



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

**HEYELAN VE KAR KAYNAKLI DOĞAL AFETLERİN  
İZLENMESİ VE HARİTALANMASINDA MODERN UZAKTAN  
ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI**

**REMZİ EKER**

**DOKTORA TEZİ  
ORMAN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. ABDURRAHİM AYDIN**

**DÜZCE, 2018**

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

**HEYELAN VE KAR KAYNAKLI DOĞAL AFETLERİN**  
**İZLENMESİ VE HARİTALANMASINDA MODERN UZAKTAN**  
**ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI**

Remzi EKER tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN

Düzce Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Abdullah Emin AKAY

Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Füsun BALIK ŞANLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hayati ZENGİN

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Yılmaz TÜRK

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 25/10/2018

## **BEYAN**

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

25 Ekim 2018

Remzi Eker

## TEŞEKKÜR

Akademik hayatıma başladığım ilk günden itibaren hem yüksek lisans eğitimim hem de doktora eğitimim boyunca sağladığı çok kıymetli rehberlik ve danışmanlık nedeniyle ve bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinden, gerek yurt içi gerekse yurt dışındaki çalışma alanlarının belirlenmesine ve yurtdışından alanında uzman araştırmacılarla iletişim kurmama ve veri teminine kadar her aşamada sağladığı katkıları, görüş ve önerileri için tez danışmanım Prof. Dr. Abdurrahim Aydın'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmasının Avusturya ayağında tez çalışmama hem çalışma alanlarının belirlenmesi ve veri temini (hava lazer tarama verisi gibi), hem de tez çalışmasının içeriği ile ilgili sağladığı katkı, görüş ve önerileri için Dr. Gerhard Volk'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının yine Avusturya ayağında özellikle heyelan ile ilgili çalışmaların gerçekleştirilmesinde ve SAR interferometri konusunun tez çalışmasında uygulanabilmesine yönelik olarak rehberlik yaparak katkı, görüş ve öneriler sağlayan Dr. Diethard Lieber'e çok teşekkür ederim.

Avusturya Gschlifgraben heyelan alanına ait lazer tarama verilerini sağlayarak tez çalışmasının tamamlanmasında önemli katkılar sağlayan Yukarı Avusturya-Linz, Sel ve Çığ Kontrolü, Orman Teknik Servisine (Forest Technical Service for Torrent and Avalanche Control) teşekkür ederim.

Tez çalışması TÜBİTAK 2214/A-BİDEB Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı (Başvuru No: 1059B141400900) kapsamında 15.03.2015-14.03.2016 tarihleri arasında bir yıllık süre ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Burs programı kapsamında çalışmalar yapmak üzere gidilen Avusturya, Doğa Kaynakları ve Yaşam Bilimleri Üniversitesi (University of Natural Resources and Life Sciences), Ölçme, Uzaktan Algılama ve Yer Bilgisi Enstitüsü (Institute of Surveying, Remote Sensing and Land Information) yönetici ve araştırmacılarına ve de bu süreçte gerek davet yazısını göndererek gerekse tez çalışmasının başarılı şekilde gerçekleştirilebilmesinde



sağladığı katkı, görüş ve önerileri için Dr. Helmut Fuchs'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasının yine Avusturya ayağında özellikle Gallenzerkogel heyelan alanı üzerinde İHA ile uçuşların gerçekleştirilmesinde bünyelerindeki İHA platformu ve diğer araçları kullanabilme imkânları sağlayan Avusturya, Doğa Kaynakları ve Yaşam Bilimleri Üniversitesi (University of Natural Resources and Life Sciences), Dağlık Alan Risk Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Mountain Risk Engineering) yöneticileri ve çalışanları ile birlikte özellikle Dr. Johannes Hübl'e çok teşekkür ederim. Ayrıca enstitü personellerinden saha çalışmalarında destek veren Friedrich Zott and Georg Nagl'e teşekkür ederim.

Çalışmanın İsviçre ayağında gerek davet yazısı göndererek gerek veri temini konusunda tez çalışmasının tamamlanabilmesi açısından oldukça önemli katkı, görüş ve öneriler sağlayan İsviçre Federal Orman, Kar ve Peyzaj Araştırmaları Enstitüsü (The Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL) bünyesindeki Kar ve Çığ Araştırmaları Enstitüsünden (Institute for Snow and Avalanche Research, SLF) araştırmacı Dr. Yves Bühler'e sonsuz teşekkür ederim. Yine SLF bünyesindeki araştırmacılardan Sebastian Schlögl ve Andreas Stoffel'e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmasının önemli bir bölümü olan SAR uydu verileri (ERS-1/2, Envisat ASAR) Avrupa Uzay Ajansına sunulan proje kapsamında (European Space Agency, ESA) (Proje No: 31237) arşivlerinden temin edilmiştir. Ayrıca Sentinel-1 uydusuna ait verileri kullanıcılar ile ücretsiz olarak paylaşan ESA'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Düzce Üniversitesi BAP-2017.02.02.543 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Düzce Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Tez çalışmasının Türkiye ayağında saha çalışmalarına katılarak destek veren Orman Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Sayın Yalçın Sefer'e teşekkür ederim.

Tez çalışmasının İsviçre ayağında oraya gidebilmem için sponsorluk yaparak ekonomik destek veren Maxwell Innovations'dan Sayın Orkut Aktaş'a teşekkür ederim. Ayrıca Maxwell Innovations'ın diğer üyelerine teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca her an yanımda olan ve çalışmamın her aşamasında bana varlıklarıyla destek olan anneme, babama ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Tezimin son dönemlerinde hayatıma girerek varlığıyla hayatıma anlam katan, çok sevdiğim ve değer verdiğim, her anlamda güzel ve eşsiz bir insan olan, aynı alanlarda olmasak da idealist, başarılı ve örnek aldığım meslektaşım ve hayat arkadaşım Öğr. Gör. Tuğçe ŞIK'a sonsuz teşekkür ederim.

**25 Ekim 2018**

**Remzi Eker**



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>X</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>XII</b>
<b>HARİTA LİSTESİ</b> .....	<b>XIII</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>XV</b>
<b>SİMGELER</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XIX</b>
<b>EXTENDED ABSTRACT</b> .....	<b>XX</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. DOĞAL TEHLİKE VE AFETLER</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. UZAKTAN ALGILAMA</b> .....	<b>4</b>
<b>1.2.1. Pasif Optik Uzaktan Algılama Sistemleri (Kameralar, Tarayıcılar)</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2.2. Lazer Tarayıcı (LIDAR) Sistemler</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2.3. Hiper-spektral Uzaktan Algılama Sistemleri</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2.4. İnsansız Hava Aracı (İHA) Sistemleri</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2.5. Mikrodalga Uzaktan Algılama Sistemleri</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2.6. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) Sistemler</b> .....	<b>20</b>
<b>1.3. RADAR (SAR) İNTERFEROMETRİ</b> .....	<b>31</b>
<b>1.4. İNTERFEROMETRİK SAR (INSAR) ZAMAN SERİLERİ</b> .....	<b>42</b>
1.4.1.1. <i>Persistent Scatterer Interferometry (PSI)</i> .....	<b>45</b>
1.4.1.2. <i>Stable Point Network (SPN)</i> .....	<b>47</b>
1.4.1.3. <i>Persistent Scatterer Pairs (PSP)</i> .....	<b>48</b>
1.4.1.4. <i>Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)</i> .....	<b>48</b>
1.4.1.5. <i>Coherence Pixel Technique (CPT)</i> .....	<b>49</b>
1.4.1.6. <i>Small Baseline Subset (SBAS)</i> .....	<b>49</b>
1.4.1.7. <i>SqueeSAR™</i> .....	<b>51</b>
1.4.1.8. <i>Quasi PS Technique (QPS)</i> .....	<b>51</b>
<b>1.5. HEYELANLAR VE İLGİLİ ÇALIŞMALARDA UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANIMI</b> .....	<b>51</b>
<b>1.5.1. Heyelan Çalışmalarında Uygun Uzaktan Algılama Tekniğinin Seçim Kriterleri</b> .....	<b>57</b>
<b>1.6. KAR VE ÇİĞ ÇALIŞMALARINDA UZAKTAN ALGILAMANIN KULLANILMASI</b> .....	<b>60</b>
<b>1.7. AMAÇ VE KAPSAM</b> .....	<b>70</b>
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>74</b>
<b>2.1. ÇALIŞMA ALANLARININ TANITILMASI</b> .....	<b>75</b>
<b>2.2. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİ</b> .....	<b>84</b>
<b>2.2.1. İHA ile Heyelana Ait Görüntülerin Alınması ve Yapılan İşlemler</b> .....	<b>85</b>

2.2.2. Gerçekleştirilen Heyelan İzleme Çalışmaları.....	88
2.3. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİ .....	90
2.3.1. İHA Tabanlı Görüntü Alımı ve Verilerin İşlenmesi.....	90
2.3.2. Yersel Lazer Tarama Verileri ve Yapılan İşlemler .....	94
2.3.3. Kar Örtüsü Erimesinin İzlenmesi .....	97
2.4. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: KARŞIYAKA MAHALLESİ HEYELANI (ZONGULDAK, DEVREK) VE HİMMETOĞLU KÖYÜ HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİ .....	99
2.4.1. Kullanılan Veriler, Yazılımlar ve Yapılan Ön İşlemler .....	99
2.4.2. InSAR Zaman Serileri Analizlerinin Uygulanması.....	111
2.4.2.1. PSI yöntemi ile Heyelan İzleme ve Deformasyon Haritalama .....	111
2.4.2.2. SBAS Yöntemi ile Heyelan İzleme ve Deformasyon Haritalama.....	120
2.5. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİ .....	125
2.5.1. 3B (3-Boyutlu) Nokta Bulutları Tabanlı Kullanılan Metotlar.....	126
2.5.1.1. Doğrudan nokta-nokta ölçüm yöntemleri.....	126
2.5.1.2. Bulut-bulut ölçüm yöntemleri .....	126
2.5.1.3. Bulut-model ve model-model ölçüm yöntemleri .....	127
2.5.1.4. Çok Ölçekli Model-Model Bulut Karşılaştırma yöntemi .....	128
2.5.2. Sayısal Görüntü Korelasyon ve Partikül Görüntü Velosimetri Yöntemi .....	130
2.5.3. Kullanılan Veriler, Yazılımlar ve Yapılan İşlemler .....	131
3. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	135
3.1. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİNE AİT BULGULAR .....	135
3.1.1. İHA Uçuşları ve SfM Veri İşlemeye Ait Bulgular .....	135
3.1.2. Gallenzerkogel Heyelanının İzlenmesine Ait Bulgular .....	137
3.2. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİNE AİT BULGULAR.....	140
3.2.1. İHA ve TLS tabanlı Ortofoto Mozaik Görüntüler ile Kar Kaplı Alanların Haritalanmasına Ait Bulgular .....	140
3.2.2. Kar Erimesinin Kar Derinlik Değerlerindeki Değişimle İzlenmesine Ait Bulgular .....	145
3.3. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: DEVREK HEYELANI (ZONGULDAK) VE HİMMETOĞLU HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİNE AİT BULGULAR .....	152
3.3.1. Zonguldak İli Devrek İlçesi Karşıyaka Mahallesi Heyelanına Ait PSI Analizi Bulguları.....	152
3.3.2. Zonguldak İli Devrek İlçesi Karşıyaka Mahallesi Heyelanına Ait Hava Fotoğraflarının Sayısal Fotogrametrik Yöntemle Değerlendirilmesi ve SfM Tabanlı İHA Verisine Ait Bulguları.....	161
3.3.3. Bolu İli Göynük İlçesi Himmetoğlu Köyü Heyelanına Ait PSI ve SBAS Analizi Bulguları.....	168

<b>3.4. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİ .....</b>	<b>173</b>
<b>3.4.1. 3B LIDAR Nokta Bulutları Tabanlı Heyelan Deformasyon Haritalama Uygulamasına İlişkin Bulgular .....</b>	<b>173</b>
<b>3.4.2. Sayısal Görüntü Korelasyonu Kullanılarak Heyelan Yerdeğiştirme Alanlarının Elde Edilmesine İlişkin Bulgular .....</b>	<b>178</b>
<b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>181</b>
<b>4.1. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR.....</b>	<b>181</b>
<b>4.2. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR.....</b>	<b>182</b>
<b>4.3. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: DEVREK HEYELANI (ZONGULDAK) VE HİMMETOĞLU HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİNE AİT SONUÇLAR.....</b>	<b>185</b>
<b>4.4. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR .....</b>	<b>188</b>
<b>4.5. TEZ ÇALIŞMASINA İLİŞKİN SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>189</b>
<b>5. KAYNAKLAR .....</b>	<b>195</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>223</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. EM Radyasyon ve spektrum [25] .....	5
Şekil 1.2. Uzaktan algılamada kullanılan sensörlerin sınıflandırılması [33]. .....	7
Şekil 1.3. Mikrodalga uzaktan algılama sensörlerinin temel sınıfları [98]. .....	18
Şekil 1.4. Tipik radar sistemi temel blok diyagramı [118]. .....	21
Şekil 1.5. Görüntüleme radarı geometrisi [112]. .....	23
Şekil 1.6. Görüntüleme radarı geometrisi [114]. .....	23
Şekil 1.7. Gerçek açıklıklı bir radarın menzil çözünürlüğü [114]. .....	25
Şekil 1.8. Gerçek açıklıklı bir radarın azimut çözünürlüğü [114]. .....	25
Şekil 1.9. SAR azimut çözünürlüğü. ....	26
Şekil 1.10. Sinüzoidal bir sinyalin fazı ( $\sin\phi$ fonksiyonu $2\pi$ radyan devirli bir periyodiktir) [122]. .....	29
Şekil 1.11. Yan bakışlı radar görüntüsünde oluşan temel kaymalar [120] .....	30
Şekil 1.12. Tekrarlı geçiş interferometri şematik gösterimi. ....	38
Şekil 1.13. Çözülmemiş faz (mavi), göreceli çözülmüş faz (yeşil) ve mutlak çözülmüş faz (kırmızı) ([196]'dan değiştirilmiştir) .....	41
Şekil 1.14. Farklı InSAR zaman serileri analizi metodlarının kullanım yaygınlığı ([200]'den uyarlanmıştır) .....	43
Şekil 1.15. Vektör uzunluğu ile gösterilen zayıf ( $S_w$ ) ve güçlü ( $S_s$ ) yansıtıcı genlikleri. ....	46
Şekil 1.16. İlgili sinyaldeki rastgele gürültünün etkisini düşürmek için dağılmış yansıtıcılar koherentli olarak toplanabilmektedir. ....	50
Şekil 1.17. SBAS algoritması blok diyagramı .....	50
Şekil 2.1. Tez çalışması genel iş akışı. ....	74
Şekil 2.2. Devrek heyelanı bölgeleri. ....	80
Şekil 2.3. Heyelan alanından bir uçangöz görüntüsü. ....	80
Şekil 2.4. Heyelan bölgesinde oluşan yarıklar. ....	83
Şekil 2.5. Heyelan sonucu yıkılan bina. ....	83
Şekil 2.6. RTK-GPS ile alınan YKN ve fotoğraf üzerindeki görüntüsü. ....	86
Şekil 2.7. MikroKopter OktoXL İHA (solda), uzaktan kumanda ve yer kontrol ünitesi (sağda). ....	87
Şekil 2.8. Trimble GeoExplorer 6000 GeoXH marka diferansiyel-GNSS cihazı ve kullanılan YKN (solda); İHA ile alınan görüntüde belirgin şekilde görülebilen YKN örnek görüntüsü (sağda). ....	92
Şekil 2.9. AscTec Falcon 8 multikopter (solda); yer kontrol istasyonu (sağda). ....	92
Şekil 2.10. Sınıflandırılmış 3B nokta bulutları: kırmızı noktalar gürültü sınıfını, sarı noktalar gürültü olmayan sınıfı temsil etmektedir. ....	97
Şekil 2.11. ENVI yazılımı ve Sarscape modülü ekran arayüz görüntüsü. ....	105
Şekil 2.12. Leica photogrammetry süite 9.2 arayüz görüntüsü. ....	107
Şekil 2.13. Kullanılan DJI Mavic Pro Model İHA platformu. ....	108
Şekil 2.14. Devrek Karşıyaka mahallesi heyelan alanında gerçekleştirilen İHA uçuşuna ait uçuş planı görüntüsü .....	110
Şekil 2.15. Himmetoğlu köyü heyelan alanında gerçekleştirilen İHA uçuşuna ait uçuş	

planı görüntüsü .....	110
Şekil 2.16. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında ERS-1 ve ERS-2 uydu SAR görüntülerinin birlikte kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri .....	114
Şekil 2.17. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında Envisat ASAR uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri. ....	115
Şekil 2.18. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri.....	116
Şekil 2.19. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri .....	117
Şekil 2.20. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı SBAS analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri .....	123
Şekil 2.21. C2C yöntemlerinin en yakın komşu (solda) ve lokal yükseklik fonksiyonu (sağda) şematik gösterimi ([375]'ten uyarlanmıştır).....	127
Şekil 2.22. M3C2 algoritması çalışma prensibi [375] .....	128
Şekil 2.23. DIC çalışma prensibi. ....	131
Şekil 2.24. CloudCompare yazılımı içerisindeki M3C2 eklentisi arayüzü.....	132
Şekil 2.25. CIAS sayısal görüntü korelasyon yazılımı arayüzü .....	134
Şekil 3.1. LIDAR DEM verisi ile İHA DEM verisi karşılaştırma grafiği .....	138
Şekil 3.2. Zaman serileri boyunca İHA ve TLS tabanlı kar derinlik değerlerinin karşılaştırılması .....	148
Şekil 3.3. Zaman serileri boyunca karlı pikseller üzerinde rastgele tanımlı 15 adet noktadaki İHA ve TLS verilerinin kar derinliği-zaman grafikleri. ....	150
Şekil 3.4. Heyelan üzerinde seçilen A ve B noktalarındaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri .....	160
Şekil 3.5. Yerleşim alanı içerisinde ve heyelan yarığına yakın bölgede seçilen üç farklı deformasyon hızına sahip üç farklı noktadaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri .....	172
Şekil 3.6. Deformasyon sınıfları alansal dağılım yüzdeleri grafiği .....	178

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

Çizelge 1.1. Radar bantlarının frekans ve dalgaboyları [112].	19
Çizelge 1.2. InSAR zaman serileri analizlerinde kullanılan algoritma/metotlar	43
Çizelge 1.3. Literatürde yer alan farklı PSI yaklaşımları ve özellikleri [201].	44
Çizelge 1.4. Heyelan çalışmalarında uzaktan algılama seçimindeki teknik kriterlerin değerlendirilmesi [248].	59
Çizelge 1.5. Heyelan çalışmalarında uzaktan algılama seçimindeki heyelan ile ilgili kriterlerin değerlendirilmesi [248].	60
Çizelge 2.1. İHA ile gerçekleştirilen uçuşlara ait bilgiler.	85
Çizelge 2.2. Gerçekleştirilen İHA uçuşlarına ilişkin bilgiler.	92
Çizelge 2.3. Yersel lazer tarama verileri sınıflandırma sonuçları.	96
Çizelge 2.4. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelanı için temin edilen SAR uydu verileri.	101
Çizelge 2.5. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelanı için temin edilen SAR uydu verileri.	103
Çizelge 2.6. HGM'den temin edilen hava fotoğraflarına ait bilgiler.	107
Çizelge 2.7. Gerçekleştirilen İHA uçuşlarına ilişkin bilgiler.	109
Çizelge 3.1. Eşik değeri tabanlı sınıflandırma işlemi doğruluk değerlendirme sonuçları.	143
Çizelge 3.2. Eşik değeri tabanlı sınıflandırma sonucu belirlenen karla kaplı alanlara ait sonuçlar.	143
Çizelge 3.3. İHA tabanlı elde edilen kar derinliklerinin TLS verileri ile karşılaştırılması için kullanılan ME, MAE, SD ve RMSE değerleri.	148
Çizelge 3.4. Deformasyon sınıfları piksel sayıları dağılım yüzdeleri.	178



## HARİTA LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Harita 2.1. Avusturya-Gallenzerkogel heyelan alanı.....	76
Harita 2.2. Avusturya-Gschlifgraben heyelan alanı konum haritası.....	77
Harita 2.3. Dischma vadisi (Davos, İsviçre) konum haritası.....	78
Harita 2.4. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelanı konum haritası. .....	79
Harita 2.5. Himmetoğlu köyü heyelanı konum haritası.....	82
Harita 2.6. 2014 yılından sonra yapılan kazı çalışmalarının yapıldığı bölge ve alandaki değişimin 2004-2017 yılları arasındaki gösterimi. ....	84
Harita 2.7. LIDAR-DSM (solda) ve LIDAR-DTM (sağda). ....	88
Harita 2.8. İHA tabanlı üretilen ortofoto görüntüler.....	94
Harita 2.9. Yersel lazer tarayıcı ile üretilmiş ortofoto görüntüler (Siyah Pikseller “NoData” ya karşılık gelmektedir).....	95
Harita 2.10. 3B nokta bulutu karşılaştırması için kullanılan 2011 (üstte) ve 2015 (altta) LIDAR verileri.....	132
Harita 2.11. DIC analizi için LIDAR verisi üzerinde seçilen alanlar. ....	133
Harita 3.1. İHA uçuşu verileri ile elde edilen ortofoto görüntüler. ....	136
Harita 3.2. 2009 yılına ait LIDAR ve birinci İHA uçuşu verileri DEM farkları ile elde edilen deformasyon haritası. ....	138
Harita 3.3. Birinci ve ikinci İHA uçuş verileri ile elde edilen M3C2 algoritması sonuçları. ....	139
Harita 3.4. Üçüncü İHA uçuşu ile üretilen ortofoto görüntü üzerinde sahada yapılan heyelan stabilizasyon/kontrol çalışmaları. ....	140
Harita 3.5. İHA ve TLS tabanlı kar örtüsü haritaları (1: Kar örtüsü, 0: Karsız alan, - 1: NoData).....	142
Harita 3.6. İHA tabanlı ortofoto görüntüde yanlış sınıflandırılan piksellerin gösterilmesi. ....	144
Harita 3.7. TLS tabanlı kar örtüsü haritası. Tarama açısına göre objeler arkasında kalan açıklıklar (NoData). ....	145
Harita 3.8. İHA ve TLS tabanlı üretilen kar derinlik haritaları. ....	146
Harita 3.9. İHA ve TLS tabanlı üretilen kar derinlik haritaları. ....	147
Harita 3.10. İHA tabanlı kar derinlik haritası (A ve B bir önceki tarihli veriye göre daha yüksekte hatalı modellenen kar örtüsü (üstte) ve ani kar kütlesi erimesi (altta)). ....	151
Harita 3.11. ERS-1/2 uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası. ....	153
Harita 3.12. Envisat ASAR uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası. ....	155
Harita 3.13. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası. ....	156
Harita 3.14. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyonların arazideki durumu.....	158
Harita 3.15. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen	

deformasyonların arazideki durumu.....	158
Harita 3.16. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyonların arazideki durumu.....	159
Harita 3.17. İHA ile SfM tabanlı üretilen DEM ve Ortofoto mozaik.....	162
Harita 3.18. Heyelan alanına ait eski tarihli hava fotoğraflarından sayısal fotogrametrik yöntemle üretilen ortofotolar ile İHA-tabanlı ortofoto görüntüden zamansal değişimin değerlendirilmesi.....	163
Harita 3.19. Sayısal fotogrametrik yöntemle üretilen 1984 ve 2011 yıllarına ait DEM verilerinden elde edilen M3C2 mesafe haritası.....	164
Harita 3.20. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası ile 2011-2018 yılları arasındaki M3C2 mesafe analizi ile elde edilen heyelan deformasyonu haritasının karşılaştırılması.....	166
Harita 3.21. 2011 ve 2018 yıllarına ait ortofotodan heyelan kaynaklı yatay yerdeğiştirmenin analizi ve binaların durumu. 2011-5: 2011 yılı verisinde mevcut olup heyelan sonucu yıkılan binalar (siyah), 2018-5: 2018 yılı verisinde mevcut olup heyelan sonucu yıkılan bina (turuncu), 2011-1: İki zaman serisi arasında konumlarında değişim olmayan binalar (mavi), 2011-2 ve 2018-2: 2011 yılındaki bina konumlarından (kırmızı) heyelan sonucu oluşan yerdeğiştirmeye bağlı 2018 yılındaki bina konumları (sarı).....	167
Harita 3.22. 2011 ve 2018 yıllarına ait ortofotodan heyelan kaynaklı binalardaki yatay yerdeğiştirme durumu.....	167
Harita 3.23. Heyelan bölgesi PSI analizi sonucu elde edilen deformasyon hızları haritası.....	169
Harita 3.24. Heyelan bölgesi SBAS analizi sonucu elde edilen deformasyon hızları haritası.....	170
Harita 3.25. Heyelan bölgesinde interferometrik zaman serileri analizi sonucu elde edilen deformasyonların arazideki durumları.....	171
Harita 3.26. Heyelan bölgesinde interferometrik zaman serileri analizi sonucu elde edilen deformasyonların arazideki durumları.....	171
Harita 3.27. M3C2 mesafe verisi (yani deformasyon haritası).....	174
Harita 3.28. Heyelan alanı üzerinde deformasyonun daha yoğun olduğu “A” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.....	174
Harita 3.29. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “1” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.....	175
Harita 3.30. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “2” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.....	176
Harita 3.31. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “3” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.....	177
Harita 3.32. DIC analizi sonucu elde edilen yerdeğiştirme alanları haritası.....	179
Harita 3.33. DIC analizi sonucu elde edilen yerdeğiştirme alanları haritasındaki 1 nolu bölge.....	180
Harita 3.34. DIC analizi sonucu elde edilen yerdeğiştirme alanları haritasındaki 2 nolu bölge.....	180

## KISALTMALAR

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AGL	Above Ground Level
AIS	Airborne Imaging Spectrometer
ALS	Airborne Laser Scanner
APS	Atmospheric Phase Screen
ASCII	American Standard Code For Information Interchange
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
C2C	Cloud-To-Cloud
C2M	Cloud-To-Model
CANUPO	Caractérisation De Nuages De Points
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
CCD	Charge-Coupled Device
CDF	Cumulative Distribution Function,
CPT	Coherent Pixels Technique
CRED	Centre For Research On The Epidemiology Of Disasters
DEM	Digital Elevation Model
DePSI	Delft Persistent Scatterer Interferometry
d-GNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DIC	Digital Image Correlation
DoD	Dem Of Difference
DSLR	Digital Single Lens Reflex
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
EDM	Electronic Distance Meter
EM-DAT	Emergency Events Database
EMR	Elektro Manyetik Radyasyon
EMS	Elektro Manyetik Spektrum
ERAST	Environmental Research Aircraft And Sensor Technology
ERS	European Remote Sensing
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FOV	Field Of View
GHz	Giga Hertz
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
HGK	Harita Genel Komutanlığı
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
Hz	Hertz
IHA	İnsansız Hava Aracı
IMU	Inertial Measurement Unit
InSAR	Interferometrik SAR
INU	Inertial Navigation Unit

IPTA	Interferometric Point Target Analysis
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KAP	Kite Aerial Photography
LAZER	Light Amplification By Stimulated Emission Of Radiation
LIDAR	Light Detection And Ranging
LOD	Level Of Detection
M3C2	Multiscale Model-To-Model Cloud Comparison
MAE	Mean Absolute Error
ME	Mean Error
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MP	Mega Pixel
MSS	Multi Spectral Sensor
MTA	Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü
NASA	National Aeronautics And Space Administration
NCC	Normalized Cross Correlation
NIR	Near Infrared
P2P	Point-To-Point
PIV	Particle Image Velocimetry
PPI	Plan Position Indicator
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
PSI	Persistent Scatterers Interferometry
QPS	Quasi Persistent Scatterers
RADAR	Radio Detection And Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RMSE	Root Mean Square Error
SAR	Sentetik Açıklıklı Radar
SAR	Syntetic Aperture Radar
SBAS	Small Baseline Subset
SD	Standard Deviation
SfM	Structure-From-Motion
SHGM	Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü
SLAR	Side Looking Airborne Radar
SLC	Single Look Complex
SNR	Signal-To-Noise Ratio
SODAR	Sound Detection And Ranging
SONAR	Sound Navigation Ranging
SPN	Stable Points Network
SRTM	Shuttle Radar Topography Mapper
StaMPS	Stanford Method For Persistent Scatterers
STBAS	Small Temporal Baseline Subset
SWIR	Short Wave Infrared
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TIR	Termal Infrared
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TLS	Terrestrial Laser Scanner
TM	Thematic Mapper
UgCS	Universal Ground Control System
VIS	Visible
YKN	Yer Kontrol Noktası

## SİMGELER

$\epsilon$	Avro
$\lambda$	Dalga boyu
$B_{\perp}$	Dik Ana Hat
$R$	Eğik Menzil
$\varphi$	Faz
$f$	Frekans
$\theta$	Işın Geliş Açısı
$\tau_p$	Işınlanma Süresi
$c$	Işık Hızı
$\Delta\varphi$	Interferometrik Faz
$W$	Radar Anten Genişliği
$l$	Radar Anteni Uzunluğu

## ÖZET

### HEYELAN VE KAR KAYNAKLI DOĞAL AFETLERİN İZLENMESİ VE HARİTALANMASINDA MODERN UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANILMASI

Remzi EKER

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN

Ekim 2018, 222 sayfa

Uzaktan algılama tekniklerinin doğal afetlerde kullanımı teknolojik ve bilimsel gelişmelere bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada insansız hava aracı (İHA) sistemleri, lazer tarama sistemleri (hava ve yersel), Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) interferometri (InSAR) ve optik sayısal fotogrametri modern uzaktan algılama tekniklerinin üç ayrı ülkede (Türkiye, Avusturya ve İsviçre) yer alan beş ayrı çalışma alanında heyelan ve kar/çığ çalışmalarına yönelik uygulamaları yapılmıştır. Avusturya (Gallenzerkogel ve Gschlieffgraben heyelanları) ve Türkiye’de (Himmetoğlu ve Devrek heyelanları) ikişer adet alanda heyelan çalışması ve İsviçre’de (Dischma vadisi) kar derinlik haritalama ve kar erimesinin izlenmesi çalışması yapılmıştır. Avusturya’daki heyelan sahalarında İHA ve hava lazer tarama verileri ile heyelan izleme, Türkiye’deki heyelan sahalarında InSAR zaman serileri (Persistent Scatterers Interferometry, PSI ve Small Baseline Subset, SBAS analizleri), İHA ve optik sayısal fotogrametri teknikleri ile heyelan deformasyon haritalama, İsviçre’de ise İHA ve yersel lazer tarama verileri ile kar derinlik haritalama ve kar örtüsü erimesinin izlenmesi çalışması yapılmıştır. Gschlieffgraben heyelan alanında sadece hava lazer tarama verisi ile nokta bulutu karşılaştırma teknikleri ve sayısal görüntü korelasyon teknikleri ile heyelan deformasyonlarının ve yerdeğiştirme alanlarının belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Gallenzerkogel heyelan alanında yaklaşık bir yıllık dönem için üç ayrı İHA verisi ve heyelan öncesi hava lazer tarama verisi kullanılarak hem Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) farkları hem de modern nokta bulutu karşılaştırma algoritması olan M3C2 yöntemi kullanılarak heyelan izleme çalışması yapılmıştır. Dischma vadisinde ise yaklaşık bir aylık dönemde temin edilen beş ayrı İHA ve yersel lazer tarama (TLS) verisi ile kar erimesinin izlenmesi çalışması yapılmıştır. İHA ve TLS verileri zaman serileri kullanılarak kar erimesine ilişkin ilk örnek bir çalışma yapılmıştır. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında eski tarihli hava fotoğrafları ve İHA verileri ile birlikte ERS-1/2, Envisat ASAR ve Sentinel-1 C band SAR görüntüleri ile uzun dönemli (1992-2015) deformasyon haritalama için PSI analizi yapılmıştır. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında ise İHA verisi ile birlikte, Sentinel-1 C band SAR görüntüleri ile PSI ve SBAS analizleri yapılarak yüzey deformasyonlarını izleme çalışması yapılmıştır. Gerçekleştirilen örnek uygulamalar ile doğal afetlerde gelişmiş uzaktan algılama tekniklerinin kullanım imkânları değerlendirilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Doğal afet, İHA, Lazer tarama, InSAR, Uzaktan algılama.

## ABSTRACT

### THE USAGE OF MODERN REMOTE SENSING TECHNIQUES IN MONITORING AND MAPPING OF LANDSLIDE AND SNOW RELATED NATURAL HAZARDS

Remzi EKER

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Forest Engineering  
Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN

October 2018, 222 pages

The use of remote sensing techniques in natural hazards has been increasing due to technological and scientific developments. The present study examined the use of modern remote sensing techniques in landslide and snow/avalanche case applications within five study areas selected from three countries (i.e., Turkey, Austria and Switzerland). These selected modern remote sensing techniques included unmanned aerial vehicle (UAV) systems, laser scanning systems (aerial and terrestrial), Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry (InSAR), and optical aerial photogrammetry. The landslide studies were carried out within two study areas in Turkey (Himmetoğlu and Devrek) and two in Austria (Gallenzerkogel and Gschliefgraben), while the snow/avalanche study was conducted in one study area in Switzerland (Dischma valley). Both UAV and aerial laser scanning data were used for landslide monitoring in the study areas located in Austria and the InSAR time series together with UAV and optical aerial photogrammetry were used for landslide monitoring in the study areas in Turkey. However, only UAV and terrestrial laser scanning (TLS) were used for monitoring snow depth mapping and snow cover ablation in the study area in Switzerland. For the monitoring of the Gschliefgraben landslide, only techniques for comparison of point clouds and the digital image correlation method were used via the available aerial laser scanning data. However, both UAV and laser scanning data were used to monitor the Gallenzerkogel landslide using both the Digital Elevation Model (DEM) of difference and the M3C2 algorithm, an advanced point cloud comparison method. A case study was carried out for monitoring snow cover ablation with UAV and TLS data obtained as a five-time series over the period of a month in Dischma valley (Davos, Switzerland). This case study is one of the first in which snow cover ablation was monitored using both UAV and TLS. For a long-term period (1992-2015), the surface deformation due to the Karşıyaka Road landslide (Devrek, Zonguldak) was monitored and mapped via persistent scatterers interferometry (PSI) analysis carried out using C-band SAR images from ERS-1/2, Envisat ASAR, and Sentinel-1 satellites. In addition to data from SAR satellites, the aerial photographs and UAV data were also used. Both PSI and small baseline subset (SBAS) analysis were carried out together with UAV data in order to obtain C-band SAR images of the surface deformation caused by the Himmetoğlu Village landslide (Göynük, Bolu) from the Sentinel-1 satellite. The usage possibilities of advanced remote sensing techniques in natural hazards were evaluated based on the findings of these case studies.

**Keywords:** Natural hazards, UAV, Laser scanning, InSAR, Remote sensing.

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **THE USAGE OF MODERN REMOTE SENSING TECHNIQUES IN MONITORING AND MAPPING OF LANDSLIDE AND SNOW RELATED NATURAL HAZARDS**

Remzi EKER

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Forest Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Abdurrahim AYDIN

October 2018, 222 pages

#### **1. INTRODUCTION**

Natural hazards are today one of the most crucial threats to human life. Remote sensing techniques have been increasingly used in natural hazards as a result of on-going developments. In the present work, studies were carried out on the use of modern remote sensing techniques in landslide and snow/avalanche case applications within five study areas selected from three countries (i.e., Turkey, Austria, and Switzerland). These selected modern remote sensing techniques included unmanned aerial vehicle (UAV) systems, laser scanning systems (aerial and terrestrial), Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry (InSAR), and optical aerial photogrammetry. The landslide studies were carried out within two study areas in Turkey (Himmetoğlu and Devrek) and two in Austria (Gallenzerkogel and Gschlifgraben), while the snow/avalanche study was conducted in one study area in Switzerland (Dischma valley). Both UAV and aerial laser scanning data were used for landslide monitoring in the study areas in Austria and the InSAR time series together with UAV and optical aerial photogrammetry were used for landslide monitoring in the study areas in Turkey. However, only UAV and terrestrial laser scanning (TLS) were used for monitoring snow depth mapping and snow cover ablation in the study area in Switzerland. For the monitoring of the Gschlifgraben landslide, only techniques for comparison of point clouds and the digital image correlation (DIC) method were used via available aerial laser scanning data. However, both UAV and laser scanning data were



used to monitor the Gallenzerkogel landslide using both the Digital Elevation Model (DEM) of difference and the M3C2 algorithm, an advanced point cloud comparison method. A case study was carried out for monitoring snow cover ablation with UAV and TLS data obtained as a five-time series over the period of a month in Dischma valley (Davos, Switzerland). This case study is one of the first in which snow cover ablation was monitored using both UAV and TLS. For the long-term period covering 1992-2015, the surface deformation due to the Karşıyaka Road landslide (Devrek, Zonguldak) was monitored and mapped via persistent scatterers interferometry (PSI) analysis carried out using C-band SAR images from ERS-1/2, Envisat ASAR, and Sentinel-1 satellites. In addition to data from SAR satellites, aerial photographs and UAV data were also used. Both PSI and Small BAseline Subset (SBAS) analyses were carried out together with UAV data in order to obtain C-band SAR images of the surface deformation caused by the Himmetoğlu Village landslide (Göynük, Bolu) from the Sentinel-1 satellite. The usage possibilities of advanced remote sensing techniques in natural hazards were evaluated based on the findings of these case studies.

## **2. MATERIAL AND METHODS**

### **2.1. DEFINITION OF STUDY AREAS**

The present study examined the use of modern remote sensing techniques carried out for landslide and snow/avalanche case applications within five study areas selected from three countries (i.e., Turkey, Austria, and Switzerland). The first landslide area in Austria is that of Gallenzerkogel, located in the municipality of Hollenstein (Ybbs, Lower Austria). The upper left coordinates are -117839.42, 295545.08, and the lower right coordinates are -117421.13, 295284.58 in MGI Austria GK M31. The landslide area, covering 7.46 ha, is located between 760 m and 495 m a.s.l. and slope gradients reaching up to 70% can be seen. Former events in the area have also been reported, with the oldest known documented event recorded in 1899 with 7500 m<sup>3</sup> of displacement. Furthermore, in 2014, it was reactivated with a total displacement of ca. 2000 m<sup>3</sup>.

The second study area in Austria is the Gschlifgraben landslide system, located in Upper Austria (Gmunden Municipality). The upper, left, right, and lower coordinates of the area are MGI/Austria GK M31: EPSG Projection area 306000.25, 35399.75, 38500.25, and 303899.75, respectively. Detailed information on this landslide, comprising an earth flow amounting to about 3.8 million m<sup>3</sup> accumulated solids, was well represented by

Marschallinger et al. (2009).

The study area in Switzerland is located in the upper Dischma valley, 13 km from Davos in the canton of Grisons. The study area of Gletschboden is nearly flat and has been used in other experimental studies to analyse small-scale variability in snow ablation rates during patchy snow cover and to investigate small-scale boundary layer dynamics over a melting snow cover. It covers 267000 m<sup>2</sup> with elevations varying from 2040 m to 2155 m a.s.l. There are no settlements in the area and it is covered with short alpine grass and sparse small shrubs.

The first study area in Turkey is an active landslide in Karakaş Road in the Devrek district of Zonguldak Province. This destructive landslide was re-activated on 16 July 2015 and damaged two houses, one high-school building, one mosque, and one bridge in the region. The area of the landslide event is located between coordinates of 41° 14' 26'' N – 31° 54' 19'' E and 41° 11' 59'' N – 31° 59' 01'' E in the WGS84 Coordinate System.

The second study area in Turkey is a landslide area located in Himmetoğlu, a village in Göynük region within the province of Bolu. The district is located in the centre of an open-pit mine area for a coal-mining operation. The landslide (referred to hereafter as the Himmetoğlu landslide) was induced by open-pit mining activities at 10:00 p.m. on 12 December 2018. In total, seven houses were damaged due to the landslide. One of the houses had heavy damage, while the others had only slight damage. The landslide area is located where open-pit mining activities had begun after 2014 following the government expropriation. The landslide event prompted local authorities to order the immediate evacuation of these houses.

## **2.2. LANDSLIDE MONITORING USING UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND LIDAR DATA: CASE OF GALLENZERKOGEL LANDSLIDE (YBBS, LOWER AUSTRIA)**

In the present study, three flight missions were carried out via a workflow categorised as: (1) off-site preparation; (2) on-site preparation and image acquisition; and (3) post-processing. The on-site preparation and image acquisition stage included the flights and field work. The ground control points (GCPs) required for image processing were surveyed with sub-centimetre (<5 mm) accuracy using the Real-Time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS). The UAV-based aerial survey of Gallenzerkogel landslide was carried out via a rotary-wing mini-octocopter (i.e., multicopter UAV), the

ARF MikroKopter OktoXL having the dimensions of  $73 \times 73 \times 50$  cm and weighing about 4.9 kg (including camera and batteries). The mean altitude of the flight missions was set to less than 60 m a.g.l. A Canon EOS 650D DSLR camera with a resolution of 18 megapixels was carried by the UAV to take all images. In order to acquire a sufficient number of images for photogrammetric analysis, the camera was adjusted to be triggered automatically at a constant time interval of 2 s, independent of its position and orientation in the space. Post processing included the georeferencing of all obtained images using the GNSS log from the multicopter and also by means of the GCPs using Agisoft Photoscan. For each flight mission, point clouds, DEMs, and orthophotos were generated to use for further analysis in GIS software (ESRI ArcGIS) and cloud processing software (CloudCompare) in order to evaluate the landslide event. Following data acquisition with UAV flights, the SfM algorithm was applied to generate point clouds, DEMs and orthophotos, using Agisoft Photoscan Professional version 1.1.6. This procedure was included in the post-processing stage of the UAV aerial survey. For the monitoring of the landslide using the obtained data, the DEM of difference (DoD) was applied by subtracting the DEM obtained from the first flight of the UAV from the LIDAR-DEM because the LIDAR-DEM, representing the pre-failure topography, was obtained as both a DTM and a DSM. In this study, cloud-to-cloud distance computation between the first and second UAV flights was carried out using the M3C2 plug-in of CloudCompare 3D processing software in order to monitor landslide activity during the period following the first UAV flight. This comparison was made because of the density of the vegetation surrounding the landslide area. However, because of the on-going landslide control/stabilisation work over the landslide area, the third UAV flight was not used to monitor landslide activity.

### **2.3. MONITORING OF SNOW COVER ABLATION USING VERY HIGH SPATIAL-RESOLUTION REMOTE SENSING TECHNIQUES: CASE OF UPPER DISCHMA VALLEY (DAVOS, SWITZERLAND)**

The three main steps of the workflow for the UAS-based data acquisition were: (1) flight planning; (2) on-site flight plan evaluation, reference point setting and image acquisition; and (3) image post-processing as in other studies applying UAS. Flight planning preparation included several pre-requisites that had to be determined before moving on-site, such as weather and wind conditions and topography of the area of interest. The UAS

missions were planned using the Ascending Technologies (AscTec) Navigator software on a tablet computer before moving on-site. Swiss topographic maps were imported and the waypoint navigation was calculated based on camera specifications, desired ground sampling distance (GSD) and image overlap. The on-site preparation and image acquisition stage included the field work and UAS flights. The GCPs necessary for image rectification and image geocoding were surveyed using the Trimble GeoExplorer 6000 GeoXH differential GNSS device with an accuracy of better than 10 cm. In total, nine GCPs, which had to be clearly visible in the base imagery, were applied in the field before the flight missions were carried out. All GCPs were measured according to the CH1903-LV03 Swiss Coordinate System. The UAS flights were performed with the AscTec Falcon 8 octocopter. The Falcon 8 was equipped with a Sony NEX-7 camera. The Sony NEX-7 system camera features a 24MP APS-C CMOS sensor and was equipped with a small, lightweight Sony NEX 20 mm F/2.8 optical lens (81 g). The camera was connected to the Falcon 8 by a gimbal with active stabilisation and vibration damping and was powered by the UAS battery. Post processing included all office work carried out in order to obtain the high-resolution DSMs and orthophotos from the UAS imagery. In the present study, the SfM algorithm was applied to generate the DSMs and orthophotos, using Agisoft Photoscan Professional version 1.3.2. The workflow of the SfM algorithm in Photoscan consisted of: (1) image matching and bundle block adjustment; (2) inclusion of GCPs and dense geometry reconstruction; and (3) texture mapping and export of DSMs and orthophotos. The UAS imagery from each flight was imported in Photoscan, and generic image alignment was carried out. Agisoft Photoscan Professional software aligned the images automatically by matching features present in the different overlapping images. Bundle block adjustment was then carried out and outliers were deleted from the sparse point cloud to avoid reconstruction errors. In the dense geometry reconstruction and inclusion of the GCPs stage, the global positioning system (GPS) markers (i.e., field-measured GPS coordinates of the GCPs) were then defined in order to recalculate and fine-tune the bundle adjustment within the estimated accuracy. Small shifts in X and Y can lead to large differences in the Z direction, particularly in steep terrain, making a more accurate calculation of snow depth (HS) essential. Consequently, following the absolute referencing on the DSM of 9 May 2016 with differential GNSS, the relative referencing of other DSMs was made by identifying artificial points that were defined over clearly visible features such as small stones, boulders, etc., thus creating 190 artificial GCPs to use together with the nine GCPs surveyed in the field. In the present

study, all models were generated with a calculated accuracy of better than 5 cm.

In the present study, five TLS datasets were obtained, which were recorded by a Riegl-VZ6000 and used as a reference in order to compare the TLS and UAS measurements for HS and snow-covered areas. The scan position of the Riegl-VZ6000 was located at approximately 30 vertical metres above the Gletschboden area on a northerly exposed slope. All datasets were converted from the scanner's own coordinate system into Swiss CH1903 LV03 coordinates by scanning five fixed reflectors in the nearby surroundings of the Gletschboden area in order to accurately match them with the UAS measurements. The Riegl-VZ6000 laser-scanning measurement system captures digital images via a high-resolution camera in order to generate products such as coloured point clouds, textured triangulated surfaces, high-resolution panorama images and orthophotos. The TLS scans were carried out on the same dates as the UAS flights except for the data for the snow-free surface. The TLS-based orthophotos were created from the images taken by the digital camera using RiScan Pro software and then imported into ArcGIS for classification. Before generating DSMs from the raw TLS point clouds, all point clouds were classified to eliminate points which were defined as noise, including non-ground points such as telephone lines, etc. sensed incorrectly due to water vapour in air and/or light conditions (Fig. 5). This enabled the DSMs to be generated with improved accuracy for this study. The CANUPO (CAracterisation de NUages de POints) plug-in for CloudCompare (<http://www.danielgm.net/cc/>), a freely available, open-source, 3D point cloud and mesh processing software, was applied.

In the present study, changes both in the areal extent of the snow cover and in the HS were estimated from high-resolution remote sensing data. Estimation of the areal extent of the snow cover was made from orthophotos by classifying pixels as snow-covered and snow-free. These classifications were carried out using a very simple method based on a threshold value applied to the blue-band information of the orthophotos for the determination of the snow-covered pixels. The blue band of the orthophotos was used because pixels covered by snow can be more sharply distinguished from pixels not covered by snow in the blue band due to the differences in spectral reflectance of the ground and the snow. The HS was simply calculated by subtracting the snow-covered DSMs from those without snow. Following the subtraction, the snow-free pixels were set to zero and the HS was considered for only the snow-covered pixels in order to avoid any confusion in evaluating snow ablation. Because no manual HS measurements were

carried out in the field, the TLS measurements were used as reference datasets for the comparison of the UAS-based HS measurements. The error of the UAS-based HS values was calculated as the difference in the Z value between the UAS and TLS datasets of the same date.

#### **2.4. LANDSLIDE MONITORING USING INSAR TIME SERIES ANALYSIS: CASES OF KARŞIYAKA ROAD LANDSLIDE (DEVREK, ZONGULDAK) AND HIMMETOĞLU VILLAGE LANDSLIDE (GÖYNÜK, BOLU) IN TURKEY**

The monitoring and deformation mapping of two landslides located in Turkey were carried out using InSAR time series analysis (PSI and SBAS) methods. For the long-term period covering 1992-2015, the surface deformation due to Karşiyaka Road landslide (Devrek, Zonguldak) was monitored and mapped via PSI analysis carried out using C-band SAR images from ERS-1/2, Envisat ASAR, and Sentinel-1 satellites. In addition to data from SAR satellites, the aerial photographs and UAV data were also used. Both PSI and SBAS analyses were carried out together with UAV data in order to determine the surface deformation due to the Himmetoğlu Village landslide (Göynük, Bolu) from the C-band SAR images of the Sentinel-1 satellite. The SAR satellite images, as the main remote-sensing data of the methods used in the study, were obtained from the European Space Agency (ESA) virtual archives (Virtual Archive 4, VA4). The satellite images were from ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR and Sentinel-1A. For the Karşiyaka Road landslide area, 29 data items from the ERS-1 and ERS-2 satellites, and 40 from the Envisat ASAR satellites, for a total of 69, were obtained as Level-0 data and used in the analysis. These data covered roughly the 18-year period between 1992 and 2010. In addition, 22 images of Sentinel-1A in SLC (single look complex) format available for the study area were also obtained from the archives. For Himmetoğlu Village landslide area, a total of 26 SAR data items were obtained from archives covering a period of nine months in 2017. Both PSI and SBAS methods were applied using ENVI 5.3 software (HARRIS Geospatial Solutions) and the SARscape 5.2 module.

Stereo aerial photographs were also obtained from the General Directorate of Mapping (HGM) for the landslide area in the Devrek district of Zonguldak Province. There were a total of 20 photographs from 1944, 1948, 1982, 1984, 1998 and 2011 available in the HGM archives. The aerial photographs of 2011 were taken with a digital camera while the others were taken with an analog camera and afterwards scanned and digitised. The

aim was to determine the temporal changes in the region via analysis of these aerial photos. In the processing of the aerial photographs, digital photogrammetry applications were carried out using Leica Geosystems, Leica Photogrammetry Suite 9.2 software.

In addition to the aerial photographs, high-accuracy and high-resolution data were obtained by flying the UAV over the landslide area in Devrek, Zonguldak, as well as the landslide area in Himmetoğlu Village (Göynük, Bolu). For the UAV data acquisition, one flight over both the Karşiyaka Road and the Himmetoğlu Village landslides was carried out using the DJI Mavic Pro model UAV platform. This platform allows for the capture of 12MP DNG and RAW images. The single flight over Karşiyaka Road landslide was carried out on July 23, 2018, and the UAV flight over the landslide of Himmetoğlu Village on December 17, 2017. All UAV flights were planned using Universal Ground Control Software (UGCS) version 2.13.519. The prepared flight plans were then uploaded to the air vehicle with UgCS for DJI software running on Android, which enabled completely autonomous flights to be carried out. Three UAV flights were carried out over the Karşiyaka Road landslide area with a GSD of 5 cm, resulting from an approximate flight altitude of 160 m a.g.l., and took about 11-15 min. The overlapping of both front and side images was 70%. One flight carried out on Himmetoğlu Village landslide had a GSD of 3 cm.

## **2.5. MAPPING LANDSLIDE DEFORMATION AND DETECTING LANDSLIDE DISPLACEMENT FIELDS USING AERIAL LASER SCANNING DATA: CASE OF GSCHLIEFGRABEN LANDSLIDE (GMUNDEN, UPPER AUSTRIA)**

In the present study, firstly, in order to map landslide deformations, a 3D point cloud comparison was made using aerial laser scanning (LIDAR) data belonging to 2012 and 2015 having a 1-m spatial resolution. In order to regenerate point clouds from the data obtained, the ArcGIS 10.3 ArcMap module was used, since LIDAR data could not be obtained as raw point clouds. The M3C2 algorithm, an advanced point cloud comparison method, was used to determine the distances between two point clouds due to landslide deformation. Secondly, in the present study, DIC was applied to image pairs of ‘hillshade’ grayscale images, derived from LIDAR DTMs having 1-m spatial resolution. All LIDAR data obtained as two time series were dated as 11 February 2008 and 28 April 2008. Because Gschliefgraben is a large landslide system, DIC analysis was only made for a small portion of the landslide area located close to the crown (head). This area was

selected because upon visual inspection more activation was observed between the two series. Within the study area, two separate active sections were observed. The DIC analysis was applied using image correlation software (CIAS) which matches offsets between two images based on normalised cross-correlation. The inputs (i.e., both images need to be exactly the same resolution and to be a single channel grayscale). The output was the ASCII list of offsets in Cartesian and polar coordinates and correlation coefficients. Measuring an individual horizontal displacement vector basically involves two steps: (1) choosing an image section with sufficient contrast in the image at time 1 (called the ‘reference block’); (2) searching the corresponding image section within a sub-area in the image at that time. The ground coordinates of the central pixel within the reference block are known due to the usage of already georeferenced data (‘Geotiff’). The correlation coefficient provides the maximum displacement using the difference between the central pixel coordinates within the reference block and the central pixel coordinates in the corresponding location in the test block. The size of the test area must be chosen based on the expected displacement. Moreover, textural characteristics of the ground surface should be taken into account when choosing the size of the reference and test blocks. In the present study, the size of the reference block was 16 and the size of the test block was defined as 64. The results from DIC were then compared with the displacements estimated from the tracking of the well-constrained morphological features on the shaded relief images.

### **3. RESULTS AND DISCUSSIONS**

#### **3.1. LANDSLIDE MONITORING USING UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND LIDAR DATA: CASE OF GALLENZERKOGEL LANDSLIDE (YBBS, LOWER AUSTRIA)**

In the present study, three flight missions with the UAV (ARF MikroKopter OktoXL) were carried out over the landslide area. There was an interval of 197 days between the first and second UAV flights, and 152 days between the second and third UAV flights used to take the images. All images had a GSD of less than of 1 cm. All UAV flights lasted about 10 min, and all field work covering the entire on-site preparation and image acquisition step of the UAV-based image acquisition was completed in less than 2 h except for the driving time to the study area. This duration is quite short when compared to traditional field surveys. All DEMs and orthophotos were produced at a resolution of



10 cm and all models were generated with an average of 4 cm RMSE according to the GCPs. The RMSE values for data from the first, second and third flights were 0.06 m, 0.02 m and 0.04 m, respectively. In total, 396 images for the first UAV flight mission, 116 images for second, and 94 images for third were taken to generate the models. As the highest number of images was taken during the first flight, the best quality orthophotos were obtained from among them.

The UAV-based DSMs, orthophotos, point clouds and LIDAR-DEMs (obtained as DTMs and DSMs) were used for the monitoring of the Gallenzerkogel landslide. The LIDAR-DEM (1-m resolution) from 2009 represented the pre-landslide topography. The monitoring of the landslide was first carried out by applying the DoD. Before applying the DoD, the RMSE of the LIDAR-DEM and first UAV-DEM was calculated using 770 points located over places without vegetation cover outside the active landslide area. The RMSE value was determined as 0.2 m. First, in order to observe the change in vegetation between the LIDAR-DSM and the first UAV-DSM data, the differences that were reclassified as less than -15 m (selected on the basis of field observations) were obtained by the DoD method. This map shows both the trees that were destroyed by the landslide and the trees that were removed due to the landslide in the area. In addition, in order to determine landslide deformations, the DoD was applied by subtracting the first UAV-DSM from the LIDAR-DTM. Because the UAV-DSM data included vegetation cover, differences of greater than 2 m were eliminated. According to the deformation map, the difference was between -6.6 m and 2 m. Over the landslide area, a total of 4380.1 m<sup>3</sup> of the slope material was eroded, while 297.4 m<sup>3</sup> of the material had accumulated within the most active part of the slope. In addition, 688.3 m<sup>3</sup> of the total eroded material had belonged to the road destroyed by the landslide. In the present study, in order to monitor landslide activity during the period following the first UAV flight, a cloud-to-cloud comparison was carried out using the M3C2 algorithm. The cloud-to-cloud comparison of the first and second UAV flight data was applied because when the UAV meshes were generated, the vegetation surrounding the landslide area caused more noise. After eliminating both the distance uncertainty values of higher than 15 cm and the non-significant changes, the M3C2 distance was determined as -2.5 m – 2.5 m. Related uncertainty values ranged from 12.3 cm to 15 cm, with a mean value of 13.4 cm and a standard deviation of 7.4 mm. In the present study, neither DoD nor M3C2 methods could be used with the third flight data to monitor landslide activity. This was due to the

landslide control/stabilisation work, which had markedly increased following the date of the second flight, and the resulting excavation and replacement of the earth material in the study area. Thus, the landslide control/stabilisation work had considerably changed the topography data between the second and third flights. However, the high-resolution orthophotos enabled the visual monitoring of the control/stabilisation work in the area.

### **3.2. MONITORING OF SNOW COVER ABLATION USING VERY HIGH SPATIAL-RESOLUTION REMOTE SENSING TECHNIQUES: CASE OF UPPER DISCHMA VALLEY (DAVOS, SWITZERLAND)**

In the present study, snow cover ablation was firstly monitored based on the change of snow-covered areas. Snow-cover maps generated with a simple threshold classification are given in Fig. 6. The classification accuracy of both UAS- and TLS-based orthophotos was investigated in terms of user accuracy, producer accuracy, overall accuracy, and kappa index. According to these results, all UAS-based orthophotos enabled the snow-covered and snow-free pixels to be distinguished with a very high overall accuracy of 97%. The user accuracy values for UAS were determined as '1' for snow-covered pixels. Although the producer accuracy values were determined as '1' for snow-free pixels, a high producer accuracy value of '1' could not be obtained for the snow-covered class due to incorrectly classified pixels representing water, bare boulders and small stones which had values higher than the threshold. The number of such pixels incorrectly classified as snow increased with the increase in areas not covered by snow. The overall accuracy values obtained for TLS were also high (85%), but not as high as those for UAS. Change in the areal extent of the snow cover was calculated based on the data classified during the time sequences of both the UAS- and TLS-based orthophotos. Decreases of snow-covered areas due to snow ablation could clearly be seen in both the UAS- and TLS-based snow-cover maps. The UAS enabled the mapping of an area larger than the single-point TLS measurement. Moreover, there were many gaps (i.e., NoData pixels) in the TLS data due to the scanning angle. Gaps in the TLS data covered more than 30% of the scanned area. It was also observed that gaps in TLS-based orthophotos increased as the snow-covered areas decreased. Because the study area topography was nearly flat, the TLS could not accurately capture images for generating orthophotos. The simple threshold method applied in this study can be used to obtain snow-cover maps, to monitor snow ablation and to enable calculation of change in snow-covered areas with very high

accuracy. However, there is no standard for determination of the threshold value. In addition, the threshold value and classification success depend on the cumulative effects of the sensor specifications, light conditions, shadow effects based on topography and objects such as boulders, shrubs, trees, etc., and spectral features of existing objects in the area.

The comparison of UAS-based HS values was made using TLS-based HS values as a reference dataset because no field measurements had been carried out for HS. It was important to pay extra attention while monitoring the change in HS values. This was because the errors in the HS values were greater than those in the surface area measurements due to the fact that in the DSM differencing, the snow-free and snow-covered DSM errors could be additive. According to the statistical comparison of the UAS- and TLS-based HS values, the UAS-based HS values were mapped with a RMSE ranging between 0.07 m and 0.14 m over the time series. The highest RMSE was obtained from the UAS data of 9 May 2016 because these UAS-based HS values were mostly lower than the TLS-based HS values. In addition, the UAS- and TLS-based HS values were compared statistically via the independent t-test using the HS obtained from 30 points created over pixels covered with snow for the duration of all the time series. According to the independent t-test, the differences between the UAS and TLS HS values from the DSMs of 9 May 2016 were statistically significant. However, the remaining DSMs exhibited no statistically significant differences in HS values between UAS and TLS.

To compare change in HS for both UAS-DSMs and TLS-DSMs during the time series, 15 points randomly distributed over snow-covered areas were created for the DSMs of all series. Changes in HS during the time series showed that especially when less snow ablation had occurred between two time series, like the one-day interval data used in this study, some biased pixels were found in both the UAS- and TLS-based high-resolution DSMs. For example, P1, P2, P3, and P4 for UAS and P5 and P13 for TLS showed increases in the HS of 11 May 2016 when compared to 10 May 2016, even when no snowfall had been observed. The UAS-based HS values were more biased than the TLS-based HS values for the one-day interval observation. However, despite the one-day interval data bias in mapping snow ablation, many pixels were able to map areas where snow ablation was clearly observed.

### **3.3. LANDSLIDE MONITORING USING INSAR TIME SERIES ANALYSIS: CASES OF KARŞIYAKA ROAD LANDSLIDE (ZONGULDAK, DEVREK) AND HIMMETOĞLU VILLAGE LANDSLIDE (BOLU, GÖYNÜK) IN TURKEY**

A PSI analysis was applied to monitor the landslide that occurred on Karşıyaka Road (Devrek district, Zonguldak Province) on 16th June 2016 over a long-term period (1992-2015) using C-band SAR data from ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR, and Sentinel-1 satellites. The long-term evaluation period was divided into three sub-periods: 1) 1992-2001 for ERS-1 and ERS-2; 2) 2003-2010 for Envisat ASAR; and 2014-2015 for Sentinel-1. According to surface deformations obtained via PSI analysis, for the period of 1992-2001 (ERS-1 and ERS-2), deformation velocities varied between -25.5 mm/year and 23.4 mm/year. Negative values corresponded to surface subsidence, while positive values corresponded to surface uplifts. According to the deformation velocity map obtained from the ERS-1 and ERS-2 satellite data, as expected, Devrek district had more stable PS points, whereas both the landslide area and its surrounding area had more unstable PS points with the highest deformation velocities. For this first period of analysis, a total of 394 PS points were determined directly within the landslide area. The deformation velocities of these points varied between -25.4 mm/year and 23.1 mm/year.

According to surface deformations obtained via PSI analysis, for the period of 2003-2010 (Envisat ASAR), deformation velocities varied between -24.4 mm/year and 24.6 mm/year. According to the deformation velocity map obtained from data of the Envisat ASAR satellite, similar to first period of analysis, Devrek district had more stable PS points, but both the landslide area and its surrounding area had more unstable PS points with the highest deformation velocities, as was also expected. For this second period of analysis, a total of 357 PS points were determined directly within the landslide area. The deformation velocities of these points varied between -23.7 mm/year and 24.3 mm/year.

According to the surface deformations obtained via PSI analysis, for the period of 2014-2015 (Sentinel-1A), deformation velocities varied between -24.6 mm/year and 24.4 mm/year. According to deformation velocity map obtained from the Sentinel-1 satellite data, similar to the first and second periods of analysis, as expected, Devrek district had more stable PS points, but both the landslide area and its surrounding area had more unstable PS points with the highest deformation velocities. However, the number of PS points obtained from the Sentinel-1A SAR data was about three times higher than the

number of PS points obtained from both ERS-1/2 and Envisat ASAR. For this third period of analysis, a total of 1199 PS points were determined directly within the landslide area. The deformation velocities of these points varied between -24.5 mm/year and 24.3 mm/year. The PSI results obtained from Sentinel-1 data, covering the near-real time destructive landslide movement, were confirmed with field observations. It was observed that the PSI results were quite compatible with the field observations.

Stereo aerial photographs were also obtained from the General Directorate of Mapping (HGM) for the landslide area in Devrek district of Zonguldak Province. There are a total of 20 photographs from 1942, 1944, 1982, 1984, 1998 and 2011 available in the HGM archives. The aerial photographs of 2011 were taken with a digital camera, while the others were taken with an analog camera, scanned and digitised. It could be clearly observed from historical aerial photographs that the region has had a landslide problem since the 1940s. In addition, a noticeable growth in the settlement area towards to the toe of the landslide was observed from these aerial photographs. In addition to visual evaluation of the aerial photographs, digital photogrammetric methods were used to generate DEMs from stereo pairs of photographs. Although the M3C2 analysis of the data generated by digital photogrammetric methods between 1982 and 2011 did not allow mapping of the landslide-induced deformations due to the high number of modelling errors in the DEM, the M3C2 algorithm application for the 2011–2018 DEM data enabled the mapping of the landslide deformations. When the results of the M3C2 analysis of the 2011–2018 data were compared to the results of the PSI analysis obtained from the SAR Sentinel-1A satellite data, it was observed that the PSI results were quite compatible with the results obtained via photogrammetric methods. The geocoded orthophotos generated from both aerial photographs and UAV images revealed the horizontal displacements of buildings due to the landslide. For this purpose, two orthophotos belonging to 2011 and 2018 were used and accordingly, horizontal displacements ranging from 1.2 m to 41.3 m were observed on the landslide.

For the Himmetoğlu Village landslide, both PSI and SBAS methods were applied to obtain the surface deformations of the near-real time destructive landslide occurrence over a 9-month period. For this purpose, only the Sentinel-1 satellite C-band SAR data was used. According to surface deformations obtained via PSI analysis, deformation velocities varied between -18.52 mm/year and 30.5 mm/year. For this period of analysis, a total of 115 PS points were determined directly within the settlement area very close to

the landslide. The deformation velocities of these points varied between -18.4 mm/year and 18.1 mm/year. According to surface deformations obtained via SBAS analysis, deformation velocities varied between -14 mm/year and 22.9 mm/year. For this period of analysis, a total of 56 PS points were determined directly within the settlement area very close to the landslide. The deformation velocities of these points varied between -12.1 mm/year and 11.5 mm/year. The PSI and SBAS results obtained from Sentinel-1 data covering the near-real time destructive landslide movement were confirmed via field observations. It was observed that both the PSI and SBAS results were quite compatible with the field observations.

#### **3.4. MAPPING LANDSLIDE DEFORMATION AND DETECTING LANDSLIDE DISPLACEMENT FIELDS USING AERIAL LASER SCANNING DATA: CASE OF GSCHLIEFGRABEN LANDSLIDE (GMUNDEN, UPPER AUSTRIA)**

In the present study, firstly, in order to determine and map landslide deformations, the M3C2 algorithm was applied to 3D LIDAR point clouds. According to the results of the M3C2 algorithm, surface deformations ranging between -3 m and 3 m were determined and mapped. The resulting deformation map was also classified. According to the classified deformation map, a total of 96.5% of all pixels were in the deformation class with values ranging from -50 cm to 50 cm, while 1.1% of remaining pixels were in the eroded deformation class and 2.3% were in the accumulated deformation class. With this application, it was shown that the LIDAR data enabled the mapping of deformations even when there was dense vegetation covering the area.

In this study, two time series of the LIDAR dataset generated in 2008 were also used for obtaining landslide displacement fields via DIC analysis. The DIC analysis was performed using CIAS software. The study area selected for DIC analysis was 10.19 ha having two parts identifiable by visual inspection as clearly exhibiting more activity. Because of the large size of the dataset, the analysis was performed on the more active parts of the landslide area without including the whole of the LIDAR DEM data in the process. As expected, the DIC analysis identified high displacements within these two more active parts of the landslide area. According to results, between the two time series, displacement rates within the study area were determined as 0–32.2 m with sub-pixel precision image matching. The DIC provided displacements for 25445 points. The mean displacement was obtained as 0.23 m. In the study area, of all points, 51 had

displacements higher than 2 m, of which the mean of the maximum correlation coefficient was less than 0.70. Of these points, only three points showed displacement of more than 30 m, 10 points of more than 20 m, 21 points of more than 10 m, and 17 points of more than 2 m. These points were interpreted as unrealistic (extreme) values of displacement which were not compatible with the real situation.

## **4. CONCLUSION AND OUTLOOK**

### **4.1. LANDSLIDE MONITORING USING UNMANNED AERIAL VEHICLE (UAV) AND LIDAR DATA: CASE OF GALLENZERKOGEL LANDSLIDE (YBBS, LOWER AUSTRIA)**

In this study, a case application of UAV-based photogrammetry was carried out for the Gallenzerkogel (Lower Austria) landslide, via three flights conducted after the landslide event and LIDAR data representing the pre-failure topography. The presence of the LIDAR data of the area enabled the LIDAR and UAV data to be combined in the study. A standard digital camera was used to collect RGB (true colour) images for all UAV flights. The SfM was used to obtain DEMs, orthophotos and point clouds from hundreds of overlapping images. All SfM outputs were successfully used for the monitoring of the landslide. The UAV-DEMs and orthophotos show great potential for analysis of landslide behaviour. In this study, both DoD and M3C2 methods were used for analysis of landslide deformations. According to the DoD, a total of 4380.1 m<sup>3</sup> of the slope material was eroded, while 297.4 m<sup>3</sup> of the material had accumulated within the most active part of the slope. In addition, 688.3 m<sup>3</sup> of the total eroded material had belonged to the road destroyed by the landslide. The M3C2 algorithm proved to be suitable and satisfactorily accomplished accurate change detection results when compared to the most common DoD. The M3C2 algorithm, a modern methodology for change detection analysis, enabled the detection of changes in complex topography directly on point clouds, without meshing or gridding. Because the vegetation surrounding the landslide area caused more noise in generating meshes, the M3C2 algorithm was used in the cloud-to-cloud comparison. The M3C2 algorithm outputs indicated distance uncertainty and non-significant change between two series of data. Deformations caused by landslide activity could only be mapped by eliminating both the distance uncertainty values and the non-significant changes. Since the landslide control/stabilisation work had considerably changed the topography data between the second and third flights, neither the DoD nor

the M3C2 method could be used with the third flight data. However, high-resolution orthophotos enabled the monitoring of on-going control/stabilisation work.

#### **4.2. MONITORING OF SNOW COVER ABLATION WITH VERY HIGH SPATIAL-RESOLUTION REMOTE SENSING TECHNIQUES: CASE OF UPPER DISCHMA VALLEY (DAVOS, SWITZERLAND)**

In the present study, a comparison was carried out in a short time series (within a month) using UAS and TLS to monitor snow ablation with high-resolution remote sensing data. The main focus of this study was the investigation of UAS data performance in monitoring snow ablation. The TLS data was chosen for the reference in order to compare the results. Although the first three series of data were measured at one-day intervals (i.e., 9, 10, 11 May 2016), the next survey was carried out 16 days later (27 May 2016). Thereby, it became possible to observe the role played by the time interval of the data acquisition in the monitoring of snow ablation.

Change in the areal extent of the snow cover due to ablation was monitored using high-resolution orthophotos generated from both UAS and TLS imageries. By applying a simple threshold value to the blue-band information of the orthophotos, the snow-covered and snow-free pixels could be distinguished. Even though both UAS- and TLS-based orthophotos enabled the mapping of the snow cover, the UAS-based orthophotos provided more accurate snow-cover maps. Because the study area topography was nearly flat and objects (e.g., boulders, stones, etc.) obscured the underlying snow and thus hindered snow classification, the TLS images could not capture the area as accurately (Kappa = 0.72 – 0.84) as the UAS images (Kappa = 0.94 – 0.99), even though the TLS instrument was located at an elevated position in relation to the scanned area. Moreover, the UAS-based orthophotos allowed for the mapping of larger areas than the ones covered by TLS scans. Although UAS-based orthophotos provided very high accuracy for snow classification, some pixels were classified incorrectly due to the high reflectance of objects. Nevertheless, the number of incorrectly classified pixels could not be ignored in this study. Applying a threshold to the orthophoto blue band is a very simple and quick method that can be used to map snow cover and monitor snow ablation during a time series. However, it is clear that specific characteristics of the study area, such as the flat topography and absence of taller vegetation and elevated objects (forests, buildings, etc.), played a role in lessening the shadow effect and along with the day-time flights made this



classification approach applicable for the dataset used in the study.

Change in HS due to ablation was monitored by using high-resolution DSMs generated by SfM from digital UAS imagery and from 3D raw point clouds created by TLS operations. In this study, the CANUPO binary classification method was first applied to the TLS 3D raw point clouds since the point clouds had incorrectly sensed points which could adversely affect the calculation of HS. This classification is a new approach for improving the quality of models in order to obtain more accurate HS values in snow and avalanche studies. The UAS-DSMs were generated by using the SfM algorithm in the Agisoft Photoscan Professional software version 1.3.2. The 190 artificial GCPs defined from the DSM of 9 May 2016 were used in the SfM processing to obtain well-registered DSMs. This approach also resulted in important improvements in the quality of the models by avoiding general deformation (i.e., bending or doming effects) in the 3D models. Otherwise, the DSM of 11 May 2016, in particular, could not have been used for the monitoring of snow ablation because higher altitudes were recorded than had been logged in the previous data, even though no snowfall had been observed and the pixels showed clear ablation.

Most pixels representing change in the HS derived from the UAS data were consistent with the TLS data. According to the independent t-test, there were statistically significant differences between the HS values of the UAS and TLS DSMs from 9 May 2016. However, no statistically significant differences were seen between the HS of the UAS and TLS DSMs for the remaining time series. The same was also observed in the ME, MAE, SD, and RMSE values at around 0.1 m. In both the UAS- and TLS-based high-resolution DSMs some pixels detecting change in HS due to ablation between one-day intervals were biased. The UAS-based HS values were more biased than the TLS-based HS values because some pixels covered by snow were modelled at higher altitudes than the previous model had shown, even though artificial GCPs had increased the precision of the registration of the models. Because of the many factors contributing to bias in mapping the change in HS due to ablation, it can be concluded that both UAS and TLS should be used very carefully when monitoring snow ablation in terms of HS, particularly for short time spans such as some days where a change in HS of only a few centimetres occurs. On the other hand, UAS proved to be a valuable tool to map snow ablation, both in the X and Y extent and in the Z direction, when longer time intervals were chosen.

### **4.3. LANDSLIDE MONITORING USING INSAR TIME SERIES ANALYSIS: CASES OF KARŞIYAKA ROAD LANDSLIDE (ZONGULDAK, DEVREK) AND HIMMETOĞLU VILLAGE LANDSLIDE (BOLU, GÖYNÜK) IN TURKEY**

In the present study, InSAR time series analysis was applied using two methods, PSI and SBAS, within two landslide areas located in Turkey. One of these two landslide areas is located in Devrek district (Zonguldak Province), the other in Himmetoğlu Village (Göynük, Bolu Province). Although the landslide area in Devrek has been an active landslide since the 1940s, a destructive movement was triggered on 16 June 2016 causing damage to a number of buildings. In this case study, a long-term (1992-2015) monitoring of landslide deformation was mapped by applying PSI analysis from four different satellites: ESA's C-band ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR, and Sentinel-1. According to deformations obtained for the data covering the whole period, the deformations of Devrek district were more stable, while the landslide area and its surroundings exhibited more unstable deformations. In addition, the results obtained were confirmed via field observations. Owing to the availability of historical aerial photographs of the region since 1944, it was possible to apply both visual interpretation and digital photogrammetric methods. Although the M3C2 analysis of the 1982–2011 data generated by digital photogrammetric methods did not allow for the mapping of the landslide-induced deformations due to the high number of modelling errors of the DEM, the M3C2 algorithm application for the 2011–2018 DEM data enabled the mapping of landslide deformations. When the results of the M3C2 analysis of the 2011–2018 data were compared to the results of the PSI analysis from the Sentinel-1A satellite SAR data, the PSI results were found to be quite compatible with the results obtained via photogrammetric methods. In this case application, a successful combination of SAR data, aerial photographs and UAV data was presented for long-term monitoring of an active landslide.

The second landslide area in Turkey is located in Himmetoğlu village (Göynük district, Bolu Province). A destructive landslide event triggered by open-pit coal mining activities in the region was evaluated using both PSI and SBAS. In addition, UAV data were obtained over the landslide area. All deformation maps generated using both methods showed the highest deformation velocities were measured over the area where the building damage had occurred. In addition, the results of the InSAR time series analysis were confirmed via field observations. This case study demonstrated the possibilities of

using SAR data to investigate the adverse effect on the surrounding environment of open-pit mine activity.

#### **4.4. MAPPING LANDSLIDE DEFORMATION AND DETECTING LANDSLIDE DISPLACEMENT FIELDS USING AERIAL LASER SCANNING DATA: CASE OF GSCHLIEFGRABEN LANDSLIDE (GMUNDEN, UPPER AUSTRIA)**

Aerial laser scanning (LIDAR) data are some of the most important remote sensing data used in landslide studies. In the present study, both the point cloud comparison technique (i.e., the M3C2 algorithm) and DIC analysis were applied with two time series of LIDAR data. All case applications were carried out over a landslide located in Austria. For point cloud comparison, the M3C2 method was used. The inputs of this method are the 3D point clouds; however, all LIDAR data were obtained as DEM data. Thus, point cloud data were regenerated from LIDAR-DEM, even though this caused information losses. In general, the use of the DoD method provides differences in the Z direction. However, the M3C2 algorithm not only provided a difference in the Z direction, but also detected other differences between point clouds. When the results were overlapped with satellite data of the landslide area, as expected, higher deformations were mostly observed inside steep slopes having no vegetation cover over them.

Another method applied in the present study was DIC, which can be used to obtain landslide displacement fields. To this aim, two time series of LIDAR data acquired in 2008 were used. The DIC analysis was made using CIAS software. The DIC analysis calculated cross-correlation values of pixels inside a search window of the reference data by sliding it within a search window selected inside the cell-based data selected for comparison. The 2-direction displacements were determined in the grid cell that had the highest cross-correlation value. Consequently, one important limitation of the DIC in the calculation of the landslide displacement fields was the size of the windows used for the cross-correlation calculation. This requires prior knowledge regarding the displacement rates before its application.

# 1. GİRİŞ

Tez çalışması temel olarak 4 ana bölümden oluşmaktadır: 1) Giriş, 2) Materyal ve Yöntem, 3) Bulgular ve Tartışma ve 4) Sonuç ve Öneriler. Tezin ilk bölümü olan Giriş bölümünde alt başlıklar altında öncelikle “Doğal Tehlike ve Afetler” ile “Uzaktan Algılama” hakkında detaylı açıklama yapılmıştır. Ayrıca temin edilebilen veriler kapsamında uygulamaları gerçekleştirilebilen heyelan ve kar/çığ çalışmalarında uzaktan algılama tekniklerinin kullanımı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra tezin amaç ve kapsamı alt başlık altında anlatılarak yapılan çalışmalar hakkında kısaca bilgi verilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümü olan “Materyal ve Yöntem” başlığı altında tez kapsamında farklı uygulama örneklerinin gerçekleştirildiği çalışma alanları tanıtılmıştır. Daha sonra gerçekleştirilen her bir uygulama için ayrı bir alt başlık altında hedeflenen uygulama kapsamında temin edilen veriler, kullanılan yazılımlar ve yöntemler ile gerçekleştirilen çalışmalar detaylı olarak anlatılmıştır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümü olan “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında ise tez kapsamında farklı çalışma alanlarında farklı uzaktan algılama verileri ile birlikte farklı yöntemlerin kullanıldığı her bir uygulamaya ilişkin bulgular ayrı alt başlıklar altında paylaşılmaktadır.

Tezin dördüncü bölümü olan “Sonuçlar ve Öneriler” başlığı altında yine her bir uygulamaya ilişkin sonuçlar ve ilgili öneriler ayrı alt başlıklar altında verilmiş, daha sonra tezin amaç ve kapsamına ilişkin olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler anlatılmıştır.

## 1.1. DOĞAL TEHLİKE VE AFETLER

Temelde bir tehdit olarak anlaşılan tehlike teriminin literatürde yaygın şekilde kabul edilen çeşitli tanımlamaları bulunmaktadır. Tehlike, “insan hayatı kayıpları ve yaralanmalar, yapısal hasarlar, sosyal ve ekonomik yıkımlar veya çevresel bozulmalara sebep olabilen potansiyel olarak zarar veren fiziksel bir olay, olgu veya insan aktivitesi” şeklinde tanımlanmaktadır [1]. Bir diğer yaygın kullanılan tanımlama ise, “tehdit oluşturan bir olay veya belirli bir zaman dönemi içinde ve belirli bir alanda potansiyel olarak zarar oluşturabilen olgu olasılığı”dır [2]. Tehlike kaynakları, doğal (yani jeolojik,

hidro-meteorolojik ve biyolojik) ve insan-kaynaklı süreçler (çevresel yıkım ve teknolojik tehlikeler) olarak sınıflandırılmaktadır. Tehlikeler tekil olaylar halinde olabileceği gibi, sıralı (ardışık) veya kombine (farklı tip tehlikeler ile) olarak meydana gelebilmektedirler. Her bir tehlike konumu, yoğunluğu, sıklığı ve olasılığı ile karakterize edilmektedir [1]. Doğal tehlike (ya da hidro-meteorolojik tehlike), atmosferik, hidrolojik, jeolojik ve yangınlarla ilişkili olarak meydana gelebilen çevresel olgudur. Doğal tehlike, tehlike teriminin tanımında da görülebileceği gibi insan ve yapılarda zarara sebep olabilen doğa olayıdır. Hidro-meteorolojik tehlikelerin örnekleri; taşkınlar, moloz ve çamur akmaları, tropik kasırgalar, fırtına dalgaları, yıldırım/dolu fırtınaları, yağmur ve sert rüzgârlar, kar fırtınası ve diğer çeşitli fırtınalar, kuraklık, çölleşme, orman yangınları, sıcaklık dalgaları, kum veya toz fırtınaları, permafrost ve çığlar şeklindedir [3]. Doğal tehlike, potansiyel durumdan insanın zarar görebilirliğini etkileyen aktif duruma dönüştüğünde “afet” olarak tanımlanmaktadır. Afet, tehlikenin toplum veya alan üzerindeki etkisi olup, genellikle önlenilme kapasitesinin aşıldığı bir olay olarak tanımlanmaktadır [4]. Afetler, doğal tehlikeler ile insan aktivitelerinin kompleks şekillerdeki etkileşimleridir. Doğal tehlikelerin insan ve ekonomik gelişim üzerindeki etkileri, tek hane ölçeğinden ulusal ölçeğe değişiklik göstermekte olup bu nedenle bir olayın afet olarak sınıflandırılmasında uluslararası olarak üzerinde anlaşmaya varılmış minimum bir kriterden bahsedilememektedir [5]. Bununla birlikte, tehlike olarak değerlendirilen olaylar belirli bir afet-eşiğine ulaşmasalar ve bu yüzden de küresel afet veri tabanında yer almasalar dahi genellikle ortaya çıkan etki ve kayıpların önemli bir bölümünü oluşturabilmektedir [6]. Tehlike ve afet terimleri yanı sıra risk terimi de önemli olmaktadır. Risk terimi ile ilgili literatürde pek çok tanımlama bulunmaktadır. Ancak genel olarak risk, “bir tehlikenin/afetin neden olacağı kayıpların (ölüm, yaralanma, mal vb.) beklenen/tahmin edilen değeri” olarak tanımlanmaktadır [7]. Doğal afet riski, belirli bir doğal afet nedeniyle yaşam kayıpları ile yaralanmalarının beklenen/tahmin edilen sayısı, mülke verilen zararlar ve ekonomik aktivitenin bozulmasıdır. Bu tanımlamaya göre bazı unsurlar risk altında bulunmaktadır. Risk altındaki unsurlar, nüfus, topluluk, yapılı çevre, doğal çevre, ekonomik faaliyetler ve hizmetlerden oluşmaktadır [8].

Çevresel olaylar toplumu ve/veya çevreyi olumsuz olarak etkilediklerinde doğal tehlike olmaktadır. Bunların çoğu da yerleşim alanlarından uzak, özellikle dağlık alanlarda meydana gelmekte ve çoğu zaman ya hiç dikkat çekmemekte ya da hemen unutulmaktadır. Yeryüzünde insanoğlunun görünmeye başlamasına kadar, pek çok jeo-

fiziksel olay (depremler, volkanik sarsıntılar, kütle hareketleri ve sel/taşkınlar) sadece flora ve fauna üzerinde tehdit oluşturan olgular olarak değerlendirilirken günümüzde ise doğal tehlikeler, insanoğlunun büyük problemlerinden biri olarak nitelendirilmektedir [9]. Çünkü özellikle son dönemlerdeki oluşumları ve buna bağlı olarak meydana gelen ölümler ile ekonomik zararlarda önemli artışlar gözlenmektedir. Dünya genelinde, özellikle son 50 yılda, doğal tehlikelerin frekanslarında artış gözlenmektedir [10]. Doğal tehlikelerin frekanslarındaki artış oranının, yüzyılın başlangıcında yılda 10 adet iken sonlarına doğru yılda 450'nin üzerinde olduğu ifade edilmektedir [11]. Özellikle 1950'lerden sonra, doğal tehlikelerin sayısındaki artış üssel olarak gerçekleşmektedir. CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters)'in EM-DAT (Emergency Events Database) istatistiklerine göre, dünya genelinde, 1974-2003 arasında, salgın hastalıklar hariç 6.367 adet doğal afet kayıt edilmiştir [12]. Sadece 2003 yılında, bütün afet kaynaklı ölümlerin %86'sı doğal tehlikelerden kaynaklanırken, dünya genelindeki her 25 insandan biri olumsuz şekilde etkilenmiştir [12]. Yine dünya genelinde 2007-2013 yılları arasında (ki oldukça kısa bir zaman dilimidir) 2.507 adet doğal olarak meydana gelen afet EM-DAT veritabanına kayıt edilmiş ve bunlar 620.000'den fazla insanın hayatını kaybetmesine ve 1,2 milyardan fazla insanın etkilenmesine sebep olmuştur [13]-[19].

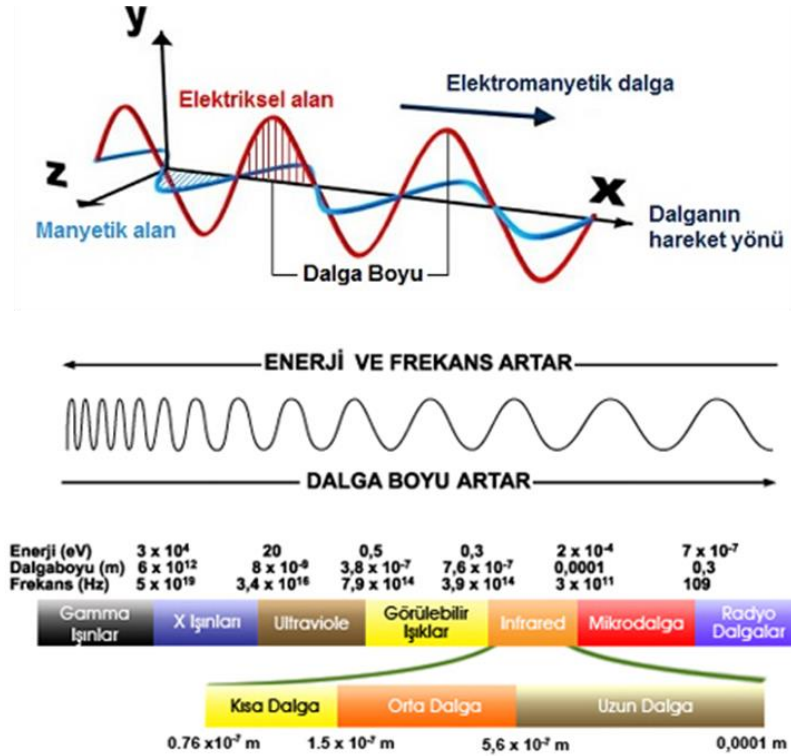
Özellikle dünyanın birçok bölümünde mevcut olan dağlık alanlar, çeşitli tehlike ve afetlere konu olmaktadır. Bir dağ, deniz seviyesinden olan yüksekliği, yamaç dikliği (eğimi) ve büyük platolar haricindeki engebeli yapısı ile tanımlanmaktadır. Dünya yüzeyinin %27'sini dağlar kaplamakta olup bu yaklaşık olarak karasal yüzeyinin de beşte birine karşılık gelmektedir [20]. Ayrıca dünya nüfusunun %22'sini teşkil eden yaklaşık 1,2 milyar insan [20], dağlar ve eteklerinde yaşamakta olup, insanoğlunun yarısı bir şekilde dağlık kaynaklara bağımlı durumdadır [21]. Dağlık bölgelerde yaşayan insanlar, tehlike ve riskler ile yaşamlarına devam etmek zorundadırlar. Pek çok dağlık alan sadece tek bir tehlikeye değil birden fazla tehlikeye konu olmaktadır. Son on yılda pek çok dağlık bölgenin artan şekilde doğal tehlikelere duyarlı hale geldiği ve doğal tehlikelerin oransal olarak yüksek miktarlarının dağlık alanlarda meydana geldiği bilimsel çalışmalarda ortaya konulmaktadır [22]. Dağlık alanlardaki çığları, moloz akmalarını, taşkınları, heyelanları, taş-kaya yuvarlanmalarını ve diğer tehlikeli toprak ve kaya kütle hareketlerini içeren tehlike niteliğindeki olaylar kayıplara, yaralanmalara, hizmetlerin aksamasına ve çevresel hasarlara yol açmaktadır. Çünkü dağlık alanlar diğer alanlara göre

nispeten daha fazla jeo-fiziksel ve hidrolojik olarak aktif durumda olup, yükseklik ve bakı kaynaklı enerji ve nemdeki değişimler ile biyolojik olarak önemli farklılıklara da sahiptir [23]. Rölyef ve jeolojisine ilave olarak, insan aktiviteleri de tehlikelerin etkileri üzerinde olumsuz şekilde artırıcı katkılar yapmaktadır. Dağ ormanlarının ortadan kaldırılması, uygun olmayan tarımsal uygulamalar gibi yanlış arazi kullanımları erozyonu hızlandırabilmekte ve heyelan, taşkın ve çığ olaylarının meydana gelme olasılıklarını artırmaktadır. Ayrıca uygun olmayan şekilde barajların, yolların ve maden sahalarının kurulumu da tehlikeli doğa olaylarının meydana gelmesinde artışa sebep olmaktadır. Yine son dönemde gündemde olan iklim değişikliği sismik olmayan doğal tehlikelerin artışında küresel ölçekte etkili rol oynamaktadır [22]. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2007 yılı raporuna göre iklim değişikliği ekstrem olayların (yani çığlar, heyelanlar, taşkınlık, kuraklıklar, rüzgar fırtınaları, sıcak hava dalgaları ve orman yangınları gibi doğal tehlikelerin) şiddet ve frekansında artışa sebep olacaktır [24].

## 1.2. UZAKTAN ALGILAMA

Yer gözlem olarak da adlandırılan uzaktan algılama, doğrudan temas olmaksızın yeryüzündeki alanlar veya objeler hakkında bilgi elde edilmesi [25] olarak veya Elektro-Manyetik Spektrumun (EMS) bir veya daha fazla bölgesindeki Elektro-Manyetik Radyasyonu (EMR) kullanarak, yukarı perspektiften alınan görüntülerden, dünyanın kara ve su yüzeyleri hakkında bilgi çıkarımı olarak tanımlanmaktadır [26]. Uzaktan algılama, EMS'nin çeşitli dalga boyu bölgelerinde alınan yer yüzeyine ilişkin görüntüleme bağlı olarak çalışmaktadır. Çünkü farklı yüzey malzemeleri ve/veya alanlar, malzemenin özelliklerine (yapısal, kimyasal ve fiziksel), yüzeyin pürüzlülüğüne, ışının geliş açısına, yoğunluğuna ve dalga boyuna bağlı olarak EMS'nin farklı bantlarındaki farklı enerji miktarlarını geri döndürmektedir [25]. Bu yüzden uzaktan algılama sistemleri belirli dalga boylarında obje tarafından yansıtılan, dağıtılan veya saçılan EMR'nin yoğunluğunu algılayacak şekilde tasarlanmaktadır [27]. Buraya kadar yapılan açıklamalara bağlı olarak uzaktan algılama sistemlerinin bütün işleyişi beş temel bileşene ayrılabilir: 1) enerji kaynağı (pek çok uzaktan algılamada güneş en yaygın kullanılan enerji kaynağıdır), 2) atmosferdeki partiküller ile enerjinin etkileşimi, 3) daha sonra hedef obje ve/veya alan ile etkileşim, 4) veri olarak sensör tarafından enerjinin kayıt edilmesi, 5) görsel ve sayısal olarak yorumlama için sayısal olarak görüntüleri üretilmesidir.

Elektrik ve manyetik alanlardan oluşan elektromanyetik (EM) enerji, harmonik bir dalga şeklinde, ışık hızında ( $\sim c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ) hareket eden bütün enerjileri kapsayan bir terim olarak tanımlanmaktadır. Uzayda EM enerjinin periyodik dalgalar şeklinde taşındıkları (hareket ettikleri) anlamına gelen harmonik dalga deseni zamanda eşit aralıklarda meydana gelen dalgaları ifade etmektedir (Şekil 1.1) [27]. Sadece malzeme ile etkileşime geçtiğinde algılanabilen EM enerjinin harmonik yapısından dolayı, dalga boyu ve frekans terimleri önemli olmaktadır. Dalga boyu, bir dalga üzerindeki noktadan bir sonraki dalga üzerindeki aynı konumlu noktaya olan mesafedir. Frekans ise belirli bir noktadan spesifik bir zaman biriminde ya da saniyede geçen dalga tepesi sayısıdır. Frekansın birimi hertz (Hz) olarak ifade edilmektedir. Önemli bir diğer terim olan EMS ise metre boyutlarından nanometre boyutlarına değişen dalga boylarındaki enerjinin kesiksiz gösterildiği spektrumdur (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. EM Radyasyon ve spektrum [25]

EMR'yi algılamada temel amaç, bir objeyi diğerinden ayırt etmek veya şekil, boyut ve diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi çıkarmak için spektral karakteristikleri kullanmaktır [25]. Bu amaç kapsamında, farklı sensörler, EMS'nin görünür, yakın kızılötesi, termal kızılötesi, mikro veya radyo dalgaları bölümlerinde objeleri uzaktan algılayabilecek şekilde geliştirilmektedir [28]. Uzaktan algılama sistemleri doğal şekilde mevcut olan enerjiyi ölçerse "pasif uzaktan algılama" olarak

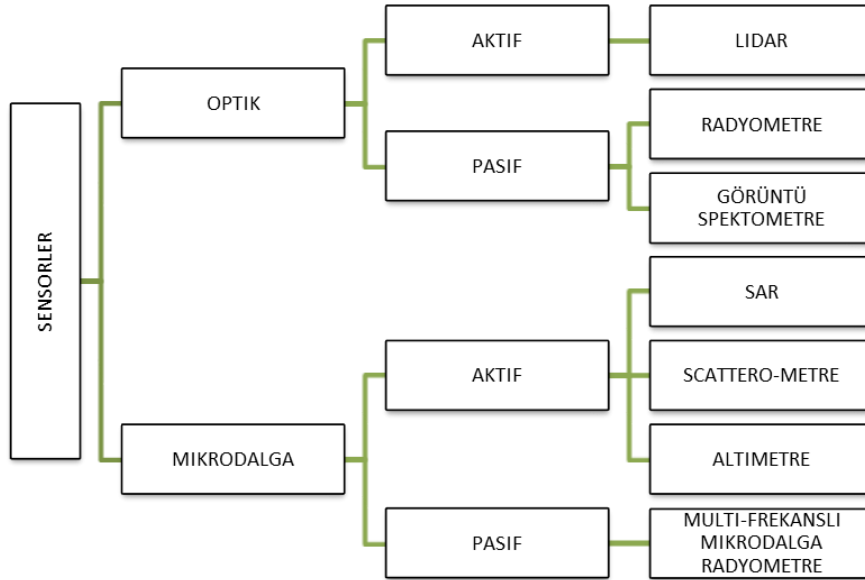


adlandırılmaktadır. Ancak bu doğal olarak mevcut enerji ifadesinden, bütün pasif sensörler için güneşten gelen enerji anlaşılmalıdır. Örneğin, termal kızılötesi ve pasif mikrodalga sensörler dünyanın kendisinden yayılan doğal enerjiyi ölçmektedir. Öte yandan, uzaktan algılama sensörleri hedefi aydınlatmak için gerekli enerjiyi kendileri sağlıyor ve de hedeften yansıyan bu radyasyonu algılayıp ölçüyorsa “aktif uzaktan algılama” olarak adlandırılmaktadır [27].

Uzaktan algılamada veri alım metotları, hava kameraları, tarayıcılar ve radar gibi bir sensörün kullanımına dayanmaktadır. Yersel, hava ve uzay olarak sınıflandırılan platformlar ile taşınan uzaktan algılayıcı sensör, EM enerjiyi algılayan, sayısallaştıran ve kayıt eden bir aygıt olarak tanımlanmaktadır [29]. Daha ziyade, hareket eden bir platforma monte edilen sensörler kullanılırken, nadir olarak da statik (sabit) platformlar kullanılmaktadır. Yersel sensörler, genel olarak daha küçük alanlarda yüzey hakkında daha yoğun ve detaylı bilgi kayıt etmede kullanılırken, hava platformları çoğunlukla herhangi bir zamanda (ki genellikle veri alımı amacına bağlıdır) dünya yüzeyinin herhangi bir bölümünde detaylı görüntüler almak için kullanılmaktadır. Uzayda ise uzaktan algılama, uzay mekiği ve daha yaygın olarak da uydular ile gerçekleştirilmektedir. Uzaktan algılama sensörleri oldukça geniş ölçeklerde (yani piksel çözünürlüklerinde), radyometride, bant sayılarında ve bant genişliklerinde veri sağlamaktadır. Ayrıca veri sürekliliği, sinoptik kapsama alanı, küresel ulaşım, birim alan maliyeti, tekrar edilebilirlik, doğruluk ve belirsizliklerin giderilmesinde çok daha ayrı avantajlar sağlamaktadır [30]. Başka bir ifadeyle, her bir sensör kendi teknik karakteristiğine sahiptir ve kullanım amaçlarına bağlı olarak avantaj ve dezavantajlarından bahsetmek mümkün olmaktadır.

Genel olarak, uzaktan algılamada kullanılan sensörler, optik sensörler ve mikrodalga sensörler şeklinde iki kategoriye ayrılmaktadır. Daha öncede bahsedildiği gibi bunlar pasif veya aktif olabilmektedir. Uzaktan algılama sensörleri ayrıca piksel boyutu veya yer örnekleme mesafesine göre 1) düşük çözünürlüklü ( $\geq 30$  m ve  $< 300$  m), 2) orta çözünürlüklü ( $\geq 5$  m ve  $< 30$  m), 3) yüksek çözünürlüklü ( $\geq 1$  m ve  $< 5$  m) ve 4) çok yüksek çözünürlüklü ( $< 1$  m) [31] olarak da sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, piksel boyutu 16 m’den daha küçük olan uydu görüntüleri genel olarak yüksek çözünürlüklü olarak ifade edilmektedir. Ayrıca, uzaktan algılama sensörleri günümüzde temelde sensörün algılayabildiği bantların tipi ve sayısına göre: 1) pankromatik, 2) termal, 3) mikrodalga, 4) multi-spektral ve 5) hiper-spektral sensörler olarak sınıflandırılabilirler.

Uzaktan algılamadaki sensörlerin sınıflandırılmasının şematik bir gösterimi Şekil 1.2’de verilmektedir. Pankromatik sensörler görünür ışık veya yakın kızılötesi ışık spektrumundaki bantları kapsamaktadır. Pankromatik terimi çok geniş dalga boyundaki bütün fotonları kayıt eden görüntüler için kullanılmaktadır. Pankromatik görüntüler ayrıca çok yüksek çözünürlük ile karakterize edilmektedir [32]. Multi-spektral tarayıcı ise EMS’nin iki veya daha çok bantlarında aynı anda görüntü alımı yapmaktadır [25]. Hatta bunlar pankromatik bandı da içerebilmekte olup uzaktan algılamada en çok kullanılan tarama sistemleridir. Termal tarayıcılar ise EMS’nin sadece termal bölümünde çalışan multi-spektral tarayıcıların spesifik tipleridir. Termal sensörler yüzeylerinde yer alan foton algılayıcıları (ki bunlar fotonlarla direkt temasa duyarlıdır) aracılığıyla yayılan termal radyasyonu algılamak için kullanılmaktadır [25]. Hiper-spektral uzaktan algılama ise yüzlerce çok dar, kesiksiz (sürekli) olarak EMS’nin görünür, yakın kızılötesi ve orta kızılötesi bölümlerindeki spektral bantlarda alım yapan multi-spektral tarama sistemlerindeki son gelişme olarak ifade edilmektedir.



Şekil 1.2. Uzaktan algılamada kullanılan sensörlerin sınıflandırılması [33].

### 1.2.1. Pasif Optik Uzaktan Algılama Sistemleri (Kameralar, Tarayıcılar)

Optik mekanik tarayıcı sistemler, uzaktan algılama sensörlerinin önemli bir grubunu oluşturmaktadır [34]. Dolayısıyla optik görüntüler de uzaktan algılamanın en yaygın kullanılan tipi olmaya devam etmektedir. Çünkü optik görüntülerin çok amaçlı kullanıldıkları ve yüksek oranda güvenilir oldukları yapılan pek çok çalışmada gösterilmektedir. Optik görüntülerin alımında kullanılan uzaktan algılama sistemleri,

görüntüleme ve tarama sistemleri olarak kategorize edilmektedir [35]. Kameralar ve vidikonlar, bir alanın anlık görüntüsünün alımında kullanılan görüntüleme sistemleri örnekleridir. Yer yüzeyinin görüntülenmesinde, uzaktan algılamada kullanılan kameralar, en basit ve en eski sensörlerdir. Hava fotoğrafları, özellikle bu amaçla geliştirilmiş kameralar kullanılarak hava araçları vasıtası ile alınmaktadır. Kamera sistemleri çoğunlukla hava fotoğrafı alımında hava aracında bulunsa da düşük yörüngeli uydular ve NASA (National Aeronautics and Space Administration)'nın uzay mekiği misyonları da klasik kameralar kullanmaktadır [36]. Vidikonlar, elektronik olarak yüklü yüzeylerde görüntünün kayıt edilmesinde kullanılmaktadır [35]. Uzaktan algılama görüntülerinin oluşturulmasında EM enerji hem fotografik olarak (yani analog olarak) hem de elektronik olarak (yani sayısal olarak) algılanabilmekte ve kayıt edilebilmektedir. Günümüzde film ve sayısal olmak üzere iki temel tip kamera kullanımında bulunmaktadır [37]. Hava fotoğraflarında kullanılan film karakteristikleri; pankromatik (siyah ve beyaz, S/B) (0,4-0,7 mikron), kızılötesi (S/B) (0,4-0,9 mikron), renkli (0,4-0,7 mikron) ve renkli kızılötesi (0,4-0,9 mikron) olarak sınıflandırılmaktadır. Kameralara ilave olarak uzaktan algılama ayrıca EMS'de çoklu bantlara duyarlı olan algılayıcılar kullanılmaktadır. Günümüzde sensörler ile veri alımı esas olarak sayısal formatta gerçekleştirilmektedir. Çünkü günlük hayatta kullanılan film kameralarının yerini dijital kameraların aldığı gibi havadan yapılan ölçümlerde de dijital sensörler kameraların yerini almış durumdadır. Bu nedenle görüntü herhangi bir resimsel, yani piksel tabanlı gösterim olarak tanımlanmakta iken fotoğraf ise kimyasal reaksiyonlar temelinde fotoğraf filmlerine kayıt edilen spesifik görüntüler olarak tanımlanmaktadır [27], [37]. Tarayıcı sistemler de görüntü üretmede arazi (yüzey) boyunca taranmış sonlu bir görüş alanında etkili olan algılayıcı kullanılmaktadır [27]. Optik tarayıcılar, tarama aygıtına sahip elektro-optik uzaktan algılama sensörleri olup, görünür ışıktan mikrodalga aralığına kadar oldukça geniş spektrumda algılamada kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerin çıktısı, kullanılan sensörün tipine bağlı olarak bir veya daha fazla algılayıcı sensörden oluşan algılayıcı ve tarayıcılar kullanılarak üretilen sayısal görüntülerdir. Tarayıcı sistemler dört temel tarama modunda kullanılmaktadır: 1) yörünge enine tarama, 2) dönel tarama, 3) yörünge boyuna tarama ve 4) yan tarama [27]. Bu kapsamda kullanıcılara dağıtılan görüntülerin alımında operasyonda olan çeşitli uydu sistemleri bulunmaktadır. Uydular ile uzaktan algılamanın modern çağı Landsat Multi-Spektral Tarayıcı (MSS)'nin ilk kez 1972 yılında yer yüzeyinin yüksek çözünürlüklü sinoptik görüntülerinin sağlanması ile başlamıştır [38]. Uydu uzaktan algılamada yaygın şekilde kullanılan sensörlerden biri olan MSS, anlık

olarak EMS'nin farklı bantlarında görüntü alımı gerçekleştirmektedir. Multi-spektral görüntülerin alımları temel olarak iki metot ile gerçekleştirilmektedir: 1) görüntüleme sistemleri ve 2) tarama sistemleri [27]. MSS, NASA'nın kitle pazar enstrümanlarının ilk örneğidir [39]. Tematik Haritalayıcı (Thematic Mapper (TM)) optik uzaktan algılamada kullanılan bir diğer yaygın görüntüleme sistemidir. TM her birinin görünür ve kızılötesi bantlarda çalıştığı 16 algılayıcı seti (dizisi) ve salınan tarama aynalı, yörünge enine tarama yapan bir sistemdir [27]. Modern sistemler çizgi dizili veya matris dizili geniş süpürge tarama düzenli yük-bağlaşik aygıt (charge-coupled device (CCD)) temelinde çalışmaktadır [40]. CCD sayısal görüntü alımında bugün yaygın olarak kullanılan algılayıcı konumundadır. Öncelikli olarak kompakt bir görüntü sensörü olarak geliştirilen CCD, günümüzde pek çok bilimsel çalışma alanında, görünür ve ultraviyole dalga boyunda çalışan üstün bir görüntü sensörüdür [41]. Paralel çerçeve sensörleri olarak bilinen bu sistemler görünür aralıktan orta kızılötesine değişen üç ve altı spektral bantta radyasyonu algılamaktadır [42].

### **1.2.2. Lazer Tarayıcı (LIDAR) Sistemler**

Uzaktan algılama sistemleri tarafından mesafe, sayısal olarak kaynaktan objeye ve daha sonra objeden kaynağa tekrar geri dönen radyasyonun bu iki yönlü hareket zamanının çok hassas şekilde ölçülmesi ile belirlenebilmektedir [43]. Ancak bu prensip darbeli veya modülasyonlu bir kaynak ve yeterli zaman çözünürlüklü bir algılama sistemi gerektirmektedir. Bu sistemler, ses, radyo dalgaları ve ışık kullanımına bağlı olarak SONAR (Sound Navigation Ranging) veya SODAR (Sound Detection And Ranging), RADAR (Radio Detection And Ranging) veya LIDAR (Light Detection And Ranging) şeklinde sınıflandırılmaktadır [43]. SONAR su altında mesafe belirleme amaçlı kullanılırken, diğerleri atmosferde kullanılmaktadır. Bütün mesafe belirleme sistemleri EM enerjinin yayılması ve alınması prensibi ile çalışmaktadır. Aralarındaki temel farklılık kullandıkları bant frekansları olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen sistemlerden biri olan ve literatürde; Lazer Kaynaklı Yön ve Mesafe Belirleme (Laser Induced Direction And Ranging) [44], lazer altimetre (laser altimeter) [45], [46], lazer tarama (laser scanning) [47] ve daha yaygın şekilde Işık Algılama ve Mesafe Belirleme (Light Detection And Ranging) [48] şeklindeki farklı terminolojiye sahip LIDAR, taşıyıcı olarak lazer ışın demetini kullanan aktif bir uzaktan algılama sistemidir [48]. LAZER (Laser) kısaltması ise "Light Amplification by Stimulated

Emission of Radiation”, yani radyasyonun uyarılmış emisyonu ile ışığın güçlendirilmesine karşılık gelmektedir [49]. LIDAR terimi ilk olarak Middleton ve Spilhaus tarafından 1953 yılında ortaya konulmuştur [43]. Hiç şüphesiz günümüzün en önemli coğrafi-konumsal veri alım teknolojisi olan LIDAR aslında yeni değildir. LIDAR’ın uzaktan algılama aygıtı olarak kullanımı tarihte 30 yıldan fazla geriye gitmektedir [45]. Temelde LIDAR prensibinin ortaya çıkışı, her ne kadar modern LIDAR teknolojisinin gelişimi 1960’lardan sonra hızlı şekilde gelişmeye başlamışsa da lazer öncesi dönemlere dayanmaktadır [43], [45]. O zamandan beri lazer doğal çevrelerin doğru ve daha hassas ölçümünde önemli bir role sahiptir [47]. Lazer, yüksek oranda koşutlanmış, yönelimli, koherent ve eş fazlı bir EMR ışın demeti (veya darbesi) üreten ve yayan bir cihazdır [49]. İkinci dünya savaşının sonunda radarın gizliliğinin ortadan kalkması ile geliştirilen ilk cihaz başarılı bir şekilde kullanılmıştır [43]. Özellikle 1970’lerde, tekniğin güvenilirliği artmış ve mühendislik ölçümleri ve yapı endüstrisinde lazerlerin kullanımı başlamıştır. Daha sonra, 1980’lerde ve 1990’larda, sistemin hava şartlarına dayanıklı makinelere adaptasyonu ile çevresel sistemlerde geniş bir alanda uygulama imkânı bulmuştur [43], [45]. Yakın görünür ışık kaynağı kullanan, Elektromanyetik Mesafe Ölçüm (Electromagnetic Distance Measuring (EDM)) araçlarının gelişimi, DTM (Digital Terrain Model) üretiminde gerekli veriyi etkin şekilde toplamaya imkân verdiği için disiplinin gelişiminde önemli etkiye sahip olmuştur. Ancak, büyük alanlardaki (özellikle  $>1 \text{ km}^2$ ) yoğun haritalama, klasik teodolit EDM kullanımı ile büyük işlem zamanı ve maliyeti ortaya çıkarmıştır [43]. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için, LIDAR teknolojisi 1995’ten bu yana, satışa hazır şekilde ticari pazarının gelişimi ile faydalı bir araç olarak yer almaktadır [45]. Çünkü LIDAR hızlı şekilde, yoğun ve yüksek doğrulukta nokta bulutları üretebilmekte ve topoğrafyanın sayısal modellerinin oluşturulmasına ve hedef yüzeyin düşey yapısının modellenmesine imkân sağlamaktadır [45], [50].

Temelde LIDAR sistemi verici ve alıcıdan oluşmaktadır. LIDAR’ın bileşenleri çoğunlukla; 1) verici, 2) verici optikleri, 3) alıcı optikleri, 4) algılayıcı, 5) veri alımı, işleme, değerlendirme, görüntüleme ve kayıt etmede kullanılan elektronik sistemden oluşmaktadır [43]. Bütün lazer sistemler, sensör ve aydınlatılan zemindeki nokta arasındaki mesafeyi ölçmektedir [48]. Sistem tarafından ölçülen mesafe kısa süreli lazer ışının yayımı ile sensör alıcısındaki aynı ışının yansımasının (yani geri dönen sinyalin) geri dönüşü arasındaki gidiş-geliş süresinin hassas ölçümü ile belirlenmektedir [51].

LIDAR sistemler; 1) ışının yayılım fiziksel sürecinin çeşidine (Rayleigh, Mie, elastik ve elastik olmayan geri yansıma, emilim ve aydınlanma gibi), 2) kullanılan lazer tipine (Die ve ND: YAG), 3) LIDAR ölçümlerinin amacına (aerosol, bulut özellikleri, sıcaklık, ozon, nemlilik ve su buharı, rüzgar ve türbülans gibi), 4) LIDAR'ın ölçebileceği atmosferik parametrelere (Atmosferik yoğunluk, gaz kirleticiler, atmosferik sıcaklık profilleri gibi), 5) ölçümlerde kullanılan dalga boyuna (ultraviyole, kızılötesi görünür), 6) LIDAR konfigürasyonlarına (monostatic, biaxial, coaxial, düşey olarak noktalı ve tarayıcı LIDARlar ve bi-static), 7) ölçüm moduna (analog ve dijital), 8) platform tipine (laboratuarlardaki istasyonlar, mobil araçlar, balon, uçak ve uydu), 9) dalga boyu sayısına (tekil ve çoklu dalga boyulu) bağlı olarak oldukça farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır [52].

Genelde LIDAR platformları, karasal veya yersel, hava ve uzay tabanlı olmaktadır. LIDAR, ilk olarak dünya genelinde iklim gözlemleri yapabilmek için sabit konumlu yersel bir aygıt olarak geliştirilmiştir. Bunun dışında yersel lazer tarayıcı yoğun üç boyutlu konumsal veri setleri toplamaya imkân veren bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Bunlar yapısında, çalışmasında, maksimum menziline, doğruluk derecelerinde, çözünürlüklerde ve merkezi lazer dalga boylarında farklılaşan yersel tarayıcı sistemlerdir [53]. Yersel lazer tarayıcılar ayrıca köprü, bina ve kıyı ölçümleri için sabit konumlu tripodlara monte edilebildikleri [54] gibi optik görüntüleme tabanlı mobil haritalama sistemlerinden evrilmiş mobil platformlar da mevcuttur [55]. LIDAR'ın gelişimi daha sonra hava ve uzay platformlarına evrilmiştir. LIDAR sisteminin ilk başarılı uygulamalarından sonra araştırmacılar hava araçlarında taşınabilecek formlarının oluşturulmasına yönelik çalışmalara başlamışlardır [56]. Günümüzde hava LIDAR sistemleri geniş alanlarda veri alımı için kullanılan en yaygın ve düşük maliyetli denebilecek platform olup uçaklar ve helikoptere adaptasyonu sağlanmıştır. Pek çok hava platformu bir saatte 50 km<sup>2</sup> alanı tarayabilme kapasitesine sahiptir [54]. Dünya yüzeyine düşen herhangi bir ışın noktasının X, Y ve Z koordinatlı pozisyonu üç kaynaktan yararlanarak belirlenmektedir; 1) LIDAR sensörü, 2) Hava aracının Referans Navigasyon Birimi (Inertial Navigation Unit, INU) ve 3) GPS (Global Positioning System) [47]. Hava araçları kadar yaygın olmasa da ölçüm kapasiteleri hava lazer tarama sistemlerinden 100 kat daha büyük olan uzay lazer tarama sistemleri de mevcuttur [57]. Ancak, lazer tarama kullanan uzay sistemlerinin misyonları operasyonel karakteristikleri bakımından sınırlı olmaktadır.

LIDAR sistemlerde kullanılan dalga boyları yaklaşık 250 nm'den 11 µm'ye uygulamaya bağlı olarak değişmektedir [58]. Yersel lazer uygulamalarında lazer dalga boyları 900-1064 nm arasındadır [51]. Lazer ışının şiddeti ve alıcı açıklığının büyüklüğü maksimum uçuş yüksekliğinin belirlenmesinde etkili olan temel faktörlerdir [48]. Geri dönen sinyalin yoğunluk ya da şiddeti, gönderilen ışının toplam şiddeti, lazer ışınının fraksiyonu, lazerin dalga boyunda asılı yüzeyin yansıtılması ve yansıtılan aydınlanmanın fraksiyonu gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir [51]. Geri dönen sinyalin tipine bağlı olarak, LIDAR sistemler “kesikli geri dönüş” veya “tam dalga-formu” olarak kategorize edilmektedir [46], [51]. Kesikli geri dönüş lazer sistemler; bir ışın (ilk veya son geri dönüş), iki ışın (ilk ve son geri dönüş) veya çoklu ışın (beş geri dönüşe kadar) ölçümü yapabilirken, tam dalga-form sistemler eşit zaman aralıklarında seri olarak sensöre geri dönen enerjinin miktarını ölçmektedir [46]. Çoklu ışın ölçümü yani beş geri dönüşe kadar ölçüm yapabilen sistemler daha yaygın şekilde kullanılmaktadır [54].

### **1.2.3. Hiper-spektral Uzaktan Algılama Sistemleri**

Hiper-spektral uzaktan algılama, yüksek spektral ve konumsal çözünürlüklü veri sağlayan bir diğer gelişmekte olan tekniktir. Hiper-spektral uzaktan algılama, multi-spektral sistemlerin arkasından gelişen spektral görüntüleme yeni nesil teknolojidir [59]. Hiper-spektral uzaktan algılama daha doğru bilgi çıkarımı sağlayarak uzak çevreleri anlamamızı pozitif yönde etkilemektedir. Çünkü görüntüdeki her pikselden çok daha detaylı spektral bilgi elde edilebilmektedir. Hiper-spektral uzaktan algılama ve görüntü spektroskopisi bu kapsamda kullanılan iki teknolojidir. Bu iki teknoloji arasındaki farklılık şöyle açıklanabilmektedir; hiper-spektral uzaktan algılama, daha ziyade uzaktan algılama sistemi olarak tanımlanırken, görüntü spektrometri teknolojisi bütün konumsal ve spektral alanları (mikroskopiden makroskopiye) kapsamaktadır [60]. Literatürde, görüntü spektroskopisi, görüntü spektrometri, hiper-spektral görüntü ve nadir olarak ultra spektral görüntü terimleri kullanılmaktadır [61]. Görüntü spektrometrinin orijinal tanımı “parlaklık spektrumu türetilebilen her bir piksel için kesiksiz (sürekli), kayıt edilmiş yüzlerce spektral bantlarda görüntü alımı”dır [62], [63]. Görüntü spektrometrisinin bir diğer tanımı “çok sayıda dar, spektral olarak sürekli bantlarda, kalibre edilmiş parlaklık birimlerinde ölçülen ve uzaktaki bir platformdan konumsal olarak bağdaştırılan anlık alımlar” şeklindedir [64]. Hiper-spektral uzaktan algılamanın hedefi multi-spektral sistemlere benzer olarak çok sayıda dar ve sürekli bantlardan oluşan görüntüler şeklinde alınmış ve kalibre edilmiş spektradan dünya sistemi bileşenlerini sayısal olarak

ölçebilmektir [65]. Başka bir ifadeyle, MSS ve TM gibi multi-spektral sensörler nispeten geniş birkaç dalgaboylu görüntüler üretirken, hiper-spektral sensörler bitişik yüzlerce dar spektral bantlarda görüntü üretmektedir [66]. Yirminci yüzyılın sonlarında geliştirilen uydu sistemleri dünyanın birkaç spektral bantta görünüşünü sağlamaktadır. Ancak multi-spektral uydular dünyanın yansıyan solar spektrumunu gösteren bütün bileşik bilgiyi yakalamada yetersiz olmaktadır [61]. Pek çok dar bantta yapılan hiper-spektral alım analistlere piksellerde temsil edilen dünyanın spektral yansıma eğrilerini oluşturma imkânı vermektedir [67]. Hiper-spektral uzaktan algılamanın multi-spektral uzaktan algılamaya üstünlükleri bir piksele karşılık gelen her bir noktadaki bütün spektrumunu elde edebilmesi, yüzey özelliklerinin belirlenmesinde multi-spektralin kısıtlı kapasitesini ortadan kaldırmasıdır [59]. Hiper-spektral uzaktan algılamanın esas dezavantajı da yüksek maliyeti ve kompleks yapısıdır. Ayrıca, hiper-spektral verinin aşırı şekilde büyük olması yüzünden büyük depolama kapasitesi gerektirmesi dezavantaj olarak ifade edilebilir.

Görüntü spektroskopisi veya hiper-spektral görüntü uzun bir gelişim ve bilim toplumu tarafından kabul görme geçmişine sahiptir. Hiper-spektral sistemlerde meydana gelen gelişim dijital elektronikler ve bilgisayar sistemlerindeki gelişim ile yakından bağlantılıdır. Teknolojik gelişmelere paralel ortaya çıkan artış spektroskopinin potansiyelinde farkındalık yaratmaktadır. Spektroskopi terimi ilk kez 19. Yüzyıl sonlarında kullanılmış [61] ve spektroskop ilk olarak astronomlar tarafından yıldızların, kümelerin, galaksilerin ve yıldız bileşimlerinin dairesel hızlarının belirlenmesinde kullanılmıştır [68]. Hiper-spektral görüntü terimi literatüre ilk kez Goetz ve diğerleri tarafından 1985 yılında eklenmiştir [62]. Arazi ve laboratuvar spektrometreleri yansıtma değerlerinin ölçümünde kullanılmakta ve böylece sürekli eğriler şeklinde spektrum değerleri elde edilmektedir. Elde edilen spektrometre ölçümlerinin analiz edilmesiyle görüntüdeki her bir piksel için detaylı spektrum elde etmek mümkün olmaktadır. Bu yüzden görüntü spektrometreleri ile yüksek spektral çözünürlüklü spektrumlar kullanılarak toplanan yansıtma değerlerine dayanarak malzemelerin tanımlanması yapılabilmektedir [69].

Hiper-spektral görüntüler, görüntü spektrometre (ya da hiper-spektral sensör veya spektroskop) adı verilen cihazlar kullanılarak üretilmektedir. Görüntü spektroskopları, CCD'nin daha yenilikçi bir tasarımıdır [60]. Hiper-spektral sensörler tipik olarak 150 ila 300 adet 5-10 nm bant genişliklerinde kesiksiz bantlar şeklinde 350-2500 nm arasındaki



dalgaboylarında yansıtılan spektrumu ölçmektedir [70]. Ayrıca, son dönemde geliştirilen sensörler nanometre altı aralıklarda daha yüksek spektral çözünürlüklü görüntüler alınmasına imkân vermektedir [71]. Bu sensörler genellikle hem yer platformlarında (istasyon veya el cihazı olarak) hem de hava ve uzay platformlarında kullanılmaktadır. Arazi ya da laboratuvar cihazları araştırma topluluklarının gereklilikleri doğrultusunda geliştirilmişlerdir. Yer platformu sistemleri daha fazla yüksek spektral çözünürlük gerektiren daha hassas ölçümler yapmada kullanılmaktadır [59]. Spektrometre bir görüntüleme sensörü olarak kullanıldığında, benzer şekilde görüntüdeki her bir piksel için dar, kesiksiz yansıtma spektrumlarına sahip görüntü üretmektedir. Görüntü spektrometrenin (yani hiper-spektral uzaktan algılama) başlaması 1972 yılında Landsat-1 uydusunun fırlatılmasına dayanmaktadır [63]. Görüntü spektroskopisine dayanan yer gözlemi, yirmi yıldan fazla bir sürede seyrek olarak kullanılabilen bir araştırma aracından, geniş bir kullanıcı topluluğuna sunulan bir meta ürününe dönüştürülmüştür [61]. Hava platformlarında hiper-spektral uzaktan algılama kullanımı da yaklaşık 30 yıllık bir geçmişe dayanmaktadır [59]. İlk görüntü spektrometre (ki Görüntü Spektrometre Tarama (Scanning Imaging Spectroradiometer, SIS) olarak adlandırılmaktadır) NASA Johnson Uzay Merkezi için 1970'lerin başlarında yapılmıştır [65]. NASA üretilen görüntüleri hiperspektral olarak adlandırmış olduğu farklı görüntü spektrometreler ortaya koymaktadır [67]. Hava platformlarındaki hiper-spektral sensörlerde spektral aralık genellikle 380-12700 nm arasındadır [42]. Jet Propulsion Laboratuvarının (JPL) havasal görüntü spektrometresi (Airborne Imaging Spectrometer, AIS) gelecek görüntü spektrometrelerin yapısal gelişiminde en fazla etkiye sahip birinci nesil cihazdır. İlk kez 1983 yılında uçurulan AIS, 1,2-2,4 mikron aralıklarında 128 banda sahipti [67]. AIS'nin başarısı hava görünür/kızılötesi görüntü spektrometrenin (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS) ortaya çıkmasına ve gelişimine öncülük etmiştir [61]. AVIRIS ilk kez 1986 yılında uçurulmuştur ve 0,4-2,5 mikron aralıklarında 224 bantta görüntü alımı gerçekleştirmiştir [67]. AVIRIS, uçurulmuş en kaliteli ve en iyi kalibre edilmiş havasal görüntüleme sensörü kabul edilmektedir [63]. Hava platformlarında bu iki gelişmeden sonra başarılı şekilde kullanılan çeşitli yeni görüntüleme sistemleri ortaya çıkmıştır. HyMap, Integrated Spectronics tarafından Sidney'de (Avustralya) geliştirilen gelişmiş hiper-spektral sensörlerinden biridir ve mevcut hava hiper-spektral uzaktan algılamanın en gelişmiş sistemidir [72]. HyMap sensörü, VIS, NIR, SWIR, MWIR ve TIR spektral bölgelerinde (0,45-2,5  $\mu\text{m}$ ), 10-20 nm spektral bant genişliklerinde 126 spektral bantta alım yapma kapasitesine sahiptir [72], [73]. Bu sensörlerin yanında hava

platformlarında mevcut başarılı şekilde kullanılan AISA, HYDICE, CASI ve HyperCAM gibi farklı sensörler de bulunmaktadır ve detaylı listesi Cocks ve diğerleri tarafından verilmektedir [74]. Uzay sistemleri ile karşılaştırıldığında bu havasal görüntüleme sensörleri daha yüksek konumsal ve spektral çözünürlüklere sahip olsalar da, şerit genişlikleri daha düşüktür ve konumsal olarak kapladıkları alan daha sınırlıdır [59]. Bu yüzden, her ne kadar bazı dezavantajları olsa da uydu sensörlerinin bütün dünyayı görüntüleme kapasitelerinden dolayı, görüntü spektrometreler uzay platformlarında kullanılmaya da başlamıştır. TRW şirketi tarafından 1997 yılında fırlatılan ancak başarısız olan LEWIS hiper-spektral görüntüleyici (HIS) ilk uzay platformu görüntü spektrometresidir [65]. [60]'a göre, yörüngedeki ilk uzay platformu hiper-spektral sensör NASA'nın yüksek çözünürlüklü görüntü spektrometre programının parçası olan HIRIS'dir. Hyperion olarak adlandırılan bir diğer sensör yine NASA tarafından 2000 yılında Yeni Milenyum Programı çerçevesinde fırlatılmıştır [65]. Bu görüntü spektrometre TRW tarafından yapılmıştır ve EO-1 misyonunda taşınmaktadır [63]. Hyperion VIS-NIR-SWIR spektral bölgelerinde 10 nm bant genişliklerinde 224 bantta alım yapabilmektedir [60]. Ayrıca günümüzde bilinen hiper-spektral yer gözlem uydu sensörleri arasında MSMSISat (G. Afrika ve Belçika), PRISMA (İtalya), HISUI (Japonya), EnMAP (Almanya), HypIRI (ABD), ve Resourcesat-3 (Hindistan) yer almaktadır [59].

#### **1.2.4. İnsansız Hava Aracı (İHA) Sistemleri**

Teknolojinin pek çok alanında olduğu gibi insansız hava aracı (İHA) sistemleri de ilk olarak askeri uygulamalar amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır [75]. Aslında İHA sistemleri yeni bir teknoloji değildir. Sadece son yıllarda sivil amaçlı uygulamaları daha çok keşfedilmeye başlanmıştır [76]. İHA sistemleri drone'lar, insansız veya pilotsuz hava araçları ve uzaktan pilot ile kontrol edilen araçlar olarak ifade edilebilmektedir [75], [77]. İsminden de anlaşılacağı gibi hava aracını kontrol edebilecek herhangi bir kimsenin hava aracı içerisinde yer almadığı bütün uçan araçları kapsamaktadır [78]. Araç içerisinde fiziksel olarak kontrol edecek kimse olmasa da, bu aracın otomatik olarak kendiliğinden uçtuğu anlamına gelmemektedir [79]. Bütün İHA çeşitleri yarı otomatik, tam otomatik veya bunların kombinasyonları şeklinde çalışan yer kontrol birimleri içermektedir [78].

İlk İHA, düşman bölgesinde daha düşük risklerde sessizce hareket edebilmesi ve küçük olması dolayısıyla 1916 yılında askeri gözlem amaçlarıyla ABD ordusu tarafından

geliştirilmiştir [80], [81]. Ancak, İHA sisteminin esas gelişimi 1950'lerde askeri amaçlar ile soğuk savaş döneminde, farklı ülkelere ait projeler ile başlamıştır [82]. İHA ile hava fotoğrafı alımı ilk örneği ise 1955 yılındadır [83]. Ancak, insanlı hava araçları tarihinden öncesine ait örneklerde bulunmaktadır. Örneğin, 1849 yılında insansız sıcak hava balonlarının hava bombardımanı amacıyla Venedik'te [84] ve Amerikan İç Savaşları'nda [85, 86] kullanıldıkları görülmektedir. Uygun fotoğrafik aparatların geliştirilmesi ile birlikte ABD ordusu tarafından İspanyol-Amerikan savaşlarında 1898 yılında uçurtmalara uzaktan çalıştırılan kameralar monte edilmiştir [87]. 1970 ve 1980'lerde NASA tarafından "Mini-Sniffer" programı çerçevesinde yüksek irtifalı atmosferik gözlem amaçlı İHA geliştirmiş ancak çok sınırlı başarı elde edilmiştir [75]. 1990'larda NASA'nın Çevresel Araştırma Hava Aracı ve Sensör Teknolojileri (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (ERAST)) programı kapsamında protokoller ve kapasiteler geliştirilmiştir [75]. Aynı dönemde, NASA'nın minyatürizasyondaki çaba ve katkıları ile daha küçük organizasyonlar kendi araştırma ihtiyaçlarına bağlı olarak İHA sistemleri oluşturmaya ve geliştirmeye başladılar. Günümüzde İHA sistemleri pazarı hem askeri hem de sivil alanlarda hızlı şekilde gelişmektedir. Ancak 2005 yılında piyasaya sürülen İHA sistemlerinin sadece %8'i sigorta sorunları, güvenli iletişim frekanslarının olmaması ve yasal düzenleme sorunları yüzünden sivil uygulamalardır [82].

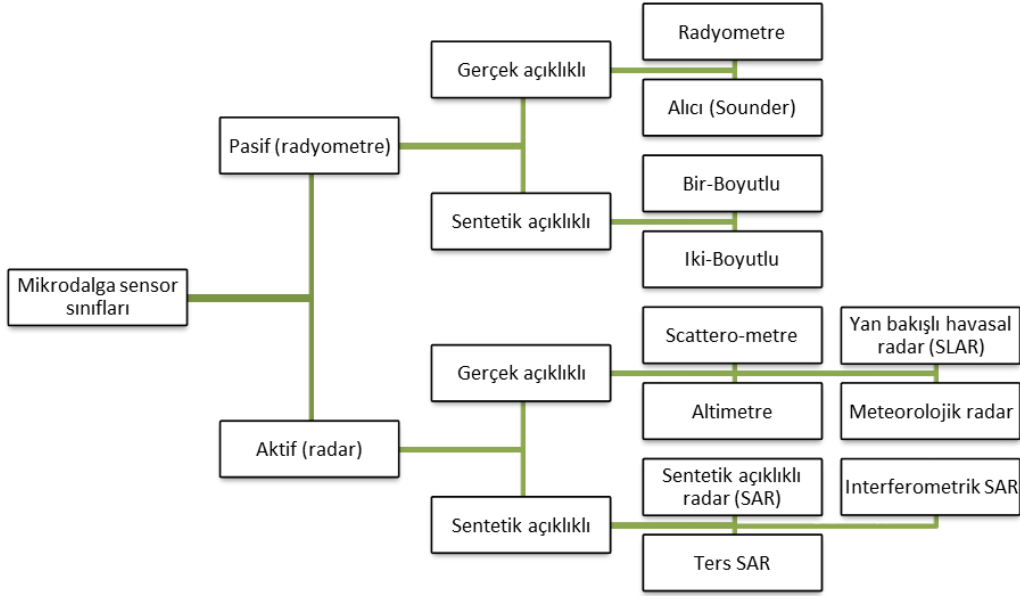
Uzay veya hava platform uzaktan algılama sistemleri yer gözleminde temel platformlardır. Ancak uzaktan algılama sistemlerinde İHA teknolojilerinin kullanımı artan şekilde hem bilimsel hem de sivil mühendislik uygulamalarında önem kazanmaya, alternatif uzaktan algılama platformu [88], [89] veya yeni fotogrametrik ölçüm aracı [78] olarak devam etmektedir. Uzaktan algılama ve haritalama da kullanılan İHA sistemlerinin sayısı artmaktadır fakat pek çoğu hala araştırma aşamasındadır [79]. 1980 yılında, 3 kg taşıma kapasitesine sahip döner kanatlı İHA modeli fotogrametri çalışmalarında kullanılmıştır. Uçurtmalar, planörler, balonlar, uçaklar döner ve sabit kanatlı İHA sistemleri manuel, yarı ve tam otomatik uçuş modlarında havadan fotogrametrik veri alımında kullanılmaktadır [81]. İHA sisteminin seçimi uygulamaya bağlı olmaktadır [76]. Uçurtmalar ile hava fotoğraflarının alımı (yani uçurtma hava fotoğrafçılığı (kite aerial photography (KAP) veya Kiteography) çok amaçlı kullanım ve düşük maliyet sağlamaktadır [90]-[92]. Ancak bu sistemlerin izleme kapasitesi 10 Ha'dan daha küçük alanlardır [76]. Özellikle rüzgârın fazla olduğu alanlarda yararlı olan uçurtmalar

yüzeyden 50-150 m yüksekliklere kadar kamera teçhizatını yukarı kaldırmak için kullanılmaktadırlar. [91]'e göre küçük kanatlı uçurtmalar ( $1,5 \text{ m}^2$ ) kuvvetli rüzgârlarda (25-40 km/s) en uygun iken, büyük esnek olmayan uçurtmalar ( $3 \text{ m}^2$ ) hafif rüzgârlarda (15-25 km/s) daha uygundur. KAP sistemlerin diğer avantajları; arazide hızlı kurulum ve çalışma, daha küçük ekiple çalışılabilme ve kolay uçuş eğitimidir [91]. Bir diğer İHA sistemi olan balonlar ve zeplinler, düşük rüzgarlı alanlarda ( $<5 \text{ km/s}$ ) fotoğraflık ölçümlerin titreşimsiz ve çok daha stabil yapımına imkan vermektedir [76]. Ayrıca, zeplinler yüksekliği kesin şekilde kontrol edilebilen konumlarda uzun dönemlerde (birkaç saatten haftalara değişen) kullanılabilirler [93]. Bunlar özellikle sahanın sabit bir noktadan gözlenmesinde çok yararlıdırlar. Helikopterler, planörler veya uçaklar motor gücüne sahip İHA'lar olup daha büyük alanların hızlı şekilde haritalanması kapasitesine sahiptirler [94]. Zeplinlerin aksine, görüntü alımında motorun çalışmasından kaynaklı titreşimler söz konusudur. Ayrıca, pek çok motor gücü ile çalışan İHA zeminden uzaktan kontrol sistemleri ile sistemi yönetebilecek yetenekte operatörler gerektirmektedir [76]. Ancak bu kısıtlama da geliştirilen otomatik uçuş sistemleri ile büyük oranda ortadan kaldırılmıştır [80]. Yerden kontrol edilen helikopterler havada daha az stabil olabilmektedir ancak kalkış ve iniş için uçak ve planörlerin aksine bir rampa gerektirmemektedirler [95], [96]. Yine son dönemde mikro İHA olarak tanımlanan çok küçük (birkaç cm boyutlarında) ve hafif, oldukça makul taşıma kapasitesine (yaklaşık 100-200 gr) sahip sistemler de geliştirilmektedir [79]. Sivil uygulamalarda İHA sistemlerinin sınıflandırılması boyut, maksimum uçuş süresi ve kapasitesine bağlı olarak yapılmakta olup detaylı açıklama Schaepman tarafından yapılmaktadır [75]. Motor gücü ile çalışan İHA sistemleri bileşenleri; hava aracı, sensör taşıyıcı ve yer kontrol istasyonudur [75]. Yer kontrol istasyonundan kontrol edilen araç arasında güvenli iletişim bağlantısı olması gereklidir. Düşük irtifalı İHA sistemleri görüntü alımında çok yüksek çözünürlüklere ulaşma imkânı sağladıklarından yükte hafif tüketici bazlı dijital kameralar ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak görünür ve kızılötesi spektrumda çalışan, multi- veya hiper-spektral alım yapabilen görüntüleme sistemleri, minyatür radarlar, pasif mikrodalga radyometreler ve LIDAR da kullanılmaktadır [79], [97].

### **1.2.5. Mikrodalga Uzaktan Algılama Sistemleri**

Mikrodalga uzaktan algılama teknolojisi, özellikle hava fotoğraflarının sivil uygulamaları ile kıyaslandığında nispeten yenidir. Bu yüzden mikrodalga frekanslarında çalışan

sensörler çeşitli uygulamalarda oldukça sınırlı kullanıma sahip olmuştur. Bu uzaktan algılama sistemleri isminden de anlaşılacağı gibi EMS'nin mikrodalga (yaklaşık 1 mm'den 1 m'ye değişen) bölgesinde çalışmaktadır. Mikrodalga uzaktan algılama sistemleri Şekil 1.3'te gösterildiği gibi pasif (radyometreler) veya aktif (radarlar) olabilmektedir. Bu sistemlerin her ikisi de antenler ve alıcılar içermektedir. Ancak radarlar, radyometrelerden ayrıca verici içermeleriyle farklılaşmaktadır [98].



Şekil 1.3. Mikrodalga uzaktan algılama sensörlerinin temel sınıfları [98].

Pasif mikrodalga uzaktan algılamada, mikrodalga radyometreler, yayılan enerjiyi ölçmek için kullanılırlar [99]. Burada ifade edilen enerji, doğal malzemelerin yaydıkları ve yüzeylerinin fiziksel özelliklerinin karmaşık bir fonksiyonu olarak ifade edilen EMR'dir. Radyometreler, mikrodalga sinyallerinin termal emisyonlarını ölçen pasif mikrodalga sensörleridir [98]. Aktif mikrodalga uzaktan algılamada ise, Radio Detection And Ranging (Radyo Algılama ve Mesafe Ölçme) kısaltılması olan radar sistemleri kullanılmaktadır. Aktif mikrodalga uzaktan algılama sistemi, bunlara radar görüntüleme sistemleri de denilmektedir, arazi ve hedef objelerin yansıtma özelliklerine bağlı olarak çalışmaktadır. Bu sistemlerde mikrodalga sinyali, görüntüsü alınacak alana doğru yayılır, bu alandan geri-saçılan/yansıtılan enerjinin bir bölümü algılanır, sinyalin kuvvet (şiddet) ve gidiş-geliş süresi gözlemlenerek görüntü üretilir [100]. Mikrodalga uzaktan algılama, görüş alanı içerisinde kalan objelerden saçılan EM dalgayı kullanmasından dolayı optik ve LIDAR sistemlere benzemektedir. Ancak esas farklılık aynı zamanda radarın öne çıkan avantajını da temsil eden uzun dalga boyu (yani daha düşük frekans) kullanmasıyla ilgilidir [101]. Daha uzun dalga boyu, EM alanının koherent alınmasına (yani sinyalin genlik

ve faz bilgisinin alınması) izin vermektedir. Faz ile ilgili bilgi, optik sistemlerde alınması hiç kolay olmayan interferometri ve polarimetri gibi tekniklerle kullanılabilir [102]-[104]. EMR, dalga boyundan daha büyük veya aynı boyutlarda olan objeler ile etkileşmektedir [105]-[108]. Başka bir ifadeyle dalga boyu ile karşılaştırıldığında daha küçük olan objeler, EMR için şeffaf olmakta ve dalga, bu küçük partiküllerden oluşan kümeleri geçebilmektedir. Bu özelliklerinden ve de aktif bir uzaktan algılama sistemi olmasından dolayı, radar sistemleri ışık ve hava koşullarından bağımsız olarak çalışmaktadır. Bunun anlamı bulut, sis ve yağış gibi pek çok hava koşulunda ve ayrıca gece ile gündüz görüntü alımının mümkün hale gelmesidir. Neredeyse bütün hava koşullarında ölçüm yapmayı sağlayan mikrodalgalar için bulutlar önemli ölçüde şeffaf olmaktadır. Bunların yanında, orman örtüsü de EM dalga tarafından bir dereceye kadar geçilebilir bir ortamdır. Bu özelliği radarın vejetasyonun incelenmesinde ana avantajlarından birisidir. İçerisine nüfuz edebildiği için ormanın iç tabakaları hakkında bilgi toplanabilmektedir [108]-[111]. Çizelge 1.1’de kullanılan radar bantlarının frekans ( $f$ ) ve dalga boyları ( $\lambda$ ) listelenmektedir. Radar görüntüleme sistemlerinde K-bandından daha kısa dalga boyları atmosferdeki su buharı ve diğer partiküller tarafından yansıtıldıklarından dolayı pek kullanılmamaktadırlar [112]. Radar görüntüleme sistemlerinde en fazla kullanılan bantlar ise X, C ve L bantlarıdır [113].

Çizelge 1.1. Radar bantlarının frekans ve dalgaboyları [112].

Bant	Frekans Aralıkları (GHz)		Dalgaboyu Aralıkları (cm)	
UHF	0.3	1	100	30
L	1	2	30	15
S	2	4	15	7.5
C	4	8	7.5	3.75
X	8	12	3.75	2.5
Ku	12	18	2.5	1.67
K	18	27	1.67	1.11
Ka	27	40	1.11	0.75
V	40	75	0.75	0.40
M	75	110	0.40	0.27
mm	110	300	0.27	0.10

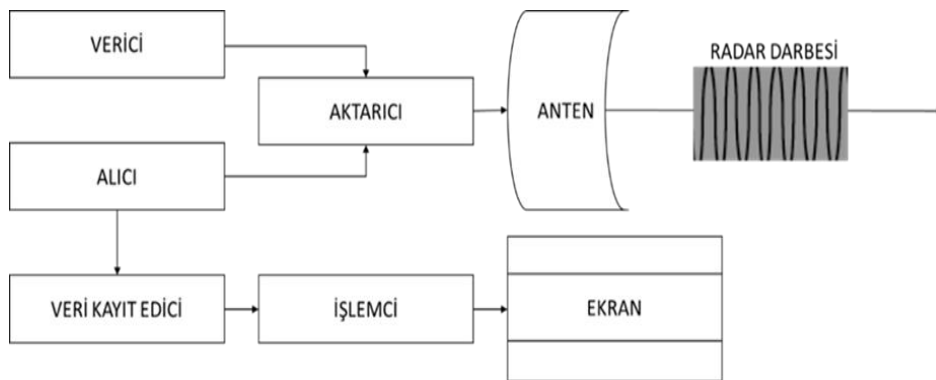
İlk görüntüleme radarlarında İkinci Dünya Savaşı döneminde dikdörtgen formatta görüntü üreten B tipi tarayıcı (B-scan) kullanılmıştır [114]. Elde edilen görüntüde ise uçağın kenarına olan mesafe ve açı arasındaki doğrusal olmayan ilişki önemli kaymalara sebep olmuştur. Bu kayma Plan Pozisyon Göstergesi (Plan Position Indicator, PPI) kullanılarak büyük oranda iyileştirilmiştir. 1950'lerde ise yan bakışlı hava radarları (Side Looking Airborne Radar, SLAR) üretilmeye başlamıştır [114]. SLAR ile tarama işlemi hava aracının hareketi ile yeryüzünde uçağın uçuş doğrultusuna dik olarak sabit ışın demeti kullanılarak yapılmaktadır. SLAR sistemlerin ilk versiyonları askeri gözlem amaçları ile kullanılmıştır. 1960'ların ortalarına doğru ilk yüksek çözünürlüklü SLAR sistemin gizliliği ortadan kalkarak bilimsel çalışmalarda kullanım olanakları ortaya çıkmıştır. Ancak bu sistemlerin azimut çözünürlükleri düşük olmaktadır. SLAR sistemler için azimut ışın genişliğinin daha küçük olması daha iyi çözünürlük anlamına gelmektedir. Radar görüntüleme sistemlerinde (gerçek açıklıklı radar) yüksek çözünürlüklü görüntü elde edebilmek için ya pratik olmayan şekilde büyük anten kullanımı ya da radar sisteminin atmosferde çeşitli zayıflamalarla uğraşmasına sebep olacak çok kısa dalga boyları kullanımı gerekmektedir. Özellikle hava platformları için anten boyutunun büyük olması ve buna bağlı olarak ağırlığı önemli bir kısıt olmaktadır. Radar görüntüleme sistemlerinde yüksek çözünürlük elde edilmesinin başka bir yolu da sinyal işleme teknikleri kullanımıdır [114]. Sentetik Açıklı Radar (SAR), fiziksel anten açıklığının bu yetersizliğini ortadan kaldırmak için geliştirilen yeni bir sinyal işleme ile yüksek çözünürlük sağlayan sistemdir. Dünya yüzeyi ve ilgili hedeflerin algılanması, tanımlanması ve arazi özelliklerinin ortaya konulmasında yeterli yüksek çözünürlük sağlamaktadır.

### **1.2.6. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) Sistemler**

SAR sistemler, 30 yıldan fazla süredir uzaktan algılamada geniş çapta kullanılan, hava araçları veya uydu/uzay platformları aracılığı ile büyük ölçekli ve yüksek çözünürlüklü görüntü alımına izin veren gelişmiş bir uzaktan algılama tekniğidir [115]. SAR sistemler, yüzey topoğrafyasının, zamanla oluşan değişimlerinin ve yüzey karakteristiklerinde meydana gelen diğer detay değişimlerin ölçülmesinde kullanılan gelişmiş bir mikrodalga görüntüleme sistemi olarak da tanımlanmaktadır [116]. Aktif bir uzaktan algılama sistemi olan SAR, radar sistemlerini kullanarak mevcut antenin platforma bağlı ileri hareketi ile çok uzun anten sentezlenmesi prensibiyle çalışmaktadır. Diğer bir ifadeyle, SAR sistemi monte edildiği platformun hareketinden yararlanarak çok uzun doğrusal dizilimli yapay

bir anten oluşturabilmektedir. Hava koşullarından bağımsız, gece ve gündüz çalışabilme özelliği ve sağladıkları yüksek çözünürlük sayesinde yer bilimlerinden, iklim değişikliği araştırmalarına ve 2B ve 3B haritalama ile değişim algılamadan (change detection), 4B haritalamaya (yer ve zaman dâhil), güvenlik ile ilgili çalışmalardan gezegenlerin araştırılmasına değişen oldukça geniş disiplinlerde kullanılmaktadır. Günümüzde SAR sistemlerinin operasyonda olan 15'ten fazla uzay platformu ve gelecek 5 yıl içerisinde de 10 yeni sistemin kullanılmaya başlayacağı düşünüldüğünde sistemin bir durumla altın çağında olduğu ifade edilebilmektedir [115].

Burada öncelikle SAR teknolojisinin çalışma sistemlerinin ve ilgili terminolojisinin daha iyi anlaşılabilmesi için radarın çalışma prensibinin iyi anlaşılması gerektiği düşünülerek radar konusunda kısaca bilgi verilecektir. Radarlar hakkında daha detaylı bilgiye Merrill Skolnik tarafından yazılan "Radar Handbook" veya Mark A. Richards ve diğerleri tarafından yazılan "Principles of Modern Radar: Basic Principles" isimli kitaplardan erişilebilmektedir. Radar bir teknik ve aynı zamanda bir cihaz olarak tanımlanmaktadır [117]. Radar, EM enerjisi yaydıktan sonra hedeflerden yansıtılarak geri-dönen sinyalleri algılamak suretiyle çalışmaktadır [118]. Tipik radar sistemler, verici, aktarıcı, anten, alıcı ve veri kayıt edici bileşenlerinden oluşmaktadır (Şekil 1.4). Verici radyo dalga boylarında yüksek güçte elektromanyetik dalga (darbe) üreten bileşendir. Aktarıcı, üretilen darbeyi antene ve geri dönen yansımaları alıcıya aktaran bileşendir. Anten üretilen EM darbesini görüntülenecek alana doğru yönlendiren ve geri dönen yansımaları toplayan bileşendir. Geri dönen sinyal, alıcı tarafından sayısal değerlere dönüştürülür ve veri kayıt edici tarafından daha sonra kullanılmak ve görüntü üretmek amacıyla depolanır. Geri dönen sinyaller, hedef hakkında bilgi taşımaktadır. Sensörden hedefe olan menzile ya da mesafeye, yayılan enerjinin sensörden hedefe ve hedeften tekrar sensöre olan yolculuğunda aldığı süreden yararlanarak belirlenmektedir [118].



Şekil 1.4. Tipik radar sistemi temel blok diyagramı [118].

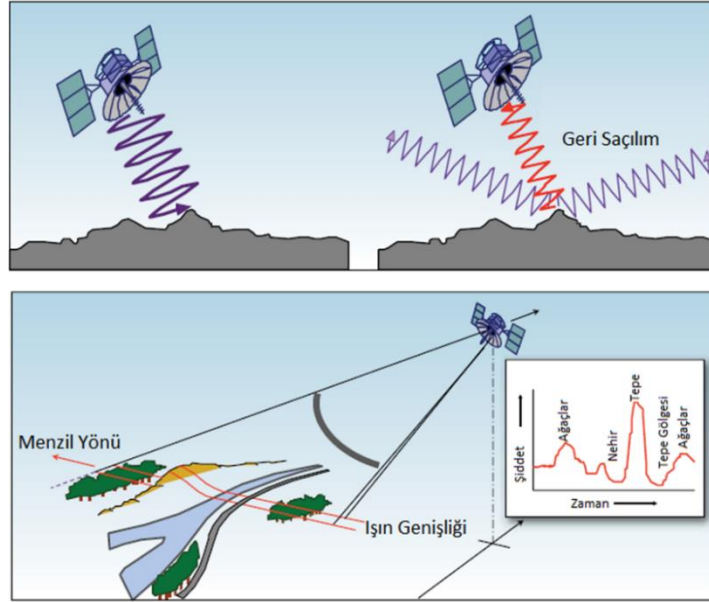


Radarlar askeri ve sivil amaçlı görüntüleme, rehberlik, uzaktan algılama ve küresel konumlama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Radar sistemleri hava trafiği kontrolünde, karayollarında araç hızı tespitinde, fırtına izlemede, medikal izlemede ve video gözlemlerinde de kullanılmaktadır [112], [119]. Gemi ve uçak algılamada radarın bir araç olarak kullanımını 1920'lerde başlamış olup, 1922'de ilk kesiksiz dalga radar sistemi Taylor tarafından geliştirilmiştir [114]. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra doğrudan uçak/gemi menziline belirlemede kullanılması yerine tekniğin çevrenin uzaktan algılanmasında kullanımına ilişkin uygulamaları ortaya çıkmaya başlamıştır [114]. Uzaktan algılama dünyasına girmesiyle birlikte radar mikrodalgaların koherent alımının farklı özelliklerinin kullanılması imkânları ile hızlı bir gelişme yaşamıştır [108].

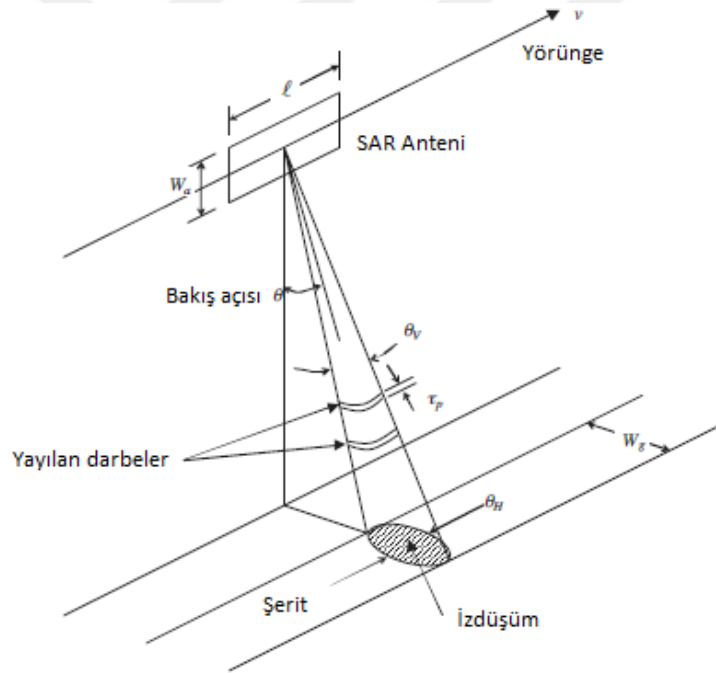
Uzaktan algılama amaçlı kullanılan radar görüntüleme sistemlerinin çalışma prensibi literatürde detaylı olarak açıklanmaktadır [112], [113]. Radar sistemlerinin görüntüleme geometrisi optik sistemlerdeki tarama ve görüntüleme sistemlerinden farklıdır (Şekil 1.5). Optik sistemlere benzer şekilde, platform yörünge (uçuş hattı) boyunca ileri doğru hareket etmektedir. Ancak modern görüntüleme radarları mikrodalga ışınını yörüngeye dik açılı olarak eğik şekilde yer yüzeyine göndermektedir. Platform azimut yönde hareket ederken anten genellikle azimut yöne dik açılı şekilde sinyal gönderip almaktadır. Eğer gözlem yönü platformun nadir doğrultusunda olursa sistem "boresight" olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan anten belirli bir zenit açısı ile azimut yöne dik olarak sinyal gönderip alırsa yan bakışlı olarak adlandırılmaktadır [114]. Menzil yönde ortaya çıkacak belirsizlikleri ortadan kaldırdığı için "boresight" sistem yerine yan bakışlı sistemler kullanılmaktadır [120]. Bir görüntüleme radarının geometrisi Şekil 1.6'da verilmektedir. Genişliği  $W_a$  ve uzunluğu  $\ell$  olan radarın fiziksel açıklığı, 3 dB ize dik anten ışın genişliği ve 3 dB iz doğrultusunda anten ışın genişliğine sahip bir RF (radyo frekanslarında) ışın üretmektedir. Bunlar sırasıyla  $\theta_V$  ve  $\theta_H$  ile gösterilmektedir.  $\theta_V$  antenin uzunluğu ve genişliği ve yayılan sinyalin dalga boyu ( $\lambda$ ) ile belirlenmektedir. Aralarındaki ilişki Denklem (1.1)'de verildiği gibidir [114]:

$$\theta_V = \lambda/W_a \quad (1.1)$$

Anten,  $v$  hızı ile uçuş yolu boyunca hareket eden bir platforma monte edilmekte ve platform belirli bir yükseklikten hareket ederken yüzeyde de kaplama alanı aydınlatılmaktadır. Zeminde oluşan bu kaplama (veya şerit) alanının genişliği ise Denklem (1.2)'teki gibi hesaplanabilmektedir [114]:



Şekil 1.5. Görüntüleme radarı geometrisi [112].



Şekil 1.6. Görüntüleme radarı geometrisi [114].

$$W_g = \frac{\lambda R}{W_a \cos \theta} \quad (1.2)$$

denklemdede  $\theta$  ışının geliş açısı veya bakma açısı,  $R$  antenden şeridin orta noktasına olan eğik menzildir.

Antenden yayılan RF enerji  $\tau_p$  ışınlanma süresine sahiptir ve darbe tekrar frekansı (pulse repetition frequency, PRF) elde etmek için kullanılabilen darbe tekrar aralığı (pulse

repetition interval, PRI) olarak adlandırılan belirli aralıklarda tekrarlanmaktadır. Sinyaller saniyede 2.000 veya daha fazla PRF ile gönderilirler. Gönderilen bu sinyaller hedef ile temas ettiklerinde hedefin fiziksel özelliklerine bağlı olarak her yöne yansıtılırlar/saçılırlar ve antene sadece küçük bir bölümü geri dönmektedir. Radar, sinyalin gidiş-geliş süresi, yansıtılma şiddeti ve geri dönen sinyalin fazı gibi özelliklerini ölçmektedir. Sinyalin yolculuk süresi, anten ile hedef arasındaki mesafenin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Mesafe, sinyal hızı (ışık hızına eşittir ( $c$ )) ile gidiş geliş süresinin ( $\Delta T$ ) çarpımlarının ikiye bölünmesi ile hesaplanmaktadır ( $Range = c\Delta T/2$ ). Geri dönen sinyalin şiddeti ise zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülmektedir. Hedeften geri dönen sinyaller aşırı derecede zayıf olduklarında yükselticiler ile kuvvetlendirilmektedirler.

SAR sistemlerinin çalışma prensiplerinin daha iyi anlaşılması için ayrıca gerçek açıklıklı radarlarda (Real Aperture Radar, RAR) çözünürlük kavramının da iyi anlaşılması gerekmektedir. Yersel çözünürlük terimi sistemin yeryüzündeki iki hedef arasında ayırım yapabilme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Yersel menzil çözünürlüğü Şekil 1.7'de  $\rho_g$  olarak gösterilmektedir. Bir RAR sisteminin menzil çözünürlüğü Denklem (1.3)'teki gibi elde edilebilmektedir [114]:

$$\rho_g = \frac{c\tau_p}{2 \sin \theta} \quad (1.3)$$

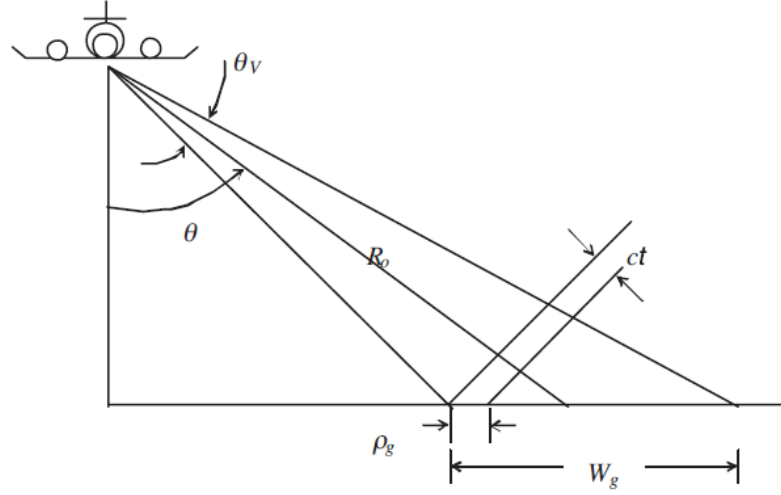
denklemde  $\tau_p$  darbe uzunluğu ve  $c$  ışık hızıdır. Menzil çözünürlüğü darbe genişliği ve görme açısının fonksiyonu olup yükseklikten bağımsızdır.

Azimut çözünürlük ise platformun uçuş doğrultusuna paralel yönde, yer yüzeyinde görüntülenen iki hedefin ayırt edilebildiği minimum mesafedir. Aynı eğik mesafede yer alan iki hedef sadece eş zamanlı olarak aynı radar ışını içerisinde yer almazlarsa çözülebilmektedirler. Şekil 1.8 azimut yönünde radar ışınının yayılma açılarını göstermektedir ve Denklem (1.4) ile belirlenmektedir [114]:

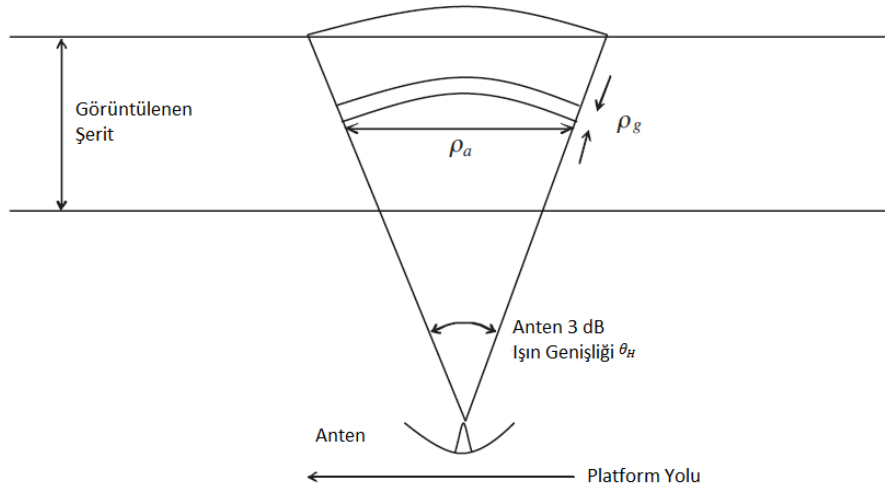
$$\theta_H = \frac{\lambda}{\ell} \quad (1.4)$$

Bu yüzden azimut çözünürlük Denklem (1.5)'teki gibi yazılabilmektedir;

$$\rho_g = R\theta_H = \frac{R\lambda}{\ell} \quad (1.5)$$



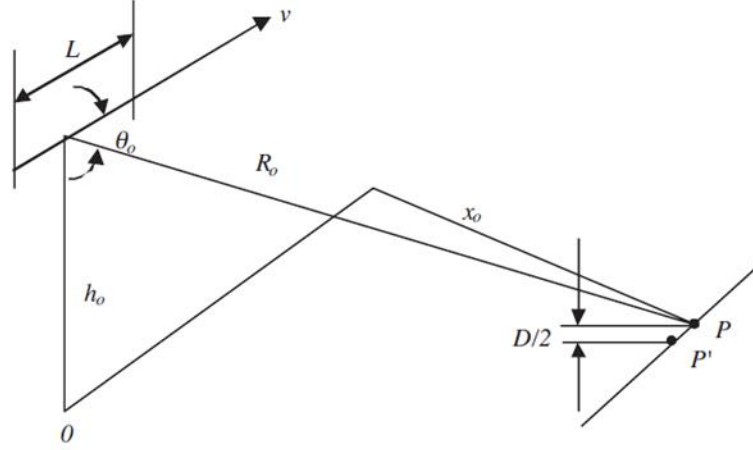
Şekil 1.7. Gerçek açıklıklı bir radarın menzil çözünürlüğü [114].



Şekil 1.8. Gerçek açıklıklı bir radarın azimut çözünürlüğü [114].

Azimut çözünürlük açıklık uzunluğuna bağlıdır. Bir diğer ifadeyle çözünürlüğü artırmak için daha uzun anten kullanılması gerekmektedir. Ancak  $l/\lambda$  değerinin birkaç yüzden daha büyük olmaması hem dalga boyu fraksiyonlarındaki doğruluk hem de mekanik olarak platform üzerinde taşınması kriterlerinden dolayı gerekmektedir.

SAR sistemler, RAR sistemlerdeki anten açıklığı dezavantajını ortadan kaldırmak için uzun fiziksel bir antenin aktüel olarak kullanılması yerine sinyal işleme teknikleri ile etkin uzun bir anten oluşturulmasına dayanmaktadır. SAR işleme, yansıyan sinyalin Doppler etkisi (frekans kayması) aracılığıyla yapılmaktadır. SAR veri alımı Şekil 1.9'da gösterilmektedir. Platform  $X_0$ ,  $Y_0$  ve  $O$  koordinatlarındaki  $P$  noktasını haritalamaktadır.



Şekil 1.9. SAR azimut çözünürlüğü.

Platform  $L$  uzunluğundaki,  $Y = 0$  da ortalanmış,  $v$  hızında,  $h_0$  yüksekliğinde  $y$  aksisine paralel olarak uçmaktadır. Uçuş zamanı  $T = L/v$  olmaktadır. Platformdan  $P$  noktasına olan menzil Denklem (1.6)'daki gibi elde edilebilmektedir:

$$R = \sqrt{X_0^2 + (Y_0 - vt)^2 + h_0^2} \quad (1.6)$$

Denklemden  $-T/2 \leq t \leq T/2$  olup  $L \ll R$  olduğunda  $R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + h_0^2}$  ve  $\cos \theta_0 = Y_0/R_0$ ,  $R$  alanı için Taylor serisinin açılımında  $t^2$  terimleri Denklem (1.7)'deki gibi,

$$R \cong R_0 \left( 1 - \frac{vt}{R_0} \cos \theta_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0^2} \sin^2 \theta_0 \right) \quad (1.7)$$

$P$ 'deki bir nokta saçıcıya doğru,  $A$  genlik,  $\omega_0$  açısal frekansı ile  $e_1 = A \cos \omega_0 t$  şeklinde tanımlanan bir sinyal gönderilecek ve nokta saçıcıdan  $\tau'$  zaman gecikmesiyle geri dönen sinyal platformdaki alıcı tarafından  $e_2 = KA \cos \omega_0(t - \tau')$  sinyali şeklinde alınacaktır. Burada  $K$  bir sabittir. Menzil  $R$ 'nin bir fonksiyonu olarak zaman gecikmesi  $\tau' = 2R/c$  olacaktır. Böylece zaman gecikmesi Denklem (1.8)'teki gibi olmaktadır:

$$\tau' = \frac{2R}{c} - \frac{vt}{R_0} \cos \theta_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0^2} \sin^2 \theta_0 \quad (1.8)$$

$\tau'$  için yerine konan alınan sinyal argümanı Denklem (1.9)'daki gibi olup

$$\theta(t) = \omega_0(t - \tau') = \omega_0 t - \frac{2\omega_0 R_0}{c} + \frac{2\omega_0 vt}{c} \cos \theta_0 - \frac{\omega_0 v^2 t^2}{R_0 c} \sin^2 \theta_0 \quad (1.9)$$

Dalga boyu açısından,  $\lambda = 2\pi c/\omega_0$  ise Denklem (1.10)'daki gibi yazılabilmektedir:

$$\theta(t) = \omega_0 t - \frac{4\pi R_0}{\lambda} + \frac{4\pi}{\lambda} v t \cos \theta_0 - \frac{2\pi v^2 t^2}{R_0 \lambda} \sin^2 \theta_0 \quad (1.10)$$

Anlık frekans genel tanımı Denklem (1.11)'deki gibi olup;

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.11)$$

buradan

$$f_i = f_0 + \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_0 - \frac{2v^2 t}{R_0 \lambda} \sin^2 \theta_0 \quad (1.12)$$

elde edilmektedir. Denklemde  $f_0 = \omega_0/2\pi$  'dir. İkinci terim  $\theta_0$  eğiklik açısı ile ilgili olan Doppler kaymasıdır. Üçüncü terim ise platformun ileri hareketinden dolayı oluşan doppler kaymasındaki değişimi temsil etmektedir.

Her ikisi de  $R$  menziline olan ancak azimut yönünde aralarında bir mesafe ( $D/2$ ) olan iki hedefin (Şekil 2.6 daki  $P$  ve  $P'$ ) anlık frekansı ise Denklem (1.12)'deki gibi olmaktadır [114]:

$$f_0 + \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_0 \text{ ve } f_0 + \frac{2v}{\lambda} \cos \theta_0 - \frac{vD}{R_0 \lambda} \sin \theta_0 \quad (1.13)$$

Çünkü aralındaki mesafenin uçuş zamanı  $t = D \sin \theta_0 / 2v$  olmaktadır ve gözlenen frekans kayması farkı da Denklem (1.14)'teki gibi olmaktadır:

$$\Delta f_i = \frac{vD}{R_0 \lambda} \sin \theta_0 \quad (1.14)$$

böylece  $\Delta f_i$  frekans farkına sahip  $D/2$  mesafe ile ayrılan iki ayrı hedefi çözmek için veri  $T \cong 1/\Delta f_i$  zamanı boyunca toplanmalıdır. Bu sayede Denklem (1.15)'teki gibi ifade edilen bir sentetik açıklık elde edilmektedir:

$$L = vT = \frac{R_0 \lambda}{D \sin \theta_0} \quad (1.15)$$

Son iki denklem kullanılarak SAR sistemler için azimut çözünürlüğü Denklem (1.16)'daki gibi ifade edilebilmektedir:

$$\rho_a = \frac{D}{2} = \frac{\lambda R_0}{2L \sin \theta_0} \quad (1.16)$$

SAR ile veri alımında  $y$  doğrultudaki maksimum çözünürlük, zemin üzerinde anten tarafından aydınlatılan kaplama alanının karşılık gelen anten dizi uzunluğundan daha büyük olması gerektiği varsayılarak elde edilebilmektedir. Anten ışın genişliği ilişkileri kullanılarak Denklem (1.17) şeklinde;

$$\frac{\lambda R_0}{\ell} > L = \frac{\lambda R}{D \sin \theta_0} \quad (1.17)$$

elde edilmektedir. Burada  $\ell$  aktüel anten uzunluğu ve  $L$  ise zeminde karşılık gelen dizi uzunluğudur.  $\theta_0 = 90^\circ$  olması durumunda bu son denklemden  $\rho a = D/2$  olduğu dikkate alınırsa Denklem (1.18) şeklinde;

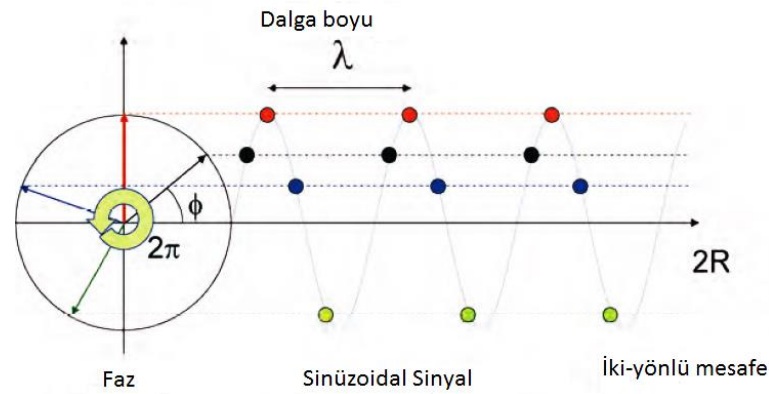
$$\rho a \geq \ell/2 \quad (1.18)$$

olarak elde edilecektir. Burada  $y$  yönünde elde edilebilir olan en iyi çözünürlük menzil, dalga boyu ve hedef almadan bağımsız şekilde aktüel anten uzunluğunun ( $\ell$ ) yarısına eşit olmaktadır. Daha iyi çözünürlük elde edebilmek için daha küçük anten uygulanmaktadır.

SAR veri işlemede ana hedef, şerit-harita (strip-map) içerisinde yer alan hedeflerin menzil ve azimut koordinatlarının belirlenmesidir. SAR veri uzayı en üstteki her bir satır aralığındaki ilk veriden (1, 2, 3, ...) ve en alttaki her satır aralığındaki son veriden oluşan veri dizisi kavramsal koleksiyonudur [121]. SAR veri işleme ile üretilen sayısal bir SAR görüntüsü ise bundan dolayı küçük resim elementlerinin (pikseller) mozaik halindeki (yani satır ve sütunlardan oluşan iki boyutlu bir dizi) gösterimidir. Her bir piksel dünya yüzeyindeki küçük bir alan ile ilgili olmaktadır. Bunlar ayrıca çözünürlük hücresi olarak da adlandırılmaktadır. Yer yüzeyine projeksiyonlanmış, karşılık gelen çözünürlük hücresi, içindeki bütün saçıcılar (kayalar, vejetasyon, binalar gibi) tarafından geri saçılan mikrodalga alanı hakkında genlik ve faz bilgisini taşıyan karmaşık bir sayıya sahiptir. Bundan dolayı SAR görüntülerine karmaşık SAR görüntüleri de denilmektedir. Görüntünün farklı satırları farklı azimut konumlarla ilişkili iken farklı sütunlar farklı eğik menzil konumlarını göstermektedir. Azimut ve eğik menzil koordinatlarındaki çözünürlük hücresinin konum ve boyutu sadece SAR sistem karakteristiklerine bağlıdır. Örnek olarak, ERS uydusu için çözünürlük hücresi azimut yönde yaklaşık 5 m, eğik menzil yönünde yaklaşık 9,5 m boyutlara sahiptir. Bitişik hücreler arasındaki mesafe ise azimut yönde 4 m iken eğik menzil yönünde 8 m'dir. Bundan dolayı da SAR çözünürlük hücreleri azimut ve eğik menzil yönünde az-çok örtüşmektedir.

Karmaşık SAR görüntüleri; algılanan SAR görüntüsü (the detected SAR image) ve faz SAR görüntüsü (the phase SAR image) olarak iki farklı tipte elde edilebilmektedir [122]. Çünkü daha önce de belirtildiği gibi SAR çözünürlük hücreleri genlik ve faz bilgisi değerlerini saklayan karmaşık sayılardan oluşmaktadır. Algılanan SAR görüntüsü, her bir SAR çözünürlük hücresi içerisinde kalan objelerden (saçıcılardan) radara doğru geri-

saçılan radyasyonun genlik değerlerinden oluşan görüntüdür. Genlik değerleri arazi üzerindeki saçıcıların kimyasal kompozisyonundan daha çok pürüzlülüğüne bağlıdır. Tipik olarak kayalar ve kent alanları kuvvetli genlikler gösterirken yumuşak düz yüzeyler (su havzaları gibi) düşük genlikler göstermektedirler. Çünkü radyasyonun büyük bölümü radardan öteye doğru yansıtılmaktadır. Algılanan SAR görüntüleri genellikle gri renklerde gösterilirler ve parlak pikseller kuvvetli genlikleri temsil ederken koyu pikseller düşük genlikleri temsil etmektedir. Faz SAR görüntüsünde ise her bir piksel sinyalin faz değerini içermektedir (Şekil 1.10). Faz değeri sensör ile obje arasında ölçülen R menziline göre açısal olarak ifadesi şeklinde düşünülebilir.



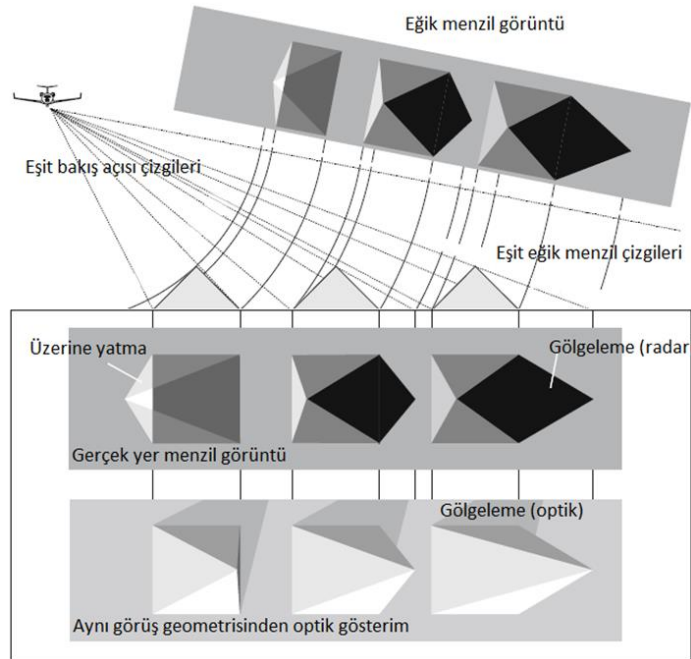
Şekil 1.10. Sinüzoidal bir sinyalin fazı ( $\sin\phi$  fonksiyonu  $2\pi$  radyan devirli bir periyodiktir) [122].

SAR görüntülerde ortaya çıkan gürültüler de bulunmaktadır. Bir SAR görüntüde birden fazla çözünürlük hücresini kapsayan homojen alanlar (tek tip kültivasyon yapılan büyük tarımsal alanlar gibi) aynı alan içerisinde farklı çözünürlük hücrelerinde farklı genlik değerleri ile görüntülenirler. Bunun nedeni SAR çözünürlük hücresi içerisinde kalan objelerden (saçıcılardan) radara doğru geri-saçılan radyasyonun genlik değerlerinden oluşan görüntü de “beneklenme” adı verilen ve SAR görüntülerde mevcut iken optik görüntülerde meydana gelmeyen bir gürültü ortaya çıkmasıdır [120], [122]. Beneklenme etkisi bir çözünürlük hücresi içerisindeki pek çok küçük temel (elementary) saçıcı tarafından saçılan sinyallerin üst üste gelmesi sonucunda oluşmaktadır. Saçıcılar arasındaki çoklu yansımalar yüzünden oluşan rastgele fazlara sahip bu sinyaller doğrudan yansıtılan radyasyona eklenmektedirler. Bu görsel etki, yeknesak bir genlik görüntüsünde oluşan “siyah-beyaz pikseller” şeklinde bir gürültüdür. Bütün koherent görüntüleme sistemlerinde yaygın olan beneklenme, her bir SAR çözünürlük hücresi içerisinde çeşitli saçıcıların varlığından dolayı önemli bir etki olmaktadır. Beneklenme, algılanan SAR



görüntülerinin kalite ve kullanımı üzerinde bir etkiye sahiptir. Tipik olarak görüntü segmentasyonu beneklenmeden çeşitli şekillerde etkilenmektedir. Ancak aynı alana ait farklı zamanlarda veya az-çok farklı görme açılarından alınmış görüntülerden yararlanarak beneklenme etkisi büyük ölçüde düşürülebilmektedir. Bu sayede görüntülerin ortalamaları alınarak rastgele oluşan genlik değişkenliği ortadan kaldırılabilmekte ve değişmeyen yeknesak bir genlik seviyesi elde edilebilmektedir.

Optik sistemler ile radar arasındaki önemli bir fark da veri alım sistemiyle ilgilidir. Daha önce de belirtildiği gibi optik sistemler nadir doğrultuda alım yaparken görüntüleme radarları yan bakışlı alım yapmaktadırlar. Bundan dolayı elde edilecek görüntüde geometrik kaymalar ortaya çıkmaktadır [108], [109], [120]. Şekil 1.11 yan bakışlı radar tasarımı ile elde edilen bir radar görüntüsünde oluşan temel kaymaları göstermektedir. Bu kaymaları aşağıdaki gibi açıklanmaktadır [120]:



Şekil 1.11. Yan bakışlı radar görüntüsünde oluşan temel kaymalar [120]

- *Küçük gösterme (Foreshortening)*: Yamaç yönü sensöre doğru iken aydınlatılan alan daha az çözünürlük hücrelerinde sıkıştırılır. Diğer bir ifade ile zeminin daha büyük bir bölümü lokal görme açısı daha düşük olduğundan dolayı aynı çözünürlük hücresinde yer alır. SAR görüntülerde küçük gösterme dağların sensöre bakan yamaçlarında meydana gelen kaymalardır. Ayrıca aynı çözünürlük hücresinde yer alan saçıcıların sayısı da artacağından dolayı geri-saçılım değeri

de artmaktadır. Yani daha küçük bir alanda bütün saçıcıların enerjisi toplanacaktır. Bundan dolayı da görüntü de pikseller daha parlak görünmektedir.

- *Üzerine yatma (Layover)*: Sensöre bakan yamacın dikliği arttığında objenin tepe noktasından geri dönen sinyal, objenin tabanından dönen sinyalden daha önce sensöre ulaşmaktadır. Bundan dolayı çözünürlük hücrelerinden daha büyük olan yüksekliklerdeki değişimler dikey yapıları etkileyecektir.
- *Gölgeleme (shadowing)*: Küçük gösterme etkisinin tam tersi olarak nitelendirilebilen gölgeleme etkisinde sensöre bakan yamaç yüzeylerinin aksi doğrultusunda olan yamaçlarda gözlenmektedir. Genelde gölgeleme etkisi altındaki alanlar daha koyu olmaktadır çünkü enerji daha büyük alanlara yayılmaktadır veya sensör tarafından görünür konumda yer almazlar.

Bir SAR görüntüsündeki kaymaların diğer sebebi de menzil ve azimut yönlerdeki çözünürlüklerinin farklı olmasıdır. Görüntü oluşturulurken, menzil çözünürlüğü bant genişliğine bağlı iken azimut çözünürlüğü ise anten uzunluğuna bağlıdır. Sonuç olarak da piksel kare değil dikdörtgen şeklinde olmaktadır. Dikdörtgen piksel ise çözünürlüğün daha yüksek olduğu yönde (uydu sistemlerinde bu genellikle azimut yöndedir) görüntünün gerilmesine sebep olacaktır. SAR görüntüsünü etkileyen çeşitli kaymalardan dolayı elde edilen görüntü bir harita ile kolay ve doğru şekilde örtüşmemektedir. Bundan dolayı ilk önce görüntü geometrik kaymaların düzeltilebilmesi için coğrafi olarak kodlanmalıdır. Daha sonra coğrafi olarak konumlanmış bir koordinat sistemi üzerine projeksiyonlanmalıdır.

### 1.3. RADAR (SAR) İNTERFEROMETRİ

İki dalganın aynı anda ve aynı yerde kavuşması ile genlik ve fazına bağlı olarak dalgaların birbirine eklenmesi veya birbirini yok etmesi söz konusu olmaktadır. Fizikte interferans (girişim) olarak adlandırılan bu durum, iki veya daha fazla dalganın üst üste binerek yeni bir dalga oluşturmasıdır. Bu konunun iyi anlaşılması için “Young deneyi” hakkında bilgi sahibi olmanın yararlı olacağı düşünülmektedir. İki ışık dalgasının girişim oluşturabilmesi için kaynakların koherent yani aynı fazda veya aralarında sabit bir fazın olması gerekmektedir. Dalgaların oluşturdukları bu girişimlerin ölçülmesi ise interferometri olarak adlandırılmaktadır. Bu kapsamda ışığın girişim özelliklerinden yararlanarak çok küçük mesafelerin ve maddelerin kırılma indislerinin ölçülmesinde,

saydam cisimlerin yüzey düzgünlüklerinin kontrolünde, çok küçük hareketlerin ölçülmesinde interferometre olarak isimlendirilen ölçü aletleri kullanılmaktadır. Christian Huygens tarafından 1690 yılında ortaya atılan dalga önü fikri interferometriye temel oluşturmaktadır. Işığın ve diğer elektromanyetik sinyallerin interferometrisi dalga önü kavramına dayanmaktadır. İnterferometri, toplamsal interferometri ve çarpımsal interferometri olmak üzere iki ayrı tipe ayrılabilir. İki sinyalin genlik değerlerinin koherent olmayan toplamı ile elde edilen interferometri “toplamsal” olarak adlandırılırken, iki sinyalin koherent içler-dışlar çarpımı ile elde edilen interferometri “çarpımsal” olarak adlandırılmaktadır.

Geleneksel jeodezik tekniklerle karşılaştırıldığında radarın göz ardı edilmemesi gereken bir diğer özelliği açılar ölçüm kapasitesidir. Tek insan gözünün objelere olan mesafe farklarını ayırt edememesine benzer şekilde bir radar veya SAR sistemde aynı menzildeki fakat farklı açılardaki iki objeyi ayırt edememektedir. Doğanın iki ayrı sensör kullanarak bu probleme oldukça basit bir çözüm sağlamasına benzer şekilde iki radar kullanım fikri radar interferometriyi ortaya çıkarmıştır. Ya farklı iki anten kullanarak ya da aynı antenin farklı açıdan aynı alanı/objeyi tekrarlı ölçümü ile alınmış iki SAR görüntüsü kullanmak suretiyle açısız ölçümlerle birlikte mesafe ölçümleri de mümkün olabilmektedir. Faz ölçümlerinin kullanımı (çarpımsal interferometri olarak kategorisinde değerlendirilmektedir) dalga boyu fraksiyonunda göreceli mesafelerin gözlenmesine imkân vermekte ve sensör konumlarındaki farklılıklar da topoğrafik haritalama için gerekli olan açısız farklılıkların gözlenmesine olanak vermektedir. Radar interferometri İkinci Dünya Savaşı’ndan sonra gelişme göstermiştir. 1946 yılında Ryle ve Vonberg, Michelson-Morley interferometre radyo analogunu imal etmiş ve daha sonra yeni kozmik radyo kaynakları yerleştirmiştir [123]. Gezegen haritalama alanında menzil-Doppler konfigürasyonu (range-Doppler configuration), “eş menzil (iso-range)” hatlarından ve “eş-Doppler (iso-Doppler)” hatlarından geri dönen radar yansımalarının haritalanmasına imkân vermiştir [124]. Ancak burada muğlak kalan gezegenin kuzey ve güney yarımkürelerinden geri dönen yansımalar arasındaki belirsizlik olmuştur. Bu belirsizliği ortadan kaldırmak için iki anten entegre edilmiş interferometri yaklaşımı kullanılmıştır [125]. Ay’ın gözlenmesinde anten ışın genişliği kuzey-güney belirsizliğini çözmekte yeterli olurken, yükseklik farklılıklarının ölçülmesinde interferometriyi kullanma imkânı da vermiştir [126], [127]. İnterferometrinin bu uygulamaları günümüzde halen kullanılmaya devam etmektedir [128]. Ay’ın kutuplarının topoğrafik haritalanmasında,

birbirine 20 km mesafelerdeki iki anten kullanılarak yatayda 150 m ve düşeyde 50 m çözünürlük elde edilmiştir [128]. Topoğrafik haritalamada ise ilk hava radar (SAR) interferometri deneyleri Birleşik Devletler ordusu tarafından yapılmış ve 1971 yılında faz farkı görüntülerinden yükseklik bilgisinin elde edilmesine ait patent alınmıştır [129], [130]. İki anten ve optik işleme teknikleri ile koherent toplamsal interferometri kullanılan bu metodun ilk sonuçları Graham tarafından ilk kez 1974 yılında yayınlanmıştır [131]. Tek geçişli ya da “dual” anten hava interferometri esas olarak 1980’lerde dijital işleme teknikleri ve koherent çarpımsal interferometri kullanılmasıyla olgunlaşma göstermiştir [132]. İlk sonuçları, iki görüntünün her bir çözünürlük elementi için genliklerinin çarpılması ve fazlarının farkının alınmasıyla Gray ve Forris-Manning tarafından üretilen “interferogram”lardır [136]. Bu sayede doğrulukları 10 m ile 30 m arasında değişen 10 x 11 km’lik bir alanın topoğrafik haritası üretilmiştir. Ayrıca, 1987 yılında Goldstein ve Zebker, hava aracının uçuş doğrultusunda monte edilmiş iki anten kullanıldıkları sistemin sonuçları ile saçıcıların hareketine olan hassasiyetini göstermişlerdir. Uydu sistemlerinde, platformun belirli dönemlerde aynı alanı yeniden ziyaret etmesiyle gerçekleştirilen interferometri uygulaması “tekrarlı geçiş interferometri” ilk kez 1987 yılında geçmiş (historic) Seasat verisi kullanılarak [134], [135] ve ayrıca SIR-B verisi kullanılarak gösterilmiştir [137]. Hava aracı ile tekrarlı geçiş interferometri uygulaması ise Gray ve Forris-Manning tarafından gösterilmiştir [136].

Optik sistemlerle karşılaştırıldığında yeterli doğruluklar sağlayan radar interferometrinin ilk uygulamaları topoğrafyanın belirlenmesine yöneliktir. Ancak tekrarlı geçişli konfigürasyonunun daha çarpıcı uygulaması olarak deformasyon izleme gösterilmektedir. Saçıcıların görüntüdeki bir referans konuma göre bakış doğrultusu (line of sight) yönündeki göreceli hareketleri L, C ve X bant radarlarda cm ve mm doğruluklarda dalga boyu fraksiyonlarında ölçülebilmektedir [137]. Ancak bu uygulamadaki problem efektif ana hat mesafesinin sıfırdan büyük olmasından dolayı deformasyon sinyalinin topoğrafik sinyal ile karışmasıdır. Bu problemin çözümünde, “topoğrafik interferogram” olarak adlandırılan veriden (ya da referans yükseklik modelinden) elde edilen topoğrafik sinyalin, deformasyon sinyalinin ana hat mesafesine göre ölçeklenmesi ve deformasyon sinyalinden çıkarılması ile elde edilen diferansiyel interferogram kullanılmaktadır [137]. Bu yaklaşımın ilk gösterimi Landers depreminin yer değiştirme alanının haritalanmasında Massonet ve Adragna tarafından kullanılan diferansiyel radar interferometri örneğidir [138]. Bu çalışmada topoğrafik faz sinyalinin

silinmesinde referans yükseklik modeli kullanılmıştır. Zebker ve diğerleri de aynı alanda üç-geçişli method olarak adlandırılan yaklaşımla benzer bir çalışma yapmışlardır [139]. Bu metotta topoğrafik faz sinyalinin elde edilmesinde kısa zamansal ayrıma sahip iki SAR görüntüsü kullanılmış ve bu iki görüntüden biri üçüncü SAR görüntüsü ile kombine edilerek diferansiyel interferogram üretilmiştir. Massonet ve diğerleri bir yılın üzerindeki zaman aralıklarında bile iki SAR görüntüsünün kurak ve bozulmamış alanlarda kombine edilebileceğini göstermişler ancak atmosferik geciken sinyalin sonuçlar üzerinde etkili olabileceğini de tartışmaktadırlar [140].

SAR interferometri (tekrarlı geçiş) jeodezik uygulamaları kabaca 4 kategoriye ayrılabilir [117]; 1) Topoğrafik Haritalama, 2) Deformasyon haritalama, 3) Tematik Haritalama ve 4) Atmosferik gecikme haritalama. Burada her bir kategori ayrı alt başlıklar altında biraz daha detaylı olarak açıklanacaktır. Topoğrafik haritalama kapsamında uzay radar interferometrinin DEM oluşturulmasında kullanımı ilk denemelerinden sonra [133], on yıl içerisinde standart bir jeodezik araç haline dönüşmüştür. Günümüzde ticari olarak mevcut yazılımlar uzman olmayan kullanıcılar tarafından da kullanılabilir ve ayrıca firmalar mevcut SAR verilerinden coğrafi kodlanmış DEM'ler oluşturulması hizmetleri sağlamaktadır. Özellikle ERS1/2 uydularının oluşturduğu "tandem misyonu" verileri bu amaçlar için kullanılmaktadır [141]. ERS uydularının düzenli alımları sayesinde dünyanın bütün kapsamında amaçlanan pek çok interferometrik yükseklik modellerinin mozaiklenmesi ile büyük alanların hatta kıtasal ölçeklerde haritalanmasına olanak vermektedir. Topoğrafyanın radar interferometrik ölçümleri ilk bakışta optik (stereografik) metotlara benzer görülebilmektedir. Her iki metotta yükseklik farklarının elde edilmesi için iki adet görüntüye ihtiyaç duymaktadır. Ancak asıl teknik farklılıklar optik tekniklerde doğrudan açı-ölçümlerine dayanan paralaks farkına dayanırken, radar sistemlerde "mesafe" ölçümlerine dayanmaktadır. Paralaks ölçümleri arazideki homolog özelliklerin tespit edilmesini gerektirmektedir. Bundan dolayı kutup bölgelerindeki karlı alanlar veya çöllerdeki kumul alanlarda sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca optik teknikler, güneş ile aydınlatılmayı gerektirmekte olup bulutlardan da geçememektedir. Tekrar geçişli interferometrinin kullanılarak topoğrafik haritalanmasındaki ana problemler ise üzerine yatma, küçük gösterme, gölge, alımlar arasındaki zaman aralıkları, vejetasyon yüzünden oluşan koherens düşüşüne bağlı yüzey korelasyonunun bozulması ve verideki atmosferik sinyaldir. Son iki hata kaynaklarını efektif ana hat mesafesi uzunluğu etkilemektedir.

Örneğin daha uzun ana hat mesafesi, geometrik korelasyon bozulması yüzünden verideki gürültüyü artırırken, üretilen DEM'deki atmosferik bozuklukların etkilerini önemli ölçüde düşürmektedir. Ya da kısa ana hat mesafesi tam tersi etkiler oluşturmaktadır. Ancak tek geçiş interferometri (aynı platformda iki anten bulunan ya da tandem misyonu gibi) veri alımı, eş zamanlı gerçekleştirildiğinden bu hata kaynaklarından etkilenmemekte, interferometrik kombinasyonda atmosferik sinyal kaldırılmaktadır. Tek geçiş interferometriyi kullanan SRTM misyonu bundan dolayı özel olarak topografya ölçümleri için tasarlanmış olup tekrarlı geçiş interferometriye göre daha güvenilir ve daha iyi yükseklik verisi sağlamaktadır [142], [143].

Deformasyon haritalamada, diferansiyel InSAR tekniğinin pek çok uygulaması, Gabriel ve diğerleri tarafından tarımsal alanlar üzerindeki zemin hareketlerinin gözlenmesine ilişkin çalışmanın yayınlanmasından sonra gelişme göstermiştir [137]. Diferansiyel interferometri ile tekrarlı geçiş interferometri kullanarak yüzey deformasyon ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Bakış hattı doğrultusu boyunca meydana gelen yer değiştirmeler doğrudan interferogram da kayıt edildiği için dalga uzunluğu fraksiyonlarında ölçülebilmektedirler. Ancak ne yazık ki sıfırdan farklı olan bazhatları interferogram içerisinde topografya ile ilişkili bazı hassasiyetlere sebep olmaktadır. Çünkü 1) sıfır bazhatlı yörüngede uydunun manevra yapabilmesi arzu edilmediğinden veya çoğunlukla mümkün olmadığından ve 2) sadece bir tane sıfır bazhatlı menzil-kutusu sağlayan görme açısından değişimlerle ana hat mesafesindeki değişimden dolayı dik ana hat mesafesi sıfırdan sapmaktadır. Diferansiyel interferogramın elde edilmesinde kullanılan farklı yaklaşımlar mevcuttur. İki geçiş metodu, radar koordinatlarına dönüştürülen, ana hat mesafesi kullanılarak ölçeklenen ve interferogramdan çıkarılan harici bir yükseklik modeli kullanmaktadır [138]. Dünyanın pek çok alanı için yükseklik modelleri mevcut olduğundan dolayı bu uygulanabilir bir yaklaşım olarak önem kazanmaktadır. Elbette yükseklik modelindeki hatalar ana hat mesafesi karakteristiklerine bağlı olarak deformasyon sonuçları içerisine yayılmaktadır. Üç geçiş metodu olarak adlandırılan ikinci bir yaklaşım da diferansiyel interferogram elde etmede kullanılabilir [144]. Burada ilave üçüncü bir SAR alımı kullanılmakta ve topoğrafik çift olarak adlandırılan verinin oluşturulmasında uygun olan partner SAR alımı ile kombine edilmektedir. Bu çiftin deformasyona sahip olmadığı, topografyaya karşı duyarlılığı sağlayan uygun bir ana hat mesafesine sahip olduğu ve yeterli koherense sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu çift çözüldükten sonra deformasyon çiftinin ana hat mesafesi

karakteristiklerine ölçeklenerek deformasyon çiftinden çıkarılması işlemi gerçekleştirilerek diferansiyel interferogram üretilmektedir. Ancak A ve B SAR görüntülerinden türetilen topoğrafik çift ve A ve C SAR görüntülerinden türetilen deformasyon çifti kullanılarak üç geçiş metodunun uygulanabilmesi için iki çift arasındaki ana hat mesafesi farkının dikkate alınması gerekmektedir. Her iki interferogramdan referans fazının çıkarılmasından sonra ana hat mesafesi ölçeklenebilmektedir [144]. Üç geçiş metodu sadece topoğrafik çift ile deformasyon çiftinin her ikisinin de ortak bir görüntüye sahip olması durumunda uygulanabilmektedir. Bu görüntü daha sonra diğer ikisinin doğrultulmasında bir referans olarak kullanılmaktadır. Spesifik bir çerçeve için mevcut bazhatları olması yüzünden topoğrafik çift ile deformasyon çifti için ortak bir görüntü seçilememektedir. Bu durumlarda topoğrafik ve deformasyon çiftlerinin bağımsız olduğu dört geçiş metodu kullanılabilir. İki interferogram yeterli şekilde doğrultulabildiği sürece metodoloji üç geçiş metodu ile mukayese edilebilmektedir. Üç geçiş metodu ile uygulamadaki farklılığı üç veya dört çerçevedeki atmosferik sinyalin etkisi ve interferogramların doğrultulmasında ortaya çıkmaktadır.

Topoğrafik haritalamadaki hassasiyeti etkileyen ana hat mesafesinin ölçeklenmesi deformasyon haritalamada mevcut olmadığından doğruluklar santimetre altı seviyelere ulaşabilmektedir. SAR interferometri yüzey deformasyonlarının pek çok formlarına uygulanmaktadır. Sismik uygulamaları depremlerin, fayların ve tektoniklerin incelenmesini kapsamaktadır. Bu kapsamda deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası deformasyon ölçüm kapasitesi ortaya çıkmaktadır. İnterferogram oluşturmada kullanılan görüntülerin ikisinin de deprem öncesinde alınmış olması, birinin depremden önce birinin depremden sonra alınmış olması ve her ikisinin de depremden sonra alınmasına bağlı olarak bu uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Arşiv uydu verilerinin kullanılması olanakları diğer jeodezik tekniklerle ulaşamayacak doğruluk ve çözünürlükte jeofiziksel ve afet çalışmalarına imkân vermektedir. Bu konularda yapılmış çalışmalara örnek olarak; [138]-[140], [145]-[147] verilebilir. Yanardağ deformasyon izleme açısından benzer şekilde üç kategoride çalışma yapılabilmektedir. Ancak elbette arşiv veri mevcudiyeti olup, volkanik aktivite öncesi veri analizi tehlike tahmininin geliştirilmesinde önemli olmaktadır. Bununla birlikte uyuyan yanardağların düzenli izlenmesi potansiyel tehlikenin değerlendirilmesi açısından önemli olmaktadır [148]. Toprağın madencilik çalışmaları gibi aktivitelere bağlı olarak oturması veya yükselmesi konuları da diğer bir konu başlığı olmaktadır. Dünyadaki pek çok alan su, gaz, petrol, tuz

ve diğer mineral kaynakların çıkarılmasına bağlı olarak oturmalara veya yükselmelere maruz kalmaktadır. Ayrıca tünel inşası gibi yapı çalışmaları da benzer sorunlara sebep olmaktadır. Kesiksiz deformasyon haritalamada zamansal korelasyon bozulması önemli kısıtlamalar ortaya çıkarsa da, daha uzun zaman aralıklarında koherent kalan kentsel alanlar veya spesifik doğal ya da yapay özellikler aracılığıyla gözlemler yapılabilmektedir [149]-[155]. Buzul ve buz hareketinin interferometri ile çalışılması da rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir [156]. Grönland veya Antarktika gibi ulaşılamaz arazilerde interferometrik ölçümler küresel ısınma ve deniz seviyesi yükselmesi gibi daha gelişmiş problemlerde girdi olarak kullanılabilir. Buzul dinamikleri hakkında paha biçilemez bilgiler sağlamaktadır.

Tematik haritalamada kullanımı ise koherens değişimine dayanmaktadır. İki radar alımı arasında yer yüzeyinin saçıcı karakteristiklerindeki değişimler interferogramda, iki görüntünün birbirine benzerlik derecesinin göstergesi olan koherens değerinde değişime sebep olabilmektedir. Saçılım mekanizmasının değişmeden kaldığı her durumda koherens değeri en yüksek olup sadece alım geometrisi, veri işleme ve termal gürültüden etkilenmektedir. Farklı tip arazi kullanımları ile ilgili olarak koherens değerindeki düşüşün analiz edilmesi literatürde rapor edilmektedir [157]-[161]. Spesifik uygulamaları; ormancılık [160], taşkın izleme [162], lav akıntıları [163], [164], buz penetrasyonu [165]; heyelanlar [166] ve yangınlar, toprak nem değişimi veya vejetasyon büyümesi olarak gösterilebilmektedir. Radar sinyalinin atmosferik kırılma değişimine bağlı olan duyarlılığı genellikle radar interferometride bir sıkıntı olarak kabul edilmektedir. Ancak SAR alımlarının yüzey deformasyonunun olmadığı topografyası bilinen alanlar üzerindeki alım bolluğu verideki atmosferik sinyalin yorumlanmasını meteoroloji ve atmosferik dinamiklerin çalışılmasında ilgi çekici bir amaç yapmaktadır.

InSAR ölçümleri, iki SAR alımı (genel olarak ana (master) ve yardımcı (slave) olarak adlandırılırlar) arasındaki değişimi meydana çıkarır. Şekil 1.12’de tipik bir SAR ölçümünde temel faz gözlemi gösterilmektedir.

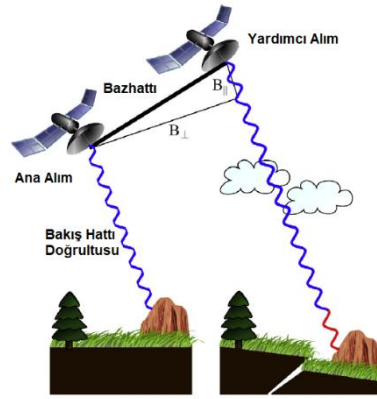
Basit şekilde anlatmak gerekirse bir nokta saçıcının faz geri dönüşü Denklem (1.19)’daki gibi hesaplanmaktadır [117]:

$$\varphi = \frac{2R_p 2\pi}{\lambda} + \varphi_{scat} \quad (1.19)$$

Denklemden  $\varphi$  faz,  $R_p$  radar ve zemindeki nokta arasındaki menzile,  $\lambda$  dalga boyu,  $\varphi_{scat}$  hedefin elektriksel özellikleri ile ilgili olan saçılım faz katkısına karşılık gelmektedir.



InSAR ölçümleri, özellikle topografya, zemin hareketi, atmosferik koşullar, uydular arası konumsal ayırım ve zeminin elektriksel özelliklerine karşı hassas olmaktadır [167], [168]. Bu faktörlerin InSAR ölçümlerinde faz farkına katkıları Denklem (1.20)'de verilmektedir. InSAR faz sinyali, bütün bu faktörlerin değişimlerinin bütünsel toplamı olup, uygulamaya bağlı olarak bazı faktörler gürültü olarak kabul edilebilmektedir. Örneğin, DEM üretimi hedefleniyorsa, deformasyon (zemin hareketi) gürültü olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde, zaman serileri analizleri metotları da stabil topoğrafik faz katkısını deformasyonları elde edebilmek için silinmesini gerektirmektedir.



Şekil 1.12. Tekrarlı geçiş interferometri şematik gösterimi.

$$\Delta\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{topo} + \varphi_{orbit} + \varphi_{defo} + \varphi_{tropo} + \varphi_{iono} + \varphi_{scat} + \varphi_{noise} \quad (1.20)$$

Denklemde  $\Delta\varphi$  interferometrik faz (ya da iki SAR alımı arasındaki faz değişimi),  $\varphi_{flat}$  düz arazi fazı,  $\varphi_{topo}$  topoğrafik faz katkısı,  $\varphi_{orbit}$  yörünge bilgisindeki hatalardan kaynaklanan faz hatası,  $\varphi_{defo}$  zemin deformasyonu ile ilgili faz katkısı,  $\varphi_{tropo}$  troposferik faz katkısı,  $\varphi_{iono}$  iyonosferik faz katkısı,  $\varphi_{scat}$  saçıcının elektriksel özellikleriyle ilgili faz katkısı,  $\varphi_{noise}$  kombine gürültü terimini ifade etmektedir.

Düz arazi ( $\varphi_{flat}$ ), topoğrafik faz ( $\varphi_{topo}$ ) ve zemin deformasyonu fazı ( $\varphi_{defo}$ ) iki geçiş arasındaki menzil fark denkleminin bütün parçaları olup topografya ve uydu yörüngelerinin bir fonksiyonudur. Menzildeki değişim Denklem (1.21)'e bağlı olarak faz ile ilişkilidir [102]:

$$\Delta\varphi_{flat,topo,defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1.21)$$

Denklemde  $\lambda$  radar dalgaboyunu ve  $\Delta R$  uydunun ilk ve ikinci geçişi arasındaki menzil değişimini göstermektedir. Düz zemin fazı dünyanın şekli yüzünden kaynaklanmakta olup jeodezik datum (yani WGS84) ve uyduların yörünge bilgilerinden

hesaplanabilmektedir. Pek çok SAR görüntü yazılımları görüntüleri düz zemin varsayımı ile odaklamaktadır, bundan dolayı, düz ve gerçek zemin arasındaki faz farkı dikkate alınmak zorundadır. Düz zemin fazı paralel ana hat mesafesi ile ilişkili olup Denklem (1.22)'deki gibidir [169]:

$$\varphi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (1.22)$$

Denklemde  $B_{\parallel}$  her bir piksel için paralel ana hat mesafesidir. Topoğrafik faz ise referans elipsoit üzerindeki topografya ile ilişkili interferogramın faz bileşeni olup dik doğrultulu ana hat mesafesi ile orantılıdır [170]:

$$\varphi_{topo} = \frac{(4\pi/\lambda)/B_{\perp}}{R \sin \theta \Delta z} \quad (1.23)$$

Denklem (1.23)'de  $\varphi_{topo}$  topoğrafik faz katkısı,  $B_{\perp}$  dik doğrultulu ana hat mesafesi,  $R$  hedef ve uydu arasındaki mesafe,  $\theta$  anten bakış açısı ve  $\Delta z$  referans elipsoit üzerindeki topografyadır. Denklem (4) ve Denklem (5) içerisindeki düz ve topoğrafik faz değerleri ana hat mesafe değerlerine ( $B_{\parallel}$  ve  $B_{\perp}$ ) bağlı olarak belirlenmektedir. Bundan dolayı uydu yörünge bilgisindeki her hangi bir hata  $\varphi_{orbit}$  olarak gösterilen artık faz hatası ortaya çıkaracaktır. Deformasyon da ayrıca interferometrik fazın bir kısmı olup uydunun bakış yönü doğrultusu boyunca ölçülmektedir. Uydu ve zemin arasındaki menzil arttıkça deformasyon pozitif değerler almakta olup çöküntüleri pozitif faz değişimi şeklinde haritalar. Deformasyon yüzünden oluşan interferometrik faz ( $\varphi_{defo}$ ) Denklem (1.24) ile belirlenmektedir [170]:

$$\varphi_{defo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{defo} \quad (1.24)$$

Ana ve yardımcı görüntülerin alımları esnasındaki atmosferik koşullardaki farklılıklar da interferometrik faz ölçümlerine katkı yapmaktadır. Troposferik faz katkısı, kırıcılık indeksi 1 olan boş bir alana göre troposferin oldukça büyük kırıcılık indeksine sahip olmasından kaynaklanmaktadır [171].

$$\varphi_{tropo} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{tropo} \quad (1.25)$$

Denklem (1.25)'de  $\Delta R_{tropo}$  atmosferik gecikmeden dolayı menzil değişimini göstermektedir. Atmosferik faz katkısı harici ölçümler (ENVISAT MERIS gibi) ve atmosferik modeller kullanılarak hesaplanabilmektedir [171], [172]. Genellikle troposferik faz katkısı C-band (4-6 GHz) ve daha yüksek frekanslı radarlar için atmosferik faz ekranı (atmospheric phase screen APS) olarak adlandırılmaktadır. Ancak L-band (1-

2 GHz) ve daha düşük frekanslı radarlar için iyonosferik toplam elektron içeriği (ionospheric total electron content TEC) değişimler interferometrik fazı önemli ölçüde etkilemektedir. İyonosferik koşullardaki değişimler ayrıca görüntü bağdaştırma işleminde zorluklar oluşturarak ve ayrıca da Faraday rotasyonu yüzünden oluşan koherensi düşürerek menzil ve azimut yönlerde bulanıklıklara sebep olabilmektedir [173], [174]. TEC'deki 1 birim farklılık ( $1.016 \text{ m}^{-2}$ ) aşağıda verilen formüle göre L-bantta 2 döngülük, C-bantta 0,5 döngülük ve X-bantta 0,3 döngülük bir faz gecikmesine sebep olacaktır [174]:

$$\varphi_{iono} = 1.69 \times 10^{-6} N \lambda \quad (1.26)$$

Denklem (1.26)'da  $N$  birim alandaki elektronların sayısıdır. Saçıcının elektriksel özelliklerindeki değişimlerden kaynaklı faz katkısı genellikle topografya ve deformasyon ölçümlerinde göz ardı edilebilir olarak varsayılır. Ancak penetrasyon derinliği, kuru kar su eşdeğeri ve toprak nemi ölçümlerine ilişkin yansıtıcının yalıtkanlık özelliklerindeki değişimlere dayalı çalışmalar mevcuttur [175]-[177]. İnterferometrik ölçümlerin farklı olgulardaki değişimleri yansıtılabildiğine dikkat edilmelidir. Bu yüzden, sonuçlar analiz edilirken çoğunlukla belirli varsayımlar yapılmaktadır. Genelde, daha büyük sinyal interferogramı domine eder ve penetrasyon derinliğindeki değişimler gibi daha küçük sinyaller zemin deformasyonu veya topografya gibi daha büyük sinyaller tarafından çoğunlukla maskelenmektedirler. Daha küçük sinyallerin çalışılması daha büyük katkı sağlayıcıların iyi anlaşılmasını gerektirir ki böylece etkileri minimize edilebilsin.

İnterferometrik faz gürültü terimi ( $\varphi_{noise}$ ) koherens ile ilişkilendirilebilmektedir ve dört farklı korelasyon bozukluğu terimine ayrılabilir [157]. Farklı korelasyon bozuklukları terimlerinin etkisi çarpımsal olup Denklem (1.27)'deki gibidir:

$$\gamma_{total} = \gamma_{spatial} + \gamma_{Doppler} + \gamma_{temporal} + \gamma_{thermal} \quad (1.27)$$

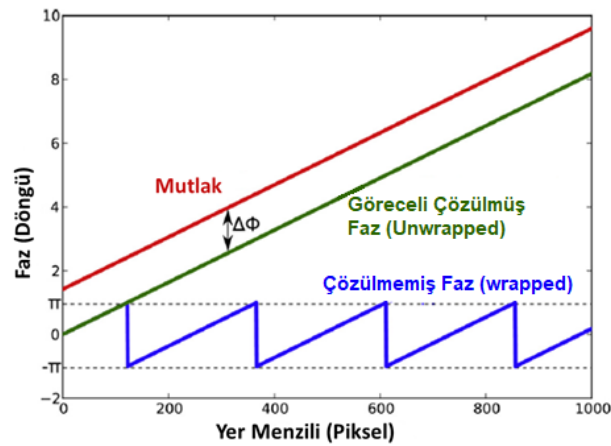
Denklemden  $\gamma_{total}$  toplam korelasyon (interferometrik koherens),  $\gamma_{spatial}$  konumsal ana hat mesafesi korelasyon bozukluğu,  $\gamma_{temporal}$  zamansal korelasyon bozukluğu,  $\gamma_{Doppler}$  Doppler merkezi korelasyon bozukluğu ve  $\gamma_{thermal}$  termal korelasyon bozukluğudur. Toplam korelasyon hiçbir korelasyon bozukluğu olmaması durumunda 1'e eşit olmaktadır. Konumsal ana hat mesafesi korelasyon bozukluğu iki uydu yörüngesi arasındaki yatay ayırımla ilgilidir. Doppler merkezi kaynaklı korelasyon bozuklukları ana ve yardımcı alımları esnasında yalpalama, sallanma ve sendeleme gibi uydu

konumlarında değişiklik meydana geldiğinde ortaya çıkmaktadır. Uydunun yalpalama ve sendelemesine bağlı olan yan bakış açısı yüzünden bu etki oluşmaktadır [178]. Zamansal korelasyon bozukluğu çözünürlük hücresindeki saçıcıların özelliklerinin zaman içerisindeki değişiminden dolayı meydana gelmektedir. Hacim saçılımının dominant olduğu ormanlık alanlarda daha kuvvetli olmaktadır. Radarın termal gürültüsü ise bir korelasyon bozukluğu terimi oluşturur ve çoğunlukla interferometride göz ardı edilir.

Denklem (1.20) de gösterildiği gibi, interferometrik faz uydu pozisyonundaki hatalar ve deformasyon ölçümlerini değiştiren topografya gibi pek çok olgunun bir toplamıdır. Ayrıca, atmosferik koşulların değişimi de deformasyon sinyalini bozacaktır. 2000 yılından beri, pek çok grup bu istenmeyen sinyallerin önlenmesi üzerine aynı alana ait çoklu alımları kullanarak çalışmaktadır [167], [179]-[193]. Bu deterministik faz katkı sağlayıcıların yanısıra, interferometrik fazın çözülmesi bir non-parametrik problem olmaktadır ve sadece belirli varsayımlar altında pek çok aynı ölçüde doğru olan çözümlere sahiptir [194]. Bu varsayımlar zaman serileri analizleri arasında değişiklik göstermektedir.

### Faz Çözme

InSAR faz ölçümleri  $-\pi$  ve  $+\pi$  arasında paketlenmektedir. Pek çok pratik uygulama için kesiksiz faz değerleri gereklidir ve çözülmüş faz olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1.13). 2B veya 3B de tanımlanmış olmasına bakılmaksızın çözülmüş faz, ölçülen veri argümanının kesiksiz eğrisidir ve aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi başlangıç noktasının sıfır olan faz türevinin bir integrali olarak dikkatli bir şekilde tanımlanmaktadır [195].



Şekil 1.13. Çözülmemiş faz (mavi), göreceli çözülmüş faz (yeşil) ve mutlak çözülmüş faz (kırmızı) ([196]'dan değiştirilmiştir)

$$\varphi_N = \int_{m=0}^N \varphi'_m dm \quad (1.28)$$

$$c = 0$$

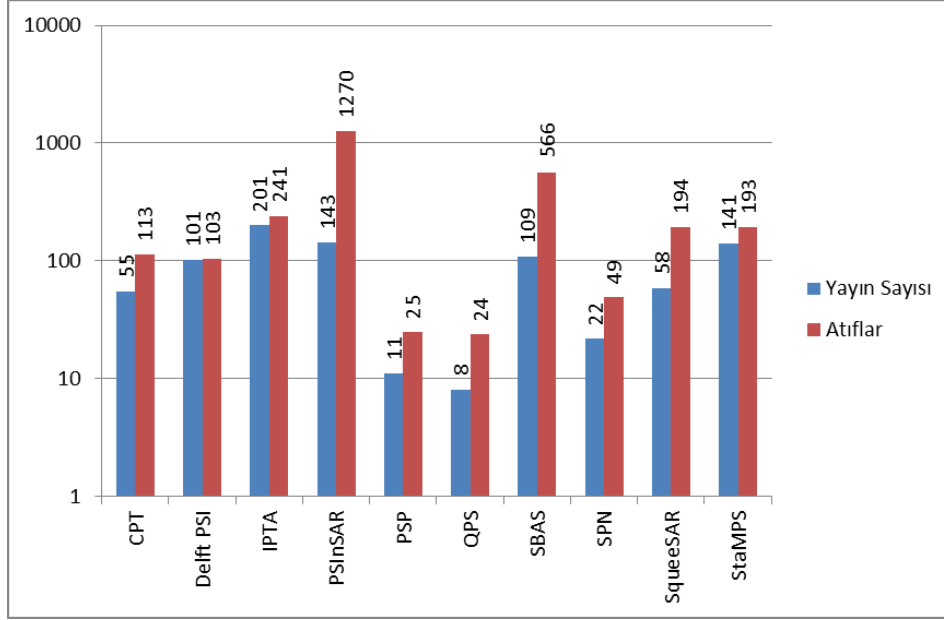
Denklem (1.28)'de  $\varphi_0$  referans noktası,  $\varphi_N$  son nokta,  $m$  integrasyon değişkeni (ölçüm aksisi boyunca bulunan örnekler) ve  $\varphi'_m$  karmaşık faz türevidir. InSAR ölçümleri göreceli olduğu için mutlak faz ve göreceli çözülmüş faz arasındaki offset ( $\Delta\varphi$ ), sadece GPS ölçümleri gibi ilave bilgi kullanılarak çözülebilmektedir. Literatürde faz çözme işleminin diğer tanımlamaları da mevcuttur. Çözme ayrıca temel değerlerin karmaşık-çözülmemiş farklarının toplamı olarak tanımlanmaktadır [197], [198]:

$$\varphi_N = \varphi_0 + \sum_{m=0}^N \Delta\varphi_m \quad (1.29)$$

Denklem (1.29)'da  $\Delta\varphi_m$  ayrık karmaşık türev işlemi fazıdır (açı( $\Delta e^{i\varphi_m}$ )). Ayrık durumda, bu iki denklem arasındaki pratik farklılık ilk denklemde sıfır olarak fakat ikinci denklemde başlangıç pikselinin açısı tanımlanan başlangıç piksel değeridir. Bu faz çözme fonksiyonlarının yüksek boyutlu ifadeleri [199]'da bulunabilir.

#### 1.4. INTERFEROMETRİK SAR (INSAR) ZAMAN SERİLERİ

InSAR zaman serileri analizleri dünya yüzeyindeki deformasyonların ve yer değiştirmelerin gözlenmesinde ortaya çıkmış önemli bir alan olmaktadır. Dünya yüzeyinde meydana gelen yer değiştirme ve deformasyonlar, deprem, volkanizma, heyelan, yeraltı suyu seviyelerindeki değişim, sulak alanlar su seviyelerindeki değişim gibi farklı sebeplerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu Yerdeğiştirme ve deformasyonların incelenmesinde interferometrik verinin zaman serileri analizinde kullanılan farklı algoritma/metotları kapsamlı olarak Osmanoğlu ve diğerleri tarafından derlenmiştir [200] (Çizelge 1.2) ve ayrıca literatürde yapılan çalışmaların sayısı ile birlikte bu çalışmalarda yapılan atıflara ilişkin bilgilerde ortaya konmuştur (Şekil 1.14). Benzer şekilde Crosetto ve diğerleri de PSI (Persistent Scatterer Interferometry) konusunda derleme bir çalışma ortaya koymuştur [201]. Bu çalışmada literatürde yer alan, InSAR zaman serisi analizi için geliştirilen algoritma/yöntemler farklı PSI yaklaşımları ana başlığı altında değerlendirmektedir (Çizelge 1.3). Geliştirilen PSI algoritmaları kronolojik sırada açıklanarak özellikle dört en önemli PSI yaklaşımı hakkında detaylı bilgi sağlanmaktadır. Bu derleme çalışmalara göre ilk PSI tekniği, Ferretti ve diğerleri tarafından geliştirilen



Şekil 1.14. Farklı InSAR zaman serileri analizi metotlarının kullanım yaygınlığı ([200]'den uyarlanmıştır)

Çizelge 1.2. InSAR zaman serileri analizlerinde kullanılan algoritma/metotlar

Metod/Algoritma Adı	İlgili Çalışmalar
Coherent Pixels Technique (CPT)	[188]
Delft Persistent Scatterer Interferometry (DePSI)	[185], [186]
Interferometric Point Target Analysis (IPTA)	[183]
Quasi Persistent Scatterers (QPS)	[193]
Small Baseline Subset (SBAS)	[182], [187]
Stable Points Network (SPN)	[191], [192]
SqueeSAR™	[180], [181]
Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)	[184], [206]

“Permanent Scatterers” yaklaşımı olup [167], [179], daha sonra PSInSAR™ algoritması olarak “Politecnico di Milano” firmasının ayrı bir birimi olarak kurulan Tele-Rilevamento Europa, TRE ([www.treuropa.com](http://www.treuropa.com)) isimli firma tarafından patenti alınmıştır [201]. Bu iki öncü çalışmayı takiben farklı çalışmalarla çeşitli katkılar ortaya konmuştur.

Bu katkılardan en çok kullanılanlardan biri olan SBAS (Small BAseLine Subset) tekniğidir. SBAS algoritmasının tanıtımı Lanari ve diğerleri tarafından verilmektedir [187]. Ayrıca ileri de detaylı olarak açıklanacaktır. SBAS tekniğine benzer çoklu bakışlı görüntülere dayalı yaklaşımlar, Mora ve diğerleri ve Schdmidt ve Bürgmann tarafından tanıtılmıştır [202], [203]. Ayrıca PSI konusunda çalışan “Gamma Remote Sensing ([www.gamma-rs.ch](http://www.gamma-rs.ch))” ve “Altamira Information ([www.altamira-information.com](http://www.altamira-information.com))” isimli

iki firmada aynı yıl içerisinde kendi yaklaşımlarını tanıtmışlardır [183], [204]. Kentsel olmayan çevrelerdeki episodik yer kabuğu deformasyonlarını analiz etmek için Hooper ve diğleri tarafından bir PSI metodu geliştirilmiştir [184].

Çizelge 1.3. Literatürde yer alan farklı PSI yaklaşımları ve özellikleri [201].

PSI Metodu Kaynağı	Ana hat Konfigurasyonu	Piksel Seçim Kriteri	Deformasyon Modeli
[167], [179]	Tekil Master	Genlik Dağılımı	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[182]	Küçük Temel Hat	Koherens	Konumsal düzgünlük
[202]	Küçük Temel Hat	Koherens	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[204]	Küçük Temel Hat	Koherens	Konumsal ve zamansal düzgünlük
[183]	Tekil Ana	Genlik dağılımı ve Spektral Faz Çeşitliliği	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[191], [204]	Küçük Temel Hat	Genlik dağılımı, koherens, spektral koherens	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[186]	Tekil Ana	Genlik dağılımı, sinyal/karışıklık oranı	Farklı tip deformasyon modelleri
[184]	Tekil Ana	Genlik ve faz kriteri	Konumsal düzgünlük
[205]	Küçük Temel Hat	Koherens	Zaman içindeki aşamalı doğrusal fonksiyon
[189]	Tekil Ana	Genlik dağılımı	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[207]	Küçük Temel Hat	Koherens	Konumsal düzgünlük
[181]	Tekil Ana (Üçgenlemeden sonra)	İstatistiksel türdeşlik testi	Zaman içindeki deformasyon modeli
[193]	Hedef bağımlı interferogram kümeleri	Quasi PS yaklaşımı	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[208]	Küçük Temel Hat	Koherens	Farklı tip deformasyon modelleri
[209]	Tekil Ana	Genlik dağılımı	Farklı tip deformasyon modelleri
[210]	Küçük Temel Hat	İstatistiksel türdeşlik testi	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[211]	Tekil Master	İstatistiksel türdeşlik testi	Zaman içindeki doğrusal deformasyon
[212]	Küçük Temel Hat	Genlik dağılımı ve kuzin PS	Konumsal düzgünlük

Crosetto ve diğleri en küçük kareler düzeltmesi ve doğrusal deformasyon fonksiyonlarına dayanan aşamalı, basitleştirilmiş bir PSI yaklaşımı önermişlerdir [205]. Costantini ve diğleri PS (Persistent Scatterers) noktalarının komşu çiftlerinin görel

özelliklerini kullanan bir PSI yöntemi önermişlerdir [189]. López-Quiroz ve diğerleri ise zamansal olarak parametrelenmiş ters inversiyona dayalı yeni bir SBAS yöntemi tanıtmışlardır [207]. Ferretti ve diğerleri ise PSInSAR<sup>TM</sup> yazılımının gelişmiş versiyonu olan SqueeSAR<sup>TM</sup> isimli algoritmayı geliştirmişlerdir [181]. Perissin ve Wang kısmi olarak koherent olan hedefleri kullanan PSI yaklaşımı tanıtmışlardır [193]. Hetland ve diğerleri uzayda dalgacık dağılımı ve zamandaki genel parametrelmeye dayalı bir algoritma tanıtmışlardır [208]. Van Leijen tarafından jeodezik hesap teorisine dayalı bir algoritma önerilmiştir [209]. Goel ve Adam ise deformasyon deseninin bilindiği olguların izlenmesine yönelik bir PSI yaklaşımı ortaya koymuşlardır [210]. Komşu piksel yığınlarının koherens bilgisini kullanan bir PSI yaklaşımı Lv ve diğerleri tarafından önerilmiştir [211]. Kuzen PS noktalarına dayalı bir PSI yaklaşımı da Devanthéry ve diğerleri tarafından önerilmiştir [212]. Burada yapılan derleme çalışmalara ilave olarak ayrıca Çizelge 1.2’te verilen yaklaşımlar daha detaylı olarak alt başlıklar halinde anlatılmaktadır.

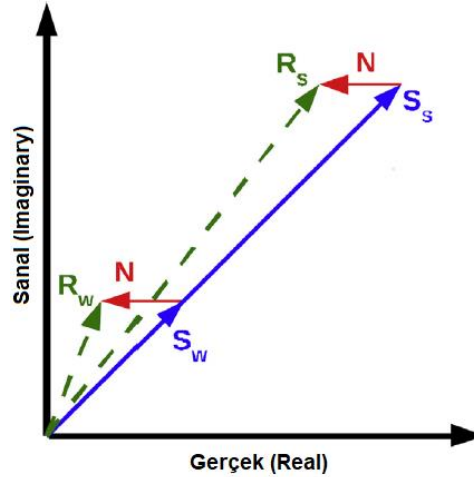
#### 1.4.1.1. *Persistent Scatterer Interferometry (PSI)*

PSI, PSInSAR<sup>TM</sup> ve IPTA yöntemleri aynı teorik temelde çalışmaktadır [200]. PSI zaman serileri algoritması, SAR çözünürlük hücresinden daha küçük boyutlara sahip “persistent scatterer” isimli saçıcıları (yeryüzündeki ağaç, bina vb yapay ve doğal bütün objeler) kullanmak üzere geliştirilmiştir [167], [186]. Bu yüzden PS, ana hat mesafesi korelasyonu bozukluğundan etkilenmezler ve tek bir ana görüntü kullanarak kritik ana hat mesafesi daha uzun değerlerine sahip görüntü çiftlerinden bile interferogramlar yığını oluşturulabilmektedir. Ana hat mesafesi korelasyonu bozukluğu olmaksızın, temin edilen bütün veri interferogramlar oluşturmak için kullanılabilir ki bu algoritmanın en önemli avantajı olarak değerlendirilmektedir [200]. Çözünürlük hücresi içerisinde yer alan ve bu yaklaşımla kullanılan PS’ler üzerinde metre altı DEM hassasiyetine ve birkaç milimetre yüzey hareketi doğruluğuna erişilebilmektedir [213]. PS’ler daha doğru şekilde coğrafi konumlandırılabilir ve başlangıç DEM çıkarılmasından sonra artık DEM hatası hesaplanabilmektedir. Çeşitli tiplerde PS’lerin birbirinden ayırt edilebilmesi ve çözünürlük hücresinde noktasal konumlandırılabilmesi imkânı sağlamaktadır [214].

PS’ler kentsel alanlarda daha yoğun şekilde tespit edilebildiklerinden, PSI tekniğinin metropoliten alanlarda zaman serileri analizi için kullanımı uygundur [215]. PSI tekniğinin ana işlem adımları [200]; 1) Bir ana görüntüden interferogramlar yığınının



oluşturulması ve topoğrafik fazın yok edilmesi 2) Genlik dağılım metodu tabanlı PS adaylarının seçimi 3) Atmosferik faz ekranının hesaplanması ve yok edilmesi, 4) İlave PS'lerin bulunması. Bir ana görüntüden interferogramlar yığını oluşturmak ve her bir interferogramdan topoğrafik fazın yok edilmesi DIAPASON, DORIS, ISCE, ROI-PAC gibi bir InSAR işleme yazılımı kullanılarak yapılabilmektedir [200]. Burada büyük bazhatları yüzünden bazı üretilen interferogramlarda saçaklar görünür olmasa da bazı piksellerde PS'ler koherent kalmaktadır. PS adayları, seçilen önceden tanımlı kriterler tabanında PS yaklaşımının ilk adımı olan noktalardır. Genlik dağılım metodu, PS adaylarını saçıcının zaman içerisindeki genlik değerini dikkate alarak seçmektedir. Burada düşünce, hem güçlü bir saçıcıya (yüksek genlik) ve hem de zayıf bir saçıcıya (düşük genlik) uygulanan, önceden belirlenmiş aynı dereceli gürültünün faz değişiminin güçlü saçıcılarda daha az olacağıdır (Şekil 1.15). Tek bir pikselin genlik dağılımı, standart sapmasının onun ortalama değerine oranı olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır [167]:



Şekil 1.15. Vektör uzunluğu ile gösterilen zayıf ( $S_w$ ) ve güçlü ( $S_s$ ) yansıtıcı genlikleri. Her iki saçıcıya da aynı gürültü ( $N$ ) uygulandığında oluşan vektörlerin faz açısı zayıf saçıcı ( $R_w$ ) için kuvvetli ( $R_s$ ) saçıcıdan daha fazladır [200].

$$D_A = \sigma_A / \mu_A \quad (1.30)$$

Denklemden  $D_A$  genlik dağılım değerini ve  $\sigma_A$  ve  $\mu_A$  ise sırasıyla standart sapma ve genlik değerleri ortalamasını göstermektedir. Tipik olarak,  $D_A$  değeri 0.25'ten az olan noktalar PS adayları olarak seçilmektedir. DEM için düzeltme değerleri ve deformasyon hızlarının tahminleri, küçük bazhatlı interferogramlardan başlayarak tekrarlı şekilde genlik dağılım metodu ile seçilmiş noktalar için hesaplanmaktadır [200]. Bir sonraki adım, ana görüntü

verisi ile başlayarak APS (atmospheric phase screen)'nin hesaplanmasıdır. PS adayları kullanılarak 2B bir konumsal ağ oluşturulur ve artık faz değerleri DEM ( $\varphi_{topo}$ ) ve deformasyon ( $\varphi_{defo}$ ) sinyalleri giderildikten sonra her bir PS adayı için hesaplanmaktadır. Geriye kalan artık faz  $\varphi_{scat}$ ,  $\varphi_{noise}$  ve  $\varphi_{atmo}$  faz katkılarını içermektedir (ki bunlar Denklem 1.20'de yer almaktadır). PS adayları için saçıcının yalıtkanlık sabitindeki ( $\varphi_{scat}$ ) değişimler göz ardı edilebilmektedir. Tek bir ana görüntüye göre interferogramlar üretildiği için bütün interferogramlar artığın bir ortalaması ile hesaplanabilen ana veriden kaynaklanan atmosferik katkıya sahiptirler. Ana verideki bütün PS adayları için  $\varphi_{atmo}$  bilindiğinde, düşük geçişli bir filtreleme ve Krigging işlemi ana veri için APS hesaplamada uzay alanında uygulanır. Diğer alımlar için APS bütün interferogramlardaki  $\varphi_{atmo}$  'nin yok edilmesine olanak vererek aynı şekilde hesaplanmaktadır. Bütün PSI teknikleri özellikle APS'nin doğru hesaplanmasında yanlış bazhatları ve topoğrafik yükseklik haritaları olması durumunda güvenilir sonuçlar için çok sayıda mevcut ekran (>10) gerektirmektedir [200]. APS hesaplamasından sonra, gözlemlerden bütün istenmeyen sinyaller temizlenebilir ve DEM hataları ve saçıcı hızları piksel piksel bütün noktalar için hesaplanabilmektedir. Bu işlem koherens değerini maksimize eden faz değerlerinin zaman serileri analizlerini kullanarak yapılmaktadır. 30'dan fazla alımlarda ve yüksek SNR değerleri durumunda beklenen DEM doğruluğu PS için 0,5 m ve deformasyon oranı doğruluğu 0,5 mm/yıl dır [167]. PSI algoritmasının çeşitli varyasyonları geçmiş yıllarda geliştirilmiştir. SPN ve PSP iki örneği olup farklılıkları sonraki bölümlerde açıklanmaktadır.

#### 1.4.1.2. *Stable Point Network (SPN)*

PSI algoritmaları bir ana görüntüden oluşturulan görüntü yığınları kullanmaktadır. Çünkü PS'lerin tanımlanması ana hat mesafesi korelasyonu bozukluğundan etkilenmemektedir. SPN, persistan saçıcıları kullanmasına rağmen, çoklu ana görüntüden oluşturulan yığın kullanmaktadır ki mükemmel olmayan PS'lerin geometrik korelasyon bozukluğu sınırlandırmayı amaçlamaktadır. SPN, persistan saçıcıları üç farklı seçim kriterini dikkate alarak seçmektedir: i) genlik stabilitesi, ii) interferometrik koherens ve iii) spektral koherens [191]. SPN, 1992 den bu yana CNES tarafından geliştirilen DIAPOSON interferometrik işlemci ile oluşturulmaktadır [204]. SPN çeşitli zemin deformasyon olgularına başarılı şekilde uygulanmıştır [191], [192], [216].

#### 1.4.1.3. *Persistent Scatterer Pairs (PSP)*

PSI, yörüngesel rampalar (orbital ramps), atmosferik faz katkısı ve DEM hataları gibi konumsal ürünlerin hesaplanması ve giderilmesine dayanmaktadır. Buna ulaşabilmek için çok fazla sayıda görüntü ve genellikle doğrusal olarak tanımlanmış bir deformasyon modeli kullanılmaktadır. PSP metodu deformasyon modeli gerekliliğini konumsal ürünler uzay ile ilişkilidir ve komşu noktalar karşılaştırıldığında yok sayılabilir varsayımını dâhil ederek ortadan kaldırmaktadır. PSP komşu noktaları kullanarak yaylar tanımlar ve minimum yaylar kümeli bütün potansiyel PS'leri oluşturur [217]. Her bir yay için yükseklik ve deformasyon hızındaki farklılık, daha sonra sonlu fark entegrasyonu kullanarak çözülmüş bir faz elde etmek için entegre edilebilen ağ üzerinde hesaplanmaktadır [190].

#### 1.4.1.4. *Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS)*

StaMPS, PSI ile bazı benzerliklere sahiptir, ancak, PS'ler, genliklerine bakılmaksızın zaman ve mekanda stabil faz karakteristikli saçıcılar olarak yeniden tanımlanmaktadır [184]. Bu yüzden, PSI daki gibi noktalar persistan saçıcılar olarak adlandırılrsa da terimin anlamı sadece faz karakteristikleri bakımından uyumaktadır bu noktaları bulma metodu bakımından değil. Bu değişim StaMPS'yi deformasyon ölçümlerinde kentsel olmayan araziler üzerinde de kullanmaya imkân sağlamaktadır. StaMPS ve PSI her ikisi de PS adaylarının başlangıç seçiminde genlik dağılımını kullanmaktadır fakat StaMPS için eşik değeri daha yüksektir (0,4). StaMPS ayrıca PS adaylarının koherensinin diğer yakında olan PS adaylarını kullanarak ve düşük koherens değerli noktaların reddedilerek hesaplandığı tekrarlı bir model kullanmaktadır. PSI ise sadece StaMPS ten daha fazla noktanın elimine edilmesine neden olan stabil bir zamansal davranışlı PS adaylarını seçmektedir. Yine ilave PS bulma modeli de farklıdır. PSI daki model, topografya, doğrusal faz ve uzun dalga boyu hata kaynakları (atmosfer ve yörünge) kombinasyonu iken StaMPS deki tek kısıt sadece lokal bir penceredeki fazın faz değişimidir [184], [186], [218]. StaMPS'in ilk versiyonunun ortaya çıkmasından sonra kullanılan çözme işleminin şekli değişmiştir. Başlangıç versiyonu 3B zaman serileri üretmek için 2B çözme işlemleri serisi kullanmaktaydı. Çözme işlemi ilk olarak zaman alanında yapıldı ve daha sonra bütün örnekler üzerinde 3B bir çözüm entegre etmek için tekrarlı en küçük kareler metodu kullanılırdı. SNAPHU tarafından sağlanan konumsal çözme işlemi optimize etmek için maliyet haritaları tanımlayarak ve seyrek noktaları düzenli bir grid'e enterpole ederek zamansal çözme işleminden sonra uzay boyutunda olasılık yoğunluk fonksiyonları

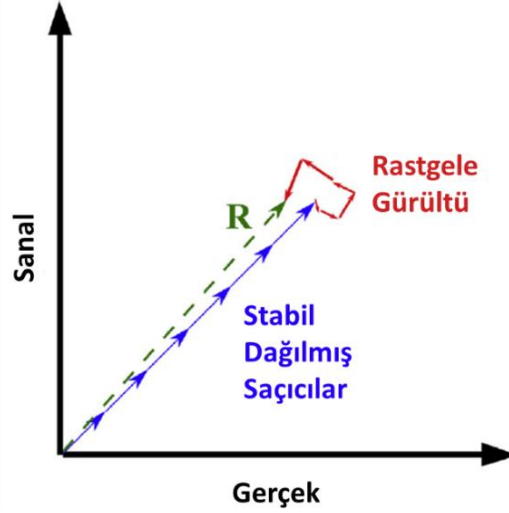
hesabının içerildiği versiyon 2.0'dan bu yana StaMPS 3B çözme metodu ile gelirken StaMPS in en son versiyonu 12 Eylül 2013'te yayımlanan versiyon 3.3b1'dir [219], [220]. Versiyon 3.0'dan bu yana, StaMPS, SBAS analizine ve ayrıca PS ve SBAS kombinasyonuna izin vermektedir.

#### 1.4.1.5. *Coherence Pixel Technique (CPT)*

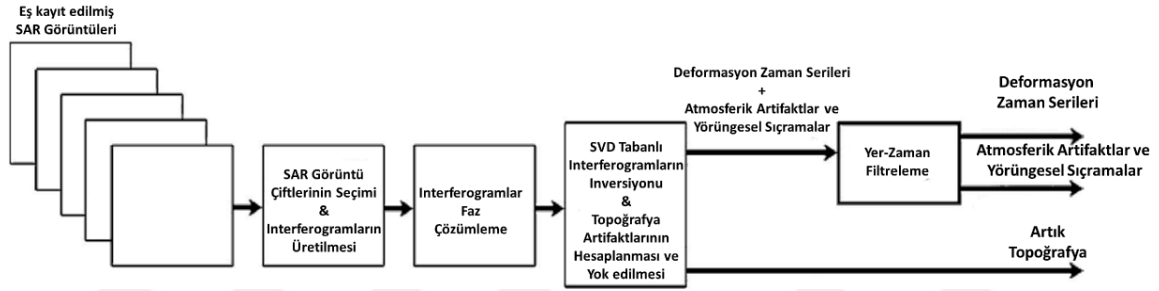
Koherent piksel tekniği PSI metotlarına benzerdir çünkü analiz için PS leri kullanır ve çözülmemiş interferogramlardan başlar. Ancak CPT, zamansal, dik doğrultulu ve Doppler merkezi frekanslı 3 boyutta bir ana görüntüden yığın oluşturmak yerine çoklu-ana görüntüden interferogram yığını oluşturmak için üç eksen olarak minimum kapsayan ağaç ağı kullanmaktadır [188]. İnterferometrik faz yaylar üzerinde eşlenik gradyan (eğim) metodu olarak isimlendirilen tekrarlı bir optimizasyon yönlendirme kullanarak çözülmektedir. Doğrusal olmayan deformasyon interferogramların başlangıç doğrusal modelli çözme işleminin uygulanmasından sonra tekil değerli ayrıştırma kullanarak hesaplanabilmektedir.

#### 1.4.1.6. *Small Baseline Subset (SBAS)*

SBAS algoritması dağıtılmış saçıcıları (Şekil 1.16) ve tekil değerli ayrıştırmayı zaman içerisinde bağımsız çözülmüş interferogramları bağlamak için kullanmaktadır [182], [221]. Küçük Zamansal Ana Hat Mesafesi Alt Küme (Small Temporal Baseline Subset, STBAS) sadece kısa zamansal ana hat mesafelerinin kullanıldığı interferogramlar ile elde edilmiş SBAS algoritmasının bir modifikasyonudur [222], [223]. Kısa zamansal ana hat mesafeleri özellikle zamansal korelasyon bozukluğunu minimize etmek için sulak alanlardaki su seviyesindeki değişimleri izlemek gibi büyük oranda değişken olan olgularda ihtiyaç duyulmaktadır. Altında yatan kavramsal benzerlikleri yüzünden her iki algoritmada bu çalışmada SBAS olarak adlandırılmaktadır. SBAS bir zaman serisi oluşturmak için çoklu çözülmüş interferogramları kombine etmektedir. Bu interferogramların ana ve yardımcı görüntüleri ilgili sinyal için ortalama ana hat mesafesi parametresi kullanılarak seçilmektedir. Deformasyon analizlerinde, ana hat mesafesi parametreleri kritik ana hat mesafesinin %25'i ve yaklaşık 1 yıllık zamansal ana hat mesafesi olarak ayarlanabilmektedir. STBAS algoritması için ise en kısa zamansal ana hat mesafesine sahip çiftler konumsal ayrıma bakılmaksızın seçilmektedir. Şekil 1.17'de gösterildiği gibi bu interferogramlar tek bir görüntüye göre bağdaştırılmalıdır.



Şekil 1.16. İlgili sinyaldeki rastgele gürültünün etkisini düşürmek için dağılımş yansıtıcılar koherentli olarak toplanabilmektedir.



Şekil 1.17. SBAS algoritması blok diyagramı

Çözülmüş, bağdaştırılmış interferogramlar topoğrafya, atmosfer ve deformasyon sinyallerini içermektedir. Dik doğrultulu ana hat mesafesi tarafından ölçeklenmesine rağmen, topoğrafya sinyali bütün interferogramlarda yer almaktadır. Topoğrafya bütün interferogramların Denklem (1.31)'deki gibi kombine edilmesiyle hesaplanmaktadır [182]:

$$\Delta_t = \left[ \frac{4\pi B_{\perp 1}}{\lambda R \sin \theta} \frac{4\pi B_{\perp 2}}{\lambda R \sin \theta} \dots \frac{4\pi B_{\perp N}}{\lambda R \sin \theta} \right] \quad (1.31)$$

Denklemden  $\Delta_t$  referans noktasına göre topoğrafya,  $B_{\perp}$  her bir alım için dik doğrultulu ana hat mesafesi,  $R$  menzil ve  $\theta$  antenin görme açısıdır. Topoğrafik faz katkısının tanımlanması ve yok edilmesini takiben sinyal sadece atmosferik ve deformasyon sinyallerini içermektedir. Ortaya çıkan interferogramlar zaman-ardışık alımlar arasında ortalama faz hızlarına dönüştürülmektedir [182]. Atmosferik filtreleme PSI'daki gibi konumsal-zamansal filtre kullanılarak yüksek konum ve düşük zamansal ilişkili sinyalin çıkarılması ile işlemin sonunda gerçekleştirilmektedir [167], [179].

#### 1.4.1.7. *SqueeSAR*<sup>TM</sup>

*SqueeSAR*<sup>TM</sup> ikinci nesil *PSInSAR*<sup>TM</sup> olarak geliştiricileri TRE tarafından tanıtılmıştır [180], [181], [224], [225]. *SqueeSAR*<sup>TM</sup> nin öncekinden ana farklılığı zaman serileri analizlerinde persistan ve dağılmış saçıcıların kombinasyonudur. Başka bir ifadeyle, *PSI* sadece *PS*'lere odaklanırken, *SqueeSAR*<sup>TM</sup> her iki dağılmış ve persistan saçıcılardan da bilgiyi toplayarak kombine etmektedir [226]. Sabit ve dağılmış saçıcıların kombinasyonuna interferogramlar yığınınındaki aynı konumsal komşuluktaki doğru nokta gruplarını bulmak için birden fazla ana görüntüden ağı oluşturarak ve yeni bir mesafe metriği tanımlayarak ulaşılmaktadır. *SqueeSAR*<sup>TM</sup> de kullanılan mesafe metriği Kolmogorov-Smirnow (KS) testidir [224], [227]. Parametrik olmayan KS testi metrik olarak iki kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) arasındaki mutlak farkın maksimum değerini kullanmaktadır [227]. *SqueeSAR*<sup>TM</sup> de kullanılan KS testi olasılık yoğunluk fonksiyonu ve CDF'yi hesaplamak için interferogram yığınınından elde edilen genlik değerlerini kullanmaktadır. Pikseller daha sonra komşuluklar oluşturan benzer CDF'li (veya düşük KS mesafeli) komşu pikselleriyle kombine edilmektedir.

#### 1.4.1.8. *Quasi PS Technique (QPS)*

*QPS*, gözlemlerin konumsal yoğunluğunu artırmak için kısmen koherent hedefleri kullanmaktadır. Ancak pek çok persistan saçıcı algoritmasında kullanılan bir ana görüntüden oluşturulan yığın yerine, ana hat mesafesi korelasyonu bozukluğunu sınırlandırmak için birden fazla-ana görüntü ağını kullanmaktadır. Dahası bu kentsel olmayan alanlardaki kapsamı artırmaya olanak vererek zamansal olarak koherent saçıcıların katılımına izin vermektedir. Düzenli *PSI* algoritmalarından başka bir farklılığı ayrıca dağılmış saçıcıların faz tepkisini iyileştirmek için konumsal filtrelemenin uygulanabilmesidir. *SqueeSAR*<sup>TM</sup>'nin aksine, *QPS* dağılmış saçıcıların gruplandırılmasında bir istatistiksel benzerlik ölçümü kullanmaz [228].

## 1.5. HEYELANLAR VE İLGİLİ ÇALIŞMALARDA UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİNİN KULLANIMI

Doğal tehlike ve afetler arasında, heyelanlar yaşam kayıpları, yaralanmalar ve yapısal hasarlar bakımından öncelikle dik yamaçlı dağlık alanlarda dünya genelinde önemli zararlara neden olmaktadır. Heyelanlar ayrıca akarsulara sediment ve ağaç parçaları vb.

materyal taşınımına ve yüzey formlarının şekillenmesine sebep olmaktadır. Heyelanlar insanlar ve yapılar ile etkileşim halinde olmadıkları sürece doğal tehlike olarak kabul edilmektedirler. Heyelan yamacı oluşturan malzemenin bir bölümünün kendi ağırlık desteğini sağlayamaması durumunda meydana gelmektedir. Diğer bir ifadeyle heyelan duraylılığı bozan kuvvetlerin stabiliteyi sağlayan kuvvetlere üstün gelmesi sonucu oluşmaktadır [229]. Heyelanlar genellikle dik yamaçlarda meydana gelseler de, yamaç eğimi veya rölyefi düşük olan alanlarda da meydana gelebilmektedirler. Heyelan terimi, kaya, moloz ve toprak kütlelerinin yamaç aşağı hareketi olarak tanımlanmaktadır [230]. Literatürde kabul gören başkaca tanımlar: “toprak, kaya veya karışımlarının nispeten kuru kütlelerinin fark edilebilir düşme veya kayma hareketi” [231] ve “doğal kaya, toprak, yapay dolgu veya kombinasyonlarının oluşturduğu yamaç malzemesinin aşağı ve dışa doğru hareketi” [232] şeklindedir. Heyelanlar büyük ve karmaşık doğal ve insan kaynaklı çevresel faktörler kümesi tarafından kontrol edilmektedirler [233]. Heyelanın meydana gelmesi, ana kayanın oluşumu yani fiziksel özelliklerinin olduğu jeolojik evirmeye bağlı olmaktadır [234]. Heyelanlar, temelde, kayaların sürekli ayrışması ile oluşan toprak kütlelerinin yavaşça stabiliteyi için kritik olarak kabul edilen kalınlığa ulaştıklarında yamaçların evirilme dinamiklerinin doğal bir sonucu olarak meydana gelirler. Heyelanların temel sebepleri, doğal ve insan kaynaklı olarak sınıflandırılmaktadır. Doğal faktörler: 1) toprak oluşumu ve kayanın malzeme ve jeolojik yapısındaki zayıflıklar, 2) aşırı yağışlar, kar erimeleri gibi toprak suyu rejimindeki değişiklikler üzerinde etkili olan dış faktörler ve 3) depremler ve volkanik aktiviteler iken, insan kaynaklı faktörler: 1) düzgün mühendislik ve jeolojik girdiler olmadan yapı inşası, 2) yanlış tarımsal faaliyetler ve 3) vejetasyonun kaldırılması ve ormansızlaşma olarak değerlendirilmektedir [235].

Heyelan olayları, taş-kaya yuvarlanmaları, moloz akmaları, toprak kayması, kaya çığları ve çamur akmalarını içeren farklı formlarda meydana gelebilmektedir [236]. Hareket eden malzeme ve hareketin tipine bağlı olarak heyelanlar farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Heyelanların literatürde en yaygın şekilde kabul edilen sınıflandırılması düşme, kayma (dönel ve düzlemsel kayma), devrilme, akma, yanal yayılma ve karışık olarak Varnes tarafından yapılan sınıflandırmadır [237]. Heyelanlar ayrıca alansal büyüklüklerine bağlı olarak çok küçük ( $200 \text{ m}^2$ ), küçük ( $200 \text{ m}^2$ - $2.000 \text{ m}^2$ ), orta büyüklükte ( $2.000 \text{ m}^2$ - $20.000 \text{ m}^2$ ), büyük ( $20.000 \text{ m}^2$ - $200.000 \text{ m}^2$ ), çok büyük ( $200.000 \text{ m}^2$ - $2.000.000 \text{ m}^2$ ) ve ekstrem ( $>2.000.000 \text{ m}^2$ ) şeklinde bir standart olmamasına karşın sınıflandırılmaktadır [229]. Frehner ve diğerleri heyelanları kayma derinliklerine

göre de üç sınıfa ayırmaktadır; sığ heyelanlar (<2 m), orta derinlikte heyelanlar (2 m-10 m) ve derin heyelanlar (>10 m) [238].

Heyelan duyarlılık, tehlike ve risk modelleme çalışmaları için temel altlık oluşturan envanter, heyelanların konumları, alansal büyüklükleri, şekli vb. bilgileri içermektedir [239]. Heyelan haritalamanın en basit formu olan envanter haritaları, heyelanların konumlarını, tipini ve eğer biliniyorsa oluş tarihlerini göstermektedir. Envanter haritası hazırlamada farklı metotlar kullanılabilir. Bunlar harita hazırlama amacına, çalışma alanının büyüklüğüne, kullanılan hava fotoğrafları ve altlık haritaların ölçeğine ve mevcut kaynaklara bağlıdır [240]. Heyelan envanterleri farklı ölçeklerde (küçük ölçekli, orta ölçekli ve büyük ölçekli olarak) çeşitli kaynaklardan derlenebilmektedir. Heyelan duyarlılığı çalışmaları, bir bölgede heyelan oluşumuna neden olabilecek girdi parametrelerin, yani hazırlayıcı faktörlerin, dikkate alınarak heyelan duyarlılığının göreceli olarak sınıflandırılması olarak tanımlanmaktadır [241]. Heyelan duyarlılığı, güncel ve/veya geçmişte meydana gelmiş heyelanların özelliklerinden yararlanarak, gelecekte potansiyel teşkil eden alanların ortaya konulmasıdır. Heyelan duyarlılığı, tetikleyici faktörler (yağış, deprem vb.) değerlendirilmeden belirlenen heyelan meydana gelme olasılığı şeklinde belirtilmektedir [242]. [243], heyelan duyarlılık çalışmalarının; 1) Heyelanlar gelecekte nerelerde meydana gelecek? 2) Hangi tür heyelanlar nasıl meydana gelecek? sorularına cevap verir nitelikte olması gerektiğini ifade etmektedir. Heyelan tehlikesi, potansiyel olarak hasar verici etkiye sahip olan heyelan olayının, belirli alanda ve zaman döneminde meydana gelebilme olasılığı olarak tanımlanmaktadır [244]. Bu tanımda, büyüklük, konum ve zaman faktörleri bir arada yer almaktadır [245]. Heyelan riski ise heyelan duyarlılık ve tehlike kavramlarını içeren, aynı zamanda nüfus yoğunluğu, ekonomik faaliyetler gibi sosyo-ekonomik parametrelerin de değerlendirildiği bir kavramdır [243]. Tanımdan da anlaşıldığı gibi, heyelan kaynaklı can ve mal kayıpları ile birlikte oluşabilecek hasarın tahmin edilmesi, aynı zamanda ekonomik ve çevresel zararlarının da değerlendirildiği bir kavram olarak değerlendirilmektedir [241]. Ayrıca Ercanoğlu ve diğerleri, heyelan risk haritalama çalışmalarının ayrıntılı olması, çok sayı ve türde veriye gereksinim duyulması nedenlerinden dolayı heyelan duyarlılık ve tehlike haritalama çalışmalarından daha az sayıda olduğunu ifade etmektedir [241].

Dünya yüzeyinin fiziksel karakteristikleri ile ilgili verinin ölçümü ve kayıt edilmesi bütün sivil mühendislik projeleri için önemli bir aşamadır. Çünkü örneğin bir heyelanın çok



zamanlı olarak izlenmesi heyelanın muhtemel konumsal ve zamansal gelişiminin tahmin edilmesi ve heyelanın tanınması açısından ilgili projenin ön etüdünde (yani proje başlangıç safhasında) olması gerekmektedir. Bu kapsamda özellikle heyelanlar yüzünden meydana gelen toprak yüzey yer değişimleri ve yapılarda meydana gelen deformasyonlar önemli olmaktadır. Heyelan aktivitesinin incelenmesinde kullanılan çeşitli teknik ve cihazlar bulunmaktadır [246]. Bu teknikler ve cihazlar; uzaktan algılama teknikleri veya uydu teknikleri, fotogrametrik teknikler, jeodezik veya ölçme teknikleri ve jeoteknik veya cihaz yerleştirme teknikleri veya fiziksel teknikler olarak sınıflandırılmaktadır [247]. Bunlardan elektronik aygıtlar ile mesafe ölçümü ve üçgenleme gibi jeodezik yöntemler çok yüksek doğruluk sağlamaktadır. GPS'ler ve Total Station'lar sayesinde heyelan alanının belirlenmesi ve yılda mm ya da cm ölçeğinde oluşan hareketin algılanması mümkün olabilmektedir [246]. Bu yöntemde heyelan yüzeyinin modellenmesi, heyelan gövdesi üzerinde dolaşarak yoğun şekilde alınan profil noktalarının enterpolasyonu ile yapılmaktadır. Ancak bu işlem uzun süren ve yorucu bir arazi çalışması gerektirir ve bazen sahanın yapısından dolayı ulaşım güçlükleri ortaya çıkmaktadır.

Ortaya çıkan uzaktan algılama teknikleri tipik olarak heyelan çalışmaları için tasarlanmamış olup genellikle araştırma ve operasyonel uygulamalarda kapasitelerinden yararlanmak için adapte edilmeleri ve doğrulanmaları gerekmektedir. Bu adaptasyon süreci heyelan çalışmalarının farklı aşamaları için ortaya konulması gerekli olan genel iş ve uygulamaların dikkate alınmasını kapsamaktadır. Kavramsal bir çerçeve olarak risk yönetim döngüsü temelinde, uzaktan algılama tekniklerinin heyelanlarda uygulanmasında 3 temel aşama ortaya konulabilmektedir [248]:

- Etkilenen alanları, heyelan sayılarını ve afete müdahaleye destek amaçlı ana olaydan hemen sonra olayın boyutlarını gösteren haritaların oluşturulmasında görüntü analizleri ile “*hızlı haritalama*”
- Heyelanların tipleri, alt bölümleri, aktivite durumu ve hacimlerinin detaylı olarak incelenmesi, ayrıca tehlike değerlendirme kapsamında hazırlayıcı ve tetikleyici parametrelerin elde edilmesi ile “*heyelan karakterizasyonu*”
- Spesifik bir heyelanın veya potansiyel olarak duraysız (stabil olmayan) olan sahaların zamansal değişimleri hakkında bilgi toplamak amacıyla periyodik ve/veya sürekli olarak veri setlerinden gözlem ve analizler ile “*izleme çalışmaları*”

Jaboyedoff ve diğeri ise LIDAR verisi temelinde heyelan çalışmalarında uzaktan algılama kullanımını; heyelan tespit ve karakterizasyonu, tehlike değerlendirme ve duyarlılık haritalama, modelleme ve izleme çalışmaları olarak sınıflandırmaktadır [49]. Mevcut veya yakın gelecekte faal olması planlanmış farklı uzay, hava ve yer platformu uzaktan algılama sistemleri heyelanların bahsedilen çalışmaları için oldukça önemli girdi veri kaynaklarıdır. Özellikle son yıllarda meydana gelen teknik ve bilimsel gelişmeler, heyelan haritalama ve izleme çalışmalarında uzaktan algılama verisi kullanımı potansiyelinde artışa sebep olmaktadır [249]-[253]. Mevcut cihazların güvenilirliği ve etkinliği, heyelan kaynaklı yer değiştirme oranları ve kütle hacmi gibi farklı heyelan kinematiklerinin ölçülmesinde oldukça kapsamlı çözümler sağlayarak artmaktadır. Yer hareketlerinin yorumlanması ve modellenmesinde ve uzaktan algılama gözlemlerinden mekanik parametrelerin elde edilmesinde gelişmeler olmaktadır. Temelde arazinin üç boyutlu modellenmesinde yüksek çözünürlük ve doğrulukta ürünlerin elde edilebilme imkânlarının ortaya çıkması bu duruma katkı sağlamaktadır. Uzaktan algılama teknikleri özellikle dağlık arazilerde konumsal dağılım bilgisi elde etmede önemli bir araç olmaktadır. Bunlar nokta bazlı arazi ölçümlerine (ki bunlar yoğun iş gücü, zaman ve maliyet oluştururlar) alternatif ya da tamamlayıcı olarak kabul edilmektedirler [248]. Heyelan çalışmalarında uzaktan algılama kullanımı 1900'lerden günümüze değerlendirilmektedir. Heyelanlarda ilk sistematik uzaktan algılama kullanımı İsviçre Alplerindeki derin bir heyelanın izlenmesinde teodolitlerin ve üçgen ağların kullanımına dayanmaktadır [254]. Fotoğraflar ile heyelanların ve etkilerinin dokümantasyonu 19. yy başlarındaki fotoğrafın keşfinden sonra yapılmıştır. İlk korunmuş örneklerden birisi 11 Eylül 1881'de Elm köyünde (Glarus Kantonu, İsviçre) yıkıma sebep olan düzensiz madencilik uygulamaları sonucu ortaya çıkmış kaya kayması fotoğraflarıdır [255'e atfen 248]. Bu ilk çalışmaların dikkate değer bir örneği de 1889 ve 1928 yılları arasında Monte Arbino'da yapılan büyük kaya kaymasının hız ve hareketinin dokümantasyonunun trigonometrik ölçüm serileridir. Bu çalışma heyelanlara karşı erken uyarıda uzaktan algılamanın ilk başarılı uygulaması kabul edilmektedir [256], [257]. Yaklaşık aynı dönemde yine İsviçre Alplerinde yer alan Kilchenstock'ta yapılan sürekli trigonometrik ölçümler ile hareket ve meteorolojik değişkenler arasındaki ilişki ilk kez ortaya konmuştur [248]. 1920'lerde ilk foto-teodolitler geliştirildikten hemen sonra topografik ölçümlerde kullanılmaya başlanmıştır. 1920'ler sonlarına doğru buzullarda meydana gelen hareketlerin dokümantasyonunu yapan Finsterwalder tarafından bu cihazlar kullanılmıştır [258], [248]. Bu teknik ayrıca Monte Arbino kaya kaymasının hacminin

hesaplanmasına da (ki yaklaşık 20 milyon m<sup>3</sup> hesaplanmıştır) olanak sağlamıştır [256]. İlk hava fotoğrafları 1858'de kayıt edilmiş ve 1910'lara hava fotoğrafları stereo çiftlerinden doğru yükseklik ölçümleri yapılmış ve bu topoğrafik ölçümleri büyük ölçüde etkilemiştir [248].

Optik uzaktan algılama görüntülerinin görsel yorumlanması geçmişte ve günümüzde halen heyelan haritalama çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [259]. Heyelan tehlike analizi için heyelanların konumlarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Hava fotoğrafları ve uydu görüntüleri bu amaç için kullanılmaktadır. Doğrudan arazide yapılacak gözlemler her ne kadar heyelanların tam olarak tespiti için olmazsa olmaz yöntem olsa da, heyelanların özellikle ulaşımı zor hatta kimi zaman imkânsız dağlık alanlarda meydana gelmesi durumunda tespit edilmeleri zor, maliyetli ve zaman alıcı olmaktadır [260]. Bu durumda ise heyelanlar hakkında sınırlı veri toplanmakta ve olasılık analizlerinde gerekli hatasız heyelan verisi kullanımı mümkün olamamaktadır. Heyelan envanter haritalarının yapımında uzaktan algılama verisinin yersel çözünürlüğü heyelan özelliklerinin boyutları ile ilgili olarak oldukça önemlidir. Örneğin tipik 40.000 m<sup>2</sup> büyüklüğündeki bir heyelan SPOT Pan görüntüsünde 20x20 piksele ve SPOT çok bantlı görüntülerde 10x10 piksele karşılık gelmektedir. Bu çözünürlük heyelanın sınırlarının tanımlanması için yeterli olabilirken heyelanın tipi ve oluşmasına sebep olan karakteristiklerin düzenli analizi için yetersizdir [261]. Yeterli çözünürlüklü ve stereo olarak alınmış görüntüler meydana gelmiş heyelanların genel bir envanterinin yapımına olanak verirken, ancak tüm heyelanların yeterli şekilde haritalanmalarına olanak vermemektedir. Hava fotoğraflarının kullanımı bu açıdan halen önemini korumaktadır. Çünkü uygun fotogrametrik incelemeler belli zaman aralıkları boyunca meydana gelen geometrik değişimlerin tanımlanmasına olanak sağlamaktadır [262]. Yeterli zaman aralıklarında alınan iki veya daha fazla hava fotoğrafının stereoskopik olarak yorumlanması heyelanların belirlenmesinde ve morfolojik özelliklerinin tanımlanmasında kullanılan en etkili ve popüler yöntemdir. Ancak stereoskopik görüntü yorumlamanın güvenilirliği yoğun şekilde yorumlayıcının deneyimine bağlıdır. Bundan dolayı özellikle heyelanlarla ilgili çalışmalar kapsamında fotoğrafın yorumlanmasıyla ilgili daha sayısal tekniklerin kullanımı (analitik veya sayısal fotogrametri) gerekmektedir [262]. Heyelanların yorumlanmasında en iyi fotoğraf ölçeklerinin 1:15.000 ve 1:25.000 arasında olması gereklidir [263]. Eğer küçük ölçekler kullanılırsa ve boyut ve kontrastları yeterli büyüklükte ise bir heyelan sadece tanımlanabilmektedir.

Heyelanların uzaktan algılama verileri ile çalışıldığı bir diğer konu modern uzaktan algılama teknikleri ile heyelanların yer değiştirme miktarının izlenmesidir. Uzaktan algılama teknikleri heyelan sahalarında yapılacak gözlemlerin eksikliklerini büyük ölçüde gidermektedir. Fotogrametrik yöntemler uzun süredir heyelan değişiminin periyodik olarak kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Zanutta ve diğerleri İtalya Apeninlerinde bulunan duraysız bir yamaçtaki zamansal değişimi değerlendirmek için hava fotoğraflarından sayısal fotogrametrik yöntemler ile DTM üretmişlerdir [262]. Özellikle InSAR ve LIDAR verileri giderek artan şekilde kullanılmaktadır [49]. Kullanılan Radar uzaktan algılama sistemleri yer sabit (ground-based) inSAR ve uydu radar görüntüleme teknolojileri olabilmektedir. Radar uzaktan algılama sistemlerinden inSAR özellikle büyük alanlardaki küçük yer değiştirmelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. LIDAR ise Yersel Lazer Tarama (Terrestrial Laser Scanning (TLS)) ve Hava Lazer Tarama (Airborne Laser Scanning (ALS)) sistemleri ile yüksek çözünürlüklü ve doğrulukta DTM'lerin heyelan incelemelerinde kullanımına olanak vermektedir [49], [264]. Örneğin [265], Courmayeur (İtalya) daki Mont de la Saxe heyelanını kalıcı 7 adet GPS istasyonu, her iki saatte bir robotik total station ile izlenen 25 prizma ve her 10 dakikada bir veri toplayan yer sabit InSAR sistemi ile gözlemiştir. Ayrıca TLS ile heyelanın DEM verisi oluşturulmuştur. Bitelli ve diğerleri yaptıkları çalışmada Bologna (İtalya) yakınlarındaki vejetasyondan yoksun ve aktif olan heyelan alanında (ki bu alan yıllarca GPS ile izlenmiş ve ayda 1-2 cm hareket olduğu tespit edilmiştir) fotogrametrik yöntemler ile TLS kullanmışlar ve sonuçlarını karşılaştırmışlardır [246]. Buna göre TLS'nin çoğu durumlarda ekonomik ve doğru arazi modelleri oluşturduğunu, etkili ve hızlı çözümler sağladığını bildirmişlerdir. Fotogrametrik yöntemlerle havasal olarak (airborne) izlenmesi durumunda hem pahalı aygıtlara ihtiyaç duyulması hem de daha karmaşık bir organizasyon içermesi dezavantaj olabilmektedir. Ayrıca fotogrametrik yöntemin her ne kadar yerini sayısal fotogrametriye bırakıyor olsa da yarı otomatik DEM üretiminde uzman deneyiminin hataların azaltılmasındaki önemi, tam otomatik yöntemlerde ise vejetasyon varlığı, gölge durumu veya diğer kısıtların olması durumunda kullanışlı olmadığı ifade edilmektedir.

### **1.5.1. Heyelan Çalışmalarında Uygun Uzaktan Algılama Tekniğinin Seçim Kriterleri**

Heyelan çalışmalarında uygun uzaktan algılama tekniğinin seçimi farklı faktörlere bağlı olmaktadır. Heyelan ile ilgili kriterler heyelanın tipi, boyutu ve beklenen yer değiştirme

miktarlarını kapsamaktadır. Harici kriterler ise sahanın özellikleri, yüzey koşulları, finansal ve lojistik kısıtlar, mevcut risk yönetim fazı ve çalışmanın bilimsel hedefleri olarak değerlendirilmektedir. Teknik kriterler ise uzaktan algılama tekniğinin kapasite ve özellikleri olmaktadır. Bunların pek çoğu da birbiriyle ilişkili olmayan faktörlerdir [248]. Farklı izleme tekniği olarak değerlendirilen teknik kriterler aslında çalışmanın ana odağı durumundadır. Burada kabul edilen kriterler kullanılan sistemlerin ölçüm doğruluğu, ölçüm mesafesi, yersel örnekleme mesafesi, konumsal olarak kapsam alanı, zamansal çözünürlükleri, yapılan ölçümlerin kalitesi, data alım ve işleme maliyetleri, hedeflenen gözlem zaman ve süresi, veri alım sisteminin taşınabilirliği ve tekniğin uygunluğudur. Bahsedilen teknik kriterler hakkında daha açıklayıcı bilgi Çizelge 1.4'te verilmektedir. Heyelan ile ilgili faktörlerin değerlendirilmesi için hareket oluşumu hakkında yeterli bilgi elde edilmelidir. Bu sayede uygun uzaktan algılama tekniğinin seçiminde kriter olarak değerlendirilebilir. Uygulanan uzaktan algılama tekniği en azından tipik olarak belirli bir yönde yoğunlaşan değişimin ana bileşenini yakalamalıdır. Heyelanın büyüklüğü ve konumsal dağılımı önemli ölçüde değişim gösteriyorsa konumsal kapsam ve detay arasında çalışmanın ölçeği tipik olarak değişebilmektedir. Pek çok mevcut yersel teknik lokal ölçümleri kapsamakta iken uydu teknikleri büyük alanları kapsamaktadır. Heyelanın tahmin edilen yer değiştirme miktarı heyelan tipi ile yakından ilgilidir ve başka bir kriter olarak değerlendirilmektedir. Heyelanların muhtemel yer değiştirme oranları yılda birkaç milimetre olabileceği gibi saniyede metrelerce de olabilmektedir. Bu yüzden gözlem sıklığı ve uygulanabilir teknik seçiminde önemli etkiye sahiptir. Stumpf tarafından bu etki Çizelge 1.5'te verildiği şekilde açıklanmaktadır [248].

Harici faktörler de yakından ilgili olup, saha düzenlemelerini, yüzey koşullarını (vejetasyon, kar, toprak nemliliği) ve finansal ve lojistik kısıtları içermektedir. Uygulamada mevcut risk stratejileri ve çalışmanın bilimsel hedefleri önemli rol oynamaktadır. Risk değerlendirme çalışmalarının klasik aşamaları (önleme, müdahale, iyileştirme ve yeniden inşa gibi) yapılacak aktivitenin aşamaları ile yakından ilgili olmaktadır.

Çizelge 1.4. Heyelan çalışmalarında uzaktan algılama seçimindeki teknik kriterlerin değerlendirilmesi [248].

Teknik Kriterler		
Kriterler	Ölçek aralığı	Açıklamalar
Kapsama alanı	Noktasal, Lokal (spesifik bir yamaç veya heyelan), Bölgesel	Ölçümlerin yapıldığı tipik ölçekler
Bilgi Tipi	1B	Yer değiştirmenin bir bileşeni / aks veya sensörün bakış hattı boyunca oluşan konumsal değişim
	2B	Bir noktadaki veya konumsal 3B yer değiştirme alanındaki 2B yer değiştirme (genellikle yatay)
	3B	Bir noktadaki veya konumsal 3B yer değiştirme alanındaki 3B yer değiştirme
	Hacim	Hareket eden kütlelerin hacmi ve hacimsel değişim bilgisi
	Yüzey özellikleri	Yüzey özelliklerinin yer ve zamana bağlı değişimi
Konumsal çözünürlük	mm ile hm arasında	Ölçümlerin yer örnekleme mesafeleri veya piksel çözünürlükleri
Zamansal çözünürlük	saniye ile aylar arasında	Ölçümler arasındaki ölçüm kayıt zamanı
Hedefe olan mesafe	m ile km arasında	Ölçüm aracının kullanılabildiği hedefe olan mesafedir. Bu kriter sabit yörüngeli uydu sistemleri ile ilgili değildir.
Ölçüm doğruluğu	mm ile dm arasında mm <sup>3</sup> ile 10 m <sup>3</sup> (hacimlerde)	Yer değiştirme oranları, hacimler veya yüzey özellikleri konumu gibi ölçülen niceliklerin doğruluğu
Çalışma modu	Sürekli	Uzun zaman dönemlerinde kayıt edilen insan müdahalesi olmayan otomatik kesiksiz ölçümler
	Periyodik (Aralıklı)	Çeşitli gün, hafta ve ay aralıklarla yapılan insan müdahalesi olan ölçümlerdir
Yaklaşık uygulama zamanı	Dakikalar ile aylar	Sistemin ölçümü ve nihai sonuçların elde edilmesi arasındaki yaklaşık zaman
Yaklaşık maliyet	10 ile 100,000 €	Sistemin kurulum, çalışma ve veri işleme maliyetleri
Teknik uygunluk	Kavram	Teknik tasarım ve amaçlanan potansiyel uygulamalar
	Prototip	Sınırlı sayıda deneylerde test edilmiş prototip sistemler
	Örnek çalışmalar	Kısa zaman dönemlerinde heyelan izlemede test edilmiş çalışan sistem
	Ticari	Uzun zaman dönemlerinde çeşitli heyelan uygulamalarında kullanılmış çalışan ve ticari sistem ve yazılımlar
	Kabul Görmüş	Tekniğin potansiyel ve limitleri iyi anlaşılmıştır.

Çizelge 1.5. Heyelan çalışmalarında uzaktan algılama seçimindeki heyelan ile ilgili kriterlerin değerlendirilmesi [248].

Heyelan ile ilgili Kriterler		
Kriterler	Ölçek aralığı	Açıklamalar
Heyelan tipi Yer değiştirme oranları Gözlem sıklığı	Uygulanabilir değil	Teknik bu özel kategori için kullanışlı değil
	Muhtemelen uygulanabilir değil	Bu özel kategori için tekniğin kullanışlı olması büyük oranda mümkün değil, ancak beklentiler mevcut
	Bir kaç durum için uygulanabilir	Teknik kullanılabilir olsa da kısıtlar mevcut, diğer alternatifler değerlendirilmelidir
	Pek çok durum için uygun	Teknik çeşitli heyelan çalışmalarına uygulanabilir, karar vermeden önce diğer kriterler dikkatlice değerlendirilmelidir
	Pek çok durum için ideal	Pek çok uygulamada bu teknik mükemmel sonuçlar sağlamaktadır.

## 1.6. KAR VE ÇİĞ ÇALIŞMALARINDA UZAKTAN ALGILAMANIN KULLANILMASI

Kar yağışı genellikle karmaşık altıgen yapıda dallanmış, beyaz ve yarı saydam “kar tanesi” olarak adlandırılan buz kristallerinden oluşan bir yağış türüdür. Dünya yüzeyine ulaşan küresel yağışların yaklaşık olarak %5’i (Arktik bölgelerde %50–90’lara ulaşabilmektedir) kar şeklinde oluşmaktadır [266]. Karın yerde kalma süresine bağlı olarak da kar ile kaplı alanlar genellikle kalıcı (permanent), mevsimsel (seasonal) ve geçici (temporary) kar örtüleri şeklinde sınıflandırılmaktadır [267]. Geçici ve mevsimsel kar örtüleri yaz aylarında büyük oranda ortadan kalkarken, kalıcı kar örtüleri yıllarca varlığını devam ettirebilmektedir. Kar örtülerinin dünya üzerindeki dağılımı Rees tarafından şöyle açıklanmaktadır: “...*Kalıcı kar örtülerinin büyük çoğunluğu güney yarım kürede iken geçici ve mevsimsel kar örtüleri çoğunlukla kuzey yarım kürede gözlenmektedir. Yaklaşık olarak ifade etmek gerekirse, geçici kar örtüleri Kuzey Amerika’da 30° ile 40° enlemleri arasında, mevsimsel kar örtüleri de 40° enlemlerinin kuzeyinde görülmektedir. Batı Avrupa’da mevsimsel kar örtüleri 60° enlemlerinin kuzeyinde, geçici kar örtüleri ise İber Yarımadası (Iberian Peninsula) haricinde her yerde görülebilmektedir. Doğu Avrupa’da mevsimsel kar örtüleri 50° enlemlerinden daha kuzeyde yer alırken, geçici kar örtüleri Orta Doğu’da 35° enlem derecelerine kadar güneye ulaşabilmektedir. Asya’da ise mevsimsel kar örtüleri 30° enlemlere kadar güneyde oluşabilmektedir...*” [267]. Kuzey yarım kürede kar örtülerinin kapladığı alan (Grönland hariç) Ağustos ayındaki yaklaşık 4 milyon km<sup>2</sup> ile Ocak ayındaki yaklaşık 46 milyon km<sup>2</sup> arasında değişmektedir [268]. Kuzey yarım küredeki kalıcı olmayan kar

örtüsünün sağladığı su miktarı ise yaklaşık olarak  $3 \times 10^{15}$  kg'dır [269]. Başka bir ifadeyle bu kar kaplı alanlarda su miktarı  $65 \text{ kg/m}^2$  veya 65 milimetreye denk olmaktadır [267].

Kar örtüsü, kar-su eşdeğeri ve kar derinliği gibi kar parametrelerinin lokal, bölgesel ve küresel ölçeklerde araştırılması pek çok bilimsel çalışma için önem arz etmektedir. Bu çalışmalar özellikle iklim, hidroloji, ekoloji ve su kaynaklarının yönetimi (yüzeysel akış tahmini, rezervuar yönetimi, hidroelektrik enerji üretimi, sulama uygulamaları ve taşkın kontrolü gibi) başlıklarını kapsamaktadır [270], [271]. Özellikle kar örtüsü konumsal olarak hemen bütün ölçeklerde önem arz etmektedir. Karın varlığı ile su, hava-atmosfer ve toprak-sediment ile insan ve biyosfer, çevresel akış süreçleri, hidrodinamik ve hidroloji arasındaki etkileşimleri içeren süreçler arasında güçlü bir ilişki bulunmaktadır [272].

Özellikle Dünya albedosunun kontrol edilmesinde oynadığı rolden dolayı iklim açısından önemli olan coğrafi-fiziksel bir değişken olmaktadır [273]. Aynı zamanda hidroloji açısından da önemlidir [274], [275]. Mevsimsel kar örtüsü toprak yüzey albedosundaki yıllık veya bir yıldan daha fazla süreli maksimum değişimlerin temel sebebi olmakta [276] ve küresel iklim sistemine önemli bir geri bildirim mekanizması sağlamaktadır. Önemli klimatolojik etkisi ise yer ve atmosfer arasındaki sıcaklık değişimini düşürdüğü için, termal bir yalıtım sağlamasıdır [267]. Karın oluşturduğu termal yalıtım bitkileri düşük kış sıcaklıklarından korumaktadır. Daha yerel ölçeklerde kar örtüsü; içme, sulama ve hidroelektrik güç üretimi amaçlı suyun depolanması ile birlikte taşkın suyu üretimi potansiyelinden dolayı önemli olmaktadır [277], [278]. Yine, kar örtüsü kış rekreasyonları (kayak gibi) ile ekonomik fayda sağlaması yanı sıra kara ve tren yolları gibi ulaşım ağlarında kesintilere sebep olması gibi ekonomik zararlar da oluşturabilmektedir [267]. Bütün bu açıklamalardan kar örtüsünün konumsal sınırlarının izlenmesi yanı sıra kar derinliği ve kar-su eşdeğeri gibi parametrelerinin belirlenmesi ihtiyacının ne kadar önemli olduğu anlaşılabilir.

Kar parametrelerinin ölçülmesi bahsedilen çalışmalar yanı sıra kar çığları ile ilgili olarak çığ tehlike/risk değerlendirme, çığ dinamiklerinin modellenmesi ve doğrulanması ile birlikte çığ önlem yapılarının planlanması gibi çalışmalar açısından da önem arz etmektedir [279]. Çığlar tüm dünyada karla kaplı dağlık alanlarda meydana gelen, hızlı hareket eden kütle hareketleri olup insan aktivitelerine engel olarak can kayıplarına ve yapılarda hasarlara sebep olan doğa olaylarıdır [280]. Dağlık alanlarda artan nüfus ve insan aktivitesine bağlı olarak çığların olumsuz etkilerindeki artış kamu kurumlarının aktif ve pasif çığ önleme tekniklerine başvurarak çığ zararlarını önleme ve azaltma



çalışmalarına önem vermesine neden olmuştur. Çığ koruma önlemlerinde tehlike ve risk değerlendirme çalışmaları çığ koruma yapılarının büyük ekonomik giderlerinden dolayı önem kazanmaktadır [281], [282].

Kar parametrelerinin örneklenmesindeki/ölçülmesindeki temel kaygılar, verinin sık zaman aralıklarında doğru şekilde ölçülebilmesi, ölçüm yapan kişiler açısından risklerin ortadan kaldırılabilmesi, yüksek çözünürlüğe sahip konumsal olarak sürekli (spatially continuous) olacak şekilde temin edilebilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [283]-[287]. Kar derinlik ölçümlerinin yüksek çözünürlüklü konumsal olarak sürekli şekilde yapılabilmesi özellikle önemli olmaktadır. Çünkü yoğun kar yağışları esnasında veya sonrasında rüzgâr ile karın taşınması, yağışların bölgesel olarak heterojenlik göstermesi, dağlık bölgelerde topoğrafyanın farklı yükselti, bakı ve eğim özellikleri ile birlikte çığ olayları yüzünden kar derinliği çok fazla değişkenlik göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı da kar parametrelerinin bölgesel ve küresel ölçeklerde ölçülmesinde farklı tekniklerin kullanımları araştırma konusu olmaktadır [288]. Kar örtüsü bahsedildiği gibi kuzey yarımkürede kışın maksimum 46 milyon km<sup>2</sup>'lik alan kapsamakta ve sadece arazi ölçümleri ile kar örtüsü dağılımının karakteristikleri hakkında yeterli bilgi sağlanamamaktadır [289]. Doğrudan arazide yapılan ölçümler olan geleneksel ölçüm yöntemleri, enterpolasyon yöntemlerinin uygulanmasına konu olan ayrık noktalarda kar çukurları ve profil açılması veya sondalama yapılmasıdır [271], [290]. Ancak, her ne kadar bahsedilen yersel ölçümler oldukça doğru olsalar da, geniş ve yüksek rakımlı dağlık alanlarda riskli, emek-yoğun, zaman alıcı ve maliyetli olmaktadır [291]. Bunlarla birlikte İsviçre Alp dağlarında bulunan 250 adet istasyon gibi konvansiyonel gözlem istasyonları ve otomatik kar ve hava gözlem istasyonları da kullanılmaktadır [292]. Ancak bu istasyonlar da derinlik gibi kar parametrelerinin küçük ölçekli değişimlerini ölçme kapasitesine sahip değildirler çünkü istasyon ölçümleri de noktasal olarak gerçekleştirilmektedir [293], [294]. Kar biliminde uzaktan algılama bahsedilen geleneksel yöntemlerin kısıtlarını elimine etmek için kullanılan gelişmiş bir araç olarak kullanılabilir. Aynı zamanda yersel ölçümlerle birlikte tamamlayıcı bir araç olarak da kullanılabilir. Uzaktan algılama yüksek frekanslı olarak oldukça fazla değişken ve dinamik olan kar örtüsünün konumsal olarak sürekli, güvenli, tarafsız ve kapsamlı şekilde ölçülmesine izin vermektedir [295].

Uzaktan algılama, sensörler aracılığıyla algılanan elektromanyetik radyasyonun karakteristiklerinden Dünya yüzeyinin doğası hakkında çıkarımlar yapma olarak

tanımlanmaktadır. Bu çıkarım yapma süreci, radyasyonun karakteristiği ve malzemenin ilgili fiziksel özellikleri arasındaki ilişkinin kurulmasını gerektirmektedir. Bu nedenden dolayı kar malzemesinin özelliklerinden de bahsedilmesi ihtiyacı görüldüğünden burada kısaca anlatılacaktır. Kar malzemesi, genel olarak, buz kristalleri, sıvı su ve havanın karışımından oluşmaktadır. Atmosferik yağış, rüzgâr veya mekanik depolama ile yer yüzeyinde biriken kar kristalleri kar örtüsünü oluşturmaktadır. Kar örtüsünü açıklamakta kullanılan en temel ve entansif fiziksel parametre yoğunluk olup, çok soğuk koşullar altında oldukça yeni yağmış kar haricinde yoğunlukları tipik olarak 200-600 kgm<sup>-3</sup> aralığındadır [296]-[299]. Yeni yağın karın yoğunluğu ise yaklaşık 100 kgm<sup>-3</sup>'dir [267]. Kar örtüsü bekledikçe kar malzemesinin yoğunluğu, rüzgâr ve yerçekimi tarafından sıkıştırılmasından ve/veya termal başkalaşıma uğramasından dolayı artmaktadır. Karın elektromanyetik radyasyonu yansıtması, her ne kadar süreçlerin bahsedildiği gibi zamanla kar örtüsündeki yoğunluğun artışına sebep olmasına karşın, direkt olarak yoğunluğa bağlı olmamaktadır. Çünkü zamanla tanecik boyu artmakta ve karın yansıtma derecesi de düşmektedir. Aynı zamanda kar örtüsü zamanla "is" ve "toz" ile kaplanmakta ve yansıtma özelliği azalmaktadır. Taze kar örtüsünün albedosu %90'lara kadar çıkabilirken, zaman içerisinde etkili olan bahsedilen durumlardan dolayı %40'lara hatta kirlenmiş kar örtüsünde %20'lere kadar düşebilmektedir [300]. Kar örtüsünün içyapısını açıklayan diğer önemli bir parametre tanecik boyu (grain size, crystal size) olup genellikle buz kristallerinin ortalama veya eşdeğer yarıçapı olarak tanımlanmaktadır. Tipik olarak tanecik boyutları 0,1 ve 3 mm arasında değişmektedir ancak 0,01 mm tanecik boyutu da düşük yoğunluklu yeni kar örtülerinde rapor edilmiştir [267]. Kar örtüsünün yansıtma özelliği tanecik boyutu arttıkça azalmaktadır. Eğer kar örtüsü sıcaklığı 0°C'nin altında ise sıvı su içermemekte olup "kuru kar" terimi, ancak sıcaklığı 0°C'ye eşit veya yüksek ise sıvı su içermekte olup "kar ıslaklığı" terimi ortaya çıkmaktadır [267]. Karın elektromanyetik spektrumun optik ve yakın kızılötesi bölgesinde elektromanyetik özellikleri değerlendirildiğinde, taze kuru kar, insan gözü için beyaz görünmektedir. Yani, göze duyarlı olan dalga boyları aralığında (yaklaşık 0,4 ila 0,65 µm) çok az değişkenlik göstererek, yüksek oranda yansıtıcı olmaktadır. Bunun nedeni karı oluşturan buzun yalıtkan özelliklerde olması ile birlikte metre küp başına 10<sup>9</sup> adet gibi oldukça yüksek oranda parçacıktan oluşan bölünmüş bir formda olmasıdır [267]. Kuru kar görünür aralıkta (350-750 nm) yüksek ve sabit yansıtma özelliğinden dolayı parlak görünürken karın yüksek yansıtma özelliği ve elektromanyetik dalgaların karın içerisine penetrasyonu spektrumun yakın (NIR, near infrared) (750-1.400 nm) ve kısa dalga

(SWIR, shortwave infrared) (1.400-3.000 nm) kızılötesi aralığında önemli ölçüde düşmektedir [301]. Yakın kızılötesi aralıklarda buz orta derece emici olup bundan dolayı karın yansıtıcılığı tanecik boyutuna duyarlı olmaktadır. Kısa dalga kızılötesi aralıkta ise buzun emici özelliği çok yüksek olup karın yansıtıcılığı da göreceli olarak daha küçük olmaktadır [295]. Kar örtüsünde içerilen toplam su miktarı kar-su eşdeğeri olarak tanımlanmaktadır. Kar örtüsündeki bütün buzun erimesiyle elde edilecek olan sıvı suyun miktarı olan bu terim aslında kar örtüsünün birim alanında içerilen toplam suyun bir ölçüsüdür. Kar örtüsünde sıvı suyun varlığı yansıtma özelliği üzerinde az oranda doğrudan etkiye sahiptir. Ancak kar örtüsünün yüzey parametresi elektromanyetik radyasyon ile etkileşiminde önemli bir rol oynamaktadır. Yüzey parametresi küçük ölçeklerde yüzey pürüzlülüğü olarak, büyük ölçeklerde yüzey topografyası olarak ifade edilmektedir. Kar termal kızılötesi bölgede yüksek oranda yansıtıcı değildir. Tanecik boyu 100 µm'yi geçtiğinde, termal aralıklarında karın yansıtıcılığı %1'i aşmamaktadır [267]. Termal kızılötesi bölgede buzun absorpsiyonu oldukça yüksektir. Kar yüzeyinden radyasyonun saçılması yüzeyin yalıtkanlık sabiti, yüzeyin pürüzlülük özellikleri ve saçılım geometrisine bağlı olmaktadır.

Günümüzde gece-gündüz ve hemen bütün hava koşullarda ve kutup bölgelerinde elektromanyetik spektrumun farklı bantlarında çalışan ve hava araçları ve uzay platformlarına entegre çeşitli sensörlerin kullanılması ile uzaktan algılama, kar ve buzulların yaygın olduğu soğuk ve uzak bölgelerde yoğun olarak bilimsel çalışmaların başlamasına neden olmuştur [300]. Bu kapsamda en çok kullanılan uzaktan algılama görüntüleri optik ve pasif mikrodalga görüntülerdir. Optik ve yakın kızılötesi sensörler kar örtüsünü kar olmayan yüzeylerden ayırt etmede kullanılmaktadır [272]. Çünkü kar elektromanyetik spektrumun bu her iki bölgesinde de tespit edilmesini kolaylaştıran ayırt edici özellikler ortaya koymaktadır. Görünür ve kızılötesi bölgede kar çok yüksek bir albedoya sahiptir. Ayrıca pasif mikrodalga sensörler, ki kar parametrelerinin izlenmesinde uzun bir geçmişe sahiptirler, kar örtüsü kuru ise kar ile kaplı alanların haritalanmasında kullanılmaktadır [302]. Mikrodalga bölge de kar örtüsü üzerinde kar örtüsü bulunmayan zemine göre oldukça düşük parlaklık sıcaklığına sahiptir [267]. Kar örtüsü ile birlikte kar derinliği ve kar-su eşdeğeri parametrelerinin ölçülmesinde de pasif mikrodalga sensörler kullanılmaktadır [303]-[305]. Ancak bu sistemler oldukça düşük konumsal çözünürlüklere (5-25 km gibi) sahiptirler. Her iki tip görüntüde (optik ve mikrodalga) avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Optik görüntüler daha yüksek

çözünürlüklere sahipken, gündüz ve bulutsuz koşullarda çalışmaktadır [268]. Mikrodalga görüntüler ise gece-gündüz ve bulutlu koşullarda dahi çalışmasına rağmen düşük çözünürlüklere sahiptirler. Özellikle hidrolojik çalışmalar açısından çözünürlüğün düşük olması problem oluşturmaktadır [306].

Kar ile kaplı alanlar (kar örtüsü) uzaktan algılama ile ölçülen daha yaygın olarak ölçülen parametredir [307]-[313]. Kar örtüsü haritaları karın elektromanyetik spektrumun görünür aralığında toprak (0,05-0,40) ve vejetasyon (0,05-0,26) [302] gibi doğal çevrelerden daha yüksek albedoya (0,4-0,96 gibi) sahip olmasından dolayı optik uydu görüntülerden üretilebilmektedir [314]. Kar ilk kez 1960 yılında TIROS-1 uydusu ile elde edilen görüntüden gözlenmiştir [315]. Kar örtüsü rutin olarak ise 1966 yılından beri uzaydan optik görüntüler kullanılarak [316] ve 1978 yılından beri mikrodalga görüntüler kullanılarak [318] izlenmektedir. Bu tarihten sonra günümüzde farklı konumsal çözünürlüklerde kullanılan uydu sistemleri AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat MSS (Multispectral Scanner System), Landsat TM, Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), SPOT ve SPOT-XS platformlarıdır [270], [318], [319]. Kar örtüsünün uzaktan algılanmasında yaygın olan problemler genellikle mevsimsel kar örtülerinin çoğunun orman örtüsü altında [320] ve karmaşık topoğrafyalarda bulunmasıdır [321]-[324].

Uydu uzaktan algılama yanı sıra hava fotoğrafları da sıklıkla kar parametrelerinin (kar derinlik haritalamada) belirlenmesinde kullanılmaktadır. Taranmış hava fotoğraflarının kar derinlik haritalama amaçlı ilk kullanımı denemeleri 50 yıl öncesine kadar uzanmaktadır [325]. Bu çalışmalarda hava fotoğraflarının kullanım potansiyellerinin vurgulanmasına rağmen büyük ölçekli kar derinlik haritalama çalışmalarında yeterli doğrulukta olmadığı ifade edilmektedir. Bununla birlikte analog hava fotogrametrisi olan bu yaklaşımın kısıtları modern dijital (sayısal) sensörlerin, ki yüksek çözünürlük sağlayan ortalama yersel örnekleme [326] ve 12-bit radyometrik çözünürlüğe sahip olabilmektedirler [293], [327], kullanılmaya başlamasıyla ortadan kaldırılabilir. Sayısal hava fotoğrafları kullanılarak kar derinlik haritalamaya ilişkin olarak güncel ve detaylı bir çalışma Bühler ve diğerleri tarafından yapılmıştır [293]. Bu çalışmada kar derinliği havza ölçeğinde sayısal fotogrametri yöntemleriyle elde edilen karlı sezondaki kış sayısal arazi modeli ile karsız sezonu temsil eden yaz sayısal arazi modeli farkı alınarak haritalanmıştır. Bu yaklaşım genel olarak DEM verisi kullanılarak kar derinlik

haritalamada uygulanan bir yaklaşımdır. Çalışmalarında DEM farkı yaklaşımıyla elde ettikleri kar derinliklerini yersel ölçümler, d-GNSS (differential global navigation satellite system), yersel lazer tarama verisi ve yer radarı ile tespit ettikleri kar derinlikleri ile karşılaştırarak üstünlükleri ve zayıf yönlerini kapsamlı olarak ortaya koymuşlardır.

Fotogrametri yaklaşımının ilk uygulamalarının yeteri başarıyı sağlayamaması ile birlikte gelişen aktif bir uzaktan algılama sistemi olan LIDAR [328] veya hava ve yersel lazer tarama teknolojilerinin [286], [329]-[331] özellikle kar derinlik haritalama çalışmaları için tercih edilen bir sistem olmuştur. LIDAR verilerinden kar derinliğinin elde edilmesi fotogrametri yaklaşımlarıyla aynı mantıkla karlı ve karsız döneme ait üretilen DEM verilerinin farklarının alınmasına dayanmaktadır. Tekrarlı şekilde gerçekleştirilen hava lazer tarama sistemleri kar derinliklerinin 0,1 ile 2 m yatay boşluklu ve desimetre ölçeğinde düşey doğruluklarla elde edilmesine imkân sağlamaktadır [332]. Bununla birlikte hava lazer tarama sistemleri kıyasla daha maliyetli [329] ve hava fotoğrafları alımı gibi lazer tarayıcı sensörü taşıyacak olan uçak ve helikopter gibi hava aracının uçuşunu gerçekleştirebilmesi için uygun hava koşullarının mevcut olması gerekmektedir [293]. Yersel lazer tarayıcılar sistem konumsal olarak sürekli kar derinlik ölçümlerinin uygun koşullar altında milimetre ile santimetre hassasiyetlerinde değişen çok yüksek doğruluklarda gerçekleştirilebilmesine imkân vermektedir [286], [329]. Yersel lazer tarayıcılar kar derinlik ölçümlerinin aynı gün içerisinde bile farklı zamanlarda ölçümler şeklinde gerçekleştirilebilmesine imkân verebilmektedir [329]. Ancak yoğun iş gücü ve zaman harcanmasına sebep olmakta ve ölçümler sadece yağışın olmadığı zamanlarda, operatör tarafından erişilebilir olan alanlarda ve sensör ile hedef arasına sis-bulut gibi herhangi bir engelin girmediği durumlarda mümkün olabilmektedir [293]. Ayrıca tarama menzili 3-4 km ile sınırlı olan yersel lazer tarayıcılar ile büyük ölçekli havzalarda tarayıcının kurulduğu tek bir noktadan bütün alanı tarama imkânı olamamaktadır. Bu durum kar derinlik ölçümünde sürekli bir veri setine sahip olmak için farklı noktalardan taranan verilerin çok iyi eşleştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır [291]. Yersel lazer tarayıcı sistemlerin doğruluğu, hedefin çözünürlüğüne, ışın çapına, tarama süresi ve açısına, kurulum ayarlarına ve verinin işlenmesi için eşleştirilme hatalarının önlenmesine bağlı olmaktadır [329].

Uydu ve hava tabanlı uzaktan algılama yer gözlem konusunda temel platformları olsa da [333], [334], son dönemlerde küçük İHA alternatif bir uzaktan algılama platformu [88], [89] ve/veya yeni bir fotogrametrik ölçüm aracı [78] olarak bilimsel ve uygulama

çalışmalarında giderek önem kazanmaktadır. Buna bağlı olarak İHA teknolojisinin başta kar derinlik haritalama olmak üzere kar ve çığ konularında kullanımı da yaygınlaşmaktadır [290], [295], [335]-[341]. İHA-tabanlı sayısal fotoğraflar ile “SfM (Structure-from-Motion)” algoritmasını kullanan yazılımların entegrasyonu kar ve çığ çalışmalarında kullanımlarına ilişkin etkili, düşük maliyetli ve hızlı bir çerçeve ortaya çıkarmaktadır. Bu teknoloji çok yüksek çözünürlük ve hassasiyette (mm-dm derecelerinde) DEM ve ortofoto görüntüler elde etmeye imkân sağlamaktadır. Ancak uçuş kapasitelerinden dolayı diğer teknolojilere nazaran daha küçük alanlarda (örneğin bir multikopter ile yapılan bir uçuş ile 1 km<sup>2</sup> alan ölçülebilmektedir) kullanılabilirler. Sabit kanatlı İHA sistemleri multikopter İHA sistemlerine göre daha büyük alanlarda (birkaç km<sup>2</sup> alan) veri teminine imkân verebilirken, yüksek dağ koşullarında ve rüzgârlı havalarda uçurulmaları daha zordur [337].

Çığların uzaktan algılama ile çalışılmasında da kar ile ilgili yapılan çalışmalarda olduğu gibi arazi çalışmalarının güvenlik açısından yüksek risk içermesi, çalışmaların sadece iyi hava koşulları ve stabil karın mevcut olduğu ve gözlemlerin hızlı ve kolay erişilebilir olduğu alanlarda yapılabilmesi gibi benzer gerekçeler söz konusudur. Yersel ölçümlerde kullanılan teknikler, çığ aktivitesinin haritalanması, istatistiksel olarak anlamlı veri analizi, risk hesaplamaları ya da meteorolojik tetikleyici faktörlerle ayrıntılı karşılaştırmayı engelleyen büyük belirsizliklere ve zamansal ve mekânsal veri boşluklarına yol açmaktadır [295]. Yersel, hava ve uzay tabanlı uzaktan algılama kullanımı, bahsedilen veri boşluklarını doldurma potansiyeline sahip olup, çığ aktivitesinin ve dinamiğinin gelişmiş bir nicel ölçümünü sağlamaktadır. Çığ biliminin geçmiş yıllardaki araştırma sorularında henüz daha fazla bir değişme olmamıştır. Günümüzde halen araştırmacılar hangi topoğrafik, meteorolojik ve kar örtüsü faktörlerinden dolayı hangi tip bir çığın ne büyüklükte, ne zaman ve nerede oluşabileceğini bilmek istemektedirler. Özellikle Avrupa Uzay Ajansı (ESA) için yapılan bir araştırma için tanımlanan üç kullanıcı grubu olan ulusal ve bölgesel çığ uyarı servisleri, alp profesyonelleri ve genel kamu için çığ aktiviteleri, kar örtüsü koşulları ve kar stabilitesi gibi önem arz eden bilgilerin yakın gerçek zamanlı ve güvenilir şekilde temin edilmesi ihtiyacı söz konusudur [295].

Çığların karakterizasyonu amacıyla günümüzde optik, lazer tarayıcı ve radar sensör verileri elektromanyetik spektrumun belirli dalga boylarında kullanılmaktadırlar. Çığların tespit edilmesi ve haritalanmasında ilgili çığ enkazını oluşturan karın fiziksel özellikleri

belirleyici olmaktadır. Çığın tespit edilmesinde aşılması gereken asıl engel çoğu kez hem çığ enkazını oluşturan hem de çevreleyen kar örtüsünün aynı malzemedен oluşması durumunda söz konusu olmaktadır. Optik uzaktan algılama çığ enkazının, çevreleyen kar örtüsüne nazaran artan derinliği, kar yoğunluğu ve gölgeler oluşturan yüzey pürüzlülüğü nedeniyle kontrast farklılığına sahip olmasından dolayı tespit edilmesinde kullanılabilir. Bununla birlikte bu kar özellikleri sensör tarafından aydınlatılma ve algılanma açısından da etkilenmektedir. Çığların optik sensörler ile uzaktan algılanması genel olarak yersel optik uzaktan algılama, hava optik uzaktan algılama ve uydu optik uzaktan algılama olarak kategorize edilebilmektedir [295]. Christiansen, yersel optik uzaktan algılama kullanımında ilk çalışma yapanlardan birisidir [342]. Çalışmasında kar dinamiklerinin izlenmesinde otomatik hızlandırılmış fotoğrafçılık kullanmıştır. Son dönemde çığ biliminde kullanımı ortaya çıkan bu yöntem genel olarak saçak düşmelerinin ve dinamiklerinin [343], [344] ve açılma ve duraysızlaşma sonucu oluşan kayma çatlaklarının izlenmesinde [345]-[348] kullanılmaktadır. Bu yöntem tam olarak anlaşılabilen saçak dinamikleri ve kayma çatlakları dinamiklerinin zamansal ve konumsal olarak yüksek çözünürlüklerde veri sağlayan hızlandırılmış fotoğrafçılık sayesinde meteorolojik veri ile ilişkilendirilerek daha kapsamlı anlaşılmasına imkân sağlamaktadır [295]. Bunun yanı sıra topoğrafik haritalamanın omurgasını oluşturan optik hava fotoğrafları çığ enkazının haritalanmasına imkân sağlamaktadır. Bozulma gerçekleşmeyen çevresindeki kar örtüsüne nazaran daha pürüzlü yüzey tekstürüne sahip olan orta ve büyük boyutlu çığların kütlelerinin %94 oranda doğru tespit edilebilmektedir [295]. Uydu optik uzaktan algılama çığların tespit edilmesinde kullanılabilir. Örnek olarak Larsen ve diğerleri ve Lato ve diğerleri Batı Norveç'te yer alan bir alan üzerinde Quickbird uydu görüntüleri (metre altı çözünürlüğe sahiptir: pankromatik görüntü için 60 cm) ile çığ tespit algoritmasını kullanarak bir uygulama yapmışlardır [349], [350]. Yine Eckerstorfer ve diğerleri Landsat-8 pankromatik görüntülerden (15 m çözünürlüğe sahiptir) manuel olarak büyük çığ enkazının olduğu alanların tespitini Kuzey Norveç Troms bölgesinde yapmışlardır [351], [352].

Çığ ile ilgili çalışmalarda lazer tarayıcı sensörler de hem çığın tespit edilerek alansal sınırlarının hem de hacminin elde edilmesine imkân vermektedir. Bu kapsamda Prokop çalışmasında, yersel lazer tarayıcı ile çığların tespit edilmesine ilişkin ilk örneklerden birini gerçekleştirmiştir [329]. Üç adet gevşek kar çığı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, çığların hem başlama hem de akma bölgelerindeki kütle kayıplarını hem de

durma bölgelerindeki biriken malzeme miktarını tespit etme imkânları değerlendirilmiştir. Yine aynı yaklaşım Prokop ve diğerleri tarafından da kullanılmıştır [353]. Kullanılan yersel lazer tarama verisi kar örtüsü kütle dengesindeki değişime bağlı olarak çığ hacminin hesaplanmasına da izin vermiştir. Sovilla ve diğerleri de çalışmalarında kontrollü olarak düşürülen bir çığ olayına ilişkin çığ enkazının derinliğini ortaya koymuşlardır [354]. Yersel lazer tarama yanı sıra hava lazer tarama verisi de benzer amaçlar için kullanılabilir. Vallet ve diğerleri yaptıkları çalışmada çığ enkazının hacmini 20-30 cm doğruluklarda belirlendiğini helikoptere monte edilen lazer tarayıcı sistemle alınan veri kullanarak göstermişlerdir [355]. Bunların yanı sıra Chrustek ve Wezyk potansiyel çığ başlama bölgelerini hava lazer tarama verisi ile üretilen DTM verisinden üretmişlerdir [356].

Radar sensörler ile çığ enkazının bulunduğu yerler çoğunlukla algılanabilmektedir. Çünkü bozulmaya uğramamış çevredeki kar örtüsüne nazaran çığ enkazının artan yüzey pürüzlülüğünden dolayı radar geri saçılım sinyalinde artış olmaktadır. Radar uzaktan algılamanın çığ çalışmalarında kullanımı optik sistemlere benzer olarak yersel, hava ve uzay platformları kullanılarak yapılabilmektedir. Çıgların yersel radar uzaktan algılama ile çalışıldığı ilk çalışma Martinez-Vazquez ve Fortuny-Guasch tarafından 5,8 GHz frekanslı C-band SAR sistem kullanılarak yapılmıştır [357]. Çıglar, radar sinyalinin geri saçılımında zamansal korelasyon bozukluğu ortaya çıkması yüzünden önemli fiziksel değişimler göstermektedir. Zamansal korelasyon bozukluğunun nicel bir değeri olan koherens değerleri elde edilen koherens görüntülerinde çığ alanlarında düşük değerlere sahip olmaktadır [295]. Bunun yanı sıra kar örtüsünde zamanla oluşan fiziksel değişimler de korelasyon bozukluğu problemi ortaya çıkarabilmekte olup çıgların tespitini güçleştirebilmektedir. Bu problemin çözümüne yönelik olarak da konumsal ortalama alma (averaging) ve morfolojik filtreleme Martinez-Vazquez ve Fortuny-Guasch tarafından uygulanarak çıgların yaptıkları çalışmada %73,5 doğruluk ile tespit edilebildiğini göstermişlerdir [357]. Martinez-Vazquez ve Fortuny-Guasch ise diferansiyel interferometrik SAR (DInSAR) kullanarak yersel SAR verileriyle çığ hacminin elde edilebileceği ortaya koymuşlardır [358]. Bu çalışmalarla birlikte Wiesmann ve diğerleri ve Malnes ve diğerleri yaptıkları çalışmada GPRI (GAMMA Portable Radar Interferometer) ile yaptıkları veri alımıyla çığ tespitine ilişkin çalışma gerçekleştirmişlerdir [359], [364]. Hava radar uzaktan algılama verisinin çığ çalışmalarında kullanıldığına dair bir kaynak literatürde henüz yer almamaktadır [295]. Uydu radar uzaktan algılamanın çığ



çalışmalarında kullanımına ilişkin olarak Wiesmann ve diğerleri ilk kez SAR uydu görüntülerinden çığ enkazının tespit edilmesi imkânlarını göstermektedir [361]. Çalışma kapsamında ERS-1 ve ERS-2 C-band SAR görüntüleri kullanılmıştır. Bühler ve diğerleri ise TerraSAR-X uydu görüntülerini (isminde de gösterildiği X-band görüntülerdir) çığ tespiti için kullanmıştır [362]. Malnes ve diğerleri de 3 m konumsal çözünürlüğe sahip C-band Radarsat-2 Ultrafine Mode uydu görüntülerini 2013 yılı nisan ayında Kuzey Norveç'te meydana gelen katastrofik çığların tespit edilmesi amacıyla kullanmışlardır [363]. Yine Kuzey Norveç Troms bölgesinde Eckerstorfer ve diğerleri 2014 Mart ayında meydana gelen çığların tespit edilmesi amacıyla aynı uyduya ait görüntüleri kullanmışlardır [351], [352]. Malnes ve diğerleri ise ilk kez Sentinel-1A uydu görüntülerini çığ enkazının tespiti amacıyla kullanmışlardır [364].

## 1.7. AMAÇ VE KAPSAM

Uzaktan algılama, gelişen bir disiplin olarak, belirli bir mesafeden yer yüzeyindeki objelerin ölçümü ve gözlenmesinde temel bir araçtır. Oldukça geniş konumsal, zamansal, radyometrik ve spektral çözünürlük aralıklarında, farklı platformlardan kullanılan çeşitli sensörler ile uzaktan algılanmış verinin mevcudiyeti, uzaktan algılamayı büyük ölçekli çalışma ve uygulamalarda en iyi/uygun veri kaynağı yapmaktadır. Günümüzde uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), konumsal bilgi içeren pek çok çalışma alanında olduğu gibi doğal afet çalışmalarında da vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. Doğal afetler artan nüfusa ve çevresel bozulmalara bağlı olarak özellikle zor topoğrafik ve iklimik koşulların hâkim olduğu dağlık alanlarda daha sık meydana gelmekte ve ciddi boyutlarda can kayıpları ile maddi hasarlara ve ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu durum doğal afetlerin oluşumunun önlenmesi veya zararlarının minimize edilmesi konusunda kamu otoritelerini çeşitli projelerin yapılmasına zorlamaktadır. Buna bağlı olarak doğal afet konularında devam eden akademik çalışmalarda da son dönemlerde özellikle modern uzaktan algılama tekniklerinin kullanımının önem kazandığı görülmektedir. Doğal afet çalışmalarında modern uzaktan algılama teknolojisi kullanımının nispeten yeni olup özellikle son yıllarda yoğunlaşmaya başladığı gözlenmektedir.

Afet önleme ve zararlarını azaltma amaçlı yürütülen proje ve uygulamalarda öncelikle afetlere ilişkin düzenli ve kapsamlı bir envanterin mevcut olması gerekmektedir. Daha sonraki çalışmalar kapsamında ise oluşturulan envanter altlık olarak kullanılarak,

meydana gelebilecek hasar ve ekonomik kayıpların tespitinde ve alınacak aktif/pasif önlemlerin belirlenerek, gerekli mühendislik yapılarının dizaynına yönelik tehlike/risk değerlendirme ve bölgeleme haritalarının üretilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda genel olarak arazi çalışmaları ile yersel topoğrafik ölçümler yapılarak afete ilişkin topoğrafik veri alımı klasik yöntem olarak gerçekleştirilmektedir. Ancak klasik yöntemler ile veri toplama süreci özellikle afetlerin dağlık alanlar gibi zor topoğrafik arazilerde yer alması ve çalışmanın büyük alanlarda yapılması durumunda oldukça zor, pahalı, zaman alıcı olmakta ve yoğun iş gücü gerektirmektedir. Uzaktan algılama teknikleri sayesinde ise bu eksikliklerin giderilmesi mümkün olabilmektedir. Uzaktan algılama verileri, doğal afetlerden doğan etkilerin ve bu afetlerin şiddetlerinin hızlı şekilde değerlendirilmesi, potansiyel afetlere karşı erken uyarıda afetin en çok etkilediği alanların hızlı şekilde belirlenmesi, afet öncesi çalışmalarda tesislerin planlanması, kriz boyunca kurtarma ve tahliye çalışmalarının planlanması, afet sonrası iyileştirme ve inşaa çalışmalarının izlenmesi, doğru altlık haritaların oluşturulması ve güncellenmesi gibi çalışmalarda kullanılabilir. Bu nedenlerden dolayı verilerin hem afetten önce alınması hem de afetten hemen sonra alınarak güncellenmesi gerekmektedir.

Türkiye’de uzaktan algılama teknikleri daha ziyade tarım, ormancılık, çevre, arazi kullanımı, jeoloji, jeodezi ve fotogrametri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle pasif uzaktan algılama yöntemi olan optik uydu görüntüleri ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) (eski adıyla Harita Genel Komutanlığı, HGK) tarafından uzun yıllardır alınan analog ve sayısal hava fotoğrafları bu kapsamda yaygın şekilde CBS ve konumsal karar destek programları ile bütünleşik olarak kullanılmaktadır. Ancak doğal afetlerde uzaktan algılama kullanımının diğer kullanım alanlarına kıyasla daha yeni ve kısıtlı kullanımı söz konusudur. Bundan dolayı Türkiye’de akademik olarak da doğal afetler ve doğal afetlerde modern uzaktan algılama tekniklerinin kullanımı konusu son dönemlerde önem kazanmaktadır. Özellikle aktif uzaktan algılama sistemi olan radar görüntüleri (SAR, InSAR gibi) ve lazer tarama sistemleri gibi gelişmiş teknikler ile İHA sistemleri gibi çeşitli hava araçları ile alınan veriler ile birlikte stereoskopik uydu görüntülerinin kullanıldığı sayısal fotogrametri yöntemlerinin kullanımı son zamanlarda doğal afet analizlerinde gittikçe artmaktadır. Ancak, özellikle jeolojik, klimatolojik ve topoğrafik özellikleri nedeniyle doğal afetlerin sık gözlemlendiği bir ülke olan Türkiye’de bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmaların yeterli sayıda olmadığı gözlenmektedir. Doğal afetlerde modern uzaktan algılama tekniklerinin kullanım imkânlarının gerçekleştirilen

uygulamalar ile birlikte değerlendirilmesi hedeflenen bu tez çalışmasının amaçları;

- Modern uzaktan algılama çalışmalarında kullanılan yeni tekniklerin ulusal ve uluslararası bilimsel literatürde detaylı bir derleme çalışması yapılarak özellikle son dönemlerde ortaya çıkan gelişmeler ile birlikte araştırılması,
- Bu uzaktan algılama tekniklerinin doğal afet problemlerinde kullanım olanaklarının, veri temini imkânlarının, çalışma konusuna ve amacına bağlı olarak veri alım sıklığının ve veri standartlarının taşınması gereken özelliklerini, kullanılan tekniğin avantaj ve dezavantajları ile birlikte önemli kısıtlarının değerlendirilmesi,
- Doğal afetlere ilişkin, çalışılan doğal afet türüne ve gerçekleştirilen çalışmanın amacına bağlı olarak, temin edilebilen verilerle birlikte hem veri ön işleme aşamasında hem de amaçlar doğrultusunda kullanımları aşamasında hangi yöntemlerin ve yazılımların kullanılabildiğinin değerlendirilmesi
- Doğal afetlere ilişkin, çalışılan doğal afet türüne ve gerçekleştirilen çalışmanın amacına bağlı olarak, birden fazla uzaktan algılama tekniğinin birlikte kullanım imkânlarının ortaya konulması şeklindedir.

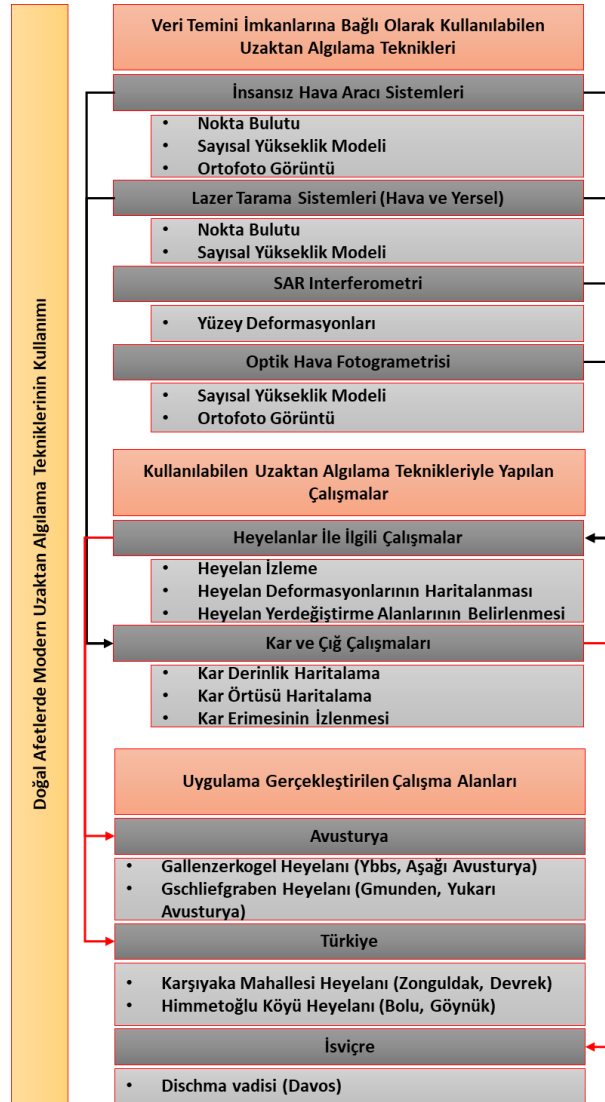
Tez çalışmasında modern uzaktan algılama teknikleri kapsamında İHA sistemleri, lazer tarayıcı sistemler (hava ve yersel), SAR interferometri ve optik hava fotogrametrisi teknikleri, erişilebilen verilerle birlikte yine izin ve imkânlar dâhilinde gerçekleştirilebilen saha çalışmalarına bağlı olarak, heyelan ve kar/çığ çalışmalarına yönelik olarak kullanılmıştır. Gerçekleştirilen uygulamalar özelinde ise tez kapsamında yapılan işler ve bu işlere ilişkin alt amaçlar aşağıdaki gibidir:

- Gerçekleştirilen İHA uçuşları ile elde edilen verilerden üretilen yüksek çözünürlüklü DEM ve ortofoto kullanarak heyelan izleme
  - İHA ile veri alımı, veri işleme süreçlerinin ve bu verilerle heyelan izleme yöntemlerinin değerlendirilmesi (DEM farkları, M3C2 algoritması)
  - İHA tabanlı yüksek çözünürlüklü verilerin yüksek doğruluk ve çözünürlüklü hava lazer tarama (LIDAR) verisi ile birlikte kullanım imkânlarının değerlendirilmesi
- Temin edilen hava lazer tarama (LIDAR) verileri ile heyelan deformasyonlarının ve yerdeğiştirme alanlarının haritalanması

- Heyelan deformasyonlarının haritalanmasında LIDAR verileri ile kullanılabilen yöntemlerin değerlendirilmesi ve gelişmiş bir nokta bulutu karşılaştırma yöntemi olan M3C2 algoritmasının kullanımı imkânlarının değerlendirilmesi
- Heyelan kaynaklı yerdeğişirmelerin sayısal görüntü korelasyon yöntemleri ile ortaya konulması ve haritalanması imkanlarının değerlendirilmesi
- SAR interferometri (InSAR) zaman serileri analizleri yöntemlerinden PSI (Persistent Scatterers Interferometry) ve SBAS (Small Baseline Subset) yöntemleri ile heyelan deformasyonlarının izlenmesi
  - Yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde modern bir uzaktan algılama tekniği olan InSAR zaman serileri analizlerinden PSI yöntemi ile uzun dönemli heyelan kaynaklı deformasyonların haritalanması, optik hava fotogrametrisi ve İHA verileri ile birlikte kullanım olanaklarının değerlendirilmesi
  - InSAR zaman serileri analizlerinden PSI ve SBAS yöntemleri kullanılarak açık maden işletmeciliği faaliyeti sonucu tetiklenen heyelan alanında yüzey deformasyonlarının haritalanması ve İHA verisi ile birlikte kullanım olanaklarının değerlendirilmesi
- İHA ve TLS verisi zaman serileri kullanılarak kar örtüsü haritalama ve kar örtüsü erimesinin izlenmesi
  - Kar/çığ çalışmaları açısından önemli bir parametre olan kar derinlik bilgisinin elde edilebilmesi ve kar örtüsünün haritalanması kapsamında modern ve gelişmiş bir uzaktan algılama tekniği olan ve bu kapsamda yaygın şekilde kullanılmaya başlanan İHA ve TLS verilerinin birlikte kullanımı ile kar derinlik haritalama ve kar erimesinin izlenmesi, yöntemlerinin ortaya konulması, kullanılan tekniklerin birbirine olan üstünlük ve kısıtlarının değerlendirilerek bu alanda ilk örnek uygulama çalışmanın gerçekleştirilmesi

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında farklı uzaktan algılama teknikleri, temin edilebilen verilere bağlı olarak seçilen çalışma alanlarında heyelan ve kar/çığ çalışmalarına yönelik olarak kullanılmak suretiyle örnek uygulama çalışmaları yürütülmüştür. Çalışmanın genel iş akış planı Şekil 2.1’de verilmektedir. Bu bölümde ilk olarak çalışma alanları detaylı olarak tanıtıldıktan sonra tez kapsamında gerçekleştirilen uygulama çalışmalarına ilişkin temin edilebilmiş veriler, üretilebilen veriler ile yöntemler, ilgili çalışmanın amacına bağlı olarak tercih edilen yöntem ve kullanılan yazılımlar detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 2.1. Tez çalışması genel iş akışı.

## 2.1. ÇALIŞMA ALANLARININ TANITILMASI

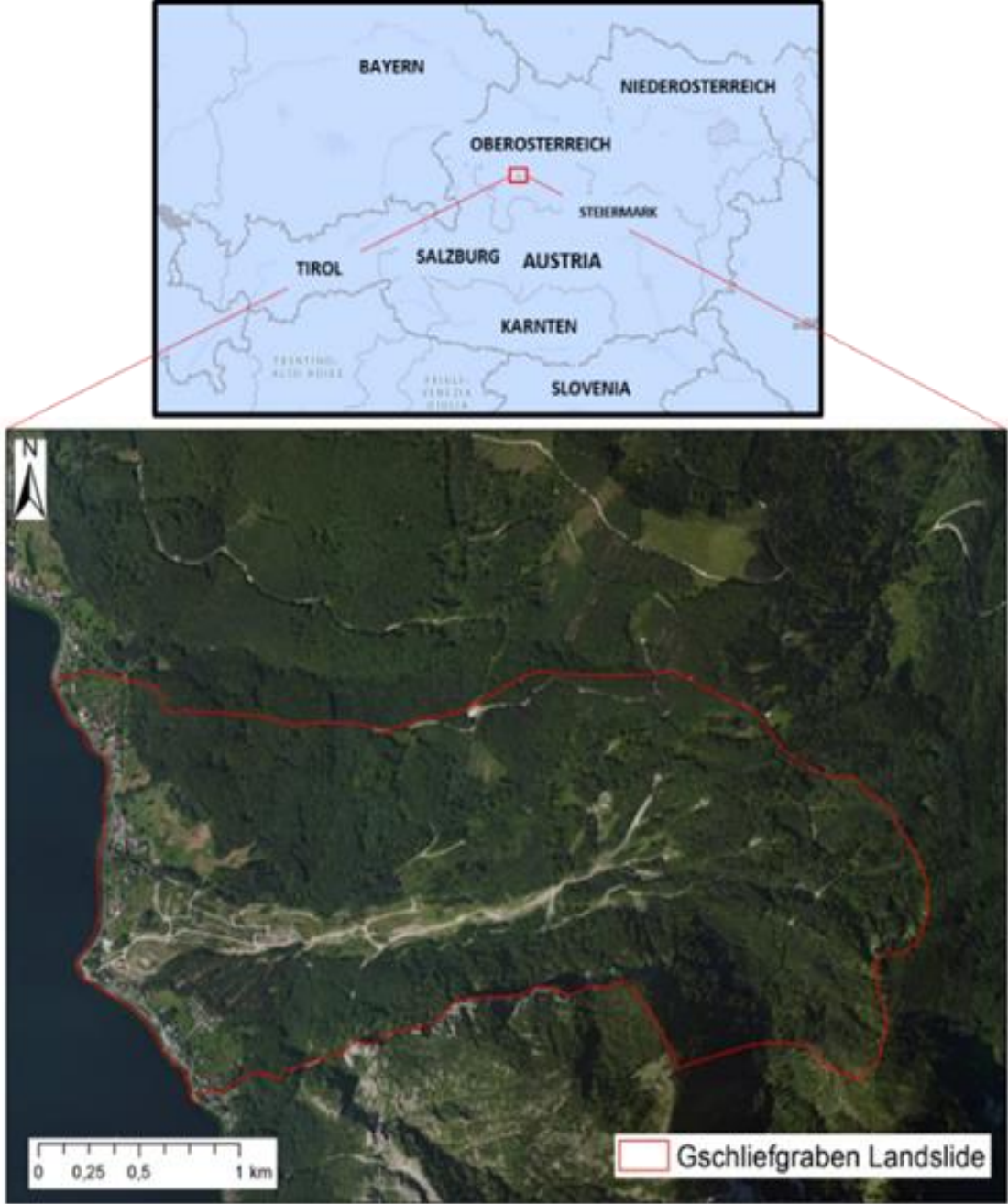
Tez çalışması kapsamında erişilebilen uzaktan algılama verileri, İHA sistemleri, lazer tarama (hava ve yersel lazer tarama) sistemleri, SAR verileri ve optik hava fotoğraflarıdır. Bu veriler kullanılarak doğal tehlikelerden heyelanlar ile birlikte kar/çığ çalışmalarıyla ilgili uygulamalar yapılmıştır. Bahsedilen uygulamalar için seçilen çalışma alanları temin edilebilen verilere bağlı olarak Türkiye (2 adet heyelan sahası), Avusturya (2 adet heyelan sahası) ve İsviçre (1 adet havza alanı)'de yer almaktadır. Bu bölümde her bir çalışma alanı ayrı ayrı tanıtılmaktadır.

Avusturya'da yer alan birinci çalışma alanı, Hollenstein (Ybbs, Aşağı Avusturya) bölgesi sınırları içerisinde yer alan Gallenzerkogel isimli heyelan alanıdır (Harita 2.1). Heyelan alanı MGI Austria GK M31 koordinat sisteminde -117.839,42, 295.545,08 sol üst ve -117.421,13, 295.284,58 sağ alt koordinatları arasında yer almaktadır. Heyelan alanı 7,46 ha büyüklüğünde olup, bulunduğu arazi 495 m ile 760 m rakımları arasındadır. Yamaç eğiminin ise heyelan alanında %70'lere kadar ulaştığı gözlenmektedir. Schweigl tarafından sahada meydana gelen eski heyelanlar hakkında bilgi verilmektedir [365]. Buna göre alanda bilinen en eski heyelan olayı 1899 yılında kayıt edilmiştir ve bu olayda 7500 m<sup>3</sup> malzeme yer değiştirmiştir. Alandaki en yeni hareket 2014 yılında yaklaşık toplam 2000 m<sup>3</sup> malzemenin harekete geçmesi sonucu oluşmuştur [366].

Avusturya'daki ikinci çalışma alanı ise Gmunden (Yukarı Avusturya) bölgesinde yer alan Gschlifgraben isimli havza alanıdır (Harita 2.2). Traunsee Gölü kenarında yer alan bu büyük havza alanı jeolojik olarak heyelanların oluşmasına sebep olmaktadır. Heyelan alanı üst, sol, sağ ve alt koordinatları MGI/Austria GK M31: EPSG koordinat sisteminde sırasıyla 306.000,25, 35.399,75, 38.500,25 ve 303.899,75'dir. Heyelan hakkında detaylı bir çalışma Marschallinger ve diğerleri tarafından yapılmıştır [367]. Buna göre meydana gelen toprak akmasında 3,8 milyon m<sup>3</sup> katı malzeme birikmiştir. Heyelan olayı Nisan 2006 da meydana gelen kaya düşmesini takiben Kasım 2007'de 4,7 m/gün hızla hareket ederek yeniden aktif hale gelmiştir. Heyelan sonucunda yollar, binalar, alt yapı tesisleri üzerinde tehdit ortaya çıkmıştır. Alanda daha önce meydana gelen heyelan olayları detaylı olarak Jedlitschka tarafından derlenmiştir [368]. Buna göre bilinen en eski heyelan olayı 1660 yılında meydana gelmiş ve olayda büyük bir çiftlik "Harschengut" Traunsee gölüne doğru hareket ederek hasar görmüştür. Daha sonra 1734 yılında ise havza içerisindeki birikinti konisinin (alluvial fan) büyük bir bölümü gölün içerisine doğru hareket etmiştir.



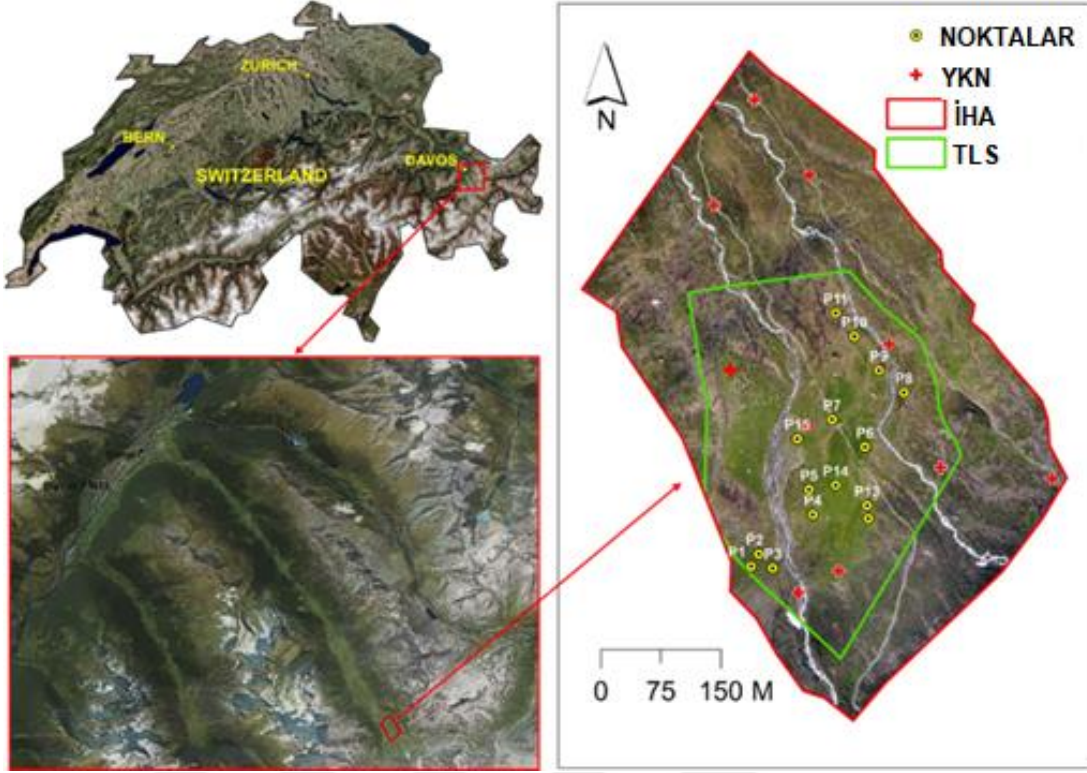




Harita 2.2. Avusturya-Gschlifgraben heyelan alanı konum haritası.

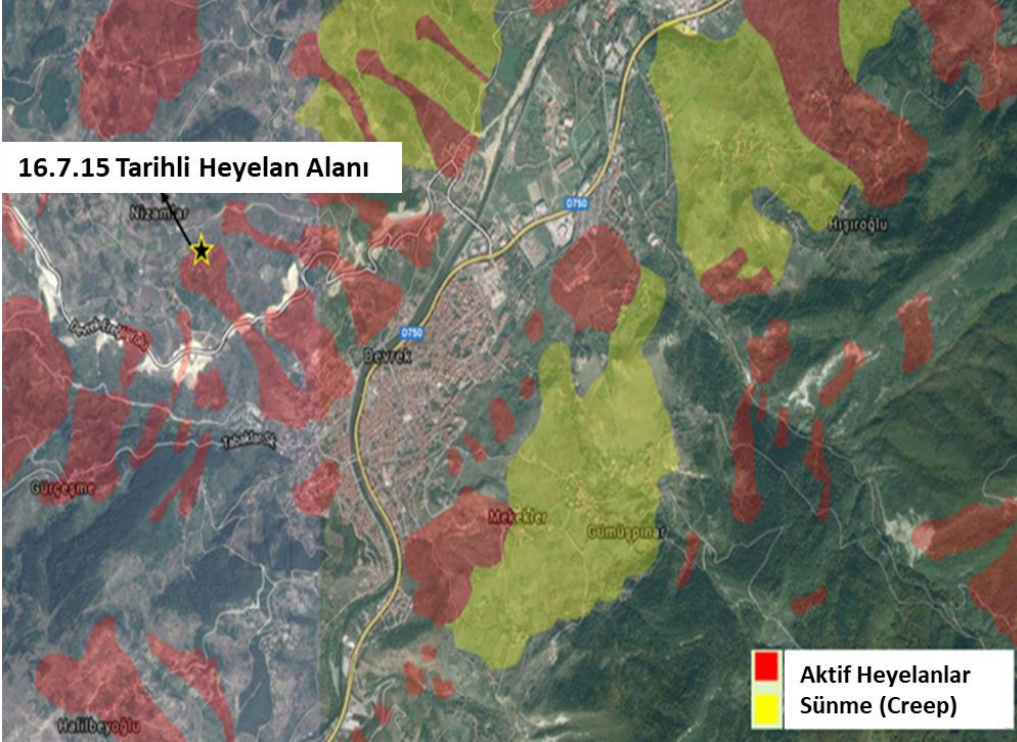
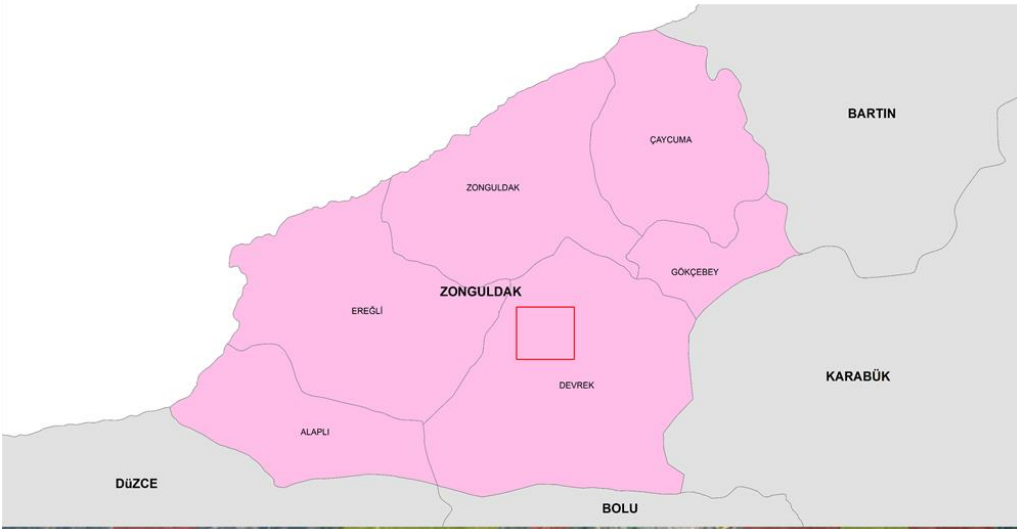
İsviçre’de yer alan ve yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verileri ile kar derinlik haritalama, kar erimesinin izlenmesi çalışmasının gerçekleştirildiği çalışma alanı ise Davos’a 13 km mesafedeki yukarı Dischma vadisidir (Harita 2.3). Gletschnoden olarak isimlendirilen alan Grisons kantonunda yer almaktadır. Çalışma alanı 26,7 ha büyüklükte olup, 2040 m ile 2155 m rakımları arasındadır. Çalışma alanında herhangi bir yerleşim alanı bulunmamaktadır ve alan kısa Alpin çayırlıkları ile seyrek küçük çalılıklarla kaplıdır. Alanda herhangi bir orman örtüsü bulunmamaktadır.





Harita 2.3. Dischma vadisi (Davos, İsviçre) konum haritası.

Türkiye’de bulunan birinci çalışma alanı Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesinde yer alan heyelan alanıdır. Heyelan olayı 16 Temmuz 2015 yılında tetiklenerek yaklaşık 40 ha bir alanda etkili olmuştur. Heyelan alanı Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA)’ne ait yerbilimleri veri tabanında da aktif heyelan olarak görünmektedir (Harita 2.4). Heyelan Karşıyaka mahallesini içine alarak Devrek çayına bağlanan Çomaklar deresine doğru hareket etmiştir. Heyelan oluşumu ve gelişimine bağlı olarak 3 ana kütle ve kanal yapısına sahip olarak değerlendirilmektedir (Şekil 2.2). Kaymanın gerçekleştiği ana kütle, yaklaşık olarak 700 m uzunluğunda, ortalama olarak 110 m genişliğinde ve 5 m ile 23 m arasında değişen derinliğe sahiptir. Kütlenin hacmi ise yaklaşık olarak 1.100.000 m<sup>3</sup> olarak ifade edilmektedir. Üst kütleyle bağlı olarak kayan bölümün yanında 620 m uzunluğunda, ortalama 135 m genişliğinde ve 8,0 – 15,0 m derinliğinde yaklaşık 1.050.000 m<sup>3</sup> hacme sahip üst yan kütle yer almaktadır. Bu iki kütle arasında gelişen derinliği 5 m civarında, uzunluğu yaklaşık 180 m, genişliği 40 m ve hacmi 39.000 m<sup>3</sup> olan bir akma bölgesi gelişmiştir. Heyelanın en alt kısmında ise, yerleşim alanlarının ve Çomaklar deresinin etkilendiği 700 m uzunluğunda, genişliği yaklaşık 300 m ve derinliği yer yer 53 m varan derinlikte bir heyelan kütlesi gelişmiştir (Şekil 2.3). Bu kütle için yaklaşık hacmi 5.140.000 m<sup>3</sup> civarındadır. Alan üzerinde heyelan nedeniyle 88 bina ve 1 adet okul boşaltılmak durumunda kalmıştır [369].



Harita 2.4. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelanı konum haritası.





Şekil 2.2. Devrek heyelanı bölgeleri.



Şekil 2.3. Heyelan alanından bir uçangöz görüntüsü.

Türkiye’de bulunan ikinci çalışma alanı ise Göynük ilçesinde (Bolu ili, Türkiye) bir köy olan Himmetoğlu köyüdür. Köy maden kömürü işletilen açık ocak işletmesinin ortasında yer almaktadır (Harita 2.5). Bu alanda 12 Aralık 2017 günü saat 10:00’da açık ocak kömür işletmeciliği faaliyetleri sonucunda bir heyelan (bundan sonra Himmetoğlu Köyü heyelanı olarak adlandırılacaktır) meydana gelmiştir. Alanda heyelan nedeniyle çok büyük yarıklar ortaya çıkmıştır (Şekil 2.4). Ayrıca heyelan nedeniyle toplam 7 ev hasar görmüş olup evlerden biri ağır hasara uğrarken, diğerleri ise hafif hasar görmüştür (Şekil 2.5). Heyelan bölgesi, hükümet tarafından kamulaştırma kararının alınmasından sonra, açık ocak madenciliği faaliyetlerinin 2014’ten sonra başladığı bölgede yer almaktadır (Harita 2.6).

Heyelanın meydana gelmesinden hemen sonra yetkililer tarafından tehlike altında yer alan evlerin derhal tahliye edilmesine karar verilmiştir. Bununla birlikte bölgedeki stabilite sorunları yeni olmamaktadır. Bölgedeki madenciliğin başlamasından bu yana bölgede önemli stabilite problemleri yaşanmaya ve hatta bazı çevresel etkilerin ortaya çıkmasıyla araştırmacılar tarafından 1997 yılında Himmetoğlu kömür madeninde stabilite problemlerinin nedenleri, mekanizmaları ve çevresel etkileri araştırılmıştır [370]. Himmetoğlu’ndaki madencilik faaliyetleri, 1980 yılında kömür sahasının batı ucunda başlamıştır [370]. Yapılan bu araştırmaya göre kömür üretiminde kesintiye neden olan ilk büyük yamaç duraysızlığı 1995 yılında meydana gelmiştir. Ayrıca 1996 Eylül ayında Ovaçay deresine bitişik güney yan duvar boyunca meydana gelen büyük çaplı hareketler de rapor edilmektedir.

Bunlara ek olarak, 1998 yılında Ovaçay deresi ve diğer tarım alanlarının yataklarına doğru uzanan yeni gerilim çatlakları ve birkaç metre seviyelerinde zeminde oturmaların meydana geldiği bildirilmiştir. Madencilik çalışmaları sonucu oluşan stabilite problemleri ayrıca maden alanını çevreleyen civar bölgelerde de olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Tarım alanlarının meydana gelen stabilite problemleri yüzünden tehdit altında olduğu da Ulusay ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ifade edilmektedir [370]. Bütün bunlara ek olarak açık ocak işletmeciliği faaliyetleri, bölgedeki arazi örtüsü ve arazi kullanımında önemli değişikliklere neden olmuştur.





Harita 2.5. Himmetoğlu köyü heyelanı konum haritası.



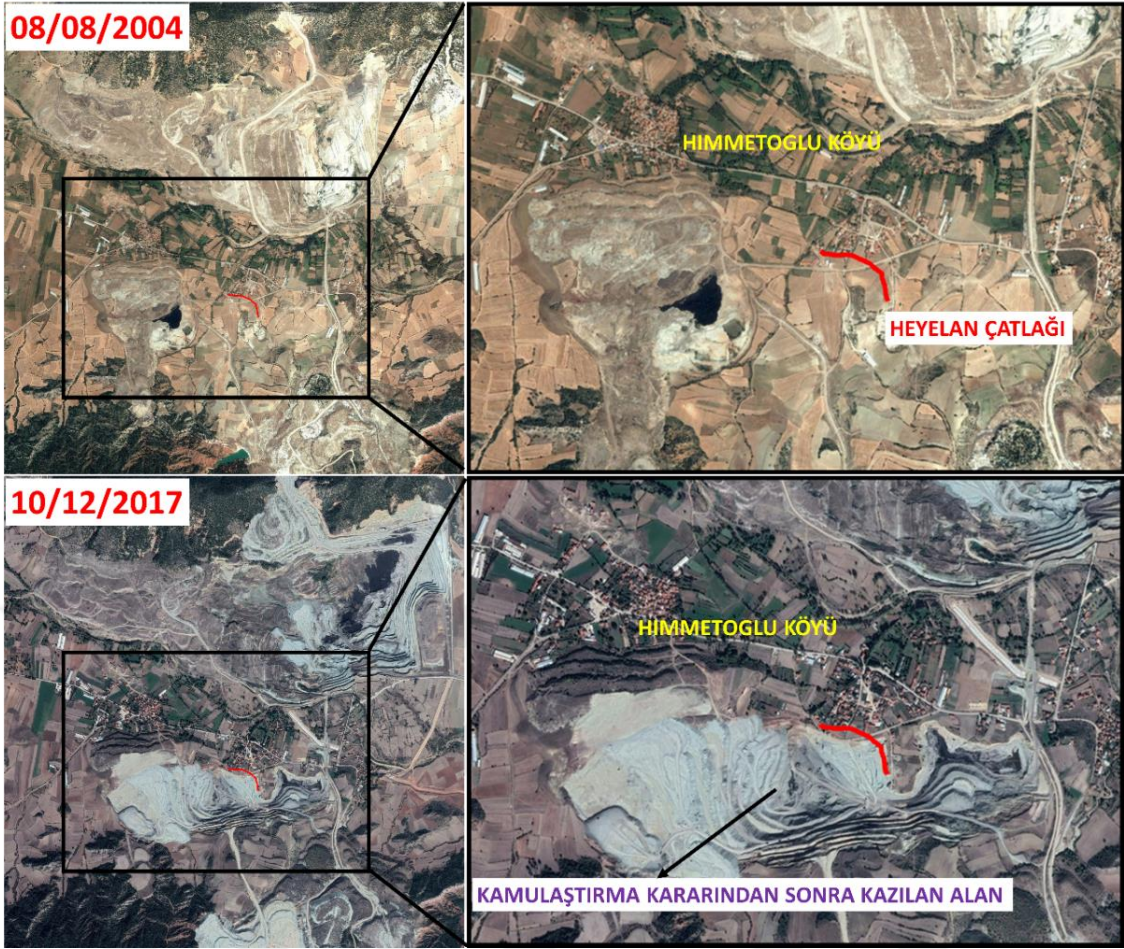


Şekil 2.4. Heyelan bölgesinde oluşan yarıklar.



Şekil 2.5. Heyelan sonucu yıkılan bina.





Harita 2.6. 2014 yılından sonra yapılan kazı çalışmalarının yapıldığı bölge ve alandaki değişimin 2004-2017 yılları arasındaki gösterimi.

## 2.2. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİ

Aşağı Avusturya Hollenstein bölgesinde (Ybbs) yer alan Gallenzerkogel heyelanını İHA ve LIDAR verilerini kullanarak izleme çalışması tez kapsamında gerçekleştirilen ilk uygulama örneğidir. Bu kapsamda alan üzerinde farklı tarihlerde toplamda 3 ayrı uçuş yapılarak İHA ile veri alımı yapılmıştır. Ayrıca alana ait heyelan öncesi durumu gösteren 1 m çözünürlüğe sahip 2009 yılına ait LIDAR verisi de temin edilerek kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar ve kullanılan yöntemlere ilişkin detaylı bilgiler bu bölümde verilmektedir.

### 2.2.1. İHA ile Heyelana Ait Görüntülerin Alınması ve Yapılan İşlemler

İHA ile görüntü alımına ait işlemlerin temel adımları [371]; 1) arazi öncesi hazırlık, 2) arazi çalışması ve uçuşun gerçekleştirilmesi ve 3) arazi çalışması ve uçuş sonrası işlemlerdir. Arazi öncesi hazırlık safhasında, alana hareket etmeden önce hava koşulları ve ilgili alanın topografyası gibi bazı gerekli ön bilgilerin elde edilmesi gerekmektedir. İHA ile bir heyelanın ölçülmesinde optimum hava koşulları rüzgar ve yağışın olmadığı bulutlu bir gökyüzü olarak ifade edilmektedir [371]. Çünkü yağış İHA sisteminin elektronik birimlerini ve görüntü kalitesini olumsuz olarak etkilemektedir. Yine rüzgâr, hareket kaynaklı bulanıklığa sebep olarak görüntünün keskinliğini ve GNSS güzergâh doğruluğunu düşürmektedir. İlgili alana ait topografya Google Earth'ten yararlanarak kabaca değerlendirilebilmekte ve otomatik uçuşlar için GNSS güzergâhlarının oluşturulması amacıyla en yüksek ve en düşük arazi kotları belirlenebilmektedir. Bu işlemler en uygun uçuş planının yapılmasında anahtar rol oynamaktadır. Gerekli olan bütün bilgiyi içeren düzenli bir uçuş ancak yeterli kalite ve bindirme oranına sahip (>%90 ön bindirme ve >%70 yan bindirme) görüntülerin temin edilebilmesiyle başarılı bir ölçümün gerçekleştirilebilmesine imkân vermektedir. Arazi öncesi hazırlık safhasında başarılı bir uçuş planlama ve arazi çalışması hazırlığı yapılabilmesi bu nedenlerden önem arz etmektedir. Arazi çalışması ve uçuşun gerçekleştirilmesi aşaması, arazideki gerekli çalışmaları ve uçuşların gerçekleştirilmesini içermektedir. Uçuş sonrası görüntü işlemede gerekli olan yer kontrol noktaları (YKN), İHA ile uçuşlar gerçekleştirilmeden önce, her biri İHA ile alınan fotoğraflarda görünecek şekilde renkli püskürtme boya ile arazi üzerinde işaretlendikten sonra santimetre altı doğruluklarda (< 5 mm) RTK-GPS kullanılarak X, Y ve Z konum bilgileri elde edilmiştir (Şekil 2.6). Uçuşun kapsadığı alan üzerinde her bir uçuş için ölçülen YKN'lere ait bilgi Çizelge 2.1'de verilmektedir. Ölçülen YKN'ler, görüntü rektifikasyonu ve görüntü coğrafi kodlama amaçları için gerekmektedir.

Çizelge 2.1. İHA ile gerçekleştirilen uçuşlara ait bilgiler.

Uçuş Tarihi	Uçuş Sayısı	Alınan Görüntü Sayısı	Ortalama Uçuş Yüksekliği (m AGL)	Odak Uzunluğu (mm)	GSD (cm/px)	Uçuşun Kapsadığı Alan (Ha)	Ölçülen YKN Sayısı
21.04.2015	3	396	40.69	20	0,896	6.10	9
04.11.2015	1	116	39.27	24	0,721	5.13	9
04.04.2016	1	94	41.38	24	0,759	5.00	8





Şekil 2.6. RTK-GPS ile alınan YKN ve fotoğraf üzerindeki görüntüsü.

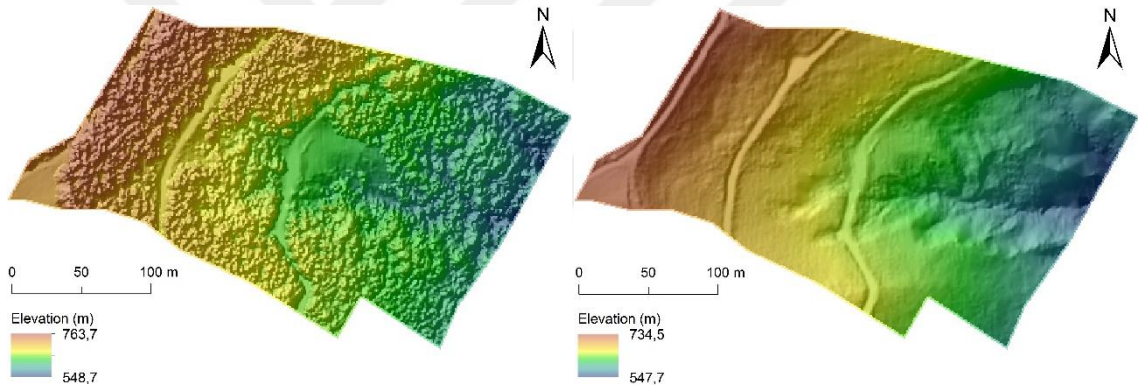
Gallenzerkogel heyelanı üzerinde İHA tabanlı heyelan izleme amaçlı olarak toplamda 3 adet uçuş gerçekleştirilmiştir. Çalışmada uçuşlar ARF MikroKopter OktoXL marka döner-kanatlı mini multikopter kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Platformun kamera dahil ağırlığı 4.9 kg olup boyutları 73×73×50 cm'dir. Platform üzerinde X ve Y konum koordinatlarını sağlayan ve konum bilgisini 1 sn aralıklarla ölçerek SD karda kayıt edebilen bir GNSS sistem vardır. Ayrıca platform üzerinde platformun yerden olan yüksekliğini (AGL, above ground level) belirleyen barometre bulunmaktadır. Uçuş planları ise MikroKopterTool isimli yazılım kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılım içerisinde tanımlanan varış noktaları boyunca kullanıcı tanımlı uçuş hızlarıyla uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Bütün uçuşlar platformun iniş ve kalkış zamanları haricinde otonom olarak gerçekleştirilmiştir. Platformun batarya kapasitesine bağlı olarak herhangi bir kırımın meydana gelmemesi için 15 dakikayı geçmeyecek şekilde görev tamamlanmıştır. Ortalama uçuş yüksekliği gerçekleştirilen bütün uçuşlarda 60 m AGL'den daha küçüktür. Sayısal görüntülerin alımı, platforma monte edilen Canon EOS 650D DSLR (Digital Single Lens Reflex) marka 18 MP (MegaPixel) kamera ile platformun havadaki konum ve yöneliminden bağımsız olarak 2 sn'de bir şekilde yapılmıştır. Gerçekleştirilen uçuşlara ait bazı anahtar bilgiler Çizelge 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.7. MikroKopter OktoXL İHA (solda), uzaktan kumanda ve yer kontrol ünitesi (sağda).

Arazi çalışması ve uçuş sonrası işlemler ise elde edilen bütün fotoğrafların, İHA üzerindeki GNSS'den gelen koordinat bilgisinden yararlanarak ve Agisoft Photoscan yazılımı kullanılarak, alınan YKN'ler yardımıyla, coğrafi olarak referanslanmasını ve SfM algoritması ile nokta bulutu, Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model, DEM) ve ortofoto görüntü üretimi gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Elde edilen veriler CBS yazılımı olan ArcGIS ve açık kodlu nokta bulutu işleme yazılımı olan CloudCompare gibi diğer yazılımlarda kullanılmak üzere uygun formatlarda kayıt edilmiştir. İHA ile alınan sayısal görüntülerden çalışma kapsamında Agisoft Photoscan Professional version 1.3.2 yazılımı kullanılarak SfM algoritması ile nokta bulutu, DEM ve ortofoto görüntü üretilmiştir. Photoscan yazılımında kullanılan SfM algoritmasının iş akışı 1) görüntü hazırlama, 2) görüntü eşleştirme ve ışın demetleri ile dengeleme (bundle block adjustment), 3) yoğun geometrinin yeniden oluşturulması ve YKN'lerin dahil edilmesi ve 4) tekstür haritalama ve DEM/ortofoto üretiminden oluşmaktadır [372]. Görüntü hazırlama işlem adımı İHA'dan uçuş esnasında gelen GPS bilgisi dijital kameranın zaman ayarları ile alınan bütün fotoğraflar için senkronize edilmiş ve İHA-GPS koordinatları karşılık gelen her bir fotoğrafın JPEG-EXIF başlık (header) dosyalarına kayıt edilmiştir. Bu işlem görüntü coğrafi konumlandırma (geocoding) olarak isimlendirilmektedir. Coğrafi konumlandırılmış İHA ile alınan görüntülerin Photoscan yazılımına eklenmesinden sonra JPEG-EXIF başlık dosyalarında depolanan GPS bilgisinden yararlanarak görüntü yönlendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Photoscan yazılımı görüntüleri otomatik olarak konumlandırarak örtüşen görüntülerdeki öznetelikler eşleştirmektedir. Daha sonra seyrek nokta bulutunun oluşturulması için ışın demetleri ile

dengeleme işlemi yapılmış ve elde edilen nokta bulutundan yanlış noktalar, model oluşturma hatalarının önlenmesi için silinmiştir. Yoğun geometri yeniden oluşturma ve YKN'lerin dâhil edilmesi işlem adımı, RTK-GPS ile alınan YKN'ler ile coğrafi konumlandırma işleminin gerçekleştirilmesinden sonra yoğun 3B model yüksek doğrulukta yeniden oluşturulmaktadır. Burada YKN'ler kamera pozisyon ve yönlerini optimize etmek için kullanılmaktadır. Daha sonra tekstür haritalama yapılarak oluşturulan modele fotoğraflara ait gerçek renkler giydirilmektedir. Bütün bu işlemlerin ardından Photoscan yazılımında DEM (.tiff formatında) ve ortofoto mozaik görüntüler elde edilebilmektedir. Oluşturulan modellerin doğruluğu yine kullanılan YKN'ler aracılığıyla yazılım tarafından hesaplanmaktadır. İHA ile temin edilen veriler yanısıra çalışma alanının heyelan olmadan önceki durumunu gösteren yüksek çözünürlüklü (1m) hava LIDAR verisi hem DTM hem de Sayısal Yüzey Modeli (Digital Surface Model, DSM) şeklinde temin edilmiştir (Harita 2.7).



Harita 2.7. LIDAR-DSM (solda) ve LIDAR-DTM (sağda).

### 2.2.2. Gerçekleştirilen Heyelan İzleme Çalışmaları

Çalışmada Gallenzerkogel heyelanının yüksek çözünürlüklü İHA ve LIDAR verileri ile izlenmesinde heyelan kaynaklı deformasyonlar birinci uçuş verisinden üretilen DSM'nin LIDAR tabanlı DSM verisinden çıkarılmasıyla elde edilen ve üretilen DEM modellerinin farkları alınarak belirlenmiştir. Bu yöntem literatürde "DEM of Difference (DoD)" olarak adlandırılmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak temin edilen LIDAR verisi 1 m çözünürlüğe sahip olduğu için İHA tabanlı üretilen DEM verileri çözünürlükleri de 1 m olacak şekilde yeniden örneklenmiştir. Daha sonra farklı platformlardan türetilen DEM verilerinin karşılaştırılması/doğrulanması amacıyla heyelan alanı ve vejetasyon kaplı bölgelere düşmeyecek şekilde rastgele dağılan 770 adet nokta belirlenerek bu noktalarda ortalama karekök hata (root mean square error, RMSE) hesaplanmıştır. Kullanılan bu doğruluk



değerlendirme kriterine göre küçük RMSE değeri farklı iki veri seti arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymaktadır. Burada uygulanan bu karşılaştırma yöntemi literatürde çeşitli çalışmalarda da kullanılmıştır [372]-[374]. Kullanılan DoD yöntemi ile heyelan deformasyonlarının belirlenmesi amacıyla düşey (Z yönlü) farkların elde edilmesi yanısıra hacimsel değişimler de [374]'ün çalışmalarında uyguladıklarına benzer şekilde elde edilmiştir. Çalışmada birinci uçuşun gerçekleştirildiği tarihten sonraki heyelan aktivitesinin izlenmesi amacıyla birinci ve ikinci uçuş tarihinde gerçekleştirilen uçuş verilerinden SfM ile üretilen 3B nokta bulutları kullanılarak buluttan buluta mesafe hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Bu nokta bulutu karşılaştırma yöntemi heyalan alanı etrafında yoğun vejetasyon örtüsü bulunduğu için seçilmiştir. Bu işlem için CloudCompare 3B nokta bulutu işleme yazılımı içerisinde çalışan M3C2 (Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison) algoritması kullanılmıştır. Ancak ikinci ve üçüncü uçuşlardan elde edilen veriler arasında ise bu yöntem uygulanmamıştır. Çünkü bu dönemde heyelan üzerinde devam eden kontrol/stabilizasyon çalışmaları dolayısıyla heyalan izleme yapılamamaktadır. Burada kullanılan M3C2 algoritması [375] özellikle kompleks yapıya sahip topoğrafyalarda verinin ağ (“mesh” veya “grid”) yapıya dönüştürülmeden doğrudan nokta bulutu verisini kullanarak değişimlerin tespit edilmesine imkan vermektedir [376]. M3C2 algoritmasını kullanarak iki nokta bulutu arasındaki mesafenin hesaplanmasında tanımlanması gereken parametreler: 1) referans ve karşılaştırılacak olan nokta bulutu verisinin tanımlanması, 2) çekirdek noktaların tanımlanması ve 3) normal ölçek (D), projeksiyon ölçeği (d), silindir derinliği ve 4) eşleştirme hatası [376]. Buna göre birinci İHA uçuştan türetilen nokta bulutu verisi referans, ikinci İHA uçuş verisinden türetilen nokta bulutu karşılaştırılacak nokta bulutu olarak tanımlanmıştır. Agisoft PhotoScan yazılımı ile SfM tabanlı oluşturulan modelin yoğun nokta bulutu verisi M3C2 algoritmasında kullanılmak üzere metin dosyası (.txt) olarak kayıt edilmiştir. M3C2 algoritmasında kullanılan D ve d parametreleri ise Lague ve diğerleri tarafından yapılan öneriler kapsamında belirlenmiştir [375]. Bu çalışma için D parametresi sabit bir değer olarak 5 m (ki spesifik olarak nokta bulutu verisinin ortalama pürüzlülük değerinin 25 katından daha büyük olması gerektiği önerilmekte olup nokta bulutlarının ortalama pürüzlülüğü 0,17 m'dir) tanımlanmıştır. Bunun nedeni ise nokta bulutları arasında karşılık gelen hiçbir elemanın tanımlanamıyor olmasıdır. Projeksiyon ölçeği ise 5,2 adet/m<sup>2</sup> ortalama nokta yoğunluğu ile nokta mesafelerinin hesaplanması için uygun olacak şekilde 2 m olarak ayarlanmıştır. Bu şekilde algoritma için gerekli koşul olan minimum dört noktadan daha fazla nokta işleme dahil

edilebilmektedir [376]. Algoritma tarafından nokta bulutları arasındaki mesafenin hesaplanmasında kullanılacak çekirdek noktalar ise minimum nokta aralığı referans bulutta 50 cm olacak şekilde belirlenmiştir. Yazılım tarafından eşleştirme hatası ( $reg$ ) ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [376]:

$$reg = \sqrt{(RMSE_{ref})^2 + (RMSE_{comp})^2} \quad (2.1)$$

Denklemden RMSE Agisoft PhotoScan yazılımında model oluşturulurken kullanılan YKN'ler aracılığıyla hesaplanan ortalama karekök hatadır. Bu çalışmada 0,063 m olarak elde edilmiştir. M3C2 algoritması işlem sonucunda üç adet çıktı sağlamaktadır. Bunlar: M3C2 mesafesi, anlamlı değişim ve mesafe belirsizliği verileridir. Mesafe belirsizliği, %95 tespit derecesi (level of detection,  $LOD_{95\%}$ ) algoritma tarafından aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır [376].

$$LOD_{95\%} = \pm 1.96 \left( \sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2}} + reg \right) \quad (2.2)$$

Denklemden  $d$  projeksiyon ölçeği,  $\sigma_1(d)^2$  ve  $\sigma_2(d)^2$  sırasıyla  $n_1$  ve  $n_2$  nokta bulutları lokal pürüzlülüğü değerleridir. Bu çalışmada mesafe belirsizlik değeri 15 cm'den daha büyük olan noktalar ile birlikte anlamlı değişim verisine göre nokta bulutları arasındaki farkın anlamsız olduğu (non-significant change) noktalar elimine edilmiştir. Geriye kalan noktalar ise heyelan deformasyonlarının belirlenmesi ve haritalanması amacıyla kullanılmıştır.

### **2.3. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİ**

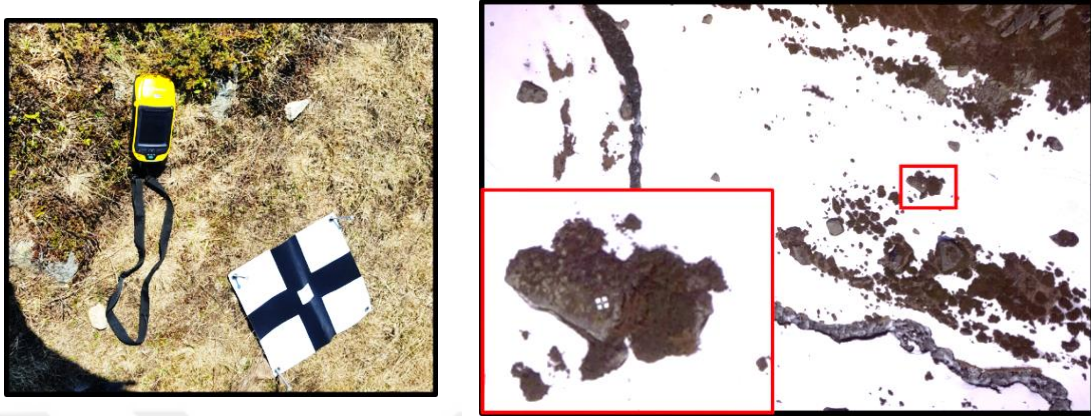
Bu çalışmada İsviçre Davos'ta yer alan Yukarı Dischma Vadisinde yer alan havza üzerinde yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama tekniklerinden İHA ve TLS verisi kullanılarak kar erimesinin izlenmesine yönelik bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

#### **2.3.1. İHA Tabanlı Görüntü Alımı ve Verilerin İşlenmesi**

İHA tabanlı görüntü alımı işlem aşamaları bu çalışmada da heyelan izleme çalışmasında olduğu gibi 3 temel adımda gerçekleştirilmiştir: 1) uçuş planlanması, 2) arazide uçuş

planının değerlendirilmesi, YKN'lerin uygulaması, uçuşların gerçekleştirilerek görüntülerin alınması ve 3) İHA görüntülerinin işlenmesi. Uçuş planının hazırlanması saha gitmeden önce belirlenmesi gereken ilgili alanın topoğrafik özellikleri, hava ve rüzgâr koşulları gibi bazı ön gerekliliklere sahiptir. Yüksek alp dağlık bölgelerinde çoğunlukla İHA sisteminin teknik özelliklerinin limitleri aşılmaktadır (detaylar için bkz. [337]). Araziye gitmeden önce uçuş planları Ascending Technologies (AscTec) Navigator isimli tablet bilgisayara yüklü yazılım kullanılarak yapılmıştır. Kamera özellikleri, istenilen yer örnekleme mesafesi (ground sampling distance, GSD) ve görüntü bindirme oranlarına bağlı olarak yazılıma aktarılan (imported) İsviçre topoğrafik haritaları üzerinde varış noktalarının tanımlanmıştır. Arazideki hazırlık ve uçuşların gerçekleştirilmesi safhasında ise öncelikle görüntü rektifikasyonu ve görüntü coğrafi kodlama için gerekli olan YKN'ler Trimble GeoExplorer 6000 GeoXH marka diferansiyel-GNSS cihazı kullanılarak 10 cm'den daha iyi doğruluklarla ölçülmüştür. Toplamda İHA ile alınan görüntülerde belirgin şekilde görülebilen 9 adet YKN ölçümü İHA ile uçuşların gerçekleştirilmesinden önce yapılmıştır (Şekil 2.8). Bütün YKN'ler CH1903-LV03 İsviçre koordinat sisteminde ölçülmüştür. İHA uçuşları ise daha önce Bühler ve diğerleri tarafından da kullanılan AscTec Falcon 8 oktokopter (Şekil 2.9) gerçekleştirilmiştir [336], [337]. Görüntü alımında ise Falcon 8 platformuna monte edilebilen Sony NEX-7 marka dijital kamera kullanılmıştır. Falcon 8 platformunun teknik özelliklerine ilişkin detaylı bilgi Bühler ve diğerleri tarafından verilmektedir [336], [337]. Buna göre platform üzerinde GNSS ve IMU (Inertial Measurement Unit) içeren navigasyon sensörleri, bir barometre, bir pusula ve 2,5 m'den daha yüksek konum doğruluğu sağlayan adaptif kontrol birimi ile birlikte dengeli uçuşa izin veren kontrol birimleri bulunmaktadır. Platforma monte edilebilen Sony NEX-7 kamera ise 24 MP APS-C CMOS sensöre sahip olup, hafif (81 g) ve küçük Sony NEX 20 mm F/2.8 optik lens kullanılmıştır. Gücünü İHA bataryalarından alarak çalışan kamera ise platforma, aktif stabilizasyon ve titreşim söndürme sağlayan bir gimbal (yalpa çemberi) ile bağlanmaktadır. Yer kontrol istasyonundan pozlama süresi gibi temel kamera ayarları kontrol edilebilmekte olup kamera kadrajı video sinyali şeklinde yer kontrol istasyonuna aktarılmaktadır. Tablet bilgisayar yer kontrol istasyonuna uçuşun yapılacağı alanda bağlanmaktadır. Uçuşlar gerçekleştirilmeden önce uçuş planı beklenmedik durumlara karşı (arazi topografyasındaki değişimler gibi) gözden geçirilerek son kontrolleri yapılabilmektedir. Uçuşlar yapılan planlar kapsamında tanımlanan varış noktaları ile otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Sadece kullanıcı İHA'nın motorlarının çalıştırılması ve inişi ile

motorların durdurulması esnasında kontrol etmektedir. Çalışma kapsamında alan üzerinde beş ayrı uçuş gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen uçuşlara ilişkin bilgiler Çizelge 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.8. Trimble GeoExplorer 6000 GeoXH marka diferansiyel-GNSS cihazı ve kullanılan YKN (solda); İHA ile alınan görüntüde belirgin şekilde görülebilen YKN örnek görüntüsü (sağda).



Şekil 2.9. AscTec Falcon 8 multikopter (solda); yer control istasyonu (sağda).

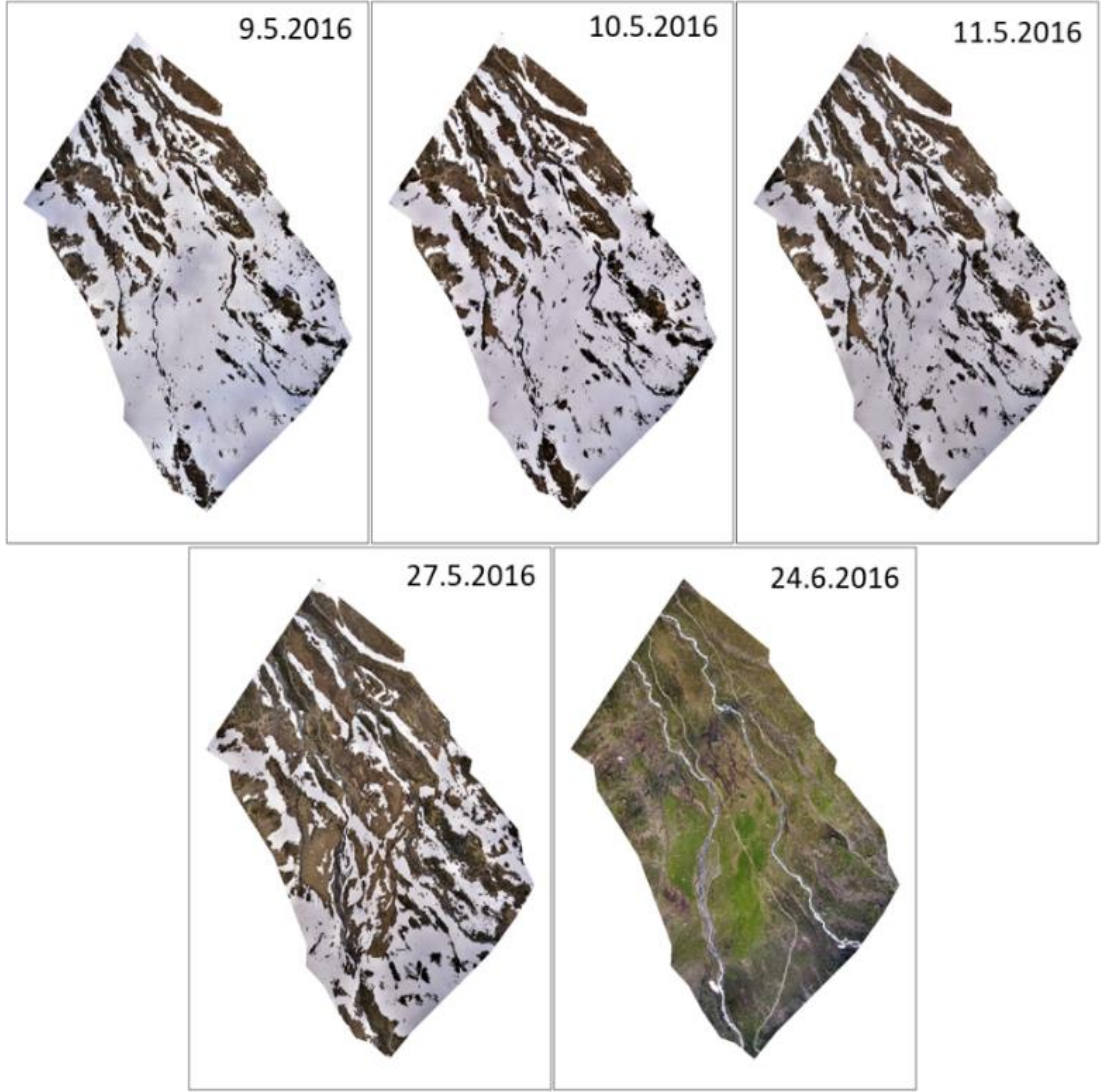
Çizelge 2.2. Gerçekleştirilen İHA uçuşlarına ilişkin bilgiler.

Uçuş Tarihleri	Alınan Görüntü Sayısı	Ortalama Uçuş Yüksekliği (m AGL)	Odak Uzaklığı (mm)	ISO	GSD (cm/px)	Uçuşun Kapsadığı Alan (m <sup>2</sup> )	Ölçülen YKN Sayısı
09.05.2016	235	121	20	100	2,24	305.457,9	9
10.05.2016	238	123	20	100	2,27	303.577,2	9
11.05.2016	234	122	20	100	2,24	302.012,0	9
27.05.2016	244	124	20	100	2,29	311.802,7	9
24.06.2016	216	129	20	100	2,38	315.327,5	9

İHA görüntülerinden yüksek çözünürlüklü DSM'lerin ve ortofoto görüntülerin üretilmesi için ofiste gerçekleştirilen bütün çalışmalar İHA görüntülerinin işlenmesi safhasını oluşturmaktadır. Çalışmada Agisoft PhotoScan Professional versiyon 1.3.2 kullanılmıştır. Photoscan yazılımı ile SfM algoritmasının kullanıldığı işlemlerin iş akışı 1) görüntü eşleştirme ve ışın demetleri ile dengeleme, 2) YKN'lerin tanımlanması ve yoğun geometrinin yeniden oluşturulması ve 3) tekstür haritalama ve DEM/ortofoto üretiminden oluşmaktadır [372]. Gerçekleştirilen her uçuş için ayrı ayrı olmak üzere bahsedilen adımlar uygulanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak uçuşlar ile alınan görüntüler Photoscan yazılımına aktarılarak jenerik yöneltmesi yapılmıştır. Agisoft Photoscan yazılımı görüntü yöneltme işlemini otomatik olarak örtüşen farklı görüntülerdeki öznelikleri eşleştirerek yapmaktadır. Işın demetleri ile dengeleme gerçekleştirildikten sonra üretilen seyrek nokta bulutundan aykırı noktalar silinmiştir.

YKN'lerin tanımlanması ve yoğun geometrinin yeniden oluşturulması aşamasında GNSS alıcısı ile arazide ölçülen YKN'ler kamera konumlarının yeniden tanımlanarak optimize edilmesi ve daha hassas ışın demetleriyle dengeleme yapılması amacıyla yazılım içerisinde gerekli görülen doğruluk derecelerinde (<5 cm) tanımlanmıştır. Ancak özellikle yüksek eğime sahip topoğrafyalarda kar derinliklerinin daha doğru şekilde elde edilmesinde, üretilen modeller arasında ortaya çıkan X ve Y koordinatlarındaki küçük kaymalar bile Z doğrultusunda önemli farklar oluşturarak büyük bir etkiye sahip olabilmektedir [336], [339]. Bu nedenden dolayı, 9 Mayıs 2016 tarihli kış verisinin YKN'ler ile mutlak şekilde kayıt edilmesinden sonra bu veri referans alınarak bütün modellerde açık şekilde belirgin olan kaya, küçük taş vb objelerden [336] yararlanarak 190 adet yapay YKN üretilmiştir. Üretilen bu 190 adet yapay YKN arazide ölçülen 9 adet YKN ile birlikte diğer modellerin üretilmesinde kullanılmıştır. Böylece uçuşların kapsadığı bütün alan üzerine homojen olarak dağılmış fazla sayıda YKN kullanılarak bahsedilen X ve Y doğrultulu kaymaların minimize edilmesi sağlanmıştır. YKN kullanımı ile güncellenmiş ışın demetleri dengeleme işlemini takiben yoğun nokta bulutu elde edilmiş ve tekstür haritalaması yapılmıştır. Daha sonra DSM ve ortofoto görüntüler 10 cm yersel çözünürlüğe sahip olacak şekilde üretilmiştir. Bütün model çıktıları aynı alansal büyüklüğe (267.000 m<sup>2</sup>) sahip olacak şekilde kesme işlemi uygulanarak yeniden düzenlenmiştir (Harita 2.8).

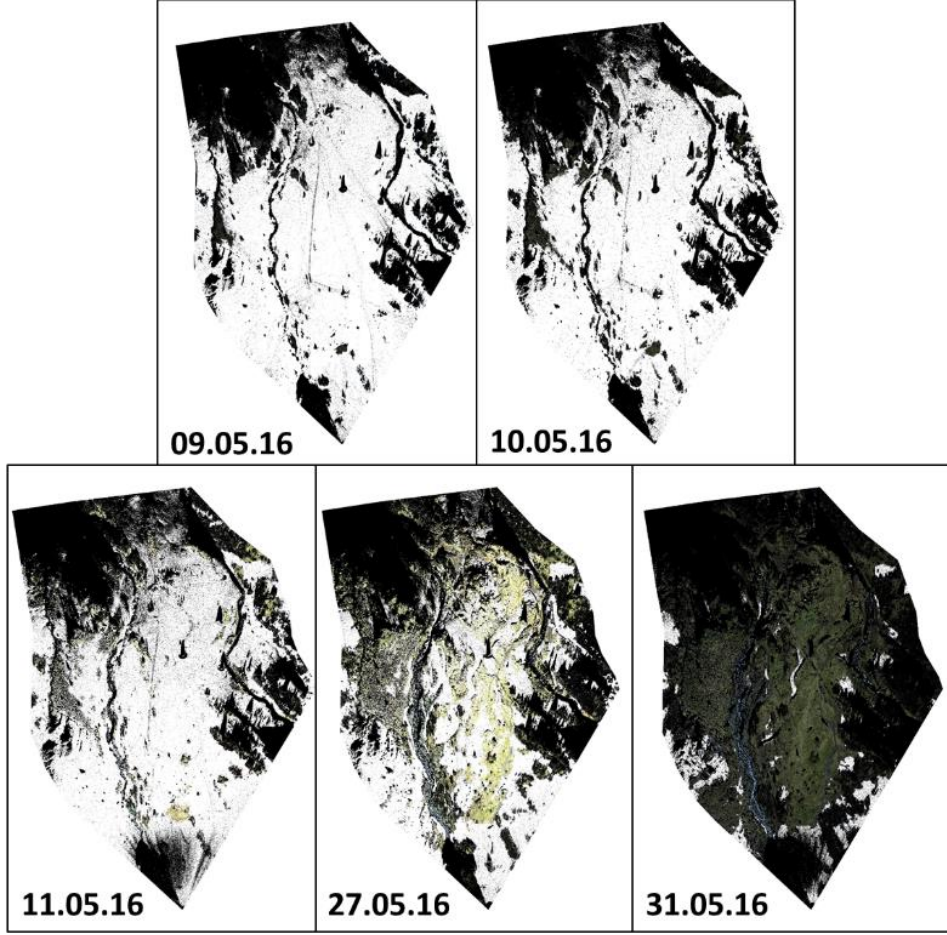




Harita 2.8. İHA tabanlı üretilen ortofoto görüntüler.

### 2.3.2. Yersel Lazer Tarama Verileri ve Yapılan İşlemler

İHA ile haritalanan karlı kaplı alanların ve gerçekleştirilen kar derinlik ölçümlerinin karşılaştırılması amacıyla referans veri seti olarak kullanılmak üzere İHA verileri ile aynı tarihlerde Riegl-VZ6000 marka lazer tarayıcı kullanılarak beş adet ölçüm yapılmıştır. Kullanılan lazer tarayıcı Gletschboden alanının yaklaşık olarak 30 m üzerinde ve kuzeyindeki açık alana konumlandırılmıştır. Tarama pozisyonundan 100 m mesafelerde 0,01 m düşey çözünürlük sağlayacak şekilde 300 kHz ölçüm frekanslarında ve  $0,007^\circ$  ışın demeti sapma açısıyla tek noktadan tarama yapılmıştır. Lazer tarayıcı sistem sensörden kar kaplı yüzeye ve buradan tekrar sensöre olan lazer ışının hareket süresini kayıt ederek kendi koordinat sisteminde nokta mesafelerini hesaplayarak konum bilgilerini kayıt etmektedir.



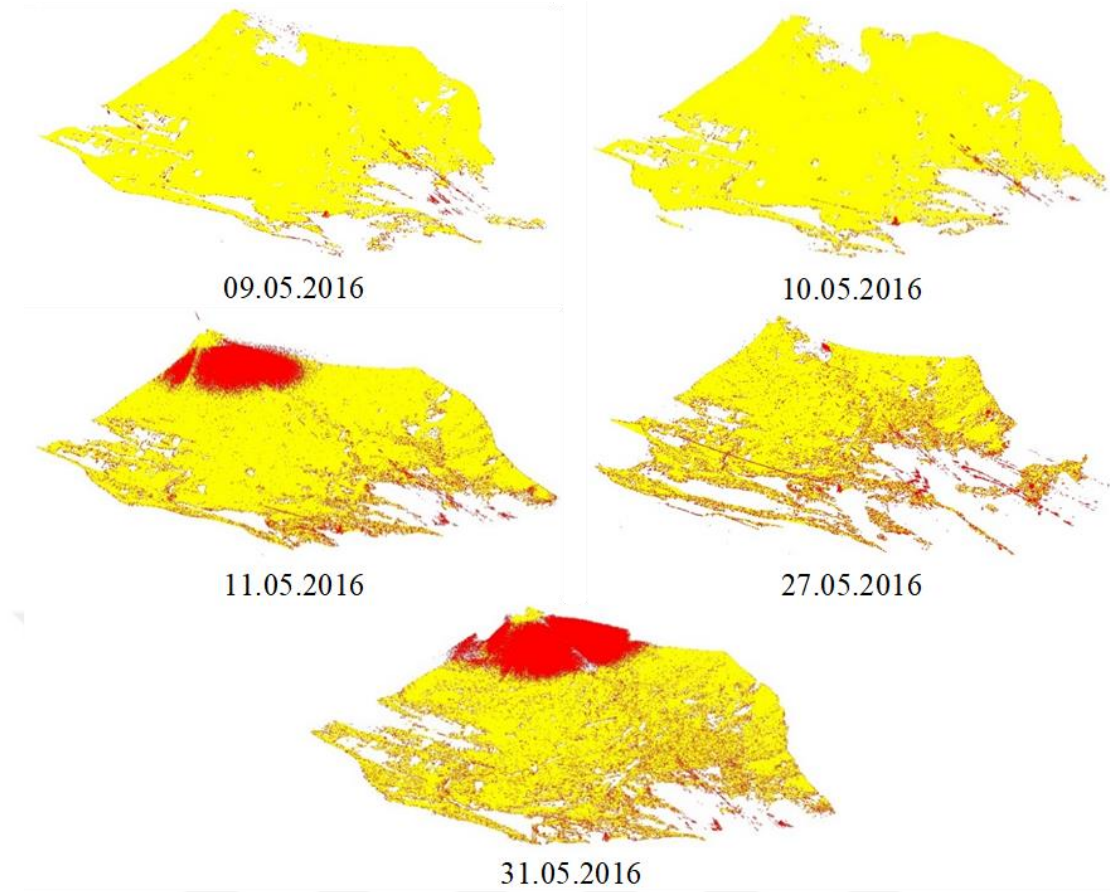
Harita 2.9. Yersel lazer tarayıcı ile üretilmiş ortofoto görüntüler (Siyah Pikseller “NoData” ya karşılık gelmektedir).

Bu şekilde elde edilen nokta bulutu daha sonra İHA verileri ile aynı olan İsviçre CH1903 LV03 koordinat sistemine Gletschboden alanının yakın çevresinde konumlanmış tarayıcı tarafından taranan beş adet sabit reflektör noktalarından yararlanarak dönüştürülmüştür. Bu sayede üretilen modellerin İHA tabanlı modellerle örtüşmesi sağlanmıştır. Kullanılan Riegl-VZ6000 marka lazer tarayıcı tarama esnasında aynı zamanda gerçek renklerle giydirilmiş nokta bulutu üretmek, üçgenlenmiş yüzeylerin tekstür haritalarını üretmek ve yüksek çözünürlüklü panorama ve ortofoto görüntüleri elde etmek amaçlarıyla yüksek çözünürlüklü bir dijital kamera aracılığıyla sayısal görüntüleri de kayıt etmektedir (Harita 2.9). Yersel lazer tarama verileri İHA uçuşları ile sadece karsız dönemi temsil eden yaz verisi için farklı tarihlidir (31 Mayıs 2016). Yersel lazer tarama verilerine ilişkin bazı bilgiler Çizelge 2.3’de verilmektedir. Tarayıcı üzerindeki sayısal kamera ile alınan görüntülerden ortofoto görüntü üretimi işlemi RiScan Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve ArcGIS yazılımında kullanılmak üzere uygun formatta kayıt edilmiştir.

Yersel lazer tarama ham verilerinden DSM'lerin üretilmesinden önce bütün ham nokta bulutları tarama anında ortamda içerilen su buharı, sis ve/veya ortamın ışık koşulları gibi faktörler yüzünden zeminin daha yüksekte yanlış şekilde algılanmış noktalar ile telefon/elektrik hatlarındaki kabloları temsil eden ve gürültü olarak tanımlanan noktaların elimine edilmesi için sınıflandırılmıştır. Yapılan bu sınıflandırma DSM'lerin doğruluklarının artırılmasına imkan sağlamıştır. Sınıflandırma işlemi CloudCompare isimli açık kodlu nokta bulutu işleme yazılımı içerisinde çalışan CANUPO (CAracterisation de NUages de POints) isimli eklentisi (<http://www.danielgm.net/cc/>) kullanılarak yapılmıştır. CANUPO yazılımı Brodu ve Lague tarafından kompleks doğal çevreler için nokta bulutlarının çok ölçekli boyutsal ölçüt (multi-scale dimensionality criterion) kullanılarak ikili sınıflandırılması için geliştirilmiştir [377]. Nokta bulutlarının CANUPO sınıflandırılması iki adımda gerçekleştirilmektedir: 1) sınıflandırıcıların eğitilmesi ve 2) nokta bulutunun sınıflandırılması. Çalışma kapsamında yersel lazer tarama ham nokta bulutlarının sınıflandırılması için ilk olarak gürültü ve gürültü olmayan olarak tanımlanan her iki sınıfa ait nokta örnekleri (yani sınıflandırıcılar) CloudCompare yazılımı kullanılarak eğitim veri seti olarak kullanılmak üzere toplanmıştır. Gürültü sınıfını temsil eden noktalar toplamda 290450 adet iken, gürültü olmayan sınıfa ait toplanan nokta sayısı 1098406 adettir. En iyi sınıflandırıcı performansı sağlayabilen çok-ölçekli tanımlayıcıların (descriptors) belirlenmesi için gerekli olan ölçek aralıkları (range of scales) yapılan pek çok deneme sonucunda 0,5, 1, 2,5 ve 10 olarak seçilmiştir. Sınıflandırılan nokta bulutları Şekil 2.10'da verilmektedir. Ayrıca sınıflandırma işlemine ilişkin sonuçlar Çizelge 2.3'te verilmektedir.

Çizelge 2.3. Yersel lazer tarama verileri sınıflandırma sonuçları

Tarama Tarihleri	Tarama Sayısı	Ham Verideki Nokta Sayısı	Gürültü Sınıfındaki Nokta Sayısı	Gürültü Olmayan Sınıfın Nokta Sayısı	Gürültü Sınıfı (%)	Gürültü Olmayan Sınıfı (%)
09.05.2016	1	2.724.596	17.238	2.707.358	0,6	99,4
10.05.2016	1	2.909.957	16.275	2.893.682	0,6	99,4
11.06.2016	1	3.095.311	262.941	2.832.370	8,5	91,5
27.05.2016	1	3.944.456	243.243	3.701.213	6,2	93,8
31.05.2016	1	3.27.7353	562.438	2.714.915	17,2	82,8



Şekil 2.10. Sınıflandırılmış 3B nokta bulutları: kırmızı noktalar gürültü sınıfını, sarı noktalar gürültü olmayan sınıfı temsil etmektedir.

Daha sonra gürültü sınıfını temsil eden noktalar filtrelenerek elimine edilmiş ve geri kalan gürültü olmayan sınıfa ait noktalar 10 cm yersel çözünürlüklü DSM üretmek amacıyla ArcGIS yazılımında kullanıma uygun “.shp (shapefile)” formatında kayıt edilmiştir. Bunlarla birlikte üretilen DSM’ler İHA verilerinden üretilen DSM’ler arasındaki X ve Y doğrultulu kaymaları minimize etmek ve daha doğru kar derinlik belirlemek için yeniden eş kayıt edilmiştir.

### 2.3.3. Kar Örtüsü Erimesinin İzlenmesi

Kar örtüsü erimesi gözlemlenen zaman aralığında erime ve süblimleşmenin ortak etkisi sonucunda kar örtüsü alan ve yüksekliğindeki değişim süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada çok yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verisi kullanılarak erime kaynaklı hem kar örtüsü alansal değişimi hem de kar örtüsü derinliklerindeki değişimler belirlenmiştir. Kar örtüsündeki alansal değişim İHA ve yersel lazer tarama verilerinden üretilen ortofotoların piksel tabanlı olarak karlı ve karsız alanların belirlenmesi ile

hesaplanmıştır. Bu sınıflandırmalar karla kaplı piksellerin belirlenmesi için ortofotoların mavi bandına bir eşik değeri ile filtreleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Ortofotoların mavi bandı karla kaplı pikseller, zemin ve kar örtüsünün spektral yansımalarındaki farklılıklar nedeniyle mavi bantta karla kaplı olmayan piksellerden daha keskin şekilde ayırt edilebildiği için kullanılmıştır. Piksellerin sınıflandırılması ArcGIS yazılımı ArcMap modülünde “Raster Calculator” (Spatial Analyst – Map Algebra) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mavi banttaki pikseller eşik değeri uygulanarak şu şekilde sınıflandırılmıştır: piksel değeri eğer belirlenen eşik değerine eşit veya büyükse “karla kaplı” (1) olarak piksel değeri eğer belirlenen eşik değerinden küçükse “karsız piksel” (0) olarak ve piksel değeri sıfıra eşit ise “NoData” (-1) olarak sınıflandırılmıştır. Ancak İHA tabanlı ortofotolarda veri boşlukları (gaps) olmadığı için sınıflandırmalarında “NoData” seçeneği sınıflandırılmaya dâhil edilmemiştir. Çalışmada kar ile kaplı farklı alanlardan seçilen piksellerden yararlanarak belirlenen minimum değer eşik değeri olarak seçilmiştir. Eşik değerleri İHA tabanlı ortofotolar için 138 olarak, yersel lazer tarama tabanlı ortofotolar için ise 250 olarak belirlenmiştir. Görüntü sınıflandırma işlemlerinde doğruluk değerlendirme analizi sınıflandırılan verinin referans bir görüntü ile veya sahada yapılan gözlem verileriyle karşılaştırarak yapılmaktadır. Bu çalışmada doğrulama verisi olarak İHA tabanlı ortofotoların görsel yorumlanmasıyla üretilmiştir. Doğruluk değerlendirme analizleri ArcGIS yazılımı ArcMap modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak “Create Accuracy Assessment Point” (Spatial Analyst-Segmentation and Classification toolset) kullanılarak alan üzerine rastgele dağılan noktalar üretilmiştir. Toplamda İHA verileri için 250 adet, yersel lazer tarama verileri için 100 adet nokta üretilmiştir. Noktaların dağılımı düzenli rastgele olarak tanımlanmıştır. Daha sonra “Compute Confusion Matrix” (Spatial Analyst- Segmentation and Classification toolset) kullanılarak doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu araç kutusu her bir sınıf için “kullanıcı doğruluğu”, “üretici doğruluğu” değerlerini hesaplamaktadır. Bu doğruluk değerleri 0-1 arasında değişmekte olup 1 değeri %100 doğru sınıflandırma anlamına gelmektedir. Bunların yanı sıra “toplam doğruluk” ile “kappa istatistikleri” de hesaplanmaktadır. Kar örtüsü alansal değişimlerin eşik değeri tabanlı sınıflandırılması ile izlenmesi yanı sıra kar örtüsü erimesi kar derinliğinde meydana gelen zamansal değişimin izlenmesinde yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama verilerinin kullanımı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda kar derinlik değerleri karlı dönem DSM verisinden karsız dönem DSM verisinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Bu çıkarma işlemini takiben sınıflandırılan ortofotolardan yararlanarak belirlenen karsız piksellere 0

değeri atanmış olup kar derinliklerindeki değişimin sadece karlı piksellerde değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Saha da yersel kar derinlik ölçümü yapılamadığı için yersel lazer tarama ile elde edilen kar derinliği verisi İHA tabanlı kar derinlik verisinin doğrulanması amacıyla referans veri olarak kullanılmıştır. İHA tabanlı kar derinlik verisindeki hata yersel lazer tarama verisi ile elde edilen kar derinlik verisi arasındaki Z doğrultusunda ortaya çıkan farklılık olarak hesaplanmıştır [340]. Bu kapsamda ortalama hata (ME, mean error), ortalama mutlak hata (MAE, mean absolute error), standart sapma (SD, standard deviation) ve RMSE hesaplanarak değerlendirme yapılmıştır. Bu hata ölçümlerinin formülleri aşağıda verilmektedir:

$$ME(\mu) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (2.3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta h_i|}{n} \quad (2.4)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \mu)^2} \quad (2.5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \quad (2.6)$$

Denklemlerde  $\mu$  ortalama,  $n$  test edilen nokta sayısı (referans verideki karla kaplı piksel sayısına eşittir),  $\Delta h_i$  i. noktadaki kar derinlik farkını göstermektedir. Çalışmada ayrıca bütün zaman serileri boyunca karla pikseller üzerinde tanımlanmış 30 adet nokta kullanılarak İHA ve yersel lazer tarayıcı ile elde edilen kar derinliklerini karşılaştırmak için bağımsız t testi yapılmıştır. Bağımsız t testi aynı sürekli, bağımlı değişkende ilişkisiz gruplar arasındaki ortalamaları karşılaştırmaktadır.

## **2.4. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: KARŞIYAKA MAHALLESİ HEYELANI (ZONGULDAK, DEVREK) VE HİMMETOĞLU KÖYÜ HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİ**

### **2.4.1. Kullanılan Veriler, Yazılımlar ve Yapılan Ön İşlemler**

InSAR zaman serileri analizleri (PSI ve SBAS) ile heyelan izleme ve deformasyonlarının haritalanması Türkiye’de belirlenen iki ayrı heyelan alanında yapılan çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen çalışma alanları Bölüm 2.1 de



tanıtılmıştır. Buna göre belirlenen ilk çalışma alanı olan Zonguldak ili Devrek ilçesinde meydana gelen heyelan alanında uzun dönemli heyelan izleme ve deformasyonlarının haritalanmasına ilişkin bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında kullanılan yöntemlerdeki ana uzaktan algılama verisi olan SAR uydu görüntüleri Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency, ESA) sanal arşivlerinden (Virtual Archive 4, VA4) temin edilmiştir. Temin edilen uydu görüntüleri ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR ve Sentinel-1A uydularına aittir. Bu kapsamda Sentinel-1 uydu görüntüleri hariç diğer uydulara ait görüntüler ESA'ya önerilen ve kabul edilen bir proje çalışması (Proje No: 31237) kapsamında kullanıcı adı ve şifre ile giriş yapılarak <http://eo-virtual-archive4.esa.int> adresinden ücretsiz ve kotasız olarak temin edilmiştir. Sanal arşivler yüksek bant genişliği, geniş depolama alanı ve yazılımı birleştirerek ESA'nın SAR verilerine kolay ve hızlı erişim imkanı sağlayan çevrimiçi (online) arşivlerdir.

Günümüzde ESA'nın sağladığı bu bulut tabanlı (cloud based) sanal arşiv çok büyük miktarda veri barındıran (yaklaşık 90 bin ürün) içermekte ve interferometri, heyelan ve değişim tespiti ilgili çalışma yapan araştırmacılar için erişime açıktır. Çalışma alanı üzerinde ESA sanal arşivinde mevcut olan ve her üç uydu için de (ERS-1, ERS-2 ve Envisat ASAR uyduları) aynı yörüngeden InSAR zaman serileri analizleri için yeterli sayıda veri ham şekilde (raw) Level-0 olarak isimlendirilen seviyede belirlenmiştir. InSAR zaman serileri analizleri yeter sayıdaki SAR uydu verileri sadece azalan (descending) uydu yörüngesindeki 250 numaralı rota (track) için mevcut durumdadır. Bundan dolayı 250 numaralı rota için ERS-1 ve ERS-2 uyduları için 29 adet veri, Envisat ASAR uydusu için de 40 adet veri olmak üzere toplamda 69 adet temin edilerek analizlerde kullanılmıştır (Çizelge 2.4). Bu veriler kabaca 1992 ve 2010 yılları arasındaki 18 yıllık dönemi kapsamaktadır. Arşivden temin edilen ERS-1/2 SAR Level 0 seviye verileri “görüntü modu” tarama modunda alınmış, telemetri verisi içeren, işlenmemiş ve veri işleme için gerekli tüm yardımcı verileri içeren, ayrıca tam SAR veri işleme ile ilgili kullanıcılar için paylaşılan veri tipidir. Arşivden CEOS (Comitte on Earth Observation Satellites, [www.ceos.org](http://www.ceos.org)) veri formatında temin edilen bu tür verilerin isimlendirilmesi ERS-1 için “ER01\_SAR\_IM\_0P” ve ERS-2 için “ER02\_SAR\_IM\_0P” ile başlamaktadır. Örneğin, bir ERS-2 SAR uydusuna ait Level-0 verinin isimlendirilmesi “ER02\_SAR\_IM\_0P\_20010720T083639\_20010720T083656\_IPA\_32669\_0000.CEOS” şeklindedir. Bu isimlendirmede “0P” verinin Level 0 olduğu bilgisini vermektedir.

Çizelge 2.4. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelanı için temin edilen SAR uydu verileri.

NO	UYDU	TARİH	NO	UYDU	TARİH	NO	UYDU	TARİH
1	ERS-1	19-05-1992	31	Envisat-ASAR	16-01-2004	61	Envisat-ASAR	11-09-2009
2	ERS-1	01-09-1992	32	Envisat-ASAR	30-04-2004	62	Envisat-ASAR	16-10-2009
3	ERS-1	19-01-1993	33	Envisat-ASAR	09-07-2004	63	Envisat-ASAR	20-11-2009
4	ERS-1	30-03-1993	34	Envisat-ASAR	13-08-2004	64	Envisat-ASAR	25-12-2009
5	ERS-1	17-08-1993	35	Envisat-ASAR	31-12-2004	65	Envisat-ASAR	29-01-2010
6	ERS-1	23-03-1995	36	Envisat-ASAR	04-12-2005	66	Envisat-ASAR	05-03-2010
7	ERS-1	27-04-1995	37	Envisat-ASAR	11-03-2005	67	Envisat-ASAR	09-04-2010
8	ERS-1	01-06-1995	38	Envisat-ASAR	15-04-2005	68	Envisat-ASAR	18-06-2010
9	ERS-1	06-07-1995	39	Envisat-ASAR	20-05-2005	69	Envisat-ASAR	23-07-2010
10	ERS-1	10-08-1995	40	Envisat-ASAR	29-07-2005	70	Sentinel-1A	16-10-2014
11	ERS-1	14-09-1995	41	Envisat-ASAR	02-09-2005	71	Sentinel-1A	28-10-2014
12	ERS-1	19-10-1995	42	Envisat-ASAR	11-11-2005	72	Sentinel-1A	09-10-2014
13	ERS-2	29-12-1995	43	Envisat-ASAR	24-02-2006	73	Sentinel-1A	21-11-2014
14	ERS-2	08-11-1996	44	Envisat-ASAR	09-06-2006	74	Sentinel-1A	03-12-2014
15	ERS-2	18-12-1998	45	Envisat-ASAR	14-07-2006	75	Sentinel-1A	15-12-2014
16	ERS-2	02-04-1999	46	Envisat-ASAR	05-01-2007	76	Sentinel-1A	27-12-2014
17	ERS-2	07-05-1999	47	Envisat-ASAR	09-02-2007	77	Sentinel-1A	08-01-2015
18	ERS-2	11-06-1999	48	Envisat-ASAR	16-03-2007	78	Sentinel-1A	13-02-2015
19	ERS-2	20-08-1999	49	Envisat-ASAR	25-05-2007	79	Sentinel-1A	09-03-2015
20	ERS-2	24-09-1999	50	Envisat-ASAR	16-11-2007	80	Sentinel-1A	21-03-2015
21	ERS-2	03-12-1999	51	Envisat-ASAR	09-05-2008	81	Sentinel-1A	02-04-2015
22	ERS-2	07-01-2000	52	Envisat-ASAR	22-08-2008	82	Sentinel-1A	14-04-2015
23	ERS-2	17-03-2000	53	Envisat-ASAR	31-10-2008	83	Sentinel-1A	26-04-2015
24	ERS-2	26-05-2000	54	Envisat-ASAR	05-12-2008	84	Sentinel-1A	08-04-2015
25	ERS-2	04-08-2000	55	Envisat-ASAR	09-01-2009	85	Sentinel-1A	20-04-2015
26	ERS-2	13-10-2000	56	Envisat-ASAR	20-03-2009	86	Sentinel-1A	01-06-2015
27	ERS-2	17-11-2000	57	Envisat-ASAR	24-04-2009	87	Sentinel-1A	13-06-2015
28	ERS-2	22-12-2000	58	Envisat-ASAR	29-05-2009	88	Sentinel-1A	25-06-2015
29	ERS-2	20-07-2001	59	Envisat-ASAR	03-07-2009	89	Sentinel-1A	07-07-2015
30	Envisat-ASAR	12-12-2003	60	Envisat-ASAR	07-08-2009	90	Sentinel-1A	19-07-2015
						91	Sentinel-1A	31-07-2015



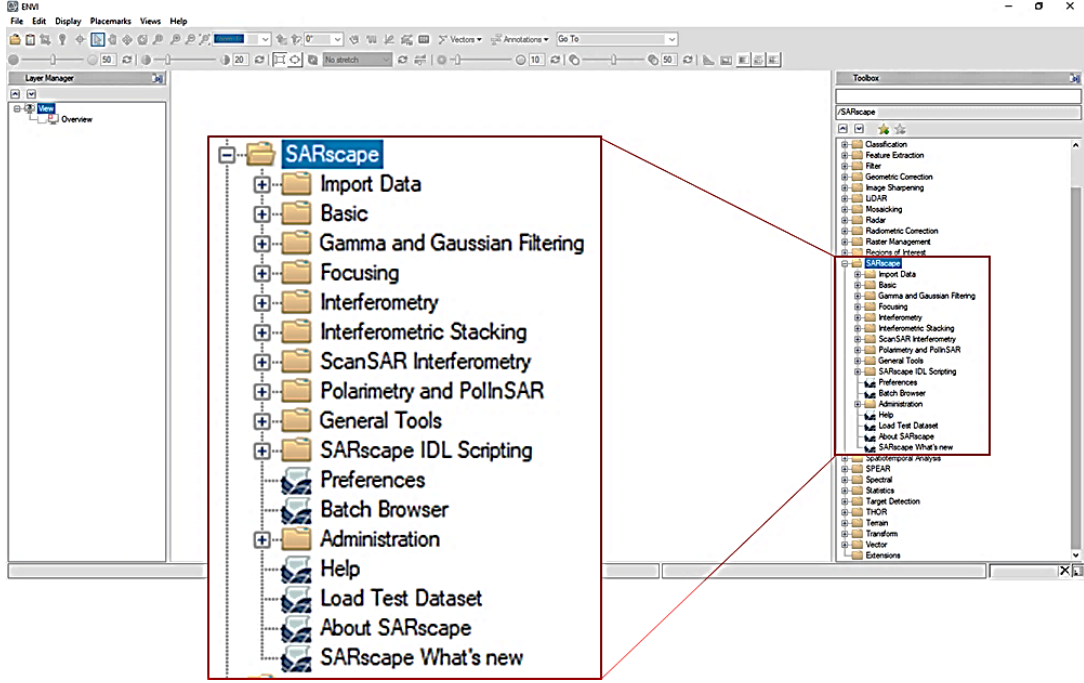
Devamında yer alan “20010720T083639\_20010720T083656” şeklindeki bilgi ise veri alım zaman aralığını tarih ve saat olarak göstermektedir. Yine bu isimlendirmenin devamında yer alan IPA (veya bazı verilerde DPA) verinin hangi veri işleme ve depolama merkezinden geldiği (processing and archiving facility/center, PAF/PAC) bilgisini vermektedir. Bu bilginin devamındaki rakamlar ise yörünge numarası bilgisini vermektedir. Çalışma da analizlerde kullanılmak üzere temin edilen N1 formatındaki Envisat ASAR verilerinde ise isimlendirme ERS-1/2 uydularından farklı olarak “ASA\_IM\_\_OCNIPA20060609\_080718\_000000642048\_00250\_22348\_0385” şeklinde olup benzer şekilde veri alım modu, veri seviyesi, veri alım aralığı bilgisini içermektedir. Ayrıca farklı olarak rota numarası, bağıl ve mutlak yörünge numaraları bilgisini sağlamaktadır. Ayrıca çalışma alanı üzerinde mevcut olan Sentinel-1A uydusuna ait 22 adet görüntü de SLC (single look complex) formatında Copernicus tarafından ücretsiz, bütün ve açık şekilde kullanıcı ile açık erişim merkezi üzerinden paylaşılan arşivlerden temin edilmiştir. Daha önce “Sentinels Scientific Data Hub” olarak bu hizmet ile Sentinel-1, Sentinel-2 ve Sentinel-3 uydularına ait veriler kullanıcılar ile paylaşılmaktadır (<https://scihub.copernicus.eu/>). SAR SLC veri formatı ise ham veriden (yani Level 0) veriden güncel yardımcı parametreler kullanılarak üretilmiş, eğik menzil ve faz bilgisi muhafaza edilen sayısal iki boyutlu görüntülerdir. Genel olarak Level-1 olarak seviyelendirilmekte olan Sentinel-1A uydusuna ait sayısal görüntüler ise “S1A\_IW\_SLC\_\_1SDV\_20141016T155053\_20141016T155121\_002857\_0033A6\_15 B2.SAFE” şeklinde isimlendirilmekte olup “.safe” uzantılıdır. Benzer şekilde uydu adı, tarama modu, veri alım aralığı, yörünge gibi veriye özgü bilgilerden oluşmaktadır. Zonguldak ili Devrek ilçesi heyelan alanı üzerinde toplamda dört ayrı uyduya ilişkin 91 adet veri temin edilmiştir. Tez çalışması kapsamında InSAR zaman serileri analizleri ile heyelan hareketinin izlenmesine ilişkin diğer bir uygulama da Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu Köyünde meydana gelen heyelan alanı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu alan üzerinde de sadece Sentinel-1A uydu verileri SLC formatında Copernicus açık erişim merkezinden toplamda 26 adet SAR verisi 2017 yılının 9 aylık bir dönem için temin edilmiştir (Çizelge 2.5). Arşivlerden temin veriler bilgisayarda oldukça yüksek depolama alanı (GigaByte ölçeklerinde) kaplamaktadır. Bu bölümde ayrıca verileri temin edilen ERS-1, ERS-2, Envisat ve Sentinel-1A yer gözlem uydularına ait bazı bilgiler de verilecektir. Burada bahsedilen her bir yer gözlem uydusu hakkında detaylı teknik bilgiye ESA'nın yer gözlem sistemleri ilgili web sayfasından (<https://earth.esa.int/web/guest/home>) erişilebilmektedir.

Çizelge 2.5. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelanı için temin edilen SAR uydu verileri.

NO	UYDU	TARİH	NO	UYDU	TARİH	NO	UYDU	TARİH
1	Sentinel-1A	04-03-2017	10	Sentinel-1A	20-06-2017	19	Sentinel-1A	06-10-2017
2	Sentinel-1A	16-03-2017	11	Sentinel-1A	02-07-2017	20	Sentinel-1A	18-10-2017
3	Sentinel-1A	28-03-2017	12	Sentinel-1A	14-07-2017	21	Sentinel-1A	30-10-2017
4	Sentinel-1A	09-04-2017	13	Sentinel-1A	26-07-2017	22	Sentinel-1A	11-11-2017
5	Sentinel-1A	21-04-2017	14	Sentinel-1A	07-08-2017	23	Sentinel-1A	23-11-2017
6	Sentinel-1A	03-05-2017	15	Sentinel-1A	19-08-2017	24	Sentinel-1A	05-12-2017
7	Sentinel-1A	15-05-2017	16	Sentinel-1A	31-08-2017	25	Sentinel-1A	17-12-2017
8	Sentinel-1A	27-05-2017	17	Sentinel-1A	12-09-2017	26	Sentinel-1A	29-12-2017
9	Sentinel-1A	08-06-2017	18	Sentinel-1A	24-09-2017			

ERS-1, ERS-2 ve Envisat uydu misyonları ESA'nın dünyamızın atmosfer, okyanus, kara ve buz alanlarında sürekli olarak ve küresel olarak 1992'den itibaren veri sağlayan kutupsal yörüngeli uyduları olup ESA'nın yer gözlem anlamında 20 yıllık mirasını oluşturmaktadırlar. Bunlardan birincisi olan ERS-1 yer gözlem uydusu özellikle mikrodalga spektrumda çevresel gözlem amacıyla ESA tarafından yer gözlem alanından ilk kez geliştirilmiş misyonudur. ERS-1 uydusu 17 Temmuz 1991 tarihinde Fransız Guyanası Kourou'nun Ariane-4 aracında fırlatılmış güneş senkronize kutupsal yörüngeli uydudur. ERS-1 uydusu misyonunu 9 yıllık aktif görev süresi sonrasında 10 Mart 2000 yılında bütünleşik vaziyet kontrol sisteminde (onboard attitude control system) meydana gelen arıza sonucu tamamlamıştır. ERS-2 uydusu ise 21 Nisan 1995 tarihinde ERS-1 misyonunun sürdürülmesi amacıyla (ki bu karar ESA tarafından 1989 yılında alınmıştır.) devam ettirilmesi amacıyla geliştirilmiştir. ERS-2 uydusu bundan dolayı ERS-1 uydusunun önemli ölçüde kopyası niteliğini taşımaktadır. Sadece atmosferdeki kimyasal bileşimi ölçebilmek için geliştirilen GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) isimli yeni aygıt eklenmiştir. ERS-1 uydusu görevini 2000 yılında tamamladığı için ERS-2 uydusu ile örtüşen bir dönem boyunca iki uydu birlikte veri toplamışlardır. ERS-2 uydusu da görevini Eylül 2011'de tamamlamıştır. ERS uydu misyonları 14 yıllık sürede 1,5 milyondan fazla çerçevede görüntü alımı gerçekleştirmiştir. Geliştirilen bu uydular yerden yaklaşık 785 km yükseklikten 35 gün aralıklarla yörüngesini tamamlayacak şekilde veri sağlamaktadır. Ayrıca SAR interferometri uygulamaları kapsamında ERS-1 ve ERS-2 uydularının birlikte veri topladığı dönem (Tandem Misyon modu olarak ifade edilmektedir) içerisinde ise iki uydu arasında aynı yerden geçiş zaman farkı 24 saat olacak şekilde gerçekleşmiştir. ERS misyonlarını takiben yine ESA tarafından 1 Mart 2002'de ERS sistemlerinin mirasına uygun zenginleştirilmiş araçlar taşıyacak şekilde Envisat

isimli üzerinde 10 adet araç bulunduran bir uydu geliştirilmiştir. Üzerindeki en önemli araçlarından birisi olan ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) ERS uydu misyonları ile uyumlu olarak veri bütünlüğü sağlamaktadır. ESA tarafından geliştirilen uydu misyonları uzun dönemli veri bütünlüğü sağlanması adına mikrodalga aralığının C bandında (5,3 GHz merkez frekanslı ve 5,6 cm dalga boyu) çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Sentinel-1 uydusu ise yine C band SAR veri sürekliliğinin ERS ve Envisat misyonlarından itibaren devam ettirilmesi amacıyla C-SAR sensör taşıyan ESA tarafından geliştirilmiş en yeni nesil yer gözlem uydusudur. Temel amacı kara ve okyanus gözlem olan Sentinel-1 misyonu Sentinel-1A ve Sentinel-1B olmak üzere iki uydu takımından oluşmaktadır. Bu uydu takımlarından Sentinel-1A 3 Nisan 2014 tarihinden itibaren, Sentinel-1B ise 25 Nisan 2016 tarihinden itibaren yerden 693 km yükseklikte, güneş senkronize kutupsal yörüngede 12 gün tekrar aralığıyla veri alımına devam etmektedir. Sentinel-1A ve 1B uyduları arasındaki aynı noktadan geçme zaman aralığı ise 6 gündür. Uyduların öngörülen ömürleri 7 yıldır. Temin edilen hem Level-0 ham veriler hem de Level-1 SLC formatındaki verilere uygulanan ön işlemler ile birlikte InSAR zaman serileri analizleri kapsamında yapılan PSI ve SBAS yöntemlerinin uygulamalarında HARRIS Geospatial Solutions tarafından ticari lisanslı olarak kullanıcılara sağlanan ENVI 5.3 yazılımı ve SARscape 5.2 modülü kullanılmıştır (Şekil 2.11). ENVI Sarscape modülü kullanıcılara mevcut bütün uzay ve hava platformlarından temin edilmiş SAR verilerinin işlenmesi ve analizine imkân veren bir yazılımdır. ENVI Sarscape içerisinde de interferometri analizlerinde kullanılan iki temel modülü bulunmaktadır: “Interferometry” ve “Interferometric Stacking” Modülleri. “Interferometry” modülü kullanıcılara hem InSAR teknikleri ile DEM üretme hem de DInSAR teknikleri ile deformasyon haritaları üretmeye imkan sağlamaktadır. Sarscape modülü ile hem 2 geçiş interferometri analizleri yapmak, hem de 2, 3 ve 4 geçiş diferansiyel interferometri analizleri yapmak mümkün olabilmektedir. “Interferometric Stacking” modülü ise kullanıcılara SAR veri yığınları kullanarak hem nokta tabanlı (PSI gibi) hem de alan tabanlı (SBAS gibi) zaman serileri analizlerinin yapılmasına izin vermektedir. Zonguldak ili Devrek ilçesinde meydana gelen heyelan alanı için temin edilen Level-0 seviye ham SAR verilerinin interferometrik analizlerde kullanılabilmesi için SLC formatında olmaları gerekmektedir. Bundan dolayı ilk olarak Level-0 olarak temin edilen verilerin odaklanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sarscape modülü ile bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle temin edilen görüntüler ERS-1 ve ERS-2



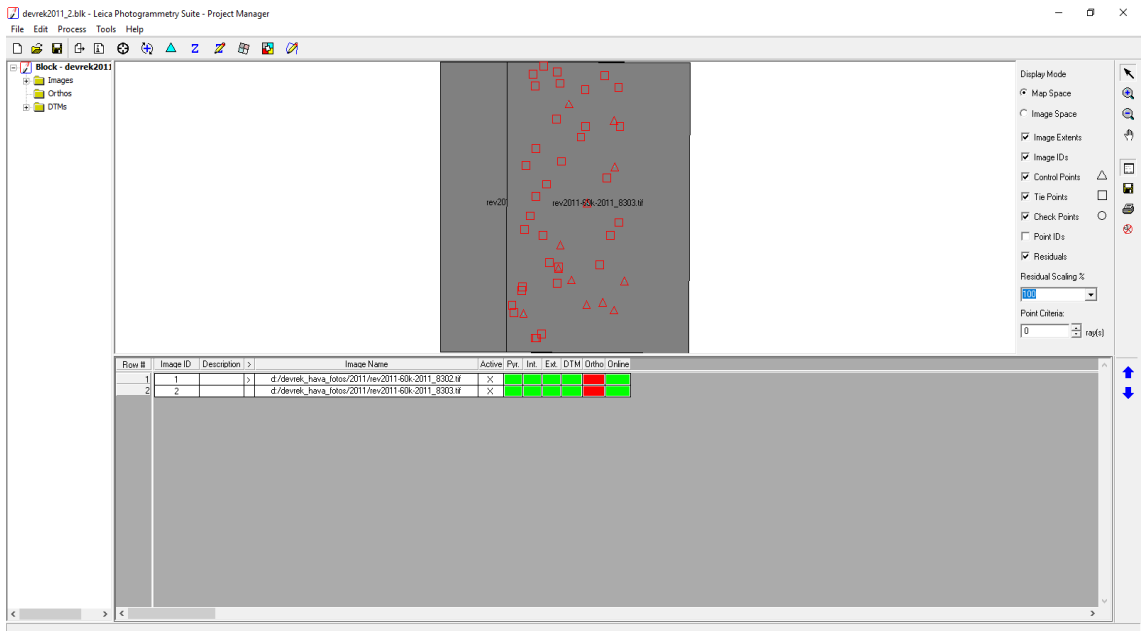
Şekil 2.11. ENVI yazılımı ve Sarscape modülü ekran arayüz görüntüsü.

uyduları için CEOS veya ENVISAT formatta olmaları gerekmektedir. Bunun dışında her bir görüntüye ait yörünge bilgilerini içeren yardımcı verilerin temin edilerek bu aşamada kullanılması gerekmektedir. ERS uyduları için yörünge dosyaları PRC (Precise: Hassas) ve PRL (Preliminary: Öncül) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu dosyalar ESA'nın "Earth Observation Help Desk" hizmeti aracılığıyla temin edilerek Sarscape modülünde kullanılmak üzere PRC/PRL isimli klasöre kayıt edilmiştir. Envisat ASAR görüntüleri ise "IM: Image Mode" görüntüleme modunda temin edildiği için Envisat ASAR IM için mevcut hazırlanmış modül kullanılarak yapılmıştır. Aynı şekilde Envisat ASAR görüntülerinin odaklanması için de yörünge bilgilerini sağlayan yardımcı dosyalar ESA'dan temin edilmiştir. Bu dosyaları ise DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) tarafından VOR (Verified ORbits) ve POR (Precise ORbits) şeklinde sağlanmaktadır. Mevcut görüntüler için arşivde mevcut her iki tip dosyalar temin edilerek Sarscape modülünde kullanılmak üzere DORIS isimli klasöre kayıt edilmiştir. ERS ve Envisat uydularına ait ham görüntülerden SLC formatında SAR görüntüler üretildikten sonra zaman serisi analizlerine çok sayıda veri dâhil edildiği ve her bir görüntü bilgisayar depolama birimi içerisinde oldukça büyük alan kapladığı için çalışma alanını kapsayan bir bölge için görüntülere kesip çıkarma işlemi yapılmıştır. Daha sonra kesilen görüntüler interferometrik zaman serileri analizlerinde girdi veri olarak kullanılmıştır. Daha önce de bahsedildiği Sentinel-1A uydusuna ait görüntüler

zaten arşivden SLC formatında temin edildiği odaklanma işlemi yapılmaya gerek olmamıştır. Sadece veri boyutu azaltılarak daha hızlı analizler yapabilmek için çalışma alanını kapsayan bir bölge kesip çıkarılmıştır. Level-0 olarak temin edilen görüntüleri odaklanma işlemi uygulanmak suretiyle temin edilen SLC görüntüleri ENVI Sarscape ile daha sonraki analizlere uygun formatta üretilmektedir. Ancak zaten SLC olarak temin edilen Sentinel-1A uydu görüntülerinin ENVI Sarscape modülü tarafında okunabilecek uygun formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu aşamada da Sentinel uydusuna ait yörünge bilgilerini içeren yardımcı verilere gereksinim duyulmaktadır. Sentinel uydusuna ait yardımcı veriler ise ESA tarafından sağlanan arşivden temin edilmiştir. Interferometrik analizlerde diferansiyel interferometri için hem topografya bilgisinden sanal interferogramlar üretmek hem de eğik menzil koordinatlarında olan SAR görüntülerinin coğrafi koordinat sisteme dönüştürülmesi için DEM verisine sahip olunması gerekmektedir. Bu kapsamda ENVI Sarscape modülü internet bağlantısı olması durumunda çalışma alanına ait DEM verisini (SRTM gibi) temin edebilmeye imkân vermektedir. Ancak bu çalışmada Zonguldak ili Devrek ilçesi için 1/25 000 ölçekli topoğrafik haritadan üretilen 10 m yersel çözünürlüklü DEM verisi üretilerek kullanılmıştır. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyündeki heyelan alanı için ise 30 m yersel çözünürlüklü SRTM-3 V2 DEM verisi temin edilmiştir. Zonguldak ili Devrek ilçesinde meydana gelen heyelan alanı için ayrıca Harita Genel Müdürlüğü'nden (HGM) stereo hava fotoğrafları temin edilmiştir. HGM arşivlerinde alan üzerinde mevcut olan 1944, 1948, 1982, 1984, 1998 ve 2011 yıllarına ait toplam 20 adet fotoğraf mevcuttur. Bunlardan 2011 yılına ait hava fotoğrafı sayısal kamera ile alınmışken diğerleri analog kamera ile alınmış ve taranarak sayısallaştırılmış verilerdir. Ayrıca 2011 yılına ait hava fotoğrafı renkli iken diğerleri siyah-beyaz renklidir. Temin edilen hava fotoğraflarına ait bilgiler Çizelge 2.6'da verilmektedir. Temin edilen bu hava fotoğrafları ile sahanın zamansal olarak değişimi tespit edilmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda özellikle DEM üretimine imkân veren (örneğin, 2011 yılına ait veri) stereo hava fotoğraflarından yararlanarak elde edilen deformasyon haritası SAR verileri ile tespit edilen deformasyonların doğrulanması amacıyla kullanılmıştır. Hava fotoğraflarının işlenmesinde Leica Geosystems, Leica Photogrammetry Suite 9.2 yazılımı kullanılarak sayısal fotogrametri uygulamaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.12). Sayısal fotogrametrik yöntem ile DEM üretilmesi sürecinde gerekli olan YKN'ler ise araziden Satlab SL600 cors-GPS cihazı ile santimetre (<5 cm) doğruluklarda ölçülmüştür. Bu kapsamda 35 adet YKN ölçümü gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 2.6. HGM'den temin edilen hava fotoğraflarına ait bilgiler.

Sıra No	Fotoğraf Numarası	Ölçek	Uçuş Yılı	Tipi	Boyutu
1	108-731	1 / 35.000	1944	Siyah-Beyaz	19*19
2	108-732	1 / 35.000	1944	Siyah-Beyaz	19*19
3	108-733	1 / 35.000	1944	Siyah-Beyaz	19*19
4	223-570	1 / 35.000	1948	Siyah-Beyaz	19*19
5	223-571	1 / 35.000	1948	Siyah-Beyaz	19*19
6	223-572	1 / 35.000	1948	Siyah-Beyaz	19*19
7	223-573	1 / 35.000	1948	Siyah-Beyaz	19*19
8	3613-65	1 / 35.000	1982	Siyah-Beyaz	23*23
9	3613-66	1 / 35.000	1982	Siyah-Beyaz	23*23
10	3613-67	1 / 35.000	1982	Siyah-Beyaz	23*23
11	3703-3410	1 / 8.000	1984	Siyah-Beyaz	23*23
12	3703-3411	1 / 8.000	1984	Siyah-Beyaz	23*23
13	3703-3412	1 / 8.000	1984	Siyah-Beyaz	23*23
14	3703-3413	1 / 8.000	1984	Siyah-Beyaz	23*23
15	4524-2871	1 / 35.000	1998	Siyah-Beyaz	23*23
16	4524-2872	1 / 35.000	1998	Siyah-Beyaz	23*23
17	4524-2873	1 / 35.000	1998	Siyah-Beyaz	23*23
18	REV2011-8301	1 / 60.000	2011		
19	REV2011-8302	1 / 60.000	2011		
20	REV2011-8303	1 / 60.000	2011		



Şekil 2.12. Leica photogrammetry süite 9.2 arayüz görüntüsü.

Temin edilen hava fotoğraflarının yanısıra hem Zonguldak ili Devrek ilçesinde meydana gelen heyelan hem de Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyünde meydana gelen heyelan alanı üzerinde İHA ile uçuş yapılarak yüksek doğruluk ve çözünürlüklü veri temin edilmiştir. Bu kapsamda DJI Mavic Pro model İHA platformu kullanılarak Devrek heyelanı üzerinde 1 adet, Himmetoğlu köyü heyelanı üzerinde 2 adet uçuş gerçekleştirilerek veri alınmıştır. DJI Mavic Pro modeli satışa hazır İHA (Şekil İHA) bataryası takılı iken 743 gr ağırlığa sahip pervaneleri katlanabilir olan ve çanta içerisinde taşınabilen bir platformdur. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) İHA yönetmeliğine göre İHA-1 (500 gr - 4 kg aralığında) kategorisinde tanımlanmaktadır. Üzerinde engel algılayıcı 5 adet sensör bulunmaktadır. Maksimum 15 m/s hızlarda uçuş gerçekleştirilebilen DJI Mavic pro üzerinde entegre 1/2,3 inçlik, 12,3 mega piksel (MP) çözünürlüğünde CMOS sensör barındırmaktadır (Şekil 2.13). Bu sensör ile 12MP DNG ve RAW fotoğraflar çekilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen uçuşlarda görüntüler “.jpeg” formatında alınmıştır. DJI Mavic Pro model İHA, üzerinde şarj, irtifa, menzil gibi teknik bilgileri kullanıcıya gösteren LCD ekrana sahip bir kumandaya akıllı cep telefonu veya tablet bilgisayar bağlanarak kontrol edilebilmektedir (Şekil İHA). Devrek heyelanı üzerinde 23 Temmuz 2018 tarihinde uçuş gerçekleştirilebilmişken, Himmetoğlu köyü heyelanı üzerinde 17 Aralık 2017 tarihinde gerçekleştirilebilmiştir. Yapılan İHA uçuşlarına ait bazı bilgiler Çizelge 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.13. Kullanılan DJI Mavic Pro Model İHA platformu.

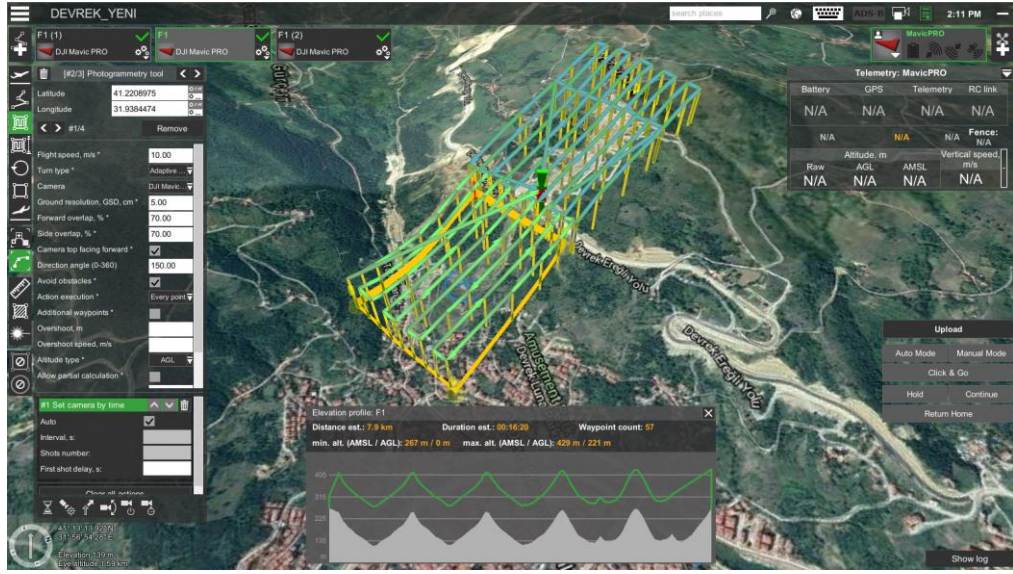
Cizelge 2.7. Gerçekleştirilen İHA uçuşlarına ilişkin bilgiler.

Uçuş No	Uçuş Tarihi	Uçuş Yeri	Alınan Görüntü Sayısı	Yer Örnekleme Mesafesi (cm)	Ortalama Uçuş Yüksekliği (m)
1	17.12.2017	Himmetoğlu Heyelanı	82	3	100
2	23.07.2018	Devrek Heyelanı	559	5	160

İHA uçuşları UgCS (Universal Ground Control Software) versiyon 2.13.519 yazılımı kullanılarak planlanmıştır (Şekil 2.14-Şekil 2.15). Yazılım ile hazırlanan uçuş planları Android tabanlı çalışan UgCS for DJI yazılımı ile hava aracına gönderilerek otonom uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu uçuşlarda Devrek heyelanı üzerinde 5 cm yer örneklem mesafesine sahip görüntü alınacak şekilde yaklaşık yerden 160 m yükseklikten ortalama 11-15 dk süren üç ayrı uçuş yapılmıştır. Uçuşlarda ön ve yan bindirme oranları %70 olarak belirlenmiştir. Himmetoğlu köyü heyelan alanı üzerinde de 3 cm yer örnek mesafesine sahip görüntü alınacak şekilde yaklaşık yerden 100 m yükseklikten uçuşlar gerçekleştirilmiştir. Himmetoğlu köyü heyelan alanında ilk gerçekleştirilen İHA uçuşunda sadece heyelanın meydana geldiği alana ait veri alımı hedeflendiği için tek uçuş yapılarak daha küçük bir alanda çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilen uçuş ortalama 10-15 dk bir süreyi kapsamaktadırlar. Alanlarda uçuşlar gerçekleştirilmeden önce YKN ölçümleri yapılmıştır. Bu kapsamda Devrek heyelanı üzerinde 10 adet, Himmetoğlu köyü heyelanı alanı üzerinde İHA uçuşu için 6 adet YKN Satlab SL600 cors-GPS cihazı kullanılarak ölçülmüştür. İHA ile alınan görüntülerin işlenerek yüksek çözünürlüklü ve doğruluklu DEM ve ortofoto görüntü üretmek amacıyla Agisoft PhotoScan Professional versiyon 1.3.2 kullanılmıştır. Photoscan yazılımında kullanılan SfM algoritmasının iş akışı 1) görüntü eşleştirme ve ışın demetleri ile dengeleme, 2) YKN'lerin dahil edilmesi ve yoğun geometrinin oluşturulması ve 3) tekstür haritalama ve SYM/ortofoto üretiminden oluşmaktadır. İHA ile alınan görüntülerin Photoscan yazılımına eklenmesinden sonra JPEG-EXIF başlık dosyalarında depolanan GPS bilgisinden yararlanarak görüntü yönlendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Photoscan yazılımı görüntüleri otomatik olarak konumlandırarak örtüşen görüntülerdeki öznelikler (feature) eşleştirmektedir. Daha sonra seyrek (sparse) nokta bulutunun oluşturulması için ışın demetleri ile dengeleme işlemi yapılmış ve elde edilen nokta bulutundan yanlış noktalar (outliers), model oluşturma hatalarının önlenmesi için silinmiştir. İkinci işlem adımında, Cors-GPS ile alınan YKN'ler tanımlanmış ve kamera



konumları tanımlanan YKN'ler aracılığıyla optimize edilmiştir. Bu işlem sonucu elde edilen ortalama karesel hata 4 cm olarak elde edilmiştir. Böylece İHA üzerindeki GPS'e göre (ki metre ölçeğinde konum hassasiyeti sağlamaktadır) santimetre hassasiyetinde yönlendirme sağlanmıştır. Bu işlemin ardından yoğun 3B model oluşturulmaktadır. Daha sonra tekstür haritalama yapılarak oluşturulan modele fotoğraflara ait gerçek renkler giydirilmektedir. Bütün bu işlemlerin ardından Photoscan yazılımında SYM (.tiff formatında) ve ortofoto mozaik görüntüler elde edilebilmektedir.



Şekil 2.14. Devrek Karşıyaka mahallesi heyelan alanında gerçekleştirilen İHA uçuşuna ait uçuş planı görüntüsü



Şekil 2.15. Himmetoğlu köyü heyelan alanında gerçekleştirilen İHA uçuşuna ait uçuş planı görüntüsü

## 2.4.2. InSAR Zaman Serileri Analizlerinin Uygulanması

Çalışma kapsamında seçilen ve uygulamaları gerçekleştirilen InSAR zaman serileri analizleri için PSI ve SBAS yöntemleri uygulanmıştır. PSI ve SBAS yöntemleri ENVI Sarscape modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak uygulanan PSI yöntemi bu bölümde açıklanacaktır. Daha sonra SBAS yöntemi hakkında bilgi verilecektir.

### 2.4.2.1. PSI yöntemi ile Heyelan İzleme ve Deformasyon Haritalama

Tez çalışması kapsamında PSI analizi ile heyelan izleme ve deformasyon haritalama uygulaması hem Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşiyaka mahallesinde meydana gelen heyelan alanı üzerinde çok uzun dönemli dönem için (1992-2015 yılları arasında) ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR ve Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri kullanılarak, hem de Bolu ili Göynük ili Himmetoğlu köyünde meydana gelen heyelan alanı üzerinde 2017 yılının 9 aylık dönemde Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. ENVI Sarscape modülü kullanılarak gerçekleştirilen PSI analizi uygulamasında temel olarak aşağıdaki işlem adımları uygulanmaktadır [378]:

1. Bağlantı Grafik Oluşturma (Connection Graph Generation)
2. İlgi Alanının Belirtilmesi (Area of Interest Definition) (Opsiyonel)
3. Interferometrik İş akışı (Interferometric Workflow)
  - 3.1. Eş Kayıt etme (Co-registration)
  - 3.2. Interferogramların üretilmesi ve dünyanın düz olduğu kabul edilerek hesaplanan referans fazın silinmesi (Interferogram generation and Flattening)
  - 3.3. Ortalama güç görüntüsü ve genlik dağılım indeksinin oluşturulması (Mean power image and amplitude dispersion index generation) (MuSigma)
4. Inversion: İlk Adım (Inversion: First Step)
  - 4.1. Koherens, hız ve artık topoğrafya hesaplama (Coherence, velocity and residual topography estimation)
5. Inversion: İkinci Adım (Inversion: Second Step)
  - 5.1. Atmosfer deseni yok etme (Atmosphere pattern removal)
  - 5.2. Koherens, hız ve artık topoğrafya hesaplama (Coherence, velocity and residual topography estimation)

- 5.3. Yerdeğiştirme bileşen hesaplama (Displacement component estimation)
6. Coğrafi Kodlama (Geocoding)
  - 6.1. Hız ve hassas sonuçların geo kodlanması (Velocity and precision results geocoding)
  - 6.2. Yerdeğiştirme geo kodlanması (Displacement geocoding)

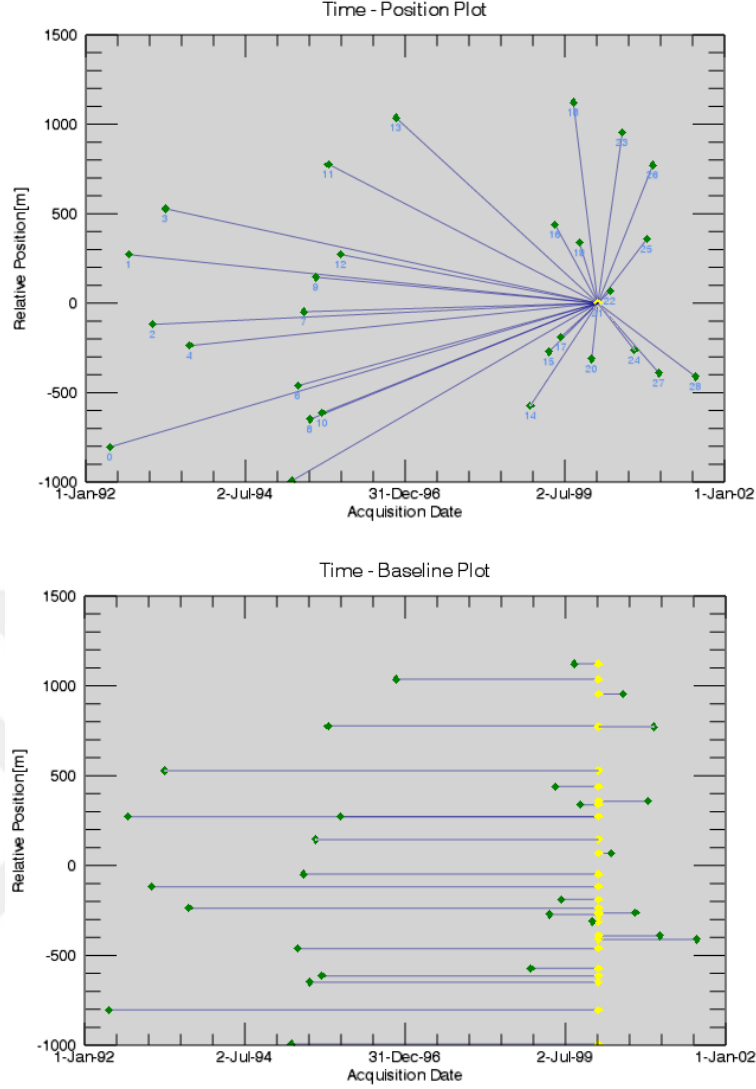
PSI analizinin yukarıda belirtilen işlem adımlarına başlamadan önce ENVI ve Sarscape modülünün ayarları kullanılacak veri tipine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Tez kapsamında gerçekleştirilen uygulamalarda belirlenen alanlar öncelikle radyometrik ve interferometrik faz açısından zaman serileri boyunca stabil kalacak saçıcıların mevcut olduğu (orman örtüsünün olmadığı veya kentsel alanlar gibi) alanlar olduğu için seçilmiştir. Bu hepsinden önce PSI analizinin uygulanabilmesi için oldukça önemli bir kriterdir. Ayrıca seçilen alan üzerinde PSI analizi için önemli olan yeter sayıda girdi SAR görüntüsünün mevcut olması da gerekmektedir. Çünkü kullanılan görüntü sayısı piksel koherens hesaplaması için ve yeterli doğrulukta kalıcı saçıcıların belirlenebilmesi için önem arz etmektedir. Yeterli sayıda görüntü kullanılarak analiz yapılmaması durumunda bütün alan üzerinde gereğinden fazla sayırsa PS elde edilmesi yanı sıra yanlış yerdeğiştirme hesaplamaları yapılmasına sebep olacaktır. Genel olarak PSI analizleri için kullanılması gereken SAR görüntülerinin en az 20 tane olması gerektiği ifade edilmektedir [378].

PSI analizi işlem adımlarından birincisi olan bağlantı grafik oluşturma aşamasında Sarscape modülünde girdi olarak tanımlanan SLC formatındaki SAR görüntülerinden çoklu interferogram çiftleri oluşturulmasında ana görüntü ile yardımcı görüntülerin belirlenerek bunlar arasındaki bağlantı ağının oluşturulması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu adımda tanımlanan N adet görüntüden maksimum N-1 adet interferogram çifti oluşturulmaktadır. Bu aşamada ana görüntü tanımlanan girdi SAR görüntüler içerisinde otomatik olarak yazılım tarafından belirlenmektedir. Aynı zamanda kullanıcı tarafından da ana görüntü seçimi mümkün olabilmektedir. Ancak kullanıcı tarafından ana görüntü seçimi kesin surette gerekli bir durum değildir. Çünkü final sonuçlar, üzerinde bu seçimden etkilenmemektedir [382]. Hatta kullanıcı tarafından ana görüntü seçimi maksimum adette interferogram çifti elde edememe riski de içermektedir. Bu adımda belirlenen bağlantılar yazılım tercihlerinde tanımlanan konumsal ana hat mesafe değerleri içinde oluşturulmaktadır. Önceden tanımlı olarak yazılımda konumsal ana hat mesafesi kritik ana hat mesafesinin %500'ü olacak

şekildedir. Yani SAR görüntüleri arasındaki ana hat mesafesinin bu eşik değerini aşması durumunda interferogram çiftleri oluşturulamayarak PSI analizinden çıkarılacaktır.

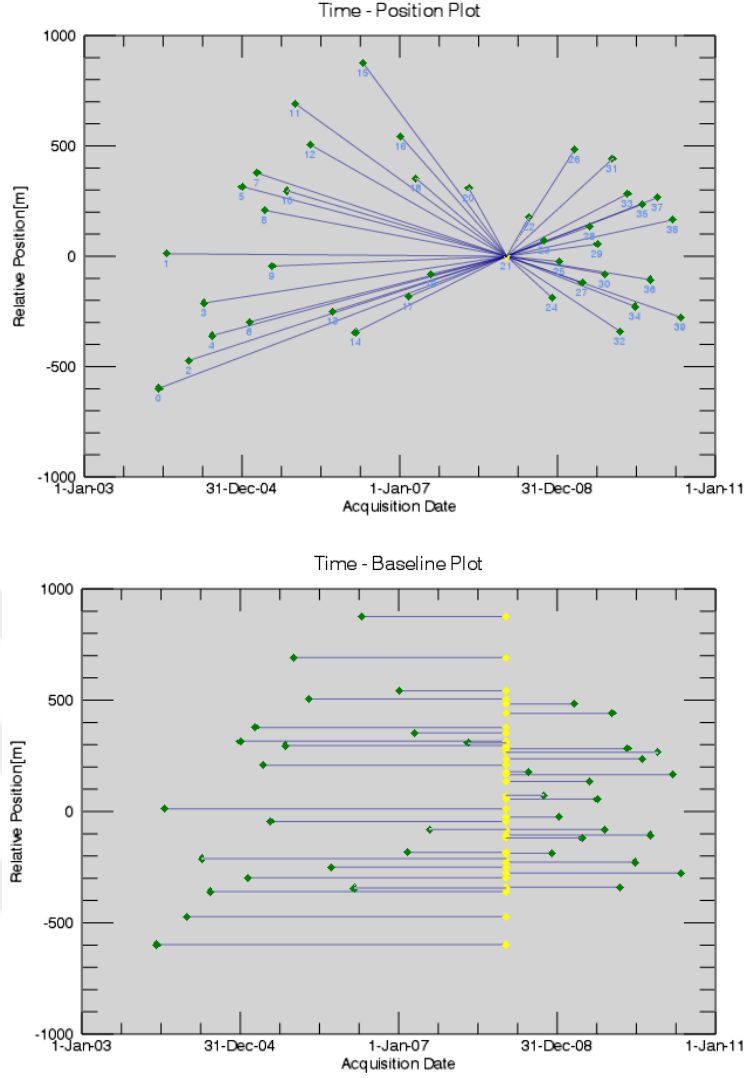
Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşiyaka mahallesinde meydana gelen heyelan alanı üzerinde kullanılan ERS-1 ve ERS-2 uydu görüntüleri ile ilk analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 29 adet görüntü analize dâhil edilmiştir. Bu görüntülerden 7 Ocak 2000 tarihli görüntü ana görüntü olarak yazılım tarafından seçilmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen zaman-pozisyon grafiği (time-position plot) ve zaman-ana hat mesafesi grafiği (time-baseline plot) Şekil 2.16'da verilmektedir. Yazılım ayrıca tanımlanan bilgisayar konumunda veri işleme sonucu oluşturulan klasörleri saklamaktadır. Bu klasör içerisinde PSI analizi ile yapılan her bir işlem adımına ait bir alt klasör de oluşturmakta ve üretilen verileri buralarda saklamaktadır. ERS-1 ve ERS-2 görüntüleri ile gerçekleştirilen ilk işlem adımına ait klasör içerisinde belirlenen görüntü çiftlerine ait ortalama ana hat mesafesi bilgileri ile hız ve yükseklik hassasiyet bilgileri burada oluşturulan metin dosyasından öğrenilebilmektedir. Buna göre seçilen ana görüntü referans alınarak yardımcı görüntüler arasındaki ana hat mesafesi 1.122,22 m ile -994,05 m arasında değişen farklı değerler almaktadır (Şekil 2.16). Seçilen ana görüntü referans alındığında yardımcı görüntüler ile arasındaki maksimum zamansal fark ise 3.094 gün olarak elde edilmiştir. Aynı alan üzerinde ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait SAR görüntülerinin devamı olarak temin edilen 40 adet Envisat ASAR uydu SAR görüntülerine aynı işlem uygulanmıştır. Envisat ASAR görüntüleri arasından 9 Mayıs 2008 tarihli görüntü ana görüntü olarak yazılım tarafından otomatik olarak seçilmiştir.

Buna bağlı olarak elde edilen zaman-pozisyon grafiği ve zaman-ana hat mesafesi grafiği Şekil 2.17'de verilmektedir. Seçilen ana görüntü referans alınarak belirlenen ana hat mesafe değerleri Envisat ASAR uydu SAR görüntüleri için 875,54 m ile -598,46 m arasında değişmektedir (Şekil 2.17). Seçilen ana görüntü referans alındığında yardımcı görüntüler ile arasındaki maksimum zamansal fark 1.610 gün olarak elde edilmiştir. Yine Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşiyaka mahallesinde meydana gelen heyelan alanı üzerinde ERS-1, ERS-2 ve Envisat ASAR uydularına ait SAR görüntülerinin devamı olarak temin edilen 22 adet Sentinel-1A uydu SAR görüntülerine aynı işlem uygulanmıştır. Envisat ASAR uydusuna ait son görüntü 23 Temmuz 2010 tarihli olup Sentinel-1A uydusuna ait ilk görüntü 16 Ekim 2014 tarihlidir.



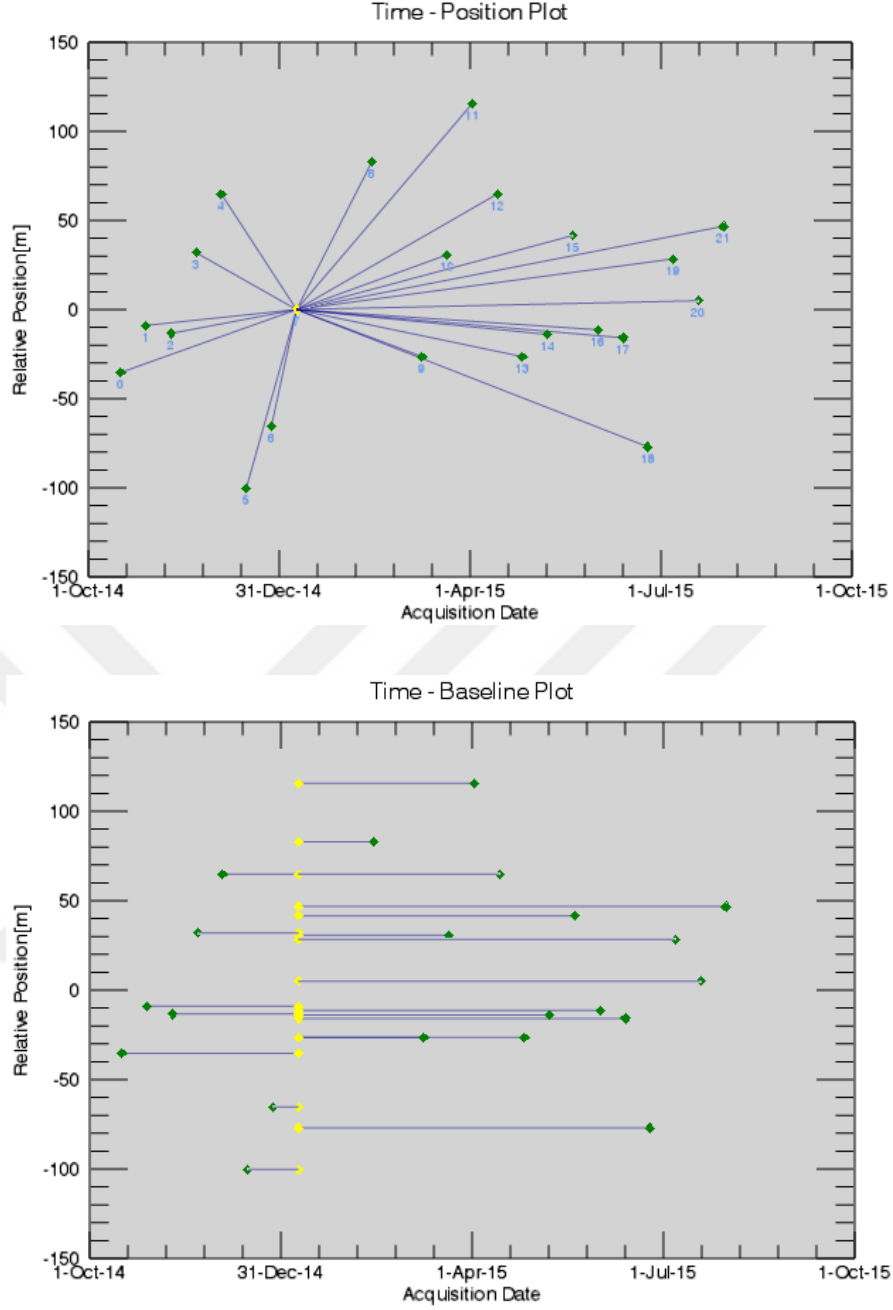
Şekil 2.16. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında ERS-1 ve ERS-2 uydusu SAR görüntülerinin birlikte kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri

Envisat ASAR uydusu ile Sentinel-1A uydusundan temin edilen SAR görüntüsü arasında 1.546 gün (yaklaşık 4,2 yıl) için veri temin edilememiştir. Çünkü ESA arşivlerinde Envisat ASAR uydusuna ait daha sonraki zamanlar için veri bulunmazken, Sentinel-1A ise 3 Nisan 2014 tarihinden itibaren misyonuna başlamıştır. Ancak yine de heyelan 16 Temmuz 2015 tarihinde tetiklendiği için heyelana yakın dönemler boyunca meydana gelen yerdeğiştirmelerin yakalanabilmesi için Sentinel-1A verisi de analize dâhil edilmiştir. Sentinel-1A görüntüleri arasından 8 Ocak 2015 tarihli görüntü ana görüntü olarak yazılım tarafından otomatik olarak seçilmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen zaman-pozisyon grafiği ve zaman-ana hat mesafesi grafiği Şekil 2.18’de verilmektedir. Seçilen ana görüntü referans alınarak belirlenen ana hat mesafe değerleri Sentinel-1A uydusu SAR görüntüleri için 115,60 m ile -77,05 m arasında değişmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.17. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında Envisat ASAR uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri.

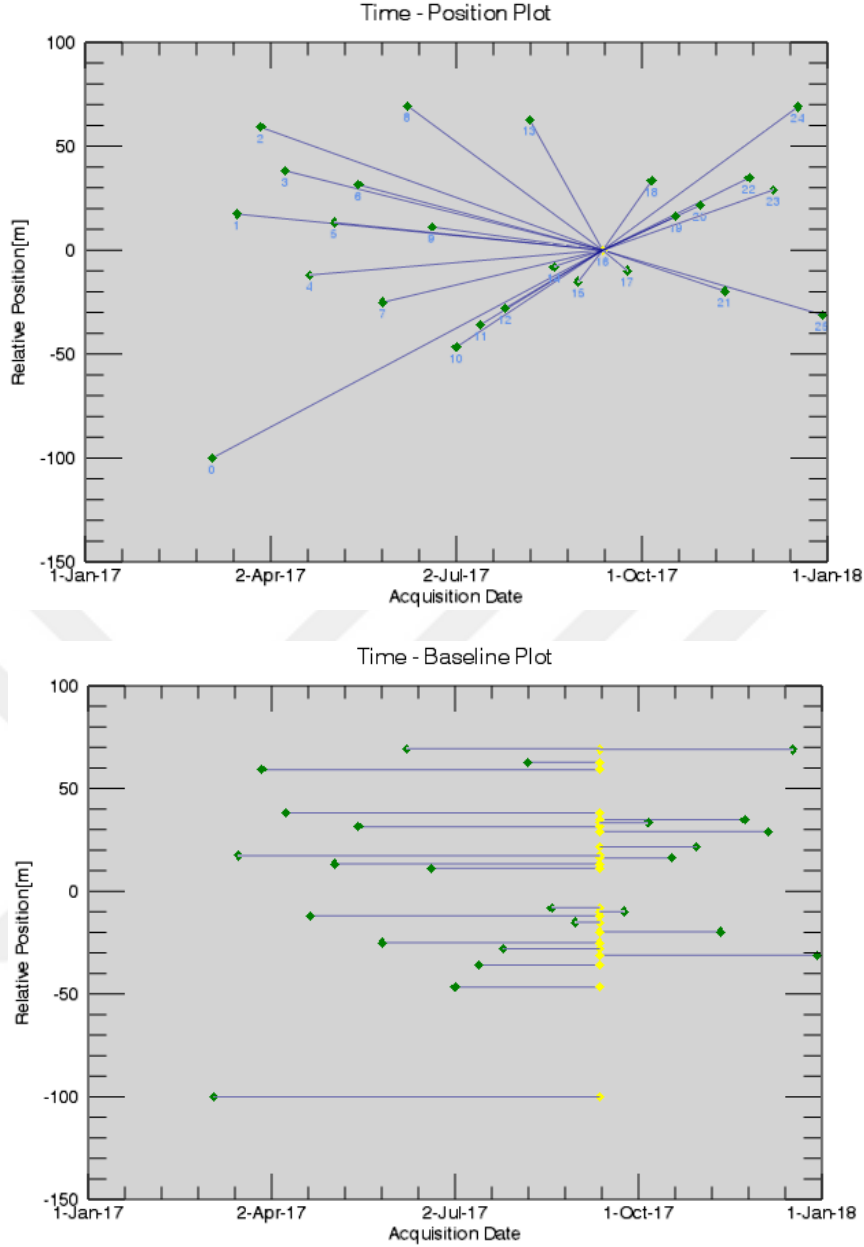
Seçilen ana görüntü referans alındığında yardımcı görüntüler ile arasındaki maksimum zamansal fark 204 gün olarak elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında PSI analizi daha önce de belirtildiği gibi Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyünde meydana gelen heyelan alanı üzerinde de Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda toplamda 26 adet SAR verisi 2017 yılının 9 aylık bir dönem için temin edilmiştir. Temin edilen görüntüler arasından 12 Eylül 2017 görüntü ana görüntü olarak yazılım tarafından otomatik olarak seçilmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen zaman-pozisyon grafiği ve zaman-ana hat mesafesi grafiği Şekil 2.19'da verilmektedir. Seçilen ana görüntü referans alınarak belirlenen ana hat mesafe değerleri Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri için 69,45 m ile -100,08 m arasında değişmektedir (Şekil 2.19).



Şekil 2.18. Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri

Seçilen ana görüntü referans alındığında yardımcı görüntüler ile arasındaki maksimum zamansal fark 192 gün olarak elde edilmiştir. Elde edilen veriler bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi çalışma alanını kapsayacak şekilde görüntü kesme işlemi uygulandığı için PSI analizinin ikinci adımı olan ve zaten opsiyonel olan İlgi Alanının Belirtilmesi aşaması atlanmıştır. Dolayısıyla bundan sonra üçüncü adım “İnterferometrik İş akışı” uygulanmıştır.





Şekil 2.19. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı PSI analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri

PSI analizinde zorunlu olan bu aşamada yazılım tarafından görüntü eş kayıt etme, interferogramların üretilmesi ve referans fazın silinmesi ile birlikte genlik dağılım indeksinin oluşturulması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Görüntü eş kayıt etme aşamasında seçilen ana görüntü referans alınarak diğer bütün görüntülerin onun üzerine eş kayıt edilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Standard InSAR işlemlerinden farklı olarak PSI analizi noktasal hedefleri belirlemeye çalıştığı için burada spektral kayma ve Doppler bant genişliği filtreleri uygulanmamaktadır [378]. Görüntü eş kayıt işlemi ile



başarılı şekilde eş kayıt edilen her bir yardımcı görüntü kullanılarak aynı ana görüntü ile interferogramlar üretilmektedir. Bu aşamada tamamlanması ile yazılıma tanımlanan referans DEM verisi kullanılarak interferogramlara referans fazın silinmesi işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında 10 m yersel çözünürlüklü DEM verisi kullanılmıştır. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında ise yazılım tarafından otomatik olarak indirilen 30 m yersel çözünürlüklü SRTM-3 V2 DEM verisi kullanılmıştır. Ancak DEM verisinin temin edilememesi durumunda bu işlem elipsoidal model kullanılarak da çalıştırılabilmektedir. Ayrıca bu aşamada yazılımda, ana görüntünün, topoğrafyanın yok edilmesinde daha iyi sonuçlar alınabilmesi için DEM verisi ile daha doğru örtüştürülmesi amacıyla YKN dosyası da tanımlanabilmektedir. Ancak yapılan uygulamalar için bu aşamada ana görüntü zaten yardımcı yörünge dosyaları ile düzeltme işlemine tabi tutulduğundan YKN dosyası tanımlanması gerekmemektedir. İnterferogramların üretilmesi ve dünyanın düz olduğu kabul edilerek hesaplanan referans fazın silinmesi işleminden sonra genlik dağılım indeksi oluşturulmuştur. Genlik dağılım indeksi (D) aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [378]:

$$D = \frac{\mu}{\sigma} \quad (2.7)$$

denklemden  $\sigma$  belirli bir piksel için genlik değerinin zamansal standard sapması ve  $\mu$  belirli bir piksel için genlik değerinin zamansal ortalamasıdır. Burada bütün seri boyunca daimi olarak benzer, göreceli olarak büyük genlik değerine sahip olan bir pikselin küçük faz dağılımına sahip olduğu beklenmektedir. Bundan dolayı bu denklem ile belirlenen ilişki potansiyel olarak koherent noktaların tanımlanmasına imkân sağlamaktadır. Küçük indeks değerlerinin büyük faz standard sapmasına sahip olmaları beklenirken büyük indeks değerlerinin daha küçük faz standard sapmasına olmasına beklenmektedir. Burada D indeks değerine bir eşik değerinin uygulanması şeklindeki pratik bir yöntem ile en küçük faz dağılımına sahip noktaların seçimi gerçekleştirilmektedir [378]. Bu aşamada görüntüler yazılım tarafından otomatik şekilde radyometrik olarak kalibre edilmektedirler. Bu kalibrasyon ise  $\sigma$  ve  $\mu$  değerlerinin daha hassas şekilde hesaplanmasına imkan vermektedir.

İnterferometrik iş akışı işlem aşamasında sonra yine PSI analizi için zorunlu olan “İnversiyon: birinci adım” işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu adımda referans fazı silinmiş kompleks interferogramlar kullanılarak artık yükseklik (residual height) ve yerdeğiştirme hızları hesaplanmaktadır. İnterferogramlar oluşturulduktan sonra bütün

interferogramlardaki kaymış faz ortadan kaldırılmaktadır. Oluşan bu kaymış fazın temizlenmesi için bir veya daha fazla piksel, genlik dağılım indeksi baz alınarak otomatik olarak seçilmektedir. Seçilen referans nokta sayısı alanın büyüklüğüne bağlı olarak belirlenmektedir. Yazılımda her 5 km<sup>2</sup> alana bir referans nokta düşecek şekilde önceden tanımlı olan ayarlar kullanılmıştır. Yaklaşım belirli sayıda koherent radar sinyal reflektörü tanımlanmasına dayanmaktadır. Daha sonra tanımlanan bu noktaların faz geçmişi analiz edilmektedir. PSI analizinde PS seçiminde temel olarak iki kısıt söz konusudur: noktalar stabil olmalı (dalgalanmalar yılda bir milimetreden daha az olmalı) ve SAR anteni tarafından algılanabilir şekilde doğru konumlanmış olmalıdır. PSI analizinde alan içerisindeki bütün PS'leri etkileyen sabit yerdeğişirmeler algılanamamaktadır. Ayrıca sistem doğrusal bir trend ile zaman içerisindeki yerdeğişirmeleri hesaplayacak şekilde tasarlanmıştır. Zaman içerisinde oluşan yerdeğiştirme oranlarındaki değişimler bundan dolayı doğru şekilde gösterilememektedir. PSI analizinde PS olarak tespit edilebilen noktalar genellikle yerleşim alanlarında bulunan çatı, köprü ve direk gibi insan yapımı objeler veya doğal alanlardaki yüzeye çıkmış anakaya gibi doğal objelerdir. “İnversiyon: ikinci adım” aşamına geçmeden önce birinci adımın sonuçlarının kontrol edilmesi farklı alt alanlardaki mozayikleme hatalarının tespit edilmesi gerekmektedir. Burada asıl olarak “Velocity\_first” ve “Heigh\_first” isimli çıktıların mozayiklenmesi esnasında üst üste gelen zonlardaki kayma belirlenmekte ve her bir alt alanda yeniden faz belirleme için kullanılmaktadır. Sonuçların kontrol edilmesinde çıktı “Velocity\_first” ve “Heigh\_first” dosyalar ENVI yazılımında “Subareas.shp” dosyası ile birlikte açılarak değerlendirilir. Hız ve yükseklik değerlerinde önemli sıçramalar olmaması gerekmektedir. Eğer farklı bloklar arasında bu değerlerde önemli sıçramalar mevcut ise ilk olarak koherens eşik değerinin ayarlanması gerekmektedir [378].

“İnversiyon: ikinci adım” işlem adımı ise bir önceki işlemde gelen ilk doğrusal model ürünlerini atmosferik faz bileşenlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Doğrusal model hesaplandıktan sonra hız ve yükseklik değerlerini iyileştirmek için atmosfer hesaplama işleminden önce bütün fark interferogramlarından çıkarılmaktadır. Bu aşamada atmosferik filtre zamansal bir “High-Pass Filter” ve konumsal bir “Low-Pass Filter” kullanılmaktadır. “Atmospheric Low Pass Filter” atmosferik değişimlerin konumsal dağılımlarını dikkate alırken, “Atmospheric High-Pass Filter” atmosferik değişimlerin zamansal değişimlerini dikkate almaktadır. Bu aşamalardan sonra ikinci inversiyon

aşaması tarihe göre yerdeğiştirmeleri elde etmek için uygulanarak final yerdeğiştirme hız modeli uydurulmaktadır. Daha sonra coğrafi kodlama işlem adımı uygulanarak PS ürünleri iki ayrı formatta “vektör” ve “hücre tabanlı” olarak elde edilir. Daha doğru yerdeğiştirme ölçümleri elde edilmesi için girdi olarak bir veya daha fazla noktadan oluşan yer kontrol noktası (YKN) ölçümü verisi kullanılabilir. Bu bilgi yerdeğiştirme trend değerlendirmenin optimize edilmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu aşamada bahsedilen amaç doğrultusunda bu işlem zorunlu olmadığı için ve araziden herhangi bir ölçüm verisi temin edilemediği için kullanılmamıştır.

#### 2.4.2.2. SBAS Yöntemi ile Heyelan İzleme ve Deformasyon Haritalama

Tez çalışması kapsamında Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyünde meydana gelen heyelan alanı üzerinde uygulanan bir diğer InSAR zaman serileri analizi yöntemi SBAS yöntemidir. SBAS yöntemi yine PSI yöntemi gibi ENVI Sarscape modülü kullanılarak uygulanmıştır. Sarscape modülü kullanıldığında SBAS yönteminde gerçekleştirilen işlem adımları aşağıdaki gibidir [379]:

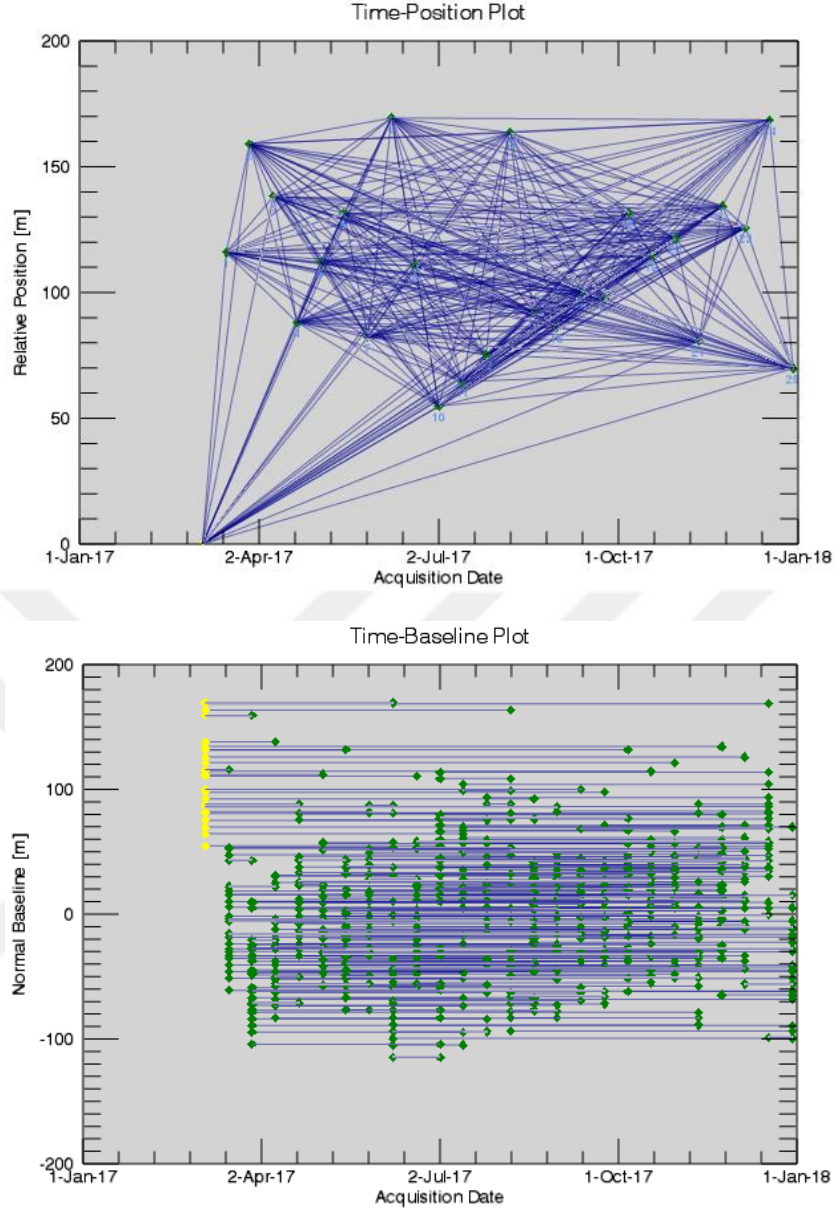
1. Bağlantı Grafik Oluşturma
2. İlgi Alanının Belirlenmesi
3. Interferometrik İş akışı
  - 3.1. Eş kayıt etme
  - 3.2. Interferogramların üretilmesi-referans fazın silinmesi-filtreleme
  - 3.3. Çözme işlemi (Unwrapping)
4. Düzenleme ve Referans Fazın Yeniden Silinmesi (Refinement and Re-flattening)
5. Inversiyon: birinci adım
  - 5.1. Hız ve artık topografya hesaplama
  - 5.2. Ortalama güç görüntüsü ve hassas bileşen belirleme (precision component estimation)
  - 5.3. İkinci çözme işlemi (Second unwrapping)
6. Inversiyon: ikinci adım
  - 6.1. Düzenleme ve referans fazın yeniden silinmesi
  - 6.2. Yerdeğiştirme bileşen hesaplama
  - 6.3. Atmosfer deseni yok etme
  - 6.4. Koherens ve diğer katmanların hesaplanması
7. Coğrafi kodlama
  - 7.1. Hız ve hassas sonuçların coğrafi kodlanması

## 7.2. Yerdeğiştirme coğrafi kodlanması

### 8. “Raster” → “Shape” dönüşümü

SBAS yöntemi uygulanmadan önce uygun yazılım ayarları tanımlanmalıdır. Bu konuda yazılım yardım dökümanı detaylı bilgi sağlamaktadır. Bağlantı grafik oluşturma işlem adımında ilk olarak PSI yöntemine benzer şekilde SBAS yönteminde işlenecek olan interferogram çiftleri tanımlanmaktadır. Bu yöntemde N adet tanımlanan görüntüden teorik olarak maksimum  $(N*(N-1))/2$  adet interferogram oluşturulmaktadır. Çünkü PSI yönteminde bir ana görüntü belirlenip diğer bütün yardımcı görüntüler sadece onunla eşleştirilerek interferogramlar üretilirken, SBAS yönteminde ise bütün tanımlı ölçütlere uygun veriler kullanılarak interferogram çiftleri oluşturulmaktadır. Bu çalışmada Himmetoğlu köyü heyelan alanı için PSI yönteminde kullanılan aynı Sentinel-1A görüntüleri SBAS analizi için de kullanılmıştır. Yazılım tarafından ilk olarak üst ana görüntü (super master) otomatik olarak seçilmiştir. Eklenen Sentinel-1A görüntüleri arasından 4 Mart 2017 tarihli görüntü üst ana görüntü olarak belirlenmiştir. Üst ana görüntü bütün SBAS yöntemi işlemlerinde referans görüntü olarak kullanılmakta ve bütün işlenen eğik menzil çiftler bu referans görüntü üzerine eş kayıt edilmektedir. Çiftlerin oluşturulmasında zamansal ve normal ana hat mesafe değerleri rol oynamaktadır. Sensör tipi ve kullanıcı deneyimine bağlı olarak normal ana hat mesafesi değeri kritik ana hat mesafesi değerinin %45-50’si olacak şekilde büyütülebilir. Zamansal ana hat mesafesi değeri ise çalışma alanının durumuna bağlı olarak kuru alanlarda 500-800 güne kadar belirlenebilmektedir. Ancak nemli ve yoğun yeşil alanlarda alım tarihleri arasında uzun farkların olduğu görüntüler arasında koherent çiftler bulunmamasına neden olduğundan dolayı önemli ölçüde düşük tutulmasını gerektirmektedir [379]. Bu parametrelerin büyük olarak ayarlanması durumunda maksimum sayıda (girdi olarak kullanılan görüntü sayısına bağlı olarak da oldukça fazla sayıda) interferogram çiftleri oluşturulacaktır. PSI yönteminde olduğu gibi Sarscape modülü SBAS yönteminde de görüntü çiftlerinin bağlantı şekillerini gösteren grafikler oluşturmaktadır (Şekil 2.20). Tanımlanan girdi görüntülere bağlı olarak oluşturulan bütün muhtemel çiftlere ait bilgiler bu işlem sonucu rapor olarak da bilgisayarın tanımlı lokasyonunda saklanmaktadır. PSI yönteminde de anlatıldığı gibi elde edilen veriler analize sokulmadan önce çalışma alanını kapsayacak şekilde görüntü kesme işlemine tabi tutulduğu için SBAS yönteminin de ikinci adımı olan ve zaten opsiyonel olan İlgi Alanının Belirtilmesi aşaması atlanarak Interferometrik İş akışı adımına geçilmiştir. Interferometrik iş akışı işlem adımında amaç

çözölmüş interferogramlar yığıını elde etmektir. Bu aşamada bütün interferogramlar üst ana görüntü referans alınarak eş kayıt edilmektedir. Bu aşamada interferometrik olarak işlenecek olan veri yığıının en doğru şekilde elde edilmesine imkân verecek şekilde parametre ayarlarının yapılması önemlidir. Bu konuda detaylı bilgiye yazılımın yardım dökümanından erişilebilmektedir. Bu işlem bittikten sonra referans fazı silinmiş ve çözülmemiş interferogramlara göz atılması ve daha da önemlisi çözülmüş fazların kontrol edilmesi önerilmektedir. Bu sayede interferogramlarda ortaya çıkabilen istenmeyen davranışlar, veri problemleri (yanlış yörünge vb.) ve koherent olmayan çiftler belirlenebilmektedir. Dahası bu sayede yerdeğıştirme olan bölge tespit edilerek doğrulanabilmektedir. Artık topografya interferogramların normal ana hat mesafesi bileşenine doğru orantılı bir faz değerine sahip olduğundan büyük normal ana hat mesafesine sahip çiftlerden yararlanarak açık şekilde tanımlanabilmektedir. Bununla birlikte yerdeğıştirme de interferogramların zamansal ana hat mesafesi bileşenine doğru orantılı bir faz değerine sahip olduğundan büyük zamansal ana hat mesafesine sahip çiftlerden yararlanarak açık şekilde tanımlanabilmektedir. Bu şekilde yapılan görsel değerdendirme sonucu interferometrik filtreleme gücü artırılabilmekte veya azaltılabilmektedir. Eğer pek çok interferogramda düşük koherent gösteren alanlar var ise bu değerd artırılmalıdır. Veyahut hızlı işlem yapabilmek için konumsal çözünürlükten ödün verilecekse de düşürölmelidir. Kumul alanlar gibi çok kuru bölgelerde ise interferometrik filtreleme gücünü düşürme kararı verilebilmektedir. Bu konuda en iyi seçenek olarak temsili olarak seçilmiş görüntü çiftleri ile standard interferometrik araçlar kullanılarak en uygun parametre ayarlarının yapılması önerilmektedir [379]. Bu aşamada “Goldstein filter” isimli filtre tipik olarak kullanılmaktadır. Ayrıca şiddetli yörünge hataları olması durumunda interferogramların kalitesinin iyileştirilmesi için Sarscape modülü ayarlarından “Remove Residual Phase Frequency” işlemi aktif hale getirilip otomatik olarak kullanılabilir. Bu özelliğinin özellikle yoğun şekilde doğrusal olmayan çok sayıda artık saçaklar varsa kullanımı tavsiye edilmektedir. Burada ayrıca çözme yöntemi olarak “Delaunay MCF (minimum cost flow)” yöntemi önerilmektedir [379]. Ancak yoğun artık topografya veya gerçekten şiddetli yerdeğıştirme söz konusu olduğunda Delaunay MCF yöntemi bazı problemlere sebep olabileceğinden klasik MCF yönteminin test edilmesi de tavsiye edilmektedir. Bu aşamadaki bir diğerd önemli faktör ise “Decomposition level (DCL)” olup önceden tanımlı değeri yazılımda “1” dir.



Şekil 2.20. Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında Sentinel-1A uydu SAR görüntülerinin kullanıldığı SBAS analizinde elde edilen bağlantı ağı grafikleri

Düzenleme ve referans fazın yeniden silinmesi aşamasında bir önceki aşamada üretilen çözülmüş faz yığınlarından faz sabitlerinin ve faz sıçramalarının belirlenerek giderilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Uygulamaya bu aşamada YKN verisi girilmektedir. Ancak burada kullanılan YKN verisi geometrik YKN verisinden farklıdır. Burada kullanılan YKN verisi eğik geometride (menzil ve azimut doğrultuda) veya coğrafi kodlanmış geometride (x, y ve h olarak ki h değeri girdi DEM verisinden okunabilmektedir) alınabilen düzenleme amaçlı kullanılacak veridir. YKN'ler bu işlem aşamasında arayüz

kullanılarak tanımlanabilmektedir. Tipik olarak YKN'ler eğik menzilde seçilmektedir. Bu çalışmada da eğik menzilde YKN seçimi yapılmıştır. YKN konumlarının seçiminde ise yazılımın yardım dokümanında önerilen şekilde çözülmüş faz dosyalarından yararlanarak şu kriterlere göre seçilmiştir: 1) YKN'ler artık topografya saçakları üzerine tanımlanmamalı, 2) Yerdeğiştirme alanı üzerinde tanımlanmamalı ve 3) Faz sıçramaları olmamalıdır.

Inversiyon: birinci adım işlem adımında yerdeğiştirme oranı ve artık topografyaya ait ilk hesaplamalar SBAS inversiyon kerneli kullanılarak yapılmaktadır. Ayrıca ikinci bir çözme işlemi de yapılmaktadır. Bu aşamada üç farklı esas model uydurma seçeneği mevcuttur. Bunlar doğrusal, ikinci dereceden ve üçüncü dereceden modellerdir. Bu aşamada yerdeğiştirme davranışı hakkında önceden bir bilgi sahibi olunmadığından doğrusal model kullanılmıştır [379]. Doğrusal modele ait sistem denkleminde kullanılan genel formül Denklem (2.8)'deki gibidir:

$$Phase = (H_{res} \times K_1) + (V \times T_1 \times \frac{4\pi}{\lambda}) \quad (2.8)$$

Denklemden  $Phase$  çözülmüş interferogramlar yığınının faz ölçümleri,  $H_{res}$  hesaplanan artık topoğrafik yükseklik,  $K_1$  ana hat mesafesi ve artık topografya arasındaki oran,  $V$  hesaplanan ortalama yerdeğiştirme oranı,  $T_1$  analiz altındaki her bir çifti oluşturan görüntüler arasındaki zaman ve  $\lambda$  sensörün dalga boyudur [379]. Inversiyon aşamasında ikinci veya üçüncü dereceden modeller seçildiğinde ise sadece hız değil aynı zamanda daha yüksek derece terimler de elde edilecek olup bu modellerde kullanılan formüller Denklem (2.9) ve Denklem (2.10)'daki gibidir:

$$\text{İkinci dereceden model: } V \times T + \left(\frac{1}{2}\right) \times A \times T^2 \quad (2.9)$$

$$\text{Üçüncü dereceden model: } V \times T + \left(\frac{1}{2}\right) \times A \times T^2 + \left(\frac{1}{6}\right) \times dA \times T^3 \quad (2.10)$$

Denklemden  $A$  ivmelenme ve  $dA$  ivmelenme değişimidir.

İkinci çözme işlemi hesaplanan yerdeğiştirme oranı ile artık topografya denklediği çözülmemiş interferogramlar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu interferogramlarda daha az sayıda saçaklar olmalıdır. İkinci çözme işleminin ardından yazılım otomatik olarak çözülmemiş interferogramlardan giderilmiş olanlarını eklemektedir. Birinci inversiyon adımının ardından yeniden çözülmüş dosyalar görsel olarak incelenerek kullanışsız olan interferogramların elimine edilmesi işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

Inversiyon ikinci adım işlem adımında da yerdeğiştirme zaman serilerinin elde edilmesi için SBAS inversiyon kerneli kullanılmaktadır. Yerdeğiştirme zaman serilerinin elde edilmesinin ardından son ve arındırılmış yerdeğiştirme zaman serileri elde etmek için atmosferik filtreleme uygulanmaktadır. Bu aşamada ayrıca yerdeğiştirme YKN veri dosyası tanımlanmaktadır. Bu YKN verisi düzenleme ve yeniden flatte aşamasında üretilen veridir. Burada uygulanan atmosferik filtrelemenin amacı ise atmosferik bazı fiziksel özellikleriyle ilgili olan yerdeğiştirme zamansal imzalarını yumuşatmaktır. Bu filtrelemede “Low Pass Spatial Filter”, “High Temporal Pass Filter” ile kombine edilerek ilk elde edilen yerdeğiştirme değerlerine uygulanmaktadır. Buradaki varsayım atmosferin büyük konumsal korelasyona (önceden tanımlı olarak 1,2 km) ve düşük zamansal korelasyona (önceden tanımlı olarak bir yıl) sahip olduğu şeklindedir. Buraya kadar yapılan işlemlerin sonucunda final hız değerleri hesaplanmış olmaktadır. Bu işlem den sonra yerdeğiştirmelerin ve hızların kullanıcı tanımlı, düşey veya maksimum eğim doğrultusunda olmak üzere farklı yönlere göre coğrafi kodlanması işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak burada gerçek yerdeğiştirme doğrultusu bilinmiyorsa yanlış yön seçimi yanlış değerler ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Bundan dolayı bakış hattı doğrultusunda elde edilen değerlerin sensör konfigürasyonlarına göre ölçüldüğünden dolayı her zaman daha doğru ölçümler olacağı dikkate alınmalıdır.

## **2.5. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİ**

Hava lazer tarama verileri (LIDAR verileri) heyelanlarla ilgili çalışmalarda oldukça önemli ölçüde uygulama alanı bulabilen bir modern uzaktan algılama tekniğidir. Bundan dolayı tez kapsamında Gschliefgraben heyelan alanı üzerinde heyelan deformasyonlarının ve yerdeğiştirme alanlarının (displacement fields) haritalanmasına örnek uygulamaları yapılarak kullanılan veri setleri ve uygulanan yöntemler burada detaylı olarak anlatılmaktadır. Burada ilk olarak LIDAR ölçümlerinden elde edilen 3B nokta bulutlarından yararlanarak heyelan deformasyon ve yerdeğiştirme alanlarının elde edilmesinde kullanılan yöntemler anlatılacaktır.



### 2.5.1. 3B (3-Boyutlu) Nokta Bulutları Tabanlı Kullanılan Metotlar

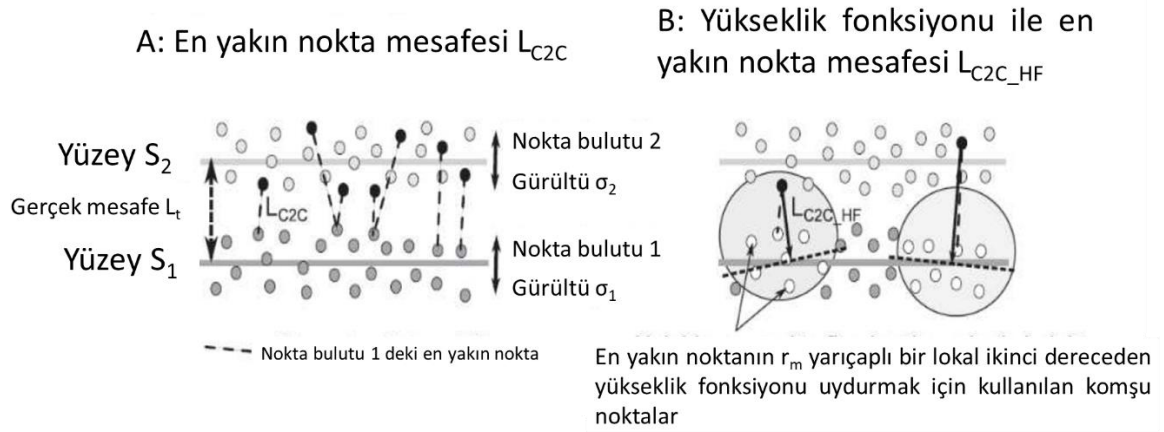
Heyelan deformasyonlarının ve yerdeğiştirme alanlarının elde edilmesinde 3B nokta bulutlarının kullanılabilirdiği pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu metotlar LIDAR 3B nokta bulutları kullanılarak heyelan hareketlerinin ve hızlarının belirlenmesinde de kullanılabilir [380]. 3B nokta bulutları ile yüzey değişimlerinin hesaplanması ya yerdeğiştirme alanlarının hesaplanması için yüzeydeki yapısal olarak benzer kısımlarının 3B olarak izlenmesiyle ya da yapısal olarak benzer kısımların belirlenememesi durumlarında iki nokta bulutunun arasında mesafe hesapları yapılarak gerçekleştirilmektedir [375]. Nokta bulutları zaman serilerinin kullanıldığı bu yöntemler genel olarak 1) doğrudan nokta-nokta ölçümleri (directly point-to-point, P2P measurements), 2) bulut-bulut ölçümleri (cloud-to-cloud measurements, C2C) teknikleri, 3) bulut-model (cloud-to-mesh, C2M) ve model-model (mesh-to-mesh, M2M) ölçüm yöntemleri şeklinde sınıflandırılabilir [380]. Bunların dışında ayrıca “Çok Ölçekli Model-Model Bulut Karşılaştırma (M3C2)” olarak isimlendirilen ve lazer tarama zaman serisi verilenin doğal çevrelerin izlenmesi amacıyla kullanıldığı, son dönemlerde geliştirilmiş yöntem de kullanılmaktadır.

#### 2.5.1.1. Doğrudan nokta-nokta ölçüm yöntemleri

Tekniğin isminde de belirtildiği gibi P2P yönteminde referans nokta bulutu olarak belirlenen buluttaki bir nokta ile karşılaştırılan nokta bulutu olarak belirlenen buluttaki bir nokta arasındaki mesafenin ölçümü gerçekleştirilmektedir. Bu ölçümler bu nokta bulutu işleme yazılımı kullanılarak kullanıcı tarafından doğrudan ölçümün gerçekleştirilmesi şeklinde yapılabilmektedir. P2P yöntemi heyelan çalışmalarından ziyade kaya düşmesi çalışmalarında kullanılmaktadır [381]-[383]. P2P yöntemi yüzey geometrik parametrelerinin elde edilmesinde ve yapısal ve mekanik mühendislik alanları gibi diğer alanlarda kullanılan bir yöntemdir.

#### 2.5.1.2. Bulut-bulut ölçüm yöntemleri

Temel olarak P2P yöntemine benzer olan C2C yöntemleri genel olarak en kısa mesafeler yaklaşımı kullanılmaktadır. Referans nokta bulutundaki her bir nokta ile karşılaştırılan nokta bulutundaki onların en yakın komşu noktası arasındaki mesafe belirlenmektedir (Şekil 2.21). C2C yönteminde belirlenen mesafeler referans nokta bulutunun yüzeyi temsil eden bir lokal model (veya yükseklik modeli) kullanılarak da ölçülebilmektedir (Şekil 2.21/A). Yükseklik modeli referans nokta bulutu içerisinde isteğe bağlı, önceden



Şekil 2.21. C2C yöntemlerinin en yakın komşu (solda) ve lokal yükseklik fonksiyonu (sağda) şematik gösterimi ([375]'ten uyarlanmıştır)

tanımlı bir konumda en uygun düzlemsel yüzeye merkezlenmiş bir fonksiyondur. Karşılaştırılan buluttaki en yakın noktaya olan mesafe lokal modele göre normal yönünde (normal direction) hesaplanmaktadır [380].

### 2.5.1.3. Bulut-model ve model-model ölçüm yöntemleri

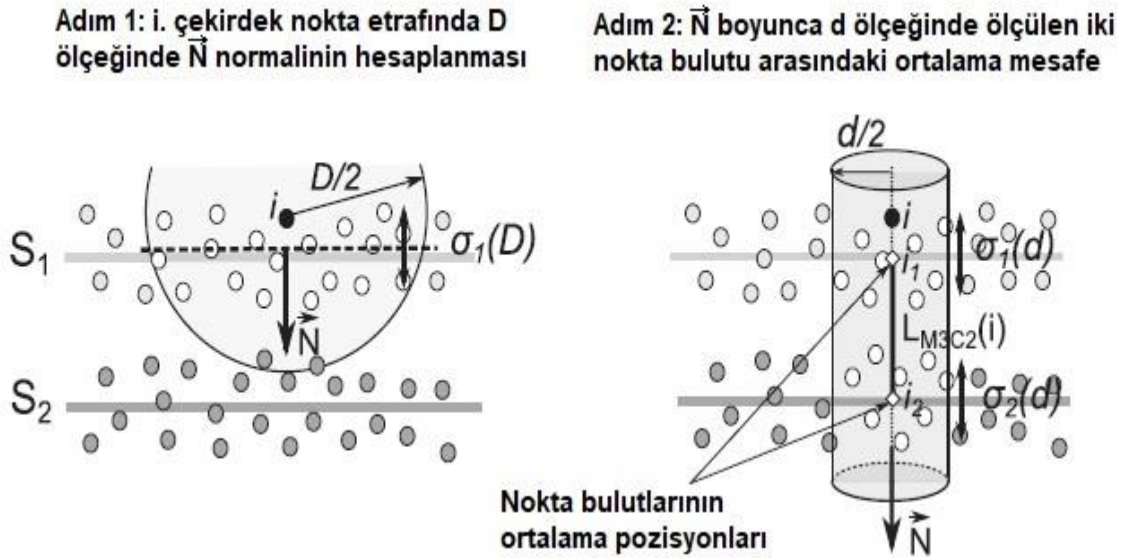
C2M ve M2M ölçümleri temel olarak C2C ölçüm yönteminin lokal model versiyonuna benzer şekilde çalışmaktadır ancak bu ölçümlerde lokal olarak değilde bütün olarak yüzeyler birbirine uydurulmaktadır. Bütüncül yüzey modelleri oluşturmada enterpolasyon kullanılmaktadır. Bu enterpolasyon yöntemleri, krigleme (kriging), Delaunay üçgenleme ve ters mesafe ağırlıklı ortalama (inverse distance weighted averaging) olarak daha ziyade kullanılabilir [380]. Bu yöntemlerin de her biri avantaj ve dezavantajlara sahiptirler.

Burada bahsedilen lokal ve bütüncül enterpolasyon yöntemleri arasındaki önemli ayrım şu şekilde açıklanmaktadır. Lokal modeller nokta bulutu verisini daha yakın şekilde birbirine uydururlar ancak büyük ölçekli topoğrafik eğilimleri yakalayamamaktadırlar. Bütüncül modeller ise veriyi yumuşatırlar ve büyük ölçekli topoğrafik eğilimleri yakalayacak şekilde tasarlanmışlardır. C2M referans yüzeyi temsil edecek bütüncül bir yüzey kullanmaktadır. Bu yöntemde karşılaştırılan nokta bulutundaki en yakın noktaya olan mesafe yüzey normal vektörleri doğrultusunda hesaplanmaktadır. M2M ise her iki modelden türetilen bütüncül yüzey modellerini kullanarak belirli aralıklarda tanımlanmış yerler (konumsal çözünürlüğe bağlı olarak değişen piksel orta noktaları gibi) arasındaki mesafeyi ölçmektedir. M2M yöntemi ise iki forma sahiptir: 1) DEM Farkları (DoD) ve 2) eğim-normali (slope-normal) [380]. Bunlardan en çok bilineni ve kullanılanı olan DoD

teknğinde yüzeyler arasındaki  $Z$  (yüksekti) değerleri arasındaki farklar, karşılaştırılan yüzeyin referans yüzeyden çıkarılması ile hesaplanmaktadır.

#### 2.5.1.4. Çok Ölçekli Model-Model Bulut Karşılaştırma yöntemi

M3C2 tekniği bir yüzeyin normal yönünde nokta bulutları arasındaki mesafeyi hesaplanmaktadır. Yüzey normali referans nokta bulutundaki her bir noktanın etrafında belirli bir yarıçap alanındaki noktalara bir lokal model uydurmaktadır. Yarıçap kabaca hesaplanan bir değer olarak veya kullanıcı deneyimine bağlı olarak ayarlanabilmektedir [380]. Lokal model düzlemine ayrı bir daha küçük yarıçap çizilerek silindirik bir alanda belirli bir mesafede normal yönünde genişletilir. Bu alan içerisinde kalan nokta bulutuna ait bütün noktalar seçilerek silindirin eksenleri boyunca her bir nokta kümesinin ortalama pozisyonları tanımlanmaktadır. Her bir bulut içerisindeki yüzey pozisyonları ortalama konumlar olarak kabul edilmektedir. Ayrıca bunlar arasındaki mesafeler de yüzey yerdeğiştirme ölçümleri olarak tanımlanmaktadır. M3C2 algoritması çalışma prensibi Şekil 2.22’de gösterilmektedir.



Şekil 2.22. M3C2 algoritması çalışma prensibi [375]

M3C2 yöntemiyle iki nokta bulutu arasındaki mesafenin hesaplanmasında gerekli parametreler; 1) referans nokta bulutu ile karşılaştırılan nokta bulutunun tanımlanması, 2) çekirdek noktaların tanımlanması, 3) normal ölçek ( $D$ ), projeksiyon ölçek ( $d$ ) ve silindir derinliği değerlerinin tanımlanması, ve 4) kayıt hatasının tanımlanması şeklinde açıklanabilir [376]. Bu yöntemde gerçekleştirilen işlem adımları aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir:

- Başlangıç nokta bulutundan nokta kümeleri ölçüm işlemleri yapmak üzere seçilmektedir. Bu adım opsiyonel olup sadece işlem yapma süresini kısaltılması amacıyla gerçekleştirilmektedir.
- Noktalar kümesine uydurulan bir düzlem tanımlanarak her bir çekirdek nokta için bir yüzey normali tanımlanmaktadır. Bu noktalar kullanıcı tanımlı bir yönde yöneltilerek vektörler elde edilir.  $NN_i$  noktaları  $i$ . noktanın  $D/2$  yarıçapına sahip küre içerisinde kalan noktalardır. Burada  $D$  normalin ölçeğidir.
- $D$  ölçeğinde noktalar arasındaki mesafenin standard sapması olarak  $i$  etrafındaki nokta bulutunun pürüzlülüğü hesaplanmaktadır.
- Projeksiyon ölçeği olarak tanımlanan  $d$  değerinin yarısı ( $d/2$ ) yarıçapındaki bir silindirin tanımlanması ikinci adımı oluşturmaktadır. Bu silindirin eksen  $i$  noktasından geçmektedir ve silindir kullanıcı tarafından tanımlanan maksimum derinlik değerinde eksinin her iki yönünde uzatılmaktadır. Silindir  $n_1$  ve  $n_2$  isimli nokta alt kümeleri üretmek adına her iki nokta bulutu ile kesiştirilmektedir.
- İki nokta bulutu arasındaki ortalama mesafe  $i_1$  ve  $i_2$  olarak tanımlanan  $n_1$  ve  $n_2$  kullanılarak elde edilen yüzey normalleri boyunca hesaplanmaktadır. M3C2 mesafesi  $i_1$  ve  $i_2$  arasındaki mesafeye karşılık gelmektedir.

Bu yaklaşımda normal ölçek ( $D$ ) ve projeksiyon ölçekleri ( $d$ ) verinin pürüzlülük ve nokta yoğunluğu değerlerine bağlı olarak seçilmelidir. Spesifik olarak normal ölçek ortalama pürüzlülük değerinin 25 katı büyük olacak şekilde seçilir. Projeksiyon ölçeği de nokta yoğunluğuna uygun olacak şekilde tanımlanmaktadır. M3C2 algoritması içerisinde kullanıcı isterse bu parametreleri tanımlanan nokta bulutlarına göre tahmin ettirebilmektedir. M3C2 algoritması kayıt hatasını ise Denklem (2.11) ile hesaplamaktadır [376]:

$$reg = \sqrt{(RMSE_{ref})^2 + (RMSE_{comp})^2} \quad (2.11)$$

denklemden RMSE, kullanılan modellerin ortalama karekök hata değeri olup referans veri aracılığıyla hesaplanabilmektedir. M3C2 algoritmasının temel olarak üç çıktısı bulunmaktadır. Bunlar M3C2 mesafesi, anlamlı değişim ve mesafe belirsizliğidir. Mesafe belirsizliği %95 tespit etme seviyesi (level of detection,  $LOD_{95\%}$ ) olup M3C2 algoritması tarafından Denklem (2.12) kullanılarak hesaplanmaktadır [384]:

$$LOD_{95\%} = \pm 1.96 \left( \sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2} + reg} \right) \quad (2.12)$$

denklemden  $d$  projeksiyon ölçeği,  $\sigma_1(d)^2$  ve  $\sigma_2(d)^2$  ise  $n_1$  ve  $n_2$  nokta bulutlarının lokal pürüzlülük değerleridir.

### 2.5.2. Sayısal Görüntü Korelasyon ve Partikül Görüntü Velosimetri Yöntemi

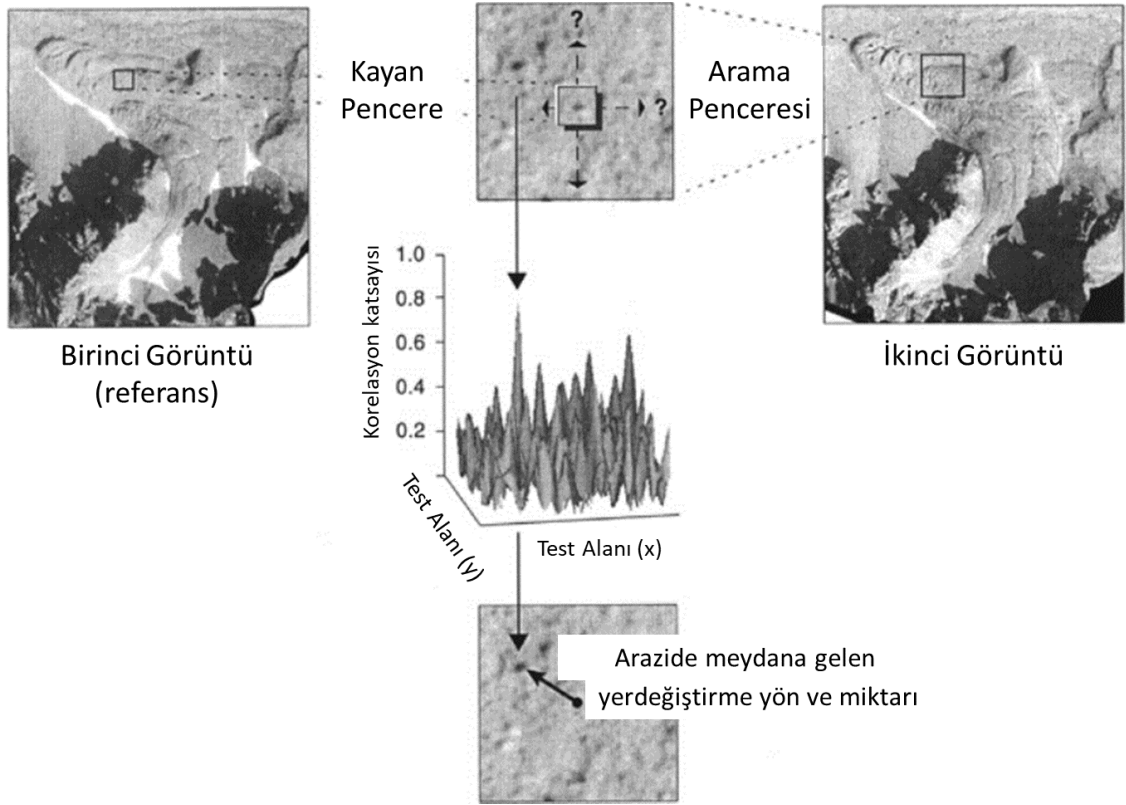
Sayısal görüntü korelasyon (Digital Image Correlation, DIC) ve Partikül görüntü velosimetri (Particle Image Velocimetry, PIV) pratikte birbiri yerine kullanılabilir. DIC ve PIV yöntemleri farklı iki zamanda alınmış iki görüntünün korelasyonu ile 2B/3B yerdeğiştirme alanlarının elde edilmesinde kullanılan bir deformasyon ölçüm tekniği olarak tanımlanmaktadır [385]. Temel olarak PIV ardışık zaman serileri şeklinde alınan hücre tabanlı iki görüntü arasında çapraz korelasyon hesaplanması ile bir düzlemde hız vektörlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu yöntemler piksel altı doğruluklarda oluşan yerdeğiştirmeleri hesaplamak için piksel yoğunluk değerlerini kullanmaktadır [386]. Bu nedenle DIC veya PIV yöntemlerini LIDAR verilerine adapte edebilmek için verinin 3B nokta bulutu yapısından hücresel yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında görüntü ilk olarak küçük karelerden oluşan bölgelere ayrılmaktadır ki genel olarak 7x7 ile 70x70 boyutlarında değişebilmektedir [387]. Bundan dolayı bu yöntemlerde korelasyonun hesaplanmasında temel parametreler kayan pencere büyüklüğü, arama penceresi büyüklüğü ve adım büyüklüğü olmaktadır [388]. Görüntü korelasyon işlemi normalleştirilmiş çapraz korelasyon (normalized cross correlation, NCC) fonksiyonu ile Denklem (2.13) ile hesaplanmaktadır:

$$r_N(i_s, j_s) = \frac{\sum_{i=0}^{W_c} \sum_{j=0}^{W_c} (I_1(i, j) - \mu_{I_1}) \cdot (I_2(i + i_s, j + j_s) - \mu_{I_2})}{\sqrt{\sigma_{I_1}} \cdot \sqrt{\sigma_{I_2}}} \quad (2.13)$$

denklemden  $r_N$  NCC fonksiyonu,  $\mu$  ve  $\sigma$  sırasıyla arama penceresi içerisine düşen piksellerin ortalama ve standard sapma değerleri olup  $I_1$  ve  $I_2$  iki ardışık zaman serisini oluşturan görüntülerin  $i$ . ve  $j$ . piksel değerlerinin konumunu ifade etmektedir. Bu formül ile  $r_N$  değeri her bir belirli kayma ( $s$ ) değeri için hesaplanmaktadır. Hesaplanan  $r_N$  değerinin maksimum olduğu kayma yapılan konum, orijine göre yerdeğiştirmenin miktarının hesaplandığını konumu göstermektedir (Şekil 2.23).

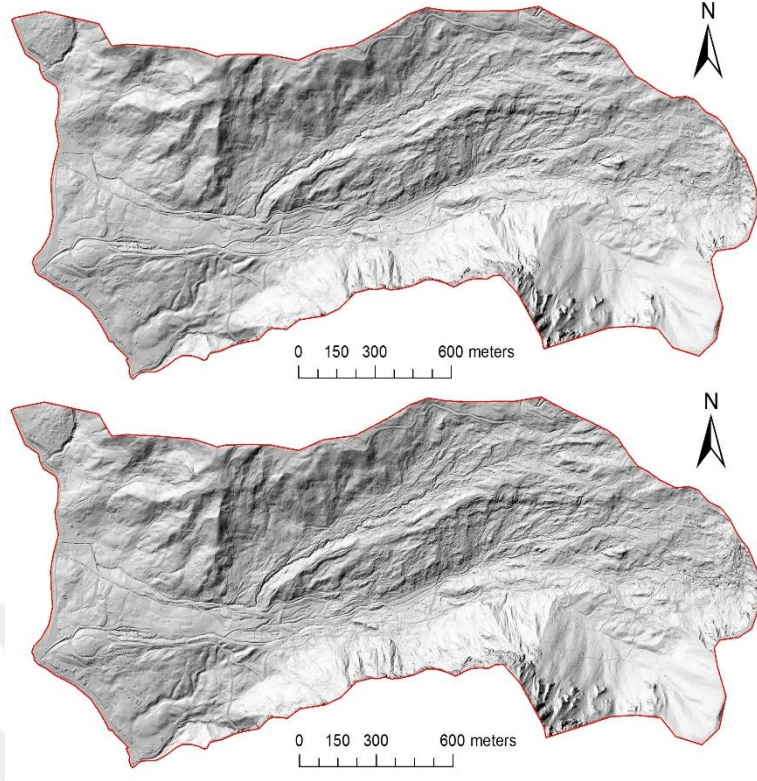
### 2.5.3. Kullanılan Veriler, Yazılımlar ve Yapılan İşlemler

Bu çalışmada 1 m yersel çözünürlüğe sahip 2012 ve 2015 yıllarında Gschliefgraben heyelan alanı üzerinde alınmış LIDAR verisi 3B nokta bulutu karşılaştırma yöntemleri ile heyelan deformasyonlarının haritalanması amacıyla kullanılmıştır (Harita 2.10). Bu veriler 3B nokta bulutu karşılaştırmaları yapılabilmesi için ilk olarak ArcGIS 10.3 yazılımı ArcMap modülü kullanılarak hücre-tabanlı veriden vektör formata (multipoint) dönüştürülmüştür. LIDAR verileri ham nokta bulutu olarak temin edilememiştir.

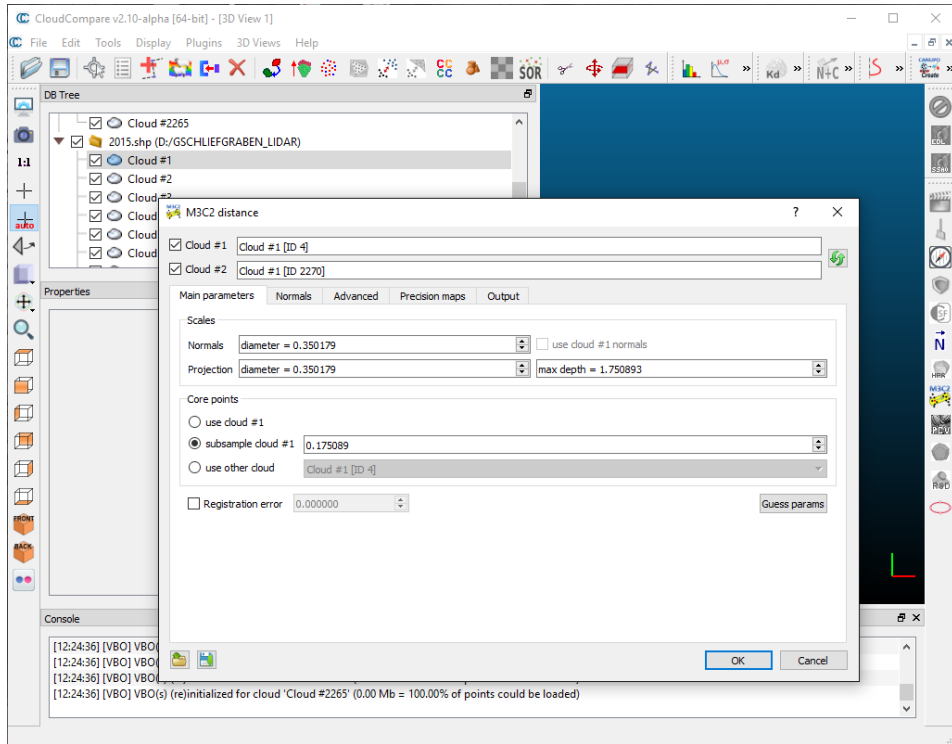


Şekil 2.23. DIC çalışma prensibi.

Yapılan dönüştürme işlemi sonrası elde edilen nokta bulutlarının karşılaştırılması ile heyelan deformasyonlarının iki zaman serisi arasında belirlenmesi için M3C2 algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma CloudCompare (Şekil 2.24) isimli açık kodlu nokta bulutu işleme yazılımı içerisinde eklenti olarak çalışmaktadır. Algoritmada gerekli olan parametreler ise yazılım tarafından otomatik hesaplanan değerler şeklinde tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.



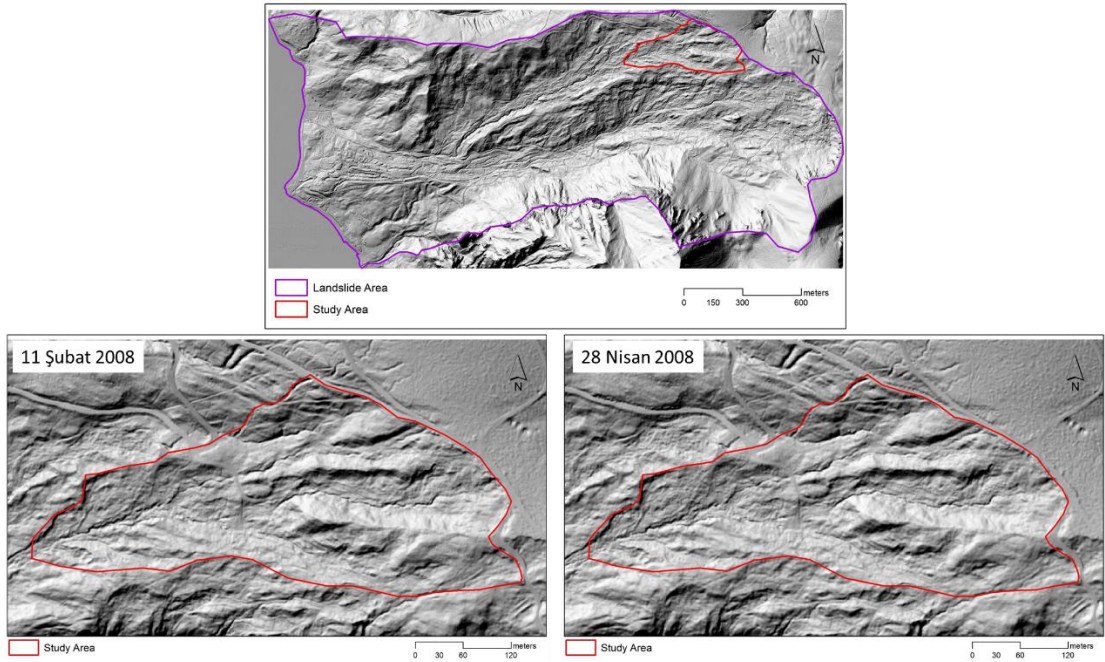
Harita 2.10. 3B nokta bulutu karşılaştırması için kullanılan 2011 (üstte) ve 2015 (altta) LIDAR verileri.



Şekil 2.24. CloudCompare yazılımı içerisindeki M3C2 eklentisi arayüzü.



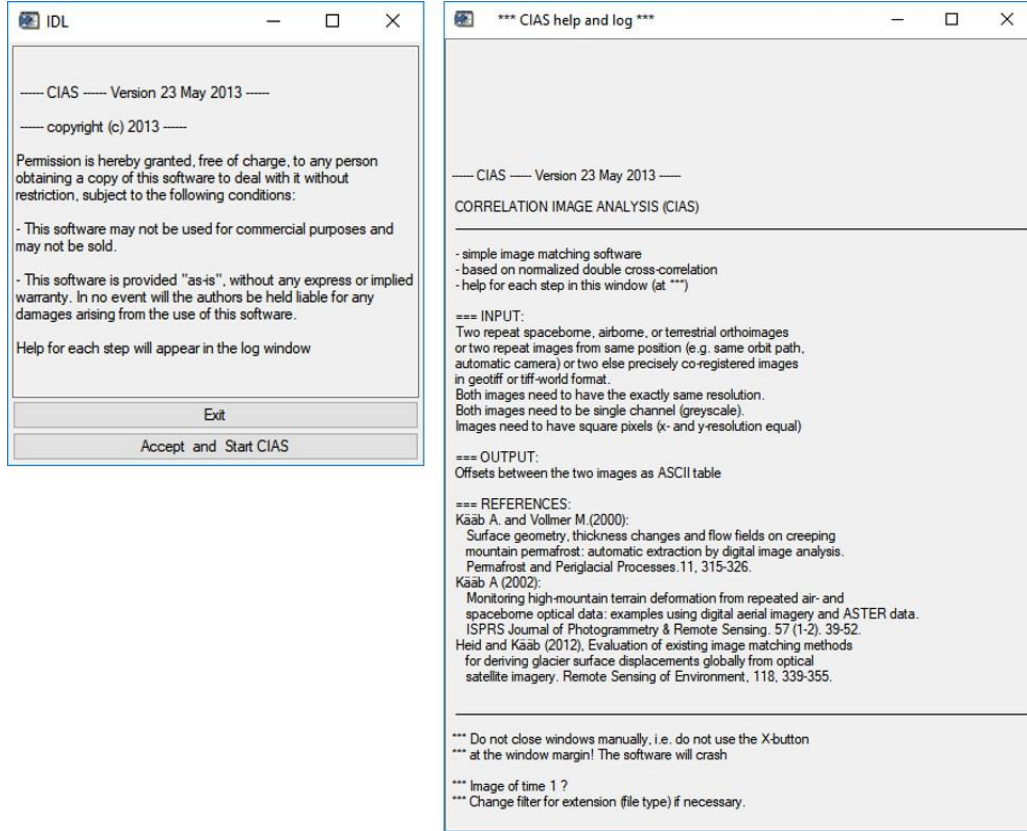
DIC yöntemi ile heyelan yerdeğiştirme alanlarının belirlenmesi ile ilgili çalışmada ise yine Gschliefgraben heyelan alanı üzerinde 2008 yılında alınmış 1 m yersel özünürlüklü DEM verisi kullanılmıştır. İki zaman serisi şeklinde temin edilen bu verilerden ilki 11 şubat 2008 tarihli, ikincisi ise 28 Nisan 2008 tarihlidir (Harita 2.11). Temin edilen veriler 20 cm yatay ve 15 cm dikey doğruluklara sahiptir. DIC analizi sayısal görüntü korelasyon yazılımı olan CIAS [389] kullanılmıştır (şekil 2.25). Yazılımın girdi dosyası olan görüntüler aynı çözünürlüğe sahip olmalı ve tek banttandır. Yazılımın ıktısı ise Kartezyen ve kutupsal koordinatlardaki kayma miktarlarını ve korelasyon katsayılarını içeren ASCII verisidir. CIAS ile yerdeğiştirme alanlarının belirlenmesi temel olarak iki adımda gerçekleşmektedir [389]: 1) referans görüntü üzerinde yeterli kontrasta sahip görüntü bölümünün tanımlanması (kayan pencere) ve 2) karşılaştırılan görüntüde arama penceresinin tanımlanması.



Harita 2.11. DIC analizi için LIDAR verisi üzerinde seçilen alanlar.

Arama penceresi büyüklüğü alanda meydana gelen yerdeğiştirme büyüklüklerine göre belirlenmelidir. Aynı zamanda zemin yüzeyinin tekstürel özellikleri de kayan pencere ve arama penceresi büyüklüklerinin belirlenmesinde dikkate alınmalıdır [389]. Bu çalışmada kayan pencere büyüklüğü 16 ve arama penceresi büyüklüğü de 64 olarak seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise gölgeli kabartma verisi üzerinde manuel olarak iyi şekilde ayırt edilebilen morfolojik objelerin yerdeğiştirme miktarları belirlenmek suretiyle değerlendirilmiştir [390], [391].





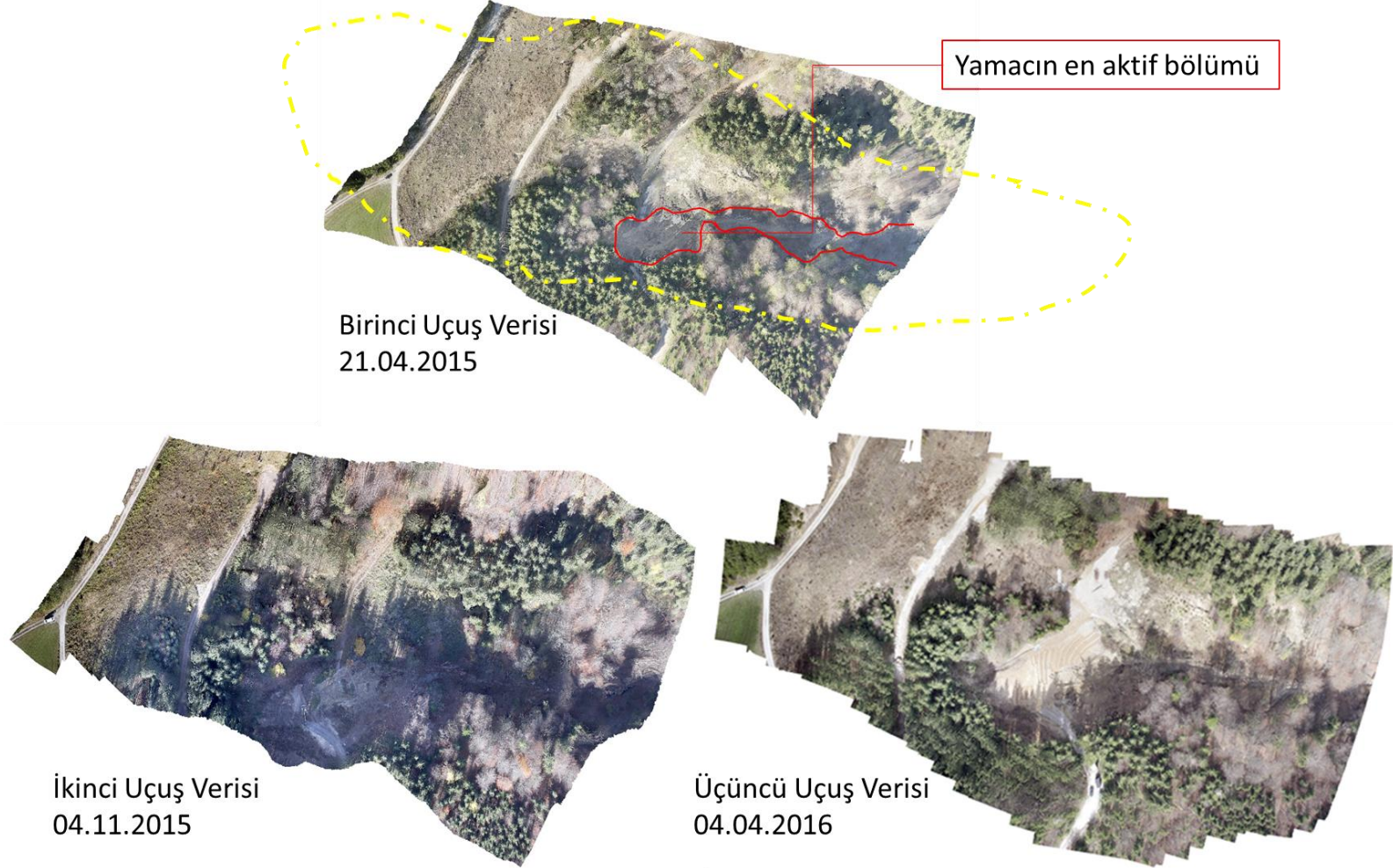
Şekil 2.25. CIAS sayısal görüntü korelasyon yazılımı arayüzü

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİNE AİT BULGULAR

##### 3.1.1. İHA Uçuşları ve SfM Veri İşlemeye Ait Bulgular

Bu çalışmada heyelan alanı üzerinde 3 ayrı İHA uçuşu (ARF MikroKopter OktoXL) gerçekleştirilmiştir. Birinci ve ikinci uçuş arasında 197 gün zaman farkı varken, ikinci ve üçüncü uçuş arasında 152 gün zaman farkı vardır. Gündüz vakti gerçekleştirilen uçuşlarda veri alımı için kullanılan 18 MP çözünürlüğe sahip Canon EOS 650 DSLR kamera olup bu amaç için yeterli standartlara sahiptir. Aynı sistem daha önce Lucieer ve diğerleri tarafından da kullanılmıştır [372]. İHA ile alınan görüntülerde yersel örnekleme mesafesi 1 cm'den daha az olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bütün uçuşlar yaklaşık 10 dakika olup, sahada gerçekleştirilen bütün çalışmalar sahaya ulaşım için harcanan zaman haricinde 2 saatten daha az sürede tamamlanmıştır. Klasik ölçüm teknikleri ile kıyaslandığında bu süre oldukça kısadır. Agisoft yazılımı ile SfM algoritması tabanlı gerçekleştirilen veri işleme ile üretilen bütün ortofoto mozaik görüntüler Harita 3.1'de verilmektedir. Bütün DSM verileri ve ortofoto mozaikler 10 cm çözünürlükte üretilmiş olup sahaya tanımlanan YKN'ler ile hesaplanan RMSE değerlerine göre ortalama 4 cm'den daha az hataya sahiptirler. RMSE değerleri birinci, ikinci ve üçüncü uçuşlar için sırasıyla 0,06, 0,02 ve 0,04 cm olarak elde edilmiştir. Bu değerler daha önce literatürde yapılmış çalışmalarda değerlerle tutarlıdır [371], [374]. Gerçekleştirilen uçuşlar ile alınan görüntü sayıları sırasıyla birinci uçuş için 396 adet, ikinci uçuş için 116 adet ve üçüncü uçuş için 94 adettir. En fazla görüntü birinci uçuşta temin edilebilmiştir. Bundan dolayı da en yüksek kalitede ortofoto mozaik görüntü de bu uçuş verisine aittir. Diğer iki uçuşta ortaya çıkan görüntü sayısındaki azalma ile örtüşen fotoğraf sayısı da azalmış ve yamacın en aktif bölümü etrafında bulunan yoğun vejetasyonun olduğu bölgelerde gürültü oranı yüksek olarak gözlenmiştir. Bununla birlikte gürültü oluşumundan bahsedilse bile SfM algoritmasının bir diğer çıktısı da yoğun 3B nokta bulutu olduğu için heyelan izlemeye engel bir durum oluşturmamaktadır. Elde edilen bütün nokta bulutlarında 10 milyondan fazla X, Y ve Z koordinatları bilinen nokta bulunmakta olup nokta yoğunluk değerleri bütün uçuşlar için 150 nokta/m<sup>2</sup> dir.



Birinci Uçuş Verisi  
21.04.2015

Yamacın en aktif bölümü

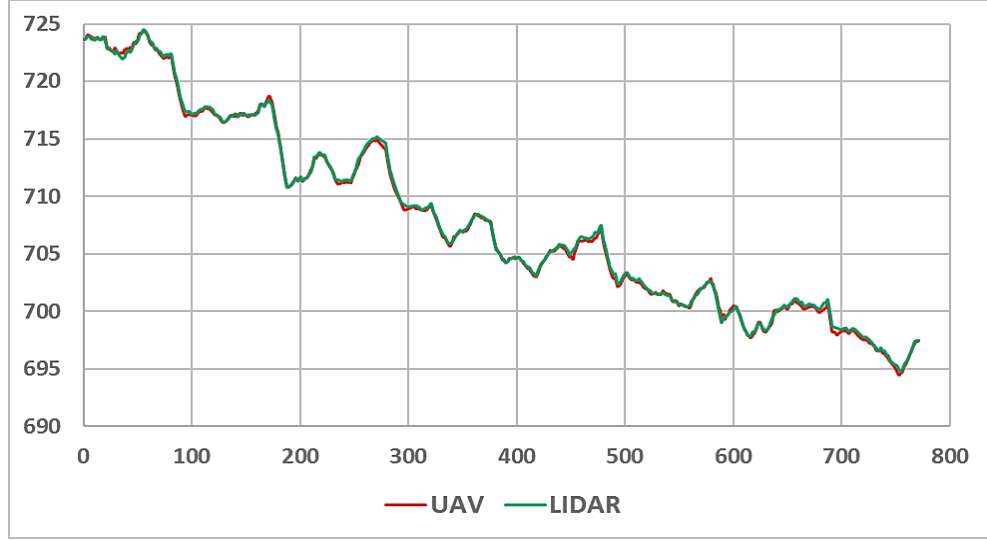
İkinci Uçuş Verisi  
04.11.2015

Üçüncü Uçuş Verisi  
04.04.2016

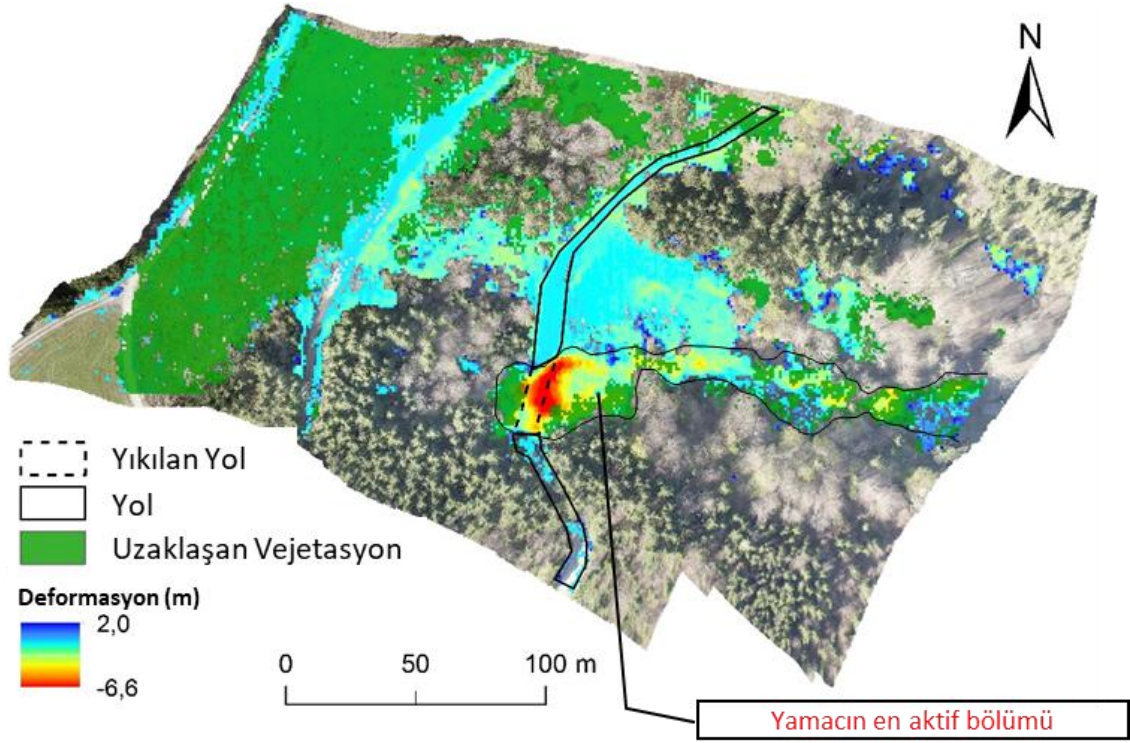
Harita 3.1. İHA uçuşu verileri ile elde edilen ortofoto görüntüler.

### 3.1.2. Gallenzerkogel Heyelanının İzlenmesine Ait Bulgular

Tez kapsamında Gallenzerkogel heyelanının izlenmesi amacıyla İHA tabanlı DEM verileri, ortofoto mozaik görüntüler ve 3B nokta bulutları kullanılmıştır. Heyelan öncesi topoğrafik durumu temsil eden 2009 yılına ait LIDAR tabanlı DEM verisi (1 m yersel çözünürlüklü) temin edilmiştir. Heyelan izleme çalışması kapsamında ilk olarak DEM farkları yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde birinci uçuş verisi karşılaştırılan veri olarak, LIDAR DEM verisi de referans veri olarak kullanılmıştır. DEM farkları yöntemi uygulamadan önce iki farklı sensör ile alınan DEM verilerinin karşılaştırılması amacıyla heyelan alanı dışında ve vejetasyon olmayan alanlar (yol, kaya vb) üzerinde rastgele konumlarda belirlenen 770 noktadan yararlanarak RMSE değeri hesaplanmıştır. Buna göre LIDAR DEM ve İHA tabanlı birinci uçuş verisinden üretilen DEM arasında 0,2 m RMSE mevcuttur. Ayrıca seçilen noktalardaki yükseklik değerleri dağılım grafiği ile de DEM'ler değerlendirilmiştir (Şekil 3.1). Bu grafiğe göre İHA tabanlı DEM verisinin LIDAR DEM verisi ile oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. DEM farkları analizi ile elde edilen veriden  $\pm 0,2$  RMSE değerlerine sahip pikseller analize dâhil edilmeyerek elimine edilmiştir. Çünkü bu aralıktaki değerlerin kesin olarak meydana gelen heyelandan mı yoksa modelleme hatasından mı kaynaklandığı bilinmemektedir. DEM farkları yöntemi ilk olarak İHA DSM verisi ile LIDAR DSM verisi kullanılarak yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen DEM farkından alandan uzaklaşmış vejetasyon örtüsünün belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen fark verisinde -15 m (ki saha gözlemlerinden belirlenmiştir) değerinden daha küçük değerler kullanılarak sahadaki hem heyelan nedeniyle uzaklaştırılan hem de heyelan hareketi sonucu yıkılarak uzaklaşan vejetasyon haritalanmıştır (Harita 3.2). Ayrıca DEM farkları yöntemi İHA DSM ve LIDAR DTM verisine uygulanarak heyelan deformasyonları haritalanmıştır (Harita 3.2). Elde edilen bu ikinci DEM farkı verisinde sahadaki vejetasyon varlığı yüzünden ve bununda İHA DSM verisinden elimine edilemesinden dolayı 2 m'den daha büyük fark değerlerine sahip piksel değerleri elimine edilerek analize dahil edilmemiştir. Buna göre elde edilen fark verisi değerleri -6,6 m ile 2 m arasında deformasyonları gösterecek şekilde temin edilmiştir (Harita 3.2). Ayrıca elde edilen fark verisinden yararlanarak heyelan kütle hacmine ait değerler de hesaplanmıştır. Buna göre yamacın en aktif bölümünde alan üzerinde  $4380,1 \text{ m}^3$  malzeme taşınırken  $297,4 \text{ m}^3$  malzeme birikmiştir. Göçen yol bölümündeki malzeme miktarı ise  $688,3 \text{ m}^3$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.1. LIDAR DEM verisi ile İHA DEM verisi karşılaştırma grafiği

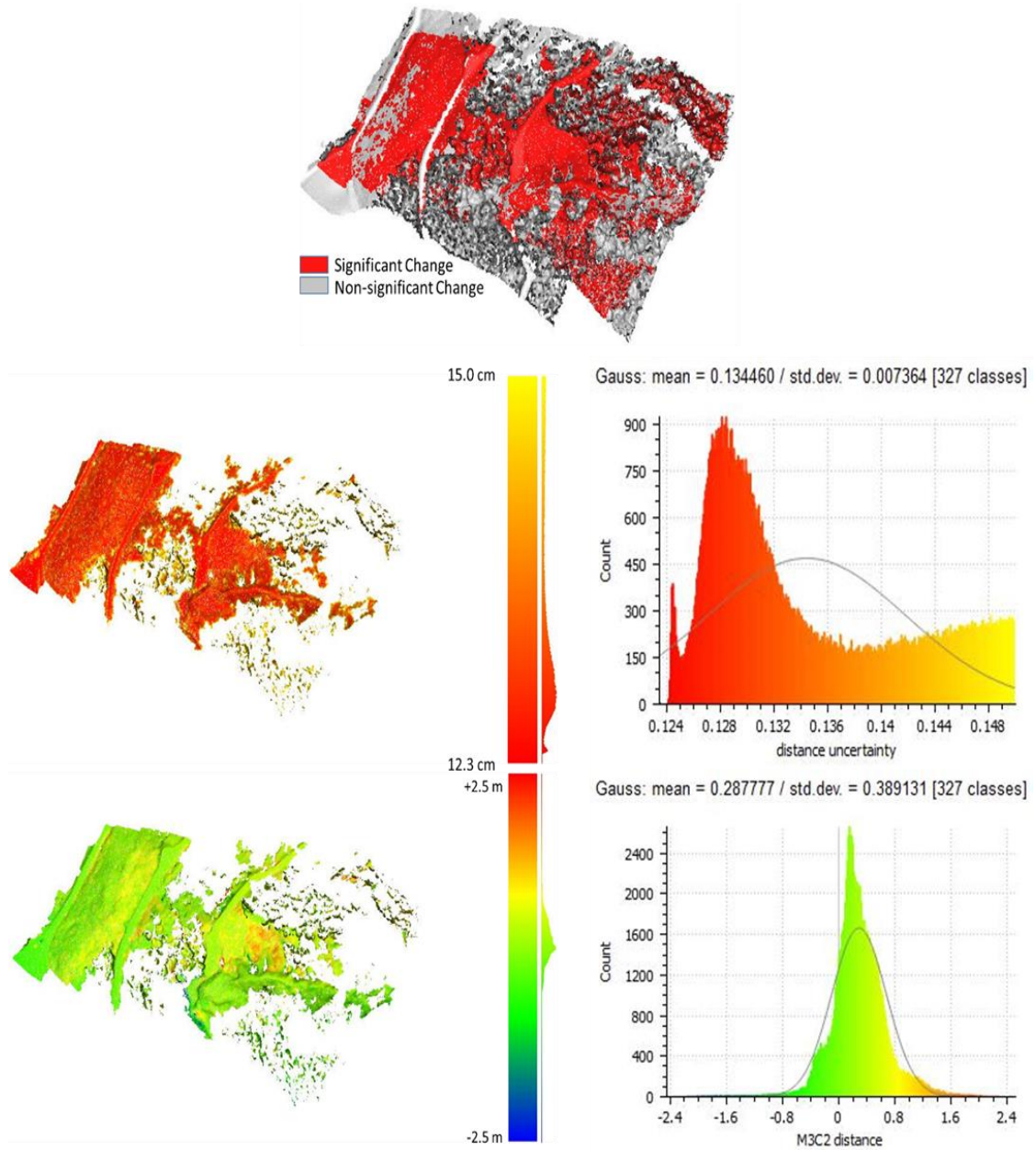


Harita 3.2. 2009 yılına ait LIDAR ve birinci İHA uçuşu verileri DEM farkları ile elde edilen deformasyon haritası.

Çalışmada zaman serilerinin devamındaki yani birinci ve ikinci İHA uçuş verileri arasındaki heyelan aktivitesinin izlenmesi amacıyla ancak alan üzerindeki yoğun vejetasyon varlığı yüzünden DEM farkları yöntemi yerine nokta bulutu karşılaştırma yöntemi olan M3C2 yöntemi kullanılmıştır. İHA verilerinden SfM algoritması ile elde

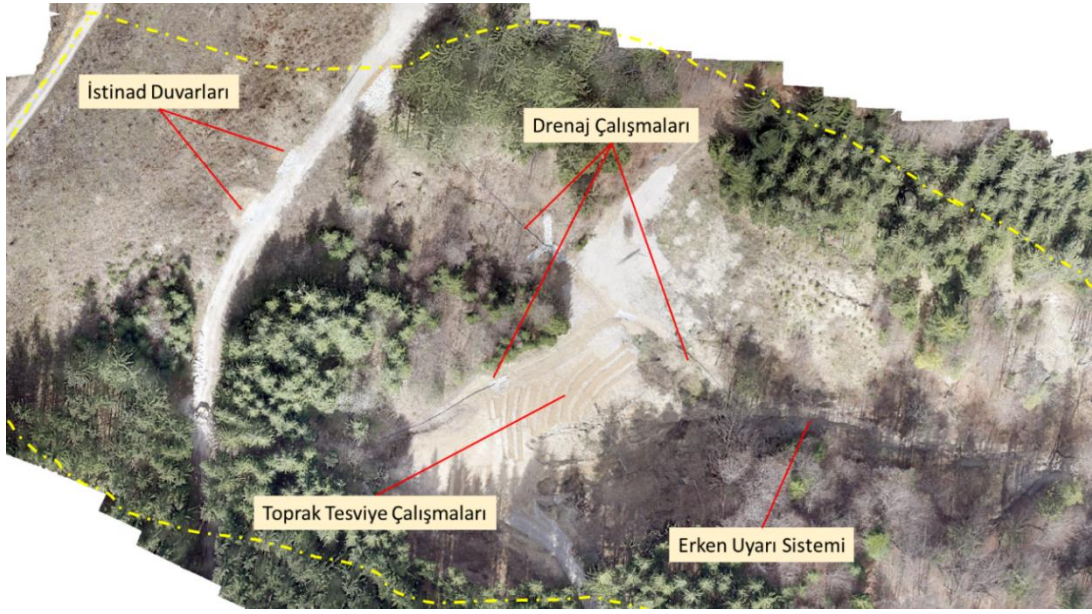


edilen 3B nokta bulutlarının modellenmesi yoğun vejetasyon varlığı nedeniyle daha fazla gürültü içereceğinden dolayı bu yöntem tercih edilmiştir. M3C2 yönteminin çıktıları Harita 3.3'te verilmektedir. Buna göre M3C2 mesafe değerleri elde edilen fark değerlerinden 15 cm'den daha büyük olan mesafe belirsizlik değerleri ile istatistiksel olarak anlamsız olan değerlere sahip piksellerin elimine edilmesiyle -2,5 m ile 2 m arasında belirlenmiştir. Buna göre geriye kalan veride belirsizlik değerleri 12,3 cm ile 15 cm arasında değişmektedir. Ortalama belirsizlik değeri ise 13,4 cm ve standart sapma değeri de 7,4 cm olarak elde edilmiştir (Harita 3.3).



Harita 3.3. Birinci ve ikinci İHA uçuş verileri ile elde edilen M3C2 algoritması sonuçları.

Bu çalışmada ikinci ve üçüncü İHA uçuş verileri arasındaki dönemde ne DEM farkları ne de M3C2 yöntemi kullanılarak heyelan aktivitesi izlenememiştir. Çünkü bu dönem içerisinde saha da heyelan kontrol amaçlı inşa çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu inşa çalışmaları ile gerçekleştirilen kazı çalışmaları ile toprak malzemesi yerdeğiştirmiş ve topoğrafya önemli derecede değişikliğe uğratılmıştır. Bundan dolayı üçüncü İHA uçuş verisi ile üretilen yüksek yersel çözünürlüklü ortofoto mozaik görüntü alanda gerçekleştirilen heyelan stabilizasyon/kontrol çalışmalarının görsel olarak izlenmesine imkan vermiştir (Harita 3.4).



Harita 3.4. Üçüncü İHA uçuşu ile üretilen ortofoto görüntü üzerinde sahada yapılan heyelan stabilizasyon/kontrol çalışmaları.

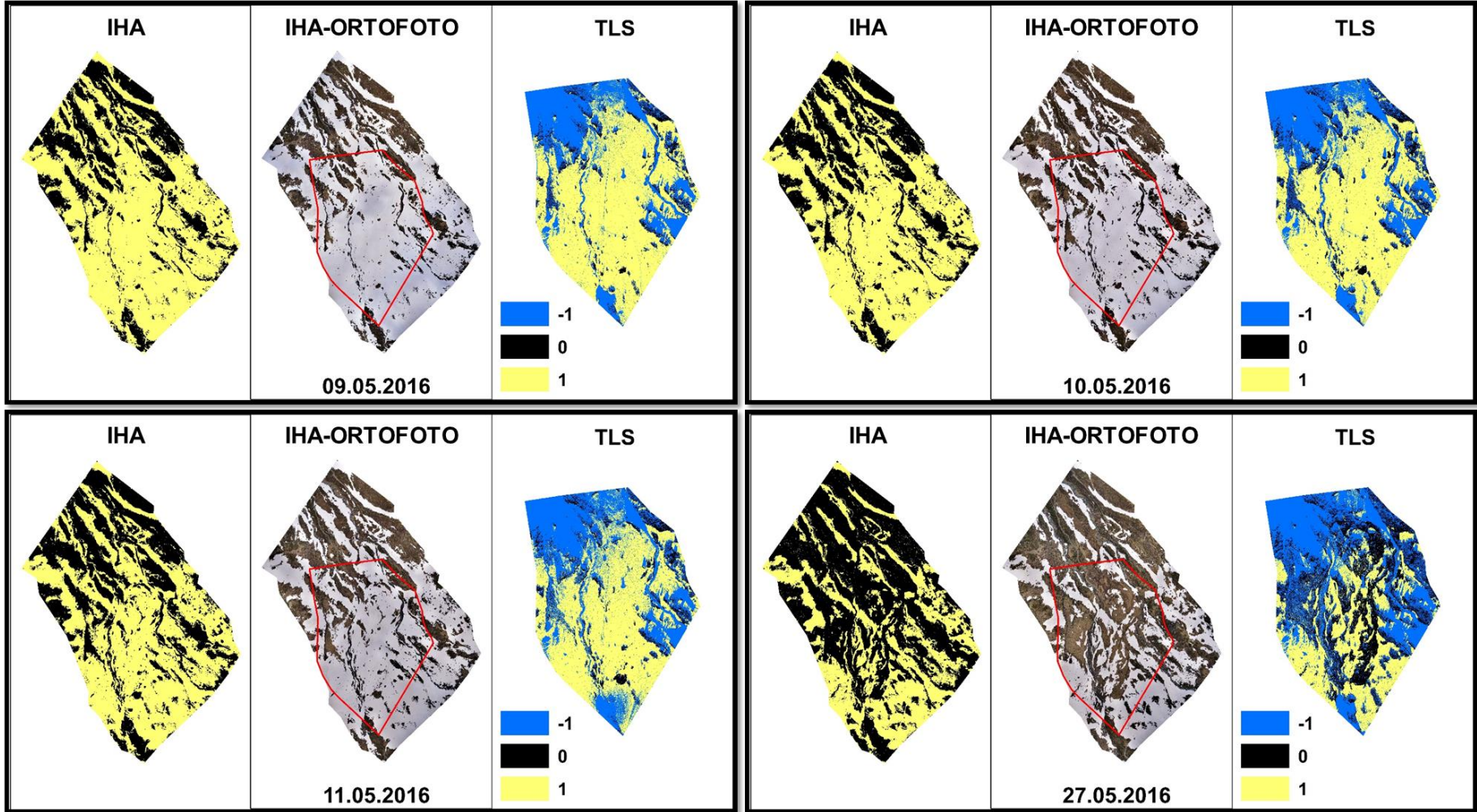
## **3.2. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİNE AİT BULGULAR**

### **3.2.1. İHA ve TLS tabanlı Ortofoto Mozaik Görüntüler ile Kar Kaplı Alanların Haritalanmasına Ait Bulgular**

Bu çalışmada kar erimesinin izlenmesi ilk olarak karla kaplı alanlardaki değişimin belirlenmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Kar örtüsü haritaları İHA ve TLS tabanlı ortofoto mozaik görüntülerin mavi bandına uygulanan bir eşik değeri sınıflandırılması ile üretilmiştir (Harita 3.5). Gerçekleştirilen sınıflandırma uygulamasının doğruluk değerlendirmesi ise kullanıcı doğruluğu, üretici doğruluğu ve toplam doğruluk

değerlerinin hesaplanması ve ayrıca Kappa istatistiğinin hesaplanması ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Bu sonuçlara göre bütün İHA tabanlı ortofotolar %97 gibi çok yüksek bir doğruluk değeri ile karla kaplı alanları kar kaplı olmayan alanlardan ayırt edilmesine olanak sağlamıştır. İHA tabanlı ortofotolardan kar ile kaplı piksellerin sınıflandırılmasına ait kullanıcı doğruluk değeri 1 olarak elde edilirken, kar olmayan piksellerin sınıflandırılmasına ait üretici doğruluk değeri de 1 olarak elde edilmiştir. Üretici doğruluk değeri çok yüksek elde edilmiş olmasına rağmen 1 olarak elde edilememiştir çünkü su, çıplak kaya ve küçük taşların tanımlanan eşik değerinden daha yüksek piksel değerlerine sahip olmasından dolayı yanlış şekilde sınıflandırılmıştır (Harita 3.6). Toplam doğruluk değerleri TLS tabanlı ortofotolar için de yüksek olarak elde edilmiştir (>%85). Ancak İHA tabanlı ortofotolar kadar yüksek doğruluk sağlamamıştır. Elde edilen TLS karla kaplı sınıf değerleri için kullanıcı doğruluğu yine de oldukça yüksektir (Çizelge 3.1). En düşük kullanıcı doğruluğu değeri, en büyük boşluk yüzdesine ve en düşük karla kaplı alan sayısına sahip olan 27 Mayıs 2016 tarihli ortofoto görüntüden elde edilmiştir (Çizelge 3.1). Kar örtüsünün kapladığı alandaki değişim hem İHA hem de TLS tabanlı sınıflandırılmış ortofoto görüntülerin zaman serilerinin analiz edilmesine bağlı olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). Kar erimesine bağlı olarak ortaya çıkan kar örtüsünün alansal büyüklüğündeki azalma her iki teknik ile elde edilen kar örtüsü haritalarında açık şekilde gözlemlenebilmektedir. İHA tabanlı veri TLS ile tek bir noktadan tarama verisinden daha büyük bir alan kaplamaktadır. Bunun dışında tarama açısı nedeniyle TLS verilerinde çok sayıda boşluk (yani NoData değerine sahip pikseller) ortaya çıkmıştır (Harita 3.7). TLS verilerindeki boşluklar taranan alanın %30'undan fazlasını kapsamaktadır (Çizelge 3.2). Buna bağlı olarak yapılan değerlendirmede karla kaplı alanlar erimeye bağlı olarak azaldıkça TLS tabanlı ortofoto görüntülerdeki boşlukların arttığı da gözlenmektedir. Çalışma alanındaki topoğrafya düze yakın bir durumda olduğu için TLS sistemi ile elde edilen görüntülerde problemler daha çok gözlenmiştir. Ayrıca beklendiği gibi nadir doğrultu da görüntü alımı sağlayan İHA sistemleri daha doğru şekilde kar kaplı alanların sınıflandırılmasına olanak sağlamıştır. TLS verilerindeki boşluklar taranan alanın %30'undan fazlasını kapsamaktadır (Çizelge 3.2). Ayrıca, karla kaplı alanlar azaldıkça TLS bazlı ortofotolardaki boşlukların arttığı gözlenmiştir. Çalışma alanı topoğrafisi neredeyse düz olduğundan, TLS, ortofoto oluşturmak için görüntüleri doğru bir şekilde yakalayamamıştır. Beklendiği gibi, görüntülerin en düşük noktadan ele alınması, karla kaplı alanların daha doğru bir sınıflandırılmasına yol açmıştır.





Harita 3.5. İHA ve TLS tabanlı kar örtüsü haritaları (1: Kar örtüsü, 0: Karsız alan, -1: NoData)

Çizelge 3.1. Eşik değeri tabanlı sınıflandırma işlemi doğruluk değerlendirme sonuçları.

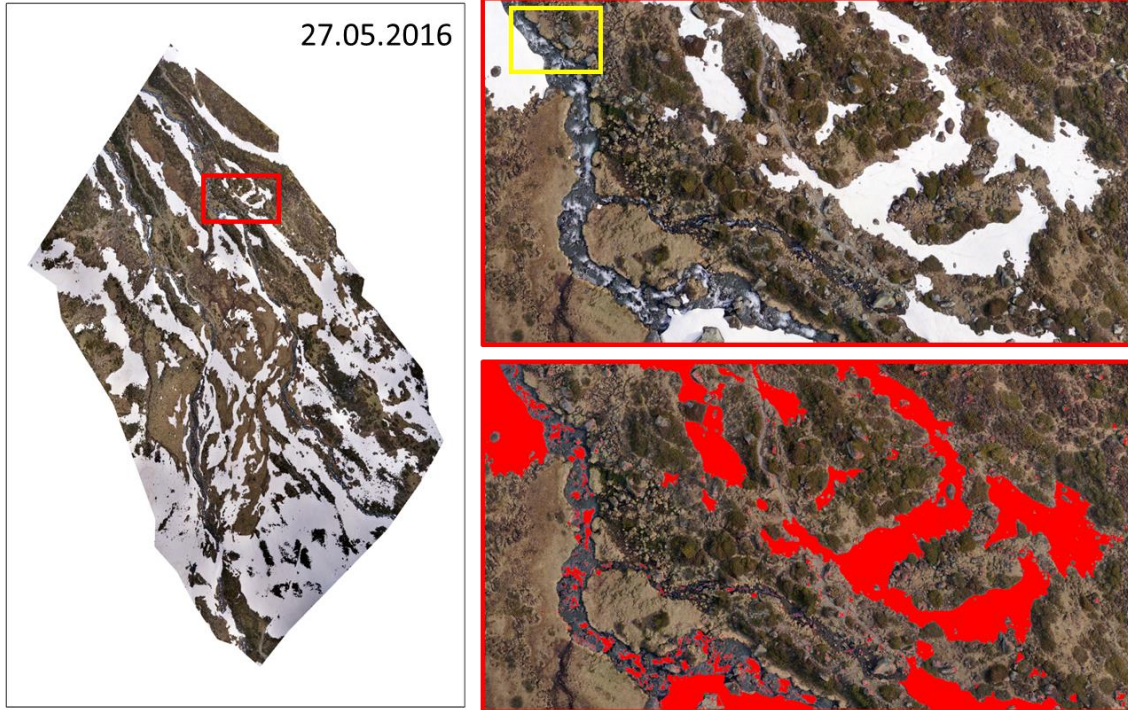
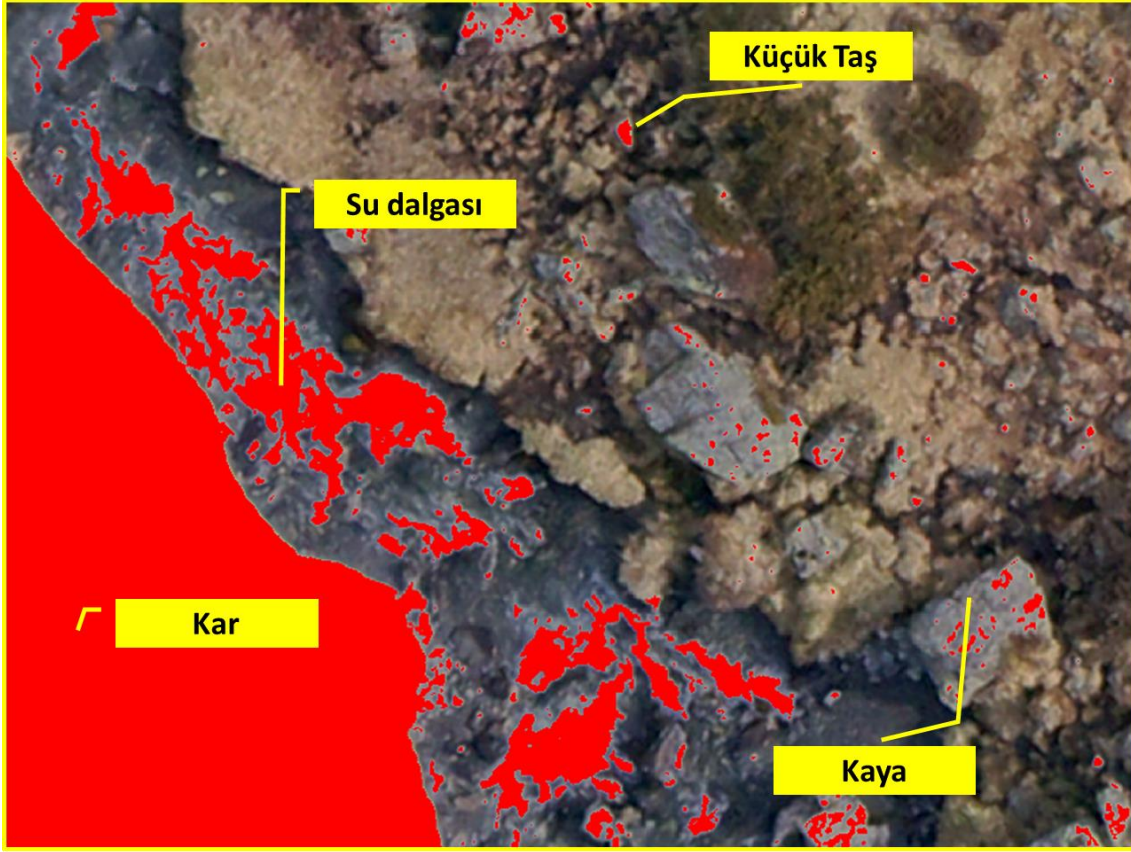
	Sınıflar	9.05.2016		10.05.2016		11.05.2016		27.05.2016	
		UAS	TLS	UAS	TLS	UAS	TLS	UAS	TLS
Kullanıcı Doğruluğu	1	1,00	0,98	1,00	0,96	1,00	0,95	1,00	0,87
	0	0,97	0,74	0,98	0,88	0,94	0,88	0,99	0,95
Üretici Doğruluğu	1	0,97	0,79	0,98	0,89	0,94	0,89	0,99	0,95
	0	1,00	0,97	1,00	0,96	1,00	0,95	1,00	0,88
Toplam Doğruluk		0,98	0,86	0,99	0,92	0,97	0,92	0,99	0,91
Kappa Index value		0,97	0,72	0,98	0,84	0,94	0,83	0,99	0,82

Çizelge 3.2. Eşik değeri tabanlı sınıflandırma sonucu belirlenen karla kaplı alanlara ait sonuçlar.

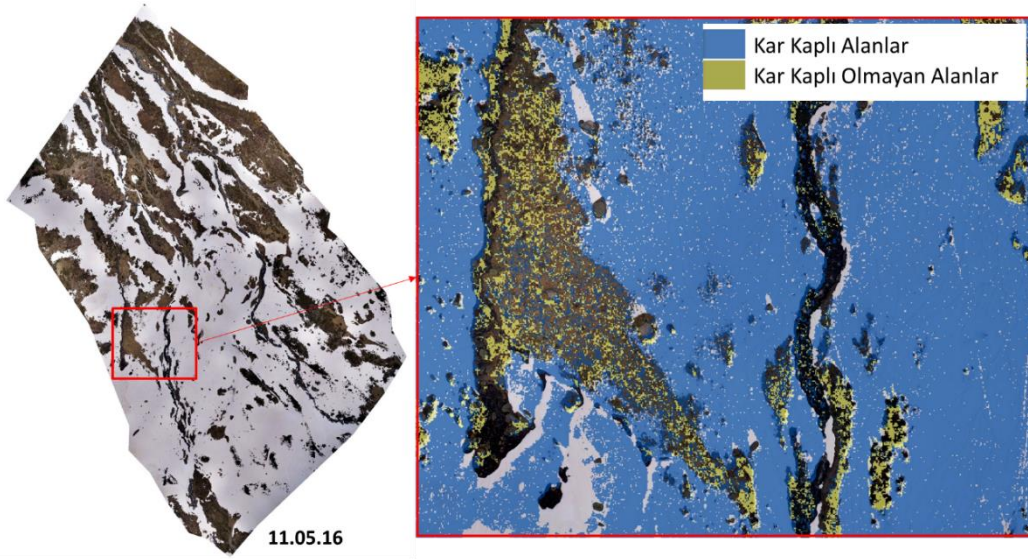
Tarih	İHA		TLS			İHA	TLS	
	Kar ile kaplı piksel sayısı	Kar ile kaplı olmayan piksel sayısı	Kar ile kaplı piksel sayısı	Kar ile kaplı olmayan piksel sayısı	NoData değerine sahip piksel sayısı	Kar ile kaplı alan (%)	Kar ile kaplı alan (%)	NoData değerine sahip piksel (%)
09.05.16	18.580.602	8.122.602	1.681.822	180.374	852.549	69,6	61,9	31,4
10.05.16	17.170.161	9.533.453	1.554.396	250.833	909.473	64,3	57,3	33,5
11.05.16	15.944.740	10.758.035	1.443.553	220.441	1.050.810	52,6	53,2	38,7
27.05.16	10.623.759	16.079.909	805.836	697.481	1.211.432	39,8	29,6	44,6

Burada uygulanan eşik değeri sınıflandırma yöntemi kar örtüsü haritası üretme ve kar erimesinin izlenmesine yönelik olarak kullanılabilen kolay ve basit bir yöntem olarak değerlendirilebilir. Ancak bu yöntemde standart bir eşik değerinden bahsedilememektedir. Ayrıca eşik değeri ve sınıflandırma başarısı sensör özellikleri, ışık koşulları, topoğrafya ve üzerindeki objelere (kaya, çalı, ağaç vb) bağlı olarak oluşan gölge etkisi ile birlikte yüzeyin spektral yansıtma özelliğinin kümülatif etkisine bağlı olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan bu yöntem her ne kadar kolay ve çabuk bir yöntem olarak değerlendirilebilse de çalışma yapılan sahanın özellikleri bu verinin bu amaç için kullanılabilmesine imkân sağlamıştır. Bu saha özellikleri, düze yakın düşük eğimli topoğrafyası, vejetasyon ve uzun boylu obje varlığının olmaması veya az olmasıdır. Ayrıca uçuşların gerçekleştirildiği saatler ve havanın bulut durumu da etkili olmuştur. Daha gelişmiş sınıflandırma yöntemleri (bant oranlama, kontrolü ve kontrolsüz sınıflandırma gibi) yanlış sınıflandırılan piksel sayısını minimize ederek daha başarılı sınıflandırma sağlayabilir.





Harita 3.6. İHA tabanlı ortofoto görüntüde yanlış sınıflandırılan piksellerin gösterilmesi.

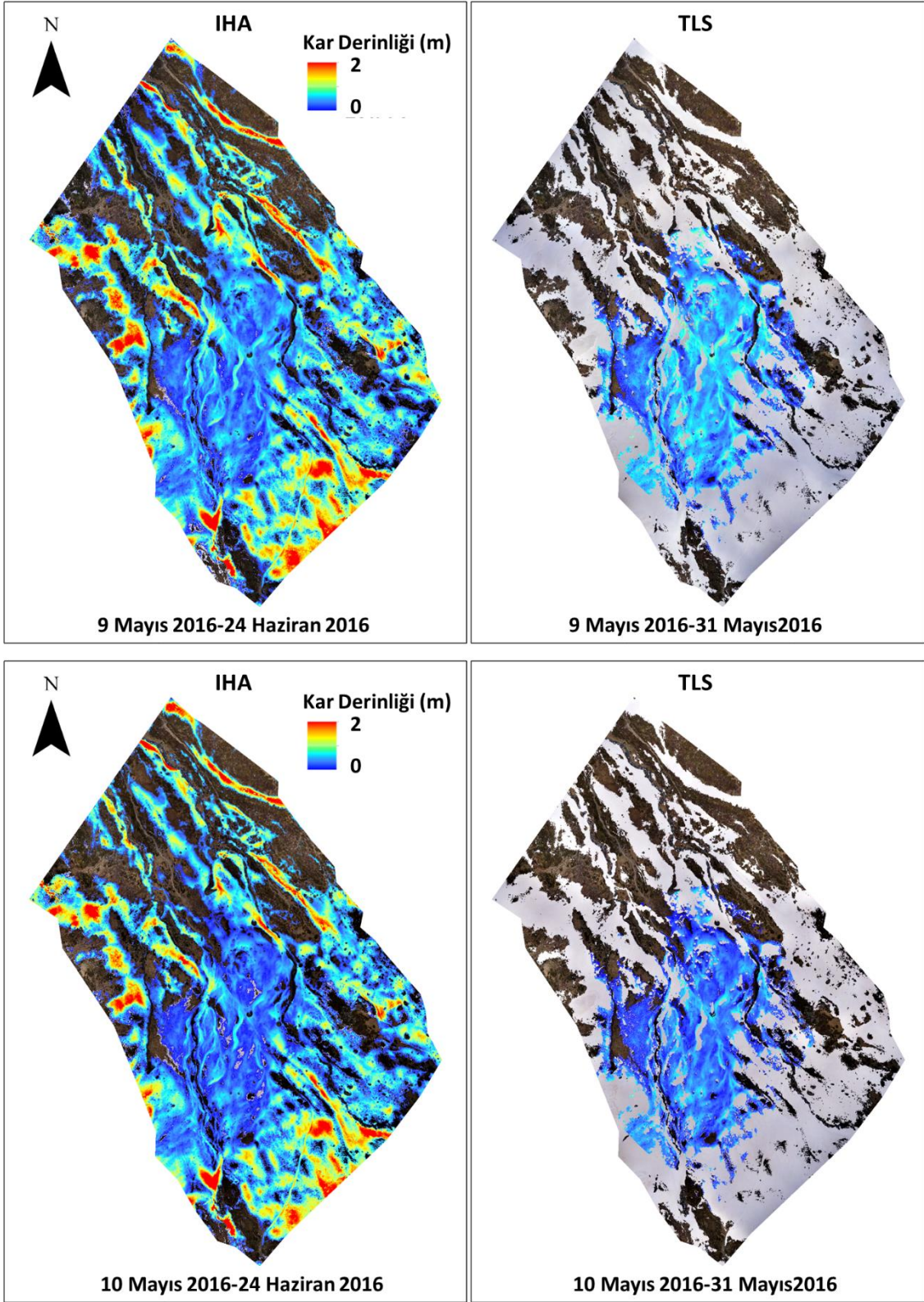


Harita 3.7. TLS tabanlı kar örtüsü haritası. Tarama açısına göre objeler arkasında kalan açıklıklar (NoData).

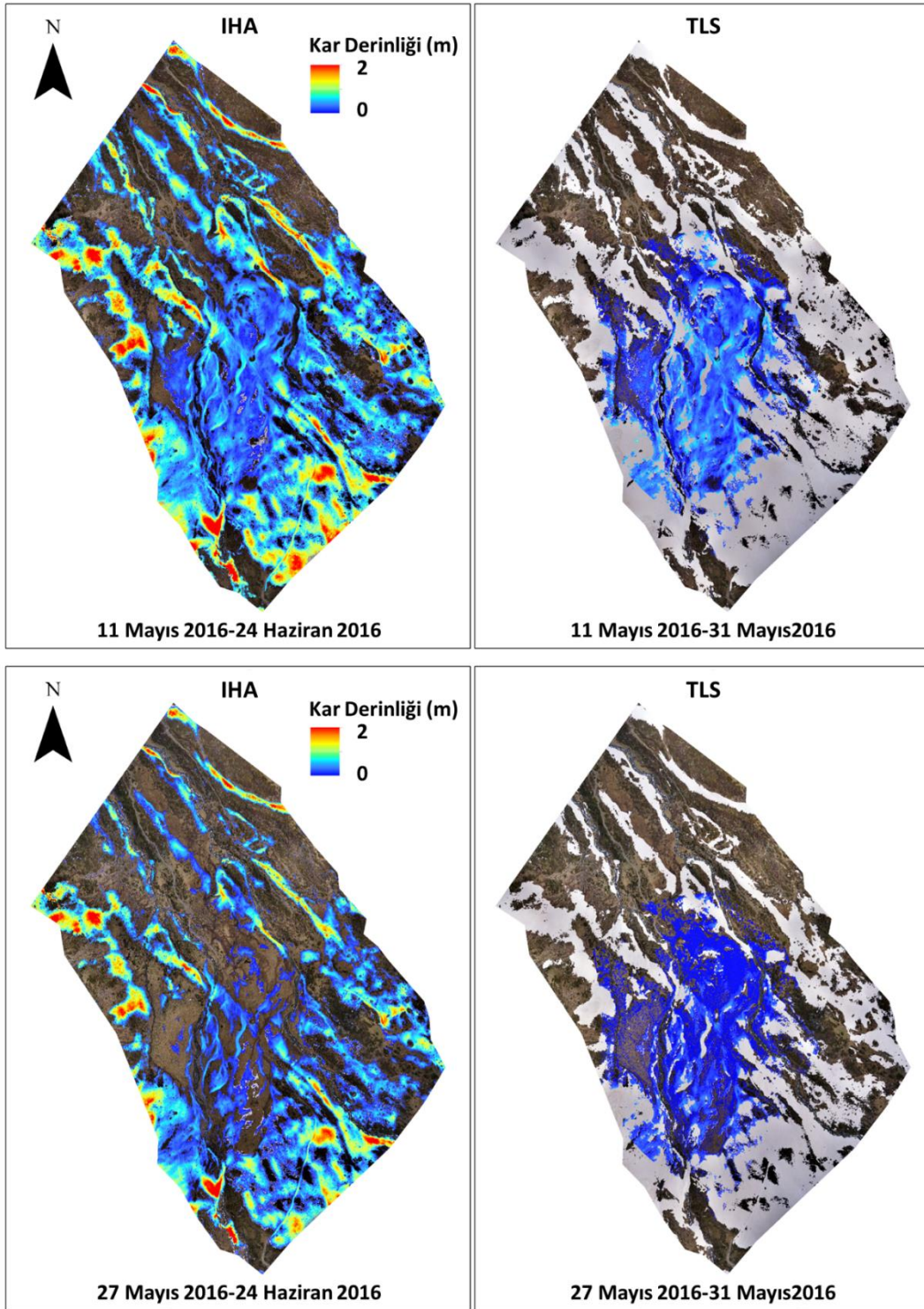
### 3.2.2. Kar Erimesinin Kar Derinlik Değerlerindeki Değişimle İzlenmesine Ait Bulgular

Kar ile kaplı alanların haritalanmasının yanısıra kar erimesinin izlenmesi amacıyla karlı ve karsız dönem verileri kullanılarak DEM farkları yöntemi ile kar derinlik değerleri hesaplanmıştır. TLS verisi ile üretilen karsız dönem DEM verisi (31 Mayıs 2016) tamamen karsız piksellerden oluşmadığından dolayı DEM farkları yöntemi uygulanmadan önce karlı pikseller elimine edilmiştir. Kar derinlik hesaplama amacıyla DEM farkları yöntemi ile elde edilen veriler Harita 3.8 ve Harita 3.9’da gösterilmektedir. IHA tabanlı veri alımının TLS ile veri alımına göre temel avantajı TLS ile bir noktadan tarama yapıldığında elde edilen verinin kapladığı alandan daha büyük alanları kapsayacak şekilde veri alımına imkân sağlamasıdır. Ayrıca TLS verisinin eğik menzil tarama geometrisi yüzünden kaya, çalı vb objelerin arkasında oluşan boşluklara IHA tabanlı verilerde rastlanmamaktadır. IHA tabanlı elde edilen kar derinlik verileri yersel ölçüm verisinin temin edilememiş olmasından dolayı TLS tabanlı kar derinlik verileri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yüksek çözünürlüklü yakın menzil uzaktan algılama teknikleri ile kar derinlik değerlerindeki değişimin izlenmesinde ayrıca dikkatli olunmalıdır çünkü karlı ve karsız dönem modellerinin hatalarının da eklenmesi yüzünden yüzey alanı ölçümlerine göre daha fazla oranda hata içermektedir [339]. IHA ve TLS tabanlı kar derinlik değerlerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasına ilişkin bilgiler Çizelge 3.3’te verilmektedir. Bu karşılaştırmaya göre IHA tabanlı kar derinlik değerleri zaman serileri boyunca TLS verisine göre 0,07 m ile 0,14 m RMSE hata ile edilmiştir. En yüksek RMSE değerine sahip olan IHA verisi 9 Mayıs 2016 tarihinde elde edilen veride gözlenmektedir.





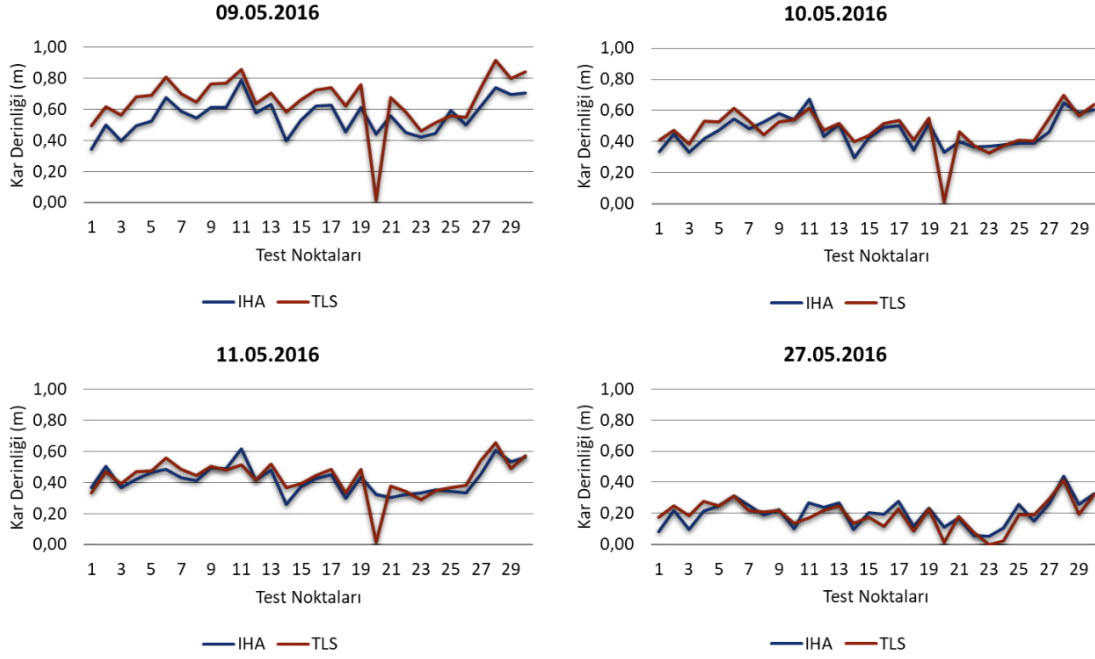
Harita 3.8. İHA ve TLS tabanlı üretilen kar derinlik haritaları.



Harita 3.9. İHA ve TLS tabanlı üretilen kar derinlik haritaları.

Bunun nedeni ise İHA tabanlı kar derinlik değerlerinin TLS tabanlı kar derinlik değerlerine göre çoğunlukla daha küçük değerlerde elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca İHA ve TLS verileri bütün zaman serisi boyunca karlı pikseller üzerinde üretilen rastgele dağılımlı 30 adet noktadan yararlanarak bağımsız t-testi kullanılarak da istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan bağımsız t-testi sonuçlarına göre İHA ve TLS tabanlı kar derinlikleri arasında 9 Mayıs

2016 tarihli veri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunurken diğer tarihlere ait veriler arasında bir fark bulunmamaktadır. IHA ve TLS tabanlı kar derinlik değerleri Şekil 3.2’de ayrıca grafik olarak da karşılaştırılmaktadır. Verilen grafik ile birlikte Çizelge 3.3’te verilen ME değerine (0,08) bakıldığında 9 Mayıs 2016 tarihli veri için TLS tabanlı kar derinlik değerlerinin IHA tabanlı değerlerden daha yüksek olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.2. Zaman serileri boyunca IHA ve TLS tabanlı kar derinlik değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 3.3. İHA tabanlı elde edilen kar derinliklerinin TLS verileri ile karşılaştırılması için kullanılan ME, MAE, SD ve RMSE değerleri.

Tarih	ME	MAE	SD	RMSE
09.05.2016	0,08	0,12	0,10	0,14
10.05.2016	0,01	0,07	0,09	0,09
11.05.2016	0,01	0,06	0,08	0,08
27.05.2016	-0,01	0,04	0,06	0,07

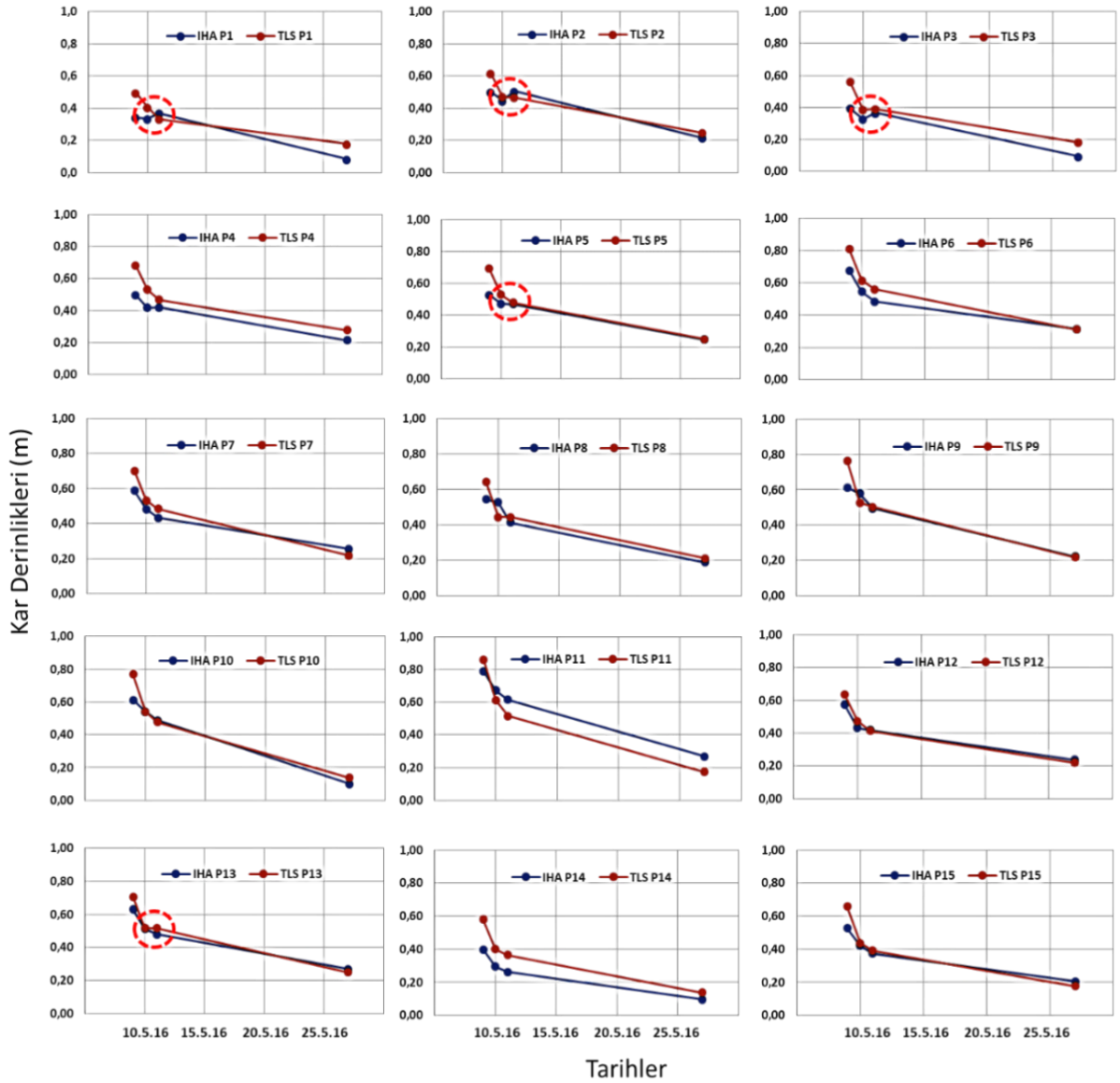
Zaman serileri boyunca IHA ve TLS tabanlı kar derinlik değerlerinin karşılaştırılması için DSM verilerdeki kar ile kaplı pikseller üzerinde konumlanan rastgele dağılımlı 15 adet nokta belirlenmiştir (Harita 2.3). Bu noktalardan yararlanarak zaman serisi boyunca kar derinliklerinde meydana gelen değişimleri gösteren grafikler üretilmiştir (Şekil 3.3). Bu grafikler incelendiğinde iki zaman serisi arasında bir gün gibi kısa dönem olan dönemler için özellikle kar erimesinin az gerçekleştiği piksellerde yanlışlar söz konusu olmaktadır. Örneğin Şekil 3.3’te de gösterilen IHA-P1, IHA-P2, IHA-P3 ve IHA-P4 ile TLS-P5 ve TLS-P13 isimli



noktalarda bir önceki gün kar yağışı gerçekleşmemiş olmasına rağmen 11 Mayıs 2016 tarihli verideki kar derinliği 10 Mayıs 2016 tarihli verilerden daha yüksek olacak şekilde elde edilmiştir. Kar derinlik haritaları incelendiğinde aralarında bir gün zaman farkı olan seriler arasında kar erimesinin izlenebilmesinde IHA tabanlı değerlerin TLS verilerine göre daha yanıltıcı olduğu gözlenmektedir. Ancak yine de IHA verilerinin büyük oranda tutarlı sonuçlar vererek kar erimesinin izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Bunlara ilave olarak, özellikle akarsu üzerinde meydana gelen ani erime olayları bütün zaman serileri boyunca açık şekilde gözlenebilmektedir (Harita 3.10, mor renkli kareler içinde gösterilen alanlar). IHA tabanlı modellerin daha doğru eş kayıt edilebilmesi amacıyla çok sayıda yapay YKN'ler üretilerek kullanılmasına rağmen, IHA DSM verilerinde bazı pikseller bir önceki tarihli veriden daha büyük yükselti değerlerinde modellenmiştir (Harita 3.10, sarı renkli kare içinde kalan pikseller). Özellikle 11 Mayıs 2016 tarihli IHA tabanlı elde edilen DSM verisi 190 adet yapay YKN ile yeniden SfM ile modelleme yapılmadan kar derinlik haritalama ve erimenin izlenmesi çalışmasına imkân vermemiştir. Bunun sebebi genel olarak SfM algoritması ile nadir ya da dikey doğrultularda açık diziler (veya eşit aralıklı paralel) şeklinde veri alımı gerçekleştirilen durumlarda 3B modellerde ortaya çıkan “genel deformasyon (bükülme veya eğilme etkisi (bending or doming effect))” olmaktadır [392]. Bu hata daha çok 11 Mayıs 2016 tarihli IHA-DSM verisinde gözlenmektedir. Sebebi ise kamera ağ geometrisinin kötü şekilde planlanması ile ortaya çıkan yanlış fotogrametrik planlama olarak ifade edilmektedir [392]. Görüntü eşleştirme ve ışın demetleri ile dengeleme işlem aşamasında YKN'lerin tanımlanması modellerdeki Z değerlerinde azalmaya sebep olmasına rağmen burada gözlemlenen eğilme hatasının kalıcı olduğu görülmektedir [393]. IHA platformlarında olduğu gibi dikey verim alım geometrisi kullanıldığı durumlarda yakın paralel şeritlerde alımı gerçekleştirilen görüntülerden model üretilmesi durumunda SfM uygulamasındaki otomatik kalibrasyonlu görüntü eşleştirme ve ışın demetleri ile dengeleme radyal lens kaymalarının rektifikasyonuna imkân verememekte olduğundan dolayı DEM verilerinde eğilme hatalarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır [394, 395]. Ayrıca alınan görüntülerin kalitesi de önemli rol oynamaktadır. Görüntü çözünürlüğü ve keskinliği gibi görüntü kalite parametreleri 100 m'den daha uzun menzillerde alım gerçekleştirildiğinde daha önemli olmaktadır [396]. Objeye (ya da hedefe) olan mesafe arttıkça ölçüm hatalarında artış gözlenmektedir [397], [398].

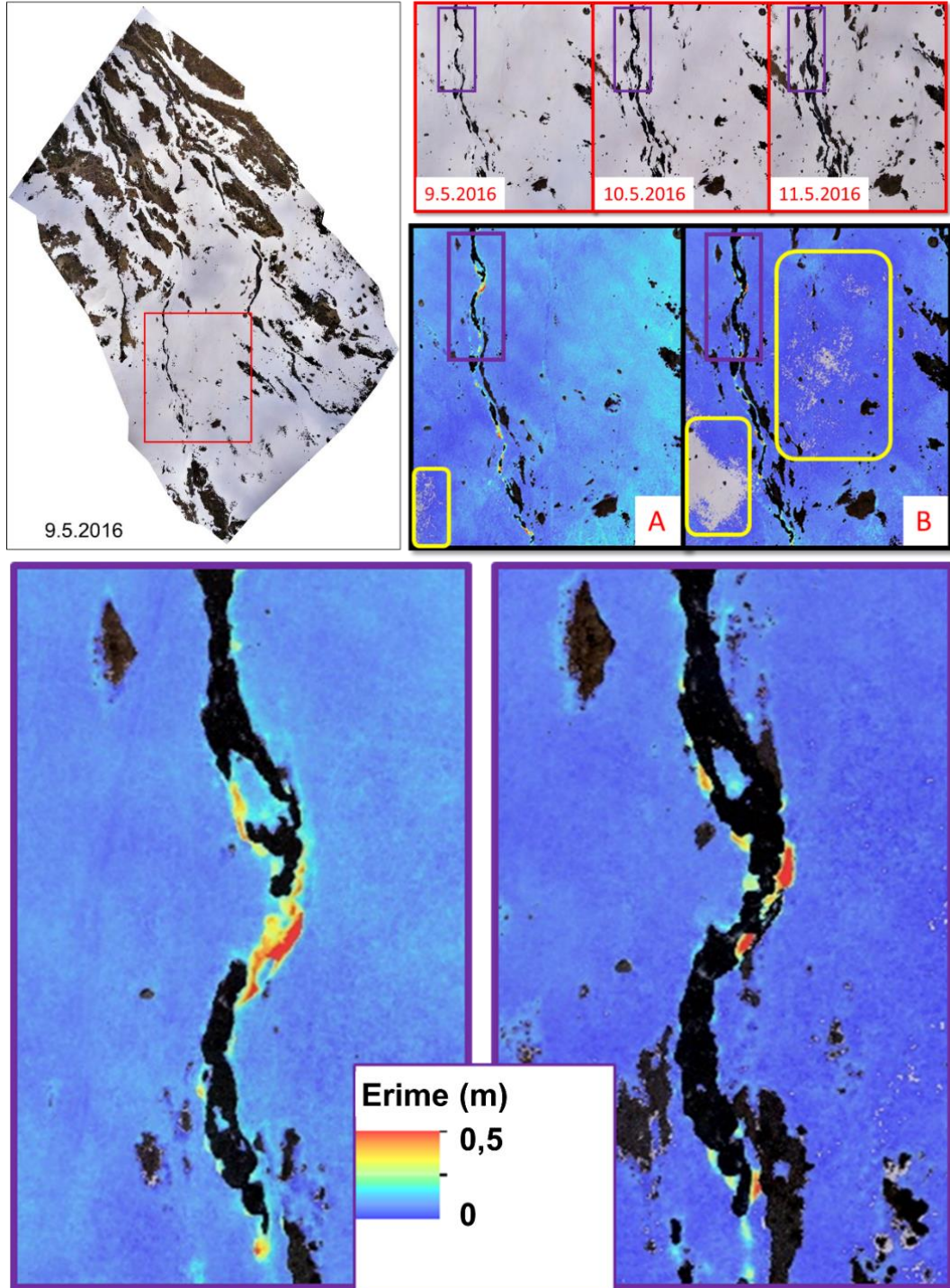




Şekil 3.3. Zaman serileri boyunca karlı pikseller üzerinde rastgele tanımlı 15 adet noktadaki İHA ve TLS verilerinin kar derinliği-zaman grafikleri.

Bu çalışmada da düşük kaliteli görüntülerden üretilen yükseklik modellerinde (örneğin 24 Haziran 2016 tarihli veri) olduğu gibi pikseller olması gerekenden daha büyük yükseltilerde modellenmiştir. Düşük kaliteli görüntülerden üretilen modellerde algoritma kamera konumları hassas şekilde optimize edilememektedir. Çalışma kapsamında düşük kaliteli görüntüler SfM işleme aşamasında modelde boşlukların ortaya çıkmasına neden olacağından dolayı elimine edilememiştir. Yine modellemede kullanılan YKN'lerin sayıları ve dağılımları da modeldeki kayma hatalarının azalmasında ve buna bağlı olarak sonuç verinin kalitesi üzerinde etkili olmaktadır. Bundan dolayı da yapay 190 adet YKN üretilerek daha doğru kar derinlik değerlerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Bütün bu faktörlere ilaveten kar örtüsü mevcudiyeti de görüntülerdeki karlı piksellerin birkaç metreye kadar hatalı şekilde ölçülmesine

neden olabilmektedir [339]. Kar örtüsü yüzünden oluşan düşük görüntü tekstürü algoritmanın yoğun görüntü eşleştirmede oluşacak düşük performans daha çok belirsizlik oluşturacaktır. Bu durum ise yakın kızılötesi görüntüler kullanılmasıyla önlenmektedir [337].



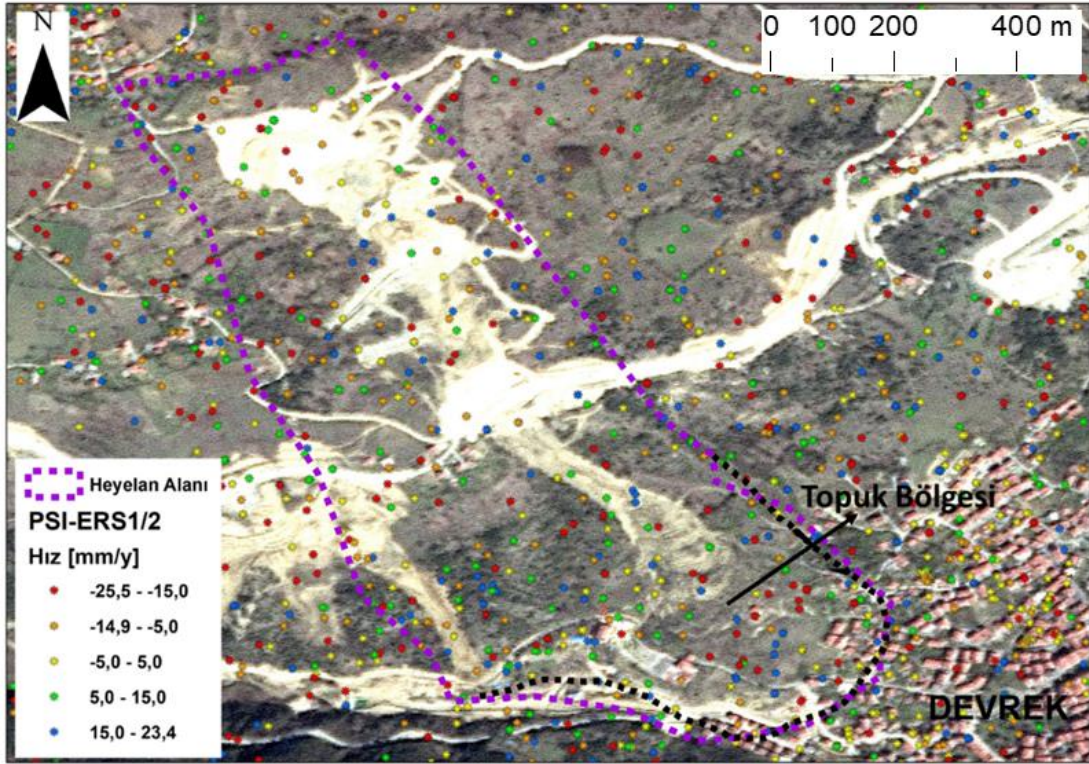
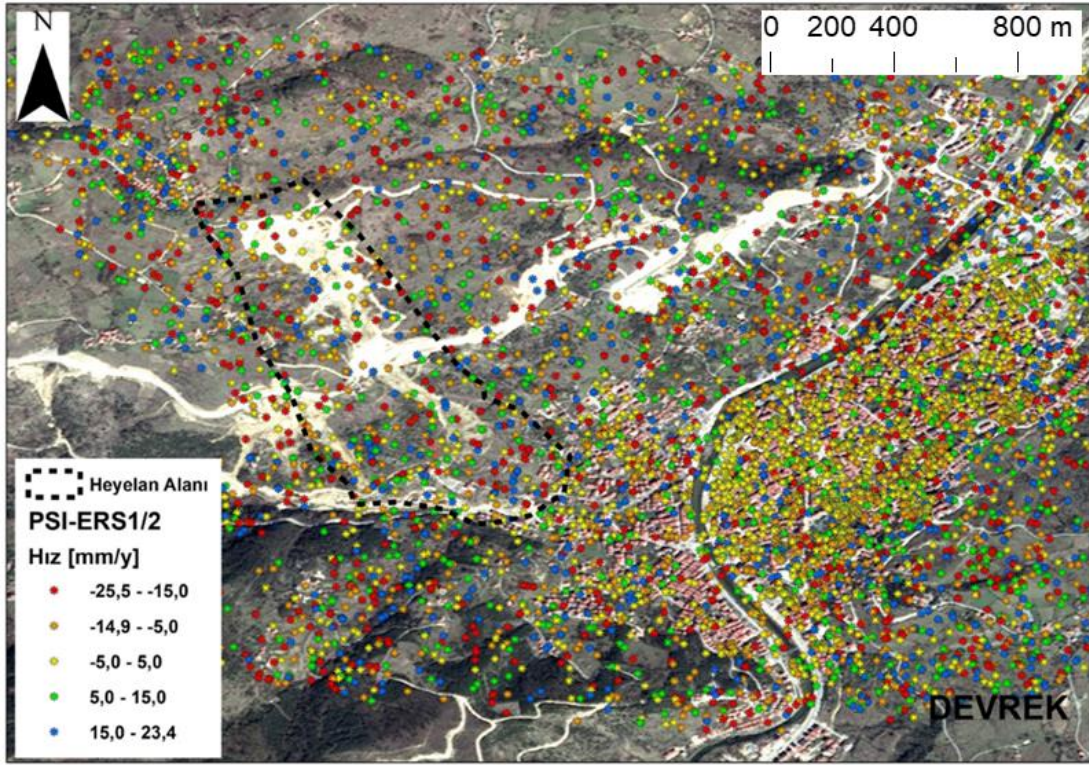
Harita 3.10. İHA tabanlı kar derinlik haritası (A ve B bir önceki tarihli veriye göre daha yüksekte hatalı modellenen kar örtüsü (üstte) ve ani kar kütlesi erimesi (altta)).

### **3.3. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: DEVREK HEYELANI (ZONGULDAK) VE HİMMETOĞLU HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİNE AİT BULGULAR**

#### **3.3.1. Zonguldak İli Devrek İlçesi Karşıyaka Mahallesi Heyelanına Ait PSI Analizi Bulguları**

Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesinde 16 Temmuz 2015 tarihinde meydana gelen heyelan alanında uzun dönemli heyelan kaynaklı deformasyon ve yerdeğiştirme alanlarının belirlenmesi amacıyla ilk olarak ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR ve Sentinel-1A uydularından 1992-2015 yılları arasında (8.437 gün) PSI analizi gerçekleştirilmiştir. ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait mevcut görüntülerin kapsadığı 1992-2001 yılları arasındaki dönem, Envisat ASAR uydu görüntülerinin kapsadığı 2003-2010 ve Sentinel-1A uydu görüntülerinin kapsadığı 2014-2015 yılları arası dönem olmak üzere üç farklı dönemde inceleme yapılmıştır. PSI analizinin gerçekleştirilmesi için en az 20 adet SAR görüntünün analize dâhil edilmesi gerekmektedir. ERS-1 uydusuna ait analiz için kullanılabilir olan görüntü sayısı 12 adettir. ERS-2 uydusuna ait ise 17 adet görüntü temin edilebilmiştir. ESA'nın bu iki uydusuna ait görüntüler kombine edilerek toplamda 29 adet görüntüden 1992-2001 yılları arasında 3349 günlük dönem için bir analiz yapılmıştır. Devamındaki dönem için ise Envisat ASAR uydusuna ait 39 adet görüntü kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. ERS-2 uydusuna ait son veri 20 Temmuz 2001 yılına ait olup Envisat ASAR uydusuna ait ilk veri ise 12 Aralık 2003 tarihlidir. Bu uydu verilerinin alım tarihleri arasındaki 875 günlük dönemde heyelan kaynaklı deformasyon ve yerdeğiştirme alanları hakkında bilgi üretilmemiştir. Envisat ASAR uydusuna ait görüntüler ise 2003-2010 yılları arasındaki 2.380 günlük dönemi kapsamaktadır. Devamındaki dönem için ise Sentinel-1A uydusuna ait görüntüler kullanılmıştır. Envisat ASAR uydusuna ait son görüntü 23 Temmuz 2010 tarihli olup Sentinel-1A uydusuna ait ilk veri ise 16 Ekim 2014 tarihlidir. Bu iki tarih arasındaki 1546 günlük dönem için yine analiz yapılamamıştır. ERS-1 ve ERS-2 uydu SAR görüntülerinin kapsadığı döneme ait PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızı haritası Harita 3.11'de verilmektedir. Elde edilen haritaya göre deformasyon hızları sinyalin bakış hattı doğrultusunda (line of sight) SAR verilerinin kapsadığı dönem boyunca -25,5 mm/yıl ile 23,4 mm/yıl arasında değişmektedir. Negatif değerler oturma pozitif değerler ise zemindeki yükselmelere karşılık gelmektedir. Harita 3.11'de de görülebileceği gibi Devrek ilçe merkezi, yerleşim alanları dışında kalan ancak MTA heyelan envanter haritasına göre (bkz. Harita 2.4) aktif ve sünme olaylarının meydana geldiği bölgelerde deformasyon hızları yüksek olarak elde edilmiştir.





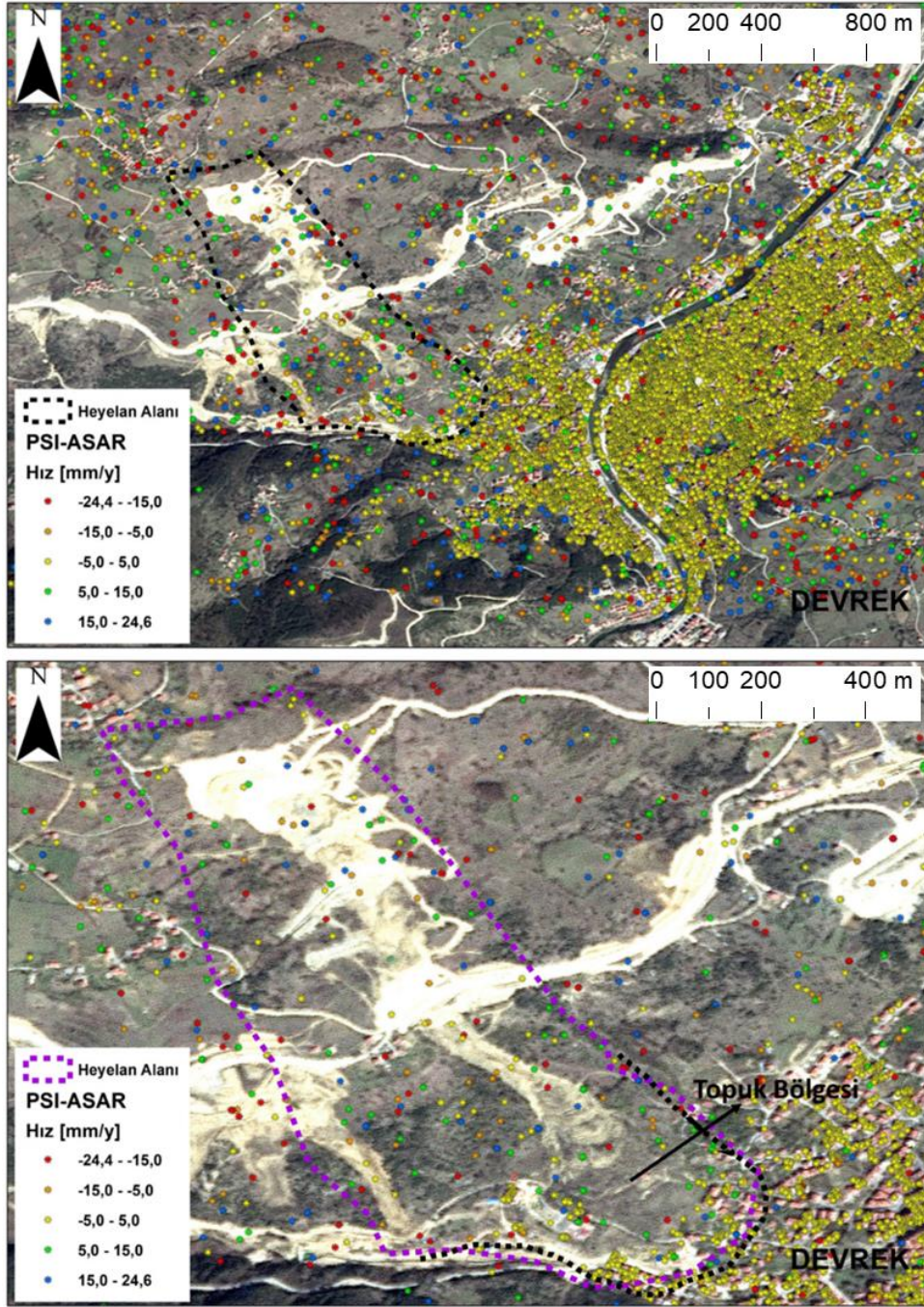
Harita 3.11. ERS-1/2 uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası.

Çalışma alanında tespit edilen PS noktalarının 394 tanesi heyelan alanı içerisinde yer almaktadır. Bu PS noktalarının hızları  $-25,4$  mm/yıl ile  $23,1$  mm/yıl arasında değişmekte olup toplamı  $-239,6$  mm/yıl, ortalaması ise  $-0,6$  mm/yıl ve standart sapması  $14,3$  mm/yıldır. Heyelan alanı içerisinde kalan PS noktalarının 16 tanesi için hız hassasiyetleri 1 olup geriye kalan 378

noktanın hız hassasiyet değerleri 0,24 mm/yıl ile 0,37 mm/yıl arasında değişmektedir. Ortalama hız hassasiyet değeri ise  $<0,4$  mm/yıl olarak elde edilmiştir. Çalışmada PSI analizinde PS noktaların belirlenmesinde koherens eşik değeri 0,6 olarak belirlenmiştir. ERS-1/2 verilerinin PSI analizinde koherens eşik değeri 0,6 olarak belirlenmiş ve bu değerden daha küçük koherens değerine sahip PS adayları elimine edilmiştir. Heyelan alanı içerisinde kalan PS noktalarının koherens değerleri 0,60 ile 0,69 arasında değişmektedir. Heyelan alanında kalan PS noktalarının ortalama koherens değeri 0,62 olarak elde edilmiştir. Bu değer 1'e yakın olması belirlenen noktadaki yerdeğiştirme ve hız bilgilerinin daha güvenilir olması anlamına gelmektedir. Ancak üzerinde her ne kadar yoğun vejetasyon örtüsü bulunmasa da yerleşim alanı dışında olan bu bölgede koherens değeri 0,6'dan daha büyük 394 adet PS belirlenebilmiştir. PSI analizinin bir diğer problemi olan PS noktaların belirlenmesi çalışılan heyelan alanı için önemli bir kısıt olmamıştır. Yine koherens değerinin daha düşük olmasının bir sebebi analizde kullanılan veriler arasındaki zamansal ana hat mesafe değerleridir. Zamansal çözünürlüğü 35 gün olmasına rağmen ESA arşivlerinden temin edilebilen çalışma alanı için mevcut veriler düzenli aralıklara sahip değildirler.

Çalışma alanında Envisat ASAR uydu SAR görüntülerinin kapsadığı döneme ait PSI analizi sonucu elde edilen deformasyon hızı haritası Harita 3.12'de gösterilmektedir. Elde edilen haritaya göre 2003-2011 yılları arası dönemde deformasyon hızı  $-24,4$  mm/yıl ile  $24,6$  mm/yıl arasında değişmektedir. Devrek ilçe merkezi yerleşiminin bulunduğu bölge genel olarak stabil olarak haritalanırken, etrafında yer alan ve yerleşim olmayan bölgelerde deformasyon hızlarının daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Envisat ASAR verileri ile elde edilen deformasyon haritasının ERS-1/2 verileri ile elde edilen deformasyonlarla benzer bölgelerde benzer hızlarda olduğu gözlenmektedir. Envisat ASAR uydu SAR görüntüleriyle gerçekleştirilen PSI analizi sonucunda heyelan alanı içerisinde 357 adet PS nokta belirlenmiştir. Bu noktaların hızları ise  $-23,7$  mm/yıl ile  $24,3$  mm/yıl arasında değişmekte olup toplamı  $391,11$  mm/yıl, ortalaması  $1,1$  mm/yıl, standart sapması ise  $9,8$  mm/yıldır. Heyelan alanı içerisinde belirlenen PS noktalarının 16 tanesinin hız hassasiyet değeri  $1$  mm/yıl iken geriye kalan 341 adet PS noktanın hız hassasiyet değeri  $0,21$  mm/yıl ile  $0,48$  mm/yıl arasında değişmektedir. Ortalama hız hassasiyet değeri ise ERS-1/2 verilerine benzer şekilde  $<0,4$  mm/yıl olarak elde edilmiştir. ERS-1/2 verilerinden farklı olarak Envisat ASAR verileri ile PSI analizi yapılırken koherens eşik değeri 0,5 olarak seçilmiştir. Aksi takdirde heyelan alanı üzerinde PS noktası belirlenmemektedir. Heyelan alanı içerisinde kalan PS noktalarının koherens değerleri ise  $0,52$  ile  $0,82$  arasında değişmektedir. Ortalama koherens değerleri ise  $0,56$ 'dır.

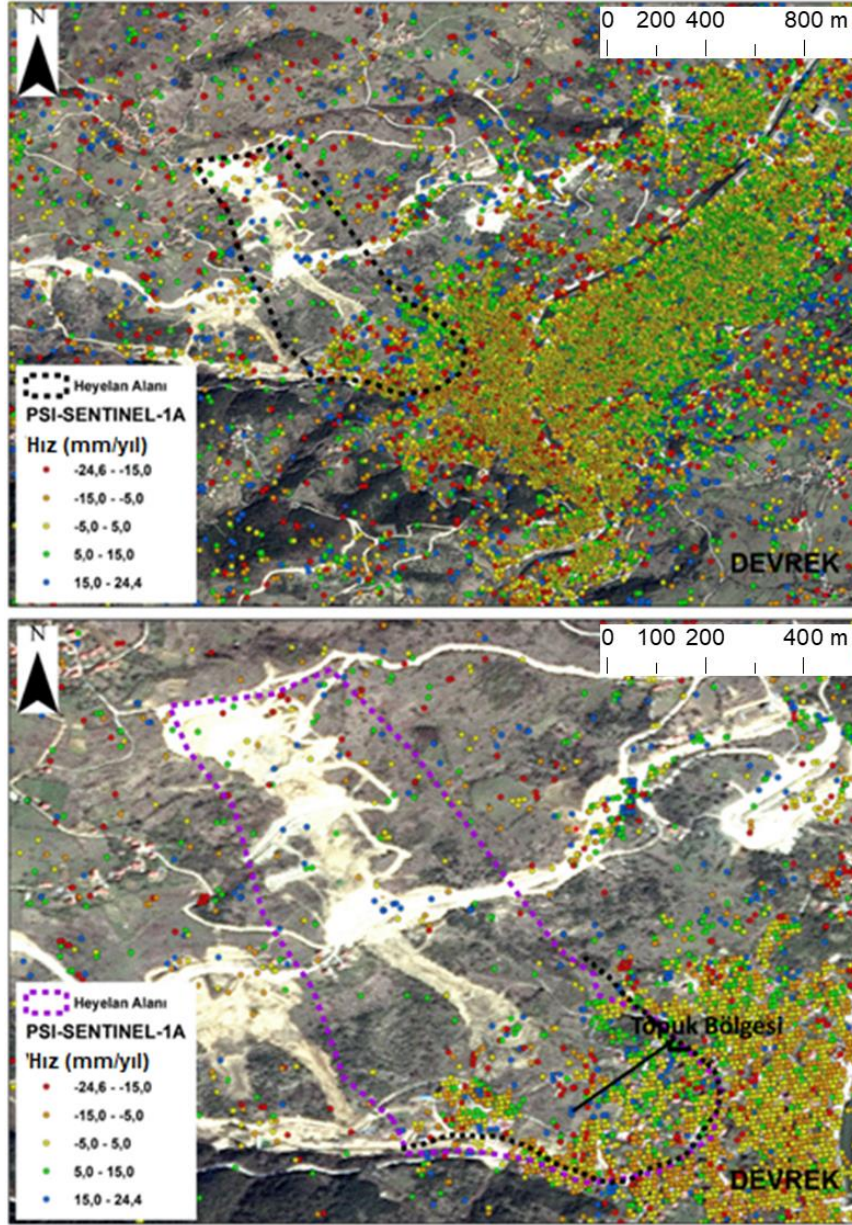




Harita 3.12. Envisat ASAR uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası.

Çalışma alanı üzerinde heyelanın yıkıcı hareketi ortaya çıkıncaya kadar olan 288 günlük bir dönem için ise Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri ile PSI analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deformasyon haritası Harita 3.13'te gösterilmektedir. Elde edilen deformasyon haritasına göre deformasyon hızları -24,6 mm/yıl ile 24,4 mm/yıl arasındadır.



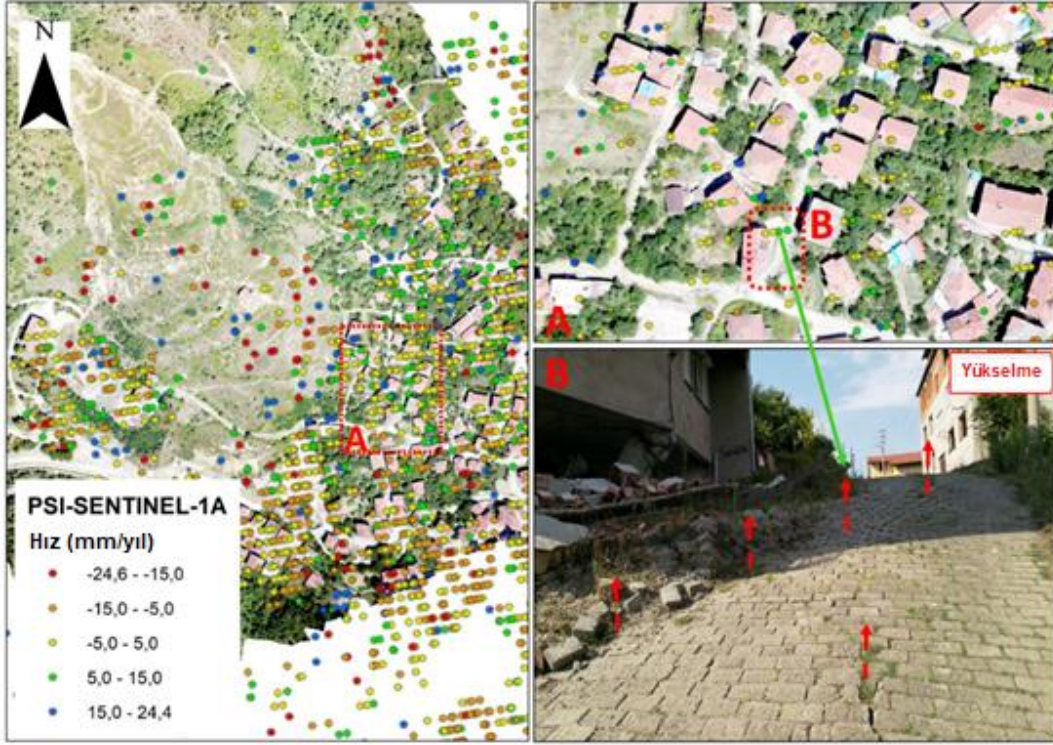


Harita 3.13. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası.

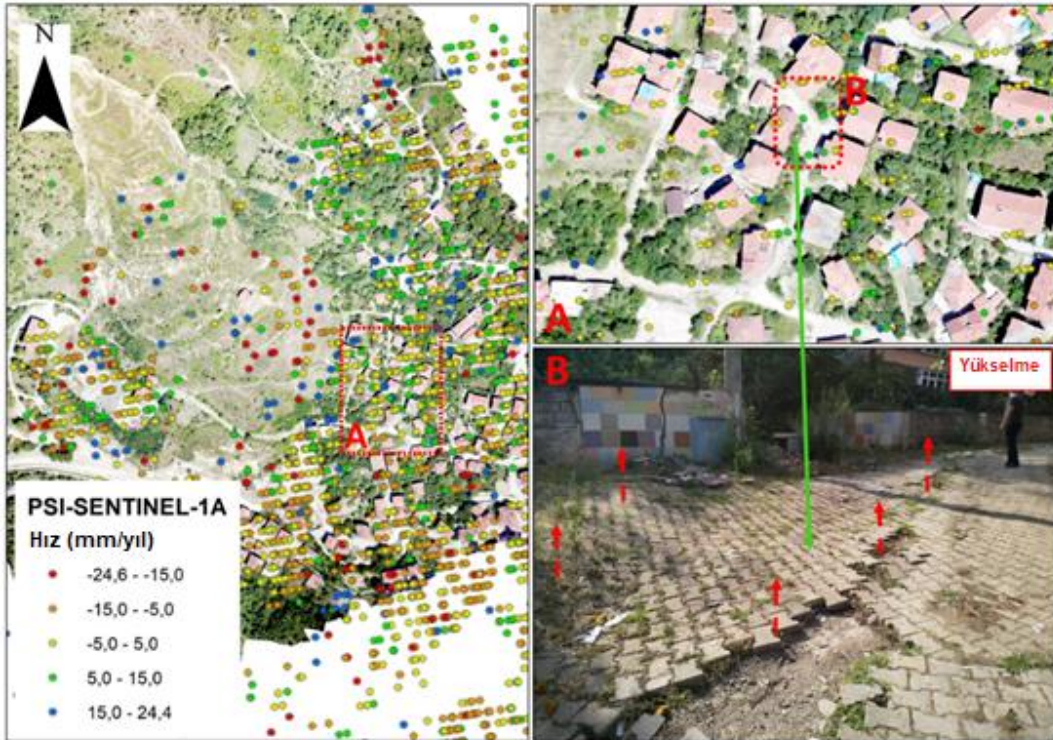
ERS-1/2 ve Envisat ASAR uydu görüntüleriyle elde edilen deformasyonlara benzer şekilde Devrek ilçe merkezi daha stabil olarak haritalanırken, etrafında yer alan ve yerleşim olmayan bölgelerde deformasyon hızlarının daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Heyelan alanı içerisinde kalan PS sayısı 1.199 adet olup ERS-1/2 ve Envisat ASAR verilerine nazaran neredeyse 3 kat daha fazladır. Heyelan alanı içerisinde belirlenen PS noktalarının hızları -24,5 mm/yıl ile 24,3 mm/yıl arasında değişmektedir. PS noktalarının 37 tanesi 1 mm/yıl hız hassasiyet değerine sahip iken geriye kalan noktaların hız hassasiyet değerleri 1,8 mm/yıl ile 5,4 mm/yıl arasında değişmektedir. Ortalama hız hassasiyet değeri ise 3,5 mm/yıldır. Sentinel-

1A uydu SAR görüntülerinin PSI analizinde koherens eşik değeri 0,6 olarak seçilmiştir. Heyelan alanı içerisine düşen PS noktalarının koherens değerleri ise 0,6 ile 0,91 arasında değişmekte olup ortalama 0,68 koherens değerlerine sahiptirler. Sentinel-1A verileri hem 12 günde bir veri alımı hem de interferometrik bir tüp olarak nitelendirilen daha doğru bir yörüngede veri alımına imkan sağlaması nedeniyle, ayrıca da zamansal baz değerlerinin daha küçük olması nedeniyle daha yüksek koherens değerlerine sahip PS noktalar belirlenmesine imkan sağlamıştır. Belirlenen alan içerisinde ERS-1/2 uydu görüntüleri ile toplam 7241 adet PS elde edilirken, Envisat ASAR uydu SAR görüntüleri ile 21.372 adet PS elde edilmiştir. Sentinel-1A uydu SAR görüntüleri ile ise 64.688 adet PS elde edilmiştir. Literatürde de belirtildiği üzere elde edilen PS noktaları çoğunlukla yerleşim alanı üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ancak heyelan sahası üzerinde korelasyon bozukluklarına sebep olacak yoğun vejetasyon bulunmaması nedeniyle PS nokta belirlenmiştir. Ayrıca bölgede artan yapılaşmanın da etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle Sentinel-1A uydu verileri ile yapılan analiz dikkate alındığında heyelanın topuk bölgesinde daha yoğun olarak belirlenen PS noktalarının en yüksek hızlarda ışının bakış hattı doğrultusunda deformasyona uğradığı gözlenmektedir. Yapılan PSI analizi ile elde edilen noktalar ayrıca arazide yapılan gözlemler ile kontrol edilmiştir. Özellikle heyelanın yıkıcı hareketine yakın dönemi kapsayan Sentinel-1A uydu verileri ile elde edilen sonuçlar arazi gözlemleri doğrulanmıştır. Analiz ile elde edilen sonuçlar arazi gözlemleri ile kıyaslandığında sonuçların tutarlı olduğu gözlenmektedir. Harita 3.14 ve Harita 3.15'teki görüntülerde de verildiği gibi arazide, radar ışınının bakış hattı doğrultusu boyunca yükselme olduğunu gösterdiği yerlerde yükselmelerin olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Harita 3.16'da da gösterilen zeminde oturma olduğunu gösteren PS noktalarının arazide denk geldiği yerlerde de oturmaların olduğu gözlenmiştir. Yapılan bu değerlendirme ile uydu SAR verileri ile elde edilen yerdeğiştirmelerin doğru olarak yakalandığı ortaya konmuştur. Heyelan topuğu üzerinde 1992-2015 yılları arasında mevcut veriden PSI analizi ile elde edilmiş deformasyon hızları ile birlikte yerdeğiştirme grafikleri de elde edilmiştir. Bu kapsamda deformasyon hızının yüksek olduğu heyelan topuğu üzerinde yer alan seçilen iki noktanın (A ve B noktaları) yerdeğiştirme zaman grafiği üretilmiştir (Şekil 3.4). Seçilen A noktası yükselmenin meydana geldiği, B noktası ise oturmanın meydana geldiği bölümden seçilmiştir. Seçilen noktaların deformasyon hızları -16 mm/yıl ile 16 mm/yıldır. Bu noktalardaki deformasyonların uzun dönemli analizlerde yüksek deformasyon hızlarında oturma ve yükselme olan hem A hem de B noktasında süreklilik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen grafiklerde bazı dönemlerde oturma bazı dönemlerde yükselmeler şeklinde dalgalı bir deformasyon gözlenirse de genel eğilim olarak oturma veya yükselme olduğu gözlenmektedir.



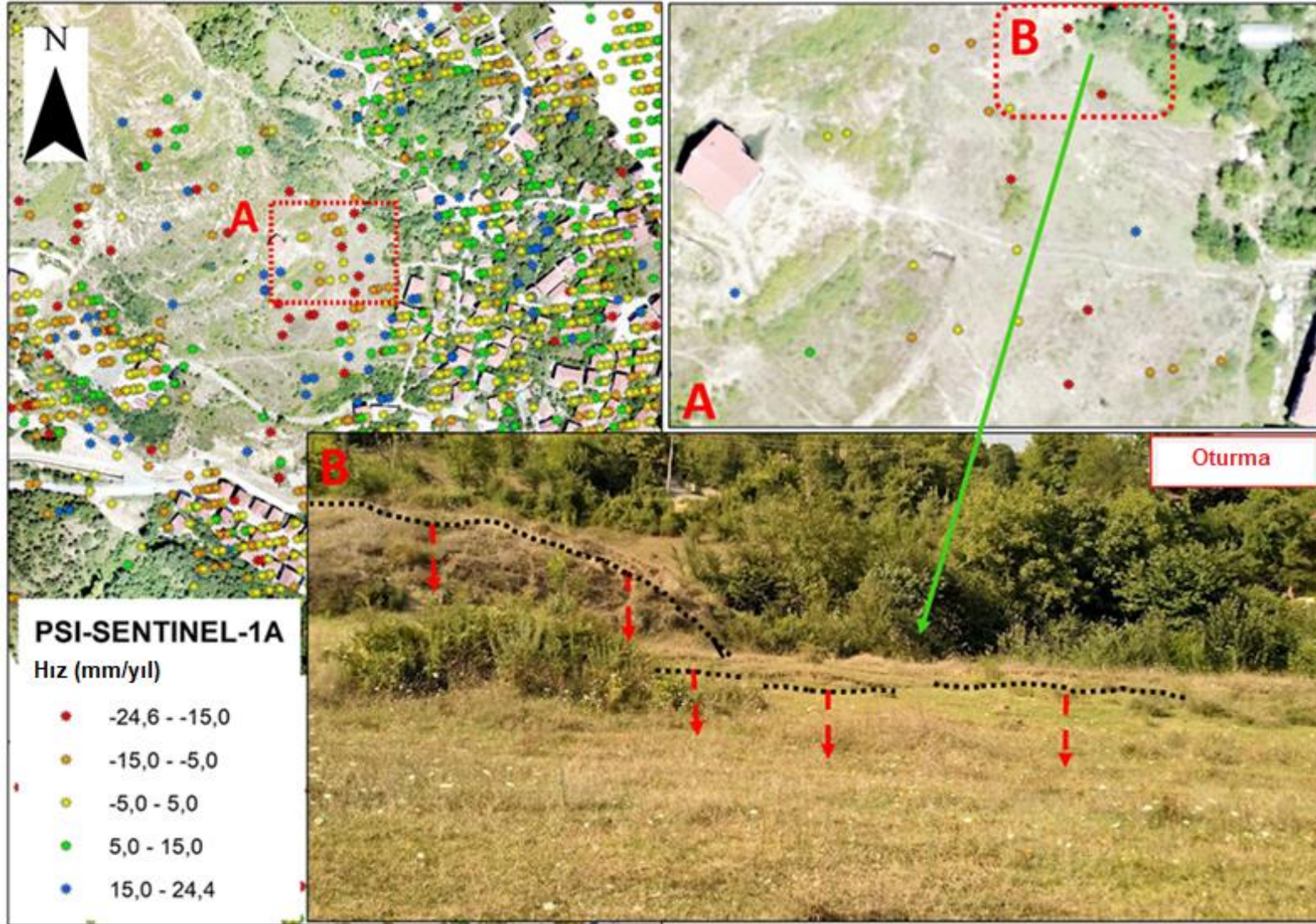


Harita 3.14. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyonların arazideki durumu.



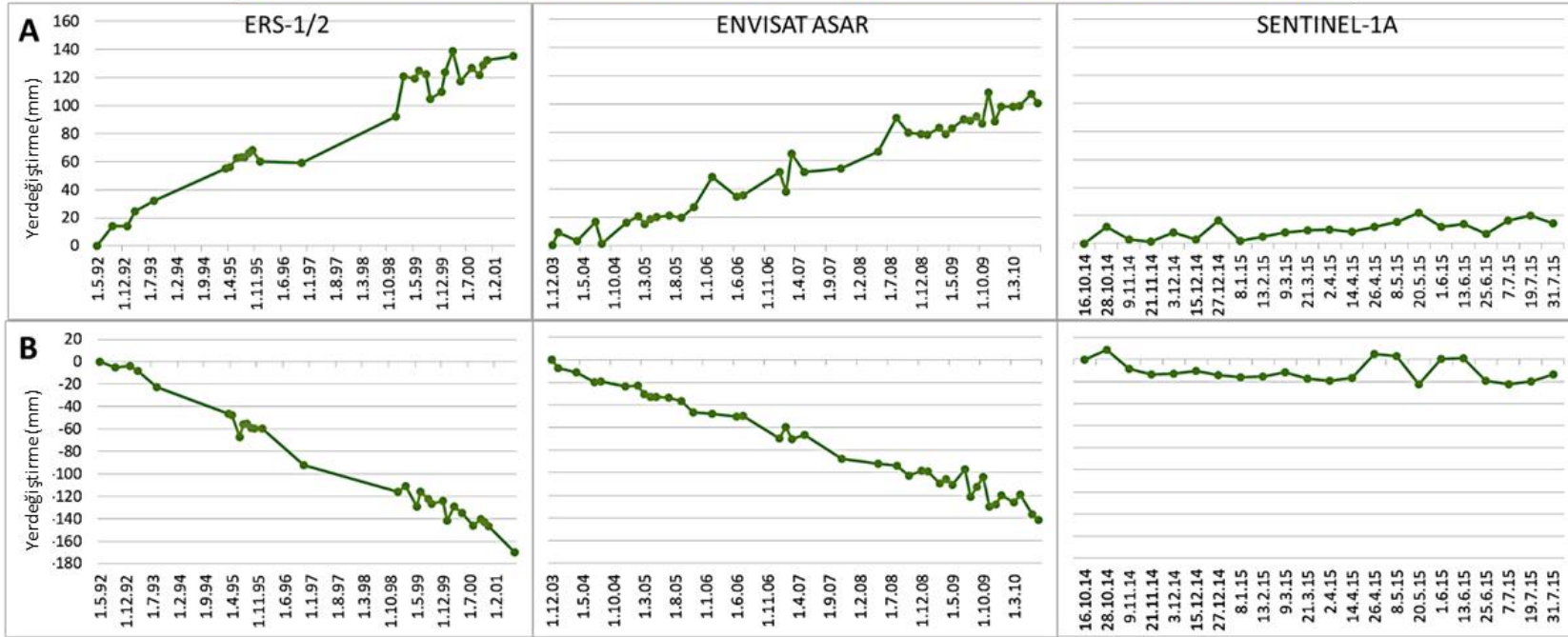
Harita 3.15. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyonların arazideki durumu.





Harita 3.16. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyonların arazideki durumu.





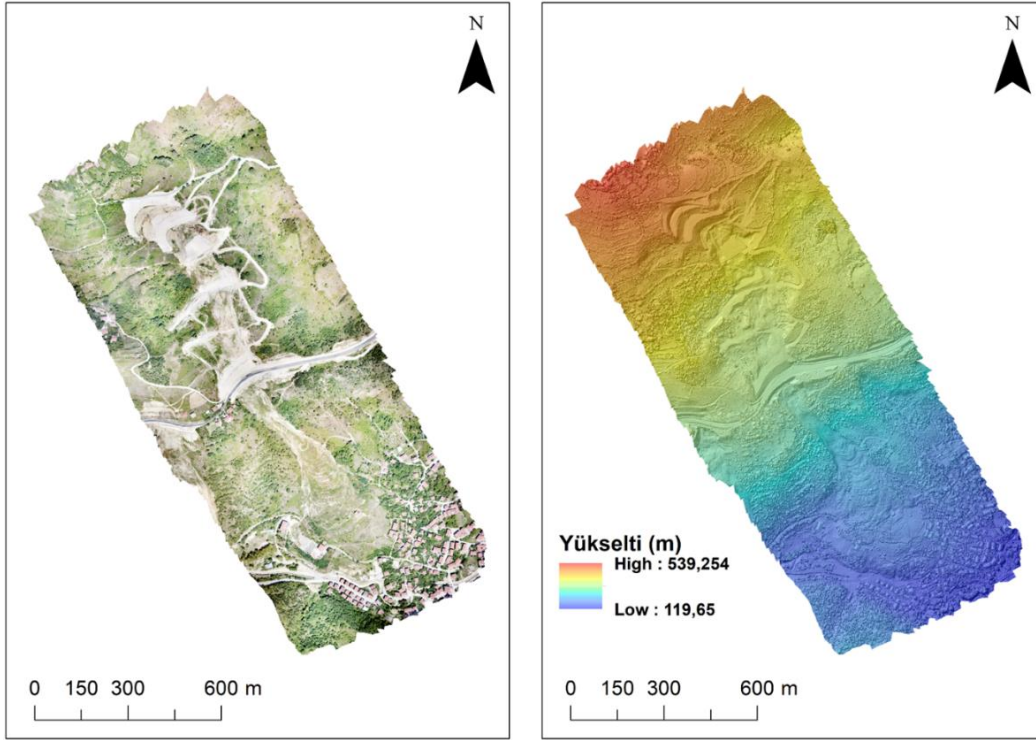
Şekil 3.4. Heyelan üzerinde seçilen A ve B noktalarındaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri

Çalışmada kullanılan SAR verilerinin PSI analizinde koherens eşik değeri ERS-1/2 ve Sentinel-1 uyduları için 0,6, Envisat ASAR uydusu için 0,5 olarak ayarlanmıştır. Özellikle Envisat ASAR uydusu için bu değer 0,5 olarak ayarlandığında heyelan alanı içerisinde PS noktaları elde edilebilmektedir. PSI ile belirlenen deformasyonların doğruluğunu etkileyen bir parametre olan koherens eşik değeri, 0 ile 1 arasında değişmekte olup, 0 değeri yüksek oranda gürültü veya korelasyon bozukluğunu, 1 değeri ise verinin gürültü içermediği anlamını taşımaktadır. Tanımlanan koherens eşik değerinin genel olarak 0,5 ve üzeri değerleri heyelan ile ilgili çalışmalarda güvenilir olarak kabul edilmektedir. Örneğin yaptıkları çalışmalarda koherens eşik değerini [399] >0,5, [400] ve [401] >0,6, [402] >0,65 ve [403] ise >0,75 tanımlayarak kullanmışlardır. Bu çalışmada seçilen koherens eşik değerinin yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında güvenilir değerler olduğu değerlendirilmektedir.

### **3.3.2. Zonguldak İli Devrek İlçesi Karşiyaka Mahallesi Heyelanına Ait Hava Fotoğraflarının Sayısal Fotogrametrik Yöntemle Değerlendirilmesi ve SfM Tabanlı İHA Verisine Ait Bulguları**

Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşiyaka mahallesinde 16 Temmuz 2015 tarihinde meydana gelen heyelan alanında HGM'den 1942, 1944, 1982, 1984, 1998 ve 2011 yıllarına ait 20 adet stereo hava fotoğrafı temin edilmiştir. Bunlardan 2011 yılına ait hava fotoğrafı sayısal kamera ile alınmışken diğerleri analog kamera ile alınmış ve taranarak sayısallaştırılmış verilerdir. Ayrıca 2011 yılına ait hava fotoğrafı renkli iken diğerleri siyah-beyaz renklidir. Temin edilen bu hava fotoğrafları ile sahanın zamansal olarak değişimi tespit edilmesi amaçlanmıştır.

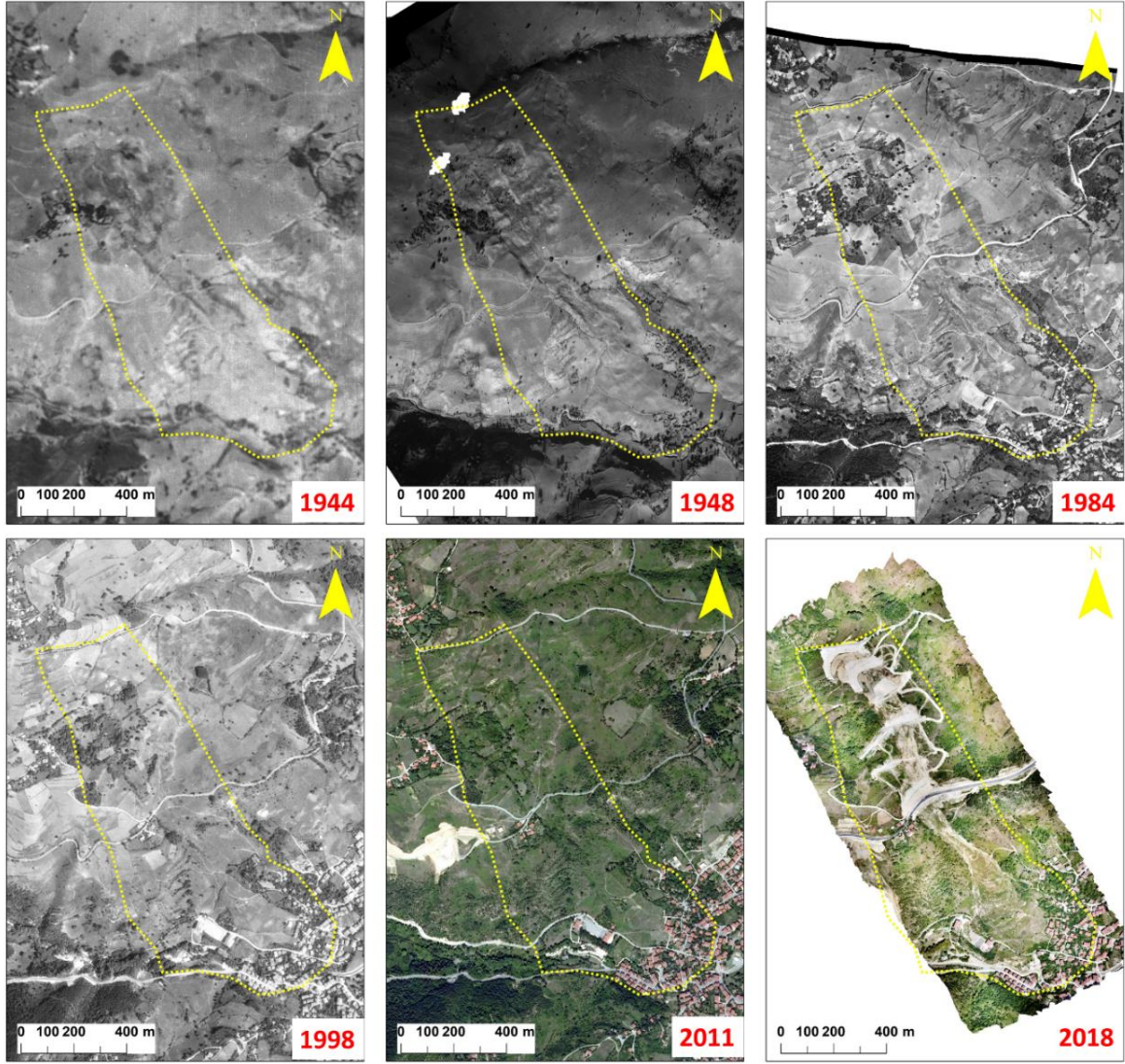
Heyelan alanı üzerinde ayrıca 23 Temmuz 2018 tarihinde İHA ile uçuş yapılarak görüntü alımı gerçekleştirilmiş ve elde edilen görüntülerden SfM algoritması tabanlı DEM ve ortofoto mozaik görüntü üretilmiştir. Üretilen DEM ve ortofoto görüntüler Harita 3.17'de verilmektedir. Çalışmada özellikle DEM üretimine imkân veren (örneğin, 2011 yılına ait veri) stereo hava fotoğraflarından ve İHA tabanlı görüntülerden SfM algoritmasıyla elde edilen DEM verilerinden yararlanarak heyelan kaynaklı deformasyon haritası üretilmesi ve elde edilen verilerin SAR verileri ile tespit edilen deformasyonlar ile karşılaştırılarak PSI tabanlı analiz sonuçlarının doğrulanması hedeflenmiştir.



Harita 3.17. İHA ile SfM tabanlı üretilen DEM ve Ortofoto mozaik.

Elde edilen hava fotoğraflarından 1982 yılına ait veri hariç (çünkü 1984 yılına ait veri ile aralarında diğer fotoğraflara göre oldukça kısa bir zaman farkı vardır) ortofoto görüntü üretilmiştir (Harita 3.18). Üretilen ortofoto görüntüler heyelan alanının 1944 yılından itibaren günümüze değişimini ortaya koymaya imkân vermiştir. Yapılan görsel değerlendirmeye bağlı olarak 1944 yılında alan üzerinde herhangi yerleşim alanının bulunmadığı görülmektedir. Ayrıca bu yıla ait hava fotoğrafında heyelan alanı topoğrafyadaki deformasyon nedeniyle açık şekilde tespit edilebilmektedir. Elde edilen tarihi hava fotoğraflarından yararlanılarak sahanın en az 1940'lerden itibaren heyelan problemi ile karşı karşıya kaldığı anlaşılabilmektedir (Harita 3.18). Ayrıca hava fotoğraflarından her ne kadar alanda heyelan problemi söz konusu olsa da özellikle heyelan alanının topuk kısmına yakın bölgelerde zamanla heyelan topuğuna doğru genişleyen bir yapılaşma gözlenmektedir. Bu görsel analizlerden yapılaşmanın özellikle 1980'lerden sonra yoğunluk kazandığı söylenebilmektedir. Sayısal fotogrametrik yöntemlerle üretilen ortofoto görüntülerin görsel analizi ile birlikte stereo olarak alınan fotoğraflardan yine sayısal fotogrametrik yöntemlerle DEM verisi üretilerek heyelan kaynaklı topoğrafyadaki değişimlerin elde edilmesi ve deformasyonlarının ortaya konulması hedeflenmiştir. Ancak temin edilen hava fotoğraflarından sayısal kamera ile alınan 2011 yılına ait fotoğraflardan ve sensör parametreleri hakkında bilgi elde edilebilen 1984 yılına ait stereo fotoğraflardan DEM üretilenmiştir.

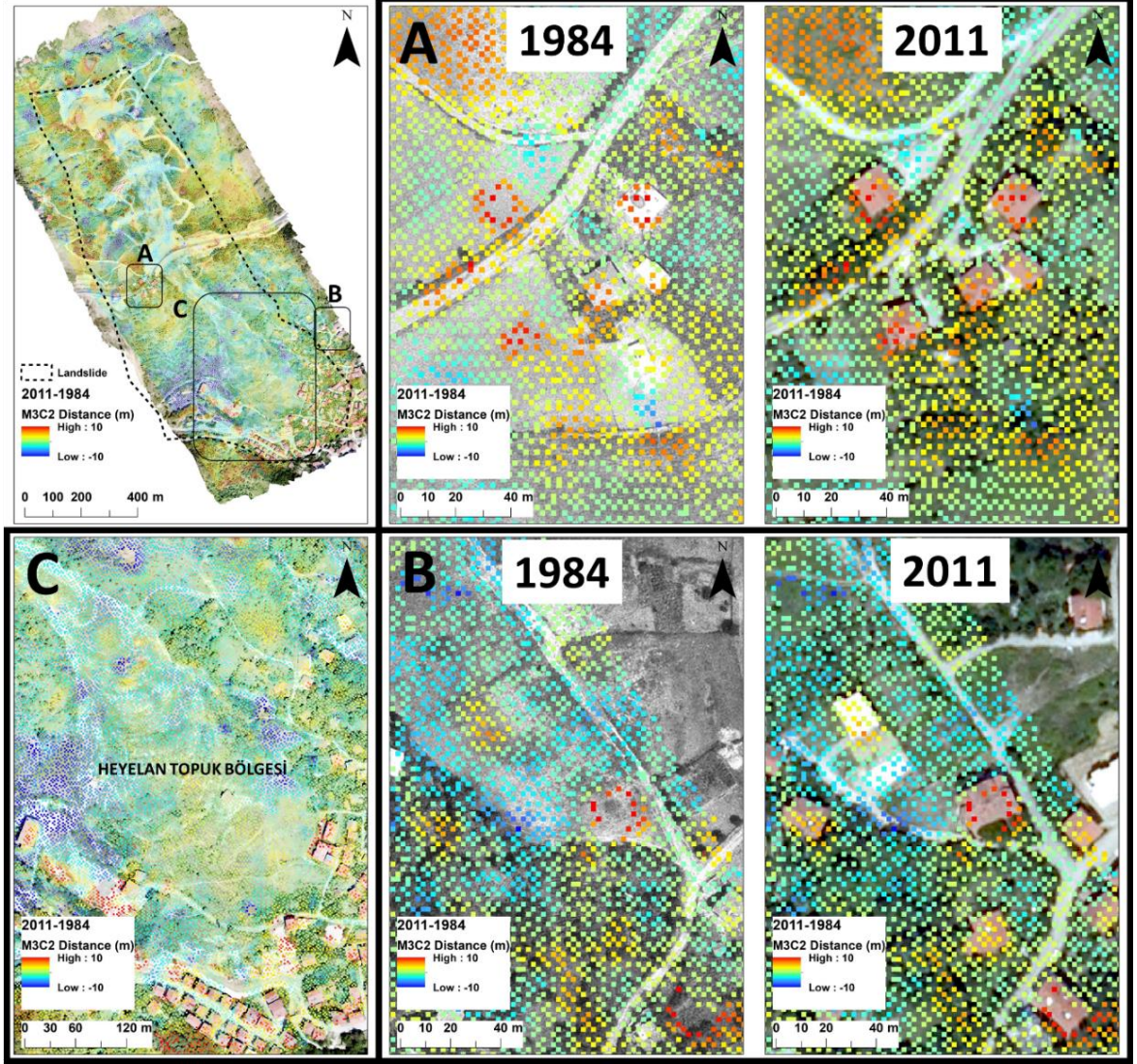




Harita 3.18. Heyelan alanına ait eski tarihli hava fotoğraflarından sayısal fotogrametrik yöntemle üretilen ortofotolar ile İHA-tabanlı ortofoto görüntüden zamansal değişimin değerlendirilmesi.

Sayısal fotogrametrik yöntemlerle üretilen 1984 ve 2011 yıllarına ait DEM verilerinden yararlanarak heyelan deformasyonu ve yerdeğiştirme alanları hakkında sağlıklı bilgi alınamamıştır. Çalışma kapsamında üretilen her iki DEM verisi nokta bulutuna dönüştürülerek CloudCompare yazılımı altında çalışan M3C2 algoritması ile iki model farkı ve dolayısıyla heyelan kaynaklı deformasyon bilgisi elde edilmiştir. Elde edilen M3C2 mesafe verisi Harita 3.19’da gösterilmektedir. Bu veriye göre iki zaman serisi arasında yeni inşa edilen binalar gibi oldukça keskin yükseklik değişimleri görülebilmektedir (Harita 3.19). Ancak elde edilen M3C2 mesafeleri heyelan kaynaklı deformasyonların haritalanmasına imkân vermemektedir.



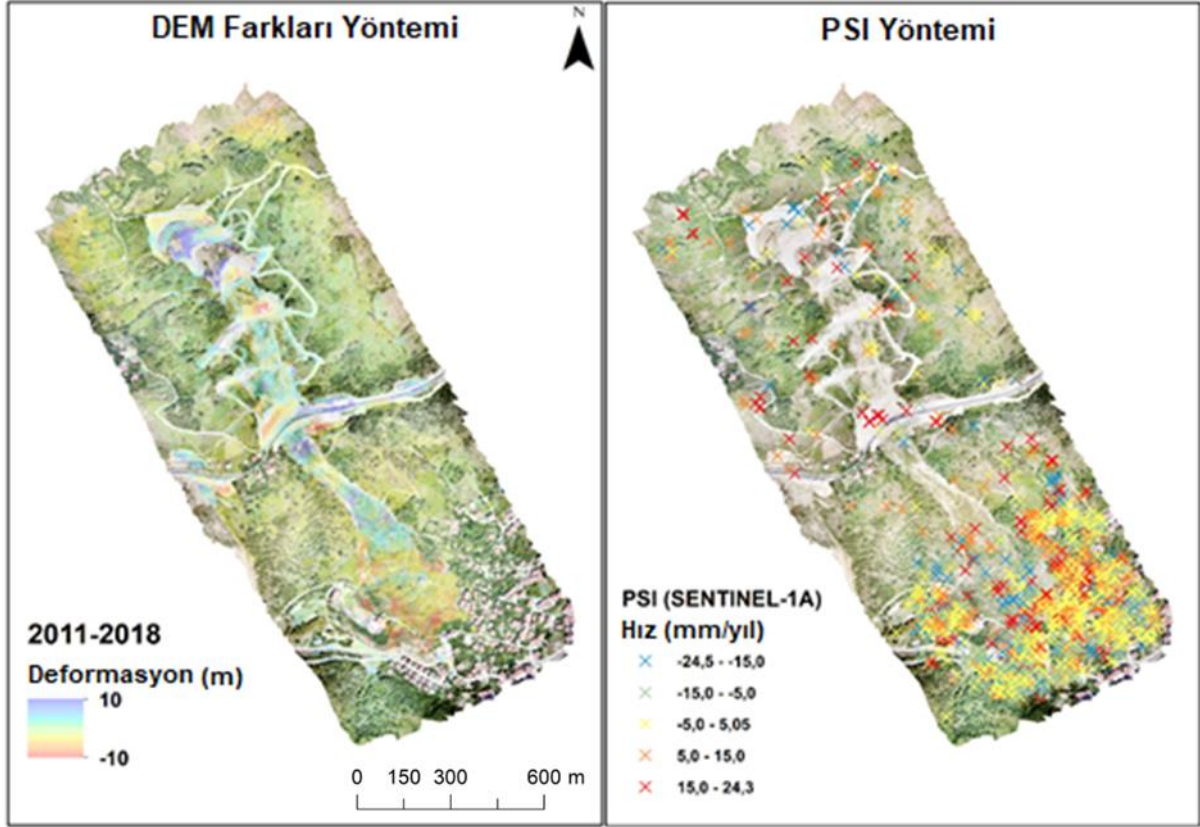


Harita 3.19. Sayısal fotogrametrik yöntemle üretilen 1984 ve 2011 yıllarına ait DEM verilerinden elde edilen M3C2 mesafe haritası

Sayısal fotogrametrik yöntemlerle 1982-2011 yılları için üretilen DEM verileri ile M3C2 algoritması kullanılarak elde edilen iki model arası mesafe değerleri 20 m ile -26 m arasında elde edilmiştir. M3C2 algoritması aynı zamanda mesafe belirsizlik ve anlamlı değişim değerlerini de sağlamaktadır. Bu analizde istatistiksel olarak iki model arasındaki farkın anlamlı olmadığı noktalar ile mesafe belirsizlik değerinin  $>50$  cm olduğu değerler elimine edilmiştir. Sonuçta elde edilen M3C2 mesafe değerleri ise -10 m ile 10 m arasında değişmektedir. M3C2 algoritması için nokta bulutu üretilen ve hava fotoğraflarından elde edilen DEM verileri, özellikle 1984 yılına ait veri, gerek kullanılan fotoğrafların tarama kalitesi, gerekse DEM üretimi için kullanılan YKN'lerin konum ve sayısına bağlı olarak 1-2 m RMSE hata ile üretilebilmişlerdir.

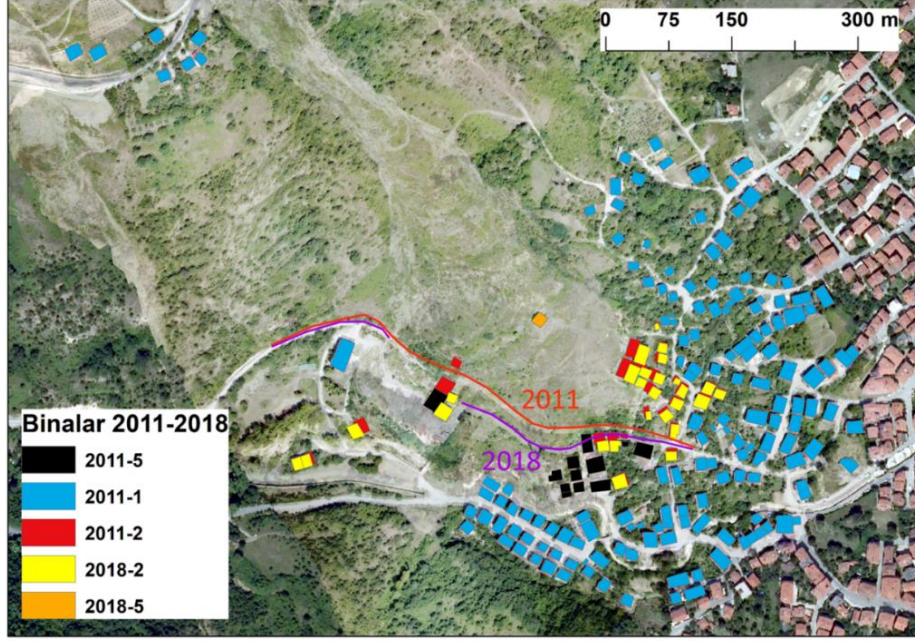


Bundan dolayı her ne kadar elde edilen M3C2 mesafe verisi sonuçlarına göre yeni inşa edilen bina, vejetasyon gelişimi gibi iki zaman serisi arasındaki ani farklar iki model arasında yakalanabilmiş olsa da heyelan kaynaklı topoğrafyada oluşan bir oturma ya da yükselme sonucu oluşan bir değişim modellenememiştir. Sadece heyelan topuk bölgesinde elde edilen M3C2 mesafe değerleri değerlendirildiğinde değerler -9,8 m ile 8,9 m arasında değişmektedir. Ortalama fark -1,8 m ve standart sapma değeri 2,0 m'dir. Sayısal fotogrametrik yöntemlerle üretilen 1982 ve 2011 yıllarına ait DEM verileri arasındaki M3C2 analizi DEM verilerinin içerdiği yüksek modelleme hataları nedeniyle heyelan kaynaklı deformasyonları yakalayamasa da, 2011 yılına ait DEM verisi ile 2018 yılına ait İHA tabanlı DEM verisi arasında gerçekleştirilen M3C2 algoritma uygulaması heyelan deformasyonlarını haritalamaya izin vermiştir. Her iki veri de ham olarak sayısal kamera ile alındığından dolayı üretilen modeller yüksek modelleme hataları içermemektedir. İHA ile üretilen model, sayısal fotogrametrik yaklaşımla üretilen 2011 yılına ait modelin çözünürlüğü 1 m olduğu için İHA tabanlı DEM verisi de 1 m yersel çözünürlüğe sahip olacak şekilde yeniden örneklenmiş ve nokta bulutu üretilmiştir. Üretilen nokta bulutlarına uygulanan M3C2 algoritmasının sonuçları ise Harita 3.20'de verilmektedir. Elde edilen M3C2 mesafe verisinde 2011 verisi referans veri olarak kullanıldığı için negatif değerler heyelan hareketi sonucu oluşan zemindeki yükselmeleri, pozitif değerler ise oturmaları göstermektedir. Buna göre heyelanın akma bölgesinden geçen karayolunun üst bölümünde yol inşaatının güvenliğinin sağlanması amacıyla heyelan stabilizasyonu için istinat duvarları inşa edilmişken, henüz topuk bölgesinde herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. Bundan dolayı heyelanın topuk bölgesi için M3C2 algoritması ile heyelan deformasyonlarının sayısal fotogrametri yöntemleri ve SfM tabanlı DEM verilerinden haritalanması imkânı olmuştur. Elde edilen veri Sentinel-1A uydu SAR verileri ile elde edilen PSI analizi sonuçları ile değerlendirildiğinde PSI sonuçlarının fotogrametrik yöntemlerle elde edilen sonuçlar ile tutarlılık gösterdiği görülmektedir (Harita 3.20). Alana ait sayısal fotogrametrik yöntem ve SfM tabanlı üretilen 2011 ve 2018 ortofoto görüntülerden yararlanarak ayrıca heyelan kaynaklı yataydaki yerdeğiştirmeler de tespit edilebilmiştir. Özellikle binalar ile heyelanın topuk bölgesi üzerinde konumlanan yoldaki değişim her iki yıla ait ortofotolar üzerinde sayısallaştırma yapılarak ortaya konmuştur (Harita 3.21). Yapılan sayısallaştırma sonucu Harita 3.21'de de siyah ve turuncu renklerde (sırasıyla 2011-5 ve 2018-5 şeklinde kodlanmıştır) gösterilen evler ortofoto görüntüden de açıkça tespit edilebilen heyelan sonucunda yıkılmış binaları göstermektedir.

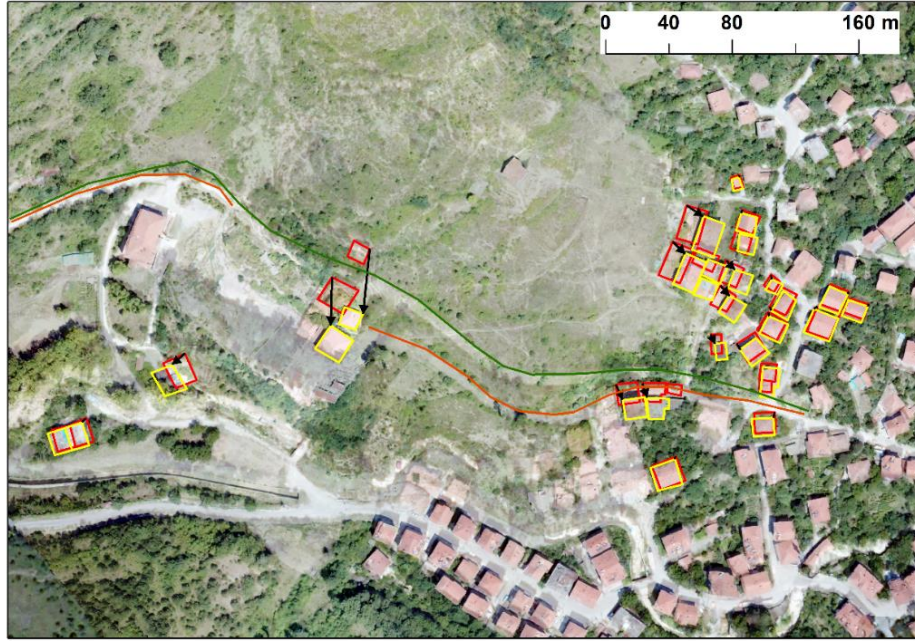


Harita 3.20. Sentinel-1A uydu verilerinden PSI analizi ile elde edilen deformasyon hızları haritası ile 2011-2018 yılları arasındaki M3C2 mesafe analizi ile elde edilen heyelan deformasyonu haritasının karşılaştırılması.

Yine görüntü üzerinde kırmızı ve sarı renklerde (sırasıyla 2011-2 ve 2018-2 şeklinde kodlanmış) binalar ise heyelan kaynaklı konumlarında yatayda kaymalar meydana gelmiş binaları göstermektedir. Heyelan kaynaklı konumlarında kaymalar olan binalar ayrıca daha yakından Harita 3.22’de de verilmektedir. Kırmızı renkli binalar 2011 yılındaki konumlarını gösterirken, sarı renkli binalar ise heyelan sonrası 2018 yılındaki konumlarını göstermektedir. Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen yataydaki değişimler 1,2 m ile 41,3 m olarak ölçülmüştür. En fazla yerdeğiştirme heyelan sonucu yıkılan heyelan topuk uç bölgesinde konumlanan İmam Hatip Lisesi binasında ölçülmüştür. Açık mavi ile gösterilen (2011-1 kodlu) binalar ise herhangi bir yerdeğiştirme tespit edilmeyen binalardır. Yine heyelan topuk bölgesi üzerinde yer alan yoldaki yatay yer değiştirme ise Harita 3.22 üzerinde kırmızı (2011) ve mor (2018) renklerde gösterilmektedir. Yolda meydana gelen yerdeğiştirme miktarı ise 0 ile 40 m aralığında ölçülmüştür.



Harita 3.21. 2011 ve 2018 yıllarına ait ortofotodan heyelan kaynaklı yatay yerdeğiştirmenin analizi ve binaların durumu. 2011-5: 2011 yılı verisinde mevcut olup heyelan sonucu yıkılan binalar (siyah), 2018-5: 2018 yılı verisinde mevcut olup heyelan sonucu yıkılan bina (turuncu), 2011-1: İki zaman serisi arasında konumlarında değişim olmayan binalar (mavi), 2011-2 ve 2018-2: 2011 yılındaki bina konumlarından (kırmızı) heyelan sonucu oluşan yerdeğiştirmeye bağlı 2018 yılındaki bina konumları (sarı).



Harita 3.22. 2011 ve 2018 yıllarına ait ortofotodan heyelan kaynaklı binalardaki yatay yerdeğişirme durumu.

### **3.3.3. Bolu İli Göynük İlçesi Himmetoğlu Köyü Heyelanına Ait PSI ve SBAS Analizi Bulguları**

Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu Köyü Heyelan alanı üzerinde temin edilen 26 adet Sentinel-1A uydu SAR verileri ile heyelan olayının gerçekleşmesine kadar geçen 2017 yılının 9 aylık bir dönemi için PSI ve SBAS analizleri gerçekleştirilmiştir. Oldukça büyük bir alanda açık kömür madenciliği yapılan köy yerleşiminin kamulaştırılmayan alanı civarında gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonucu oluşan heyelan olayı gerçekleşmeden önce alanda meydana gelen yüzeysel deformasyonların heyelan olayının sinyallerini verip vermediğini ortaya çıkarmak amacıyla InSAR zaman serileri analizi yapılmıştır. Köy yerleşiminin bulunması ayrıca alanda yoğun vejetasyon bulunmaması C band SAR verileri ile interferometrik analizler yapmaya imkân sağladığı için Sentinel-1A verileri ile zaman serileri analizleri gerçekleştirilmiştir.

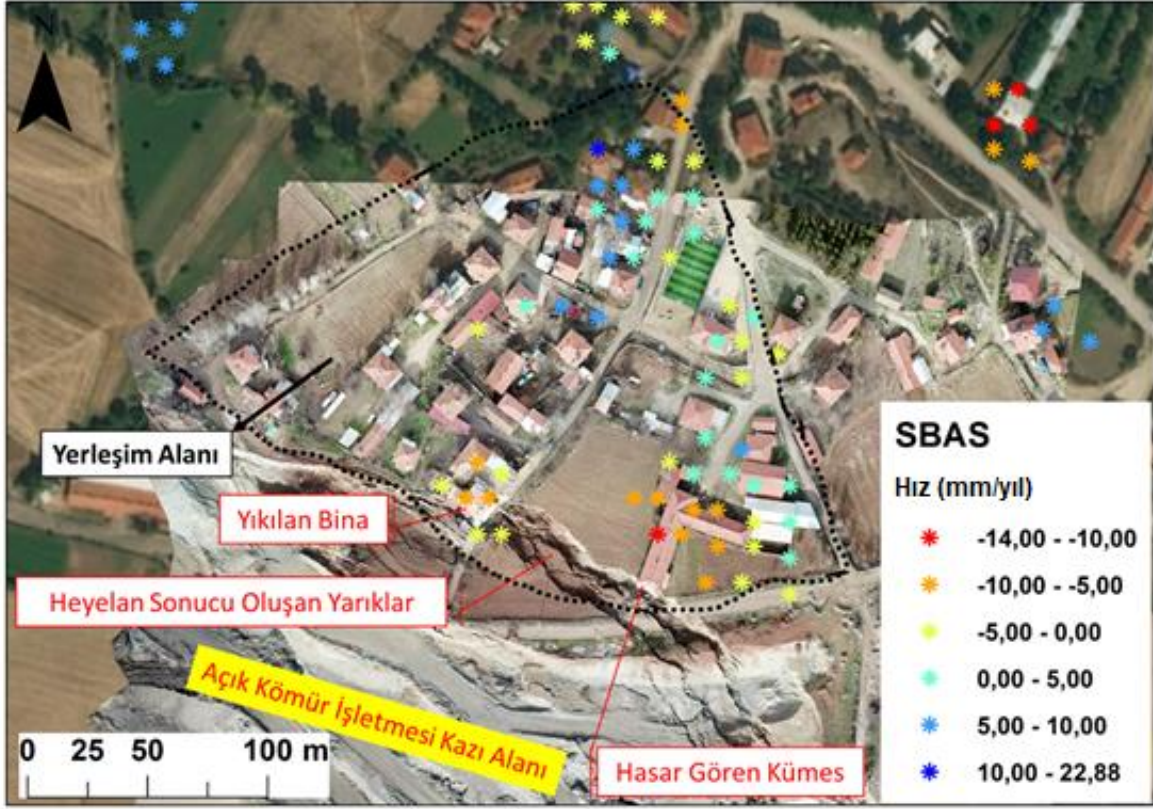
Yine heyelan meydana geldikten sonra gerçekleştirilen arazi çalışmaları ile köy sakinleri yapılan görüşmelerden zemin hareketlerinin olduğu evlerinin duvarlarında bu hareketlerden kaynaklı çatlakların meydana geldiği bilgisi edinilmiştir. Bu bilgiden yararlanarak bu çok yavaş yüzey deformasyonlarının SAR interferometri yöntemleri ile tespit edilebileceği anlaşılacak, ayrıca ESA arşivlerinden ücretsiz olarak veri temini imkânları nedeniyle bu analizlerin gerçekleştirilmesi hedeflenerek ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Alana ait temin edilen SAR verileriyle ilk olarak PSI analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analize ait sonuçlar Harita 3.23'te verilmektedir. PSI analizi ile deformasyon hız değerleri -18,52 mm/yıl ile 30,45 mm/yıl arasında ölçülmüştür. PSI analizi ile 100.000 adet PS nokta belirlenmiş olup bunlardan 115 tanesi heyelan olayının meydana geldiği en yakın yerleşim alanı (Harita 3.23) içerisinde yer almaktadır. Yerleşim alanı içerisinde kalan bu PS noktalarının deformasyon hızları ise -18,35 mm/yıl ile 18,10 mm/yıl arasında değişmektedir. Ortalama deformasyon hızı ise -0,59 mm/yıldır. Yerleşim alanı üzerinde yer alan PS noktalarının koherens değerleri ise 0,65 ile 0,90 arasında değişmekte olup ortalama koherens değeri 0,72'dir. Yerleşim alanı içerisinde kalan PS noktalarının hız hassasiyet değerleri ise 1,00 ile 4,63 mm/yıl arasında değişmekte olup ortalama hız hassasiyet değeri 3,00 mm/yıl, standart sapması ise 0,57 mm/yıldır. Elde edilen PS noktalar incelendiğinde özellikle meydana gelen heyelanın yarıkları üzerinde yer alan yıkılan bina ve hasar gören kümesin bulunduğu (Harita 3.23) bölgede en yüksek hızlarda zeminde oturma şeklinde deformasyon olduğu gözlenmektedir.





Harita 3.23. Heyelan bölgesi PSI analizi sonucu elde edilen deformasyon hızları haritası.

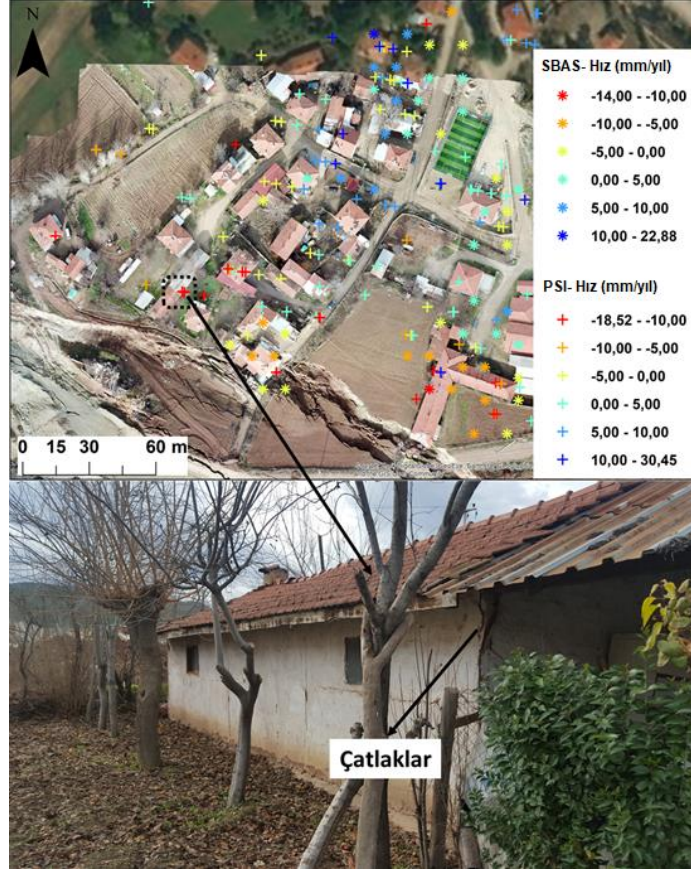
Çalışma alanı üzerinde ayrıca SBAS analizi de gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analiz ile elde edilen sonuçlar Harita 3.24'te gösterilmektedir. SBAS analizi sonucu 196.297 nokta elde edilmiştir. Elde edilen bu noktadaki deformasyon hızları -14 mm/yıl ile 22,88 mm/yıl arasında değişmektedir. Bu noktalardan 56 tanesi yerleşim alanı içerisinde yer almaktadır. Yerleşim alanı içerisinde kalan bu noktaların deformasyon hızları ise -12,12 mm/yıl ile 11,45 mm/yıl arasında değişmekte olup ortalama deformasyon hızı -0,52 mm/yıl elde edilmiştir. Bu noktaların koherens değerleri ise 0,13 ile 0,49 arasında değişmekte olup ortalama koherens değeri 0,3'tür. Yine bu noktadaki hız hassasiyet değerleri 0,85 mm/yıl ile 1,56 mm/yıl arasında değişmektedir. Ortalama hız hassasiyet değeri ise 1,21 mm/yıl olup standart sapması 0,16 mm/yıldır. Çalışma alanında heyelan sonucu yıkılan bina ve hasar gören kümesin bulunduğu bölgede SBAS analizi ile noktalar elde edilmiş ve bu noktalarda yüksek hızlarda ve zeminde oturma şeklinde deformasyon olduğu ortaya konmuştur. Sentinel-1A uydu SAR verileri ile yapılan PSI ve SBAS analizleri sonuçları arazide yapılan gözlemler ile doğrulanmıştır. Bu kapsamda PSI ve SBAS analizlerine göre yüksek deformasyon hızları tespit edilen noktalardaki yapılar ve zeminde inceleme yapılmıştır.



Harita 3.24. Heyelan bölgesi SBAS analizi sonucu elde edilen deformasyon hızları haritası.

Yapılan gözlemler ile analizlerle elde edilen deformasyonların tutarlı olduğu gözlenmektedir (Harita 3.25 ve Harita 3.26). Buna göre analizler sonucu yüksek hızlarda deformasyon gözlenen noktalardaki yapılarda önemli çatlaklar olduğu görülmektedir. Çatlakların gözlendiği bina sahipleri ile yapılan görüşmelerde tespit edilen çatlakların açık kömür madenciliği için gerçekleştirilen kazı çalışmaları sonrasında ve özellikle temin edilen verinin periyotları içerisinde meydana geldiği öğrenilmiştir. PSI analizi ile elde edilmiş deformasyon hızları ile birlikte yerdeğiştirme-zaman grafikleri de elde edilmiştir. Bu kapsamda alan üzerinde belirlenen üç ayrı bölgede deformasyon hızları ve konumları birbirine yakın olan PSI ve SBAS analizleri ile elde edilen noktalar için bu grafikler üretilmiştir (Şekil 3.5). Belirlenen bölgelerdeki seçilen PSI ve SBAS analizlerine ait noktalar arası mesafe ortalama 7 m'dir. Ancak seçilen bölgelerdeki deformasyon hızları birbirine yakındır. Elde edilen grafiklerde de görüldüğü gibi her iki metotla belirlenen yerdeğiştirme eğilimleri birbirine benzer olarak gelişmektedir.



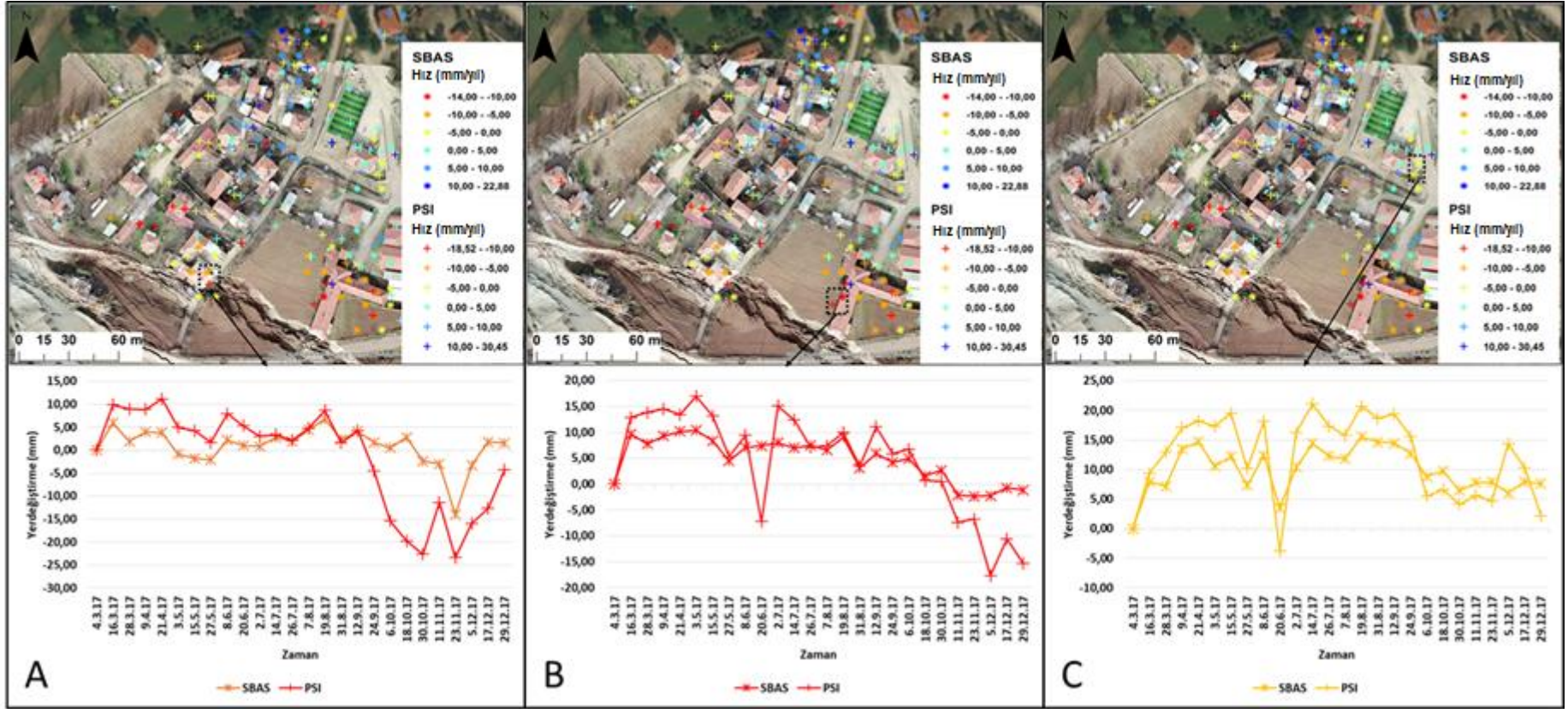


Harita 3.25. Heyelan bölgesinde interferometrik zaman serileri analizi sonucu elde edilen deformasyonların arazideki durumları



Harita 3.26. Heyelan bölgesinde interferometrik zaman serileri analizi sonucu elde edilen deformasyonların arazideki durumları.





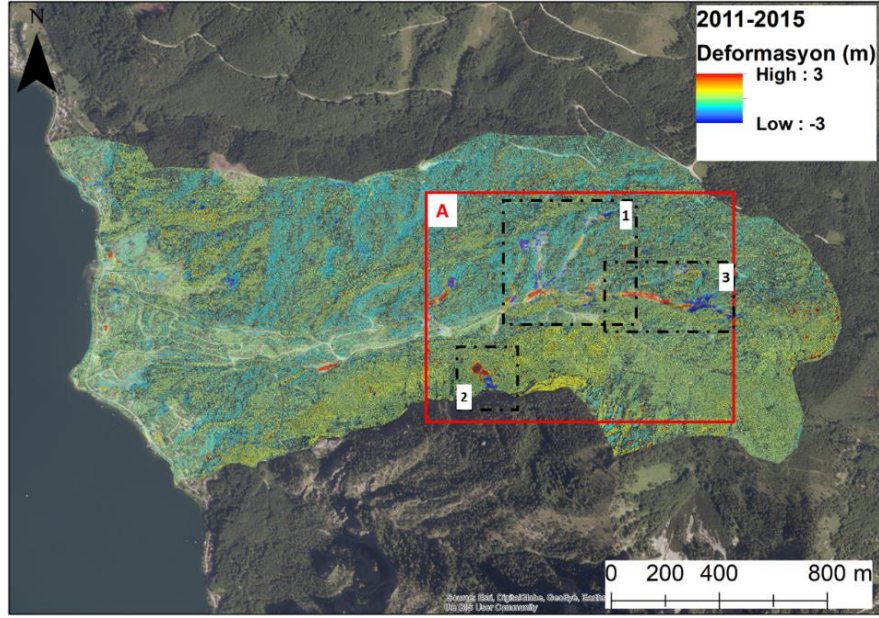
Şekil 3.5. Yerleşim alanı içerisinde ve heyelan yarığına yakın bölgede seçilen üç farklı deformasyon hızına sahip üç farklı noktadaki yerdeğiştirme-zaman grafikleri

### **3.4. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİ**

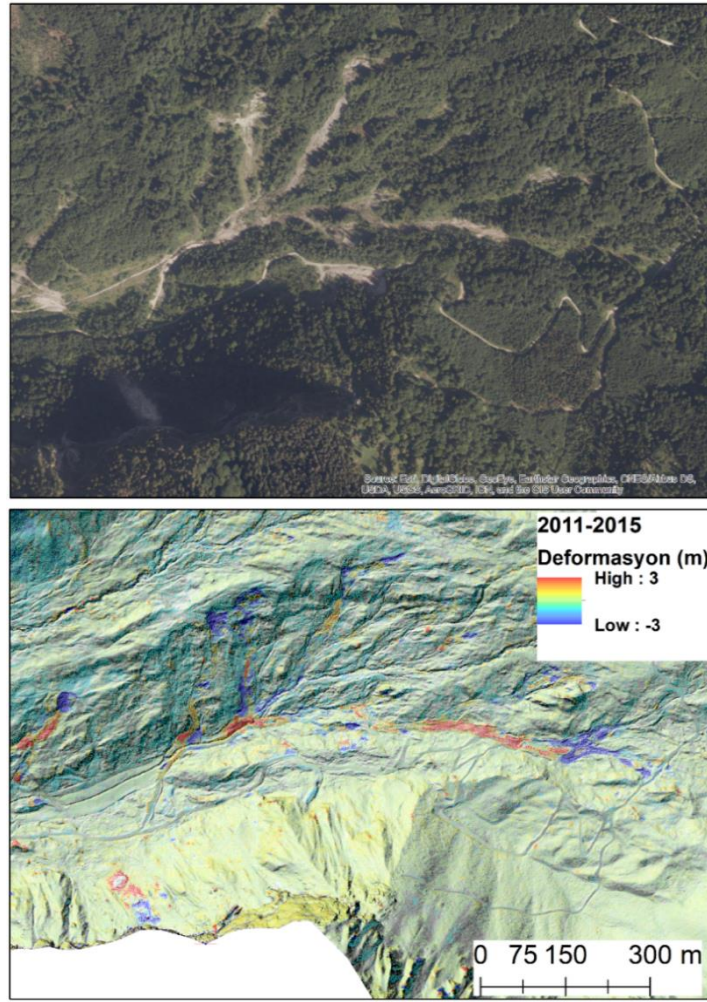
#### **3.4.1. 3B LIDAR Nokta Bulutları Tabanlı Heyelan Deformasyon Haritalama Uygulamasına İlişkin Bulgular**

Bu çalışmada 3B LIDAR nokta bulutları kullanılarak heyelan deformasyonlarının belirlenmesi ve haritalanmasına yönelik olarak M3C2 algoritması kullanılarak bir uygulama yapılmıştır. Bu kapsamda heyelan üzerinde 2011 ve 2015 yıllarına ait 1 m yersel çözünürlüklü DEM verisi temin edilmiştir. M3C2 algoritması nokta bulutu tabanlı çalıştığı için DEM verisinden yeniden nokta bulutu üretimi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu veri dönüşüm işlemi sonucunda elde edilen “.shp” uzantılı nokta bulutu verisi daha sonra CloudCompare yazılımına aktarılmış ve algoritmanın uygulaması gerçekleştirilmiştir. M3C2 algoritmasının nokta bulutları arasındaki mesafeyi belirlemede ihtiyaç duyduğu parametreler ise yazılım tarafından otomatik olarak belirlenen değerler tanımlanmıştır.

M3C2 algoritması temel olarak üç çıktı dosya sağlamaktadır. Bunlardan birincisi M3C2 mesafe çıktısıdır. Bu veri iki zaman serisi arasında heyelan kaynaklı deformasyonları gösteren mesafe bilgisini sağlamaktadır. M3C2 mesafe bilgisi dışında anlamlı değişim (significant change) çıktısı sağlanmaktadır. Bu veride anlamlı fark bulunan noktalar “1” ile anlamlı fark bulunmayan noktalar ise “0” değeri ile gösterilmektedir. İki nokta bulutu arasındaki mesafenin anlamlı olmadığı “0” değerine sahip noktalar veri setinden elimine edilmiştir. Ayrıca mesafe belirsizliği (distance uncertainty) verisi de üçüncü çıktı olarak sağlanmaktadır. Mesafe belirsizlik değeri “ $\geq 0,35$  cm” olan noktalar elimine edilmiştir. Bu işlemler sonucunda kalan noktalar ise hücre tabanlı veri formatına dönüştürülerek uydu görüntüsü üzerine yerleştirilmiştir. Elde edilen heyelan deformasyon haritası Harita 3.27’de gösterilmektedir. Bu haritaya göre deformasyonlar -3 m ile 3 m arasında değişecek şekilde sınıflandırılmıştır. Elde edilen deformasyon haritasında “A” ile gösterilen yüzeysel hareketlerin en sık görüldüğü bölümleri kapsamaktadır (Harita 3.28). Bu kapsamda belirlenen bu bölge içerisinde ise üç ayrı bölgede taşınma ve birikme olaylarının bu iki zaman serisi arasında en yoğun olduğu gözlenmektedir.



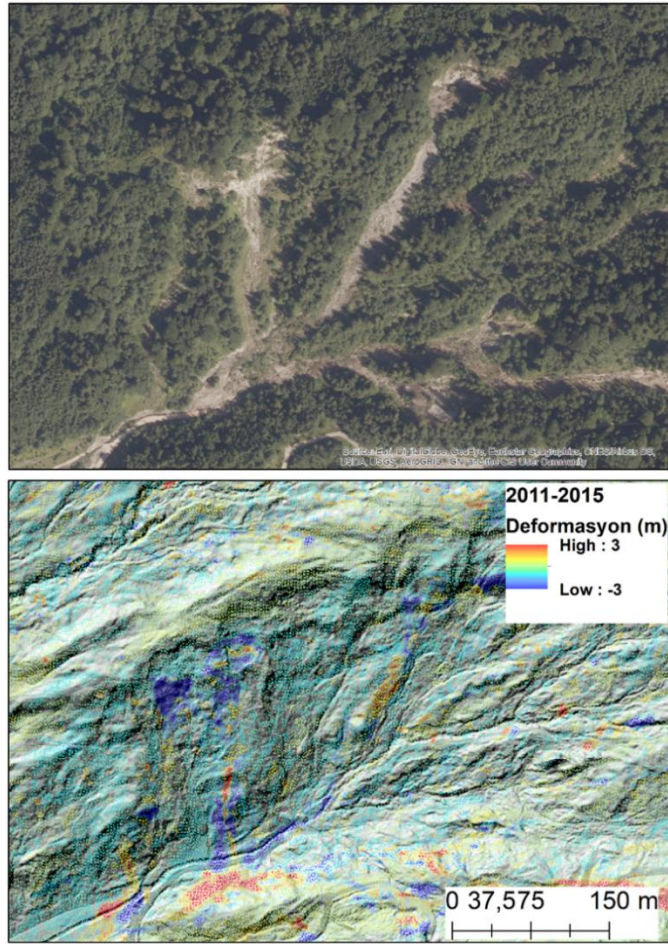
Harita 3.27. M3C2 mesafe verisi (yani deformasyon haritası)



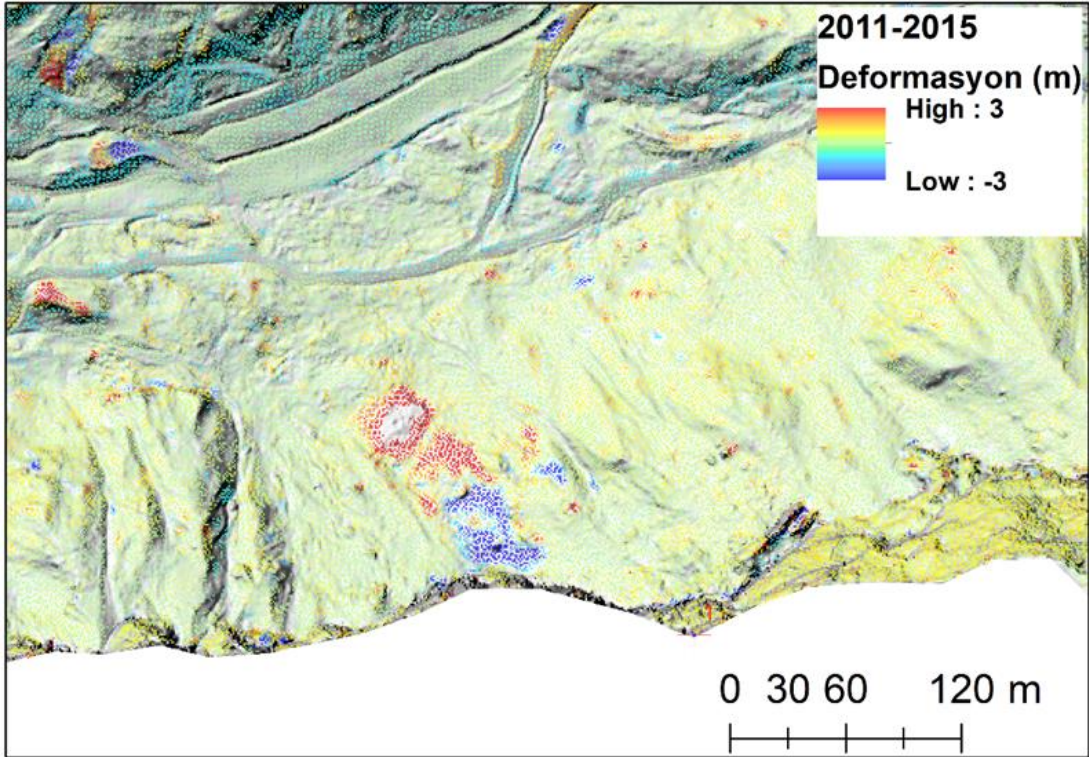
Harita 3.28. Heyelan alanı üzerinde deformasyonun daha yoğun olduğu "A" ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası



Heyelan kütlesi üzerinde deformasyonların en şiddetli olarak tespit edildiği bu alanlara ait daha detay görüntüler Harita 3.29, Harita 3.30 ve Harita 3.31’de verilmektedir. Elde edilen verilerin uydu görüntüleri ile durumları kıyaslandığında beklenen şekilde daha ziyade ayrışmış malzemenin bulunduğu, üzerinde vejetasyon olmayan kanal içlerinde, daha yoğun erozyona bağlı daha fazla deformasyon olduğu gözlenmektedir. Elde edilen deformasyon haritasından akma (mavi) ve birikme (kırmızı) olan bölgeler haritalanmıştır. Elde edilen deformasyon haritası ayrıca sınıflandırılmış ve sonuçları Çizelge 3.4’te ve Şekil 3.6’da verilmektedir. Buna göre elde edilen deformasyon sınıflandırmasına göre veride piksellerin %96,5 i -50 cm ile 50 cm deformasyon sınıfında yer almaktadır. Bu alanlar en stabil olan bölgeler olarak değerlendirilmektedir. Bunun dışında taşınma ve birikme olan değeri sırasıyla -50 cm küçük ve 50 cm büyük olan piksellerin sayısal olarak yüzdeleri ise taşınma olan pikseller için %1,1 ve birikme olan pikseller için %2,3 olarak elde edilmiştir.

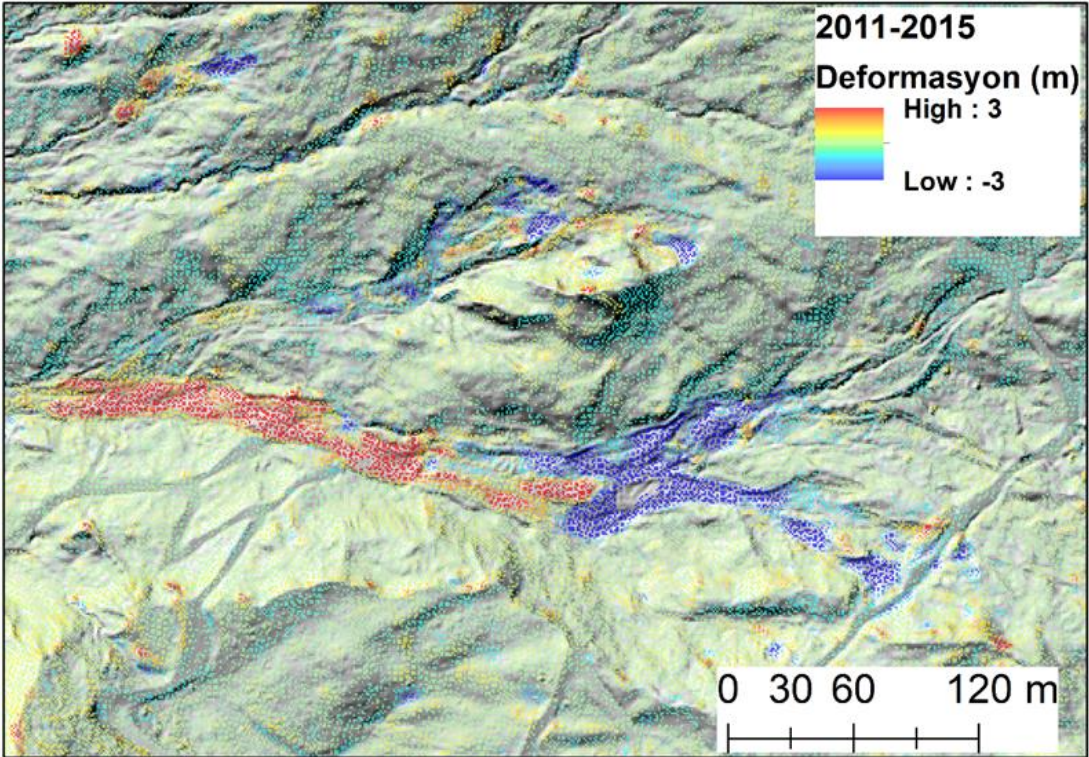


Harita 3.29. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “1” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.



Harita 3.30. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “2” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.

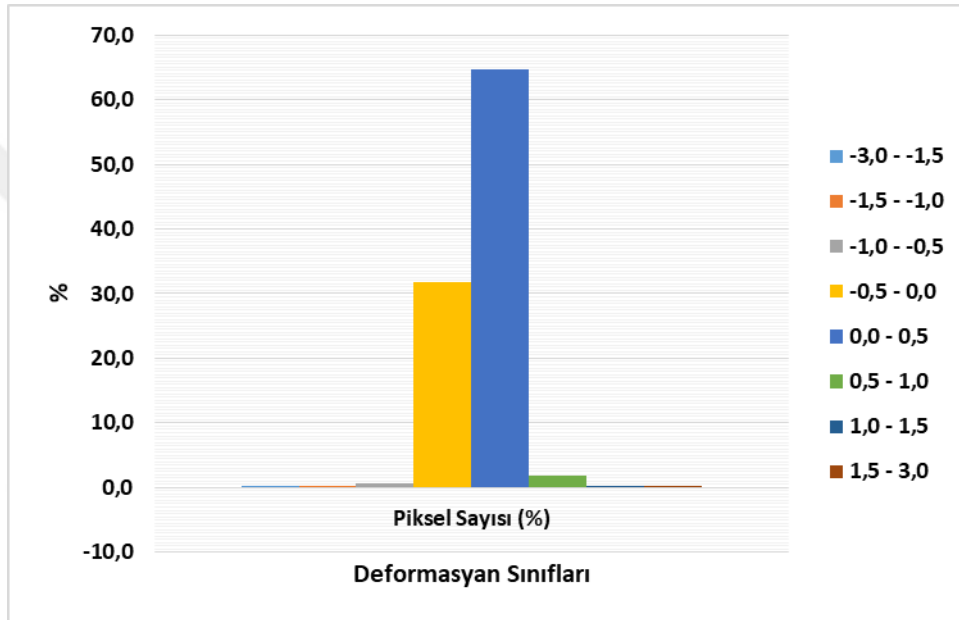




Harita 3.31. Heyelan alanı üzerinde “A” ile gösterilen bölge içerisindeki “3” ile gösterilen bölgenin deformasyon haritası.

Çizelge 3.4. Deformasyon sınıfları piksel sayıları dağılım yüzdeleri.

Deformasyon Sınıf Aralıkları (m)	Piksel Sayısı (%)
-3,0—1,5	0,1
-1,5 —1,0	0,2
-1,0 —0,5	0,8
-0,5 —0,0	31,8
0,0 —0,5	64,7
0,5 —1,0	1,8
1,0 —1,5	0,3
1,5 —3,0	0,2



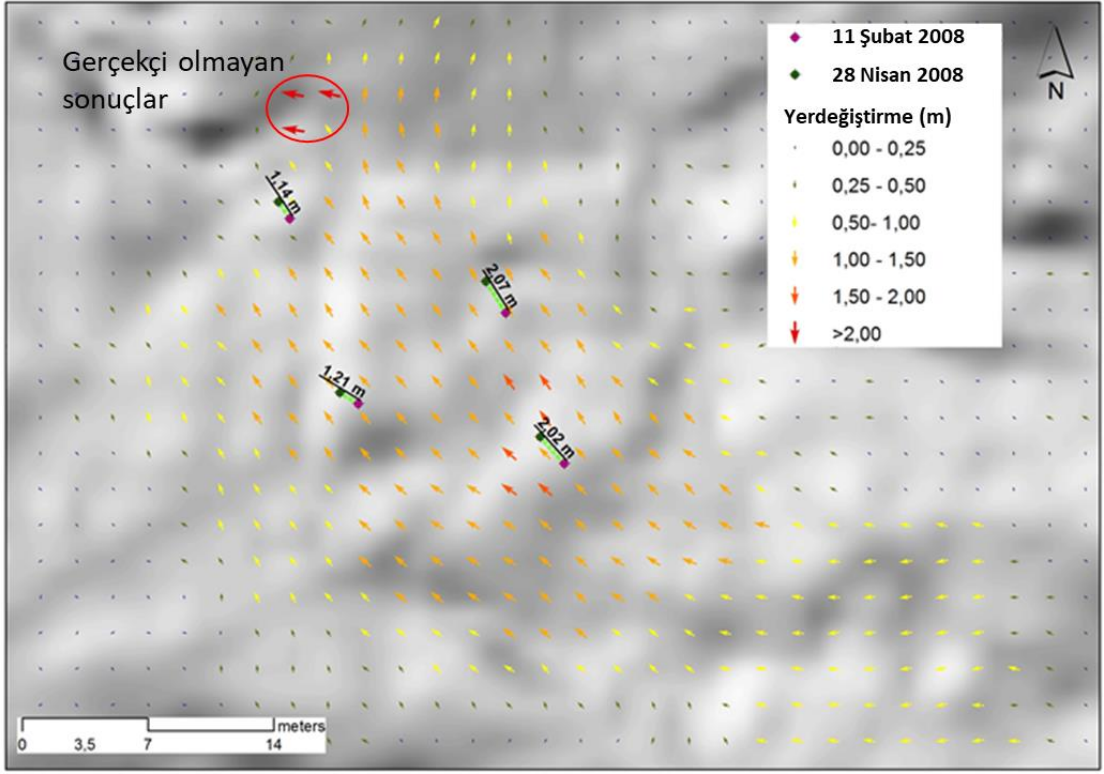
Şekil 3.6. Deformasyon sınıfları alansal dağılım yüzdeleri grafiği.

### 3.4.2. Sayısal Görüntü Korelasyonu Kullanılarak Heyelan Yerdeğiştirme Alanlarının Elde Edilmesine İlişkin Bulgular

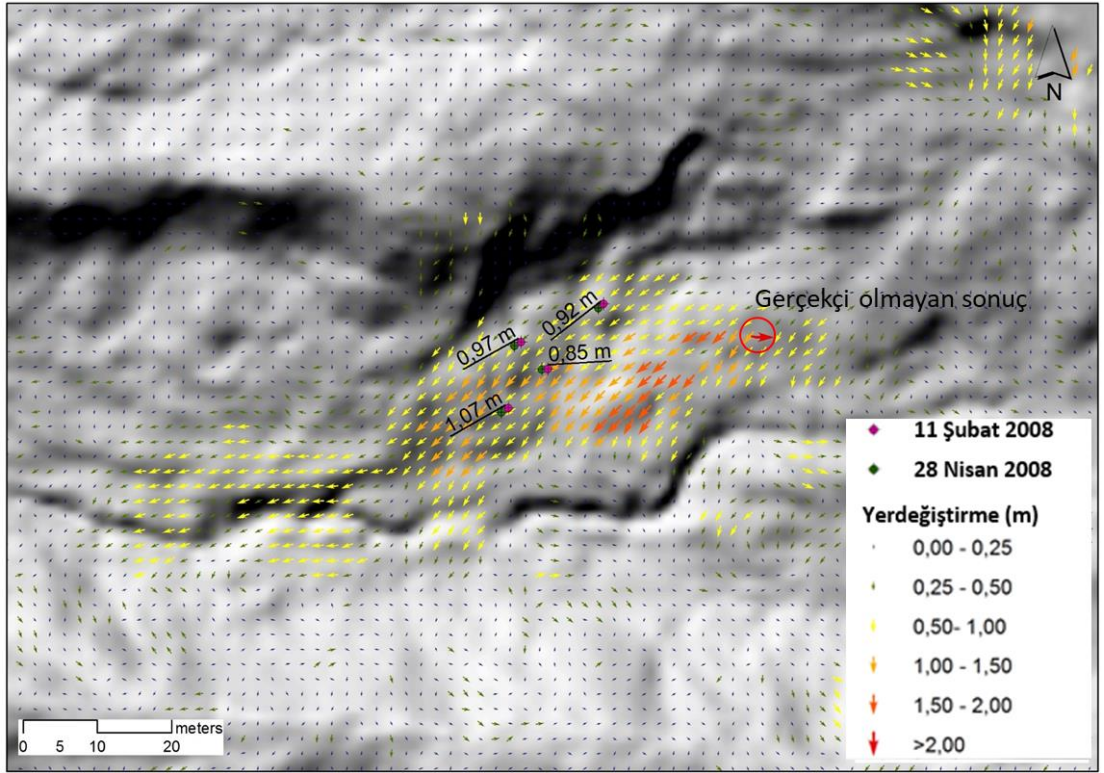
Bu çalışmada DIC analizi ile heyelan yerdeğiştirme alanlarının elde edilmesi için iki zaman serisi şeklinde 2008 yılına ait LIDAR veri seti kullanılmıştır. DIC analizi CIAS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Veri seti çok büyük olduğundan dolayı heyelan alanı üzerinde belirlenen daha aktif bölgesinde analiz yapılarak LIDAR DEM verisinin bütünü işleme dâhil edilmemiştir. Seçilen alan 10,19 ha büyüklüğündedir. Yapılan uygulama ile elde edilen heyelan yerdeğiştirme alanları haritası Harita 3.32’de gösterilmektedir.







Harita 3.33. DIC analizi sonucu elde edilen yerdeğiştirme alanları haritasındaki 1 nolu bölge.



Harita 3.34. DIC analizi sonucu elde edilen yerdeğiştirme alanları haritasındaki 2 nolu bölge.

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 4.1. İNSANSIZ HAVA ARACI (İHA) VE LIDAR VERİLERİ KULLANARAK HEYELAN İZLEME: GALLENZERKOGEL HEYELANI (YBBS-AŞAĞI AVUSTURYA) ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR

Bu çalışmada İHA-tabanlı fotogrametri ile LIDAR verilerinin kullanılarak Gallenzerkogel heyelanının izlenmesi uygulaması gerçekleştirilmiştir. İHA-tabanlı fotogrametri amaçlı veri alımı yaklaşık bir yıllık bir dönemde üç ayrı uçuş yapılarak gerçekleştirilmiştir. Heyelan öncesi topografyayı temsil eden LIDAR DEM verisinin varlığı İHA tabanlı fotogrametri ile kombine edilmesine imkân sağlamıştır. İHA ile verilerin alımında RGB görüntüler alımına imkân veren standart bir kamera kullanılmıştır. Alınan görüntüler ile SfM tabanlı DEM ve ortofoto üretimi başarılı şekilde gerçekleştirilebilmiş ve bütün veriler heyelan izleme amaçlı kullanılabilmiştir. İHA tabanlı üretilen DEM ve ortofotolar heyelan davranışının izlenmesinde oldukça iyi bir potansiyel sağlamıştır.

Bu çalışmadan İHA sistemlerinin kullanmasının hava koşullarının imkân verdiği, gün ışığı olan saatlerde olmak koşuluyla neredeyse istenilen her an veri alımı için kullanılabilir olduğu söylenebilir. Buradan İHA kullanımının çok zamanlı veri alımında esnek, hızlı, etkin ve nispeten daha az maliyetli olduğu sonucuna varılabilir. Gallenzerkogel heyelan alanı üzerinde yapılan uçuşlar değerlendirildiğinde, yaklaşık 5 ha büyüklüğünde olan bir sahada İHA ile veri alımı 10 dakika gibi kısa bir zamanda gerçekleştirilebilmiştir. Bu süre sahaya ulaşım ve sahada uçuş öncesi yapılan çalışmaları kapsamamaktadır.

İHA ile veri alımı ayrıca yersel ölçümlere göre belirli noktalar için değil bütün saha için sürekli veri sağlamaktadır. İHA sistemler yine yersel ölçümlere göre hem yüksek doğruluk ve çözünürlüklerde hem de daha detaylı veri sağlamaktadır. İHA ile alınan bütün görüntüler ortalama 1 cm yer örneklem mesafesi değerine sahiptirler. SfM algoritması uygulaması ile elde edilen yoğun nokta bulutu verisi çok yüksek yoğunluklara sahip olacak şekilde elde edilmiştir. Elde edilen nokta bulutundaki nokta yoğunluğu 150 nokta/m<sup>2</sup> ve üzeri yoğunluk değerine sahiptir. Bu çalışmada kullanılan İHA sistemi üzerinde bulunan GPS sisteminin metre ölçeklerinde konum hassasiyetine sahip görüntü

alımına imkân verdiği için, sahaya uçuş öncesi kamera konumlarının optimizasyonu amaçlı YKN uygulaması gerçekleştirilmiştir. Heyelanlar gibi zor ve tehlikeli topoğrafyalarda YKN uygulaması oldukça zahmetli ve tehlikeli olabilmektedir. Ayrıca aplike edilen YKN'ler görüntü işleme yazılımında kullanıcı tarafından tanımlanarak dış yöneltme işlemi yapıldığı için bu süreçte üretilen modele ilave hata kaynakları dâhil olabilmektedir.

Gallenzerkogel heyelan alanında gerçekleştirilen çalışmada heyelan deformasyonlarının analiz edilebilmesi ve haritalanabilmesi hem DEM farkları hem de gelişmiş nokta bulutu karşılaştırma algoritması olan M3C2 uygulanmıştır. Gerçekleştirilen DEM farkları uygulamasına göre heyelan alanında kütle hareketi sonucu 4380,1 m<sup>3</sup> malzeme taşınmış ve 297,4 m<sup>3</sup> malzemenin de heyelanın en aktif bölgesinde biriktiği tespit edilmiştir. Ayrıca taşınan malzemenin 688,3 m<sup>3</sup>'ü heyelan sonucu yıkılan yoldan taşınmıştır. İHA tabanlı elde edilen yüksek doğruluk ve çözünürlüklü DEM verileri heyelan malzemesinin taşınan ve biriken hacminin hesaplanmasına imkân vermiştir. Yine karmaşık bir topoğrafyaya sahip olan alan üzerinde ayrıca yoğun vejetasyon da bulunduğu için DEM farkları yerine doğrudan nokta bulutları karşılaştırması yapmaya imkân veren gelişmiş M3C2 algoritması uygulanmıştır. Bu modern algoritma DEM farkları yöntemine kıyasla daha doğru şekilde heyelan kaynaklı değişimin analiz edilmesine imkân sağlamaktadır.

Heyelan alanında ikinci ve üçüncü uçuş dönemleri arasında gerçekleştirilen stabilizasyon/kontrol çalışmaları yüzünden topoğrafya önemli ölçüde değiştiği ve heyelan izleme amaçlarının gerçekleştirilmesi söz konusu olmadığı için ne DEM farkları ne de M3C2 algoritması uygulanabilmiştir. Ancak İHA tabanlı elde edilen yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüleri saha üzerinde gerçekleştirilen çalışmaları izleme olanağı sağlamaktadır.

#### **4.2. KAR ERİMESİNİN ÇOK YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ UZAKTAN ALGILAMA TEKNİKLERİ İLE İZLENMESİ: YUKARI DISCHMA VADİSİ (DAVOS, İSVİÇRE) ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR**

Bu çalışmada çok yüksek çözünürlüklü uzaktan algılama teknikleri ile kar erimesinin bir ay gibi kısa bir dönem boyunca izlenmesinde İHA ve TLS verileri kullanımı ve bu tekniklerin karşılaştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın asıl odak noktası kar erimesinin izlenmesinde İHA sisteminin performansının değerlendirilmesidir. Bu



kapsamda TLS verileri bir nevi referans veri amacıyla kullanılmıştır. Çalışmada temin edilebilen zaman serisi şeklindeki verilerin karlı döneme ait ilk üç serisi (9, 10 ve 11 Mayıs 2016 tarihli) bir günlük zaman aralıklarına sahiptirler. Diğer karlı döneme ait seri ise 27 Mayıs 2016 tarihli olup 16 günlük bir zaman aralığıyla temin edilmiştir. Bu sayede temin edilen verilerle veri alım zaman aralıklarının kar erimesinin izlenmesi üzerindeki etkisi de gözlemlenmiştir.

Çalışmada kar erimesinin izlenmesine yönelik hem kar örtüsü ile kaplı alanlardaki değişim hem de erimeye bağlı kar derinliklerinde oluşan değişimin ortaya konulması hedeflenmiştir. Kar erimesine bağlı karla kaplı alanlardaki azalmanın izlenebilmesi İHA ve TLS tabanlı yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntülerin mavi bandına bir eşik değeri tabanlı sınıflandırma uygulanmıştır. Her iki yöntemle ait veri karla kaplı alanların haritalanmasına imkân sağlamış olsa da İHA tabanlı ortofotolar daha doğru sonuçlar sağlamıştır. Çalışma alanının düze yakın bir topoğrafyaya sahip olması, alan üzerinde sınıflandırma işlemine engel olabilecek şekilde kar örtüsünün üzerini örtecek bir objenin (yoğun orman örtüsü vs.) bulunmaması İHA sistemi için sınıflandırma doğruluğunu artıran faktörler olarak değerlendirilebilirken, özellikle düze yakın topoğrafik yapısı nedeniyle her ne kadar TLS daha üst kotlarda konumlandırılarak tarama gerçekleştirilmiş olsa da tarama açısı yüzünden aynı açı doğrultusunda çekilen görüntülerden üretilen ortofotodan yapılan sınıflandırma doğruluğu İHA sistemine göre düşük olmuştur. Yine tarama açısına bağlı olarak yüzeydeki kaya vb engellerin arkasına düşen kısımlarda boşluklar olacak şekilde veri alımı olmuştur ki bu durumda İHA sistemine göre TLS sisteminin bir dezavantajı olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca tek İHA uçuşu ile üretilen ortofotolar tek noktadan yapılan tarama verisi üretilen ortofotolara göre çok daha büyük alanlar kapsamaktadır. Bu da İHA sisteminin TLS sistemine göre bir diğer üstünlüğü olmaktadır. Her ne kadar İHA sistemi TLS sistemine nazaran yüksek doğruluklarda sınıflandırma imkânı vermiş olsa da bazı piksellerin belirlenen eşik değerinden daha yüksek yansıtma değerlerine sahip olmasından dolayı yanlış şekilde sınıflandırılması söz konusu olmaktadır. Yine ortofotoların mavi bandına uygulanan eşik değeri tabanlı sınıflandırma işlemi çalışma alanının düze yakın topoğrafyası, üzerinde kar örtüsünü örten yoğun vejetasyon bulunmaması veya gölge etkisi oluşturacak bir objenin olmaması, veri alım anındaki hava koşulları ve güneş ışınlarının durumu gibi pek çok faktörün sınıflandırma başarısını artıran şekilde uygun olduğu için başarılı sonuç sağladığı göz ardı edilmemelidir.

Kar erimesine bağlı olarak kar derinliğindeki değişimin izlenmesi amacıyla SfM algoritması tabanlı DEM verisi üretilmiş ve karsız döneme ait DEM verisinden kar derinlik değerleri elde edilmiştir. Hem İHA tabanlı zaman serileri için hem de TLS tabanlı zaman serileri için ayrı ayrı gerçekleştirilen bu DEM farkları işlemleri ile elde edilen kar derinliklerinin zamana bağlı değişimi değerlendirilmek suretiyle kar erimesinin izlenmesi işlemi yapılmıştır. İHA verilerine uygulanan SfM tabanlı yaklaşımın oldukça yüksek doğruluklarda modelleme imkânı sağladığı gözlenmektedir. Ancak bu yaklaşımda model kalitesi ve doğruluğu üzerinde dolayısıyla da kar derinlik değerlerinin doğru şekilde elde edilmesi üzerinde etkili olan parametreler bulunmaktadır. Bunlar İHA ile alınan görüntülerin kaliteleri, bindirme oranları, yer örnekleme mesafe değerleri ile birlikte modelleme esnasında kullanılan YKN'lerin arazi üzerindeki dağılımları ve sayısı olarak ifade edilebilir. Özellikle YKN sayısının fazla olması ve alan üzerinde homojen dağılım göstermesi İHA tabanlı 3B modellemede ortaya çıkan genel model deformasyonunu (bükülme etkisi gibi) minimize etmekte etkin olmaktadır. Bu çalışmada 190 adet YKN tanımlanarak modelleme gerçekleştirilmesi ve genel deformasyon etkisinin minimize edilmeye çalışılmasına rağmen özellikle veri alım aralığının kısa olduğu verilerde bir önceki gün kar yağışı olmamasına rağmen bir önceki seriye göre daha yüksek kar derinlik değerleri elde edilebilmektedir. Bu durumda kar örtüsünün bizzat kendisinin SfM tabanlı modelleme de eşleştirme problemleri oluşturması da etkin olmaktadır.

Çalışmada ayrıca TLS verileri ham 3B nokta bulutları olarak temin edilmiş ve gürültü olarak kabul edilen yüzeyde herhangi bir obje olmamasına rağmen yüzeyden daha yüksekte ölçülen noktaların elimine edilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda CloudCompare nokta bulutu işleme yazılımı altında çalışan CANUPO 3B nokta bulutu sınıflandırma yaklaşımı uygulanmıştır. Bu şekilde TLS verilerinden daha doğru kar derinlik değerleri elde edilmesi sağlanmıştır. TLS verilerine kar derinlik çalışmalarında ilk kez bu yaklaşım uygulanarak başarılı sonuçlar alınabildiği ve bundan sonraki çalışmalarda da kullanılabiliceği ortaya konmuştur. Çalışmada her iki yöntemle elde edilen kar derinlik değerlerinin zaman serileri boyunca karşılaştırılması amacıyla bağımsız t-testi uygulanmış, ayrıca her iki metot için elde edilen kar derinlikleri arasında ME, MAE, SD ve RMSE değerleri hesaplanmıştır. Yapılan bağımsız t-testi sonuçlarına göre İHA ve TLS verileri ile elde edilen kar derinlikleri arasında 9 Mayıs 2016 tarihli veri hariç istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunamamıştır. İHA tabanlı kar derinlikleri ile TLS tabanlı kar derinlikleri arasında zaman serileri boyunca ortalama olarak 0,1 m RMSE



hata ölçülmüştür. Yapılan değerlendirmelere göre İHA sisteminin kar erimesinin izlenmesinde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Ancak hem İHA hem de TLS verilerinde özellikle 1 gün gibi kısa zaman aralıklarında değerlendirme yaparken dikkatli olunması gerektiği düşünülmektedir.

#### **4.3. INSAR ZAMAN SERİLERİ ANALİZLERİ İLE HEYELAN İZLEME: DEVREK HEYELANI (ZONGULDAK) VE HİMMETOĞLU HEYELANI (BOLU-GÖYNÜK) ÖRNEKLERİNE AİT SONUÇLAR**

Bu çalışmada interferometrik sentetik açıklıklı radar zaman serileri analizleri kullanılarak heyelan izleme çalışması iki ayrı heyelan alanında gerçekleştirilmiştir. İlk çalışma Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesindeki 16 Temmuz 2015 yılında tetiklenerek yaklaşık 40 ha bir alanda etkili olmuş ve Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü -MTA- 'ne ait yerbilim verilerinde de aktif heyelan olarak görünen sahada gerçekleştirilmiştir. Bu heyelan alanı 1940'lardan itibaren hareketine devam etmektedir. Bundan dolayı bu alanda ESA arşivlerinden temin edilen C band SAR verileri ile uzun dönemli hareketlerinin izlenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 1992 yılından itibaren heyelanın yıkıcı şekilde gerçekleşmesine kadar geçen 2015 yılına kadar farklı uydu sistemlerine ait veriler kullanılmıştır. Veri temin edilebilerek kullanılan uydular ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR ve Sentinel-1A'dır. SAR interferometri yöntemleri özellikle yavaş hareket eden heyelanlara ilişkin izleme çalışmalarında kullanımı artan, aktif bir uzaktan algılama sistemi olmasının sağladığı avantajlar yanısıra uzun dönemli (özellikle ESA arşivleri için 1991'den itibaren) veri erişim imkânı olan modern bir uzaktan algılama sistemidir. Bunların yanı sıra interferometrik zaman serileri analizleri özellikle yerleşim alanları üzerinde veya yoğun vejetasyon bulunmayan kırsal alanlarda kullanılabilmektedir. Bu alan Devrek ilçesinde bir kısmı yerleşim alanında bir kısmı üzerinde orman örtüsü vb olmayan kırsal bir bölgede yer aldığı için interferometrik zaman serileri analizleri hedeflenmiştir.

Çalışma alanında ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait mevcut görüntülerin kapsadığı 1992-2001 yılları arasındaki dönem, Envisat ASAR uydu görüntülerinin kapsadığı 2003-2010 ve Sentinel-1A uydu görüntülerinin kapsadığı 2014-2015 yılları arası dönem olmak üzere üç farklı dönemde inceleme yapılmıştır. PSI analizinin gerçekleştirilmesi için en az 20 adet SAR görüntünün analize dâhil edilmesi gerekmektedir. ERS-1 uydusuna ait analiz

için kullanılabilir olan görüntü sayısı 12 adettir. ERS-2 uydusuna ait ise 17 adet görüntü temin edilebilmiştir. ESA'nın bu iki uydusuna ait görüntüler kombine edilerek toplamda 29 adet görüntüden 1992-2001 yılları arasında 3349 günlük dönem için bir analiz yapılmıştır. Devamındaki dönem için ise Envisat ASAR uydusuna ait 39 adet görüntü kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. ERS-2 uydusuna ait son veri 20 Temmuz 2001 yılına ait olup Envisat ASAR uydusuna ait ilk veri ise 12 Aralık 2003 tarihli'dir. Bu uydu verilerinin alım tarihleri arasındaki 875 günlük dönemde heyelan kaynaklı deformasyon ve yerdeğiştirme alanları hakkında bilgi üretilmemiştir. Envisat ASAR uydusuna ait görüntüler ise 2003-2010 yılları arasındaki 2.380 günlük dönemi kapsamaktadır. Devamındaki dönem için ise Sentinel-1A uydusuna ait görüntüler kullanılmıştır. Envisat ASAR uydusuna ait son görüntü 23 Temmuz 2010 tarihli olup Sentinel-1A uydusuna ait ilk veri ise 16 Ekim 2014 tarihli'dir. Bu iki tarih arasındaki 1.546 günlük dönem için yine analiz yapılamamıştır.

Çalışma alanında InSAR zaman serileri analizi yöntemi olarak PSI uygulanmıştır. PSI ile elde edilen deformasyon hızları değerlendirildiğinde Devrek ilçe merkezi yerleşim alanı üzerinde deformasyon hızları açısından daha stabil bir yapı gözlenirken, bu yerleşim alanı etrafında ve özellikle heyelan alanı içerisinde maksimum deformasyon hızlarına sahip noktalar belirlenmiştir. Bu durum analizi gerçekleştirilen bütün farklı uydu verileri ve dönemlerde de benzerlik göstermiştir. Ayrıca analiz ile belirlenen deformasyonların bir nevi doğrulanması amacıyla özellikle günümüze yakın deformasyonları sağladığı için arazideki durumları da saha çalışmalarıyla değerlendirilmiştir. Yapılan gözlemler analizler ile belirlenen deformasyonların saha gözlemleriyle uyduştüğünü göstermiştir. Yine alana ait eski tarihli hava fotoğraflarının temin edilebilmesi (ki 1944-2011 yılları arasında mevcut 20 adet stereo hava fotoğrafı temin edilebilmiştir) ve ayrıca İHA ile uçuş yapılarak heyelan sonrası duruma ait en güncel, yüksek doğruluk ve çözünürlüğe sahip verinin de temin edilebilmesi PSI analizi sonuçlarını desteklemesi ve heyelan hakkında bilgi vermesi amacıyla kullanılmıştır. Eski tarihli hava fotoğrafları incelendiğinde heyelanın 1940'lardan itibaren görsel değerlendirmeye tespit edilebildiği, ancak sayısal fotogrametri yöntemleriyle hem yeterli hassasiyette DEM verisi üretilmediği ve hem de heyelan alanı üzerinde meydana gelen deformasyonların sadece yersel ölçümler veya SAR sistemler ile ölçülebilecek seviyelerde olması yüzünden hava fotoğraflarından topoğrafik değişime ilişkin veri temin edilememiştir. Ancak 2011 yılına ait sayısal hava fotoğraflarından sayısal fotogrametri yöntemleriyle üretilen DEM verisi ile 2018 yılında

İHA ile temin edilen yüksek çözünürlüklü sayısal görüntülerden SfM tabanlı üretilen DEM verisi kullanılarak heyelan deformasyonları haritalanabilmiştir. Elde edilen deformasyon haritası ile Sentinel-1A uydu verisine ait deformasyonlar benzerlik göstermektedir. Ayrıca üretilen ortofoto görüntülerden (ki bu çalışmada 2011 ve 2018 tarihli ortofotolar kullanılmıştır) heyelan kaynaklı yatayda oluşan yerdeğiştirmeler bina ve yol vb yapısı bozulmamış objelerden yararlanarak haritalanabilmiştir. ERS-1/2, Envisat ASAR ve Sentinel-1A uydularından ayrı dönemler için gerçekleştirilen PSI analizi ile belirlenen ve heyelan içerisinde birbirine yakın konumlarda yer alan iki ayrı noktada yerdeğiştirme-zaman grafikleri üretilerek yapılan değerlendirme yapılmıştır. Buna göre her ne kadar her bir zaman serisi içerisinde dönemlerde oturma ve yükselme şeklinde yerdeğiştirme söz konusu olsa da o noktadaki genel eğilim zeminde oturma veya yükselmelerin zaman serisi boyunca süreklilik gösterdiği görülmüştür.

Çalışma kapsamında bir diğer InSAR zaman serileri analizleri, Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyünde 12 Aralık 2017 tarihinde alanda devam eden açık kömür işletmeciliği faaliyetleri sonucu yapılan kazılar neticesinde tetiklenen heyelan alanı üzerinde, 26 adet Sentinel-1A uydu SAR görüntüsü kullanılarak gerçekleştirilen PSI ve SBAS analizleri ile uygulanmıştır. Çalışma alanının düze yakın topoğrafyaya sahip olması, üzerinde köy yerleşiminin bulunması ve ayrıca yoğun vejetasyon örtüsünün bulunmaması nedeniyle SAR interferometri analizlerinin kullanım imkânı elde edilmiştir. Heyelan olayından hemen sonra gerçekleştirilen İHA uçuşu ile veri alımı ve gerçekleştirilen saha çalışmaları esnasında köy sakinleri ile yapılan görüşmeler ve gözlemlere dayalı olarak alanda açık kömür işletmeciliği faaliyetleri yüzünden zemin deformasyonlarının ve buna bağlı olarak binalarda çatlakların söz konusu olduğu gözlenmiştir. Bundan dolayı da heyelanın yıkıcı olarak ortaya çıkmadan evvel zemin hareketlerinde meydana gelen deformasyonlar ile heyelanın sinyalini verip vermediğinin araştırılması amacıyla bu yöntemlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Yapılan PSI ve SBAS analizleri ile özellikle heyelan yarıklarının bulunduğu bölgede yer alan ve heyelan nedeniyle yıkılan bina ile hasar gören kümes üzerinde deformasyon hızları maksimum olan noktalar belirlenmiştir. Her iki yöntemle ait sonuçlardan birbirine yakın konumlanmış noktalara ilişkin yerdeğiştirme zaman grafikleri üretilerek değerlendirildiğinde benzer zemin deformasyonları eğilimleri gözlenmiştir. Ayrıca saha da yapılan gözlemler ile analiz sonucu elde edilen deformasyonların tutarlılık gösterdiği ortaya konmuştur.

#### **4.4. HAVA LAZER TARAMA VERİLERİ KULLANILARAK HEYELAN DEFORMASYONLARININ VE YERDEĞİŞTİRME ALANLARININ HARİTALANMASI: GSCHLIEFGRABEN (GMUNDEN, YUKARI AVUSTURYA) HEYELANI ÖRNEĞİNE AİT SONUÇLAR**

Hava lazer tarama (LIDAR) verileri heyelan deformasyonlarının haritalanmasında literatürde yaygın olarak kullanılan bir uzaktan algılama verisidir. Bu çalışmada LIDAR verileri ile heyelan deformasyonlarının ve yerdeğiştirme alanlarının haritalanmasında Gschliefgraben heyelan alanı üzerinde temin edilmiş 1 m yersel çözünürlüklü 2011 ve 2015 yıllarına ait veri kullanılmıştır. DEM farkları yaklaşımı bu tür verilerde genel olarak hızlı ve kolay uygulanabilir bir yöntem olarak tercih edilmektedir. Ancak bu çalışmada LIDAR zaman serileri arasında dönem için deformasyonların haritalanmasında modern bir yaklaşım olarak M3C2 nokta bulutu karşılaştırma yaklaşımı uygulanmıştır. LIDAR genel olarak yoğun 3B nokta bulutu verisi sağlamaktadır. Bu yaklaşımın kullanılabilmesi için nokta bulutu verisinin temin edilmesi gerekmektedir. Gschliefgraben heyelanı üzerinde 3B LIDAR nokta bulutu verileri temin edilemediği için DTM olarak temin edilen veriler nokta bulutu verisine dönüştürülmüştür. Ham nokta bulutu verisinden hücre tabanlı DEM verisine dönüşüm işlemi esnasında özellikle karmaşık topoğrafyalarda önemli ölçü de veri kaybı söz konusu olabilmektedir. Bu çalışmada ham nokta bulutu verisi elde edilememesi tam olarak istenilen amacın elde edilememesine neden olmuştur. Ancak DEM farkları yaklaşımında veriler aynı koordinat sistemine sahip oldukları için üst üste gelen piksel değerleri (yani Z değerleri) arasındaki farklar deformasyonların haritalanmasını sağlamaktadır. Bu durumda iki model arasındaki X, Y doğrultusunda oluşacak kaymalar daha yüksek hataların elde edilmesine sebep olabilmektedir. Bu çalışmada LIDAR DTM verileri yeniden nokta bulutu verisine dönüştürülerek CloudCompare gibi nokta bulutu işleme yazılımında öncelikle birbirine yeniden kayıt edilerek modeller arasındaki kaymalar minimize edilebilmektedir. Bu çalışmada da iki nokta bulutu verisi birbirine hassas şekilde yeniden kayıt edilerek kaymalar minimize edilmiştir. Daha sonra gelişmiş M3C2 algoritması uygulanarak deformasyon haritası temin edilmiştir. DEM farkları yaklaşımı sadece Z doğrultusundaki farkları ortaya koyarken M3C2 algoritması ise 3B olarak farkları değerlendirmektedir.

Yapılan analizler ile uydu görüntüsü çakıştırıldığında heyelan alanı üzerinde özellikle vejetasyon olmayan eğimli kanallar içerisinde ve sarp yamaçlarda deformasyonun

maksimum olduğu ortaya konmuştur. Yapılan analizler LIDAR verilerinin yüksek oranda vejetasyon olmasına rağmen zeminden olan geri dönüşler kullanılarak DTM üretilebildiği için heyelan deformasyonunun incelenmesine imkân sağlamaktadır. M3C2 algoritması ayrıca istatistiksel olarak anlamlı değişim ve mesafe belirsizliği verilerini de sağlamaktadır. İki nokta bulutu arasındaki mesafenin anlamlı olmadığı “0” değerine sahip noktalar veri setinden elimine edilmiştir. Mesafe belirsizlik değeri “ $\geq 0.35$  cm” olan noktalar elimine edilmiştir. Böylece iki model arasında hem belirli bir belirsizlik değeri üzerindeki farklar ile iki model arasında anlamlı bir fark olmayan noktalar elimine edilerek daha güvenilir deformasyon haritalama çalışması yapılabilmektedir.

Bu çalışmada yine Gschliefgraben heyelan alanı üzerinde temin edilmiş LIDAR verileri kullanılarak heyelan deformasyon ve yerdeğiştirme alanlarının haritalanmasında sayısal görüntü korelasyon (DIC) yaklaşımı uygulanmıştır. Bu kapsamda 2008 yılına ait iki zaman serisi kullanılmıştır. Kullanılan veriler gölgeli kabartma (hillshade) verisine dönüştürülüp GeoTiff olarak kayıt edildikten sonra CIAS yazılımı ile DIC analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analiz ile iki seri arasında heyelan kaynaklı yatayda oluşan yerdeğiştirme alanları elde edilebilmiştir. DIC analizi yerdeğiştirme alanlarını 2B olarak, iki adet hücre tabanlı görüntü arasında belirlenen bir bölge için çapraz korelasyon değerlerini hesaplamak suretiyle haritalamaya olanak sağlamaktadır. Bu yöntemin en önemli kısıtı heyelan hareketi nedeniyle kütlelerin aşırı şekilde deforme olarak iki zaman serisi arasında korelasyon değerinin hesaplanamamasıdır. Ayrıca bu yöntemin uygulanabilmesi için alanda meydana gelen deşitirmelerin büyüklükleri hakkında önceden bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Aksi takdirde DIC analizi esnasında sonuçları önemli ölçüde etkileyen arama ve kayan pencere büyüklükleri parametrelerini doğru şekilde belirlemek mümkün olamamaktadır.

#### **4.5. TEZ ÇALIŞMASINA İLİŞKİN SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu doktora tez çalışmasında modern uzaktan algılama tekniklerinin doğal afetlerde kullanımının değerlendirilebilmesi için temin edilebilen veriler kapsamında heyelan, çığ, kaya düşmesi ve sel/taşkın gibi doğal afetlerde kullanım olanaklarının değerlendirilmesi, mevcut literatürdeki yöntemlerin irdelenerek örnek uygulamaların yapılması hedeflenmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği süre kapsamında imkânlar dâhilinde temin edilebilen verilere bağlı olarak İHA sistemleri, lazer tarama sistemleri (yersel ve hava

lazer tarama), SAR interferometri yöntemleri ile optik hava fotogrametrisi uzaktan algılama teknikleri olarak, arazi çalışmalarını gerçekleştirme izin ve imkânlarının elde edilebildiği sahalarda, doğal afetlerden sadece heyelan ve kar/çığ çalışmalarına yönelik olarak kullanılabilmişlerdir. Bazı verilerin Türkiye’de temin edilebilme imkânlarının olmaması ya da modern uzaktan algılama tekniklerinden birden fazlasının aynı alan için aynı dönemlerde temin edilememesi nedeniyle üç ayrı ülkede (Türkiye, Avusturya ve İsviçre) yer alan beş ayrı sahada çalışmalar yapılmıştır. Belirlenen çalışma alanlarının ikisi Türkiye, ikisi Avusturya ve biri İsviçre’de yer almaktadır. Avusturya ve Türkiye’de yer alan sahalarda heyelan çalışmaları ile ilgili uygulamalar yapılabilmişken, İsviçre’de yer alan sahada kar/çığ çalışmalarıyla ilgili olarak kar derinlik haritalama ve kar örtüsü erimesinin izlenmesine yönelik bir uygulama çalışması yapılabilmıştır. Yurtdışında gerçekleştirilen uygulama çalışmaları Avusturya-Bodenkultur Üniversitesi, Dağlık Alan Risk Mühendisliği Enstitüsü (Institute of Mountain Risk Engineering) araştırmacıları, İsviçre Kar ve Çığ Araştırmaları Enstitüsü (Institute for Snow and Avalanche Research SLF) araştırmacıları ile yapılan işbirlikleri sayesinde gerçekleştirilebilmiştir. Yine Avusturya’da gerçekleştirilen çalışmalara ilişkin veri temini konusunda Avusturya Sel ve Çığ Kontrolü Orman Teknik Servisi destek sağlamıştır. Belirlenen uzaktan algılama tekniklerinin hepsi heyelanlar ile ilgili uygulama çalışmalarında kullanılabilmişken, kar ve çığ çalışmalarıyla ilgili olarak sadece İHA ve yersel lazer tarama sistemleri kullanılabilmiştir. Bunlarla birlikte, temin edilebilen verilere bağlı olarak İHA sistemler her üç ülkede de kullanılabilmişken, SAR sistemler sadece Türkiye’de, Hava lazer tarama sistemleri sadece Avusturya’da, yersel lazer tarama sistemleri sadece İsviçre’de ve optik hava fotogrametrisi ise sadece Türkiye’de kullanılabilmiştir. Uzaktan algılama tekniklerindeki gelişmelere ve kullanımlarındaki yaygınlaşmaya rağmen Türkiye’de modern uzaktan algılama tekniklerine ait veri temini önemli bir kısıt olmaktadır. Özellikle hava lazer tarama verisinin Türkiye’de henüz doğal afete konu olan bir alanda temin edilememesi, yersel lazer tarama sistemlerinin ise pahalı olması ve henüz yeterli düzeyde yaygın olmaması nedeniyle bu sistemlerin kullanımında önemli kısıtlar söz konusu olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı hava lazer tarama verileri Avusturya’da yer alan heyelan alanları için kullanılabilmiştir. Üzerinde orman örtüsü gibi yoğun vejetasyon bulunan alanlarda dahi kullanım imkânları söz konusu olan bu tekniğin, doğal afetler kapsamında ilgili çalışmalarda etkin şekilde kullanımı için Türkiye’de en kısa zamanda gerekli yatırımların yapılarak, gerektiği şekilde yaygın veri temini imkânlarının



araştırmacı ve uygulayıcılar için sağlanmasının bir gereklilik olduğu düşünölmektedir.

Son dönemde literatürde kullanımı artan ve yaygınlaşan İHA sistemlerinin Türkiye’de kullanımı ve veri temini imkânları açısından değerlendirildiğinde özellikle lazer tarama sistemlerine nazaran daha kolay erişilebilir ve daha ucuz bir teknik olduğu değerlendirilebilir. Bu teknik aynı zamanda yersel çalışmaların pek çok dezavantajını da ortadan kaldırmaktadır. Hem yurtdışındaki sahalarda, heyelan ve kar/çığ çalışmaları için kullanılabilen hem de Türkiye’de heyelan çalışmalarında kullanılan bu tekniğin diğer optik hava ve uzay sistemlerine nazaran daha ucuz, esnek ve kolay bir teknik olduğu değerlendirilmektedir. Bu sistemlerin günümüz teknolojik imkânları kapsamında en önemli dezavantajının kısa uçuş süreleri olduğu, ancak bu dezavantajın da gelecekte ortadan kalkarak büyük oranda giderileceği öngörülmektedir. Bunların yanı sıra günümüzde yaygın şekilde optik kameralar ile veri alımının sağlandığı bu sistemlerde, gelişen teknolojiye bağlı olarak İHA platformlarına uygun şekilde minyatürize edilmiş lazer tarayıcı sistemler ile multi- ve hiper-spektral sensör sistemlerinin entegrasyonu ile daha detaylı veri alımı imkânlarının ortaya çıktığı ve gelecekte daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda gelecekte bahsedilen sistemlerin kullanıldığı bir çalışma yapılabileceği önerilmektedir.

Optik hava fotogrametrisi açısından değerlendirildiğinde Türkiye’de 1939 yılından itibaren Harita Genel Müdürlüğü (eski adıyla Harita Genel Komutanlığı) arşivlerinde analog ve sayısal hava fotoğrafları bulunmaktadır. Özellikle doğal afet analizlerinde alanın geçmiş yıllara ait verilerinin mevcut olması, örneğin doğal afet gelişiminde arazi kullanımındaki değişimin etkin rolü açısından değerlendirildiğinde bu değişimin incelenmesi gibi daha detaylı şekilde analizler yapılabilmesi imkânları sağlayabilmektedir. Eski tarihli analog hava fotoğraflarının yanı sıra sayısal hava kameraları ile alınmış yüksek çözünürlüklü stereo görüntüler özellikle heyelan çalışmalarında İHA verileri ile birlikte değerlendirilerek analizler gerçekleştirme imkânları sağlamaktadır. Bu veriler kolay temin edilebilmeleri yanı sıra mevcut lisanslı veya açık kodlu uzaktan algılama yazılımları ile kolayca işlenebilmekte ve analizlerde kullanılabilirler. Ancak eski tarihli analog fotoğraflar tarayıcılar ile belirli standartlarda sayısallaştırılabilseler de özellikle küçük miktarlarda gerçekleşen heyelan deformasyonlarının izlenmesinde yeterli doğrulukta modellenemedikleri için kısıtlar içermektedir. İHA veya sayısal hava fotoğrafları ile elde edilebilen yüksek doğruluk ve çözünürlüklerde DEM verisi yine küçük deformasyonların (<35 cm) izlenmesinde kısıtlar

içerseler de topoğrafyada önemli değişimlere sebep olan deformasyonların haritalanmasına imkân vermektedirler.

SAR interferometrisinin kullanımı değerlendirildiğinde ESA'nın özellikle araştırmacılarla arşiv verilerinin paylaşımında kolaylık sağlama ile birlikte Sentinel-1 gibi yeni nesil uydu sistemlerinin verilerini ücretsiz olarak paylaşma politikaları Türkiye gibi bazı verilerin erişim kısıtları olan ülkeler için önemli veri kaynağı olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte yüzey deformasyonlarının izlenmesi ve haritalanmasında diferansiyel SAR interferometri tekniğinin güvenilir yeni nesil jeodezik bir ölçüm tekniği olduğu da pek çok çalışmada gösterilmektedir. Buna bağlı olarak son dönemlerde interferometrik SAR zaman serileri analizi yöntemlerinin heyelan gibi doğal afet kaynaklı deformasyonlara ilişkin etkin bir yöntem olarak kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Türkiye'de oldukça kısıtlı çalışma örnekleri bulunan bu gelişmiş uzaktan algılama tekniklerinden InSAR zaman serisi analizlerinin heyelan çalışmalarıyla ilgili olarak iki ayrı sahada uygulanmıştır. Bu sahalardan birincisi olan Zonguldak ili Devrek ilçesi Karşıyaka mahallesi heyelan alanında ESA'nın C band 4 farklı uydu verisi (ERS-1, ERS-2, Envisat ASAR ve Sentinel-1) 1992-2015 yılları arasındaki heyelan kaynaklı deformasyonun elde edilmesinde kullanılmıştır. Bu alanda sadece PSI analizi gerçekleştirilmiştir. İkinci çalışma alanı olan Bolu ili Göynük ilçesi Himmetoğlu köyü heyelan alanında gerçekleştirilen çalışmada ise PSI ve SBAS analizleri Sentinel-1 uydu verileri kullanılarak yapılmıştır. Böylece günümüzde yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılabilen modern uzaktan algılama tekniği başarılı uygulamaları gerçekleştirilerek yöntemler değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar ile heyelan analizinde (ki uzun dönemli analizler de yapılabilmektedir) SAR verileri ile eski tarihli hava fotoğrafları ve İHA verilerinin kombinasyonu uygulanmıştır. Hem modern uzaktan algılama teknikleri, hem de yeni ve gelişmiş yöntemler bir arada değerlendirilerek kullanım olanakları gösterilmiştir.

Uzaktan algılama verileri ile elde edilen sonuçların doğrulanması yapılan çalışmalarda önemli bir işlem adımı olmaktadır. InSAR zaman serileri analizleri ile elde edilen deformasyonların doğrulanmasında literatürde genel olarak GPS ölçümleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise elde edilen sonuçların doğrulanması GPS ölçümü yapılamaması nedeniyle arazide yapılan gözlemler ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca alana ait eski tarihli hava fotoğrafları ve İHA görüntüleri alınarak InSAR zaman serilerine ait sonuçlar doğrulanmaya çalışılmıştır. Eski tarihli hava fotoğrafları her ne kadar DEM

farkları yöntemi ile heyelan kaynaklı yüzey hareketlerini tespit etme imkanı sağlamamış olsa da görsel yorumlama ile değerlendirilmiştir.

Yine InSAR zaman serileri analizleri ile heyelan izleme çalışmalarında yamacın vejetasyon ile kaplı olması durumunda korelasyon bozuklukları ortaya çıkmakta ve kullanılan teknik ile istenilen analizler gerçekleştirilememektedir. Bu kapsamda çalışma alanında yoğun vejetasyon olmaması nedeniyle seçilen sahalar için güvenilir şekilde kullanılabilmişlerdir. Ancak ileride yapılabilecek çalışmalarda hem vejetasyon varlığı kaynaklı korelasyon bozukluklarının ortadan kaldırılması hem de sonuçların daha güvenilir olarak elde edilebilmesi için koordinatı bilinen noktalara düşük maliyetli köşe reflektörleri yerleştirilerek yamaç hareketinin izlenmesi şeklinde çözümler uygulanabileceği değerlendirilmektedir. Bu sayede sadece köşe reflektörlerinin bulunduğu pikseller dikkate alınarak yapılacak analiz ile heyelan kaynaklı yüzey deformasyonlarına ilişkin değerlendirme imkânı elde edilebilmektedir. Gelecekte bu konuya ilişkin bir araştırma çalışması yapılabileceği önerilmektedir.

Bu çalışma kapsamında kar derinlik parametresinin elde edilmesi ve kar örtüsü erimesinin izlenmesine yönelik bir çalışma yapılabilmıştır. Ancak doğal afet çalışmalarının önemli bir aşaması da meydana gelen olayların, detaylı olarak incelenerek envanter oluşturulması/olay dökümantasyonunun gerçekleştirilmesidir. Bu kapsamda özellikle İHA sistemlerinin, özellikle çığlar gibi zor ve tehlikeli topoğrafyalarda meydana geldiği dikkate alındığında, önemli bir araç olabileceği değerlendirilmektedir. Böylece hem çığ başlama bölgesi ve akma bölgesi hakkında hem de meydana gelen çığın birikme bölgesindeki materyal hacmi gibi bilgiler ölçülerek çığ tehlike/risk değerlendirme, haritalama çalışmaları için gerekli bilgileri içeren detaylı bir veri tabanı oluşturulmasında bu modern tekniğin kullanım imkânlarının değerlendirilebileceği bir çalışma yapılabileceği düşünülmektedir.

Çığ envanterinin oluşturulması/olay dökümantasyonunda İHA kullanımı haricinde SAR uydu verilerinin kullanım imkânlarının değerlendirilebileceği bir çalışma yapılabileceği düşünülmektedir. Çünkü bu sistemler hem yüksek çözünürlüğe sahip olabilmekte (örneğin, menzil ve azimut çözünürlükleri Sentinel-1A/B stripmap için 5 m x 5m, TerraSAR-X için 1-3 m x 2.4 m), hem de aktif bir uzaktan algılama sistemi olduğu için optik uydu sistemlerinin aksine pek çok hava koşulunda ve gece/gündüz veri alımı imkânı sağlamaktadırlar. Ayrıca yeni uydu sistemlerinin veri alım sıklığı (zamansal

çözünürlükleri) da (Sentinel-1A ve 1B için 6 gün, TerraSAR-X için 11 gün, Cosmo-SkyMed için 8 gün) bu kapsamda yeterli olarak değerlendirilmektedir.

İHA ile kar parametrelerinin belirlenmesinde daha sık veri alımı yaparak hem meteorolojik veri ile ilişkilendirilmesi hem de alanda orman varlığı söz konusu olduğunda meşcere özelliklerine bağlı olarak etkileşiminin değerlendirildiği daha kapsamlı bir çalışmanın gelecekte yapılabileceği değerlendirilmektedir.

SAR verilerinin heyelan deformasyonlarının haritalanması çalışmalarında kullanımı haricinde literatürde heyelanların karakterizasyonu yapılarak mevcut heyelan envanterinin güncellenmesi konusunda çalışmalar da bulunmaktadır. Türkiye içinde bu tekniklerin optik uydu görüntüleri, İHA ve hava fotoğrafları ile birlikte kullanılması ile benzer çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında veri temin imkanları dahilinde heyelan ve kar/çığ çalışmalarına yönelik uygulamalar gerçekleştirilebilmiştir. Ancak taş-kaya yuvarlanması, sel ve taşkın, orman yangınları gibi diğer doğal afetlerde kullanımlarına yönelik imkânlarının ve kısıtlarının değerlendirilebileceği çalışmalar yapılarak literatüre katkı yapılabileceği de düşünülmektedir.

.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] UN/ISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction), *Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*, Geneva, Switzerland: United Nations, 2004, pp. 430.
- [2] EEA (European Environment Agency). (2016, May 25), *Multilingual Environmental Glossary* [Online]. Available: <http://glossary.eea.eu.int/EEAGlossary>.
- [3] C. D. B. and C. C. S. (2016, May 25). *Sourcebook on the Integration of Natural Hazards into the Environmental Impact Assessment (EIA) Process* [Online]. Available: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8516/Source\\_Book\\_Natural\\_hazards.pdf?sequence=3&isAllowed=1](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8516/Source_Book_Natural_hazards.pdf?sequence=3&isAllowed=1).
- [4] K. Thywissen. (2016, June 20). *Components of risk: a comparative glossary* [Online]. Available: <http://collections.unu.edu/view/UNU:1869>.
- [5] DFID, “Reducing the risk of disasters — helping to achieve sustainable poverty reduction in a vulnerable world,” A DFID policy paper, 2006.
- [6] EEA (European Environment Agency) “Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe,” *Technical report 13/2010*, Copenhagen, Denmark, 2010.
- [7] ADRC. (2016, May 25). *Total Disaster Risk Management-Good Practices* [Online]. Available: [http://www.adrc.asia/publications/TDRM2005/TDRM\\_Good\\_Practices/GP2005\\_e.html](http://www.adrc.asia/publications/TDRM2005/TDRM_Good_Practices/GP2005_e.html).
- [8] D. Alexander, “Natural Hazards,” *Natural Hazards*, vol. 1, pp. 632, 1993.
- [9] A. A. Irasema, “Geomorphology, Natural Hazards, Vulnerability and Prevention of Natural Disasters in Developing Countries,” *Geomorphology*, vol. 47, pp. 107–124, 2002.
- [10] N. Laframboise and B. Loko, “Natural Disasters: Mitigating Impact, Managing Risks,” *IMF Working Papers*, vol. 12, no. 245, p. 1, 2012.
- [11] E. Bryant, *Natural Hazards*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004, pp. 328.
- [12] D. Guha-Sapir, D. Hargitt, and P. Hoyois, *Thirty years of natural disasters: 1974-2003: The Numbers*, Brussels, Belgium: CRED, 2004, pp. 190.
- [13] J. M. Scheuren, O. le Polain de Waroux, R. Below, D. Guha-Sapir, and S. Ponserre, *Annual Disaster Statistical Review-The Number and Trends 2007*, Melin, Belgium: CRED, 2008, pp. 64.
- [14] J. Rodriguez, F. Vos, R. Below, and D. Guha-Sapir, *Annual Disaster Statistical Review 2008: The Numbers and Trends*, Melin, Belgium: CRED, 2009, pp. 33.
- [15] F. Vos, J. Rodriguez, R. Below, and D. Guha-Sapir, *Annual Disaster Statistical Review 2009: The Numbers and Trends*. Brussels, Belgium: CRED, 2010, pp. 46.

- [16] D. Guha-Sapir, F. Vos, R. Below, and S. Ponserre, *Annual Disaster Statistical Review 2010: The Numbers and Trends*, Brussels, Belgium: CRED, 2011, pp. 50.
- [17] D. Guha-Sapir, F. Vos, R. Below, and S. Ponserre, *Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends*, Brussels, Belgium: CRED, 2012, pp. 52.
- [18] D. Guha-Sapir, P. Hoyois, and R. Below, *Annual Disaster Statistical Review 2012: The Numbers and Trends*, Brussels, Belgium: CRED, 2013, pp. 50.
- [19] D. Guha-Sapir, P. Hoyois, and R. Below, *Annual Disaster Statistical Review 2013: The Numbers and Trends*, Brussels, Belgium: CRED, 2014, pp. 50.
- [20] S. Blyth, B. Groombridge, I. Lysenko, L. Miles, and A. Newton, "Mountain Watch. Environmental Change & Sustainable Development in Mountains," UNEP-WCMC, UK, Rep. Biodiversity Series 12, 2002.
- [21] C. Körner and M. Ohsawa, "Mountain systems," in *Ecosystems and human well-being: current State and trends. Findings of the Conditions and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*, R. Hassan, R. Scholes, and N. Ash, Eds., Washington, USA: Island Press, 2005, pp. 681-716.
- [22] C. Marty, O. Korup, M. Phillips, S. Margreth, "Mountain hazards," in *Mountains and Climate Change - From Understanding to Action*, T. Kohler and D. Maselli, Eds., Bern, Switzerland: Geographica Bernensia, Centre for Development and Environment (CDE), 2009, pp. 78.
- [23] J. S. Gardner and J. Dekens, "Mountain hazards and the resilience of social-ecological systems: Lessons learned in India and Canada," *Natural Hazards*, vol. 41, pp. 317–336, 2007.
- [24] IPCC, "Climate Change 2007, Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- [25] S. Aggarwal, "Principles of remote sensing," in *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, M. V. K. Sivakumar, P. S. Roy, K. Harmsen, and S. K. Saha, Eds., Geneva, Switzerland: World Meteorological Organisation, 2004, pp. 427.
- [26] J. B. Campell and R.H. Wynne, *Introduction to Remote Sensing*, Fifth Edition, New York, USA, The Guilford Press, 2011, pp. 667.
- [27] F. F. Sabins, *Remote Sensing: Principles and Applications*, Third Edition, USA: Waveland Press, 2007, pp. 512.
- [28] A. P. Cracknell and L. Hayes, *Introduction to Remote Sensing*, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007, pp. 335.
- [29] K. Tempfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, and L. L. F. Janssen, *Principle of Remote Sensing, An introductory book*, , Fourth edition, Enschede, The Netherlands: ITC Educational Textbook Series, 2001, pp. 589.
- [30] A. Melesse, Q. Weng, S. Prasad, and G. Senay, "Remote Sensing Sensors and applications in environmental resources mapping and modelling," *Sensors*, vol. 7, no. 12, pp. 3209-3241, 2007.
- [31] P. E. Miller, "High resolution optical satellite imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 8, pp. 3044-3045, 2013.



- [32] M. Fauvel, J.A. Palmason, J.A. Benediktsson, J. Chanussot, and J.R. Sveinsson, "Classification of remote sensing imagery with high spatial resolution," *Image and Signal Processing for Remote Sensing XI 06 (SPIE)*, vol. 5982, pp. 1–15, 2005.
- [33] R. R. Naval Gund, "Earth observation systems for sustainable development: Indian experience," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Symp*, Hyderabad, India, 2002, pp. 1457-1466.
- [34] J. Lintz and D.S. Simonett, *Remote Sensing of Environment*, MA, USA: Reading, Addison-Wesley, 1976, pp.694.
- [35] F. F. Sabins, *Remote Sensing and Principles and Image Interpretation*, New York, USA:WH Freeman, 1997, pp. 512.
- [36] L. L. F. Janssen, G. C. Huurneman, W. H. Bakker, C. V. Reeves, B. G. H. Gorte, C. Pohl, M. J. C. Weir, J. A. Horn, A. Prakash, and T. Woldai, *Principles of remote sensing: an introductory textbook*, ITC Educational Textbook Series; Vol. 2, Enschede, Netherland: ITC, 2001, pp. 409.
- [37] D. P. Paine and J. D. Kiser, *Aerial Photography and Image Interpretation*, 3rd Edition, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. 648.
- [38] R. A. Schowengerdt, *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, San Diego, California, USA: Elsevier Inc., 2007, pp. 560.
- [39] C. B. Pease, *Satellite Imaging Instruments: Principles, Technologies and Operational systems*, New York, USA: Ellis Horwood, 1991, pp. 336.
- [40] R. Sandau, *Digital Airborne Camera: Introduction and Technology*, Heidelberg, Germany: Springer Science+Business Media B.V., 2010, pp. 343.
- [41] N. Waltham, "CCD and CMOS sensors," in *Observing Photons in Space*, M.C.E. Huber, A. Pauluhn, J. L. Culhane, J. G. Timothy, K. Wilhelm, A. Zehnder, Eds., vol. 9, New York, USA: ISSI Scientific Report Series, Springer, 2013, pp. 731.
- [42] I. Voronvencii, "The hyperspectral sensors used in satellite and aerial remote sensing," *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, vol. 2, pp. 51-56, 2009.
- [43] C. Weitkamp, "Lidar: Introduction," in *Laser Remote Sensing*, Chapter 1, pp. 2-36, T. Fujii and T. Fukuchi, Eds., Florida, USA: Taylor & Francis Group, 2005, pp. 912.
- [44] K. Marks and P. Bates, "Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models," *Hydrological Processes*, vol. 14, no. 11-12, pp. 2109–2112, 2000.
- [45] M. Flood, "Laser altimetry: from science to commercial LiDAR mapping," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 67, pp. 1209–1211, 1213–1217, 2001.
- [46] K. Lim, P. Treitz, M. Wulder, B. St-Onge, and M. Flood, "LiDAR remote sensing of forest structure," *Progress in Physical Geography*, vol. 27, pp. 88–106, 2003.
- [47] A. R. G. Large and G. L. Heritage, "Laser Scanning-Evolution of the Discipline," in *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, NJ, USA: Wiley Blackwell, 2009, pp. 1–20.

- [48] A. Wehr and U. Lohr, "Airborne laser scanning—an introduction and overview," *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 54, pp. 68–82, 1999.
- [49] M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, A. Abellán, M. H. Derron, A. Loye, R. Metzger, and A. Pedrazzini, "Use of LIDAR in landslide investigations: A review," *Natural Hazards*, vol. 61, no. 1, pp. 5–28, 2012.
- [50] M. E. Charlton, A. R. G. Large, and I. C. Fuller, "Application of airborne lidar in river environments: The River Coquet, Northumberland, UK," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 28, pp. 299–306, 2003.
- [51] M. A. Lesky, W. B. Cohen, G. G. Parker and D. J. Harding, "Lidar remote sensing for ecosystem studies," *BioScience*, vol. 52, pp. 19-30, 2002.
- [52] Y. Hassebo. (2016, June 20). Active remote sensing: LiDAR SNR improvements. [Online]. Available: [http://cdn.intechopen.com/pdfs/37522/InTech-Active\\_remote\\_sensing\\_lidar\\_snr\\_improvements.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/37522/InTech-Active_remote_sensing_lidar_snr_improvements.pdf).
- [53] D. D. Lichti, S. J. Gordon, M. P. Stewart, J. Franke, and M. Tsakiri, "Comparison of Digital Photogrammetry and Laser Scanning, Laser Scanner Behaviour and Accuracy, Close-Range Imaging, Long-Range Vision," *ISPRS Commission V, Symposium*, Corfu, Greece, 2002, pp 39-44.
- [54] J. Carter, K. Schmid, K. Waters, L. Betzhold, B. Hadley, R. Mataosky, and J. Halleran, *Lidar 101: An introduction to lidar technology, data, and applications*, Charleston, USA: NOAA Coastal Services Center, 2012, pp. 72.
- [55] C. Toth, "R&D of Mobile Mapping and Future Trends," *ASPRS Annual Conference*, Baltimore, MD, USA, 2009, pp. 7.
- [56] M.P. McCormick, "Airborne and Spaceborne Lidar," in *Lidar. Springer Series in Optical Sciences*, C. Weitkamp, Eds., vol 102. New York, USA: Springer, 2005, pp. 456.
- [57] G. Petrie and C. K. Toth, "Airborne and Spaceborne Laser Profilers and Scanners," in *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, J. Shan and C. K. Toth, Eds., Boca Raton, USA: CRC Press, 2009, pp. 616.
- [58] U. R. Wandinger, "Lidar," in *Lidar*, C. Weitkamp, Eds., New York, USA: Springer, 2005, pp. 456.
- [59] M. Teke, H. Deveci, O. Haliloglu, S. Gurbuz, and U. Sakarya, "A short survey of hyperspectral remote sensing applications in agriculture," *6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2013)*, Istanbul, Turkey, 2013, pp. 171-176.
- [60] E. Ben-Dor, D. Schlapfer, A. J. Plaza, and T. Malthus, "Hyperspectral Remote Sensing," in *Airborne Measurements for Environmental Research: Methods and Instruments*, M. Wendisch and J.-L. Brenguier, Eds., Weinheim, Germany: Wiley-VCH verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, pp. 641.
- [61] M. E. Schaepman, S. L. Ustin, A. Plaza, T. H. Painter, J. Verrelst, and S. Liang, "Earth system science related imaging spectroscopy: An assessment," *Remote Sensing of Environment*, vol. 3, no. 1, pp. 123-137, 2009.
- [62] A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, and B. N. Rock, "Imaging spectrometry for earth remote sensing," *Science*, vol. 228, pp. 1147–1153, 1985.

- [63] A. F. H. Goetz, "Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 5–16, 2009.
- [64] M. E. Schaepman, "Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 9, pp. 204–223, 2007.
- [65] F.D. Van der Meer, H.M.A. van der Werff, F.J.A. van Ruitenbeek, C.A. Hecker, W.H. Bakker, M. F. Noomen, M. van der Meijde, E.J.M. Carranza, J. Boudewijn de Smeth, and T. Woldai, "Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 14, pp. 112–128, 2012.
- [66] R. B. Smith. (2016, July 20). *Tutorial: Introduction to hyperspectral imaging* [Online]. Available:<https://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyrspec.pdf>.
- [67] L. G. Prost, *Remote sensing for geologists: a guide to image interpretation*, New York, USA: Gordon and Breach Science Publishers, 2001, pp. 326.
- [68] J. B. Hearnshaw, *The analysis of starlight One hundred and fifty years of astronomical spectroscopy*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1986, pp. 546.
- [69] F. A. Kruse, "Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration," *9th Australasian Remote Sensing Conference*, Sydney, Australia, 1998, pp. 19.
- [70] S. L. Ustin, D. A. Roberts, and J. A. Gamon, "Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties," *BioScience*, vol. 53, pp. 523–534, 2004.
- [71] K. S. He, D. Rocchini, M. Neteler, and H. Nagendra, "Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasions," *Diversity and Distributions*, vol. 17, pp. 381–392, 2011.
- [72] F. A. Kruse, J. Boardman, A. Lefkoff, J. Young, K. Kierein–Young, T. Cocks, R. Janssen, and P. Cocks, "HyMap: An Australian Hyperspectral Sensor Solving Global Problems—Results from USA HyMap Data Acquisitions," *10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, Adelaide, Australia, 2000, pp. 16.
- [73] T. Cocks, R. Janssen, A. Stewart, I. Wilson, and T. Shields, "The HyMap™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance," *1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, Switzerland, 1998, pp. 37–42.
- [74] M. E. Schaepman, "Imaging Spectrometers," in *The SAGE Handbook of Remote Sensing*, T. A. Warner, M. Duane Nellis, and G. Foody, Eds., London, UK: Sage, 2009, pp. 568.
- [75] A. C. Watts, V. G. Ambrosia, and E. A. Hinkley, "Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 6, pp. 1671–1692, 2012.
- [76] R. Dunford, K. Michel, M. Gagnage, H. Piégay, and M. L. Trémelo, "Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest," *International Journal of Remote Sensing*, vol.

30, pp. 4915-4935, 2009.

- [77] V. G. Ambrosia, S. S. Wegener, D. V. Sullivan, S. W. Buechel, S. E. Dunagan, J. A. Brass, J. Stoneburner, and S. M. Schoenung, "Demonstrating UAV-acquired real-time thermal data over fires," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 69, pp. 391–402, 2003.
- [78] H. Eisenbeiss, "UAV Photogrammetry," Ph.D. Thesis. Institut für Geodesie und Photogrammetrie, ETH-Zürich. Zürich, Switzerland, 2009.
- [79] J. Everaerts, "The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Remote Sensing and Mapping," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37. Part B1. Beijing, China, 2008, pp. 6.
- [80] A. Rango, A. Laliberte, C. Steele, J. E. Herrick, B. Bestelmeyer, T. Schmutz, A. Roanhorse, and V. Jenkins, "Using unmanned aerial vehicles for rangelands: current applications and future potentials," *Environmental Practice*, vol. 8, pp. 159–168, 2006.
- [81] K. N. Tahar, A. Ahmad, W. A. A. W. M. Akib, and W. S. Udin, "Unmanned Aerial Vehicle Technology For Large Scale Mapping," *ISG & ISPRS 2011*, Shah Alam, Malaysia, 2011, pp. 11.
- [82] H. Bendea, P. Boccardo, S. Dequal, F. G. Tonolo, D. Marenchino, and M. Piras, "Low cost UAV for post disaster assessment," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 2008, pp. 1373-1379.
- [83] L. R. Newcome, *Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Vehicles*, 1st edn, Reston, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2004, pp. 172.
- [84] A.C. Watts, L. N. Kobziar, and H. F. Percival, "Unmanned Aircraft Systems for Wildland Fire Monitoring and Research," *24th Tall Timbers Fire Ecology Conference: The Future of Fire: Public Awareness, Health, and Safety*, Tallahassee, FL, USA, 2009; pp. 86–90.
- [85] D. Bowen, *Encyclopedia of War Machines: An Historical Survey of the World's Great Weapons*, London, UK: Peering Books, 1977, pp. 368.
- [86] F. S. Haydon, "Aeronautics in the Union and Confederate Armies, With a Survey of Military Aeronautics Prior to 1861," in *Military Ballooning During the Early Civil War*, Baltimore, MD, USA: Johns Hopkins University Press: vol. 1. 2000, pp. 399.
- [87] J. Hannavy, *Encyclopedia of Nineteenth-Century Photography*, Routledge, UK: Taylor & Francis Group: vol. 1, 2007, pp. 14–15.
- [88] L. Wallace, A. Lucier, C. Watson, and D. Turner, "Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory," *Remote Sensing*, vol. 4, pp. 1519–1543, 2012.
- [89] S. Nebiker, A. Annena, M. Scherrer, D. Oesch, "A light-weight multispectral sensor for micro UAV—Opportunities for very high resolution airborne remote sensing," *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, Beijing, China, 2008, pp. 1193–1198.

- [90] J. S. Aber and D. Galazka, "Kite aerial photography for quaternary investigations in Poland," *Geological Quarterly*, vol. 44, pp. 33–38, 2000.
- [91] J. S. Aber, S. W. Aber, and F. Pavri, "Unmanned small-format aerial photography from kites for acquiring large scale, high-resolution, multiview-angle imagery," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS*, Denver, CO, USA, 2002, pp. 6.
- [92] M. J. Smith, J. Chandler, and J. Rose, "High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, pp. 155–161, 2009.
- [93] L. A. Vierling, M. Fersdahl, X. Chen, L. Zhengpend, and P. Zimmerman, "The shortwave aerosat-mounted imager (SWAMI): a novel platform for acquiring remotely sensed data from a tethered balloon", *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, pp. 255–264, 2006.
- [94] S. Dugdale, "An evaluation of imagery from an unmanned aerial vehicle (UAV) for the mapping of intertidal macroalgae on Seal Sands, Tees Estuary, UK," Master Thesis, Geography Department, University of Durham, UK, 2007.
- [95] J. Lejot, C. Delacourt, H. Piégay, T. Fournier, M. L. Trémélo, and P. Allemand, "Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, pp. 1705–1725, 2007.
- [96] A. S. Rango, A.S. Laliberte, J. E. Herrick, C. Winters, and K. Havstad, "Development of an operational UAV/remote sensing capability for rangeland management," *23rd Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems (UAVS) Conference*, Bristol, United Kingdom, 2008, pp. 9.
- [97] R. Sugiura, N. Noguchi, and K. Ishii, "Correction of Low-altitude Thermal Images applied to estimating Soil Water Status," *Biosystems Engineering*, vol. 96, pp. 301–313, 2007.
- [98] F. T. Ulaby and D.G. Long, *Microwave radar and radiometric remote sensing*, Ann Arbor, USA: University of Michigan Press, 2014, pp. 1116.
- [99] R. R. Navalgund, "Remote sensing: Basics and applications," *Resonance*, vol. 6, pp. 51–60, 2001.
- [100] W. Parker. (2016, June 15). Discover the benefits of radar imaging. *EJE Earth Imaging Journal* [Online]. Available: <http://eijournal.com/print/articles/discover-the-benefits-of-radar-imaging>.
- [101] J. A. Richards, *Remote sensing with imaging radar—signals and communication technology*, Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH &Co. KG, 2009, pp. 361.
- [102] R. Bamler, and P. Hartl, "Synthetic aperture radar interferometry," *Inverse Problems*, vol. 14, no. 4, pp. 1-54, 1998.
- [103] S. R. Cloude, *Polarisation: applications in remote sensing*, Oxford, UK: Oxford University Press, 2009, pp. 472.
- [104] K. P. Papathanassiou and S. R. Cloude, "Single-baseline polarimetric SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39,

- pp. 2352–2363, 2001.
- [105] J. A. Stratton, *Electromagnetic theory*, New York, USA: McGraw-Hill, 1941, pp. 640.
  - [106] E. J. Rothwell and M. J. Cloud, *Electromagnetics*, Boca Raton, USA: CRC Press, 2001, pp. 704.
  - [107] R. S. Cloude, *An introduction to wave propagation & antennas*. London, UK: UCL Press, 1995, pp. 200.
  - [108] I. H. Woodhouse, *Introduction to microwave remote sensing*, Boca Raton, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, pp. 400.
  - [109] J. B. Campbel, *Introduction to remote sensing*, New York, USA: The Guilford Press, 2007, pp. 667.
  - [110] R. N. Treuhft and P. R. Siqueira, “Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar,” *Radio Science*, vol. 35, pp. 141–177, 2000.
  - [111] S. R. Cloude, D. G. Corr, and M. L. Williams, “Target detection beneath foliage using polarimetric synthetic aperture radar interferometry,” *Waves in Random Media*, vol. 14, pp. S393–S414, 2004.
  - [112] T. P. Ager, “An introduction to synthetic aperture radar imaging,” *Oceanography*, vol. 26, no. 2, pp. 20–33, 2013.
  - [113] D. P. Lusch, *Introduction to Microwave Remote Sensing*, Michigan, USA: Center for Remote Sensing and GIS, Michigan State University, 1999, pp. 84.
  - [114] Y. K. Chan and V. C. Koo, “An introduction to synthetic aperture radar (SAR),” *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 2, no. 6, pp. 27–60, 2008.
  - [115] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, M.G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, 2013.
  - [116] P. A. Rosen, S. Hensley, I. R. Joughin, F. K. Li, S. N. Madsen, E. Rodriguez, and R. Goldstein, “Synthetic aperture radar interferometry,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 333-376, 2000.
  - [117] R. F. Hanssen, *Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2001, pp. 327.
  - [118] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, London, UK: McGraw Hill, 1980, pp. 762.
  - [119] L. Paul and P. Ramamoorthy, “Synthetic aperture radar image change detection using fuzzy c-means clustering algorithm,” *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Electronics Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 1374-1379, 2013.
  - [120] G. Franceschetti and R. Lanari, *Synthetic Aperture Radar Processing*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999, pp. 324.
  - [121] J. Kamath, “Real time imaging systems for synthetic aperture radar using coarse quantized correlators with VLSI realisation,” Ph.D. dissertation, University of Idaho, Idaho, USA, 1995.



- [122] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, D. Massonet, *InSAR Principle: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, Netherlands: ESA Publications, 2007, pp. 48.
- [123] B. Tubbs. (2016, May 10). Astronomical Optical Interferometry, A Literature Review[Online]. Available: [http://www.cus.cam.ac.uk/~rnt20/interferometry/ast\\_opt\\_int/pagel.html](http://www.cus.cam.ac.uk/~rnt20/interferometry/ast_opt_int/pagel.html).
- [124] J. V. Evans and T. Hagfors, *Radar Astronomy*, New York, USA: McGraw-Hill, 1968, pp. 620.
- [125] A. E. Rogers and R. P. Ingalls, "Venus: Mapping the surface reflectivity by Radar Interferometry," *Science*, vol. 165, no. 3895, pp. 797–799, 1969.
- [126] S. H. Zisk, "A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography," *The Moon*, vol. 4, pp. 296–306, 1972.
- [127] I. I. Shapiro, S. H. Zisk, A. E. E. Rogers, M. A. Slade, and T. W. Thompson, "Lunar topography: Global determination by radar," *Science*, vol. 178, pp. 939–948, 1972.
- [128] J. L. Margot, D. B. Campbell, R. F. Jurgens, and M. A. Slade, "Topography of the Lunar Poles from Radar Interferometry: A Survey of Cold Trap Locations," *Science*, vol. 284, pp. 1658–1660, 1999.
- [129] D. Richman, "Three-dimensional Azimuth-correcting Mapping Radar," U.S. Patent 4321601, 1982.
- [130] F. M. Henderson, and A. J. Lewis, "Principles and applications of Imaging Radar," in *Manual of Remote Sensing*, 3rd edn. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 2440.
- [131] L. C. Graham, "Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 6, pp. 763–768, 1974.
- [132] R. M. Goldstein, E. R. Caro, and C. Wu, "Method and apparatus for contour mapping using synthetic aperture radar," U. S. Patent 4551724, 1985.
- [133] H. A. Zebker and R. M. Goldstein, "Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations," *Journal of Geophysical Research*, vol. 91, no. B5, pp. 4993–4999, 1986.
- [134] F. K. Li, and R. M. Goldstein, "Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, pp. 88–97, 1990.
- [135] C. Prati, F. Rocca, A. Monti Guarnieri, and E. Damonti, "Seismic migration for SAR focusing: interferometrical applications," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 627–640, 1990.
- [136] A. L. Gray, and P. J. Farris-Manning, "Repeat-pass interferometry with airborne synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, no. 1, pp. 180–191, 1993.
- [137] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry," *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, no. B7, pp. 9183–9191, 1989.
- [138] D. Massonet and F. Adragna, "A full-scale validation of radar Interferometry

- with ERS-1: the Landers earthquake,” *Earth Observation Quarterly*, vol. 41, pp. 1-5, 1993.
- [139] H. A. Zebker, T. G. Farr, R. P. Salazar, and T. H. Dixon, “Mapping the world’s topography using radar interferometry: The TOPSAT mission”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, no. 12, pp. 1774–1786, 1994.
- [140] D. Massonnet, K. Feigl, M. Rossi, and F. Adragna, “Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake,” *Nature*, vol. 369, pp. 227–230, 1994.
- [141] M. van der Kooij, “Production of DEMs from ERS tandem Data,” *FRINGE workshop*, Liège, Belgium, 1999, pp. 5.
- [142] R. L. Jordan, E. R. Caro, Y. Kim, M. Kobrick, Y. Shen, F. V. Stuhr, and M. U. Werner, Shuttle radar topography mapper (SRTM), *Proc. SPIE 2958, Microwave Sensing and Synthetic Aperture Radar*, Sicily, Italy, 1996, pp. 412–422.
- [143] R. Bamler, M. Eineder, and H. Breit, “The X-SAR Single-Pass Interferometer on SRTM: Expected Performance and Processing Concept,” *EUSAR’96*, Königswinter, Germany, 1996, pp. 181–184.
- [144] H. A. Zebker, P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel, and C. L. Werner, “On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. B10, pp. 19617–19634, 1994.
- [145] G. Peltzer and P. Rosen, “Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, earthquake observed by SAR interferometry,” *Science*, vol. 268, pp. 1333–1336, 1995.
- [146] D. Massonnet, and K. L. Feigl, “Satellite radar interferometric map of the coseismic deformation field of the M = 6.1 Eureka Valley, California earthquake of May 17, 1993,” *Geophysical Research Letters*, vol. 22, no. 12, pp. 1541–1544, 1995.
- [147] G. Peltzer, P. Rosen, F. Rogez, and K. Hudnut, “Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow,” *Science*, vol. 273, pp. 1202–1204, 1996.
- [148] F. Amelung, D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Laczniaik, “Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation,” *Geology*, vol. 27, pp. 483–486, 1999.
- [149] S. Usai, “The use of man-made features for long time scale INSAR,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’97)*, Singapore, Singapore, 1997, pp. 1542–1544.
- [150] S. Usai and R. Hanssen, “Long time scale INSAR by means of high coherence features,” *Third ERS Symposium—Space at the Service of our Environment*, Florence, Italy, 1997, pp. 225–228.
- [151] R. Hanssen and S. Usai, “Interferometric phase analysis for monitoring slow deformation processes,” *Third ERS Symposium—Space at the Service of our Environment*, Florence, Italy, 1997, pp. 487–491.
- [152] S. Usai and R. Klees, “On the Feasibility of Long Time Scale INSAR,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’98)*, Seattle,

Washington, USA, 1998, pp. 2448–2450.

- [153] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, and F. Rocca, “Multi-image DEM Reconstruction,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’98)*, Seattle, Washington, USA, 1998, pp. 1367–1369.
- [154] S. Usai and R. Klees, “On the interferometric characteristics of anthropogenic features,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’99)*, Hamburg, Germany, 1999, pp. 1734–1736.
- [155] S. Usai and R. Klees, “SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, pp. 2118–2123, 1999.
- [156] R. M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb, and R. M. Frolich, “Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream,” *Science*, vol. 262, pp. 1525–1530, 1993.
- [157] H. A. Zebker and J. Villasenor, “Decorrelation in interferometric radar echoes,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 5, pp. 950–959, 1992.
- [158] J. Askne and J. O. Hagberg, “Potential of Interferometric SAR for Classification of Land Surfaces,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’93)*, Tokyo, Japan, 1993, pp. 985–987.
- [159] P. Hartl, and Y. Xia, “Besonderheiten der Datenverarbeitung bei der SAR Interferometrie,” *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, vol. 6, pp. 214–222, 1993.
- [160] U. Wegmüller, C. L. Werner, D. Nüesch, and M. Borgeaud, “Land-surface analysis using ERS-1 SAR Interferometry”, *ESA Bulletin*, vol. 81, pp. 30–37, 1995.
- [161] D. A. Yocky, and B. F. Johnson, “Repeat-Pass Dual-Antenna Synthetic Aperture Radar Interferometric Change-Detection Post-Processing”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 64, no. 5, pp. 425–429, 1998.
- [162] D. Geudtner, R. Winter, and P. W. Vachon, “Flood monitoring using ERS-1 SAR Interferometry coherence maps,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’96)*, Lincoln, NE, USA, 1996, pp. 966–968.
- [163] P. A. Rosen, S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb, and E. J. Fielding, “Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry,” *Journal of Geophysical Research E: Planets*, vol. 101, pp. 23109–23125, 1996.
- [164] H. A. Zebker, P. Rosen, S. Hensley, and P. J. Mouginiis-Mark, “Analysis of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii, using SIR-C radar correlation measurements,” *Geology*, vol. 24, pp. 495–498, 1996.
- [165] E. W. Hoen and H. A. Zebker, “Penetration Depths Inferred from Interferometric Volume Decorrelation Observed over the Greenland Ice Sheet,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, no. 6, pp. 2571–2583, 2000.
- [166] H. Rott, B. Scheuchl, A. Siegel, and B. Grasemann, “Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from a mass waste above a reservoir in the Otztal Alps, Austria,” *Geophysical Research Letters*, vol.

- 26, pp. 1629–1632, 1999.
- [167] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, “Permanent scatterers in SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, pp. 8–20, 2001.
  - [168] C. Colesanti, A. Ferretti, F. Novali, C. Prati, and F. Rocca, “SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1685–1701, 2003.
  - [169] DEOS. (2017, January 10). Doris User’s Manual and Technical Documentation,” Delft University of Technology, 4.02 ed. [Online]. Available: [http://doris.tudelft.nl/software/doris\\_v4.02.pdf](http://doris.tudelft.nl/software/doris_v4.02.pdf).
  - [170] A. Ferretti, A. Monti-guarnieri, C. Prati, and F. Rocca, “InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation,” chap. Part A, *ESA Publications*, vol. 19, pp. 1–40, 2007.
  - [171] H. A. Zebker, P. A. Rosen, and S. Hensley, “Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. B4, pp 7547–7563, 1997.
  - [172] R. Hanssen, and A. Feijt, “A first quantitative evaluation of atmospheric effects on SAR Interferometry,” *ESA Workshop on ERS SAR Interferometry FRINGE'96*, Zurich, Switzerland, 1996, pp. 277–282.
  - [173] F. J. Meyer, and N. Jeremy, “The Impact of the Ionosphere on Interferometric SAR Processing,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008)*, Boston, MA, USA, 2008, pp. 391–394.
  - [174] U. Wegmuller, C. Werner, T. Strozzi, and A. Wiesmann, “Ionospheric electron concentration effects on SAR and InSAR,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2006)*, Denver, CO, USA, 2006, pp. 3731–3734.
  - [175] T. Guneriusson, K. A. Høgda, H. Johnsen, and I. Lauknes, “InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, pp. 2101–2108, 2001.
  - [176] M. Nolan and D. R. Fatland, “Penetration depth as a DInSAR observable and proxy for soil moisture,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 532–537, 2003.
  - [177] M. Nolan, D. R. Fatland, and L. Hinzman, “DInSAR measurement of soil moisture,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 2802–2813, 2003.
  - [178] N. Miranda, B. Rosich, C. Santella, and M. Grion, “Review of the impact of ERS-2 piloting modes on the SAR Doppler stability”, *FRINGE Workshop*, Frascati, Italy, 2003, pp. 11.
  - [179] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, “Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, pp. 2202–2212, 2000.
  - [180] A. Ferretti, F. Novali, A. Fumagalli, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, "Beyond PSInSAR: the SqueeSAR approach”, *AGU Fall Meeting, Abstracts 1*, San Francisco, California, USA, 2009, pp.1.
  - [181] A. Ferretti, F. Novali, A. Fumagalli, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, “A new

- algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3460–3470, 2011.
- [182] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, “A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 2375–2383, 2002.
- [183] C. Werner, U. Wegmuller, T. Strozzi, and A. Wiesmann, “Interferometric point target analysis for deformation mapping,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS’03)*, Toulouse, France, 2003, pp. 4362–4364.
- [184] A. Hooper, H. Zebker, P. Segall, and B. Kampes, “A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers,” *Geophysical Research Letters*, vol. 31, pp. 1–5, 2004.
- [185] B. Kampes, “Displacement Parameter Estimation using Permanent Scatterer Interferometry,” Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Netherland, 2005.
- [186] B. Kampes, *Radar Interferometry – Persistent Scatterer Technique, Remote Sensing and Digital Image Processing*, Netherlands: Springer, 2006, pp. 211.
- [187] R. Lanari, F. Casu, M. Manzo, G. Zeni, P. Berardino, M. Manunta, and A. Pepe, “An overview of the small baseline subset algorithm: a DInSAR technique for surface deformation analysis,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 164, no. 4, pp. 637–661, 2007.
- [188] P. Blanco-Sanchez, J. J. Mallorquí, S. Duque, and D. Monells, “The coherent pixels technique (CPT): an advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 165, no. 6, pp. 1167–1193, 2008.
- [189] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, and F. Minati, “A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2008)*, Boston, Massachusetts, USA, 2008, pp. II-449.
- [190] M. Costantini, F. Malvarosa, and F. Minati, “A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 3, pp. 758–768, 2012.
- [191] M. Crosetto, E. Biescas, J. Duro, J. Closa, and A. Arnaud, “Generation of advanced ERS and Envisat Interferometric SAR products using the Stable Point Network technique,” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 74, pp. 443–450, 2008.
- [192] F. Kuehn, D. Albiol, G. Cooksley, J. Duro, J. Granda, S. Haas, A. Hoffmann-Rothe, and D. Murdohardono, “Detection of land subsidence in Semarang, Indonesia, using stable points network (SPN) technique,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 60, no. 5, pp. 909–992, 2010.
- [193] D. Perissin and T. Wang, “Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, pp. 271–280, 2012.

- [194] J. M. Bioucas-Dias and G. Valadao, "Phase unwrapping via graph cuts", *IEEE transactions on image processing*, *IEEE Signal Processing Society*, vol. 16, pp. 698–709, 2007.
- [195] J. Tribolet, "A new phase unwrapping algorithm," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 25, no. 2, pp. 170–177, 1977.
- [196] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface," *Reviews of Geophysics*, vol. 36, pp. 441–500, 1998.
- [197] D. C. Ghiglia, G. a. Mastin, and L. a. Romero, "Cellular-automata method for phase unwrapping," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4, no. 1, pp. 267–280, 1987.
- [198] K. Itoh, "Analysis of the phase unwrapping algorithm," *Applied optics*, vol. 21, pp. 2470, 1982.
- [199] B. Osmanoglu, T. H. Dixon, S. Wdowinski, and E. Cabral-Cano, "On the importance of path for phase unwrapping in synthetic aperture radar interferometry," *Applied Optics*, vol. 50, no. 19, pp. 3205–3220, 2011.
- [200] B. Osmanoglu, T. H. Dixon, S. Wdowinski, E. Cabral-Cano, and Y. Jiang, "Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, pp. 1–12, 2011.
- [201] M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-González, N. Devanthery, and B. Crippa, "Persistent Scatterer Interferometry: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 115, pp. 78–89, 2016.
- [202] O. Mora, J. J. Mallorqui, and A. Broquetas, "Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 2243–2253, 2003.
- [203] D. A. Schmidt and R. Bürgmann, "Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B9, p. 2416, 2003.
- [204] J. Duro, J. Inglada, J. Closa, N. Adam, and A. Arnaud, "High resolution differential interferometry using time series of ERS and ENVISAT SAR data," *FRINGE 2003 Workshop*, Frascati, Italy, 2003, pp. 72.
- [205] M. Crosetto, B. Crippa, and E. Biescas, "Early detection and in-depth analysis of deformation phenomena by radar interferometry," *Engineering Geology*, vol. 79, pp. 81–91, 2005.
- [206] A. J. Hooper, "A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches," *Geophysical Research Letters*, vol. 35, pp. L16302, 2008.
- [207] P. López-Quiroz, M. P. Doin, F. Tupin, P. Briole, and J. M. Nicolas, "Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 69, pp. 1–15, 2009.
- [208] E. A. Hetland, P. Musé, M. Simons, Y. N. Lin, P. S. Agram, and C. J. DiCaprio, "Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation," *Journal*



*of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 117, no. B2, pp. 17, 2012.

- [209] F. van Leijen, “Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory” Ph.D. dissertation, University of Technology Delft, Netherland, 2014.
- [210] K. Goel and N. Adam, “A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 5454–5468, 2014.
- [211] X. Lv, B. Yazici, M. Zeghal, V. Bennett, and T. Abdoun, “Joint-scatterer processing for time-series InSAR,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 7205–7221, 2014.
- [212] N. Devan  ry, M. Crosetto, O. Monserrat, M. Cuevas-Gonz  lez, and B. Crippa, “An approach to persistent scatterer interferometry,” *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 6662–6679, 2014.
- [213] A. Ferretti, G. Savio, R. Barzaghi, A. Borghi, S. Musazzi, F. Novali, C. Prati, and F. Rocca, “Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, pp. 1142–1153, 2007.
- [214] D. Perissin and A. Ferretti, “Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 12, pp. 4043–4058, 2007.
- [215] U. Soergel, *Radar Remote Sensing of Urban Areas*, New York, USA: Springer, Dordrecht, 2010, pp. 277.
- [216] G. Herrera, D. Notti, J.C. Garc  a-Davalillo, O. Mora, G. Cooksley, M. S  nchez, and M. Crosetto, “Analysis with C-and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area,” *Landslides*, vol. 8, no. 2, pp. 195–206, 2011.
- [217] M. Costantini, S. Falco, F. Malvarosa, F. Minati, F. Trillo, and F. Vecchioli, “Persistent scatterer pairs (PSP) approach in very high resolution SAR interferometry,” *Synthetic Aperture Radar (EUSAR), 2010 8th European Conference on, VDE*, Aachen, Germany, 2010, pp. 1–4.
- [218] J. Sousa, A. Hooper, R. Hanssen, L. Bastos, “Comparative study of two different PS-INSAR approaches: DEPSI vs. STAMPS,” *ESA FRINGE Workshop*, Frascati, Italy, 2009, pp. 8.
- [219] A. Hooper, R. Pedersen, and F. Sigmundsson, “Constraints on Magma Intrusion at Eyjafjallaj okull and Katla Volcanoes in Iceland,” University College Dublin, USA, rep. VOLUME Project, 2009.
- [220] A. Hooper, “A Statistical-Cost Approach to Unwrapping the Phase of InSAR Time Series,” *ESA FRINGE Workshop*, Frascati, Italy, 2009, pp. 5.
- [221] R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. J. Mallorqu  , P. Berardino, and E. Sansosti, “A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 7, pp. 1377–1386, 2004.
- [222] S. H. Hong, S. Wdowinski, S. W. Kim, and J. S. Won, “Multi-temporal monitoring of wetland water levels in the Florida Everglades using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) ,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, pp. 2436–2447, 2010.

- [223] S. H. Hong and S. Wdowinski, “Multitemporal multitrack monitoring of wetland water levels in the florida everglades using alos palsar data with interferometric processing,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, pp. 1355–1359, 2014.
- [224] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, “The Second Generation PSInSAR Approach: SqueeSAR,” *ESA FRINGE Workshop*, Frascati, Italy, 2009, pp. 42.
- [225] A. Ferretti, F. Novali, A. Fumagalli, C. Prati, F. Rocca, A. Rucci, “Beyond PSInSAR: the SqueeSAR approach,” *AGU Fall Meeting, Abstracts 1*, San Francisco, California, USA, 2009, pp.1.
- [226] F. Rocca, A. Rucci, A. Ferretti, and A. Bohane, “Advanced InSAR interferometry for reservoir monitoring,” *First Break*, vol. 31, pp. 77–85, 2013.
- [227] A. Parizzi and R. Brcic, “Adaptive InSAR stack multilooking exploiting amplitude statistics: A comparison between different techniques and practical results,” *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, pp. 441–445, 2011.
- [228] Q. Luo, D. Perissin, O. Dogan, H. Lin, and W. Wang, “Tianjin suburbs PS-QPS analysis and validation with leveling data,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Munich, Germany, 2012, pp. 3915–3918.
- [229] D. H. Cornforth, *Landslides in practice: investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils*, New York, USA: Wiley, 2005, pp. 624.
- [230] D. M. Cruden, “A simple definition of a landslide,” *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, vol. 43, pp. 27–29, 1991.
- [231] C.F.S. Sharpe, *Landslides and related phenomena*, New York, USA: Columbia University Press, 1938, pp. 137.
- [232] D.J. Varnes, “Landslides type and processes,” in *Landslides Analysis and Control*, E. B. Eckel, Eds, Highway Research Board Spec. Rep. 29, 1958, pp. 20-47.
- [233] F. Guzzetti, A. Carrara, and R. Paola, “Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard,” *Natural Hazards*, vol. 20, pp. 117–135, 1999.
- [234] F. İ. Atalay and N. Bekaroğlu, *Heyelanlar ve Mühendislik Uygulaması*, Ankara, Türkiye: Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü yayını, 1973, ss. 349.
- [235] K. M. Weerasinghe, A. Malalasekara, K. Dahanayake, and S. J. Perera, *Learning to live with Landslides, Natural Hazards and Disaster*, the Asian Disaster Preparedness Centre, Thailand: Sri Lankan-German Development Cooperation, 2002, pp. 40.
- [236] K. T. Chau, Y. L. Sze, M. K. Fung, W. Y. Wong, E. L. Fong, and L. C. P. Chan, “Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS,” *Computers and Geosciences*, vol. 30, pp. 429–443, 2004.
- [237] D. J. Varnes, “Slope movements: type and processes, In landslides and engineering practice” in *Transportation research board, national academy of sciences*, R.L. Schuster and R.J. Krizek, Eds., special report, pp. 12-33, 1978.
- [238] M. Frehner, B. Wasser, and R. Schwitter, *Sustainability and success monitoring*

*in protection forests*, Bern, Switzerland: Federal Office for the Environment FOEN, UW-0727-E, 2007, pp. 55.

- [239] B. D. Malamud, D. L. Turcotte, F. Guzzetti, and P. Reichenbach, "Landslide inventories and their statistical properties," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 29, pp. 687–711, 2004.
- [240] F. Guzzetti, A. Carrara, M. Cardinali, and P. Reichenbach, "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy," *Geomorphology*, vol. 31, pp. 181-216, 1999.
- [241] M. Ercanoğlu, N. Temiz, Ö. Kaşmer, "Heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesinde bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının kullanımının araştırılması," TÜBİTAK Projesi, Rap. 103Y-126, 2005.
- [242] F. C. Dai, and C. F. Lee, "Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong," *Geomorphology*, vol. 42, pp. 213–228, 2002.
- [243] P. Aleotti and R. Chowdhury, "Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 58, pp. 21–44, 1999.
- [244] D. J. Varnes, *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*, Paris, France: UNESCO, 1984, pp. 60.
- [245] M. Ercanoglu, "Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks," *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 5, pp. 979–992, 2005.
- [246] G. Bitelli, M. Dubbini, A. Zanutta, "Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies," *XXth ISPRS congress*, Istanbul, Turkey, 2004, pp. 6.
- [247] P. D. Savvaıdis, "Existing landslide monitoring systems and techniques," *Conference from Stars to Earth and Culture, In honor of the memory of Professor Alexandros Tsioumis*, Thessaloniki, Greece, 2003, pp. 242-258.
- [248] A. Stumpf, "Landslide recognition and monitoring with remotely sensed data from passive optical sensors," Ph.D. dissertation, University of Strasbourg, France, 2013.
- [249] G. Metternicht, L. Hurni, and R. Gogu, "Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments," *Remote Sensing of Environment*, vol. 98, pp. 284–303, 2005.
- [250] C. Delacourt, P. Allemand, E. Berthier, D. Raucoules, B. Casson, P. Grandjean, C. Pambrun, and E. Varel, "Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review," *Bulletin de la Societe Geologique de France*, vol. 178, pp. 89-100, 2007.
- [251] K. E. Joyce, S. E. Belliss, S. V. Samsonov, S. J. McNeill, and P. J. Glassey, "A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters," *Progress in Physical Geography*, vol. 33, pp. 183–207, 2009.
- [252] M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, A. Abellán, M. H. Derron, A. Loye, R. Metzger,

- and A. Pedrazzini, "Use of LIDAR in landslide investigations: a review," *Natural Hazards*, vol. 61, pp. 1-24, 2012.
- [253] F. Guzzetti, A.C. Mondini, M. Cardinali, F. Fiorucci, M. Santangelo, K. T. Chang, "Landslide inventory maps: New tools for an old problem," *Earth-Science Reviews*, vol. 112, pp. 42-66, 2012.
- [254] J. Ganz, *Die Gipfelbewegung der Rosablanche*, Zurich, Switzerland: SAC-Jahrbuch, 1914, pp. 50.
- [255] A. Heim, "Der Bergsturz von Elm. Zeitschrift der Deutschen," *Geologischen Gesellschaft*, vol. 34, pp. 74-115, 1882.
- [256] H. Zölly, "Geschichte der geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen," in der Schweiz, Stiftung Dr. Joachim de Jacomi, Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Eidgenössischen Landestopographie, 1948.
- [257] C. Bonnard, "Technical and human aspects of historic rockslide dammed lakes and landslide dam breaches," *A chapter of the book Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue on Security of natural and artificial Rockslide Dams, pp. 21-31, 2006.
- [258] R. Finsterwalder, "Geschwindigkeitsmessungen an Gletschern mittels Photogrammetrie," *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, vol. 19, pp. 251-262, 1931.
- [259] S. Voigt, T. Kemper, T. Riedlinger, R. Kiefl, K. Scholte, and H. Mehl, "Satellite image analysis for disaster and crisis-management support," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 6, pp. 1520-1528, 2007.
- [260] S. Lee, J. Choi, and K. Min, "Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, pp. 2037-2052, 2004.
- [261] C. J. van Westen, "The modelling of landslide hazards using GIS," *Surveys in Geophysics*, vol. 21, pp. 241-255, 2000.
- [262] A. Zanutta, P. Baldi, G. Bitelli, M. Cardinali, and A. Carrara, "Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis," *Annals of Geophysics*, vol. 49, pp. 1067-1080, 2006.
- [263] N. Rengers, R. Soeters, C. J. van Westra, "Remote Sensing and GIS Applied to Mountain Hazard Mapping," *Episodes*, vol. 15, no. 1, pp. 36-45, 1992.
- [264] J. Travelletti, J. P. Malet, K. Samyn, G. Grandjean, and M. Jaboyedoff, "Control of landslide retrogression by discontinuities: evidence by the integration of airborne- and ground-based geophysical information," *Landslides*, vol. 10, pp. 37-54, 2013.
- [265] R. Roncella, G. Forlani, M. Fornari, and F. Diotri, "Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry," *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 2, no.5, pp.297-304, 2014.
- [266] H. Hoinkes, "Glaciology in the International Hydrological Decade," *IUGG General Assembly, Bern, IAHS Commission on Snow and Ice, Reports and Discussions, IAHS Publication*, No. 79, pp. 7-16, 1967.
- [267] W.G. Rees, *Remote sensing of snow and ice*, Boca Raton, FL, USA: Taylor &

Francis, 2006, pp. 277.

- [268] A. Frei and D. A. Robinson, “Northern hemisphere snow extent: regional variability 1972–1994,” *International Journal of Climatology*, vol. 19, no.14, pp. 1535–1560, 1999.
- [269] J. L. Foster, and A.T.C. Chang, “Snow Cover,” in *Atlas of Satellite Observations Related to Global Change*, R.J. Gurney, J.L. Foster and C.L. Parkinson, Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993, pp. 459.
- [270] H. Haefner, K. Seidel, and H. Ehrler, “Applications of snow cover mapping in high mountain regions,” *Phys. Chem. Earth*, vol. 22, no. 3-4, pp. 275–278, 1997.
- [271] G. Luzi, L. Noferini, D. Mecatti, G. Macaluso, M. Pieraccini, C. Atzeni, A. Schaffhauser, R. Fromm, and T. Nagler, “Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: Results from an experimental data collection in Tyrol (Austria),” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, pp. 382–393, 2009.
- [272] J. T. Koskinen, J. T. Pulliainen, and M. T. Hallikainen, “The use of ERS-1 SAR data in snow melt monitoring,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 3, pp. 601–610, 1997.
- [273] A.W. Nolin, “Recent advances in remote sensing of seasonal snow,” *J. Glaciol.*, vol. 56, no. 200, pp. 1141–1150, 2010.
- [274] B. Ross and J. Walsh, “Synoptic-scale influences of snow cover and sea ice,” *Monthly Weather Review*, vol. 114, no. 10, pp. 1795–1810, 1986.
- [275] T. P. Barnett, L. Dümenil, U. Schlese, E. Roeckner, and M. Latif, “The effect of Eurasian snow cover on regional and global climatic variations,” *Journal of Atmospheric Science*, vol. 46, no. 5, pp. 661–685, 1989.
- [276] R. L. Armstrong and M. J. Brodzik, “Hemispheric-scale comparison and evaluation of passive-microwave snow algorithms,” *Annals of Glaciology*, vol. 34, pp. 38–44, 2002.
- [277] A. Rango, “Snow hydrology processes and remote-sensing,” *Hydrological Processes*, vol. 7, no. 2, pp. 121–138, 1993.
- [278] A. Rango, A. T. C. Chang, and J. L. Foster, “The utilization of spaceborne microwave radiometers for monitoring snowpack properties,” *Nordic Hydrology* vol. 10, no. 1, pp. 25–40, 1979.
- [279] Y. Bühler, M. Marty, L. Egli, J. Veitinger, T. Jonas, P. Thee, and C. Ginzler, “Spatially continuous mapping of snow depth in high alpine catchments using digital photogrammetry,” *The Cryosphere Discuss*, vol. 8, pp. 3297–3333, 2014.
- [280] J. Schweizer, “Snow avalanche formation and Dynamics,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 54, pp. 153–154, 2008.
- [281] S. Fuchs, M. Bründl, and J. Stötter, “Development of avalanche risk between 1950 and 2000 in the Municipality of Davos, Switzerland,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 4, pp. 263–275, 2004.
- [282] M. Barbolini, U. Gruber, C. J. Keylock, M. Naaim, and F. Savi, “Application of statistical and hydraulic-continuum dense-flow avalanche models to five real European sites,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 31, pp. 133–149, 2000.

- [283] K. Elder, J. Dozier, and J. Michaelsen, “Snow accumulation and distribution in an alpine watershed,” *Water Resources Research*, vol. 27, no. 7, pp. 1541–1552, 1991.
- [284] M. Lehning, H. Löwe, M. Ryser, and N. Raderschall, “Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain,” *Water Resources Research*, vol. 44, no. 7, pp. 19, 2008.
- [285] J. Schweizer, K. Kronholm, J. B. Jamieson, and K.W. Birkeland, “Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation,” *Cold Reg. Sci. Technol*, vol. 51, pp. 253–272, 2008.
- [286] T. Grünewald, M. Schirmer, R. Mott, and M. Lehning, “Spatial and temporal variability of snow depth and ablation rates in a small mountain catchment,” *The Cryosphere*, vol. 4, pp. 215–225, 2010.
- [287] L. Egli, T. Jonas, T. Grünewald, M. Schirmer, and P. Burlando, “Dynamics of snow ablation in a small Alpine catchment observed by repeated terrestrial laser scans,” *Hydrol. Process.*, vol. 26, pp. 1574–1585, 2011.
- [288] D. Vikhamar and R. Solberg, “Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data,” *Remote Sen. Environ.*, vol. 88, pp. 309–323, 2003.
- [289] N. Mognard, “Snow cover Dynamics,” in *Arctic Environment Variability in the Context of Global Change*, L.P. Bobylev, K.Y. Kondratyev, and O.M. Johannessen, Eds., Chichester, England: Praxis-Springer, 2003, pp. 472.
- [290] B. Miziński and T. Niedzielski, “Fully-automated estimation of snow depth in near real time with the use of unmanned aerial vehicles without utilizing ground control points,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 138, pp. 63–72, 2017.
- [291] A. Jaakkola, J. Hyyppä, and E. Puttonen, “Measurement of Snow Depth Using a Low-Cost Mobile Laser Scanner,” *IEEE Geosci. Remote Sens. Letters*, vol. 11, pp. 587–591, 2014.
- [292] N. Foppa, A. Stoffel, and R. Meister, “Synergy of in situ and space borne observation for snow depth mapping in the Swiss Alps,” *Int. J. Appl. Earth Obs.*, vol. 9, pp. 294–310, 2007.
- [293] Y. Bühler, M. Marty, L. Egli, J. Veitinger, T. Jonas, P. Thee, and C. Ginzler, “Snow depth mapping in high-alpine catchments using digital photogrammetry,” *The Cryosphere*, vol. 9, pp. 229–243, 2015.
- [294] T. Grünewald and M. Lehning, “Are flat-field snow depth measurements representative? A comparison of selected index sites with areal snow depth measurements at the small catchment scale,” *Hydrol. Processes*, vol. 29, pp. 1717–1728, 2015.
- [295] M. Eckerstorfer, Y. Bühler, R. Frauenfelder, and E. Malnes, “Remote Sensing of Snow Avalanches: Recent Advances, Potential, and Limitations,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 121, pp. 126–140, 2016.
- [296] H. Rott, “The analysis of backscattering properties from SAR data of mountain regions,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 347–353, 1984.
- [297] M.T. Hallikainen, F.T. Ulaby, and T.E. Van Deventer, “Extinction behavior of dry snow in the 18–90 GHz range,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote*



- Sensing*, vol. 25, pp. 737–745, 1987.
- [298] H. Rott, R. E. Davis, and J. Dozier, “Polarimetric and multifrequency SAR signatures of wet snow,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '92)*, Houston, Texas, USA, 1992, pp. 3.
- [299] T. Guneriusson, H. Johnsen, and K. Sand, “DEM corrected ERS-1 SAR data for snow monitoring,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 2, pp. 181–195, 1996.
- [300] Hall, D.K., and J. Martinec, “Remote Sensing of Ice and Snow,” *Geocarto International*, vol. 1, no. 1, pp. 64, 1985.
- [301] D. Scherer, D. K. Hall, V. Hochschild, M. König, J.-G. Winther, C. R. Duguay, F. Pivot, C. Mätzler, F. Rau, K. Seidel, R. Solberg, and A. E. Walker, “Remote sensing of snow cover,” in *Remote Sensing in Northern Hydrology: Measuring Environmental Change*, C. R. Duguay and A. Pietroniro, Eds., Washington DC, USA: American Geophysical Union, 2013, pp. 7–38.
- [302] A. Tait, “Estimation of snow water equivalent using passive microwave radiation data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 64, no. 3, pp. 286–291, 1998.
- [303] F. Ulaby and W. Stiles, “The active and passive microwave response to snow parameters: 2. Water equivalent of dry snow,” *J. Geophys. Res.*, vol. 85, pp. 1045–1049, 1980.
- [304] A.T. Chang, J.L. Foster, D.K. Hall, A. Rango, B. K. Hartline, “Snow water equivalent estimation by microwave radiometry,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 259–267, 1982.
- [305] J. Pulliainen, “Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations,” *Remote Sensing of Environment*, vol.101, pp. 257-269, 2006.
- [306] A.P. Standley, “The use of passive microwave and optical data in the SNOWTOOLS Project,” *EARSeL Workshop on Remote Sensing of Land Ice and Snow*, Freiburg, Germany, 1997, pp. 61-68.
- [307] M. Matson, “NOAA satellite snow cover data,” *Paleogeography and Paleocology*, vol. 90, pp. 213-280, 1991.
- [308] D. A. Robinson and A. Frei, “Seasonal variability of northern hemisphere snow extent using visible satellite data,” *Professional Geographer*, vol. 51, pp. 307-314, 2000.
- [309] A. G. Klein and A.C. Barnett, “Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande river basin for the 2000–2001 snow year,” *Remote Sens Environ*, vol. 86, pp. 162-176, 2003.
- [310] A. E. Tekeli, Z. Akyürek, A. A. Şorman, A. Şensoy, and A. Ü. Şormani, “Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 97, pp. 216-230, 2005.
- [311] R. D. Brown, C. Derksen, and L. Wang, “Assessment of spring snow cover duration variability over northern Canada from satellite datasets,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 111, pp. 367–381, 2007.
- [312] A. Roy, A. Royer, and R. Turcotte, “Improvement of springtime stream-flow

- simulations in a boreal environment by incorporating snow-covered area derived from remote sensing data,” *Journal of Hydrology*, vol. 390, pp. 35–44, 2010.
- [313] M. Hori, K. Sugiura, K. Kobayashi, T. Aoki, T. Tanikawa, K. Kuchiki, M. Niwano, and H. Enomoto, “A 38-year (1978–2015) Northern Hemisphere daily snow cover extent product derived using consistent objective criteria from satellite-borne optical sensors,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 191, pp. 402–418, 2017.
- [314] J. Dozier, *Prospects and Concerns for Satellite Remote Sensing of Snow and Ice; National Academies*, Washington, DC, USA: The National Academies Press, 1989, pp. 55.
- [315] F. S. Singer and R. W. Popham, “Non-meteorological observations from satellites,” *Astronautics and Aerospace Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 89–92, 1963.
- [316] M. Matson, C.F. Ropelewski, and M.S. Varnardore, *An Atlas of Satellite-Derived Northern Hemisphere Snow Cover Frequency*, Washington, U.S: Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration Data and Information Service, National Environmental Satellite, Data and Information Service, 1986, pp. 713.
- [317] D. K. Hall, R. E. J. Kelly, G. A. Riggs, A.T.C. Chang, and J. L. Foster, “Assessment of the relative accuracy of hemispheric-scale snow-cover maps,” *Annals of Glaciology*, vol. 34, pp. 24–30, 2002.
- [318] D. K. Hall, G. A. Riggs, and V. V. Salomonson, “Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 54, pp. 127–140, 1995.
- [319] C. J. Crawford, S. M. Manson, M. E. Bauer, and D. K. Hall, “Multitemporal snow cover mapping in mountainous terrain for Landsat climate data record development,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 135, pp. 224–233, 2013.
- [320] D. K. Hall, J. L. Foster, V.V. Salomonson, A.G. Klein, and J.Y.L. Chien, “Development of a technique to assess snow-cover mapping errors from space,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE39, no. 2, pp. 432–438, 2001.
- [321] R. Solberg, D. Hiltbrunner, J. Koskinen, T. Guneriussen, K. Rautiainen, and M. Hallikainen, “Snow algorithms and products-review and recommendations for research and development,” Project SNOWTOOLS WP410, Norwegian Computing Centre, Oslo, Norway, rep. 924, 1997.
- [322] D. Vikhamar and R. Solberg, “A method for snow-covermapping in forest by optical remote sensing,” *EARSeL Specialist Workshop on Remote Sensing of Land and Snow*, Dresden, Germany, 2000, pp. 328-338.
- [323] A. G. Klein, D. K. Hall, and G. A. Riggs, Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model,” *Hydrological Processes*, vol. 12, pp. 1723–1744, 1998.
- [324] M. Stahli, J. Schaper, and A. Papritz, “Towards a snow-depth distribution model in a heterogeneous subalpine forest using a Landsat TM image and an aerial photograph,” *Annals of Glaciology*, vol. 34, pp. 65–70. 2002.
- [325] F. Smith, C. Cooper, and E. Chapman, “Measuring Snow Depths by Aerial

- Photography,” *Western Snow Conference*, Lake Tahoe, Nevada, USA, 1967, pp. 66–72.
- [326] C. Y. Lee, S. D. Jones, C. J. Bellman, and L. Buxton, “DEM creation of a snow covered surface using digital aerial photography,” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII (Part B8)*, Beijing, China, 2008, pp. 831–835.
- [327] M. Nolan, C. Larsen, and M. Sturm, “Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry,” *The Cryosphere*, vol. 9, pp. 1445–1463, 2015.
- [328] J. Deems, T. Painter, and D. Finnegan, “Lidar measurement of snow depth: A review,” *Journal of Glaciology*, vol. 59, pp. 467–479, 2013.
- [329] A. Prokop, “Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 54, pp. 155–163, 2008.
- [330] R. Mott, M. Schirmer, M. Bavay, T. Grünwald, and M. Lehning, “Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover,” *The Cryosphere*, vol. 4, pp. 545–559, 2010.
- [331] T. Grünwald, Y. Bühler, and M. Lehning, “Elevation dependency of mountain snow depth,” *The Cryosphere*, vol. 8, pp. 2381–2394, 2014.
- [332] J.S. Deems and T.H. Painter, “Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources,” *International Snow Science Workshop*, Telluride, Colorado, 2006, pp. 30–38.
- [333] G. Zhou and D. Zang, “Civil UAV system for earth observation,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2007)*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 5319–5322.
- [334] H. Xiang and L. Tian, “Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV),” *Biosystems Engineering*, vol. 108, no. 2, pp. 174–190, 2011.
- [335] B. Vander Jagt, A. Lucieer, L. Wallace, D. Turner, and M. Durand, “Snow Depth Retrieval with UAS Using Photogrammetric Techniques,” *Geosciences*, vol. 5, pp. 264–285, 2015.
- [336] Y. Bühler, M. S. Adams, R. Bösch, and A. Stoffel, “Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): Potential and limitations,” *The Cryosphere*, vol. 10, pp.1075–1088, 2016.
- [337] Y. Bühler, M. S. Adams, A. Stoffel, R. Boesch, “Photogrammetric reconstruction of homogenous snow surfaces in alpine terrain applying near-infrared UAS imagery,” *International Journal of Remote Sensing*, vol 38, no. 8-10, pp. 2029-2036, 2017.
- [338] C. de Michele, F. Avanzi, D. Passoni, R. Barzaghi, L. Pinto, P. Dosso, A. Ghezzi, R. Gianatti, and G. Della Vedova, “Using a fixed-wing UAS to map snow depth distribution: An evaluation at peak accumulation,” *The Cryosphere*, vol. 10, pp. 511–522, 2016.
- [339] P. Harder, M. Schirmer, J. Pomeroy, and W. Helgason, “Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle,”

*The Cryosphere*, vol. 10, no. 6, pp. 2559-2571, 2016.

- [340] M. S. Adams, Y. Bühler, and R. Fromm, “Multitemporal Accuracy and Precision Assessment of Unmanned Aerial System Photogrammetry for Slope-Scale Snow Depth Maps in Alpine Terrain”, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 175, no. 9, pp. 3303-3324, 2017.
- [341] H. M. Wainwright, A. K. Liljedahl, B. Dafflon, C. Ulrich, J. E. Peterson, A. Gusmeroli, and S. S. Hubbard, “Mapping snow depth within a tundra ecosystem using multiscale observations and Bayesian methods,” *The Cryosphere*, vol. 11, pp. 857–875, 2017.
- [342] H. H. Christiansen, “Snow-cover depth, distribution and duration data from northeast Greenland obtained by continuous automatic digital camera,” *Annals of Glaciology*, vol. 32, pp. 102–108, 2001.
- [343] A. van Herwijnen and C. Fierz, “Monitoring snow cornice development using timelapse photography,” *International Snow Science Workshop*, Banff, Canada, 2014, pp. 865–869.
- [344] S. Vogel, M. Eckerstorfer, and H. H. Christiansen, “Cornice dynamics and meteorological control at Gruvefjellet, Central Svalbard,” *The Cryosphere*, vol. 6, pp. 157–171, 2012.
- [345] S. Feick, C. Mitterer, L. Dreier, S. Harvey, and J. Schweizer, “Automated detection and monitoring of glide-snow events using satellite-based optical remote sensing,” *International Snow Science Workshop*, Anchorage, Alaska, 2012, pp. 603–609.
- [346] J. Hendrikx, H. E. Peitzsch, and D. B. Fagre, “Time-lapse photography as an approach to understanding glide avalanche activity,” *International Snow Science Workshop*, Anchorage, Alaska, 2012, pp. 872–877.
- [347] H. E. Peitzsch, J. Hendrikx, B. D. Fagre, and B. Reardon, “Characterizing wet slab and glide slab avalanche occurrence along the Going-to-the-sun road, Glacier national park, Montana, USA,” *International Snow Science Workshop*, Squaw Valley, Canada, 2010, pp. 651–659.
- [348] A. van Herwijnen and R. Simenhois, “Monitoring glide avalanches using time-lapse photography,” *International Snow Science Workshop*, Anchorage, Alaska, USA, 2012, pp. 899–903.
- [349] S. Ø. Larsen, A.-B. Salberg, and R. Solberg, “Automatic Avalanche Mapping Using Texture Classification of Optical Satellite Imagery,” *European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL)*, Matera, Italy 2013, pp. 399–410.
- [350] M. J. Lato, R. Frauenfelder, and Y. Bühler, “Automated detection of snow avalanche deposits: segmentation and classification of optical remote sensing imagery,” *Natural Hazards Earth Systems Sciences*, vol. 12, pp. 2893–2906, 2012.
- [351] M. Eckerstorfer, E. Malnes, R. Frauenfelder, U. Domaas, and K. Brattlien, “Avalanche debris detection using satellite-borne radar and optical remote sensing,” *International Snow Science Workshop*, Banff, Canada, 2014, pp. 122–128.
- [352] M. Eckerstorfer, S. A. Solbø, and E. Malnes, “Using “structure-from-motion” photogrammetry in mapping snow avalanche debris,” in *Wiener Schriften zur*

*Geographie und Kartographie*, K. Kriz (Ed.), Vienna, Austria: University of Vienna, 2015. pp. 171–187.

- [353] A. Prokop, P. Schön, F. Singer, P. Gaëtan, M. Naaim, E. Thibert, “Determining avalanche modelling input parameters using terrestrial laser scanning technology,” *International Snow Science Workshop*, Chamonix Mont-Blanc, France, 2013, pp. 770–774.
- [354] B. Sovilla, J. N. McElwaine, M. Schaer, and J. Vallet, “Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: measurements from Vallée de la Sionne,” *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 115, no. F2, p. 13, 2010.
- [355] J. Vallet, J. Skaloud, and O. Koelbl, “Development of a helicopter-based integrated system for avalanche mapping and hazard management,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 33, pp. 565–572, 2000.
- [356] P. Chrustek and P. Wezyk, “Using high resolution LiDAR data to estimate potential avalanche release areas on the example of Polish mountain regions,” *International Snow Science Workshop*, Davos, Switzerland, 2009, pp. 495–499.
- [357] A. Martinez-Vazquez and J. Fortuny-Guasch, “A GB-SAR processor for snow avalanche identification,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 3948–3956, 2008.
- [358] A. Martinez-Vazquez and J. Fortuny-Guasch, “Feasibility of snow avalanche volume retrieval by GB-SAR imagery,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Denver, Colorado, USA, 2006, pp. 743–746.
- [359] A. Wiesmann, R. Caduff, T. Strozzi, J. Papke, and C. Mätzler, “Monitoring of dynamic changes in alpine snow with terrestrial radar imagery,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Quebec City, Canada, 2014, pp. 3662–3665.
- [360] R. Caduff, A. Wiesmann, Y. Bühler, and C. Pielmeier, “Continuous monitoring of snowpack displacement at high spatial and temporal resolution with terrestrial radar interferometry,” *Geophysical Research Letters*, vol. 42, pp. 813–820, 2015.
- [361] A. Wiesmann, U. Wegmueller, M. Honikel, T. Strozzi, and C. L. Werner, “Potential and methodology of satellite based SAR for hazard mapping,” *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Sydney, Australia, 2001, pp. 3.
- [362] Y. Bühler, C. Bieler, C. Pielmeier, A. Wiesmann, R. Caduff, R. Frauenfelder, C. Jaedicke, and G. Bippus, “All-weather avalanche activity monitoring from space?” *International Snow Science Workshop*, Banff, Canada, 2014, pp. 795–802,
- [363] E. Malnes, M. Eckerstorfer, Y. Larsen, R. Frauenfelder, A. Jonsson, C. Jaedicke, and S. A. Solbø, “Remote sensing of avalanches in northern Norway using Synthetic Aperture Radar,” *International Snow Science Workshop*, Grenoble — Chamonix, Mont Blanc, France, 2013, pp. 955–959.
- [364] E. Malnes, M. Eckerstorfer, and H. Vickers, “First Sentinel-1 detections of avalanche debris,” *Cryosphere*, vol. 9, pp. 1943–1963, 2015.
- [365] J. Schweigl, “Hollenstein/Ybbs, Gst. Nr. 586, 663, 673. 659/1, 672/1 und 263/5

- (L6180) der KG Großhollenstein, Winkelmayr Karl u. Kordula, Fellner Dietmar, Katastrophenschaden, Erdbeben und Mure, Wiederherstellung der Forststraße, Geologisches Gutachten (BD1-G-212/022–2014),” Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2014, pp. 3–4.
- [366] J. Hübl, M. Beck, M. Zöchling, M. Moser, C. Kienberger, A. Jenner, D. Forstlechner, “Ereignisdokumentation 2015,” Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur – Wien, Österreich, IAN Report 175, 2016.
- [367] R. Marschallinger, C. Eichkitz, H. Gruber, and Ki Heibl, “The Gschlifgraben landslide (Austria): a remediation approach involving torrent and avalanche control, geology, geophysics, geotechnics and geoinformatics,” *Austrian Journal of Earth Science*, vol. 102, no. 2, pp. 36–51, 2009.
- [368] M. Jedlitschka, “Gefahrenzonenplan der WLW,” Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Österreich, rep. Gebietsbauleitung Salzkammergut, 1974.
- [369] Ş.H. Kutoğlu, K.S. Görmüş, Ö.F. Çapar, T. Deguchi, G. Gökhan, V. Akgül, O. Alp, A. Okul, M. Erdoğan, A. Kayı, Ö. Bircan, ve K. Aygan, “16 Temmuz 2015 Devrek Heyelanı Çalışma Raporu,” BEÜ Afet Uygulama ve Araştırma Merkezi, Zonguldak, 2017.
- [370] R. Ulusay, C. Gökçeoğlu, H. Sönmez, and E. Tuncay, “Causes, mechanism and environmental impacts of instabilities at Himmetoğlu coal mine and possible remedial measures,” *Environmental Geology*, vol. 40, pp. 769–786, 2001.
- [371] G. Lindner, K. Schraml, R. Mansberger, and J. Hübl, “UAV monitoring and documentation of a large landslide,” *Applied Geomatics*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2016.
- [372] A. Lucieer, S. M. de Jong, and D. Turner, “Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography,” *Progress in Physical Geography*, vol. 38, no. 1, pp. 97–116, 2014.
- [373] W. W. Immerzeel, P. D. A. Kraaijenbrink, J. M. Shea, A. B. Shrestha, F. Pellicciotti, M. F. P. Bierkens, and S. M. de Jong, “High-resolution monitoring of himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 150, pp. 93–103, 2014.
- [374] D. Turner, A. Lucieer, and S. M. de Jong, “Time series analysis of landslide dynamics using an unmanned aerial vehicle (UAV),” *Remote Sensing*, vol. 7, pp. 1736–1757, 2015.
- [375] D. Lague, N. Brodu, and J. Leroux, “Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z),” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, pp. 10–26, 2013.
- [376] G. Esposito, G. Mastrorocco, R. Salvini, M. Olivetti, and P. Starita, “Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 3, pp. 103, 2017.
- [377] N. Brodu and D. Lague, “3D Terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol.

68, pp. 121–134, 2012.

- [378] Sarmap, PS Tutorial. (2017, May 15). [Online]. Available: [http://www.sarmap.ch/tutorials/PS\\_Tutorial\\_V\\_0\\_9.pdf](http://www.sarmap.ch/tutorials/PS_Tutorial_V_0_9.pdf).
- [379] Sarmap, SBAS Tutorial. (2017, May 15). [Online]. Available: [http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas\\_tutorial\\_V\\_2\\_0.pdf](http://www.sarmap.ch/tutorials/sbas_tutorial_V_2_0.pdf).
- [380] B. D. Haugen, “Qualitative and quantitative comparative analyses of 3D lidar landslide displacement field measurements,” Master Thesis, Colorado School of Mines, USA, 2016.
- [381] A. Abellan, M. Jaboyedoff, T. Oppikofer, and J. M. Vilaplana, “Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event,” *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, vol. 9, no. 2, pp. 365-372, 2009.
- [382] G. M. Stock, G. W. Bawden, J. K. Green, E. Hanson, G. Downing, B. D. Collins, S. Bond, and M. Leslar, “High-resolution three-dimensional imaging and analysis of rock falls in Yosemite Valley, California,” *Geosphere*, vol. 7, no.2, pp. 573-581, 2011.
- [383] A. H. Deliormanli, N. H. Maerz, and J. Otoo, “Using terrestrial 3D laser scanning and optical methods to determine orientations of discontinuities at a granite quarry,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, vol. 66, pp. 41-48, 2014.
- [384] G. J. Borradaile, *Statistics of earth science data: their distribution in space, time, and orientation*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003, pp. 351.
- [385] J. Travelletti, C. Delacourt, P. Allemand, J.P. Malet, J. Schmittbuhl, R. Toussaint, and M. Bastard, “Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 70, pp. 39–55, 2012.
- [386] W. A. Take, “Thirty-Sixth Canadian Geotechnical Colloquium: Advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, pp. 1199–1220, 2015.
- [387] M. Malesa, K. Malowany, L. Tymińska-Widmer, E.A. Kwiatkowska, M. Kujawska, B.J. Rouba, and P. Targowski, “Application of digital image correlation (DIC) for tracking deformations of paintings on canvas,” *SPIE 8084, O3A: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology III*, Munich, Germany, 2011, pp. 80840L.
- [388] A. M. Rosu, M. Pierrot-Deseilligny, A. Delorme, R. Binet, and Y. Klinger, “Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 100, pp. 48–59, 2014.
- [389] A. Kääb and M. Vollmer, “Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: Automatic extraction by digital image analysis”, *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 11, pp. 315–326, 2000.
- [390] A. Daehne and A. Corsini, “Kinematics of active earthflows revealed by digital image correlation and DEM subtraction techniques applied to multi-temporal LiDAR data,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, pp. 640–654, 2013.



- [391] M. Esparmer, “Utilizzo di dati Lidar ed Ortofoto multi-temporali per la caratterizzazione di frane di scorrimento-colata,” Tesi di Laurea Triennale, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy, 2010.
- [392] E. Nocerino, F. Menna, and F. Remondino, “Accuracy of typical photogrammetric networks in cultural heritage 3D modeling projects”, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing)*, vol. 40, pp. 465–472, 2014.
- [393] L. Javernick, J. Brasington, and B. Caruso, “Modelling the topography of shallow braided rivers using structure-from-motion photogrammetry,” *Geomorphology*, vol. 213, pp.166–182, 2014.
- [394] M. R. James and S. Robson, “Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 39, pp. 1413–1420, 2014.
- [395] J. T. Dietrich, “Riverscape mapping with helicopter-based Structure-from-Motion photogrammetry,” *Geomorphology*, vol. 252, pp. 144–157, 2015.
- [396] M. Smith, J. L. Carrivick, and D. J. Quincey, “Structure from motion photogrammetry in physical geography,” *Physical Geography*, vol. 40, no. 2, pp. 247-275, 2016.
- [397] F. Dai, Y. Feng, and R. Hough, “Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications,” *Visualization in Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 1-14, 2014.
- [398] M. Rumpler, S. Daftry, A. Tscharf, R. Pretenthaler, C. Hoppe, G. Mayer, and H. Bischof, “Automated End-to-End Workflow for Precise and Geo-accurate Reconstructions using Fiducial Markers,” *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. II-3, pp. 135–142, 2014.
- [399] C. Zhao, Q. Zhang, Y. He, J. Peng, C. Yang, and Y. Kang, “Small-scale loess landslide monitoring with small baseline subsets interferometric synthetic aperture radar technique—case study of Xingyuan landslide, Shaanxi, China,” *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, p. 026030, 2016.
- [400] S. Bianchini, G. Herrera, R. M. Mateos, D. Notti, I. Garcia, O. Mora, and S. Moretti, “Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry,” *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, pp. 6198–6222, 2013.
- [401] C. E. Jones, K. An, R. G. Blom, J. D. Kent, E. R. Ivins, and D. Bekaert, “Anthropogenic and geologic influences on subsidence in the vicinity of New Orleans, Louisiana,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 121, pp. 3867–3887, 2016.
- [402] A. Novellino, F. Cigna, A. Sowter, M. Ramondini, and D. Calcaterra, “Exploitation of the Intermittent SBAS (ISBAS) algorithm with COSMO-SkyMed data for landslide inventory mapping in north-western Sicily, Italy,” *Geomorphology*, vol. 280, pp. 153–166, 2017.
- [403] E. H. Bouali, T. Oommen, and R. Escobar-Wolf, “Mapping of slow landslides on the Palos Verdes Peninsula using the California landslide inventory and persistent scatterer interferometry,” *Landslides*, vol. 15, no. 3, pp. 439–452, 2018.

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Remzi EKER  
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.12.1986  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : remzieker@duzce.edu.tr

## ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Orman Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Y. Lisans	Orman Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2013
Lisans	Orman Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2009
Lise		Kastamonu Kuzeykent Lisesi	2005