



**KÜRESEL SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN
ICESAT-2 VE GEDİ VERİLERİ İLE DÜZELTİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ömer Gökberk NARİN

Danışman

Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

Bu tez çalışması 22.FEN.BİL.02 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**KÜRESEL SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN ICESAT-2
VE GEDİ VERİLERİ İLE DÜZELTİLMESİ**

Ömer Gökberk NARİN

Danışman

Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Ömer Gökberk NARİN tarafından hazırlanan “Küresel sayısal yükseklik modellerinin ICESat-2 ve GEDI verileri ile düzeltilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 09 / 10 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ

Başkan : Prof. Dr. Fusun BALIK ŞANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Saygın ABDİKAN
Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İbrahim YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

09 / 10 / 2023

Ömer Gökberk NARİN

ÖZET

Doktora Tezi

KÜRESEL SAYISAL YÜKSEKLİK MODELLERİNİN ICESAT-2 VE GEDI VERİLERİ İLE DÜZELTİLMESİ

Ömer Gökberk NARİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ

Sayısal Yükseklik Modelleri (SYM), gridlenmiş yükseklik bilgisi ve o bilgidен üretilen eğim, bakı gibi değerler yardımıyla birçok mesleki disiplinde önemli bir veri kaynağıdır. Bu sebeple ücretli, ücretsiz, lokal ölçekte ya da küresel ölçekte birçok SYM üretilmiş ve üretilmektedir. Ancak küresel SYM (KSYM) verileri, veri yapıları ya da SYM üretim aşamalarından dolayı çeşitli hatalar içermektedir. Bu hataların giderilmesi için farklı SYM'ler beraber kullanılarak veri iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, KSYM verilerinin (AW3D30, ASTER KSYM ve SRTM) uzay tabanlı LiDAR altimetre verileri (GEDI ve ICESat-2) ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında, öncelikle 2018 yılının sonlarında veri toplamaya başlayan uzay tabanlı LiDAR altimetre sistemlerinden GEDI ve ICESat-2 verilerinin SYM üretimi performansına bakılmıştır. Bu kapsamda Amerika Birleşik Devletleri, Yeni Zelanda ve Porto Rico adasından test alanları seçilmiştir. Test alanlarında doğruluk verisi olarak havadan LiDAR verileri kullanılmıştır. Test alanlarında, kriging metoduna göre SYM'ler üretilmiş ve sonuçları AW3D30, ASTER KSYM ve SRTM verileri ile karşılaştırılmıştır. GEDI ve ICESat-2 verilerinin ayrı ayrı kullanılarak oluşturulan SYM'lerde başarı düşük olsa da, ICESat-2 ve GEDI verilerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan modellerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle korelasyonun %99 ile yüksek ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Veri iyileştirme kapsamında beş farklı test alanı seçilmiştir. Bu alanlar SYM üretiminde kullanılan alanlara ek olarak İstanbul ve Ankara illeridir. İstanbul ve Ankara illerinde yer

doğruluğu olarak GNSS verisi kullanılmıştır. KSYM verilerini, GEDI ve ICESat-2 verileriyle iyileştirmek için ANN, CNN ve XGBoost yöntemleri kullanılmıştır.

GEDI ve ICESat-2 verilerinin nokta bazlı doğruluklarına bakıldığında 6.48 m ile 11.29 m arasında değişmektedir. Bu sonuçlara göre yalnızca test alanı-3'de GEDI verisi KSYM'lere göre kötü sonuç verirken diğer tüm alanlarda KSYM verilerine göre düşeyde daha yüksek doğrulukta olduğu sonucuna varılmıştır. SYM iyileştirme potansiyeline bakıldığında tüm alanlarda KSYM'ler iyileştirilmiştir. Genel doğrulukta en çok iyileşme CNN yöntemiyle ASTER KSYM verisinde KOH'a göre 4.35 m ile Test Alanı-4'te elde edilmiştir. Arazi örtüsü sınıflarına göre en iyi iyileşme CNN yöntemiyle ASTER KSYM verisinde KOH'a göre 4.72 m ile mera sınıfında elde edilmiştir. Eğim grubu sınıflarında en iyi iyileşme CNN metoduyla ASTER KSYM verisinde KOH'a göre 9.77 m ile %60-> eğim grubunda elde edilmiştir.

Çalışma sonucu yöntemler yönünden incelendiğinde en başarılı yöntemin CNN yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Arazi örtüsü sınıflarında en iyi iyileşme başarısı orman sınıfında elde edilmiştir. Eğim gruplarında, yüksek eğimlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

2023, xii + 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: GEDI, ICESat-2, Sayısal Yükseklik Modeli, CNN, ANN, XGBoost

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

IMPROVING OF GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODELS WITH ICESAT-2 AND GEDI DATA

Ömer Gökberk NARİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ

Digital Elevation Models (DEMs) are a crucial data source in many professional disciplines, with the aid of gridded elevation data. Because of this, numerous DEMs have been produced and continue to be produced, whether for pay or without charge, locally or globally. However, global DEM (KSYM) data contains various errors due to data structures or DEM production steps. To eliminate these errors, data improvement methods have been developed by using different DEMs together. In this study, it is aimed to improve KSYM data (AW3D30, ASTER KSYM and SRTM) with space-based LiDAR altimeter data (GEDI and ICESat-2).

In the thesis study, firstly, the DEM production performance of GEDI and ICESat-2 data from space-based LiDAR altimeter systems, which started collecting data in late 2018, was investigated. In this instance, Puerto Rico, New Zealand, and the United States were chosen as test regions. Airborne LiDAR data was used as reference data in the test the DEM accuracy of the study areas. In the test areas, DEMs were produced by using the Kriging interpolation method and the results were compared with AW3D30, ASTER GDEM, and SRTM data. While it was observed that the accuracy of the DEMs created by using GEDI and ICESat-2 data independently was low, higher accuracy was obtained in the models created by using ICESat-2 and GEDI data together. In particular, it has been determined that there is a high correlation of 99% between the reference data and the produced DEM data.

In the second stage of the thesis study, five different test areas were selected to improve

the Global DEMs data (AW3D30, ASTER GDEM, and SRTM) with space-based LiDAR altimeter data, which is the main purpose of the study. These areas are Istanbul and Ankara provinces of the Türkiye, in addition to the other three areas used in DEM production. GNSS data was used as ground truth in Istanbul and Ankara data. Three different methods named Artificial Neural Networks (ANN), Convolutional Neural Networks (CNN) and Extreme Gradient Boosting Machines (XGBoost) were used to improve the accuracy of GDEM data with GEDI and ICESat-2 data. Considering the point-based accuracies of GEDI and ICESat-2 data, it varies between 6.48 m and 11.29 m. According to these results, while GEDI data had worse results than GDEMs only in test area-3, higher vertical accuracy was obtained compared to GDEM data in remaining areas. Considering the DEM improvement potential, GDEMs have been improved in all areas. The greatest improvement in overall accuracy was achieved with the CNN method on ASTER KSYM data with 4.35 m in test area-4 according to RMSE. According to land cover classes, the best improvement was obtained in rangeland class in ASTER GDEM data with 4.72 m using the CNN method in test area-3 according to RMSE. The best improvement in the slope group classes was obtained in the 60->% slope group in ASTER GDEM data with 9.77 m using the CNN method in test area-3 according to RMSE.

When the results of the study were examined in terms of considered methods, it was concluded that the most successful method was the CNN method. The best accuracy improvement success in land cover classes was achieved in the forest class. In slope groups, better results were obtained at higher slopes.

2023, xii + 90 pages

Keywords: GEDI, ICESat-2, Dijital Elevation Models, CNN, ANN, XGBoost

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusunun belirlenmesi, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mevlüt GÜLLÜ'ye, değerli vakitlerini benimle paylaşarak görüş ve önerilerini sunan tez izleme kurulu üyeleri Sayın Prof. Dr. Füsün BALIK ŞANLI ve Sayın Prof. Dr. İbrahim YILMAZ'a, tez yazım süresince yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. Eren Can SEYREK'e, tez araştırmalarım ve sürecinde verdikleri destekten dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü akademik ve idari personellerine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Delft Teknoloji Üniversitesinde misafir araştırmacı olarak doktora tezime üzerine yaptığım çalışmalarda bana yol gösteren ve bilgi birikimini benimle paylaşan Sayın Dr. Roderik C. Lindenbergh'e teşekkürlerimi sunarım.

İlk günden bugüne danışmanlığını, çalışkanlığını, hocalığını ve insanlığını örnek aldığım, yüksek lisans danışmanım değerli hocam Sayın Doç. Dr. Saygın ABDİKAN'a akademik hayatıma ve bana kattığı vizyon ve misyonlar, doktora tezi sürecimde verdiği destekler için teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde sağlamış oldukları maddi ve manevi destekleri ile bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan annem Nesrin NARİN'e, babam Mustafa NARİN'e ve abim Yasin Ayberk NARİN'e teşekkürü borç bilirim.

Doktora sürecimin her döneminde beni cesaretlendiren, çalışmanın bitmesi için bana sürekli verdiği desteklerden dolayı Sevgili eşim Cansu NARİN'e ve ona iyi bir gelecek sunmak ve daha güzel bir dünya bırakabilmek için beni daha çok çalışmaya motive eden oğlum İnanç Mustafa NARİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırmayı yurt dışında "2214 a Doktora Sırası Yurt Dışı Araştırma Bursu" ile 6 ay boyunca destekleyen ve finanse eden TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırmada İstanbul ve Ankara illerine ait yer doğruluğu verisini ücretsiz bir şekilde vererek araştırma sonuçlarına destek olan Harita Genel Müdürlüğüne teşekkür ederim.

Bu tez çalışması AKÜ BAPK tarafından 22.FEN.BİL.02 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Ömer Gökberk NARİN
Afyonkarahisar 2023



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	14
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	16
3. GEDI ve ICESat-2 UZAY TABANLI LİDAR ALTİMETRE SİSTEMLERİ.....	22
3.1 GEDI.....	22
3.2 ICESat-2	24
4. MATERYAL ve YÖNTEM	26
4.1 Çalışma Alanı	26
4.2 Veri	28
4.2.1 Küresel Sayısal Yükseklik Modelleri	28
4.2.2 Küresel Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü	29
4.3 Metodoloji	30
4.3.1 GEDI ve ICESat-2 Veri Filtreleme ve Eğitim Verisini Oluşturma	31
4.3.1.1 GEDI Veri Filtreleme.....	32
4.3.1.2 ICESat-2 Veri Filtreleme	32
4.3.2 Kriging Enterpolasyon Yöntemi ve Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma.....	33
4.3.3 Veri İyileştirme Metodu ve Kullanılan Algoritmalar	33
4.3.3.1 Evrişimli Sinir Ağları.....	34
4.3.3.2 Yapay Sinir Ağları	36
4.3.3.3 Aşırı Gradyan Artırma	38
4.4 Yersel Gerçeklik Verisi	39
4.5 Doğruluk Analizi	40
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	42

5.1 Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturmaya Dair Bulgular	42
5.1.1 Nokta-Tabanlı Bulgular	42
5.1.2 Raster-Tabanlı Bulgular	46
5.2 Sayısal Yükseklik Modeli Geliştirmeye Dair Bulgular	51
5.2.1 Uzay Tabanlı LiDAR Altimetre Verisine ait Bulgular	51
5.2.2 İyileştirilmiş ve Ham Sayısal Yükseklik Modellerine ait Bulgular	54
5.2.3 Arazi Örtüsü Tabanlı Bulgular	60
5.2.4 Eğim Tabanlı Bulgular	63
6. SONUÇLAR	65
7. KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	78
EKLER	83

KISALTMALAR DİZİNİ

ALOS	The Advanced Land Observing Satellite
ANN	Artificial Neural Network
ATBDs	Algorithm Theoretical Basis Documents
ATLAS	Advanced Topographic Laser Altimeter System
AW3D30	ALOS World 3D - 30m
CNN	Convolutional Neural Network
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
GEDİ	Global Ecosystem Dynamics Investigation
GPS	Global Positioning System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNSS-PPP	Global Navigation Satellite System-Precise Point Positioning
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
ICESat-2	Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2
IDW	Inverse Distance Weighting
ISS	International Space Station
İHA	İnsansız Hava Aracı
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KOH	Karesel Ortalama Hata
KPE	Küresel Polinomal Enterpolasyon
LiDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
LPE	Lokal Polinomal Enterpolasyon
MAD	Median Absolute Deviation
MAE	Mean Absolute Error
METİ	Ministry of Economy, Trade and Industry
MLR	Multi Linear Regression
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NKOH	Normalize Edilmiş Karesel Ortalama Hata
NMAD	Normalized Median Absolute Deviation
ORK	Ordinary Kriging
PRISM	Panchromatic Remote-Sensing Instrument for Stereo Mapping
RTF	Radyal Tabanlı Fonksiyonlar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SYM	Sayısal Yükseklik Modeli
WGS84	World Geodetic System 1984
XGBoost	Extreme Gradient Boosting Machines

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 GEDI ışın konfigürasyonu. Dubayah vd. (2020) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.	23
Şekil 3.2 (a) ICESat-2 ışın konfigürasyonu Markus vd. (2017) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir. (b) ICESat-2 gözlemevinin yönlendirmesine bağlı olarak değişen ATLAS ışın deseni Neumann vd. (2019) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.	25
Şekil 3.3 ICESat-2 tarafından farklı seviyelerde sunulan ürünleri göstermektedir. İnt.Kyn.7’den Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.....	25
Şekil 4.1 Çalışma alanları ve yükseklik ile arazi örtüsü (Karra vd. 2021) haritaları.	27
Şekil 4.2 Eğitim noktalarının konumsal dağılımları.	31
Şekil 4.3 SYM üretimi ve doğruluklarının kontrolü için iş akışı.	33
Şekil 4.4 KSYM verilerinin iyileştirmesi için iş akışı.....	34
Şekil 4.5 CNN mimarisi.	35
Şekil 4.6 ANN mimarisi.....	37
Şekil 4.7 Test alanı-2’de oluşturulan ASTER KSYM için ANN mimarisi	37
Şekil 4.8 XGBoost mimarisi	38
Şekil 4.9 Test alanı-2’de oluşturulan SRTM için ilk 2 ağacın grafiği.	39
Şekil 4.10 Test alanı 4 ve 5 için yersel gerçeklik verilerinin dağılımı.	40
Şekil 5.1 Her test alanı için GEDI ve ICESat-2 verilerinin yer doğruluğu ile yükseklik farklarının konumsal dağılımı.	43
Şekil 5.2 Nokta-Tabanlı hata dağılım grafikleri.....	45

Şekil 5.3 KOH, MAE ve NMAD sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği (sonuçlar m cinsindendir).	46
Şekil 5.4 GEDI, ICESat-2 ve GEDI - ICESat-2 verileriyle üretilmiş SYM'ler ve yer doğruluğu olarak kullanılan SYM.	47
Şekil 5.5 Test Alanı-1 için KSYM ve üretilen SYM'lerin yükseklik farkı haritaları. ...	47
Şekil 5.6 Test Alanı-1'de raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.....	48
Şekil 5.7 Test Alanı-2 için KSYM ve üretilen SYM'lerin yükseklik farkı haritaları. ...	48
Şekil 5.8 Test Alanı-2'de raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.....	49
Şekil 5.9 Test Alanı-3 için KSYM ve üretilen SYM'lerin yükseklik farkı haritaları. ...	50
Şekil 5.10 Test Alanı-3'te raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.....	50
Şekil 5.11 Raster tabanlı sonuçlarda KOH, MAE ve NMAD sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği. (Sonuçlar m cinsindendir).	51
Şekil 5.12 GEDI ve ICESat-2 verilerine ait hata histogram grafikleri.....	52
Şekil 5.13 GEDI ve ICESat-2 verilerini KOH'a göre eğim gruplarındaki hataları.	53
Şekil 5.14 GEDI ve ICESat-2 verilerini KOH'a göre arazi örtüsü gruplarındaki hataları.	54
Şekil 5.15 Test alanı-1 için hata dağılım grafikleri.	55
Şekil 5.16 Test Alanı-2 için hata dağılım grafikleri.....	56
Şekil 5.17 Test alanı-3 için hata dağılım grafikleri.	57
Şekil 5.18 Test alanı-4 için hata dağılım grafikleri.	58
Şekil 5.19 Test alanı-5 için hata dağılım grafikleri.	59
Şekil 5.20 Metotların test alanlarında iyileştirme oranları yüzde olarak verilmiştir.	60
Şekil 5.21 Test alanları için ham ve iyileştirilmiş KSYM verilerinin arazi örtüsü sınıflarına göre KOH doğrulukları.	62

Şekil 5.22 Test alanları için ham ve iyileştirilmiş KSYM verilerinin eğim gruplarına göre KOH doğrulukları..... 64



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 GEDI ürünlerine ait ürün isimleri ve kaynakçaları. İnt.Kyn.1'den Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.	23
Çizelge 4.1 Çalışma alanına ait diğer bilgiler.	26
Çizelge 4.2 KSYM'lere ait bilgiler.	29
Çizelge 4.3 Test alanlarına ait arazi örtüsü oranları.....	30
Çizelge 4.4 Test alanlarına ait nokta yoğunlukları.....	31
Çizelge 4.5 Test alanı-2'de oluşturulan AW3D30 için eğitim setinin CNN ağ yapısı. .	36
Çizelge 4.6 Çalışmada kullanılan LiDAR verisinden üretilmiş SYM verilerine ait bilgiler.	40
Çizelge 5.1 SYM üretiminde kullanılmış noktaların sayı ve yoğunlukları.....	43
Çizelge 5.2 GEDI ve ICESat-2 için hata dağılım oranları	44

1. GİRİŞ

Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), yer bilimleri konusunda çalışan bilim insanları, karar vericiler ve uygulama yapanlar için önemli rol oynayan temel bir bileşendir. SYM'ler, arazi yüzeyinin belirli bir datumda elde edilmiş ve gridlenmiş yükseklik verilerini gösteren, 3 boyutlu raster veri formatında sayısal olarak temsil edilen matematiksel modellerdir. SYM'ler sahip olduğu özellikler sayesinde coğrafi analizlerin ve harita üretiminin yıllar içerisinde temelini oluşturan bir araç haline gelmiştir. SYM'ler, uydu görüntülerinin ortorektifikasyonu, arkeolojik alanların tespiti (Štular vd. 2021), toprak türü dağılımının haritalanması (Park vd. 2001), dağ buzulu değişim çalışması (Jaber vd. 2013), batimetri çalışması (Muslim ve Foody 2008), hidroloji çalışmaları (Petrasova vd. 2017) ve ağaç yüksekliği (Wang vd. 2021) gibi çalışmalarda kullanılmaktadır.

İlk SYM'ler 1950'li yıllarda topografik haritaların manuel olarak sayısallaştırılmasıyla üretilmiştir. Ancak SYM'lerin gerçek anlamda gelişimi, bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle ivme kazanmıştır. İlk bilgisayar tabanlı SYM'ler 1960'ların sonlarına doğru ortaya çıkmıştır. Günümüzde birçok farklı metot ile SYM üretilebilmektedir. Küresel Uydu Konumlama Sistemi - Hassas Nokta Konumlandırma (Global Navigation Satellite System - Precise Point Positioning - GNSS-PPP) (Abdallah vd. 2020), nivelman yöntemi (Erdogan 2009), İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi (Uysal vd. 2015), ışık algılama ve mesafe ölçümü (Laser Imaging Detection and Ranging - LiDAR) (Liu vd. 2008), pasif sistemler (ASTER Küresel SYM (KSYM)) (Tachikawa vd. 2011), ALOS World 3D – 30 m (AW3D30) (Tadono vd. 2014) vb.) ve aktif sistemler (Shuttle Radar Topography Mission - SRTM) (van Zyl 2001), TanDEM-X (Rizzoli vd. 2017)) uzaktan algılama, uzay tabanlı LiDAR altimetre sistemleri Küresel Ekosistem Dinamikleri Araştırması (Global Ecosystem Dynamics Investigation - GEDI), Buz, Bulut ve Arazi Yükseklik Uydusu-2 (Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2 - ICESat-2) (Narin ve Gullu 2023) ile üretilebilmektedir. Yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları söz konusudur. SYM'nin kullanımına yönelik olarak istenilen çözünürlük, çalışma alanının büyüklüğü ve topografik yapısına göre değişmektedir. Bu sebeple, araştırmacılar, karar vericiler ya da kullanıcılar farklı büyüklük, konumsal çözünürlük ve veri toplama tekniklerinde birçok SYM üretilmiştir (Mesa-Mingorance ve Ariza-López

2020). Üretilen SYM'lerin doğrulukları ve güncel olmaları önemli bir konudur. SYM'ler üretilirken hem yersel ölçümlerde hem de uzay tabanlı görevlerde verinin bozulmasına sebep olacak birçok faktör vardır. Ayrıca inşaat sahalarından taşınan büyük toprak ya da kaya kütleleri, mermer, bor gibi madenlerin çıkarılması, büyük çapta oluşan toprak kaymaları gibi etmenlerden dolayı SYM'ler çoğu zaman güncellemeye ihtiyaç duymaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı uzay tabanlı LiDAR altimetre verileri ile DEM üretimi yapıp yapılamayacağını incelenmesidir. Ayrıca daha önceden üretilmiş olan KSYM'lerin (AW3D30, ASTER KSYM ve SRTM) uzay tabanlı LiDAR altimetre verileri ile doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır.

Tez çalışmasında hipotez aşağıdaki maddeler şeklinde kurulmuştur;

- GEDI verisi ile SYM oluşturulabilir.
- ICESat-2 verisi ile SYM oluşturulabilir.
- GEDI ve ICESat-2 verilerinin birlikte kullanılmasıyla SYM oluşturulabilir.
- KSYM modelleri GEDI ve ICESat-2 verileri ile entegre edilerek daha güncel ve doğru modeller elde edilebilir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Geçmişten günümüze kadar KSYM'ler birçok bölge ve ülkede farklı yersel gerçeklik verisi ile karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasının hazırlık aşamasında en çok kullanılan KSYM'ler, yersel gerçeklik verileri ve karşılaştırma ölçütleri ile incelenmiştir. İncelenen bu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Santillan ve Makinano-Santillan (2016), çalışmalarında Filipinler'in kuzeydoğusundaki Mindanao'daki çeşitli bölgelerinde bulunan Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System - GPS) ile elde edilmiş 274 yer kontrol noktası ile SRTM, ASTER KSYM ve AW3D30 verilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada Karesel Ortalama Hata (KOH) kullanmışlardır. KOH'a göre, AW3D30 = 5.68 m, ASTER KSYM = 11.98 m ve SRTM = 8.28 m hata vermiştir. Ayrıca AW3D30 verisinin diğer KSYM'lerine göre farklı arazi örtüsü türlerinde de daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Yap vd. (2019), çalışmalarında Kamerun genelinde GPS/nivelman tekniği ile elde edilmiş 555 yer kontrol noktası ile SRTM, ASTER KSYM ve AW3D30 verilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada KOH ve Normalize Medyan Mutlak Sapma (Normalized Median Absolute Deviation – NMAD) kullanmışlardır. KOH ve NMAD'a göre sırasıyla AW3D30 = 13.06 m ve 7.75 m, ASTER KSYM = 18.87 m ve 13.30 m ve SRTM = 13.25 m ve 7.41 m hata vermiştir. Farklı arazi örtüsü sonuçlarına göre orman ve çalılık alanlarda modellerin daha kötü sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca eğim gruplarında da KSYM'lere göre en iyi sonucu AW3D30'un verdiğini belirtmişlerdir.

Apeh vd. (2019), çalışmalarında Nijerya genelinde GPS ile elde edilmiş 65 yer kontrol noktası ile SRTM, ASTER KSYM ve AW3D30 verilerini karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada KOH kullanmışlardır. KOH'a göre, AW3D30 = 5.40 m, ASTER KSYM = 20.03 m ve SRTM = 7.47 m hata vermiştir. Ayrıca yükseklik aralıklarına göre yaptıkları analizde AW3D30 ve SRTM'in 201 m - 400 m arasında ve 801 m'den daha yüksek olduğu bölgelerde daha doğru sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Florinsky vd. (2018), çalışmalarında Rusya'nın Avrupa kısmının orta kesiminde, Moskova'nın 120 km güneyinde ve Pushchino'nun 15 km güneybatısında yer alan çalışma sahasında 69 yer kontrol noktası ile SRTM, ASTER KSYM ve AW3D30 verilerini karşılaştırmışlardır. KOH'a göre, AW3D30 = 7.87 m, ASTER KSYM = 9.10

m ve SRTM = 17.91 m hata vermiştir. En iyi sonucun AW3D30 olduğunu belirtmişlerdir. Uuemaa vd. (2020), çalışmalarında Estonya, Çin, Yeni Zelanda ve Norveç'te yer alan çalışmada LiDAR ve Pleiades-1A verilerinden üretilen SYM'ler ile ASTER KSYM, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM ve NASADEM verilerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda KOH sonuçlarında ülke sıralamasıyla Estonya – Çin – Yeni Zelanda ve Norveç AW3D30 = 7.92 m – 7.18 m – 11.42 m ve 4.98 m, ASTER KSYM = 10.36 m – 13.52 m – 11.77 m – 9.22 m, SRTM = 6.59 m – 10.00 m – 13.07 m – NA, MERIT = 3.01 m – 12.43 m – 13.58 m – 10.49 m, TanDEM-X = 7.16 m – 11.1 m – 15.05 m – 6.84 m ve NASADEM = 6.39 m – 8.53 m – 12.08 m – NA hata vermiştir. Çalışmalarında ayrıca eğim, bakı ve arazi örtüsüne göre de inceleme yapmışlardır. Sonuç olarak, AW3D30 verisinin çoğu testte en sağlam ve en istikrarlı performansa sahip olduğunu ve bu nedenle birden fazla coğrafi bölgede analiz için en iyi seçim olduğunu belirtmişlerdir. Alganci vd. (2018), çalışmalarında İstanbul ilini seçmişlerdir ve referans veri olarak Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından üretilen Sayısal Yüzey Modelinden rastgele seçilen 1000 yer kontrol noktası ile AW3D30, ASTER GDEM, SRTM, SPOT SYM ve Pleiades SYM kullanmışlardır. KOH'a göre AW3D30 = 5.91 m, ASTER GDEM = 6.92 m, SRTM = 6.49 m, SPOT sayısal yüzey modelin = 4.23 m, ve Pleiades Sayısal Yüzey Modeli = 5.09 m hata vermiştir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında KSYM olarak SRTM, ASTER KSYM ve AW3D30 kullanıldığı görülmüştür. Çalışmalarda KOH ölçütü sıkça kullanılmıştır. Ayrıca çalışmalarda eğim, arazi örtüsü gibi parametrelerin düşey doğruluğa etkisinin araştırıldığı da görülmüştür. KSYM çalışmalarına ait daha detaylı bilgi için Mesa-Mingorance ve Ariza-López (2020) yılında yaptığı gözden geçirme makalesi incelenebilir.

Tez çalışmasında kullanılacak olan uzay tabanlı LiDAR altimetre sistemleri 2018 yılının sonlarında veri toplamaya başladığı için literatür bakımından kısıtlıdır. Ancak literatürde ki çalışmalar incelendiğinde düzeltmeye çalışılan KSYM'lere göre daha yüksek doğruluklar verdiği görülmüştür. Uzay tabanlı LiDAR altimetre sistemleri için incelenen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Adam vd. (2020), Almanya'da iki farklı alanda yaptıkları çalışmada 69927 GEDI noktası ile hem yüzey hem de kanopi verilerini incelemişlerdir. Çalışma da Medyan Mutlak Hata

(Median Absolute Error – MAE) ölçütünü kullanmışlardır. Arazi yüksekliği için hatayı sırasıyla, 2.55 m ve 3.10 m kanopi için 0.97 m ve 0.30 m bulmuşlardır. GEDI verisinin doğruluğuna arazi örtüsü, eğim ve ayrıca GEDI parametresi olan hassasiyet, güneş yüksekliği ve ışın tipinin etkilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca GEDI verisinde %9-13 aykırı değer olduğunu belirtmişlerdir.

Urbazaev vd. (2022), yaptıkları çalışmada dört farklı arazi sınıfı ve altı farklı orman tipindeki arazilerde GEDI ve ICESat-2 verilerinin arazi yüksekliği belirlemedi ki performanslarını karşılaştırmışlardır. KOH'a göre arazi örtüsü sınıflarında GEDI verisi 1.52 m ile 6.60 m arasında ICESat-2 verisi 1.47 m ile 5.34 m arasında hata vermiştir. Ayrıca eğimin ve orman tiplerinin doğruluğa etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Liu vd. (2021), yaptıkları çalışmada 40 farklı Ulusal Ekolojik Gözlemevi Ağı (National Ecological Observatory Network – NEON) alanında ICESat-2 ve GEDI verisinin arazi yüksekliği ve kanopi yüksekliği belirlemedeki başarısını araştırmışlardır. Ayrıca her iki veri için gece/gündüz gibi zaman farklarını da detaylı olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak KOH'ya göre orta ve alt enlemlerde 2.24 m ile 4.03 m arasında doğruluklar elde etmişlerdir. Ayrıca her iki verinin de arazi yüksekliği belirlemede 20 m'den daha uzun ve kapalılığın %90'dan fazla olduğu alanlarda doğruluğunun düştüğünü belirtmişlerdir. Gece ve gündüz olarak karşılaştırdıklarında ise gece elde edilen verilerin yüksek doğruluklar verdiği için kullanılmasını önermişlerdir.

Quirós vd. (2021), yaptıkları çalışmada İspanya'nın 10 farklı alanındabölgesinde LiDAR verileri ile GEDI verilerini karşılaştırmıştır. LiDAR ile karşılaştırma sonucunda KOH'a göre 6.05 m doğruluk elde etmişlerdir. GEDI doğruluğunun kapalılık ve eğim ile yüksek ilişkisi olduğunu belirtmişlerdir.

Narin vd. (2023), yaptıkları çalışmada GEDI verisinin arazi yüksekliği belirlemek için çoklu kriter stratejisi oluşturmuşlardır. GEDI için aynı bölgede 3 farklı güneş yüksekliği olan veriyi karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak GEDI verisinin güneş yüksekliğinin düşük olduğu zamanlarda 5 m'den daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Shang vd. (2022), yaptıkları çalışmada ICESat-2 verisinin arazi yüksekliği belirlemedeki başarısı için yeni bir strateji ortaya koymuşlardır. Çin'in iki farklı bölgesinde yaptıkları çalışmada 8 adımlı filtreleme sonucunda KOH'a göre ICESat-2 verisinin 0.53 m ile arazi yüksekliğini tespit ettiklerini belirtmişlerdir.

Tezde yer alan SYM üretimi için enterpolasyon metodu seçimi için literatür taranmıştır. Literatürde Ters Mesafe Ağırlıklandırma (Inverse Distance Weighting - IDW), Ordinary Kriging (ORK), Kriging, Radyal Tabanlı Fonksiyonlar (RTF), Küresel Polinomal Enterpolasyon (KPE), Lokal Polinomal Enterpolasyon (LPE) gibi birçok enterpolasyon metodu bulunmaktadır.

Banjo vd. (2021), yaptıkları çalışmada IDW, ORK, kriging, EBK, KPÜ, LPE ve bariyerli Kernel enterpolasyon yöntemlerini karşılaştırmış ve ORK yönteminin KOH'a göre en iyi sonuçları KOH'a göre 7.79 m ile verdiğini belirtmişlerdir.

Setiyoko ve Kumar (2012), yaptıkları çalışmada deterministik (IDW, KPE, LPE ve RTF) ve olasılıksal (Kriging, ORK, evrensel Kriging, gösterge Kriging, olasılıksal Kriging, ayırıcı Kriging ve coKriging) enterpolasyon yöntemlerini kullanmıştır. Çalışma sonucunda ortalama hataya göre ORK enterpolasyon yönteminin en az hatayı verdiğini (ortalama hata = 1.29 m) belirtmişlerdir.

Sunila ve Kollo (2007), yaptıkları çalışmada Kriging yöntemini bulanık mantık yöntemiyle karşılaştırmışlardır. KOH'a göre ORK yönteminin 3.27 m ile daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında ORK metodunun diğer metotlara göre daha iyi sonuç verildiği görülmüştür ve çalışmada SYM üretimi için ORK metodu kullanılmıştır.

Tezin asıl amacı olan KSYM'leri iyileştirme çalışmaları için kısıtlı bir literatür bulunmaktadır. KSYM'leri iyileştirme çalışmaları için incelenen çalışmalar aşağıdadır:

Crippen vd. (2016), yılında SRTM verisini ASTER ve ICESat/GLAS verileriyle yeniden işleyerek NASADEM verisi oluşturmuşlardır.

Yue vd. (2017), yaptıkları çalışmada Yapay Sinir Ağı (YSA) ile ASTER KSYM, SRTM-1 ve ICESat/GLAS noktalarını birleştirerek yeni bir model üretmişlerdir. Çalışma alanı olarak Çin ülkesinin tamamı kullanılmıştır. Tüm Çin için KOH'a göre doğruluk ASTER 20.467 m SRTM-1 16.487 m iken yeni elde ettikleri modelin 15.205 m hataya sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Chen et al. (2020), yaptıkları çalışmada SRTM ile ICESat/GLAS verilerini birleştirmişlerdir. Çalışma alanı olarak Çin'in Jiangxi ili olarak belirlemişlerdir ve 146 adet GNSS noktası ile kontrol etmişlerdir. Birleştirme yapmak için Çoklu Lineer

Regresyon (Multi Linear Regression – MLR), Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı, genelleştirilmiş regresyon sinir ağı ve rastgele orman metotlarını kullanmışlardır. Çalışmanın sonunda metotların içinde en iyi sonucu rastgele orman metodunun verdiğini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonucunda diğer KSYM verilerinin iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Lee ve Hahn (2020), yaptıkları çalışmada KOMPSAT 3 uydusundan üretilen DEM verisi ile ICESat/GLAS verilerini birleştirerek yeni bir DEM üretmişlerdir. Çalışmada “POINT-TO-SURFACE” eşleme metodunu kullanmışlardır. Çalışma sonucunda DEM doğruluğunun 9 m’den 2 m’ye düştüğünü belirtmişlerdir.

Yamanokuchi vd. (2007), yaptıkları çalışmada Antarktika bölgesinde InSAR ve ICESat/GLAS verisini birleştirmişlerdir. Çalışmada yersel doğruluk olarak GPS ölçümlerini kullanmışlardır. InSAR SYM ile GPS ölçümleri arasında KOH’a göre ± 279.3 m hata bulunurken düzeltilmiş InSAR SYM’nin doğruluğu ± 39.5 m’dir.

Tez çalışmasından hedeflenen KSYM düzeltmesi için literatürde yeterli metot karşılaştırması yapılmaması nedeniyle. Bu sebeple metot seçimi yapmak için yer bilimlari ile alakalı farklı konularda metot karşılaştırması yapmış çalışmalar incelenmiştir.

Sahin (2020), yaptığı çalışmada heyelan duyarlılık haritalamada Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Gradient Boosting Machine ve Rastgele Orman metotlarını kullanmış ve en iyi sonucu XGBoost metodu ile elde etmiştir.

Panahi vd. (2020), yeraltı suyunun potansiyel konumlarını belirlemek için Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Network- CNN) ve Destek Vektör Makineleri (DVM)’yi karşılaştırmış ve CNN’in daha başarılı sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Ghorbanzadeh vd. (2019), toprak kayması belirlemede Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network - ANN), tek boyutlu CNN ve DVM metotlarını kullanmışlardır ve en iyi sonucu CNN metodu verdiğini belirtmişlerdir.

Abdikan vd. (2023), bitki boyu tahmininde Lineer Regresyon, MLR ANN, XGBoost ve CNN tekniklerini kullanmışlardır. En iyi sonucun ANN metodu ile sonrasında da CNN metodu ile elde edildiğini belirtmişlerdir.

Literatür taramasından sonra tez çalışmasında KSYM verilerinin GEDI ve ICESat-2 verileri ile iyileştirmek için ANN, CNN ve XGBoost metotları kullanılmaya karar

verilmiştir.

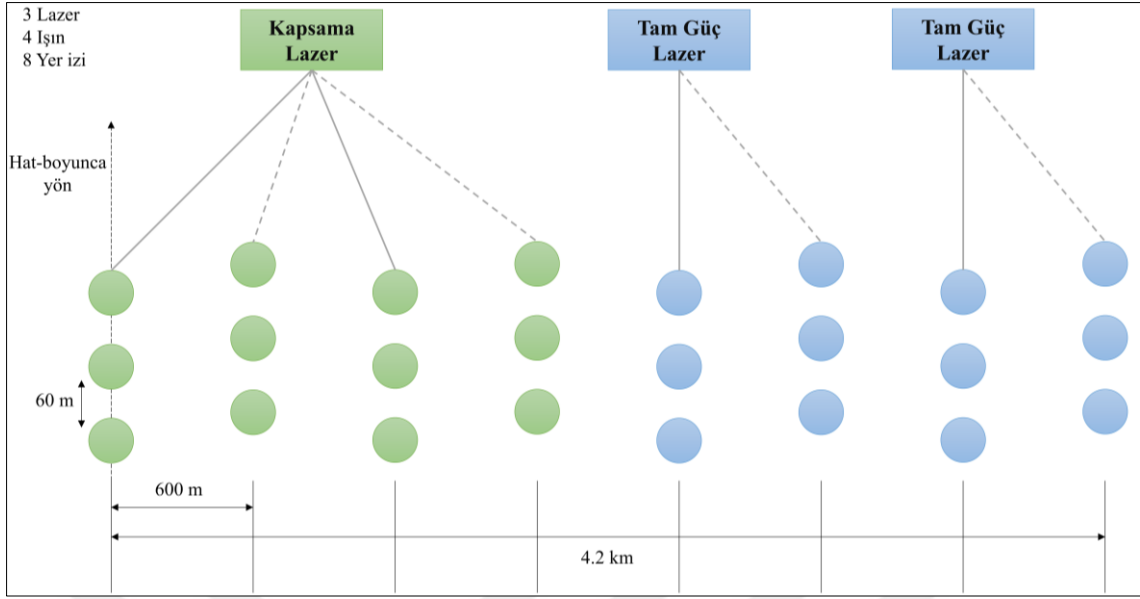


3. GEDI ve ICESat-2 UZAY TABANLI LiDAR ALTİMETRE SİSTEMLERİ

GEDİ ve ICESat-2 uzay tabanlı altimetre sistemleri yer bilimleri için önemli bir veri kaynağı oluşturmaktadır. İki sistem arasında kaplama alanı, zamansal çözünürlük, konumsal çözünürlük gibi farklar bulunsada kutup bölgeleri hariç kaplama alanları benzerliği ve aynı tarihlerde topladıkları veriler hem alandaki veri yoğunluğu artırmakta ve her iki sistemi karşılaştırılabilir hale getirmektedir. Tez çalışmasında GEDI L2A ve ICESat-2 ATL08 altimetre verileri kullanılmıştır. Bu iki altimetre verisi de arazi yüksekliği belirlemek için kullanılan ürünlerdir.

3.1 GEDI

Temel amacı fiziksel yeryüzü topografyasını ve ormanlarını araştırmak olan GEDI, 2018 yılının aralık ayında Uluslararası Uzay İstasyonuna (International Space Station – ISS) entegre edilmiş bir LiDAR altimetre sistemidir (Dubayah vd. 2020). GEDI, 1064 nanometre dalga boyunda ışık yayan üç lazere sahiptir. Bu lazerler bir adet kapsama (coverage) ve iki adet tam güç (full power) lazer olarak ikiye ayrılır. Bu lazerler toplamda 8 yer izi bırakır ve her iz arasında 600 m bulunmaktadır. Her ışın arasında hat-boyunca (along-track direction) 60 m yön farkı bulunmaktadır (Şekil 3.1). GEDI 51.6° Kuzey ve Güney enlemleri arasında World Geodetic System 1984 (WGS84) sisteminde 25 metre çapında lazer ayak izi oluşturarak 3 boyutlu bilgi elde eder (Dubayah vd. 2020). GEDI farklı uygulamalar için ürünlerini kategorize etmiştir ve tüm verileri ücretsiz olarak sunulmaktadır. Ayrıca her bir ürün için fiziksel teorileri, matematiksel prosedürleri, verinin hata kaynakları ve kullanımlarına yönelik dokümanlar hazırlamışlardır. Çizelge 3.1 GEDI ürünlerine ait ürün isimleri ve kaynakçaları. İnt.Kyn.1’den Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.Çizelge 3.1’de Algoritma Teorik Temel Belgeleri (Algorithm Theoretical Basis Documents – ATBDs), ürün isimleri ve kaynakçaları verilmiştir. GEDI ürünleri sayesinde orman yüksekliği belirleme (Vatandaslar vd. 2023), su yüksekliği değişimi (Zhang vd. 2023), arazi yüksekliği (Narin vd. 2023), yaprak alan indeksi tahmini (Wang vd. 2023), arazi kar yüksekliği (Bisschop 2021) gibi birçok farklı çalışma yapılabilmektedir. Tez çalışmasında L2A ürünleri kullanılmıştır (Çizelge 3.1).



Şekil 3.1 GEDI ışın konfigürasyonu. Dubayah vd. (2020) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.

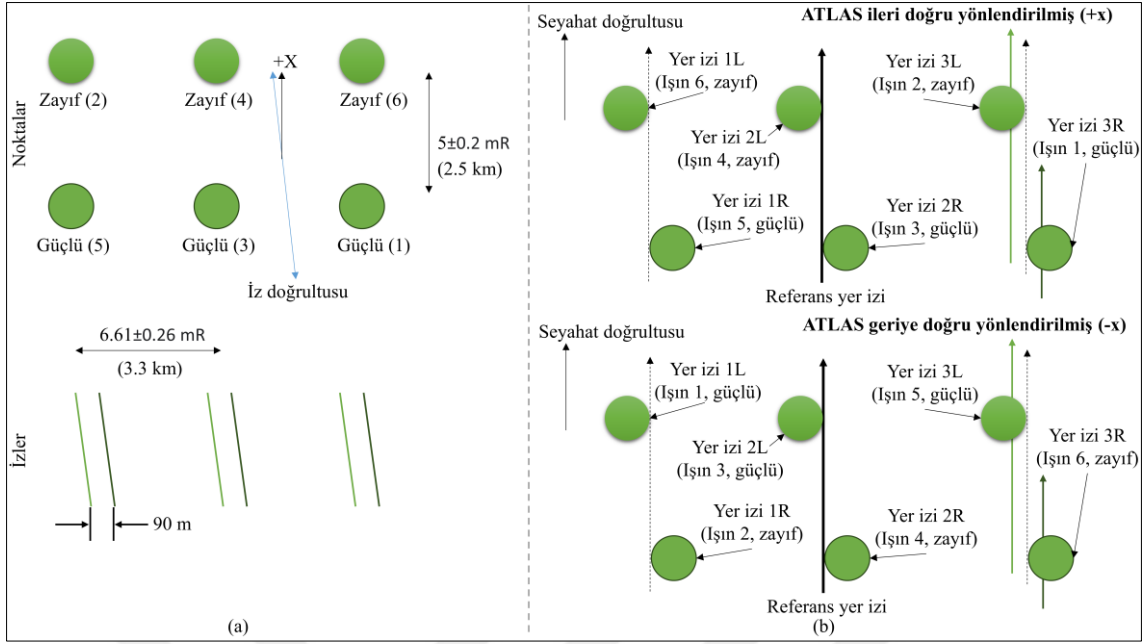
Çizelge 3.1 GEDI ürünlerine ait ürün isimleri ve kaynakçaları. İnt.Kyn.1'den Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.

ATBD	ATBD ismi	Veri ürünleri	Kaynak
L1A-2A	L1A ve L2A ürünlerinin, üretimi, dalga formunun yorumlaması, oluşturulması ve yayınlanması	1A: Ham dalga formu 2A: Arazi yüksekliği, Kanopi yüksekliği, Bağlı Yükseklik (RH) metrikleri	İnt.Kyn.2
L1B	L1 ve L2 ürünleri için dalga biçimi coğrafi konum belirleme	Coğrafi konumlu dalga formları	İnt.Kyn.3
L2B	Ayak izi kanopi örtüsü ve dikey profil metrikleri	Kanopi Örtü Fraksiyonu ve profili, yaprak alan indeksi ve profili	İnt.Kyn.4
L3	Gridlenmiş arazi yüzey metrikleri	Gridlenmiş düzey 2 metrikleri	İnt.Kyn.5
L4A	Ayak izi toprak üstü biyokütle yoğunluğu	Ayak izi toprak üstü biyokütle seviyesi	(Kellner vd. 2023)
L4B	Gridlenmiş biyokütle ürünü	Gridlenmiş toprak üstü biyokütle yoğunluğu	-

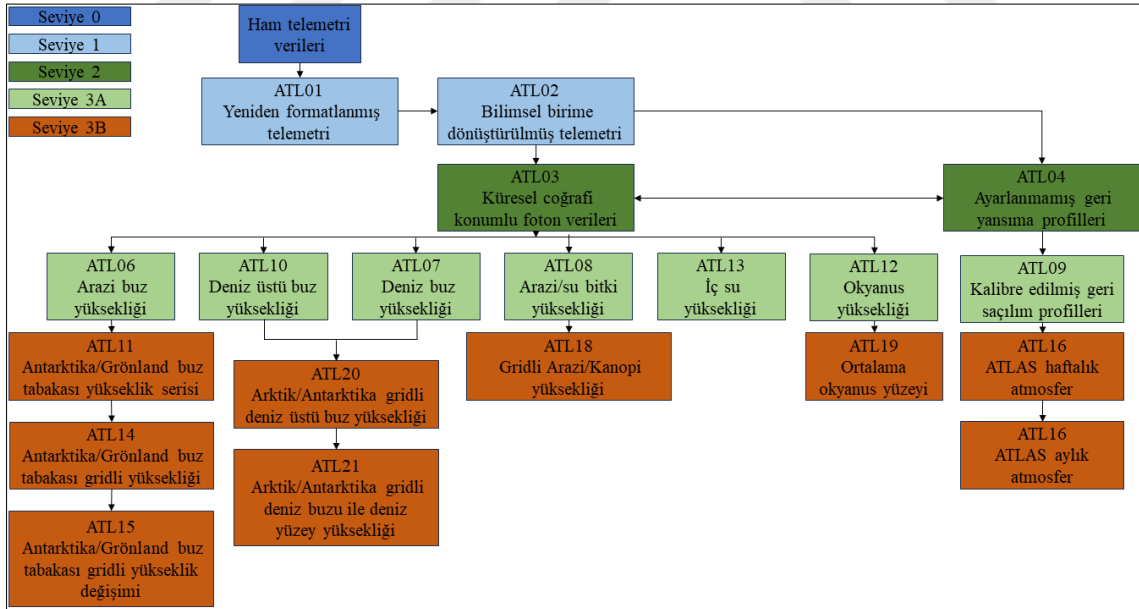
3.2 ICESat-2

Asıl amacı deniz/kara buz kalınlığı, bulut yüksekliği ve arazi yüksekliği olan ICESat-2 uydusu Eylül 2018'de fırlatılmıştır. ICESat-2 uydusu Gelişmiş Topografik Lazer Altimetre Sistemi (Advanced Topographic Laser Altimeter System - ATLAS) LiDAR sensörünü taşımaktadır. Birincil amacı buzullar olduğu için kutuplara yakın bir yörüngeye sahiptir. Bu yörünge sayesinde dünya çapında yükseklikleri ölçmektedir. ICESat-2, 532 nm dalga boyunda foton-sayar sisteminde lazer altimetre sisteminde veri toplamaktadır. Lazer altimetre sistemi, lazer ışınını her biri güçlü ve zayıf bir ışın içeren üç çift halinde düzenlenen altı ayrı ışına böler. Üç çift birbirinden 3,3 kilometre uzaktadır ve her çiftteki güçlü ve zayıf ışınlar arasında 90 metre fark bulunmaktadır (Şekil 3.2) (Markus vd. 2017). ICESat-2 88° Kuzey ve Güney enlemleri arasında WGS84 sisteminde veri toplamaktadır. 91 günlük bir zamansal çözünürlüğe sahiptir (Neuenschwander ve Magruder 2019). ICESat-2 gözlemevi, güneş dizilerindeki güneş ışığını en üst düzeye çıkarmak için yılda yaklaşık iki kez yeniden yönlendirilmektedir. ATLAS ileri yönde yönlendirildiğinde, zayıf ışınlar ışın çiftinin sol tarafındadır ve 1L, 2L ve 3L yer yolları ile ilişkilidir, geriye doğru yönlendirildiğinde ise tam tersi şekilde ilişkilidir. ATLAS ileri yönde olduğunda zayıf ışınlar güçlü ışınlardan yaklaşık 2,5 km öndedir. ATLAS geriye doğru yönlendirildiğinde zayıf ve güçlü ışınların göreceli konumları değişir. Güçlü ışınlar yerdeki ray çiftlerinin sol tarafındadır ve zayıf ışınlara öncülük etmektedir (Neumann vd. 2019) (Şekil 3.2).

ICESat-2 verileri farklı uygulamalar için birçok seviye de “ATL” ön adıyla ürünlerini kategorize edilmiştir ve tüm veriler ücretsiz olarak kullanılabilir (Şekil 3.3). ICESat-2 ürünleri için fiziksel teorilere, matematiksel prosedürlere, verinin hata kaynaklarına ve kullanımlarına yönelik dokümanları İnt.Kyn.6'dan ulaşılabilir. ICESat-2 ürünleri sayesinde arazi yüksekliği (Narin ve Gullu 2023), orman yüksekliği (Vatandaslar vd. 2023), iç su yüksekliği (Narin ve Abdikan 2023), deniz buzu kalınlığı (Petty vd. 2020) batimetrik haritalama (Parrish vd. 2019) gibi birçok çalışma yapılabilir. Tez çalışmasında seviye 3A ürünü olan ATL08 kullanılmıştır.



Şekil 3.2 (a) ICESat-2 ışın konfigürasyonu Markus vd. (2017) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir. (b) ICESat-2 gözlemevinin yönlendirmesine bağlı olarak değişen ATLAS ışın deseni Neumann vd. (2019) çalışmasından Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.



Şekil 3.3 ICESat-2 tarafından farklı seviyelerde sunulan ürünleri göstermektedir. İnt.Kyn.7'den Türkçeleştirilerek düzenlenmiştir.

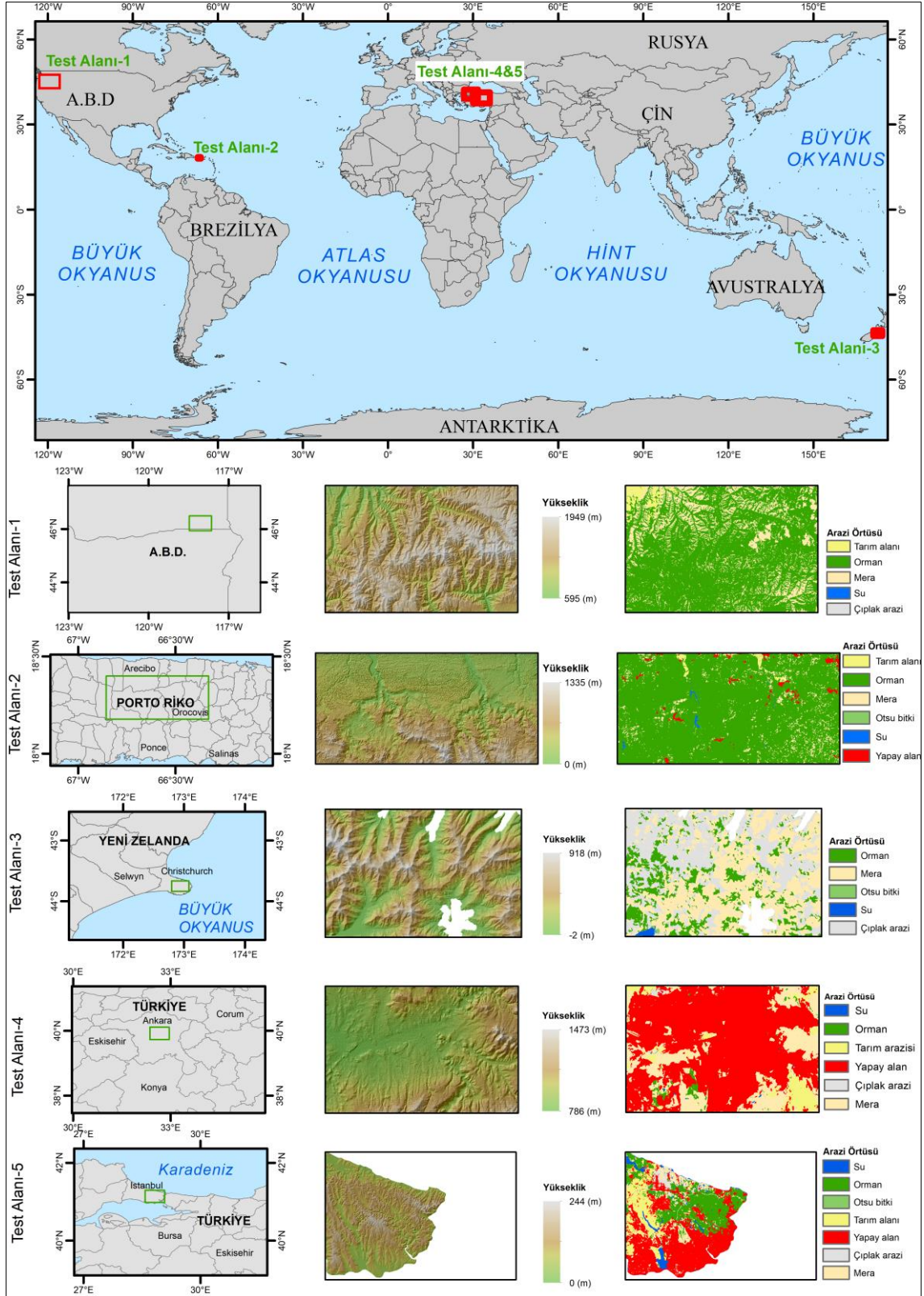
4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1 Çalışma Alanı

Tez çalışmasında 5 adet test alanı kullanılmıştır. Test Alanı-1 Amerika Birleşik Devletleri'nin Washington eyaletinin güney doğusunda yer almaktadır. Çalışma alanı Mavi Dağlar (Blue Mountains) sıra dağlarının batısında Umatilla Ulusal ormanlarında bulunmaktadır (Şekil 4.1). Bu alan dik yamaçlara ve derin kanyonlara sahiptir (İnt.Kyn.8). Bu alanın %77'si ormanlarla kaplıdır. Test Alanı-2, Karayipler'de yer alan Porto Riko adasında bulunmaktadır. Çalışma alanı Porto Riko adasının batısında yer almaktadır (Şekil 4.1). Çalışma alanının doğusunda Cordillera Central sıra dağları yer almakta olup adanın en yüksek noktası “Cerro de Punta” bulunmaktadır (Balghin ve Coleman 1965). Kuzey tarafı ise nispeten daha düz bir arazi yapısına sahiptir. Ayrıca nehir yataklarının oluşturduğu iki adet derin vadiye sahiptir. Bu alanın %90'ı ormanlarla kaplıdır. Test Alanı-3, Yeni Zelanda'nın Güney Adasında yer almaktadır ve “Banks peninsula” olarak adlandırılmaktadır (Şekil 4.1). Bu alan volkanik kökenli bir yarımadadır (Stipp ve McDougall 1968). Yarımadanın %42'si mera iken %41'i çıplak arazidir. Test Alanı-4, Türkiye'nin başkenti olan Ankara ilindedir (Şekil 4.1). Bu alan yoğun yerleşim yeri olduğu için seçilmiştir. Test alanı-5 Türkiye'nin en yoğun nüfusuna sahip olan İstanbul ili olarak seçilmiştir (Şekil 4.1). Alanda yoğun olarak yerleşim ve orman bulunmaktadır. Çalışma alanlarına ait diğer bilgiler Çizelge 4.1'de yer almaktadır.

Çizelge 4.1 Çalışma alanına ait diğer bilgiler.

Parametre	Test Alanı-1	Test Alanı-2	Test Alanı-3	Test Alanı-4	Test Alanı-5
Ülke İsmi	A.B.D.	Porto Riko	Yeni Zelanda	Türkiye	Türkiye
Merkez					
Koordinatları	46° 7'31.82"K 117°44'37.12"B	18°16'46.54"K 66°34'26.98"B	43°43'12.69"G 172°53'25.06"D	39°57'0.50"K 32°50'1.83"D	41° 8'22.13"K 28°49'40.09"D
(WGS84)					
Alan (km ²)	~1140	~2003	~460	~683	~2091
Min. – Maks.					
Yükseklik	595 –1950	0 – 1335	-2 – 918	786 –1473	0 – 244
(m)					



Şekil 4.1 Çalışma alanları ve yükseklik ile arazi örtüsü (Karra vd. 2021) haritaları.

4.2 Veri

4.2.1 Küresel Sayısal Yükseklik Modelleri

Sayısal yükseklik modeli raster formatında düzenli bir şekilde sunulan ve her pikseli yükseklik bilgisi içeren sayısal verilerden oluşan bir modeldir. Sayısal arazi modelleri sadece yüzey yüksekliği bilgisini içerir. Bina, ağaç ve bitki türleri gibi zeminden yüksekte olan verilerin yükseklik bilgilerini içermemektedir. SYM verileri dağ, vadi, ova ve benzeri birçok coğrafi yapının yükseklik bilgisini içerdiği için birçok disiplin tarafından kullanılmaktadır. Bu sebeple hem lokal ölçekte hem de küresel ölçekte birçok SYM verisi üretilmiştir. Tez çalışması kapsamında KSYM'lerin iyileştirmesi amaçlandığı için literatür bilgilerinde KSYM ile ilgili literatür taraması verilmiştir. Tez çalışmasında AW3D30, ASTER GDEM ve SRTM KSYM'leri kullanılmıştır.

AW3D30 Gelişmiş Kara Gözlem Uydusu (The Advanced Land Observing Satellite - ALOS) 2006 yılında Japonya Uzay Araştırma Ajansı (Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA) tarafından geliştirilmiştir. ALOS uydusu küresel veri toplamak için üretilmiştir ve Stereo Haritalama için Pankromatik Uzaktan Algılama Aracı (Panchromatic Remote Sensing Instrument for Stereo Mapping - PRISM) sensörü ile donatılmıştır. ALOS 2006 – 2011 yılları arasında veri toplamıştır. JAXA tarafından 2015 yılında AW3D30 (Versiyon 1.0) yayınlamış ve ardından birçok güncelleme gerçekleştirilmiştir. AW3D30 kaplama alanı 60° Kuzey ile 60° Güney enlemleri arasındadır (Tadono vd. 2014). AW3D30 ile ilgili diğer bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Tez çalışmasında AW3D30 (Versiyon 3.2) kullanılmıştır.

ASTER, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration – NASA) ve Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı (Ministry of Economy, Trade, and Industry - METI) tarafından ortak olarak geliştirilen optik sensörlü bir uydudur. ASTER KSYM, ASTER uydusundan toplanan görüntüleriyle oluşturulmuş bir GDEM'dir. Version.1 2009 yılında duyurulmuştur. Ardından birçok güncelleme getirilmiştir. ASTER KSYM'in kaplama alanı 83° Kuzey ile 83° Güney enlemleri arasındadır (Tachikawa vd. 2011). ASTER KSYM ile ilgili diğer bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çalışmamızda ASTER KSYM (Versiyon 3) kullanılmıştır.

SRTM, NASA tarafından KSYM oluşturulması için gerçekleştirilen bir projedir. 11 Şubat 2000 tarihinde 11 günlük görev süresiyle 60° Kuzey ile 60° Güney enlemleri arasında sentetik açıklı radar görüntüleri toplamıştır (van Zyl 2001). SRTM ilk versiyonu 2003 yılında yayınlamıştır. Ardından birçok GÜNCELLEME getirilmiştir. SRTM ile ilgili diğer bilgiler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çalışmamızda SRTM (Versiyon 3) kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 KSYM’lere ait bilgiler.

KSYM	AW3D30	ASTER GDEM	SRTM
Projeksiyon	Coğrafi	Coğrafi	Coğrafi
Yatay Datum	GRS80 (ITRF97)	WGS84	WGS84
Düşey Datum	EGM96	EGM96	EGM96
Veri Toplama	2006-2011	2000-2013	2000
Sensör	Optik	Optik	Radar (C band)
Çözünürlük (m)	~30	~30	~30
Kurum	JAXA	NASA/METI	NASA
Kaynak	(Tadono vd. 2014)	(Tachikawa vd. 2011)	(van Zyl 2001)

4.2.2 Küresel Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü

Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü (Land Use/Land Cover) dünya yüzeyindeki farklı tipteki fiziksel sınıfları raster formatında sunan sayısal bir üründür. Tez çalışmasında arazi örtüsü verisini KSYM geliştirmede arazi örtüsünün doğruluğa etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Bu kapsamda çalışma alanlarına ait yeni arazi örtüsü haritaları üretmek yerine Impact Observatory, Microsoft ve Environmental Systems Research Institute (ESRI) tarafından geliştirilen Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü verisi kullanılmıştır. Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü verisi derin öğrenme algoritmaları kullanılarak Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilmiştir. Oluşturulan Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü 10 m. çözünürlüğe sahiptir ve ücretsiz olarak servis edilmektedir (Karra vd. 2021). Bu çalışmada 2020 yılına ait Arazi Kullanımı/Arazi Örtüsü verisi 30 m çözünürlüğe

örnekleyerek kullanılmıştır. Çalışma alanlarına ait arazi örtüsü oranları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Test alanlarına ait arazi örtüsü oranları

Sınıflar (%)	Test Alanı-1	Test Alanı-2	Test Alanı-3	Test Alanı-4	Test Alanı-5
Su	0.003	0.282	0.399	0.224	3.872
Orman	76.749	90.602	16.814	1.555	25.161
Otsu bitki	0.000	0.047	0.147	0.000	0.056
Tarım arazisi	2.677	0.795	0.000	12.382	13.802
Yapay Alan	0.000	1.839	0.000	59.557	44.832
Çıplak Arazi	0.031	0.000	40.455	1.564	2.983
Mera	20.540	6.436	42.185	24.718	9.294

4.3 Metodoloji

Tez çalışmasında 5 farklı test alanı seçilmiştir. Bu test alanlarından 1,2 ve 3'ü hem SYM üretiminde hem de SYM iyileştirmede kullanılırken, Test Alanı-4 ve Test Alanı-5 ise SYM iyileştirme de kullanılmıştır. Bunun sebebi kontrol amaçlı kullandığımız verilerin özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bölüm 4.4'te yersel gerçeklik verileri detaylı şekilde anlatılmıştır. Bu alanlar seçilirken KSYM verilerinin düzeltilmeden önceki ve sonraki hataya sebep olabilecek eğim grupları ve arazi örtüsü kullanımları incelenmiştir. GEDI ve ICESat-2 LiDAR altimetre verileri farklı özelliklere sahip olsa da iki uydunun da ortak amaçlarından birisi topoğrafyanın belirlenmesidir. Bu sebeple alana düşen nokta sayısını artırmak için her iki veri birlikte kullanılmıştır. Üretilen KSYM'leri karşılaştırmak ve iyileştirmek için ücretsiz servis edilen ve literatürde çokça kullanılan AW3D30, ASTER GDEM ve SRTM verileri seçilmiştir. SYM üretimi için Kriging enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ilerleyen bölümde detaylı şekilde anlatılmıştır. Uydur altimetresi ile KSYM verilerinin iyileştirilmesi için CNN, ANN ve XGBoost metotları kullanılmıştır. Bu metotlar ilerleyen bölümlerde detaylı şekilde anlatılmıştır. Ayrıca çalışmada Test Alanı-1, Test Alanı-2 ve Test Alanı-3 için yer doğruluğu verisi için havadan LiDAR ile üretilen SYM kullanılırken Test Alanı-4 ve Test Alanı-5 için GNSS verileri kullanılmıştır.

4.3.1 GEDI ve ICESat-2 Veri Filtreleme ve Eğitim Verisini Oluşturma

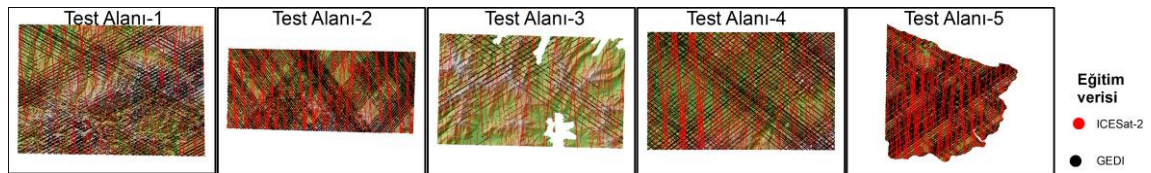
GEDİ ve ICESat-2 verileri eğitim verisi olarak kullanılmadan önce bir dizi filtreleme işlemi uygulanmış sonra düşey datum düzeltmesi yapılmıştır. Filtreleme adımlarını bölüm 4.3.1.1 ve bölüm 4.3.1.2’de açıklanmıştır. KSYM verileri düşey datumu Dünya Yerçekimi Modeli 1996 (Earth Gravitational Model 1996 - EGM96) kullanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan GEDI ve ICESat-2 verileri WGS84 datumunu kullanmaktadır. Bu sebeple GEDI ve ICESat-2 verileri için The International Center for Global Earth Models sitesinden için nokta tabanlı EGM96 ondülasyon değerleri indirilmiştir (Ince vd. 2019). Sonrasında GEDI ve ICESat-2 verileri Eşitlik 4.1 yardımıyla KSYM verileri ile aynı düşey datuma indirgenmiştir.

$$H_{\text{Ortometrik yükseklik}} = h_{\text{Elipsoidal yükseklik}} - N_{\text{Jeoid yüksekliği}} \quad (4.1)$$

Tüm filtreleme işlemlerinden sonra çalışma alanlarına ait nokta yoğunlukları Çizelge 4.4’te ve GEDI ve ICESat-2 verileri için konumsal dağılımları Şekil 4.2’de verilmiştir. SYM üretimi için yapılan filtreleme işlemi sonuçları ayrıca Bölüm 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 Test alanlarına ait nokta yoğunlukları.

Nokta Yoğunluğu (Nokta/km ²)					
Veri Türü	Test Alanı-1	Test Alanı-2	Test Alanı-3	Test Alanı-4	Test Alanı-5
GEDİ	46.64	37.02	16.82	72.82	35.60
ICESat-2	12.26	11.07	13.71	23.33	14.21



Şekil 4.2 Eğitim noktalarının konumsal dağılımları.

4.3.1.1 GEDI Veri Filtreleme

Tez çalışmasında GEDI L2A verileri rGEDI paketi kullanılarak indirilmiştir (Silva vd. 2020). Veride bulunan aykırı değerleri ayıklamak için bir dizi işlem uygulanmıştır. Bu filtrelemede GEDI kullanıcı rehberinin 6. bölümünde yer alan öneriler ve eşik değerleri kullanılmıştır (İnt.Kyn.9). Kullanıcı rehberinde yer alan işlem adımları uygulandıktan sonra veri setinde aykırı değerlerin yer aldığı görülmüştür. Bu sebeple SYM tabanlı eşik değer filtrelemesi uygulanmıştır (Shang vd. 2022). Tez çalışmasında GEDI verisini eğitim verisine dönüştürmek için uygulanan filtreleme adımları sırasıyla aşağıda verilmiştir. Filtreleme adımları uygulandıktan sonra SYM üretimi için GEDI ve ICESat-2 verilerinin iz düşümleri arasında mesafenin çok fazla olduğu görülmüştür. Bu sebeple SYM üretiminde GEDI verisi için aşağıda yer alan işlem adımlarından sadece 1. adım kullanılmıştır. Diğerleri KSYM iyileştirme çalışmasında kullanılmıştır.

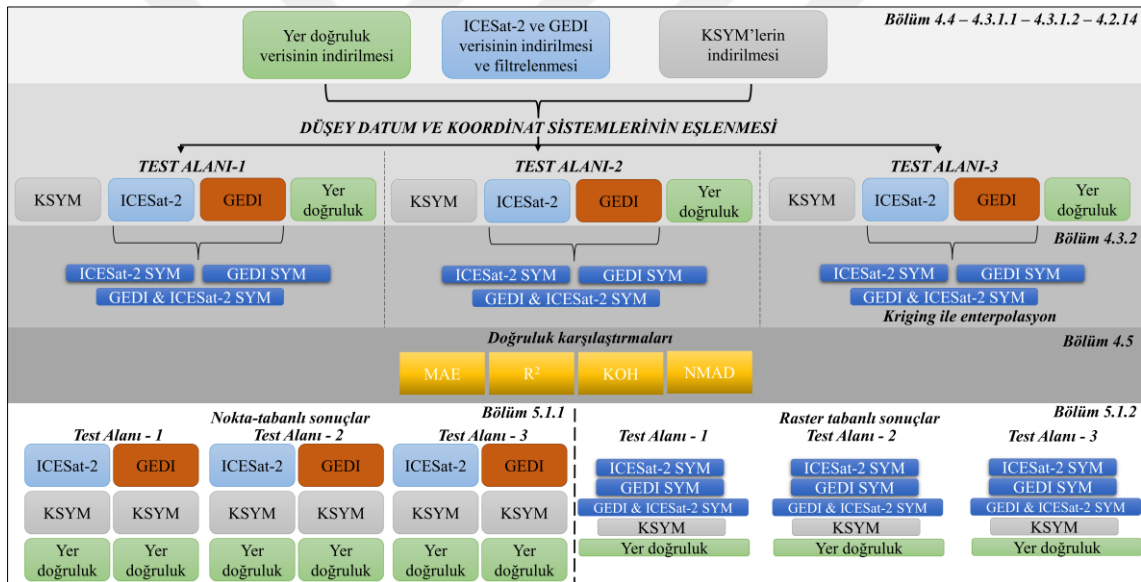
1. İndirilen tüm GEDI verilerinden ilk önce kaliteli veriler seçilmiştir (Quality_flag=1).
2. Güneş ışınlarının negatif etkisini gidermek için yalnızca gece verileri seçilmiştir (solar_elevation < 0).
3. Yoğun ormanlık alanlar ve şehir alanları için hassasiyete (sensitivity)'e göre veriye eşik değer filtrelemesi uygulanmıştır (Sensitivity > 0.9).
4. Son olarak SRTM verisi kullanılarak SYM tabanlı eşik değer filtrelemesi yapılmıştır. ($16 \text{ m} > \text{Fark}_{(\text{SRTM-GEDI})} > -16 \text{ m}$)

4.3.1.2 ICESat-2 Veri Filtreleme

Tez çalışmasında ICESat-2 ATL08 verileri <https://openaltimetry.org/> web adresinden indirilen ICESat-2 ATL08 (h_te_best_fit) yüksekliklerinin hepsi kullanılmıştır (Khalsa vd. 2022). KSYM iyileştirme çalışmasında güçlü ışınlar (Şekil 3.2) seçilmiştir. Ardından GEDI verisinde yapılan işlemler gibi SYM tabanlı eşik değer filtreleme ve eğitim verileri elde edilmiştir.

4.3.2 Kriging Enterpolasyon Yöntemi ve Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturma

Tez çalışmasında GEDI ve ICESat-2 verileriyle SYM oluşturmak için Kriging enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Kriging, bilinen noktaların konumlarının uzaysal dağılımına dayalı variogram kullanan bir enterpolasyon yöntemidir (Burrough 1986, Oliver ve Webster 1990). SYM'ler 1 yay saniyelik uzaysal çözünürlükte (~30 m) üretilmiştir. Çalışmada her test alan için 3 farklı SYM üretilmiştir. SYM üretimi için ilk olarak yalnızca GEDI verisi, ikinci olarak yalnızca ICESat-2 verisi ve üçüncü olarak GEDI ve ICESat-2 verisi birlikte kullanılmıştır. Daha sonra KSYM'ler ile doğrulukları test edilmiştir (Şekil 4.3).

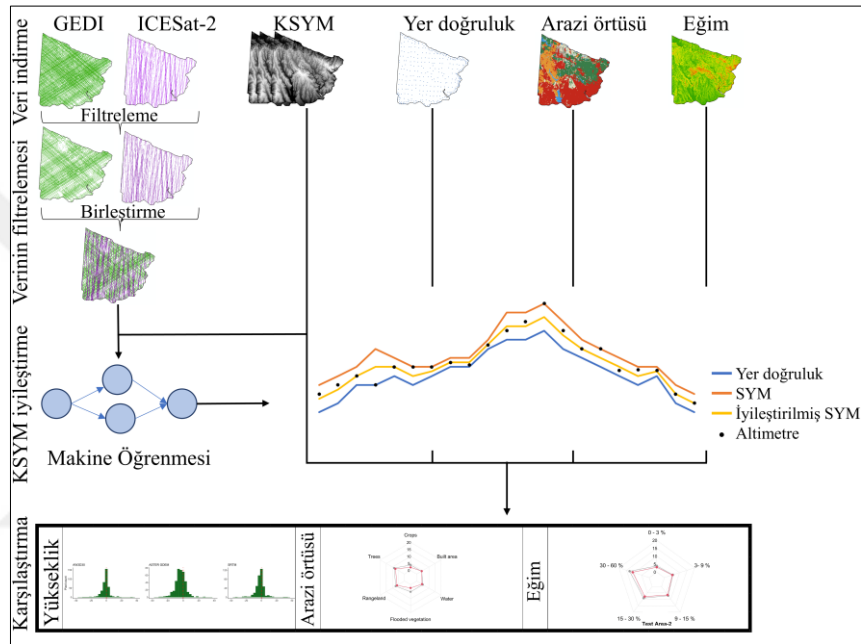


Şekil 4.3 SYM üretimi ve doğruluklarının kontrolü için iş akışı.

4.3.3 Veri İyileştirme Metodu ve Kullanılan Algoritmalar

GDEM'ler geliştirilirken 3 farklı metot kullanılmıştır. Metotlar makine öğrenmesi tekniklerinin alt sınıflarıdır. Makine öğrenmesi teknikleri belirli bir matematiksel fonksiyon elde etmeden bilgisayara doğru veriler verilerek diğer verilerin öğrenilmesini sağlayan bir sistemdir. Genel olarak insan beyninin bir veriyi öğrenmesi gibi

çalışmaktadır. Bunlardan bir tanesi karar ağacı metotlarından olan XGBoost, diğer ikisi de derin öğrenme tekniklerinden ANN ve CNN'dir. Tüm kodlar R programlama dilinde kullanılmıştır (R Core Team 2013). Bu kodlarda Keras (Arnold 2017) ve Caret (Kuhn 2015) kütüphaneleri kullanılmıştır. Veri iyileştirme iş akışı Şekil 4.4'de verilmiştir. Metotlara ait genel bilgiler, kullanılan parametreler ve parametre değişkenleri ilerleyen bölümlerde verilmiştir.

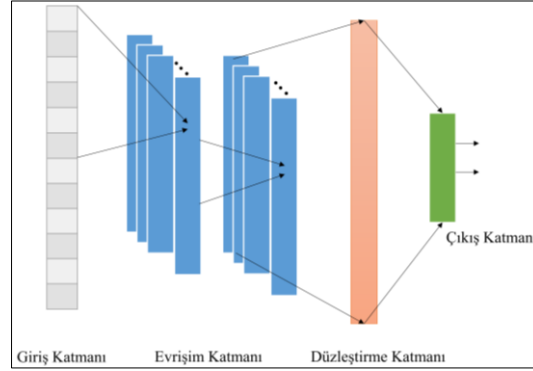


Şekil 4.4 KSYM verilerinin iyileştirilmesi için iş akışı

4.3.3.1 Evrişimli Sinir Ağları

CNN, bilgisayar bilimleri ve yapay zekâ alanında son derece önemli rol oynayan derin öğrenme yöntemlerinden biridir. Temel olarak, görüntü işleme, regresyon, tanıma, sınıflandırma ve daha birçok görev için kullanılan özel bir sinir ağı türüdür. CNN, hiperspektral görüntü sınıflandırılması (Seyrek ve Uysal 2022), uydu görüntülerinin sınıflandırılması (Kadhim ve Abed 2020), zaman serisi kestirimi (Jin vd. 2020), otomatik yüz tanıma sistemleri (Tiraki vd. 2022), otonom araç (Chishti vd. 2018), bitki boyu tahmini (Abdikan vd. 2023), gibi geniş bir kullanım alanı bulmuştur. CNN mimarisi giriş,

tek-boyutlu evrişim tabakası, düzleştirme katmanı (flatten layer), ve çıkış tabakasından oluşmaktadır (şekil 4.5).



şekil 4.5 CNN mimarisi.

Tez alışmasında KSYM verilerini iyileştirmek için tek-boyutlu CNN mimarisi kullanılmıştır (İnt.Kyn.10). Tek-boyutlu CNN, giriş verisini işlemek ve özelliklerini öğrenmek için kullanılan bir tür CNN metodudur. Temel olarak, tek-boyutlu CNN'ler, bir boyutta verilerdeki özellikleri çıkarmak ve bu özellikleri kullanarak belirli görevleri gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Tek-boyutlu CNN'ler, giriş verisini farklı boyutlarda evrişim (convolution) işlemlerine tabi tutarlar ve bu işlemlerle verinin farklı özellikleri vurgulanır veya çıkartılır.

Tek-boyutlu CNN'de evrişim tabakası için değişkenler, optimizer = Adam, filters = 1024 kernel boyutu = 1 ve aktivasyon fonksiyonu = ReLU seçilmiştir (Eşitlik 4.2).

$$f(n) = \begin{cases} 0 & \text{için } n < 0 \\ n & \text{için } n \geq 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

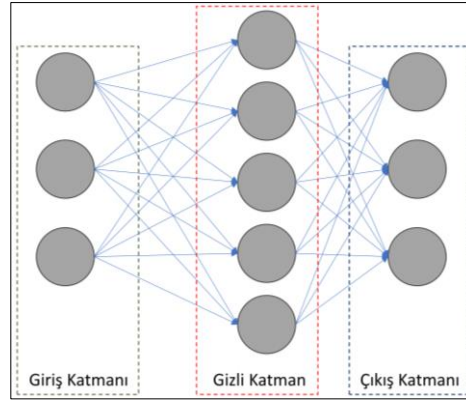
CNN mimarisine göre sonuçları düzenli hale getirmek ve KSYM iyileştirmek için epochs = 100, batch size = 16 seçilmiştir. Ayrıca eğitim sonrası kayıp grafikleri çizdirilerek aşırı ya da eksik öğrenme olup olmadığı kontrol edilmiştir. Çizelge 4.5'te tez çalışmasında kullanılan örnek bir CNN ağı yapı rneği verilmiştir.

Çizelge 4.5 Test alanı-2’de oluşturulan AW3D30 için eğitim setinin CNN ağ yapısı.

Katman	Katman tipi	Çıktı Boyutu	Parametre Sayısı
conv1d	Tek boyutlu evrişim	(None,1,256)	512
flatten	Düzleştirme	(None,256)	0
dense_1	Yoğun	(None,128)	32896
dense	Yoğun	(None,1)	129
Toplam Parametre Sayısı: 24,833			
Eğitilebilir Parametre Sayısı: 24,833			
Eğitilemeyen Parametre Sayısı: 0			

4.3.3.2 Yapay Sinir Ağları

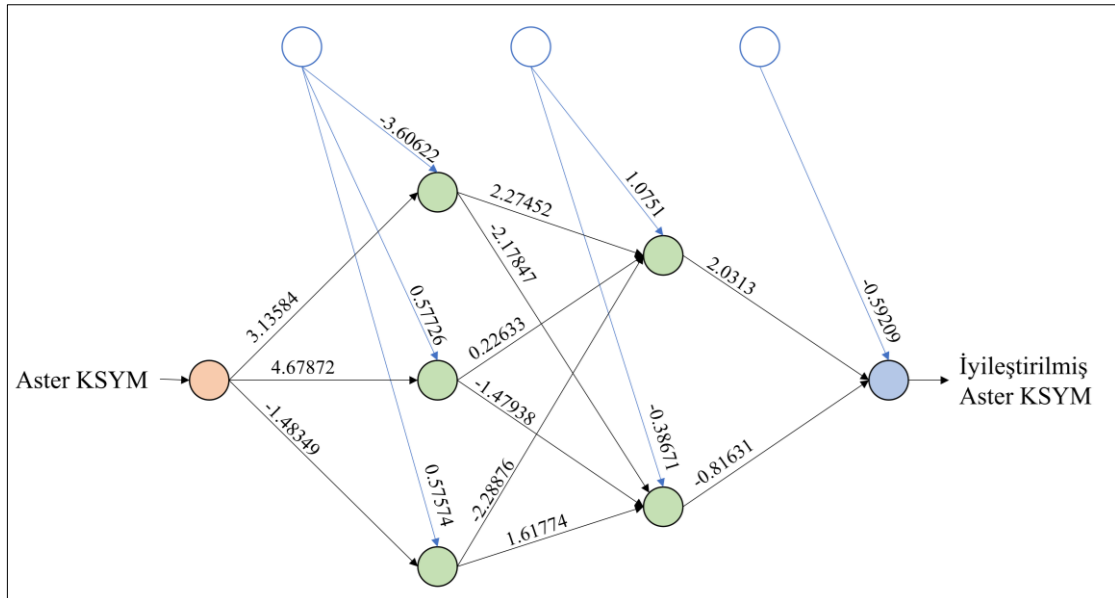
Tez çalışmasında kullanılan bir diğer yöntem ANN’dir. ANN, biyolojik sinir sistemlerinden ilham alarak tasarlanmış, makine öğrenimi ve yapay zekâ alanlarında önemli bir rol oynayan modelleme tekniklerinden birisidir. Bu sinir ağları, karmaşık görevleri çözmek ve veri analizi yapmak için kullanılan güçlü araçlar sunmaktadır. Temelde, ANN, sinir hücrelerini (nöronlar) taklit eden yapay bir yapıya sahiptir ve bu nöronlar, veriyi işlemek, öğrenmek ve tahmin yapmak için birbirleriyle iletişim kurar. Bu nöronlar, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonları aracılığıyla bilgileri işlerler. ANN, görüntü tanıma, doğal dil işleme, otomatik sürüş, oyun stratejileri geliştirme ve daha birçok uygulama alanında başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bununla birlikte mesleğimizde de koordinatlandırma (Gullu ve Narin 2019), uydu görüntülerinin sınıflandırılması (Kavzoglu ve Mather 2003), bitki boyu tahmini (Abdikan vd. 2023), datum dönüşümü (Gullu vd. 2011b), jeodezik sıklaştırma noktaların hız tahminlerinin belirlenmesi (Gullu vd. 2011a) gibi çalışmalarda kullanılmaktadır. Tez çalışmasında R programlama dilinde regresyon için hazırlanmış ANN algoritması kullanılmıştır (İnt.Kyn.11). ANN temelde giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 ANN mimarisi.

Veriler eğitilmeden önce yükseklik değerleri min-max metoduna göre 0-1 değerleri arasına normalize edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid (Eşitlik 4.3) ve 2 gizli katmanlı model seçilmiştir. Birinci gizli katman için 3 nöron ikinci gizli katman için 2 nöron kullanılmıştır. Şekil 4.7’de tez çalışmasında kullanılan örnek bir ANN mimarisi verilmiştir.

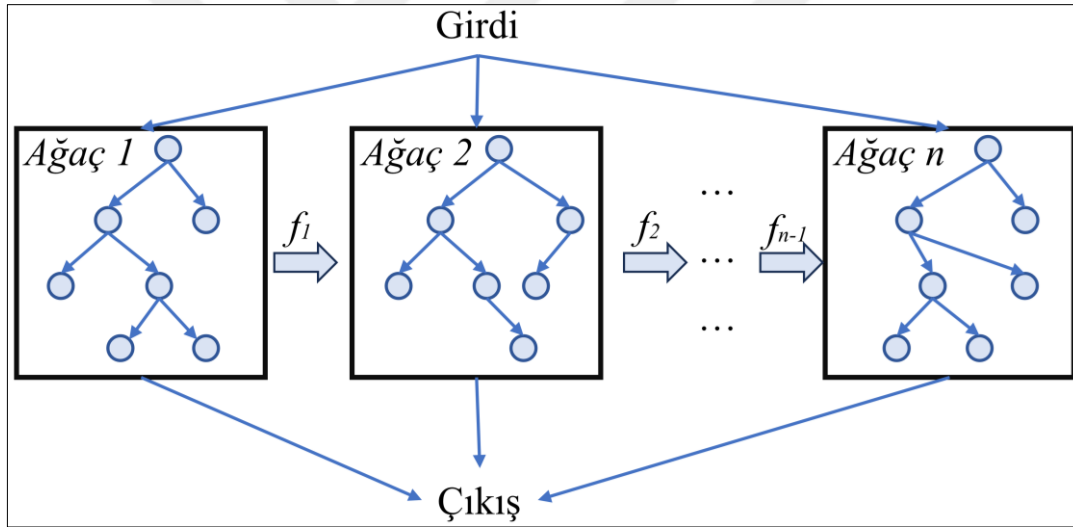
$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (4.3)$$



Şekil 4.7 Test alanı-2’de oluşturulan ASTER KSYM için ANN mimarisi

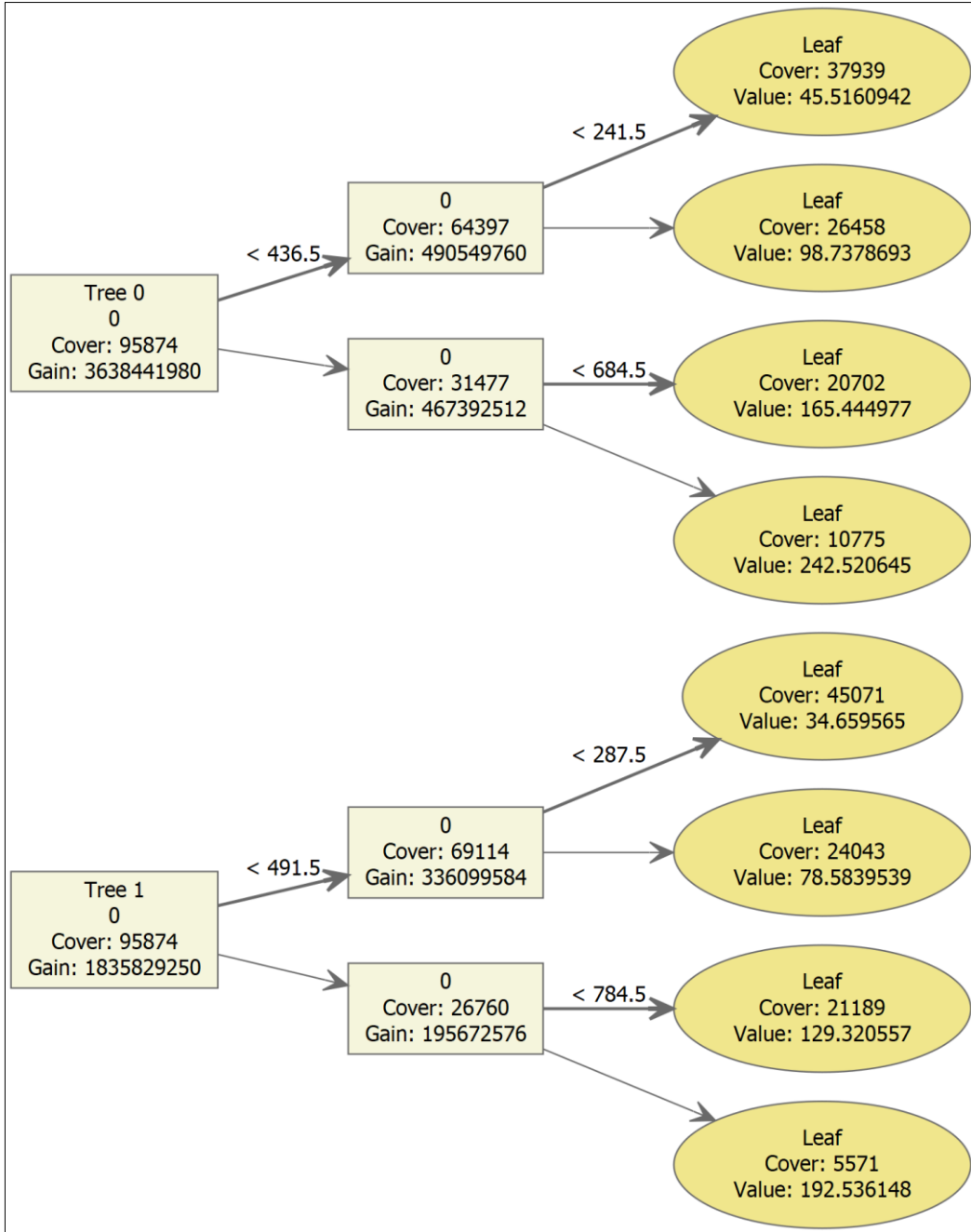
4.3.3.3 Aşırı Gradyan Artırma

XGBoost, genellikle karar ağaçları gibi basit modelleri temel alır ve ardışık iterasyonlarla bu modelleri geliştirir. Her iterasyonda, önceki modelin hatalarını düzeltmek için yeni bir ağaç eklenir. Bu nedenle, XGBoost, esas olarak (bir araya getirilmiş (ensemble) bir öğrenme yaklaşımıdır. XGBoost, çeşitli veri bilimi yarışmalarında ve gerçek dünya uygulamalarında sonuçlar elde etmek için sıkça kullanılan bir tekniktir ve özellikle sınıflandırma ve regresyon problemlerinde etkilidir (Wang vd. 2019). XGBoost mimarisi Şekil 4.8’da verilmiştir.



Şekil 4.8 XGBoost mimarisi

Tez çalışmasındaki diğer metotların aksine tahmine dayalı bir metottur (İnt.Kyn.12). Çalışmada XGboost değişkenleri şu şekildedir; Max depth = 3, nrounds = 2500 olarak kullanılmıştır. Şekil 4.9’da tez çalışmasında kullanılan XGBoost ağaç yapısının ilk iki ağaç yapısı verilmiştir.



Şekil 4.9 Test alanı-2’de oluşturulan SRTM için ilk 2 ağacın grafiği.

4.4 Yersel Gerçeklik Verisi

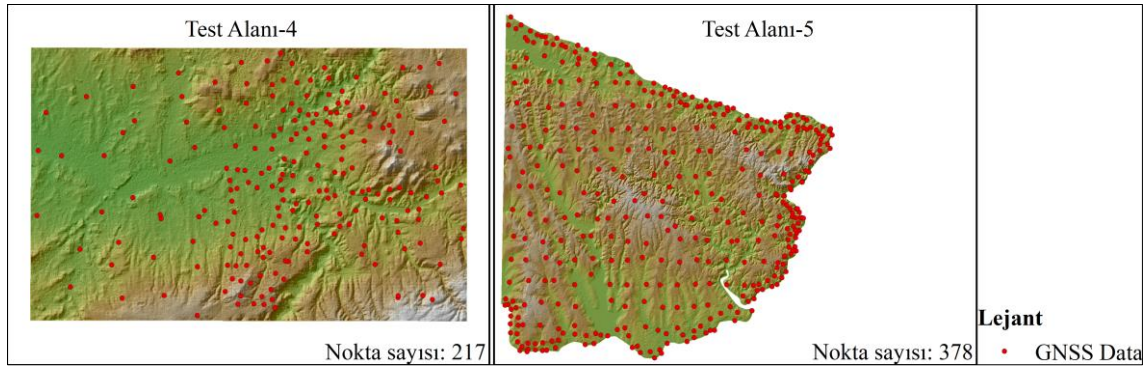
Tez çalışmasında 2 farklı veri toplama tekniğine dayalı yersel gerçeklik verisi kullanılmıştır. Test Alanı-1,2 ve 3 için havadan ölçülmüş LiDAR verisinden üretilmiş SYM verileridir. SYM verilerine ücretsiz olarak erişilebilmektedir ve verilere ait bilgiler

Çizelge 4.6’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Çalışmada kullanılan LiDAR verisinden üretilmiş SYM verilerine ait bilgiler.

Özellikler	Test Alanı 1	Test Alanı 2	Test Alanı 3
Veri toplama zamanı	2018	2018	2018-2019
Uçuş yüksekliği (m)	1650-2100	700-1000	1525-2200
Nokta yoğunluğu	8 (nokta/m ²)	42 (nokta/m ²)	6 (nokta/m ²)
Düşey doğruluk (KOH)	0.10 m	0.13 m	0.028 m
Kaynak	İnt.Kyn.13	İnt.Kyn.14	İnt.Kyn.15

Tez çalışmasında yer alan Test Alanı-4 ve Test Alanı-5 için yer doğruluğu verisi GNSS ile üretilmiştir. Bu veriler HGM tarafından yersel gravite sıklaştırma çalışmaları için toplanmış verilerdir. Veriler yatayda <cm, dikeyde ise <dm altı doğruluk ile ölçülmüştür. Veriler 2-3 km aralıklar ile toplanmıştır. Verilerin konumsal dağılımı Şekil 4.10’da verilmiştir. Verilerin yükseklik değerleri Eşitlik 4.1 yardımıyla EGM96 datumuna indirgenmiştir.



Şekil 4.10 Test alanı 4 ve 5 için yersel gerçeklik verilerinin dağılımı.

4.5 Doğruluk Analizi

Tez çalışmasında yersel gerçeklik verileriyle, ham SYM verileri (AW3D30, ASTER

KSYM ve SRTM), Uzay Tabanlı LiDAR altimetre verileriyle üretilen SYM'ler ve iyileştirilmiş verilerin doğrulukları kontrol edilmiştir. Literatürde sıklıkla kullanılan; Ortalama Hata (Mean Error - ME) (Eşitlik 4.4), (MAE) (Eşitlik 4.5), KOH (Eşitlik 4.6), Normalize KOH (NKOH) (Eşitlik (4.7) ve Normalize Ortanca Mutlak Hata (Normalized Median Absoulute Deviation – NMAD) (Eşitlik 4.8) ölçütleri kullanılmıştır.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g - t \quad (4.4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |g - t| \quad (4.5)$$

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g - t)^2} \quad (4.6)$$

$$NKOH = \frac{RMSE}{g_{max} - g_{min}} * 100 \quad (4.7)$$

$$NMAD = 1.4826 * ortanca(|(g - t) - ortanca(g - t)|) \quad (4.8)$$

Burada n yersel gerçeklik verisinin nokta sayısını, g yersel gerçeklik verisinin düşey değerini, t GEDI, ICESat-2, üretilmiş KSYM, iyileştirilmiş KSYM ve ham KSYM verilerinin düşey değerlerini temsil etmektedir.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışmasında Bölüm 4.3.1.'de anlatıldığı gibi iki farklı filtreleme yöntemi kullanılmıştır. Bu sebeple tez bulguları 2 farklı başlıkta anlatılmıştır. Bunun en önemli sebebi birlikte Test Alanı 4 ve 5 için yersel veri GNSS tarafından üretilen noktasal verilerdir. SYM üretimi sonrasında Şekil 5.4'de görüldüğü gibi GEDI ve ICESat-2 noktalarının yoğun olarak bulunduğu alanlarda hata, nokta bulunmayan alanlara göre daha azdır. GNSS noktalarının tamamının yüksek hatalı alanlarda olması durumunda üretilen SYM'ler olduğundan daha hatalı görülebilir. Bunun tam tersi düşünüldüğünde GNSS noktaları üretilen SYM'lerde düşük hatalı yerlerde çıkması sonucunda SYM'ler olduğunda daha başarılı gözükecektir. Ayrıca GNSS verileri toplanırken konumsal olarak homojen dağılımlı olsa bile orman ve su gibi sınıflarda ya da bazı eğim gruplarında oldukça kısıtlı veri bulundurmaktadır. Bu sebeplerden dolayı Test Alanı 4 ve 5'de SYM doğruluğu karşılaştırmasında yanlış yorumlamalar yapmamak için SYM üretimi yapılmamıştır. Bu durum SYM iyileştirmede bir sorun değildir, çünkü her ne kadar GNSS noktaları arazi örtüsü sınıflarında ya da arazi eğim gruplarında homojen olarak veri barındırmasa da KSYM'lerin ham verileri ve iyileştirmiş verileri arasında karşılaştırma şansı oluşturmaktadır. Bu sebeple teze dair bulgular değerlendirilirken Bölüm 5.1 ile Bölüm 5.2 ayrı ayrı incelenmiştir ve sonuçlar bunlara bağlı olarak değişmiştir.

5.1 Sayısal Yükseklik Modeli Oluşturmaya Dair Bulgular

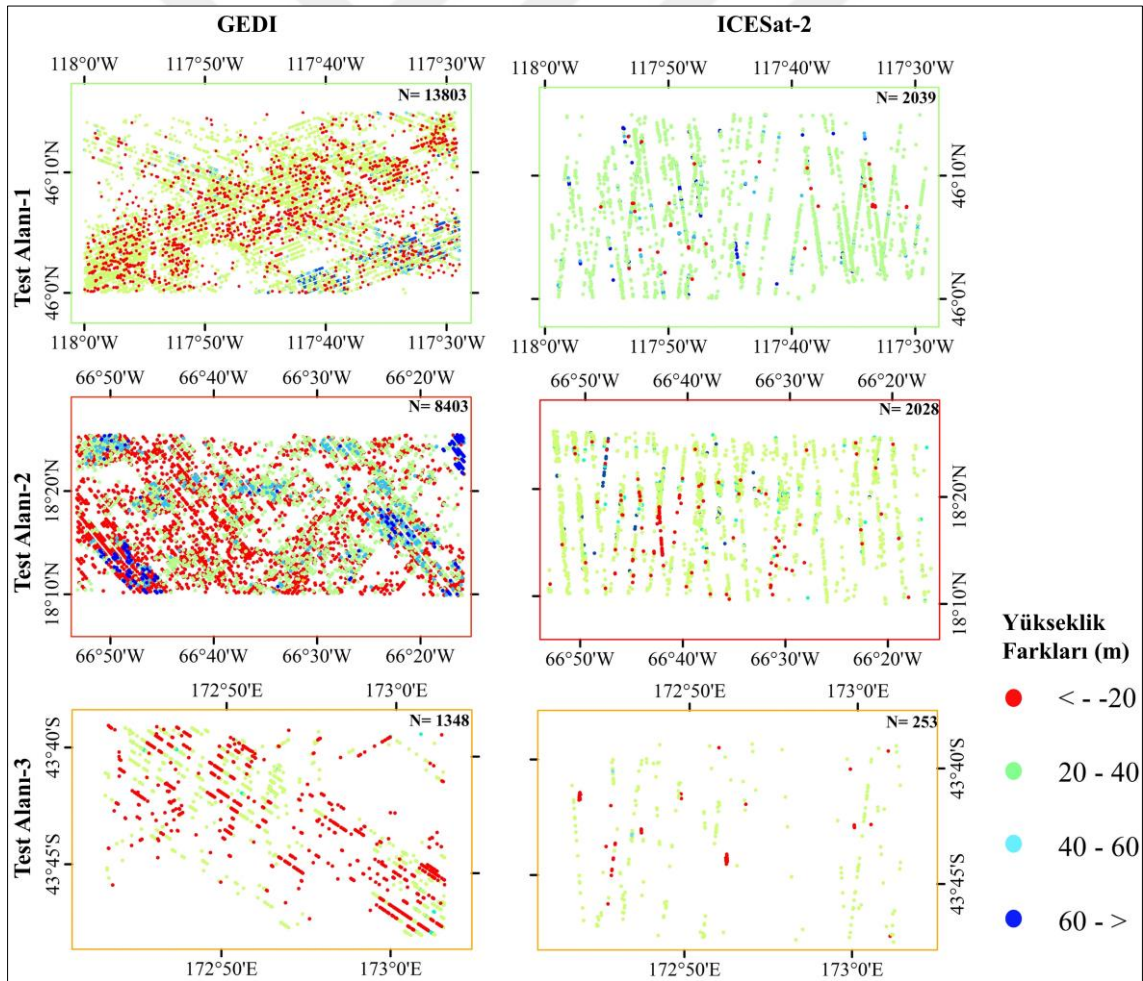
5.1.1 Nokta-Tabanlı Bulgular

Çalışmada, ilk önce GEDI ve ICESat-2 verilerinin km^2 'ye düşen nokta sayısına bakılmıştır (Çizelge 5.1). GEDI ISS'ye entegre şekilde çalıştığı ve zamansal çözünürlüğü yüksek olduğu için hemen hemen aynı dönem içerisinde daha fazla veri toplamıştır. Çizelge 5.1'e bakıldığında en yüksek kullanılabilir nokta yoğunluğunun Test Alanı-1'de olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.1'de verilen nokta sayısı ve yoğunlukları Çizelge 4.4'te verilen nokta yoğunlukları farklıdır. Bunun sebebi Bölüm 4.3.1'de anlatılan filtrelemede uygulanan işlem adımlarının farklılığına dayanmaktadır.

Çizelge 5.1 SYM üretiminde kullanılmış noktaların sayısı ve yoğunlukları.

Test alanları	Alan (km ²)	Nokta sayısı			Nokta yoğunluğu (nokta/km ²)		
		GEDI	ICESat-2	GEDI — ICESat-2	GEDI	ICESat-2	GEDI — ICESat-2
1	1093	83540	29205	112745	76.43	26.72	103.15
2	2037	76672	31140	107812	37.64	15.29	52.93
3	462	14622	10017	24639	31.65	21.68	53.33

GEDI ve ICESat-2 verilerinin konumsal hata dağılımı Şekil 5.1’te verilmiştir. Konumsal hata dağılımları verilirken düşeyde -20 m ile +20 m arasında hatası bulunan noktalar gösterilmemiştir.



Şekil 5.1 Her test alanı için GEDI ve ICESat-2 verilerinin yer doğruluğu ile yükseklik farklarının konumsal dağılımı.

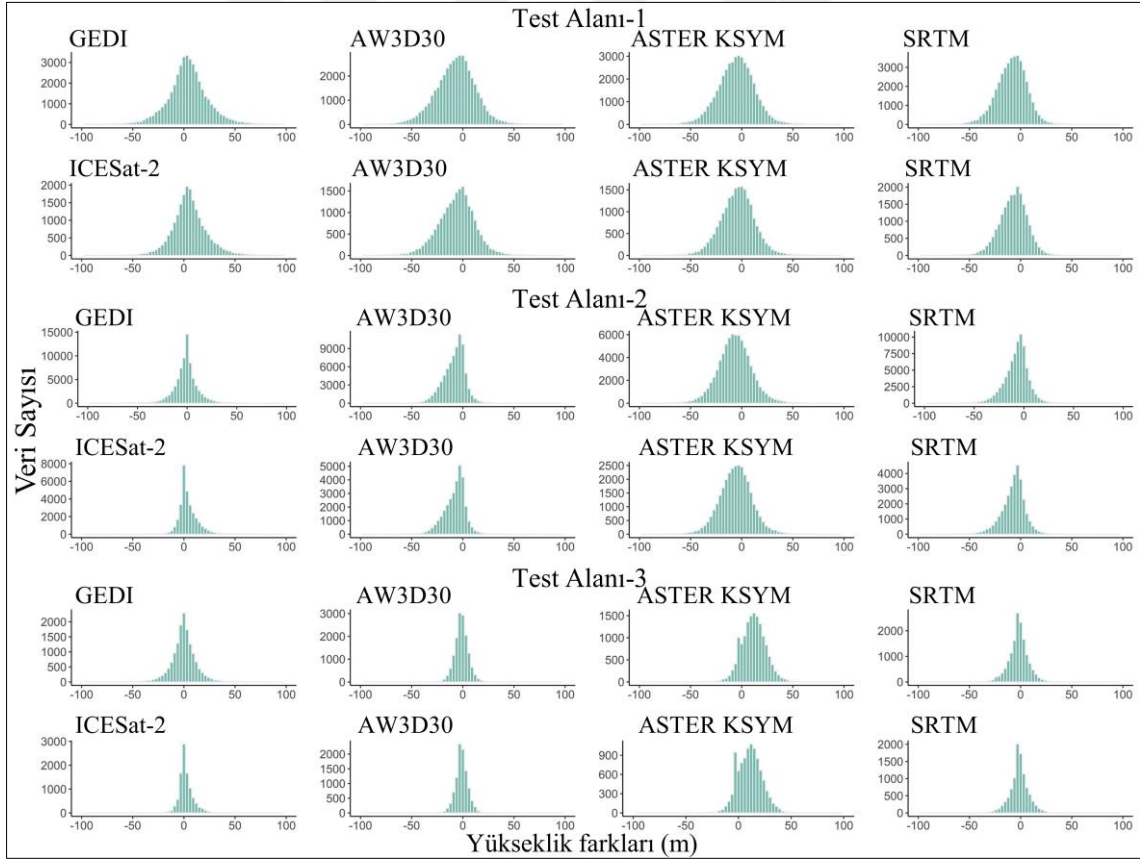
ICESat-2 verileri, test alanlarının tamamında -20 – +20 aralığında %93'ten fazla veri dağılımının olduğu görülmektedir. (Çizelge 5.2). GEDI verilerinde ise bu oran farklılık göstermekte olup %83 ile %90 arasında bir oranda dağılım olduğu görülmektedir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 GEDI ve ICESat-2 için hata dağılım oranları

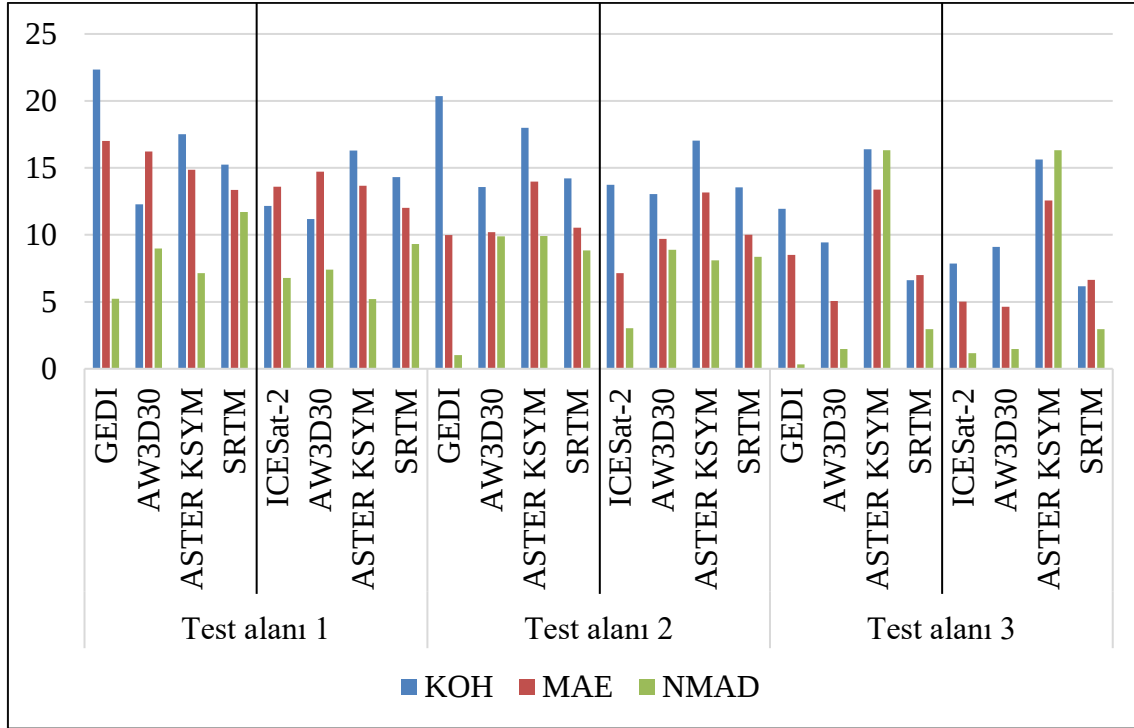
Test alanları	GEDI			ICESat-2		
	Aralık (m)	Nokta sayısı	Oran (%)	Aralık (m)	Nokta sayısı	Oran (%)
1	< — -20	5253	6.288	< — -20	38	0.130
	-20 — 20	69737	83.477	-20 — 20	27166	93.018
	20 — 40	6386	7.644	20 — 40	1734	5.937
	40 — 60	1105	1.323	40 — 60	160	0.548
	60 — >	1059	1.268	60 — >	107	0.366
2	< — -20	4702	6.133	< — -20	128	0.411
	-20 — 20	68269	89.040	-20 — 20	29112	93.487
	20 — 40	2816	3.673	20 — 40	1646	5.286
	40 — 60	468	0.610	40 — 60	181	0.581
	60 — >	417	0.544	60 — >	73	0.234
3	< — -20	673	4.603	< — -20	45	0.449
	-20 — 20	13274	90.781	-20 — 20	9764	97.474
	20 — 40	598	4.090	20 — 40	205	2.047
	40 — 60	70	0.479	40 — 60	3	0.030
	60 — >	7	0.048	60 — >	0	0.000

GEDI, ICESat-2 ve KSYM'ler tüm test alanında yersel gerçeklik verileriyle karşılaştırılmıştır (Çizelge 5.2). Karşılaştırmada GEDI verisinin ayak izinin düştüğü noktalar ve ICESat-2 verisinin ayak izinin düştüğü noktalar aynı konumda olmadıkları için KSYM'ler her bir veri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. GEDI verisi KOH'a göre nokta bazlı karşılaştırma sonuçlarında Test Alanı-1 (22.350 m) (Ek 1) ve Test Alanı-2 (20.359 m) en kötü sonuçları vermesine rağmen Test Alanı-3'de (11.952 m) ile ASTER KSYM'den daha iyi sonuç vermiştir. Ayrıca KSYM'ler arasında Test Alanı-1 (12.292 m)

(Ek 1) ve Test Alanı-2 (13.578 m) için en iyi sonuçları AW3D30 verirken, Test Alanı-3 (6.623 m) için SRTM en iyi sonuçları vermiştir. ICESat-2 verisi KOH'a göre nokta bazlı karşılaştırma sonuçlarına göre AW3D30'dan sonra Test Alanı-1'de (12.166 m) (Ek 1) en iyi sonucu verirken, Test Alanı-2'de ASTER KSYM (17.044 m) en kötü sonucu vermiştir. Test Alanı-3'te ICESat-2 (7.846 m), SRTM'den (6.172 m) sonra en iyi sonucu verdi. Hata dağılım grafikleri incelendiğinde Test Alanı-1 de hataların tüm verilerde normal dağılıma uygun olduğu görülmektedir. Test Alanı-2 ve 3'de KSYM verilerinin hatalarının negatif yönde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca GEDI ve ICESat-2 hataları sıfıra yakın ve pozitif yönde yoğunlaşmaktadır (Şekil 5.2). NMAD sonuçlarına göre GEDI, tüm alanlarda en iyi sonuçları vermiştir, ICESat-2 ise Test Alanı-2 dışındaki tüm alanlarda en iyi sonuçları verdi. KOH'A göre alanları karşılaştırdığımızda Test Alanı-3'de en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.3).



Şekil 5.2 Nokta-Tabanlı hata dağılım grafikleri.

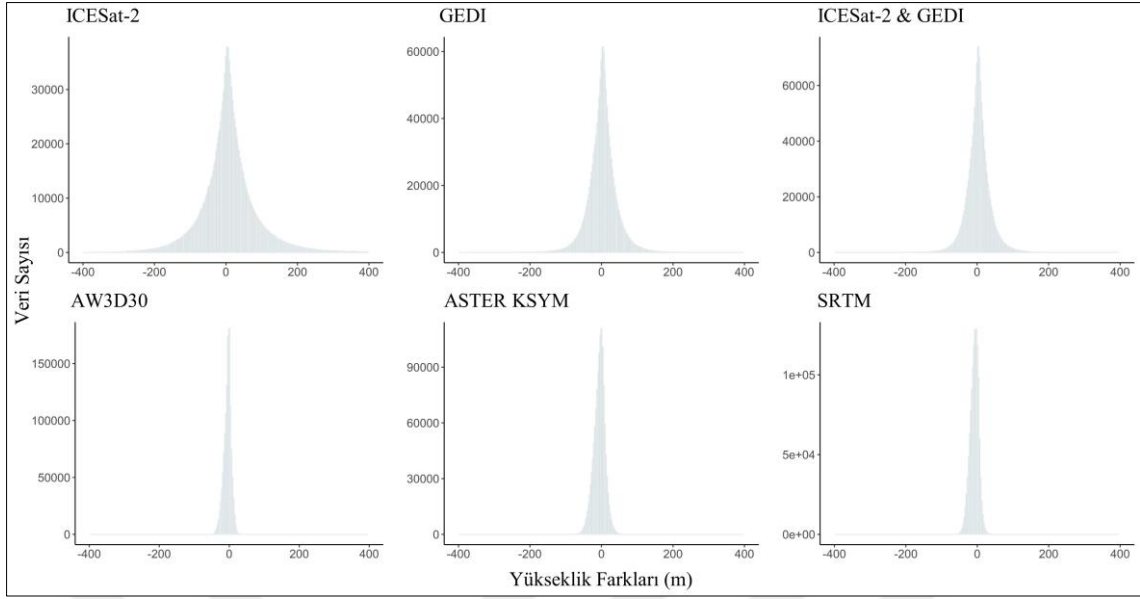


Şekil 5.3 KOH, MAE ve NMAD sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği (sonuçlar m cinsindendir).

GEDİ ve ICESat-2 verilerinin bu bölümdeki KOH, NMAD ve MAE'ye göre sonuçlar Bölüm 5.2'deki nokta tabanlı sonuçlara göre daha kötüdür. Bunun sebebi Bölüm 4.3.1'de anlatıldığı gibi ilk adımdan sonra filtreleme teknikleri kullanılmamış olmasıdır. Çünkü GEDİ ve ICESat-2 noktaları arasındaki boşluk arttıkça SYM üretiminde hatalar meydana gelmektedir.

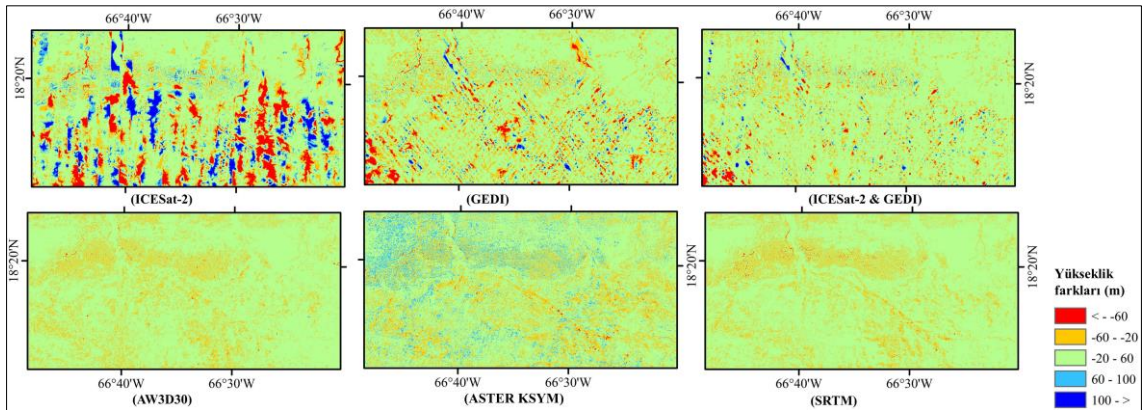
5.1.2 Raster-Tabanlı Bulgular

Tez çalışmasında GEDİ, ICESat-2 ve GEDİ - ICESat-2 birlikte kullanılarak 3 farklı SYM üretilmiştir. SYM üretimi Bölüm 4.3.2'de anlatıldığı gibi Kriging enterpolasyon metoduyla yapılmıştır (Şekil 5.4).

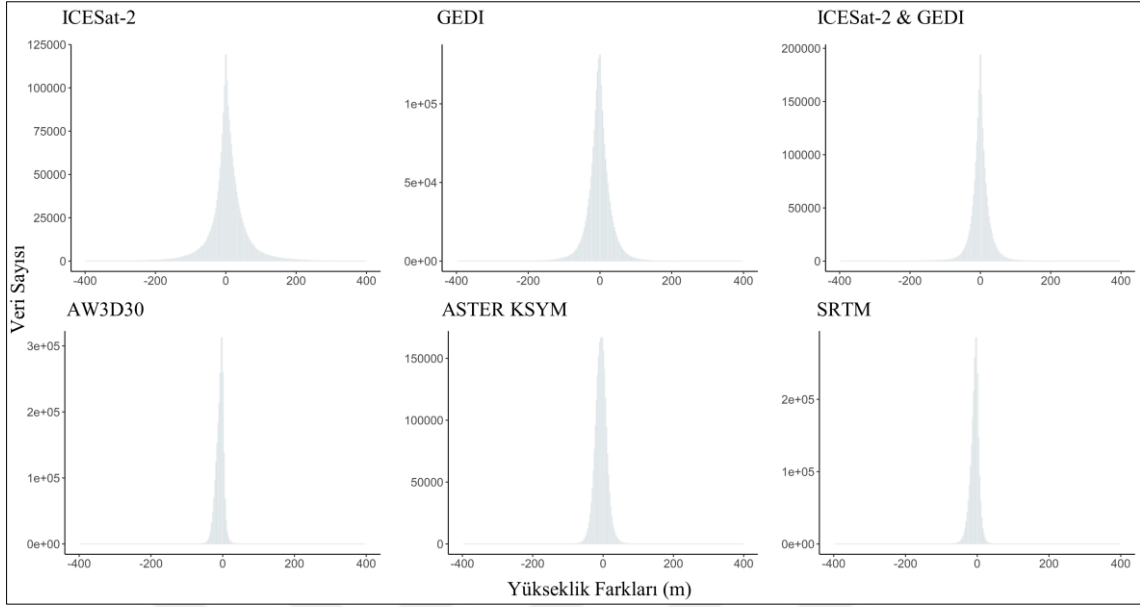


Şekil 5.6 Test Alanı-1’de raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.

Test Alanı-1’de olduğu gibi Test Alanı-2’de de ICESat-2 verisinde boşluk bulunmasından dolayı ICESat-2 SYM (Şekil 5.7) KOH’a göre 51.788 m ile en kötü sonucu vermiştir. Üretilen SYM’lerde Test Alanı-2, Test Alanı-1’e göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak diğer KSYM’ler göre 10 ile 15 m arasında hataya sahiptir (Ek 2). AW3D30 ayrıca Test Alanı-2’de de en iyi sonuçları vermiştir (Ek 2). Şekil 5.8’de, üretilen SYM’lere ve KSYM’lere ait hata dağılım grafikleri verilmiştir. Test Alanı-2’de NMAD’e göre sonuçlar incelendiğinde GEDI - ICESat-2 ile üretilen SYM’in KOH 0,166 m ile en iyi sonucu verdiği görülmektedir. (Şekil 5.11).

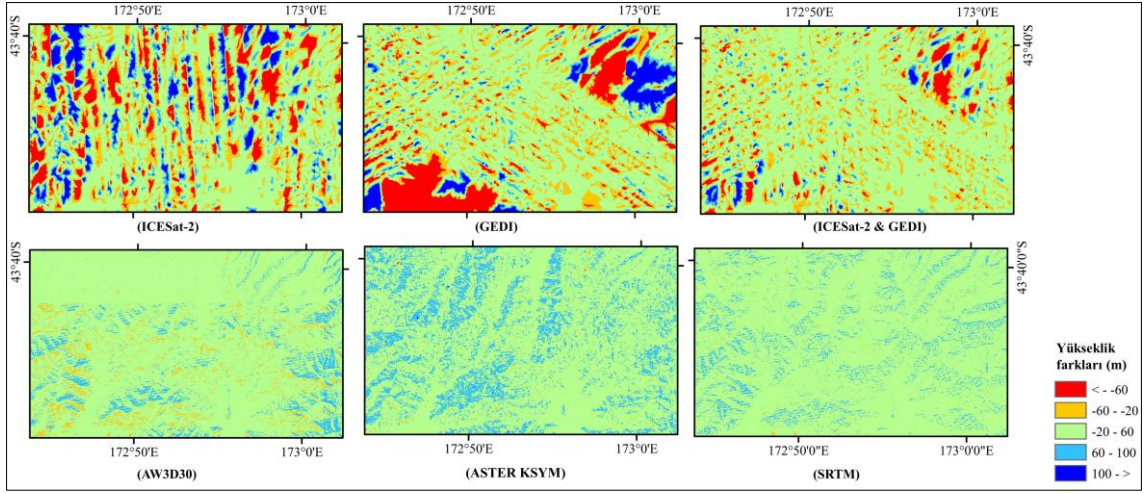


Şekil 5.7 Test Alanı-2 için KSYM ve üretilen SYM’lerin yükseklik farkı haritaları.

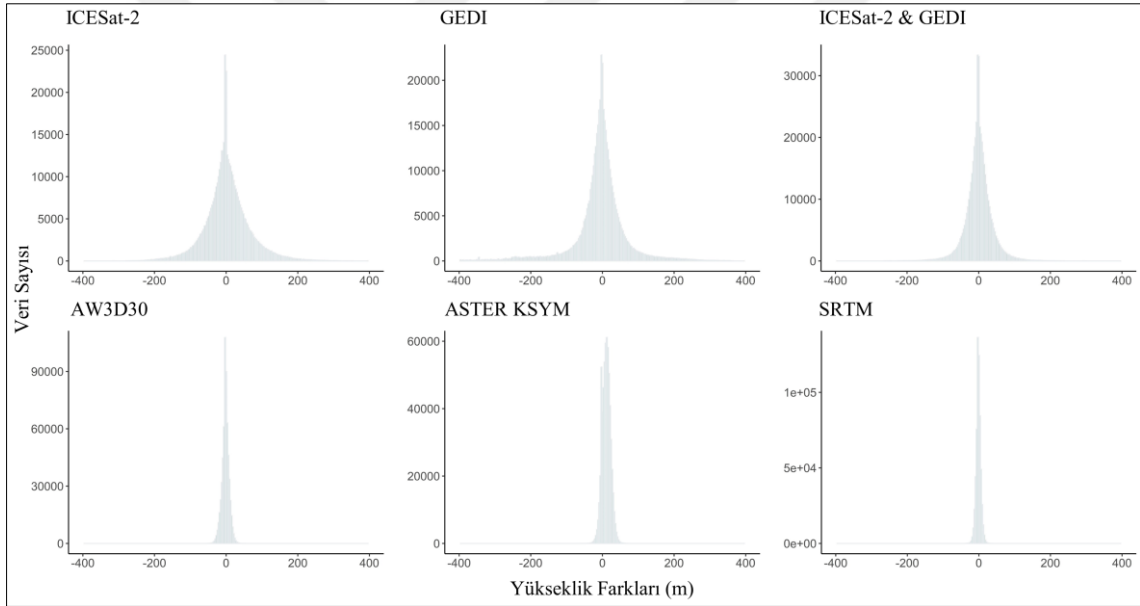


Şekil 5.8 Test Alanı-2’de raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.

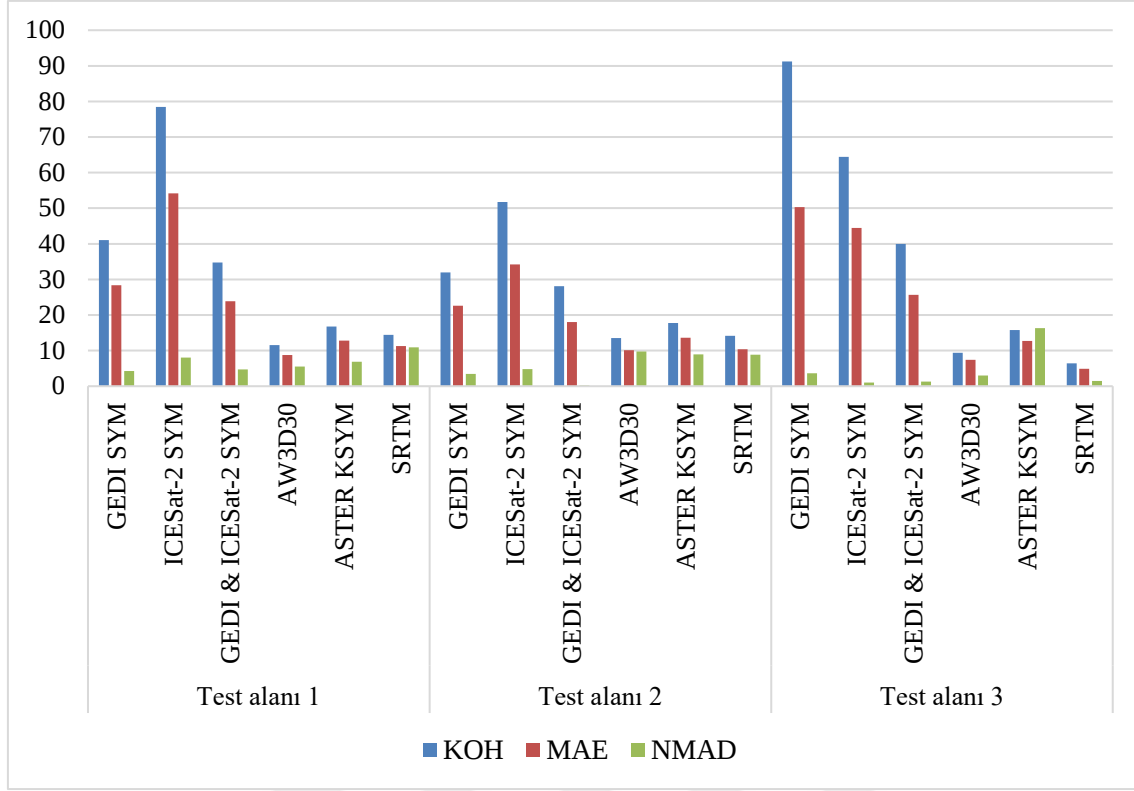
Test Alanı-3, GEDI verilerinde diğer alanlara göre daha fazla boşluğa sahiptir (Şekil 5.9). Bu boşluklardan dolayı GEDI verileri 91.217 m ile KOH’a göre en kötü sonucu bu alanda vermiştir. İki veri birleştirildiğinde KOH 39.954 m şeklinde sonuç vermesine rağmen diğer KSYM'lere göre oldukça başarısızdır. Test Alanı-3'te SRTM 6.434 m ile en iyi sonuçları vermiştir. Şekil 5.10’da üretilen SYM'lere ve KSYM'lere ait hata dağılım grafikleri verilmiştir. Test Alanı-3'te sonuçlar NMAD'e göre incelendiğinde GEDI ve ICESat-2 kombinasyonu ile üretilen SYM'nin 0,843 m ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.11). Raster tabanlı sonuçlara genel olarak bakıldığında KOH’a göre sonuçlar düşük olsa da NMAD'e göre iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi NMAD ortanca değeri baz alan istatistiksel bir analiz olduğu için aykırı değerlerden çok etkilenmemiştir. Bu sebepten NMAD’a göre GEDI ve ICESat-2 sonuçları iyi çıkmıştır.



Şekil 5.9 Test Alanı-3 için KSYM ve üretilen SYM'lerin yükseklik farkı haritaları.



Şekil 5.10 Test Alanı-3'te raster-tabanlı hata dağılım grafikleri.



Şekil 5.11 Raster tabanlı sonuçlarda KOH, MAE ve NMAD sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği. (Sonuçlar m cinsindendir).

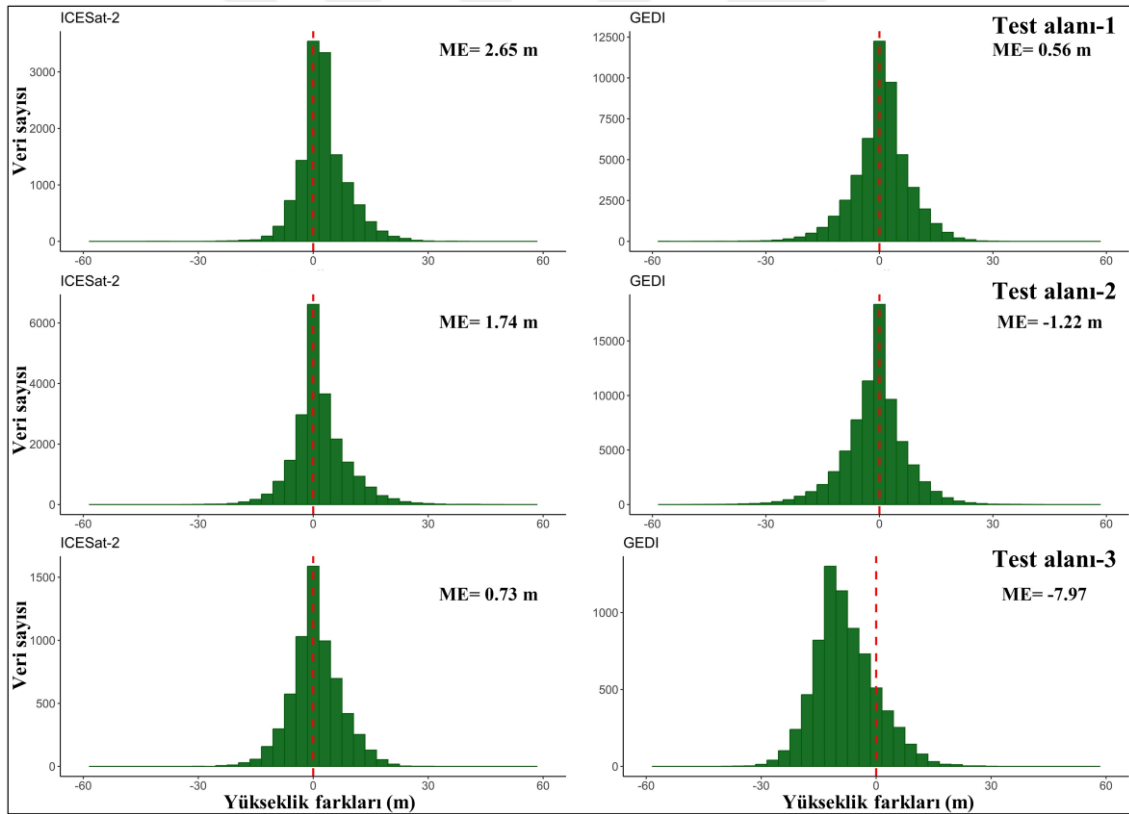
Üretilen SYM'lerde boşluklar fazla olduğu için hata miktarı fazla çıkmaktadır. Ancak tez uygulamasının yapıldığı süreçte ve sonrasında GEDI ve ICESat-2 veri toplamaya devam etmiştir. Artan veri sayısına bağlı olarak SYM kalitesinin ve doğruluğunun artacağı öngürülebilir.

5.2 Sayısal Yükseklik Modeli Geliştirmeye Dair Bulgular

5.2.1 Uzay Tabanlı LiDAR Altimetre Verisine ait Bulgular

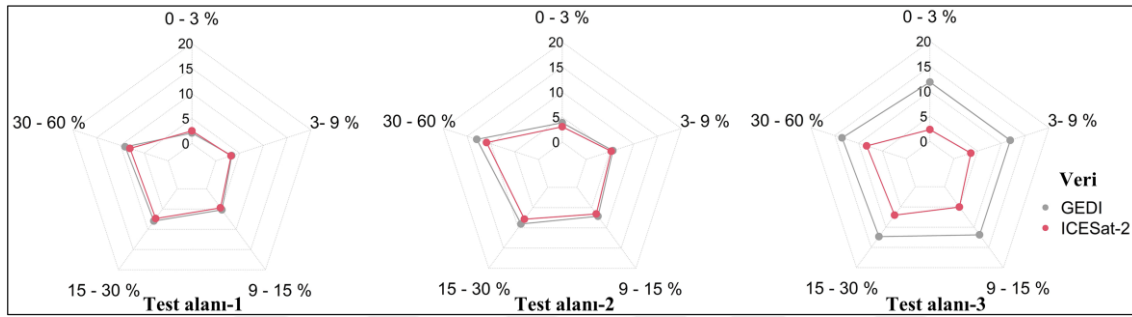
Tez çalışmasının bu bölümünde GEDI ve ICESat-2 verilerini Test Alanı-1,2 ve 3'te ki doğrulukları incelenmiştir. Test Alanı 4 ve 5'de yer doğruluğu GNSS olduğu için bu alanlarda GEDI ve ICESat-2 verilerinin doğrulukları incelenmemiştir. Öncelikli olarak verilere ait hata dağılım grafikleri hazırlanmıştır (Şekil 5.12). Şekil 5.12 incelendiğinde

Test Alanı-3’de GEDI hariç tüm test alanlarında “0” değerine yakın ve pozitif yönde hatalarda yoğunlaştığı görülmektedir. KOH’lara bakıldığı zaman en iyi sonucun Test Alanı-3’te ICESat-2’nin 6.48 m. ile verdiğini en kötü sonucun ise yine Test Alanı-3’te GEDI 11.29 m ile verdiğini görülmektedir (Ek 4). NRMSE’ler yönünden incelediğimizde Test Alanı-1 de GEDI için %2.3 ile en iyi başarıyı elde ederken en kötü sonucu Test Alanı-3’de GEDI %11.29 ile vermiştir (Ek 4). NMAD metriği incelediğinde ise en iyi sonucun Test Alanı-1 de ICESat-2’nin verdiğini en kötü sonuç ise Test Alanı-3’te GEDI vermiştir. Test Alanı-3 hariç hem ICESat-2 hem de GEDI 6 m ile 9 m arasındaki doğruluklara ulaşmıştır (Ek 4). Bu sonuçlara bakıldığında Bölüm 4.3.1’de verilen filtreleme adımları uygulandığında GEDI ve ICESat-2 verisinin düşeyde daha iyi doğruluklara ulaştığı görülmektedir. Ayrıca filtreleme adımlarının ayrıntılı analizlerine GEDI için (Narin vd. 2023) ICESat-2 için (Shang vd. 2022) çalışmalarına bakılabilir.



Şekil 5.12 GEDI ve ICESat-2 verilerine ait hata histogram grafikleri.

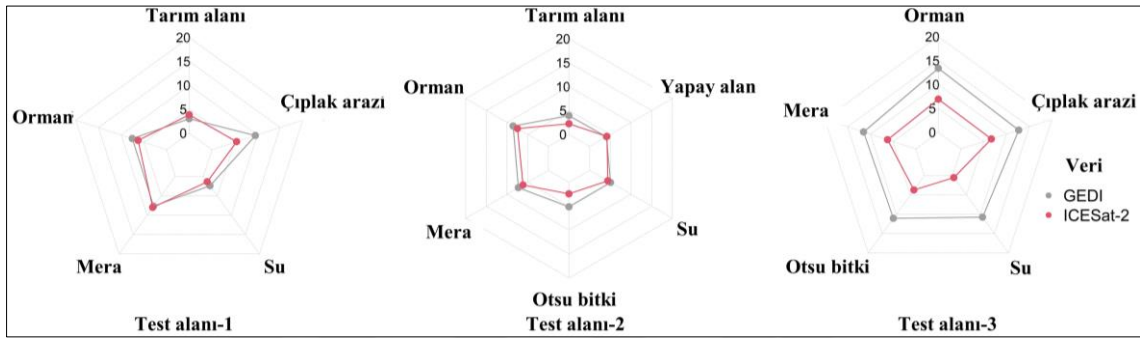
Tez çalışmasında ayrıca arazi eğim gruplarına göre de karşılaştırmalar yapılmıştır. Eğim arttıkça hataların da arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.13). GEDI ve ICESat-2 eğim gruplarından benzer şekilde etkilendiği görülmektedir (Ek 6). Özellikle eğim grubunun 15-30 % ve üstünde olan eğim gruplarında (Ek 6) genel doğruluktan (Ek 6) daha kötü sonuçlar verdiği görülmektedir. Test Alanı-3 de GEDI verisi eğim gruplarından çok fazla şekilde etkilenmemiş tüm eğim gruplarında hemen hemen benzer sonuçlar vermiştir (Ek 6). Eğim gruplarında elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlar ile örtüşmektedir (Adam vd. 2020, Liu vd. 2021, Quirós vd. 2021).



Şekil 5.13 GEDI ve ICESat-2 verilerini KOH'a göre eğim gruplarındaki hataları.

Arazi örtüsü sonuçları incelendiğinde Test Alanı-1'de GEDI ve ICESat-2 verisi içinde su alanları en iyi sonuçları vermiştir (KOH'a göre ICESat-2 = 1.4 m, GEDI = 2.4 m) (Şekil 5.14). Ama su alanı içerisine düşen nokta sayısı oldukça azdır (Ek 5). Bu sebeple su sınıfının genel doğruluğa etkisi çok düşüktür. Test Alanı-1'de GEDI çıplak arazide sınıf bazında en başarısız sonucu vermiştir. (KOH = 9.57 m). ICESat-2 ise en kötü sonucu mera sınıfında vermiştir (KOH= 8.01 m). Test Alanı-2 de her iki veri içinde tarım alanı sınıfı en iyi sonucu vermiştir (KOH'a göre ICESat-2 = 2.23 m, GEDI = 3.93 m) (Şekil 5.14). En kötü sonuçlar ise orman sınıfına aittir (KOH'a göre ICESat-2 = 7.47 m, GEDI = 8.5 m) (Şekil 5.14). Test Alanı-3'te her iki veri için de iyi sonuç su sınıfındadır (KOH'a göre ICESat-2 = 0.52 m, GEDI = 10.74 m) (Şekil 5.14). En kötü sonuçlar ise orman sınıfına aittir (KOH'a göre ICESat-2 = 6.93 m, GEDI = 13.4 m) (Şekil 5.14). GEDI ve ICESat-2 arazi örtüsü gruplarından aynı şekilde etkilendiği görülmektedir (Ek 5). Diğer test alanlarına göre Test Alanı-3'de mera ve çıplak arazi oranının yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.1). Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, ormanlık

alanlarda arazi yüksekliği belirlemede diğer sınıflara göre daha kötü sonuçlar vermektedir (Liu vd. 2021, Urbazaev vd. 2022). Tarım arazileri literatürdeki sonuçlara benzer şekilde tez çalışmasında da en iyi sonucu vermiştir (Liu vd. 2021). Su sınıfındaki sonuçlar literatürdeki çalışmalara göre kötü sonuçlar vermiştir. Bunun sebebi olarak literatürde yapılan su yüksekliği belirleme çalışmalarında farklı metodolojilerin izlenmesi görülmektedir (Xiang vd. 2021, Narin ve Abdikan 2023).

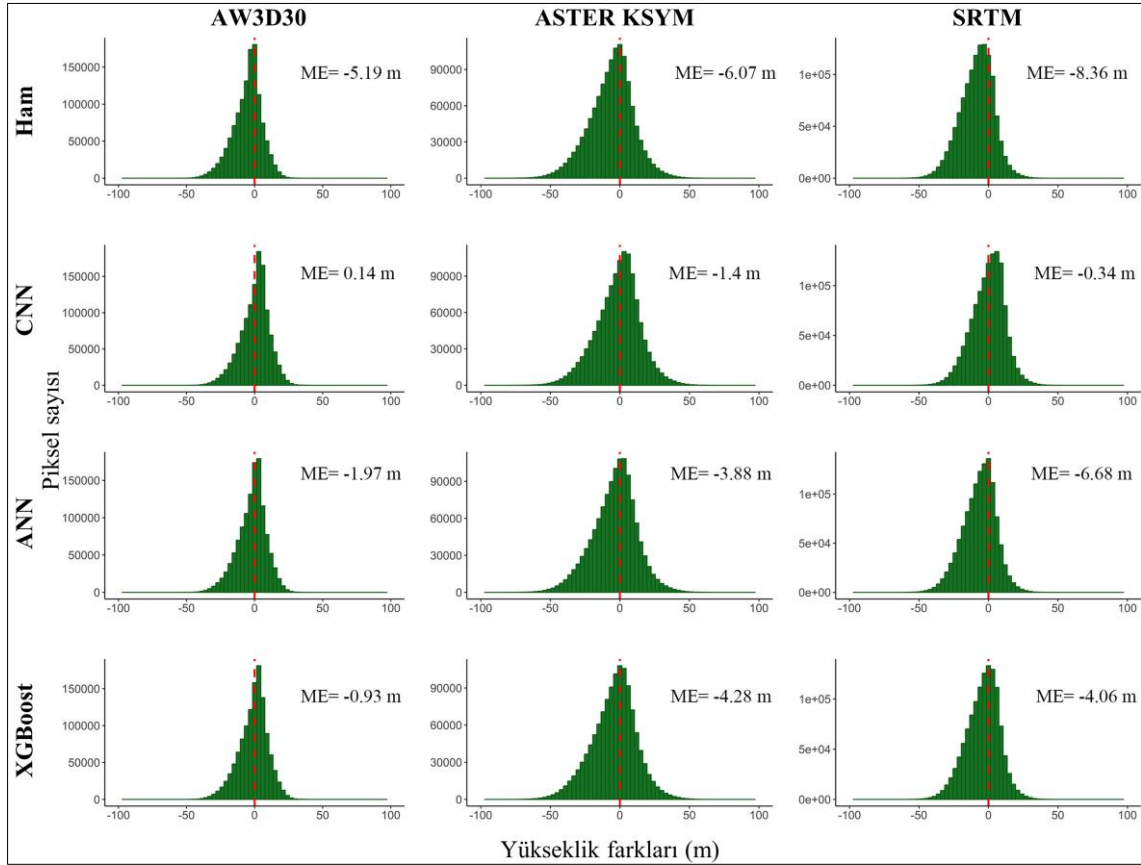


Şekil 5.14 GEDI ve ICESat-2 verilerini KOH'a göre arazi örtüsü gruplarındaki hataları.

5.2.2 İyileştirilmiş ve Ham Sayısal Yükseklik Modellerine ait Bulgular

Tez çalışmasının bu bölümünde hem KSYM'lerin hem de iyileştirilen KSYM'lerin verileri yükseklik yönünden karşılaştırılmıştır. Test Alanı-1 için ham KSYM'ler incelendiğinde hataların negatif yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 5.15). Ham KSYM'ler içinde en iyi sonuç AW3D30'a aittir (KOH = 11.7 m). En kötü sonuç ise ASTER KSYM'ye aittir (KOH = 16.89 m). Ayrıca GEDI ve ICESat-2 verilerinin KOH sonuçları (Ek 4) ham KSYM verilerine göre daha iyidir (Ek 7). Ayrıca GEDI ve ICESat-2 verisinin hata dağılımı pozitif yönlüken (Şekil 5.12) ham KSYM'lerin hata dağılımı negatif yönlüdür (Şekil 5.15). Şekil 5.15'de bulunan iyileştirilmiş KSYM'ler incelendiğinde iyileştirilen KSYM verilerinin hatalarının negatif yönden pozitif yöne doğru yöneldiği görülmektedir. Chen vd. (2020) yılında yaptığı çalışmasında sadece SRTM ve ICESat/GLAS verisi kullansa da sonucunun hata dağılımında benzer şekilde negatif yönden pozitive yöneldiği görülmektedir. Bununla birlikte tüm metotlar için Test Alanı-1'de doğruluğun KOH'a göre arttığı görülmektedir (Ek 7). En yüksek doğruluk

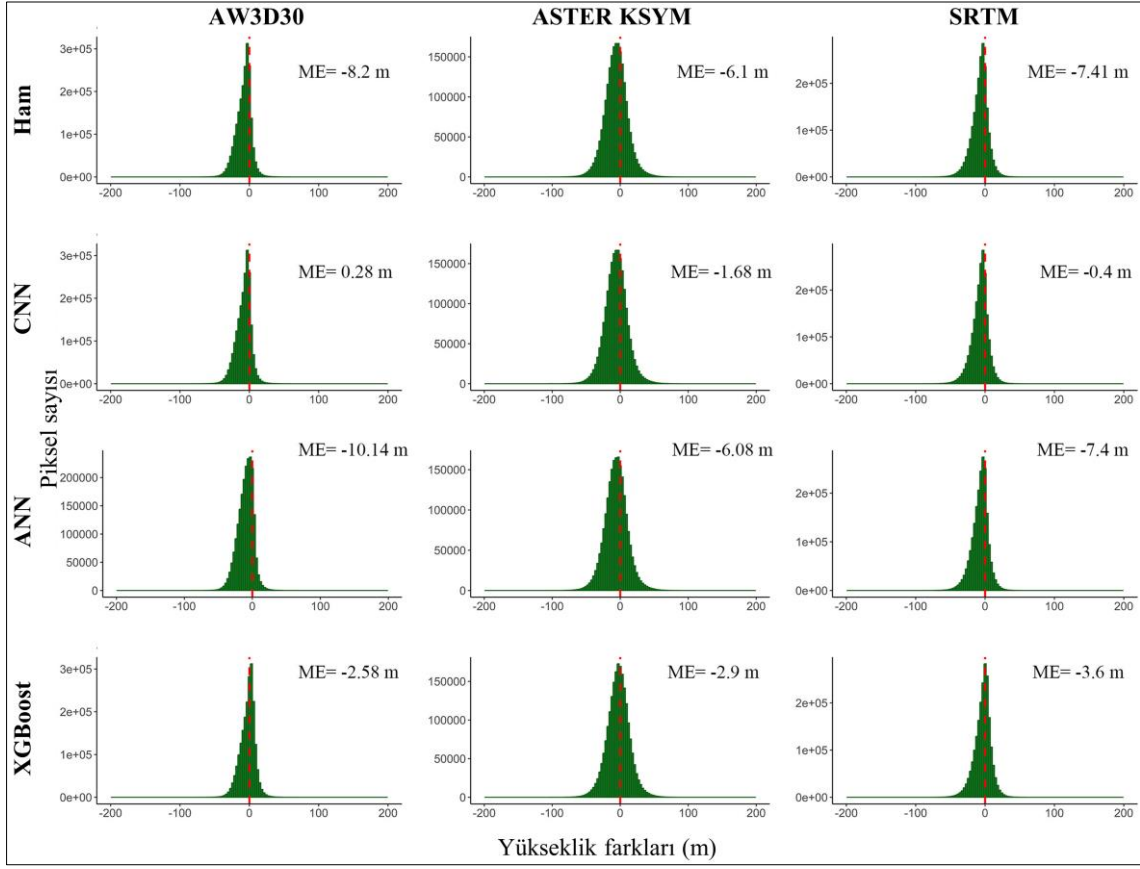
olarak AW3D30'un KOH'a göre 11.7 m'den 10.46 m'ye arttığı görülmüştür. Test Alanı-1 de en çok doğruluk artışı SRTM verisinde CNN metoduna göre görülmüştür (KOH'a göre doğruluk 14.55 m'den 11.81 m'ye yükselmiştir).



Şekil 5.15 Test alanı-1 için hata dağılım grafikleri.

Test Alanı-2 için de Test Alanı-1 gibi ham verilerin hatalarının negatif yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 5.16). Ham KSYM'ler içerisinde en iyi sonuç Test Alanı-1'de olduğu gibi AW3D30 verisine aittir (KOH = 13.44 m). En kötü sonuç ise ASTER KSYM'ye aittir (KOH = 17.61 m). Test Alanı-2'de GEDI ve ICESat-2 verilerinin sonuçları (Ek 4) ham KSYM'lere göre daha iyi çıkmıştır (Ek 7). Şekil 5.16 incelendiğinde iyileştirilmiş KSYM'lerin ham KSYM'lere göre hatalarının sıfır değerine yakın bölgede daha çok yoğunlaştığı görülmektedir. Test Alanı-2'de en iyileşme CNN metoduna göre AW3D30 verisinde gerçekleşmiştir (KOH'a göre 13.44 m'den 10.71 m'ye) (Ek 7). Test Alanı-2 sonuçları genel olarak Test Alanı-1 ile benzer olmakla birlikte Test Alanı-2'de

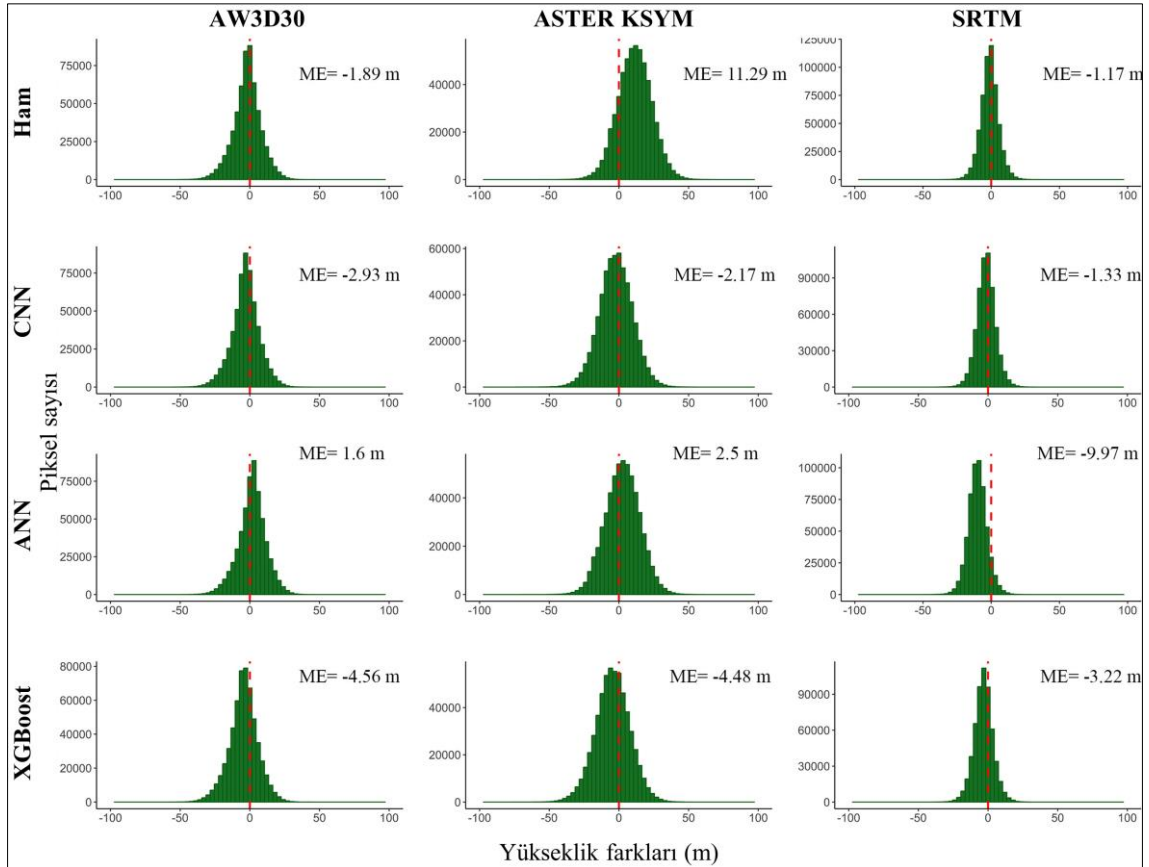
doğruluğun tüm ham KSYM'ler için daha fazla oranda arttığı görülmektedir (Ek 7).



Şekil 5.16 Test Alanı-2 için hata dağılım grafikleri.

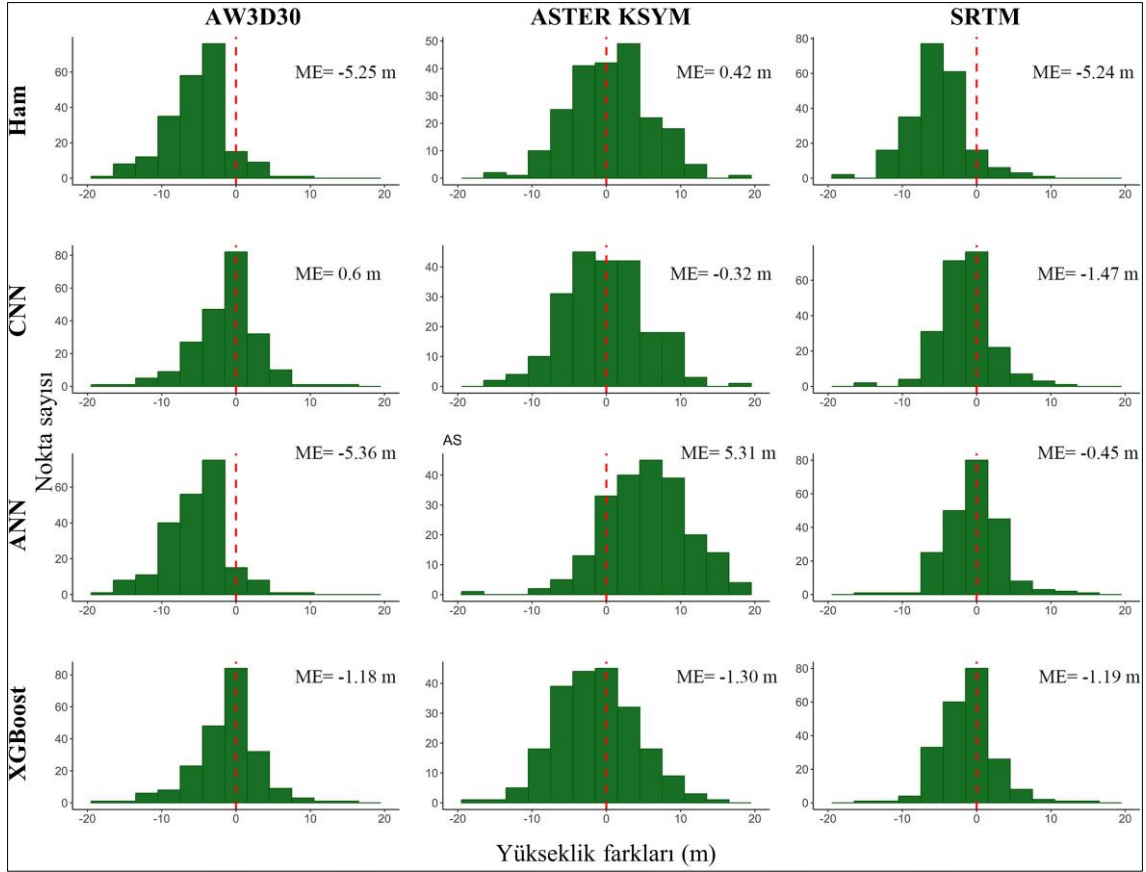
Test Alanı-3'de ham KSYM'ler için hatalar ASTER KSYM hariç negatif yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 5.17). Bu alanda ham KSYM'ler arasında en iyi sonucu SRTM vermiştir (KOH = 6.63 m). En kötü sonuç ise ASTER KSYM'ye aittir (KOH = 16.6 m). KSYM'ler içerisinde sadece ASTER KSYM verisi tüm metotlarda iyileştirilebilmiştir en iyi sonuç CNN tekniğinde elde edilmiştir (KOH'a göre 16.6 m'den 12.25 m'ye). AW3D30 verisi bu bölgede ANN metodu ile herhangi bir iyileşme elde edilememiştir (Ek 7). SRTM verisi ise CNN metodu ile herhangi bir iyileşme elde edilememiştir (Ek 7). 5 test alanından sadece Test Alanı-3'te iyileşme görülmemiştir. Bunun sebepleri olarak; bu çalışma alanında GEDI verisinin doğruluk değerinin (Ek 4) ham KSYM'ye (Ek 7) göre daha düşük çıkması, Test Alanı-3'ün en düşük nokta yoğunluğuna sahip olması ve (Çizelge 4.4). Test Alanı-3'te GEDI verisinin negatif yönlü bir hata dağılımına sahip

olması sayılabilir (Şekil 5.12). SRTM ve AW3D30 verisi sıfıra yakın alanda yoğunlaştığı için bu verileri negatif yönlü hataya dönmüştür (Şekil 5.17). Ama ASTER KSYM verisi pozitif yönlü hata dağılımına (Şekil 5.17) sahip olduğu için veride düzelme görülmüştür. Söz konusu sebepler ASTER KSYM hariç diğer KSYM verilerinde verinin bu test alanında iyileştirilmesini kısıtlamıştır.



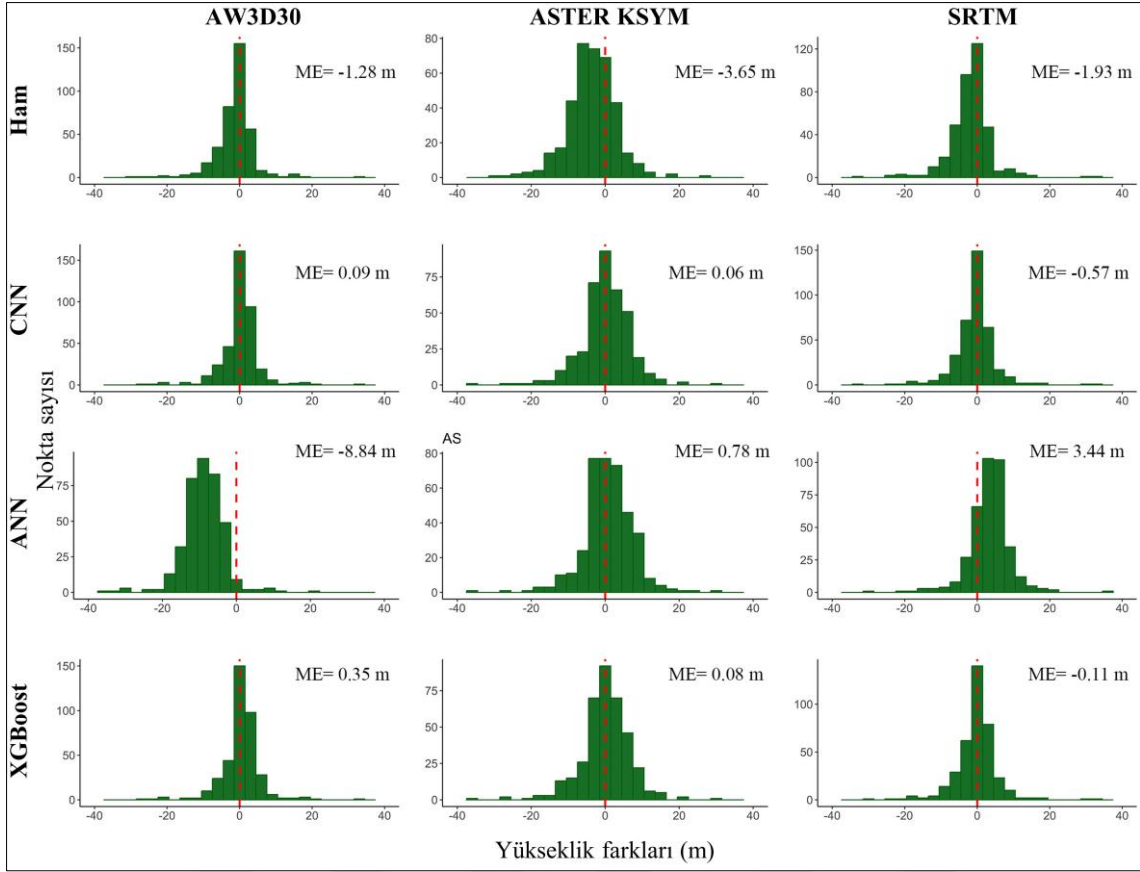
Şekil 5.17 Test alanı-3 için hata dağılım grafikleri.

Test Alanı-4 için hata dağılımının ASTER KSYM hariç eksi yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 5.18). Test Alanı-4 de en iyi sonuç ham KSYM için ASTER KSYM vermiştir (KOH = 5.64 m). Veriler iyileştirildikten sonra SRTM'in en iyi sonucu ANN metoduyla vermiştir. Doğruluk KOH'a göre 6.45 m'den 3.72 m'ye yükselmiştir (Ek 7). Veri iyileştikten sonra hata dağılımının da sıfıra yakın alanlarda yoğunlaştığı görülmüştür (Şekil 5.18). Ayrıca bu alanda AW3D30 verisi en iyi sonuçları XGBoost metoduna göre vermiştir (Ek 7).



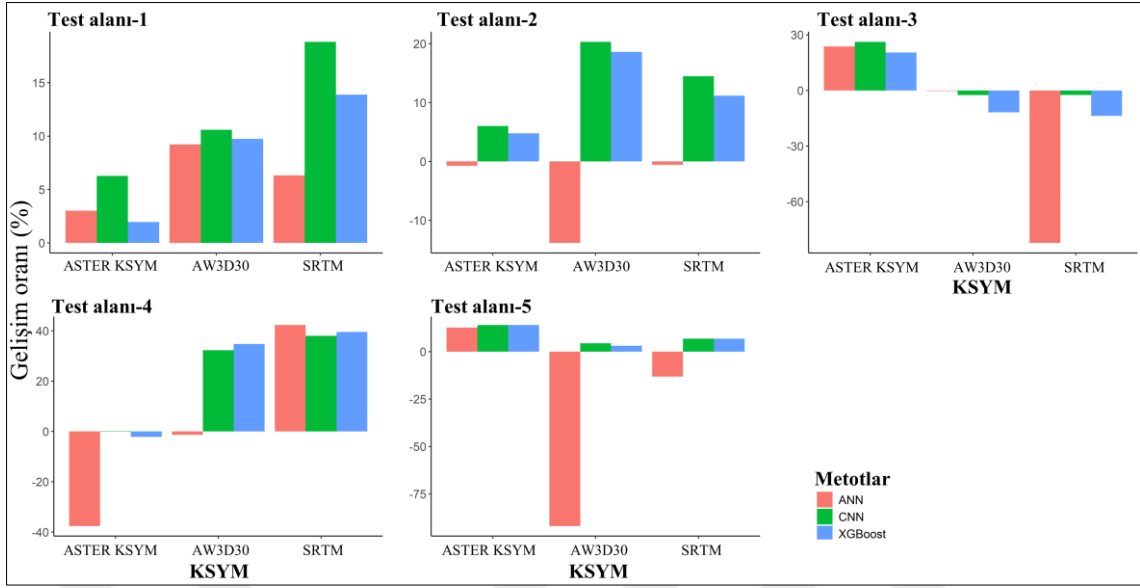
Şekil 5.18 Test alanı-4 için hata dağılım grafikleri.

Test Alanı-5 de tüm veriler için hata dağılımının eksi yönlü olduğu görülmektedir (Şekil 5.19). Test Alanı-5'te ham data için en iyi sonuç AW3D30 (KOH = 5.47 m), en kötü sonuç ASTER KSYM'ye aittir (KOH = 7.74 m) (Ek 7). Alganci vd. (2018) yılında İstanbul ili batı yakasında yaptıkları çalışma sonuçları ile Test Alanı-4 sonuçları benzer çıkmıştır. Tez çalışmasındaki sonuçların literatürdeki sonuçların hatalarından daha yüksek çıksa da AW3D30 en iyi ASTER KSYM en kötü sonucu vermiştir (Santillan ve Makinano-Santillan 2016, Alganci vd. 2018, Apeh vd. 2019). İyileştirilen verilerde en çok iyileşmeyi AW3D30 verisi vermiştir (Ek 7).



Şekil 5.19 Test alanı-5 için hata dağılım grafikleri.

Tez çalışmasında metot bazlı karşılaştırma yapıldığında Test Alanı-1, 2 ve 3'te CNN metodunun diğer metotlara göre daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 5.20). Test Alanı-1'de CNN metodu ile SRTM verisi %18.8 oranında iyileştirilmiştir. Test Alanı-2'de CNN metodu ile AW3D30 verisi %20.31 oranında iyileştirilmiştir. Test Alanı-3'te ASTER KSYM verisi %26.2 oranında iyileştirilmiştir. Test Alanı-4'te ANN metodu ile SRTM verisi %42.3 oranında iyileştirmiştir. Test Alanı-5'te CNN metodu ile ASTER KSYM verisi %14.08 oranında iyileştirilmiştir.



Şekil 5.20 Metotların test alanlarında iyileştirme oranları yüzde olarak verilmiştir.

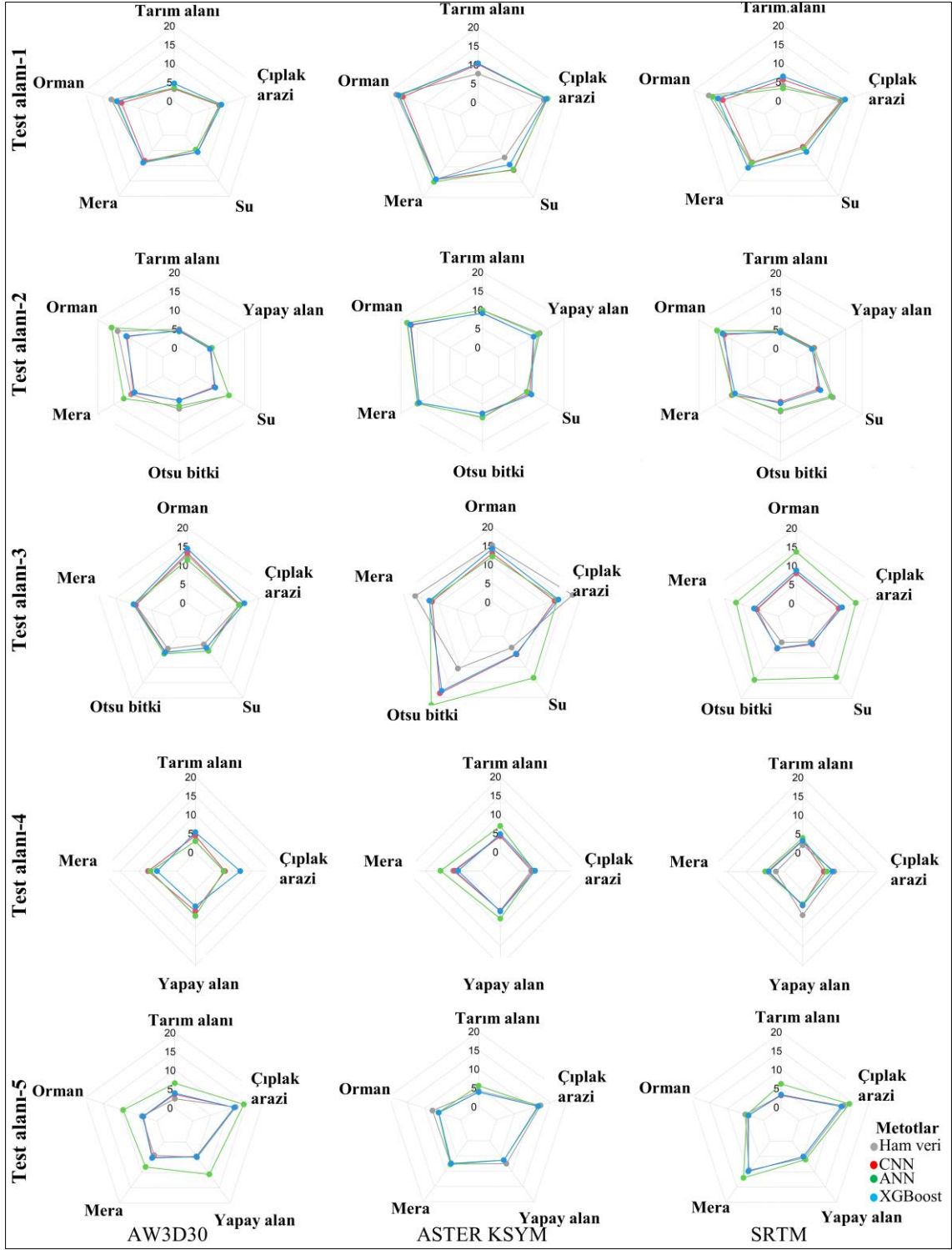
5.2.3 Arazi Örtüsü Tabanlı Bulgular

Tez çalışmasının bu bölümünde ham KSYM'ler ve iyileştirilmiş KSYM'ler arazi örtüsü bakımından karşılaştırılmıştır. Test Alanı-1'de 5 farklı arazi sınıfı mevcuttur ve %76 oranı ile en büyük alan orman sınıfıdır (Çizelge 4.3). KOH ölçütüne göre arazi örtüsü sınıflarında en iyi sınıf tarım alanı, en kötü sonuçlar ise orman sınıfıdır (Şekil 5.21). AW3D30 verisi CNN metoduyla orman alanında KOH'a göre 12.55 m'den 9.71 m'ye yükselmiştir (Ek 8). Test Alanı-2'de 6 farklı sınıf mevcuttur ve %90 oranı ile en büyük alanlı sınıf ormandır (Çizelge 4.3). Arazi örtüsü sınıflarından KOH'a göre en iyi sonuç tarım arazileri sınıfındayken en kötü sonuç orman sınıfıdır (Şekil 5.21). AW3D30 verisi Test Alanı-2'de CNN metoduyla orman sınıfında KOH'a göre doğruluğu 13.85 m'den 10.96 m'ye yükselmiştir (Ek 8). Test Alanı-3'te 5 farklı sınıf mevcuttur ve %42 oranı ile en büyük alanlı sınıf meraya aittir (Çizelge 4.3). Test Alanı-3'te ASTER KSYM verisi CNN metoduyla mera alanında KOH'a göre doğruluğu 16.54 m'den 11.82 m'ye yükselmiştir (Ek 8). Test Alanı-4'te 6 farklı sınıf mevcuttur ve %59 oranı ile en büyük sınıf yapay alana aittir (Çizelge 4.3). Test Alanı-4'te SRTM verisinin ANN metoduyla yapay alanlarda KOH'a göre doğruluğu 6.59 m'dan 4.02 m'ye yükselmiştir (Ek 8). Test Alanı-5'de 7 farklı sınıf vardır ve %44 oranı ile en büyük sınıf yapay alanlara aittir

(Çizelge 4.3). Test Alanı-5’de ASTER KSYM verisi CNN metoduyla yapay alanlarda KOH’a göre doğruluğu 7.52 m’den 6.35 m’ye yükselmiştir (Ek 8).

Arazi örtüsü bazlı karşılaştırmada iyileştirmelerin GEDI ve ICESat-2 verisinin doğruluğunun yüksek olduğu sınıflarda daha başarılı olduğu görülmüştür. Su alanlarında her ne kadar Test Alanı-2’de iyileşme (Ek 8) olsa da kullandığımız metotta su alanlarının uygun olmadığı görülmüştür. Çünkü iç sulardaki, su yüksekliği her noktada eşit kabul edilen bir düzlem gibidir. Tezde uygulanan metotta ham KSYM verilerinin her bir pikselinde iyileşme yapmayı hedeflediği için hata oranı su alanlarında artmaktadır.

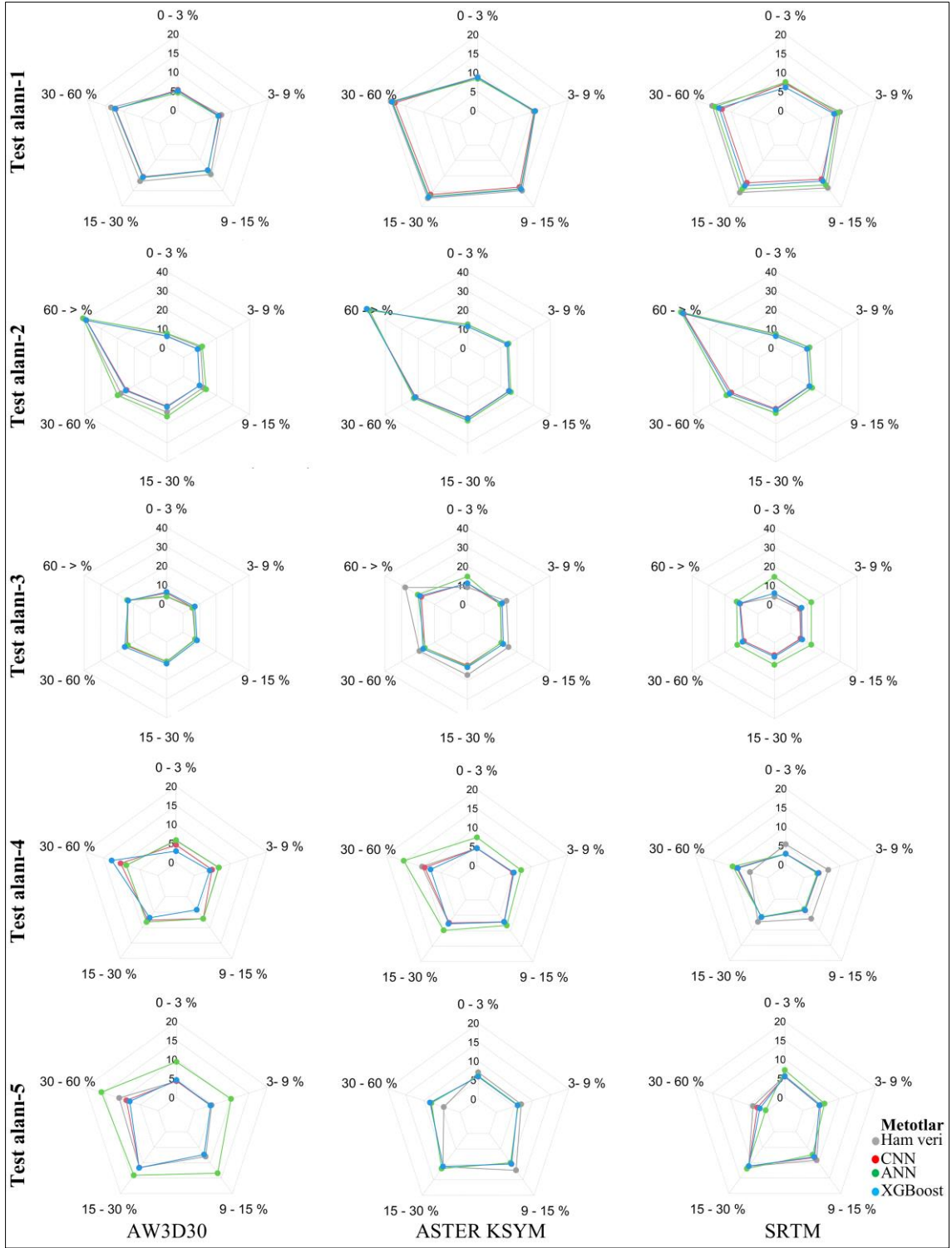
En iyi iyileşmeler tüm alanlarda orman ve yapay alan sınıflarında meydana gelmiştir. Literatüre bakıldığında tez çalışmasıyla benzer olarak orman sınıfının diğer sınıflara göre kötü sonuç verdiği görülmektedir (Santillan ve Makinano-Santillan 2016, Uemaa vd. 2020). Bu sebeple tezde kullanılan metodun ormanlık alanlar ve yapay alanlar için daha etkili bir yöntem olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 5.21 Test alanları için ham ve iyileştirilmiş KSYM verilerinin arazi örtüsü sınıflarına göre KOH doğrulukları.

5.2.4 Eğim Tabanlı Bulgular

Tüm çalışma alanlarında ve tüm verilerde eğim arttıkça hatanın arttığı görülmektedir (Ek 9). Verilerin iyileşme oranlarına bakıldığında özellikle %9-15 aralığından sonra daha yüksek iyileşmeler görülmektedir (Şekil 5.22). Test alanı-1 için en çok iyileşme SRTM verisinde görülmektedir (Ek 9). Özellikle %9-15 eğim grubu ve daha yüksek eğimli alanlarda metot önemli iyileşme göstermiştir (Şekil 5.22). Test Alanı-2’de tüm eğim gruplarında ve tüm verilerde iyileşme elde edilmiştir (Şekil 5.22). Test Alanı-2’de en yüksek eğim grubunun bulunduğu %15-30 eğimde AW3D30 verisinin KOH doğruluğuna göre 13.87 m’den 10.79 m’ye yükselmiştir (Ek 9). Test Alanı-3’te ASTER KSYM verisinde %0-3 eğim grubu hariç diğer tüm eğim gruplarında önemli iyileşmeler gözükmemektedir (Ek 9). Özellikle en yüksek eğim grubunun bulunduğu %15-30 eğimde ASTER KSYM verisinin doğruluğu KOH’a göre 17.17 m’den 12.12 m’ye yükseldiği görülmüştür. Test Alanı-4’te SRTM verisi %30-60 hariç diğer tüm alanlarda önemli iyileşmeler görülmüştür (Ek 9). Test Alanı-5 için tüm verilerde %30-60 hariç diğer tüm eğim gruplarında önemli iyileşmeler görülmüştür (Ek 9). Tez çalışmamızda ham veri eğim sonuçları olarak literatürdeki diğer çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edilmiştir (Uuemaa vd. 2020, Shetty vd. 2022).



Şekil 5.22 Test alanları için ham ve iyileştirilmiş KSYM verilerinin eğim gruplarına göre KOH doğrulukları.

6. SONUÇLAR

SYM'den elde edilen bilgiler farklı mesleki disiplinler tarafından kullanılmaktadır. Bu sebeple SYM'lerin üretim yöntemleri farklılık göstermektedir. Tez çalışmasında KSYM'lerinin üzerinde durulmuştur. KSYM'ler üretim yılları sebebiyle hem güncelliğini yitirmiş hem de kendi içerisinde sistematik hatalar barındırmaktadır. Bu sebeple 2018 yılının sonunda veri toplamaya başlayan uzay tabanlı LiDAR altimetre verilerinin doğrulukları tez çalışması kapsamında hem yeni SYM oluşturma potansiyeli incelenmiş hem de mevcut KSYM'leri iyileştirmeye çalışılmıştır.

GEDİ ve ICESat-2 verilerinin nokta bazlı doğrulukları incelendiğinde;

- Bölüm 4.3.1'de verilen filtreleme adımlarının tamamı uygulandığında mevcut KSYM verileri ile kıyaslandığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Test Alanı-1 için GEDİ ve ICESat-2 verileri KOH'a göre sırasıyla 6.6 m ve 7.41 m doğrulukları verirken KSYM'lerde AWD3D30 = 11.7 m, ASTER KSYM = 16.89 m, SRTM = 14.55 m doğruluktur.
- Test Alanı-2 için GEDİ ve ICESat-2 verileri KOH'a göre sırasıyla 8.29 m ve 7.26 m doğrulukları verirken KSYM'lerde AWD3D30 = 13.44 m, ASTER KSYM = 17.61 m, SRTM = 13.96 m doğruluktur.
- Test Alanı-3 için GEDİ ve ICESat-2 verileri KOH'a göre sırasıyla 11.29 m ve 6.48 m doğrulukları verirken KSYM'lerde AWD3D30 = 10 m, ASTER KSYM = 16.6 m, SRTM = 6.63 m doğruluktur.

Bu bağlamda Uzay tabanlı LiDAR verilerinin hem daha güncel hem de daha doğru olması yeni veriler toplandıkça arazi yüzey tahmininin daha başarılı olacağı sonucuna varılmıştır.

GEDİ ve ICESat-2 verileri ile SYM üretimi potansiyeli bakımından incelendiğinde;

- Test Alanı-1 için KOH'a göre GEDİ SYM = 41.05 m ICESat-2 SYM = 78.43 m GEDİ - ICESat-2 SYM 34.74 m, AW3D30 = 11.54 m, ASTER KSYM = 16.71 m ve SRTM = 14.44 m doğruluktur.
- Test Alanı-2 için KOH'a göre GEDİ SYM = 31.99 m, ICESat-2 SYM = 51.79 m GEDİ - ICESat-2 SYM = 28.1 m , AW3D30 13.54 m , ASTER KSYM 17.76 m ve SRTM 14.18 m doğruluktur.

- Test Alanı-3 için KOH'a göre GEDI SYM = 91.22 m, ICESat-2 SYM = 64.39 m, GEDI - ICESat-2 SYM 39.95 m, AW3D30 9.40 m, ASTER KSYM 15.78 m ve SRTM 6.43 m doğruluktadır.

Her ne kadar tez sonuçlarına göre güncel KSYM modellerinin doğruluklarına yaklaşamamış olsalar da GEDI ve ICESat-2 verisinin birlikte kullanımı doğruluğu önemli şekilde artırmıştır. Ayrıca GEDI ve ICESat-2 sistemlerinin yeni veri toplaması, yeni uzay tabanlı LiDAR altimetre sistemleri sayesinde yeni SYM üretililebilecektir.

Tez çalışmasının bir diğer hipotezi ise KSYM verilerinin düşey doğruluklarını artırmaya yönelik yeni bir metot sunmasıdır. Bu metot 5 farklı test alanında farklı doğruluk metrikleri ve yersel gerçeklik ile test edilmiştir.

Genel olarak sonuçlara baktığımızda en iyi iyileştirmeler;

- Test Alanı-1'de CNN metodu ile SRTM'de doğruluk 14.55 m'den 11.81 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-2'de CNN metodu ile AW3D30'da doğruluk 13.44 m'den 10.71 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-3'te CNN metodu ile ASTER KSYM'de doğruluk 16.6 m'den 12.25 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-4'te ANN metodu ile SRTM'de doğruluk 6.45 m'den 3.72'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-5'te CNN metodu ile ASTER KSYM'de doğruluk 7.74 m'den 6.65 m'ye yükselmiştir.

Arazi örtüsü sınıflarının sonuçlarına baktığımızda en iyi iyileştirmeler;

- Test Alanı-1'de CNN metodu ile SRTM verisinde orman sınıfında doğruluk 15.73 m'den 11.84 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-2'de CNN metodu ile AW3D30 verisinde su sınıfında doğruluk 10.24 m'den 5.79'm ye yükselmiştir.
- Test Alanı-3'te CNN metodu ile ASTER KSYM verisinde mera sınıfında doğruluk 16.54 m'den 11.82 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-4'te CNN metodu ile SRTM verisinde çıplak arazi sınıfında doğruluk 3.4 m'den 0.6 m'ye yükselmiştir.

- Test alanı-5'te XGBoost metodu ile ASTER KSYM orman sınıfında doğruluk 7.88 m'den 6.24 m'ye yükselmiştir.

Eğim gruplarına göre sonuçlara baktığımızda en iyi iyileştirmeler;

- Test Alanı-1'de CNN metodu ile SRTM verisinde %15-30 eğim grubunda doğruluk 15.39 m'den 12.25 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-2'de CNN metodu ile AW3D30 verisinde %30-60 eğim grubunda doğruluk 17.98 m'den 14.52 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-3'te CNN metodu ile Aster KSYM verisinde %60-> eğim grubunda doğruluk 27.72 m'den 17.95 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-4'te ANN metodu ile SRTM verisinde %9-15 eğim grubunda doğruluk 6.38 m'den 3.27 m'ye yükselmiştir.
- Test Alanı-5'te ANN metodu ile SRTM verisinde %30-60 eğim grubunda doğruluk 3.8 m'den 0.5'ye yükselmiştir.

Çalışma sonucu metotlar yönünden incelendiğinde en başarılı metodun CNN metodu olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Arazi örtüsü sınıflarında en iyi iyileşme başarısı orman alanlarında gerçekleşmiştir. Eğim gruplarında, yüksek eğimlerde metodun daha iyi sonuçlar verildiği görülmüştür.

Ayrıca veri iyileştirmenin GEDI ve ICESat-2 verisi ile büyük ilişkisi mevcuttur. Nokta yoğunluğu fazla olan bölgelerde ya da yeni elde edilecek veriler ile birlikte üretilecek modeller daha iyi sonuçlar vereceği açık bir şekilde öngörülmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Abdallah A, Saifeldin A, Abomariam A, Reda A, 2020, Efficiency of Using GNSS-PPP for Digital Elevation Model (DEM) Production, *Artificial Satellites*, 55, 17-28.
- Abdikan S, Sekertekin A, Narin O G, Delen A, Balik Sanli F, 2023, A comparative analysis of SLR, MLR, ANN, XGBoost and CNN for crop height estimation of sunflower using Sentinel-1 and Sentinel-2, *Advances in Space Research*, 71, 3045-3059.
- Adam M, Urbazaev M, Dubois C, Schmullius C, 2020, Accuracy Assessment of GEDI Terrain Elevation and Canopy Height Estimates in European Temperate Forests: Influence of Environmental and Acquisition Parameters, *Remote Sensing*, 12, 3948.
- Alganci U, Besol B, Sertel E, 2018, Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7, 114.
- Apeh O, Uzodinma V, Ebinne E, Moka E, Onah E, 2019, Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa, *Journal of Geographic Information System*, 11, 111-123.
- Arnold T B, 2017, kerasR: R Interface to the Keras Deep Learning Library, *J. Open Source Softw.*, 2, 296.
- Balghin W G V, Coleman A, 1965, Puerto Rico, *Geography*, 50, 274-286.
- Banjo O, Salami W, Adewale R, Adegoke A, 2021, Spot height digital elevation model of Yewa division, Ogun State Nigeria, *FUW Trends in Science & Technology Journal*, J, 6, 436-440.
- Bisschop T, 2021, Detecting Alpine glacier changes from a combination of ICESAT-2 and GEDI data.

- Burrough P A, 1986, Principles of geographical information systems for land resources assessment, Geocarto International, 1, 54-54.
- Chen C, Yang S, Li Y, 2020. Accuracy Assessment and Correction of SRTM DEM Using ICESat/GLAS Data under Data Coregistration. Remote Sensing 12, 20. Erişim Adresi.
- Chishti S O, Riaz S, BilalZaib M, Nauman M, 2018, Self-driving cars using CNN and Q-learning, 2018 IEEE 21st International Multi-Topic Conference (INMIC), 1-7.
- Crippen R, Buckley S, Agram P, Belz E, Gurrola E, Hensley S, Kobrick M, Lavalley M, Martin J, Neumann M, Nguyen Q, Rosen P, Shimada J, Simard M vd.Tung W, 2016, NASADEM Global Elevation Model: Methods and Progress, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B4, 125-128.
- Dubayah R, Blair J B, Goetz S, Fatoyinbo L, Hansen M, Healey S, Hofton M, Hurtt G, Kellner J, Luthcke S, Armston J, Tang H, Duncanson L, Hancock S, Jantz P, Marselis S, Patterson P L, Qi W vd.Silva C, 2020, The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography, Science of Remote Sensing, 1, 100002.
- Erdogan S, 2009, A comparision of interpolation methods for producing digital elevation models at the field scale, Earth Surface Processes and Landforms, 34, 366-376.
- Florinsky I V, Skrypitsyna T N, Luschikova O S, 2018, Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia, Remote Sensing Letters, 9, 706-714.
- Ghorbanzadeh O, Blaschke T, Gholamnia K, Meena S R, Tiede D, Aryal J, 2019, Evaluation of Different Machine Learning Methods and Deep-Learning Convolutional Neural Networks for Landslide Detection, Remote Sensing, 11, 196.
- Gullu M, Yilmaz İ, Yilmaz M, Turgut B, 2011a, An alternative method for estimating densification point velocity based on back propagation artificial neural networks,

Studia Geophysica et Geodaetica, 55, 73-86.

Gullu M, Yilmaz M, Yilmaz I, Turgut B, 2011b, Datum transformation by artificial neural networks for geographic information systems applications, International symposium on environmental protection and planning: geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS) applications (ISEPP), Izmir-Turkey, 13-19.

Gullu M, Narin O G, 2019, Georeferencing of the Nile River in Piri Reis 1521 map, Using Artificial Neural Network Method, *Acta Geodaetica et Geophysica*, 54, 387-401.

Ince E S, Barthelmes F, Reißland S, Elger K, Förste C, Flechtner F vd.Schuh H, 2019, ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 647-674.

Jaber W A, Floricioiu D, Rott H, Eineder M, 2013, Surface elevation changes of glaciers derived from SRTM and TanDEM-X DEM differences, 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, 1893-1896.

Jin X, Yu X, Wang X, Bai Y, Su T, Kong J, 2020, Prediction for Time Series with CNN and LSTM, *Proceedings of the 11th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC2019)*, Singapore, 631-641.

Kadhim M A, Abed M H, 2020, Convolutional Neural Network for Satellite Image Classification, Huk M, Maleszka M, Szczerbicki E (Ed.), *Intelligent Information and Database Systems: Recent Developments*, (165-178), Springer International Publishing, Cham.

Karra K, Kontgis C, Statman-Weil Z, Mazzariello J C, Mathis M, Brumby S P, 2021, Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning, 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 4704-4707.

Kavzoglu T, Mather P M, 2003, The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification, *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4907-4938.

- Kellner J R, Armston J, Duncanson L, 2023, Algorithm theoretical basis document for GEDI footprint aboveground biomass density, *Earth and Space Science*, 10, e2022EA002516.
- Khalsa S J S, Borsa A, Nandigam V, Phan M, Lin K, Crosby C, Fricker H, Baru C vd.Lopez L, 2022, OpenAltimetry - rapid analysis and visualization of Spaceborne altimeter data, *Earth Science Informatics*, 15, 1471-1480.
- Kuhn M, 2015, Caret: classification and regression training, *Astrophysics Source Code Library*, ascl: 1505.1003.
- Lee H, Hahn M, 2020, Point-to-surface matching for DEM correction using icesat data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 715-720.
- Liu A, Cheng X, Chen Z, 2021, Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals, *Remote Sensing of Environment*, 264, 112571.
- Liu X, Zhang Z, Peterson J, Chandra S, 2008, Large area DEM generation using airborne LiDAR data and quality control, *8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Shanghai, China, 79-85.
- Markus T, Neumann T, Martino A, Abdalati W, Brunt K, Csatho B, Farrell S, Fricker H, Gardner A, Harding D, Jasinski M, Kwok R, Magruder L, Lubin D, Luthcke S, Morison J, Nelson R, Neuenschwander A, Palm S, Popescu S, Shum C K, Schutz B E, Smith B, Yang Y vd.Zwally J, 2017, The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation, *Remote Sensing of Environment*, 190, 260-273.
- Mesa-Mingorance J L, Ariza-López F J, 2020. Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing* 12, 16. Erişim Adresi.

- Muslim A M, Foody G M, 2008, DEM and bathymetry estimation for mapping a tide-coordinated shoreline from fine spatial resolution satellite sensor imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 29, 4515-4536.
- Narin O G, Abdikan S, 2023, Multi-temporal analysis of inland water level change using ICESat-2 ATL-13 data in lakes and dams, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 15364-15376.
- Narin O G, Gullu M, 2023, A comparison of vertical accuracy of global DEMs and DEMs produced by GEDI, ICESat-2, *Earth Science Informatics*, 16, 2693-2707.
- Narin O G, Lindenbergh R, Abdikan S, 2023, Multi-Criteria Strategy for Estimating GEDI Terrain Height, 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), 1-6.
- Neuenschwander A L, Magruder L A, 2019, Canopy and terrain height retrievals with ICESat-2: A first look, *Remote Sensing*, 11, 1721.
- Neumann T A, Martino A J, Markus T, Bae S, Bock M R, Brenner A C, Brunt K M, Cavanaugh J, Fernandes S T, Hancock D W, Harbeck K, Lee J, Kurtz N T, Luers P J, Luthcke S B, Magruder L, Pennington T A, Ramos-Izquierdo L, Rebold T, Skoog J vd. Thomas T C, 2019, 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.
- Oliver M A, Webster R, 1990, Kriging: a method of interpolation for geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems*, 4, 313-332.
- Panahi M, Sadhasivam N, Pourghasemi H R, Rezaie F, Lee S, 2020, Spatial prediction of groundwater potential mapping based on convolutional neural network (CNN) and support vector regression (SVR), *Journal of Hydrology*, 588, 125033.
- Park S J, McSweeney K, Lowery B, 2001, Identification of the spatial distribution of soils

- using a process-based terrain characterization, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Parrish C E, Magruder L A, Neuenschwander A L, Forfinski-Sarkozi N, Alonzo M, Jasinski M, 2019, Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance, *Remote Sensing*, 11, 1634.
- Petrasova A, Mitasova H, Petras V, Jeziorska J, 2017, Fusion of high-resolution DEMs for water flow modeling, *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2, 6.
- Petty A A, Kurtz N T, Kwok R, Markus T, Neumann T A, 2020, Winter Arctic Sea Ice Thickness From ICESat-2 Freeboards, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015764.
- Quirós E, Polo M E, Fragoso-Campón L, 2021, GEDI Elevation Accuracy Assessment: A Case Study of Southwest Spain, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 5285-5299.
- R Core Team R, 2013, *R: A language and environment for statistical computing*.
- Rizzoli P, Martone M, Gonzalez C, Wecklich C, Borla Tridon D, Bräutigam B, Bachmann M, Schulze D, Fritz T, Huber M, Wessel B, Krieger G, Zink M vd. Moreira A, 2017, Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119-139.
- Sahin E K, 2020, Assessing the predictive capability of ensemble tree methods for landslide susceptibility mapping using XGBoost, gradient boosting machine, and random forest, *SN Applied Sciences*, 2, 1308.
- Santillan J, Makinano-Santillan M, 2016, Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMs over Northeastern Mindanao, Philippines, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 149-156.
- Setiyoko A, Kumar A, 2012, Comparison analysis of interpolation techniques for DEM

generation using Cartosat-1 stereo data, International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES), 9.

Seyrek E C, Uysal M, 2022, Farklı Platformlardan Elde Edilen Hiperspektral Görüntülerin Sınıflandırılmasında Evrişimli Sinir Ağları, Destek Vektör Makineleri ve Rastgele Orman Algoritmalarının Performanslarının Karşılaştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22, 1368-1379.

Shang D, Zhang Y, Dai C, Ma Q, Wang Z, 2022, Extraction Strategy for ICESat-2 Elevation Control Points Based on ATL08 Product, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1-12.

Shetty S, Vaishnavi P C, Umesh P, Shetty A, 2022, Vertical accuracy assessment of open source digital elevation models under varying elevation and land cover in Western Ghats of India, Modeling Earth Systems and Environment, 8, 883-895.

Silva C A, Hamamura C, Valbuena R, Hancock S, Cardil A, Broadbent E N, Almeida D, Silva Junior C vd.Klauber C, 2020, rGEDI: NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) Data Visualization and Processing. version 0.1. 8, accessed on October. 22 2020.

Stipp J J, McDougall I, 1968, Geochronology of the Banks Peninsula Volcanoes, New Zealand, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 11, 1239-1258.

Štular B, Lozić E, Eichert S, 2021. Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology. Remote Sensing 13, 9. Erişim Adresi.

Sunila R, Kollo K, 2007, A COMPARISON OF GEOSTATISTICS AND FUZZY APPLICATION FOR DIGITAL ELEVATION MODEL.

Tachikawa T, Hato M, Kaku M, Iwasaki A, 2011, Characteristics of ASTER GDEM version 2, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3657-3660.

- Tadono T, Ishida H, Oda F, Naito S, Minakawa K, Iwamoto H, 2014, Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-4, 71-76.
- Tiraki Y, Bakır Ç, Serttaş S, Temurtaş H, 2022, Evrişimsel Sinir Ağları ile Otomatik Yüz Tanıma Sistemi, International Journal of Engineering Research and Development, 14, 219-224.
- Urbazaev M, Hess L L, Hancock S, Sato L Y, Ometto J P, Thiel C, Dubois C, Heckel K, Urban M, Adam M vd.Schmullius C, 2022, Assessment of terrain elevation estimates from ICESat-2 and GEDI spaceborne LiDAR missions across different land cover and forest types, Science of Remote Sensing, 6, 100067.
- Uuemaa E, Ahi S, Montibeller B, Muru M, Kmoch A, 2020, Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM), Remote Sensing, 12, 3482.
- Uysal M, Toprak A S, Polat N, 2015, DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill, Measurement, 73, 539-543.
- van Zyl J J, 2001, The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography, Acta Astronautica, 48, 559-565.
- Vatandaslar C, Narin O G, Abdikan S, 2023, Retrieval of forest height information using spaceborne LiDAR data: a comparison of GEDI and ICESat-2 missions for Crimean pine (*Pinus nigra*) stands, Trees, 37, 717-731.
- Wang Y, Pan Z, Zheng J, Qian L, Li M, 2019, A hybrid ensemble method for pulsar candidate classification, Astrophysics and Space Science, 364, 139.
- Wang Y, Zhang X, Guo Z, 2021, Estimation of tree height and aboveground biomass of coniferous forests in North China using stereo ZY-3, multispectral Sentinel-2, and DEM data, Ecological Indicators, 126, 107645.
- Wang Y, Fang H, Zhang Y, Li S, Pang Y, Ma T vd.Li Y, 2023, Retrieval and validation

of vertical LAI profile derived from airborne and spaceborne LiDAR data at a deciduous needleleaf forest site, *GIScience & Remote Sensing*, 60, 2214987.

Xiang J, Li H, Zhao J, Cai X, Li P, 2021, Inland water level measurement from spaceborne laser altimetry: Validation and comparison of three missions over the Great Lakes and lower Mississippi River, *Journal of Hydrology*, 597, 126312.

Yamanokuchi T, Doi K, Shibuya K, 2007, Combined use of InSAR and ICESat / GLAS data for high accuracy DEM generation on antarctica, 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1229-1231.

Yap L, Kandé L H, Nouayou R, Kamguia J, Ngouh N A, Makuate M B, 2019, Vertical accuracy evaluation of freely available latest high-resolution (30 m) global digital elevation models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling ground control points, *International Journal of Digital Earth*, 12, 500-524.

Yue L, Shen H, Zhang L, Zheng X, Zhang F, Yuan Q, 2017, High-quality seamless DEM generation blending SRTM-1, ASTER GDEM v2 and ICESat/GLAS observations, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 20-34.

Zhang Z, Bo Y, Jin S, Chen G, Dong Z, 2023, Dynamic water level changes in Qinghai Lake from integrating refined ICESat-2 and GEDI altimetry data (2018–2021), *Journal of Hydrology*, 617, 129007.

İnternet Kaynakları

1- <https://gedi.umd.edu/data/documents/>, 12/09/2023.

2- https://lpdaac.usgs.gov/documents/581/GEDI_WF_ATBD_v1.0.pdf, 12/09/2023.

3- https://lpdaac.usgs.gov/documents/579/GEDI__WFGEO_ATBD_v1.0.pdf, 12/09/2023.

- 4- https://lpdaac.usgs.gov/documents/588/GEDI_FCCVPM_ATBD_v1.0.pdf, 12/09/2023.
- 5- https://daac.ornl.gov/daacdata/gedi/GEDI_L3_Land_Surface_Metrics/comp/GEDI_ATBD_L3R01.pdf, 12/09/2023.
- 6- <https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>, 13/09/2023.
- 7- <https://nsidc.org/data/icesat-2/products>, 13/09/2023.
- 8- <https://www.fs.usda.gov/recarea/umatilla/recarea/?recid=56927>, 13/09/2023.
- 9- https://lpdaac.usgs.gov/documents/986/GEDI02_UserGuide_V2.pdf, 13/09/2023.
- 10- <https://www.datatechnotes.com/2020/01/how-to-fit-regression-data-with-cnn.html>, 13/09/2023.
- 11- <https://www.geeksforgeeks.org/how-neural-networks-are-used-for-regression-in-r-programming/>, 15/09/2023.
- 12- <https://www.r-bloggers.com/2020/11/r-xgboost-regression/>, 15/09/2023.
- 13- <https://lidarportal.dnr.wa.gov/>, 15/09/2023
- 14- <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5eb7a41882ce25b5135d09c1>, 15/09/2023
- 15- <https://doi.org/10.5069/G98W3BHC>, 15/09/2023

2. TÜBİTAK Kutup 1001 projesi

Proje Durumu: Kabul edildi sözleşme imza aşamasında

Adı: Derin Öğrenme Temelli Kıyı Çizgisi ve Buzul Sınıflarının Otomatik Tespiti:
Antarktika – Marguerite Körfezi Örneği

Proje No: 122G287

Projede Görevi: Araştırmacı

3. Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Kariyer Destek Projesi

Proje durumu: Tamamlandı

Adı: Pafta Dönüşümü ve Sayısallaştırılmasının Yapay Sinir Ağı (YSA) Tekniği ile
Yapılabilirliğinin Araştırılması

Proje No: 18.Kariyer.175

Projede Görevi: Araştırmacı

4. Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Kariyer Destek Projesi

Proje durumu: Tamamlandı

Adı: Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Entegrasyonu ile Güneş Enerji
Potansiyelinin Modellenmesi

Proje No: 18.Kariyer .224

Projede Görevi: Araştırmacı

5. Afyon Kocatepe Üniversitesi BAP Lisansüstü Tez (Doktora) Projesi

Proje durumu: Devam Etmekte

Adı: Küresel Sayısal Yükseklik Modellerinin ICESat-2 ve GEDI verileriyle düzeltilmesi

Proje No: 22.FEN.BİL.02

Projede Görevi: Araştırmacı

Yayınlar ve Bildiriler:

Güllü, M., & Narin, Ö. G. (2019) Dengeleme Hesabı-Teori ve Uygulama. Nobel Akademik Yayıncılık (Uluslararası Kitap)

Narin O. G., Abdikan S., 2022. Multi-temporal analysis of inland water level change using ICESat-2 ATL-13 data in lakes and dams. Environ Sci Pollut Res. (Web of Science kategori = Q1)

Abdikan, S., Sekertekin, A., Narin, O. G., Delen, A., & Sanli, F. B. (2022). A comparative analysis of SLR, MLR, ANN, XGBoost and CNN for crop height estimation of sunflower using Sentinel-1 and Sentinel-2. Advances in Space Research. (Web of Science kategori = Q1)

Narin, O. G., & Gullu, M. (2023). A comparison of vertical accuracy of global DEMs and DEMs produced by GEDI, ICESat-2. Earth Science Informatics, 1-15. (Web of Science kategori = Q2)

Vatandaslar, C., Narin, O. G., & Abdikan, S. (2022). Retrieval of forest height information using spaceborne LiDAR data: a comparison of GEDI and ICESat-2 missions for Crimean pine (*Pinus nigra*) stands. Trees, 1-15. (Web of Science kategori = Q2)

Narin O. G., Vatandaslar C., Abdikan S., (2022). Estimating Stand Top Height Using Freely Distributed ICESat-2 LiDAR Data: A Case Study from Multi-species Forests in Artvin, Forestist,72, 3, 294-298. (ESCI)

Çapadış, A., Narin, Ö. G., Yilmaz, M., & Güllü, M. (2022). HGM Küre Uygulamasının Dijital Harita Arşivlemede Kullanılabilirliği: Pervititch Haritaları Örneği. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(3), 607-614. (TR-indeks)

Narin, O. G. & Gullu, M., (2022). Evaluating the Planimetric Accuracy of a Historical Map (the Europe and Mediterranean Sea Map of Piri Reis): A New Method and Cartographic Analysis. The Cartographic Journal. DOI:

10.1080/00087041.2021.1956064 (SSCI)

Gullu, M., & Narin, O. G. (2019). Georeferencing of the Nile River in Piri Reis 1521 map, Using Artificial Neural Network Method. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 54(3), 387-401. (Web of Science kategori = Q3)

Narin, O. G., & Abdikan, S. (2020). Monitoring of phenological stage and yield estimation of sunflower plant using Sentinel-2 satellite images. *Geocarto International*, 1-15. (Web of Science kategori = Q2)

Narin, Ö. G., Noyan, Ö. F., & Abdikan, S. A. (2021). Monitoring vegetative stages of sunflower and wheat crops with Sentinel-2 images according to BBCH-Scale. *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 38(1), 46-52. (TR-indeks)

Narin, O. G., Sekertekin, A., Saygin, A., Sanli, F. B., & Gullu, M. (2021). Yield Estimation of Sunflower Plant with Cnn and ANN Using SENTINEL-2. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 385-389. (Scopus)

Narin, O. G., Abdikan, S., Bayik, C., Sekertekin, A., Delen, A., and Balik Sanli, F (2021). Coherence and Backscatter Based cropland Mapping Using Multi-Temporal Sentinel-1 with Dynamic Time Warping, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B5-2021, 37–41, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2021-37-2021>. (Scopus)

Eroğlu, M. M., & Narin, O. G. (2021). Google Earth and GDM Globe comparison with Dijital Elevation Model (DEM) produced with unmanned aerial vehicle. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 545-551. (In Turkish) (ESCI)

Narin, O. G. (2019). Monitoring of Phenological Stage and Yield Estimation of Sunflower Plant Using Sentinel-2 satellite Images (Master's thesis, Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Saygin ABDIKAN). (In Turkish)

Narin, O. G., Gullu, M., Baybura, T., & Turgut, B. (2018). Investigation of The Usability of Artificial Neural Networks (ANN) on 1/1000 Scale Cadastral Map Sheets

Transformation. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(2), 575-580. (In Turkish) (TR-indeks)

Seyrek E. C., Narin O. G., Koçak T. & Uysal M. (2021). The use of UAV photogrammetry in archaeological surveys: The case of Kolankaya Trenches. Türkiye Fotogrametri Dergisi, 3(2), 69-75 (In Turkish) (Uluslararası indeks)

Narin O. G. (2021). Using Mobile Augmented Reality Application in Implementary Development Plan. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(4), 875-880. (In Turkish) (TR-indeks)



EKLER

Ek 1. Test Alanı-1'e ait SYM üretimine ait sonuçlar.

Veri	Korelasyon	KOH	MAE	NMAD
GEDİ	0.9961	22.350	17.021	5.234
AW3D30	0.9991	12.292	16.227	8.991
ASTER KSYM	0.9980	17.521	14.868	7.131
SRTM	0.9989	15.235	13.350	11.695
ICESat-2	0.9993	12.166	13.598	6.778
AW3D30	0.9993	11.190	14.709	7.413
ASTER KSYM	0.9985	16.291	13.668	5.204
SRTM	0.9991	14.314	12.020	9.326
GEDİ SYM	0.9888	41.052	28.383	4.236
ICESat-2 SYM	0.9589	78.430	54.145	8.049
GEDİ - ICESat-2 SYM	0.9921	34.740	23.857	4.679
AW3D30	0.9993	11.543	8.741	5.486
ASTER KSYM	0.9984	16.717	12.830	6.905
SRTM	0.9991	14.435	11.291	10.893

*Gri dolgulu değerler nokta bazlı sonuçlardır.

Ek 2. Test Alanı-2'ye ait SYM üretimine ait sonuçlar.

Veri	Korelasyon	KOH	MAE	NMAD
GEDİ	0.9960	20.359	9.985	1.017
AW3D30	0.9989	13.578	10.203	9.882
ASTER KSYM	0.9972	17.995	13.967	9.907
SRTM	0.9986	14.210	10.525	8.835
ICESat-2	0.9960	13.746	7.135	3.039
AW3D30	0.9989	13.052	9.700	8.879
ASTER KSYM	0.9972	17.044	13.168	8.095
SRTM	0.9986	13.546	10.021	8.360
GEDİ SYM	0.9891	31.998	22.618	3.459
ICESat-2 SYM	0.9738	51.788	34.215	4.798
GEDİ - ICESat-2 SYM	0.9943	28.096	18.025	0.246
AW3D30	0.9725	13.538	10.080	9.753
ASTER KSYM	0.9980	17.759	13.606	8.927
SRTM	0.9983	14.178	10.369	8.869

*Gri dolgulu değerler nokta bazlı sonuçlardır.

Ek 3 Test Alanı-3'e ait SYM üretimine ait sonuçlar

Veri	Korelasyon	KOH	MAE	NMAD
GEDİ	0.9981	11.952	8.511	0.335
AW3D30	0.9989	9.442	5.060	1.483
ASTER KSYM	0.9982	16.382	13.391	16.309
SRTM	0.9994	6.623	7.007	2.965
ICESat-2	0.9992	7.846	5.021	1.167
AW3D30	0.9989	9.102	4.643	1.484
ASTER KSYM	0.9984	15.614	12.555	16.309
SRTM	0.9995	6.172	6.630	2.967
GEDİ SYM	0.8935	91.217	50.336	3.603
ICESat-2 SYM	0.9473	64.391	44.479	1.063
GEDİ - ICESat-2 SYM	0.9800	39.954	25.707	1.25
AW3D30	0.9989	9.398	7.445	2.965
ASTER KSYM	0.9984	15.783	12.711	16.308
SRTM	0.9995	6.434	4.884	1.483

*Gri dolgulu değerler nokta bazlı sonuçlardır.

Ek 4. GEDİ ve ICESat-2 genel doğrulukları.

Metrikler	Test Alanı-1		Test Alanı-2		Test Alanı-3	
	GEDİ	ICESat-2	GEDİ	ICESat-2	GEDİ	ICESat-2
MAE	4.70	5.37	5.84	4.98	9.66	4.85
RMSE	6.60	7.41	8.29	7.26	11.29	6.48
NRMSE %	2.30	2.60	3.60	3.30	6.00	3.50
NMAD	5.52	4.22	5.99	4.78	7.22	5.45

Ek 5. Arazi kullanımına göre GEDİ ve ICESat-2 için KOH değerleri.

Sınıflar	Test Alanı-1				Test Alanı-2				Test Alanı-3			
	NS	GEDİ	NS	I-2	NS	GEDİ	NS	I-2	NS	GEDİ	NS	I-2
Bitki	1167	3	622	3.84	463	3.93	276	2.23	—	—	—	—
Orman	38701	7.54	9428	6.25	65867	8.5	19376	7.47	1174	13.4	946	6.93
Mera	11406	7.68	3324	8.01	5321	7.24	1704	6.11	2797	11.46	2782	6.18
Otsu bitki	—	—	—	—	23	5.13	16	2.41	7	11.04	10	3.71
Su	1	2.4	3	1.4	126	5.05	60	4.39	4	10.74	29	0.52
Yapay alan	—	—	—	—	2146	4.05	506	4.17	—	—	—	—
Çıplak Arazi	15	9.57	8	5.43	—	—	—	—	3747	12.69	2531	6.67
Kar	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* NS: Nokta Sayısı, I-2: ICESat-2

Ek 6. Arazi eğimine göre GEDI ve ICESat-2 için KOH değerleri.

Sınıflar	Test Alanı-1				Test Alanı-2				Test Alanı-3			
	NS	GEDI	NS	I-2	NS	GEDI	NS	I-2	NS	GEDI	NS	I-2
0 - 3 %	1412	2.1	569	2.52	5933	3.87	1700	3.08	135	11.85	157	2.38
3- 9 %	6734	3.36	2185	3.22	13886	5.62	4246	5.28	658	11.88	551	3.6
9 - 15 %	6295	5.19	1667	4.7	15691	7.13	4748	6.56	1413	11.88	1188	5.02
15 - 30 %	21377	7.96	5314	7.34	30906	9.04	8964	7.86	4530	12.33	3654	7.03
30 - 60 %	15325	9.05	3608	8.04	7287	12.96	2201	10.91	952	13.48	647	8.31
60 - > %	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	10

* NS: Nokta Sayısı, I-2: ICESat-2

Ek 7. Ham ve Düzeltilmiş KSYM'lerin genel doğrulukları.

Metodlar	Metrikler	Test Alam-1				Test Alam-2				Test Alam-3				Test Alam-4				Test Alam-5			
		AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE	SRTM	AW3D	ASTE
Ham veri	MAE	8.74	12.83	11.29	10.09	13.61	10.37	7.54	13.62	5.05	5.68	4.41	5.65	3.32	5.76	4.02					
	RMSE	11.70	16.89	14.55	13.44	17.61	13.96	10.00	16.6	6.63	6.76	5.64	6.45	5.47	7.74	6.16					
	NRMSE %	4.30	6.20	5.30	5.90	7.70	6.10	5.30	8.80	3.50	6.20	5.10	5.90	10.30	14.90	11.8					
	NMAD	9.14	14.22	11.63	9.26	14.93	9.66	8.89	11.86	5.93	3.49	5.27	3.01	2.91	5.81	3.25					
CNN	MAE	8.16	12.2	9.33	8.06	12.64	8.88	7.82	9.64	5.24	3.65	4.42	3.00	3.22	4.69	3.58					
	RMSE	10.46	15.83	11.81	10.71	16.55	11.94	10.25	12.25	6.79	4.58	5.63	4.00	5.23	6.65	5.74					
	NRMSE %	3.80	5.80	4.30	4.70	7.30	5.30	5.40	6.50	3.60	4.20	5.10	3.7	10.00	12.80	10.9					
	NMAD	9.15	14.21	11.34	9.27	14.78	9.78	8.62	11.67	6.04	5.26	5.29	2.96	2.88	4.93	3.10					
ANN	MAE	8.03	12.48	10.44	11.79	13.70	10.37	7.72	10.08	10.50	5.78	6.29	2.76	9.24	4.89	5.16					
	RMSE	10.62	16.38	13.63	15.30	17.74	14.04	10.03	12.67	12.08	6.85	7.76	3.72	10.50	6.76	6.97					
	NRMSE %	3.90	6.00	5.00	6.60	7.70	6.10	5.30	6.80	6.50	6.30	7.00	3.40	20.80	12.90	12.80					
	NMAD	9.13	14.38	11.35	10.92	15.06	9.87	8.53	12.33	6.16	3.46	5.50	3.05	4.25	5.65	3.95					
XGBoost	MAE	8.11	12.62	9.64	8.10	12.81	9.02	8.63	10.39	5.88	3.18	4.54	2.89	3.30	4.70	3.65					
	RMSE	10.56	16.56	12.53	10.94	16.77	12.40	11.18	13.2	7.54	4.41	5.76	3.90	5.30	6.65	5.74					
	NRMSE %	3.90	6.10	4.60	4.80	7.30	5.40	5.90	7.00	4.00	4.00	5.20	3.60	10.20	12.90	11.00					
	NMAD	9.28	14.49	11.44	9.13	14.86	9.69	8.93	11.92	6.14	3.38	5.58	3.05	2.95	5.02	3.25					

*AW3D: AW3D30, ASTE: ASTER KSYM

Ek 8. Arazi kullanımına göre ham ve düzeltilmiş KSYM'ler için KOH değerleri.

Metotlar	Sınıflar	Test Alanı-1					Test Alanı-2					Test Alanı-3					
		Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM
Ham Veri	Bitki	32855	3.2	7.6	4.04	16605	4.93	9.88	4.71	0	—	—	—	—	—	—	—
	Orman	941795	12.55	17.85	15.73	1893105	13.85	17.96	14.41	92965	12.75	15.08	7.89	—	—	—	—
	Mera	252043	8.65	14.09	9.43	134468	9.74	14.76	9.51	233248	9.35	16.54	5.91	—	—	—	—
	Otsu bitki	0	—	—	—	973	6.18	8.67	6.75	813	3.81	10.57	1.62	—	—	—	—
	Su	32	4.84	6.92	3.97	5901	10.24	8.63	11.02	2205	2.43	3.71	1.42	—	—	—	—
	Yapay alan	0	—	—	—	38417	4.98	12.56	5.32	0	—	—	—	—	—	—	—
CNN	Çıplak arazi	385	7.56	13.34	10.96	0	—	—	—	223682	9.4	17.4	6.8	—	—	—	—
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—
	Bitki	32855	3.38	10.09	5.61	16605	4.64	9.13	4.48	0	—	—	—	—	—	—	—
	Orman	941795	9.71	16.01	11.84	1893105	10.96	16.86	12.23	92965	13.27	12.97	8.13	—	—	—	—
	Mera	252043	8.4	14.08	9.03	134468	9.03	14.46	9.9	233248	9.47	11.82	6.1	—	—	—	—
	Otsu bitki	0	—	—	—	973	3.91	7.54	4.21	813	4.96	18.69	3.71	—	—	—	—
ANN	Su	32	5.53	11.06	3.93	5901	5.79	9.48	6.6	2205	3.67	5.94	2.27	—	—	—	—
	Yapay alan	0	—	—	—	38417	4.72	10.67	5.16	0	—	—	—	—	—	—	—
	Çıplak arazi	385	7.62	14.19	11.6	0	—	—	—	223682	9.64	12.41	6.89	—	—	—	—
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—
	Bitki	32855	3.56	10.33	3.3	16605	4.33	9.86	4.42	0	—	—	—	—	—	—	—
	Orman	941795	11.14	16.95	14.67	1893105	15.72	18.1	14.49	92965	11.46	12.13	13.69	—	—	—	—
XGBoost	Mera	225706	8.99	14.92	9.18	134468	11.97	14.91	9.65	233248	10.05	12.4	11.82	—	—	—	—
	Otsu bitki	0	—	—	—	973	5.44	8.54	6.46	813	5.5	22.57	13.91	—	—	—	—
	Su	32	4.72	10.85	4.43	5901	10.26	8.55	10.45	2205	4.56	13.63	13.04	—	—	—	—
	Yapay alan	0	—	—	—	38417	5.04	11.99	4.9	0	—	—	—	—	—	—	—
	Çıplak arazi	385	7.89	14.37	11.89	0	—	—	—	223682	9.38	13.13	11.58	—	—	—	—
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—
XGBoost	Bitki	32855	4.69	10.36	6.5	16605	4.5	9.03	4.21	0	—	—	—	—	—	—	—
	Orman	941795	10.94	17.2	13.17	1893105	11.23	17.1	12.78	92965	14.44	14.22	8.77	—	—	—	—
	Mera	225706	9.02	14.08	10.8	134468	8.64	14.4	8.96	233248	9.99	12.58	6.79	—	—	—	—
	Otsu bitki	0	—	—	—	973	4	7.59	4.57	813	5.09	17.88	3.5	—	—	—	—
	Su	32	5.56	9.27	5.58	5901	6.08	10.02	7.2	2205	3.55	5.72	2.01	—	—	—	—
	Yapay alan	0	—	—	—	38417	4.42	10.71	4.61	0	—	—	—	—	—	—	—
XGBoost	Çıplak arazi	385	8.16	13.98	12.33	0	—	—	—	223682	10.9	13.45	7.76	—	—	—	—
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—

Ek 8. (devam) Arazi kullanımına göre Ham ve Düzeltilmiş KSYM'ler için KOH değerleri.

Metotlar	Sınıflar	Test Alanı-4					Test Alanı-5				
		Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM		
Ham Veri	Bitki	3	2.99	4.33	1.99	17	2.44	4.2	3.18		
	Orman	0	—	—	—	45	4.17	7.88	5		
	Mera	6	6.86	7.5	2.1	15	4.33	7.64	9.47		
	Otsu bitki	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Su	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Yapay alan	206	6.83	5.61	6.59	265	5.07	7.52	5.48		
CNN	Çıplak arazi	2	2.6	3.17	3.4	23	11.97	12.3	12.5		
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Bitki	3	4.4	4.18	3.3	17	3.62	3.88	3.14		
	Orman	0	—	—	—	45	3.8	6.23	4.23		
	Mera	6	7.57	7.12	4.27	15	5.05	7.55	9.81		
	Otsu bitki	0	—	—	—	0	—	—	—		
ANN	Su	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Yapay alan	206	5.62	5.62	4.02	265	4.74	6.35	5.03		
	Çıplak arazi	2	2.86	3.7	0.6	23	11.6	11.56	11.86		
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Bitki	3	2.96	6.9	3.9	17	6.58	5.57	6.2		
	Orman	0	—	—	—	45	9.44	6.24	4.6		
XGBoost	Mera	6	6.95	10.86	4.95	15	8.2	7.77	11.99		
	Otsu bitki	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Su	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Yapay alan	206	6.91	7.69	3.69	265	10.59	6.36	6		
	Çıplak arazi	2	2.49	4.01	1.44	23	14.25	11.77	14.03		
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—		
XGBoost	Bitki	3	5.34	4.74	3.16	17	3.92	3.87	3.36		
	Orman	0	—	—	—	45	3.86	6.13	4.09		
	Mera	6	5.2	6.21	4	15	5.24	7.43	9.85		
	Otsu bitki	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Su	0	—	—	—	0	—	—	—		
	Yapay alan	206	4.34	5.78	3.91	265	4.82	6.35	5.04		
XGBoost	Çıplak arazi	2	6.91	4.24	2.91	23	11.61	11.63	11.82		
	Kar	0	—	—	—	0	—	—	—		

*Piks.: Piksel sayısı, AW3D: AW3D30, ASTE: ASTER KSYM

Ek 9. Arazi eğimine göre Ham ve Düzeltilmiş KSYM'ler için KOH değerleri.

Metotlar	Sınıflar	Test Alan-1					Test Alan-2					Test Alan-3					
		Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM
Ham Veri	0 - 3 %	29718	5.02	8.87	6.91	120714	7.31	12.5	7.36	11167	3.76	8.94	4				
	3- 9 %	128646	7.01	10.91	10.05	324298	10.41	14.81	10.47	42543	5.62	13.65	5.28				
	9 - 15 %	129262	9.7	14.81	13.89	406262	11.9	16.14	11.98	92125	7.21	14.9	5.78				
	15 - 30 %	526779	11.9	17.27	15.39	918447	13.87	17.89	14.17	329611	10.32	17.17	6.63				
	30 - 60 %	408195	13.44	18.93	15.24	309508	17.98	22.43	19.74	69981	13.91	19.11	8.58				
	60 - > %	0	—	—	—	296	40.96	49.62	47.55	4	13.36	27.72	10.79				
CNN	0 - 3 %	29718	5.31	8.69	7.29	120714	6.19	11.33	6.2	11167	5.66	11.07	5.91				
	3- 9 %	128646	6.42	10.51	8.87	324298	8.6	13.89	8.89	42543	6.12	10.07	5.85				
	9 - 15 %	129262	8.34	13.64	11.09	406262	9.66	15.02	10.35	92125	7.5	10.58	6.09				
	15 - 30 %	526779	10.5	16.07	12.25	918447	10.79	16.72	12.04	329611	10.52	12.12	6.71				
	30 - 60 %	408195	12.19	17.85	12.52	309508	14.52	21.56	17.02	69981	14.17	15.84	8.52				
	60 - > %	0	—	—	—	296	38.92	51.08	45.73	4	13.38	17.95	10.86				
ANN	0 - 3 %	29718	4.56	8.35	7.5	120714	7.54	12.25	7.02	11167	4.02	14.58	14.44				
	3- 9 %	128646	6.11	10.66	9.45	324298	11.35	14.7	10.29	42543	6.03	9.91	12.35				
	9 - 15 %	129262	8.5	14.17	12.96	406262	13.66	16.21	11.99	92125	7.55	10.47	12.34				
	15 - 30 %	526779	10.72	16.68	14.28	918447	16.16	18.1	14.32	329611	10.36	12.64	11.72				
	30 - 60 %	408195	12.38	18.46	14.45	309508	19.94	22.67	19.92	69981	13.52	15.88	12.52				
	60 - > %	0	—	—	—	296	40.79	49.72	47.49	4	13.92	20.08	12.9				
XGBoost	0 - 3 %	29718	5.06	8.71	6.08	120714	6.02	11.3	6.12	11167	6.19	11.02	5.89				
	3- 9 %	128646	6.23	10.77	8.44	324298	8.57	13.96	8.96	42543	7.11	11.07	6.43				
	9 - 15 %	129262	8.39	14.33	11.7	406262	9.68	15.2	10.45	92125	8.44	11.69	6.87				
	15 - 30 %	526779	10.64	16.88	13.19	918447	11.09	16.99	12.53	329611	11.45	13.08	7.51				
	30 - 60 %	408195	12.33	18.65	13.33	309508	15.01	21.84	18.03	69981	15.34	16.86	9.3				
	60 - > %	0	—	—	—	296	39.12	51.21	46.46	4	13.29	18.85	11.13				

Ek 9. (devam) Arazi eğimine göre Ham ve Düzeltilmiş KSYM'ler için KOH değerleri.

Metotlar	Sınıflar	Test Alanı-4				Test Alanı-5			
		Piks.	AW3D	ASTE	SRTM	Piks.	AW3D	ASTE	SRTM
Ham Veri	0 - 3 %	39	5.72	4.56	5.37	121	4.29	7.06	6
	3 - 9 %	117	6.75	4.92	6.72	180	4.7	6.86	5
	9 - 15 %	47	7.11	7.09	6.38	42	8	11.9	9
	15 - 30 %	12	8.17	7.56	7.39	16	11.57	10.78	11
	30 - 60 %	2	8.74	10.16	4.85	1	10.8	4.5	4
	60 - > %	0	—	—	—	0	—	—	—
CNN	0 - 3 %	39	4.57	4.5	2.9	121	4.32	5.91	5
	3 - 9 %	117	4.92	4.93	4.08	180	4.39	5.92	5
	9 - 15 %	47	7.11	7.15	3.68	42	7.32	9.87	8
	15 - 30 %	12	7.58	7.45	5.91	16	11.61	10.71	11
	30 - 60 %	2	10.32	9.42	8.53	1	8.8	8.2	3
	60 - > %	0	—	—	—	0	—	—	—
ANN	0 - 3 %	39	5.85	7.38	2.85	121	9.37	6.14	7
	3 - 9 %	117	6.83	7.19	3.7	180	10.04	6.03	6
	9 - 15 %	47	7.14	8.3	3.27	42	13.38	9.45	7
	15 - 30 %	12	8.2	9.88	5.77	16	14.06	11.35	12
	30 - 60 %	2	8.78	15.23	9.66	1	15.7	7.9	0
	60 - > %	0	—	—	—	0	—	—	—
XGBoost	0 - 3 %	39	2.96	4.54	2.84	121	4.59	5.94	6
	3 - 9 %	117	4.29	5.17	3.96	180	4.39	5.9	5
	9 - 15 %	47	4.23	7.2	3.57	42	7.32	9.81	8
	15 - 30 %	12	6.79	7.76	5.88	16	11.67	10.71	11
	30 - 60 %	2	12.78	7.8	8.22	1	7.9	8.3	2
	60 - > %	0	—	—	—	0	—	—	—

*Piks.: Piksel sayısı, AW3D: AW3D30, ASTE: ASTER KSYM