

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BÖLGESEL VE KÜRESEL BOYUTTAKİ AFETLERİN
FARKLI JEOSENSÖRLER İLE İNCELENMESİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal MUTLU

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BÖLGESEL VE KÜRESEL BOYUTTAKİ AFETLERİN
FARKLI JESENSÖRLER İLE İNCELENMESİ VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bilal MUTLU
(501191611)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Serdar EROL

HAZİRAN 2022

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION AND ANALYSIS OF REGIONAL
AND GLOBAL DISASTERS USING DIFFERENT GEOSENSORS**

M.Sc. THESIS

**Bilal MUTLU
(501191611)**

Department of Geomatics Engineering

Geomatics Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Serdar EROL

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191611 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bilal MUTLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “BÖLGESEL VE KÜRESEL BOYUTTAKİ AFETLERİN FARKLI JEOSENSÖRLER İLE İNCELENMESİ VE ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Serdar EROL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa YANALAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Atınc PIRTI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Haziran 2022**
Savunma Tarihi : **20 Haziran 2022**





Ömer AKIN'a,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezim ve lisans tezim de dahil olmak üzere, bu zamana kadar yapmış olduğum bütün akademik çalışmalarında yanımda olan, yüksek lisans tez danışmanım Prof. Dr. Serdar EROL başta olmak üzere, Doç. Dr. Bihter EROL ve Prof. Dr. Reha Metin ALKAN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, Mustafa Serkan IŞIK ve Volkan ÖZBEY hocalarıma ve Muhammed Raşit ÇEVİKALP arkadaşşıma tezime katmış oldukları maddi ve manevi her türlü yardımdan dolayı teşekkür ederim.

Hayatının baharını yaşayamadan hain bir saldırı sonucu aramızdan ayrılan iş arkadaşım ve dostum Ömer AKIN'ı ise saygı ve özlemlle anıyorum.

Öğrenim hayatım boyunca her türlü fedakarlığı göstererek bu günlere ulaşmamı sağlayan başta annem, babam ve teyzem olmak üzere tüm aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım...

Haziran 2022

Bilal MUTLU
(Geomatik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	7
2.1 GNSS	8
2.1.1 PPP-AR	10
2.1.2 İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri	14
2.1.2.1 CSRS-PPP	14
2.1.2.2 AUSPOS	15
2.1.3 GNSS tekniğinin farklı uygulamaları	16
2.1.3.1 Hız ve ivme verisinin türetilmesi	16
2.1.3.2 Düşey yer hareketi (VLM)	17
2.1.3.3 GNSS reflektometri tekniği	17
2.2 Kuvvetli Yer Hareketi Sensörü Verileri	19
2.2.1 Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi (TADAS)	19
2.2.2 Ham ivme verisinden hız ve yer değiştirme verisi türetilmesi	20
2.3 Deniz Seviyesi Ölçmeleri	20
2.3.1 Bağıl ve mutlak deniz seviyesi	22
2.4 İnterferometrik SAR	23
2.5 Uydu Altimetresi	25
2.6 Gravite Uydu Sistemleri Verileri (GRACE ve GRACE-FO)	28
2.6.1 Eşdeğer su kalınlığı	30
2.6.2 Buzul sonrası geri tepme	31
3. UYGULAMA	33
3.1 Sisam Depremi Örneği	33
3.2 Antarktika Buzul Kütlesi Kaybı Örneği	41
4. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	65



KISALTMALAR

AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
ASL	: Absolute Sea Level (Mutlak Deniz Seviyesi)
AUSPOS	: Geoscience Australia online GPS processing
CRI	: Coastal Resolution Improvement (Kıyı Şeridi Çözünürlük İyileştirme)
CSRS-PPP	: The Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning
DCM	: Decoupled Clock Model
DLR	: Germany's Research Centre for Aeronautics and Space (Alman Havacılık ve Uzay Merkezi)
ESA	: European Space Agency
ESD	: Enhanced Spectral Diversity (Gelişmiş Spektral Çeşitlilik)
EWT	: Equivalent Water Thickness
GFZ	: German Research Centre for Geosciences
GIA	: Glacial Isostatic Adjustment
GMSL	: Global Mean Sea Level
GNSS	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri
GNSS-R	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Reflektometrisi
GPS	: Global Positioning System
GRACE	: The Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow On
Hz	: Hertz
ICESat	: Ice, Cloud and Elevation Satellite
IGS	: International GNSS Service
InSAR	: Interferometric synthetic aperture radar
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
KOERI	: Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute
KBR	: K-Band Ranging System (K-Bant Mesafe Ölçme Sistemi)
LOS	: Line of sight (uydu görüş hattı)
LWET	: Liquid Water Equivalent Thickness
Mascon	: Mass Concentration blocks (Kütle Konsantrasyon Blokları)

MeaSURES	: Making Earth System Data Records for Use in Research Environments
Mw	: Moment Magnitude
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NRCan	: National Resources Canada
PGR	: Post-Glacial rebound
PPP	: Precise Point Positioning
PPP-AR	: Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution
RSL	: Relative Sea Level (Rölatif Deniz Seviyesi)
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SDS	: Scientific Data System (Bilimsel Veri Sistemi)
SGMS	: Strong Ground Motion Sensors
SLA	: Sea Level Anomaly (Deniz seviyesi anomalisi)
SLC	: Simple Look Complex (Tek Bakış Karmaşık)
SNAP	: Sentinel Application Platform (Sentinel Uygulama Platformu)
SNR	: Signal-to-Noise Ratio (Sinyal-Gürültü Oranı)
TADAS	: Turkish Accelerometric Database and Analysis System (Türkiye İvme Veri Tabanı ve Arşiv Sistemi)
TOPEX	: Ocean Topography Experiment
TUSAGA	: Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı
USO	: Ultra Stable Oscillator (Yüksek Doğruluklu Osilatör)
UNAVCO	: University NAVSTAR Consortium
UTC	: Coordinated Universal Time
UT-CSR	: University of Texas - Center for Space Research
VLM	: Vertical Land Motion

SEMBOLLER

$P_{i,r}^S$: GNSS kod ölçmeleri
$\phi_{i,r}^S$: GNSS faz ölçmeleri
ρ_r^S	: Uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzunluk
dt	: GNSS saat hataları
S	: GNSS uydusu
r	: GNSS alıcısı
f	: Frekans
λ	: Dalgaboyu
Δt	: Zaman farkı
v	: Hız
a	: İvme
A	: Elektromanyetik dalganın genliği
ω	: Açısal frekans
$\Delta\sigma$: Yüzey yoğunluk değişimi
l	: Açılım derecesi
m	: Açılım mertebesi
$\Delta\hat{C}, \Delta\hat{S}$: Küresel harmonik katsayılar
ΔE	: Sağa değerlerdeki farklar
ΔN	: Yukarı değerlerdeki farklar
$\Delta 2B$: 2 boyuttaki farklar
Δh	: Yükseklik değerlerdeki farklar



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Veri kümesinde yararlanılan uydu misyonları.	26
Çizelge 2.2 : ICESat-2 veri türleri.	27
Çizelge 2.3 : ICE-5G GIA modelinin parametreleri.	32
Çizelge 3.1 : CSRS-PPP Statik deprem öncesi ve sonrası farkları.	33
Çizelge 3.2 : Deprem gününe ait CSRS-PPP Kinematik çözümün sabit koordinatlara göre farkları.	35





ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : GNSS istasyonlarının inter-sismik hız vektörleri.	8
Şekil 2.2 : Antarktika kıtasında yer alan ve bu çalışma kapsamında kullanılan GNSS istasyonlarının konumları.	9
Şekil 2.3 : GNSS-R yönteminin şekil üzerinde gösterimi.	18
Şekil 2.4 : IDSL-41, IDSL-25 ve Syros mareograf istasyonlarının konumları (kırmızı yıldız, deprem üssünü göstermektedir).	21
Şekil 2.5 : Faraday ve Scott Base mareograf istasyonlarının konumları.	22
Şekil 2.6 : SNAP iş akışı diagramı.	25
Şekil 2.7 : ICESat-2 foton grafiği.	28
Şekil 2.8 : Temsili PGR çizimi.	31
Şekil 3.1 : GNSS istasyonlarının %95 güven aralığındaki ko-sismik deformasyon vektörleri.	34
Şekil 3.2 : CESM ve İZMİ istasyonları için rölatif-statik çözümlerden türetilen yer değiştirme grafikleri.	35
Şekil 3.3 : CESM ve İZMİ istasyonları için PPP-AR kinematik yer değiştirme grafikleri.	36
Şekil 3.4 : CESM ve İZMİ istasyonlarının PPP-Kinematik çözümlerinin 2B dağılım grafiği.	37
Şekil 3.5 : Çeşme SGMS ve CESM GNSS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri.	38
Şekil 3.6 : Konak SGMS ve İZMİ GNSS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri.	39
Şekil 3.7 : InSAR tekniği kullanılarak elde edilen uydu görüş hattı (LOS) yer değiştirme haritası.	40
Şekil 3.8 : IDSL-41, IDSL-25 ve Syros mareograf istasyonlarından elde edilen zamansal değişim grafikleri.	40
Şekil 3.9 : Heidarzadeh ve diğ. (2021) tarafından elde edilmiş trend etkisi çıkartılmış deniz seviyesi değişimleri [1].	41
Şekil 3.10 : 1992 ve 2021 yılları arasındaki SLA değişimi.	42
Şekil 3.11 : 2010 ve 2021 yılları arasındaki EWT değişimi.	42
Şekil 3.12 : ICE-5G GIA zamansal kütle değişimi trendi.	43
Şekil 3.13 : 2010 ve 2021 yılları arasındaki CryoSat-2 karasal buz yüksekliği değişimi.	43
Şekil 3.14 : Faraday mareograf istasyonu RSL değerinin zamansal değişimi.	44
Şekil 3.15 : VNAD GNSS istasyonu zamansal VLM değişimi.	44
Şekil 3.16 : Faraday mareograf istasyonu bölgesinde SLA değişimi.	45
Şekil 3.17 : Faraday mareograf istasyonu çevresindeki EWT değişimi.	45
Şekil 3.18 : Scott Base mareograf istasyonu RSL değerinin zamansal değişimi. ...	46

Şekil 3.19 : SCTB GNSS istasyonu zamansal VLM değişimi.	46
Şekil 3.20 : Scott Base mareograf istasyonu bölgesinde SLA değişimi.	47
Şekil 3.21 : Scott Base mareograf istasyonu çevresindeki EWT değişimi.	47
Şekil 3.22 : Pine adası çevresindeki örneklem konumları.	48
Şekil 3.23 : ICESat-2 karasal buz yükseliği değişimi.	49
Şekil 3.24 : CryoSat-2 karasal buz yükseliği değişimi.	49
Şekil 3.25 : Pine adası çevresinde EWT değişimi.	50
Şekil 3.26 : Pine adası çevresinde SLA değişimi.	50
Şekil 3.27 : Pine adası çevresindeki GNSS istasyonlarının zamansal VLM değişimi.	51
Şekil 3.28 : PIG1 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	52
Şekil 3.29 : PIG2 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	52
Şekil 3.30 : PHIG istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	53
Şekil 3.31 : VNAD istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	53
Şekil 3.32 : HOWE istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	53
Şekil 3.33 : BERP istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	54
Şekil 3.34 : BRIP istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	54
Şekil 3.35 : FTP4 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	54
Şekil 3.36 : INMN istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi. .	54

BÖLGESEL VE KÜRESEL BOYUTTAKİ AFETLERİN FARKLI JEOSENSÖRLER İLE İNCELENMESİ VE ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında, bölgesel ve küresel etkiye sahip doğal afetlerin gözlemlenmesi ve analizinde, farklı özelliklerdeki jeosensörlerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, biri bölgesel diğeri ise küresel olan iki afetin farklı jeosensör verilerini kullanarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu kapsamda, birinci uygulamada, 30.10.2020 tarihinde İzmir Sisam Adasında gerçekleşen Mw 6.9 büyüklüğündeki depremin değerlendirilmesi; ikinci uygulamada ise küresel ısınma sebebiyle Antarktika kıtasında gerçekleşen buzul erimesi kaynaklı dinamik hareketlerin izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tezin ilk kısmında, Küresel Konum Belirleme Sistemi (GNSS), kuvvetli yer hareket sensörü (SGMS), interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR) ve mareograf verileri kullanılarak deprem sonucu oluşan deformasyonların belirlenmesi amaçlanmıştır. Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı – Aktif (TUSAGA-Aktif) ağına dahil olan ve deprem bölgesinde bulunan 4 farklı GNSS istasyonunun 1 saniye aralıklı (1 Hz) gözlem verileri, CSRS-PPP ve AUSPOS servisleri kullanılarak sırasıyla PPP-AR (statik ve kinematik) ve rölatif-statik yöntemlerine göre çözdürülmüş ve konum değişimleri elde edilmiştir. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından depremlerin takibi için kurulan Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi (TADAS) ağı dahilinde ve kullanılan TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarının yakınında bulunan SGMS istasyonlarının ham ivme verilerinden yer değiştirme ve hız değerleri türetilmiştir. GNSS gözlemlerinin PPP-AR kinematik çözümlerinden elde edilen yer değiştirme değerlerinden de hız ve ivme verileri türetilmiş, iki farklı jeosensörden elde edilmiş olan veriler karşılaştırılmıştır. Sonrasında, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yönetilen Sentinel-1 uydu misyonundan elde edilen deprem öncesi ve sonrası zamanlara ait olan yapay açıklıklı radar (SAR) görüntüleri yardımıyla InSAR yönteminden yararlanılarak uydu görüş hattı (LOS) üzerindeki yer değiştirme haritası üretilmiştir. Ayrıca deprem üssüne yakın konumda ve açık deniz havzasında bulunan mareograf istasyonlarının deprem anını içeren zaman serileri elde edilmiş ve deprem sebebiyle meydana gelen sapmalar olduğu gözlenmiştir. Tez çalışmasının diğer kısmında Antarktika Kıtasındaki buzul kaybının takibi ve analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, 2 farklı mareograf istasyonu ve yakınlarda yer alan GNSS istasyonlarının verilerinden yararlanılmıştır. Mareograf istasyonlarından elde edilen, rölatif deniz seviyesi (RSL) değişimi ile GNSS gözlemlerinden elde edilen düşey kara hareketi (VLM) değişimi trend değerlerinden mutlak deniz seviyesi (ASL) değişimi elde edilmiştir. Ayrıca, altimetre uydu misyonları kullanılarak üretilen deniz seviyesi anomalisinin (SLA) zamansal değişimi, ASL değişimini ifade edeceği için iki farklı yöntemle elde edilen trend değerleri birbirleriyle doğrulanmıştır. Bunlara ek olarak, GRACE ve GRACE-FO uydu gravite misyonlarından yararlanılarak türetilen eşdeğer su kalınlığı

(EWT) değişimi iki mareograf istasyonunun bulunduğu bölge için de elde edilmiş fakat kullanılan ürünün mekansal çözünürlüğü düşük olduğu ve ilgili bölge kıyı şeridi olduğu için buzul kütesinin trend değerini ifade etmek yerine, yükselen deniz seviyesi trendi ile uyuştuğu saptanmıştır. Sonrasında aynı bölgeler için, buzul izostatik denge (GIA) sonucunda gerçekleşen buzul sonrası geri-tepme (PGR) hareketinin zamansal kütle değişim oranları ile VLM trendleri karşılaştırılmış ve birbirlerini valide ettiği gözlenmiştir. Çalışmanın devamında, Antarktika Pine Adası özelinde çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kaya üzerinde bulunan GNSS istasyonlarının VLM trendleri ile bölgedeki PGR trend değeri karşılaştırılmış ve iki farklı veri grubundan da yükselen trend değerleri elde edildiği görülmüştür. Buzul üstünde bulunan GNSS istasyonlarına ait VLM trendi ise negatif yönde olup, CryoSat-2 ve ICESat-2 uydu misyonlarından elde edilen kara buz yüksekliği trendlerinin yönüyle ve ayrıca bölgedeki EWT değişiminin trend yönü ile birbirlerini valide etmekte olduğu ortaya konulmuştur. Pine Adası açıklarındaki ASL trendinin ise pozitif yönlü olduğu görülmüştür. Çalışmanın son aşaması olarak, Antarktika Kıtasının batı bölgesinde bulunan 9 adet GNSS istasyonunda kar kalınlığının değişimini belirlemek amacıyla reflektometri yönteminden yararlanılmış ve bölgede azalan trend olduğu ortaya konulmuştur.

INVESTIGATION AND ANALYSIS OF REGIONAL AND GLOBAL DISASTERS USING DIFFERENT GEOSENSORS

SUMMARY

Natural disasters can be divided into regional and global scales. Regional disasters such as earthquakes, floods, fires, volcanic eruptions, tornadoes and erosion affect smaller areas. While these disasters only affect the regions where they occur, global warming, which has a global impact, is actually one of the most important natural disasters of today. Due to global warming, the glaciers are melting, and accordingly the sea level rises, droughts occur and seasonal irregularities are experienced. In order to determine the impact of disasters, which have such important effects on our world, various observations should be made by using different methods. Within the scope of this thesis, it is aimed to investigate and analyze regional and global disasters using different geosensors. Within the scope of this thesis, two different case studies were conducted. Firstly, the Samos earthquake, and secondly, the glacial loss in Antarctica Continent were investigated with various geosensors.

In the first stage of the thesis, a disaster with a regional effect was investigated with geosensors. In this context, data belonging to the Samos earthquake with a magnitude of Mw 6.9 (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute - KOERI) occurred 8 km north of Samos Island at a depth of 16 km, on 30.10.2020, at 11:51:24 UTC in the sea between Samos Island and Kusadasi Bay of Turkey, were used. Within the scope of this study, deformations in the region were determined using Global Navigation Satellite System (GNSS), strong ground motion sensors (SGMS) and interferometric synthetic aperture radar (InSAR) methods, and in addition to these, sea level observations recorded at tide-gauges were investigated and interpreted. Observation data of GNSS stations which is included in Turkish National Permanent GNSS Network-Active (TUSAGA-Aktif) located in the earthquake zone were used. Firstly, 3 dimensional position data according to PPP-AR kinematic and static methods were generated by using the CSRS-PPP web-based service. In addition, the position calculations of the relevant data according to the relative static positioning method were performed using the AUSPOS service. Afterwards, the raw accelerometer data obtained from the SGMS stations in the Turkish Accelerometric Database and Analysis System (TADAS) network were first converted into velocity data and then displacement data. Besides, the displacement values obtained from the PPP-AR kinematic solution by using the GNSS method were first converted into velocity and then acceleration values, and compared with displacement, velocity and acceleration data obtained from SGMS stations. With the InSAR method, the line of sight (LOS) displacement map of the region was produced by processing the data obtained from the Sentinel-1 satellites of 2 different dates belonging to the earthquake region. The data of 3 tide-gauge stations located on the island of Kos, Plomari and Syros, which

are the closest to the earthquake zone and in the open sea basin, were analyzed and interpreted.

In the second stage of the thesis, it is aimed to analyze a global disaster. In recent years, with the increasing effect of global warming, a serious decrease in glacial masses has been observed in the polar regions. Due to the greater loss of mass, especially in the western parts of the Antarctic continent, various analyzes were carried out around Pine Island within the scope of this study. Continuous observations in these regions are necessary to determine the loss of glacier mass and the increase in global mean sea level (GMSL). Also, as a result of the mass loss of glaciers, an uplift occurs in the affected areas due to glacial isostatic adjustment (GIA). This uplift is called post-glacial rebound (PGR), and it is important to observe this effect as well. In this context; Geosensors such as GNSS, radar altimeters, gravity satellite missions and tide-gauges are widely used and contribute to the tracking of these dynamic phenomena. Within the scope of this study, the changes of the glacier mass in the Antarctic region in a certain time interval were investigated by using geosensors data. Firstly, temporal variation data of vertical land motions (VLM) of various GNSS stations provided to users by GNSS analysis centers, were used. In addition, the temporal variation of the snow height around the station was obtained by using the GNSS Reflectometry (GNSS-R) technique by utilizing GNSS observations. Afterwards, equivalent water thickness (EWT) data obtained from the GRACE/GRACE-FO solutions was used. GIA data which is obtained from ICE-5G global GIA model was used to validate VLM trend derived from the GNSS data. The temporal variation of the ice mass was observed using the ice thickness data on land derived from the CryoSat-2 and ICESat-2 satellite radar altimeter data. In addition, sea level anomaly (SLA) change data between 1998 and 2019, which was presented to researchers within the scope of the US National Aeronautics and Space Administration (NASA) MeaSURES project, was used. This dataset contains data from the satellite altimeter missions TOPEX/Poseidon, ERS-1-2, Envisat, Jason-1-2-3, CryoSat-2, AltiKa and Sentinel-3A. SLA change represents absolute sea level (ASL) change. Besides, relative sea level change trend was calculated by using tide-gauge stations data. The time series obtained from these geosensors provide information about the change in the relevant region. Thus, the mass loss in the study area has been studied from a broad perspective based on the comparative results of different geosensors data.

As a result of the first part of the study, the effects of the Samos Earthquake were determined with different geosensors. According to PPP-AR static solutions, significant deformations were found in CESM and IZMI GNSS stations and it was validated with relative static solutions. With respect to PPP-AR kinematic solutions, the maximum horizontal displacement was found to be 12 cm at the CESM station, and it was obtained that this movement was predominantly in the North direction, while values varying between 6-8 centimeters were obtained at the other stations. The effect of the earthquake cannot be understood from the changes in height values according to the daily PPP kinematics solution of CESM and IZMI GNSS stations. However, it was determined that there was an instantaneous subsidence of up to 4 cm when the kinematic change in the 1-minute time interval including the earthquake moment was examined in order to compare the SGMS and GNSS data. Afterwards,

Çeşme and Konak SGMS stations were analyzed located near CESM and IZMI GNSS stations, respectively. Displacement, velocity and acceleration data obtained from GNSS and SGMS geosensors were compared. It has been observed that the results of CESM GNSS and Çeşme SGMS stations are compatible with each other, but the same situation is not true for IZMI GNSS and Konak SGMS stations. Thanks to the LOS displacement map obtained by using the InSAR technique, it has been revealed that there is a 10 cm uplift in the west of Samos Island and a 10 cm subsidence in the east. In addition, a 5 cm subsidence was observed in Çeşme province on the opposite northern coast of the island, and this value is matched with the difference values obtained from the CESM GNSS station located at that location. According to the tide-gauge stations, it was observed that there were deviations from 5 cm to 12 cm according to the current oscillation due to the effect of the earthquake and the aftershocks.

In the second part of the thesis, the glacial loss in the western parts of the Antarctic continent was revealed with different geosensors. Firstly, time series were produced from the data of 2 different tide-gauge stations located in the northwest and south of the continent and the VLM data of GNSS stations located near these stations. In addition to these, the SLA and EWT change values of the same regions were obtained. It has been revealed that the ASL trend obtained as a result of the sum of the VLM and RSL trend values and the SLA trends obtained from the satellite altimeter validate each other for both tide-gauges. Since the spatial resolution of the EWT and GIA data is low, there is no significant result for these 2 points located in the coastal regions. However, it was seen that the EWT trends obtained around both tide gauges were consistent with the SLA trends. In the Pine Island part of the study; firstly, the GIA mass rate was verified with the trend values of the GNSS stations located on the rock. The trend direction obtained from the PIG2 GNSS station on the glacier was validated by CryoSat-2 and ICESat-2 land ice elevation and GRACE EWT change data. Although the trend of uplifting GNSS stations and the direction of the GIA mass rate are the same, their numerical magnitudes are different. In addition, ASL rise in the offshore areas of the island was shown with the SLA change graph and its trend was found. Finally, the snow thickness variation obtained by using the GNSS-R method has a decreasing trend of approximately -35 mm/y at the PIG1 and PIG2 stations located on the Pine Island glacier; It was found that there was a decreasing trend below a millimeter at PHIG, VNAD, FTP4 and HOWE stations, while there was no significant change in snow thickness at other stations (BERP, INMN and BRIP).

In conclusion, investigation and analysis of regional and global disasters was carried out with the help of various geosensors with open access data. Although the data obtained from SAR and gravity satellite missions have low spatial and temporal resolution, that they are of great importance for the observation of disasters by expressing the general trend of large regions. Geosensors such as GNSS, SGMS and tide-gauge stations are higher accurate but only express the characteristics of the places where they are located. However, it has been demonstrated that they are of great importance in disaster observations due to their high accuracy and being able to validate satellite mission's results.



1. GİRİŞ

Afet kavramı düşünülduğünde ilk olarak deprem, sel, yangın, volkanik patlamalar, hortum ve erozyon gibi afetler akıllara gelmektedir. Bu söz konusu afetler sadece gerçekleştikleri bölgeleri etkisi altında bırakırken, bunların yanında daha küresel bir etkiye sahip olan küresel ısınma da aslında günümüzün en önemli doğal afetlerinden biridir. Küresel ısınma sebebiyle buzullar erimekte olup, buna bağlı olarak deniz seviyesi yükselmekte, kuraklıklar baş göstermekte ve mevsim düzensizlikleri yaşanmaktadır. Bu denli önemli etkileri olan afetlerin dünyamıza olan etkilerinin belirlenebilmesi, belirli aralıklarda veya sürekli olarak çeşitli yöntemler kullanılarak gözlemler yapılmasını gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ise bölgesel ve küresel boyuttaki afetlerin gözlemlenmesinde, farklı jeosensörlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi ve analizi yapılmıştır. Jeosensör kavramı, koordinat sistemi altlığında küçük bir odadan büyük bir ekosistemin son derece karmaşık dinamiklerine kadar gözlem yapılmasına imkan sağlayan cihazlar olarak tanımlanmaktadır [2]. Bu tanımdan hareketle, yeryüzünün dinamik hareketlerinin jeodezik veya jeoteknik yöntemler ile gözlemlenmesinde kullanılan bütün sensörler jeosensör olarak nitelendirilebilmektedir.

Tez çalışmasının ilk aşamasında, bölgesel etkiye sahip olan bir afetin jeosensörler ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 30.10.2020 tarihinde Mw 6.9 büyüklüğünde (Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü - KOERI), saat 11:51:24 UTC'de gerçekleşen Sisam depreminin verilerinden yararlanılmıştır. Depremin odak noktası, Sisam Adasının 8 km kuzeyinde ve deniz seviyesine göre 16 km derinliktedir. Sisam Adası ile Türkiye'nin Kuşadası Körfezi arasındaki denizde yaklaşık 40 km uzunluğundaki kuzeye eğimli normal fay zonu üzerinde gerçekleşmiş olan Sisam depreminin etkisiyle, özellikle yakın yerleşim yerlerinde ciddi seviyelerde can ve mal kaybı yaşanmıştır. Depremin şiddetinin büyük olması ve buna bağlı olarak

insan yaşamına etkisinin de büyük olması, bu depremin çeşitli açılardan incelenmesini gerekli kılmıştır. Bu çalışma kapsamında, bölgede gerçekleşen deformasyonlar Küresel Konum Belirleme Sistemi (GNSS), kuvvetli yer hareket sensörü (SGMS) ve interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR) yöntemleri kullanılarak belirlenmiş ve bunlara ek olarak mareograf istasyonlarında kaydedilen anlık deniz seviyesi gözlemleri incelenmiş ve yorumlanmıştır. GNSS yöntemi ile deprem bölgesine en yakın olan Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı – Aktif (TUSAGA-Aktif) istasyonlarına ait olan 1 saniye aralıklı (1 Hz) gözlem verileri, ilk olarak CSRS-PPP web-tabanlı hizmeti kullanılarak PPP-AR kinematik ve statik yöntemlerine göre çözdürülmüştür. Buna ek olarak ise, rölatif statik konumlama yöntemine göre ilgili verilerin konum hesaplamaları AUSPOS servisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve depremin neden olduğu deformasyonların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Sonrasında, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) kapsamındaki Türkiye İvme Veri Tabanı ve Arşiv Sistemi (TADAS) ağında yer alan SGMS istasyonlarından edinilen ham ivmeölçer verileri, öncelikle hız verilerine sonrasında ise yer değiştirme verilerine dönüştürülmüştür. Bunun yanı sıra, GNSS yöntemi kullanılarak PPP-AR kinematik çözümden elde edilen yer değiştirme değerleri de öncelikle hız, sonrasında ise ivme değerlerine dönüştürülmüş ve SGMS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan diğer bir yöntem olan InSAR yöntemi ile ise deprem bölgesine ait olan 2 farklı tarihteki Sentinel-1 uydusundan elde edilmiş olan gözlem verilerinin işlenmesi ile bölgenin uydu görüş hattı (LOS) boyunca olan yer değiştirme haritası üretilmiştir. Son olarak, depremin açık denizde gerçekleşmesi, deniz seviyesinin değişiminin gözlenmesini ve tsunami analizi yapılmasını da gerekli kılmıştır. Deprem sonrasında özellikle Sisam Adasında ve İzmir ili kıyılarında meydana gelen deniz seviyesinde yükselme yerel halk tarafından farkedilmiş ve maddi hasara yol açmıştır. Çalışmada, deprem bölgesine en yakın ve açık deniz havzasında olan Kos, Plomari ve Syros adasında bulunan 3 adet mareograf istasyonun verileri kullanılmıştır. Ayrıca, literatürde halihazırda yapılmış olan çalışmalardan biri olan Heidarzadeh ve diğ. (2021) tarafından elde edilen dalga trend analizinden yararlanılmış ve çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur [1].

Literatüre bakıldığında ilk olarak Zumberge tarafından 1997 yılında ortaya atılan PPP yönteminin sismik deformasyon analizlerindeki kullanılabilirliği Kouba (2003), Li ve diğ. (2014) ve Doğan ve diğ. (2018) çalışmalarında değerlendirilmiş ve kullanılabilirliği ortaya konulmuştur [3-5]. Kouba (2003), çalışmasında 30 saniyeden daha kısa aralıklı olan GNSS gözlem verilerinin PPP yöntemine göre işlenmesi ile ko-sismik deformasyonların belirlenmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuştur [3]. Li ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada öncelikle PPP yöntemi ile PPP-AR yöntemi karşılaştırılmış ve PPP-AR yönteminin özellikle gerçek zamanlı çözümde yüksek doğruluk sağladığı ortaya konulmuş, sonrasında ise PPP-AR yöntemi ile elde edilen deplasman verileri ile ivmeölçer sensör verilerini ayrı ayrı incelenip PPP-AR yönteminin tek başına erken uyarı sistemine katkı verebileceği ortaya konulmuştur [4]. Doğan ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada, Mw 6.6 büyüklüğündeki, 21 Temmuz 2017 tarihli Bodrum-Kos depremi sonucu oluşan deformasyonların, TUSAGA-Aktif ağı dahilindeki GNSS istasyonlarının verilerinin PPP tekniği ile işlenmesi sonucunda belirlenebileceği ortaya konulmuştur [5]. GNSS ve InSAR yöntemlerinin birlikte kullanımı ile de afet alanlarının geniş çapta incelenebilirliği Bürgmann ve diğ. (2002) ve Ganas ve diğ. (2020) çalışmaları ile ortaya konulmuştur [6,7]. Bürgmann ve diğ. (2002), 12 Kasım 1999'da Mw 7.2 büyüklüğünde gerçekleşen Düzce depreminin yarattığı deformasyonu GNSS ve InSAR yöntemleri kullanılarak incelemiş ve deformasyonunun etkilerini gözler önüne sermişlerdir [6]. Ganas ve diğ. ise GNSS ve InSAR yöntemlerini kullanarak 6.4 Mw büyüklüğündeki 26 Kasım 2019 Arnavutluk depremini incelemiş ve 2 farklı yöntemden elde edilen verilerin birbirlerini destekler nitelikte olduğunu ortaya koymuşlardır [7]. SGMS verileri ile GNSS yöntemlerinden elde edilen verilerin karşılaştırması ve birlikte kullanımı ise Geng ve diğ. (2013) ve Tu ve diğ. (2015) [8,9] tarafından sunulmuştur. Geng ve diğ. (2013) çalışmalarında, yüksek frekanslı GPS verisinin PPP-AR yöntemi ile çözümü ve ivmeölçer verileri ile kombinasyonu sonucunda erken uyarı sistemlerine katkı verilebileceğini 26 Ağustos 2012 tarihinde büyüklüğü Mw 4.6 ile Mw 5.5 arasında değişen Brawley sismik faaliyetleri örneği ile deneyerek ortaya koymuşlardır [8]. Tu ve diğ. (2015), çalışmalarında yüksek frekanslı PPP çözümü kullanarak öncelikle ivmeölçer verisindeki zaman farkını gidermiş, sonrasında da ivmeölçer

sensör verilerinden yararlanarak PPP-AR çözümü ile birlikte Kalman filtresine girdirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise, 2 farklı yöntemden gelen verilerin birbirlerini destekler nitelikte olduğu ve birlikte kullanımlarıyla daha güvenilir bir sonuca ulaşılabileceği ortaya konulmuştur [9].

Tezin ikinci aşamasında ise, küresel boyuttaki bir afet ele alınmıştır. Son yıllarda, küresel ısınmanın artan etkisiyle kutup bölgelerindeki buzul kütlelerinde ciddi bir erime gözlenmektedir. Antarktika Kıtasının özellikle batısında kalan kısımlarındaki kütle kaybının daha fazla olmasından dolayı bu çalışma kapsamında, Pine Adası çevresi özelinde de analizler gerçekleştirilmiştir. Antarktika'nın batısında ve özellikle Pine Adası bölgesinde sürekli gözlemler, buzul kütlelerindeki kaybı belirlemek ve küresel ortalama deniz seviyesindeki (GMSL) artışı izlemek için gereklidir. Ayrıca, buzulların kütle kaybının bir sonucu olarak, etkilenen alanlarda buzul izostatik denge (GIA) kaynaklı olarak bir yükselme de meydana gelir. Bu yükselme hareketine buzul sonrası geri-tepme (PGR) denir ve bu etkinin de gözlenmesi önemlidir. Bu bağlamda; GNSS, uydu radar altimetresi, gravite uydu misyonları ve mareograf istasyonları gibi jeosensörler yaygın olarak kullanılmaktadır ve bu dinamik fenomenlerin takibine katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında, jeosensör verileri kullanılarak Antarktika bölgesindeki buzul kütlelerinin belirli bir zaman aralığındaki değişimleri araştırılmıştır. İlk olarak, NAVSTAR Üniversite Konsorsiyumu (UNAVCO) ve Uluslararası GNSS Servisi (IGS) GNSS ağlarına ait istasyonların, analiz merkezleri tarafından kullanıcılara sunulan düşey yer hareketlerinin (VLM) zamansal değişimi verisi kullanılmıştır. Ayrıca yine GNSS gözlemlerinden yararlanarak, GNSS Reflektometri (GNSS-R) tekniği kullanımıyla istasyonların çevresindeki kar yüksekliklerinin zamansal değişimi elde edilmiştir. Sonrasında, GRACE/GRACE-FO çözümlerine düzeltme olarak girdirilen ICE-5G GIA modelinden elde edilen trend değeri ile GNSS istasyonlarının VLM trend değerlerinin birbirlerini doğrular nitelikte olduğu ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, GRACE/GRACE-FO çözümlerinden türetilen eşdeğer su kütlesi kalınlığı (EWT) verisi kullanılarak buz kütlelerinin zamansal değişimi elde edilmiştir. CryoSat-2 ve ICESat-2 uydu radar altimetre verilerinden türetilen kara üzerindeki buz kalınlığı verisi kullanılarak buz kütlelerinin zamansal değişimi gözlemlenmiştir. Ayrıca,

Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) MeaSURES projesi kapsamında araştırmacılara sunulan 1998 ile 2019 yılları arasına ait olan deniz seviyesi anomalilerinin (SLA) zamansal değişim verisi kullanılmıştır. Bu veri kümesinde TOPEX/Poseidon, ERS-1-2, Envisat, Jason-1-2-3, CryoSat-2, AltiKa ve Sentinel-3A uydu altimetre misyonlarından elde edilen veriler bulunmaktadır. Buna ek olarak, 2 farklı mareograf istasyonunun verileri kullanılmış ve deniz seviyesi değişim trendi hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan jeosensörlerden elde edilen zaman serileri ve farklı zamanlara ait verilerin birbirleri arasındaki farklar, ilgili bölgede aranan değişim ile ilgili bilgiler sağlamaktadır. Böylece, alışma alanındaki kütle kaybı, farklı jeosensör verilerinin karşılaştırılmalı sonuçlarına dayanarak geniş bir perspektiften incelenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmı ile ilgili olarak literatüre bakıldığında; Mazzotti ve diğ. (2008) alışmalarında GNSS verisi ile elde edilen VLM trendi ile mareograf istasyonlarından elde edilen rölatif deniz seviyesi (RSL) trendinin toplamı ile uydu altimetresi yardımıyla elde edilen mutlak deniz seviyesi (ASL) trendinin valide edilebileceğini ortaya koymuşlardır [10]. Li ve diğ. (2021) alışmalarında PPP özümleri ile ICESat-2 ATL06 verisini bir rota boyunca karşılaştırmış ve uydu altimetre verilerinden türetilen buz kalınlığı değişimi verisi ile GNSS çözümlerinin birbirlerini valide ettiğini ortaya koymuşlardır [11]. ICESat verisine ek olarak CryoSat uydu verisi de farklı yazarlar tarafından buz kalınlığı değişiminin takibi için kullanılmıştır [12-14]. Farklı çalışmalarda da GRACE uydu misyonundan türetilen EWT değişimi verilerinin kutup bölgelerindeki buzul kütle kaybının izlenmesinde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır [15,16]. Bunun yanında, yine GRACE uydu misyonu verilerine düzeltme olarak girdirilen farklı GIA modellerinin, buzul kütle kaybı sonrası oluşan geri yüklemenin belirlenmesi amacıyla kullanılabilirliği çeşitli eserlerde işlenmiştir [17-19]. Pinat ve diğ. (2021) gerçekleştirdikleri çalışmada, Antarktika Kıtası genelinde farklı GNSS istasyonlarının verilerinden yararlanarak kar kalınlığının GNSS-R yöntemi ile zamansal değişimi verisini türetmiş ve çalışmamızın odağında olan Pine Adası yakınında bulunan Thwaites buzulunda da azalan trend olduğunu saptamışlardır [20].

Tez çalışması kapsamında, sadece açık erişimli veri kümeleri kullanılmıştır. Radar uydusu sistemleri (Sentinel-1, ICESat-2, CryoSat-2, TOPEX vs.), gravite uydusu misyonları (GRACE, GRACE-FO), GNSS, SGMS ve mareograf istasyonları afet bölgelerinde test edilmiştir. Uydusu sistemlerinden elde edilen verilerin özellikle küresel çaptaki afetlerin takibini kolaylaştırdığını belirtmek gerekirken, GNSS, SGMS ve mareograf istasyonları gibi bulunduğu konumu ifade eden jeosensörlerin doğruluklarının daha yüksek olduğu ve uydusu sistemlerinden elde edilen verilerin doğrulanması aşaması için gerekli olduğu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, bölgesel ve küresel çaptaki afetlerin çeşitli jeosensörler ile takibinin mümkün ve gerekli olduğu ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, çalışmada jeosensör verilerinin birbirleri arasındaki tutarlılıklar kontrol edilmiştir.



2. MATERYAL VE METOT

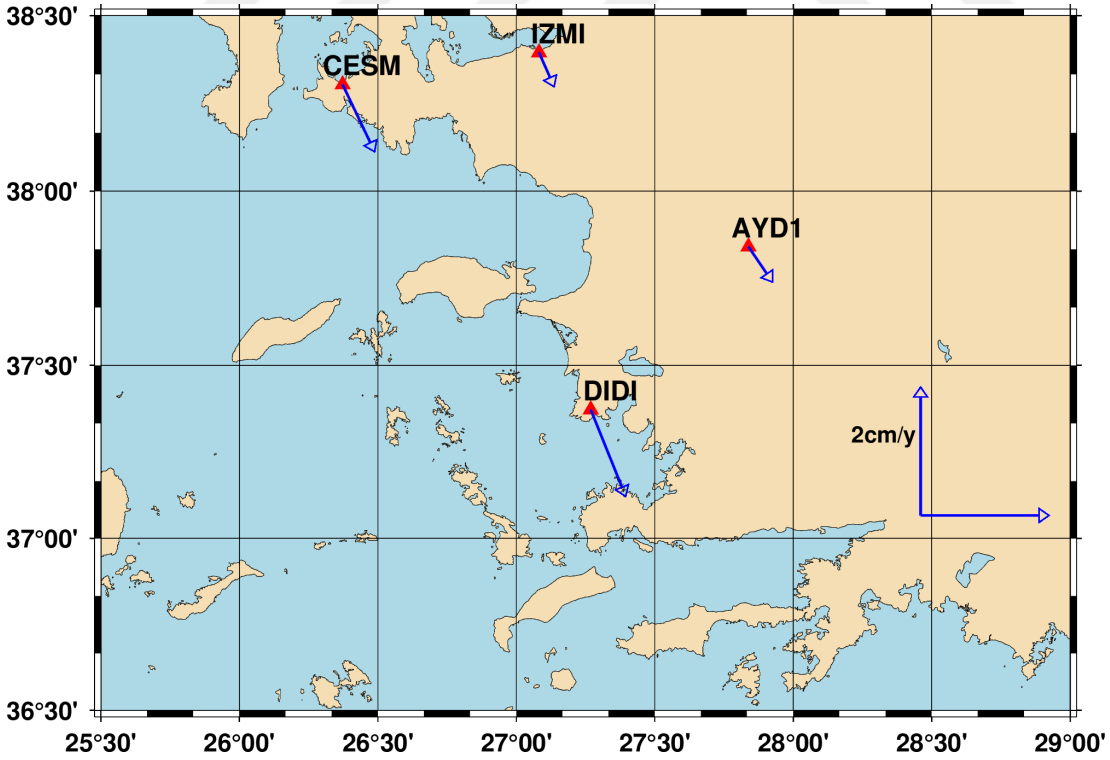
Bu tez çalışmasının ilk kısmında, bir depremin etkilerinin farklı jeosensör verileri ile ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, giriş bölümünde de anlatıldığı gibi öncelikle GNSS yöntemi kullanılarak inter-sismik ve ko-sismik deformasyonlar belirlenmiştir. Bu aşamada, Türkiye çapında homojen olarak dağılmış toplamda 159 istasyonu bulunan TUSAGA-Aktif ağında yer alan ve deprem bölgesinde bulunan 4 adet GNSS istasyonunun 1 Hz'lik uydu gözlem verileri kullanılmıştır. Sonrasında ise, deprem bölgesine yakın olan SGMS istasyonlarının verileri AFAD'a ait olan TADAS servisinden elde edilmiştir. SAR yöntemi kullanılarak depremin geniş çaptaki etkisinin araştırılması aşamasında ise Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yönetilen Sentinel-1 uydusunun verilerinden yararlanılmış ve görüntüler Sentinel Open Access Data Hub sitesinden ücretsiz olarak elde edilmiştir. Deprem etkisiyle oluşan tsunaminin etkisinin incelenmesi için de deprem bölgesindeki mareograf istasyonları araştırılmış ve deprem üssüne çok yakın olmasa da depremin etkisi ile deniz seviyesi değişimini belirlemek amacıyla IDSL-41, IDSL-25 ve Syros istasyonlarının verileri kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında ise, Antarktika bölgesindeki buzul kütlelerinin zamansal değişimleri jeosensör verileri kullanılarak incelenmiştir. Bununla ilgili olarak, UNAVCO ve IGS kuruluşlarının ağlarında yer alan GNSS istasyonlarının verileri, GRACE/GRACE-FO gravite uydu misyonu çözümleri, TOPEX Alt A, TOPEX Alt B, Jason-1-2-3, CryoSat-2 ve ICESat-2 uydu radar altimetre verileri ve mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesi değişimi verilerinden oluşturulan zaman serileri aracılığıyla çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında; BACK, BERP, BRIP, FTP4, HOWE, INMN, PHIG, PIG1, PIG2, SCTB ve VNAD GNSS istasyonlarının verileri kullanılmıştır. Sonrasında, GRACE/GRACE-FO gravite uydu misyonlarından 2010-2021 yılları arasında elde edilen EWT verileri [21]

kullanılmıştır. Ayrıca, GRACE/GRACE-FO uydu misyonu çözümlerine düzeltme olarak girdirilen ICE-5G modelinin GIA zamansal kütle değişim oranı [22] verisinden yararlanılmıştır. NASA MEaSUREs projesi kapsamında servis edilen deniz altimetresi verileri ile 1992 ile 2019 yılları arasındaki SLA değişimi haritalanmış ve bu zaman içerisindeki değişimi incelenmiştir. İlgili deniz altimetresi verileri TOPEX Alt A, TOPEX Alt B, Jason-1-2-3 uydu görevlerine ait verilerden oluşmaktadır [23]. Çalışmada ayrıca, 2010-2021 yılları arasında CryoSat-2'den ve 2018-2020 yılları arasında ICESat-2'den türetilen karasal buz yüksekliği verilerinden yararlanılmıştır.

2.1 GNSS

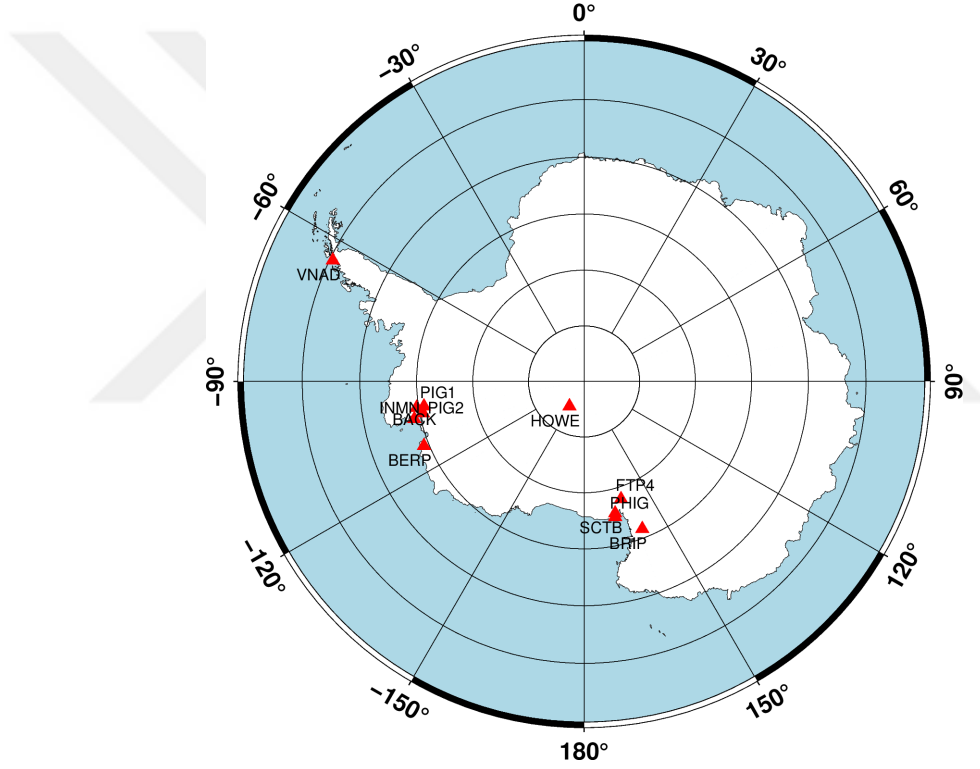
Tezin ilk çalışması olan Sisam depremi bölgesinde, TUSAGA-Aktif istasyonlarının 1 Hz'lik gözlemleri kullanılmış ve depremin neden olduğu ko-sismik deformasyonun ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Çalışmada, TUSAGA-Aktif ağı içerisinde yer alan; AYD1, CESH, DIDI ve IZMI GNSS istasyonlarının 1 saniye aralıklı gözlem verileri kullanılmıştır [24]. GNSS istasyonlarının ITRF96 datumu 2005.0 epöğündeki inter-sismik hız vektörleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir [25].



Şekil 2.1 : GNSS istasyonlarının inter-sismik hız vektörleri.

AYD1, CESH, DIDI ve IZMI GNSS istasyonlarının deprem günden 3 gün öncesinden ve 3 gün sonrasına kadarki zamanı kapsayan 1 Hz veri sıklığına sahip gözlem verileri öncelikle gün gün ve deprem günü için deprem öncesi ve sonrası olacak şekilde AUSPOS servisi yardımıyla bağıl-statik olarak çözdürülmüştür. Sonrasında, deprem gününe ait olan gözlem verisi CSRS-PPP servisinin kullanımıyla PPP yöntemi ile kinematik ve statik olacak şekilde çözdürülmüştür.

Tezin Antarktika bölgesinde gerçekleştirilen kısmında ise, IGS ve UNAVCO kuruluşları tarafından kurulan GNSS ağı kapsamında yer alan BACK, BERP, BRIP, FTP4, HOWE, INMN, PHIG, PIG1, PIG2, SCTB ve VNAD GNSS istasyonlarından yararlanılmıştır. Bu istasyonların konumları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 : Antarktika kıtasında yer alan ve bu çalışma kapsamında kullanılan GNSS istasyonlarının konumları.

Bu istasyonlardan; SCTB ve VNAD, mareograf istasyonlarının yakınında konumlanmış ve VLM trendinin üretilmesinde yararlanan noktalardır. Bu istasyonların düşey hareketlerinin 1 gün aralıklı zamansal değişimleri, Nevada Jeodezik Laboratuvarı (NGL) servisinden elde edilmiştir. PPP tekniği kullanılarak çözümleri gerçekleştirilen ilgili noktaların konum verileri, NGL tarafından servis edilmektedir [26]. SCTB istasyonunun 2004 yılının 302. gününden 2019 yılının 361. gününe kadar olan 1

gün aralıklı verisi mevcuttur. VNAD istasyonunda ise 2009 yılının 92. gününden 2017 yılının 49. gününe kadar olan 1 gün aralıklı zaman serisi mevcuttur. BACK, INMN ve PIG2 istasyonlarının düşey hareketlerinin zamansal değişimleri yine NGL servisinden elde edilmiştir. Kaya üzerine tesis edilmiş olan BACK ve INMN istasyonlarının trendi ile GIA trendinin valide edilmesi amaçlanmıştır. Buz kütlesi üzerine tesis edilmiş olan PIG2 istasyonundan türetilen trend verisi ile ise, CryoSat-2 ve ICESat-2 uydu misyonlarından elde edilen buzul kalınlığının zamansal değişim verisi doğrulanmıştır. BERP, BRIP, FTP4, HOWE, INMN, PHIG, PIG1, PIG2 ve VNAD istasyonlarının 1 hafta aralıklı gözlem verilerinin GNSS-R yöntemine göre çözümüyle ise, istasyonların çevresindeki kar kalınlığı değişimlerinin zamansal değişimi türetilmiştir.

2.1.1 PPP-AR

PPP'nin mevcut formu, ilk olarak Anderle (1976) tarafından öne sürülmesine rağmen, 1997 yılında Zumberge ve diğ. tarafından ortaya konulmuştur [27,28]. O zamandan beri, PPP tekniği tüm dünyada birçok farklı bilimsel ve pratik uygulamada başarıyla kullanılmıştır [28-31]. Kullanıcıların kendi konumlarını belirleyebilmesi için tek bir GNSS alıcısı ile toplanan verilerin yeterli olması, işlem özgürlüğü sağlamakta, yöntemin uygulanmasını kolaylaştırmakta ve ölçüm maliyetini önemli ölçüde düşürmektedir. Çoklu GNSS PPP modeli için kod ve faz gözlem denklemleri aşağıda verilmiştir [32-34].

$$P_{i,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_{r,1}^S + b_{P_i}^r - b_{P_i}^S + \varepsilon \left(P_{i,r}^S \right) \quad (2.1)$$

$$\phi_{i,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + \frac{f_1^2}{f_i^2} I_{r,1}^S - \lambda_i N_i + b_{\phi_i}^r - b_{P_i}^S + \varepsilon \left(\phi_{i,r}^S \right) \quad (2.2)$$

$$f_0 = 10.23 \text{ MHz}; \quad f_1 = 154 \cdot f_0; \quad f_2 = 120 \cdot f_0$$

Denklemlerde (2.1,2.2), r GNSS alıcısını, i sinyal frekansını, S ise GNSS uydusunu (G:GPS, R:GLONASS vb.) ifade etmektedir. Bunların yanında, $P_{i,r}^S$ kod, $\phi_{i,r}^S$ faz ölçmelerini ifade etmektedir. ρ_r^S uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzunluğu, c ışık hızını, dt^r alıcı saat hatasını, dt^S uydu saat hatasını, T_r^S troposferik gecikmeyi, f_i ilgili sinyaldeki frekansı, $I_{r,1}^S$ eğik iyonosferik gecikmeyi, $b_{P_i}^r$ ve $b_{P_i}^S$ alıcı ve uydu

kod donanım gecikmesini (code hardware delays - bias), N_i tam sayı belirsizliğini, λ_i ilgili frekanstaki dalga boyu değerini (metre), $b_{\phi_i}^r$ ve $b_{\phi_i}^S$ alıcı ve uydu faz donanım gecikmesini ve ε diğer modellenemeyen hataları (çoklu yol yayılımı vs.) ifade etmektedir. İyonosferik gecikmeyi ortadan kaldırmak için, çift frekansların kombinasyonu yardımıyla, faz ve kod gözlem denklemlerinin iyonosfer-bağımsız (IF) lineer kombinasyonları üretilir [28].

$$\alpha_{IF} = \frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)}; \beta_{IF} = \frac{-f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} \quad (2.3)$$

$$P_{IF,r}^S = \alpha_{IF} P_{1,r}^S + \beta_{IF} P_{2,r}^S \quad (2.4)$$

$$\phi_{IF,r}^S = \alpha_{IF} \phi_{1,r}^S + \beta_{IF} \phi_{2,r}^S \quad (2.5)$$

$$\lambda_{IF} = \frac{2cf_0}{(f_1^2 - f_2^2)} = 6.3mm \quad (2.6)$$

$$N_{IF} = 17N_1 + 60N_{WL} \Rightarrow (N_{WL} = N_1 - N_2) \quad (2.7)$$

Sonrasında, ilgili kod ve faz denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P_{IF,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + b_{P_{IF}}^r - b_{P_{IF}}^S + \varepsilon \left(P_{IF,r}^S \right) \quad (2.8)$$

$$\phi_{IF,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + b_{\phi_{IF}}^r - b_{\phi_{IF}}^S - \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon \left(\phi_{IF,r}^S \right) \quad (2.9)$$

İyonosfer-bağımsız uydu kod ve faz biasları $b_{P_i}^S$ ve $b_{\phi_i}^S$, uydu saat hataları $cdt_{P_{IF}}^S$ ve $cdt_{\phi_{IF}}^S$ içerisinde olarak kabul edilmektedir. Buna ek olarak, alıcı saat hataları ($cdt_{P_{IF}}^r$ ve $cdt_{\phi_{IF}}^r$) da $b_{P_i}^r$ ve $b_{\phi_i}^r$ biaslarını içermektedir. Böylece saat hataları ilgili bias değerlerini kapsayacak şekilde kabul edilirse, denklemler aşağıdaki gibi olacaktır:

$$P_{IF,r}^S = \rho_r^S + cdt_{P_{IF}}^r - cdt_{P_{IF}}^S + T_r^S + \varepsilon \left(P_{IF,r}^S \right) \quad (2.10)$$

$$\phi_{IF,r}^S = \rho_r^S + cdt_{\phi_{IF}}^r - cdt_{\phi_{IF}}^S + T_r^S - \lambda_{IF} N_{IF} + \varepsilon \left(\phi_{IF,r}^S \right) \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} cdt_{P_{IF}}^r = cdt^r + b_{P_{IF}}^r; & cdt_{P_{IF}}^S = cdt^S + b_{P_{IF}}^S \\ cdt_{\phi_{IF}}^r = cdt^r + b_{\phi_{IF}}^r; & cdt_{\phi_{IF}}^S = cdt^S + b_{\phi_{IF}}^S \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} b_{P_{IF}}^r = \alpha_{IF} b_{P_1}^r + \beta_{IF} b_{P_2}^r; & b_{P_{IF}}^S = \alpha_{IF} b_{P_1}^S + \beta_{IF} b_{P_2}^S \\ b_{\phi_{IF}}^r = \alpha_{IF} b_{\phi_1}^r + \beta_{IF} b_{\phi_2}^r; & b_{\phi_{IF}}^S = \alpha_{IF} b_{\phi_1}^S + \beta_{IF} b_{\phi_2}^S \end{cases} \quad (2.13)$$

Geniş dalga boyu faz kombinasyonu ($\phi_{WL,r}^S$) aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$\begin{cases} \alpha_{WL} = \frac{f_1}{(f_1-f_2)}; & \beta_{WL} = \frac{-f_2}{(f_1-f_2)} \\ \phi_{WL,r}^S = \alpha_{WL} \phi_{1,r}^S + \beta_{WL} \phi_{2,r}^S \\ \phi_{WL,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{r,1}^S + \left(\alpha_{WL} b_{\phi_1}^r + \beta_{WL} b_{\phi_2}^r \right) \\ \quad - \left(\alpha_{WL} b_{\phi_1}^S + \beta_{WL} b_{\phi_2}^S \right) - \lambda_{WL} N_{WL} + \varepsilon \left(\phi_{WL,r}^S \right) \end{cases} \quad (2.14)$$

Dar dalga boyu kod kombinasyonu ($P_{NL,r}^S$) aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$\begin{cases} \alpha_{NL} = \frac{f_1}{(f_1+f_2)}; & \beta_{NL} = \frac{f_2}{(f_1+f_2)} \\ P_{NL,r}^S = \alpha_{NL} P_{1,r}^S + \beta_{NL} P_{2,r}^S \\ P_{NL,r}^S = \rho_r^S + cdt^r - cdt^S + T_r^S + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{r,1}^S + \left(\alpha_{NL} b_{P_1}^r + \beta_{NL} b_{P_2}^r \right) \\ \quad - \left(\alpha_{NL} b_{P_1}^S + \beta_{NL} b_{P_2}^S \right) + \varepsilon \left(P_{NL,r}^S \right) \end{cases} \quad (2.15)$$

$\phi_{WL,r}^S$ ve $P_{r,NL}^S$ eşitlikleri sayesinde atmosferik gecikme, uydu ve alıcı saat hatalarının elimine edilmesini sağlayan Hatch-Melbourne-Wüben fonksiyonu türetilmektedir (HMW) [35-37].

$$A_{HMW} = \phi_{WL,r}^S - P_{r,NL}^S = b_{A_{HMW}}^r - b_{A_{HMW}}^S - \lambda_{WL} N_{WL} + \varepsilon \left(A_{HMW,r}^S \right) \quad (2.16)$$

$$\begin{cases} b_{A_{HMW}}^r = \left(\alpha_{WL} b_{\phi_1}^r + \beta_{WL} b_{\phi_2}^r \right) - \left(\alpha_{NL} b_{P_1}^r + \beta_{NL} b_{P_2}^r \right) \\ b_{A_{HMW}}^S = \alpha_{WL} b_{\phi_1}^S + \beta_{WL} b_{\phi_2}^S - \alpha_{NL} b_{P_1}^S + \beta_{NL} b_{P_2}^S \end{cases} \quad (2.17)$$

Buraya kadar, genel PPP GNSS gözlemleri ve lineer fonksiyonları açıklanmıştır. Buradan itibaren ise, CSRS web tabanlı çevrimiçi PPP servisi ayrıştırılmış saat modeli (DCM) metoduna göre çözüm ürettiği için DCM metodu detaylandırılmıştır. Hem kod hem de faz gözlemleri için uydu saatlerini ayrı ayrı içeren DCM, Collins ve diğ.

(2010) tarafından geliştirilmiştir [38]. DCM çözümü için yukarıda türetilen denklem 2.10, 2.11 ve 2.16 kullanılmıştır.

Bu modele göre yapılacak çözümlerde parametreler sırasıyla uydu ve alıcı DCM parametreleri olarak ikiye ayrılmaktadır; $cdt_{P_{IF}}^S$, $cdt_{\phi_{IF}}^S$, b_{AHMW}^S ve $cdt_{P_{IF}}^r$, $cdt_{\phi_{IF}}^r$, b_{AHMW}^r . Çözüm bir istasyon için uygulanacak ise, bilinmeyenler sırasıyla 3 adet koordinat değeri, 3 adet alıcı DCM parametre değeri, $3n$ (n : uydu sayısı) kadar uydu DCM parametreleri, 1 troposferik gecikme ve $2(n-1) N_{WL}$ ve N_1 belirsizlikleridir. Bilinmeyen değişken sayısı fazla olduğundan, Uydu DCM parametreleri ağ çözümleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

DCM'ye göre yapılacak ağ çözümleri için öncelikle ağda bir referans istasyon seçilir ve alıcı DCM parametreleri ($cdt_{P_{IF}}^r$, $cdt_{\phi_{IF}}^r$, b_{AHMW}^r) seçilen istasyonda sıfır olarak kabul edilir, böylece ağ saat datumu belirlenmiş olur. Bundan sonra, seçilen referans istasyonunda gözlemlenen tüm uydular için N_{WL} ve N_1 belirsizlikleri rastgele tamsayı değerlerine ayarlanır. Bu işlem sayesinde referans istasyonu için belirsizlik datumu (ambiguity datum) belirlenmiş olur. Sonrasında, ağdaki başka bir istasyon için bir referans uydu belirlenir ve bu referans uydu için N_{WL} ve N_1 değerleri rastgele tam sayılara ayarlanır. Daha sonra, seçilen bu referans olmayan istasyon için tüm belirsizlik değerleri, referans uydunun N_{WL} ve N_1 değerlerine göre tahmin edilir. Ağda işlenmemiş istasyon kalmayınca kadar bu işleme devam edilir ve bu sayede ağdaki her alıcı için kendi belirsizlik datumları belirlenmiş olur.

Ağ çözümü için datum defekt değeri incelenecek olursa; m alıcı sayısını ve n uydu sayısını ifade ettiği bir varsayımda, toplam gözlem denklemi sayısı $3(m \times n)$ 'dir (Denklem 2.10, 2.11 ve 2.16). Referans istasyon için bilinmeyen değerler ise sırasıyla; 3 adet koordinat, 1 adet troposferik gecikme, 0 adet alıcı DCM parametresi ve $3n$ uydu DCM parametreleridir. Referans istasyonunu için N_{WL} ve N_1 belirsizlik değerleri yukarıda açıklandığı gibi ayarlandığından, n kadar uydu için toplamda $2n$ belirsizlik değeri bu işlem için bilinen olarak kabul edilmektedir. Ağdaki diğer $m-1$ adet referans olmayan istasyon için bilinmeyen parametreler $3(m-1)$ koordinatları, $m-1$ troposferik gecikme, $3(m-1)$ alıcı DCM parametreleri, $3n$ uydu DCM parametreleri ve $2(n-1)(m-1)$ adet belirsizlik (N_{WL} ve N_1) değeri olarak listelenebilir. Sonuç

olarak, toplamda bilinmeyen parametreler $3m$ adet koordinat, m sayıda troposferik gecikme, $3(m-1)$ alıcı DCM parametresi, $3n$ uydu DCM parametresi ve $2(n-1)(m-1)$ adet belirsizliktir. Anlamli bir dengeleme islemi yapabilmek için bu bilinmeyenlerin sayısı gözlem denklemlerinin sayısından ($3(m \times n)$) az olmalıdır [39].

Kullanıcı çözümü için ise (tek bir alıcı ile), ağ çözümü sonucunda elde edilen uydu DCM parametreleri (cdt_{PIF}^S , $cdt_{\phi IF}^S$, b_{AHMW}^S) gereklidir. Ağ çözümünde, alıcı saat datumu belirlendiği için saat datumu belirlemeye gerek yoktur. Ancak, alıcının bulunduğu konum aslında ağ çözümü dahilinde olmayan bir istasyon olduğundan, bu istasyon için de bir referans uydu seçilmeli ve belirsizlik değerleri (N_{WL} ve N_1) rastgele tamsayı değerlerine ayarlanmalıdır. Uydu DCM parametrelerini bilindiği ve referans uydunun belirsizlik değerlerinin belirlendiği bir durumda, bilinmeyen parametreler 3 adet koordinat, 3 alıcı DCM parametresi, 1 troposferik gecikme, $2(n-1)$ adet belirsizlik (N_{WL} ve N_1) değerinden oluşmaktadır. Serbestlik derecesi $3n - (3 + 3 + 1 + 2(n-1)) = n - 5$ olarak hesaplanabilir, bu nedenle DCM metoduna göre PPP çözümü gerçekleştirebilmek için minimum 5 uydu gözlemlenmelidir [40].

2.1.2 İnternet tabanlı GNSS veri değerlendirme servisleri

Teknolojinin de gelişmesiyle beraber, farklı metotlara göre GNSS çözümü sağlayan yazılımlara ulaşım kolaylaşmıştır. İşlem sürelerinin kısalması ve internet bağlantılarının gelişmesiyle birlikte web-tabanlı GNSS veri değerlendirme servislerine olan rağbet artmıştır. Tek veya çok-frekanslı statik veya kinematik GNSS verilerini PPP veya bağıl yöntem ile değerlendirebilen birbirinden farklı servisler mevcuttur. Bu çalışma kapsamında bağıl statik çözüm için AUSPOS servisi, PPP kinematik ve statik çözüm için ise CSRS-PPP servisinden yararlanılmıştır.

2.1.2.1 CSRS-PPP

Natural Resources Canada (NRCan) tarafından sağlanan CSRS-PPP hizmeti, 2003 yılından bu yana tüm dünyadaki kullanıcılara PPP çözümleri sunmaktadır [41]. CSRS-PPP, PPP gibi karmaşık bir işlem dizisini, kullanıcıların kolayca algılayabileceği bir forma indirgemıştır ve kullanıcının PPP tekniği ile ilgili teorik bilgisi olmadan bile PPP çözümünü kolayca yapmasını sağlayan web tabanlı bir

hizmettir [41]. Kullanıcıların sadece tek veya çift frekanslı GNSS gözlem verilerini (RINEX, *.zip, *.gzip, *.gz, *.z, *.YYo) yüklemeleri ile statik veya kinematik PPP çözümleri elde etmesini mümkün kılan bu servis, referans çerçevesi (NAD83 veya ITRF), işleme modu (statik veya kinematik) ve okyanus gelgit yüklemesi (OTL) dosyası gibi işleme seçeneklerini seçim olarak kullanıcılara sunmaktadır. Daha sonra belirtilen geçerli e-posta adreslerine ilgili çözümler gönderilir. İşlem aşamasında GPS ve GLONASS gözlem verilerini kullanmakta olan bu servis yakın gelecekte tüm GNSS misyonlarından ve sinyallerinden yararlanmayı planlanmaktadır [42]. CSRS-PPP servisi, 20 Ekim 2020 tarihine kadar faz başlangıç belirsizliğinin tam sayı değil kesirli bir sayı olarak kestirmekteydi. Bu tarihten sonra, CSRS-PPP sistemi CSRS PPP-AR olarak güncellenmiş ve 1 Ocak 2018 tarihinden sonraki tarihlere ait olan veriler için DCM metoduna göre faz başlangıç belirsizliğinin tam sayı olarak kestirilmesine başlamıştır [38].

PPP-AR ile santimetre düzeyinde doğruluk elde etmek için gereken gözlem süresi azalmıştır. CSRS-PPP servisi, NRCan tarafından üretilen ultra hızlı (DCU), hızlı (DCR) ve final (DCF) hassas uydu yörünge ve saat ürünleri kullanarak belirsizlik çözümlenmesi yapmaktadır. DCF ürünleri, IGS final yörünge dosyası ile NRCan tarafından üretilen saat düzeltme verilerinin birleşimidir [43]. CSRS-PPP AR, belirsizlikleri gidermek için DCM metodunu kullanmaktadır [38]. CSRS-PPP, statik veya kinematik gözlem yoluyla elde edilen çift frekanslı çoklu GNSS (GPS ve GLONASS) verilerini işleyebilmekte ve bu hesaplamaları akademik bir yazılım olan SPARK (Simon's PPP with Ambiguity Resolution using a Kalman filter) ile gerçekleştirmektedir.

2.1.2.2 AUSPOS

AUSPOS, Geoscience Australia tarafından kullanıcıların hizmetine sunulan ücretsiz bağıl-statik çözüm sağlayan bir internet-tabanlı servistir. Sadece GPS uydu sistemine ait olan çift frekanslı gözlemlerin çözümlerini gerçekleştirebilen bu servis, ilgili 30 saniye aralıklı RINEX gözlem dosyasının, anten tipinin ve anten yüksekliğinin internet arayüzündeki ilgili kısımlara eklenmesiyle çözümün üretilmesini mümkün kılmaktadır. İşlemin sonucunda; Avustralya 2020 Yermerkezli (Geocentric) Datumu

(GDA2020), Avustralya 1994 Yermerkezli Datumu (GDA94) ve Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi (ITRF) datumuna göre elde edilen koordinatları içeren raporlar kullanıcıların belirttikleri e-posta adreslerine iletilmektedir. Servis tarafından bağıl-statik metoduna göre çözüm gerçekleştirildiği için ilgili istasyona en yakın konumda bulunan maksimum 15 adet IGS veya Asya-Pasifik Referans Ağı (APREF) istasyonunu referans istasyonu olarak seçilmektedir. Hesap anında halihazırda üretilmiş olan en iyi IGS ürünleri kullanılmaktadır [44].

2.1.3 GNSS tekniğinin farklı uygulamaları

GNSS uydu misyonları sayesinde ilgili konumun 3 boyutlu koordinat değerleri farklı metotlara göre elde edilebilmektedir. Bunun yanında, GNSS gözlemlerinden yararlanılarak ilgili istasyonun hız ve ivme değerlerinin elde edilmesi, VLM değişiminin gözlenmesi ve reflektometri tekniği ile anten yüksekliğinin tespiti mümkündür.

2.1.3.1 Hız ve ivme verisinin türetilmesi

Afet bölgesindeki GNSS istasyonlarına ait kinematik olarak üretilen konum verilerinin, öncelikle sabit olarak kabul edilen koordinatlardan olan farkları hesaplanır. Bu aşamada da sabit koordinatlar ITRF96 datumu 2005.0 epoğunda bulunduğu için öncelikle ölçme datumuna ve epoğuna getirilmelidir. Sonrasında, elde edilen 3B fark değerlerinin zamansal değişiminden öncelikle hız değerleri türetilir. t_i anındaki hız (v) değeri, t_{i+1} ve t_i anlarındaki yer değiştirme (YD) değerlerinin farklarının t_{i+1} ve t_i arasındaki zaman farkına (Δt) bölümü ile elde edilmektedir (Denklem 2.18).

$$v(t_i) = \frac{YD(t_{i+1}) - YD(t_i)}{\Delta t} \quad (2.18)$$

Sonrasında, t_i anındaki ivme (a) değeri ise, t_{i+1} ve t_i anlarındaki hız (v) değerlerinin farklarının t_{i+1} ve t_i arasındaki zaman farkına bölümü ile elde edilmektedir (Denklem 2.19).

$$a(t_i) = \frac{v(t_{i+1}) - v(t_i)}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Bu tez kapsamında, ilgili zaman serilerinin, hız ve ivme parametrelerinin türetilmesi Python yazılım dili ortamında gerçekleştirilmiştir.

2.1.3.2 Düşey yer hareketi (VLM)

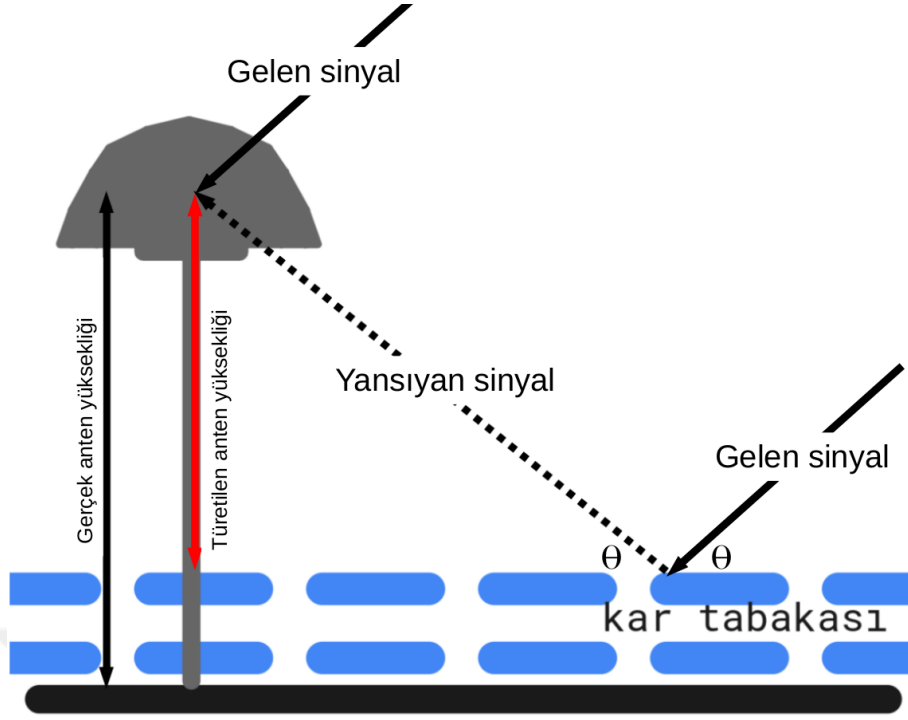
Küresel ısınmanın en önemli sonuçlarından biri olan deniz seviyesinin yükselmesinin mareograf verileri kullanılarak mutlak olarak belirlenebilmesi için kara kütlelerinin düşey hareketinin gözlenmesi büyük önem taşımaktadır [45]. VLM, kıyıdaki RSL değişimini doğrudan etkilemektedir ve tektonik aktiviteler, depremler, buzul sonrası geri tepme veya diğer aktif jeofizik süreçler gibi birçok olası tetikleyici etkeni mevcuttur. Ayrıca, ASL değerini türetebilmek için VLM ve RSL değerlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, altimetre ölçmelerinden doğrudan ASL üretilmekte ve Mareograf ile GNSS verilerinden elde edilen ASL değerleri doğrulanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Nevada Jeodezik Laboratuvarı (NGL) servisinin PPP tekniğine göre çözümler ile elde ettiği 1 gün aralıklı GNSS VLM zaman serileri kullanılmıştır. NGL, PPP çözümü için NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından geliştirilen GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software (GIPSY OASIS-II) yazılımını kullanmaktadır [26].

2.1.3.3 GNSS reflektometri tekniği

GNSS-R yöntemi, alıcıda elde edilen sinyal-gürültü oranı (SNR) varyasyonlarından türetilen ve antenin yakınındaki çevre ile ilgili kullanıcılara bilgi veren bir tekniktir. GNSS antenin altında yansıtıcılığı yüksek olan bir yüzey olması durumunda, özellikle düşük uydu yükseklik açılara sahip uydu sinyalleri bu yüzeyden yansarak alıcı antenine ulaşmaktadır. Uydu yükseklik açısının değeri düşükçe yansıyan sinyal oranı da arttığı için, bu analizin gerçekleştirilmesi aşamasında düşük uydu yüksekliğine sahip uyduların sinyallerinden yararlanılmaktadır. GNSS-R temelinde, antene doğrudan ve yansarak gelen sinyallerin arasındaki etkileşimden dolayı ortaya çıkan SNR modellerine göre yapılan bir analizdir [46]. Şekil 2.3'te GNSS-R yöntemi ile kar kalınlığının belirlenmesi görselleştirilmiştir.

Genel trendden arındırılmış SNR verisinin denklemi aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.3 : GNSS-R yönteminin şekil üzerinde gösterimi.

$$\delta SNR = A(\theta) \sin\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \phi\right) \quad (2.20)$$

Burada, h yansıyan yüzeye göre olan anten yüksekliğini, λ taşıyıcı frekansın dalgaboyunu, $A(\theta)$ uydu yükseklik açısına göre değişiklik gösteren genlik değerini, θ uydu yükseklik açısını ve ϕ faz farkını ifade etmektedir. Denklem 2.20'nin $\sin(\theta)$ 'ya göre türevinin alınmasıyla, ilgili sinüzoidal dalganın frekansı denklem 2.21'deki haliyle belirlenmektedir ve δSNR , denklem 2.21'de verilen frekans sabitinin zamana göre değişen lineer bir fonksiyonudur [47].

$$f = \frac{2h}{\lambda} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21, denklem 2.20 içerisine girdirilirse Denklem 2.22 elde edilmektedir.

$$\delta SNR = A(\theta) \sin(2\pi f \sin(\theta) + \phi) \quad (2.22)$$

$2\pi f$ açısal frekansı ifade ettiği için eşitliklerde ω ile gösterilebilir (Denklem 2.23). Denklem 2.23'e bakıldığında basit harmonik hareketin genel denklemini

$(A \sin(\omega t + \phi))$ ifade ettiği anlaşılmaktadır. Zamansal değişimi ise $\sin(\theta)$ ifade etmektedir. Sinüs fonksiyonuna bağlı olarak uydu yükseklik açısı arttıkça fonksiyonun değeri de artmaktadır.

$$\delta SNR = A(\theta) \sin(\omega \sin(\theta) + \phi) \quad (2.23)$$

Sonrasında, denklem 2.23'ten elde edilen değer trendden arındırılmış halinden yararlanılır ve tersine hesap yapılır (Denklem ??). Uydu yükseklik açısı θ bilindiği için Lomb Scargle Periodogramı kullanılarak baskın frekans değeri bulunmakta ve sonrasında ilgili zamandaki anten yüksekliği hesaplanmaktadır [46].

$$h = f\lambda \quad (2.24)$$

Bu çalışma kapsamında ise, anten çevresindeki kar yüksekliğinin zamansal değişimi arandığı için, gerçek anten yüksekliği değerinden, elde edilen h değerleri çıkartılarak ilgili zamandaki kar yüksekliği hesaplanmıştır.

2.2 Kuvvetli Yer Hareketi Sensörü Verileri

SGMS, koordinat sisteminden bağımsız olarak sabitlendiği istasyonda, üç yöndeki anlık ivme değerini yüksek frekansla ölçen bir jeosensördür. Bu jeosensörlerin maliyetinin düşük ve ölçme doğruluklarının yüksek oluşu, SGMS ağlarının afetlerin gözlenmesindeki önemini arttırmaktadır. Ülkemizde AFAD tarafından yönetilen SGMS ağı ise TADAS ağı olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, Sisam depreminin merkez üssü yakınlarında yer alan Çeşme ve Konak istasyonlarının 0.01 saniye aralıklı (100 Hz) verilerinden yararlanılmıştır.

2.2.1 Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi (TADAS)

TADAS ağı ülke çapında homojen olarak dağılmış 0.01 saniye aralıklı (100 Hz) veri kaydetme özelliğine sahip 795 adet SGMS istasyonundan oluşmaktadır. Gerçekleşen depremler sonucunda anlamlı hareketlerin gözlemlendiği istasyonlarda yer değiştirme, hız ve ivme verilerinin yanında, deprem parametrelerinin çözümleri oluşturularak

kullanıcılara sunulmaktadır. Bunun yanında, ham ivmeölçer verileri de kullanıcılar ile paylaşılmaktadır [48].

2.2.2 Ham ivme verisinden hız ve yer değiştirme verisi türetilmesi

Lineer olarak belirli bir andaki (t_i) hız değerinin kestirimine, başlangıç hız değeri sıfır olarak ($v_{t_0} = 0$) kabul edilerek hesaplamaya başlanır. t_i anındaki hız ($v(t_i)$) değeri, $v(t_{i-1})$ anındaki hız değerine $a(t_{i-1})$ anındaki ivme değerinin aradaki zaman farkı (Δt) ile çarpımının eklenmesi ile elde edilir (Denklem 2.25).

$$v(t_i) = v(t_{i-1}) + a(t_{i-1}) \cdot \Delta t \quad (2.25)$$

Sonrasında, t_i anındaki yer değiştirme ($YD(t_i)$) değeri ise, $YD(t_{i-1})$ anındaki yer değiştirme değerine $v(t_{i-1})$ anındaki hız değerinin aradaki zaman farkı (Δt) ile çarpımının eklenmesi ile elde edilir (Denklem 2.26).

$$YD(t_i) = YD(t_{i-1}) + v(t_{i-1}) \cdot \Delta t \quad (2.26)$$

2.3 Deniz Seviyesi Ölçmeleri

Bu tez çalışması içerisinde yer alan iki farklı çalışmada da deniz seviyesi gözlemlerinden yararlanılmıştır. Sisam depremi örneğinde, deprem üssü açık denizde olduğu için depremin şiddetiyle oluşan deniz seviyesi değişiminin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Deprem sonrasında özellikle Sisam adasında ve İzmir ili kıyılarında deniz seviyesinde yükselme yerel halk tarafından farkedilmiş ve maalesef maddi hasara yol açmıştır. Çalışmada deprem bölgesine en yakın ve açık deniz havzasında bulunan 3 adet mareograf istasyonunun verileri kullanılmıştır. Kos, Plomari ve Syros adalarında yer almakta olan bu istasyonların isimleri sırasıyla IDSL-41, IDSL-25 ve Syros'tur. IDSL-25 ve 41 istasyonlarının verileri Avrupa Birliğine (EU) bağlı olarak hizmet veren Joint Research Centre (JRC) tarafından yönetilen veri servisinden elde edilmiştir. Syros istasyonunun verisi ise Intergovernmental Oceanographic Commission Sea Level Station Monitoring Facility (IOC SLSMF [49]), servisi kullanılarak elde

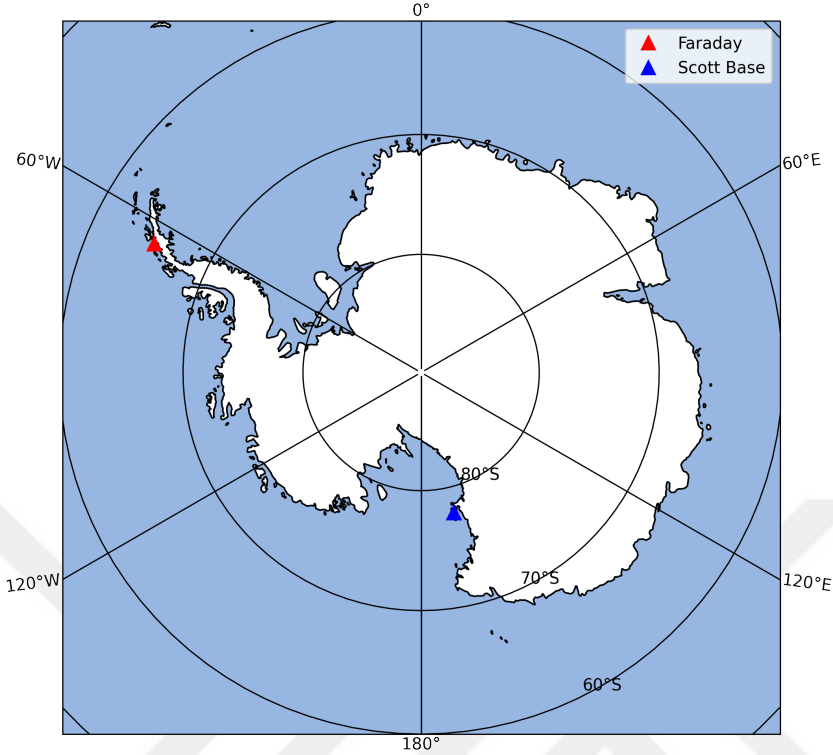
edilmiştir. İstasyonların konumları ve deprem üssü (kırmızı yıldız) Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 : IDSL-41, IDSL-25 ve Syros mareograf istasyonlarının konumları (kırmızı yıldız, deprem üssünü göstermektedir).

Çalışmanın Antarktika kısmında ise, mareograf istasyonlarından elde edilen bağıl deniz seviyesi değişim trendleri ve GNSS zaman serilerinden elde edilen VLM trend değerlerinden türetilen mutlak deniz seviyesi değişimi ile altimetre misyonları ile elde edilen mutlak deniz seviyesi değişimi valide edilmiştir. Hawaii Üniversitesi Deniz Seviyesi Merkezinin (UHSLC) kullanıcıların erişimine açık olan veri servisi kullanılarak, 2 farklı mareograf istasyonunun zaman serisi bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Faraday istasyonunun 1993 ile 2019 yılları arasında, Scott Base

isyasyonunun ise 2001 ile 2008 yılları arasını kapsayan verileri ilgili servisten edinilmiştir. Faraday ve Scott Base istasyonlarının konumları Şekil 2.5’te verilmiştir.



Şekil 2.5 : Faraday ve Scott Base mareograf istasyonlarının konumları.

2.3.1 Bağlı ve mutlak deniz seviyesi

Bağlı deniz seviyesi değişimi, okyanusun yüksekliğinin belirli bir konumdaki karaya göre değişimini ifade ederken, mutlak deniz seviyesi değişimi okyanus yüzeyinin seçilen belli bir küresel referans yüzeyine göre (referans elipsoidi vs.) göre olan yüksekliğini ifade etmektedir yani mutlak deniz seviyesi yakınındaki karaların düşey hareketinden bağımsızdır. Bu tanımdan yola çıkılacak olursa, mareograf istasyonlarından elde edilen veri bağlı deniz seviyesi (*RSL*) ve uydu altimetresinden elde edilen veri mutlak deniz seviyesi (*ASL*) olarak tanımlanabilir. İki deniz seviyesi arasındaki dönüşüm ise GNSS gözlemleri ile elde edilecek olan *VLM* verisi ile sağlanabilmektedir [10,50]. GNSS ve mareograf ölçmelerinden türetilecek *ASL* değeri denklem 2.27’de verilmiştir.

$$ASL = RSL + VLM \quad (2.27)$$

2.4 İnterferometrik SAR

SAR uyduları, dünya yüzeyini görüntülemek için mikrodalga sinyaller kullanan aktif sensörlerdir. SAR görüntüsünün bir pikseli, yeryüzünden geri saçılan sinyalin genlik ve faz bilgilerini içerir. SAR sinyalinin genlik değeri ilgili yüzeyin sensöre göre olan oryantasyonunu, yüzeyin yapısını (pürüzlülük) ve yüzeyin dielektrik özelliklerini ifade eder. Faz değeri ise sinyalin dalgaboyu ve sensör-yüzey arası mesafenin oranı ile ilgilidir. Mesafe farkı değerlerinin elde edilebilmesi için, çalışma alanını kapsayan iki veya daha fazla SAR görüntüsünün birleştirilmesi sonucunda oluşan faz farkı (interferogram) görüntülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iki veya daha fazla SAR görüntüsünden, referans olarak alınan görüntüye Master denirken, konum değişiminin arandığı diğer görüntülere ise Slave denilmektedir. İnterferometrik faz (Φ), dalga boyuna (λ) ve; hedefin referans yüzeyine göre olan yüksekliğine (δR_T), iki farklı zamandaki uydu geçişi arasındaki yörünge farklılıklarına ve hedefin yüksekliğindeki değişime (δR_D), atmosfer sebebiyle oluşan kırılma indisine (δR_A) ve diğer dekoherasyon (δR_N) kaynaklarına bağlıdır. Bu parametrelerin yardımıyla, iki farklı uydu geçişinde elde edilen sensör-hedef mesafelerinin farkı elde edilmektedir. InSAR yöntemi ile bir hedefin iki farklı zaman içerisindeki konumsal değişiminin (deformasyonunun) yüksek doğrulukta elde edilebilmesinde, topografya kaynaklı olası hataları ortadan kaldırmak için yükseklik modellerinden yararlanılmaktadır [51,52].

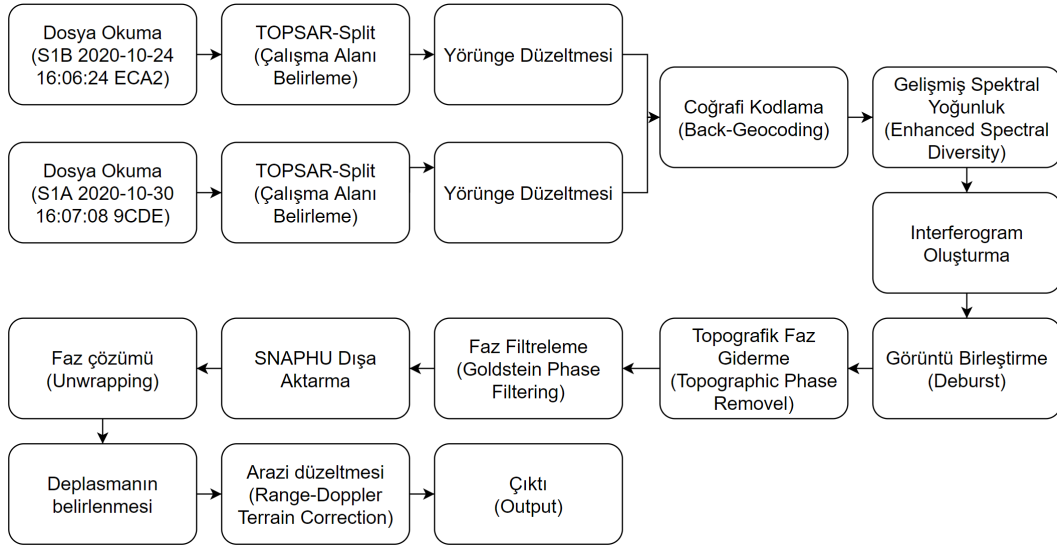
$$\Phi = \frac{4\pi}{\lambda} (\delta R_T + \delta R_A + \delta R_D + \delta R_N) \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'den de anlaşılacağı üzere, elde edilen faz farkı, 2π 'nin katları olarak bulunmaktadır. Basit harmonik harekette $\frac{2\pi}{\lambda}$ ile yer değiştirme miktarı çarpıldığında dalga sayısı elde edilmektedir. Bu kapsamda oluşacak olan interferogram görüntüsündeki her saçak (fringe) 1 tam dalgayı ifade etmektedir. Faz farkını gösteren interferogramdan yer değiştirme değerlerine geçiş isteniyorsa, saçakların odak noktası itibariyle her saçak 2π değerinin katları ile çarpılmalıdır. Sonrasında da, elde edilen görüntü global koordinat sistemine yerleştirilir.

Çalışmanın bu kısmında, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yönetilen Copernicus Sentinel-1 A/B uydularının verileri kullanılarak InSAR tekniği ile deprem sonucu

oluşan yüzeydeki yer değiştirmelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deprem anından önceki en son veri olan Sentinel-1B uydusu tarafından 24/10/2020 tarihinde elde edilen SAR görüntüsü Master olarak seçilmiş olup, depremin hemen ardından Sentinel-1A uydusu tarafından elde edilen SAR görüntüsü ise Slave olarak seçilmiştir. Bu veriler ESA tarafından yönetilen Sentinel Open Access Data Hub sitesinden ücretsiz olarak indirilmiştir. Birinci görüntü, Sentinel-1B'nin 24 Ekim 2020 saat 16:06:24'de deprem üssü üzerinden geçişi esnasında elde edilmiştir. İkinci görüntü ise, Sentinel-1A tarafından 30 Ekim deprem günü saat 16:07:08'de yani deprem saatinden sonraki zaman dilimi içerisinde edinilmiştir. Sentinel-1 uydusunun işlenmesi ile elde edilen seviye 1 Tek Bakış Karmaşık (Level-1 SLC) SAR verileri, açık kaynak kodlu bir yazılım olan Sentinel Uygulama Platformu (SNAP) kullanılarak işlenmiştir. Sentinel-1 SLC IW verisi kompleks bir veri seti olduğu için 3 dikey şerit (swath) ve yatay şeritlerden (burst) oluşmaktadır. İşlemin ilk adımında, 2 farklı görüntü için de çalışma bölgesini içeren swath ve burstler belirlenir ve yörünge düzeltmeleri getirilir. Sonrasında her iki görüntü de coğrafi koordinatlara dönüştürölür ve üst üste bindirilmiş olur. Gelişmiş Spektral Çeşitlilik (ESD) yöntemi ile mesafe ve azimut iyileştirmesi yapılır. Sonrasında, interferogram elde edilir fakat henüz farklı burstler birleştirilmediği için yatay olarak kesiklikler mevcuttur. Bu yatay kesiklikler, Deburst işlemi ile giderilir ve Topografik Faz etkisinin giderilmesi işlemi yapılır. Gürültülü fazı yumuşatmak için Goldstein faz filtresi kullanılır. Unwrapping işlemini gerçekleştirmek için ise, açık kaynak kodlu SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping) yazılımı kullanılmaktadır. SNAPHU işlemi sonucunda elde edilen yer değiştirme haritasının birimi fazdan metreye dönüştürölmelidir. Son olarak ise DEM modelinden yararlanılarak arazi düzeltmesi yapılır ve uydu bakış doğrultusuna (LOS) göre olan yer değiştirme haritası üretilmiş olur. Bu işlemlerin iş akış diagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmı olan Antarktika çalışmasında ise, CryoSat-2 uydu misyonunun SAR İnterferometrik (SARin) modundan yararlanılmış ve kara üzerinde bulunan buzulların yüksekliklerinin değişimi incelenmiştir. Cryosat-2 uydu misyonuna ait buzul bölgelerini içeren SARin verileri ESA tarafından servis edilmektedir ve 2010 ile 2021 arasını kapsayan aylık çözümler grid veri formatında yayınlanmaktadır [13].



Şekil 2.6 : SNAP iş akışı diagramı.

Bu verilerden yararlanarak, Pine adası buzulunun zamansal değişimi incelenmiş ve trend değeri elde edilmiştir.

2.5 Uydu Altimetresi

Uydu altimetresi, radar teorisinin genel prensibi ile çalışmaktadır, yani uydudan gönderilen sinyalin yeryüzünden yansıyıp geri dönmesi arasında geçen zaman farkından uydu ile yer arasındaki mesafe türetilmektedir (Denklemler 2.29).

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (2.29)$$

Uydu altimetre misyonlarının ana amacı, deniz yüzeyi yüksekliğinin (SSH) değişimini incelemektir. Bunun yanında, elde edilen ölçmelerle farklı disiplinleri kapsayan çeşitli çalışmalar için farklı bilgiler türetilmektedir.

Bu çalışma kapsamında ise, deniz seviyesinin ortalama deniz seviyesine göre olan değişimini ifade eden deniz seviyesi anomalilerinin (SLA) zamansal değişimi verilerinden yararlanılmıştır. Veri kümesi, eş zamanlı olarak 2 farklı uydu grubundan elde edilen grid verilerden oluşmaktadır. İlk uydu kümesi, TOPEX/Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2 veya Jason-3'ten; diğer uydu kümesi ise: ERS-1, ERS2, Envisat, AltiKa, Cryosat-2 ve Sentinel 3A'dan oluşmaktadır. Bu uyduların kullanım süreleri ve aktif oldukları zaman dilimleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Veri kümesinde yararlanılan uydu misyonları.

Tarih	1. Uydu Grubu	Tarih	2. Uydu Grubu
1992-2002	TOPEX / Poseidon	1992-1995	ERS-1
2002-2008	Jason - 1	1995-2002	ERS-2
2008-2016	Jason - 2	2002-2010	Envisat
2016- ...	Jason - 3	2010-2013	CryoSat-2
		2013-2016	AltiKa
		2016- ...	Sentinel 3A

Bu uydu misyonlarından elde edilen veriler Goddard Uzay Uçuş Merkezi (NASA Goddard Space Flight Center) tarafından işlenip, PO-DAAC (NASA The Physical Oceanography Distributed Active Archive Center) servisi tarafından MeaSURES projesi kapsamında kullanıcılara yayınlanmaktadır. Her iki uydu grubundan elde edilen grid verilerden, ayrı ayrı iki uydu grubu için de günlük global ortalama deniz seviyesi yükseklikleri ($GMSL_1$ ve $GMSL_2$) hesaplanmaktadır. Sonrasında, ilgili gündeki $GMSL$ değerini elde edebilmek için, $GMSL_1$ ve $GMSL_2$ 'nin 19 günlük değerlerinin (günlük $GMSL$ için istenen tarihte ortalanarak) ortalaması hesaplanmaktadır. Sonrasında, 2. uydu grubu tarafından elde edilen günlük SSH verisi (h'_2) $GMSL_1$ ve $GMSL_2$ değerlerine göre oranlanır:

$$h_2 = h'_2 + \frac{GMSL_1}{GMSL_2} \quad (2.30)$$

Sonrasında elde edilen h_2 SSH değerinden 1993 ile 2018 yılları arasındaki verileri kapsayan ortalama deniz seviyesi yüksekliği çıkartılır ve ilgili grid ve zamandaki SLA değeri elde edilmiş olur (Denklem 2.31) [23].

$$h = h_2 - \bar{h}_{1993-2018} \quad (2.31)$$

ICESat-2 uydu misyonu, 2003 ile 2009 yılları arası hizmet veren ICESat uydusunun devamı niteliğindedir. Özellikle kutup bölgelerine yönelik hizmet vermesi beklendiği için yörünge eğikliği 92° olarak belirlenmiştir. Zamansal çözünürlüğü ise 91 gündür. ICESat-2, buzulların ve deniz buzu gibi çeşitli değişkenlerin yüksekliklerinin ölçülmesine olanak tanıyan bir lazer altimetre uydusudur. ICESat-2 uydusunun üzerinde ilgili ölçmeleri gerçekleştiren Gelişmiş Topografik Lazer Altimetre Sistemi

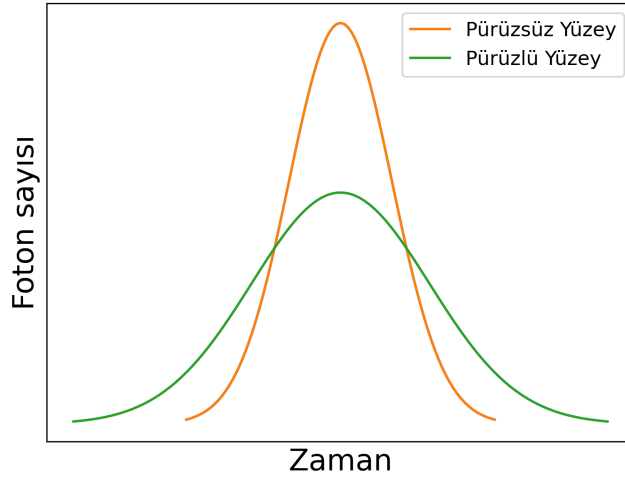
(ATLAS) mevcuttur. Bu uydu misyonu tarafından kullanıcılara servis edilen veriler ATL kısaltması ile isimlendirilmektedir ve ATL00'dan ATL21'e kadar (ATL05 hariç) toplamda 21 farklı ürün mevcuttur. ATL veri çeşitleri Çizelge 2.2'de verilmiştir [53].

Çizelge 2.2 : ICESat-2 veri türleri.

Veri Türü	Açıklama
ATL00	Ham veri
ATL01	Formatlanmış Veri
ATL02	Bilimsel birime dönüştürülmüş ham veri
ATL03	Koordinatlandırılmış foton verisi
ATL04	Normalize edilmiş geri saçılım profil verisi
ATL06	Karasal buz yüksekliği
ATL07	Deniz buzu yüksekliği
ATL08	Bitki yüksekliği
ATL09	Kalibre edilmiş geri saçılım profil verisi
ATL10	Deniz buzu derinliği
ATL11	Karasal buz yüksekliği zaman serisi
ATL12	Okyanus yüksekliği
ATL13	İç (inland) suların yüksekliği
ATL14	Gridlenmiş karasal buz yüksekliği verisi
ATL15	Buz kütlelerinin zamansal değişim oranı
ATL16	Haftalık atmosferik veri
ATL17	Aylık atmosferik veri
ATL18	Gridlenmiş meşcere yükseklik verisi
ATL19	Ortalama okyanus seviyesi
ATL20	Gridlenmiş deniz buzu derinliği
ATL21	Deniz buzu örtüsünün içerisindeki gridlenmiş deniz yüzeyi yüksekliği

ATLAS ölçme sistemi, dönen fotonların uyduya dönüşündeki zaman aralığını hesaplamaktadır. Bu çalışma prensibine göre, düz bir zeminden yansıyan ilk foton ile son foton arasındaki süre birbirine yakın iken, pürüzlü ve eğik yüzeylerden yansıyan fotonların uyduya ulaşma süresi arasındaki fark artmaktadır. Uyduya ulaşan fotonların zamana göre grafiğini normal dağılım olarak düşünecek olursak, pürüzsüz yüzeyden yansıyan fotonların dağılımının standart sapması küçük olurken, diğerlerinin standart sapması yüksek olacaktır [53]. Şekil 2.7'de zamana bağlı olarak değişen ICESat-2 foton dağılımları görselleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, ICESat-2 ATL06 karasal buz yüksekliği verisi kullanılmıştır. ATL06 verisi, ATL03 verisinin işlenmesi ile türetilmektedir. ATL03 verisi coğrafi olarak koordinatlandırılmış foton verilerini içermektedir. Bu veri içerisinden, buz



Şekil 2.7 : ICESat-2 foton grafiği.

tabakasından yansıyan foton karakteristiğine uygun olan aralıklar içerisinde düşen fotonlar seçilmekte ve yükseklik değişimleri ATL06 verisi adı altında paylaşılmaktadır [53].

2.6 Gravite Uydu Sistemleri Verileri (GRACE ve GRACE-FO)

Dünya gravite alanını ve zamansal değişimlerini yüksek doğrulukla ölçmeyi amaçlayan GRACE uydu misyonu 17 Mart 2002'de yörüngeye yerleştirilmiştir. Elde edilen yüksek doğruluklu gravite verileri ile kara, deniz ve buzullardaki su rezervlerinin takibine imkan sağlamıştır. GRACE gravite uydu misyonu, kütle değişimleri ile doğrudan ilgili olduğu için, dünyanın direkt olarak gravite değerinden ziyade, gravite alanındaki değişimlerini belirler. GRACE uydu misyonu, NASA ve DLR uzay ajansları tarafından yürütülen bir projedir. Bu çerçevede GRACE uzay araştırmaları, University of Texas - Center for Space Research (UT-CSR) ve German Research Centre for Geosciences (GFZ) tarafından yürütülmektedir [54]. GRACE misyonu 5 yıl için tasarlanmış olmasına rağmen 2017 yılı sonuna kadar yörüngede kalmış ve yerini 2018 Mayıs itibariyle GRACE-FO misyonuna bırakmıştır.

GRACE uydu misyonu, aralarında 220 ± 50 km başlangıç mesafesi olacak şekilde tasarlanmış, ekvatora göre 460 km yükseklikte ve 89° eğimli dairesel bir yörüngede serbestçe hareket edebilen 2 adet özdeş (ikiz) uydudan oluşmaktadır [55]. Bu iki

uydu arasındaki mesafeyi ölçmek için tasarlanan mikrodalga ultra hassas mesafe ölçme sistemi (KBR - K-bant mesafe ölçüm sistemi), 10 mikrometre doğruluk sağlamaktadır [56]. KBR sistemine ek olarak, ikiz uydular üzerindeki gravite dışındaki kuvvetleri algılamak için; yüksek doğruluklu osilatörler (Ultra Stable Oscillator - USO), uyduların yıldızlara göre konumunu belirleyen yıldız kameraları (Star Camera Assembly) ve ivmeölçerler, gibi farklı ölçüm cihazları bulunmaktadır. Ayrıca, üzerlerinde uydulara enerji sağlayan güneş panelleri (Globalstar Silicon Solar Cell Arrays) ve 3B konum elde edebilmek için kullanılan çift frekanslı GPS alıcıları bulunmaktadır [57].

GRACE ölçme prensibine göre: ikiz uydular eğer güçlü bir gravite alanının üzerinden geçiyorlarsa, bu alandan geçen ilk uydu graviteden etkilenir ve takip eden uydunun biraz daha ilerisine çekilir. Bu gravite kuvveti, ikiz uyduların birbirinden uzaklaşmasına neden olduğu için uydu çifti arasındaki iç mesafe artar. İkinci uydu gravite değişim noktasından geçtikten sonra ise ikiz uydular birbirine yaklaşır [58]. Bu aradaki mesafe değişimi sayesinde gravite alanındaki değişimler türetilabilmektedir.

GRACE Bilimsel Veri Sistemi (SDS), GRACE verilerinin işleme, geliştirilme ve arşivlenme süreçleri için oluşturulmuş ve JPL, GFZ ve UT-CSR kurumları tarafından yönetilmektedir. SDS veri sistemi 4 farklı veri setinden oluşmaktadır: Seviye-0, Seviye-1, Seviye-2 ve Seviye-3 (Kütle Konsantrasyon Blokları - Mass Concentration blocks - mascon). Seviye-0 verileri, Almanya'daki DLR merkezi tarafından toplanan ve işlenmek üzere SDS merkezlerine gönderilen ham uydu telemetri verileridir. Bu verilerde K-bandı ham verileri, GPS sistemine göre elde edilen yörünge bilgileri ve ham ivmeölçer verileri mevcuttur [59]. Seviye-1 verileri ise, Seviye-1A ve Seviye-1B olarak ikiye ayrılmaktadır. Seviye-1A ürünleri, Seviye-0 verisine sensör kalibrasyon faktörü eklenerek Seviye-0 verisinin ikili sayı sistemi (binary) formatına dönüştürülmüş halidir. Seviye-1B ürünleri, Seviye-0 verilerine zaman bilgisinin eklendiği işlenmiş telemetri verilerinden oluşmaktadır [60]. Seviye-1 ürünlerinin işlenmesiyle elde edilen Seviye-2 verileri ise, gravite değerini ve standart sapmalarını belirleyen küresel harmonik katsayılarından oluşmaktadır. Ayrıca Seviye-2 verileri, uydunun yere çok yakın olmasından kaynaklanan atmosferik etkiler, dünyanın gelgit etkileri gibi sistematik etkilerden temizlenmiş olarak servis edilmektedir. Mascon

(Seviye 3) ürünleri sayesinde ise, bir bölgeyi ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) ifade eden gridler halinde gravite/kütle değişiminin doğrudan tespiti mümkündür. Standart küresel harmonik yaklaşım yerine mascon veri kullanımı ile veriyi filtreleme işlemine gerek duymaksızın analiz etmek mümkündür. Grid halinde servis edilen bu verilerin, kıyı şeritlerini içeren gridlerinde hem kara hem okyanus sinyalleri bulunmaktadır. Bundan dolayı, SDS kapsamında Kıyı Şeridi Çözünürlük İyileştirme (CRI) filtresi uygulanmış Seviye-3 verileri mevcuttur. Bu çalışma kapsamında da, EWT değerinin zamansal değişimi JPL kuruluşu tarafından servis edilen CRI filtresi uygulanmış RL06 Seviye-3 verileri kullanılmıştır [61]. RL06 veri kümesinin 2002 ile 2022 yılları arasındaki Antarktika kıtasındaki aylık ortalama kütle değişim değerleri, NASA tarafından kullanıcılara servis edilmektedir. Bu veri kümesine göre, Antarktika kıtasındaki kütle değişimi trend değerinin -152.20 ± 39.00 Gt/yıl olduğu ortaya konulmaktadır [62].

2.6.1 Eşdeğer su kalınlığı

Tez çalışmasının ikinci kısmını oluşturan Antarktika çalışmasında GRACE verilerinden yararlanılmıştır. İlk olarak, GRACE uydu misyonu verilerinden türetilerek elde edilen eşdeğer su kalınlığının (EWT) zamansal değişim verilerinden yararlanılmış ve çalışma alanlarındaki buzul kütle kaybı trendinin türetilmesi amaçlanmıştır. Denklem 2.32’de verilen yüzey yoğunluk değişimi fonksiyonunun ortalama su yoğunluğuna ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) bölümü ile EWT değeri türetilmektedir [63].

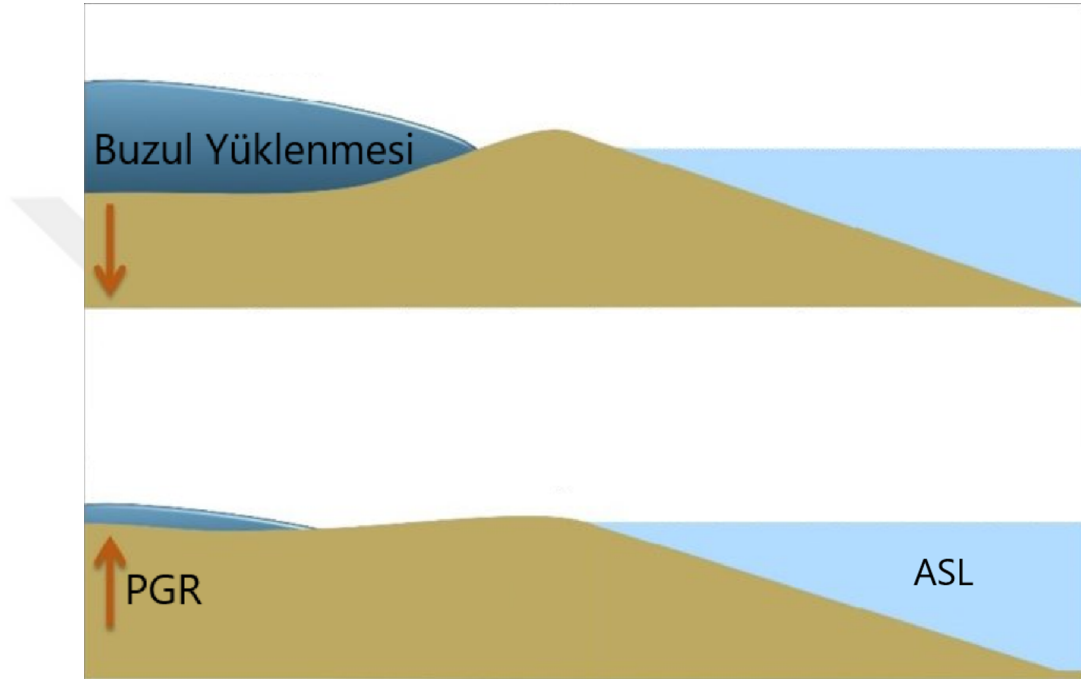
$$\Delta\sigma(\theta, \lambda) = a \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \hat{P}_{lm} \cos(\theta) (\Delta\hat{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \Delta\hat{S}_{lm} \sin(m\lambda)) \quad (2.32)$$

Bu denklemde; $\Delta\hat{C}_{lm}$ ve $\Delta\hat{S}_{lm}$ küresel harmonik katsayıları, l ve m sırasıyla küresel açılımın derecesini ve mertebesini, a dünyanın yarıçapını, θ ve λ ilgili konumun enlem değerinin 90° ’ye göre olan farkı ile boylamını ve \hat{P}_{lm} normalize edilmiş Legendre fonksiyonunu ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında da, NASA tarafından servis edilen 2010 ile 2021 arasına ait olan CRI filtresi geçirilmiş EWT verilerinden yararlanılmıştır [21]. EWT verilerinden elde edilen trend değerleri ile; CryoSat-2 ve ICESat-2 karasal buz kütle değişimi trendleri ve GNSS istasyonlarından elde edilen VLM trendleri karşılaştırılmıştır.

2.6.2 Buzul sonrası geri tepme

Yer kabuğu, manto tabakasının üzerinde bulunduğu için ve manto tabakası, viskozitesi çok yüksek bir plazma yapı olmasından dolayı, kara kütlelerindeki kütle değişimi sonucunda çok yavaş bir hızla olmasına rağmen yukarı yönlü bir hareket söz konusudur (Şekil 2.8). Bu söz konusu dengeye buzul izostatik denge (GIA), buzul kütlelerinin erimesi sonucunda oluşan karalardaki harekete ise buzul sonrası geri tepme (PGR) veya izostatik geri tepme denilmektedir [64].



Şekil 2.8 : Temsili PGR çizimi.

Bu kapsamda GIA modelleri; son buzul maksimum dönemindeki buzul dağılımı ile bu buzulların erime zamanına ve manto tabakasının viskozite profiline bağlı olarak değişim göstermektedir [65]. Bu düşey hareket, özellikle direk olarak kütle değişiminin türetilmesini amaçlayan GRACE uydu misyonunu bozucu niteliktedir. Bundan dolayı, elde edilen global GIA modellerinin etkisi, GRACE verilerinden çıkartılarak servis edilmektedir [66]. Farklı yaklaşımlarla üretilen çeşitli GIA modelleri mevcuttur. GRACE gravite misyonu ve çeşitli altimetre misyonları (ICESat, CryoSat vb.) gibi jeodezik yöntemlerin kullanımıyla da GIA modelleri üretilmektedir [67]. Bu modellerin yanı sıra, jeofiziksel yöntemlerin kullanımıyla üretilen modeller de vardır. Jeofiziksel modellerden biri olan ve GRACE verilerine

düzeltilme olarak eklenen ICE-5G GIA zamansal kütle değişimi verisi, bu çalışma kapsamında kullanılmıştır [17,22]. ICE-5G GIA modelinin oluşturulma aşamasında kullanılan parametreler Çizelge 2.3'te verilmiştir [66].

Çizelge 2.3 : ICE-5G GIA modelinin parametreleri.

GIA Modeli	ICE-5G
Litosfer Kalınlığı	90 km
Üst Manto Viskozitesi	$9 \cdot 10^{20}$ Pa·s
Alt Manto Viskozitesi	$3.6 \cdot 10^{21}$ Pa·s
Son Buzul Dönemi Maksimumundan Günümüze Östatik Deniz Seviyesinin Değişmesine Katkı	17.3 m
Antarktika Buzullarının Azalmasının Başlangıç/Bitiş Zamanı	9000 yıl önceden 4000 yıl önceye

Çalışma kapsamında, GIA değerinin zamansal kütle değişimi oranı ile kaya üzerinde konumlandırılmış GNSS alıcılarının düşeyde yaptıkları zamansal değişimin trendleri karşılaştırılmıştır.

3. UYGULAMA

3.1 Sisam Depremi Örneği

Önceki başlıkların altında da bahsedildiği gibi, 30 Ekim 2020 yerel saat ile 14:51:24'te (11:51:24 UTC) gerçekleşen Sisam Depreminin jeosensörlerle incelenmesi, ilk olarak GNSS yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, TUSAGA-Aktif ağında bulunan AYD1, CESH, DIDI ve IZMI GNSS istasyonlarının deprem öncesindeki ve sonrasındaki üçer günü de içeren toplamda 7 günlük, 1 saniye aralıklı aralıklı (1 Hz) gözlem verilerinden yararlanılmıştır. İlk olarak, deprem öncesi ve sonrasına ait olan gözlem verilerinin CSRS-PPP web tabanlı servis kullanılarak PPP-AR statik yöntemine göre konum farkları hesaplanmış ve bu değerler izelge 3.1'de verilmiştir.

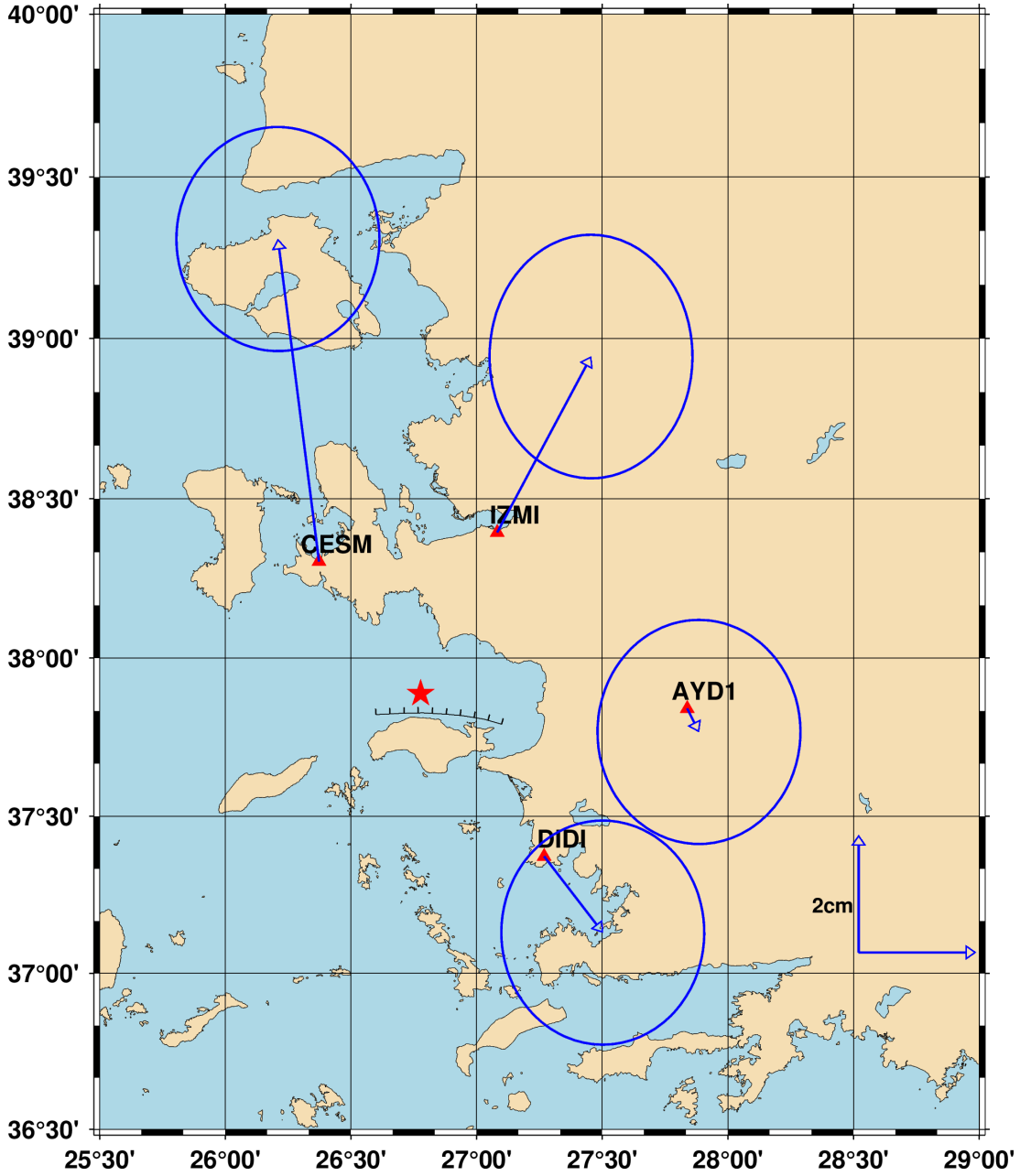
Çizelge 3.1 : CSRS-PPP Statik deprem öncesi ve sonrası farkları.

ID	ΔE (cm)	ΔN (cm)	Δh (cm)	$\Delta 2B$ (cm)
IZMI	1.6	3.0	-1.9	3.4
CESM	-0.7	5.0	-2.0	5.0
DIDI	1.0	1.3	-2.8	1.6
AYD1	0.2	-0.4	0.8	0.4

Çizelge 3.1'den elde edilen ko-sismik deformasyon vektörleri ve %95 güven aralığına göre oluşturulmuş hata elipsleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Şekil 3.1 incelendiğinde, CESH ve IZMI istasyonlarında anlamlı deformasyonların oluştuğu söylenebilmektedir. Sonrasında, yine CSRS-PPP servisinden yararlanılarak 4 GNSS istasyonunun deprem gününe ait olan gözlem verileri kinematik olarak çözdürülmüştür. Sonrasında, sabit koordinatların hesaplandığı ITRF96 datumu ve 2005.0 epoğuna taşınmıştır [25]. Elde edilen konum değerlerinin, istasyonların sabit koordinatlarına göre olan farklarının istatistikleri izelge 3.2'de verilmiştir.

AUSPOS servisi kullanılarak, rölatif statik yöntem ile deprem gününe ait 2 farklı gözlem verisi (deprem saati öncesi ve sonrasını kapsayan 2 farklı gözlem verisi) ile deprem günü öncesi ve sonrasındaki 3'er güne ait olan toplam 8 gözlem verisinin



Şekil 3.1 : GNSS istasyonlarının %95 güven aralığındaki ko-sismik deformasyon vektörleri.

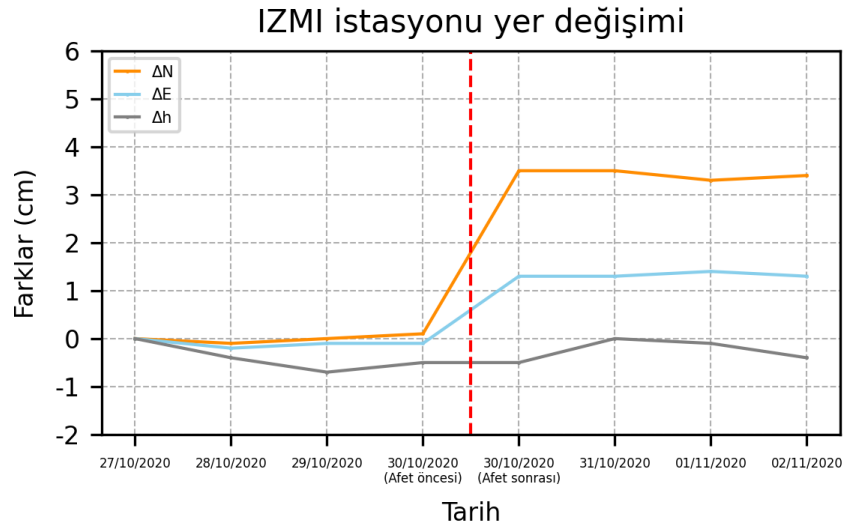
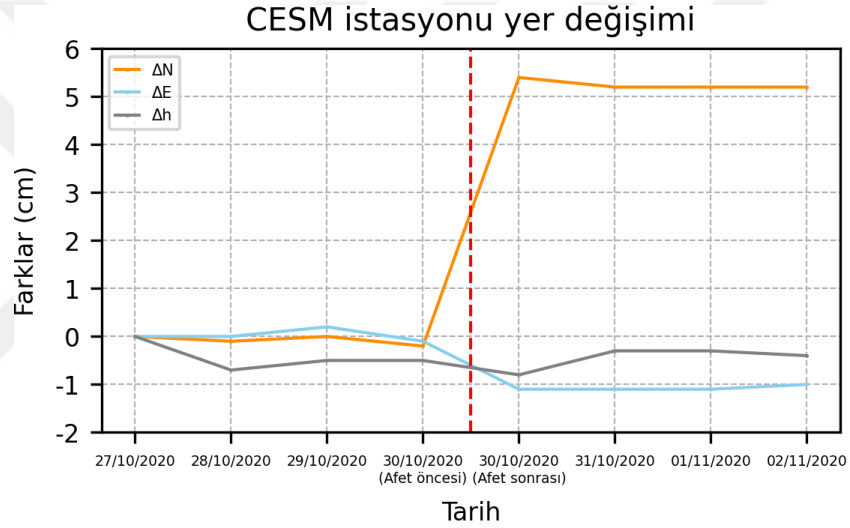
CESM ve IZMI istasyonları için çözümleri yapılmış ve konum değişiklikleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

PPP-Statik yöntemi ile belirlenen deformasyon vektörlerine göre anlamlı deformasyon değerlerinin saptandığı CESM ve IZMI istasyonları için, PPP kinematik çözümlerden elde edilen konum ve yükseklik farklarının zamana bağlı değişimleri Şekil 3.3'te verilmiştir.

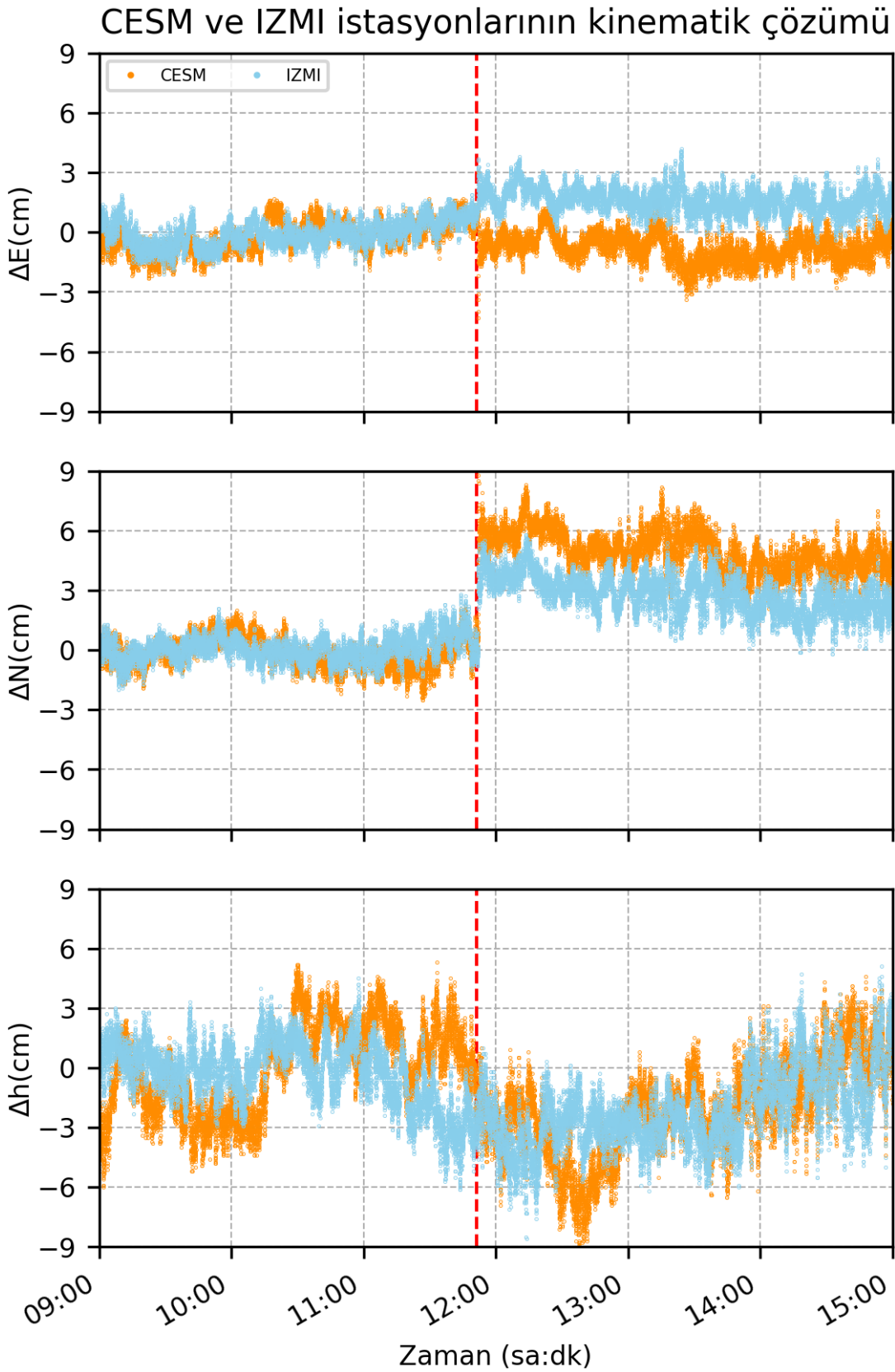
Çizelge 3.2 : Deprem gününe ait CSRS-PPP Kinematik çözümün sabit koordinatlara göre farkları.

ID	ΔE (cm)			ΔN (cm)		
	Maks	Min	Aralık	Maks	Min	Aralık
İZMI	4.2	-2.1	6.3	5.8	-2.0	7.8
CESM	3.0	-4.3	7.3	12.3	-2.5	14.8
DIDI	4.8	-1.8	6.6	2.4	-7.0	9.4
AYD1	4.6	-3.3	7.9	3.3	-6.1	9.4

ID	$\Delta 2B$ (cm)			Δh (cm)		
	Maks	Min	Aralık	Maks	Min	Aralık
İZMI	6.2	0.0	6.2	5.1	-8.6	13.7
CESM	12.3	0.0	12.3	5.3	-9.0	14.3
DIDI	7.7	0.0	7.7	7.2	-10.1	17.3
AYD1	6.2	0.0	6.2	8.0	-7.6	15.6

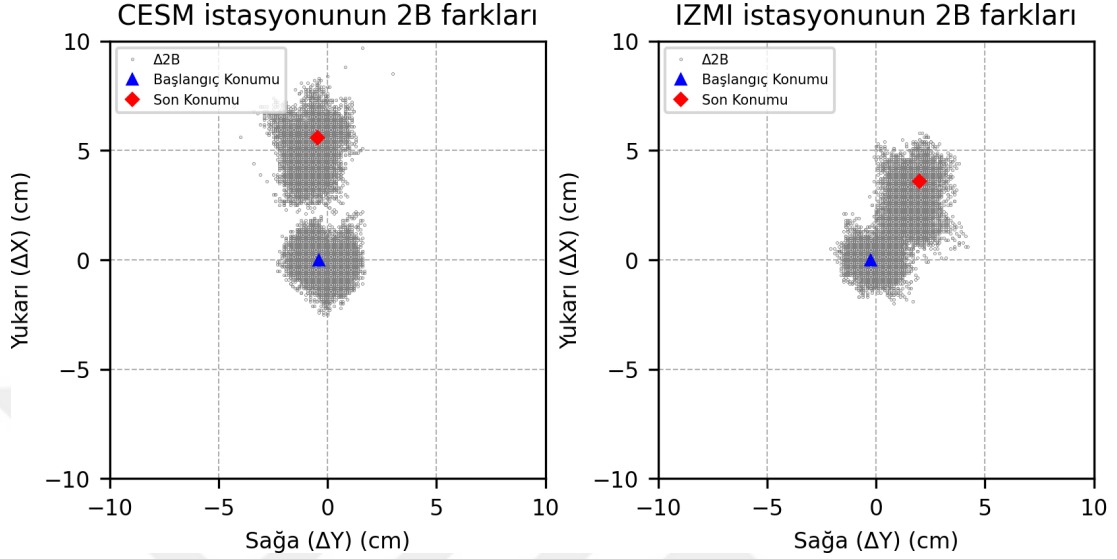


Şekil 3.2 : CESM ve İZMI istasyonları için rölatif-statik çözümlerden türetilen yer değişirme grafikleri.



Şekil 3.3 : CESM ve IZMI istasyonları için PPP-AR kinematik yer değiştirme grafikleri.

Ayrıca, CESM ve IZMI istasyonlarının deprem anını kapsayan kinematik konum farklarının dağılım grafikleri Şekil 3.4'te verilmiştir. Başlangıç konumu olarak deprem öncesine ait olan fark değerlerinin ortalaması, son konum olarak ise deprem sonrasında ait olan fark değerlerinin ortalaması kabul edilmiştir.



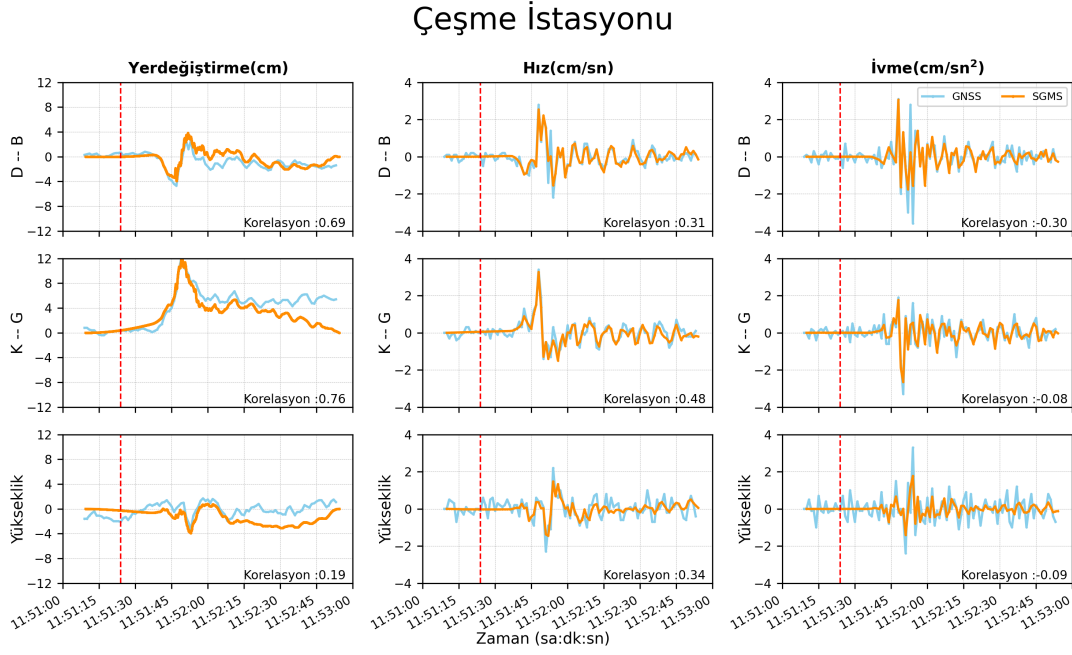
Şekil 3.4 : CESM ve IZMI istasyonlarının PPP-Kinematik çözümlerinin 2B dağılım grafiği.

Fayın yapısı gereği doğu-batı yönünde uzayan bir normal fay olmasından dolayı, depremin etkilerinin kuzey-güney yönlerinde daha çok hissedilmesi öngörülmektedir. CESM ve IZMI istasyonları deprem üssünün kuzeyinde kalması sebebiyle, iki istasyonda da maksimum değişimler kuzey-güney yönünde saptanmıştır.

CESM istasyonunun kuzey bileşenindeki yer değiştirme, deprem anında (11:51:24 UTC) 12 cm'ye ulaşmış ve daha sonra 6 cm'ye kadar düşmüştür (Çizelge 3.2). CESM istasyonunun 2B dağılım grafiği (Şekil 3.4) incelendiğinde, rölatif-statik çözüme benzer şekilde (Şekil 3.2), noktanın kuzey yönünde 5.5 cm hareket ettiği görülmektedir. IZMI istasyonu deprem anında 4 cm kuzeye ve 2 cm doğuya hareket etmiştir. Kinematik analiz sonucunda ise noktadaki yatay hareket 4.5 cm olarak bulunmuş ve noktanın kuzeydoğu yönünde hareket ettiği gözlenmiştir.

Ek olarak, TADAS ağında yer alan ve deprem bölgesinin yakınında bulunan Çeşme ve Konak SGMS sensörlerinin verileri kullanılmıştır. Bu sensörlerden Çeşme, CESM GNSS istasyonu ve Konak ise, IZMI GNSS istasyonunun verisi ile kıyaslanmıştır.

SGMS sensörlerinden alınan ham ivmeölçer verileri ile bu verilerden türetilmiş hız ve yer değiştirme değerleri; GNSS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme değerleri ile bu verilerden türetilmiş olan hız ve ivme verileri ile karşılaştırılmıştır. Fakat, zamansal olarak iki veriyi üst üste çakıştırabilmek için, GNSS saniyesi ile UTC arasında olan 18 saniyelik fark yani artık saniye değeri kadar, GNSS gözlemlerini geriye çekmek gerekmektedir. Çeşme SGMS ve CESM GNSS istasyonlarına ait olan 3B zamansal değişim grafikleri Şekil 3.5’te verilmiştir.

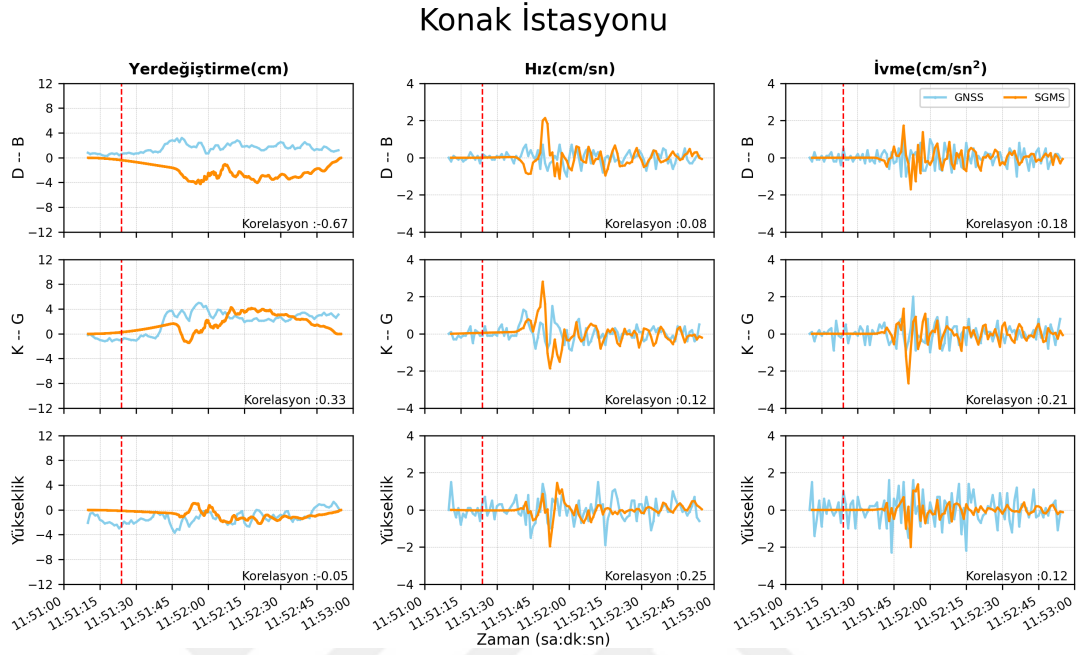


Şekil 3.5 : Çeşme SGMS ve CESM GNSS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri.

Şekil 3.5 incelendiğinde, iki farklı istasyondan elde edilen maksimum ve minimum yer değiştirme değerlerinin örtüşmekte olduğu görülmektedir. Hız ve ivme değerlerinin ise yaklaşık olarak örtüştüğü gözlemlenmektedir. Aynı işlemler IZMI GNSS ve Konak SGMS istasyonları için de gerçekleştirilmiş fakat 2 veri arasında Çeşme istasyonlarındakine benzer bir uyum görülemediği (Şekil 3.6).

IZMI ve Konak istasyonlarının yer değiştirme değerlerine bakıldığında, birbirlerine ters bir hareket gözlemlenmektedir. Buradan yola çıkılacak olursa, Konak SGMS istasyonunun doğrultularında bir sıkıntı olduğu, yani kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde doğru bir şekilde yönlendirilmediği sonucu çıkarılabilmektedir (Şekil 3.6).

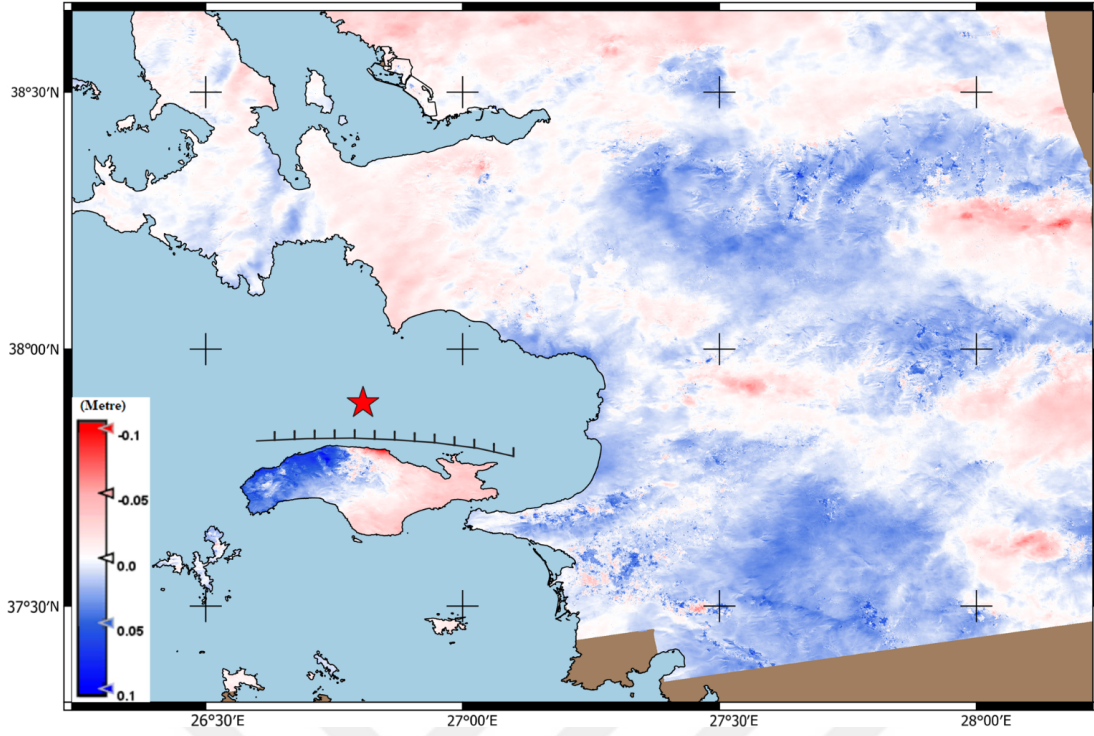
GNSS ve SGMS istasyonlarının yanı sıra ESA Sentinel-1 SAR verileri kullanılarak deprem bölgesi için InSAR işlemi gerçekleştirilmiş ve LOS yer değiştirme haritası üretilmiştir (Şekil 3.7).



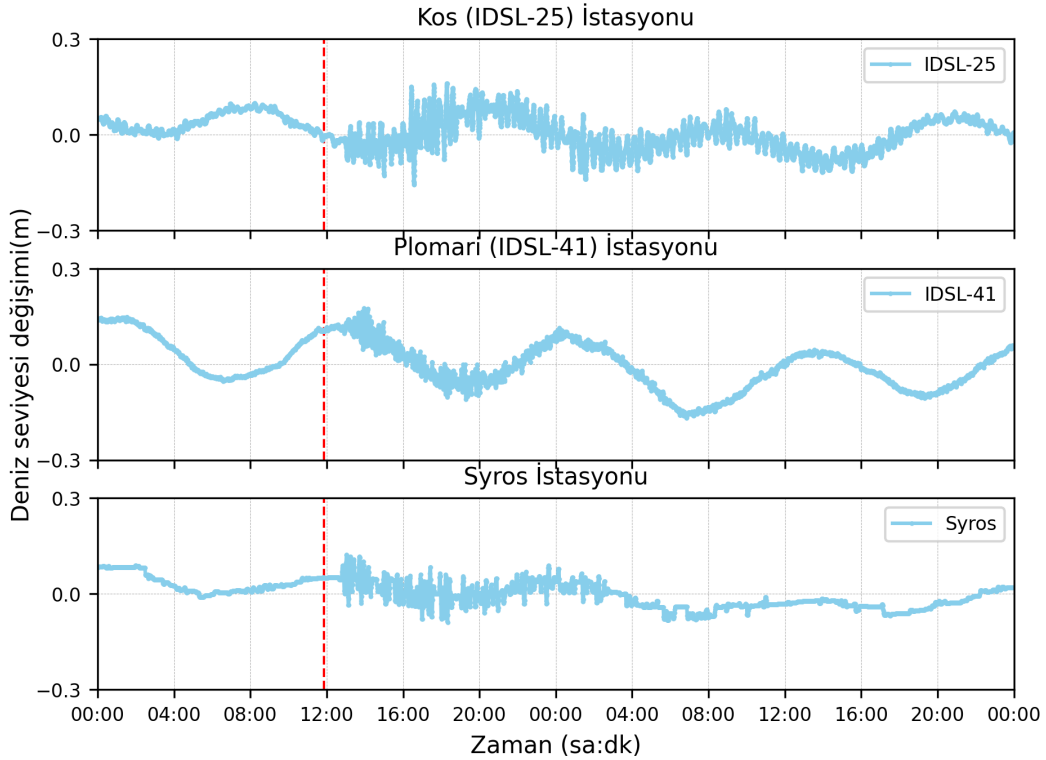
Şekil 3.6 : Konak SGMS ve IZMI GNSS istasyonlarından elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verileri.

Şekil 3.7 incelendiğinde, Sisam adasının batısında 10 cm'lik yükselme varken, kuzeyinde ise 10 cm'lik bir çökme saptanmıştır. Bunun yanı sıra, fayın kuzeyinde kalan Çeşme taraflarında 5 cm'lik bir çökme gözlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen InSAR sonuçlarının, Ganas ve diğ. (2021) tarafından ortaya konulan sonuçlar ile örtüşmekte olduğu görülmektedir [68]. Buna ek olarak, 3 farklı mareograf istasyonunun deprem günü ve sonrasına ait olan deniz seviyesi değişimleri Şekil 3.8'de verilmiştir.

Deprem anından sonra oluşan artçı depremlerin de etkisiyle, mevcut salınımdan farklı olarak sapmalar olduğu gözlenmiş fakat bu çalışma kapsamında dalga trend analizi yapılmadığı için Heidarzadeh et al. (2021) çalışmalarında yer alan ve aşağıda da verilen Şekil 3.9'a göre çeşitli çıkarımlar yapılmıştır [1]. Şekil 3.9'un sol tarafındaki grafikler ilgili istasyonlardaki zamansal deniz seviyesi değişimini ifade ederken, sağ tarafındaki grafikler trend etkisi çıkartılmış deniz seviyesi değişimlerini ifade

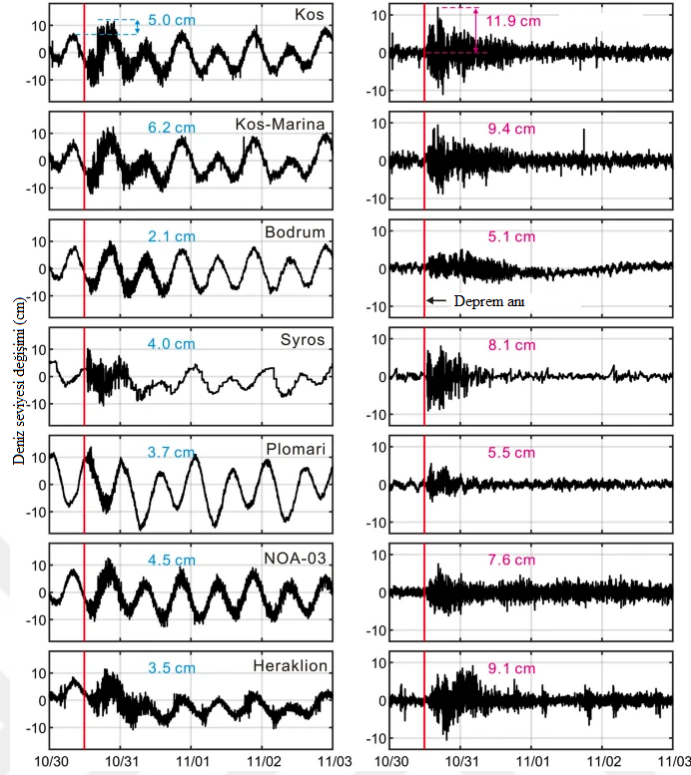


Şekil 3.7 : InSAR tekniği kullanılarak elde edilen uydu görüş hattı (LOS) yer değiştirme haritası.



Şekil 3.8 : IDSL-41, IDSL-25 ve Syros mareograf istasyonlarından elde edilen zamansal değişim grafikleri.

etmektedir. Buna göre, bu istasyonlarda en az 5.1 cm en çok ise 11.9 cm deniz seviyesi değişimi gözlemlendiği söylenebilmektedir [1].



Şekil 3.9 : Heidarzadeh ve diğ. (2021) tarafından elde edilmiş trend etkisi çıkartılmış deniz seviyesi değişimleri [1].

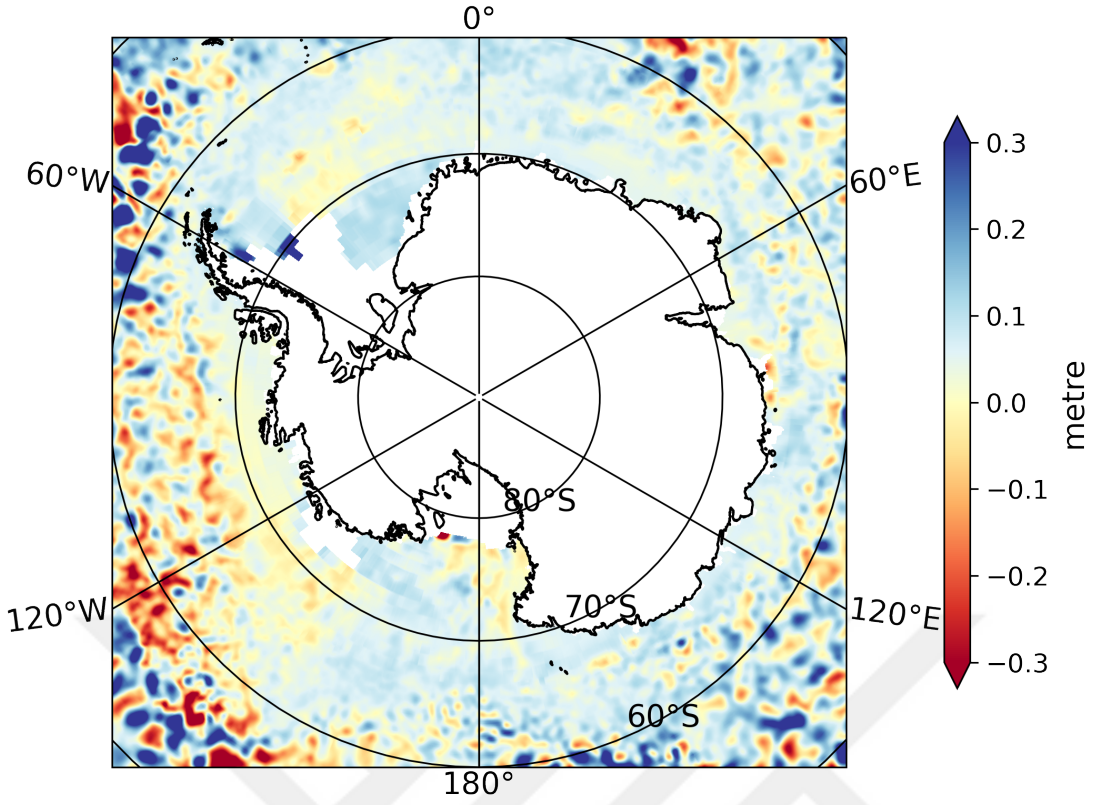
3.2 Antarktika Buzul Kütlesi Kaybı Örneği

Çalışmanın ikinci kısmını oluşturan Antarktika kıtasındaki buzul kütlesi kaybı örneği kapsamında ilk olarak, bu çalışmada kullanılan ve Antarktika genelini kapsayan veri setlerinin görselleştirilmesi yapılmıştır. 1992 yılı ile 2019 yılları arasındaki SLA değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir.

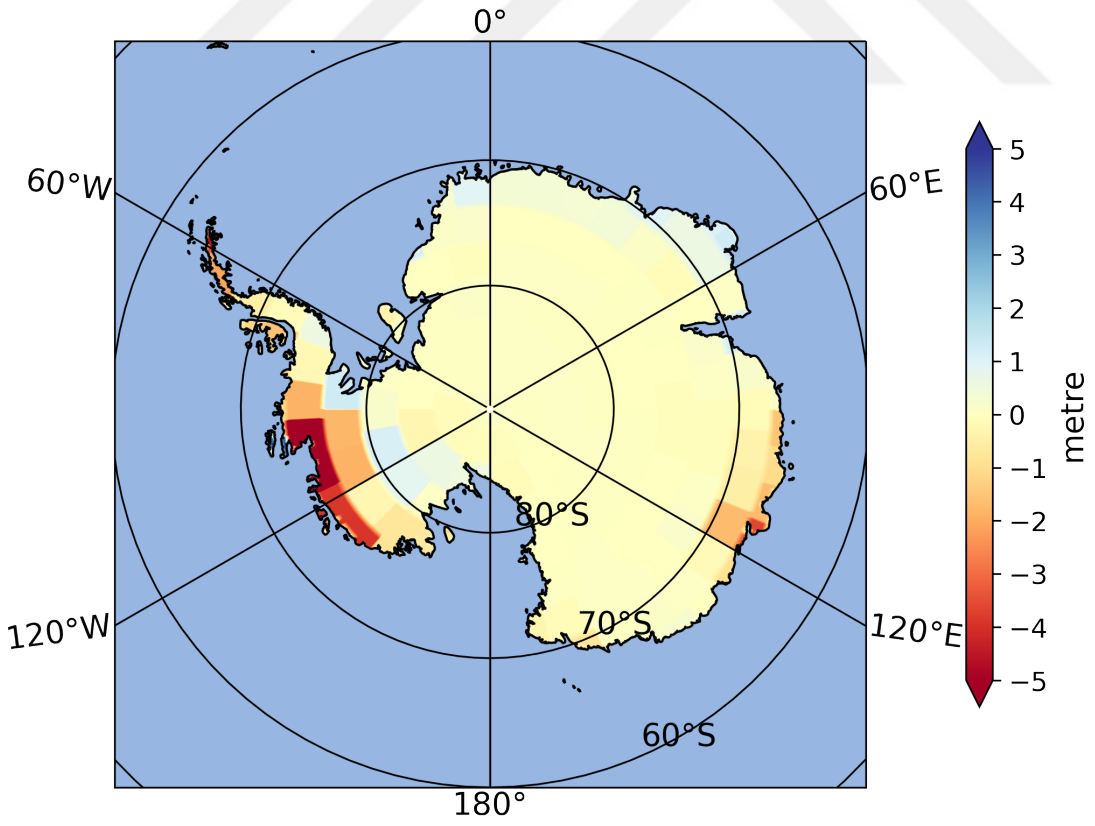
Sonrasında, GRACE/GRACE-FO uydu misyonlarına ait verilerden türetilen EWT değerlerinin 2010 ile 2021 yılları arasındaki değişimi Şekil 3.11'de verilmiştir.

Ayrıca, GRACE/GRACE-FO uydu misyonlarına da düzeltme olarak uygulanan ICE-5G GIA zamansal kütle değişimi trendi Şekil 3.12'de verilmiştir.

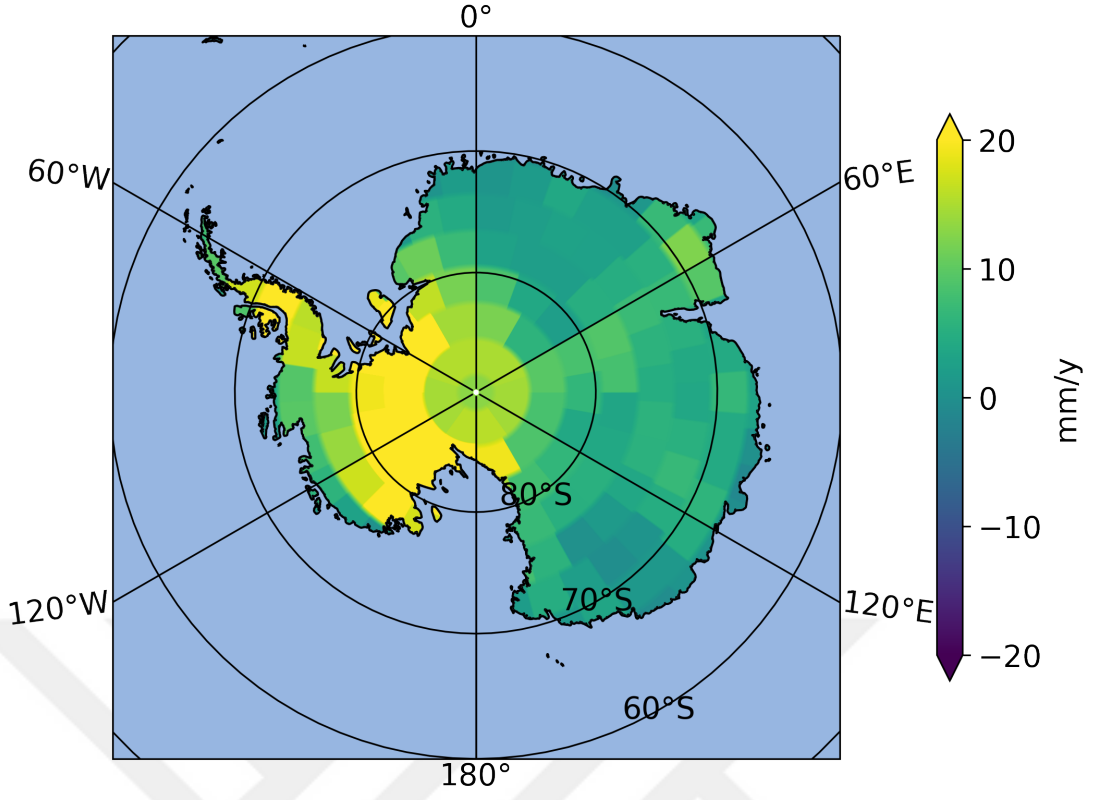
Son olarak da, CryoSat-2 uydu misyonu yardımıyla elde edilen 2010 ile 2021 yılları arasındaki kara buz yüksekliği değişimi Şekil 3.13'te verilmiştir.



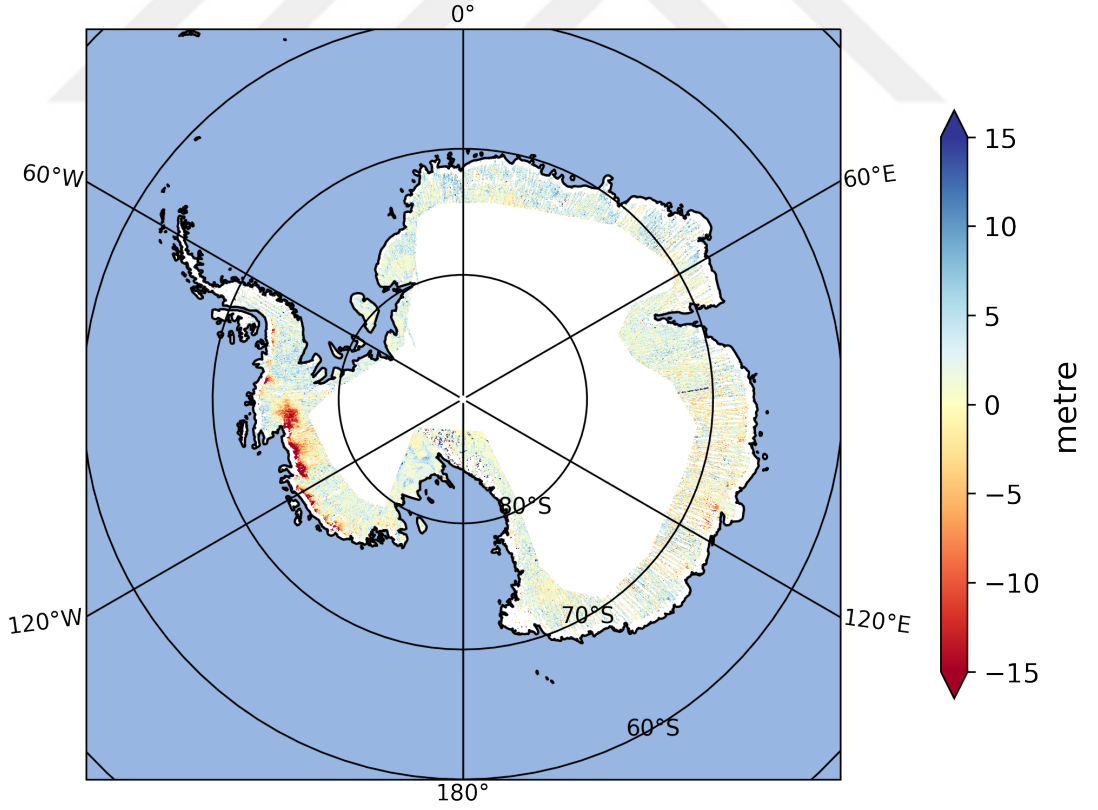
Şekil 3.10 : 1992 ve 2021 yılları arasındaki SLA değişimi.



Şekil 3.11 : 2010 ve 2021 yılları arasındaki EWT değişimi.



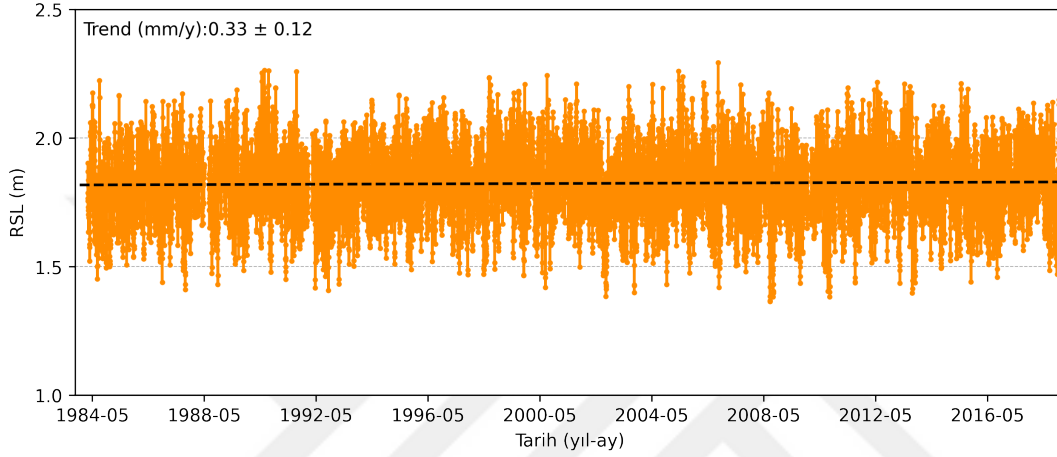
Şekil 3.12 : ICE-5G GIA zamansal kütle değişimi trendi.



Şekil 3.13 : 2010 ve 2021 yılları arasındaki CryoSat-2 karasal buz yüksekliği değişimi.

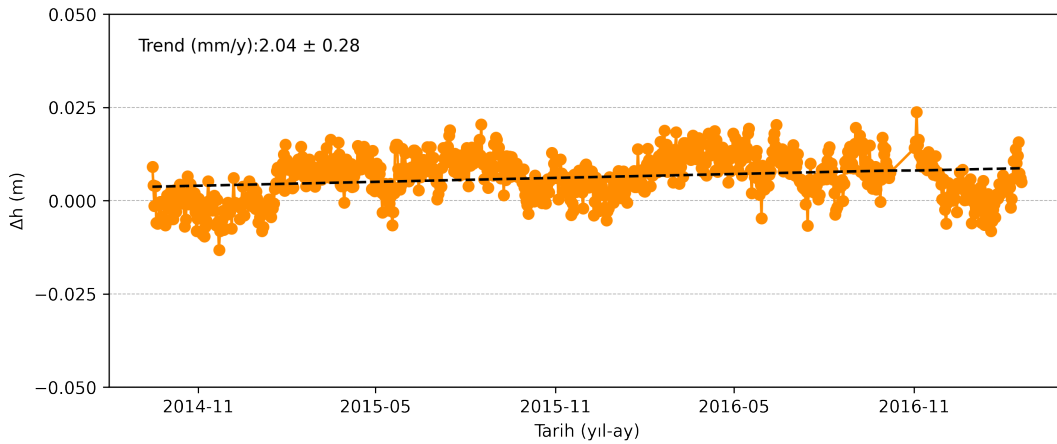
Şekil 3.11, 3.12 ve 3.13'e bakıldığında, Antarktika bölgesinin özellikle batı tarafında ciddi bir kütle kaybı olduğu çıkarımı yapılabilmektedir.

Çalışmanın devamında, Şekil 2.5'te konumları verilen Faraday ve Scott Base mareograf istasyonlarının RSL verisinin trendi ile sırasıyla VNAD ve SCTB GNSS istasyonlarından elde edilen VLM trendinden yararlanılarak ilgili konumlardaki SLA değerlerinin valide edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 3.14'te Faraday istasyonunda elde edilen RSL değerinin zamansal değişimi verilmiştir.



Şekil 3.14 : Faraday mareograf istasyonu RSL değerinin zamansal değişimi.

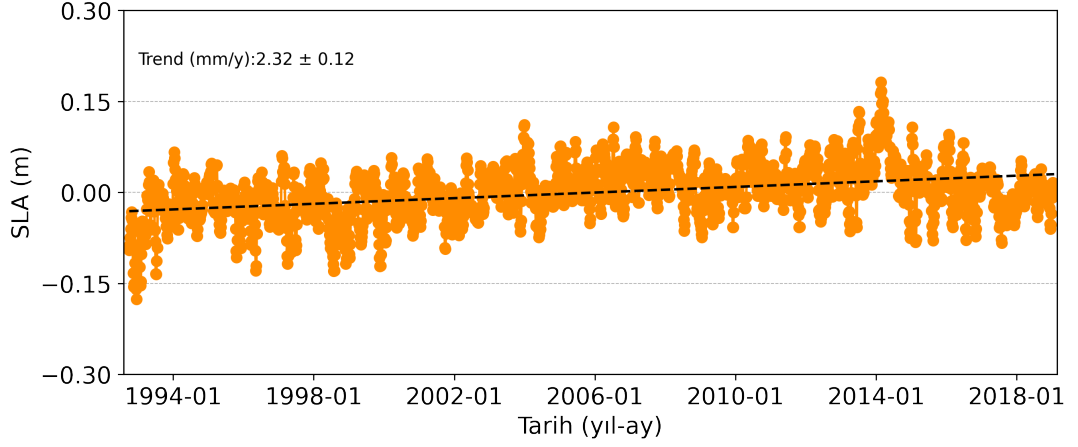
Faraday mareograf istasyonunun yakınında bulunan VNAD GNSS istasyonunun zamansal VLM değişimi Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.15 : VNAD GNSS istasyonu zamansal VLM değişimi.

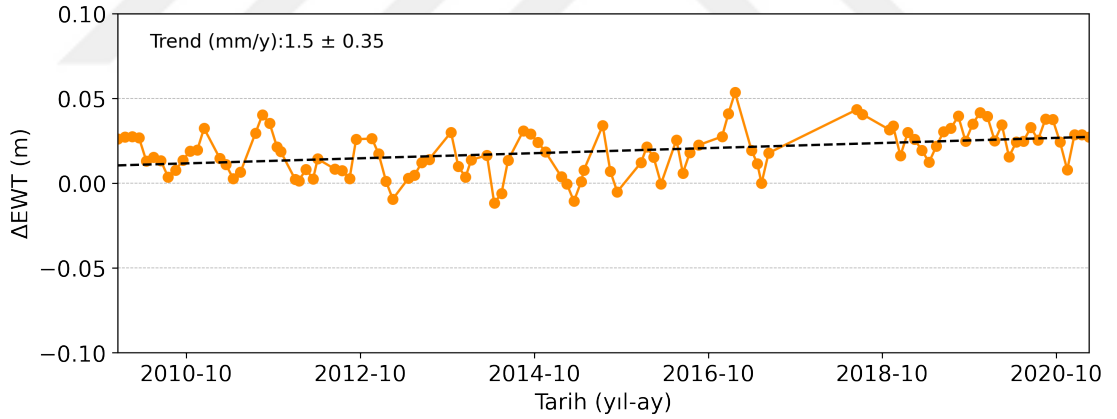
Şekil 3.14 ve 3.15'te verilen zamansal RSL ve VLM değişimlerinin trendleri sırasıyla 0.33 mm/y ve 2.04 mm/y olarak hesaplanmıştır. Bu iki farklı trend değerinin

toplanmasıyla 2.37 mm/y elde edilmiştir. İlgili bölgedeki zamansal SLA değişimi ise Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16 : Faraday mareograf istasyonu bölgesinde SLA değişimi.

Şekil 3.16'da, 1992 ile 2019 yılları arasındaki SLA değişimi verilmiş ve trendi 2.32 mm/y olarak bulunmuştur. VLM ile RSL trendlerinin toplamından elde edilen trend değeri (2.37 mm/y) ile birbirlerini valide ettiği saptanmıştır. Faraday mareograf istasyonu çevresindeki zamansal EWT değişimi ise Şekil 3.17'de verilmiştir.

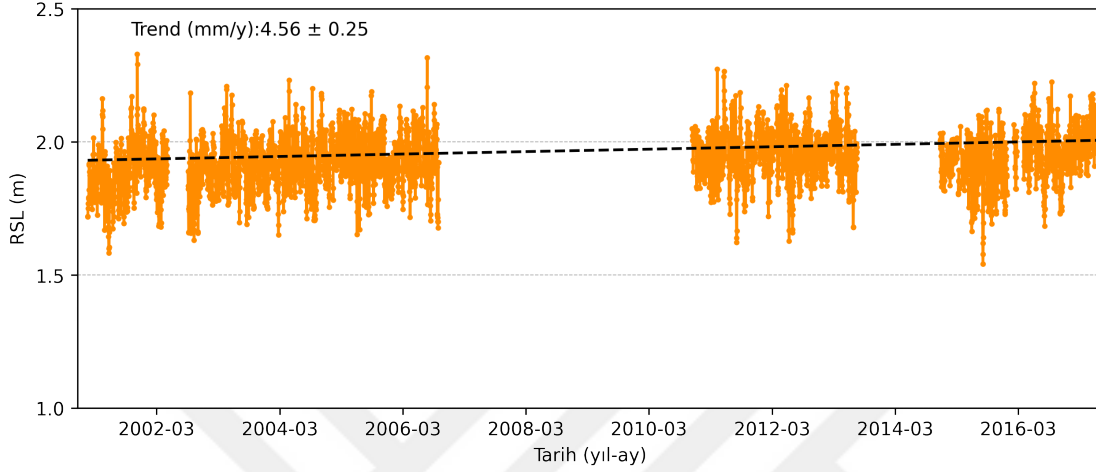


Şekil 3.17 : Faraday mareograf istasyonu çevresindeki EWT değişimi.

Şekil 3.17'de de belirtildiği gibi EWT trendi 1.50 mm/y olarak elde edilmiştir, fakat EWT çözümünün mekansal çözünürlüğün az oluşu ve istasyonun kıyı şeridinde yer almasından dolayı, kara buzul kaybı için anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Bu noktadaki EWT değişimi, karadaki buzul kaybını değil deniz seviyesindeki yükselme eğilimini göstermektedir. Aynı zamanda, Şekil 3.12'den de anlaşılacağı gibi bölgedeki

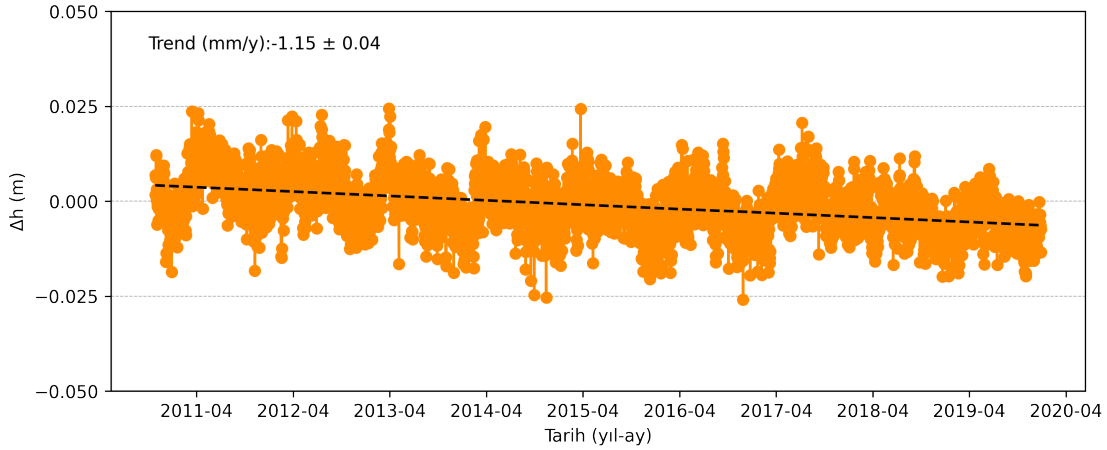
GIA kütle değişimi 4.60 mm/y olarak bulunmuş, değerleri yakın olmasa da VLM trendi ile aynı yönlü olduğu saptanmıştır.

Sonrasında aynı işlem adımları Scott Base mareograf istasyonu için gerçekleştirilmiştir ve Şekil 3.18’de mareograf istasyonundan elde edilen RSL değerinin zamansal değişimi verilmiştir.



Şekil 3.18 : Scott Base mareograf istasyonu RSL değerinin zamansal değişimi.

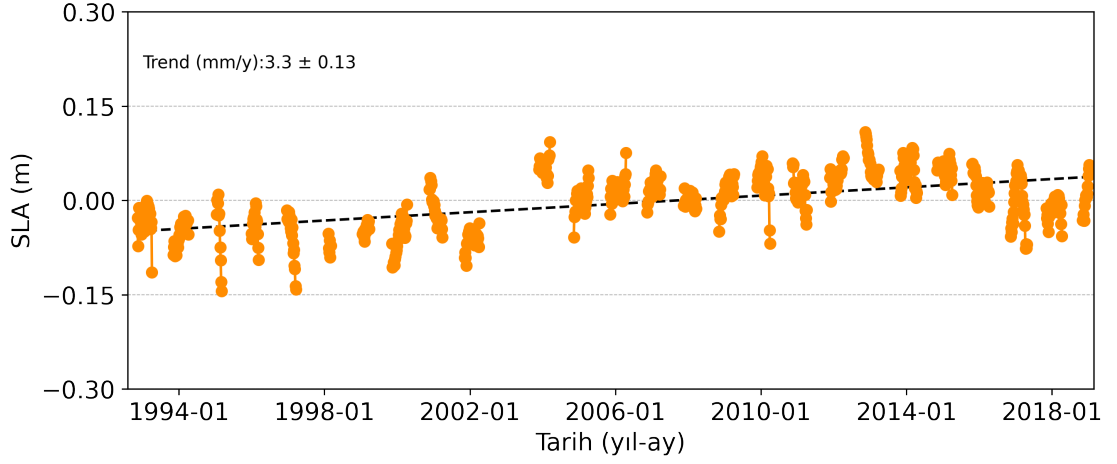
Scott Base mareograf istasyonunun yakınında bulunan SCTB GNSS istasyonunun zamansal VLM değişimi Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19 : SCTB GNSS istasyonu zamansal VLM değişimi.

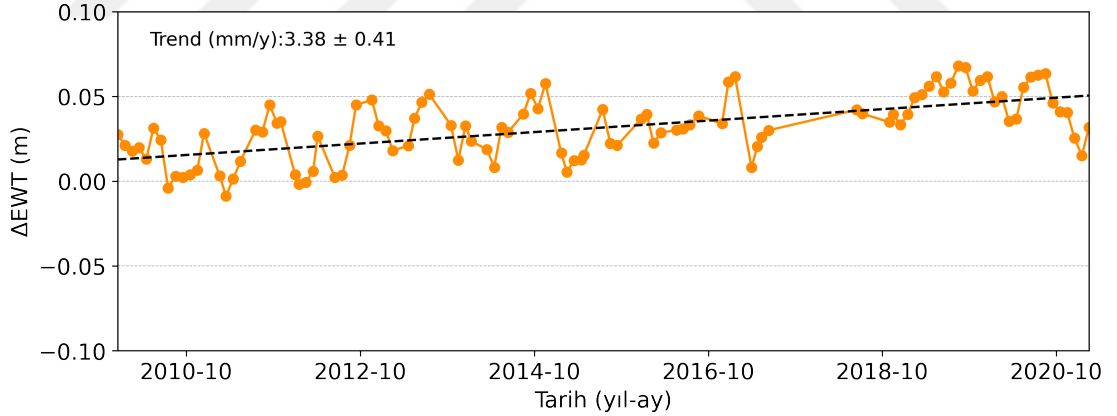
Şekil 3.18 ve 3.19’da verilen zamansal RSL ve VLM değişimlerinin trendleri sırasıyla 4.56 mm/y ve -1.15 mm/y olarak hesaplanmıştır. Bu iki farklı trend değerinin

toplanmasıyla 3.41 mm/y elde edilmiştir. İlgili bölgedeki zamansal SLA değişimi ise Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20 : Scott Base mareograf istasyonu bölgesinde SLA değişimi.

Şekil 3.20’de verilmiş olan SLA değişiminin trendi 3.30 mm/y olarak bulunmuştur. VLM ile RSL trendlerinin toplamından elde edilen trend değeri (3.41 mm/y) ile birbirlerini valide ettiği saptanmıştır. Faraday mareograf istasyonu çevresindeki zamansal EWT değişimi ise Şekil 3.21’de verilmiştir.

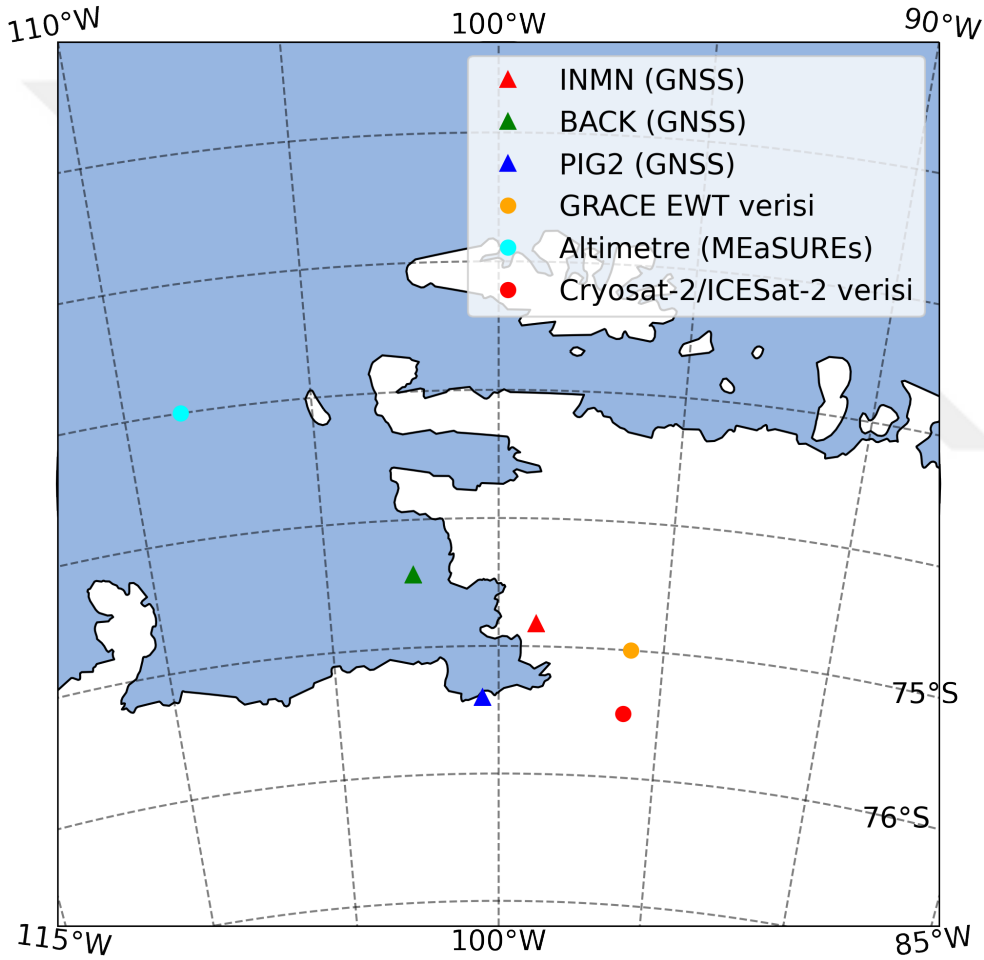


Şekil 3.21 : Scott Base mareograf istasyonu çevresindeki EWT değişimi.

Şekil 3.21’de de belirtildiği gibi EWT trendi 3.38 mm/y olarak elde edilmiştir fakat burada da EWT çözümünün mekansal çözünürlüğünün az oluşu ve istasyonun kıyı şeridinde yer almasından dolayı Faraday istasyonunda da olduğu gibi karadaki buz kaybı için anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Bu noktadaki EWT değişimi de Faraday istasyonundaki gibi denizdeki SLA değişimini yansıtmaktadır. Aynı zamanda,

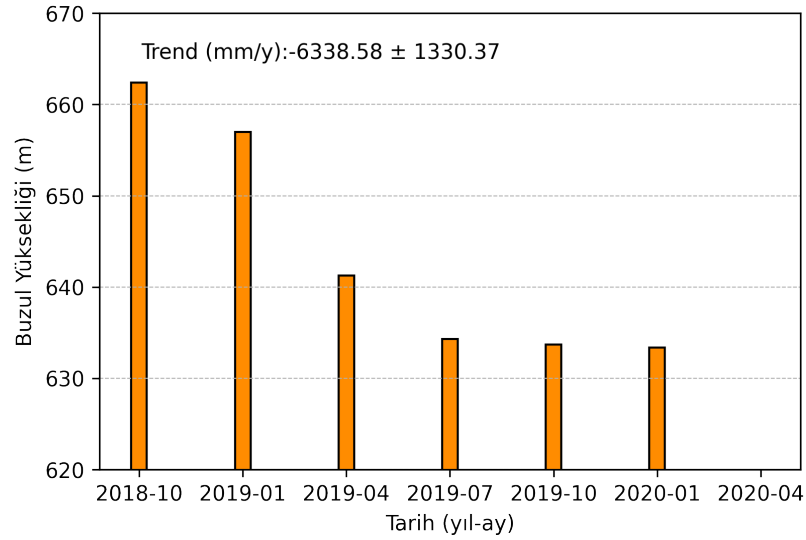
Şekil 3.12'den de anlaşılacağı gibi bölgedeki GIA kütle değişimi 6.90 mm/y olarak görünmektedir, fakat bu bölgede GNSS istasyonundan elde edilen VLM trendi ile birbirlerini valide etmemektedir.

Çalışmanın devamında, Şekil 3.11, 3.12 ve 3.13'te verilen bilgilerden hareketle kıtanın batısında ciddi anlamda kütle kaybı olduğu anlaşıldığı için, kıtanın batısında yer alan Pine adası çevresinde; CryoSat-2 ve ICESat-2 uydu misyonlarından yararlanılarak karasal buz yüksekliği değişimi, EWT değişimi, SLA değişimi ve GNSS istasyonları ile VLM değişimi incelenmiştir. Bu analizler yapılırken alınan örneklem konumları Şekil 3.22'de gösterilmektedir.



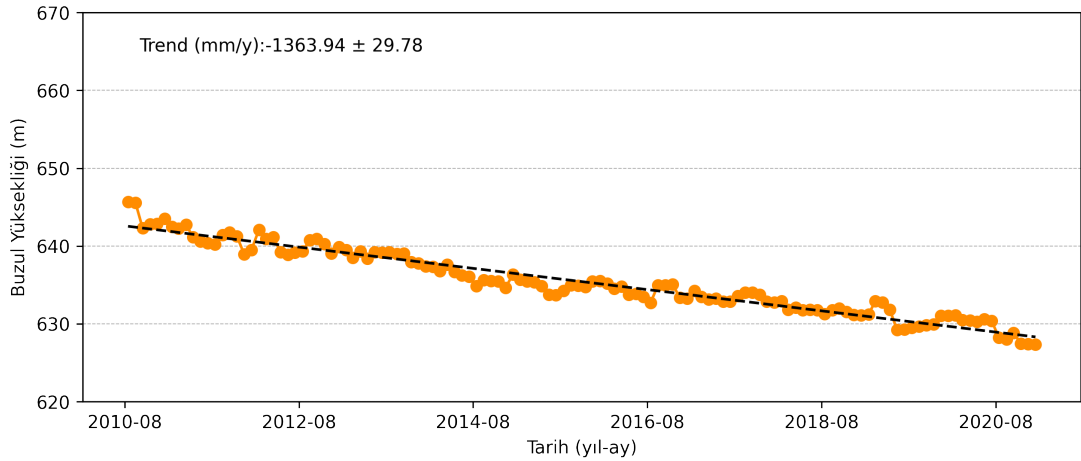
Şekil 3.22 : Pine adası çevresindeki örneklem konumları.

ICESat-2 uydu misyonundan türetilen, 2018 Kasım ayı itibariyle 91 günde bir (ICESat-2 uydu misyonunun zamansal çözünürlüğü) tam olarak aynı konuma ait olan buz yüksekliği değerleri Şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23 : ICESat-2 karasal buz yükseliği değişimi.

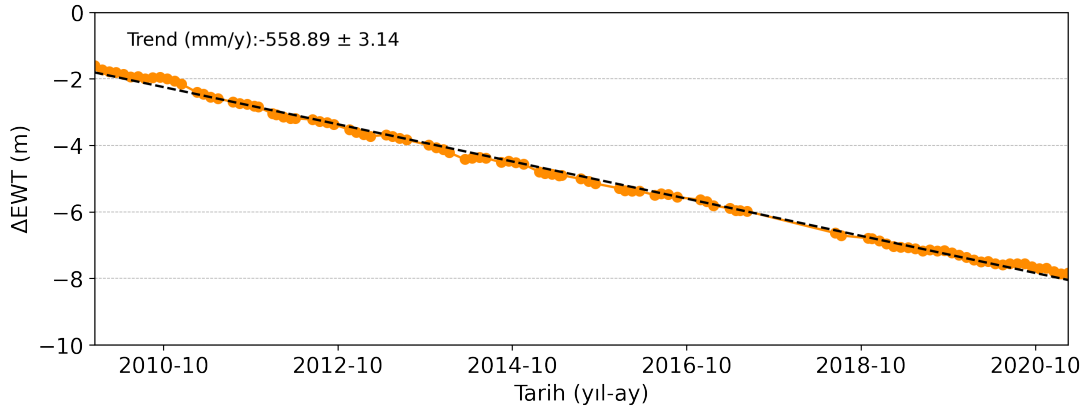
CryoSat-2 uydu misyonu ile ise, 2010 ile 2021 yılları arasına ait olan buz yüksekliği değerleri Şekil 3.24’te verilmiştir. Şekil 3.23 ve 3.24’e bakıldığında, iki farklı uydu misyonundan da negatif yönlü trend bulunmuş ve Pine Adası bölgesinde buzul kaybının olduğu anlaşılmaktadır. Fakat, trend değeri olarak farklılık söz konusudur çünkü iki veri grubu farklı uzunlukta zaman serisi içermektedir. Bunun yanında, GRACE/GRACE-FO uydu gravite misyonları ile de kütle kaybının belirlenebilmesi için ilgili bölgedeki EWT değişimi Şekil 3.25’te verilmiştir.



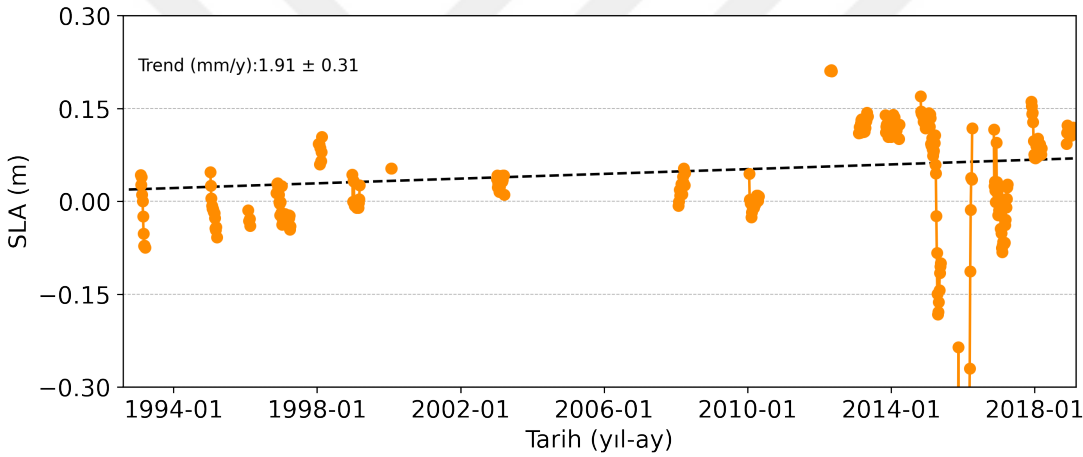
Şekil 3.24 : CryoSat-2 karasal buz yükseliği değişimi.

ICESat-2 ve CryoSat-2 karasal buz yüksekliği değişim trendleri, GRACE uydu misyonlarından elde edilen EWT değişimi trendi ile de karşılaştırılmış ve trend yönü olarak birbirlerini valide ettikleri görülmüştür. Bölgedeki buzul kütlesi kaybı

sebebiyle, deniz seviyesinde de artış beklenmekte olup bunun kontrolü ise Şekil 3.26'da verilen uydu altimetre misyonları tarafından sağlanan SLA değişimi trendinin elde edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.



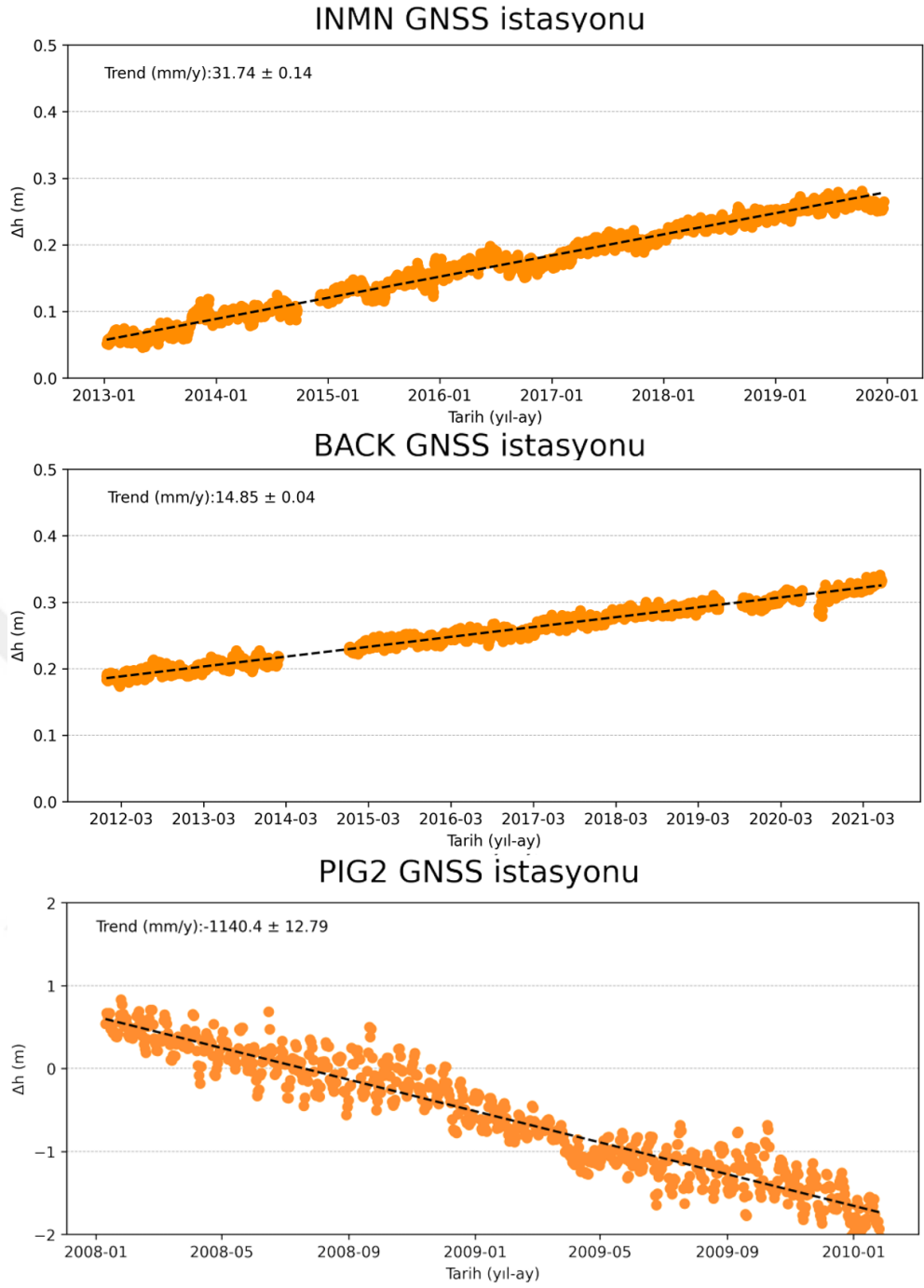
Şekil 3.25 : Pine adası çevresinde EWT değişimi.



Şekil 3.26 : Pine adası çevresinde SLA değişimi.

Ayrıca, Pine adası ve çevresinde biri buzul üzerinde diğer ikisi kaya üzerinde konumlanan toplamda 3 adet GNSS istasyonunun VLM değerlerinin zamansal değişimi Şekil 3.27'de verilmiştir.

Kaya üzerinde bulunan INMN ve BACK istasyonlarının VLM trendleri pozitif olarak bulunmuş ve PGR etkisi ile bölgenin yükselmekte olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, Şekil 3.12'den de bölgenin GIA kütle değişimi 9.60 mm/y olarak bulunmuş ve trend yönlerinin GNSS istasyonları ile örtüştüğü ortaya konulmuştur. Buzul üzerinde yer alan PIG2 istasyonunda ise, 2 yıllık kısa bir süre içerisinde yaklaşık 2.5 metrelik bir erimenin söz konusu olduğu gözlenmiştir.



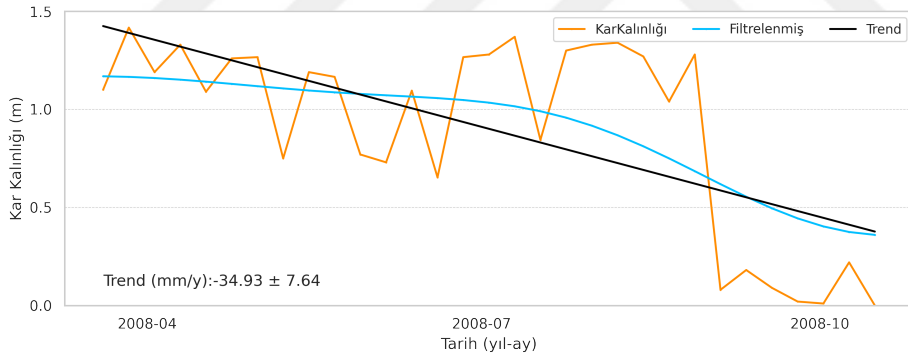
Şekil 3.27 : Pine adası çevresindeki GNSS istasyonlarının zamansal VLM değişimi.

Son olarak, Antarktika kıtasının batı tarafı geneline dağılmış olan 9 adet GNSS istasyonunun, 1 hafta aralıklı gözlem verilerinden yararlanılarak GNSS-R yöntemi uygulanmıştır. İlgili istasyonların çevresindeki kar kalınlığı değişimlerinin zaman serileri oluşturulmuştur. Bu GNSS istasyonları Şekil 2.2’de gösterilen sırasıyla FIG1, FIG2, PHIG, VNAD, FTP4, HOWE, BERP, INMN ve BRIP istasyonlarıdır. İlk olarak, Pine adası buzulunda bulunan FIG1 ve FIG2 istasyonlarına ait olan kar kalınlığı

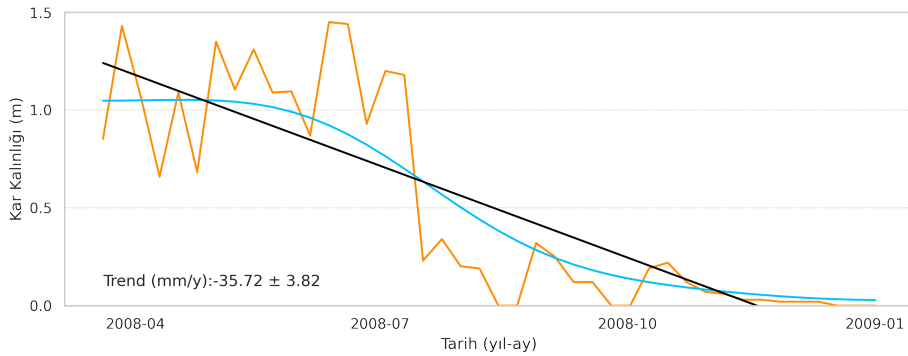
değişimleri elde edilmiştir. Grafiklerde; turuncu ile gösterilen zamansal veriyi, mavi ile gösterilen 1 boyutlu Gauss filtresi (standart sapma 6 olarak alınmıştır) geçirilmiş veriyi ve siyah olan ise lineer trendi ifade etmektedir.

Pine adasında bulunan PIG1 ve PIG2 istasyonlarından elde edilen ve Şekil 3.28 ile 3.29'da verilen zaman serilerine göre kar kalınlığında ciddi bir düşüş olduğu ortaya konulmuştur. Fakat GNSS istasyonları buzul üzerinde bulunduğundan, halihazırda negatif yönlü VLM trendi (PIG2 VLM grafiği Şekil 3.27'de verilmiştir) olduğundan dolayı elde edilen kar kalınlığı değişimi değerlerinin gerçeği yansıtmayı yansıtmadığını belirtmek mümkün değildir. Kar kalınlığı değişimiyle ilgili olarak analiz yapabilmek için bu noktadaki yatay konum değişimlerinin de incelenmesi gerekmektedir. Diğer istasyonlardaki kar kalınlığı değişimlerinin trend değerleri ise milimetrenin altında kalmıştır fakat yine de azalan trend değerleri söz konusudur.

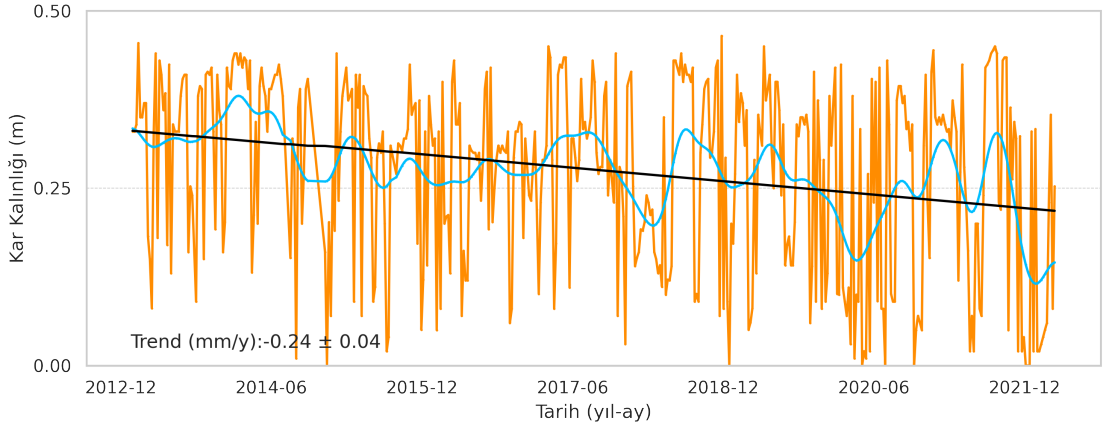
Şekil 3.28'den, Şekil 3.32'ye kadar verilen grafiklerden yola çıkılacak olursa, Antarktika kıtasının batısında buzul kaybının yanı sıra kar kalınlığında da düşüş olduğu söylenebilmektedir.



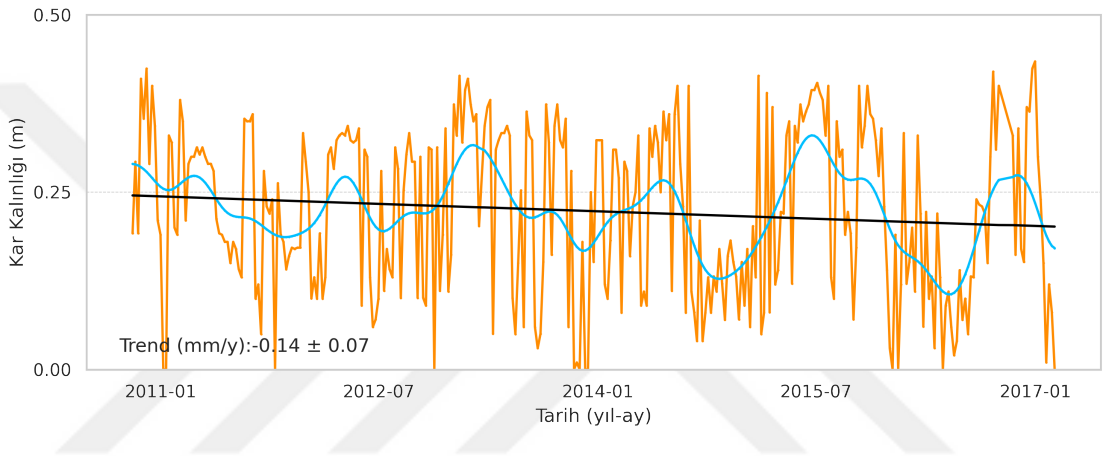
Şekil 3.28 : PIG1 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.



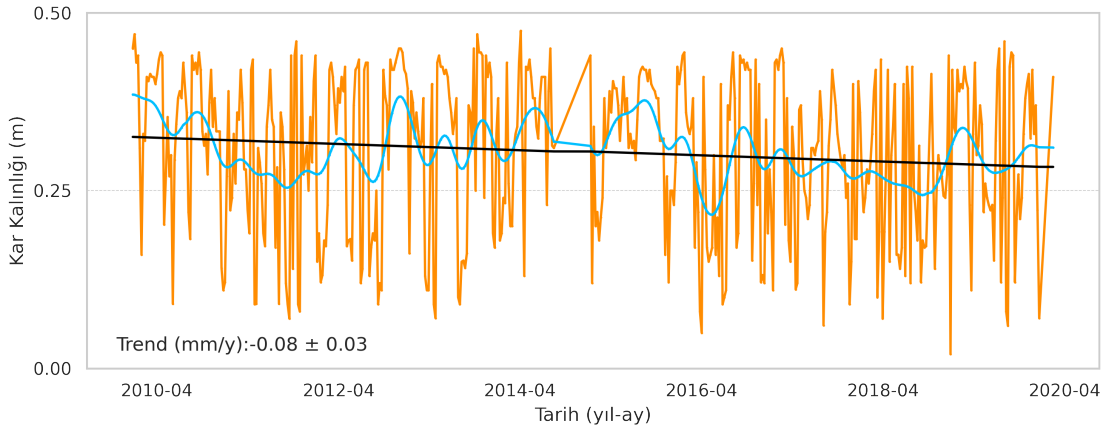
Şekil 3.29 : PIG2 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.



Şekil 3.30 : PHIG istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.

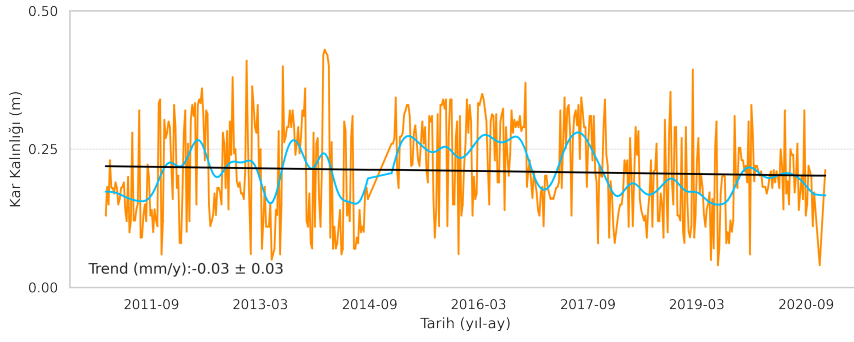


Şekil 3.31 : VNAD istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.

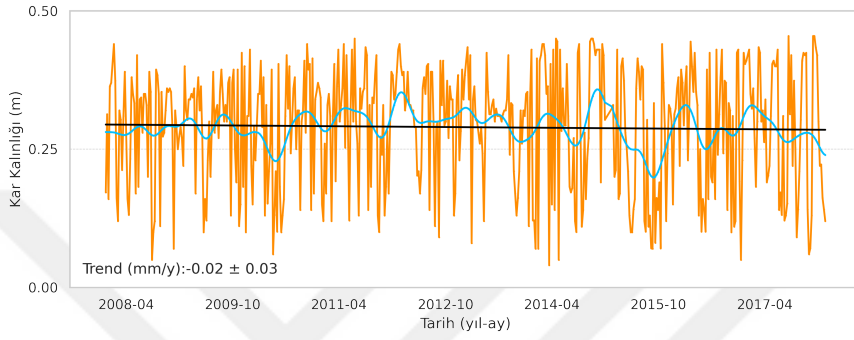


Şekil 3.32 : HOWE istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.

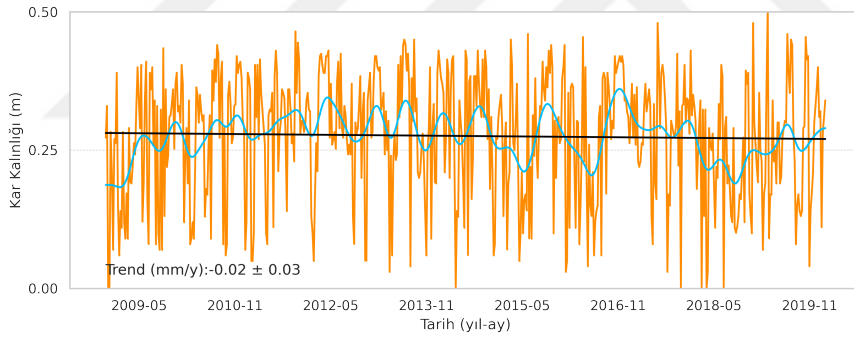
Şekil 3.33 ile Şekil 3.36 arasında kalan grafiklerde çizilen zaman serilerinden üretilen trend değerleri ise, standart sapmalarından küçük değer aldıkları için anlamlı değildir.



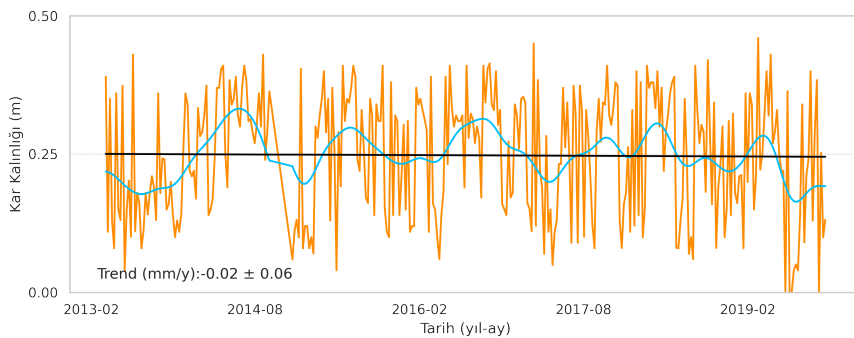
Şekil 3.33 : BERP istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.



Şekil 3.34 : BRIP istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.



Şekil 3.35 : FTP4 istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.



Şekil 3.36 : INMN istasyonu reflektometri yöntemine göre kar kalınlığı değişimi.

4. SONUÇLAR

Çalışmanın ilk kısmında, farklı jeosensörler kullanılarak Sisam Depreminin etkileri saptanmıştır. GNSS sonuçlarına bakılacak olursa deprem öncesi ve sonrası PPP-Statik çözümlerinin santimetre düzeyinde farklılıklar içerdiği, ve bu farklılardan oluşturulan deformasyon vektörlerinin %95 güven aralığına göre kontrolü sonucunda, CESM ve IZMI istasyonlarında anlamlı yatay deformasyonların olduğu belirlenmiştir. PPP-Kinematik çözümlerine göre ise, CESM istasyonunda 12 cm'lik yatay yer değiştirme gözlenmiştir. Diğer istasyonlardaki yatay yer değiştirmeler ise 6-8 cm arasındadır. CESM istasyonunun yataydaki 12 santimetrelilik yer değiştirmesinin ana hareketi ise Kuzey yönünde gerçekleşmiştir. CESM ve IZMI GNSS istasyonlarının günlük PPP kinematik çözümüne göre yükseklik değerlerinin değişimlerinden ise depremin etkisi anlaşılammaktadır (Şekil 3.3). Fakat, SGMS ve GNSS verilerinin karşılaştırılabilmesi için deprem anını içeren 1 dakikalık zaman aralığındaki kinematik değişime bakıldığında 4 cm'ye kadar anlık bir çökme olduğu saptanmıştır (Şekil 3.5 ve 3.6). Anlamlı yatay deformasyon değerleri elde edilen CESM ve IZMI istasyonlarının verilerinin rölatif-statik yöntemine göre çözümlerinden elde edilen fark değerleri de PPP-Statik çözümünü destekler niteliktedir. CESM ve IZMI GNSS istasyonlarının yakınında yer alan sırasıyla Çesme ve Konak SGMS istasyonlarının verilerinin incelenmesi sonucunda ise, CESM GNSS istasyonunun PPP-AR kinematik çözümleri ve Çesme SGMS istasyonundan elde edilen yer değiştirme, hız ve ivme verilerinin birbirlerini doğrular nitelikte olduğu gözlenmiştir, fakat aynı durum IZMI GNSS ve Konak SGMS istasyonları için geçerli değildir. Çesme SGMS verisinin CESM GNSS istasyonunu destekler nitelik de oluşu ise PPP-kinematik yönteminin deprem sensörü olarak kullanılabilirliğini ön plana çıkarmıştır. InSAR tekniği ile elde edilen LOS yer değiştirme haritası sayesinde ise Sisam adasının batısında 10 cm'lik yükselme ve doğusunda ise 10 cm'lik çökme olduğu saptanmıştır. Bunun yanı sıra, adanın karşı kuzey kıyısında yer alan Çesme bölgesinde 5 cm'lik bir çökme gözlenmiş

ve bu değer ile o konumda bulunan CESH GNSS istasyonundan elde edilen fark değerleri uyum göstermiştir. Mareograf istasyonlarının verileri yorumlanacak olursa da Sisam adasında yer alan herhangi bir istasyona ait veriler elde edilemediği ve diğer istasyonlar ile deprem üssü arasında kara parçaları olduğu için aslında deprem etkisiyle oluşan karakteristik değişimler elde edilememektedir. Fakat Heidarzadeh ve diğ. (2021) alışmalarında da ortaya konulduğu gibi ege denizi kıyısında yer alan çeşitli istasyonlarından elde edilen dalga etkisi giderilmiş (de-tide) verilere göre minimum 5 cm ve maksimum 12 cm'ye kadar farklar gözlenmiştir [1]. Çalışmanın ilk kısmının sonucunda, 30 Ekim 2020 tarihinde Sisam adası açıklarında gerçekleşen 6.9 Mw byklğindeki depremin farklı jeosensör verilerine göre değerlendirmeleri yapılmış ve farklı sensörlerden elde edilen sonuçların birbirlerini destekler nitelikte oldukları ortaya konulmuştur.

Çalışmanın ikinci aşamasında ise ilk olarak; Antarktika kıtası için, 1992 ve 2019 yılları arasındaki SLA değişimi, 2010 ve 2021 yılları arasındaki gözlemlenen EWT değişimi, GIA değişim oranı ve CryoSat-2 uydusundan elde edilen 2010 ile 2021 yılları arasındaki karasal buz yüksekliliği değişimini gösteren haritalar üretilmiştir. Bu haritalardan da anlaşılacağı üzere Antarktika Kıtası'nın batısında yer alan buzul ktellerinde kütle kaybının olduğu, PGR etkisine bağlı olarak kara yükselmesinin olduğu ve ayrıca deniz seviyesinin yükseldiği ortaya çıkmıştır. Sonrasında, kıtanın kuzeybatı ve güneyinde yer alan 2 farklı mareograf istasyonunun verilerinden ve bu istasyonların yakınında bulunan GNSS istasyonlarının verilerinden zaman serileri üretilmiştir. Bunlara ek olarak da, yine aynı bölgelerin SLA ve EWT değişim değerleri elde edilmiştir. İlk olarak, kıtanın kuzeybatısında yer alan Faraday deniz seviyesi gözlem istasyonu ve çevresi değerlendirilmiş, GNSS ykseklilik bileşeninin zamansal değişiminden elde edilen VLM trendi 2.04 mm/y ve mareograf gözlemlerinden RSL trend değeri 0.33 mm/y olarak bulunmuştur. Mutlak Deniz Seviyesi trendi, VLM ile RSL trend değerlerinin birbirleriyle toplanması sonucunda 2.37 mm/y olarak elde edilmiş ve uydu altimetresinden elde edilen SLA trendi (2.32 mm/y) ile örtüştüğü ortaya konulmuştur (2.37 mm/y \approx 2.32 mm/y). Ayrıca GIA kütle değişimi trend değeri (4.6 mm/y) ile VLM trendinin aynı yönde olduğu gözlemlenmiştir. Kıtanın güneyinde yer alan Scott Base istasyonunun da ise RSL trendi 4.56 mm/y ve GNSS istasyonunun

VLM trendi -1.15 mm/y olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin birbirleri ile eklenmesi ile mutlak deniz seviyesi trendi 3.41 mm/y olarak hesaplanmıştır. Uydu altimetre misyonlarından elde edilen SLA trendi ise 3.30 mm/y olarak elde edilmiş ve türetilen mutlak deniz seviyesi değerini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür (3.41 mm/y \approx 3.30 mm/y). Her iki mareograf istasyonu çevresinde elde edilen EWT trendlerinin SLA trendleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca GIA kütle trendi ve CryoSat-2 Kara Buz Yüksekliği değişim haritaları incelendiğinde buzul kütle kaybı ve PGR etkisinin olduğu anlaşılabileceğinden Scott Base GNSS istasyonunun buzul üzerine yerleştirildiği çıkarımı yapılabilmektedir.

Çalışmanın Pine Adası ile ilgili bölümünde, GIA kütle trendi değeri, kaya üzerinde konumlandırılmış GNSS istasyonlarının trend değerleri ile doğrulanmıştır. Buzul üzerinde bulunan PIG2 GNSS istasyonundan elde edilen trendin yönü (-1140.40 mm/y), CryoSat-2 (-1363.94 mm/y) ve ICESat-2 (-6338.58 mm/y) kara buz yüksekliği ve GRACE EWT (-558.89 mm/y) değişim verileri ile doğrulanmıştır. CryoSat-2 ve ICESat-2 verilerinden elde edilen azalan trend değerleri aynı değildir, ancak PIG2 GNSS istasyonu ve CryoSat-2 altimetre verisinin yükseklik değişimi trend değerleri birbiriyle benzeşmektedir (-1140.40 mm/y \approx -1363.94 mm/y). Benzer şekilde, yükselen GNSS istasyonlarının trendi ve GIA kütle hızının yönü aynı olmasına rağmen, sayısal büyüklükleri farklıdır (GIA: 9.6 mm/y, INMN: 31.74 mm/y, BACK: 14.85 mm/y). Ayrıca Pine Adası bölgesinin açık deniz alanlarındaki deniz seviyesi yükselişi de SLA değişimi grafiği ile gösterilmiş ve trendi +1.91 mm/y olarak bulunmuştur. Bunun yanında, GNSS-R yönteminden yararlanılarak elde edilen kar kalınlığı değişiminin özellikle Pine adası buzulunda konumlanan PIG1 ve PIG2 istasyonlarında yaklaşık -35 mm/y azalan trende sahip olduğu; PHIG, VNAD, FTP4 ve HOWE istasyonlarında milimetrenin altında kalan azalan trend olduğu diğer istasyonlarda (BERP, INMN ve BRIP) ise anlamlı bir kar kalınlığı değişiminin olmadığı elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, çeşitli jeosensör verileri kullanılarak Antarktika'daki buz kütlesi kaybı araştırılmıştır. Kıta üzerindeki PGR etkisi, sağlam zemindeki GNSS gözlemleri ile kontrol edilmiş ve GIA kütle trendi ile karşılaştırılmıştır. GRACE EWT değişimi ise, buzul yüzeyindeki GNSS istasyonlarının zaman serileri ve altimetri

yöntemiyle elde edilen kara buz yükseklik değişimi ile doğrulanmıştır. Sonuç olarak, küresel ısınma nedeniyle batı Antarktika'daki buz kütlesi kaybı; GRACE/GRACE-FO uydu misyonlarının ürünleri, uydu altimetresinden elde edilen kara buz yüksekliği değişimi ve GNSS zaman serileri ile doğrulanmıştır. Aynı zamanda, deniz seviyesinin yanı sıra, PGR etkisi nedeniyle kıtanın da yükseldiği ortaya konulmuştur. Ayrıca, kıtanın batı bölgesinde buzul kaybına ek olarak, kar kalınlığında da azalma olduğu ortaya konulmuştur.

Çalışma kapsamında, açık erişimli jeosensör verileri ve açık kaynak kodlu yazılımlar yardımı ile bölgesel ve küresel boyuttaki afetlerin analizi ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın genel sonucu olarak, InSAR ve gravite uydu misyonlarından elde edilen verilerin geniş bölgelerin izlenmesinde uygun olduğu; bunun yanı sıra, GNSS, SGMS ve mareograf istasyonları gibi sadece konumlandırıldığı bölgelerin özelliklerini ve trend değerlerini ifade eden jeosensörlerin ise uydu misyonlarının sonuçlarını doğrulayabilir durumda buldukları, bu yüzden de afetlerin gözlemlenmesi açısından bütün jeosensörlerin büyük önem taşıdıkları ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Heidarzadeh, M., Pranantyo, I.R., Okuwaki, R., Dogan, G.G. ve Yalciner, A.C.** (2021). Long Tsunami Oscillations Following the 30 October 2020 Mw 7.0 Aegean Sea Earthquake: Observations and Modelling, *Pure and Applied Geophysics*, 178(5), 1531–1548.
- [2] **Stefanidis, A. ve Nittel, S.** (2004). *GeoSensor networks*, Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [3] **Kouba, J.** (2003). Measuring Seismic Waves Induced by Large Earthquakes with GPS, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47(4), 741–755, <https://doi.org/10.1023/A:1026390618355>.
- [4] **Li, X., Ge, M., Lu, C., Zhang, Y., Wang, R., Wickert, J. ve Schuh, H.** (2014). High-Rate GPS Seismology Using Real-Time Precise Point Positioning With Ambiguity Resolution, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10), 6165–6180.
- [5] **Dogan, A.H., Tunalioglu, N., Erdogan, B. ve Ocalan, T.** (2018). Evaluation of the GPS Precise Point Positioning technique during the 21 July 2017 Kos-Bodrum (East Aegean Sea) Mw 6.6 earthquake, *Arabian Journal of Geosciences*, 11(24), 775.
- [6] **Bürgmann, R., Ayhan, M.E., Fielding, E.J., Wright, T.J., McClusky, S., Aktug, B., Demir, C., Lenk, O. ve Türkezer, A.** (2002). Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSar Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 161–171.
- [7] **Ganas, A., Elias, P., Briole, P., Cannavo, F., Valkaniotis, S., Tsironi, V. ve Partheniou, E.I.** (2020). Ground Deformation and Seismic Fault Model of the M6.4 Durrës (Albania) Nov. 26, 2019 Earthquake, Based on GNSS/INSAR Observations, *Geosciences*, 10(6), <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/6/210>.
- [8] **Geng, J., Bock, Y., Melgar, D., Crowell, B.W. ve Haase, J.S.** (2013). A new seismogeodetic approach applied to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(7), 2124–2142, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ggge.20144>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ggge.20144>.

- [9] **Tu, R., Zhang, Q., Wang, L., Liu, Z. ve Huang, G.** (2015). An improved method for tight integration of GPS and strong-motion records: Complementary advantages, *Advances in Space Research*, 56(11), 2335–2344.
- [10] **Mazzotti, S., Jones, C. ve Thomson, R.E.** (2008). Relative and absolute sea level rise in western Canada and northwestern United States from a combined tide gauge-GPS analysis, *Journal of Geophysical Research*, 113(C11), C11019.
- [11] **Li, R., Li, H., Hao, T., Qiao, G., Cui, H., He, Y., Hai, G., Xie, H., Cheng, Y. ve Li, B.** (2021). Assessment of ICESat-2 ice surface elevations over the Chinese Antarctic Research Expedition (CHINARE) route, East Antarctica, based on coordinated multi-sensor observations, *The Cryosphere*, 15(7), 3083–3099, <https://tc.copernicus.org/articles/15/3083/2021/>.
- [12] **Aublanc, J., Moreau, T., Thibaut, P., Boy, F., Rémy, F. ve Picot, N.** (2018). Evaluation of SAR altimetry over the antarctic ice sheet from CryoSat-2 acquisitions, *Advances in Space Research*, 62(6), 1307–1323.
- [13] **Gourmelen, N., Escorihuela, M.J., Shepherd, A., Foresta, L., Muir, A., Garcia-Mondéjar, A., Roca, M., Baker, S.G. ve Drinkwater, M.R.** (2018). CryoSat-2 swath interferometric altimetry for mapping ice elevation and elevation change, *Advances in Space Research*, 62(6), 1226–1242.
- [14] **McMillan, M., Shepherd, A., Sundal, A., Briggs, K., Muir, A., Ridout, A., Hogg, A. ve Wingham, D.** (2014). Increased ice losses from Antarctica detected by CryoSat-2, *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3899–3905, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014GL060111>.
- [15] **Chen, J., Wilson, C., Tapley, B., Blankenship, D. ve Young, D.** (2008). Antarctic regional ice loss rates from GRACE, *Earth and Planetary Science Letters*, 266(1-2), 140–148.
- [16] **Göttl, F., Schmidt, M. ve Seitz, F.** (2018). Mass-related excitation of polar motion: an assessment of the new RL06 GRACE gravity field models, *Earth, Planets and Space*, 70, 195, <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0968-4>.
- [17] **A, G., Wahr, J. ve Zhong, S.** (2013). Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada, *Geophysical Journal International*, 192(2), 557–572.
- [18] **Li, W., Li, F., Shum, C., Shu, C., Ming, F., Zhang, S., Zhang, Q. ve Chen, W.** (2022). Assessment of Contemporary Antarctic GIA Models Using High-Precision GPS Time Series, *Remote Sensing*, 14(5), <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/5/1070>.

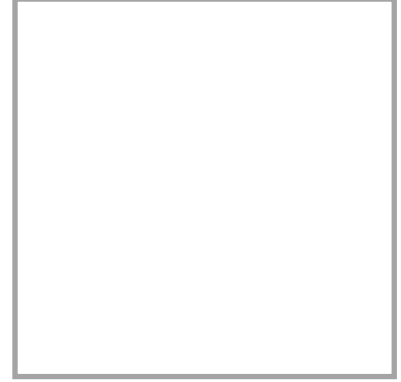
- [19] **Zhang, B., Wang, Z., Li, F., An, J., Yang, Y. ve Liu, J.** (2017). Estimation of present-day glacial isostatic adjustment, ice mass change and elastic vertical crustal deformation over the Antarctic ice sheet, *Journal of Glaciology*, 63(240), <https://doi.org/10.1017/jog.2017.37>.
- [20] **Pinat, E., Defraigne, P., Bergeot, N., Chevalier, J.M. ve Bertrand, B.** (2021). Long-Term Snow Height Variations in Antarctica from GNSS Interferometric Reflectometry, *Remote Sensing*, 13(6), 1164, <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/6/1164>.
- [21] **Wiese, D. N., Yuan, D. N., Boening, C., Landerer, F. W., ve Watkins M. M.** (2019). *JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height JPL RL06 Version 2.*, PO.DAAC, CA, USA., erişim tarihi: 08.06.2021.
- [22] **TELLUS-NASA** (2019). *TELLUS_GIA_0.5Deg_v1.0. Ver. 1.0.*, PO.DAAC, CA, USA., erişim tarihi: 08.06.2021.
- [23] **Zlotnicki V., Qu, Z. ve Willis, J.** (2019). *MEaSURES Gridded Sea Surface Height Anomalies Version 1812.*, PO.DAAC, CA, USA., erişim tarihi: 08.06.2021.
- [24] **TUSAGA-Aktif** (2020a). *Deprem Verileri*, <<https://www.tusaga-aktif.gov.tr/Web/DepremVerileri.aspx>>, erişim tarihi: 26.05.2022.
- [25] **TUSAGA-Aktif** (2020b). *İstasyon Konum Bilgileri*, <<https://www.tusaga-aktif.gov.tr/Web/IstasyonKonumBilgileri.pdf>>, erişim tarihi: 26.05.2022.
- [26] **Nevada Geodetic Laboratory** (2022). *GNSS istasyonları VLM zaman serileri.*, <<http://geodesy.unr.edu/>>, erişim tarihi: 26.05.2022.
- [27] **Anderle, R.J.** (1976). Point positioning concept using precise ephemeris, *Satellite Doppler Positioning*, cilt 1, s.47–75.
- [28] **Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M. ve Webb, F.H.** (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017.
- [29] **Héroux, P. ve Kouba, J.** (2001). GPS precise point positioning using IGS orbit products, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 573–578.
- [30] **Alkan, R.M. ve Erol, S.** (2019). Hassas Nokta Konumlama Yöntemi'nin Antarktika'da Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, s.37–38.
- [31] **Bezcioglu, M., Özer Yiğit, C. ve Bodur, M.N.** (2019). Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği, *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 19(1), 162–169.

- [32] **Xu, G.** (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications*, Heidelberg, Almanya: Springer Berlin.
- [33] **Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E.** (2008). *GNSS - Global Navigation Satellite Systems : GPS, GLONASS, Galileo & more*, Almanya: Springer Verlag.
- [34] **Xiao, G.** (2019). *Multi-frequency and multi-GNSS PPP phase bias estimation and ambiguity resolution*, Doktora Tezi, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe.
- [35] **Hatch, R.** (1983). The synergism of GPS code and carrier measurements, *International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, cilt 2, s.1213–1231.
- [36] **Melbourne, W.** (1985). The case for ranging in GPS-based geodetic systems, *Proc. 1st int. symp. on precise positioning with GPS*, s.373–386.
- [37] **Wubenna, G.** (1985). Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI 4100 Code and Carrier Measurements, *Proceedings 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*, U. S. Department of Commerce, s.403–412, <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599798417280>.
- [38] **Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F. ve Héroux, P.** (2010). Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing, *NAVIGATION*, 57(2), 123–135, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x>.
- [39] **Shi, J.** (2012). *Precise Point Positioning Integer Ambiguity Resolution with Decoupled Clocks*, Doktora Tezi, University of Calgary, Calgary.
- [40] **Shi, J. ve Gao, Y.** (2014). A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods, *GPS Solutions*, 18.
- [41] **Klatt, C. ve Johnson, P.** (2017). Estimating benefits to Canada and the world: the Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning Service, *GEOMATICA*, 71(1), 37–44.
- [42] **Url-1** (2022). <https://www.geoed.ca/product/csrs-ppp-transitioning-to-a-modernized-positioning-service-in-canada-product>, erişim tarihi: 25.05.2021.
- [43] **Banville, S.,** (2020). CSRS-PPP Version 3: Tutorial., Canadian Geodetic Survey, Surveyor General Branch, Natural Resources Canada.
- [44] **Url-2** (2022). <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioningnavigation/geodesy/auspos>, erişim tarihi: 15.06.2020.

- [45] **Hammond, W.C., Blewitt, G., Kreemer, C. ve Nerem, R.S.** (2021). GPS Imaging of Global Vertical Land Motion for Studies of Sea Level Rise, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7).
- [46] **Larson, K., Löfgren, J. ve Haas, R.** (2013). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver, *Advances in Space Research*, 51, 1301–1310.
- [47] **Yu, K., Ban, W., Zhang, X. ve Yu, X.** (2015). Snow Depth Estimation Based on Multipath Phase Combination of GPS Triple-Frequency Signals, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(9), 5100–5109.
- [48] **Url-3** (2022). <<https://tadas.afad.gov.tr/>>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [49] **Url-4** (2022). <<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [50] **Snay, R., Cline, M., Dillinger, W., Foote, R., Hilla, S., Kass, W., Ray, J., Rohde, J., Sella, G. ve Soler, T.** (2007). Using global positioning system-derived crustal velocities to estimate rates of absolute sea level change from North American tide gauge records, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4), <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006JB004606>.
- [51] **Wasowski, J. ve Bovenga, F.** (2022). Remote sensing of landslide motion with emphasis on satellite multi-temporal interferometry applications: an overview, bölüm 11, Hazards and Disasters Series, Elsevier, second edi sürüm, s.365–438, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128184646000068>.
- [52] **Hanssen, R.** (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, Dordrecht, Hollanda: Springer Netherlands.
- [53] **Smith, B.** (2018). ICE, CLOUD, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) Project Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land Ice Along-Track Height Product (ATL06), **Teknik Rapor**, University of Washington Applied Physics Lab.
- [54] **Url-5** (2022). <https://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/overview/index.html>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [55] **Bettadpur, S. ve Watkins, M.** (2000). GRACE gravity science and its impact on mission design. In Proc. Of the Spring AGU Meeting.
- [56] **Kim, J., Roeset, P., Bettadpur, S., Tapley, B. ve Watkins, M.,** (2001). Error analysis of the gravity recovery and climate experiment (GRACE) mission, *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000*, Springer, s.103–108.
- [57] **Davis, E., Dunn, C., Stanton, R. ve Thomas, J.** (1999). The GRACE mission: meeting the technical challenges., **Teknik Rapor**, Jet Propulsion Lab., California Inst. of Tech. Pasadena, CA United States.

- [58] **Weigelt, M.** (2007). *Global and local gravity field recovery from satellite-to-satellite tracking*, Doktora Tezi, University of Calgary, Calgary, Canada.
- [59] **Watkins, M., Gruber, T. ve Bettadpur, S.** (2000). Science data system development plan, *GRACE*, 23p.
- [60] **Url-6** (2022). <<https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE?tab=documentation>>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [61] **Url-7** (2022). <https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [62] **Url-8** (2022). <https://opendap.jpl.nasa.gov/opendap/allData/tellus/L4/ice_mass/RL06/v02/mascon_CRI/antarctica_mass_200204_202203.txt>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [63] **Wahr, J., Molenaar, M. ve Bryan, F.** (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30205–30229, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/98JB02844>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/98JB02844>.
- [64] **Url-9** (2022). <<https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/gia-trends/>>, erişim tarihi: 25.05.2022.
- [65] **Yamamoto, K., Fukuda, Y. ve Doi, K.** (2011). Interpretation of GIA and ice-sheet mass trends over Antarctica using GRACE and ICESat data as a constraint to GIA models, *Tectonophysics*, 511(3), 69–78, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195110004956>.
- [66] **Peltier, W.** (2004). Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32(1), 111–149, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>.
- [67] **Riva, R.E.M., Gunter, B.C., Urban, T.J., Vermeersen, B.L.A., Lindenbergh, R.C., Helsen, M.M., Bamber, J.L., van de Wal, R.S.W., van den Broeke, M.R. ve Schutz, B.E.** (2009). Glacial Isostatic Adjustment over Antarctica from combined ICESat and GRACE satellite data, *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3), 516–523, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X09006128>.
- [68] **Ganas, A., Elias, P., Briole, P., Valkaniotis, S., Escartin, J., Tsironi, V., Karasante, I. ve Kosma, C.** (2021). Co-seismic and post-seismic deformation, field observations and fault model of the 30 October 2020 Mw=7.0 Samos earthquake, Aegean Sea, *Acta Geophysica*, 69(3), 999–1024, <https://doi.org/10.1007/s11600-021-00599-1>.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Bilal MUTLU



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü (%100 İngilizce).

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2020 Şubat - Devam Ediyor, Araştırma Görevlisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği.
- 2018 Ağustos - Eylül, Stajyer. Geotek Harita Mühendislik Ltd. Şti., Düzce.
- 2018 Temmuz - Ağustos, Stajyer. EDK (Aksa) Proje Ltd. Şti., Ankara.
- 2017 Temmuz - Ağustos, Stajyer. Akdeniz İnşaat A.Ş., YD Madencilik Düzce Çimento Fabrikası şantiyesi, Düzce.
- 2016 Temmuz - Ağustos, Stajyer. Yürekli Harita Bürosu, Düzce.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Alkan, R. M., Erol, S. ve **Mutlu, B.** (2022). Real-time multi-GNSS Precise Point Positioning using IGS-RTS products in Antarctic region. Polar Science. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100844>
- Alkan, R. M. , Erol, S. ve **Mutlu, B.** (2022). IGS-RTS ürünleri kullanılarak gerçek-zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniğinin performans analizi: Antarktika örneği. Yerbilimleri , 43 (1) , 76-95 . DOI: 10.17824/yerbilimleri.1050124

- **Mutlu, B.**, Erol, S. ve Erol, B.: An Investigation on the Ice Mass Loss in Antarctica Using Different Geosensors Data, Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG), Haziran 28 – Temmuz 2, 2021, Pekin, Çin.
- Erol, S., **Mutlu, B.** ve Erol, B.: Assessment of the Galileo System Contribution on RT-PPP Using Different Real-Time Correction Services in the Antarctic Region, Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG), Haziran 28 – Temmuz 2, 2021, Pekin, Çin.
- **Mutlu, B.**, Erol, S., Çevikalp, M. R., ve Erol, B.: Geodetic Investigation of the 30 October 2020 Mw 6.9 Samos-Izmir Earthquake, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Nisan 2021, EGU21-12219, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-12219>, 2021
- Erol, S., **Mutlu, B.**, Erol, B., ve Çevikalp, M. R.: Static and Pseudo-Kinematic PPP-AR Performance in Antarctic Region, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Nisan 2021, EGU21-14144, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14144>, 2021.
- Çevikalp, M. R., Erol, B., **Mutlu, B.**, ve Erol, S.: Accuracy Assessment of Recent High-Degree Global Geopotential Models Using Geodetic Control Points and Terrestrial Gravity Data in Turkey, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Nisan 2021, EGU21-11929, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-11929>, 2021.
- Erol, S., **Mutlu, B.**, Erol, B., Katıgöz, S. ve Alkan, R.M. (2020). Antarktika Kıtasında Hassas Nokta Konumlama (Precise Point Positioning-PPP) Tekniğinin Performansının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20 (5), 844-856. DOI: 10.35414/akufemubid.761692
- **Mutlu, B.**, Erol, S. ve Alkan, R. M. (2020). Comparison of Static PPP Performance of CSRS-PPP Float and Trimble RTX-PP Services. Intercontinental Geoinformation Days (IGD), 173-176, Mersin, Türkiye.
- **Mutlu, B.**, Çevikalp, M. R. ve Erol, B.(2019).Assessments on Temporal Variations of Earth Gravity Field with Grace Observations. XXIX International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, İstanbul, Türkiye, 5 - 06 Kasım 2019, ss.351-363.