

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜRKİYE’NİN BATI VE GÜNEY KIYILARINDAKİ DÜŞEY
YERKABUĞU HAREKETLERİNİN UYDU ALTİMETRESİ,
MAREOGRAF, GNSS VE InSAR ÖLÇMELERİYLE BELİRLENMESİ

Muharrem Hilmi ERKOÇ

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE’NİN BATI VE GÜNEY KIYILARINDAKİ DÜŞEY YERKABUĞU
HAREKETLERİNİN UYDU ALTİMETRESİ, MAREOGRAF, GNSS VE
InSAR ÖLÇMELERİYLE BELİRLENMESİ**

Muharrem Hilmi ERKOÇ tarafından hazırlanan tez çalışması 29.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Uğur DOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Uğur DOĞAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Doğan Uğur ŞANLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Bihter EROL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. M. Tefik ÖZLÜDEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Uğur DOĞAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Türkiye'nin Batı ve Güney Kıyılarındaki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Uydu Altimetresi, Mareograf, GNSS VE InSAR Ölçmeleriyle Belirlenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muharrem Hilmi ERKOÇ

İmza



Tüm Şehit ve Gazilerimize

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusundan tüm analizlerine kadar yanımda olan, geleceğime yön veren, mesleğime daha çok bağlanmama vesile olan canım hocam Prof. Dr. Uğur Doğan'a, kıymetli yönlendirmeleri için Tez Komitesi Üyeleri Prof. Dr. Cüneyt Aydın ve Doç. Dr. Bihter Erol'a, tüm birikimlerini paylaşan değerli hocam Prof. Dr. Doğan Uğur Şanlı'ya, tez savunma jüri üyesi Sayın Doç. Dr. Tevfik Özlüdemir'e, tektonik açıdan bir çok meselede fikir aldığım ve engin bilgileri ile beni aydınlatan Prof. Dr. Semih Ergintav hocama, yazılım desteği, sorunların çözümü ve önemlisi arkadaş yakınlığından öte yardımları için değerli kardeşim Arş. Gör. Dr. Hüseyin Duman'a, destek ve motivasyonları için arkadaşlarım Öğr. Gör. Mehmet Eren, Arş. Gör. Dr. Seda Özarpacı, Arş. Gör. Dr. Aziz Saraçoğlu, Arş. Gör. Alpay Özdemir ve ofis arkadaşım Arş. Gör. Dr. Hicret Gürsoy Sürmeneli'ye teşekkür ederim.

Ayrıca Mareograf ve GNSS verilerinin edinilmesinde gerekli destekleri için Dr. Albay Hasan Yıldız ve Dr. Albay Erdinç Sezen özelinde Harita Genel Müdürlüğü personeline şükranlarımı sunarım.

Kalbimde çok ayrı yeri olan, gerek döküman gerek seyahat desteği gibi bir çok konuda katkısı bulunan Avrupa Uzay Ajansı (ESA) personeline, özellikle Dr. Jerome Benveniste, Dr. Marco Restano ve Américo Ambrózio'a, Avrupa Yerbilimleri Birliği (EGU) toplantılarındaki küçük ama çok önemli önerileri için Prof. Dr. Ole Baltazar Andersen'a, yine eğitim ve seyahat destekleri için Delft Üniversitesi ekibine ve Dr. Riccardo Riva'ya, CTOH ekibinden Florence Birol'a, kendisi ile defalarca buluşma şerefine nail olduğum Fransız Uzay Ajansı (CNES) emekli araştırmacısı Prof. Dr. Anny Cazenave hocamıza minnettarlığımı belirtirim. Desteklerini gördüğüm birçok arkadaşıma özellikle Yüksek Mühendis Kerim Aykut Gümüş'e, annem Tülin Erkoç ve babam, meslektaşım Mustafa Erkoç'a teşekkürlerimi en kalbi duygularımla iletirim.

Muharrem Hilmi Erkoç

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	7
2 YÖNTEMLER	8
2.1 Deniz Seviyesi Verileri.....	10
2.1.1 Bağlı Deniz Seviyesi Belirleme	11
2.1.2 Mutlak Deniz Seviyesi Belirleme	14
2.2 GNSS ve Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) Ölçmeleri.....	20
2.2.1 GNSS Ölçmeleri	20
2.2.2 Yapay Açıklıklı Radar Ölçmeleri.....	23
3 TÜRKİYE’NİN BATI VE GÜNEY KIYILARI BOYUNCA DÜŞEY YERKABUĞU HAREKETLERİNİN BELİRLENMESİ	28
3.1 Çalışma Bölgesi ve Veri Sağlayıcı Kuruluşlar	28
3.2 Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi.....	31
3.2.1 Bağlı Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi.....	34
3.2.2 Mutlak Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi.....	41
3.2.3 Bölgesel Gelgit Modelinin Oluşturulması	45
3.2.4 Deniz Seviyesi Trendinin Belirlenmesi	48
3.3 GNSS Verilerinin Analizi	51
3.4 InSAR Verilerinin Analizi	65
3.5 Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi	69
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	78
KAYNAKÇA	81
A MAREOGRAF VE GNSS İSTASYONLARI ZAMAN SERİLERİ	88
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	94

SİMGE LİSTESİ

w_i	Açısal Frekans
P	Ağırlık Matrisi
h_i	Aletsel Hataların Toplamı
Alt	Altimetre Uydusu Yüksekliği
P_b	Anlık Yerel Deniz Seviyesi Basıncı
SSH	Anlık Deniz Seviyesi Yüksekliği
x	Bilinmeyenler vektörü
σ_0^2	Bilinmeyenler Vektörünün Önsel Varyansı
λ	Boylam
RSa	Bölgesel Yıllık Gelgit Parametresi
RSsa	Bölgesel Yarı-Yıllık Gelgit Parametresi
h_{SSB}	Deniz Durumu Yanılması
P_0	Deniz Seviyesinde Ölçülen Basıncı
h_{dac}	Dinamik Atmosferik Etki
S_{cor}	Düzeltilmiş Uzaklık
S	Düzeltilmemiş Uzaklık
φ	Enlem
ϕ_i	Faz
A_i	Fourier katsayısı (Kosinüs)
B_i	Fourier katsayısı (Sinüs)
m	Gelgit Bileşeni Sayısı
θ	Geliş Açısı
R_i	Genlik
VLM_{GNSS}	GNSS'den Elde Edilen Düşey Yerkabuğu Hareketi Oranı
t	Gözlem Zamanı
VLM_{InSAR}	InSAR'dan Elde Edilen Düşey Yerkabuğu Hareketi Oranı
h_{wet}	Islak İyonosferik Etki
h_{iono}	İyonosferik Etki
h_{stide}	Katı Dünya Gelgiti
A	Katsayılar Matrisi
R	Korelasyon Katsayısı

h_{dry}	Kuru Troposferik Etki
h_{ptide}	Kutup gelgiti
LOS_{disp}	LOS yönündeki yer değiştirme
O1	Lunar, Günlük Gelgit Parametresi
M2	Lunar, Yarı-Günlük Gelgit Parametresi
K1	Lunar Solar, Günlük Gelgit Parametresi
h_{otide}	Okyanus Gelgiti
h_{ol}	Okyanus Yüklenmesi
H_0	Ortalama Deniz Seviyesi
P_{ref}	Ortalama Küresel Yüzey Atmosferik Basıncı
N	Ölçü Sayısı
l	Ölçü Vektörü
e	Rastgele Hatalar Vektörü
S2	Solar, Yarı-Günlük Gelgit Parametresi
VLM_{SA-TG}	Uydu Altimetresi-Mareograf Farkından Düşey Yerkabuğu Hareketi Oranı
Ssa	Yarı-Yıllık Gelgit Parametresi
$h(t)$	Yerel Datuma Ait Yüzeyden Olan Anlık Deniz Seviyesi
Sa	Yıllık Gelgit Parametresi

KISALTMA LİSTESİ

ASL	Mutlak Deniz Seviyesi
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic
CHAMB	Challenging Minisatellite Payload
CMEM	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
CNES	Centre national d'études spatiales
CTOH	Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere
DAC	Dinamik Atmosferik Düzeltme
DInSAR	Diferansiyel Interferometrik Yapay Açıklıklı Radar
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
EUREF	European Referans Frame
ESA	European Space Agency
ESA-CCI	ESA Climate Change Initiative
FES2014	Finite Element Solution 2014
GIA	Buzul İzostatik Ayarı
GLOSS	The Global Sea Level Observing System
GNSS	Küresel Konumlama Sistemleri
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GOOS	Global Ocean Observing System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
HMB	Zamana Dayalı Gelgit Analiz Modeli
HMF	Frekansa Dayalı Gelgit Analiz Modeli
IB	İnverse Barametre
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IGS	International GNSS Service
INSAR	Interferometrik Yapay Açıklıklı Radar
IOC	The Intergovernmental Oceanographic Commission
LOS	Line of site
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOC	National Oceanography Centre
PSI	Persistent Scatterer Interferometry
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level

RSL	Bağıl Deniz Seviyesi
SAR	Yapay Açıklıklı Radar
SLR	Satellite Laser Ranging
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
SSB	Sea State Bias
SWH	Significant Wave Height
TUDES	Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi
QIF	Quasi Ionosphere-Free
VLM	Düşey Yerkabuğu Hareketleri, Vertical Land Motion



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Küresel GIA Modeli	1
Şekil 1.2	Küresel Deniz Seviyesi Değişim Oranı	2
Şekil 1.3	Bölgesel Deniz Seviyesi Değişim Oranı (Akdeniz)	3
Şekil 1.4	Dubrovnik Mareograf İstasyonuna ait Zaman Serileri	5
Şekil 1.5	Akdeniz'deki VLM Değerleri (1993-2004)	6
Şekil 2.1	Düşey Yerkabuğu Hareketleri	8
Şekil 2.2	Modern Mareograf İstasyonu (MERG)	11
Şekil 2.3	Modern Mareograf İstasyonu İç Yapısı	12
Şekil 2.4	Uydu Altimetresi Prensibi	15
Şekil 2.5	Uydu Altimetresi Ölçüm Hataları	16
Şekil 2.6	GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi	22
Şekil 2.7	Prensip Olarak InSAR Yaklaşımı	26
Şekil 2.8	Petrinja Depremine Ait İnterferogram (6.4 Mw, 29.12.2020)	27
Şekil 3.1	Çalışma Bölgesi	29
Şekil 3.2	ERDM Mareograf İstasyonu Zaman Serisi	36
Şekil 3.3	Düzeltilmeler, Eşik Değer ve Histogram	36
Şekil 3.4	DTU10 Küresel Gelgit Modeli	38
Şekil 3.5	Mareograf İstasyonlarından, DTU10 Küresel Gelgit Modelinden ve Bölgesel (Akdeniz) X-TRACK Modelinden Günlük Gelgit Parametrelerinin Karşılaştırılması	40
Şekil 3.6	Deniz Seviyesi Trendi (1993-2015)	42
Şekil 3.7	ESA-CCI Projesi Akdeniz Deniz Seviyesi Trendi	42
Şekil 3.8	1993-2019 Yılları Arasında Uydu Altimetre Geçişinin Zaman Serisi ..	43
Şekil 3.9	Mareograf istasyonları, Multi-misyon Uydu Altimetre Çözümleri, Bölgesel (Akdeniz) X-TRACK Gelgit Modellerinden Elde Edilen Yıllık (Sa) ve Yarı-yıllık (Ssa) Gelgit Parametrelerinin Karşılaştırılması	44
Şekil 3.10	Aylık Ortalama Deniz Seviyesi Değerleri	49
Şekil 3.11	GNSS Ağı	51
Şekil 3.12	C-GNSS İstasyonlarına Ait Zaman Serisi	57
Şekil 3.13	ORID C-GNSS İstasyonu İçin Farklı Stratejiler ile Bulunan Düşey Hız ve Standard Sapma Değerleri	58
Şekil 3.14	S1 ve Diğer Strateji Çözümleri Arasındaki Farklar ve Standart Sapmalar (IGS/EUREF Verileri)	60

Şekil 3.15 S1 ve Diğer Strateji Çözümleri Arasındaki Farklar ve Standart Sapmalar (Kampanya Verileri).....	61
Şekil 3.16 S1 ve Diğer Strateji Çözümleri Arasındaki Farklar ve Standart Sapmalar (Sürekli İstasyon Verileri-A)	62
Şekil 3.17 S1 ve Diğer Strateji Çözümleri Arasındaki Farklar ve Standart Sapmalar (Sürekli İstasyon Verileri-B)	63
Şekil 3.18 Düşey Bileşen Hızları ve Standard Sapmaları.....	65
Şekil 3.19 Interferogramlar.....	68
Şekil 3.20 VLM'nin Farklı Yöntemlerle Elde Edilmesi ve Sonuçların Karşılaştırılması Algoritması	69
Şekil 3.21 ERDM Mareograf İstasyonu Zaman Serisi	71
Şekil 3.22 ANTL Mareograf İstasyonu Zaman Serisi	72
Şekil 3.23 VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} Değerleri.....	75
Şekil 3.24 VLM_{InSAR} Değerleri	76

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Mareograf Verileri.....	32
Tablo 3.2	Uydu Altimetresi Verileri.....	33
Tablo 3.3	Uydu Altimetresi İçin Kullanılan Modeller ve Limitleri.....	34
Tablo 3.4	Gelgit Parametreleri ve Periyotları	35
Tablo 3.5	ERDM İstasyonu Gelgit Bileşenleri	37
Tablo 3.6	Korelasyon Katsayıları.....	39
Tablo 3.7	Gelgit Parametrelerinin Genliklerinin Karşılaştırılması.....	41
Tablo 3.8	Bölgesel RSa ve RSsa	46
Tablo 3.9	X-TRACK Çözümü ile Olan Farklar.....	47
Tablo 3.10	Bölgesel Gelgit Modeli	47
Tablo 3.11	Deniz Seviyesi Trendleri	50
Tablo 3.12	GNSS Kampanya Ölçümleri	52
Tablo 3.13	GNSS Verileri Değerlendirme Bilgileri	53
Tablo 3.14	GNSS Datum Stratejileri	54
Tablo 3.15	C-GNSS Veri Bilgileri	56
Tablo 3.16	Düşey Hız Bileşenlerinin IGS/EUREF Çözümleri ile Karşılaştırılması.....	59
Tablo 3.17	Kampanya GNSS İstasyonları Hızları ve Standard Sapmaları.....	64
Tablo 3.18	InSAR Veri Bilgileri	67
Tablo 3.19	VLM Oranları	74
Tablo 3.20	VLM Oranları'nın Karşılaştırılması	77

Türkiye'nin Batı ve Güney Kıyılarındaki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Uydu Altimetresi, Mareograf, GNSS ve InSAR Ölçmeleriyle Belirlenmesi

Muharrem Hilmi ERKOÇ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Bu tez çalışmasında, Türkiye'nin batı ve güney kıyılarında yer alan mareograf istasyonlarındaki düşey yer kabuğu hareketlerinin multi-misyonel uydu altimetresi ve mareograf verileriyle belirlenmesi ve elde edilen sonuçların GNSS/InSAR ölçme yöntemleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında öncelikle, 1998-2018 yılları arasında Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kapsamında işletilen 8 mareograf istasyonuna ilişkin bağıl ve mutlak deniz seviyesi verileri kullanılarak deniz seviyesi üzerindeki önemli etkileri bulunan gelgit parametreleri belirlenmiş ve bölgesel gelgit modeli oluşturulmuştur. Elde edilen model sonuçları, DTU10 (Denmark Technical University Tidal Model-10) ve FES2014b (Finite Element Solution-2014) küresel gelgit modelleri ve CTOH (Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere) tarafından yayınlanan bölgesel parametreleri (X-TRACK) ile karşılaştırılmıştır. Ana gelgit bileşenleri (yarı günlük: M2, S2 ve günlük: K1, O1) ile küresel ve bölgesel model çözümleri arasındaki farklar maksimum 1.3 cm'den daha küçük olarak belirlenmiştir. Ayrıca, mareograf istasyonlarından ve uydu

altimetresinden Türkiye'nin güneybatı kıyısı için bölgesel bir gelgit modeli oluşturulmuş ve iki yöntem arasındaki fark yaklaşık 0.8 cm olarak elde edilmiştir. Deniz seviyesi üzerindeki gelgit etkisi giderildikten sonra mareograf istasyonlarından düşey yer kabuğu hareketin etkisini içeren bağıl deniz seviyesi trendleri ve aynı zamansal dönemi kapsayan multi-misyonel uydu altimetresi verilerinden düşey yer kabuğu hareketinden bağımsız olan mutlak deniz seviyesi trendleri belirlenmiştir. Mareograf istasyonlarında düşey yer kabuğu hareketini kestirmek için her bir zaman serisinden harmonik analizle mevsimsel sinyaller çıkarıldıktan sonra altimetre ve mareograf verilerinden elde edilen deniz seviyesi arasındaki düşey yer kabuğu hareketi (Vertical Land Motion, VLM_{SA-TG}) hesaplanmıştır. Burada uydu altimetresi verilerinin kontrolü için CTOH tarafından yayınlanan deniz seviyesi anomalileri (X-TRACK) ve CMEM (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) veri arşivinden elde edilen aylık deniz seviyesi anomalilerinden yararlanılmıştır. Düşey yer kabuğu hareketinin kontrolü geleneksel olarak GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ölçmeleri ile yapıldığından GNSS verilerinin değerlendirilmesinde farklı değerlendirme stratejileri kullanılarak en ideal düşey hız değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, GNSS istasyonları için düşey hız değerlerinin datum olarak seçilecek referans istasyon seçimine bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırmak için farklı değerlendirme stratejileri göz önüne alınmıştır. Bu çalışma için, 26 sürekli GNSS istasyonundan oluşan bir jeodezik ağ tasarlanmıştır. Uygulanan stratejiler, tektonik hareketlerden en az etkilendiği düşünülen Avrasya levhasında bulunan 10 sürekli GNSS istasyonunun on farklı kombinasyonundan oluşturulmuştur. Elde edilen analiz sonuçlara göre, belirlenen düşey hızların IGS tarafından yayınlanan düşey hızlar ile oldukça uyumlu olduğu ve aralarındaki fark maksimum 0.4 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Uydu altimetresi ve mareograf istasyonlarından elde edilen düşey yer kabuğu hareketi ile GNSS verilerinden elde edilen düşey yer kabuğu hareketi (VLM_{GNSS}) arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamsız olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, alansal düşey yer kabuğu hareketlerini belirlemek amacıyla Avrupa Uzay Ajansı'nın (ESA) 2014 -2018 dönemi için Sentinel-1 verileri kullanılarak düşey zaman serileri oluşturulmuş ve VLM_{InSAR} değerleri de belirlenmiştir. Tüm ölçme yöntemleri göz önüne alınarak elde edilen

sonuçlara göre, Türkiye'nin güney ve batı kıyılarında bulunan mareograf istasyonlarında genel olarak yükselme yönünde düşey yer kabuğu hareketleri belirlenmiştir. Türkiye'nin güney kıyılarda, maksimum 1.2 ± 1.2 mm/yr iken minimum 0.3 ± 1.0 mm/yr düşey hızlar hesaplanırken, batı kıyılarda ise maksimum 3.0 ± 1.1 mm/yr , minimum 0.7 ± 0.9 mm/yr düşey hızlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşey yer kabuğu hareketleri, deniz seviyesi, gelgit, GNSS, InSAR



Determination of Vertical Land Motion in South-West Coasts of Turkey Using Satellite Altimetry, Tide Gauge, GNSS and InSAR Observations

Muharrem Hilmi ERKOÇ

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Uğur DOĞAN

This thesis aims to determine the vertical land motions at the tide gauge stations on the western and southern coasts of Turkey with multi-mission satellite altimetry and tide gauge data and compare the results with GNSS/InSAR measurement methods. For this purpose, using the relative and absolute sea level data of 8 tide gauge stations between 1998 and 2018, operated by the Turkish National Sea Level Monitoring System (TUDES) tide parameters with significant effects on sea level were determined and a regional tide model was created. The model results obtained are based on the global tide models of DTU10 (Denmark Technical University Tidal Model-10) and FES2014b (Finite Element Solution-2014) and regional parameters (X-TRACK) published by CTOH (Centre of Topography of the Oceans and the Hydrosphere) have been compared. Differences between the main tidal components (semi-diurnal: M2, S2 and diurnal: K1, O1) and global and regional model solutions were determined to be smaller than a maximum of 1.3 cm. In addition, a regional tide model for Turkey's south and west coast was created from tide gauge stations and satellite altimetry, and the

difference between the two methods was obtained as approximately 0.8 cm. After removing the tidal effect on sea level, relative sea level trends, including the effect of vertical land motion from tide gauges and absolute sea level trends independent of vertical land motion, were determined from multi-mission satellite altimetry data covering the same temporal period. In order to estimate the vertical land motion at the tide gauge stations, after seasonal signals were extracted from each time series by harmonic analysis, the vertical crustal motion (VLM_{SA-TG}) between the sea level obtained from the altimeter and tide gauge data was calculated. More, monthly sea level anomalies obtained from the sea level anomalies published by the CTOH data archive (X-TRACK) and CMEM (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) were used to control satellite altimetry data. Since the control of the vertical land motion is traditionally determined with GNSS (Global Navigation Satellite System) measurements, it aims to determine the ideal vertical velocity values using different processing strategies to evaluate GNSS data. In this context, different processing strategies are considered to investigate how the vertical velocity values for GNSS stations change depending on the reference station to be selected as datum. For this study, a geodetic network consisting of 26 continuous GNSS stations was designed. The strategies were composed of ten combinations of 10 continuous GNSS stations located on the Eurasian plate, which are thought to be the least affected by tectonic movements. According to the analysis results, the determined vertical velocities were compatible with the vertical velocities published by IGS. Their difference was determined to be a maximum of 0.4 mm/year. It was determined that the differences between the vertical land motion obtained from satellite altimeter and tide gauge stations and the vertical land motion (VLM_{GNSS}) obtained from GNSS data were statistically insignificant. In addition, to determine the areal vertical land motions, vertical time series were created using the European Space Agency's (ESA) Sentinel-1 data for 2014-2018, and VLM_{InSAR} values were determined. According to the results obtained by considering all measurement methods, vertical land motions in the direction of uplift were determined at the tide gauge stations located on Turkey's south and west coasts. While maximum 1.2 ± 1.2 mm/yr vertical velocities were calculated on the southern coasts of Turkey,

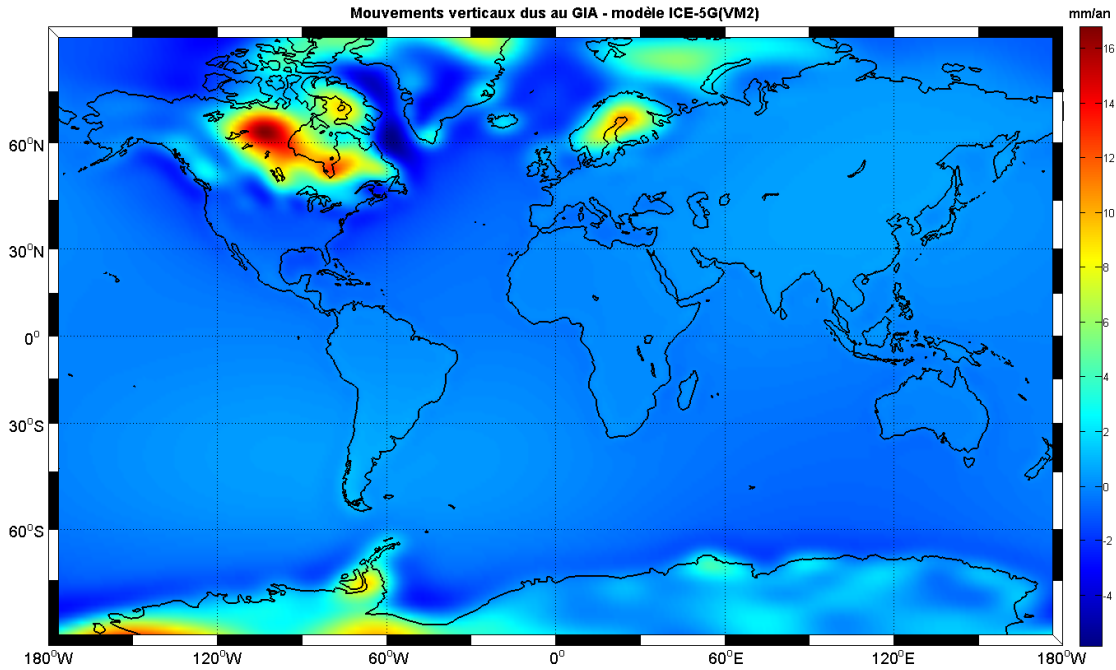
minimum 0.3 ± 1.0 mm/yr vertical velocities were calculated. In contrast, maximum 3.0 ± 1.1 mm/yr and minimum 0.7 ± 0.9 mm/yr vertical velocities were obtained on the western coasts.

Keywords: Vertical land motion, sea level, tidal model, GNSS, InSAR



1.1 Literatür Özeti

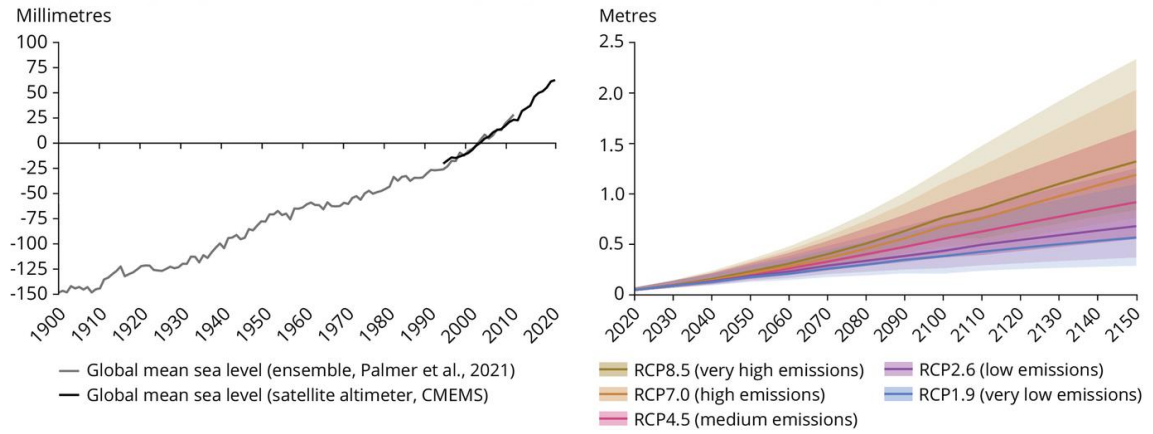
Düşey yerkabuğu hareketleri (VLM), bir jeosentrik referans çerçevesinde arazi yüzeyinin uzun yıllar içerisinde ortalama uzun vadeli değişim oranı olarak tanımlanmaktadır. Levha hareketleri sebebiyle deniz altına etkiyen tektonik kuvvetler, lokalize faylanma, yapay olarak projelendirilen kıyı peyzajı çalışmaları (yapay adalar, büyük inşaa alanları vb.), buzul izostatik ayarındaki (GIA) değişimler, iklim değişikliği, yeraltı suyundaki değişim, yeraltı kaynaklarının çıkarılması gibi etmenler düşey yerkabuğu hareketlerini etkilemektedir. Düşey yerkabuğu hareketleri küresel olarak GIA etkisinin modellenmesi ile hesaplanabilmektedir (Şekil 1.1). Bölgesel yaklaşımlarda genellikle bağıl/mutlak deniz seviyesinin GNSS ve InSAR çözümleri ile birlikte analiz edilmesiyle belirlenmektedir.



Şekil 1.1 Küresel GIA modeli [1]

VLM'nin belirlenmesindeki en önemli etmen deniz seviyesi olmakla birlikte küresel ve bölgesel deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi, dünyanın

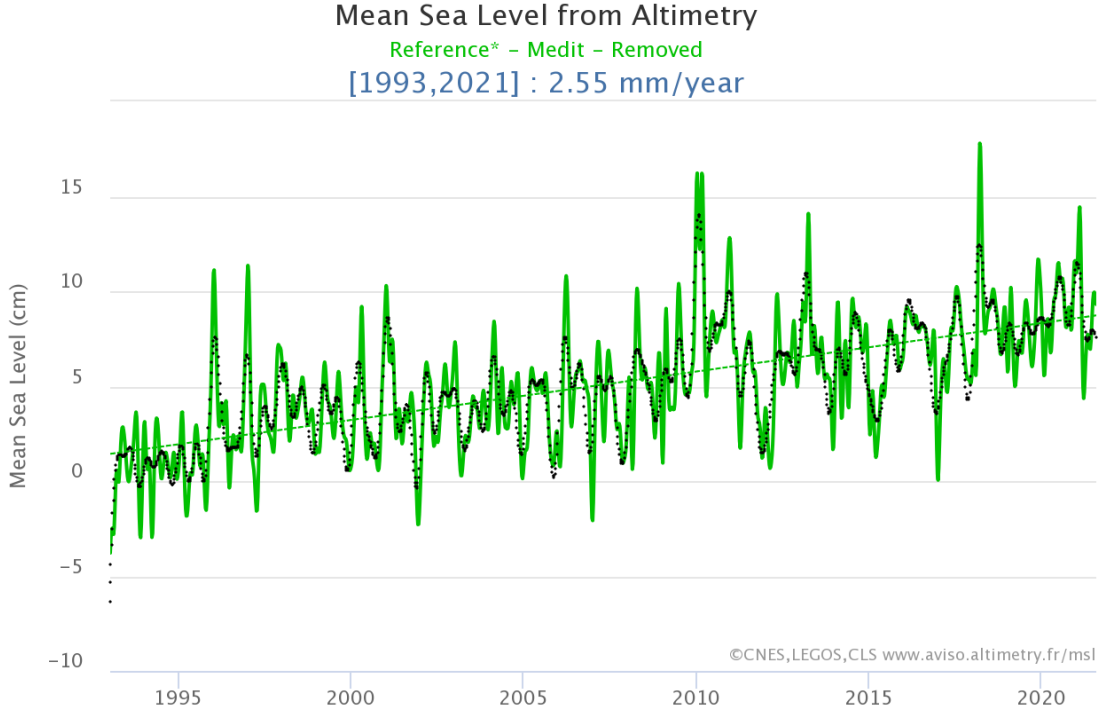
sürdürülebilir yaşam alanı olması için gereklidir. Küresel deniz seviyesi genellikle buzulların erimesi, suyun termal genişmesi ve iklim değişikliğinin bir sonucu olarak yeraltı suyu depolanmasındaki değişiklikler nedeniyle farklılaşmaktadır [2, 3]. Ayrıca son yüzyılda endüstriyel tesislerin oluşturduğu karbon emisyonları nedeniyle antropojenik zorlamanın küresel deniz seviyesine etkisi göz ardı edilemez düzeydedir. Avrupa Çevre Ajansı tarafından yayınlanan raporlar, küresel deniz seviyesi değişiminin 1993 ile 2020 arasında 3.3 mm/yıl ve AVISO yeniden işlenmiş L4 verileri kullanılarak 3.52 mm/yıl olarak hesaplandığını ortaya koymuştur [4].



Şekil 1.2 Küresel deniz seviyesi değişim oranı [4]

Küresel deniz seviyesi yükselme oranı tek tip olmadığından ve konuma bağlı olduğundan [5], bölgesel deniz seviyesi değişikliklerinin dikkate alınması gerekir. Fiziksel nedenler genellikle farklı okyanuslarda veya denizlerde değişiklikler meydana getirir. Akdeniz, dar bir boğaz olan Cebelitarık üzerinden Atlantik Okyanusu ile su alışverişi yapan çok derin bir havzadır [6]. Bu nedenle tuzluluk, yıllık rüzgâr değişkenliği, küresel okyanus sirkülasyon modellerindeki değişiklikler ve büyük ölçekli girdapların konumu, Akdeniz'deki bölgesel deniz seviyesi değişkenliğini etkileyebilir [3]. Ayrıca bu etkilerle birlikte, termal genişleme faktörü son 20 yıldır bölgesel deniz seviyesi değişikliklerine hâkim olduğu bilinmektedir [7]. Muhammed vd. (2019), 1993 ve 2017 yılları arasında GIA düzeltmesi ile tüm bölgede 0.036°C/yıl sıcaklık artışı ve 2.7 ± 0.4 mm/yıl deniz seviyesi değişikliği belirlemiştir [8]. Öte yandan Bonaduce vd. (2016), 1993

ile 2012 yılları arasındaki deniz seviyesi değişiminin 2.4 ± 0.5 mm/yıl olduğunu bulmuştur [9]. 1993-2021 arasındaki bölgesel deniz seviyesi eğilimi, AVISO tarafından yeniden işlenen L4 DUACS verileri kullanılarak 2.55 mm/yıl olarak hesaplanmıştır [10].

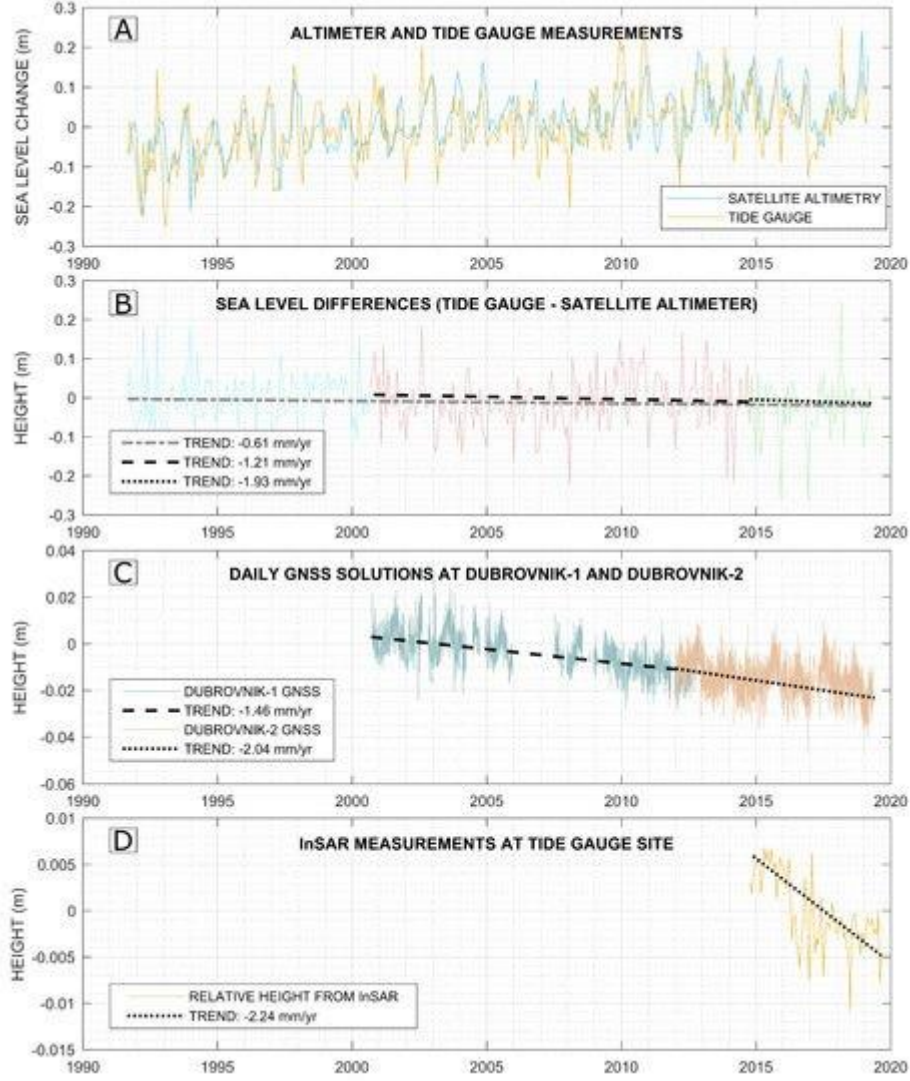


Şekil 1.3 Bölgesel deniz seviyesi değişim oranı (Akdeniz) [10]

1800'lü yılların başından beri deniz seviyesi gözlemleri kıyılara konumlandırılmış mareograf istasyonları ile yapılmaktayken, 1990'lı yılların başında Topex/Poseidon uydusunun yörüngeye yerleşmesi ile uydu altimetresi ikinci yöntem olarak ortaya çıkmıştır [11-13]. Mareograf istasyonları rölatif deniz seviyesini gözlemlediği için bazı lokal düşey hareketlerden etkilenmektedir. Uydu altimetresi ise yer merkezli bir referansa göre deniz seviyesini ölçer ve düşey yerkabuğu hareketlerinden etkilenmez [14-17]. Düşey yer kabuğu hareketleri geçmişteki deniz seviyesinin nasıl değiştiği ve deniz seviyesinin gelecekteki projeksiyonu hakkında bilgi vermektedir [6, 16, 18]. Mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesinin içinde düşey yer kabuğu hareketlerinin etkisi yer aldığından bu değerin deniz seviyesinin içinden ayıklanması gerekir. Düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesiyle denizlerdeki küresel ısınma, eriyen buzulların izleri gibi uzun dönemli etkilerin tespiti de mümkündür. Benzer şekilde

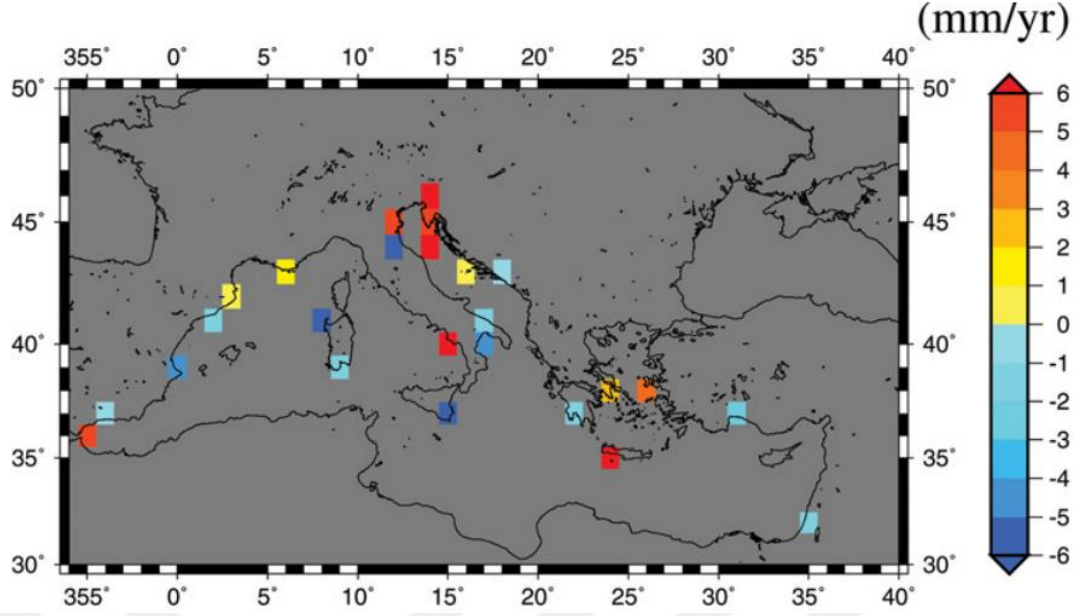
kıyı taşkınlarının belirlenmesinde veya deniz çekilmelerinin incelenmesinde de düşey yer kabuğu hareketleri önem arz etmektedir. Bu hareket, global anlamda GIA modelleri ile tahmin edilmektedir. Fakat model hataları ve modelde yer almayan lokal etkiler GIA modelinin direkt olarak kullanımını sınırlamaktadır [18-20]. Bu yüzden düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde jeodezik yöntemler ve uzaktan algılama yöntemleri kullanılmaktadır. En yaygın yöntem GNSS ve en son kullanılan yöntem ise InSAR'dır [21].

Düşey yer kabuğu hareketlerinin farklı yöntemlerle belirlendiği birçok çalışma vardır. A.Santamaría-Gómez vd. tarafından yapılan çalışmada uzun dönemli deniz seviyesi değişimlerini incelemiş mareograflardaki düşey hareketi yüksek doğrulukla GNSS verilerini analiz ederek belirlemeye çalışmıştır [22]. Guy Wöppelman vd. çalışmasında mareograf verilerine düşey yer kabuğu hareketi düzeltmesini getirerek geçtiğimiz yüzyılda deniz seviyesi değişimini kuzey yarım kürede 2 mm/yıl ve güney yarım kürede ise 1.1 mm/yıl hesaplamıştır. Marijan Grgic vd tarafından Hırvatistan'ın Dubrovnik şehrinde bulunan iki GNSS istasyonu zaman serileri, uydu altimetresi ve mareograf istasyonu zaman serisi farkı ve Sentinel-1 InSAR zaman serileri düşey yer kabuğu hareketini belirlemiş ve sırasıyla -1.93 ± 0.38 mm/yıl, -2.04 ± 0.22 mm/yıl ve -2.24 ± 0.46 mm/yıl olarak kestirmiştir [23].



Şekil 1.4 Dubrovnik mareograf istasyonuna ait zaman serileri [23]

Türkiye'nin Akdeniz ve Ege kıyılarındaki mareograf istasyonlarında düşey yer kabuğu hareketlerini belirlendiği bazı çalışmalar yapılmıştır [14, 15, 20]. Fenoglio-Marc vd. yaptığı çalışmada 1993-2001 yılları arasında ANTL mareograf istasyonunda düşey yer kabuğu hareketini -3.0 ± 1.6 mm/yıl olarak hesaplamıştır. Garcia vd. tarafından yapılan çalışmada 1993-2001 yılları arasında lineer düşey yer kabuğu hareketini (Altimetre-Mareograf) MNTS, BDRM ve ANTL için sırasıyla -12.8 ± 3.8 mm, 21.6 ± 5.6 mm/yıl ve -17.6 ± 4.0 mm/yıl olarak bulunmuştur. Yıldız vd. tarafından yapılan çalışmada ise 1993-2009 yılları arasında ANTL ve MNTS Mareograf istasyonlarında, düşey yer kabuğu hareketini hesaplanmış ve sırasıyla -2.9 ± 0.8 mm/yıl ve -1.2 ± 0.5 mm/yıl olarak hesaplamıştır.



Şekil 1.5 Akdeniz'deki VLM değerleri (1993-2004) [14]

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında Türkiye'nin batı ve güney kıyıları boyunca (Akdeniz, Ege ve Marmara denizleri) güncel mareograf ve çok misyonlu uydu altimetresi verileri kullanılarak deniz seviyesi eğilimlerinin belirlenmesi ve bu iki yöntem arasındaki farklar, GNSS ve InSAR ölçme yöntemleriyle elde edilen sonuçlar ile birlikte VLM oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında,

- Türkiye'nin batı ve güney kıyılarındaki deniz seviyesine ait değişimlerinin belirlenmesi,
- Mareograf ve uydu altimetresi verilerinin birbiri ile karşılaştırılması,
- Bölgesel gel-git modelinin oluşturulması,
- Düşey yönde yerel hareketlerin belirlenmesi için GNSS ve InSAR ölçme yöntemleri ile analizlerin yapılması,
- VLM'nin belirlenmesi ve farklı yöntemlerle karşılaştırılması hedeflenmiştir.

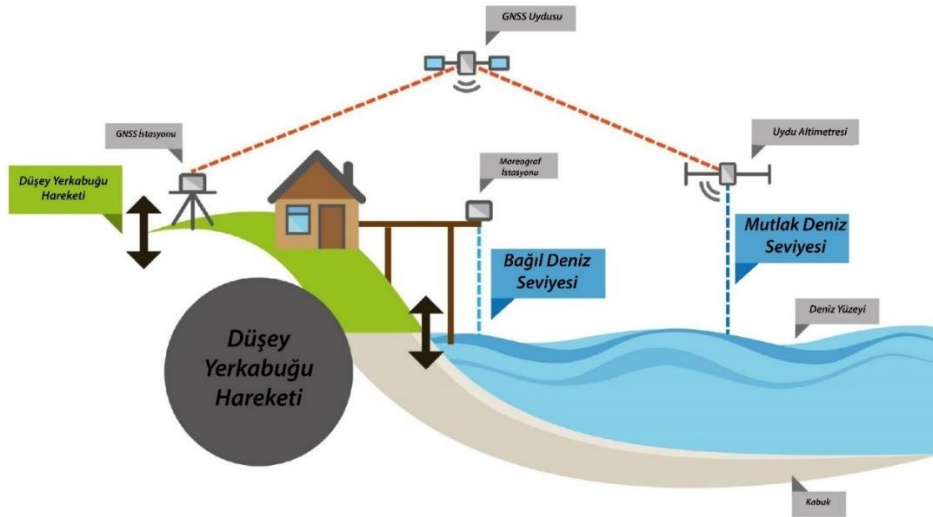
1.3 Hipotez

Bu çalışma için aşağıdaki hipotezler öngörülmektedir:

- Mareograf istasyonları yerel hareketler sebebiyle VLM etkisine maruz kalmaktadır.
- Yerel hareketlerin neden olduğu bölgesel deniz seviyesindeki değişimler belirlenirken VLM'nin dikkate alınması gereklidir.
- Türkiye'nin batı ve güney kıyılarında anlamlı deniz seviyesi değişimi belirlenmektedir.
- VLM'nin GNSS ile belirlenmesi için GNSS verilerinin bağlı değerlendirilmesinde referans istasyonu seçiminin anlamlı etkisi vardır.
- Türkiye'nin batı ve güneyindeki denizlerde (Akdeniz, Ege, Marmara) deniz seviyesi üzerinde gelgit parametreleri etkili olmaktadır.
- GNSS VLM'nin belirlenmesinde noktasal sonuç verirken InSAR ölçmelerinden faydalanılarak VLM alansal olarak belirlenebilmektedir.

2 YÖNTEMLER

Düşey yerkabuğu hareketleri geçmişteki deniz seviyesinin nasıl değiştiği ve deniz seviyesinin gelecekteki projeksiyonu hakkında bilgi vermektedir [6, 16, 18]. Bu sebeple düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesinde kıyı bölgelerdeki deniz seviyesi bileşenlerinin dikkate alınması ve sürdürülebilir bir yaşam için izlenmesi gerekir. Düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi matematiksel olarak oldukça basit bir formüle sahip olmakla beraber bunun uygulama karşılığı bir hayli özen gerektirir ve birçok verinin toplanması esasına dayanır. Günümüzde deniz seviyesi farklı yaklaşımlarla belirlenmekle birlikte, iki yüzyılı aşkın süredir deniz seviyesi gözlemleri kıyılara konumlandırılmış mareograf istasyonları ile, çeyrek asrı aşkın süredir ikinci yöntem olarak ortaya çıkan uydu altimetresi misyonları ile yapılmaktadır. Bu iki yöntem çevresel, küresel ve lokal bazı faktörlerden etkilenmektedir. Fakat global etkilerin olmadığını veya giderildiğini düşündüğümüzde bağıl deniz seviyesi belirleyen mareograf istasyonları düşey yerkabuğu hareketlerinden etkilenirken mutlak deniz seviyesi belirleyen uydu altimetresi verileri bu durumdan etkilenmez.



Şekil 2.1 Düşey yerkabuğu hareketleri [24]

Düşey yer kabuğu hareketlerinin matematiksel modeli, kıyı bölgelere kurulmuş mareograf istasyonlarında yapılan ölçümler ile denizlerden yansıma yapan bir lazer ışını gibi düşünülebilen uydu sistemlerinden elde edilen deniz seviyesi arasındaki fark olarak karşımıza çıkar ve (2.1) gibi ifade edilir.

$$VLM = ASL - RSL \quad (2.1)$$

Burada VLM düşey yer kabuğu hareketini, ASL mutlak deniz seviyesini ve RSL ise bağıl deniz seviyesini ifade eder. Bu farkın kontrolü için küresel konumlama sistemleri (GNSS), VLBI, DORIS gibi birçok yöntemler kullanılmaktadır. Fakat maliyet ve uygulanabilirlik açısından en öne çıkan doğrulama yöntemi GNSS olup dünyada ve farklı disiplinlerde ortaya çıkan görüş GNSS'in en aktif yöntem olduğudur. Şekil 2.1 ile gösterilen ifadeler kısaca açıklanırsa; yerden yaklaşık 20 bin kilometre yükseklikteki konumlama uyduları, alçak yörünge uyduları grubunda yer alan uydu altimetresi misyonlarının konum verilerini belirlemeye yardım eder. Böylece uydu altimetresi misyonundan deniz, okyanus veya göl gibi alanlara yollanan lazerin ulaşım süresinden deniz seviyesinin bir jeosentrik yüzeye göre değeri bulunur. Bu değerin, normal şartlarda, matematiksel olarak kıyılardaki mareograf istasyonlarında elde edilen deniz seviyesi değeri ile aynı bulunması gerekir. Fakat dünyanın yapısı ve kara/denizlerin birçok etmeden etkilenmesi sebebiyle bu değerler aynı olmamaktadır. GNSS istasyonlarında yapılan gözlemler ile birlikte düşey yer kabuğu hareketleri kontrollü olarak belirlenmiş olur. Ayrıca Şekil 2.1'in dışında son yıllarda düşey yer kabuğu hareketleri InSAR yöntemi ile belirlenmekte olup, oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Bilinen diğer bir noktada GNSS verilerinin 30 yıla yakın bir geçmişi olduğu varsayılır ise 1800'lü yıllara kadar olan düşey hareketlerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Fakat çeşitli projeksiyonlar ile 1900'lü yıllardan günümüze düşey yer kabuğu hareketlerinin tahmini yapıldığı görülmektedir.

Düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde üstesinden gelinmesi gereken bazı konular vardır. Bunların en başında mareograf istasyonları ile uydu altimetresi misyonlarının geçiş güzergahları arasındaki mesafelerdir. Genel olarak bir kara parçasının 10 km açığı kıyı bölgesi olarak kabul edilmekteyken, bazı

kaynaklarda 30 km'ye kadar alınabileceği öngörülmektedir. Fakat en önemli unsur iki farklı çözüm getirecek altimetre misyon güzergahı ile mareograf arasındaki mesafenin oldukça minimum olmasıdır. Diğer önemsenmesi gereken konulardan birisi de hala birçok bölgede Mareograf istasyonlarında eş bir sürekli gözlem yapan GNSS istasyonlarının olmamasıdır. Burada genel yaklaşım Mareograf ve GNSS istasyonları arasındaki mesafenin 250 metrenin altında olmasıdır.

2.1 Deniz Seviyesi Verileri

Disiplinler arası bir konu olarak deniz seviyesi değişimlerinin araştırılması, ulusal yükseklik referans sistemlerinin oluşturulması, liman operasyonları, kıyı inşaatları, gelgitlerin araştırılması, deniz canlılarının popülasyonu, sel-tsunami uyarı sistemlerinin geliştirilmesi, turizm alanlarının imarı gibi bir çok amaç için gereklidir [25-28].

Deniz seviyesinin kıyı alanları üzerindeki etkilerini belirlemek için referans alınacak en uygun yüzey deniz seviyesidir [5, 29]. Bu referans yüzey, diğer bir deyişle deniz seviyesi, okyanus suyunun ısınması, buzulların erimesi, yüzey rüzgarları, arkeolojik etkiler, iklim değişiklikleri, düşey hareketler, gelgitler, yerçekimi kuvvetleri, kara buzullarının dağılımındaki değişiklikler kavram nedeniyle değişmektedir [6, 30-32].

Günümüzde mareograf istasyonları ve uydu altimetresi, deniz seviyesi değişikliklerini izlemek ve gelgit bileşenlerini belirlemek için iki ana tekniktir. Mareograflar, yerel bir datuma göre deniz seviyesini ölçerler. Bu nedenle, gözlemleri yerel düşey yerkabuğu hareketlerinden etkilenebilir. Uydu altimetresi, deniz seviyesini yer merkezli bir referansa göre ölçer ve düşey yerkabuğu hareketlerinden etkilenmez.

Mareograf istasyonları yaygın ve geleneksel olarak kıyı bölgelerde ve adalarda konumlandırılarak üç asırdan fazla süredir deniz seviyesini belirlemek için kullanılmaktadır. Şu anda, dünya çapında üç yüzden fazla mareograf istasyonu bulunmaktadır. 1993 yılından bu yana uydu altimetresi yöntemi, yaklaşık 10 günlük aralıklarla kıyı bölgelerinde, açık denizlerde ve okyanuslarda mutlak deniz seviyesinin belirlenmesi için mekansal bir yöntem olmuştur. Paleo yaklaşımı ayrıca

uzun dönemli deniz seviyesi değişimlerini belirlemekte ve bölgenin jeolojisi hakkında bilgi elde etmektedir [33].

2.1.1 Bağlı Deniz Seviyesi Belirleme

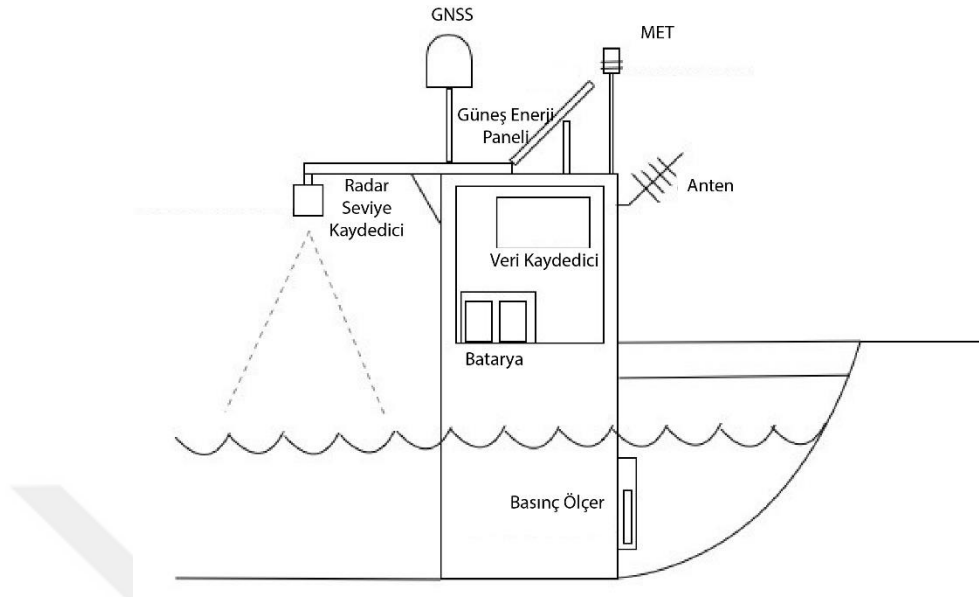
1800'lü yıllarda mekanik şamandıra ve durgun kuyular ile, mira benzerimsi bir metrik cetvel üzerinde yapılan gözlemler ile başlayan bağlı deniz seviyesi ölçümleri günümüzde modern otomatik ve akustik/radar sensörlü mareograf istasyonları ile gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.2). Günümüzde mareograf istasyonlarında deniz seviyesi değişimlerini etkileyebilecek sıcaklık, hava basıncı, rüzgar hızı ve yönü ve nem gibi meteorolojik parametreler de gözlenmektedir.



Şekil 2.2 Modern mareograf istasyonu (MERG)

Modern mareograf istasyonlarının iç yapısında radar mekanizma sayesinde deniz seviyesi sürekli olarak kaydedilebilmektedir. Mareograf istasyonları opsiyonel olarak GNSS istasyonlarına sahip olabilmektedir. MET modülü rüzgâr, nem vb.

gibi çeşitli gerekli bilgilerin alınmasına yarar. Basınç ölçer vasıtasıyla anlık basınç verisine de erişim mümkündür.



Şekil 2.3 Modern mareograf istasyonu iç yapısı

Dünya, ay ve güneş arasındaki çekim kuvveti, gelgit etkisi olarak bilinen üstün bir etkiye sahiptir. Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın deniz seviyesindeki değişimlerin belirlenmesinde önemli bir unsurdur [34]. Bu nedenle gelgit bileşenlerinin hesaplanması ve deniz seviyesi verilerinden çıkarılması gerekmektedir. Gelgit modellemede zamana (HMB) ve frekans alanına (HMF) dayalı iki harmonik gelgit analizi yöntemi kullanılmaktadır [35]. HMB, N-sonlu bir sayı ile ifade edilebilen gelgitin harmonik bileşenlerini ifade eder [35-36]. HMF ise ölçülen deniz seviyesinde harmonik etki ve gürültü ile stokastik bir modelin kurulmasına dayanan bir yöntemdir [37]. En küçük kareler harmonik analizi, deniz seviyesi verileri üzerindeki periyodik etkileri belirlemek için harmonik analizin kullanılması ilkesine dayanmaktadır. Gelgit etkisi, deniz seviyesi değişimi üzerindeki önemli etkileri nedeniyle büyük önem taşımaktadır. Deniz seviyesi verilerinde bilinen frekanslar için gelgit bileşenleri kullanılarak (2.2) ile fonksiyonel bir model geliştirilmiştir [38-40]:

$$h(t) = H_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t \quad (2.2)$$

Burada $h(t)$ Mareograf röper noktasına göre yerel datuma ait yüzeyden olan anlık deniz seviyesi, H_0 ortalama deniz seviyesi, t gözlem zamanı, ω_i açısal frekans, A_i ve B_i hesaplanması gereken Fourier katsayılarıdır. Deniz seviyesi ve gelgit bileşenlerini belirlemek için fonksiyonel model, denklem (2.3)'de gösterilen en küçük ortalama kareler yöntemiyle oluşturulabilir.

$$l = A x + e \quad \text{ve } e \approx (0, \sigma_0^2 P^{-1} = C_{ll}) \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \omega_1 t_1 & \sin \omega_1 t_1 & \cdots & \cos \omega_m t_1 & \sin \omega_m t_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \omega_1 t_n & \sin \omega_1 t_n & \cdots & \cos \omega_m t_n & \sin \omega_m t_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_0 \\ A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ A_m \\ B_m \end{bmatrix} + e$$

Burada l ölçü vektörünü, A katsayılar matrisini, x bilinmeyenler vektörünü ve e ise rastgele hatalar vektörü olup beklenen değeri sıfırdır. σ_0^2 önsel varyans, P ağırlık matrisi, n ölçü sayısı ve m ise gelgit bileşeni sayısıdır.

(2.3)'ün en küçük kareler parametre kestirimini kullanarak çözümü aşağıdaki gibidir:

$$x = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (2.4)$$

$$C_{xx} = S_0^{-2} (A^T P A)^{-1} \quad \text{ve } S_0^2 = (l^T P l - A^T P l x) / (n - m)$$

En küçük kareler kestirimi ile bulunan gelgit bileşenlerinin genlik (R_i) ve faz (ϕ_i) değerleri (2.5) ile hesaplanmaktadır.

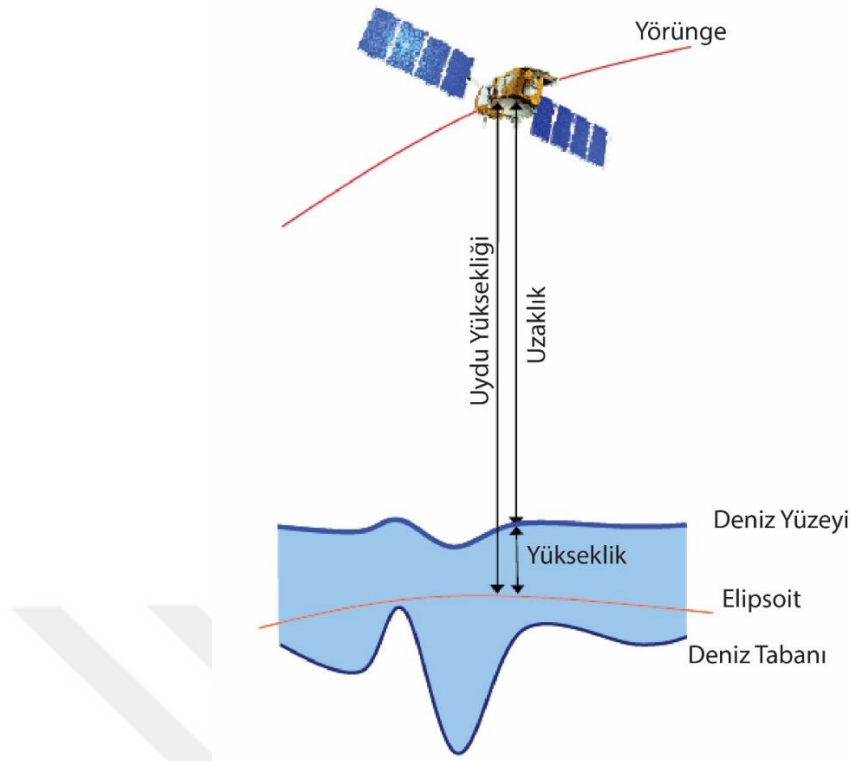
$$R_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad (2.5)$$

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{B_i}{A_i}\right) \quad , \quad \phi_i = 2 \arctan\left(\frac{B_i}{A_i + R_i}\right)$$

2.1.2 Mutlak Deniz Seviyesi Belirleme

Mutlak deniz seviyesinin belirlenmesi, uydu altimetresi misyonları ile okyanus, deniz, göl, nehir gibi alanlarda uydudan gönderilen radar sinyalinin gidiş-dönüş süresinin ölçülerek deniz seviyesinin araştırılmasıdır. Okyanusların uzaysal izlenmesi çok daha eskiye dayanmasına rağmen, birçok disiplinin birlikte hareketi ve çözümlemelere katkısı ile 1992 yılında yörüngede yerini alan Topex/Poseidon iklim bilimleri ve deniz seviyesinin mutlak yöntemlerde belirlenmesi konusunda yeni bir çağ açmıştır. Deniz seviyesi rutin olarak yarı küresel kapsama alanı (denizler/göller düşünüldüğünde) ve birkaç gün/hafta tekrar geçiş süresi ile uydu altimetresi misyonları tarafından ölçülür. Altimetre, dünyanın kütle merkezine göre deniz seviyesi değişimlerini ölçer ve deniz seviyesinin ölçümleri mutlak bir referans sisteminde yapılır ve düşey yerkabuğu hareketlerinden etkilenmez.

Altimetrede prensip, uydunun radar dalgası yayarak deniz yüzeyinden yansıyan sinyalin işlenmesidir. GNSS uyduları yardımıyla altimetre uydusunun üzerindeki GNSS alıcısının bir referans yüzeye (referans elipsoidi) göre yörüngedeki konumu uydu yüksekliğini ifade eder. Altimetre uydusu üzerindeki radar dalgası sadece okyanus, deniz, göl vb. yüzeylerden yansıyıp geri dönecek özelliktedir. Bu dalga gidiş ve dönüş süresince hareketinden uzaklık hesaplanır. Gidiş ve dönüş sinyalinin genliğine ve dalga biçimine bakarak, okyanuslar üzerindeki dalga yüksekliğini ve rüzgâr hızını ve daha genel olarak sinyalin yansıtıldığı çoğu yüzey için geri saçılım katsayısını ve yüzey pürüzlülüğü de ölçülebilmektedir. Eğer iki frekansta yayın yapan altimetre uydusu kullanılıyorsa, kullanılan frekansların özelliklerine göre okyanuslardaki yağmur oranı, gemilerin denize bıraktığı atıklar, akıntı hızları, buz çatlakları üzerindeki yarıkların tespiti gibi bulgulara erişilebilir.



Şekil 2.4 Uydu altimetresi prensibi [10]

Altimetre uydusu misyonlarındaki matematiksel ifade (2.6) ile ifade edilmiştir. Uzaklık kavramı üzerinde jeofiziksel ve buradaki uzaklık ölçmeye yarayan sistemden kaynaklı bazı hatalar vardır. Bunlar; uydu altimetresi ölçüm hataları, uydu konum hataları, jeofiziksel hatalar, sinyal yayılım hatalarıdır.

$$SSH = Alt - S_{cor} \quad (2.6)$$

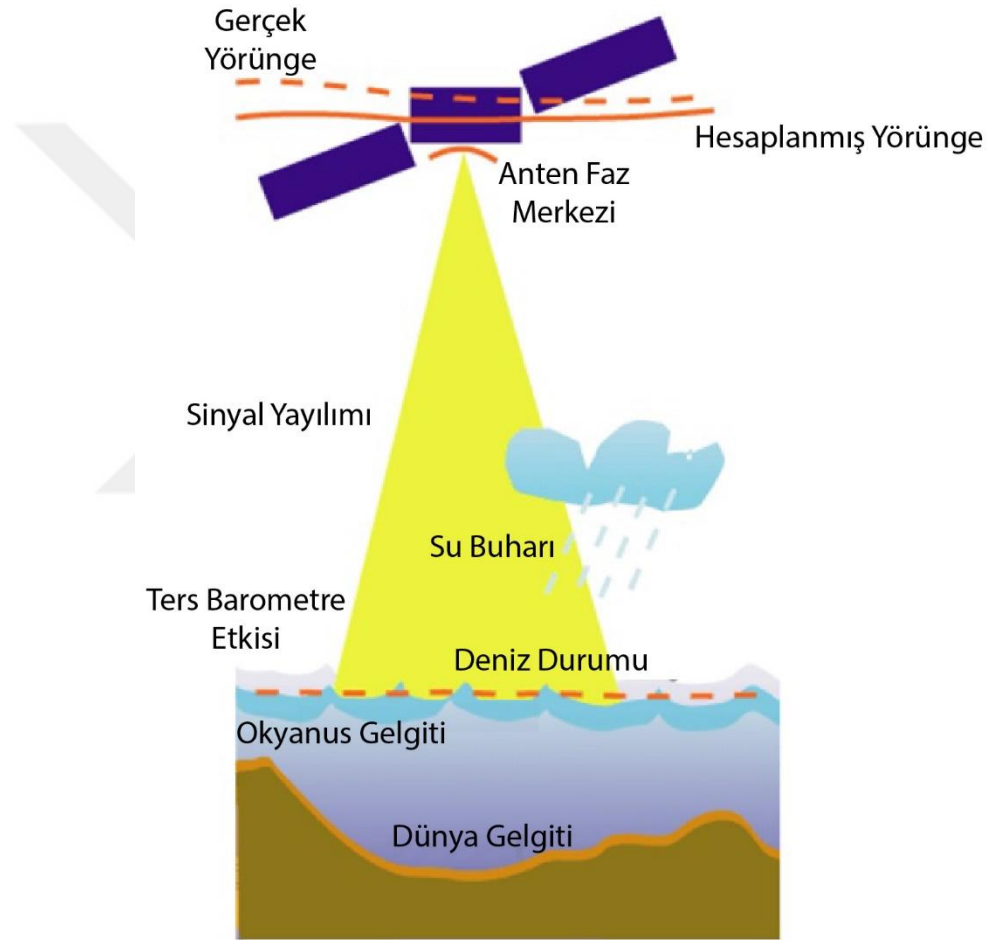
Burada SSH anlık deniz seviyesi değeri, Alt uydu yüksekliği, S_{cor} ise düzeltilmiş uzaklık değeridir. S_{cor} ifadesi (2.7) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$S_{cor} = S + (h_i + h_{iono} + h_{dry} + h_{wet} + h_{SSB} + h_{otide} + h_{ol} + h_{stide} + h_{ptide} + h_{DAC}) \quad (2.7)$$

Burada S uydu altimetresi ile deniz yüzeyi arasında düzeltilmesi gereken uzaklıktır. h_i aletsel hataların toplamını, h_{iono} iyonosferik etkiyi, h_{dry} kuru troposferik etkiyi, h_{wet} ıslak iyonosferik etkiyi, h_{SSB} deniz durumu yanılmasını, h_{otide} okyanus gelgitini, h_{ol} okyanus yüklenmesini, h_{stide} katı dünya gelgitini, h_{ptide} kutup gelgitini, h_{DAC} ise dinamik atmosferik etkiyi ifade etmektedir.

2.1.2.1 Uydu Altimetresi Ölçüm Hataları

En ideal uzaklığı elde etmek için, ölçülen iki yönlü sinyal çıkış-varış süresi bir dizi aletsel hatalar içermektedir [41]. Bu hatalar; Doppler etkisi (uydu ile deniz yüzeyi arasındaki hız farkının geri yansıyan sinyalin frekansında etki etmesi), uydunun deniz yüzeyine göre daha ivmeli olması, osilatör etkisi, altimetre kalibrasyon etkisi, iz noktası gösterimi hatalarıdır. Ölçme hatası olarak bilinen bu etkilerden bazıları uydu fırlatılmadan önce laboratuvar ortamında, bazıları ise ilk veri alındıktan sonra kalibrasyon aşamasında hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.5 Uydu altimetresi ölçüm hataları [42]

2.1.2.2 Uydu Yörünge Hataları

Her uydu misyonunda olduğu gibi uydu altimetresinin yörüngesi de çok hassas olarak belirlenmelidir. Deniz üzerinde yapılan her bir araştırma yüksek hassasiyet gerektiğinden, yörünge hatalarını en aza indirebilecek teknikler geliştirmek için

uydu altimetresi misyonlarının uygulamaya alındığı dönemin başlangıcından itibaren birçok gelişim yaşanmıştır [43-45]. Hassas yörünge belirleme, uydunun kütle merkezinin üç boyutlu konumunun, düzenli aralıklarla, iyi tanımlanmış bir referans çerçevesinde tahmin edilmesini sağlayan prosedürdür ve uydu hareketinin dinamiklerini uydu konumunun yüksek hassasiyetli gözlemleriyle açıklayan doğru ve karmaşık matematiksel modelleri birleştirir [43]. Alçak dünya yörüngesindeki bir uydunun hareketi, dünya yer çekimi alanı (katı dünya ve okyanus gelgitleri), ay, güneş ve diğer gezegenlerden kaynaklı yerçekimi etkileri, dünya ve güneş üzerindeki radyasyonel etki ve atmosferik direnç gibi kavramlardan dolayı bozulmaktadır.

Uydu yörünge hataları sebebiyle Dünya'nın yerçekimi alanı modellenmelerinde önemli kısıtlar ve belirsizlikler olmaktadır. Yerçekimi kuvveti modelleri, genel yaklaşımla uydu teknikleri ile ve GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) ve CHAMB (CHALLENGING Minisatellite Payload) kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu özel yerçekimi misyonları sayesinde modellerin hassasiyet ve doğrulukları artmıştır [46-47]. Çeşitli yerçekimi etkileri için mevcut modeller, Uluslararası Yer Döndürme Hizmeti (IERS) kapsamında yayınlanmıştır [48]. Uzay aracının büyüklüğü ve şekline göre güneş radyasyon basıncı ve atmosferik boşluk gibi yerçekimi olmayan kuvvetler değişkenlik gösterir. Böylece uydular için bu modellemelerin yapılması daha basittir.

Altimetre uydusu ölçümlerinin uydu yörüngesinin belirlenmesinde bir etkisi yoktur, bu nedenle uydu hareketinin altimetre misyonlarından farklı gözlemlerle belirlenmesi gereklidir. Genel olarak üç farklı yaklaşımla altimetre misyonlarının hareketi belirlenebilmektedir. Bunlar SLR, DORIS ve GNSS gözlemlerine dayanır.

2.1.2.3 Sinyal Yayılım Hataları

Sinyal yayılım hataları atmosferik kırılmadan dolayı oluşan gecikmeden ve deniz durumu yanılması (SSB) kavramlarından oluşmaktadır. Esasen atmosferik etkiler, altimetre sinyalinin yayılmasını geciktirerek, ölçülen sinyal geliş-gidiş süresini artırır, bu da uzaklığın daha büyük olarak hesaplanmasına sebep olmaktadır.

Atmosferik kırılmadan dolayı oluşan gecikmenin üç temel kaynağı vardır ve bunlar iyonosferik etkiler, kuru troposferik etki ve yaş troposferik etkidir.

İyonosferik etkiler, serbest elektronlar ile ilişkili atmosferin yalıtkan özelliğinin bir sonucudur. Işık hızı toplam elektron içeriğine bağlı olarak bir miktar azalır [49]. Böylece atmosferdeki elektron içeriği yüzeyden yansıyan sinyalin yolunun uzamasına sebep olur. Bu uzama elektron yoğunluğu modelleri oluşturularak giderilebileceği gibi, çift frekanslı altimetrelere veya DORIS gözlemleri ile de belirlenebilir.

Kuru troposferik etki altimetre ölçümlerine getirilmesi gereken en büyük düzeltme olup atmosferdeki kuru hava molekülü kütlelerinin ölçülen sinyal yolunu 2-3 m daha fazla belirlenmesine yol açtığı durumdur. Deniz seviyesinde ölçülen basınç değeri (P_0) ile doğru orantılı olup enlem (φ) yardımıyla (2.8) ile bulunur.

$$\Delta SSH_{dry} \sim 0.2277 P_0 (0.0026 \cos 2\varphi) \quad (2.8)$$

Islak troposferik düzeltme hem su buharını hem de bulut sıvı su damlacığının atmosferik kırılmaya sebep olması ile ortaya çıkar. Troposferdeki su miktarı uzaydaki konum ve zamana bağlı yüksek oranda değişiklik gösterir ve 5 ile 30 cm arasında sinyal yolu gecikmelerine sebep olabilir. Islak troposferik düzeltme hem mikrodalga radyometresi hem de su buharı içeren atmosferik modeller kullanılarak hesaplanabilir [50-51].

Yansıtılan sinyalin özelliği gereği gerçek deniz durumunu etkileyen önemli bir etki vardır ve buna deniz durumu yanılması (SSB) denir. Deniz yüzeyinin düzgün olup olmadığı yansıyan alanın boyutunu değiştirmektedir. Yansımalar dalga çukurlarında daha fazla dalga tepelerinde daha azdır. Uydu altimetresi ile ölçülen deniz yüzeyi dalga çukurlarında eğimli olduğundan bazı sistematik düzeltmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu deniz durumu yanılması etkisi SWH'nin bir yüzdesel ifadesi olarak düşünülebilir [52].

$$\epsilon \sim \beta \cdot SWH \quad (2.9)$$

Burada β değeri %1-5 aralığındadır. Daha doğru deniz durumu yanılması düzeltmeleri elde etmek için gözlem ve deneye dayalı olarak okyanus dalgası

modelleri yardımıyla belirlenen değerler ile rüzgar hızı ve SWH ölçümlerinden faydanılabilir. [52].

2.1.2.4 Jeofiziksel Hatalar

Uydu altimetresi misyonları ile gerçekleştirilen deniz seviyesi ölçümleri katı dünya gelgiti, okyanus gelgiti, kutup gelgiti, atmosferik basınç, rüzgar gerilimi gibi jeofiziksel hatalardan etkilenmektedir.

Okyanus gelgitleri, gök cisimlerinin, özellikle Ay ve Güneş'in çekiminden kaynaklanan deniz yüzeyinin periyodik deformasyonlarıdır. Dünyaya göre Ay ve Güneşin bağıl hareketleri ve Dünya'nın kendi eksenini etrafındaki dönüşü birlikte düşünüldüğünde su kütlelerinde farklı büyüklüklere sahip periyodik yer değiştirmeler meydana gelir. Açık okyanusta gelgit genlikleri tipik olarak yaklaşık bir metre iken kıyı bölgelerinde birkaç metreye ulaşabilir [53].

Katı Dünya gelgiti, ay-güneş zorlaması nedeniyle okyanus tabanı da dahil olmak üzere Dünya kabuğunun elastik periyodik deformasyonudur. Genellikle okyanus gelgitleri ile benzer frekanslarda ve genliği yaklaşık 50 cm civarında olmaktadır. Katı dünya gelgiti literatürde Love denklemleri ile türetilmektedir [54-55].

Kutup gelgiti, okyanus yüzeyinde gerçekleşen gelgit benzeri bir hareket olup ve Dünya'nın dönme ekseninin değişmesinden kaynaklanan küçük etkilerden oluşur.

Atmosferik basınç arttıkça ve azaldıkça, deniz yüzeyi sırasıyla düşen veya yükselen hidrostatik olarak tepki verme eğilimindedir. Atmosferik basınç miktarında 1 mbar'lık bir artış, deniz yüzeyi üzerinde ortalama 1 cm düşme anlamına gelmektedir. Bu etkiye atmosferik basınç yüklemesi diğer bir adıyla ters barometre etkisi (IB) denir.

$$IB = 0.9948 (P_b - P_{ref}) \quad (2.10)$$

Burada P_b anlık yerel deniz seviyesi basıncı, P_{ref} ise okyanus üzerinde zamanla değişen ortalama küresel yüzey atmosferik basıncıdır. Dinamik Atmosferik Düzeltme (DAC), atmosferik basınç ve rüzgâr zorlaması etkisinin birlikte düşünülmesi ile elde edilmektedir. [56-57].

2.2 GNSS ve Yapay Açıklıklı Radar (InSAR) Ölçmeleri

Düşey yer kabuğu hareketlerinin kontrolü ve lokal etkilerden kaynaklandığının gösterilmesi için uzun yıllardır GNSS tekniği kullanılmaktayken son yıllarda uzaktan algılama sistemlerinin hızla gelişmesiyle InSAR yöntemi de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. GNSS ile mareograf istasyonundaki noktasal yer hareketleri belirlenirken InSAR ile alansal çökme ve yükselmeler belirlenebilmektedir.

2.2.1 GNSS Ölçmeleri

Uzay tekniklerinin 1960'lı yıllarda hayatımıza girmesi ile birçok zahmetli işlemler daha kolay hale gelmiştir. Buna paralel olarak son 40 yıldır konum belirlemede klasik ölçmelere alternatif olarak küresel konumlama sistemi hayatımıza dahil olmuştur. Farklı disiplinlerin de ilgi duyması ile küresel konumlama; taşınmaz mülkiyeti sınırları, deniz seviyesi değişimleri, buzul kalınlıkları, tektonik hareketler, deprem/heyelan gibi afetlerin oluşturduğu deformasyonlar, mühendislik yapılarının izlenmesi, tsunaminin ulaşabileceği ve zarar verebileceği maksimum yükseklik tayini gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

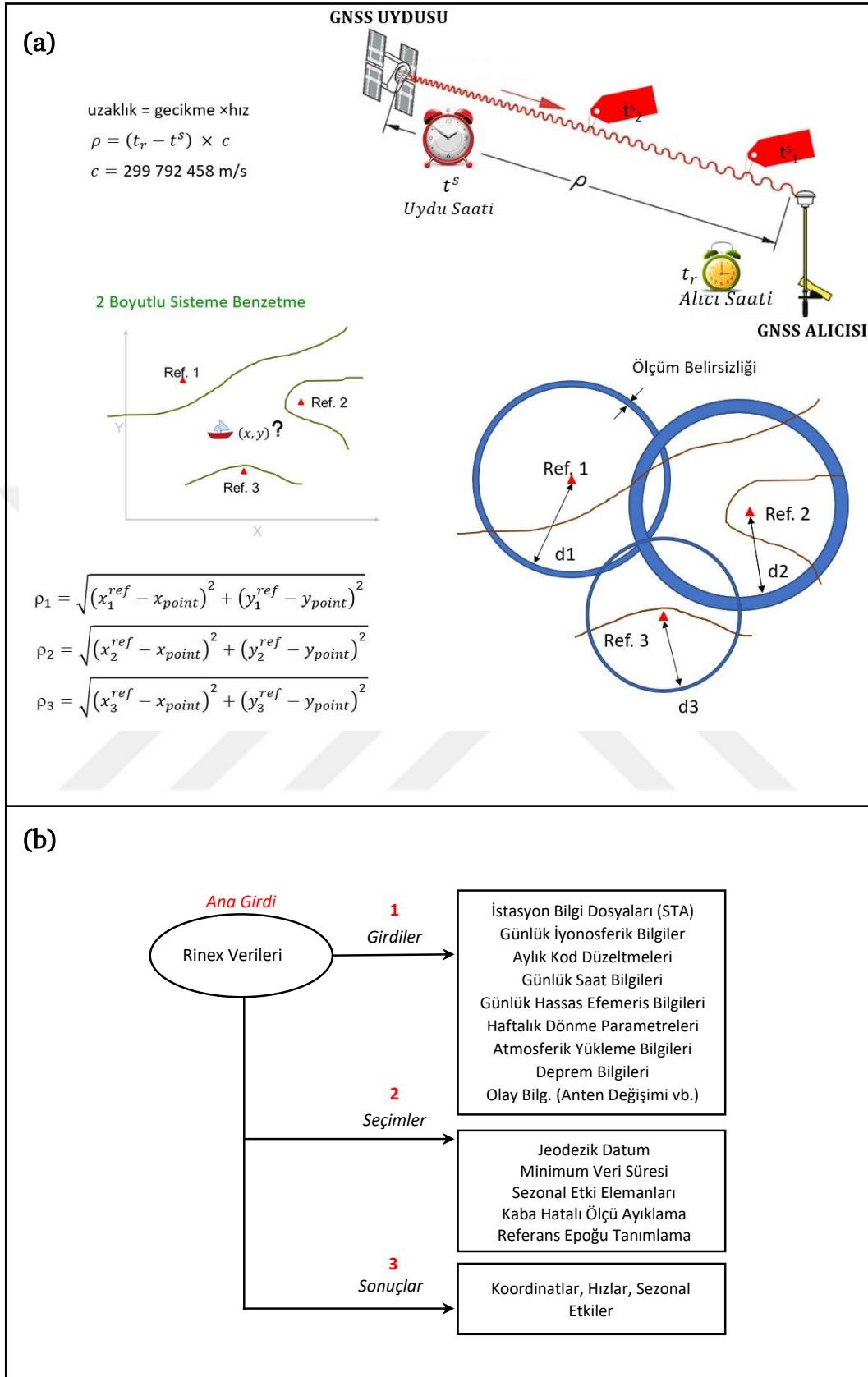
Bir bölge ya da noktadaki düşey yer değiştirmeyi ele alacak olursak en yaygın etkiler düşey atımlı depremler, buzul erime veya oluşumu, doğal veya yapay çökme/yükselmeler ve düşey yer kabuğu hareketleri olarak öne çıkmaktadır. Bu sebeple düşey hızların belirlenmesi ve olası tehlikelere karşı önlemlerin alınması, insan yaşamı, doğal ortamların korunması ve mühendislik yapılarının zarar görmemesi açısından önem arz etmektedir.

Dünyanın genelini kapsayan global GNSS ağlarının bazen bölgesel anlamda düşey hareketleri belirlemede yetersiz kalması ya da istenen bölgede global nokta bulunmaması bilim insanlarını arazide kampanya ölçümleri yapmaya itmektedir. Kampanya ölçümlerinin mevsimsel etki, yer altı su çekilmeleri, solar maksimum ve minimum gibi ölçüm kalitesini düşürebilecek durumlardan etkilenmemesi için bazı önlemler alınmalıdır. Özellikle düşey hareket ve hızların belirlenmesinde bu etkilerin arındırılması veya minimuma indirilmesi gerekmektedir.

Düşey hareketlerin/hızların belirlenmesinde diğer önemli kavram yapılan değerlendirme yöntemi veya alınacak referans istasyonlarının durumudur. Örneğin birçok plakadan etkilenen bölgede araştırma yapılacak ise plaka hareketi en az olan bölgede referans istasyon seçmek belirlenmek istenen hız/yer değiştirmelere en az şekilde olumsuz etkide bulunacaktır.

Küresel konumlama sistemlerinde verilerin en kaliteli şekilde elde edilebilmesi için temel dikkat edilmesi gereken kurallara ilaveten -istasyonun düzgün kurulması, GNSS veri kalitesini etkileyecek faktörlerin dikkate alınması vb.- ölçüm süresi de önemlidir. Sürekli GNSS istasyonları bu konuda bir adım önde olsa da yeri geldiğinde kampanya ölçümleri yapılması gerekmektedir. Bu konuda yapılan birçok çalışma göstermiştir ki iyi sonuçlar elde etmek için ölçüm süresinin minimum 8-10 saat olması ölçümün kalitesini arttıracaktır. İlave olarak düşey hızların belirlenmesi için ayrıca bir GNSS istasyonu için en az 3 yıl tekrarlı bir şekilde mevsimsel vb. etkilerden arındırılmış bir şekilde ölçülmesi önerilmektedir [58]. Düşey hızların belirlenmesinde diğer bir kavram doğruluk analizidir. Yapılan birçok çalışma göstermiştir ki baz mesafesi, enlem, boylam ve elipsoidal yükseklik düşey bileşen doğruluğuna dolayısıyla düşey hızlara etki etmektedir [16, 20, 23, 29].

Düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi veya diğer bir deyişle doğrulanması ve mareograf istasyonlarında elde edilen deniz seviyelerinden ayıklanması için GNSS verilerinin değerlendirmesinde genel olarak statik veya PPP çözümleri kabul görmüştür. Bu verilerin değerlendirilmesinde alınan referans çerçevesinin güncel olması, yer dönme parametreleri gibi birçok kavramın dikkate alınması ayrıca önemli bir unsurdur. GNSS ölçüm prensibi ve GNSS verisinin değerlendirilmesi için gerekli işlemler ve akış şeması Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Prensip olarak GNSS (a), GNSS verilerinin değerlendirilmesi (b)

Tüm istasyonlara ilişkin GNSS verileri değerlendirildikten sonra zaman serilerinin oluşturulması ve hızların hesaplanması aşamasına gelinmektedir. Literatürde birçok çalışmada önerilen model lineer zaman serisi modeli olup (2.11) ile gösterilmiştir. Düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi için zaman serisi oluşturulmasındaki asıl amaç oluşturulan ağdaki genel eğilimin görülmesi ve bölgedeki lokal hızların belirlenip diğer yöntemler ile karşılaştırılmasının sağlanmasıdır.

$$\begin{aligned}
 y(t_i) = & d_o + v_0(t_i - t_0) + \\
 & \sum_{k=1}^{n_d} d_k \eta_{d,k}(t_i) + \sum_{k=1}^{n_s} s_k \eta_{s,k}(t_i) + \\
 & \sum_{k=1}^{n_v} v_k(t_i - t_{v,k}) \cdot \eta_{v,k}(t_i) + \\
 & \sum_{k=1}^{n_p} a_k \sin(\omega_k t_i - t_{v,k}) + b_k \cos(\omega_k t_i - t_{v,k}) \cdot \eta_{p,k}(t_i)
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Burada d_o ofseti, v_0 t_0 epochundaki hız, $d_k \eta_{d,k}(t_i)$ süreksizliği, $s_k \eta_{s,k}(t_i)$ kaba hatayı, $v_k(t_i - t_{v,k}) \cdot \eta_{v,k}(t_i)$ hız değişimini ω_k , a_k ve b_k bağıntıya ilişkin fonksiyonel parametreleri ifade eder.

2.2.2 InSAR Ölçmeleri

2.2.2.1 InSAR ve Farklı Yaklaşımlar

Yapay açıklıklı radar interferometrisi (InSAR) dünya yüzeyindeki benzer pixel üzerinde iki farklı faz gözlemi arasındaki faz değişimini gözlemleyen jeodezi ve uzaktan algılamada kullanılan bir radar tekniğidir. Diğer yöntemlere göre daha yüksek zamansal frekans ve doğrulukta, geniş alanlardaki karasal hareketleri yüksek çözünürlüklü bilgi ile sunar. Bu teknik, günlerden yıllara kadar olan zaman dilimlerinde deformasyondaki milimetrik ölçekteki değişiklikleri potansiyel olarak ölçebilir. Depremler, volkanlar ve heyelanlar gibi doğal tehlikelerin jeofiziksel izlenmesi ve yapı mühendisliğinde, özellikle de çökme ve yapısal stabilitenin izlenmesi için uygulamaları vardır.

SAR sinyali, genlik ve faz bilgisi ile yorumlanmaktadır. Genlik, radarın yansımalarının sonucu olarak yansıma direnci, faz ise bir tam sinüs dalgası döngüsünün direnci olarak ifade edilmektedir. Uydu anteni ile yer hedefleri arasındaki mesafe SAR görüntüsünün fazı ile belirlenir. InSAR, aynı alanın farklı

sensör konumlarından alınan iki karmaşık radar SAR gözlemi arasındaki faz farkına dayanır ve Dünya'nın yüzeyi ile radar arasındaki mesafe bilgilerini alansal olarak çıkarır. Bu iki görüntünün fazlarının birleştirilmesiyle faz ile arazi topoğrafyası arasında yüksek oranda ilişki olup olmadığı belirlenebilir ve deformasyon modellerinden oluşan İnterferogramlar oluşturulabilir. Topoğrafyanın sebep olduğu faz kayması interferogramlardan ayıklanırsa oluşturulan ürünler arasındaki fark iki görüntü arasında oluşan yüzeydeki deformasyonlarını ifade eder. Buna Diferansiyel İnterferometri (DInSAR) denir.

Bu yöntemle elde edilen yer değiştirmeler eğik gözlem hattı (line of sight, LOS) olarak isimlendirilir. LOS yönündeki yer değiştirmeler yatay ve düşey bileşenlere rahatlıkla dönüştürülebilir. Düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesinin istendiği çalışmalar için LOS yönü yeterli ve hassas bilgi vermekte, ayrıca yoğun olarak kullanılmaktadır. Geleneksel DInSAR'ın, yer değiştirmenin etkileri ve atmosferik etmenler arasındaki ayırım açısından kısıtları vardır. Kalıcı Saçılım İnterferometrisi (Persistent Scatterer Interferometry, PSI) teknikleri, olağan temel ve zamansal kısıtlamaları aşarak ve daha sonra geniş bir interferogram geçmişinden zaman içindeki ortalama eğilimleri hesaplamak için kullanılabilir interferogramların sayısını en üst düzeye çıkararak bu tür sınırlamaların üstesinden gelebilir. Burada sadece yeterli düzeyde yüksek tutarlılıktaki hedefler dikkate alınır, böylece piksel yoğunluğu azalır. InSAR çözümleri diferansiyel, GNSS ise yer merkezli mutlak sonuç verir. Bu çözümleri birlikte düşünerek küçük alanlarda yerel hareketleri mm hassasiyetinde incelemek için PSI methodu kullanılır. Yüksek duyarlılıkta sonuç alabilmek için referans noktasının yüksek doğrulukta bilinmesi önemlidir. Hatalar giderildiğinde PS InSAR ile; deformasyon hızı, ivme, yükseklik, örtüşme gibi kavramlar hakkında bilgi edinilir ve mm hassasiyetinde zaman serileri oluşturulabilir [59].

2.2.2.2 Prensip Olarak InSAR

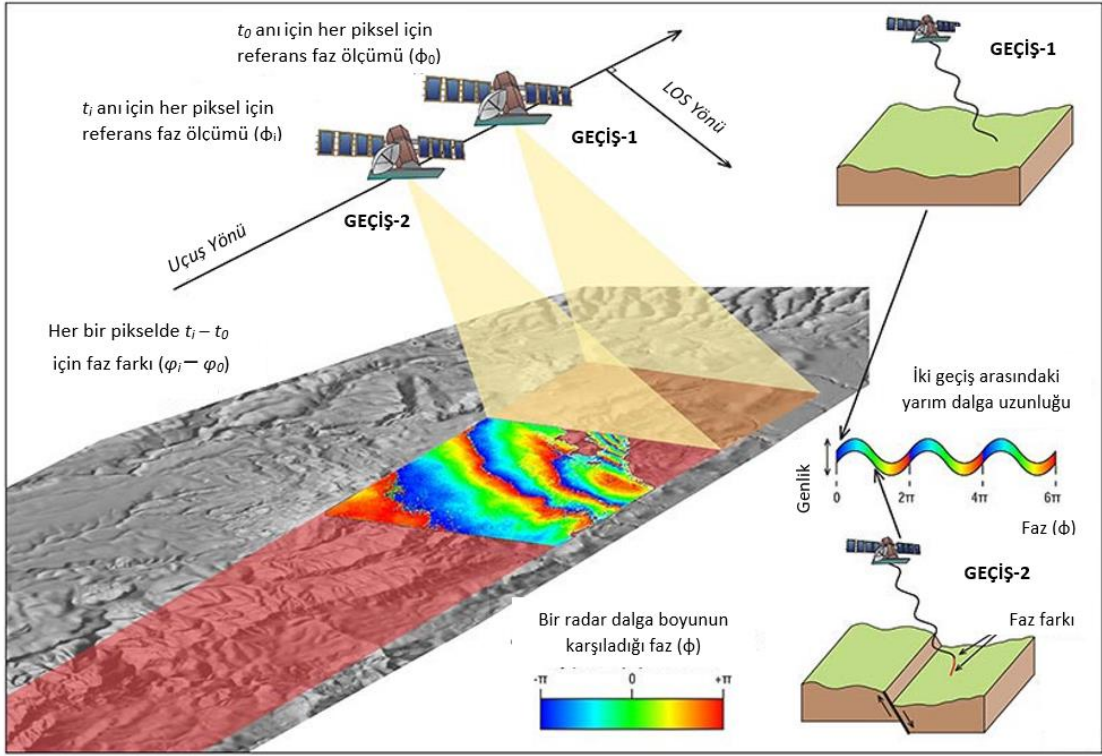
Bir dalganın fazı ister tepede, ister dipte veya arada bir yerde olursa olsun fazın konumunu tanımlar. Faz, 0 ila 360 derece (veya 0 ila 2π radyan) arasında değerler alır ve açı gibi ifade edilir. InSAR ve SAR görüntüsü elde etmek için her bir dalganın yaklaşık 100 km genişliğinde alan kapladığı söylenebilir. Yapaylık,

uydunun daha büyük bir alanı kaplayan çok daha büyük bir radar vericisini taklit etmesini sağlayacak şekilde nasıl hareket ettiğini ifade eder.

Bir deformasyon örneğinde açıklayacak olursak, deformasyondan önce ve sonra yerdeki tam olarak aynı noktaya tek bir radar dalgası gönderip aldığını varsayalım. Aynı nokta için faz okumaları ise; depremden önce π radyan, depremden sonra 2π radyan olsun. İkisi arasındaki faz farkı π radyan olup, uyduya geri dönen dalga yerdeki faz farkının iki katına çıktığı bilinmektedir. InSAR'ın matematiksel olarak faz modelinin ifadesi (2.12) ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}\varphi &= \varphi_{topo} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{duz_dun} + \varphi_{yor} + e [2\pi] \\ \varphi_{def} &= \frac{4\pi}{\lambda} \delta_r\end{aligned}\tag{2.12}$$

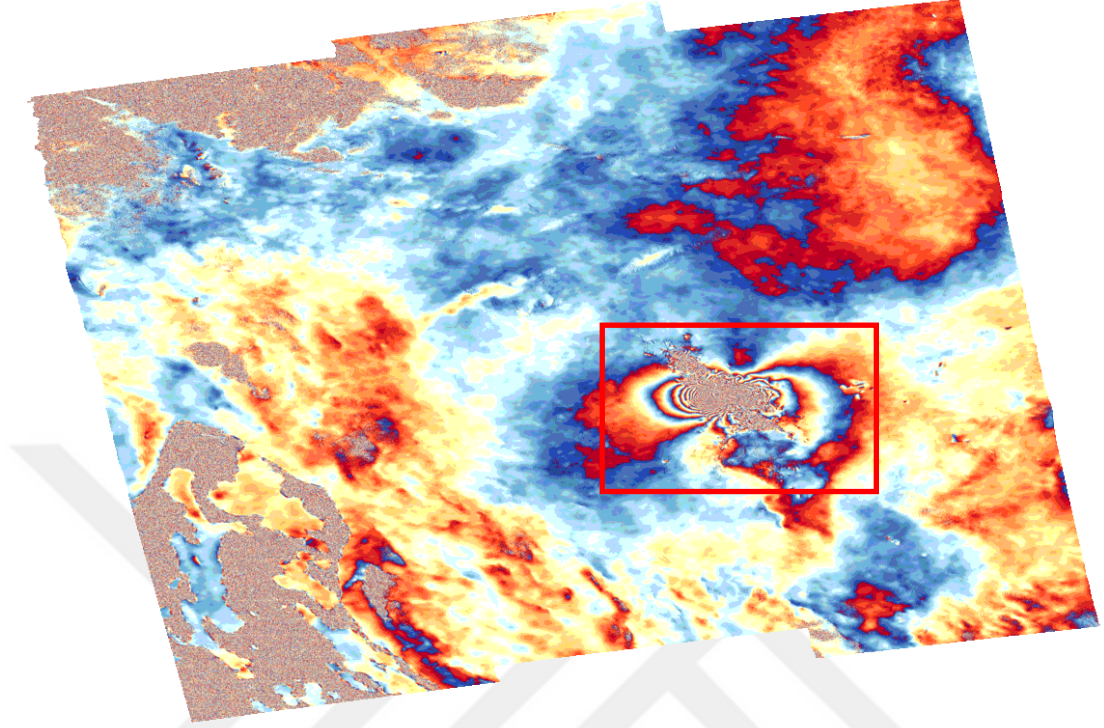
Burada φ_{topo} topografya ile ilgili faz bileşeni, φ_{def} deformasyon ile ilgili faz bileşeni, φ_{atm} atmosfer ile ilgili faz bileşeni, φ_{duz_dun} dünya yüzeyi ile ilgili faz bileşenini, φ_{yor} yörünge ile ilgili faz bileşenini ve e ise gürültüyü ifade eder. Deformasyon ile ilgili faz bileşeni eşitliği, sensörün görüş hattındaki δ_r kadar yer değiştirme miktarını ifade eder.



Şekil 2.7 Prensip olarak InSAR yaklaşımı [60]

Bir interferogramdaki renklerin farklı olması, deformasyondan önce veya sonra elde edilen radar dalgalarının fazındaki olası değişiklikleri ifade eder. Renkli konturlar, iki veri seti arasındaki girişim saçaklarını temsil eder. Şekil 2.8 ile 29 Aralık 2020’de Hırvatistan’ın Petrinja kentinde meydana gelen 6.4 Mw büyüklüğündeki deprem sonrası oluşan interferogram gösterilmektedir. Her girişim saçığı arasındaki mesafe, yer hareketini temsil eder (bir interferogramda, Şekil 2.8’de açıklanan π ’nin faz farkı değişik renkli pikselle gösterilir). Saçıklar birbirine ne kadar yakınsa, deprem sırasında zeminin maruz kaldığı gerilme o kadar büyük olur. Kırmızı dikdörtgen içindeki bölge, saçıkların en yakın olduğu yeri ve ayrıca depreme neden olan fayın yerini gösterir. Aynı alana ait iki InSAR görüntüsü ile yeryüzündeki her bir nokta için bu işlemin tekrarlanması gerekir ve bir interferogramın oluşturulması oldukça karmaşık bir işlemdir. Bir uydunun iki kez tam olarak aynı konumda olması pek olası değildir ve ayrıca topografya, atmosfer ve gürültünün de telafi edilmesi gerekir. İnterferogramlar yardımıyla bir depremin yeri, büyüklüğü ve türü diğer yöntemlere göre görece daha kolay belirlenebilir. Ayrıca deprem modellerini iyileştirmemize ve bir bölge için

gelecekteki sismik tehlikeyi araştırmamıza da yardımcı olabilirler Ayrıca interferogramlar intersismik gerilim birikimini ölçmek için de kullanılır.

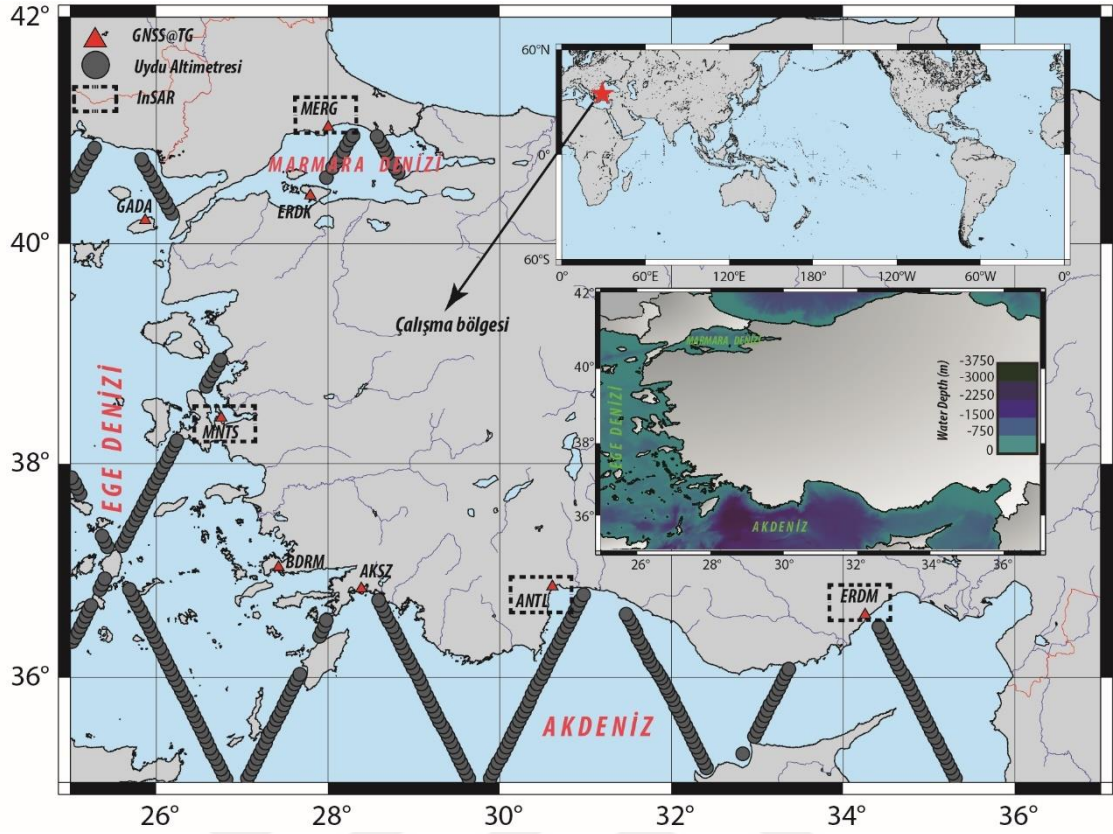


Şekil 2.8 Petrinja depremine ait interferogram (6.4 Mw, 29.12.2020) [61]

TÜRKİYE’NİN BATI VE GÜNEY KIYILARINDAKİ YER KABUĞU HAREKETLERİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Çalışma Bölgesi ve Veri Sağlayıcı Kuruluşlar

Türkiye'nin batı ve güney kıyıları üç ayrı denizden; Akdeniz, Ege Denizi ve Marmara Denizi'nden oluşur. Türkiye'yi çevreleyen denizler ve kara alanları tektonik açıdan oldukça aktif alanlardandır. Bunun dışında lokal etkilerle de bölgede beklenmedik çökme ve yükselmeler görülmektedir. Türkiye'nin kıyıları birçok turistik alana, tarım bölgelerine, liman ve inşaat planlamalarına sahip olduğu için her açıdan detaylı şekilde incelenmektedir. Deniz Seviyesi de bu izlenen unsurlardan biridir. Bu çalışmada Türkiye kıyılarını çevreleyen 8 mareograf istasyonunda düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda Deniz seviyesi verileri (Mareograf ve Uydu altimetresi), GNSS verileri ve InSAR verileri düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Çalışma Bölgesi

Düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesinde deniz seviyesi aktif rol aldığı için deniz ve okyanus kıyılarında araştırma yapan kurumlar bu konuya daha çok önem vermiştir. Küresel organizasyon olarak PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level), SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales), GLOSS (Global Sea Level Observing System), IOC (UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission) gibi oluşumlar ortaya çıkmıştır.

1933 yılında kurulan PSMSL, küresel mareograf istasyonu ağından deniz seviyesi verilerinin toplanmasından, yayınlanmasından, analizinden ve yorumlanmasından sorumlu olmuştur. Merkezi Liverpool'da Ulusal Oşinografi Merkezi'nde (NOC) bulunmaktadır.

SONEL, uzun dönemli deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesinde mareograf istasyonlarından (bağıl deniz seviyeleri) ve jeodezik yöntemlerden (uydu altimetresi, GNSS vb.) faydalanarak kıyılardaki deniz seviyelerinin ve VLM değerlerinin belirlenmesini amaçlayan bir oluşumdur. Ayrıca uydu

altimetrelerinin kalibrasyonu gibi önemli bir misyonu kendilerine görev olarak yüklemiştir.

Birleşmiş Milletler bünyesindeki UNESCO Uluslararası Oşinografi Komisyonu (IOC) küresel okyanus araştırmalarını desteklemeyi, bu alanda çalışmalar yapılmasını teşvik etmeyi ve hükümetler üstü sürdürülebilir çevre düşüncesini yaymayı kendine hedef olarak belirlemiştir. IOC, okyanus gözlemleri, tsunami uyarıları ve denizlerdeki mekansal planlama gibi alanlarda programları koordine ederek, okyanusların sağlığını korumak için 150 üye ülke ile birlikte çalışmasına olanak tanır. 1960 yılında kurulduğundan bu yana, IOC, okyanuslarımızın, kıyılarımızın ve deniz ekosistemlerimizin yönetimini anlamak ve iyileştirmek için çalışan diğer tüm Birleşmiş Milletler organlarına bir odak noktası olmuştur. IOC, BM Gündemi 2030 ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, İklim IOC, 2030 BM Gündemi ve Sürdürülebilir Kalkınma, Paris Anlaşması (İklim değişikliği) ve Sendai Yaklaşımı (Afet Riskini Azaltma) gibi bir çok küresel hedeflere ulaşmak için tüm üye Devletlerin bilimsel ve kurumsal yapılarını geliştirmelerini teşvik etmektedir.

Küresel Okyanus Gözlem Sisteminin (GOOS) bir bileşeni olan Küresel Deniz Seviyesi Gözlem Sistemi (GLOSS), geniş bir araştırma ve operasyonel kullanıcı tabanını desteklemek için iyi tasarlanmış, yüksek kaliteli bir deniz seviyesi gözlem ağı kurmayı hedeflemektedir. 1985 yılında kurulmuş ve amacı uzun vadeli iklim değişikliği çalışmaları için küresel olarak deniz seviyesini ölçmek olan bir uluslararası Oşinografi Komisyonu programıdır. GLOSS ile deniz seviyesi değişimi ve okyanus sirkülasyonu araştırmaları, fırtına dalgalanmaları gibi olaylar sırasında kıyıların korunması, sel uyarısı ve tsunamilerin izlenmesi, liman operasyonları için gelgit bileşenleri, düşey jeodezik datum ve ülke sınırlarının belirlenmesi gibi konuların belirlenmesine olanak sağlayan araştırmaların gerçekleştirilmesini kendine görev olarak benimsemiştir

AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) CNES tarafından kurulmuş bir oluşumdur. Altimetre uydu misyonlarından veri ve ürünleri işlemek, arşivlemek ve dağıtmak konularını görev edinmiştir AVISO+ portalı (www.aviso.altimetry.fr), 10000 kayıtlı kullanıcının CNES ve CTOH'den yalnızca okyanus odaklı uygulamalar için değil, aynı zamanda hidroloji, kıyı, buz

uygulamaları için 40'tan fazla ürüne ücretsiz olarak erişmesi için giriş noktasıdır. Mutlak deniz seviyesinin belirlenmesine katkı sağlayan başka organizasyonlar da mevcuttur.

Küresel organizasyonlar dışında bazı bölgesel organizasyonlar da mevcut olup, bu kurumlar sadece ulusal sınırları veya kıyılarında sorumluluk sahibidir. Ülkemizde bu sorumluluk Harita Genel Müdürlüğü'ne aittir. Bağlı deniz seviyesi gözlemleri için Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kapsamında Harita Genel Müdürlüğü tarafından GLOSS standartlarını sağlayan toplam 20 sayısal ve otomatik mareograf istasyonundan oluşan İzleme Ağı oluşturulmuş ve Türkiye ve KKTC kıyılarına tesis edilmiştir. TUDES istasyonları ile bağlı deniz seviyesi ve buna ek olarak seviye değişimlerini etkileyen parametreler de (basınç, rüzgâr, nem, hava sıcaklığı) sürekli olarak gözlenmektedir.

Bu çalışmada Türkiye'nin batı ve güney kıyılarını kapsayan 8 Mareograf istasyonundaki deniz seviyesi verileri periyodu 1998-2018 arasında olacak şekilde analiz edilmiştir. Tüm mareograf istasyonu verileri TUDES (Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi) veri merkezinden alınmıştır. Uydu altimetresi verileri ise AVISO veri arşivinden alınmıştır.

3.2 Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi

Çalışma kapsamında mareograf verileri ve multi-misyonel uydu altimetresi verileri kullanılarak deniz seviyesi analizleri gerçekleştirilmiştir. 1998-2018 aralığındaki zamansal çözünürlük ile TUDES kapsamındaki tüm Mareograf istasyonlarından faydalanılmıştır (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Mareograf Verileri

Mareograf	Konum		15 Dakikalık Veri		
	<i>Enlem</i>	<i>Boylam</i>	<i>Başlangıç</i>	<i>Bitiş</i>	<i>Veri Servisi</i>
<i>AKSZ</i>	36.849	28.282	2008	2018	TUDES
<i>ANTL</i>	36.836	30.613	1998	2018	TUDES
<i>BDRM</i>	37.029	27.420	1998	2018	TUDES
<i>ERDK</i>	40.390	27.846	1999	2018	TUDES
<i>ERDM</i>	36.563	34.255	2003	2018	TUDES
<i>GADA</i>	40.233	25.894	2009	2018	TUDES
<i>MERG</i>	40.969	27.961	2004	2018	TUDES
<i>MNTS</i>	38.396	26.749	1999	2018	TUDES

Bu istasyonlar son teknoloji ile donatılmış (otomatik ve dijital) sensörlerden oluşmakta olup, içerdiği mekanizma sayesinde sadece deniz seviyesi değil aynı zamanda rüzgâr, sıcaklık, basınç ve nem gibi gerekli gözlemler de anlık olarak takip edilmektedir. Uydu altimetresi verileri mareograf istasyonları ile benzer zamansal çözünürlükte olup AVISO veri arşivinden edinilmiştir (Tablo 3.2).

Tablo 3.2 Uydu Altimetresi Verileri

<i>Altimetre</i> <i>Misyonu</i>	<i>Bilgiler</i>			
	<i>Döngü</i>	<i>Zaman Aralığı</i>	<i>Veri Servisi</i>	<i>Kaynak Veri</i>
<i>Topex/Poseidon</i>	001-491	1992-2005	AVISO	MGDR-B
<i>Jason-1</i>	001-259	2001-2013	AVISO	GDR-C
<i>Jason-2</i>	001-303	2008-2019	AVISO	GDR
<i>Jason-3</i>	025-136	2016-Halen	AVISO	GDR

Uydu altimetresi verilerinin birkaç santimetre doğruluğa sahip olduğu bilinmektedir [62]. Kullanılan altimetre verilerinin limitleri tablo 3.3 ile gösterilmiştir. Tüm gözlemler GLOSS standartlarında olup veriler bir santimetreden daha iyi doğrulukla edinilmektedir. Deniz derinliği kıyı bölgelerdeki gelgitlerin etkisinin yorumlanması açısından büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sebeple dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, GEBCO Compilation Group tarafından yayınlanan model kullanılmıştır. [63]. Mareograf istasyonları, altimetre izleri (Jason1-2-3 için) ve derinlik verileri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Uydu Altimetresi İçin Kullanılan Modeller ve Limitleri

Parametre	Model	Veri Limitleri (m)	
		Minimum	Maksimum
Yörünge	CNES GDR-E	-	-
Kuru Troposfer	ECMWF	-2.5	2.5
Islak Troposfer	ECMWF	-0.6	0.6
İyonosfer	JPL GIM	-0.5	0.5
Atmosferik Basınç	MOG2D	-1.0	1.0
Okyanus Gelgiti	FES2014b	-1.0	1.0
Okyanus Yükleme	LEGOS/CNES	-0.5	0.5
Deniz durumu yanılması	CLS non-parametric	-1.0	1.0
Referans Yüzey	CLS/CNES	-	-
Standart Sapma Oranı		-0.1	0.1
Deniz Seviyesi Anomalisi		-3.0	3.0

3.2.1 Bağlı Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi

Mareograf verilerindeki kaba hatalı değerler sonuçları doğrudan etkilediğinden, verilerin içerisinde kontrolü gereklidir. Bu nedenle zaman serisi verileri kontrol edilmeli ve kaba hatalı veriler bulunursa veriden çıkarılmalıdır. Bu çalışmada veri kalitesini belirlemek için Fourier ve Gauss dağılım fonksiyonu (3-sigma) olmak üzere iki yöntem uygulanmıştır [32].

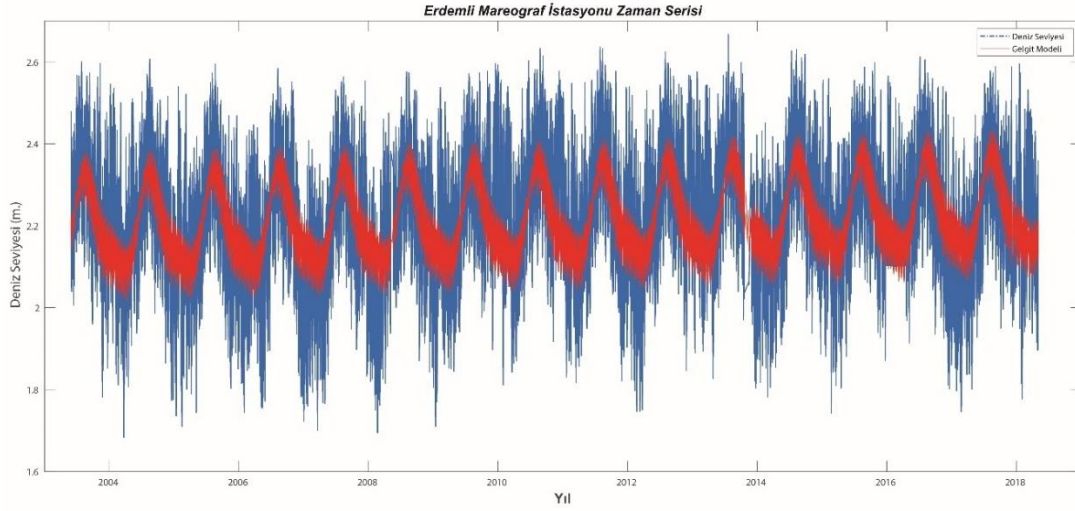
Tablo 3.4, mareograf verilerini kullanarak gelgitin ana bileşenleri ile ilgili dönemleri gösterir ve bunlar günlük (K2, M2, N2, Ma2, R2, S2, T2, J1, K1, M1, O1, Oo1, Ms4), 15 günlük (Mf, Msf), aylık (Mm) altı aylık (Ssa) ve yıllık (Sa) gelgit parametrelerinden oluşur.

Tablo 3.4 Gelgit Parametreleri ve Periyotları

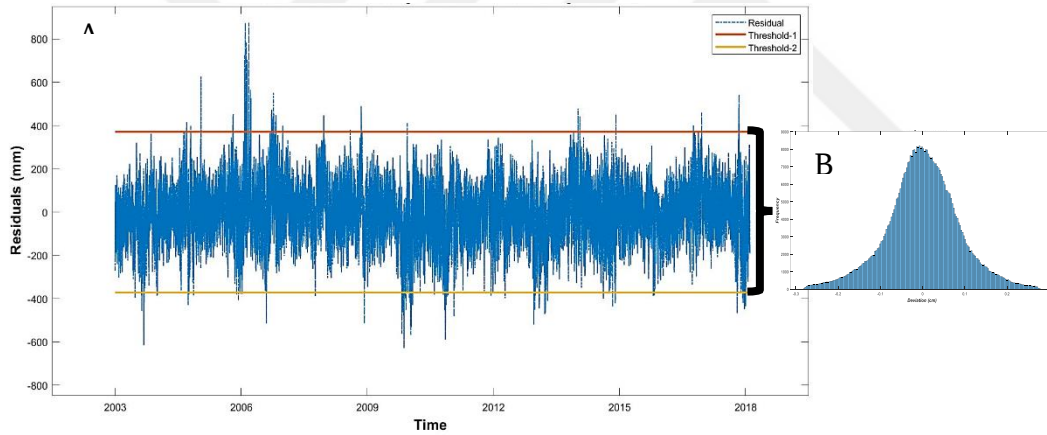
<i>Parametre</i>	<i>Periyot (Gün)</i>	<i>Parametre</i>	<i>Periyot (Gün)</i>
<i>K2</i>	<i>0.498634738</i>	<i>P1</i>	<i>1.002745517</i>
<i>M2</i>	<i>0.517524947</i>	<i>Q1</i>	<i>1.119514937</i>
<i>N2</i>	<i>0.527431168</i>	<i>S1</i>	<i>1</i>
<i>Ma2</i>	<i>0.516792787</i>	<i>Mf</i>	<i>13.66082894</i>
<i>R2</i>	<i>0.499316491</i>	<i>Mm</i>	<i>27.55428194</i>
<i>S2</i>	<i>0.5</i>	<i>Msf</i>	<i>14.76537814</i>
<i>T2</i>	<i>0.500685383</i>	<i>Oo1</i>	<i>0.929419758</i>
<i>J1</i>	<i>0.962436532</i>	<i>Ssa</i>	<i>182.6150475</i>
<i>K1</i>	<i>0.997269476</i>	<i>Ms4</i>	<i>0.254305803</i>
<i>M1</i>	<i>1.035050102</i>	<i>Sa</i>	<i>365.230095</i>
<i>O1</i>	<i>1.075805563</i>		

Gelgit parametreleri, Gauss dağılım fonksiyonu (3-sigma) ile kaba hatalı ölçüler belirlendikten sonra (2.2) ile kestirilmiştir. Bunun için, gelgit parametreleri kullanılarak (2.3)'e eşit olan fonksiyonel model kurulur. Gelgit parametrelerinin genlik (R) ve fazları (ϕ), tüm mareograf istasyonlarında (2.4) ile hesaplanmıştır. ERDM Mareograf istasyonunun zaman serisi Şekil 3.2'de örnek olarak verilmiştir.

(Diğerleri Ek-A'dadır) Şekil 3.2'de mavi çizgi deniz seviyesinin yüksekliğini, kırmızı çizgi ise gelgit modelini göstermektedir.



Şekil 3.2 ERDM mareograf istasyonu zaman serisi



Şekil 3.3 Düzeltmeler ve eşik değer (A), histogram (B)

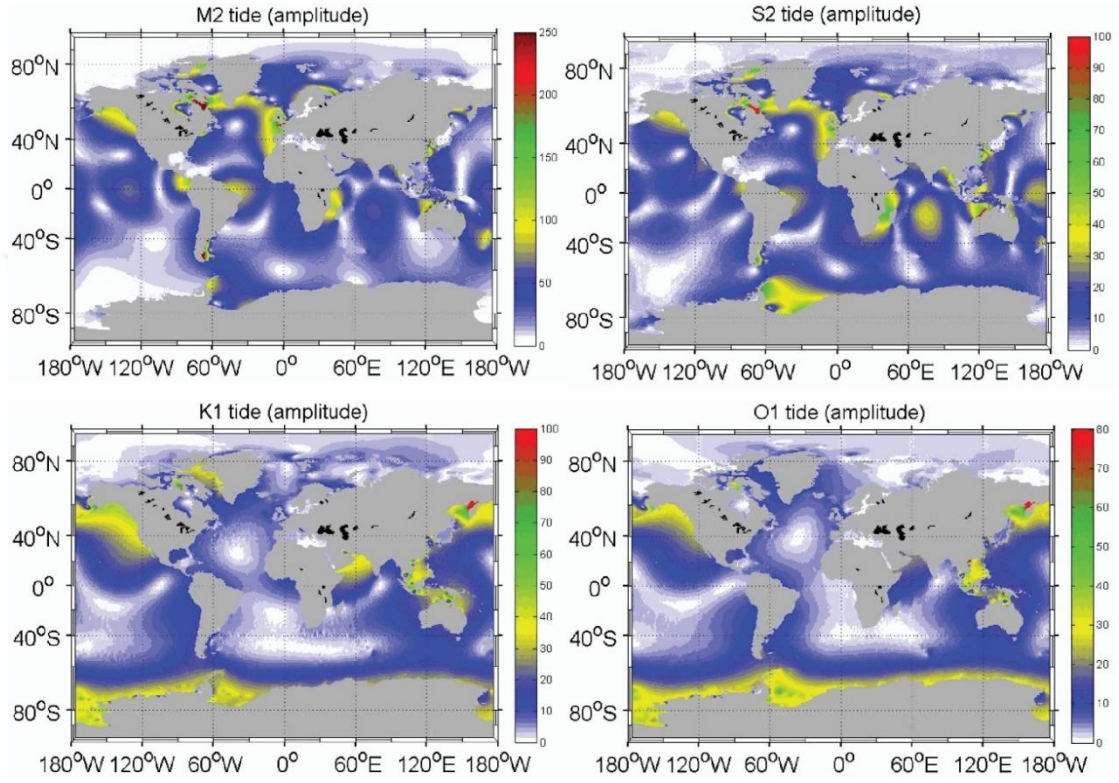
Şekil 3.3(A), ERDM mareograf istasyonu için düzeltmeleri ve 3-sigma sınırlarını; Şekil 3.3(B), ERDM mareograf istasyonundaki verilerin histogramını göstermektedir. Düzeltmelerin dağılımı yaklaşık olarak normal dağılım olarak karşımıza çıkmaktadır. Histogram, 0.01 cm'lik bir ortalama değerle -28.2 cm ile 28.9 cm arasındaki aralığını gösterir. Mareograf istasyonlarından 21 gelgit parametresi belirlenmiştir ve ERDM gelgit ölçüm istasyonunun 21 gelgit parametresinin genliği, Tablo 3.5'de örnek olarak verilmiştir.

Tablo 3.5 ERDM İstasyonu Gelgit Bileşenleri

<i>ERDM</i>							
<i>Parametre</i>	<i>R (cm.)</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>Parametre</i>	<i>R (cm.)</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
<i>K2</i>	1.767	-0.00206	-0.01755	<i>P1</i>	0.969	0.00934	-0.00262
<i>M2</i>	10.086	0.09647	0.02944	<i>Q1</i>	0.289	-0.00179	0.00228
<i>N2</i>	1.673	-0.01376	-0.00953	<i>S1</i>	0.534	-0.00279	0.00455
<i>Ma2</i>	0.372	-0.00323	0.00185	<i>Mf</i>	0.306	0.00274	0.00136
<i>R2</i>	0.120	-0.00119	-0.00017	<i>Mm</i>	0.652	0.00584	0.00290
<i>S2</i>	5.909	0.04101	0.04254	<i>Msf</i>	0.520	0.00001	-0.00520
<i>T2</i>	0.405	-0.00399	0.00074	<i>Oo1</i>	0.123	-0.00062	-0.00106
<i>J1</i>	0.163	-0.00163	0.00001	<i>Ssa</i>	3.174	-0.02116	0.02366
<i>K1</i>	2.783	0.02621	0.00934	<i>Ms4</i>	0.029	0.00020	-0.00021
<i>M1</i>	0.037	-0.00036	0.00001	<i>Sa</i>	10.652	0.01163	0.10588
<i>O1</i>	1.956	0.01100	-0.01618				

Ayrıca, mareograf istasyonlarındaki deniz seviyesi verilerinden M2, S2, K1 ve O1 ana günlük gelgit parametreleri belirlenmiştir. Gelgit bileşenleri için ilave olarak TUDES kapsamındaki VLM'nin belirlenmesi için yeterli sayıda GNSS kampanya verisine sahip olmayan BZYZ, ISKD ve TSCU mareograf istasyonları da kullanılmıştır (2008-2018 zaman aralığı). Bu değerler DTU10 küresel gelgit modeli ve X-TRACK bölgesel gelgit modelleriyle karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Marmara Denizi'ndeki ERDK ve MERG istasyonlarında, Ege ve Akdeniz'deki mareograf istasyonlarına göre daha küçük gelgit parametrelerinin bulunduğu belirlenmiştir. Bunun en önemli sebebi Marmara Denizi'nin bir iç

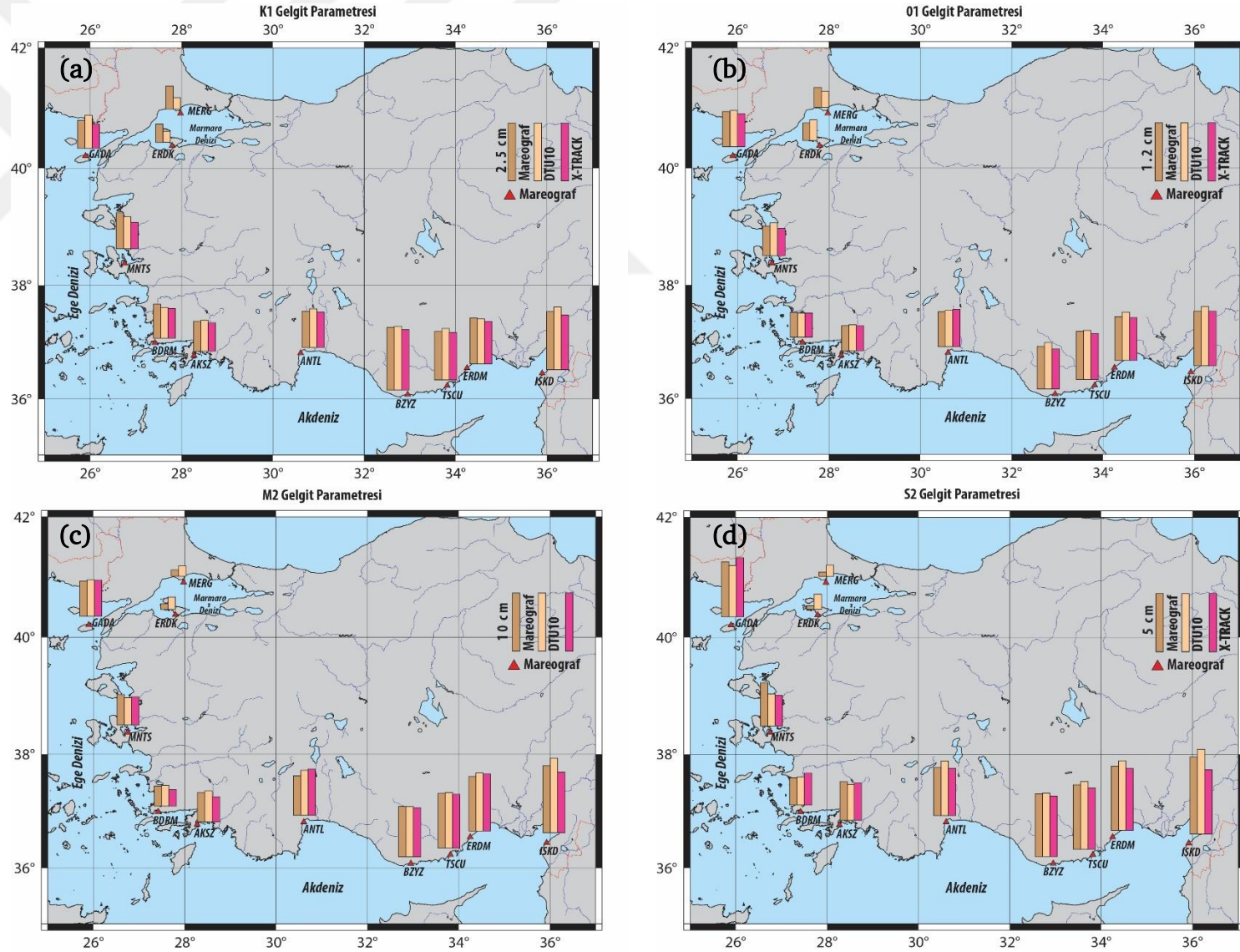
deniz olmasıdır. Akdeniz'de bulunan mareograf istasyonlarında elde edilen gelgit parametreleri diğer denizlerde yer alan mareograflarda elde edilen sonuçlara göre nispeten daha büyük değerlerden oluşmaktadır. Mareograf istasyonlarından elde edilen gelgit parametreleri DTU10 küresel ve X-TRACK bölgesel gelgit modeli sonuçları ile karşılaştırmış ve aradaki farkların bir santimetreden az olduğu belirlenmiştir. Korelasyon katsayıları Tablo 3.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4 DTU10 küresel gelgit modeli (birim cm)

Tablo 3.6 Korelasyon Katsayıları

<i>Parametre</i>	<i>Korelasyon Katsayısı (r)</i>		
	<i>Mareograf-DTU10</i>	<i>Mareograf-FES2014b</i>	<i>Mareograf-X-TRACK</i>
<i>M2</i>	0.98	0.99	0.96
<i>S2</i>	0.96	0.99	0.90
<i>K1</i>	0.94	0.91	0.89
<i>O1</i>	0.93	0.91	0.90



Şekil 3.5 Mareograf istasyonlarından, DTU10 Küresel Gelgit Modelinden ve Bölgesel (Akdeniz) X-TRACK Modelinden günlük gelgit parametrelerinin karşılaştırılması. (a), (b), (c) ve (d) sırasıyla M2, S2, K1 ve O1 gelgit parametrelerini gösterir.

Bölgede daha önceden 1999 yılı verileri kullanılarak Yıldız vd. (2003) tarafından yapılmış bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada verileri bir yıllık olarak alınmış ve 4 mareograf istasyonu ile sınırlı tutulmuştur [64]. Yapılan çalışmada M2, S2, K1 ve O1 gelgit parametreleri hesaplanmıştır. Tablo 3.7’de bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile bir karşılaştırma yapılmış ve oldukça uyumlu sonuçlar bulunmuştur.

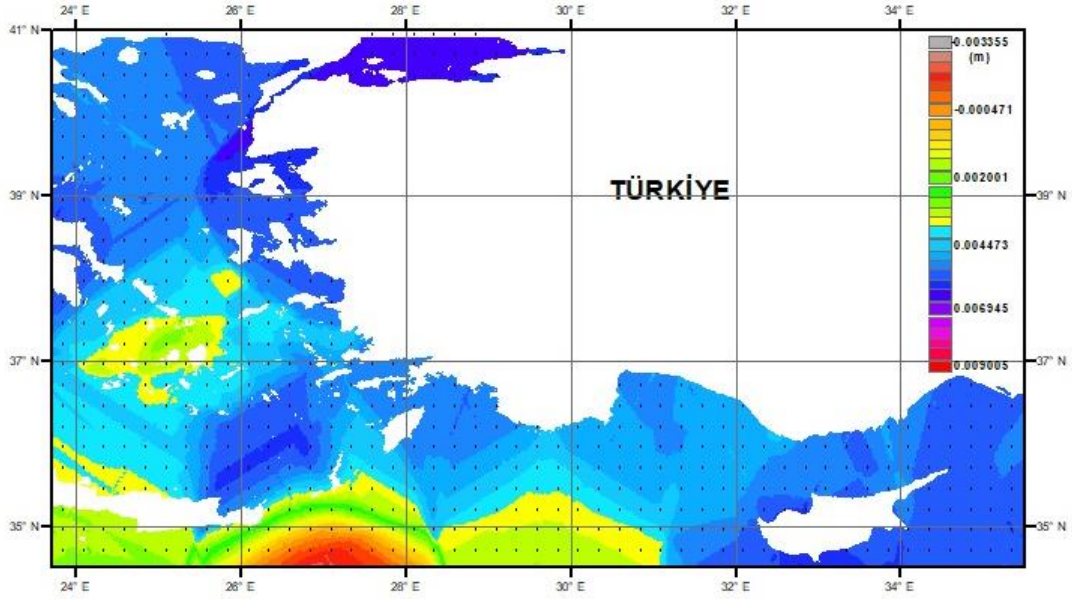
Tablo 3.7 Gelgit Parametrelerinin Genliklerinin Karşılaştırılması

<i>Mareograf</i>	<i>M2 (cm)</i>	<i>S2 (cm)</i>	<i>K1 (cm)</i>	<i>O1 (cm)</i>	<i>Veri Aralığı</i>	<i>Referans</i>
<i>ANTL</i>	7.0	4.3	2.2	1.3	1998-1999	[64]
	7.1	4.4	2.2	1.4	1998 -2019	Bu Çalışma
<i>BDRM</i>	3.9	2.6	2.1	1.1	1998-1999	[64]
	3.8	2.5	2.1	1.2	1998 -2019	Bu Çalışma
<i>ERDK</i>	0.5	0.3	1.2	0.8	2000 - 2001	[64]
	0.4	0.3	1.3	0.8	1999 - 2019	Bu Çalışma
<i>MENT</i>	5.7	4.0	2.5	1.3	2000 - 2001	[64]
	5.5	4.0	2.4	1.3	1999 - 2019	Bu Çalışma

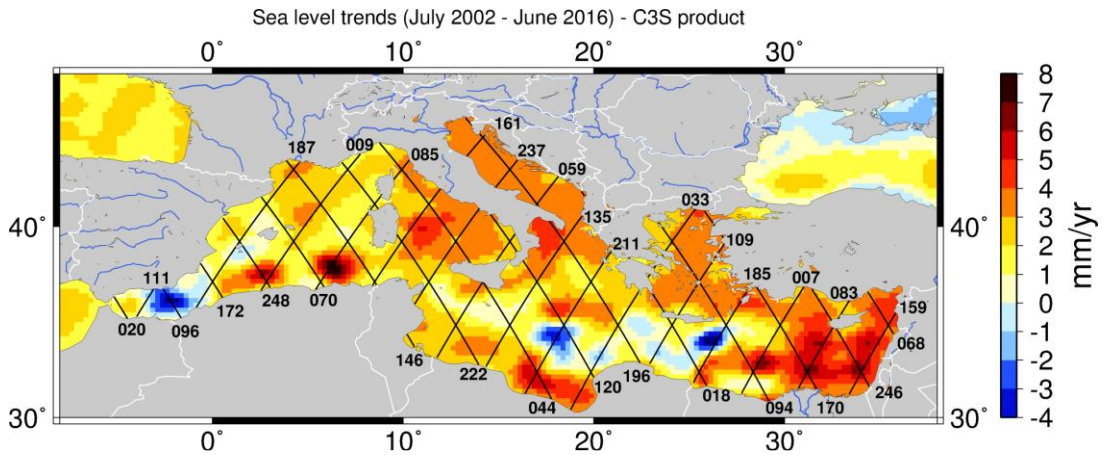
3.2.2 Mutlak Deniz Seviyesi Verilerinin Analizi

Bu çalışmada Türkiye’nin batı ve güney kıyılarında uydu altimetresi verileri kullanılarak deniz seviyesi trendlerinin ve gelgit parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, Tablo 3.2’de yer alan multi-misyonlu altimetre analizinden yararlanılmıştır. İlk olarak ham verilerin, düzeltilmiş veya grid verilerden hangisinin kullanılması gerektiği üzerine araştırmalar yapılmıştır. Literatür ile birlikte değerlendirildiğinde düzeltilmiş veya grid verilerin düşey yer kabuğu hareketleri hakkında yeterli doğrulukta sonuç verdiği kanısına ulaşılmıştır. Mareograf istasyonlarının aksine uydu altimetresi verilerinden anlık deniz seviyesi hesaplanması için (2.6)’da verilen düzeltilmiş uzunluk kavramının belirlenmesi gerekir. Düzeltilmiş uzunluğun belirlenmesi için uzunluk üzerindeki uydu altimetresi ölçüm hataları, uydu konum hataları, jeofiziksel hatalar, sinyal

yayılım hatalarının giderilmesi gereklidir. Tüm bu işlemler yapıldıktan sonra anlık deniz seviyesi belirlenebilmektedir. Test amaçlı ilk etapta 1993-2015 yılları arasındaki deniz seviyesi değişimi AVISO-NASA arşivlerinden edinilmiş seviye-2 verileriyle belirlenmiş ve ESA-CCI projesi kapsamında oluşturulan 2002-2016 yılları arasını kapsayan deniz seviyesi trendi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'ye bakıldığında trendlerin uyumlu olduğu görülmektedir.



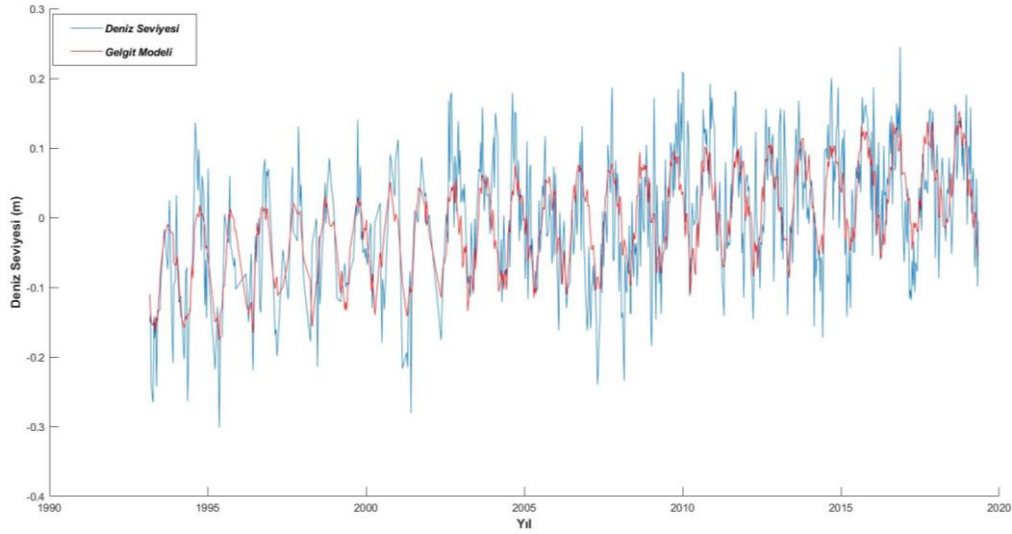
Şekil 3.6 Deniz seviyesi trendi (1993-2015)



Şekil 3.7 ESA-CCI Projesi Akdeniz deniz seviyesi trendi [65]

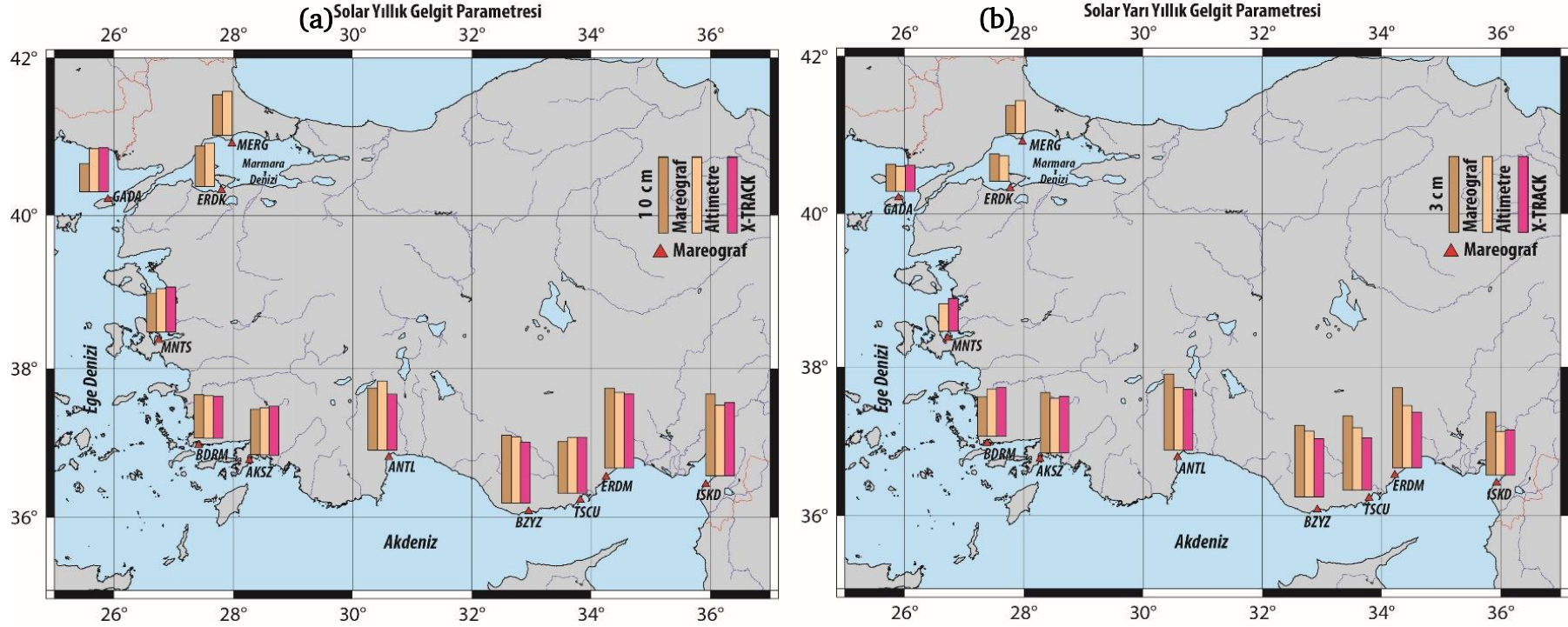
Çalışmada bölgesinden geçen tüm uydu altimetresi izlerinde öncelikle düzeltilmiş uzaklık ve anlık deniz seviyeleri hesaplanmıştır. Ardından gelgit parametrelerinin

hesaplanması aşamasına geçilmiştir. Şekil 3.8 ERDM mareograf istasyonuna en yakın altimetre uydu geçişi izinin zaman serisini ifade etmektedir.



Şekil 3.8 1993-2019 yılları arasında uydu altimetre geçişinin zaman serisi (ERDM Mareograf < 10 km)

Uydu altimetresi gözlemleriyle anlık deniz seviyeleri hesaplandıktan sonra veri kaba hatalı verilerin tespiti işlemine tabii tutulmuştur. Mareograf istasyonlarında olduğu gibi Gauss dağılım fonksiyonu (3-sigma) ile kaba hatalı ölçüler belirlenmiş, sonra (2.2) ile kestirilmiştir. Fonksiyonel model (2.3)'teki gibi oluşturulup genlik ve fazlar (2.4) yardımı ile hesaplanmıştır. Verilerden $0.25^0 \times 0.25^0$ 'lük gridler elde edilerek, bu verilere krigging enterpolasyonu uygulanmıştır [66]. Bunlar için Matlab kodu kullanılmış ve gridlemenin doğruluğu cm düzeyinde bulunmuştur. Uydu altimetresi verilerinden elde edilen Solar Yıllık (Sa) ve Solar yarı yıllık (Ssa) gelgit parametreleri mareograf istasyonlarından, DTU10 küresel gelgit modelinden ve X-TRACK'den elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır ve Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, Akdeniz'de bulunan mareograf istasyonlarına ait gelgit parametreleri en büyük değerleri göstermiştir.



Şekil 3.9 Mareograf istasyonları, multi-misyon uydu altimetre çözümleri, bölgesel (Akdeniz) X-TRACK gelgit modellerinden elde edilen yıllık (S_a) ve yarı-yıllık (S_{sa}) gelgit parametrelerinin karşılaştırılması. (a) ve (b) sırasıyla S_a ve S_{sa} 'yı gösterir.

Mareograf istasyonları, multi-misyon uydu altimetre çözümleri, bölgesel (Akdeniz) X-TRACK gelgit modellerinden elde edilen sonuçlar değerlerin birbiri ile uyumlu ve genlik değerleri arasındaki farkın bir cm ve altında olduğunu göstermiştir.

3.2.3 Bölgesel Gelgit Modelinin Oluşturulması

Türkiye'nin güney ve batı kıyıları üç ayrı denizden oluşur: Akdeniz, Ege ve Marmara. Bunlardan Akdeniz'in batısı ve Ege Denizi dünyanın en önemli turistik bölgeleri arasında yer almaktadır. Orta ve Doğu Akdeniz, önemli limanlar, sanayi tesisleri ve tarım alanlarının yanı sıra inşaat alanlarından oluşmaktadır. Marmara Denizi kıyıları ise turistik tesislerin yanı sıra önemli tarihi eserlere, sanayi tesislerine, liman ve yerleşimlere ev sahipliği yapmaktadır. Bu nedenle, sürekli izlenen deniz seviyesi ve güncellenmiş gelgit modeli, turistik tesislerin iyileştirilmesi ve doğal yapının korunması, gelecekteki sanayi tesisleri, limanlar ve tarım alanları için gerekli öngörülerin sağlanması açısından önemlidir.

Bu bağlamda, uydu altimetre ve Mareograf istasyonlarını kullanarak Türkiye'nin batı ve güney kıyısının ana gelgit parametreleri hesaplanmış ve bölgesel gelgit modeli oluşturulmuştur. Daha önceden bölgede Yıldız vd. (2011) tarafından yapılan çalışma o zaman kullanımda olan Mareograf istasyonlarındaki gelgit parametrelerini belirlemeyi hedeflemiştir. Bu çalışmada oluşturulan bölgesel gelgit modeli 11 mareograf istasyonundaki 1998-2018 zaman aralığında verilerin analiz edilmesiyle oluşturulmuştur. Ayrıca diğer bir yöntem olan uydu altimetresi de kullanılmış ve sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Küresel ve bölgesel gelgit modeller bazı kabuller ile ve Türkiye'nin batı ve güneyini içeren mareograf verileri olmadan hesaplandığı için bu noktada eksik kalmaktadır. Bu modellerin mareograf istasyonlarından elde edilen sonuçlara ne kadar iyi yaklaştığı da Mareograf verilerinden elde edilen gelgit modelinin önemini göstermektedir.

Tablo 3.8, Akdeniz için mareograf istasyonları ve uydu altimetresi verileri kullanılarak tahmin edilen bölgesel yıllık gelgit parametresinin (R_{sa}) ve bölgesel yarı yıllık gelgit parametresinin (R_{ssa}) Ege ve Marmara Denizi'nde bulunan değerlerden daha büyük bir genliğe sahip olduğunu göstermektedir. Akdeniz, Ege ve Marmara Denizi'ndeki mareograf istasyonlarından ve uydu altimetresinden

elde edilen Rsa'nın genliği farkı sırasıyla 0.5 cm, 0.8 ve 0.2 cm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Rssa'nın genlik farkları sırasıyla yaklaşık 1.2 cm, 0.4 ve 0.1 cm bulunmuştur. Karşılaştırma sonucunda Mareograf istasyonlarından ve uydu altimetresi misyonlarından elde edilen değerler ile oluşturulan bölgesel gelgit modellerinin birbirleri ile uyumlu olduğunu görülmektedir. Ayrıca her iki yöntemin birbirleri ile korelasyonlu olduğunu gösteren (r) korelasyon katsayısı Rsa için 0.87 ve Rssa için 0.91 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.8 Bölgesel Rsa ve Rssa

<i>Bölge</i>	<i>Mareograf</i>		<i>Multi-misyon Uydu Altimetresi</i>	
	<i>Genlik-RSa</i> (cm)	<i>Genlik-RSsa</i> (cm)	<i>Genlik-RSa</i> (cm)	<i>Genlik-RSsa</i> (cm)
<i>Akdeniz</i>	9.1 ± 1.2 cm	3.3 ± 0.7 cm	9.6 ± 1.6 cm	2.1 ± 0.5 cm
<i>Ege</i>	4.9 ± 0.8 cm	1.0 ± 0.3 cm	5.7 ± 1.2 cm	1.4 ± 0.3 cm
<i>Marmara</i>	5.2 ± 0.9 cm	1.3 ± 0.4cm	5.4 ± 1.1 cm	1.1 ± 0.3 cm

Uydu altimetresi ve Mareograf verilerinden hesaplanan bölgesel yıllık gelgit parametresi (Rsa) ve bölgesel yarı aylık gelgit parametresi (Rssa) ile CTOH organizasyonu tarafından hazırlanan X-TRACK bölgesel gelgit modeli ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar bulunmuştur. X-TRACK verisi Marmara Denizi için mevcut olmadığı için Marmara'da böyle bir karşılaştırma yapılamamıştır. Tablo 3.9 ile Mareograf ve X-TRACK vasıtasıyla oluşturulan modeller arasındaki fark ve multi-misyonlu uydu altimetresi ve X-TRACK'tan yararlanılarak oluşturulan modeller arasındaki fark gösterilmiştir.

Tablo 3.9 X-TRACK Çözümü ile Olan Farklar

<i>Bölge</i>	<i>Mareograf- X-TRACK</i>		<i>Uydu Altimetresi – X-TRACK</i>	
	<i>Genlik-RSa</i> (cm)	<i>Genlik-RSsa</i> (cm)	<i>Genlik-RSa</i> (cm)	<i>Genlik-RSsa</i> (cm)
<i>Akdeniz</i>	0.63 ± 0.1	1.20 ± 0.40	0.74 ± 0.20	0.03 ± 0.0
<i>Ege</i>	0.82 ± 0.2	0.54 ± 0.10	0.07 ± 0.02	0.14 ± 0.04

Akdeniz ve Ege Denizi'nde her iki yöntem ile oluşturulan yarı yıllık ve yıllık bölgesel gelgit parametrelerinin X-TRACK çözümünden olan farkın yaklaşık bir santimetreden az olduğu belirlenmiştir.

21 ayrı bileşenden oluşan tüm gelgit parametreleri dikkate alındığından gerçek anlamıyla bir bölgesel gelgit modeli oluşturulmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde özellikle deniz seviyesini doğrudan etkilediği için bu modelin oluşturulup deniz seviyesi verilerinden çıkarılması hedeflenmişti. Tablo 3.10 ile mareograf ve uydu altimetresi verilerinden elde edilen bölgesel gelgit modeli veya toplam gelgit etkisine ilişkin değerler gösterilmiştir.

Tablo 3.10 Bölgesel Gelgit Modeli

<i>Bölge</i>	<i>Mareograf</i>	<i>Multi-misyon Uydu Altimetresi</i>
	<i>Genlik ve Std. Sapma.</i> (cm)	<i>Genlik ve Std. Sapma.</i> (cm)
<i>Akdeniz</i>	39.53 ± 5.3	38.24 ± 3.5
<i>Ege</i>	22.90 ± 2.2	23.41 ± 3.6
<i>Marmara</i>	12.26 ± 0.9	11.04 ± 0.7

Akdeniz, Ege ve Marmara Denizi mareograf ve multi-misyonlu uydu altimetresinden genlik farklılıkları sırasıyla 1.3 cm, 0.5 cm ve 1.2 cm olarak belirlenmiştir. Her iki yöntem ile belirlenen bölgesel gelgit modelleri arasındaki korelasyon katsayısı ise 0.97 olarak bulunmuştur.

3.2.4 Deniz Seviyesi Trendinin Belirlenmesi

(2.2) ile belirlenen yüksek frekanslı deniz seviyesi değerlerinden tüm gelgit etkileri çıkarıldığında (3.1) ile deniz seviyesine ilişkin trendler belirlenebilir. Deniz seviyesi verilerinde belirlenecek trend için genel yaklaşım aylık ortalama değerlerin elde edilmesidir. Bu sebeple yöntemine bakılmaksızın tüm deniz seviyesi verilerinden aylık ortalama değerlerin hesaplanması gerekmektedir.

$$y_i = b t_i + r_i \quad (3.1)$$

Burada y_i aylık ortalama deniz seviyesi değeri, t_i desimal yıl cinsinden zaman bilgisi ve r_i ise hatayı ifade eder. En küçük kareler yaklaşımı ile b deniz seviyesi trendi belirlemek için en ideal doğrusal eğilimdir ve hesaplanmasında (3.2)'den faydalanılır.

$$b = \frac{\sum_i (t_i - T)(y_i - Y)}{\sum_i (t_i - T)^2} \quad (3.2)$$

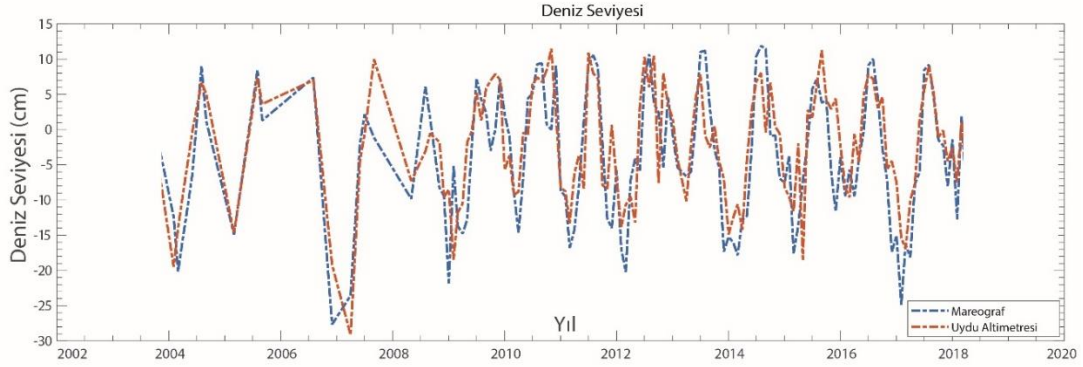
Burada y_i ve t_i ortalama değerler, olup deniz seviyesi trendinin standart sapması (3.3)'deki gibi bulunur.

$$s_b = \frac{\sum_i (t_i - T)^2 - b \sum_i (t_i - T)(y_i - Y)}{(n - 2) \sum_i (t_i - T)^2} \quad (3.3)$$

Burada n hesaplanmış aylık ortalama deniz seviyesi sayısıdır.

(3.1-3) kullanılarak Mareograf ve uydu altimetresi verileri ile aylık ortalama deniz seviyesi değerleri ve bu değerlerden deniz seviyesi trendleri belirlenmiştir. ERDM mareograf istasyonu ve bu istasyon bölgesine enterpole edilmiş altimetre verilerinin aylık ortalama değerleri Şekil 3.10 da gösterilmiş olup diğer istasyonların zaman serileri benzer şekilde oluşturulmuştur. Mareograflardan elde edilen en büyük deniz seviyesi trendi MERG istasyonunda 5.1 mm/yıl olarak belirlenirken uydu altimetresi verilerinden elde edilen en büyük deniz seviyesi

trendi ERDM istasyonu bölgesinde 3.7 mm/yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca her iki yöntemle elde edilen yıllık ve yarıyıllık gelgit parametreleri ise ERDM istasyonu bölgesinde en büyük değerlere ulaşmış ve bu değerler sırasıyla yaklaşık 10 cm ve 3 cm civarındadır.



Şekil 3.10 Aylık ortalama deniz seviyesi değerleri

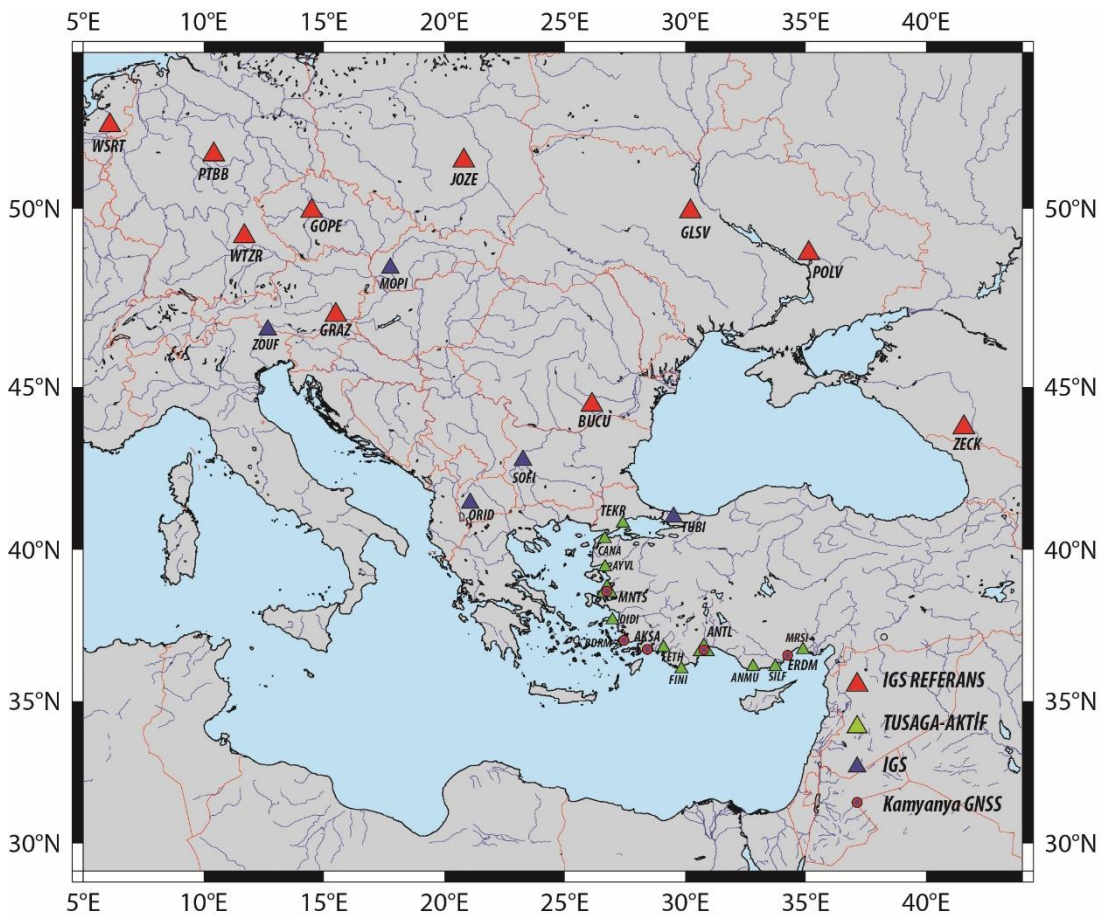
Mareograf ve uydu altimetresi verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendleri CMEMS ve X-TRACK tarafından yayınlanan grid değerler ile karşılaştırılmış ve çalışmanın ana hedeflerinden olan VLM'nin belirlenmesinde bu iki altimetre grid verilerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca bölgedeki deniz seviyesi paternini belilemek için TUDES ağından bağımsız ve bölgeye yakın olan iki istasyon belirlenmiş ve analizleri yapılmıştır. PSMSL'den seçilen LEROS ve ALEXANDROPOLIS (ALEX.) maraograf istasyonları bölgenin deniz seviyesi patterni ile oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Tablo 3.11'e bakıldığında mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesi değerleri ile grid altimetre verilerinden elde edilen deniz seviyesi değerleri arasındaki korelasyon değerlerinin oldukça iyi olduğu ve iki farklı grid verisinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3.11 Deniz Seviyesi Trendleri

İstasyon	Mareograf					Uydu Altimetresi				
	Trend	DAC	Trend (XTRACK)	RMSD	Korelasyon	Mesafe	Trend (CMEMS)	RMSD	Korelasyon	Mesafe
	(mm/yıl)	(mm/yıl)	(mm/yıl)	(cm)	Katsayısı(r)	TG-SA (km)	(mm/yr)	(cm)	Katsayısı(r)	TG-SA (km)
<i>AKSZ</i>	1.1 ± 0.3	0.4 ± 0.2	3.6 ± 0.8	4.1	0.81	22	3.4 ± 0.9	3.2	0.88	5
<i>ANTL</i>	2.4 ± 0.8	0.5 ± 0.3	2.7 ± 0.7	3.3	0.87	31	3.0 ± 0.6	6.8	0.73	2
<i>BDRM</i>	2.6 ± 0.7	0.5 ± 0.2	5.6 ± 1.0	7.6	0.67	148	4.8 ± 0.8	3.5	0.71	4
<i>ERDK</i>	3.5 ± 0.8	0.3 ± 0.2	-	-	-	-	4.2 ± 0.5	5.3	0.77	2
<i>ERDM</i>	3.7 ± 0.9	0.3 ± 0.2	4.9 ± 0.9	2.8	0.92	13	4.3 ± 0.8	3.6	0.79	3
<i>GADA</i>	0.6 ± 0.2	0.6 ± 0.2	1.4 ± 0.3	5.9	0.73	22	1.2 ± 0.2	4.9	0.81	2
<i>MERG</i>	1.4 ± 0.3	0.4 ± 0.3	-	-	-	-	4.6 ± 0.9	4.0	0.76	2
<i>MNTS</i>	3.8 ± 0.7	0.4 ± 0.2	3.1 ± 0.7	6.6	0.65	55	3.3 ± 0.7	3.4	0.84	1
<i>LEROS</i>	2.0 ± 0.3	0.4 ± 0.2	3.5 ± 0.8	7.0	0.69	106	4.1 ± 0.8	3.1	0.89	3
<i>ALEX.</i>	1.4 ± 0.6	0.5 ± 0.3	3.8 ± 0.9	3.7	0.81	10	4.3 ± 0.7	2.9	0.86	2

3.3 GNSS Verilerinin Analizi

Çalışmanın ana çerçevesini oluşturan ve düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi için en ideal stratejinin tespit edilmesi amacıyla mareograf istasyonlarında yapılan kampanya GNSS ölçümlerinin de dahil edildiği, kıyı bölgelerde yer alan sürekli gözlem yapan GNSS istasyonlarını içeren bir ağ oluşturulmuştur. Bu, IGS kapsamındaki on referans GNSS istasyonu, 5 IGS/EUREF istasyonu, 2 TUDES kapsamında işletilen istasyon, 9 TUSAGA-AKTİF istasyonu ve 5 kampanya ölçümü olmak üzere toplam 31 noktadan oluşmaktadır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 GNSS Ağı

Yapılan kampanya ölçümlere ilişkin bilgiler Tablo 3.12'de gösterilmiştir. Kampanya ölçümleri planladığı tarihlerde kapa indeksinin 4 ve altında olduğu, solar aktivitenin ideal olduğu dönemlerde genel olarak mayıs/eylül aylarında yapılmıştır. Tüm kampanya ölçümlerinde önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlara dayalı olarak kampanya GNSS ölçümlerinin mümkün olması halinde

tekrarlı yapılması önerilmektedir. Bu sebeple her bir istasyon 3 veya 6 gün tekrarlı ölçülmüştür.

Tablo 3.12 GNSS Kampanya Ölçümleri

<i>Kampanya GNSS Veri Bilgileri</i>								
<i>Yıl</i>	<i>İstasyon</i>							
	<i>ERDM</i>	<i>ANT2</i>	<i>AKSZ</i>	<i>BODR</i>	<i>ERDK</i>	<i>GADA</i>	<i>MENT</i>	<i>MERG</i>
2001		.		.				.
2003		.			.			.
2005	.	.		.	.		.	.
2007	.	.		.	.		.	.
2008			.	.	.	.	.	.
2009		.	.	.	.	.	.	.
2010	.	.	.	.		.	.	.
2011	.	.	.	.			.	.
2012	.	.	.	.	.	.	.	.
2013	.	.	.	.	.	.	.	.
2014	.	.	.	.	.		.	.
2016	.	.	.	.		.	.	.
2017				.				
2018	.		.			.	.	.

Tüm GNSS verileri BERNese V5.2 yazılımı ile IGS final efemeris ve yer dönme parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. L1/L2'yi belirlemek için faz belirsizliği çözümü olarak QIF kullanılmıştır. Zenit troposfer gecikmeleri dikkate alınmış, FES2014b küresel okyanus yükleme modeli kullanılmıştır. Kampanya değerlendirmelerine ilişkin detaylı veri bilgisi Tablo 3.13'te gösterilmiştir.

Tablo 3.13 GNSS Verileri Değerlendirme Bilgileri

<i>Parametre</i>	<i>Tanım</i>
<i>GNSS Yazılımı</i>	<i>Bernese 5.2</i>
<i>Veri</i>	<i>Faz ve kod gözlemleri</i>
<i>Gözlem Süresi ve Veri aralığı</i>	<i>24-saatlik sürekli istasyon gözlemleri ve 8-10 saatlik kampanya ölçümleri / 30 saniyelik veriler</i>
<i>Yükseklik Açısı</i>	<i>10o</i>
<i>İyonosfer</i>	<i>İyonosferden bağımsız lineer kombinasyon L3</i>
<i>Troposfer</i>	<i>Saastamoinen modeli, Vienna Mapping Function (VMF1, [67])</i>
<i>Anten PCV</i>	<i>IGS [68]</i>
<i>Dünya Dönme Par.</i>	<i>IERS</i>
<i>Kutup Gelgiti</i>	<i>IERS2010 [69]</i>
<i>Okyanus Yüklemesi</i>	<i>FES2004 [48]</i>
<i>Yörünge</i>	<i>IGS final</i>
<i>Referans Çerçeve</i>	<i>ITRF2014 datum [70]</i>

Tüm deęerlendirmeler ITRF14 2010.00 epoęunda yapılmıřtır. Referans olarak Avrasya plakasındaki aktif faylardan etkilenmedięi dūřınūlen 10 istasyon kullanılmıřtır. Bu 10 referans istasyondan bařlamak ūzere giderek azalan sayıda referans istasyon yaklařımı benimsemiřtir. Deęerlendirme stratejileri bu istasyonların kombinasyonlarından oluřmakta olup Tablo 3.14’de gōsterilmiřtir.

Tablo 3.14 GNSS Datum Stratejileri

İstasyon	Stratejiler									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>GRAZ</i>										•
<i>BUCU</i>									•	•
<i>POLV</i>								•	•	•
<i>ZECK</i>							•	•	•	•
<i>GLSV</i>						•	•	•	•	•
<i>JOZE</i>					•	•	•	•	•	•
<i>GOPE</i>				•	•	•	•	•	•	•
<i>WTRZ</i>			•	•	•	•	•	•	•	•
<i>PTBB</i>		•	•	•	•	•	•	•	•	•
<i>WSRT</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tüm istasyonlara iliřkin GNSS verileri deęerlendirildikten sonra zaman serilerinin oluřturulması ve hızların hesaplanması ařamasına geçilmiřtir. Genel olarak literatūre bakıldıęında bir çok çalıřmada ūnerilen model lineer zaman serisi modelidir. VLM için zaman serisi oluřturulmasındaki asıl amaç oluřturulan aędaki genel eęilimin gōrūlmesi ve bōlgedeki lokal hızların belirlenip dięer yōntemler ile

karşılaştırılmasının sağlanmasıdır. Bu çalışmada kullanılacak model Dach vd. (2015) tarafından önerilen ve Bernese 5.2 yazılımı içerisinde bir modül olarak kullanılan FODIT'te kullanılan (2.11) bağıntısıdır.

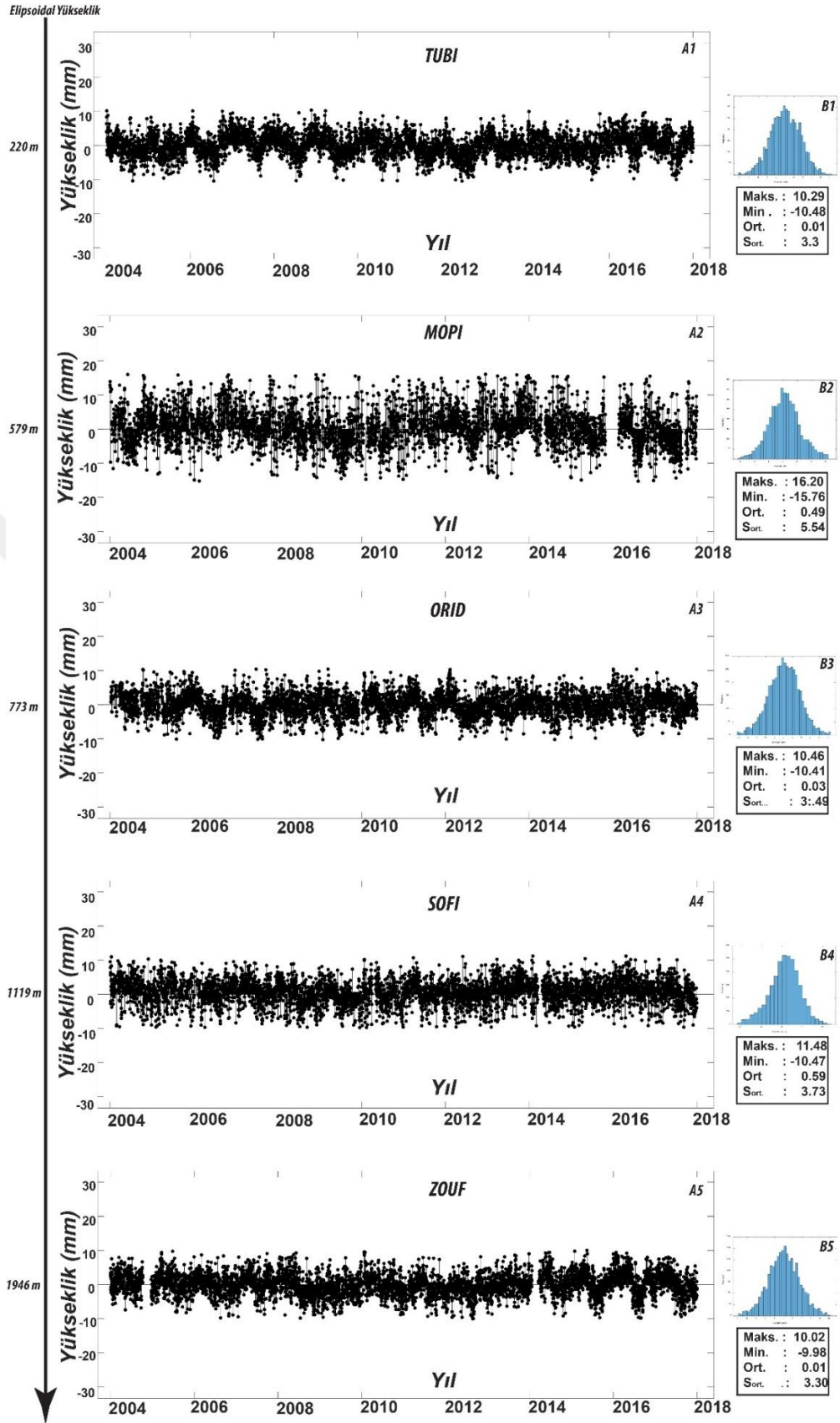
Zaman verisi ve hızlar oluşturulurken Tablo 3.14'te gösterilen stratejilere göre değerlendirme işlemi yapılmış ve tüm istasyonların olduğu bölgeyi kapsayan 2004-2010 arası 24 adet 5mw'den büyük ve 2010-2018 yılları arası bölgede gerçekleşmiş 4.5mw ve üzeri 146 deprem dikkate alınmıştır. Zaman serisi oluşturulması ve hızların hesaplanması için FODIT algoritması Sekil-2.5b'de gösterilmiştir.

Zaman serisi analizi için kullanılan 16 sabit istasyon için gerekli bilgiler Tablo 3.15'te gösterilmiştir. Burada 4 ayrı veri sağlayıcı Merkez kullanılmış olup IGS/EUREF/TUDES ağları kapsamındaki noktaların verileri 2004-2018 yılları arasında, TUSAGA AKTIF verileri ise 2010-2018 yılları arasındadır. TUDES kapsamındaki verilerde yüzde 35 civarında veri boşluğu mevcut olup IGS/EUREF/TUSAGA-AKTIF ağları kapsamında veri boşlukları yüzde 10'un altındadır. Veri örnekleri (Değerlendirilmiş veriler) ise yaklaşık 2500 ile 5000 adet/gün arasındadır. Elipsoidal yükseklikler 32 ila 1946 metre aralığında değişmektedir. Kampanya verilerinde zaman serileri için, minimum 10 yıllık, en az 5 kampanya ölçümü yapılmış, 3-6 gün arası tekrarlı olarak ölçümlerin yapıldığı istasyonlar dikkate alınmıştır. Bu ölçümler aynı mevsimlerde yapıldığı için mevsimsel etkilere maruz kalmadığı düşünülmüştür.

Burada IGS/EUREF ağları kapsamındaki GNSS istasyonlarına ilişkin verilerin değerlendirilmesindeki en önemli amaç stratejiler arasındaki farkların daha önce yayınlanmış hızlar ile karşılaştırılması olarak açıklanabilir. Şekil 3.12'de C-GNSS istasyonu verilerinin düşey bileşen zaman serileri ile birlikte düzeltme ve histogramları göstermektedir. A1, A2, A3, A4, A5 zaman serisini, B1, B2, B3, B4, B5 ise ilgili GNSS istasyona ilişkin histogramı göstermektedir. Örneğin ORID istasyonuna ait düşey bileşenin düzeltmeleri sıfıra yakın bir ortalamaoya sahip olmakla beraber maksimum 10.46 mm ve minimum -10.41 mm'dir. Ayrıca ortalamanın standart sapması 3 mm'dir.

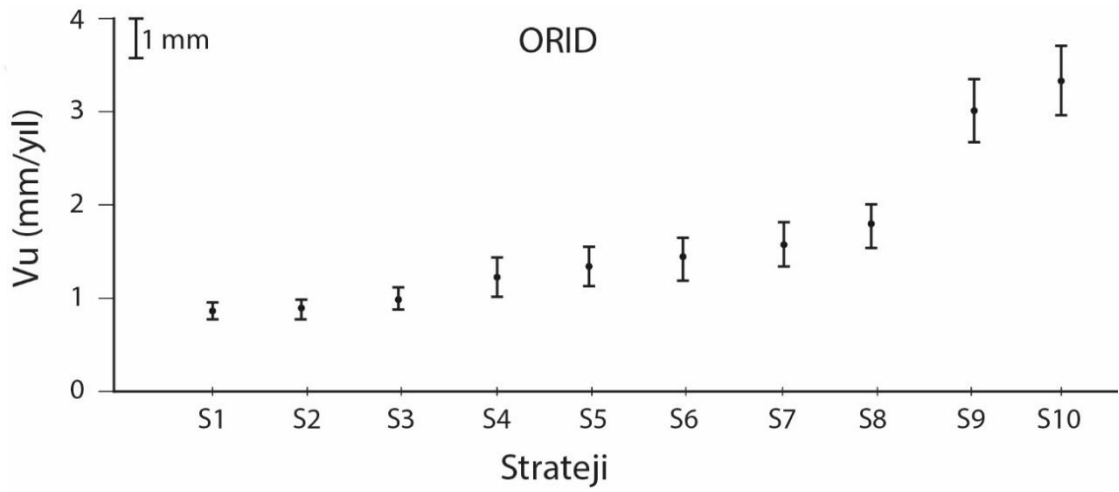
Tablo 3.15 C-GNSS Veri Bilgileri

C-GNSS Verileri					
<i>İstasyon</i>	<i>Veri</i>	<i>Veri</i>	<i>Veri</i>	<i>Elipsoidal</i>	<i>Veri</i>
<i>Adı</i>	<i>Sayısı</i>	<i>Süresi (Yıl)</i>	<i>Boşluğu (%)</i>	<i>Yük. (m)</i>	<i>Sağlayıcı</i>
<i>ANMU</i>	<i>2484</i>	<i>6.8</i>	<i>6.9</i>	<i>39.6</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>ANTA</i>	<i>3249</i>	<i>8.9</i>	<i>36.4</i>	<i>32.7</i>	<i>TUDES</i>
<i>AYVL</i>	<i>2356</i>	<i>6.5</i>	<i>11.7</i>	<i>54.2</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>CANA</i>	<i>2488</i>	<i>6.8</i>	<i>6.8</i>	<i>141.2</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>DIDI</i>	<i>2415</i>	<i>6.6</i>	<i>9.5</i>	<i>79.3</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>FETH</i>	<i>2408</i>	<i>6.6</i>	<i>9.8</i>	<i>37.3</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>FINI</i>	<i>2509</i>	<i>6.9</i>	<i>6.0</i>	<i>36.3</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>MNTS</i>	<i>3228</i>	<i>8.8</i>	<i>36.8</i>	<i>59.2</i>	<i>TUDES</i>
<i>MOPI</i>	<i>4662</i>	<i>12.8</i>	<i>8.8</i>	<i>579.0</i>	<i>EUREF</i>
<i>MRSI</i>	<i>2421</i>	<i>6.6</i>	<i>9.3</i>	<i>40.5</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>ORID</i>	<i>4864</i>	<i>13.3</i>	<i>4.8</i>	<i>773.0</i>	<i>IGS</i>
<i>SILF</i>	<i>2500</i>	<i>6.8</i>	<i>6.3</i>	<i>52.8</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>SOFI</i>	<i>4853</i>	<i>13.3</i>	<i>5.0</i>	<i>1119.5</i>	<i>IGS</i>
<i>TEKR</i>	<i>2543</i>	<i>7.0</i>	<i>4.7</i>	<i>48.8</i>	<i>TUSAGA-AKTIF</i>
<i>TUBI</i>	<i>5009</i>	<i>13.7</i>	<i>2.0</i>	<i>220.3</i>	<i>IGS</i>
<i>ZOUF</i>	<i>4851</i>	<i>13.3</i>	<i>5.1</i>	<i>1946.5</i>	<i>IGS</i>



Şekil 3.12 C-GNSS İstasyonlarına ait Zaman Serisi

On farklı veri strateji kullanılarak GNSS istasyonları için düşey bileşene ait hız değerleri ve belirsizlikleri hesaplanmıştır ve ORID istasyonundan alınan düşey hız değerlerinin bir örneği Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Şekil 3.13'de gösterildiği gibi, bir numaralı strateji (S1) için düşey hız değişimi 1 mm/yıl'dan azdır. Dokuz ve sekiz numaralı stratejilerde (S9 ve S10) için düşey hız değişimi 3 mm/yıl'dan azdır ve hız değeri diğer stratejilerinden daha büyüktür. Düşey hızlar için, bir numaralı strateji (S1), ilk sekiz strateji (S2..S8) iyi uyum sağlamış ve yedi numaralı strateji (S7) ile istatistiki açıdan eşit kabul edilebilir olarak belirlenmiştir.



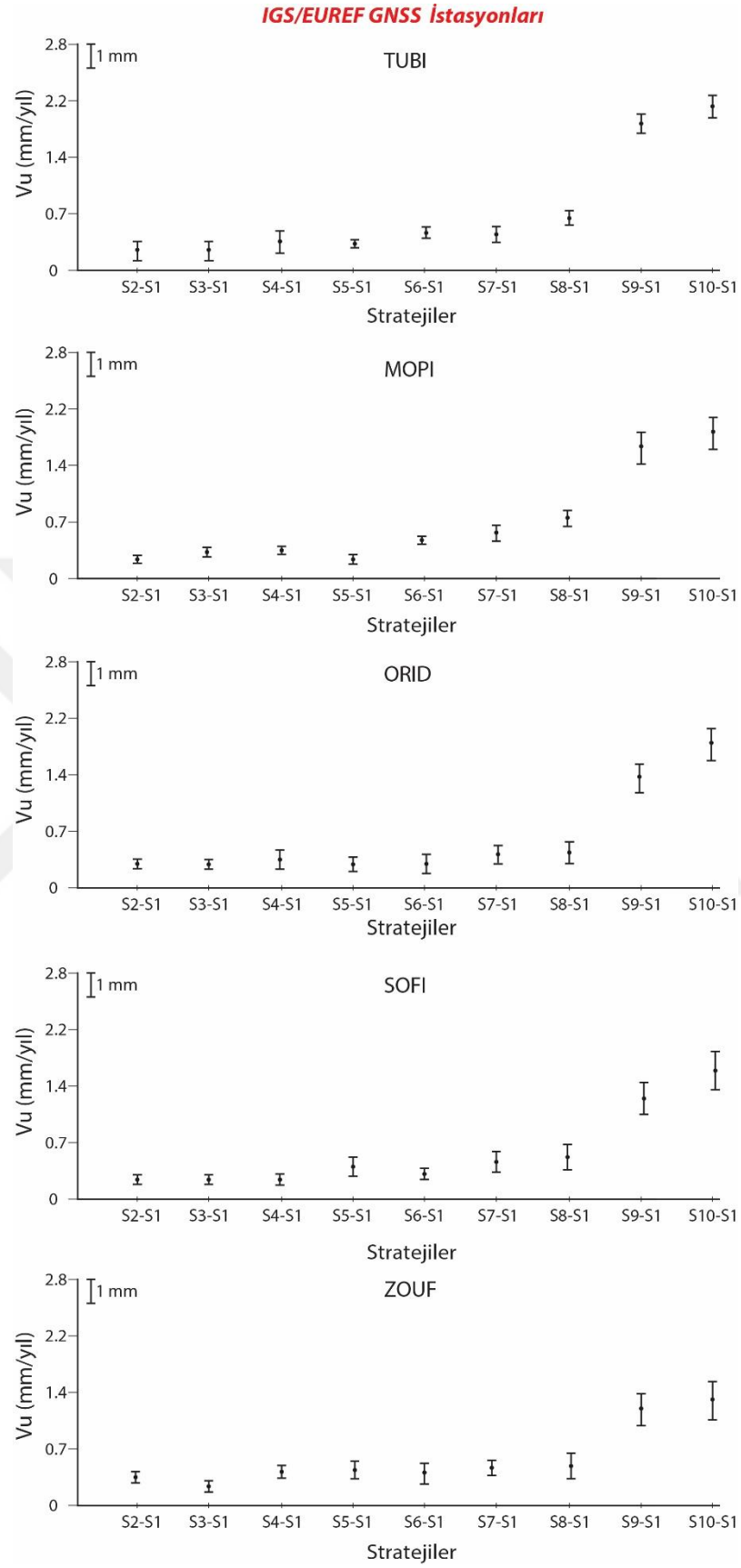
Şekil 3.13 ORID C-GNSS İstasyonu için farklı stratejiler ile bulunan düşey hız ve standard sapma değerleri

IGS ve EUREF tarafından yayınlanan çözümler gerçek sonuçlar olarak kabul edilerek bu çalışmadaki tüm stratejilere ait GNSS değerlendirme işlemi sonuçları ile karşılaştırıldığında uyum sağlanacağı varsayılmıştır. Çünkü IGS/EUREF çözümleri çok uzun süreli GNSS verilerinin günlük çözümlerine dayanmaktadır. ORID istasyonu için ilk veri stratejisi (S1) çözümünü dikkate alındığında düşey hız yaklaşık 0.9 mm/yıl olarak kestirilmiştir. Bu değer aynı zamanda IGS/EUREF çözümü (0.95 mm/yıl) ile karşılaştırıldığında büyük uyum sağlamaktadır. İlk sekiz stratejide de benzer uyum belirlenirken diğer çözümlerden elde edilen düşey bileşene ait hızlar gerçek değerler olarak kabul edilemez. Bu nedenle, ilk veri stratejisini kullanarak 5 IGS istasyonu için düşey bileşen hız değerleri hesaplanmış ve bu sonuçlar IGS/EUREF çözümleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 3.16).

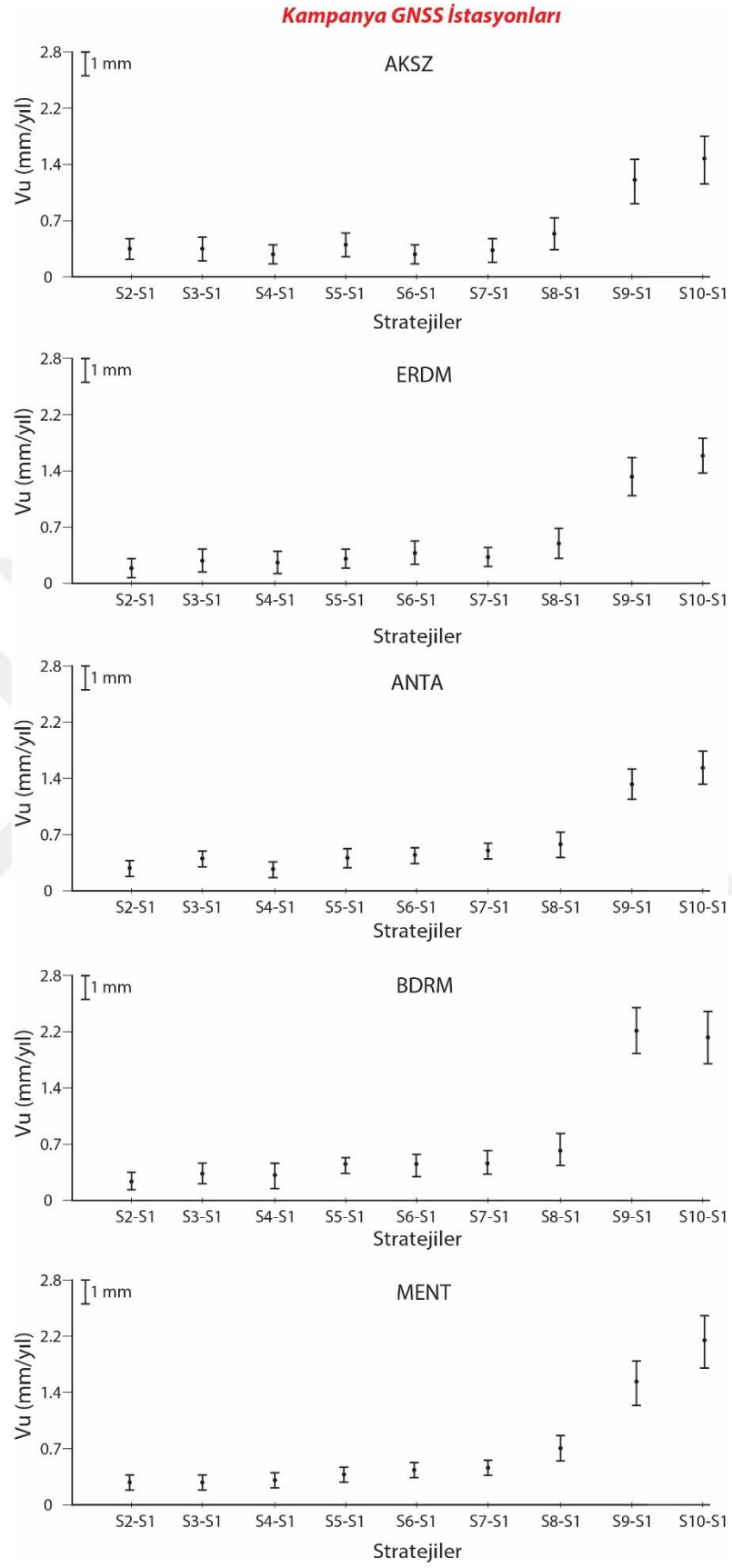
Tablo 3.16 Düşey Hız Bileşenlerinin IGS/EUREF çözümleri ile karşılaştırılması

İstasyon	Vu (S1)	Vu (S7)	Vu (IGS/EUREF)	Farklar (S7-Yayınlanmış)	Test
Adı	(mm/yıl)	(mm/yıl)	(mm/yıl)	(mm/year)	Değeri
TUBI	-1.0 ± 0.3	-0.9 ± 0.4	-1.3 ± 0.2	0.4 ± 0.3	1.3
MOPI	-0.2 ± 0.2	-0.4 ± 0.5	-0.2 ± 0.8	0.2 ± 0.9	0.2
ORID	0.9 ± 0.2	0.8 ± 0.7	1.0 ± 0.6	0.2 ± 0.8	0.3
SOFI	-0.1 ± 0.2	-0.1 ± 0.6	-0.4 ± 0.5	0.3 ± 0.7	0.4
ZOUF	1.4 ± 0.4	1.5 ± 0.6	1.0 ± 0.5	0.4 ± 0.7	0.6

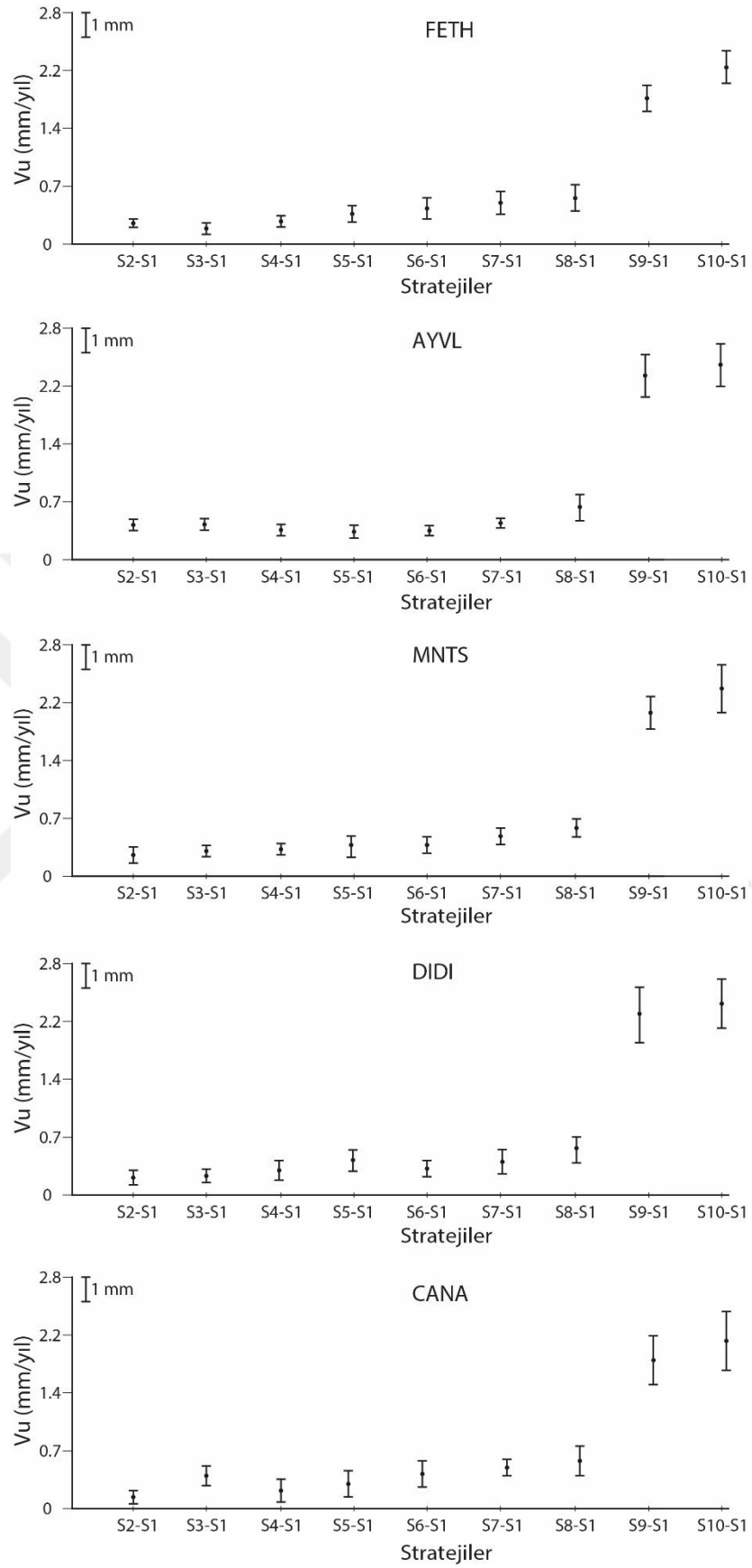
Bu karşılaştırma işleminden sonra tüm veriler on farklı stratejiye göre yeniden ele alınarak düşey bileşene ait hızlar ve standart sapmalar hesaplanmıştır. Şekil 14-17, diğer stratejiler kullanılarak elde edilen hız bileşenleri ile S1 stratejisi kullanılarak belirlenen hız alanı arasındaki farkı göstermektedir. Şekil 14-17'de görüldüğü gibi, S9 ve S10 stratejileri için dikkate değer bir hız farkı gözlemlenmiştir. S10 stratejisinin farklılıkları diğer stratejilerden daha büyüktür. Tüm istasyonlar için S1...S8 stratejiler arasındaki hız farkları istatistiksel olarak anlamsız ve diğer stratejilere göre daha küçüktür.



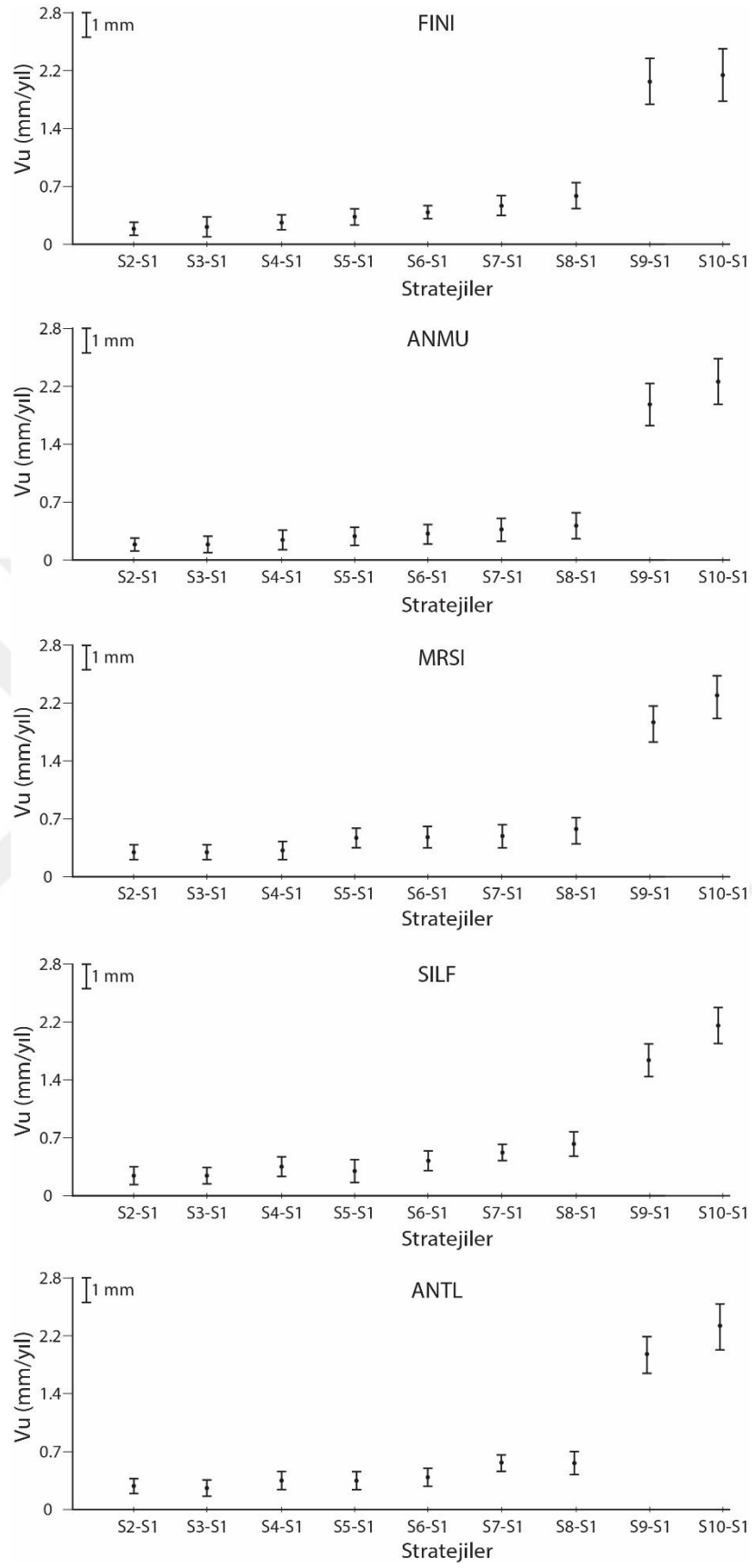
Şekil 3.14 S1 ve diğer strateji çözümleri arasındaki farklar ve standart sapmalar (IGS/EUREF Verileri)



Şekil 3.15 S1 ve diğer strateji çözümleri arasındaki farklar ve standart sapmalar
(Kampanya Verileri)



Şekil 3.16 S1 ve diğer strateji çözümleri arasındaki farklar ve standart sapmalar
(Sürekli İstasyon Verileri-A)



Şekil 3.17 S1 ve diğer strateji çözümleri arasındaki farklar ve standart sapmalar
(Sürekli İstasyon Verileri-B)

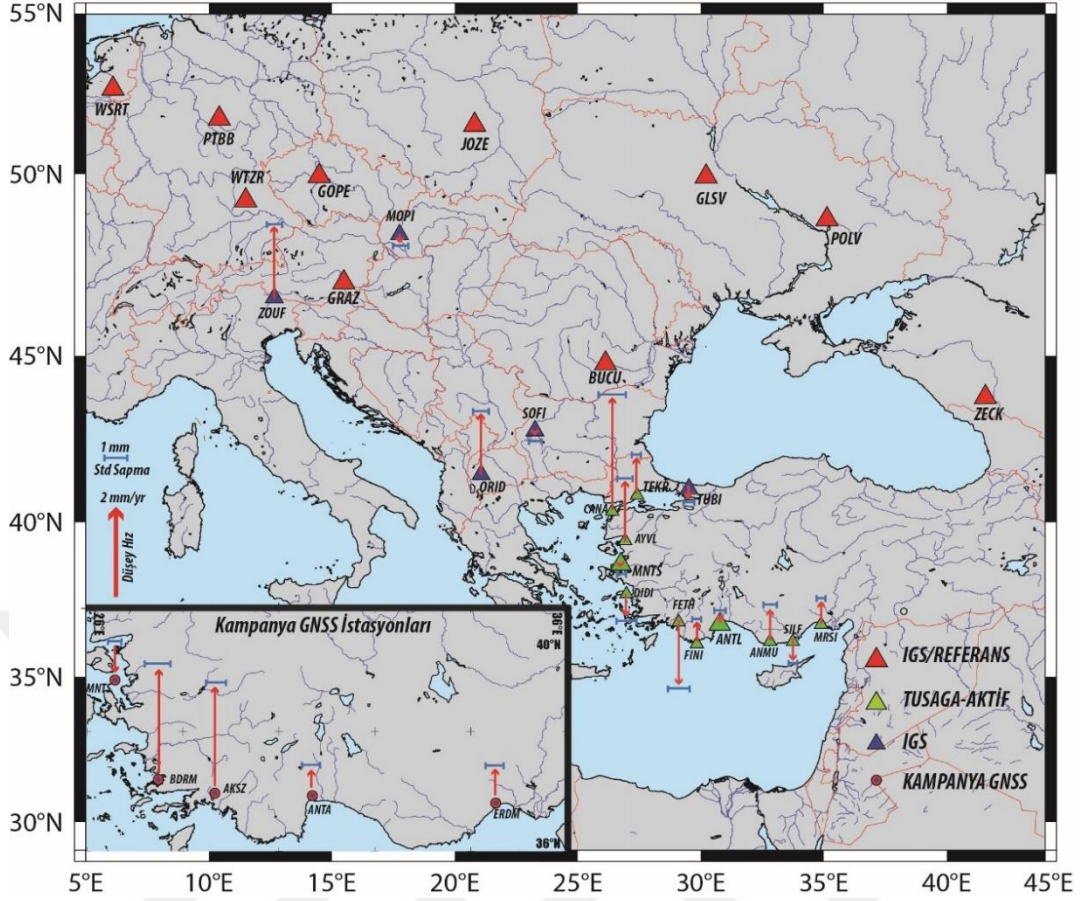
C-GNSS istasyonları ve kampanya GNSS verileri için jeodezik düşey hızlar ve belirsizlikleri, birinci veri değerlendirme stratejisine (S1) dayalı en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3.17 ve Şekil 3.18). Bu belirsizlikler %95 güven düzeyindedir.

Tablo 3.17'de, kampanya GNSS verileri ile hesaplanan hızlarda anlamlı bir değişim bulunmuştur. Ege Denizi'nin aynı tarafında yer alan AKSA ve BODR kampanya GNSS çözümleri için düşey hızlar, S1 stratejisine göre ortalama 2.45 ± 0.5 mm/yıldır. Bağlı hız vektörlerinden bölgenin önemli deformasyon modelleriyle aktif olduğu kolayca anlaşılabilir

Tablo 3.17 Kampanya GNSS istasyonları hızları ve standard sapmaları

GNSS İstasyonu	Veri Aralığı	Vu (mm/yıl)
ERDM	2005-2018	0.6 ± 0.7
ANTL	2001-2018	0.4 ± 0.7
AKSZ	2008-2018	2.4 ± 0.8
BODR	2001-2018	2.5 ± 1.0
ERDK	2001-2014	1.0 ± 0.3
MNTS	2001-2018	-0.6 ± 0.5

Ayrıca, Şekil 3.18'de gösterilen düşey hız vektörlerine dayalı olarak, C-GNSS istasyonlarında (MNTS, TUBİ ve SOFİ istasyonları hariç) önemli bağlı hareket bulunmuştur. Ayrıca CANA C-GNSS istasyonu diğerlerine göre çok daha büyük bir düşey hıza sahiptir.



Şekil 3.18 Düşey bileşen hızları ve standard sapmaları

3.4 InSAR Verilerinin Analizi

InSAR bir mikrodalga görüntüleme sistemi olup aktif bir sistem olarak isimlendirilir ve gece-gündüz çalışma kabiliyetine sahiptir. Uydu konumunun ve mikrodalga seyahat süresinin bir fonksiyonu olarak uydu-obje arasındaki mesafenin bulunması, sayısal yükseklik modellerinin (DEM) oluşturulmasına ve arazinin santimetre doğrulukla yüzey deformasyonlarının belirlenmesine olanak sağlar.

VLM'nin InSAR yöntemi ile belirlenmesi için ERDM, ANTL, MENT ve MERG mareograf istasyonu bölgelerinde ESA'nın Sentinel-1 Interferometric Wide (IW) swath verileri kullanılmıştır. Veriler SNAP yazılımı ile değerlendirilmiştir. Tüm interferogramlardaki topografya etkileri, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1-yay saniyelik sayısal yükseklik modeli kullanılarak kaldırılmıştır. Unwrapped işlemi için SNAPHU kullanılmıştır. InSAR zaman serileri, hem genlik

hem de faz bilgisini kullanarak kalıcı saçıcıların seçilmesine izin veren StaMPS kullanılarak tek bir ana interferogram ile hesaplanmıştır. Zaman serisi için değerlendirilen geçişler her yılın İlkbahar ve Sonbahar aylarında ikişer veri olacak şekilde seçilmiştir. Verilerin polarizasyonu VV olup, verilere ilişkin tüm bilgiler Tablo 3.18’de gösterilmiştir.



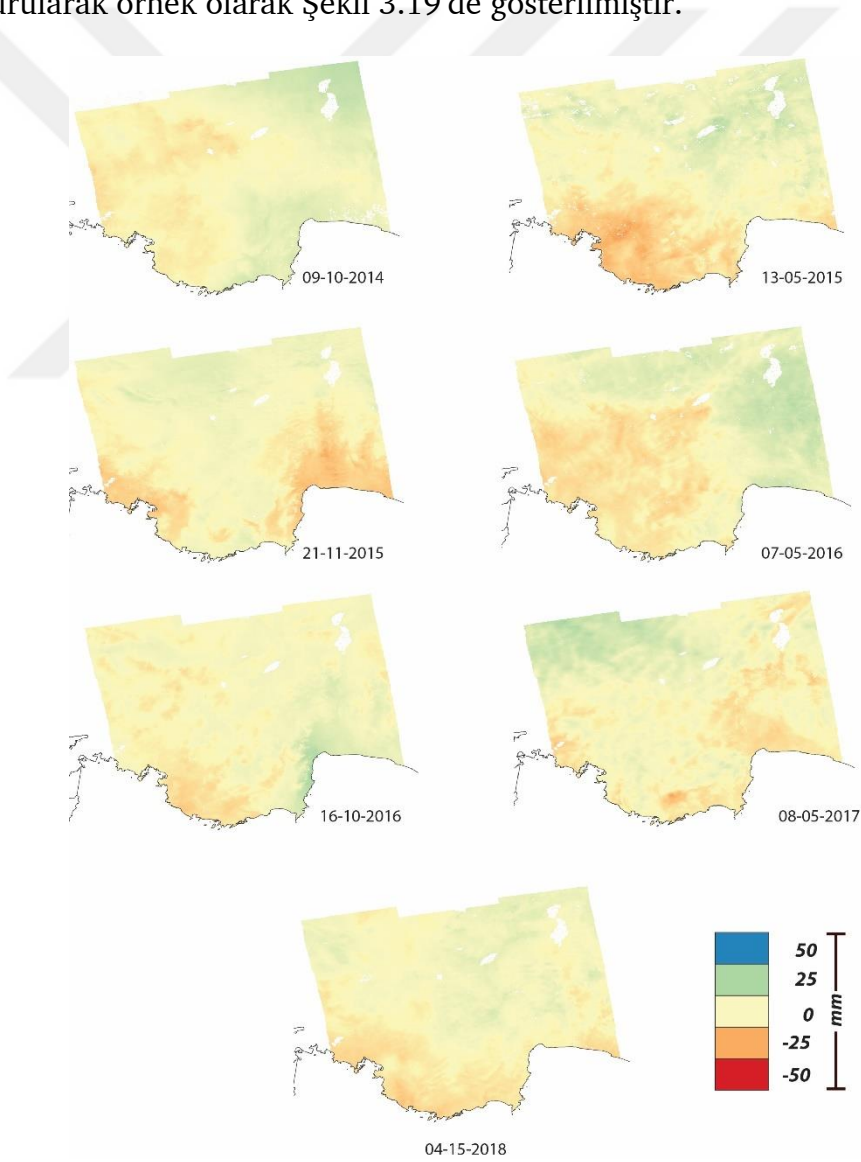
Tablo 3.18 InSAR Veri Bilgileri

İstasyon	Tarih	Veri Türü	Saçılım	İz	Çerçeve
ERDM	2014; Ekim	Single Look	IW	167	460
	2015; Nisan, Ekim	Complex			
	2016; Nisan	(SLC)			
	2017; Mayıs, Ekim				
	2018; Nisan				
ANTL	2015; Ekim	Single Look	IW	65	469
	2016; Nisan, Ekim	Complex			
	2017; Nisan, Ekim	(SLC)			
	2018; Nisan				
MENT	2014, Ekim	Single Look	IW	36	464
	2015; Şubat, Ekim	Complex			
	2017; Mayıs, Ekim	(SLC)			
	2018; Mayıs				
MERG	2014, Ekim	Single Look	IW	36	464
	2015; Şubat, Ekim	Complex			
	2017; Mayıs, ekim	(SLC)			
	2018; Mayıs				

InSAR verilerinden elde edilen yer değiştirmeler LOS yönünde olduğundan, tüm hesaplamalar LOS yönüne göre yapılır. Bu yöndeki düşey yer kabuğu hareketleri VLM_{InSAR} olarak isimlendirilir ve nihai hesaplanan düşey deformasyonu belirlemek için, LOS yer değiştirmesi ile geliş açısının (θ) kosinüs bileşeni arasında bir ilişki kurulması ile elde edilir (3.4) [71-73].

$$VLM_{InSAR} = \frac{LOS_{disp}}{\cos \theta} \quad (3.4)$$

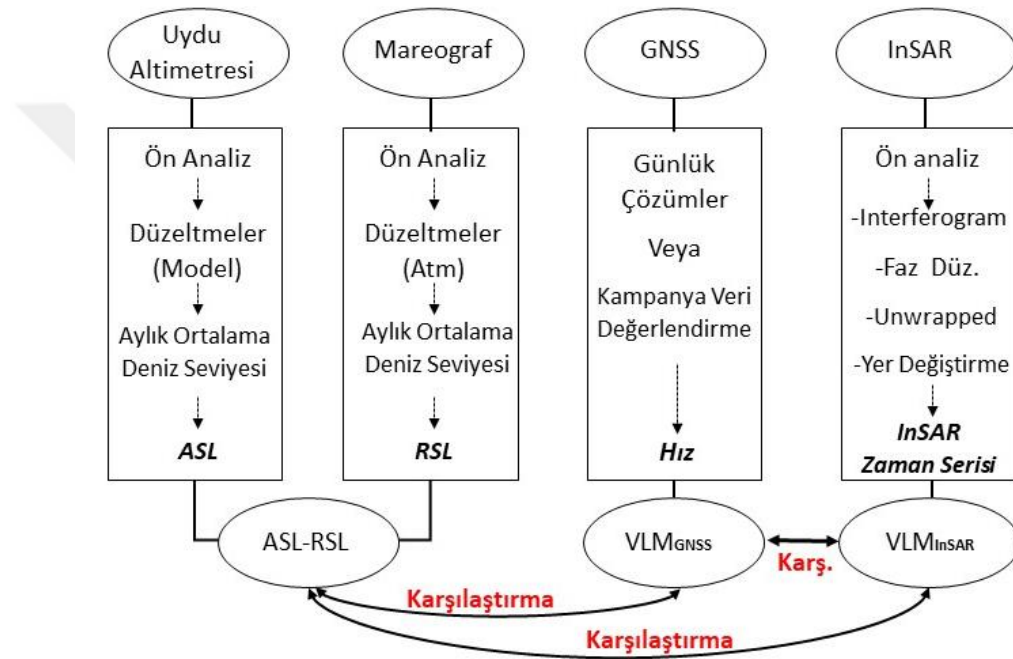
ANTL mareograf istasyonu bölgesinde Tablo 3.18’de belirtilmiş zamanlarda gerçekleşen Sentinel-1 geçişlerine ilişkin interferogramlar SNAP yazılımı ile oluşturularak örnek olarak Şekil 3.19’de gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Interferogramlar (ANTL)

3.5 Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi

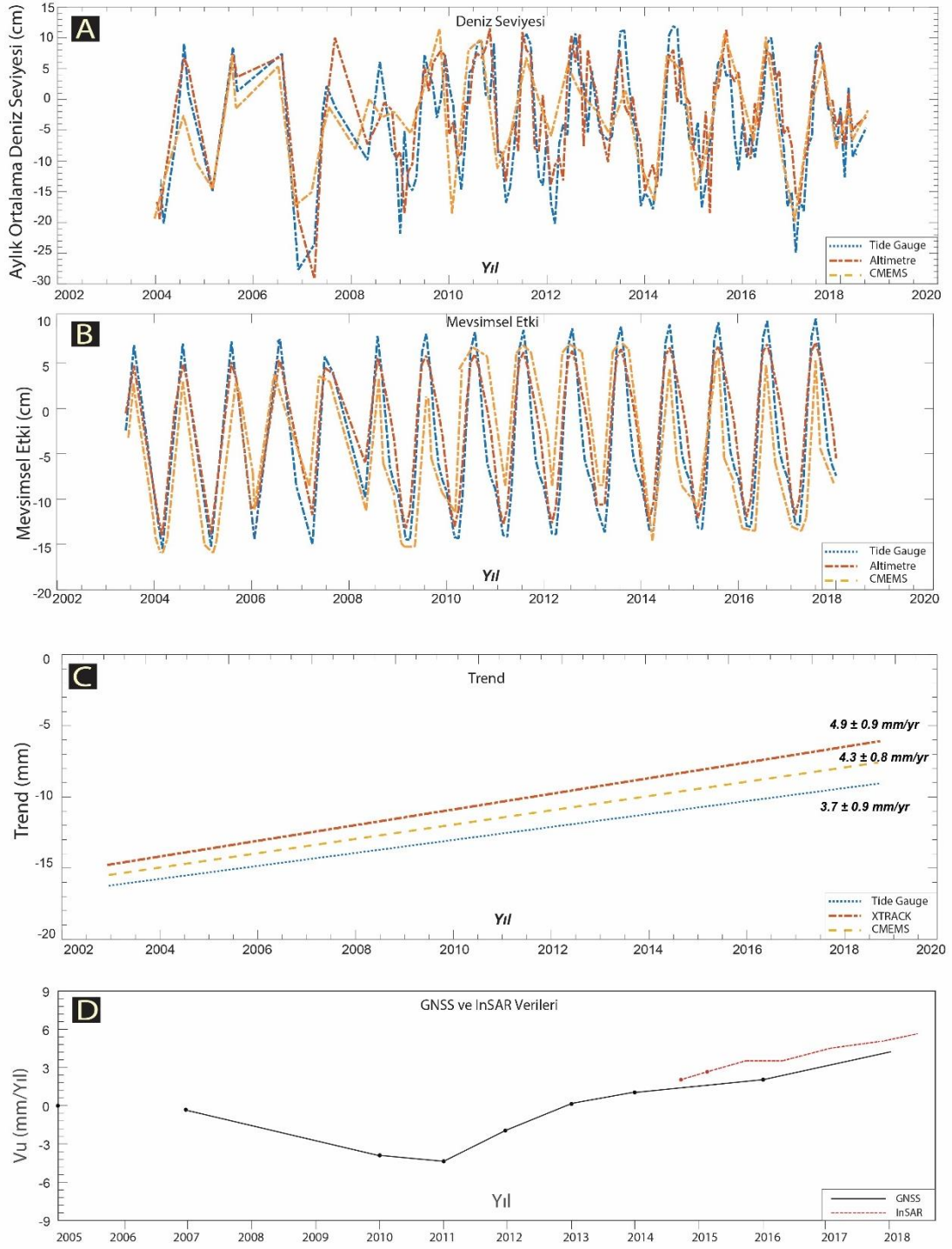
Düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesinde uydu altimetresi ve mareograf verilerinden elde edilen aylık ortalama deniz seviyesi trendleri kullanılmaktadır. (2.1) bağıntısıyla ifade edilmiş ASL ve RLS trendlerinin farkının lokal etkilerden olup olmadığı ise GNSS ve InSAR yöntemleri ile belirlenmektedir. Kullanılan yöntemlere ilişkin algoritma Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



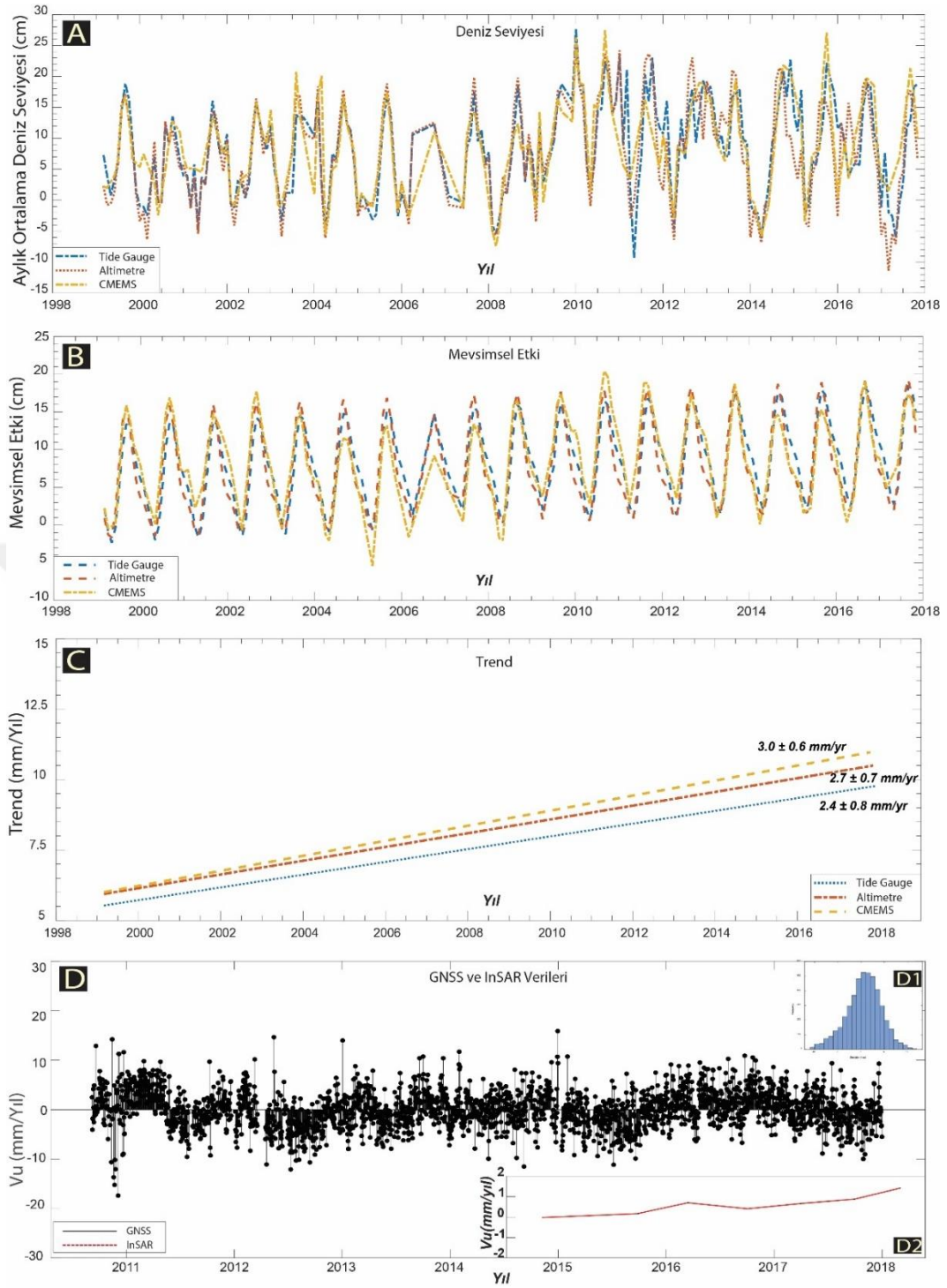
Şekil 3.20 VLM'nin farklı yöntemlerle elde edilmesi ve sonuçların karşılaştırılması algoritması

Bu çalışmada, her 15 dakikada bir mareograf istasyonlarından ve yaklaşık olarak her 10 günde bir uydu altimetresinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Mareograf istasyonlarında yapılan GNSS ölçümleri değerlendirilerek zaman serileri oluşturulmuştur. Ayrıca 2014-2018 yılları arasında InSAR görüntülerinden oluşturulan zaman serileri ile GNSS verileri desteklenmiştir. ERDM mareograf istasyonunun aylık ortalama deniz seviyesi değerleri ve bu istasyon konumuna (birkaç km) enterpole edilen altimetre verileri Şekil 3.21(A)'de gösterilmiştir. Burada her iki yöntemle de minimum aylık ortalama deniz seviyesi değeri ile maksimum deniz seviyesi arasında yaklaşık 40 cm fark olduğu tespit edilmiştir.

Her iki yöntem için de aylık ortalama değerler hesaplanmıştır. Bu istasyonda 2005-2018 yılları arasında 9 kampanya GNSS ölçümü ile oluşturulan zaman serisi şekil 3.18(D)'de gösterilmektedir. Aylık ortalama deniz seviyesi değerleri (mareograf istasyonu için mavi, uydu altimetresi için kırmızı, CMEMS grid veri için sarı) şekil 3.21(A)'da, GNSS (siyah çizgi) ve InSAR (kırmızı çizgi) zaman serileri şekil 3.21 (D)'de gösterilmiştir. ERDM mareograf istasyonundaki GNSS gözlemleri ölçüm kampanyaları yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde ANTL istasyonundaki uydu altimetresi ve mareograf verilerinden aylık ortalama deniz seviyesi değerleri hesaplanmıştır. ANTL istasyonunda kampanya ölçümlerine ek olarak sürekli gözlem yapan istasyona ilişkin C-GNSS verileri bulunmaktadır. 2014 yılı sonrası Sentinel-1 verileri analiz edilerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. şekil 3.22(A) aylık ortalama deniz seviyesini (her iki yöntemden kestirilen) gösterir ve şekil 3.22(D) C-GNSS ve InSAR zaman serilerini gösterir. şekil 3.22(D1), değerlendirilmiş GNSS verilerinin sonuçlarının normal dağıldığını gösterir ve şekil 3.22(D2) InSAR zaman serisini gösterir.



Şekil 3.21 ERDM Mareograf İstasyonu Zaman Serisi



Şekil 3.22 ANTL Mareograf İstasyonu Zaman Serisi

Uzun vadeli deniz seviyesi trendi belirlenirken mevsimsel sinyallerin deniz seviyesi verilerinden çıkarılması gerekir. Tablo 3.11’de tüm mareograf istasyonlarına ilişkin deniz seviyesi trendleri, yıllık ve yarıyıllık gelgit değerleri gösterilmiştir. ERDM istasyonunda yıllık ve altı aylık gelgit etkileri maksimum değerde ve bu değerler sırasıyla yaklaşık 10 cm ve 3 cm olarak belirlenmiştir.

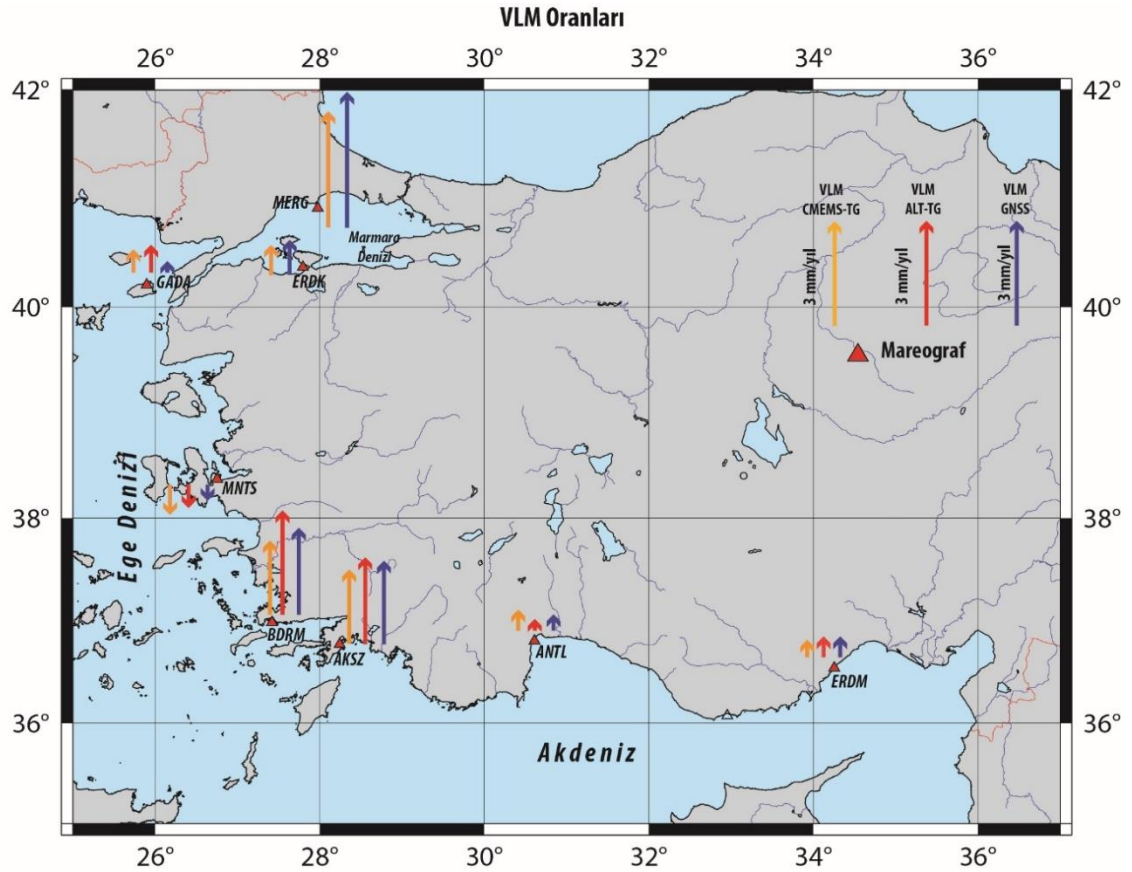
Mareograf istasyonlarından elde edilen maksimum deniz seviyesi trendi MERG istasyonunda 5.1 mm/yıl, uydu altimetresinden elde edilen maksimum deniz seviyesi trendi ise ERDM istasyon bölgesinde 3.7 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Ayrıca bölgedeki deniz seviyesi kestirilen yarı yıllık ve yıllık sinyaller önceki çalışmalar ve küresel modellerle oldukça uyumludur [64, 69]. Tablo 3.10'da gösterilen ve uydu altimetrisinden elde edilen deniz seviyesi trendleri, ESA-CCI projesi kapsamında yapılmış ve yayınlanmış çalışma ile de uyumludur [3, 74].

Uydu altimetresi ile mareograf istasyonlarından elde edilen ortalama deniz seviyesi farkı VLM_{SA-TG} (2.1) yardımı ile belirlenmiş, bu değerlerin lokal etkilerden kaynaklandığını kanıtlamak için en çok kullanılan yöntem GNSS olarak literatürde yaygın yer bulmuştur. Uydu altimetresi, mareograf ve GNSS verileri kullanılarak 8 adet mareograf istasyonunda VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} değerlerinin belirlenmesi için Şekil 3. 18 'deki algoritmada açıklanan analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki tüm GNSS istasyonları, mareograf istasyonları ile eş konumludur. ERDM ve ANTL istasyonlarına ilişkin zaman serileri Şekil 3.21 ve 3.20'da ifade edilmiş olup VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} sonuçları birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu istasyonlar ve diğer tüm istasyonlara ilişkin bulgular Tablo 3.19'da gösterilmiştir. VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} değerleri için maksimum VLM oranı MERG istasyonunda ve minimum MENT istasyonunda belirlenmiştir. Bu çalışmada kestirilen VLM oranları önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında bazı istasyonlarda (örneğin ANTL) VLM oranlarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılığın en önemli nedeni veri zaman aralığının farklı olmasıdır. Daha önce yapılan çalışmalar 1993-2002 yıllarını kapsayan verileri içeriyordu. Ayrıca daha önceki yayınlarda GIA'nın etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu ifade edildiğinden bu çalışmada dikkate alınmamıştır [14, 15, 20].

Tablo 3.19 VLM Oranları

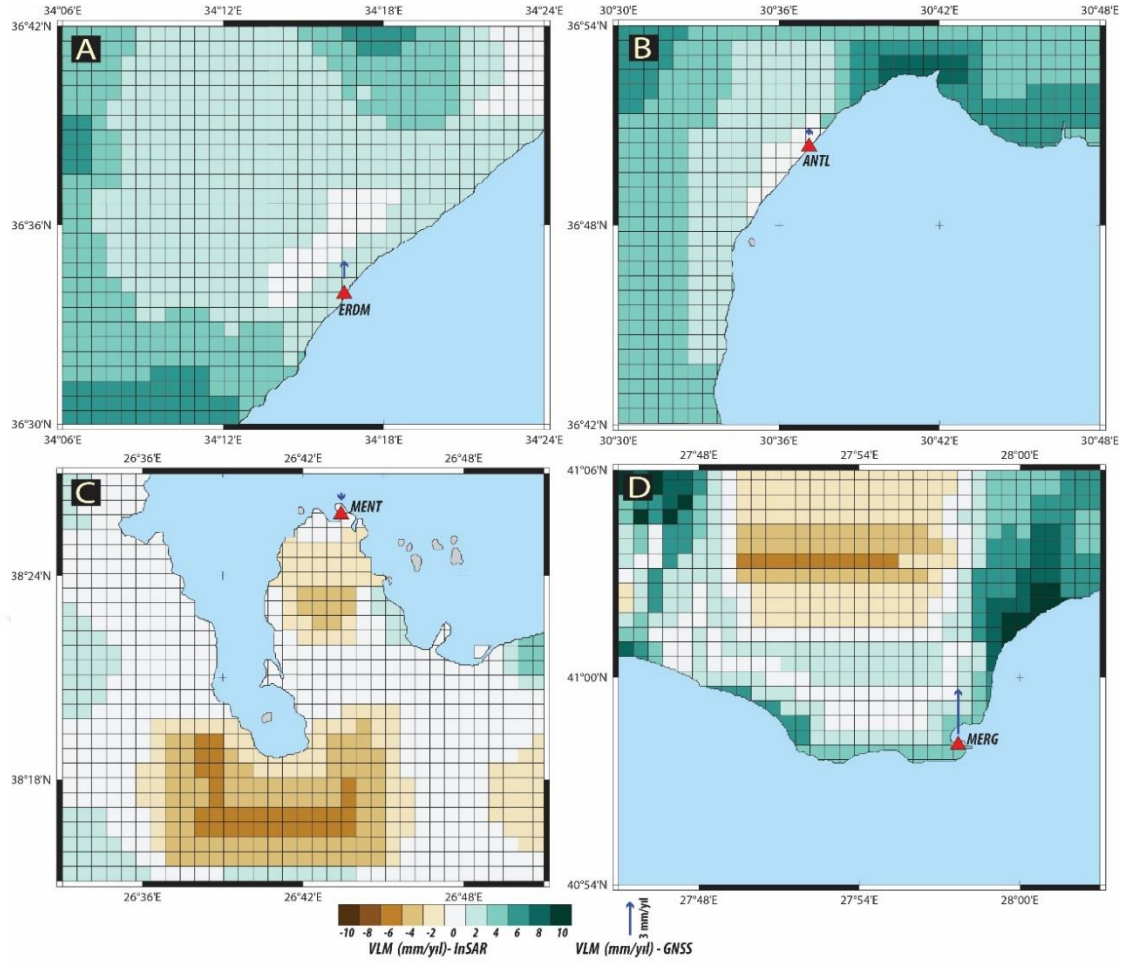
İstasyon	Trend ve VLM Değerleri (mm/yıl)					
	Mareograf	Altimetre	CMEMS	VLM _{Altimetre-TG}	VLM _{CMEMS-TG}	VLM _{GNSS}
<i>AKSZ</i>	1.1 ± 0.3	3.6 ± 0.8	3.4 ± 0.9	2.5 ± 0.9	2.3 ± 0.9	2.4 ± 0.6
<i>ANTL</i>	2.4 ± 0.8	2.7 ± 0.7	3.0 ± 0.6	0.3 ± 1.0	0.6 ± 1.0	0.4 ± 0.1
<i>BDRM</i>	2.6 ± 0.7	5.6 ± 1.0	4.8 ± 0.8	3.0 ± 1.1	2.2 ± 1.0	2.5 ± 0.7
<i>ERDK</i>	3.5 ± 0.8	-	4.2 ± 0.5	-	0.7 ± 0.9	1.0 ± 0.3
<i>ERDM</i>	3.7 ± 0.9	4.9 ± 0.8	4.2 ± 0.8	1.2 ± 1.2	0.5 ± 0.8	0.6 ± 0.1
<i>GADA</i>	0.6 ± 0.2	1.4 ± 0.3	1.2 ± 0.2	0.8 ± 0.3	0.6 ± 0.2	0.2 ± 0.1
<i>MERG</i>	1.4 ± 0.3	-	4.6 ± 0.9	-	3.2 ± 0.9	3.9 ± 0.9
<i>MNTS</i>	3.8 ± 0.7	3.1 ± 0.8	3.3 ± 0.7	-0.7 ± 0.9	-0.5 ± 0.8	-0.3 ± 0.1

Bir şekil üzerinde inceleyecek olursak, Şekil 3.23 mareograf istasyonunda elde edilen VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} değerlerini göstermektedir. Burada kırmızı işaretler $VLM_{XTRACK-TG}$ 'yi sarı işaretler $VLM_{CMEMS-TG}$ 'yi ve mavi işaretler VLM_{GNSS} 'i göstermektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi, MENT mareograf istasyonu hariç tüm istasyonlarda VLM oranları yükselme eğiliminde olup, üç farklı çözümünden elde edilen sonuçlar birbiriyle uyumludur.



Şekil 3.23 VLM_{SA-TG} ve VLM_{GNSS} değerleri

Şekil 3.1'de gösterilen çalışma alanında 2014-2018 yılları arasında ANTL, ERDM, MNTS, MERG mareograf istasyonlarında STAMPS yazılımından elde edilen VLM değerleri belirlenmiştir. InSAR verilerinin değerlendirilmesi aşamalarındaki tüm işlemler sırasıyla gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.19'de gösterilen algorithmadaki işlem adımları izlenmiştir.



Şekil 3.24 VLM_{InSAR} değerleri

Şekil 3.24 VLM_{InSAR} değerlerini ifade etmekte olup, kırmızı üçgenler mareograf istasyonlarının yerini gösterir. Her hücreye karşılık gelen VLM oranlarını görselleştirmek için on bir farklı renk kullanılmıştır. Her mareograf istasyonuna karşılık gelen hücrenin ağırlıklı ortalama PSI yer değiştirme oranlarının standart sapmaları Tablo 3.20'da gösterilmektedir. Analize göre, MENT mareograf istasyonunda negatif bir VLM oranı tespit edilmiş ve diğer istasyonlarda pozitif VLM oranları belirlenmiştir. Pozitif VLM oranı, yükselme, negatif oran ise çökme anlamına gelmektedir.

Tablo 3.20 VLM Oranları'nın Karşılaştırılması

İstasyon	Trend (mm/yıl)	
	GNSS	InSAR
<i>ANTL</i>	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.1
<i>ERDM</i>	1.6 ± 0.5	2.2 ± 0.7
<i>MNTS</i>	-0.6 ± 0.2	-0.3 ± 0.1
<i>MERG</i>	4.1 ± 0.6	4.3 ± 0.8

InSAR verileri GNSS verileriyle karşılaştırıldığında birbirine çok yakın hız değerleri elde edildiği ve oluşan farkların ihmal edilebilir olduğu görülmektedir. ERDM mareograf istasyon bölgesine odaklanıldığında VLM_{InSAR} değeri 2.2 ± 0.7 mm/yıl olup, Weiss vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise 2.4 mm/yıl olarak bulunmuştur (2015-2020 dönemi Sentinel-1 verileri kullanılarak) [75]. Bu çalışma kapsamında, ERDM mareograf istasyonunda kampanya GNSS ölçümlerinin analizi ile belirlenen VLM_{GNSS} değeri de 1.6 ± 0.5 mm/yıl olarak bulunmuş olup, VLM_{InSAR} ile arasındaki fark istatistiksel olarak anlamsızdır. Tablo 3.17'de gösterilen zaman aralığı için InSAR verilerinin analizi sonucunda elde edilen VLM_{InSAR} değerleri, VLM_{GNSS} ile karşılaştırmalı olarak Tablo 3.19'da gösterilmiştir.

Yaklaşık iki asırlık süredir geleneksel mareograf istasyonları yardımı ile belirlenen deniz seviyesi VLM gibi lokal etkilere maruz kalır. Çeyrek asırdan fazla süredir hayatımızda olan uydu altimetresi verileri ise jeosentrik bir referans yüzeyinden gözlem yaptığı için VLM'den etkilenmez. Geleneksel yöntemlerle belirlenen deniz seviyesi üzerindeki VLM etkisi GNSS/InSAR teknikleri kullanılarak giderilmektedir. Bu çalışmada Türkiye'nin batı ve güney kıyılarındaki 8 mareograf istasyonundaki VLM etkisinin deniz seviyesi verileri ile belirlenmesi ve GNSS/InSAR verileri ile doğrulanması/kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda öncelikle deniz seviyesi verileri ile bölgesel gelgit modeli oluşturularak deniz seviyesi verileri gelgit bileşenleri etkilerinden arındırılmıştır. Bunun için 15 dakikalık mareograf verilerinden ve yaklaşık 10 günlük uydu altimetresi verilerinden 21 parametrelilik gelgit bileşenleri belirlenmiş, Marmara, Ege ve Akdeniz için uygun model oluşturulup, FES2014, DTU10 ve XTRACK modelleri ile karşılaştırılmış ve oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bu aynı zamanda global modellerin kalibrasyonu olarak değerlendirilmektedir. Deniz seviyesi üzerindeki en önemli etki olan gelgit etkisi kaldırıldıktan sonra mareograflardaki deniz seviyesi trendi, yıllık ve yarıyıllık sinyaller belirlenmiştir. Mareograflardan elde edilen deniz seviyesi trendi MERG istasyonunda en büyük ($5.1 \pm 0.8 \text{ mm/yr}$) ve GADA istasyonunda en küçük ($0.8 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$) olarak belirlenmiştir. En büyük yarı yıllık ve yıllık sinyal genliği sırasıyla $10.2 \pm 1 \text{ cm}$ ve $3.2 \pm 0.5 \text{ cm}$ olarak ERDM istasyonunda belirlenmiştir. Uydu altimetresi verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendi MERG istasyonunda en büyük ($3.8 \pm 0.7 \text{ mm/yr}$) ve GADA istasyonunda en küçük olarak ($0.6 \pm 0.2 \text{ mm/yr}$) hesaplanmıştır. Bu iki yöntem ile analiz edilen trendin farkı olarak VLM_{SA-TG} , MENT mareograf istasyonunda çökme ve diğer istasyonlarda yükselme eğilimi göstermiştir. VLM_{SA-TG} değerleri -0.1 mm/yr ile 3.8 mm/yr arasında değişmektedir.

VLM değerlerinin lokal etkilerden kaynaklandığını gösteren method olan GNSS verilerinin değerlendirilmesi için datum tanımlama gereksinimi duyulmuş ve düşey hızların belirlenmesi için referans nokta seçiminin önemi ve nasıl olması gerektiği irdelenmiştir. Bu sebeple tamamı Türkiye kıyılarında bulunan ve VLM'nin hesaplanması için altyapı oluşturacağı düşünülen 6 GNSS istasyonu dikkate alınmıştır. Kampanya verileri; en az 10 yıl ve 5 ayrı kampanyada ölçülen, 3-6 günlük tekrarlı ölçümleri bulunan, aynı mevsimlerde ölçülen, Kp index ve solar aktivitenin en az etkilediği zamanlarda ölçümleri gerçekleştirilen verilerden seçilmiştir. Kampanya ölçümleri, Avrasya plakasında yer alan görece tektonik hareketlerden minimum etkilendiği düşünülen, düşey zaman serileri iyi GNSS istasyonlarının oluşturduğu 10 farklı kombinasyonda Bernese v5.2 yazılımı ile, ITRF14 2010.0 epoğunda değerlendirilmiştir. IGS/EUREF/TUDES/TUSAGA-AKTIF verilerinden oluşan 21 sürekli gözlem yapan GNSS istasyonu verileri de benzer kombinasyonlara göre değerlendirilmiş ve Bernese v5.2 yazılımı içerisinde yer alan FODIT modülü ile 2004-2018 yılları için zaman serileri oluşturulmuştur. Kampanya verilerine göre pozitif yönde maksimum hız 2.5 mm/yıl olarak BDRM GNSS istasyonunda ve negatif yönde maksimum hız ise -0.7 mm/yıl olarak MENT istasyonunda belirlenmiştir. Sürekli gözlem yapan GNSS istasyonlarında ise pozitif yönde maksimum hız 2.6 mm/yıl olarak CANA GNSS istasyonunda ve negatif yönde maksimum hız ise -1.5 mm/yıl olarak FETH istasyonunda belirlenmiştir. Ayrıca kampanya verilerinde kullanılan tüm değerlendirme stratejilerinden elde edilen düşey hız değerleri ile sürekli gözlem yapan GNSS istasyonlarından elde edilen hızlar arasında korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılara göre 3 veya 4 referans istasyon kullanılır ise korelasyon katsayısının yüzde 90 ve üzerinde, tek referans istasyon kullanıldığında ise bu istasyonun baz mesafesinin kısa olmasından bağımsız korelasyonun yüzde 60'a kadar düştüğü ve dolayısıyla hızların duyarlılığının düşük olduğu bulunmuştur.

Çalışmanın ana çıktısı olan VLM'nin kontrolü için 8 mareograf istasyonunda GNSS verileri en uygun veri değerlendirme stratejisi belirlenerek değerlendirilmiş ve zaman serileri oluşturulmuştur. Böylece VLM_{GNSS} değerleri hesaplanmış ve VLM_{SA-TG} ile uyumlu olarak MENT mareograf istasyonunda çökme ve diğer istasyonlarda yükselme eğilimi göstermiştir. Ayrıca VLM_{GNSS} değerlerinin -0.3 mm/yıl ile 3.9

mm/yıl arasında değiştiği belirlenmiş ve VLM_{SA-TG} değerleri ile arasındaki farkın anlamlı olmadığı tespit edilmiştir.

2014-2018 yılları arasında, 4 mareograf istasyonunda VLM değerlerini belirlemek için GNSS ve InSAR verilerinin analiz edilmesinden yararlanılmıştır. Ayrıca bu değerler diğer çalışmalarda bulunan InSAR dūřey hız bileşenleri ile karşılaştırılmıştır. Aralarında farkların anlamsız olduğu ve oldukça açık bir uyum olduğu belirlenmiştir.



- [1] Van der Wal W., “Glacial isostatic adjustment: introduction and recent developments”, Summer School, Delft University, Delft, Netherlands, 2019.
- [2] Levitus, S., Antonov, J. I., Boyer, T. P., Baranova, O. K., Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Reagan, J. R., Seidov, D., Yarosh, E. S., Zweng, M. M, “World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000 m), 1955-2010,” *Geophysical Research Letters*, vol. 39, 2012.
- [3] Mohamed B., Skiliris N., “Steric and atmospheric contributions to interannual sea level variability in the eastern mediterranean sea over 1993–2019,” *Oceanologia*, vol. 54, pp. 50-62, 2021.
- [4] European Environmental Agency, <https://www.eea.europa.eu/ims/global-and-european-sea-level-rise>, 10.06.2022.
- [5] Stammer, D., Cazenave, A., Ponte, R.M., Tamisiea, M. E., “Causes for contemporary regional sea level changes,” *Annual Review of Marine Science*, vol. 5, pp. 21-46, 2013.
- [6] Church, John A., Monselesan, M., Gregory, J. M., Marzeion, B., “Evaluating the ability of process based models to project sea-level change,” *Environmental Research Letters*, vol. 8, 2013.
- [7] Meyssignac, B. and Cazenave, A., “Sea level: A review of present-day and recent-past changes and variability,” *Journal of Geodynamics*, vol. 58, pp. 96-109, 2012.
- [8] Mohamed, B., Abdallah, A. M., Alam El-Din, K., Nagy, H., and Shaltout, M., “Inter-annual Variability and Trends of Sea Level and Sea Surface Temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 Years,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 176, pp. 3787-3810, 2019.
- [9] Bonaduce, A., Pinardi, N., Oddo, P., Spada, G., Larnicol, G., “Sea-level variability in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauges,” *Climate Dynamics*, vol. 47, 2016.
- [10] AVISO, <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>, 10.06.2022.
- [11] Cazenave, A., Dieng, H.-B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K., Decharme, B., Berthier, E., “The rate of sea-level rise,” *Nature Climate Change*, vol. 4, pp. 358-361, 2014.
- [12] Nerem, R. S., Beckley, B. D., Fasullo, J. T., Hamlington, B. D., Masters, D., Mitchum, G. T., “Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, pp. 2022-2025, 2018

- [13] Poitevin, C., Wöppelmann, G., Raucoules, D., Le Cozannet, G., Marcos, M., Testut, L.; Mitchum, G. T., “Vertical land motion and relative sea level changes along the coastline of Brest (France) from combined space-borne geodetic methods,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 222, pp. 275-285, 2019.
- [14] Fenoglio-Marc, L., Dietz, C., Groten, E., “Vertical land motion in the Mediterranean Sea from altimetry and tide gauge stations,” *Marine Geodesy*, vol. 27, pp. 683–701, 2004.
- [15] García, F., Vigo, M. I., García-García, D., Sánchez-Reales, J. M., “Combination of Multisatellite Altimetry and Tide Gauge Data for Determining Vertical Crustal Movements along Northern Mediterranean Coast,” *Pure and Applied Geophysics*, vol. 169, pp. 1411–1423, 2012.
- [16] Wöppelmann, G., Marcos, M., “Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, 2012.
- [17] Mohamed, B., Mohamed, A., Alam El-Din, K., Nagy, H., Elsherbiny, A., “Sea level changes and vertical land motion from altimetry and tide gauges in the Southern Levantine Basin,” *Journal of Geodynamics*, vol. 128, pp. 1-10, 2019.
- [18] Woodworth, P.L., “Some important issues to do with long-term sea level change,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 364, pp. 787–803, 2006.
- [19] Teferle, F.N., Bingley, R.M., Williams, S.D.P., Baker, T.F., Dodson, A.H., “Using continuous GPS and absolute gravity to separate vertical land movements and changes in sea-level at tide-gauges in the UK,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 364, pp. 917-930, 2006.
- [20] Yıldız, H., Andersen, O.B., Simav, M., Aktuğ, B., Özdemir, S., “Estimates of vertical land motion along the southwestern coasts of Turkey from coastal altimetry and tide gauge data,” *Advances in Space Research*, vol. 51, pp. 1572–1580, 2013.
- [21] Wöppelmann, G., Le Cozannet, G., Michele, M., Raucoules, D., Cazenave, A., Garcin, M., et al., “Is land subsidence increasing the exposure to sea level rise in Alexandria, Egypt,” *Geophysical Research Letters*, vol. 40, pp. 2953–2957, 2013.
- [22] Santamaria-Gomez, A., Gravelle, M., Dangendorf, S., Marcos, M., Spada, G., Wöppelmann, G., “. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors” *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 473, pp. 24–32, 2017.
- [23] Grgic, M., Bender, J., Bašić, T., “Estimating Vertical Land Motion from Remote Sensing and In-Situ Observations in the Dubrovnik Area (Croatia): A Multi-Method Case Study,” *Remote Sensing*, vol. 12, 2020.
- [24] Riddell, R.A., “Vertical motion of the Australian plate”, 10th Annual Graduate Research Conference 2016, Australia, 2016.

- [25] Melloul, A., Collin, M., "Hydrogeological Changes in Coastal Aquifers due to Sea Level Rise," *Ocean and Coastal Management*, vol. 49, pp. 281–297, 2006.
- [26] Philip, J., Knight, C. O., Bird, A. S., Andrew J. P., "A low-cost GNSS buoy platform for measuring coastal sea levels." *Ocean Engineering*, vol. 203, 2020.
- [27] Woodworth, P.L., "A survey of recent changes in the main components of the ocean tide," *Continental Shelf Research*, vol. 30, pp. 1680–1691, 2010.
- [28] Riazi, A., "Accurate tide level estimation: A deep learning approach," *Ocean Engineering*, vol. 198, 2020.
- [29] Ballu, V., Gravelle, M., Wöppelman, G., Viron, O., Rebischung, P., Becker, M., Sakic, P., "Vertical land motion in the Southwest and Central Pacific from available GNSS solutions and implications for relative sea levels," *Geophysical Journal International*, vol. 218, pp. 1537–1551, 2019.
- [30] Ray, R.D., "Secular changes of the M2 tide in the Gulf of Maine," *Continental Shelf Research*, vol. 26, pp. 422–427, 2006.
- [31] Ray, R.D., "Secular changes in the solar semidiurnal tide of the western North Atlantic Ocean," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, 2009.
- [32] Soltanpour, A., Pirooznia, M., Aminjafari, S., Zareian, P., "Persian Gulf and Oman Sea Tide Modeling Using Satellite Altimetry and Tide Gauge Data (TM-IR01)," *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 36, pp. 677–687, 2017.
- [33] Feredikse, T., "A crash course in using tide gauges to study sea level", Summer School, Delft University, Delft, Netherlands, 2019.
- [34] Agnew, D. C., "Earth tides," in G. Schubert & T. Herring (Eds.), *Geodesy*. Oxford: Elsevier, 2009.
- [35] Marone, E., Raicich, F., Mosetti, R., "Harmonic tidal analysis methods on time and frequency domains: similarities and differences for the Gulf of Trieste, Italy, and Paranagua Bay, Brazil," *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 54, pp. 183–204, 2013.
- [36] Foreman, M.G.G., "Manual for tidal heights analysis and predictions," *Pacific Marine Science Report*, vol. 10, 1977.
- [37] Doodson A.T., "Harmonic development of the tide-generating potential," in *Proceedings of the Royal Society of London*, 1921.
- [38] Horn, W., "Some recent approaches to tidal problems," *International Hydrographic Review*, vol. 38, 1960.
- [39] Dronkers, J.J., "Tidal computations in rivers and coastal waters," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 95, 1969.
- [40] Mousavian, R., Hossainali, M.M., "Detection of main tidal frequencies using least squares harmonic estimation method," *Journal of Geodetic Science*, vol. 2, 2012.

- [41] Chelton, D. B., Walsh, E.J., and MacArthur, J.L., "Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 6, pp 407-438, 1989.
- [42] Passaro, M., "Altimetry Principles", 12th Coastal Altimetry Workshop, Rome, Italy, 2020.
- [43] Tapley, B. D., J. C. Ries, G. W. Davis, R. J. Eanes, B. E. Schutz, C. K. Shum, M. M. Watkins, J. A. Marshall, R. S. Nerem, B. H. Putney, S. M. Klosko, S. B. Luthcke, D. Pavlis, R. G. Williamson, and N. P. Zelensky, "Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 99, pp. 24383-24404, 1994.
- [44] Rudenko, S., Otten, M., Visser, P., Scharroo, R., Schöone, T., Esselborn, S., "New improved orbit solutions for the ERS-1 and ERS-2 satellites," *Advances in Space Research*, vol. 49, pp. 1229-1244, 2012.
- [45] Le Traon, P.Y., Ogor, F., "ERS-1/2 orbit improvement using T/P: The 2 cm challenge," *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, pp. 8045-8057, 1998.
- [46] Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., "An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008", 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2008.
- [47] Mayer-Gürr T., Rieser, D., Höck, E., Brockmann, J.M., Schuh, W.D., Krasbutter, I., Kusche, J., Maier, A., Krauss, S., Hausleitner, W., Baur, O., Jaggi, A., Meyer, U., Prange, L., Pail, R., Fecher, T., Gruber, T., "The new combined satellite only model GOCO03s", 2015 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2015.
- [48] Petit, G., Luzum, B., "IERS Conventions," in *IERS Technical Note ; 362009* Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie 2010.
- [49] Callahan, P. S., "Ionospheric variations affecting altimeter measurements: A brief synopsis," *Marine Geodesy*, vol. 8, pp. 249-263, 1984.
- [50] Fernandes, M. J., Azaro, C.L, Nunes, A.L., Pires, N., Bastos, L., Mendes, V.B., "GNSS-derived Path Delay: an approach to compute the wet tropospheric correction for coastal altimetry," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, pp. 596-600, 2010.
- [51] Fernandes, M. J., Azaro, C.L, Ablain, M., Pires, N., "Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions," , *Remote Sensing of Environment*, vol. 169, pp. 50-74, 2015.
- [52] Tran, N., Labroue, S., Philipps, S., Bronner, E., Picot, N., "Overview and Update of the Sea State Bias Corrections for the Jason-2, Jason-1 and TOPEX Missions," , *Marine Geodesy*, vol. 33, pp. 348-362, 2010.
- [53] Le Provost, C., "Ocean tides," in *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, 2001.
- [54] Cartwright, D. E., Tayler, R.J., "New computations of the tide generating potential," *Geophysical Journal International*, vol. 23, pp. 45-74, 1971.

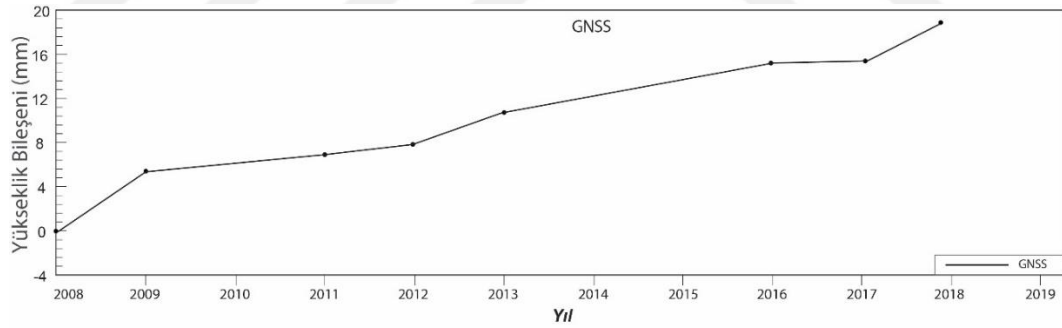
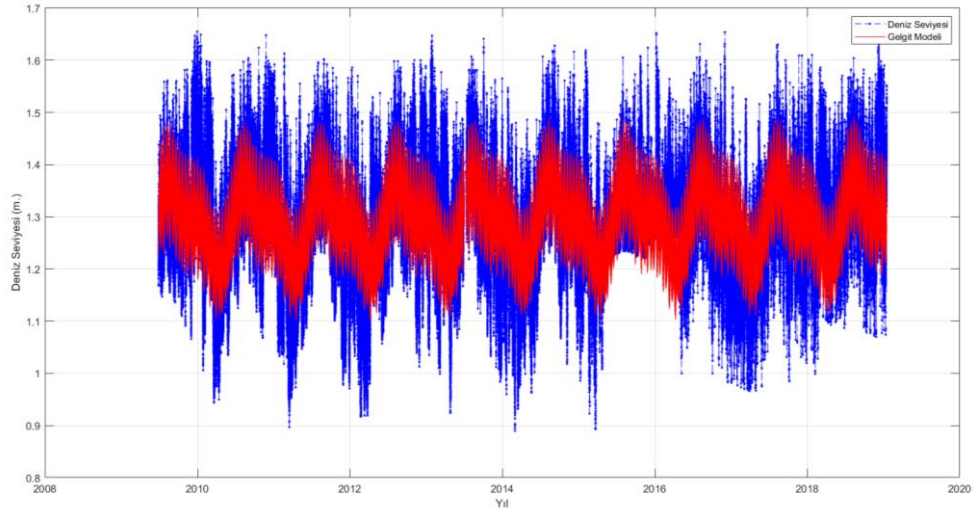
- [55] Cartwright, D. E., Edden, A.C., “Corrected tables of tidal harmonics,” *Geophysical Journal International*, vol. 33, pp. 253-264, 1973.
- [56] Carrere, L. and Lyard, L., “Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing comparison with observations,” *Geophysical Research Letters*, vol. 30, pp. 45-74, 2003.
- [57] Carrere, L., Faugere, Y., Ablain, M., “Improvement of pressure derived corrections for altimetry using the ERA-Interim dataset,” *Ocean Sciences*, vol. 12, pp. 825-842, 2016.
- [58] Blewitt, G., Lavallee, D., “Effect of annual signals on geodetic velocity,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, 2002.
- [59] Morgan, J., Raval, S., MacDonald, B., Falorni, G., Iannacone, J., “Application of advanced InSAR techniques to detect vertical and horizontal displacements,” 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil and Engineering, Perth, Australia, 2013.
- [60] Australian Government Geoscience Australia, “Applying geoscience to Australia's most important challenges,” <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar#heading-1>, 10.06.2022
- [61] How insar Works? <https://comet.nerc.ac.uk/earth-observation/insar/how-insar-works/>, 10.06.2022
- [62] Cazenave, A., “Satellite Altimetry” in *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Third Edition), 2019.
- [63] GEBCO Bathymetric Compilation Group, “The GEBCO_2020 Grid-a continuous terrain model of the global oceans and land,” *British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre, NERC, UK*, 2020.
- [64] Yildiz H., Demir, C., Gurdal, M.A., Akabalı, O.A, Ayhan, M.E., Turkoglu, Y., “Analysis of sea level and geodetic measurements of Antalya-II, Bodrum II, Erdek and Mentesh, tide Gauges in the period of 1984-2002,” *Harita Dergisi*, vol. 17, 2003.
- [65] Quartly, G. D., Legeais, J.-F., Ablain, M., Zawadzki, L., Fernandes, M. J., Rudenko, S., Carrère, L., García, P. N., Cipollini, P., Andersen, O. B., Poisson, J.-C., Mbajon Njiche, S., Cazenave, A., and Benveniste, J., “A new phase in the production of quality-controlled sea level data,” *Earth System Science Data*, vol. 9, pp. 557-572, 2017.
- [66] Matheron, G., “*Traité de géostatistique appliquée*,” *Le krigeage: Memoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. no. 24*, Editions Bureau de Recherche Géologiques et Minières, Paris, France, 1963
- [67] Boehm, J., Werl, B., Schuh, H., “Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 11, 2006.

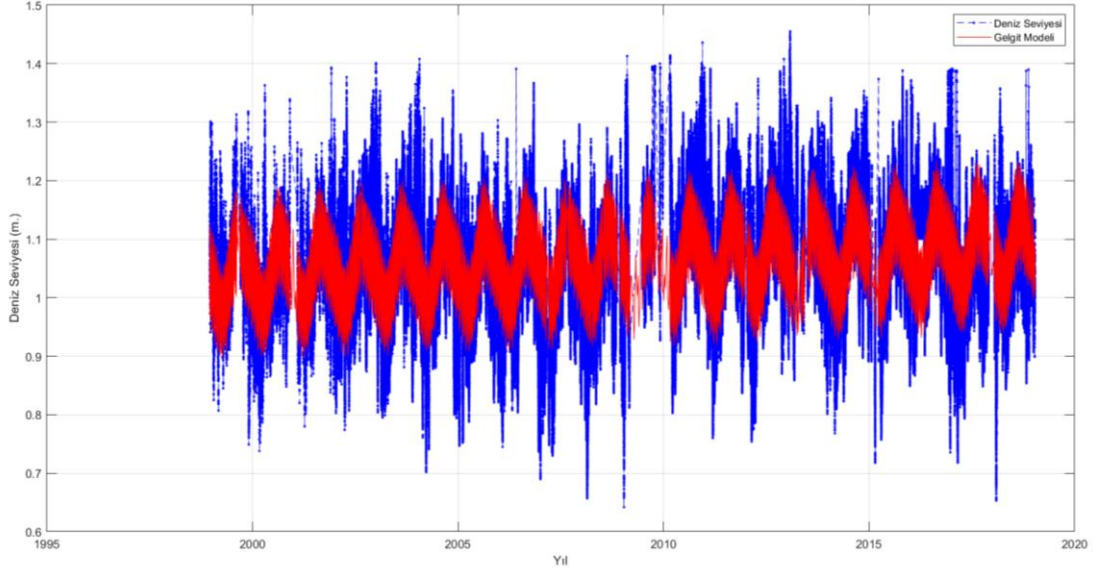
- [68] International GNSS Service (IGS), “IGS absolute phase centre corrections” http://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/general/pcv_archive, 10.06.2022.
- [69] Lyard, F., Lefevre, F., and Letellier, T., “Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004,” *Ocean Dynamics*, vol. 56, pp. 394–415, 2006.
- [70] Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Metivier, and X. Collilieux, “ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 121, pp. 6109–6131, 2016.
- [71] Aobpaet, A., Cuenca, M.C., Hooper, A., Trisirisatayawong, I., “InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, pp. 2969–2982, 2013.
- [72] Di Lisa, M., Ali, H. E. A., Mazzanti, P., Moretto, S., “Inferring the Creep Settlement Behavior of Rockfill in Reclaimed Lands by Advanced SAR Interferometry and Numerical Modeling: An Example from Arabian Gulf,” *Remote Sensing*, vol. 12, 2020.
- [73] Şanlı, D., Blewitt, J., “Geocentric sea level trend using GPS and >100-year tide gauge record on a postglacial rebound nodal line,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, pp. 713–719, 2001.
- [74] Benveniste, J., Birol, F., Calafat, F., Cazenave, A., Dieng, H., Gouzenes, Y., Legeais, J. F., Léger, F., Niño, F., Passaro, M., Schwatke, C., Shaw, A., “Coastal sea level anomalies and associated trends from Jason satellite altimetry over 2002–2018,” *Scientific Data*, vol. 7, 2020.
- [75] Weiss, J.R., Walters; R.J., Morishita, Y., Wright, T.J., Lazecky, M., Wang, H., Yu, C., “High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data,” *Geophysical Research Letters*, vol. 27, 2020.
- [76] AVISO, “AVISO User Handbook: Merged TOPEX/Poseidon Products,” Romonville St-Agne, France, 1996.
- [77] Global Sea Level Observing System (GLOSS), “Manual On Quality Control Of Sea Level Observations,” Paris, France, 2020.
- [78] Hooper, A., “A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches,” *Geophysical Research Letters*, vol. 35, 2008.
- [79] Hooper, A., “A statistical-cost approach to unwrapping the phase of InSAR time series,” *ESA FRINGE Workshop*, Frascati, Italy, 2009.
- [80] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M., “Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation,” *Tectonophysics*, vol. 514-517, pp. 1-13, 2012.
- [81] Saastamoinen J., “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites,” *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, vol. 15, pp. 247-251, 1972.

- [82] Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J., Wobbe, F., "Generic Mapping Tools: Improved Version Released," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 94, pp. 409-410, 2013.
- [82] Birol, F., Fuller, N., Lyard, F., Cancet, M., Niño, F., Delebecque, C., Fleury, S., Toubanc, F., Melet, A., Saraceno, M., Léger, F., "Coastal applications from nadir altimetry: example of the X-TRACK regional products," *Advances in Space Research*, vol. 59, pp. 936-953, 2016.
- [83] Ayhan, M. E., "Effects of Offsets and Outliers on the Sea Level Trend at Antalya 2 Tide Gauge within the Eastern Mediterranean Sea," *Marine Geodesy*, 2022.
- [84] Amiri-Simkooei, A.R., Asgari, J., "Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites," *GPS Solution*, vol.16, pp. 77-88, 2012.
- [85] Cipollini, P., Barbosa, S., Coelho, H., Joana Fernandes, M., Gómez-Enri, J., Gommenginger, C., Martin-Puig, C., Vignudelli, S., Woodworth, P., Benveniste, J., "A summary of the COASTALT project and its contribution to the monitoring of coastal sea level," 2015 General Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2015.

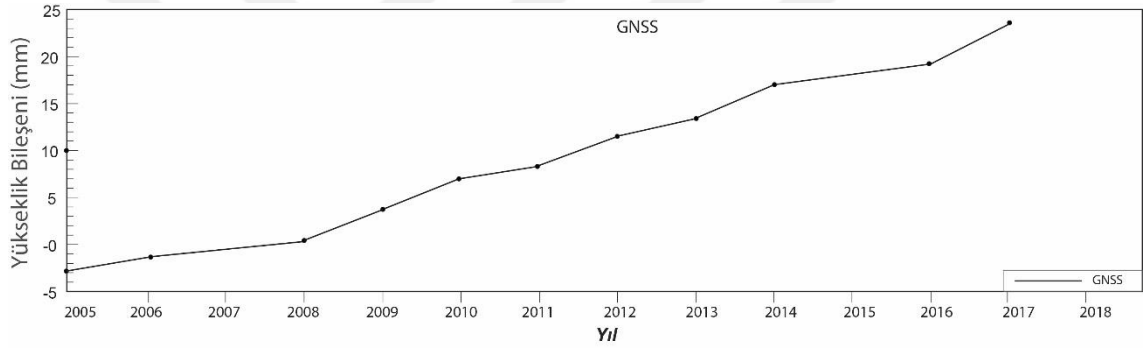
A

MAREOGRAF VE GNSS İSTASYONLARI ZAMAN SERİLERİ

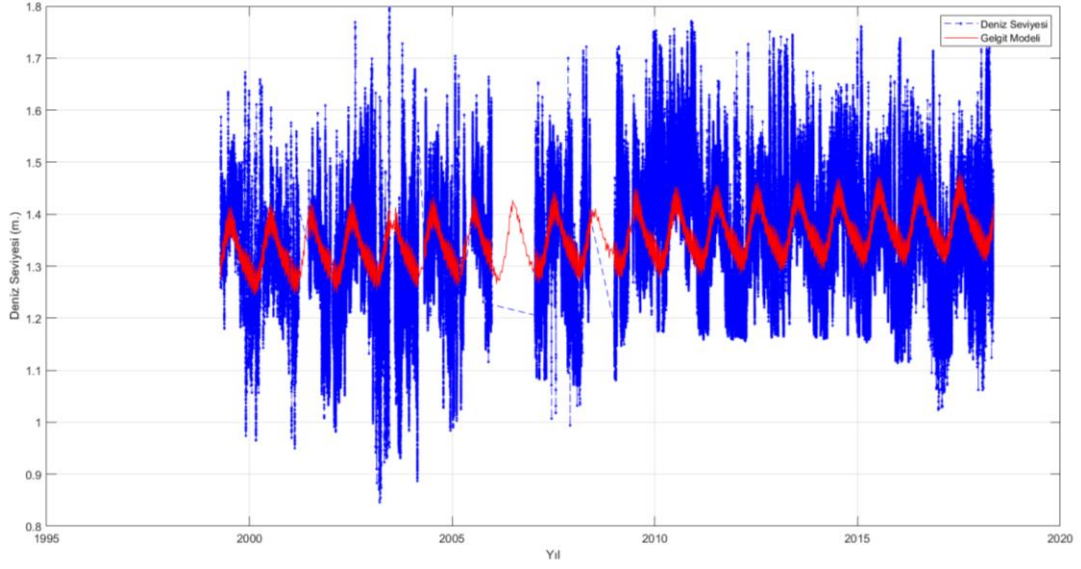




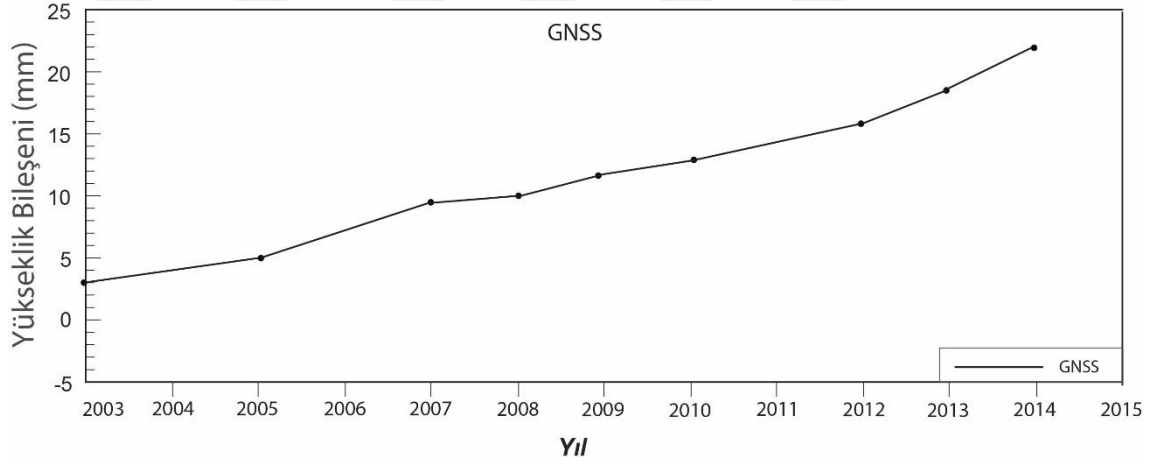
Şekil A.3 BDRM Mareograf İstasyonu Gelgit Modeli



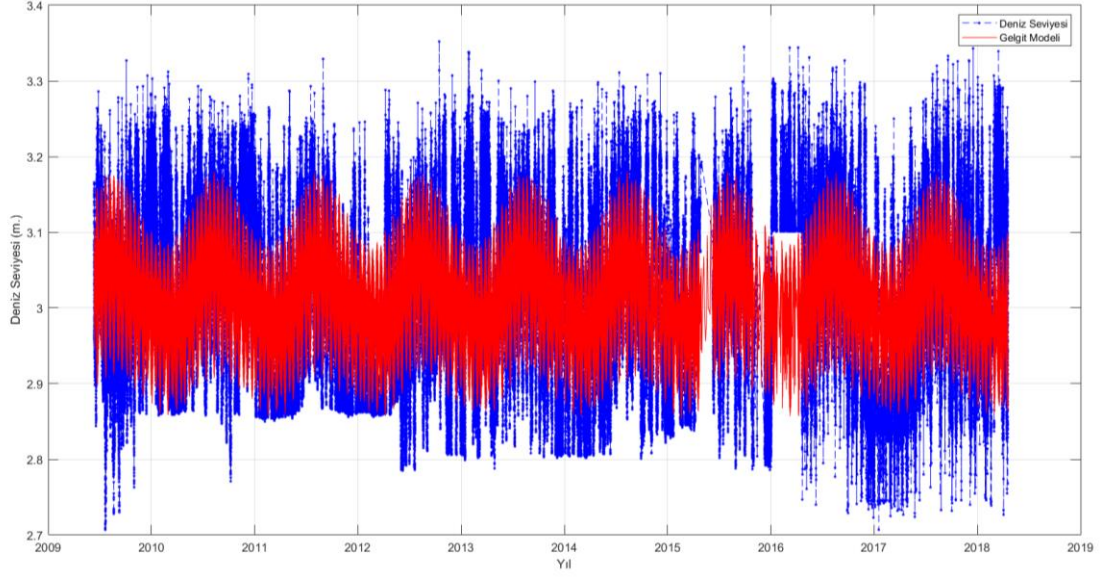
Şekil A.4 BDRM Mareograf İstasyonu GNSS Zaman Serisi



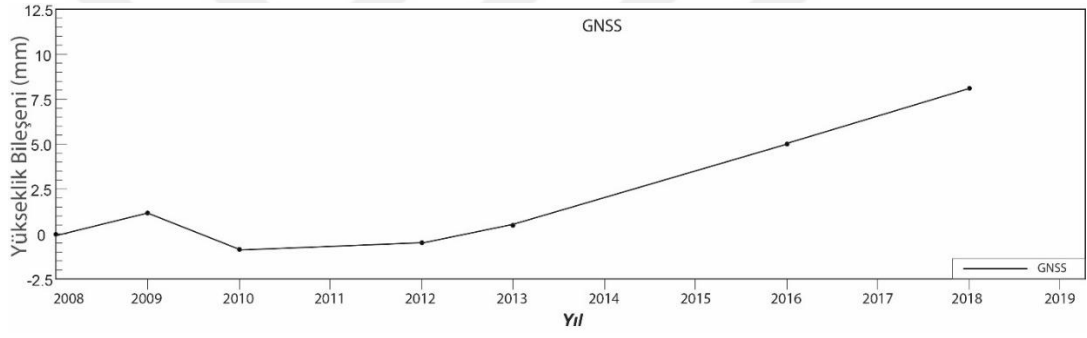
Şekil A.5 ERDK Mareograf İstasyonu Gelgit Modeli



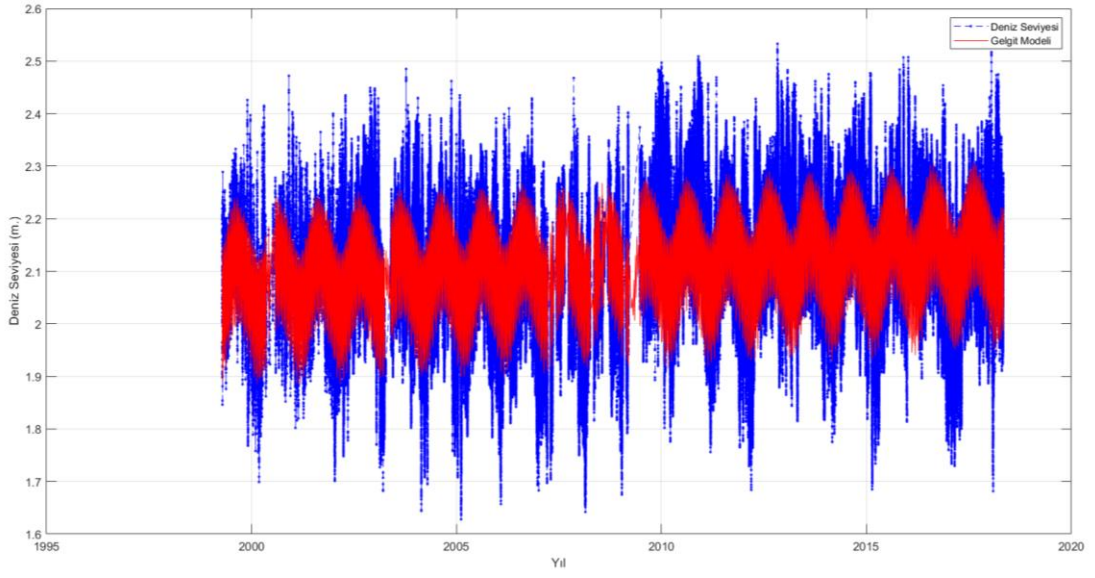
Şekil A.6 ERDK Mareograf İstasyonu GNSS Zaman Serisi



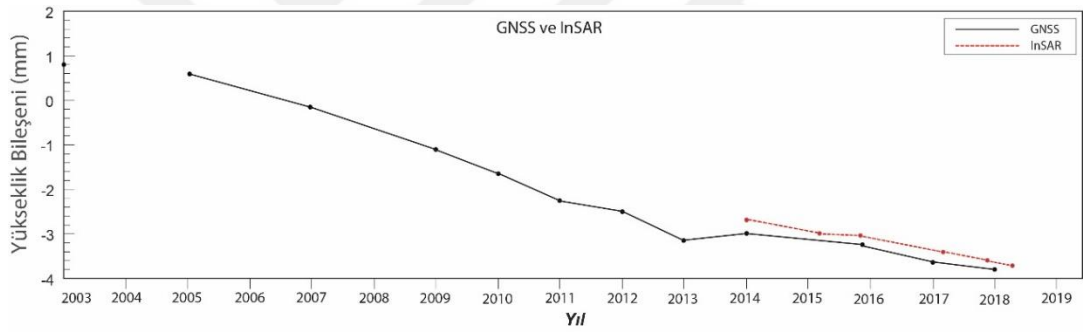
Şekil A.7 GADA Mareograf İstasyonu Gelgit Modeli



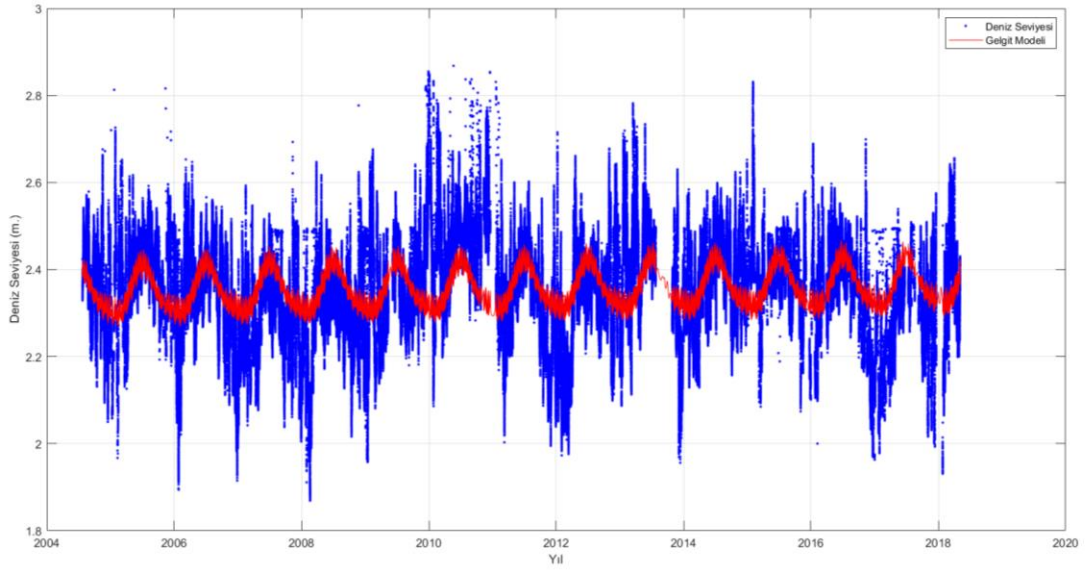
Şekil A.8 GADA Mareograf İstasyonu GNSS Zaman Serisi



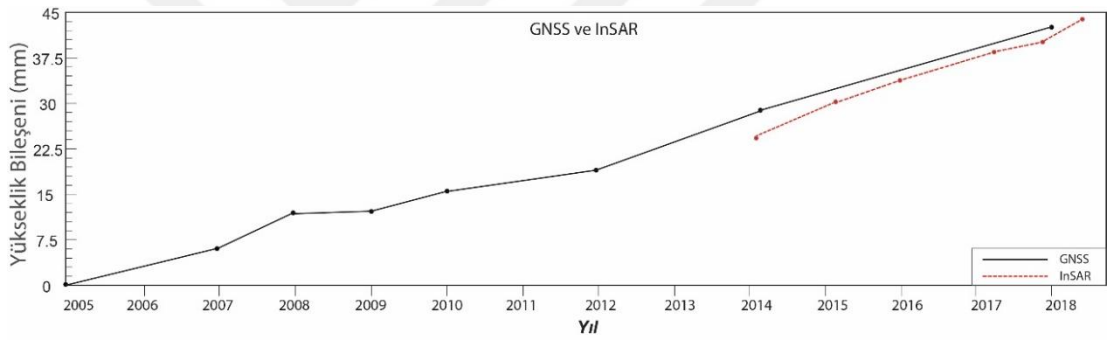
Şekil A.9 MENT Mareograf İstasyonu Gelgit Modeli



Şekil A.10 MENT Mareograf İstasyonu GNSS/InSAR Zaman Serisi



Şekil A.11 MERG Mareograf İstasyonu Gelgit Modeli



Şekil A.12 MERG Mareograf İstasyonu GNSS-InSAR Zaman Serisi

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Erkoç M. H., Doğan U., 2019. Regional Patterns of Sea Level Trends and Tidal Model in The Southwestern Coast of Turkey, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Avusturya, 7 - 12 Nisan 2019, ss.1
2. Erkoç M. H., Doğan U., 2019. Impact of Tides Constituents on Determining of Sea Level Trends in the Southwestern Coast of Turkey, XXIX International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, İstanbul, Türkiye, 5-06 Kasım 2019, ss.37
3. Erkoç M. H., Doğan U., 2020. Determination of Sea Level Trends of the Marmara Sea from Satellite Altimetry and Tide Gauges Data (2010- 2019), 12th Coastal Altimetry Workshop, Rome, İtalya, 4-07 Şubat 2020, ss.35
4. Erkoç M. H., Doğan U., 2022. Effects of Datum Definition on Estimation of GNSS Vertical Velocities, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Avusturya, 22 - 27 Mayıs 2022, ss.1

Makaleler

1. Erkoç M.H., Doğan U., 2022. Regional Tidal Modelling Using Tide Gauges and Satellite Altimetry Data in South-West Coast of Turkey, KSCE Journal of Civil Engineering. Doi: 10.1007/s12205-022-0320-1
2. Erkoç M.H., Doğan U., Yıldız, H., Sezen, E., 2022. Estimation of Vertical Land Motion Along the South and West Coast of Turkey from Multi-Sensor Observations, Advances in Space Research. Doi: 10.1016/j.asr.2022.06.022