T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROLOJİ KAYNAKLI DÜŞEY YER DEĞİŞTİRMELERİN GRACE ÇÖZÜMLERİYLE BELİRLENMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Beyza GÜNEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİDROLOJİ KAYNAKLI DÜŞEY YER DEĞİŞTİRMELERİN GRACE ÇÖZÜMLERİYLE BELİRLENMESİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ

Beyza GÜNEY tarafından hazırlanan tez çalışması 11.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Burak AKPINAR, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mahmut Oğuz SELBESOĞLU, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Cüneyt AYDIN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Hidroloji Kaynaklı Düşey Yer Değiştirmelerin GRACE Çözümleriyle Belirlenmesi: Türkiye Örneği" 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.

Beyza GÜNEY



Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışma için beni yönlendiren, çalışma ile alakalı tüm sorularıma bilgi ve tecrübesiyle yanıt bulmamı sağlayan, araştırmaya ve öğrenmeye yönelten ve her zaman destek olan danışmanım Prof. Dr. Cüneyt Aydın'a ve her zaman bilgisi ve görüşleriyle yardımcı olan Arş. Gör. Özge Güneş'e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni her türlü konuda destekleyen değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, koşulsuz sevgileriyle her zaman yanımda olan aileme sonsuz sevgi, saygı ve minnetlerimi sunarım.

Son olarak, çalışmamda kullandığım DDK çözümlerini sağlayan ICGEM (International Centre for Global Earth Models) veri merkezi, GSFC Mascon çözümlerini sağlayan CCAR (Colorado Center for Astrodynamics Research) veri merkezi ve GNSS zaman serileri verilerinin sunucusu Nevada jeodezik laboratuvarına ve çalışmada kullanmış olduğumu MATLAB yazılımının akademik lisansını sağlayan YTÜ Rektörlüğüne teşekkürü bir borç bilirim.

Beyza GÜNEY

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xv
HARİTA LİSTESİ xvi
ÖZET xvii
ABSTRACT xix
1 GİRİŞ 1
1.1. Literatür Özeti 1
1.2. Tezin Amacı 3
1.3. Çalışmanın Hipotezi 4
2 HİDROLOJİ KAYNAKLI DÜŞEY YER DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ 5
2.1. GRACE Uydu Sistemi 7
2.1.1 GRACE Uyduları Ölçüm Sistemi 8
2.2. GRACE-FO Uydu Sistemi 10
2.3. GRACE ve GRACE-FO Veri Sistemi 11
2.4. EWT (Equivalent Water Thickness: Eşdeğer Su Kalınlığı) 12
2.5. Gravite Çözümlerinden Düşey Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi 15
2.6. Regresyon Analizi 15
2.7. Harmonik Regresyon 16
3 UYGULAMA 18
3.1. Uygulamanın Amacı ve İçeriği 18
3.2. DDK Verisi 18
3.3. Mascon Verisi 20
3.4. GPS Verisi 22
3.5. Çalışma Alanı 23
3.6. Kullanılan Yazılımın Tanıtımı 24
3.7. Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 26
3.7.1. ADAN İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 26
3.7.2. ADIY İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 28
3.7.3. AMAS İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 30
3.7.4. HARC İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 32

3.7.5. AYD1 İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri.....34
3.7.6. BALK İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 36
3.7.7. BAYB İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 38
3.7.8. IGIR İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 40
3.7.9. CAVD İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 42
3.7.10. ISPT İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 44
3.7.11. DEIR İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 46
3.7.12. IZMI İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 48
3.7.13. YOZT İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 50
3.7.14. CORU İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 52
3.7.15. TRAB İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri 54
3.8. EWT ve Düşey Yer Değiştirme Arasındaki Fonksiyonel İlişkinin Araştırılması 56
3.9. Regresyon Sonuçlarının İncelenmesi 58
3.9.1. Mascon No:5321 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları ...58
3.9.2. Mascon No:9080 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları ...61
3.9.3. Mascon No:9009 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları ...63
3.10. Mascon EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm 66
3.10.1. Mascon No:5321 EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm 66
3.10.2. Mascon No:9009 EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm 67
4 SONUÇ 69
KAYNAKÇA 71
A GPS GRACE GENLİK VE FAZ SONUÇLARI 76
B REGRESYON KATSAYI DEĞERLERİ 78
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 84

SİMGE LİSTESİ

v	Bağımlı değişken
u	Bağımsız değişken
$\mathbf{x}$	Bilinmeyenler vektörü
σ^2	Birim ağırlıklı ölçünün varyansı
$C_{lm}(t)$, $S_{lm}(t)$	Bir t periyotundaki küresel harmonik katsayılar
$\mathbf{y}$	Değişim vektörü
R	Dünyanın yarıçapı
V_d	Düşey yer değiştirme
b_1	Doğrusal trend
C_{20}	En büyük harmonik katsayı
φ	Faz
$\mathbf{e}$	Hata vektörü
λ	Jeodezik boylam
GM	Jeosentrik çekim sabiti
$\mathbf{A}$	Katsayılar matrisi
c	Kosinüs genliği
$\mathbf{C}_{xx}$	Kovaryans matrisi
ϑ	Kutup uzaklığı
$\Delta C_{lm}(t)$, $\Delta S_{lm}(t)$	Küresel harmonik katsayı anomalileri
l	Küresel harmonik modelin derecesi
m	Küresel harmonik modelin sırası
h_l, k_l	l derecesine bağlı elastik Love sayıları
l_{max}	Maksimum harmonik katsayı derecesi
ϕ	Mekansal çözünürlük
ω	Mevsimsel bileşenlerin frekansı
P_{lm}	Normalize edilmiş Legendre fonksiyonu
T	Periyot
$e(t)$	Rasgele hata
a_e	Referans elipsoidinin büyük yarı ekseni
a	Regresyon katsayısı
b_0	Sıfır eki
s	Sinüs genliği

Δe	Su kalınlığındaki değişim (EWT değişimi)
$y(t)$	t zamanındaki jeopotansiyel değişim
ξ	Yarıçap vektörü
ρ	Yoğunluk (ρ_{ave}: Yeryuvarı ortalama yoğunluğu, ρ_w: Suyun yoğunluğu)
$\Delta\sigma$	Yüzey kütle yoğunluğu değişimi
$\Delta\breve{C}_{nm}, \Delta\breve{S}_{nm}$	Yüzey kütle yoğunluk katsayı değişimleri
t	Zaman değişkeni
n	Zaman serisindeki gözlem sayısı

KISALTMA LİSTESİ

ACC	Accelerometer
CCAR	Colorado Center for Astrodynamics Research
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Plastik
CSR	Center for Space Research
DDK	Decorrelation Filter
DLR	Deutsches Zentrum für Luft (Alman Uzay Araştırmaları Merkezi)
DoD	ABD Savunma Bakanlığı
ESA	European Space Agency
EWT	Equivalent Water Thickness
GFZ	GeoForschung Zentrum
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow On
GSFC	Goddard Space Flight Center
GUİ	Grafik Kullanıcı Arayüzü
IAG	Ulusal Jeodezi Derneği
ICGEM	International Centre for Global Earth Models
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KBR	K-Bant Range
L0	Level-0
L1	Level-1
L2	Level-2
L3	Level-3
LEO	Low Earth Orbit
LRR	Lazer Retro-Reflektör
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Mascon	Mass Concentration
MATLAB	Matrix Laboratory
RDC	Raw Data Center
RMS	Root Mean Square

SDS	Science Data System
SCA	Star Camera Assembly
SGG	Satellite Gravity Gradiometry
SLR	Satellite Laser Ranging
SST-II	Satellite to Satellite Tracking in the low-low mode
SST-h1	Satellite to Satellite Tracking in the high-low mode
SSL	Space Sytems/Loral

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gravite izleme uyduları 6
Şekil 2.2 GRACE uydu sistemi [41] 7
Şekil 2.3 GRACE ikiz uydularının bir illüstrasyonu [50] 8
Şekil 2.4 GRACE uydusu donanımları [51] 9
Şekil 2.5 GRACE uydularının ölçme tekniği 9
Şekil 2.6 GRACE-FO uydu sistemi [45] 10
Şekil 2.7 GRACE veri akış diyagramı [57] 11
Şekil 2.8 GRACE-FO veri akışı [8] 12
Şekil 2.9 GRACE ve GRACE-FO ile izlenen su katmanları 13
Şekil 3.1 ICGEM online veri paneli [63] 19
Şekil 3.2 SLR tarafından yayınlanan C20 katsayıları (Erişim tarihi 10.06.2023). 19
Şekil 3.3 DDK 2 harmonik katsayılar verisi 20
Şekil 3.4 Mascon hücre çözümleri görselleştirimi [65] 21
Şekil 3.5 GSFC örnek mascon hücresi EWT gösterimi 21
Şekil 3.6 GSFC Mascon örnek veri dosyası 22
Şekil 3.7 Nevada GPS istasyonları interaktif haritası [65] 23
Şekil 3.8 Nevada jeodezi laboratuvarından elde edilen tnv3 uzantılı veri formatı 23
Şekil 3.9 Grace2 yazılımı arayüzü 25
Şekil 3.10 Yazılımla hesaplanabilen analizler 25
Şekil 3.11 ADAN noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 26
Şekil 3.12 ADAN noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 27
Şekil 3.13 ADAN noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali) 27
Şekil 3.14 ADAN noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali) 28
Şekil 3.15 ADIY noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 28
Şekil 3.16 ADIY noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 29
Şekil 3.17 ADIY noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali) 29
Şekil 3.18 ADIY noktası GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali) 30
Şekil 3.19 AMAS noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 30
Şekil 3.20 AMAS noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 31

Şekil 3.21 AMAS noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....31

Şekil 3.22 AMAS noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....32

Şekil 3.23 HARC noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....32

Şekil 3.24 HARC noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 33

Şekil 3.25 HARC noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS Sinyali).....33

Şekil 3.26 HARC noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....34

Şekil 3.27 AYD1 noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 34

Şekil 3.28 AYD1 noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....35

Şekil 3.29 AYD1 noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....35

Şekil 3.30 AYD1 noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....36

Şekil 3.31 BALK noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....36

Şekil 3.32 BALK noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....37

Şekil 3.33 BALK noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....37

Şekil 3.34 BALK noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....38

Şekil 3.35 BAYB noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....38

Şekil 3.36 BAYB noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 39

Şekil 3.37 BAYB noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....39

Şekil 3.38 BAYB noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....40

Şekil 3.39 IGIR noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 40

Şekil 3.40 IGIR noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 41

Şekil 3.41 IGIR noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....41

Şekil 3.42 IGIR noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....42

Şekil 3.43 CAVD noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 42

Şekil 3.44 CAVD noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 43

Şekil 3.45 CAVD noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....43

Şekil 3.46 CAVD noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....44

Şekil 3.47 ISPT noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 44

Şekil 3.48 ISPT noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 45

Şekil 3.49 ISPT noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....45

Şekil 3.50 ISPT noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....46

Şekil 3.51 DEIR noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 46

Şekil 3.52 DEIR noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 47

Şekil 3.53 DEIR noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....47

Şekil 3.54 DEIR noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....48

Şekil 3.55 IZMI noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 48

Şekil 3.56 IZMI noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....49

Şekil 3.57 IZMI noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....49

Şekil 3.58 IZMI noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....50

Şekil 3.59 YOZT noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 50

Şekil 3.60 YOZT noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....51

Şekil 3.61 YOZT noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....51

Şekil 3.62 YOZT noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....52

Şekil 3.63 CORU noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....52

Şekil 3.64 CORU noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 53

Şekil 3.65 CORU noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....53

Şekil 3.66 CORU noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....54

Şekil 3.67 TRAB noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi 54

Şekil 3.68 TRAB noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi.....55

Şekil 3.69 TRAB noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali).....55

Şekil 3.70 TRAB noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali).....56

Şekil 3.71 9083 numaralı mascon için EWT ve düşey yer değiştirme.....56

Şekil 3.72 9083 numaralı mascon için EWT ve düşey yer değiştirme doğrusal bağıntı 57

Şekil 3.73 5321 numaralı mascon için EWT - düşey yer değiştirme grafiği.....58

Şekil 3.74 5321 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu.....59

Şekil 3.75 5321 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği 59

Şekil 3.76 5321 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu model sonucu 60

Şekil 3.77 5321 numaralı mascon için zamansal bağlı regresyon sonucu düzeltmeler 60

Şekil 3.78 9080 numaralı mascon için EWT- düşey yer değiştirme grafiği.....61

Şekil 3.79 9080 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu.....61

Şekil 3.80 9080 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği 62

Şekil 3.81 9080 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu model sonucu 62

Şekil 3.82 9080 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu düzeltmeler..63

Şekil 3.83 9009 numaralı mascon için EWT- düşey yer değiştirme grafiği.....63

Şekil 3.84 9009 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu.....64

Şekil 3.85 9009 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği 64

Şekil 3.86 9009 numaralı mascon için zamansal regresyon model sonucu.....65

Şekil 3.87 9009 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu düzeltmeler..65

Şekil 3.88 5321 numaralı mascon EWT değerleri ve model sonucu belirlenmiş düşey yer değiştirmeler 66

Şekil 3.89 5321 numaralı mascon için DDK2 ve mascon verisi ile elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm) 67

Şekil 3.90 9009 numaralı mascon EWT değerleri ve model sonucu belirlenmiş düşey yer değiştirmeler 68

Şekil 3.91 9009 numaralı mascon için DDK2 ve mascon verisi ile elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm) 68

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Gravite uydularına ilişkin birtakım özellikler.....6
Tablo A.1 GPS ve GRACE düşey yer değiştirme yıllık sinyal genlik ve faz sonuçları.....76
Tablo B.1 Kuadratik regresyon katsayıları….. 78
Tablo B.2 Zamansal regresyon katsayıları.....81

HARİTA LİSTESİ

Harita 3.1 Çalışma alanı haritası 24

ÖZET

Hidroloji Kaynaklı Düşey Yer Değiştirmelerin GRACE Çözümleriyle Belirlenmesi: Türkiye Örneği

Beyza GÜNEY

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Yerin gravite alanı, yerin biçimine ve fiziksel yapısına ilişkin çeşitli bilgileri içermektedir. Gravite alanındaki zamansal değişimleri kullanarak gravite anomalisi değişimi, deniz yüzeyindeki değişim, hidrolojik değişim, hidroloji kaynaklı yer değiştirmeler gibi çeşitli jeopotansiyel değişimler belirlenebilir. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) ve Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) ile, global olarak 2002 yılından günümüze kadar gravite alanı izlenebilmektedir. GRACE, hidrolojik değişimlere oldukça duyarlıdır. Bu sayede hem kıtalardaki su bütçesindeki değişimleri hem de okyanus tabanı değişimleri ve buzullardaki erime miktarları yüksek duyarlılıkla ortaya çıkarılabilmektedir. GRACE ile elde edilen Seviye 2 verisi olan küresel harmonik katsayılar ile su kaynaklı düşey yer değiştirmeler elde edilebilmektedir. Global Positioning System (GPS) ise yeryüzü üzerindeki noktaların yatay ve düşey hareketlerini milimetre seviyesinde izleyebilmemizi sağlamaktadır. Bu çalışmada, Türkiye geneline dağılmış sabit GPS istasyonlarından bazılarının düşey yer değiştirme zaman serileri ile bu noktalara ilişkin GRACE harmonik modellerinden elde edilen bir jeopotansiyel değişim olan su kaynaklı düşey yer değiştirme zaman serileri karşılaştırılmıştır. Birçok noktada GRACE zaman serilerinden elde edilen

yıllık genlik ile GPS'den elde edilen yıllık genlik birbirine benzer bulunmuştur. GPS yıllık sinyali, GRACE sinyaline göre yaklaşık 3 ay gecikmeli elde edilmiştir. Bu sonuç, meydana gelen su değişiminin birçok noktada 3 ay sonra fiziksel yeryüzü üzerinde bir kara hareketi oluşturduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, yerin morfolojik özelliğine bağlı olarak GPS sinyali su değişimine bu kadar sürede tepki vermektedir. Bu çalışmada aynı zamanda harmonik katsayılardan elde edilen Eşdeğer Su Kalınlığı (EWT) ve düşey yer değiştirmeler arasında fonksiyonel bir ilişki kurulmuştur. GRACE Seviye 3 verisi olan Mascon çözümlerindeki EWT değerlerinden düşey yer değiştirmelerin bu bağıntıyla elde edilebilirliği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GRACE, GPS, düşey yer değiştirme, hidrolojik değişim, Mascon

ABSTRACT

Monitoring of Hydrology-Induced Vertical Displacements Using GRACE Solutions: A Case Study in Türkiye Region

Beyza GÜNEY

Department of Geomatic Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

The gravity field of the Earth contains various information about the shape and physical structure of the Earth. By using temporal changes in the gravity field, it is possible to obtain various geopotential changes such as gravity anomaly changes, changes in sea surface, hydrological changes, and hydrology-induced land movements. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) has been globally monitored this variation since 2002. GRACE is highly sensitive to hydrological changes, allowing for the detection of changes in continental water budgets, ocean floor changes, and amounts of melting ice with high precision. The Level 2 data obtained with GRACE can be used to determine vertical displacements with spherical harmonic coefficients. The Global Positioning System (GPS) enables us to track both horizontal and vertical movements of points on the Earth's surface at the millimeter level. In this study, vertical displacement time series from certain fixed GPS stations distributed throughout Turkey were compared with vertical displacement time series derived from GRACE harmonic models related to these points. The amplitude of the annual change signal obtained from both GRACE and GPS time series was found to be similar at many points. The GPS annual signal was obtained approximately 3 months delayed compared to the GRACE signal. This result indicates that the water change at many points leads to a terrestrial movement

on the physical Earth's surface after a delay of 3 months. In other words, the GPS signal responds to water changes with such a delay depending on the morphological characteristics of the location. This study also established a functional relationship between the Equivalent Water Thickness (EWT) obtained from the harmonic coefficients and vertical displacements. The feasibility of obtaining vertical displacements from EWT values in Mascon solutions, which are GRACE Level 3 data, with this relation is analyzed.

Keywords: GRACE, GPS, vertical displacement, hydrological changes, Mascon

1

GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Jeodezinin araştırma konularından biri, yerin gravite alanının zaman içindeki değişimini incelemektir. Yerin gravite alanını belirlemek için geçmişte 3 özel uydu misyonu geliştirilmiştir. CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) 2000, GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) 2009 ve çalışmada kullanılan GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 2002 yılında gravite alanını belirlemek için yörüngesine gönderilmiştir [1]. GRACE uydu sistemi CHAMP ve GOCE uydularından farklı olarak, aynı yörüngede aralarında 220±50 km mesafe olacak şekilde birbirini izleyen ikiz LEO (Low Earth Orbit) uydularıyla yapılanmıştır. 17 Mart 2002'de Alman Amerikan ortaklığı ile yörünge düzlemine yaklaşık 500 km yükseklikte yerleştirilmiştir. 2017 yılına kadar görevine devam etmiştir. 22 Mayıs 2018'de GRACE misyonunun devamı niteliğinde olan GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment-Follow On) uydusu görevine başlamıştır ve halen veri sağlamaya devam etmektedir. GRACE ve GRACE/GFO uydularının özellikle global veya bölgesel hidrolojik değişimlere karşı gelişmiş hassasiyetinin olduğu kanıtlanmıştır ve genellikle hidrolojik sebeplere bağlı kütle değişim hareketlerinin yorumlanması çalışmalarında kullanılmaktadır [2], [3], [4], [5], [6].

GRACE ile elde edilen veri türü 4 adettir: Seviye 0, Seviye 1 (L1), Seviye 2 (L2), Seviye 3 (L3). Seviye 0 verisi telemetri verilerini içermektedir. Seviye 1 verisi Seviye-1A ve Seviye-1B olarak iki türdür. Seviye-1B verisi uydu konum verilerini, ikiz uydular arasındaki uzaklık değişimlerini, çekim dışı ivme verilerini içermektedir. Seviye-2 verisi, GRACE uzay aracının yörüngelerini ve dünyanın gravite potansiyeli için küresel harmonik katsayı tahminlerini içermektedir. Seviye-3 verisi ise su seviyesi değişimine dönüştürülmüş, işlenmiş veridir. Mascon (mass concentration) çözümleri de bir Seviye 3 verisidir, 1°x1° veya 3°x3° boyutlarındaki

geometrik hücrelerin aylık eşdeğer su kalınlığı (Equivalent Water Thickness-EWT) değişimlerini içermektedir.

GRACE' in Mart 2002'de yörüngesine gönderilmesinden bu yana, GRACE verileri üç farklı işlem merkezinden sürekli olarak aylık gravite çözümleri yayınlamaktadır. Bu merkezler Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Space Research at University of Texas, Austin (CSR) ve GeoforschungsZentrum Potsdam (GFZ) merkezleridir [7], [8].

Gravite alanındaki değişimler, Dünya içinde ve yüzeyinde veya üzerindeki kütlelerin yoğunluk fonksiyonundaki değişimden kaynaklanır. Örneğin, okyanus, atmosfer ve karasal su havzalarındaki kütle değişimleri, yerin gravite alanında zamansal değişim meydana getirirler. Su kütlesi değişimleri Dünya yüzeyinde yaklaşık birkaç kilometre kalınlığında bir katmanda yoğunlaşır. GRACE ve GRACE-FO uyduları yeryüzünde meydana gelen kütle değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır. GRACE ve GRACE-FO uyduları ile okyanuslardaki kütle değişimleri [9],[10], buzulların erimesi ve bunun etkileri [11], [12], [13], yeraltı sularındaki seviye değişimleri [14], [15], [16], [17] izlenebilmektedir. Hidrolojik olaylara bağlı olarak meydana gelen değişimlerden biri olan EWT değişimi GRACE ve GRACE-FO uydularının verilerinden belirlenebilmektedir. EWT değişimi L2 verilerinde bulunan küresel harmonik katsayılar kullanılarak harmonik regresyon ile bulunabilir [18], [19], [20], [21], [22].

Değişen kütle yüklemesine bağlı olan düşey yer değiştirmeler ise GRACE L2 verisinden elde edilen harmonik katsayıları (C_{lm}, S_{lm}) ve Love sayıları cinsinden ifade edilmektedir. Love sayıları h_n (deformasyon yükü Love sayısı) ve k_n (gravite yükü Love sayısı) hesaplanması ve değerleri birçok farklı kaynakta sunulmuştur [21], [23], [24], [25], [26]. Düşey yer değiştirmeler Global Positioning System (GPS) verileri ile de belirlenebilmektedir.

GPS, 1973 yılında ABD Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen ve 1994 yılında tam olarak işler hale gelen bir uydu navigasyon sistemidir. İlk başta askeri amaçlı olarak tasarlanan GPS, 1983 yılında sivil kullanım için de açılmıştır. Günümüzde ise, yeryüzündeki deformasyonların (yerkabuğu deformasyonları, kıtasal yükselme ve çökme hareketleri, volkanik kaynaklı deformasyonlar, heyelan hareketleri vb.) izlenmesi için vazgeçilmez bir bileşendir. GPS yeryüzü üzerindeki noktaların yatay

ve düşey hareketlerini milimetre seviyesinde izleyebilmemizi sağlamaktadır [27], [28].

Hidroloji kaynaklı yerkabuğunda meydana gelen düşey yer değiştirmeler, GRACE ve GPS koordinat zaman serilerinde kendisini belli eder. Geçmişteki çalışmalarda GPS ve GRACE' den elde edilen düşey yer değiştirmeler genellikle yüksek tutarlılık göstermiştir. GPS tarafından elde edilen mevsimsel düşey yer değiştirme zaman serisinin, GRACE harmonik modellerinden elde edilen bir jeopotansiyel değişim olan su kaynaklı düşey yer değiştirme zaman serilerinin yüksek oranda ilişkili olduğu hem küresel [29], [30] hem de bölgesel ölçekte [31], [32], [33] gözlenmiştir. GPS ve GRACE verilerinin birlikte kullanımı, tektonik ve tektonik olmayan kuvvetlerin kabuk deformasyonuna katkısının ayrıştırılmasını sağlayabilir ve sismik gerilme birikimi ve hidrolojik süreçlerin hâkim olduğu mevsimsel yüzey kütlesi değişimlerinin etkisi nedeniyle kabuğun nasıl deforme olduğuna dair öngörü sağlayabilir [34], [35].

GRACE ve GRACE-FO ürünleri olan harmonik katsayılar ve mascon çözümlerinden elde edilen düşey deformasyonlar ile GPS ile elde edilen düşey deformasyonlar birçok güncel çalışmada karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde, elde edilen yer değiştirmelerin GPS'den elde edilenlerle uyumlu olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, mascon çözümlerinin, küresel harmoniklerden türetilmiş çözümlere göre GPS yer değiştirme zaman serileriyle daha iyi uyum gösterdiği belirtilmiştir [36], [37]. Mascon çözümünden elde edilen düşey yer değiştirmenin yıllık genliği, harmonik katsayılarla elde edilenden biraz daha büyük ancak GPS ile gözlemlenenden daha küçük bulunmuştur. GRACE ve GRACE-FO ürünlerini doğrulamak için GPS verilerinin kullanılmasının bağımsız bir yaklaşım sağlayacağı çeşitli çalışmalarda öngörülmüştür [36], [37].

1.2. Tezin Amacı

Yeryüzünde gözlenen kabuk deformasyonunun sebeplerinden biri, yüzey üstü ve yüzeyin altındaki hidrolojik değişimlerdir. Düşey yer değiştirmeler birçok farklı yolla belirlenebilmektedir. GRACE ve devamı niteliğindeki GRACE-FO uydularının 2002'den günümüze yerin gravite alanındaki değişimlerini izlediği, özellikle karadaki hidrolojik değişimlere ve buzullardaki kütle kayıplarına karşı duyarlı olduğu literatür özetinde incelenen kaynaklarda açıklanmıştır. Bu

çalışmada, hidroloji kaynaklı düşey yer değişimleri GRACE ve GRACE-FO verisi kullanılarak incelenecektir.

GPS ise yeryüzü üzerindeki noktaların yatay ve düşey hareketlerini izlememizi sağlamaktadır. GPS verileriyle elde edilen düşey yer değiştirmelerin doğruluğu yatay yer değiştirmelerin doğruluğuna göre daha düşüktür. GRACE verilerinin kullanılmasıyla GPS'den elde edilen düşey yer değiştirmeler iyileştirilebilir. Ayrıca, GRACE ve GRACE-FO ürünlerini doğrulamak için GPS verilerinin kullanılması bağımsız bir yaklaşım sağlayabilir. Bu çalışmada Türkiye geneline dağılmış sabit GPS istasyonlarından bazılarının düşey yer değiştirme zaman serileri ile bu noktalara ilişkin GRACE harmonik modellerinden elde edilen bir jeopotansiyel değişim olan su kaynaklı düşey yer değiştirme zaman serileri karşılaştırılıp sonuçlar yorumlanmaktadır.

Ayrıca, L2 küresel harmonik katsayıları ile elde edilen EWT ve düşey yer değiştirmeler arasındaki fonksiyonel ilişki incelenmektedir. Söz konusu fonksiyonel ilişki hem EWT büyüklüğü hem de zamana bağlı olarak ele alınacak, buradan elde edilen polinom katsayıları, yalnızca EWT verisini sunan Mascon zaman serilerine uygulanacaktır. Böylece, EWT'den hidroloji kaynaklı düşey yer değiştirmeye kolay bir geçiş bölgesel ölçekte incelenecektir.

1.3. Çalışmanın Hipotezi

Çalışma, iki hipoteze dayanmaktadır.

- GRACE ve GPS zaman serilerinden elde edilen yıllık değişim sinyali birbiriyle uyumludur.
- EWT verisi ile hidroloji kaynaklı düşey yer değiştirme arasında fonksiyonel bir ilişki bulunur.

2

HİDROLOJİ KAYNAKLI DÜŞEY YER DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ

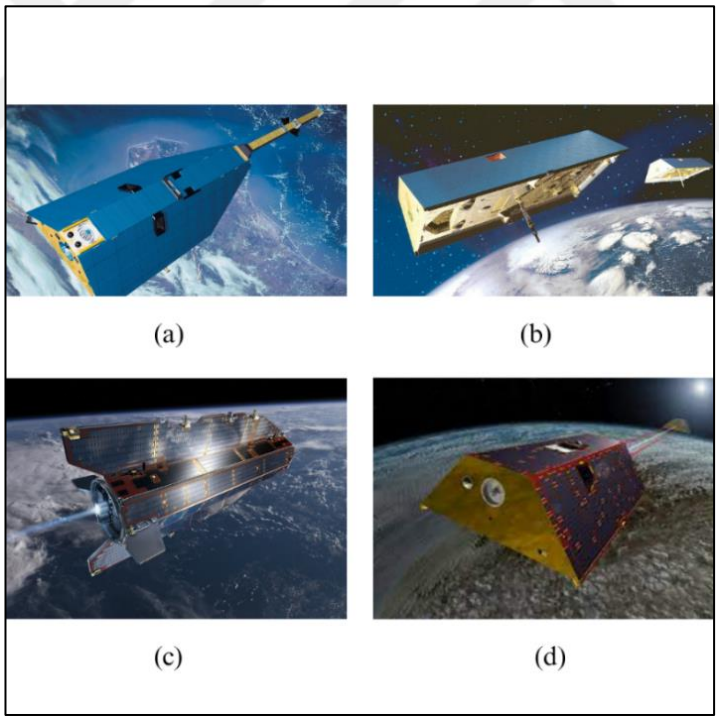
Yer gravite alanının izlenmesi için geçmişten günümüze birçok yapay uydu misyonu geliştirilmiştir. Bunlardan 2000 yılında yörüngesine gönderilmiş CHAMP ile, enerjinin korunumu ilkesi doğrultusunda yerin statik gravite alanı yüksek çözünürlükte elde edilmiştir. CHAMP uydusu, SST-hl (Satellite-to-Satellite Tracking - High to Low) yöntemiyle yüksek yörüngedeki uydudan alçak yörüngedeki uydunun yerçekimi alanı ve diğer fiziksel parametrelerini ölçmek üzere tasarlanmış ivmeölçerlerle donatılmıştır. [38], [39]. 2009 yılında fırlatılan GOCE ise o güne kadarki en gelişmiş gravite belirleme amacına sahiptir. GOCE SST-hl yöntemine ek olarak, 3 yönlü ivmeölçerlerden oluşan gradyometrelerle eş zamanlı olarak uydu gravite gradyometrisi (SGG-Satellite Gravity Gradiometry) yöntemiyle görevini sürdürmüştür. GOCE verileri, oşinografi, katı yer fiziği, jeodezi ve deniz seviyesi araştırmaları için çok çeşitli yeni olasılıkları hayata geçirmekte ve iklim değişikliğini daha iyi anlamamıza önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. 2013'te uçuşu sona ermesine rağmen, GOCE'den elde edilen zengin veriler okyanus sirkülasyonu, deniz seviyesi, buz dinamikleri ve yerin iç yapısı hakkındaki anlayışımızı geliştirmek için kullanılmaya devam etmektedir [1], [40].

Hidrografik değişime duyarlılığı ile öne çıkan GRACE ise 2002 yılında görevine başlayarak, yarı analitik bir yöntem kullanarak gravite alanını belirlemektedir. Yarı analitik yöntemin prensibi, yerçekimi alanının doğruluğunun, kümülatif jeoit yükseklik hatası ile uzay kaynaklı cihazların ölçüm hatası arasındaki ilişki tarafından oluşturulan uydu gözlem denkleminin hata modeli kullanılarak tahmin edilmesidir. Avantajları, yüksek dereceli yerçekimi alanı modelinin kurulmasının hızlı olması, uydu gözlem denkleminin fiziksel anlamının kesin olması ve hata analizinin kolay olmasıdır. GRACE uydu misyonunun devamı niteliğinde olan GRACE- FO uydusu ile ikiz uydular arasındaki mesafe değişimleri belirlenerek, yaklaşık 320 km çapa sahip bir yerin 1 santimetresinin bile kütle hareketinin sebep

olduğu yerçekimi alanındaki değişim ayırt edilebilir ve bu değişimler aylık periyotlarla kaydedilebilmektedir [1], [41], [42]. Sonraki bölümlerde GRACE ve GRACE-FO uydu misyonları ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Tablo 2.1 Gravite uydularına ilişkin birtakım özellikler

Parametreler	**CHAMP**	**GRACE**	**GOCE**	**GRACE-FO**
Bilimsel Kurum	GFZ	NASA ve DLR	ESA	NASA ve DLR
Görev Süresi	15.07.2000-19.09.2010	17.03.2002-27.10.2017	17.03.2009-10.11.2013	22.05.2018-Devam etmekte
Yörünge Yüksekliği	200-454 km	300-500 km	240-250 km	Yaklaşık 250 km
Eğim Açısı	87°	89°	96,5°	89°
İzleme Yöntemi	SST-HL	SST-HL/LL	SST-HL/SGG	SST-HL/LL

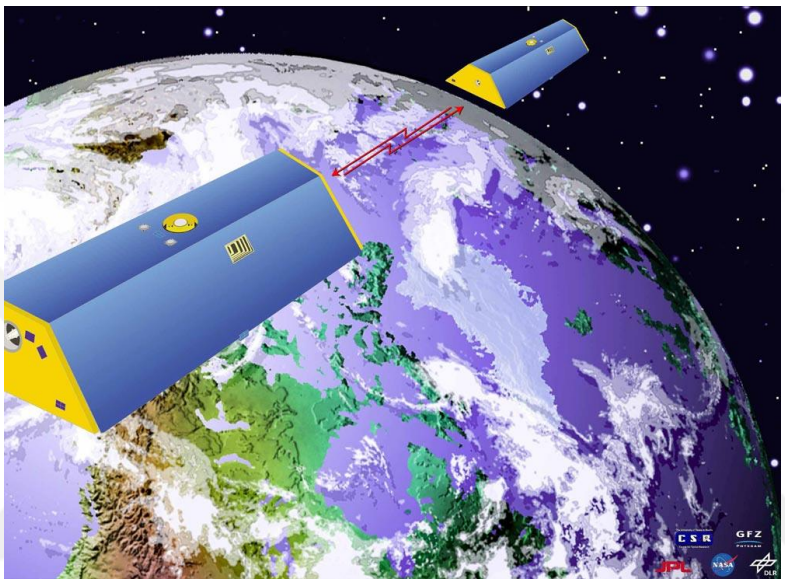


Şekil 2.1 Gravite izleme uyduları

(a) CHAMP (b) GRACE (c) GOCE (d) GRACE-FO [38], [43], [44], [45]

2.1. GRACE Uydu Sistemi

GRACE, Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Alman Uzay Araştırmaları Merkezi (DLR)'nin ortak çalışması olan bir gravite araştırma uydusudur ve uluslararası Dünya Gözlem Sistemi uydularının bir parçasıdır. GRACE uyduları görevine 2002 yılı mart ayında Rusya'da bulunan Plesetsk Uzay Üssü'nden gönderilmesiyle başlamış, 2017 yılı ekim ayında uzay aracının yakıtının bitmesiyle görevini sonlandırmıştır [41], [42].



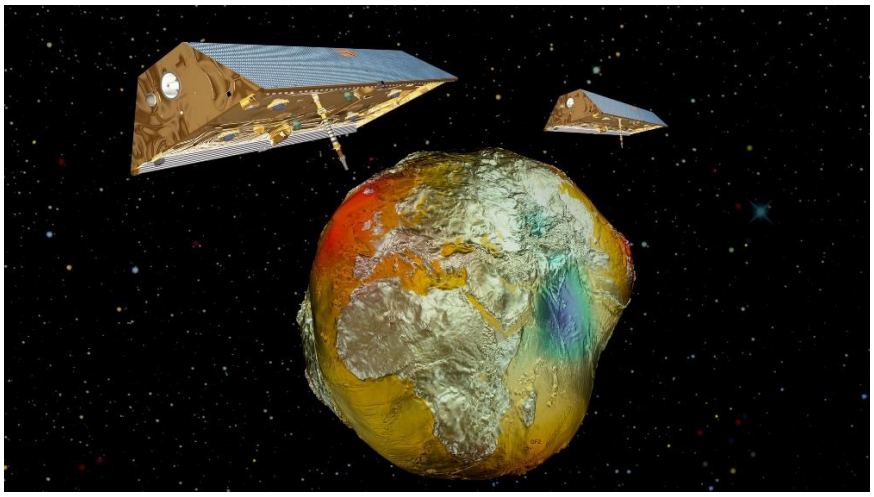
Şekil 2.2 GRACE uydu sistemi [41]

GRACE ekvatora eğimi 89.5˚olan, birbirleri arasında başlangıç mesafesi 220±50 km olan, dairesel yörüngede gezen ve yörünge yüksekliği yaklaşık 500 km iki özdeş uydu GRACE-A ve GRACE-B'den oluşmaktaydı [41], [42].

GRACE uydusundan elde edilen veriler çeşitli hidroloji kaynaklı kütle değişimi çalışmaları,

- Okyanuslardaki su kütlesi değişimi [9], [10],
- Yer altı su kaynaklarındaki seviye değişimi [14], [15], [16], [17],
- Buzulların erimesi ve bunun etkilerinin izlenmesi [11], [12], [13],

gibi çalışmalar yanında gravite alanının ve jeoit değişiminin izlenmesi [46], tektonik hareketlerin incelenmesi [34], [47], [48], [49] gibi farklı alandaki araştırmalara da katkı sağlamaktadır.

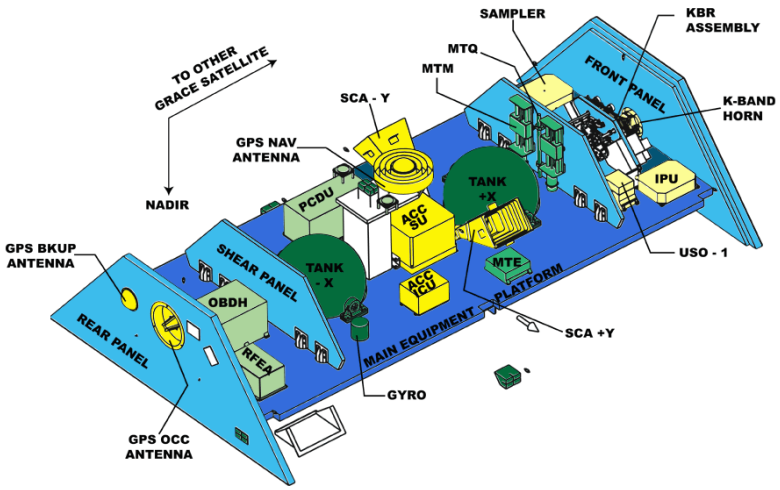


Şekil 2.3 GRACE ikiz uydularının bir illüstrasyonu [50]

2.1.1 GRACE Uyduları Ölçüm Sistemi

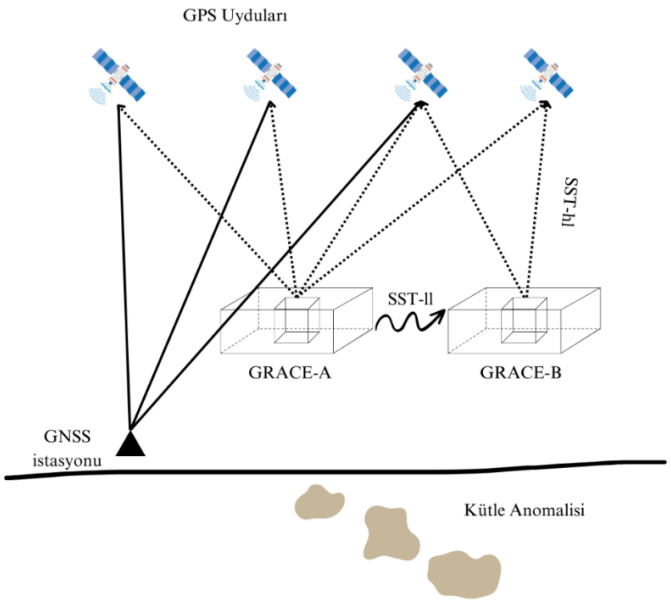
GRACE uyduları Astrium GmbH ve Space Systems/Loral (SSL) tarafından geliştirilmiştir. Astrium GmbH, JPL ile yaptığı sözleşme çerçevesinde, CHAMP görevinden kalan mirası kullanarak iki uçuş uydusunun ana unsurlarını inşa etmiştir. GRACE uydu sistemi tasarımı, düşük termal bozulma için alüminyum çekirdek ve kenar profillerine sahip Karbon Fiber Takviyeli Plastik (CFRP) sandviç panellere dayanan basit ve sağlam bir yapıya sahiptir. Tüm elektrik üniteleri, kablo tesisatı, GN2 tankları ve iticilere giden borular merkezi ekipman panelinin her iki tarafında yer almaktadır. Uydunun dış formu aerodinamik davranışına göre optimize edilmiştir [51].

GRACE-A ve GRACE-B uyduları K-Bant menzil sistemi (KBR) ile donatılmıştır. Uyduların arka panelinde bulunan GPS alıcıları uyduların konumlarını belirlemek ve iki uydunun KBR ölçümlerini senkronize edebilmek için veri sağlamaktadır. SCA (Yıldız kameraları-Star Camera Assembly) kullanılarak yıldızlara göre uyduların konumları belirlenmektedir. Uyduya etki eden yerçekimsel olmayan ivmeleri hassas bir şekilde ölçmek için yüksek hassasiyetli ivmeölçerler (ACC) bulunmaktadır. Şekil 2.3'te GRACE uydularının biri için donanım yapısı gösterilmektedir [7], [21], [51], [52].



Şekil 2.4 GRACE uydusu donanımları [51]

GRACE gravite alanını belirlerken CHAMP ve GOCE uydularından daha farklı bir teknik kullanmaktadır. SST-hl yöntemine ek olarak, alçak yörüngeli uydular arasından uydudan uyduya izleme (SST-ll, Satellite to satellite tracking low to low) tekniğini kullanan ilk yapay uydudur. SST-ll tekniği sayesinde uydular arasındaki mesafedeki değişikleri birkaç mikron hassasiyette sürekli takip edebilmektedir. GRACE çözümlerinin bazıları SST-ll ve SST-hl verileri birlikte işlenerek elde edilmektedir. Şekil 2.3'te SST-hl ve SST-ll tekniklerinin gösterimi yer almaktadır [21], [51], [52], [53].



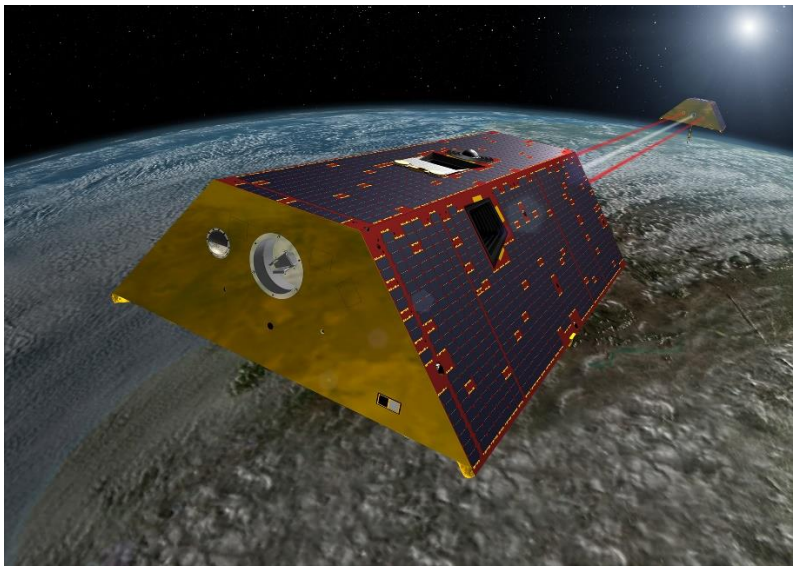
Şekil 2.5 GRACE uydularının ölçme tekniği

2.2. GRACE-FO Uydu Sistemi

Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on (GRACE-FO) uydusu NASA ve GFZ ortaklığındaki bir projedir. GRACE-FO, 17 Mart 2002'de Dünya yörüngesinde dönmeye başlayan GRACE görevinin devamı niteliğindedir [54].

22 Mayıs 2018'de California Vanderbang Hava Kuvvetleri üssünden fırlatılan GRACE-FO, yeraltı su depolaması, büyük göl ve nehirlerdeki su miktarı, toprak nemi, buz tabakaları ve buzullar ile okyanusa su eklenmesinin neden olduğu deniz seviyesindeki değişiklikleri izlemek için amacıyla görevini sürdürmektedir. Kütle değişimini izlemenin yanı sıra, iki uydunun her biri GPS antenlerini kullanarak hava durumunun izlenmesine ve tahmin edilmesine yardımcı olmak üzere günde en az 200 atmosferik sıcaklık dağılımı ve su buharı içeriği profili sağlamaktadır [54], [55].

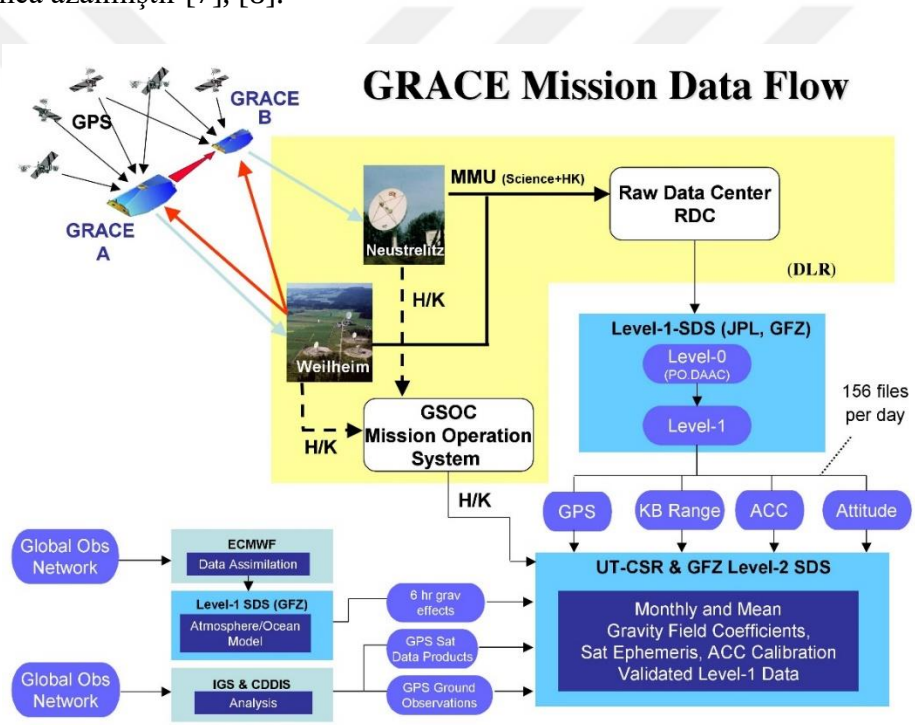
GRACE-FO uydusunun amaçlarından ilki dünya gravite alanının modellenmesidir. GRACE uydusunda olduğu gibi iki eş düzlemli alçak yörüngeli özdeş iki uydu arasındaki mesafe ölçülerek bu amaca ulaşılmaktadır. Buna ek olarak hassas konumlandırma için GPS alıcıları, yerden bağımsız menzil belirlemesi için Lazer Retro-Reflektör (LRR) ve uyduya etki eden yerçekimsel olmayan ivmeleri hassas bir şekilde ölçmek için yüksek hassasiyetli ivmeölçerler bulunmaktadır [54], [56].



Şekil 2.6 GRACE-FO uydu sistemi [45]

2.3. GRACE ve GRACE-FO Veri Sistemi

GRACE ve GRACE-FO verileri Science Data System (SDS) ile dağıtılmaktadır. Sistem geliştirme, veri işleme ve arşivleme JPL, CSR ve GFZ veri merkezleri arasında paylaşılmaktadır. GRACE ve GRACE-FO verileri, mümkün olan birçok parametre seçimi ve çözüm stratejisi nedeniyle üç farklı işleme merkezinde işlenmektedir. GFZ, CSR ve JPL bu çözüm stratejilerini farklı şekilde araştırmaktadır. Bu üç veri merkezinden GRACE ve GRACE-FO verileri düzenli olarak paylaşılmaktadır. Ortaya çıkan L2 gravite alanlarındaki farklılıklar gravite değişimlerinin özelliklerinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmuştur. Çeşitli yaklaşımlar ve merkezlerin işleme stratejileri arasındaki farklar genel olarak süreç boyunca azalmıştır [7], [8].

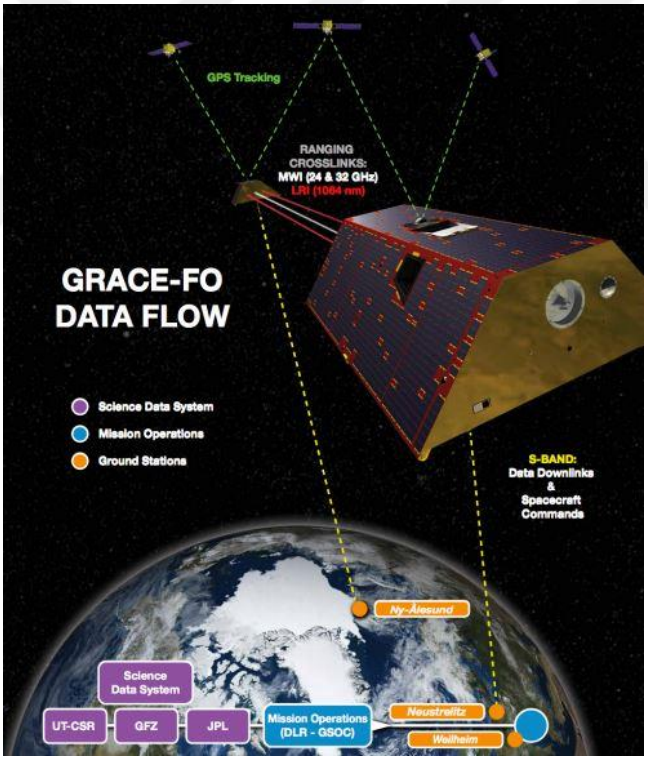


Şekil 2.7 GRACE veri akış diyagramı [57]

Seviye 0 veri ürünleri, Neustrelitz'deki DLR'de bulunan GRACE Raw Data Center (RDC) tarafından telemetri verileridir. Her downlink geçişinden elde edilen bu telemetri verileri, Bilim Aracı ve Uzay Aracı Temizlik veri akışlarına ayrılır ve RDC'de sürekli bir arşive yerleştirilir. Sonuç olarak, her uydudan, her geçişten iki dosya dönen arşivde kullanılabilir hale getirilir. Bu iki dosya Seviye 0 verileri olarak tanımlanır. SDS bu dosyaları düzenli olarak alır ve ilgili alet ve yardımcı temizlik verilerini çıkarır ve yeniden biçimlendirir [7], [8].

Seviye-1 verisi Seviye-1A ve Seviye-1B olarak ikiye ayrılır. Seviye-1A verisi Seviye 0 verilerine uygulanan işlem sonucu elde edilmektedir. Seviye-1A verisi düzenlenip, doğrulanmaktadır. Daha sonra uydular arası uzaklıkları, uydunun yörünge bilgilerini ve çekim dışı ivmeler gibi ölçüleri de içerisinde bulunduran Seviye-1B verisi oluşturur. Seviye-0 verisinden Seviye-1B verisinin oluşma sürecine Seviye-1 veri işleme denir. Seviye-1B ürünleri, küresel harmonik katsayılar biçiminde aylık yerçekimi alanı tahminlerini üretmek için işlenir. Bazen, ortalama veya statik yerçekimi alanının bir tahminini üretmek için birkaç aylık veriler birleştirilir. Bu tahminler Seviye-2 olarak etiketlenir [7], [8].

2018 yılında Release-06 verisi GRACE için, 2019 yılında GRACE-FO için yayınlanmıştır. İçerisinde GRACE ve GRACE-FO için harmonik katsayılar bulunmaktadır.



Şekil 2.8 GRACE-FO veri akışı [8]

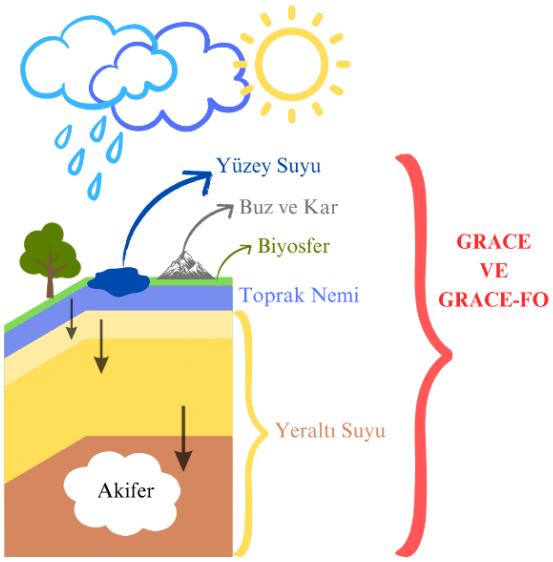
2.4. EWT (Equivalent Water Thickness: Eşdeğer Su Kalınlığı)

GRACE ve GRACE-FO uyduları gravite alanına bağlı zamansal değişimleri izlemektedir. Uydular jeopotansiyel değişimlerden özellikle hidroloji kaynaklı

değişimlere karşı duyarlıdır. Hidrolojik katmanların değişimiyle ilişkili olan EWT değişimi aylık yer gravite çözümlerinden elde edilir. EWT değişimi hidroloji ve iklim değişikliği çalışmalarında kullanılmaktadır. GRACE ve GRACE-FO'nun L2 verisinden elde edilen jeopotansiyel değişiklikler bozucu potansiyelin bir eşitliği olarak yazılabilir. Bir t periyodunda küresel harmonik katsayıları $C_{lm}(t)$, $S_{lm}(t)$ küresel koordinatları ξ, ϑ ve λ, olan bir noktada küresel harmonik açılımın ifadesi Eşitlik 2.1'deki gibidir. Eşitlikteki ξ yarıçap vektörünü, ϑ kutup uzaklığını, λ jeodezik boylamı, GM jeosentrik çekim sabitini, l açınım derecesini m sırasını, $P_{lm}(\cos\vartheta)$ tam normalleştirilmiş Legendre polinomunu ifade etmektedir [58], [59].

$$T(\xi,\vartheta,\lambda;t)=\frac{GM}{\xi}\sum_{l=0}^{l_{max}}\left(\frac{a_E}{\xi}\right)^l\sum_{m=0}^{l}\left(\delta C_{lm}(t)\cos m\lambda+\delta S_{lm}(t)\sin m\lambda\right)P_{lm}(\cos\vartheta) \quad (2.1)$$

Yüzey suyu, yeraltı suyu, topraktaki nemi, kar ve buzullarda oluşan erime gibi kütle değişimleri GRACE ile elde edilmektedir [60]. EWT değişimi su katmanlarındaki kütle değişimi hakkında bilgi veren bir GRACE ürünüdür. EWT verisindeki değişikliğin hangi su katmanından geldiği belirlenemez; bu nedenle elde edilen su değişimi çoğunlukla toplam su bütçesi anomalisi ya da değişimi olarak da adlandırılır.



Şekil 2.9 GRACE ve GRACE-FO ile izlenen su katmanları

Yüzey kütle yoğunluğu değişimi aylık harmonik katsayılar ile ifade edilmektedir [20] :

$$\Delta\sigma(\vartheta,\lambda) = a_e\rho_w \sum_{l=2}^{l_{max}} \sum_{m=2}^{l} (\Delta\breve{C}_{lm}\cos m\lambda + \Delta\breve{S}_{lm}\sin m\lambda) P_{lm}(\cos\vartheta) \tag{2.2}$$

Burada ρ_w suyun yoğunluğunu (1000 kg/m^3), $\Delta\breve{C}_{lm}$ ve $\Delta\breve{S}_{lm}$ yüzey yoğunluk değişimlerini ifade eder. EWT değişimi yüzey yoğunluk değişiminin su yoğunluğuna oranıyla bulunmaktadır [20]:

$$\Delta e(\vartheta,\lambda) = \frac{\Delta\sigma(\vartheta,\lambda)}{\rho_w} \tag{2.3}$$

Eşitlik 2.4' de a_e Referans elipsoidinin büyük yarı ekseni olmak üzere, yüzey yoğunluk değişimi ile küresel harmonik katsayı değişimleri (ΔC_{lm}, ΔS_{lm}) arasında aşağıdaki ilişki bulunur [20]:

$$a_e \begin{Bmatrix} \Delta\breve{C}_{nm} \\ \Delta\breve{S}_{nm} \end{Bmatrix} = a_e \frac{\rho_{ave}(2l+1)}{3\rho_w(1+k_l)} \begin{Bmatrix} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{Bmatrix} = K_l \begin{Bmatrix} \Delta C_{lm} \\ \Delta S_{lm} \end{Bmatrix} \tag{2.4}$$

Burada k_l, l derecesindeki Love yükleme sayılarını, ρ_{ave} ortalama yeryuvarı yoğunluğunu yani 5517 kg/m^3 değerini ifade eder. Love yükleme sayıları belli harmonik dereceleri birçok farklı kaynakta yayınlanmıştır [21], [23], [24], [25]. Basit interpolasyon yöntemleriyle de ara dereceler için kolayca hesaplanabilmektedir.

Eşitlik 2.4'te verilen katsayı değişimleri Eşitlik 2.2'de göz önüne alınarak ve bulunan yüzey yoğunluk değimini ifade eden Eşitlik 2.3'te yerine konulduğunda, EWT değişimi, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [20], [23].

$$\Delta e(\vartheta,\lambda) = \sum_{l=2}^{l_{max}} \sum_{m=0}^{l} (\Delta C_{lm}\cos m\lambda + \Delta S_{lm}\sin m\lambda) K_l P_{lm}(\cos\vartheta) \tag{2.5}$$

Burada l_{max} açınımın en büyük derecesidir, bu dereceye bağlı olarak mekansal çözünürlük belirlenir:

$$\phi \approx \frac{2000km}{l_{max}} \tag{2.6}$$

L2 verileri için harmonik açınımın en büyük derecesi 60 derecedir. Mekansal çözünürlük, böylece, yaklaşık olarak 330 km olur [59].

2.5. Gravite Çözümlerinden Düşey Yer Değiştirmelerin Belirlenmesi

Yer yüzündeki suyun yeniden dağılımı, yerkabuğu üzerindeki yük veya ağırlıkta bir değişim olarak ortaya çıkar. Altta yatan manto tarafından desteklenen kabuk, yıllık zaman ölçeklerinde elastik olarak deforme olur. GRACE , bu kütle hareketleri nedeniyle oluşan deformasyonu izlemek için de önemli bir bilgi kaynağı olarak karşımıza çıkar. GRACE uydusunun verilerinden biri olan harmonik katsayılar ile bir noktada t periyodu için yüzey düşey yer değiştirmesi aşağıdaki harmonik açınım ile hesaplanabilmektedir [34]:

$$h(\vartheta,\lambda,t) = R\sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=0}^{l} P_{lm}(\cos\vartheta)\times\left[\Delta C_{lm}(t)\cos m\lambda + \Delta S_{lm}(t)\sin m\lambda\right]\times\frac{h_l}{1+k_l} \qquad (2.7)$$

Burada, R, yeryuvarı yarıçapı ve h_l, Farrell tarafından tanımlanmış elastik yük Love sayısıdır. [21], [23], [24], [25], [26].

2.6. Regresyon Analizi

Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, bir noktadaki EWT değişimleri ile düşey yer değişimleri arasındaki ilişki regresyon analizi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu analizde, önce kuadratik regresyon sonrasında ise zamansal regresyon uygulanmaktadır. Kuadratik regresyon, bağımlı değişken (v) ile bağımsız değişken (u) arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan ikinci dereceden bir polinom regresyon türüdür. Bu model, verilerin doğrusal regresyonla iyi açıklanamadığı durumlarda, verilerdeki eğilimlerin daha iyi yakalanabilmesi için kullanılır [62].

Kuadratik regresyon denklemi şu şekilde yazılabilir:

$$v = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 \qquad (2.8)$$

Burada, a katsayıları, regresyon katsayılarıdır. Zamansal regresyon, hem mevsimsel (periyodik) bileşenleri hem de doğrusal olmayan trendleri modellemek için kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu model, zaman serisindeki mevsimsel değişimleri ve uzun vadeli eğilimleri yakalamak için ikinci dereceden bir polinom ile trigonometrik bileşenleri birleştirir.

Zamansal regresyon modeli aşağıdaki biçimde ifade edilebilir [62]:

$$v(t) = a_3 + a_4 t + a_5 t^2 + a_6\sin(wt) + a_7\cos(wt) \qquad (2.9)$$

Burada, *w*, mevsimsel bileşen frekansıdır ve *T* mevsimsel döngü süresi olmak üzere *2π/T* biçiminde ifade edilir. (2.9) regresyon modeli, farklı mevsimsel döngü süreleri için genişletilebilir.

2.7. Harmonik Regresyon

Bir noktaya ilişkin t zamanındaki $y(t)$ jeopotansiyel değişimi (EWT ya da düşey yer değiştirme) için aşağıdaki regresyon modeli düşünülür:

$$y(t) - e(t) = b_0 + b_1 t + \sum_{i=1}^{2} (c_i \cos(\omega_i t) + s_i \sin(\omega_i t)) \qquad (2.10)$$

Burada, $e(t)$, rasgele hata; b_0, sıfır eki; b_1 is doğrusal trend (hız); ω_1 ve ω_2 yıllık ve yarıyıllık periyodik sinyallerin açısal frekansları; c ve s kosinüs ve sinüs genlikleridir. Açısal frekanslar genellikle $\omega_1 = 2\pi/T_1$ (T_1=1 yıl) ve $\omega_2 = 2\pi/T_2$ (T_2=1/2 yıl) alınır; sinyalin genliği ise $A = \sqrt{c^2 + s^2}$ ile tanımlanır. $n > 6$ değişim olması durumunda, kestirim modeli aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \Delta y(t) \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}} - \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ \mathrm{e}(t) \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{e}} =$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \vdots & & & \vdots & & \vdots \\ 1 & t & \cos(\omega_1 t) & \sin(\omega_1 t) & \cos(\omega_2 t) & \sin(\omega_2 t) \\ \vdots & & & \vdots & & \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ c_1 \\ s_1 \\ c_2 \\ s_2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{y} - \mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

(2.11)

Burada, $\mathbf{y}$, n×1 boyutlu değişim vektörü; $\mathbf{e}$, n×1 boyutlu hata vektörü; $\mathbf{A}$, n×6 boyutlu düzeltme denklemlerinin katsayılar matrisi; $\mathbf{x}$, 6×1 bilinmeyenler vektörü ve n, zaman serisindeki gözlem sayısıdır. Ölçülerin eşit ağırlıklı oldukları varsayılarak, en küçük kareler yöntemine göre bilinmeyenler ve hata vektörü aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{y} \quad , \quad \mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x} \qquad (2.12)$$

Buradan regresyon parametrelerinin kovaryans matrisi belirlenir:

$$\mathbf{C}_{xx} = \sigma^2(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1} \tag{2.13}$$

Burada, σ^2 birim ağırlıklı ölçünün varyansıdır:

$$\sigma^2 = \frac{\mathbf{e}^T\mathbf{e}}{n-6} \tag{2.14}$$

3

UYGULAMA

3.1. Uygulamanın Amacı ve İçeriği

Uygulama iki aşamadan oluşmaktadır. İlk bölümde Türkiye'ye düzgün olarak dağılmış ve verilerinde kesiklik yaşanmayan sabit GPS istasyonlarında GPS düşey zaman serileri ile bu istasyonlarda GRACE DDK çözümünden elde edilen düşey yer değiştirmeler karşılaştırılmaktadır. İki farklı zaman serisinden elde edilen yıllık mevsimsel sinyalin genlikleri ve bunların zamansal olarak birbirlerine göre olan farklar incelenmektedir. İkinci bölümde ise Türkiye'deki mascon hücrelerinin orta noktalarına karşılık gelen lokasyonlarda DDK harmonik katsayılarından bulunan EWT zaman serisi ve düşey yer değiştirme zaman serisi karşılaştırılmaktadır. İki zaman serisi arasındaki fonksiyonel ilişki kuadratik ve zamansal regresyonla incelenmektedir. Her bir mascon için elde edilen bu regresyon modeli, mascon'lara ait EWT zaman serilerine uygulanmakta ve bu mascon verisi için düşey yer değiştirmeler hesaplanmaktadır.

3.2. DDK Verisi

Uluslararası Jeodezi Derneği (IAG) gravite alanı servislerinden biri olan ICGEM (International Centre For Global Earth Models- Uluslararası Global Yer Modelleri Merkezi) DDK verilerini çevrimiçi panelde kullanıcılarına sunmaktadır. Seviye 2 harmonik katsayı modellerinin JPL, CSR ve GFZ için ayrı ayrı ve Gauss filtresi uygulanmış hali ya da DDK filtrelenmiş çözümlerine bu panel üzerinden ulaşılabilmektedir. 8 adet filtre yarıçapı için DDK çözümleri panelde yayınlanmaktadır. DDK1 filtresi yarıçapı 530 km, DDK2 ise yarıçapı 340 km olan Gauss filtresine karşılık gelmektedir. Filtre yarıçapı arttıkça hatalar azalmakta, fakat sinyalin genliğinde kayıplar oluşmaktadır. Filtre yarıçapı arttıkça hatalar azalırken mekansal çözünürlük de düşmektedir.



Şekil 3.1 ICGEM online veri paneli [63]

Bu çalışmada Türkiye'de mascon verileriyle uyumluluğu açısından DDK2 filtreli veriler seçilmiştir. GRACE ve GRACE-FO uyduları için Release 06, CSR veri merkezinden yayınlanan DDK2 filtreli harmonik katsayı verileri kullanılmıştır. GRACE ve GRACE-FO'dan elde edilen C_{20} katsayıları arasında önceki çalışmalarda belirtilen anormallikler fark edilmiştir. Satellite Laser Ranging (SLR) Dünya'nın zamana göre değişken yerçekimi alanının en büyük bileşeni olan, Dünya'nın dinamik basıklığındaki C_{20} değişiklikleri izlemektedir. DDK2 verilerinde C_{20} katsayısı SLR tarafından yayınlanan verilere göre değiştirilmiştir [64].

```
#  Description for UT/CSR monthly C20 RL-06 time series from SLR
#
#  Column 1: Approximate mid-point of monthly solution (years)
#  Column 2: C20 from SLR (normalized)
#  Column 3: Delta C20 relative to a mean value of -4.841694723127E-4 (1E-10)
#  Column 4: Solution sigma (1E-10)
#  Column 5: Mean value of Atmosphere-Ocean De-aliasing model (1E-10)
#  Columns 6-7: Start and end dates of data used in solution (YearMonthDay.Seconds)
#
#  The RL-06 background gravity model includes solid earth and ocean tides, solid
#  earth and ocean pole tides, and the Atmosphere-Ocean De-aliasing (AOD1B) product.
#  However, the monthly mean of the AOD model has been restored; subtract Column 5 to remove it.
#
#  SLR estimates always use the full set of days in each calendar month.
#
 2002.0411  -4.8416938140E-04  0.7592  0.3274  0.4373   20020101.0000   20020201.0000
 2002.1259  -4.8416947550E-04 -0.1818  0.2493 -0.4052   20020201.0000   20020301.0000
 2002.2026  -4.8416938814E-04  0.6918  0.2390  0.4156   20020301.0000   20020401.0000
 2002.2875  -4.8416933871E-04  1.1861  0.3813  0.2722   20020401.0000   20020501.0000
 2002.3696  -4.8416928572E-04  1.7160  0.3578  0.7870   20020501.0000   20020601.0000
 2002.4545  -4.8416942769E-04  0.2963  0.2916 -0.2968   20020601.0000   20020701.0000
 2002.5366  -4.8416957006E-04 -1.1274  0.2970 -0.7891   20020701.0000   20020801.0000
 2002.6215  -4.8416960476E-04 -1.4744  0.2415 -1.0505   20020801.0000   20020901.0000
 2002.7064  -4.8416955128E-04 -0.9396  0.2523 -0.4253   20020901.0000   20021001.0000
 2002.7885  -4.8416940837E-04  0.4895  0.2570  0.7455   20021001.0000   20021101.0000
 2002.8734  -4.8416944207E-04  0.1525  0.2662  0.2131   20021101.0000   20021201.0000
 2002.9555  -4.8416938801E-04  0.6931  0.3574  0.5263   20021201.0000   20030101.0000
 2003.0404  -4.8416935632E-04  1.0100  0.2492  0.5262   20030101.0000   20030201.0000
 2003.1253  -4.8416933642E-04  1.2090  0.2282  0.9923   20030201.0000   20030301.0000
 2003.2019  -4.8416933840E-04  1.1892  0.1952  0.5209   20030301.0000   20030401.0000
 2003.2868  -4.8416940808E-04  0.4924  0.2848  0.0479   20030401.0000   20030501.0000
 2003.3689  -4.8416942652E-04  0.3080  0.2482 -0.1482   20030501.0000   20030601.0000
 2003.4538  -4.8416938034E-04  0.7698  0.3049  0.4879   20030601.0000   20030701.0000
 2003.5359  -4.8416959048E-04 -1.3316  0.2983 -0.6671   20030701.0000   20030801.0000
 2003.6208  -4.8416961757E-04 -1.6025  0.1956 -0.7407   20030801.0000   20030901.0000
 2003.7057  -4.8416955555E-04 -0.9823  0.1950 -0.4138   20030901.0000   20031001.0000
 2003.7878  -4.8416956354E-04 -1.0622  0.3095 -0.3707   20031001.0000   20031101.0000
 2003.8727  -4.8416943444E-04  0.2288  0.3419  0.5495   20031101.0000   20031201.0000
 2003.9548  -4.8416937743E-04  0.7989  0.2719  0.5550   20031201.0000   20040101.0000
 2004.0397  -4.8416935698E-04  1.0034  0.2307  0.7843   20040101.0000   20040201.0000
 2004.1246  -4.8416935175E-04  1.0557  0.2890  0.9727   20040201.0000   20040301.0000
 2004.2040  -4.8416941763E-04  0.3969  0.2697  0.1633   20040301.0000   20040401.0000
```

Şekil 3.2 SLR tarafından yayınlanan C20 katsayıları (Erişim tarihi 10.06.2023)

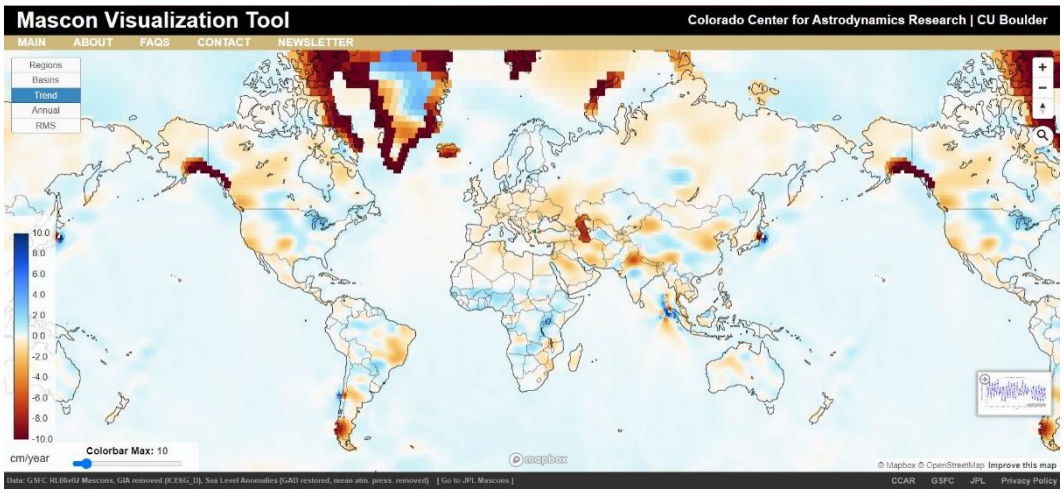
kfilter_DDK2_GSM-2_2002095-2002120_GRAC_UTCSR_BA01_0600.gfc

```
end_of_head ============================================================
gfc     0    0  1.000000000000E+00  0.000000000000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
gfc     1    0  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
gfc     1    1  0.000000000000E+00  0.000000000000E+00  0.0000E+00  0.0000E+00
gfc     2    0 -4.841693350629E-04 0.000000000000E+00  5.8800E-13  0.0000E+00
gfc     2    1 -2.477033023606E-10  1.411764118197E-09  7.4770E-13  7.8500E-13
gfc     2    2  2.439308012131E-06 -1.400307965443E-06  1.1290E-12  1.0370E-12
gfc     3    0  9.572911854210E-07  0.000000000000E+00  4.5880E-13  0.0000E+00
gfc     3    1  2.030437680702E-06  2.482335500861E-07  5.7880E-13  5.6210E-13
gfc     3    2  9.048080813641E-07 -6.189323376184E-07  8.9290E-13  8.4150E-13
gfc     3    3  7.212299891967E-07  1.414423113246E-06  9.9960E-13  8.8820E-13
gfc     4    0  5.400145589354E-07  0.000000000000E+00  4.6800E-13  0.0000E+00
gfc     4    1 -5.361110799053E-07 -4.735393321487E-07  5.0750E-13  5.0390E-13
gfc     4    2  3.504792225027E-07  6.625354096683E-07  6.9540E-13  6.5490E-13
gfc     4    3  9.908748523803E-07 -2.009576700703E-07  1.1220E-12  1.0020E-12
gfc     4    4 -1.885801907305E-07  3.089046337443E-07  1.1100E-12  1.1390E-12
gfc     5    0  6.858424507568E-08  0.000000000000E+00  4.0490E-13  0.0000E+00
gfc     5    1 -6.290378956072E-08 -9.435256266721E-08  4.4170E-13  4.3240E-13
gfc     5    2  6.520597340636E-07 -3.233511877535E-07  5.0090E-13  4.8080E-13
gfc     5    3 -4.518277706295E-07 -2.149632997049E-07  7.5870E-13  7.0290E-13
gfc     5    4 -2.953133436440E-07  4.974003037978E-08  1.0970E-12  1.1170E-12
gfc     5    5  1.747989539890E-07 -6.693335772344E-07  1.0910E-12  1.1310E-12
gfc     6    0 -1.500076942926E-07  0.000000000000E+00  3.8070E-13  0.0000E+00
gfc     6    1 -7.594875169091E-08  2.652761602684E-08  4.0060E-13  3.9060E-13
gfc     6    2  4.862046358216E-08 -3.737940468863E-07  4.6870E-13  4.5820E-13
gfc     6    3  5.723168427578E-08  8.952571277609E-09  5.8120E-13  5.5780E-13
gfc     6    4 -8.601549428854E-08 -4.714525818578E-07  7.6130E-13  7.6600E-13
gfc     6    5 -2.671700983048E-07 -5.365190283976E-07  1.1840E-12  1.1980E-12
gfc     6    6  9.486072746637E-09 -2.373767032608E-07  8.7420E-13  8.5900E-13
gfc     7    0  9.053352800211E-08  0.000000000000E+00  3.5350E-13  0.0000E+00
gfc     7    1  2.808992443250E-07  9.512245559579E-08  3.7890E-13  3.6030E-13
gfc     7    2  3.304124720139E-07  9.300161607075E-08  4.0180E-13  3.9080E-13
gfc     7    3  2.504504686841E-07 -2.171503755610E-07  5.3220E-13  5.1260E-13
gfc     7    4 -2.750054812473E-07 -1.240309326521E-07  5.5530E-13  5.6870E-13
gfc     7    5  1.660599349749E-09  1.792274082037E-08  7.9620E-13  8.2400E-13
gfc     7    6 -3.588096646866E-07  1.517795855024E-07  1.3050E-12  1.2750E-12
gfc     7    7  1.522358693280E-09  2.409904026874E-08  1.1090E-12  1.1100E-12
gfc     8    0  4.946651353954E-08  0.000000000000E+00  3.3930E-13  0.0000E+00
gfc     8    1  2.320302437960E-08  5.887970520842E-08  3.5810E-13  3.3990E-13
gfc     8    2  8.003527545143E-08  6.527103572343E-08  3.9280E-13  3.7980E-13
gfc     8    3 -1.937310958895E-08 -8.600725431520E-08  4.5290E-13  4.4180E-13
gfc     8    4 -2.443665640456E-07  6.981301167413E-08  5.3590E-13  5.5000E-13
gfc     8    5 -2.569925473007E-08  8.922882385864E-08  6.2090E-13  6.3230E-13
```

Şekil 3.3 DDK 2 harmonik katsayılar verisi

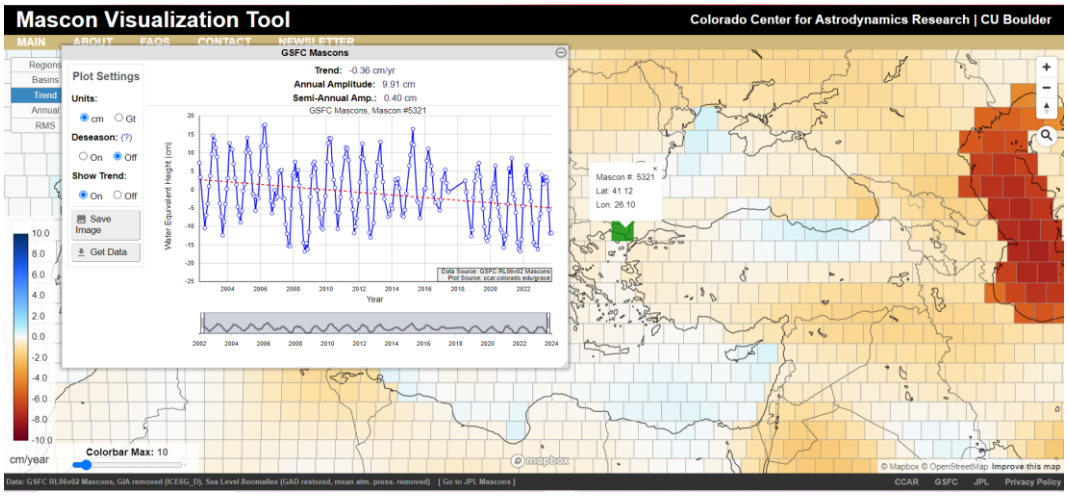
3.3. Mascon Verisi

Masconlar (mass concentrations), GRACE uyduları arasındaki gözlemlerden elde edilen gravite alanı temel fonksiyonlarından biridir. Masconlar, tek tek ele alındığında kendi kapladıkları yüzey alanının gravite sinyalini belirtirken, tüm masconlar beraber düşünüldüğünde yer yuvarının gravite alanını ifade etmektedir. Masconlar hücrelerindeki iç dış harekette bulunan su miktarına bağlı olarak ortaya çıkan çekim kuvvetindeki yerel değişiklikleri sunmaktadır. GRACE/GRACE-FO gözlemlerinin ilk on yılında standart olan küresel harmonik yaklaşım yerine masconların kullanımı birkaç önemli avantaj sunmaktadır. Masconlar sayesinde birtakım jeofiziksel şartlar çok daha kolay uygulanabilmektedir. Bu şartlar, küresel harmoniklerden türetilen kara ve okyanus ızgaralarına uygulanan ampirik işlem sonrası filtrelemeden çok daha titiz bir yaklaşım olan Seviye-2 işleme adımında GRACE/GRACE-FO gözlemlerinden gelen gürültüyü filtrelemeye yardımcı olur.

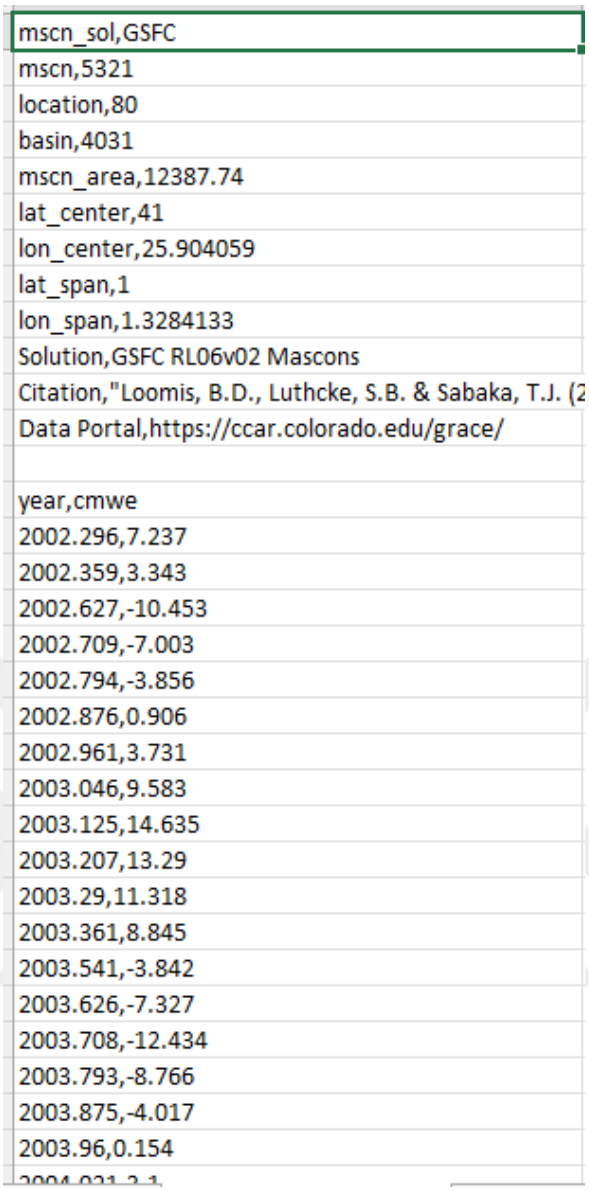


Şekil 3.4 Mascon hücre çözümleri görselleştirimi [65]

41168 adet Mascon hücresi için çözümler, web sitesindeki 'Trend' sekmesinde ayrı ayrı elde edilebilmektedir. Şekil 3.4'teki interaktif harita, ilgili 1x1 derecelik Mascon hücrelerini göstermektedir. Belirli bir hücre seçilerek, o hücrenin EWT değerlerinin zaman serisi grafiği görselleştirilebilir. Açılan panelden hücredeki EWT verisi indirilebilir.



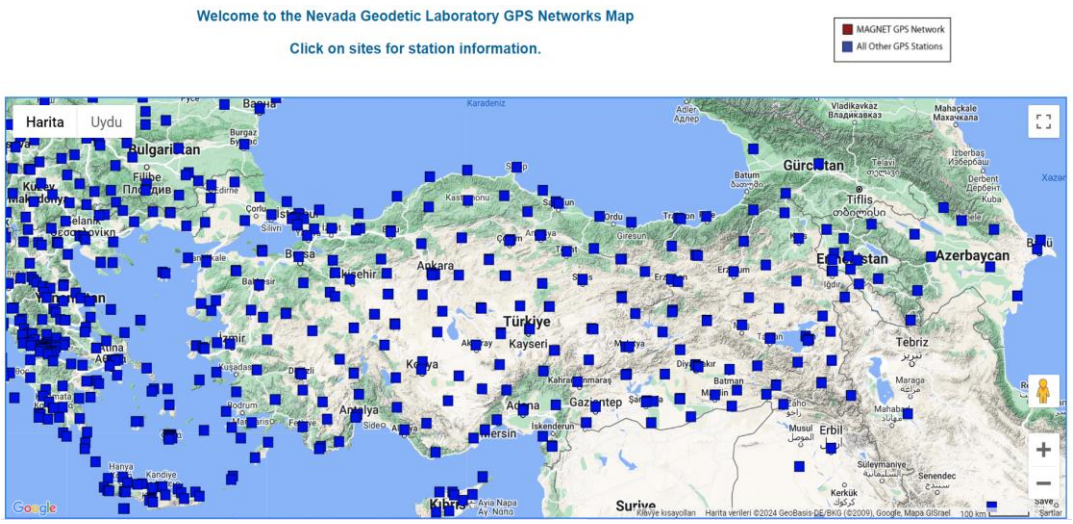
Şekil 3.5 GSFC örnek mascon hücresi EWT gösterimi



Şekil 3.6 GSFC Mascon örnek veri dosyası

3.4. GPS Verisi

Bu çalışmada, Türkiye'deki bazı GPS istasyonlarından elde edilen düşey yer değiştirmeler ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda, NEVADA Jeodezi Laboratuvarı'ndan temin edilen .tnv3 formatındaki GPS verileri kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Nevada GPS istasyonları interaktif haritası [65]

ADAN.tnv3 - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

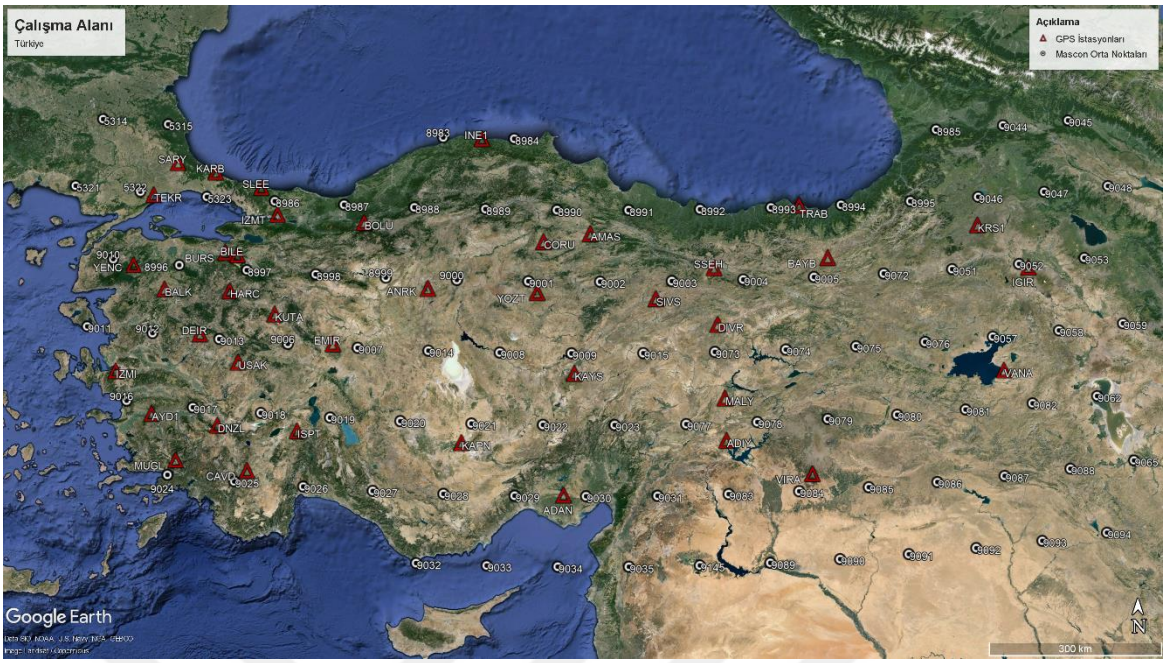
site	YYMMMDD	yyyy.yyyy	__MJD	week	d	reflon	_e0(m)	__east(m)	____n0(m)	_north(m)	u0(m)	____up(m)	_ant(m)	sig_e(m)	sig_n(m)	sig_u(m)	__corr_en	__corr_eu
ADAN	09JAN16	2009.0431	54847	1514	5	35.3	3890	0.874436	4096899	0.386809	60	0.523384	0.0870	0.000688	0.000812	0.002956	-0.086032	0.159747
ADAN	09JAN17	2009.0459	54848	1514	6	35.3	3890	0.872542	4096899	0.386417	60	0.521036	0.0870	0.000710	0.000839	0.002946	-0.083051	0.130175
ADAN	09JAN18	2009.0486	54849	1515	0	35.3	3890	0.873806	4096899	0.386760	60	0.526252	0.0870	0.001181	0.001270	0.004610	0.033096	0.170981
ADAN	09JAN19	2009.0513	54850	1515	1	35.3	3890	0.873389	4096899	0.387532	60	0.521842	0.0870	0.001142	0.001276	0.004586	-0.045371	0.126870
ADAN	09JAN21	2009.0568	54852	1515	3	35.3	3890	0.877040	4096899	0.389002	60	0.523311	0.0870	0.001083	0.001191	0.004239	0.030183	0.144365
ADAN	09JAN22	2009.0595	54853	1515	4	35.3	3890	0.876204	4096899	0.389151	60	0.527445	0.0870	0.000677	0.000793	0.002783	-0.063555	0.123880
ADAN	09JAN23	2009.0623	54854	1515	5	35.3	3890	0.875427	4096899	0.385876	60	0.530001	0.0870	0.000677	0.000796	0.002857	-0.070702	0.157358
ADAN	09JAN24	2009.0650	54855	1515	6	35.3	3890	0.873825	4096899	0.386253	60	0.536062	0.0870	0.000666	0.000794	0.002762	-0.067859	0.130027
ADAN	09JAN25	2009.0678	54856	1516	0	35.3	3890	0.873065	4096899	0.386952	60	0.525160	0.0870	0.000670	0.000786	0.002756	-0.067650	0.135526
ADAN	09JAN26	2009.0705	54857	1516	1	35.3	3890	0.873400	4096899	0.386211	60	0.522141	0.0870	0.000678	0.000792	0.002810	-0.057576	0.125394
ADAN	09JAN27	2009.0732	54858	1516	2	35.3	3890	0.873894	4096899	0.388147	60	0.520576	0.0870	0.000666	0.000786	0.002742	-0.067444	0.137761
ADAN	09JAN28	2009.0760	54859	1516	3	35.3	3890	0.873989	4096899	0.386375	60	0.517318	0.0870	0.000672	0.000794	0.002773	-0.067297	0.130880
ADAN	09JAN29	2009.0787	54860	1516	4	35.3	3890	0.871636	4096899	0.385722	60	0.521499	0.0870	0.000819	0.000955	0.003413	-0.054462	0.127711
ADAN	09JAN30	2009.0815	54861	1516	5	35.3	3890	0.872516	4096899	0.388262	60	0.519938	0.0870	0.000975	0.001050	0.003731	-0.017669	0.132120
ADAN	09JAN31	2009.0842	54862	1516	6	35.3	3890	0.873340	4096899	0.387043	60	0.516947	0.0870	0.000852	0.000971	0.003464	-0.028748	0.114909
ADAN	09FEB01	2009.0869	54863	1517	0	35.3	3890	0.874536	4096899	0.386308	60	0.517493	0.0870	0.000897	0.000978	0.003503	-0.004412	0.130488
ADAN	09FEB02	2009.0897	54864	1517	1	35.3	3890	0.874483	4096899	0.388274	60	0.512344	0.0870	0.000893	0.000981	0.003551	-0.011119	0.131318
ADAN	09FEB03	2009.0924	54865	1517	2	35.3	3890	0.874778	4096899	0.389090	60	0.511952	0.0870	0.001265	0.001342	0.004819	0.079720	0.107419
ADAN	09FEB04	2009.0951	54866	1517	3	35.3	3890	0.876595	4096899	0.388572	60	0.520210	0.0870	0.001455	0.001594	0.005507	0.057500	0.148918
ADAN	09FEB05	2009.0979	54867	1517	4	35.3	3890	0.877270	4096899	0.388939	60	0.522014	0.0870	0.001800	0.001818	0.005857	0.111983	-0.008632
ADAN	09FEB06	2009.1006	54868	1517	5	35.3	3890	0.876279	4096899	0.389273	60	0.521013	0.0870	0.001386	0.001508	0.005147	0.097598	0.078874
ADAN	09FEB07	2009.1034	54869	1517	6	35.3	3890	0.876019	4096899	0.386871	60	0.522817	0.0870	0.001980	0.002232	0.007463	0.163082	0.163799
ADAN	09FEB08	2009.1061	54870	1518	0	35.3	3890	0.876459	4096899	0.386672	60	0.520315	0.0870	0.001415	0.001574	0.005480	0.043271	0.139719
ADAN	09FEB09	2009.1088	54871	1518	1	35.3	3890	0.876804	4096899	0.387273	60	0.517824	0.0870	0.001306	0.001440	0.004853	0.034083	0.072296
ADAN	09FEB10	2009.1116	54872	1518	2	35.3	3890	0.879129	4096899	0.386579	60	0.536971	0.0870	0.001773	0.001959	0.006211	0.140134	0.081098
ADAN	09FEB12	2009.1170	54874	1518	4	35.3	3890	0.876779	4096899	0.386800	60	0.523290	0.0870	0.001526	0.001653	0.005251	0.151278	0.031063
ADAN	09FEB13	2009.1198	54875	1518	5	35.3	3890	0.876861	4096899	0.386325	60	0.522541	0.0870	0.001612	0.001676	0.005309	0.174772	-0.034732
ADAN	09FEB14	2009.1225	54876	1518	6	35.3	3890	0.877363	4096899	0.388725	60	0.523530	0.0870	0.001686	0.001824	0.005621	0.190763	0.030978

Şekil 3.8 Nevada jeodezi laboratuvarından elde edilen tnv3 uzantılı veri formatı

3.5. Çalışma Alanı

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi NEVADA GPS ağında bulunan Türkiye'deki bazı noktaların verisi çalışmada işlenmiştir. Bu noktalarda düşey yer değiştirme hem GPS hem GRACE verileriyle hesaplanmıştır.

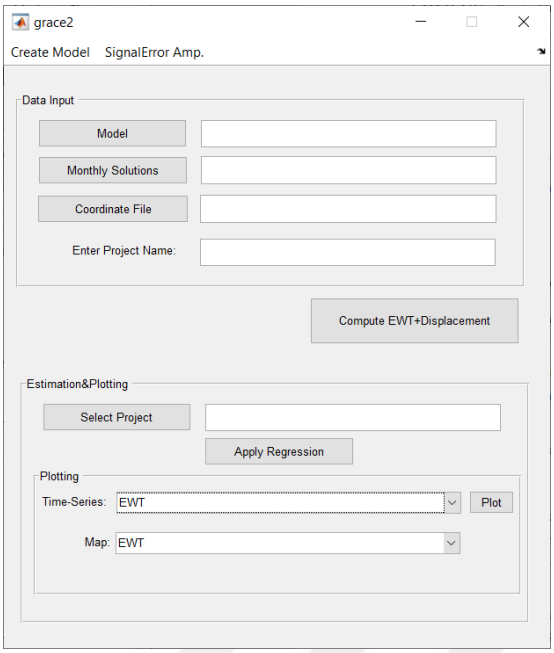
Ayrıca çalışmada EWT ve düşey yer değiştirme arasında bir bağıntı bulunacağı ve mascon EWT çözümlerine uygulanacağı için Türkiye'deki mascon orta noktaları çalışma alanına eklenmiştir.



Harita 3.1 Çalışma alanı haritası

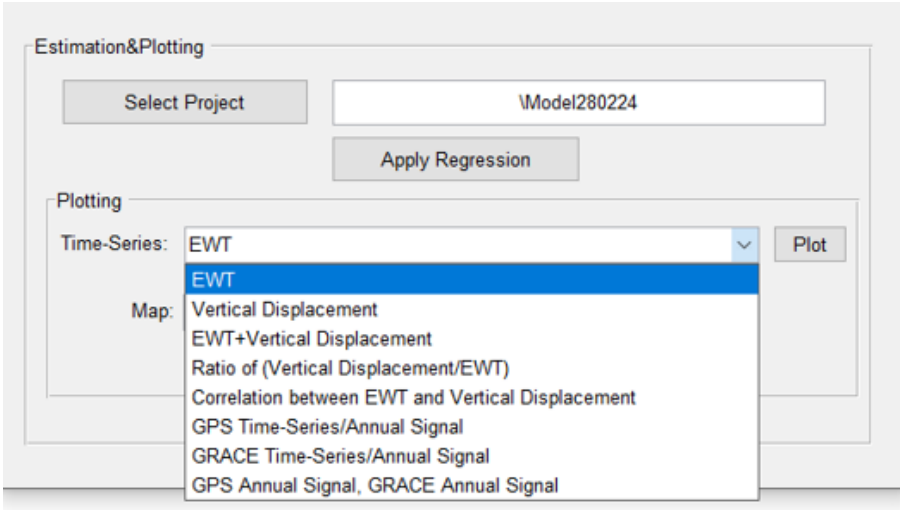
3.6. Kullanılan Yazılımın Tanıtımı

Çalışmada kullanılan yazılım, teknik birçok hesaplama içerdiğinden buna uygun olan Matrix Laboratory (MATLAB) ortamında geliştirilmiştir. MATLAB, matris tabanlı yapısı ve yerleşik grafik yetenekleri sayesinde verilerin programlanması, hesaplanması ve görselleştirilmesi için son derece etkili ve yüksek seviyeli bir programlama dili olarak öne çıkmaktadır. Özellikle mühendislik, fen bilimleri ve ekonomi gibi disiplinlerde geniş bir kullanım alanına sahip olan MATLAB, akademik dünyada büyük bir öneme sahiptir. Hem teorik hem de uygulamalı araştırmalarda kullanılan bu dil, karmaşık hesaplamaların ve analizlerin hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. MATLAB kullanıcılarına grafik kullanıcı arayüzü (GUI) sağladığından, bir kullanıcı arayüzü oluşturulmasında pratiklik sağlamıştır. Şekil 3.9'da kullanılan yazılımın arayüzü gösterilmiştir. Matlab komut satırına grace2 yazıldığında ilgili arayüz açılır ve hesaplamalar kolaylıkla yapılabilir.



Şekil 3.9 Grace2 yazılımı arayüzü

Uygulamalar için öncelikle "Create Model" seçilerek bir GRACE model dosyası oluşturulur. Daha sonra bu model dosyası, aylık küresel harmonik katsayıların bulunduğu klasör ve çalışmada kullanılacak istasyon koordinatlarının bulunduğu .txt dosyası seçilerek ilgili projeye bir isim verilir. Daha sonra "Compute EWT+Displacement" seçilerek ilgili noktalara ilişkin hesaplama sonuçlarının yer aldığı bir proje klasörü oluşur. Bu proje seçilerek regresyon uygulanır ve istenen grafikler seçilerek çizdirilebilir. Bu yazılımda EWT, düşey yer değiştirme, regresyon gibi tüm adımların grafiklerine ve hesaplamalarına ulaşılmaktadır.



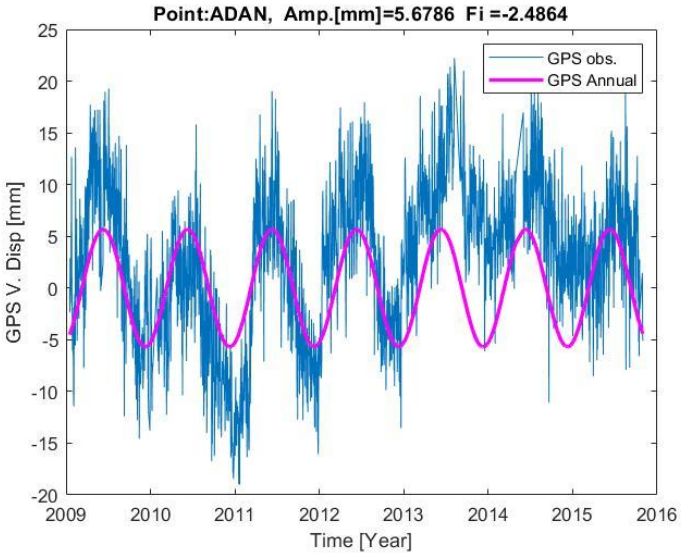
Şekil 3.10 Yazılımla hesaplanabilen analizler

3.7. Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

Çalışmada Türkiye geneline dağılmış 40 adet sabit GPS istasyonlarının verileri NEVADA GPS laboratuvarından elde edilerek, düşey zaman serilerine ulaşılmıştır. GRACE harmonik modellerinden elde edilen bir jeopotansiyel değişim olan su kaynaklı düşey yer değiştirmeler Eşitlik 2.7 ye göre hesaplanarak zaman serileri de elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm GPS istasyonları için düşey zaman serileri hem GPS hem GRACE verileri kullanılarak hesaplanmış ve grafiğe dökülmüştür. GRACE zaman serilerinden elde edilen yıllık değişim sinyali genliği ile GPS'den elde edilen yıllık değişim sinyali genliği birbirine benzer bulunmuştur. Ele alınan istasyonlardan 15'inin sonuç grafikleri aşağıda verilmektedir; diğer istasyon sonuçları ise Ek-A'da paylaşılmaktadır.

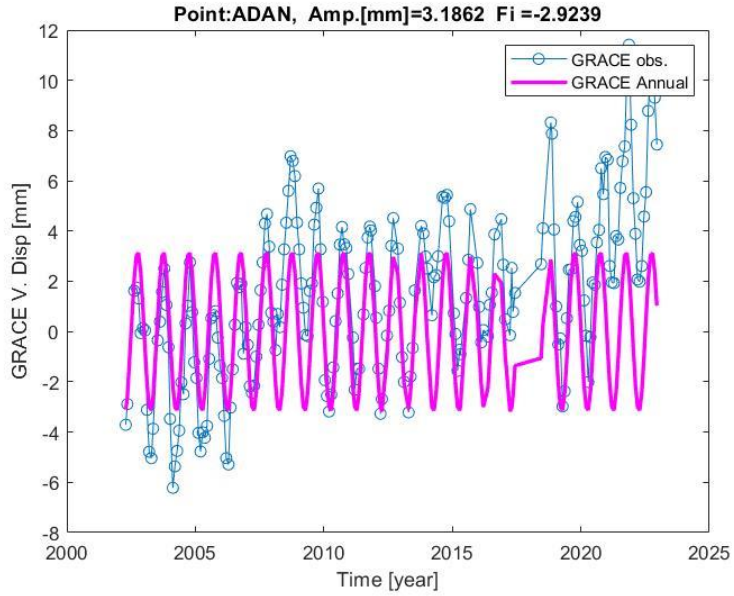
3.7.1. ADAN İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

ADAN noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 5.6786 mm, faz açısı -2.4864 rad bulunmuştur Şekil 3.11'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



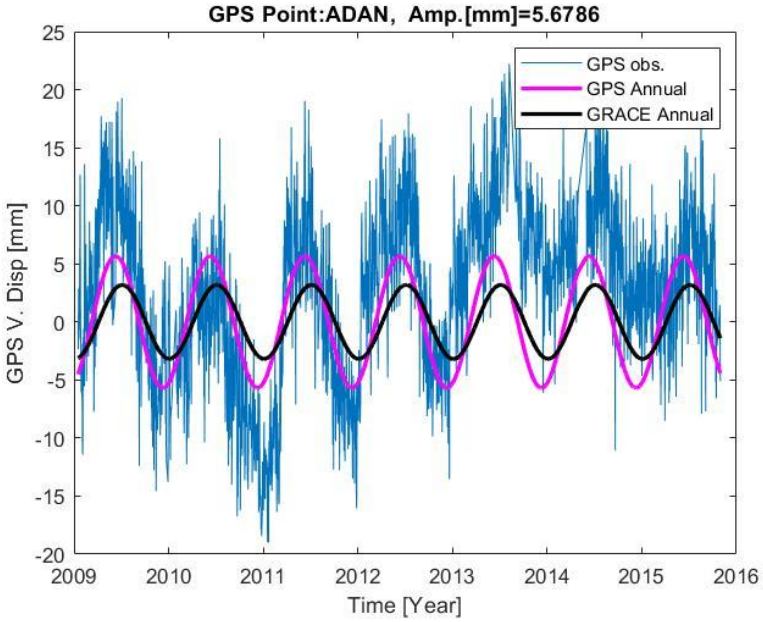
Şekil 3.11 ADAN noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.1862 mm ve faz açısı -2.9239 rad bulunmuştur. Şekil 3.12'deki mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

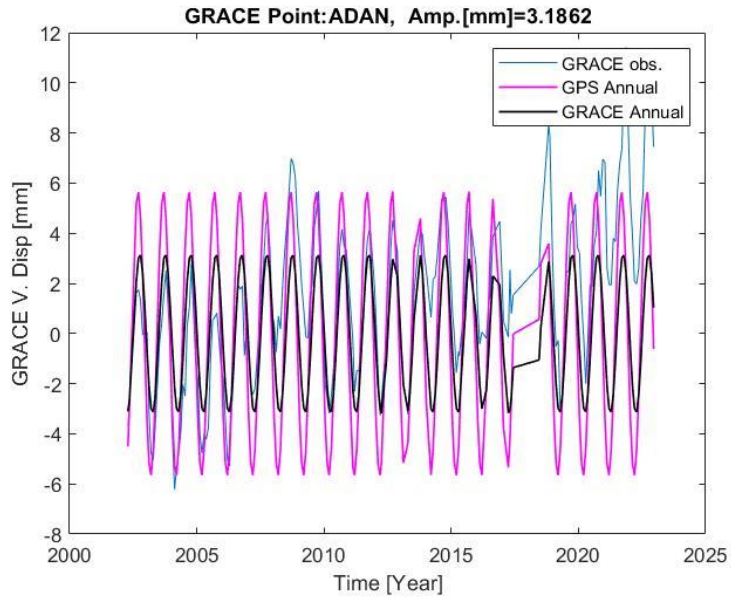


Şekil 3.12 ADAN noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

ADAN Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı -0.822 aydır; bir başka deyişle, GPS yıllık sinyali yaklaşık olarak 25 gün gecikmelidir.



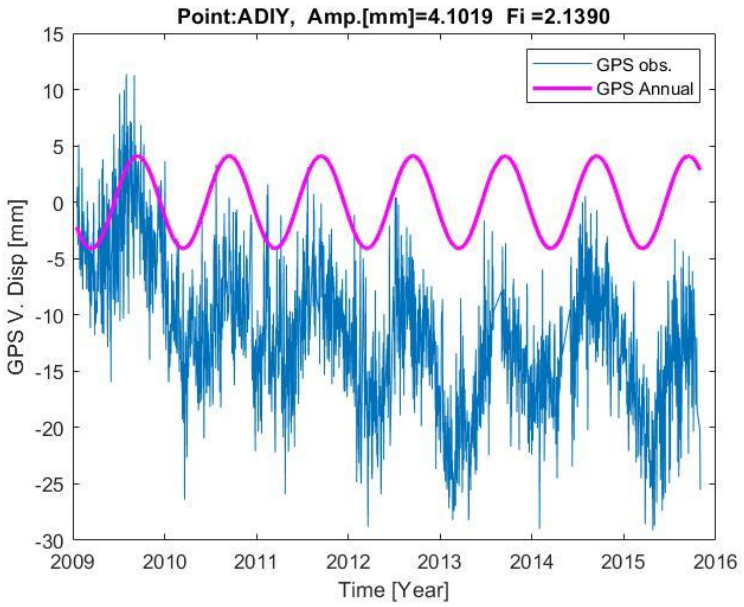
Şekil 3.13 ADAN noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.14 ADAN noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

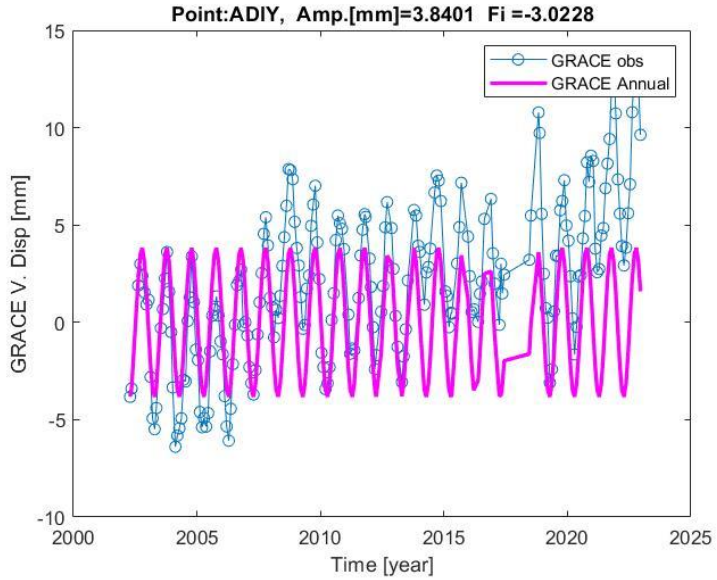
3.7.2. ADIY İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

ADIY noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.1019 mm, faz açısı 2.1390 rad bulunmuştur. Şekil 3.15'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



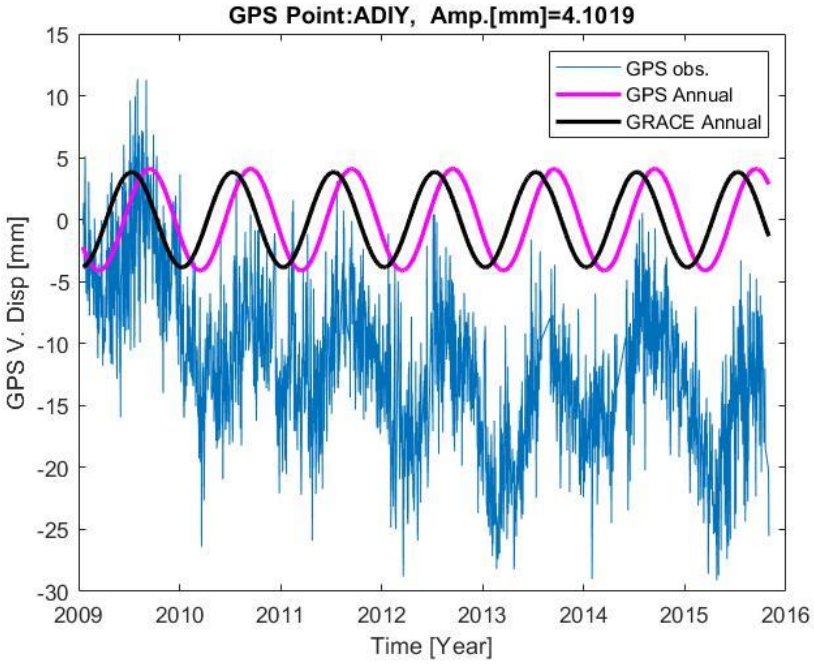
Şekil 3.15 ADIY noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.8401 ve faz açısı -3.0228 rad bulunmuştur. Şekil 3.16'da mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

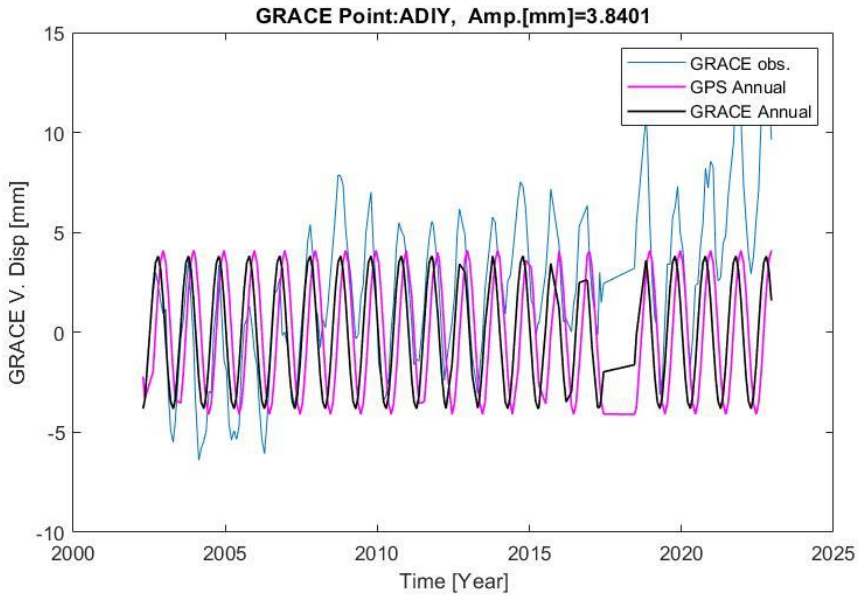


Şekil 3.16 ADIY noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

ADIY Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.136 ay çıkmıştır. Bir başka deyişle, GPS yıllık sinyali yaklaşık olarak 2 ay gecikmelidir.



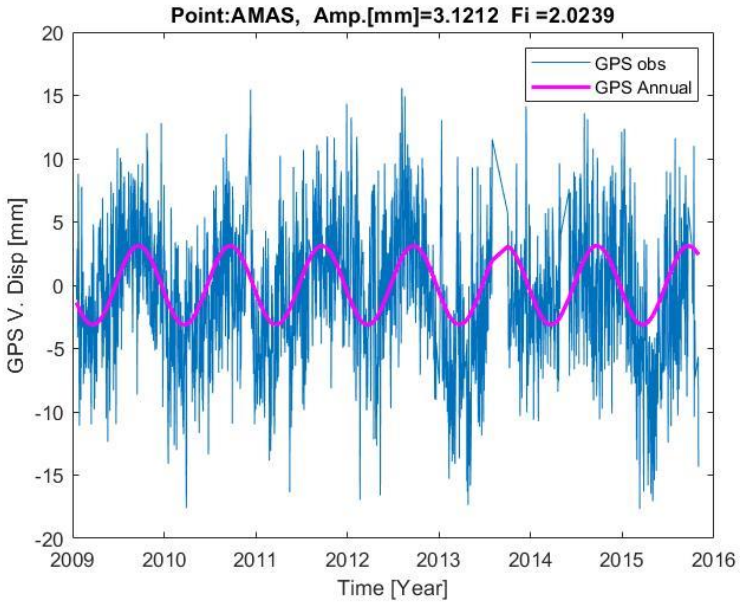
Şekil 3.17 ADIY noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.18 ADIY noktası GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

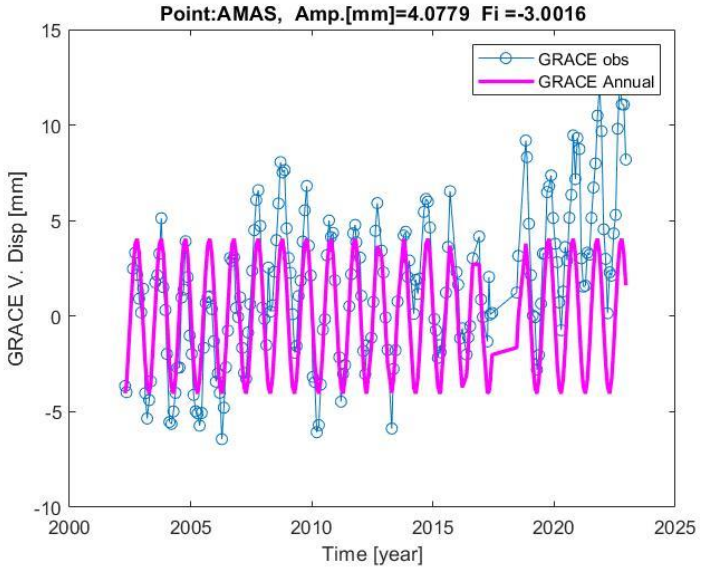
3.7.3. AMAS İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

AMAS noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.1212 mm, faz açısı 2.0239 rad bulunmuştur. Şekil 3.19'daki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



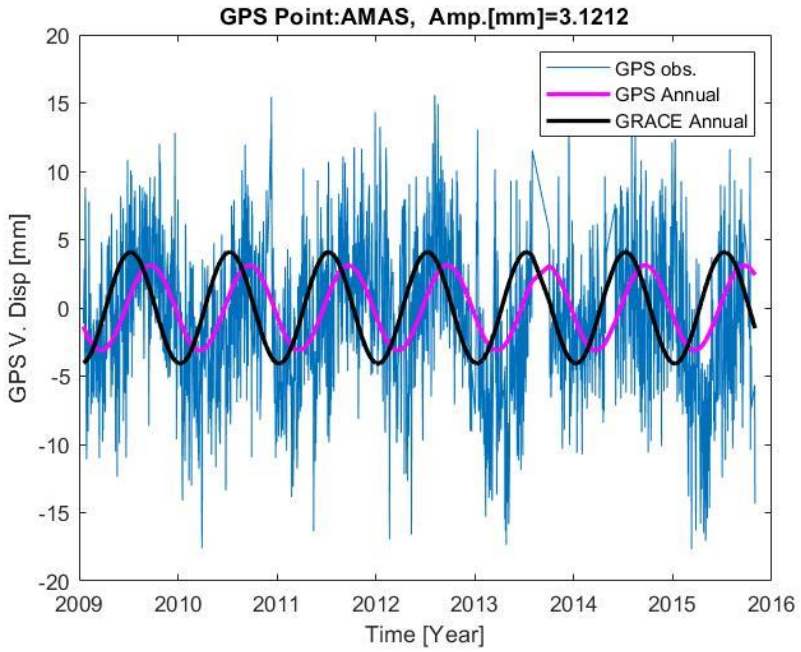
Şekil 3.19 AMAS noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.0779 ve faz açısı -3.0016 rad bulunmuştur. Şekil 3.20'de mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

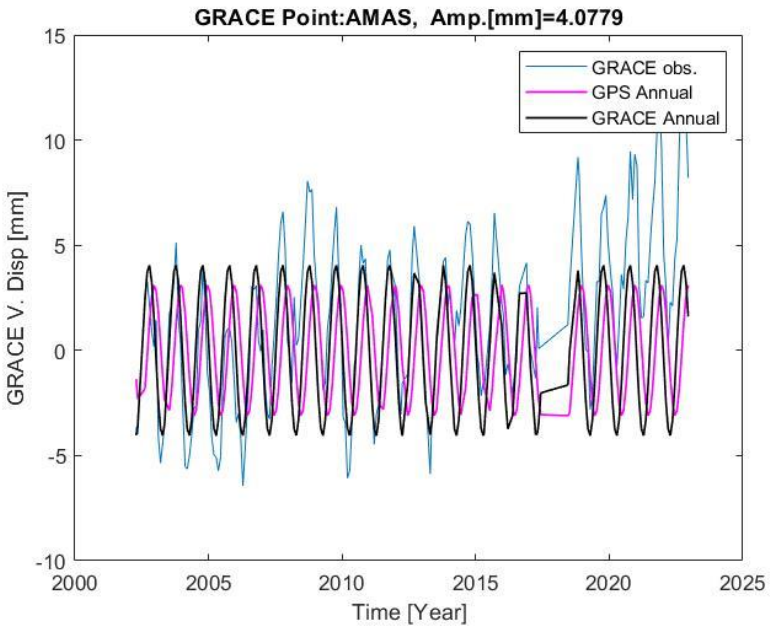


Şekil 3.20 AMAS noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

AMAS Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.3976 ay çıkmıştır.



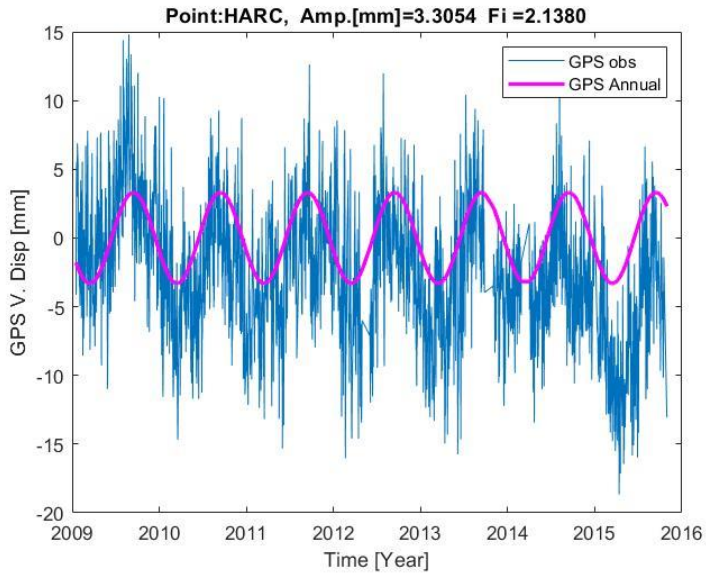
Şekil 3.21 AMAS noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.22 AMAS noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

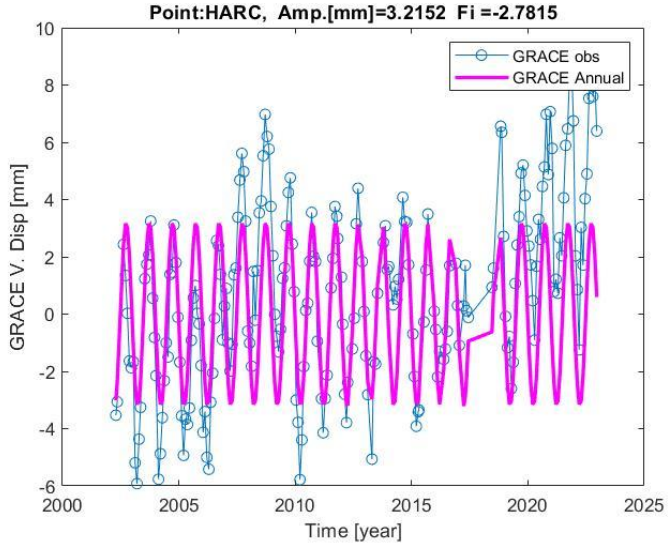
3.7.4. HARC İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

HARC noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.3054 mm, faz açısı 2.1380 rad bulunmuştur. Şekil 3.23'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



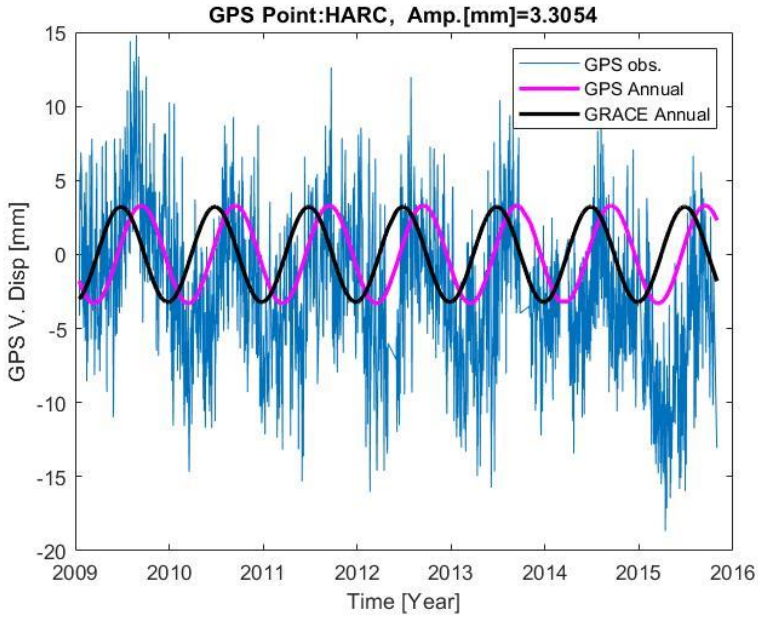
Şekil 3.23 HARC noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.2152 ve faz açısı -2.7815 rad bulunmuştur. Şekil 3.24'te mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

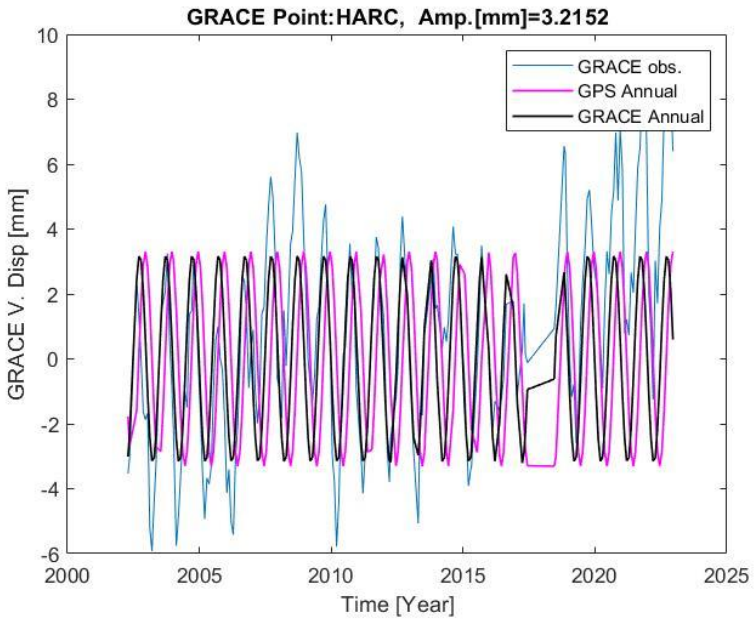


Şekil 3.24 HARC noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

HARC Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.5956 ay çıkmıştır.



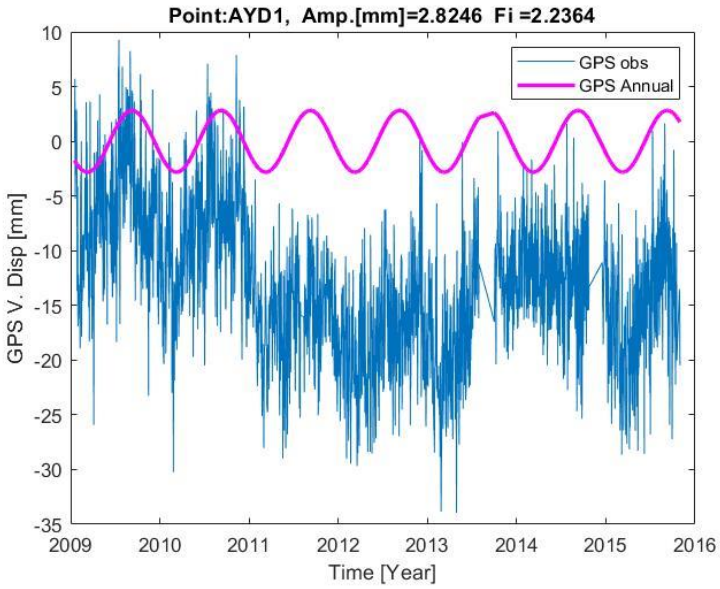
Şekil 3.25 HARC noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS Sinyali)



Şekil 3.26 HARC noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

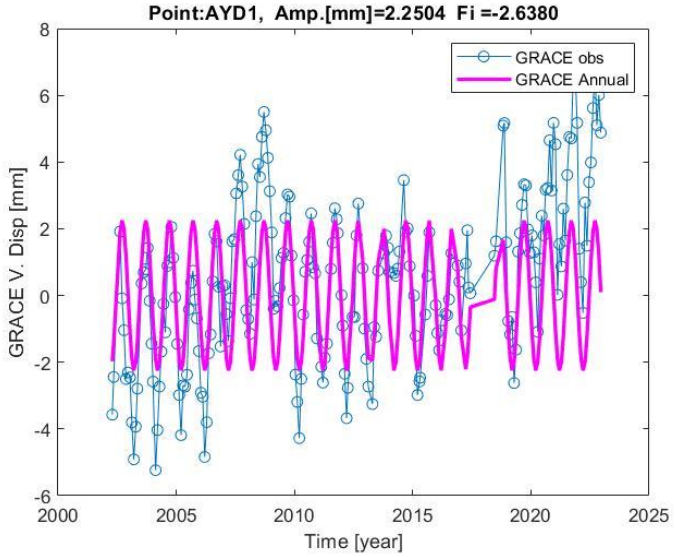
3.7.5. AYD1 İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

AYD1 noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.8246 mm, faz açısı 2.2364 rad bulunmuştur. Şekil 3.27'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



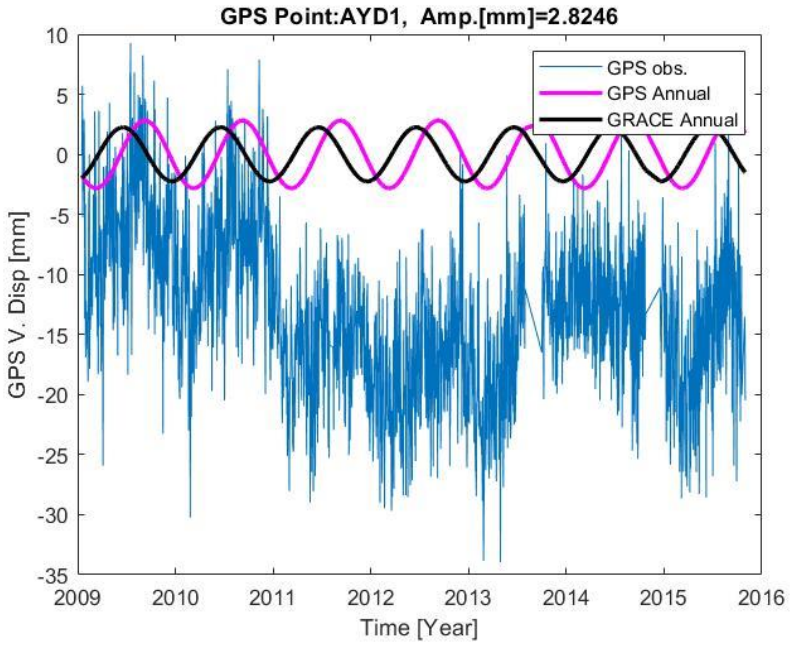
Şekil 3.27 AYD1 noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.2504 ve faz açısı -2.638 rad bulunmuştur. Şekil 3.28'de mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

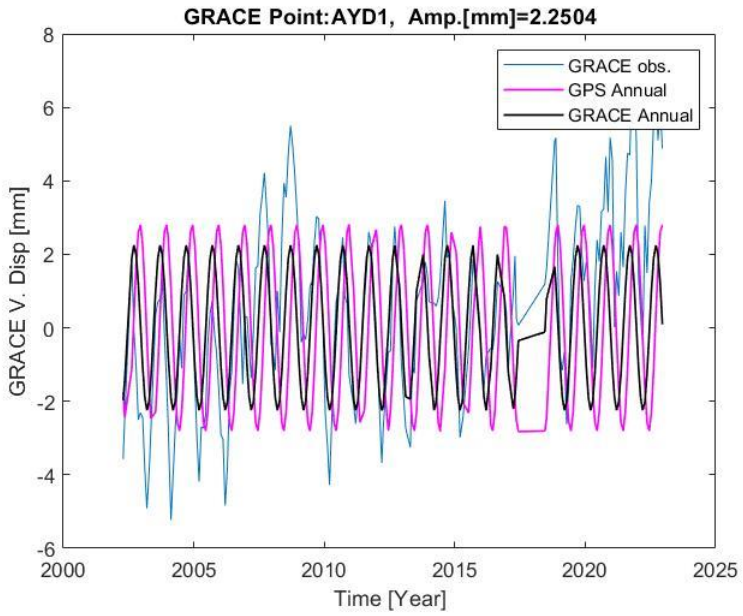


Şekil 3.28 AYD1 noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

AYD1 Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.694 ay çıkmıştır.



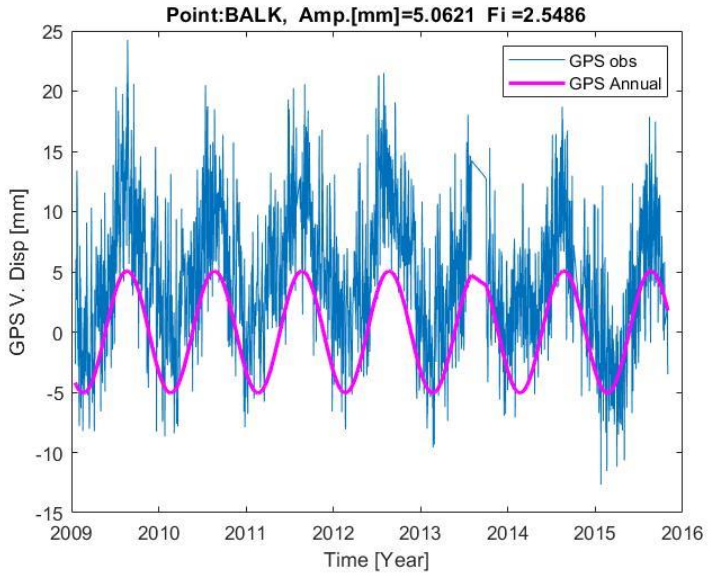
Şekil 3.29 AYD1 noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.30 AYD1 noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

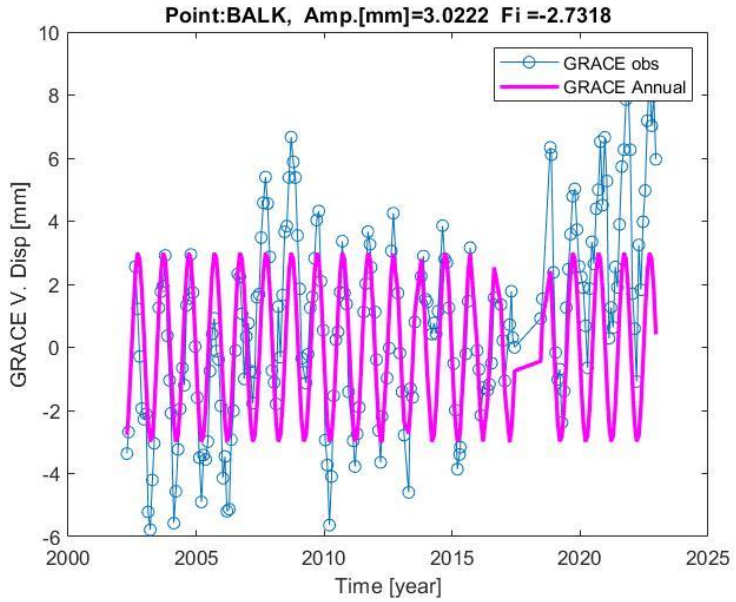
3.7.6. BALK İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

BALK noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 5.0621 mm, faz açısı 2.5486 rad bulunmuştur. Şekil 3.31'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



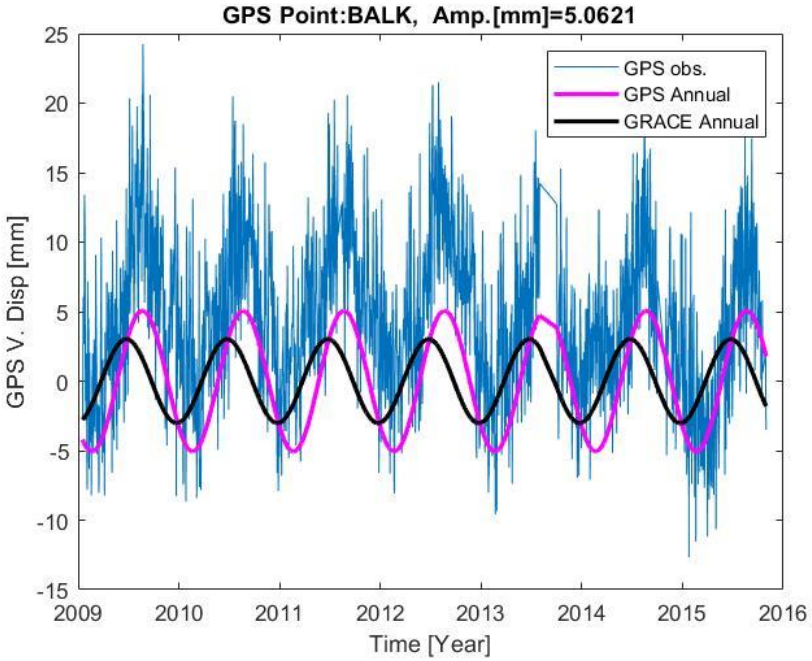
Şekil 3.31 BALK noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.0222 ve faz açısı -2.7318 rad bulunmuştur. Şekil 3.32'de mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

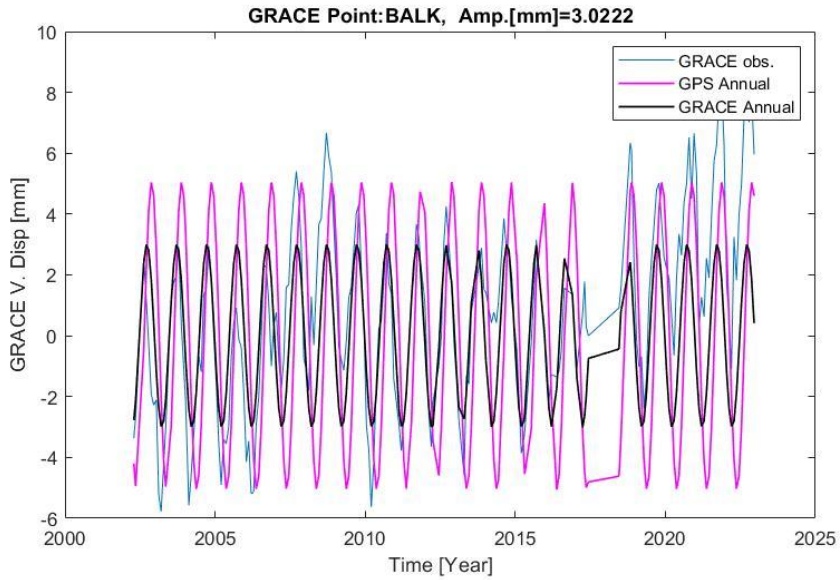


Şekil 3.32 BALK noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

BALK Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 1.938 ay çıkmıştır.



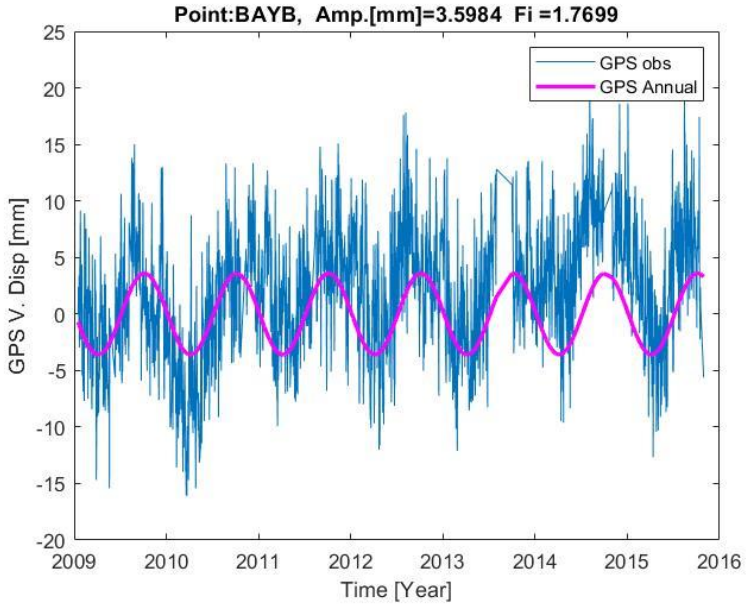
Şekil 3.33 BALK noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.34 BALK noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

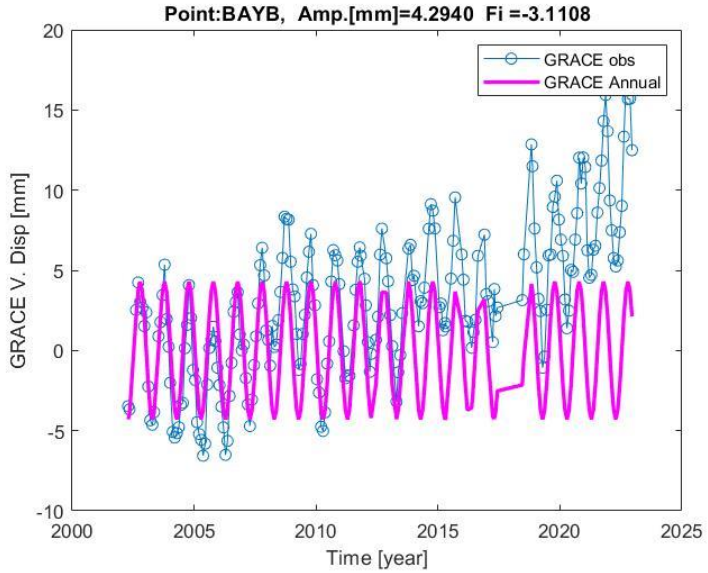
3.7.7. BAYB İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

BAYB noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.5984 mm, faz açısı 1.7699 rad bulunmuştur. Şekil 3.35'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



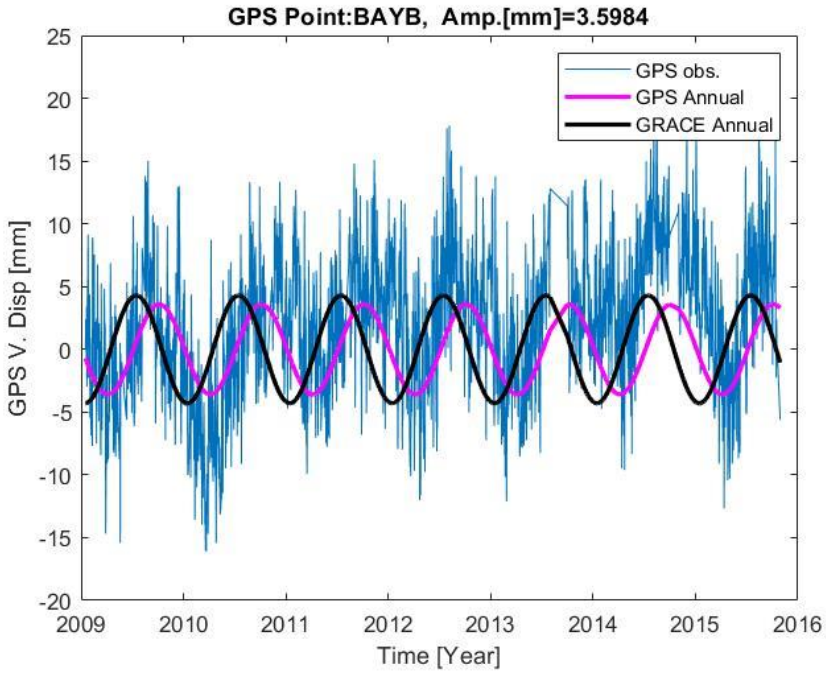
Şekil 3.35 BAYB noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.2940 ve faz açısı -3.1108 rad bulunmuştur. Şekil 3.36'da mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

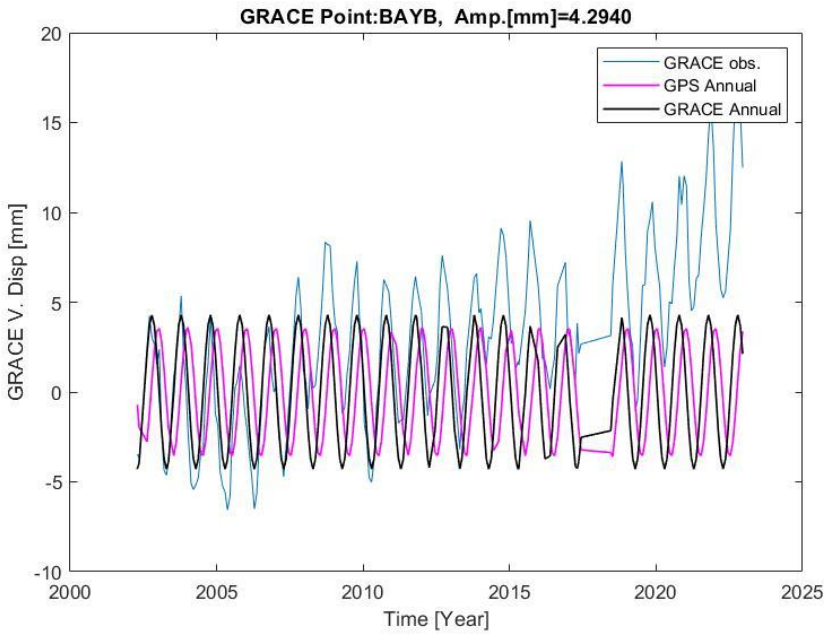


Şekil 3.36 BAYB noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

BAYB Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.694 ay çıkmıştır.



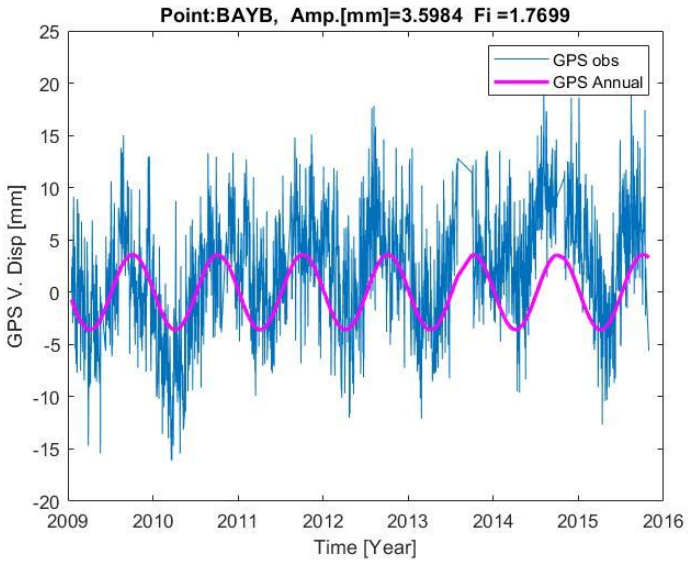
Şekil 3.37 BAYB noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.38 BAYB noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

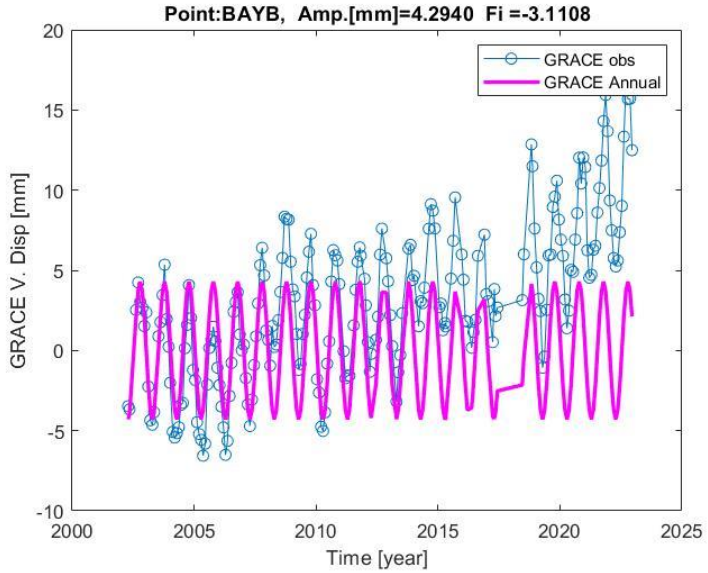
3.7.8. IGIR İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

IGIR noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.1831 mm, faz açısı 1.3822 rad bulunmuştur. Şekil 3.39'daki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



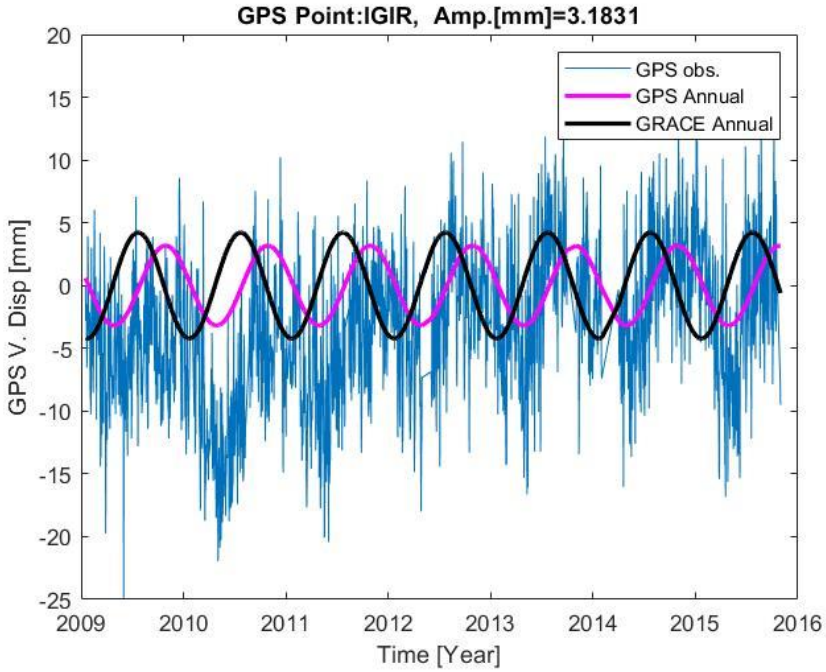
Şekil 3.39 IGIR noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.2196 ve faz açısı 3.0552 rad bulunmuştur. Şekil 3.40'ta mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

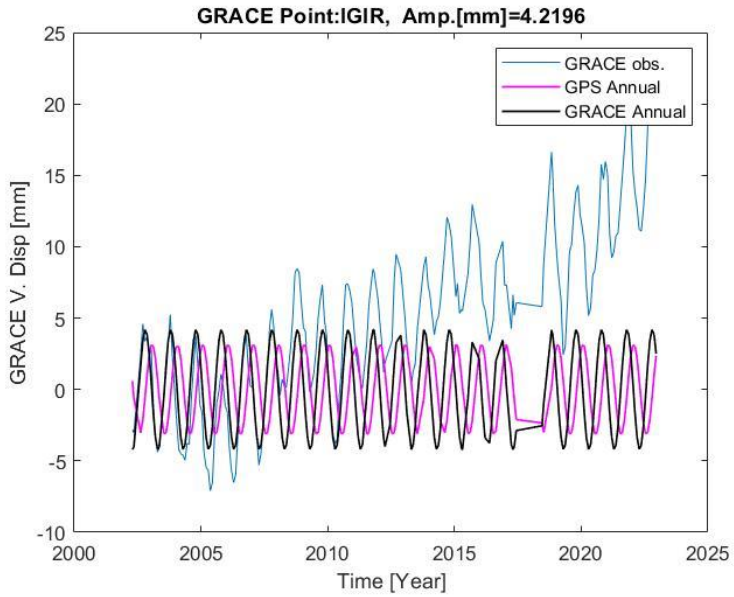


Şekil 3.40 IGIR noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

IGIR Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 3.186 aydır; bir başka deyişle, GPS yıllık sinyali yaklaşık olarak 3 ay gecikmelidir.



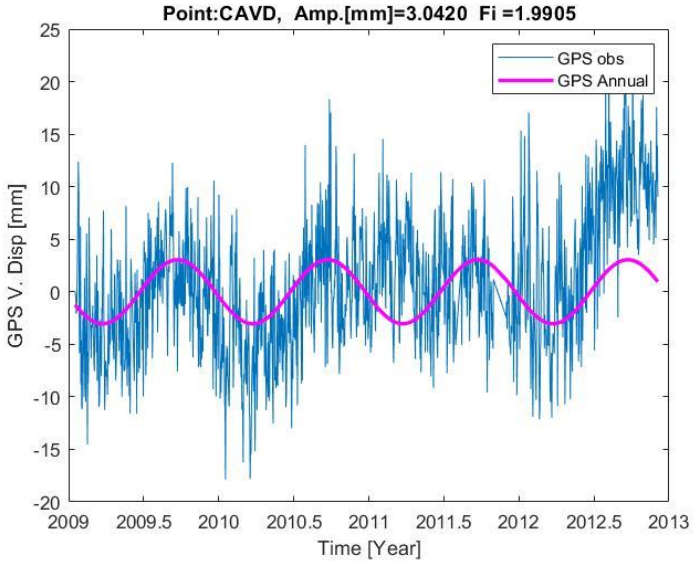
Şekil 3.41 IGIR noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.42 IGIR noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

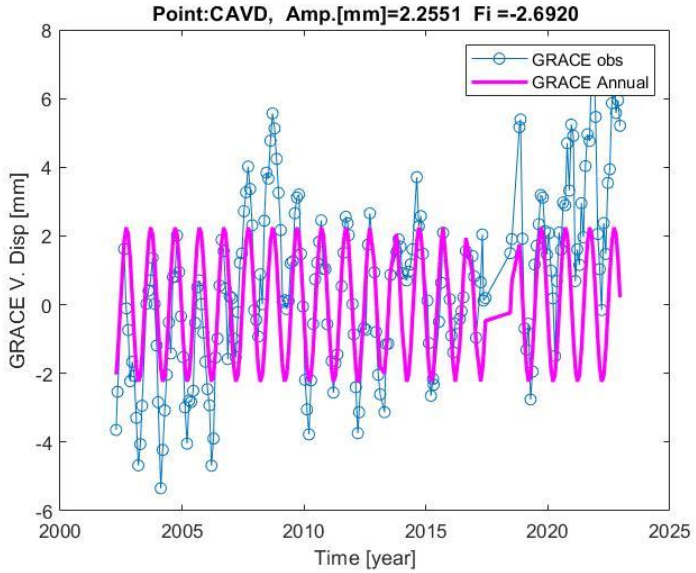
3.7.9. CAVD İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

CAVD noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.0420 mm, faz açısı 1.9905 rad bulunmuştur. Şekil 3.43'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



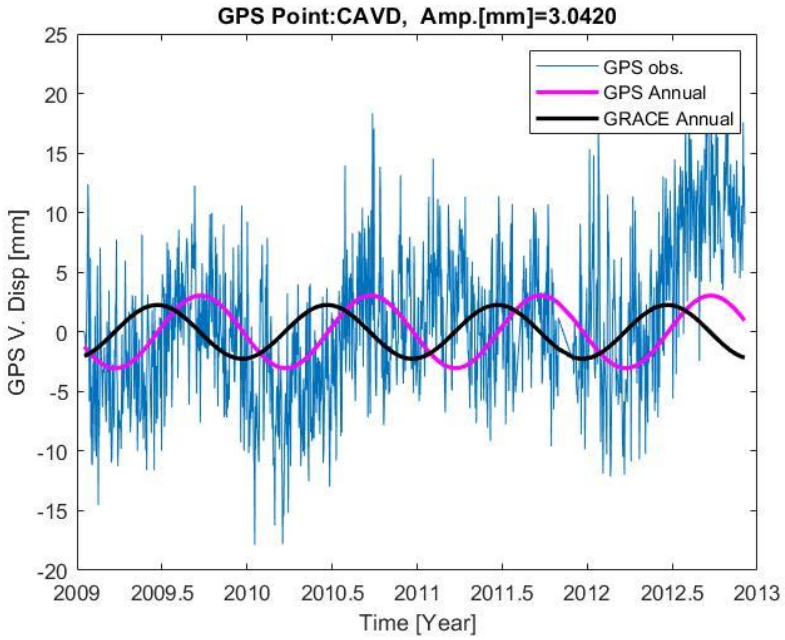
Şekil 3.43 CAVD noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.2551 ve faz açısı -2.6920 rad bulunmuştur. Şekil 3.44'te mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

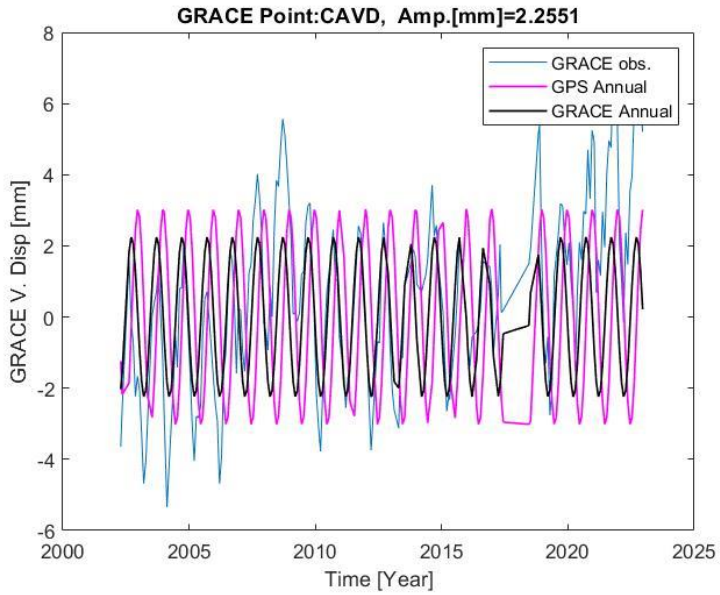


Şekil 3.44 CAVD noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

CAVD Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 3.0552 aydır; bir başka deyişle, GPS yıllık sinyali yaklaşık olarak 3 ay gecikmelidir.



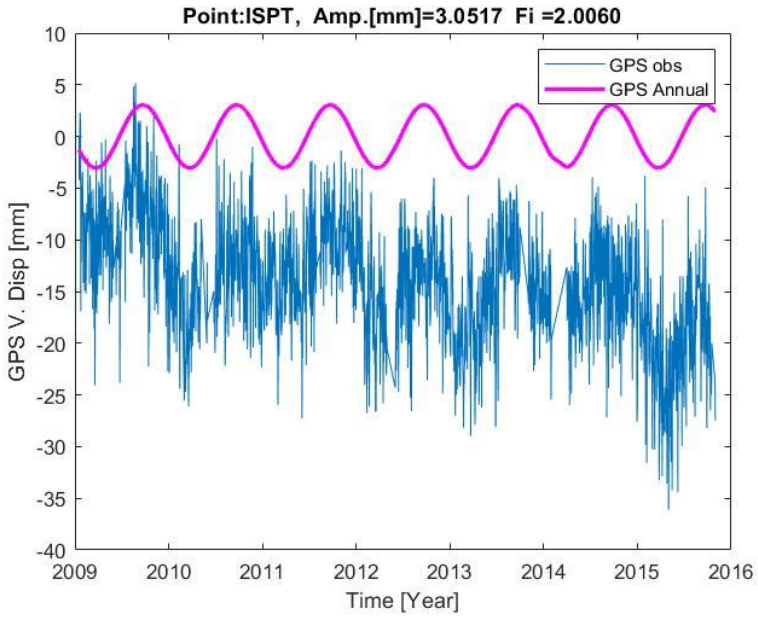
Şekil 3.45 CAVD noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.46 CAVD noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

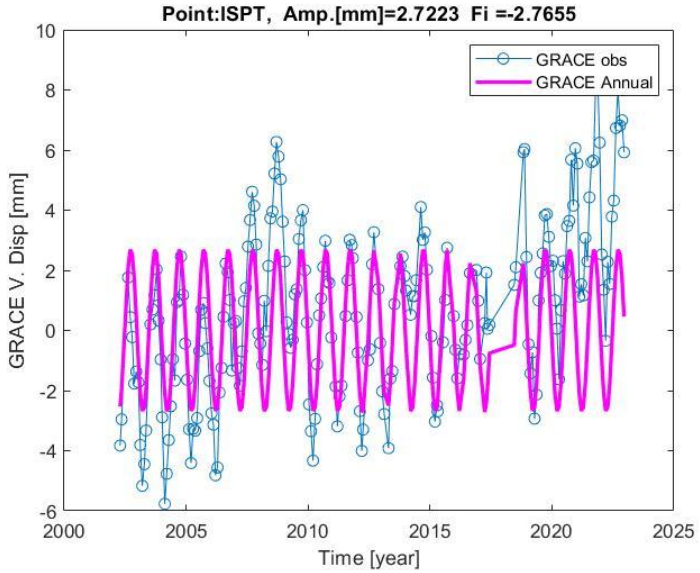
3.7.10. ISPT İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

ISPT noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.0517 mm, faz açısı 2.006 rad bulunmuştur. Şekil 3.47'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



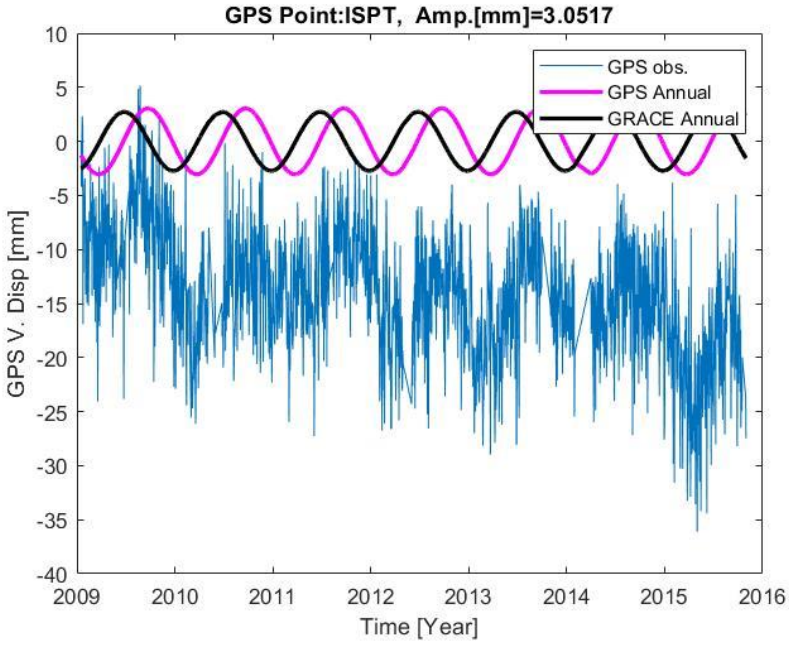
Şekil 3.47 ISPT noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.7223 ve faz açısı -2.7655 rad bulunmuştur. Şekil 3.48'de mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

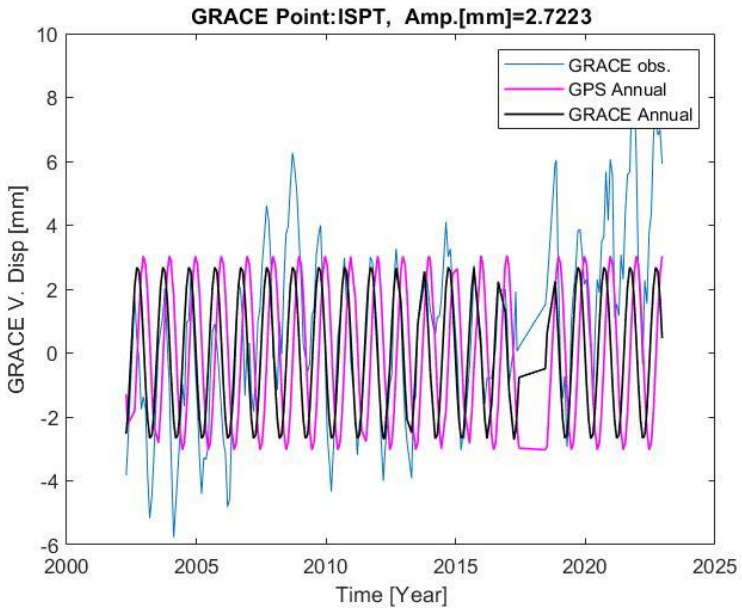


Şekil 3.48 ISPT noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

ISPT Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.892 ay çıkmıştır.



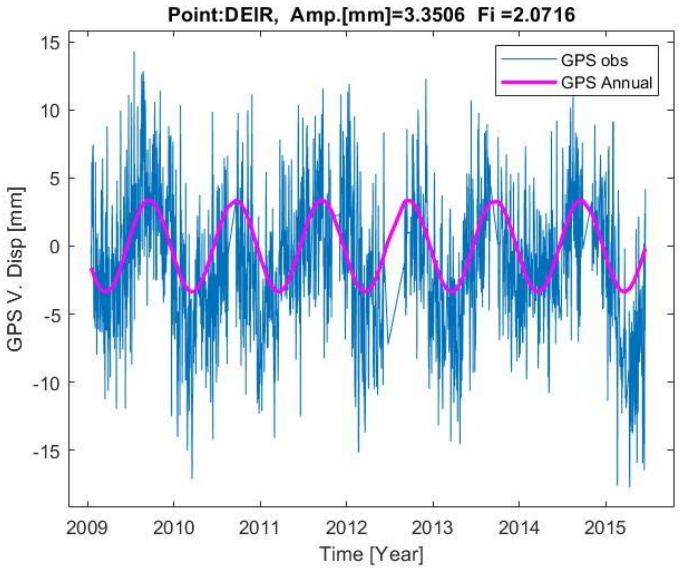
Şekil 3.49 ISPT noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.50 ISPT noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

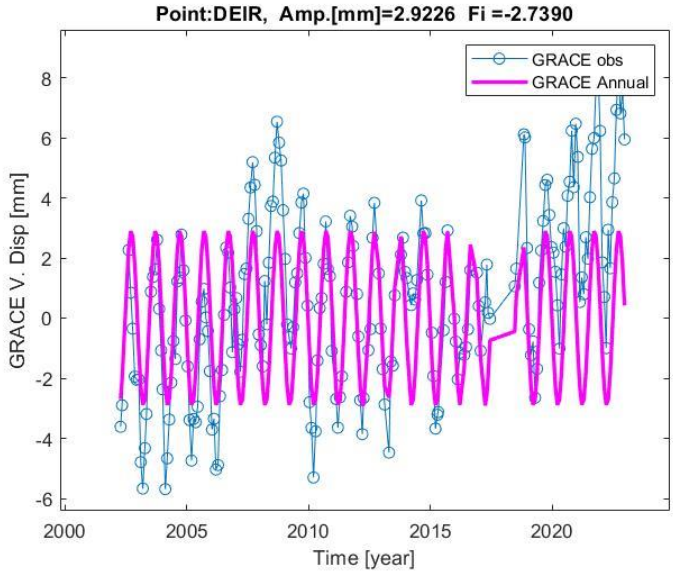
3.7.11. DEIR İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

DEIR noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.3506 mm, faz açısı 2.0716 rad bulunmuştur. Şekil 3.51'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



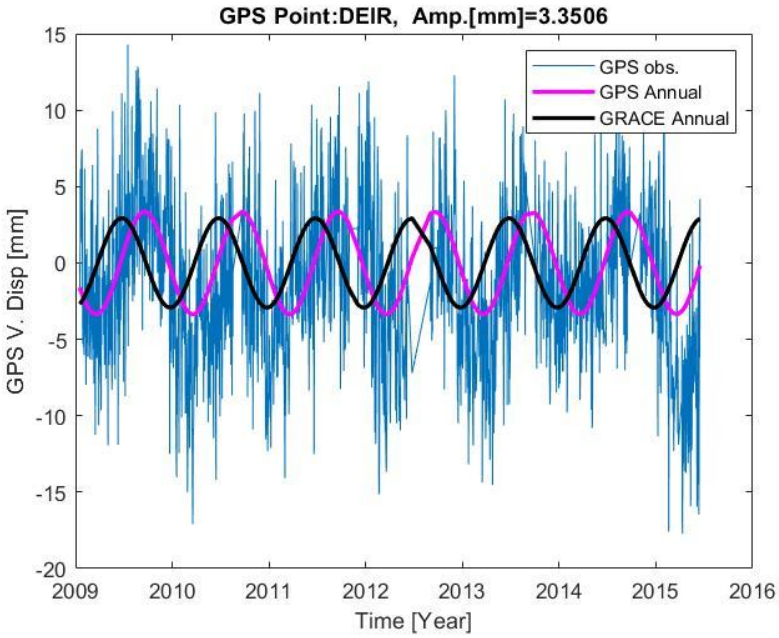
Şekil 3.51 DEIR noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.9226 ve faz açısı -2.7390 rad bulunmuştur. Şekil 3.52'de mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

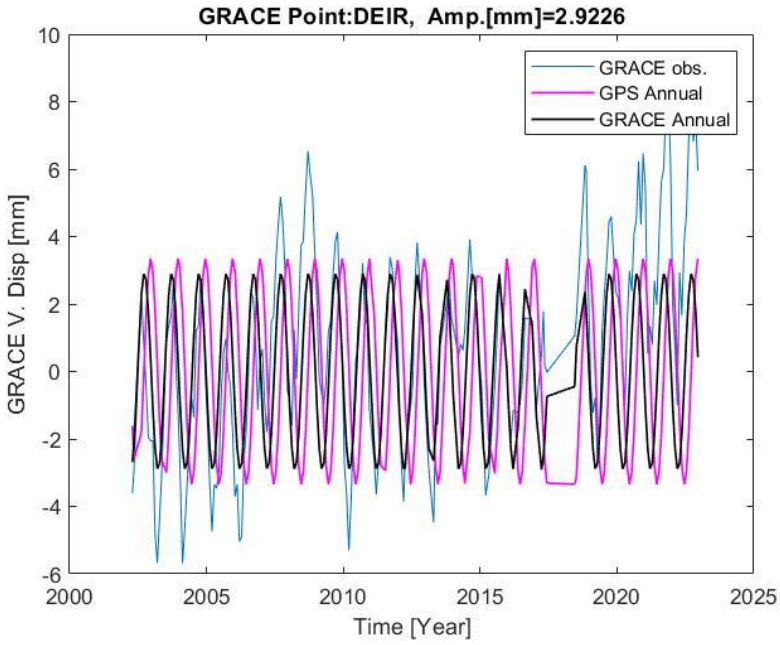


Şekil 3.52 DEIR noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

DEIR Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.7924 ay çıkmıştır.



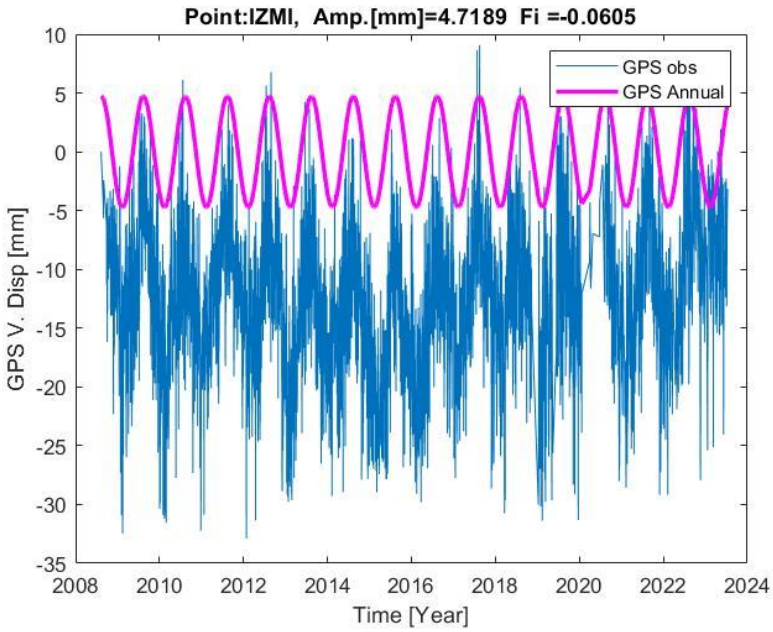
Şekil 3.53 DEIR noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.54 DEIR noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

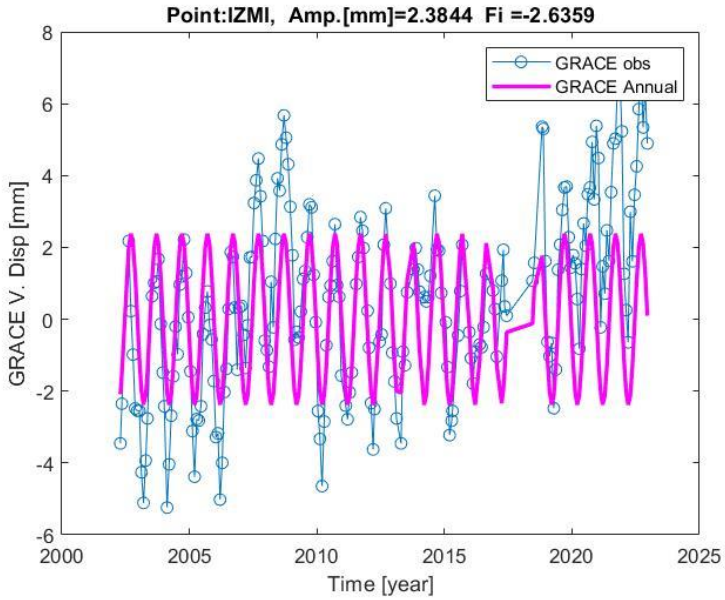
3.7.12. IZMI İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

IZMI noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.7189 mm, faz açısı -0.0605 rad bulunmuştur. Şekil 3.55'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



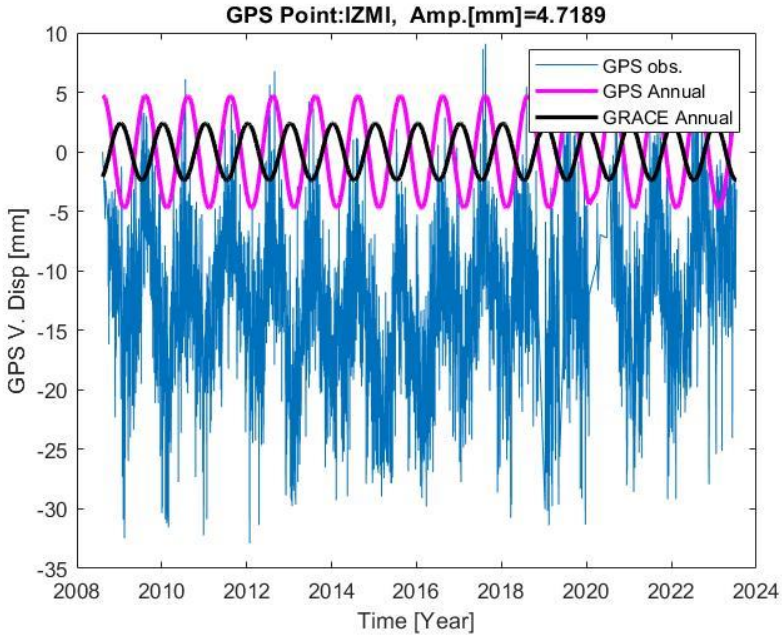
Şekil 3.55 IZMI noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.3844 ve faz açısı -2.6359 rad bulunmuştur. Şekil 3.56'da mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

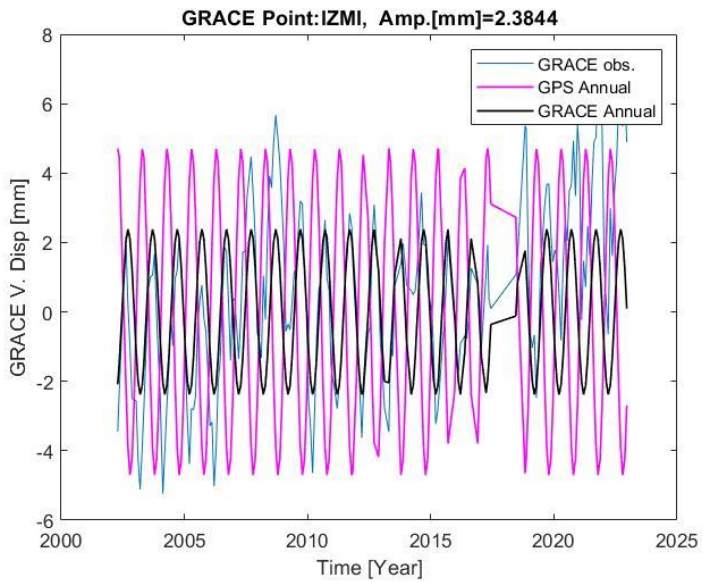


Şekil 3.56 IZMI noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

IZMI Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 7.0956 ay çıkmıştır.



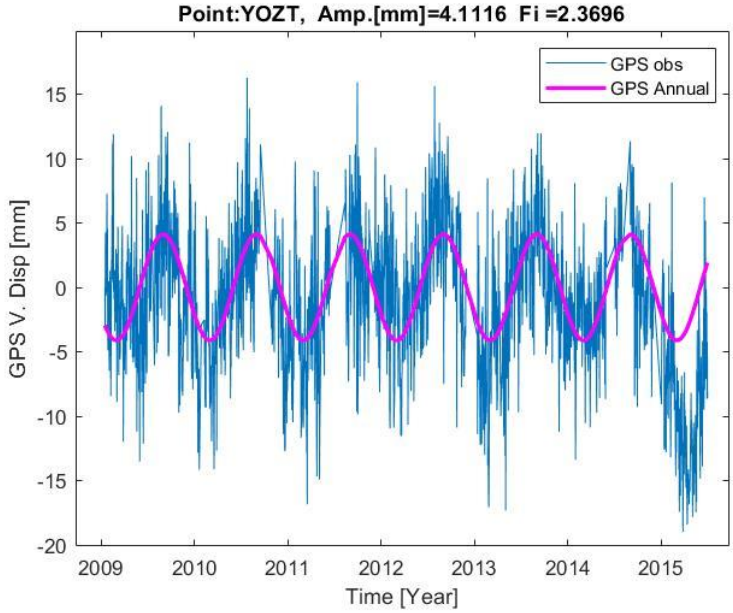
Şekil 3.57 IZMI noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.58 IZMI noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

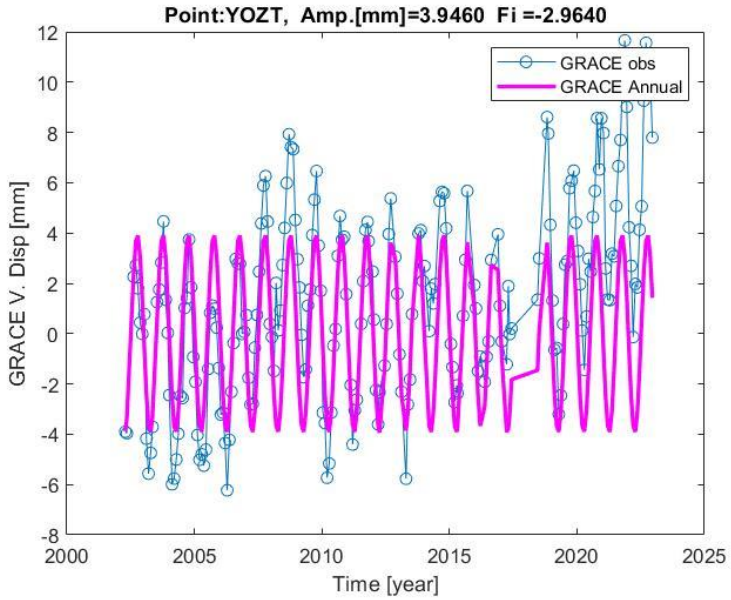
3.7.13. YOZT İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

YOZT noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.1116 mm, faz açısı 2.3696 rad bulunmuştur. Şekil 3.59'taki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



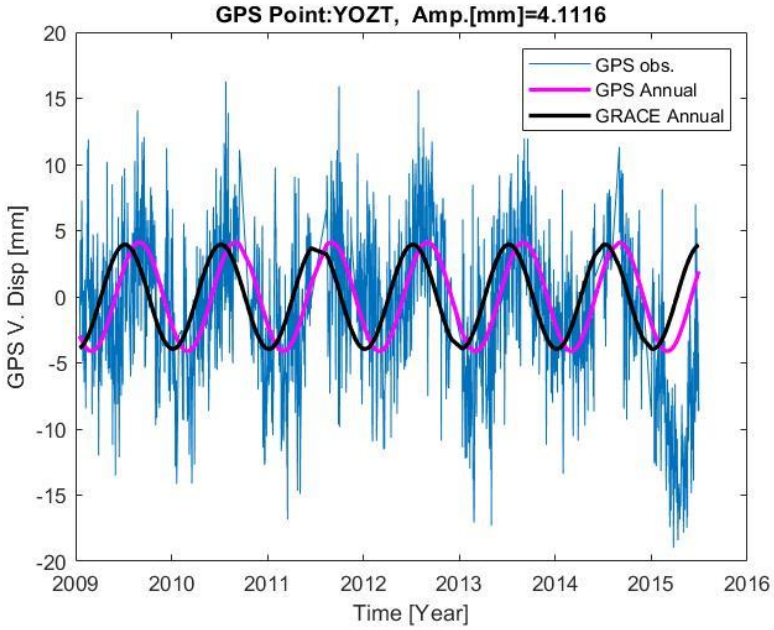
Şekil 3.59 YOZT noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 3.9460 ve faz açısı -2.9640 rad bulunmuştur. Şekil 3.60'ta mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

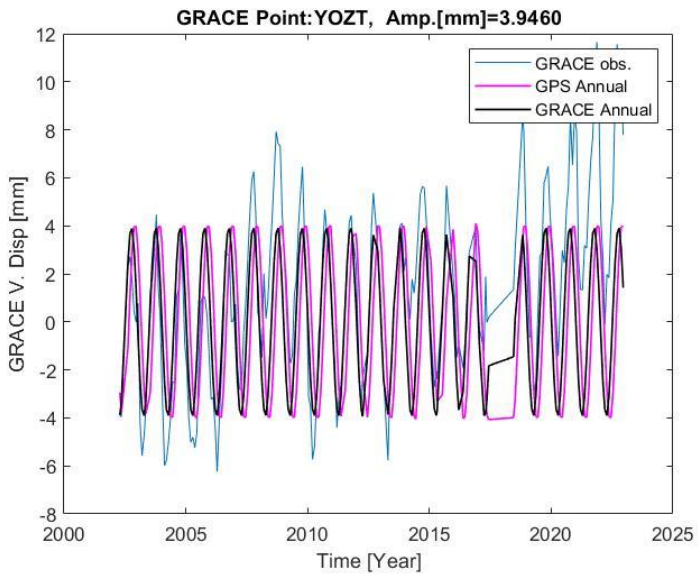


Şekil 3.60 YOZT noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

YOZT Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.5296 ay çıkmıştır.



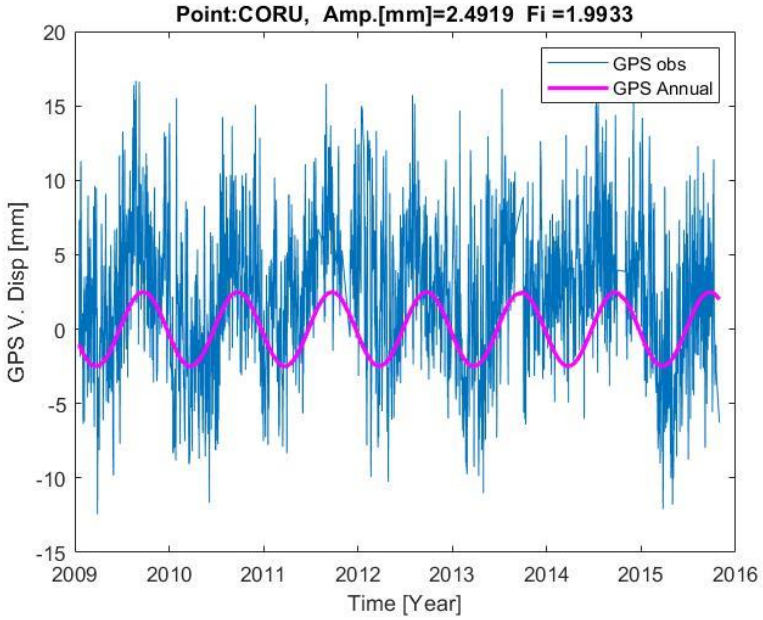
Şekil 3.61 YOZT noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.62 YOZT noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

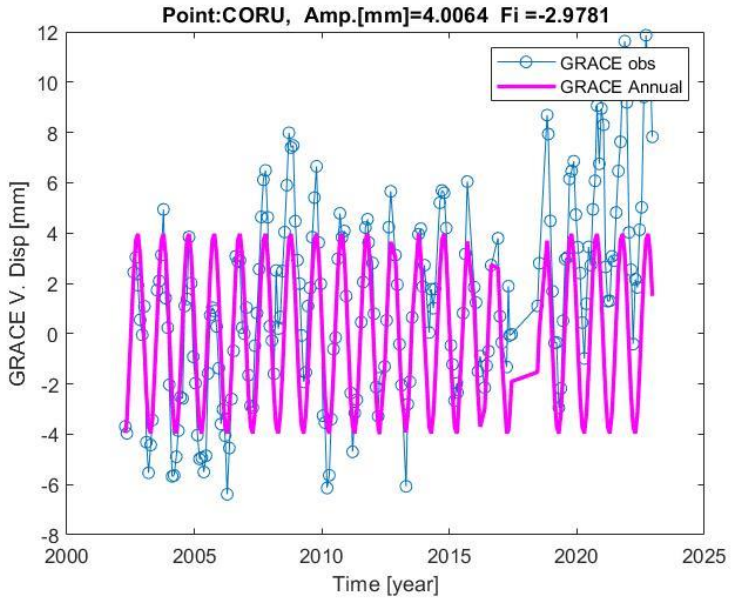
3.7.14. CORU İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

CORU noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 2.4919 mm, faz açısı 1.9933 rad bulunmuştur. Şekil 3.63'teki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



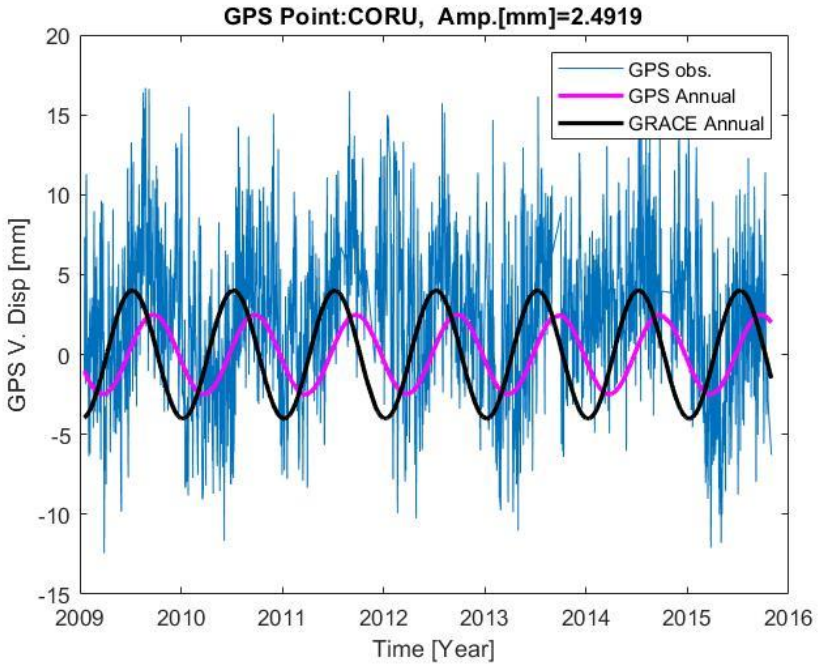
Şekil 3.63 CORU noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.0064 ve faz açısı -2.9781 rad bulunmuştur. Şekil 3.64'te mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

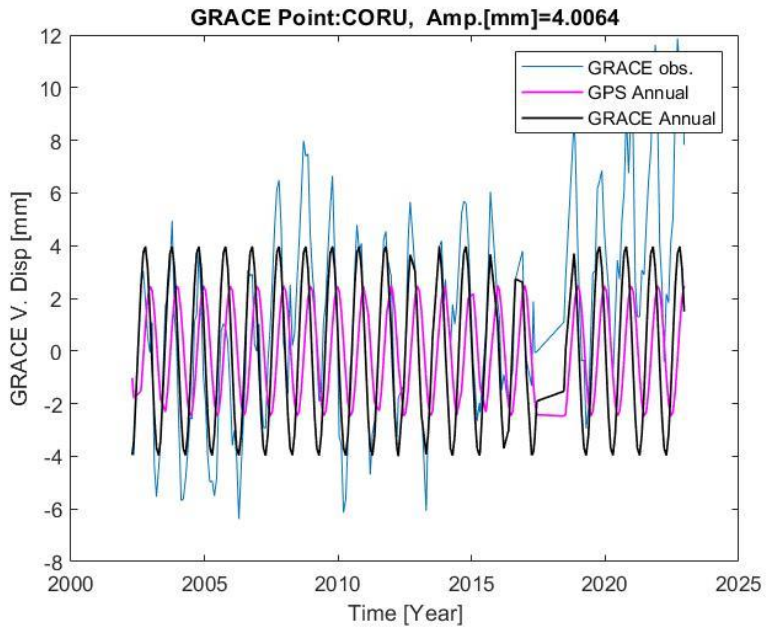


Şekil 3.64 CORU noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

CORU Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.4972 ay çıkmıştır.



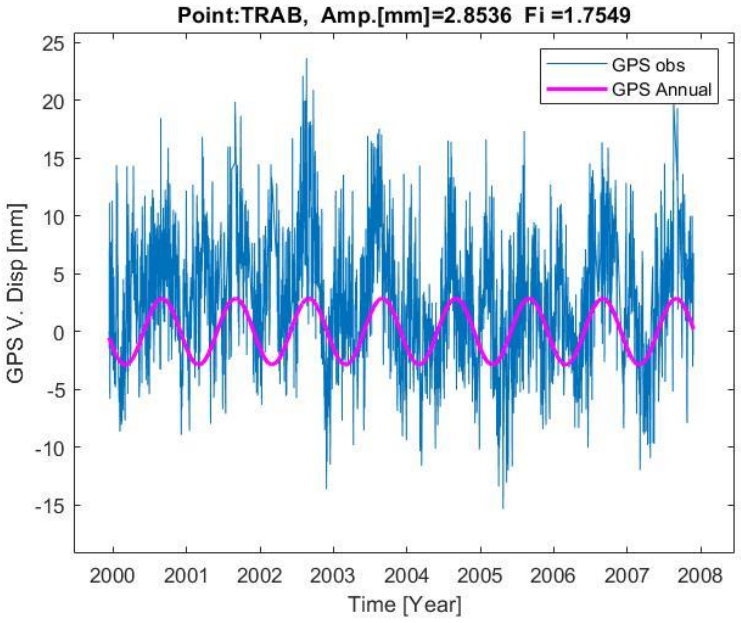
Şekil 3.65 CORU noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



Şekil 3.66 CORU noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

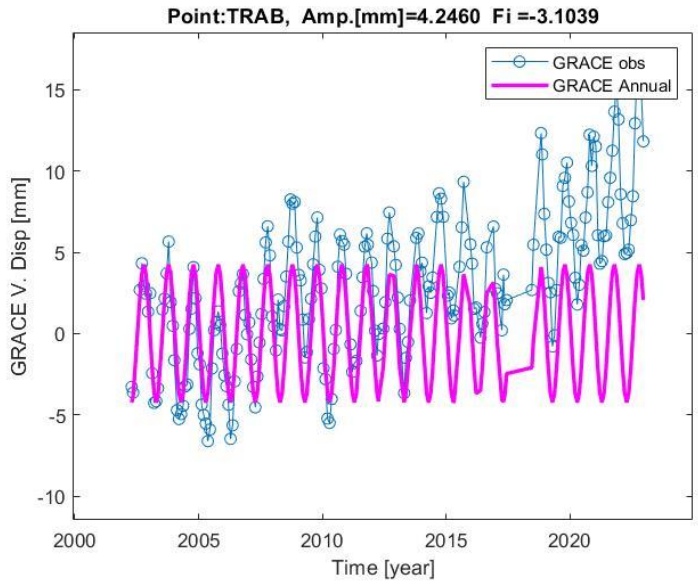
3.7.15. TRAB İstasyonu için Düşey Yer Değiştirme Zaman Serileri

TRAB noktası için GPS ile elde edilen zaman serisinin genliği 28536 mm, faz açısı 1.7549 rad bulunmuştur. Şekil 3.67'deki grafikte mavi sinyal GPS sinyalini magenta sinyal ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.



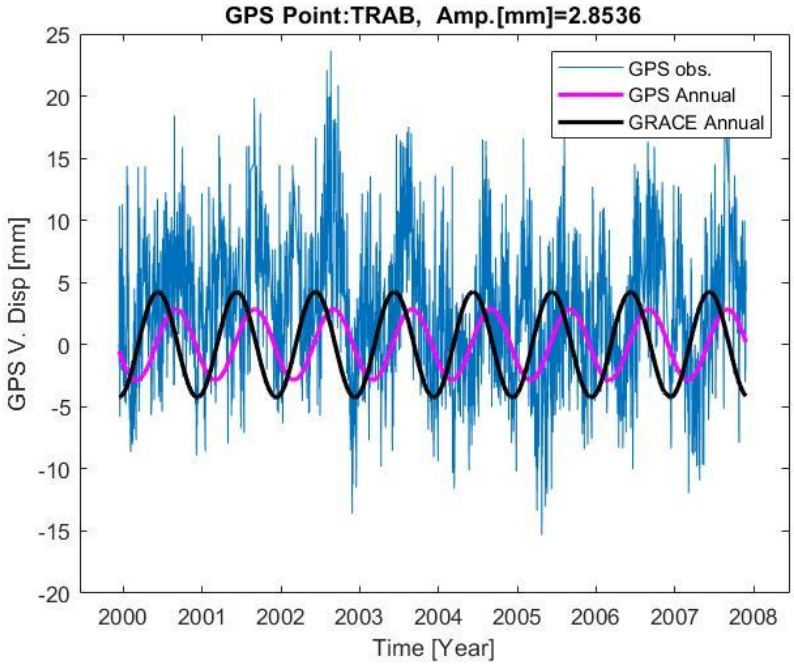
Şekil 3.67 TRAB noktası GPS verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

GRACE ile elde edilen zaman serisinin genliği 4.2460 ve faz açısı -3.1039 rad bulunmuştur. Şekil 3.68'te mavi sinyal GRACE sinyalini magenta ise modellenen yıllık periyodik sinyali ifade etmektedir.

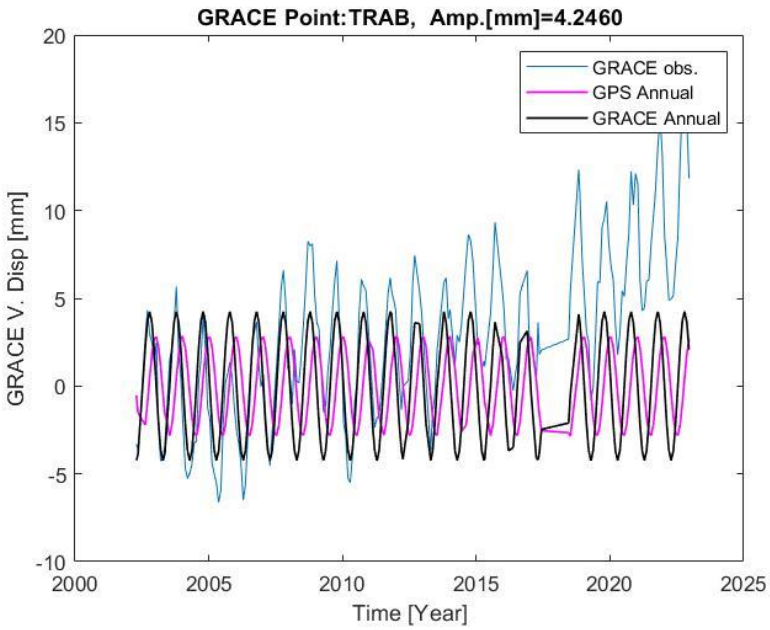


Şekil 3.68 TRAB noktası GRACE verisiyle elde edilen düşey zaman serisi

TRAB Noktası için GPS ve GRACE arasındaki faz farkı 2.7276 ay çıkmıştır.



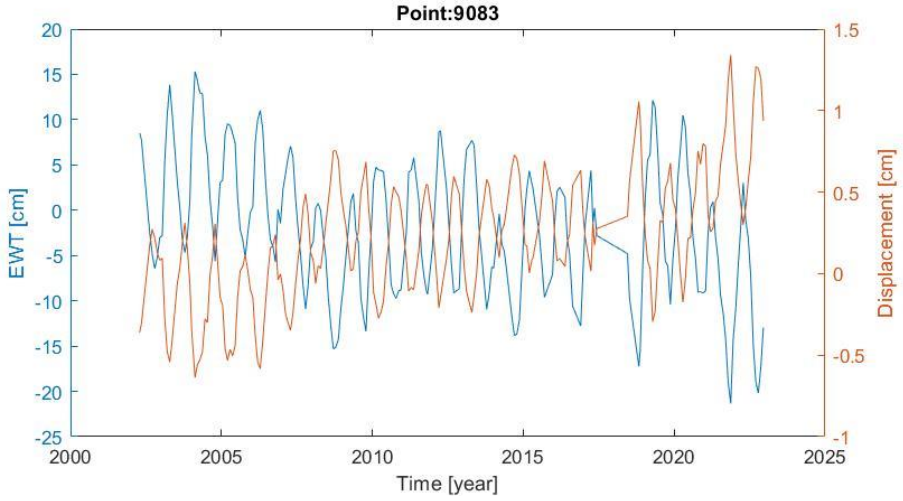
Şekil 3.69 TRAB noktası GPS-GRACE düşey yer değiştirme zaman serileri (GPS sinyali)



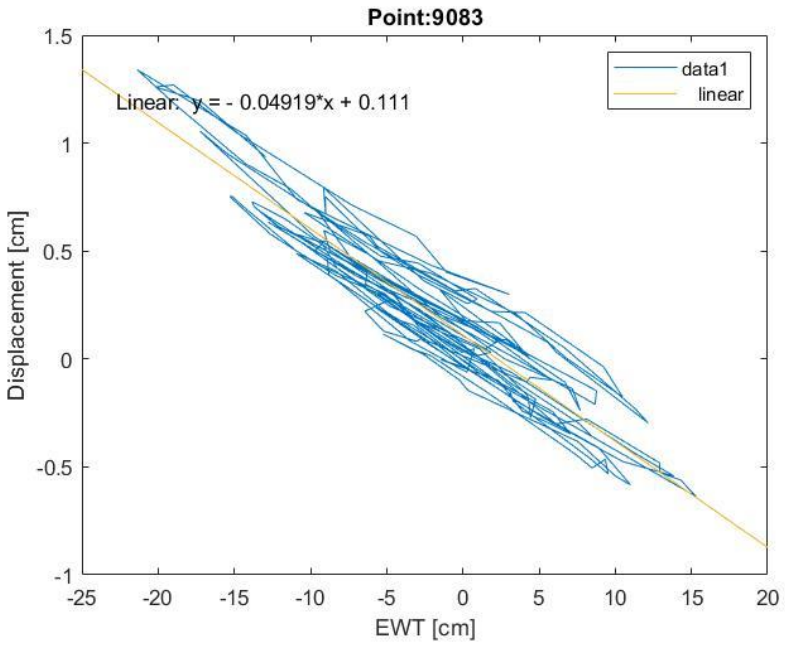
Şekil 3.70 TRAB noktası için GRACE-GPS düşey yer değiştirme zaman serileri (GRACE sinyali)

3.8. EWT ve Düşey Yer Değiştirme Arasındaki Fonksiyonel İlişkinin Araştırılması

Çalışmada DDK2 harmonik katsayılarından elde edilen düşey yer değiştirme ve EWT arasında bir fonksiyonel ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Doğrusal regresyon gibi birçok regresyon işlemi denenmiştir. Şekil 3.71'de 9083 numaralı mascon noktasındaki EWT ve düşey yer değiştirmenin grafiği verilmiştir. Grafikte EWT mavi ile düşey yer değiştirme turuncu ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.71 9083 numaralı mascon için EWT ve düşey yer değiştirme



Şekil 3.72 9083 numaralı mascon için EWT ve düşey yer değiştirme doğrusal bağıntı

Şekil 3.72'de 9083 no'lu mascon için yer değiştirme ve EWT arasındaki doğrusal bağıntı verilmiştir. Doğrusal regresyon sonucu incelendiğinde düşey yer değiştirmeler ve EWT arasında zıt bir ilişki olduğunu gözlenmiştir. Ancak sadece doğrusal regresyon yaparak noktalar için ortak bir bağıntı elde edilememektedir. Bu nedenle kuadratik regresyon denenmiştir. Regresyon sonuçları incelendiğinde iki değişim arasında ayrıca zamansal bir etki gözlemlendiğinden zamansal regresyon uygulanmıştır. İki regresyon sonucu Eşitlik 3.1'deki bağıntı elde edilmiştir. Bağıntıda EWT dm, Düşey Yer Değiştirme (V_d) mm birimindedir. Referans Zamanı: 2002.2931506849 alınmıştır. Δt, referans zamanı ve gözlem zamanı arasındaki farktır.

$$V_d = (a_0 + a_1 EWT + a_2 EWT^2) \times (10 + EWT) - 100 - (a_3 + a_4 \Delta t + a_5 \Delta t^2 + a_6 \cos(2\pi \Delta t) + a_7 \sin(2\pi \Delta t) + a_8 \cos(2\pi \frac{\Delta t}{15}) + a_9 \sin(2\pi \frac{\Delta t}{15}))$$

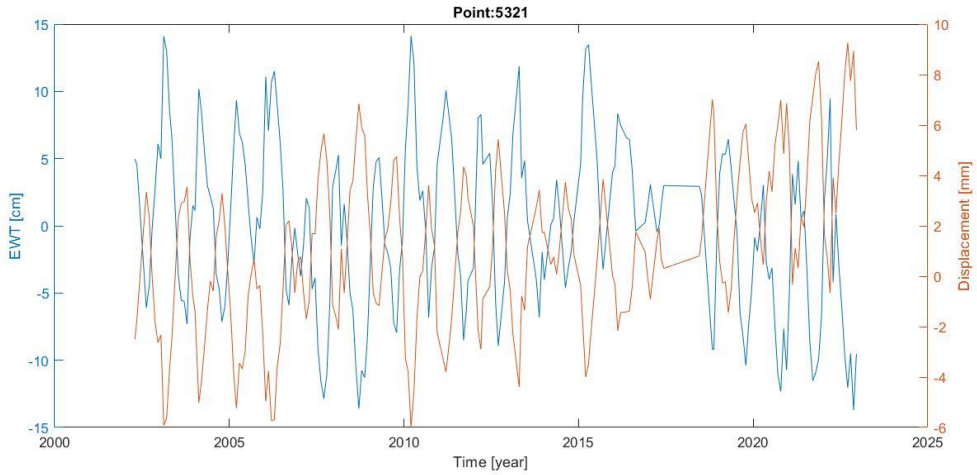
(3.1)

3.9. Regresyon Sonuçlarının İncelenmesi

Türkiye'deki mascon orta noktalarının DDK2 harmonik katsayı çözümleriyle elde edilen EWT ve düşey yer değiştirme sonuçlarına Eşitlik 3.1 uygulanarak sonuçlar yaklaşık 100 mascon orta noktası için değerlendirilmiştir. Bu nokta sonuçlarının bazıları bu bölümde aktarılacaktır, tüm katsayı sonuçları ise EK-B'de paylaşılmıştır.

3.9.1. Mascon No:5321 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları

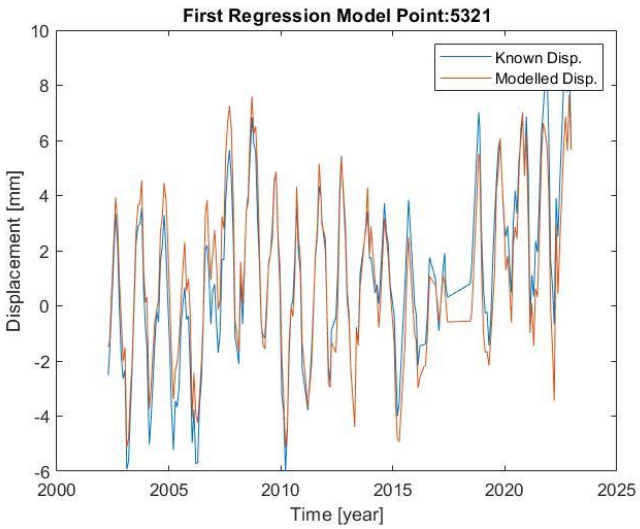
Sonuçlar incelendiğinde 41º enlem ve 25.90º boylamda bulunan 5321 numaralı mascon orta noktası için DDK2 filtreli EWT değerleri ve hidroloji kaynaklı düşey yer değiştirme sonuçları Şekil 3.70'te birlikte verilmiştir. Şekil 3.70'te EWT değerleri mavi ile yer değiştirme değerleri turuncu ile ifade edilmiştir.



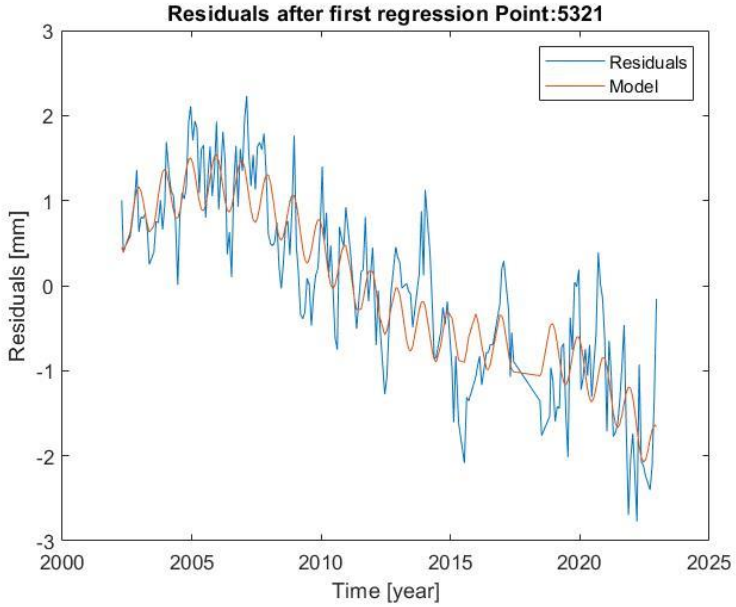
Şekil 3.73 5321 numaralı mascon için EWT - düşey yer değiştirme grafiği

İlk regresyon sonrası Eşitlik 3.1' deki katsayılar:

a_0 = 10.08718302, a_1 = -1.50302294, a_2 = 0.17427378, ve RMS= 1.1120 mm bulunmuştur.

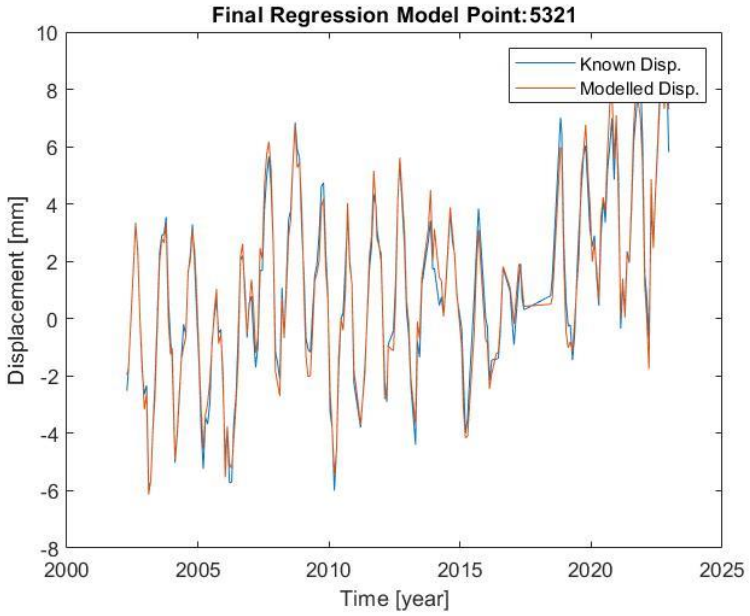


Şekil 3.74 5321 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu



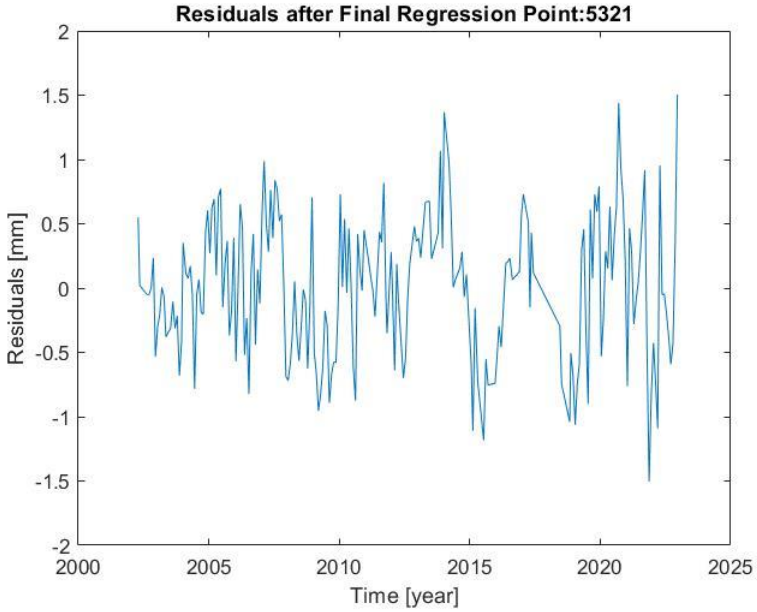
Şekil 3.75 5321 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği

Şekil 3.74'te modellenen ve bilinen düşey yer değiştirmeler gösterilmiştir. Şekil 3.75'te verilen düzeltmelerin grafiği incelendiğinde zamansal etkilerin olduğu görünmektedir.



Şekil 3.76 5321 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu model sonucu

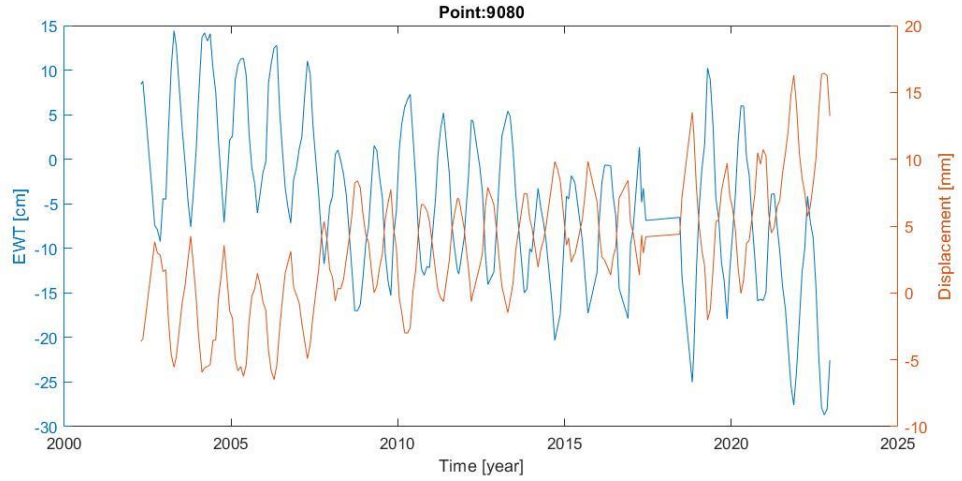
İkinci regresyon sonrası Eşitlik 3.1'deki zamana bağlı regresyon katsayıları a_3 = 0.64902003, a_4 = 0.05261099, a_5 = -0.00949473, a_6 = 0.30009104, a_7 = -0.14020311, a_8 = -0.06220417, a_9= -0.49332989 ve 2. regresyon sonucu RMS= 0.5407 mm bulunmuştur.



Şekil 3.77 5321 numaralı mascon için zamansal bağlı regresyon sonucu düzeltmeler

3.9.2. Mascon No:9080 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları

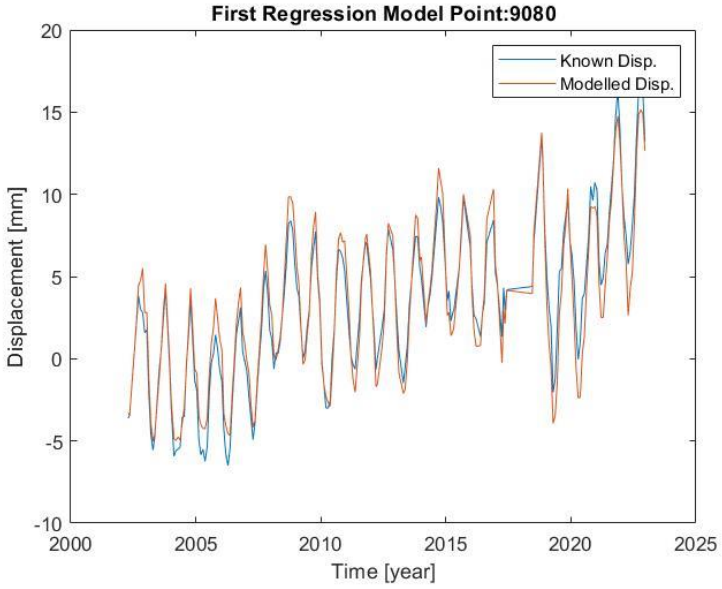
Sonuçlar incelendiğinde 38º enlem ve 41.34º boylamda bulunan 9080 numaralı mascon orta noktası için DDK2 filtreli EWT değerleri ve hidroloji kaynaklı düşey yer değiştirme sonuçları Şekil 3.78'te birlikte verilmiştir. Şekil 3.78'te EWT değerleri mavi ile yer değiştirme değerleri turuncu ile ifade edilmiştir.



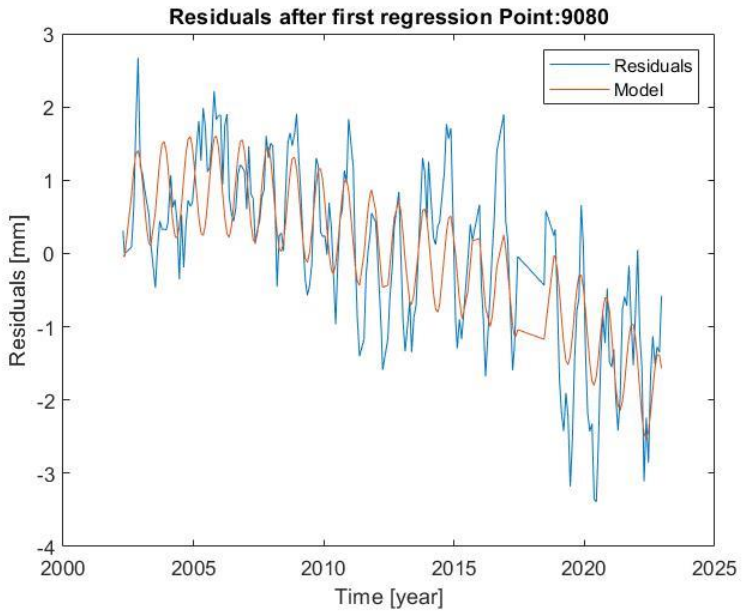
Şekil 3.78 9080 numaralı mascon için EWT- düşey yer değiştirme grafiği

İlk regresyon sonrası Eşitlik 3.1' deki katsayılar:

a_0 = 10.04274391, a_1 = -1.51552297, a_2 = 0.21350457, ve RMS= 1.2275 mm bulunmuştur.

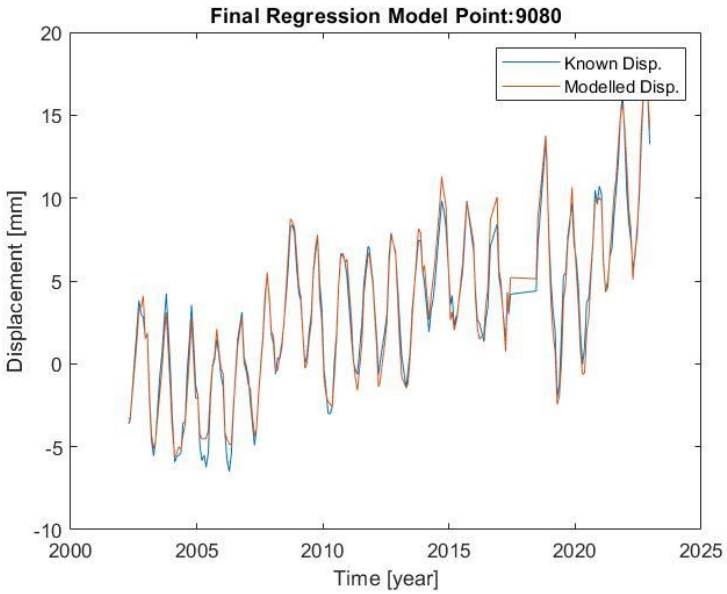


Şekil 3.79 9080 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu



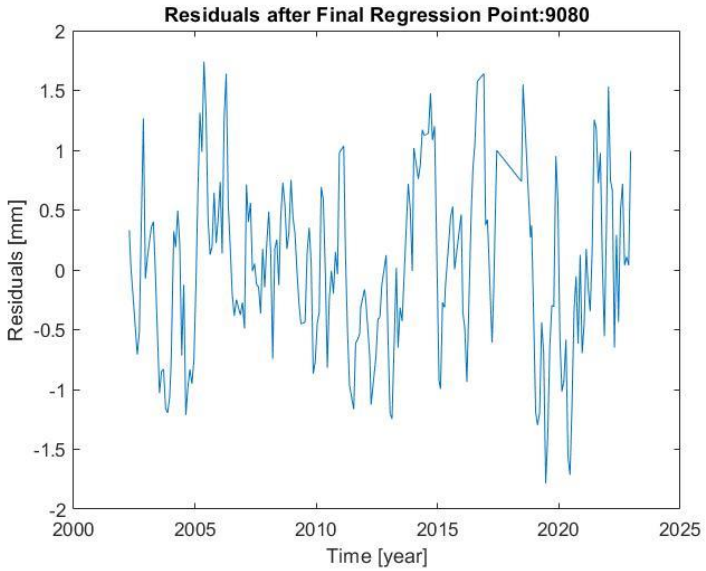
Şekil 3.80 9080 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği

Şekil 3.79'da modellenen ve bilinen düşey yer değiştirmeler gösterilmiştir. Şekil 3.80'de verilen düzeltmelerin grafiği incelendiğinde zamansal etkilerin olduğu görünmektedir.



Şekil 3.81 9080 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu model sonucu

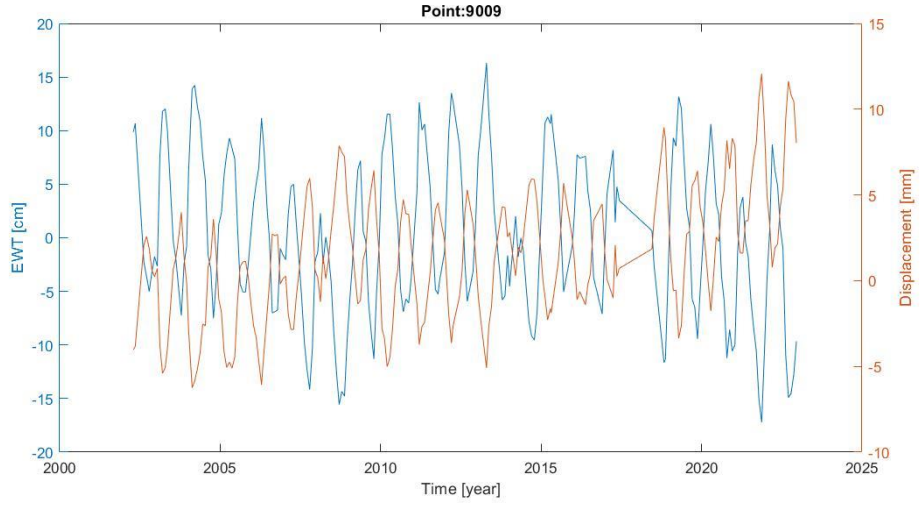
İkinci regresyon sonrası Eşitlik 3.1' deki zamansal regresyon katsayıları a_3 = 0.53474236, a_4= 0.08650013, a_5 = -0.01053664, a_6 = 0.39182304, a_7 = -0.56802785, a_8 = -0.11490677, a_9= -0.19824942 ve 2. regresyon sonucu RMS=0.7237 mm bulunmuştur.



Şekil 3.82 9080 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu düzeltmeler

3.9.3. Mascon No:9009 için EWT ve Düşey Yer Değiştirme Sonuçları

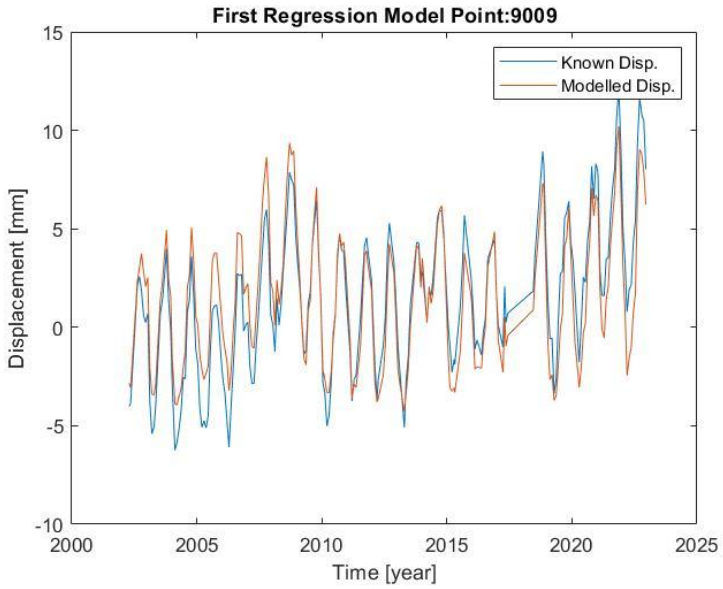
Sonuçlar incelendiğinde 39º enlem ve 25.48º boylamda bulunan 9009 numaralı mascon orta noktası için DDK2 filtreli EWT değerleri ve hidroloji kaynaklı düşey yer değiştirme sonuçları Şekil 3.83'te birlikte verilmiştir. Şekil 3.83'te EWT değerleri mavi ile yer değiştirme değerleri turuncu ile ifade edilmiştir.



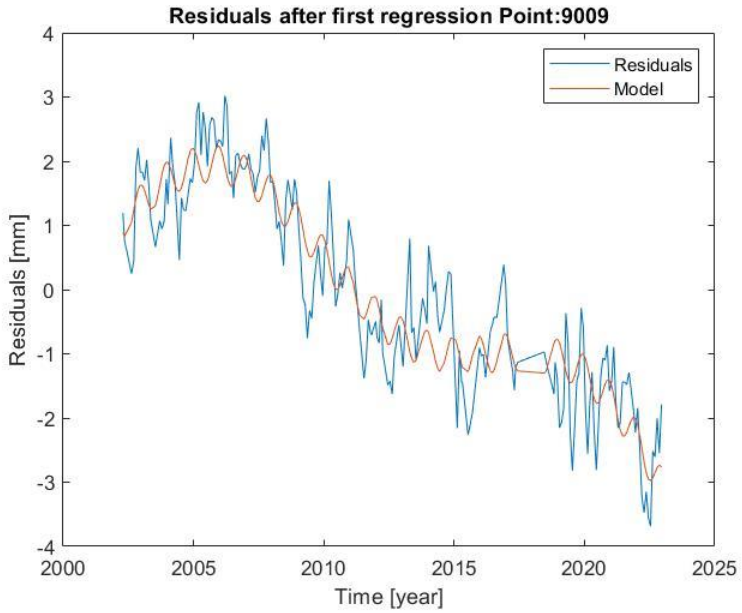
Şekil 3.83 9009 numaralı mascon için EWT- düşey yer değiştirme grafiği

İlk regresyon sonrası Eşitlik 3.1' deki katsayılar:

a_0 = 10.11965182, a_1 = -1.49740722, a_2 = 0.20742897, ve RMS= 1.5901 mm bulunmuştur.

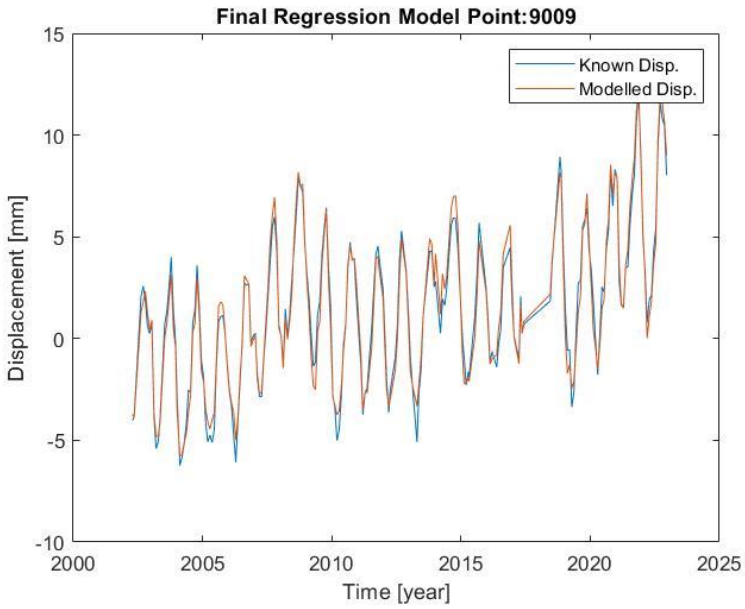


Şekil 3.84 9009 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası model sonucu



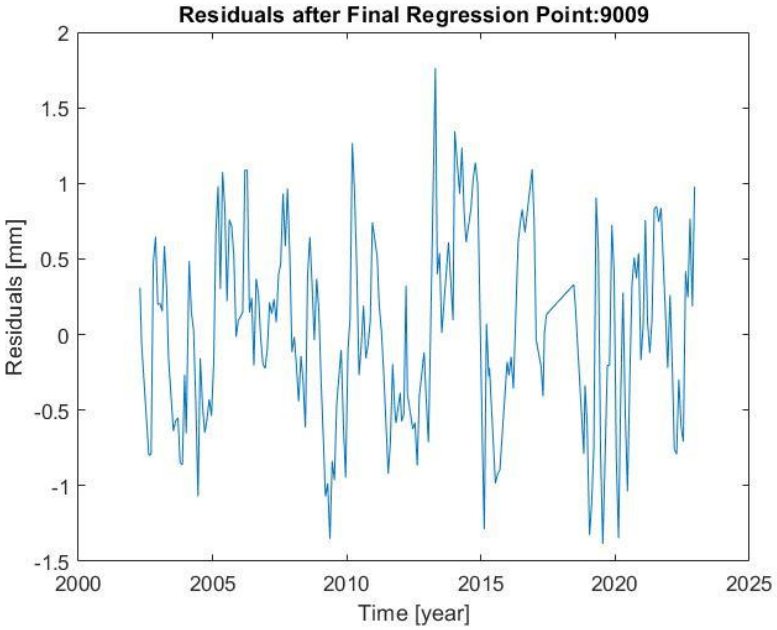
Şekil 3.85 9009 numaralı mascon için ilk regresyon sonrası düzeltmelerin grafiği

Şekil 3.84'te modellenen ve bilinen düşey yer değiştirmeler gösterilmiştir. Şekil 3.85'te verilen düzeltmelerin grafiği incelendiğinde zamansal etkilerin olduğu görünmektedir.



Şekil 3.86 9009 numaralı mascon için zamansal regresyon model sonucu

İkinci regresyon sonrası Eşitlik 3.1' deki zamansal regresyon katsayıları a_3 = 0.92330905, a_4= 0.08901078, a_5 = -0.01489416, a_6 = 0.28197953, a_7 = -0.08493918, a_8 = -0.19432758, a_9= -0.88008518 ve 2. regresyon sonucu RMS=0.6192 mm bulunmuştur.



Şekil 3.87 9009 numaralı mascon için zamansal regresyon sonucu düzeltmeler

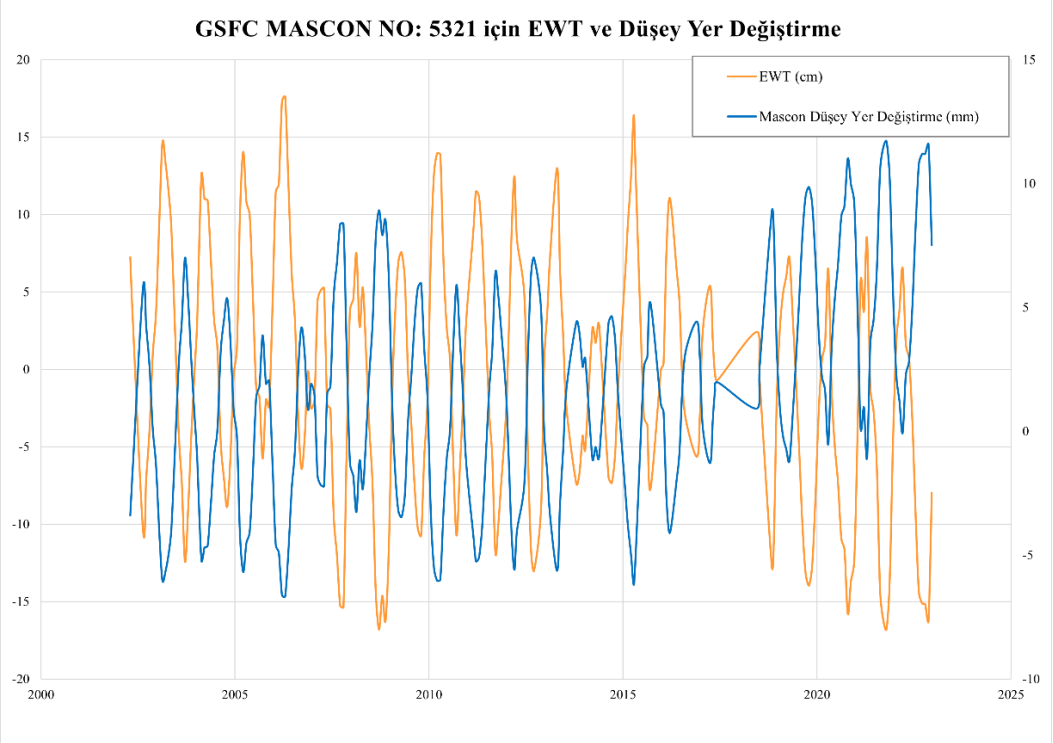
3.10. Mascon EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm

Önceki bölümde anlatılmış olan EWT ve düşey yer değiştirme arasında oluşturulmuş bağıntı, GSFC Mascon EWT verisinde kullanılabilir mi? Bu amaçla, bu bölümde, bazı mascon orta noktalarındaki GSFC Mascon EWT değerlerinden düşey yer değerlerine dönüşüm gerçekleştirilmektedir.

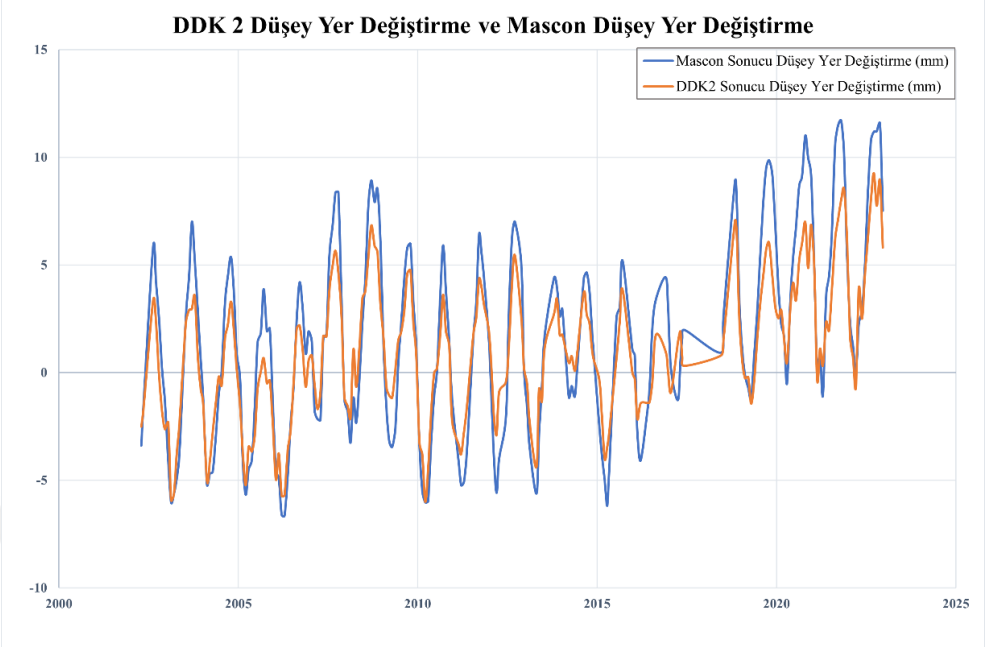
3.10.1. Mascon No:5321 EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm

5321 numaralı mascon için EWT değerleri Eşitlik 3.1'deki bağıntı ve EK-B'de paylaşılan katsayılar ile düşey yer değiştirmelere çevrilmiştir.

Şekil 3.88'de Mascon' dan elde edilen EWT ve daha önce belirlenmiş fonksiyonel ilişki ile elde edilen düşey yer değiştirmelerin grafiği verilmiştir, Şekil 3.89'da ise mascon noktasındaki hem DDK2 hem GSFC mascon değerlerinden elde edilen düşey yer değiştirmelerin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.88 5321 numaralı mascon EWT değerleri ve model sonucu belirlenmiş düşey yer değiştirmeler

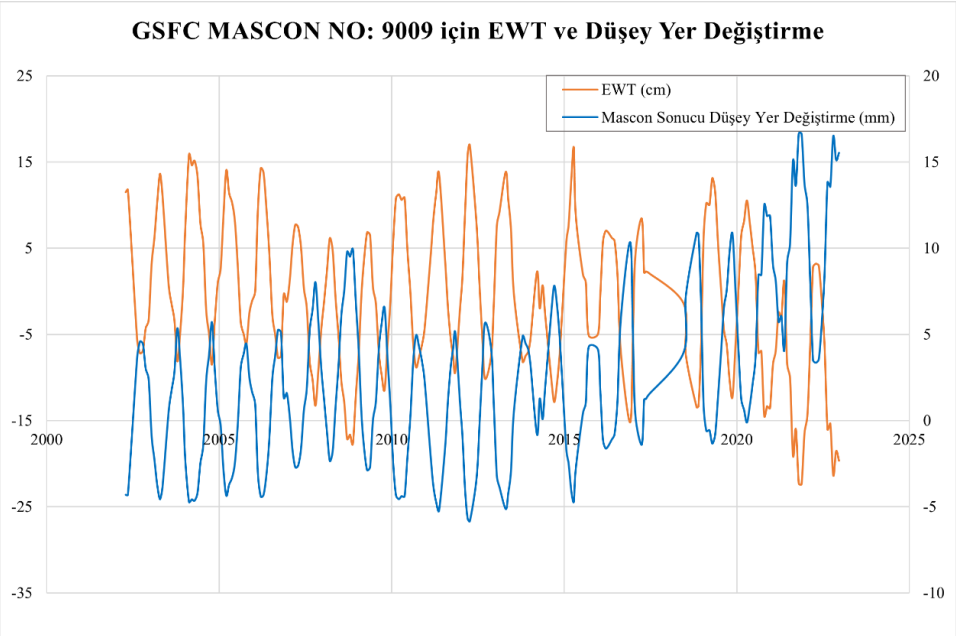


Şekil 3.89 5321 numaralı mascon için DDK2 ve mascon verisi ile elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm)

3.10.2. Mascon No:9009 EWT Verisinden Düşey Yer Değiştirmeye Dönüşüm

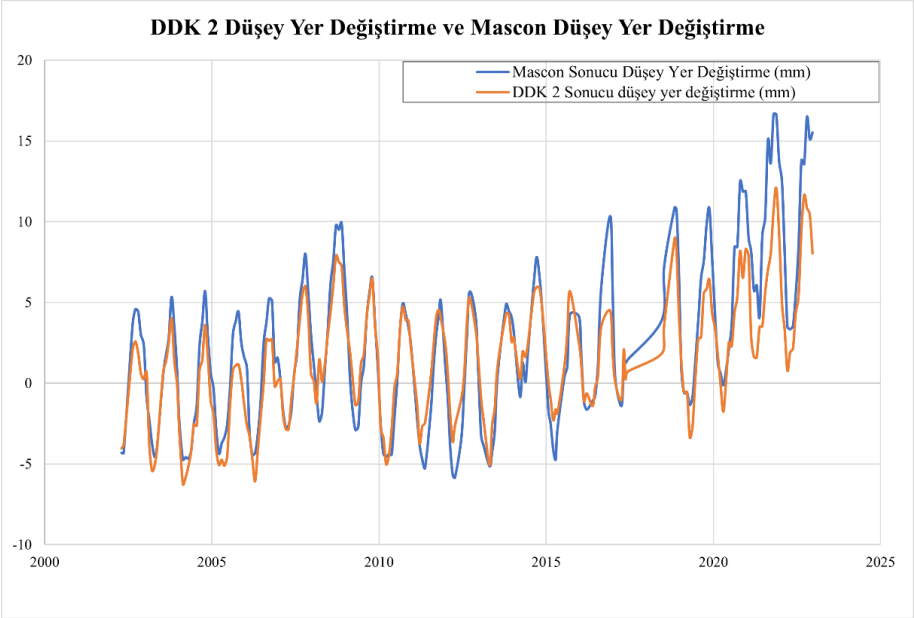
9009 numaralı mascon için EWT değerleri Eşitlik 3.1'deki bağıntı ve EK-B'de paylaşılan katsayılar ile düşey yer değiştirmelere çevrilmiştir.

Şekil 3.90'da Mascon' dan elde edilen EWT ve kurulan fonksiyonel ilişki ile belirlenmiş düşey yer değiştirmelerin grafiği verilmiştir.



Şekil 3.90 9009 numaralı mascon EWT değerleri ve model sonucu belirlenmiş düşey yer değiştirmeler

Şekil 3.91'de mascon noktasındaki hem DDK2 hem GSFC mascon değerlerinden elde edilen düşey yer değiştirmelerin grafiği verilmiştir. Grafikler incelendiğinde çalışmada DDK2 verileriyle elde edilen bağıntının Mascon verilerine uygulandığında belirlenmiş sonuçlarla da uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.91 9009 numaralı mascon için DDK2 ve mascon verisi ile elde edilen düşey yer değiştirmeler (mm)

4

SONUÇ

Yerkabuğundaki hidroloji kaynaklı düşey deformasyonlar GPS, GRACE ve devamı niteliğinde olan GRACE-FO uyduları ile izlenebilmektedir. GRACE ve GRACE-FO uyduları ile, global olarak 2002 yılından günümüze kadar gravite alanı izlenebilmektedir. GRACE ve GRACE-FO uyduları hidrolojik değişimlere oldukça duyarlıdır. Bu sayede kıtalardaki su değişimleri, okyanus tabanı değişimleri ve buzullardaki kütle kayıpları yüksek duyarlılıkla belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada Türkiye'deki bazı GPS istasyonlarındaki düşey yer değiştirmeler hem GRACE ve GRACE-FO DDK2 çözümleri hem de GPS verileri kullanılarak belirlenmiştir. GRACE verileri ICGEM veri merkezi, GPS verileri Nevada Jeodezi Laboratuvarı'ndan elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde GPS ile gözlemlenen yıllık sinyal genliklerinin 1.66 ile 6.83 mm aralığında değiştiği ve ortalama 3.79 mm olduğu hesaplanmıştır. GRACE gözlem sonucunda aynı noktalarda belirlenen yıllık sinyal genliklerinin 2.03 ile 4.29 mm aralığında değiştiği ve ortalama genliğin 3.45 mm olduğu hesaplanmıştır. GRACE zaman serilerinden elde edilen yıllık sinyal genlikleri ile GPS'den elde edilen yıllık sinyal genlikleri birçok noktada birbirine benzer bulunmuştur. Noktaların genelinde GPS yıllık sinyalinin, GRACE sinyaline göre yaklaşık 3 ay gecikmeli elde edildiği görülmüştür. GPS ve GRACE arasındaki faz gecikmesi, meydana gelen hidrolojik değişimin 3 ay sonra fiziksel yeryüzü üzerinde bir kara hareketi oluşturduğunu göstermektedir. Yerin morfolojik özelliğine bağlı olarak GPS sinyali su değişimine bu kadar süre sonra tepki vermektedir.

GPS'nin düşey yer değiştirme belirleme doğruluğu yataya göre daha düşüktür. Troposfer ve iyonosfer tabakaları, GPS sinyallerinin geçişinde farklı kırılma ve gecikmelere neden olur. Bu etkiler, düşey doğruluk üzerinde yatay doğruluğa göre daha fazla etki yapar; çünkü, sinyalin atmosferde aldığı yol, düşey ölçümlerde daha fazla varyasyon gösterir. GRACE ile GPS birlikte kullanılarak düşey yer değiştirme belirlemede iyileştirme gerçekleştirilebilir.

GPS gözlemleri, yüzey kütle değişimi ve kabuk hareketleri dahil olmak üzere her türlü faktörün neden olduğu deformasyonu yansıtırken, GRACE hidrolojik etmenlerin neden olduğu düşey deformasyonu daha iyi gözlemlemektedir. Bu sayede, tektonik ve tektonik olmayan kuvvetlerin kabuk deformasyonuna katkılarının ayrılması sağlanabilir.

GPS ve GRACE karşılaştırmalarına ek olarak, EWT değerleri ve düşey yer değiştirmeler arasında fonksiyonel bir bağıntı kurulmuştur. Bunun için öncelikle DDK2 verilerinin Türkiye mascon orta noktalarındaki EWT ve düşey yer değiştirmeleri birlikte ele alınmıştır. Daha sonra, çeşitli regresyon işlemleri uygulanmıştır. İlk olarak, doğrusal regresyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal regresyon sonucu incelendiğinde, düşey yer değiştirmeler ve EWT arasında zıt bir ilişki olduğunu gözlenmiştir. Ancak, yalnız doğrusal regresyon ile ortak bir bağıntı elde edilememektedir. Bu nedenle kuadratik regresyon denenmiştir. Kuadratik regresyon sonrası düzeltmelerde zamana bağlı mevsimsel etkiler görüldüğünden ikinci bir regresyon işlemi uygulanarak EWT ve düşey yer değiştirmeler arasında 10 parametreli fonksiyonel bir model oluşmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, modelin milimetre mertebesinde bir duyarlılığa sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Elde edilen bu fonksiyonel bağıntının GSFC Mascon EWT değerlerine uygulanabilirliği incelenmiştir. GRACE Seviye-3 ürünlerinden olan GSFC Mascon EWT değerlerinden düşey yer değiştirmeye çalışmada kurulan fonksiyonel bağıntı ile dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar L3 verisi olan Mascon EWT değerlerinden düşey yer değiştirmelere başarılı bir şekilde geçiş sağlanabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

[1] G. Balmino, F. Perosanz, R. Rummel, N. Sneeuw, and H. Sunkel, "CHAMP, GRACE and GOCE: Mission concepts and simulations," *Bollettino di geofisica teorica ed applicata*, vol. 40, pp. 309–319, Dec. 1999.

[2] B. D. Tapley, "GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System," *Science*, vol. 305, no. 5683, pp. 503–505, Jul. 2004, doi:10.1126/science.1099192.

[3] B. D. Tapley *et al.*, "Contributions of GRACE to understanding climate change," *Nature Climate Change*, vol. 9, no. 5, pp. 358–369, Apr. 2019, doi:10.1038/s41558-019-0456-2.

[4] E.S.Atayer, "Yeryuvarı Gravite Alanının Aylık Grace Çözümleri ile İzlenmesi ve Duyarlılığı Üzerine Bir İnceleme", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.

[5] M. Rodell *et al.*, "Emerging trends in global freshwater availability," *Nature*, vol. 557, no. 7707, pp. 651–659, May 2018, doi: 10.1038/s41586-018-0123-1.

[6] N. Tangdamrongsub, C. Hwang, J. S. Borak, S. Prabnakorn, and J. Han, "Optimizing GRACE/GRACE-FO data and a priori hydrological knowledge for improved global terrestial water storage component estimates," *Journal of Hydrology*, vol. 598, p. 126463, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126463.

[7] Case, K., Kruizinga, G.L.H. ve Wu, S.-C., GRACE Level 1B Data Product User Handbook, JPL, 2010.

[8] Savannah, S. Cooley and Felix, W. Landerer, GRACE-FO Level-3 Data Product User Handbook, JPL, 2021.

[9] D. P. Chambers, "Calculating trends from GRACE in the presence of large changes in continental ice storage and ocean mass," *Geophysical journal international*, vol. 176, no. 2, pp. 415–419, Feb. 2009, doi: 10.1111/j.1365-246x.2008.04012.x.

[10] L. Zenner *et al.*, "Non-tidal atmospheric and oceanic mass variations and their impact on GRACE data analysis," *Journal of geodynamics*, vol. 59–60, pp. 9–15, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.jog.2012.01.010.

[11] I. Velicogna, "Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 19, Oct. 2009, doi: 10.1029/2009gl040222.

[12] D. C. Slobbe, P. Ditmar, and R. C. Lindenbergh, "Estimating the rates of mass change, ice volume change and snow volume change in Greenland from ICESat and GRACE data," *Geophysical Journal International*, vol. 176, no. 1, pp. 95–106, Jan. 2009, doi: 10.1111/j.1365-246x.2008.03978.x.

[13] E. Rignot, I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan, and J. T. M. Lenaerts, "Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise," *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 5, p. n/a-n/a, Mar. 2011, doi: https://doi.org/10.1029/2011gl046583.

[14] S. Swenson and J. Wahr, “Monitoring Changes in Continental Water Storage with GRACE,” *Space Science Reviews*, vol. 108, no. 1/2, pp. 345–354, 2003, doi: 10.1023/a:1026135627671.

[15] R. SCHMIDT *et al.*, “GRACE observations of changes in continental water storage,” *Global and Planetary Change*, vol. 50, no. 1–2, pp. 112–126, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.11.018.

[16] M. Wei, H. Zhou, Z. Luo, and M. Dai, “Tracking inter-annual terrestrial water storage variations over Lake Baikal basin from GRACE and GRACE Follow-On missions,” *Journal of hydrology. Regional studies*, vol. 40, pp. 101004–101004, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101004.

[17] A. Hassan and S. Jin, “Water storage changes and balances in Africa observed by GRACE and hydrologic models,” *Geodesy and geodynamics*, vol. 7, no. 1, pp. 39–49, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.geog.2016.03.002.

[18] Ö. Güneş, “Zamana Bağli Uydu Gravite Çözümlerinden Elde Edilen Kütle Değişimi Sinyallerinin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[19] Makineci, M.N., Doğanalp, S., “Detection of Equivalent Water Thickness Changes with GRACE/GRACE-FO Satellites on The Caspian Sea Between 2002- 2021”. Turkish Journal of Remote Sensing, 4(2) , 53-61, 2022.

[20] X. Liu, “Global Gravity Field Recovery from Satellite-to-satellite Tracking Data with the Acceleration Approach”, *Netherlands Geodetic Commission*, 2008.

[21] Simav, Mehmet, Hasan Yildiz, And Ersoy Arslan. "GRACE Uydu Verileri ile Yer Sistemi İçerisindeki Kütle Değişimlerinin İzlenmesi." *Harita Dergisi* 149, 15-27, 2013.

[22] B. F. Chao, “On inversion for mass distribution from global (time-variable) gravity field,” vol. 39, no. 3, pp. 223–230, Apr. 2005, doi:10.1016/j.jog.2004.11.001.

[23] Wahr, J., Molenaar, M., ve Bryan, F., “Time Variability of the Earth’s Gravity Field: Hydrological and Oceanic Effects and Their Possible Detection Using GRACE”, Journal of Geophysical Research, 103 (B12): 30,205-30,229, 1998.

[24] W. E. Farrell, “Deformation of the Earth by surface loads,” *Reviews of Geophysics*, vol. 10, no. 3, p. 761, 1972, doi:10.1029/rg010i003p00761.

[25] G. Blewitt and P. Clarke, “Inversion of Earth’s changing shape to weigh sea level in static equilibrium with surface mass redistribution,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B6, Jun. 2003, doi:10.1029/2002jb002290.

[26] S. D. Pagiatakis, “The response of a realistic earth to ocean tide loading,” *Geophysical journal international*, vol. 103, no. 2, pp. 541–560, Nov. 1990, doi:10.1111/j.1365-246x.1990.tb01790.x.

[27] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice*. Vienna: Springer Vienna, 1993.

[28] John Olusegun Ogundare, *Precision surveying : the principles and geomatics practice*. Hoboken: Wiley, 2016.

[29] P. Tregoning, Christopher J.E. Watson, Guillaume Ramillien, H. McQueen, and J. Zhang, "Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS," *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 15, p. n/a-n/a, Aug. 2009, doi: 10.1029/2009gl038718.

[30] V. Tesmer, P. Steigenberger, S. Bordas, and Torsten Mayer-Gürr, "Vertical deformations from homogeneously processed GRACE and global GPS long-term series," vol. 85, no. 5, pp. 291–310, Feb. 2011, doi: 10.1007/s00190-010-0437-8.

[31] R. Liu, R. Zou, J. Li, C. Zhang, B. Zhao, and Y. Zhang, "Vertical Displacements Driven by Groundwater Storage Changes in the North China Plain Detected by GPS Observations," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 2, p. 259, Feb. 2018, doi: 10.3390/rs10020259.

[32] V. G. Ferreira, H. D. Montecino, C. E. Ndehedehe, R. A. del Rio, A. Cuevas, and S. R. C. de Freitas, "Determining seasonal displacements of Earth's crust in South America using observations from space-borne geodetic sensors and surface-loading models," *Earth, Planets and Space*, vol. 71, no. 1, Aug. 2019, doi: 10.1186/s40623-019-1062-2.

[33] J. C. Davis, P. Elosegui, J. X. Mitrovica, and M. E. Tamisiea, "Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS," *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 24, Dec. 2004, doi: 10.1029/2004gl021435.

[34] A. P. Saji *et al.*, "Surface Deformation and Influence of Hydrological Mass Over Himalaya and North India Revealed From a Decade of Continuous GPS and GRACE Observations," *Journal of geophysical research. Earth surface*, vol. 125, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1029/2018jf004943.

[35] P. S. Sunil, A. P. Saji, K. Vijay Kumar, M. Ponraj, S. Amirtharaj, and A. Dhar, "Revealing the Contemporary Kinematics of Antarctic Plate Using GPS and GRACE Data," *Earth and environmental sciences library*, pp. 343–359, Jan. 2022, doi: 10.1007/978-3-030-87078-2_18.

[36] L. Wang, C. Chen, X. Ma, Z. Fu, Y. Zheng, and Z. Peng, "Evaluation of GRACE mascon solutions using in-situ geodetic data: The case of hydrologic-induced crust displacement in the Yangtze River Basin," *Science of the total environment*, vol. 707, pp. 135606–135606, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135606.

[37] P. Wang, S.-Y. Wang, J. Li, J. Chen, and Z. Qi, "Comparison of GRACE/GRACE-FO Spherical Harmonic and Mascon Products in Interpreting GNSS Vertical Loading Deformations over the Amazon Basin," *Remote sensing*, vol. 15, no. 1, pp. 252–252, Jan. 2023, doi: 10.3390/rs15010252.

[38] A. J. alex @gfz-potsdam.de, "GFZ Satellite Mission CHAMP," *www.gfz-potsdam.de*.https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/infrastructure/gfz-satellite-mission-champ

[39] Geomagnetism, . Geophysics, Departments, Gfz Publication Database, Deutsches GeoForschungsZentrum, "CHAMP: overview of final ME products and format description," Jan. 2019, doi: 10.2312/gfz.b103-19104.

[40] "GOCE - Earth Online," *earth.esa.int*. https://earth.esa.int/eogateway/missions/goce

[41] https://jpl.nasa.gov, "Grace - Earth Missions - NASA Jet Propulsion Laboratory," *NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL)*. https://www.jpl.nasa.gov/missions/gravity-recovery-and-climate-experiment-grace

[42] "GRACE - Earth Online," *earth.esa.int*. https://earth.esa.int/eogateway/missions/grace

[43] "The chase of GRACE satellites," *www.dlr.de*. https://www.dlr.de/en/images/2017/4/the-chase-of-grace-satellites_28810/

[44] "GOCE completes its mission," *www.esa.int*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/GOCE/GOCE_completes_its_mission

[45] "Overview | Mission," *GRACE-FO*. https://gracefo.jpl.nasa.gov/mission/overview/

[46] E. Rangelova and M. G. Sideris, "Contributions of terrestrial and GRACE data to the study of the secular geoid changes in North America," *Journal of Geodynamics*, vol. 46, no. 3–5, pp. 131–143, Oct. 2008, doi:10.1016/j.jog.2008.03.006.

[47] S.-C. . Han, "Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake," *Science*, vol. 313, no. 5787, pp. 658–662, Aug. 2006, doi: 10.1126/science.1128661.

[48] S. Choi, C.-W. Oh, and H. Luehr, "Tectonic relation between northeastern China and the Korean peninsula revealed by interpretation of GRACE satellite gravity data," *Gondwana Research*, vol. 9, no. 1–2, pp. 62–67, Jan. 2006, doi:10.1016/j.gr.2005.06.002.

[49] D. Wang, B. Zhao, Y. Li, J. Yu, Y. Chen, and X. Zhou, "Determination of tectonic and nontectonic vertical motion rates of the North China Craton using dense GPS and GRACE data," *Journal of Asian earth sciences*, vol. 236, pp. 105314–105314, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jseaes.2022.105314

[50] "The successful US/German satellite gravity mission GRACE comes to an end after 15 years," *www.gfz-potsdam.de*, Oct. 27, 2017. https://www.gfz-potsdam.de/en/press/news/details/the-successful-us/german-satellite-gravity-mission-grace-comes-to-an-end-after-15-years

[51] "The GRACE Satellites," *www.gfz-potsdam.de*. https://www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/projects/grace/the-grace-satellites

[52] C. Dunn, et al. "Instrument of GRACE GPS augments gravity measurements." *GPS world* 14.2, 16-29. 2003.

[53] R. Rummel, G. Balmino, J. A. Johannessen, P. Visser, and P. L. Woodworth, "Dedicated gravity field missions—principles and aims," vol. 33, no. 1–2, pp. 3–20, Jan. 2002, doi:10.1016/s0264-3707(01)00050-3.

[54] F. W. Landerer *et al.*, "Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance," *Geophysical Research Letters*, vol. 47, no. 12, Jun. 2020, doi: 10.1029/2020gl088306.

[55] https://www.jpl.nasa.gov, "GRACE - FO," *NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL)*. https://www.jpl.nasa.gov/missions/gravity-recovery-and-climate-experiment-follow-on-grace-fo

[56] "Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO) | PO.DAAC / JPL / NASA," *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC)*, Mar. 12, 2020. https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE-FO?tab=mission-objectives&sections=about

[57] "GRACE - Gravity Recovery and Climate Experiment," *www2.csr.utexas.edu*. https://www2.csr.utexas.edu/grace/asdp.html

[58] B Hofmann-Wellenhof, H. Moritz, and Springerlink (Online Service, *Physical geodesy*. Wien ; New York Springerwiennewyork, 2006.

[59] C. Aydın., Fiziksel Jeodezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği, Lisans Ders Notları, İstanbul, 2014.

[60] A. Cazenave and J. Chen, "Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in theEarth system," *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 298, no. 3–4, pp. 263–274, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.epsl.2010.07.035.

[61] *Gps.gov*, 2022. https://www.gps.gov/multimedia/images/GPS-III-A.jpg

[62] R. M. Heiberger and E. Neuwirth, *R Through Excel*. Springer Science & Business Media, 2010.

[63] F. B. Reißland Elmas Sinem Ince, Sven, "ICGEM International Center for Global Gravity Field Models," *icgem.gfz-potsdam.de*. https://icgem.gfz-potsdam.de/sl/temporal

[64] "Index of /pub/slr/degree_2," *download.csr.utexas.edu*. https://download.csr.utexas.edu/pub/slr/degree_2/ (Erişim tarihi 10.06.2023)

[65] "Mascon Visualization Tool," *ccar.colorado.edu*. https://ccar.colorado.edu/grace/gsfc.html

[66] "MAGNET + Global GPS Network Map," *geodesy.unr.edu*. http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html

A

GPS GRACE GENLİK VE FAZ SONUÇLARI

Tablo A.1 GPS ve GRACE düşey yer değiştirme yıllık sinyal genlik ve faz sonuçları

Nokta Adı	GPS Genliği (mm)	Fi GPS (rad)	GRACE Genliği (mm)	Fi Grace (rad)	GPS Grace Farkı (ay)
ADAN	5.6786	-2.4864	3.1862	-2.9239	-0.822
ADIY	4.1019	2.139	3.8401	-3.0228	2.136
AMAS	3.1212	2.0239	4.0779	-3.0016	2.3976
ANRK	3.1501	2.6074	3.7312	-2.9082	1.446
AYD1	2.8246	2.2364	2.2504	-2.638	2.694
BALK	5.0621	2.5486	3.0222	-2.7318	1.938
BAYB	3.5984	1.7699	4.294	-3.1108	2.694
BILE	2.8865	2.0181	3.3634	-2.7999	2.7924
BOLU	3.3573	1.4485	3.7107	-2.8891	3.7452
BURS	5.2078	2.5697	3.3397	-2.7923	1.7412
CAVD	3.042	1.9905	2.2551	-2.692	3.0552
CORU	2.4919	1.9933	4.0064	-2.8781	2.4972
DEIR	3.3506	2.0716	2.9226	-2.739	2.7924
DIVR	2.6213	-1.8059	4.1792	-3.0433	-2.4636
DNZL	4.8613	2.3696	2.4454	-2.6973	2.3328
EMIR	3.1589	1.6592	3.3077	-2.8326	3.4164
HARC	3.3054	2.138	3.2152	-2.7815	2.5956
IGIR	3.1831	1.3822	4.2196	3.0502	3.186
INE1	1.6682	0.2076	3.9033	-2.9641	5.9136
ISPT	3.0517	2.006	2.7223	-2.7655	2.892
IZMI	4.7189	-0.0605	2.3844	-2.6359	7.0956
IZMT	5.1494	2.6076	3.5553	-2.8383	1.6104
KAPN	6.8295	-2.6415	3.2107	-2.8782	-0.4596
KARB	3.4804	2.3051	3.5139	-2.807	2.2332

Tablo A.1 GPS ve GRACE düşey yer değiştirme yıllık sinyal genlik ve faz sonuçları (devamı)

KAYS	3.8212	2.4846	2.9076	-2.9624	1.5768
KRS1	2.6282	0.1307	4.2283	3.0751	5.6184
KUTA	4.1132	2.069	3.2563	-2.8045	2.6604
MALY	4.6227	2.0504	4.0065	-3.031	2.2992
MUGL	5.6442	2.6813	2.0288	-2.6199	1.8408
SARY	3.4175	2.4849	3.4638	-2.7826	1.938
SIVS	3.3334	2.0319	4.1328	-3.0193	2.3652
SLEE	3.2379	2.5341	3.5706	-2.834	1.7412
SSEH	3.4215	1.3591	4.2218	-3.0524	3.5808
TEKR	5.1441	2.5775	3.3383	-2.7575	1.8072
TRAB	2.8536	1.7549	4.246	-3.1039	2.7276
USAK	3.7103	2.862	2.9084	-2.7552	1.1508
VANA	3.6826	-2.5946	4.1934	3.101	-1.116
VIRA	2.0733	2.3316	3.7953	-3.0577	1.7088
YENC	5.8884	2.4808	3.0327	-2.7175	2.1036
YOZY	4.1116	2.3696	3.946	-2.964	2.5296

B

REGRESYON KATSAYI DEĞERLERİ

Tablo B.1 Kuadratik regresyon katsayıları

Mascon No	a_0	a_1	a_2
5321	10.0872	-1.503	0.1743
5322	10.0945	-1.5036	0.1775
5323	10.1043	-1.5038	0.1791
8983	10.1573	-1.5043	0.1686
8984	10.1689	-1.5071	0.168
8985	9.9773	-1.4972	0.2304
8986	10.1165	-1.5029	0.1791
8987	10.1299	-1.5011	0.178
8988	10.1432	-1.4995	0.177
8989	10.1541	-1.5009	0.1781
8990	10.16	-1.5087	0.1836
8991	10.1567	-1.5252	0.1951
8992	10.1393	-1.5471	0.2097
8993	10.1054	-1.5645	0.2178
8994	10.0574	-1.5642	0.2177
8995	10.0046	-1.5302	0.2231
8996	10.1009	-1.4939	0.1768
8997	10.1076	-1.4928	0.1804
8998	10.1157	-1.4925	0.1832
8999	10.1246	-1.493	0.1858
9000	10.133	-1.495	0.1893
9001	10.1388	-1.4998	0.1945
9002	10.1395	-1.5088	0.2022
9003	10.1322	-1.5217	0.2109
9004	10.1137	-1.5362	0.2162
9005	10.0813	-1.5463	0.2165

Tablo B.1 Kuadratik regresyon katsayıları (devamı)

9006	10.1037	-1.4855	0.1886
9007	10.1082	-1.4864	0.1932
9008	10.1175	-1.4922	0.2026
9009	10.1197	-1.4974	0.2074
9010	10.0962	-1.4958	0.172
9011	10.0988	-1.491	0.1651
9012	10.0988	-1.4879	0.1757
9013	10.1005	-1.486	0.183
9014	10.1132	-1.4886	0.1978
9015	10.1178	-1.5048	0.2114
9016	10.1005	-1.4831	0.1681
9017	10.0982	-1.4842	0.1842
9018	10.0973	-1.4847	0.1941
9019	10.0978	-1.4856	0.2007
9020	10.0994	-1.4872	0.2055
9021	10.1015	-1.4896	0.2089
9022	10.1033	-1.4928	0.211
9023	10.1036	-1.4972	0.2112
9024	10.1007	-1.4751	0.1697
9025	10.0974	-1.4875	0.195
9026	10.0942	-1.4938	0.2097
9027	10.0921	-1.4965	0.2169
9028	10.0911	-1.4978	0.2189
9029	10.0911	-1.4991	0.2174
9030	10.0911	-1.5013	0.2134
9031	10.0895	-1.5047	0.209
9032	10.0848	-1.5226	0.2385
9033	10.0814	-1.5222	0.2314
9034	10.0792	-1.5217	0.2206
9035	10.0767	-1.5213	0.2116
9044	9.9428	-1.3823	0.2628
9045	9.9188	-1.205	0.3158
9046	9.9579	-1.4514	0.2449

Tablo B.1 Kuadratik regresyon katsayıları (devamı)

9047	9.9205	-1.317	0.2865
9048	9.8912	-1.1098	0.3486
9051	9.9854	-1.4991	0.2303
9052	9.9384	-1.417	0.2572
9053	9.8974	-1.282	0.3008
9057	9.9706	-1.4779	0.2356
9058	9.9252	-1.4059	0.2614
9059	9.8845	-1.2941	0.299
9062	9.9273	-1.4196	0.2557
9065	9.9486	-1.448	0.2429
9072	10.0357	-1.5388	0.2183
9073	10.1094	-1.5145	0.2132
9074	10.0909	-1.5248	0.2133
9075	10.0595	-1.5291	0.2144
9076	10.0173	-1.5166	0.2207
9077	10.1003	-1.5035	0.2099
9078	10.0905	-1.5111	0.2087
9079	10.0715	-1.5167	0.2094
9080	10.0427	-1.5155	0.2135
9081	10.0064	-1.502	0.2218
9082	9.9665	-1.4713	0.2356
9083	10.0842	-1.5084	0.2059
9084	10.0736	-1.5109	0.2056
9085	10.0569	-1.5106	0.2081
9086	10.0345	-1.506	0.2131
9087	10.0072	-1.4953	0.2205
9088	9.9775	-1.4765	0.2305
9089	10.0671	-1.5162	0.2053
9090	10.0593	-1.5113	0.2064
9091	10.0492	-1.5059	0.209
9092	10.0363	-1.5006	0.2126
9093	10.0205	-1.495	0.2173
9094	10.0024	-1.488	0.2229
9145	10.0729	-1.5198	0.2066

Tablo B.2 Zamansal regresyon katsayıları

Mascon No	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
5321	0.649	0.0526	-0.0095	0.3001	-0.1402	-0.0622	-0.4933
5322	0.6712	0.0591	-0.0103	0.3425	-0.0701	-0.0538	-0.5845
5323	0.72	0.0673	-0.0114	0.3827	0.0129	-0.0611	-0.6766
8983	1.1543	0.1041	-0.0178	0.5277	0.5289	-0.204	-0.8982
8984	1.1597	0.1306	-0.02	0.5217	0.5672	-0.2854	-1.0087
8985	-0.9103	0.1958	-0.0098	0.6341	0.592	-0.9492	-1.0117
8986	0.7905	0.0777	-0.0129	0.4148	0.1049	-0.0868	-0.7662
8987	0.8756	0.0903	-0.0146	0.4346	0.1981	-0.1302	-0.8503
8988	0.9647	0.1037	-0.0164	0.442	0.2774	-0.1852	-0.9277
8989	1.0432	0.1166	-0.0181	0.4432	0.3184	-0.2418	-1
8990	1.0923	0.1272	-0.0193	0.4514	0.289	-0.2892	-1.0694
8991	1.0855	0.1316	-0.0197	0.4855	0.1591	-0.3208	-1.13
8992	0.9761	0.1249	-0.0185	0.5603	-0.0654	-0.3456	-1.1608
8993	0.6882	0.1113	-0.0153	0.6611	-0.2826	-0.3992	-1.1294
8994	0.195	0.1111	-0.0115	0.7261	-0.2986	-0.5181	-1.0238
8995	-0.4083	0.1429	-0.0093	0.6925	-0.0091	-0.7055	-0.9078
8996	0.412	0.1151	-0.0128	0.2716	-0.0374	-0.124	-0.7636
8997	0.5014	0.1108	-0.0133	0.3002	0.013	-0.1309	-0.8234
8998	0.6114	0.1082	-0.014	0.323	0.0617	-0.1479	-0.8761
8999	0.7341	0.1075	-0.015	0.3388	0.1019	-0.1731	-0.9211
9000	0.8584	0.1079	-0.016	0.349	0.1211	-0.2022	-0.958
9001	0.9692	0.1079	-0.0168	0.3593	0.0994	-0.2287	-0.9867
9002	1.0461	0.1052	-0.0172	0.3806	0.0131	-0.2467	-1.0039
9003	1.0554	0.0977	-0.0167	0.4261	-0.1507	-0.2568	-0.9989
9004	0.9365	0.0878	-0.015	0.5014	-0.36	-0.2738	-0.9542
9005	0.6236	0.0863	-0.0125	0.5867	-0.5046	-0.3264	-0.8577
9006	0.4021	0.1244	-0.0137	0.2146	0.0253	-0.1667	-0.8684
9007	0.5307	0.1133	-0.0138	0.2327	0.0282	-0.1716	-0.8878
9008	0.8055	0.0964	-0.0146	0.2636	-0.0155	-0.1881	-0.8955
9009	0.9233	0.089	-0.0149	0.282	-0.0849	-0.1943	-0.8801
9010	0.3493	0.1202	-0.0126	0.24	-0.0856	-0.127	-0.6977

Tablo B.2 Zamansal regresyon katsayıları (devamı)

9011	0.1277	0.1675	-0.0146	0.1513	-0.0147	-0.1817	-0.7587
9012	0.1958	0.1526	-0.0141	0.1729	0.0001	-0.1712	-0.8041
9013	0.289	0.1376	-0.0137	0.1945	0.0146	-0.1663	-0.8404
9014	0.6687	0.1042	-0.0142	0.2485	0.0177	-0.1795	-0.8973
9015	0.9958	0.082	-0.0148	0.311	-0.2023	-0.196	-0.8449
9016	0.0975	0.1772	-0.0151	0.0943	0.1233	-0.2125	-0.7923
9017	0.1728	0.1583	-0.0144	0.1041	0.0967	-0.1973	-0.8236
9018	0.2682	0.1396	-0.0137	0.1178	0.0685	-0.1854	-0.8411
9019	0.3801	0.1226	-0.0133	0.1342	0.0359	-0.1766	-0.8462
9020	0.5053	0.1077	-0.0131	0.1523	-0.0047	-0.1701	-0.8384
9021	0.6368	0.0951	-0.0131	0.1714	-0.0576	-0.1652	-0.8161
9022	0.761	0.0851	-0.0132	0.1917	-0.1284	-0.1603	-0.777
9023	0.8575	0.0785	-0.0133	0.2155	-0.2223	-0.1525	-0.7168
9024	0.1915	0.1638	-0.0148	0.0453	0.2691	-0.2416	-0.7464
9025	0.2291	0.151	-0.0142	0.0395	0.1928	-0.2132	-0.7874
9026	0.2966	0.1343	-0.0135	0.0474	0.1155	-0.1872	-0.7992
9027	0.3865	0.1167	-0.0128	0.0648	0.0377	-0.1653	-0.7861
9028	0.4901	0.1011	-0.0124	0.0873	-0.0418	-0.1475	-0.7509
9029	0.5957	0.0893	-0.0121	0.1117	-0.1249	-0.1313	-0.6934
9030	0.6901	0.0821	-0.0121	0.137	-0.2117	-0.112	-0.6107
9031	0.7624	0.0789	-0.0122	0.1642	-0.2983	-0.085	-0.4986
9032	0.3885	0.1078	-0.012	0.0122	0.0326	-0.1274	-0.6906
9033	0.4509	0.0944	-0.0113	0.0426	-0.0767	-0.0977	-0.6192
9034	0.5167	0.0866	-0.011	0.0737	-0.1697	-0.0677	-0.5168
9035	0.5895	0.0815	-0.0109	0.104	-0.2418	-0.0297	-0.3836
9044	-1.6259	0.3097	-0.0133	0.3925	1.1557	-1.2506	-1.1778
9045	-2.7254	0.5239	-0.0222	0.0171	1.7448	-1.7434	-1.8167
9046	-1.068	0.2188	-0.0101	0.5445	0.5042	-0.9681	-0.9271
9047	-1.9117	0.3596	-0.015	0.2715	1.1218	-1.3676	-1.2692
9048	-3.1731	0.5971	-0.0249	-0.1737	1.7751	-2.0079	-2.1568
9051	-0.4682	0.1525	-0.0091	0.5992	-0.1186	-0.6414	-0.6667
9052	-1.1424	0.2369	-0.0106	0.4627	0.3905	-0.9502	-0.7761
9053	-1.9907	0.3739	-0.0153	0.2027	0.997	-1.4229	-1.2051
9057	-0.4261	0.1564	-0.0091	0.506	-0.1979	-0.5308	-0.3858

Tablo B.2 Zamansal regresyon katsayıları (devamı)

9058	-1.0493	0.2333	-0.0105	0.4049	0.2402	-0.8495	-0.5275
9059	-1.7848	0.3442	-0.0141	0.2093	0.7577	-1.3113	-0.9142
9062	-0.7715	0.2069	-0.0099	0.3623	0.0657	-0.6228	-0.1997
9065	-0.3445	0.1649	-0.0093	0.3072	-0.1011	-0.3061	0.127
9072	0.1279	0.1052	-0.01	0.634	-0.4405	-0.4425	-0.734
9073	0.9848	0.0766	-0.0142	0.3584	-0.3625	-0.1945	-0.7784
9074	0.8449	0.0757	-0.0129	0.4244	-0.5216	-0.1997	-0.6707
9075	0.5488	0.0843	-0.0111	0.4918	-0.5925	-0.2352	-0.5327
9076	0.1117	0.1088	-0.0095	0.5287	-0.4909	-0.3349	-0.4131
9077	0.9032	0.0758	-0.0133	0.2472	-0.3381	-0.1382	-0.6278
9078	0.8768	0.0759	-0.0128	0.2904	-0.4596	-0.1177	-0.5036
9079	0.7593	0.0785	-0.0119	0.3423	-0.5516	-0.1018	-0.3509
9080	0.5347	0.0865	-0.0105	0.3918	-0.568	-0.1149	-0.1982
9081	0.1966	0.1066	-0.0094	0.422	-0.4716	-0.1893	-0.0917
9082	-0.2461	0.1459	-0.009	0.4163	-0.2532	-0.3537	-0.0797
9083	0.8049	0.0775	-0.0121	0.1947	-0.3767	-0.0489	-0.3574
9084	0.8079	0.076	-0.0117	0.228	-0.4371	-0.0091	-0.1964
9085	0.7549	0.0753	-0.011	0.2619	-0.4694	0.0223	-0.034
9086	0.624	0.079	-0.01	0.2926	-0.4622	0.0278	0.1054
9087	0.396	0.0926	-0.0092	0.3148	-0.4029	-0.0142	0.1941
9088	0.0661	0.1209	-0.0089	0.3218	-0.2823	-0.1232	0.2065
9089	0.7587	0.068	-0.0105	0.1556	-0.312	0.066	-0.062
9090	0.8256	0.061	-0.0102	0.1732	-0.3194	0.1119	0.0946
9091	0.8493	0.0572	-0.0099	0.1859	-0.3197	0.1475	0.2302
9092	0.8065	0.0593	-0.0095	0.1961	-0.3175	0.1644	0.3349
9093	0.6795	0.0694	-0.0092	0.2053	-0.3099	0.1516	0.3992
9094	0.461	0.0895	-0.009	0.2133	-0.2866	0.0973	0.4126
9145	0.6731	0.0755	-0.0108	0.1321	-0.2887	0.0166	-0.2269

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. Güney ve C. Aydın, "GRACE ve GPS Zaman Serilerinin Türkiye için Karşılaştırılması," in Proceedings of *4th International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies*, 2024, s.591-592.