

**ICESAT-2 NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN KAR
KALINLIĞI BELİRLEME POTANSİYELİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF SNOW DEPTH DETERMINATION
POTENTIAL OF ICESAT-2 POINT CLOUD DATA**

BÜŞRA ŞAHİN

DOÇ. DR ALİ ÖZGÜN OK

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2021

ÖZET

ICESAT-2 NOKTA BULUTU VERİLERİNDEN KAR KALINLIĞI BELİRLEME POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Büşra ŞAHİN

Yüksek Lisans, Geomatik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali Özgün OK

Haziran 2021, 88 sayfa

Kar, ekosistemler ve yaşamsal döngülerin devamı için hayati önem arz eden yağış çeşitlerinden biridir. Bununla beraber yoğun kar yağışı sonucu yaşanabilen çığ önceden tahmin edebilmek için riskin değerlendirilip, olası bir afet durumunda can ve mal kaybının azaltılabilmesi amacıyla tehlikenin önceden tahmin edilmesi önemlidir. Bu nedenle kar kalınlığının düzenli aralıklarla ölçülerek kar kütesinin takibinin sağlanması önemli bir ihtiyaçtır. Bu kapsamda, herhangi bir arazi çalışmasına gerek kalmadan aktif veya pasif sensör teknolojileri yardımıyla veri sağlayan uydu teknolojilerinden yerel ve/veya küresel ölçekte fayda sağlamak kolaylıklar getirmektedir.

Çalışmanın ilk kısmında, ICESat-2 uydusu nokta bulutu verileri kullanılarak kar kalınlığı belirleme hedefi doğrultusunda öncelikle Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları çalışma alanlarında doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda farklı tarihlerde alınan nokta bulutu verileri için dört farklı güvenilirlik düzeylerinde sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güvenilirlik düzeyi yüksek olan nokta bulutu verilerinin ortalama karesel hatanın karekökü değerlerinin oldukça dar bir bantta değiştiğini ortaya koymuştur (0.32 m – 0.49 m). Tez çalışmasının devamında Norveç'te belirlenen üç farklı bölgedeki çalışma alanları için ICESat-2 platformu tarafından toplanan verilerden kar kalınlığı belirleme potansiyeli tespit edilmeye çalışılmıştır.

Norveç'in 3 havalimanı (Bardufoss, Tromsø, Røros havalimanları) yakın çevrelerinde ICESat-2 verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla belirlenen çalışma alanları için elde edilen sonuçlardaki kar kalınlığı tahmin hatalarının -13 cm ile +32 cm arasında olduğu hesaplanmıştır. Norveç çalışma alanlarından elde edilen kar kalınlığı tahmini sonuçları analiz edildiğinde, elde edilen tahmin sonuçlarının oldukça başarılı olduğu ve yüksek güvenilirlik düzeyine sahip verilerin hassasiyet seviyesi ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: ICESat-2, Doğruluk Analizi, Kar Kalınlığı, ATLAS sensörü, LiDAR, Nokta Bulutu, Sayısal Arazi Modeli



ABSTRACT

INVESTIGATION OF SNOW DEPTH DETERMINATION POTENTIAL OF ICESAT-2 POINT CLOUD DATA

Büşra ŞAHİN

Master of Sciences, Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali Özgün OK

June 2021, 88 pages

Snow is one of the types of precipitation that is vital for ecosystems and the continuation of life cycles. However, in order to predict avalanche events that may occur as a result of heavy snowfall, it is important to evaluate the hazard occurrence and to predict the risk in order to reduce the loss of life and property in case of a possible disastrous event. For this reason, it is necessary to monitor the snow mass by measuring the snow depth at regular intervals; and in this context, it is applicable to benefit from satellite technologies that provide data with the help of active or passive sensor technologies on a local and/or global scale without the need for any field work.

In the first part of this thesis, in line with the goal of determining snow depth using ICESat-2 satellite point cloud data, accuracy analyses were carried out primarily within the study areas of Erzurum and Van Ferit Melen airports. In this context, results in four different levels of reliability were obtained for point cloud data collected at different dates. The results revealed that the mean square error of point cloud data having high reliability level varies in a very narrow band (0.32 m – 0.49 m). Thereafter, in thesis, it

was attempted to determine the potential for determining snow depth from the data collected by the ICESat-2 platform for the study areas in three different regions in Norway. In order to investigate the potential for determining snow depth from ICESat-2 data in the vicinity of 3 Norwegian airports (Bardufoss, Tromsø, Røros airports), it was calculated that the snow depth prediction errors were between -13 cm and +32 cm for the related study areas. When the results of snow depth estimation from the Norwegian study areas were analyzed, it was concluded that the results achieved were quite successful, and were highly compatible with the sensitivity level of the data having high level of confidence.

Keywords: ICESat-2, Accuracy Analysis, Snow Depth, ATLAS sensor, LiDAR, Point Cloud, Digital Terrain Model

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bilimsel liderliği ile beni yönlendiren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, her daim sabır gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ali Özgün OK'a,

Çalışmamı yürütürken ilerlediğim yolda engin bilgi, yorum ve teşvikleriyle destek olan *Grup Çığ* ekibine; Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU, Doç. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU, Sinem ÇETİNKAYA ve A. Kürşat ÖZCAN'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın ilk bölümünde yer alan doğrulama verileri ile ilgili olarak desteğini esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü doktora öğrencisi Gizem BAYBAŞ DAĞLI'ya, her daim büyük ilgi ve sabırla meslek hayatımıza faydalı olabilmek için çabalayan, yanlarına çekinmeden gidebildiğim ve lisans eğitimimi tamamladığım Hacettepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Destekleri ve güvenleriyle her zaman yanımda olan, hayatta sahip olduğum değerli hediyem canım annem, babam ve çok kıymetli kardeşime teşekkür ederim. Ayrıca motivasyonu ile tez çalışmalarım süresince katkıları için Vahit Fatih KÜÇÜKİBA'ya ve O'nun her zaman yanında olan sevgili ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Kapsam ve Amaç	1
1.2. Literatüre katkı	5
1.3. Çalışma Organizasyonu.....	6
2. LAZER TARAMA SİSTEMLERİ.....	7
2.1. Lazer ve LiDAR.....	7
2.2. Uydu Platformlarında Kullanılan Lazer Sistemleri.....	10
2.3. ICESat (Ice,Cloud, and Elevation Satellite) Platformları	13
2.3.1. ICESat Uydu Platformu	13
2.3.2. ICESat-2 Uydu Platformu	15
2.4. Literatürde Yer Alan İlgili Bazı Çalışmalar	18
3. ÇALIŞMA ALANLARI	22
3.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanları	22
3.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanları.....	23
4. VERİLER VE İŞLEME YÖNTEMİ.....	26
4.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanı Verileri.....	26
4.1.1. ICESat-2 ATLAS Nokta Bulutu Verileri	26
4.1.2. Referans Sayısal Arazi Modeli (SAM)	28
4.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanı Verileri	29
4.2.1. ICESat-2 ATLAS Nokta Bulutu Verileri	29

4.2.2. Referans Sayısal Arazi Modeli (SAM).....	30
4.1.3. Kar Kalınlığı Verileri.....	33
4.3. Veri İşleme Yöntemi.....	35
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
5.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanı Bulguları.....	40
5.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanı Bulguları	50
6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR	57
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	64
EK 5 - Tezden Türetilmiş Bildiriler.....	64
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Türkiye'de yaşanan çığın yıllara göre dağılımı [10].	4
Şekil 1.2. Türkiye'de 1950-2018 tarihleri arasında yaşanan çığın illere göre dağılımı [7].	4
Şekil 2.1. (a) Foton soğrulması, (b) kendiliğinden yayma ve (c) uyarılmış yayma [16].	8
Şekil 2.2. Lazer ışının özellikleri	8
Şekil 2.3. Lazer üretici sistemlerin genel bileşenleri [15].	9
Şekil 2.4. LOLA verileriyle oluşturulmuş sırasıyla Ay'ın topografya, eğim, pürüzlülük haritaları [20].	11
Şekil 2.5. GLAS sensörü veri alım periyotları [23].	14
Şekil 2.6. ICESat-2 uçuş yönünde ışınların arazideki temsili iz düşümü [25].	16
Şekil 2.7. ICESat-2 ATLAS algılayıcısı veri ürünleri, seviyeleri ve tanımları [28].	18
Şekil 3.1. Erzurum ve Van Ferit Melen havalimanları.	22
Şekil 3.2. (a) Norveç ve Norveç'te bulunan (b) Bardufoss, (c) Tromsø ve (d) Røros havalimanlarının Google Earth görüntüleri.	24
Şekil 4.2. Erzurum Havalimanı (EH) ve Van Ferit Melen Havalimanı (VH) üzerinde nokta bulutlarına göre kesilmiş SAM verileri.	28
Şekil 4.3. Havalimanları yakın çevresinden toplanan ICESat-2 verilerin iz düşümü. (a) Bardufoss, (b) Røros ve (c) Tromsø çalışma alanları.	30
Şekil 4.5. SAM'dan kesilen Norveç test alanlarının arazi üzerinde görünümü.	32
Şekil 4.6. Norveç Meteoroloji Enstitüsü tarafından internet ortamında yayımlanan meteoroloji istasyonlarının görüntüsü [43].	34
Şekil 4.7. Norveç'te bulunan istasyonların kar kalınlığı ölçüm periyotlarına göre grafikleri [42].	35
Şekil 4.8. Norveç jeoid ondülasyon verisi [46].	36
Şekil 5.1. Orta ve yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine düşen ICESat-2 noktalar (yeşil) ve düşmeyen noktaların (mavi) tespiti, (sağ sütun) ICESat-2 ATL08 nokta bulutu ile SAM ara kesit görselleri.	47

- Şekil 5.2.** Yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine düşen ICESat-2 noktalar (yeşil) ve düşmeyen noktaların (mavi) tespiti, (sağ sütun) ICESat-2 ATL08 nokta bulutu ile SAM ara kesit görselleri. 50
- Şekil 5.3.** Bardufoss çalışma alanında (BH#1 - BH#4) yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruplandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri. 54
- Şekil 5.4.** Røros çalışma alanında (RH#1 - RH#4) yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruplandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri. 55
- Şekil 5.5.** Røros (RH#5 - RH#7) ve Tromsø (TH#1) çalışma alanında yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruplandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri. 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. ICESat GLAS algılayıcısı veri ürünleri, seviyeleri ve tanımları [23, 24]...15	
Çizelge 3.1. Erzurum ve Van illerine ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından analiz edilen meteorolojik uç değerler [41].23	23
Çizelge 3.2. Bardufoss, Tromsø ve Røros Havalimanlarında 2010-2021 yılları arasında ölçülen meteorolojik uç değerleri [40].25	25
Çizelge 4.1. Doğruluk analizinde kullanılan ICESat -2 nokta bulutu özellikleri27	27
Çizelge 4.2. Referans SAM merkez koordinatları29	29
Çizelge 4.3. Norveç çalışma alanlarında kullanılan ICESat-2 nokta bulutu verisi özellikleri.....31	31
Çizelge 4.4. Test alanların koordinatları33	33
Çizelge 4.5. Bardufoss, Røros, Tromsø meteorolojik istasyon bilgileri detayları [43]. .34	34
Çizelge 5.1. İstatistiksel ölçütler ve eşitlikleri.40	40
Çizelge 5.2. ATL08 düşük güvenilirlik düzeyli (2) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”).41	41
Çizelge 5.3. ATL08 orta güvenilirlik düzeyli (3) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)41	41
Çizelge 5.4. ATL08 yüksek güvenilirlik düzeyli (4) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)42	42
Çizelge 5.5. ATL08 orta ve yüksek güvenilirlik düzeyli (3 ve 4) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)42	42
Çizelge 5.6. Test alanı istasyon adı, kar kalınlığı, veri alım tarihi ve analiz sonucu elde edilen medyan değerleri.51	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cm	Santimetre
m	Metre
m/sn	Metre/saniye
mm	Milimetre
nm	Nanometre

Kısaltmalar

3B	3 Boyutlu
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AMSR-E	Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System
AMSTR2	Advanced Microwave Scanning Radiometer 2
ATLAS	Advanced Topographic Laser Altimeter System
ATM	The Airborne Topographic Mapper
AWS	Automatic Weather Station
BELA	BepiColombo Laser Altimeter
BH	Bardufoss Havalimanı
CAIC	Colorado Çığ Bilgi Merkezi
CALIOP	Cloud-Aerosol LiDAR with Orthogonal Polarization
DA	Doğruluk Analizi
EDM	Lazer Mesafe Ölçer
Envisat	Environmental Satellite
ESE	Dünya Yer Bilimleri
EH	Erzurum Havalimanı
GALA	Ganymede Laser Altimeter
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GSFC	Goddard Uzay Uçuş Merkezi
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
ICESat	Ice, Cloud, and Elevation Satellite
ICESat-2	Ice, Cloud, and Elevation Satellite
IMS	Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System
LALT	The SELENE Laser Altimeter
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LIST	Land Surface Topograhı
LiDAR	Light Detection and Ranging
LiDAR	Light Detection and Ranging
LLRI	Lunar Laser Ranging Instrument
LOLA	Lunar Orbiter Laser Altimeter
LVSI	Vegetation and Ice Sensor
MABEL	Multiple Altimeter Beam Experimental LiDAR
MLA	Mercury Laser Altimeter
NMA	Norveç Haritalama Kurumu
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOLA	Mars Orbiter Laser Altimeter
NASA	ABD Havacılık ve Uzay Dairesi
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration'nın
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
OMGİ	Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu
RH	Røros Havalimanı
TH	Tromsø Havalimanı
SAM	Sayısal Arazi Modeli
SYM	Sayısal Yüzey Modeli
VH	Van Ferit Melen Havalimanı

1. GİRİŞ

1.1. Kapsam ve Amaç

Dünya'mızdaki değişimleri gözlemleyebilmek, doğal kaynakların zamansal süreçte takibini yapabilmek, yaşadığımız çevrenin daha iyi anlaşılabilmesi için araştırılmasında bilgiye hızlı ve güvenilir kaynaklardan erişerek gerekli analizleri ve yorumları gerçekleştirmek oldukça önem arz eden konular arasındadır.

Kar, yeryüzünde yaşayan tüm canlılar ve doğa için hayati bakımından önemli bir yağış çeşididir. Yeryüzü ve yeraltı su rezervlerinin en önemli kaynağı olan kar suyu, aynı zamanda topraktaki çeşitli mineralleri de çözerek doğadaki bitkilerin sağlıklı beslenmesine de yardımcı olmaktadır. Kar, canlıları da etkilemektedir. Örneğin, bitki ve hayvanların bazıları karın altında eksi derecelerdeki hava sıcaklığından korunarak kışın hayatına devam etmektedir. Kar suyuyla beslenen ırmaklar, yer altı suları vb. insanlar ve doğa için yaşamsal öneme sahiptir.

Değişen bir iklim altında, su kaynakları ve çeşitliliği giderek daha önemli hale gelmektedir. Dağlık havzalarda kar erimesi sonucu oluşan su, doğal olarak kaynakların önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu nedenle, karın mekânsal ve zamansal dağılımının takip edilmesi, dağ su kaynaklarını izlenmesi ve devamında oluşacak olan akışın tahmin edilmesi önem taşımaktadır [1]. Kar örtüsü, yüzey albedosunu, termal iletkenliği, ısı kapasitesini ve aerodinamik pürüzlülüğü değiştirir ve dolayısıyla atmosferik dolaşımı da etkiler. Kuzey Yarımküre, küresel kar örtüsünün yaklaşık %98'ine sahip olup [2] mevsimsel kar örtüsünü tanımlayan üç anahtar parametre kar derinliği, kar suyu eşdeğeri (SWE) ve kar yoğunluğudur [3]. Kar derinliğini ve yoğunluğunu hesaba katan kar örtüsünden daha kapsamlı bir parametre olan kar suyu eşdeğeri, kar erimesinin baskın olduğu bölgelerde hidrolojik döngü ve su temini üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir [2]. Bununla birlikte, kar suyu eşdeğerinin ölçülmesi zaman almakta olup, kar yoğunluğu biliniyorsa, kar kalınlığından hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, güvenilir bir kar yoğunluğu tahmin yöntemiyle SWE yerine kar derinliğini kısmen örnekleyerek iş ve zaman tasarrufu sağlanabilir ve sadece kar kalınlığı verileri mevcudiyeti durumunda hidrolojik analizlere izin verebilir [1].

Diğer yandan kar örtüsünün, iklim üzerinde tek başına olmasa da önemli bir etkisi vardır. Kar beyazı, yani parlak ve açık renkli yüzeyler, ışığı daha az miktarda absorbe ederek geri yansıtır. Dolayısıyla, Dünya'daki toplam kar örtüsü miktarı Dünya'nın ısınma ve soğuma dengelerini düzenlemektedir. Kar örtüsünün beklenen düzeyde olması gelen güneş enerjisinin gerektiği kadar yansımaya ve dolayısıyla artık birçok bilim insanı tarafından oldukça ciddi bir sorun olarak tanımlanan küresel ısınmanın olumsuz etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir.

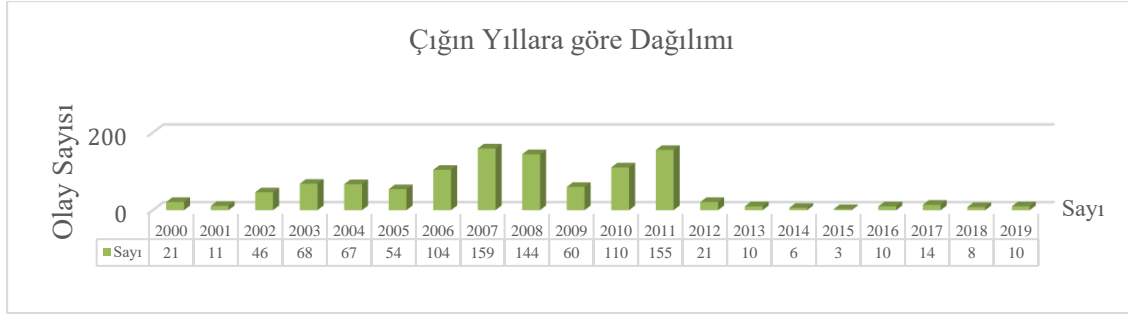
Küresel ısınma, doğal ve yapay kaynakların takibi, doğal veya insan kaynaklı afetlerin tespiti ve izlenmesi, orman ve bitki örtüsünün değişimlerinin takibi gibi konularda küresel ve yerel ölçekte doğru verilere oldukça fazla ihtiyaç duyulmaktadır. Yeryüzündeki nesnelere fiziksel olarak temas etmeksizin o nesnelere hakkında bilgi toplanabilmesine imkân veren uzaktan algılama bilim dalı sayesinde çok çeşitli ve farklı özelliklerde dijital verilerin toplanması mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, yeryüzüne ait güncel ve doğru bilgilerin hızlı ve düşük maliyette elde edilmesinde uzaktan algılama teknolojileri kolaylık sağlamaktadır. Düzenli olarak yeryüzünü ve değişimleri izleme, farklı dalga boylarında elektromanyetik tayfin genişliğinden ve atmosferik pencerelerden yararlanılarak gözle görülemeyen detaylara ait verilerin toplanabilmesi de uzaktan algılama alanının en büyük avantajlarından biridir.

Doğa ve insanoğlu, doğal afetlerin her zaman tehdidi altındadır. Uzaktan algılama teknolojileriyle elde edilen verilerin uygulama alanlarından birisi de meydana gelen veya olası doğal afetlerin tespiti ve sürekli izlenmesidir. Dünyada doğal afetlerin türleri ve önemi ülkeden ülkeye farklılaşmakla birlikte ülkelerde gözlenen afet türlerinin önemli bir çoğunluğunu meteorolojik değişimlerden kaynaklı afetler (heyelan, sel, kuraklık, çığ, vb.) oluşturmaktadır. Meteoroloji kaynaklı doğal tehlikelerin karakter ve etkileri değerlendirildiğinde yoğun kar yağışı sonucu oluşabilen çığ tehlikesi önem arz eden tehlikeler arasında yer almaktadır. Yoğun kar yağışı sonucunda biriken kar kütesinin eğim yönünde iç ya da dış kuvvetlerin etkisiyle kayması sonucunda çığ meydana gelmektedir. Çığa (i) kar örtüsünün anlık durumu, (ii) engebe, eğim ve bitki örtüsü gibi arazi parametreleri (iii) topoğrafya, (iv) rüzgâr, sıcaklık gibi meteorolojik ve (v) yapay etkenler neden olmaktadır [4–7]. Kar yağışı sonrasında binaların çatıları veya araçların ön camları gibi eğimli yüzeylerde en düşük yoğunlukta da olsa çığın fiziksel hareketi gözlemlenebilmektedir. Hava sıcaklığı düşük derecelerdeyken kar bulunduğu yüzeye yapışır ve kaymaz. Sıcaklığın artmasıyla eğim yönünde kar yüzeyden kayar ve

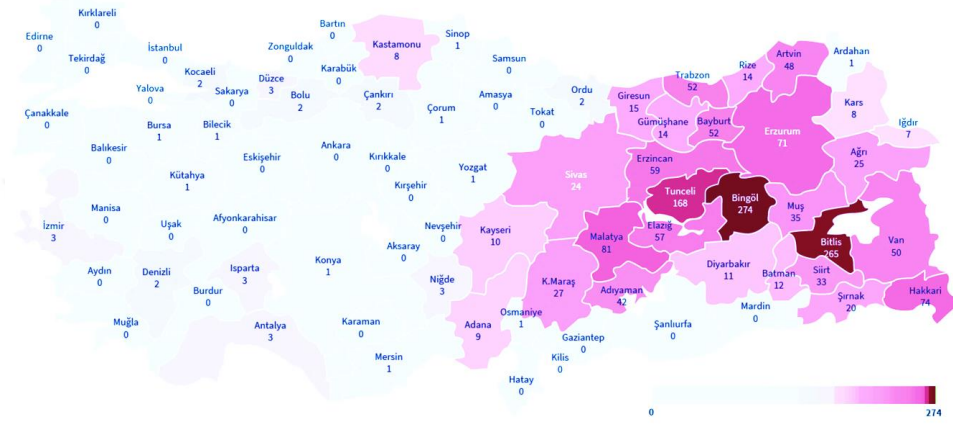
birikinti oluşturur. Oluşan bu birikintiler ise farklı ölçeklerde ele alındığında çığ bölgesinde yaşıyan insanların can ve mal kaybının yaşamasına neden olabileceği gibi ulaşım, ticaret, turizm ve sosyo-ekonomik gibi alanlarda da yaşam kalitesini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Yağan karın eğime ve hava koşullarına bağlı olarak çığın oluşması sonucunda birçok insan hayatını kaybetmektedir. En çok kuzey yarım kürede gerçekleşen çığ afetleri yıllara göre ciddi kayıplar ortaya koymaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda Avrupa'da (Avusturya, İsviçre, Slovenya'daki Alp Dağları) 1950 ve 2015 yılları arasında toplam 3729 kişi çığ nedeniyle hayatını kaybetmiştir. Örneğin sadece 1999 yılı Şubat ayı içerisinde Alp Dağları bölgesinde birkaç günde yüzlerce çığ düşmüş ve en az 100 kişi hayatını kaybederken 10 binden fazla kişi ancak helikopterler vasıtasıyla kurtarılabildi [8]. Amerika'da yapılan bir araştırmada ise 1999 ile 2019 yılı arası gerçekleşen ığlarda toplam 456 kişi hayatını kaybetmiştir. Colorado ığ Bilgi Merkezine (CAIC) göre, Amerika'da son 10 yılın kış aylarında ortalama 27 kişi meydana gelen çığ afeti sonucu hayatını kaybetmektedir [9]. Bir başka araştırmada 2020-2021 kış aylarında en çok ölüm Fransa'da 18 kişinin hayatını kaybetmesiyle kayıtlara geçmiştir. Fransa'yı takiben İsviçre'de 15, İtalya'da 14 ve Avusturya'da 10 kişi çığ afeti nedeniyle hayatını kaybetmiştir [8].

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından yayımlanan rapora göre ülkemizde 1 Ocak 1950 ile 1 Haziran 2018 tarihleri arasında 1500'ün üzerinde çığ yaşanmıştır [10]. Bunlardan çoğu 1990'lı yıllardan itibaren yaşanmış olup (Şekil 1.1) ığ sayısında son 10 yılda gözle görülür bir azalma göze çarpmaktadır. Ancak, Van ilimizde 4-5 Şubat 2020 tarihlerinde arka arkaya meydana gelen iki çığ sonucu yaşanan ve toplam 42 vatandaşımızın hayatını kaybettiği çığ afeti, konunun ne kadar kritik ve hayati derecede önem arz ettiğini ülkemize tekrar hatırlatan üzücü bir örnek olmuştur. Şekil 1.2'de 1 Ocak 1950 ile 1 Haziran 2018 tarihleri arasında resmi kayıtlara göre meydana gelen ığların il bazında sayıları verilmiştir. Meydana gelen çığ sayıları incelendiğinde ilk sıralarda Bingöl, Bitlis ve Tunceli vilayetlerimiz gelmektedir. Bu bağlamda Doğu Anadolu Bölgesi'nin çığın ülkemizde açık ara en fazla yaşandığı bölge olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 1.1. Türkiye'de yaşanan çığın yıllara göre dağılımı [10].



Şekil 1.2. Türkiye'de 1950-2018 tarihleri arasında yaşanan çığın illere göre dağılımı [7].

Çoğu zaman yaşadığımız bölgenin ya da kullanılmakta olduğumuz arazilerin doğal tehlike derecesini göz önünde bulundurmak, yaşanacak olası bir afetin meydana getirebileceği zararları en aza indirmek adına önemlidir. Ülkemizde Doğu Anadolu Bölgesi veya kayak turizminin yoğun ve sık olarak yapıldığı alanlarda çığlara sıklıkla rastlanmaktadır. Dolayısıyla önceden tahmin edebilmek için riskin değerlendirilip, olası bir afet durumunda can ve mal kaybının azaltılabilmesi amacıyla tehlikenin önceden tahmin edilmesi önemlidir. Çığlarda önceden yapılabilecek risk değerlendirmelerinin en önemli adımlarından birisi, çığın yaşanabileceği bölgelerdeki kar kalınlığının düzenli aralıklarla ölçülerek kar kütlesinin takibinin sağlanmasıdır. Bu bölgelerde, özellikle engebeli arazi ve kar yağışı nedeniyle zaten ulaşımı tehlikeli olan alanlardan gündüz/gece (düzenli) kar kalınlığı ölçümü gerçekleştirmek hem oldukça zor hem de maliyetli olmaktadır. Bu nedenle herhangi bir arazi çalışmasına gerek kalmadan aktif veya pasif sensör teknolojileri kullanarak veri sağlayan gözlem uydularından küresel ve yerel ölçekte faydalanmak kolaylık sağlayacaktır. Optik görüntülerle kar örtüsü izlemesi yapılabilmekte olup görüntülerin yorumlanması kolay olmamakla birlikte yüksek

mekânsal çözünürlüklerde maliyet de yüksek olabilmektedir [11]. Ayrıca yine bu görüntülerden kar kalınlığı ölçüm bilgisine doğrudan ulaşmak da oldukça zordur. Ancak LiDAR (**L**ight **D**etection and **R**anging) teknolojisi kullanan altimetre uyduları kullanılarak (örn. ICESat-2) toplanan nokta bulutu verileriyle 3-boyutlu (3B) ölçümler yapılabilmekte ve bu verilerden arazide meydana gelen yükseklik değişimlerinin tespitinde yararlanılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, günümüzde 3-boyutlu (3B) ölçümler yapan ve topladığı verilere açık olarak ulaşılabilen bir altimetre uydusu olan ICESat-2 verilerinin kullanılması tercih edilmiş ve bu uydu tarafından sağlanan nokta bulutu verileriyle kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak ICESat-2 platformu ATLAS algılayıcısından elde edilen nokta bulutu verilerinin doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir. Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları doğruluk karşılaştırması için düz yüzeyler sağlaması açısından ATLAS veri doğruluk analizleri için çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Farklı tarihlerde alınan nokta bulutu verileri için dört farklı güvenilirlik düzeylerinde sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, güvenilirlik düzeyi yüksek olan nokta bulutu verilerinin ortalama karesel hatanın karekökü değerlerinin oldukça dar bir bantta değiştiğini ortaya koymuştur. Kar kalınlığı belirleme potansiyeli için Norveç'te belirlenen üç farklı bölgede çalışma alanları belirlenmiştir. Norveç'in 3 havalimanının (Bardufoss, Tromsø, Røros havalimanları) yakın çevrelerinde ICESat-2 verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla seçilen çalışma alanları için elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde yapılan tahmin sonuçlarının oldukça başarılı olduğu ve yüksek güvenilirlik düzeyine sahip verilerin hassasiyet seviyesi ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

1.2. Literatüre katkı

Bu tez çalışmasının literatüre katkıları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ICESat-2 verileri için doğruluk analizleri literatürde ilk kez görece düz ve pürüzsüz bir satıhtan oluşan ve oldukça yüksek doğruluğa sahip referans verisi bulunan iki havalimanında test edilmiştir.
- Kutup bölgeleri dışında kar kalınlığı belirlemeye yönelik ICESat-2 verilerinin kullanımı ve uygunluğu araştırılmış ve Norveç çalışma alanlarında

doğrulmaları yapılmıştır. Bu kapsamda ICESat-2 özelinde literatürde yer alan çalışmalar oldukça az sayıdadır.

- Önerilen veri işleme yöntemi için MATLAB ortamında bir komut dosyası geliştirilmiştir.

1.3. Çalışma Organizasyonu

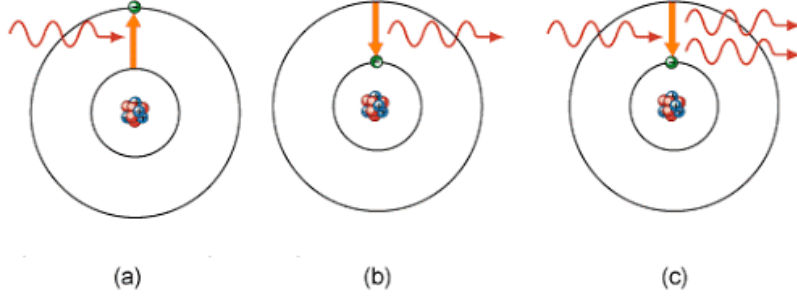
Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümü giriş kısmı olup, uzaktan algılama teknolojilerinin yaşamımıza katkıları, kar ve çığın takibinin önemi hakkında bilgiler sunulmuş ve çalışmanın literatüre katkısı belirtilmiştir. Tezin ikinci bölümünde, lazer tarama sistemleri çalışma prensipleri, uydu tabanlı algılayıcılar ve ICESat ve ICESat-2 uydularının teknik özellikleri ve geçmişte yapılmış olan bazı çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, çalışma alanları tanıtılmıştır. Tezin dördüncü bölümünde ise, Bölüm 3'te sunulan çalışma alanları için kullanılan veriler ve genel veri işleme yöntemi tanıtılmıştır. Tezin beşinci bölümünde çalışmadan elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen bulgular kapsamında tez çalışması sonuçları paylaşılmıştır.

2. LAZER TARAMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde lazer tarama sistemleri çalışma prensipleri, uydu tabanlı algılayıcılar ve ICESat ve ICESat-2 uydularının teknik özellikleri, kar kalınlığı tespiti için geçmişte yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

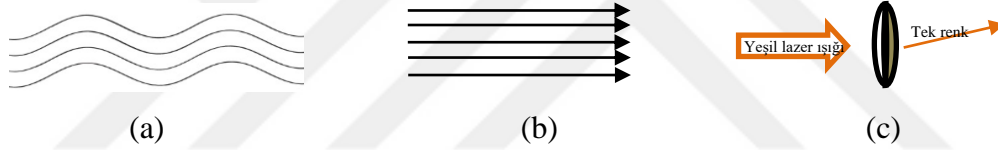
2.1. Lazer ve LiDAR

Hayatı kolaylaştıran teknolojilerden biri olan lazer cihazları günlük yaşamımızın birçok aşamasında kullanılmakta olup enerji kullanımında yüksek ve düşük olarak sınıflandırabileceğimiz; mühendislik, medikal, eğlence, iletişim gibi platformlarda karşımıza çıkar. Düşük enerjili lazerlere barkod okuyucular, tarayıcı, yazıcılar, fiber optik kablolarla veri aktarımı, hologram, lazer işaretleyici gibi örnekler verilebilir. Nükleer hızlandırıcılar, göz ameliyatları, üç boyutlu modelleme ise yüksek enerjili lazer kullanılan alanlara örneklerdir [12]. Lazer, İngilizce **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation kavramının baş harflerinden türetilmiştir. Yani uyarılmış olan fotonların ışın demetleri halinde enerji yaymasıdır [13]. Her bir kavramın özel anlamı olup ışık, elektromanyetik radyasyonu tanımlarken sadece gözle görebildiğimiz dalga boyu değil spektrumdaki bütün dalga boylarını kapsar. Amplifikasyon, uyarılan atomdan elde edilecek ışık miktarını artırmak demektir. Uyarılmış yayma, lazer ışığının üretim şeklini ifade etmektedir. Uyarılmış seviyede bulunan bir atom kendi enerjisini başka atomlara aktararak, ısı vererek ya da ışık şeklinde yayılarak farklı formlarda tüketebilir. Enerji ışık şeklinde yayıldığı durumda ışığın dalga boyu atomun tükettiği enerjiye karşılık gelecektir. Işık, kendiliğinden yayma veya uyarılmış yayma formlarında yayılabilir. Temel enerji düzeyinde bulunan atomun yüksek enerji düzeyine ulaşmak için elektron soğurulması olur (Şekil 2.1a). Bu düzeyde atom belli bir süre kalacak ve sonunda kendiliğinden foton yayacaktır (Şekil 2.1b). Uyarılmış yayma ise, soğurulmuş elektronla aynı enerjiye sahip ikinci bir elektronun uyarılmış atomun tekrar uyarılması sonucu iki fotonu aynı anda yaymasıyla oluşur (Şekil 2.1c). Radyasyon, ışık hızında hareket eden bu enerji kızılötesi, görünür ışık, radyo dalgası gibi formlarda dalga ve parçacık (foton) davranışdır [14, 15].



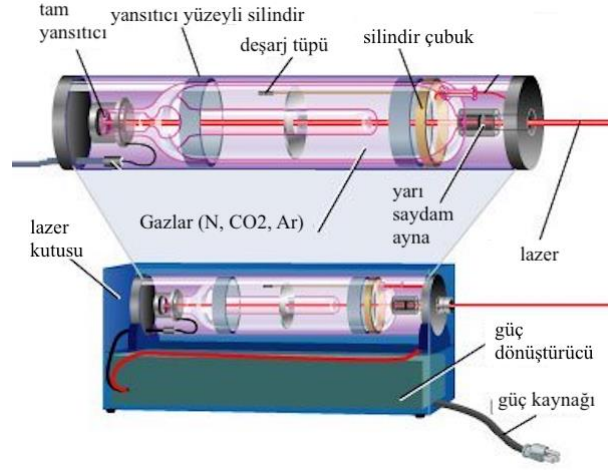
Şekil 2.1. (a) Foton soğrulması, (b) kendiliğinden yayma ve (c) uyarılmış yayma [16].

Lazerin diğer ışık türlerinden ayıran özellikleri, tutarlılık (*coherent*), polarizasyon (*collimated*) ve tek renkliliktir (*monochromatic*). Sinüzoidal hareketle aynı şekil ve boyutta (Şekil 2.2a) hareket ederken ışınlar paralele yakın (Şekil 2.2b) ışık demeti halinde tek renkte (Şekil 2.2c) yayılır.



Şekil 2.2. Lazer ışınının özellikleri

Lazer ışınının üretilebilmesi için sistemin gereksinimleri; tam yansıtıcı ve yarı saydam ayna, silindir çubuk, deşarj tüpü, yansıtıcı yüzeyli eliptik silindir ve güç kaynağıdır (Şekil 2.3). Deşarj tüpü silindirik çubukta bulunan elektronları dış etki ile (elektrik, flaş vb.) uyarma mekanizmasını oluşturur. Gazlar (Azot, Argon, Karbondioksit vb.), katı ve yarı iletkenler (Nd: YAG, Nd:Glass), yakut gibi kristaller aktif ortamı oluşturmak için kullanılabilirler. Güç kaynağı mekanizması, ihtiyaç duyulan elektriksel, kimyasal enerjiyi sağlar. Sistemin iki ucunda tam ve yarı saydam ayna yer almaktadır. Tam saydam ayna uyarılmış elektronları yarı saydam ayna üzerine yansıtır. Bu şekilde ileri geri giden elektronların enerji seviyeleri artar ve ortam yoğunluğunun artmasıyla yarı saydam aynadan geçebilen lazer ışınları ışımaya yapar [10].



Şekil 2.3. Lazer üretici sistemlerin genel bileşenleri [15].

Lazer sistemlerinin kullanılan ışığın dalga boyu, gücü, ışık/ışın atama süresi, ışının boyutu ve sapması gibi önemli özelliklerinden farklı alanlarda yararlanılır. Dalga boyunun uzunluğu kullanılan lazer materyaline ve optik tasarımına bağlıdır. Materyal katı hal, yarı iletken, kristal ve gaz olmak üzere farklı çeşitlerde kullanılmaktadır. En yaygın tercih edilen materyal olan Neodimyum: Yttrium Alüminyum Granat (Nd: YAG) 1064 nm dalga boyuna sahiptir ve yersel, hava lazer tarama sistemlerinde kullanılır. Kullanılacak alana göre tercih edilen ışık dalgaları farklı özelliklere sahiptir. Örneğin, ölçümü yapılacak göl, deniz gibi yüzeylerde geçirgenlik faktörü dikkate alınarak kısa dalga boyuna sahip materyaller tercih edilebilir [15].

LiDAR, lazer/ışık algılama ve mesafe tespiti anlamına gelen, nesne (hedef) ile arasındaki mesafeyi nesnenin yaydığı elektromanyetik enerjinin saçılması, soğurması ve yansıtması yardımıyla belirleyen bir uzaktan algılama tekniğidir. Kendi enerjisini hedefe gönderen aktif algılayıcıya sahip sistem, ışığın havada yayılma hızını ve lazer sinyallerinin toplam uçuş süresi bilgisini kullanır [17]. Uçuş süresi, sensör tarafından gönderilen ve geri toplanan lazer sinyalleri arasında geçen süreyi ifade eder.

Yersel, hava ve uydu platformlarında kullanılan LiDAR sistemleri Dünya'nın şekil ve yüzey özellikleri hakkında üç boyutlu (3B) bilgi toplar. LiDAR sistemleri lazer kaynağı, yayılan dalga biçimini tespiti için tasarlanmış senkronize sistem, cihazın konumu ve yüksekliğini ölçmeyi sağlayan hibrit coğrafi referans sisteminden oluşur. LiDAR sensörleri mobil cihazlarda, sabit karasal istasyonlarda, yeraltı araçlarında, hafif hava araçlarında (Drone, İHA vb.), sabit veya döner kanatlı uçaklarda ve uydularda

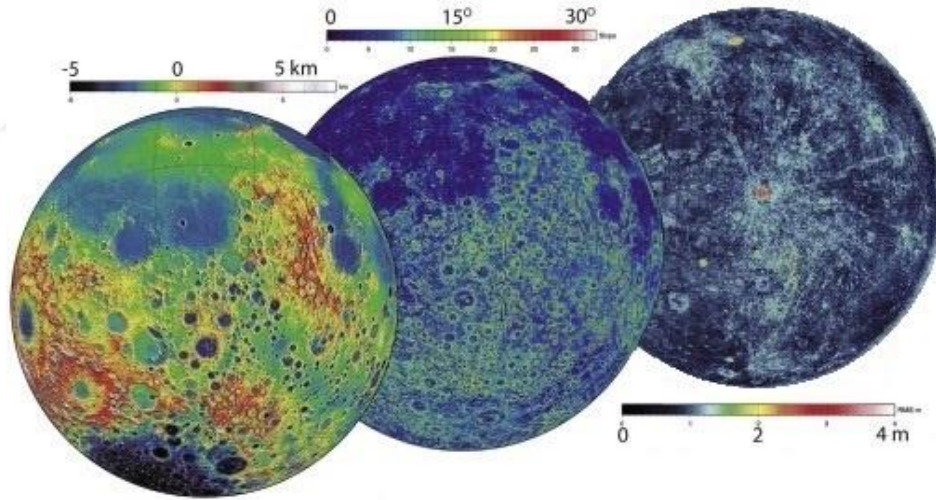
kullanılmaktadır. Uzaktan algılama sistemlerinden RADAR ile karşılaştırıldığında lazer sistemleri çalıştıkları görece kısa dalga boyu nedeniyle yoğun bulutlara veya nesnelere yeterince nüfuz edemezler ve daha dar bir alana sinyal gönderirler. Ancak yine de elde edilen veri, tatmin edici bir zamansal ve mekânsal çözünürlüğe sahip olabilir [12, 13, 15].

2.2. Uydu Platformlarında Kullanılan Lazer Sistemleri

Bilim insanlarının atmosfer yoğunluk profillerinin belirlenmesi amacıyla 1930'lu yıllarda başlayan lazer kullanımı, 1940-1950 yıllarında lazer mesafe ölçer (EDM) ile mesafelerin hassas ve doğru ölçmeyi amaçlamasıyla gelişmiştir. Ardından ışığın hızlandırılarak yüksek enerjili ışınmasıyla lazer kavramı tanımlanmış ve lazer sistemleri araştırmacılar tarafından uydularda kullanılmaya başlanmıştır. İlk uzay tabanlı LiDAR algılayıcısı 1970'lerin başında Apollo 15 görevinde ilk lazer verici kamerayla ya da bağımsız çalışan bir sistem olarak kullanılmıştır. Apollo 15'i takip eden 16 ve 17 görevlerinde de dakikada 3.75 atım hızında yakut lazer kullanılarak sistem geliştirilmiştir. 1980'lerin sonunda diyot pompalı katı haldeki lazerlerin çıkmasıyla uzayda LiDAR sistemlerinin uzun süreli görev yapması mümkün hale gelmiştir. İlk diyot pompalı Nd:YAG materyalini kullanan uzay tabanlı LiDAR ABD Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA / GSFC) tarafından geliştirilen Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA), uzay aracının yakıt sisteminde meydana gelen bir sorun nedeniyle Mars yörüngesine ulaşamamış olmasına rağmen MOLA'ya benzer lazer ve detektöre sahip daha küçük bir sistem Clementine görevinde 1994 yılında Ay'a gönderilerek, Ay yüzeyinin küresel ölçekte topoğrafik haritasının birkaç yüz metre hassasiyette çıkarılmasını sağlamıştır. Bir başka küçük boyutlarda tasarlanmış lazer sistemi ise Johns Hopkins Üniversitesi Uygulamalı fizik laboratuvarında geliştirilmiş ve 1994 yılında uzaya fırlatılarak Dünya'ya yakın bir asteroidin (Eros-433) şekli ve topoğrafyası ölçülmüştür. MOLA'nın ardından önemli bir dönüm noktası olan ikinci sistem yine NASA ve GSFC tarafından tasarlanıp 1997'de fırlatılmış ve bu sayede Güneş sisteminin dördüncü gezegeni olan Merkür'ün yüzeyi haritalanmıştır. Mercury Laser Altimeter (MLA), NASA ve GSFC ile birlikte MESSENGER görevi için 2004 yılında fırlatılmış ve 2011 yılının Mart ayında Merkür'ün yörüngesine girmiştir. Mars'a göre daha sıcak bir ortamda MOLA'ya göre küçük kütle boyutlarında benzer işlevsellik ve performansla

gezegenin yüzey yüksekliğini, kuzey yarım kürenin küresel şeklini ve kutuplarda kamerayla veri toplanamayan yerlerin haritalanmasını sağlamıştır.

Gezegenlerin yanı sıra Ay ile ilgili gözlemler yapmak amacıyla 2007 yılında Japonya'nın The SELENE Laser Altimeter (LALT) [18] ve 2008 yılında ise Hindistan'ın Lunar Laser Ranging Instrument (LLRI) [19] lazer ölçüm sistemleri farklı platformlar ile fırlatılmıştır. Bu sayede her biri yaklaşık 10 milyon lazer altimetrik ölçümlerle Ay yüzeyi topoğrafyasını haritalandırmıştır. NASA tarafından 2009 yılında geliştirilen Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) uzayda çoklu ışın kullanan ilk lazer algılayıcısıdır. Bağımsız beş ayrı yönden alım yaparak günümüzde de Ay'dan veri sağlamaktadır. Gece ve gündüz aynı ışık şiddetiyle yapılan ölçümlerle kalıcı olarak gölgelenen kutup alanları da dahil olmak üzere yüksek hassasiyetli albedo haritası üretilmektedir. Yapılan ölçümler dar bir spektral bantta ve hassas konum belirlemeyle yapılmıştır. Örneğin, LOLA'dan elde edilen Ay yüzeyi yüksekliği, eğimi-pürüzlülüğü ve albedo haritası Şekil 2.4'teki gibidir.



Şekil 2.4. LOLA verileriyle oluşturulmuş sırasıyla Ay'ın topografya, eğim, pürüzlülük haritaları [20].

Dünya'nın yeryüzü yüksekliğinin ölçülmesi hava LiDAR ölçümleri ve uzay görevleriyle desteklenmeye çalışılmıştır. Bir hava LiDAR algılayıcısı olan NASA'nın The Airborne Topographic Mapper (ATM) ile ilk olarak Grönland'da buz yüksekliği ölçülmüştür. 1990'lı yılların sonlarına doğru ise The Land, Vegetation and Ice Sensor (LVSI) geliştirilmesiyle bitki örtüsü, toprak, buz ve kar örtüsü araştırmaları

gerçekleştirilmiştir. Öncül bir sistem olan Ice, Cloud, and Elevation Satellite (ICESat) NASA tarafından geliştirilerek 2003 yılında fırlatılmıştır. Üzerindeki GLAS sensörü altimetre görevlerinde 1064 nm, atmosferik ölçümlerde 532 ve 1064 nm dalga boyunu kullanmıştır. Kuzey ve güney kutbuna ait o zamana kadar eşi görülmemiş veri sağlayarak buz yüksekliği ile ilgili bilgi sağlarken, orta enlemlerde ise kara ve bitki örtüsü hakkında veriler toplamıştır [21].

NASA tarafından tasarlanan iki güncel veri toplayan Dünya yörüngeli LiDAR görevlerinden ilki 2018 yılında fırlatılmış olan ikinci Ice, Cloud, and Elevation Satellite (ICESat-2) uydusudur. ICESat-2, yeryüzü yüksekliğini ve yüzey eğimini ölçebilme kabiliyetine sahip altı lazer ışınına sahiptir. Tek foton tespiti ve 532 nm dalga boyunda yüksek atım gücüne sahiptir. Bir diğer LiDAR görevi ise Küresel Ekosistemi araştırmayı hedefleyen Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) uydusudur. GEDI, Dünya'daki orta kuşaktaki hemen hemen tüm tropikal ve ılıman ormanların üç boyutlu yapısının yüksek çözünürlükle ölçümünü yapmak, karbon döngüsü ve biyoçeşitlilik çalışmaları için özel tasarlanmış bir LiDAR uydusudur.

Bu konudaki gelecekteki çalışmalar yüzey yüksekliğini çoklu ışınlarla ardışık ölçme tekniği ile haritalamaya ve bu sayede 3B görselleştirmeye doğru gelişmektedir. Ölçümlerin kapsamını daha da iyileştirmek amacıyla ışın sayısı artırılıp, lazer ayak izi konumsal çözünürlüğü arttırmak amacıyla küçültülmektedir. NASA'nın yeni nesil hedefleri arasında Dünya yüzeyini birkaç yıl içinde LiDAR kullanarak haritalandırmak amacıyla Land Surface Topography (LIST) bulunmaktadır. LIST, ICESat uyduları ve GEDI gibi araziye, bitki örtüsünü haritalamak için 5 m çapında ayak izine ve 1000 ışına sahip olması düşünülmektedir.

Merkür'den lazer altimetre veri sağlayan MESSENGER uzay aracının eksantrik yörüngesi sebebiyle sadece kuzey yarım küreden veri sağlanmış ve bu nedenle yeni bir uydu sistemine ihtiyaç duyulmuştur. Bu kapsamda Avrupa Uzay Ajansı tarafından 2018 yılında BepiColombo Laser Altimeter (BELA) fırlatılmıştır. Aracın gezegene 2025 yılının sonlarına doğru ulaşması beklenmektedir. Diğer gezegen yüzeyi yüksekliği ölçümü için tasarlanan Ganymede Laser Altimeter (GALA) uydusunun ise 2022 yılı ortalarına doğru fırlatılması ve 2029 yılı sonlarında Jüpiter'e ulaşması hedeflenmektedir. GALA ile Jüpiter yüzeyinin kimyasal ve fiziksel yapısı, yüzey buzlu yüksekliği gibi ölçümler yapılması hedeflenmektedir. Genel olarak, çoklu ışın demetleri alınmasında ölçümün verimliliği uzay aracının kaynak kısıtlamalarına bağlıdır. Yüksek

verimli lazer sistemlerinde gerçek zamanlı veri işleme, depolama kapasitesi, kütle, güç ve maliyet açısından zorluklar devam etmektedir [20].

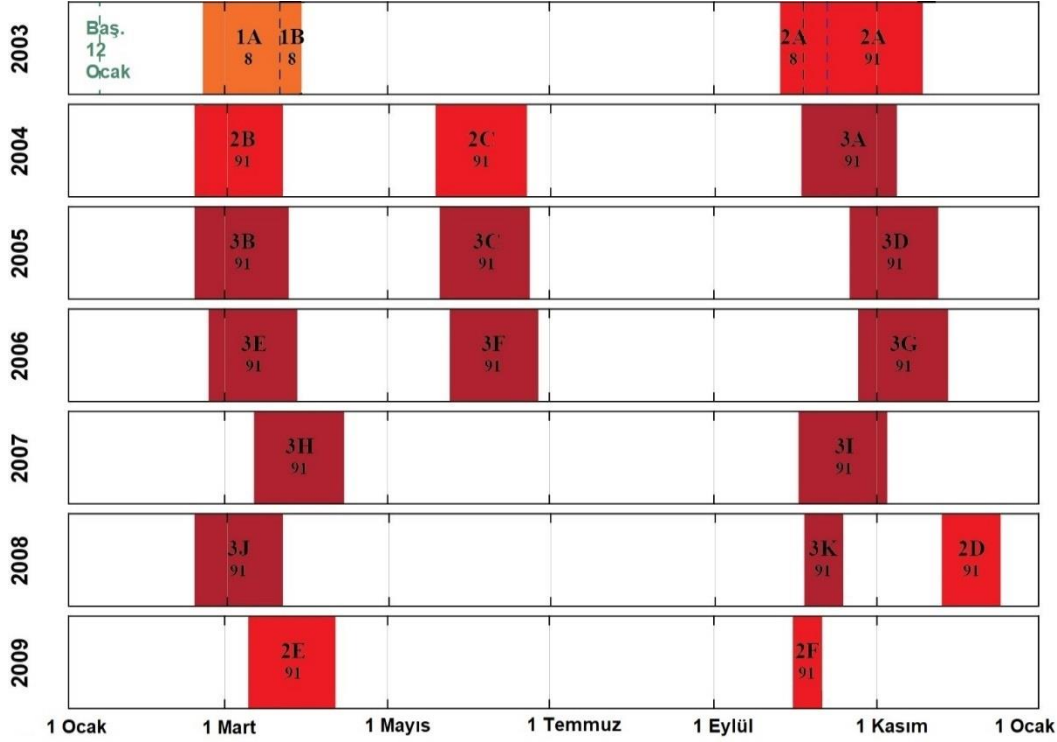
2.3. ICESat (Ice,Cloud, and Elevation Satellite) Platformları

Bu bölümde, NASA tarafından geliştirilerek 2003 yılında fırlatılmış Ice, Cloud, and Elevation Satellite (ICESat) ve bu başarılı görevin ardından ikincisi 2018 yılında fırlatılan Ice, Cloud, and Elevation Satellite-2 (ICESat-2) uydularının bazı teknik özelliklerinden bahsedilmektedir.

2.3.1. ICESat Uydu Platformu

Antarktika ve Grönland'daki buz yüksekliğindeki değişimini takip etme ve bulut yükseklikleri, kar-buz kalınlığı, bitki örtüsü ve topoğrafyayı haritalama görevleri çerçevesinde ICESat uydusu fırlatılmıştır. Bu uydu, ABD Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Goddard Uzay Uçuş Merkezi (GSFC) tarafından ekosistemlerin değişimini kapsamlı olarak takip etmek amacıyla geliştirilmiş Dünya Yer Bilimleri (ESE) programının alt görevlerinden birini oluşturmaktadır. ICESat aynı zamanda Laser Altimeter - 1 olarak da adlandırılmakta olup Kriyosfer ölçümlerine odaklı ilk uzay tabanlı lazer altimetre görevidir. Lazerin kullanım ömrünün kısıtlı olması sebebiyle yaklaşık 30 günlük periyotlarda yılda 2-3 kez değiştirilerek veri alımı yapılmıştır (Şekil 2.5). Değişen modlarına rağmen yine de buz tabakalarındaki hızlı değişim takip edilebilmiştir [22].

ICESat altimetre verileri buz ve katı toprak kütle değişimini araştırmak amacıyla GRACE uydusuyla, Environmental Satellite (Envisat) uydusunun eşzamanlı radar altimetre ölçümleriyle Kuzey Kutup denizinin yüksekliğinin ölçülmesi, haritalanması ve yüksek çözünürlüklü deniz yerçekimi modelinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Antarktika'daki buzul altı gölleri keşfedilerek gelgit modelleri oluşturulmuştur.



Şekil 2.5. GLAS sensörü veri alım periyotları [23].

ICESat, 600 km yükseklikteki yörüngede 94° inklinasyon açısıyla 183 günlük döngü içinde turunu tamamlar. Topoğrafya ve yoğun bulutların ölçümü 1064 nm dalga boyu, bulutların ve aerosollerin dikey dağılımını ölçmek için 532 nm dalga boyunda Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) algılayıcısı kullanılmıştır. Bu algılayıcı bünyesinde Lazer-1, Lazer-2 ve Lazer-3 olarak adlandırılan farklı lazerler bulunmakta olup görev gereksinimine ve lazer kullanım ömrüne uygun olarak aynı anda yalnızca bir lazer çalışma periyotları içerisinde veri toplama görevini gerçekleştirmiştir. Yedi yıllık görevi süresi içinde yılda 2 ya da 3 kez alım yapacak şekilde toplam 20 çalışma periyodu belirlenmiştir (Şekil 2.5). Yeryüzüne 40 Hz frekansta iletilen lazer darbeleri 65 m'lik ayak izine sahiptir. Birbirini takip eden 65 m'lik ayak izleri arasında 172 m mesafe bulunmaktadır. Geri dönen lazer darbeleri 1 m çapındaki teleskopla yakalanarak analog detektörde sayısallaştırılır. Sayısallaştırılan iletim darbeleri ve karşılık gelen geri dönüş darbeleri dalga formlarını oluşturur. Lazeri iletimi ve geri dönüşü dalga formlarının farkı alınarak uçuş süresi hesaplanır. Tek yönlü mesafe uçuş süresinin yarısı ile ışık hızının çarpılması ve troposfer gecikmesinin düzeltilmesi ile mesafe hesaplanmış olur.

ICESat'ın temel hedefi, Arktik ve Antarktika'daki buz tabakalarının kütle/hacim değişiminin yıllık ve uzun vadede küresel deniz seviyesi üzerindeki etkisinin yeterli doğrulukta belirlenmesi olmasına rağmen topoğrafya, hidroloji, bulut yükseklikleri ve atmosferdeki aerosol dağılımları, bitki örtüsü ve kanopi yükseklikleri gibi farklı disiplinlerde 15 veri ürünü sağlamıştır. Çizelge 2.1'de veri ürünlerinin seviyesi ve tanımı sunulmuştur. Veri ürünlerine, internet üzerinden (NSIDC veya OpenAltimetry) erişilmesi mümkün olup veriler ücretsiz olarak temin edilebilmektedir. Sunulan veriler .hdf5 veri formatındadır. Hiyerarşik veri formatı olan hdf5, küme ve grup olarak tanımlanan nesnelere arasında ilişki kurarak çok boyutlu verileri depolamak için kullanılan, esnek boyutlu bir format türüdür.

Çizelge 2.1. ICESat GLAS algılayıcısı veri ürünleri, seviyeleri ve tanımları [23, 24].

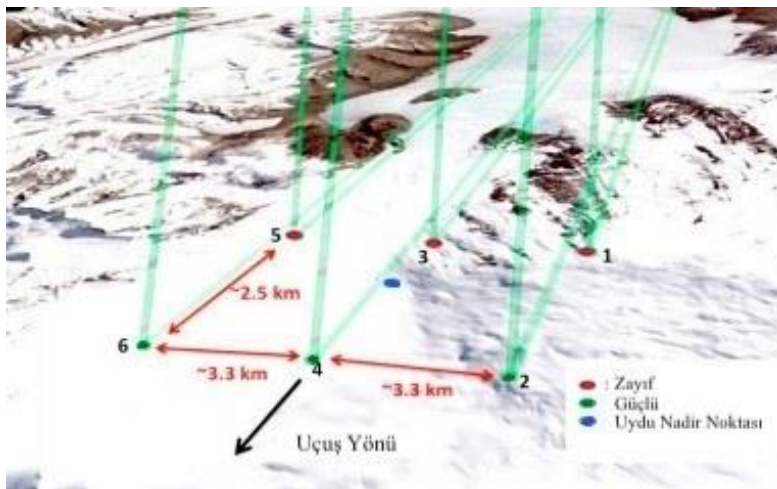
Veri Ürünleri	Ürün Seviyesi	Veri tanımı
GLAH01	L1A	Küresel Altimetre Verisi
GLAH02	L1A	Küresel Atmosfer Verisi
GLAH03	L1A	Küresel Mühendislik Verisi
GLAH04	L1A	Küresel Lazer Nokta Bulutu Verisi
GLAH05	L1B	Küresel Dalga Formu Tabanlı Mesafe Düzeltme Verisi
GLAH06	L1B	Küresel Yükseklikler
GLAH07	L1B	Küresel Geri Yansıma
GLAH08	L2	Küresel Gezegen Sınır ve Yükseltilmiş Aerosol Tabakaları Yüksekliği
GLAH09	L2	Küresel Çok Katmanlı Bulutlar için Bulut Yükseklikleri
GLAH10	L2	Küresel Aerosol Dikey Yapı Verileri
GLAH11	L2	Küresel İnce Bulut / Aerosol Optik Derinlik Verileri
GLAH12	L2	Kutup Bölgeleri Buz Tabakası Verileri
GLAH13	L2	Deniz Buzulları Altimetre Verisi
GLAH14	L2	Küresel Arazi Yüzeyi Altimetre Verisi
GLAH15	L2	Okyanus Altimetre Verisi

2.3.2. ICESat-2 Uydu Platformu

2003 ile 2009 yılları arasında başarılı şekilde görevini yapan ICESat'ın ardından 2018 yılında benzer amaçlar doğrultusunda ICESat-2 uydusu fırlatılmıştır. Uydunun birincil

görevi kriyosferdeki değişikliklerin takibinin sağlanması olsa da uydu yoluyla Dünya'nın bitki örtüsü ve jeodezik ölçümlerinin yapılması da amaçlanmaktadır [25].

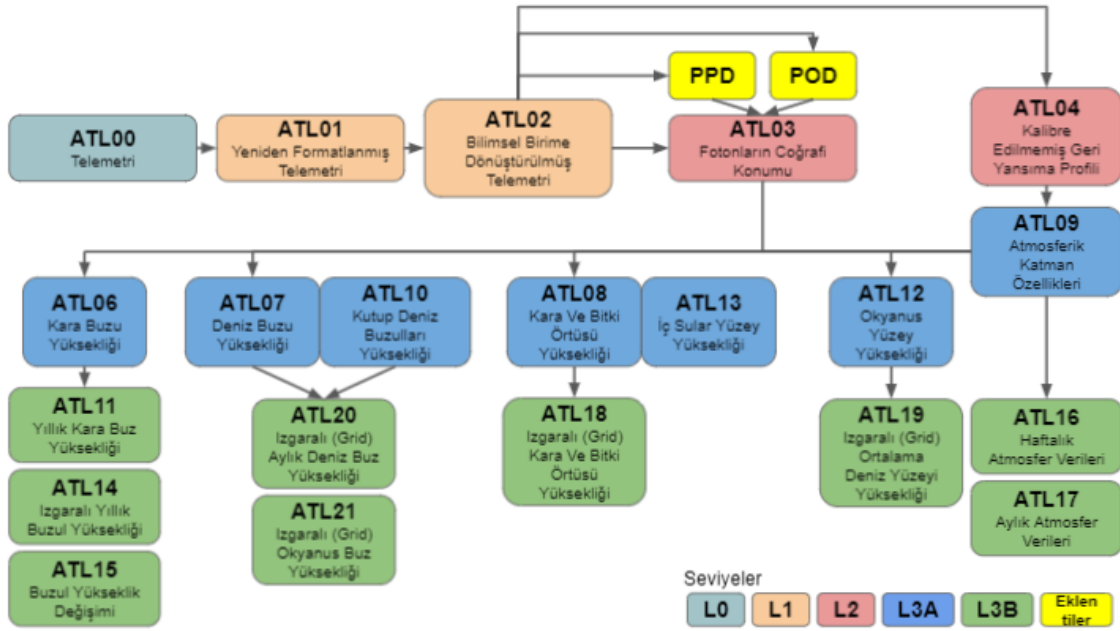
Uydu görevinde Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS) algılayıcısı bulunmakta olup bu algılayıcı analog lazer altimetre sistemi olan ICESat'a göre farklı bir ölçüm yöntemine sahiptir. ICESat tam dalga boyu veri alım yöntemiyle tasarlanmışken ICESat-2 uydusunda foton düzeyinde algılama hassasiyetine sahip yeni foton sayma teknolojisi kullanılmıştır [21, 25]. Yeni teknoloji de her bir atımda daha az enerji üreterek 10 kHz frekansında mikro-darbeleri lazerler kullanılmıştır. Yüksek frekans oranı, yeryüzünde 13 m çapında ayak izi, iki ayak izi arasında 70 cm'lik mesafe oluşturur. Bu mesafenin görece kısa olması buzullar, deniz yüzeyi gibi alanlarda toplanan ölçüm sayısını arttırmıştır. Sistemde kullanılan tek foton teknolojisi ile her bir foton, zaman etiketiyle ve coğrafi konumu ile belirlenir. ATLAS sensörü 2×3 dizi boyutunda organize edilmiş 6 lazer ışını tek atımda göndererek geri dönen sinyallerle araziden 3B veri sağlar (Şekil 2.6). Işınlardan yüzeyden uydunun uçuş yönüne dik ~3.3 km aralıklı 3 çift ışına bölünür. Bu formasyon tekrarlı geçişlerde yükseklik tespitinin yapılmasına imkân sağlar. Işın çiftlerinde zayıf ve güçlü yansıtma özelliğine sahip yüzeylerin tespiti için enerji seviyeleri göreceli olarak belirlenmiştir. Yüksek enerjili (güçlü) ışın ve düşük enerjili (zayıf) ışın çiftlerinde yapılandırılmıştır. Zayıf ve güçlü ışınlar veri alım yönünde ~2.5 km aralıklı toplanır [21]. Şekil 2.6'de sensöre ait veri alım görseli sunulmuştur. Görselde kırmızı noktalar güçlü ışınları, yeşil noktalar zayıf ışınları ve mavi nokta ise uydu nadir noktasını temsil etmektedir. Güçlü ışın bitki örtüsü gibi düşük yansıtma oranına sahip yüzeyleri, gündüz gölgelik yerlerin tespitinde kullanılır. Buna karşın zayıf ışın gece veri alımında sınırlı tespite sahiptir.



Şekil 2.6. ICESat-2 uçuş yönünde ışınların arazideki temsili iz düşümü [25].

Uydu yörüngesi kutup bölgelerindeki değişimleri tespit ve takip etmek için 92° inklınasyon açısına ve zamansal çözünürlüğü 91 gün olacak şekilde tasarlanmıştır. 3 seviyede kullanım amaçlarına göre veri ürünleri sunulmaktadır (Şekil 2.7). ICESat-2 veri ürün yelpazesinde ilk ürün ATLO1, ham verinin biçimlendirilerek dönüştürülmüş halidir. ATLO2’de sıcaklık ve voltaj değişimlerinin sensör üzerindeki etkileri düzeltilir ve zamanlama ve işaretleme sapmaları kaldırılır. ATLO3’te sensörden elde edilen her bir zaman etiketli fotonun elipsoit yüksekliklerini içeren Seviye-2 ürünü elde etmek amacıyla hassas nokta ve hassas yörünge belirleme kullanılarak ATLO2’nin farklı veri ürünleri birleştirilir. ATLO4 normalleştirilmiş göreceli geri saçılım profilleri sağlar ve ATLO9 kalibre edilmiş geri saçılım profilleri, atmosferik katman yükseklikleri ve ilgili atmosferik parametreler üretir. Seviye-3A’da bulunan tüm veri ürünleri, ATLO3’deki konum etiketli foton yüksekliklerinden ve ATLO9’daki atmosferik parametrelerden yararlanılarak elde edilir. Kara buz elipsoit yükseklikleri ATLO6’da, deniz buz ve kutup okyanus yükseklikleri ATLO7’de ve kara ve bitki örtüsü yükseklikleri ATLO8’de sağlanmaktadır. Arktik ve Antarktika deniz buzulları yükseklikleri ile ilgili parametreler ATLO10’da sunulmuştur. Okyanus yükseklikleri ATLO12’de, iç su yükseklikleri ATLO13’te verilmiştir. Seviye 3B ürünleri, Seviye 3A’nın ürünlerinin grid (raster) olarak sunulduğu ürünlerdir [26].

Üretilen verilerde yükseklik doğruluğunu etkileyen çeşitli parametreler vardır. Yükseklik doğruluğu; radyal yörünge belirsizliği, coğrafi konum bilgisi, atmosferik saçılmalar ve troposfer kaynaklı yol gecikme hataları gibi parametrelerden etkilenmektedir [21], [49], [50], [51]. Radyal yörünge belirsizliği en fazla 4 cm ve troposfer kaynaklı yol gecikme hatası yaklaşık olarak 3 cm olarak tahmin edilmektedir. Bütün hata kaynakları göze alındığında düz yüzeyler için hassasiyetin yaklaşık 25 cm standart sapmaya sahip olması beklenmektedir.



Şekil 2.7. ICESat-2 ATLAS algılayıcısı veri ürünleri, seviyeleri ve tanımları [28].

2.4. Literatürde Yer Alan İlgili Bazı Çalışmalar

Bu bölümde literatürde yer alan ve tez kapsamında yapılan araştırmalarla ilgili çalışmalardan kısaca bahsedilmiş ve literatürde yer alan çalışmalar, önerilen metodoloji, kullanılan veriler ve (varsa) rapor edilen sonuçlar gibi temel yönleriyle özetlenmiştir.

Dong [29] tarafından araştırmalarda iklim değişikliğinden yola çıkılarak kar kütlesi [30] araştırması için uzaktan algılamada, hidrolojik modelleme ve yerinde gözlemler olmak üzere 3 farklı yöntem incelenmiştir. Çalışmada bu üç metodun avantajlarından, kısıtlarından bahsedilerek kar kütlesi ve özellikleri ile ilgili daha etkin tahminlerde bulunulabilmesi için yollar aranmıştır. Yapılan analizler sonucunda kar kütlesinin uzaktan algılama teknolojileriyle takip edilmesi önerilmiştir.

Orsolini vd. [31] tarafından yapılan çalışmada, Tibet Platosunda kar örtüsü ve kalınlığı tespit araştırması uydu görüntüleriyle istasyonda ölçülen değerler karşılaştırılarak yapılmıştır. İstasyon değerlerine karşılık Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) ve Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E) uyduları analizlerde kullanılmıştır. Çalışmada önerilen yöntem sonucunda sistematik olarak kar örtüsü fazla olarak tespit edilmiş ve yüksek irtifalarda bulunan kar örtüsünün dikkate alınmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda

Himalayalar ve Tibet Platosu üzerindeki kar ve su kaynakları analizlerinde iyileştirmeler yapılarak bu kaynakların analiz potansiyelinin artacağı öngörülmüştür.

Kongoli vd. [32] tarafından yapılan çalışmada ise kar kalınlığının tahmini pasif mikrodalga uydudan elde edilen ve yerinde kar ölçüm değerleri ile iki boyutlu optimal enterpolasyon tekniğiyle karşılaştırılması yoluyla araştırılmıştır. Önerilen yöntem, Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSTR2) ile ölçülen kar kalınlığına ve Global Historical Climatology Network'ten alınan yerinde ölçüm değerlerine uygulanmıştır. Kuzey Amerika'da 2017 yılı Ocak-Şubat ayları için toplanan sonuçlar, yöntemin dağlık alanlarda düşük irtifa alanlarına göre daha düşük doğrulukla sonuçlar ürettiğini gösterse de National Oceanic and Atmospheric Administration'nın (NOAA) küresel tahmin sistemine kıyasla daha doğru çıktılar elde ettiği sonucuna varılmıştır.

Popescu vd. [33] tarafından yapılan çalışmada ICESat-2 fırlatılmadan önce uydu verilerini işlemek amacıyla bir genel çerçeve geliştirilmiştir. Bu kapsamda ICESat-2'ye benzer verilerle fotonların zemin veya kanopi sınıflandırılması için algoritmalar kullanılarak; Multiple Altimeter Beam Experimental LiDAR (MABEL) ve simüle edilmiş ICESat-2 verileriyle arazi ve kanopi yüksekliği ölçümleri çalışılmıştır. Algoritmanın ilk aşamasında fotonlar filtrelenerek gürültü giderilmesi amaçlanmıştır. Filtrelenen fotonları hareketli pencere ve kübik enterpolasyon uygulanarak zemin ve kanopi sınıflandırılması yapılmıştır. Uygulanan çok aşamalı filtreleme yönteminde ham veride bulunan fotonların korunduğu gözlenmiştir. MABEL ve simüle edilmiş ICESat-2 verileri kalibre edilmiş, sonuçlara göre gece ve gündüz alınan veriler karşılaştırıldığında kanopi yüksekliklerinin gündüz daha iyi analiz edilebildiği anlaşılmıştır. Çalışmaya göre ICESat-2'den elde edilen arazi ve bitki örtü yapısı ölçümlerinin doğrulama sonuçları misyonunun başarılı olabileceği ve geniş ölçekte haritalama yapılmasına olanak sağlayacağı düşünülmektedir.

Bavay vd. [34] tarafından yapılan bir araştırmada Alp'lerde bulunan en büyük ve en küçük havzalar olan Inn havzası (1945 km²) olan Dischma havzası (43 km²) göz önünde bulundurularak ileri tarihlerde yaşanabilecek kar ve yüzey akış senaryoları ele alınmıştır. Yüksek çözünürlüklü Alpine3D modeli kullanılarak kar, toprak, bitki örtüsü ve dışarıdaki değişiklikler tahmin edilmiştir. Çalışmada, deniz seviyesinden 3000 m üzerindeki rakımlarda buzlanma gözlemlenirken, gelecekte olması beklenen senaryolarda bu miktarın yaklaşık 900 m azalacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra mevcut durumda kar erimesi yaz ayı sonuna kadar ciddi katkı sağlarken olası

senaryolarda bu miktarın ilkbahar aylarına kadar geri çekilip azalacağı yönünde olmuştur. Sonbahar tahminleri olarak ise fazla yağış ve biriken fazla suyun baskı oluşturma ihtimalinin yüksek olacağı ifade edilmiştir. Modeldeki belirsizliklerin tahminleri etkileme olasılığını şimdiden ölçmek gelecekte yapılacak gözlemlerin doğruluğuna ışık tutacağı belirtilmiştir.

Painter [35] tarafından yapılan çalışmada, NASA'nın Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) algılayıcısı kullanılarak elde edilen karla kaplı alan için tane boyutunu ve albedoyu kullanarak yeni bir model tanımlanmış ve doğrulanmıştır. Yapılan model kızılötesi ve kısa dalga bantlarını kullanarak bitki örtüsü, toprak ve kaya analizi gerçekleştirmiştir. Himalaya, Colorado'nun yüksek ovaları, Sierra, Nevada ve Rocky Dağları'ndaki kar kütleleri yapılan model kullanılarak 30 m çözünürlükte ölçülmüştür. Sonuç olarak, 31 alanda yapılan araştırmada RMS hatası %1 ile %13 arasında değişmiş ve ortalama %5 olarak kaydedilmiştir. Ortalama mutlak hatalar ise tane boyutu için 51 µm, albedo için %4,2 olarak bulunmuştur.

Lu vd. [36] tarafından yapılan bir araştırmada kar örtüsünün hassas tespiti için bir yöntem geliştirilmiş ve bu amaçla dik ile polar yörüngeli Cloud-Aerosol LiDAR with Orthogonal Polarization (CALIOP) verileri kullanılarak çeşitli analizler yapılmıştır. Çalışma Arktik Denizi için toplamda 10 yıllık (2006-2016) verilere uygulanmış olup kar erimelerinin açık su ve kara yüzeylerinden verimli olarak ayrıldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak CALIOP gözlemleri ışığında Kuzey Kutbu deniz buzul örtüsünün mevsimsel olarak değişiklik gösterdiği saptanmıştır.

Neuenschwander ve Magruder [37] tarafından yapılan çalışmada ICESat-2 uydusunun arazi ve kanopi yükseklik verisi sağlayan ATL08 veri ürününün hava LiDAR verileriyle kıyaslaması yapılmıştır. Ayrıca, uydunun bitki örtüsü uygulamaları için geniş kapasitesini vurgulamak için seçilen ekosistemlerden ICESat-2 gözlemlerinin nitel örnekleri sunulmuştur. Finlandiya'nın bitki örtüsüyle kaplı bir bölgesi üzerinde bir ICESat-2 kesiti kullanılarak misyonun ATL08 veri ürünü doğruluğunun analizi, orta veya yüksek güven aralığında filtelenmiş fotonlara yapılmıştır. 100x14 m olarak tanımlanmış çalışma alanı içerisinde ICESat-2 nokta bulutu verileri 100 m'lik segmentler halinde değerlendirilmiştir. Her bir segment içerisinde nokta bulutu verisinin medyan değeri ve ek olarak eğim düzeltmeleri hesaplanmıştır. Medyan ve eğim düzeltmeleri ayrı ayrı hava LiDAR verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda Finlandiya'da bitki örtüsünün bulunduğu bir alanda yatayda 5 m'lik bir fark olduğu hesaplanmıştır. Düşey

doğruluk değerleri arazi ve kanopinin bulunduğu bir kesitte sırasıyla 0.85 m ve 3.2 m olarak raporlanmıştır.

Deems vd. [38] tarafından gerçekleştirilen çalışmada kar kalınlığının hesabı için kullanılan yaklaşımda veri kümelerine ayrılarak değişimin fraktal boyutta olduğu ve fraktal boyuttaki değişimin ise variogram eğimleriyle tahmin edilebileceği ifade edilmiştir. Kuzey Colorado'da üç bölgede topoğrafya ölçümleri hava LiDAR teknolojisi kullanılarak yaz ve kış aylarında yapılmıştır. Kar kalınlığı ve bitki örtüsü topografyasının her biri farklı ölçeklerde ifade edilmiştir.

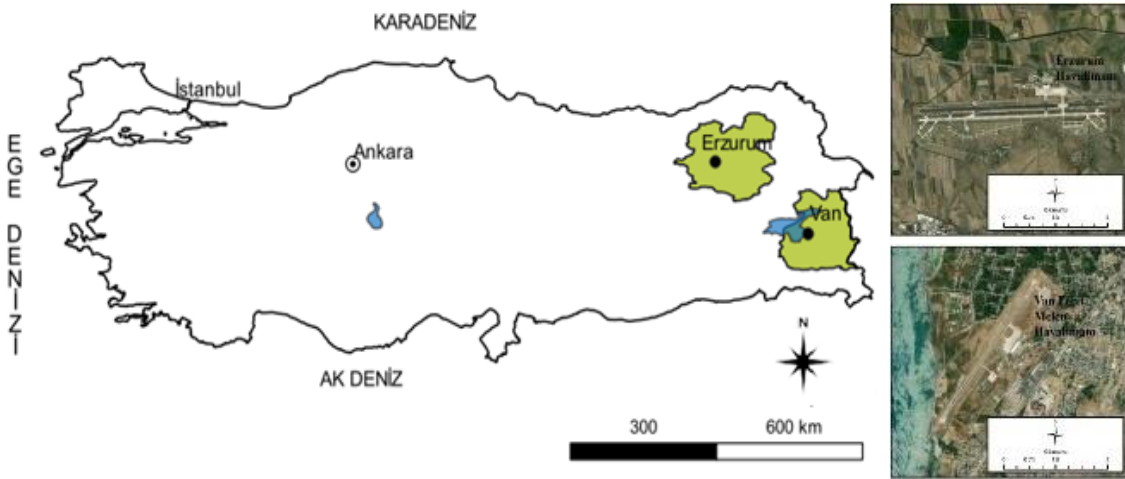
Treichler ve Kääb [39] tarafından Norveç'in güneyindeki İskandinav Dağlarında 2003-2009 dönemini kapsayan çalışmada ICESat lazer altimetresi ile kar kalınlığı hesaplama çalışması yapmıştır. Hardangervidda dağ platosu çalışma alanı olarak belirlenmiştir. 3 farklı dijital yükseklik modeli ve kar örtüsünün bulunduğu Mart ayı ile karın olmadığı Haziran ayı için uydu altimetre verileri kullanılmıştır. Referans dijital yükseklik modeli ile GLAH14 veri ürünü arasındaki pozitif yükseklik farkları kar kalınlığını düşünülerek bölgesel ölçekte desimetre doğruluğunda analiz potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Kar kalınlığı tahmini çalışmalarının tam dalga biçimi ICESAT verileri veya ICESAT-2'den yükseklik ölçümleri kullanılarak geliştirilebileceği ifade edilmiştir.

3. ÇALIŞMA ALANLARI

Bu tez çalışmasında ICESat-2 uydusu tarafından sağlanan nokta bulutu verileriyle kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması üzerine çalışılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak ICESat-2 platformu ATLAS algılayıcısından elde edilen nokta bulutu verilerinin doğruluk analizi Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan iki havaalanı üzerinde gerçekleştirilmiş, ardından ICESat-2 verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması Norveç'te belirlenen üç havaalanının yakın çevresinde belirlenen çalışma alanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanları

Türkiye'de çığın sıkça rastlandığı Doğu Anadolu Bölgesi içinde yer alan Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları, görece düz yüzeyler sağlaması açısından ATLAS veri doğruluk analizleri için çalışma alanı olarak tercih edilmiştir [27]. Erzurum Havalimanı ve Van Ferit Melen Havalimanı merkez noktaları sırasıyla $39^{\circ}57'10.4''$ K, $41^{\circ}11'22.9''$ D ve $38^{\circ}28'08.4''$ K, yükseklik değerleri ortalama deniz seviyesinden yine sırasıyla 1751.60 - 1757.10 m ve 1649.03 - 1670.10 m aralığındadır. Bu havalimanları sırasıyla ≈ 4.5 km² ve ≈ 3.5 km²'lik alanları kaplamaktadır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Erzurum ve Van Ferit Melen havalimanları.

Türkiye'de 1950-2020 yılları arasında kar yağışının en fazla görüldüğü Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan Erzurum ve Van'da hâkim olan iklim [40] türü Doğu Anadolu Karasal iklimi olup kış mevsimi soğuk, yazın ise serin geçmektedir. Hava sıcaklığının

düşük olduğu dönem bölge genelde kar altındadır ve don yaşanmaktadır. Bölge, en fazla yağışı kış ve ilkbahar aylarında almaktadır. Rakımın yüksek olduğu yerlerde bitki örtüsü çayırlardan, düşük olduğu yerlerde bozkır ve kuru ormanlardan oluşmaktadır.

İllere ait ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan 1927-2020 yıllarına ait meteorolojik değerler incelendiğinde; en düşük sıcaklık değeri -37.2°C ile Ağrı'da ölçülmüştür. İki il için kar kalınlığı değerleri 100 cm üzerinde olup en yüksek değer 120 cm ile Van'da ölçülmüştür. Günlük en hızlı rüzgâr 46.0 m/sn ile Van'da gözlemlenmiştir. Belirtilen illere ait ölçülen sıcaklık, kar ve rüzgâr uç değerleri Çizelge 3.1'de bulunmaktadır.

Çizelge 3.1. Erzurum ve Van illerine ait Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından analiz edilen meteorolojik uç değerler [41].

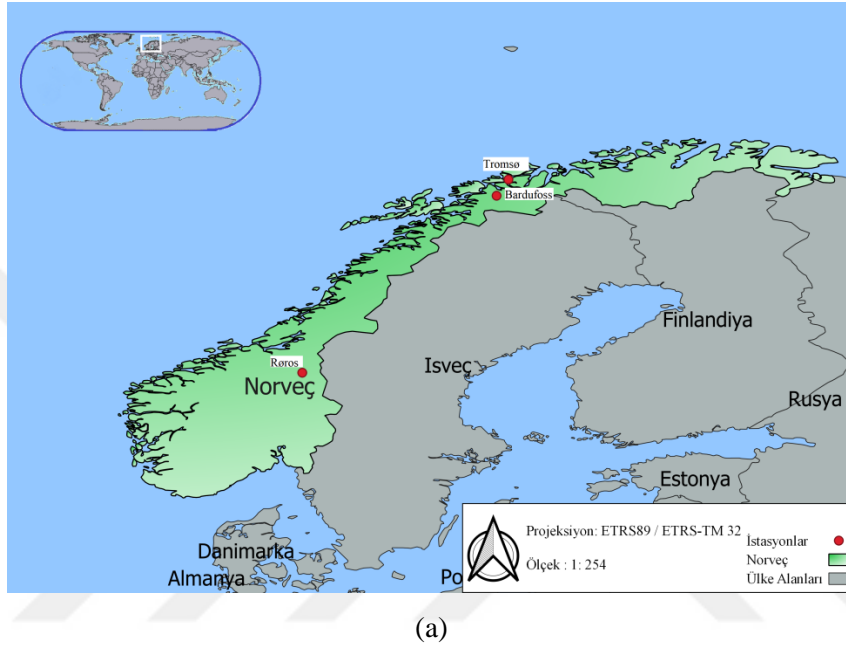
	Erzurum	Van
En Yüksek Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	36.5	37.5
En Düşük Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	-37.2	-28.7
En Yüksek Kar (cm)	110	120
Günlük en hızlı rüzgâr (m/sn)	30.6	46.0

3.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanları

Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanlarında yapılan nokta bulutu doğruluk analizlerinin yanı sıra kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla kar yağışının orta kuşak ülkelerine göre daha fazla gözlemlendiği ve referans arazi modeli verilerine ulaşılabilen bir kuzey Avrupa ülkesi olan Norveç tercih edilmiştir. Norveç, İskandinav yarımadasının batısında İsveç, Finlandiya ve Rusya'ya komşu olup Avrupa'nın kuzeyinde yer almaktadır (Şekil 3.2a).

Norveç'te yer alan istasyonlara ait kar kalınlığı verileri açık olarak internet üzerinden paylaşılmaktadır [42]. Bu sayede ICESat-2 uydusu tarafından (i) arazi yüzeyinde kar olduğu bilinen ve (ii) bulut bulunmadığı durumlarda veri toplanabilen zamanlar dikkate alınarak belirtilen her iki koşulun ortak bir şekilde sağlandığı gözlenen Norveç'in 3

havalimanı (Bardufoss, Tromsø, Røros havalimanları) yakın çevreleri çalışma alanları olarak belirlenmiştir. Havalimanları merkez nokta koordinatları Bardufoss için $69^{\circ}06'43''$ K, $18^{\circ}53'85''$ D, Tromsø için $69^{\circ}68'19''$ K, $18^{\circ}91'63''$ D ve Røros için $62^{\circ}57'71''$ K, $11^{\circ}35'31''$ D olup havalimanlarının yükseklik değerleri deniz seviyesinden sırasıyla 77 m, 626 m ve 10 m'dir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. (a) Norveç ve Norveç'te bulunan (b) Bardufoss, (c) Tromsø ve (d) Røros havalimanlarının Google Earth görüntüleri.

Norveç'in temel yer şekillerini İskandinav dağları ve dağların yüksek kesimlerinde yer alan buzul şekilleri oluşturur. Kıyılar girintili çıkıntılı fiyortlardan oluşmaktadır. Atlas okyanusuna kıyısı olan Norveç'te batı rüzgârları ve Golfstrim sıcak su akıntısı kıyı şeridinde kışın sıcaklığın eksi derecelere düşmesini önleyerek iç kesimlere kıyasla ılıman iklim görülür. Golfstrim akıntısı en büyük termal anomalilerden biri olup, kutup

noktasına yakın Finnmark bölgesinde fiyortların donmasını önlemektedir. Batı Norveç'te yaz ve kış ayları ılık ve yıllık ortalama 2.250 mm yağış görülür. Dağlarla çevirili Doğu Norveç'te yazlar ılık, kışlar soğuk geçer ve ortalama 760 mm yağış görülmektedir. Ilıman iklimin görüldüğü kıyı kesimlerde geniş yapraklı ağaçlar yükseklik arttıkça ve Kuzey'e doğru gidildikçe yerini iğne yapraklı ağaçlara ve dağ çayırları alır. Kutup altı iklimi olarak adlandırılan tundra iklimi bitki örtüsü tundralar ve alpin çayırlara ülkenin kutba yakın yerlerinde rastlanmaktadır. Norveç Meteoroloji Enstitüsü tarafından internet ortamında [43] erişilebilir olarak paylaşılan meteorolojik istatistikler kapsamında istasyonlarda son 10 yılda ölçülen uç değerler Çizelge 3.2'de verilmiştir. İstatistiki değerlere göre alanlarda maksimum sıcaklık 28°C ile 34°C arasında değişmektedir. İklim ve coğrafi koşullarına göre Røros -42,1°C ile en soğuk il olarak değerlendirilebilir. Merkezlerde rüzgâr hızı 21,4 m/sn ile 25,5 m/sn arasındadır.

Çizelge 3.2. Bardufoss, Tromsø ve Røros Havalimanlarında 2010-2021 yılları arasında ölçülen meteorolojik uç değerleri [40].

	Bardufoss	Tromsø	Røros
En Yüksek Sıcaklık (°C)	33,5	28,7	29,3
En Düşük Sıcaklık (°C)	-33,5	-17,8	-42,1
En Yüksek Kar (cm)	118	100	82
Günlük en hızlı rüzgâr (m/sn)	21,6	25,5	21,4

4. VERİLER VE İŞLEME YÖNTEMİ

Bu bölümde, Bölüm 3'te sunulan çalışma alanları için kullanılan veriler ve genel veri işleme yöntemi tanıtılmıştır. Tez kapsamında kullanılan veriler (referans arazi modelleri, ICESat-2 nokta bulutu verileri ve kar kalınlığı verileri) her iki çalışma bölgesi için ayrı başlıklarda sunulmuştur.

4.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanı Verileri

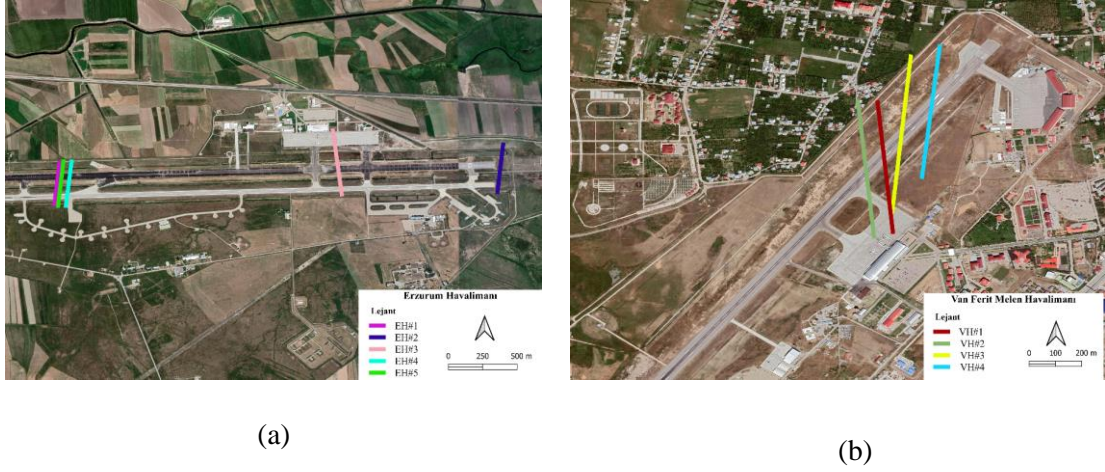
Doğu Anadolu Bölgesi içerisinde yer alan Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları çalışma alanları sadece ICESat-2 platformu ATLAS algılayıcısından elde edilen nokta bulutu verilerinin doğruluk analizi amacıyla kullanıldığından bu çalışma bölgesine ait verileri ilgili havalimanları için (1) ICESat-2 platformundan elde edilen nokta bulutu verileri ve (2) referans sayısal arazi modelleri oluşturmaktadır.

4.1.1. ICESat-2 ATLAS Nokta Bulutu Verileri

ICESat-2 uydu platformu 14 Ekim 2018 tarihinden beri veri sağlamaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan tüm veriler ücretsiz veri sağlayan OpenAltimetry platformundan temin edilmiştir. OpenAltimetry, NSIDC (*National Snow and Ice Data Center*) ile iş birliği içinde çalışan NASA'nın ICESat ve ICESat-2 uydu platformlarından gelen verilerin erişimi ve görselleştirilmesini sağlayan ortak bir platformdur [45]. Ham veri (ATL00) L1 seviyeli ürünlerden olup bu veriye foton uçuş süreleri hesaplanması ve sıcaklık, voltaj etkileri düzeltilerek ürünlerin adları numaralandırılmaktadır (ATL01, ATL02). L2 seviyedeki ürünler için her bir fotona ait coğrafi konum verisi üretilmiştir. L2 seviyeli ürünler kullanılabilirlik amaçlarına göre sınıflandırılarak L3 verileri elde edilmektedir (Şekil 2.7). Bu tez çalışmasında sunulan ürünlerden ATL08: ATLAS/ICESat-2 Seviye 3A (*L3A*) Arazi ve Bitki Örtüsü Yüksekliği bilgisini içeren nokta bulutu kullanılmıştır. ATL08 ürünü arazi yüksekliği, bitki yüksekliği ve bitki örtüsü ile ilgili tahminler ve çalışmalar yapılmasına olanak sağlamaktadır [26].

Erzurum ve Van Ferit Melen havalimanları çalışma bölgelerinde ICESat-2 nokta bulutu iz düşümleri OpenAltimetry platformundan aranmış ve farklı tarihlerde ilgili havalimanlarına düşen nokta bulutu verileri indirilmiştir (Şekil 4.1). Analizlerde

kolaylık sağlama adına ilgili havalimanlarının baş harfleri (EH ve VH) kullanılarak elde edilen veriler isimlendirilmiştir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.1. (a) Erzurum ve (b) Van Ferit Melen Havalimanlarından alınan verilerin iz düşümü.

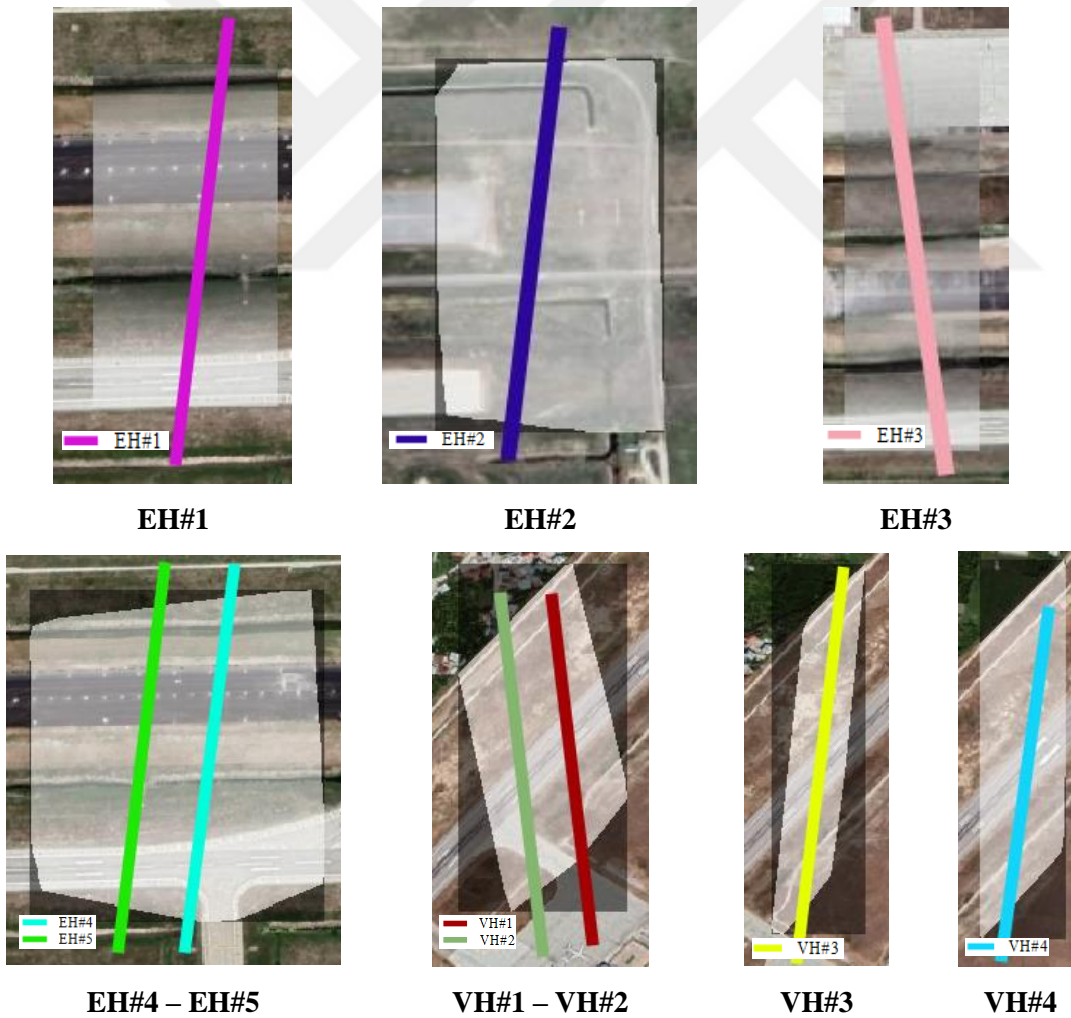
Çizelge 4.1. Doğruluk analizinde kullanılan ICESat -2 nokta bulutu özellikleri

LiDAR		Geçiş Numarası	Alım tarihi	Güçlü / Zayıf (G/Z)	Toplam Nokta Sayısı
Hatlar					
Erzurum Havalimanı	EH#1	98	03.10.2019	G	11372
	EH#2	98	03.10.2019	G	13240
	EH#3	121	04.10.2019	G	3379
	EH#4	1043	04.12.2019	G	4808
	EH#5	1043	04.12.2019	Z	7132
Van Ferit Melen Havalimanı	VH#1	441	27.10.2018	G	15406
	VH#2	441	27.10.2018	Z	12227
	VH#3	1302	20.03.2020	G	3870
	VH#4	1302	20.03.2020	Z	743

4.1.2. Referans Sayısal Arazi Modeli (SAM)

Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları için 1:1.000 ölçekli dijital hâlihazır haritalardan konumsal yer örnekleme aralığı 10 cm olan sayısal arazi modelleri (SAM) üretilmiştir. Oldukça fazla sayıda katmandan oluşan 1:1.000 ölçekli dijital hâlihazır haritaların sadece eşyüksekti eğrileri, yükseklik noktaları, şev alt ve üst çizgileri, pist, yol ve varsa kanalların sınırlarını gösteren katmanları referans arazi modeli üretimi aşamasında kullanılmıştır. Havalimanlarının genelde düzlük bir yapıya sahip olması nedeniyle elde edilen referans SAM verisinin bir piksel (≈ 10 cm) civarında bir genel doğruluğa sahip olduğu değerlendirilmektedir.

Devamında elde edilen ICESat-2 nokta bulutu verileri ile uyumlu olacak şekilde referans SAM'lar kesilmiştir (Şekil 4.2). Üretilen SAM verilerinin tamamı coğrafi koordinatlarda olup merkez koordinatlarının bilgileri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. Erzurum Havalimanı (EH) ve Van Ferit Melen Havalimanı (VH) üzerinde nokta bulutlarına göre kesilmiş SAM verileri.

Çizelge 4.2. Referans SAM merkez koordinatları

SAM Merkez Koordinatları		
Doğruluk Analizi	Boylam	Enlem
EH#1	41°15'62''	39°95'78''
EH#2	41°19'38	39°95'95''
EH#3	41°18'01''	39°96'08''
EH#4-EH#5	41°15'63''	39°95'81''
VH#1-VH#2	43°33'57''	38°47'64''
VH#3	43°33'74''	38°47'80''
VH#4	43°33'88''	38°47'91''

4.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanı Verileri

Norveç çalışma alanları ICESat-2 platformu ATLAS algılayıcısından elde edilen nokta bulutu verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla kullanıldığından bu çalışma bölgesine ait verileri ilgili havalimanlarının yakın çevresi için (1) ICESat-2 platformundan elde edilen nokta bulutu verileri, (2) referans sayısal arazi modelleri ve (3) meteorolojik istasyonlardan toplanmış referans kar kalınlığı verileri oluşturmaktadır.

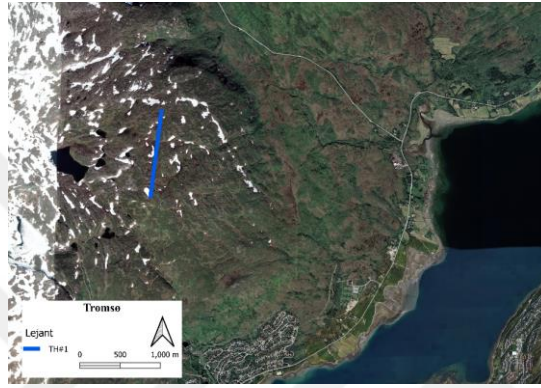
4.2.1. ICESat-2 ATLAS Nokta Bulutu Verileri

Yine bu çalışma alanları için sunulan ürünlerden ATL08: ATLAS/ICESat-2 Seviye 3A (L3A) Arazi ve Bitki Örtüsü Yüksekliği nokta bulutu verileri kullanılmıştır. Norveç'in 3 havalimanı (Bardufoss, Røros, Tromsø havalimanları) yakın çevrelerini kapsayan çalışma bölgelerinde ICESat-2 nokta bulutu iz düşümleri OpenAltimetry platformundan aranmış ve farklı tarihlerde ilgili havalimanlarına düşen nokta bulutu verileri indirilmiştir (Şekil 4.3). Analizlerde kolaylık sağlaması amacıyla ilgili havalimanlarının baş harfleri (BH, RH ve TH) kullanılarak elde edilen veriler isimlendirilmiştir (Çizelge 4.3).



(a)

(b)



(c)

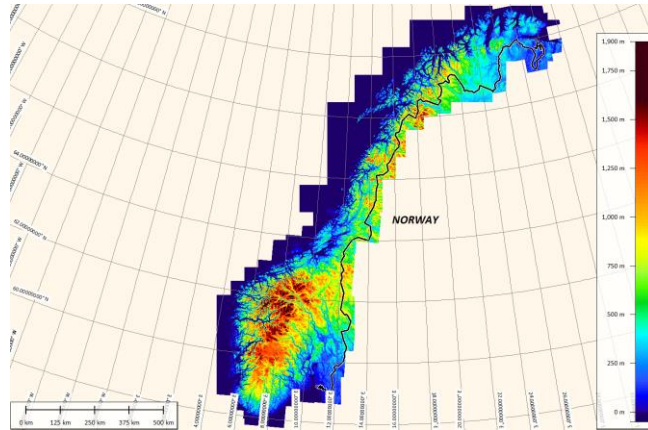
Şekil 4.3. Havalimanları yakın çevresinden toplanan ICESat-2 verilerin iz düşümü. (a) Bardufoss, (b) Røros ve (c) Tromsø çalışma alanları.

4.2.2. Referans Sayısal Arazi Modeli (SAM)

Norveç Haritalama Kurumu (NMA), LiDAR ve görüntü eşlemeye dayalı ayrıntılı yükseklik modeli oluşturmayı amaçlayan bir haritalama programını 2016 yılında başlatmıştır [46]. Bu programın hedefi, 2022 yılına kadar tüm Norveç'i kapsayan, çeşitli detay seviyelerinde tamamen yeni bir yükseklik ve yüzey modeli setine sahip olmaktır. Bu bağlamda açık veri portalından 20 m yer örnekleme aralığına sahip Norveç'in tamamını kapsayan sayısal arazi modeli (SAM) ücretsiz olarak temin edilmiştir (Şekil 4.4). SAM verisi, hava LiDAR teknolojisi kullanılarak üretilmiş olup yükseklik hassasiyetinin ≈ 10 cm olduğu ifade edilmektedir. İndirilen SAM verisinin projeksiyonu UTM 33. bölge ve Avrupa Yersel Referans Sistemi 1989 (ETRS89) olduğundan veri coğrafi koordinatlara dönüştürülmüştür. SAM verisinin yükseklik bilgisi ise Norveç 2012 yılında sonuçlandırılan ulusal yükseklik datumuna (NN2000) göre sunulmuştur.

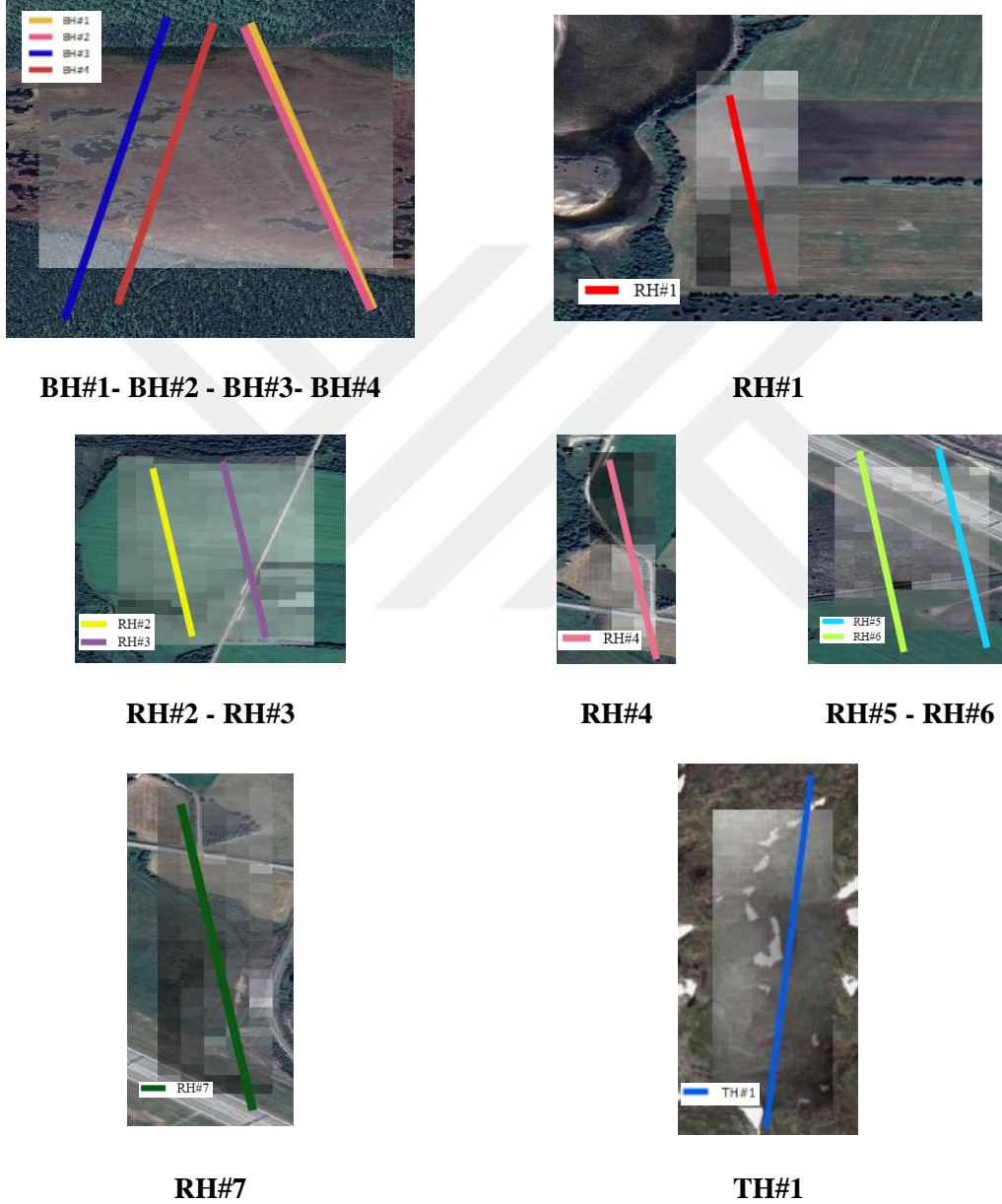
Çizelge 4.3. Norveç çalışma alanlarında kullanılan ICESat-2 nokta bulutu verisi özellikleri.

LiDAR Hatlar		Geçiş Numarası	Alım tarihi	Güçlü / Zayıf (G/Z)	Toplam Nokta Sayısı
Bardufoss	BH#1	1021	02.03.2020	G	294080
	BH#2	1021	02.03.2020	Z	187082
	BH#3	465	27.01.2019	Z	92619
	BH#4	465	27.01.2019	G	92619
Røros	RH#1	1250	20.03.2019	Z	2658
	RH#2	1250	20.03.2019	G	7782
	RH#3	1250	20.03.2019	Z	4739
	RH#4	1250	20.03.2019	G	6786
	RH#5	1250	20.03.2019	Z	9802
	RH#6	1250	20.03.2019	G	17290
	RH#7	1250	20.03.2019	G	17290
Tromsø	TH#1	907	02.21.2021	Z	28754



Şekil 4.4. Norveç sayısal arazi modeli (SAM).

Ardından, elde edilen ICESat-2 nokta bulutu verileri ile uyumlu olacak şekilde referans SAM'lar kesilmiştir (Şekil 4.5). Seçilen alanlar istasyonlardan çok uzak olmayacak şekilde ve zamansal değişim periyodundan etkilenmeyen açık alanlar olarak belirlenmiştir. Üretilen SAM verilerinin tamamı coğrafi koordinatlarda olup merkez koordinatlarının bilgileri Çizelge 4.4'de sunulmuştur.



Şekil 4.5. SAM'dan kesilen Norveç test alanlarının arazi üzerinde görünümü.

Çizelge 4.4. Test alanların koordinatları

SAM Merkez Koordinatları		
Test alanları	Boylam	Boylam
BH#1- BH#2 - BH#3- BH#4	18.4848	69.1843
RH#1	11.3439	62.5959
RH#2 - RH#3	11.3426	62.592
RH#4	11.3443	62.5865
RH#5 - RH#6	11.346	62.5782
RH#7	11.3464	62.5844
TH#1	18.8566	69.7284

4.1.3. Kar Kalınlığı Verileri

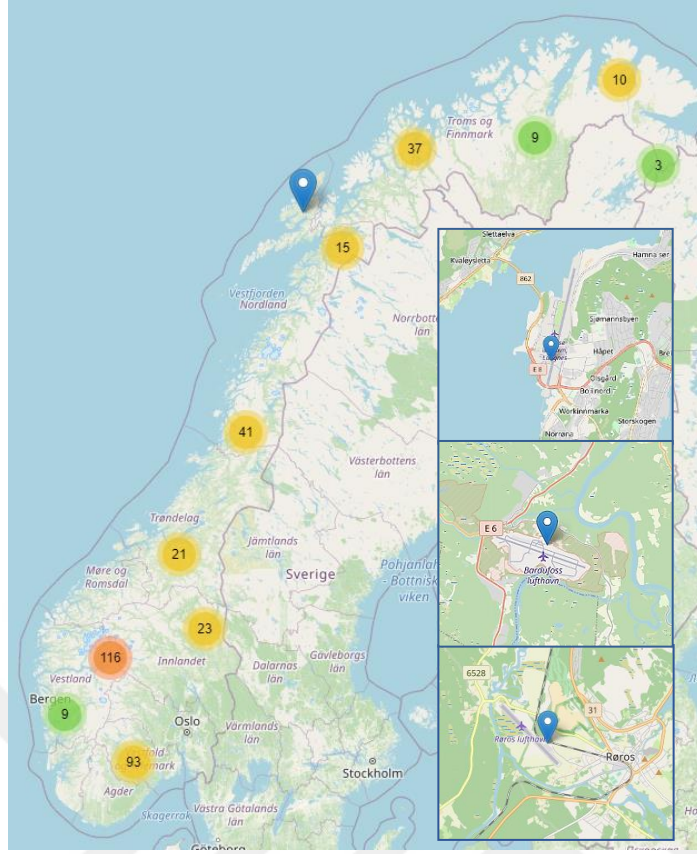
Norveç Meteoroloji Enstitüsü tarafından ölçüm yapılan 378 meteoroloji istasyonu bulunmakta olup (Şekil 4.6) meteoroloji istasyonları üç tipe ayrılmaktadır:

1. *Tip istasyon:* 1957 yılından önce kurulmuş, yüksek kaliteli kar ölçümleri alan uzun vadeli istasyonlardır. Bu şekilde kurulmuş 45 istasyon bulunmaktadır.

2. *Tip istasyon:* Gözleme 1957 yılında veya sonrasında başlayan manuel ve otomatik ölçüm alan istasyonlardır. Ülke genelinde 2. Tip istasyon sayısı 265'tir.

3. *Tip istasyon:* Yeni kurulmuş birkaç yıllık veriye sahip otomatik ölçüm alan istasyonlardır. Toplam istasyon sayısı 77'dir [43].

Bardufoss istasyonu 1. Tip istasyon olup 80 yıldır çalışmakta olan test alanları içinde en eski istasyondur. Røros ve Tromsø istasyonları ise 2. Tip istasyonlardır. Hem otomatik hem de manuel ölçüm yapılmaktadır. İstasyonlara ait bilgiler Çizelge 4.5'de bulunmaktadır.



Şekil 4.6. Norveç Meteoroloji Enstitüsü tarafından internet ortamında yayımlanan meteoroloji istasyonlarının görüntüsü [43].

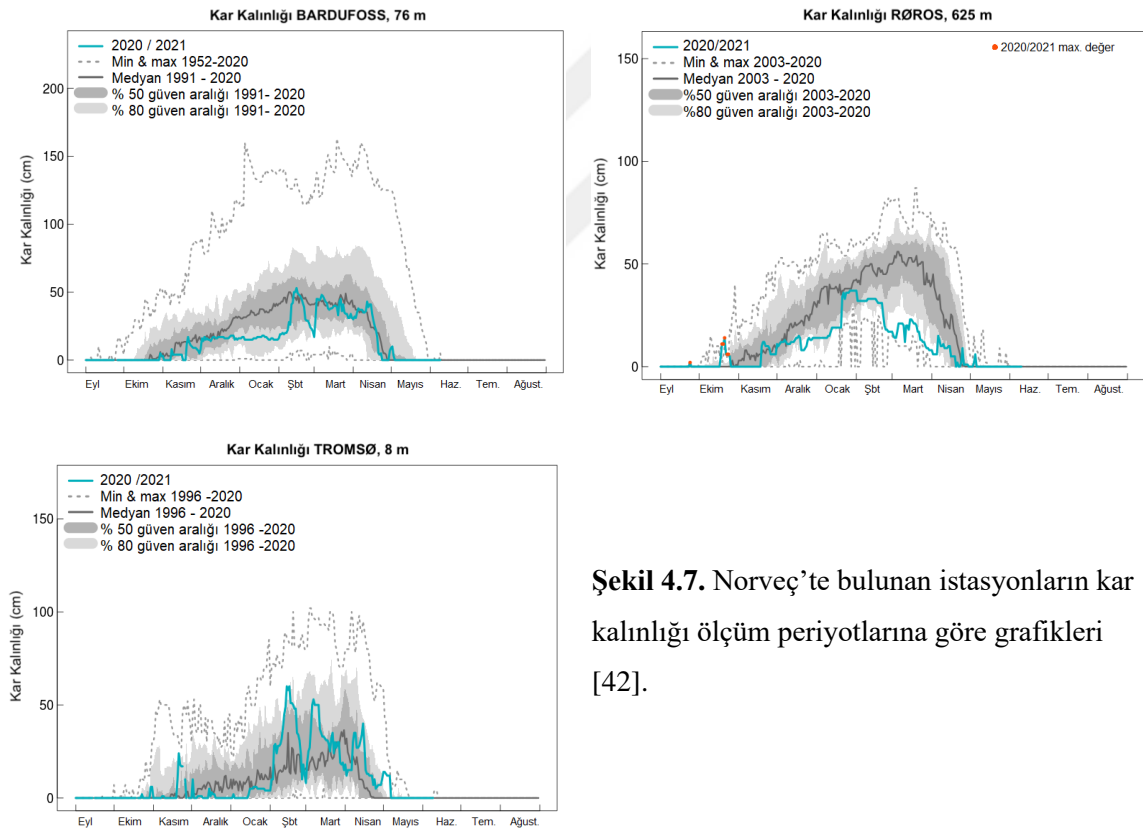
Çizelge 4.5. Bardufoss, Røros, Tromsø meteorolojik istasyon bilgileri detayları [43].

İstasyonlar	Bardufoss	Røros	Tromsø
Özellikler			
İl	Målselv	Røros	Tromsø
Bölge	Troms Og Finnmark	Trøndelag	Troms Og Finnmark
İstasyon Numarası	SN89350	SN10380	SN90490
İstasyon tipi	1	2	2
Deniz seviyesinden yüksekliği (m)	76	625	8
Ölçüm periyodu	01.07.1940-günümüz	01.08.1957-günümüz	30.09.1964-günümüz

Bardufoss istasyonu kar kalınlığı grafiği (Şekil 4.7a) incelendiğinde 1991-2020 periyodunda medyan değerlerine göre Kasım-Nisan dönemini kapsayacak şekilde karlı geçtiği, 2020-2021 dönem periyodunda ise bu düzenin korunduğu ve maksimum kar kalınlığının genelde Şubat, Mart ve Nisan aylarında gözlemlendiği söylenebilir.

Røros istasyonu kar kalınlığı grafiği (Şekil 4.7b) incelendiğinde 2003-2020 periyodunda medyan değerlerine göre Ekim-Nisan döneminin genelde karlı geçtiği, 2020-2021 dönem periyodunda ise bu düzenin korunduğu ve maksimum kar kalınlığının Ocak ve Şubat aylarında olduğu anlaşılmaktadır.

Tromsø istasyonu kar kalınlığı grafiği (Şekil 4.7c) incelendiğinde 1996-2020 periyodunda medyan değerlerine göre Kasım-Nisan döneminin genelde karlı geçtiği ve 2020-2021 periyodunda ise bu düzenin korunduğu ve maksimum kar kalınlığının Şubat ve Mart aylarında gözlemlendiği anlaşılmaktadır.

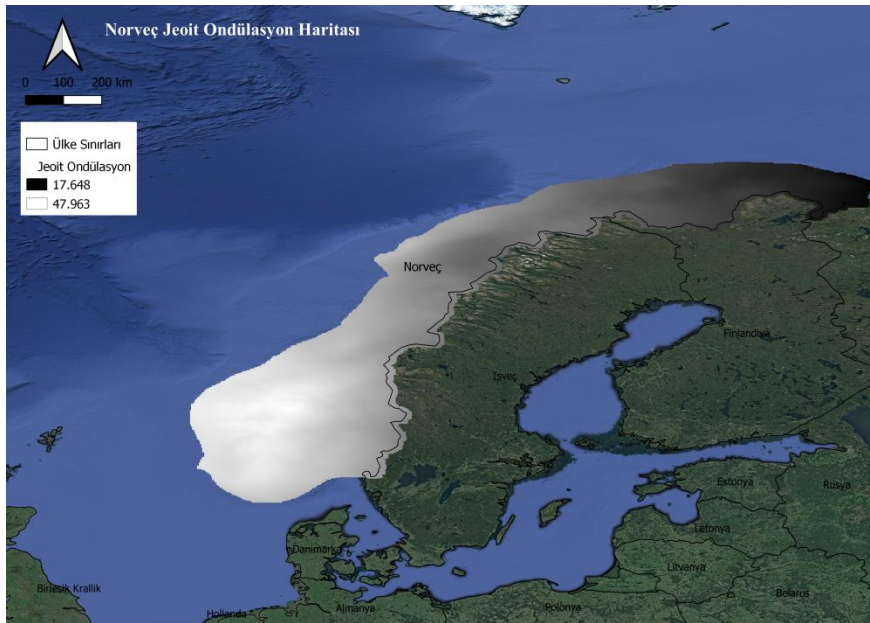


Şekil 4.7. Norveç’te bulunan istasyonların kar kalınlığı ölçüm periyotlarına göre grafikleri [42].

4.3. Veri İşleme Yöntemi

Bu aşama da öncelikle uydu platformundan elde edilmiş nokta bulutu verisi ile SAM’ın aynı yükseklik sisteminde tanımlanması gerekmektedir. Uydular, küresel konumlama

sistemleri aracılığında WGS-84 elipsoidini baz alarak ölçüm gerçekleştirmektedir. Bu nedenle üç boyutlu (3B) koordinat değerleri WGS-84 referans elipsoidine göre hesaplanmaktadır. Ancak kullanılan SAM yükseklik değerleri ortometrik yani jeoid üzerinde tanımlanmıştır. Oluşan datum farkını gidermek amacıyla elipsoit – ortometrik yükseklik dönüşümünün gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elipsoit yüksekliği (h), Ortometrik yükseklik (H) ve jeoid yüksekliği / ondülasyonu (N) arasında, $N = h - H$, bağlantısı gereğince jeoid ondülasyonu (N) bilgisine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaç doğrultusunda, Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi çalışma alanları için Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi kapsamında hesaplanan Türkiye Jeoidi - 2019 (TG-19) [47] değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları için ayrı ayrı N değerleri temin edilerek yükseklik dönüşümünde kullanılmıştır. Bununla beraber Norveç çalışma alanlarına ait SAM verilerinin yükseklik bilgisi de Norveç ulusal yükseklik datumuna göre sunulmuş olduğundan bu veri setinin yükseklik değerlerini de WGS-84 referans elipsoit yüksekliğine göre ayarlamak amacıyla geoid ondülasyon haritası kullanılması gerekmektedir (Şekil 4.8). Bu kapsamda Norveç çalışma alanlarıyla ilgili her bir koordinata ait ondülasyon değeri, haritadan otomatik olarak elde edilerek yükseklik dönüşümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Norveç jeoid ondülasyon verisi [46].

ICESat-2 nokta bulutu veri seti her bir noktanın 3B koordinat değerini ve güvenilirlik düzeyini ifade eden bilgiyi içermektedir. Güvenilirlik düzeyi sınıflandırması 0-4 değerleri arasında olup;

- 0 : gürültü,
- 1 : olası foton sinyali,
- 2 : düşük güvenilirlik,
- 3 : orta güvenilirlik,
- 4 : yüksek güvenilirlik düzeyini belirtmektedir [13].

Bu alışmada Doğu Anadolu Bölgesi havalimanı çalışma alanı verileri kullanılarak yapılan doğruluk analizleri için güvenilirlik düzeylerinden gürültü ve olası foton sinyali dikkate alınmadan doğruluk analizleri; (i) düşük güvenilirlik (seviye 2), (ii) orta güvenilirlik (seviye 3), (iii) yüksek güvenilirlik (seviye 4) ve (iv) orta ve yüksek güvenilirlik (seviyeler 3 ve 4) olacak şekilde ayrı ayrı filtrelenerek incelenmiştir. ICESat-2 ATL08 nokta bulutu belirtilen güvenilirlik düzeylerine (i-iv) göre maksimum, minimum ortalama ve medyan değerleri izelge 4.6 - izelge 4.9'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. ATL08 nokta bulutu düşük güvenilirlik düzeyli (2) veri istatistikleri.

Test Alanı	Veri		Maksimum (m)	Minimum (m)	Ortalama (m)	Medyan (m)
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü işın	1761.07	1751.61	1755.52	1754.98
	EH#2	güçlü işın	1760.76	1742.52	1753.56	1753.90
	EH#3	güçlü işın	-	-	-	-
	EH#4	güçlü işın	1760.95	1752.41	1755.58	1755.19
	EH#5	zayıf işın	1759.05	1750.82	1754.43	1753.34
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü işın	1666.68	1654.66	1660.80	1661.63
	VH#2	zayıf işın	1665.91	1653.48	1659.57	1659.91
	VH#3	güçlü işın	-	-	-	-
	VH#4	zayıf işın	-	-	-	-

Çizelge 4.7. ATL08 nokta bulutu orta güvenilirlik düzeyli (3) veri istatistikleri.

Test Alanı	Veri		Maksimum (m)	Minimum (m)	Ortalama (m)	Medyan (m)
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü işın	1757.60	1753.23	1756.25	1756.38
	EH#2	güçlü işın	1756.68	1752.26	1754.92	1755.36
	EH#3	güçlü işın	1773.61	1773.61	1773.61	1773.61
	EH#4	güçlü işın	1757.32	1754.58	1756.39	1756.54
	EH#5	zayıf işın	1756.96	1753.52	1755.22	1754.94
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü işın	1663.12	1659.36	1661.00	1660.89
	VH#2	zayıf işın	1662.14	1658.37	1660.94	1661.36
	VH#3	güçlü işın	-	-	-	-
	VH#4	zayıf işın	1674.94	1674.94	1674.94	1674.94

Çizelge 4.8. ATL08 nokta bulutu yüksek güvenilirlik düzeyli (4) veri istatistikleri.

Test Alanı	Veri	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	Medyan (m)	
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	1753.79	1756.54	1755.39	1755.70
	EH#2	güçlü ışın	1756.67	1757.33	1757.10	1757.13
	EH#3	güçlü ışın	1752.20	1756.86	1755.61	1755.70
	EH#4	güçlü ışın	1755.47	1756.81	1756.07	1755.93
	EH#5	zayıf ışın	1753.35	1757.38	1756.05	1756.20
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	1658.61	1662.71	1661.61	1662.04
	VH#2	zayıf ışın	1658.69	1661.92	1660.73	1661.08
	VH#3	güçlü ışın	1659.15	1667.52	1662.78	1663.18
	VH#4	zayıf ışın	1661.88	1665.13	1664.00	1664.53

Çizelge 4.9. ATL08 nokta bulutu orta ve yüksek güvenilirlik düzeyli (3 ve 4) veri istatistikleri.

Test Alanı	Veri	Minimum (m)	Maksimum (m)	Ortalama (m)	Medyan (m)	
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	1752.26	1756.69	1755.18	1755.53
	EH#2	güçlü ışın	1753.23	1757.60	1756.43	1756.72
	EH#3	güçlü ışın	1752.20	1773.62	1755.62	1755.70
	EH#4	güçlü ışın	1754.58	1757.32	1756.30	1756.40
	EH#5	zayıf ışın	1753.35	1757.38	1756.02	1756.19
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	1658.61	1663.12	1661.58	1661.99
	VH#2	zayıf ışın	1658.37	1662.14	1660.77	1661.14
	VH#3	güçlü ışın	1659.15	1667.52	1662.78	1663.18
	VH#4	zayıf ışın	1661.88	1674.94	1664.04	1664.53

Bununla beraber Norveç'te bulunan çalışma alanlarında ise ICESat-2 nokta bulutu verilerinden kar kalınlığı belirlenmesi hedeflendiğinden güvenilirlik düzeyi en yüksek olan sadece seviye 4 değerleri filtrelenerek analizlerde kullanılmıştır. Bu kapsamda sadece 20 Mart 2019 tarihinde veri alımı yapılan Røros istasyonu civarında bulunan RH#4 verisinde yüksek güvenilirlik düzeyinde nokta bulunmadığından orta güvenilirlik düzeyi kullanılmak durumunda kalmıştır.

Norveç çalışma alanlarında referans SAM verisinin piksel boyutunun 20 m olması nedeniyle bir SAM pikseli içine oldukça fazla sayıda ICESat-2 nokta bulutu düşmektedir. Bu nedenle, referans SAM içinde aynı piksele karşılık gelen tüm nokta bulutu değerleri gruplandırılmıştır. Böylece tüm SAM piksellerine karşılık gelen ATL08 değerleri bulunmuş ve her piksel için ATL08 nokta bulutu verilerinin medyan değeri hesaplanarak her SAM pikseline karşılık gelen tek bir nokta bulutu verisi elde edilmiştir. Bu sayede hem nokta bulutunda yer alma olasılığı bulunan kaba hataların sonuçlar üzerindeki etkisinin azaltılması mümkün olmuş, ayrıca her iki verinin

yükseklik değerlerinin farkı alınarak gelen (pozitif) farklılıklar arazi üzerinde yer alan karın kalınlığı olarak değerlendirilmiştir. Son aşamada ise SAM verisindeki tüm pikselleri hesaba katarak, arzu edilen çalışma bölgesine ait kar kalınlığı tahmini oluşturmak için tüm değerlerin medyanı alınmıştır.

Bu tez kapsamında sunulan veri işleme adımlarının tümünün uygulaması ve işlenmesi MATLAB ortamı kullanılarak geliştirilmiştir. Yukarıda açıklanan veri işleme stratejisi adımları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Veri İşleme Adımları:

1. Girdi Verilerin Okutulması (ICESat-2 Nokta Bulutu Verileri, SAM)
 2. Nokta Bulutu Verilerinin Güvenilirlik Düzeylerine göre Filtrelenmesi
 3. Elipsoit – Ortometrik Yükseklik Dönüşümünün Sağlanması
 4. SAM’da Aynı Piksel İçine Düşen Nokta Bulutu Verilerinin Tespiti ve Gruplandırılması
 5. Gruplanan ICESat-2 Nokta Bulutu Verileri İçin Yükseklik Tespiti
 6. Her SAM pikseli ile Gruplanan ICESat-2 Nokta Bulutu Verilerinin Yükseklik Değerlerinin Karşılaştırılarak Yükseklik Farklarının Hesaplanması
 7. Hesaplanan Yükseklik Farklarından Çalışma Alanı Bölgesinde Kar Kalınlığı Tahmini Yapılması
-

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında elde edilmiş olan bulgulara yer verilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak ICESat-2 platformu ATLAS algılayıcısından elde edilen nokta bulutu verilerinin doğruluk analizi sonuçlarına yer verilmiştir. Bu aşamayı, kar kalınlığı belirleme potansiyeli üzerine gerçekleştirilen analizin sonuçlarının incelenmesi takip etmektedir.

5.1. Türkiye - Doğu Anadolu Bölgesi Havalimanı Çalışma Alanı Bulguları

Karşılaştırmalar sırasında elde edilen yükseklik farkları, 8 farklı temel istatistiksel parametre (minimum, maksimum, ortalama değer, ortanca değer, ortalama mutlak hata, ortanca mutlak hata, standart sapma ve ortalama karesel hatanın karekökü) yardımıyla değerlendirilmiştir (Çizelge 5.1). Eşitliklerde n toplam nokta sayısını, y_i referans değeri, x_i nokta bulutu yükseklik değerini ve md ifadenin medyanı alındığını belirtmektedir. Toplam dört farklı güvenilirlik düzeyinde (düşük, orta, yüksek, orta ve yüksek beraber) filtreleme yapılarak elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2 – 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.1. İstatistiksel ölçütler ve eşitlikleri.

İstatistiksel Parametre	Eşiklikler
Minimum Fark	$\min(y_i - x_i)$
Maksimum Fark	$\max(y_i - x_i)$
Ortalama Hata	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}$
Medyan Hata	$md(y_i - x_i)$
Ortalama Mutlak Hata	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i - x_i }{n}$
Medyan Mutlak Hata	$md(\sum_{i=1}^n y_i - x_i)$
Standart Sapma	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n - 1}}$
Ortalama Karesel Hatanın Karekökü	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}$

Çizelge 5.2. ATL08 düşük güvenilirlik düzeyli (2) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”).

Test Alanı	Veri		Toplam Nokta Sayısı	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Hata	Med. Hata	Ort. Mutlak Hata	Ortanca Mutlak Hata	Standart Sapma	Ort. Karesel Hatanın Karekökü
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	125	4.91	-5.07	0.45	0.43	1.06	0.63	1.54	1.60
	EH#2	güçlü ışın	151	5.92	-13.19	-1.19	-0.08	2.67	1.79	3.69	3.87
	EH#3	güçlü ışın	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	EH#4	güçlü ışın	66	5.97	-3.44	0.32	0.26	1.27	0.51	1.96	1.97
	EH#5	zayıf ışın	35	3.75	-3.86	-1.23	-1.79	2.08	2.39	2.06	2.38
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	66	4.15	-5.88	-0.91	-0.40	1.97	1.26	2.47	2.62
	VH#2	zayıf ışın	71	4.20	-6.81	-1.23	-0.92	1.94	1.40	2.25	2.55
	VH#3	güçlü ışın	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VH#4	zayıf ışın	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge 5.3. ATL08 orta güvenilirlik düzeyli (3) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)

Test Alanı	Veri		Toplam Nokta Sayısı	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Hata	Med. Hata	Ort. Mutlak Hata	Ortanca Mutlak Hata	Standart Sapma	Ort. Karesel Hatanın Karekökü
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	345	2.26	-1.54	0.41	0.41	0.52	0.44	0.48	0.63
	EH#2	güçlü ışın	340	1.72	-2.32	0.10	0.25	0.45	0.37	0.57	0.58
	EH#3	güçlü ışın	1	18.26	18.26	-	-	-	-	-	-
	EH#4	güçlü ışın	213	1.76	-1.03	0.35	0.35	0.39	0.36	0.30	0.46
	EH#5	zayıf ışın	49	1.83	-1.91	0.18	0.21	0.43	0.27	0.58	0.60
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	79	0.99	-1.31	-0.38	-0.65	0.60	0.65	0.54	0.66
	VH#2	zayıf ışın	93	0.81	-0.99	-0.34	-0.38	0.39	0.39	0.29	0.45
	VH#3	güçlü ışın	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VH#4	zayıf ışın	1	10.81	10.81	-	-	-	-	-	-

Çizelge 5.4. ATL08 yüksek güvenilirlik düzeyli (4) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)

Test Alanı	Veri		Toplam Nokta Sayısı	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Hata	Med. Hata	Ort. Mutlak Hata	Ortanca Mutlak Hata	Standart Sapma	Ort. Karesel Hatanın Karekökü
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	428	-0.28	1.25	0.34	0.32	0.35	0.32	0.19	0.39
	EH#2	güçlü ışın	90	-0.20	0.52	0.29	0.30	0.30	0.30	0.12	0.32
	EH#3	güçlü ışın	2156	-3.85	1.90	0.33	0.30	0.36	0.30	0.30	0.45
	EH#4	güçlü ışın	92	-0.99	1.28	0.35	0.32	0.38	0.33	0.29	0.45
	EH#5	zayıf ışın	1058	-1.15	2.59	0.29	0.27	0.35	0.29	0.35	0.46
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	1457	-1.50	0.63	-0.30	-0.26	0.32	0.27	0.26	0.40
	VH#2	zayıf ışın	358	-0.89	0.41	-0.31	-0.34	0.33	0.34	0.23	0.39
	VH#3	güçlü ışın	1959	-4.05	2.63	-0.22	-0.25	0.33	0.28	0.37	0.44
	VH#4	zayıf ışın	322	-2.66	0.06	-0.39	-0.36	0.40	0.36	0.29	0.49

Çizelge 5.5. ATL08 orta ve yüksek güvenilirlik düzeyli (3 ve 4) nokta bulutu ile SAM yükseklik veri karşılaştırmalı istatistikleri (birim “metre”)

Test Alanı	Veri		Toplam Nokta Sayısı	Min. Fark	Maks. Fark	Ort. Hata	Med. Hata	Ort. Mutlak Hata	Ortanca Mutlak Hata	Standart Sapma	Ort. Karesel Hatanın Karekökü
<i>Erzurum Havalimanı</i>	EH#1	güçlü ışın	768	-2.32	1.72	0.23	0.30	0.39	0.34	0.42	0.48
	EH#2	güçlü ışın	435	-1.54	2.26	0.38	0.37	0.48	0.39	0.43	0.58
	EH#3	güçlü ışın	2157	-3.85	18.26	0.34	0.30	0.37	0.30	0.49	0.60
	EH#4	güçlü ışın	305	-1.03	1.76	0.35	0.34	0.39	0.35	0.30	0.46
	EH#5	zayıf ışın	1107	-1.91	2.59	0.28	0.27	0.35	0.29	0.37	0.40
<i>Van Ferit Melen Havalimanı</i>	VH#1	güçlü ışın	1536	-1.50	0.99	-0.30	-0.27	0.33	0.28	0.28	0.41
	VH#2	zayıf ışın	451	-0.99	0.81	-0.32	-0.35	0.34	0.35	0.24	0.40
	VH#3	güçlü ışın	1959	-4.05	2.63	-0.22	-0.25	0.33	0.28	0.37	0.44
	VH#4	zayıf ışın	323	-2.66	10.81	-0.36	-0.35	0.43	0.36	0.68	0.77

Çizelge 5.2’de sunulan sonuçlardan anlaşıldığı üzere her iki havaalanı için de düşük güvenilirlik düzeyine sahip nokta bulutu verisinin sayıca az olduğu hatta üç veride (EH#3, VH#3 ve VH#4) hiç bulunmadığı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlardan

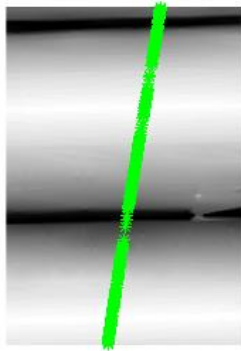
standart sapma ve ortalama karesel hatanın karekökü 1.54 m ve üzerinde hesaplandığı ve sonuçların genel olarak (kaba) hatalar içerdiği anlaşılmaktadır. Diğer taraftan yine aynı üç veri (EH#3, VH#3 ve VH#4) için orta güvenilirlik düzeyine sahip nokta bulutu verisinin de neredeyse bulunmadığı Çizelge 5.3'den görülmektedir. Diğer veriler için her ne kadar Çizelge 5.2 ile kıyaslandığında sonuçlarda ciddi bir iyileşme gözlenmiş olsa da tüm verilerin kaba hatalar içerdiği minimum ve maksimum hata değerlerinden görülmektedir. Ancak yine de genel anlamda orta güvenilirlik düzeyine sahip verilerin sonuçları tatmin edici düzeyde olarak değerlendirilmiştir. Yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalarda ise hala bazı verilerde (örn. EH#3, EH#5, VH#3, VH#4) kaba hatalar bulunduğu Çizelge 5.4'te sunulan minimum ve/veya maksimum hata değerlerinden anlaşılmaktadır. Ancak güvenilirlik düzeyi yüksek olarak belirtilen veride ortalama karesel hatanın karekökleri oldukça dar bir bantta değişmektedir (0.32 m – 0.49 m). Yüksek güvenilirlik düzeyine sahip verilere orta güvenilirlik düzeyine sahip veriler eklendiğinde ise ortalama karesel hatanın karekökünün belirli oranlarda arttığı görülmektedir (Çizelge 5.5).

Çizelge 5.4'de EH#3 ve VH#4 verilerinden elde edilen maksimum farkların Çizelge 5.5'de belirgin olarak değişmesi, her iki veri seti için Çizelge 5.3'de sunulan ve orta güvenilirlik düzeyine sahip birer kaba hatalı noktanın etkisi ile açıklanmaktadır. Güvenilirlik düzeyine göre verilerin filtrelenmiş olması, standart sapma ve ortalama karesel hatanın karekökü değerlerinde görece farklılaşmalara yol açmıştır. Güçlü ve zayıf ışın olarak toplanan verilerin yüksek güvenilirlik düzeyinde maksimum, minimum değerlerde azalma gözlemlenirken standart sapma, ortalama karesel hatanın karekökü, ortalama ve ortanca hata değerlerinde anlamlı değişiklikler gözlenmemiştir. Değerlendirmeler sonucunda ICESat-2 verilerinin güvenilirlik düzeyi yüksek verilerinin de kaba hatalar içerebildiği ancak orta ve düşük güvenilirlik düzeyine sahip verilerinin daha fazla seviyede hatalar barındırdığı ortaya çıkmaktadır. Bu kapsamda hataları azaltmak için sadece güvenilirliği yüksek verilerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ancak güvenilirliği yüksek verilerin sayıca az olduğu durumlarda ise verilerde mutlaka bir kaba hata ayıklama işleminin uygulanması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.

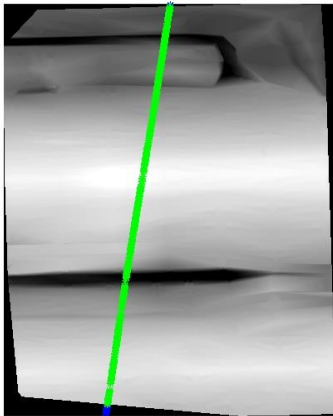
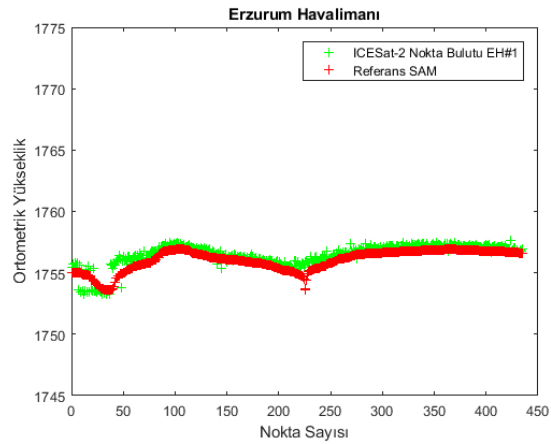
Sonuçlarda bir diğer ilgi çekici husus ise iki çalışma bölgesi için ortalama mutlak hata ve ortanca mutlak hata değerlerinin birbirine çok yakın olmasıdır. Ancak mutlak değerler alınmadan hesaplanan ortalama ve ortanca hata değerleri incelendiğinde

sonuçların Erzurum Havalimanı için pozitif, Van Ferit Melen Havalimanı için ise negatif işaretli olduğu görülmektedir. Bunun da ATLAS nokta bulutuna uygulanan jeoid ondülasyon değerleri ile ilişkili olabileceği değerlendirilmekte ve bu bağlamda geoid-elipsoit yükseklik dönüşümlerinin belirli seviyede hata barındırdığı anlaşılmaktadır.

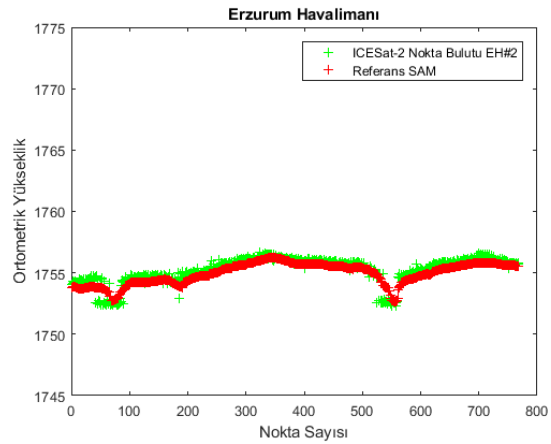
Çizelgeler 5.4 ve 5.5'te sunulan sayısal sonuçlara ek olarak görsel sonuçlarda Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir. Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları SAM verileri ile ICESat-2 nokta bulutunun üst üste oturduğu kısımlar için oluşturulan ara kesitler Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'nin sağ sütunlarında yer almaktadır. Ara kesitler incelendiğinde Çizelgeler 5.4 ve 5.5 için yapılan değerlendirmelerin görsel olarak doğrulandığı anlaşılmaktadır. Örneğin, EH#5 verisinde orta ve yüksek güvenilirlik düzeyinde arakesit analizlerinde Erzurum havalimanında kaba hatalar olduğu görülmektedir (Şekil 5.1). Van havalimanı çalışma alanına ait VH#3 ve VH#4 verilerinin kesit analizinde ise kaba hatalar daha net bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.1).

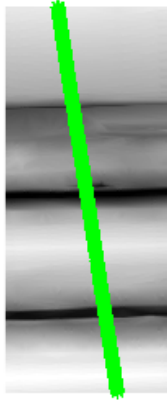


EH#1

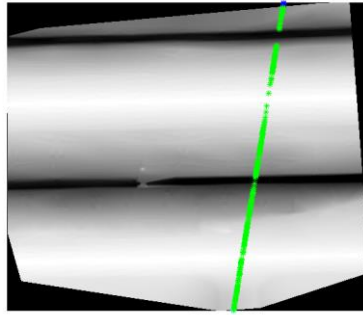
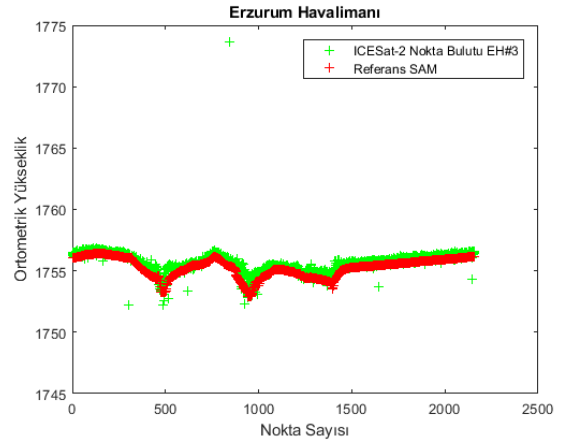


EH#2

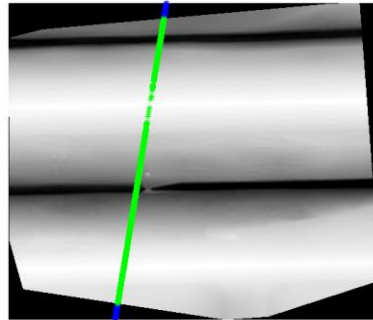
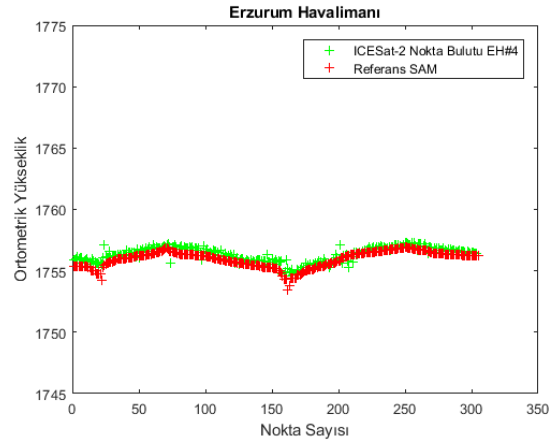




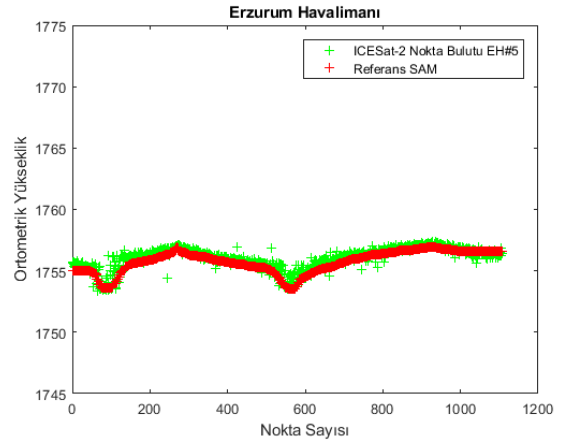
EH#3

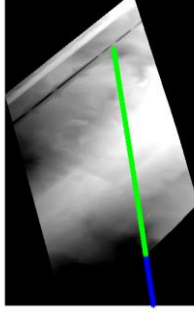


EH#4

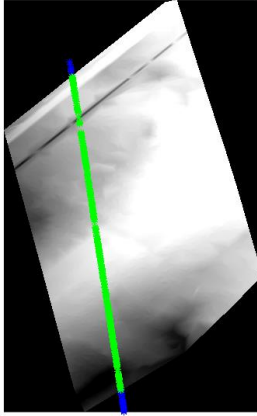
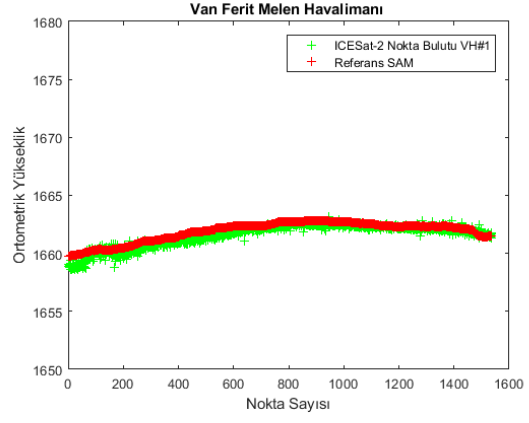


EH#5

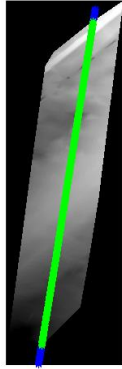
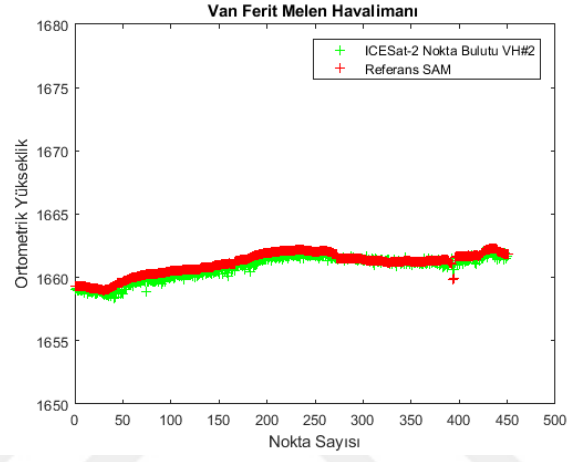




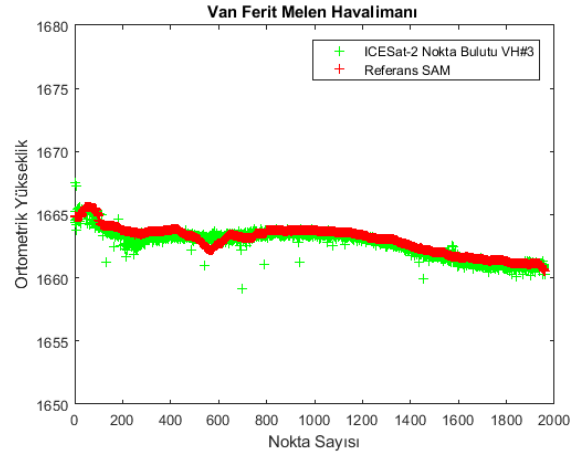
VH#1



VH#2

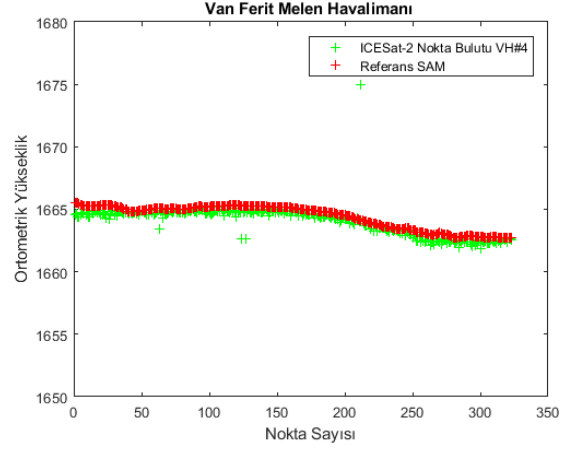


VH#3

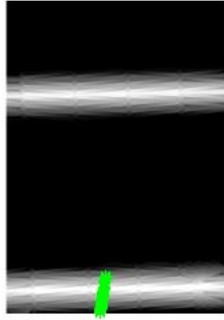




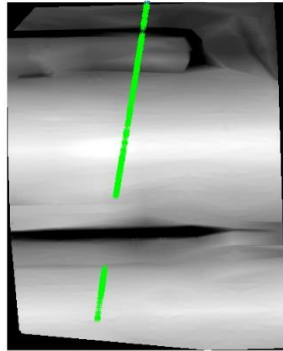
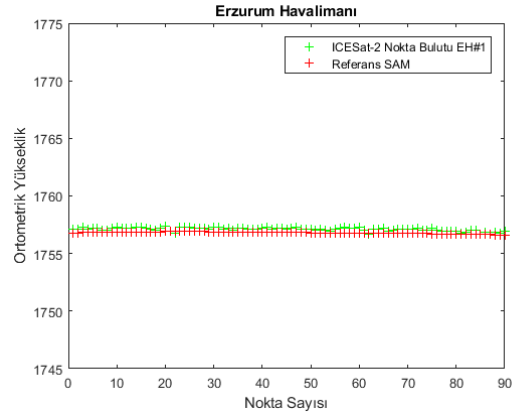
VH#4



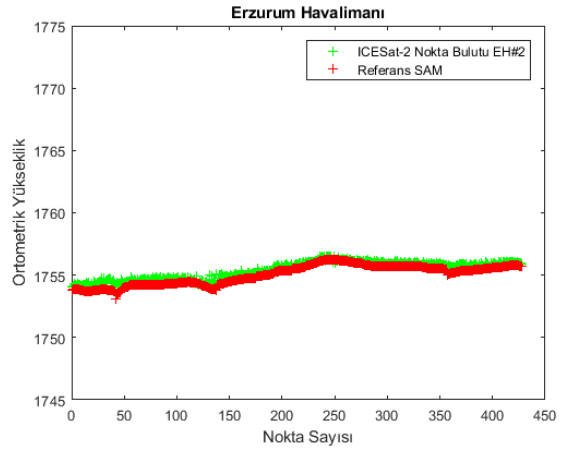
Şekil 5.1. Orta ve yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine düşen ICESat-2 noktalar (yeşil) ve düşmeyen noktaların (mavi) tespiti, (sağ sütun) ICESat-2 ATL08 nokta bulutu ile SAM ara kesit görselleri.

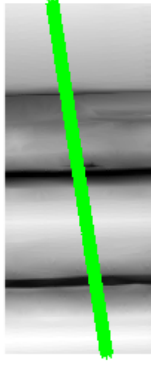


EH#1

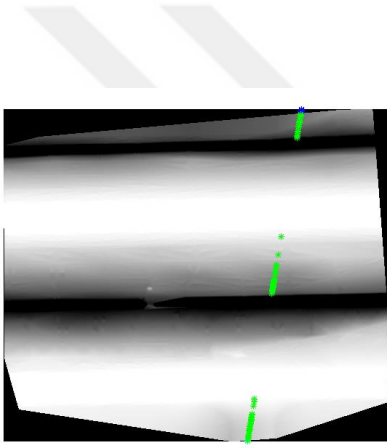
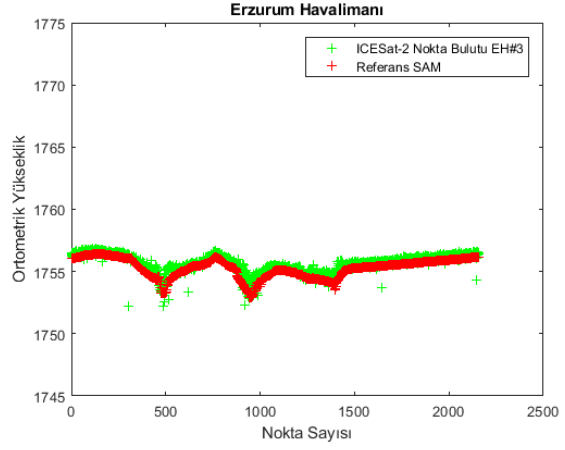


EH#2

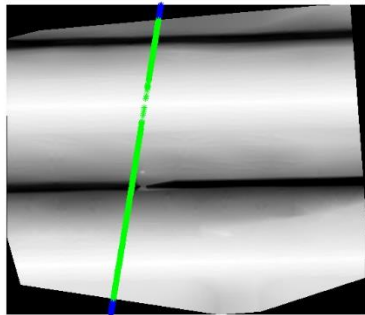
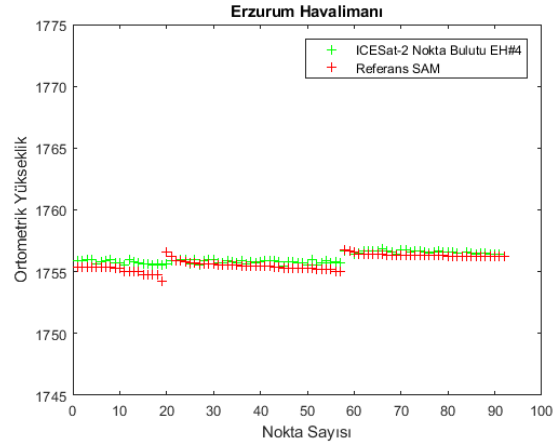




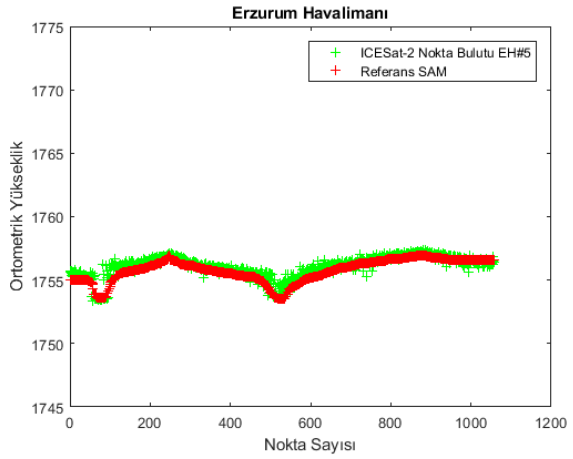
EH#3

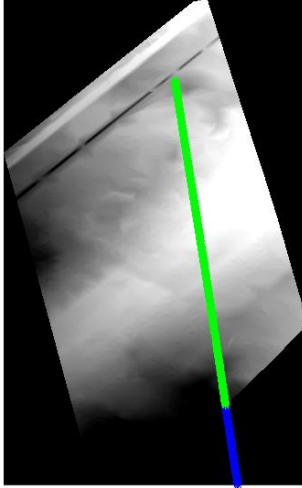


EH#4

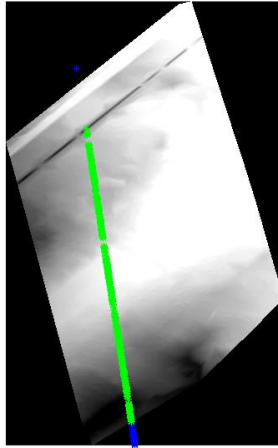
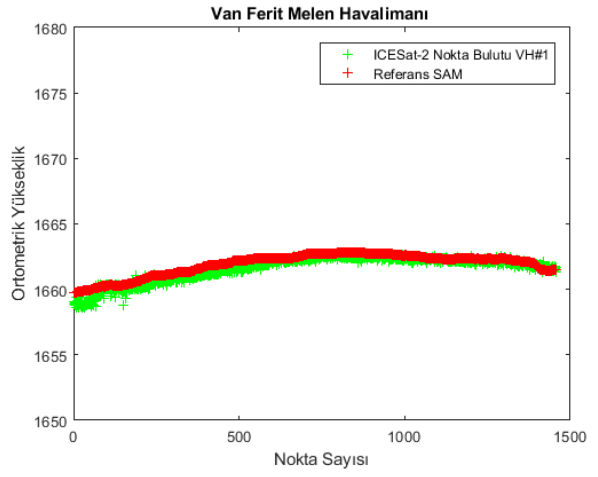


EH#5

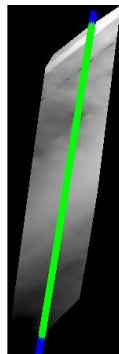
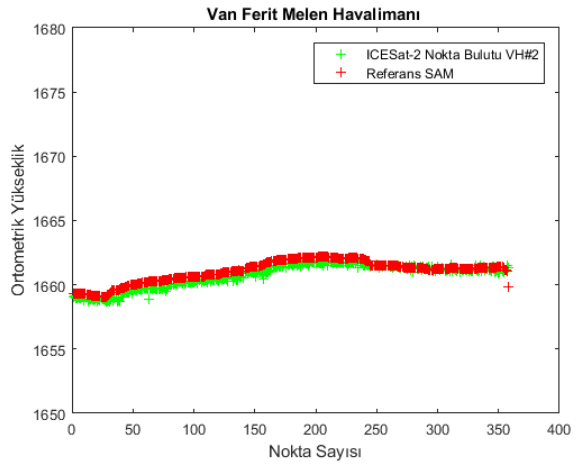




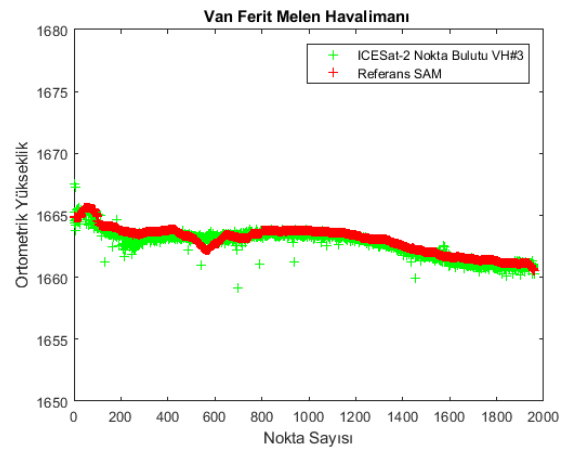
VH#1

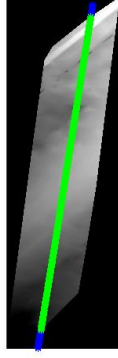


VH#2

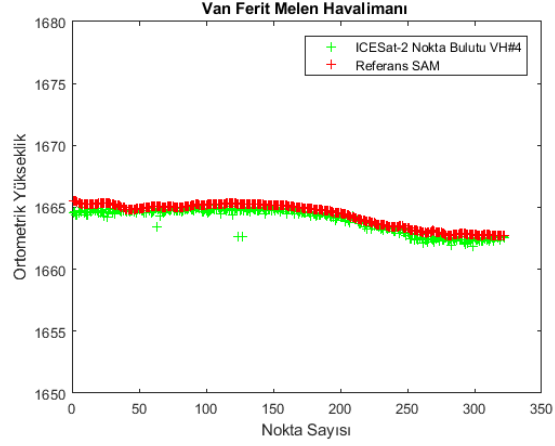


VH#3





VH#4



Şekil 5.2. Yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine düşen ICESat-2 noktalar (yeşil) ve düşmeyen noktaların (mavi) tespiti, (sağ sütun) ICESat-2 ATL08 nokta bulutu ile SAM ara kesit görselleri.

5.2. Avrupa - Norveç Çalışma Alanı Bulguları

Norveç'in 3 havalimanı (Bardufoss, Tromsø, Røros havalimanları) yakın çevrelerinde ICESat-2 verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla belirlen çalışma alanları için elde edilen sonuçlar Çizelge 5.6'da sunulmuştur. Aynı çizelgede meteorolojik gözlem istasyonlarında yapılan ölçümlerin tarihi ve kar kalınlığı, çalışma alanlarının ilgili meteoroloji istasyonlarına mesafeleri gibi yardımcı bilgiler de yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Test alanı istasyon adı, kar kalınlığı, veri alım tarihi ve analiz sonucu elde edilen medyan değerleri.

İstasyon Adı	İstasyonda Kar Ölçüm Tarihi	Referans Kar Kalınlığı (cm)	ICESat-2 Veri Alım Tarihi	Çalışma Alanının İstasyona Mesafesi (m)	Şerit Adı	Tahmin Edilen Kar Kalınlığı (cm)	Tahmin Farkı (cm)
Bardufoss	02.03.2020	109	02.03.2020	13740	BH#1	116	+7
					BH#2	109	0
	27.01.2019	59	27.01.2019	13710	BH#3	74	+15
					BH#4	71	+12
Røros	20.03.2019	37	20.03.2019	2030	RH#1	66	+29
				1530	RH#2	57	+20
					RH#3	47	+10
				977	RH#4	55	+18
				230	RH#5	51	+14
					RH#6	69	+32
				657	RH#7	48	+11
Tromsø	21.02.2021	48	21.02.2021	5120	TH#1	35	-13

Bardufoss çalışma alanları için elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, 2 Mart 2020 tarihli veri için istasyonda ölçülmüş olan kar kalınlığı ile ICESat-2 verilerinden elde edilen sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. BH#1 verisi için kar kalınlığı sadece 7 cm gibi oldukça düşük bir hatayla tahmin edilebilirken, BH#2 verisinde referans kar kalınlığı sonucu hatasız tahmin edilebilmiştir. 27 Ocak 2019 tarihli BH#3 ve BH#4 verilerinde sırasıyla +15 cm ve +12 cm tahmin hataları gözlemlenmiştir. Seçilen çalışma alanlarının Bardufoss havalimanına mesafeleri ise 13.7 km civarındadır. Røros çalışma alanlarının meteorolojik gözlem istasyonunun yer aldığı havalimanına uzaklığının 0.23 - 2.03 km arasında değiştiği görülmektedir. 20 Mart 2019 tarihinde

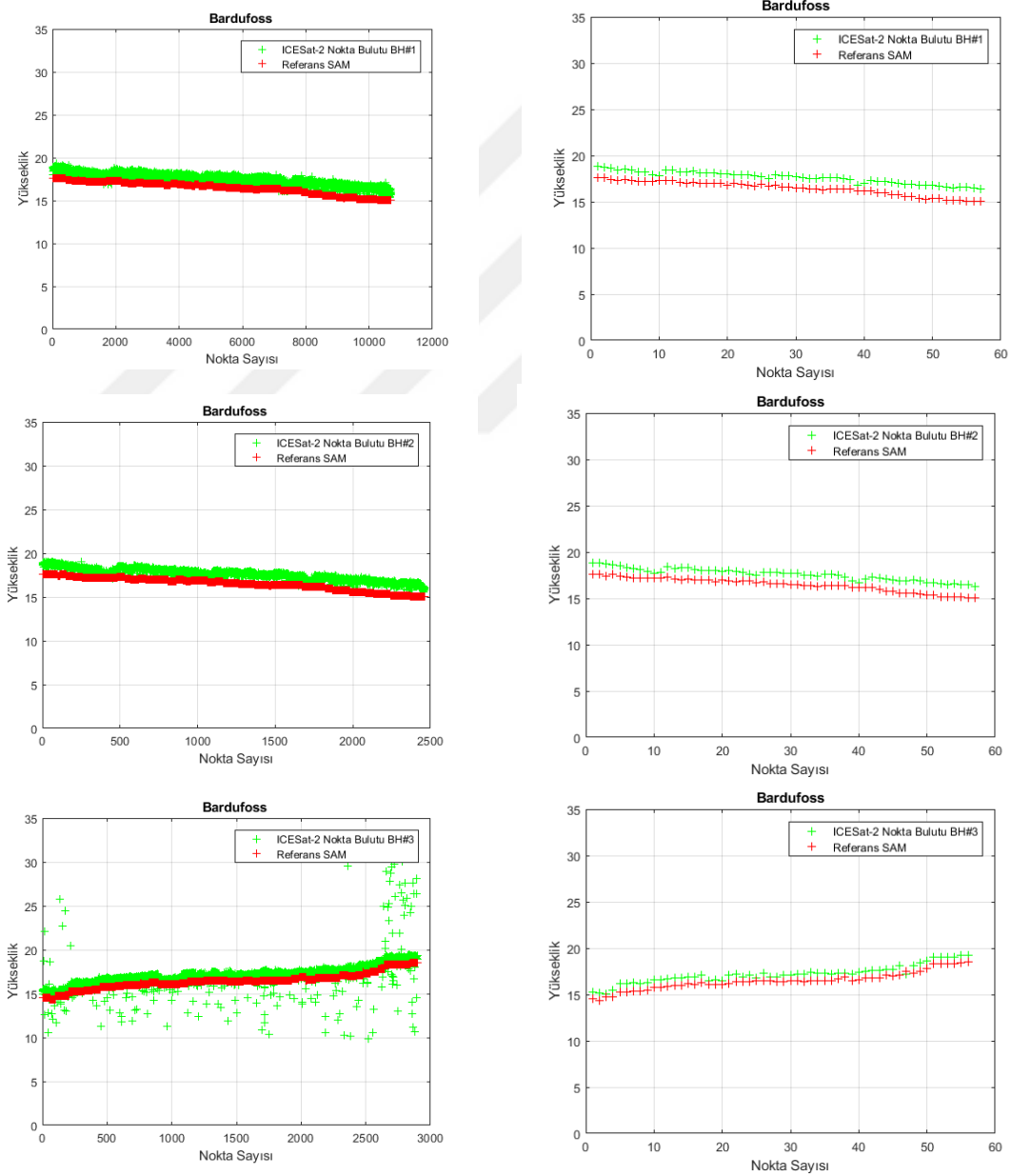
toplanan 7 veri için referans kar kalınlığı verisi ile tahmin edilen kar kalınlığının arasındaki farkların sistematik bir şekilde pozitif yönde olduğu ve +10 cm ile +32 cm arasında değiştiği görülmektedir.

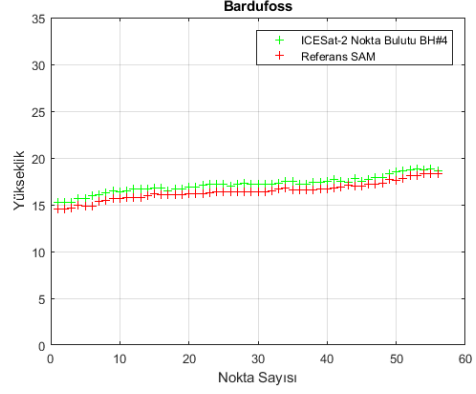
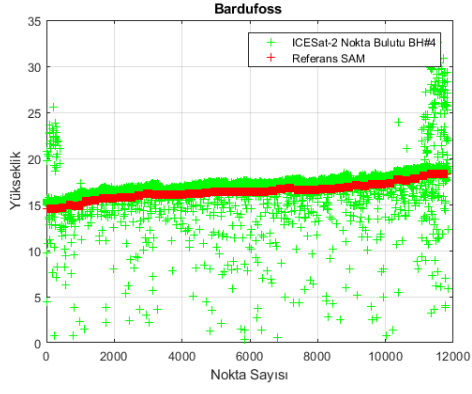
Tromsø çalışma alanı ise diğer alanlardan farklı olarak görece dağlık bir alan içerisinde yer almaktadır (Şekil 4.3c). Tromsø havalimanından 5.12 km uzakta bulunan bu alan için tahmin edilen kar değeri, ölçülen kar değerinden 13 cm düşük olarak hesaplanmıştır.

Norveç çalışma alanlarından elde edilen kar kalınlığı tahmini sonuçları beraber değerlendirildiğinde, elde edilen tahmin sonuçların oldukça başarılı olduğu ve Bölüm 5.1’de verilen yüksek güvenilirlik düzeyli doğruluk analizleri sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 5.5’te verilen medyan farklarının kar tahmini sonucunda elde edilen medyan farkları seviyesinde olduğu da görülmektedir. Bu da aslında elde edilen tahmin farklarının sadece verinin kendi hassasiyet seviyesi ile doğrudan ilişkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

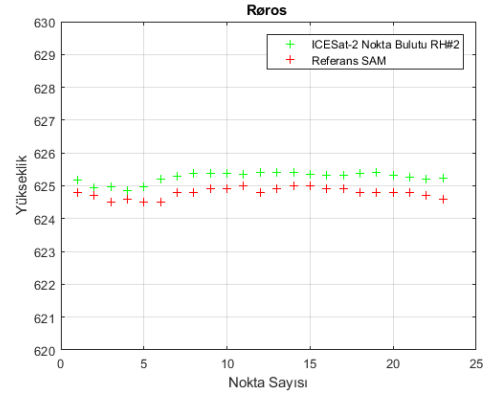
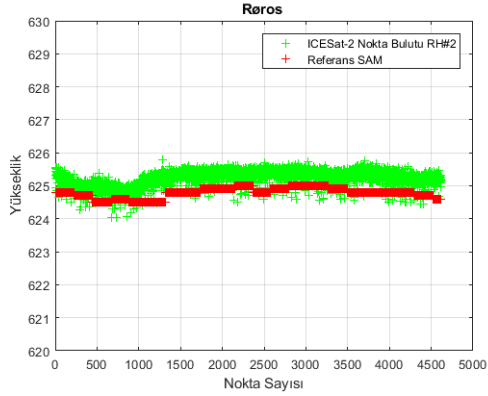
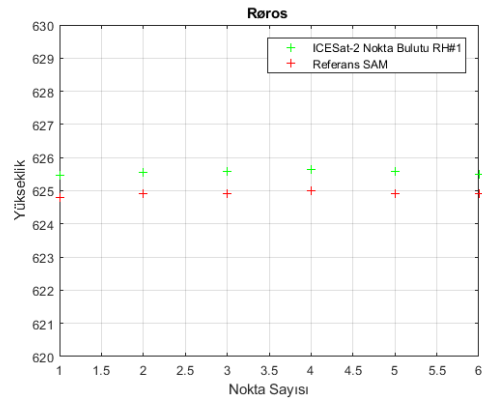
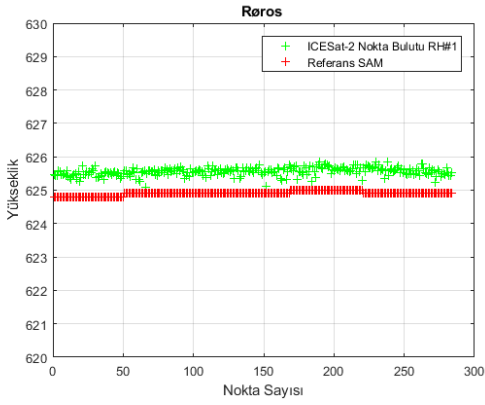
Burada dikkat çekilmesi gereken önemli bir husus ise kar kalınlığı tahmini için seçilen Norveç’teki bölgelerin tamamının açık, arazi üstü detay içermeyen ve görece düz alanlar olmasıdır. Engebeli alanlarda ICESat-2 verilerinin hassasiyetinin bozulduğu bilinmektedir. Ayrıca doğal veya insan yapımı arazi üstü nesnelerin bulunduğu durumlar da kar kalınlığı tahminin de sorun teşkil edebilmektedir. Bu konuda Bardufoss çalışma alanları içinde yer alan BH#3 ve BH#4 verilerinde bir örnek gözlenmektedir. Şekil 4.3a ve Şekil 4.5’te görüldüğü üzere çalışma alanının kuzey ve güneyinde yoğun ağaçlık alanlar gözlenmekte olup BH#3 ve BH#4 verilerinde yer alan başlangıç ve bitiş noktalarının belirli bir kısmı bu ağaçlık alanlar üzerine düşmüştür. Bu durum iki çalışma alanı için sunulan ara kesitlerde net olarak görülmektedir (Şekil 5.3 – sol sütun). Ancak ICESat-2 verilerinin ağaçlık alanlarda dahi zeminden veri toplayabilmesi ve referans SAM verisinin 20 m yer örnekleme aralığına sahip olması nedeniyle ICESat-2 verilerin grup olarak değerlendirilerek yüksekliklerin medyan değerlerinin hesaplanması sayesinde bu sorun bu iki alan için giderilebilmiştir (Şekil 5.3 – sağ sütun). Benzer bir durum Røros çalışma alanında toplanan RH#6 verisinde de görülmekle beraber (Şekil 5.5), bu durum yine elde edilen sonucu önemli derecede etkilememiştir. Ancak yine de ICESat-2 verileri kullanılarak kar kalınlığı tahmini yapılması planlanan alanların görece düz ve açık alanlar olmasının sonuçların güvenilirliği bakımından önem arz edeceği değerlendirilmektedir.

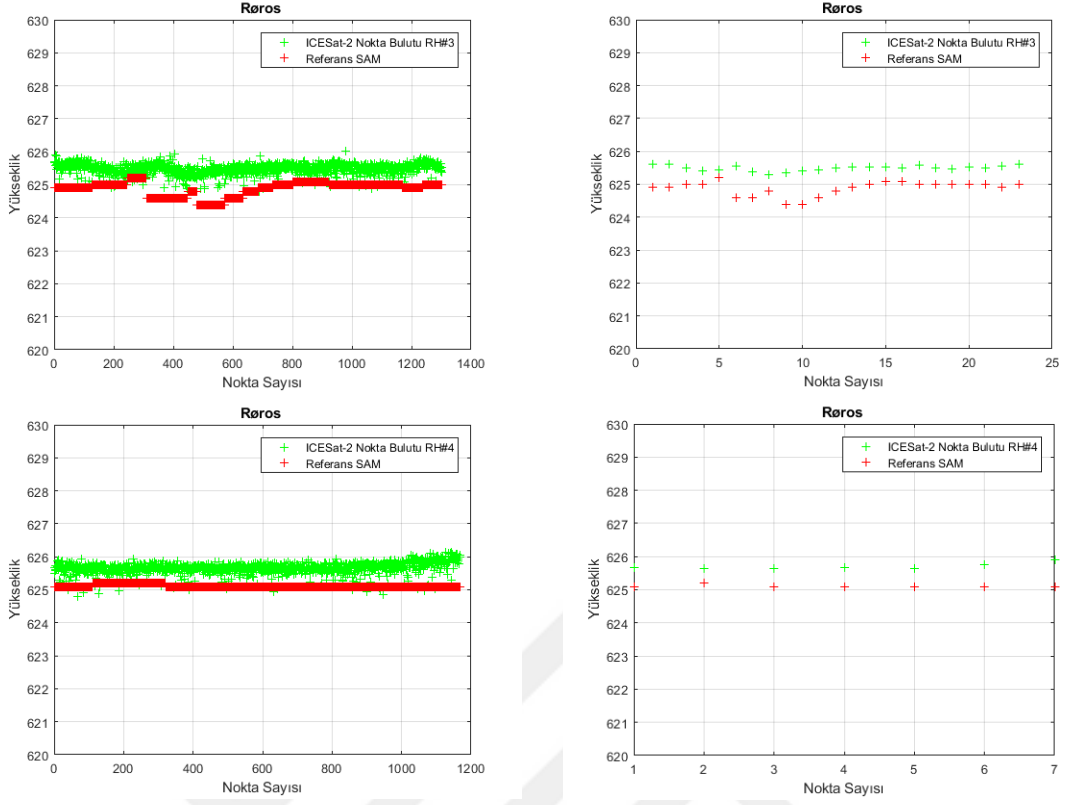
Tüm veriler için ara kesitler Şekil 5.3 - Şekil 5.5'te sunulmuştur. Ara kesitler incelendiğinde yapılan yorumlar görsel olarak da doğrulanabilmektedir. Ancak tüm veriler için mümkün olan en yüksek güvenilirlik düzeyi kullanılmış ise de Bardufoss çalışma alanları içinde yer alan BH#3 ve BH#4 nokta bulutu verileri yüksekliklerinde SAM'da belirtilen arazi kotunun altında çok sayıda hatalı yüksekliğe sahip nokta olduğu görülmektedir (Şekil 5.3). Bu durumun veri alımı yapılan bölgenin yapısı ve veri toplama tarihi ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Ancak böyle bir hatalı veri durumunda dahi bu iki alan için kar kalınlığı tahmin sonuçlarının oldukça iyi olduğu görülmektedir.



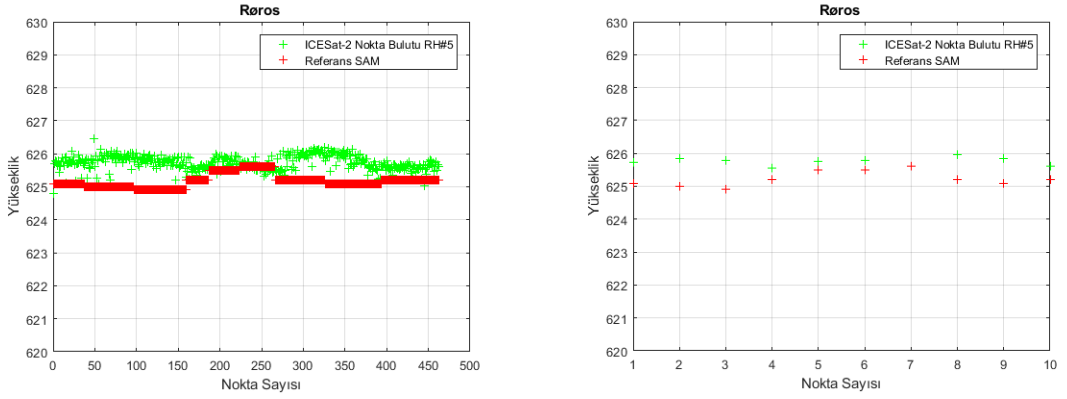


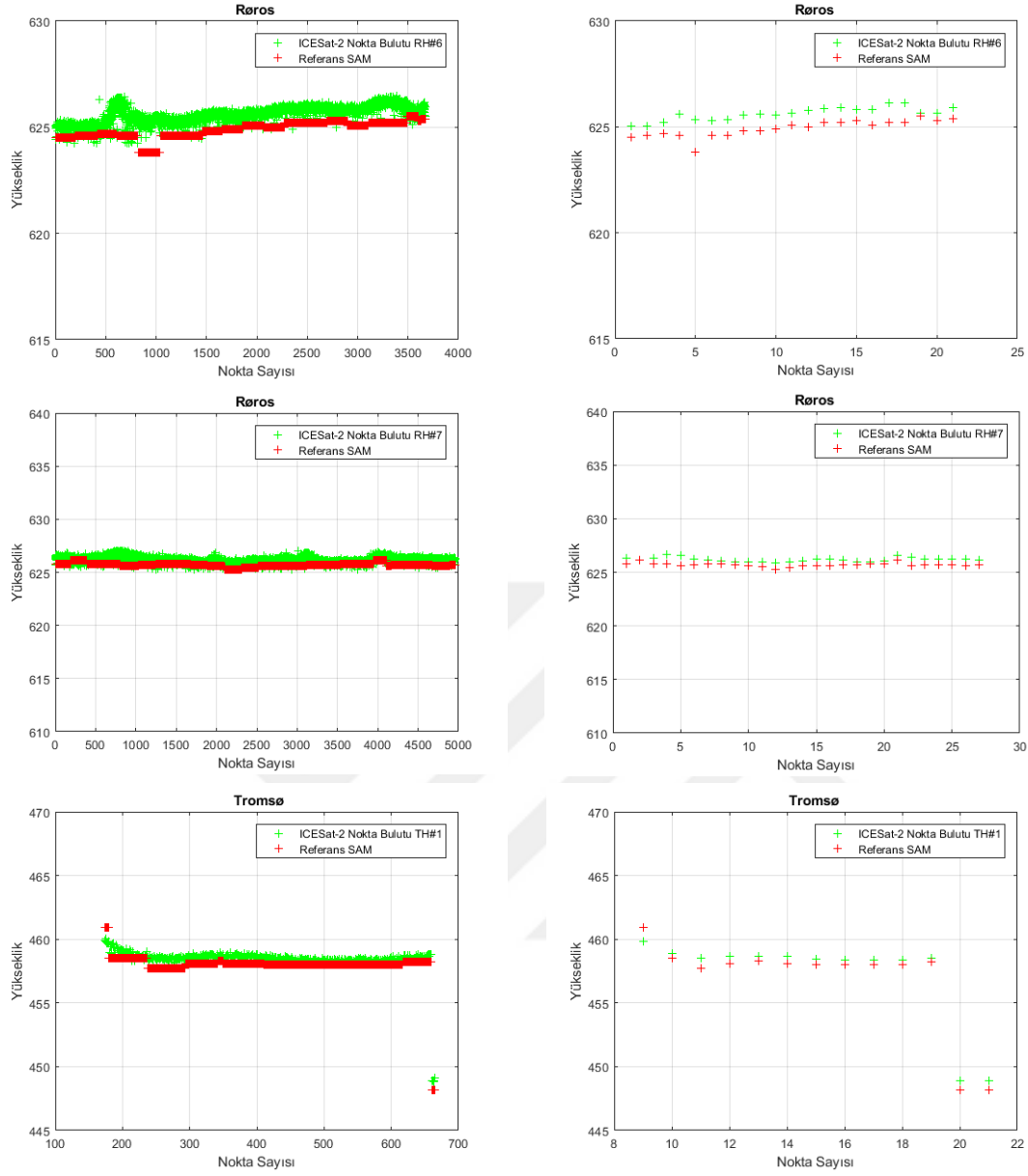
Şekil 5.3. Bardufoss çalışma alanında (BH#1 - BH#4) yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruptandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri.





Şekil 5.4. Røros çalışma alanında (RH#1 - RH#4) yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruplandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri.





Şekil 5.5. Røros (RH#5 - RH#7) ve Tromsø (TH#1) çalışma alanında yüksek güvenilirlik düzeyine sahip noktalar için ara kesitler. (sol sütun) SAM üzerine (kırmızı) düşen tüm ICESat-2 noktaları (yeşil) ve (sağ sütun) ICESat-2 nokta bulutunun gruplandırma sonrasında her SAM pikseline düşen medyan değerleri.

6. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, ICESat-2 uydusu nokta bulutu verileri kullanılarak kar kalınlığı belirleme hedefi doğrultusunda önce Erzurum ve Van Ferit Melen Havalimanları çalışma alanlarında doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda farklı tarihlerde alınan nokta bulutu verileri için dört farklı güvenilirlik düzeylerinde sonuçlar elde edilmiştir. Doğruluk analizlerini gerçekleştirmek amacıyla 1/1000 ölçekli sayısal haritalardan üretilen referans SAM ile nokta bulutu verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güvenilirlik düzeyi yüksek olan nokta bulutu verilerinin ortalama karesel hatanın karekökü değerlerinin oldukça dar bir bantta değiştiğini ortaya koymaktadır (0.32 m – 0.49 m). Değerlendirmeler, ICESat-2 verilerinin güvenilirlik düzeyi yüksek verilerinin kaba hatalar içerebildiği ancak orta güvenilirlik düzeyi verilerinin daha fazla seviyede hatalar barındırdığı ortaya koyulmuştur.

İkinci aşamada, Norveç'te belirlenen üç farklı bölgedeki çalışma alanları için ICESat-2 platformu tarafından toplanan verilerden kar kalınlığı belirleme potansiyeli tespit edilmeye çalışılmıştır. Norveç'in 3 havalimanı (Bardufoss, Tromsø, Røros havalimanları) yakın çevrelerinde ICESat-2 verilerinden kar kalınlığı belirleme potansiyelinin araştırılması amacıyla belirlen çalışma alanları için elde edilen sonuçlardaki tahmin hatalarının -13 cm ile +32 cm arasında değiştiği gözlenmiştir. Norveç çalışma alanlarından elde edilen kar kalınlığı tahmini sonuçları analiz edildiğinde, elde edilen tahmin sonuçların oldukça başarılı olduğu ve yüksek güvenilirlik düzeyine sahip verilerin hassasiyet seviyesi ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışması sırasında yaşanan/karşılaşılan zorluklar;

- ICESat-2 zamansal çözünürlüğün 91 gün olması nedeniyle arzu edilen tarihte veri toplanamaması neticesinde veriye ulaşılamaması,
- Bulutlu günlerde veri toplanamaması neticesinde verilerde eksiklikler gözlenmesi,
- ICESat-2 yükseklik doğruluğunu radyal yörünge belirsizliği, coğrafi konum bilgisi, atmosferik saçılmalar ve troposfer kaynaklı yol gecikme hataları gibi faktörlerin yanı sıra topoğrafya (özellikle eğim) ve arazideki nesne sınıflarından etkilenmesi,

- ICESat-2 yükseklik verilerinin WGS84 elipsoit referans yüzeyine göre verilmesi nedeniyle jeoid ondülasyon dönüşümü ihtiyacının yaşandığı durumlarda bölgesel veya ülke boyutlarındaki çalışma alanlarında bu dönüşümün sonuç doğruluğu üzerinde etkileri olabilmesi,
- Erzurum ve Van Ferit Melen havalimanlarında kullanılan TG-19 jeoid modeliyle havalimanlarının referans verilerinin üretimi sırasında tercih edilen jeoid modelinin birbirinden farklı olabileceği,
- Kar kalınlığı tespiti için kullanılacak olan (dağlık) alanlarda görece düzlük bir yapıda ve arazi üstü nesne barındırmayan alanlardan seçilmesi gerekliliği ve bu alanlarda rüzgâr gibi etkenlerle karın birikerek/savrularak meteoroloji istasyonda ölçülen değerle farklı olabileceği,
- Kar kalınlığı tahmini için hassas bir şekilde üretilmesi zorunlu olan hassas ve yüksek yer örnekleme aralığına sahip SAM verisinin erişilebilirliği,

şeklinde özetlenmektedir.

Gelecek çalışmalarda ise;

- ICESat-2 verilerinin kar yüksekliği belirleme potansiyelinin bölgesel ölçekte değerlendirilmesinin ele alınması ve özellikle ülkemizin Doğu Anadolu Bölgesi için (i) hassas arazi yüksekliği verisi ve (ii) kar yüksekliği bilgisi elde edilmesi durumunda benzer uygulamanın bölgesel ölçekte yapılması,
- Çalışma alanlarında karşılaşılan ağaçlık alanlarla ilgili olarak, bu alanların otomatik olarak belirlenip (Sentinel-2, CORINE vb.) filtrelenerek yonteme dahil edilmesi,
- ICESat-2 yükseklik doğruluğunu etkileyen faktörlerin [21], [49], [50], [51] daha detaylı olarak ele alınması ve etkilerinin analiz edilmesi,
- ICESat-2 uydusunun zamansal çözünürlüğünün 91 gün olması ve bulutlu günlerde veri alınamaması nedeniyle uydu verilerinden elde edilecek kar yüksekliği bilgisinin çığın önceden tahmininde kullanılabilirliğinin detaylı analizinin yapılması,
- Kar kalınlığı tahmini değerlerinin farklı alanlarda kullanılan simülasyon yazılımlarına girdi olarak fayda sağlayabileceğinden bu yönde çalışmalar yapılması,

hedeflenen araştırma konuları arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Jonas, T., Marty, C., Magnusson, J., “Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps”, *Journal of Hydrology*, Vol. 378,p. 161-167, **2009**.
- [2] Jeong, D., Sushama, L., Khaliq, M., “Attribution of spring snow water equivalent (SWE) changes over the northern hemisphere to anthropogenic effects”, *Climate Dynamics*, vol. 48, p. 3645-3658, **2017**.
- [3] Zhong, X., Zhang, T., Su, H., Xiao, X., Wang, S., Hu, Y., Wang, H., Zheng, L., Zhang, W., Xu, M., Wang, J., “Impacts of landscape and climatic factors on snow cover in the Altai Mountains”, *China, Advances in Climate Change Research*, vol. 12, p. 95-107, **2021**.
- [4] Kadioğlu, M., "Türkiye’de İklim Değişikliği Risk Yönetimi." *Türkiye’nin İklim Değişikliği II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını*, **2012**.
- [5] Voiculescu, M., Ardelean, F., Marcel, T. O., Milian, N., “Topographical factors, meteorological variables and human factors in the control of the main snow avalanche events in the Făgăraş Massif (Southern Carpathians-Romanian Carpathians): Case studies”, *Geographia Polonica*, vol.89, p.47-64, **2016**.
- [6] Hao, J., Huang, F., Liu, Y., Amobichukwu, C.A., Li, L., “Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains”, *China. Journal of Mountain Science*, 15(7), **2018**.
- [7] Ward, R., “Avalanche prediction in Scotland: II. Development of a predictive model.” *Applied Geography* 4.2, p. 109-133, **1984**.
- [8] Avrupa Çevre Ajansı, “Avrupa’da yakın tarihlerde yaşanan doğal felaketlerin ve teknolojik kazaların etkilerinin incelenmesi”, Çevre sorunları raporu, no.35, **2003**.
- [9] Colorado Avalanche Information Center, <https://avalanche.state.co.us/> (**Erişim Tarihi: 16 Şubat 2021**).
- [10] AFAD, Türkiye’de Afet Yönetimi ve Doğa Kaynaklı Afet İstatistikleri, Disaster Management and Natural Disaster Statistics in Turkey, **2018**.

- [11] Kongoli, C., Romanov, P., Ferraro, R., “Snow cover monitoring from remote-sensing satellites: Possibilities for drought assessment”, *Remote Sensing and Drought – New and Emerging Monitoring Approaches*, vol 1, no. 15, *CRC Press Taylor and Francis Group*, 359–386, **2012**.
- [12] Hitz, C., Ewing, J., Hecht, J., “An Overview of Laser Technology”, in *Introduction to Laser Technology*, 4. baskı, Hoboken : John Wiley & Sons, p. 1-7, **2012**.
- [13] Hecht, M., “Understanding Lasers:An Entry-Level Guide”, in *Introduction to Laser Technology*, in AACR Educ. B., 3.baskı, p. 304–304, **2008**.
- [14] Hecht, J., “Laser Characteristics”, in *Understanding Lasers:An Entry-Level Guide*, p.93–128, **2019**.
- [15] Shan, J., Toth, C. K., “Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning” in *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, *CRC Press*, **2017**.
- [16] Anonim, http://www.hk-phy.org/articles/laser/laser_e.html. (**Erişim Tarihi: 12 Haziran 2021**).
- [17] Carlos, J., Diaz, F., Carter, W., Shrestha, R., Glennie, C., “Lidar Remote Sensing” in *Handbook of Satellite Applications*, *Springer*, vol 1, p.757-809, **2020**.
- [18] Barker, M. K., Mazarico, E., Neumann, G. A., Zuber, M. T., Haruyama, J., Smith, D. E., “A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera”. *Icarus*, 273, p. 346-355, **2016**.
- [19] Kamalakar, A., Bhaskar, K., Prasad, L., Ranjith, R., Lohar, K. A., Venketeswaran, R., Alex, T. K., “Lunar ranging instrument for Chandrayaan-1”, *Journal of Earth System Science*, 114(6), p.725-731, **2005**.
- [20] Sun, X. “Lidar Sensors From Space”, *Elsevier*, ASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States, **2017**.
- [21] Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... ve Zwally, J., “The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation”, *Remote Sensing of Environment*, no. 190, p.260-273, **2017**.
- [22] Groh, A., Ewert, H., Scheinert, M., Fritsche, M., Rülke, A., Richter, A., ve

- Dietrich, R., “An investigation of glacial isostatic adjustment over the Amundsen Sea Sector, West Antarctica”, *Global and Planetary Change*, 98, p.45-53, **2012**.
- [23] National Snow and Ice Data Center, <https://nsidc.org/data/icesat>. **(Erişim Tarihi: 8 Nisan 2021)**.
- [24] Zwally, H. J., Schutz, B., Abdalati, W., Abshire, J., Bentley, C., Brenner, A., Thomas, R., “ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land”, *Journal of Geodynamics*, 34(3-4), p.405-445, **2002**.
- [25] Neuenschwander, A., Katherine P., “The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission”, *Remote Sensing of Environment* 221, p. 247-259, **2019**.
- [26] National Snow and Ice Data Center, <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>. **(Erişim Tarihi: 8 Nisan 2021)**.
- [27] şahin, B., çetinkaya, S., şzcan, A. K., Ok, A. ř., Kocaman, S., Gökçeoğlu, C., “IceSat–2 Uydu Verilerinden Elde Edilen Nokta Bulutu Verilerinden Kar Kalınlığı Belirleme Potansiyelinin Analizi”, 4th International Natural Disasters and Disaster Management Symposium (*ISHAD2020*), 3(2), p. 850-859, **2020**.
- [28] Neumann T., Brenner A., Hancock D., Robbins J., Saba J., Harbeck K., “Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2) | Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Global Geolocated Photons (ATL03) Contributions, Greenbelt, Maryland, **2018**.
- [29] Dong, C., “Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review”, *Journal of Hydrology*, 561, p.573-583, **2018**.
- [30] Deems, J. S., Gadomski, P. J., Vellone, D., Evanczyk, R., LeWinter, A. L., Birkeland, K. W., ve Finnegan, D. C., “Mapping starting zone snow depth with a ground-based lidar to assist avalanche control and forecasting”, *Cold Regions Science and Technology*, 120, p. 197-204, **2015**.
- [31] Orsolini, Y., Wegmann, M., Dutra, E., Liu, B., Balsamo, G., Yang, K., ve Arduini, G., “Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations”, *The Cryosphere*, 13(8), p. 2221-2239, **2019**.
- [32] Kongoli, C., Key, J., Smith, T. M., “Mapping of Snow Depth by Blending Satellite and In-Situ Data Using Two-Dimensional Optimal Interpolation—Application to AMSR2”, *Remote Sensing*, 11(24), 3049, **2019**.

- [33] Popescu, S. C., Zhou, T., Nelson, R., Neuenschwander, A., Sheridan, R., Narine, L., Walsh, K. M., “Photon counting LiDAR: An adaptive ground and canopy height retrieval algorithm for ICESat-2 data”, *Remote Sensing of Environment*, 208, p.154-170, **2018**.
- [34] Bavay, M., Lehning, M., Jonas, T., ve Löwe, H., “Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments”, *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(1), p. 95-108, **2009**.
- [35] Painter, T. H., Rittger, K., McKenzie, C., Slaughter, P., Davis, R. E., ve Dozier, J., “Retrieval of subpixel snow covered area, grain size, and albedo from MODIS”, *Remote Sensing of Environment*, 113(4), p. 868-879, **2009**.
- [36] Lu, X., Hu, Y., Liu, Z., Rodier, S., Vaughan, M., Lucker, P., ve Pelon, J., “Observations of Arctic snow and sea ice cover from CALIOP lidar measurements”. *Remote Sensing of Environment*, Vol.194, p.248-263, **2017**.
- [37] Neuenschwander, A. L., and Lori A. Magruder. "Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look." *Remote Sensing*, 11(14) ,1721, **2019**.
- [38] Deems, J. S., Fassnacht, S. R., Elder, K. J., “Fractal distribution of snow depth from lidar data”, *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), p. 285-297, **2006**.
- [39] Treichler, D., Käab, A., “Snow depth from ICESat laser altimetry—A test study in southern Norway”, *Remote Sensing of Environment*, p. 389-401, **2017**.
- [40] Sensoy, S., Demircan, M., Ulupınar, U., Balta, I., Türkiye iklimi. *Turkish State Meteorological Service (DMI)*, Ankara, **2018**.
- [41] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. İl ve İlçeler Resmi İstatistikler. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H> **(Erişim Tarihi: 26 Ağustos 2020)**.
- [42] Norwegian Centre for Climate Services, <https://seklima.met.no/observations/>. **(Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2021)**.
- [43] Norwegian Meteorological Institute, <https://cryo.met.no/en/snow-depth-products>. **(Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2021)**.
- [44] Norwegian Meteorological Institute, <https://cryo.met.no/en>. **(Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2021)**.
- [45] OpenAltimetry, <https://openaltimetry.org/data/icesat2/>. **(Erişim Tarihi: 8 Haziran 2021)**

- [46] The Norwegian Mapping Authority, <https://www.kartverket.no/en/about-kartverket>. **(Erişim Tarihi: 11 Mayıs 2021)**.
- [47] Harita Genel M¼d¼rl¼g¼. TG 19 Duyuru Metni. https://www.harita.gov.tr/images/haberler/TG-19_Duyuru_Metni_14012020.pdf. **(Erişim Tarihi: 6 Ağustos 2020)**.
- [48] Neumann T., Brenner A., Hancock D., Robbins J., Saba J., Harbeck K., “Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICESat-2) | Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land - Vegetation Along-track products (ATL08) Contributions, **2018**.
- [49] Kwok, R., S. Kacimi, M.A. Webster, N.T. Kurtz, A.A. Petty. “Arctic Snow Depth and Sea Ice Thickness from ICESat-2 and CryoSat-2 Freeboards: A First Examination”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(3), e2019JC016008, **2020**.
- [50] Kacimi, S. and R. Kwok. The Antarctic sea ice cover from ICESat-2 and CryoSat-2: freeboard, snow depth and ice thickness. *The Cryosphere*, 14, p. 4453-4474, **2020**.
- [51] Neumann, T. A., Martino, A. J., Markus, T., Bae, S., Bock, M. R., Brenner, A. C., Thomas, T. C.. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite–2 Mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111325, **2019**.

EKLER

EK 5 - Tezden Türetilmiş Bildiriler

Şahin, B., Çetinkaya, S., Özcan, A. K., Ok, A. Ö., Kocaman, S., Gökçeoğlu, C.,
“IceSat–2 Uydu Verilerinden Elde Edilen Nokta Bulutu Verilerinden Kar Kalınlığı
Belirleme Potansiyelinin Analizi”, *4th International Natural Disasters and Disaster
Management Symposium (ISHAD2020)*, 3(2), p. 850-859, **2020**.

