T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMANA BAĞLI UYDU GRAVİTE ÇÖZÜMLERİNDEN ELDE EDİLEN KÜTLE DEĞİŞİMİ SİNYALLERİNİN ANALİZİ

ÖZGE GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOMATİK PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. CÜNEYT AYDIN

İSTANBUL, 2018

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZAMANA BAĞLI UYDU GRAVİTE ÇÖZÜMLERİNDEN ELDE EDİLEN KÜTLE DEĞİŞİMİ SİNYALLERİNİN ANALİZİ

Özge GÜNEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 20.12.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Uğur DOĞAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yer gravite alanı izleme uydu sistemi GRACE'in Seviye-3 çözümlerinden GSFC Mascon ve DDK filtreli çözümlerine ilişkin eşdeğer su kalınlığı zaman serileri analiz edilmiştir. 2003-2016 yılları arasındaki veri seti kullanılarak global ve bölgesel ölçekte ele alınan çözümler farklı matematiksel ve stokastik yaklaşımlar altında incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca benimle bilgisini paylaşan, tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Cüneyt AYDIN'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmamda kullandığım GSFC Mascon ve DDK çözümlerini sağlayan CCAR (Colorado Center for Astrodynamics Research) ve ICGEM (International Centre for Global Earth Models) veri merkezlerine de bir teşekkürü borç bilirim.

Saygılarımla.

Aralık, 2018

Özge GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xiii

ÖZET xiv

ABSTRACT xvi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 5

BÖLÜM 2

GRAVİTE DEĞİŞİMLERİNİN BELİRLENMESİNDE GRACE UYDU SİSTEMİ ve ZAMAN SERİSİ ANALİZİ 6

2.1 GRACE Uydu Sistemi 8
2.1.1 GRACE Ölçme Sistemi 10
2.1.2 GRACE Veri Sistemi 11
2.2 Eşdeğer Su Kalınlığı (EWT-Equivalent Water Thickness) 13
2.3 Zamana Bağlı Kütle Değişiminin GRACE ile İzlenmesinde Harmonik Regresyon Modeli 16
2.4 Zaman Serisi Analizi 17
2.4.1 Sinüzoidal Sinyal 21
2.4.2 Zaman Serilerinde Spektral Analiz 24
2.4.3 Zaman Serilerinde Gürültüler, Spektral İndeksleri ve PSD grafikleri . 27
2.4.4 Renkli Gürültüler için Kovaryans Matrisi Modeli 31
2.5 Gürültü Genliklerinin Varyans Bileşenlerinin Kestirimi ile Elde Edilmesi . 33

2.5.1 Varyans Bileşenlerinin Kestirimi 33
2.5.2 Gürültü Genlikleri Bilinmeyen Harmonik Regresyon Modeli 35
2.6 EWT Zaman Serisinde PSD grafikleri 36

BÖLÜM 3

SAYISAL UYGULAMA 40

3.1 Uygulamanın Amacı ve Kapsamı 40
3.2 Verilerin Tanıtılması 40
3.2.1 DDK Verisi 41
3.2.2 Mascon Verisi 43
3.2.2.1 GRCTellus JPL Mascon Çözümleri 44
3.2.2.2 GSFC Mascon Çözümleri 48
3.3 Veri Değerlendirme İşlem Adımları 54
3.4 Yıllık Trend Kestirimi 58
3.4.1 Global Ölçekte EWT Analizi 60
3.4.2 Türkiye Bölgesi için EWT Analizi 72
3.4.3 Antarktika ve Grönland Bölgeleri için EWT Analizi 83

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER 93

KAYNAKLAR 97

EK-A

EN KÜÇÜK KARELER KESTİRİMİ 106

EK-B

TÜRKİYE BÖLGESİ İÇİN DDK1, DDK3 ve DDK4 TREND DEĞERLERİ 107

EK-C

TÜRKİYE BÖLGESİ İÇİN ZAMAN SERİLERİ 108

C-1 Standart Yaklaşımdan Elde Edilen EWT-Zaman Serileri 108
C-2 Korelasyonlu Yaklaşımdan Elde Edilen EWT-Zaman Serileri 113

ÖZGEÇMİŞ 117

SİMGE LİSTESİ

a	Sıfır eki
a_E	Referans elipsoidin büyük yarı ekseni
$\mathbf{A}$	Katsayılar matrisi
A	Sinyal genliği
$A1$	Yıllık genlik
$A2$	Yarıyıllık genlik
b	Yıllık trend
C_{lm}, S_{lm}	Aylık küresel harmonik katsayılar
$\mathbf{C}$	Kovaryans matris
$\mathbf{C}_{\bar{y}\bar{y}}$	Dengeli ölçülerin kovaryans matrisi
c_1, s_1	Yıllık sinüslü ve kosinüslü terimlerin genlikleri
c_2, s_2	Yarıyıllık sinüslü ve kosinüslü terimlerin genlikleri
$\mathbf{B}\boldsymbol{\gamma}$	Gauss-Helmert modelinde hata vektörü
$\mathbf{I}$	Birim matris
f	Frekans
f_0, P_0	Güç spektrumunda normalizasyon sabitleri
$F_{r1\text{-}r2,r2,0.95}$	%5 yanılma olasılığına karşılık gelen F-dağılımının güven sınırı değeri
GM	Jeosentrik çekim sabiti
k_l	l derecesine bağlı Love yükleme sayısı
l	Küresel harmonik açınımın derecesi
l_{max}	Maksimum harmonik katsayı derecesi
L	Zaman serisinin uzunluğu
L_0	Güç spektrumunda sabit bir fonksiyon
m	Küresel harmonik açınımın sırası
n	Ölçü sayısı
$\mathbf{Q}$	Ağırlık katsayıları matrisi
$\mathbf{P}$	Ağırlık matrisi
$P_{lm}(\cos\vartheta)$	Tam normalleştirilmiş Legendre fonksiyonu
r	Serbestlik derecesi
s_0^2	Birim ağırlıklı ölçünün sonsal varyansı
S_{yy}	Periyodogram kestirimi
$T(\xi,\vartheta,\lambda)$	Bozucu potansiyel

$\mathbf{T}_c$	Renkli gürültü için dönüşüm matrisi
T	Periyot
T'	Model testinde test değeri
u	Bilinmeyen sayısı
$\mathbf{v}$	Düzeltme vektörü
$\mathbf{V}$	Varyans bileşen kestiriminde ağırlık katsayıları matrisi
$\mathbf{y}$	Ölçü vektörü
$\mathbf{x}$	Bilinmeyenler vektörü
γ	Dalga boyu
$\Delta\breve{C}_{lm}$, $\Delta\breve{S}_{lm}$	Yüzey yoğunluk katsayı değişimleri
ΔC_{lm}, ΔS_{lm}	Modeller arasındaki küre harmonik katsayı değişimleri
Δe	Eşdeğer su kütlesi değişimi (EWT)
Δt	Örnekleme aralığı
$\Delta\sigma$	Yüzey kütle yoğunluğu değişimi
ϑ	Kutup uzaklığı
θ	Varyans çarpanı
κ	Spektral indeks
λ	Jeodezik boylam
μ	Beklenen değer
ξ	Yarıçap vektörü
ρ_{ave}	Yeryuvarı ortalama yoğunluğu
ρ_w	Suyun yoğunluğu
σ_0^2	Birim ağırlıklı ölçünün önsel varyansı
σ_1^2, σ_2^2	Varyans bileşenleri
σ_w^2, σ_c^2	Beyaz ve renkli gürültülerin varyans bileşenleri
σ_c	Renkli gürültü genliği
σ_f	Kırpışma gürültü genliği
φ	Faz
ϕ	Mekansal çözünürlük
ψ	Gama fonksiyonuna ve spektral indekse bağlı fonksiyon
ω	Açısal frekans
Ω	Düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamı

KISALTMA LİSTESİ

ACC	Accelerometer
BIQUE	Best Invariant Quadratic Unbiased Estimation
BS	Buz Sahanlığı
CCAR	Colorado Center for Astrodynamics Research
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
CSR	Center for Space Research
CRI	Coastline Resolution Improvement
DDK	Decorrelation Filter
DLR	Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt DLR
DFT	Discrete Fourier Transform
EKKY	En Küçük Kareler Yöntemi
ESA	European Space Agency
EWT	Equivalent Water Thickness
FFT	Fast Fourier Transform
GFZ	GeoForschung Zentrum
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GSFC	Goddard Space Flight Center
GPS	Global Positioning System
GRACE-FO	Gravity Recovery and Climate Experiment – Follow On
IAUE	Iterative Almost Unbiased Estimation
ICESat	Ice, Cloud and land Elevation Satellite
ICGEM	International Centre for Global Earth Models
InSAR	İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Sistemi
JPL	Jet Propulsion Laboratory
KBR	K-Bant Range
L0	Level-0
L1	Level-1
L2	Level-2
L3	Level-3
LEO	Low Earth Orbit
NASA	National Aeronautics and Space Administration

Mascon	Mass Concentration
MINQUE	Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation
PSD	Power Spectral Density
SDS	Science Data System
SNR	Signal to Noise Ratio
SCA	Star Camera Assembly
SGG	Satellite Gravity Gradiometry
SST-II	Satellite to Satellite Tracking in the low-low mode
SST-h1	Satellite to Satellite Tracking in the high-low mode
VBK	Varyans Bileşen Kestirimi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 (a) CHAMP, (b) GOCE, (c) GRACE ve (d) GRACE-FO uyduları [51], [59], ... [60], [58] 8
Şekil 2. 2 GRACE uyduları [11] 9
Şekil 2. 3 GRACE uydularının izlediği yörüngeler [63] 9
Şekil 2. 4 GRACE uydusu ölçme tekniği 10
Şekil 2. 5 GRACE uydusu üzerindeki donanımlar [75] 11
Şekil 2. 6 GRACE uydusu veri akış şeması [76] 12
Şekil 2. 7 GRACE verisinin içerdiği su katmanları [5] 14
Şekil 2. 8 Amazon havzasına ilişkin zaman EWT zaman serisi örneği 16
Şekil 2. 9 Zaman serisinin temel bileşenleri 18
Şekil 2. 10 Bir koordinat zaman serisi ve trend örneği 19
Şekil 2. 11 Bir zaman serisinde mevsimsel etki örneği [86] 19
Şekil 2. 12 Sinüzoidal sinyal ve gürültü (Kesikli eğri gözlemi, mavi eğri modeli, noktalar ise artık hatayı yani gürültüyü gösterir) 20
Şekil 2. 13 Dalga yapısınına ilişkin genlik ve dalga boyu 21
Şekil 2. 14 Farklı faz açılarına sahip sinyaller (üst, orta ve alt şekillerde faz açısı, sırasıyla $\varphi=-\pi/2$, $\varphi=0$ ve $\varphi=\pi/2$'dir) 22
Şekil 2. 15 İki farklı sinüs sinyali arasındaki faz kayıklığı 23
Şekil 2. 16 $N(0,1)$ dağılımlı rasgele hata eklenmiş "$0{,}5\cos(2\pi t/12)+\cos(2\pi t/6+\pi/18)$" sinyali 25
Şekil 2. 17 "$0{,}5\cos(2\pi t/12)+\cos(2\pi t/6+\pi/18)$" sinyalinin normalize edilmiş frekans değerlerine karşılık PSD grafiği (kutu içindeki değerler maksimum PSD'ye sahip frekans değerlerini göstermektedir) 26
Şekil 2. 18 Bir jeodezik sinyalde aynı anda yer alabilecek gürültü türleri 27
Şekil 2. 19 Zaman serisindeki gürültülerin spektral indeks değerleri 28
Şekil 2. 20 Şekil 2.16'da verilmiş zaman serisinin log-log PSD grafiği 29
Şekil 2. 21 Şekil 2.16'da verilmiş zaman serisinin (a) kırpışma gürültüsü içermesi, (b) rasgele yürüyüş gürültüsü içermesi, (c) $\kappa=1$ spektral indeksli mavi gürültü içermesi durumunda log-log PSD grafikleri 30
Şekil 2. 22 Kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültülerinin zaman serisindeki korelasyon matrisleri 33
Şekil 2. 23 Trend çıkarılmış EWT zaman serisinde log-log PSD grafiği (a) Grönland dış (kıyı) havzası, (b) Murray havzası ve (c) Amazon havzası 38

Şekil 2. 24 Trend, yıllık ve yarıyıllık dalgalar çıkarılmış EWT zaman serisinde log-log PSD grafiği (a) Grönland dış (kıyı) havzası, (b) Murray havzası ve (c) Amazon havzası 39
Şekil 3. 1 ICGEM web sayfası [104] 41
Şekil 3. 2 Grönland'a ilişkin ICGEM G3 Browser'dan elde edilen zaman serisi [104]. 42
Şekil 3. 3 DDK veri örnek dosyası 43
Şekil 3. 4 CCAR web sayfası arayüzü ve JPL Masconlar [107], [109] 45
Şekil 3. 5 JPL Mascon veri dosyası örneği ve zaman serisi grafiği 46
Şekil 3. 6 Kara ve okyanus alanlarında CRI filtresi ile karşılaştırılması [114] 48
Şekil 3. 7 GSFC Mascon Bölge Çözümleri – Bölgelerin Dağılımı [110] 49
Şekil 3. 8 GSFC Mascon havza çözümleri [110] 50
Şekil 3. 9 GSFC Mascon trend sekmesi web arayüzü [110] 51
Şekil 3. 10 GSFC Mascon örnek veri dosyası ve zaman serisi grafiği 52
Şekil 3. 11 GSFC Mascon yıllık trend ve genlik değerleri [120] 54
Şekil 3. 12 Veri değerlendirme işlem adımları 55
Şekil 3. 13 Zaman serilerinde ardışık periyotlar arasındaki gün biriminde zaman farkları a) GSFC-Mascon, b) DDK 56
Şekil 3. 14 Fırat-Dicle Havzası (a) Mascon ve (b) DDK2 çözümleri EWT zaman serisi 57
Şekil 3. 15 Veri boşlukları doldurulduktan sonra zaman serilerinde ardışık periyotlar arasındaki gün biriminde zaman farkları a) GSFC-Mascon, b) DDK 58
Şekil 3. 16 Kestirim işleminde kullanılan modeller 59
Şekil 3. 17 GSFC Mascon havzalarının global ölçekte dağılımı 60
Şekil 3. 18 Havzalar için standart fonksiyonel model altında (a) standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen yıllık trend parametreleri ..... (cm/yıl) 61
Şekil 3. 19 Havzalar için standart fonksiyonel model altında (a) standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen yıllık trend standart sapmaları (cm/yıl) 62
Şekil 3. 20 Havzalar için iki farklı stokastik yaklaşımdan elde edilen trend değerleri farkları (cm/yıl) 64
Şekil 3. 21 Standart yaklaşım altında elde edilen yıllık trend değerlerine ait %95 olasılıklı güven aralığı (a) alt sınır ve (b) üst sınır değerleri (cm/yıl) 66
Şekil 3. 22 Korelasyonlu yaklaşım altında elde edilen yıllık trend değerlerine ait %95 olasılıklı güven aralığı (a) alt sınır ve (b) üst sınır (cm/yıl) 67
Şekil 3. 23 Korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen kırpışma gürültüsü genlikleri ..... ($cm/yıl^{1/4}$) 69
Şekil 3. 24 Yıllık genlik değerleri (a) standart yaklaşım, (b) korelasyonlu yaklaşım.. 70
Şekil 3. 25 Yarıyıllık genlik değerleri (a) Standart yaklaşım, (b) korelasyonlu yaklaşım 71
Şekil 3. 26 Türkiye bölgesi için kullanılan GRACE GSFC Mascon hücreleri [110] 73
Şekil 3. 27 Türkiye için standart model ile elde edilen yıllık trend değerleri (a) GRACE GSFC Mascon, (b) DDK2 (cm/yıl) 74
Şekil 3. 28 Türkiye için standart model ile elde edilen yıllık trend standart sapmaları (a) GRACE GSFC Mascon, (b) DDK2 (cm/yıl) 74

Şekil 3. 29 Türkiye havza haritası ve uygulamada çalışılan havzalar 76
Şekil 3. 30 Türkiye Havzalarında Mascon ve DDK çözümlerine ilişkin EWT zaman serileri kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)..... 77
Şekil 3. 31 Farklı stokastik yaklaşımlardan elde edilen trend değerlerinin farkları.. 80
Şekil 3. 32 (a) Standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşım ile elde edilen yıllık genlikler; (c) standart yaklaşım ve (d) korelasyonlu yaklaşım ile elde edilen yarıyıllık genlikler (cm) 81
Şekil 3. 33 Farklı stokastik yaklaşımlardan elde edilen (a) yıllık ve (b) yarıyıllık genlik değerlerinin farkları..... 82
Şekil 3. 34 (a) Grönland topoğrafyası (kırmızı≈2000 m) ve (b) Antarktika topoğrafyası (kırmızı≈4000 m) [121] ve havzaları..... 84
Şekil 3. 35 (a) Grönland Dış ve (b) Batı Antarktika havzalarında EWT zaman serileri ve trend modelleri..... 84
Şekil 3. 36 Grönland dış havzası için korelasyonlu yaklaşımda karar verme akış şeması.....86
Şekil 3. 37 Havza bazında kestirilen kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)..... 87
Şekil 3. 38 Antarktika ve Grönland havzalarına ilişkin (a) yıllık ve (b) yarıyllık genlik değerleri (cm) 89
Şekil 3. 39 Antarktika buz örtü havzalarına ilişkin kırpışma gürültüsü genlikleri ..... (cm/yıl$^{1/4}$)..... 90
Şekil B. 1 Türkiye Bölgesi için (a) DDK1, (b) DDK3, (c) DDK4 (cm/yıl) 107
Şekil C. 1 Batı Karadeniz havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve . (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 109
Şekil C. 2 Sakarya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 110
Şekil C. 3 Konya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri.. 111
Şekil C. 4 Fırat Dicle havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 112
Şekil C. 5 Batı Karadeniz havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve . (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 113
Şekil C. 6 Sakarya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 114
Şekil C. 7 Konya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 115
Şekil C. 8 Fırat Dicle havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri 116

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3. 1 Bölgeler ve Mascon sayıları 50
Çizelge 3. 2 Batı Karadeniz havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları ..... (cm/yıl) 78
Çizelge 3. 3 Sakarya havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl)..... 78
Çizelge 3. 4 Konya havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl) 78
Çizelge 3. 5 Fırat-Dicle havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl). 79
Çizelge 3. 6 Standart stokastik yaklaşım sonucunda elde edilen yıllık trend ve ivme ... ($cm/yıl^2$) parametreleri (Parentez içindeki değerler standart sapmaları göstermektedir)..... 85
Çizelge 3. 7 Korelasyonlu yaklaşım sonucunda elde edilen yıllık trend (cm/yıl) ve ivme ($cm/yıl^2$) parametreleri (Parentez içindeki değerler standart sapmaları göstermektedir)..... 87
Çizelge 3. 8 Buz kütle değişimleri 91

ÖZET

ZAMANA BAĞLI UYDU GRAVİTE ÇÖZÜMLERİNDEN ELDE EDİLEN KÜTLE DEĞİŞİMİ SİNYALLERİNİN ANALİZİ

Özge GÜNEŞ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Yeryuvarı gravite alanının zamansal değişiminin alçak yörüngeli yakın yer uyduları ile izlenmesi yaklaşık 20 yıllık bir geçmişe dayanmaktadır. Bu uydulardan biri olan GRACE uydu sistemi de, 2002-2016 yılları arasında aylık periyotlarla yayımlanan veri seti sayesinde yeraltı su kaynaklarındaki kütle değişiminin izlenmesi, buzul kütlesindeki değişimin trendlerin belirlenmesi gibi özellikle hidrolojik değişimlere karşı duyarlı çalışmalarda önemli bilgi sağlamıştır. Bu çalışmada, GRACE veri türlerinden olan GSFC Mascon (2003-2016) ve DDK (2002-2016) filtreli aylık periyotlu eşdeğer su kalınlığı çözümleri kullanılmıştır. GSFC Mascon çözümleri, CCAR veri merkezinden global anlamda havza bazında, bölgesel anlamda ise bireysel Mascon hücreleri olarak elde edilmiştir. DDK filtreli çözümler ise, ICGEM veri merkezinden sağlanmıştır.

Global ve bölgesel ölçekteki hidrolojik değişimler harmonik regresyon modeli altında incelenmiştir. Trend, yıllık ve yarıyıllık periyodik sinyalden oluşan bu model, çalışmada standart fonksiyonel model olarak ele alınmıştır. Ayrıca yoğun olarak buz kütlesi içeren kutup bölgelerinde (Grönland ve Antarktika'da bulunan havzalarda) doğrusal trend modeli, ivme parametresi ile genişletilerek, farklı fonksiyonel yaklaşımların EWT analizinde trend değerlerini, standart sapma bilgilerini ve diğer parametrelerin anlamlılığını nasıl etkilediği incelenmiştir.

Bununla birlikte, zaman serisinin stokastik kısmına ilişkin farklı modeller de kullanılmıştır. Çünkü, EWT zaman serisinde zamansal korelasyonların olduğu yani veri

setinde beyaz gürültü dışında renkli gürültü türlerinin de var olduğu düşünülmektedir. Bu çerçevede, veri seti PSD-frekans grafikleri ile spektral anlamda da analiz edilmiştir. Zaman serisinde kırpışma gürültüsü de olduğuna karar verilmiş ve gürültü kombinasyonuna (beyaz + kırpışma gürültüleri) ilişkin genlikler varyans bileşenlerinin kestirimi yöntemi ile elde edilmiştir. Böylece, veri setinin uygun biçimde ağırlandırılması sağlanmıştır. Bunun sonucunda, zaman serisindeki EWT değerleri, 1) eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz, 2) farklı ağırlıklı ve korelasyonlu olmak üzere, iki farklı stokastik yaklaşım altında ele alınmıştır. Renkli gürültünün global ve bölgesel EWT analizindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, EWT zaman serilerindeki zamansal korelasyonların yıllık trend kestirimlerini anlamlı biçimde etkilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GRACE, Mascon, Eş Değer Su Kalınlığı (EWT), zamansal korelasyon, kırpışma gürültüsü

ABSTRACT

SIGNAL ANALYSIS OF MASS VARIATIONS FROM TEMPORAL GRAVITY SATELLITE SOLUTIONS

Özge GÜNEŞ

Department of Geomatic Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

The monitoring of the temporal variation of the Earth's gravity field with low earth orbit satellites has a history of 20 years. The GRACE satellite system, which is one of these satellites, has provided important information especially in the studies which are sensitive to hydrological changes such as monitoring the mass change in ground water resources, determining of trends in glacial mass, thanks to the data set which is published in monthly periods between 2002-2016. In this study, GSFC Mascon (2003-2016) and DDK (2002-2016) filtered monthly equivalent water thickness solutions were used. GSFC Mascon solutions were obtained from the CCAR data center on a global basin basis and as individual Mascons in regional terms. DDK filtered solutions are provided from ICGEM data center.

The trends of the hydrological changes in global and regional scale were studied under the harmonic regression model. This model, which has trend, annual and semi-annual periodic signal effects, was considered as the standard functional model in this study. In addition, in the polar regions (Greenland and Antarctica basins) the linear trend model expanded by the acceleration parameter and examined how different functional approaches affect the trend values, standart deviations and the significance of other parameters in EWT analysis.

Furthermore, different models of the stochastic part of the time series were also used. Because, there are temporal correlations in the EWT time series, that is, there are also colored noise types besides white noise in the data set. In this context, the data set was also analyzed in spectral manner with PSD-frequency graphics. In the time series, it was decided that there was flicker noise and then the amplitudes of the noise combination (white + flicker noise) were obtained by the estimation of variance components. Thus, the data set was weighted properly. As a result, the EWT values in a time-series were studied under two different stochastic approaches: the EWT values are 1) equally weighted and non-correlated, and 2) different weighted and correlated. The effects of color noise on global and regional EWT analysis were examined. According to the results, it was seen that the temporal correlations in the EWT time series significantly affected the annual trend estimations.

Keywords: GRACE, Mascon, Equivalent Water Thickness (EWT), temporal correlation, flicker noise

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Jeodezinin en önemli amaçlarından biri, yeryuvarı gravite alanının ve zaman içindeki değişimlerinin belirlenmesidir. Bu konuda yapay yer uydularının önemi yadsınamaz. Sputnik 1'den (1957) bu yana kullanılan yapay uyduların jeodezik çalışmalara birçok katkısı olmuştur. Ancak bunlardan salt ya da kısmi amacı yer gravite alanının global ölçekte incelenmesine yönelik olanlarının en önemlileri yalnızca 18 yıllık bir geçmişe sahiptir. Bu uydular, CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) ve GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment-Follow On) uydularıdır [1]. GRACE, gravite alanının hem statik hem de dinamik yapısına ilişkin 2002 yılından beri yüksek çözünürlükte (en iyi 150 km civarında) bilgi sağlamaktadır. Özellikle hidrolojik değişimlere karşı duyarlılığı ile bilinen GRACE uyduları, okyanuslardaki su miktarı ve tabanı basıncı değişimi, yeraltı su kaynaklarındaki seviye değişimlerinin izlenmesi ve trend kestirimi [2], [3], [4], [5], buzul kütlelerinin değişimi ve deniz seviyesine etkilerinin izlenmesi [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], çalışmalarının yanında tektonik hareketlerin etkilerinin incelenmesi [16], [17], [18], [19], yer gravite ivme ve jeoit değişiminin izlenmesi [16], [20], [21], [22] gibi çeşitli jeodezik ve jeodinamik çalışmalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yukarıda sözü edilen çalışmalar kapsamında GRACE'den sağlanan jeopotansiyel değişimler, ICESat (Ice, Cloud and land Elevation Satellite), InSAR (İnterferometrik Yapay Açıklıklı Radar Sistemi) gibi uydu teknikleri ve GLDAS (Global Land Data Assimilation System) gibi hidrolojik modellerle birlikte ele alınarak çok disiplinli çalışmalara katkı sağlamaktadır.

GRACE, NASA (National Aeronautics and Space Administration) ve DLR'nin (Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt) ortak çalışması olarak 17 Mart 2002 tarihinde yaklaşık 500 km yüksekliğindeki yörünge düzlemine yerleştirilen iki adet ikiz alçak yörüngeli uydu (Low Earth Orbit-LEO) sisteminden oluşmaktadır. GRACE uyduları, kullanım ömrü 5 yıl olarak planlanmasına karşın 2016 yılına kadar veri sağlamış, 22 Mayıs 2018 tarihinde ise GRACE uydusunun devamı niteliğinde olan GRACE-FO uydusu uzaya fırlatılmıştır.

GRACE uydu verisi, Seviye-0, Seviye-1 (Level 1-L1), Seviye-2 (Level 2-L2) ve Seviye-3 (Level 3-L3) şeklinde sınıflandırılmaktadır [23], [24], [25], [26]. Bunlardan Seviye-1B, Seviye-2 ve Seviye-3 veri türleri kullanıcılara sunulmaktadır. Uydular arasındaki mesafe değişimlerini, ivme ölçülerini ve GPS (Global Positioning System) gözlemlerini içeren Seviye-1B verisinin değerlendirilmesi ile elde edilen aylık küresel harmonik katsayılar (C_{lm}, S_{lm}) Seviye-2 verisini oluşturmaktadır. Seviye-3 verisi ise, çeşitli veri merkezleri tarafından değerlendirilmiş Seviye-1 ya da Seviye-2 verisinden elde edilen yer üzerinde nokta-nokta, havza-havza ya da bölge-bölge verilen ilgili jeopotansiyel sinyalini ifade etmektedir. Bir Seviye-3 veri türü olan Mascon (mass concentration) çözümleri, CSR (Center for Space Research), JPL (Jet Propulsion Laboratory), NASA gibi merkezler tarafından yayınlanan 1^ox1^o ya da 3^ox3^o boyutlu yüzey parçalarına ilişkin aylık eşdeğer su kalınlığı (Equivalent Water Thickness-EWT) değişimlerinden oluşmaktadır. Tez çalışmasında 2003-2016 yılları arasına ilişkin GSFC (Goddard Space Flight Center) Mascon aylık EWT değişimleri kullanılmaktadır.

EWT değişimi zaman serisinin analizi için, doğrusal trend (yıllık değişim) ve periyodik sinyalleri içeren standart bir fonksiyonel model kullanılır. Zaman serisi analizinde harmonik regresyon yaklaşımı olarak geçen bu model ile su ya da buz kütle değişiminin doğrusal trendi, yani yıllık artma ve azalma miktarları belirlenebilmektedir. Bununla birlikte, GRACE'den elde edilen EWT sinyalinin yoğun olarak kullanıldığı Grönland ve Antarktika buz bölgelerinde [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [27], [28] standart modelin yetersiz olduğu, doğrusal trend yerine ikinci dereceden bir trend (yıllık değişim+ivme) fonksiyonunun kullanılması gerektiği literatürdeki [12], [13] çalışmalarında irdelenmiştir.

Diğer yandan, jeodezik zaman serilerinde ölçüler arasındaki zamana bağlı korelasyonların kestirim işleminde göz önüne alınması gerektiği bilinmektedir. Örneğin, GPS zaman serilerindeki bu tür korelasyonlar birçok çalışmada irdelenmiştir [29], [30], [31], [32]. Söz konusu korelasyonların ihmal edilmesi zaman serisinden elde edilen trend değerlerini anlamlı biçimde etkileyebilmekte, standart sapmaların olması gerekenden daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. Bir başka deyişle, kestirim sonuçlarını etkilemektedir. GRACE EWT zaman serisinden trend ve periyodik sinyal bilgisinin kestiriminde ise bu tür korelasyonlar genellikle göz önüne alınmaz. Kestirimin stokastik modelinde EWT değerlerinin eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz olduğu, yani yalnız beyaz gürültüyle yüklü oldukları varsayılır. Bir başka deyişle, bir hata kaynağının tüm süreci zamana bağlı olarak etkileyebileceği, yani değerler arasında zamansal bir korelasyon oluşabileceği ihtimali düşünülmez.

Bir zaman serisinde zamansal korelasyonları göz önüne alabilmek için, zaman serisi spektral anlamda analiz edilmelidir. Yani, ilgili frekans alanında verinin sadece beyaz gürültü ile yüklü olmadığı, renkli ya da güç yasası gürültüleri (colored noise-power low noise) olarak adlandırılan farklı spektral indekslerdeki gürültüler ile yüklü olduğu da düşünülmelidir [31], [32], [33]. Güç yasası gürültülerinden jeodezik anlamda en çok bilinenleri, kırpışma gürültüsü (pink ya da flicker noise) ve rasgele yürüyüş gürültüsüdür (Brown ya da random walk noise). Williams 2003'te [33] bu gürültülerin jeodezik zaman serileri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Spektral analiz uygulanırken çeşitli yöntemler kullanılmakta olup, en çok uygulanan yöntemlerden biri de veriye ait güç spektral yoğunluk (Power Spectral Density-PSD) grafiklerinin incelenmesidir. Veriye ait PSD grafikleri çizdirildiğinde, grafiğin eğimi, verinin yüklü olduğu hata türü ile ilgili bilgi sunmaktadır [34], [35], [36]. Örneğin, bir veri setine ait PSD-Frekans grafiğinde, eğim sıfır ise bu veri beyaz gürültü ile yüklüdür sonucuna ulaşılabilir. Benzer şekilde negatif ya da pozitif eğime sahip olduğunda da güç yasası gürültüleri ile yüklü olduğu düşünülür.

Güç yasası gürültüleri farklı spektral indeks değerlerine sahip olmakla birlikte, gözlemlerin ağırlıklandırılması amacıyla uygulamaya dahil edilmek istendiklerinde, öncelikli olarak gürültü kaynağının sürece etkisini ifade eden dönüşüm matrislerinin

belirlenmesi gerekir [31], [32], [33]. Johnson ve Wyatt (1994)'te [37], $-3<\kappa<-1$ aralığındaki herhangi bir spektral indeks değeri için, dönüşüm matrislerinin [38] nasıl oluşturulması gerektiği açıklanmaktadır. Bu dönüşüm matrisleri yardımıyla, maksimum likelihood kestirim yöntemi ya da varyans bileşenlerinin kestirim işlemi uygulanarak, bu gürültülere ilişkin genlikler elde edilebilmektedir.

Varyans bileşenlerinin kestirimi, pek çok jeodezik problemde uygulanmaktadır [39]. Bu kestirim işlemi, jeodezide iki farklı amaç için kullanılmaktadır: (1) Farklı kaynaklardan, örneğin farklı ölçme aletlerinden gelen jeodezik ölçülerin Gauss-Markoff dengeleme modelinde en uygun biçimde birleştirilmesi ve (2) ölçülerin içindeki farklı hata kaynaklarının Gauss-Helmert modeli içinde en uygun şekilde ele alınması. Her iki kullanım alanında, hetereskodastik yapıdaki ölçülerin dengeleme modelinde en uygun şekilde ağırlıklandırması gerçekleştirilir [40], [41], [42], [43], [44], [45].

Jeodezide varyans bileşenlerinin kestirimi, Helmert (1924)'e [40] kadar geriye gitmektedir. Gerek jeodezi gerekse istatistikte günümüzde kullanılan yöntemler ise MINQUE (Minimum Quadratic Unbiased Estimation) ([46], [47], [48], [49]), BIQUE (Best Invariant Quadratic Unbiased Estimation) ([45]), iteratif AUE (Almost Unbiased Estimation) ([42] ve [50]) ve Helmert yöntemleridir.

1.2 Tezin Amacı

EWT zaman serilerinden trend ve diğer periyodik bileşenler, "standart fonksiyonel model; eşit ağırlıklı EWT değerleri" biçimindeki standart bir dengeleme modeli kullanılarak elde edilir. Ancak zaman serilerinde zamansal korelasyonları da düşünmek gerekir. Bununla birlikte, yüksek oranda buz kütle değişimine sahip buzul bölgelerde doğrusal bir trend yerine ikinci dereceden bir trend, yani yıllık değişim ve ivmenin birlikte düşünülmesi gerekir. Çalışmanın amaçları, bu doğrultuda, aşağıdaki biçimde sıralanabilir:

- Standart dengeleme modeli kullanılarak GSFC Mascon EWT değişimlerinin havza-havza ve bölge-bölge analiz edilmesi,
- Türkiye bölgesi için DDK çözümleri ve Mascon çözümlerinin karşılaştırılması,

- EWT zaman serilerinde zamansal korelasyonun analiz edilmesi (*Zamansal korelasyonların incelenmesi için öncelikle PSD analizleri yapılarak, PSD grafiklerinde zamansal korelasyonun varlığı gösterilmektedir. Bu analizlere göre en uygun renkli gürültü modeli için Türkçe kaynaklarda "kırpışma gürültüsü" olarak da geçen pembe gürültü modeli kullanılmaktadır. Bu gürültü modeli ile, dengelemenin stokastik modelindeki bilinmeyen gürültü genlikleri iterative AUE yöntemine göre varyans-bileşenlerinin kestirimi biçiminde elde edilmekte, elde edilen dolu (korelasyonları içeren) ağırlık matrisleriyle yeniden dengeleme yapılarak, söz konusu bilinmeyen trend ve periyodik bileşenler elde edilmektedir*),

- Zamansal korelasyonların EWT trend ve periyodik bileşen kestirimlerine etkisinin incelenmesi,

- Grönland ve Antarktika buzul bölgelerinde EWT dengeleme modelinin ivme parametresiyle genişletilmesi ve korelasyon etkilerinin bu modelde irdelenmesi.

1.3 Hipotez

Çalışma aşağıdaki hipotezler üzerine kurulmuştur;

- GRACE EWT zaman serilerinde zamansal korelasyonları düşünmek gerekir. Aksi halde, küçük standart sapmalar elde edilmekte, buna bağlı olarak parametrelerin anlamlılığı değişmektedir.

- GSFC Mascon çözümleri bölgesel/mekansal anlamda yüksek korelasyonlu olduğundan veriler havza bazında kullanılmalıdır.

- Mascon çözümleri Türkiye bölgesi için DDK çözümleri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Özellikle DDK2 verisi filtre boyutu açısından Mascon çözümleri ile benzerdir.

- Kutup bölgelerinde yıllık ve yarıyıllık etkileri içeren fonksiyonel model yetersizdir. Bölgedeki bazı havzalarda modelin ek parametre (ivme) ile genişletilmesi gerekmektedir.

BÖLÜM 2

GRAVİTE DEĞİŞİMLERİNİN BELİRLENMESİNDE GRACE UYDU SİSTEMİ VE ZAMAN SERİSİ ANALİZİ

Yeryuvarı gravite alanı günümüzde alçak yörüngeli farklı uydu sistemleri tarafından takip edilebilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte 2000'de CHAMP, 2002'de GRACE ve 2009'da GOCE uyduları doğrudan yeryuvarı gravite alanını incelemek için geliştirilmiş alçak yörüngeli yakın yer uydularıdır. Bu uydular, farklı ölçme teknikleri ile jeodezik ve jeodinamik çalışmalarda global ve bölgesel ölçekte yüksek çözünürlükte gravite alanı bilgisi sağlamaktadır.

15 Temmuz 2000 tarihinde Rus Plesetsk uzay üssünden fırlatılan CHAMP (**CHA**llenging **M**inisatellite **P**ayload), gravite alanı belirleme amaçlı ilk uydudur. Yaklaşık olarak 454 km uzaklıktaki yörüngede bulunan uydu, Potsdam Almanya Yer Araştırmaları Merkezi (GFZ- Geoforschungzentrum) tarafından işletilmiştir. Görev süresi 5 yıl olarak planlanan uydu, 2010 yılına kadar veri sağlamıştır [51]. Uydu merkezine yerleştirilmiş ivmeölçere sahip olan CHAMP, SST-h1 (Satellite to satelllite tracking- High to low) yani yüksek yörüngeli uydudan alçak yörüngeli uyduya izleme tekniğine göre çalışmaktadır. Uydu sistemi ile; statik yeryuvarı gravite alanının uzun dalga boylu yapısını belirlemek, global yer manyetik alanını haritalamak ve zamansal değişimlerini izlemek ve iyonosfer ve troposfer tabakalarını incelemek amaçlanmıştır [51], [52], [53].

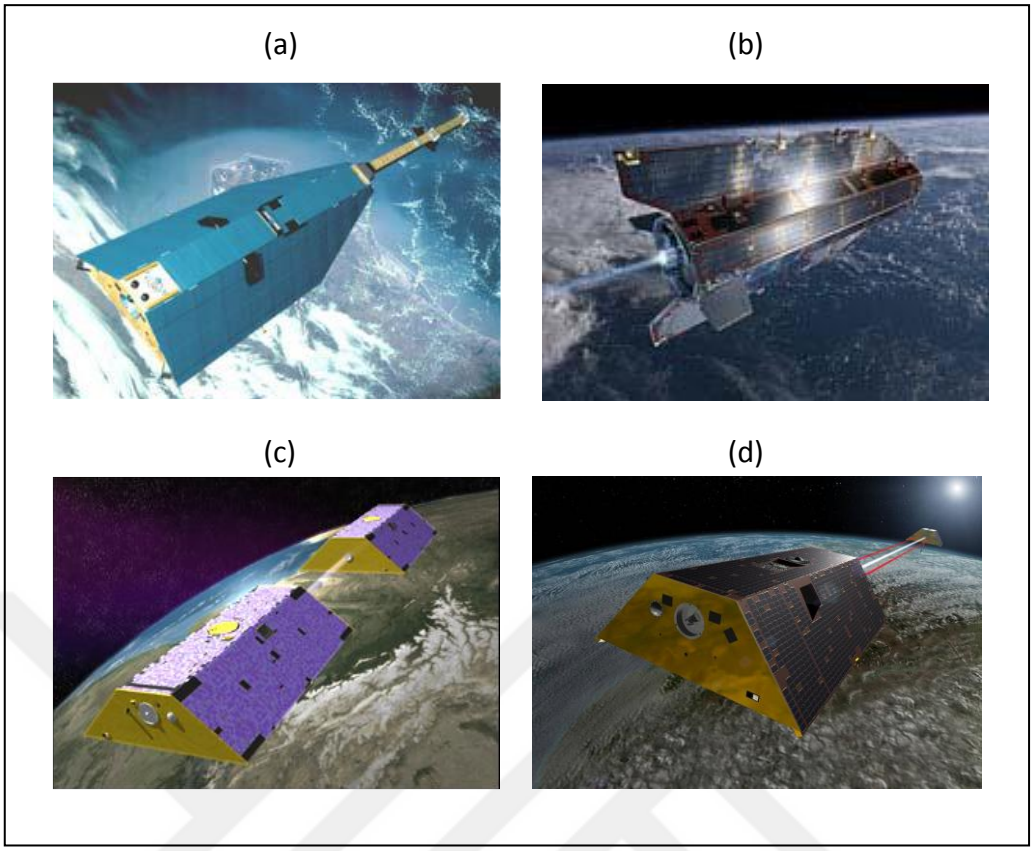
17 Mart 2009 tarihinde Rusya'nın Plesetsk üssünden fırlatılan GOCE (**G**ravity Field and Steady-State **O**cean **C**irculation **E**xplorer), Avrupa Uzay Ajansı (ESA-European Space Agency) tarafından işletilmiştir. Yaklaşık 250 km uzaklıktaki yörüngede 4 yıl veri sağlayan uydu, Kasım 2013 yılında ömrünü tamamlamış olmasına karşın uydudan elde edilen veri günümüzde halen değerlendirilme aşamasındadır. SST-h1 ölçme tekniğinin yanı sıra, gradyometre adı verilen 3 eksenli ivmeölçerlerden oluşan bir sisteme sahip olan GOCE aynı zamanda uydu gravite gradyometrisi (SGG-Satellite Gravity Gradiometry) tekniği ile ölçüm yapmaktadır. GOCE'un en temel amaçlarından birisi, yeryuvarının statik (zamana bağlı olmayan) gravite alanını ve jeoidi oldukça yüksek doğrulukta (100 km konumsal çözünülükte, gravite anomalileri için 1mGal ve jeoit yüksekliği için 1-2 cm) belirlemektir [54], [55], [56].

Bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınan GRACE ise, Alman-Amerikan ortaklığı ile 17 Mart 2002'de yaklaşık 500 km yükseklikteki yörünge düzlemine yerleştirilen iki adet ikiz uydu sisteminde oluşmaktadır. 2002-2016 yılları arasında veri sağlayan GRACE uydusunun devamı niteliğinde olan GRACE-FO (GRACE-**F**ollow **O**n) ikiz uydusu 22 Mayıs 2018 tarihinde, Californiya'da Vandenberg Hava Kuvvetleri üssünden başarılı bir şekilde fırlatılmıştır [57], [58].

GRACE-FO uydusu ile, buz tabakaları ve buzullardaki kütle değişiklikleri de dahil olmak üzere değişen iklime ilişkin bilgi elde edilebilecek; kuraklıklar, depremler gibi doğal olayları tanımlayan süreçler ve tarımda kullanılmak üzere yeraltı suyunu pompalamaktan kaynaklanan akifer[1] seviyelerindeki değişiklikler gibi bazı insan faaliyetlerinin etkileri de gözlenecektir. Uydular arasındaki uzaklık değişimleri ölçülerek, yaklaşık 320 km çaplı bir alanın 1 cm kadar küçük bir kısmının bile kütle hareketinin neden olduğu yerçekimi alanındaki değişim aylık olarak izlenebilecektir [58].

Yukarıda özellikleri anlatılan gravite alanı belirleme uydularına ilişkin görseller Şekil 2.1'de verilmiştir.

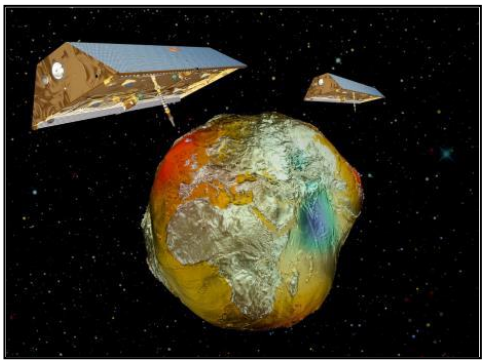
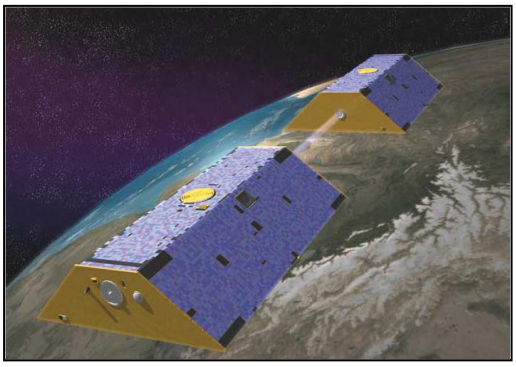
[1] Akifer : Ekonomik olarak önemli miktarda suyu depolayabilen (yüksek permeabiliteli) ve yeterince hızlı taşıyabilen (iletken) geçirimli jeolojik birimlerdir.



Şekil 2. 1 (a) CHAMP, (b) GOCE, (c) GRACE ve (d) GRACE-FO uyduları [51], [59], [60], [58]

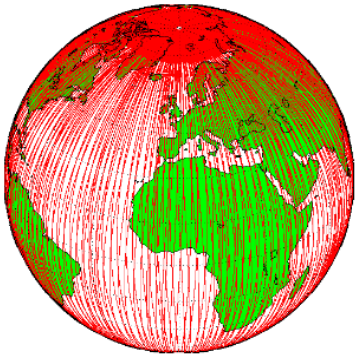
2.1 GRACE Uydu Sistemi

17 Mart 2002'de Rusya'daki Plesetsk Uzay Üssü'nden fırlatılan GRACE (**G**ravity **R**ecovery **a**nd **C**limate **E**xperiment) uydu sistemi, Teksas Üniversitesi Uzay Araştırmaları Merkezi (CSR)'nin yürütücülüğünde, Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Alman Uzay Araştırmaları Merkezi (DLR)'nin ortak çalışmasıdır [57].

Şekil 2. 2 GRACE uyduları [61]

GRACE uydu sistemi (Şekil 2.2), aralarındaki başlangıç uzaklığı 220±50 km olacak şekilde tasarlanmış, yerden yüksekliği yaklaşık olarak 500 km ve ekvatorla eğimi 89.5^{o} olan dairesel bir yörüngede serbest olarak dolaşan ikiz uydulardan (GRACE-1 ve GRACE-2) oluşmaktadır. Yörünge yüksekliği, her yıl ortalama 2,7 km azalmaktadır [62]. Görev süresi 5 yıl olarak planlanan uydu, 2016 yılına kadar veri sağlamıştır.



Şekil 2. 3 GRACE uydularının izlediği yörüngeler [63]

GRACE uydusunun amacı,

- Okyanuslardaki su kütlesi ve dip basıncı değişiminin izlenmesi [64],
- Yeraltı su kaynaklarındaki seviye değişimlerinin izlenmesi,[2], [3], [4], [5],
- Buzul kütlelerinin değişiminin ve deniz seviyesine etkileri gibi zamana bağlı kütle değişimlerinin incelenmesi [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15],
- Yeryuvarı gravite alanının ve jeoit değişiminin izlenmesi [16], [20], [21], [22],
- Bu değişimler ile ilişkili olan iklimsel olayları açıklayan sinyallerin elde edilmesi,

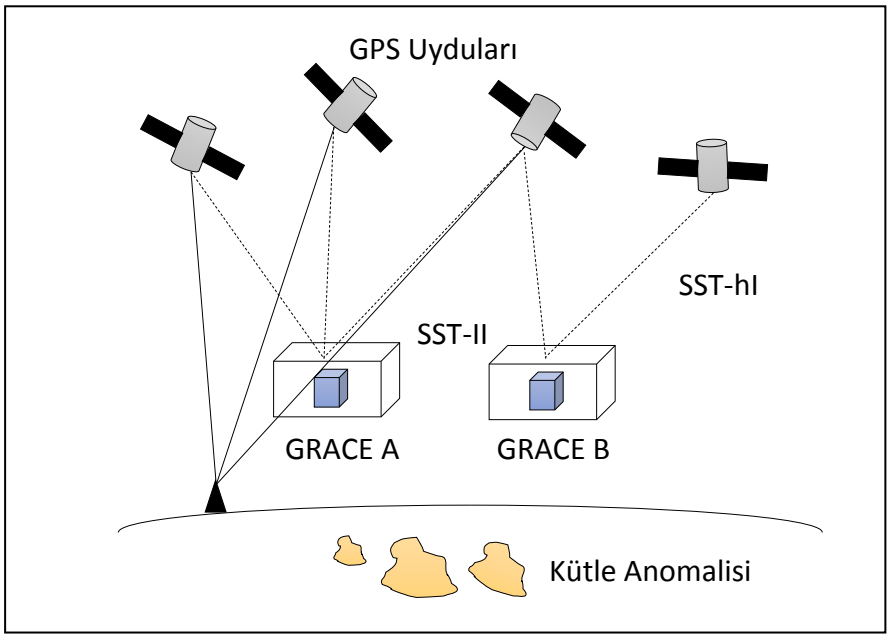
• Tektonik hareketlerin incelenmesi [16], [17], [18], [19],

• Kütle değişimlerinin farklı disiplinlerle birlikte havza bazında izlenmesi [65],[66], [67], [68], [69],

gibi farklı alanlardaki çalışmalara katkı sağlamaktır. GRACE, global ve bölgesel ölçekte hidrolojik değişimlere karşı yüksek duyarlılık sağladığından, çoğunlukla kütle hareketleri ve değişimlerinin izlenmesi çalışmalarında kullanılmaktadır.

2.1.1 GRACE Ölçme Sistemi

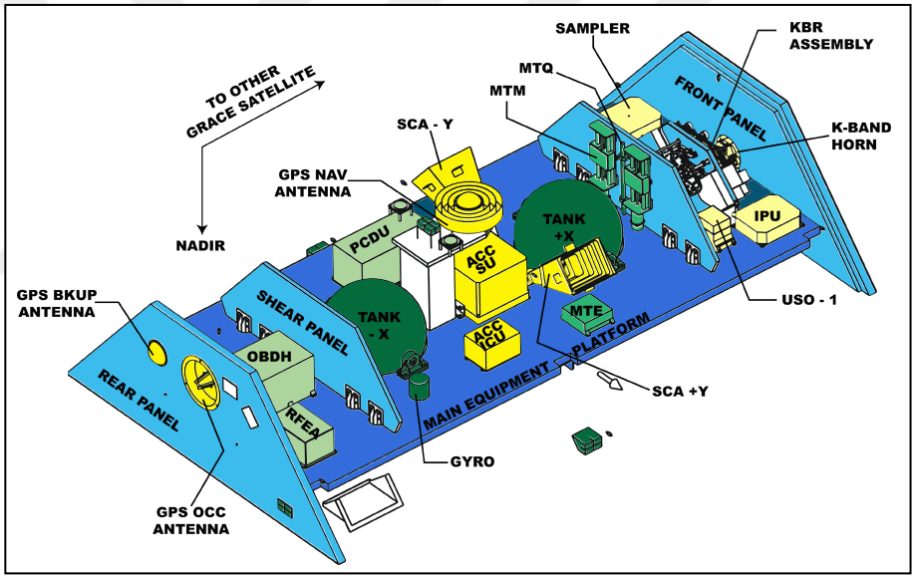
GRACE uydusu, gravite alanı belirleme amacıyla tasarlanan diğer uydulardan farklı olarak, yüksek yörüngeli uydudan alçak yörüngeli uyduya izleme (SST-hI) ve alçak yörüngede bulunan uydular ile uydudan uyduya izleme (Satellite to satellite tracking-low to low, SST-II) tekniğine sahip ilk ve tek uydudur. Bu ölçme tekniklerinin birlikte kullanılması ile yeryuvarı gravite alanı bilgisinin doğruluğu arttırılmakta, yani çözünürlüğü yükseltilerek değişimlerin daha doğru bir şekilde izlenmesi sağlanmaktadır [16], [70]. Şekil 2.4'te SST-II ölçme tekniğine ilişkin yapı gösterilmiştir.



Şekil 2. 4 GRACE uydusu ölçme tekniği

GRACE uydu sisteminde, her iki uydu arasındaki mesafe değişimlerini ölçmek için iki farklı frekansta çalışan KBR (K-Bant Range) uzunluk ölçme sistemi bulunmaktadır. Uyduların farklı frekansa sahip KBR'lere sahip olmasının nedeni iyonosfer etkisini ortadan kaldırmaktır. GRACE bunların dışında, uyduların konumunun belirlenmesi ve hassas zamanlama için GPS alıcıları, uyduların yıldızlara göre konumunun belirlenebilmesi için yıldız kameraları (SCA-Star Camera Assembly), ivmeölçerler (ACC), osilatörler ve uyduya enerji sağlayan paneller gibi pek çok donanıma sahiptir. Söz konusu bu sistemlere ilişkin uydu mekanizması Şekil 2.5'te verilmiştir [23], [71], [72].

KBR uzaklık değişim sistemi ile uydular arasındaki mesafe 10 µm doğruluğunda ölçülebilmektedir [73], [74]. Söz konusu bu uzaklık değişimlerinin sürekli ve yüksek doğrulukla izlenmesi sayesinde de çok küçük kütle değişimleri gözlenebilmektedir.



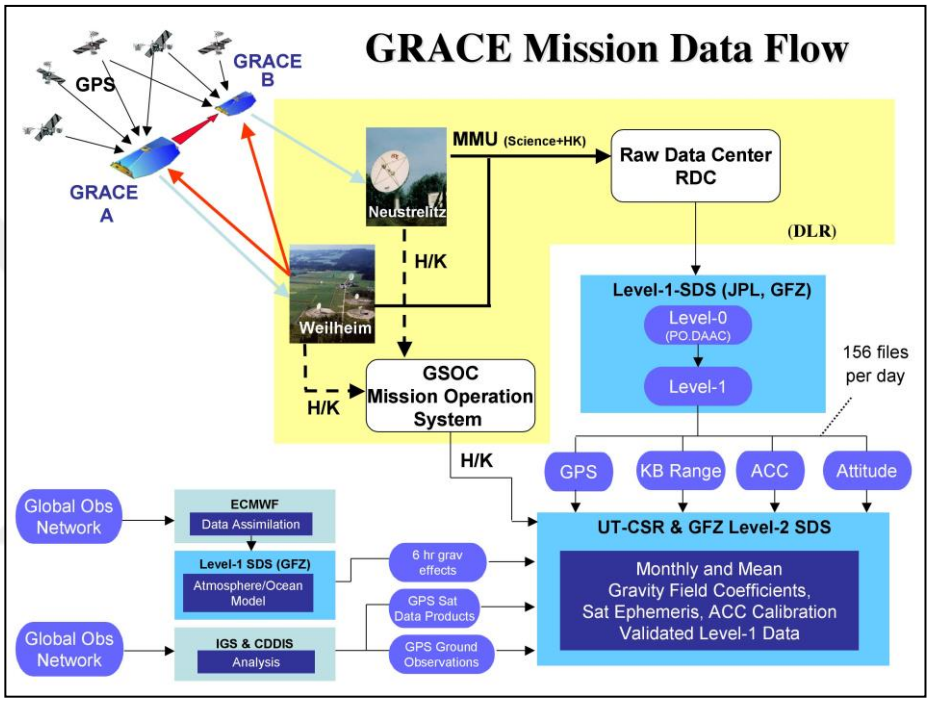
Şekil 2. 5 GRACE uydusu üzerindeki donanımlar [75]

2.1.2 GRACE Veri Sistemi

GRACE veri akışı, JPL, GFZ ve CSR arasındaki GRACE Bilim Veri Sistemi (Science Data System-SDS) ile sağlanmaktadır [23].

GRACE uydularından elde edilen veriler Seviye-0, Seviye-1, Seviye-2 ve Seviye-3 olmak üzere farklı şekillerde yayınlanmaktadır. Şekil 2.6'da verilere ait akış şeması gösterilmiştir.

GRACE uydularından toplanan K-bant, GPS ve ivmeölçer veri setleri, Seviye-0 (L0) verisi olarak tanımlanmaktadır. Seviye-1 verileri 1A ve 1B olmak üzere iki gruba ayrılır. Seviye-0 verisinin işlenmesi ile Seviye-1A (Level-1A) verisi elde edilmektedir. Bu veri düzenlendikten ve doğrulandıktan sonra, uydu yörünge bilgilerini, uydudan uyduya olan mesafeleri ve çekim dışı ivmeler gibi ölçüleri de içeren Seviye-1B (Level-1B) verisine dönüştürülmektedir. Seviye-0'dan Seviye-1B verisinin elde edilmesine kadar geçen süreç Seviye-1 veri işleme olarak isimlendirilmektedir [23], [26].



Şekil 2. 6 GRACE uydusu veri akış şeması [76]

Seviye-2 (L2) verisi, Seviye-1B ürünlerinin kalibre edilmesi yani işlenmesi ile elde edilir ve kullanıcıya, aylık küresel harmonik katsayılar ve bunların standart sapma bilgileri (Formal Errors) şeklinde sunulur [1], [16], [25].

GRACE Seviye-2 verisi farklı sürümlerde kullanıcılara sunulmaktadır. Ocak 2002 ve Nisan 2011 yılları arasına ilişkin elde edilen veriler, RL-04 sürümü olarak yayınlanmıştır. RL-05 sürümü ise, Ocak 2004 yılında yayınlanmaya başlamış olup, güncel çalışmalarda halen kullanılmaktadır [77]. GRACE-FO uydusuna ilişkin veriler, RL-06 sürümü olarak yayınlanacaktır.

Sürümler arasında aşağıda sıralanan iyileşmeler olmaktadır;

✓ Kullanılan modeller (atmosfer, okyanus-kara gelgit modelleri, gelgitsel olmayan okyanus hareket modelleri, statik gravite alanı) sürüm yükseldikçe daha iyileşmektedir,

✓ Yeni sürümlerin çözümlerinde sistematik hatalar daha azdır yani sinyal daha fazla korunmaktadır.

Seviye-1B ve Seviye-2 verilerinden başka Seviye-3 verisi de kullanıcılara sağlamaktadır. Korelasyon etkilerinin giderildiği, farklı konumsal çözünürlükte ve filtrelenmiş olan bu ürünler, işlenmiş veri olarak çeşitli servisler tarafından yayınlanmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan GSFC Mascon verisi CCAR (Colorado Center for Astrodynamics Research) web sayfasından elde edilmiştir. Bölüm 3.2'de söz konusu verinin nasıl elde edildiği ve özellikleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.2 Eşdeğer Su Kalınlığı (EWT-Equivalent Water Thickness)

Gravite alanına ilişkin zamansal değişimler, yani jeopotansiyel değişimler (gravite ivmesi, jeoit yüksekliği ve EWT değişimleri) GRACE ile izlenebilmektedir. Bu jeopotansiyel değişimler bozucu potansiyelin bir fonksiyonu olarak yazılabilirler.

Küresel koordinatları ξ, ϑ ve λ olan bir noktada herhangi bir *t* periyodundaki bozucu potansiyelin küresel harmonik açınımı aşağıdaki gibi ifade edilir:

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

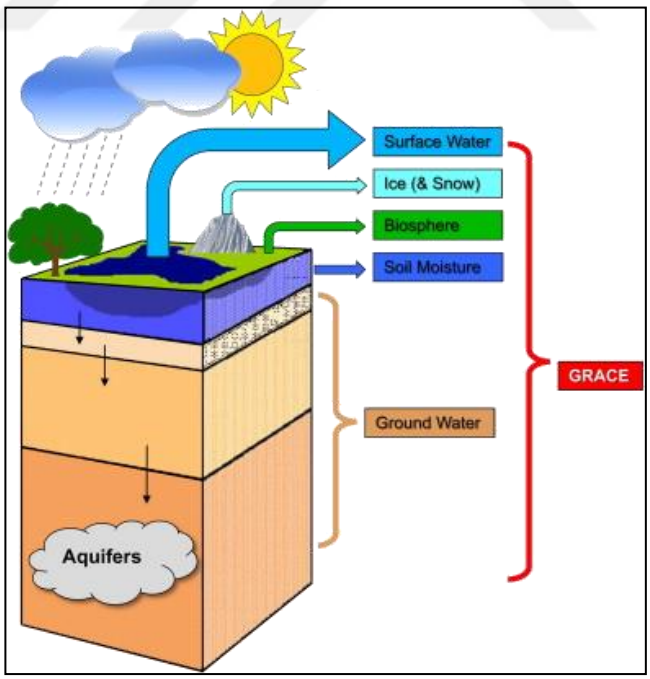
Burada, ξ, yarıçap vektörü; ϑ, kutup uzaklığı; λ, jeodezik boylam; *l*, açınım derecesi; *m* sırası; *GM*, jeosentrik çekim sabiti; a_E, referans elipsoidin büyük yarı ekseni; δC_{lm} ve δS_{lm}, yeryuvarı çekim potansiyelinin tam normalleştirilmiş harmonik katsayılarının normal gravite potansiyelinin çekim kısmına ilişkin harmonik katsayılarından sapmaları ve $P_{lm}(\cos\vartheta)$, tam normalleştirilmiş Legendre polinomudur [52].

Kütle değişimleri, okyanus, atmosfer, karasal su depoları, yeraltı ve yerüstü suları, buzullardaki erimeler gibi farklı hidrolojik kaynaklardan meydana gelmektedir. GRACE uydusu, özellikleri gereği, global ve bölgesel alanlarda meydana gelen bu hidrolojik

değişimlere karşı duyarlıdır [5], [78], [79]. Aylık yer gravite alanı çözümlerinden elde edilen (EWT) değişimi de bu amaçla hidrolojik ve iklim değişikliği gibi çalışmalarda sıklıkla kullanılan GRACE ürünüdür.

GRACE çözümleri ile, bölgesel ve global anlamda su havzalarındaki trendler, kutup bölgelerindeki erime miktarları, denizlerde ve okyanuslardaki su seviyesindeki artışlar gibi kütledeki zamana bağlı değişimler gözlenebilmektedir. Ayrıca GRACE uydusu, yörüngesinin kutup bölgelerine yakın geçmesi nedeniyle bu bölgelerde daha duyarlı sonuçlar vermekte, özellikle Antarktika ve Grönland'da bulunan buzullardaki değişimlerin incelenmesinde tercih edilmektedir.

GRACE uydusu, su miktarlarının düşey doğrultudaki toplam değişiklikleri, yani yeraltı suları, toprak nemi, yüzey suyu, kar ve buzullardaki değişimlerin toplamına ilişkin veri sağlamaktadır [2], [3], [5]. Dolayısıyla Şekil 2.7'de gösterilen katmanların tümüne ilişkin bilgi sağlayan EWT verisi ile yapılan çalışmalarda da değişimlerin hangi katmandan meydana geldiği ayırt edilemez. Bunları ayırmak için, uydu altimetresi gibi farklı disiplinlerdeki hidrografik ve oşinografik veriden yararlanılması gerekir.



Şekil 2. 7 GRACE verisinin içerdiği su katmanları [5]

GRACE verisi ile zaman serisi çalışırken, yüzey kütle yoğunluğu terimi kullanılır. Yüzey kütle yoğunluğunda meydana gelen bu değişim küresel harmoniklerin toplamı şeklinde ifade edilir [16], [80]. Küresel harmonikler hesaplanmadan önce, GRACE verilerinden çekim alanında geçici değişime sebep olan jeofiziksel etkiler modellenerek, elimine edilmektedir. Böylece hidrolojik sinyaller korunmaktadır. Dolayısıyla, aylık olarak elde edilen küresel harmonik katsayılar kütle değişimlerini daha iyi bir şekilde ifade etmektedir [2], [16], [80], [81].

Yüzey kütle yoğunluğu,

$$\Delta\sigma(\vartheta,\lambda)=a_E\rho_w\sum_{l=2}^{l_{max}}\sum_{m=0}^{l}(\Delta\breve{C}_{lm}\cos m\lambda+\Delta\breve{S}_{lm}\sin m\lambda)P_{lm}(\cos\vartheta) \tag{2.2}$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada, ρ_w, suyun yoğunluğunu (1000kg/m^3); $\Delta\breve{C}_{lm}$ ve $\Delta\breve{S}_{lm}$ yüzey yoğunluk katsayı değişimlerini göstermektedir. Yüzey yoğunluk değişiminin su yoğunluğuna oranı EWT değişimini verir [2], [16], [80]:

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

Yüzey yoğunluk katsayı değişimleri ile yerçekimi potansiyeli arasında aşağıdaki ilişki bulunur [16], [80]:

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

Burada, ρ_{ave}, yeryuvarı ortalama yoğunluğunu (5517 kg/m^3) ve k_l ise l harmonik derecesine bağlı Love yükleme sayılarını ifade etmektedir [80], [82]. Eşitlik (2.4), Eşitlik (2.3)'de yerine yazılırsa, EWT değişiminin GRACE küresel harmonik katsayılar cinsinden ifadesi elde edilir [16], [80]:

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

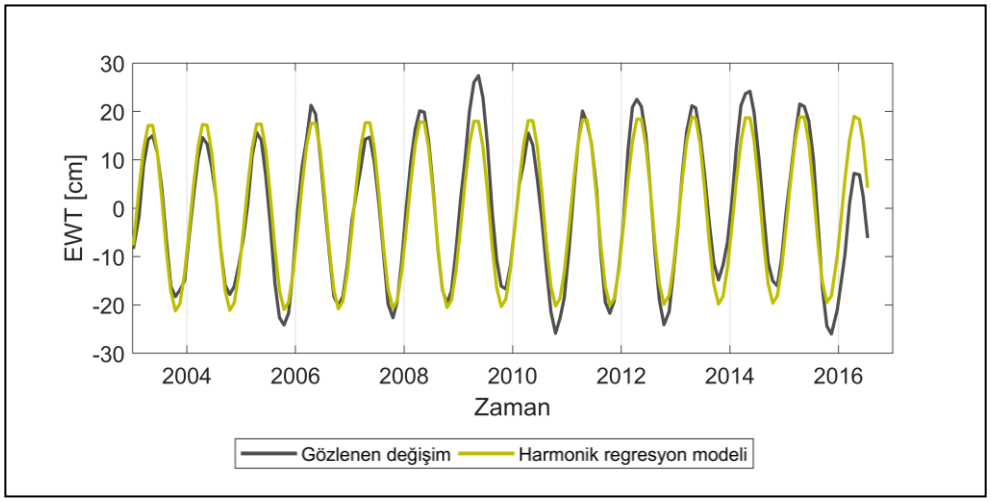
Elde edilen EWT değişiminin mekansal çözünürlüğü açınımın en büyük harmonik derecesi l_{max}'a bağlı olarak,

$$\Phi \approx \frac{20000\ km}{l_{max}} \tag{2.6}$$

ile ifade edilir. l_{max}, Seviye-2 verisi için 60 dereceye kadar çıkabilmektedir. Yani, çözünürlük 20000/60≈330 km civarındadır. Ancak, yüksek gürültüye sahip daha yüksek derecedeki yüzey harmoniklerdeki sinyallerin etkisini gidermek için farklı yumuşatma ve korelasyonsuzlaştırma filtreleri kullanılır [80]. Bu nedenle, Seviye-2 verisinden elde edilen çözünürlük 330 km'lerden daha da düşüktür. Seviye-3 verisinde nokta-nokta ya da $1^o \times 1^o$ büyüklükteki yüzey alanlarında çözümler hazır olarak verilmiş olsa da, çözünürlüğün veri sıklığı kadar olmayacağı göz önüne alınmalıdır; Seviye-3 verisinin çözünürlüğü için yine Eşitlik (2.6) düşünülmelidir. Aksi halde mekansal korelasyonları göz önüne almak gerekir.

2.3 Zamana Bağlı Kütle Değişiminin GRACE ile İzlenmesinde Harmonik Regresyon Modeli

GRACE çözümlerinden elde edilen EWT değişimi, gözlem zamanı *t*'ye bağlı trend ve periyodik bileşenlerden oluşan jeopotansiyel bir fonksiyondur (Şekil 2.8).



Şekil 2. 8 Amazon havzasına ilişkin zaman EWT zaman serisi örneği

Her bir yer noktası ya da yüzey parçasına ilişkin EWT değişiminin izlenmesinde zaman serisi analizi yaklaşımlarından biri olan harmonik regresyon modeli kullanılmaktadır [83]. t_j zamanındaki bir ölçü için bu model aşağıdaki biçimde oluşturulur:[16], [20]:

$$y(t_j) = a + bt_j + \sum_{i=1}^{p} \{c_i \cos(\omega_i t_j) + s_i \sin(\omega_i t_j)\} \quad (2.7)$$

Burada, *a*, sıfır eki; *b*, yıllık trend; *c* ve *s* ilgili sinüs sinyalinin kosinüs ve sinüs genlikleri ve ω, sinüzoidal sinyalin açısal frekansıdır; *T* periyoduna göre,

$$\omega = 2\pi/T \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanır. GRACE çalışmalarında, genellikle, yıllık ve yarıyıllık sinüs dalgaları düşünülür. Buna göre, *T*=1 ve *T*=1/2 yıl ile

$$\omega_1 = 2\pi \times 1 \quad \text{ve} \quad \omega_2 = 2\pi \times 2 \quad (2.9)$$

açısal frekanslı iki dalga, Eşitlik (2.7)'de göz önüne alınır. Böylece, bir noktaya ilişkin *n* sayıda aylık EWT çözümü için, aşağıdaki fonksiyonel model oluşturulur:

$$\begin{aligned} y(t_1) + v_1 &= a + bt_1 + c_1 \cos(2\pi t_1) + s_1 \sin(2\pi t_1) + c_2 \cos(4\pi t_1) + s_2 \sin(4\pi t_1) \\ &\vdots \\ y(t_n) + v_n &= a + bt_n + c_1 \cos(2\pi t_n) + s_1 \sin(2\pi t_n) + c_2 \cos(4\pi t_n) + s_2 \sin(4\pi t_n) \end{aligned} \quad (2.10)$$

Burada, *v*, ilgili EWT değerinin düzeltmesini göstermektedir. EWT değerleri eşit ağırlıklı öngörülerek, Eşitlik (2.10)'da geçen *a*, *b*, *c* ve *s* bilinmeyenleri en küçük kareler yöntemi (EKKY) ile kestirilir (EK-A). *p* nokta ile ifade edilen bir bölgede her bir noktanın *b* yıllık trend parametreleri o bölgedeki hidrolojik değişimin ifade edilmesinde kullanılır [5].

Yukarıda tanımlanan modellemeyle yalnız beyaz gürültü (white noise) düşünülür. Tez çalışmasında, sinyalde beyaz gürültünün dışında bulunan diğer gürültü türlerinin genlikleri de kestirilerek, trend değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir (Bölüm 3/Sayısal Uygulama). Yıllık trend kestiriminin fonksiyonel modeli, harmonik regresyon yaklaşımının temelini oluşturan sinüzoidal sinyal yapısı ve zaman serisi analizi ile genlik kestiriminde kullanılan varyans bileşenlerinin kestirim yöntemi, Bölüm 2.4 ve 2.5'te açıklanmaktadır.

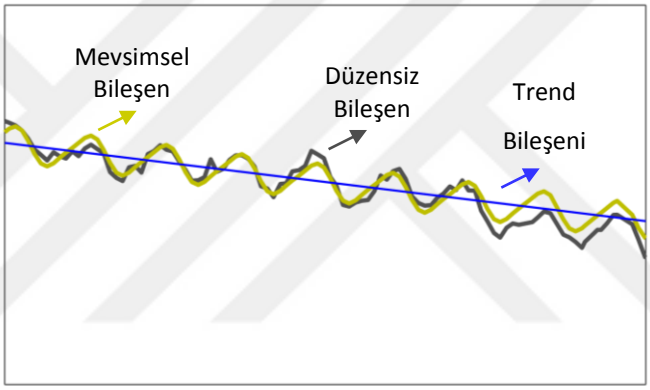
2.4 Zaman Serisi Analizi

Zaman serisi, her biri bir *t* zamanında kaydedilmiş olan bir gözlem kümesidir. Söz konusu gözlemler, zamana göre sıralanmış olarak zaman serisi grafikleri ile gösterilmektedir. İki tür zaman serisinden söz edilebilir. (1) *Sürekli Zaman Serisi*: Zaman

içinde sürekli olarak kaydedilebilen gözlemlere sahip seriler olup, elektrik sinyalleri, voltaj, ses titreşimleri gibi mühendislik alanlarına ait serilerdir; (2) *Kesikli Zaman Serileri*: Belli aralıklarla elde edilebilen gözlemlere sahip serilerdir. GRACE ile elde edilen EWT gözlemleri aylık olduğu için, GRACE zaman serileri kesikli zaman serileridir.

Zaman serisi analizi, gözlenen verinin zamana bağlı olarak istatistiksel incelenmesini ve gelecek dönemlere ilişkin prediksiyonun güvenilir bir şekilde yapılabilmesini içermektedir [83], [84], [85].

Bir veri grubuna ait zaman serisi, en genel çerçevede, trend, mevsimsel bileşen, çevrimsel bileşen ve düzensiz bileşen olmak üzere dört temel kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2. 9 Zaman serisinin temel bileşenleri

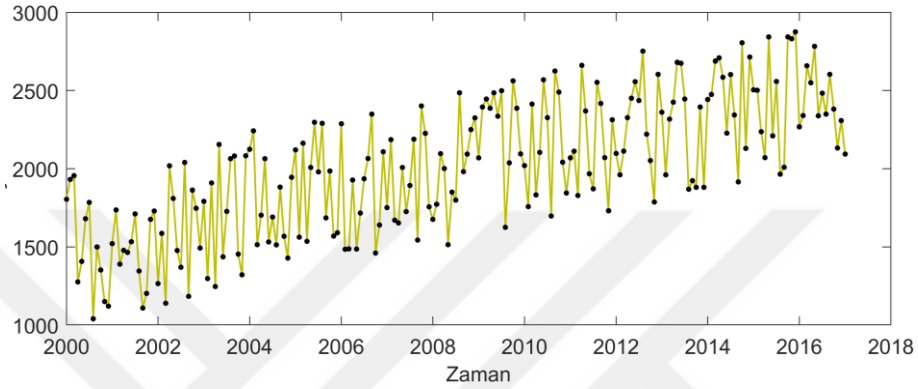
• *Trend Bileşeni*: Zamana bağlı bir değişken hakkında elde edilen gözlem değerlerinin, belli bir zaman aralığında artma, azalma ya da değişmeme şeklindeki eğilimlerine trend denir.

• *Mevsimsel Bileşen*: Zaman serisinde kısa dönemde veya mevsimlere göre meydana gelen değişimdir. Örneğin, işsizlik oranlarının incelendiği bir zaman serisinde, bu oranın kış aylarında yüksek, yaz aylarında düşük olması mevsimsel bileşen olarak ele alınabilir. Bu etki, uygun yöntemlerle veriden giderilebilmektedir.

• *Çevrimsel (Dönemsel, Devresel) Bileşen*: Mevsimsel değişimden farklı olarak, daha uzun zaman aralığındaki dönemsel değişimdir. Bu değişimler, belirli bir periyoda sahip olmamakla birlikte yine de öngörülebilmektedir.

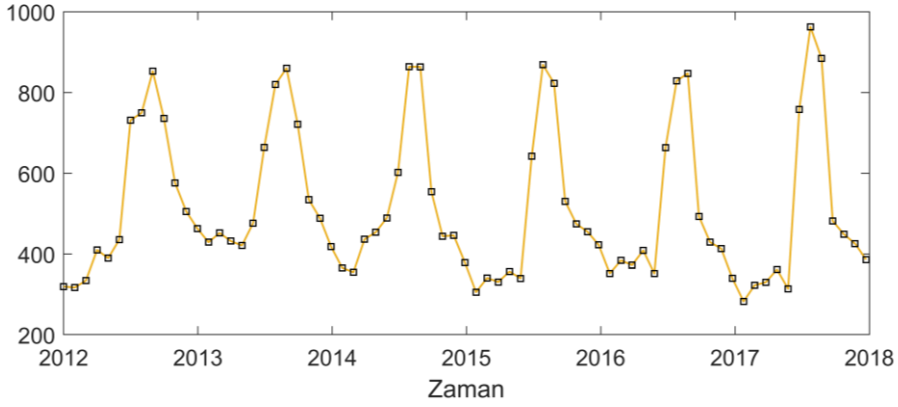
• *Düzensiz (rasgele) Bileşen*: Bir veri setinde trend ve çevrimsel bileşen etkileri giderildikten sonra, sinyalde hala mevcut olan fakat oluş nedeni belli olmayan değişimlerdir [84], [85].

Örneğin, bir noktanın bir yerel koordinat bileşenine ilişkin 2000 ve 2017 yılları arasındaki zaman serisi grafiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, koordinatların yıllara göre artan bir trend eğiliminde olduğu görülmektedir.



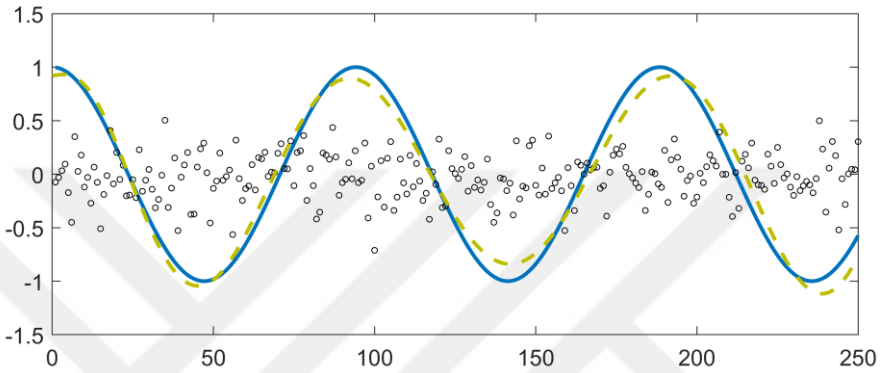
Şekil 2. 10 Bir koordinat zaman serisi ve trend örneği

Şekil 2.11'de, yılın ortalarında en büyük, başlarında ise en küçük değerler alan bir zaman serisi örneği gösterilmektedir [86]. Bu şekildeki düzenli artış ve azalmalar mevsimsel etkiyi ifade etmektedir. Bir önceki örnek ile karşılaştırıldığında, belirgin bir trend eğiliminin olmadığı görülmektedir.



Şekil 2. 11 Bir zaman serisinde mevsimsel etki örneği [86]

Zaman serisi analizine bir diğer örnek de sinyal analizi problemidir. Şekil 2.12'de simülasyon veri setine ait bir zaman serisi grafiği verilmiştir. Bu grafikte kesikli eğri gözlemi ifade etmektedir. Sinüzoidal dalga yapısındaki bu gözlem için bir modelleme yapıldığında, şekilde nokta ile gösterilmiş geriye kalan artık hatalar gürültüyü ifade eder. Sinyalden gelen gürültülerin ayrılması için çeşitli analiz yaklaşımları kullanılır. Bu modellemeyle sinyali tanımlayan parametreler (açısal frekans ya da periyot ve sinyalin genliği) elde edilir.



Şekil 2. 12 Sinüzoidal sinyal ve gürültü (Kesikli eğri gözlemi, mavi eğri modeli, noktalar ise artık hatayı yani gürültüyü gösterir)

Zaman serilerinin analizi, zamanın matematiksel fonksiyonları ile deterministik olarak modellenebilen trendler ve mevsimsel değişimlerin belirlenmesine dayanır. Ancak, çoğu zaman serisinde gözlemler arasında zamana bağlı korelasyonlar bulunmaktadır. Bir zaman serisi analizindeki metodolojinin çoğu, bu istatistiksel ilişkiyi ve verideki temel özellikleri uygun istatistiksel modeller ve tanımlayıcı yöntemler kullanarak açıklamayı amaçlamaktır [87].

GRACE verisi ile zaman serisi analizinde ise, zamana bağlı kütle değişiminin izlenmesinde bir önceki bölümde verilen yıllık ve yarıyıllık etkilerin olduğu periyodik yapıya ilişkin sinüzoidal sinyal hareketi tanımlamaktadır. Bu nedenle, bir sonraki başlık altında, sinüs dalgasının hareketini tanımlamaya yönelik temel kavramlar verilmiş, sinyalin modellenmesinde kullanılan parametrelere değinilmiştir.

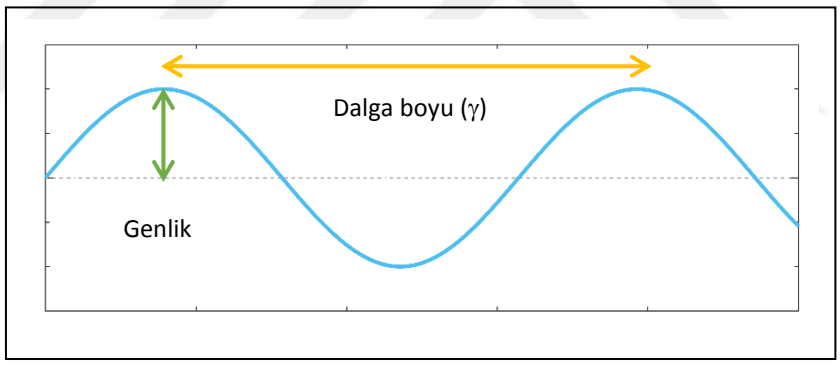
2.4.1 Sinüzoidal Sinyal

Sinyal, hareketli bir mekanizmanın ya da doğa olaylarının durum ve davranış bilgilerini taşıyan, bir veya daha fazla değişken ile tanımlanan bir fonksiyon olup veri işlemede dalga olarak adlandırılır. Bir dalga kuramsal olarak genliği, dalga boyu ve fazı ile tanımlanmaktadır [88].

GRACE uydu verisinden elde edilen sinyallere ait zaman serileri incelendiğinde, dalga yapısının periyodik etkileri içeren ve sinüzoidal sinyal olarak tanımlanan yapıdan oluştuğu görülmektedir. Sinüzoidal sinyal en basit hali ile,

$$y(t)=A\cos(2\pi ft+\varphi)=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{2.11}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, A, sinyalin genliğini; f, frenkansını; φ, başlangıç fazını; $(\omega t+\varphi)$ açısı ise, herhangi bir zamanda hesaplanan anlık faz bilgisini göstermektedir. Söz konusu parametreler ile bir sinyalin tanımı yapılabilmektedir (Şekil 2.13).



Şekil 2. 13 Dalga yapısınına ilişkin genlik ve dalga boyu

Frekans f, periyodik bir harekette birim zamanda belli bir noktadan geçen dalgaların sayısıdır, zamanın tersi olan hertz ($Hz=sn^{-1}$), 1/gün, 1/ay vb. birimlerle ölçülür. Açısal frekans ω ise, birim zamanda taranan açı, yani, radyan ya da seçilen açı birimine göre derece sayısıdır. Frekans ve açısal frekans arasında,

$$f=\omega/2\pi \tag{2.12}$$

şeklinde bir ilişki bulunmaktadır.

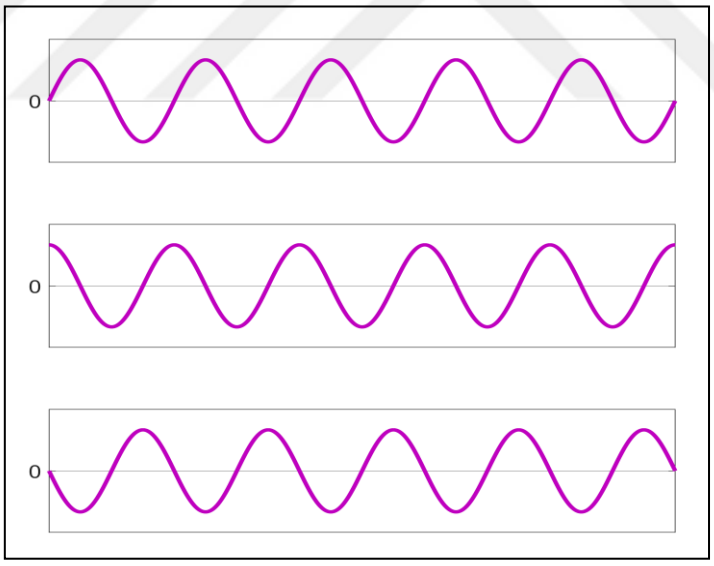
Dalga boyu γ, bir sinyalde ard arda gelen iki tepe noktası arasındaki uzaklık olarak tanımlanır. Sinyalin kendi kendisini düzenli olarak tam bir tekrarlaması için gereksinen

zamana ise, sinyalin periyodu denir. Bu nedenle bir sinyalin periyodu dalga boyuna eşdeğer olmakla birlikte ifade edildikleri birimler farklıdır. Örneğin, dalga boyu uzunluk birimiyle ölçülmesine karşılık, periyot zaman birimiyle ölçülür.

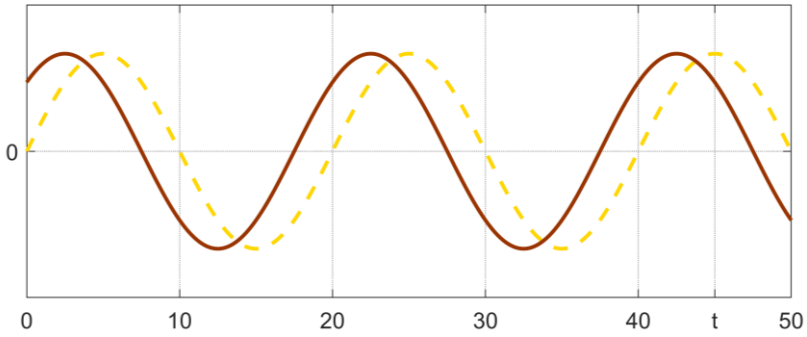
Düzenli zaman aralıklarıyla kendini tekrar eden sinyallere de periyodik sinyaller denir. Frekans ve periyot arasında, "f=1/T" şeklinde bir ilişki vardır. Periyodu büyük olan bir sinyalin frekansı düşük, küçük olanın frekansı ise yüksek olarak tanımlanır.

Genlik A, bir dalga şeklinin en çukurundan en tepesine kadar olan yüksekliğin yarısı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, periyodik harekette maksimum düzey olarak da ifade edilebilmektedir. Sinyal analizi çalışmalarında yıllık, yarıyıllık gibi farklı periyotlar için de genlik hesabı yapılmaktadır. Söz konusu tez çalışmasında da verilere ait yıllık ve yarıyıllık bileşenler göz önüne alınmaktadır.

Başlangıç fazı (kısaca, faz) φ, bir sinyalin referans bir noktaya göre başlangıç anını gösteren açısal bir büyüklük olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.14'te farklı faz açılarına sahip sinyaller gösterilmektedir.



Şekil 2. 14 Farklı faz açılarına sahip sinyaller (üst, orta ve alt şekillerde faz açısı, sırasıyla φ=−π/2, φ=0 ve φ=π/2'dir)



Şekil 2. 15 İki farklı sinüs sinyali arasındaki faz kayıklığı

Genlik ve dalga boyları özdeş, ancak bir *t* zamanındaki genlikleri farklı iki sinüs sinyaline ait zaman serisi Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Genlikler arasındaki fark, her iki sinyalin faz açıları arasındaki farka eşdeğer olup iki sinyal arasındaki faz farkı olarak adlandırılmaktadır.

Eşitlik (2.11)'de verilen sinüzoidal dalga modeli, sayısal uygulamalar için uygun değildir. Zaman serilerinde, aylık, haftalık, yıllık ve yarıyıllık gibi farklı periyotlu etkiler de bulunmakta, başka bir deyişle, çalışılan veri türüne göre düşük, orta veya yüksek frekanslı modeller oluşabilmektedir. Bu nedenle, söz konusu eşitlik

$$y(t) = A\cos(\omega t + \varphi) + Z \tag{2.13}$$

şeklinde üstel karmaşık sayılar ile genişletilebilmektedir. Bununla birlikte, "cos(α+β)=cos(α)cos(β)-sin(α)sin(β)" trigonometrik toplam fark eşitliği, Eşitlik (2.11)'de düşünülerek,

$$y(t) = A\cos(\omega t + \varphi) = A\cos(\varphi)\cos(\omega t) \; - \; A\sin(\varphi)\sin(\omega t) \tag{2.14}$$

yazılabilir. Burada, $c = A\cos(\varphi)$ ve $s = -A\sin(\varphi)$ denirse,

$$y(t) = c\cos(\omega t) + s\sin(\omega t) \tag{2.15}$$

elde edilir. Bu eşitlik, Bölüm 2.3'te açıklanan harmonik regresyon modelinde sözü edilen yıllık ve yarıllık periyotlu sinüzoidal sinyallere ilişkindir. Söz konusu regresyon modelinde *c* ve *s* kosinüs ve sinüs genliklerinin kestirimi ile, ilgili sinyale ilişkin genlik ve başlangıç fazı aşağıdaki eşitliklere göre sonradan elde edilir:

$$A = \sqrt{c^2 + s^2}\,, \tag{2.16}$$

$$\varphi = -\arctan(s/c). \quad (2.17)$$

2.4.2 Zaman Serilerinde Spektral Analiz

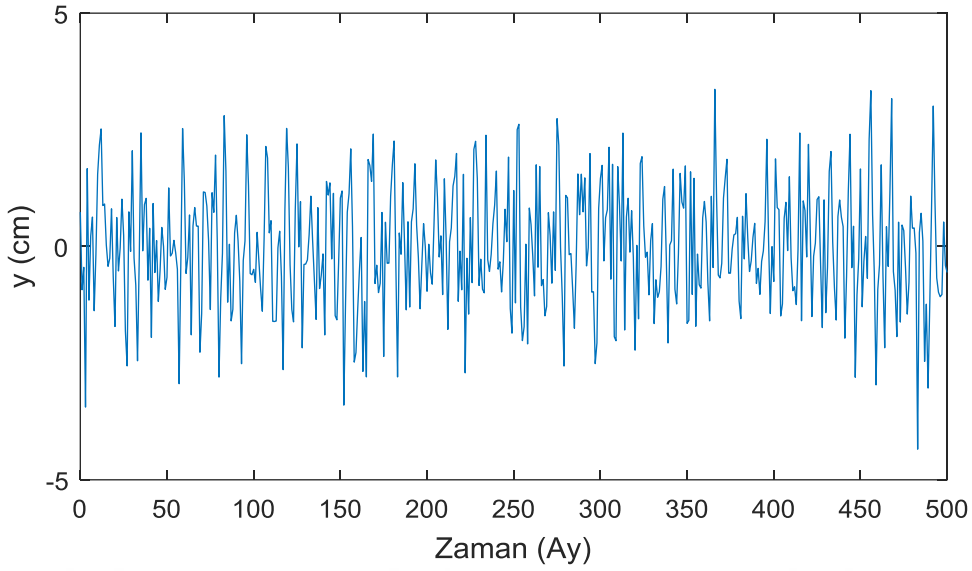
Bir zaman serisinde gerek sinyal yapısını gerekse gürültü türlerini ortaya çıkarmak için spektral analiz teknikleri uygulanır. Zaman serilerinde spektral analiz, frekans etki alanının diğer bir deyişle spektral yoğunluk (PSD, power spectral density) fonksiyonunun incelenmesi olarak ele alınmaktadır [83], [84], [85].

Spektral analiz kestirimlerinde Fourier, Laplace ve Hilbert gibi yaklaşımlar uygulanmakta olup, en çok kullanılan yöntem Fourier serileri ya da Fourier (Hızlı Fourier, Ayrışık Fourier gibi) dönüşümüdür. Fourier dönüşümleri, dalga formlarını sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının bir kombinasyonu olarak ifade eden fourier serileri ile açıklanan matematiksel işlemlerdir. Sinyal analizinde PSD, otokorelasyon fonksiyonunun bir Fourier dönüşümü olarak da ifade edilir. Çalışılan veri türüne bağlı olarak, uygulamada farklı Fourier dönüşüm yaklaşımları kullanılabilmektedir. Bunlar literatürde ayrık zamanlı Fourier (-DFT- Discrete Fourier Transformation), hızlı Fourier (FFT -Fast Fourier Transformation) dönüşümü gibi farklı isimlerle yer almaktadır [84].

Fourier dönüşümü temelli bir yöntem olan periyodogram analizi[1], klasik spektral kestirim yöntemi olarak bilinir. Bu analiz yöntemi, bilinen bir frekanstaki sinyalin genliğini araştırmak ve PSD kestirimini yapmak için kullanılır [83], [89].

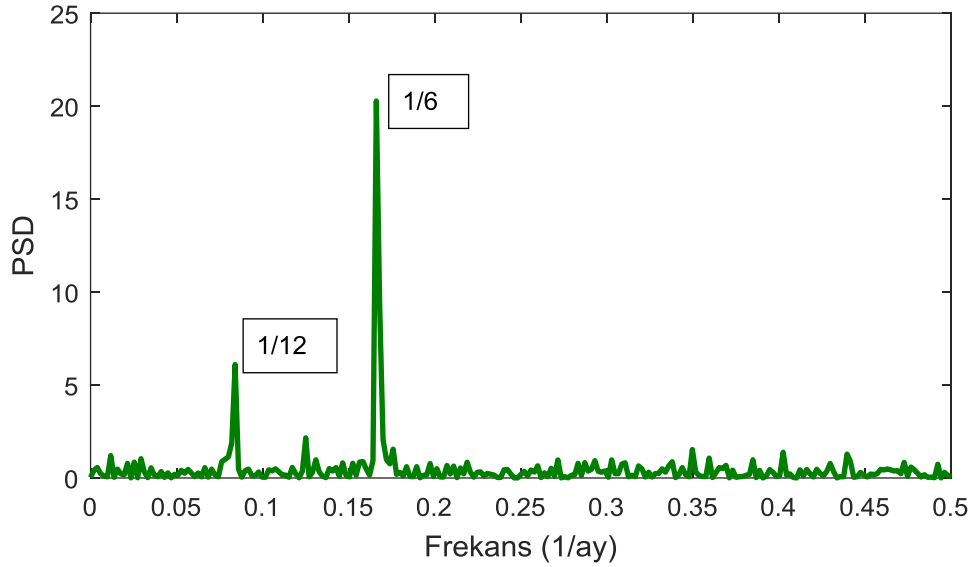
Örneğin, faz açıları $\varphi_1=0$ ve $\varphi_2=\pi/18$, genlikleri A_1=0,5 cm ve A_2=1 cm, periyotları T_1=12 ay ve T_2=6 ay olan iki sinüzoidal sinyalin birbirleri üzerine bindiklerini, 500 ay boyunca ayda bir $N(0,1)$ dağılımlı rasgele hata e ile ölçüldüklerini düşünelim: t=[0 1 2…500] ay olmak üzere söz konusu sinyal "$y(t)=0{,}5\cos(2\pi t/12)+\cos(2\pi t/6+\pi/18)+e$" şeklinde simüle edilmiş ve Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Söz konusu zaman serisi gözlendiğinde, bunun yalnız beyaz gürültüye sahip bir sinyal olduğu yorumu yapılabilir. Ancak, burada sinyalin iki dalgadan oluşan bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Söz konusu dalgaların periyotlarını ya da $1/T$ şeklindeki frekanslarını belirlemek için verinin periyodogramı çıkarılır.

[1] Zaman serisinin belli frekanslardaki periyodogramı, Matlab'de "periodogram" fonksiyonu ile hesaplanabilmektedir [90].



Şekil 2. 16 $N(0,1)$ dağılımlı rasgele hata eklenmiş "0,5cos(2πt/12)+cos(2πt/6+π/18)" sinyali

Şekil 2.16'daki sinyal bir y vektörü altında toplanmak üzere, "[psd,w]=periodogram(y)" Matlab komutuyla "w=2π*f*" açısal frekanslarına karşılık psd güç spektral yoğunlukları elde edilir. Burada w frekanslarının 2π'ye oranlarına karşılık psd'ler bir xy eksen takımında gösterilirse Şekil 2.17'de verilen frekansa karşılık güç spektral yoğunluk grafiği elde edilir. Buradan diğerlerine göre anlamlı şekilde büyük olan iki adet PSD göze çarpmaktadır. Bunlar, $1/T_1=1/12$, yani $T_1=12$ ay'a diğeri de $1/T_2=1/6$, yani $T_2=6$ ay'a karşılık gelmektedir. Bir başka deyişle, Şekil 2.16'daki zaman serisinde ayırt edilemeyen iki sinüzoidal dalga, "frekans, PSD" grafiğinde açık olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, sinyal içindeki dalgaların başlangıç fazları, PSD analizini etkilememektedir. Burada önemli olan, sinyal-gürültü oranı yani SNR (signal to noise ratio) ve zaman serisinin uzunluğu ile veri toplama sıklığıdır. Örneğin, SNR düşük yani rasgele hataların varyansı yüksek ve/veya veri uzunluğu yeterli değilse, Şekil 2.17'deki gibi açık biçimde yüksek orandaki PSD'leri gözlemek mümkün olmayabilir.



Şekil 2. 17 "0,5cos(2πt/12)+cos(2πt/6+π/18)" sinyalinin normalize edilmiş frekans değerlerine karşılık PSD grafiği (kutu içindeki değerler maksimum PSD'ye sahip frekans değerlerini göstermektedir)

Bir sonraki alt bölüm açıklandığı üzere, zaman serisinde yukarıdaki örnekte olduğu gibi yalnız beyaz gürültü olmayabilir. Çeşitli gürültü türlerinin güç spektrumlarının belirlenmesinde de PSD değerlerinden yararlanılır [31], [32], [33], [91], [92], [93].

Periyodogram yöntemi, Welch (1967) [94], Thomson (1982) [95], Lomb (1976) [96] ve Scargle (1982) [97] gibi bilim adamları tarafından geliştirilmiştir. Welch (1967)'ye göre [94] periyodogram analizi, zaman serisindeki verinin birbirini belli oranda kapsayan alt bölümlere ayrılmasını esas alarak yapılan PSD kestirimine dayanır. Her bir alt bölümün periyodogramı hesaplanarak, ilgili frekansa karşılık gelen PSD kestirimi aritmetik ortalama biçiminde verilir [89], [98], [99]:

$$PSD_{Welch}(f) = \frac{1}{L}\sum_{i=0}^{L-1} S_{yy,i}(f) \tag{2.18}$$

Burada, L zaman serisinin uzunluğu, S_{yy} ise her bir alt bölümün periyodogram kestirimidir. Bu yöntem, özellikle SNR'ın düşük olduğu durumlarda periyodograma göre daha iyi bir sonuç sağlamaktadır [99]. Ayrıca Matlab'te "pwelch" fonksiyonu ile Welch yöntemine göre PSD hesabı yapılabilmektedir [98].

2.4.3 Zaman Serilerinde Gürültüler, Spektral İndeksleri ve PSD grafikleri

Gürültü, sinyalde bulunan ve sinyalin taşıdığı bilgileri etkileyen, istenmeyen ya da oluşması önlenemeyen rasgele hatalardır [100]. Çıkış noktalarından itibaren zamana bağlı olarak sistemi etkileyen bu gürültüler, güç yasası eşitliğine göre,

$$PSD(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\kappa} = L_0 f^{\kappa} \tag{2.19}$$

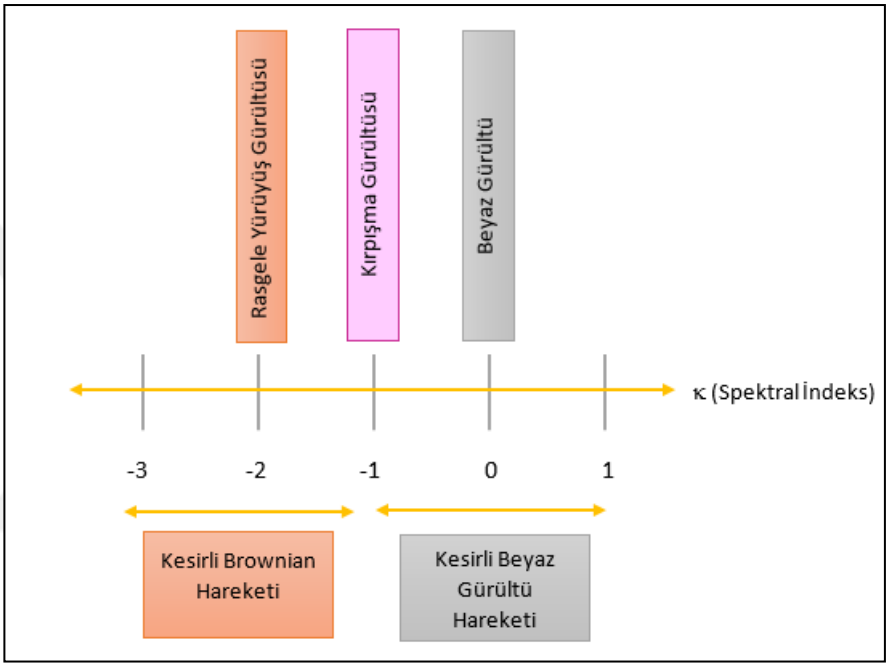
şeklindeki güç spektrumuna sahiptir [93]. Burada, κ, spektral indeks, P_0 ve f_0, normalizasyon sabitleri ve L_0, oldukça yavaş değişen sabit bir fonksiyondur.

Spektral indeksin değerine göre beyaz gürültü (white noise), kırpışma gürültüsü (pink noise ya da flicker noise), rasgele yürüyüş (Brown noise/random walk noise), mavi gürültü (blue noise), gri gürültü gibi renkli gürültüler (colored noises) zaman serisinde yer alabilecek türdeki gürültülerdir. Jeodezik zaman serilerinde, beyaz gürültü yanında kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültülerinin olduğu bilinmektedir [31], [33]. Kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültülerinin nedenleri tam olarak bilinmemekle birlikte, GPS zaman serilerinde kırpışma gürültüsünün, güneş lekeleri değişiminden, yer dönme parametrelerindeki düzensizliklerden, atomik saat zaman hatalarından, rasgele yürüyüş gürültüsünün ise lokal nokta hareketlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir [31], [92], [101], [102].



Şekil 2. 18 Bir jeodezik sinyalde aynı anda yer alabilecek gürültü türleri

Spektral indeks değerleri, [-3, 1] değerleri arasındadır. Durağan süreçlerde $-1<\kappa<1$ ve durağan olmayan süreçlerde $-3<\kappa<-1$ aralığında değişen negatif indeks değerlerine sahiptirler [31], [33], [91]. $-3<\kappa<-1$ aralığında olanlar kesirli Brownian hareketi (fractional Brownian motion), $-1<\kappa<1$ aralığında olanlar kesirli beyaz gürültü hareketi (fractional gaussian noises) olarak adlandırılır [31], [32], [33], [92]. Beyaz gürültü için $\kappa=0$, kırpışma gürültüsü için $\kappa=-1$ ve rasgele yürüyüş gürültüsü için $\kappa=-2$'dir. Söz konusu spektral indekslere göre bu gürültüler, Şekil 2.19'da gösterilmiştir.

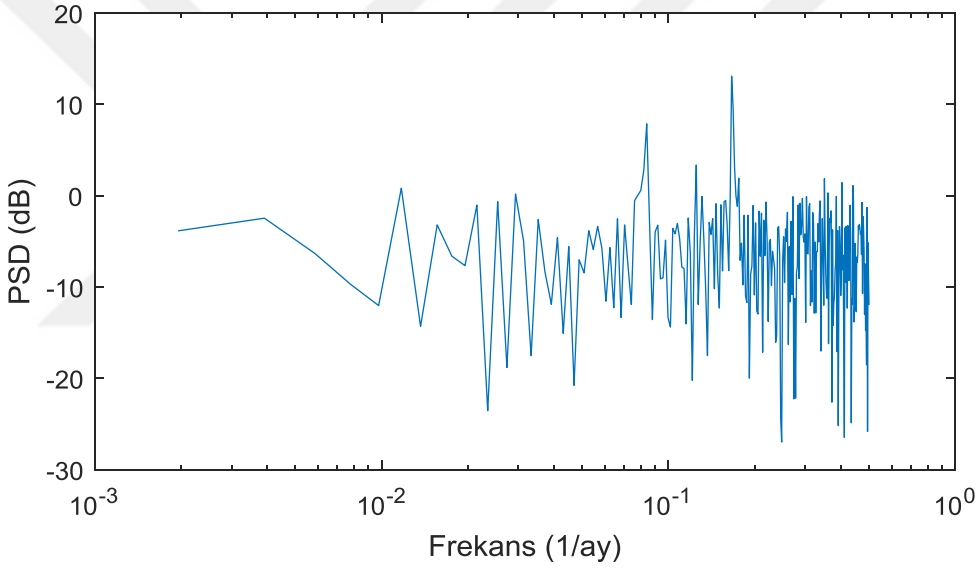


Şekil 2. 19 Zaman serisindeki gürültülerin spektral indeks değerleri

Eşitlik (2.19)'da L_0 etkisiz bir fonksiyon olarak ele alınırsa, beyaz gürültü için $PSD(f)=f^{(\kappa=0)}=1$, kırpışma gürültüsü için $PSD(f)=f^{(\kappa=-1)}=1/f$, rasgele yürüyüş gürültüsü için $PSD(f)=f^{(\kappa=-2)}=1/(f^2)$ çıkar. Buradan, beyaz gürültünün farklı frekanslarda sabit bir PSD fonksiyonuna, kırpışma gürültüsünün, belirli bir frekans aralığındaki, gürültü frekansıyla ters orantılı olarak değişen bir PSD fonksiyonuna, rasgele yürüyüş gürültüsünün ise belirli bir frekans aralığındaki, gürültü frekansının karesiyle ters orantılı olarak değişen bir PSD fonksiyonuna sahip olduğu ortaya çıkar. Bir sinyaldeki gürültü türlerinin belirlenmesi için, bu nedenle PSD değerleri desibel (dB) birimine, 10log(PSD) fonksiyonuyla dönüştürülür (desibel, 1 birimlik bir güç birimi referans alınarak güçteki değişimi ifade eden bağıl bir birimdir. Genellikle ses şiddetinin ölçülmesi için kullanılır). Böylece Eşitlik (2.19)'dan,

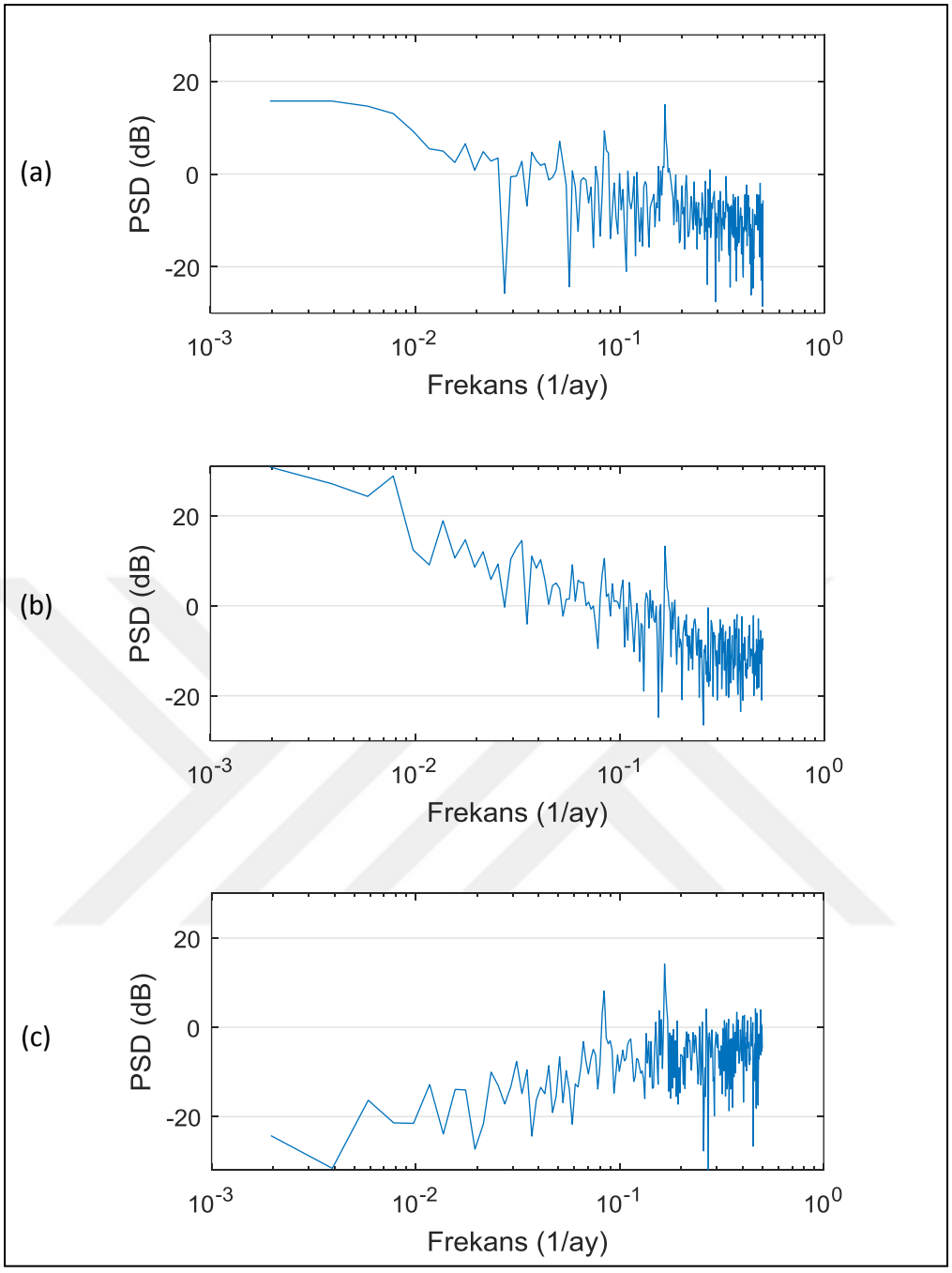
$$10\log(PSD)=10\log(L_0)+10\kappa\log(f) \quad (2.20)$$

çıkar. Bu fonksiyon bir "*a*+*bx*" doğrusal fonksiyonu gibi düşünülebilir. Bu nedenle periodogramlarda frekansın doğal logaritmasına karşılık dB birimindeki PSD değerleri çizdirilirse (oluşan grafiğe, bunun için, log-log grafiği adı verilir), ortaya çıkan eğrinin eğimi κ spektral indeksine karşılık gelir ve gürültünün türü, Şekil 2.19'da verilen spektruma göre tanımlanabilir. Örneğin, beyaz gürültüye sahip olduğu bilinen Şekil 2.16'daki zaman serisine ilişkin Şekil 2.17'deki Frekans-PSD grafiği, log(Frekans)-10log(PSD) için çizdirilirse Şekil 2.19 elde edilir. Buradan ilgili log-log eğrisinin eğiminin 0 olduğu, yani κ=0'lık beyaz gürültüyle yüklü bir sinyal olduğu, bir başka deyişle sürece katkısının zamana bağlı olmadığı sonucu ortaya çıkar.



Şekil 2. 20 Şekil 2.16'da verilmiş zaman serisinin log-log PSD grafiği

Diğer gürültü türlerininin güç spektrumlarını örnek üzerinde göstermek için, Şekil 2.16'daki zaman serisinin beyaz gürültüsü çıkartılıp, Matlab ile veriye 1 cm genlikli, kırpışma gürültüsü, rasgele yürüyüş gürültüsü ve mavi gürültü eklenmiştir. Söz konusu zaman serilerinin log-log PSD grafikleri Şekil 2.20'dekine benzer biçimde Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Şekil 2.21a, kırpışma gürültülü zaman serisine, Şekil 2.21b rasgele yürüyüş gürültülü zaman serisine ve Şekil 2.21c mavi gürültülü zaman serisine karşılık gelmektedir. Şekil 2.21b'deki eksi işaretli eğimin Şekil 2.21a'dakine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 2.21c'de ise mavi gürültüye karşılık pozitif işaretli eğim ortaya çıkmıştır.



Şekil 2. 21 Şekil 2.16'da verilmiş zaman serisinin (a) kırpışma gürültüsü içermesi, (b) rasgele yürüyüş gürültüsü içermesi, (c) κ=1 spektral indeksli mavi gürültü içermesi durumunda log-log PSD grafikleri

Beyaz gürültü dışındaki renkli gürültüler bir zaman serisinin periyodik yapısını bozar. Çünkü, Şekil 2.18'de gösterildiği gibi, bu gürültü türleri zaman serisinde bir başka sinüzoidal dalga gibi ortaya çıkabilir. Örneğin, bir kırpışma gürültüsü mevsimsel bir etki olarak algılanabilir. Böylesi bir durumda, zaman serisinin uzunluğuna ve veri toplama sıklığına bağlı olarak frekans-PSD grafiklerinde esas sinüzoidal dalganın periyot

kestirimi biaslı olur. Bir başka deyişle, söz konusu renkli gürültülerin varlığı, yapılacak harmonik regresyon analizinin kestirim değerlerini etkiler. Bununla birlikte, uygulamada bir zaman serisi birden fazla sayıda renkli gürültüyü aynı anda içerebilir. Böylesi bir durumda, söz konusu zaman serisinin log-log PSD grafiklerinden ilgili gürültünün spektrumunu açık biçimde belirlemek mümkün olmaz. Bunun için Allan varyans gibi analiz teknikleri önerilebilir. Ancak bu teknikler için oldukça uzun ve boşluksuz bir zaman serisine ihtiyaç duyulur.

Yukarıda değinilen sorunları aşmak için, belli varsayımlar altında çalışılır. Daha önceki deneyimlerden zaman serisinin belli periyotlu dalgalara ya da belli spektrumdaki gürültülere sahip olduğu varsayımları birer ön bilgi olarak analizde kullanılır. Ne kadar ön bilgi varsa, sinyalden geriye kalan artık hataların spektral analizleri, zaman serisinin o kadar derin ve ayrıntılı analizine imkan tanır. Zaman serisi analizi, bu nedenle, otomatik bir akış şemasından ziyade, gözlem işleminin ve gözlenen büyüklüklerin fiziğine bağlı olarak yapılabilecek bir spektral analiz yöntem dizisidir. Örneğin, bir noktadaki gravite ölçülerine ilişkin bir zaman serisinde birinci ya da ikinci dereceden polinomla açıklanabilen bir drift etkisinin ya da gelgit deformasyonun var olduğunu önceden bilmek, bu ölçülere ilişkin zaman serisi analizini kolaylaştırır. Böylece, gözlenmek istenen kütle değişimi esaslı diğer zamansal değişimlerin daha iyi analiz edilmesi mümkün olur.

Farklı güç spektrumundaki gürültü türlerine ilişkin yapılacak bir varsayım da yukarıda değinilen zaman serilerinin analizinin etkinliğini arttıracak bir ön bilgi niteliğindedir. Bir zaman serisinin belli gürültü türleriyle yüklü olduğu varsayımı altında, otoregresyon sonucunda elde edilmiş kovaryans matrisleri yardımıyla bu gürültülerin bir harmonik regresyon modeli altında nasıl modellenebileceği bir sonraki bölümde açıklanmaktadır.

2.4.4 Renkli Gürültüler için Kovaryans Matrisi Modeli

Hosking (1981) [38], ilgili otoregresyon (AR) modeline göre spektral indeksi belli olan bir gürültünün stokastik sürece katkısını incelemektedir. Buna göre, genliği σ_c, spektral indeksi κ olan bir renkli gürültü, $n\times1$ boyutlu $\mathbf{e}\sim N(0, \mathbf{C}=\sigma_c^2\mathbf{I})$ i.i.d. normal dağılmış bir rasgele hata vektöründen bir dönüşüm kullanılarak açıklanabilir [37]:

$$\mathbf{e}_c=\mathbf{T}_c\mathbf{e} \tag{2.21}$$

Burada, $\mathbf{C}$, $n\times n$ boyutlu varyans matris; $\mathbf{I}$, $n\times n$ boyutlu birim matris ve $\mathbf{T}_c$, $n\times n$ boyutlu dönüşüm matrisidir. $\mathbf{T}_c$ dönüşüm matrisi, $|\kappa|$ indeksi bir tam sayı olmak üzere, Γ gama fonksiyonuna bağlı,

$$\psi_n=\frac{\frac{-\kappa}{2}\left(1-\frac{\kappa}{2}\right)\cdots\left(n-1-\frac{\kappa}{2}\right)}{n!}=\frac{\Gamma\left(n-\frac{\kappa}{2}\right)}{n!\Gamma\left(-\frac{\kappa}{2}\right)} \tag{2.22}$$

fonksiyonuyla, aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{T}_c=\begin{bmatrix}\psi_0 & 0 & 0 & \cdots & 0\\ \psi_1 & \psi_0 & 0 & \cdots & 0\\ \psi_2 & \psi_1 & \psi_0 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \psi_n & \psi_{n-1} & \psi_{n-2} & \cdots & \psi_0\end{bmatrix} \tag{2.23}$$

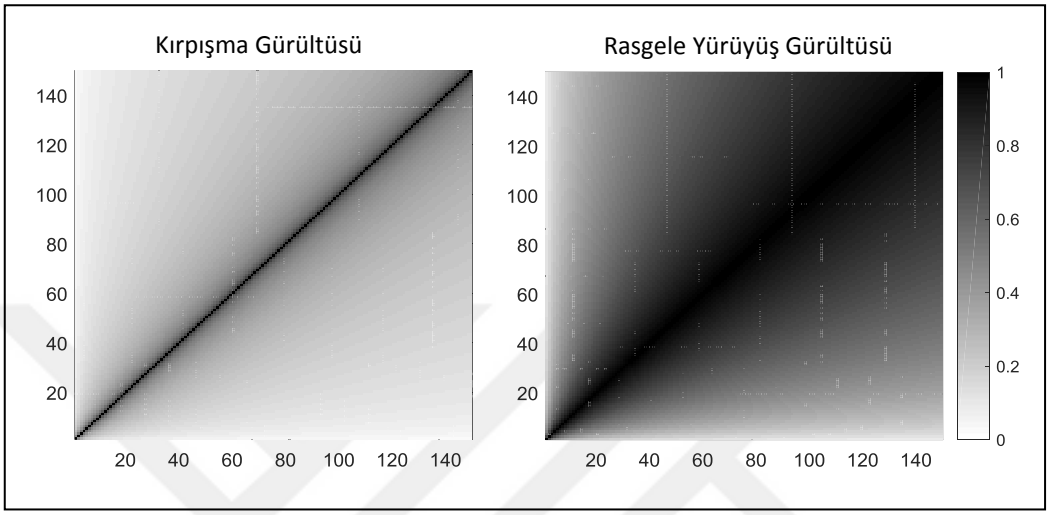
Eşitlik (2.21)'e varyans-kovaryans yayılma kuralı uygulanırsa, renkli gürültünün kovaryans matrisi,

$$\mathbf{C}_c=\sigma_c^2(\mathbf{T}_c\mathbf{T}_c^T)=\sigma_c^2\mathbf{Q}_c \tag{2.24}$$

çıkar. Farklı spektral indeksteki gürültülerin bir arada ele alınabilmesi için, veri toplama aralığı Δt (sabit) olan bir zaman serisinde, $\mathbf{T}_c$ matrisi "$\Delta t^{-\kappa/4}$" ile ölçeklendirilir [33]. Bu durumda $\mathbf{Q}_c$ ağırlık katsayıları matrisinin birimi "zaman$^{-\kappa/2}$" olur. Renkli gürültünün kovaryans matrisinin biriminin metrik, örneğin "cm^2" olması için, Eşitlik (2.24)'e göre σ_c'nin birimi cm/(zaman$^{\kappa/4}$) olmalıdır. Örneğin, zaman birimi "yıl" ise, kırpışma gürültüsü için Eşitlik (2.24)'de σ_c'nin birimi cm/yıl$^{1/4}$, rasgele yürüyüş gürültüsü için cm/yıl$^{1/2}$ olur.

$\mathbf{Q}_c$ matrisi, $\kappa\neq0$ iken her zaman dolu bir matristir. Dolayısıyla, söz konusu renkli gürültü zaman serisindeki y değerlerinin zamana bağlı biçimde korelasyonlu olmasına neden olur. Bu nedenle, renkli gürültü taşıyan zaman serilerinde bu tip gürültülere "zamansal korelasyonlu" gürültüler de denir. Kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültüsü için n=150 iken $\mathbf{Q}_c$ matrislerinden elde edilen korelasyonlar, Şekil 2.22'de gösterilmiştir. Köşegen dışındaki elemanlar incelendiğinde, zaman serisinde birbirine yakın olan

ölçülerin yüksek korelasyonlu, birbirine uzak olanların ise daha düşük korelasyonlu olduğu görülmektedir. Kırpışma gürültüsü için zaman serisinin boyu artsa da ölçüler arasındaki bu korelasyonlar birbirine yakın kalmakta (%40 ve %20 arasında), rasgele yürüyüş gürültüsü için ise zaman arttıkça birbirinden görece daha uzak olan ölçüler arasında korelasyonlar artmaktadır.



Şekil 2. 22 Kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültülerinin zaman serisindeki korelasyon matrisleri

2.5 Gürültü Genliklerinin Varyans Bileşenlerinin Kestirimi ile Elde Edilmesi

Renkli gürültülerin kovaryans matrisleri Eşitlik (2.24) biçiminde öngörülebildiği için, deterministik kısmı bilinen bir harmonik regresyon modelinde "σ_c" renkli gürültü genlikleri, onların kareleri olan "σ_c^2" varyans bileşenleri biçiminde kestirilebilir. Bu bölümde, öncelikle, varyans bileşenlerinin kestirimi kısaca açıklanmakta, sonrasında ise söz konusu gürültü genlikleri için dengeleme modeli verilmektedir.

2.5.1 Varyans Bileşenlerinin Kestirimi

Dengeleme hesabında ağırlık matrisi uygun biçimde oluşturulmalıdır. Aksi durumda, bilinmeyenler ve onlara ilişkin varyans-kovaryans matrisi doğru olarak elde edilmez [42], [43], [44], [50], [103]. Özellikle, farklı kaynaklardan gelen ölçülerin birleştirilmesinde ağırlıklar uygun biçimde ölçeklendirilmelidir. Ölçülerin içerdiği farklı hata kaynaklarının dengelemenin stokastik modelinde uygun biçimde

modellenebilmesi gerekir [42]. Farklı stokastik özellikleri dengeleme hesabında ele alabilmek için, varyans bileşenlerinin kestirimi gerekir [40], [41], [42], [43], [44].

Jeodezide varyans bileşenlerinin kestirimi ilk olarak Helmert tarafından ele alınmıştır. Bundan yaklaşık bir asır sonra Rao ve Mitra (1971) [46] varyans bileşen kestirimi (MINQUE) yönteminin güncel tanımlanmasını yapmıştır. Günümüzde, birçok jeodezik çalışmada varyans bileşen kestirim yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler MINQUE ([46], [47], [48], [49]), BIQUE (Best Invariant Quadratic Unbiased Estimation) ([45]), iteratif AUE (Almost Unbiased Estimation) [42], [50]) ve Helmert yöntemleridir. Dengeleme hesabında geçen ölçülerin normal dağılımlı olması durumunda bu yöntemlerle özdeş varyans bileşen kestirimleri elde edilmektedir [42], [43].

İki ölçü grubu $\mathbf{y}_1$ ve $\mathbf{y}_2$ olsun. Bu ölçülere ilişkin Gauss-Markoff modeli aşağıdaki gibi tanımlansın:

$$\mathbf{y}+\mathbf{v}=\begin{bmatrix}\mathbf{y}_1\\ \mathbf{y}_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{v}_1\\ \mathbf{v}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}_1\\ \mathbf{A}_2\end{bmatrix}\mathbf{x}=\mathbf{A}\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{C}=\sigma_1^{\,2}\begin{bmatrix}\mathbf{Q}_1 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{0}\end{bmatrix}+\sigma_2^{\,2}\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2\end{bmatrix}=\sigma_1^{\,2}\mathbf{V}_1+\sigma_2^{\,2}\mathbf{V}_2 \qquad (2.25)$$

Bu modele varyans bileşenleri ($\sigma_1^{\,2}$ ve $\sigma_2^{\,2}$) bilinmeyen olan Gauss-Markoff modeli adı verilir [45]. Varyans bileşenlerinin kestirimi için iteratif yol izlenir. Öncelikle varyans bileşenleri iki kısımda ele alınır:

$$\sigma_1^{\,2}=\theta_1(\sigma_1^{\,2})_0\ ,\ \sigma_2^{\,2}=\theta_2(\sigma_2^{\,2})_0 \qquad (2.26)$$

Burada, $(\sigma_1^{\,2})_0$ ve $(\sigma_2^{\,2})_0$ yaklaşık varyans bileşenini, θ ise varyans çarpanını ifade etmektedir. (2.25)'teki bilinmeyen kovaryans matrisin ilk yaklaşık değeri,

$$\mathbf{C}_0=(\sigma_1^{\,2})_0\mathbf{V}_1+(\sigma_2^{\,2})_0\mathbf{V}_2=(\mathbf{G}_1)_0+(\mathbf{G}_2)_0 \qquad (2.27)$$

biçiminde elde edilir. Buradan BIQUE yöntemine göre varyans çarpanlarının ilk kestirim değerleri belirlenir:

$$\begin{bmatrix}\hat{\theta}_1\\ \hat{\theta}_2\end{bmatrix}=\left\{\begin{bmatrix}\mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0) & \mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0)\\ \mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0) & \mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0)\end{bmatrix}\right\}^{-1}\begin{bmatrix}\mathbf{y}^T\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0\mathbf{W}_0\mathbf{y}\\ \mathbf{y}^T\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0\mathbf{W}_0\mathbf{y}\end{bmatrix} \qquad (2.28)$$

Burada $\mathbf{W}_0$, yaklaşık kovaryans matrisi kullanılarak elde edilen ortogonal bir matristir:

$$\mathbf{W}_0=\mathbf{C}_0^{-1}(\mathbf{I}-\mathbf{A}(\mathbf{A}^T\mathbf{C}_0^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T) \qquad (2.29)$$

Varyans çarpanları "1" değerine yakınsa iterasyon sonlandırılır; Eşitlik (2.26)'dan varyans bileşenlerinin kestirim değerleri elde edilir. Eğer varyans çarpanları "1" den farklıysa Eşitlik (2.26)'dan elde edilecek varyans bileşenleri yaklaşık değerler olarak kabul edilir ve Eşitlik (2.27) ve Eşitlik (2.28)'e göre iteratif işlem sürdürülür.

BIQUE yerine Helmert veya iteratif AUE yöntemleri de kullanılabilir. Uygulamada her üç yöntem eşit çözümler verir. Iteratif AUE yöntemi, Helmert yönteminin bir başka biçimidir; yukarıda açıklanan BIQUE yönteminin basitleştirilmiş halidir. Bu yönteme göre, varyans çarpanları aşağıdaki eşitliğe göre belirlenir:

$$\hat{\theta}_1 = \frac{\mathbf{y}^T\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0\mathbf{W}_0\mathbf{y}}{\mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_1)_0)} \quad , \quad \hat{\theta}_2 = \frac{\mathbf{y}^T\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0\mathbf{W}_0\mathbf{y}}{\mathrm{iz}(\mathbf{W}_0(\mathbf{G}_2)_0)} \tag{2.30}$$

Diğer iteratif işlemler, BIQUE yöntemiyle özdeştir.

Iteratif AUE yöntemi Gauss-Helmert modelinde de uygulanabilir [42]. Bir Gauss-Helmert modeli aşağıdaki gibi olsun [45]:

$$\mathbf{y}=\mathbf{A}\mathbf{x}+[\mathbf{I}\ \mathbf{T}_c]\ [\mathbf{e}_w\ \mathbf{e}_c]^T=\mathbf{A}\mathbf{x}+\mathbf{B}\boldsymbol{\gamma} \quad ; \quad \mathbf{C}_w=\sigma_w^2\mathbf{I}\ ,\ \mathbf{C}_c=\sigma_c^2\mathbf{I} \tag{2.31}$$

Burada, $\mathbf{T}_c$, c hata kaynağı için bilinen katsayılar matrisi, $\boldsymbol{\gamma}$ ise tüm hataları içeren vektördür. Yukarıdaki model, varyans-kovaryans yayılma kuralı uygulanarak bir Gauss-Markoff modeli haline dönüştürülebilir. "$\mathbf{B}\boldsymbol{\gamma}$" hata terimi için "$-\mathbf{v}$" ifadesi kullanılırsa, $\mathbf{e}$'nin varyans kovaryans matrisi, "$\mathbf{C}=\sigma_w^2\mathbf{I}+\sigma_c^2\mathbf{T}_c\mathbf{T}_c^T$" ile σ_w^2 ve σ_c^2 varyans bileşenleri bilinmeyen Gauss-Markoff modeli oluşturulur:

$$\mathbf{y}+\mathbf{v}=\mathbf{A}\mathbf{x} \quad ; \quad \mathbf{C}=\sigma_w^2\mathbf{I}+\sigma_c^2\mathbf{T}_c\mathbf{T}_c^T=\sigma_w^2\mathbf{V}_w+\sigma_c^2\mathbf{V}_c \tag{2.32}$$

Böylece, Gauss-Helmert modelinde bilinmeyen varyans bileşenleri yukarıda açıklanan BIQUE ya da iteratif AUE yöntemlere göre kestirilir.

2.5.2 Gürültü Genlikleri Bilinmeyen Harmonik Regresyon Modeli

Farklı spektral indeksli gürültü türlerine sahip bir zaman serisindeki ölçüler için dengelemenin matematiksel modeli (2.32) eşitliği biçiminde yazılabilir [32]. Örneğin, zaman serisindeki ölçüler ($\mathbf{y}$), beyaz gürültü, kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültüsü içeriyorsa, dengeleme modeli aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\mathbf{y}+\mathbf{v}=\mathbf{A}\mathbf{x} \quad ; \quad \mathbf{C}=\sigma_w^2\mathbf{I}+\sigma_f^2\mathbf{T}_f\mathbf{T}_f^T+\sigma_r^2\mathbf{T}_r\mathbf{T}_r^T=\sigma_w^2\mathbf{V}_w+\sigma_f^2\mathbf{V}_f+\sigma_r^2\mathbf{V}_r \tag{2.33}$$

Burada, σ_w, beyaz gürültü genliği; σ_f, kırpışma gürültüsü genliği; σ_r, rasgele yürüyüş gürültü genliği; $\mathbf{T}_f$ ve $\mathbf{T}_r$, sırasıyla kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültüsü için Eşitlik (2.23)'den ele edilen dönüşüm matrisidir. (2.33) dengeleme modelinde, $\mathbf{V}_f$ ve $\mathbf{V}_r$ matrisleri için Eşitlik (2.24)'deki ağırlık katsayıları matrisi kullanılır ($\mathbf{V}_f=\mathbf{Q}_f$, $\mathbf{V}_r=\mathbf{Q}_r$).

Gürültü genlikleri, yukarıda açıklanan iteratif AUE yöntemine göre 2.26-2.30 eşitlikleri kullanılarak iteratif olarak kestirilir. Bu yönteme göre, dengelemede önsel varyans "1" alınmış olur. Varyans bileşenleri, yani gürültü genliklerinin kareleri elde edildikten sonra en uygun ağırlık modeli belirlenmiş olur ve dengeleme sonrasında hesaplanacak sonsal varyans, dolayısıyla 1'e gider (ispat için [39]). Eğer iteratif çözüm sırasında varyans bileşenleri negatif işaretli olursa, bu, söz konusu zaman serisinin ilgili gürültü kaynağının stokastik olarak modellenmesi için yeterli olmadığını gösteririr. Böylesi bir durumda gürültü kaynaklarını ifade eden **C** kovaryans matrisi tasarımının yeniden düşünülmesi, bir başka deyişle, farklı gürültü kombinasyonlarının ele alınması gerekir.

2.6 EWT Zaman Serisinde PSD grafikleri

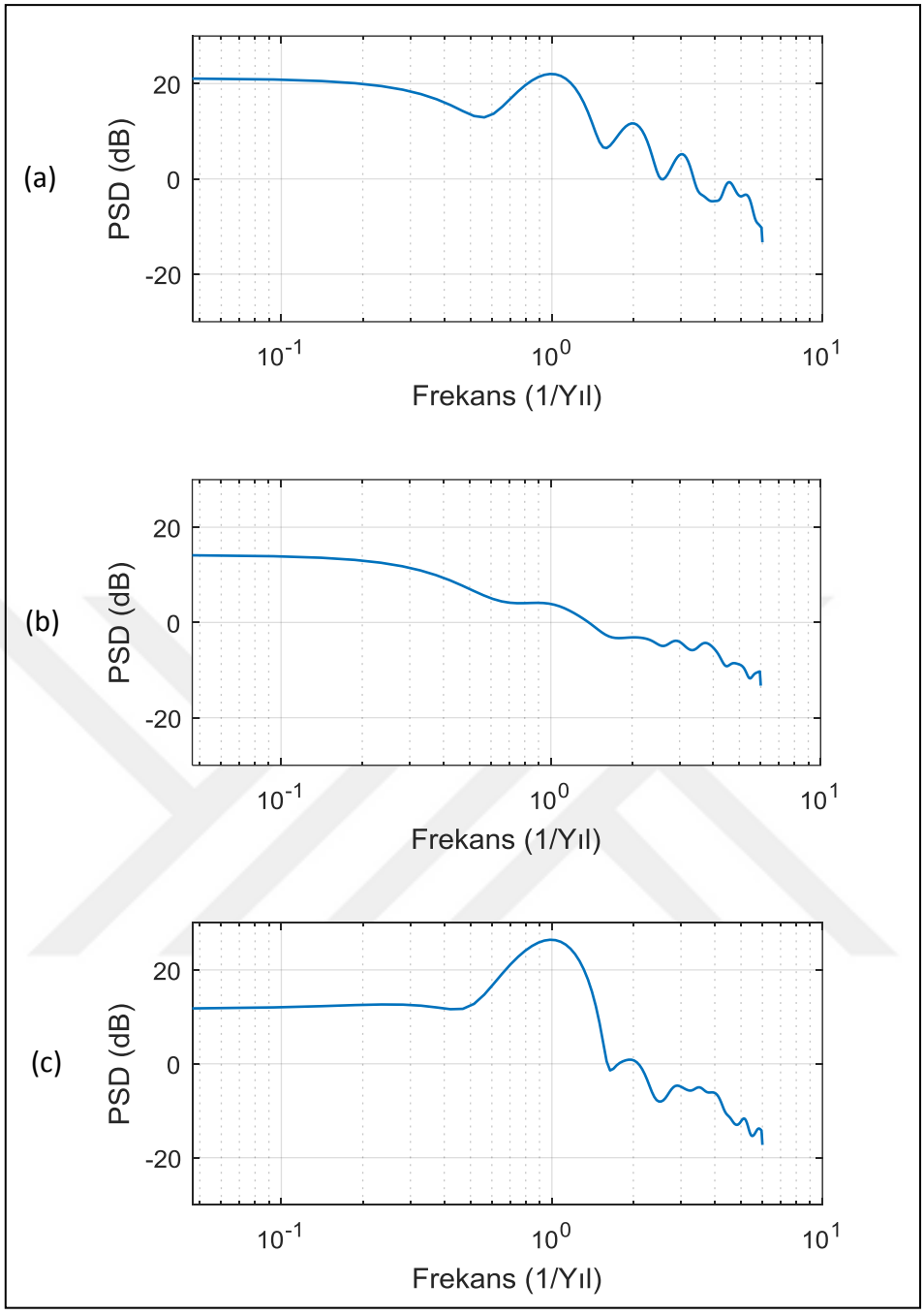
GRACE ile 2002-2016 yılları arasında aylık olarak yayınlanan küresel harmonik katsayı modellerinden 15×12=180 adet bulunmaktadır (Bu sayı, Sayısal Uygulama bölümünde açıklandığı üzere, eksik olan yıllar vb. nedeniyle daha azdır). Bir başka deyişle, veri aralığı Δt=1/12 yıl, veri sıklığı yani frekansı 12 yıl^{-1}, toplam uzunluğu, doğal olarak, (180-1)×1/12≈15 yıl olan bir EWT zaman serisinden söz edilmektedir. Bölüm 2.3'de açıklanan harmonik regresyon modeline göre, EWT zaman serisinde yıllık ve yarı yıllık sinüzoidal dalgalar yanında "$a+bt$" biçimindeki doğrusal bir trend, standart bir yaklaşım olarak, deterministik kısmı oluşturur.

EWT zaman serilerine Bölüm 2.4.2'de açıklanan Welch algoritması uygulanarak PSD grafikleri incelenmiştir. Örnek olarak, Grönland dış (kıyı) havzası, Murray havzası (Okyanusya, Avustralya) ve Amazon havzasına ilişkin log-log PSD grafikleri verilmektedir. Öncelikle, "$a+bt$" doğrusal trendi zaman serisinden çıkarılarak geriye kalan EWT sinyalinin PSD'leri analiz edilmiş ve Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Her ne kadar veri yoğunluğu az olsa da, söz konusu üç havzaya ilişkin log-log PSD eğrilerinin eksi

işaretli eğime sahip oldukları açık biçimde görülmektedir. Kıta havzalarının tümünde benzer özellikteki eğimler mevcuttur. Bunun yanında, söz konusu grafiklerde yıllık sinüzoidal dalganın etkileri de belirgindir. En yüksek genlikli yıllık değişim gösteren Amazon havzasındaki yıllık dalganın PSD'si grafiklerde en yüksek olarak çıkmıştır. Grönland dış havzası ise oldukça yüksek oranda (yaklaşık -20 cm/yıl) trend değerine sahip bir havzadır. Grönland havzasına ilişkin Şekil 2.23a'da, yüksek frekansta (periyodu 1 yıl'dan küçük olan) dalga etkileri görülmektedir.

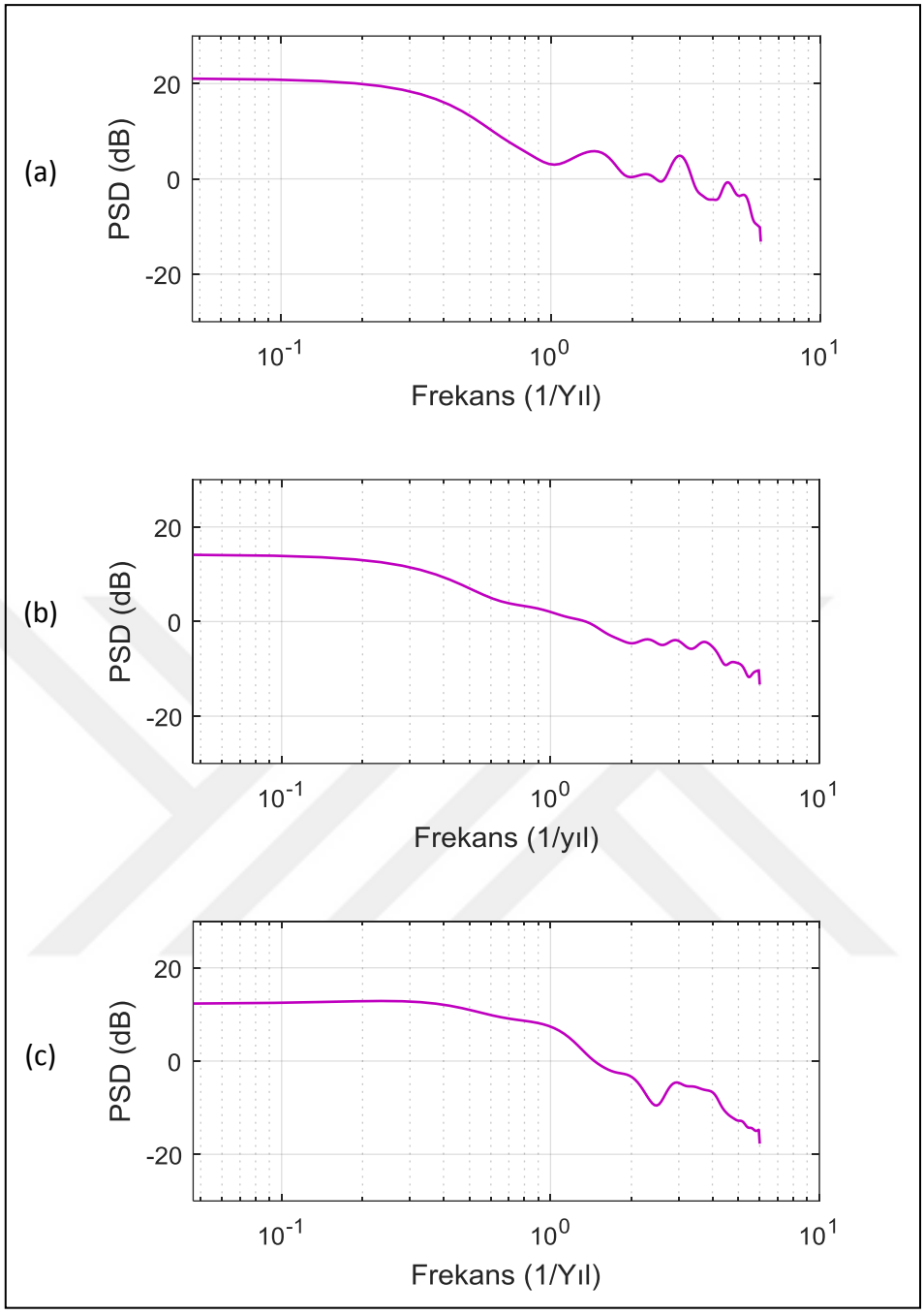
Trend yanında, yıllık ve yarıyıllık dalgalar da sinyalden çıkarıldığında EWT sinyallerinin log-log PSD grafikleri eksi işaretli eğime sahip olurlar mı? Bu amaçla, bilinen harmonik regresyon modeli uygulanarak elde edilen artık hataların log-log PSD grafikleri Şekil 2.24'te verilmiştir. Bu grafiklerde de eksi işaretli eğimler açıkça görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 2.23'te görülen 1/yıl frekansından daha yüksek olan frekanslardaki anlamlı olabilecek PSD dalgalanmaları nispeten azalmıştır.

Şekil 2.23 ve 2.24'te görülen eksi işaretli eğimler, EWT sinyalinin Şekil 2.19'da verilen spektrumun kesirli Brownian hareket kısmına ilişkin zamansal korelasyona neden olan renkli gürültü türleriyle yüklü olduklarını göstermektedir. Bir başka deyişle, EWT zaman serilerinde zamansal korelasyonlar bulunmaktadır.



Şekil 2. 23 Trend çıkarılmış EWT zaman serisinde log-log PSD grafiği (a) Grönland dış (kıyı) havzası, (b) Murray havzası ve (c) Amazon havzası

EWT zaman serilerine ilişkin PSD grafiklerinden kesin bir spektral indeks tanımı yapmak mümkün değildir. Çalışmada, jeodezik zaman serilerinde en çok kullanılan eksi işaretli kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültüsü göz önüne alınarak harmonik regresyon modeli uygulanmaktadır.



Şekil 2. 24 Trend, yıllık ve yarıyıllık dalgalar çıkarılmış EWT zaman serisinde log-log PSD grafiği (a) Grönland dış (kıyı) havzası, (b) Murray havzası ve (c) Amazon havzası

BÖLÜM 3

SAYISAL UYGULAMA

3.1 Uygulamanın Amacı ve Kapsamı

Uygulamanın amacı, GRACE Seviye-3 olarak kullanıcılara sağlanan EWT zaman serilerini incelemektir. Bu amaçla, global ölçekte GSFC Mascon, Türkiye bölgesinde ise hem GSFC Mascon hem de DDK (Decorrelation filter) ile farklı fonksiyonel ve stokastik yaklaşımlar altında kestirimler yapılmış; sonuçlar hem istatistiki olarak hem de haritalanarak mekansal boyutta incelenmiştir.

Yukarıda temel amacı ve genel kapsamı ile belirtilen sayısal uygulama bölümü, aşağıdaki alt bölümlerden oluşmaktadır:

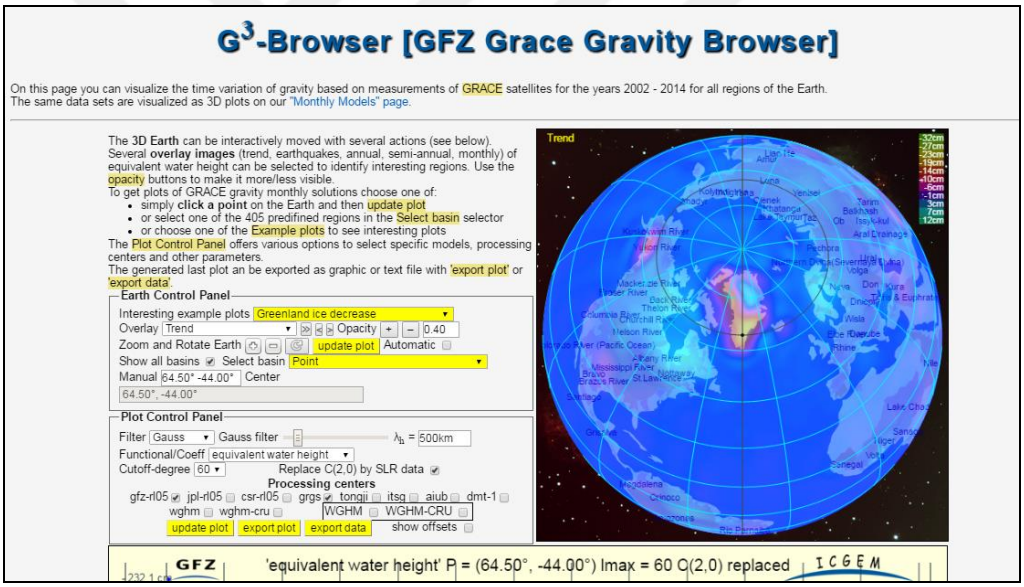
- Verilerin tanıtılması
- Veri değerlendirme işlem adımları
- Yıllık trend kestirimi

3.2 Verilerin Tanıtılması

Uygulamada, DDK ve Mascon çözümlerinden elde edilen EWT zaman serileri kullanılmıştır.

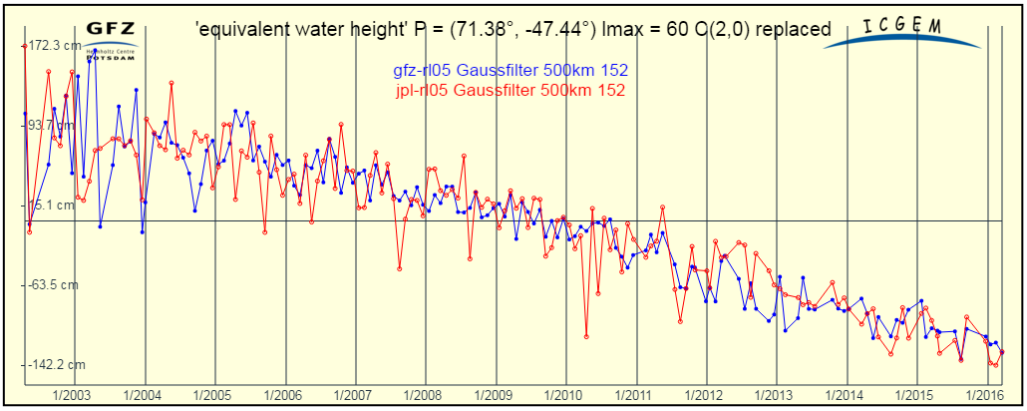
3.2.1 DDK Verisi

Uluslararası Global Yer Modelleri Merkezi, ICGEM (International Centre For Global Earth Models), Uluslararası Jeodezi Derneği olan IAG'nin gravite alanı servislerinin beş merkezinden biridir. ICGEM veri merkezi G3 Browser (G3 Tarayıcısı) ile 2002-2016 yılları için herhangi bir yer noktasında EWT zaman serilerini kullanıcıya interaktif olarak sunmaktadır (Şekil 3.1)[1]. Online bir panel üzerinden diğer Seviye-2 harmonik katsayı modellerine (GFZ, JPL ve CSR) gerekli Gauss filtrelemesi yapılarak ya da DDK filtrelenmiş çözümler doğrudan kullanılarak zaman serilerine ulaşılabilmektedir. Bunlara ek olarak, doğrudan Grönland ve Antartika'ya ilişkin EWT değişimleri de elde edilebilmekte ve görselleştirilebilmektedir [104]. Örnek bir görsel, Grönland için Şekil 3.2'de verilmiştir (Söz konusu EWT zaman serileri Bölüm 2'de açıklanan harmonik açınım sonucunda interaktif olarak elde edilmiş çözümlerdir).



Şekil 3. 1 ICGEM web sayfası [104]

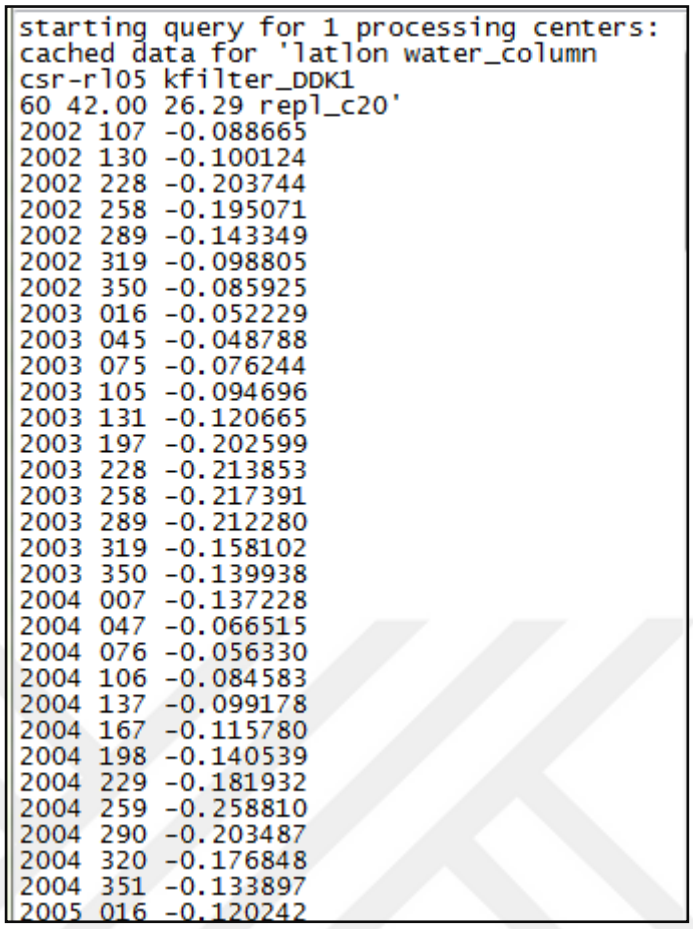
[1] Tez yazım aşamasında G3 Browser ICGEM web sayfasından kaldırılmıştır. Şu anda yalnız harmonik katsayı modelleri olan Seviye-2 verisine ulaşılmaktadır.



Şekil 3. 2 Grönland'a ilişkin ICGEM G3 Browser'dan elde edilen zaman serisi [104]

DDK çözümleri DDK1'den DDK8'e kadar 8 farklı filtre yarıçapı için üretilmektedir. DDK1 filtresi 530 km, DDK2 340 km ve DDK3 ise 240 km yarıçaplı Gauss filtresine karşılık gelmektedir [105]. Burada, filtre boyutu arttırıldığında hatalar kaybolmakta, ancak sinyalin genliğinde de kayıplar meydana gelmektedir. Örneğin, DDK1 çözümü DDK2'ye göre daha fazla sinyal yumuşatmasına sahip olduğu için, daha az hatalı ancak daha düşük çözünülürlüğe sahiptir.

Türkiye'de bulunan 107 farklı nokta için (bu noktalar daha sonraki bölümde açıklanan Türkiye'ye ilişkin Masconların orta noktalarıdır), DDK1, DDK2, DDK3 ve DDK4 filtreli çözümlerine (CSR-RL05) karşılık gelen zaman serileri elde edilmiştir. Söz konusu DDK çözümlerine ilişkin bu Seviye-3 verisi, onlara ilişkin harmonik katsayı modelleri olan Seviye-2 verisinden elde edilecek EWT zaman serileriyle özdeştir. EWT değerlerine ilişkin örnek dosya Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu dosya, veri merkezi, DDK türü, harmonik açınımın en büyük derecesi (burada 60 derecelik CSR çözümleri kullanılmıştır), C_{20} kuşak harmoniği katsayısının Satellite Laser Ranging (SLR) verisiyle değiştirilmiş olduğu üst bilgilerinin altında yer alan "yıl, gün ve EWT (m)" sırasındaki değerleri içermektedir.



Şekil 3. 3 DDK veri örnek dosyası

3.2.2 Mascon Verisi

Her biri yerküre yüzeyine dağılmış ayrı hücreler yani kütle yoğunlukları olarak ifade edilen Masconlar (mass concentrations), temel olarak GRACE'nin uydular arası gözlemlerine dayanan bir gravite alanı fonksiyonudur. Masconlar, bir bütün olarak ele alındığında tüm yerkürenin gravite alanını ifade ederken, bireysel mascon hücreleri olarak ele alındıklarında ise, kendi kapladıkları yüzey alanın gravite sinyalini temsil ederler. Her bir Mascon, esas olarak her bir hücrenin içine ve dışına hareket eden su kütlesine bağlı olarak hücre içindeki çekim kuvvetinin yerel değişikliklerini göstermektedir. Masconlar kullanılarak jeofiziksel anlamdaki kısıtlamalar (koşullar) daha basit ve etkili bir şekilde uygulanabilmektedir. Bu ön kısıtlamalar sayesinde, Seviye-2 verisinin işlenmesinde GRACE uydu çözümlerinden gelen gürültülerin filtrelenmesi kolaylaşır ve bölgesel olarak yapılan alan kısıtlamalarında çok daha sağlıklı çözümler elde edilir [106], [107].

CCAR's (Colorado Center for Astrodynamics Research) GRACE Mascon Explorer, GSFC ve JPL'de geliştirilen GRACE Mascon çözümlerine kolay erişim sağlar. Masconlar, aylık EWT verileri şeklinde JPL ve GSFC veri merkezleri tarafından sağlanmaktadır.

Seviye-3 verisi olarak sunulan Masconlar için CCAR web sayfasında yayınlanan çözümler,

• JPL RL05M_1.MSCN v02 çözümü,

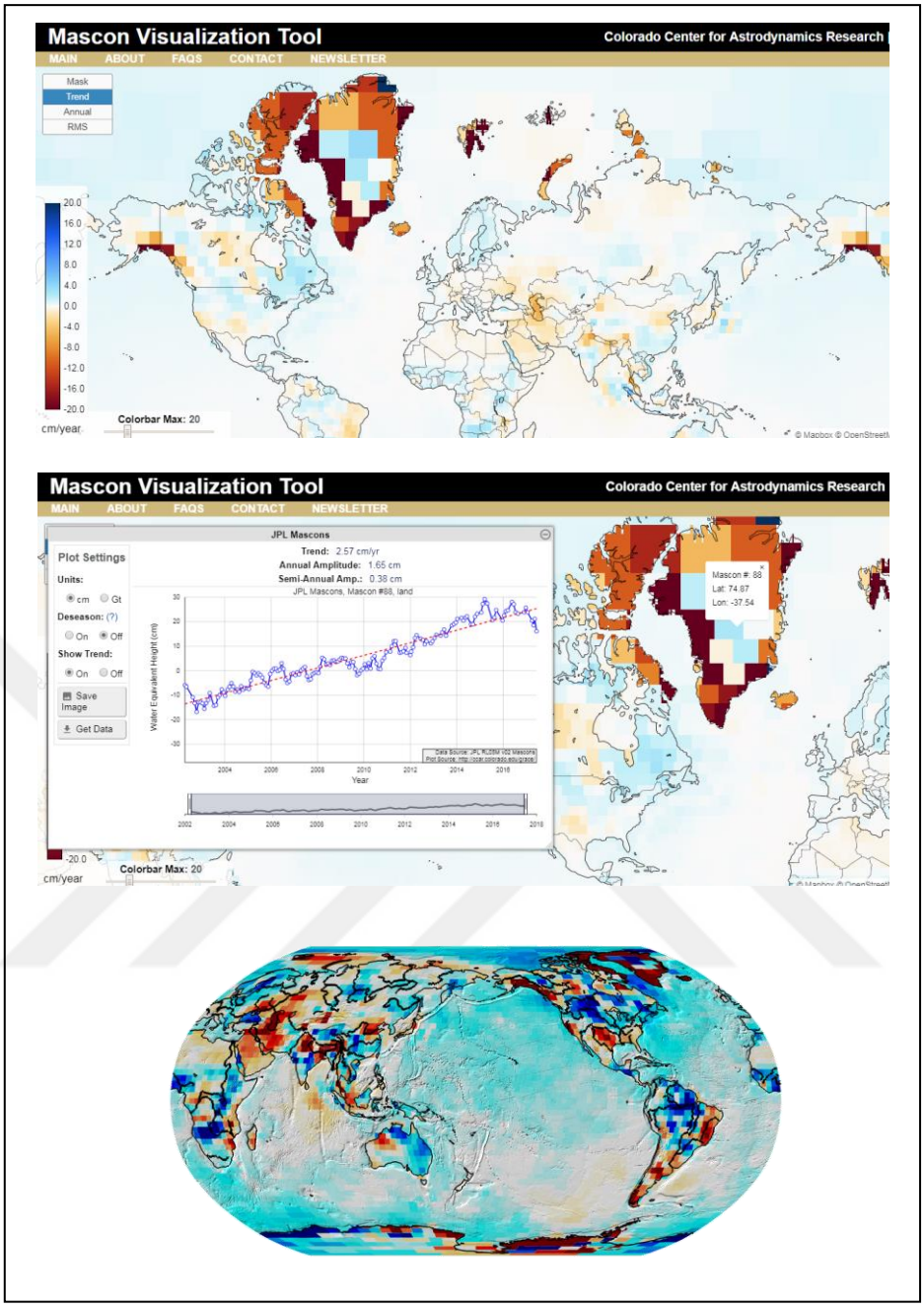
• GSFC Global Mascons v02.4 çözümüdür.

JPL ve GSFC veri işleme merkezleri tarafından sağlanan bu Seviye-3 verileri, Seviye-2 verisi (küresel harmonik katsayılar) yerine doğrudan GRACE Seviye-1B verilerinden inversiyonla elde edilmiş sinyallerdir [108].

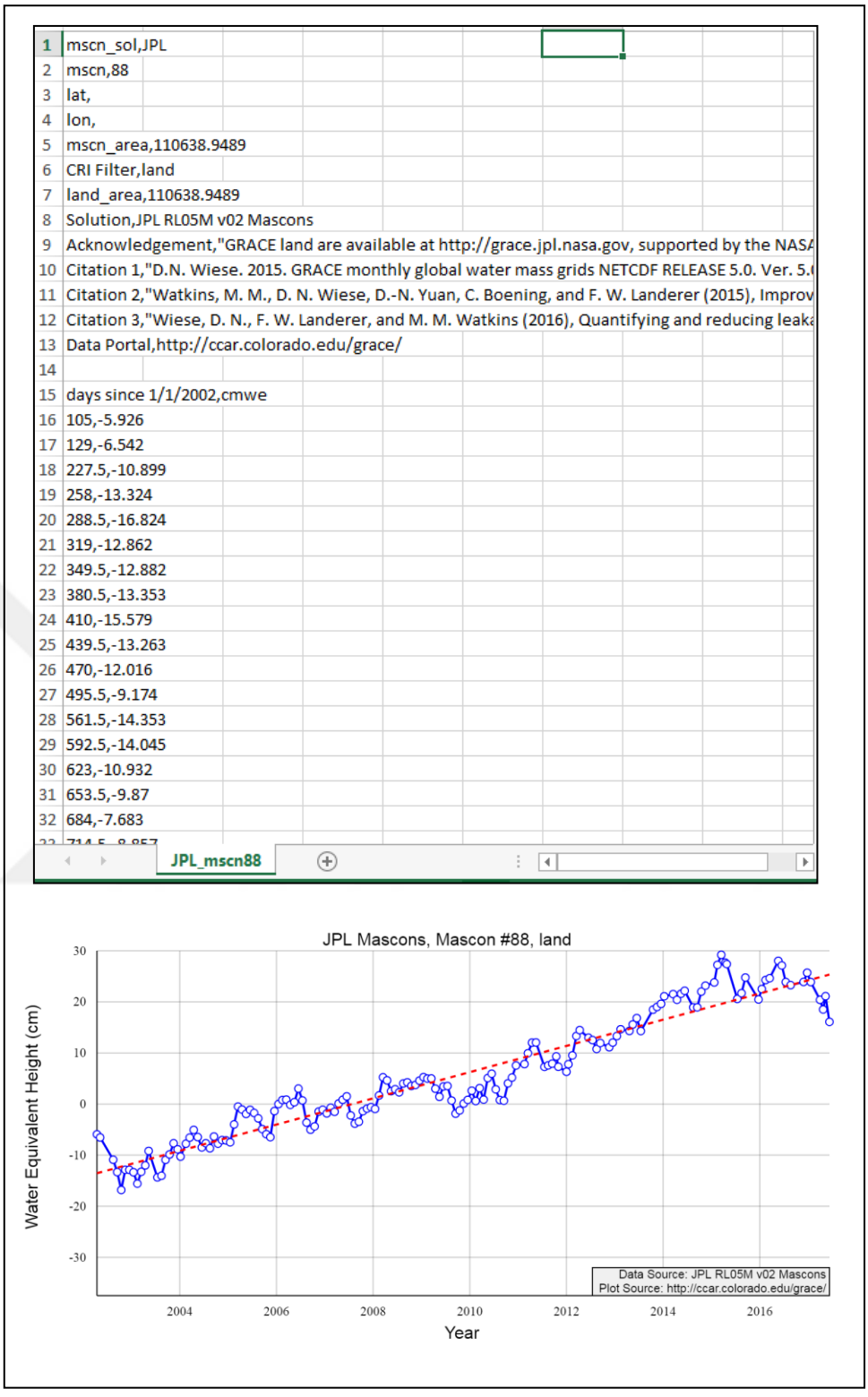
3.2.2.1 GRCTellus JPL Mascon Çözümleri

Fiziksel yeryüzünde bulunan 4551 eşit alanlı, büyüklüğü 3 derece olan Mascon hücreleri tarafından temsil edilen bu çözüm, bölgesel olarak belirlenmiş her hücredeki gravite alanındaki değişikliği temsil eder. Her hücrenin boyu, ilgili çözümün çözünürlüğünü ifade eder. Söz konusu çözümün elde edilmesinde kullanılan altlık modeller JPL-RL05 Seviye-2 verisiyle özdeştir [106].

Bu Mascon çözümüne http://ccar.colorado.edu/grace/jpl.html web sayfasından [109] interaktif olarak erişilebilmektedir. İlgili Mascon'a ait EWT zaman serisi de sunulmaktadır. Şekil 3.4'te web sayfasına ait arayüz, mascon hücrelerinin harita üzerindeki gösterimi, Şekil 3.5'te de örnek veri dosyası gösterilmiştir.



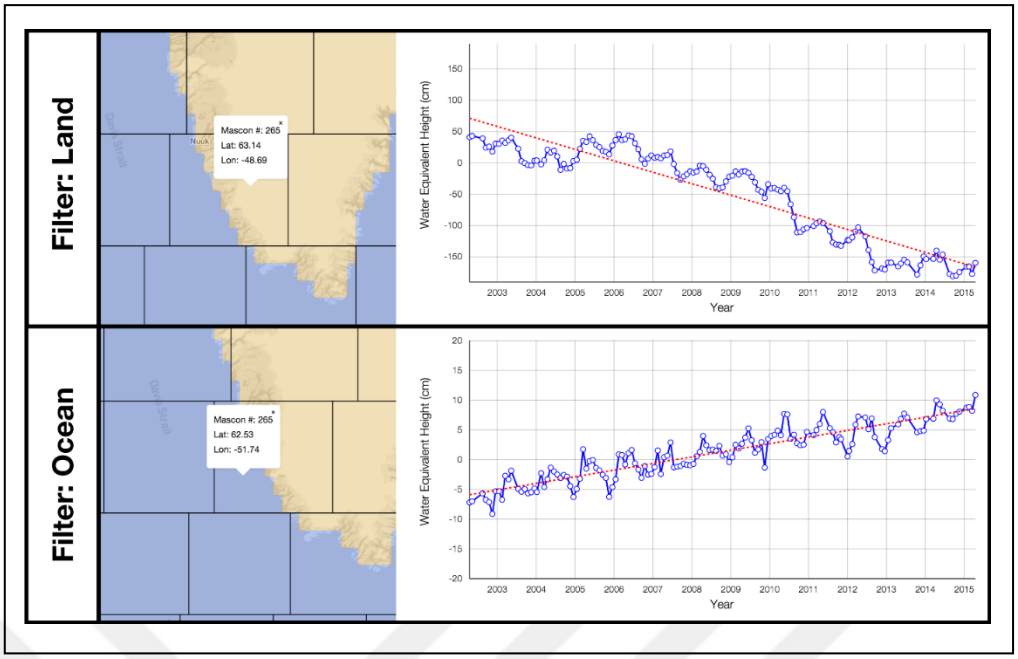
Şekil 3. 4 CCAR web sayfası arayüzü ve JPL Masconlar [107], [109]



Şekil 3. 5 JPL Mascon veri dosyası örneği ve zaman serisi grafiği

JPL Mascon çözümleri aşağıdaki özelliklere sahiptir [107]:

- C_{20} katsayıları, SLR'den elde edilen çözümler ile değiştirilir [111],
- Derece-1 katsayıları (Geocenter), Swenson, Chambers ve Wahr (2008)'de [112] gösterilen yönteme göre kestirilmektedir.
- Buzul çağı sonrası dengelenme etkileri (GIA) düzeltmesi uygulanmaktadır.
- Ölçümlerden gelen hataları en aza indirmek için, 3x3 boyutundaki Mascon hücrelerinin aylık gravite alanı modellerine bir ön kısıtlama getirir. Burada, verilere ek olarak sistematik şeritvari (destriping) hataların giderilmesi için bir filtreleme işlemi uygulanmaz. Bunun sonucunda Masconlardan, küresel harmonik katsayılardan elde edilen çözümlere kıyasla daha yüksek SNR elde edilerek, daha fazla sinyal korunmaktadır. (Hataların ve belirsizliklerin giderilmesi konusunda daha detaylı bilgi Wiese, Landerer ve Watkins 2016'da [113] bulunmaktadır).
- Veriler, 2004.0-2009.999 epokları arasında belirlenen statik gravite alanına göre olan anomaliler şeklinde elde edilmektedir.
- Ayrıca JPL Mascon çözümleri, sahil boyunca bulunan Masconlarda okyanus sinyallerinden kara sinyallerini ayırmak için bir Kıyı Şeridi Çözünürlük Geliştirme (CRI-Costline Resolution Improvement) filtresi kullanır. Sonuç olarak, aynı Mascon içindeki arazi alanları ve okyanus alanları, bu filtre uygulandığında farklı sinyaller verir. Kıyı şeridi filtresi seçilirse, kara bölgeleri, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi aynı Mascon içindeki okyanus alanlarından farklı bir sinyal gösterir.



Şekil 3. 6 Kara ve okyanus alanlarında CRI filtresi ile karşılaştırılması [114]

3.2.2.2 GSFC Mascon Çözümleri

NASA GSFC global Mascon çözümleri, 41168 farklı 1x1 dereceli eşit alanlı kütle blok setlerine ilişkin aylık EWT zaman serilerinden oluşmaktadır. Mascon çözümlerinde, belirli sınır bölgeleri tanımlanarak, çözümlerde komşuluk ilişkileri dikkate alınır. Böylece, mekansal anlamdaki bu sınır bölgeleri boyunca sinyal sızıntısı önemli ölçüde azaltılmış olur.

Sınır bölgeleri,

- 2000 m'den yüksek olan Grönland iç bölgesi (havzası),
- 2000 m'den alçak Grönland dış bölgesi (havzası),
- Antarktika Buz Kütlesi,
- Alaska Körfezi,
- Kara ve okyanus

olmak üzere 5 farklı bölge olarak tanımlanmıştır.

Sınır bölgelerini doğru bir şekilde tanımlamak için Mascon hücrelerinin alanları 1x1 derece olarak belirlenmiştir. Ancak belirli bir bölgedeki çözümlerin çözünürlüğünün esas olarak diğer GRACE çözümleri (~ 300 km) ile aynı olduğunu belirtmek gerekir. Bir

başka bir deyişle, belirli bir Mascon için kütle değişiminin zaman serisi, aynı sınır bölgesi içindeki en yakın Masconlarla büyük oranda mekansal korelasyonludur.

GSFC Mascon çözümleri, http://ccar.colorado.edu/grace/gsfc.html [110] web sayfasından interaktif olarak elde edilebilmektedir. Mascon çözümleri, bölgelere, havzalara ya da doğrudan bireysel Mascon hücrelerine göre elde edilebilmektedir. Ayrıca ilgili çözümlere ilişkin EWT zaman serisi grafikleri de kullanıcıya sunulmaktadır. Söz konusu alanlara ilişkin çözümler aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır.

- Bölge Çözümleri

GSFC Mascon çözümünde, kıta bölgelerini ve büyük denizleri görüntülemek mümkündür. Bu çözümler, interaktif bölge haritası olarak kullanıcılara sunulmuştur (Şekil 3.7). Bu bölgelerin herhangi biri seçildiğinde, o bölgeye ilişkin Mascon veri dosyasını elde edilmektedir.



Şekil 3. 7 GSFC Mascon Bölge Çözümleri – Bölgelerin Dağılımı [110]

Toplamda 41168 Mascon hücresi bulunmaktadır. Bunlardan 13652 adeti yukarıda açıklanan 13 bölgeyi oluştururken, geriye kalan 27516 hücre denizlere ilişkindir.

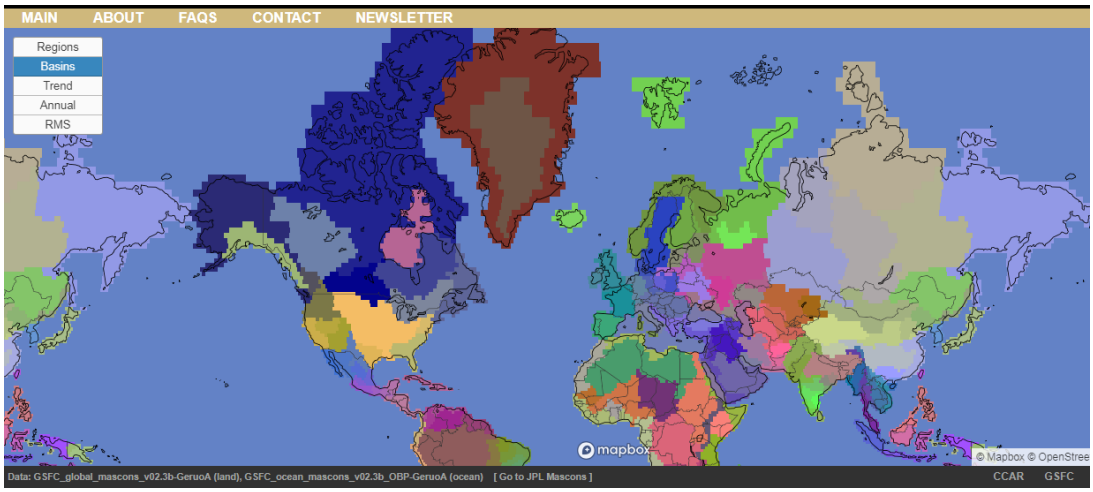
Çizelge 3.1'de bölgeler ve Mascon sayıları gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 Bölgeler ve Mascon sayıları

Bölge No	GSFC Mascon Bölge Adı	Mascon Sayısı	Bölge No	GSFC Mascon Bölge Adı	Mascon Sayısı
1	North America	1786	10	Ocenia	765
2	Hudson Bay	68	11	Ross Ice Shelf	29
3	Mexico and Central America	342	12	Ronne Ice Shelf	32
4	South America	1583	13	Antarctica	1127
5	Greenland	199	14	Mediterranean Sea	140
6	Europe	1031	15	Black Sea	28
7	Asia	3281	16	Caspian Sea	37
8	Middle East	839	17	Red Sea	43
9	Africa	2570	18	Open Ocean	27268

• Havza Çözümleri

Yukarıda açıklanan kıtasal bölgeler çeşitli drenaj havzalarına ayrılmıştır. İnteraktif harita üzerinden "Basins" sekmesi seçilerek, Şekil 3.8'de gösterilen havzaların üzerine tıklandığında, söz konusu havzaya ilişkin EWT zaman serisi kullanıcıya sunulmaktadır.

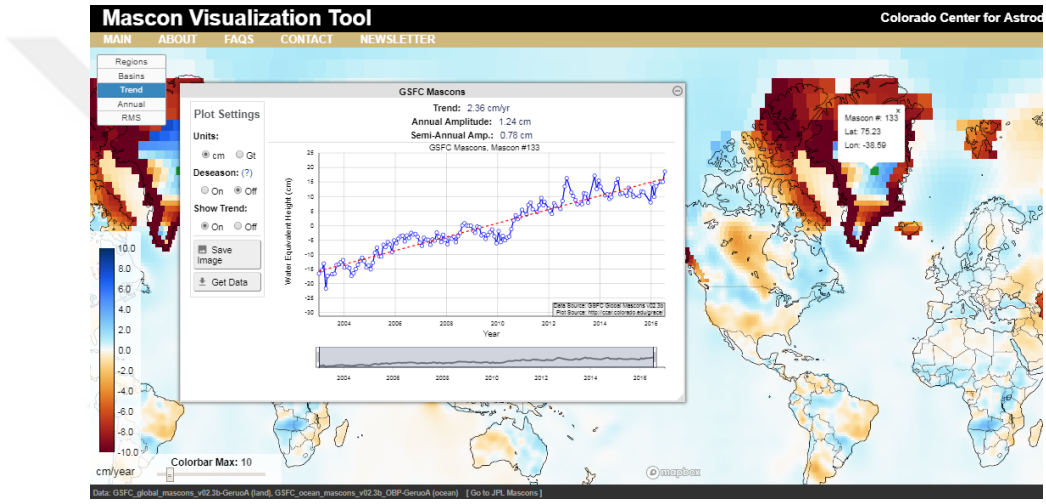


Şekil 3. 8 GSFC Mascon havza çözümleri [110]

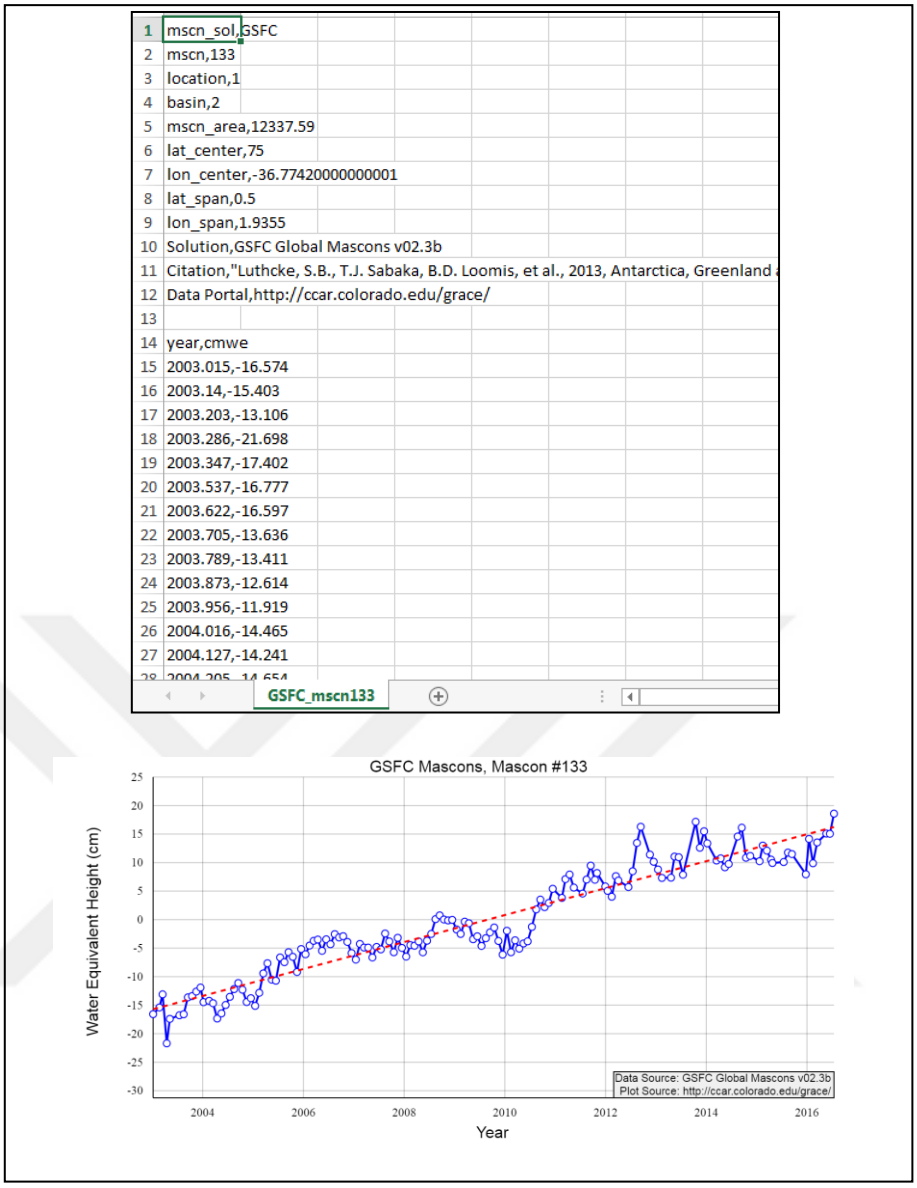
41168 Mascon hücresi havzalara göre gruplandırıldığında karaların oluşturduğu 13 bölgeyi temsil eden 197 farklı havza bulunmaktadır. (Denizleri ve açık okyanusu temsil eden ise 5 havza vardır.)

• Mascon Hücre Çözümleri

41168 Mascon hücresi için ayrı ayrı çözümler 'Trend' sekmesi ile elde edilebilmektedir. Şekil 3.9'da verilen interaktif harita üzerinde ilgili 1×1 derecelik Mascon hücreleri görüntülenmektedir. İlgili hücre üzerine tıklanarak, o hücreye ilişkin EWT zaman serisi grafiği de elde edilmektedir. Bu grafik üzerinden, ilgili EWT değerleri dosyası indirilmektedir (Şekil 3.10).



Şekil 3. 9 GSFC Mascon trend sekmesi web arayüzü [110]



Şekil 3. 10 GSFC Mascon örnek veri dosyası ve zaman serisi grafiği

Bununla birlikte, ilgili zaman serileri [106]'daki web sayfasından HDF5 dosya formatında bir veri dosyası olarak da elde edilebilmektedir. Yine bu sayfada, HDF5 formatına ait örnek dökümanlar bulunmaktadır. Çözümlere ilişkin ayrıntılı açıklamalar Luthcke vd. (2013)'de [115] verilmektedir.

GSFC Mascon çözümleri aşağıdaki özelliklere sahiptir [106]:

- Masconlar için en güncel versiyon v02.4 çözümleri olup (Temmuz 2018), tez çalışmasında kullanılan versiyon v02.3b'dir. v02.4 çözümleri bir önceki versiyon olan v02.3b ile aynı olup, farklı olarak; sızıntı-kaçak etkilerini içeren yeni Masconlara sahiptir [106].

o Mascon çözümleri doğrudan GRACE Seviye-1B gözlemleri kullanarak elde edilmektedir.

o GSFC Mascon çözüm stratejisinin en önemli faydalarından biri, bölgesel olarak belirlenen sınırlı alanlarda en küçük kareler kestirim yöntemi aracılığıyla bir ön bilgi sağlamasıdır. Ayrıca, SNR önemli ölçüde iyileştirilmiş ve sınır bölgelerinin sınırları boyunca sinyal sızıntısının azaltılması sağlanmıştır.

o Kullanıcılar tarafından Mascon çözümlerine ek bir filtreleme işlemi uygulanmasına gerek yoktur.

o Mascon çözümleri, Ocak 2003 - Temmuz 2016 tarihleri arasındaki periyotları içermektedir.

o Çözümlerde, 2004.0-2016.0 epokları arasında belirlenen gravite alanına göre olan anomaliler şeklinde elde edilmektedir.

o Arka plan statik alanı için GOCO-05S modeli, epok 2008.0 olarak kullanılmaktadır.

o Gelgit modeli olarak GOT4.7 kullanılmaktadır [116].

o Atmosfer ve okyanus modellemede (ECMWF+MOG2D) modeli kullanılmaktadır [117].

o Yer merkezi ile ilgili olan derece 1 katsayıları düzeltmesi Swenson vd, 2008'e [112] göre yapılmaktadır.

o C_{20} harmonik katsayısı GRACE TN-07 Teknik Notların'da gösterildiği şekilde SLR verileri ile değiştirilmektedir [118].

o Kutuplardaki gelgit etkilerinin düzeltilmesi ile ilgili olan C_{21} / S_{21} trend düzeltmesi, Wahr vd. 2015'e [119] göre yapılmaktadır.

o Temmuz 2015 tarihindeki Antarktika buz kütlesine ilişkin Mascon çözümlerinde, GRACE verisindeki veri boşlukları nedeniyle çözümlere lineer enterpolasyon uygulanmıştır.

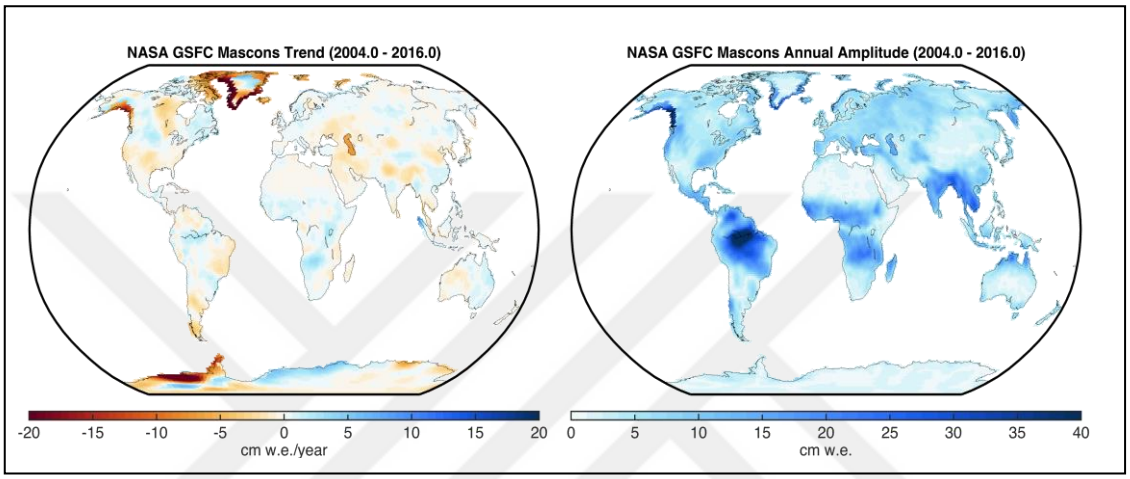
o Buzul çağı sonrası dengelenme etkileri düzeltmesi (GIA) uygulanmaktadır.

o GSFC ve JPL, ilgili Mascon çözümlerini elde etmek için iki farklı çözüm yöntemi uygular. GSFC çözümü, yeryüzündeki kütlesel değişimleri temsil etmek için çok daha

fazla ve daha küçük mascon hücreleri kullanmaktadır. Bu nedenle, sahil şeritlerindeki çözümler, JPL'den elde edilen sonuçlara göre daha tutarlıdır.

○ Mascon verisine gelen güncellemeler Seviye-1B verisinden başlanarak iteratif olarak modellere uygulanır.

GSFC Mascon çözümlerine ilişkin yıllık trend değerleri ve yıllık genlikler Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11 GSFC Mascon yıllık trend ve genlik değerleri [120

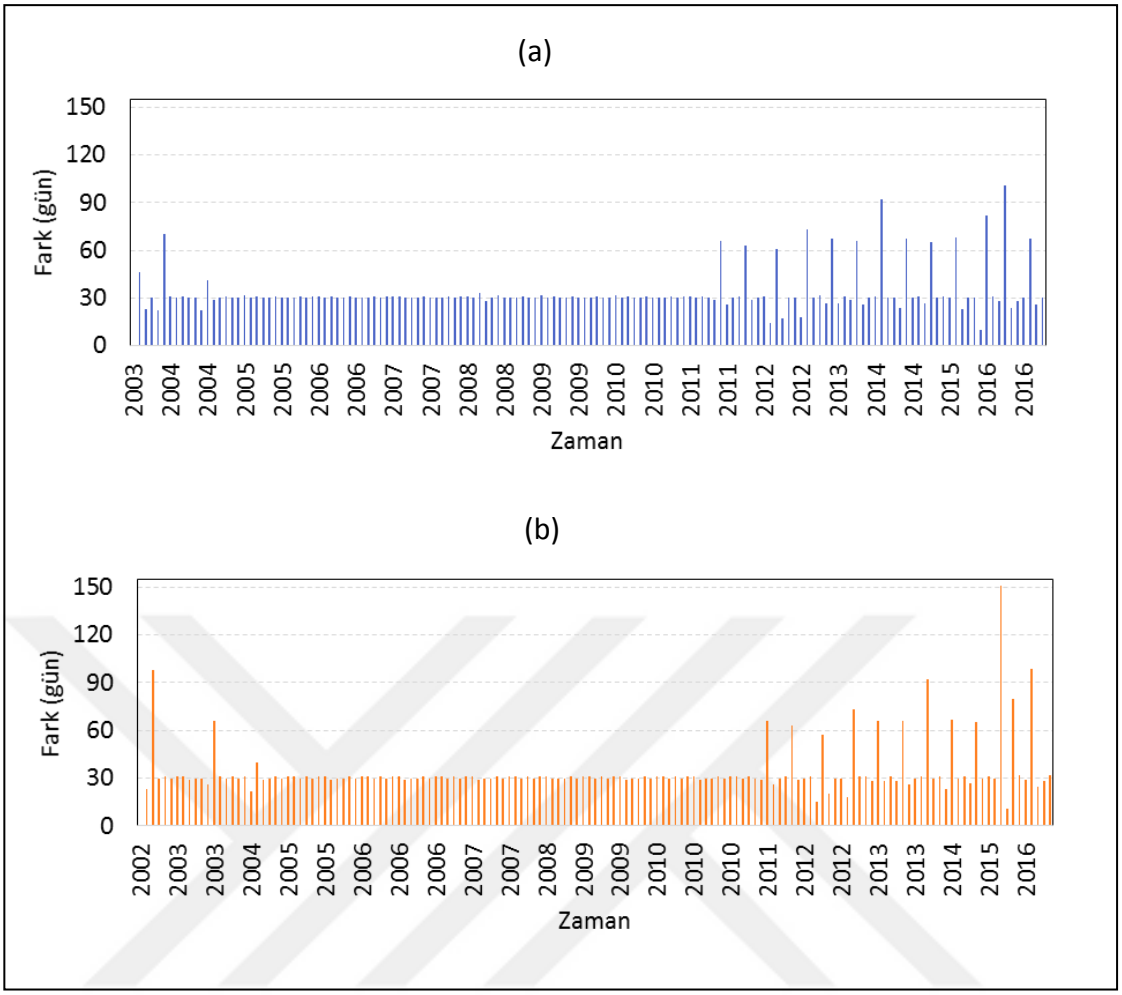
3.3 Veri Değerlendirme İşlem Adımları

Çalışmada kullanılan GSFC Mascon ve DDK verilerinin değerlendirilmesinde Şekil 3.12'de gösterilen sıra izlenmektedir. Elde edilen zaman serilerinde veri boşlukları bulunmaktadır. Bölüm 2.5'de açıklanan varyans bileşenlerinin kestirimi yoluyla EWT zaman serilerinde gürültü türlerinin göz önüne alınabilmesi için söz konusu veri boşluklarının doldurulması gerekir. Veri boşlukları doldurulduktan sonraki kestirim işlemleri bir sonraki bölümde açıklanmıştır.



Şekil 3. 12 Veri değerlendirme işlem adımları

GSFC Mascon veri dosyasında 2003-2016 yıllarını kapsayan 148 farklı tarih için EWT verisi sunulmakta olup, bu sayı 2002-2016 yılları arasında veri sağlayan DDK çözümleri için 149'dur. Yaklaşık 14 ve 15 yıl uzunluğa sahip olan bu zaman serilerinin düzenli aylık periyotlar şeklinde olmadığı ve %10 civarında veri boşlukları olduğu görülmüştür (Şekil 3.13).

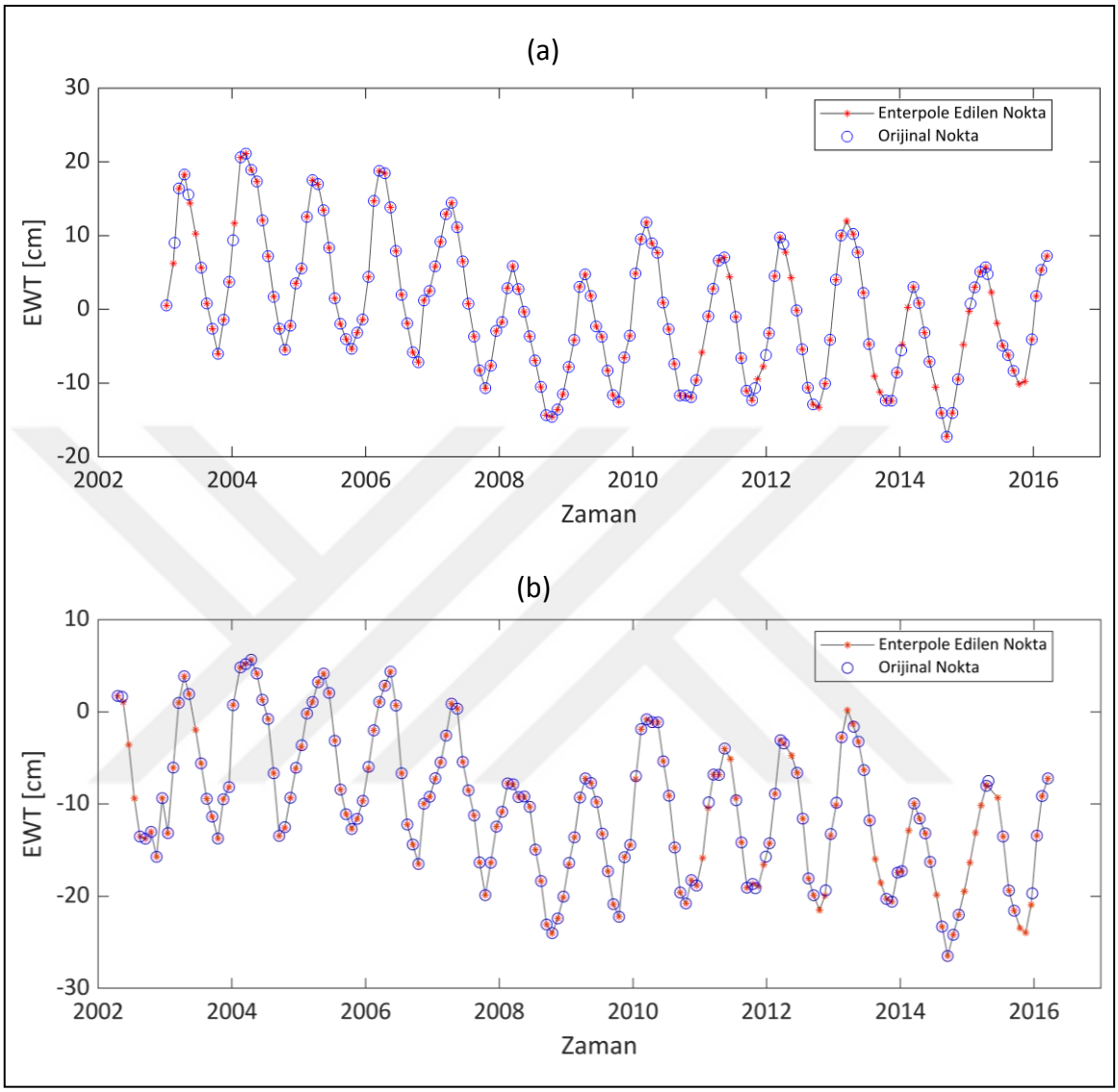


Şekil 3. 13 Zaman serilerinde ardışık periyotlar arasındaki gün biriminde zaman farkları a) GSFC-Mascon, b) DDK

Söz konusu veri boşluklarının doldurulması için Matlab'de "boslukdoldurma" adlı bir fonksiyon yazılmıştır. Fonksiyon dosyası, doğrusal enterpolasyon yöntemine göre zaman serilerini, olabildiğince, "1/ay" ölçü frekansına getirmektedir. Tam "1/ay" frekansını elde etmek değildir; çünkü, EWT zaman serileri, 0,92; 1,88 gibi 1 ay'ın katları olmayan epoklara karşılık gelmektedir.

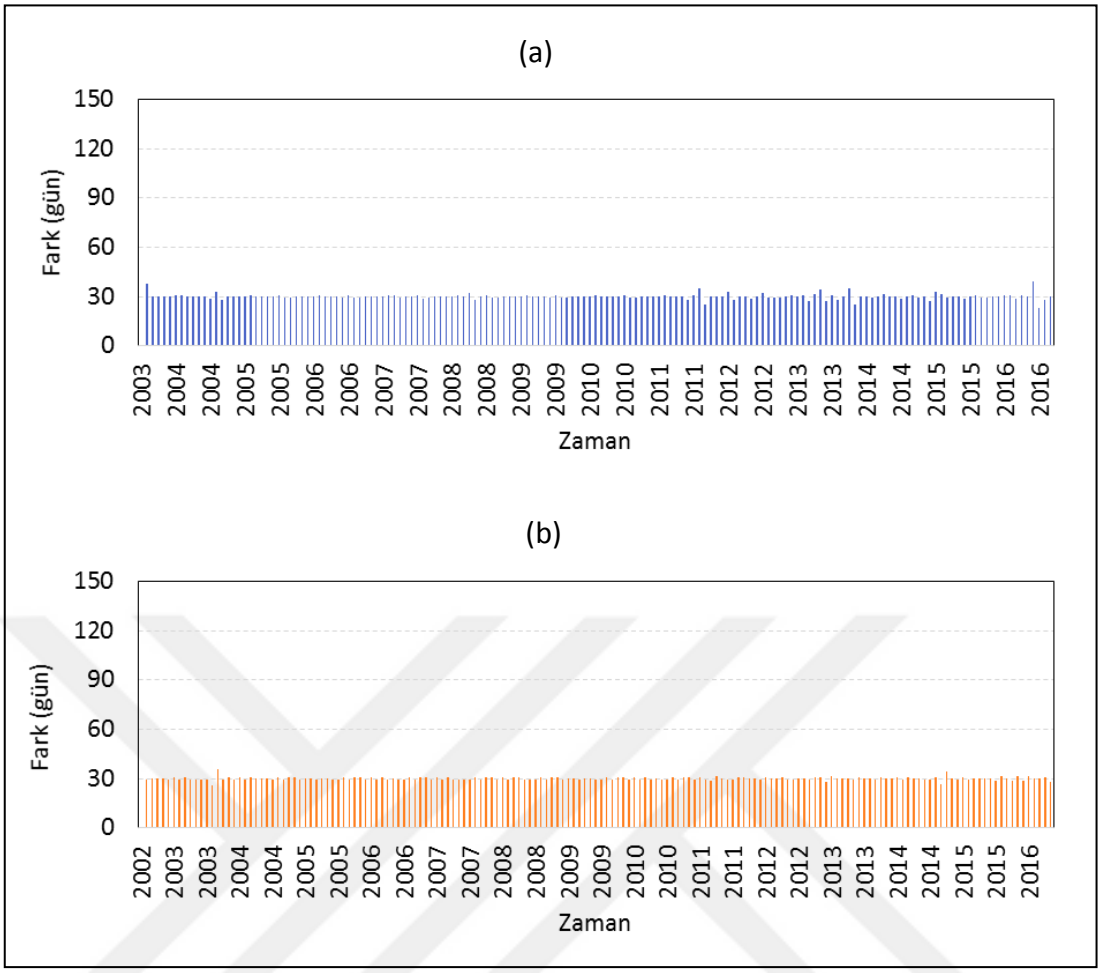
Fonksiyon, 1 ay düzenine uymayan yerleri, tam sayı şeklindeki epoklar biçiminde doldurmaktadır. Örneğin, "0; 0,92; 1,88; 3,98" (ay) gibi bir *t* zaman değer kümesi varsa bunu "0; 0,92; 1,88; 3; 3,98" şeklinde "3" ile genişletmekte, 3 zamanına karşılık gelen ölçü değeri, eldeki (t,y) nokta çiftlerine göre en uygun biçimde enterpole edilmektedir. Girdiler, t (yıl), y (ölçü), taralık=1/12 (yıl) şeklinde olup, çıktılar, "T (yıl), L (ölçü)" şeklinde sonuç zaman serisi nokta çiftlerini göstermektedir.

Şekil 3.14'te veri boşluklarının doldurulmasına ilişkin zaman serisi örneği Fırat Dicle havzasına ait Mascon ve DDK2 çözümleri için gösterilmiştir.



Şekil 3. 14 Fırat-Dicle Havzası (a) Mascon ve (b) DDK2 çözümleri EWT zaman serisi

Şekil 3.14 incelendiğinde, daire ile gösterilen noktalar veri merkezinden elde edilen EWT değerlerini, yıldız ile gösterilen noktalar ise enterpolasyon sonucu elde edilen değerleri ifade etmektedir. Burada, düzene uymayan noktalar silinerek, geriye kalan noktalarla enterpolasyon yapılarak veri düzensizlikleri ve boşlukları giderilmiştir. Şekil 3.15'de veri boşlukları giderildikten sonra ardışık periyotlar arasındaki zaman farkları gösterilmiştir. Böylece, veri sıklığı 1/ay ya da 12 $yıl^{-1}$ düzenine getirilmiştir.



Şekil 3. 15 Veri boşlukları doldurulduktan sonra zaman serilerinde ardışık periyotlar arasındaki gün biriminde zaman farkları a) GSFC-Mascon, b) DDK

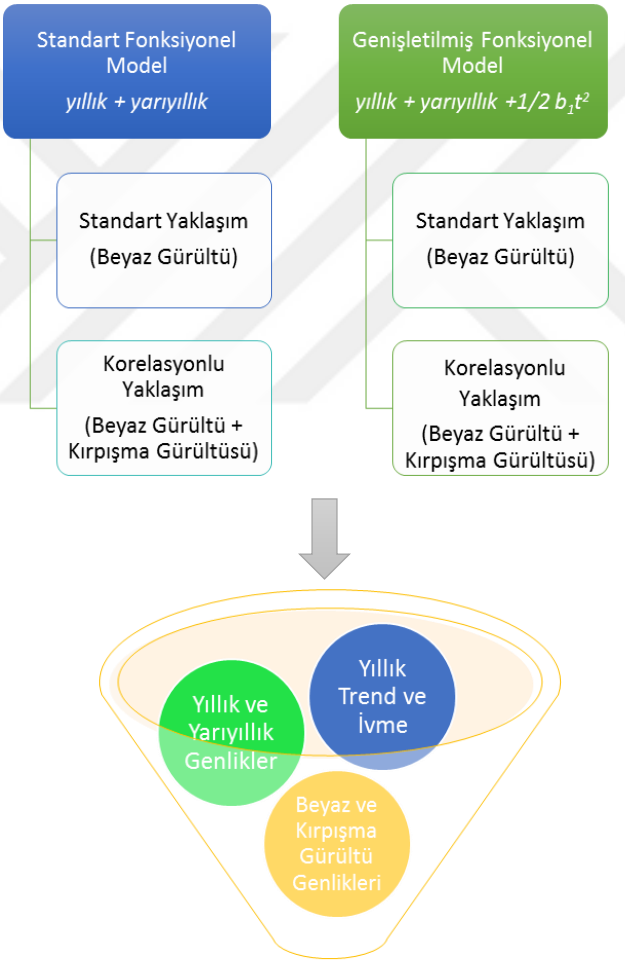
3.4 Yıllık Trend Kestirimi

Bölüm 2.3'de Eşitlik (2.10)'la ifade edilen harmonik regresyon modelinde "*b*" yıllık trend parametresi ilgili bölgedeki su ya da buz kütlesi değişiminin ifade edilmesi için kullanılır. Bu modelde geçen *c* ve *s* sinüzoidal dalganın kosinüs ve sinüs genliklerinden elde edilen *A* yıllık ve yarıyıllık genlikler de önemli bir hidrolojik değişim ölçütüdür. Söz konusu bileşenlerin kestirimi için ilgili harmonik regresyon model, Grönland ve Antarktika havzaları için "$0.5b_1t^2$" ivme terimi ile genişletilerek, genişletilmiş fonksiyonel model oluşturulmuştur. Her iki fonksiyonel model iki stokastik model altında çalışılmıştır:

I. Eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz (standart yaklaşım)

II. Farklı ağırlıklı ve korelasyonlu (korelasyonlu yaklaşım).

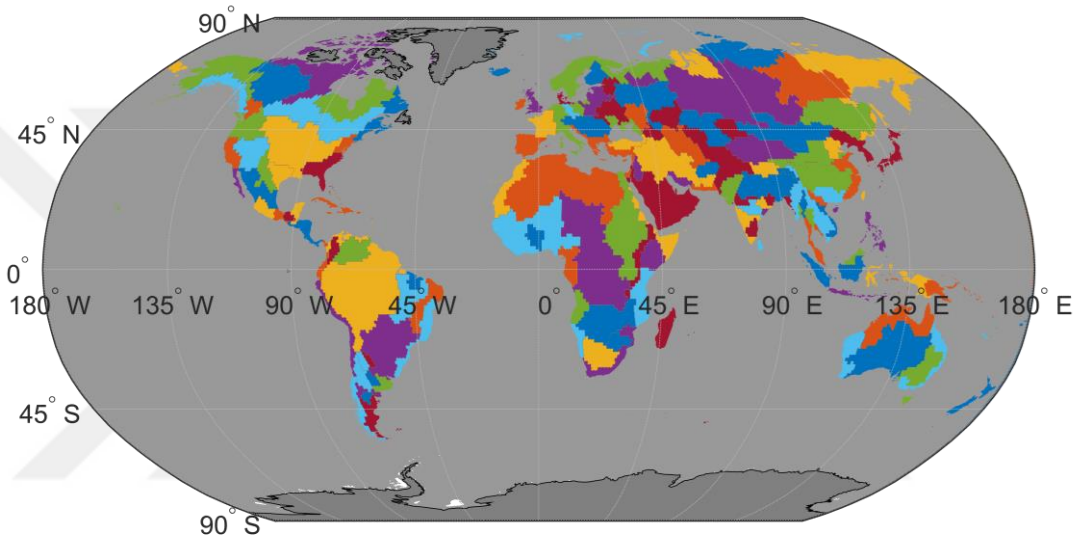
Korelasyonlu yaklaşım için, Bölüm 2.5.2'de verilen gürültü genlikleri bilinmeyen dengeleme modeli oluşturulmuştur. Yapılan ön çalışmalarda, "beyaz gürültü+kırpışma gürültüsü+rasgele yürüyüş gürültüsü" modeli ile yüksek standart sapmalı kestirimler elde edilmiştir. Rasgele yürüyüş gürültüsü içeren diğer modeller de standart sapmalar büyük olduğu, dolayısıyla kestirilen parametrelerin anlamlılıkları çok düştüğü (anlamlı trende sahip Grönland, Alaska ve Antarktika gibi buzul havzalar dışında havza kalmadığı, yani SNR yükseldiği) için, "rasgele yürüyüş gürültüsü" varsayılan modelden çıkartılarak yalnız "beyaz gürültü+kırpışma gürültüsü" kullanılmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde kullanılan söz konusu yaklaşımlar Şekil 3.16'da özetlenmiştir.



Şekil 3. 16 Kestirim işleminde kullanılan modeller

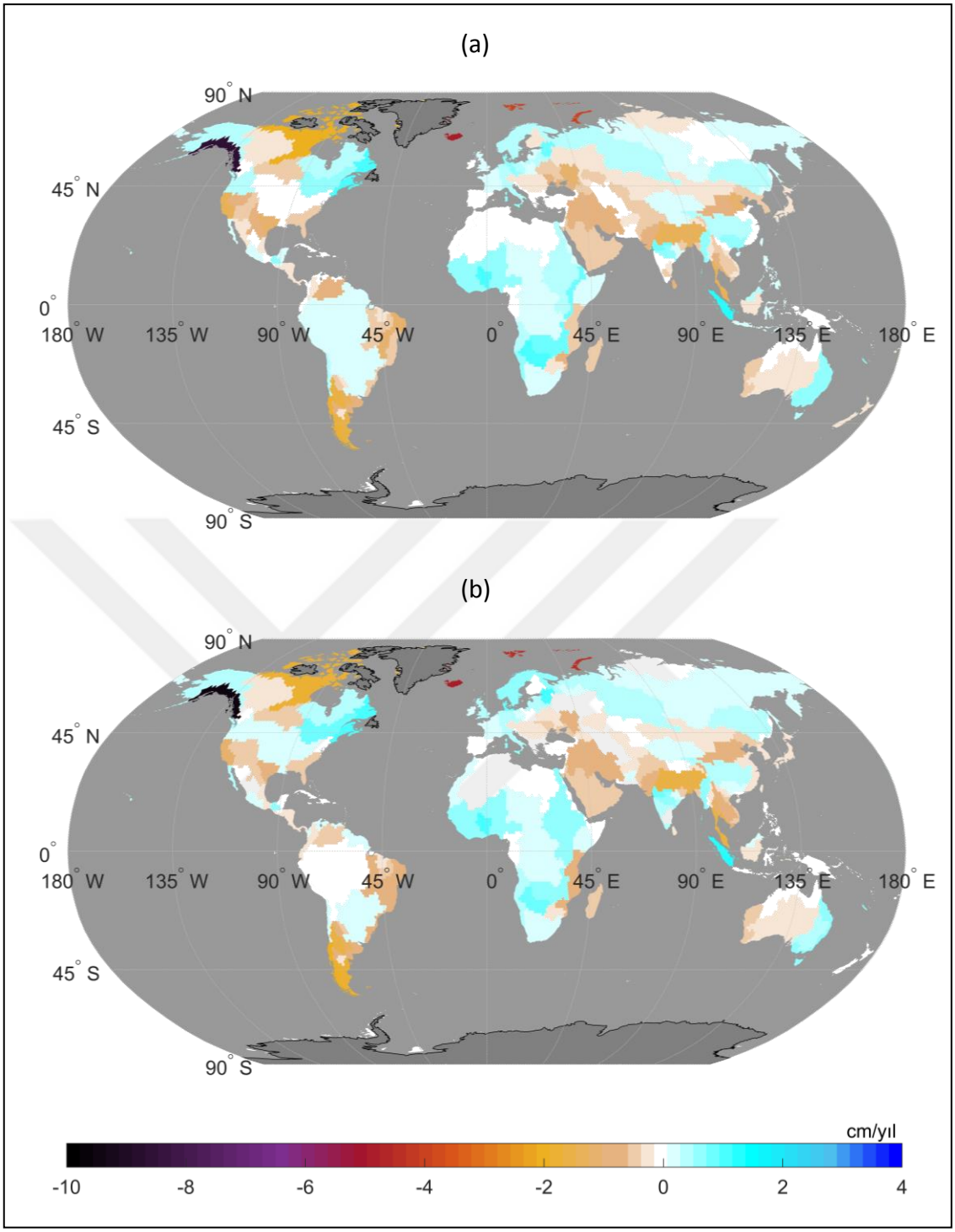
3.4.1 Global Ölçekte EWT Analizi

Global ölçekte yıllık trend kestimi, Bölüm 3.2.2'de anlatılan Şekil 3.17'de gösterilmiş olan 12197 Mascon hücresinden oluşan 191 farklı havza için EWT değerleri kullanılarak yapılmıştır. Veri boşlukları Bölüm 3.3'te bahsedildiği şekilde doldurulduktan sonra, değerlendirme stratejisi olarak (Şekil 3.16) standart fonksiyonel model, iki farklı stokastik yaklaşım (standart ve korelasyonlu) altında ele alınmıştır. (Grönland ve Antarktika'da bulunan 7 farklı havza için değerlendirmeler Bölüm 3.4.3'te yapılmıştır.)

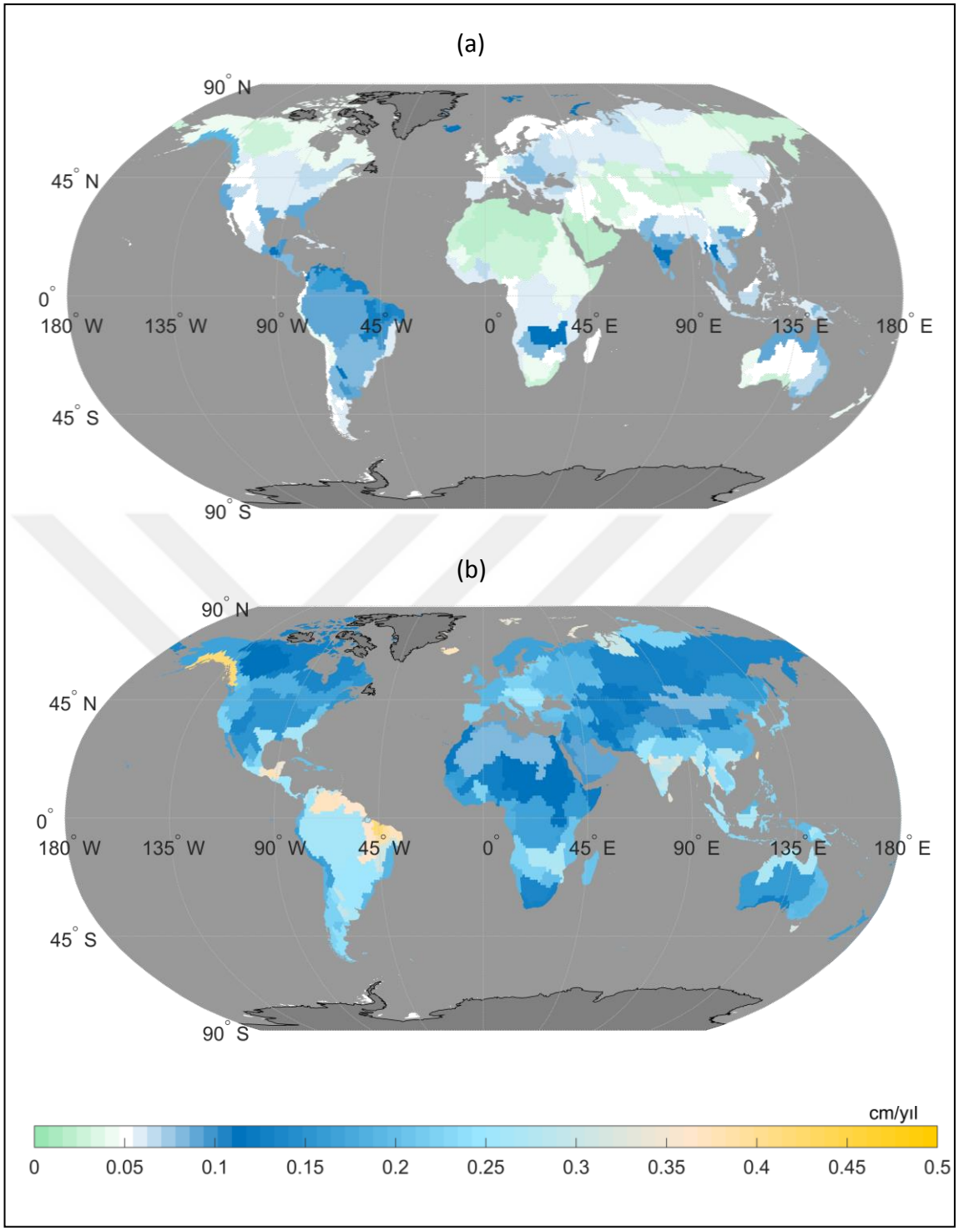


Şekil 3. 17 GSFC Mascon havzalarının global ölçekte dağılımı

Değerlendirmeler sonucunda yıllık trend parametresinin yanında, yıllık ve yarıyıllık genlikler ile korelasyonlu yaklaşımda varyans bileşenlerinin kestirimi ile elde edilen kırpışma gürültü genliği (σ_f) de hesaplanmıştır. Elde edilen yıllık trend kestirimleri ve standart sapma değerleri Şekil 3.18 ve 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 18 Havzalar için standart fonksiyonel model altında (a) standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen yıllık trend değerleri (cm/yıl)



Şekil 3. 19 Havzalar için standart fonksiyonel model altında (a) standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen yıllık trend standart sapmaları (cm/yıl)

Şekil 3.18a ve 3.19a'daki "standart fonksiyonel model+standart stokastik yaklaşım" sonuçları incelendiğinde;

- Yıllık trend parametrelerine göre (Şekil 3.18a), havzaların %46'sı pozitif eğilimli trend değerine sahipken, %54'ü negatif eğilimli trend değerine sahiptir.

- Tüm havzalar için yıllık trend değeri ortalama olarak -0,20 cm/yıl civarındadır.

- En küçük trend değeri -8,66±0,19 cm/yıl ile Kuzey Amerika bölgesinde bulunan Alaska havzasında elde edilmiştir. (Grönland ve Antarktika trend kestirimleri daha yüksektir. Ancak bu bölgeler, sonraki bölümlerde incelenmektedir.)

- En büyük trend değeri ise, 1,36±0,06 cm/yıl'lık değer ile Asya bölgesinde bulunan Sumatra adası havzası için elde edilmiştir.

- Trend parametrelerine ait standart sapma değerleri incelendiğinde ise, değerlerin 0,02 ile 0,19 cm/yıl arasında değiştiği ve ortalama olarak 0,06 cm/yıl civarında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Sonuçlar bölgesel olarak incelendiğinde, Alaska havzası hariç, ortalama -0,25 cm/yıl'lık bir trend olduğu, yani su kütlesindeki değişimin havzalarda çoğunlukla azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, diğer bölgeler/kıtalar incelendiğinde, Güney Amerika'da ortalamanın sıfıra yakın olduğu, Avrupa ve Asya'daki havzalarda hem pozitif hem de negatif işaretli trend değerleri görülürken, Afrika bölgesinde ise genelde pozitif eğilimli trend karakterine sahip havzalar olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Okyanusya bölgesinde ise, Tazmanya, Murray ve Doğu Avustralya kıyısındaki havzalarda ortalama 0,50 cm/yıllık bir trend değeri varken, Yeni Zelanda ve diğer havzalarda ortalama -0,23 cm/yıllık azalma eğilimli trend değerleri olduğu gözlenmiştir.

Şekil 3.18b ve 3.19b'deki "standart fonksiyonel model+korelasyonlu stokastik yaklaşım" sonuçlar incelendiğinde;

- Yıllık trend parametrelerine göre (Şekil 3.18b), havzaların %47'si pozitif eğilimli trend değerine sahipken, %53'ü negatif eğilimli trend değerine sahiptir.

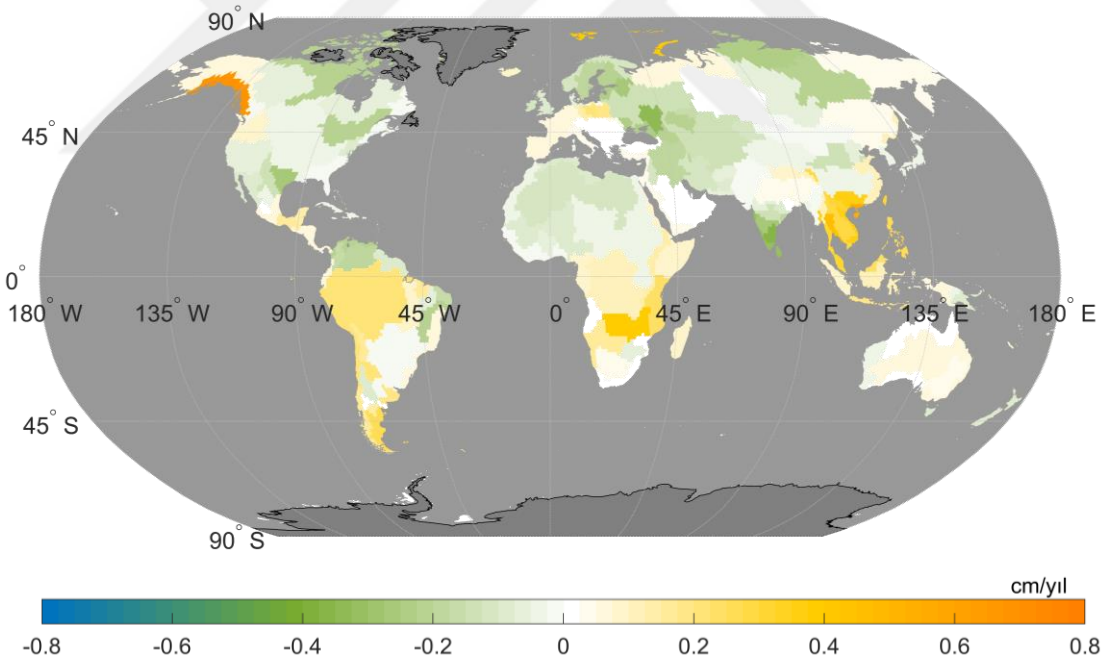
- Tüm havzalar için yıllık trend değeri ortalama olarak -0,21 cm/yıl civarındadır.

• En küçük trend değeri standart yaklaşım sonuçlarına benzer şekilde, -9,35±0,42 cm/yıl ile Kuzey Amerika bölgesinde bulunan Alaska havzasında elde edilmiştir.

• En büyük trend değeri ise, 1,27±0,25 cm/yıl ile Asya bölgesinde bulunan Sumatra adası havzasında elde edilmiştir.

• Trend parametrelerine ait standart sapma değerlerinin ise 0,08 ile 0,42 cm/yıl arasında değiştiği ve ortalama olarak 0,22 cm/yıl civarında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

• Sonuçlar bölgesel olarak incelendiğinde, standart yaklaşım altında elde edilen negatif ve pozitif eğilimli trend değerine sahip bölgelerdeki havzaların yine aynı karaktere sahip olduğu gözlenmiştir. Bölgesel olarak en büyük değişiklik, Güney Amerika bölgesinde bulunan havzalarda meydana gelmiş olup, trend değerlerinin sıfıra daha da yaklaştığı görülmüştür.



Şekil 3. 20 Havzalar için iki farklı stokastik yaklaşımdan elde edilen trend değerleri farkları (cm/yıl)

Her iki değerlendirme stratejisi için sonuçlar karşılaştırıldığında ise, trend değerlerinin kestiriminde farklılıklar olduğu görülmüştür. Sonuçlar Şekil 3.20'de bulunan farklar (standart yaklaşım–korelasyonlu yaklaşım) üzerinden incelendiğinde,

- Farkların -0,37 cm/yıl ve 0,69 cm/yıl arasında olduğu görülmektedir.

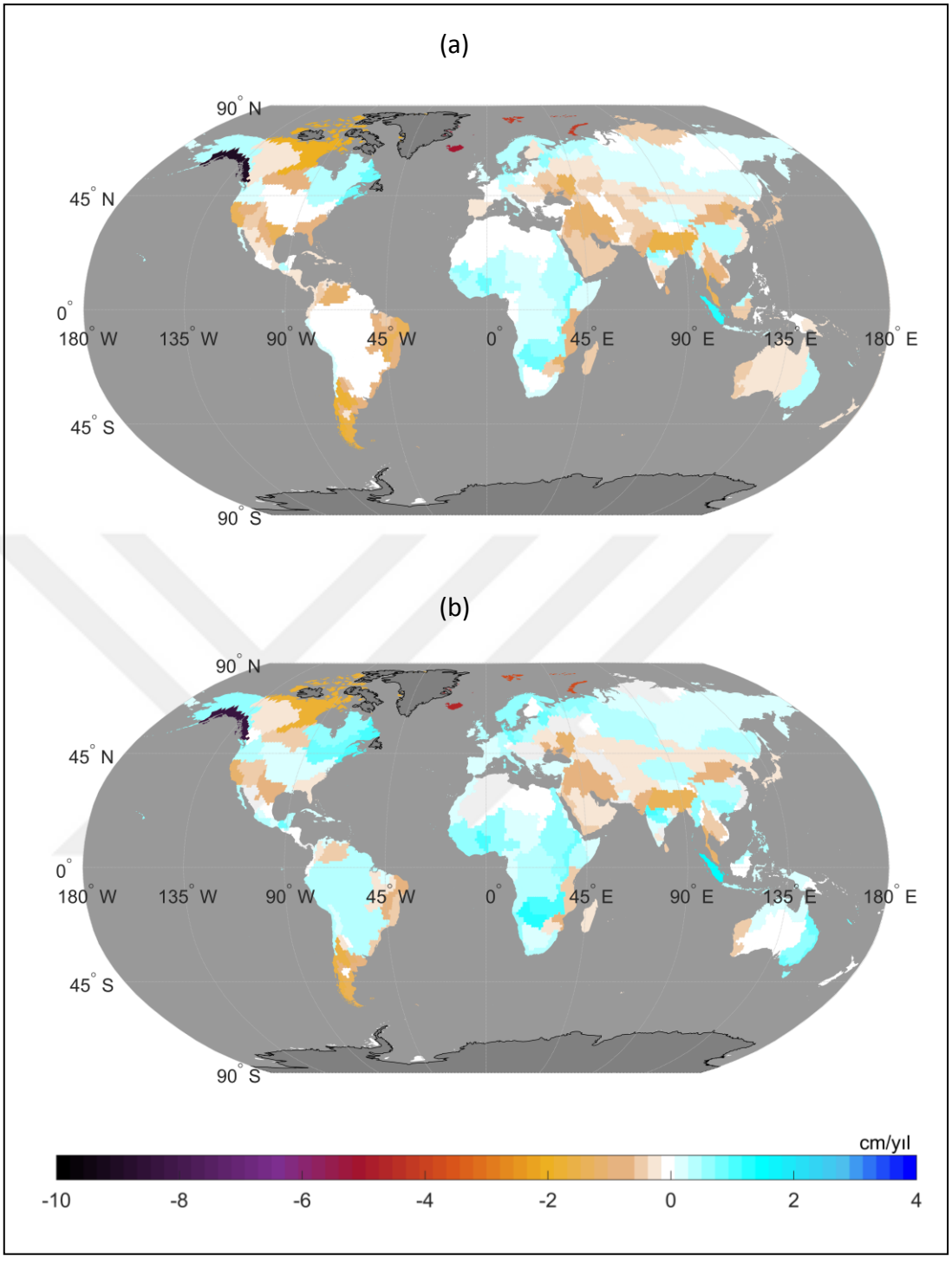
- Alaska havzasında yıllık trend değeri -8,66±0,19 iken, korelasyonlu yaklaşım sonuçlarına göre -9,35±0,42 cm/yıllık trend değeri elde edilmiştir. İki yaklaşım arasındaki en büyük fark olan 0,69 cm/yıl bu havzadaki kestirim değerinden kaynaklanmaktadır.

- Amazon havzasında, standart yaklaşım sonuçlarına göre trend kestirimi 0,14±0,09 cm/yıl iken, korelasyonlu yaklaşım sonuçlarına göre -0,06±0,26 cm/yıl'dır.

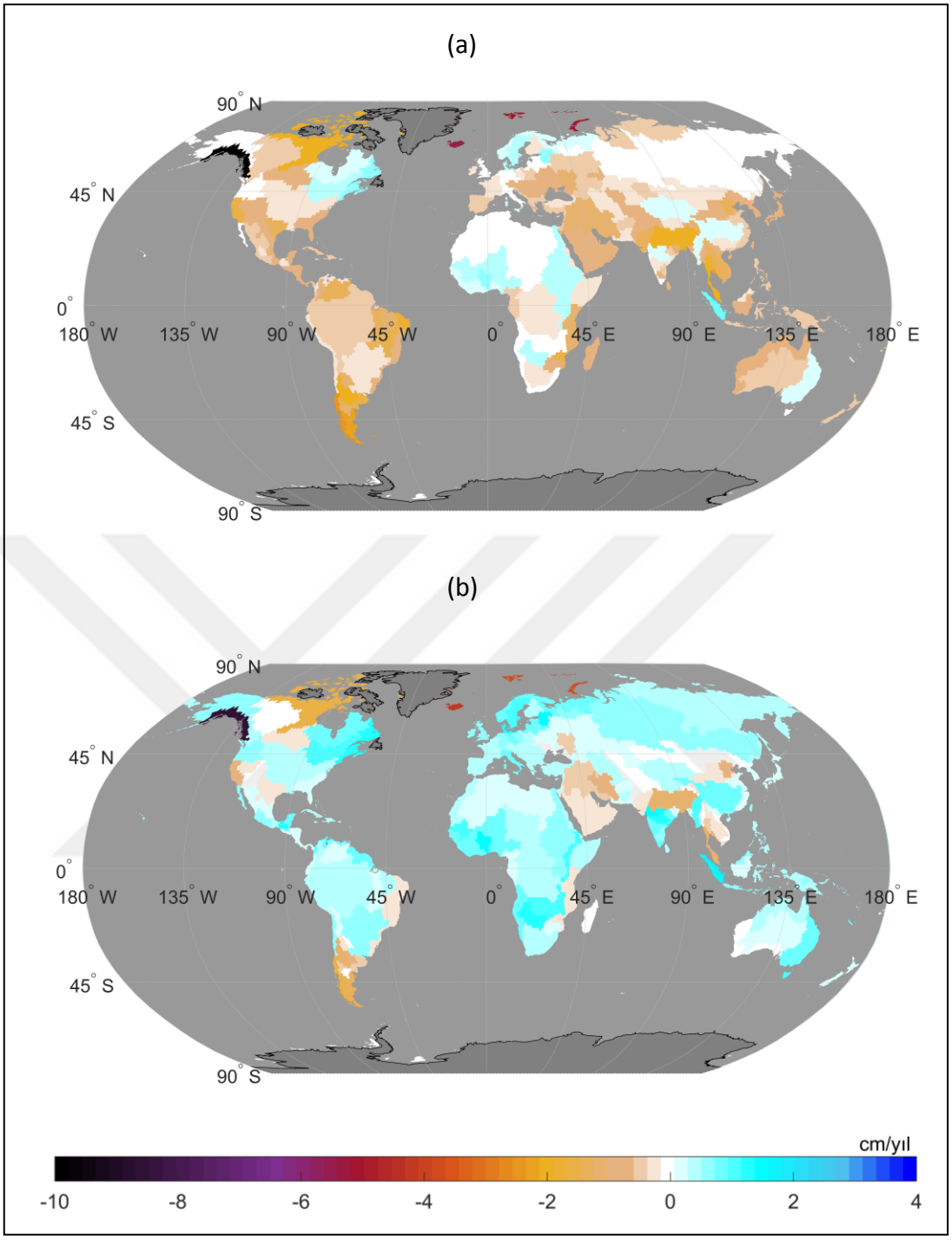
- Trend değerlerine ait standart sapma değerleri yaklaşık olarak 3 kat artmaktadır.

- Standart yaklaşım sonuçlarına uygulanan %5 yanılma olasılıklı *t* testine göre trend kestirimleri anlamlı olan havzaların oranı %84 iken; bu oran korelasyonlu yaklaşım sonuçlarında %44'e kadar düşmektedir. Bu durum, zamansal korelasyonlar göz önüne alındığında, trend değerlerinin standart sapmalarının önemli ölçüde küçültmesinden kaynaklanmaktadır. Zamansal korelasyonlar düşünülmediğinde, istatistiki olarak anlamlı değerler bulunan havzalarda aslında gerçeğin böyle olmadığı, kestirimlerde anlamlı belirsizlikler olduğu ortaya çıkmaktadır. Korelasyonlu yaklaşım ile havzalar için daha anlamlı sonuçlar üretilebileceği, dolayısıyla, yapılacak yorumlarda daha temkinli olunabileceği sonucuna varılmaktadır.

- Her iki yaklaşımdan elde edilen trend parametreleri ve bunların standart sapmaları uygulanan çözüm stratejisine bağlı olarak değiştiğinden, çözümlere ilişkin güven aralıkları da çalışmada incelenmiştir. Kestirim sonucu elde edilen trend değeri *b*'nin beklenen değeri μ ve standart sapması s_b olmak üzere, %95 olasılıklı güven aralığı $P(b-1{,}97s_b < \mu \leq b+1{,}97s_b)$=%9belirlenmiştir. Burada, 1,97 değeri, %5 yanılma olasılığına karşılık gelen *t*-dağılımının güven sınır değeridir. Güven aralığının alt "$b-1{,}97s_b$" ve üst "$b+1{,}97s_b$" sınır değerleri Şekil 3.21 ve 3.22'de gösterilmiştir.



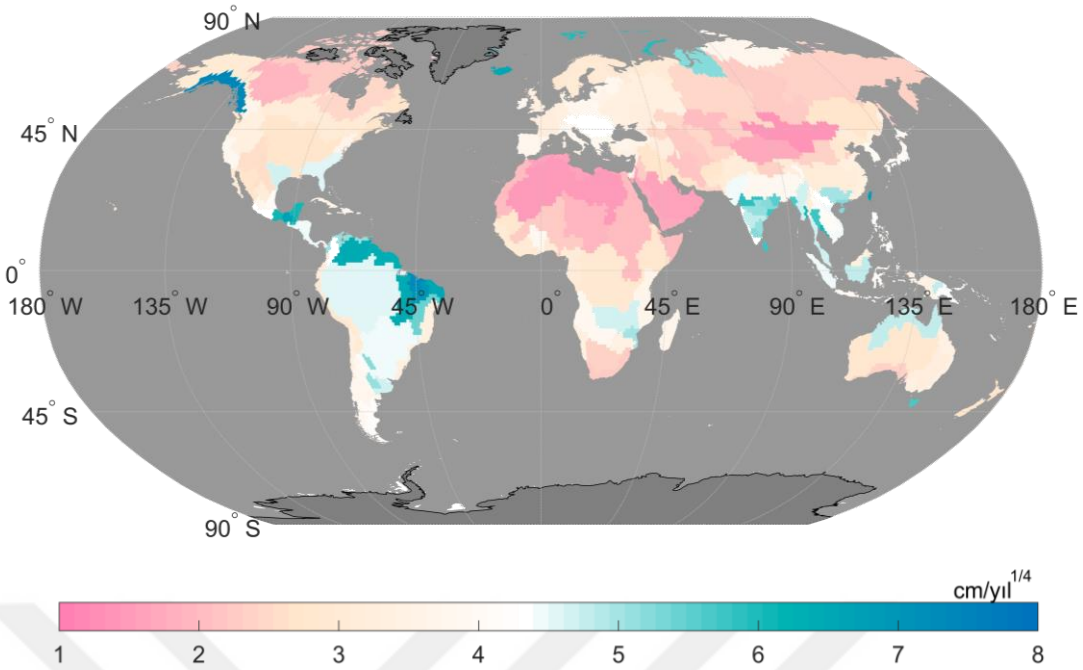
Şekil 3. 21 Standart yaklaşım altında elde edilen yıllık trend değerlerine ait %95 olasılıklı güven aralığı (a) alt sınır ve (b) üst sınır değerleri (cm/yıl)



Şekil 3. 22 Korelasyonlu yaklaşım altında elde edilen yıllık trend değerlerine ait %95 olasılıklı güven aralığı (a) alt sınır ve (b) üst sınır değerleri (cm/yıl)

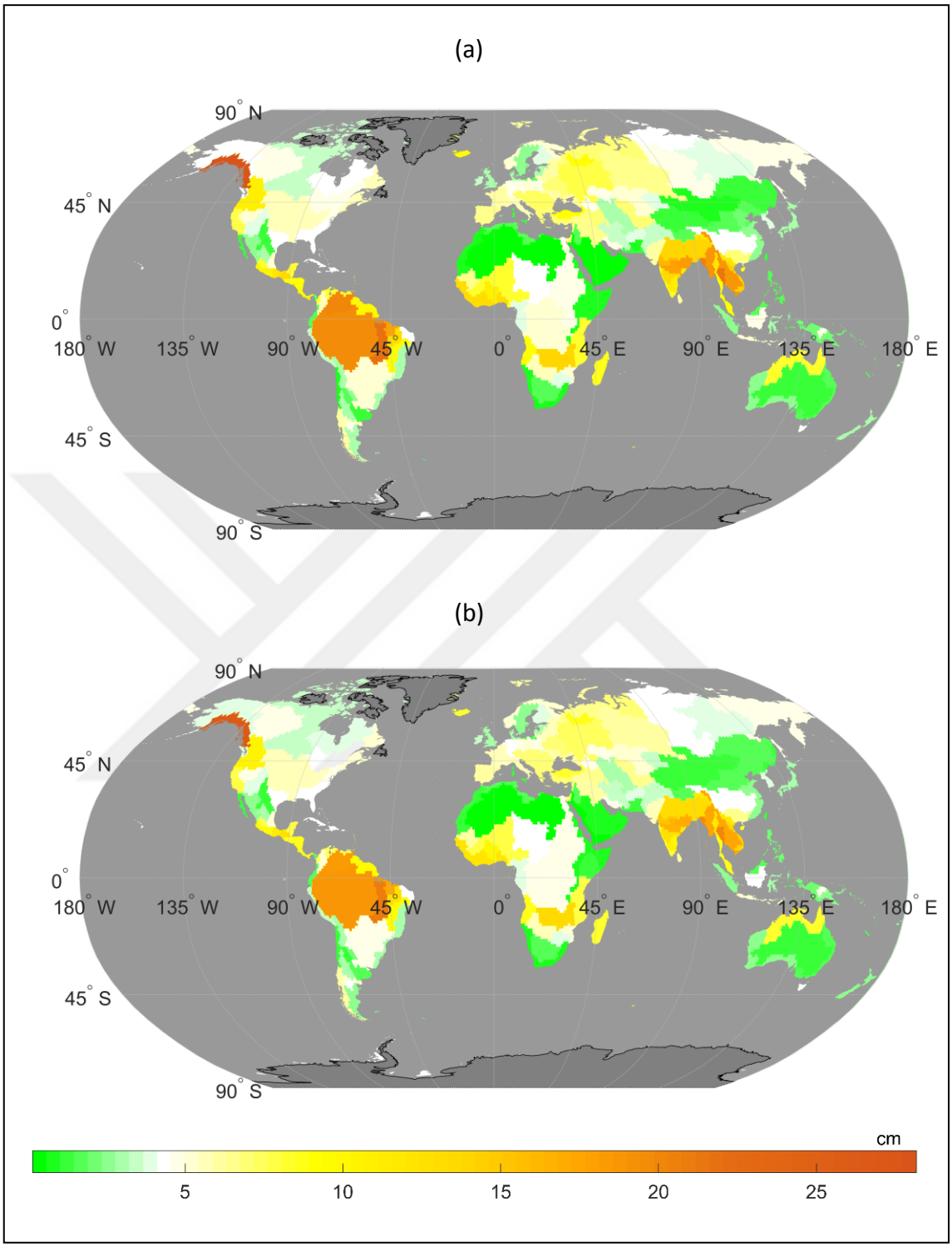
Şekil 3.21 ve 3.22 incelendiğinde, korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen değerlerin daha geniş bir güven aralığına sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, daha önce de bahsedildiği gibi, standart sapma değerlerinin yaklaşık olarak 3 kat daha büyük olmasıdır. En küçük ve en büyük değerler incelendiğinde, standart yaklaşım sonuçları için bu değerler sırasıyla -9,04 ve 1,48 cm/yıl iken, korelasyonlu yaklaşım için -10,19 ve 1,77 cm/yıl olarak elde edilmiştir. Standart yaklaşım altında bazı bölgelerde (örneğin Amazon havzasında) güven aralığı pozitif eğimli bir trendi gösterirken, korelasyonlu yaklaşımda güven aralığı negatif ve pozitif eğimli bir trend belirsizliğini göstermektedir. Benzer durum, Türkiye'nin orta ve batı bölgeleri için de söz konusudur. Ancak buradan korelasyonlu yaklaşımın daha kötü sonuçlar verdiği anlamlı çıkarılmamalıdır. Bu sonuçlar, bu ve benzeri bölgelerin hidrolojik değişimi konusunda literatürde neden farklı değerlendirmeler olduğunun bir yansıması olarak görülmelidir. Bir başka deyişle, sinyal genliği küçük olan bölgelerde daha temkinli yorumlar daha doğru stokastik modeller sayesinde yapılabilmektedir.

Korelasyonlu yaklaşım sonuçlarından elde edilen parametrelerden biri de kırpışma gürültüsü genliğidir. Zamansal korelasyonlar düşünüldüğünde, çalışılan Mascon verisi için beyaz gürültü genlikleri çoğunlukla sıfır kabul edilebilecek değerlere giderken kırpışma gürütüsü genlikleri 1 ile 8 cm/yıl$^{1/4}$ arasında değişmekte olup tüm kıtasal havzalarda ortalama 4 cm/yıl$^{1/4}$ civarındadır. Şekil 3.23'te havzalara ilişkin kırpışma gürültüsü genlikleri gösterilmiştir. En büyük kırpışma gürültüsü genliği Alaska havzasında elde edilmiş olup, en küçük değer de Asya bölgesinde bulunan Güney Moğolistan havzasındadır. Diğer bölgeler incelendiğinde ise, büyük genlik değerleri çoğunlukla Güney Amerika bölgesindeki havzalarda bulunmaktadır.

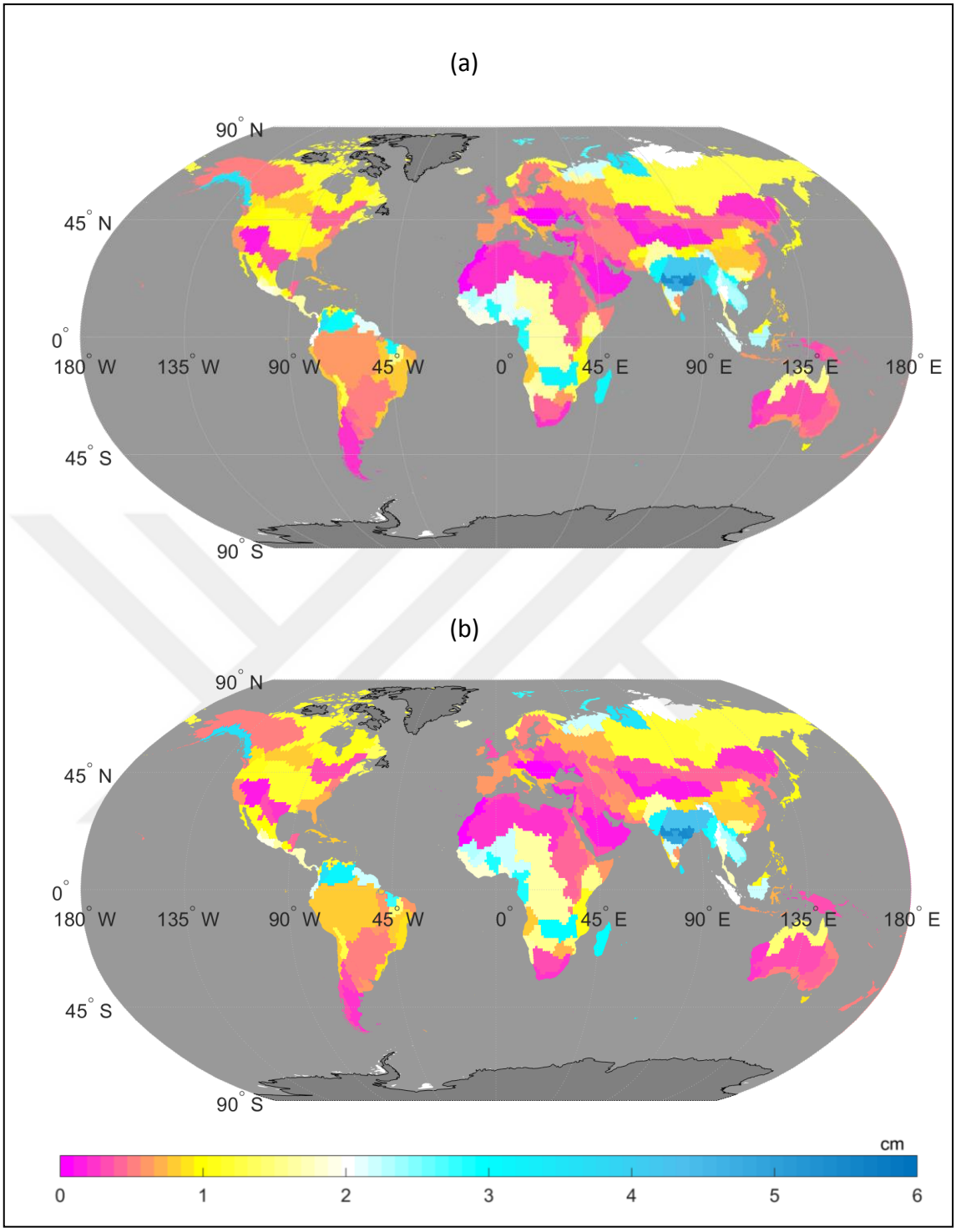


Şekil 3. 23 Korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)

Kestirim sonucunda elde edilen bir diğer bileşen de yıllık ve yarıyıllık etkileri gösteren genlik değerleridir. Şekil 3.24 ve 3.25'te iki farklı stokastik yaklaşım için yıllık ve yarıyıllık genlik değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3. 24 Yıllık genlik değerleri (a) standart yaklaşım, (b) korelasyonlu yaklaşım



Şekil 3. 25 Yarıyıllık genlik değerleri (a) Standart yaklaşım, (b) korelasyonlu yaklaşım

Şekil 3.24 ve 3.25'teki genlik değerleri incelendiğinde;

- Yıllık genlik değerleri standart yaklaşım sonuçlarına göre, 0,17 ile 28,18 cm arasında değişirken ortalama olarak 6 cm civarındadır. Korelasyonlu yaklaşım sonucunda da hemen hemen aynı genlik istatistikleri elde edilmiştir.

- Her iki yaklaşım sonucuna göre, en büyük yıllık genlik değeri Alaska havzasında, en küçüğü ise Sahra Çölü havzasında elde edilmiştir.

- Yarıyıllık genlik değerlerinde de her iki yaklaşım için sonuçlar benzer olup, ortalama olarak 1,19 cm civarındadır.

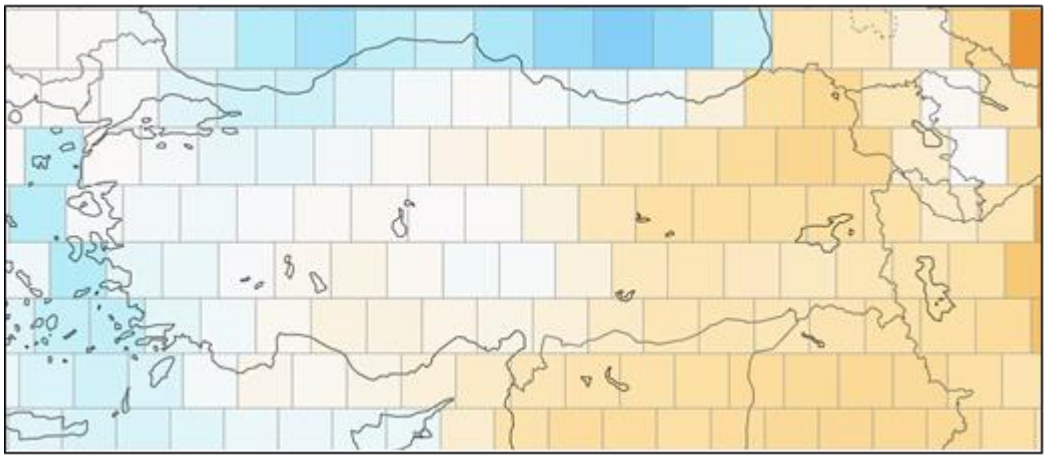
- En büyük yarıyıllık genlik değeri, Asya bölgesinde bulunan Mahanadi havzasında, en küçük değer ise Afrika bölgesinde bulunan Maghreb havzasında elde edilmiştir.

- Her iki yaklaşımdan elde edilen genlik değerleri birbirine oldukça yakındır. Buradan zamansal korelasyonların genlik kestirimlerini anlamlı biçimde etkilemediği sonucuna ulaşılmaktadır.

- Kırpışma gürültüsü genliği ile yıllık ve yarıyıllık sinüzoidal dalga genlikleri arasında doğru orantı bulunmaktadır: Gürültü genliği, dalga genliği büyük olan havzalarda daha yüksek, küçük olanlarda ise daha düşüktür. Bu durumun Mascon çözümleri ile ilişkisi incelenmelidir.

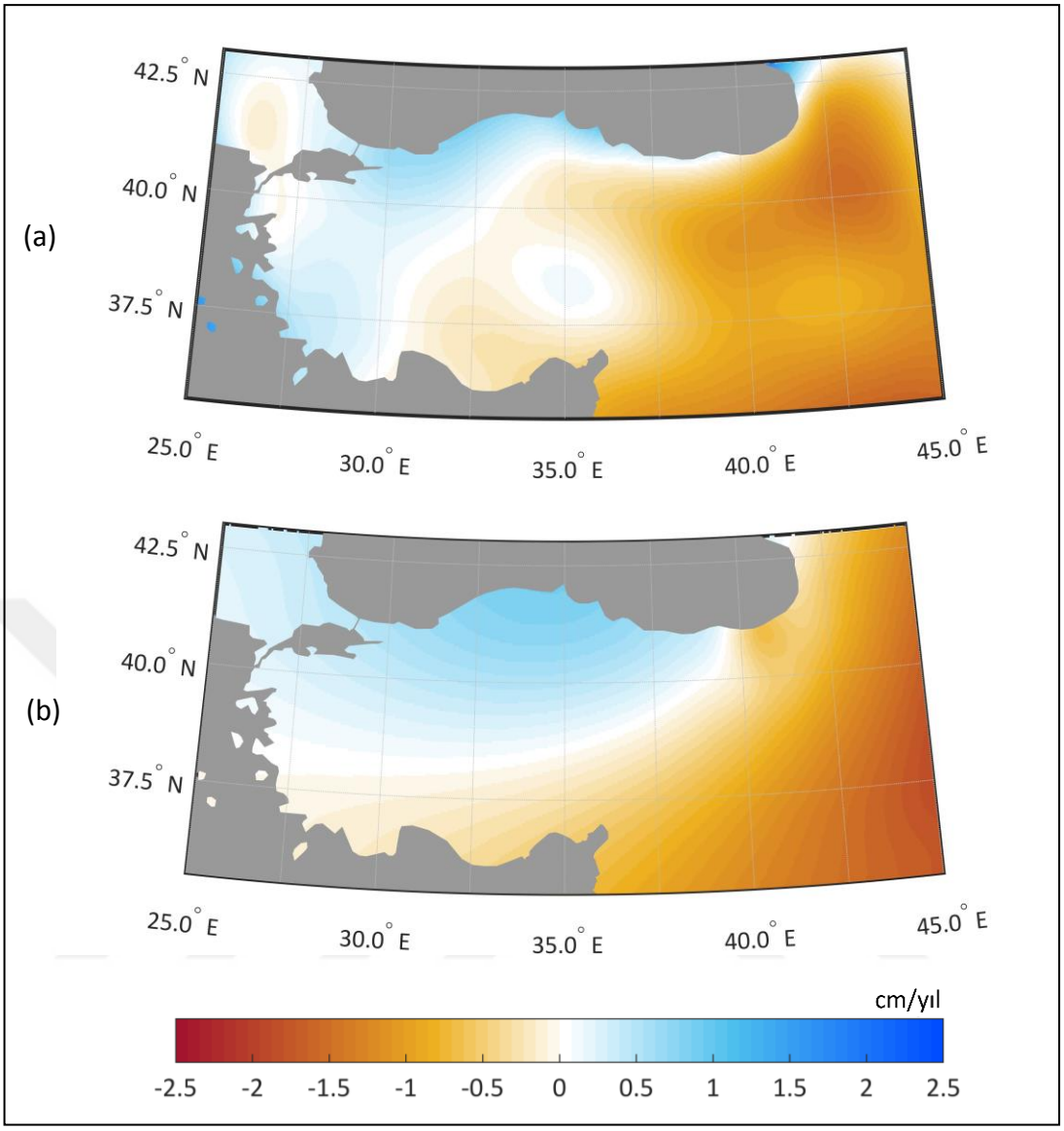
3.4.2 Türkiye Bölgesi için EWT Analizi

Türkiye'de EWT trend kestirimlerini yapmak için, Şekil 3.26'da gösterilen 1×1 derecelik Mascon hücrelerinden karaya ilişkin olan 107 adedinde GRACE GSFC Mascon çözümleri ele alınmıştır. Söz konusu Mascon çözümleri yanında, bölgede daha önce sıklıkla kullanılmış DDK çözümleri (DDK1, DDK2, DDK3 ve DDK4) de analiz edilmektedir. DDK EWT zaman serileri her bir Mascon hücresinin ağırlık merkezine ilişkindir. Mascon çözümleri 2003-2016, DDK çözümleri ise 2002-2016 yılları arasını kapsamaktadır. Her iki veri grubu için zaman serisindeki boşluklar Bölüm 3.3'de açıklanan şekilde doldurulmuştur.



Şekil 3. 26 Türkiye bölgesi için kullanılan GRACE GSFC Mascon hücreleri [110]

Söz konusu hücrelere ilişkin EWT trend kestirimleri, standart fonksiyonel model ve standart stokastik yaklaşım (korelasyonsuz ve eşit ağırlıklı) kullanılarak yapılmıştır. Mascon çözümleri ile birlikte burada yalnız DDK2 çözümleri verilmiştir (Şekil 3.27). Çünkü, Mascon ve DDK2 çözümlerinin çözünürlüğü yaklaşık olarak eşittir: Mascon 300 km, DDK2 ise 340 km Gauss yumuşatma yarıçapına karşılık gelen çözümlerdir [105], [114]. Yani, çözünürlükleri, 60 derecelik harmonik modeller düşünüldüğünde sırasıyla, 330 ve 300 km'dir. Trend değerlerinin standart sapmaları Şekil 3.28'de, diğer DDK çözümleriyle elde edilen trend değerleri ise Ek-B'de gösterilmiştir.

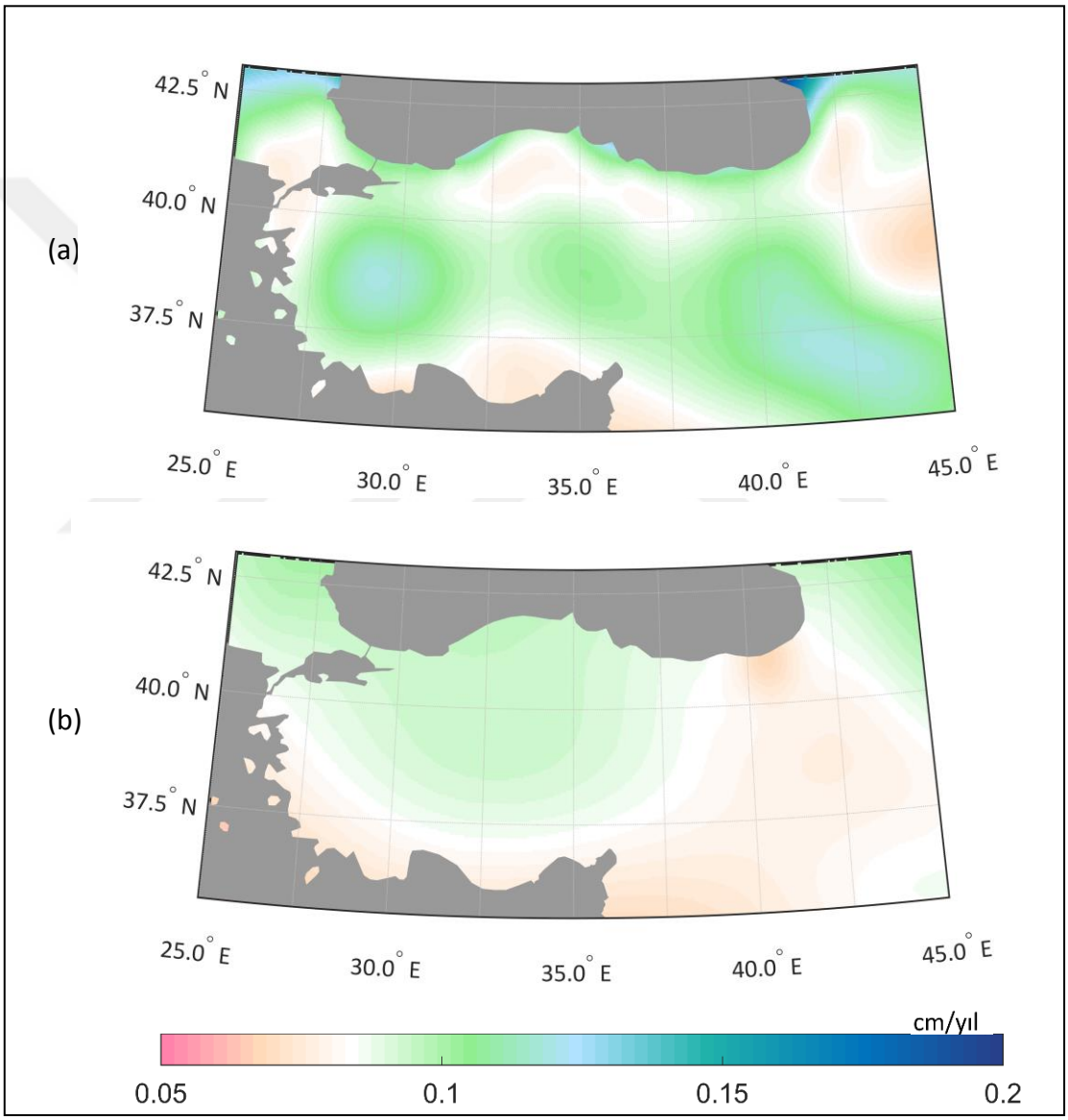


Şekil 3. 27 Türkiye için standart model ile elde edilen yıllık trend değerleri (a) GRACE GSFC Mascon, (b) DDK2 (cm/yıl)

Şekil 3.27(a)'daki Mascon çözümlerine göre Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde yıllık trend değerlerinin -1 ile -1.5 cm/yıl arasında olduğu, İç Anadolu'dan batıya doğru gidildiğinde ise yıllık trendin 1 cm/yıl değerlerine yükseldiği görülmektedir. Yani, doğudan batıya doğru gidildikçe, su kütlesinde bir artma olmaktadır. Kuzey kesimde ise, 0,5 ile 1 cm/yıl aralığında yıllık trend değerlerinin olduğu, yani su kütlesinde artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 3.27(b)'deki DDK2 çözümleri Mascon çözümlerine benzerdir. Ancak, Mascon çözümündeki mavi renk tonu ile gösterilmiş Batı ve Orta Karadeniz'deki artma trendinin DDK2 çözümünde doğuya ve İç Anadolu'ya doğru yayıldığı, tersine DDK2'deki Güneydoğu Anadolu'da yer alan Fırat-Dicle havzasındaki

kahverengi tonuyla gösterilmiş azalmanın Mascon çözümünde İç Anadolu'ya ve kuzeye doğru bir miktar aktarıldığı görülmektedir. 30 km'lik çözünürlük farkı göz ardı edildiğinde iki çözüm arasındaki bu farklılık Mascon çözümlerinde halihazırda giderilmiş sinyal sızması etkisinden kaynaklanmaktadır.

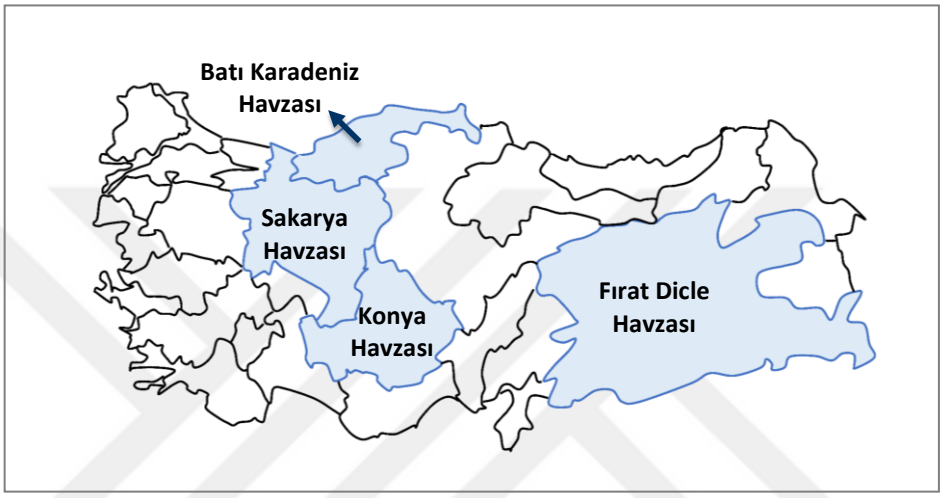
Şekil 3.28'de görüldüğü gibi DDK2 trend kestirimlerinin standart sapmaları daha düşüktür. Bu sonuç, ağırlıklı olarak DDK2'nin yumuşatma yarıçapının Mascon'dan daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. 28 Türkiye için standart model ile elde edilen yıllık trend sapma sapmaları (a) GRACE GSFC Mascon, (b) DDK2 (cm/yıl)

Yukarıdaki analizde EWT zaman serileri incelenen noktalar arasındaki uzaklık yaklaşık 111 km'dir. Bu uzaklık her iki çözümün çözünürlüğünden küçük olduğu için ele alınan

EWT zaman serilerinde mekansal korelasyonlar da bulunur. Bir başka deyişle, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'deki sonuçlar söz konusu mekansal korelasyonların da etkisi altında oluşmuş mekansal çözümlerdir. Bu etkiden kurtulmak için birbirinden daha uzak noktaları düşünmek, ya da daha iyisi, bölgedeki su havzalarına karşılık gelen Mascon hücrelerindeki EWT zaman serilerini ele almak gerekir. Bu amaçla, Şekil 3.29'da gösterilmiş Batı Karadeniz, Sakarya, Konya ve Fırat-Dicle havzaları için analizler yapılmıştır.



Şekil 3. 29 Türkiye havza haritası ve uygulamada çalışılan havzalar

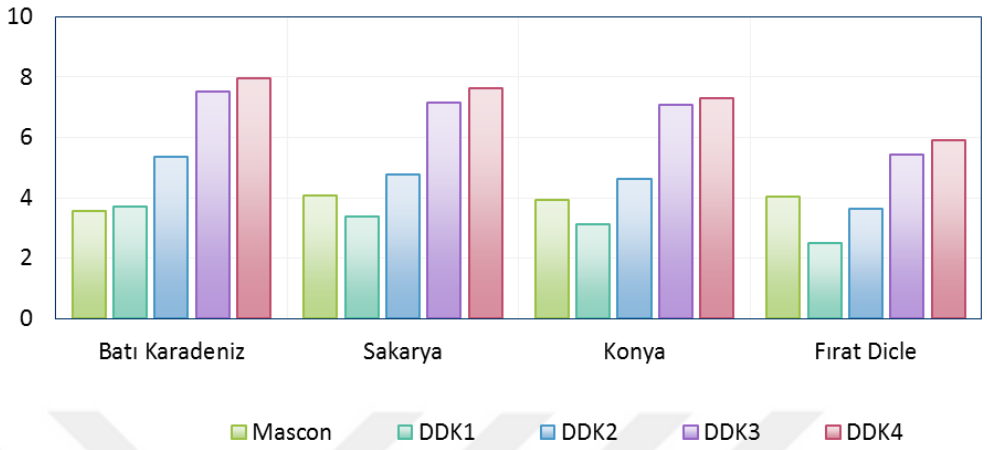
Havzalara ilişkin EWT zaman serilerinin analizi için, öncelikle havza sınırları içinde kalan Masconlar belirlenmiştir. Batı Karadeniz havzası 9, Sakarya Havzası 17, Konya Havzası 13 ve Fırat Dicle Havzası 30 Mascon hücresinden oluşmaktadır. Her bir havzanın EWT zaman serisi, havzadaki Mascon hücrelerine (DDK çözümleri için bu Masconların merkezlerine) ilişkin EWT zaman serilerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Bu zaman serileri, Bölüm 3.4 açıklandığı gibi iki farklı yaklaşım altında analiz edilmiştir:

I.Eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz (standart yaklaşım)

II. Farklı ağırlıklı ve korelasyonlu (korelasyonlu yaklaşım).

GSFC Mascon ve DDK çözümlerine ilişkin korelasyonlu yaklaşımda elde edilen kırpışma gürültüsü genlikleri Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Elde edilen genlikler, çözümlere karşılık gelen Gauss yumuşatma yarıçapıyla ters orantılıdır. Yarıçap küçüldükçe, kırpışma gürültüsü genliği artmaktadır (Mascon, DDK1, DDK2, DDK3, DDK4 çözümleri, sırasıyla 300, 530, 340 km ve 240 km'lik Gauss yumuşutma yarıçapına karşılıktır [105], [114]).

Filtre boyutu arttıkça daha yüksek harmonik derecedeki SNR oranı düşük katsayılar çözümden uzaklaştırılmış olduğundan, gürültü genliği ile yarıçap arasında gözlenen bu ters orantı beklenen bir sonuçtur.



Şekil 3. 30 Türkiye Havzalarında Mascon ve DDK çözümlerine ilişkin EWT zaman serileri kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)

Her iki yaklaşım sonucunda elde edilen trend değerleri ve standart sapmaları Çizelge 3.2, 3.3, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir. Havzalara ilişkin zaman serileri ve kestirim sonucunda elde edilen modeller Ek-C'de gösterilmiştir. Çizelge 3.2-3.5'teki standart yaklaşım sonuçları incelendiğinde;

✓ Batı Karadeniz havzasında Mascon çözümünden 0,38±0,07 cm/yıl, DDK2 çözümünden 0,64±0,07 cm/yıl'lık trend değeri elde edilmiştir. Aradaki fark, Karadeniz'den karaya olan sızıntı-kaçak sinyalinin etkisidir.

✓ Sakarya havzasında Mascon çözümünden 0,18±0,08 cm/yıl, DDK2'den ise 0,33±0,08 cm/yıl trend değeri elde edilmiştir. Burada, yine sızıntı etkisi kendini göstermektedir. Ancak SNR oranı Batı Karadeniz havzası kadar yüksek değildir.

✓ Konya hazvasında, Mascon ve DDK çözümleri farklı işaretli trend vermişlerdir. Ancak bu trend değerlerinin standart sapmaları yüksek olduğu için her ikisinin de anlamsız oldukları söylenebilir.

✓ Fırat-Dicle havzasında ise tüm çözümler yaklaşık -0,90 cm/yıl trend değerini işaret etmektedir. Standart sapmaları da 0,07 cm/yıl civarındadır.

Çizelge 3. 2 Batı Karadeniz havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl)

Batı Karadeniz Havzası				
	Standart Yaklaşım		Korelasyonlu Yaklaşım	
Veri	Trend	s_{TREND}	Trend	s_{TREND}
Mascon	0,38	0,07	0,42	0,21
DDK1	0,04	0,06	0,07	0,21
DDK2	0,64	0,08	0,51	0,30
DDK3	0,72	0,10	0,54	0,42
DDK4	0,67	0,10	0,49	0,44

Çizelge 3. 3 Sakarya havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl)

Sakarya Havzası				
	Standart Yaklaşım		Korelasyonlu Yaklaşım	
Veri	Trend	s_{TREND}	Trend	s_{TREND}
Mascon	0,18	0,08	0,14	0,34
DDK1	0,01	0,06	0,01	0,19
DDK2	0,33	0,08	0,16	0,26
DDK3	0,16	0,10	-0,08	0,39
DDK4	0,10	0,10	-0,15	0,42

Çizelge 3. 4 Konya havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl)

Konya Havzası				
	Standart Yaklaşım		Korelasyonlu Yaklaşım	
Veri	Trend	s_{TREND}	Trend	s_{TREND}
Mascon	-0,05	0,08	-0,10	0,23
DDK1	-0,15	0,05	-0,15	0,17
DDK2	0,09	0,08	-0,08	0,26
DDK3	-0,13	0,10	-0,36	0,39
DDK4	-0,18	0,10	-0,40	0,40

Çizelge 3. 5 Fırat-Dicle havzası yıllık trend değerleri ve standart sapmaları (cm/yıl)

Fırat Dicle Havzası				
	Standart Yaklaşım		Korelasyonlu Yaklaşım	
Veri	Trend	s_{TREND}	Trend	s_{TREND}
Mascon	-0,95	0,08	-0,67	0,23
DDK1	-0,87	0,05	-0,70	0,14
DDK2	-0,90	0,06	-0,72	0,20
DDK3	-0,89	0,08	-0,70	0,30
DDK4	-0,93	0,09	-0,74	0,33

Çizelge 3.2-3.5'teki korelasyonlu yaklaşım sonuçları incelendiğinde;

✓ Batı Karadeniz havzasında Mascon çözümünden 0,42±0,21 cm/yıl, DDK2 çözümünden 0,51±0,30 cm/yıl'lık trend değeri elde edilmiştir. Aradaki 0,09 cm/yıl'lık fark (standart yaklaşımda 0,26 cm/yıl) sızıntı-kaçak sinyalinin etkisidir. Ancak, DDK2 çözümünün standart sapması oldukça yüksektir. Yani, %5 yanılma olasılığı ile DDK2'den elde edilen 0,51 cm/yıl'lık trend anlamlı değilken, Mascon'dan elde edilen 0,42 cm/yıl'lık trend anlamlı olarak kabul edilebilir.

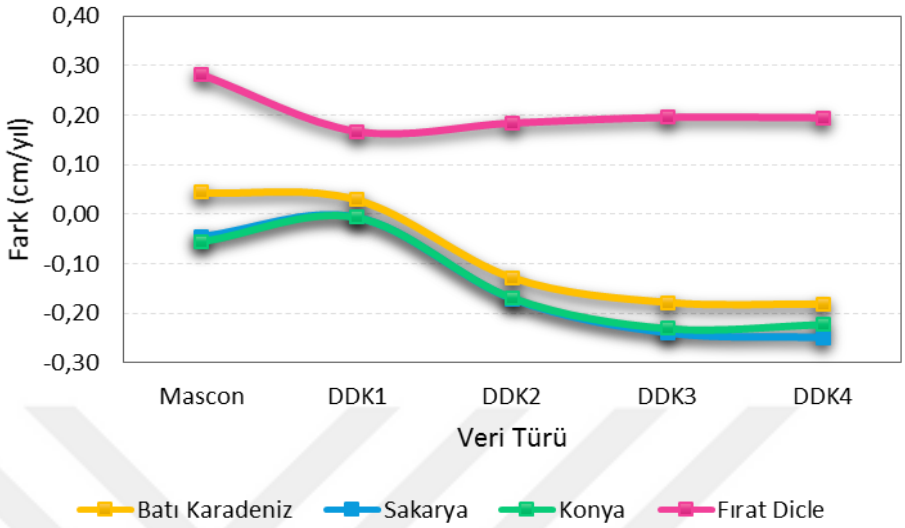
✓ Sakarya ve Konya havzalarında tüm veri türleri için anlamlı bir trend değerinin elde edilemediği saptanmıştır. Bu iki havzada SNR'nin oldukça düşük olduğu, dolayısıyla tüm zaman aralığı için geçerli anlamlı bir trendden söz etmenin mümkün olmadığı görülmektedir.

✓ Fırat Dicle havzasında ise, hem Mascon hem de diğer DDK çözümleri -0,70 cm/yıl'lık anlamlı bir trend kestirimi vermektedir. Yani, bölgedeki diğer havzalara göre güçlü bir sinyalin bulunduğu bu havza için ilgili çözümlerden herhangi biri kullanılabilir.

✓ Tüm havzalar için standart sapma değerlerinin 0,30 cm/yıl civarında olduğu görülmektedir. Standart stokastik yaklaşıma göre standart sapmalar 3,75 kat büyümüştür.

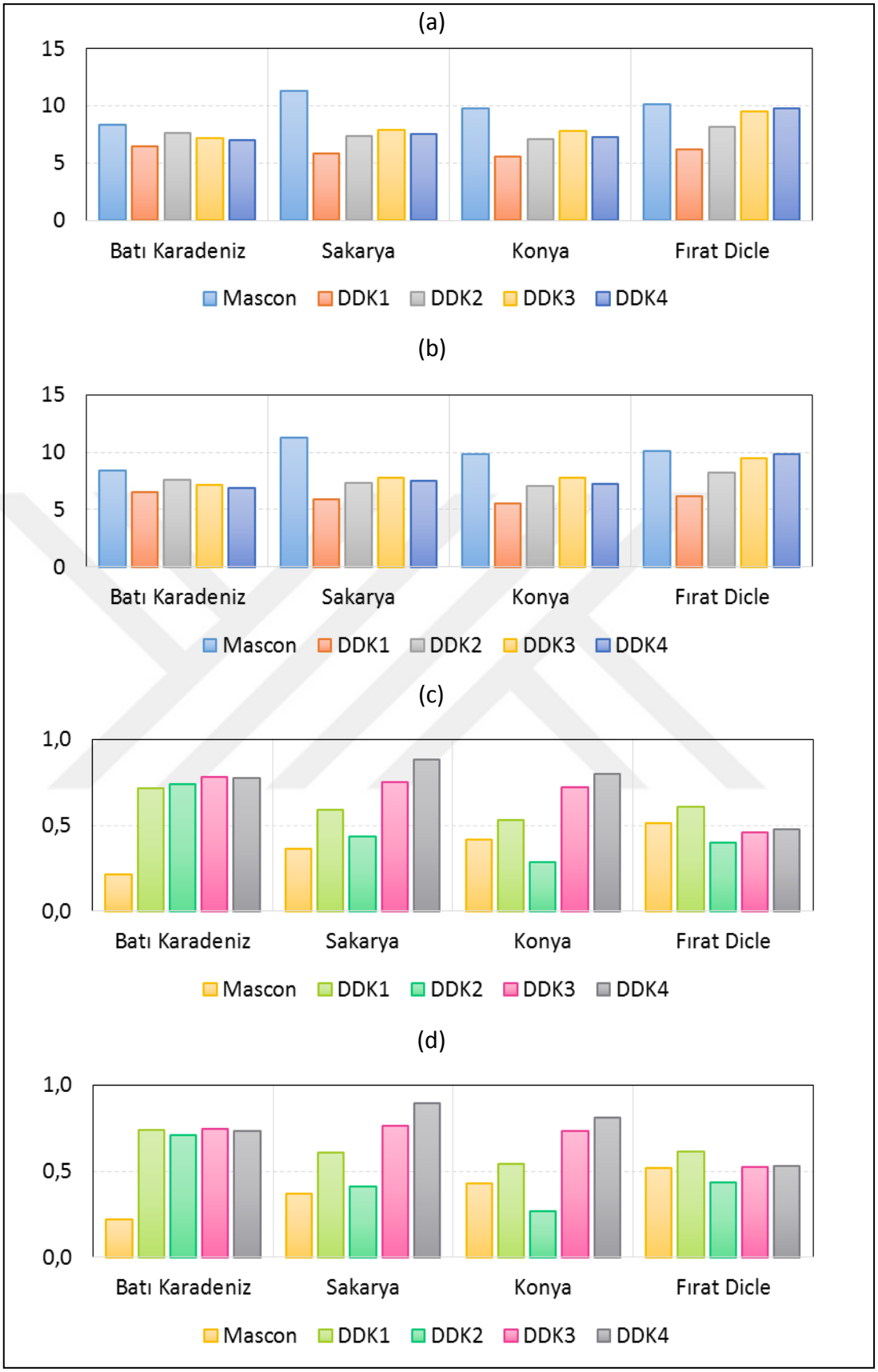
Hücre çözümlerinde olduğu gibi, havza bazında da Mascon ile en uyumlu DDK çözümü DDK2'dir. Korelasyonların göz önüne alınması trend değerlerini ve standart sapmalarını değiştirmektedir. EWT zaman serilerindeki zamansal korelasyonların havzalardaki trend

kestirimlerine etkisi (Çizelge 3.2-3.5'te verilen "korelasyonlu yaklaşım-standart yaklaşım" trend farkları) Şekil 3.31'de gösterilmiştir. Buna göre, korelasyonlu yaklaşım, havzaların trend değerlerini 0,30 cm/yıl kadar değiştirebilmektedir.



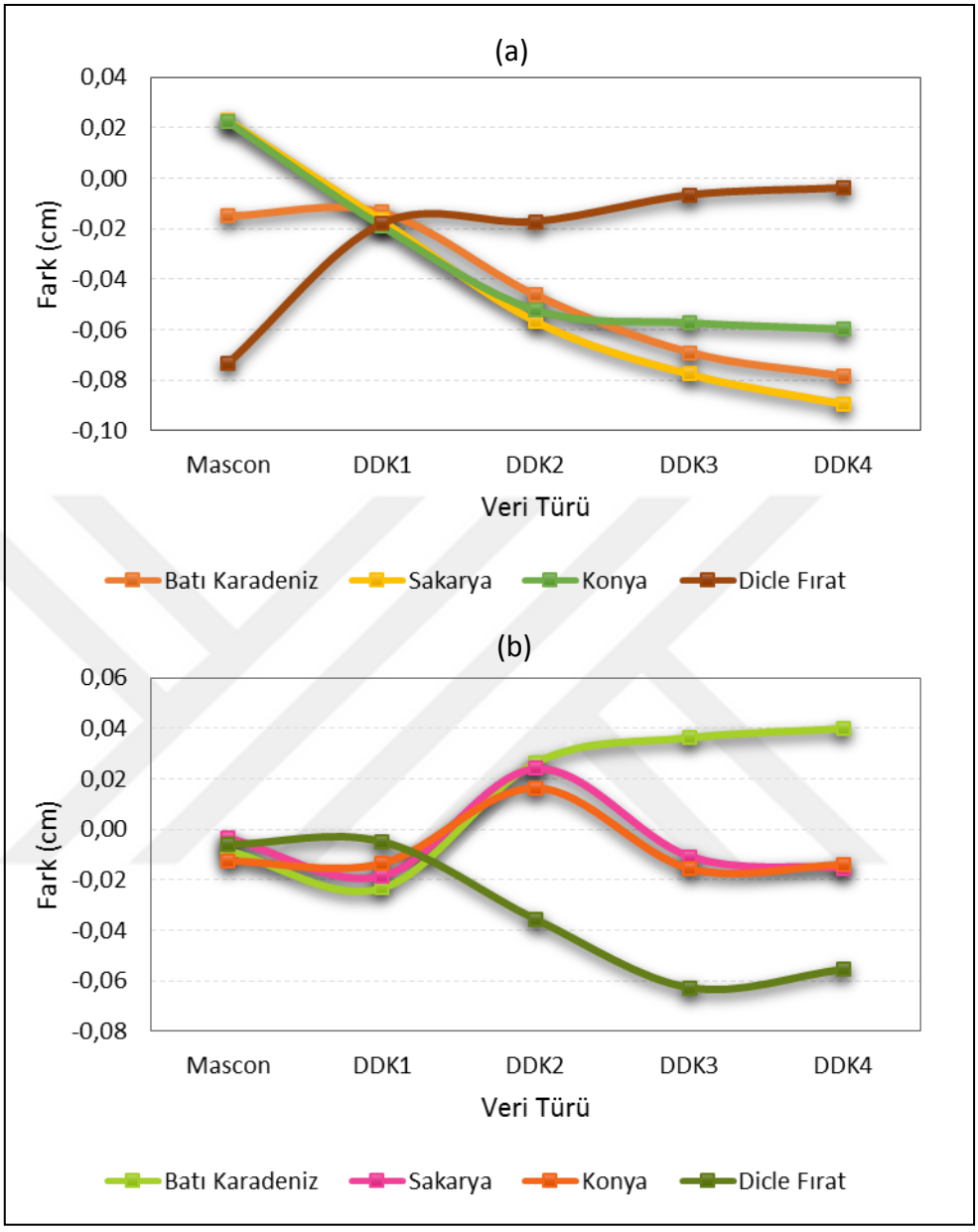
Şekil 3. 31 Farklı stokastik yaklaşımlardan elde edilen trend değerlerinin farkları

Ayrıca, iki farklı yaklaşımdan elde edilen yıllık ve yarıyıllık genlikler Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Tüm havzalar için yıllık genlik değerleri 6 ile 12 cm arasında değişmektedir. Mascon çözümleri, DDK çözümlerine göre en yüksek yıllık genlik değerlerine sahiptir. Yarıyıllık genlik değerleri ise, 0,2 ile 0,8 cm arasında değişmektedir. Yıllık genliklerden farklı olarak, burada en küçük değerler genellikle Mascon çözümleri için elde edilmiştir.



Şekil 3. 32 (a) Standart yaklaşım ve (b) korelasyonlu yaklaşım ile elde edilen yıllık genlikler; (c) standart yaklaşım ve (d) korelasyonlu yaklaşım ile elde edilen yarıyıllık genlikler (cm)

Her iki stokastik yaklaşımdan elde edilen yıllık ve yarıyıllık genlik değerlerinin farkları ise, Şekil 3.33'de sunulmuştur.



Şekil 3. 33 Farklı stokastik yaklaşımlardan elde edilen (a) yıllık ve (b) yarıyıllık genlik değerlerinin farkları

Şekil 3.33 incelendiğinde, zaman serisindeki korelasyonların hem yıllık hem de yarıyıllık dalga genlik değerlerine olan etkisinin tüm çözümler için 1 mm'den az olduğu görülmektedir. Özellikle, Mascon çözümlerinde korelasyonların yarıyıllık genliklerine olan etkisi yok denecek kadardır.

3.4.3 Antarktika ve Grönland Bölgeleri için EWT Analizi

Yerküre üzerinde en yüksek oranda kütle değişiminin meydana geldiği iki bölge kuzey kutbundaki Grönland ve güney kutbunda yer alan Antarktikadır. Global ısınmanın da etkisiyle bu bölgelerdeki buzullardaki kütle kaybı GRACE'in aktif olduğu dönemden bu yana oldukça yoğunlaşmıştır. GRACE, bu bölgelerde birbirine daha yakın olan yörünge çizgilerine sahip olduğu için (bkz. Şekil 2.3), kutup bölgelerinde daha düşük gürültülü çözümler vermektedir. Dolayısıyla, bir GRACE çözümünün bu bölgelerdeki SNR'si diğer karasal bölgelerdekine göre oldukça yüksektir. GRACE EWT zaman serileri, bu bölgelerdeki buz (buz örtüsü, buz sahanlıkları ve/veyaz buzulların) kütle kaybına ilişkin önemli bilgi kaynağıdır.

Bu bölümde, Grönland ve Antarktika buz kütlelerine ilişkin 2003-2016 yılları arasındaki GSFC GRACE Mascon çözümlerinden elde edilen EWT değişimleri analiz edilmektedir. Önceki sayısal uygulamalarda olduğu gibi, Grönland ve Antarktika EWT zaman serilerine ilişkin bilinen harmonik regresyon modeli, standart ve korelasyonlu stokastik yaklaşım altında incelenmektedir. Bu bölgelere ilişkin önemli problemden biri, kütle kaybının ivmelenerek artıp artmadığıdır. Bir başka deyişle, buzların erimesi yavaşlamakta mıdır yoksa hızlanmakta mıdır? Çalışmada ele alınan esaslar çerçevesinde, bu nedenle, EWT zaman serilerinin analizi için ilgili regresyon modeli "$0.5b_1t^2$" ivmelenme etkisi ile genişletilmektedr. Elde edilen b_1 ivme parametrelerinin anlamlılığı irdelenecektir.

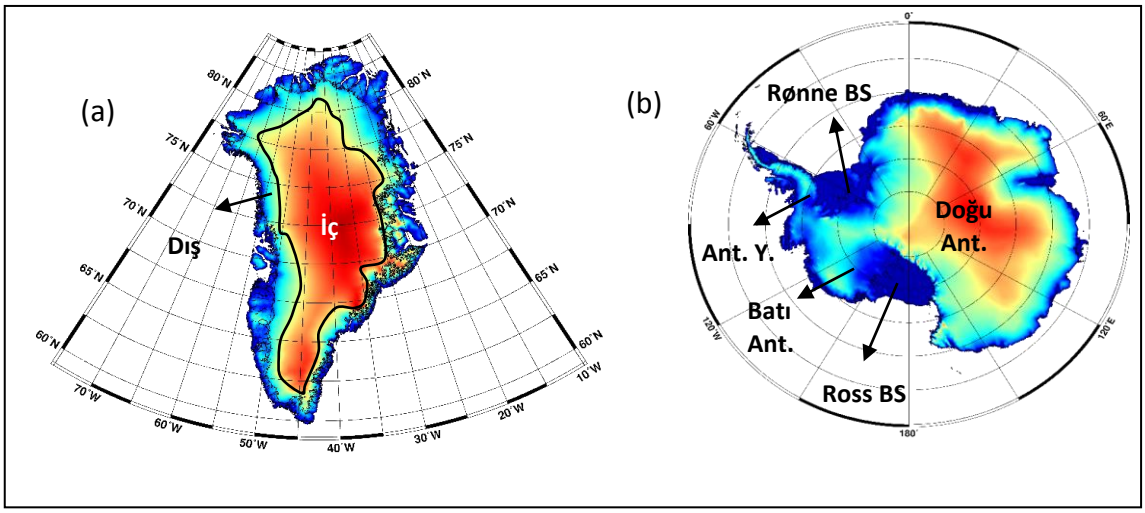
• Çalışma Bölgesinin Tanıtılması

Antarktika ve Grönland bölgelerinde EWT zaman serilerinin incelenmesi için;

- Grönland'a ilişkin iki havza (2000 m'den yüksek olan iç bölge ve alçak olan dış bölge),

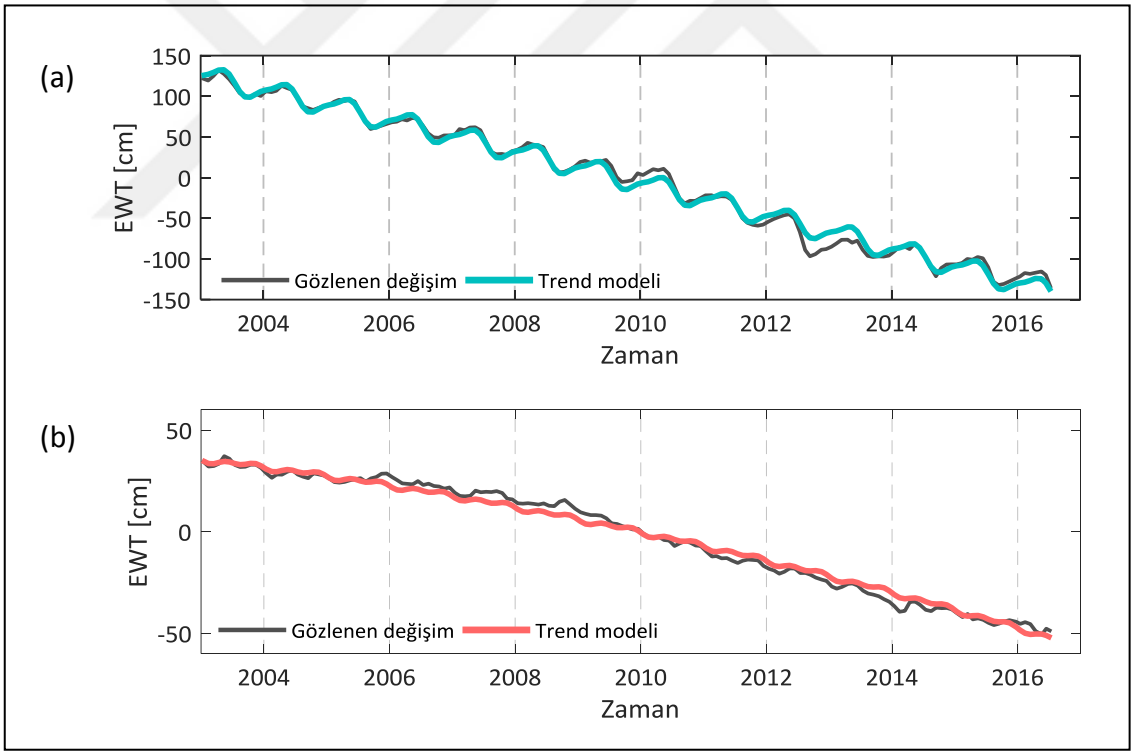
- Antarktika'ya ilişkin 5 havza (Antarktika Yarımadası, Batı Antarktika, Doğu Antartika buz örtüleri ve Rønne ve Ross Buz Sahanlıkları-BS)

göz önüne alınmıştır. Söz konusu havzalar Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 34 (a) Grönland topoğrafyası (kırmızı≈2000 m) ve (b) Antarktika topoğrafyası (kırmızı≈4000 m) [121] ve havzaları

Şekil 3.35'de Batı Antarktika ve Grönland dış havzasına ait yıllık trend kestirimi için kullanılan EWT zaman serileri ve ivme ile genişletilmiş fonksiyonel model gösterilmiştir.



Şekil 3. 35 (a) Grönland Dış ve (b) Batı Antarktika havzalarında EWT zaman serileri ve trend modelleri

Her bir havza için veri boşlukları doldurulduktan sonra hem standart hem de ivme ile genişletilmiş fonksiyonel modelde önce eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz EWT'ler öngörülmüştür. Hangi fonksiyonel modelin doğru olduğuna karar vermek için *F*-dağılımlı aşağıdaki test istatistiği kullanılmıştır:

$$T' = \frac{(\Omega_1 - \Omega_2)/(r_1 - r_2)}{\Omega_2 / r_2} \sim F(r_1, r_2) \tag{3.1}$$

Burada, Ω, düzeltmelerin ağırlıklı karelerinin toplamını, *r*, serbestlik derecesini, $(\ldots)_1$ indisli değerler standart fonksiyonel model ile yapılan dengeleme işlemini, $(\ldots)_2$ ise genişletilmiş model ile yapılan dengeleme işlemini ifade etmektedir. Test büyüklüğü *T'*, %5 yanılma olasılığına karşılık gelen *F*-dağılımının güven sınırından ($F_{(r_1 - r_2),\, r_2, 0.95}$) büyükse ivmeli model, küçükse standart fonksiyonel model doğru olarak kabul edilmiştir. Yapılan model test sonucunda doğru olduğuna karar verilen modele ilişkin trend ve ivme parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3. 6 Standart stokastik yaklaşım sonucunda elde edilen yıllık trend ve ivme (cm/yıl^2) parametreleri (Parentez içindeki değerler standart sapmaları göstermektedir)

		Standart Yaklaşım	
Bölge	*Havza*	*Trend* (cm/yıl)	*İvme* (cm/yıl^2)
Grönland	Grönland Dış	-17,93 (0,56)	-0,26 (0,08)
	Grönland İç	1,47 (0,22)	-0,19 (0,03)
Antarktika	Ant. Y.	-4,60 (0,39)	-0,37 (0,06)
	Batı Ant.	-3,44 (0,23)	-0,49 (0,03)
	Doğu Ant.	0,22 (0,02)	Anlamsız
	Rønne BS	-0,04 (0,06)	Anlamsız
	Ross BS	-2,92 (0,16)	0,11 (0,02)

Çizelge 3.6'daki sonuçlara göre,

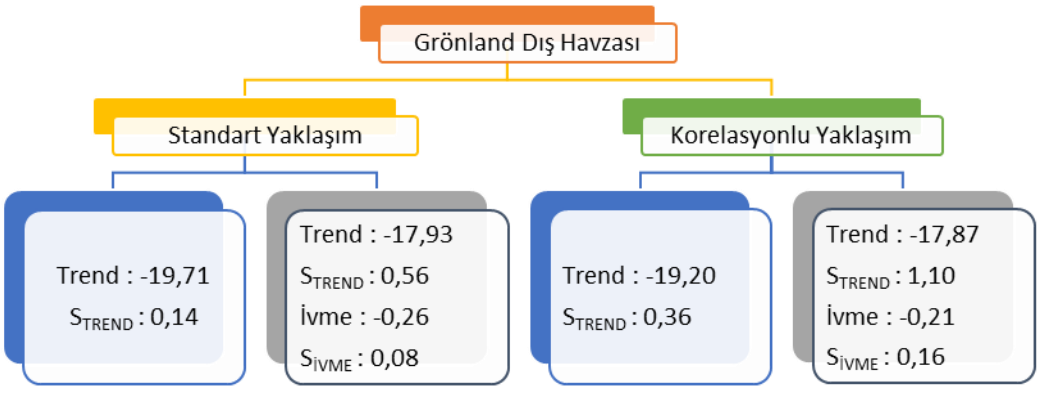
- Doğu Antarktika buz havzası ve Rønne buz sahanlığı dışındaki tüm yerlerde ivmeli model anlamlı bulunmuştur. Buna göre, Grönland Dış, Antarktika Yarımadası ve Batı Antarktika havzalarında buz kütleleri ivmelenerek azalmakta, halen yoğun kar yağışına sahip Grönland İç havzasında, Antarktika'da en büyük alanı kaplayan Doğu Antarktika havzasında ve Ross buz sahanlığında buz kütlesi ivmelenerek artmaktadır.

• Grönland dış havzasındaki ivmeli kütle kaybı (erime) miktarı her yıl 18 cm civarındadır.

• Antarktika'da Güney Amerika'nın en uç noktasına yakın yerleri olan Antarktika Yarımadası ve Batı Antarktika havzalarındaki erime miktarı Grönland'a göre düşüktür. Ancak, global ısınmanın Antarktika'ya ulaştığını ve erimenin daha da arttığını göstermektedir.

GSFC Mascon çözümünün EWT zaman serilerinin analizine göre Grönland ve Antartika için yukarıdaki sonuçlar kabul edilebilir mi? Erimenin Antarktika'nın kuzeyine karşılık gelen bölgelerinde arttığı popüler kaynaklardan da bilinmektedir. Ancak, Grönland için aynı olgu geçerli midir? Yukarıdaki yorumlar, EWT zaman serilerinin korelasyonsuz olduğu yaklaşımı ile gerçekleştirilmiş analizlere dayanmaktadır. Söz konusu çıkarımlardan emin olmak için, Grönland ve Antarktika'daki zaman serilerinde korelasyonlar ele alınmalıdır. Zaman serilerinin kırpışma gürültüsü ile yüklü oldukları varsayılarak Çizelge 3.6'daki analizler yinelenmiştir.

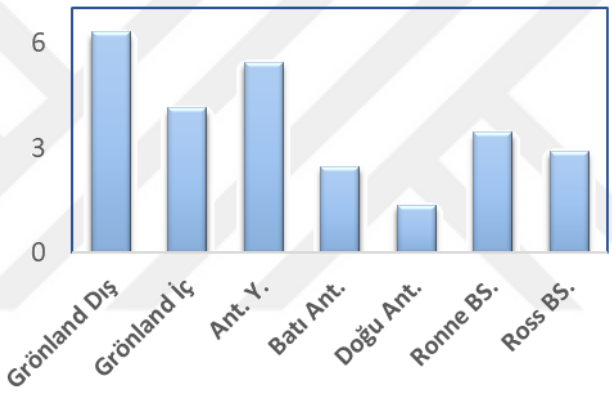
Genişletilmiş ivmeli modelin geçerli olup olmadığının belirlenmesi için, model testi yerine *t*-testine göre parametre testi uygulanmıştır. Test sonucunda trend ya da ivme parametresinin anlamsız olduğu belirlenmiş ise standart fonksiyonel model, ivme parametresi anlamlı ise genişletilmiş model doğru olarak kabul edilerek kestirim işlemleri yapılmıştır. Bu şekildeki karar verme akış şeması, örnek olarak Grönland dış havzası için Şekil 3.36'da gösterilmiştir. %5 yanılma olasılığı ile kabul edilen modele göre elde edilmiş trend ve ivme parametreleri Çizelge 3.7'de, havzalara ilişkin kırpışma gürültüleri Şekil 3.37'de verilmiştir.



Şekil 3. 36 Grönland dış havzası için korelasyonlu yaklaşımda karar verme akış şeması

Çizelge 3. 7 Korelasyonlu yaklaşım sonucunda elde edilen yıllık trend (cm/yıl) ve ivme (cm/yıl^2) parametreleri (Parentez içindeki değerler standart sapmaları göstermektedir)

		Korelasyonlu Yaklaşım	
Bölge	*Havza*	*Trend* (cm/yıl)	*İvme* (cm/yıl^2)
Grönland	Grönland Dış	-19,20 (0,36)	Anlamsız
	Grönland İç	0,49 (0,24)	Anlamsız
Antarktika	Ant. Y.	-6,66 (0,31)	Anlamsız
	Batı Ant.	-3,65 (0,43)	-0,42 (0,06)
	Doğu Ant.	0,13 (0,08)	Anlamsız
	Rønne BS	0,27 (0,20)	Anlamsız
	Ross BS	-3,48 (0,51)	0,19 (0,07)



Şekil 3. 37 Havza bazında kestirilen kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)

Çizelge 3.7 incelendiğinde;

- Standart yaklaşıma göre trend ve ivme kestirimlerinin değiştiği görülmektedir. Grönland bölgesinde ivmeli model anlamsız, Antarktika'da ise yalnız Batı Antarktika havzası ve Ross buz sahanlığı için ivmeli hareket anlamlı bulunmuştur.

- Grönland dış havzası buz kütlesi erime hızı -19,20±0,36 cm/yıl'dır. Antarktika'daki Batı Antarktika havzası ise -3,65t-0,21t^2 cm/yıl'lık, bu havzaya komşu Ross buz sahanlığı ise -3,48t+0,08t^2 cm/yıl'lık ivmeli bir buz kütle erimesine sahiptir. Bir başka deyişle, Batı Antarktika havzası ve Ross buz sahanlığı gözlem süresi dahilinde hızlanarak devam eden bir erimeye sahiptir.

• Doğu Antarktika için trend değeri 0,13±0,08 cm/yıl'dır. Ancak bu hız parametresine göre havzada buz kütlesinin eridiğini ya da arttığını %5 yanılma olasılığı ile söylemek mümkün değildir. Ancak daha yüksek yanılma olasılıkları, örneğin 1-0,68=0,32, yani %32 yanılma olasılığı ile arttığı söylenebilir.

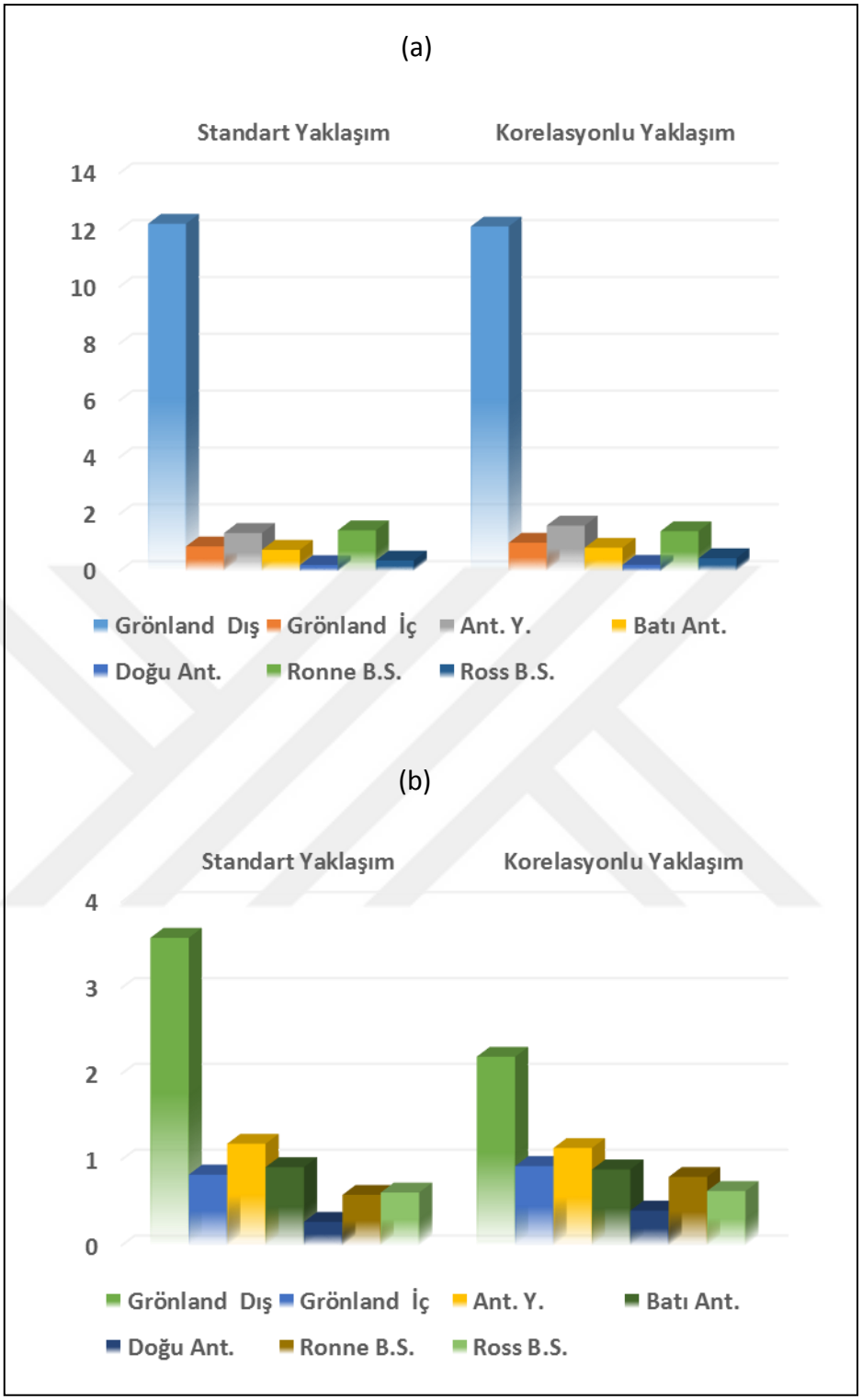
Şekil 3.38 incelendiğinde;

• Her iki buzul bölge için kestirilen kırpışma gürültüsü genlikleri 1,3 ile 6,5 cm/yıl$^{1/4}$ arasında değişmektedir. Grönland'da 2000 metreden alçak olan dış havzada gürültü genliği 6,33; iç havzada ise 4,14 cm/yıl$^{1/4}$'dür. Antarktika'da ise en büyük gürültü genliğine Antarktika Yarımadası havzası sahiptir (5,46 cm/yıl$^{1/4}$).

Grönland ve Antarktika havzalarında her iki stokastik yaklaşım altında elde edilen yıllık ve yarıyıllık sinüzoidal dalga genlikleri Şekil 3.38'de gösterilmiştir. Bu sinyal genlikleri incelendiğinde;

• Yıllık genlik değerlerinin 0 ile 12 cm arasında değiştiği ve farklı yaklaşımlar altında benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Genliklerin ortalaması, standart yaklaşım için 2,45 cm, korelasyonlu yaklaşım için 2,51 cm'dir.

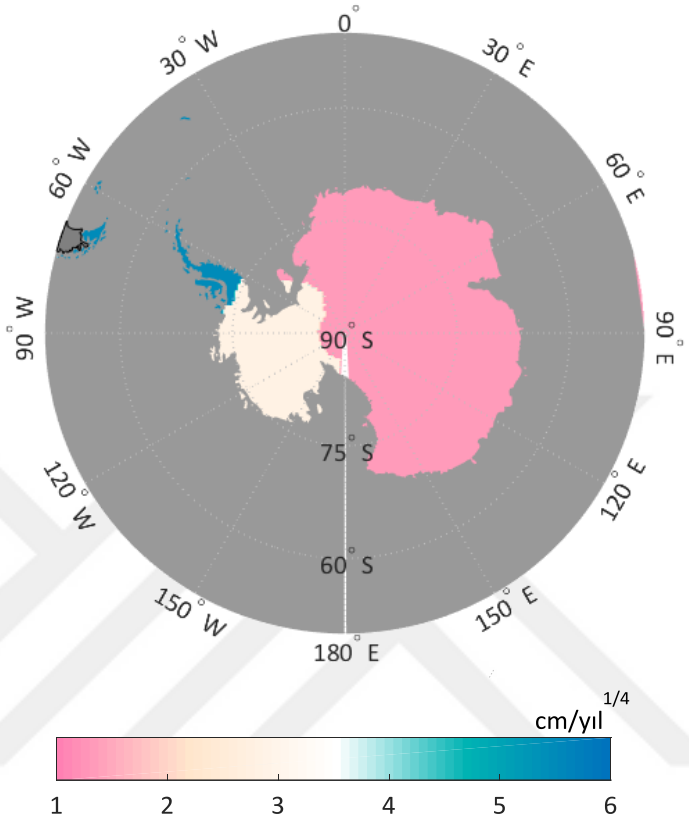
•Yarıyıllık genlik değerlerinde de her iki yaklaşım altında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Değerler 0 ile 4 cm arasında değişmektedir.



Şekil 3. 38 Antarktika ve Grönland havzalarına ilişkin (a) yıllık ve (b) yarıyllık genlik değerleri (cm)

Bölüm 3.4.1'deki global ölçekte yapılan EWT analizinde olduğu gibi, Grönland ve Antarktika havzalarındaki sinüzoidal dalga genlikleri ile kırpışma gürültüsü genlikleri doğru orantılıdır. Örneğin Şekil 3.39'da mekansal olarak gösterilen kırpışma gürültüsü

genlikleri ile Şekil 3.38'deki dalga genlikleri karşılaştırıldığında, Antarktika Yarımadası en yüksek dalga genliğine ve kırpışma gürültü genliğine, Doğu Antarktika ise en küçük dalga genliğine ve kırpışma gürültü genliğine sahiptir.



Şekil 3. 39 Antarktika havzalarına ilişkin kırpışma gürültüsü genlikleri (cm/yıl$^{1/4}$)

Çizelge 3.7'de verilen, çalışmada öngörülen genişletilmiş fonksiyonel model ve stokastik yaklaşımla elde edilmiş sonuçlar gerçekçi midir? Bunun için, elde edilen sonuçlar literatürde verilen güncel değerlerle karşılaştırılmıştır. Öncelikle, EWT'nin yıllık trend parametreleri ile Gt biriminde yıllık kütle değişim miktarları elde edilmiştir. Gt birimine geçiş için GSFC Mascon sitesinde Grönland ve Antarktika havzalarına ilişkin Gt birimindeki kütle değişimleri ile EWT değişimleri orantılanmış ve her havza için bir katsayı belirlenmiştir: Bu katsayı, "kütle=hacim×yoğunluk" ilişkisine göre "(kütle/EWT)=yüzölçüm×yoğunluk" oranını vermektedir. Her bir havzaya ilişkin katsayı ile Çizelge 3.7'deki trend ve ivme parametreleri çarpılarak Çizelge 3.8'deki "Bu çalışma" satırında yer alan kütle değişimleri belirlenmiştir. Çizelgede "Grönland" için iç ve dış havzaların toplamı, "Antarktika" için ise Antarktika Yarımadası, Batı Antarktika ve Doğu

Antarktika buz örtüleri toplamı gösterilmiştir. Elde edilen kütle değişimleri güncel diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır:

- Grönland için Ran vd. 2017 [14], -286 Gt/yıl trend değerini verirken, NASA [122], bu çalışmada elde edilen -280,5 Gt/yıl değerine oldukça yakın -281 Gt/yıl'lık kütle değişiminden söz etmektedir.

- Antarktika için güncel çalışmalarda kütle değişimi bilgisi oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada elde edilen -129,1 Gt/yıl'lık trend değeri ile NASA [123] tarafından verilen -125 Gt/yıl oldukça iyi uyuşmaktadır. Ancak farklı olarak, bu çalışma ile bölgede söz konusu buz kütle kaybının hızlanarak devam ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu, ilginç bir sonuçtur: Grönland'da global ısınmanın etkileri uzun zamandır bilinmekteyken, Antarktika'ya ilişkin yorumlar sınırlı kalmıştır. Ancak bu çalışmadaki Batı Antarktika buz örtüsü nedeniyle oluşan anlamlı ivmelenme, global ısınma etkisinin bu bölgede de görülmeye başlandığını ve artarak devam ettiğini göstermektedir. Şekil 3.35b incelendiğinde bu ivmelenmenin 2006-2008 arasında başladığı görülmektedir.

Çizelge 3. 8 Buz kütle değişimleri

Bölge	Kaynak	Trend (Gt/yıl)	İvme (Gt/yıl^2)
Grönland	Bu çalışma	-280,5$\pm$6	–
	[14]	-286	–
	[122]	-281	Bilgi Yok
Antarktika	Bu çalışma	-129,1$\pm$15	-11,6$\pm$2
	[123]	-125	Bilgi Yok

Standart bir harmonik regresyon modeli ve standart bir stokastik yaklaşım kullanılarak kütle değişimleri belirlenmiş olsaydı,

- Grönland için -290,4 Gt/yıl,

- Antarktika için -206,0 Gt/yıl,

buz kütle erime hızları elde edilirdi. Bu sonuçlar, standart yaklaşım ile yapılan analizin Grönland için 13 yılda 128,7 Gt, Antarktika için ise 13 yılda 19,5 Gt'lik fazladan kütle kaybı kestirimine neden olacağını göstermektedir.

Çizelge 3.7'deki karşılaştırmalar neticesinde, EWT zaman serilerindeki korelasyonların trend kestiriminde göz önüne alınmasının önemli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Grönland ve Antarktika'daki buz kütlesinin erimesi, doğal olarak deniz seviyesinin yükselmesine neden olur. Okyanusların toplam yüzölçümü $3{,}618\times10^8$ km^2'dir. 1 mm deniz seviyesinin değişmesi, "hacim=yüzölçüm×yükseklik" eşitliğine göre suyun hacmini 361,8 km^3 değiştirir. 1 Gt buz erirse, 1 km^3 su hacmi ortaya çıkar. Bu nedenle her bir Gt'lik buz erimesi deniz seviyesini 1/361,8 mm arttırır. Buna göre, Grönland'daki 280,5 Gt'lik yıllık erime, global deniz seviyesini yılda 280,5/361,8=0,78 mm arttırmaktadır. Antarktika'daki erime ivmelenerek arttığı için, buradaki kütle kaybının neden olduğu deniz seviyesi artışı $(129{,}1/361{,}8)t+0{,}5\times11{,}6/(361{,}8)t^2=0{,}35t+0{,}02t^2$ kadardır. 13 yıllık süre içinde iki kutup bölgesinde meydana gelen buz erimesi bir anda gerçekleşse, deniz seviyesi $0{,}78\times13+0{,}35\times13+0{,}02\times13^2=18{,}07$ mm, yani yaklaşık 2 cm civarında artar. Bir başka deyişle, iki kutup bölgesindeki erime yıllık 1,4 mm global deniz seviyesi artışına karşılık gelir.

BÖLÜM 4

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yeryuvarı gravite alanının zamansal değişiminin izlenmesinde alçak yörüngeli yakın yer uyduları önemli bilgi sağlamaktadır. Bu uydulardan biri olan GRACE uydu sistemi de, 2002-2016 yılları arasında yeryuvarı gravite alanının zamansal değişimine ilişkin veri sağlamıştır. Özellikle hidrolojik değişimlere karşı duyarlı olduğundan, yeraltı su kaynaklarındaki değişimlerin belirlenmesi, buzul kütlesindeki değişimlerin izlenmesi gibi çalışmalarda diğer yer bilimleri disiplinleri ile birlikte sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, GRACE Seviye-3 ürünlerinden olan GSFC Mascon ve DDK filtreli çözümler kullanılmıştır. CCAR veri merkezinden temin edilen 2003-2016 aralığını kapsayan GSFC Mascon veri seti, filtrelenmiş ve PGR, sızıntı-kaçak sinyali gibi etkilerin giderildiği, havza ve bireysel Mascon hücreleri bazında aylık periyotlarda üretilen eşdeğer su kalınlığı çözümlerinden oluşmaktadır. 2002-2016 aralığında sadece yumuşatma filtresi uygulanan DDK filtreli çözümler ise, ICGEM veri merkezi aracılığıyla elde edilmiştir. Söz konusu bu veri setleri ile öncelikle global ve bölgesel ölçekteki hidrolojik değişimlerin trendleri harmonik regresyon modeli altında incelenmiş ve anlamlılıkları irdelenmiştir. (Burada, global olarak Mascon verisine ait tüm havzalar değerlendirilirken, bölgesel ölçekte Grönland, Antarktika ve Türkiye'deki bazı havzalara ilişkin incelemeler yapılmıştır.) Daha sonra ise, zaman serilerinde bulunan zamansal korelasyonların incelenmesi için farklı stokastik yaklaşımlar uygulanarak, jeodezik zaman serisinde bulunabilecek gürültülere ve büyüklüklerine ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, çalışmada standart fonksiyonel yaklaşım olarak kabul edilen harmonik regresyon modeli, yoğun olarak buz kütlesi içeren bölgelerde doğrusal trend yerine ivme

parametresi ile genişletilmiş ve bu durumun havzalara ilişkin kestirim sonuçlarına olan etkisi de incelenmiştir.

Yukarıda bahsedilen farklı stokastik yaklaşımların doğru bir şekilde uygulanması için ilk olarak veri setinde bulunan gürültünün ya da gürültü türlerinin belirlenmesi gerekir. Literatürde renkli gürültüler olarak geçen beyaz gürültü dışındaki bu sinyallerden jeodezik zaman serilerinde en sık rastlananları kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültüleridir. Bu gürültüler özellikle GPS zaman serilerinde, birlikte (beyaz +kırpışma + rasgele yürüyüş gürültü kombinasyonu gibi) bulunmaktadır. Bu sinyallerin belirlenebilmesi için de zaman serisinin spektral anlamda analiz edilmesi gerekir. Periyodogram yöntemi ve PSD-Frekans grafikleri ile yapılan analiz işlemlerinde, grafiğin verdiği eğime göre söz konusu bu gürültülerin türü hakkında çıkarımlarda bulunulmakla birlikte, sadece bu sonuçlara bakarak gürültü türünün tam olarak belirlenmesi güçtür. Çünkü, verinin örnekleme aralığının büyük olması yani verinin boşluklu olması, birden fazla sinyalin bulunması gibi durumlar bu sinyallerin tam olarak ayırt edilmesini engellemektedir.

Bu çerçevede, uygulamada çalışılan yaklaşık 13 yıl uzunluğundaki GRACE Mascon EWT veri setinde de benzer şekilde bu gürültülerin birlikte bulunduğu hipotezinden hareketle yukarıda bahsedilen işlemler uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, veri setinde yalnızca beyaz gürültü olmadığı, beyaz+kırpışma gürültü kombinasyonunun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışmada, zaman serisinde bulunan gürültü türlerine karar verildikten sonra, kırpışma gürültüsüne ilişkin dönüşüm matrisi tanımlanarak, varyans bileşenlerinin kestirim yöntemlerinden biri olan iteratif AUE yöntemi uygulanmıştır. Böylece, gürültü kombinasyonuna ilişkin genlikler kestirilmiş ve aynı zamanda veri setinin uygun biçimde ağırlıklandırılması sağlanmıştır.

Çalışmada anlatılan bu veri işleme adımları uygulandığında, kullanılan stokastik yaklaşıma göre global ölçekte incelenen havzalara ait trend değeri kestirimlerinin değiştiği görülmüştür. Burada, daha da önemli olan sonuç ise, trend parametresine ait standart sapma bilgisinin değişmesidir. Zamansal korelasyonlar göz önüne alınarak yapılan analizlerde, standart sapmalar ortalama olarak 3 kat artmaktadır. Bu durum,

standart bir yaklaşımın oldukça iyimser kestirimlere neden olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle, trend değerlerine ait %95 güven düzeyine karşılık gelen güven aralığı kestirimleri korelasyonlu yaklaşım sonuçlarında daha geniş bir alanda bulunmakta, bu da sonuçların daha temkinli yorumlanmasını sağlamaktadır. Burada önemli olan bir diğer çıkarım ise, farklı stokastik yaklaşımlarınn yıllık ve yarıyıllık genlik değerlerini anlamlı olarak etkilememesidir. Ayrıca, korelasyonlu yaklaşım sonuçlarından elde edilen bir diğer parametre olan kırpışma gürültüsü genliğinin, yıllık ve yarıyıllık bileşenler ile orantılı bir şekilde değiştiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuçlar, Türkiye bölgesi için bireysel Mascon hücreleri ve DDK filtreli çözümlere göre karşılaştırıldığında ise, Mascon çözümlerinin DDK2 filtreli çözümler ile uyumlu olduğu sonucu elde edilmiştir. Çözümler arasındaki yaklaşık 30 km'lik çözünürlük farkı göz önüne alınmadığında, iki çözüm arasındaki farklılığın temel olarak sızıntı-kaçak sinyalinden kaynaklandığı görülmektedir. Ayrıca, bireysel Mascon hücreleri ile yapılan uygulamada, incelenen noktalar arasındaki uzaklık, çözümlerin mekansal çözünürlüğünden daha küçük olduğu için, zaman serilerinde mekansal korelasyonların da etkisi bulunur. Bu etkiden kurtulmak için, bireysel Mascon hücresi yani gridler bazında olan çözümler değil, havza bazındaki EWT zaman serilerinin ele alınması gerekir. Buna göre yapılan çalışmada, Batı Karadeniz havzasında Mascon ve DDK2 filtreli çözümlere ait farkların sızıntı-kaçak sinyalinin etkisinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Tükiye'nin iç kesimini temsil eden Sakarya ve Konya havzalarında standart bir stokastik yaklaşıma göre anlamlı olarak elde edilen trend değerleri korelasyonlu yaklaşımda anlamsız çıkmaktadır. Güneydoğu kesimini temsil eden Fırat-Dicle havzasında ise her iki yaklaşım için de anlamlı trend değerleri elde edilmektedir. Ayrıca çözümün filtre boyutunun, kırpışma gürültü genliği ile ters orantılı olarak değiştiği görülmüştür.

Kutup bölgelerinde bulunan yoğun olarak buz kütlesi içeren Grönland ve Antarktika'daki havzalarda ise, sadece stokastik modelin değil, fonksiyonel modelin doğruluğu da incelenmiştir. Bu amaçla, ivme parametresi ile genişletilen modelde, standart yaklaşım sonuçlarına göre Grönland ve Antarktika'daki bazı havzalarda yıllık buz kütle değişiminde ivmelenme hareketinin de etkisi olduğu görülmüştür. Ancak, veri setindeki zamansal korelasyonlar düşünüldüğünde, gerçeğin böyle olmadığı,

ivmelenmenin Batı Antarktika ve Ross buz sahanlığındaki buz kütle değişiminden kaynaklandığı ve bu durumun 2006 yılından sonra etkisini göstermeye başladığı sonucuna ulaşılmıştır. Küresel ısınmanın etkilerini gösterdiği bu bölgelerdeki kütle değişimlerinin incelenmesinde ivmelenme etkisinin de göz önüne alınması önerilmektedir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, bir jeodezik zaman serisinde bulunan zamansal korelasyonların özellikle trend değerlerine ait güven aralıklarını önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Bu nedenle GRACE EWT değişimlerinin analizinde, sonuçların daha doğru bir şekilde elde edilebilmesi için, sinyalde bulunan gürültülerin zaman serisine uygun şekilde modellenmesi gerekir. Özellikle yeni fırlatılan GRACE-FO uydusu ve GRACE uydu veri setlerinin birleştirilmesi ile daha uzun zaman serileri elde edileceğinden, gelecek çalışmalarda spektral anlamda daha yüksek doğruluklu çalışmalar yapılabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] Elsaka, B., (2010). Simulated Satellite Formation Flights for Detecting the Temporal Variations of the Earth's Gravity Field, Doktora Tezi, Universität Bonn Institut für Geodäsie und Geoinformation, Bonn.

[2] Swenson, S. ve Wahr, J., (2003). "Monitoring Changes in Continental Water Storage with GRACE", Space Science Reviews, 108: 345-354.

[3] Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, Ch., Güntner, A., Döll, P., Ramillien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H. ve Wünsch J., (2006). "GRACE Observations of Changes in Continental Water Storage", Global and Planetary Change, 50: 112-126.

[4] Chen, Y., Schaffrin, B. ve Shum, C.K., (2008). ''Continental Water Storage Changes from GRACE Line-of-Sight Range Acceleration Measurements'', VI Hotine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy, 29 Mayıs – 2 Haziran 2008, China, 62-68.

[5] Cazenave, A. ve Chen, J., (2010). "Time-Variable Gravity from Space and Present-Day Mass Redistribution in the Earth System", Earth and Planetary Science Letters, 298: 263-274.

[6] Velicogna, I., ve Wahr, J., (2006). ''Acceleration of Greenland Ice Mass Loss in Spring 2004'', Nature, 443: 329-331.

[7] Ramillien, G., Lombard, A., Cazenave, A., Ivins, E.R., Llubes, M., Remy, F. ve Biancale, R., (2006). ''Interannual Variations of the Mass Balance of the Antarctica and Greenland Ice Sheets from GRACE'', Global and Planetary Change, 53 (3): 198-208.

[8] Slobbe, D.C., Ditmar, P. ve Lindenbergh, R.C., (2009). "Estimating the Rates of Mass Change, Ice Volume Change and Snow Volume Change in Greenland from ICESat and GRACE Data", Geophysical Journal International, 176: 95-106.

[9] Baur, O., Kuhn, M., ve Featherstone, W.E., (2009). ''GRACE-Derived Ice-Mass Variations over Greenland by Accounting for Leakage Effects'', Journal of Geophysical Research, 114 (B6).

[10] Luo, Z.C., Li Q., Zhang, K., ve Wang, H., (2012). ‘’Trend of Mass Change in the Antarctic Ice Sheet Recovered from the GRACE Temporal Gravity Field’, Sci China Earth Sci, 55: 76–82.

[11] Baur, O., (2012). ‘’On the Computation of Mass-Change Trends from GRACE Gravity Field Time-Series’’, Journal of Geodynamics, 61: 120-128.

[12] Velicogna, I. ve Wahr, J., (2013). ‘’Time-Variable Gravity Observations of Ice Sheet Mass Balance: Precision and Limitations of the GRACE Satellite Data’’, Geophysical Research Letter, 40: 3055–3063.

[13] Velicogna, I., Sutterley, T. C., ve van den Broeke, M.R., (2014). ‘’Regional Acceleration in Ice Mass Loss from Greenland and Antarctica Using GRACE Time-Variable Gravity Data’’, Geophysical Research Letter, 41: 8130–8137.

[14] Ran, J., Ditmar, P., Klees, R. ve Farahani, H.H., (2017). ‘’Statistically Optimal Estimation of Greenland Ice Sheet Mass Variations from GRACE Monthly Solutions Using an Improved Mascon Approach’’, Journal of Geodesy, 92 (3): 299-319.

[15] Forsberg, R., Sørensen, L. ve Simonsen, S., (2017). ‘’ Greenland and Antarctica Ice Sheet Mass Changes and Effects on Global Sea Level’’, Surveys in Geophysics, 38 (1): 89-104.

[16] Liu, X., (2008). Global Gravity Field Recovery from Satellite-to-Satellite Tracking Data with the Acceleration Approach, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Netherlands.

[17] Mikhailov, V., Tikhotsky, S., Diament, M., Panet, I. ve Ballu, V., (2004). “Can Tectonic Processes Be Recovered from New Gravity Satellite Data?”, Earth and Planetary Science Letters, 228: 281-297.

[18] Choi, S., Oh, C.-W. ve Luehr, H., (2006). “Tectonic Relation Between Northeastern China and the Korean Peninsula Revealed by Interpretation of GRACE Satellite Gravity Data”, Gondwana Research, 9: 62-67.

[19] Han, S.C., Shum, C.K., Bevis, M., Ji, C. ve Kuo, C.Y., (2006). “Crustal Dilatation Observed by GRACE After the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake”, Science, 313: 658-662.

[20] Müller, J., Neumann-Redlin, M., Jarecki, F., Denker, H. ve Gitlein, O., (2006). “Gravity Changes in Northern Europe as Observed by GRACE”, In: Dynamic Planet, Tregoning, P., Rizos, P. (Eds.), Springer, IAG Symp., 22-26 Ağustos 2005, 130: 523-527.

[21] Rangelova, E. ve Sideris, M.G., (2008). “Contributions of Terrestrial and GRACE Data to the Study of the Secular Geoid Changes in North America”, Journal of Geodynamics, 46: 131-143.

[22] Mémin, A., Rogister, Y., Hinderer, J., Omang, O.C. ve Luck, B., (2011). “Secular Gravity Variation at Svalbard (Norway) from Ground Observations and GRACE Satellite Data”, Geophysical Journal International, 184: 1119-1130.

[23] GFZ, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), https://www.gfz-potsdam.de/en/grace/, 10 Haziran 2018.

[24] Watkins, M.M., Gruber, T. ve Bettadpur, S.V., (2000). Science Data System Development Plan, Revision C, NASA Missions GRACE.

[25] Case, K., Kruizinga, G.L.H. ve Wu, S.-C., (2004). GRACE Level 1B Data Product User Handbook, JPL.

[26] Bettadpur S., (2012). GRACE Product Specification Document, Center for Space Research, University of Texas Austin, Texas.

[27] Joodaki, G. ve Nahavandchi, H., (2011). ''Mass Loss of the Greenland Ice Sheet from GRACE Time-Variable Gravity Measurements'', Studia Geophysica et Geodaetica, 56: 197-214.

[28] Jin, S. ve Zou, F., (2015). ''Re-estimation of Glacier Mass Loss in Greenland from GRACE with Correction of Land-Ocean Leakage Effects'', Global and Planetary Change, 135: 170-178.

[29] Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, S. ve Behr, J., (1997). ''Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities'', Journal of Geophysical Research, 102 (B8): 18,035–18,055.

[30] Langbein, J. ve Johnson, H., (1997). ''Correlated Errors in Geodetic Time Series: Implications for Time-Dependent Deformation'', Journal of Geophysical Research, 102 (B1): 591–603.

[31] Williams, S.D.P., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M. ve Johnson, D.J., (2004). ''Error Analysis of Continuous GPS Position Time Series'', Journal of Geophysical Research, 109 (B3).

[32] Amiri-Simkooei, A.R., Tiberius, C.C.J.M. ve Teunissen, P.J.G., (2007). ''Assessment of Noise in GPS Coordinate Time Series: Methodology and Results'', Journal of Geophysical Research, 112 (B7).

[33] Williams, S., (2003). ''The Effect of Coloured Noise on the Uncertainties of Rates Estimated from Geodetic Time Series'', Journal of Geodesy, 76: 483-494.

[34] Weik, M.H., (2000a). Pink noise, In: Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA.

[35] Weik, M.H., (2000b). Blue noise, In: Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA.

[36] Weik, M.H., (2000c). White noise, In: Computer Science and Communications Dictionary, Springer, Boston, MA.

[37] Johnson, H. ve Wyatt, F.K., (1994). ''Geodetic Network Design for Fault-Mechanics Studies'', Manuscripta Geodaetica, 19 (5), 309-323.

[38] Hosking, J.R.M., (1981).'' Fractional Differencing'', Biometrika 68 (1): 165–176.

[39] Aydın, C., (2007). Marmara Bölgesi Gravite Değişimlerinin Belirlenmesi için Model Tasarımı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[40] Helmert, F.R., (1924). Die Ausgleichungsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate, 3. AUFL., Leipzig/Berlin.

[41] Aydın, C., (2011). ''Estimation of Variance Components Using a Step-by-Step Approach'', Journal of Surveying Engineering, 137 (2): 40-46.

[42] Fotopoulos, G., (2005). ''Calibration of Geoid Error Models via a Combined Adjustment of Ellipsoidal, Orthometric and Gravimetric Geoid Height Data'', Journal of Geodesy, 79: 111-123.

[43] Crocetto, N., Gatti, M. ve Russo, P., (2000). ''Simplified Formulae for the BIQUE Estimation of Variance Components in Disjunctive Observation Groups'', Journal of Geodesy, 74: 447-457.

[44] Lucas, R. ve Dillinger, W.H., (1998). ''MINQUE for Block Diagonal Bordered Systems Such As Those Encountered in VLBI Data Analysis'', Journal of Geodesy, 72: 343-349.

[45] Koch, K.R., (1999). Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag, Berlin.

[46] Rao, C.R. ve Mitra S.K., (1971). Generalized Inverse of Matrices and Its Applications, John Wiley, Newyork.

[47] Rao, C.R., (1971). ''Minimum Variance Quadratic Unbiased Estimation of Variance Components'', Journal of Multivariate Analysis, 1: 445-456.

[48] Rao, C.R., (1972). ''Estimation of Variance and Covariance Components in Linear Models'', Journal of the American Statistical Association, 67 (337): 112-115.

[49] Sjöberg L.E., (1983). ''Unbiased Estimation of Variance-Covariance Components in Condition Adjustment with Unknowns-A MINQUE Approach'', ZfV, 108 (9): 382-387.

[50] Hsu, R., (1999). ''An Alternative Expression for the Variance Factors Using Iterated Almost Unbiased Estimation'', Journal of Geodesy, 73: 173-179.

[51] GFZ, Challenging Minisatellite Payload (CHAMP), https://www.gfz-potsdam.de/en/section/geomagnetism/infrastructure/champ/, 5 Eylül 2018.

[52] Hofmann-Wellenhof, B. ve Moritz, H. (2005). Physical Geodesy, Second Edition, Springer-Verlag Wien.

[53] Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy, 2nd edition, Walter de Gruyter, Berlin.

[54] ESA, Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer (GOCE), https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE, 5 Eylül 2018.

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

[56] Doğanalp, S., (2013). Gravite Alanı Belirleme Amaçlı Yakın Yer Uyduları için Duyarlı Yörünge Belirleme Teknikleri, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

[57] NASA, GRACE Mission, http://www.nasa.gov/mission_pages/Grace/index.html, 19 Kasım 2016.

[58] NASA, GRACE FO, https://gracefo.jpl.nasa.gov/news/136/grace-fo-turns-on-range-finder-sees-mountain-effects/, 5 Ekim 2018.

[59] ESA, GOCE, https://www.esa.int/spaceinimages/Missions/GOCE, 5 Eylül 2018.

[60] Earth Observatory, (GRACE), https://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE, 5 Eylül 2018.

[61] GFZ, GRACE Satellite Tandem, http://www.gfz-potsdam.de, 20 Kasım 2016.

[62] Schmidt R., Flechtner F., Meyer U., Neumayer K. H., Dahle C., König R., ve Kusche J., (2008). "Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites", Surveys in Geophysics, 29: 319-344.

[63] Abart, C., (2005). Assessment of Solution Strategies for GRACE Gravity Field Processing, Yüksek Lisans Tezi, Graz University of Technology, Graz.

[64] Chambers, D.P., (2009). "Calculating Trends from GRACE in the Presence of Large Changes in Continental Ice Storage and Ocean Mass", Geophysical Journal International, 176: 415-419.

[65] Werth, S., Güntner, A., Petrovic, S. ve Schmidt, R., (2009). ''Integration of GRACE Mass Variations into a Global Hydrological Model'', Earth and Planetary Science Letters, 277: 166-173.

[66] Luthcke, S., Arendt, A., Rowlands, D., McCarthy, J., ve Larsen, C., (2008). ''Recent Glacier Mass Changes in the Gulf of Alaska Region from GRACE Mascon Solutions'', Journal of Glaciology, 54 (188): 767-777.

[67] Li, Q., Zhong, B., Luo, Z., ve Yao, C., (2016). ''GRACE-Based Estimates of Water Discharge over the Yellow River Basin'', Geodesy and Geodynamics, 7 (3): 187-193.

[68] Long, D., Pan, Y., Zhou, J., Chen, Y., Hou, X., Hong, Y., Scanlon, B.R. ve Longuevergne, L., (2017). ''Global Analysis of Spatiotemporal Variability in Merged Total Water Storage Changes Using Multiple GRACE Products and Global Hydrological Models'', Remote Sensing of Environment, 192: 198-216.

[69] Rodell, M., Chen, J., Kato, H., Famiglietti, J.S., Nigro, J. Ve Wilson, J.L., (2007). '' Estimating Groundwater Storage Changes in the Mississippi River Basin (USA) Using GRACE'', Hydrogeology Journal, 15 (1): 159-166.

[70] Rummel, R., Balmino, G., Johannessen, J., Visser, P., ve Woodworth, P., (2002).'' Dedicated Gravity Field Missions—Principles and Aims'', Journal of Geodynamics, 33: 3-20.

[71] ESA, GRACE, https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/g/grace, 5 Eylül 2018.

[72] Dunn C., Bertiger W., Bar-Sever Y., Desai S., Haines B., Kuang D., Franklin G., Haris I., Kruizinga G., Meehan T., Nandi S., Nguyen D., Rogstad T., Thomas J., Tien J., Romans L., Watkins M., Wu S., Bettadpur S., ve Kim J., (2003). ''Instrument of GRACE: GPS augments gravity measurements'', GPS World, 14 (2): 16–28.

[73] Simav, M., (2012). Uydu Ve Model Verilerine Dayalı Akdeniz Su Kütlesi Değişimleri, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[74] Yıldırım, Y.Ö., (2015). Grace Uydu Verileri ile Türkiye'nin Uzun Dönemli Su Kütle Değişiminin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

[75] GFZ, View inside of a GRACE satellite, https://www.gfz-potsdam.de/en/grace/the-grace-satellites/, 10 Ekim 2018.

[76] UTCSR, Grace Mission Data Flow, http://www2.csr.utexas.edu/grace/asdp.html, 19 Ekim 2016.

[77] Atayer, E.S. ve Aydın, C., (2012). ''GRACE RL04 ve RL05 Sürümlerinin Hız Alanında Karşılaştırılması'', TUJK-2012-Yerel Jeoidlerin Belirlenmesi, 29-30 Kasım 2012, Afyon.

[78] Wahr, J., Swenson, S. ve Velicogna, I., (2006). "Accuracy of GRACE Mass Estimates", Geophysical Research Letters, 33 (6).

[79] Atayer, E.S. ve Aydın, C., (2012). ''GRACE Çözümlerinde Korelasyon Etkilerinin Yüksek Dereceden Polinomlarla Giderilmesi'', TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi, 1 (1): 35 – 42.

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

[81] Guo, J., Mu, D., Liu, X., Yan, H. Ve Dai, H., (2014). ''Equivalent Water Height Extracted from GRACE Gravity Field Model with Robust Independent Component Analysis'', Acta Geophysica, 62 (4): 953-972.

[82] Farrell, W. E. (1972). ''Deformation of the Earth by Surface Loading'', Reviews of Geophysics, 10 (3): 761-797.

[83] Brockwell, P.J. ve Davis, R.A., (2016). Introduction to Time Series and Forecasting, Third Edition, Springer, Switzerland

[84] Tanır Kayıkçı, E., (2018). Zaman Serileri Analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği, Lisans Ders Notları, Trabzon.

[85] Chatfield, C. (1996). The Analysis of Time Series—An Introduction, 5th Edition, Chapman and Hall CRC, London.

[86] TUİK, Turizm İstatistikleri, https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=74&locale=tr, 5 Eylül 2018.

[87] Cowpertwait S.P. ve Metcalfe, A.V., (2009). Introductory Time Series with R-Use R, Springer, New York.

[88] Jeofizik Mühendisleri, Jeofizik Mühendisliği için Sinyal Ders Notu, http://www.jeofizikmuhendisleri.com/upload/dosyalar/73876042.pdf, 23 Temmuz 2018.

[89] Kiss, A. ve Földváry L., (2018). ''Multi-Annual Mass Variations from GRACE Monthly Solutions – Preliminary Results'' Acta Geodynamica et Geomaterialia, 15: 165–172. ,

[90] Matlab, Periyodogram Analizi, https://www.mathworks.com/examples/signal/mw/signal-ex20286697-periodogram, 19 Mayıs 2018.

[91] Agnew, D., (1992). ''The Time-Domain Behavior of Power-Law Noises'', Geophysical Research Letter, 19: 333–336.

[92] Mandelbrot, B., (1983). The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman and Company, New York.

[93] Mandelbrot, B. ve Van Ness, J., (1968). Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications, SIAM Review, 10: 422–437.

[94] Welch, P.D., (1967). ''The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms'', IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 15 (2): 70–73.

[95] Thomson, D.J., (1982). ''Spectrum Estimation and Harmonic Analysis'', Proceedings of the IEEE, 70 (9): 1055–1096.

[96] Lomb, N.R., (1976). ''Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data'', Astrophysics and Space Science, 39: 447–462.

[97] Scargle, J. D., (1982). ''Studies in Astronomical Time Series Analysis. II - Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data'', The Astrophysical Journal, 263: 835-853.

[98] Matlab, Welch PSD Kestirimi, https://www.mathworks.com/examples/signal/mw/signal-ex45136368-welch-s-method, 9 Haziran 2018.

[99] Alkan, A. Ve Yılmaz A.S., (2007). '' Kapasitör Anahtarlama Sonucu Oluşan Geçici Salınımların Frekans ve Zaman Frekans Domeninde Analizi'', Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi, 14-17 Kasım 2007, Eskişehir.

[100] Hassan, U. ve Anwar, M.S., (2008). Statistical properties of White Noise (Electronics & Signal Processing).

[101] Kurt, A. ve Deniz, R., (2010). ''Deformasyon Hızlarının İyileştirilmesinde Sabit GPS İstasyonları Zaman Serileri Analizinden Yararlanılması'', Harita Dergisi, 144: 20-28.

[102] Gardner, M., (1978). ''Mathematical Games: White and Brown music, Fractal Curves and One-Over- Fluctuations'', Scientific American, 238 (4): 16–32.

[103] Demirel, H., (2009). Dengeleme Hesabı, 3. Baskı, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

[104] ICGEM, http://icgem.gfz-potsdam.de/home, 19 Ekim 2016.

[105] Flechtner, F., Sneeuw, N. ve Schuh W.D., (2014). Observation of the System Earth from Space – CHAMP, GOCE, GRACE and Future Missions, Report 20, Springer-Verlag, Berlin.

[106] NASA, GSFC Mascon Bilgi Sayfası, https://neptune.gsfc.nasa.gov/gngphys/index.php?section=470, 20 Ekim 2016.

[107] NASA, JPL Mascon Bilgi Sayfası, https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/, 20 Ekim 2016.

[108] Jacob T., Wahr, J., Pfeffer, W.T. ve Swenson, S., (2012). ''Recent Contributions of Glaciers and Ice Caps to Sea Level Rise'', Nature, 482: 514-518.

[109] CCAR, JPL Mascon, http://ccar.colorado.edu/grace/jpl.html, 20 Ekim 2016.

[110] CCAR, GSFC Mascon, http://ccar.colorado.edu/grace/gsfc.html, 20 Ekim 2016.

[111] Cheng, M. ve Tapley, B.D., (2004). ''Variations in the Earth's Oblateness During the Past 28 years'', Journal of Geophysical Research, 109 (B9).

[112] Swenson S.C., Chambers, D.P. ve Wahr, J., (2008). ''Estimating Geocenter Variations from a Combination of GRACE and Ocean Model Output'', Journal of Geophysical Research, 113 (B8).

[113] Wiese, D.N., Landerer, F.W. ve Watkins, M.M., (2016). ''Quantifying and Reducing Leakage Errors in the JPL RL05M GRACE Mascon Solution, Water Resources Research, 52: 7490–7502.

[114] CCAR, CCAR bilgi sayfası, http://ccar.colorado.edu/grace/about.html, 16 Ekim 2016.

[115] Luthcke, S.B., Sabaka, T.J., Loomis, B.D., Arent, A.A., McCarthy, J.J. ve Camp, J., (2013). ''Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska Land Ice Evolution from an Iterated GRACE Global Mascon Solution'', Journal of Glaciology, 59 (216): 613-631.

[116] Ray, R., (1999). A Global Ocean Tide Model from Topex/Poseidon Altimetry: GOT99.2, NASA GSFC, Maryland.

[117] Carrere, L., ve Lyard, F., (2003). ''Modeling the Barotropic Response of the Global Ocean to Atmospheric Wind and Pressure Forcing- Comparisons with Observations'', Geophysical Research Letter, 30 (6).

[118] Cheng, M.K., Tapley, B.D. ve Ries, J.C., (2013). ''Deceleration in the Earth's Oblateness, Journal of Geophysical Research, 118: 740-747.

[119] Wahr, J., Nerem, R.S. ve Bettadpur, S.V., (2015). ‘’The Pole Tide and its Effect on GRACE Time-Variable Gravity Measurements: Implications for Estimates of Surface Mass Variations’’, Journal of Geophysical Research, 120: 4597-4615.

[120] NASA, GRACE, https://neptune.gsfc.nasa.gov/gngphys/index.php?section=456, 15 Ekim 2016.

[121] Helm, V., Humbert, A. ve Miller, H. (2014). ‘’Elevation and Elevation Change of Greenland and Antarctica Derived from CryoSat-2’’, The Cryosphere, 8: 1539-1559.

[122] NASA, Grönland, https://svs.gsfc.nasa.gov/30879, 4 Şubat 2018.

[123] NASA, Antarktika, https://svs.gsfc.nasa.gov/30880, 4 Şubat 2018.

EK-A

EN KÜÇÜK KARELER KESTİRİMİ

Dengeleme modeli, fonksiyonel ve stokastik olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu kısımlar,

$$\mathbf{y}+\mathbf{v}=\mathbf{A}\mathbf{x}\ ;\ \mathbf{P}=\sigma_0^2\mathbf{C}^{-1} \tag{A.1}$$

biçiminde tanımlanır [dengeleme kitabı]. Ölçü sayısı *n* ve bilinmeyen sayısı *u* olmak üzere; **y**, *nx*1 boyutlu ölçü vektörü; **v**, *nx*1 boyutlu düzeltme vektörü; **A**, *nxu* boyutlu katsayılar matrisi (rank**A**=*u*); **x**, *ux*1 boyutlu bilinmeyenler vektörü; **P**, *nxn* boyutlu ağırlık matrisi; $\sigma_0{}^2$, birim ağırlıklı ölçünün varyansı ve **C**, *nxn* boyutlu ölçülerin kovaryans matrisidir. Dengeleme hesabı, en küçük karelere göre ağırlıklı düzeltme değerlerinin toplmı en küçük olacak şekilde oluşturulan normal denklemlerin çözümü ile yapılır. Sonuç olarak bilinmeyenler vektörü,

$$\mathbf{x}=(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{y} \tag{A.2}$$

şeklinde kestirilir. Düzeltmeler ve bilinmeyenlerin kovaryans matrisi,

$$\mathbf{v}=\mathbf{A}\mathbf{x}-\mathbf{y} \tag{A.3}$$

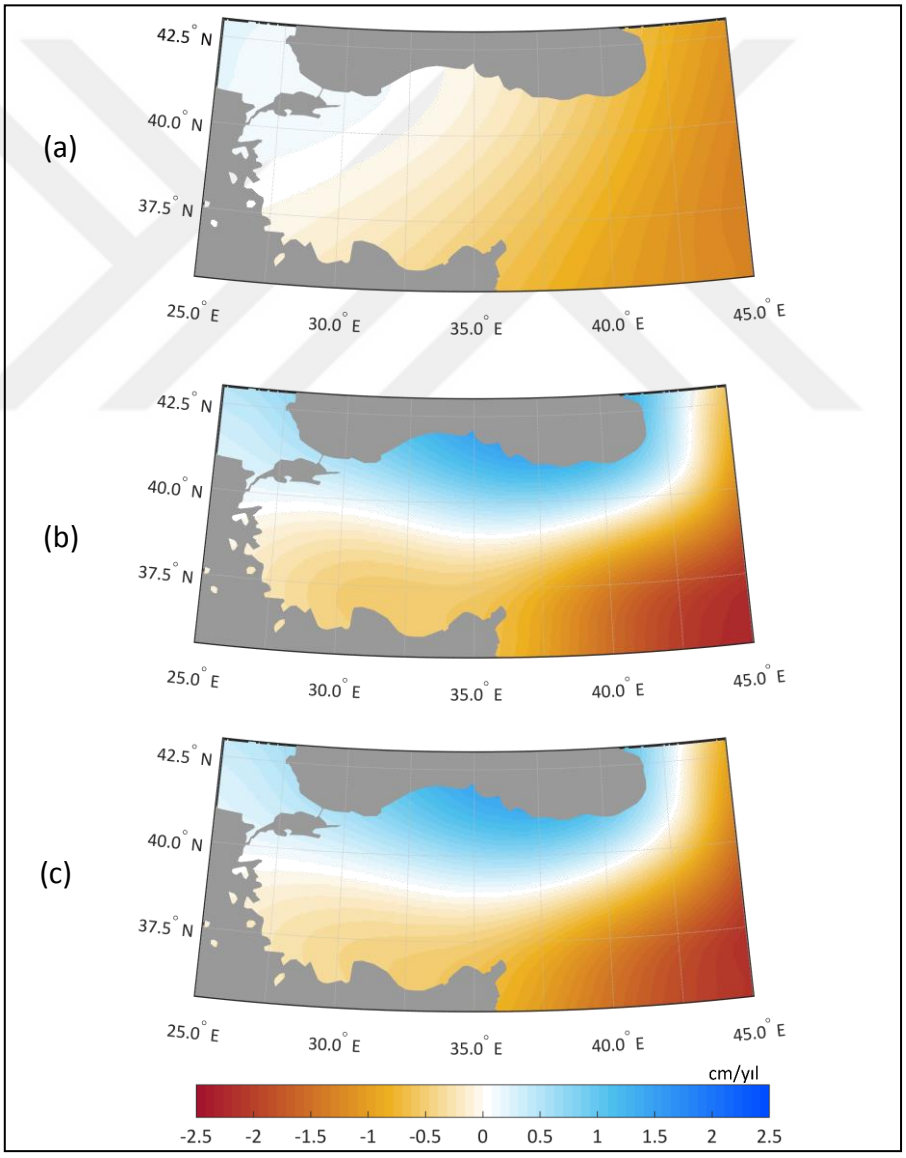
$$\mathbf{C}_{xx}=\frac{\mathbf{v}^T\mathbf{P}\mathbf{v}}{n-u}\left(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\right)^{-1}=s_0{}^2\left(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}\right)^{-1} \tag{A.4}$$

olarak elde edilir. Dengeli ölçülerin kovaryans matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\mathbf{C}_{\bar{y}\bar{y}}=s_0{}^2\left(\mathbf{A}(\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\right) \tag{A.5}$$

EK-B

TÜRKİYE BÖLGESİ İÇİN DDK1, DDK3 ve DDK4 TREND DEĞERLERİ



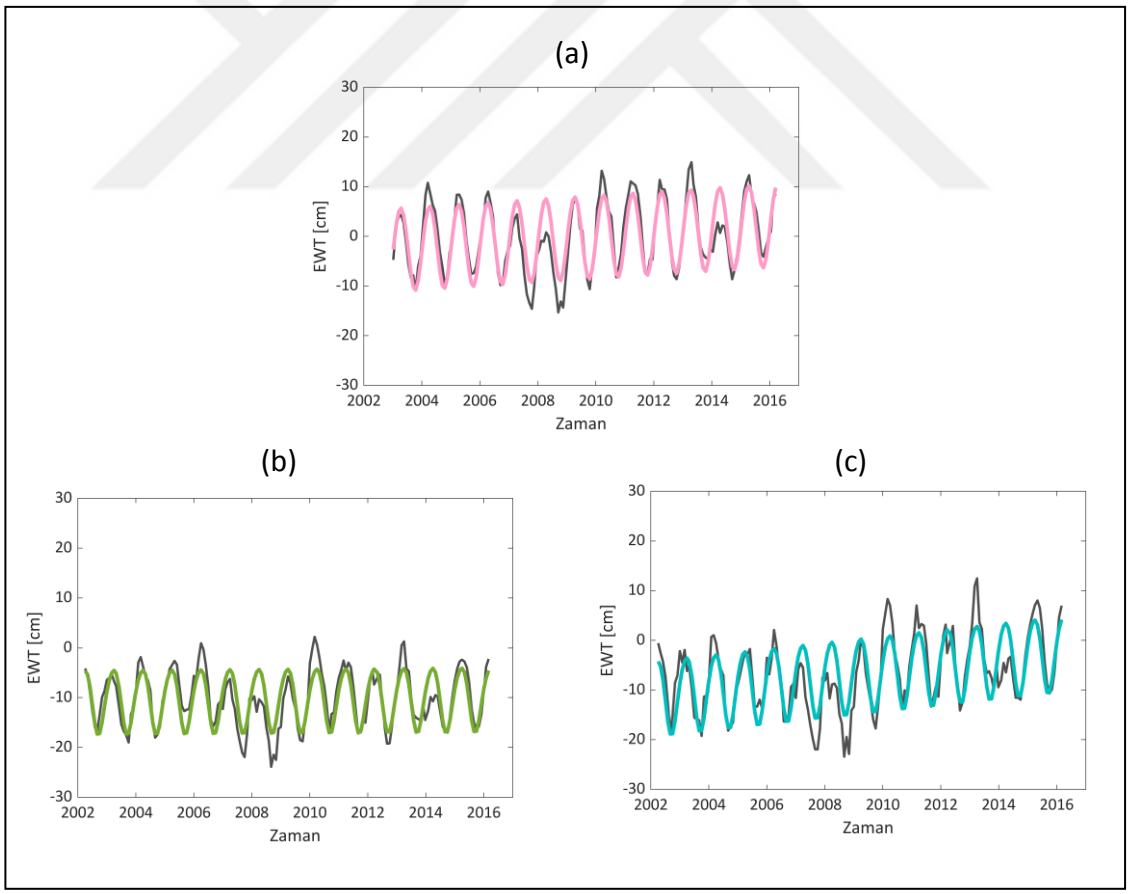
Şekil B. 1 Türkiye Bölgesi için (a) DDK1, (b) DDK3, (c) DDK4 (cm/yıl)

EK-C

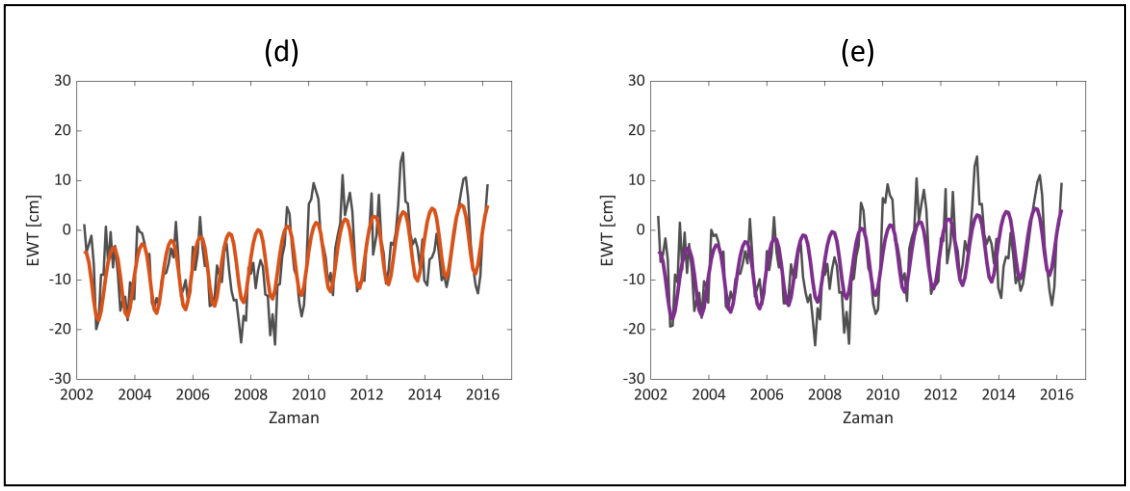
TÜRKİYE BÖLGESİ İÇİN ZAMAN SERİLERİ

C-1 Standart Yaklaşımdan Elde Edilen EWT-Zaman Serileri

Batı Karadeniz Havzası

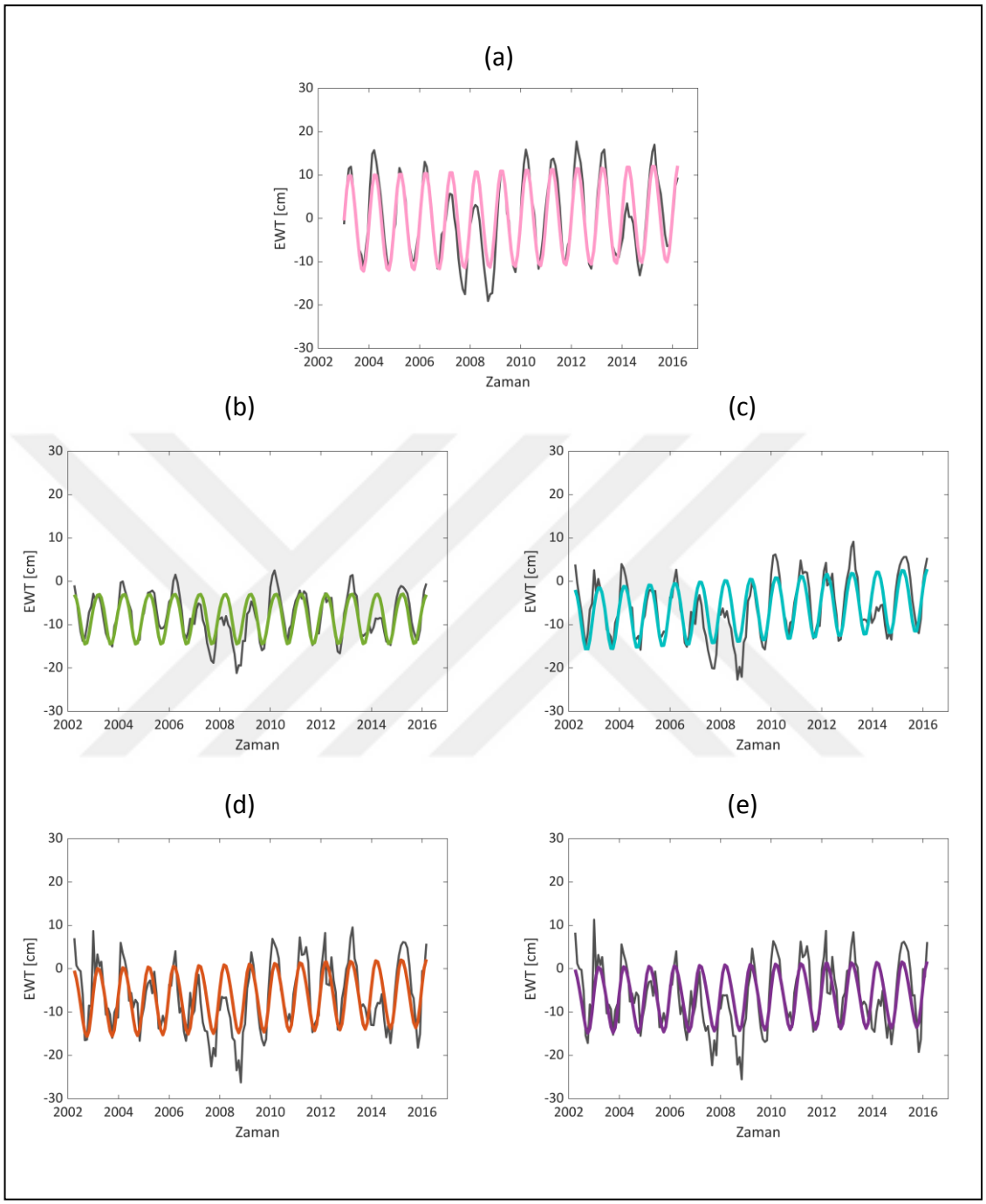


Şekil C. 1 Batı Karadeniz havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri



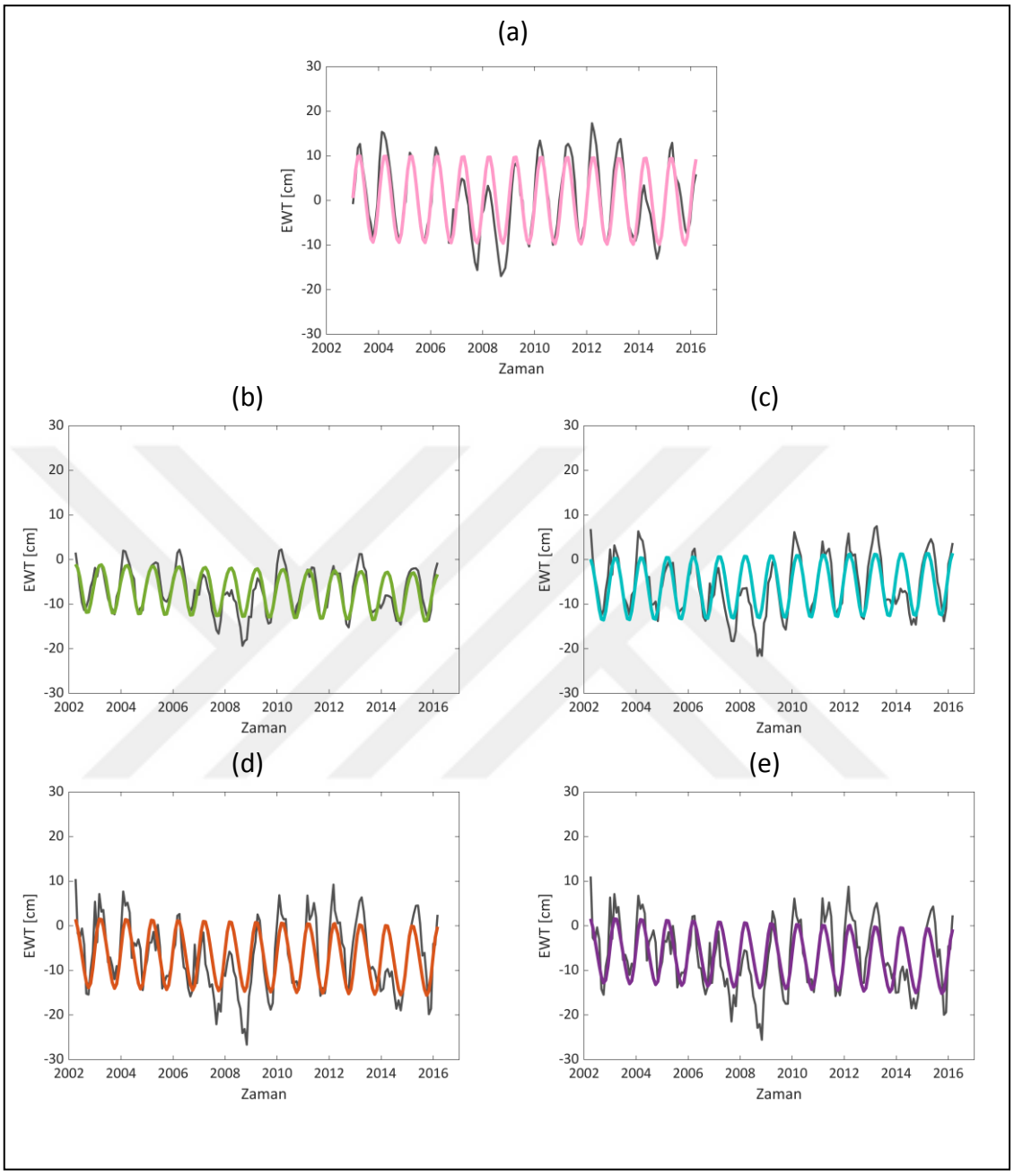
Şekil C. 1 Batı Karadeniz havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri (devam)

Sakarya Havzası



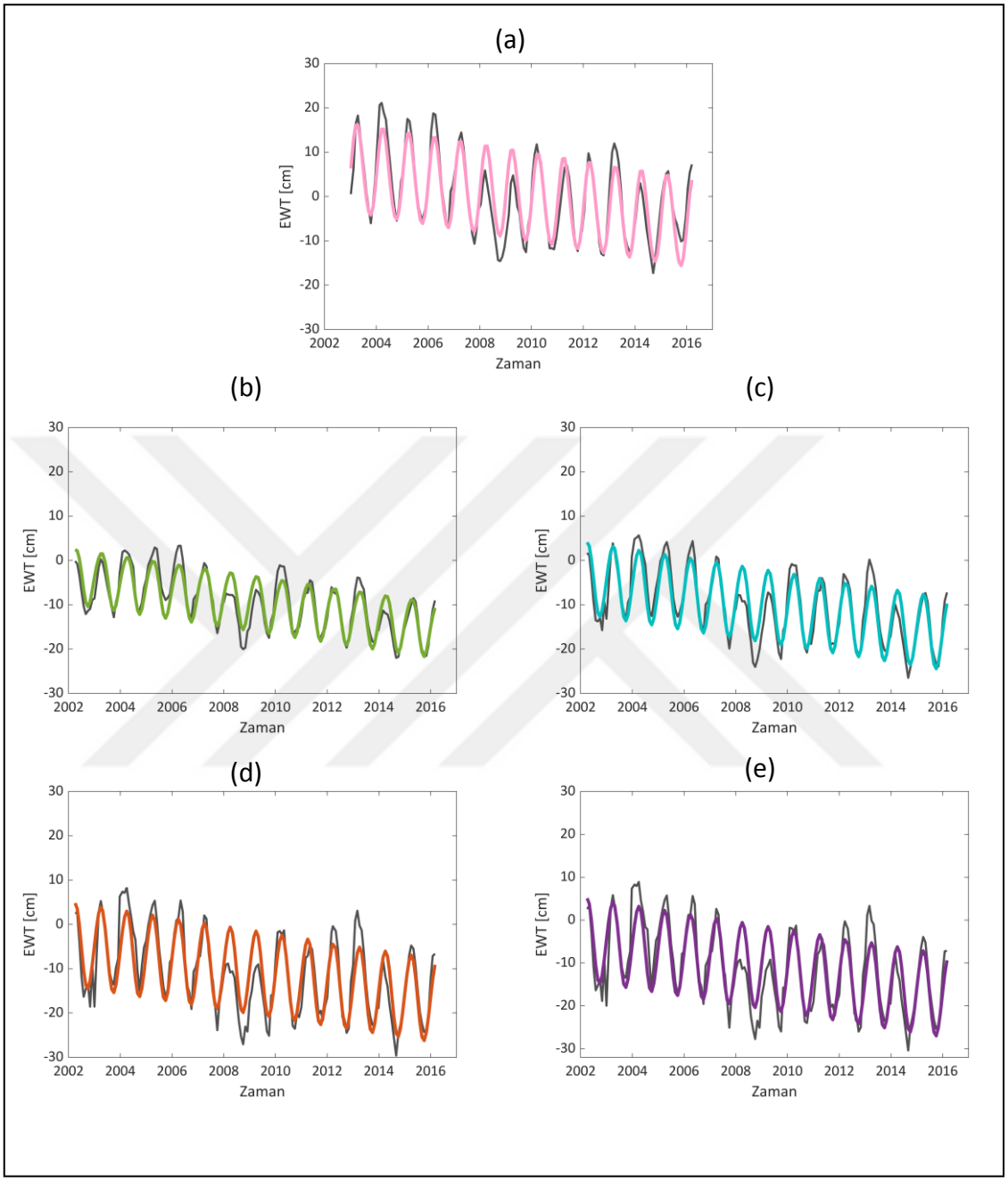
Şekil C. 2 Sakarya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

Konya Havzası



Şekil C. 3 Konya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

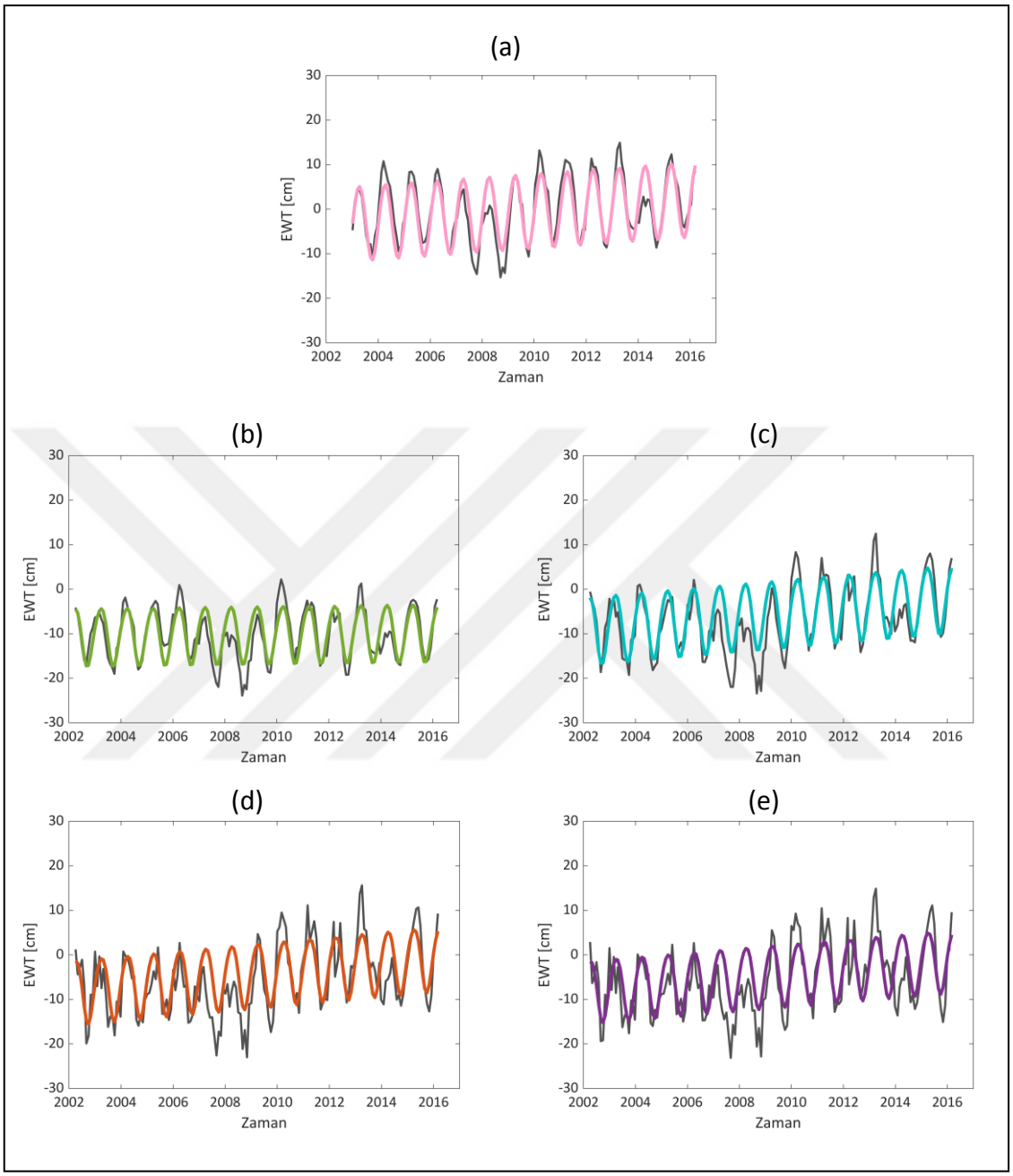
Fırat Dicle Havzası



Şekil C. 4 Fırat Dicle havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri standart yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

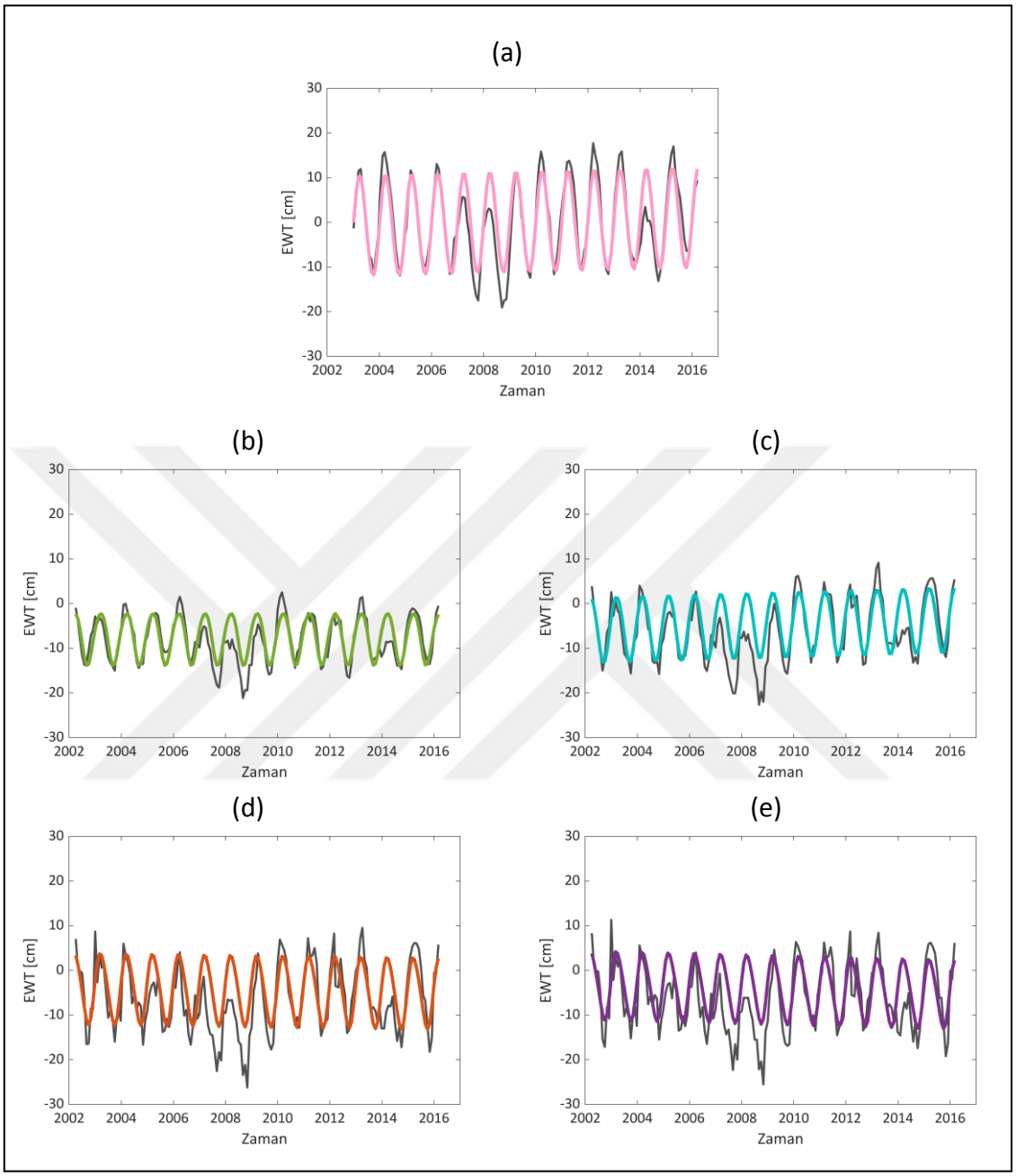
C-2 Korelasyonlu Yaklaşımdan Elde Edilen EWT-Zaman Serileri

Batı Karadeniz Havzası



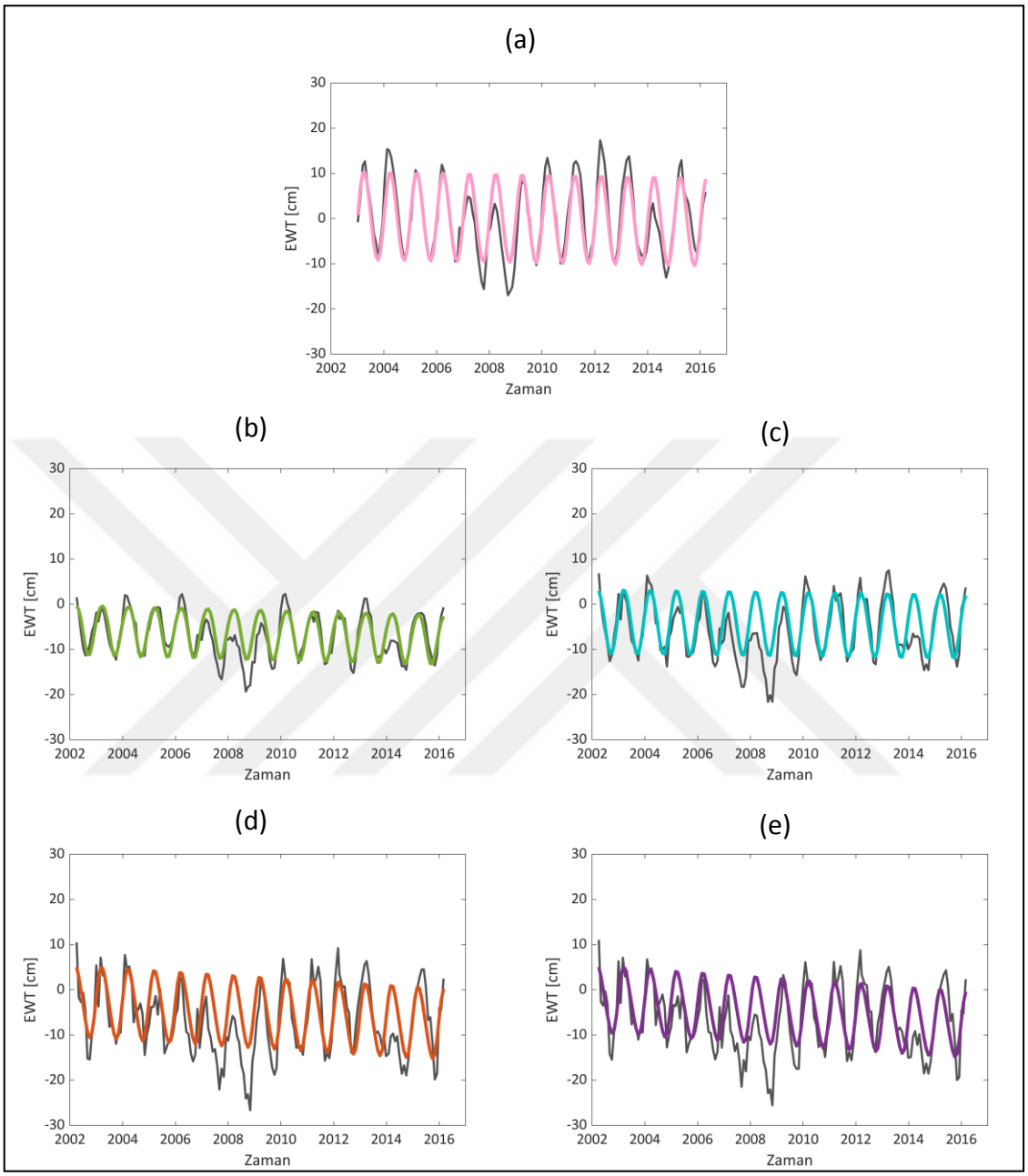
Şekil C. 5 Batı Karadeniz havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

Sakarya Havzası

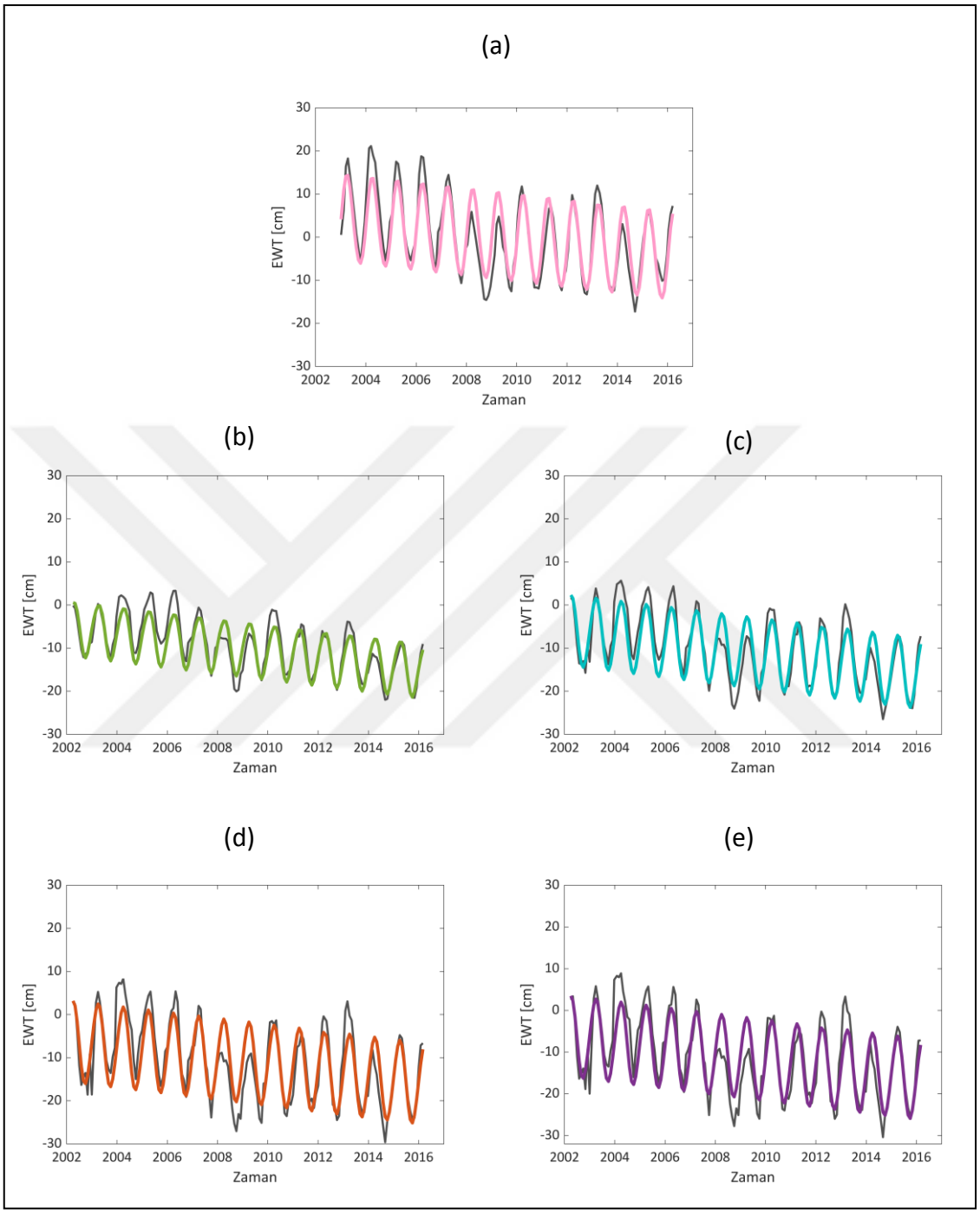


Şekil C. 6 Sakarya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

Konya Havzası



Şekil C. 7 Konya havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri



Şekil C. 8 Fırat Dicle havzası için (a) Mascon, (b) DDK1, (c) DDK2, (d) DDK3 ve (e) DDK4 çözümleri korelasyonlu yaklaşımdan elde edilen EWT-zaman serisi grafikleri

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özge GÜNEŞ

Doğum Tarihi ve Yeri : 14.09.1994, İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce, Almanca

E-posta : ozgeg@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Harita Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lise	Fen	ECA Elginkan Anadolu Lisesi	2012

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Güneş, Ö. ve Aydın, C., (2018). "Comparison of GRACE Mascon and DDK Derived Hydrological Trends in Turkey", EGU General Assembly 2018, 8-13 Nisan 2018, Viyana.

2. Güneş, Ö. ve Aydın,C., (2018). "Grönland Ve Antarktika'daki Buz Kütleleri Daha Hızlı Mı Eriyor? (2003-2016) GRACE-Mascon Çözümleriyle Bir İrdeleme", Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği Bilimsel Kongresi, 30 Mayıs - 2 Haziran 2018, İzmir, 211-214.

ÖDÜLLERİ

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü 2015-2016 1. Öğretim Mezunları Dönem Birinciliği