



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

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI ÖLÇME TEKNİKLERİ İLE 6 ŞUBAT 2023
KAHRAMANMARAŞ DEPREMİNİN PARSEL SINIRLARINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI:
ADİYAMAN İLİ KAHTA İLÇESİ ERİKDERE MAHALLESİ
UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan ÖZTÜRK

DANIŞMAN

Doç. Dr. Aydan YAMAN

AKSARAY, 2025

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 222306418 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Hasan ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “**FARKLI ÖLÇME TEKNİKLERİ İLE 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMİNİN PARSEL SINIRLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: ADIYAMAN İLİ KAHTA İLÇESİ ERİKDERE MAHALLESİ UYGULAMASI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Harita Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Aydan YAMAN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Prof. Dr. Hacı Murat YILMAZ

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Tarık Torun

Hacı Bayram Veli Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.....

Tez Savunma Tarihi: 11/09/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Fazliye KARABÖRK

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinallliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Hasan ÖZTÜRK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi, tecrübe ve akademik birikimini benimle paylaşarak her aşamada yanımda olan, değerli danışmanım Doç. Dr. Aydan Yaman'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin yönlendirmeleri ve desteği çalışmamın şekillenmesinde önemli rol oynamıştır.

Saha çalışmaları ve veri toplama sürecinde bana katkı sağlayan Özçiçek Harita Mühendislik ve Çokgen Mühendislik firmalarına verdikleri teknik destek ve iş birliği için teşekkür ederim. Uygulama sürecinin verimli ve sağlıklı biçimde tamamlanmasında gösterdikleri yardım ve kolaylık, çalışmanın başarıyla yürütülmesine büyük katkı sağlamıştır.

Her koşulda manevi desteğini esirgemeyen aileme de şükranlarımı sunuyorum. Bu süreçte bana gösterdikleri sabır ve anlayış, motivasyon kaynağım olmuştur.

Bu tez çalışması, yalnızca bireysel bir çabanın değil, birçok kişi ve kurumun katkısıyla oluşmuş kolektif bir emeğin ürünüdür. Emek veren ve destek olan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

Hasan Öztürk
AKSARAY, 2025

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. İNSANSIZ HAVA ARACI VE FOTOGRAMETRİK UYGULAMALARI	8
3.1 İHA'ların Sınıflandırılması.....	9
3.2 İHA'ların Ana Bileşenleri.....	13
3.3 İHA'ların Kullanım Alanları.....	14
3.4 İHA Kullanım Avantajları ve Dezavantajları	16
3.5 İş Akış Süreci ve Teknik Altyapı	18
3.5.1 Yer kontrol noktaları (YKN) ve hedefler	20
3.5.2 Görüntü işleme ve model oluşturma	21
3.5.3 Kalite kontrol ve hata analizi	24
3.6 Uygulamada Kullanılan İHA: DJI Mavic 3 Enterprise	25
4. GNSS AĞI İLE VERİ TOPLAMA	29
4.1 GNSS Veri Toplama Yöntemleri	29
4.1.1 Gerçek zamanlı kinematik (RTK).....	29
4.1.2 Statik ölçüm	31
4.1.3 Hızlı statik GNSS ölçüm (Rapid Static GNSS Surveying)	31
4.1.4 Noktasal konumlama yöntemi (PPP)	33
4.2 GNSS Verilerinin Kullanım Alanları	34
4.3 Uygulamada Kullanılan GNSS Alıcısı: Sino GNSS T300 Plus Gps	35
5. YERSEL ÖLÇME TEKNİKLERİ VE TOTAL STATION KULLANIMI....	38
5.1 Total Station Teknolojisinin Temel İlkeleri.....	39
5.2 Yersel Ölçme Teknikleri ve Hassasiyet Analizi	40
5.3 Yersel Ölçmelerde Hata Kaynakları ve Doğruluk Değerlendirmesi.....	41
5.4 Uygulamada Kullanılan Total Station Ölçüm Cihazı: Leica TS07	43
6. FOTOGRAMETRİ, GNSS VE TOTAL STATION YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	45
6.1 Üç Yöntemin Ölçüm Hassasiyeti Açısından Karşılaştırılması	45
6.2 Kullanım Alanlarına Göre Avantaj ve Dezavantajlar	45
6.3 Deprem Sonrası Yüzey Kayıklığı Takibinde Uygun Yöntem Seçimi.....	46
6.4 Yöntemlerin Entegrasyonu ve Veri Analizi.....	47
7. YÖNTEM	48
7.1 Çalışma Alanının Tanıtımı.....	48
7.2 Yer Kontrol Noktalarının Tesisi.....	49
7.3 Yer Kontrol Noktalarının GNSS ile Ölçülmesi	50
7.4 Yer Kontrol Noktalarının Total Station Ölçüm Cihazı ile Ölçülmesi	56
7.5 Yer Kontrol Noktalarının İHA ile Ölçülmesi	61
7.5.1 Uçuş planının hazırlanması	61
7.5.2 İHA uçuşu yapılması ve ortofoto üretim aşaması.....	62
7.6 Çalışma Alanı Kayıklık Boyutu	76
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	88

KAYNAKÇA	92
ÖZGEÇMİŞ	96



YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI ÖLÇME TEKNİKLERİ İLE 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMİNİN PARSEL SINIRLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: ADIYAMAN İLİ KAHTA İLÇESİ ERİKDERE MAHALLESİ UYGULAMASI

Hasan ÖZTÜRK

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Aydan YAMAN

ÖZET

Bu tez çalışmasında, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremler sonrasında Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi'nde oluşan kayıklıklar, üç farklı ölçme tekniği kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, fotogrametri tabanlı İnsansız Hava Aracı (İHA) görüntüleri, Küresel Konumlama Sistemi (GNSS) ölçümleri ve Total Station (TS) verileri birlikte değerlendirilmiş; bu yöntemlerin kayıklık tespitindeki etkinliği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Saha uygulamaları kapsamında, DJI Mavic 3 Enterprise modeli İHA ile yapılan uçuşlarda, %75 enine ve boyuna bindirme oranlarıyla, 50 metre irtifada görüntüler elde edilmiştir. GNSS ölçümleri Sino GNSS T300 Plus alıcısı ile statik modda yapılmış, Total Station verileri ise Leica TS07 cihazı ile toplanmıştır. Tüm veriler, TUREF 39 koordinat sistemine göre değerlendirilmiştir. Fotogrametrik işlemler Agisoft Metashape yazılımında gerçekleştirilmiş ve ortofoto üretimi dahil olmak üzere tüm iş akış adımları tamamlanmıştır.

Çalışma sonucunda, İHA ile geniş alanın yüksek çözünürlüklü olarak modellenilebildiği, GNSS ölçümleri ile noktasal yer değişimlerinin belirlenebildiği ve Total Station ile lokal doğrulukta detay analizlerin yapılabildiği görülmüştür. Üç tekniğin bir arada kullanımı, hem mekânsal kapsam hem de ölçüm hassasiyeti açısından birbirini tamamlayıcı veriler üretmiş; bölgedeki kayıklıklar başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Bu yönüyle tez, deprem sonrası yüzey değişimlerinin analizinde çoklu yöntem kullanımının sağladığı katkıları ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Deprem, GNSS, İHA fotogrametrisi, Total Station, Yüzey kayıklığı.

Eylül, 2025; 96 sayfa

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF THE FEBRUARY 6, 2023 KAHRAMANMARAŞ EARTHQUAKE ON PARCEL BOUNDARIES USING DIFFERENT MEASUREMENT TECHNIQUES: APPLICATION IN ERIKDERE NEIGHBORHOOD, KAHTA DISTRICT, ADIYAMAN PROVINCE

Hasan ÖZTÜRK

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Surveying Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Aydan YAMAN

ABSTRACT

In this thesis study, post-earthquake surface deformations that occurred in the Erikdere neighborhood of Kahta district, Adıyaman province, following the earthquakes centered in Kahramanmaraş on February 6, 2023, were analyzed using three different measurement techniques. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-based photogrammetry, Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements, and Total Station (TS) observations were jointly evaluated, and their effectiveness in detecting deformations was comparatively examined.

During the fieldwork, aerial images were collected using a DJI Mavic 3 Enterprise UAV at 50 meters altitude with 75% forward and side overlap. GNSS measurements were performed in static mode using a Sino GNSS T300 Plus receiver, while total station data were acquired with a Leica TS07 instrument. All data were evaluated in the TUREF 39 coordinate reference system. Photogrammetric processing, including orthoimage generation, was carried out using Agisoft Metashape software.

The study showed that UAV data enabled high-resolution modeling of wide areas, GNSS measurements identified point-based displacements, and Total Station measurements provided locally detailed analyses with high accuracy. The combined use of these three techniques yielded complementary datasets in terms of both spatial coverage and measurement precision. In this respect, the study demonstrates the contribution of multi-method approaches in detecting post-seismic ground deformations effectively.

Keywords: Earthquake, GNSS, Surface deformation, Total Station, UAV photogrammetry.

September, 2025; 96 Pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Sabit kanatlı ve multikopter İHA(URL-1).	10
Şekil 3.2. Tarımsal alanların izlenmesinde kullanılan multispektral İHA’lardan elde edilen harita örneği (URL-2).	15
Şekil 3.3. İHA ile ölçüm sürecine ait tipik iş akışı diyagramı.	19
Şekil 3.4. Yer kontrol noktası(URL-3).	21
Şekil 3.5. DJI Mavic 3 Enterprise modeli.	28
Şekil 4.1. RTK’nın çalışma prensibi(URL-4).	30
Şekil 4.2. Sino GNSS T300 Plus ölçüm cihazı.	35
Şekil 5.1. Leica TS07 total station ölçüm cihazı.	43
Şekil 7.1. Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi.	48
Şekil 7.2. YKN tesis aşaması.	50
Şekil 7.3. Sabit RTK kurma.	51
Şekil 7.4. Gezici GNSS ile epoklu ölçüm.	52
Şekil 7.5. Uçuş öncesi kontrol ayarları.	63
Şekil 7.6. Uçuş rotası.	64
Şekil 7.7. Fotoğrafları yazılıma yükleme aşaması.	65
Şekil 7.8. Fotoğrafların hizalanması.	66
Şekil 7.9. Kamera parametrelerinin optimize edilmesi.	67
Şekil 7.10. Mesh model aşaması.	68
Şekil 7.11. Build Point Cloud aşaması.	68
Şekil 7.12. Şekil Build Point Cloud aşaması.	69
Şekil 7.13. Ortofoto oluşturma.	70
Şekil 7.14. Ortofotoyu dışa aktarma.	70
Şekil 7.15. Nokta bulutunu dışa aktarma.	71
Şekil 7.16. Ortofoto görüntüsü üzerinde YKN dağılımı.	72
Şekil 7.17. Adıyaman üzerinde bulunan aktif fay hatları.	77
Şekil 7.18. Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi orijinal kadastrosu.	78
Şekil 7.19. Erikdere Mahallesi Kadastrosu üzerinde çalışma alanın gösterilmesi.	79
Şekil 7.20. Çalışma alanında deprem sonrası kayıklık boyutunun vektörel gösterimi.	80
Şekil 7.21. 155 numaralı parselin deprem öncesi ve deprem sonrası kayıklığını gösteren kadastro verisi.	80
Şekil 7.22. 155 numaralı parselin kuzeybatı köşesine ait deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.	81
Şekil 7.23. Muhtelif parsellere ait deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.	82
Şekil 7.24. Erikdere Mahallesi 16 numaralı parselin deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.	83
Şekil 7.25. Hatay ili Hassa ilçesine ait deprem öncesi ortofoto.	85
Şekil 7.26. Hatay ili Hassa ilçesine ait deprem sonrası ortofoto.	85
Şekil 7.27. Kayıklık Raporu Örneği(Hatay Kadastro Müdürlüğü,2025).	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. DJI Mavic 3 Enterprise İHA teknik özellikleri.....	26
Çizelge 4.1. Noktasal konumlama yöntemi avantaj ve dezavantajları.	34
Çizelge 5.1. Leica TS07 total station teknik özellikleri.....	44
Çizelge 6.1. İHA GNSS ve total station ölçüm tekniklerinin karşılaştırılması.....	46
Çizelge 7.1. GNSS ilk ölçüm verileri.	52
Çizelge 7.2. GNSS ikinci ölçüm verileri.	53
Çizelge 7.3. GNSS üçüncü ölçüm verileri.	54
Çizelge 7.4. GNSS ölçümlerinin karşılaştırılması.....	55
Çizelge 7.5. Total station ilk ölçüm değerleri.	57
Çizelge 7.6. Total station ikinci ölçüm değerleri.	58
Çizelge 7.7. Total station üçüncü ölçüm değerleri.	58
Çizelge 7.8. Total station ölçümlerinin analizi.	60
Çizelge 7.9. İHA ile ilk ölçüm verileri.	72
Çizelge 7.10. İHA ikinci ölçüm verileri.....	73
Çizelge 7.11. İHA üçüncü ölçüm verileri.	74
Çizelge 7.12. İHA ölçümlerinin karşılaştırılması.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

CBS	Coğrafi Bilgi Sistemi
DSM	Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model)
DTM	Sayısal Arazi Modeli (Digital Terrain Model)
EDM	Elektronik Mesafe Ölçer (Electronic Distance Measurement)
GCP	Yer Kontrol Noktası (Ground Control Point)
GNSS	Küresel Navigasyon Uydu Sistemi
GPS	Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
GSD	Zemin Örneklem Mesafesi (Ground Sampling Distance)
İHA	İnsansız Hava Aracı
IMU	Ataletsel Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
MVS	Çoklu Görünüm Stereo (Multi-View Stereo)
PPP	Noktasal Konumlama Yöntemi (Precise Point Positioning)
RTK	Gerçek Zamanlı Kinematik (Real-Time Kinematic)
SfM	Hareketten Yapılandırma (Structure-from-Motion)
TS	Total Station (Toplam İstasyon)
UTM	Evrensel Transvers Merkator Projeksiyon Sistemi
WGS84	Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (World Geodetic System 1984)

1. GİRİŞ

Depremler, ani oluşumları ve yüksek yıkıcılık potansiyelleriyle hem insan yaşamı hem de doğal çevre üzerinde kalıcı etkiler bırakabilen önemli jeodinamik olaylardır (Reilinger vd., 2006). Bu olaylar, kısa sürede meydana getirdikleri ağır can ve mal kayıplarının yanı sıra, uzun vadede sosyal yapıyı, ekonomik dengeyi ve fiziksel altyapıyı olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, depremler doğa kaynaklı tehlikeler içerisinde sürekli izlenmesi, modellenmesi ve etkilerinin çok yönlü olarak analiz edilmesi gereken başlıca afet türlerinden biridir. Fay hatları boyunca biriken ve zamanla boşalan yer kabuğu gerilimleri, jeolojik yapıların ve yüzey özelliklerinin etkisiyle farklı kayıklık örüntülerine neden olur (Aktuğ vd., 2009). Bu tür yer hareketlerinin bilimsel olarak incelenmesi, yalnızca mevcut etkilerin açıklanması açısından değil, aynı zamanda olası gelecekteki olaylara karşı hazırlıklı olunması ve risk azaltma planlarının geliştirilmesi bakımından da büyük önem taşır (Özener vd., 2010). Deprem sonrasında oluşan yüzey kayıklıklarının sistematik olarak izlenmesi, yer kabuğunun dinamik süreçlerinin anlaşılmasında temel rol üstlenir (Colomina ve Molina, 2014). Özellikle kayıklıkların doğru ve zamanında tespit edilmesi; yapı güvenliği değerlendirmelerinden yeniden inşa süreçlerine, hasar tespitinden afet riski analizine kadar geniş bir uygulama alanı bulur. Bu kapsamda jeodezik ölçüm tekniklerinin önemi giderek artmakta; GNSS, fotogrametri ve yersel ölçüm yöntemleri, kayıklıkların yüksek duyarlılıkla ve zamansal-mekânsal doğrulukla belgelenmesini sağlayan etkili teknolojiler olarak öne çıkmaktadır (Blewitt vd., 2009; Wolf vd., 2014).

GNSS (Küresel Konumlama Sistemleri), uydular aracılığıyla elde edilen sinyaller yardımıyla yer yüzeyindeki noktaların konumlarını milimetre düzeyinde belirleme olanağı sunan, yüksek hassasiyetli bir ölçüm teknolojisidir. Bu sistemler, özellikle jeodinamik süreçlerin izlenmesi ve kayıklık analizlerinin gerçekleştirilmesinde güvenilir veri üretim araçları olarak öne çıkmaktadır (Blewitt vd., 2009). Türkiye’de GNSS temelli kayıklık izleme çalışmaları, başta Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu Fay Zonu olmak üzere aktif fay sistemlerinin gözlemlenmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Örneğin, 1999 Kocaeli depremi sonrasında yapılan analizlerde GNSS verileri kullanılarak yüzey hareketleri ayrıntılı şekilde değerlendirilmiştir (Aktuğ vd., 2009). Bunun yanı sıra, Doğu Anadolu Fay hattı boyunca yürütülen uzun

sürekli GNSS ölçümleri, bölgedeki doğrultu atımlı fayların kayıklık özelliklerini belirlemede önemli katkılar sağlamıştır (Özener vd., 2010).

Fotogrametri, yüzeyin fiziksel özelliklerini görüntüler aracılığıyla üç boyutlu biçimde modelleyerek zamana ve mekâna bağlı analizlerin gerçekleştirilmesini mümkün kılan güçlü bir yöntemdir. Son yıllarda insansız hava araçları (İHA) ile bu yöntemin bütünleşik şekilde kullanılması, özellikle afet sonrası veri toplama ve değerlendirme süreçlerinde önemli avantajlar sağlamıştır. Bu teknolojik entegrasyon sayesinde hem görüntüleme süresi kısalmış hem de elde edilen verilerin doğruluğu artmıştır (Nex ve Remondino, 2014; Wolf vd., 2014).

Total station teknolojisi, yüksek konum doğruluğu ve noktasal ölçüm kapasitesi sayesinde kayıklık izleme çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Bu cihazlar; yapısal hareketlerin izlenmesi, aktif heyelan bölgelerinin gözlemlenmesi ve kısa süreli yer değiştirmelerin yüksek hassasiyetle ölçülmesi gibi uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Gili vd. (2000), gerçekleştirdikleri çalışmada, aktif heyelan sahalarında total station ile yapılan ölçümlerle yüzey hareketlerini başarıyla takip etmişlerdir.

Deprem sonrası meydana gelen yüzey kayıklıklarının kapsamlı şekilde değerlendirilebilmesi açısından GNSS, fotogrametri ve total station tekniklerinin eş zamanlı kullanımı önemli bir avantaj sunar. GNSS sistemi, geniş coğrafi alanlarda sürekli konum bilgisi sağlayarak büyük ölçekli yer değiştirmelerin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Fotogrametrik yöntemler ise, yüzey değişimlerinin ayrıntılı biçimde modellenmesine olanak tanıyarak görsel analizler açısından güçlü bir altyapı sağlar. Total station cihazları ise, yüksek konum doğruluğu ile küçük çaplı yapısal hareketlerin noktasal düzeyde izlenmesi için tercih edilmektedir. Literatürde yer alan çeşitli bilimsel araştırmalar, bu üç yöntemin birlikte uygulanmasının kayıklık analizlerinde hem ölçüm hassasiyetini hem de genel analiz güvenilirliğini anlamlı şekilde artırdığını göstermektedir.

Afet yönetimi süreçlerinde geliştirilecek etkili stratejilerin temelini, sahadan elde edilen güvenilir ve kapsamlı veriler oluşturur. Bu bağlamda, farklı ölçüm tekniklerinin birlikte kullanılması, elde edilen bulguların birbirini doğrulaması açısından önem taşır ve yorumlama sürecine bilimsel derinlik kazandırır. GNSS

tabanlı sistemler, zaman içinde süreklilik arz eden konum bilgileri sunarken; fotogrametrik yaklaşımlar, yüzeyde meydana gelen değişimlerin ayrıntılı biçimde analiz edilmesini sağlar. Öte yandan, total station kullanımı, özellikle yapıların kayıklık analizinde ihtiyaç duyulan yüksek hassasiyetli verilerin elde edilmesine katkıda bulunur. Bu bütüncül yaklaşım sayesinde, yüzeyde oluşan hem yatay hem de düşey kayıklıklar detaylı olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışma, Adıyaman İli Kahta İlçesi Erikdere Mahallesi'ni de son derece etkileyen 2023 yılında meydana gelen Kahramanmaraş depreminin ardından, GNSS, fotogrametri ve total station teknikleriyle yüzey kayıklıklarının tespit ve analizi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın hedefi, üç tekniğin entegre biçimde kullanımının sağladığı verimliliği ortaya koymak ve yöntemlerin doğruluk düzeylerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir. Çalışma kapsamında GNSS ile kabuk hareketleri izlenmiş, İHA destekli fotogrametriyle yüzey modelleri oluşturulmuş, total station ile kritik noktalarda hassas ölçümler yapılmıştır. Böylece her yöntemin avantajı uygulamalı olarak değerlendirilmiş ve saha verilerinin yorum gücü artırılmıştır.

Araştırma kapsamında elde edilen veriler hem yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması hem de bölgenin kayıklık dinamiklerinin detaylı şekilde analiz edilmesi açısından değerlidir. Elde edilen bulgular, sadece bu bölgeye özgü değil, benzer jeolojik yapıya sahip bölgeler için de yol gösterici olabilecek niteliktedir. Çalışma, ölçüm tekniklerinin saha koşullarına bağlı olarak nasıl bir araya getirilebileceğini ve entegre analizlerin literatüre nasıl katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Depremler, yer kabuğunda biriken gerilimin ani bir şekilde açığa çıkmasıyla, yüzeyde kalıcı şekil değişimlerine yol açan jeodinamik olaylardır. Bu tür yüzey kayıklıklarının şiddeti, yönelimi ve mekânsal dağılımı; GNSS, insansız hava aracı (İHA) fotogrametrisi, total station ölçümleri, Lidar taramaları, InSAR teknolojisi ve spektral görüntüleme gibi çağdaş konum belirleme ve uzaktan algılama yöntemleri sayesinde yüksek hassasiyetle tespit edilebilmektedir (Colomina ve Molina, 2014). Mevcut literatür, bu yöntemlerin hem bireysel kullanımlarına hem de birbirini tamamlayacak şekilde entegre olarak uygulandığı araştırmalara sıklıkla yer vermekte; bu da daha kapsamlı ve güvenilir kayıklık analizlerinin yapılabilmesini mümkün kılmaktadır.

Kahramanmaraş merkezli 6 Şubat 2023 depremleri sonrasında Doğu Anadolu Fay Zonu boyunca meydana gelen yüzey kayıklıkları, GNSS ölçümleri aracılığıyla detaylı biçimde analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Tiryakioğlu vd. (2024), Ecemiş Fayı üzerinde gerçekleştirdikleri araştırmada, 6 Şubat depremlerinin ardından GNSS yöntemiyle kabuksal kayıklıkları belirlemeye yönelik yüksek çözünürlüklü ölçümler yapmışlardır. Araştırmada, fay hattı boyunca 20 istasyondan elde edilen GNSS verileri değerlendirilmiş ve bazı bölgelerde 2.5 metreye varan yatay yer değiştirmeler tespit edilmiştir. Çalışma, Doğu Anadolu Fay Zonu'nun aktif tektonik karakterini doğrularken, bu tür büyük depremlerin yüzey kayıklıklarına etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Ayrıca araştırmada, GNSS tabanlı ölçümlerin yalnızca anlık (ko-sismik) değil, aynı zamanda post-sismik kayıklıkların izlenmesinde de etkin bir yöntem olduğu vurgulanmıştır (Tiryakioğlu vd., 2024).

Elazığ Sivrice Depremi sonrasında GNSS verileri üzerinden yapılan değerlendirmeleri örnek teşkil eden önemli bir çalışma, Konakoğlu ve Akar (2021) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada, 24 Ocak 2020 tarihinde meydana gelen M_v 6.5 büyüklüğündeki depremin ardından, TUSAGA-Aktif ağına ait çevre GNSS istasyonlarından elde edilen veriler analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda istasyonlarda yatay yönde yaklaşık 2-6 cm aralığında yerde değiştirmeler tespit edilmiş. Bu veriler depremin bölgedeki jeodinamik etkilerini sayısal olarak ortaya koymuştur. Çalışma yalnızca kosismik (deprem anı) kayıklıkları değil, aynı zamanda deprem sonrası süreçte devam eden yer hareketlerini de ortaya çıkarması

açısından dikkat çekicidir. Elde edilen bulgular, GNSS sistemlerinin teknolojik hareketliliklerin izlenmesinde sunduğu yüksek hassasiyeti ve zamansal sürekliliği bir kez daha göstermektedir (Akar ve Konakoğlu, 2021)

Çin'in Qinghai Eyaleti'nde meydana 2021 yılında meydana gelen Mw 7.3 Maduo Depremi sonrasında gerçekleştirilen bir çalışmada, İHA tabanlı fotogrametri ile InSAR verileri entegre edilerek yüzey kırıklarının detaylı haritalaması yapılmıştır. Bu kapsamda, İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler kullanılarak ortofoto ve sayısal yüzey modelleri üretilmiş; InSAR verileri ile de kayıklık büyüklükleri sayısal olarak ortaya konmuştur. Çalışmada kullanılan bu entegre yöntem, yüzey kırıklarının hem şekil özelliklerini görsel olarak sunmakta hem de bölgedeki yatay ve düşey kayıklıkları kantitatif biçimde analiz etme imkânı sağlamaktadır. Böylece, arazi üzerindeki değişimlerin mekânsal boyutu bütüncül şekilde analiz edilmiştir (Yang vd., 2022).

Batı Yunanistan'da meydana gelen aktif bir heyelanın izlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, İHA tabanlı fotogrametri, GNSS ölçümleri ve InSAR teknikleri entegre bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma, Şubat 2021 ile Nisan 2023 tarihleri arasında tekrarlanan İHA uçuşları ve eş zamanlı GNSS ölçümleriyle yüzey kayıklıklarını yüksek hassasiyetle haritalamıştır. Bu entegre yaklaşım santimetre düzeyinde kayıklıkların tespit edilmesini sağlamış ve heyelanın evrimi hakkında kapsamlı bilgiler sunmuştur (Katsigianni vd., 2023).

González-Aguilera vd. (2009), yersel lazer tarayıcılar ile dijital kameralarla elde edilen verileri bir araya getirerek üç boyutlu nokta bulutları oluşturmuş ve bu verileri kayıklık analizlerinde kullanmıştır. Zamanla yapılan ölçümlerin karşılaştırılmasıyla yüzeydeki hacimsel değişimler metrik düzeyde belirlenmiştir. Bu tür bir yaklaşım, özellikle eğimli arazilerde ve yapı çevrelerinde detaylı kayıklık takibi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

Yu vd. (2022) yaptıkları çalışmada, deprem sonrası hasar görmüş yapıların yapısal durumlarının değerlendirilmesi için İHA fotogrametrisi ve nokta bulutu segmentasyonu yöntemlerini birleştirerek yeni bir kayıklık ölçüm yöntemi geliştirmiştir. Özellikle yüksek katlı binalarda, İHA ile elde edilen görüntülerden oluşturulan nokta bulutları kullanılarak yapısal bileşenlerin otomatik segmentasyonu

ve çok seviyeli kayıklık tahmini gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, deprem sonrası yapıların hızlı ve detaylı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Yu vd., 2022).

Pathak vd. (2023), Nepal'de gerçekleştirdikleri çalışmada, yol hizalama projelerinde GNSS, insansız hava aracı (İHA) ve total station (TS) yöntemlerini karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, DJI Phantom 4 İHA kullanılarak 150 metre irtifadan görüntüler toplanmış ve Pix4D yazılımı ile işlenmiştir. Ayrıca, 11 adet yer kontrol noktası kullanılarak ortofotoların doğruluğu artırılmıştır. GNSS ölçümleriyle 15 istasyonun koordinatları belirlenmiş ve TS ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, GNSS yönteminin yatay ve düşey doğruluk açısından TS yöntemine göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, İHA ve GNSS yöntemlerinin TS yöntemine göre daha az zaman ve iş gücü gerektirdiği, bu nedenle yol hizalama projelerinde daha verimli olduğu belirtilmiştir.

Tong vd. (2015), Çin'deki bir açık ocak maden sahasında GNSS, İHA destekli fotogrametri ve yersel lazer tarama yöntemlerini eşzamanlı kullanarak üç boyutlu yüzey modelleri gerçekleştirmiştir. Bu çalışma, karmaşık topoğrafik yapıya sahip alanlarda hem yatay hem de düşey kayıklıkların hassas şekilde izlenmesini mümkün kılan entegre bir sistem geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Yunanistan'ın Thessaly bölgesinde meydana gelen Ellassona depremleri sonrasında gerçekleştirilen bir çalışmada, yapı ve zemin kayıklıklarının belirlenmesi amacıyla İHA, GNSS ve total station sistemleri birlikte kullanılmıştır. Çalışmada İHA ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler sayesinde yüzey kırıkları ayrıntılı şekilde haritalanmış; GNSS ve total station ölçümleriyle yatay ve düşey yer değiştirmeler kantitatif olarak analiz edilmiştir. Bu yöntemlerin entegre biçimde kullanılması, deprem sonrası meydana gelen yüzey kayıklıklarının hem görsel hem de sayısal olarak değerlendirilmesine olanak sağlamış ve mühendislik yapılarının güvenliğinin izlenmesinde etkili bir yaklaşım sunmuştur (Koukouvelas ve Nikolakopoulos, 2021).

Türkiye'nin batısında meydana gelen 2020 Samos Depremi sonrasında yapılan bir araştırmada, GNSS istasyonlarının stabilitesi ve yer değiştirme eğilimleri analiz edilmiştir. Çalışmada, GNSS verileri ile elde edilen konum değişimleri, yapı ölçeğinde kayıklık izleme açısından değerlendirilmiş; bu bulgular, fotogrametrik

yöntemlerle desteklenmiştir. Deprem sonrası oluşan yer değiştirme miktarlarının belirlenmesi, afet yönetimi ve yapı sağlığı izleme süreçleri açısından önemli bilgiler sunmuştur (Özarpacı, 2024).

Reilinger vd. (2006), Türkiye genelinde kurdukları GNSS ağı sayesinde farklı fay segmentleri üzerindeki kayıklık hızlarını analiz etmiş ve bu verilerle yıllık gerilim birikimi eğrileri oluşturmuştur. Bu çalışma, GNSS'in yalnızca depremler sonrası değil, öncesinde de gerilim birikimini izlemek açısından önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

Literatürde yer alan bu çok sayıdaki çalışma, GNSS, fotogrametri ve total station tekniklerinin, deprem sonrası yüzey hareketlerinin izlenmesinde etkili şekilde kullanıldığını açıkça ortaya koymaktadır. Bu yöntemlerin hem tek başına hem de entegre biçimde uygulandığı araştırmalar sayesinde, ani ve zamana yayılan kayıklıklar detaylı biçimde modellenabilmektedir.

Bu bağlamda, bu tez çalışmasında Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi'nde GNSS, total station ve İHA fotogrametri yöntemleri kullanılarak üç ayrı ölçüm periyodunda yüzey hareketleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında bölgenin kuzeybatı yönünde aylık ortalama 2–3 mm'lik bir yüzey kayması gösterdiği tespit edilmiştir.

Bu kayıklık yönü ve büyüklüğü, Doğu Anadolu Fay Zonu üzerindeki bölgesel tektonik hareketlerle ve Arap levhasının kuzeye doğru ilerlemesiyle uyumlu sonuçlar sunmuştur. Farklı yöntemlerin aynı alanda eş zamanlı uygulanması, verilerin karşılaştırmalı analizine olanak sağlamış; GNSS'in geniş alan doğruluğu, total station'ın lokal hassasiyeti ve İHA fotogrametrisinin yüzey modelleme gücü birleşerek kapsamlı bir analiz yapılmasını mümkün kılmıştır.

Sonuç olarak bu çalışma, hem literatürdeki benzer araştırmalarla tutarlılık gösteren hem de yerel düzeyde özgün bulgular sunan önemli bir saha araştırmasıdır. Elde edilen veriler, bölgesel deprem riski analizlerinde, risk haritalarının güncellenmesinde ve yapı güvenliği açısından yapılacak mühendislik çalışmalarında referans niteliği taşımaktadır.

3. İNSANSIZ HAVA ARACI VE FOTOGRAMETRİK UYGULAMALARI

İnsansız Hava Araçları (İHA), içinde pilot bulunmaksızın uzaktan kumanda ya da önceden programlanmış otonom sistemler yardımıyla kontrol edilen, motorlu hava taşıtlarıdır. Başlangıçta yalnızca askeri amaçlarla geliştirilen bu araçların tarihi, 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. İlk örnekleri radyo kontrollü hedef uçaklar olan İHA'lar, özellikle I. Dünya Savaşı'nın hemen ardından geliştirilen “Aerial Target” projeleriyle gündeme gelmiştir (Eisenbeiss, 2009). II. Dünya Savaşı sırasında ise keşif ve gözetleme görevleri için yaygın şekilde kullanılmış, bu dönemde özellikle ABD ve Almanya tarafından geliştirilen prototipler ön plana çıkmıştır. Soğuk Savaş yıllarında teknolojik gelişmelere paralel olarak İHA sistemleri hızla evrim geçirmiş; radar, sensör ve uzun menzilli iletişim sistemlerinin entegrasyonu ile daha sofistike hale gelmiştir (Colomina ve Molina, 2014).

2000'li yıllardan itibaren GPS teknolojilerinin yaygınlaşması, dijital kameraların minyatürleşmesi ve gelişmiş uçuş kontrol sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte İHA'lar askeri alanın dışına çıkarak sivil, ticari ve bilimsel amaçlarla da kullanılmaya başlanmıştır. Bu yeni dönemde İHA'lar, başta haritacılık, arazi modelleme, tarım alanlarının takibi, arkeolojik belgelenme, çevresel izleme, orman yangını takibi, altyapı projelerinin planlanması, afete müdahale ve hasar tespiti gibi birçok farklı alanda vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir (Colomina ve Molina, 2014; Luhmann vd., 2014).

Ayrıca insansız hava aracı sistemlerinin düşük maliyet, operasyonel esneklik, insan yaşamını riske atmama ve yüksek çözünürlükte veri sağlama gibi avantajları, onların jeodezi, fotogrametri ve uzaktan algılama gibi ölçme bilimlerinin en önemli teknolojilerinden biri haline gelmesini sağlamıştır. Geliştirilen GNSS destekli navigasyon sistemleri, atalet ölçüm birimleri (IMU), çok bantlı kameralar ve gelişmiş uçuş yazılımları sayesinde günümüzde İHA'lar, santimetre düzeyinde hassasiyetle veri toplayabilmekte ve coğrafi bilgi sistemlerine entegre edilerek karar destek sistemlerine katkı sunmaktadır (Eisenbeiss, 2009; Nex ve Remondino, 2014).

İHA'lar, düşük irtifadan ve yüksek çözünürlükte veri toplayabilmeleri, tekrar edilebilir görevlerle çalışma esnekliği sunmaları ve farklı sensörlerle entegre çalışabilmeleri sayesinde fotogrametri uygulamalarında devrim yaratmıştır. Bu

sistemler, hem mekânsal hem de spektral veri açısından zengin, hassas ve güncel haritaların üretimini mümkün kılmaktadır.

3.1 İHA'ların Sınıflandırılması

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), kullanım amacı, yapısal özellikleri, uçuş kapasitesi ve kontrol sistemlerine göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, İHA'nın görev türüne ve kullanılacağı ortama uygunluğunu belirlemede kritik öneme sahiptir.

3.1.1 Kanat yapısına göre sınıflandırma

Kanat yapılarına göre insansız hava araçları, sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.1). Sabit kanatlı İHA'lar uçak benzeri bir yapıya sahip olup ileri yönlü itme kuvvetiyle hareket ederler ve kaldırma kuvvetini sabit kanatları aracılığıyla elde ederler. Bu tür İHA'lar, yüksek hız ve uzun menzil avantajları sayesinde genellikle geniş alanların hızlı bir şekilde taranmasını gerektiren tarım, orman yönetimi, sınır gözetimi ve büyük ölçekli arazi haritalama gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Colomina ve Molina, 2014). Ancak sabit kanatlı İHA'lar dikey kalkış ve iniş yapma yeteneğine sahip olmadıkları için kalkış aşamasında pist veya fırlatma sistemi, iniş aşamasında ise geniş açık bir alana ihtiyaç duyarlar.

Döner kanatlı ya da multikopter olarak adlandırılan İHA'lar ise helikopter benzeri bir çalışma prensibine sahiptir ve birden fazla pervaneye sahiptirler. Bu İHA'lar, dikey kalkış ve iniş yetenekleri sayesinde dar alanlarda rahatlıkla operasyon gerçekleştirebilirler. Ayrıca sabit bir noktada havada durabilmeleri ve yüksek manevra kabiliyetine sahip olmaları, onları detaylı görüntüleme ve hassas ölçüm gerektiren görevler için uygun hale getirmektedir. Bu özelliklerinden dolayı döner kanatlı İHA'lar, özellikle şehir içi haritalama, mimari yapıların modellenmesi ve kısa mesafeli yüzey analizleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Nex ve Remondino, 2014).



Şekil 3.1. Sabit kanatlı ve multikopter İHA(URL-1).

3.1.2 Kontrol türüne göre sınıflandırma

İnsansız hava araçları, kontrol yöntemlerine göre manuel, yarı otonom ve tam otonom olmak üzere üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Manuel İHA’larda uçuşun tüm aşamaları operatör tarafından doğrudan kontrol edilmekte olup, bu tür sistemlerde herhangi bir otomasyon bulunmamaktadır. Kullanıcı, kumanda aracılığıyla İHA’nın yönünü, hızını ve irtifasını anlık olarak belirler. Bu sistemler genellikle eğitim süreçlerinde ya da hobi amaçlı uçuşlarda tercih edilir. Kontrolün tamamen kullanıcıda olması, hem manevra kabiliyetini artırır hem de operatörün deneyim kazanmasına olanak tanır; ancak otomatik uçuş görevleri gerçekleştirme yeteneği bulunmadığı için profesyonel uygulamalarda sınırlı kullanım alanına sahiptir.

Yarı otonom İHA’lar, kullanıcı kontrolü ile otomasyonun bir arada bulunduğu sistemlerdir. Bu araçlarda kalkış, sabit irtifada seyir ya da otomatik iniş gibi bazı görevler yazılım tarafından kontrol edilerek otomatikleştirilmiştir. Ancak uçuşun belirli aşamalarında kullanıcı, gerektiğinde manuel müdahalede bulunabilir. Bu durum, özellikle karmaşık görevlerde veya aniden değişen çevresel koşullarda sistemin esnekliğini artırır. Yarı otonom sistemler, hem güvenliği artırmak hem de

operatöre uçuşun kritik anlarında destek olmak amacıyla geliştirilmiştir. Özellikle keşif, gözetim ve eğitim uçuşlarında tercih edilmektedir.

Tam otonom İHA'lar ise gelişmiş kontrol algoritmaları ve sensör entegrasyonları sayesinde tüm uçuşu insan müdahalesi olmadan gerçekleştirebilir. Kalkıştan inişe kadar olan tüm görevler, önceden planlanmış rotalar ve parametreler doğrultusunda yazılım aracılığıyla tanımlanır. GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri), IMU (Ataletsel Ölçüm Birimi), barometrik sensörler, Lidar ve kamera sistemleri gibi entegre sensörler yardımıyla İHA, çevresel koşullara uyum sağlayarak yüksek doğrulukta görev icra eder. Bu sistemler, tarımsal ilaçlama, haritalama, arama-kurtarma, afet sonrası hasar tespiti ve güvenlik gibi tekrarlayan ve belirli rotalara dayanan operasyonlar için ideal bir çözüm sunar. Operatörün müdahalesine gerek kalmaksızın tüm sürecin yazılımsal olarak kontrol edilebilmesi, insan hatası riskini azaltmakta ve operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırmaktadır.

3.1.3 Uçuş süresi ve menzile göre sınıflandırma

İnsansız hava araçları, uçuş süresine göre farklı kategorilere ayrılmakta olup, bu sınıflandırma kullanım amacına ve operasyonel kapasiteye göre belirlenmektedir. Mikro İHA'lar, genellikle 0–20 dakika arasında uçuş süresine sahiptir ve bu nedenle hobi uçuşları veya kısa menzilli test uygulamaları için tercih edilmektedir. Hafif ve kompakt yapıları, kolay taşınabilirlik avantajı sağlarken; batarya kapasitelerinin sınırlı olması, bu sistemlerin veri toplama potansiyelini azaltmakta ve yalnızca küçük çaplı görevlerle sınırlandırmaktadır.

Mini İHA'lar, 20–60 dakika aralığında uçuş gerçekleştirebilen sistemlerdir. Akademik çalışmalar, sivil gözetim faaliyetleri ve küçük ölçekli haritalama görevleri için oldukça uygundur. Kısa süreli gözlem gerektiren projelerde, özellikle şehir içi uygulamalarda, mimari yapıların belgelenmesinde ve çevresel analizlerde sıkça kullanılmaktadır.

Orta seviye İHA'lar, bir saatten uzun süren uçuş kabiliyetleriyle daha profesyonel görevlerde yer alırlar. Bu tür araçlar, orta büyüklükteki arazi modelleme, çevresel gözlem ve tarım arazilerinin analizi gibi daha kapsamlı projelerde tercih edilmektedir. Hem veri kalitesi hem de kapsama alanı açısından mini sınıf İHA'lara göre önemli avantajlar sunmaktadır.

Uzun süreli uçuş yapabilen İHA'lar ise altı saatten daha uzun havada kalabilen sistemlerdir ve genellikle askeri operasyonlar, sınır gözetimi, istihbarat toplama ve geniş ölçekli keşif görevleri için kullanılmaktadır. Bu sınıfa ait İHA'lar, güneş enerjili sistemler veya hibrit motorlarla donatılarak, operasyonel süreyi maksimuma çıkarmayı hedefler. Geniş alanların tek seferde taranabilmesi sayesinde, kesintisiz veri toplama gerektiren uzun soluklu görevlerde yüksek verimlilik sağlarlar.

3.1.4 Kullanım amacına göre sınıflandırma

İnsansız hava araçları kullanım amaçlarına göre farklı kategorilere ayrılmaktadır. Askerî İHA'lar, özellikle keşif, gözetleme, hedef tespiti ve gerektiğinde saldırı amacıyla kullanılan sistemlerdir. Bu tür İHA'lar uzun menzil ve yüksek irtifada uçuş kabiliyetine sahip olup, genellikle büyük gövdeli, jet motorlu ve silah taşıyabilen yapıdadırlar. Operasyonel kabiliyetleri sayesinde modern savunma sistemlerinin vazgeçilmez bileşenleri arasında yer almaktadır.

Sivil İHA'lar ise kargo taşımacılığı, ulaşım hizmetleri, emniyet birimleri tarafından yapılan denetimler, toplumsal olayların izlenmesi ve medya sektöründeki yayıncılık gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu grup, kullanım yaygınlığı açısından en geniş İHA türünü oluşturur ve farklı özelliklerdeki modellerle çeşitli ihtiyaçlara cevap verebilir.

Ticari İHA'lar, özel sektör faaliyetlerinde etkin bir şekilde kullanılmakta olup; tarımsal ilaçlama, yapı denetimi, güneş paneli kontrolleri ve film ya da dizi prodüksiyonları gibi görevlerde yer almaktadır. Bu araçlar, farklı sensörler ve kamera sistemleriyle donatılabilmekte ve sektöre özgü çözümler sunabilmektedir.

Bilimsel ve akademik amaçlarla kullanılan İHA'lar ise jeolojik yapıların incelenmesi, atmosferik veri toplama, uzaktan algılama, arkeolojik alanların belgelenmesi, eğitim amaçlı uygulamalar ve fotogrametrik modelleme gibi birçok araştırma faaliyetinde kullanılmaktadır. Bu tür sistemler, üniversiteler, araştırma merkezleri ve enstitüler tarafından geliştirilen ve kullanılan araçlar olup, bilimsel veri üretiminde önemli bir rol oynamaktadır (Luhmann vd., 2014).

3.2 İHA'ların Ana Bileşenleri

İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemleri, birbirini tamamlayan donanım ve yazılım bileşenlerinin entegre bir şekilde çalıştığı kompleks platformlardır. İHA'nın başarılı ve güvenli bir şekilde görevini yerine getirebilmesi, bu bileşenlerin kalitesi ve uyumu ile doğrudan ilişkilidir. Temel bileşenler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

• Gövde ve Kanatlar

İHA'nın taşıyıcı yapısı olan gövde, tüm diğer bileşenlerin montajını sağlayan fiziksel çerçeveyi oluşturur. Aerodinamik tasarımı, uçuş sırasında hava direncini azaltarak daha stabil ve verimli bir uçuş sağlar. Sabit kanatlı İHA'larda kanat açıklığı, kaldırma kuvvetini etkilerken; multikopterlerde pervanelerin yerleşimi uçuş dengesini belirler. Hafif fakat sağlam malzemelerden (örneğin karbon fiber, plastik kompozitler) üretilmesi hem manevra kabiliyeti hem de dayanıklılık açısından önemlidir.

• Motor ve Pervane Sistemleri

İHA'ların hareketini sağlayan temel itici güç motorlardır. Genellikle elektrikli motorlar tercih edilir. Bu motorlara bağlı pervaneler sayesinde kaldırma kuvveti oluşur. Döner kanatlı sistemlerde (quadcopter, hexacopter vb.) her pervane farklı yönlerde dönerek dengeli uçuş sağlar. Sabit kanatlı sistemlerde ise bir veya daha fazla motor, ileri yönlü itiş üretir. Motorların gücü, yük kapasitesini ve maksimum uçuş süresini belirler.

• GNSS Modülü (Global Navigation Satellite System)

GNSS sistemi, İHA'nın dünya üzerindeki kesin konumunu belirleyen uydu tabanlı navigasyon sistemidir. GPS (ABD), GLONASS (Rusya), Galileo (AB) ve BeiDou (Çin) gibi küresel sistemleri kullanarak koordinat bilgisi üretir. RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) veya PPK (Sonradan İşlenen Kinematik) düzeltmeleriyle konum hassasiyeti santimetre seviyesine kadar artırılabilir. Bu modül, uçuş rotasının doğru bir şekilde izlenmesini ve ortofoto üretiminde hassas jeoreferanslamayı sağlar.

- **IMU (Inertial Measurement Unit – Ataletsel Ölçüm Birimi)**

IMU; ivmeölçer, jiroskop ve bazen manyetometre sensörlerinden oluşan bir sensör grubudur. İHA'nın üç eksenindeki (x, y, z) hız, ivme, eğim, dönüş ve yönelim bilgilerini toplar. GNSS ile birlikte çalışarak sistemin yönelimini düzeltir ve ani hareketlerde uçuş denetimini sağlar. Özellikle rüzgarlı koşullarda, sabit konumda kalabilmek için IMU'dan gelen veriler kritik öneme sahiptir.

- **Uçuş Kontrol Bilgisayarı (Flight Control Unit – FCU)**

FCU, İHA'nın “beyni” olarak görev yapar. Tüm sensörlerden gelen verileri analiz eder ve motorlara gerekli komutları ileterek İHA'nın dengeli uçuşunu sağlar. Otonom modda uçuş rotasının izlenmesi, kalkış-iniş otomasyonu, GPS sinyali kaybında güvenli iniş ve acil durum prosedürlerinin yönetimi bu birim tarafından yürütülür. Yazılım güncellemeleriyle yeni görevler ve uçuş stratejileri entegre edilebilir (DJI, 2021; Luhmann vd., 2014).

- **Yer Kontrol İstasyonu (Ground Control Station – GCS)**

Yer Kontrol İstasyonu, İHA ile gerçek zamanlı iletişimi sağlayan kontrol merkezidir. Operatör, bu arayüz üzerinden uçuş rotasını tanımlar, sensör verilerini takip eder, uçuş sırasında müdahalelerde bulunabilir. GCS sistemleri çoğunlukla taşınabilir tablet, dizüstü bilgisayar ya da özel ekran konsolları şeklindedir. Bazı sistemlerde telemetri modülleri sayesinde veri aktarımı kilometrelerce mesafeden gerçekleştirilebilir. Gelişmiş yazılımlar ile rotalar 3D olarak planlanabilir ve görev simülasyonları yapılabilir (Colomina ve Molina, 2014).

Bu bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan entegre sistemler, İHA'ların yüksek doğrulukla veri toplayabilmesini, güvenli uçuş gerçekleştirmesini ve farklı coğrafi koşullarda görev yapabilmesini sağlar. Her bir bileşenin performansı, genel sistem başarısına doğrudan katkıda bulunmaktadır.

3.3 İHA'ların Kullanım Alanları

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), teknolojik gelişmelerin etkisiyle yalnızca askeri alanda değil; sivil, bilimsel ve ticari pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaya

başlanmıştır. Gelişmiş görüntüleme sistemleri, GNSS entegrasyonu, otomatik uçuş planlama yazılımları ve çeşitli sensörlerin kullanımı, İHA'ların birçok disiplinde veri toplama, analiz etme ve izleme faaliyetlerinde etkin rol oynamasını sağlamaktadır (Eisenbeiss, 2009; Nex ve Remondino, 2014). İHA'ların kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir:

- **Haritacılık ve Fotogrametri:** İHA'lar, kısa sürede yüksek çözünürlüklü ortofoto ve sayısal yüzey modeli (DSM/DTM) üretimi ile klasik haritalama yöntemlerine göre daha ekonomik, hızlı ve detaylı veri sağlar. Özellikle zemin örnekleme mesafesinin (GSD) düşük olması, santimetre hassasiyetinde mekânsal analizlerin yapılmasına imkân tanır. Kent planlaması, yol projeleri, imar uygulamaları ve kentsel dönüşüm çalışmaları bu verilerle desteklenmektedir.

- **Tarımsal Alanların İzlenmesi:** Multispektral ve hiperspektral kameralarla donatılmış İHA'lar, bitki sağlığı, toprak nem oranı, verim tahmini ve zararlı tespiti gibi hassas tarım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. NDVI gibi bitki örtüsü indekslerinin çıkarılması sayesinde, tarımsal verimlilik artırılmakta ve ilaçlama/gübreleme gibi müdahaleler daha hedefli hâle getirilmektedir. Şekil 3.2 de tarımsal alanların izlenmesinde kullanılan multispektral İHA'lardan elde edilen harita örneği görülmektedir.



Şekil 3.2. Tarımsal alanların izlenmesinde kullanılan multispektral İHA'lardan elde edilen harita örneği (URL-2).

- **İnşaat ve Şantiye Modelleme:** İnşaat alanlarının üç boyutlu modellenmesi, ilerleme izleme, hacim hesaplamaları ve iş makinelerinin konumlandırılması gibi birçok süreçte İHA'lar aktif olarak kullanılmaktadır. Yüksek çözünürlüklü ortofotolar ve nokta bulutları sayesinde proje yöneticileri, sahadan elde edilen verileri uzaktan analiz edebilir.
- **Arama Kurtarma ve Afet Yönetimi:** Doğal afetler (deprem, sel, heyelan, yangın vb.) sonrasında hızlı durum değerlendirmesi yapılabilmesi için İHA sistemleri, termal kameralarla donatılarak arama kurtarma faaliyetlerine büyük katkı sunmaktadır. Özellikle ulaşılması zor bölgelerde, can kaybını azaltmak ve müdahale sürecini hızlandırmak adına İHA'lardan elde edilen görüntüler kritik öneme sahiptir.
- **Güvenlik ve Trafik İzleme:** Kamu güvenliğini sağlamaya yönelik uygulamalarda İHA'lar, kalabalık kontrolü, sınır gözetimi, trafik yoğunluğu tespiti ve olay yerine müdahale öncesi keşif amacıyla kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı video aktarımı ve termal sensörlerle, gece ve gündüz izleme yapma yeteneği sayesinde emniyet güçlerine destek verir.
- **Enerji ve Altyapı Denetimi:** Enerji iletim hatları, güneş enerjisi santralleri, rüzgâr türbinleri ve boru hatları gibi büyük altyapı sistemlerinin denetimi, geleneksel yöntemlerle oldukça zaman alıcı ve riskli olabilir. İHA'lar bu sistemlerin uzaktan izlenmesini, termal kaçak analizlerini ve yapısal bozulmaların tespitini mümkün kılar.
- **Arkeolojik Alanların Belgelenmesi:** Kültürel miras alanlarının üç boyutlu belgelenmesi, haritalanması ve korunması açısından İHA'lar büyük avantaj sağlar. Yüksek çözünürlüklü görseller ile tarihi yapılar dijital ortamda modellenir, restorasyon süreçleri planlanabilir.

3.4 İHA Kullanım Avantajları ve Dezavantajları

Avantajları

- **Düşük Operasyonel Maliyet:** İHA'lar, geleneksel hava fotoğrafçılığı ve yersel ölçüm tekniklerine göre çok daha düşük maliyetli çözümler sunar. Uçak veya helikopter gibi büyük hava platformlarının ihtiyaç duyduğu yakıt, pilot, bakım ve yer

ekibi masraflarına kıyasla İHA'lar, tek kişiyle yönetilebilen, elektrikle çalışan ve kolay taşınabilir sistemlerdir. Bu durum, özellikle küçük ve orta ölçekli projelerde bütçe tasarrufu sağlar.

- **Zor Ulaşılır Alanlarda Veri Toplama İmkânı:** Dağlık, ormanlık, sulak veya tehlikeli bölgelerde veri toplamak genellikle güç ve risklidir. İHA'lar, bu tür sahalarda insan hayatını riske atmadan, ulaşılması zor bölgelerin üzerinde uçarak görüntü ve ölçüm verisi sağlayabilir. Özellikle afet sonrası değerlendirmelerde ve arama kurtarma faaliyetlerinde bu özellik kritik öneme sahiptir.

- **Yüksek Çözünürlüklü Veri Üretimi:** İHA sistemleri, santimetre altı seviyelerde çözünürlük sağlayabilen yüksek kaliteli kameralar ve sensörlerle donatılabilmektedir. Bu özellik sayesinde detaylı ortofoto haritalar, sayısal yükseklik modelleri (DSM/DTM) ve 3D yüzey modelleri elde edilebilir. Hassas mühendislik uygulamaları ve kent bilgi sistemleri için bu veriler oldukça değerlidir.

- **Kısa Sürede Geniş Alan Kapsama:** İHA'lar, tek bir uçuşta birkaç kilometrekarelik alanı kapsayabilir. Özellikle sabit kanatlı modellerle, kısa sürede geniş alanlardan veri toplanması mümkündür. Bu durum, zaman kısıtlamasının olduğu projelerde etkin bir planlama ve veri üretimi yapılmasını sağlar.

- **Otomatik Uçuş Planlama:** Modern İHA'lar, GPS tabanlı yazılımlar aracılığıyla önceden tanımlanan rota ve irtifalara göre tamamen otonom uçuş gerçekleştirebilir. Bu özellik, ölçüm hassasiyetini artırırken operatör kaynaklı hataları en aza indirir. Aynı zamanda tekrar edilebilir veri toplama görevlerini kolaylaştırır.

Dezavantajları

- **Hava Koşullarına Karşı Hassasiyet:** İHA'lar, rüzgâr, yağmur, kar ve yoğun sis gibi olumsuz hava koşullarına karşı duyarlıdır. Özellikle küçük ve hafif multikopter modelleri, 10–12 m/s üzeri rüzgârlarda uçuş stabilitesini kaybedebilir. Bu da veri kalitesini düşürür ve güvenli uçuşu tehlikeye atar.

- **Batarya Süresinin Kısıtlı Olması:** İHA'ların uçuş süresi genellikle batarya kapasitesiyle sınırlıdır. Multikopter İHA'larda bu süre ortalama 20–45 dakika

arasındadır. Geniş alanların taranması gerektiğinde birden fazla uçuş veya batarya değişimi gerekebilir. Bu durum operasyon süresini uzatır ve verimliliği etkiler.

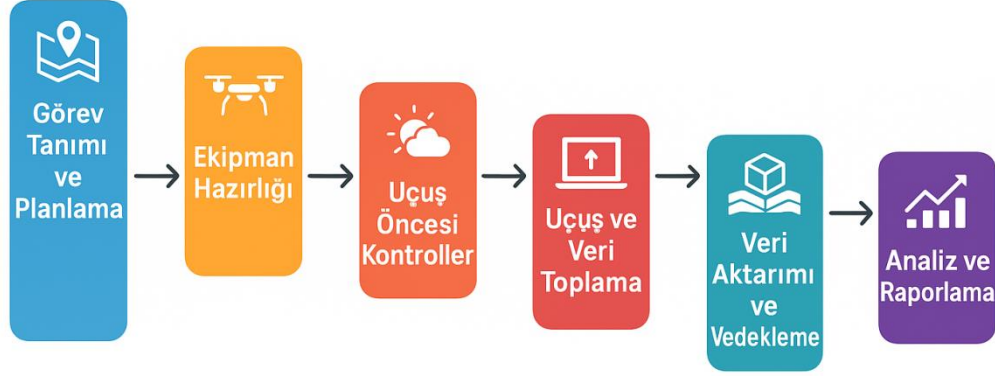
- **Yasal Düzenlemelere Tabi Olması:**Birçok ülkede İHA uçuşları, sivil havacılık otoriteleri tarafından belirlenen mevzuatlara tabidir. Özellikle şehir içi, havaalanı çevresi veya kritik tesisler üzerinde uçuş izni almak zorunlu olabilir. Uygun belgeler ve kayıt prosedürlerinin yerine getirilmemesi durumunda cezai yaptırımlar söz konusu olabilir.

- **Operatör ve Yazılım Bağımlılığı:**İHA'ların etkin kullanılabilmesi için operatörün teknik bilgiye sahip olması gerekir. Uçuş planlaması, veri toplama, sensör kullanımı ve yazılım tabanlı görüntü işleme gibi konularda eğitimli personel gereklidir. Ayrıca, verilerin analiz edilmesi için özel yazılımlar (Pix4D, Agisoft Metashape, DJI Terra vb.) kullanılmakta olup bu durum sistem bağımlılığını artırmaktadır.

3.5 İş Akış Süreci ve Teknik Altyapı

İHA tabanlı fotogrametri, çok disiplinli bir süreçtir ve ölçüm mühendisliği, uzaktan algılama, yazılım teknolojileri ve veri analizi gibi farklı uzmanlık alanlarının koordinasyonunu gerektirir. Süreç, saha öncesi hazırlık aşamasından başlayarak model üretimi ve doğrulama adımlarına kadar sistematik bir şekilde ilerler.

İHA ile veri toplama süreci, belirli aşamaları takip eden planlı bir iş akışına sahiptir. Uçuş öncesinde, çalışma alanına ve amaçlara uygun olarak görev planlaması yapılır ve buna en uygun İHA platformu seçilir. Uçuşun güvenli ve verimli şekilde gerçekleşebilmesi için meteorolojik koşullar değerlendirilir. Uygun hava şartları sağlandığında, planlanan uçuş gerçekleştirilir ve görüntü/veri toplama süreci tamamlanır. Uçuşun ardından elde edilen veriler analiz edilerek gerekli hesaplamalar ve değerlendirmeler yapılır, raporlar oluşturulur. Şekil 3.3'te İHA ile ölçüm sürecine ait genel iş akışı diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. İHA ile ölçüm sürecine ait tipik iş akışı diyagramı.

Bu diyagramda, İHA ile gerçekleştirilen ölçüm sürecinin temel aşamaları sırasıyla gösterilmektedir. Görev planlamasından veri analizine kadar olan adımlar, sistematik ve bütüncül bir yaklaşımı yansıtmaktadır.

İHA fotogrametri çalışmalarının başarısı, öncelikle görev planlamasının doğru ve titizlikle yapılmasına bağlıdır. Görev planlaması aşamasında uçuş rotası, uçuş yüksekliği, kamera parametreleri ve görüntülerin üst üste binme oranları belirlenir. Bu kritik planlamalar, genellikle DJI Pilot 2, DroneDeploy, UgCS, Litchi gibi özel yazılımlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Uçuş sırasında elde edilecek görüntülerin fotogrametrik işleme uygun olması için görüntüler arasında boyuna bindirme oranı %70–%80, enine indirme oranı ise %60–%70 seviyelerinde tutulmalıdır. Bu bindirme değerleri, stereo modelleme ve üç boyutlu yüzey üretimi için gereklidir.

Uçuş irtifası, elde edilecek görüntülerin çözünürlüğünü doğrudan etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yüksek çözünürlüklü veriler için genellikle 50–80 metre gibi düşük irtifalar tercih edilirken, daha geniş alanları taramak amacıyla 100–120 metre arası daha yüksek irtifalar kullanılmaktadır. Bu bağlamda, irtifa ayarı doğrudan GSD (Ground Sampling Distance) değerini belirlemekte ve ölçüm hassasiyetini etkilemektedir. Uçuş hızı ve kamera eğimi de planlama sürecinin önemli

bileşenlerindendir. Multikopter tipi İHA'larda genellikle 3–5 m/s hızlar uygun görülürken, sabit kanatlı sistemlerde 10–15 m/s hızlar tercih edilir. Kameralar çoğunlukla dik açıyla (90°) aşağı bakacak şekilde konumlandırılırken, eğik açılı çekimler ise 3 boyutlu şehir modellemeleri gibi özel uygulamalarda kullanılır.

Uçuş zamanı planlanırken, güneşin en yüksek konumda olduğu saatlerin tercih edilmesi gölge etkisini azaltarak görüntü kalitesini artırır. Ayrıca rüzgâr hızları ve hava durumu gibi çevresel faktörler de uçuşun güvenli ve verimli geçmesi açısından dikkate alınmalıdır. Uygulamada, İHA'lar önceden tanımlanan rotaları otomatik olarak takip ederek belirli aralıklarla görüntüleri toplar. Bu süreçte kullanılan GNSS sistemleri, her bir fotoğrafın çekildiği anda konum bilgisini kaydeder. Elde edilen GNSS log verileri, fotogrametrik işlem aşamasında görüntülerle eşleştirilerek coğrafi referanslamanın sağlanmasına yardımcı olur. Bu şekilde elde edilen veriler, yüksek doğrulukta sayısal yüzey modelleri ve ortofoto haritaların üretilmesini mümkün kılar.

RTK (Gerçek Zamanlı Kinematik) ve PPK (Sonradan İşlenen Kinematik) teknolojileri, bu süreçte santimetre hassasiyetinde konum doğruluğu sunar. RTK, uçuş esnasında baz istasyonundan gelen düzeltme verilerini anlık olarak kullanırken; PPK, uçuş sonrası düzeltme sağlar. Her iki yöntem, YKN ihtiyacını azaltarak veri üretimini hızlandırır.

Görüntü toplama sırasında bindirme oranları genellikle %70–80 arasında planlanır. Uygun kamera ayarları (örneğin deklanşör hızı, odak uzaklığı), net ve bulanıklık içermeyen görüntüler elde edilmesini sağlar. Görüntülerin kalitesi, sonradan oluşturulacak sayısal modellerin doğruluğunu doğrudan etkiler.

Yer kontrol istasyonları üzerinden uçuşun anlık izlenmesi, batarya, sinyal gücü ve uçuş durumu gibi parametrelerin kontrolünü sağlar. Bu sayede güvenli, verimli ve tekrarlanabilir veri toplama süreçleri gerçekleştirilmiş olur.

3.5.1 Yer kontrol noktaları (YKN) ve hedefler

Yer Kontrol Noktaları (YKN), GNSS ile hassas konum bilgileri elde edilmiş, yeryüzünde fiziksel olarak işaretlenmiş referans noktalarıdır. Bu noktalar, hava görüntülerinde kolaylıkla ayırt edilebilecek şekilde yerleştirilir; genellikle yüksek kontrastlı siyah-beyaz hedefler tercih edilir. Fotogrametrik işlem sırasında, bu

noktaların koordinatları ilgili yazılıma tanımlanarak görüntülerin doğruluğu ve konumsal hassasiyeti sağlanır. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, YKN'nin merkezinden alınan koordinat değerleri üzerinden fotogrametrik işlem adımları sürdürülmektedir.



Şekil 3.4. Yer kontrol noktası(URL-3).

Fotogrametrik doğruluğun sağlanabilmesi için yer kontrol noktalarının (YKN) çalışma alanına uygun şekilde yerleştirilmesi büyük önem taşır. Şekilde, bu amaçla kullanılan bir YKN'nin zemindeki yerleşimi gösterilmektedir. YKN sayısı, projenin hedef doğruluğu ve alanın büyüklüğüne bağlı olarak değişiklik gösterebilmekle birlikte genellikle 4 ila 10 adet arasında önerilmektedir (Agisoft LLC, 2020). Bu noktaların çalışma alanının tamamına homojen şekilde dağılması gerekir; özellikle köşelere ve merkeze yerleştirilmeleri, modelin genel geometrik tutarlılığını artırır. YKN'lerin eksik veya hatalı kullanımı durumunda, elde edilen modellerde sistematik konum kaymaları ortaya çıkabilir. Bu nedenle, yer kontrol noktaları özellikle kentsel ölçüm uygulamaları ve mühendislik temelli hassas analizlerde vazgeçilmez bir bileşen olarak kabul edilmektedir.

3.5.2 Görüntü işleme ve model oluşturma

Toplanan görüntüler, üç boyutlu modelleme sürecinin temelini oluşturan Structure-from-Motion (SfM) ve Multi View Stereo (MVS) algoritmalarını kullanan gelişmiş fotogrametri yazılımlarına aktarılır. Bu yazılımlar, çekilen fotoğraflar arasında konumsal ve yönelimsel ilişki kurarak nesnelerin ve yüzeylerin dijital temsiliyi oluşturmaya olanak tanır. Bu işlem, özellikle geleneksel ölçüm teknikleriyle

ulaşılması güç veya tehlikeli alanlarda, güvenli ve yüksek doğruluklu bir modelleme çözümü sunar. SfM algoritmaları, görüntülerin mekânsal yapısını çözümleyerek kameraların üç boyutlu pozisyonlarını ve görüntülerdeki ortak noktaların koordinatlarını belirler. MVS ise bu çözümlemeyi temel alarak, sahnedeki her bir noktanın yoğun üç boyutlu temsilini üretir. Bu işlem dizisi, modern dijital fotogrametri uygulamalarının temel yapı taşlarını oluşturur ve genellikle řu aşamalardan oluşur:

- **Fotoğrafların Hizalanması (Image Alignment):** İlk aşama olan fotoğraf hizalama sürecinde, yazılım görüntülerdeki ortak alanları ve nesneleri tespit ederek, bu noktaları eşleştirir. Bu eşleştirme işlemi, özellikle görüntülerin ortak görsel içeriğe sahip olduğu durumlarda yüksek doğrulukta gerçekleşir. Görseller arasında benzerlik tespiti, genellikle SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded-Up Robust Features) veya ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) gibi öznetelik tabanlı algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu algoritmalar, değişen ölçek, dönme ve aydınlatma koşullarına karşı dayanıklıdır. Tespit edilen anahtar noktalar eşleştirilerek her bir fotoğrafın yaklaşık konumu ve yönelimi hesaplanır. Elde edilen bu bilgiler yardımıyla, sahnenin kaba bir üç boyutlu modeli oluşturulur ve sistem, fotoğrafları proje koordinat sistemine göre konumlandırır. Bu adımın doğruluğu, tüm modelleme sürecinin temelini oluşturduğundan oldukça kritiktir.
- **Kamera Kalibrasyonu (Camera Calibration):** Bu aşamada, kullanılan kamera sisteminin iç yöneltme (intrinsic) parametreleri çözülerek görüntü üzerindeki geometrik bozulmalar minimize edilir. Kamera kalibrasyonu, genellikle otomatik olarak gerçekleştirilir ve řu temel bileşenleri içerir: lensin odak uzaklığı, optik merkez konumu, radial ve tangential distortion (mercek bozulmaları), sensör boyutu ve baş-yön (roll-pitch-yaw) sapmaları. Bu kalibrasyon sayesinde, gerçek dünya ile görüntü verisi arasındaki geometrik ilişki daha sağlıklı bir biçimde kurulmuş olur. Özellikle geniş açılı lenslerde veya düşük kaliteli optik sistemlerde bozulmaların etkisi daha belirgin olduğu için kalibrasyon işlemi, model doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli bir adımdır.

- **Yoğun Nokta Bulutu Üretimi (Dense Point Cloud Generation):** Fotoğrafların hizalanması ve kalibrasyonu tamamlandıktan sonra, sistem sahnedeki tüm ayrıntıları kapsayacak şekilde yoğun bir üç boyutlu nokta bulutu üretir. Bu aşamada Multi-View Stereo (MVS) algoritmaları kullanılarak, her bir piksele karşılık gelen mekânsal noktalar hesaplanır. Elde edilen nokta bulutu genellikle milyonlarca üç boyutlu noktadan oluşur ve bu noktalar, yüzeyin ayrıntılı geometrisini temsil eder. Nokta yoğunluğu, kullanılan kamera çözünürlüğü ve fotoğraflar arası örtüşme oranı gibi parametrelere bağlı olarak değişir. Bu bulut, daha sonra yüzey modeli (mesh) ve diğer sayısal analizler için temel veri kaynağı olarak kullanılır. Ayrıca, nokta bulutuna atanan renk bilgisi (RGB) sayesinde hem geometrik hem de görsel açıdan zengin bir veri seti oluşturulmuş olur.
- **Mesh ve Texture Oluşturma (Meshing and Texturing):** Yoğun nokta bulutunun oluşturulmasının ardından, yüzey geometrisinin daha kompakt ve düzenli biçimde temsil edilmesi amacıyla üçgen ağ yapıları (triangular mesh) oluşturulur. Mesh oluşturma işlemi, nokta bulutundaki komşu noktalar arasında bağlantılar kurularak yüzeyin sürekliliğini sağlar. Bu sayede yüzey pürüzsüz ve bütünsel bir forma kavuşturulur. Daha sonra, fotoğraflardan elde edilen renk bilgileri bu ağ yapılarına projeksiyonla aktarılır ve yüzeye fotogerçekçi bir görünüm kazandırılır. Bu dokulandırma (texturing) işlemi sayesinde, elde edilen model yalnızca geometrik değil, aynı zamanda görsel olarak da anlamlı ve kullanıcı dostu hale gelir. Elde edilen 3B model, sanal gerçeklik, mimari görselleştirme, kültürel miras belgelenmesi ve haritacılık gibi birçok farklı alanda rahatlıkla kullanılabilir.
- **Ortofoto ve Sayısal Model Üretimi (Orthophoto and Elevation Models):** Son aşamada, elde edilen veriler kullanılarak yüksek doğrulukta ortofotolar, Sayısal Yüzey Modelleri (DSM) ve Sayısal Arazi Modelleri (DTM) üretilir. Ortofoto, eğim ve bakı farkları giderilmiş, ölçeklendirilmiş ve coğrafi referanslı bir hava fotoğrafıdır. Bu görseller, klasik harita yerine kullanılabilir, ölçü alınabilir özellikte yüksek çözünürlüklü veriler sunar. Aynı süreçte oluşturulan DSM, ağaçlar, binalar ve diğer yapay nesneleri kapsarken; DTM yalnızca doğal arazi yüzeyini temsil eder. Bu sayısal yükseklik modelleri, hidrolojik modelleme, eğim ve bakı analizleri, hacim

hesaplamaları, mühendislik projeleri, altyapı planlamaları ve jeolojik analizler gibi çok çeşitli disiplinlerde kullanılmaktadır.

- **İşlem Süresi ve Etkileyen Faktörler:** Bu tüm süreçlerin toplam işlem süresi; kullanılan veri setinin hacmine, görüntü çözünürlüğüne, örtüşme oranına, kamera kalitesine ve kullanılan bilgisayarın donanım gücüne bağlı olarak değişir. Küçük alanlarda ve düşük çözünürlüklü görüntülerle yapılan işlemler birkaç saat içinde tamamlanabilirken, büyük alanları kapsayan ve yüksek çözünürlükteki projelerde bu süreç birkaç günü bulabilir. Özellikle işlemci çekirdek sayısı, RAM miktarı ve GPU performansı, bu süreci doğrudan etkileyen en önemli teknik faktörlerdir. Ayrıca, paralel işlem destekleyen yazılımlar ve bulut tabanlı hesaplama sistemleri kullanıldığında, işlem süresi önemli ölçüde kısaltılabilir. Bu nedenle, büyük ölçekli fotogrametrik projelerde donanım seçimi ve veri işleme stratejileri büyük önem arz eder.

Bu açıklamalar doğrultusunda, fotogrametrik veri işleme süreci yalnızca görsel bilgi toplama ile sınırlı kalmayıp; çok aşamalı, hesaplama yoğun ve teknik bilgi gerektiren bir modelleme yaklaşımını temsil etmektedir.

3.5.3 Kalite kontrol ve hata analizi

Üretilen modelin doğruluğu mutlaka istatistiksel olarak test edilmelidir. Fotogrametrik yazılımlarda genellikle şu metrikler kullanılır:

- RMS Hatası (Root Mean Square Error): GCP'ler ve model üzerindeki noktalar arasındaki ortalama fark.
- Z doğruluğu (dikey hata): Özellikle hacim hesaplamalarında kritik önem taşır.
- Modelin Global Kayması: Coğrafi koordinat sisteminde modelin yönelimi ve kayma durumu kontrol edilir.
- İdeal RMS değerleri:

X, Y doğruluğu < 5 cm

Z doğruluğu < 10 cm (GCP ile desteklenmişse <5 cm) olmalıdır.

Bu sınırlar, Türkiye’de Harita Genel M¼d¼rl¼ğ¼ tarafından yayınlanan fotogrametrik harita ¼retim teknik şartnamesine (HGK, 2005) ve TUSAGA-Aktif sistemine ilişkin doğruluk beklentilerine (HGK, 2011) dayanmaktadır.

Kalite kontrol s¼reci sonucunda; model yeniden y¼nlendirilebilir, YKN’ler optimize edilebilir veya d¼ř¼k kaliteli g¼r¼nt¼ler elenebilir.

Bu s¼reçlerin her biri, y¼ksek hassasiyetli, g¼venilir ve tekrar edilebilir fotogrametrik veriler ¼retebilmenin temel yapı taşlarıdır. Fotogrametri projelerinde her adımın dikkatle planlanması ve titizlikle uygulanması, son ¼r¼nlerin doğruluğu ve geçerliliği ağıısından kritik ¼neme sahiptir.

3.6 Uygulamada Kullanılan İHA: DJI Mavic 3 Enterprise

Bu çalışmada kullanılan DJI Mavic 3 Enterprise, ortofoto ¼retimi ve y¼zey modelleme için profesyonel bir platform sunmaktadır. 2021 sonlarında piyasaya s¼r¼len cihaz aşağıdaki izelge 3.1’de verilen teknik ¼zelliklere sahiptir:

Çizelge 3.1. DJI Mavıç 3 Enterprise İHA teknik özellikleri.

Kategori	Özellik
Ağırlık	915 g (pervaneler dahil)
Maksimum Kalkış Ağırlığı	1050 g
Boyutlar (Katlanmış)	221×96.3×90.3 mm
Boyutlar (Açılmış)	347.5×283×107.7 mm
Uçuş Süresi	Maksimum 45 dakika
Maksimum. Uçuş Hızı	15 m/s (Normal), 21 m/s (Sport)
Maksimum Rüzgar Direnci	12 m/s
Maksimum Kalkış İrtifası	6000 m
GNSS	GPS + Galileo + BeiDou + GLONASS (RTK ile)
Hassas Konumlama	RTK ile: Yatay: ±0.1 m, Dikey: ±0.1 m
Kamera Sensörü	4/3 CMOS, 20 MP
Lens	24 mm odak, f/2.8–f/11 diyafram
Deklanşör	Mekanik ve elektronik
Zoom Kamera	12 MP, 56× hibrit zoom
Fotoğraf Formatları	JPEG, DNG (RAW)
Video Formatları	MP4/MOV (H.264/H.265)
Maksimum Görüntü Boyutu	5280×3956 piksel
Depolama	microSD (maks. 512 GB)
Batarya	5000 mAh LiPo 4S, 77 Wh
Şarj Süresi	Yaklaşık 1.5 saat
İletim Mesafesi	15 km (OcuSync 3.0)
Çalışma Sıcaklığı	-10°C ila 40°C
Engel Algılama	Çok yönlü (ön, arka, üst, alt, sol, sağ)
RTK Desteği	Opsiyonel RTK modülü ile
Ek Özellikler	Akıllı düşük ışık, hızlı çekim, APAS 5.0, gelişmiş RTH

Entegre 4/3 inç CMOS sensöre sahip 20 megapiksel Hasselblad kamerası, yüksek çözünürlüklü ve renk doğruluğu yüksek görüntüler üretme yeteneği ile fotogrametrik çalışmalar için ideal bir sistem sunar. Geniş sensör yapısı, özellikle düşük ışık koşullarında dahi kaliteli veri elde edilmesini mümkün kılar (DJI, 2020). CMOS teknolojisi sayesinde, veri aktarımı hızlı ve enerji açısından verimli bir şekilde gerçekleştirilir. Hasselblad'ın gelişmiş optik sistemi, özellikle netlik ve doğal renk üretiminde yüksek performans göstererek fotogrametri uygulamalarında güvenilir ve gerçekçi sonuçlar sağlar (DJI, 2020).

Kamerada bulunan f/2.8 ila f/11 aralığında ayarlanabilir diyafram açıklığı, farklı ışık koşullarında optimum görüntü kalitesi elde edilmesini mümkün kılar. Geniş diyafram açıklığı olan f/2.8, düşük ışıkta daha parlak görüntüler sunarken; dar açıklık olan

f/11, daha geniş alan derinliği sağlayarak yüzey detaylarının haritalama süreçlerinde daha net algılanmasını sağlar. Bu özellik, hem gündüz hem de alacakaranlık saatlerinde etkili veri toplama sürecine katkıda bulunur.

ISO aralığı 100 ile 6400 arasında değişmektedir. Düşük ISO değerleri (100–400) ile elde edilen görüntüler daha az parazit içerdiğinden, yüksek doğruluk gerektiren ölçümler için uygundur. Yüksek ISO değerleri (1600–6400) ise düşük ışıklı ortamlarda veri kaybı olmaksızın görüntü elde edilmesini sağlar. Bu esneklik, farklı hava ve ışık koşullarına rağmen veri toplama sürecinin kesintisiz ve kaliteli bir şekilde yürütülmesine imkân tanır.

Yer örneklem aralığı (Ground Sampling Distance, GSD) uçuş yüksekliğine göre değişkenlik gösterir. Örneğin, 50 metre yükseklikten yapılan çekimlerde yaklaşık 1.5 cm/piksel, 100 metrede 3 cm/piksel ve 120 metrede ise 3.5–4 cm/piksel GSD değeri elde edilmektedir. Bu oranlar, farklı ölçeklerdeki haritalama projelerinde istenen detay seviyesinin sağlanmasına yardımcı olur.

Kameranın uçuş sırasında otomatik kontrolü ve görev planlaması DJI Pilot 2 yazılımı üzerinden gerçekleştirilir. Bu yazılım sayesinde kullanıcılar, uçuş rotalarını önceden tanımlayabilir, irtifa ve görüntü alma sıklığı gibi parametreleri ayarlayarak sistemin sahada otonom şekilde çalışmasını sağlayabilir. Böylece zaman kaybı en aza indirilirken, insan hatası kaynaklı veri kalitesizliği de büyük ölçüde önlenmiş olur.

Bu sistem sayesinde, özellikle deprem sonrası yüzey kayıklığı analizi, mühendislik projeleri ve kentsel dönüşüm çalışmalarında yüksek doğrulukta veri sağlanmıştır. Bu doğrultuda kullanılan İHA sistemlerinden biri, Şekil 3.5’de görüldüğü üzere, yüksek çözünürlüklü kamera ve GNSS destekli konumlama yetenekleriyle bu tür uygulamalarda etkin şekilde görev yapmaktadır.



Şekil 3.5. DJI Mavic 3 Enterprise modeli.

İHA'lar, klasik ölçüm sistemlerine göre çok daha kısa sürede geniş alanları kapsayabilme, düşük maliyetle hassas veri üretimi ve otomasyon kabiliyeti sayesinde modern haritacılığın vazgeçilmez unsuru haline gelmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, özellikle fotogrametri ve coğrafi bilgi sistemleri alanında daha etkin, yaygın ve akıllı çözümler sunması beklenmektedir.

4. GNSS AĞI İLE VERİ TOPLAMA

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS), dünya yüzeyindeki herhangi bir noktanın konumunu hassas bir şekilde belirlemek için kullanılan, uydu tabanlı küresel konumlama sistemleridir. GNSS teknolojisi, yüksek doğruluk gerektiren ölçüm uygulamaları için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Yerkabuğu hareketlerinin izlenmesinden arazi modelleme ve şehir planlamasına kadar çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca, GNSS ölçümleri; inşaat mühendisliği, afet yönetimi, altyapı takibi, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve kayıklık analizleri gibi disiplinlerde de kritik rol oynamaktadır (Hofmann-Wellenhof vd., 2008).

GNSS sistemleri; GPS (ABD), GLONASS (Rusya), Galileo (Avrupa Birliği), BeiDou (Çin) gibi uydu takımyıldızlarını içermektedir. Bu sistemler, GNSS alıcıları aracılığıyla uydulardan alınan sinyallerin işlenmesiyle konum, hız ve zaman bilgisi üretir. GNSS ile yapılan ölçümler, metre altı, santimetre ve hatta milimetre düzeyinde doğruluk sağlayabilir (Leick vd., 2015).

GNSS ağı ile veri toplama işlemi, proje amacına, hedeflenen doğruluk seviyesine ve çalışma sahasının özelliklerine bağlı olarak farklı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler aşağıda detaylı biçimde açıklanmıştır.

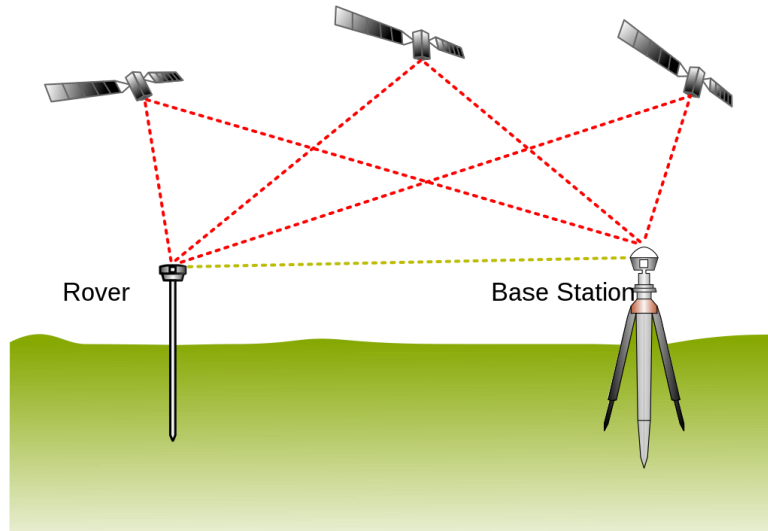
4.1 GNSS Veri Toplama Yöntemleri

GNSS ile konum belirleme amacıyla kullanılan temel veri toplama yöntemleri arasında Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK), Statik GNSS Ölçüm, Hızlı Statik Ölçüm ve Noktasal Konumlama (PPP) bulunmaktadır. Her bir yöntemin avantajları, sınırlılıkları ve uygulama alanları farklılık göstermektedir (Seeber, 2003).

4.1.1 Gerçek zamanlı kinematik (RTK)

RTK (Real-Time Kinematic) yöntemi, GNSS sinyallerine anlık düzeltmeler uygulanarak yüksek hassasiyetle konum belirlenmesini sağlayan bir ölçme tekniğidir. Bu yöntemde sabit bir referans istasyonu ile hareketli bir GNSS alıcısı (rover) birlikte çalışır. Sabit istasyonda kurulu alıcı, kesin konumu bilinen bir noktaya yerleştirilerek uydu sinyallerinden elde edilen verileri düzeltir ve bu düzeltmeleri radyo, GSM ya da internet bağlantısı aracılığıyla gezici alıcıya iletir. Gezici alıcı, bu

düzeltilmeleri kullanarak gerçek zamanlı ve santimetre düzeyinde konum belirler. Şekil 4.1’de RTK’nın çalışma prensibi görülmektedir. RTK, özellikle kısa sürede yüksek doğruluk gerektiren mühendislik ve haritacılık projelerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Hofmann-Wellenhof vd., 2001). Ancak bu yöntemin doğruluğu, düzeltme verilerinin iletimine doğrudan bağlıdır; dolayısıyla sabit ve gezici alıcılar arasında sürekli ve kararlı bir bağlantı sağlanması büyük önem taşır. Sinyal iletiminde yaşanacak kesintiler ya da iletişim kopmaları, konum doğruluğunun azalmasına yol açabilir. Ayrıca baz uzunluğu arttıkça ölçüm doğruluğu azaldığı için RTK sistemleri genellikle 10–20 km’lik menziller içerisinde kullanılmaktadır (Leick vd., 2015). Sistemin çalışma sürecinde öncelikle referans istasyonu kurulmakta ve sabit GNSS alıcısının koordinatları belirlenmektedir. Ardından gezici alıcı, bu istasyondan aldığı düzeltme verileriyle anlık konumunu hesaplar. GNSS sinyalleri iyonosfer ve troposfer gecikmeleri, yörünge hataları ve uydu saat sapmaları gibi çeşitli etkilere maruz kaldığından, RTK bu hataları düzeltici algoritmalar ile iyileştirerek hassas konumlama sağlar. Tüm bu özellikleri sayesinde RTK yöntemi, gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek doğruluk sunarak şehir planlaması, inşaat mühendisliği, topoğrafik haritalama ve hassas tarım gibi birçok alanda etkin biçimde kullanılmaktadır. Ancak, iletişim altyapısına bağımlılık ve sinyal kesintilerine olan hassasiyet, bu yöntemin önemli sınırlamaları arasında yer alır (El-Rabbany, 2002).



Şekil 4.1. RTK’nın çalışma prensibi(URL-4).

4.1.2 Statik ölçüm

Statik GNSS ölçüm yöntemi, yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Özellikle jeodezik kontrol noktalarının belirlenmesinde, kayıklık analizlerinde ve büyük ölçekli haritalama projelerinde tercih edilen bu yöntem, sabit GNSS alıcılarının uzun süreli (genellikle birkaç saat) veri toplaması esasına dayanır (Leick vd., 2015). Elde edilen veriler gerçek zamanlı değil, daha sonra özel post-processing yazılımları aracılığıyla işlenerek hassas konum bilgisi elde edilir. Statik yöntemde sabit ve gezici alıcılar genellikle eş zamanlı veri toplar; bu sayede sabit istasyon referans görevi görerek gezici alıcının konum düzeltmeleri hesaplanır. Gözlem süresi, hedeflenen doğruluk seviyesine göre belirlenmekle birlikte, sürenin uzaması ölçümün güvenilirliğini artırır. Statik yöntemle yapılan GNSS ölçümleri, baz uzunluğu ile ilişkili olarak milimetre seviyesinde doğruluk sağlayabilir. Bu özelliği sayesinde yer kabuğu hareketlerinin uzun dönemli izlenmesinde, mühendislik yapılarının stabilitesinin kontrolünde ve jeodinamik araştırmalarda etkin biçimde kullanılmaktadır (Hofmann-Wellenhof vd., 2001). Bununla birlikte, ölçüm süresinin uzun olması ve gerçek zamanlı sonuç vermemesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak uygun planlama ve yazılım desteğiyle, bu sınırlamalar aşılabılır ve statik GNSS yöntemi, hassas jeodezik ağ kurulumlarında ve kayıklık izleme çalışmalarında yüksek güvenilirlikte sonuçlar sunar (El-Rabbany, 2002).

4.1.3 Hızlı statik GNSS ölçüm (Rapid Static GNSS Surveying)

Hızlı statik GNSS yöntemi, klasik statik ölçüm yöntemine benzer bir yapıda uygulanmakta olup en belirgin farkı, veri toplama süresinin çok daha kısa tutulmasıdır. Bu yöntemde ölçüm süresi genellikle 5 ila 30 dakika arasında değişmekte ve kısa sürede yüksek doğrulukta konum bilgisi elde edilmektedir. Özellikle 0 ila 10 kilometre arasındaki baz uzunluklarında uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Daha kısa sürede veri toplanması, bu yöntemin hem zaman hem de kaynak kullanımı açısından verimli olmasını sağlar.

Uygulama sırasında genellikle iki GNSS alıcısı kullanılır. Bunlardan biri sabit bir noktaya kurularak referans istasyonu işlevi görürken, diğeri gezici olarak belirlenen hedef noktalarda ölçüm yapar. Gezici alıcı, sabit alıcıyla eş zamanlı olarak veri toplar ve böylece koordinat belirleme sürecinde uydu sinyallerinin senkronize şekilde

işlenmesi mümkün hale gelir. Hızlı statik yöntemdeki temel amaç, kısa süreli sabit kalmalarla birçok noktanın yüksek doğrulukta ölçülebilmesini sağlamaktır.

Bu yöntem özellikle açık arazilerde, internet bağlantısının bulunmadığı veya RTK düzeltme verilerinin sağlanamadığı koşullarda önemli avantajlar sunar. Harita üretimi, mühendislik uygulamaları, altyapı projeleri ve küçük ölçekli kayıklık izleme çalışmalarında sıkça tercih edilmektedir. Ayrıca, hızlı statik ölçüm sayesinde bir saha çalışması süresince çok sayıda nokta ölçülerek etkin bir veri toplama gerçekleştirilebilir.

Ölçüm süresini etkileyen temel faktörler arasında baz uzunluğu, çevresel engeller (örneğin binalar veya ağaçlar), uydu sayısı ve uydu geometrisi yer alır. Özellikle düşük PDOP değerlerine sahip zaman dilimlerinde yapılan ölçümler, sonuçların doğruluğunu artırmaktadır. Sabit alıcının konumlandırılacağı noktanın stabil olması, anten yüksekliğinin doğru ölçülmesi ve gezici alıcının ölçüm süresi boyunca sabit kalması gibi hususlar, ölçüm doğruluğunu etkileyen kritik unsurlardır.

Hızlı statik yöntem, RTK yöntemine kıyasla daha düşük ekipman ve altyapı gereksinimi ile sahada uygulanabilir. Aynı zamanda, klasik statik yöntem kadar uzun süreli gözleme ihtiyaç duymadan benzer doğruluk seviyelerine ulaşabilmesi nedeniyle, uygulamacılar için pratik ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Literatürde bu yöntemin kısa baz uzunluklarında santimetre düzeyinde doğruluk sağlayabildiği belirtilmiştir (Leick vd., 2015).

- Zamandan tasarruf sağlar: Klasik statik yönteme kıyasla daha kısa sürede ölçüm yapılabilir.
- Yüksek doğruluk sunar: Uygun çevresel koşullarda santimetre düzeyinde doğruluk elde edilebilir.
- İletişim altyapısına ihtiyaç duymaz: RTK gibi gerçek zamanlı düzeltme verileri gerektirmez.
- Çok noktalı projelerde etkilidir: Kısa süreli gözlemlerle çok sayıda hedef noktanın ölçülmesi mümkündür.

Ayrıca, ölçüm yapılacak noktaların çevresel koşulları göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle yüksek yapılar, ağaçlık alanlar veya metalik

yüzeylerin yakınında yapılacak ölçümler, sinyal yansıması (multipath) nedeniyle hatalı sonuçlara yol açabilir. Bu sebeple, açık görüş alanına sahip ve sinyal engelleyici unsurlardan uzak noktaların tercih edilmesi büyük önem taşır. Ölçüm süresi boyunca GNSS alıcısının stabilitesi sağlanmalıdır. Gezici alıcının sabitlenmesi ve hareket ettirilmeden veri toplanması, ölçüm doğruluğu açısından kritik bir gerekliliktir. Alıcının sarsılması ya da yer değiştirmesi, sinyalin bozulmasına ve verinin geçersiz hale gelmesine neden olabilir. Bu unsurlar dikkate alınarak gerçekleştirilen hızlı statik GNSS ölçümleri, düşük maliyetle yüksek doğrulukta veri üretimine olanak tanımaktadır.

Kullanım Alanları:

- Kayıklık analizleri
- Altyapı projeleri (yol, köprü, baraj ön çalışmaları)
- Fotogrametri ve harita üretimi için kontrol noktası ölçümleri
- Tarım ve ormancılık uygulamalarıdır.

Literatürde hızlı statik yöntem, RTK yöntemine alternatif olarak gösterilmekte ve çoğu durumda benzer doğruluk seviyelerine ulaşabilmektedir (Leick vd., 2015). Özellikle internet bağlantısının mümkün olmadığı veya RTK düzeltme verisinin ulaştırılamadığı durumlarda etkin bir çözüm sunmaktadır.

4.1.4 Noktasal konumlama yöntemi (PPP)

PPP, tek bir GNSS alıcısı kullanarak hassas konum belirlemeyi amaçlayan bir yöntemdir. RTK'dan farklı olarak sabit bir referans istasyonuna ihtiyaç duymaz. Çizelge 4.1'de PPP'nin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

- **PPP Ölçüm Süreci:**

1. GNSS Verilerinin Toplanması: Çift frekanslı alıcı ile uzun süreli veri kaydı yapılır.
2. Uydu Yörünge ve Saat Hatalarının Düzeltilmesi: Uluslararası GNSS Servisi (IGS) tarafından sağlanan düzeltmeler uygulanır.
3. İyonosfer ve Troposfer Hata Modellerinin Kullanımı: Çevresel hata düzeltmeleri yapılır.

4. Veri İşleme: Post-processing GNSS yazılımları ile analiz gerçekleştirilir (Dow vd., 2009).

Çizelge 4.1. Noktasal konumlama yöntemi avantaj ve dezavantajları.

Özellik	Avantajlar	Dezavantajlar
Doğruluk	Santimetre seviyesinde doğruluk sağlar (post-processing ile).	RTK GNSS kadar hızlı değildir.
Bağımsız Çalışma	Referans istasyonuna gerek duymaz, tek alıcı yeterlidir.	Post-processing için uzun süre veri toplamak gerekebilir.
Veri İşleme	Büyük ölçekli haritalama ve kayıklık analizlerinde kullanılabilir.	Gerçek zamanlı PPP (RT-PPP) post-processing kadar hassas değildir.
Maliyet	Ekstra altyapı gerektirmez, RTK'dan daha düşük maliyetlidir.	Gerçek zamanlı çözüm için yüksek kaliteli GNSS alıcısı gereklidir.

4.2 GNSS Verilerinin Kullanım Alanları

GNSS destekli konum verileri, mühendislik ve jeodezik çalışmaların farklı aşamalarında etkin biçimde kullanılmaktadır.

- Deprem Sonrası Kayıklık İzleme: Yer kabuğunda meydana gelen hareketlerin milimetrik düzeyde takibi.
- Kentsel Planlama: Altyapı sistemlerinin detaylı ve hassas biçimde haritalanması.
- Yüzey Modelleme: Yükseklik bilgilerine dayalı sayısal arazi modellerinin üretilmesi.
- Afet Risk Yönetimi: Deprem, sel ve heyelan gibi afetlerin etkilerinin mekânsal olarak analiz edilmesi.
- Mühendislik Yapılarının Takibi: Baraj, köprü, enerji nakil hatları gibi yapılar üzerindeki yer değiştirmelerin izlenmesi.

GNSS tabanlı ölçüm ağlarıyla gerçekleştirilen veri toplama ve dengeleme işlemleri, jeodezik doğruluğun artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Statik, RTK ve PPP gibi farklı ölçüm teknikleri, kullanıcıların projeye özgü gereksinimlerine göre esnek çözümler sunmaktadır. Bu ölçümlerden elde edilen verilerin ağ dengelemesiyle

işlenmesi, hata kaynaklarının azaltılmasını ve güvenilir sonuçlara ulaşılmasını sağlar. Ayrıca, GNSS verilerinin fotogrametri ve klasik yersel ölçüm yöntemleriyle entegre edilmesi; proje bazlı analizlerde hem veri kalitesini yükseltmekte hem de yorumlama kapasitesini güçlendirmektedir.

4.3 Uygulamada Kullanılan GNSS Alıcısı: Sino GNSS T300 Plus Gps

Sino GNSS T300 Plus, yüksek hassasiyetli bir GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcısıdır ve coğrafi konum belirleme, haritalama, mühendislik ölçümleri ve kayıklık analizi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır. Çoklu uydu sistemi desteği ve gelişmiş sinyal işleme teknolojisi sayesinde, zorlu saha koşullarında bile hassas ve güvenilir konum verileri sağlar. RTK (Real-Time Kinematic) desteği ile saniyeler içinde santimetre hassasiyetinde ölçümler yapılabilmektedir, bu da özellikle yüksek doğruluk gerektiren mühendislik projeleri ve kayıklık analizlerinde önemli bir avantaj sunar (Sino GNSS, 2021). Uygulamada kullanılan GNSS alıcısı Şekil 4.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.2. Sino GNSS T300 Plus ölçüm cihazı.

Uygulamada kullanılan GNSS alıcısı Sino GNSS T300 Plus aletinin teknik özellikleri ve avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- **Çoklu Uydu Sistemi Desteği:** Sino GNSS T300 Plus, GPS (L1, L2, L5), GLONASS (L1, L2), Galileo (E1, E5a, E5b), BeiDou (B1, B2, B3) ve QZSS gibi

birçok küresel navigasyon uydu sistemini destekleyerek hassas ve hızlı konum belirleme yapabilmektedir. Bu çoklu uydu desteği, farklı sistemlerin bir arada çalışmasını sağlayarak konum doğruluğunu artırır (Sino GNSS, 2023).

- **Yüksek Konum Hassasiyeti:** RTK teknolojisi sayesinde santimetre seviyesinde doğruluk sağlar. T300 Plus, horizontal doğruluk için 8 mm + 1 ppm, vertical doğruluk için ise 15 mm + 1 ppm seviyelerinde doğruluk sağlar (Sino GNSS, 2023).

- **Sağlam ve Taşınabilir Tasarım:** Hafif ve dayanıklı yapısı sayesinde, cihaz saha çalışmalarında kolayca taşınabilir ve zorlu hava koşullarına karşı dayanıklıdır. IP67 su geçirmezlik sertifikası ile toza ve suya karşı koruma sağlar, bu da cihazın zorlu doğa koşullarında dahi güvenli bir şekilde kullanılabilmesini mümkün kılar (Sino GNSS, 2023).

- **Veri İletimi:** Sino GNSS T300 Plus, Bluetooth, Wi-Fi, UHF radyo bağlantısı ve 4G LTE ile hızlı ve güvenilir veri iletimi yapabilir. Ayrıca, NTRIP, RTCM, ve CORS gibi ağ bağlantı protokollerini destekler, böylece gerçek zamanlı veri aktarımı kolaylaşır (Sino GNSS, 2023).
- **Çift Frekans Alımı:** Hem L1 hem de L2 frekanslarını alabilme kapasitesine sahip olan bu cihaz, farklı frekansların birlikte kullanılabilmesi sayesinde daha doğru veri toplama imkânı sunar. Çift frekans alımı, sinyal bozulmalarını azaltır ve daha hassas ölçümler yapılmasını sağlar (Sino GNSS, 2023).
- **Bağlantı Uzaklığı ve Veri Depolama:** UHF radyo bağlantısı ile 10 km'ye kadar veri iletimi mümkündür. Cihazda 8 GB dahili bellek ve SD kart desteği bulunur, bu da kullanıcıya verileri uzun süre saklama imkânı tanır. Ayrıca, cihazda 4.3 inç LCD ekran ve dokunmatik ekran özelliği ile veri görüntüleme ve cihaz yönetimi kolaylıkla yapılabilir (Sino GNSS, 2023).
- **Çalışma Sıcaklığı:** -40°C ile +65°C arasında değişen sıcaklıklarda çalışabilme yeteneğine sahiptir, bu da özellikle zorlu saha koşullarında uzun süreli kullanım sağlar (Sino GNSS, 2023).
- **Batarya:** 10 saat kesintisiz kullanım sağlayan yüksek kapasiteli batarya ile uzun saha çalışmalarına uygundur (Sino GNSS, 2023).

Kullanım Alanları:

- Harita Mühendisliği: Yüksek doğruluklu arazi ölçümleri ve haritalama çalışmaları.
- Kayıklık Analizi: Deprem, heyelan ve zemin hareketlerinin izlenmesi.
- İnşaat ve Mühendislik Uygulamaları: Yol, bina ve altyapı projelerinde hassas ölçümler.
- Tarım ve Arazi Yönetimi: Hassas tarım uygulamaları ve arazi düzenlemeleri (Sino GNSS, 2023).



5. YERSEL ÖLÇME TEKNİKLERİ VE TOTAL STATION KULLANIMI

Yersel ölçme teknikleri, insanlığın yer belirleme ve mekânsal düzenleme ihtiyacından doğarak binlerce yıllık bir gelişim süreci içerisinde evrilmiştir. Antik çağda, özellikle Mısırlılar tarafından Nil Nehri'nin taşkınlarını kontrol altına almak ve tarım arazilerinin sınırlarını yeniden belirlemek amacıyla iplerle ve basit ölçüm direkleriyle yapılan işlemler, yersel ölçmenin ilk örnekleri arasında sayılabilir. Bu dönemlerde ölçme işlemleri temel geometrik ilkeler çerçevesinde yürütülmekteydi.

Orta Çağ ve Rönesans dönemlerinde ise gözlem araçlarında ve geometri bilgisinde yaşanan gelişmelerle birlikte, daha sistematik ve hassas ölçümler mümkün hâle gelmiştir. Bu dönemde, açısal ölçümlerde devrim niteliğinde bir yenilik olan teodolit aleti geliştirilmiş ve harita yapımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Teodolitin kullanımı, özellikle Avrupa'da mühendislik projelerinde, yol yapımlarında ve topografik haritalarda büyük kolaylık sağlamıştır (Kavanagh ve Slaterry, 2014).

19. yüzyıldan itibaren optik sistemlerdeki ilerlemeler, mekanik doğruluk ilkesine dayalı daha güvenilir ölçüm cihazlarının geliştirilmesine olanak tanımıştır. 20. yüzyılda ise teodolit ve mesafe ölçer cihazlarının daha kompakt ve taşınabilir hale getirilmesiyle yersel ölçmelerde yeni bir dönem başlamıştır. Ancak asıl dönüşüm, 1980'li yıllarda teodolit ile elektronik mesafe ölçerin (EDM) birleştirilmesiyle ortaya çıkan Total Station cihazlarının geliştirilmesiyle yaşanmıştır (Ghilani ve Wolf, 2012). Bu cihazlar, aynı anda hem açısal hem de doğrusal ölçüm yapabilme yeteneği sayesinde haritacılık uygulamalarında büyük kolaylıklar sağlamış, veri toplama süresini azaltmış ve doğruluğu önemli ölçüde artırmıştır.

Günümüzde kullanılan Total Station sistemleri ise bu teknolojinin evriminde ulaşılan en gelişmiş aşamayı temsil etmektedir. Lazer tabanlı reflektörsüz ölçümler, entegre GNSS modülleri, otomatik hedef tanıma sistemleri ve robotik kontrol gibi özelliklerle donatılmış bu cihazlar, artık bir operatöre ihtiyaç duymadan ölçüm yapabilmekte, hatta bulut sistemleri aracılığıyla anlık veri paylaşımı sağlayabilmektedir (Leick vd., 2015; Seeber, 2003). Bu gelişmeler sayesinde yersel ölçmeler, özellikle kısa ve orta mesafeli kayıklık analizlerinde vazgeçilmez hale gelmiş; zemin değişimlerinin izlenmesinde büyük bir öneme sahip olmuştur.

5.1 Total Station Teknolojisinin Temel İlkeleri

Total Station, elektronik uzaklık ölçer (EDM), optik sistemler ve entegre yazılım bileşenleri ile çalışan, açısal ve doğrusal ölçümler yapabilen jeodezik bir cihazdır. Deprem sonrası kayıklık analizlerinde, belirlenen sabit noktalar üzerinden yapıların ve zeminin hareketlerini takip etmek için kullanılır (Leick vd., 2015).

- Total Station'ın temel bileşenleri

Total Station cihazının temel bileşenleri, cihazın hem açısal hem de doğrusal ölçüm yeteneklerini mümkün kılan entegre sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemlerin başında, ışık veya lazer sinyalleri kullanarak hedefe olan mesafeyi yüksek doğrulukla ölçebilen Elektronik Uzaklık Ölçer (EDM) gelir. EDM, ölçüm sırasında sinyallerin hedefe gönderilip geri dönme süresine dayanarak mesafe hesaplaması yapar. Bununla birlikte, yatay ve düşey açılarda hassas ölçümler yapılabilmesini sağlayan açısal ölçüm sensörleri de cihazın en kritik bileşenlerinden biridir. Bu sensörler, hedefin üç boyutlu konumunun belirlenmesinde önemli rol oynar. Ölçülen tüm mesafe ve açı verileri, entegre veri kaydedici ve işleme ünitesi tarafından dijital olarak kaydedilir ve analiz için kullanıma hazır hale getirilir. Ayrıca Total Station cihazları hem prizma kullanılarak yapılan ölçümleri hem de prizmasız, lazer tabanlı reflektörsüz ölçümleri destekleyerek kullanım esnekliği sunar. Bu özellikler, Total Station'ı hem yapı içi hem de açık arazi uygulamalarında çok yönlü ve güvenilir bir ölçüm aracı haline getirmektedir.

- Total Station çalışma prensibi

Total Station cihazları hem mesafe hem de açı ölçümlerine dayanan entegre bir sistem üzerine kuruludur. Cihaz, ölçüm yapılacak noktalar arasındaki mesafeyi belirlemek için ışık ya da lazer dalgaları gönderir. Bu dalgalar hedefe ulaştıktan sonra yansır ve geri döner; cihaz, bu dönüş süresini hesaplayarak iki nokta arasındaki mesafeyi yüksek doğrulukla belirler. Aynı anda yatay ve düşey açılar da ölçülür ve bu veriler sayesinde hedef noktanın üç boyutlu koordinatları elde edilir. Bu ölçüm prensibi sayesinde Total Station hem konum hem de mesafe bilgilerini tek bir cihazla sağlayarak detaylı jeodezik analizlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır (Hofmann-Wellenhof vd., 2008).

5.2 Yersel Ölçme Teknikleri ve Hassasiyet Analizi

Yersel ölçmelerde hassasiyet, ölçüm yöntemi ve kullanılan ekipmanın doğruluk seviyesi ile doğrudan ilişkilidir. Total Station ölçümlerinde doğruluk seviyeleri genellikle milimetre mertebesinde olup, jeodezik kontrol ve kayıklık analizlerinde güvenilirlerdir.

Yersel ölçme teknikleri, özellikle deprem sonrası yüzey ve yapısal kayıklıkların hassas biçimde izlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Açık alan ölçümleri, genellikle büyük ölçekli inşaat projelerinde ve yüzey kayıklıklarının uzun dönemli takibinde tercih edilirken; tünel ve yeraltı ölçümleri, yeraltında meydana gelen kayıklıkların, özellikle deprem sonrası hareketliliklerin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Ayrıca bina, köprü ve baraj gibi mühendislik yapılarının statik ve dinamik davranışlarının izlenmesi amacıyla da yersel ölçme teknikleri kullanılarak yapısal sağlamlık analizleri gerçekleştirilir. Bu ölçümlerde elde edilen verilerin doğruluğu, çeşitli hassasiyet faktörlerinden etkilenmektedir. Özellikle ölçüm süresi bu faktörlerin başında gelmekte olup, uzun süreli gözlemler daha güvenilir ve kararlı sonuçlar üretmektedir. Bunun yanında çevresel faktörler, özellikle atmosferik koşullar (örneğin sıcaklık, nem, basınç), ölçüm verilerinde hata kaynağı olabilmektedir. Ayrıca kullanılan ekipmanların teknik yeterliliği ve düzenli olarak kalibrasyonlarının yapılması, toplam doğruluk üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Seeber, 2003). Bu kapsamda Total Station cihazları, yüksek doğrulukta yersel ölçüm imkânı sunduğu için özellikle deprem sonrası kayıklık takibinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Total Station ile yapılan ölçümlerde genellikle jeodezik kontrol noktaları referans alınmakta; deprem öncesi ve sonrası aynı noktalar üzerinden periyodik ölçümler gerçekleştirilerek kayıklık analizleri yapılmaktadır (Leick vd., 2015). Bu süreçte ilk olarak ölçüm yapılmaya uygun sabit kontrol noktaları belirlenir. Ardından ölçüm periyotları günlük, haftalık veya aylık olarak tanımlanır ve bu süreklilik, yüzeydeki değişimlerin düzenli olarak izlenmesini sağlar. Yapılan ölçümler sonucunda önceki dönem verileri ile yeni ölçümler karşılaştırılarak koordinat farkları hesaplanır; böylece deprem sonrası meydana gelen yer değiştirmeler, milimetre düzeyinde tespit edilebilir. Elde edilen bu veriler, GNSS ve fotogrametri yöntemlerinden sağlanan sonuçlarla karşılaştırılarak bütüncül bir analiz yapılabilir ve ölçüm doğruluğu artırılabilir (Enge ve Misra, 2006). Bu

bütünleşik yaklaşım, yalnızca yersel değil, aynı zamanda uydu ve hava tabanlı verilerle de desteklenerek deprem sonrası kayıklıkların ayrıntılı biçimde modellenmesini mümkün kılmaktadır.

5.3 Yersel Ölçmelerde Hata Kaynakları ve Doğruluk Değerlendirmesi

Yersel ölçmelerde hata kaynakları, topografik ve atmosferik etkiler, ölçüm cihazlarının kalibrasyon durumu ve operatör hatalarından kaynaklanabilir (Hofmann-Wellenhof vd., 2008).

- Önemli hata kaynakları:
 - Atmosferik koşullar: Sıcaklık, nem ve basınç değişimleri ışık kırılmasına neden olabilir.
 - Aletsel hatalar: Total Station cihazlarının kalibrasyonu yanlış ise ölçümlerde hata oluşabilir.
 - İnsan kaynaklı hatalar: Hedef noktanın yanlış belirlenmesi veya prizmanın yanlış hizalanması.
- Hassasiyet ve doğruluk analizi:
 - Ölçüm tekrarı: Farklı zamanlarda tekrarlanan ölçümler doğruluk analizi için önemlidir.
 - Karşılaştırmalı analiz: GNSS ve fotogrametri ile karşılaştırmalı doğruluk değerlendirme yapılmalıdır.
 - Hata düzeltme yöntemleri: En küçük kareler yöntemi (Least Squares Adjustment) gibi matematiksel yöntemlerle ölçüm hataları en aza indirilebilir (Leick vd., 2015).

Total Station teknolojisi, deprem sonrası kayıklık analizlerinde yüksek hassasiyet ve güvenilirlik sunan önemli bir yersel ölçme yöntemidir. Milimetre düzeyinde doğruluk sağlayan bu sistemler, sabit jeodezik kontrol noktaları üzerinden yapılan periyodik ölçümlerle hem zemin hem de yapı elemanlarındaki küçük ölçekli yer değiştirmelerin tespiti ve izlenmesi için son derece uygundur. Özellikle kısa ve orta mesafeli kayıklık analizlerinde optimum performans gösteren Total Station cihazları, yapıların ve zemin yüzeyinin zamana bağlı dinamik davranışlarını ayrıntılı biçimde ortaya koyma imkânı sunmaktadır.

Cihazın sunduğu prizmalı ve reflektörsüz ölçüm olanakları, farklı arazi koşullarında esnek uygulamalar yapılabilmesine imkân tanırken; gelişmiş elektronik sistemleri sayesinde ölçüm sürecinde operatör kaynaklı hatalar minimize edilmektedir. Bununla birlikte, cihazın düzenli kalibrasyonu, çevresel koşulların dikkate alınması ve uygun ölçüm stratejilerinin uygulanması, elde edilecek verilerin doğruluk düzeyini doğrudan etkileyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Tüm bu özellikleriyle Total Station teknolojisi, deprem sonrası kayıklıkların izlenmesinde hem mühendislik uygulamalarında hem de bilimsel araştırmalarda güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır (Seeber, 2003).

Literatürde yer alan birçok çalışmada, Total Station sistemlerinin deprem sonrası kayıklık izleme süreçlerinde etkin biçimde kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, Japonya'daki 2011 Tōhoku Depremi sonrasında yapılan mühendislik izleme çalışmalarında, Total Station cihazları kullanılarak büyük altyapı projelerinde meydana gelen milimetrik düzeydeki yapısal yer değiştirmeler başarıyla tespit edilmişti. Bu çalışmalar, Total Station teknolojisinin yalnızca teorik düzeyde değil, aynı zamanda pratik uygulamalarda da yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunduğunu göstermektedir.

Türkiye özelinde ise, Total Station teknolojisinin deprem sonrası kayıklık izleme uygulamalarına dair çarpıcı bir örnek, 1999 İzmit Depremi'nin ardından Sakarya, Gölcük ve çevresinde gerçekleştirilen kayıklık ölçümlerinde görülmektedir. Bu bölgelerde yer alan sabit noktalar üzerinde düzenli aralıklarla yapılan Total Station ölçümleri sayesinde, fay hattı boyunca gelişen yatay ve düşey yönlü yer değiştirmeler milimetrik düzeyde belirlenmiştir. Bu veriler yalnızca akademik değerlendirmelerde değil, aynı zamanda yeniden yapılandırma ve risk analizi çalışmalarında da kullanılmıştır. Bu örnek, Total Station sistemlerinin afet sonrası değerlendirme süreçlerinde ne denli etkin ve güvenilir bir araç olduğunu somut biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen yüksek doğruluklu veriler hem afet yönetiminde hem de yeniden yapılanma süreçlerinde karar alma mekanizmalarına önemli katkılar sağlamaktadır.

5.4 Uygulamada Kullanılan Total Station Ölçüm Cihazı: Leica TS07

Bu çalışmada yersel ölçümler için Leica TS07 total station cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.1). Leica TS07, özellikle arazi ölçümleri, mühendislik projeleri, haritalama ve kayıklık analizlerinde yüksek doğrulukla ölçüm yapabilen, modern ve kullanıcı dostu bir total station cihazıdır. Leica'nın TPS teknolojisi üzerine geliştirilen bu model, güvenilir ölçüm performansı, otomatik hizalama özellikleri ve kapsamlı veri aktarım seçenekleriyle öne çıkmaktadır (Leica Geosystems, 2020).



Şekil 5.1. Leica TS07 total station ölçüm cihazı.

Çizelge 5.1’de Leica TS07 total station cihazının temel teknik özelliklerini özetlemektedir. Bu çizelge aracılığıyla cihazın hem prizmalı hem de prizmasız ölçüm kabiliyetleri, açı ve mesafe ölçüm hassasiyetleri ile veri aktarım ve depolama kapasitesi gibi kritik teknik parametreleri açık biçimde görülebilmektedir. Leica TS07, özellikle yer kontrol noktalarının (YKN) hassas biçimde belirlenmesi gereken fotogrametrik uygulamalarda hem sahada kullanım kolaylığı hem de yüksek doğruluk seviyesi sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Sahada hızlı hedefleme imkânı sağlayan EDM teknolojisi ve çift eksenli kompansatör sistemi gibi gelişmiş özellikleri, zorlu arazi koşullarında dahi güvenilir sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kullanıcı dostu ICON arayüzüyle birlikte gelen bu cihaz, çalışmalarda yüksek verimlilik sağlamıştır (Leica Geosystems, 2023).

Çizelge 5.1. Leica TS07 total station teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Açı Ölçüm Hassasiyeti	1", 2", 3" ve 5" seçenekleri
Mesafe Ölçüm Hassasiyeti (Prizma ile)	1.5 mm + 2 ppm
Mesafe Ölçüm Hassasiyeti (Prizmasız)	2 mm + 2 ppm
Ölçüm Menzili (Prizma ile)	3500 m'ye kadar
Ölçüm Menzili (Prizmasız)	500 m'ye kadar
Otomatik Hedefleme	Gelişmiş EDM teknolojisi ile hızlı ve güvenilir hedefleme
Kompansatör Sistemi	Çift eksenli eğim sensörü ile dengeleme
Ekran	3.5 inç renkli dokunmatik ekran
Yazılım Arayüzü	ICON arayüzü
Veri Depolama	SD kart desteği ve 2 GB dahili hafıza
Veri Aktarımı	USB, Bluetooth ve seri port
Ölçüm Modları	Prizmalı / prizmasız; kodlu / kodsuz

Leica TS07, özellikle sahada hızlı ve güvenilir ölçüm yapılması gereken durumlarda tercih edilmektedir. Kullanıcı dostu arayüzü ve taşınabilir yapısı sayesinde, zorlu arazi koşullarında dahi etkin kullanım imkânı sunar. Bu özellikleri sayesinde, çalışmada yer kontrol noktalarının (YKN) hassas biçimde ölçülmesinde etkili bir araç olmuştur.

6. FOTOGRAMETRİ, GNSS VE TOTAL STATION YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Deprem sonrası kayıklık analizlerinde kullanılan üç temel yöntem olan fotogrametri, GNSS ve Total Station, farklı doğruluk seviyeleri, kullanım alanları ve operasyonel avantajları ile öne çıkmaktadır. Bu bölümde, bu yöntemlerin ölçüm hassasiyeti, kullanım alanları ve entegrasyon süreçleri detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

6.1 Üç Yöntemin Ölçüm Hassasiyeti Açısından Karşılaştırılması

Ölçüm hassasiyeti, kullanılan yonteme ve ölçüm koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Fotogrametri, geniş alanların modellenmesi ve yüzey hareketlerinin takibi için uygun bir yöntemken, GNSS daha çok geniş ölçekli jeodezik ölçümler için kullanılır. Total Station ise yüksek doğruluk gerektiren yerel ölçümler için idealdir.

- Fotogrametri: Ortofoto ve sayısal yüzey modelleri (DSM) oluşturarak kayıklıkları analiz eder. Ancak doğruluk, kamera kalitesi ve uçuş planlamasına bağlıdır.
- GNSS: Küresel referans sistemlerinde yüksek hassasiyet sunar ve büyük ölçekli kayıklık ölçümlerinde kullanılır. RTK GNSS, santimetre seviyesinde doğruluk sağlar.
- Total Station: Yüksek doğrulukla noktasal ölçüm yaparak kısa mesafeli kayıklık analizlerinde güvenilir sonuçlar sunar. Ancak geniş alanlarda kullanımı daha sınırlıdır.

6.2 Kullanım Alanlarına Göre Avantaj ve Dezavantajlar

Çizelge 6.1’de fotogrametri, GNSS ve Total Station yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırmalı olarak özetlemektedir. Her bir yöntemin farklı saha koşullarına ve ihtiyaçlara göre öne çıkan özellikleri, ölçüm sürecinde nasıl tercih edilmesi gerektiğine dair fikir vermektedir:

Çizelge 6.1. İHA GNSS ve total station ölçüm tekniklerinin karşılaştırılması.

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Fotogrametri	Geniş alanları hızlı kapsar, 3B model ve ortofoto üretimi sağlar, yüksek çözünürlük sunar	Doğruluk kamera kalitesi ve uçuş planına bağlıdır, yer kontrol noktası gerekebilir
GNSS	Küresel koordinat sisteminde yüksek doğruluk, uzun süreli izleme, RTK ile santimetre hassasiyet	Baz istasyonu gerekebilir, ormanlık ya da dar alanlarda sinyal kaybı yaşanabilir
Total Station	Yüksek lokal doğruluk, hassas noktasal ölçüm, hedeflenen küçük alanlarda güçlü kontrol	Geniş alanlarda verim düşer, zaman alıcıdır, personel ve görüş hattı gerektirir

Bu karşılaştırma, her yöntemin kendi içinde farklı güçlü ve zayıf yönler taşıdığını, ancak uygulama alanına göre tamamlayıcı nitelikte kullanılabileceğini göstermektedir. Fotogrametri yöntemi, geniş alanların kısa sürede modellenmesini sağlarken; GNSS sistemi, zamansal sürekliliği olan, büyük ölçekli kayıklıkların izlenmesine olanak tanır. Total Station ise, özellikle yüksek doğruluk gerektiren lokal alan çalışmalarında ideal çözümler sunar. Deprem sonrası yüzey değişimlerinin doğru analiz edilebilmesi için bu yöntemlerin entegratif biçimde kullanılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, literatürde de sıkça vurgulandığı üzere, verilerin doğruluğunu artırmakta ve yorum kapasitesini güçlendirmektedir.

6.3 Deprem Sonrası Yüzey Kayıklığı Takibinde Uygun Yöntem Seçimi

Deprem sonrası yüzey kayıklığının belirlenmesi ve izlenmesi için farklı yöntemler kullanılır. GNSS, geniş ölçekli hareketlerin belirlenmesi için uygundur. Fotogrametri, kayıklığın yüzeysel etkilerini haritalamak ve modellemek için kullanılırken, Total Station, belirli yapıların veya lokal kayıklıkların izlenmesi için tercih edilir.

- Geniş ölçekli yüzey kayıklığı takibi: GNSS ağları kullanılarak büyük çaplı yüzey hareketleri takip edilir.
- Yüzey kayıklıklarının haritalanması: Fotogrametri ile ortofoto ve 3D yüzey modelleri oluşturulur.
- Yerel yüzey kayıklığı analizleri: Total Station ile hassas ölçümler gerçekleştirilir.

6.4 Yöntemlerin Entegrasyonu ve Veri Analizi

Üç yöntemin entegre kullanımı, kayıklık analizlerinde en yüksek doğruluk seviyesine ulaşılmasını sağlar. GNSS, geniş alanların ölçümünü sağlarken, fotogrametri yüzey değişimlerini belirleyerek bölgesel analizlere katkıda bulunur. Total Station ise lokal hareketlerin detaylı analizini yaparak noktasal doğruluk sağlar.

- Veri Entegrasyonu: GNSS verileri, fotogrametrik yüzey modelleri ile karşılaştırılarak doğruluk analizi yapılır.
- Hata Analizi ve Dengeleme: GNSS ve Total Station verileri ile fotogrametrik model arasındaki farklar analiz edilerek hata düzeltmeleri yapılır.
- Sonuçların Karşılaştırılması: Üç yöntemin birlikte kullanılmasıyla elde edilen kayıklık haritaları karşılaştırılarak doğruluk değerlendirmesi yapılır.

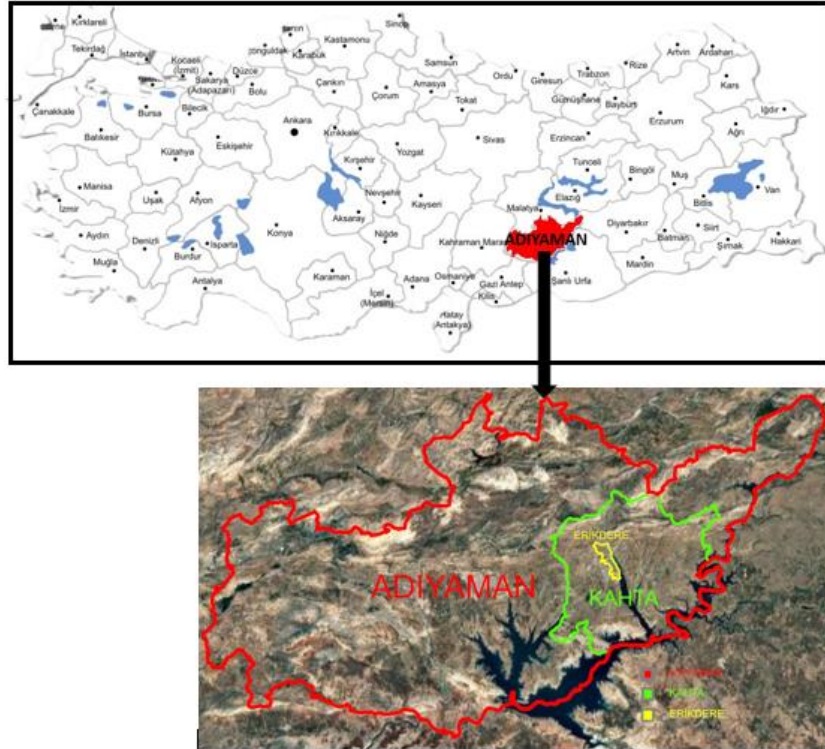
Bu bölümde ele alınan karşılaştırmalar, deprem sonrası kayıklık analizlerinde hangi yöntemin en uygun olduğunu belirlemek için rehber niteliğindedir. Yöntemlerin entegrasyonu, afet yönetimi ve mühendislik projelerinde daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

7. YÖNTEM

Adıyaman ili, 2023 yılında meydana gelen büyük depremin ardından yüzey kayıklığı analizleri açısından önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Çalışma sahasının seçilme nedenleri arasında, bölgenin aktif fay hatlarına yakınlığı, jeolojik yapısı ve deprem sonrası meydana gelen yüzey değişimlerinin belirgin olması bulunmaktadır. Bu çalışmada, GNSS, İHA ile fotogrametri ve Total Station yöntemleri birlikte kullanılarak yüzey kayıklığı analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her yöntemin avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır.

7.1 Çalışma Alanının Tanıtımı

Adıyaman ili, 2023 yılında meydana gelen büyük depremin ardından kayıklık analizleri açısından önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Çalışma sahasının seçilme nedenleri arasında, bölgenin aktif fay hatlarına yakınlığı, jeolojik yapısı ve deprem sonrası meydana gelen yüzey değişimlerinin belirgin olması bulunmaktadır. Türkiye haritası üzerinde Adıyaman ili Kahta İlçesi Erikdere Mahallesi'nin sınırları Şekil 7.1'de görülmektedir. Bu çalışmada, GNSS, İHA ile fotogrametri ve Total Station yöntemleri birlikte kullanılarak kayıklık analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.1. Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi.

Adıyaman ili, Doğu Anadolu Fay Zonu (DAFZ) üzerinde yer alması nedeniyle jeoteknik ve jeodezik açıdan kritik bir konuma sahiptir. Bölge, aktif tektonik hareketliliğe sahip olması nedeniyle yüksek sismik risk altında bulunmakta ve bu durum, özellikle yerleşim alanlarında zemin özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Gölbaşı ilçesi gibi alanlarda, alüvyon ve bataklık karakterli zeminler yaygın olup bu zeminlerin deprem anında sıvılaşma ve taşıma gücü kaybı gibi mühendislik açısından riskli davranışlar sergilediği bilinmektedir. Bu nedenle, bölgedeki yapılaşmalarda kapsamlı zemin etütlerinin (jeoteknik sondajlar, jeofizik ölçümler, laboratuvar testleri vb.) yapılması büyük önem arz etmektedir. Bu tür jeoteknik çalışmalar, hem yapı güvenliği hem de yerleşim planlaması açısından vazgeçilmezdir.

Jeodezik açıdan bakıldığında ise Adıyaman, deprem sonrası yüzey kayıklıklarının izlenmesi için uygun koşullara sahip bir çalışma alanı sunmaktadır. GNSS, İHA fotogrametrisi ve Total Station gibi modern ölçüm tekniklerinin bir arada kullanılmasıyla, bölgedeki yatay ve düşey yer değiştirmeler yüksek hassasiyetle belirlenebilmektedir. Bu yöntemlerle elde edilen veriler, yalnızca kayıklık analizlerinde değil, aynı zamanda yapıların, yolların ve altyapı unsurlarının güvenlik değerlendirmelerinde de kullanılmaktadır. Ayrıca bu entegre ölçüm sistemleri, olası risklerin erken tespiti açısından da önemli katkılar sağlamaktadır.

Sonuç olarak, Adıyaman ili hem jeoteknik hem de jeodezik yönlerden detaylı ölçüm ve analizlerin yapılmasını gerektiren bir bölge niteliğindedir. Aktif fay zonu üzerinde yer alması, zemin çeşitliliği ve sismik hareketlilik gibi faktörler, bu bölgeyi mühendislik açısından dikkatle incelenmesi gereken bir alan haline getirmiştir. Bu bağlamda, modern teknolojilerin kullanımı ve doğru veri analizi, bölgenin güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde gelişimine katkı sağlayacaktır.

7.2 Yer Kontrol Noktalarının Tesisi

Arazi ölçümlerinde yüksek doğruluk sağlamak amacıyla Yer Kontrol Noktaları (YKN) belirlenmiş ve sahada tesis edilmiştir. YKN'ler, GNSS ölçümleri ve yersel ölçümler için referans noktaları olarak kullanılmıştır. Bu noktalar, hem DJI Mavic 3 Enterprise ile elde edilen hava verilerinin doğruluğunu artırmak hem de Leica TS09

total station ile yapılan yersel ölçümlerle birlikte hassas konum belirleme sağlamak amacıyla stratejik noktalara yerleştirilmiştir.

Uygulama sahasında yer kontrol noktalarının (YKN) oluşturulması sürecinde, ölçüm güvenilirliği ve uzun vadeli kullanım dikkate alınarak nokta seçimi titizlikle gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, görüş alanı geniş ve çevresel etkenlerden minimum düzeyde etkilenecek alanlar tercih edilmiştir. Belirlenen her bir noktaya yaklaşık 40 cm derinliğinde beton dökülerek sağlam bir zemin hazırlanmış ve bu beton yüzeyin merkezine poligon çivisi tesis edilmiştir (Şekil 7.2). Böylece, hem fiziksel dayanıklılığı yüksek hem de fotogrametrik uygulamalarda uzun süreli stabilite sağlayabilecek referans noktaları oluşturulmuştur.



Şekil 7.2. YKN tesis aşaması.

7.3 Yer Kontrol Noktalarının GNSS ile Ölçülmesi

Sino T300 Plus GNSS alıcısı kullanılarak, Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK - Real Time Kinematic) konumlandırma yöntemiyle sabit bir poligon noktası üzerinde 60 epokluk veri alımı gerçekleştirilmiştir. Bu nokta, daha sonra çalışmanın temel referans noktası olarak belirlenmiş ve sistemin doğruluk referansı olarak kullanılmıştır. Şekil 7.3’de kurulan sabit görülmektedir.



Şekil 7.3. Sabit RTK kurma.

Elde edilen bu referans koordinatlar, sabit GNSS cihazına yüklenerek yer kontrol noktaları (YKN) üzerindeki ölçümler için baz istasyonu görevi üstlenmiştir. Her bir YKN’de, yine Sino T300 Plus GNSS alıcısı ile 60 epok boyunca veri toplanmış ve bu şekilde konum hassasiyeti artırılmıştır. Epok sayısının fazla tutulması, özellikle çok yollu sinyaller (multipath etkisi) ile iyonosfer ve troposfer kaynaklı gecikmeler gibi çevresel hata faktörlerinin etkisini azaltarak daha doğru konum bilgisi elde edilmesine katkı sağlar. Bu sayede GNSS ölçümlerinde elde edilen verilerin güvenilirliği artar ve hassasiyet seviyesi yükseltilmiş olur. Şekil 7.4’de gezici GNSS ile yapılan ölçüm görülmektedir.



Şekil 7.4. Gezici GNSS ile epoklu ölçüm.

GNSS ile ilk ölçüm, 12 Mart 2025 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işleminin tamamlanmasının ardından, elde edilen veriler ağ bağlantısı aracılığıyla cihazın el ünitesinden alınarak dijital ortama aktarılmıştır. Bu ilk ölçüme ait noktasal koordinat değerleri, referans olarak değerlendirilmiş ve Çizelge 7.1’de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. GNSS ilk ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.418	4189010.880	604.024
YKN2	467293.061	4189023.765	602.251
YKN3	467338.828	4189022.357	594.798
YKN4	467383.999	4189019.861	585.662
YKN5	467419.873	4189000.220	578.768
YKN6	467438.003	4188966.837	577.079
YKN7	467445.684	4188928.221	576.703
YKN8	467417.162	4188905.521	578.209
YKN9	467376.651	4188896.677	579.969
YKN10	467336.286	4188892.246	582.048
YKN11	467295.580	4188884.024	584.227
YKN12	467256.401	4188885.233	586.459
YKN13	467201.253	4188930.967	591.816
YKN14	467230.696	4188992.944	602.013

İkinci ölçüm, aynı yöntem ve ekipman kullanılarak 12 Nisan 2025 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde GNSS alıcısı, ilk ölçümde belirlenen sabit noktaya tekrar kurularak süreklilik sağlanmıştır. Bu ölçüm sonucunda elde edilen koordinatlar, birinci ölçümle karşılaştırılarak aradaki farklar belirlenmiştir. İlgili veriler, Çizelge 7.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. GNSS ikinci ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.414	4189010.882	604.023
YKN2	467293.059	4189023.766	602.250
YKN3	467338.824	4189022.358	594.798
YKN4	467383.997	4189019.864	585.663
YKN5	467419.871	4189000.222	578.773
YKN6	467438.000	4188966.839	577.081
YKN7	467445.682	4188928.223	576.704
YKN8	467417.159	4188905.523	578.207
YKN9	467376.649	4188896.676	579.966
YKN10	467336.284	4188892.248	582.045
YKN11	467295.578	4188884.025	584.229
YKN12	467256.397	4188885.235	586.455
YKN13	467201.250	4188930.962	591.817
YKN14	467230.693	4188992.942	602.016

Üçüncü ve son ölçüm ise 12 Mayıs 2025 tarihinde yapılmıştır. Böylece her biri yaklaşık birer aylık aralıklarla üç ayrı GNSS ölçüm periyodu tamamlanmıştır. Tüm ölçümler, aynı referans sisteminde değerlendirilmiştir. İlgili veriler Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.3. GNSS üçüncü ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.413	4189010.884	604.022
YKN2	467293.057	4189023.768	602.247
YKN3	467338.823	4189022.361	594.797
YKN4	467383.992	4189019.866	585.667
YKN5	467419.868	4189000.223	578.774
YKN6	467437.996	4188966.840	577.082
YKN7	467445.679	4188928.225	576.705
YKN8	467417.157	4188905.525	578.202
YKN9	467376.650	4188896.681	579.963
YKN10	467336.283	4188892.250	582.049
YKN11	467295.576	4188884.027	584.227
YKN12	467256.395	4188885.238	586.452
YKN13	467201.248	4188930.968	591.816
YKN14	467230.690	4188992.946	602.019

Üç ölçüme ait GNSS verileri toplandıktan sonra, verilerin işlenmesi ve mekânsal olarak analiz edilmesi amacıyla Netcad yazılımı kullanılmıştır. Netcad, özellikle harita mühendisliği, planlama, kadastro ve altyapı projelerinde yaygın olarak tercih edilen, Türkçe arayüzlü, CAD tabanlı bir coğrafi bilgi sistemi ve mühendislik yazılımıdır. Yazılım, GNSS verilerinin koordinat dönüşümü, veri tabanı ile ilişkilendirilmesi, kayıklık analizleri ve detay çizimleri gibi pek çok işlemi desteklemektedir (Netcad, 2023). Kullanıcı dostu arayüzü sayesinde, saha verilerinin görselleştirilmesi, vektörel verilerin analiz edilmesi ve mühendislik raporlaması kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, üç ayrı tarihte alınan GNSS ölçümleri Netcad ortamına aktararak, ölçüm noktaları arasındaki koordinat farkları analiz edilmiştir. Netcad'in kayıklık analiz araçları kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, ölçüm yapılan sabit noktalarda kuzeybatı yönünde 2–3 mm düzeyinde sürekli bir kayma hareketinin olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Çizelge 7.4'de sunulmuştur.

Çizelge 7.4. GNSS ölçümlerinin karşılaştırılması.

NOKTA NO	$\Delta Y1$ - $\Delta Y2$ (mm)	$\Delta X1$ - $\Delta X2$ (mm)	$\Delta Z1$ - $\Delta Z2$ (mm)	$\Delta Y2$ - $\Delta Y3$ (mm)	$\Delta X2$ - $\Delta X3$ (mm)	$\Delta Z2$ - $\Delta Z3$ (mm)	$\Delta Y1$ - $\Delta Y3$ (mm)	$\Delta X1$ - $\Delta X3$ (mm)	$\Delta Z1$ - $\Delta Z3$ (mm)	YÖN
YKN1	4	-2	1	1	-2	1	5	-4	2	KUZEYBATI
YKN2	2	-1	1	2	-2	3	4	-3	4	KUZEYBATI
YKN3	4	-1	0	1	-3	1	5	-4	1	KUZEYBATI
YKN4	2	-3	-1	5	-2	-4	7	-5	-5	KUZEYBATI
YKN5	2	-2	-5	3	-1	-1	5	-3	-6	KUZEYBATI
YKN6	3	-2	-2	4	-1	-1	7	-3	-3	KUZEYBATI
YKN7	2	-2	-1	2	-2	-1	4	-4	-2	KUZEYBATI
YKN8	3	-2	2	2	-2	5	5	-4	7	KUZEYBATI
YKN9	2	1	3	-1	-5	3	1	-4	6	KUZEYBATI
YKN10	2	-2	3	1	-2	-4	3	-4	-1	KUZEYBATI
YKN11	2	-1	-2	2	-2	2	4	-3	0	KUZEYBATI
YKN12	4	-2	4	2	-3	3	6	-5	7	KUZEYBATI
YKN13	3	5	-1	2	-6	1	5	-1	0	KUZEYBATI
YKN14	3	2	-3	3	-4	-3	6	-2	0	KUZEYBATI

Çizelgedeki değerlere göre, özellikle X ve Y koordinatlarındaki milimetrik yer değiştirmeler, her üç ölçümde de benzer doğrultuda gerçekleşmiştir. Elde edilen bulgular, bölgedeki düşük genlikli ancak sürekli karakterde bir kayıklık sürecine işaret etmektedir.

7.4 Yer Kontrol Noktalarının Total Station Ölçüm Cihazı ile Ölçülmesi

GNSS (Küresel Konumlama Sistemi) ölçmeleri sonucunda elde edilen koordinat verileri doğrultusunda sabit referans noktaları oluşturulmuştur. Bu noktalar, saha çalışmaları sırasında yersel ölçüm ağının temelini oluşturmuş ve sistematik bir şekilde düzenlenmiştir. Referans noktalarının koordinat sistemine bağlanması amacıyla, klasik ölçme yöntemlerinden biri olan durulan-bakılan tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemle, GNSS ağına entegre edilen referans poligon noktalarına Total Station cihazı aracılığıyla bağlantı sağlanmıştır.

GNSS tabanlı ölçüm sistemlerinde ortaya çıkabilecek sistematik hataların etkisini en aza indirmek amacıyla, oluşturulan referans noktalarına yönelik yeniden gözlemler gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemler sonucunda, mevcut noktalara ait koordinat değerleri karşılaştırılmış ve gerektiğinde düzeltmeler yapılarak nihai koordinatlar belirlenmiştir. Elde edilen güncel referans noktaları kullanılarak Total Station cihazı ile tekrar bağlanıp GNSS verileriyle elde edilen koordinatlara yeni değerler verilip bağlantılar sağlanmıştır. Yüksek doğruluk gerektiren bu uygulamalarda, yatay açı ölçümleri 0.0001 g hassasiyetle gerçekleştirilmiş, kot bağlantısı ise ± 0 mm düzeyinde doğrulukla sağlanmıştır. Bu hassasiyet seviyesi, kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyon durumu ve uygulanan ölçüm yöntemlerinin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Yatay açı ve düşey kot sıfırlama işlemleri tamamlandıktan sonra, oluşturulan referans ağına dayalı olarak yer kontrol noktalarının merkezine yerleştirilen poligon çivileri üzerinden, reflektör yardımıyla total station cihazı kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle, hem yatay hem düşey konum bilgileri yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

Birinci ölçüm, referans ağı kurulduktan ve yatay-düşey sıfırlama işlemleri tamamlandıktan sonra, poligon çivilerine yerleştirilen reflektör yardımıyla alınmıştır.

Bu ilk ölçüm, ilerleyen dönemlerde yapılacak karşılaştırmalar için temel veri seti olarak değerlendirilmiştir. Ölçüm sırasında cihaz kurulum yüksekliği ve reflektör yüksekliği sabitlenmiş, ölçüm çevresinde görüş hattını etkileyebilecek dış unsurlar minimize edilmiştir. Total station ile yapılan ilk ölçüm verileri Çizelge 7.5’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 7.5. Total station ilk ölçüm değerleri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.407	4189010.878	604.418
YKN2	467293.050	4189023.767	602.251
YKN3	467338.816	4189022.362	594.791
YKN4	467383.987	4189019.867	585.664
YKN5	467419.866	4189000.230	578.755
YKN6	467437.966	4188966.846	577.078
YKN7	467445.680	4188928.231	576.701
YKN8	467417.163	4188905.528	578.204
YKN9	467376.653	4188896.684	579.956
YKN10	467336.290	4188892.251	582.051
YKN11	467295.580	4188884.024	584.229
YKN12	467256.402	4188885.227	586.461
YKN13	467201.249	4188930.961	591.814
YKN14	467230.687	4188992.941	602.019

İkinci ölçüm, birinci ölçümden yaklaşık bir ay sonra aynı yöntemle ve aynı cihaz parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm verileri Çizelge 7.6’da görülmektedir.

Çizelge 7.6. Total station ikinci ölçüm değerleri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.408	4189010.880	604.417
YKN2	467293.051	4189023.765	602.250
YKN3	467338.814	4189022.362	594.790
YKN4	467383.987	4189019.865	585.664
YKN5	467419.864	4189000.230	578.757
YKN6	467437.967	4188966.847	577.076
YKN7	467445.680	4188928.229	576.701
YKN8	467417.161	4188905.531	578.202
YKN9	467376.653	4188896.682	579.957
YKN10	467336.290	4188892.250	582.054
YKN11	467295.579	4188884.022	584.229
YKN12	467256.402	4188885.227	586.463
YKN13	467201.250	4188930.963	591.832
YKN14	467230.688	4188992.938	602.018

Üçüncü ve son ölçümde ise, birinci ve ikinci ölçümlerle aynı referans noktaları ve cihaz kurulumu kullanılmış; yöntemsel süreklilik korunmuştur. Veriler Çizelge 7.7’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 7.7. Total station üçüncü ölçüm değerleri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.405	4189010.880	604.416
YKN2	467293.049	4189023.767	602.253
YKN3	467338.814	4189022.364	594.792
YKN4	467383.988	4189019.867	585.662
YKN5	467419.865	4189000.228	578.757
YKN6	467437.965	4188966.845	577.075
YKN7	467445.680	4188928.230	576.702
YKN8	467417.162	4188905.529	578.204
YKN9	467376.651	4188896.685	579.956
YKN10	467336.289	4188892.252	582.052
YKN11	467295.579	4188884.020	584.228
YKN12	467256.401	4188885.224	586.462
YKN13	467201.248	4188930.961	591.832
YKN14	467230.688	4188992.943	602.018

Total Station cihazı ile gerçekleştirilen üç periyodik ölçümün ardından, elde edilen veriler USB bağlantısı aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve Netcad yazılımı ortamında analiz edilmiştir. Çizelge 7.8’de yer alan değerlere bakıldığında, ölçüm noktaları arasında dikkate değer bir lokal kayıklık tespit edilmemiştir. Ölçümler arasındaki küçük koordinat farklılıklarının ise insan kaynaklı hata, cihaz bağlantı

hassasiyeti, atmosferik koşullar gibi çevresel ve teknik faktörlerden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Bu farklar, genellikle milimetre düzeyinde olup, analiz sonuçlarının güvenilirliğini etkileyecek boyutta değildir. Dolayısıyla, Total Station ölçümlerine göre bölgedeki yüzey hareketliliğinin durağan kaldığı söylenebilir.



Çizelge 7.8. Total station ölçümlerinin analizi.

NOKTA NO	$\Delta Y1-Y2$ (mm)	$\Delta X1-X2$ (mm)	$\Delta Z1-Z2$ (mm)	$\Delta Y2-Y3$ (mm)	$\Delta X2-X3$ (mm)	$\Delta Z2-Z3$ (mm)	$\Delta Y1-Y3$ (mm)	$\Delta X1-X3$ (mm)	$\Delta Z1-Z3$ (mm)	YÖN	YÖN	YÖN
YKN1	-1	-2	1	3	0	1	2	-2	2	Kuzeydoğu	Batı	Güneydoğu
YKN2	-1	2	1	2	-2	-3	1	0	-2	Güneydoğu	Kuzeybatı	Batı
YKN3	2	0	1	0	-2	-2	2	-2	-1	Batı	Kuzey	Güneydoğu
YKN4	0	2	0	-1	-2	2	-1	0	2	Güney	Kuzeydoğu	Doğu
YKN5	2	0	-2	-1	2	0	1	2	-2	Batı	Güneydoğu	Güneybatı
YKN6	-1	-1	2	2	2	1	-1	-3	3	Kuzeydoğu	Güneybatı	Kuzeydoğu
YKN7	0	2	0	0	-1	-1	0	1	-1	Güney	Kuzey	Güney
YKN8	2	-3	2	-1	2	-2	1	-1	0	Kuzeybatı	Güneydoğu	Kuzeybatı
YKN9	0	2	-1	2	-3	1	2	-1	0	Güney	Kuzeybatı	Kuzeybatı
YKN10	0	1	-3	1	-2	2	1	-1	-1	Güney	Kuzeybatı	Kuzeybatı
YKN11	1	2	0	0	2	1	1	4	1	Kuzeybatı	Güney	Güneybatı
YKN12	0	0	-2	1	3	1	1	3	-1	0	Güneybatı	Güneybatı
YKN13	-1	-2	-1	2	2	1	1	0	0	Kuzeydoğu	Güneybatı	Batı
YKN14	-1	3	1	0	-5	0	-1	2	1	Güneydoğu	Kuzey	Güneydoğu

Total Station ile gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, yöntemsel olarak lokal ölçekli yüzey hareketlerinin, özellikle mikro düzeydeki yer değiştirmelerin ve potansiyel heyelan risklerinin tespit edilebileceği anlaşılmıştır. Bu yöntem, kısa mesafelerde yüksek doğrulukla noktasal konum verisi sağladığı için sınırlı alanlardaki ani yüzey değişimlerinin belirlenmesinde etkili bir ölçüm aracıdır. Ancak çalışmanın gerçekleştirildiği bölgede heyelan oluşumuna neden olabilecek jeoteknik veya morfolojik bir durum gözlemlenmediğinden, yapılan üç dönemlik ölçümler arasında anlamlı bir yer değişikliği tespit edilmemiştir.

Bu durum, ölçüm sonuçlarında görülen küçük konum farklarının sistematik bir kayıktan çok, ölçüm hatası, çevresel koşullar (örneğin sıcaklık, rüzgâr, görüş hattı engelleri) ve cihaz toleransı gibi faktörlerden kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca, Total Station yöntemi ile bölgesel veya geniş ölçekli tabaka hareketlerinin doğrudan izlenmesinin mümkün olmadığı da anlaşılmıştır.

7.5 Yer Kontrol Noktalarının İHA ile Ölçülmesi

Bu bölümde, İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılarak gerçekleştirilen uçuş planlaması, sahada yürütülen uçuş uygulamaları ve elde edilen görüntüler üzerinden ortofoto üretim süreci adım adım ele alınacaktır.

7.5.1 Uçuş planının hazırlanması

Uçuş planlaması, DJI Pilot 2 yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yazılım arayüzünde, fotogrametrik görüntüleme yapılacak çalışma alanı harita üzerinde belirlenerek görev alanı poligon olarak çizilmiştir. Uçuş irtifası 50 metre olarak tanımlanmış, bu yükseklik değerine göre kullanılan kameranın odak uzaklığı ve sensör boyutu dikkate alındığında yer örnekleme mesafesi (GSD) yaklaşık **1.0–1.5 cm/piksel** aralığında hesaplanmaktadır. Bu çözünürlük, detaylı ortofoto ve sayısal model üretimi için yeterli hassasiyeti sağlamaktadır.

Görüntü bindirme oranları enine ve boyuna olmak üzere her iki yönde %75 olarak ayarlanmıştır. Bu bindirme oranları, Structure-from-Motion (SfM) ve benzeri fotogrametrik algoritmaların doğru şekilde çalışması, üç boyutlu modellemenin hatasız gerçekleştirilmesi ve ortofoto üretiminde boşlukların oluşmaması açısından uygun değerlerdir.

Görev planı oluşturulurken, kamera tetikleme parametreleri uçuş irtifası, bindirme oranı ve planlanan uçuş dinamikleri dikkate alınarak DJI Pilot 2 yazılımı tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır. Uçuş süresince İHA'nın konum verileri GNSS (GPS) sistemi aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kaydedilmiştir. Bu sayede her bir fotoğraf karesine ait konum bilgisi uçuş boyunca sürekli izlenmiş ve görüntüler koordinatlı şekilde kaydedilmiştir. Planlama aşamasında tanımlanan tüm parametreler doğrultusunda görev senaryosu oluşturulmuş ve sahada uygulanmak üzere cihaz belleğine yüklenmiştir.

7.5.2 İHA uçuşu yapılması ve ortofoto üretim aşaması

Uygulama süreci, İHA'nın sahaya gönderilmeden önce yapılan güvenlik ve uçuş ayarlarının kontrolüyle başlamaktadır. Şekil 7.5'de DJI tarafından geliştirilen DJI Pilot yazılımına ait "Uçuş Öncesi Kontrol" ekranı yer almaktadır. Bu yazılım, RTK destekli kurumsal DJI cihazlarında kullanılan gelişmiş görev planlama ve uçuş kontrol platformudur. Bu aşamada Return to Home (RTH) irtifası 210 metre, maksimum uçuş irtifası ise 350 metre olarak belirlenmiştir. Bu değerler, çalışma sahasında yer alabilecek yüksek yapılar veya engebeli araziler dikkate alınarak cihazın güvenli biçimde uçuş gerçekleştirebilmesi ve sinyal kaybı durumunda otomatik olarak eve dönüşünü sağlayabilmesi açısından önemlidir. Sinyal kaybı eylemi olarak "Eve Dön" seçilmiş; bu sayede iletişim kesilirse İHA otomatik olarak kalkış noktasına geri döner. Engellerden kaçınma sistemi "Fren" modunda çalışacak şekilde ayarlanmıştır; böylece cihaz önüne çıkan nesneleri algılayarak çarpışma öncesi durur. Ayrıca yatay, yukarı ve aşağı yönlü sensörler aktif hale getirilmiştir. Bu ayarlar uçuşun güvenli, istikrarlı ve operatör müdahalesi olmadan sürdürülebilmesi için yapılmıştır.

Uçuş Öncesi Kontrol

✕

⚠ Not: Hava aracının kollarının tamamen açıldığından emin olun. Hava aracının kolları açıksa bu mesajı dikkate almayın

RTH İrtifası (20~1500m) -100 -10 210 +10 +100 Maksimum İrtifa (20~1500m) -100 -10 350 +10 +100 Ana Konum Noktası 📍 A	Sinyal Kaybı Eylemi Eve Dön ▼ Maksimum Uçuş Mesafesi ☐ Kumanda Çubuğu Modu Mod 2 ▼
---	---

Pil Uyarısını Özelleştir

Çok Düşük: 20%
Düşük: 25%

Engellerden Kaçınma

Fren

Kaçın

Kapalı

Yatay Algılama	A	Fren: 6.5m	Uyarı: 16.0m	
Yukarı Algılama	A	Fren: 1.0m	Uyarı: 10.0m	
Aşağı Algılama	A	Fren: 0.5m	Uyarı: 10.0m	

Sonraki

Şekil 7.5. Uçuş öncesi kontrol ayarları.

Şekil 7.6’da, yine DJI Pilot 2 arayüzünde, görev planlamasının ardından İHA’nın tanımlanmış uçuş rotası üzerindeki ilerleyişi görülmektedir. Görev ilerleme oranı %29’dur. Harita üzerinde gösterilen paralel çizgiler, belirlenen bindirme oranları ve irtifaya göre otomatik oluşturulmuş görev rotasını temsil etmektedir. Rota üzerinde H simgesi kalkış/iniş noktasını, S harfi ise görevin başlangıç noktasını göstermektedir. Ekranın alt kısmında uçuşa ilişkin anlık veriler yer almaktadır: yüksekliği 34.5 metre, yatay hızı 13.4 m/s, dikey hızı ise 1.3 m/s olarak ölçülmektedir. Enlem ve boylam bilgileri de görüntülenmekte, bu sayede konum verileri hassas biçimde kayıt altına alınmaktadır. Uçuşun bu noktasında cihaz 270 fotoğraftan 51’ini çekmiş durumdadır. Tüm bu bilgiler, İHA’nın rotasında düzenli şekilde ilerlediğini ve görevin kontrol altında sürdürüldüğünü göstermektedir.



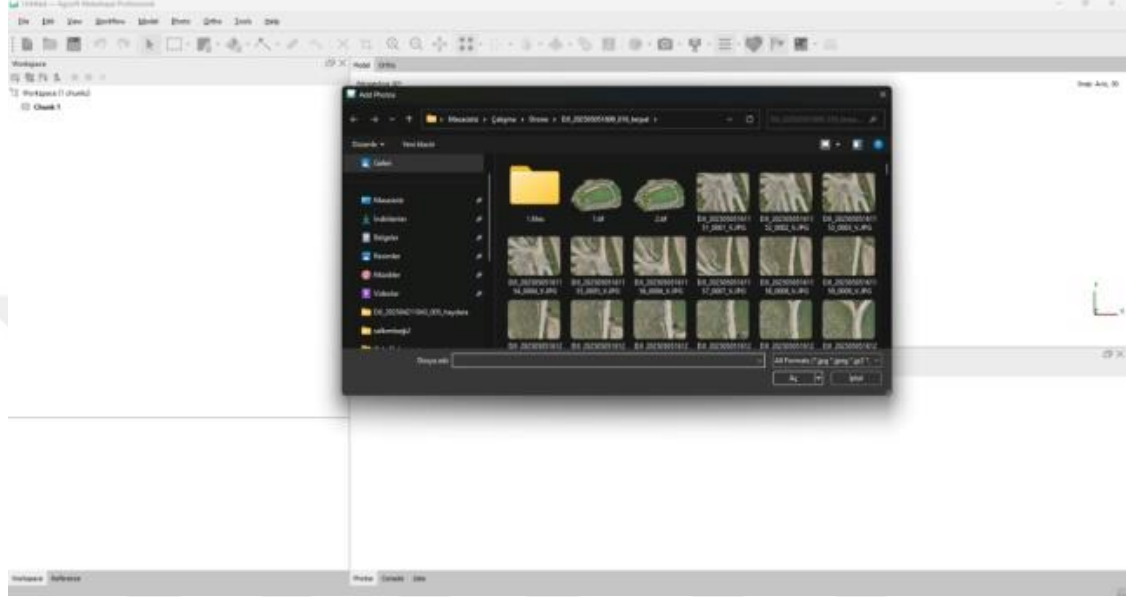
Şekil 7.6. Uçuş rotası.

İnsansız hava aracı (İHA) tabanlı fotogrametrik veri işleme süreci, yüksek çözünürlüklü ortofoto ve sayısal yüzey modelleri üretimini mümkün kılan, birçok aşamadan oluşan teknik ve planlı bir iş akışını içerir. Bu süreçte kullanılan Agisoft Metashape Professional yazılımı, fotogrametri temelli görüntü işleme algoritmalarını temel alarak kullanıcıya yüksek doğrulukta ve geometrik tutarlılığa sahip ürünler sunmaktadır. Yapay zekâ destekli eşleme algoritmaları, Structure-from-Motion (SfM) ve Multi View Stereo (MVS) yöntemleri ile entegre edilerek 2B görüntülerden 3B modeller üretilebilmektedir (Agisoft LLC, 2020; Turner vd., 2012).

İşleme süreci, yazılım arayüzünde yer alan “Workflow” sekmesi üzerinden başlatılmaktadır. İlk adımda, “Add Photos” komutu aracılığıyla İHA ile elde edilen hava fotoğrafları projeye yüklenmektedir (Şekil 7.7). Bu görüntülerin, uçuş sırasında önceden belirlenen güzergâh üzerinde, %75 ve üzeri bindirme oranlarıyla, düzgün sıralanmış şekilde çekilmiş olması gereklidir. Görsellerin eksiksiz ve homojen şekilde dağılmış olması, yazılımın otomatik bağ noktası tespiti ve hizalama algoritmalarının doğru çalışabilmesi açısından kritik önem taşımaktadır. Görseller yüklendikten sonra hizalama, kamera optimizasyonu, yoğun nokta bulutu üretimi, üçgen ağ (mesh) oluşturulması, dokulandırma (texture) ve ortofoto mozaikleme adımları sırasıyla yürütülmektedir.

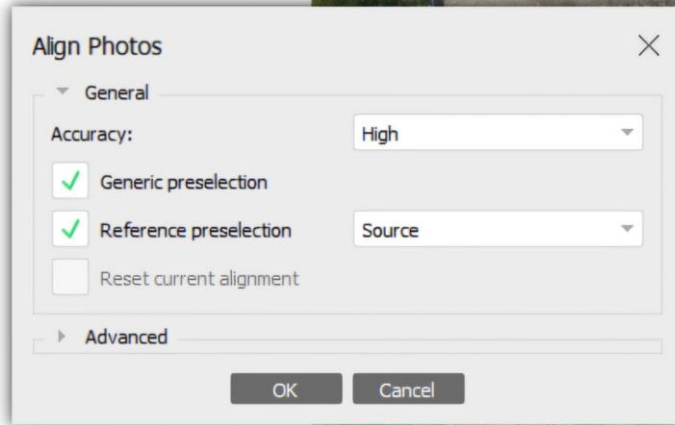
Agisoft Metashape, bu adımların her birinde kullanıcıya esnek işlem parametreleri sunar. Yazılım, hem GNSS destekli konum verilerini hem de Yer Kontrol Noktaları

üzerinden doğrulama kabiliyeti ile bağıl ve mutlak doğruluk gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Üretilen çıktılar; GeoTIFF, LAS/LAZ, OBJ, PDF, DXF gibi farklı formatlarda, coğrafi koordinat sistemleriyle uyumlu şekilde dışa aktarılabilir. Ayrıca grafik işlemci (GPU) desteği sayesinde büyük hacimli veri setleriyle çalışma imkânı sunarak hızlı ve verimli işleme süreçleri sağlamaktadır (Agisoft LLC, 2020).



Şekil 7.7. Fotoğrafları yazılıma yükleme aşaması.

Fotoğraflar içe aktarıldıktan sonra, bir sonraki adım olan “Align Photos” işlemi uygulanır. Bu işlem, fotoğrafların çakıştırılmasını sağlar. Teknik olarak bu, fotogrametrik karşılıklı yöneltme (relative orientation) ve mutlak yöneltme (absolute orientation) işlemlerinin gerçekleştirilmesi anlamına gelir. Program bu aşamada, fotoğraflar üzerinde ortak nesne ve dokuları otomatik olarak tespit eder, bu nesneler aracılığıyla her bir görüntünün diğerleriyle olan konumsal ilişkisini kurar. Açılan parametre penceresinde “Accuracy” seçeneği ile hizalama hassasiyeti belirlenir. İlk hizalamanın yüksek hassasiyette yapılması önerilir. Bu, modellerin daha güvenilir bir geometriye sahip olmasını sağlar. İlerleyen işlemlerde (örneğin dense cloud üretiminde) daha düşük ayarların kullanılması, işlem süresini azaltır ve veri uyumluluğunu artırır(Şekil 7.8).



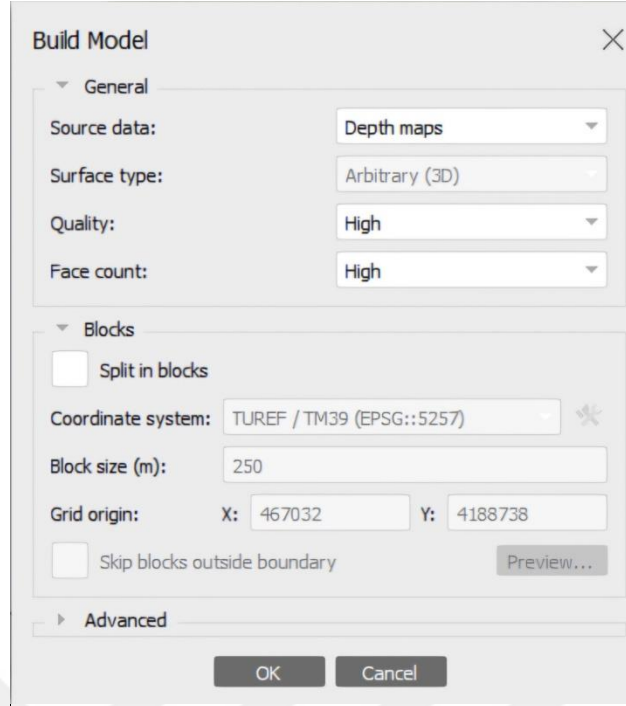
Şekil 7.8. Fotoğrafların hizalanması.

Bu işlem sonucunda, yazılım otomatik olarak seyrek nokta bulutu (sparse point cloud) üretir. Bu bulut, yazılımda “Tie Points” olarak adlandırılır ve temel eşleşme noktalarından oluşur. Örneğin, işlem sonunda toplam 255.086 adet eşleşme noktası oluşmuştur. Bu noktalar, görüntüler arasında tespit edilen ortak noktaları temsil eder. Ancak çalışma alanının sınırları dışına taşan görüntü alanları da bu süreçte nokta üretmiş olabilir. Veri yoğunluğunu azaltmak ve dosya boyutunu küçültmek amacıyla, bu gereksiz alanlar “Free from Selection” komutu ile temizlenir.

Ayrıca, “Resize Region” komutu kullanılarak belirlenen modelleme hacmi yeniden ölçeklendirilir. Bu işlem, hatalı yükseklik (Z değeri) barındıran noktaların sınır dışı edilmesine olanak sağlar ve modelin merkezinde kalan verilerin daha homojen ve anlamlı bir dağılım göstermesini mümkün kılar. Bu adım, özellikle sonradan üretilen 3B modellerin kalitesi açısından önemlidir.

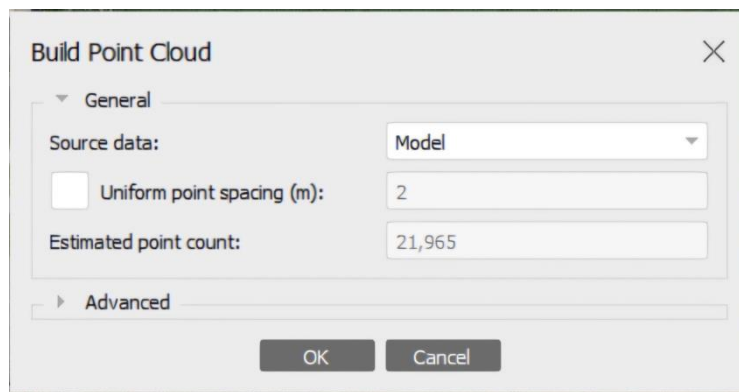
Seyrek nokta bulutunun oluşturulmasının ardından, kamera parametrelerinin optimize edilmesi gerekir. Bunun için “Tools > Optimize Cameras” komutu çalıştırılır. Bu pencerede optimize edilecek iç parametreler (odak uzaklığı, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2) ile dış parametreler seçilir (Şekil 7.9). Tüm parametrelerin seçilmemesinin nedeni, bazı bileşenlerin gereksiz değişikliklere sebep olarak genel modeli bozabilmesidir. RTK destekli konum verileri bulunduğu için bu

[illegible]



Şekil 7.10. Mesh model aşaması.

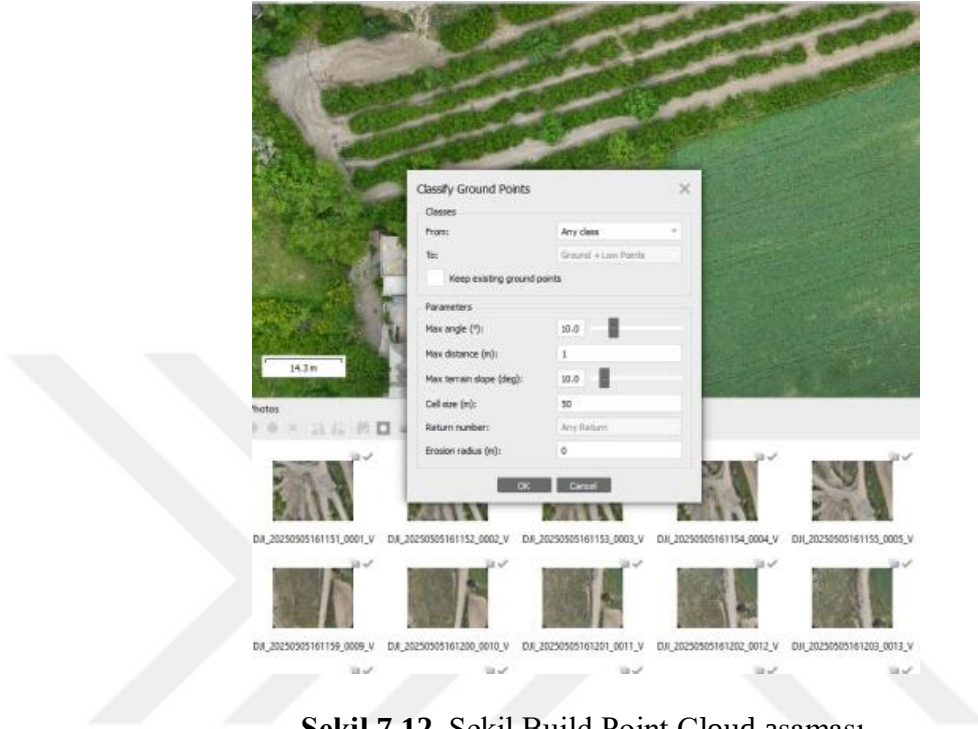
Bazı Metashape sürümlerinde, yoğun nokta bulutu oluşturma işlemi “Build Dense Cloud” olarak yer alırken, bazılarında bu işlem “Build Point Cloud” olarak geçmektedir (Şekil 7.11). Teknik olarak bu işlem, hizalanan fotoğraflardan çok sayıda ve yoğun (milyonlarca) 3B noktanın hesaplanarak her bir noktaya renk bilgisi atanmasıyla gerçekleştirilir. Bu veri, daha sonra ortofoto üretimi, sayısal yüzey modeli çıkarımı ve hacim hesapları için kullanılabilir.



Şekil 7.11. Build Point Cloud aşaması.

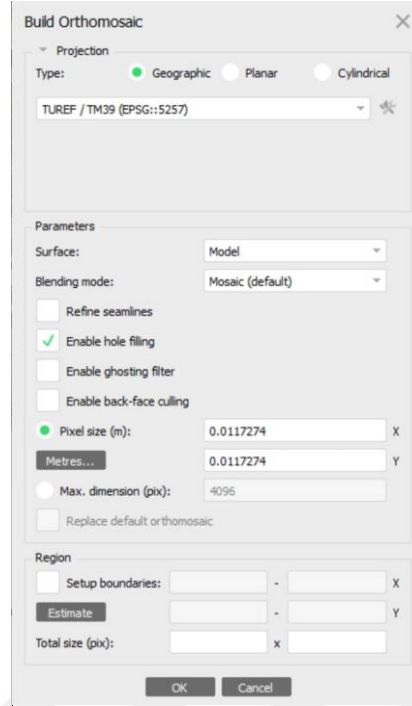
Yoğun nokta bulutu üretildikten sonra, nokta sınıflandırma işlemi yapılır. Bu işlem, modelde yer alan ağaç, bina ve diğer üstyapı öğelerinden yalnızca arazi (zemin) yüzeyinin ayrıştırılmasını sağlar. Bunun için nokta bulutu üzerinde sağ tıklanarak

“Process > Classify Ground Points” komutu seçilir (Şekil 7.12). Açılan pencerede “Ground” sınıfı işaretlenir. Açık, mesafe ve eğim gibi sınıflandırma kriterleri sahaya özgü olarak girilir. Bu işlem, özellikle DTM üretimi gibi analizler için kritik öneme sahiptir.



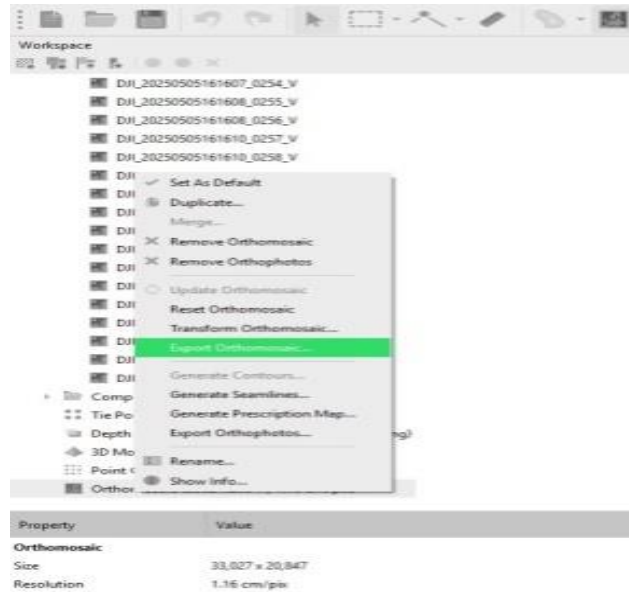
Şekil 7.12. Şekil Build Point Cloud aşaması.

Sınıflandırılmış model üzerinden ortofoto üretimine geçilir. “Workflow > Build Orthomosaic” komutu ile başlayan bu işlem, oluşturulan 3B yüzey modeli üzerine hizalanan fotoğrafların doğru bir şekilde projeksiyonu ile gerçekleştirilir. Blending Mode olarak “Mosaic” seçilir, bu sayede fotoğraflar arası geçişler daha doğal hale getirilir. Veri boşluklarının doldurulması için “Fill Holes” özelliği aktif hale getirilir. Koordinat sistemi olarak TUREF / TM Zone 39 (EPSG:5257) seçilerek model ülke sistemine uyarlanır (Şekil 7.13).



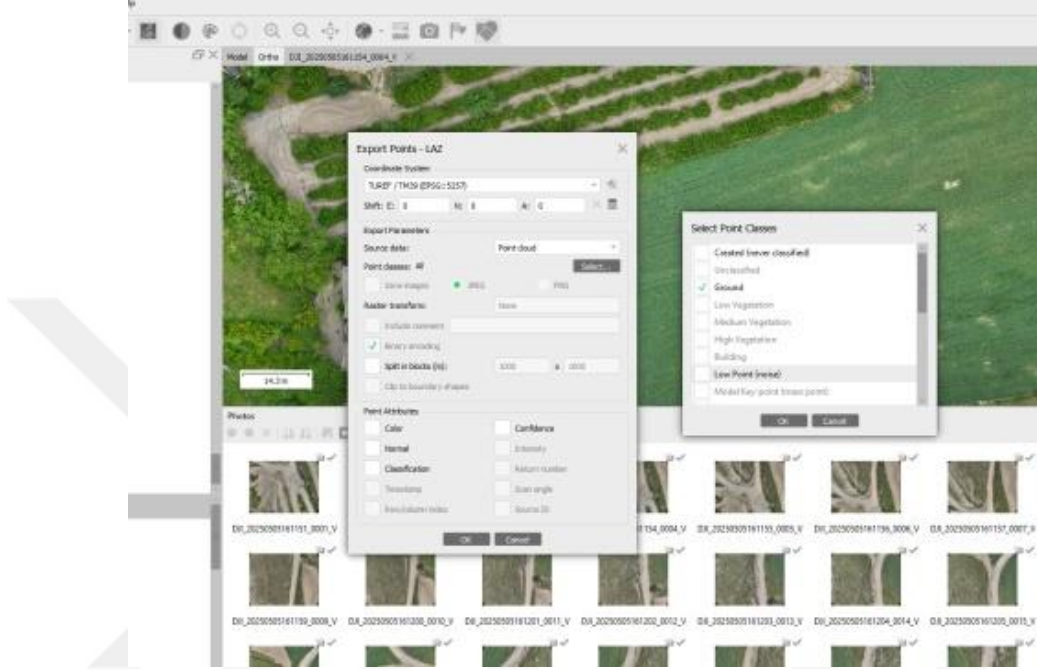
Şekil 7.13. Ortofoto oluşturma.

Ortofoto üretiminin ardından elde edilen raster görüntü, TIFF formatında dışa aktarılır. Bu işlem için ortofoto sekmesinde sağ tıklanarak “Export Orthomosaic” komutu seçilir(Şekil 7.14). Çıktı ayarlarında çözünürlük (pixel size) korunur ve format olarak GeoTIFF belirlenir. GeoTIFF formatı, görüntüye koordinat bilgisi entegre edebildiği için harita tabanlı sistemlerde kullanılabilir.



Şekil 7.14. Ortofotoyu dışa aktarma.

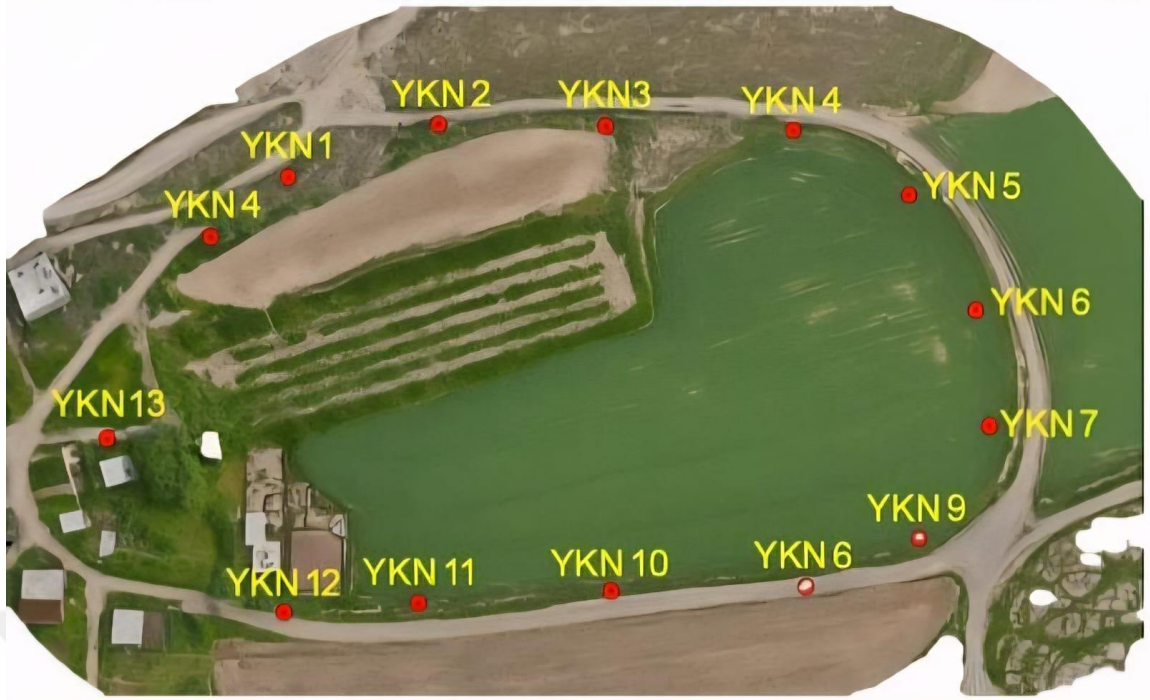
Son adımda, sınıflandırılmış nokta bulutu dışa aktarılır. Bunun için nokta bulutu üzerinde sağ tıklanarak “Export Point Cloud” komutu seçilir. Çıktı formatı olarak sıkıştırılmış veri türü olan .LAZ seçilir. Ayrıca yalnızca “Ground” sınıfı işaretlenerek üstyapıdan arındırılmış zemin verisi elde edilir (Şekil 7.15). Bu veri, özellikle topoğrafik analizlerde ve sayısal arazi modeli üretiminde doğrudan kullanılabilir.



Şekil 7.15. Nokta bulutunu dışa aktarma.

Tüm bu adımlar, İHA tabanlı fotogrametrik çalışmalarda ortofoto üretimi sürecinin temelini oluşturur. Her bir aşamanın dikkatli, düzenli ve teknik gerekliliklere uygun şekilde yürütülmesi, sonuç ürünün doğruluğu ve kullanılabilirliği açısından son derece önemlidir.

Bu kapsamda, İHA tabanlı fotogrametrik ölçümler DJI Mavic 3 Enterprise platformu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uçuş irtifası 50 metre olarak belirlenmiş ve bu irtifada yapılan çekimlerle yaklaşık 1.0–1.5 cm/piksel aralığında yer örnekleme mesafesi (GSD) elde edilmiştir. YKN’ler üzerine yapılan görüntüleme ile üç ayrı tarihte fotogrametrik model üretimi gerçekleştirilmiş ve her ölçüm döneminde aynı yöntemle ortofoto ile sayısal yüzey modeli oluşturulmuştur. Şekil 7.16’da ortofoto görüntü üzerinde YKN’lerin dağılımı görülmektedir.



Şekil 7.16. Ortofoto görüntüsü üzerinde YKN dağılımı.

İlk İHA ölçümü 12 Mart 2025 tarihinde gerçekleştirilmiştir. DJI Pilot 2 yazılımı kullanılarak tanımlanan uçuş planı doğrultusunda sahada uçuş gerçekleştirilmiş ve %75 bindirme oranıyla alınan görüntüler, Agisoft Metashape yazılımında işlenmiştir. Yapılan modelleme sonucunda YKN noktalarına ait koordinatlar elde edilmiş ve bu veriler Çizelge 7.9’de verilmiştir. Bu ölçüm, analiz sürecinin başlangıç noktasını temsil etmektedir.

Çizelge 7.9. İHA ile ilk ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.407	4189010.898	604.037
YKN2	467293.040	4189023.767	602.272
YKN3	467338.811	4189022.356	594.820
YKN4	467383.997	4189019.850	585.675
YKN5	467419.856	4189000.219	578.785
YKN6	467437.992	4188966.836	577.092
YKN7	467445.682	4188928.213	576.694
YKN8	467417.173	4188905.533	578.226
YKN9	467376.650	4188896.702	579.972
YKN10	467336.290	4188892.259	582.060
YKN11	467295.577	4188884.042	584.209
YKN12	467256.377	4188885.245	586.467
YKN13	467201.278	4188930.964	591.798
YKN14	467230.683	4188992.928	602.016

İkinci İHA ölçümü, 12 Nisan 2025 tarihinde aynı uçuş parametreleri ve aynı cihaz kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümde de 50 metre irtifada aynı görev planı takip edilmiştir. Görüntüler aynı yazılımla işlenmiş, ortofoto ve sayısal yüzey modelleri oluşturulmuştur. İşlenen verilerden elde edilen YKN koordinatları, ilk ölçümle karşılaştırılmak üzere çıkarılmış ve Çizelge 7.10'da sunulmuştur.

Çizelge 7.10. İHA ikinci ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.398	4189010.891	604.042
YKN2	467293.029	4189023.765	602.249
YKN3	467338.799	4189022.354	594.835
YKN4	467384.006	4189019.871	585.662
YKN5	467419.858	4189000.212	578.764
YKN6	467437.986	4188966.852	577.096
YKN7	467445.676	4188928.231	576.701
YKN8	467417.172	4188905.524	578.211
YKN9	467376.655	4188896.714	579.957
YKN10	467336.277	4188892.257	582.064
YKN11	467295.564	4188884.030	584.230
YKN12	467256.381	4188885.227	586.452
YKN13	467201.277	4188930.981	591.792
YKN14	467230.699	4188992.923	602.026

Üçüncü ve son İHA ölçümü, 12 Mayıs 2025 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Yine aynı irtifa ve bindirme oranları korunarak uçuş yapılmış ve benzer veri işleme adımları uygulanmıştır. Üçüncü ölçümden elde edilen fotogrametrik koordinatlar Çizelge 7.11'de verilmiştir.

Çizelge 7.11. İHA üçüncü ölçüm verileri.

NOKTA NO	Y (m)	X (m)	Z (m)
YKN1	467256.408	4189010.885	604.025
YKN2	467293.041	4189023.754	602.261
YKN3	467338.804	4189022.367	594.838
YKN4	467383.989	4189019.865	585.653
YKN5	467419.870	4189000.214	578.770
YKN6	467437.996	4188966.851	577.081
YKN7	467445.664	4188928.219	576.713
YKN8	467417.170	4188905.537	578.220
YKN9	467376.646	4188896.718	579.963
YKN10	467336.278	4188892.263	582.077
YKN11	467295.561	4188884.042	584.223
YKN12	467256.392	4188885.235	586.454
YKN13	467201.26	4188930.964	591.804
YKN14	467230.693	4188992.937	602.021

Böylece her biri yaklaşık bir ay arayla alınmış üç farklı İHA verisi ile kayıklık analizi yapılması hedeflenmiştir. Ancak yapılan bu üç ölçümün karşılaştırmalı analizinde, GNSS ölçümlerinden elde edilen 2–3 mm düzeyindeki kuzeybatı yönlü yer değiştirmelerin, fotogrametrik verilerle tespit edilmediği görülmüştür. Bunun temel nedeni, 50 metre irtifada elde edilen görüntülerin GSD değerinin 0.9–1.5 cm/piksel aralığında olması ve bu çözünürlüğün altındaki yer değişimlerinin modelleme sürecinde belirsiz kalmasıdır. Teorik olarak, bir kayıklığın güvenilir şekilde modellenebilmesi için GSD değerinden daha büyük bir yer değiştirme meydana gelmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, 1 cm'nin altındaki kaymalar, kullanılan görüntü çözünürlüğü nedeniyle ayırt edilememiştir. Üç ölçümün analizi Çizelge 7.12'de verilmiştir.

Çizelge 7.12. İHA ölçümlerinin karşılaştırılması.

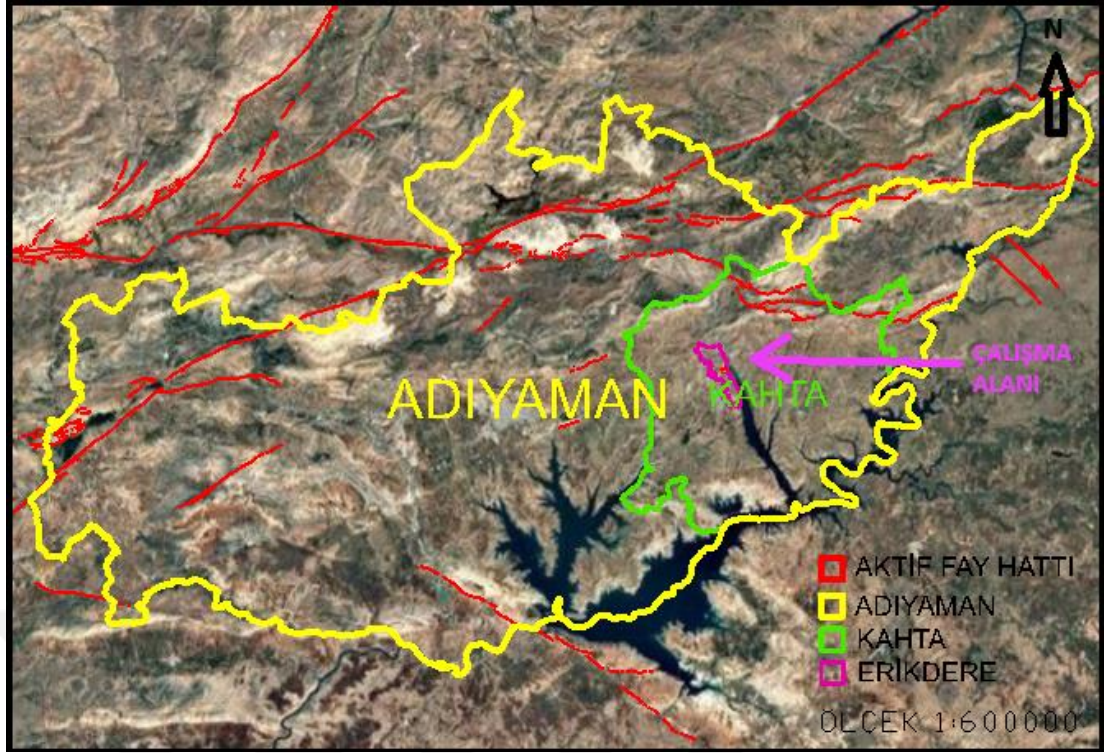
NOKTA NO	$\Delta Y1-$ $\Delta Y2$ (mm)	$\Delta X1-$ $\Delta X2$ (mm)	$\Delta Z1-$ $\Delta Z2$ (mm)	$\Delta Y2-$ $\Delta Y3$ (mm)	$\Delta X2-$ $\Delta X3$ (mm)	$\Delta Z2-$ $\Delta Z3$ (mm)	$\Delta Y1-$ $\Delta Y3$ (mm)	$\Delta X1-$ $\Delta X3$ (mm)	$\Delta Z1-$ $\Delta Z3$ (mm)	YÖN1-2	YÖN2-3	YÖN1-3
YKN1	9	7	-5	-10	6	17	-1	13	12	Kuzeybatı	Kuzeydoğu	Güneydoğu
YKN2	11	2	23	-12	11	-12	-1	13	11	Kuzeybatı	Kuzeydoğu	Güneydoğu
YKN3	12	2	-15	-5	-13	-3	7	-11	-18	Kuzeybatı	Güneydoğu	Kuzeybatı
YKN4	-9	-21	13	17	6	9	8	-15	22	Güneydoğu	Kuzeybatı	Kuzeybatı
YKN5	-2	7	21	-12	-2	-6	-14	5	15	Kuzeydoğu	Güneydoğu	Güneydoğu
YKN6	6	-16	-4	-10	1	15	-4	-15	11	Güneybatı	Kuzeybatı	Kuzeydoğu
YKN7	6	-18	-7	12	12	-12	18	-6	-19	Kuzeybatı	Güneybatı	Kuzeybatı
YKN8	1	9	15	2	-13	-9	3	-4	6	Güneybatı	Kuzeybatı	Kuzeybatı
YKN9	-5	-12	15	9	-4	-6	4	-16	9	Kuzeydoğu	Kuzeybatı	Kuzeybatı
YKN10	13	2	-4	-1	-6	-13	12	-4	-17	Güneybatı	Kuzeydoğu	Kuzeybatı
YKN11	13	12	-21	3	-12	7	16	0	-14	Güneybatı	Kuzeybatı	Batı
YKN12	-4	18	15	-11	-8	-2	-15	10	13	Güneydoğu	Kuzeydoğu	Güneydoğu
YKN13	1	-17	6	17	17	-12	18	0	-6	Kuzeybatı	Güneybatı	Batı
YKN14	-16	5	-10	6	-14	5	-10	-9	-5	Güneydoğu	Kuzeybatı	Kuzeydoğu

Daha düşük irtifadan (örneğin 20–30 metre) yapılacak uçuşlarla GSD değeri 1 cm'nin altına indirilebilir ve milimetrik kayıklıkların tespit edilebilme olasılığı artırılabilir. Ancak düşük irtifa uçuşları veri miktarını önemli ölçüde artırmakta, bu da işlem süresini uzatmakta ve daha güçlü bilgisayarlara olan ihtiyacı doğurmaktadır. Bu çalışmada kullanılan bilgisayar donanımının kısıtlı işlem gücü nedeniyle daha düşük irtifalı model üretimi tercih edilmemiş ve irtifa 50 metre olarak sabit tutulmuştur.

Sonuç olarak, üç farklı tarihte alınan İHA görüntüleriyle oluşturulan fotogrametrik veriler karşılaştırılmış; ancak çözünürlük sınırları nedeniyle GNSS ile tespit edilen 2–3 mm düzeyindeki kayıklıklar İHA verileriyle tespit edilememiştir.

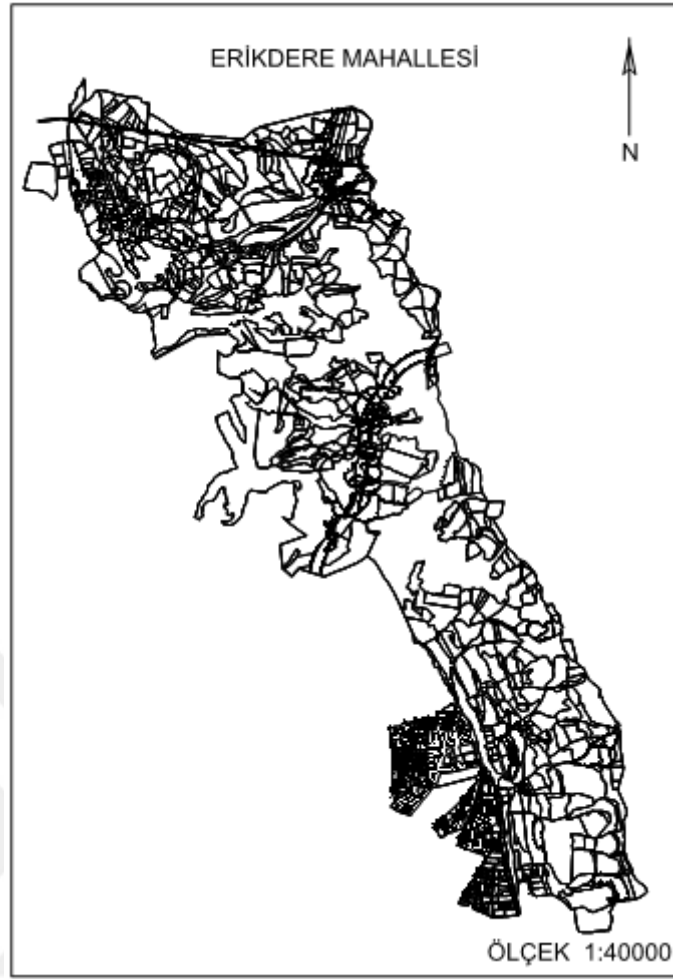
7.6 Çalışma Alanı Kayıklık Boyutu

Deprem öncesi ve sonrası kayıklığın boyutunu ortaya koymak amacıyla Adıyaman Kadastro Müdürlüğü'nden aktif fay hatları, deprem öncesi(Şekil 7.17) ve deprem sonrası orijinal kadastro verileri temin edilmiştir.Şekil 7.17'de görüldüğü gibi çalışma alanı, kuzeydoğusundaki aktif fay hattına uzaklığı yaklaşık 10,5 km iken kuzeybatısındaki Çelikhan ve Gölbaşı ilçelerinden geçen Doğu Anadolu Fay Hattına uzaklığı ortalama 28,5 km'dir.



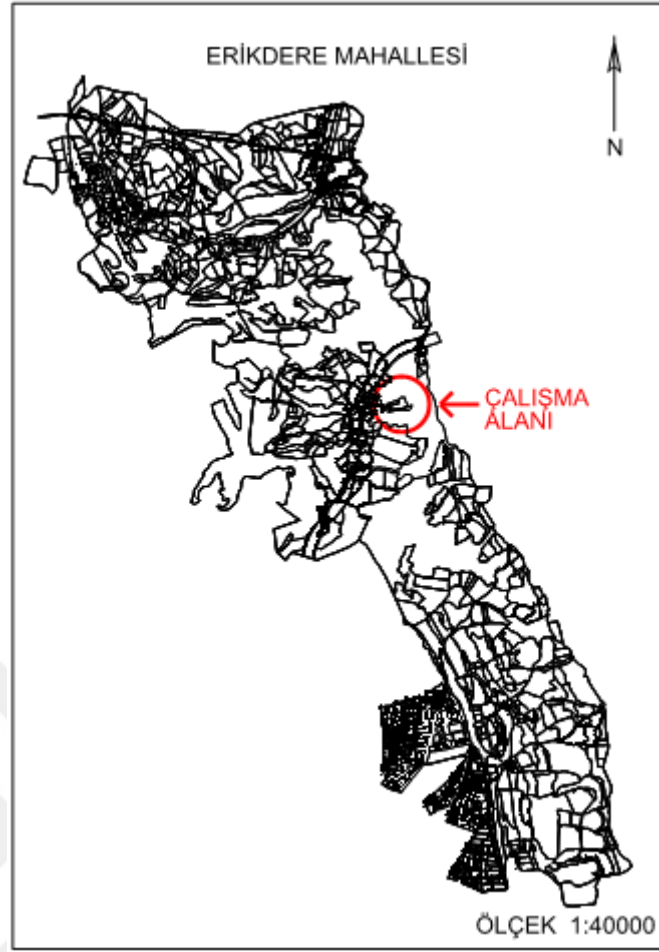
Şekil 7.17. Adiyaman üzerinde bulunan aktif fay hatları.

Deprem sonrasına ilişkin ölçümler GNSS yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilerden kayıklık parametreleri üretilmiştir (Adiyaman Kadastro Müdürlüğü, 2025). Bu parametreler, Netcad yazılımında işlenmiş ve mevcut kadastro altlığına affın dönüşümü uygulanmıştır. Affın dönüşümü; öteleme, dönme, ölçekleme ve kaydırma parametrelerini içeren doğrusal bir model olup, ölçüm verilerinin kadastro koordinat sistemine uyarlanmasını sağlamaktadır.



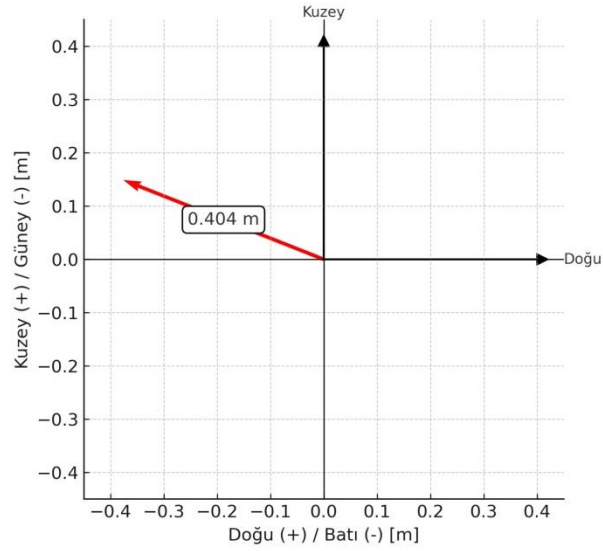
Şekil 7.18. Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi orijinal kadastrosu.

Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi kadastrosu üzerinde çalışma alanı Şekil 7.19’da gösterilmiştir.



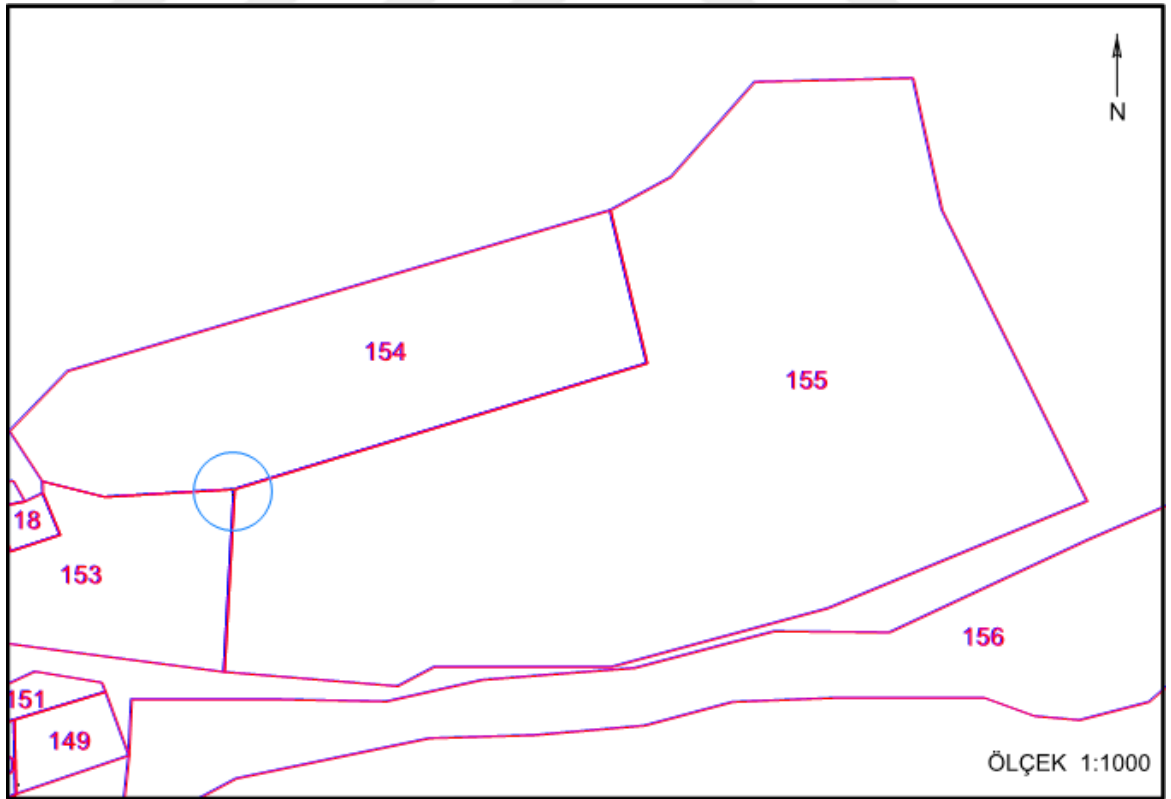
Şekil 7.19. Erikdere Mahallesi Kadastro su üzerinde çalışma alanının gösterilmesi.

Yapılan dönüşüm sonrası oluşturulan yeni altlık, deprem öncesine ait orijinal kadastro verileriyle karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda, DX yönünde kuzeye doğru 0,149 m ve DY yönünde batıya doğru 0,376 m olmak üzere toplamda 0,404 m büyüklüğünde kuzeybatı yönlü bir kayıklık meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 7.18’de bu yer değiştirmenin koordinat sistemi üzerinde vektör olarak gösterimi sunulmuştur.



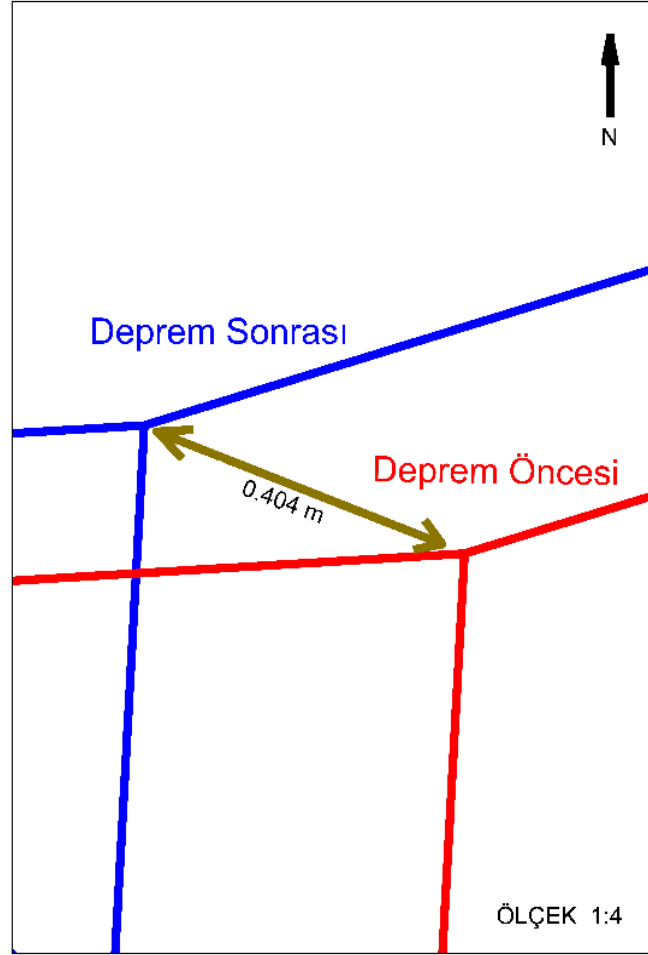
Şekil 7.20. Çalışma alanında deprem sonrası kayıklık boyutunun vektörel gösterimi.

Ayrıca, deprem öncesi ve sonrası kadastro verilerinin aynı parsel üzerinde çakıştırılmasıyla(Şekil 7.19) ve muhtelif parseller ile çakıştırılmasıyla(Şekil 7.20) elde edilen görselleştirme, kayıklığın mekânsal etkilerini doğrudan gözlemlene imkânı sağlamaktadır.



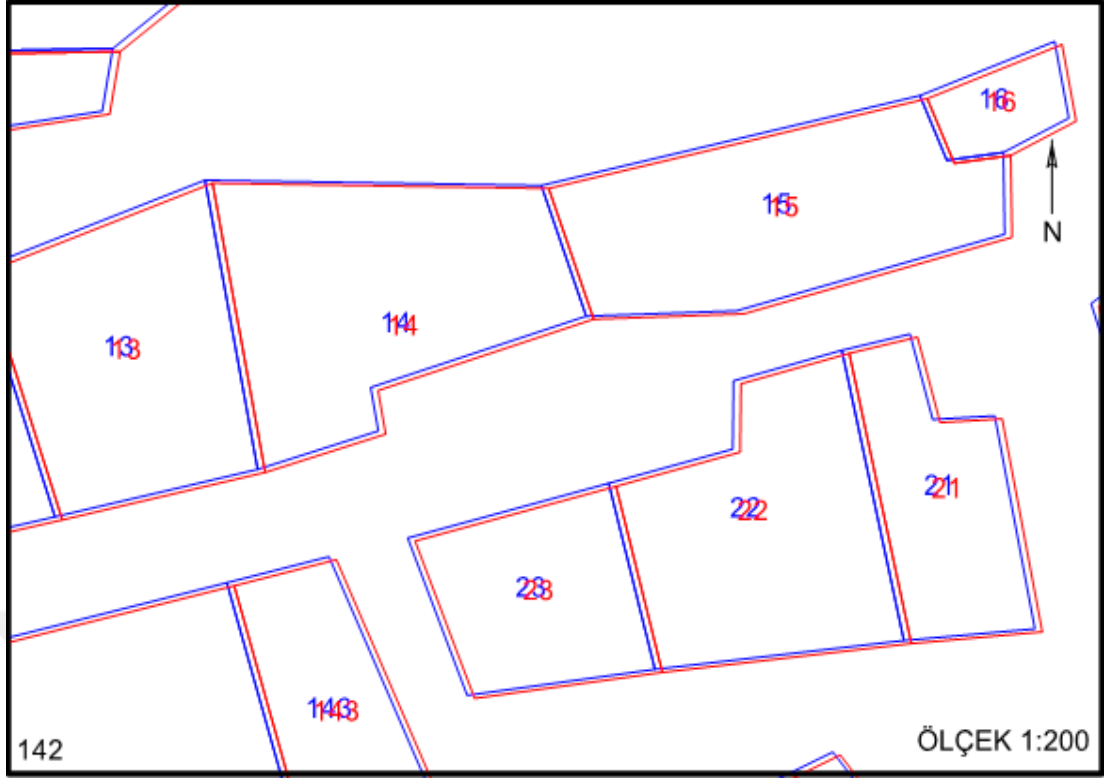
Şekil 7.21. 155 numaralı parselin deprem öncesi ve deprem sonrası kayıklığını gösteren kadastro verisi.

Şekil 7.21’de 155 numaralı parselin deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro parseli verilmiştir. Kayıklığı daha net görebilmek amacıyla Şekil 7.21’de daire içerisinde gösterilen 155 numaralı parsel için kuzeybatı köşe noktası Şekil 7.22’de görülmektedir.



Şekil 7.22. 155 numaralı parselin kuzeybatı köşesine ait deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.

Şekil 7.23’de ise Erikdere Mahallesi köyünde bulunan muhtelif parsellerin deprem öncesi ve deprem sonrası kayıklığı gözle görülebilecek düzeydedir.



Şekil 7.23. Muhtelif parsellere ait deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.

Şekil 7.24’de yine Erikdere Mahallesi köyiçi mevkiinde bulunan 16 numaralı parselde ait deprem öncesi ve deprem sonrası kadastro verisi görülmektedir. Kırmızı renkte görünen parsel sınırı deprem öncesine ait veri, mavi renkte görünen parsel sınırı ise deprem sonrasına ait veridir.



Şekil 7.24. Erikdere Mahallesi 16 numaralı parselin deprem öncesi ve deprem sonrasına ait kadastro verisi.

Bu analizlere ek olarak, kayıklık çalışmalarının gerçekleştirildiği Erikdere Mahallesi 155 numaralı parselde yaklaşık 0,40 m büyüklüğünde yer değiştirme meydana geldiği belirlenmiştir. Çalışma alanında kaydedilen 0,40 cm’lik kayıklıkda dönüşümden gelen 7 cm’lik bir hata vardır. Bununla birlikte GNSS ağlarındaki hata kaynakları da göz önünde bulundurulduğunda dönüşümden gelen bozulmalar ve gnss ağlarıyla ölçüm yapıldığı esnadaki hata miktarları da bu kayıklığa dahildir.

Erikdere Mahallesi’nin batı kesimlerinde 0,38 m, doğu kesimlerinde ise 0,44 m’lere varan yer değiştirmeler tespit edilmiştir. Doğu kısmındaki kayıklık ortalama 0,39 m, batı kısmında ise 0,42 m civarında gerçekleşmiştir. Bu dağılım, 6 Şubat 2023 tarihinde yaşanan Pazarcık ve Elbistan depremlerinin merkez üssüne yaklaştıkça kayıklık boyutunun arttığını açıkça göstermektedir. Nitekim, merkez üssüne daha yakın olan Gölbaşı ve Çelikhan ilçelerinde 2 metreyi aşan kayıklıkların meydana geldiği, ayrıca şiddetin en fazla hissedildiği Hatay ilinde de 2 metreyi geçen yer değiştirmelerin raporlandığı bilinmektedir(Adıyaman Kadaströ Müdürlüğü,2025).

Hem kadastro verileri hem de GNSS ölçüleriyle yapılan analizler, bölgedeki kayıklığın hem boyutunu hem de yönünü ortaya koymakta; yer değiştirmelerin mekânsal dağılımı, depremin merkez üssüne olan uzaklığa bağlı olarak artan bir eğilim sergilediğini kanıtlamaktadır.

Söz konusu Adıyaman ili Kahta İlçesi Erikdere Mahallesiindeki çalışma alanı üzerinde aktif fay bulunmadığı ve herhangi bir güncelleme çalışması yapılmamış olup bölgeye ait 06.02.2023 öncesi ortofoto verilerine ulaşılmamıştır.

Depremin genel etkisinin daha iyi şekilde gösterilebilmesi için Hatay ilinde yapılan çalışmalardan elde edilen ortofoto görüntülere de tez kapsamında yer verilmiştir. Ortofoto görüntü üzerinden kayıklık çalışmalarının nasıl yapıldığı, sürecin nasıl yönetildiği ile alakalı depremin etkisinin en çok hissedildiği yerlerden olan Hatay İli Hassa İlçesine ait çalışmalardan bahsedilecektir.

Hatay İli üzerinden 3 aktif ana fay hattı geçmektedir ve 06.02.2023 tarihindeki depremde bu fay hatlarında kırılmalar olmuştur. Fay hattı üzerinde zıt yönlü 3 metreyi bulan yer değiştirmeler olduğu görülmüştür. Yer değiştirmeler her yerde aynı yönlü olmadığı için yani fay hattında sabit bir yönde değil de tabaka hareketleri esnasında açı yaparak bindirmeler gerçekleştiği için kayıklık bir yönde olmamıştır. Fay hattından uzaklaştıkça kayıklık miktarı azalmaktadır.

Örnekleme olarak Hatay İli Hassa İlçesi Dervişpaşa Mahallesi 1431 ada 94 parsel içerisinde aktif fayın geçtiği ve deprem öncesi 3402 sayılı Kadastro Kanununun 22-A Maddesi uygulaması sonucu parselin yeni sınırlarının olduğu ve sınırların oluşturulmasında 02.08.2021 tarihli vektörizasyonu yapılmış ortofotonun kullanıldığı, 06.02.2023 tarihli deprem felaketinden sonra oluşan kayıklıkların tespiti amacıyla 17.10.2023 tarihli vektörizasyonu yapılmış ortofoto görüntü ile parselin deprem sonrası uğradığı kayıklığı göstermek amaçlı kullanılan söz konusu parselin doğu kısmının Arap Levhasında batı kısmının Akdeniz Levhasında kaldığı ve parsel içerisinde aktif fayın geçtiği tespit edilmiş olup görselde oluşan kayıklığın ve parsel sınırındaki kayıklığın (bozulmanın) görülmesi amacıyla Şekil 7.21 de gösterilen Dervişpaşa Mahallesi 1431 ada 94 numaralı parselde 06.02.2023 tarihinden önceki ve sonraki durumu Şekil 7.25 ve Şekil 7.26'da görülmektedir (Hatay Kadastro Müdürlüğü, 2025).



Şekil 7.25. Hatay ili Hassa ilçesine ait deprem öncesi ortofoto.



Şekil 7.26. Hatay ili Hassa ilçesine ait deprem sonrası ortofoto.

Bahsi geçen levha hareketleriyle elde edilen kayıklıklar levhaların dönme noktasından dolayı dönüşüm parametresi ile mümkün olmadığı, aktif fay hattından uzaklaştıkça kayıklıkların farklılık göstermesinden dolayı kayma miktarları ve kayma yönleri bölgesel olarak farklılık gösterdiğinden öncelikle mahalle bazlı olarak kuzey, güney, doğu, batı ve orta noktasından tespitlerin yapıldığı ve tespitlerde mahallenin genel kayıklığının ortak çıkması halinde kayma miktarlarının dy ve dx yönünde tespitinin yapılarak gerekli düzeltmelerin yapıldığı fakat elde edilen değerlerde değişiklik tespit edilmesi halinde nokta sıklaştırması yapılmak suretiyle mahalle bazından ada bazına kadar inilmek suretiyle tespitlerin yapıldığı ve elde edilen verilerle dy , dx yönünde düzeltmeler yapılarak rapor haline getirilmiştir. Hatay ili Hassa İlçesi Çay Mahallesi ait rapor Şekil 7.27’de verilmiştir(Hatay Kadastro Müdürlüğü,2025).

RAPOR

Hatay Kadastro Müdürlüğü yetki alanında bulunan Hatay İlinde 06.02.2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli depremin sonucunda Tesis Kadastro Çalışmaları sonucu elde edilen taşınmazlara ait koordinatların zeminde oluşan deformasyon (etkileşim) sebebiyle oluşan kaymaların mülkiyet üzerinde yaptığı değişimlerin tespiti amacıyla Mahalle bazında yapılan kontrol ölçüleri ile Kadastro değerleri arasındaki farklılığın tespiti amacıyla yapılan çalışma sonucu, elde edilen bilgiler çerçevesinde mahalle bazında gerekli düzeltmeye esas olmak üzere elde edilen değerlere göre düzeltilmesi Müdürlüğümüzce uygun görülmüş olup;

Buna göre;

Hatay İli Hassa İlçesi ÇAY Mahallesi'n de yapılan kontrol ölçüleri sonucu elde edilen değerler ile Kadastro değerleri arasında yapılan değerlendirme sonucu ,deprem nedeniyle oluşan deformasyonun sistematik olmadığının tespiti sonucu yapılacak düzeltmenin ada bazlı olarak ele alınması gerektiğinden dolayı;

- 1- 1130,1131,1135,1146,1147,1148,1149,1150,1151,1152,1153 nolu adalarda yapılan hesaplamalar sonucu $Dy=-0,74$ m., $Dx=-2,23$ m. olmak üzere toplamda 2,348 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 2- 1155 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,47$ m., $Dx= -1,06$ m. olmak üzere toplamda 1,161 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 3- 1154 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= 0,10$ m., $Dx= -1,10$ m. olmak üzere toplamda 1,108 m Güney-Doğu yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 4- 1156 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,37$ m., $Dx= -1,23$ m. olmak üzere toplamda 1,283 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 5- 1157 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,55$ m., $Dx= -0,76$ m. olmak üzere toplamda 0,938 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 6- 1158 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy=-0,41$ m., $Dx= -1,35$ m. olmak üzere toplamda 1,409 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 7- 1160 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,28$ m., $Dx= -0,77$ m. olmak üzere toplamda 0,822 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 8- 1159 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,41$ m., $Dx= -1,35$ m. olmak üzere toplamda 1,409 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 9- 1162 nolu adanın yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,43$ m., $Dx= -1,22$ m. olmak üzere toplamda 1,296 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı,
- 10-1163 ve 1164 nolu adalarda yapılan hesaplamalar sonucu $Dy= -0,42$ m., $Dx= -1,32$ m. olmak üzere toplamda 1,388 m Güney-Batı yönünde kayma tespitinin yapıldığı.

Şekil 7.27. Kayıklık Raporu Örneği(Hatay Kadastro Müdürlüğü,2025).

Sonuç olarak Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi'nde yapılan analizler, deprem sonrası yaklaşık 0,40 m büyüklüğünde kuzeybatı yönlü kayıklık meydana

geldiğini ortaya koymuştur. Hatay ili Hassa ilçesinde elde edilen ortofoto karşılaştırmalarıyla birlikte değerlendirildiğinde, kayıklığın boyutu ve yönü, fay hatlarına yakınlık ve levha hareketlerinin etkisiyle mekânsal farklılıklar gösterdiğini açıkça kanıtlamaktadır.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Adıyaman ili Kahta ilçesi Erikdere Mahallesi'nde, deprem sonrası yüzey kayıklıklarının belirlenmesine yönelik olarak GNSS, Total Station ve İHA fotogrametri yöntemleri kullanılarak üç farklı periyotta ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir yöntemin ölçüm doğruluğu, uygulama koşulları ve kullanım avantajları dikkate alınarak sahaya özgü değerlendirmeler yapılmıştır.

GNSS ölçümleri, RTK yöntemiyle üç ayrı tarihte tekrarlanmış ve elde edilen veriler Netcad yazılımında işlenerek kayıklık analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda, çalışma alanında kuzeybatı yönlü, ortalama 2–3 mm düzeyinde bir yer değişimi olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, Doğu Anadolu Fay Zonu üzerindeki tektonik hareketlerle uyumlu bir kayıklık eğilimini ortaya koymaktadır.

Total Station verileri, yüksek doğrulukla noktasal konum belirlenmesini sağlamış ancak belirli noktalarda oluşan milimetrik yer değiştirmelerin bazı bölgelerde istatistiksel hata sınırları içerisinde kalması nedeniyle, yer yer anlamlı kayıklıklar tespit edilememiştir. Bu bulgular, çalışma sahasında Total Station ölçümleri kapsamında bölgesel ölçekte anlamlı bir kayıklık oluşmadığını göstermektedir. Ayrıca ölçümlerde, cihaz kurulum hataları, hedef prizma merkezleme hataları, atmosferik kırılma etkileri, ölçüm esnasında sıcaklık ve basınç değişimlerinden kaynaklanan sinyal kırılmaları ile alet kalibrasyon eksiklikleri gibi hata kaynaklarının da sonuçlar üzerinde etkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, Total Station yöntemi, yapı çevresi gibi dar alanlarda detaylı gözlem yapma avantajı sunmuş ve GNSS ölçümlerini yerel ölçekte desteklemiştir.

İHA ile gerçekleştirilen üç ayrı ölçüm, DJI Mavic 3 Enterprise ölçüm cihazı kullanılarak 50 metre irtifada gerçekleştirilmiş ve elde edilen görüntüler Agisoft Metashape yazılımında işlenmiştir. Bu uçuşlarda üretilen ortofotoların GSD (Ground Sampling Distance) değeri yaklaşık 1.25 cm/piksel olarak belirlenmiş olup, bu çözünürlük seviyesi milimetrik düzeydeki yer değişimlerini ayırt etme açısından yetersiz kalmıştır. Bu nedenle, GNSS ile tespit edilen 2–3 mm düzeyindeki kayıklık, fotogrametrik verilerle doğrulanamamıştır. Bundan dolayı İHA ile istenilen hassas sonuca varılamamıştır. GSD'nin bu düzeyde kalması, özellikle küçük genlikli yüzey hareketlerinin saptanmasında fotogrametrik yöntemin sınırlayıcı bir faktörü olduğunu

göstermektedir. Bu bulgu, hassas kayıklık analizlerinde GSD değerinin 1 cm'nin altına düşürülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ancak daha düşük irtifalarda uçuş yapılması veri çözünürlüğünü artırırken, aynı zamanda görüntü sayısının ve veri boyutunun artmasına yol açmakta; bu da daha yüksek işlem gücüne sahip bilgisayar sistemleri gerektirmektedir. Sonuç olarak, fotogrametrik ölçüm hassasiyeti ile donanımsal kapasite ve saha koşulları arasında dikkatli bir denge kurulması gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen GNSS ölçümleri sonucunda, çalışma sahasında kuzeybatı yönlü ortalama 2–3 mm düzeyinde bir yüzey kayması tespit edilmiştir. Bu sonuç, Doğu Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan bölgedeki tektonik aktivitenin sürekliliğini ortaya koymakta ve düşük genlikli kayıklıkların hassas konumlandırma yöntemleriyle belirlenebileceğini göstermektedir. Total Station ile elde edilen veriler ise yüksek doğrulukla noktasal konum belirlenmesini mümkün kılmış, ancak kayıklığın genliği oldukça düşük olduğundan bazı bölgelerde bu değişimler istatistiksel hata sınırları içerisinde kalmış ve net biçimde gözlemlenememiştir. İHA ile 50 metre irtifada gerçekleştirilen uçuşlardan elde edilen fotogrametrik veriler ise, GSD (Ground Sampling Distance) değerinin 1.0–1,5 cm/piksel aralığında olması nedeniyle GNSS ile tespit edilen milimetrik düzeydeki yer değişimlerini gösterememiştir. Bu durum, fotogrametrik yöntemlerle yapılan kayıklık analizlerinde çözünürlük sınırının kritik bir etken olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışma alanında deprem öncesi ve sonrası Adıyaman Kadastro Müdürlüğü tarafından yapılan kayıklık çalışmalarındaki kadastro altlıkları karşılaştırıldığında, ölçümlerin gerçekleştirildiği 155 numaralı parselde yaklaşık 0,404 m büyüklüğünde kuzeybatı yönlü bir yer değiştirme meydana geldiği belirlenmiştir.

Adıyaman üzerinde gerçekleştirilen yeryüzü kayıklığı çalışmalarında, afin dönüşüm yöntemi kullanılmış olup bu süreçte parsel geometrilerinde bozulmalar meydana gelmiştir. Söz konusu kaymaların sistematik bir karakter taşıması, parsel alanlarında farklılıklara yol açmakta ve bu durum tapu alanı ile hesaplanan alan arasında uyumsuzlukların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Böylelikle mülkiyet hakkının korunması açısından hukuki ve teknik açıdan sorunlar oluşmaktadır. Bu tür hataların giderilebilmesi için, 22/A yenileme çalışmaları veya parsel bazında sınırsal

bozulmaların düzeltilmesine olanak tanıyan 41. madde uygulamaları ile tapu alanı ve hesap alanı arasındaki farklılıkların giderilmesi gerekmektedir. Ancak bu işlemler zaman ve maliyet açısından kayıplara yol açabilmektedir. Bu nedenle, dönüşüm parametrelerinin noktasal bazda uygulanması yerine, mahalle veya ada ölçeğinde dx ve dy yönlü kaydırmaların yapılması, daha bütüncül ve sağlıklı sonuçların elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

Çalışmada kullanılan ölçüm yöntemleri ve elde edilen sonuçlar, ülkemizde yürürlükte bulunan ilgili teknik mevzuat ve standartlarla uyumludur. Özellikle, fotogrametri ve yersel ölçme tekniklerinin uygulanmasında Harita Genel Müdürlüğü'nün Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliği (HGK, 2005; 2011) hükümleri esas alınmış; GNSS ve Total Station verilerinin değerlendirilmesinde ise Büyük Ölçekli Haritaların Yapımında Uyulacak Esaslar ve Kontrol Yöntemleri(HGK, 2005; 2011) dikkate alınmıştır. BÖHHBÜY'ye göre fotogrametrik üretimde kontrol noktalarında kabul edilen konum doğruluğu ± 7 cm, yükseklik doğruluğu ± 7 cm ve koordinat farkları (dx, dy, dH) ± 10 cm'yi geçmemelidir. Bu çalışmada GNSS ölçümleriyle tespit edilen 2–3 mm düzeyindeki yer değiştirmeler, mevzuatın tanımladığı tolerans değerlerinin çok altında kalmış; İHA ile yapılan ölçümlerde ise GSD değeri yaklaşık 1,25 cm/piksel olarak belirlenmiş olup, bu değer BÖHHBÜY'de öngörülen ± 10 cm koordinat doğruluğu sınırının oldukça altında kalmasına rağmen milimetrik kayıklıkların tespiti için yetersiz olmuştur. Ayrıca, İHA ile yapılan fotogrametrik çalışmalarda Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İHA Talimatı (SHT-İHA) ve ilgili uçuş güvenliği kuralları gözetilmiştir(SHGM, 2016). Bu çerçevede, veri toplama ve veri işleme süreçlerinin tamamında mevzuata uygun hareket edilmiş, elde edilen sonuçların hem yasal geçerliliği hem de teknik güvenilirliği sağlanmıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, fotogrametri tabanlı kayıklık analizlerinin milimetrik düzeyde hassasiyet gerektirdiği durumlarda, uçuş irtifasının düşürülerek GSD değerinin 1 cm'nin altına indirilmesi önerilmektedir. Ancak bu yaklaşım, elde edilecek görüntü veri setinin hacmini artıracığından, daha güçlü işlemcili bilgisayar sistemlerine ihtiyaç duyulacaktır. Aksi takdirde, veri işleme süresi uzayabilir ve analiz performansı düşebilir. Bu nedenle, saha koşulları ve donanım olanakları göz önünde bulundurularak ölçüm parametreleri belirlenmelidir. Ayrıca, GNSS, Total

Station ve İHA gibi farklı ölçüm tekniklerinin entegre biçimde kullanılması; kayıklıkların hem geniş alanlarda hem de noktasal düzeyde izlenebilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemlerin birbirini tamamlayacak şekilde bir arada değerlendirilmesi, daha güvenilir ve kapsamlı sonuçlar elde edilmesine katkı sunacaktır. Ayrıca bu çalışmadaki yapılan deformasyon ölçümleri kısa zaman aralıklarında tekrarlandığı için yapılan uzun soluklu kayıklık ölçümlerinde daha hassas ve sağlıklı sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. Çalışma bulguları, bölgenin deprem riski açısından aktif bir tektonik yapıya sahip olduğunu göstermekte olup, bu nedenle benzer kayıklık izleme çalışmalarının periyodik olarak sürdürülmesi önerilmektedir. Bu tür izleme faaliyetleri, hem afet öncesi risk analizlerinin güçlendirilmesi hem de afet sonrası yeniden yapılandırma süreçlerinin bilimsel temellere dayanması açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKÇA

Adıyaman Kadastro Müdürlüğü, 2025. URL Adres: <https://www.tkgm.gov.tr/sanliurfa-bm/adiyaman-kadastro-mudurlugu> Erişim Tarihi: 25.09.2025.

Agisoft LLC, 2020. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6.

Agisoft LLC. 2023. Agisoft Metashape Professional User Manual, Version 2.0.

Aktuğ, B., Nocquet, J.-M., Cingöz, A., Parsons, B., Erkan, Y., England, P., Lenk, O., Gürdal, M. A., Kılıçoğlu, A., Akdeniz, H., ve Tekgül, A. 2009. Deformation of western Turkey from a combination of permanent and campaign GPS data: Limits to block-like behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114, B10, B10404.

Blewitt, G., Hammond, W. C., ve Kreemer, C., 2009. Geodetic observation of contemporary deformation in the northern Walker Lane: 1. Semipermanent GPS strategy. In J. S. Oldow ve P. H. Cashman (Eds.), *Late Cenozoic Structure and Evolution of the Great Basin–Sierra Nevada Transition*, Geological Society of America Special Paper 447, 1–15

Colomina, I., ve Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.

DJI, 2020. Mavic 3 Enterprise Series – Hasselblad Camera Specifications. DJI Teknoloji A.Ş.

DJI., 2021. Mavic 3 Enterprise Technical Specifications.

Dow, J. M., Neilan, R. E., ve Rizos, C., 2009. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83, 3–4, 191–198.

Eisenbeiss, H., 2009. UAV Photogrammetry, Doktora tezi, ETH Zürich.

El-Rabbany, A., 2002. Introduction to GPS: The Global Positioning System, Artech House, 112–117

Furukawa, Y., ve Ponce, J., 2010. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32, 8, 1362–1376.

Ghilani, C. D., ve Wolf, P. R., 2012. *Elementary Surveying: An Introduction to Geomatics*, (13th ed.). Pearson Prentice Hall.

Gili, J. A., Corominas, J., ve Rius, J., 2000. Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55, 3, 167–192.

- González-Aguilera, D., Rodríguez-Gonzálvez, P. ve Gómez-Lahoz, J., 2009. 3D modeling and accuracy assessment of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage*, 10, 3, 349–354.
- Harita Genel Müdürlüğü (HGK)., 2005. Fotogrametrik Harita Üretiminde Kullanılacak Sayısal Hava Fotoğraflarına Ait Teknik Şartname. Ankara: Harita Genel Komutanlığı Yayınları.
- Harita Genel Müdürlüğü, (HGK)., 2011. TUSAGA-Aktif Teknik Şartnamesi ve Doğruluk Beklentileri. Ankara: Harita Genel Komutanlığı, Coğrafi Bilgi Sistemleri Dairesi Başkanlığı.
- Hatay Kadastro Müdürlüğü., 2025. URL Adres: <https://www.tkgm.gov.tr/hatay-bm/hatay-kadastro-mudurlugu> Erişim Tarihi: 25.09.2025.
- HGK., 2005. Büyük Ölçekli Haritaların Yapımında Uyulacak Esaslar ve Kontrol Yöntemleri (BÖHHBÜY). Harita Genel Komutanlığı, Ankara.
- HGK., 2011. Büyük Ölçekli Haritaların Yapım Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Harita Genel Komutanlığı, Ankara.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., ve Collins, J., 2001. Global positioning system: Theory and practice, 5th ed., Springer Vienna, 333–340
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., ve Wasle, E., 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo ve More. Springer Vienna.
- Katsigianni, S., ve Tsakiri, M., 2023. UAV, GNSS, and InSAR Data Analyses for Landslide Monitoring in a Mountainous Area of Western Greece. *Remote Sensing*, 15, 11, 2870.
- Kavanagh, B. F., ve Slattey, D. K., 2014. Surveying with construction applications, (8th ed.). Pearson.
- Konakoğlu, B., ve Akar, A., 2021. Elazığ ve çevresindeki illerde meydana gelen tektonik hareketlerin TUSAGA-Aktif istasyonlarının konumlarına etkisinin statik deformasyon modeller kullanılarak incelenmesi. *Geomatik*, 6, 2, 165-178.
- Leica Geosystems., 2020. Leica TS07 Total Station – Datasheet. Heerbrugg, İsviçre: Leica Geosystems AG.
- Leica Geosystems., 2023. TS07 Manual: Advanced Surveying Applications. Heerbrugg, İsviçre: Leica Geosystems AG.
- Leick, A., Rapoport, L., ve Tatarnikov, D., 2015. GPS Satellite Surveying (4th ed.). Wiley.

- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., ve Boehm, J., 2014. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (2nd ed.). Berlin, Boston: De Gruyter.
- Misra, P., ve Enge, P., 2006. *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance* (2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.
- Netcad Yazılım A.Ş., 2023. Netcad GIS: Genel Özellikler. Netcad Portal.
- Nex, F., ve Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6, 1, 1–15.
- Nikolakopoulos, K. G., ve Koukouvelas, I. K., 2021. Post-earthquake response based on UAV, GNSS and TLS technologies: A recent example from Elassona earthquakes in Thessaly, Central Greece. *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 11876, 118760N.
- Özarpacı, S., 2024. Stability Analysis of GNSS Stations Affected by Samos Earthquake. *Applied Sciences*, 14, 6, 2301.
- Özener, H., Doğru, A., ve Ünlütepe, A., 2009. An approach for rapid assessment of seismic hazards in Turkey by continuous GPS data. *Sensors*, 9, 1, 602–615.
- Pathak, H. P., Pandey, M., Paudel, B., ve Sapkota, P., 2023. A final report on Comparative Analysis of UAV and GNSS against Total Station Survey for Road Alignment. Tribhuvan University, Institute of Engineering, Pashchimanchal Campus.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., vd., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B5.
- Remondino, F., ve Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI, 5, 266–272.
- Remondino, F., ve Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI, 5, 266–272.
- Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy* (2nd ed.). Walter de Gruyter.
- SHGM., 2016. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü İnsansız Hava Aracı Talimatı (SHT-İHA). Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Sino GNSS., 2023. T300 Plus GNSS Receiver – Technical Specifications and User Manual. Com Nav Technology Ltd.
- SinoGNSS., 2021. T300 Plus GNSS Receiver Datasheet. ComNav Technology Ltd.

- Snively, N., Seitz, S. M., ve Szeliski, R., 2008. Skeletal graphs for efficient structure from motion. In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 1–8
- Tiryakioğlu, İ., Koçbulut, F., Gezin, C., Solak, H. İ., Eyübagil, E. E., Çakanşimşek, E. B., Aladoğan, K., Dönmez, E., ve Poyraz, F., 2024. 6 Şubat Kahramanmaraş depremleri sonrasında Ecemiş Fayı'nda meydana gelen kabuksal deformasyonların GNSS yöntemiyle belirlenmesi, Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14, 2, 913-931.
- Tong, X., Liu, S. ve Li, Z., 2015. Integration of UAV photogrammetry and terrestrial laser scanning for 3D mapping in open-pit mining areas. Remote Sensing, 7, 6, 6635–6662.
- Turner, D., Lucieer, A., ve Watson, C., 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery, based on Structure from Motion (SfM) point clouds. Remote Sensing, 4, 5, 1392–1410.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., ve Reynolds, J. M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300–314.
- Wolf, P. R., DeWitt, B. A., ve Wilkinson, B. E., 2014. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Yang, Y.-H., Xu, Q., Hu, J.-C., Li, H.-L., ve Li, Z., 2022. Source model and triggered aseismic faulting of the 2021 Mw 7.3 Maduo earthquake revealed by the UAV-Lidar/Photogrammetry, InSAR, and field investigation. Remote Sensing, 14, 22, 5859
- Yu, R., Li, P., Shan, J., ve Zhu, H., 2022. Structural state estimation of earthquake-damaged building structures by using UAV photogrammetry and point cloud segmentation. Measurement, 202, 111858.
- URL-1 < <https://www.dji.com/> <https://www.airmobli.com/tr/product/skyeye-3200-fixed-wing-uav-platform/>>, Erişim Tarihi: 12.03.2025.
- URL-2 <DJI., 2019. P4 Multispectral [Web sayfası]. DJI Agriculture. <https://ag.dji.com/p4-multispectral> >, Erişim Tarihi: 26.03.2025.
- URL-3 <<https://ilmutambang.com/mengenal-ground-control-point-pemetaan-drone-di-pertambangan/>>, Erişim Tarihi: 08.04.2025.
- URL-4 <<https://hitargetindonesia.net/penggunaan-gnss-metode-rtk-terhadap-hasil-terestris-surveying/>>, Erişim Tarihi: 27.04.2025.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Hasan ÖZTÜRK

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği (2015-2019)

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği A.B.D. (2022-2025)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Tuner Yol Asfalt (2023)
2. Baş Yapı İnşaat (2024)
3. Çokgen Mühendislik (2025)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Öztürk, H., 2025. İnsansız Hava Aracı ve yersel ölçüm teknikleri kullanılarak deprem sonrası deformasyon analizi: Adıyaman İli Kahta İlçesi Erikdere Mahallesi Uygulaması, 8. Uluslararası Sağlık, Mühendislik ve Uygulamalı Bilimler Kongresi.