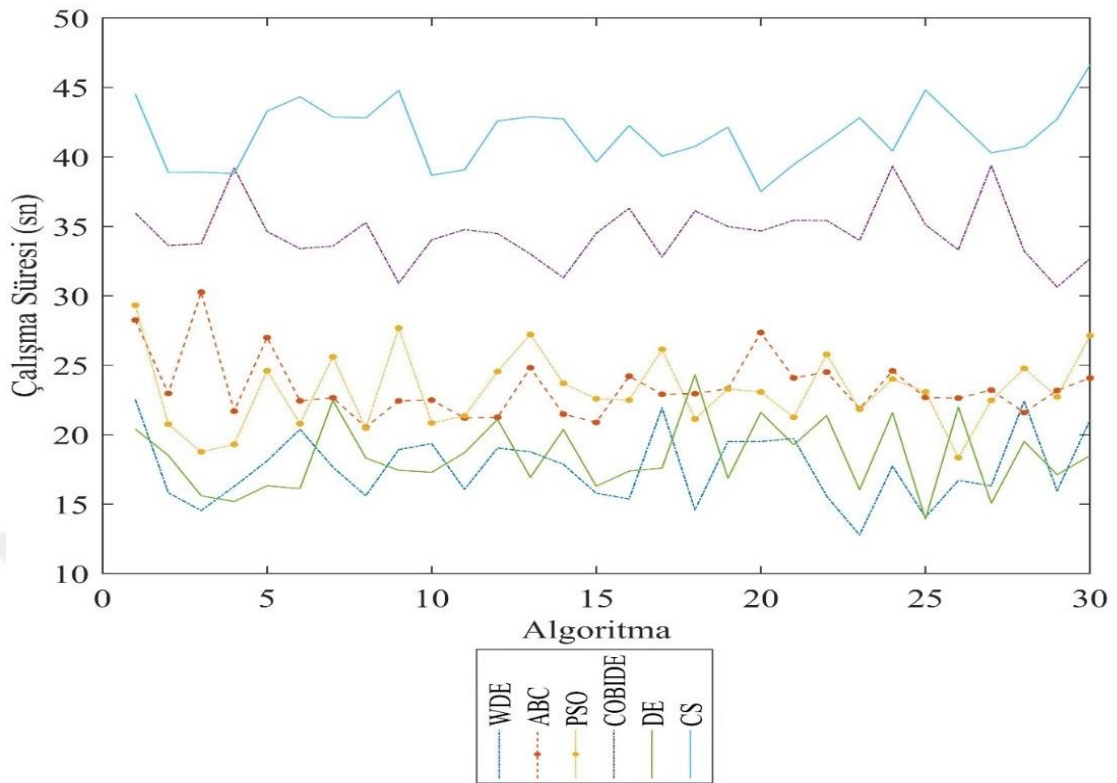
| #görüntü | <b>BOUGUET</b>                        |         |          |            |
|----------|---------------------------------------|---------|----------|------------|
|          | Dış Yönlendirme Parametreleri [R   T] |         |          |            |
| #1       | 0.12939                               | 0.97517 | -0.17971 | 200.88347  |
|          | -0.98575                              | 0.10685 | -0.12995 | -56.96282  |
|          | -0.10752                              | 0.19396 | 0.97510  | 1291.18375 |
| #2       | 0.12860                               | 0.97502 | -0.18110 | 185.00642  |
|          | -0.98708                              | 0.10825 | -0.11813 | -54.63429  |
|          | -0.09557                              | 0.19395 | 0.97634  | 1289.43527 |
| #3       | -0.05447                              | 0.98278 | -0.17657 | 470.58595  |
|          | -0.69341                              | 0.09001 | 0.71490  | -169.93272 |
|          | 0.71849                               | 0.16137 | 0.67656  | 974.05005  |
| #4       | -0.01715                              | 0.98502 | -0.17156 | 488.71594  |
|          | -0.79464                              | 0.09071 | 0.60026  | -190.30436 |
|          | 0.60684                               | 0.14663 | 0.78118  | 901.59460  |
| #5       | 0.10760                               | 0.99280 | -0.05262 | 431.83508  |
|          | -0.98847                              | 0.10116 | -0.11265 | -384.07960 |
|          | -0.10652                              | 0.06414 | 0.99224  | 1146.03491 |
| #6       | 0.10597                               | 0.99297 | -0.05276 | 417.05172  |
|          | -0.99319                              | 0.10310 | -0.05434 | -307.02892 |
|          | -0.04852                              | 0.05816 | 0.99713  | 1015.18716 |
| #7       | 0.09826                               | 0.99339 | -0.05926 | 466.26750  |
|          | -0.99510                              | 0.09872 | 0.00487  | -289.15895 |
|          | 0.01069                               | 0.05849 | 0.99823  | 968.19389  |
| #8       | 0.09502                               | 0.99347 | -0.06314 | 490.59459  |
|          | -0.99416                              | 0.09797 | 0.04532  | -270.88011 |
|          | 0.05121                               | 0.05846 | 0.99698  | 918.27615  |
| #9       | 0.15132                               | 0.98843 | 0.01062  | 350.72055  |
|          | -0.90924                              | 0.14340 | -0.39080 | -115.13629 |
|          | -0.38780                              | 0.04948 | 0.92041  | 893.14084  |
| #10      | 0.16479                               | 0.98625 | -0.01223 | 504.99957  |
|          | -0.92038                              | 0.14930 | -0.36139 | -189.96826 |
|          | -0.35459                              | 0.07081 | 0.93234  | 845.71352  |

Amaç fonksiyon değerine göre evrimsel hesaplama algoritmalarının başarısının kutu grafik üzerinde gösterimi algoritma performanslarının görsel karşılaştırılması açısından oldukça önemlidir. Şekil 33’de Test alanı 2’de kamera kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi için 30 kez koşturulan evrimsel hesaplama algoritmaları ile elde edilen amaç fonksiyon değerine ait kutu grafik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 33. Test Alanı 2 uygulamasında evrimsel hesaplama algoritmalarının performans gösterimi

WDE, ABC ve PSO algoritmaları incelendiğinde birinci ve üçüncü kuartil değerleri arasındaki mesafe olan çeyrekler arası mesafe oldukça düşüktür. ABC algoritması ve PSO algoritması oldukça kararlı çalışmışlardır. DE algoritması gürbüz sonuç üretmediğinden kartiller arası mesafe fazladır. DE algoritması incelendiğinde 2 adet aykırı değer ürettiği görülmektedir. Tek iterasyonlu çözümlerde bu aykırı değerlerde sonuç üretilmesi olasıdır. Bundan dolayı çoklu iterasyonlu çözümlerin ortalaması kullanılmaktadır. CS ve WDE algoritmaları kıyaslandığında CS algoritmasında medyan 1. Kuartile yakın çıkmasına rağmen daha uzun whiskerlere sahiptir. PSO algoritması her iterasyonda oldukça yakın sonuçlar üretmiştir ve bu gürbüz bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Şekil 34’de evrimsel hesaplama algoritmalarının her iterasyondaki çalışma süreleri gösterilmiştir.



Şekil 34. Evrimsel hesaplama algoritmalarının çalışma süre performansı

Şekil 34 incelendiğinde WDE algoritması ile DE algoritmasının birbirine yakın hızlarda çalıştığını ancak WDE algoritmasının daha hızlı olduğu görülmüştür. Algoritmaların ürettikleri sonuçların aynı medyandan gelip gelmediğine karar vermek için Wilcoxon işaretli sıralar testi uygulanmıştır. Verilerin farklarının normal dağılıma uygunluğunun incelenmesi için evrimsel hesaplama algoritmalarından elde edilen 30 farklı amaç fonksiyonu değerleri önerilen yöntem olan WDE algoritmasının ürettiği değerlerden çıkartılmıştır. Normal dağılıma uygunluğunu incelemek için bu farka Kolmogorov-Smirnov testi uygulanmıştır. Algoritmalar arasındaki farkın normal dağılıma uygunluğu incelenirken  $H_0$  hipotezi olarak verinin normal dağıldığı kabul edilmiştir.  $\alpha = 0.05$  önem seviyesinde verinin normal dağılmadığı belirlenmiştir. Daha sonra algoritmalara uygulanan ve

Tablo 27’de verilen Wilcoxon test sonuçlarına göre sadece ABC algoritmasının birkaç tane amaç fonksiyon değeri WDE’nin ürettiği sonucu geçebilmiştir.



Tablo 27. Test Alanı 2'ye ait Wilcoxon işaretli sıralar testi sonucu

|               | <b>p-değeri</b> | <b>z-değeri</b> | <b>Ranksum</b> | <b>Kazanan</b> |
|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| <b>ABC</b>    | 7.3891e-11      | -6.5125         | 474            | WDE            |
| <b>COBIDE</b> | 3.0199e-11      | -6.6456         | 465            | WDE            |
| <b>CS</b>     | 3.0199e-11      | -6.6456         | 465            | WDE            |
| <b>DE</b>     | 3.0199e-11      | -6.6456         | 465            | WDE            |
| <b>PSO</b>    | 3.0199e-11      | -6.6456         | 465            | WDE            |

Wilcoxon testi için  $H_0$  hipotezi fark verilerinin aynı eşit medyandan geldiği kabul edilmiştir.  $\alpha = 0.05$  önem seviyesinde test uygulanmıştır.

Tablo 27 incelendiğinde p değerinin 0'a çok yakın olduğunu yani  $H_0$  gerçekleşme olasılığının düşük olduğu görülmektedir. WDE algoritmasının diğer algoritmalar ile aynı medyandan gelmediği belirlenmiştir.

### 5.2.1. Nokta Bulutlarının Çakıştırılması

Nokta bulutlarının çakıştırılması aşamasında ilk önce referans nokta bulutunu oluşturan nokta bulutları kendi içerisinde çakıştırılmıştır. Her oturumda üretilen nokta bulutu YLT'nin GPS destekli olmamasından dolayı lokal koordinat sisteminde elde edilmiştir. Sırasıyla kendinden bir önceki oturumdaki nokta bulutuyla ICP yöntemi kullanılarak çakıştırılmıştır. Farklı oturumlardan elde edilen renkli nokta bulutlarının çakıştırılması sonucu ilgili çalışma alanını kapsayacak bölgeler kırılarak oluşan nokta bulutu Şekil 35'de verilmiştir.



Şekil 35. YLT verisi ile üretilen nokta bulutu

Şekil 36'de YLT ile farklı oturumlardan elde edilen sahnenin panoramik görüntüsü görülmektedir.



Şekil 36. Farklı oturumlardan elde edilen renkli panoramik görüntüler

ICP yönteminin verimli işlem yapabilmesi için nokta bulutlarının belirli oranda örtüşmesi gerekmektedir. Çakıştırma işleminin sonucunda bindirmeli alanlar için referans nokta bulutuna göre diğer nokta bulutları karşılaştırılır. Karşılaştırılan bölge içerisinde referans nokta bulutuna maksimum nokta hatası, ortalama nokta hatası ve minimum çakışma oranları belirlenir. YLT ile üretilen nokta bulutlarına ait çakışma bilgileri Tablo 28’de verilmiştir. En düşük hata değerlerini veren oturumlar koyu harfle belirtilmişlerdir.

Tablo 28. Referans nokta bulutunun çakışma raporu

| Referans Tarama Noktası | Maksimum Nokta Hatası (mm) | Ortalama Nokta Hatası (mm) | Minimum Çakışma Oranı (%) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 102                     | 2.9                        | 2.1                        | 78.7                      |
| 103                     | 3.5                        | 2.3                        | 76.5                      |
| 104                     | 2.9                        | 1.8                        | <b>80.8</b>               |
| 105                     | 4.2                        | 2.2                        | 76.7                      |
| 106                     | 3.2                        | 2                          | 78.7                      |
| 107                     | 3.8                        | 2.1                        | 75.6                      |
| 109                     | 3.5                        | 2.1                        | 76.5                      |
| 111                     | 3.1                        | 1.8                        | 77.6                      |
| 112                     | 4.2                        | 2.2                        | 76.7                      |
| 113                     | 3                          | 1.8                        | 79.1                      |
| 114                     | 3.8                        | 2.1                        | 75.6                      |
| 115                     | 2.2                        | 1.5                        | 84                        |
| 116                     | 2.9                        | 1.8                        | 79.3                      |
| 117                     | 2.9                        | 1.8                        | 79                        |
| 118                     | 2.8                        | 1.9                        | 60.9                      |
| 119                     | 2.9                        | 1.9                        | 79.5                      |
| 120                     | 5.5                        | 2.4                        | 42                        |
| 121                     | <b>8.6</b>                 | 3.3                        | <b>30.4</b>               |
| 122                     | 5.1                        | 2.4                        | 36.9                      |
| 123                     | <b>8.6</b>                 | <b>6.4</b>                 | <b>30.4</b>               |
| 124                     | 1.6                        | 1.6                        | 86.4                      |

Tablo 28 incelendiğinde maksimum hatanın 8.6 mm, minimum ortalama hatanın ise 6.4 mm ve minimum örtüşmelerin %30.4 olduğu görülmüştür. Her ne kadar %30.4 lük bindirme çok düşük görülse de bir nokta bulutu birden fazla nokta bulutu ile çakıştığı için minimum çakışma oranı düşük olan referans tarama noktasının diğer taramalarla çakışmasının incelenmesi gerekir. Gerekli incelemeler yapıldığında 121 ve 123 numaralı tarama noktaları minimum çakışma oranına neden olmuşlardır ancak diğer tarama noktaları ile daha fazla çakışma oranına sahiptirler. Her oturumun minimum ve maksimum koşulları sağladığı tarama bilgisinin önemli olmadığı için ayrıca verilmemiştir.

### 5.2.2. Georeferanslama

Georeferanslama işleminin nasıl yapılacağı georeferanslama bölümünde detaylı olarak anlatıldığı için bu bölümde uygulaması anlatılacaktır. Test Alanı 2'ye ait referans ve test nokta bulutu verisinin nokta bulutları aynı koordinat sisteminde temsil edilmesi için ECEF koordinat sistemine dönüşüm yapılmıştır. Georeferanslama için Şekil 31'de gösterilen yer kontrol noktaları tesis edilmiştir. Yer kontrol noktaları görüntülerden ayırt edilebilmesi için zeminden farklı kontrasta sahip, dikkat çekici, mekânın karakteristiğini bozmadan, detayları kapatmayacak boyutta ve tarihi mekâna zarar vermeyecek şekilde tasarlanarak tesis edilmiştir. Ancak tesis edilen yer kontrol noktalarının hepsi kullanıldığı zaman test alanı nispeten ilgili yer kontrol ağı için fazla gelmekte ve nokta bulutlarında meydana gelen deformasyon azalmaktadır. Bundan dolayı Tablo 29'da koordinatları verilen yer kontrol noktalarını çalışma bölgesini kapsayacak ve üçgen oluşturacak şekilde seçilmiştir. Koordinatları verilen noktalar SfM algoritması için de kullanılmıştır. YLT verisinin georeferanslanması için kontrol noktalarının koordinat sistemi referans kabul edilerek ICP yöntemi YLT nokta bulutu yer kontrol noktaları ile aynı koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Dönüşüm sonucu oluşan nokta konum hatası Tablo 29'de verilmiştir. En büyük hata değerlerini veren yer kontrol noktaları koyu harfle belirtilmişlerdir.

Tablo 29. Yer kontrol noktaları ile YLT verisinin georeferanslanmasında meydana gelen nokta konum hatası

| Kontrol Noktası | X (m)      | Y (m)       | Z (m)    | RMS <sub>x</sub> (mm) | RMS <sub>y</sub> (mm) | RMS <sub>z</sub> (mm) |
|-----------------|------------|-------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>D1</b>       | 461733.734 | 4283594.349 | 1183.588 | 6.7                   | 6.7                   | 0.4                   |
| <b>D3</b>       | 461737.208 | 4283587.556 | 1183.136 | 7.8                   | 7.3                   | 3                     |
| <b>D6</b>       | 461747.935 | 4283566.615 | 1183.98  | <b>14.3</b>           | 5.7                   | <b>13.1</b>           |
| <b>D8</b>       | 461752.889 | 4283555.554 | 1184.144 | 1.5                   | 1.1                   | 1.1                   |
| <b>D9</b>       | 461755.077 | 4283550.504 | 1184.113 | 5.1                   | 5.1                   | 0.5                   |
| <b>P2</b>       | 461732.065 | 4283591.014 | 1181.657 | 8.2                   | 7.2                   | 4                     |
| <b>P4</b>       | 461734.604 | 4283585.907 | 1181.812 | 3.9                   | 3.9                   | 0.5                   |
| <b>P12</b>      | 461745.343 | 4283565.129 | 1182.185 | 9.1                   | 2                     | 8.9                   |
| <b>P16</b>      | 461750.428 | 4283554.259 | 1182.362 | 11.8                  | <b>8.5</b>            | 8.3                   |
| <b>P17</b>      | 461752.671 | 4283552.542 | 1182.449 | 10.8                  | 8.4                   | 6.9                   |
| <b>P18</b>      | 461752.478 | 4283548.836 | 1182.465 | 6.7                   | 2.7                   | 6.2                   |

SfM ile georeferanslama doğrudan veya dolaylı olarak yapılabilir. Doğrudan georeferanslama oldukça maliyetli bir yöntemdir. Her ne kadar sahneye ait yakalanan videodan çıkartılan görüntülere ait GPS bilgileri enterpolasyon yöntemleri ile elde edilebilse de yeterli doğrulukta veri sağlayamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı dolaylı

georeferanslama yapılmıştır. SfM yöntemi ile referanslı nokta bulutu üretmek için bindirmeli görüntülerden ayırt edilen yer kontrol noktalarının görüntü ve cisim koordinatlarını hesaplamak gerekmektedir. Bu sebepten dolayı yer kontrol noktaları görüntüler üzerinden Agisoft Metashape yazılımı kullanarak işaretlenmiştir. SfM yöntemi ile ışın demetleri ile blok dengelemesi için sisteme dahil edilmiştir. Dengeleme sonucunda yer kontrol noktalarında elde edilen nokta konum hata değerleri Tablo 30'de verilmiştir. En düşük hata değerlerini veren yöntemler koyu harfle belirtilmiştir.

Tablo 30. SfM yöntemi ile georeferanslama için kullanılan yer kontrol noktalarında meydana hatalar

| Algoritma  | RMS <sub>x</sub> (mm) | RMS <sub>y</sub> (mm) | RMS <sub>z</sub> (mm) |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>WDE</b> | <b>13.4</b>           | <b>6.6</b>            | <b>6.0</b>            |
| ABC        | 13.8                  | 6.8                   | 6.1                   |
| PSO        | 13.6                  | 6.7                   | 6.1                   |
| COBIDE     | 13.8                  | 6.8                   | 6.1                   |
| DE         | 13.7                  | 6.8                   | 6.1                   |
| CS         | 13.5                  | 6.6                   | 6.0                   |
| ZHANG      | 13.8                  | 6.8                   | 6.1                   |
| BOUGUET    | 13.8                  | 6.9                   | 6.2                   |

### 5.2.2. İstatistiksel Değerlendirme ve Görselleştirme

Referans ve test nokta bulutları arasındaki mesafenin belirlenmesi için Test alanı-1'de olduğu gibi iki farklı yöntem tercih edilmiştir. İlk yöntem kullanılarak elde edilen gerçek mesafelerin ( $d_i^{(1)}$ ) ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 31.  $d_i^{(1)}$  Mesafelerinin istatistiksel değerleri

|                  | WDE         | ABC  | PSO  | COBIDE | DE   | CS   | Zhang | Bouguet |
|------------------|-------------|------|------|--------|------|------|-------|---------|
| <b>ORT. (cm)</b> | <b>0.78</b> | 0.80 | 0.80 | 0.81   | 0.80 | 0.79 | 0.82  | 0.83    |
| <b>STD. (cm)</b> | <b>0.68</b> | 0.69 | 0.70 | 0.69   | 0.69 | 0.68 | 0.70  | 0.71    |

Tablo 31 incelendiği zaman en küçük ortalama WDE ve standart sapmayı CS ve WDE algoritması kullanılarak elde edilen kamera kalibrasyon parametresiyle oluşturulan nokta bulutunun olduğu görülmektedir. Nümerik olarak diğer yöntemler ile üretilen sonuçlarda birbirine oldukça yakın değerlerdedir. Komşuluk sayısı arttırıldıkça ortalama ve standart sapma değerleri de artmaktadır.

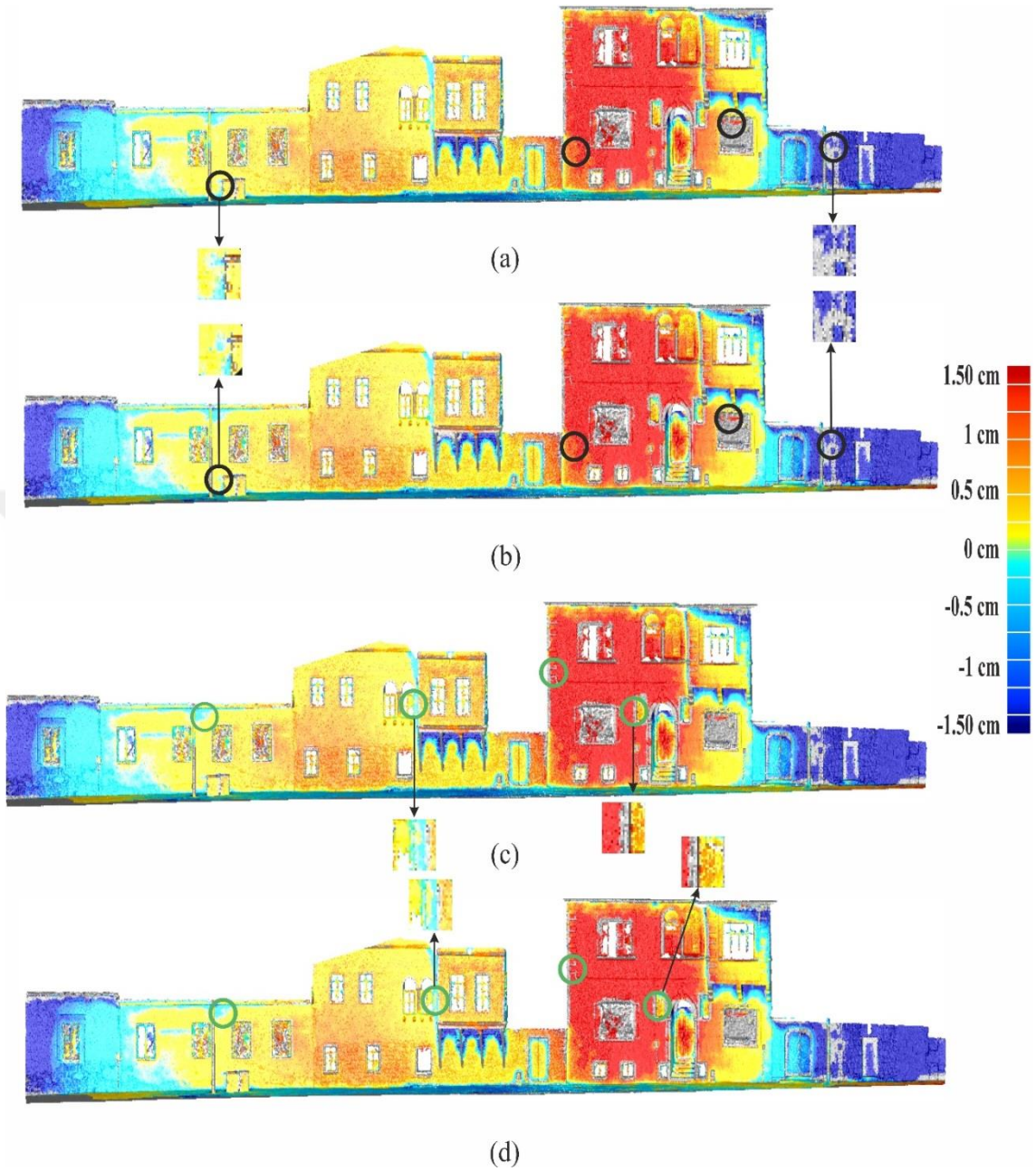
Test ve referans nokta bulutları arasındaki farkın belirlenmesi için lokal düzlem bilgisinin kullanıldığı ikinci yöntem bir önceki bölümde anlatılmıştır. Tablo 32'de

referans ve test nokta bulutları arasındaki istatistiksel farklar verilmiştir. İlgili nokta bulutları arasındaki mesafe belirlenirken komşu sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

Tablo 32.  $d_i^{(2)}$  Mesafelerinin istatistiksel değerleri

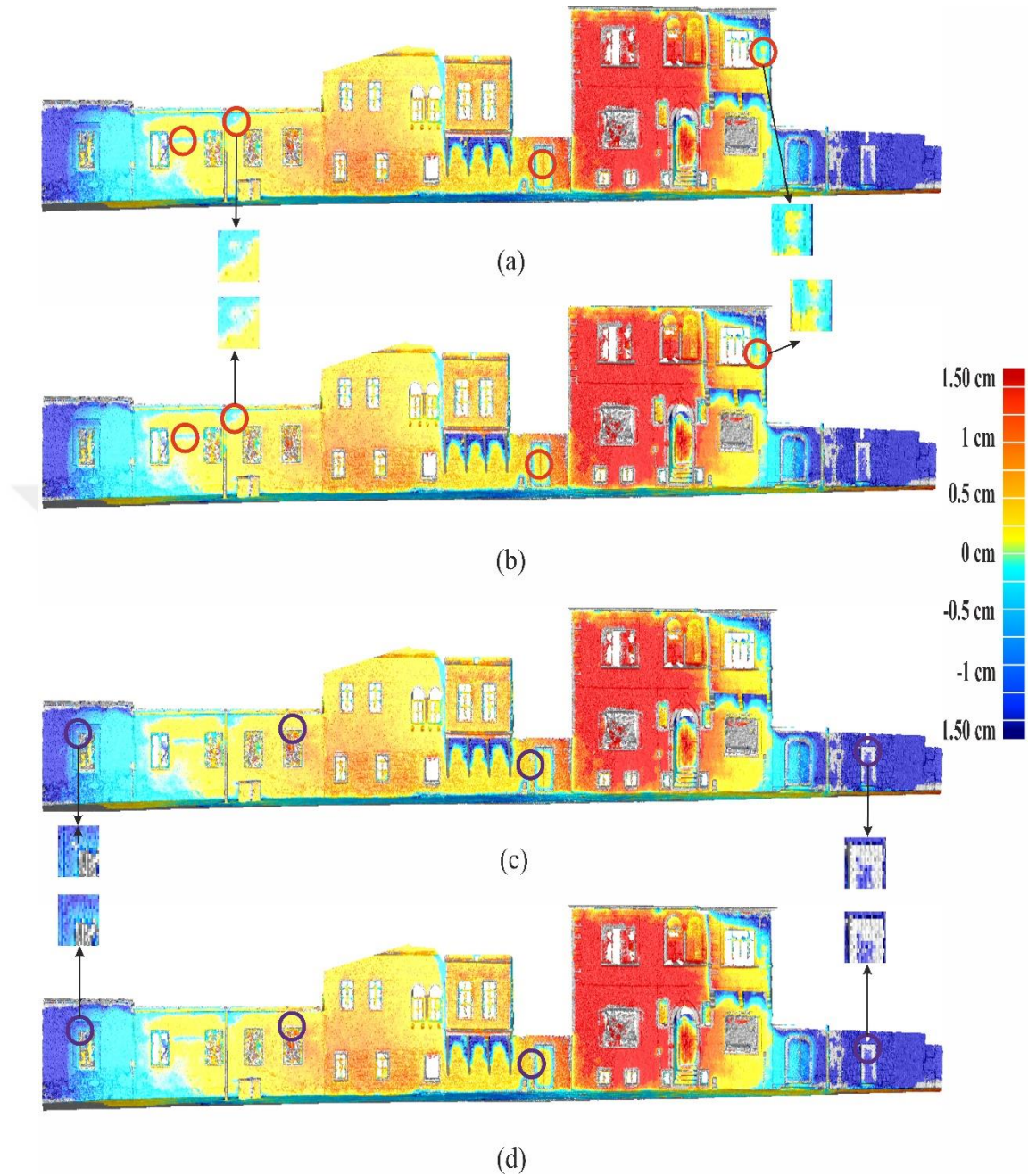
|                     | WDE                          | ABC            | PSO            | COBIDE         | DE             | CS             | Zhang          | Bouguet        |
|---------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>ORT.</b><br>(cm) | <b>0.86/-</b><br><b>0.89</b> | 0.88/-<br>0.92 | 0.87/-<br>0.91 | 0.88/-<br>0.92 | 0.88/-<br>0.83 | 0.87/-<br>0.90 | 0.88/-<br>0.92 | 0.89/-<br>0.92 |
| <b>STD.</b><br>(cm) | <b>1.11</b>                  | 1.12           | 1.12           | 1.12           | 1.12           | 1.12           | 1.12           | 1.12           |
| <b>MAX</b><br>(cm)  | <b>4.44</b>                  | 4.46           | 5.11           | 5.12           | 5.10           | 4.45           | 4.95           | 4.90           |
| <b>MİN</b><br>(cm)  | -7.61                        | -7.89          | -8.16          | -8.15          | -8.28          | -7.76          | -12.37         | -7.95          |

Tablo 32 incelendiği zaman WDE ve CS evrimsel hesaplama algoritmaları kullanılarak üretilen test nokta bulutlarının referans nokta bulutuna uzaklıklarının standart sapma ve ortalamasının yakın olduğu ve diğer algoritmaların ürettiği sonuçlardan daha düşük olduğu görülmektedir. CS algoritması WDE'den amaç fonksiyon değerine göre daha az başarılı olsa da georeferanslama hatasında WDE'ye yakın hata üretmesinden dolayı ikinci yöntem ile elde edilen mesafeler benzer çıkmıştır. ABC algoritmasının oldukça iyi amaç fonksiyon değeri üretmesine rağmen diğer algoritmalara göre daha yüksek georeferanslama hatası ürettiği Tablo 30'den görülmektedir. En kötü ortalama ve standart sapmayı ise Bouguet kamera kalibrasyonu yöntemi vermiştir. İkinci yöntem ile elde edilen mesafelerin referans nokta bulutu üzerine pseudo-renk olarak gösterimi için Şekil 37 ve Şekil 38 hazırlanmıştır. Şekil 37 ve Şekil 38'de verilen görseller hazırlanırken Tablo 32'de belirtilen MİN ve MAKS değerlerine göre lejant oluşturulmamıştır, çünkü MİN ve MAKS değerlerini sağlayan nokta sayısı veriyi temsil edemeyecek kadar azdır. Şekil 37'da WDE, PSO, DE ve Zhang yöntemleri ile elde edilen  $d_i^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi verilmiştir.



Şekil 37.  $d_l^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi a) WDE b) PSO c)DE d) Zhang

Şekil 37’de renkli halkalar ile nokta bulutları arasında farklar büyütülerek gösterilmiştir. Siyah halkalar Şekil 37.a ve Şekil 37.b’de incelendiği zaman WDE ve PSO arasında fark olduğu görülmektedir, aynı şekilde Şekil 37.c ve Şekil 37.d’de gösterilen yeşil nokta bulutları incelendiğinde DE ve Zhang modelleri arasında da fark olduğu görülmektedir. Şekil 38’de ABC, COBiDE, CS ve Bouguet yöntemleri ile elde edilen  $d_l^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi verilmiştir.



Şekil 38.  $d_i^{(2)}$  mesafelerinin referans nokta bulutu üstünde gösterimi a) ABC b) COBiDE c) CS d) Bouguet

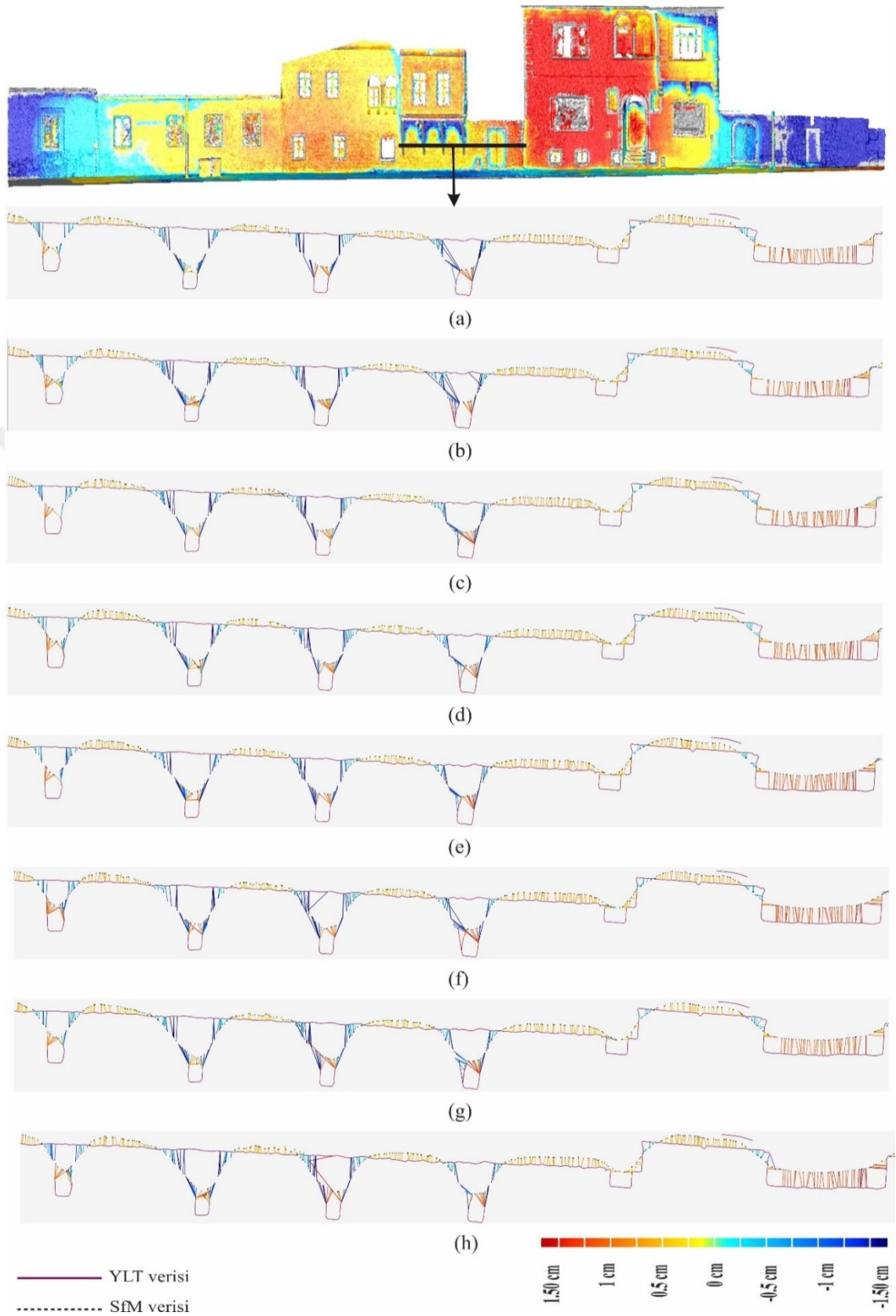
Şekil 38.a ve Şekil 38.b'de'de kırmızı halka ile ABC ve COBiDE algoritmaları, Şekil 38.c ve Şekil 38.d'de CS algoritması ve Bouguet nokta bulutları arasındaki pseudo mesafe gösterilmiştir.

Şekil 37 ve Şekil 38 ayrı ayrı incelendiğinde yöntemlerin farklı sonuçlar ürettiği görülmektedir. Ancak referans veri ile karşılaştırıldığı zaman global fark oluşmadığı sadece yerel bölgelerde farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu lokal farklılıklara

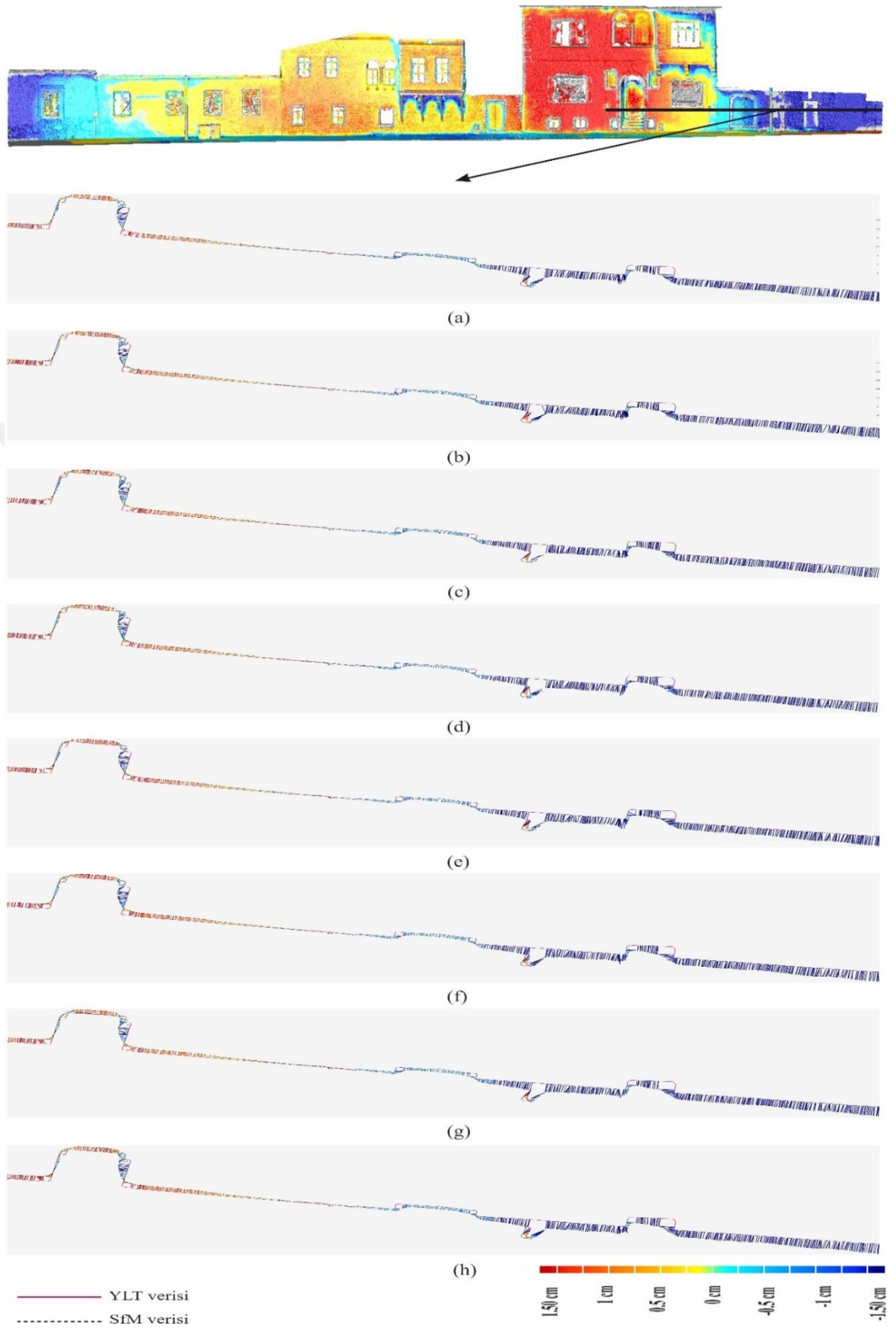
kullanılan algoritmaların farklı olması çok büyük etki etse de yer kontrol noktalarının görüntü üzerinden belirlenmesi aşamasında kullanıcı hatasına ve SfM yönteminin kararsız çalışmasında etkilidir. WDE algoritması kullanılarak hesaplanan nokta bulutu YLT verisi ile karşılaştırıldığında istatistiksel ve görsel olarak diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç ürettiği görülmektedir.

Daha ayrıntılı analiz yapmak için test ve referans nokta bulutuna ağ yüzeyler uydurulmuştur. Daha sonra bu ağ yüzeylerin farklı bölgelerinden seçilen alanlar arasındaki mesafenin belirlenmesi için farklar whiskerlar ile temsil edilmiştir. Şekil 39 ve Şekil 40'de Test Alanı 2'nin farklı bölgelerinin ayrıntılı analizi yapılmıştır.





Şekil 39. Test ağı yüzey ile referans ağı yüzey arasındaki farkların gösterimi a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, d) Bouguet.



Şekil 40. Test ağ yüzey ile referans ağ yüzey arasındaki farkların gösterimi a) WDE, b) ABC, c) PSO, d) COBiDE, e) DE, f) CS, g) Zhang, d) Bouguet.

## 6. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Görüntü kalitesinin objektif olarak belirlenmesi görüntü işleme uygulamaları için oldukça önemlidir. Görüntü yakalayıcılar dijital görüntülerin sıkıştırma, iletim, depolama, edinme, ön işleme ve çoğaltma aşamalarında görsel kalitenin etkilenmesine neden olan çeşitli bozulmalara maruz kalmaktadır. Bozulmaların yönü, şiddeti, konumu görüntü üzerinden belirlenemediği için keskinlik, dinamik aralık, kontrast gibi tanımlayıcıların değişmesine neden olur. Görüntü yakalayıcıların doğası gereği oluşan bulanıklık, ringing ve gürültü gibi etkiler tanımlayıcıların farklılaşmasına ve görüntülerin yanlış yorumlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, optik sistemler ve elektronik sensörlerin sahip olduğu yapısal özellikler, çevresel ve atmosferik etkiler, tahmin ve kontrol edilemeyen dış etkenler ve sistematik hatalar görüntü pikselleri üzerinde radyometrik veya geometrik deformasyonlara sebep olmaktadır. Bu deformasyonların bastırılması doğru metrik bilgi çıkartımı için oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında hızlı ve doğru sonuç alabilmek için kalitesi en iyi olan görüntülerin otomatik olarak belirlenerek işlenmesi zaman ve maliyet kazancı sağlamaktadır. Görsel görüntü kalitesi sübjektif belirlenebileceği gibi otonom sistemlerin gelişmesine paralel olarak geliştirilen algoritmalar ile objektif olarak da belirlenmektedir. Objektif kalite belirlenmesi videolardan elde edilen tekil görüntülerin kalite açısından değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Tez çalışmasında NIQE objektif görüntü kalite belirleme yöntemi SfM yöntemi ile nokta bulutu üretilirken görüntülerin yanlış eşleme sorununun önüne geçmesi için kullanılmıştır. Ayrıca daha kaliteli görüntüleri kullanarak oluşturulan nokta bulutunda renk dağılımının düzgün oluşmasını sağlayarak görsel kalitede arttırılmıştır. Hızlı ve etkili çalışan NIQE yönteminde çalışma alanında kullanılan görsel kalitesi yüksek olan görüntüler kullanılarak eğitim modeli oluşturulmuştur. Baz/bindirme oranına göre elde edilen tekil

görüntülerin bu model kullanılarak kalitesi kontrol edilmiş ve nokta bulutu oluşturmak için kullanılmıştır.

Kamera kalibrasyonu fotogrametrik çalışmalarda metrik bilgi üretimi açısından oldukça önemli bir süreçtir. Kamera kalibrasyonu ile metrik bilgi çıkarımında kullanılan iç yöneltme parametreleri olan odak uzaklığı, distorsiyon bilinmeyenleri, basıklık ve asal nokta konumları ile kamera poz tahmininde kullanılan dış yöneltme parametreleri olan dönüklük ve öteleme bilgileri elde edilir. Kamera kalibrasyon probleminin çözülmesi için günümüze kadar çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bazı yöntemler hiçbir yüzeye ihtiyaç duymadan çalışırken yapılan birçok çalışmada dama tahtası kalibrasyon yüzeyleri tercih edilmektedir. Bu yüzeyler sıralı karelerden oluştuğu için cisim koordinatlarının elde edilmesi için ek bir donanıma ihtiyaç duymadığından oldukça pratiktir. Kamera kalibrasyon problemi için çok sayıda matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller tahmin ettikleri parametrelerde birbirinden farklı sayısal değerler üretebilmektedir. Bu modeller temel olarak görüntü piksel koordinatını girdi olarak cisim koordinatını ise çıktı olarak kullanmaktadır. Kamera kalibrasyon problemi çok modlu problem olduğu için optimum çözümünün aranması oldukça önemlidir. Problem çözümünde lineer model kullanıldığı zaman lokal çözümlere takılma ihtimali oldukça yüksektir. Ayrıca, iki aşamalı model kullanıldığında kullanılan gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleri de lokal çözümlerden bir tanesine takılabilmektedir. Pratik endüstriyel uygulamalarda bu yöntemler ile elde edilen sonuçlar yeterli olsa da fotogrametrik standartlar bilgisayarlı görü uygulamalarından daha yüksek olduğu için sonuç ürünlerin doğruluğu yeterli olmamaktadır. Bu nedenle kamera kalibrasyon parametrelerinin oldukça yüksek doğrulukla elde edilmesi gerekmektedir.

Optimizasyon teknikleri farklı tipteki problemlerin çözümü için geliştirilirler ve ilgili problemdeki en iyi aday çözümü araştırırlar. Tez kapsamında literatürde kamera kalibrasyon parametrelerinin optimum değerlerinin elde edilmesi için geleneksel kamera kalibrasyon yöntemlerinden Zhang ve Bouquet'ın yanı sıra WDE, ABC, PSO, COBiDE, DE ve CS evrimsel hesaplama algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar daha önce çeşitli tipteki kamera kalibrasyon modellerinin çözümü için literatürde kullanılmışlardır. Ancak, çoklu evrimsel hesaplama algoritmaları ile ayrıntılı istatistiksel ve görsel olarak karşılaştırılmasının yapıldığı çalışma sayısı oldukça

yetersizdir. Evrimsel hesaplama algoritmalarının istatistiksel olarak adil karşılaştırılmasının yapılabilmesi için 30 kez aynı rastsal sayı jeneratörü ile oluşturulmuştur. Sonuçlar Wilcoxon işaretli sıralar testi kullanılarak evrimsel hesaplama algoritmaları ile elde edilen sonuçlar arasında anlamlı farklarının var olup olmadığı incelenmiştir. WDE algoritmasının ürettiği sonucun diğer algoritmalarla üretilen sonuçlardan istatistiksel olarak farklı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, algoritmaların elde ettikleri amaç fonksiyon değerleri kutu grafik çizimleri ile ve çalışma süreleri de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Kamera kalibrasyon probleminin çözümünde en düşük toplam geri-projeksiyon hatasının WDE algoritması ile elde edildiği belirlenmiştir. Kamera kalibrasyon parametrelerinin nokta bulutuna etkisinin görsel sunumunun yapılması için, SfM yöntemi ile test alanlarına ait nokta bulutları oluşturulmuştur. SfM yönteminin geometrik teorisi iki veya daha fazla görüntü, kamera kalibrasyon parametreleri bilinmesi koşuluyla, kullanılarak görüntülerin eşlenik noktalarının üçgenleme ile 3D noktalarının elde edilmesine dayanır. Farklı kamera kalibrasyon parametreleri ile distorsiyonu giderilen görüntüler kullanılarak oluşturulan nokta bulutları farklı geometrik özelliklere sahip olmaktadır. Kullanılan evrimsel hesaplama algoritmalarının nokta bulutu üzerine etkisinin araştırılması için yersel lazer tarayıcı ile taraması yapılan iki farklı test alanından çoklu resimler yakalanmıştır. Evrimsel hesaplama yöntemleri ile elde edilen kamera kalibrasyon parametreleri kullanılarak SfM yöntemi ile elde edilen test nokta bulutu lokal koordinat sisteminde üretildiği için referans nokta bulutu olan YLT verisi ile aynı koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Test ve referans nokta bulutları noktadan düzleme ve düzlemden düzleme mesafelere bakılarak iki farklı yöntem ile görsel karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde WDE algoritması ile elde edilen kamera kalibrasyon parametrelerinin ürettiği nokta bulutu YLT verisine daha yakın sonuç üretmiştir. Tamamlanan tez ile elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

- Video görüntülerinden baz/bindirme oranına bağlı olarak NIQE görüntü kalite indeksi yardımıyla SfM yönteminde kullanılmak üzere çerçeve görüntüsü çıkartılmıştır. Bu sayede video görüntülerinden eşit renk dağılımına sahip çerçeve görüntüler çıkartılarak daha hızlı görüntü eşleme yapılması sağlanmış ve yüksek doğruluklu nokta bulutu üretilmesi sağlanmıştır.

- Fotogrametrik harita üretiminde sıklıkla kullanılan SfM yöntemi ile yüksek doğruluklu nokta bulutu üretmek için dikkat edilmesi gereken platform tasarımı ve görüntü yakalama süreçleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.
- Kamera kalibrasyon yöntemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan evrimsel hesaplama algoritmalarının kamera kalibrasyon probleminin çözümündeki başarıları istatistiksel ve görsel olarak araştırılmıştır. 6 farklı evrimsel hesaplama algoritması kullanılarak kamera kalibrasyon parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında sonuçlar analiz edildiğinde WDE ve CS en başarılı algoritmalar olurken, COBiDE ve DE en başarısız algoritmalar olmuştur.
- Klasik yöntemler analiz edildiğinde ise Zhang yöntemi, Bouguet yönteminden daha başarılı olmuştur. Genel olarak bakıldığında ise evrimsel hesaplama algoritmaları klasik yöntemlerden daha iyi sonuç üretmiştir.
- Nokta bulutları farklı çevresel karakteristiğe sahip test alanlarında ve farklı tipte kameralar kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan nokta bulutlarından Test-1 alanı lokal koordinat sisteminde karşılaştırma yapılırken Test-2 alanı gerçek dünya koordinatına dönüşüm yapılarak karşılaştırılmıştır. Böylece evrimsel hesaplama algoritmalarının görsel ve istatistiksel başarıları farklı türdeki topoğrafik yapılar içinde incelenmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Ilonen, J. and V. Kyrki. Robust robot-camera calibration. in 2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). 2011. IEEE.
2. Häne, C., et al., 2017. 3D visual perception for self-driving cars using a multi-camera system: Calibration, mapping, localization, and obstacle detection. **Image and Vision Computing**, **68**: p. 14-27.
3. Zhang, Z., R. Weiss, and A.R. Hanson, 1992. Automatic calibration for a robot navigation system. University of Massachusetts at Amherst, Department of Computer and....
4. Fraser, C.S., 2013. Automatic camera calibration in close range photogrammetry. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, **79**(4): p. 381-388.
5. Yu, C. and Q. Peng, 2006. Robust recognition of checkerboard pattern for camera calibration. **Optical Engineering**, **45**(9): p. 093201.
6. Crawford, J., 2012. Multi-Sensor Calibration of an Integrated Mobil Mapping Platform. The Ohio State University.
7. Tyle\_ek, R. and R. Šára, 2010. Refinement of surface mesh for accurate multi-view reconstruction. **International Journal of Virtual Reality**, **9**(1): p. 45-54.
8. Weng, J., P. Cohen, and M. Herniou, 1992. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**, **(10)**: p. 965-980.
9. Qi, W., F. Li, and L. Zhenzhong. 2010. Review on camera calibration. in Control and Decision Conference (CCDC), Chinese. IEEE.
10. Wan, X. and G. Xu, 1996. Camera parameters estimation and evaluation in active vision system. **Pattern Recognition**, **29**(3): p. 439-447.
11. Merras, M., et al. 2013. A new method of camera self-calibration with varying intrinsic parameters using an improved genetic algorithm. in Intelligent Systems: Theories and Applications (SITA), **8th International Conference on. IEEE**.

12. Kang, D.-J., J.-E. Ha, and M.-H. Jeong, 2008. Detection of calibration patterns for camera calibration with irregular lighting and complicated backgrounds. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, **6**(5): p. 746-754.
13. Führ, G. and C.R. Jung, 2015. Camera self-calibration based on nonlinear optimization and applications in surveillance systems. **IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology**, **27**(5): p. 1132-1142.
14. Abdel-Aziz, Y. 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space in close-range photogrammetry. in Proceedings of the ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, **American Society of Photogrammetry**.
15. Guermeur, P. and J. Louchet. 2003. An evolutionary algorithm for camera calibration. in Proceeding of International Conference on Robotics Distance Learning & Intelligence Communication Systems (ICRODIC'03), Rethymno, Greece.
16. Yang, Z., et al. 2008. A novel camera calibration method based on genetic algorithm. in 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE.
17. Li, W., et al. 2014. Application of improved genetic algorithm in camera calibration. in Optics and Photonics for Information Processing VIII. International Society for Optics and Photonics.
18. Ji, Q. and Y. Zhang, 2001. Camera calibration with genetic algorithms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, **31**(2): p. 120-130.
19. Bouchouicha, M., M.B. Khelifa, and W. Puech. 2003. A non-linear camera calibration with genetic algorithms. in Seventh International Symposium on Signal Processing and Its Applications, **Proceedings. IEEE**.
20. Bilal, K. and J. Qureshi. 2008. Nature inspired optimization techniques for camera calibration. in 2008 **4th International Conference on Emerging Technologies. IEEE**.

21. Song, X., et al. 2009. Camera calibration based on particle swarm optimization. in 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. IEEE.
22. Deng, L., et al., 2016. A novel camera calibration technique based on differential evolution particle swarm optimization algorithm. **Neurocomputing**, **174**: p. 456-465.
23. Deep, K., et al., 2013. Stereo camera calibration using particle swarm optimization. **Applied Artificial Intelligence**, **27**(7): p. 618-634.
24. Zhang, J.-d., et al., 2012. Particle swarm optimisation algorithm for non-linear camera calibration. **International Journal of Innovative Computing Applications**, **4**(2): p. 92-99.
25. Zhang, Y., et al. 2018. One-Dimensional Camera Calibration Based on PSO Algorithm. in International Conference on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence. Springer.
26. Xu, J. and F. Deng. 2015. A camera self-calibration method based on IOS-PSO. in 2015 Chinese Automation Congress (CAC).
27. Qiu, H.-b., et al. 2017. A camera self-calibration method based on parallel QPSO. in 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). IEEE.
28. Özkan, C. and E. Bendeş, 2010. Kamera Kalibrasyonunda Zeki Optimizasyon Yöntemlerinin Etkinliği. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi**, **26**(4): p. 340-350.
29. Bendeş, E. and C. Özkan. 2008. Direk lineer transformasyon yönteminde yapay zeka tekniklerinin uygulanması. in Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu. Kayseri.
30. de la Fraga, L.G. and O. Schütze, Direct calibration by fitting of cuboids to a single image using differential evolution. International journal of computer vision, 2009. **81**(2): p. 119-127.
31. Zhang, W.-m. and Y.-x. Zhong, 2004. Camera calibration based on improved differential evolution algorithm. **Optical Technique**, **30**(6): p. 720-723.

32. de la Fraga, L.G. and I.V. Silva. 2008. Direct 3d metric reconstruction from two views using differential evolution. in 2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence). IEEE.
33. Assad, A. and K. Deep, 2018. A Hybrid Harmony search and Simulated Annealing algorithm for continuous optimization. **Information Sciences**, **450**: p. 246-266.
34. Liu, X. and D. Qi. 2016. Camera Calibration Based on Self-Adaptive Cuckoo Search Algorithm. in 2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). IEEE.
35. Garg, V. and K. Deep, 2016. Performance of Laplacian Biogeography-Based Optimization Algorithm on CEC 2014 continuous optimization benchmarks and camera calibration problem. **Swarm Evolutionary Computation**, **27**: p. 132-144.
36. Safaei, A. and S. Fazli, 2018. A novel solution in the simultaneous deep optimization of RGB-D camera calibration parameters using metaheuristic algorithms. **Turkish Journal of Electrical Engineering Computer Sciences**, **26(2)**: p. 743-754.
37. QiShen, L., L. LiCai, and J. ZeTao. 2009. A camera self-calibration method based on hybrid optimization algorithm. in 2009 Second International Symposium on Electronic Commerce and Security. IEEE.
38. Wenger, S.M.B., 2016. Evaluation of SfM against traditional stereophotogrammetry and LiDAR techniques for DSM creation in various land cover areas. Stellenbosch: Stellenbosch University.
39. Günen M.A., A.Ü.H., Taşkanat T., Beşdok E.,, 2018. Effect Of Different Resolution DEM Data Generated By UAVs In Determining Drainage Networks, in 1. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies. Antalya, Türkiye.
40. Kasprzak, M., K. Jancewicz, and A. Michniewicz, 2018. UAV and SfM in detailed geomorphological mapping of granite tors: an example of Starościńskie Skały (Sudetes, SW Poland). **Pure and Applied Geophysics**, **175(9)**: p. 3193-3207.

41. Themistocleous, K., et al. 2015. The methodology of documenting cultural heritage sites using photogrammetry, UAV, and 3D printing techniques: the case study of Asinou Church in Cyprus. in Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015). International Society for Optics and Photonics.
42. Smith, M.W. and D. Vericat, 2015. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from structure-from-motion photogrammetry. **Earth Surface Processes Landforms**, **40**(12): p. 1656-1671.
43. Ryan, J.C., et al., 2015. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. *The Cryosphere*, p. 1-11.
44. Alfredsen, K., et al., 2018. Brief Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. *The Cryosphere* p. 627-633.
45. Burns, J., et al., 2015. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. **PeerJ**, **3**: p. e1077.
46. Seitz, S.M., et al. 2006. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. in 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06). IEEE.
47. Salaun, Y., R. Marlet, and P. Monasse, 2017. Robust SfM with little image overlap. arXiv preprint arXiv:1703.07957.
48. Tomasi, C. and T. Kanade, Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. *International Journal of Computer Vision*, 1992. **9**(2): p. 137-154.
49. Westoby, M.J., et al., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, **179**: p. 300-314.
50. Shervais, K. S2019. *Structure from Motion Introductory Guide*. 2017 [cited Erişim Tarihi: 02.06.2019; Available from:

**<https://www.unavco.org/education/resources/modules-and-activities/field-geodesy/module-materials/sfm-intro-guide.pdf>.**

51. Shervais, K., 2017. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students.[pdf].
52. Coleman, G.B., 1995. Electronic gimbal system for electronically aligning video frames from a video sensor subject to disturbances, G. Patents, Editor.
53. Nguyen, P., 2018. Multi-camera video production for medium-sized concert.
54. Tekalp, M., 2015. Digital video processing. Prentice Hall Press.
55. **<https://www.dji.com/phantom-4-pro/info>**. Erişim Tarihi: 10.1.2019.
56. **<https://www.cnet.com/products/sony-alpha-a6000/specs/>**. Erişim Tarihi: 12.05.2019.
57. Markelin, L., et al., 2014. Geometric processing workflow for vertical and oblique hyperspectral frame images collected using UAV. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences**, **40(3)**: p. 205.
58. Leng, C., et al., 2019. Local Feature Descriptor for Image Matching: A Survey. **IEEE Access**, **7**: p. 6424-6434.
59. Wang, Y., 1998. Principles and applications of structural image matching. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, **53(3)**: p. 154-165.
60. Micusik, B. and T. Pajdla, 2006. Structure from motion with wide circular field of view cameras. **IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence**, **28(7)**: p. 1135-1149.
61. Bash, E.A., et al., 2020. Evaluation of SfM for surface characterization of a snow-covered glacier through comparison with aerial lidar. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, **8(2)**: p. 119-139.
62. Khambete, M. and M. Joshi. 2007. Blur and ringing artifact measurement in image compression using wavelet transform. **in Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology**. Citeseer.

63. Petrou, M. and C. Petrou, 2010. Image processing: the fundamentals. John Wiley & Sons.
64. Archibald, R. and A. Gelb, 2002. A method to reduce the Gibbs ringing artifact in MRI scans while keeping tissue boundary integrity. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, **21**(4): p. 305-319.
65. Popovici, I. and W.D. Withers, 2007. Locating edges and removing ringing artifacts in JPEG images by frequency-domain analysis. **IEEE Transactions on Image Processing**, **16**(5): p. 1470-1474.
66. Lepskii, O., 1991. On a problem of adaptive estimation in Gaussian white noise. **Theory of Probability Its Applications**. **35**(3): p. 454-466.
67. Chan, R.H., C.-W. Ho, and M. Nikolova, 2005. Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization. **IEEE Transactions on image processing**, **14**(10): p. 1479-1485.
68. Lee, J.-S., 1981. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. **Computer graphics image processing**, **17**(1): p. 24-32.
69. Watson, A.B., et al., 1997. Visibility of wavelet quantization noise. **IEEE Transactions on image processing**, **6**(8): p. 1164-1175.
70. BT, R.I.-R., 2002. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.
71. He, L., et al., 2014. Objective image quality assessment: a survey. **International Journal of Computer Mathematics**, **91**(11): p. 2374-2388.
72. Wang, Y., 2006. Survey of objective video quality measurements.
73. Liu, H., 2016. Image Quality Estimation: Soft-ware for Objective Evaluation.
74. Wang, W., 2016. A Study on Image Quality Evaluation In Image Capture and Production Process. Purdue University.
75. Moorthy, A.K. and A.C. Bovik, 2011. Blind image quality assessment: From natural scene statistics to perceptual quality. **IEEE transactions on Image Processing**, **20**(12): p. 3350-3364.

76. Ye, P. and D. Doermann, 2012. No-reference image quality assessment using visual codebooks. **IEEE Transactions on Image Processing**, **21**(7): p. 3129-3138.
77. Saad, M.A., A.C. Bovik, and C. Charrier, 2012. Blind image quality assessment: A natural scene statistics approach in the DCT domain. **IEEE transactions on Image Processing**, **21**(8): p. 3339-3352.
78. Mittal, A., A.K. Moorthy, and A.C. Bovik, 2012. No-reference image quality assessment in the spatial domain. **IEEE Transactions on Image Processing**, **21**(12): p. 4695-4708.
79. Mittal, A., R. Soundararajan, and A.C. Bovik, Making a " Completely Blind" Image Quality Analyzer. **IEEE Signal Process Letters**, **20**(3): p. 209-212.
80. Hsu, P., et al., Intraframe and interframe interlace coding and decoding. 2008, Google Patents.
81. Schuhmacher, S. and J. Böhm, 2005. Georeferencing of terrestrial laserscanner data for applications in architectural modeling.
82. Uzun, Y., 2003. Üç Boyutlu Astrojeodezik Dik Koordinat Sistemlerinde Dönüşüm Modelleri ve Uyuşumsuz Ölçü Gruplarının Belirlenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması, in Fen Bilimleri Enstitüsü. Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon.
83. Wenger, S.M.B., 2016. Evaluation of SfM against traditional stereophotogrammetry and LiDAR techniques for DSM creation in various land cover areas. Stellenbosch: Stellenbosch University.
84. Turner, D., A. Lucieer, and L. Wallace, 2013. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, **52**(5): p. 2738-2745.
85. Perry, J.H., 2009. A synthesized directly georeferenced remote sensing technique for small unmanned aerial vehicles. University of Florida.
86. Padró, J.-C., et al., 2019. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne

and satellite remote sensing platforms. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, **75**: p. 130-140.

87. Bisnath, S., et al. 2004. Initial results from a long baseline, kinematic, differential GPS carrier phase experiment in a marine environment. in Position Location and Navigation Symposium, Plans IEEE.
88. Poli, D., 2002. Indirect georeferencing of airborne multi-line array sensors: a simulated case study. **International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing Spatial Information Sciences**, **34(3/A)**: p. 246-251.
89. Skaloud, J. and K. Legat, 2008. Theory and reality of direct georeferencing in national coordinates. **ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing**, **63(2)**: p. 272-282.
90. Rau, J., N.-Y. Chen, and L.-C. Chen, 2002. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, **68(6)**: p. 581-588.
91. Chetverikov, D., et al. 2002. The trimmed iterative closest point algorithm. in Pattern Recognition, Proceedings. 16th International Conference on. IEEE.
92. Gruen, A. and D. Akca, 2005. Least squares 3D surface and curve matching. **ISPRS Journal of Photogrammetry Remote Sensing**, **59(3)**: p. 151-174.
93. Brostow, G.J., et al. 2008. Segmentation and recognition using structure from motion point clouds. in European conference on computer vision. Springer.
94. Hartley, R. and A. Zisserman, 2003. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge university press.
95. Birchfield, S., 1988. Essential and fundamental matrices.
96. Hartley, R.I. 1995. In defence of the 8-point algorithm. in Computer Vision, Proceedings., Fifth International Conference on. IEEE.
97. Zhang, R., 2008. Epipolar Geometry and 3D Scene Reconstruction.
98. Rao, S.S., 2019. Engineering optimization: theory and practice.: John Wiley & Sons.

99. Civicioglu, P., et al., 2020. Weighted differential evolution algorithm for numerical function optimization: a comparative study with cuckoo search, artificial bee colony, adaptive differential evolution, and backtracking search optimization algorithms. **Neural Computing and Applications**, **32**(8): p. 3923-3937.
100. Karaboğa, D., 2011. Yapay zeka optimizasyon algoritmaları: tabu araştırma, ısıtma işlemi, genetik, karınca koloni, yapay bağışıklık, Diferansiyel gelişim, parçacık sürü optimizasyonu, yapay arı koloni algoritmaları. Nobel Yayın Dağıtım.
101. Karaboga, D. and B. Basturk. 2007. Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for solving constrained optimization problems. in International fuzzy systems association world congress. Springer.
102. Karaboga, D. and B. Akay. 2007. Artificial bee colony (ABC) algorithm on training artificial neural networks. in **2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications**. IEEE.
103. Karaboğa, D. and B. Baştürk, 2008. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm. **Applied Soft Computing**, **8**(1): p. 687-697.
104. Civicioglu, P. and E. Besdok, 2013. A conceptual comparison of the Cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms. **Artificial intelligence review**, **39**(4): p. 315-346.
105. Eberhart, R. and J. Kennedy. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. in Micro Machine and Human Science, MHS'95., **Proceedings of the Sixth International Symposium on**. IEEE.
106. Shi, Y. and R.C. Eberhart. 1999. Empirical study of particle swarm optimization. in Evolutionary computation, CEC 99. **Proceedings of the 1999 congress on**. IEEE.
107. Yang, X.-S. and S. Deb. 2009. Cuckoo search via Lévy flights. in Nature & Biologically Inspired Computing, NaBIC 2009. **World Congress on**. IEEE.
108. Navimipour, N.J. and F.S. Milani, 2015. Task scheduling in the cloud computing based on the cuckoo search algorithm. **International Journal of Modeling and Optimization**, **5**(1): p. 44.

109. Wang, Y., et al., 2014. Differential evolution based on covariance matrix learning and bimodal distribution parameter setting. **Applied Soft Computing**, **18**: p. 232-247.
110. Civicioglu, P., et al., 2018. Weighted differential evolution algorithm for numerical function optimization: a comparative study with cuckoo search, artificial bee colony, adaptive differential evolution, and backtracking search optimization algorithms. **Neural Computing and Applications**, p. 1-15.
111. Markov, B., S. Konov, and A. Loginov, 2012. Calibration of cameras of photogrammetric measuring systems with the use of a genetic solution search algorithm. **Measurement Techniques**, **55**(5): p. 551-554.
112. Westoby, M.J., et al., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, **179**: p. 300-314.
113. Qi, W., F. Li, and L. Zhenzhong. 2010. Review on camera calibration. in **2010 Chinese Control and Decision Conference**. **IEEE**.
114. Zhang, Z., 2000. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, **22**.
115. Xu, Y., et al. 2011. Research on camera calibration methods of the machine vision. in **Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)**, **Second International Conference on**. **IEEE**.
116. Hall, E.L., et al., 1982. Measuring curved surfaces for robot vision. **Computer**, **(12)**: p. 42-54.
117. Ito, M., 1990. Robot vision modelling-camera modelling and camera calibration. **Advanced robotics**, **5**(3): p. 321-335.
118. Tsai, R., 1987. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. **IEEE Journal on Robotics and Automation**, **3**(4): p. 323-344.
119. Horaud, R., R. Mohr, and B. Lorecki. 1992. Linear camera calibration. in **Robotics and Automation, 1992. Proceedings., IEEE International Conference on**. **1992**. **IEEE**.

120. Toscani, G., 1987. Systemes de calibration et perception du mouvement en Vision Artificielle. Paris 11.
121. Abdel-Aziz, Y.I., 1974. Photogrammetric potential of non metric cameras.
122. Zhang, Z., et al., 2018. A single-image linear calibration method for camera. **Measurement**, **130**: p. 298-305.
123. Zhang, Z., 2014. Camera calibration. Computer vision: a reference guide, p. 76-77.
124. Wei, G.-Q. and S. De Ma, 1994. Implicit and explicit camera calibration: Theory and experiments. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, **16**(5): p. 469-480.
125. Maybank, S.J. and O.D. Faugeras, 1992. A theory of self-calibration of a moving camera. **International Journal of Computer Vision**, **8**(2): p. 123-151.
126. Armstrong, M., A. Zisserman, and R. Hartley. 1996. Self-calibration from image triplets. in European Conference on Computer Vision. Springer.
127. Hartley, R. 1993. Euclidean reconstruction from multiple views. in 2nd Europe-US Workshop on Invariance.
128. Zeller, C. and O. Faugeras, 1996. Camera self-calibration from video sequences: the Kruppa equations revisited. INRIA.
129. Pollefeys, M. and L. Van Gool. 1997. A stratified approach to metric self-calibration. in Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. **Proceedings., IEEE Computer Society Conference on. IEEE.**
130. Sturm, P. 1997. Critical motion sequences for monocular self-calibration and uncalibrated Euclidean reconstruction. **in Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings., IEEE Computer Society Conference on. 1997. IEEE.**
131. Luong, Q.-T. and O.D. Faugeras, 1997. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices. **International Journal of computer vision**, **22**(3): p. 261-289.

132. Sturm, P.F. and S.J. Maybank. 1999. On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. in Computer Vision and Pattern Recognition, **IEEE Computer Society Conference on. IEEE.**
133. Triggs, B. 1998. Autocalibration from planar scenes. in European Conference on Computer Vision. Springer.
134. Douskos, V., et al., 2008. Fully automatic camera calibration using regular planar patterns. Int. Arch. Photogram. Remote Sens. **Spatial Inf. Sci**, **37**: p. 21-26.
135. Mallon, J. and P.F. Whelan, 2007. Which pattern? biasing aspects of planar calibration patterns and detection methods. **Pattern recognition letters**, **28**(8): p. 921-930.
136. Çivicioğlu, P., K. Tuba, and E. Beşdok. 2012. Differansiyel Arama Algoritması Tabanlı Yeni Bir Kamera Kalibrasyon Yöntemi. in IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu. Zonguldak.
137. Harris, C. and M. Stephens. 1988. A combined corner and edge detector. in Alvey vision conference. Citeseer.
138. Moravec, H.P., 1980. Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover, S.Ü.B.M. Bölümü, Editor.
139. Lindeberg, T., 2012. Scale invariant feature transform.
140. Bay, H., T. Tuytelaars, and L. Van Gool. 2006. Surf: Speeded up robust features. in European conference on computer vision. Springer.
141. Chandraker, M., et al., 2007. Globally optimal affine and metric upgrades in stratified autocalibration.
142. Zhang, Z., Camera calibration. 2014, Springer. p. 76-77.
143. Jedlička, J. and M. Potůčková, 2007. Correction of radial distortion in digital images. Proceedings Technical Computing Prague.
144. Xu, L., et al., 2018. A LiDAR data-based camera self-calibration method. Measurement Science and Technology.

145. Safaei, A. and S. Fazli, 2018. A novel solution in the simultaneous deep optimization of RGB-D camera calibration parameters using metaheuristic algorithms. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, **26**(2): p. 743-754.
146. Kang, L., et al., 2014. A highly accurate dense approach for homography estimation using modified differential evolution. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, **31**: p. 68-77.
147. Garg, V. and K. Deep, Performance of Laplacian Biogeography-Based Optimization Algorithm on CEC 2014 continuous optimization benchmarks and camera calibration problem. **Swarm and Evolutionary Computation**, **27**: p. 132-144.
148. Tian, Z., J.L. Xiong, and Q. Zhang. 2010. Camera calibration with neural networks. in Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publ.
149. Bouguet, J.-Y., 2004. Camera calibration toolbox for matlab, in [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html).
150. Matsumoto, M. and T. Nishimura, 1998. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)**, **8**(1): p. 3-30.
151. Navidi, W.C., Statistics for engineers and scientists. 2008: McGraw-Hill Higher Education New York, NY, USA.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Mehmet Akif GÜNEN

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Yeri: Elbistan/Kahramanmaraş

Medeni Durumu: Evli

E-posta: makifgunen@hotmail.com

### Eğitim Bilgileri

| Derece        | Kurum   | Mezuniyet Tarihi |
|---------------|---|------------------|
| Lise          | Elbistan Anadolu Lisesi   | 2009             |
| Lisans        | İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği | 2014             |
| Yüksek Lisans | Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği      | 2017             |

### İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl                     | Kurum                                       | Görev     |
|-------------------------|---|-----------|
| 2013-2014<br>Mühendisi  | Akbaş İnşaat                                | Saha      |
| 2014-2015<br>Mühendisi  | Elbistan Lisanslı Harita Kadastro Bürosu    | Harita    |
| 2015-Halen<br>Görevlisi | Gümüşhane Üniversitesi/Erciyes Üniversitesi | Araştırma |

### YAYINLAR (SCI/SCI-E)

- Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Beşdok Erkan, 2020. Analyzing the Contribution of Training Algorithms on Deep Neural Networks for Hyperspectral Image Classification. **Photogrammetric Engineering And Remote Sensing**, 86(9), 581-588.
- Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, Çivicioğlu Beşdok Pınar, Atasever Ümit Haluk, 2020. Camera calibration by using weighted differential evolution algorithm: a comparative study with ABC, PSO, COBIDE, DE, CS, GWO, TLBO, MVMO, FOA, LSHADE, ZHANG and BOUGUET. **Neural Computing and Applications**, 32(23), 17681-17701.

3. Çivicioğlu Beşdok Pınar, Beşdok Erkan, Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, 2020. Weighted differential evolution algorithm for numerical function optimization: a comparative study with cuckoo search, artificial bee colony, adaptive differential evolution, and backtracking search optimization algorithms. **Neural Computing and Applications**, 32(8), 3923-3937.
4. Atasever Ümit Haluk, Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, 2018. A New Unsupervised Change Detection Approach Based On Pca Based Blocking And GMM Clustering For Detecting Flood Damage. **Fresenius Environmental Bulletin**, 27(3), 1688-1694.

#### **YAYINLAR (Diğer Dergiler)**

1. Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Taşkanat Talha, Beşdok Erkan, 2019. Usage Of Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) In Determining Drainage Networks. **Nature Sciences**, 14(1), 1-10.
2. Günen Mehmet Akif, Çoruh Levent, Beşdok Erkan, 2017. Oyun Dünyasında Model ve Doku Üretiminde Fotogrametri Kullanımı. **Geomatik**, 2(2), 86-93.
3. Günen, Mehmet Akif, Erkan Beşdok, 2021. Comparison of point cloud filtering methods with data acquired by photogrammetric method and RGB-D sensors. **International Journal of Engineering and Geosciences**, 6(3),125-135.

#### **ULUSLARARASI HAKEMLİ SEMPOZYUM BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR**

1. Günen Mehmet Akif, Baydoğan Murat Çağlar, Beşdok Erkan, 2019. Kültürel Eserlerin Arttırılmış Gerçeklik ile Sunumu: Germir Panagia Rum Kilisesi. X. *TUFUAB Teknik Sempozyumu*. Aksaray, Türkiye.
2. Atasever Ümit Haluk, Taşkanat Talha, Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, 2018. Rastgele Alt-uzay Tekniğinin Hiperspektral Uydu görüntülerinin Sınıflandırılmasında Etkinliğinin İncelenmesi. II. *Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Sempozyumu*. Nevşehir, Türkiye
3. Taşkanat Talha, Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Beşdok Erkan, 2018. GNSS Gözlemlerinden Ortometrik Yüksekliklerin belirlenmesinde Yapay Sinir Ağlarının Kullanımı: Erciyes Üniversitesi 15 Temmuz Yerleşkesi

Örneği. *II. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Sempozyumu*. Nevşehir, Türkiye.

4. Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Taşkanat Talha, Beşdok Erkan, 2018. Effect Of Different Resolution DEM Data Generated by UAVs in Determining Drainage Networks. *1.International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*. Antalya, Türkiye.
5. Çivicioğlu Beşdok Pınar, Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, 2018. Use of Potree and Cesium Platforms for Presentation of Point Clouds. *1.International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*. Antalya, Türkiye.
6. Günen Mehmet Akif, Çivicioğlu Beşdok Pınar, Beşdok Erkan, 2018. Heuristic solution with similarity, affinities and projective transformation problems with Backtracing Search Algorithm (BSA). *1.International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*. Antalya, Türkiye.
7. Günen Mehmet Akif, Karkınlı Ahmet Emin, Kesikoğlu Abdüsselam, Beşdok Erkan, 2017. RGB-D Sensörler ile İç Mekân Haritalaması. *IEEE International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium*, Malatya, Türkiye.
8. Karkınlı Ahmet Emin, Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, Kulakoğlu Fikri, 2017. Integration of Drone and Laser Mapping into the Documentation of Archaeological Excavation Areas. *Program for the 3rd Kültepe International Meeting*, Kayseri, Türkiye.
9. Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Beşdok Erkan, 2017. A Novel Edge Detection Approach Based on Backtracking Search Optimization Algorithm (BSA) Clustering. *IEEE The 8th International Conference on Information Technology*, Amman, Ürdün.
10. Günen Mehmet Akif, Çivicioğlu Beşdok Pınar, Beşdok Erkan, 2016. Differential Search Algorithm Based Edge Detection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Prag, Çek Cumhuriyeti.

**ULUSAL HAKEMLİ SEMPOZYUM BİLDİRİ KİTAPLARINDA YER ALAN YAYINLAR**

1. Günen Mehmet Akif, Atasever Ümit Haluk, Beşdok Erkan, 2018. Hiperspektral Görüntülerin Oto-Kodlayıcı Derin Öğrenme ile Sınıflandırılması. *VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu*, Eskişehir, Türkiye.
2. Günen Mehmet Akif, Çoruh Levent, Beşdok Erkan, 2017. Oyun Dünyasında Model ve Doku Üretiminde Fotogrametri Kullanımı. *TUFUAB IX. Teknik Sempozyumu*, Afyon, Türkiye.
3. Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, 2016. Kompleks Yüzeylede Mühendislik Tasarımı İçin Yersel Lazer Tarayıcı Kullanımı. *8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*. İstanbul, Türkiye.
4. Çivicioğlu Beşdok Pınar, Günen Mehmet Akif, Karkınlı Ahmet Emin, Beşdok Erkan, 2016. Evrimsel Arama Algoritmalarının Kaotik Doğası ve Geomatik Mühendisliğinde Kullanım Olanakları. *VI. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu*, Adana, Türkiye.
5. Günen Mehmet Akif, Karkınlı Ahmet Emin, Kesikoğlu Abdüsselam, Beşdok Erkan, 2016. KINECT II Sensörü ile Çevresel Haritalama. *VI. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu*, Adana, Türkiye.
6. Kesikoğlu Abdüsselam, Karkınlı Ahmet Emin, Günen Mehmet Akif, Beşdok Erkan, 2016. Rota Planlamada Koloni Arama Algoritmasının Kullanılması. *VI. Uzaktan Algılama ve CBS Sempozyumu*, Adana, Türkiye.

## **PROJELER**

1. Kayseri Yüzey Araştırmaları Projesi (KAYAP), 2019
2. Kültepe Kazısı, 2017-Devam Ediyor
3. Kayseri İli Eski Ticaret Yolları ve Yerleşimlerinin Tespiti (KAYAP), 2017-2018
4. İnersiyal Hareket Yakalama ve Hızlı Prototipleme Teknolojilerinin Stop Motion Karakter Animasyonu Üretiminde Kullanımının Değerlendirilmesi, Erciyes Üniversitesi BAP projesi, 2016-Devam ediyor