



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

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**RADAR GÖRÜNTÜLERİNDEN KAR DERİNLİĞİ VE HACMİNİN
HESAPLANMASI; ERCİYES DAĞI ÖRNEĞİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Tarık TORUN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Semih EKERCİN

AKSARAY, 2021

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűőecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűőterilenlerden olduđuunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve her tűrlű intihalden uzak olduđuunu beyan ederim.

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

Ahmet Tarık TORUN



TEŞEKKÜR

Lisans ve lisansüstü eğitim hayatımda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu tez çalışmasının ortaya çıkması için gerekli motivasyonu sağlayan kıymetli danışman hocam sayın Prof. Dr. Semih EKERCİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca tez çalışmamın gidişat ve yönlendirmesi konusunda bana yardımcı olan tez izleme komitesi üyesi hocalarım sayın Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK ve sayın Doç. Dr. Uğur ALGANCI'ya da ayrı ayrı teşekkür ediyorum. Tez savunma sınavımdaki gayretleri ve değerli katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Osman ORHAN ve Doç. Dr. Melayib BİLGİN'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince tezim için gerekli motivasyonu veren ve tezimin her adımında gerek çalışmalarına verdikleri katkılar ile gerekse de destekleyici tutumları ve dostlukları için Dr. Öğr. Üyesi S. Sefa BİLGİLOĞLU, Dr. Cemil GEZGİN, Dr. M. Haydar TERZİ, Arş. Gör. H. İbrahim GÜNDÜZ, Arş. Gör. Ozan ÖZTÜRK ve Arş. Gör B. Baha BİLGİLİOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisans eğitiminden başlayarak lisansüstü eğitimimi tamamlamış olduğum Aksaray Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü'nün güzide öğretim üyelerine ve çalışma arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca desteklerini her zaman arkamda hissettiğim, maddi ve manevi desteklerini bir nebze olsun eksiltmeyen, yerlerinin kesinlikle doldurulamayacağından emin olduğum muhterem babam Suat TORUN'a, saygıdeğer annem Fatma TORUN'a ve kardeşlerim Nezihe ÖZTÜRK ve Esmâ Nur NARCAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Bu tezi, hayat arkadaşım, can yoldaşım ve en yakın arkadaşım olarak gördüğüm, her adımda beni destekleyen ve her zorluğa benimle birlikte göğüs geren saygıdeğer ve kıymetli eşim Çiğdem TORUN'a ve biricik kızım Gökçe Buğlem'e ithaf ediyorum.

Bu tez çalışması Aksaray Üniversitesi ÖYP Kurum Koordinatörlüğü tarafından, Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından 2017-010 numaralı proje ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından 39890 (Third Party Missions) nolu proje ile desteklenmiştir.

Ahmet Tarık TORUN

AKSARAY, 2021

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. RADAR TEKNOLOJİSİ.....	5
2.1 Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR)	6
2.2 Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar-SAR).....	7
2.2.1 SAR görüntülerinin özellikleri.....	9
2.2.2 SAR görüntülerindeki geometrik hatalar	12
2.3 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)	13
2.4 Diferansiyel Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (DInSAR)	14
2.5 SAR Görüntüleri ile Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi	16
2.5.1 Görüntü kaydı (Coregistration).....	17
2.5.2 İnterferogram üretimi	18
2.5.3 Filtreleme	18
2.5.4 Faz belirsizliğinin giderimi (Phase Unwrapping)	18
2.5.5 Faz – Yükseklik dönüşümü ve geometrik düzeltme	18
3. KARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİ.....	20
3.1 Karın Fiziksel ve Elektromanyetik Özellikleri	20
3.1.1 Karın fiziksel özellikleri.....	20
3.1.2 Karın elektromanyetik özellikleri	21
3.2 Geleneksel Yöntemler ile Karın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	23
3.3 SAR verileri Kullanılarak Karın Fiziksel Özelliklerinin Tahmin Edilmesi.....	24
3.3.1 SAR verileri ile kar derinliğinin tahmin edilmesi	24
3.3.2 Kar-Su eşdeğerinin (KSE) hesaplanması	28
4. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER	29
4.1 Çalışma Alanı.....	29
4.2 Kullanılan Radar Verileri	30
4.3 Kullanılan Harici Sayısal Yükseklik Modelleri	33
4.3.1 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).....	33
4.3.2 ALOS World 3D (AW3D)	34
4.3.3 TanDEM-X WorldDEM	34
4.3.4 Stereo Sayısal Yükseklik Modeli	35
4.4 Arazi Çalışmaları	35
4.4.1 Yaz dönemi arazi çalışması.....	35
4.4.2 Kış dönemi arazi çalışması.....	37
5. INSAR TEKNİĞİ İLE SYM ÜRETİMİNDE FARKLI HARİCİ SYM'LERİN DOĞRULUĞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI.....	40
5.1 InSAR Tekniği İle Sayısal Yüksekli Modeli Üretimi	40
5.1.1 Görüntü işleme adımları.....	41
5.2 Yükseklik Karşılaştırmaları ve İstatistik Analizleri	42
5.2.1 Yükseklik karşılaştırmaları	42
5.2.2 İstatistik analizleri	47

6. InSAR TEKNİĞİ İLE KAR DERİNLİĞİ, KAR HACMİ VE KAR-SU EŞDEĞERİNİN HESAPLANMASI	48
6.1 Kar Yoğunluğunun Hesaplanması	48
6.1.1 Optimizasyon yöntemi ile kar yoğunluklarının hesaplanması	48
6.1.2 ISO-4355 Standartları ile kar yoğunluğunun hesaplanması	50
6.1.3 Kriging yöntemi ile kar yoğunluklarının hesaplanması	52
6.2 Kar Derinliklerinin Hesaplanması.....	55
6.3 Kar Hacminin Hesaplanması.....	59
6.4 Kar-Su Eşdeğerinin Hesaplanması.....	60
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	62
7.1 Insar Tekniği İle SYM Üretiminde Farklı Harici SYM’lerin Doğruluğa Etkisinin Araştırılması.....	62
7.2 InSAR Tekniği ile Kar Derinliği, Kar Hacmi ve Kar-Su Eşdeğerinin Hesaplanması.....	64
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	76
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	87

DOKTORA TEZİ

RADAR GÖRÜNTÜLERİNDEN KAR DERİNLİĞİ VE HACMİNİN HESAPLANMASI; ERCİYES DAĞI ÖRNEĞİ

Ahmet Tarık TORUN

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Semih EKERCİN

ÖZET

Dünya nüfusunun büyük bir bölümünün su ihtiyacının karşılanmasında önemli bir yağış faktörü olan karın, mevsimsel olarak gözlemlenmesi, mevcut su kaynaklarının korunması ve izlenmesi açısından önem taşımaktadır. Hızla artan dünya nüfusu ve gittikçe şiddetlenen küresel ısınma faktörleri karla kaplı alanlardan veri elde edilmesinin önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Son yıllarda, radar verileri kullanılarak karla kaplı arazilerin izlenmesi ve bu alanlardan bilgi elde edilmesi sayesinde, su kaynaklarının yönetimi ve hidrolojik modellerle ilgili değerli bilgiler elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında TerraSAR-X uydusuna ait, StripMap (SM) modunda algılanmış, HH polarizasyonlu görüntüler kullanılarak Erciyes Dağı için kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri hesaplanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, öncelikle SAR görüntüleri kullanılarak Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM) üretilmiştir. SYM üretimi aşamasında gerekli olan harici SYM verileri olarak Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ALOS World 3D (AW3D), TanDEM-X WorldDEM ve stereo SYM kullanılmıştır. Bununla birlikte yaz döneminde uydu geçişi ile eşzamanlı olarak gerçekleştirilen arazi çalışmalarından elde edilen nokta yükseklik bilgileri, SAR verilerinden elde edilen yüksekliklerle karşılaştırılmış ve istatistik analizler uygulanmıştır. Analizler sonucunda stereo SYM verisinin 1.52 m karesel ortalama hata değeri ile en doğru sonucu verdiği görülmüştür.

Ayrıca, radar verileri kullanılarak kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri hesaplamalarının yapılabilirdiği bir model üretilmiştir. Kış döneminde uydu geçişi ile eşzamanlı arazi çalışmaları yapılarak, çalışma bölgesi içerisinde homojen olarak dağılmış olan noktalardan kar derinliği ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Kar derinliğinin belirlenmesinde önemli bir faktör olan kar yoğunluğu, üç farklı yöntemle (kriging, optimizasyon ve ISO-4355) elde edilmiştir. Kar derinliğine ve yoğunluğuna bağlı olarak kar hacmi ve kar-su eşdeğeri haritaları üretilmiştir. Çalışma bölgesindeki toplam kar hacmi ve kar-su eşdeğeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında, üretilen modelin kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri hesaplamalarında kullanılabilir olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Radar, Kar, InSAR, Kar derinliği, Kar hacmi, KSE

Şubat 2021; 87 Sayfa

PhD. THESIS

CALCULATION OF SNOW DEPTH AND VOLUME FROM RADAR IMAGES; THE CASE OF MOUNT ERCİYES

Ahmet Tarık TORUN

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

Supervisor: Prof. Dr. Semih EKERCİN

ABSTRACT

Seasonal observation of snow, which is an important precipitation factor in supply the water needs of a large part of the world population, is important in terms of protection and monitoring of existing water resources. The rapidly increasing world population and the cumulatively global warming factors have once again revealed the importance of obtaining data from snow-covered areas. In recent years, valuable information on water resources management and hydrological modeling can be obtained by monitoring and obtaining information from snow-covered areas using radar data.

In this thesis, it is aimed to calculate snow depth, snow volume and snow-water equivalent for Mount Erciyes by using HH polarized images, sensed in StripMap (SM) mode of TerraSAR-X satellite. In this context, Digital Elevation Models (DEM) were produced using SAR images. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), ALOS World 3D (AW3D), TanDEM-X WorldDEM and stereo DEM data were used as external DEM data required during DEM generation. In addition, the point elevation information obtained from the field studies conducted simultaneously with the satellite pass during the summer period was compared with the elevations obtained from the SAR data and statistical analyzes were applied. As a result of the analysis, it was seen that the stereo DEM data gave the most accurate result with a mean square error value of 1.52 m.

Moreover a model has been created in order to calculate the snow depth, snow volume and snow-water equivalent with using radar data. On the other hand, field study was conducted simultaneously with satellite pass during the winter period and snow depth measurements were carried out from points homogeneously scattered within the study area. Snow density, which is an important factor in determining the depth of snow, was calculated by three different methods (kriging, optimization and ISO-4355). Also, snow volume and snow-water equivalent maps were produced based on the depth and density of snow. Total snow volume and snow-water equivalent have been calculated in the study area. In the light of the obtained results, it has been revealed that the produced model can be used in snow depth, snow volume and snow-water equivalent calculations.

Keywords: Radar, Snow, InSAR, Snow depth, Snow volume, SWE

February 2021; 87 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Radar geometrisi (H:Uydu Yüksekliği, Rf: Uzak Menzil, Rn: Yakın Menzil, Rm: Menzil Mesafesi, La: Anten Açıklığı, Da: Anten Genişliği).....	6
Şekil 2.2. Azimut ve menzil çözünürlüğü geometrisi.....	7
Şekil 2.3. Radar anteninden elde edilen yapay açıklık	9
Şekil 2.4. Radar sistemlerinde kullanılan bantların, frekans ve dalga boyları (λ :dalga boyu, f :frekans).....	10
Şekil 2.5. Farklı dalga boylarındaki bantların hedefe nüfuz etme oranı.....	10
Şekil 2.6. Yatay (H) ve düşey (V) polarizasyon geometrisi	11
Şekil 2.7. SAR görüntülerindeki geometrik hatalar.....	12
Şekil 2.8. Tek geçişli ve tekrarlı geçişli InSAR geometrisi.....	14
Şekil 2.9. InSAR tekniği ile SYM üretim aşamaları.....	17
Şekil 3.1. Karın elektromanyetik yansıtım özellikleri	21
Şekil 3.2. Kar gözlem istasyonu	24
Şekil 3.3. a) Radar sinyalinin kar içerisindeki geometrisi b) kardaki saçılma mekanizması 1-hava ve kar arasında yüzey saçılması 2- zemin kar arasında yüzey saçılması 3- kar içerisinde hacim saçılması.	26
Şekil 4.1. Çalışma alanı haritası.....	30
Şekil 4.2. TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları	31
Şekil 4.3. Yaz dönemi arazi çalışması fotoğrafları.	36
Şekil 4.4. Yaz dönemi arazi çalışması noktaları ve yükseklik grafikleri (Kırmızı: şev üst, Yeşil: şev orta, Beyaz: şev alt)	37
Şekil 4.5. Kış dönemi arazi çalışması fotoğrafları.....	38
Şekil 4.6. Kış dönemi arazi noktaları gösterim haritası.	38
Şekil 5.1. SYM üretimi akış şeması.....	41
Şekil 5.2. a) Kaynaştırılmış görüntü b) İnterferogram c) Filtrelenmiş interferogram d) Açılmış faz e) Faz bilgisinden üretiliş georeferanssız yükseklik haritası.	42
Şekil 5.3. Arazi çalışmasından ve SYM'lerden elde edilen nokta yükseklik bilgileri.	43
Şekil 5.4 Şev üst arazi noktaları ve grafikleri.	44
Şekil 5.5. Şev orta arazi noktaları ve grafikleri.	45
Şekil 5.6. Şev alt arazi noktaları ve grafikleri.....	46
Şekil 6.1. Optimizasyon yöntemi akış şeması.	49
Şekil 6.2. Kriging yöntemi grafiksel ve görsel betimlemesi.....	53
Şekil 6.3. Kriging analizi ile üretilen kar yoğunluğu tahmin haritaları.	54
Şekil 6.4. D-InSAR Kar derinliği üretim modeli.....	56
Şekil 6.5. 0.31 g/cm ³ yoğunluk için üretilen kar derinliği haritası.	58
Şekil 6.6. 0.36 g/cm ³ yoğunluk için üretilen kar derinliği haritası.	58
Şekil 6.7. 0.31 g/cm ³ yoğunluk için üretilen kar hacmi haritası.	59
Şekil 6.8. 0.36 g/cm ³ yoğunluk için üretilen kar hacmi haritası.	60
Şekil 6.9. 0.31 g/cm ³ yoğunluk değeri için üretilen KSE haritası.	61
Şekil 6.10. 0.36 g/cm ³ yoğunluk değeri için üretilen KSE haritası.	61
Şekil 7.1. Optimizasyon yöntemi ile elde edilen yoğunlukların grafiksel gösterimi.	65
Şekil 7.2. ISO-4355 yöntemi ile üretilen nokta kar yoğunluklarının grafiksel gösterimi.	66
Şekil 7.3. Kriging yöntemi ile üretilen nokta kar yoğunluklarının grafiksel gösterimi.	67

Şekil 7.4. Nokta kar yoğunlukları karşılaştırmalı grafiği.	68
Şekil 7.5. Yoğunluk değerlerine bağlı kar derinliği değerlerinin bağıl hata hesaplamaları.....	69
Şekil 7.6. Yoğunluk değerlerine bağlı KSE değerlerinin bağıl hata hesaplamaları...	69
Şekil 7.7. Farklı yöntemlerle elde edilen kar derinlikleri ve arazi ölçmeleri karşılaştırması.....	71
Şekil 7.8. Nokta yoğunluk değerleri ve ortalama yoğunluk değerleri ile KSE karşılaştırması.....	73



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. TerraSAR-X uydusunun teknik özellikleri.	31
Çizelge 4.2. TerraSAR-X uydusu veri temin tipleri.	32
Çizelge 4.3. Kullanılan TerraSAR-X uydu görüntüleri ve teknik özellikleri (SM: Stripmap, S: Single, HH: Horizontal-Horizontal, D: Descending, R:Right).	33
Çizelge 4.4. Kullanılan harici SYM verileri ve tez içerisindeki tanımlamaları.	33
Çizelge 4.5. Arazi nokta bilgileri ve ölçülen kar derinlikleri.	39
Çizelge 5.1. Verilere ait istatistiki analiz değerleri.	47
Çizelge 6.1. Optimizasyon yöntemi ile elde edilen nokta yoğunlukları.	50
Çizelge 6.2. ISO-4355 standardı ile elde edilen kar yoğunlukları.	51
Çizelge 6.3. Kriging yöntemi ile elde edilen nokta kar yoğunlukları.	54
Çizelge 6.4. Farklı yöntemlerle elde edilen kar derinlikleri ve arazi ölçmelerinden elde edilen kar derinlikleri (cm).	57
Çizelge 7.1. Noktaların toplam kar hacmi miktarlarının arazi çalışması değerleri ile karşılaştırılması.	74
Çizelge 7.2. Nokta derinliklerinin analiz değerleri.	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
CORS	Continuously Operating Reference Stations
DEM	Digital Elevation Model
DInSAR	Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
DSİ	Devlet Su İşleri
ECEF	Yer Merkezli Yer Sabit
ESA	European Space Agency
GHz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
HH	Horizontal-Horizontal
HV	Horizontal-Vertical
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
KSE	Kar-su Eşdeğeri
LIDAR	Light Detecting and Ranging
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NATO	North Atlantic Treaty Organization
RADAR	Radio Detecting and Ranging
RAR	Real Aparture Radar
SAR	Syntethic Aparture Radar
SLAR	Side Looking Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
TKGM	Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü
VH	Vertical-Horizontal
VV	Vertical-Vertical
ϵ	Dielektrik Sabiti
f	Frekans
λ	Dalga Boyu
ρ	Yoğunluk
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere, uzaktan algılama, cisimlere herhangi bir temas olmaksızın, cisimler hakkında bilgi edinilmesi, veri çıkarılması, ayırt edilmesi ve bu bilgilerin bir kayıt cihazı ile kaydedilerek görüntü oluşturma bilimidir (Ekercin, 2007). Uzaktan algılama sistemleri aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif sistemler geri yansımada enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanırken, aktif sistemler kendi enerjilerini kullanarak bir sinyal gönderme ve alma kabiliyetine sahiptirler. Bu noktada aktif sistemleri pasif sistemlerden ayıran en önemli özellik, gece-gündüz ve her türlü hava koşulundan bağımsız olarak çalışabilmeleridir. Mikrodalga algılayıcıları, aktif sistemlerin en önemli örneklerinden biridir. Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde algılama yapan RADAR (Radio Detecting And Ranging) sistemleri günümüzde birçok farklı çalışma alanında kullanılmaktadır. Gerçek açıklıklı (Real Aperture Radar-RAR) ve yapay açıklıklı radar (Synthetic Aperture Radar-SAR) olarak ikiye ayrılmış olan bu sistem, gerçek açıklıklı radar teknolojisinin kısıtlamalarını ortadan kaldıran yapay açıklık teknolojisi ile ilerlemesini hızlandırmıştır. Bununla birlikte radar interferometri tekniği kullanılarak geliştirilen interferometrik yapay açıklıklı radar teknolojisi, günümüzde, kar derinliği, kar-su eşdeğeri, deformasyon izlenmesi gibi parametrelerin hassas olarak belirlenmesine dair birçok alanda kullanılmaktadır. Sistem, yaklaşık olarak aynı konumdan farklı zamanlarda elde edilmiş görüntülerdeki aynı piksellerin faz bilgilerini karşılaştırılması temeline dayanmaktadır (Orhan, 2018). İki farklı zamanda algılanan SAR görüntüleri arasındaki faz farkına dayalı olarak geliştirilen DInSAR (Differential SAR Interferometry) tekniği, en temel radar interferometri tekniğidir. Temelde yüzeyde meydana değişimlerin milimetre hassasiyetinde belirlenmesi ve sayısal yüksek modeli üretimi amacı ile sıklıkla kullanılmaktadır.

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) yerbilimleri çalışmalarında kullanılan en önemli veri setlerinden biridir (Hogda vd., 2002). InSAR tekniği kullanılarak SYM üretimi, yapılacak farklı çalışmaları için temel bir altlık oluşturmaktadır. Radar görüntüleri kullanılarak stereoskopik ve interferometrik olarak iki şekilde SYM üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Gelautz vd., 2003). Diğer uygulamalarda olduğu gibi InSAR tekniği ile SYM üretimi aşamasında da algılayıcı özelliği (gece-gündüz, her türlü hava koşulundan bağımsız çalışma), bu tekniği ön plana çıkarmaktadır.

Kullanılan harici SYM verisinin çözünürlüğü düşük olsa bile, sonuçlara pozitif yönde etki etmektedir (Chaubey vd., 2016).

Radar teknolojisi, küresel yaşam kaynaklarının izlenmesinde de önemli çalışmalara veri sağlamaktadır. Mevsimsel kar örtüleri, küresel su ve enerji döngüsünün izlenmesinde ve tahmin edilmesindeki en önemli bileşenlerden biridir (Li vd., 2017; Shi, 2008). Kar, dünya nüfusunun yaklaşık altıda birinin su ihtiyacını karşılanmasını sağlayan önemli bir yağış faktörüdür (Eamer vd., 2007). Dünya nüfusunun hızla artması ve küresel ısınma etkileriyle, karla kaplı alanların izlenmesi ve bu alanlardan veri elde edilmesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır. Karın izlenmesindeki en önemli faktör ve en önemli fiziksel özelliği, kar yoğunluğudur (Rees, 2006). Kar yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterebilen kar derinliği, kar-su eşdeğeri ve kar hacmi parametreleri, kardan elde edilecek bilginin çeşitliliğinde büyük önem taşımaktadır. Kar yoğunluğu, hacim ile karşılaştırılan kütle miktarını temsil ederken, kar derinliği, karın yüzeyden olan mesafesini, kar-su eşdeğeri ise bir kar kütlesi eritildiğinde elde edilecek su miktarını ifade etmektedir. Bu parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, arazi durumu, meteorolojik durum ve kullanılan modele göre çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Bu nedenle kriyosfer çalışmaları yapan bilim insanları bu parametrelerin tahmin edilmesi adına birçok farklı uygulama yolu izlemişlerdir (Chang vd., 1982; Majumdar, 2019; Shi ve Dozier, 2000; Shi, 2008; Tedesco, 2015; Wiesmann ve Mätzler, 1999;).

Engibeli ve ulaşılması zor arazilerde yerinde ölçme yapmak ve zemine dayalı çalışmalar yapmak, özellikle kış mevsiminde, büyük zorluklar barındırmaktadır. Fakat optimum yer örnekleme ile birlikte kullanılan uzaktan algılama teknikleri, engibeli ve zor alanlar için kar parametrelerinin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Majumdar, 2019; Takala vd., 2011). Kar derinliğinin ve buna bağlı değişkenlerin izlenmesi ve tahmin edilmesi küresel çapta büyük bir önem arz etmektedir. Kardan elde edilecek su miktarı, yüzeyde bulunan kar derinliği ve karın sahip olduğu hacim, hidroloji, tarım, ziraat vb. birçok alan için altlık bilgi kaynağını oluşturmaktadır. Özellikle hidroloji alanında kar erimelerinden meydana gelecek akış ve su toplama bilgileri, sulama ve su kaynağı oluşturma çalışmaları için de önem arz etmektedir. Tüm bunların yersel arazi çalışmaları ile elde edilmesi zaman, maliyet ve işgücü açısından problemler doğurmaktadır. Karlı ve aynı zamanda eğimin yüksek

olduğu bölgelerde kar derinliği veya kar-su eşdeğeri parametrelerinin tahmin edilmesi hem zor hem de eksik kalmaktadır. Bu gibi bölgelerde yapılacak arazi çalışmalarının tüm alanı yansıtmaya özelliği olmayabilmektedir. Bu nedene InSAR tekniği kullanılarak ve mümkünse doğrulama amaçlı yapılacak arazi çalışmaları ile desteklenerek yapılan çalışmalar geniş alanlarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, Türkiye'nin en yüksek dağları arasında bulunan ve volkanik bir yapıya sahip olan Erciyes dağında seçilen bir bölgede tek polarizasyonlu radar verileri ile InSAR tekniği kullanılarak bölgedeki kar derinliği ve kar hacminin bulunması ve bununla birlikte kar-su eşdeğerinin tahmin edilmesidir. Erciyes dağı bünyesinde bulundurduğu kayak merkezi tesisi ile kış turizmine büyük katkı sağlamaktadır. Ayrıca eteklerinde bulunan su havzaları ve dere yataklarının beslenmesi, dağdan eriyen kar suları sayesinde. Bununla birlikte toprak geçirgenliği bakımından volkanik bir yapıya sahip olan dağ, yer altı sularına da katkı sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda görüntü işleme esnasında üretilen SYM'lerin kaliteli ve doğru olması bakımından farklı harici SYM verileri kullanılarak InSAR tekniği ile SYM'ler üretilmiştir. Tüm bu çalışmalar için yaz ve kış mevsimlerinde arazi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve işlenen görüntüler ile karşılaştırılarak doğruluk değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışmada yüksek çözünürlüklü, X bantda algılama yapan, TerraSAR-X uydusunun StripMap modunda, HH polarizasyonlu uydu verileri kullanılmış ve CORS-TR (Continuously Operating Reference Stations-TR) sistemi ile çalışan GPS/GNSS alıcıları aracılığıyla arazi çalışmaları yapılmıştır.

Bu tez çalışması, ülkemizde kar alanlarının izlenmesi ve bu alanlardan bilgi elde edilmesi konusundan önem arz etmektedir. Ayrıca ülke literatüründe InSAR tekniği ile çalışma alanına ait böyle bir çalışma olmaması tezin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Tez, iki bölümde ele alınarak, birinci kısımda harici SYM'lerin InSAR tekniği ile SYM üretimine etkisi incelenmiş, ikinci bölümde ise üretilen bu SYM'ler de kullanılarak kar derinliği, kar hacmi ve kar su eşdeğeri verilerinin üretimi anlatılmıştır. Radar verilerinden üretilen veriler ile arazi çalışmalarından elde edilen sonuçlar her iki bölümde de karşılaştırılmış ve istatistiki analizlere tabii tutulmuştur. Tartışma bölümünde elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde tartışılmış, pozitif yönleri ve negatif yönleri ile ele alınmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde, çalışmanın literatüre

sağladığı katkılar ve çalışmanın önemi aktarılmış, ilerleyen zamanlarda yapılabilecek çalışmalar ve daha iyi sonuçlar elde etmek için öneriler yapılmıştır.



2. RADAR TEKNOLOJİSİ

Uzaktan algılamada kullanılan sistemler enerji kaynaklarının çeşitlerine göre aktif ve pasif sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif sistemler güneşle eş zamanlı hareket ederler ve enerji kaynakları güneştir. Bu sistemler güneş ışığı olmaksızın görüntü elde edemezler. Buna karşılık aktif sistemlerin kendi enerji kaynakları vardır. Güneşten ve çoğunlukla hava koşullarından bağımsız olarak görüntü elde edebilmektedirler (Lillesand vd., 2004).

RADio Detection And Ranging teriminin kısaltması ile adlandırılan RADAR sistemleri, yeryüzüne aktif mikrodalga sinyalleri gönderir ve bu sinyallerin büyüklüğü ve yüzeyden geri yansıması arasındaki zaman farkını kaydetme esasına göre çalışmaktadır (Hanssen, 2001). Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde algılama yapan radar sistemleri, gece-gündüz ve her türlü hava koşulunda çalışabildiğinden, diğer algılayıcı platformlara göre avantajlara sahiptir.

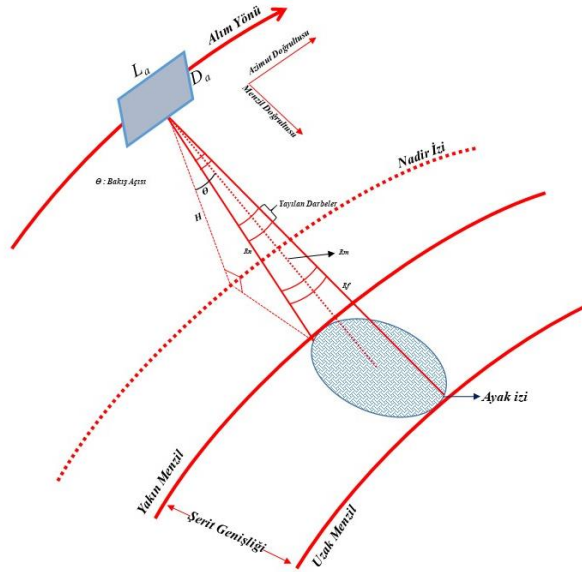
Radar teknolojisi ilk olarak Maxwell'in 1873'te "A Treatise on Electricity and Magnetism" ve 1886'da Hertz'in yaptığı deneyler ile ortaya çıkmıştır. Hertz, bilinen ilk radyo dalgalarını tespit etmiş ve bu dalgaların yansıma ve saçılmaya maruz kaldığını ortaya koymuştur (Hanssen, 2001). 1900'lü yılların başında gemi izleme ve çarpışma önleme çalışmaları için ilk radar görüntüleme sistemleri geliştirilmiştir (Hulsmeyer, 1904). 2. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkan askeri ihtiyaçlar radarın gelişimini hızlandırmıştır. Daha önceleri yer radarı olarak kullanılan teknoloji 1950'li yıllarda uçak gövdesine monte edilerek kullanılma fikrini ortaya çıkardı. Bu sayede askeri operasyonlarda hedef alanı taramak için anten döndürmek yerine uçakların gövdelerine sabitlenen radarlar ile daha fazla alan taraması yapılabilmekteydi (Akoğlu, 2001). Bu sayede yan bakışlı radar (side looking radar –SLAR) ortaya çıkmış oldu. 1960'lı yıllarda askeri amaçlarla kullanımı devam eden radar sistemler sivil amaçlı bilimsel çalışmalarda da kullanılmaya başlanmıştır. 1961 ve 1963 yıllarında Arecibo ve Goldstone Venüz ve Marsa radyo antenleri vasıtası ile sinyaller göndererek onlardan bilgi elde etme çalışmaları yapmıştır (Hanssen, 2001). Zisk (1972) tarafından ayın topoğrafyasının görüntülenmesi adına çalışmalar yapmıştır. Graham (1974) yeryüzü topoğrafyasının izlenmesi çalışmalarında radar interferometri tekniğini kullanmıştır. Zebker ve Goldstein (1986) bir uçağa monte edilmiş iki antenli sistem ile uçuş boyunca interferometri tekniğini kullanmışlardır. Bu sistemde bir antenden

gönderilen sinyal diğer anten tarafından kaydedilmektedir. Gabriel vd. (1989)'da geniş alanlarda doğrultu yönündeki deformasyonun incelenmesinde cm ve mm doğruluğunda ilk çalışmayı yapmışlardır. Günümüze kadar gelişerek gelen radar sistemleri hâlihazırda birçok disiplinde aktif olarak kullanılmaktadır.

Radar sistemleri anten açıklıklarına göre, Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR) ve Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar – SAR) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.1 Gerçek Açıklıklı Radar (Real Aperture Radar-RAR)

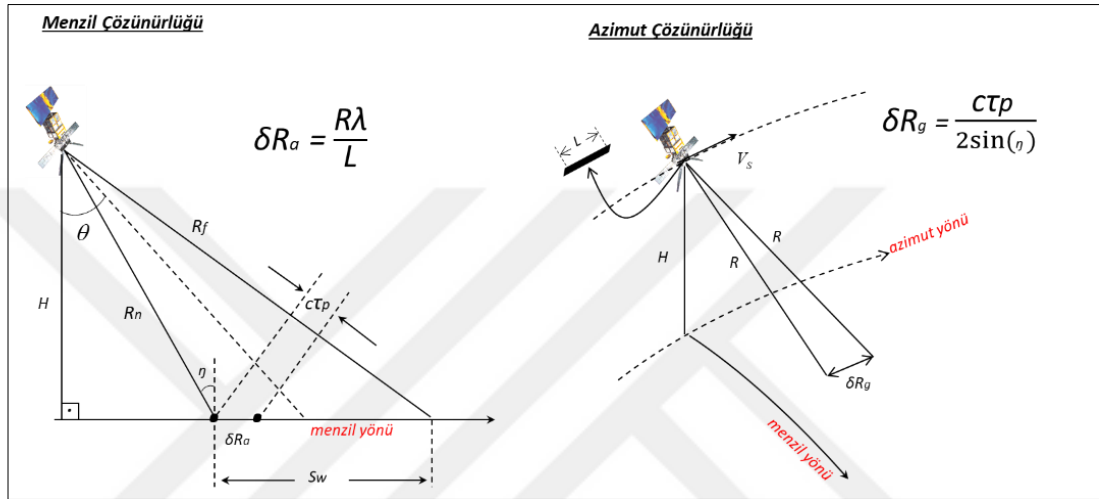
Yan Yan Bakışlı Radar (Side Looking Radar) olarak da adlandırılan bu sistemler genellikle uçaklara monte edilerek kullanılan sistemler olarak bilinmektedir (Köse, 2006). Gerçek açıklıklı radar sistemleri bir uçak ya da uydu platformuna yerleştirilmiş anten ile platformun hareket ettiği yön doğrultusunda dik olarak alım yapar (Abdikan, 2007).



Şekil 2.1. Radar geometrisi (H:Uydu Yüksekliği, R_f: Uzak Menzil, R_n: Yakın Menzil, R_m: Menzil Mesafesi, L_a: Anten Açıklığı, D_a: Anten Genişliği).

Şekil 2.1’de radar algılama geometrisi verilmiştir. Sistem uydu veya uçak platformunda uçuş doğrultusuna dik olacak biçimde, yüzeye belirli bir açı ile radar sinyallerinin gönderilip dönen sinyallerin kaydedilmesi esasına dayanmaktadır. RAR sistemlerinde görüntü alımı anten boyuna bağlıdır. Anten boyu uzadıkça açıklık açısı

azalır ve görüntü çözünürlüğü artar. Gerçek açıklıklı radar görüntüleme sistemlerinde konumsal çözünürlük anten boyu ile bağlantılıdır. Uydunun uçuş yüksekli yönündeki çözünürlük azimut (azimuth) çözünürlüğü olarak tanımlanmaktadır. Azimut çözünürlüğü, kısa dalga boylu enerji ve uzun anten boyuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bakış doğrultusundaki hedefi ayırt edebilme gücü ise menzil (range) çözünürlüğü olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.2’de azimut ve menzil çözünürlüğü formül ve geometrisi verilmiştir.



Şekil 2.2. Azimut ve menzil çözünürlüğü geometrisi (Orhan, 2018).

Gerçek açıklıklı radar sistemlerinde görüntü alımı anten boyu ile doğru orantılıdır. Anten boyunun uzaması elde edilen görüntünün konumsal çözünürlüğünün artması anlamına gelmektedir. Gerçek açıklıklı radar görüntüleme sistemlerinde anten boyunun uzatılması fiziksel olarak zordur. Bu nedenle Yapay Açıklıklı Radar (SAR) sistemi geliştirilmiştir.

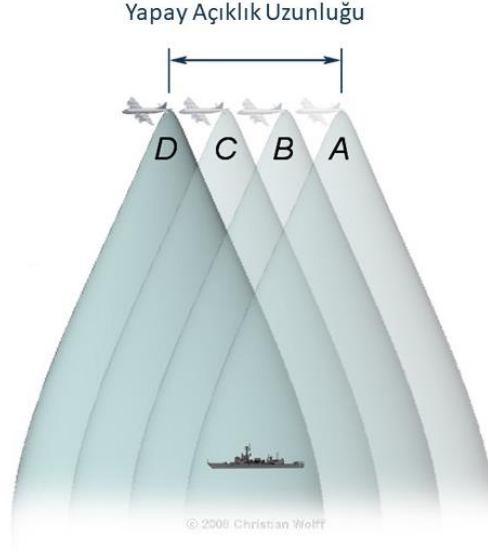
2.2 Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aerture Radar-SAR)

Yapay açıklıklı radar sistemleri temelde, aktif, yan bakışlı bir radar ve ham veriyi odaklanılmış bir görüntüye çeviren bir işlemciden oluşmaktadır (Schotter, 1987). Yapay Açıklıklı Radar, Gerçek Açıklıklı Radar sisteminin anten boyu sebebi ile ortaya çıkan engelleri aşmaya yönelik bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Bir uydu veya uçağa entegre edilmiş radar sistemi, belirli bir hızla yörünge üzerinde ileri yönlü olarak hareket ettirilir. Radar, bu hareketi sırasında, belirli bir süre boyunca, yeryüzüne sinyaller gönderir. Radar tarafından gönderilen sinyallerin geri dönüşleri yine radar

sistemi tarafından toplanmaktadır. Sistem içerisine toplanan bu sinyaller, uygun formatta kaydedilmekte ve birleştirilmektedir. Bu sayede yapay açıklık oluşturulmaktadır. Bu süreçteki uydu veya uçağın hızı ve toplam sinyal gönderim süresi yapay açıklığın boyunu belirler. Bu tür sistemlerde her bir nokta daha uzun süreli gözlemlenebilmektedir. Böylece, uydu veya uçağın ilerleme yönüne paralel olan azimut doğrultusunda, aynı boyda olduğu varsayılan gerçek açıklıklı bir antene göre daha yüksek çözünürlük elde edilmektedir (Deliormanlı, 2009).

Doppler prensibine göre çalışmakta olan SAR sistemleri uçuş boyunca hareket ederek bir yapay açıklık oluşturmakta ve uydu, yeryüzündeki objeye ilk gördüğü andan son gördüğü ana kadar sinyal göndermekte ve geri yansıma kaydetmektedir (Kemaldere, 2011). Bu bağlamda uydunun sinyal gönderip aldığı sürede kat ettiği yol uzunluğu anten kullanılmış gibi olmaktadır.

Şekil 2.3'te verilen bir SAR sisteminde A noktasından C noktasına kadar geçen sürede tüm darbe tekrarlama sürelerinin yansımalarının genliklerini ve faz açıları kaydedilir. Hedef radar tarafından ilk kez algılandığında gönderilen darbelerin yansımaları kaydedilmeye başlanır ve bu işlem platformun hareketi doğrultusunda her noktada devam eder. Platformun bu süre zarfında aldığı yol antenin yapay boyunu tayin etmektedir. Ölçme esnasında geçen süre ve darbe tekrarlama sırasında meydana gelen en uzun mesafe (Şekil 2.3'de A ve D arası) birbirlerini dengeler ve bu sayede şerit üzerinde mümkün olduğunca sabit bir açısal çözünürlük elde edilmiş olur (Canaslan, 2010).



Şekil 2.3. Radar anteninden elde edilen yapay açıklık (URL-1).

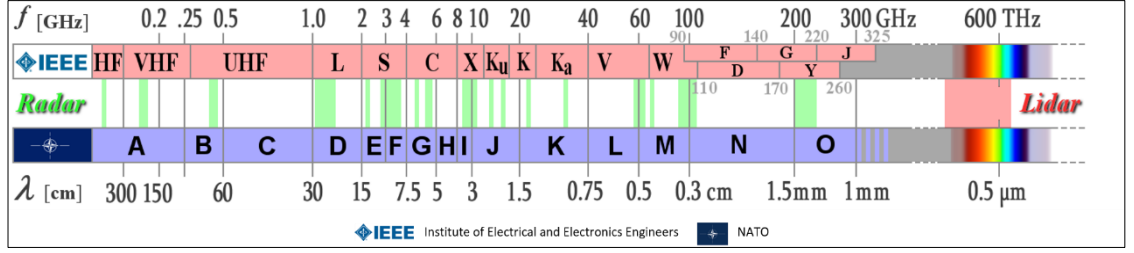
2.2.1 SAR görüntülerinin özellikleri

Uydu ve uçak platformları üzerinde bulunan anten sayesinde gönderilen ve belirli bir polarizasyon, dalga boyu ve genlik özelliklerine sahip mikrodalga ışınlımların anten ve hedef arasındaki gönderim ve kaydetme işlemleri sonucunda kompleks yapıları SAR görüntüleri elde edilmektedir (Orhan, 2018). SAR sistemlerinde kullanılan dalga boyu, sinyal gücü, polarizasyon, geliş açısı vb. sistem parametreleri ile hedef yüzeyin pürüzlülüğü, dielektrik katsayısı ve nem muhtevası gibi etkenler görüntü özelliklerini etkileyen başlıca faktörlerdir (Kemaldere, 2011).

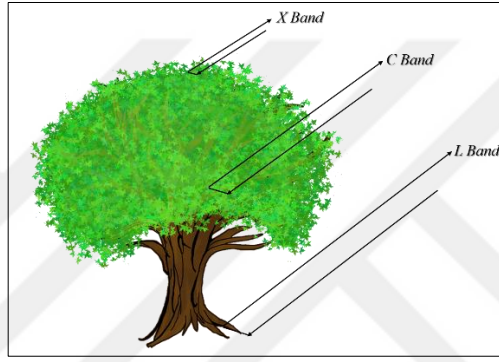
- Dalga boyu ve bantlar

Elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde çalışan radar sistemleri görünür dalga boyundan daha yüksek frekansa ve daha uzun dalga boyuna sahiptirler. Radar sistemlerinde kullanılan bantlar dalga boylarına ve frekanslarına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Literatürde bant isimlendirme sistemi IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ve NATO (North Atlantic Treaty Organization) birimleri için farklı kullanılmaktadır. Şekil 2.4'te radar bantlarına ait frekans ve dalga boyu bilgileri verilmiştir. Bu sistemlerde kullanılacak bantların seçimini etkileyen en önemli faktör penetrasyon, yani yeryüzündeki nesnelere nüfuz etme özelliğidir. Radar bantlarında dalga boyu ve nüfuz etme özelliği doğru orantılıdır. Şekil 2.5'te farklı

dalga boylarındaki bantların yeryüzündeki hedeflere nüfuz etmesi arasındaki fark görülebilmektedir.



Şekil 2.4. Radar sistemlerinde kullanılan bantların, frekans ve dalga boyları (λ: dalga boyu, f: frekans) (URL-1).

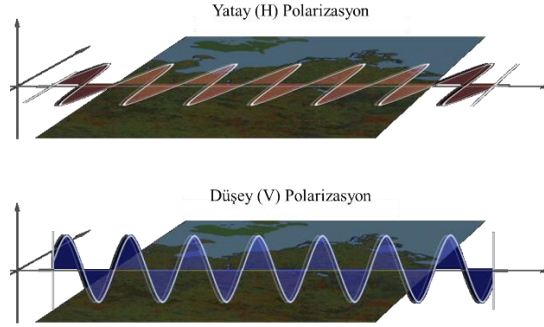


Şekil 2.5. Farklı dalga boylarındaki bantların hedefe nüfuz etme oranı (Kemaldere, 2011'den değiştirilerek).

- Polarizasyon

Polarizasyon, gönderilen ve alınan elektromanyetik dalganın yönünü belirten bir kavramdır. Gönderilen ve alınan sinyalin yönü yatay (Horizontal, H) ya da dikey (Vertical, V) olabilir. Radar alıcı ve verici antenleri bu amaçlar doğrultusunda imal edilirler. Radar görüntülerinde polarizasyon kavramı alıcı ve verici antenin özelliğine göre ortaya çıkmaktadır. HH (Yatay gönderen-Yatay alan), HV (Yatay gönderen-Dikey alan), VV (Dikey gönderen- Dikey alan) ve VH (Dikey gönderen-Yatay alan) olmak üzere dört farklı polarizasyon türü ortaya çıkmaktadır. Bir radar sistemi tekli polarizasyona sahip olabileceği gibi birkaç polarizasyonu aynı anda barındıran bir sistem de olabilmektedir. Birden fazla polarizasyon özelliği gösteren radarlara çoklu polarizasyonlu radarlar denilmektedir (Irak, 2009). Şekil 2.6'da polarizasyon türlerinin geometrisi verilmiştir. Günümüzde Radar sistemler 4 farklı algılama kombinasyonu ile çalışabilmektedir. Bunlar;

- Tek Polarizasyon : HH, VV
- Tek Çapraz Polarizasyon : HV, VH
- Çift Polarizasyon : VV/HH, HH/VV, HH/HV, VV/VH
- Tam Polarizasyon : VV + HH + VH + HV



Şekil 2.6. Yatay (H) ve dişey (V) polarizasyon geometrisi (URL-1).

- Nem içeriğı

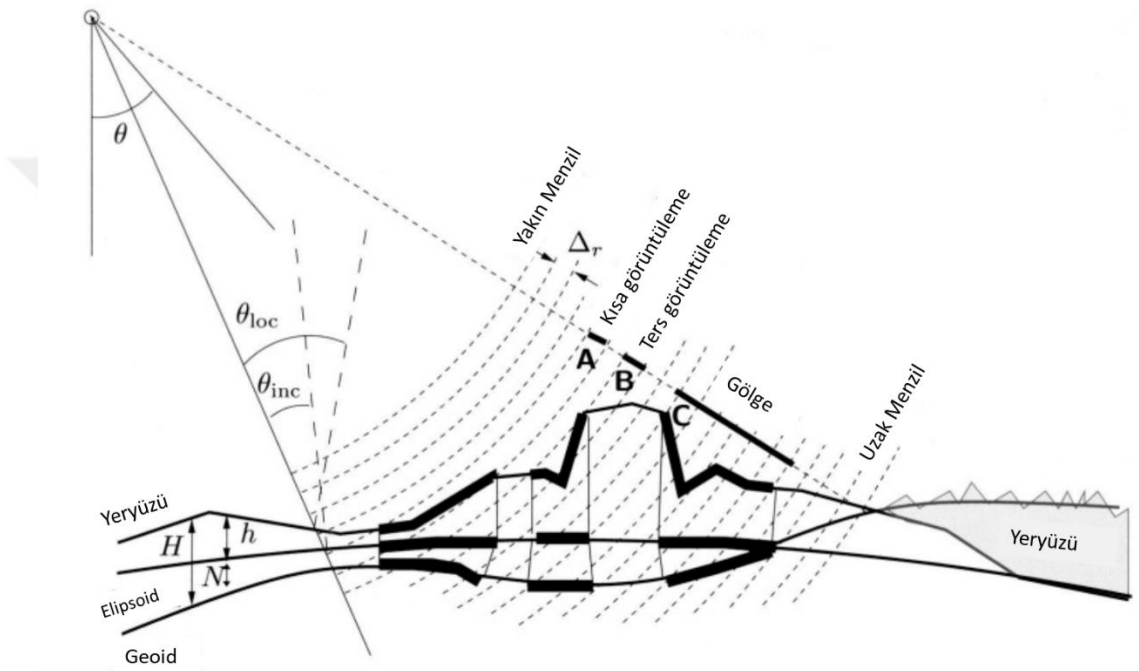
Cisimlerin yansıtma özellikleri, içerdikleri nem miktarına bağılı olarak değışiklikler göstermektedir. Bu değışimler yansıma, soğurma veya saçılma olarak ifade edilebilmektedir. SAR görüntülerinde saçılma nem miktarı ile doğıru orantılıdır ve bu nedenle nem miktarı yüksek olan bölgeler açık renkte iken daha az neme sahip alanlar koyu renkte oluşmaktadır. Nemli toprak yüzeylerinden saçılım miktarı kuru bölgelere oranla daha fazla olmaktadır (Kemaldere, 2011).

- Yüzey pürüzlülüğü

Sinyallerin saçılma gücü, yüzeyin pürüzlülüğüne ve saçılmanın meydana geldiğı hedefin dielektrik sabitine bağılıdır (Richards, 2009). Yeryüzüne gönderilen dalgalar yüzey tipine göre farklı bölgelere yansımaktadır. Yansıma sonucu algılayıcıya geri dönen sinyal sayısı ile gönderilen sinyal sayısı aynı değıldir. Yansıma sonrasında elde edilen sinyal miktarı gönderilen sinyal miktarından çok daha azdır. Bu bağlamda geri gelen yansıma şiddeti algılayıcı tarafından düşük olarak ölçülür. Bununla birlikte radar görüntüsündeki parlaklık değıeri düşmektedir (Köse, 2006).

2.2.2 SAR görüntülerindeki geometrik hatalar

SAR görüntüleri yan bakış geometrisine sahip olduklarından dolayı görüntü alımı esnasında arazi yüzeyinden de kaynaklanan görüntüleme hataları meydana gelebilmektedir. Hatalar, kısa görüntüleme (foreshortening), ters görüntüleme (layover) ve gölge (shadow) olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. SAR görüntülerindeki geometrik hatalar (Hassen 2001'den değiştirilerek).

Kısa görüntüleme (Şekil 2.7'de A) radarın eğim açısına ve topoğrafyadaki eğim durumuna bağlı olarak ortaya çıkan dağ ve tepe gibi alanların olduğundan daha kısa görüntülenmesi olarak açıklanabilir. Eğimin dalgaya dik geldiği yerler hatanın en yüksek olduğu alanlardır. Bu durumda kısa görüntülemeye maruz kalan alanlar daha parlak görünecektir.

Ters görüntüleme hatası (Şekil 2.7'de B) bir nesnenin en üst noktasının en alt noktasından önce görüntülenmesi ile ortaya çıkmaktadır. Bu durumda geliş açısının eğim açısından daha düşük olduğu yerlerde parlak bir görüntüleme meydana gelmektedir.

Gölge hatası (Şekil 2.7’de C), radar dalgalarının ulaşamadığı ve görüntüleme yapılamayan durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu alanlar görüntülenemediği için görüntü üzerinde daha koyu bir tonda ortaya çıkmaktadır.

2.3 İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar (InSAR)

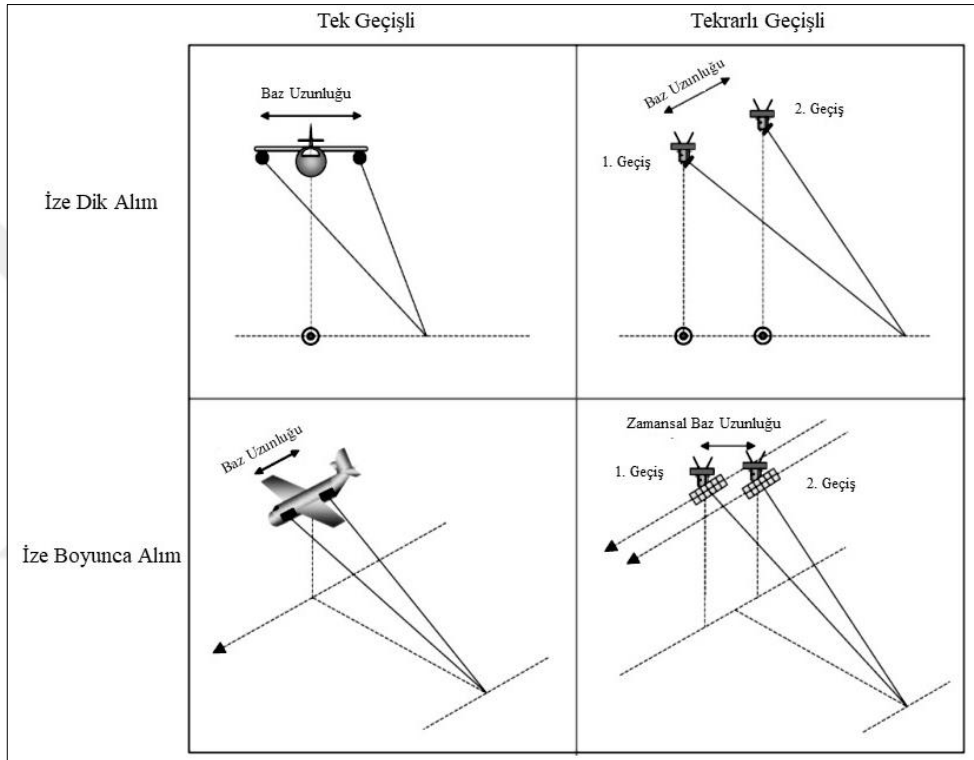
Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (SAR Interferometry-InSAR-IfSAR), günümüzde çoğunlukla jeodezi ve uzaktan algılama çalışmalarında kullanılan bir radar görüntüleme tekniğidir. Yapay açıklıklı radar görüntüsünden farklı olarak genlik ve faz bilgisini de içermektedir (Abdikan, 2007). InSAR tekniği radar sistemleri ile elde edilen görüntülerin, sayısal yükseklik modeli, deformasyon ölçmeleri, buzul incelemeleri gibi çalışmaların yapılması adına görüntülerin birleştirilerek kullanılması işlemi olarak tanımlanabilmektedir (Hanssen, 2001; Yılmaztürk, 2015).

1970’lerin sonunda InSAR tekniği farklı uygulamalar için yeryüzü gözlem çalışmalarında kullanım alanı bulmuştur. Zisk (1972) tarafından ayın topoğrafyasının görüntülenmesi adına ilk çalışma yapılmıştır. Graham (1974) yeryüzü topoğrafyasının izlenmesi adına interferometri tekniğinin kullanılabilirliğini göstermiştir. Zebker ve Goldstein (1986) bir uçağa monte edilmiş iki antenli sistem ile uçuş boyunca interferometri tekniğini kullanmışlardır. Bu sistemde bir antenden gönderilen sinyal diğer anten tarafından kaydedilmektedir.

Gabriel vd. (1989)’da geniş alanlarda doğrultu yönündeki deformasyonun incelenmesi adına cm ve mm doğruluğunda ilk çalışmayı yapmışlardır. Madsen vd. (1993) tarafından yapılan çalışmada InSAR tekniği ile üretilen sayısal yükseklik modellerinin geleneksel yöntemlerle üretilen sayısal yükseklik modelleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Günümüzde sayısal yükseklik modeli üretimi, deformasyon ölçmeleri, buzul incelemeleri vb. alanlarda InSAR tekniği sıklıkla kullanılmaktadır (Chaubey vd., 2016; Chunxia vd., 2005; Leinss vd., 2018; Makineci ve Karabörk, 2016; Orhan, 2018; Tsay ve Chen, 2001).

InSAR tekniği, SAR görüntü çiftinde, resim noktalarının faz farklarının hesaplanmasına dayanmaktadır. Faz farkı, yeryüzündeki aynı noktaya gönderilen eşit frekanslı iki sinyal arasındaki zamansal farkın açı değerine dönüşmüş şeklidir (Yılmaztürk, 2015). Bu iki görüntü arasında oluşan farka “interferogram” adı

verilmektedir (Zebker ve Goldstein, 1986). Bu teknik tek geçişli veya tekrarlı geçişli olmak üzere 2 ayrı şekilde uygulanabilmektedir. Tek geçişli teknikte iki SAR anteni bir platforma monte edilerek iki antenden de aynı zamanda veri elde edilmesine bağlı olarak çalışmaktadır. Tekrarlı geçiş sisteminde ise aynı tek anten yardımıyla farklı zaman aralıklarında aynı bölgenin farklı anten konumu ile geri saçılımının kaydedilmesi temeline dayanmaktadır (Rosen vd., 2000). Şekil 2.8’de tek ve tekrarlı geçişli InSAR geometrisi verilmiştir.



Şekil 2.8. Tek geçişli ve tekrarlı geçişli InSAR geometrisi (Richards, 2019’dan Türkçeleştirilerek).

2.4 Diferansiyel Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (DInSAR)

Diferansiyel Yapay Açıklıklı Radar İnterferometrisi (DInSAR), farklı zamanlarda algılanan farklı iki SAR görüntüsü arasındaki faz farklarının kullanılması ile yeryüzündeki hareketlerin hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlayan bir interferometrik SAR tekniğidir (Orhan, 2018; Karimzadeh ve Ahmadi, 2013).

DInSAR temelinde iki görüntü arasındaki faz farkını aşağıdaki eşitlikler ile belirler;

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} R + n_1 \quad (2.1)$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R) + n_2 \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde φ_1 ve φ_2 her iki görüntülemeye elde edilen faz değerlerini, R ve $R+\Delta R$ radar menzil mesafesini, λ dalga boyunu ve n_1 ve n_2 her iki görüntüdeki saçılma fazlarının karakteristiklerini temsil etmektedir. Eğer saçılma karakterinin her iki algılama aşamasında da eşit olduğu kabul edilirse, matematiksel olarak interferometrik faz eşitlik 2.3'deki gibi ifade edilebilir (Li vd., 2017).

$$\varphi_{insar} = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + (n_1 - n_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ΔR tek yönlü menzil mesafesini belirtmektedir. Alım esasında menzil mesafeleri fark ΔR ve deformasyon sonucunda kalan artık faz $\Delta\varphi$ aşağıdaki eşitliklerle yaklaşık olarak hesaplanmaktadır (Li vd., 2017; Rosen vd., 2000).

$$\Delta R \approx B \sin(\theta - \alpha) = B_{//} \quad (2.4)$$

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R = -\frac{4\pi}{\lambda} (B_{\perp} + \delta d) \quad (2.5)$$

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} \delta d \quad (2.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte B iki uydu arasındaki baz mesafesini, $B_{//}$ baz mesafesine paralel olan bileşeni, $B_{\perp}$ baz mesafesine dik olan bileşeni, θ geliş açısını ve δd uydu bakış yönündeki (LOS-Line of Sight) deformasyonu belirtmektedir (Bayık, 2018; Li vd., 2017).

İnterferometrik faz içeriğinde birçok etkeni barındırmaktadır. Görüntüleme esnasında topoğrafya etkileri, düz dünya etkisi, deformasyon ve gürültüler bunlara örnek olarak verilebilir. Aşağıda interferometrik fazın içerdiği bileşenler genel anlamı ile verilmiştir (Li vd., 2017; Majumdar, 2019; Richards, 2009).

$$\varphi_{insar} = \varphi_{atm} + \varphi_{topo} + \varphi_{düz} + \varphi_{defo} + \varphi_{gür} \quad (2.7)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte φ_{atm} atmosferik faz etkisini, φ_{topo} topoğrafyadan kaynaklı faz etkisini, $\varphi_{düz}$ düzleştirilmiş yeryuvarı fazını (flat earth), φ_{defo} deformasyondan oluşan fazı ve $\varphi_{gür}$ ise görüntüdeki gürültü etkisini belirtmektedir.

İnterferometrik faza etki eden bileşenler dikkatli bir şekilde ortadan kaldırıldığında deformasyon fazını hassas bir şekilde elde etmek mümkün olacaktır (Zebker ve Goldstein, 1986).

2.5 SAR Görüntüleri ile Sayısal Yükseklik Modeli Üretimi

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM-DEM), topoğrafyanın yükseklik bilgilerini ve karakteristiklerini 3 boyutlu olarak sunan bir veri kümesi olarak tanımlanmaktadır (Sefercik, 2006). SYM'ler yerbilimleri alanında yükseklik bilgisi gerektiren birçok analize altlık olarak kullanılabilir.

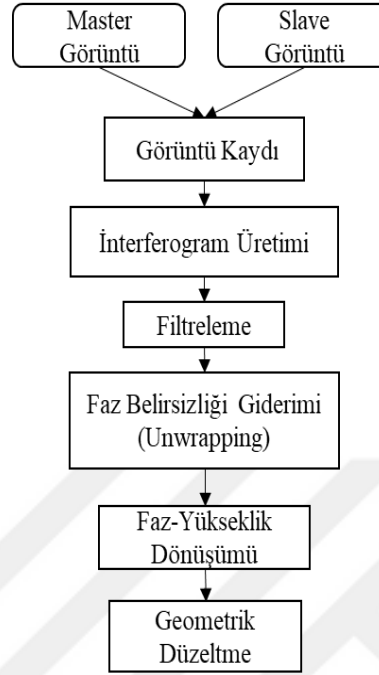
Radar görüntüleri ile sayısal yükseklik modeli (SYM-DEM-Digital Elevation Model) oluşturulmasının 2 farklı yöntemi bulunmaktadır (Gelautz vd., 2003). Bunlar;

- Stereoskopi Yöntemi
- Radar İnterferometri Yöntemi

Stereoskopi yöntemi, fotogrametrik yöntemlerle, belirli bir oranda bindirmeli olarak elde edilen hava fotoğrafları aracılığı ile stereoskopik görüş elde etmek için yapılmaktadır. Bu sayede arazi yüzeyine ait 3 boyutlu bilgi elde edilebilmektedir. Bu işlemde hava fotoğrafları yerine yapay açıklıklı radar görüntüleri ve uçaklar yerine radar uyduları kullanıldığında işlem stereoskopik SAR adını almaktadır (Köse, 2006). Bu işlemde yükseklik bilgileri bindirmeli olarak elde edilen SAR görüntüleri kullanılarak oluşturulmaktadır. Stereoskopik SAR yönteminde en önemli adım iki görüntüdeki aynı noktaların kullanılarak görüntü eşleştirmesi yapılmasıdır. İki görüntü arasındaki ölçülen paralaks kullanılarak arazi yüksekliği hesaplanmaktadır (Fayard vd., 2007).

Radar interferometri yöntemi ile SYM üretilmesi işlemi temel olarak, aynı bölgeye ait farklı zamanlarda çekilmiş iki görüntünün birinin ana görüntü (master) diğerinin ise yardımcı veya yedek görüntü (slave) olarak kabul edilip, bu iki görüntünün üst üste konulması ve değerlendirilmesi esasına dayanmaktadır (Kyaruzi, 2005). Radar görüntülerinden SYM üretim işlemi sırasıyla; görüntü kaydı, interferogram oluşturma, filtreleme, faz belirsizliğinin giderilmesi, faz bilgilerinin yükseklik bilgilerine

dönüştürülmesi ve geometrik düzeltme aşamalarından oluşmaktadır (Crosetto ve Crippa, 2000) (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. InSAR tekniği ile SYM üretim aşamaları.

2.5.1 Görüntü kaydı (Coregistration)

Görüntü kaydı, interferometrik görüntü işlemede ana adımlardan biridir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için en az iki SAR görüntüsünün benzer alım geometrisine sahip olması gerekmektedir. Bu işlemde ikincil (Slave) görüntü ana görüntüye uyması gerekmektedir (Gens, 1998; Sefercik, 2010). Görüntü kaydı aşamasında üç ana başlıkta işlemler gerçekleştirilmektedir. Bunlar görüntü bindirme (Stack), çapraz korelasyon (Cross-correlation) ve çözgü (Warp) işlemleridir. Görüntü bindirme operatörü, aynı bölgenin tekrarlı taranması ile oluşan iki adet görüntünün (master ve slave) coğrafi olarak yeniden örneklenmesi işlemidir. Bu esnada slave görüntünün değerleri ana görüntüye göre yeniden örneklenir. Çapraz korelasyon işlem adımı dünya üzerindeki bir noktanın ana görüntü ile eşleşen aynı noktasının hizalanması işlemidir. Bu işlem ile birlikte çalışan çözgü operatörü, eşleme için yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulan yer kontrol noktalarından yararlanarak matematiksel bir hesaplama işlemi yapar. Görüntü kaynaştırma işleminin ana unsurlarından biridir.

2.5.2 İnterferogram üretimi

İnterferogram, aynı bölgeye ait iki farklı SAR görüntüsünden elde edilen ve bu iki görüntü arasındaki faz farkı bilgilerini içeren görüntülerdir (Richards, 2009). Bu işlemde iki SAR görüntüsü kullanılarak daha anlamlı tek bir görüntü oluşturulmuş olur. Her iki görüntüde karşılık gelen piksellerin genliklerinin ortalaması alınır ve görüntüdeki her nokta için faz değerlerinin farkı hesaplanır. Tüm bu işlemler ardından elde edilen yeni görüntüye interferogram adı verilmektedir.

2.5.3 Filtreleme

Filtreleme işlemi interferogram kalitesinin artırılması ve sinyal gürültü oranının artırılabilmesi adına yapılan bir işlemdir. Literatürde en yaygın kullanılan filtre Goldstein ve Werner tarafından geliştirilmiş olan adaptif faz filtreleme işlemidir (Song vd., 2014; Şengün, 2009). Kullanılan filtre interferogramın keskin şeritlerini yumuşatmaktadır. Bu işlemde, görüntüdeki gürültünün diğer sinyallere göre daha düşük olduğu varsayıp düşük genliğe sahip sinyaller bastırılır ve asıl sinyalin daha büyük bir genliğe sahip olduğu kabul edilerek büyük genlikler zenginleştirilir (Şengün, 2009).

2.5.4 Faz belirsizliğinin giderimi (Phase Unwrapping)

Topoğrafyaya ait yükseklik farklarının gösterildiği interferogram 2π 'nin modülüdür. İnterferogram içeriğinde bir belirsizlik barındırmaktadır. Görüntüde bulunan her noktadaki yükseklik bilgisini elde etmek için her ölçüme doğru tam sayı faz döngüsü sayısını eklenmesi gerekmektedir. Bu belirsizliğin giderilmesi işlemine faz belirsizliğinin giderilmesi (phase unwrapping) denilmektedir. Bu işlem için dört ana yöntem bulunmaktadır. Bunlar residue-cut, least-squares, minimum cost flow ve minimum spanning tree olarak sıralanabilir (Hanssen, 2001).

2.5.5 Faz – Yükseklik dönüşümü ve geometrik düzeltme

İnterferometrik SAR verilerinden elde edilen yükseklik bilgileri uydu yörünge parametreleri ve belirli uydu geometrisi ile hesaplanmaktadır. Uydu yörünge parametreleri yer merkezli yer sabit (ECEF) koordinat sisteminde üretilirler. Bu da yükseklik hesaplamaları için bir referans elipsoide ihtiyaç olduğunu göstermektedir

(Gens, 1998; Sefercik, 2010). Bu nedenle faz - yükseklik dönüşümü işlemi yapılırken bir referans SYM kullanılmaktadır.

SAR görüntülerinin geometrik olarak düzeltilmesi işlemi optik görüntülerden farklıdır. SAR verileri yan bakışlı bir geometriye sahip olduklarından üretilen veriler üzerinde bir geometrik bozulma meydana gelmektedir. SAR sistemleri doğrusal olmayan bir sıkıştırmaya neden olduğundan polinomlar kullanılarak düzeltilemezler. Burada sensör ve işlemci karakteristikleri dikkate alınarak bir geometrik düzeltme işlemi yapılmalıdır (Sefercik, 2010). Bu aşamada SAR görüntüleri için Range-Doppler arazi düzeltmesi metodu kullanılmaktadır. Bu yöntem her bir pikselin konumunu düzeltilmesi için bir SYM kullanarak, kısa görüntüleme ve gölge gibi faktörlerin kaynaklanan geometrik bozulmaların düzeltilmesini sağlamaktadır (Flipponi, 2019).

3. KARIN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

3.1 Karın Fiziksel ve Elektromanyetik Özellikleri

Bilindiği üzere uzaktan algılama, cisimlere herhangi bir temas olmaksızın sensörler yardımı ile dünya üzerinde bulunan nesnelerden bilgi çıkarımı işlemidir. Bu nedenle incelenen materyalin elektromanyetik ve fiziksel karakteristik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde karın elektromanyetik ve fiziksel özellikleri incelenecektir. Bu çalışma SAR verileri ile yapılacağından karın optik elektromanyetik özelliklerinden kısaca bahsedilecektir.

3.1.1 Karın fiziksel özellikleri

Kar, genel anlamda buz kristalleri, su ve havanın karışımı bir madde olarak tanımlanmaktadır. Karın en temel fiziksel parametresi yoğunluk ρ_s olarak tanımlanmaktadır (Rees, 2006). Kar yoğunluğu, yeni kar yağmaması ve çok soğuk koşullar olmaması durumunda 0.2 ve 0.6 mg/m³ aralığında değişmektedir. Yeni yağmış kar (taze kar veya yeni kar) için yoğunluk değeri 0.1 mg/m³ olarak kullanılmaktadır. Yüzeydeki kar eskidikçe ve hava sıcaklığı değişimleri, rüzgar gibi etkenlere maruz kaldıkça, sıkışarak yoğunluğu artar. Yoğunluk değişiminin denklemi Eşitlik 3.1’de verilmiştir (Hallikainen vd., 1987; Martinec, 1977; Rees, 2006; Rott, 1984; Rott vd., 1992).

$$\rho(t) = \rho_0(1 + t)^{0.3} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte, t gün cinsinden geçen süreyi ρ_0 ise 0.1 mg/m³ yoğunluk değerini ifade etmektedir. Dış etkenler yok sayıldığında kar, bir ay içerisinde yaklaşık 0.3 mg/m³, bir yıl içerisinde ise yaklaşık 0.6 mg/m³ yoğunluk değerine ulaşacaktır.

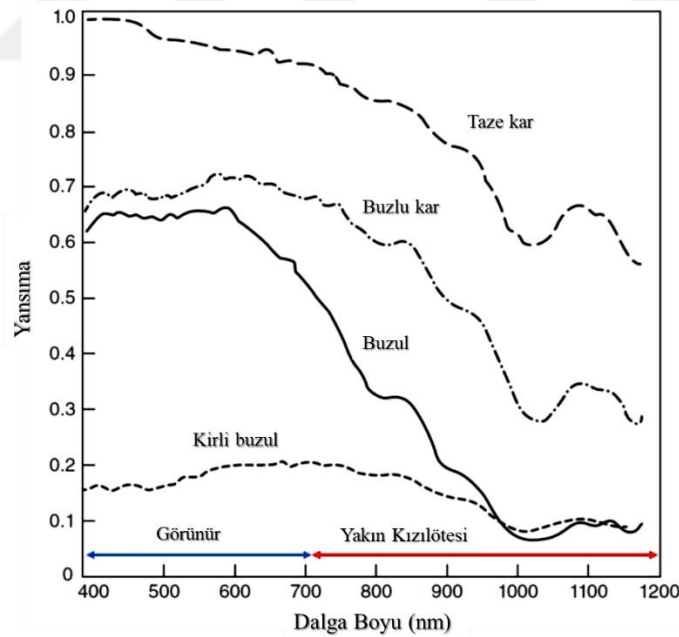
Karın bir diğer önemli fiziksel özelliği karın tane büyüklüğüdür. Genellikle karın tane boyutları 0.1 ile 0.3 mm arasında değişim göstermektedir. Kara dışardan etki eden etmenler nedeni ile kar tanelerindeki değişim homojen olmayan bir yapıda ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle kar tanelerinin karakterize edilmesi ve modellenmesi zordur (Rees, 2006).

3.1.2 Karın elektromanyetik özellikleri

3.1.2.1 Görünür, yakın kızılötesi ve termal bölgede karın yansıtım özellikleri

Yeni yağmış kar, eski ve beklemiş karlara göre insan gözüne daha parlak şekilde görünür. Bunun nedeni elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde yüksek değerlerde ve düz bir grafik değerleri almasıdır. Bunun yanında karın spektral yansıtma özellikleri dolaylı olarak kar tanelerinin büyüklüğü ile orantılıdır. Yeni yağmış kar en yüksek yansıtımı gösterirken, beklemiş ve kirlenmiş kar yüzeyleri daha az yansıma gösterirler. Bunun yanında karın muhtevastaki sıvı miktarı yansıma özelliğini etkilemektedir. Çünkü kar içerisindeki sıvı miktarı tekrar donmayı ve kristalleşmeye neden olmaktadır (Majumdar, 2019; Tedesco, 2015).

Şekil 3.1’de karın elektromanyetik spektrum üzerinde görünür (400-600 nm) ve yakın kızılötesi (700-1200 nm) bölgede sahip olduğu yansıtma özellikleri verilmiştir. Ancak elektromanyetik spektrumun termal bölgesinde (3-100 μm) ve daha yüksek dalga boylarında karın yansıtımı oldukça düşüktür (Rees, 2006).



Şekil 3.1. Karın elektromanyetik yansıtım özellikleri (Tedesco, 2015’den değiştirilerek).

3.1.2.2 Karın mikrodalga bölgede yansıtım özellikleri

Mikrodalgalar, gece gündüz veya hava koşullarından etkilenmeksizin atmosferden geçip yeryüzüne ulaşabildiklerinden dolayı kriyosfer araştırmalarında önemli bir rol oynamaktadırlar (Majumdar, 2019). Kar ile etkileşime giren elektromanyetik dalgaların dalga boyuna bağlı olarak, mikrodalgaların kar ile etkileşimi basitçe modellenabilir. Muhtevasında hava, su ve buz bulunduran karın gözenekli yapısı sayesinde mikrodalga ile etkileşimi bu üç veri kullanılarak ortaya çıkarılabilir (Leinss, 2015).

Kar kristalleri arasındaki gözenekler su buharı ve hava ile dolu durumdadır. Ancak mikrodalga algılama için birkaç metre derinlikteki kar kütleğinde bulunan su buharına bağlı dalga emme etkisi, atmosferdeki yaklaşık 10 km'lik su buharına kıyasla ihmal edilebilir durumdadır. Karda bulunan su buharı (ϵ_{hava}) kırılma indisi yaklaşık 1 olarak kabul edilir (Leinss, 2015).

Mikrodalga bölgede karın yansıma özelliğinin bulunabilmesi için dalganın düzlemsel bir kar yüzeyinden yansıdığı göz önünde bulundurulmasıdır. Bu, dalganın yüzeye çarptığı açı ve karın dielektrik sabiti ile bulunabilir. Karın dielektrik sabiti ile dış ortam arasındaki fark ne kadar büyük olursa (havanın dielektrik sabiti 1 olarak kabul edilir) yansıma katsayısı da o kadar büyük olacaktır (Rees, 2006).

Buzun dielektrik sabiti mikrodalga bölge boyunca 3.17 değerinde sabit olarak kabul edilmektedir. Bu bağlamda kuru karın dielektrik sabiti karın yoğunluğuna bağlıdır (Rees, 2006). Kuru karın yoğunluğa bağlı dielektrik sabiti aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir (Hallikainen, 1986);

$$\epsilon' = 1 + 1.9\rho_s \quad (3.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte kar yoğunluğu (ρ_s) g/cm³ olarak ifade edilmiştir. Bu eşitlikte ortalama 0.3 g/cm³ değerinde bir yoğunlukta dielektrik sabiti yaklaşık 1.57 değerini alacaktır.

Su ise mikrodalga bölgede güçlü bir emilim özelliğine sahiptir. 0 °C'de suyun mikrodalga bölgede emilimi yaklaşık 10 GHz değerinde en yüksek seviye ulaşır. Bu

nedenle suyun bağıl geçirgenliği (ϵ_{su}) mikrodalga frekanslarındaki değişimlere bağlı olarak değişmektedir (Buchner vd., 1999; Ellison vd., 1996; Majumdar, 2019).

3.2 Geleneksel Yöntemler ile Karın Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Geçmişten günümüze karın fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması adına farklı yöntemler ortaya çıkmıştır. Günümüzde kar derinliğinin ve buna bağlı özelliklerin ortaya çıkarılması adına manuel yöntemler ve kar gözlem sensörleri kullanılmaktadır (Zhu ve Shen, 2019). Kış aylarında özellikle dağlık bölgelerde karla kaplı arazi şartları kar ölçmeleri için büyük zorluklar ve yetersizlikler içermektedir. Geleneksel kar ölçme tekniklerinde genellikle belirli bir bölgeden alınan örnekler ve ölçümler geniş bir alan için ortak değerler olarak kullanılmaktadır. Bu durum yapılan ölçmelerde meydana gelen hataların, daha büyük alanlar için uygulanırken, hata oranlarının büyümesine neden olmaktadır (Priya ve Krishnaveni, 2019).

Dört mevsimin aktif olarak yaşandığı ülkemizde, kış mevsiminde, özellikle yüksek bölgelerde kar yağışları aktif olarak görülmektedir. Kar yağışı kıyılardan iç kısımlara gittikçe ve yükseklik arttıkça artış göstermektedir (Günel, 2013). Ülkemizde meteorolojik tahminler ve yağış gözlemleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ve Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından elde edilmektedir. Kurumlar, kar derinliği ve buna bağlı özelliklerin ölçülmesinde kar cetvelleri, kar örnekleme tüpleri ve kar gözlem istasyonları verilerini kullanmaktadır. Ülkemizde mevcut 130 adet açık kar gözlem istasyonu bulunmaktadır. İstasyonlar bulundukları noktanın kar derinliği verilerini ölçerek kayıt etmektedir (Şekil 3.2). Kar gözlem istasyonu verileri MGM'nin MEVBİS (Meteorolojik Veri Bilgi Sunum ve Satış Sistemi) üzerinden temin edilebilmektedir. Bu bölümde ele alınan manuel ölçmeler ve kar gözlem istasyonları ile elde edilen kar parametreleri, yalnızca bulundukları bölge için tahminlerde bulunmaktadır. Fakat istasyon bölgeleri dışında kalan alanlar veya küçük ölçekli çalışmalarda net sonuçlar elde edilememektedir. Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak elde edilecek sonuçlar ise geniş alanlarda yapılan çalışmalarda araştırmacılara ve bilime daha doğru bilgi temin etmek açısından önem arz etmektedir.



Şekil 3.2. Kar gözlem istasyonu (URL-8).

3.3 SAR Verileri Kullanılarak Karın Fiziksel Özelliklerinin Tahmin Edilmesi

Radar verilerinin hava koşullarından bağımsız olarak veri üretebilme kapasitesi, son yirmi yılda kar ile ilgili uzaktan algılama çalışmalarını artırmıştır (Gueriussen vd., 2001; Hoen ve Zebker, 2000; Leinss, 2015; Li vd., 2016; Liu vd., 2017; Majumdar, 2019; Rees, 2006; Rott vd., 2003). Bu çalışmada SAR verileri ile kar derinliği ve buna bağlı olarak kar hacminin bulunmasını öngörüldüğünden, bu bölümde kar derinliği tahmininin SAR verileri ile nasıl bulunacağına dair bilgiler ve literatür araştırmaları verilecektir. Bunların birlikte, karın bir diğer önemli fiziksel çıkarımı olarak kar-su eşdeğerinin üzerinde de durulacaktır.

3.3.1 SAR verileri ile kar derinliğinin tahmin edilmesi

Kar derinliğinin tahmin edilmesi uzaktan algılama çalışmaları açısından hala tartışılan bir konudur (Leinss, 2014). Hem fiziksel özellikleri hem de iklimsel etkenler yönünden değişiklikler gösteren kardan veri çıkarımı çalışmaları zorlaştırmaktadır. Yapay açıklıklı radar sistemleri herhangi bir hava koşuluna bağlı kalmaksızın çalışma özellikleri ve kardan veri çıkarabilme kapasiteleri bakımından bu çalışmalarda ilgi görmektedir. SAR verileri ile kar derinliği üretimi kar paketlerinin özelliklerine

değişiklik göstermektedir. Bu bölümde SAR verileri ile taze, kuru ve ıslak kar paketlerinden derinlik çıkarımı literatür araştırmaları ile desteklenerek anlatılacaktır.

3.3.1.1 Taze kar derinliğinin tahmin edilmesi

Taze kar, yeni yağmış ve dış etkenlere (sıcaklık, rüzgar vb.) tam anlamıyla maruz kalmamış kar anlamına gelmektedir (Rees, 2006). Yeni yağmış karın yoğunluk formülü eşitlik 3.1’de verilmiştir. Leinss (2015) X band yapay açıklıklı veriler ile polarimetri tekniği kullanarak kar derinliği hesaplama çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmada kopolar faz farkı (CPD) baz alınarak VV ve HH polarizasyona sahip veriler kullanılarak ile kar derinliği için teorik bir ilişki üretilmiştir. Polarimetrik yapay açıklıklı radar (PolSAR) hedeften gelen saçılma mekanizması hakkında bilgi edinmek için polarize radar sinyalleri kullanan bir tekniktir (Lee ve Pottier, 2009). Farklı polarimetrik kanalların faz farkları dikkate alınarak yapılacak bir hesaplama saçılma mekanizması hakkında bilgi verecektir. Kopolar faz farkı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir (Leinss, 2014);

$$\varphi_{CPD} = \varphi_{VV} - \varphi_{HH} \quad (3.3)$$

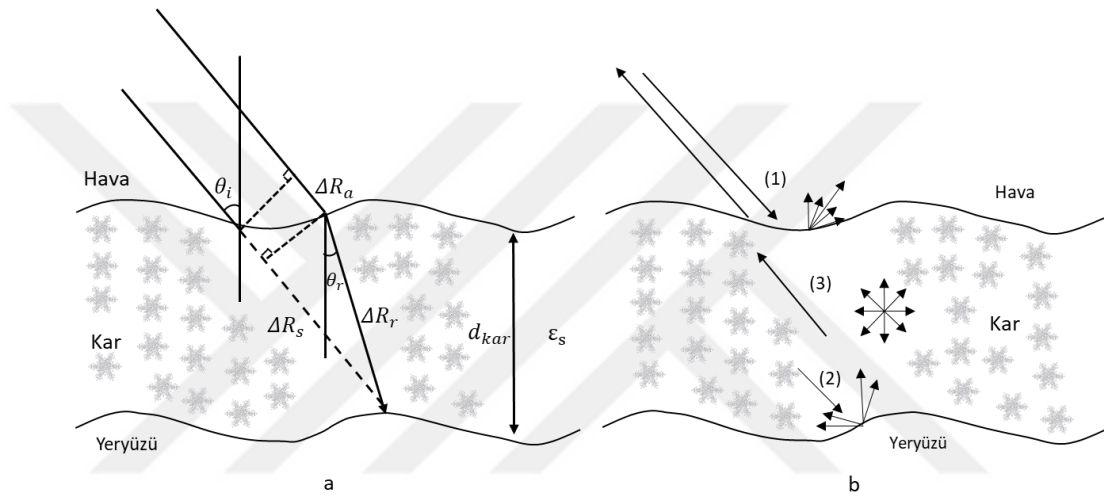
Leinss (2015) çalışmasında kopolar faz farkını yeni kar derinliği ile ilişkilendiren bir teorik yaklaşım sunmuştur. Bunun yanında arazi çalışmaları ile desteklediği bu çalışmada karın anizotropik özellikleri ve saçılma karakteristikleri de göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma sonucunda farklı derecede kopolar faz farklarının farklı kar derinlikleri ile ilişkilendirmesi yapılmış ve arazi çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Kopolar faz farkı kullanılarak kar derinliğinin hesaplanması henüz tam olarak çalışılan bir konu olmamakla birlikte, kesin sonuçlara ulaşabilmek için iklim modelleme, kar gözlemleri ve hava durumu tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Leinss, 2014).

3.3.1.2 Kuru kar derinliğinin tahmin edilmesi

Kuru kar, rüzgar, hava koşulları ve diğer etmenler nedeniyle sıkıştırılmış ve mikrodalga bölgede yaklaşık 10 GHz’e kadar olan frekanslarda şeffaf bir ortam görevi gören kar olarak adlandırılmaktadır. Kuru terimi, bu tür karların sıcaklığının 0 °C’nin altında olduğu ve nem içeriğinin düşük olduğu kabul edildiği için kullanılmaktadır. (Matzler, 1996). Kuru kar derinliğinin tahmin edilmesinde tek geçişli interferometrinin yetersiz kalmasından dolayı, tekrarlı geçiş interferometrisi literatürde en çok

kullanılan metottur (Guneriusen vd., 2001; Li vd., 2017; Liu vd., 2017). Homojen kuru karda geri saçılma tümüyle kar yüzeyi ile bağlantılıdır. Hacimsel saçılım kuru karda çok az olduğundan interferometrik faz üzerindeki etkisi ihmal edilmektedir (Guneriusen vd., 2001).

Polarize bir mikrodalga sinyali hava ortamından kar ortamına geçtiğinde iki ortam arasındaki dielektrik özelliklerin farklarından dolayı bir faz kaymasına uğramaktadır. Şekil 3.3'te radar sinyallerinin karlı ve karsız ortamda yayılma özelliklerinin değişimi gösterilmiştir (Li vd., 2017; Luzi, 2010).



Şekil 3.3. a) Radar sinyalinin kar içerisindeki geometrisi b) kardaki saçılma mekanizması 1-hava ve kar arasında yüzey saçılması 2- zemin kar arasında yüzey saçılması 3- kar içerisinde hacim saçılması (Li vd., 2017'den değiştirilerek).

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi karsız zamanda hareketsiz bir yüzey için menzil mesafesi ΔR_s olarak kabul edilir. Ancak karlı durumlarda bu mesafe, radar sinyallerinin kar içerisinde θ_r kadar bir kırılmaya uğraması nedeni ile $\Delta R_a + \Delta R_r$ şeklinde ifade edilir. Bu durumda menzil mesafesi farkı eşitlik aşağıdaki gibi olur;

$$\Delta R = \Delta R_s - (\Delta R_a + \Delta R_r) \quad (3.4)$$

Kuru karın geçirgenliği kar yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Kuru karda geçirgenlik ($\epsilon(\rho_{kar})$) buzun geçirgenliği (ϵ_{buz}) ve suyun geçirgenliğine (ϵ_{su}) bağlı olarak hesaplanmaktadır (Leinss, 2015). Aşağıdaki eşitlikte kuru karın geçirgenliğine dair denklemler verilmiştir.

$$\varepsilon(\rho_{kar}) = \begin{cases} 1 + a_1 \rho_{kar} + a_2 \rho_{kar}^3 & \rho_{kar} \leq 0.4 \text{ g / cm}^3 \\ \left[\left(1 - \frac{\rho_{kar}}{\rho_{buz}}\right) \varepsilon_{hava}^{1/3} + \frac{\rho_{kar}}{\rho_{buz}} \varepsilon_{buz}^{1/3} \right]^3 & \rho_{kar} > 0.4 \text{ g / cm}^3 \end{cases} \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5’de verilen $a_1=1.6 \text{ g/cm}^3$ ve $a_2=1.86 \text{ g/cm}^3$ değerleri Wiesmann ve Mätzler (1999) çalışmasından alınan sabit değerlerdir. Yine aynı çalışmadan elde edilen $\varepsilon_{hava}=1.005$, $\varepsilon_{buz}=3.179$ ve $\rho_{buz}=0.917 \text{ g/cm}^3$ değerleri kullanılmıştır.

Kuru kar için toplam inteferometrik faz, Eşitlik 2.7’den değiştirilerek aşağıdaki halini alır;

$$\varphi_{insar} = \varphi_{atm} + \varphi_{topo} + \varphi_{düz} + \varphi_{kar} + \varphi_{gür} \quad (3.6)$$

Bölüm 2.1.4’te açıklanan, eşitlik 3.6’nın içeriğinden diğer etmenler çıkarılarak kar fazına (φ_{kar}) ulaşılmış olur. Kar fazı yalnız bırakıldığında eşitlik 2.6’ya göre kar derinliği aşağıdaki eşitlik ile açıklanabilir;

$$\begin{aligned} \varphi_{kar} &= -\frac{4\pi}{\lambda} d_{kar} \left(\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon(\rho_{kar}) - \sin^2 \theta_i} \right) \\ &\Downarrow \\ d_{kar} &= \frac{\varphi_{kar}}{-\frac{4\pi}{\lambda} \left(\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon(\rho_{kar}) - \sin^2 \theta_i} \right)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada d_{kar} kar derinliğini, λ dalga boyunu, ε_{kar} karın dielektrik sabitini ve θ_i sinyal lokal geliş açısını ifade etmektedir. Karın dielektrik sabiti eşitlik 3.5 kullanılarak karın yoğunluk değerine göre hesaplanır.

3.3.1.3 Islak kar derinliğinin tahmin edilmesi

Islak kar, hava, buz ve suyun karışımı olarak adlandırılmaktadır (Koch vd., 2019). Tek geçişli radar interferometri tekniği ile X band radar verileri kullanılarak SYM üretimi birçok çalışmada başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar birlikte bu teknik, kar derinliği çalışmalarında da kullanılmaya başlanmıştır (Leinss vd., 2018; Majumdar, 2019). Kuru kar durumlarında yüksek penetrasyon sebebi ile bu yöntem yalnızca ıslak kar derinliğinin tahmin edilmesinde kullanılabilir. Yüksek su içeriğine sahip olan ıslak kar, gelen mikrodalga sinyalleri emer ve geriye sadece yüzey saçılması kalır. Islak kar

derinliğinin belirlenmesi için literatürde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır (Majumdar, 2019).

Islak kar derinliğinin tahmin edilmesinde ilk yöntem kar erimesi nedeni ile ortaya çıkan penetrasyon derinliğinin değişiminin hesaplanması işlemidir. X bandında kuru karın yüksek şeffaflık göstermesi ve aynı frekansta ıslak karın düşük penetrasyona sahip olması ıslak kar için derinlik tahminini mümkün kılar (Leinss, 2015).

Islak kar derinliği için bir diğer yaklaşım ise karlı ve karsız mevsimlerde elde edilen SYM'ler kullanılarak bir fark verisinin ortaya çıkarılması işlemidir. Bu işlem ile kış mevsiminde, karlı durumda, elde edilen SYM'den yaz mevsiminde elde edilen SYM çıkarılarak bir yüzey oluşturulur. Bu yüzey farklardan kalan kar derinliğini ifade etmektedir (Leinss vd., 2018).

3.3.2 Kar-Su eşdeğerinin (KSE) hesaplanması

Kar su eşdeğeri (KSE), bir kar kütlesi veya partikülünün erimesi durumunda ortaya çıkacak su miktarını temsil etmektedir (Li vd., 2017). KSE kar yoğunluğu (ρ_{kar}) ve kar derinliğinin d_{kar} çarpılması sonucu ortaya çıkmaktadır (Eşitlik 3.8).

$$KSE = \rho_{kar} * d_{kar} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü gibi kar yoğunluğu değeri KSE için en önemli etkidir. Karın fiziksel durumuna (yeni, ıslak veya kuru) bağlı olarak kar yoğunluğu değişeceğinden, KSE'de ona göre şekillenecektir.

4. ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

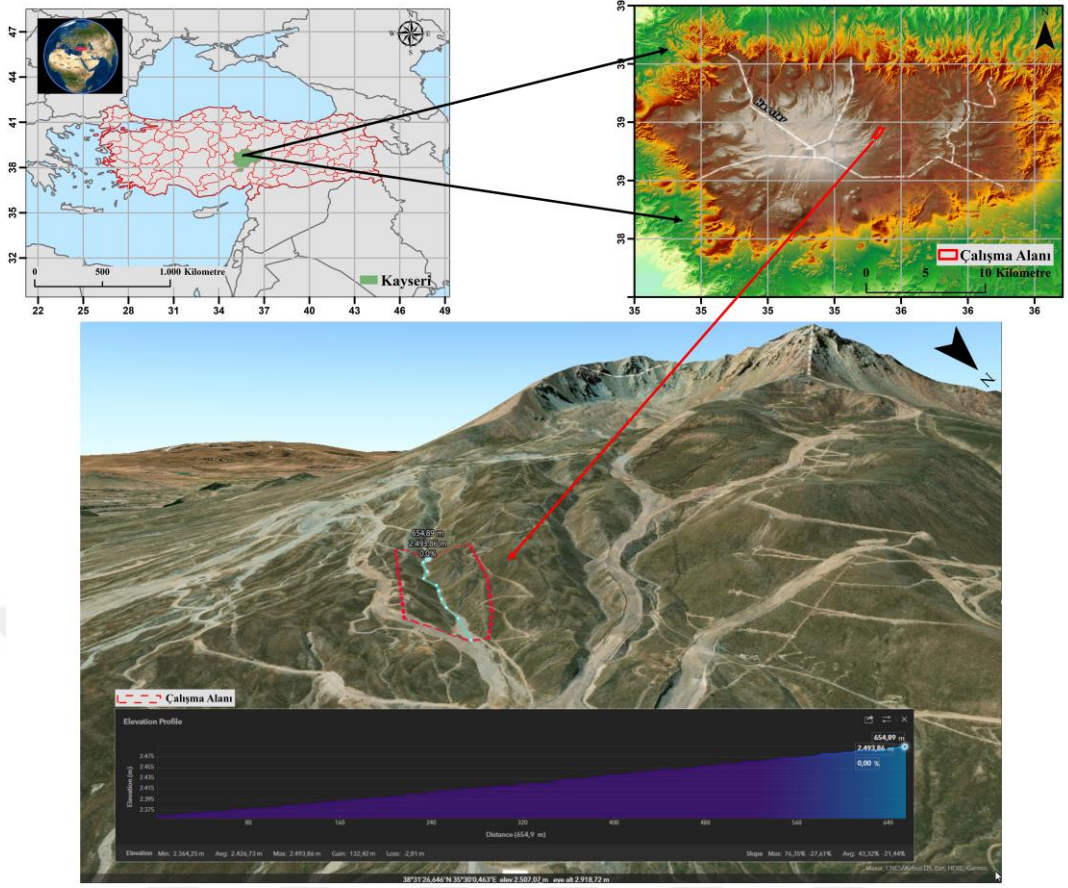
Bu bölümde tez çalışması kapsamında pilot bölge olarak belirlenen çalışma alanı tanıtılacaktır. Ayrıca çalışma için kullanılan veriler, yöntem ve analizler anlatılarak çalışmadan elde edilen veriler sunulacaktır.

4.1 Çalışma Alanı

Tez çalışması için pilot bölge olarak Türkiye'nin en yüksek dağlarından biri olarak kabul gören Erciyes Dağı seçilmiştir. Erciyes dağı Kayseri ilinin 25 km güneybatısındaki ovaların yanından birden bire yükselen büyük kütleli bir volkanik dağdır. 38° 31' 12" Kuzey 36° 28' 48" Doğu koordinatlarında bulunmaktadır. 3800 m. yüksekliğe sahip Erciyes Dağı, Türkiye'de kış turizmine de öncülük etmektedir.

Dağın kuzey yamaçlarında 2200-2700 m yükseklikler arasında birçok volkan tepesi bulunmaktadır. Erciyes Dağı, Orta Anadolu'nun en büyük stratovolkanıdır. Bunun yanında, dağın belirli bölgelerinde geçmiş jeolojik dönemlerde ortaya çıkmış ve varlığını sürdüren buzul kütleleri bulunmaktadır (Şen vd., 2003). Bölge genel olarak karasal iklim özelliklerin göstermektedir. T.C Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü 18149 Erciyes Kayak Merkezi istasyon verilerine göre, yağışlar, bölgede genelde kar şeklinde görülmektedir. İstasyonda, 2018 yılı Ocak, Şubat ve Aralık ayı ortalama sıcaklığı -5 °C iken, Haziran Temmuz ve Ağustos aylarında bu değer ortalama 13°C olarak gözlemlenmiştir. Bölgede 2018 yılı Ocak ayı ortalama kar yüksekliği 106 cm, Şubat ayı ortalama kar yüksekliği ise 114 cm olarak ölçülmüştür. Bölge, yılın 9 ayı karla kaplı olurken, Haziran Temmuz ve Ağustos aylarında yüksek sıcaklıklara bağlı olarak kar erimeleri gözlemlenebilmektedir.

Tez çalışmasında bu bölgenin seçilmesindeki ana sebep, bölgenin kar yağışı açısından çok zengin bir yapıya sahip olmasıdır. Aynı zamanda ulaşım olanakları yönünden bölgedeki diğer dağ kütlelerinden daha elverişli konumdadır. Erciyes Kayak Merkezi A.Ş tarafından işletilmekte olan 3 adet uluslararası standartta kayak pisti ve birçok zorluk derecesinde pisti bünyesinde barındırmaktadır. Bölgedeki kar yüksekliği kış turizmi açısından da büyük önem arz ettiği için çalışma bölgesi olarak kullanılması uygun bulunmuştur. Şekil 4.1'de çalışma alanı haritası gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çalışma alanı haritası.

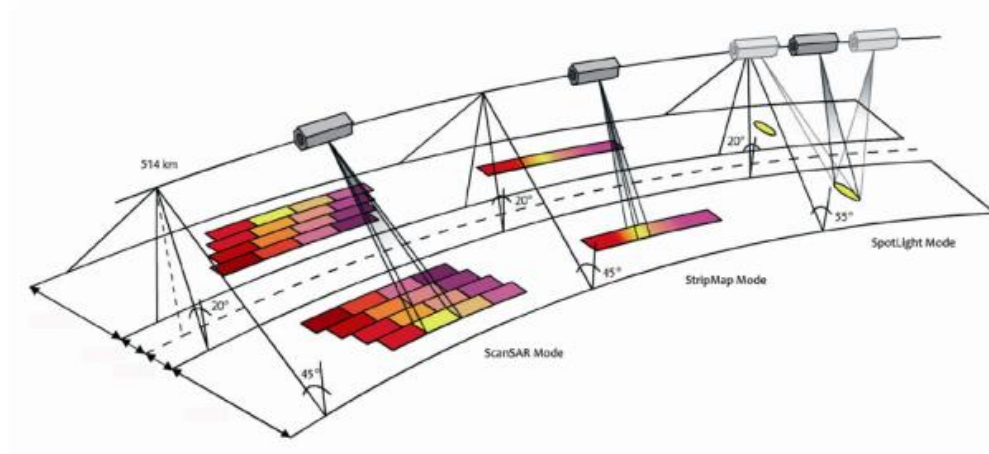
4.2 Kullanılan Radar Verileri

Çalışma alanına ait yüksek çözünürlüklü TerraSAR-X Stripmap modunda ve HH polarizasyonlu Yapay Açıklıklı Radar verileri Avrupa Uzay Ajansı (ESA)'ndan temin edilmiştir. TerraSAR-X bilimsel ve ticari amaçlarla kullanılmak üzere tasarlanmış Alman yapay açıklıklı radar uydusudur (URL-2). 15 Haziran 2007 tarihinde fırlatılan uydu günümüzde kullanılan en gelişmiş yapay açıklıklı radar uydularından biridir. Uydu, farklı görüntüleme ve polarizasyonlarda çalışabilen yüksek frekanslı X band SAR sensörüne sahiptir ve yüksek çözünürlüklü mekânsal veri sağlayabilmektedir (Sefercik, 2010). TerraSAR-X uydusunun özellikleri Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. TerraSAR-X uydusunun teknik özellikleri.

Fırlatma Tarihi	15 Haziran 2007
Fırlatma Tesisi	Baykonur Uzay Üssü (109/95), Kazakistan
Taşıyıcı Roket	Dnepr-1
Uydu Ağırlığı	1230
Uydu Boyutu	4.88 m (uzunluk) X 2.4 m (çap)
Uçuş İrtifası	514 km
Mekânsal Çözünürlük	1 m (SL), 3 m (SM), 16 m (SS)
Zamansal Çözünürlük	11 gün
Radar Frekansı ve Dalga boyu	9.65 GHz / 31 mm
Polarizasyon	HH, VH, HV, VV
Yörünge Eğikliği	97.45°

TerraSAR-X uydusu temelde 3 ana görüntüleme yöntemi ile veri sağlayabilmektedir. Bunlar ScanSAR, StripMap ve Spotlight modlarıdır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. TerraSAR-X uydusu görüntüleme modları (URL-2).

SpotLight (SL) görüntüleme yönteminde hedef üzerinde daha uzun süreli kalması ile azimut yönündeki çözünürlük artırılmaktadır. Hedef üzerinde daha uzun süreli aydınlatma ile yapay açıklığın büyümesi etkilenir ve açısal çözünürlükte iyileşme meydana gelir (Yılmaztürk, 2015). TerraSAR-X uydusunda bu görüntüleme yöntemi 10km x 10km lik bir alan kapsayacak şekilde tasarlanmıştır (Airbus, 2015).

StripMap (SM) görüntüleme yönteminde uydu yeryüzüne paralel olacak şekilde ilerlerken SAR mikrodalga demetleri uçuş doğrultusuna göre belirli bir açı ile hedefte aydınlatma sağlar. Yeryüzünde görüntülenmek istenen alanın genişliği uydunun yerden yüksekliği, antenin mikrodalga demet genişliği ve antenin bakış açısına bağlı olarak değişebilmektedir. TerraSAR uydusunun StripMap modu, 30 x 50 km’lik bir alanı 3 m çözünürlüğe kadar tarayabilme kapasitesine sahiptir (Airbus, 2015).

ScanSAR görüntüleme yöntemi çok geniş alanların taranmasına olanak sağlayan bir görüntüleme metodudur. Bu görüntüleme yönteminde görüntülenmek istenen alan üzerindeki birçok komşu şerit, her biri farklı geliş açısına sahip eş zamanlı mikrodalga demetleriyle taranır. TerraSAR uydusu yaklaşık 18.5 m çözünürlüğe 100 x 150 km’lik bir çerçevede olanak sağlayabilmektedir (Airbus, 2015). TerraSAR-X uydusunun farklı veri tipleri mevcuttur. Bu verilerin ham veya işlenmiş olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Çizelge 4.2’de TerraSAR-X uydusunun ürün tipleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. TerraSAR-X uydusu veri temin tipleri.

SSC (Single Look Slant Range Complex)	Genlik ve faz bilgisi içeren kompleks veri.
MGD (Multi Look Ground Range Detected)	Çoklu bakış işleminden geçirilmiş yer menzil verisi.
GEC (Geocoded Ellipsoid Corrected)	MGD ürününün UTM/UPS projeksiyonu, WGS84 datumu ile rektifiyeli versiyonu.
EEC (Enhanced Ellipsoid Corrected)	GEC ürününün topografik olarak düzeltilmiş versiyonu.

Çalışmada SYM üretimi ve kar derinliği hesaplanması için yaz ve kış aylarına ait farklı radar verileri kullanılmıştır. Çizelge 4.3’te kullanılan radar verileri ve teknik detayları gösterilmiştir. Çizelge 4.4’te ise kullanılan harici SYM verileri gösterilmiştir. Burada, kullanılan verilerin tez içerisindeki kullanımları kısaltma olarak verilmiştir. Tezin diğer bölümlerinde bu kısaltmalar kullanılacaktır.

Çizelge 4.3. Kullanılan TerraSAR-X uydu görüntüleri ve teknik özellikleri (SM: Stripmap, S: Single, HH: Horizontal-Horizontal, D: Descending, R:Right).

Görüntüleme Modu	Görüntüleme Tarihi ve Saati	Bağlı Yörünge	Polarizasyon Modu	Polarizasyon	Geçiş/Bakış Yönü	Geliş Açısı
SM	17-02-2018 03:45	92	S	HH	D / R	36.06 - 38.51
SM	23-08-2018 03:45	92	S	HH	D / R	36.06 - 38.51
SM	12-08-2018 03:45	92	S	HH	D / R	36.06 - 38.51

Çizelge 4.4. Kullanılan harici SYM verileri ve tez içerisindeki tanımlamaları.

Ürün Adı	Çözünürlük (m)	Tanımlanma
SRTM 3sec	90	srtm_dem
ALOS WORLD 3D 1sec	30	alos_dem
TanDEM-X WorldDEM	12	tsx_dem
Stereo SYM	5	5m_dem

4.3 Kullanılan Harici Sayısal Yükseklik Modelleri

4.3.1 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

SRTM, NASA (National Aeronautics and Space Administration), ABD Ulusal Coğrafi İstihbarat Ajansı (NGA), ABD Savunma Bakanlığı, Almanya Havacılık ve Uzay Merkezi (DLR) ve İtalya Uzay Ajansı (ASI) arasında bir işbirliği ile ortaya çıkmıştır. 2000 yılının Şubat ayında fırlatılan uydunun temel amacı, 60° Kuzey ve 60° Güney enlemleri arasında kalan bölgenin InSAR tekniği ile topoğrafik olarak haritalanması idi (Grohmann, 2018).

SRTM, C ve X bandlarına sahip iki farklı yapay açıklıklı radar sistemine sahiptir. C band radarı bitişik bir haritalama alanı oluştururken, X band radarı ise 50 km genişliğinde ayrı alanlar için veri üretimi sağlamaktadır (Farr vd., 2007). SRTM, 1'' ve 3'' olmak üzere iki farklı çözünürlükte veri sunmaktadır. Bunlardan 1'''lik veri 30m yersel çözünürlük sunarken 3'''lik veri 90m yersel çözünürlük sunmaktadır. SRTM verileri ücretsiz olarak ilgili internet adresinden temin edilebilmektedir.

4.3.2 ALOS World 3D (AW3D)

ALOS, 2013 yılında Japonya Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) tarafından ticari ortakları olan NTT DATA Corp. ve Japonya Uzaktan Algılama Teknolojileri Merkezi (RESTEC) işbirliği ile fırlatılmıştır. ALOS uydusu üzerinde bulunan ve optik bir sensör olan PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping) ile 2006-2011 yılları arasında küresel bir SYM oluşturmak için, 80° Kuzey ve 80° Güney enlemleri arasında bir haritalama yapmıştır. NTT DATA ve RESTEC yaklaşık olarak 5 m yersel çözünürlüğe sahip ticari SYM'ler üretmiştir. JAXA ise 5 m çözünürlüğe sahip SYM'leri yeniden örnekleyerek 1'' (~30m) çözünürlüğe sahip SYM'ler üreterek 2016 yılında halka açık bir hale getirmiştir. 2017 yılında mevcut verilerdeki boşlukların doldurulması amacı ile 1.1 versiyonu sunulmuştur. Bunun yanı sıra belirlenen hataların giderilmesi ve boşlukların doldurulması amacı ile 2018 yılında 2.1, 2019 yılında 2.2 ve 2020 yılında 3.1 versiyonlarına güncellenmiştir. Sayısal üç boyutlu haritalama işlemleri, doğal afetlerin izlenmesi ve deformasyon izleme gibi birçok çalışmada aktif olarak kullanılmaktadır (Grohmann, 2018; Zhang vd., 2019; URL-3).

4.3.3 TanDEM-X WorldDEM

TanDEM-X, 2003 yılında önerilen ve şu anda DLR ve EADS Astrium tarafından fizibilite çalışmaları devam eden bir misyondur. TanDEM-X misyonu, kontrollü iki radar uydusu ile (TanDEM-X ve TerraSAR-X) 200-250 m baz uzunluğuna sahip 12 m yersel çözünürlükte, küresel ölçekte sayısal yükseklik modeli üretmeyi hedeflemiştir (Krieger vd., 2005). Uydu sensörleri iz boyunca ve ize dik alım yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Misyon, dağlık alanlarda ortaya çıkabilecek gölgelenmeleri engellemek ve hataları gidermek adına dünya üzerinde iki tam tur görüntüleme görevi yapmıştır.

Kullanılan her iki uydu da, 3.1 cm dalga boyu ve tam polarizasyona sahip X band sensörler ile donatılmış yapay açıklıklı radar sistemleridir. TanDEM-X ürünü için mutlak doğruluk yatay ve düşeyde <10 m iken, göreceli doğruluk, eğimin %20'den düşük olduğu alanlar için 2m, eğimin %20'den büyük olduğu alanlar için ise 4m'dir (González vd., 2010; Grohmann, 2018; Krieger vd., 2005; Krieger vd., 2007; Rizzoli vd., 2012).

TanDEM-X WorldDEM verileri ticari olarak satın alınabilmekle beraber, Avrupa Uzay Ajansı'na sunulacak projeler kapsamında ücretsiz temin edilebilme olanağı sunmaktadır.

4.3.4 Stereo Sayısal Yükseklik Modeli

Stereo sayısal yükseklik modeli Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından, 2013 yılında, stereo hava fotoğraflarının otomatik eşleştirilmesi ile üretilmiş, arazi topoğrafyasındaki tüm detayları kapsayan, 5m yersel çözünürlüğe sahip ve düşeyde $\pm 3m$ hassasiyete sahip yükseklik verileridir. Veriler UTM-WGS84 koordinat sistemi ve datumuna sahiptir (URL-4).

Veriler için gerekli hava fotoğrafları güncellendikçe, yükseklik verileri de güncellenmektedir. Veriler HGM tarafından ticari olarak satışa sunulmuştur. Bunun yanında eğitim ve araştırma amaçlı çalışmalar için indirimli olarak temin edilebilmektedir.

4.4 Arazi Çalışmaları

4.4.1 Yaz dönemi arazi çalışması

Çalışmadan elde edilen SYM verilerinin doğruluklarının kontrol edilebilmesi amacı ile görüntü çekim tarihi ile yaklaşık olarak eş zamanlı olacak şekilde arazi çalışmaları yapılmıştır.

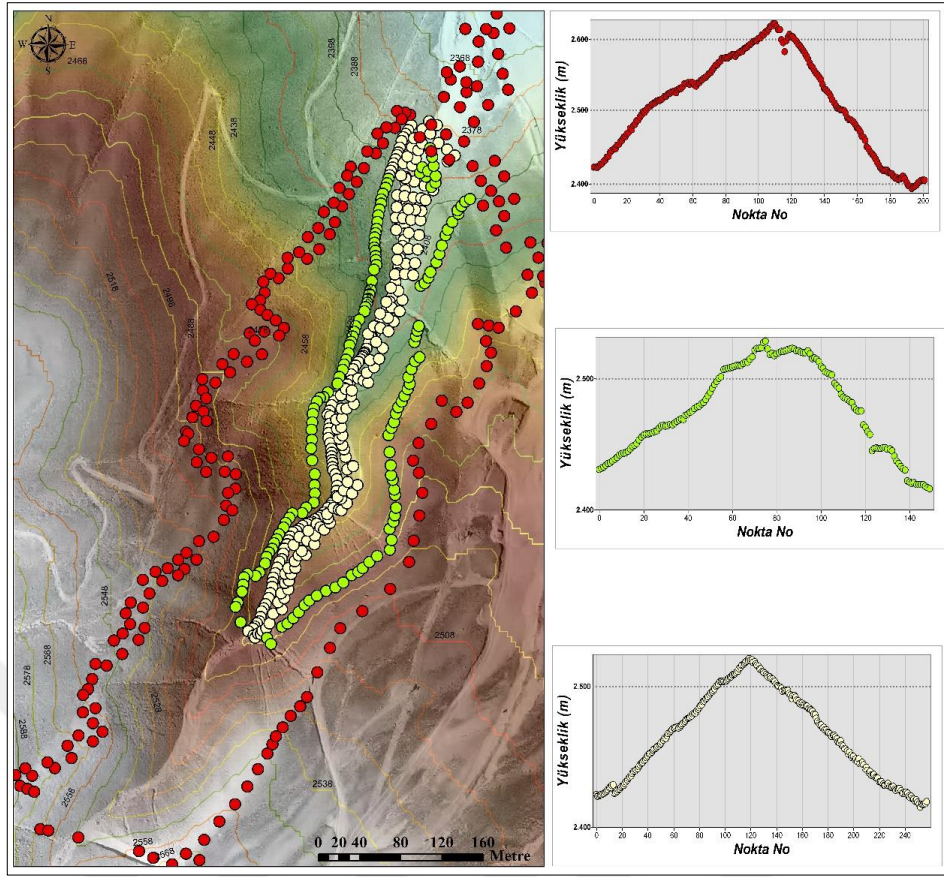
Arazi çalışmaları CORS-TR (Continuously Operating Reference Stations-TR) sistemini kullanan GPS/GNSS alıcıları yardımı ile yapılmıştır. CORS-TR projesi, 2006 yılında, İstanbul Kültür Üniversitesi (İKÜ), Harita Genel Müdürlüğü (HGM) ve Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) ortaklığı ile TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu)'a sunulmuş ve hayata geçirilmiştir. Bu proje sayesinde başta ülke savunması ve kalkınması amacı ile coğrafi bilgilerin üretilmesi için hassas konum verilerinin CORS-TR yöntemi ile daha hızlı ve ekonomik bir şekilde toplanması sağlanmıştır. TKGM ve HGM'ye ait 2 kontrol merkezi, yurtiçinde 146 sabit GNSS istasyonu ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'nde 4 istasyon ile hizmet vermektedir. Sistem kullanıcıları Ağ-RTK (Ağ-Gerçek Zamanlı Kinematik) yöntemi ile 1-13 cm aralığında doğruluklar ile ölçmeler

yapabilmektedirler (Tiryakioğlu, 2010; URL-5). Şekil 4.3'te yapılan arazi çalışmasından kesitler verilmiştir.



Şekil 4.3. Yaz dönemi arazi çalışması fotoğrafları.

Arazi çalışmalarında üretilen SYM'lerin test edilmesi amacı ile 610 adet noktanın 3 boyutlu koordinatları elde edilmiştir. Şekil 4.4'te arazi çalışmasından elde edilen noktalar ve bu noktaların yükseklik grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Yaz dönemi arazi çalışması noktaları ve yükseklik grafikleri (Kırmızı: şev üst, Yeşil: şev orta, Beyaz: şev alt) .

4.4.2 Kış dönemi arazi çalışması

Kar derinliklerinin belirlenmesi adına kış mevsimine ait görüntü alım tarihine eş zamanlı olacak şekilde arazi çalışmaları yapılmıştır. Arazi çalışmaları aşamasında, çelik şerit metreler ve kar yüzeyinden dip noktasına kadar ulaşılabilmesi için jalonlar kullanılmıştır. Çalışmalarda belirlenen noktalardan kar yükseklikleri manuel yöntemler ile toplanmış ve nokta koordinatları bir GPS/GNSS alıcısı yardımı ile kaydedilmiştir. Noktalar arazi yüzeyine homojen dağılacak şekilde belirlenmiş ve kar derinlikleri toplanmıştır. Arazi çalışmaları esnasında kar durumu, arazi eğimi ve ulaşım güçlüğü gibi bazı problemler ile karşılaşmıştır. Bu problemlere rağmen arazi üzerinde ulaşılacak noktalardan veri elde edilmeye çalışılmıştır. Yaklaşık 100 adet nokta bilgisi toplanmasına rağmen, arazi durumundan kaynaklı problemler nedeniyle ölçmelerde oluşabilecek deformasyonların en aza indiği ve kesin olarak yükseklikleri saptanabilen 20 adet nokta bu çalışma için kontrol noktaları olarak seçilmiştir. Şekil 4.5'te arazi çalışmalarından görüntüler ve Şekil 4.6'da kış dönemi arazi çalışması

noktalarının haritası verilmiştir. Çizelge 4.5’de noktalara ait kar yüksekliği bilgileri ve konumları verilmiştir.



Şekil 4.5. Kış dönemi arazi çalışması fotoğrafları.



Şekil 4.6. Kış dönemi arazi noktaları gösterim haritası.

Çizelge 4.5. Arazi nokta bilgileri ve ölçülen kar derinlikleri.

No	Nokta Adı	Enlem (°)	Boylam (°)	Yükseklik (m)	Ölçülen Kar Derinliği (cm)
1	K1	38.546211	35.502294	2404.72	80
2	K2	38.546352	35.501989	2403.78	110
3	K3	38.545974	35.502213	2409.02	130
4	K4	38.545663	35.501996	2415.75	112
5	K5	38.545219	35.501635	2425.17	60
6	K6	38.545228	35.501482	2428.61	107
7	K8	38.545032	35.501624	2428.40	63
8	K9	38.545026	35.501443	2432.70	135
9	K10	38.545003	35.501741	2429.48	115
10	K12	38.544773	35.501776	2434.84	100
11	K14	38.544828	35.501422	2437.34	150
12	K15	38.544505	35.501618	2439.33	145
13	K17	38.544510	35.501502	2441.75	150
14	K18	38.544223	35.501506	2445.42	150
15	K21	38.543785	35.501380	2456.79	89
16	K22	38.543890	35.501104	2458.80	107
17	K23	38.543127	35.500687	2474.06	150
18	K30	38.544815	35.501283	2442.91	106
19	K31	38.544777	35.501235	2445.56	130
20	K32	38.544724	35.501162	2449.51	105

5. INSAR TEKNIĞİ İLE SYM ÜRETİMİNDE FARKLI HARİCİ SYM'LERİN DOĞRULUĞA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Radar görüntüleri kullanılarak SYM üretimi iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; streoskopik metot ve inteferometrik metottur (Gelautz vd., 2003). Inteferometrik SAR verileri ile SYM üretimi, radar interferometri tekniğinin önemli bir uygulaması haline gelmiştir. Geleneksel SYM üretim yöntemlerine karşı bu tekniğin en önemli farkı, gece-gündüz ve tüm hava koşullarında veri elde edilebilmesidir (Bhardwaj vd., 2019; Eineder, 2003).

SYM üretiminde baz uzunluğu ve görüntü kalitesi gibi faktörler SYM doğruluğunu etkileyebilmektedir. InSAR tekniği ile SYM üretiminde temel hata unsurları, faz genişlemeleri ve mutlak düşey datum hataları olarak sıralanabilir. Birçok araştırmacı bu hatalar karşısında harici SYM verilerinin kullanılmasının, çözünürlükleri düşük olsa bile, doğruluğa pozitif bir etki yapacağını ortaya koymuştur (Chaubey vd., 2016; Chunxia vd., 2005; Poidomani vd., 2000; Smith 2002).

Tezin bu bölümünde, TerraSAR-X uydu görüntülerinden interferometrik yöntemler ile SYM üretimi için SRTM (Shuttle Radar Topography Misson), ALOS World 3D, TanDEM-X WorldDEM ve fotogrametrik yöntemler ile elde edilmiş SYM'ler kullanılmıştır. Ayrıca uydu geçişi ile yaklaşık eş zamanlı olacak şekilde arazi ölçmeleri yapılmış ve jeodezik yöntemleri ile nokta yükseklik bilgileri elde edilmiştir. Bölüm sonunda üretilen SYM'ler ile arazi ölçmelerinden elde edilen nokta yükseklik verileri karşılaştırılmış ve istatistiksel analizler yapılmıştır. Bölümde temel uydu verisi olarak Çizelge 4.3'te gösterilen 12.08.2018 ve 23.08.2018 tarihli yaz ayları verileri kullanılmıştır.

5.1 InSAR Tekniği İle Sayısal Yüksekli Modeli Üretimi

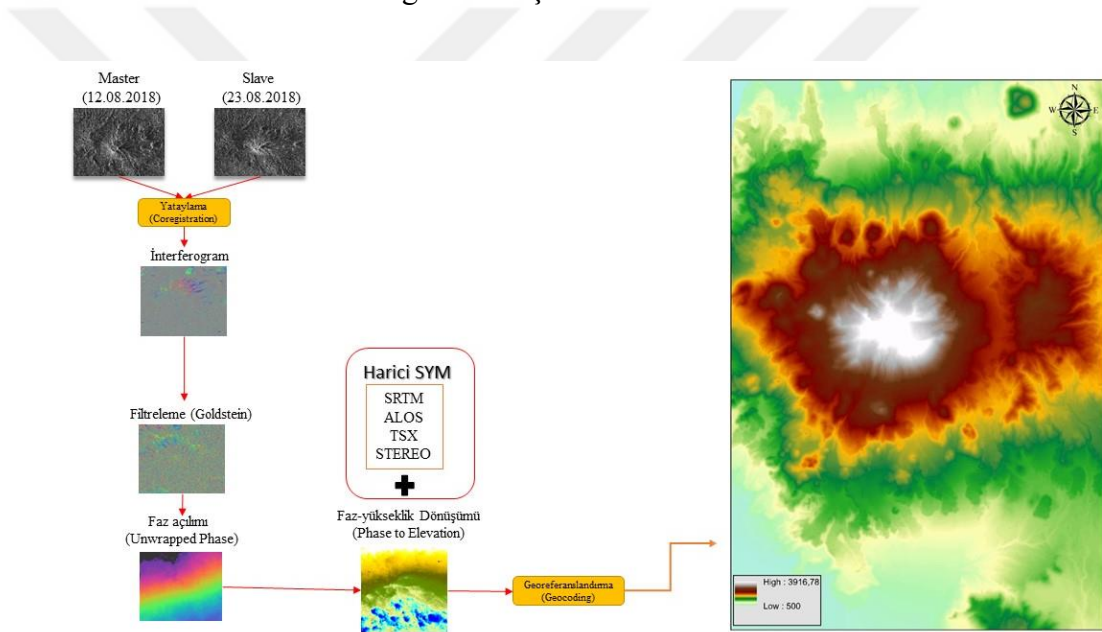
Radar interferometri tekniği ile SYM üretimi temelde, aynı bölgenin farklı zamanlarda algılanan iki görüntüsünden birinin ana (master) diğerinin yardımcı (slave) görüntü olarak kullanılıp üst üste bindirilmesi sürecine dayanmaktadır (Kyaruzi, 2005).

InSAR çiftlerinden bir SYM oluşturmak için, görüntü kaydı, interferogram oluşturma, filtreleme, faz açılımı, faz yükseklik dönüşümü ve geometrik düzletme aşamalarının uygulanması gerekmektedir (Crosetto ve Crippa, 2000).

Harici SYM'ler, interferometrik SYM üretimi sırasında topoğrafik bir faz olarak kullanılmaktadır. Bu topoğrafik faz interferogramdan çıkarılarak gerçek yüzeye ulaşılmış olur. Bu durum, faz açılımını da kolaylaştırmaktadır. Harici SYM bu işlemten sonra tekrar ilave edilerek nihai SYM üretilmiş olur (Chunxia vd., 2005).

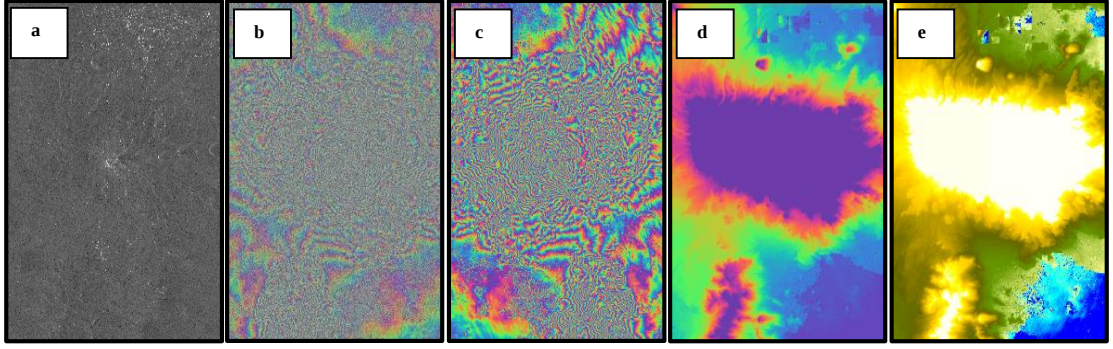
5.1.1 Görüntü işleme adımları

Tezin bu bölümünde, çalışma bölgesine 11 gün zamansal baz uzunluğuna sahip (12.08.2018-23.08.2018) bir InSAR çifti kullanılmıştır. Görüntülere sırası ile Bölüm 2.5 ve içeriğinde açıklanan işlemler, Avrupa Uzay Ajansı'nın ücretsiz olarak sağladığı SNAP 6.0 (Sentinel Application Platform) yazılımı aracılığı ile uygulanmıştır. Şekil 5.1'de SYM üretimi modeli gösterilmiştir.



Şekil 5.1. SYM üretimi akış şeması.

Bu bölümde 4 adet harici SYM kullanılarak InSAR tekniği ile üretilen SYM doğruluklarının artırılması amaçlanmıştır. Harici olarak kullanılan SYM'ler, görüntü işleme adımına topoğrafik faz olarak eklenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 5.2'de görüntü işleme adımlarının görselleri verilmiştir.



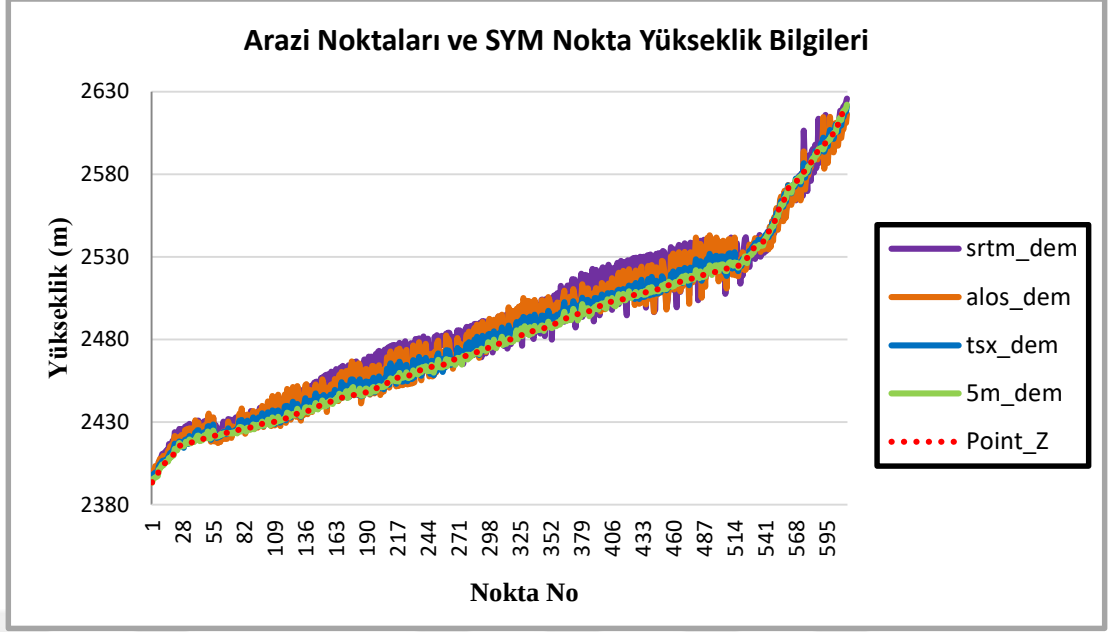
Şekil 5.2. a) Kaynaştırılmış görüntü b) İnterferogram c) Filtrelenmiş interferogram d) Açılmış faz e) Faz bilgisinden üretiliş georeferanssız yükseklik haritası.

Üretilen SYM'ler geometrik olarak düzeltilmemiş halde bulunduklarından dolayı son işlem adımı olarak geometrik düzeltme işlemi uygulanmıştır. Bu adımda amaç, menzil, azimut ve yükseklik bilgilerinin jeodezik referans sistemine dönüştürülmesidir (Hanssen, 2001). Bu sayede bütün SYM'ler aynı koordinat ve referans sistemine getirilerek analiz edilebilir hale getirilmiştir.

5.2 Yükseklik Karşılaştırmaları ve İstatistik Analizleri

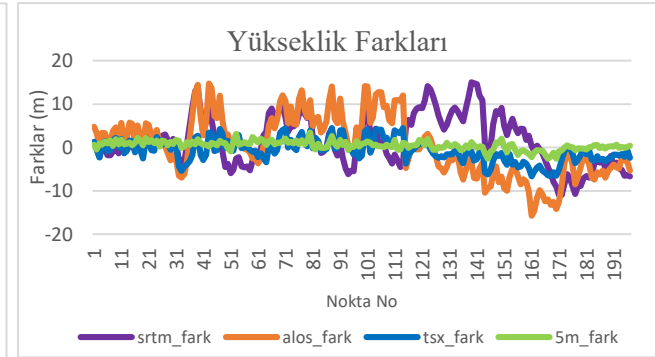
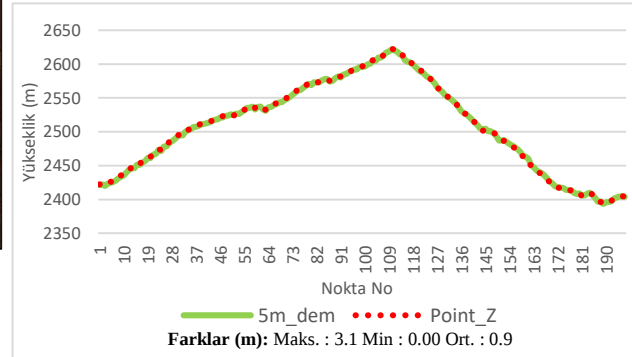
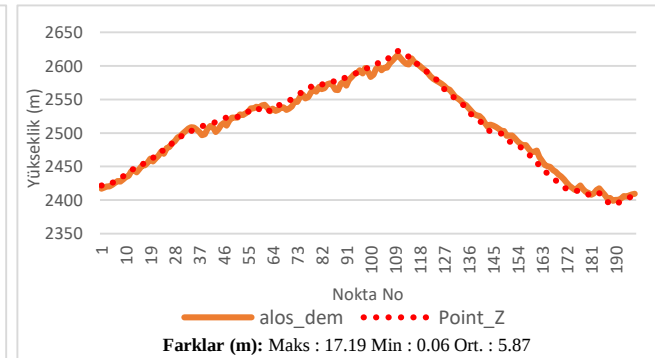
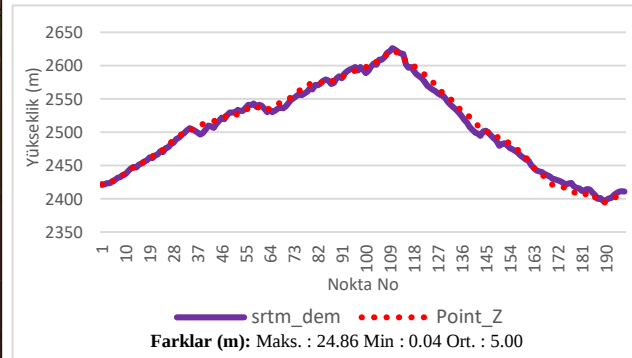
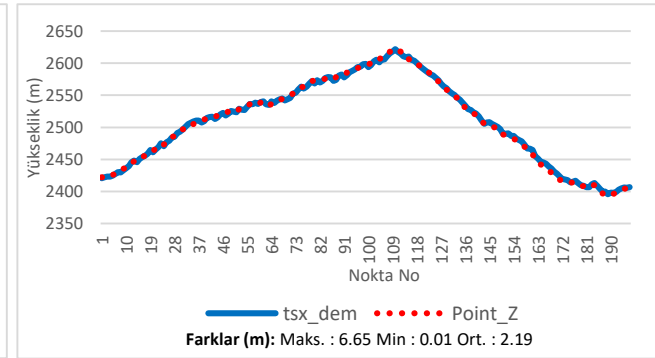
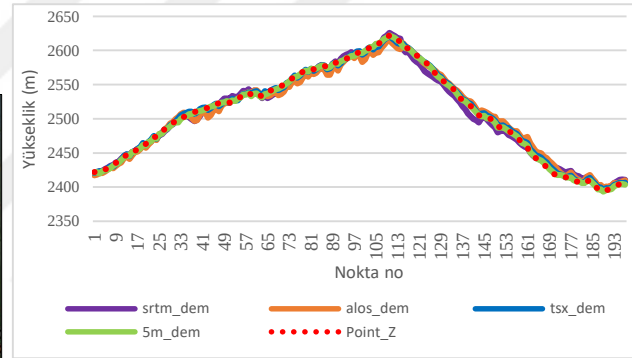
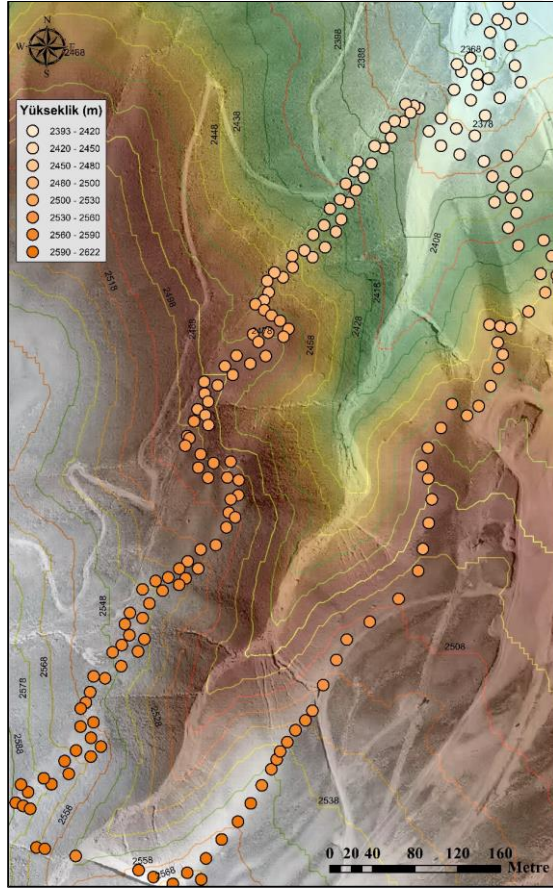
5.2.1 Yükseklik karşılaştırmaları

5. bölümde üretilen SYM'ler üzerinden arazi çalışmalarından elde edilen 610 adet nokta yükseklik bilgileri çıkarılmıştır. Bu sayede SYM'ler ile arazi çalışmaları sonucunda elde edilen yükseklik bilgileri karşılaştırılarak üretilen SYM'lerdeki doğruluklar incelenmiştir. Arazi çalışmalarından elde edilen yükseklik bilgileri (Point_Z) ve SYM'lerden elde edilen yüksekliklerinin toplu grafiği Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Burada Çizelge 4.4'te belirtilen tanımlamalar kullanılmıştır.

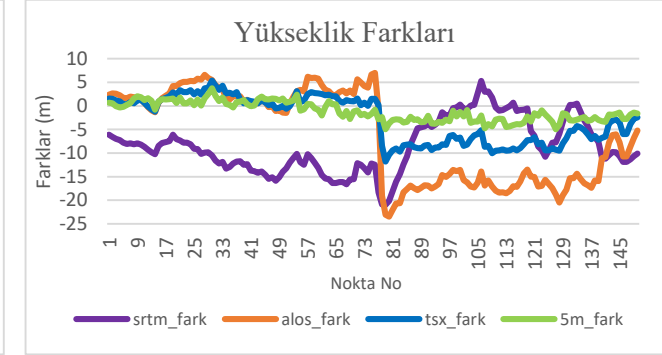
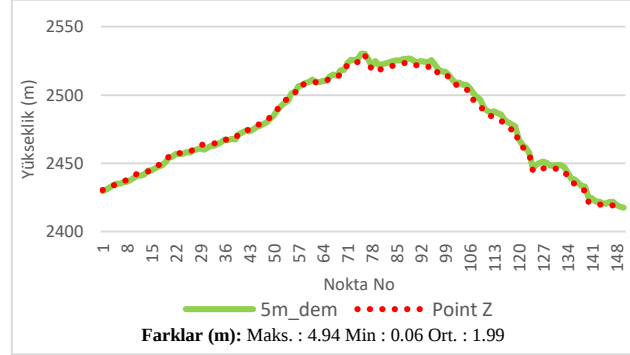
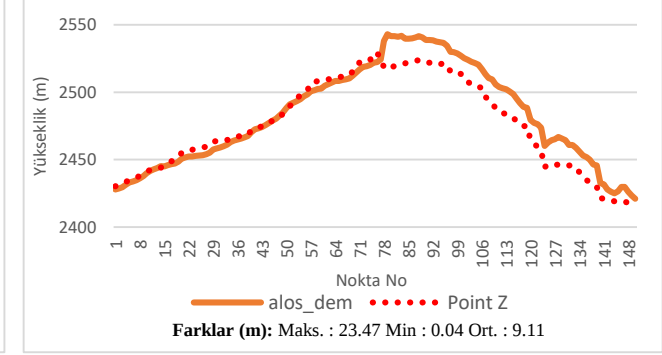
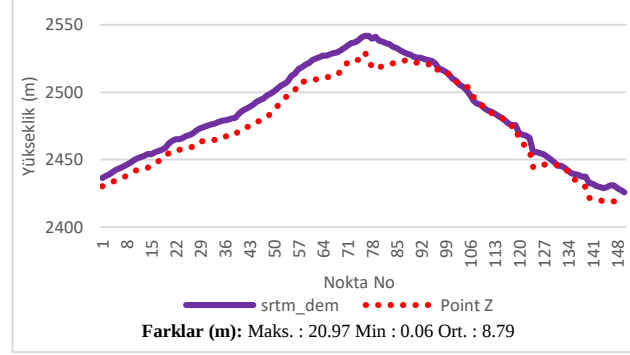
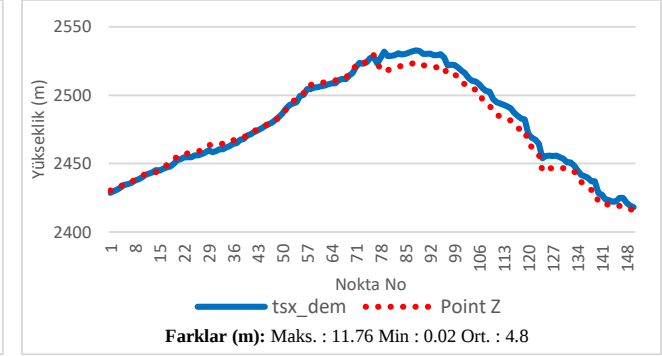
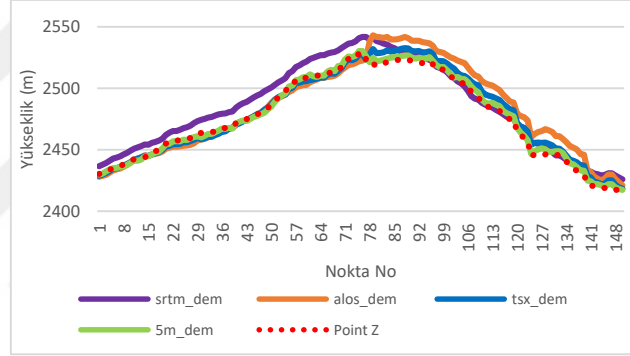
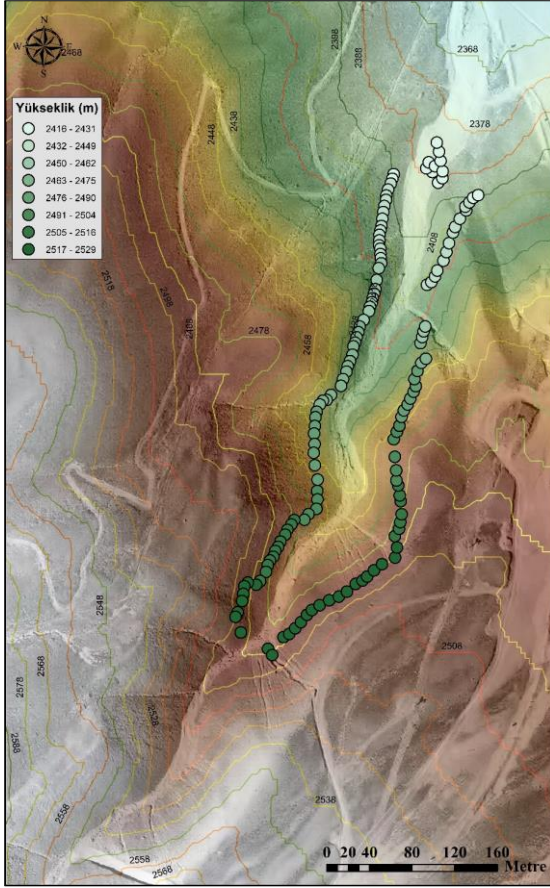


Şekil 5.3. Arazi çalışmasından ve SYM'lerden elde edilen nokta yükseklik bilgileri.

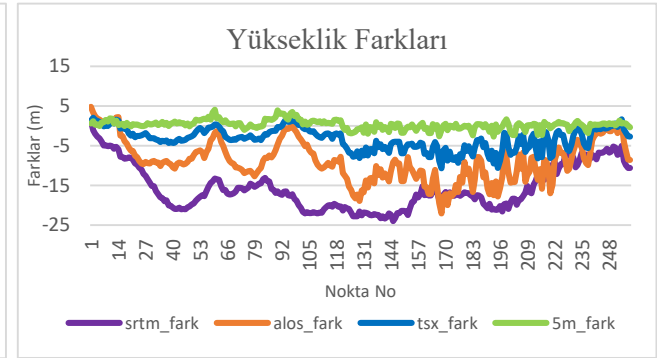
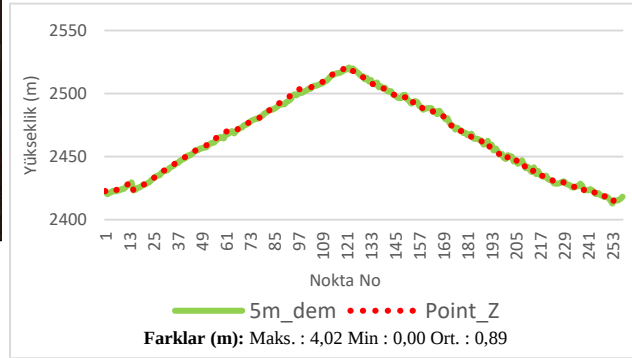
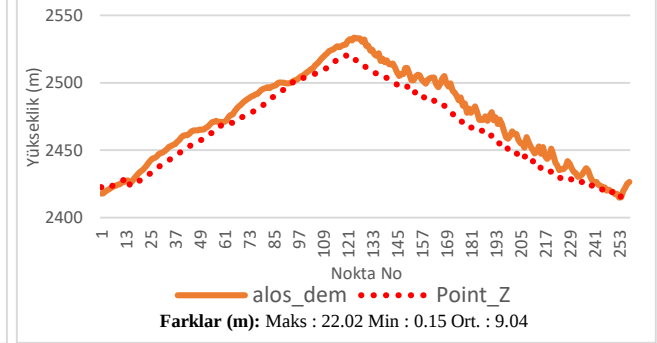
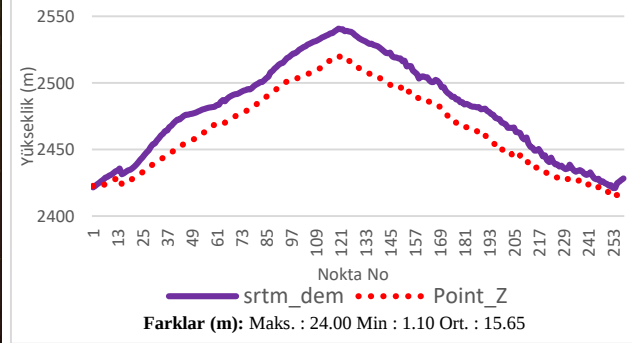
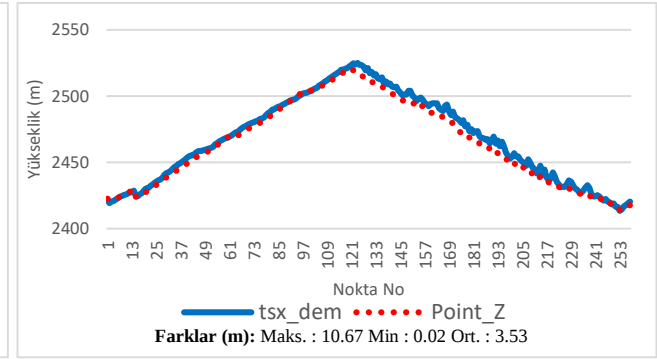
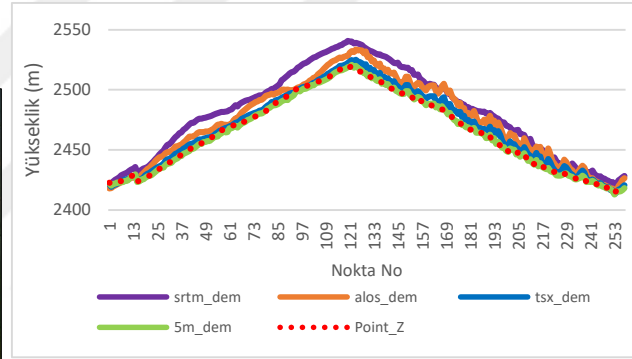
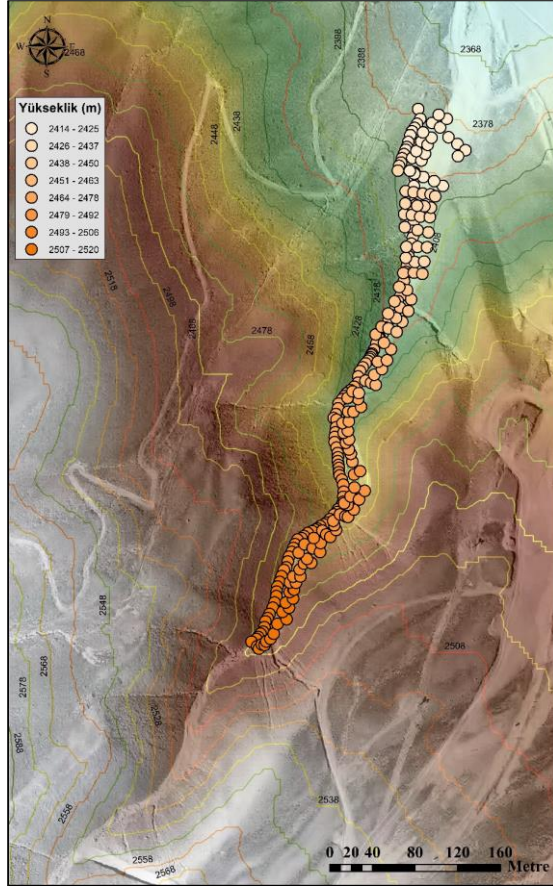
Arazi özelliklerinin sonuçlar üzerindeki etkilerinin daha iyi görülebilmesi için arazi çalışması noktaları dikkate alınarak, alan üç bölgeye ayrılmıştır. Bunlar bir çanak şeklinde olan arazinin üst bölgesini kapsayan şev üst, orta bölgesini kapsayan şev orta ve alt bölgesin kapsayan şev alt olarak isimlendirilmiştir. Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da bu bölgelere ait karşılaştırmalar ve grafikler verilmiştir.



Şekil 5.4 Şev üst arazi noktaları ve grafikleri.



Şekil 5.5. Şev orta arazi noktaları ve grafikleri.



Şekil 5.6. Şev alt arazi noktaları ve grafikleri.

5.2.2 İstatistik analizleri

Çalışmada, nokta yüksekliklerinin karşılaştırılması için bazı istatistiksel analizler kullanılmıştır. Arazi çalışmalarından elde edilen veriler ile SYM'lerden üretilen veriler karşılaştırılmış ve SYM'lerden elde edilen verilerin standart sapmaları (SS), karesel ortalama hataları (KOH) ve korelasyon katsayıları (KK) hesaplanmıştır. Hesaplamalar için kullanılan formüller aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir. Ayrıntılı bilgi Güllal vd. (2011) ve Zhang vd. (2019)'da bulunabilir.

$$\text{Ortalama Hata (OH)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_i \quad (5.1)$$

$$\text{Karesel Ortalama Hata (KOH)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta h_i^2} \quad (5.2)$$

$$\text{Standart Sapma (SS)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta h_i - OH)^2} \quad (5.3)$$

$$\text{Korelasyon Katsayısı (KK)} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5.4)$$

Yukarıdaki formüllerde Δh_i birinci ve ikinci ölçü arasındaki farkı, N örnek uzayı $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ ölçülerin ortalamasını temsil etmektedir. Çizelge 5.1'de verilere ait standart sapma, karesel ortalama hata ve korelasyon katsayısı değerleri verilmiştir. Çalışmada elde edilen verilere otokorelasyon işlemi de ayrıca uygulanmıştır. Otokorelasyon, bir zaman serisi içerisindeki değişkeninin gecikmeli değerleri arasındaki değişimin ölçüsüdür (Erdoğan, 2006).

Çizelge 5.1. Verilere ait istatistiki analiz değerleri.

Harici SYM	SS (m)	KOH (m)	KK
srtm_dem	9.30	12.45	0.9834
alos_dem	8.16	9.65	0.9873
tsx_dem	3.53	4.16	0.9976
5m_dem	1.52	1.52	0.9995

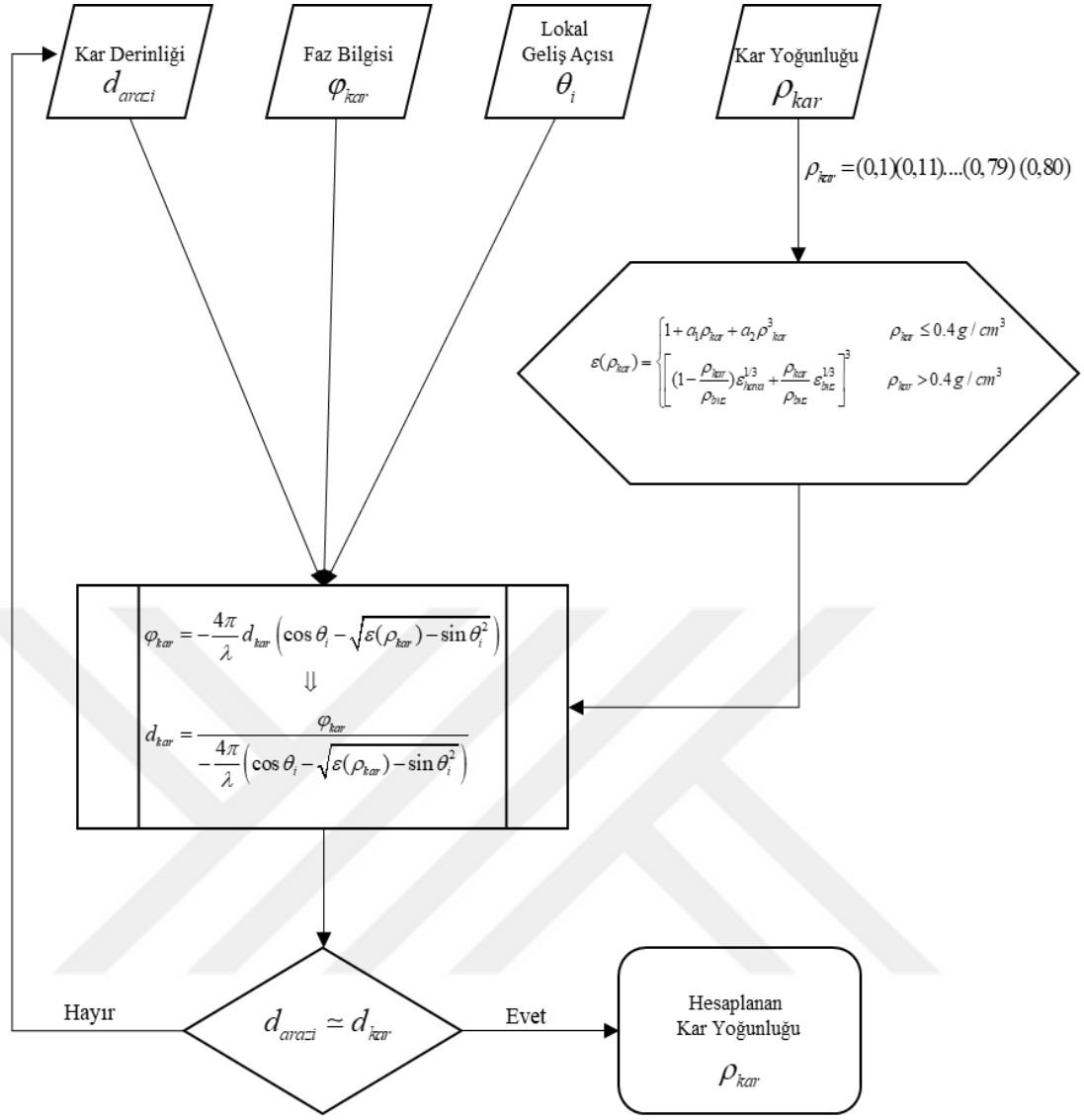
6. InSAR TEKNIĞİ İLE KAR DERİNLİĞİ, KAR HACMİ VE KAR-SU EŞDEĞERİNİN HESAPLANMASI

6.1 Kar Yoğunluğunun Hesaplanması

Literatürde kar yoğunluğu, karın en önemli fiziksel parametresi olarak kabul görmektedir (Judson ve Doesken, 2000; Rees, 2006). Kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğerinin hesaplanması işlemlerinde kullanılan yoğunluk parametresi arazi yüzeyinden örnekler alınarak ölçülebildiği gibi farklı yöntemlerle de elde edilebilir. Kar yoğunluğu ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3'te verilmiştir. Çalışmada üç farklı yöntem kullanılarak arazi ölçmelerinden elde edilen derinliklere göre kar yoğunlukları hesaplanmıştır. Yöntemlerden elde edilen kar yoğunlukları her bir yöntem için ortalama olarak kullanılıp tüm çalışma alanına uygulanmıştır.

6.1.1 Optimizasyon yöntemi ile kar yoğunluklarının hesaplanması

Görüntü alım tarihi ile eş zamanlı olarak yapılan arazi çalışmalarında belirlenen noktalardan kar derinlikleri manuel yöntemler ile ölçülmüştür. EŞitlik 3.5 ve 3.7'de verilen kar derinliği denklemi kullanılarak arazi ölçmelerinden elde edilen derinlikler karşılığında, noktalar için optimum kar yoğunluğu değerlerini hesaplayan bir dizi kod üretilmiştir. Kodlar MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Hesaplama, görüntülerden elde edilen faz bilgisi, lokal geliş açısı ve araziden elde edilen kar derinlikleri kullanılmıştır. Şekil 6.1'de optimizasyon akış şeması ve Çizelge 6.1'de noktalara ait faz bilgisi, lokal geliş açısı ve optimizasyon yöntemi ile elde edilen kar yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 6.1. Optimizasyon yöntemi akış şeması.

Çizelge 6.1. Optimizasyon yöntemi ile elde edilen nokta yoğunlukları.

Nokta Adı	Kar Derinliği (cm)	Lokal Geliş Açısı (rad)	Faz	Yoğunluk (g/cm ³)
K1	80	30.59	121.79	0.41
K2	110	42.57	117.06	0.26
K3	130	34.21	125.58	0.26
K4	112	33.92	125.70	0.30
K5	60	40.94	125.57	0.52
K6	107	12.06	130.28	0.37
K8	63	39.35	126.25	0.51
K9	135	15.33	130.80	0.29
K10	115	61.86	128.09	0.20
K12	100	59.51	133.61	0.26
K14	150	17.32	129.31	0.26
K15	145	42.55	132.27	0.23
K17	150	24.84	129.85	0.25
K18	150	43.24	129.46	0.21
K21	89	77.00	130.95	0.18
K22	107	34.39	130.32	0.33
K23	150	25.37	123.62	0.24
K30	106	4.45	130.08	0.37
K31	130	5.48	128.45	0.31
K32	105	11.40	124.45	0.36
			Ortalama	0.31

6.1.2 ISO-4355 Standartları ile kar yoğunluğunun hesaplanması

ISO (the International Organization for Standardization-Uluslararası Standart Organizasyonu), uluslararası çapta kalite standartları oluşturmak adına 1947 yılında kurulmuştur. Kuruluş toplumsal yaşamın hemen hemen her alanında gerekli standartları oluşturmak adına farklı ülkeler ile işbirliği ve anlaşma içerisinde (URL-6).

ISO, 4355 numaralı “Çatılardaki kar yüklerinin belirlenmesi” standardında Rusya tarafından ortaya çıkarılan bir formülü kar yoğunluklarının belirlenmesi adına kullanıma sunmuştur. Bu formül, kar yağışı veya ölçüm esnasında ortamdaki hava sıcaklığı, kar derinliği ve rüzgâr hızının bir fonksiyonudur. Eşitlik 6.1’de bu standart içerisinde bulunan kar yoğunluğu hesaplama denklemi verilmiştir.

$$\rho_{kar} = (90 + 130\sqrt{d}) * (1,5 + 0,17\sqrt[3]{T}) * (1 + 0,1\sqrt{v}) \quad (6.1)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikte ρ_{kar} kar yoğunluğunu (kg/m^3), d kar derinliğini (m), T ortalama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve v ortalama rüzgar hızını (m/s) belirtmektedir. Formülde kullanılan kar derinliği verileri arazi ölçmelerinden, rüzgar ve sıcaklık verileri ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından eğitim amaçlı ücretsiz olarak kullanıcılara sunulan Meteorolojik Bilgi Sunum ve Satış Sistemi (MEVBİS) üzerinden elde edilmiştir. Yapılan arazi çalışmalarında ortalama sıcaklık ve rüzgar hızı değişim göstermediğinden (sıcaklık -2.3°C , rüzgar hızı 5.5 m/s) Eşitlik 6.1 aşağıdaki gibi düzenlenmiştir.

$$\rho_{kar} = (90 + 130\sqrt{d}) * 1.57611 \quad (6.2)$$

Çizelge 6.2’de Eşitlik 6.2 kullanılarak elde edilen kar yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 6.2. ISO-4355 standardı ile elde edilen kar yoğunlukları.

Nokta Adı	Kar Derinliği (cm)	ISO-4355 Yoğunluk (g/cm^3)
K1	80	0.33
K2	110	0.36
K3	130	0.38
K4	112	0.36
K5	60	0.30
K6	107	0.35
K8	63	0.30
K9	135	0.38
K10	115	0.36
K12	100	0.35
K14	150	0.39
K15	145	0.39
K17	150	0.39
K18	150	0.39
K21	89	0.34
K22	107	0.35
K23	150	0.39
K30	106	0.35
K31	130	0.38
K32	105	0.35

Ortalama	0.36
----------	------

6.1.3 Kriging yöntemi ile kar yoğunluklarının hesaplanması

Kriging yöntemi, istatistiğin uygulamalı bir dalı olan geoistatistik yöntemlerinden biridir. Kriging yöntemi adını, yöntemi ilk geliştiren D.G Krige isimli bir maden mühendisinden almıştır. Yöntem konumsal bir geoistatistiksel kestirim yöntemi olarak kabul edilmektedir (Yaprak, 2007).

Kriging yöntemi, bilinen en yakın noktalardan elde edilen değerler kullanılarak, diğer noktaların değerlerinin kestirilmesi adına geliştirilmiş bir enterpolasyon yöntemidir. Bu yöntemde, enterpole edilecek noktaların veya değişkenlerin bölgesel bir değişken olduğu kabul edilir. Yöntem, enterpolasyon için kullanılan noktalardan daha fazla etkilenmeyi sağlayan bir ağırlık modeli kullanmaktadır (İnal vd., 2002).

IDW (Invers Distance Weighted) ve Spline enterpolasyon yöntemleri, doğrudan ölçülen değerlere veya kullanılan yüzeyin düzlüğünü belirleyen matematiksel formüllere dayandığı için içerisinde herhangi bir olasılık barındırmayan deterministik yöntemlerdir. Buna karşın kriging gibi geoistatistiksel yöntemler içerisinde otokorelasyon içeren istatistiksel modellere bağlıdır. Bu nedenle geoistatistiksel yöntemler bir tahmin yüzeyi üretmenin yanı sıra tahminlerin doğruluğu hakkında da bir bilgi verir (Oliver, 1990; URL-7).

Kriging yönteminin genel formülü Eşitlik 6.3'te gösterilmiştir;

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (6.3)$$

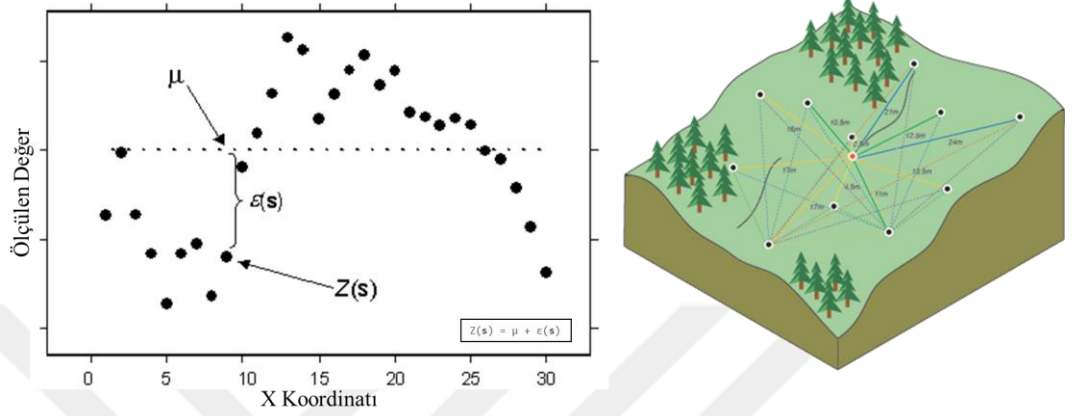
Burada, $Z(s_0)$ s_0 noktasının kestirim değerini, $Z(s_i)$ i 'nci lokasyondaki noktada ölçülen değeri, λ_i i 'nci lokasyondaki noktada ağırlık değeri, N ise ölçülen noktaların sayısını ifade etmektedir.

Kriging yöntemi ile yapılan değerlendirmenin doğruluğu aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Mert, 2005; Yaprak 2007);

- Baz alınan noktaların ölçü kalitesi ve miktarı,

- Baz alınan noktaların enterpole edilen alandaki konumları,
- Baz noktalarının topoğrafyayı temsil edebilme kabiliyeti,
- Baz noktalar ve kestirim noktaları arasındaki mesafe.

Kriging yönteminin grafiksel gösterimi Şekil 6.2’de verilmiştir.

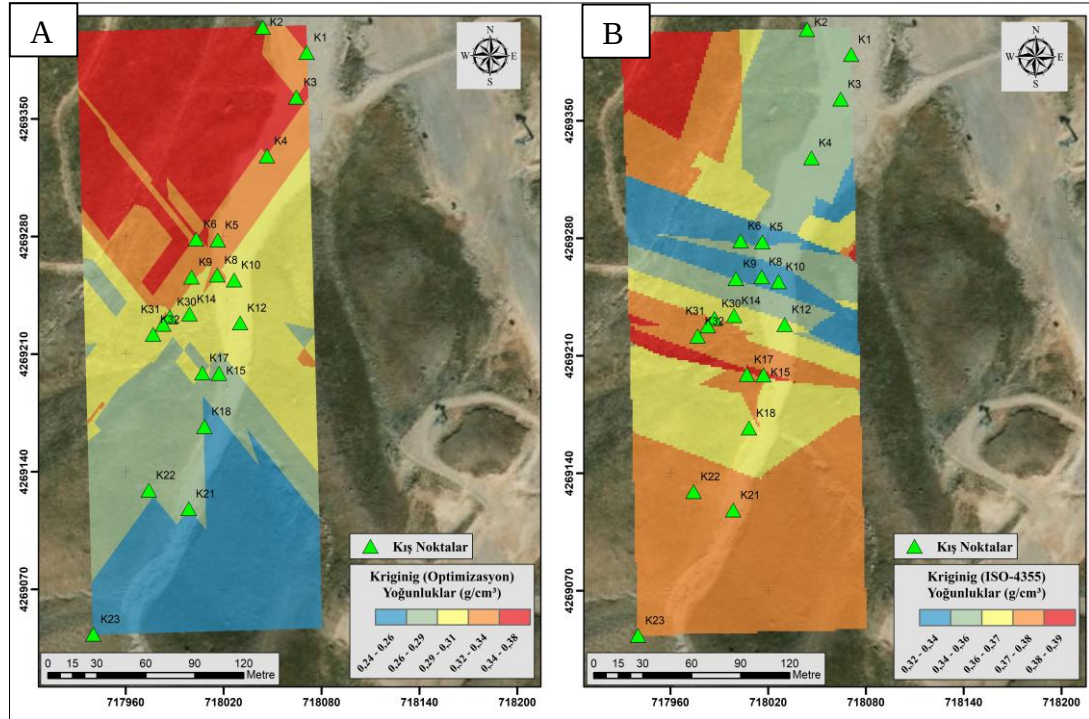


Şekil 6.2. Kriging yöntemi grafiksel ve görsel betimlemesi (URL-7’den Türkçeleştirilerek)

Çalışmanın bu bölümünde, optimizasyon ve ISO-4355 yöntemlerinden elde edilen kar yoğunlukları, kriging yöntemi kullanılarak arazideki nokta bulunmayan alanlar için kestirilmiştir. Yöntem sonucunda baz alınan noktalara ve nokta bulunmayan alanlara kestirim yapılarak yeni yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Çizelge 6.3’te noktaların kriging yöntemi kullanılarak elde edilen yoğunluk değerleri verilmiştir. Şekil 6.3’te ise kriging analizinin tahmin haritaları verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kriging yöntemi ile elde edilen nokta kar yoğunlukları.

Nokta Adı	Yoğunluklar (g/cm ³)	
	Kriging (Optimizasyon)	Kriging (ISO-4355)
K1	0.35	0.35
K2	0.38	0.35
K3	0.35	0.35
K4	0.34	0.35
K5	0.34	0.35
K6	0.34	0.35
K8	0.31	0.34
K9	0.32	0.35
K10	0.31	0.34
K12	0.30	0.36
K14	0.31	0.36
K15	0.29	0.38
K17	0.29	0.37
K18	0.26	0.37
K21	0.26	0.37
K22	0.28	0.37
K23	0.24	0.37
K30	0.31	0.37
K31	0.31	0.37
K32	0.30	0.37
Ortalama	0.31	0.36



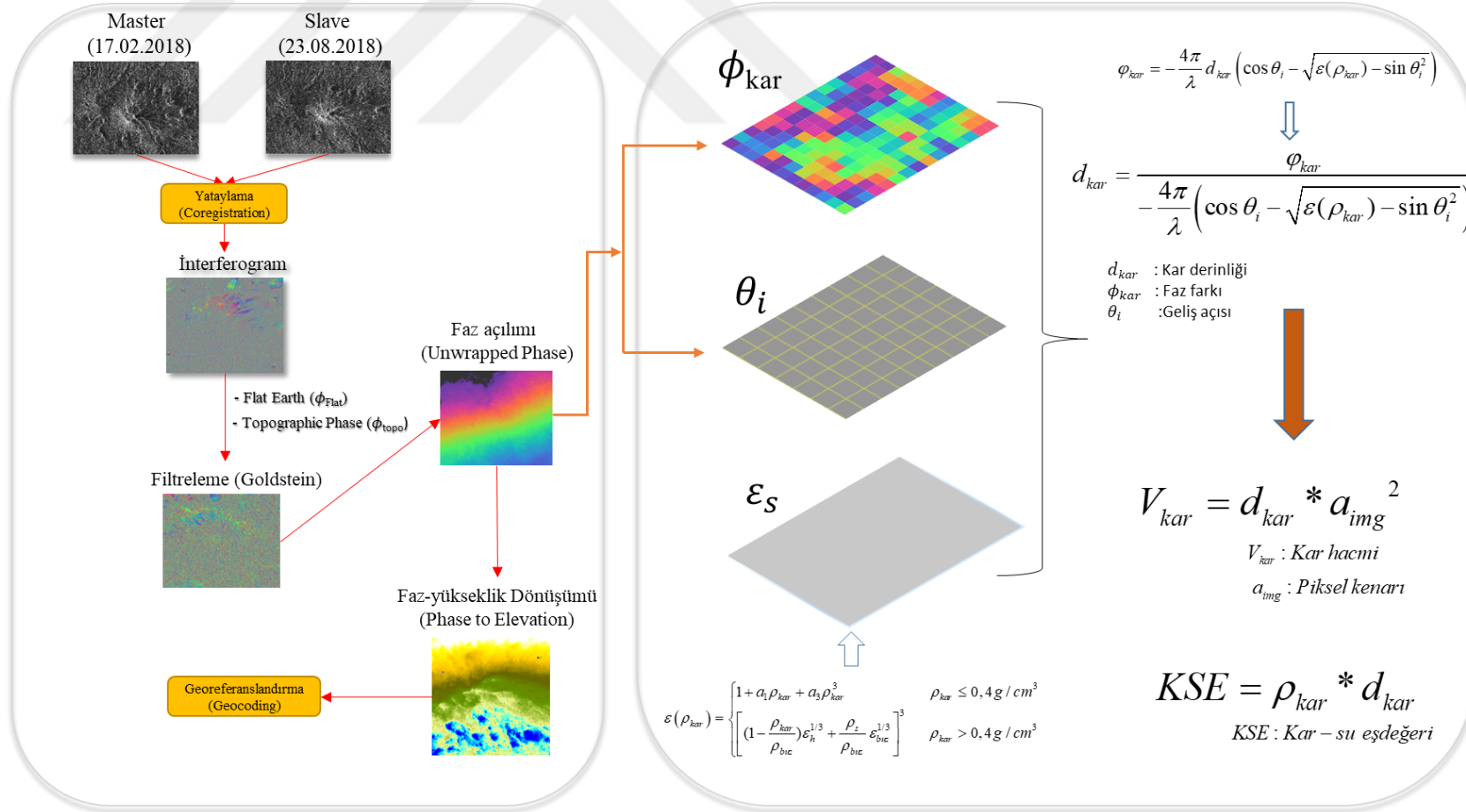
Şekil 6.3. Kriging analizi ile üretilen kar yoğunluğu tahmin haritaları.

6.2 Kar Derinliklerinin Hesaplanması

InSAR tekniği kullanılarak kar derinliklerinin hesaplanması aşamasında ilk etapta yukarıdaki bölümlerde anlatılan yöntemler ile kar yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen bu yoğunluklar ve ortalama yoğunluk değeri ile kar derinliği üretimi çalışmaları yapılmıştır. Literatürde birçok çalışmada kar yoğunlukları alansal çalışmalar için ölçmelerden veya yapılan hesaplamalardan yola çıkarak ortalama değeri olarak kullanılmıştır (Gueriussen vd., 2001; Judson ve Doesken, 2000; Leinss vd., 2014; Li vd., 2016; Liu vd., 2017; Majumdar 2019).

Çalışmada, kar derinlikleri, Eşitlik 3.7’de elde edilen formül kullanılarak ve yukarıdaki bölümlerde açıklanan kar yoğunlukları kullanılarak oluşturulmuştur. Kar derinliğinin üretilmesi adına Şekil 6.4’de gösterilen InSAR kar derinliği üretim modeli üretilmiştir (Gueriussen vd., 2001; Leinss, 2015; Liv d., 2017; Majumdar, 2019; Rott vd., 2003). Kullanılan model ham InSAR çiftlerinden kar derinliği ve buna bağlı olarak kar hacmi ve kar-su eşdeğeri üretim aşamalarını içermektedir.

D-InSAR Kar Derinliği, Kar Hacmi ve Kar-Su Eşdeğeri Üretim Modeli



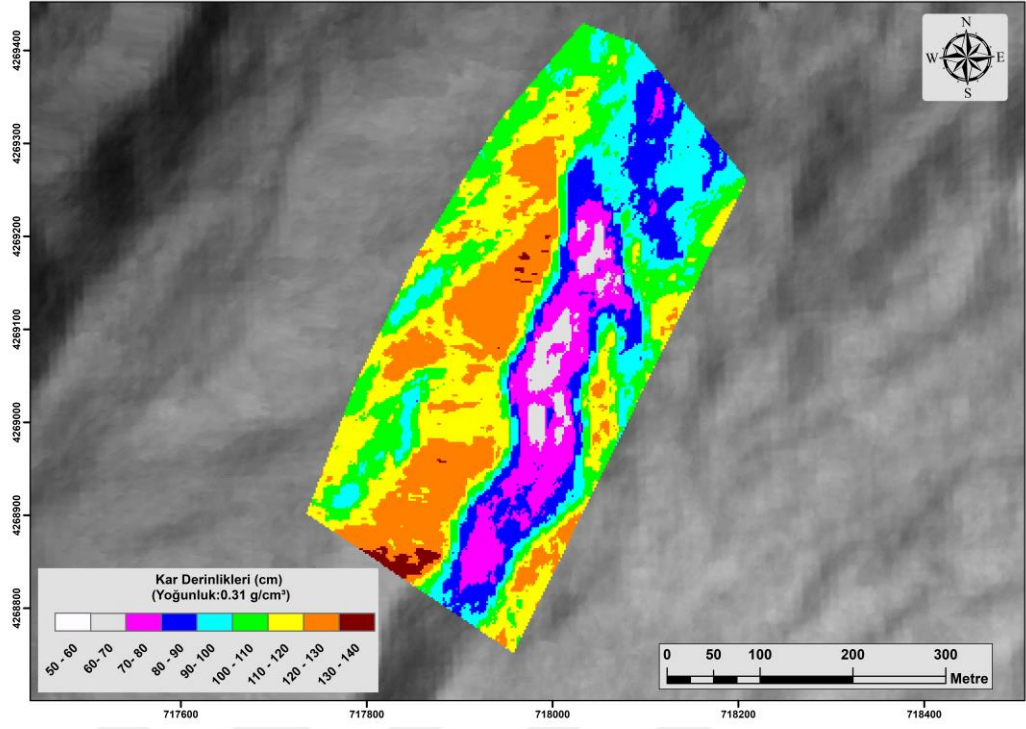
Şekil 6.4. D-InSAR Kar derinliği üretim modeli.

Bu bölümde, farklı yöntemler ile elde edilen kar yoğunlukları kullanılarak kar derinlikleri üretilmiştir. Optimizasyon, ISO ve kriging analizleri kullanılarak elde edilen kar yoğunluklarına bağlı üretilen kar derinlikleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

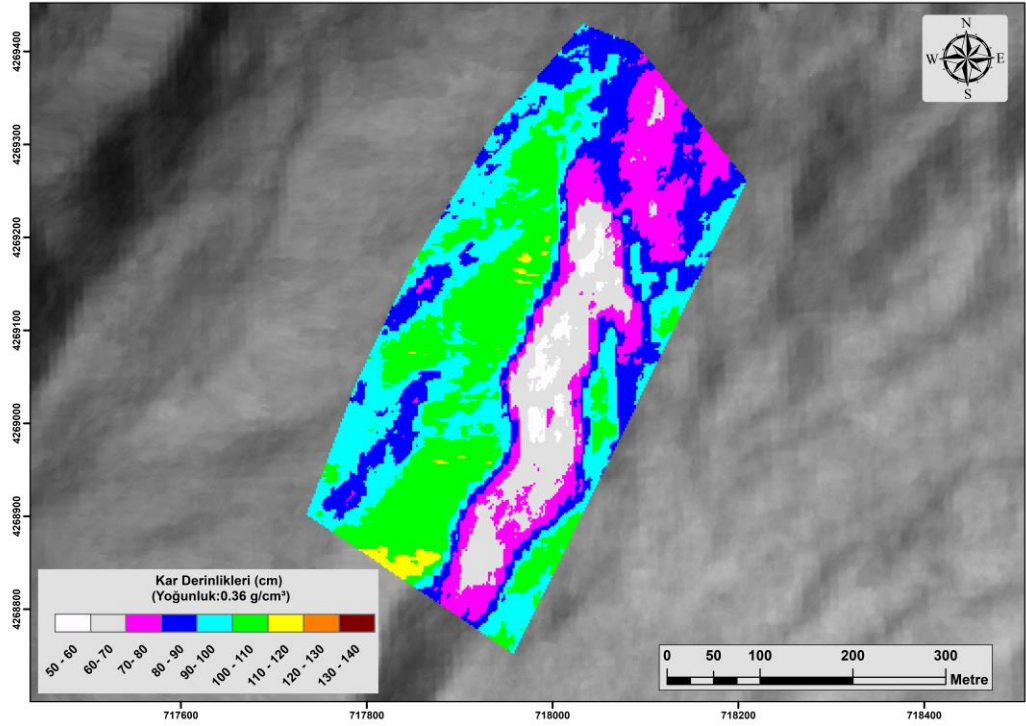
Çizelge 6.4. Farklı yöntemlerle elde edilen kar derinlikleri ve arazi ölçmelerinden elde edilen kar derinlikleri (cm).

Nokta Adı	Ölçülen Derinlik	Optimizasyon	ISO-4355	Kriging (Optimizasyon)	Kriging (ISO-4355)
K1	80	80.93	103.51	94.65	95.55
K2	110	111.49	80.70	76.39	81.32
K3	130	130.61	88.77	94.69	95.97
K4	112	113.12	93.60	99.76	96.14
K5	60	60.48	105.25	93.22	90.93
K6	107	105.85	111.28	116.91	113.84
K8	63	62.87	106.21	102.76	94.17
K9	135	137.13	102.07	122.20	113.14
K10	115	114.98	67.08	76.69	70.86
K12	100	99.03	75.64	86.23	73.07
K14	150	150.81	96.43	126.77	105.39
K15	145	142.26	83.28	114.76	85.31
K17	150	151.34	93.30	131.75	99.96
K18	150	150.91	80.00	123.37	86.18
K21	89	88.24	55.18	67.65	50.91
K22	107	105.67	98.10	127.51	93.24
K23	150	149.71	88.54	149.71	94.44
K30	106	107.26	113.14	132.02	108.27
K31	130	128.59	104.05	127.20	105.15
K32	105	104.45	107.16	126.84	100.28

Farklı yöntemlerle elde edilen kar yoğunlukları ortalama değer kullanılarak çalışma alanının tamamı için uygulanmış ve bu yoğunluklara bağlı olarak kar derinliği haritaları üretilmiştir. Şekil 6.5 ve 6.6'da üretilen kar derinliği haritaları verilmiştir.



Şekil 6.5. 0.31 g/cm³ yoğunluk için üretilen kar derinliği haritası.



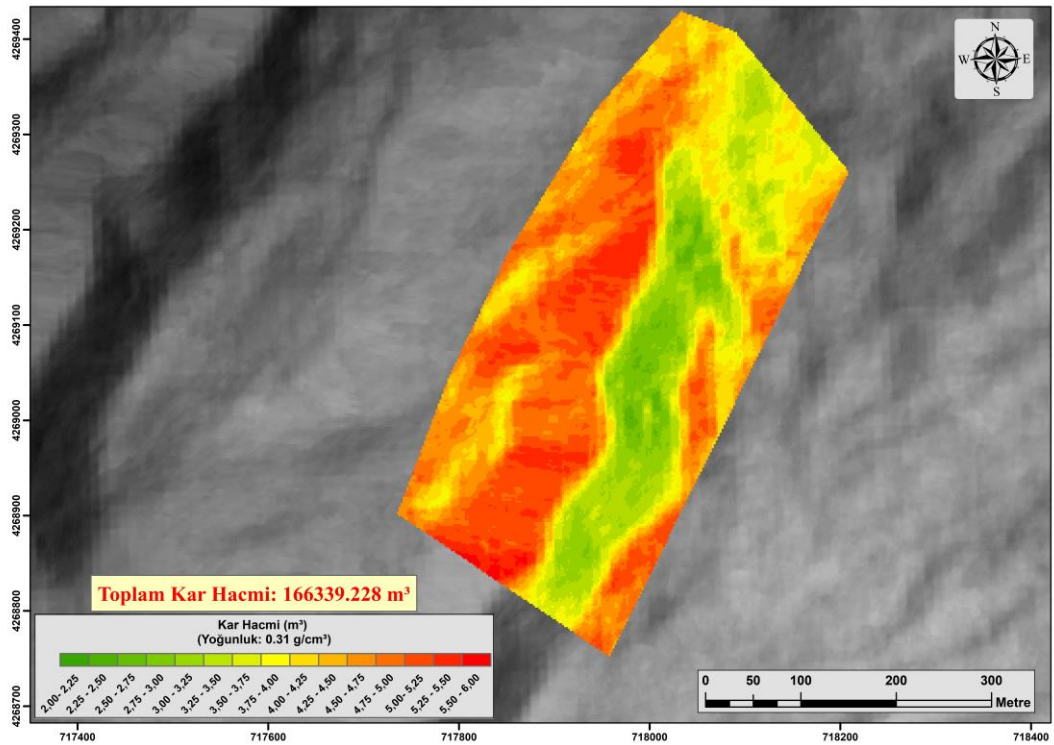
Şekil 6.6. 0.36 g/cm³ yoğunluk için üretilen kar derinliği haritası.

6.3 Kar Hacminin Hesaplanması

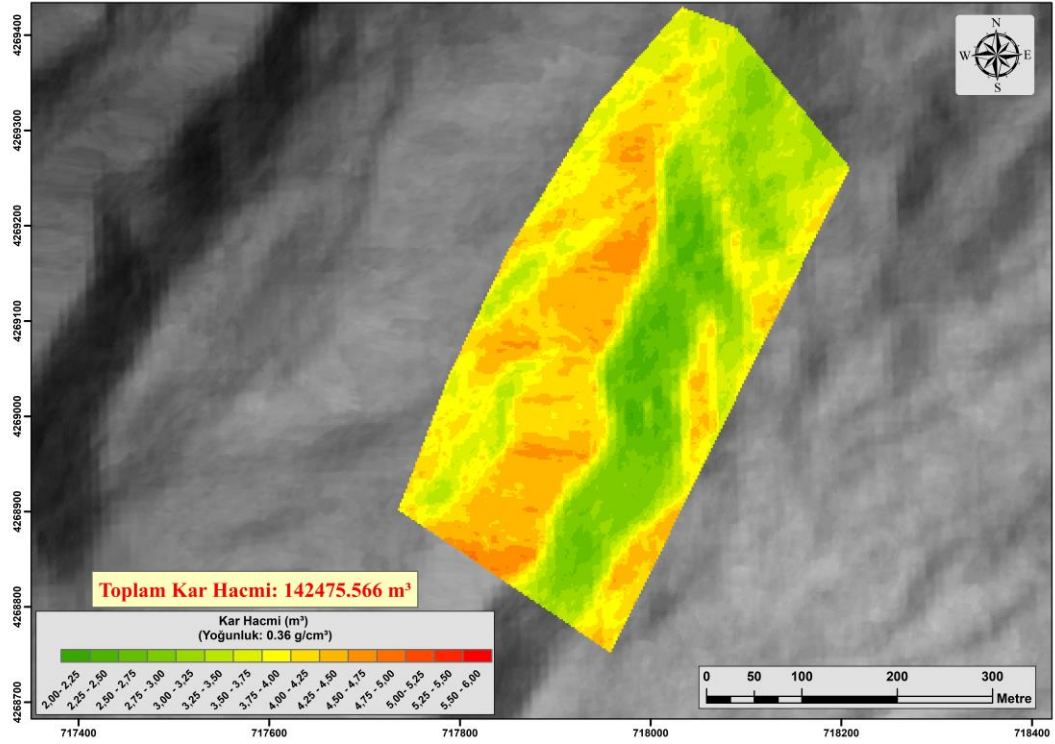
Çalışmanın bu bölümünde yukarıdaki bölümlerde elde edilen kar derinlikleri kullanılarak görüntüler üzerindeki her bir piksel için kar hacimleri hesaplanmıştır. Bu aşamada son ürün olan görüntünün piksel çözünürlüğü kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Mevcut görüntüler ile elde edilen piksel boyutları 2.4*2.04 m şeklindedir. Kare prizmaların hacim hesaplama metodu kullanılarak mevcut piksellerdeki kar hacmi hesaplanmıştır (Eşitlik 6.4).

$$v = a^2 * d_{kar} \quad (6.4)$$

Burada v kar hacmini, a piksel kenarının uzunluğunu ve d_{kar} ise metre cinsinden kar derinliğini göstermektedir. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de iki farklı yoğunlukta derinliklere bağlı üretilen hacim haritaları verilmiştir.



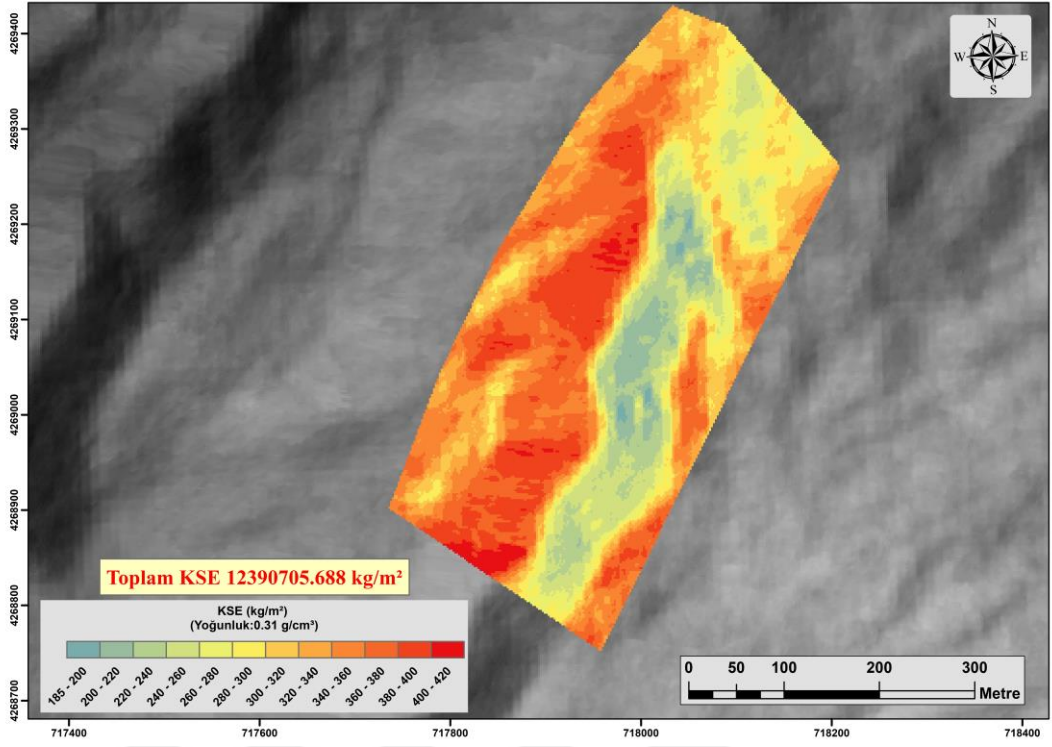
Şekil 6.7. 0.31 g/cm³ yoğunluk için üretilen kar hacmi haritası.



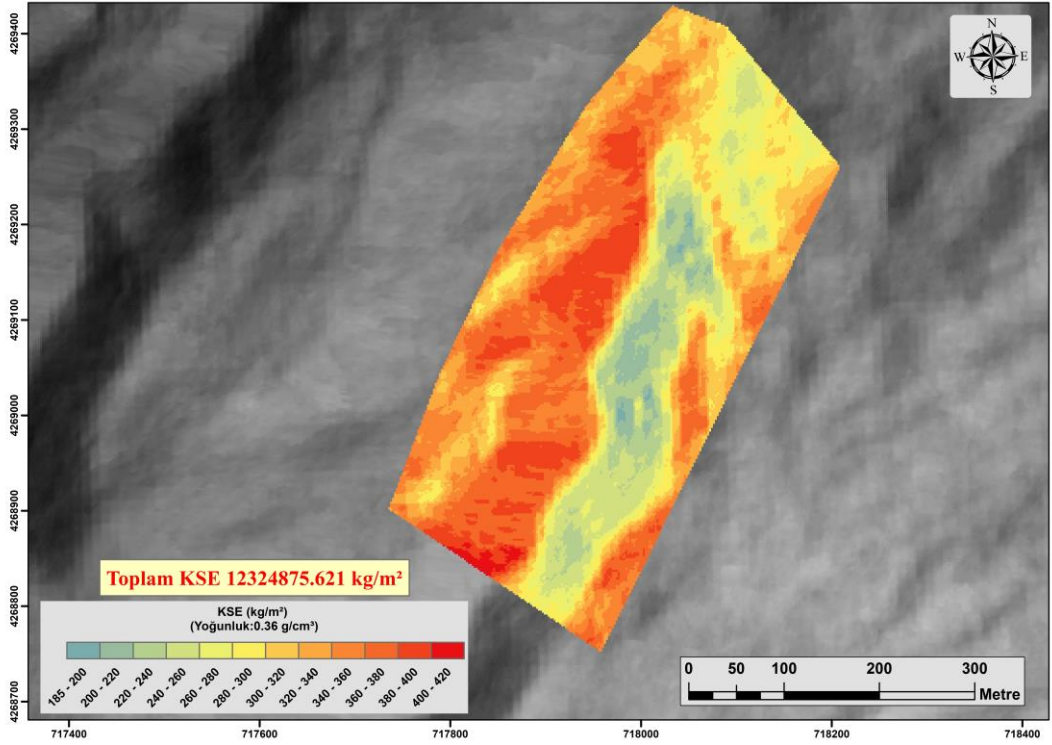
Şekil 6.8. 0.36 g/cm³ yoğunluk için üretilen kar hacmi haritası.

6.4 Kar-Su Eşdeğerinin Hesaplanması

Temelde, yerdeki kar kütlesi olarak adlandırılan Kar-Su Eşdeğeri (KSE) yerdeki karın yoğunluğu ve derinliği ile ilişkilidir (Majumdar, 2019). KSE, yer üzerinde bulunan karın tamamen eridikten sonra ne kadar su ortaya çıkacağını belirten bir parametredir. Eşitlik 3.8’de KSE hesaplamasında kullanılan bağıntı verilmiştir. Çalışmada farklı yoğunluk değerlerinde elde edilen derinlikler kullanılarak KSE hesaplamaları ve haritalamaları yapılmıştır. Şekil 6.9 ve 6.10’da farklı yoğunluk değerleri için üretilen KSE haritaları ve kg/m² cinsinden KSE verileri gösterilmiştir. Üretilen haritalar ve sonuçlarda kar yoğunluğu kg/m³, kar derinliği ise m cinsinden kullanılmıştır.



Şekil 6.9. 0.31 g/cm³ yoğunluk değeri için üretilen KSE haritası.



Şekil 6.10. 0.36 g/cm³ yoğunluk değeri için üretilen KSE haritası.

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

7.1 InSAR Tekniğı İle SYM Üretiminde Farklı Harici SYM'lerin Doğruluğı Etkisinin Araştırılması

Tezin 5. Bölümünde, SRTM, ALOS WORLD 3D, TanDEM-X WorldDEM ve stereo sayısal yükseklik modelleri ve InSAR çifti kullanılarak yeni SYM'ler elde edilmiştir. Üretilen SYM'ler yaz dönemi arazi çalışmalarında elde edilen noktaların yükseklik bilgileri ile karşılaştırılmış ve istatistiki analizlere tabii tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında SYM'ler üzerinde noktaların denk geldiğı piksellerin yükseklik değeri elde edilmiş ve arazide ölçülen noktaların yükseklik değeri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5'deki grafikte arazi çalışmaları ile elde edilen yer kontrol noktaları ve üretilen SYM'ler arasındaki ilişki açıkça görülebilmektedir. Grafikteki veriler daha anlaşılabilir ve açık olması açısından arazi şev üst, orta ve alt bölgeler olarak 3 parçaya ayrılmıştır. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki grafiklerde bu bölgelere ait ayrıntılı bilgilere yer verilmiştir.

Şekil 5.6, şev üst bölgesini temsil etmektedir. Grafiklerde her bir harici SYM verisi için arazi noktaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde, harici SYM verilerinden üretilen yeni SYM'lerin genel olarak arazi çalışmaları verilerine yakınsadığı görülebilmektedir. Grafiklerde her bir nokta için farklar göz önüne alındığında en yüksek nokta yükseklik farkının 24.86 m ile srtm_dem verisinde ve en düşük farkın ise 3.41 m ile 5m_dem verisinde olduğu görülebilmektedir.

Şekil 5.7'deki grafiklerde çalışma alanında şev orta kısmından yapılan arazi ölçmelerinden elde edilen yükseklik değeri karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde bütün SYM'lerde arazi ölçmeleri karşısında istikrarlı denebilecek bir fark söz konusudur. Meydana gelen farklar arazi topoğrafyasından kaynaklı ölçme sırasında meydana gelen yükseklik değişimlerinden olduğu düşünülmektedir. Yükseklik farklarının grafiğe göre anlamsız bir düşüş gösterdiği 73 ve 81 numaralı noktalar arasında meydana gelen farkın arazi ölçmeleri sırasında iki yamaç arasındaki geçiş esnasında arazi iç kısmından da elde edilen noktalar yüzünden meydana geldiğı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.8'deki grafiklerde çalışma alanının tam orta noktalarından, yani vadi alanının iç kısmından yapılan arazi ölçmelerine ait veriler bulunmaktadır. Grafikler incelendiğinde harici SYM verilerinin arazi ölçmeleri ile farkları görülebilmektedir. Yükseklik farkları bütün veriler için aynı alanlarda yükselme veya alçalma göstermiştir. Nokta toplama çalışmaları ilk noktadan başlayıp tekrar ilk noktaya dönülecek şekilde yapıldığı için, fark grafiğindeki veriler benzerlik göstermektedir. Fakat grafiğin orta sekmelerinde görülen veriler çıkılan en yüksek noktalardır ve bu noktalarda fark ilk ve son verilerden farklı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu grafiklere bakıldığında, vadi ortası için yükseklik farklarının arazi yükseklik değişimlerinden etkilendiği rahatlıkla söylenebilir. Başlangıç noktasında fark en düşük durumdayken arazi yüksekliği arttıkça (fark grafiği orta noktaları) oluşan farkın da arttığı görülebilmektedir.

Çizelge 5.1'de arazi noktaları yükseklikleri ve üretilen nokta yüksekliklerinin istatistiki analiz çalışmaları yapılmıştır. Burada, nokta farklarının standart sapmaları, karesel ortalama hataları ve korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Yukarıdaki grafikler ile benzer sonuçlar bu çizelge üzerinde de ortaya çıkmıştır. En yüksek standart sapma 9.30 m ile SRTM verisinde ortaya çıkarken, 5m_dem verisi 1.52 m ile en düşük standart sapma değerine sahiptir. Karesel ortalama ve korelasyon katsayısı değerlerinde de benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. 4.16 m karesel ortalama hata ve 0.9976 korelasyon katsayısı ile tsx_dem verisi en iyi sonuçlar veren ikinci veri olmuştur. Korelasyon analizi sonuçları incelendiğinde, tüm harici SYM verilerinin yüksek bir korelasyon değerine sahip olduğu görülebilmektedir. Korelasyonunu yüksek bir oranda çıkması, gerçek arazide meydana gelen değişimlerin o verideki yansımalarının ne kadar doğrulukla ortaya çıktığını ortaya koymaktadır. Yani, arazideki yükseklik değişimlerinin üretilen verilerde de yüksek bir oranda yansıtıldığı rahatlıkla söylenebilir.

Yukarıdaki sonuçlar ve tartışmalar ışığında, arazi çalışmaları ve harici SYM'lerden elde edilen nokta verilerinin genel olarak tüm alanda benzer özellikler ortaya çıkardığı söylenebilir. Genel olarak, 5m_dem verisinin tüm karşılaştırmalarda en ideal sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Bunu sırasıyla tsx_dem, alos_dem ve srtm verisi takip etmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta harici SYM verilerinin

mekânsal çözünürlük özellikleridir (Çizelge 4.4). Elde edilen sonuçlar verilerin mekânsal çözünürlükleri ile doğru orantılı olarak değiştiği rahatlıkla söylenebilir.

7.2 InSAR Tekniği ile Kar Derinliği, Kar Hacmi ve Kar-Su Eşdeğerinin Hesaplanması

Tezin bu bölümünde, InSAR tekniği kullanılarak, belirlenen alanda, kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri analizleri ve harita üretimleri yapılmıştır. Bu bölümün görüntü işleme adımlarında Bölüm 5’te elde edilen ve doğruluğu en yüksek SYM olan stereo SYM verisi (5m_dem) kullanılmıştır.

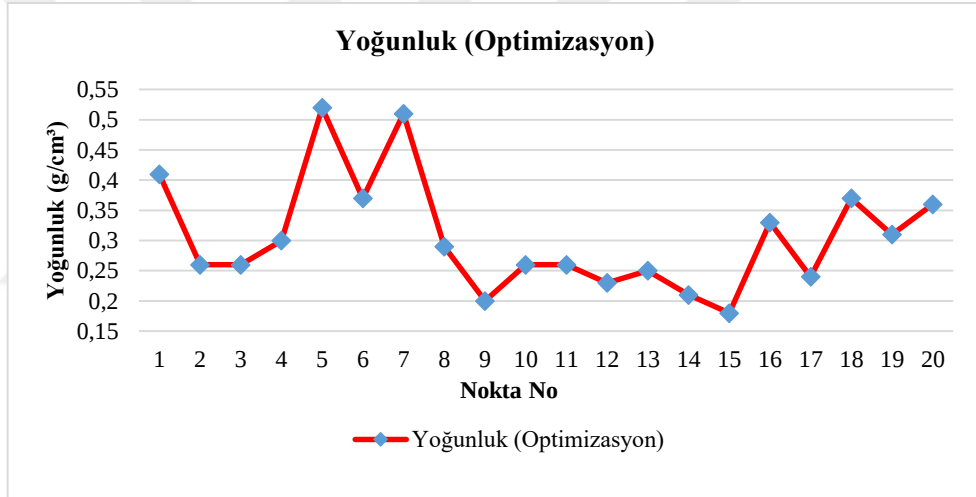
Şekil 4.5 ve Çizelge 4.5 arazi çalışmaları görüntülerini ve elde edilen noktaların kar derinliği bilgilerini içermektedir. Uydu geçişi ile yaklaşık olarak eş zamanlı yapılan arazi çalışmalarında, manuel kar ölçümlerinde olduğu üzere metreler ve direkler kullanılmıştır. Zorlu arazi şartlarında her bir nokta için GPS/GNSS alıcısı yardımı ile hassas konum belirlenmiş ve kar yüzeyinden toprak yüzeyine ulaşılabilen noktalarda kar derinliği ölçmeleri yapılmıştır. Arazi çalışmaları esnasında, kar yüzeyinin kürekler vasıtası ile eşilip toprak yüzeyine ulaşmaya ve ölçmelerin hassas yapılmasına özen gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 100 adet nokta verisi toplanmasına rağmen, yapılan değerlendirmeler sonucunda 20 adet noktanın verilerine güvenilir bir şekilde ulaşılabilirdiği belirlenmiş ve diğer analiz ve çalışmalarda bu noktalar kullanılmıştır. Çizelge 4.5’te verilen bu nokta yükseklikleri 60 cm ile 150 cm arasında değişim gösterdiği görülebilmektedir.

Çalışmanın bir sonraki kısmında ise kar derinliği üretiminde kilit parametre rolü oynayan kar yoğunluklarının hesaplanması işlemleri yapılmıştır. Arazi çalışmaları ile de elde edilebilecek kar yoğunlukları, arazi şartlarının elverişsiz olması ve yetersiz ekipman nedeniyle arazi çalışmaları esnasından üretilenmemiştir. Bu nedenle arazi ölçmelerinden elde edile derinlikler kullanılarak bir ters model oluşturulmuş ve bu şekilde hesaplanmıştır. Yoğunluk hesaplamaları optimizasyon, ISO-4355 ve kriging olmak üzere 3 farklı şekilde hesaplanmıştır.

- Optimizasyon yöntemi ile nokta kar yoğunluklarının hesaplanması;

Optimizasyon yöntemi ile yapılan yoğunluk hesaplama işleminde Eşitlik 3.5 ve 3.7’de verilen kar derinliği denklemi kullanılarak bir ters yaklaşım öne sürülmüştür. Formül

içerisinde bilinmeyen tek veri olan yoğunluk parametresi, her bir nokta için, nokta derinliğinden yola çıkılarak MATLAB yazılımında hesaplatılmıştır. Şekil 6.1’de verilen akış şemasında, arazi çalışmalarından elde edilen kar derinliği ve D-InSAR işlem sürecinden elde edilen faz bilgisi ve lokal geliş açısı verileri kullanılarak, her bir nokta için yazılımın 0.1 – 0.8 g/cm³ yoğunluk arasında 0.01 artan her bir değer için bir yoğunluk değeri hesaplaması sağlanmıştır. İşlem, ilk etapta verilen her bir kar derinliğinin, yoğunluklara göre tekrar hesaplanıp, en yakın derinlik değerinin bulunmasına kadar bir döngü içerisinde devam etmektedir. Yoğunluğa bağlı üretilen kar derinliğinin, ilk kar derinliğine yakınsadığı durumdaki yoğunluk değeri o nokta için yoğunluk değeri olarak atanmıştır. Şekil 7.1’de optimizasyon yöntemi ile üretilen nokta yoğunluklarının grafiksel gösterimi verilmiştir. Nokta yoğunluklarının 0.21 g/cm³ ve 0.52 g/cm³ arasında değiştiği görülebilmektedir.

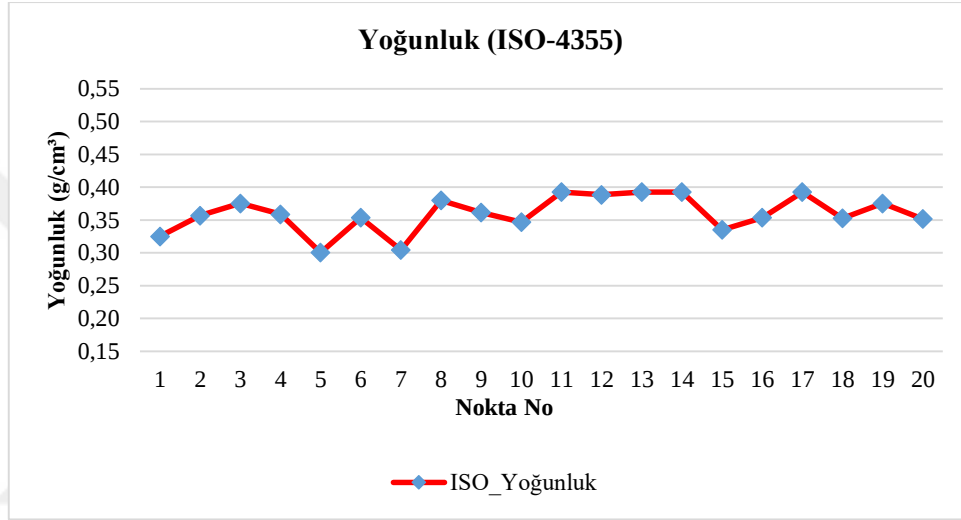


Şekil 7.1. Optimizasyon yöntemi ile elde edilen yoğunlukların grafiksel gösterimi.

- ISO-4355 standardı ile kar yoğunluğunun hesaplanması;

ISO-4355 standardında, Bölüm 6.1.2’de anlatıldığı üzere dış etmenlere ve nokta kar derinliğine bağlı olarak, nokta kar yoğunluğunun hesaplanması için bir bağıntı oluşturulmuştur. Burada, arazi çalışmaları esnasındaki hava durumu ve rüzgar hızı ve bunun yanında noktalardan elde edilen kar derinliği bilgileri ile yoğunluk hesaplaması yapılmıştır. Arazi çalışmaları esnasında bütün noktalar için rüzgar hızı ve hava sıcaklığı eşit olduğundan, bağıntı, Eşitlik 6.2’deki gibi düzenlenmiştir.

Çizelge 6.2’te incelendiğinde nokta kar yoğunluğu değerlerinin 0.30 ve 0.39 g/cm³ arasında olduğu görülebilmektedir. Bu kısımda noktalar için aynı sıcaklık ve rüzgar hızı kullanılmasından kaynaklı, tek değişkenin derinlik verisi olduğu bir durumda, birbirlerine yakın değerler ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu analizde ortalama yoğunluk değeri 0.36 g/cm³ olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 7.2’de ISO-4355 standardına göre üretilen nokta kar yoğunluğu değerinin grafiksel gösterimi verilmiştir. Burada, grafiğin yakın değerler arasında bir seyir göstermiş olduğu görülebilmektedir.

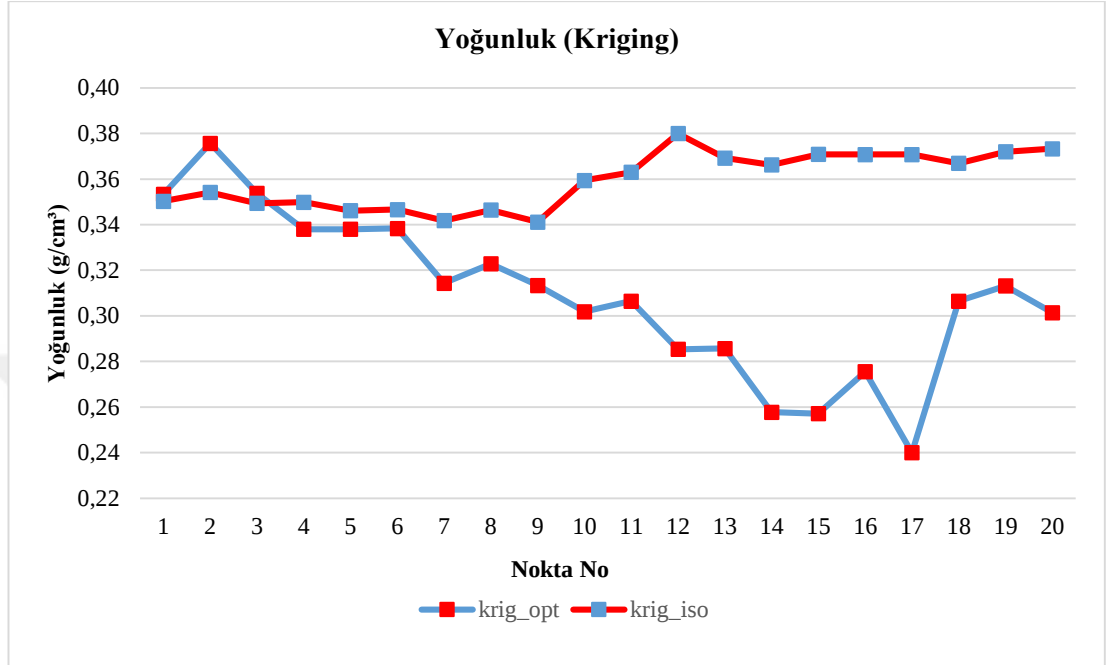


Şekil 7.2. ISO-4355 yöntemi ile üretilen nokta kar yoğunluklarının grafiksel gösterimi.

- Kriging yöntemi ile kar yoğunluğunun hesaplanması;

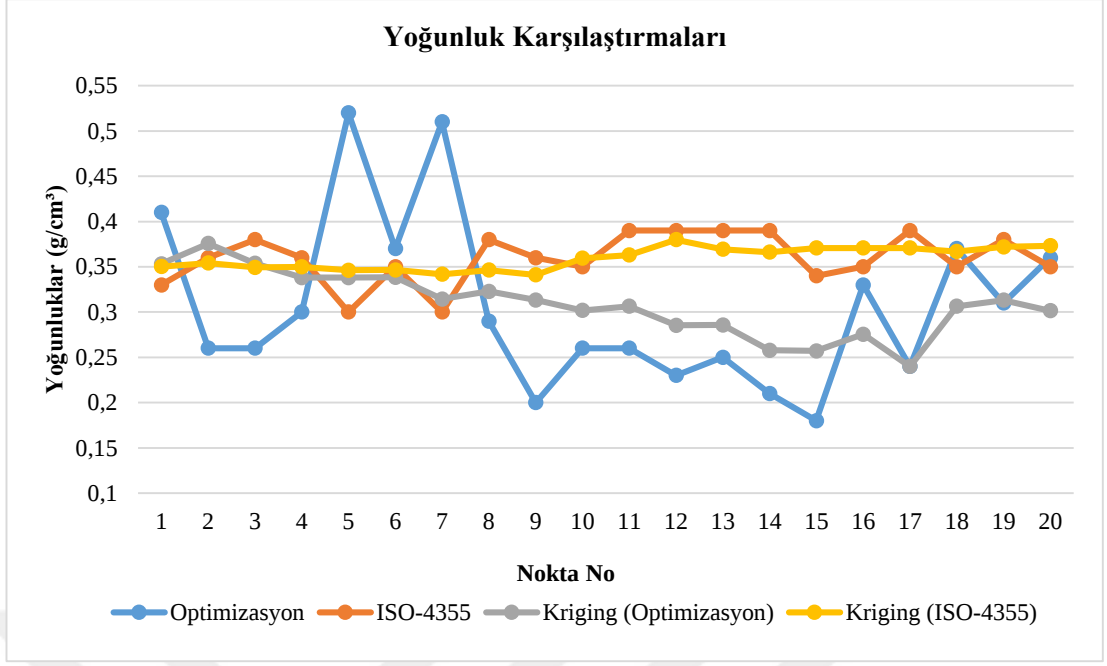
Bölüm 6.1.3’te anlatılan kriging yöntemi Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanlı çalışmalarda sıklıkla kullanılan bir geoistatistiksel yaklaşımdır. Bu bölümde optimizasyon ve ISO-4355 yöntemlerinden elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak yeni yoğunluk değerleri kestirilmiştir. Çizelge 6.3 incelendiğinde kriging yöntemi ile elde edilen yoğunluk değerleri görülebilmektedir. Optimizasyon yönteminden elde edilen kriging analizinin nokta yoğunlukları 0.24 – 0.38 g/cm³ arasında değişim gösterirken, ISO-4355 yönteminden elde edilen yoğunluk değerleri 0.34 – 0.38 g/cm³ arasında değişmektedir. Kriging (Optimizasyon) yöntemi için noktaların ve tüm alanın ortalama değeri 0.31 g/cm³ olarak elde edilirken, kriging (ISO-4355) yöntemi için noktaların ve tüm alanın ortalama değeri 0.36 g/cm³ olarak elde edilmiştir. Şekil 6.3’te verilen tahmin haritasında yoğunluk değerlerinin çalışma

alanı içerisindeki değişimleri görülebilmektedir. Burada unutulmamalıdır ki, geoistatistiksel analizlerde noktaların arazi yüzeyindeki dağılımı ne kadar homojen olursa sonuçlar o kadar doğruya yakın olacaktır. Şekil 7.3'te kriging yöntemi ile elde edilen nokta kar yoğunluklarının grafiksel gösterimi verilmiştir.



Şekil 7.3. Kriging yöntemi ile üretilen nokta kar yoğunluklarının grafiksel gösterimi.

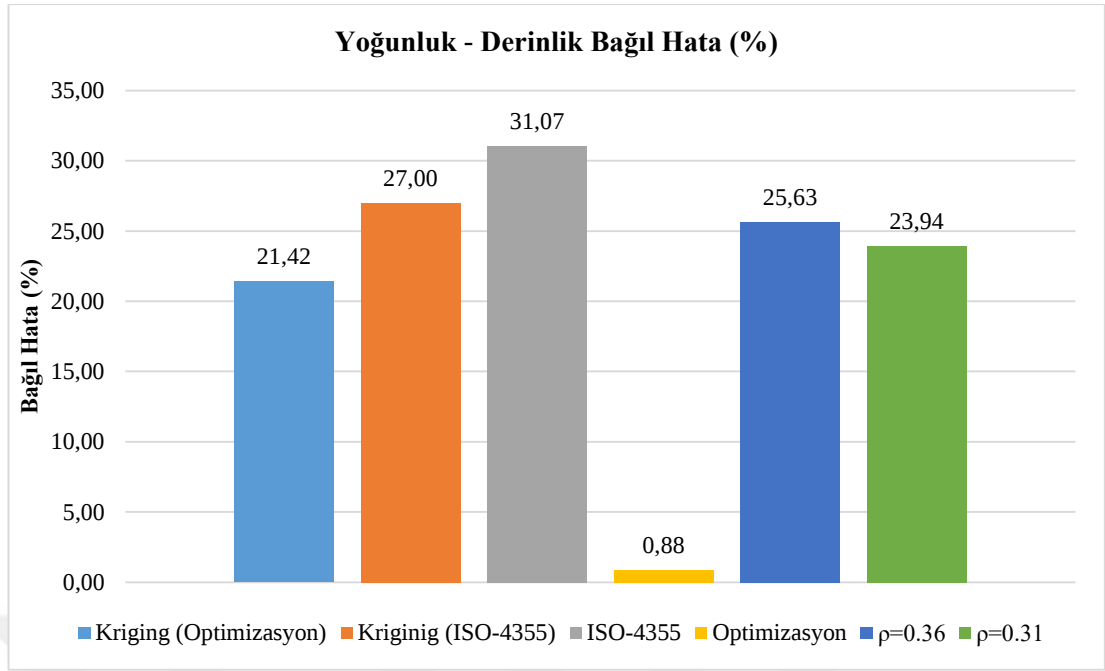
Şekil 7.4'te optimizasyon, ISO-4355 ve kriging yöntemleri ile elde edilen nokta kar yoğunluklarının karşılaştırmalı grafiği gösterilmiştir.



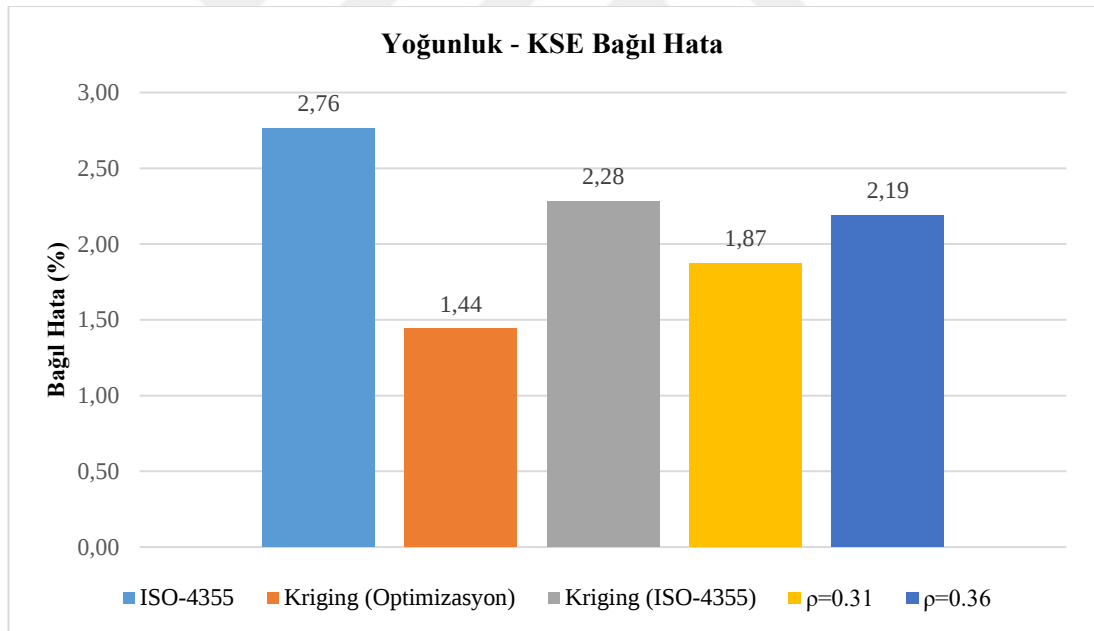
Şekil 7.4. Nokta kar yoğunlukları karşılaştırmalı grafiği.

Yoğunluk hesaplamalarına ilişkin grafikler incelendiğinde her bir nokta için yoğunluk değerinin farklı olduğu görülebilmektedir. Bunun nedeni, kar yoğunluğunun çeşitli dış etkenlere bağımlı olarak değişmesi olarak açıklanabilir. Eğim, bakı ve rüzgar etkisi (hız ve yön) gibi etmenler yoğunluk değerlerini her bir noktada değişikliğe uğratabilmektedir. Geniş alanlarda uygulanacak çalışmalar için her bir noktadan kar yoğunluğu verisinin elde edilmesinin neredeyse imkânsız olması araştırmacıları ortalama değer kullanmaya iten en büyük sebeptir.

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da farklı yöntemlerle elde edilen kar yoğunlukları karşısında kar derinliği ve KSE hesaplamalarının bağıl hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar ortalama yoğunluk değerlerinin yanı sıra her bir nokta için farklı yöntemlerle elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak hesaplanan kar derinliği ve KSE değerleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 7.5. Yoğunluk değerlerine bağlı kar derinliği değerlerinin bağıl hata hesaplamaları.



Şekil 7.6. Yoğunluk değerlerine bağlı KSE değerlerinin bağıl hata hesaplamaları.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde kar derinliği değerlerinin bağıl hata oranlarında optimizasyon ile yoğunluk belirleme yönteminin bir hayli düşük bir hata değeri gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ise optimizasyon yöntemindeki yoğunluk hesaplamasının, arazi ölçmelerinden elde edilen derinlik değerlerine bir geri dönüş şeklinde olmasıdır. Bununla birlikte, kriging (optimizasyon) metodunun % 21.42’lik

bir bağıl hata değerine sahip olması diğer yöntemlere göre en az hata ortaya çıkaran yöntem olduğunu göstermektedir. Yoğunluk değerlerine bağlı KSE bağıl hata hesaplamalarında ise en düşük hata miktarı % 1.44 olarak kriging metodunda ortaya çıkmıştır. Bunu 0.31 g/cm^3 ortalama yoğunluk değeri ve 0.36 g/cm^3 ortalama yoğunluk değeri takip etmektedir. Bu hesaplamada 0.31 g/cm^3 ortalama ile üretilen verinin hata değerinin diğerlerinden daha iyi çıkması, çalışma alanındaki kar yoğunluğunun bu yoğunluk değerine yakın olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Grafiklerden çıkarılabilecek en önemli olgu ise, kriging yönteminin diğer empirik yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiğidir. Bu da geoistatistiksel değerlendirme yöntemlerinin başarısını ortaya koymaktadır.

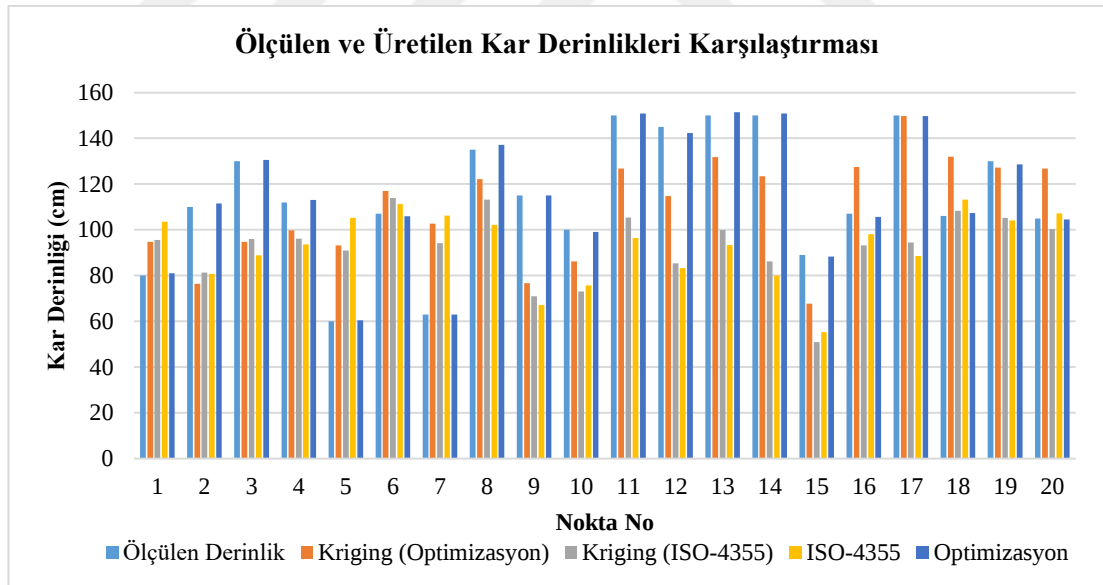
- Kar derinliklerinin hesaplanması;

Tezde, kar derinlikleri, Eşitlik 3.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Formül incelendiğinde InSAR tekniği ile kar derinliğinin üretiminde gerekli parametrelerin, yoğunluğa bağlı kar geçirgenliği, faz farkından elde edilen faz bilgisi ve geliş açısı olduğu görülebilmektedir. Öncelikli olarak görüntü işleme adımlarından elde edilen faz bilgisi ve geliş açısı kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Tezde, noktalara ait faz bilgisi ve lokal geliş açısı bilgileri, işlenmiş görüntülerin üzerine noktaların atılması ve piksel değerlerinin elde edilmesi yolu ile yapılmıştır. Bu aşamada, tüm arazi noktaları için faz bilgisi ve lokal geliş açısı bilgileri elde edilmiştir. Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere, radar sinyalleri yeryüzüne belirli bir açı ile gelmektedirler. Şekil 3.3'te gösterilen bu durum, lokal geliş açısının yeryüzüne dik olacak şekilde hesaplanması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Eşitlik 3.7'de kullanılan sinüs ve kosinüs parametreleri bu dikliğin sağlanması için kullanılmaktadır. Bunun yanında, eşitlikte belirtilen λ , her bir uydu için değişiklik gösteren dalga boyunu temsil etmektedir. Eşitlikte gösterilen bir diğer önemli parametre olan $\varepsilon(\rho_{kar})$ ise, yoğunluğa bağlı olarak karın geçirgenliğinin hesaplandığı adımdır. Kar derinliğinin hesaplanması için kullanılan bu eşitlikte, en önemli parametre, kar geçirgenliğinin hesaplanması olarak görülmektedir. Çünkü bu adımda nokta kar yoğunluklarının değişim göstermesi elde edilecek derinlik değerini de oldukça etkilemektedir.

Kar derinliğinin hesaplanması adına oluşturulan ve Şekil 6.4'te gösterilen D-InSAR kar derinliği üretim modeli, ham radar görüntülerinin işlenmesinden kar derinliği

üretimine kadar olan süreci belirtmektedir. Modele göre, ham radar görüntüleri InSAR tekniklerine göre işlendikten sonra belirtilen eşitlikler kullanılarak kar derinliğinin elde edilebilmektedir. Ayrıca derinliğe bağlı olarak kar hacminin ve KSE parametrelerinin de çıkarımı model üzerinde gösterilmiştir.

Farklı yöntemler ile elde edilen yoğunluklar sayesinde üretilen kar derinliklerini gösteren Çizelge 6.4 incelendiğinde, arazi çalışmaları ile üretilen kar derinlikleri arasındaki farklar görülebilmektedir. Çizelgede her bir nokta için, belirtilen yöntem ile ayrı ayrı nokta kar derinlikleri ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da ise ortalama yoğunluk değerleri kullanılarak üretilen kar derinliği haritaları gösterilmiştir. Haritalar incelendiğinde 0.31 g/cm^3 yoğunluk değeri ile 60-136 cm aralığında kar derinliği değerleri elde edilirken, 0.36 g/cm^3 yoğunluk değeri ile 53-115 cm arasında derinlikler elde edilmiştir. Haritalarda, arazi eğimi ve bakışının kar derinliğine de etki ettiği görülebilmektedir. Arazi yamaçlarındaki farklı kar derinliği seviyeleri, güneş, rüzgâr vb. dış etkenlerden etkilenecek şekilde değişiklik gösterdiği şeklinde yorumlanmıştır. Burada belirtilen sonuçlar ile ilgili grafik Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. Farklı yöntemlerle elde edilen kar derinlikleri ve arazi ölçmeleri karşılaştırması.

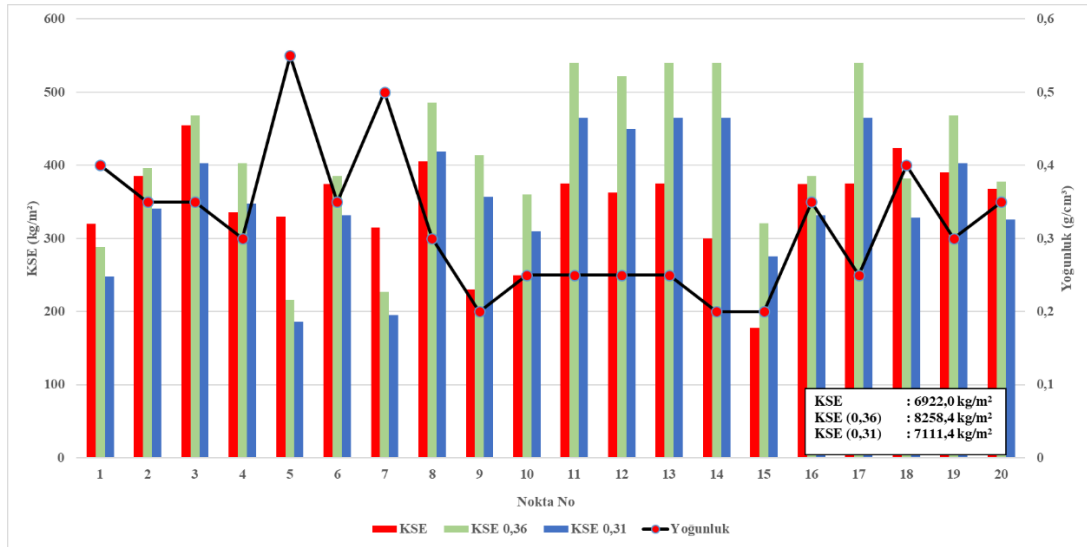
Şekil 7.7, aynı zamanda D-InSAR tekniği ile kar derinliği üretim modelinin test sonuçlarını da göstermektedir. Grafikte, optimizasyon tekniğinin arazi çalışması verilerine yakınlığı göze çarpan ilk durumdur. Bunun nedeni, optimizasyon algoritmasının araziden elde edilen derinlikler üzerinden ters bir model ile

oluşturulmasıdır (Şekil 6.1). Şekil 7.7 incelendiğinde ISO-4355 yöntemi ile üretilen kar derinliklerinin ölçülen yüksekliklere karşı 4 cm ile 70 cm arasında farklar gösterdiği görülebilmektedir. Buna karşın bu yöntem kriging analizi ile tekrar hesaplatıldığında 3 cm ve 63 cm olarak farkların azaldığı gözlemlenmiştir. ISO yöntemi bütün noktalar için ortalama 34.59 cm bir fark değeri ortaya çıkarırken, kriging (ISO-4355) yönteminde bu değer 30.67 cm olarak gözlemlenmiştir.

- Kar hacmi ve KSE hesaplanması;

Nokta kar derinlikleri hesaplandıktan sonra kar hacmi ve kar su eşdeğeri hesaplamaları yapılmıştır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de üretilen kar hacmi haritalarında yüzey üzerinde bulunan toplam kar hacmi gösterilmiştir. Burada, kar yükseklikleri piksel boyutları ile çarpılarak her piksel için bir kar hacmi hesaplaması yapılmıştır. Görüntü verisini oluşturan her bir pikselin hacim verileri toplanarak çalışma alanına ait toplam kar hacmi elde edilmiştir. Hacim hesaplamalarında 0.31 g/cm^3 yoğunluk değeri ile üretilen verilerden 166339.228 m^3 hacim bulunurken, 0.36 g/cm^3 yoğunluk değeri ile üretilen verilerden 142475.566 m^3 hacim değerine ulaşılmıştır. Arada meydana gelen yaklaşık 24000 m^3 farkın yoğunluk değişiminden olduğu ortaya çıkmaktadır. Genel fizik kurallarına göre kütlenin sabit olarak düşünüldüğü bir durumda, yoğunluğu artan bir maddenin hacmi azalma göstermesi gerekmektedir. Üretilen değerler bu tanıımı tam olarak karşılamaktadır.

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da çalışma sonucunda üretilen KSE haritaları verilmiştir. Kar derinliği ve yoğunluğunun etkili olduğu KSE değerleri, haritalar incelendiğinde ortaya çıkmaktadır. Arazinin farklı yamaçlarında farklı KSE değerlerinin elde edilmesi, kar derinliği haritaları ile benzerlik göstermektedir. KSE haritalarında dikkat edilmesi gereken husus, ortalama 0.31 g/cm^3 yoğunluk değerinde $12390705.688 \text{ kg/m}^2$ KSE değeri elde edilirken 0.36 g/cm^3 yoğunluk değeri için $12324875.621 \text{ kg/m}^2$ KSE değeri elde edilmiştir. Eşitlik 3.8’e göre KSE hesaplamasında yoğunluk değerinin artması KSE değerinin yükselmesi gerekliliğini göstermektedir. Fakat elde edilen sonuçlar bu durumun zıttı bir sonuç göstermektedir. Bunun nedeni her bir noktanın yoğunluk değerinin farklılık göstermesidir. Üretilen haritalarda ve KSE değerlerinde ortalama bir yoğunluk değeri kullanılmasından dolayı üretilen toplam KSE değerlerinde yoğunluk artmasına rağmen bir düşüş ortaya çıkmıştır. Bu durum Şekil 7.8’de grafiksel olarak açıklanmıştır.



Şekil 7.8. Nokta yoğunluk değerleri ve ortalama yoğunluk değerleri ile KSE karşılaştırması.

Yukarıdaki grafik incelendiğinde her bir noktanın hesaplanan yoğunluk değeri ile ortalama yoğunluk değeri ile üretilen KSE değerleri arasındaki fark görülebilmektedir. Nokta yoğunluk değerleri ile hesaplanan KSE değeri 6922 kg/m² olarak elde edilirken 0.36 ve 0.31 g/cm³ yoğunluk değeri ile elde edilen KSE değerleri sırasıyla 8258.4 ve 7111.4 kg/m² olarak elde edilmiştir. Grafikte 9 numaralı nokta incelendiğinde KSE değerinin 230 kg/m² olması beklenirken 0.31 g/cm³ yoğunluk değeri için 356 kg/m², 0.36 g/cm³ yoğunluk değeri için 414 kg/m² KSE değeri elde edilmiştir. Bunun yanında 1 numaralı noktada KSE değerinin 320 kg/m² olması beklenirken 0.31 g/cm³ yoğunluk değeri için 248 kg/m² ve 0.36 g/cm³ yoğunluk değeri için ise 288 kg/m² KSE değerleri elde edilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere geniş alanlar için her bir noktada yoğunluk değeri elde edilmesi zor olmasından dolayı, KSE değerlerinin kesin ve net bir hesaplaması yapılması imkânı olamamaktadır. Fakat ortalama değerler kullanılarak doğruya en yakın değerlerin elde edilebileceği düşünülmektedir. Literatürde de KSE hesaplamaları, çalışma alanı için kullanılan ortalama yoğunluk değerleri ile hesaplanmıştır ve elde edilen KSE değerlerinin hassasiyetleri, derinlik ve yoğunluk değerlerine bağlı olarak değişmektedir (Chang vd., 1982; Hill vd., 2019; Jonas vd., 2009; Shi ve Dozier, 2000).

- Model testi ve hata karşılaştırmaları;

Üretilen kar derinliği, kar hacmi ve KSE modeli, derinlik, hacim değerleri karşılaştırılarak test edilmiştir. Kış dönemi arazi çalışmalarından elde edilen nokta kar derinlikleri kullanılarak bir yüzey oluşturulmuş ve ortaya çıkan kar hacmi hesaplanmıştır. Aynı işlemler 0.31 g/cm^3 ve 0.36 g/cm^3 yoğunluk değerleri ile üretilen nokta derinlik verilerine de uygulanmıştır. Ortaya çıkan kar hacmi verileri karşılaştırılarak bağıl hata hesaplaması yapılmıştır. Çizelge 7.1’de arazi noktalarından elde edilmiş kar hacmi ve diğer yoğunluk değerlerinden üretilen hacim değerlerinin bağıl hata hesaplamaları yapılmıştır. Çizelge 7.2’de ise, arazi çalışmalarında elde edilen kar derinliği değerleri ile farklı yoğunluk değerlerinde üretilen kar derinlikleri karşılaştırılmış ve RMSE analizi yapılmıştır.

Çizelge 7.1. Noktaların toplam kar hacmi miktarlarının arazi çalışması değerleri ile karşılaştırılması.

Yoğunluk (g/cm^3)	Toplam Hacim (m^3)	Bağıl Hata (%) ((A-a)/A)
$\rho=0.31$	1.4472	9.19
$\rho=0.36$	1.2375	22.35

Çizelge 7.2. Nokta derinliklerinin analiz değerleri.

Yoğunluk (g/cm^3)	RMSE (cm)	Maksimum Fark (cm)	Minimum Fark (cm)
$\rho=0.31$	27.94	47.54	1.41
$\rho=0.36$	34.35	62.24	0.55

Yukarıdaki çizelgeler incelendiğinde tez çalışmasında üretilen modelin doğruluk sonuçları görülebilmektedir. Çizelge 7.1’de ortaya çıkan hacim değerleri, kullanılan modelin, 0.31 g/cm^3 yoğunluk değeri için % 90.81, 0.36 g/cm^3 yoğunluk değeri için ise % 77.65 oranında bir doğruluk gösterdiğini açıkça ortaya koymaktadır. Çizelge 7.2’de ise RMSE değerinin 0.31 g/cm^3 yoğunluk değerinde daha iyi olduğu söylenebilir. İki çizelge birlikte incelendiğinde ise, 0.31 g/cm^3 yoğunluk değerinde üretilen verilerin daha doğru sonuçlar gösterdiği söylenebilir. Bu durumun ortaya çıkardığı en önemli sonuç ise, 0.31 g/cm^3 yoğunluk değerinin arazinin gerçek kar yoğunluğunu yüksek oranda temsil ettiğinin ortaya çıkmasıdır.

Elde edilen tüm sonuçlar incelendiğinde göze çarpan başka bir husus ise arazi eğiminden kaynaklı SAR verilerinde meydana gelen geometrik bozulmalardır. Kısa

görüntüleme, ters görüntüleme veya gölgelenme şeklinde meydana gelen bu hatalar arazi eğimlerinden etkilenmektedirler. Gerek SYM üretiminde gerekse kar derinliği üretiminde elde edilen noktalar incelendiğinde, düzlük arazide bulunan verilerin bu hatalardan daha az etkilenmiş olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Arazi yamaçları, bakış açısına ters yönde olduğu durumlarda hata miktarlarının yükseldiği gözlemlenmiştir.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mevsimsel yağışın önemli bir bölümünü oluşturan karın izlenmesi ve yeryüzündeki durumunun değerlendirilmesi geçmişten günümüze birçok bilim alanına araştırma konusu olmuştur. Hem hidrolojik su kaynakları açısından hem de olası doğal afetlerin önceden belirlenebilmesi açısından kar izleme çalışmaları önem arz etmektedir. Özellikle karlı alanlarda yapılacak çalışmalar için arazi şartlarından kaynaklanan birçok problem ortaya çıkabilmektedir. Uzaktan algılama teknikleri ile arazi çalışmalarından kaynaklanan zorluklar büyük oranda aşılabilmektedir. Bu sayede geniş alanlarda çalışma imkânı daha da kolaylaşırken, maliyet ve iş gücü açısından da büyük kazanımlar elde edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, InSAR tekniği ile kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri üretim çalışmaları yapılmıştır. InSAR çiftlerinin işlenmesi esnasında kullanılan, arazi yüzeyinin yansıtıldığı SYM'ler farklı harici SYM verileri kullanılarak incelenmiş, doğruluk analizleri yapılmış ve en doğru sonuçların alındığı SYM verisi, kar izleme çalışmalarında yapılacak işlemler için altlık veri olarak InSAR çiftlerinin işlenmesi aşamasında kullanılmıştır. Bu sayede arazi yüzeyinin en iyi şekilde yansıtan veri elde edilmiş ve SYM kalitesinden kaynaklanan arazi değişimleri büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Bu aşamadan sonra elde edilen SYM'ler de kullanılarak InSAR çiftleri işlenmiş ve daha önceki bölümlerde anlatılan eşitlikler kullanılarak kar derinliği haritaları üretilmiştir.

Ülke ve dünya literatürü incelendiğinde kar izleme amaçlı birçok çalışma ile karşılaşılabilir. Fakat bu tez çalışmasında tek polarizasyonlu (HH) veriler kullanılarak ilk defa kar derinliği üretimi çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar uydu geçiş tarihi ile eş zamanlı yapılan arazi çalışmaları ile de karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bunun yanında kar izleme çalışmalarında önemli bir nokta olan kar yoğunluğu verisi literatürdeki çalışmalarda ortalama bir değer olarak kullanılırken, bu tezde arazi çalışmasından elde edilen her bir nokta için bir ters formülasyon ile tek tek hesaplanmıştır. Ayrıca literatürde kullanılan geoistatistiksel ve uluslararası ölçekte tanımlamalar ile yoğunluk değerleri her bir nokta için yeniden hesaplanmıştır. Arazi yüzeyinde bulunan karın kuru kar özelliği gösterdiği elde edilen yoğunluk değerleri ile de ortaya çıkmıştır.

Çalışmada, geoistatistiksel bir yöntem olan kriging metodu ile üretilen veriler ile nokta yoğunluklarının tüm alana yayılması sağlanmıştır. Yöntem nokta bulunmayan alanların yoğunluklarının kestirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Kriging yöntemi ile elde edilen nokta yoğunlukları alansal dağılımlarında yüksek bir korelasyona ulaşmıştır. Bu yöntem ile üretilen nokta yoğunluklarından elde edilen kar derinlikleri, gerçek değere diğer yöntemlerden daha fazla yaklaşmıştır. Bu durum geoistatistiksel yöntemlerin empirik yöntemlere karşı fark edilebilir miktarda iyileştirme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, seyrek nokta dağılımına sahip verilerde dahi kriging yönteminin başarılı bir performans gösterdiği ortaya konmuştur.

Tezde, kar derinliği çalışmalarının yanı sıra kar hacmi ve kar su eşdeğeri hesaplamaları da yapılmıştır. Kar hacmi, yüzeydeki karın kütsel durumu hakkında araştırmacılara aydınlatıcı bir bilgi sunmaktadır. Bunun yanında KSE hesaplamaları ile yüzeyde bulunan karın erimesi sonrasında ne kadar su ortaya çıkaracağı her bir piksel için tek tek hesaplanarak, ortaya bir KSE haritası çıkarılmıştır. KSE, hidrolojik çalışmalar için önemli bir faktördür. Kar erimesinden kaynaklı ortaya çıkacak suyun ve bu suyun havza veya yer altı sularına karışımlarının izlenmesi, su kaynaklarının izlenmesi adına yapılan çalışmalar için önemli bir veri kaynağı olarak görülmektedir.

Bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan ayıran bir diğer özelliği ise; ülkemizde kar derinliği, kar hacmi ve kar-su eşdeğeri verilerinin üretilmesi adına bu ölçekte herhangi bir çalışma yapılmamış olmasıdır. Elde edilen sonuçlar farklı alanlarda da rahatlıkla kullanılabileceği için, yoğunlukla kar düşen bölgelerin kar derinliğinin izlenmesi ve buna bağlı yapılacak çalışmalara ışık tutar niteliktedir. Herhangi bir arazi çalışmasına ihtiyaç duyulmadan, bu tezde kullanılan model ile herhangi bir karlı bölgenin izlenmesinin rahatlıkla yapılabileceği söylenebilir.

Çalışmada kar alanlarının izlenmesi için tek polarizasyonlu alçalan yörüngeye sahip veriler kullanılmıştır. Bununla birlikte, çoklu polarizasyona veya tam polarizasyona sahip veriler kullanılarak ve bunun yanında alçalan ve yükselen yörüngelerdeki veriler entegre edilerek daha kesin sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir. Fakat bu çalışma ile tekli polarizasyona sahip verilerin de ortaya çıkardığı doğruluk değerleri tatmin edici olduğu görülmüştür.

Bu verilere ek olarak imkânlar dâhilinde kullanılabilir olan optik uydu verileri ile de çalışılarak aktif ve pasif uzaktan algılama sistemlerinin birlikte kullanılması sağlanabilir. Aktif uzaktan algılama verileri ile kar derinliği ve buna bağlı parametreler ortaya çıkarılırken, pasif uzaktan algılama sistemleri ile de arazi kar örtüsü haritalama işlemleri rahatlıkla yapılabilir.

Sonuç olarak; bu çalışmada, bir yandan farklı harici SYM verileri kullanılarak InSAR tekniği ile üretilen SYM'lerin doğruluğu ortaya koyulmuş olurken, diğer taraftan InSAR tekniği kullanılarak kar derinliği, kar hacmi ve KSE parametrelerinin hesaplanabileceği açıkça ortaya konmuştur. Daha sonraki çalışmalarda arazi çalışmaları olmaksızın farklı bölgelerin bu yöntemle kar derinliği haritaları üretilbileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Abdikan, S., 2007. SAR Görüntülerinden üretilen interferometik ve stereo sayısal yükseklik modellerinin kalitesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Airbus, 2015. TerraSAR-X Image product guide- basic and enhanced radar satellite imagery, Airbus, S. 2.1, 1-24.
- Akoğlu, A.M., 2001. 17 Ağustos 1999 İzmit Depremi postsismik deformasyonunun sentetik açıklık radar interferometrisi yöntemi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayık, Ç., 2018. Çok zamanlı ve çok frekanslı SAR-GNSS verileri ile heyelanların araştırılması: Beylikdüzü-Esenyurt örneği, Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Bhardwaj, A., Jain, K. ve Chatterjee, R.S., 2019. Generation of high-quality digital elevation models by assimilation of remote sensing-based DEMs, Journal of Applied Remote Sensing, 13, 4, doi: 10.1117/1.JRS.13.4.044502.
- Buchner, R., Barthel, J. ve Stauber, J., 1999. The dielectric relaxation of water between 0°C and 35°C, Chemical Physics Letters, 306, 1–2, 57–63.
- Canaslan, F., 2010. InSAR yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Konya Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Chang, A.T.C., Foster, J. L., Hall, D.K., Rango, A. ve Hartline, B.K., 1982. Snow water equivalent estimation by microwave radiometry, Cold Regions Science and Technology, 5, 3, 259-267.
- Chaubey, N., Upadhyay, S., Joshi, A., Mishra, N., Patra, S.K. ve Chowdhury, S., 2016. Improvement in InSAR phase unwrapping using external DEM, In 2016 International Conference on Communication and Signal Processing, USA, 78-82.
- Chunxia, Z., Linlin, G., Dongchen, E. ve Hsingchung, C., 2005. A case study of using external DEM in InSAR DEM generation, Geo-Spatial Information Science, 81, 14-18.
- Crosetto, M. ve Crippa, B., 2000. Quality assessment of interferometric SAR DEMs, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, B1; part 1, 46-53.
- Deliormanlı, S., 2009. Yapay açıklıklı radar ham verilerinden görüntü oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Eamer, J., Ahlenius, H. ve Prestrud, P., 2007. Global outlook for ice & snow, Division of Early Warning and Assessment (DEWA), United Nations Environmental Programme.
- Eineder, M. 2003. Problems and solutions for InSAR digital elevation model generation of mountainous terrain, Fringe 2003 Workshop, Frascati, Italy.
- Ekercin, S., 2007. Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri entegrasyonu ile Tuz Gölü ve yakın çevresinin zamana bağlı değişim analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ellison, W. J., Lamkaouchi, K. ve Moreau, J.M., 1996. Water: a dielectric reference, Journal of Molecular Liquids, 68, 2–3, 171–279.
- Erdoğan, H., 2006. Mühendislik yapılarındaki dinamik davranışların jeodezik ölçmelerle belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. ve Alsdorf, D., 2007. The shuttle radar topography mission, Rev. Geophys, 45, 2, 1-33.
- Fayard, F., Méric, S. ve Pottier, E., 2007. Matching stereoscopic SAR images for radargrammetric applications, 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4364-4367, Barcelona, Spain.
- Filipponi, F., 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow, Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 18, 1, 11.
- Gabriel, A.K., Goldstein, R.M. ve Zebker, H.A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, 94, 9183-9191.
- Gelautz, M., Paillou, P., Chen, C. ve Zebker, H., 2003. A comparative study of radar stereo and interferometry for DEM generation, Proc. of Fringe 2003 Workshop, Frascati, Italy.
- Gens, R., 1998. Quality assessment of SAR interferometric data, PhD Thesis, Universität Hannover Fachrichtung Vermessungswesen, Germany.
- Gens, R. ve Van Genderen, J.L., 1996. Review article SAR interferometry—issues, techniques, applications, International Journal of Remote Sensing, 17, 10, 1803-1835.
- González, J.H., Bachmann, M., Scheiber, R. ve Krieger, G., 2010. Definition of ICESat selection criteria for their use as height references for TanDEM-X, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48, 6, 2750-2757.
- Graham, L.C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proc. of the IEEE, 62, 2, 763-768.

- Grohmann, C.H., 2018. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30, *Remote Sensing of Environment*, 212, 121-133.
- Guneriussen, T., Hogda, K.A., Johnsen, H. ve Lauknes, I., 2001. InSAR for estimation of changes in snow water equivalent of dry snow, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39, 10, 2101-2108.
- G  lal, E., Erdoĝan, H., Aykut, N.O. ve Erkaya, H., 2011. The use of SISO ARX models in the determination of the damage to dams, *International journal of damage mechanics*, 20, 7, 979-1001, doi: 10.1177/1056789510369333.
- G  nal, N., 2013. T  rkiye’de kar yaĝışı, karın yerde kalma s  resi ve daimi kar sınırı, *Acta Turcica*, 5, 1-13.
- Hallikainen, M., Ulaby F.T. ve Abdelrazik M., 1986. Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 34, 11, 1329–1340.
- Hanssen, R.F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis, Springer Science & Business Media.
- Hill, D.F., Burakowski, E.A., Crumley, R.L., Keon, J., Hu, J.M., Arendt, A.A., Jones K.W. ve Wolken, G.J., 2019. Converting snow depth to snow water equivalent using climatological variables, *The Cryosphere*, 13, 7, 1767-1784.
- Hoen, E.W., ve Zebker, H.A., 2000. Penetration depths inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland ice sheet, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 6, 2571-2583.
- Hogda, K.A., Guneriussen, T. ve Lauknes, I., 2002. Synthetic aperture radar for DEM generation in snow-covered mountain terrain, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4, 2193-2195.
- Hulsmeyer, C., 1904. Herzian-Wave projecting and receiving apparatus adopted to indicate or give warning of the presence of a metallic body such as a ship or a train, British Patent No. 13, 170.
- Irak, H., 2009. SAR sistem ve teknolojileri, *Elektrik M  hendisliĝi Dergisi*, 437, 86-90.
-   nal, C., Turgut, B. ve Yiĝit, C.  ., 2002. Lokal alanlarda jeoit ond  lasyonlarının belirlenmesinde kullanılan enterpolasyon y  ntemlerinin karşılaştırılması, *Sel  uk   niversitesi Jeodezi ve Fotogrametri M  hendisliĝi   ĝretiminde 30. Yıl Sempozyumu*, Konya.
- Jonas, T., Marty, C., ve Magnusson, J., 2009. Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps, *Journal of Hydrology*, 378, 1-2, 161-167.

- Judson, A. ve Doesken, N., 2000. Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains, Bulletin of the American Meteorological Society, 81, 7, 1577-1588.
- Karimzadeh, S. ve Ahmadi, F.F., 2013. Using advanced space-borne radar technology for detection and measurement of land subsidence and interseismic slip rates, the case study: NW Iran, Studies in Surveying and Mapping Science, 1, 1, 1-9.
- Kemaldere, H., 2011. Şehir altı madenciliği ve tasman etkilerinin diferansiyel insar tekniği ile belirlenmesi: Zonguldak Metropolitan Alanı Örneği, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Koch, F., Henkel, P., Appel, F., Schmid, L., Bach, H., Lamm, M., Prasch M., Schweizer J. ve Mauser, W., 2019. Retrieval of snow water equivalent, liquid water content, and snow height of dry and wet snow by combining GPS signal attenuation and time delay, Water Resources Research, 55, 5, 4465-4487.
- Köse, M.H., 2006. Uydu radar görüntülerinden üç boyutlu sayısal arazi modelinin üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M. ve Zink, M., 2007. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45, 11, 3317-3341.
- Krieger, G., Moreira, A., Hajnsek, I., Werner, M., Fiedler, H. ve Settlemyer, E., 2005. The TanDEM-X mission proposal, ISPRS Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information.
- Kyaruji, J., 2005. Quality assessment of DEM from radargrammetry data, Master Thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Hollanda.
- Lee, J.S. ve Pottier, E., 2009. Polarimetric radar imaging: from basics to applications. CRC press.
- Leinss, S., 2015. Depth, anisotropy, and water equivalent of snow estimated by radar interferometry and polarimetry, PhD Thesis, ETH Zurich, Switzerland.
- Leinss, S., Antropov, O., Vehviläinen, J., Lemmetyinen, J., Hajnsek, I. ve Praks, J., 2018. Wet snow depth from Tandem-X Single-Pass Insar DEM differencing, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 8500-8503.
- Leinss, S., Parrella, G. ve Hajnsek, I., 2014. Snow height determination by polarimetric phase differences in X-band SAR data, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7, 9, 3794-3810.
- Li, H., Wang, Z., He, G. ve Man, W., 2017. Estimating snow depth and snow water equivalence using repeat-pass interferometric SAR in the northern piedmont region of the tianshan mountains, Journal of Sensors, 2017, 1-17.

- Li, H., Xiao, P., Feng, X., He, G. ve Wang, Z., 2016. Monitoring snow depth and its change using repeat-pass interferometric SAR in Manas River Basin, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 4936-4939.
- Lillesand, T., Kiefer, R.W. ve Chipman, J., 2004. Remote sensing and image interpretation, Fifth edition, John Wiley & Sons.
- Liu, Y., Li, L., Yang, J., Chen, X. ve Hao, J., 2017. Estimating snow depth using multi-source data fusion based on the D-InSAR method and 3DVAR fusion algorithm, Remote Sensing, 9, 11, 1-17.
- Luzi, G., 2010. Ground based SAR interferometry: a novel tool for geoscience, 1–26, in Imperatore, P. and Riccio D., (Editor), Geoscience and Remote Sensing New Achievements, InTech, Rijeka, Croatia.
- Majumdar, S., 2019. Snow depth and SWE estimation using spaceborne polarimetric and interferometric synthetic aperture radar, Master Thesis, University of Twente, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Netherlands.
- Makineci, H.B. ve Karabörk, H., 2016. Evaluation Digital Elevation Model Generated by Synthetic Aperture Radar Data, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 41.
- Martinec, J., 1977. Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data, Journal of Glaciology, 19, 81, 185-195.
- Matzler, C., 1996. Microwave permittivity of dry snow, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34, 2, 573-581.
- Mert, B. A., 2005. Jeoistatistiksel analiz için bir bilgisayar programının geliştirilmesi ve Antalya-Akseki-Kızıldaş boksit yatağına uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Oliver, M.A., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, International Journal of Geographic Information Systems, 4, 313–332.
- Orhan, O., 2018. Uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri ile muhtemel obruk alanlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Poidomani C.G., Costantini D, Pasquali P. ve Jaeger P. 2000. National-scale DEM generation using ERS-Tandem data in alpine regions, ERS-ENVISAT Symposium, Sweden.
- Priya, M.G. ve Krishnaveni, D., 2019. An approach to measure snow depth of winter accumulation at basin scale using satellite data, International Journal of Computer and Information Engineering, 13, 2, 70-74.
- Rees, W.G., 2006. Remote sensing of snow and ice, CRC press.

- Richards, J.A., 2009. Remote sensing with imaging radar, 1, Springer, Berlin, Germany.
- Rizzoli, P., Bräutigam, B., Kraus, T., Martone, M. ve Krieger, G., 2012. Relative height error analysis of TanDEM-X elevation data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 30-38.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. ve Goldstein, R.M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry, Proceedings of the IEEE, 88, 3, 333-382.
- Rott, H., Nagler, T. ve Scheiber, R., 2003. Snow mass retrieval by means of SAR interferometry, In 3rd FRINGE Workshop, European Space Agency, Earth Observation, 1-6.
- Rott, H., 1984. The analysis of backscattering properties from SAR data of mountain regions, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 9, 5, 347-355.
- Rott, H., Davis, R.E. ve Dozier, J., 1992. Polarimetric and multifrequency SAR signatures of wet snow, IGARSS'92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2, 1658-1660.
- Schotter, R., 1987. Data processing aspects of synthetic aperture radar, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 20, 7, 829.
- Sefercik, U.G., 2006. Accuracy assessment of digital elevation models derived from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Sefercik, U.G., 2010. Generation and evaluation of DEMs derived by TerraSAR-X InSAR images, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Shi, J.C., 2008. Active microwave remote sensing systems and applications to snowmonitoring, Advances in Land Remote Sensing: System, Modelling, Inversion and Application, S. L. Liang, Ed., Springer, Berlin, Germany.
- Shi, J.C. ve Dozier, J., 2000. Estimation of snow water equivalence using SIR-C/X-SAR. I. Inferring snow density and subsurface properties, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, 6, 2465-2474.
- Smith A.M., 2002. DEM refinement via D-InSAR processing, Advanced Workshop on InSAR for Measuring Topography and Deformation of the Earth Surface, Hong Kong.
- Song, R., Guo, H., Liu, G., Perski, Z., Yue, H., Han, C. ve Fan, J., 2014. Improved Goldstein SAR interferogram filter based on adaptive-neighborhood technique, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12,1, 140-144.

- Şen, E., Kürkcüoğlu, B., Aydar, E., Gourgaud, A. ve Vincent, P. M., 2003. Volcanological evolution of Mount Erciyes stratovolcano and origin of the Valibaba Tepe ignimbrite (Central Anatolia, Turkey), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125, 3-4, 225-246.
- Şengün Y. S., 2009. GPS ve InSAR ölçülerini birlikte kullanarak izmit depreminde oluşan deformasyonların belirlenmesi: nokta seyrekleştirmede yeni bir algoritma, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Takala, M., Luojus, K., Pulliainen, J., Derksen, C., Lemmetyinen, J., Kärnä, J.P., Koskinen, J. ve Bojkov, B., 2011. Estimating northern hemisphere snow water equivalent for climate research through assimilation of space-borne radiometer data and ground-based measurements, *Remote Sensing of Environment*, 115, 12, 3517-3529.
- Tedesco, M., 2015. *Remote Sensing of the Cryosphere*, Chichester, John Wiley & Sons, UK.
- Tiryakioğlu, İ., 2010. TUSAGA-Aktif, CORS-TR Sistemi ve IGS ürünlerinin kullanımı, Ders notu, http://ibrahimtiryakioglu.com/dersler/ozel-olcmeler/CORS-TR_ders4.pdf Erişim Tarihi: 20.10.2019
- Tsay, J.R. ve Chen, H.H., 2001. DEM generation in Taiwan by using InSAR and ERS data, In 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9.
- Wiesmann, A. ve Mätzler, C., 1999. Microwave emission model of layered snowpacks. *Remote Sensing of Environment*, 70, 3, 307-316.
- Yaprak, S., 2007. Kriging yönteminin geoit yüzeyi modellemesinde kullanılabilirliğinin araştırılması ve varolan yöntemlerle karşılaştırılması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaztürk, S., 2015. Sbas-insar yöntemiyle düşey yönlü yüzey deformasyonlarının belirlenmesi: Bursa-orhaneli Linyit Madeni Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zebker, H.A. ve Goldstein, R.M., 1986. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, B5, 4993-4999.
- Zhang, K., Gann, D., Ross, M., Robertson, Q., Sarmiento, J., Santana, S., Rhome J. ve Fritz, C., 2019. Accuracy assessment of ASTER, SRTM, ALOS, and TDX DEMs for Hispaniola and implications for mapping vulnerability to coastal flooding, *Remote sensing of environment*, 225, 290-306.
- Zhu, Y. ve Shen, F., 2019. Snow depth determination based on GNSS-IR, China Satellite Navigation Conference, Singapore, Springer, 98-105.
- Zisk, S.H., 1972. A new, earth-based radar technique for the measurement of lunar topography, *The Moon*, 4, 3-4, 296-306.

- URL-1 <<https://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.tr.html>> Erişim Tarihi: 11.12.2017
- URL-2 <<https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x>> Erişim Tarihi: 10.01.2018
- URL-3 <<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>> Erişim Tarihi: 10.01.2020
- URL-4 <<https://www.harita.gov.tr/urun-51-haritasi.html>> Erişim Tarihi: 10.01.2020
- URL-5 <<https://www.tkgm.gov.tr/tr/icerik/tusaga-aktif-0>> Erişim Tarihi: 20.10.2019
- URL-6 <<https://www.iso.org/home.html>> Erişim Tarihi: 10.10.2019
- URL-7 <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>> Erişim Tarihi: 20.01.2020
- URL-8 <<http://www.dsi.gov.tr/haberler/2019/03/08/zorlu-kış-şartlarına-rağmen-kar-gözlem-çalışmaları-devam-ediyor>> Erişim Tarihi: 19.07.2020

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ahmet Tarık TORUN

Adres : Aksaray Üni. Müh. Fak. Harita Müh. Bölümü

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 2008-2012

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Fen Bil. Ens. Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, 2012-2015

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. 2013-2014 Araştırma Görevlisi- Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi Patnos Sultan Alparslan Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi
2. 2014-2021 Araştırma Görevlisi (35. Madde)- Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Kongrelerde Sunulan Bildiriler

- 1 Torun A.T. ve Ekercin S., 2017. Terrestrial laser scanning approach in calculation of snow depth and volume, 2nd international Conference On Civil And Environmental Engineering, 8-10 May, 2017, Nevşehir, Türkiye.
- 2 Torun A.T., Ekercin S., Alganci U. ve Yilmaztürk F., 2019. InSAR tekniği kullanılarak kar derinliği ve hacminin tahmin edilmesi, X. Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği Sempozyumu, Aksaray, Türkiye.