T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU KÜTLESİ DEĞİŞİMİNİN UYDU GRAVİTE VERİLERİYLE ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Özge GÜNEŞ

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU KÜTLESİ DEĞİŞİMİNİN UYDU GRAVİTE VERİLERİYLE ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Özge GÜNEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 10.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Cüneyt AYDIN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Uğur DOĞAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

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

Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Cüneyt AYDIN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Su Kütlesi Değişiminin Uydu Gravite Verileriyle Analizi ve Modellenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Özge GÜNEŞ

Bu çalışma, “TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu (No: 1059B142100487)” ve “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FDK-2021-4341 numaralı projesi” ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince bilgi ve deneyimlerini paylaşan, tez çalışmamın planlanması, araştırılması ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Cüneyt AYDIN'a en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamın izlenmesi sürecinde bilimsel desteklerini esirgemeyen, bilgi ve birikimlerinden faydalandığım saygıdeğer tez izleme jüri üyeleri Prof. Dr. Uğur DOĞAN ve Prof. Dr. Orhan AKYILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Military University of Technology'de araştırma yapmak üzere sağladıkları 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK), yurtdışı araştırma süresi boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Janusz BOGUSZ, Doç. Dr. Anna KLOS ve Dr. Artur LENCZUK'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, FDK-2021-4341 numaralı YTU-BAP Doktora Tez Projesi kapsamında bu tez çalışmasını destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nin tüzel kişiliğine teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince desteklerini esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Deniz ÖZ DEMİR, Dr. Öğretim Üyesi Hüseyin DUMAN, Dr. Öğretim Üyesi Zehra ÇETİN, Dr. Süreyya Özgür UYGUR, Dr. Güldane OKU TOPAL ve ismini sayamadığım Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği ailesi akademik ve idari kadrolarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla,

Özge GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR v
SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xv
ÖZET xvi
ABSTRACT xviii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Hipotez 8
2 ZAMANA BAĞLI KÜTLE DEĞİŞİMİNİN GRACE VE GRACE-FO UYDU SİSTEMLERİ İLE İZLENMESİ 10
2.1 GRACE ve GRACE-FO Uydu Sistemleri 10
2.2 GRACE ve GRACE-FO Veri Setleri 11
2.3 Toplam Su Bütçesi Değişimi 13
2.3.1 Mascon Çözümleri 14
3 TOPLAM SU BÜTÇESİ DEĞİŞİMİ ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ 16
3.1 Harmonik Regresyon Yaklaşımı 16
3.2 Renkli Gürültü Karakterine Genel Bakış 19
3.3 Stokastik Model Tasarımı 23
3.3.1 Gürültünün Modellemesinde Varyans Bileşenlerinin Kestirimi Yöntemi 23
3.3.2 Gürültünün Modellemesinde Otoregresif Modellerin Kullanımı 24
3.3.3 Türkiye Bölgesinde Hidrolojik Trendin Anlamlılığı 26
3.3.4 Nehir Havzalarında Hidrolojik Trendin Anlamlılığı 33
3.4 Fonksiyonel Model Tasarımı 40
3.4.1 Toplam Su Bütçesi Zaman Serilerinde Doğrusal Olmayan Değişimlerin Wavelet Analizi 41
3.4.2 Toplam Su Bütçesi Zaman Serilerinde Doğrusal Olmayan Değişimlerin Polinomal Fonksiyonlarla Modellenmesi 45
3.4.3 Polinomal Fonksiyonel Modelin Katkılarının İncelenmesi 48
3.4.4 Polinomal Fonksiyonel Modelin Parametrik Olmayan Bir Yaklaşımla Karşılaştırılması 57

3.4.5 Polinomal Fonksiyonel Modelin İklim İndeksleriyle Değerlendirilmesi……... 59
3.4.6 Polinomal Fonksiyonel Modelden Elde Edilen Düzeltmelerin Gürültü Karakterinin İncelenmesi…….. 64
3.5 Jeodezik Zaman Serilerinde Gözlenen Uzun Dönemli Ek Periyodik Sinyalin Araştırılması 70
4 STOKASTİK VE FONKSİYONEL MODELİ GELİŞTİRİLMİŞ HARMONİK REGRESYON YAKLAŞIMI İLE TOPLAM SU BÜTÇESİNİN ANALİZİ 80
4.1 ARTS Programının Geliştirilmesi..... 80
4.2 Nehir Havzalarında Analizlerin Gerçekleştirilmesi..... 83
5 SONUÇ 92
KAYNAKÇA 96
A IAUE YÖNTEMİ İLE VARYANS BİLEŞENLERİNİN KESTİRİMİ 111
B OTOREGRESİF MODELLER İÇİN AICc DEĞERLERİ 112
C WAVELET ANALİZİ 114
D NEHİR HAVZALARINDA MODEL-4 SONUÇLARINA GÖRE ZAMAN SERİLERİ 116
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 119

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal frekans
$\mathbf{Q}$	Ağırlık katsayıları matrisi
ϕ	AR modelin katsayısı
p, d, q	ARIMA modelde dereceler
$\boldsymbol{\beta}$	Bilinmeyenler vektörü
$\mathbf{C}_{\beta\beta}$	Bilinmeyenlerin kovaryans matris
σ^2	Birim ağırlıklı ölçünün varyansı
δ	Değişim miktarı
Ω	Düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamı
c_3, s_3	Ek periyodik sinyal sinüslü ve kosinüslü terimlerin genlikleri
T_3	Ek sinyalin periyodu
Δe	Eşdeğer su kütlesi değişimi
f	Frekans
B	Geri kaydırma operatörü
$\mathbf{y}$	Gözlem vektörü
f_0, P_0	Güç spektrumunda normalizasyon sabitleri
$\mathbf{e}$	Hata vektörü
$\mathbf{P}_{\bar{X}}^{\perp}$	İzdüşüm matrisi
λ	Jeodezik boylam
$\mathbf{X}$	Katsayılar matrisi
τ	Kaydırma parametresi
$\mathbf{C}$	Kovaryans matris
ϑ	Kutup uzaklığı
l	Küresel harmonik açınımın derecesi
m	Küresel harmonik açınımın sırası
K_l	l derecesine bağlı Love yükleme sayısı
γ	MA modelin katsayısı
l_{max}	Maksimum harmonik katsayı derecesi
ξ	Mekânsal çözünürlük
ΔC_{lm}, ΔS_{lm}	Modeller arasındaki küre harmonik katsayı değişimleri
ψ	Mother wavelet

f_c	Ortalama frekans
r	Ölçeklendirme katsayısı
$\mathbf{C}_{yy}$	Ölçülerin kovaryans matrisi
n	Ölçü/gözlem sayısı
T'	Örnekleme aralığı
T	Periyot
p	Polinom derecesi
f_r	Pseudo-frekans
a_E	Referans elipsoidin büyük yarı ekseni
R	R-kare değeri
f	Serbestlik derecesi
a	Sıfır eki
κ	Spektral indeks
ρ_w	Suyun yoğunluğu
$P_{lm}(\cos\vartheta)$	Tam normalleştirilmiş Legendre fonksiyonu
T	Test değeri
b	Trend
$C_x(r,\tau)$	Wavelet katsayıları
*	Wavelet dönüşümünün karmaşık eşleniği
$\tilde{\mathbf{C}}_{yy}$	Yaklaşık kovaryans matris
ρ_{ave}	Yeryuvarı ortalama yoğunluğu
c_1, s_1	Yıllık sinüslü ve kosinüslü terimlerin genlikleri
c_2, s_2	Yarıyıllık sinüslü ve kosinüslü terimlerin genlikleri
$F_{fo\text{-}fek,fek,0.95}$	%5 yanılma olasılığına karşılık gelen F-dağılımının güven sınırı
$t_{f,0.975}$	%5 yanılma olasılığına karşılık gelen t-dağılımının güven sınırı
$\Delta\sigma$	Yüzey kütle yoğunluğu değişimi
$\Delta\breve{C}_{lm}$, $\Delta\breve{S}_{lm}$	Yüzey yoğunluk katsayı değişimleri

KISALTMA LİSTESİ

ACC	Accelerometer
AIC	Akaike Information Criteria
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
ACF	AutoCorrelation Function
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
ARMA	Autoregressive Moving Average
BIC	Bayesian Information Criteria
CSR	Center for Space Research
CRU TS	Climatic Research Unit Time Series
AICc	Corrected AIC
DDK	Decorrelation Filter
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
ETS	Error-Trend-Seasonal
GFZ	Geoforschungs Zentrum Potsdam
GIA	Glacial Isostatic Adjustment
GLDAS	Global Land Data Assimilation System
GMSL	Global Mean Sea Level
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSFC	Goddard Space Flight Center
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	GRACE Follow-On
IAUE	Iterative Almost Unbiased Estimation
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LRI	Laser Ranging Interferometry
LSE	Least Square Estimation
L0	Level-0
L1	Level-1
L2	Level-2
L3	Level-3
L4	Level-4
Mascon	Mass concentration

NAO	North Atlantic Oscillation
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PACF	Partial AutoCorrelation Function
PDO	Pacific Decadal Oscillation
PGR	Post-Glacial Rebound
PSD	Power Spectral Density
RMS	Root Mean Square
SLR	Satellite Laser Ranging
SST-hI	Satellite to Satellite Tracking in the High-Low Mode
SST-II	Satellite to Satellite Tracking-Low to Low
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average
SDS	Science Data System
STL	Seasonal Trend Decomposition using LOESS
SSA	Singular Spectrum Analysis
SPI	Standardized Precipitation Index
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SCA	Star Camera Assembly

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Standart harmonik regresyon modelinden elde edilen doğrusal trend ve yıllık genlik değerleri 18

Şekil 3.2 2002-2022 yılları arasında mascon toplam su bütçesi zaman serisinin standart harmonik yaklaşım ile modellenmesinden elde edilen düzeltmelerin spektral indeksleri (κ) (Siyah çizgiler nehirleri göstermektedir) 22

Şekil 3.3 (a), (c) ve (e) doğrusal trendi, (b), (d) ve (f) ise sırasıyla sadece beyaz gürültü, beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi modeli ve ARMA(1,1) modellerinden elde edilen doğrusal trendin standart hatası 27

Şekil 3.4 Rasgele seçilen bir mascon (enlem: 40,8^o ; boylam: 36,2^o) zaman serisinin sadece beyaz gürültü (sol panel: a, c, e) ve ARMA(1,1) (sağ panel: b, d, f) modellerinden elde edilen düzeltmeleri için otokorelasyon grafikleri (a, b), histogramı (c, d) ve QQ çizimleri (e, f) 30

Şekil 3.5 Türkiye bölgesindeki mascon zaman serilerinin analizinden elde edilen düzeltmelerin ve ARMA(1,1) modelinin (ortalama katsayılar ϕ=0,74 ve γ=0,15) spektral güç yoğunluk grafikleri 31

Şekil 3.6 (a) Sadece beyaz gürültü, (b) beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi ve (c) ARMA(1,1) modellerinden elde edilen trendin anlamlılığı (gri mascon blokları anlamsız olarak belirlenen trendi göstermektedir) 32

Şekil 3.7 Nehir havzalarının trend değerleri 34

Şekil 3.8 Dünya'nın 24 büyük nehir havzasının zaman serilerinin analizinden elde edilen düzeltmelerin ve ARMA(1,1) modelinin (ortalama katsayılar ϕ=0,78 ve γ=0,21) spektral güç yoğunluk grafikleri 36

Şekil 3.9 Standart yaklaşım sonuçlarının ARMA(1,1) modelinden elde edilen test istatistiği değerlerine dönüştürülmesi (Sarı daireler sırasıyla Parana, Lake-Chad ve Murray-Darling'deki trendin anlamlılığına karşılık gelmektedir) 39

Şekil 3.10 Tigris-Euphrates havzasında (a) toplam su bütçesi değişimi zaman serisi ve (b) zaman serisinin farklı periyotları için doğrusal trend 41

Şekil 3.11 Wavelet analizi ile elde edilen uzun dönemli (>1,1 yıl), mevsimsel (4 ay – 1,4 yıl) ve (c) kısa dönemli (<5 ay) sinyallerin varyansı 42

Şekil 3.12 Wavelet analizi ile belirlenen 1,1 yıldan uzun dönemli sinyal ile standart fonksiyonel modelden elde edilen doğrusal trend arasındaki farkların standart sapması 44

Şekil 3.13 Polinom fonksiyonunun derecesi (Yıldızlar ve kareler, Şekil 3.15 (a-d) ve Şekil 3.21 (a-f)'de verilen zaman serilerinin konumunu göstermektedir) 47

Şekil 3.14 Polinomal fonksiyonel modelden elde edilen yıllık ve yarıyıllık genlikler 48

Şekil 3.15 (a) Antarktika Yarımadası, (b) Güney Amerika, (c) Tigris-Euphrates havzası ve (d) Ny-Alesund bölgelerinde yer alan mascon toplam su bütçesi zaman serileri (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)..... 49

Şekil 3.16 Standart fonksiyonel modelden elde edilen doğrusal trend ile polinomal trend arasındaki farkların standart sapması..... 51

Şekil 3.17 Sumatra-Andaman (a ve b) ve Tohoku-Oki (c ve d) deprem bölgelerinde seçilen toplam su bütçesi zaman serileri (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)..... 54

Şekil 3.18 (a) GSFC, (b) CSR ve (c) JPL tarafından sağlanan Sao Francisco havzasına ait mascon zaman serilerinde polinomal fonksiyonel model 56

Şekil 3.19 Toplam su bütçesi zaman serilerinde polinomal fonksiyon ile wavelet analizinin uzun dönemli sinyalinin karşılaştırılması (a: Antarktika Yarımadası, b :Güney Amerika, c: Tigris-Euphrates havzası ve d: Ny-Alesund) (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)..... 57

Şekil 3.20 Polinomal trend ile wavelet analizinden elde edilen uzun dönemli sinyal arasındaki farkların standart sapmaları 58

Şekil 3.21 Polinomal fonksiyonel modelin SPEI iklim indeksleri ile karşılaştırılması..... 62

Şekil 3.22 Polinomal fonksiyonel modelin düzeltmelerin RMS değerindeki iyileşme oranı..... 65

Şekil 3.23 Standart ve polinomal fonksiyonel modelin beyaz gürültü + renkli gürültü stokastik modeliyle analizinden elde edilen spektral indeksler 66

Şekil 3.24 Kısa dönemli hidrolojik olaylar olarak sınıflandırılan EM-DAT veri tabanındaki sel ve kuraklık oluşumları (Dairelerin büyüklüğü meydana gelen olayın süresini, renkler ise sebeplerini göstermektedir)..... 69

Şekil 3.25 Uzun dönemli ek periyodik sinyalin periyodu..... 73

Şekil 3.26 Uzun dönemli ek periyodik sinyalin genliği (Beyaz taralı alanlar genliğin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir) 74

Şekil 3.27 Standart ve ek sinyal fonksiyonel modellerinden kestirilen trendin farkı (Gri taralı alanlar ek periyodik sinyalin genliğinin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir)..... 76

Şekil 3.28 Ek sinyalin düzeltmelerin RMS değerlerine katkısı (Gri taralı alanlar ek periyodik sinyalin genliğinin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir) 77

Şekil 3.29 Nehir havzalarında ek sinyalin periyodu 79

Şekil 4.1 ARTS programının arayüzü..... 82

Şekil 4.2 Mississippi nehir havzasında üçüncü dereceden polinomal trend ve belirsizliği (a) ve (c) sadece beyaz gürültü modeli; (b) ve (d) ARMA(1,1) modeli..... 87

Şekil 4.3 Mississippi nehir havzasında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı 88

Şekil 4.4 Nehir havzalarında Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yıllık genlikler 89

Şekil 4.5 Nehir havzalarında Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yarıyıllık genliklerin anlamlılığı 90

Şekil D.1 (a) Mackenzie, (b) Nelson, (c) St.Lawrance, (d) Mississippi, (e) Amazon, (f) Parana, (g) Danube ve (h) Volga nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı 116

Şekil D.2 (a) Ob, (b) Yenisei, (c) Lena, (d) Amur, (e) Yellow, (f) Yangtze, (g) Ganges-Brahmaputra ve (h) Indus nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı..... 117

Şekil D.3 (a) Tigris-Euphrates, (b) Niger, (c) Lake Chad, (d) Nile, (e) Congo, (f) Zambezi, (g) Orange ve (h) Murray-Darling nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı 118

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Nehir havzalarında trend ve 1σ standart hatası (cm/yıl) (Gölgeli satırlar anlamsız trend oranlarını gösterirken; koyu yazılan değerler en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir. Kısaltmalar: Ganges-Brahmaputra için GB; Tigris-Euphrates için TE; Murray-Darling için MD) 35

Tablo 3.2 SPEI değerlerinin sınıflandırılması (McKee vd., 1993'ten alınmıştır) 60

Tablo 3.3 Nehir havzalarında belirlenen ek sinyalin periyodu ve genliği (Genliği 2 cm'den küçük havzalara ait satırlar gri ile gölgelenmiştir) 78

Tablo 4.1 Farklı stokastik ve fonksiyonel modellerin bilgi kriterleri (kırmızı değerler en küçük bilgi kriterini ifade etmektedir) 84

Tablo 4.2 Model-2 ve Model-4 fonksiyonel modellerinde farklı stokastik modeller kullanılarak ek periyodik sinyal genliğinin anlamlılığı 91

Tablo B.1 Türkiye bölgesindeki 90 mascon zaman serisi için modellerin bilgi kriterleri (Koyu yazılan değerler en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir.) 112

Tablo B.2 Nehir havzalarında AICc değerleri (Koyu yazılan değerler en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir. Kısaltmalar: Ganges-Brahmaputra için GB; Tigris-Euphrates için TE; Murray-Darling için MD) 113

ÖZET

Su Kütlesi Değişiminin Uydu Gravite Verileriyle Analizi ve Modellenmesi

Özge GÜNEŞ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Hidrosferde meydana gelen zamana bağlı toplam su bütçesi değişimleri, 2002'den beri GRACE ve 2018'den bu yana GRACE-FO uydu sistemleri tarafından gözlemlenmekte ve hidrojeodezi alanında ayrıntılı bir şekilde incelenmektedir. Bu değişimler, harmonik regresyon yaklaşımıyla doğrusal trend ve mevsimsel sinyalleri içeren fonksiyonel model ve sadece beyaz gürültünün olduğu stokastik modelle tanımlanmaktadır. Ancak, zamansal korelasyonlar renkli gürültüyü oluşturmakta ve ihmal edildiğinde, model parametrelerinin standart hataları küçük çıkmaktadır. Sonuç olarak, sinyal-gürültü oranı büyüdüğü için, parametrelerin, örneğin trendin, anlamlılığı değişmektedir. Bu kapsamda GSFC tarafından sağlanan aylık GRACE mascon çözümleri kullanılarak gürültü karakteri analizi yapılmıştır. Mascon çözümlerindeki spektral indeksin -1'e yakın olması kırpışma gürültüsünün baskın olduğunu göstermektedir. Gürültü karakteri, yoğun hidrolojik olayların yaşandığı bölgelerde Brownian spektruma yaklaşırken, daha az su bütçesi değişimi olan bölgelerde beyaz gürültü eğilimi göstermektedir. Bu gözlemler modellenmemiş hidrolojik olayların renkli gürültüye katkıda bulunduğunu işaret etmektedir. Gürültüyü modellemek için varyans bileşenlerinin kestirimi ve

otoregresif süreçler kullanılmıştır. Türkiye'de ve nehir havzalarında yapılan analizler, bu bölgelerdeki gürültüyü tanımlamak için ARMA(1,1) modelinin en uygun model olduğunu göstermektedir. Renkli gürültü modellerinden doğrusal trendin standart hatası yaklaşık üç kat daha büyük elde edilmekte ve trendin anlamlılığını etkilemektedir. Meydana gelen hidrolojik değişimler, doğrusal trendden önemli ölçüde farklı uzun dönemli değişimlere de yol açmaktadır. Modellenmeyen bu değişimler, stokastik yapıya taşınarak gürültü karakterini de etkilemektedir. Bu nedenle doğru stokastik modelin kurulmasının yanı sıra fonksiyonel modelin de geliştirilmesi gerekmektedir. Doğrusal olmayan trendin modellenmesi için üçüncü, dördüncü ve beşinci dereceden polinomal fonksiyonlar ile tanımlanması önerilmiştir. Polinomal fonksiyonların sonuçlarının wavelet analizi sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca, yaklaşık 6 yıl süren ek periyodik sinyal için bir algoritma geliştirilmiş ve Fisher model testi ile periyodu belirlenmiştir. Sonuç olarak, zaman serilerinin trendin polinomal fonksiyonlarla tanımlandığı ve ek sinyalin diğer mevsimsel sinyallerle birlikte modele dahil edildiği geliştirilmiş fonksiyonel model ile ARMA(1,1) gürültü modelinin stokastik kısma karşılık geldiği modelin, zaman serisini en iyi şekilde temsil eden model olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GRACE, Hidrojeodezi, Toplam su bütçesi, Renkli gürültü, Polinomal fonksiyon.

ABSTRACT

Analysis and Modelling of Water Mass Variation by Using Satellite Gravity Data

Özge GÜNEŞ

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN

Since 2002, temporal variations in total water storage in the hydrosphere have been monitored by GRACE and GRACE-FO since 2018, extensively studied in hydrogeodesy. These changes are modeled using a functional model with linear trends and seasonal signals via harmonic regression, alongside a stochastic model featuring only white noise. However, temporal correlations introduce colored noise, leading to underestimated standard errors in model parameters when neglecting. Consequently, the signal-to-noise ratio incorrectly larger and misinterprets significance of parameters as trend. Noise characteristics were analyzed using monthly GRACE mascon solutions from GSFC. The average spectral index of -1 for mascon solutions indicates predominant flicker noise. Notably, noise tends towards more Brownian characteristics in regions with intense hydrological events, contrasting with areas experiencing less water change, where it exhibits more white noise traits compared to other terrestrial regions. These observations suggest unmodeled hydrological events contribute to colored noise. Variance component estimation and autoregressive processes were used for time series modeling. Analyses in Türkiye and major river basins suggest the ARMA(1,1) model is sufficient for describes noise in these areas. The standard error of the linear trend from colored noise models is approximately three times larger, significantly impacting its statistical significance. Hydrological changes such as ongoing climate

changes, sudden, unpredictable floods, or prolonged droughts lead to long-term variations differ from the linear trend, influencing noise characteristics in the stochastic model. Thus, employing an accurate stochastic model and augmenting the functional model are crucial. Nonlinear trends were proposed using third, fourth, and fifth-degree polynomial functions, consistent with wavelet analysis findings. Additionally, an algorithm was developed to identify the period of an approximate 6-year periodic signal through Fisher model testing. In conclusion, the functional model, augmented with polynomial trends and additional signals alongside seasonal variations, and modeled with the ARMA(1,1) noise model, effectively represents the time series.

Keywords: GRACE, Hydrogeodesy, Total water storage, Colored noise, Polynomial Function.

1
GİRİŞ

Günümüzde, değişen iklim koşulları ve küresel ısınmanın etkilerinin artmasıyla havzalardaki su kütlesi değişimi, buzul kütlelerinin erimesi, deniz seviyesinde meydana gelen değişimler, kuraklık gibi sorunlar daha da önemli hale gelmiştir. Bu gibi konuları ele alan çalışmalar hem global hem de bölgesel ölçekte toplam su bütçesi değişiminin modellenmesine önemli katkılarda bulunarak hidrojeodezi literatürünü zenginleştirmektedir.

Uydu gözlemleri ve yüzey modellerinden elde edilen veri setleri ile su bütçesi değişiminin izlenmesi, teknolojinin gelişmesiyle gün geçtikçe önem kazanmakta ve su kaynakları yönetimi açısından alternatif bir yaklaşım haline gelmektedir. Gravite alanının zamana bağlı çözümleri, toplam su bütçesinin izlenmesi, okyanuslardaki su kütlesi ve dip basıncı değişiminin izlenmesi, yer altı su kaynaklarındaki seviye değişimlerinin izlenmesi gibi farklı disiplinlerde ve disiplinler arası birçok farklı problemin çözümünde kullanılmaktadır. Bu amaca hizmet eden uydulardan Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) ve devamı niteliğinde olan GRACE-Follow On (GRACE-FO) uyduları, yeryuvarı gravite alanını izleyerek su bütçesi değişimine ilişkin aylık çözümler sağlamaktadır. GRACE ve GRACE-FO uydu sistemleri özellikleri gereği, global ve bölgesel alanlarda meydana gelen hidrolojik değişimlere karşı oldukça duyarlıdır ve bu alandaki araştırmalara önemli katkılarda bulunmaktadır (Baur, 2012; Cazenave ve Chen, 2010; Chambers, 2009; Chao vd., 2018; Forsberg vd., 2017; Ran vd., 2017; Tapley vd., 2004; Wahr vd., 2006; Wang vd., 2020).

1.1 Literatür Özeti

Hidrosferde meydana gelen zamana bağlı kütle değişimleri, 2002'den beri GRACE (Tapley vd., 2004) ve 2018'den bu yana GRACE FO (Flechtner vd., 2016) tarafından başarılı bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu kütle değişimleri, hidrojeodezi adı verilen alanda kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Fiziksel ve antropojenik nedenlerden kaynaklanan ani, öngörülemeyen seller veya uzun süreli kuraklıklar, artan su talebi ve nüfus artışı gibi faktörler, toplam su bütçesinin uzun dönemli (long-term), mevsimsel (seasonal) ve kısa dönemli (short-term) zaman

ölçeklerinde değişmesine neden olmaktadır (Humphrey vd., 2016). Bu nedenle, GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinden türetilen toplam su bütçesi zaman serilerine dayalı hidrolojik olayların karakterize edilmesi uygun bir modelleme gerektirmektedir.

Toplam su bütçesi zaman serilerinin fonksiyonel modeli, gözlemlerin sayısı arttıkça yıllar içinde gelişmiştir. İlk yıllarda GRACE toplam su bütçesi sinyali, yıllık sinyalin genliğini ve fazını belirlemeye dayalı olarak modellenmiştir (Wahr vd., 2004). 11 aylık periyoda sahip GRACE çözümlerinin doğruluğunun, küresel EGM96 modelinden yaklaşık iki kat daha iyi olduğu ve hidrolojik modelle iyi bir uyum ile karakterize edildiği Wahr vd. (2004) tarafından gösterilmiştir. Ardından Chen vd. (2006) fonksiyonel modeli, ağırlıksız en küçük kareler kestirimi (Least Square Estimation, LSE) yöntemini kullanarak doğrusal (lineer) trend, yıllık ve yarıyıllık mevsimsel bileşenlerin toplamı olarak tanımlamıştır. Chen vd. (2006), Güney Alaska ve Batı Kanada bölgelerinde GRACE çözümlerinden elde edilen Nisan 2002 - Kasım 2005 tarihlerini kapsayan yaklaşık 3,5 yıllık aylık örneklemeli buzul kütle erimesini incelemiş; bunları altimetre ve hidrolojik model (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) verileriyle karşılaştırmıştır. GRACE zaman serisinden elde edilen sonuçların diğer veri setleri ile uyum içerisinde (örneğin, GRACE ve altimetre için toplam su bütçesi değişimi sırasıyla -101±22 km^3/yıl ve -96±35 km^3/yıl) olduğunu göstermiştir.

Devam eden yıllarda, farklı karasal alanları ve havzaları temsil eden GRACE gözlemlerinden türetilen hidrolojik değişimlerin analizinde harmonik regresyon modeli, yani en küçük kareler kestirimi yöntemine dayalı olarak doğrusal trend ve mevsimsel sinyalleri (yıllık ve yarıyıllık sinyaller) içeren fonksiyonel model, standart model olarak kabul görmüştür (Ahmed vd., 2014; Chen vd., 2020; Forootan vd., 2012; Jin ve Feng, 2013; Ramillien vd., 2008; Schmidt vd., 2008a; Schumacher vd., 2018; Voss vd., 2013).

Sonraki birkaç yılda yapılan araştırmalar, özellikle kutup bölgelerindeki buzul erimesi ve deniz seviyesindeki değişimler gibi özel durumları ele almak için standart fonksiyonel modelin doğrusal trendin yanı sıra ikinci dereceden ivme parametresi ile genişletildiğini göstermektedir. Velicogna ve Wahr (2006), Grönland'daki buzul kütlesi kaybını incelerken, zaman serisini standart yaklaşım ile modellenmiş ancak buzul kaybının hızlanmasıyla ikinci dereceden bir terimle daha

iyi temsil edildiğini göstermiştir. Bu bölgede gerçekleştirilen pek çok çalışmada da fonksiyonel model ivme parametresiyle genişletilerek kullanılmaya devam etmiştir (Forsberg vd., 2017; Gunes ve Aydın, 2018; Jin ve Zou, 2015; Velicogna, 2009; Velicogna ve Wahr, 2013). Benzer şekilde, Antarktika için yapılan çalışmalarda da fonksiyonel model ivme parametresiyle genişletilmiştir (Harig ve Simons, 2015; King vd., 2012; Rignot vd., 2019; Wouters vd., 2013; Tapley vd., 2019).

Daha uzun periyoda sahip zaman serileriyle farklı bölgelerde yapılan çalışmalarda, doğrusal olmayan sapmaların ivmelenmeden değil, yıllar arası (internannual) değişimlerden etkilendiği öne sürülmüştür. Hidrolojik olayları temsil eden toplam su bütçesi zaman serilerinde bu değişimlerin, iklim indeksleri, yağış, bitki örtüsü indeksi ve atmosferik etkilerle yüksek korelasyonlu olduğu gözlemlenmiştir (Chen vd., 2022a; Humphrey vd., 2016; Jensen vd., 2020; Pfeffer vd., 2022).

GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinin 20 yılı aşkın bir süredir devam etmesiyle, toplam su bütçesi zaman serilerinde doğrusal olmayan değişimlerin hâkim olduğu ve bu durumun dünya üzerindeki çoğu bölge için rapor edildiği geniş çapta kabul görmektedir (Humphrey vd., 2016; Vishwakarma vd., 2021). Humphrey vd. (2016), GRACE sinyalini uzun dönem, yıllık ve yarıyıllık mevsimsel sinyaller ile daha küçük periyotlu yıllar arası değişimlerin düzeltmeleri olarak farklı bileşenlere ayırarak, su kütlesi değişiminin doğrusal olmayan bir karaktere sahip olduğunu vurgulamıştır. Shamsudduha ve Taylor (2020) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, 37 büyük ölçekli küresel akifer sisteminden sadece beşinde trendin doğrusal kabul edilebileceği bulunmuştur. Bu sonuç, kalan rezervuarlar için standart fonksiyonel modelin yani doğrusal trend varsayımının, toplam su bütçesi değişimlerini önemli ölçüde gerçek değerinden daha az kestirdiği anlamına gelmektedir. Benzer şekilde Vishwakarma vd. (2021), beklenmedik geçici kurak ve yağışlı dönemlerin neden olduğu yıllar arası değişimlerin dikkate alınması gerektiğini ve bu durumun çeşitli iklimsel, meteorolojik ve hidrolojik olaylardan kaynaklandığını göstermiştir. Bu çalışmalarda, doğrusal olmayan değişimleri ele almak için parametrik olmayan sinyal ayrıştırma yöntemleri kullanılmaktadır. En yaygın yaklaşımlar arasında, STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess), SSA (Single Spectrum Analysis), SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) veya ETS (Error-Trend-Seasonal) bulunmaktadır (Ahi ve Cekim, 2021; Bergmann vd., 2012; Humphrey vd., 2016). Bu yöntemlerin

sonuçları birbiri ile uyumlu olmakla birlikte, çalışmalarda vurgulandığı üzere doğrusal olmayan değişimlerin iklim ve hidrolojik sinyallere karşılık geldiği bilinmektedir. Böylece, toplam su bütçesi zaman serilerinde yer alan doğrusal olmayan süreçlerin fiziksel gerçekliklerden kaynaklandığı da gösterilmektedir (Chen vd., 2022a; Duan vd., 2019; Scanlon vd., 2015). Bununla birlikte, parametrik olmayan bu yöntemler doğası gereği ayrıştırılan sinyalin yeniden üretilmesine izin vermemektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan değişimlerin modellenmesinde alternatif olarak parametrik yöntemlerin kullanılarak fonksiyonel modelin genişletilmesi düşünülmektedir.

Literatürde, özellikle okyanus kütlesindeki değişimler veya bahsedildiği üzere buzul kütlesi erimesi ile karakterize edilen bölgeler için, ikinci veya üçüncü dereceden bir polinom fonksiyonunun U- veya N-şekilli sinyalleri güvenilir bir şekilde modellemek için kullanıldığı kısıtlı sayıda çalışma yer almaktadır (Hardy vd., 2017; Jeon vd., 2018; Matsulev, 2020; Wouters vd., 2019). Ancak, GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinden elde edilen toplam su bütçesi zaman serilerinin doğrusal olmayan bileşenini modellemek için polinomal fonksiyonlar şimdiye kadar kullanılmamıştır.

Fonksiyonel modelin parametrik olarak ele alınması, stokastik modelin belirlenmesi için de önemlidir. Böylesi bir model, sadece periyodik sinyalleri tanımlamamıza değil, aynı zamanda incelenen jeopotansiyel büyüklüğün fiziksel etkilere verdiği tepkiyi ve gürültü karakterinin belirlenmesini de sağlamaktadır. Özellikle uzun periyotlu zaman serileri üzerinde yapılan çalışmalar, gözlemlerin daha doğru şekilde yorumlanmasına olanak sağladığını göstermektedir.

Birçok jeodezik zaman serisi çalışması, verilerin yalnızca beyaz gürültü (white noise) değil, aynı zamanda kırpışma gürültüsü (flicker noise) ve rastgele yürüyüş gürültüsü (random walk noise) gibi renkli gürültü de içerdiğini ortaya koymaktadır. Ancak, GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinde fonksiyonel modelin yıllar içinde değişmesi ve parametrik olmayan yöntemlerle ele alınması konularında oldukça zengin bir literatür kaynağı bulunurken, bu konunun incelenmesine dair sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu tür çalışmaların literatürdeki örnekleri, GPS (Global Positioning System) zaman serileri (Bogusz ve Klos, 2016; Bos vd., 2013; Bos vd., 2020; Langbein, 2017; Ray

vd., 2019; Williams, 2003; Zhang vd., 1997), hidrolojik zaman serileri (Modarres ve Ouarda, 2013; Saulquin vd., 2013; Tu vd., 2023; Wang vd., 2023; Yue vd., 2002; Yue ve Wang, 2004), DORIS koordinatlarının zaman serileri (Feissel-Vernier vd., 2007; Williams ve Willis, 2006), deniz seviyesi değişimi veri setleri (Bos vd., 2014) olarak sıralanabilir. Gürültü karakterinin analiz edildiği bu çalışmaların ortak özelliği on yıldan daha uzun süreli gözleme sahip zaman serilerinin incelenmesidir. Başlangıçta gözlemlerin zamana bağlı korelasyonlu olmadığı kabul edilirken; zaman serisinin periyodunun artmasıyla birlikte zamansal olarak korelasyonlu hale geldiği ve renkli gürültü karakterine sebep olduğu bilinmektedir. Bu durum gürültü karakterinin analiz edilmesi dolayısıyla stokastik modellemenin ele alınması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Çünkü, zaman serilerinde gözlemlerin sadece beyaz gürültü ile yüklü olduğu varsayımı trendin belirsizliğinin olması gerekenden daha az belirlenmesine yol açarak anlamlılığını etkilemektedir.

GRACE ve GRACE-FO zaman serilerindeki gözlemlerin artmasıyla birlikte bu alanda yapılan çalışmalarda da benzer bir durum ortaya çıkmaya başlamıştır (Gunes ve Aydin, 2022; 2024; Guo vd., 2018; Williams vd., 2014; Wouters vd., 2013; Zhang vd., 2020a). Horwath ve Dietrich (2009) ile Wouters vd. (2013), GRACE zaman serilerinde yer alan kırmızı spektrumdaki gürültüyü vurgulayarak bu korelasyonları ilk kez dile getirmiştir. Daha sonra Williams vd. (2014) ile Zhang vd. (2020a) sırasıyla dokuz ve on üç yıllık toplam su bütçesi zaman serileri için kutup bölgelerinde kırpışma gürültüsünden rastgele yürüyüş gürültüsüne kadar değişen bir spektrum bandı tanımlamıştır. Her iki çalışmada da standart fonksiyonel model parametrelerinin tahminine gürültü yapısını dahil etmek için AR(1) gibi otoregresif modellerin kullanılması önerilmiştir. Bulgular, GRACE zaman serilerinde renkli gürültünün ihmal edilmesinin, toplam su bütçesinde meydana gelen değişimi temsil eden trendin standart hatalarının üç ila dört kata kadar daha düşük tahmin edilmesine neden olduğunu vurgulamaktadır. Bu durum, buzul kütle kaybının yılda neredeyse iki yüz gigatona kadar ulaşabildiği kutup bölgeleri ve Alaska için anlamlılığı değiştirmese de çoğu nehir havzası için önem taşımaktadır. Sonuç olarak, yapılan çalışmaların geneli, GRACE ve GRACE-FO gibi uzun periyoda sahip toplam su bütçesi zaman serilerinde fonksiyonel ve stokastik modellerin en uygun şekilde bir arada kullanımının fiziksel gerçekliğin daha iyi anlaşılmasına katkı sağladığını göstermektedir. Bu yaklaşım, su döngüsü ve buzul

kütle kaybı gibi önemli hidrojeodezik olayların izlenmesi, analiz edilmesi ve modellenmesinde önemli bir adımdır.

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinde kullanılan modelin geliştirilmesinin sadece doğrusal olmayan trend ve/veya gürültü karakterinin ele alınması ile sınırlı kalmadığını göstermektedir. Bu çalışmalara ek olarak, farklı jeodezik zaman serilerini etkileyen ve literatürde kabul edilen mevsimsel sinyallerden daha uzun dönemli periyodik sinyallerin varlığıyla ilgili kapsamlı tartışmalar yapılmıştır. Özellikle, yaklaşık 6 yıllık bir periyoda sahip olduğu için 6 yıllık döngü olarak adlandırılan belirgin bir sinyale dikkat çekilmiştir (Pfeffer vd., 2023). Bu uzun dönemli periyodik bileşenin araştırılmaya başlanması yerin dönmesi ve artık gün uzunluğu gibi değişimlere dayandırılmaktadır (Abarca del Rio vd., 2000; Ding, 2019; Hsu vd., 2021; Rosat ve Gillet, 2023). Daha sonrasında ise, GPS zaman serileri (Ding ve Chao, 2018; Watkins vd., 2018), Satellite Laser Ranging (SLR) ölçümleri (Chao ve Yu, 2022) ve global ortalama deniz seviyesi gözlemleri (Global Mean Sea Level, GMSL) (Moreira vd., 2021) gibi jeodezik zaman serilerinde de varlığı gösterilmiştir. Bu çalışmalar daha uzun jeodezik zaman serilerini analiz etmeye odaklanırken, özellikle son yıllarda GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinde de araştırmalar yapılmaya başlanmıştır (Moreira vd., 2021; Pfeffer vd., 2023). Geriye doğru gidildiğinde, GRACE gözlemlerinin ilk yıllarında, Schmidt vd. (2008b)'de, yıllık periyodik sinyalden daha uzun bir sinyalin tartışıldığı görülmüştür. 2,1 ile 2,5 yıl arasında değiştiği gösterilen bu periyodik sinyal, 2003 ile 2006 yılları 18 drenaj havzasının toplam su bütçesi değişimleri kullanılarak tanımlanmıştır. Günümüzde ise, Pfeffer vd. (2023), Nisan 2002 ile Nisan 2022 arasında GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinin 20 yıllık zaman serisini kullanarak 6 yıllık döngü olarak anılan bu yeni periyodik bileşeni band-pass filtreleme yöntemi belirleyerek sebeplerini derinlemesine incelemiştir. Sonuçlar, toplam su bütçesi zaman serilerinde periyodu 4,6 ile 8,6 yıl arasında değişen ve yerin dönmesi, artık gün gibi çeşitli dinamik süreçlerle yakından ilişkilendirilebilen bir sinyalin varlığını göstermektedir.

Şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalarda, bu salınımların arkasındaki nedenler tam olarak açıklanamamıştır. Ancak, gün uzunluğu, yerin dönmesi veya atmosferik açısal momentum gibi Dünya'nın derin iç süreçleriyle veya yüzeyde meydana gelen iklim süreçleri ile korelasyonlu olduğu gösterilmiştir. Özellikle, El Niño-Southern

Oscillation (ENSO), Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), Pacific Decadal Oscillation (PDO) ve North Atlantic Oscillation (NAO) dahil olmak üzere çeşitli iklim indekslerinde gözlemleniyor olması (Moreira vd., 2021), toplam su bütçesi değişimi zaman serilerindeki önemini arttırmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Literatürde incelenen çalışmalarda toplam su bütçesi değişimini ifade eden modellerin yıllar içinde değişen fiziksel gerçekliklerle birlikte geliştirildiği görülmektedir. Özellikle zaman serisinde görülen doğrusal olmayan değişimlerin modellenmesinde parametrik olmayan yaklaşımlar uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise, bu doğrusal olmayan değişimlerin parametrize edilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla, standart modelin bir polinom fonksiyonuyla genişletilmesi önerilmektedir. Önerilen bu polinomal fonksiyonel modelde, polinom derecesi bölgeye göre değiştirilmektedir. Böylece, GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinde mevcut doğrusal olmayan sinyalin modellenmesi parametrize edilerek literatürde bu konudaki boşluğa katkı sağlanması hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçların, kara hidrolojisindeki toplam su bütçesi değişikliklerinin daha iyi anlaşılmasına sağlayabileceği katkılar çalışmanın ilerleyen bölümlerinde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Ayrıca, bu fonksiyonel modelin, genellikle sadece beyaz gürültü ile yüklü olduğu kabul edilen toplam su bütçesi zaman serilerinin gürültü karakterini de daha iyi açıklamaya yardımcı olacağı varsayılmaktadır.

Toplam su bütçesi değişimlerinde gürültü karakterinin incelendiği sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu doğrultuda, toplam su bütçesi zaman serilerini tanımlayan gürültü süreçlerinin belirlenmesi ve buna en iyi uyan stokastik modelin seçilmesi üzerine araştırmalar gerçekleştirilecektir. İlgili frekans alanında, verinin sadece beyaz gürültü ile yüklü olmadığı, renkli ya da güç yasası gürültüsü olarak adlandırılan farklı spektral indekslerdeki gürültü ile yüklü olduğu varsayımı altında çeşitli spektral analiz yöntemleri uygulanacaktır. Zaman serisinde bulunan gürültü karakterinin belirlenmesinden sonra, veri setinin gürültü türü/türlerinin kestirim sonuçlarına etkilerinin incelenmesinde kullanılan varyans bileşenlerinin kestirimi ve otoregresif süreçler gibi farklı yöntemlerin uygulanabilirliği değerlendirilecektir. Böylece, güven aralığı daha doğru ve temkinli tahminler yapılabilecektir. Çalışmanın bir diğer konusu ise, uzun dönemli periyodik sinyallerin toplam su

bütçesi zaman serisinden çıkarılmasıdır. Bu amaçla, Fisher model testine dayalı bir algoritma önerilmektedir.

1.3 Hipotez

Bu araştırmanın temel sorusu, jeodezik zaman serilerinden biri olan zamana bağlı kütle değişiminin en uygun fonksiyonel ve stokastik model altında nasıl analiz edilebileceğidir. Bu bağlamda GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinden üretilen toplam su bütçesi zaman serileri incelenmiştir. Literatürde, GRACE ve GRACE-FO veri setlerine dayanan toplam su bütçesi değişiminin izlenmesi ile ilgili birçok çalışmadan bahsedilmiştir. Ancak, bu çalışmaların büyük bir kısmında ana tema su bütçesi değişim miktarının standart harmonik regresyon yaklaşımı ile sadece beyaz gürültü varsayımı altında belirlenmesi olup, zamansal korelasyonlar göz ardı edilmiştir. Bu nedenle çalışmanın bir kısmında, bu zaman serilerinde zamansal korelasyonların araştırılması odak noktası olmuştur. Bu amaçla aşağıdaki hipotezler öne sürülmektedir:

- GRACE toplam su bütçesi zaman serilerinde zamansal korelasyonlar mevcuttur ve bu korelasyonlar renkli gürültünün varlığına sebep olmaktadır.
- Bu korelasyonların etkisini göstermek ve renkli gürültü yapısını stokastik modelde göz önüne almak için, zaman serisine otoregresif gürültü modeli veya varyans bileşenleri kestirimi gibi yöntemlerin uygulanması gerekmektedir.
- Bu korelasyonların ihmal edilmesi, trend belirsizliğinin olması gerekenden daha küçük standart sapmalarla ifade edilmesine sebep olmakta ve anlamlılığının yanlış yorumlanmasına yol açmaktadır.

Çalışmanın bir diğer odak noktası, GRACE toplam su bütçesi zaman serilerinde fonksiyonel modelin iyileştirilmesidir. Kütle değişimini ifade eden doğrusal trend değeri, gözlemlerin artmasıyla birlikte meydana gelen değişimi açıklamakta yetersiz kalmakta ve doğrusal olarak ifade edilemeyen uzun dönemli değişimlerin var olduğu bilinmektedir. Literatürde bu konuda güncel çalışmalar yer almakla birlikte, genellikle parametrik olmayan yöntemler kullanılarak toplam su bütçesi sinyali bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu çalışmada ise, doğrusal olmayan trendin parametrik olarak ifade edilmesiyle aşağıdaki hipotezler çerçevesinde fonksiyonel modelin genişletilmesi amaçlanmıştır:

- GRACE ve GRACE-FO toplam su bütçesi zaman serilerinde doğrusal olmayan (nonlinear) değişimler yer almaktadır.
- Bu doğrusal olmayan değişimi modellemek için trend, birinci dereceden bir parametre yerine polinom fonksiyonu ile tanımlanabilmektedir.
- Polinomal fonksiyonun yapısı mekânsal olarak tutarlıdır ve fiziksel olaylarla örtüşmektedir.
- Genişletilmiş bu fonksiyonel model, toplam su bütçesi zaman serilerinin gürültü karakterinin belirlenmesine katkı sağlayarak en uygun stokastik modelin tanımlanmasına da olanak tanımaktadır.

Çalışmanın son kısmında ise, jeodezik zaman serilerinde yerin dönmesinden ve çeşitli iklim etkilerinden kaynaklandığı düşünülen, yaklaşık 6 yıllık bir periyoda sahip uzun dönemli periyodik bir sinyalin varlığının GRACE toplam su bütçesi zaman serilerinde araştırılması ele alınmaktadır. Bu amaçla, Fisher model testine dayalı olarak bu 6 yıllık sinyalin tespiti için bir algoritma önerilmektedir. Dolayısıyla bir diğer hipotez de:

- GRACE toplam su bütçesi zaman serilerinde yaklaşık 6 yıllık periyoda sahip uzun dönemli periyodik bir ek sinyal yapısı bulunmaktadır ve bu sinyalin periyodu zaman serisinden çıkarılabilmektedir.

2
ZAMANA BAĞLI KÜTLE DEĞİŞİMİNİN GRACE VE GRACE-FO UYDU SİSTEMLERİ İLE İZLENMESİ

Bu bölümde, zamana bağlı gravite değişimini hassas bir şekilde izlemeye olanak sağlayan GRACE ve GRACE-FO uydu sistemleri hakkında detaylı bilgiler sunulmaktadır. Öncelikle uydu sistemlerinin çalışma prensipleri ele alınacak, ardından sağladıkları veri setleri üzerinde durulacaktır. Bu sayede, bu çalışmada kullanılan toplam su bütçesi zaman serileri hakkında kapsamlı bir genel bilgi sağlanmış olacaktır.

2.1 GRACE ve GRACE-FO Uydu Sistemleri

Yeryuvarı gravite alanının ve zaman içindeki değişimlerinin incelenmesi için son 20 yıldan fazla bir süredir alçak yörüngeli çeşitli uydu sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerden biri olan ve 2002'de yörüngesine yerleştirilen GRACE (Tapley vd., 2004), diğer uydu sistemlerinden farklı olarak 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. Başlangıçta 5 yıl hizmet vermesi planlanan GRACE, planlanandan çok daha uzun bir süre boyunca, 2017 yılına kadar veri sağlamaya devam etmiştir. 2018'de yörüngesine fırlatılan ve GRACE'in devamı niteliğinde olan GRACE-FO uydusu (Flechtner vd., 2016) ise benzer şekilde aralarındaki başlangıç uzaklığı yaklaşık 220 km ve yerden yüksekliği yaklaşık 490 km olarak tasarlanmış ikiz uydu sisteminden oluşmaktadır. Günümüzde hala veri sağlamaya devam etmektedir.

GRACE ve GRACE-FO uydu sistemlerinde, yüksek yörüngeli uydudan alçak yörüngeli uyduya izleme (Satellite to Satellite Tracking in the high-low mode, SST-hI) ve alçak yörüngede bulunan uydular ile uydudan uyduya izleme (Satellite to satellite tracking-low to low, SST-II) temel ölçme teknikleri olarak benimsenmiştir (Tapley vd., 2004). Bu ölçme tekniklerinin birlikte kullanılması ile yeryuvarı

gravite alanı bilgisinin doğruluğu arttırılmakta ve çözünürlüğü yükseltilerek değişimlerin daha doğru bir şekilde izlenmesi sağlanmaktadır.

Uyduların çalışma prensibi kısaca açıklanacak olursa, ikiz uydular altındaki değişen kütle dağılımı nedeniyle pozitif ve negatif, yerçekimsel olarak indüklenen, yol boyunca ivmeler meydana gelir. Bir uydu diğerini aynı yörüngede takip ederken, her ikisi de sürekli olarak birbirine mikrodalga sinyalleri gönderir ve gelen sinyalleri, onları ayıran mesafeyi doğru bir şekilde ölçmek ve değişiklikleri izlemek için kullanırlar. Bu mesafe değişimlerini ölçmek için iki farklı frekansta çalışan KBR (K-Bant Range) uzunluk ölçme sistemi bulunmaktadır. KBR uzaklık değişimleri 10 μm doğruluğunda ölçülebilmektedir. Böylece her yörüngede ve zaman içinde elde edilen KBR ölçümlerinin nasıl değiştiği hassas bir şekilde izlenerek, bölgeye göre değişen yerçekimi değişikliklerini ve su bütçesi değişimini yüksek hassasiyetle tespit etmek mümkün olmaktadır. Özellikle uydu yörüngesinin oldukça yakın geçtiği kutup bölgelerinde yapılan çalışmalarda daha iyi sonuçlar elde edildiği literatürdeki çalışmalardan bilinmektedir (Abart, 2005). KBR dışında, uyduların üzerinde yer alan donanımlara değinilecek olursa, konumunun belirlenmesi ve hassas zamanlama için GPS alıcıları, uyduların yıldızlara göre konumunun belirlenebilmesi için yıldız kameraları (SCA-Star Camera Assembly), ivmeölçerler (accelometer, ACC), osilatörler ve uyduya enerji sağlayan paneller gibi pek çok bileşen yer almaktadır. GRACE-FO uydusu, bu donanımlara ek olarak Lazer Aralıklı İnterferometri (Laser Ranging Interferometry, LRI)'ye de sahiptir (Flechtner vd., 2016; Kornfeld vd., 2019).

Uydular, yaklaşık 30 gün içinde tüm dünya yüzeyini aşarak bir tam periyodu tamamlamaktadır. Tüm bu veriler, farklı seviyelerde işlenmiş çözümlere dönüştürülerek kullanıcılara sunulmakta ve yaklaşık 300 km'lik bir mekânsal çözünürlük ile global ve bölgesel kütle değişimlerinin aylık haritalarını üretmek için kullanılmaktadır.

2.2 GRACE ve GRACE-FO Veri Setleri

GRACE ve GRACE-FO veri akışı, JPL (Jet Propulsion Laboratory), GFZ (Geoforschungs Zentrum Potsdam) ve CSR (Center for Space Research at University of Texas, Austin) arasındaki GRACE Bilim Veri Sistemi (Science Data System, SDS) ile sağlanmaktadır (Case vd., 2010; Klinger, 2018). GRACE

uydularından elde edilen veriler Seviye-0 (Level-0, L0), Seviye-1 (Level-1, L1; L1A ve L1B), Seviye-2 (Level-2, L2), Seviye-3 (Level-3, L3) ve Seviye-4 (Level-4, L4) olmak üzere farklı şekillerde çözümler olarak aylık periyotlarda yayımlanmaktadır. Bu çözümlerin yaklaşık 15 yıllık periyodu GRACE tarafından sağlanırken, 2018'den beri GRACE-FO uydusu veri sağlamaya devam etmektedir. İki uydu sistemi arasında 11 aylık (Haziran 2017-Mayıs 2018) bir veri boşluğu bulunmakta olup, bu boşluğun doldurulması da günümüzde ele alınan önemli konulardandır.

KBR, GPS ve ivmeölçer gibi donanımlardan elde edilen ham veri setleri Seviye-0 verisi olarak tanımlanmaktadır. Seviye-0 verisinin işlenmesi ile Seviye-1A, bu veri setlerinin düzenlenmesi ve doğrulanmasıyla da Seviye-1B ürünleri oluşmaktadır. Seviye-1B verisi, uydu yörünge bilgilerini, uydudan uyduya olan mesafeleri ve çekim dışı ivmeler gibi ölçüleri içermektedir (Bettadpur, 2012). Seviye-2 verisi, Seviye-1B ürünlerinin kalibre edilmesi yani işlenmesi ile elde edilerek kullanıcılara, aylık küresel harmonik katsayılar ve bunların standart sapma bilgileri (Formal Errors) şeklinde sunulmaktadır (Case vd., 2004).

Seviye-3 verisi, doğrudan Seviye-1B veya Seviye-2 verisinden elde edilen, korelasyon etkilerinin giderildiği, farklı mekânsal çözünürlükte ve filtrelenmiş ürünlerdir. Bu veriler, yer üzerindeki nokta-nokta, havza-havza veya bölge-bölge verilen ilgili jeopotansiyel sinyali ifade etmektedir (Tapley vd., 2019). Bir Seviye-3 veri türü olan mascon (mass concentration) çözümleri, CSR, JPL ve Goddard Space Flight Center (GSFC) gibi merkezler tarafından yayımlanan 1°x1° veya 3°x3° boyutlu yüzey parçalarına ilişkin aylık toplam su bütçesi değişimlerini içermektedir (Loomis vd., 2019; Save vd., 2016; Watkins vd., 2015).

Seviye-3 veri setlerinin temin edildiği veri işleme merkezlerinde, ürünlerde arka planda altlık olarak kullanılan modeller ve veri üretme stratejilerine yer verilmektedir. Hidroloji, buzul kütlesi ve okyanus taban basıncı değişimlerine bağlı olarak meydana gelen su kütlesi değişimlerinin incelenmesinde, filtrelenmiş olması, sızıntı-kaçak (leakage) etkilerinin giderilmesi, buzul çağı etkilerinin giderilmesi (Post-Glacial Rebound, PGR/Glacial Isostatic Adjustment, GIA) ve hidrolojik sinyalin korunmuş olması gibi avantajlar sunan mascon çözümlerinin kullanımı hidrojeodezi alanında gerçekleştirilen çalışmalarda giderek yaygınlaşmaktadır.

2.3 Toplam Su Bütçesi Değişimi

Aylık yer gravite alanı çözümlerinden elde edilen toplam su bütçesi zaman serileri su döngüsündeki yer altı suları, toprak nemi, yüzey suyu, kar ve buzullardaki değişimlerin toplamı gibi düşey doğrultudaki farklı bileşenlerin tümüne ilişkin veri sağlamaktadır. Jeopotansiyel değişimlerden biri olan bu sinyalin uydu gravimetresi ile açıklanmasında yüzey kütle yoğunluğu terimi kullanılmaktadır. Yüzey kütle yoğunluğu,

$$\Delta\sigma(\vartheta,\lambda)=a_E\rho_w\sum_{l=2}^{l_{max}}\sum_{m=0}^{l}(\Delta\breve{C}_{lm}\cos m\lambda+\Delta\breve{S}_{lm}\sin m\lambda)P_{lm}(\cos\vartheta) \tag{2.1}$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada ρ_w, suyun yoğunluğunu (1000kg/m3); $\Delta\breve{C}_{lm}$ ve $\Delta\breve{S}_{lm}$ yüzey yoğunluk katsayı değişimlerini göstermektedir. Yüzey yoğunluk değişiminin su yoğunluğuna oranı ise eşdeğer su kütlesi cinsinden toplam su bütçesi değişimini ifade etmektedir (Wahr vd., 1998);

$$\Delta e(\vartheta,\lambda)=\frac{\Delta\sigma(\vartheta,\lambda)}{\rho_w} \tag{2.2}$$

Yüzey yoğunluk katsayı değişimleri ile yerçekimi potansiyeli arasında aşağıdaki ilişki bulunur (Wahr vd., 1998; Liu, 2008):

$$a_E\begin{Bmatrix}\Delta\breve{C}_{lm}\\ \Delta\breve{S}_{lm}\end{Bmatrix}=a_E\frac{\rho_{ave}(2l+1)}{3\rho_w(1+k_l)}\begin{Bmatrix}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{Bmatrix}=K_l\begin{Bmatrix}\Delta C_{lm}\\ \Delta S_{lm}\end{Bmatrix} \tag{2.3}$$

Burada, ρ_{ave}, yeryuvarı ortalama yoğunluğunu (5517 kg/m^3) ve K_l ise l harmonik derecesine bağlı Love yükleme sayılarını ifade etmektedir (Farrell, 1972; Wahr vd., 1998). Eşitlik (2.3), Eşitlik (2.2)'de yerine yazılırsa, toplam su bütçesi değişiminin GRACE küresel harmonik katsayılar cinsinden ifadesi elde edilir;

$$\Delta e(\vartheta,\lambda)=\sum_{l=2}^{l_{max}}\sum_{m=0}^{l}(\Delta C_{lm}\cos m\lambda+\Delta S_{lm}\sin m\lambda)\,k_lP_{lm}(cos\vartheta) \tag{2.4}$$

Elde edilen toplam su bütçesi değişiminin mekânsal çözünürlüğü açınımın en büyük harmonik derecesi l_{max}'a bağlı olarak,

$$\xi\approx\frac{20000\text{ km}}{l_{max}} \tag{2.5}$$

ile ifade edilir. Dolayısıyla örneğin 60 dereceye kadar hesaplanan bir modelden elde edilen Seviye-2 verisinde çözünürlük 20000/60≈330 km civarındadır.

2.3.1 Mascon Çözümleri

Toplam su bütçesi değişimi zaman serileri, küresel aylık harmonik katsayıların harmonik fonksiyonlara açılmasıyla elde edilebildiği gibi, mascon olarak adlandırılan Seviye-3 çözümleri olarak da üretilebilmektedir. Bu çözümler Seviye-2 verilerinin işlenmesiyle ya da doğrudan Seviye-1B ürünlerinden inversiyon yöntemi ile elde edilebilmektedir. GRACE/GRACE-FO veri bilim sisteminde (SDS) yer alan resmi Seviye-3 mascon çözümleri CSR, JPL ve GSFC veri işleme merkezleri tarafından sağlanmaktadır.

Mascon çözümleri, yerkürenin yüzeyine dağılmış kütle yoğunluklarını temsil eden gravite alanı fonksiyonlarıdır. Tüm yerkürenin gravite alanını bir bütün olarak ifade ederken, havza çözümleri ve gridlenmiş mascon hücreleri, temsil ettikleri yüzey alanlarının gravite sinyalini gösterirler. Her bir mascon, hücre içine ve dışına hareket eden su kütlesine bağlı olarak hücre içindeki çekim kuvvetinin yerel değişikliklerini yansıtmaktadır. Farklı büyüklükteki yüzey alanlarını temsil eden mascon çözümleri verilmiş olsa da çözünürlüğü için de yine Eşitlik (2.5) dikkate alınmalıdır.

GRACE gözlemlerinin ilk on yılında standart olarak kullanılan küresel harmonik yaklaşımın yerine mascon yaklaşımını kullanmak, bazı jeofiziksel kısıtlamaların uygulanmasını daha kolay hale getirmektedir. Bu kısıtlamalar sayesinde, GRACE ve GRACE-FO gözlemlerinden gelen gürültünün daha etkin bir şekilde filtrelenmesi sağlanırken; aynı zamanda sızıntı-kaçak (leakage) etkileri ile buzul çağı etkileri (PGR/GIA) giderilerek hidrolojik sinyalin korunmasına katkı sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, toplam su bütçesi değişimlerini incelemek için 2002-2023 (Nisan 2002-Mayıs 2023) periyoduna sahip, aylık örneklemeli RL06v02 sürümündeki NASA GSFC mascon veri seti kullanılmıştır (Loomis vd., 2019). GSFC çözümleri, eşit yüzey alanına sahip her biri bir yay derecelik 41168 mascon hücresini temsil eden toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinden oluşmaktadır. Bunlardan 13028 mascon hücresi dünya üzerindeki karasal alanlarda meydana gelen değişimleri

temsil etmektedir. Ayrıca, eşit alanlı $1^{o}x1^{o}$ derecelik gridlerin yanı sıra havza sınırlarına göre türetilen zaman serilerini de içermektedir.

GSFC mascon çözümleri doğrudan Seviye-1B gözlemleri kullanılarak üretilmektedir ve bir dizi arka plan modeli kullanılmaktadır. Bu çözümlerin özelliklerine bakılacak olursa,

- Arka plan statik alanı için GGM05C modeli kullanılmaktadır (Ries vd., 2016).
- Yermerkezi ile ilgili harmonik katsayı düzeltmeleri Sun vd. (2016)'ya göre yapılmaktadır.
- C_{20}, C_{30} harmonik katsayıları Technical Note-14'te verildiği üzere SLR verileriyle değiştirilmektedir (Loomis vd., 2020).
- Atmosfer ve okyanus yumuşatma etkilerinin elimine edilmesinde RL06 AOD1B ürünleri kullanılmaktadır (Dobslaw vd., 2017).
- Buzul çağı sonrası (GIA) etkilerinin giderilmesinde ICE-6G_D modeli (Peltier vd., 2015) kullanılmaktadır.
- Gelgit modeli olarak GOT4.7 kullanılmaktadır (Ray, 1999).

Son olarak, toplam su bütçesi zaman serileri 2004.0-2010.0 zaman aralığındaki ortalama kaldırıldıktan sonra toplam su bütçesi anomalisi/değişimi zaman serileri olarak yayımlanmaktadır. Arka planda uygulanan modeller ve açıklamalar ile ilgili ayrıntılı bilgilerin en güncel hali Loomis vd. (2019)'da ve GSFC mascon resmi internet sayfasında verilmektedir (https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons). Ayrıca, veri setini oluşturan gözlemlerin güven aralığı yani belirsizlik durumuyla ilgili bilgi sunan hata ve sızıntı (bias) etkileri de Loomis vd. (2019)'da detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

3
TOPLAM SU BÜTÇESİ DEĞİŞİMİ ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ

Bu bölümde, GSFC tarafından sağlanan mascon çözümlerinin kullanıldığı toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinin analizine odaklanılmaktadır. Çalışma, bölgesel ve küresel ölçekteki değişimleri detaylı bir şekilde ele almaktadır. İlk olarak, standart fonksiyonel modelin analiz sonuçları sunulmaktadır. Ardından, toplam su bütçesi zaman serilerinin gürültü karakterinin analizine, stokastik ve fonksiyonel modellenmesinde önerilen yaklaşımlara odaklanılmaktadır. Bulgular, literatürdeki çalışmalarla birlikte değerlendirilmektedir. Son bölümde ise, elde edilen tüm sonuçların bir arada değerlendirilmesiyle oluşturulan nihai modelin incelenmesine geçilmektedir.

3.1 Harmonik Regresyon Yaklaşımı

Toplam su bütçesi değişimi (anomalisi) (y) zaman serilerinin analizi için oluşturulan standart fonksiyonel model aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$y_j - e_j = a + bt_j + \sum_{i=1}^{z} \left\{ c_i cos\left(\omega_i t_j\right) + s_i sin\left(\omega_i t_j\right) \right\} \tag{3.1}$$

Burada a sıfır eki, b doğrusal trend olmak üzere, z=2 için c ve s yıllık (365,25 gün) ve yarıyıllık (182,63 gün) mevsimsel sinyallerin kosinüs ve sinüs bileşenleridir. e_j ise modelden elde edilen toplam hatayı (ya da düzeltmeyi) ifade etmektedir. ω, sinüzoidal sinyalin açısal frekansı olup, T periyoduna göre, $\omega = 2\pi/T$ şeklinde tanımlanmaktadır. En küçük kareler kestirimi ile yapılan çözümler sayesinde toplam su bütçesinde meydana gelen kütle değişiminin doğrusal trendi, yani yıllık artma ve azalma miktarları belirlenebilmektedir.

Eşitlik (3.1)'den en küçük kareler yöntemine göre fonksiyonel ve stokastik model aşağıdaki biçimde oluşturulur:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ y(t_j) \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{y}} - \underbrace{\begin{pmatrix} \vdots \\ e(t_j) \\ \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{e}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 \quad t_j & \cos(\omega_1 t_j) & \sin(\omega_1 t_j) & \cos(\omega_2 t_j) & \sin(\omega_2 t_j) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{X}} \underbrace{\begin{pmatrix} a \\ b \\ c_1 \\ s_1 \\ c_2 \\ s_2 \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{\beta}} \tag{3.2}$$

$$\mathbf{e} = [\dots e_j \dots]^T \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{Q}_{yy}),\ \mathbf{C}_{yy} = \sigma^2 \mathbf{Q}_{yy}$$

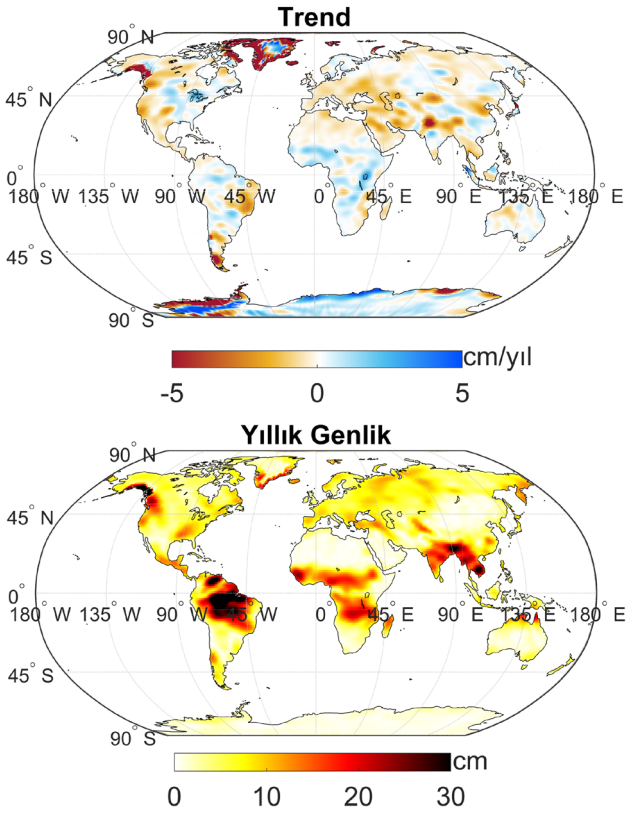
Burada fonksiyonel modelde; **y**, $n\times1$ boyutlu gözlem vektörünü; **e**, $n\times1$ boyutlu hata vektörünü; **X**, $n\times6$ boyutlu katsayılar matrisi; **β**, 6×1 boyutlu bilinmeyenler vektörünü göstermektedir. Stokastik modelde ise $\mathbf{C}_{yy}$ ölçülerin kovaryans matrisi; σ^2 bilinmeyen varyans bileşeni ve $\mathbf{Q}_{yy}$ ölçülerin kofaktör matrisi olarak tanımlanmıştır.

Eşitlik (3.2)'ye en küçük kareler yaklaşımı uygulandığında, her bir zaman serisi için varyans bileşeni hata vektörü $\hat{\mathbf{e}} = (\mathbf{X}(\mathbf{X}^T\mathbf{Q}_{yy}^{-1}\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{Q}_{yy}^{-1} - \mathbf{I})\mathbf{y}$ kullanılarak $\widehat{\sigma}^2 = \frac{\hat{\mathbf{e}}^T\mathbf{Q}_{yy}^{-1}\hat{\mathbf{e}}}{n-6}$ olarak kestirilir. Son olarak, harmonik regresyon parametrelerinin kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{\beta\beta} = \widehat{\sigma}^2(\mathbf{X}^T\mathbf{Q}_{yy}^{-1}\mathbf{X})^{-1}$olarak elde edilir. En küçük kareler yönteminde, Eşitlik (3.2)'deki modele uygun belirlenmiş fonksiyonel ve stokastik bileşenler, özellikle uygun bir kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{yy}$ içerdiğinde, yansız (unbiased) bir kestirim sağlamaktadır. Ancak, özellikle toplam su bütçesi zaman serileri için bu kovaryans matrisinin belirlenmesi zamansal korelasyonlar nedeniyle zorlayıcıdır. Bu sorunu ele almak için, zaman serileri öncelikle ölçülerin eşit ağırlıklı olarak kabul edildiği yani Eşitlik (3.2)'de verilen $\mathbf{Q}_{yy}$'nin birim matris olduğu durumda incelenir. Literatürde yer alan çalışmalarda da standart yaklaşım bu şekilde kabul edilmekte olup, bu model 'Sadece Beyaz Gürültü Modeli' olarak da adlandırılmaktadır.

Toplam su bütçesi zaman serilerinde gözlemlere ağırlık vermek için Loomis vd. (2019)'da tanımlanan harmonik katsayı hataları veya GSFC mascon çözümü hataları veri analizine dahil edebilir. Ancak, bu önsel bilginin etkisi harmonik

regresyon parametre kestiriminde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Ana etki, zaman serileri gözlemleri arasındaki otokorelasyonlardan kaynaklanan renkli gürültüdür. Bu gürültü analizlerde dikkate alınmadığında parametrelerin standart hatalarında önemli değişikliklere yol açmaktadır.

Yukarıda Eşitlik (3.2)'de matematiksel modeli verilen standart modele göre, karaları temsil eden, 2002-2022 periyodunu kapsayan RL06v2.0 sürümündeki 13028 gridlenmiş mascon çözümü, gözlemlerin yaklaşık olarak eşit ağırlıklı kabul edildiği stokastik varsayım altında analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen doğrusal trend ve yıllık genlik haritaları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Standart harmonik regresyon modelinden elde edilen doğrusal trend ve yıllık genlik değerleri

Standart modelden elde edilen doğrusal trend değerleri -53 ile 14 cm/yıl arasında değişmektedir. Karaları temsil eden tüm zaman serileri için doğrusal trendin ortalaması ise -0,5 cm/yıl ile azalmaktadır. Bununla birlikte, tüm zaman serilerinin yarısından fazlası azalan bir trende sahip olup kuraklığa eğilimlidir. Artan su bütçesi eğilimine yani pozitif trende sahip zaman serilerinde ise çoğunluğunun sadece 0 ila 1 cm/yıl arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, Grönland, Antarktika ve Alaska Körfezi, toplam su kütlesi değişiminde azalmanın en çok olduğu bölgelere karşılık gelmektedir. Daha yakından inceleyecek olursak, en önemli nehir havzalarından olan Tigris-Euphrates (bir kısmı ülkemizde yer alan Fırat-Dicle havzası) ve Ganges-Brahmaputra'yı temsil eden toplam su bütçesi değişiminin sırasıyla -1,8 ve -1,4 cm/yıl olmak üzere azalan trend değeriyle karakterize edildiği söylenebilir. Literatürde, trend değerlerindeki bu azalmanın, kuraklıklardan ve Ganges-Brahmaputra havzasında beklenmeyen yağış azalmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Vishwakarma vd., 2021). Kuzey Amerika'da yer alan Great Lakes bölgesine yakın Nelson ve St. Lawrence nehirlerinin olduğu bölgede ise yaklaşık 1 cm/yıl ile artan bir trend görülmektedir. Sonuçlar, özellikle toplam su bütçesi anomalisi zaman serilerinin pozitif ve negatif yönlü doğrusal trend değerlerinin mekânsal dağılımı bakımından Scanlon vd. (2016) ile örtüşmektedir.

Yıllık genlikler incelendiğinde, Güney Amerika'da Amazon nehri ve çevresindeki ekvatoral kuşak ile subtropikal bölgelerde en büyük değere sahip olup, tüm mascon zaman serileri için ortalaması 7 cm olarak belirlenmiştir. En küçük değerler ise, Kuzey Amerika'da Colorado, Avustralya'da Murray-Darling nehrinin geçtiği bölgeler ile Afrika'nın güneyinde Orange ve Okavango gibi yarı kurak havzalarda gözlenmektedir (Şekil 3.1). Bu sonuçlar da, yıllık genliğin bilinen mekânsal karakteriyle uyum içerisindedir (Scanlon vd., 2019).

3.2 Renkli Gürültü Karakterine Genel Bakış

Jeodezik zaman serilerinde gözlemler arasında zamana bağlı korelasyonların olduğu ve bu korelasyonların renkli gürültüyü meydana getirdiği bilinmektedir. Gürültü, sinyalde bulunan ve sinyalin taşıdığı bilgileri etkileyen, istenmeyen ya da oluşması önlenemeyen rasgele hatalardır. Bir zaman serisindeki gürültü karakterinin belirlenmesi için, zaman serisi öncelikli olarak spektral alanda analiz edilmelidir.

Spektral analiz, frekans etki alanının diğer bir deyişle spektral güç yoğunluk fonksiyonunun (Power Spectral Density, PSD) incelenmesi olarak ele alınmaktadır (Brockwell ve Davis, 2016; Chatfield, 1996). Spektral güç yoğunluk fonksiyonu, spektral indeks (κ) ve frekansın (f) bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilmektedir (Agnew, 1992; Mandelbrot ve Van Ness, 1968; Welch, 1967):

$$PSD = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^{\kappa} \tag{3.3}$$

Burada, P_0 ve f_0, normalizasyon sabitlerini temsil etmektedir. Bu eşitlik aynı zamanda,

$$10\log(PSD) = 10\log\left(\frac{P_0}{f_0{}^{\kappa}}\right) + \kappa 10\log(f) \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edildiğinde; renkli gürültünün spektral indeksi κ, "10log(PSD)" verilerinin desibel birimlerinde "10log(f)" doğal frekansı karşısındaki eğimi olarak tanımlanabilmektedir. Bu logaritmik (log-log) denklem, zaman serisini domine eden gürültü türü hakkında öncül bilgi edinmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gürültü türleri güç spektrumunda spektral indeks değerine göre sınıflandırılır ve bu değerler [-3, 1] aralığında bulunur. $-3 < \kappa < -1$ aralığında olanlar kesirli Brownian hareketi (fractional Brownian motion) olarak adlandırılırken, $-1 < \kappa < 1$ aralığında olanlar kesirli beyaz gürültü hareketi (fractional Gaussian noise) olarak adlandırılır ve bu aralıklar durağan-olmayan (non-stationary) ve durağan (stationary) süreçleri temsil eder. Bununla birlikte, spektral indeksin tam sayıya eşit olduğu özel durumlar da bulunmaktadır. Buna göre, $\kappa=0$ beyaz gürültüyü; $\kappa=-1$ kırpışma gürültüsünü ve $\kappa=-2$ rasgele yürüyüş gürültüsünü tanımlamaktadır. 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 çıkmaktadır. Bu nedenle, sadece beyaz gürültü içeren bir zaman serisinin güç spektrumu (log-log grafiği) incelendiğinde, herhangi bir eğim belirgin değildir. Ancak, kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültüsü gibi kesirli Brownian spektrumunda yer alan farklı türde gürültülerin bulunduğu zaman serisinin PSD-frekans grafiklerinde, negatif yönlü bir eğim gözlenir.

Farklı gürültü türlerine sahip veri setleri için, spektral indeksin kestirilmesinde geçiş (crossover) frekansı (f_0) dahil edilerek daha ayrıntılı bir spektral güç yoğunluğu analizi yapılabilir (Langbein ve Johnson, 1997). Ancak, bu bölümde amaç, toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinde renkli gürültünün varlığına ilişkin öncül bilgi edinmektir. Bu nedenle, Eşitlik (3.4)'te verilen log-log

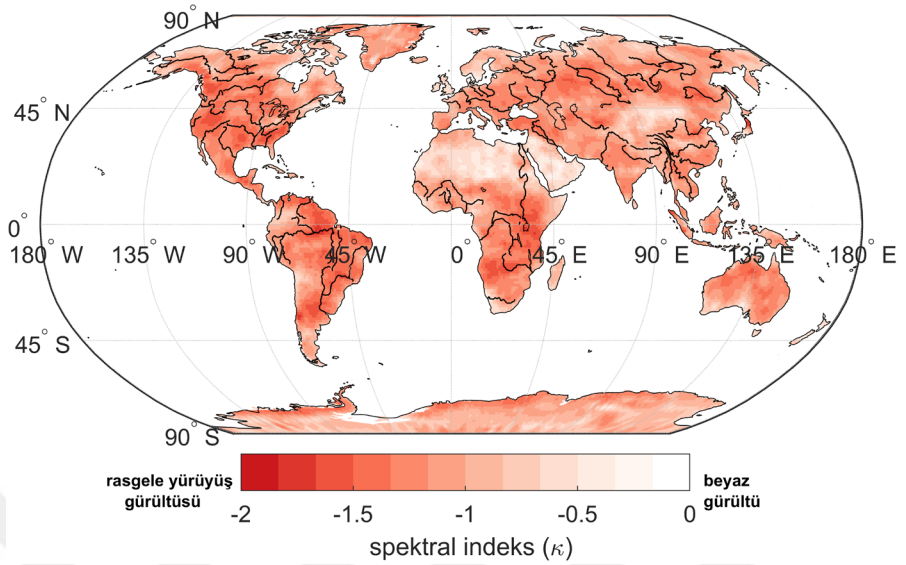
denkleminde $\frac{P_0}{{f_0}^{\kappa}}$ =1 olarak kabul edildiğinde, bu fonksiyona uygulanan en küçük kareler kestirimi sinyalin durağan olmayan kısmına ilişkin gürültüyü temsil eden spektral indeks değerini vermektedir.

Zaman serilerinin spektral güç yoğunluk fonksiyonu, Welch (Welch, 1967) veya Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Lomb–Scargle yöntemi, boşluklu zaman serilerinin spektral analizine olanak sağlamaktadır (Press vd., 2007). Bu nedenle, GRACE ve GRACE-FO gözlemleri arasındaki veri boşluklarını dikkate alarak, bu çalışmada spektral güç yoğunluk fonksiyonun belirlenmesinde Lomb-Scargle yöntemi kullanılmıştır. Buna göre, PSD-frekans grafiklerinin eğimini temsil eden spektral indeks (κ) log-log eşitliğine göre kestirilmiştir.

Global ölçekte gerçekleştirilen analizler sonucunda, toplam su bütçesi zaman serilerinde negatif eğimler sergileyen PSD-frekans grafikleri elde edilmiştir. Bu eğimi temsil eden spektral indeks değerlerinin ortalaması, GRACE dönemi (2002-2017) için -1,11±0,28 ve GRACE+GRACE-FO dönemi (2002-2022) için -1,06±0,27 bulunmuştur. Sonuçlar, iki veri setinin benzer gürültü özelliklerine sahip olduğunu yani yaklaşık beş yıllık GRACE-FO gözlemlerinde de gürültü karakterinin değişmediğini göstermektedir. Bu nedenle, Şekil 3.2'de GRACE+GRACE-FO gözlemlerini kapsayan 2002-2022 periyodu için spektral indeks haritası verilmiştir. PSD-frekans grafiklerinin bölgesel olarak daha yakından incelenebilmesi için, Türkiye'yi temsil eden 90 mascon ve başlıca nehir havzalarını temsil eden 24 mascon zaman serisi için ilgili grafikler ayrıca Şekil 3.5 ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir.

Spektral indeks değerlerinin sıfırdan uzaklaşması, zaman serisinin beyaz gürültü haricinde renkli gürültü ile yüklü olduğunu işaret etmektedir. Bu durum, yani spektral indeksin 0'dan -3'e doğru yaklaşması, spektrumdaki gücün düşük frekanslarda artması ve gürültünün daha korelasyonlu olması anlamına gelmektedir. Özellikle, kutup bölgelerinde, başlıca nehirlerin geçtiği veya kıyı şeritleri ile karakterize edilen bölgelerde indekslerin kırpışma gürültüsünü aşarak -1,5'e kadar düştüğü görülmektedir. Bu durum, toplam su bütçesi serilerindeki zamansal korelasyonların öncelikle sel, kuraklık ve kutup bölgelerindeki buzul

kütle değişimi gibi dinamik jeofizik ve hidrolojik faktörlerden etkilenebileceğini işaret etmektedir.



Şekil 3.2 2002-2022 yılları arasında mascon toplam su bütçesi zaman serisinin standart harmonik yaklaşım ile modellenmesinden elde edilen düzeltmelerin spektral indeksleri (κ) (Siyah çizgiler nehirleri göstermektedir)

Örneğin, Güney Amerika'da yer alan Amazon nehrinin geçtiği bölgenin yakınlarında, zaman serisinin spektral indeksi κ=-2'yi aşan ve rasgele yürüyüş gürültüsüne benzer özellikte bir renkli gürültü özelliği sergilemektedir. Bu gürültü modeli, bölgedeki toplam su bütçesinin genel dinamikleri üzerinde etkisi olan El Niño salınımı (ENSO) ile ilişkili dalgalanmaların neden olduğu önemli hidrolojik olaylarla yakından bağlantılıdır (Chen vd., 2010; Getirana vd., 2017; Marengo ve Espinoza, 2016; Marengo vd., 2018). Benzer şekilde, Kuzey Amerika'da ve Güney Afrika'da nehirlerin bulunduğu bölgelerde de zaman serileri kırpışma gürültüsü ve rastgele yürüyüş gürültüsüne benzeyen gürültü özellikleri göstermektedir. Bu gürültü karakterinin, kurak ve/veya yağışlı geçiş dönemlerde yeraltı suyu seviyelerinde meydana gelen dalgalanmalar gibi fiziksel etkilerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Hasan vd., 2019; Kolusu vd., 2019; Li ve Wang, 2022).

3.3 Stokastik Model Tasarımı

Zaman serilerinde stokastik model, gözlemler arasındaki ve zamana bağlı korelasyonlara göre oluşturulmaktadır. Bu nedenle, zaman serilerinin yüklü olduğu gürültü türü, serinin stokastik davranışını temsil eder. Sadece beyaz gürültü içeren zaman serilerinde, ölçülerin kovaryans matrisi $\mathbf{C}_{yy} = \sigma^2\mathbf{Q}_{yy}$ olarak tanımlanırken, $\mathbf{Q}_{yy}$'nin birim matris olduğu kabul edilir. Ancak renkli gürültü mevcut olduğunda, stokastik model farklı gürültü türlerini de içerecek şekilde yeniden tasarlanmalıdır.

Stokastik model tasarımında zamana bağlı korelasyonların ihmal edilmesi, zaman serisinden elde edilen kestirim sonuçlarını, özellikle de standart sapmaları etkilemektedir. Bu nedenle, toplam su bütçesi zaman serilerinde trend parametresinin anlamlılığı istatistiksel olarak değişmekte olup, su potansiyeli bakımından yapılacak değerlendirmelerin güven aralıklarına ilişkin yorumlar da farklılık gösterebilir. Burada önemli olan, zamana bağlı korelasyonların varlığının araştırılması ve stokastik model tasarımında uygun şekilde modellenmesidir. Bir zaman serisinin farklı gürültü türleriyle yüklü olduğu varsayımıyla, bir harmonik regresyon modeli altında nasıl modellenebileceği bu bölümün alt başlıklarında ele alınmaktadır.

3.3.1 Gürültünün Modellemesinde Varyans Bileşenlerinin Kestirimi Yöntemi

En küçük kareler kestiriminde stokastik model farklı gürültü türlerini dahil etmek için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{y} - \mathbf{e} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \;\; ; \;\; \mathbf{C}_{yy} = \sigma^2\mathbf{Q}_{yy} = \sum_{j=1}^{c} \sigma_j^2\mathbf{Q}_{jj} \tag{3.5}$$

Burada σ_j^2, j renkli gürültüsünün varyans bileşenini, $\mathbf{Q}_{jj}$ ise j'inci gürültü kaynağının kofaktör matrisini temsil etmektedir. Kofaktör matrisi $\mathbf{Q}_{jj}$, Hosking (1981) tarafından sunulan ve Williams (2003) tarafından tartışılan bilinen spektral indeks için otoregresif süreçler kullanılarak yaklaşık olarak elde edilebilir.

Varyans bileşenlerinin kestirimi, Zhang vd. (1997) ile Williams vd. (2004) tarafından açıklandığı gibi, maksimum likelihood kestirimi veya en küçük kareler varyans bileşenleri kestirimi (Amiri-Simkooei vd., 2007; Teunissen ve Amiri-Simkooei, 2008; Amiri-Simkooei, 2016) yöntemleriyle iteratif olarak

gerçekleştirilir. Alternatif olarak, Horn ve Horn (1975) tarafından sunulan Iterative Almost Unbiased Estimation (IAUE) yöntemi de varyans bileşenlerini belirlemek için uygulanabilir. IAUE yönteminin matematiksel modeli Ek A'da kısaca açıklanmaktadır. Bu yöntemler, gözlemleri ağırlıklandırmak için $\mathbf{Q}_{yy}^{-1}$ kullanılarak benzer sonuçlar üretmektedir (Aydin, 2017; Aydin vd., 2021).

Varyans bileşenlerinin kestirimi yönteminde ağırlıklandırma matrisi kullanılarak, fonksiyonel modelin parametreleri harmonik regresyon yaklaşımıyla kestirilebilmektedir. Sonuç olarak, öngörülen gürültü modeline göre oluşturulan stokastik model temelinde daha gerçekçi parametre kestirimleri elde edilebilir.

3.3.2 Gürültünün Modellemesinde Otoregresif Modellerin Kullanımı

Zaman serisindeki gürültü karakterinin dikkate alındığı çözümlerden biri de otoregresif süreçler ile yapılan regresyon analizidir. Otoregresif hata modelleri kısaca otoregresif modeller, veri setinin yüklü olduğu gürültü türüne en uygun olarak seçildiğinde yapılan kestirimlerden elde edilen parametrelerin anlamlılığı renkli gürültü varlığına uygun şekilde yorumlanabilmektedir. Her zaman serisinin farklı özellikte olması işlemlerde otomatik bir akıştan ziyade veri-sonuç odaklı çalışılmasını gerektirmektedir.

Otoregresif modeller üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler otokorelasyon (AR) bileşeni, farklandırma (I) bileşeni ve hareketli ortalama bileşeni (MA) olarak sıralanmaktadır. Bir otoregresyon modelinde (AR), ilgilenilen bir değişkenin kestirimi geçmiş değerlerini kullanılarak yapılmaktadır. Yani, otoregresyon terimi değişkenin yine kendisine göre bir regresyonu olduğunu ifade etmektedir. Farklandırma (I) bileşeni, zaman serisindeki verilerin farkını alarak trend ve mevsimsel etkileri elimine etmek için kullanılır. Hareketli ortalama (MA) bileşeni ise, zaman serisinin mevcut değeri ile geçmiş hata terimleri arasındaki ilişkiyi modellerken; geçmiş hata terimlerinin hareketli ortalamasını dikkate alır. Bu bileşenlerin kombinasyonu, ARIMA(p, d, q) (Autoregressive Integrated Moving Average) modelini oluşturur ve şu şekilde tanımlanır:

$$\underbrace{\left(1-\phi_1 B-\cdots-\phi_p B^p\right)}_{\mathrm{AR}(p)} \underbrace{(1-B)^d y_i}_{d\ \text{differentiation}} = \underbrace{(1+\gamma_1 B+\cdots+\gamma_q B^q)}_{\mathrm{MA}(q)} \mathrm{e}_i \qquad (3.6)$$

Burada ϕ ve γ sırasıyla AR ve MA modellerinin katsayılarını; B, geri kaydırma veya gecikme operatörünü ($B^w y_i = y_{i-w}$) ifade etmektedir. (p) ve (q), sırasıyla AR ve MA modellerinin, (d) ise fark almanın derecesidir. Bu parametreler (p, d ve q), negatif olmayan tamsayılar olarak seçilmektedir. Fark alma işlemi olmadığında, p. dereceden AR ve q. dereceden MA terimlerini içeren model ARMA(p, q) (Autoregressive Moving Average) modeli olarak tanımlanmaktadır.

Otoregresif modeller, bileşenlerinin derecesine ve katsayılarına göre bazı özel durumları içermektedir. Örneğin, ϕ=0 olan bir AR(1) modeli beyaz gürültü ile eşdeğerken, ϕ=1 olan bir AR(1) model veya farklandırılmış ARIMA(0,1,0) modeli rastgele yürüyüş gürültüsü ile eşdeğerdir. AR(1) ve ARMA(1,1) modelde de AR ve MA modelin katsayısına göre kırpışma gürültüsüne yakın bir spektrumda tanımlanan özellik göstermektedir. Bununla birlikte, ARMA(0,0) veya ARIMA(0,0,0) modeli de beyaz gürültü içeren en küçük kareler kestirimi altında gerçekleştirilen standart harmonik regresyon modeliyle özdeş sonuçlar üretmektedir (Box vd., 2015; Brockwell ve Davis, 2016; Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Otokorelasyon fonksiyonu (AutoCorrelation Function, ACF) ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (Partial AutoCorrelation Function, PACF) grafikleri kullanılarak da otoregresif modelin derecesi hakkında bir ön bilgi sağlanabilmektedir. Hızla azalan bir ACF grafiği, durağan süreçlerin varlığını gösterirken, yavaş bir azalma, genellikle renkli gürültü ile ilişkilendirilen durağan olmayan süreçleri göstermektedir.

Zaman serisine en iyi uyan otoregresif gürültü modelini belirlemek için Akaike Bilgi Kriteri (AIC) (Akaike, 1974), Bayesian Bilgi Kriteri (BIC) (Schwarz, 1978) ve düzeltilmiş AIC (AICc) gibi bilgi kriterleri kullanılmaktadır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında AIC kriterinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak, sınırlı örneklem büyüklüğü durumlarında AIC, aşırı uyum eğiliminde olabileceğinden, özellikle gözlem ve parametre sayısı arasındaki oranın 40'tan küçük olduğu durumlarda AICc kriterinin kullanılması önerilmektedir (Burnham ve Anderson, 2002). En küçük bilgi kriteri değerine sahip otoregresif model, zaman serisine en iyi uyan model olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, ACF ve PACF grafikleri, histogramlar ve normal olasılık çizimleri (Quantile-Quantile plot, QQ) düzeltmelerin normal dağılıma ne kadar yakınsadığının değerlendirilmesinde

önemli ölçütler sağlamakta ve en iyi uyan modelin belirlenmesinde birer ölçüt olarak kullanılmaktadır.

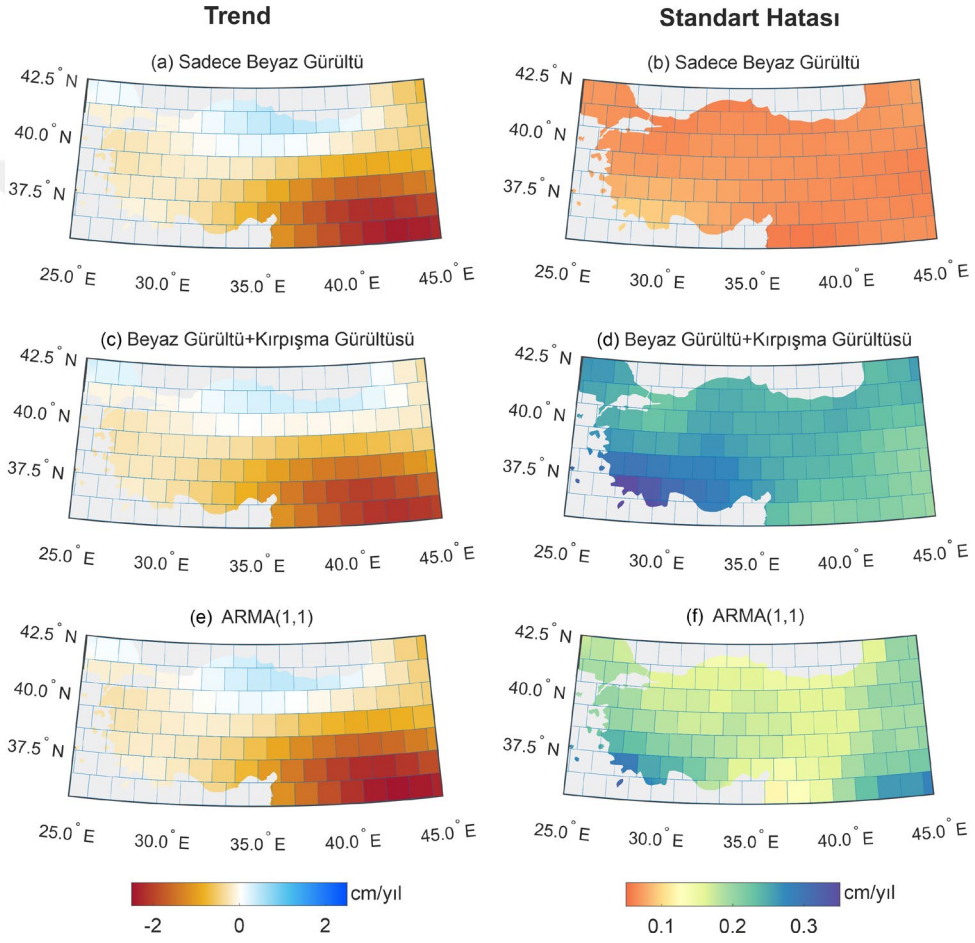
Otoregresif modellerle durağan olmayan süreçler bir regresyon modeli altında MATLAB ortamında regarima (ARIMA zaman serisi hataları ile regresyon modeli) fonksiyonu ile incelenebilmektedir. Bu çalışmada da bu fonksiyon kullanılarak bir program hazırlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Devam eden bölümlerde hem Türkiye'de hem de ana (major) nehir havzalarında gürültünün dikkate alındığı çalışmalara yer verilmektedir.

3.3.3 Türkiye Bölgesinde Hidrolojik Trendin Anlamlılığı

Gürültü karakterinin dikkate alındığı ve stokastik modelin tasarlandığı analizlerde, ilk olarak bölgesel ölçekte Türkiye'deki GRACE toplam su bütçesi değişimini ifade eden 90 farklı mascon zaman serisine odaklanılmıştır. Analizlere, standart harmonik fonksiyonel model yaklaşımıyla, zaman serisinde sadece beyaz gürültü olduğu kabul edilerek başlanmıştır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, doğrusal trend -2,5 ile 0,5 cm/yıl arasında değişmekte olup, ortalaması -0,6 cm/yıl olarak elde edilmiştir. Türkiye'nin kuzey kesiminde su bütçesi artan bir eğilime sahipken, güneydoğu kesimi, özellikle Fırat-Dicle havzası yakınları, azalan bir değişim ile karakterize edilmektedir (Abdelmohsen vd., 2022; Liesch ve Ohmer, 2016; Rateb vd., 2021; Voss vd., 2013).

Beyaz gürültü varsayımından sonra, güç spektrumunda belirgin olarak kesirli Brownian hareketi spektrumunda yer alan renkli gürültü ve buna bağlı zamansal korelasyonları dikkate almak için çeşitli gürültü modelleri ile analizler yapılmıştır. Türkiye'yi temsil eden mascon çözümlerinin spektral indeks (κ) ortalaması -1,25 (bkz. Şekil 3.2 ve ayrıca PSD grafikleri için Şekil 3.5) olarak elde edilmiştir. Ancak, PSD grafiğinden türetilen bu spektral indeks, renkli gürültünün indeksinin yaklaşık olarak anlaşılmasını sağladığı için, zaman serisinde farklı spektral indeksler ile de stokastik model tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde kullanılan modeller i) κ=-1 ile beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü, ii) κ=-1,25 ile beyaz gürültü + renkli gürültü, iii) κ=-1,40 ile beyaz gürültü + renkli gürültü iv) κ=-2 ile beyaz gürültü + rasgele yürüyüş gürültüsü olarak belirlenmiş ve varyans bileşenlerinin kestirimi yöntemi uygulanmıştır.

Farklı stokastik özelliklere sahip bu modeller, parametre kestirimi açısından incelendiğinde, trendin değerinin ayırt edici bir şekilde değişmediği ancak standart hatasının değiştiği görülmüştür. Kurulan ilk gürültü modeli olan beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü modelinde, doğrusal trendin standart hatası 0,35 cm/yıla ulaşırken, yalnızca beyaz gürültü modelinde bu hata, Şekil 3.3b'de gösterildiği gibi 0,1 cm/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu durum, çalışma bölgesindeki kırpışma gürültüsünün ihmal edilmesinin, standart hatanın üçte birine kadar daha az elde edilmesine neden olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3 (a), (c) ve (e) doğrusal trendi, (b), (d) ve (f) ise sırasıyla sadece beyaz gürültü, beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi modeli ve ARMA(1,1) modellerinden elde edilen doğrusal trendin standart hatası

Diğer stokastik modeller için ise, spektral indeksler rasgele yürüyüş gürültüsüne yaklaştıkça trendin standart hatasının daha da büyük elde edildiği görülmektedir. ii., iii. ve iv. gürültü kombinasyonları için varyans bileşenlerinin kestirimi modellerinden, trendin standart hatası beyaz gürültü modeline göre sırasıyla 6, 8 ve yaklaşık 20 kat daha büyük olarak bulunmuştur. Bu sonuç, ilgili standart hatanın

aşırı kötümser biçimde kestirildiğini göstermektedir. Örneğin, rastgele yürüyüş gürültüsü söz konusu olduğunda, önemli su kütlesi kaybına uğradığı bilinen bir bölge olan Fırat-Dicle havzası yakınlarında bile anlamlı bir trend değişimi gözlemlenememektedir. Bu durum, modelin yalnızca fonksiyonel ilişkiler dikkate alınarak kurulduğunda fiziksel gerçeği yansıtmayabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi modelinin, harmonik regresyonun stokastik doğasını tanımlamak için potansiyel olarak en uygun model olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, bu çalışma bölgesine en iyi uyan gürültü modelini belirlemek için Hector yazılımı (Bos vd., 2013) da kullanılmıştır. Hector sonuçları BIC değerlerine göre karşılaştırıldığında, zaman serilerinde beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü modelinin daha baskın olduğu görülmüştür. Ayrıca, trendin belirsizliğinin yani standart hatasının varyans bileşenlerinin kestirimi analizinden elde edilen ve Şekil 3.3d'de sunulan sonuçlar ile hem mekânsal hem de nümerik olarak uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ancak burada, zaman serisinde renkli gürültü bulunduğu durumda varyans bileşenlerinin kestirimi uygulanırken karşılaşılan çeşitli zorluklara da değinmek gerekmektedir. Bu zorluklar, sınırlı bir gözlem frekansı, kısa periyotlu zaman serisi, farklı gürültü türlerinin birbirine göre baskınlığı veya beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü + rastgele yürüyüş gürültüsü gibi daha karmaşık gürültü modellerinin varlığı olmak üzere farklı başlıklar altında toplanmaktadır. Bahsedilen bu ve benzeri nedenlerle varyans bileşenlerinin kestirimi yönteminde varyans bileşenleri her durumda sonuca yakınsayamamaktadır (Aydin vd., 2021). Bu tür zorlukların üstesinden gelmek ve zamansal korelasyonları spektral indeksin belirlenmesine bağlı olmadan daha esnek ve etkili bir şekilde modellemek için otoregresif süreçler ile analizlerin gerçekleştirilmesi önerilmektedir. Bu bağlamda, ARIMA modellerin kullanımı, zaman serisine en uygun modelin seçilmesi ve parametrelerin kestirilmesi konusunda daha esnek çözümler ve yüksek düzeyde kontrol sağlamaktadır.

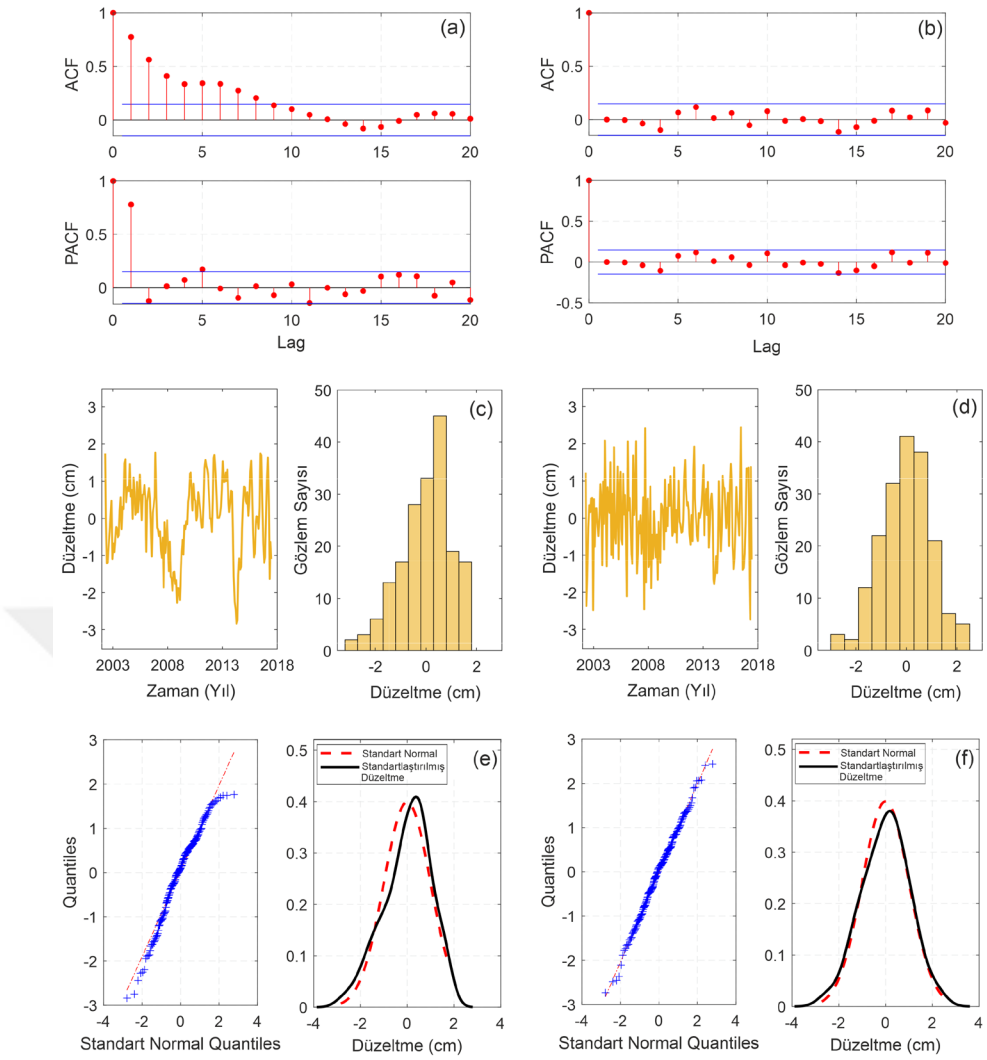
Otoregresif süreçlerle analiz aşamasında ARMA(0,1), ARIMA(0,1,0), ARMA(1,1) ve ARIMA (1,1,1) dahil olmak üzere çeşitli modeller kullanılmıştır. Tüm bu modellerle gerçekleştirilen ayrıntılı bir inceleme sonucunda, ARMA(1,1) gürültü modelinin Türkiye bölgesindeki toplam su bütçesi zaman serilerinde mevcut olan renkli gürültüyü ifade etmek için en uygun otoregresif model olduğu belirlenmiştir.

Dolayısıyla, bu gürültü modelinin en küçük AICc değerine sahip olduğu görülmüştür. Her bir mascon zaman serisi için sadece beyaz gürültü içeren standart harmonik regresyon modeli ile ARMA(1,1)'den elde edilen bilgi kriteri değerleri Ek B'de yer alan Tablo B.1'de verilmektedir. Örneğin 1 numaralı mascon çözümü için sonuçlar incelendiğinde sadece beyaz gürültü modelinden AICc değeri 1050,14 olarak hesaplanırken, bu değer ARMA(1,1) modeli için 879,36'ya düşmektedir. Benzer şekilde tüm mascon çözümleri için ARMA(1,1) modelinin kıyaslanabilir derecede daha küçük AICc değerleri ürettiği görülmektedir.

En uygun modelin belirlenmesinde bilgi kriteri değerlerine ek olarak, modelden geriye kalan düzeltmelerin de Bölüm 3.3.2'de belirtilen çeşitli grafiklere dayalı olarak normal dağılıma ne kadar yaklaştığı da incelenmiştir. Şekil 3.4'te çalışma bölgesinde rasgele seçilen bir mascon zaman serisinin (enlem: 40,8^{o} ve boylam: 36,2^{o}) modelden elde edilen düzeltmeleri için otokorelasyon grafikleri, QQ çizimleri ve histogramı hem sadece beyaz gürültü hem de ARMA(1,1) modelleri için verilmektedir.

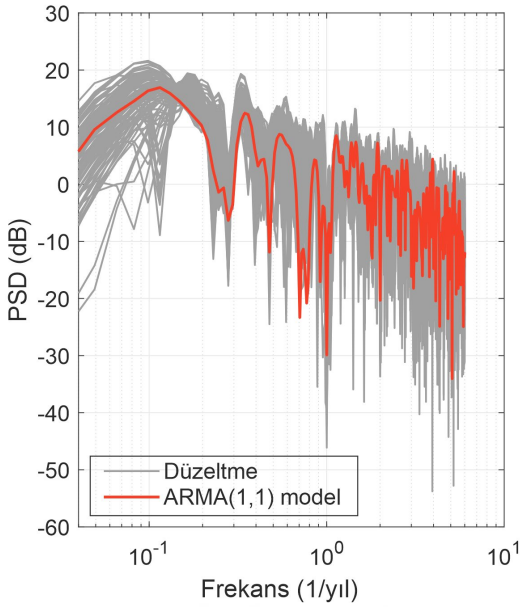
Otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon çizimleri Şekil 3.4a ve 3.4b'de gösterilmektedir. Şekil 3.4a sadece beyaz gürültü modelinden elde edilen düzeltmelerin korelasyon değerlerinin ilgili lag aralıklarında güven aralığının dışında olması ve yavaş düşüş eğilimi göstermesiyle zaman serisinin renkli gürültü ile yüklü olduğuna işaret etmektedir. Şekil 3.4b ise ARMA(1,1) modelinden elde edilen sonuçlarda ACF ve PACF çizimlerinin güven sınırları içinde kalmasının, kullanılan modelin zaman serisinin gürültü karakterine uygun olduğunu göstermektedir.

Benzer şekilde, düzeltmelerin zaman serisi ve histogramının yer aldığı Şekil 3.4c ve 3.4d incelendiğinde, ARMA(1,1) modelinden elde edilenlerin beyaz gürültüyü temsil ettiği ve bu nedenle Şekil 3.4d'de gösterilen histogramın normal dağılıma daha uygun olduğu görülmektedir. QQ grafik çizimlerinde ise modelin uygunluğu, doğrusal bir çizgi üzerinde noktaların dağılımıyla değerlendirilmektedir. ARMA(1,1) modelinden elde edilen QQ çiziminde (Şekil 3.4f) daha fazla noktanın doğru üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu şekilde çizimler ve bilgi kriterleri tüm mascon çözümleri için bir arada değerlendirildiğinde en uygun modelin ARMA(1,1) olarak seçilmesine karar verilmiştir.



Şekil 3.4 Rasgele seçilen bir mascon (enlem: 40,8º ; boylam: 36,2º) zaman serisinin sadece beyaz gürültü (sol panel: a, c, e) ve ARMA(1,1) (sağ panel: b, d, f) modellerinden elde edilen düzeltmeleri için otokorelasyon grafikleri (a, b), histogramı (c, d) ve QQ çizimleri (e, f)

En uygun modelin derecesinin belirlenmesinden sonra, bu modeli oluşturan AR ve MA katsayılarının incelenmesi kısmına geçilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, bu katsayılar renkli gürültü hakkında bilgiler içermektedir. Türkiye'yi temsil eden mascon çözümlerinin tamamında, bu gürültü modeli için ortalama AR ve MA katsayıları sırasıyla ϕ=0,74 ve γ=0,15 olarak hesaplanmıştır. Bu ortalama katsayılara sahip ARMA(1,1) gürültü modelinin spektral güç yoğunluk grafiği Şekil 3.5'te kırmızı renkle gösterilmiştir. Bu grafik, gürültü modelinin Türkiye bölgesindeki mascon zaman serilerinden elde edilen toplam su bütçesi verileriyle ne kadar uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

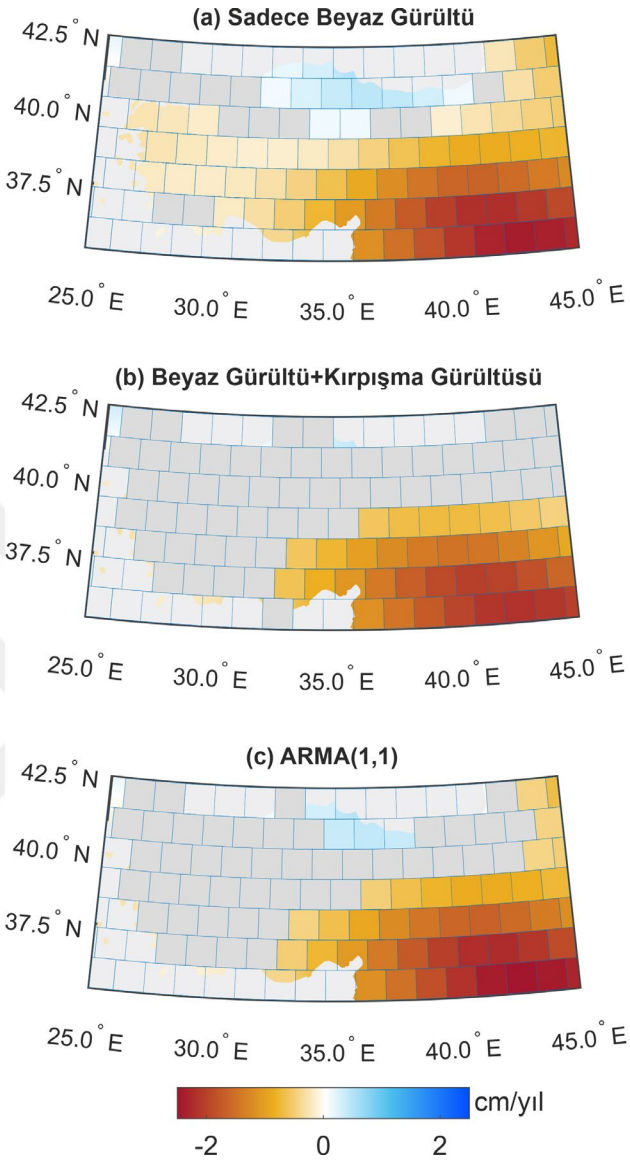


Şekil 3.5 Türkiye bölgesindeki mascon zaman serilerinin analizinden elde edilen düzeltmelerin ve ARMA(1,1) modelinin (ortalama katsayılar ϕ=0,74 ve γ=0,15) spektral güç yoğunluk grafikleri

Şekil 3.3e ve 3.3f'de, bölgedeki ARMA(1,1) gürültü modeli kullanıldığında elde edilen doğrusal trend ve standart hatası verilmektedir. Bu trend kestirimleri, sadece beyaz gürültü modeli ve beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi modeliyle elde edilenlere benzerdir. Ancak, bu kestirimlere ilişkin standart hatalar önemli ölçüde farklılık göstermektedir. ARMA(1,1) modeli, beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü modelinden daha küçük, sadece beyaz gürültü içeren standart harmonik regresyon modelinden daha büyük standart hatalar üretmektedir. Sonuç olarak, standart harmonik regresyon modelinin belirsizliği ARMA(1,1) modelinden yaklaşık 2,5 kat daha küçüktür.

2,5 ile 3 kat arasında değişen bu eksik kestirim oranları, renkli gürültüyü dikkate alarak standart hataları daha doğru bir şekilde belirlemek için önemli olsa da burada esas odak noktası, trendin anlamlılığını nasıl etkilediğini anlamaktır. Bunun için, parametre testi uygulanarak |trend|/standart hatası olarak tanımlanan test istatistiği, kurulan farklı stokastik modeller için t-student dağılımıyla incelenmiştir. Bu teste göre, test istatistiği yanılma olasılığı α=%5 için $t_{(n-6,0.975)}$=1,97'den küçükse, trend değeri %95 güven düzeyi ile anlamsız, aksi takdirde ise anlamlı olarak kabul edilmektedir. Bu sonuçlara dayanarak, Şekil 3.6, gri mascon blokları ile temsil edilen ve anlamsız olarak belirlenen trendleri göstermektedir. Türkiye'ye yakın

denize karşılık gelen mascon blokları ise açık gri renkte gösterilmiş ve analize dahil edilmemiştir.



Şekil 3.6 (a) Sadece beyaz gürültü, (b) beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü varyans bileşenlerinin kestirimi ve (c) ARMA(1,1) modellerinden elde edilen trendin anlamlılığı (gri mascon blokları anlamsız olarak belirlenen trendi göstermektedir)

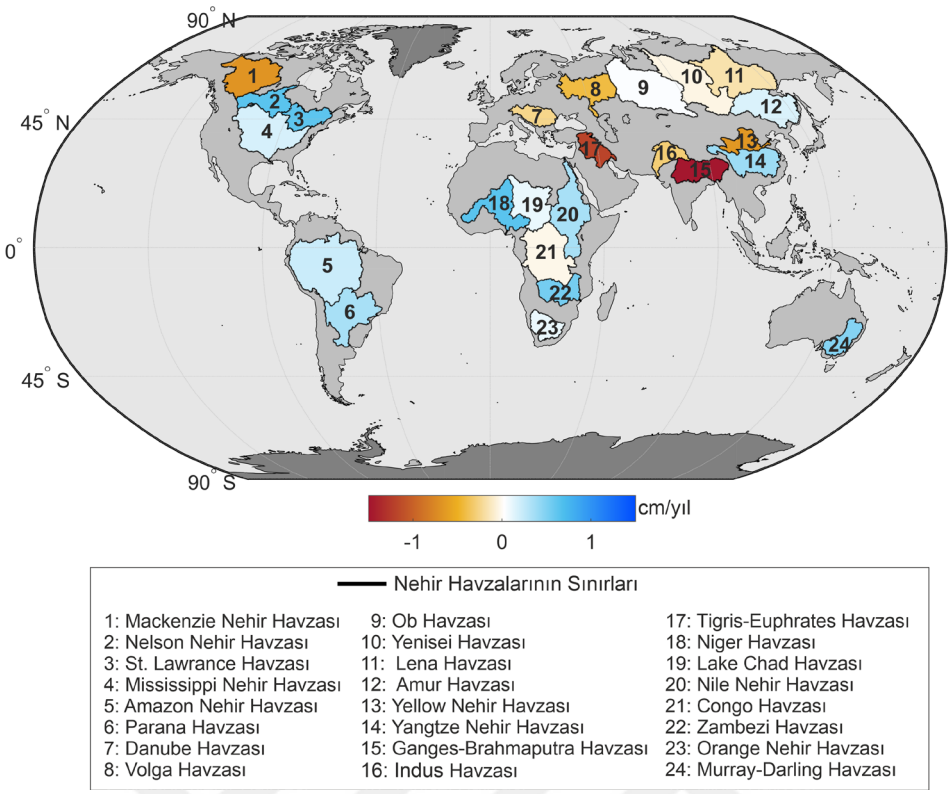
Şekil 3.6a'da gösterildiği üzere, standart harmonik regresyon yaklaşımıyla mascon bloklarının %83'ünde trend anlamlı olarak belirlenmiştir. Ancak bu oran, beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü ve ARMA (1,1) modelleri için sırasıyla %39 ve %50'ye kadar düşmektedir. Mekânsal açıdan bakıldığında, standart modelde Türkiye'nin orta-doğu bölgesindeki havzalara karşılık gelen çözümlerde anlamlı bir su bütçesi değişimi olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, diğer modellerde, Fırat-Dicle havzasının bulunduğu güneydoğu kısmı hariç, PSD grafiklerinde

görülen renkli gürültü nedeniyle trendin anlamlılığı konusunda belirsizlikler bulunmaktadır.

Sadece beyaz gürültü olduğu kabul edilen varsayımda, bölgedeki trendin anlamlılığına ilişkin komşu mascon çözümleri için tutarsız sonuçlar üretilmekte ve bu, su kütlesinin değişimi için yanlış yorumlamalara yol açabilmektedir. Öte yandan, renkli gürültüyü dikkate alan modeller, Türkiye'nin orta ve batı kesimlerinden Akdeniz'e kadar uzanan bölgede doğrusal olarak tanımlanan trendin anlamsız olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, varyans bileşenlerinin kestirimi modeli, çalışma bölgesinin kuzey kesiminde trendin anlamsız olduğunu gösterirken, ARMA(1,1) modeli, Türkiye'de iki büyük nehir olan Kızılırmak ve Yeşilırmak'ın Karadeniz ile birleştiği bölgenin kuzey kesiminde yaklaşık 0,5 cm/yıllık anlamlı bir kütle artışı olduğunu göstererek daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır.

3.3.4 Nehir Havzalarında Hidrolojik Trendin Anlamlılığı

Bir önceki bölümde, bölgesel ölçekte ele alınan Türkiye'deki mascon çözümlerinin toplam su bütçesi değişim trendi üzerinden renkli gürültünün etkisi incelenmişti. Ancak, Şekil 3.2'deki spektral indeks haritasında görüldüğü gibi, renkli gürültü, küresel ölçekte tüm kıtaları temsil eden mascon çözümleri arasında belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu bağlamda, tez çalışması süresince, bu kıtaları temsil eden ve mascon çözümü sunulan havzalara ait analizler de gerçekleştirilmiştir. Bulguların daha anlaşılır ve etkili bir şekilde sunulması için bu bölümde sonuçlar, belirlenen 24 büyük nehir havzası üzerinden tartışılmaktadır. Çalışmanın odak noktası, Şekil 3.7'de belirtilen konumları ve standart harmonik regresyon modelinden elde edilen doğrusal trendi verilen 24 büyük nehir havzası olarak belirlenmiştir. Böylece, su kütlesi değişiminde önemli rol oynayan bu nehir havzalarında detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, mascon çözümleri havza bazında üretildiği için gridlenmiş çözümlere kıyasla GRACE uydusunun çözünürlüğünden daha geniş alanları kapsayarak mekânsal korelasyonların etkisini azaltma imkânı da sağlamaktadır.



Şekil 3.7 Nehir havzalarının trend değerleri

Standart harmonik regresyon modelinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3.7'de incelendiğinde, artan kütle değişim trendinin Nelson, St. Lawrence ve Niger havzalarında belirgin olduğu, azalan değerlerin ise Tigris-Euphrates (Fırat-Dicle havzasının tamamını temsil etmektedir) ve Ganges-Brahmaputra havzalarında daha belirgin olduğu görülmektedir. Genel olarak, bu nehir havzalarında toplam su bütçesi değişiminin -1 ile 1 cm/yıl arasında değiştiği ve tüm havzalar bir arada değerlendirildiğinde trend ortalamasının -0,01 cm/yıl ile dengede olduğu bilinmektedir.

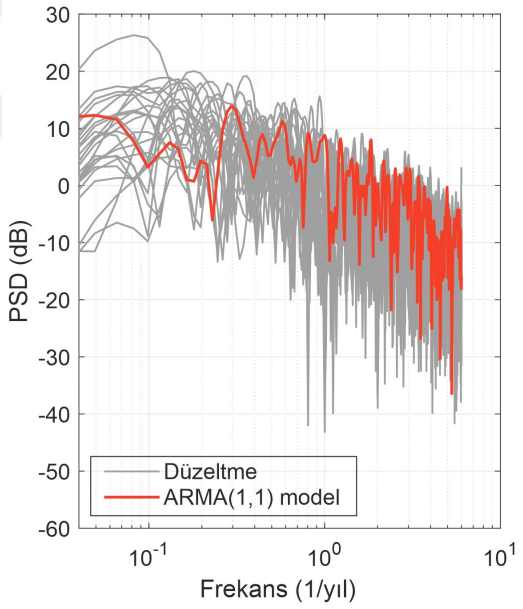
Standart yaklaşımın ardından, en uygun stokastik modelin belirlenmesi için nehir havzalarına ait zaman serilerinde de gürültü karakteri incelenmiştir. Buna göre, spektral indeksler -1 (kırpışma gürültüsü) ile -2 (rasgele yürüyüş gürültüsü) arasındaki spektrumda değişirken ortalama değer -1,4 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçları destekler nitelikte, Şekil 3.8'de verilen spektral güç yoğunluk grafiklerinde de zaman serilerinde negatif yönlü eğilimin baskın olduğu ve özellikle düşük frekanslarda daha fazla saçılma olduğu görülmektedir. Bu durum, havzaların farklı coğrafi konumlarda bulunmaları ve dolayısıyla farklı hidrolojik olaylarla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir.

Renkli gürültünün modellenmesi için analizlerde otoregresif süreçler kullanılmıştır. ARMA(1,1) modeliyle birlikte ARMA(1,0), ARIMA(1,1,0) ve ARIMA(1,1,1) başta olmak üzere çeşitli ARIMA modeller incelenmiştir. Trend kestirimleri, 1σ standart hatalarıyla birlikte Tablo 3.1'de sunulmaktadır. Karşılaştırmayı kolaylaştırmak için, sadece beyaz gürültüyü içeren standart yaklaşım modeline ilişkin kestirimler de tablonun ilk sütununa eklenmiştir. AR(1) modele eşdeğer olan ARMA(1,0) modeliyle birlikte ARMA(1,1) en küçük AICc değerlerini verirken, farklandırma yapılan ARIMA(1,1,0) ve ARIMA(1,1,1) daha büyük AICc değerlerine sahiptir. Bu sonuçlara karşılık gelen AICc değerleri Ek B'de yer alan Tablo B.2'de verilmektedir. Bilgi kriterleri karşılaştırıldığında, standart harmonik regresyon modelinin AICc değerlerinin otoregresif modellerden önemli ölçüde farklı olduğu görülmektedir.

Tablo 3.1 Nehir havzalarında trend ve 1σ standart hatası (cm/yıl)
(Gölgeli satırlar anlamsız trend oranlarını gösterirken; koyu yazılan değerler en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir. Kısaltmalar: Ganges-Brahmaputra için GB; Tigris-Euphrates için TE; Murray-Darling için MD)

	Havza	Beyaz Gürültü	ARMA(1,0)	ARMA(1,1)	ARIMA(1,1,0)	ARIMA(1,1,1)
1	Mackenzie	-0,68±0,03	-0,69±0,08	**-0,68±0,07**	-0,66±1,00	-0,72±0,07
2	Nelson	0,64±0,06	0,57±0,23	**0,58±0,21**	0,34±1,44	0,31±1,51
3	St. Lawrence	0,63±0,06	**0,91±0,34**	0,87±0,32	0,68±1,34	0,69±1,40
4	Mississippi	0,18±0,07	0,23±0,22	**0,21±0,20**	-0,01±1,26	-0,01±1,28
5	Amazon	0,22±0,10	0,14±0,46	**0,16±0,36**	0,02±2,85	-0,03±2,64
6	Parana	0,35±0,07	0,49±0,25	**0,40±0,19**	0,61±2,29	0,48±2,15
7	Danube	-0,25±0,07	**-0,28±0,25**	-0,27±0,25	-0,07±1,82	-0,07±1,80
8	Volga	-0,42±0,06	-0,32±0,20	**-0,38±0,17**	-0,15±1,78	-0,20±1,82
9	Ob	0,04±0,06	**0,27±0,31**	0,19±0,28	-0,17±1,19	-0,20±1,25
10	Yenisei	-0,04±0,03	**-0,05±0,09**	-0,06±0,08	-0,52±1,13	-0,46±0,66
11	Lena	-0,17±0,04	-0,15±0,12	**-0,17±0,09**	-0,17±1,32	-0,17±0,68
12	Amur	0,16±0,06	0,16±0,21	**0,14±0,18**	-0,03±1,51	-0,05±1,58
13	Yellow	-0,66±0,04	-0,70±0,15	**-0,69±0,15**	-0,79±1,23	-0,70±0,16
14	Yangtze	0,39±0,04	0,38±0,08	**0,38±0,07**	0,09±1,82	0,31±0,10
15	GB	-1,48±0,06	**-1,49±0,15**	-1,49±0,15	-2,02±2,16	-1,59±0,20
16	Indus	-0,30±0,04	-0,30±0,12	**-0,30±0,10**	-0,52±1,71	-0,52±1,82
17	TE	-1,19±0,05	-1,24±0,17	**-1,24±0,18**	-1,19±1,17	-1,08±0,62
18	Niger	0,64±0,03	0,64±0,06	**0,64±0,05**	0,70±1,21	0,64±0,05
19	Lake Chad	0,10±0,02	**0,11±0,05**	0,11±0,05	0,04±0,87	0,05±0,09
20	Nile	0,35±0,03	**0,33±0,09**	0,33±0,08	-0,01±1,14	0,23±0,12
21	Congo	-0,03±0,05	-0,02±0,19	**-0,04±0,17**	-0,50±1,53	-0,50±1,52
22	Zambezi	0,54±0,12	0,36±0,70	**0,43±0,56**	0,32±3,06	0,27±2,99
23	Orange	0,10±0,04	**0,07±0,12**	0,08±0,11	0,07±1,31	0,03±0,09
24	MD	0,48±0,09	**0,49±0,23**	0,49±0,23	0,31±1,49	0,30±0,78

Tablo 3.1'de, hangi modelin daha küçük AICc değerine sahip olduğunu göstermek için değerler koyu renkle belirtilmiştir. Buna göre, havzaların yaklaşık %65'inde ARMA(1,1) gürültü modelinin tercih edildiği görülmektedir. Ancak, kalan havzalar için, ARMA(1,1) ve ARMA(1,0) modelleri arasındaki AICc değer farkı çok küçük (yaklaşık 0,003) olmasına rağmen, ARMA(1,0) en iyi uyan model olarak tanımlanmıştır. Burada, ARMA(1,0) modelinin seçildiği St. Lawrence, Danube, Ob, Yenisei, Ganges-Brahmaputra, Lake Chad, Nile, Orange ve Murray-Darling havzalarında her iki otoregresif sürecin neredeyse aynı parametre kestirimlerini verdiği de belirtilmelidir. Bu nedenle, parametre kestirimi açısından, bu iki ARMA modeli arasında anlamlı bir fark yoktur. Öte yandan, ARMA(1,1) modeli, standart yaklaşımdan yaklaşık 3,1 kat daha büyük standart hatalar üretirken, bu oran ARIMA(1,1,0) ve ARIMA(1,1,1) için sırasıyla 30 ve 17 kata kadar yükselmektedir. Sonuç olarak, genel bir değerlendirme ile, diğer alternatiflerin yanı sıra, ARMA(1,1) modeli incelenen havzalar için en iyi uyum sağlayan gürültü modeli olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.8 Dünya'nın 24 büyük nehir havzasının zaman serilerinin analizinden elde edilen düzeltmelerin ve ARMA(1,1) modelinin (ortalama katsayılar ϕ=0,78 ve γ=0,21) spektral güç yoğunluk grafikleri

ARMA(1,1) gürültü modeli uygulandığında, AR ve MA katsayılarının ortalaması sırasıyla ϕ=0,78 ve γ=0,21 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8'de, bu ortalama katsayılar için ARMA(1,1) modelinin PSD grafiği de sunulmaktadır. Türkiye'de yapılan çalışmalarla benzer şekilde, havza bazında da bu gürültü modelinin toplam

su bütçesinde bulunan zamansal korelasyonları etkili bir şekilde temsil ettiği görülmektedir.

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, renkli gürültünün etkisi trendin anlamlılığının değişimini ele almak için önemlidir. Tablo 3.1'de gri gölgeli olarak verilen satırlar, %95 güven düzeyi ile t-student dağılımına göre anlamsız olarak belirlenen trendi göstermektedir. ARIMA(1,1,0) gibi farklandırma yapılan modellerde tüm havzalar için trend anlamsız hale gelirken, ARIMA(1,1,1)'de havzaların %79'u için trend anlamsız olarak belirlenmiştir. Bu durum, trendin standart hatasının beklenenden çok daha büyük elde edilmesinden (overestimation) kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan, ARMA(1,1) modelinde havzaların yaklaşık %63'ünde anlamlı bir su bütçesi değişiminden bahsedilirken, bu oran standart yaklaşımda %88'dir. Buradan hareketle, sadece beyaz gürültü içeren modelde neredeyse tüm havzalardaki kütle değişiminin doğrusal olarak ifade edilmesi anlamlı olarak kabul edilirken, ARMA(1,1) modelinde Mississippi, Amazon, Danube, Lena, Amur, Congo ve Orange gibi bazı havzalarda doğrusal olarak tanımlanan bu trendin anlamsız olduğu görülmektedir.

Ayrıca, 2018-2022 yılları arasında yaklaşık 6 yıl olan GRACE-FO çözümleri, gürültü karakterinin parametre kestirimine etkisinin incelenebilmesi için GRACE çözümlerinden sonraki 11 aylık veri boşluğu dikkate alınmadan analize dahil edilmiştir. Bu çözümler için gürültü karakteri Şekil 3.2'de gösterildiği üzere negatif spektral indeks sergilemektedir. GRACE periyodunda olduğu gibi, ARMA(1,1) modeli renkli gürültüyü en iyi temsil eden model olarak seçilmiştir. İki veri periyodu arasındaki boşluk doldurulmadan, trendin standart hatası ARMA(1,1) modeliyle standart modele göre yaklaşık 3,2 kat daha büyük bulunmuştur. Bu durum, GRACE-FO dönemindeki farklı hidrolojik olaylar ve zaman serilerinin uzunluğunun artması gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak, havzaların trendinin sayısal olarak değişse de iki farklı stokastik model arasında standart hata (1σ) oranının hala yaklaşık üç kat olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, Bölüm 3.2'de bahsedilen gürültü karakterinin GRACE-FO periyodunda değişmediği ve parametre kestirimleri üzerindeki etkilerinin özdeş olduğu ortaya konmuştur.

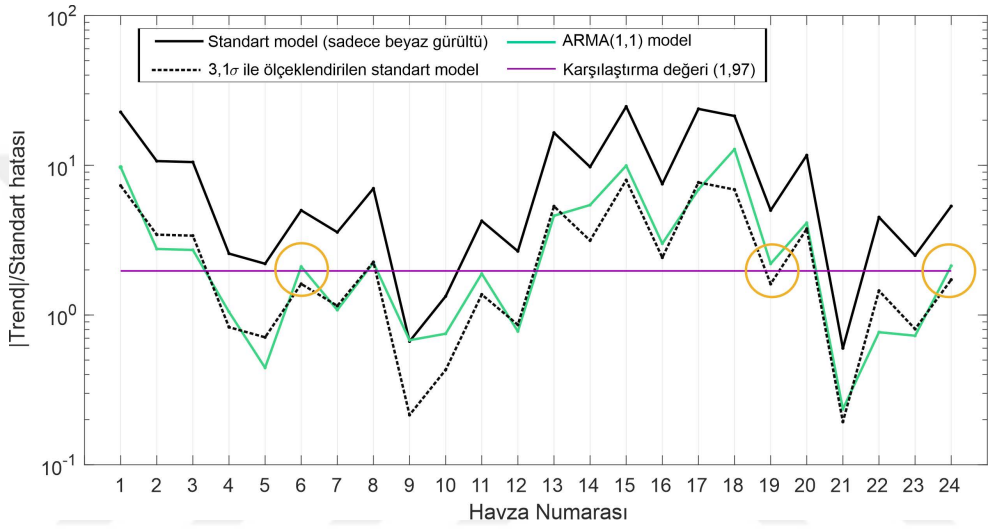
Renkli gürültünün modellenmesi sürecinde, sadece GSFC mascon çözümlerine bağlı kalmak yerine farklı veri kaynaklarının kullanılması da oldukça önemlidir. Bu yaklaşım, renkli gürültünün tek bir veri merkezine bağımlı olmadığını ve sonuçların

farklı veri setleri üzerinden de doğrulanabildiğini göstermektedir. Bu amaçla, JPL tarafından sağlanan RL06M v02 havza ölçekli mascon veri seti (Watkins vd., 2015) ile CSR, GFZ ve JPL veri merkezlerinin (https://thegraceplotter.com/) Seviye-2 veri seti olan DDK (Decorrelation Filter)-5 filtreli çözümleri (yaklaşık 180 km yarıçaplı Gauss filtresine eşdeğer (Gauer vd., 2023)) kullanılmıştır. DDK-5 çözümleri ve JPL mascon çözümleri için spektral indeks ortalaması -1 olarak elde edilmiştir (Güneş ve Aydın, 2024). PSD grafikleri incelendiğinde, Şekil 3.8'e benzer negatif yönlü eğilimlerin bulunduğu ve bu eğilimlerin ARMA(1,1) gürültü modeli ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır. Benzer şekilde, ARMA(1,1) gürültü modelinin havzalar için bu çeşitli çözümlere uygulandığında, trend parametresinin değişmediği ancak standart hatasının değiştiği gözlemlenmiştir. ARMA(1,1) modelinden standart yaklaşıma göre yaklaşık 3,3 kat daha büyük standart hatalar elde edilmiştir. Yapılan analizler farklı veri setleri için sonuçların oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir.

Nehir havzalarında hidrolojik trendin anlamlılığının incelenmesinde son aşama olarak ARMA(1,1) modeli ile standart yaklaşımdan elde edilen trendin standart hatasındaki oran üzerinde durulmaktadır. Bu oranın, ARMA(1,1) modelinin standart modelden elde edilen standart hataların yaklaşık 3,1 katı olduğu ve |trend|/standart hatası olarak hesaplanan trendin anlamlılığını değiştirdiği gösterilmişti. Otoregresif modeller kullanılmadan, standart yaklaşımdan elde edilen sonuçların anlamlılık testi değerini bu orana göre ölçeklendirmek için standart modelin test istatistiği değerinin %32,36'sı (1/3,1=32,36) alınmıştır. Böylece, standart yaklaşımdan elde edilen sonuçlar ARMA(1,1) modeli uygulanmış sonuçlarla yakın uyumluluk göstermektedir.

Şekil 3.9'da Tablo 3.1'deki değerlerden bu iki model için hesaplanan test değeri (|trend|/standart hatası) siyah ve yeşil çizgi ile gösterilmektedir. Siyah kesikli çizgi, 3,1σ ile ölçeklendirilen standart model sonuçlarını temsil etmektedir. Mor çizgi ise trendin anlamlılığının belirlenmesinde kullanılan karşılaştırma değerini (1,97) göstermektedir. Kesikli çizginin ARMA(1,1) sonuçlarını gösteren yeşil çizgiye doğru yaklaşması önerilen yaklaşımın başarılı olduğunu işaret etmektedir. Daha da önemlisi, Parana, Lake Chad ve Murray-Darling dışındaki havzalar için, bu yaklaşımın trendin anlamlılığının karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Testin %5 yanılma olasılığı ile yapıldığı düşünüldüğünde, bu üç havza için de

sonuçların kabul edilebilir düzeyde güven aralığı içinde olduğu düşünülmektedir (Aydin vd., 2021). Sonuç olarak, bu oranı kullanarak test istatistiğini ARMA(1,1) modeline eşdeğer hale getirmek, otoregresif süreçler kullanılmasa da standart yaklaşım sonuçlarının renkli gürültü modelinin istatistiklerine dönüştürülebileceğini göstermektedir. Çalışma, şu anda 24 ana nehir havzası üzerinden bu bulguları doğrulamaktadır ve tüm bu sonuçlar Gunes ve Aydin (2024)'te yayınlanmıştır. Gelecekteki çalışmalarda bu katsayı analizinin tüm kıtaları kapsayacak şekilde genişletilmesi planlanmaktadır.



Şekil 3.9 Standart yaklaşım sonuçlarının ARMA(1,1) modelinden elde edilen test istatistiği değerlerine dönüştürülmesi (Sarı daireler sırasıyla Parana, Lake-Chad ve Murray-Darling'deki trendin anlamlılığına karşılık gelmektedir)

Toplam su bütçesi zaman serilerinde renkli gürültünün hidrolojik trendin anlamlılığı üzerindeki etkisinin yanı sıra, mevsimsel sinyalleri temsil eden yıllık ve yarıyıllık periyodik bileşenler de bu bölümde ele alınmıştır. Seçilen nehir havzalarında hem standart harmonik regresyon modeli hem de ARMA(1,1) modeliyle gerçekleştirilen analizlerde yıllık genlik değerleri 0 ile 20 cm arasında değişmekte olup, ortalaması 6 cm olarak elde edilmiştir. En büyük değerler Amazon, Ganges-Brahmaputra ve Zambezi havzalarından gelmektedir. Diğer havzalarda ise yıllık genlik değerleri genel olarak 10 cm'nin altındadır. Bu sonuçlar Şekil 3.1'de verilen gridlenmiş mascon çözümlerinden elde edilen değerlerle uyum içerisindedir. Yarıyıllık genlik değerlerinin ise 5 cm'ye kadar ulaştığı ve ortalamasının 1,20 cm etrafında dağıldığı görülmektedir. Sonuçların mekânsal olarak beklendiği şekilde elde edildiği görülmüştür. Tropikal bölgede yer alan

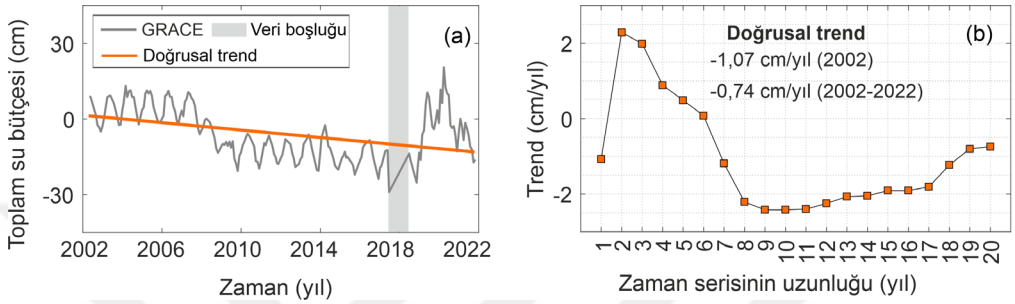
havzalarda (örneğin Amazon) mevsimsel sinyallerin daha baskın olduğu, yarı kurak havzalarda (örneğin Murray-Darling, Colorado) ise daha zayıf olduğu doğrulanmıştır (Scanlon vd., 2016; 2019). Diğer yandan, renkli gürültünün mevsimsel sinyallerin genlik kestirimini etkilemediği söylenebilmektedir. Ancak, bu durum standart hata değerleri için tam anlamıyla geçerli değildir.

Mevsimsel sinyallerin anlamlılığı, trend parametresinde olduğu gibi sadece beyaz gürültü modeli ve ARMA(1,1) modeli için karşılaştırıldığında, yıllık genliğin 24 havzanın tamamında anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Yarıyıllık genlik değerlerinde ise ARMA(1,1) model ile Amur, Danube ve Parana havzaları hariç diğer 21 havzada anlamlı sonuçlar elde edilmektedir. Standart model ile karşılaştırıldığında, bu havzalara ek olarak Murray-Darling ve Amazon havzalarında da yarıyıllık genlik değerlerinin anlamsız olduğu gözlenmektedir. Bu, parametre değerlerinin değişmesinden ziyade standart hatalardaki azalmanın bir sonucudur. Gürültü türüne uygun stokastik modelin tasarımı, yarıyıllık genliklerin daha anlamlı hale gelmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, uygun stokastik modelin sadece trend üzerinde değil, modelin tamamında etkili olduğu ve katkı sağladığı vurgulanmaktadır.

3.4 Fonksiyonel Model Tasarımı

GRACE ve GRACE-FO ile izlenen toplam su bütçesi zaman serilerindeki hidrolojik değişimleri ifade eden fonksiyonel modelin, veri setinin uzamasıyla birlikte yıllar içinde geliştirildiği literatür özeti bölümünde ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Toplam su bütçesi, değişken fiziksel faktörler nedeniyle zaman içinde sabit olmadığından (Blöschl vd., 2013; Chen vd., 2010; Hoerling vd., 2014; Long vd., 2013; Ojha vd., 2019; Palash vd., 2020; Scanlon vd., 2015; Sun vd., 2017), sadece lineer bir eğilime sahip doğrusal trend ile modellenmesi uzun vadeli su değişimini temsil eden gerçek sinyalin açıklanmasında yetersiz kalmaktadır. Bu durum, Şekil 3.10'da Tigris-Euphrates havzasında yer alan yaklaşık 20 yıllık GRACE ve GRACE-FO zaman serisi ile açıklanmaktadır. Toplam su bütçesi zaman serisinin uzunluğu 1 yıldan başlanıp 1'er yıl arttırılarak değiştirilmiştir. Buna göre doğrusal trend değerleri Şekil 3.10b'de gösterildiği gibi farklı değerler olarak elde edilmiştir. 2002 yılındaki 1 yıllık zaman serisi için trend değeri -1,07 cm/yıl olarak hesaplanırken; 2002-2007 aralığında yaklaşık olarak sıfır; 2002-2022 periyodundaki 20 yıllık zaman serisinde ise -0,74 cm/yıl olarak elde edilmiştir.

Yani, trend değişiminin zaman serisinin uzunluğu ile ilişkili olduğu söylenebilmektedir. Örneğin, 2007'den önce toplam kütle değişimi artma eğilimindeyken, daha sonra önemli ölçüde azalmakta ve bu düşüş daha sonraki yıllarda da devam etmektedir. Özellikle 2007'den 2009'a kadar olan periyotta eğilim tamamen pozitiften negatife dönmektedir. Bu nedenle Şekil 3.10a'da turuncu ile gösterilen doğrusal trendin yıllar arasında meydana gelen ve doğrusal olmayan bu değişimleri tam anlamıyla ifade edemediği görülmektedir.



Şekil 3.10 Tigris-Euphrates havzasında (a) toplam su bütçesi değişimi zaman serisi ve (b) zaman serisinin farklı periyotları için doğrusal trend

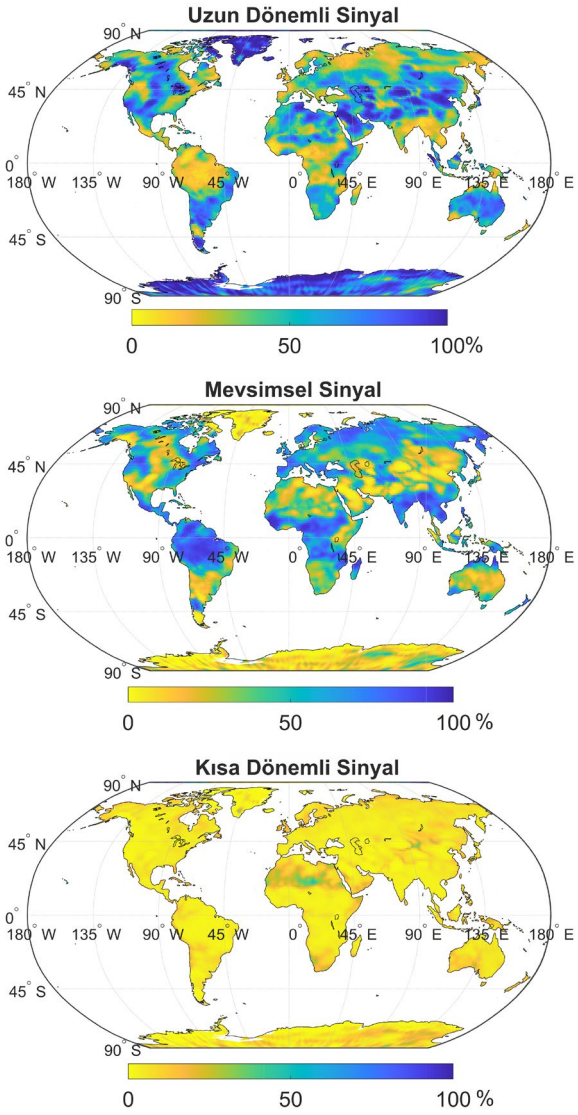
Bu motivasyonla birlikte fonksiyonel modelin yeniden ele alınması ve geliştirilmesi konusuna odaklanılmıştır. Ayrıca, renkli gürültü göz önüne alındığı stokastik modelde çoğu havzada doğrusal trendin anlamsız olduğunun tespit edilmesi de bu yaklaşımı desteklemektedir. Bu nedenle, su kütlesi değişimini ifade eden trend parametresinin fonksiyonel modelde sadece doğrusal değil, aynı zamanda doğrusal olmayan bileşenleri de içerecek şekilde polinomal fonksiyonlarla geliştirilip parametrik olarak ifade edilmesine karar verilmiştir.

3.4.1 Toplam Su Bütçesi Zaman Serilerinde Doğrusal Olmayan Değişimlerin Wavelet Analizi

Toplam su bütçesi zaman serilerindeki doğrusal olmayan değişimler, geleneksel yöntemlerden biri olan wavelet yöntemi kullanılarak analiz edilebilmektedir. Bu çalışmada, zaman serilerinin bilgi kaybı olmadan ayrıştırılmasına izin veren Meyer mother wavelet analizi kullanılmıştır (Meyer, 1990). Ek C'de bu yöntemin matematiksel modeli verilmiştir.

Parametrik olmayan bu yöntem ile toplam su bütçesi sinyali uzun dönemli (>1,1 yıl), mevsimsel (4 ay - 1,4 yıl) ve kısa dönemli (<5 ay) bileşenlere ayrılmıştır. Şekil 3.11'de, her bir bileşenin varyansı yüzdesel olarak gösterilmektedir. Bir mascon

zaman serisi için üç bileşenin varyansının toplamı %100'dür, ancak her bileşenin toplam su bütçesindeki sinyal oranı yani katkısı bölgeye göre değişmektedir. Uzun dönemli bileşen dünya genelinin yaklaşık %80'ini temsil ederken; Grönland, Antarktika, Alaska ve Patagonya gibi buzulların ve buz tabakalarının sistematik olarak erimesinin gözlemlendiği alanlarda ise neredeyse sinyalin tamamını temsil etmektedir (Rodell vd., 2018). Uzun dönemli değişimlerin ayrıca artan yağışların kaydedildiği Great Lakes bölgesinde, Avustralya'da taşkın görülen alanlarda ve Asya'da kuraklıklar nedeniyle su kütlesinin azaldığı bölgelerdeki toplam su bütçesi zaman serilerinde de baskın olduğu görülmektedir (Kayastha vd., 2022; Rodell vd., 2018).



Şekil 3.11 Wavelet analizi ile elde edilen uzun dönemli (>1,1 yıl), mevsimsel (4 ay - 1,4 yıl) ve (c) kısa dönemli (<5 ay) sinyallerin varyansı

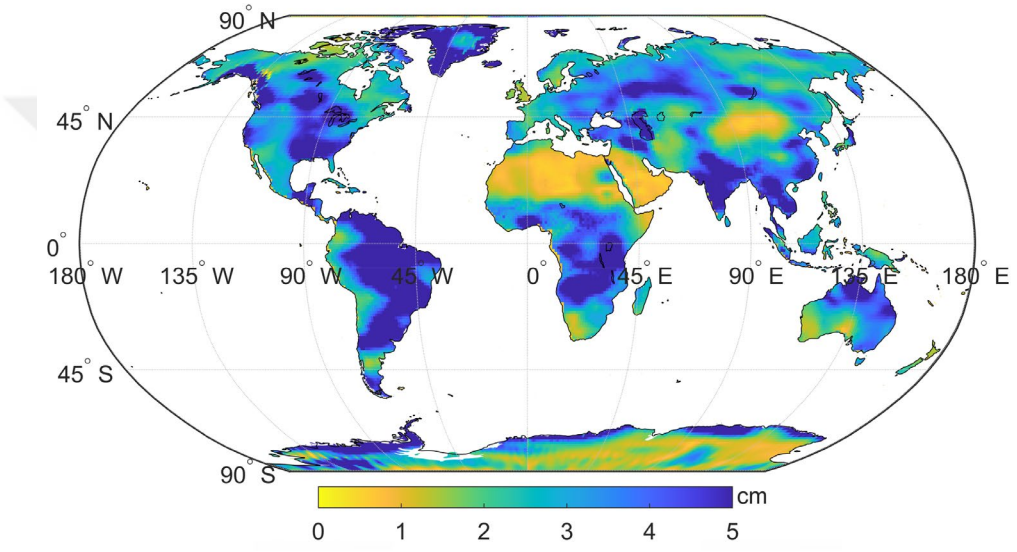
4 ay ile 1,4 yıl arasındaki dönemi temsil eden mevsimsel sinyallerin Amazon, Orinoco, Tocantins ve Parana nehir havzaları ile Krishna ve Mekong gibi Güney Asya'daki havzaları kapsayan tropikal bölgelerde baskın olduğu görülmektedir. Mevsimsel sinyaller ayrıca kuzey yarımkürenin yüksek enlem bölgelerindeki toplam su bütçesi zaman serilerinde de baskındır ve yıllık yağış geçişleri ile ilintili olduğu bilinmektedir (Reager vd., 2016). Kısa dönemli sinyallerin varyansı ise, toplam su bütçesinin %10'undan daha azını temsil etmekte ve çoğu bölge için neredeyse önemsiz olarak kabul edilmektedir. Ancak, Kuzey Afrika'nın yarı kurak ve kurak iklimin hâkim olduğu bölgelerde sinyalin yarısına yakınını temsil etmektedir. Bu üç bileşenin mekânsal dağılımı, Humphrey vd. (2016) ile Jensen vd. (2020) çalışmaları ile benzer alanları içermektedir.

Mekânsal dağılımı ve varyansı verilen uzun dönemli sinyalin, trendin doğrusal olmayan kısımlarını temsil ettiği kabul edilmektedir. Çünkü toplam su bütçesi zaman serisinde sinyalin varyansının en büyük kısmını 1,1 yıldan daha uzun olduğu kabul edilen bu doğrusal olmayan değişimler oluşturmaktadır. Uzun dönemli sinyal ile standart harmonik regresyon modelinden elde edilen doğrusal trend arasındaki farkların standart sapmaları hesaplanmış ve bu sayede toplam su bütçesi zaman serisinde trendin doğrusal olmayan kısımları için bir karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 3.12'de sunulan sonuçlar incelendiğinde; sarıdan maviye doğru gidildikçe standart sapmalar artmakta ve bu durum doğrusal olmayan trendin daha baskın olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.12 yakından incelendiğinde, Grönland'ın güney kesimi, Alaska, Batı Antarktika, Antarktika Yarımadası ve Patagonya gibi buzul kütlesinin yoğun olarak bulunduğu bölgelerde standart sapmaların 10 cm'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu farkların, toplam su bütçesi zaman serilerinde U şeklinde bir sinyal olarak gözlemlenen buzulların kütle kaybındaki hızlanmadan kaynaklandığı düşünülmektedir (Wouters vd., 2019). Bununla birlikte, iki varsayım arasındaki diğer büyük farkların, şiddetli depremlerin meydana geldiği Endonezya ve Japonya bölgelerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, toplam su bütçesi zaman serilerinde depremle ilgili jeopotansiyel değişimlerin su kütlesi üzerindeki etkisini göstermektedir (Deggim vd., 2021).

Hazar Denizi ve çevresinde tarımsal üretim nedeniyle su kaynaklarının kullanılmasına bağlı olarak trendde doğrusal olmayan değişimlerin var olduğu da

bilinmektedir. Bu değişimler, 4 cm'den büyük standart sapmayla karakterize edilmiştir (Rodell vd., 2018). Amazon, Okavango, Murray-Darling, Tigris-Euphrates ve Mississippi gibi nehir havzalarının bulunduğu bölgelerde de uzun dönemli sinyal ile doğrusal trend arasındaki farkın 5 cm'den büyük standart sapmaya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bölgeler, literatürde önemli uzun vadeli su kütlesi değişimlerinin raporlandığı bölgelere karşılık gelmektedir (Scanlon vd., 2018). Yüksek enlemler ve ekvator bölgelerinde gözlemlenen farkların da genellikle iklim değişikliğinden kaynaklanan doğrusal olmayan sinyaller ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Eicker vd., 2016).



Şekil 3.12 Wavelet analizi ile belirlenen 1,1 yıldan uzun dönemli sinyal ile standart fonksiyonel modelden elde edilen doğrusal trend arasındaki farkların standart sapması

Şekil 3.12'de sarı ve turuncu renkler ile temsil edilen en küçük standart sapmalar ise, Afrika'da Sahra Çölü, Orta Asya'da Gobi Çölü çevresi, Arap Yarımadası Çölü çevresi ile Avustralya'nın güneybatı bölgelerinde yer alan Great Victoria Çölü bölgeleriyle birlikte Doğu Antarktika'da gözlemlenmiştir. Bu durum, bahsedilen bölgelerde trendin standart fonksiyonel model ile temsil edilebildiğini ve doğrusal olmayan sapmaların önemsiz olduğunu göstermektedir. Bu bölgelerde su kütlesi değişiminin daha az olduğu, daha önce yapılan çalışmalarda iklim modelleri ile karşılaştırılarak da doğrulanmıştır (Jensen vd., 2020).

3.4.2 Toplam Su Bütçesi Zaman Serilerinde Doğrusal Olmayan Değişimlerin Polinomal Fonksiyonlarla Modellenmesi

Bir önceki bölümde, toplam su bütçesindeki doğrusal olmayan değişimler parametrik olmayan bir yöntem olan wavelet analiz sonuçları ile tartışılmıştır. Ancak, parametrik olmayan yöntemler her ne kadar hızlı çözüm sağlasa da ayrıştırılan sinyalin yeniden üretilememesi gibi bir dezavantaja sahiptir. Bu da parametrik olmayan yöntemlerin deterministik bir modelde uygulanmasını imkânsız hale getirmektedir.

Literatürdeki zaman serisi çalışmalarında şimdiye kadar sunulan yaklaşımlarda genellikle parametrik olmayan yöntemler kullanılmış ve doğrusal olmayan sinyal zaman serisinden ayrıştırılarak modelden geriye kalan düzeltmelerle yorumlamalar yapılmıştır. Ancak, böyle bir sinyal ayrıştırma prosedürünün zaman serisinin stokastik kısmının doğasını etkilediği de bilinmektedir (Klos vd., 2018). Bu nedenle doğrusal olmayan değişimlerin tanımlanabilmesi için, standart fonksiyonel modeldeki doğrusal trend polinomal bir fonksiyon olarak ifade edilecektir. Böylece Eşitlik (3.1)'de verilen standart fonksiyonel model aşağıdaki şekilde genişletilmektedir:

$$y_j - e_j = a + \sum_{k=1}^{p} b_k t_j^k + \sum_{i=1}^{z} \left\{ c_i cos\left(\omega_i t_j\right) + s_i sin\left(\omega_i t_j\right) \right\} \tag{3.7}$$

Burada b_k, p dereceli polinomun katsayısını temsil etmektedir. k=1 için bu model, doğrusal trende sahip standart fonksiyonel modele karşılık gelmektedir. k'nin farklı dereceleri için ise trend, bir polinom fonksiyonu olarak ifade edilebilecektir. Polinom fonksiyonu, parametrik olmayan yöntemlerin aksine, modellenen zaman serisinde kolayca kontrol edilebilmektedir.

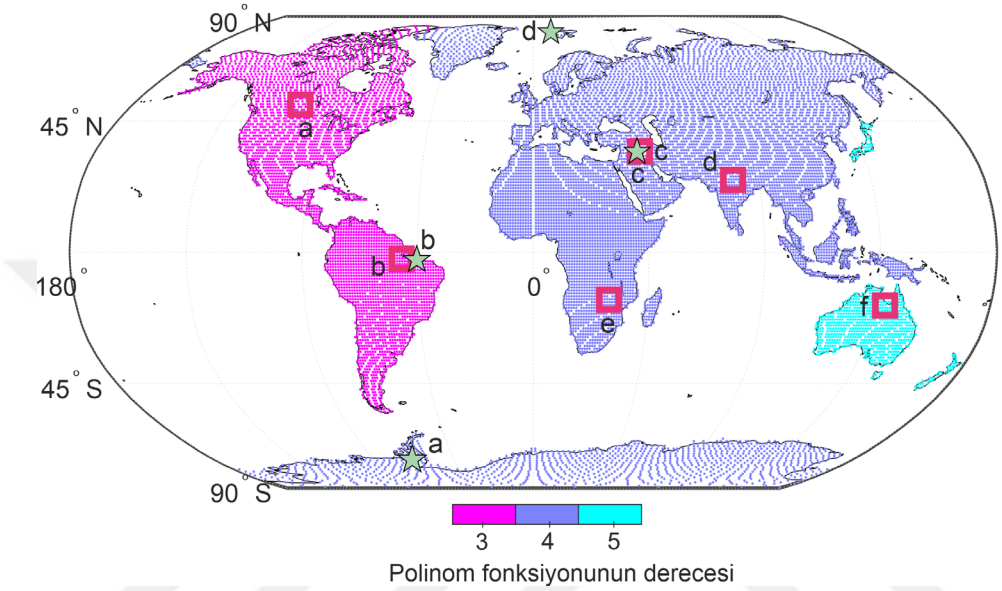
Analizlerde farklı bölgeler için çeşitli polinom dereceleri incelenmiştir. Geliştirilen bu fonksiyonel modelde, polinomal trend 6. dereceden başlayıp derecesi azaltılarak test edilmiştir. Her bir derece için, en büyük dereceden trend bileşeninin katsayılarının istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı t-student dağılımı ile incelenmiştir. Karşılaştırma değeri %5 yanılma olasılığı için $t_{(f,1-\alpha/2)}$ dağılımı ile hesaplanmıştır. Örneğin 6. dereceden bir polinom fonksiyonunun serbestlik derecesi (f serbestlik derecesi, 202 gözlem ve 11 parametre için 191 olarak elde edilmektedir) için karşılaştırma değeri 1,97 olarak elde edilmiştir. Bu test istatistiği

kullanılarak mascon çözümleri için polinom dereceleri belirlenmiştir. Gridlenmiş 1 arc derecelik bu çözümlerin mekânsal çözünürlüğü, GRACE uydusunun nominal çözünürlüğünden daha düşük olduğundan, bölgesel değişiklikleri daha iyi yansıtmak için, mascon çözümleriyle temsil edilen bölgelerde çoğunluğa uyan polinom derecesi kabul edilmiştir. Aksi halde, karaları temsil eden 13028 mascon çözümü için ayrı ayrı polinom derecesinin belirlenmesi, hem düşük çözünürlükteki alanların kontrol edilebilirliği hem de genişletilmiş modelin gelecekte tekrar kullanılmasını zorlaştıracaktır. Bununla birlikte belirlenen polinom dereceleri aynı veya benzer bir zaman aralığı dikkate alındığında doğrudan kullanılabileceği gibi, daha uzun veya daha kısa periyotlu zaman serileri için aynı istatistiksel prosedürle yeniden değerlendirilmesi de faydalı olacaktır. Serinin uzunluğu arttıkça içerdiği bilgi miktarı da arttığından, bu beklenen bir durumdur. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi zaman aralığı arttıkça değişen doğrusal trend için de aynı durum söz konusudur.

Yukarıda ayrıntıları verilen bu yaklaşıma göre, 2002-2022 periyodunu kapsayan GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinde Kuzey ve Güney Amerika bölgeleri için 3. derece polinom fonksiyonu (en düşük dereceli model), Avrupa, Asya, Afrika ve kutup bölgeleri için 4. derece polinom fonksiyonu, Japonya, Avustralya ve Yeni Zelanda için ise 5. derece polinom fonksiyonu (en yüksek dereceli model) seçilmiştir. Seçilen polinom derecelerinin (Şekil 3.13), konuma göre belirgin bir bağımlılık gösterdiği ve bunun bölgelerde meydana gelen benzer fiziksel faktörlerden kaynaklanabileceğini düşünülmektedir.

Polinom fonksiyonunun derecesinin istatistiksel olarak belirlenmesinin ardından, bu dereceler fiziksel olaylarla ilişkilendirilmiştir. Örneğin, Amerika kıtası için belirlenen 3. derece polinom fonksiyonu, genellikle nemli iklim bölgelerinin hâkim olduğu bölgelerde görülen doğrusal olmayan değişimleri modellemektedir. Bu bölgelerde, toplam su bütçesindeki değişimlerin kurak ve yağışlı dönemlerle karakterize edildiği bilinmektedir (Opie vd., 2020) . 4. dereceden polinomlarla ifade edilen Kuzey ve Güney Afrika ile Asya'nın doğu, orta ve batı kesimlerinin kurak iklim bölgeleri tarafından domine edilmekte olup, bu durum polinom derecelerinin benzerliğini açıklamaktadır. Ayrıca, çoğu alanda gözlemlenen yağışlar ile ilişkili su tüketiminin artması da 4. dereceden polinomlarla modellenmiştir (Rodell vd., 2018; Scanlon vd., 2018). 5. dereceden polinom fonksiyonunun geçerli kabul edildiği

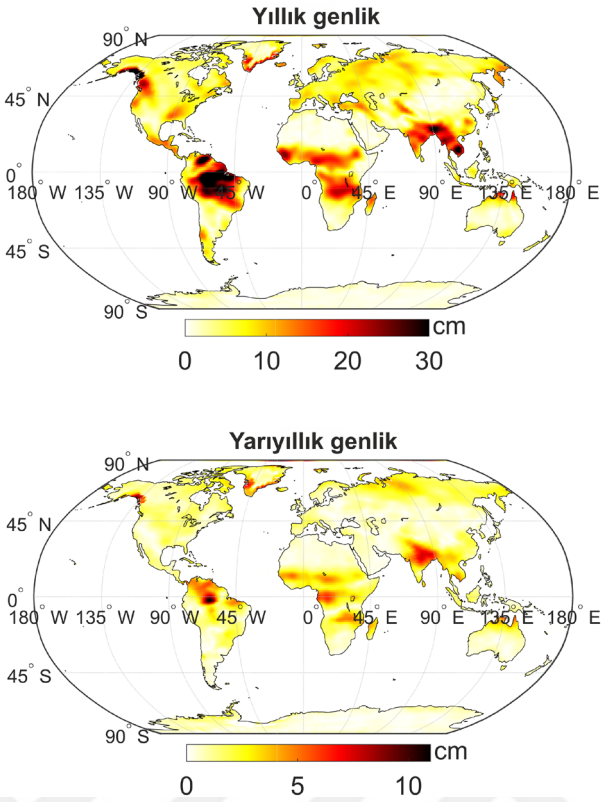
Japonya ve Avustralya bölgelerinde ise farklı iklim bölgeleri gözlemlenmiştir. Japonya nemli bir iklimle karakterize edilmekle birlikte; bu bölgede depremlerle ilişkilendirilen büyük kütle değişiklikleri de öne çıkmaktadır (Panet vd., 2018). Avustralya ise uzun süren kuraklıklar gibi olaylarla tanınmaktadır (Heimhuber vd., 2019; van Dijk vd., 2013), ki; bu da en yüksek polinom derecelerinin seçilmesini açıklamaktadır.



Şekil 3.13 Polinom fonksiyonunun derecesi
(Yıldızlar ve kareler, Şekil 3.15 (a-d) ve Şekil 3.21 (a-f)'de verilen zaman serilerinin konumunu göstermektedir)

Polinomal fonksiyonlarla genişletilen fonksiyonel modelin zaman serisinde parametre kestirimine etkilerini detaylı olarak incelemek için mevsimsel sinyallerin değişimi de ele alınmıştır. Geliştirilmiş modelden elde edilen mevsimsel sinyaller, standart fonksiyonel model ile benzer sonuçlar vermektedir. Dolayısıyla, trendde görülen doğrusal olmayan davranışın mevsimsel genliklerin büyüklüğünü etkilemediğini söylemek mümkündür. Yıllık ve yarıyıllık sinyallerin genlikleri Şekil 3.14'te gösterilmektedir.

Özellikle Amazon havzası ve Alaska Körfezi'nde yıllık sinyaller belirgin bir şekilde izlenmektedir. Ayrıca, Grönland'ın güney kıyısı, Afrika'daki Zambezi ve Congo havzaları, Ganges-Brahmaputra havzası ve yakındaki Mekong ve Yangtze nehir havzalarında da yıllık sinyaller baskındır. Yarıyıllık genliklerin de yıllık genliklerle aynı enlem bölgelerinde diğer bölgelere kıyasla daha baskın bir karaktere sahip olduğu görülmektedir (Scanlon vd., 2016; 2019).

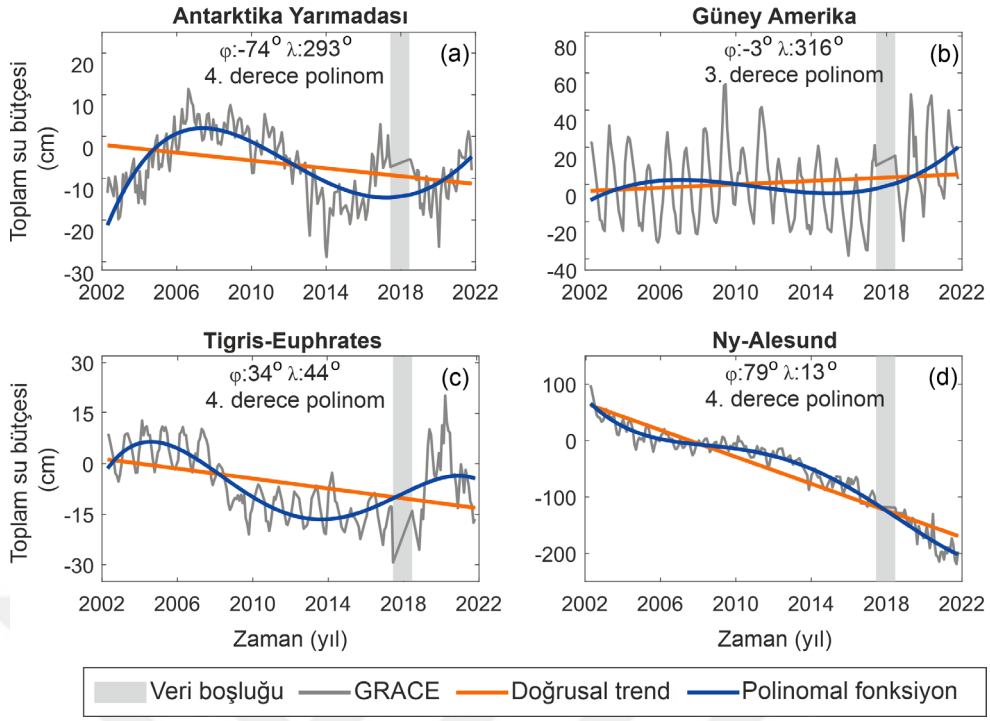


Şekil 3.14 Polinomal fonksiyonel modelden elde edilen yıllık ve yarıyıllık genlikler

3.4.3 Polinomal Fonksiyonel Modelin Katkılarının İncelenmesi

Bu bölümde, polinomal fonksiyonel modelin toplam su bütçesi değişim trendinin ifade edilmesine sağladığı katkılar ele alınmaktadır. Polinomal fonksiyonel model, su bütçesindeki değişimlerin daha karmaşık yapısını yakalamayı amaçlamaktadır. Sonuçların yorumlanmasında ilk olarak toplam su bütçesi zaman serileri üzerinden polinomal trend ile doğrusal trendin gözlemleri nasıl temsil ettiği incelenecektir.

Bu amaçla Şekil 3.13'te konumları yıldız işaretiyle belirtilen ve dört farklı enlem bölgesinden rasgele seçilen mascon zaman serileri Şekil 3.15'te verilmektedir. Zaman serisi çizimlerinde gri çizgi GRACE ve GRACE-FO gözlemlerini temsil ederken, düşey gri alan 11 aylık veri boşluğunu ifade etmektedir. Turuncu ve mavi çizgiler de sırasıyla doğrusal ve polinomal trende karşılık gelmektedir.



Şekil 3.15 (a) Antarktika Yarımadası, (b) Güney Amerika, (c) Tigris-Euphrates havzası ve (d) Ny-Alesund bölgelerinde yer alan mascon toplam su bütçesi zaman serileri (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)

Antarktika yarımadasında bulunan mascon zaman serisi (Şekil 3.15a), küresel ısınmanın etkisiyle doğrusal olmayan bir su bütçesi değişimi göstermektedir (Mouginot vd., 2014). Zaman serisi daha yakından incelendiğinde, 2002'den 2008'e kadar su bütçesinde artış olduğu gözlemlenirken sonrasında bir düşüş eğilimi başlamıştır. 2015'ten sonra ise El Niño salınımının etkisiyle artan yağışlar geçici olarak su bütçesi trendini pozitif kütle dengesine çevirmiştir (Chuter vd., 2022; Luthcke vd., 2013). Çeşitli fiziksel etmenlerden kaynaklanan bu değişimler zaman serisinde doğrusal olmayan bir hareketi meydana getirmiş ve 4. dereceden polinomal trend ile modellenebilmiştir. Burada su bütçesi değişimi doğrusal trend ile modellenmiş olsaydı bahsedilen bu değişimlerin ifade edilemeyeceği sadece zaman serisinin periyodu için azalma eğiliminde bir su bütçesi değişimi olduğu yorumlanabilecekti.

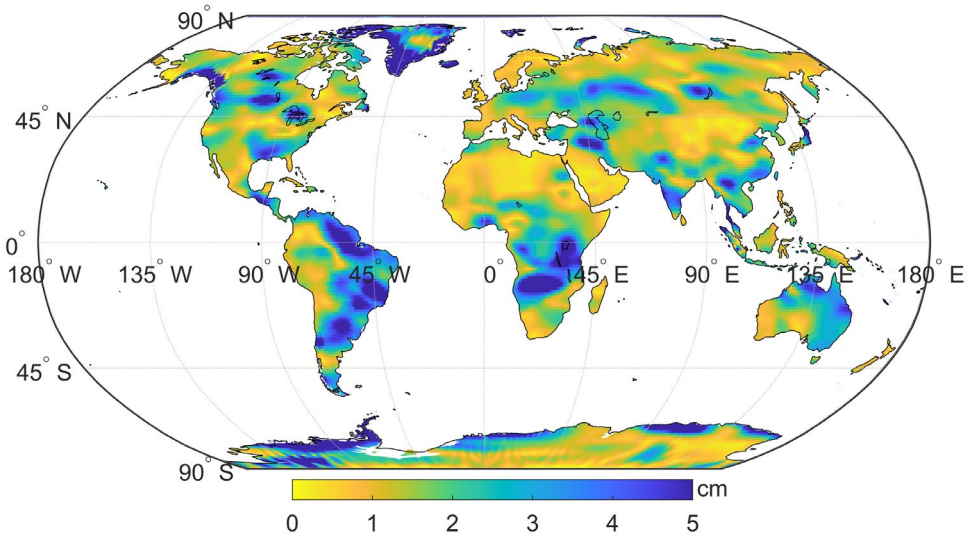
Şekil 3.15b'de Güney Amerika için gözlemlenen polinomal trend, Brezilya bölgesinde yaşanan kuraklık ve sel dönemleriyle artan veya azalan su bütçesini değişimini temsil etmektedir. 2009 yılındaki sel, El Niño salınımının neden olduğu kuraklık etkisini azaltmıştır (Chen vd., 2010) ve polinomal sinyalin yönü değişmiştir. Ancak, ardışık kurak yılların özellikle 2015'te El Niño salınımının

tetiklediği son 40 yılın en kurak yılı ile ilişkilendirildiği su bütçesi trendinde azalma gözlenmektedir (Rodell vd., 2018). 2010 ile 2014 yılları arasındaki azalma, doğrusal trend modeliyle açıklanamamakta ancak polinomal trend ile basitçe uyum sağlamaktadır. Analiz edilen periyodun son yıllarında, Güney Amerika'da La Niña koşullarıyla ilişkili olarak gözlemlenen şiddetli seller (Espinoza vd., 2022), su bütçesindeki artma eğilimini polinomal trend ile yansıtmaktadır.

Tigris-Euphrates havzasında yer alan mascon çözümü için (Şekil 3.15c) su bütçesi değişiminin yüzey suyu kaynaklarındaki dalgalanmalardan kaynaklandığı bilinmektedir (Abdelmohsen vd., 2022). Bu dalgalanmalar, yeraltı suyu kullanımının neden olduğu kuraklıkların yanı sıra 2015'ten sonra El Niño salınımı nedeniyle meydana gelen sellerden de etkilenmektedir (Liesch ve Ohmer, 2016). Şekil üzerinden de görüldüğü gibi, doğrusal trend 2002 ile 2008 ve 2008 ile 2014 yılları arasında meydana gelen doğrusal olmayan değişimleri yansıtamamaktadır.

Ny-Alesund bölgesindeki polinomal trendin ise (Şekil 3.15d), buzul kütlesindeki değişikliklerle ilişkili olduğu bilinmektedir. Polinomal sinyalin kırılma noktaları incelendiğinde üç aşama önemli ölçüde öne çıkmaktadır: 2005 yılına kadar buzul erimesinde yaşanan artış; 2005-2011 arasında buzul kütlesinde meydana gelen geri kazanım ve 2011'den sonra tekrar hızlanan erime. Bu periyotlar doğrusal trend ile fark edilememekte ancak polinom fonksiyonuyla başarılı bir şekilde yakalanmaktadır. Ayrıca, benzer değişikliklerin Svalbard'da bulunan GNSS (Global Navigation Satellite Systems) istasyonlarında da gözlemlenebildiği bilinmektedir (Rajner, 2018).

Şekil 3.15'te verilen zaman serileri, polinomal fonksiyonel modelin toplam su bütçesi trendini temsil etmedeki katkılarını açıkça ortaya koymaktadır. Turuncu ile ifade edilen doğrusal trend ile mavi ile gösterilen polinomal trend arasındaki ilişki, zaman serisinin doğrusallıktan ne kadar farklılaştığını ifade etmektedir. Bu doğrultuda bir sonraki aşama olarak standart fonksiyonel modelden elde edilen doğrusal trend ile polinomal trend arasındaki farkların standart sapmaları incelenmekte; bu farkın olası fiziksel sebepleri ve küresel ölçekte mekânsal olarak dağılımları da tartışılmaktadır. Şekil 3.16'da sunulan farkların standart sapmaları sıfırdan uzaklaştıkça trendin doğrusallıktan uzaklaştığı yani polinomal trendin baskın olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.16 Standart fonksiyonel modelden elde edilen doğrusal trend ile polinomal trend arasındaki farkların standart sapması

Farkların mekânsal dağılımları incelendiğinde, Grönland, Antarktika ve Alaska bölgeleri için toplam su bütçesi zaman serilerinin doğrusal trendden büyük sapmalarla karakterize edildiği görülmektedir. Bu bölgelerde, doğrusal trend ve polinomal fonksiyonlar arasındaki standart sapmalar 47 cm'ye ulaşmaktadır. Grönland'ın güney kıyıları, Batı Antarktika ve Antarktika yarımadası ile Alaska'da meydana gelen buzul kütlesi kaybı zaman serisinde doğrusal olmayan değişimlere neden olmaktadır (Bevis vd., 2019). Grönland'da buzul kütlesinin arttığı (Forsberg vd., 2017; Velicogna vd., 2020) iç kesimlerde ise, standart sapma değerleri 2 cm'den küçük olarak elde edilmekte ve doğrusal trend karşılaştırılabilir sonuçlar vermektedir.

Bahsedilen kutup bölgelerinde fiziksel değişimlerin sebepleri incelendiğinde, Grönland'ın toplam su bütçesi zaman serilerinde, buzul kütlesi değişiminin kar yağışı, eriyen buzulların yüzey akışı oluşturması, buzul izostatik dengesi ve okyanus kaynaklı değişimler gibi çeşitli faktörlerin etkili olduğu görülmektedir (IMBIE Team, 2020). Ayrıca, GRACE ile yapılan gözlemlerde görülen doğrusal olmayan değişimler, Kuzey Atlantik Salınım (North Atlantic Oscillation, NAO) indeksi ile de uyumlu sonuçlar vermektedir (van Angelen vd., 2014).

Doğrusal olmayan değişimlerin bir diğer sebebi de son yıllarda özellikle küresel ısınmanın etkisiyle hava ve su sıcaklıklarının artmasıdır. Bu durum 2019 yılında büyük ölçüde buzul erimesine neden olmuştur (Sasgen vd., 2020). Bahsedilen bu

fiziksel etmenler yıllar arası değişimler olarak gözlenmekte ve 4. dereceden polinomal fonksiyon ile modellenen polinomal trend tarafından temsil edilebilmektedir. Kuzey kutbuna benzer şekilde, Güney yarımkürede de Batı Antarktika ve Antarktika Yarımadası bölgeleri için toplam su bütçesi, 2006'dan sonra başlayan ve 2015'in sonlarına kadar süren buzul kütlesi kaybının hızlanması nedeniyle doğrusallıktan 10 cm'den fazla farklılık göstermektedir (Bodart ve Bingham, 2019; Velicogna vd., 2014; Zhang vd., 2021).

3. dereceden polinomal fonksiyonlar ile temsil edilen St. Lawrence, Mackenzie, Nelson ve Mississippi nehir havzaları, 4 cm'den büyük standart sapma ile doğrusal trendden farklılaşmaktadır. Örneğin, Mackenzie havzasının toplam su bütçesi zaman serileri, 2012 yılındaki gibi, yüzey suyunun azalması, sulama faaliyetlerinin artması ve iklim değişikliğine bağlı olarak çeşitli fiziksel anomalilerle azalan ve doğrusal olmayan bir eğilim sergilemektedir (Chew ve Small 2014; Hoerling vd., 2014). Güney Amerika'ya geçildiğinde Amazon, Parana ve Tocantins havzaları için ise doğrusal olmayan sinyallerin, El Niño salınımı ile ilgili sel ve kuraklık olaylarına bağlı olduğu düşünülmektedir (Chen vd., 2010). Bu bölgede 3. dereceden polinom fonksiyonu, ortalama olarak 3 cm standart sapma ile doğrusal trend modelinden farklılaşmaktadır. Patagonya buzulunun eridiği alanda ise, polinomal trend daha belirgin hale gelmekte ve her iki model arasındaki standart sapma değerleri 17 cm'ye kadar ulaşmaktadır.

4. dereceden polinomal fonksiyonlar ile tanımlanan Tigris-Euphrates havzası ve Hazar Denizi bölgesindeki zaman serilerinde de doğrusal trend ile polinomal fonksiyon arasındaki standart sapma 7 cm'ye kadar varmaktadır. Şekil 3.16'da görüldüğü üzere, bu bölgede toplam su bütçesi zaman serilerinde, doğrusal ve polinomal trend arasındaki farklar yeşil ve mavi ile temsil edilmekte ve doğrusal olmayan değişimlerin mevcut olduğu kolayca ayırt edilebilmektedir. Şekil 3.15c'de bu bölgede örnek olarak seçilen bir zaman serisinde polinomal trendin katkısı zaman serisi üzerinden de gösterilmiştir. Özellikle Tigris-Euphrates havzasında su bütçesi değişimi 2007 yılına kadar artan bir eğilim göstermiş, daha sonra ise keskin bir şekilde azalma eğilimine geçmiştir. Bu değişimler GRACE gözlemleri ile hassas bir şekilde izlenebilmiş ve polinomal trend ile de başarılı bir şekilde modellenebilmiştir. Bölgede, 2007 yılından sonra yaşanan daha az yağışlı kuraklık dönemi, toprak neminin azalması veya yeraltı suyunun tükenmesi gibi çeşitli

nedenler trendin negatif yönde değişmesine neden olmuştur. Voss vd. (2013), 2002-2009 periyodu için Tigris-Euphrates havzasında su bütçesinin yeraltı suyu kullanımı nedeniyle düşüş gösterdiğini iddia etmiştir. Ancak Forootan vd. (2017) bu kuraklığı 2003-2013 yılları arasında su dengesi ve meteorolojik kuraklık yani yağışlar ile ilişkilendirmiştir. GRACE-FO döneminde ise su bütçesinde artış olduğu görülmektedir. Bu değişimlerin kaynakları farklı fiziksel olaylarla ifade edilse de polinomal fonksiyonun başarılı bir şekilde doğrusal olmayan su kütlesi trendini modellediği görülmektedir.

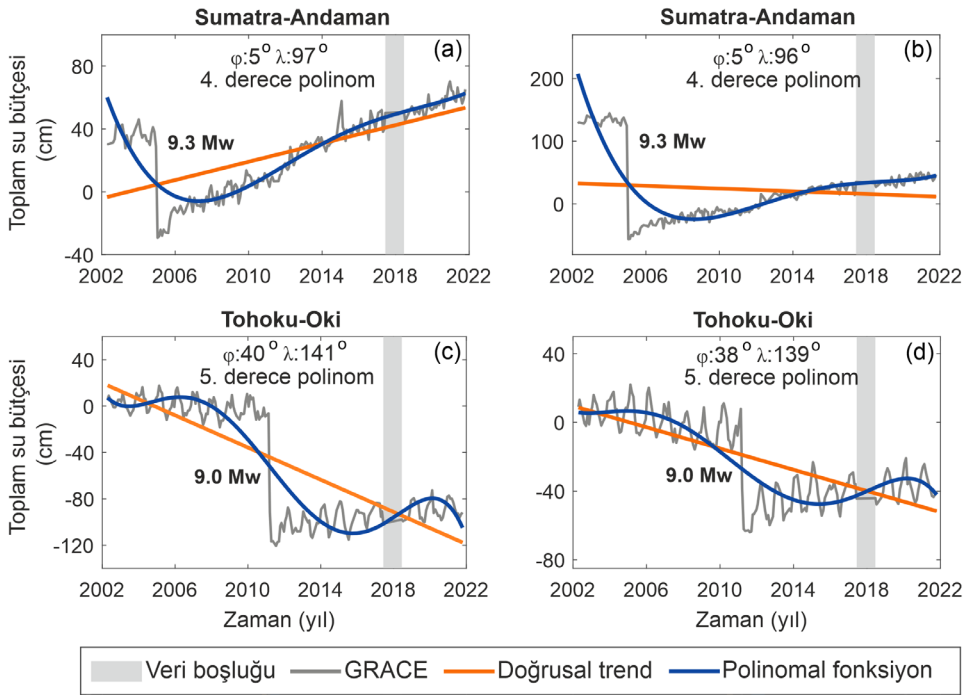
Avustralya'nın kuzey kıyıları, Asya'da Ganges-Brahmaputra ile komşuları Krishna ve Mekong, Afrika'da Zambezi, Okavango ve Congo nehir havzalarının yanı sıra Tohoku-Oki (Japonya) ve Sumatra-Andaman (Endonezya) gibi depremden etkilenen bölgelerdeki toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinde de polinomal trend ile yıllar arasında meydana gelen değişimler başarılı bir şekilde ifade edilmektedir. Özellikle, Avustralya'nın kuzey kıyısı için, doğrusal trend ile polinom fonksiyonu arasındaki sapmalar 5 cm'den fazla elde edilmektedir. Bunun başlıca nedeninin, su kütlesi üzerinde etkili olan El Niño salınımı olduğu düşünülmektedir (Forootan vd., 2012). Güney Afrika bölgesi de büyük standart sapmaların elde edildiği bölgelerden biridir. 2006 ve 2011 yılları arasında bölgenin güneyinde yer alan Zambezi nehir havzasında, yağış artışına bağlı önemli hidroklimatik değişiklikler yaşanmıştır (Rodell vd., 2018). Bu nedenle polinomal trend 14 cm'ye ulaşan sapmalar ile doğrusallıktan uzaklaşmaktadır.

Son olarak, depremlerden etkilenen bölgelerdeki 4 cm'den fazla standart sapmalara da değinilmelidir. 2004 yılında Sumatra-Andaman Denizi'nde (9.3 Mw) ve 2011 yılında Tohoku-Oki bölgesinde (9.0 Mw) meydana gelen depremler, bu bölgelerde toplam su bütçesi değişimi zaman serilerine aktarılan önemli gravite değişimine neden olmuştur. Bu durum, büyük depremlerin jeopotansiyel bir fonksiyon olan toplam su bütçesi üzerindeki etkilerinin tespit edilebileceğini (Chen vd., 2007; Han vd., 2006; Panet vd., 2018; Wang vd., 2012; Zhang vd., 2020b) ve su bütçesinin modellenmesi sırasında dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır (Deggim vd., 2021). Bu bölgede seçilen zaman serilerindeki değişimlerin polinomlarla modellenmesi, Şekil 3.17'de ayrıca zaman serisi olarak gösterilmiştir.

Zaman serilerinde görülen doğrusal olmayan trendin nedeni (Şekil 3.17), depremin neden olduğu gravite değişiminin toplam su bütçesinde meydana getirdiği belirgin

sıçrama olarak açıklanmaktadır. GRACE kaynaklı su bütçesi izleme çalışmalarında depremlerin neden olduğu kütle değişimi sıçramalarının dikkate alınması konusunda giderek daha fazla çalışma yapılmaktadır (Chen vd., 2007; Han vd., 2006; Panet vd., 2018; Wang vd., 2012; Zhang vd., 2020b). Bunlardan biri olan Deggim vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 9 Mw'den daha büyük şiddette meydana gelen depremlerden etkilenen bölgelerde, GRACE su bütçesi zaman serisinden bu etkiyi elimine etmeye yönelik geliştirilen RECOG-EQ (Regional Corrections for GRACE earthquake effect) adlı veri seti de paylaşılmıştır.

Şekil 3.17'de verilen zaman serilerinde, deprem öncesi ve sonrası dönemlerde mascon ile depremin merkezi arasındaki mesafeye bağlı olarak, toplam su bütçesi on santimetrelerden yüzlerce santimetreye kadar değişmektedir. Polinomal fonksiyonun kullanımının, toplam su bütçesi zaman serilerinde meydana gelen bu sıçramayı yansıtmayan doğrusal trende göre daha iyi modellediği zaman serilerinde açıkça görülmektedir.



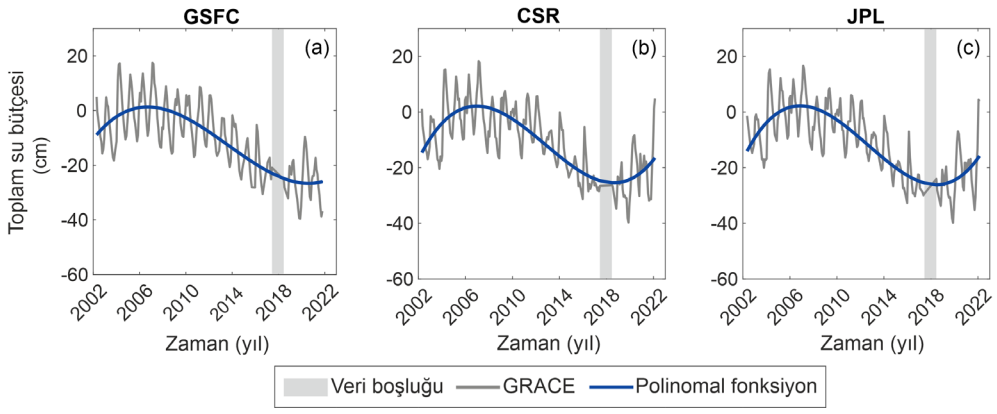
Şekil 3.17 Sumatra-Andaman (a ve b) ve Tohoku-Oki (c ve d) deprem bölgelerinde seçilen toplam su bütçesi zaman serileri (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)

Doğrusal olmayan değişimleri ifade eden polinomal modelin katkıları, literatürde yer alan önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında, Humphrey vd. (2016) benzer şekilde global bir analize sahiptir. Çalışmada, GRACE toplam su bütçesi sinyali uzun dönemli bileşen, mevsimsel bileşen ve sinyal ayrıştırma modelinden kalan düzeltmeler olmak üzere STL yöntemi ile ayrıştırılmıştır. Uzun dönemli bileşen de kendi içinde doğrusal ve doğrusal olmayan trend olmak üzere iki kısma bölünmüştür. Çalışmanın sonuçları, doğrusal trendin zaman serilerinde meydana gelen değişimleri bazı bölgelerde ifade etmeye yeterli olduğunu, ancak doğrusal olmayan trendin mekânsal olarak çok daha yaygın olduğunu ortaya koymaktadır. Kuzey Amerika'da Mississippi ve Great Lakes bölgelerinde, Güney Amerika ve Güney Afrika'daki havzalarda, Avustralya'da özellikle Murray-Darling ve Lake-Eyre havza alanları ile kuzey kısmı hariç Asya'nın çoğu bölgesinde doğrusallıktan uzaklaşan trend değerlerinin daha baskın olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle bahsedilen bölgelere odaklanıldığında, bu çalışmadaki hem wavelet analizi hem de polinomal fonksiyon modeli sonuçlarının STL yöntemi ile elde edilen sonuçlara benzer olduğunu söylemek mümkündür. Bu bölgelerin ortak özelliği çeşitli fiziksel veya jeofiziksel olayların zaman serisinin farklı periyotlarında artma veya azalma eğilimine sebep olması ve böylece doğrusal olmayan yıllar arası değişimlerin gözlenmesidir.

Bu çalışmanın polinomal fonksiyonel model sonuçlarından farklı olarak Humphrey vd. (2016) Grönland, Alaska Körfezi, Antarktika yarımadası ve Batı Antarktika bölgelerinde buzul kütlesi değişimi zaman serilerinin çok büyük değişimleri ifade ettiğini ve doğrusal trend ile modellenebileceğini öne sürmektedir. Ancak, literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde 2002-2012 döneminde Grönland'da, 2006-2016 döneminde Batı Antarktika'da buzul kütlesi kaybındaki hızlanma nedeniyle bu bölgelerin zaman serilerinde de doğrusal olmayan değişimler olduğu ortaya konmakta ve zaman serileri ikinci dereceden bir trend modeli ile ivme dikkate alınarak modellenmektedir (Rignot vd., 2019; Velicogna ve Wahr, 2013). Erimenin şiddetli olması sebebiyle bu bölgelerdeki kütle değişimi doğrusal bir trende sahip gibi görünse de buzul kütlesinin ivmelenerek şiddetli bir şekilde eridiği ya da erimenin yavaşladığı ve kütle kazancının sağlandığı bu yıllar arası periyotların gözlenebilmesi açısından polinomal trend modelinin uygulanması

önemlidir. Şekil 3.15'te hem Antarktika hem de Ny Alesund bölgesinde değişimler ve polinom fonksiyonunun uygunluğu zaman serisi üzerinde gösterilmektedir.

Sonuç olarak, literatürde parametrik olmayan wavelet, STL gibi yöntemlerle ayrıştırılan su bütçesi sinyali bu çalışmada önerilen polinomal trend yaklaşımı ile parametrik şekilde ifade edilebilmiştir. Polinomal fonksiyon modeli ile gerçekleştirilen bu analizler, fiziksel doğada meydana gelen olayların neden olduğu doğrusal olmayan değişimleri etkili bir şekilde yakalamaktadır. Zaman serileri ve modeller arasındaki farklılıkların standart sapmaları, global ölçekteki bulguları ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, polinomal fonksiyonel modelin etkinliğini göstermek için çeşitli veri setleri üzerinde yapılan analizler de önemlidir. Özellikle, GRACE ve GRACE-FO tarafından kaydedilen; gerçek fiziksel değişikliklerden kaynaklanan doğrusal olmayan trendi belirlemek amacıyla GSFC çözümlerine ek olarak CSR ve JPL veri merkezleri tarafından sağlanan farklı çözümler de ele alınmıştır. Bu amaçla, Güney Amerika'da Tocantins ve Parana havzalarının yakınında yer alan Sao Francisco havzası rastgele seçilmiştir. GSFC tarafından sağlanan zaman serileri için seçilen üçüncü dereceden bir polinomal model, bahsedilen diğer veri setleri için de kullanılmıştır (Şekil 3.18). Her üç veri setinde de toplam su bütçesi sinyalinin benzer olduğu ve polinomal fonksiyonun başarılı bir şekilde uyum sağladığı görülmektedir. Bu da kullanılan çözüme bakılmaksızın, toplam su bütçesi zaman serilerini tanımlamak için polinomal fonksiyon kullanmanın geçerliliğini vurgulamaktadır.

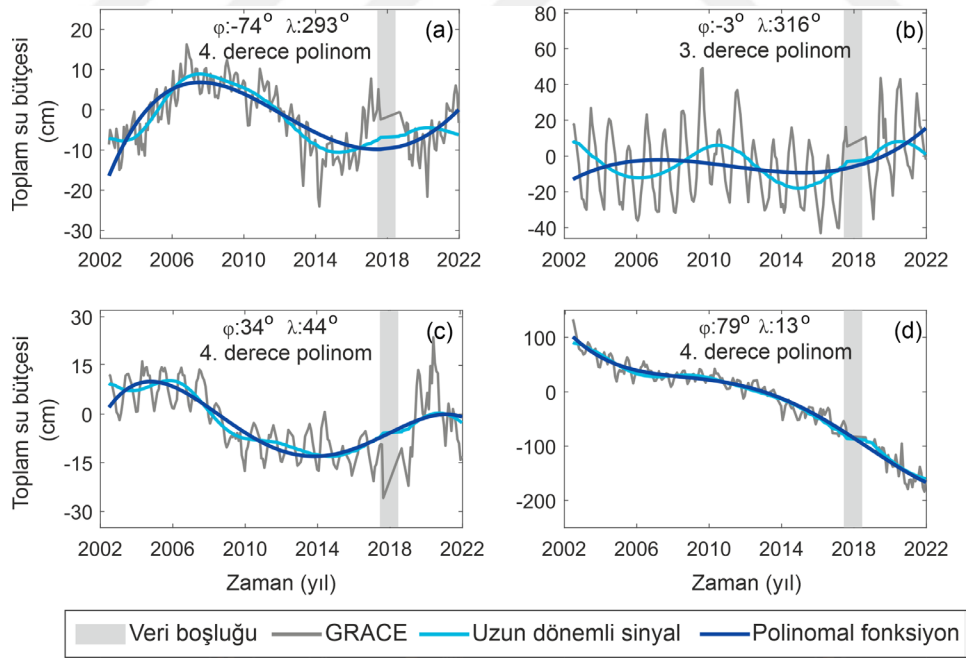


Şekil 3.18 (a) GSFC, (b) CSR ve (c) JPL tarafından sağlanan Sao Francisco havzasına ait mascon zaman serilerinde polinomal fonksiyonel model

3.4.4 Polinomal Fonksiyonel Modelin Parametrik Olmayan Bir Yaklaşımla Karşılaştırılması

Çalışmanın bu aşamasına kadar toplam su bütçesi zaman serilerindeki doğrusal olmayan trend, parametrik olmayan wavelet analizi ve parametrik bir yaklaşım olarak önerilen polinomal fonksiyonel model ile ayrı ayrı incelenmiştir. Bu bölümde ise, doğrusal olmayan değişimleri tanımlayan polinomal fonksiyonel model ile wavelet analiziyle belirlenen uzun dönemli sinyal karşılaştırılmaktadır. Wavelet analizinin SSA, STL veya kalman filtresi gibi diğer parametrik olmayan yöntemlerle çok benzer sonuçlar verdiği bilinmektedir (Klos vd., 2018).

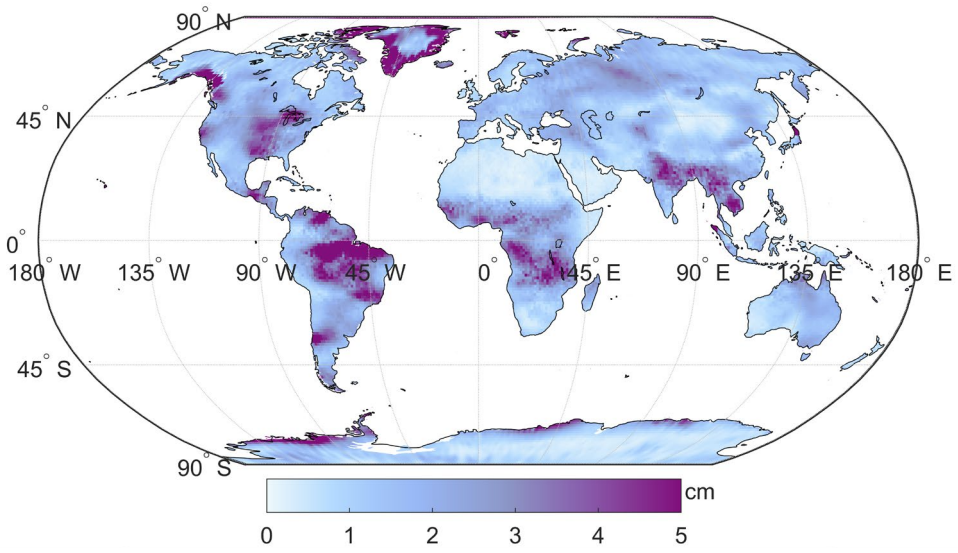
Şekil 3.15'te gösterilen mascon çözümlerine ait toplam su bütçesi zaman serileri, bu kez parametrik ve parametrik olmayan çözümleri daha yakından incelemek için kullanılmıştır. Şekil 3.19'da verilen bu seriler detaylıca incelendiğinde, turkuaz renk ile gösterilen uzun dönemli sinyal ile maviyle gösterilen polinomal fonksiyonel modelin, zaman serisinde meydana gelen uzun dönemli değişimi başarılı bir şekilde temsil ettiği ve doğrusal olmayan trendin benzer şekilde yakalandığı görülmektedir.



Şekil 3.19 Toplam su bütçesi zaman serilerinde polinomal fonksiyon ile wavelet analizinin uzun dönemli sinyalinin karşılaştırılması (a: Antarktika Yarımadası, b: Güney Amerika, c: Tigris-Euphrates havzası ve d: Ny-Alesund) (φ: enlem ve λ: boylam değerini gösterir)

Polinomal fonksiyonel model ve uzun dönemli sinyalin genel anlamda uyum sağlamasıyla birlikte, Güney Amerika'daki bir mascon çözümünün sunulduğu Şekil 3.19b'deki farklılığın yaklaşık 6 yıl periyodu olduğu bilinen ve toplam su bütçesi zaman serilerinde gözlenen ek periyodik sinyalden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, Bölüm 3.4.1'de verilen wavelet analiz sonuçlarına dayanarak, uzun dönemli sinyal bileşeni 1,1 ila 6 yıllık periyotlara sahip ve 6 yıldan daha uzun süreli alt periyodik sinyallere ayrıştırılarak elde edilmiştir. Bahsedilen bu bölgede ek sinyalin genliğinin küçük olduğu bilinmekle birlikte, söz konusu periyodik sinyalin varlığı da çalışmanın ilerleyen bölümlerinde (Bölüm 3.5) ayrıca ele alınmaktadır.

Polinomal trend ile wavelet analizinden elde edilen uzun dönemli sinyalin küresel ölçekte değişimini incelemek için diğer bölümlerde olduğu gibi aralarındaki farkın standart sapması hesaplanmıştır. İki model arasındaki farkların standart sapma ortalaması 2,5 cm olarak hesaplanmış olup sonuçların mekânsal dağılımı Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Modellerin genel anlamda yüksek korelasyonla bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.



Şekil 3.20 Polinomal trend ile wavelet analizinden elde edilen uzun dönemli sinyal arasındaki farkların standart sapmaları

İki sinyalin en çok farklılaştığı bölgeler, Şekil 3.20'de mor renkle gösterilmiş olup, bu bölgeler Alaska ve çevresi, Grönland, Mississippi ve Amazon havzası, Orta Afrika ve Asya'nın güney kısmı olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerdeki farkların, uzun vadeli bileşenin 6 yıldan uzun periyotlu alt sinyallere ayrıştırılmasından

kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir deyişle periyodik ek sinyalin bu bölgelerde baskın olabileceği anlaşılmaktadır. Benzer şekilde, Amazon, Afrika ve Asya'nın güneyindeki farklar, yıllar arası zaman diliminde gerçekleşen değişimlerden etkilenmektedir. Bu değişimler, nemli bir ekvator ikliminin sınırları içinde meydana gelen muson yağmurlarından kaynaklanabilmektedir (Khandu vd., 2016; Konapala vd., 2020; Scanlon vd., 2016; 2018).

3.4.5 Polinomal Fonksiyonel Modelin İklim İndeksleriyle Değerlendirilmesi

Polinomal fonksiyonel modelin, literatürde klasik yöntemlerden biri olarak kabul edilen wavelet analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmasının ve sonuçlarının uyumlu olduğunun görülmesinin ardından, doğrusal olmayan değişimleri ifade eden polinomal trendin fiziksel etmenlerle ilişkilendirilebilmesi amacıyla iklim indeksleriyle karşılaştırılmasına geçilmiştir.

Toplam su bütçesi zaman serileri, yağış, evapotranspirasyon ve yüzey akışının toplamını temsil ettiği için sel ve kuraklık gibi olayların güvenilir göstergeleridir (Zhao vd., 2017). Önceki çalışmalar, GRACE tarafından gözlemlenen değişimlerin, küresel ve bölgesel ölçekte yaygın olarak kullanılan SPI (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) ve NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) gibi iklim indeksleriyle tutarlı olduğunu göstermiştir (Pfeffer vd., 2022; Scanlon vd., 2022). Ayrıca, küresel kara alanlarının %97,5'inden fazlası için bu değişimlerin en az bir iklim değişkeni ile önemli ölçüde ilişkili olduğu belirlenmiştir (Guo vd., 2021).

Bu bilgiler ışığında, polinomal fonksiyonel model iklim indeksleri ile değerlendirilmiş ve doğrusal olmayan trendin kaynağı kurak ve yağışlı dönemler için incelenmiştir. İklim indeksi olarak, East Anglia Üniversitesi'nde geliştirilen Climatic Research Unit Time Series, (CRU-TS version 4.03) verilerine dayanan SPEI tercih edilmiştir. SPEI veri seti, yağış ve potansiyel evapotranspirasyon arasındaki aylık farka göre hesaplanmaktadır. Bu nedenle, iklimsel su dengesinin basit bir göstergesini temsil etmektedir (Thornthwaite, 1948). Bu veri kümesi, 0,5°'lik mekânsal çözünürlüğe ve 1901'den 2018'e kadar olan periyotta 1 ila 48 ay arasındaki farklı zaman aralıklarıyla çok ölçekli bir aylık örneklemeye sahiptir (Vicente-Serrano vd., 2010). Çok ölçekli zaman yapısı sayesinde, kuraklığın tespiti, izlenmesi ve analizinde hidrojeodezik çalışmalarda tercih edilen bir kuraklık

göstergesidir. Bu çalışma özelinde de SPEI-12 veri seti kullanılmıştır. SPEI, iklim koşullarını Tablo 3.2'de gösterildiği gibi indeks değerine bağlı olarak çeşitli kuraklık sınıflarına göre kategorize etmektedir. İndeks değeri ne kadar negatif olursa, ilgili dönemin o kadar kurak; pozitif olduğunda ise o kadar nemli olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.2 SPEI değerlerinin sınıflandırılması (McKee vd., 1993'ten alınmıştır)

SPEI değeri	Kuraklık Sınıfı
> 2,0	Aşırı nemli (Extremely wet)
1,5 –1,99	Şiddetli nemli (Severely wet)
1,0 – 1,49	Orta nemli (Moderately wet)
-0,99 – 0,99	Normal (Near Normal)
-1,0 – -1,49	Orta kurak (Moderately dry)
-1,5 – -1,99	Şiddetli kurak (Severely dry)
< -2,0	Aşırı kurak (Extremely dry)

Şekil 3.21'de, rasgele seçilen zaman serilerinde SPEI değerlerinin polinomal fonksiyon ile karşılaştırılması gösterilmektedir. Polinomal trendin uzun vadeli iklim koşullarını iyi bir şekilde yansıttığını ancak aylık örneklemde meydana gelen sel veya kuraklık gibi kısa dönemli olayların da bu genişletilmiş fonksiyonel modelden geriye kalan düzeltmelerle takip edildiği görülmektedir. Farklı bölgelerden seçilen bu zaman serilerinin konumları Şekil 3.13'teki haritada kareler ile gösterilmiştir.

Zaman serileri detaylıca incelendiğinde, Şekil 3.21a, Kuzey Amerika'da Nelson nehir havzasındaki bir mascon zaman serisini göstermektedir. Zaman serisinin ilk üç yılı, 1999-2005 yılları arasında devam eden Kanada Prairies kuraklığı nedeniyle meydana gelen permafrost bozulması ve daha az kar birikimini yansıtmaktadır; 2006 sonrasında ise su bütçesinde artış gözlemlenmektedir. (Wang vd., 2015). 2007 ve 2010 yılları arasındaki kuraklık döneminden sonra, 2010 ve 2014 yılları arasında yağışlar artarak bu bölgedeki yeraltı suyu seviyesini etkilemiştir (Li ve Wang, 2022). Yağışlardaki artış, kurak ve yağışlı dönemler arasında ani ve güçlü bir geçişi yansıtan büyük bir değişimin olduğu 2010 yılında özellikle belirgin bir şekilde fark edilmekte ve bu artış polinomal trend ile de takip edilebilmektedir. Bu yağışlı dönem, hem 2010 hem de 2011'deki SPEI değerlerinin 2'den fazla olması ile de

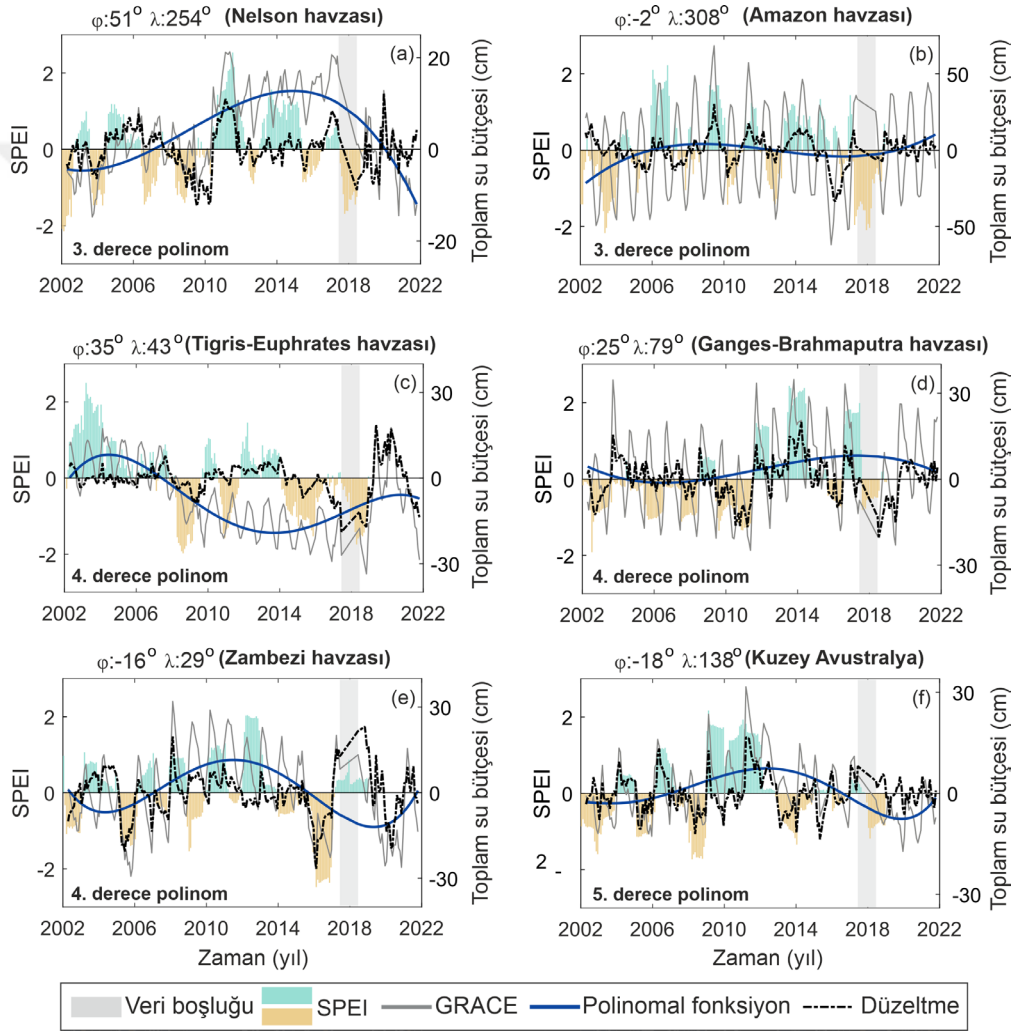
desteklenmektedir. Burada, polinomal fonksiyon seriye oldukça iyi uymasına rağmen, 2008-2011 periyodundaki kurak dönem fonksiyonel modelden kalan düzeltmeler ile daha iyi temsil edilmektedir.

Amazon havzası üzerinde rastgele seçilen bir zaman serisi Şekil 3.21b'de gösterilmektedir. Amazon havzası, El Niño salınımının toplam su bütçesi değerleri üzerinde en güçlü etkiye sahip olduğu bölgelerden biridir (Marengo vd., 2018). Örneğin, 2003'te meydana gelen ve polinomal trend ile iyi bir şekilde temsil edilen şiddetli kuraklık El Niño kaynaklıdır. La Niña salınımı ise, etkisini 2009'da meydana gelen aşırı sel olayları ile göstermektedir (Marengo ve Espinoza, 2016). Ayrıca, polinomal fonksiyonlarla genişletilen bu modelin düzeltmeleri, SPEI ile karakterize edilen kurak ve yağışlı dönemleri de başarılı bir şekilde yansıtmaktadır.

Şekil 3.21c, Tigris-Euphrates havzasında bulunan toplam su bütçesi değişimini göstermektedir. Bu bölgede, 2002-2007 yılları arasında uzun süreli yağışlı bir dönemin ardından 2008 ile 2018 arasında şiddetli ve uzun süreli kuraklık dönemi yaşanmıştır. İklim değişiklikleri, meteorolojik kuraklık veya tarımsal amaçlı olarak yeraltı ve yüzey sularının kullanılması, bu şiddetli kuraklığın olası sebepleri olarak gösterilmektedir (Longuevergne vd., 2013; Rateb vd., 2021; Voss vd., 2013). Uzun süreli bu kurak periyottan sonra, 2018'de su bütçesi artmaya başlamış ve 2022'ye kadar taşkınların da meydana geldiği yağışlı bir dönem yaşanmıştır (Abdelmohsen vd., 2022). Ayrıca, 2019'dan itibaren su yönetimi politikalarındaki değişiklikler, su bütçesi trendindeki artışa katkı sağlamıştır (Al-Karablieh ve Salman, 2016). Tüm bu değişimler ve geçiş tarihleri, polinomal trend ile doğru bir şekilde modellenebilmiştir. Ayrıca, 2008-2018 arasında uzun dönemli kuraklığın egemen olduğu dönemde, daha kısa periyotlarda gerçekleşen ve yağış alınan zaman dilimleri de (örneğin 2012-2014 arası), SPEI indeksi ve fonksiyonel modelin düzeltmeleri ile takip edilebilmiştir.

Şekil 3.21d'de, Ganges-Brahmaputra havzasından bir zaman serisi sunulmaktadır. Zaman serisinin periyodu boyunca şiddetli kurak ve yağışlı mevsimler olduğu SPEI değerleri ile gözlenmiştir. Ardışık dönemlerde meydana gelen bu değişiklikler, 2012'de kurak ve yağışlı dönemler arasında belirgin bir geçişle polinomal trend ile modellenebilmiştir. Yoğun yağışlara neden olan tropikal muson veya El Niño etkisi gibi birçok farklı faktör bu bölgedeki su bütçesi değişimlerine neden olmaktadır (Parajuli vd., 2021; Wei vd., 2021). Açıklanan bu değişiklikler, iklim indeksi SPEI

tarafından yakalanan kurak ve yağışlı dönemlerle de uyumludur. Ayrıca, Khandu vd. (2016) su bütçesi değişimlerinin Ganges-Brahmaputra bölgesindeki yağışlarla güçlü bir korelasyona sahip olduğunu göstermiştir. 2002, 2006 ve 2009'dan sonra yağışlarda yaşanan azalma ile 2011-2014 döneminde meydana gelen artışlar, toplam su bütçesi trendini etkilemekte ve polinomal fonksiyonlar ile uyumlu bir şekilde modellenmektedir. 2009 ve 2010 arasında yaşanan en kurak dönem, SPEI indeksi ile -1,5'e ulaşmış ve polinomal trend modelden çıkarıldıktan sonra düzeltmelerle temsil edilebilmiştir.



Şekil 3.21 Polinomal fonksiyonel modelin SPEI iklim indeksleri ile karşılaştırılması

Güney Afrika'nın Zambezi havzası için Şekil 3.21e'de gösterilen toplam su bütçesi değişiminde; 2005-2006, 2012, 2014-2016 gibi farklı periyodik dönemlerde kuraklıklar meydana gelmektedir. Ayrıca, 2007-2008, 2010-2012 yıllarında da şiddetli yağışlar ve episodik sel dönemlerinin neden olduğu su kaynaklarındaki

kısa, düzensiz artışlar da dikkat çekicidir (Kolusu vd., 2019). Polinomal trend ve düzeltmeler, Zambezi nehir havzasındaki uzun vadeli değişimleri ve yüksek zaman çözünürlüğünde meydana gelen yağış olaylarını doğru bir şekilde yansıtması açısından oldukça etkili bir modelleme yaklaşımı sunmaktadır.

Avustralya, özellikle El Niño salınımı nedeniyle şiddetli yağışlardan güçlü bir şekilde etkilenen bir bölgedir (Abelen vd., 2015). Bölgede, 2009 yılına kadar milenyum kuraklığı (Zhao vd., 2017) olarak adlandırılan dönem yaşanmış, ancak 2010 yılından bu yana önemli miktarda yağış da gözlenmiştir (Boening vd., 2012; van Dijk vd., 2013). 2010-2011 periyodunda toplam su bütçesinde görülen güçlü değişiklikler ise, Avustralya'daki su kaynaklarında artışa yol açan La Niña salınımının etkisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.21f'deki kütle değişimleri ile kurak ve yağışlı dönemler arasındaki geçiş trendi 5. derece bir polinom fonksiyonu kullanılarak modellenebilmektedir. Polinomal trend, 2009 yılına kadar süren uzun kuraklık dönemini ve ardından 2013 yılına kadar yağışlar nedeniyle artan su bütçesini iyi bir şekilde yansıtmakta ve SPEI iklim indeksi sonuçlarıyla da desteklenmektedir.

Yapılan tüm değerlendirmeler göz önüne alındığında polinomal trendin ve bu modelin uygulanmasıyla elde edilen düzeltmelerin zaman serilerindeki doğrusal olmayan değişimleri etkili bir şekilde temsil ettiği, değişimin fiziksel sebepleri ve iklim indeksi ile destelenerek gösterilmiştir. Burada son olarak, Ekim 2017 ve Mayıs 2018 arasındaki iki GRACE misyonu arasındaki 11 aylık veri boşluğunun etkisinden de bahsetmek gerekmektedir. Landerer vd. (2020) çalışmasında, bu veri boşluğunun uzun dönemli trendi etkilemediği sonucuna varmıştır. Bu durum, kuraklık ve sel dönemlerinin birbirini takip ettiği durumlar için Şekil 3.21d ve 3.21e'de de görülmektedir. Veri boşluğu öncesi ve sonrasındaki su bütçesinin değişimi, veri boşluğundaki değişimle tamamen zıt özellikler gösteriyorsa, polinomal trend uzun dönemli değişime uyum sağlamaktadır. Ancak bu durumda da 11 aylık bir dönemde meydana gelen ve SPEI indeksi ile tanımlanan kurak veya yağışlı dönemler, modelden geriye kalan düzeltmeler ile izlenebilmektedir.

3.4.6 Polinomal Fonksiyonel Modelden Elde Edilen Düzeltmelerin Gürültü Karakterinin İncelenmesi

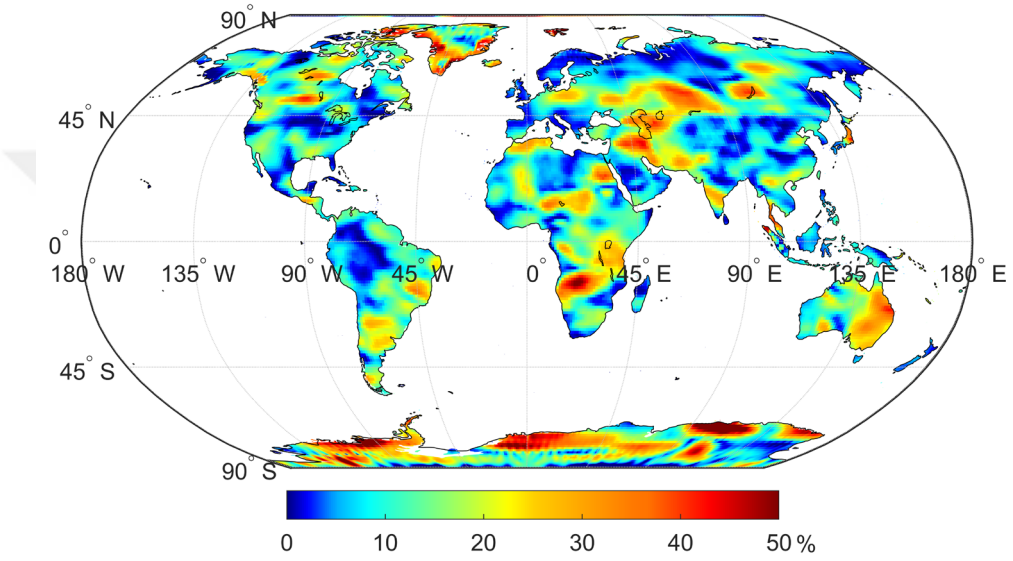
Zaman serisi analizinde kullanılan fonksiyonel modelden geriye kalan düzeltmeler zaman serisi hakkında önemli bilgiler taşımaktadır. Örneğin, doğrusal trend ve mevsimsel sinyallerin olduğu standart fonksiyonel modelde, doğrusal olmayan değişimler parametrik olarak tanımlanmadığı için düzeltmelere taşınmaktadır. Bu bağlamda, toplam su bütçesi değişiminin modellenmesinde polinomal trend yaklaşımının zaman serisinin tamamına olan katkısını incelemek için standart fonksiyonel model ve polinomal fonksiyonel modelden elde edilen düzeltmelerin RMS (Root Mean Square) değerlerindeki değişim miktarı incelenmiştir. Bu değişim oransal olarak (δ) aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$\delta = \left(\frac{\mathrm{RMS}_{doğrusal} - \mathrm{RMS}_{polinomal}}{\mathrm{RMS}_{doğrusal}} \right) \times 100 \tag{3.8}$$

Burada $\mathrm{RMS}_{doğrusal}$ ve $\mathrm{RMS}_{polinomal}$, sırasıyla standart ve polinomal fonksiyonel modellerin RMS değerini ifade etmektedir. Standart fonksiyonel modelden elde edilen düzeltmelerin RMS ortalaması 4,47 cm iken, polinomal model için bu değer 3,78 cm'dir. Bu sonuçlar, polinomal fonksiyonun doğrusal olmayan trendi modelleyerek mascon zaman serilerine katkı sağladığını ve düzeltmelerin RMS değerlerini küçülttüğünü göstermektedir.

RMS değerlerinde meydana gelen bu iyileşme oranının mekânsal dağılımı yüzdesel olarak Şekil 3.22'de verilmektedir. Toplam su bütçesi zaman serilerinin çoğunda, polinomal fonksiyonel modelin düzeltmelerinin RMS değerindeki iyileşme oranı %50'ye ulaşmıştır. Özellikle Grönland'ın güney kıyısı, Antarktika ve Zambezi nehir havzasının çevresi en yüksek iyileşme oranına sahip bölgeler olarak öne çıkmaktadır. St. Lawrence, Mackenzie ve Mississippi nehir havzalarında ve ayrıca Alaska körfezini çevreleyen bölgede RMS değerlerinin %20-40 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Güney Amerika'da ise, Orinoco, Amazon ve Parana nehir havzalarını kapsayan bölgenin batı kesimlerinde, üçüncü dereceden polinomal trend ile genişletilen modellerin RMS değerlerinde %10'dan fazla iyileşme görülmektedir. Tigris-Euphrates havzası ve Hazar denizi, Avrasya'da dördüncü dereceden polinomal trendin etkilerini göstermeye özellikle yatkın iki konum olarak öne çıkmakta ve RMS değerlerinde %30 oranında iyileşme sağlanmaktadır.

Güney Afrika'daki Zambezi ve Okavango nehir havzası bölgesinde ise, RMS değerlerindeki iyileşme en büyük seviyelere, %50'ye kadar ulaşmaktadır. Japonya'daki Tohoku-Oki deprem bölgesinin yanı sıra kuzey Avustralya kıyıları ve Sumatra-Andaman adalarında da polinomal trendin zaman serisi modeline yaklaşık %10'luk bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Güney yarım küredeki kutup bölgeleri incelendiğinde ise, özellikle Antarktika yarımadasında, Batı Antarktika kıyılarında ve Doğu Antarktika'nın küçük bir bölümünde, meydana gelen iyileşme oranı %40'ı aşmaktadır.

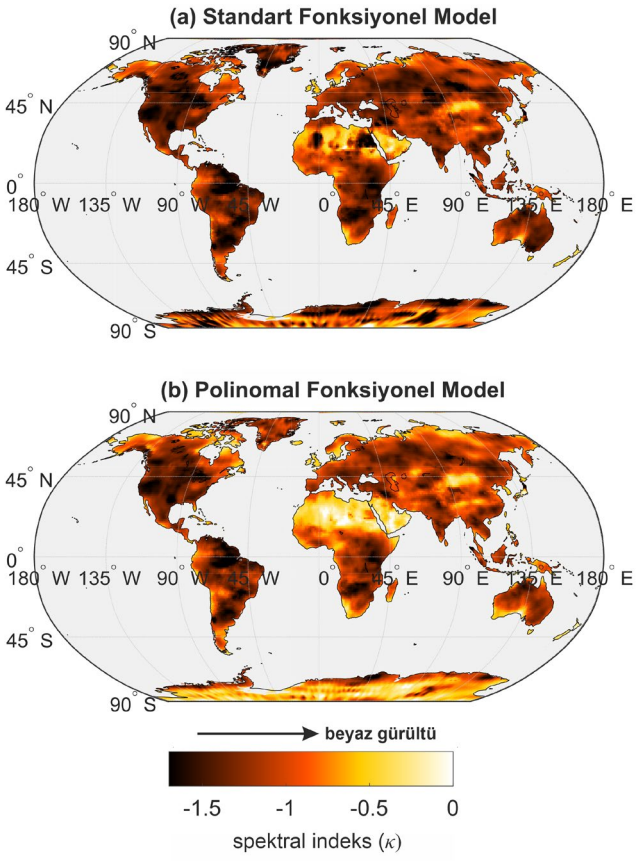


Şekil 3.22 Polinomal fonksiyonel modelin düzeltmelerin RMS değerindeki iyileşme oranı

Fonksiyonel modeldeki parametre sayısının artmasıyla matematiksel olarak RMS değerlerinin küçülmesi beklenen bir durumdur. Ancak, bu polinomal fonksiyonların sebepleri önceki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiş ve fiziksel karşılıkları açıklanmaya çalışılmıştır. Bu nedenle, yukarıda mekânsal olarak ele alınan bu iyileşmelerin sadece matematiksel bir olgudan değil, fiziksel doğada karşılığı olduğu bilinen doğrusal olmayan trendin modellenmesinden kaynaklandığı da açıkça söylenebilmektedir.

Bu bağlamda, RMS değerlerinde görülen iyileşme yüzdesine rağmen düzeltmelerde hala daha modellenmeyen düzensiz hareketlerin var olduğu da görülmektedir. Bu durumun, zaman serisindeki renkli gürültü karakteriyle yakından ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, Hector yazılımında (Bos vd., 2013) maksimum likelihood kestirim yöntemi (Langbein ve Svarc, 2019) kullanılarak standart ve

polinomal fonksiyonel modeller için analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki fonksiyonel model için stokastik kısım, güç spektrumunda tanımlanan renkli gürültü ile beyaz gürültünün kombinasyonu olarak tasarlanmıştır. Modellere en iyi uyan stokastik model BIC bilgi kriterine göre seçilmiştir. Bölüm 3.3.3'te bahsedildiği gibi bu renkli gürültünün kırpışma gürültüsüne benzer bir spektrumda olduğu görülmüştür. Çözümler gerçekleştirildikten sonra modelden edilen düzeltme değerleri kullanılarak spektral indeksler kestirilmiştir. Şekil 3.23'te beyaz gürültü + renkli gürültü stokastik modeli altında fonksiyonel modellerden elde edilen spektral indeksler sunulmaktadır.



Şekil 3.23 (a) Standart ve (b) polinomal fonksiyonel modelin beyaz gürültü + renkli gürültü stokastik modeliyle analizinden elde edilen spektral indeksler

Doğrusal trendin kullanıldığı standart fonksiyonel model sonuçları incelendiğinde, karasal alanların %97'sinde, spektral indekslerin beyaz gürültüden uzaklaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, zaman serilerindeki renkli gürültü karakterinin hidrosferde meydana gelen değişikliklerin karakterini yansıttığı düşünülmektedir. Ancak, renkli gürültünün makul bir şekilde fiziksel bağlamda açıklanamadığı bölgeler de bulunmaktadır. Bu bölgeler arasında en önemli örnek, hidrosferdeki

değişimlerden kaynaklanan kısa dönemli (short-term) olayları gösteren ve -2'ye yakın spektral indeksler elde edilen aşırı kurak karasal iklimde bulunan kuzey Afrika bölgesidir.

Zaman serisinde doğrusal olmayan trend polinomal fonksiyonlarla parametrize edilerek genişletildiğinde elde edilen spektral indeks karakteri de Şekil 3.23'te polinomal fonksiyonel model haritasında gösterilmektedir. Zaman serilerinin %88'inde spektral indekslerin beyaz gürültüden farklı olduğu elde edilmiştir. Bu modelde doğrusal olmayan uzun dönemli değişimlerin etkileri polinomal trend ile elimine edildiğinden, geriye kalan gürültü modelinin hidrolojik kaynaklı kısa-dönemli sinyallerin varlığı ile mekânsal olarak ilişkili olduğu gözlenmektedir. Böylece, polinomal fonksiyonel model, doğrusal olmayan değişimleri modellemenin yanısıra kısa dönemli hidrolojik olayların oluşabileceği potansiyel alanları belirlemeye yardımcı olduğu için sonuçların irdelenmesinde ve yorumlanmasında da oldukça önemli bir yere sahiptir.

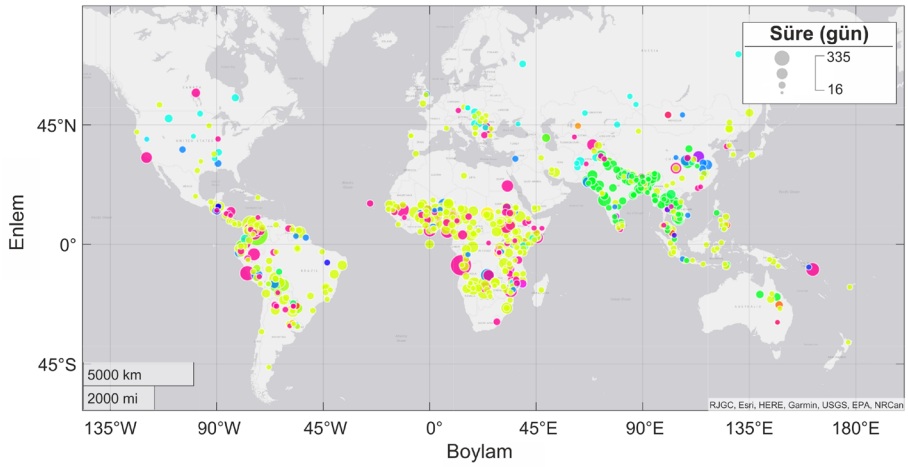
Şekil 3.23, iki fonksiyonel model arasındaki en önemli farklar açısından ele alındığında, Amerika'nın kuzeyi, Grönland, Antarktika, Hazar Denizi çevresindeki bölge, Orta Asya'nın çeşitli bölgeleri ve Afrika bölgelerinin yukarıda belirtilen kuzey kısmı dikkat çekmektedir. Bu bölgeler, önceki bölümlerde polinomal trendin en çok katkı verdiği ve doğrusal trendden farklılaştığı alanlarla önemli ölçüde çakışmaktadır. Yani, daha önce gürültü olarak kategorize edilen değişimlerin, standart fonksiyonel modelde parametrizasyonu yapılmayan uzun dönemli değişikliklerle ilgili olduğu ve basitçe stokastik kısma taşındığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, polinomal fonksiyonel model uyguladıktan sonra, düzeltmelerin hem RMS değerleri azalmakta hem de gürültü karakteri, rastgele yürüyüş gürültüsünden kırpışma gürültüsüne daha yakın spektruma gelmektedir. Bu bulgular, toplam su bütçesi zaman serilerinin durağan olmayan süreçleri ile ilgili olarak Hasan vd. (2022) tarafından elde edilen sonuçları da desteklemektedir.

Polinomal fonksiyonel modelin kısa dönemli olayların spektral indekslerde daha kolay ayırt edilebilmesine olan katkısını göstermek için spektral indekslerin mekânsal dağılımı EM-DAT veri tabanından (https://www.emdat.be/.) temin edilen sel ve kuraklık gibi kısa dönemli olarak kabul edilen olaylarla karşılaştırılmıştır. EM-DAT, 1900'lü yıllardan günümüze kadar meydana gelen afet gruplarını (süreleri, nedenleri ve şiddetleri) kaydeden bir veri tabanıdır. 2002-2022 yıllarını

içerecek şekilde bu veri tabanında kaydedilen sel ve kuraklık bilgileri temin edilerek Şekil 3.24'te gösterildiği gibi nedenleri ve süreleriyle birlikte haritalanmıştır. Burada dairelerin büyüklüğü ilgili olayın süresini, rengi ise meydana geliş sebebini göstermektedir.

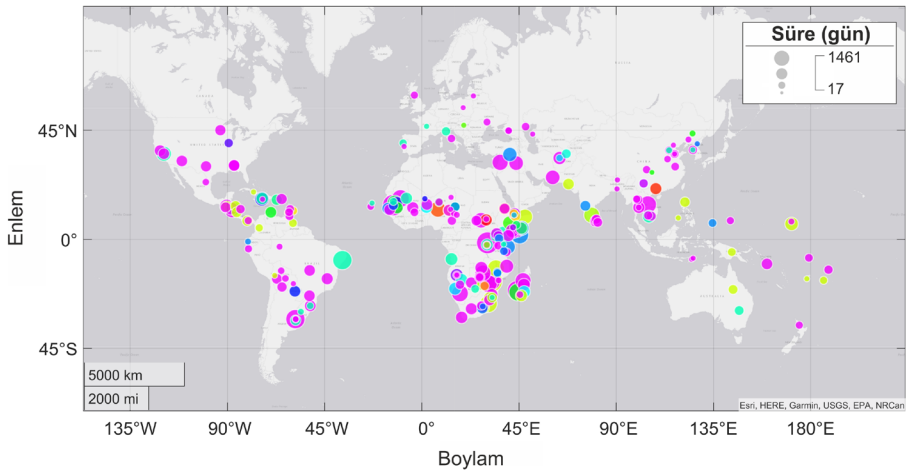
Şekil 3.24 ile polinomal fonksiyonel model uyguladıktan sonra belirlenen spektral indekslerin olduğu Şekil 3.23 ile mekânsal olarak karşılaştırıldığında, spektral indekslerin sıfıra yakın olduğu alanlarda kısa dönemli hidrolojik etkilerin gerçekleşmediği görülmektedir. Spektral indeksin sıfırdan farklılaştığı yerlerin ise sel ve kurak geçişlerinin meydana geldiği bölgelerle örtüştüğü görülmektedir. Örneğin, Afrika'nın kuzeyinde kısa dönemli fiziksel değişimler meydana gelmemekte ve bu durum spektral indeks haritasında beyaz gürültüye oldukça yakın gürültü karakteri olarak tespit edilmektedir. Amazon havzasının çevresindeki alanlar veya Afrika'nın batı, orta ve güney kısımları (örneğin Congo ve Zambezi havzası) ise 2002-2022 döneminde sellerden etkilenmiştir. Süreleri 16 ila 335 gün (<1 yıl) arasında değişen bu sellere aşırı ve şiddetli yağışlar neden olmakta, bunların bir kısmı da El Niño salınımıyla ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, Krishna, Ganges-Brahmaputra ve Mekong Nehri havzalarının yanı sıra Avustralya'daki Murray-Darling havzası ile Kuzey Amerika'daki Great Lakes yakınlarındaki bölgeler için EM-DAT veri tabanında kaydedilen seller de kayda değerdir. Bunlara Doğu Asya ve Orta Avrupa'da bulunan Yangtze ve Amur havzaları da dahil edilebilir. Buradaki değişiklikler, kar erimesi, tropik çöküntüler ve şiddetli ya da muson yağmurları gibi çeşitli faktörlerle ilişkilendirilmekte ve düzeltmelerde beyaz gürültüden uzak spektral indeks olarak tespit edilebilmektedir.

Spektral indeksin sıfırdan uzaklaştığı diğer yerlerde; Afrika'nın güneyindeki Orange havzasına yakın bölgeler, Etiyopya ve Madagaskar'ın doğu kıyıları, Amerika'nın güneyinde Parana havzasına yakın bölgeler, güney Avrupa'nın bazı bölgeleri, Tigris-Euphrates havzası ve Asya'nın güney bölgesi ile Avustralya'nın doğu kısmında bulunan havzalarda da kısa dönemli kuraklıklar kaydedilmiştir. Yağış eksikliği veya El Niño salınımı gibi çeşitli faktörlerle ilişkili bu kuraklıklar, hem uzun dönemde etkisini polinomal trend ile göstermekte; hem de 1 yıldan daha az olarak tanımlanan kısa dönemli periyotlarda stokastik modele taşınıp gürültü karakterini etkilemektedir.



Selin sebepleri

Constant rains	Incessant rains	Tropical Depression 12-E
Continuous rain	Monsoon rain	Tropical Depression 16
Cyclone Tasha, La Nina	Persistent rainfall	Tropical Depression 29
Dam/levy break or release	Rainstorms	Tropical Storm Noru
El Nino	Seasonal rain	Tropical cyclone Cempaka
Excessive rain	Snowmelt	Tropical depression Rovan
Heavy rain	Storm	Tropical depression/cyclone
Heavy rain, El Nino	Tornado	Tropical storm Dianmu
Heavy rain, La Nina	Torrential rain	<undefined>
Heavy snowfall	Tropical Depression	



Kuraklığın sebepleri

Bad distibution of rain	Heat wave	Ongoing drought
Below-average precipitation	Heavy drought	Poor rainfall
Climatic conditions	High temperature and lack	Prolonged dry spells
Crop failure	Insufficient rainfall	Rainfall deficit
Crop pests	Irregular rain	Rainfall shortages
Delayed and below-normal rains	La Nina	Scarcity of rain
Dry conditions	La Nina and El Nino	Seasonal rain above the average in 2010 and 2011
Dry spells and pests	Lack of rain	Severe lack of rainand extreme temperature
El Nino	Limited rainfall	Strong dry spell
Erratic rainfall	Locust infestation	Successive failed rainy seasons
Failed rains	Low rainfall	Two consecutive Poor rainfalls
		<undefined>

Şekil 3.24 Kısa dönemli hidrolojik olaylar olarak sınıflandırılan EM-DAT veri tabanındaki sel ve kuraklık oluşumları (Dairelerin büyüklüğü meydana gelen olayın süresini, renkler ise sebeplerini göstermektedir)

3.5 Jeodezik Zaman Serilerinde Gözlenen Uzun Dönemli Ek Periyodik Sinyalin Araştırılması

GRACE toplam su bütçesi zaman serilerinde zamansal korelasyonlar ve doğrusal olmayan trendin yanısıra yıllık sinyalden daha uzun periyoda sahip periyodik bir ek sinyal yapısından da söz edilmektedir. Literatürde, yerin dönmesi ve rotasyonundan kaynaklı olduğu öne sürülen ve 6 yıllık sinyal olarak bahsedilen bu periyodik etki sadece GRACE zaman serilerinde değil GNSS, GMSL gibi farklı jeodezik zaman serilerinde de görülmektedir (Pfeffer vd., 2023).

Bu çalışmada bu ek periyodik sinyalin toplam su bütçesi zaman serilerinde tespit edilebilmesi için bir algoritma geliştirilmiştir. Standart fonksiyonel model olarak kabul edilen doğrusal trend ve yıllık, yarıyıllık mevsimsel bileşenlerden oluşan harmonik regresyon modeli (Eşitlik 3.1) aşağıdaki şekilde ek periyodik sinyali tanımlayan genlik parametreleri ile genişletilmiştir:

$$\begin{aligned} y_j - e_j = a + bt_j + c_1 cos\left(\omega_1 t_j\right) + s_1 sin\left(\omega_1 t_j\right) + \\ ... c_2 cos\left(\omega_2 t_j\right) + s_2 sin\left(\omega_2 t_j\right) + c_3 cos\left(\omega_3 t_j\right) + s_3 sin\left(\omega_3 t_j\right) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Burada c_1 ve s_1 yıllık (365.25 gün), c_2 ve s_2 yarıyıllık (182.63 gün) mevsimsel sinyallerin kosinüs ve sinüs bileşenlerini; c_3 ve s_3 ise, yeni eklenen uzun dönemli periyodik sinyalin (T_3) bileşenlerini temsil etmektedir. $\omega_3 = 2\pi/T_3$ olmak üzere, T_3 periyodunun açısal frekansıdır. T_3 periyodunun jeodezik zaman serilerinde yaklaşık 6 yıl olduğu düşünülse de toplam su bütçesi serilerinde 4 ile 8 yıl arasında değiştiği bilinmektedir (Pfeffer vd., 2023). Bu nedenle daha doğru yorum yapabilmek amacıyla bir örneklem kümesi için bu uzun dönemli ek sinyalin periyodu araştırılmıştır. Ek sinyalin Eşitlik (3.10)'da gösterildiği gibi 1,1 ile 10 yıl arasında değiştiği varsayılmıştır. 20 yıllık bir zaman serisi analiz edileceği için Nyquist kriterine göre belirlenebilecek en büyük periyot 10 yıl olarak kabul edilmiştir.

$$A = \{ T3 | \ 1{,}1;\ 1{,}2;\ 1{,}3;\ \ldots;\ 9{,}8;\ 9{,}9;\ 10 \text{ yıl} \} \tag{3.10}$$

1,1 ile 10 yıl arasında değişen bu ek periyotlar için genişletilmiş fonksiyonel modeller oluşturulmuş ve her bir model için R-kare değeri hesaplanmıştır. Daha büyük R-kare değeri, toplam su bütçesi değişimi sinyaline daha iyi uyan ek sinyalin periyodunu belirlemek için yeterli olmaktadır. Ancak analizler bununla sınırlı

kalmayıp bir de Fisher model testi eklenmiştir. Bu kapsamda izlenen algoritma adımları aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

- Adım 1 (Ek sinyalin fonksiyonel modele eklenmesi ve analizi): 1,1-10 yıl aralığından seçilen T_3 periyodu için toplam 90 model oluşturulmaktadır. Modeller, en küçük kareler kestirimiyle analiz edilerek, düzeltmelerin ağırlıklı karelerinin toplamı hesaplanır.
- Adım 2 (Fisher model testi): Standart fonksiyonel model ile her biri farklı periyoda sahip ek sinyal ile genişletilmiş modellerden elde edilen düzeltmelerinden ağırlıklı kareleri toplamı Fisher model testine tabi tutulur. %5 yanılma olasılığı ile F-dağılımına göre genişletilmiş modelin geçerli olup olmadığı araştırılır. Bu model testi 1. adımdan itibaren her bir genişletilmiş model için uygulanarak, testi geçenler belirlenir. Testi geçen modellerin hepsinin zaman serisini daha iyi temsil eden modeller olduğu sonucuna ulaşılır. Eğer, model testini geçen genişletilmiş model yoksa bir sonraki adıma geçilmez ve toplam su bütçesinin standart fonksiyonel model ile daha iyi temsil edildiği kabul edilir.
- Adım 3 (R-Kare değerlerinin hesaplanması): Önceki adımdan model testini geçen her bir genişletilmiş model için R-kare değeri hesaplanır. Fisher model testini geçen bu modeller arasında en büyük R-kare değerine sahip model, toplam su bütçesi zaman serisine en iyi uyan ek periyodik sinyalin periyodunu veren model olarak kabul edilir.

Yukarıda adımları verilen bu algoritmanın matematiksel modeli Eşitlik (3.2)'de verilen standart fonksiyonel modelin genişletilmesiyle aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\mathbf{y}-\mathbf{e}=\begin{pmatrix}\mathbf{X} & \mathbf{X}_{\text{ek}}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\beta \\ \beta_{\text{ek}}\end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{\text{ek}}=\begin{pmatrix}\vdots & \vdots \\ c_3 cos\left(\omega_3 t_j\right) & s_3 sin\left(\omega_3 t_j\right) \\ \vdots & \vdots\end{pmatrix} \tag{3.11}$$

$$\beta_{\text{ek}}=\begin{pmatrix}c_3 & s_3\end{pmatrix}^{\text{T}}$$

Her bir zaman serisi için genişletilmiş bu model, en küçük kareler kestirimine göre analiz edilerek, hata vektörü $\widehat{\mathbf{e}_{ek}}$ ve buna bağlı olarak varyans bileşeni $\widehat{\sigma_{ek}}^2 = \frac{\widehat{\mathbf{e}_{ek}}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{e}_{ek}}{n-8}$ olarak kestirilir. Burada, $\widehat{\mathbf{e}_{ek}}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{e}_{ek}$ ifadesi düzeltmelerin ağırlıklı karelerinin toplamını (Ω_{ek}) temsil etmektedir. Bu şekilde, standart fonksiyonel modeldeki düzeltmelerin ağırlıklı karelerinin toplamı ($\Omega_o = \hat{\mathbf{e}}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{e}$) Eşitlik (3.2)'de verilen model kullanılarak en küçük kareler kestirimiyle hesaplanmıştır (Bakınız: Bölüm 3.1, sayfa 17).

Adım 2'de Fisher model testinin uygulanması aşamasına geçilmektedir. Model testi için hipotezler, H_0: $E(\hat{\beta}_{ek})=0$ ve H_1: $E(\hat{\beta}_{ek})\neq 0$ olarak kurulmaktadır. Bu hipotezler için F dağılımına göre test istatistiği,

$$T = \frac{\Omega_o - \Omega_{ek}}{f_o - f_{ek}} \frac{f_{ek}}{\Omega_{ek}} \sim F(f_o - f_{ek}, f_{ek}) \tag{3.12}$$

olarak yazılmaktadır. f_o ve f_{ek} sırasıyla standart ve ek sinyal ile genişletilmiş fonksiyonel modelin serbestlik derecesini göstermektedir. Hesaplanan test değeri, F dağılımının güven sınırından büyükse ($T \geq F_{f_o - f_{ek}, f_{ek}, 0.95}$) H_1 hipotezi %5 yanılma olasılığı ile kabul edilmektedir. Yani, fonksiyonun ek sinyal ile genişletilmesiyle zaman serisinin daha iyi modellendiği kabul edilmektedir. Böylece, algoritmanın son adımı olan hangi ek periyodik sinyalin en iyi uyduğunu gösteren R-kare değerlerinin hesaplanması aşamasına geçilmektedir. R-kare değeri,

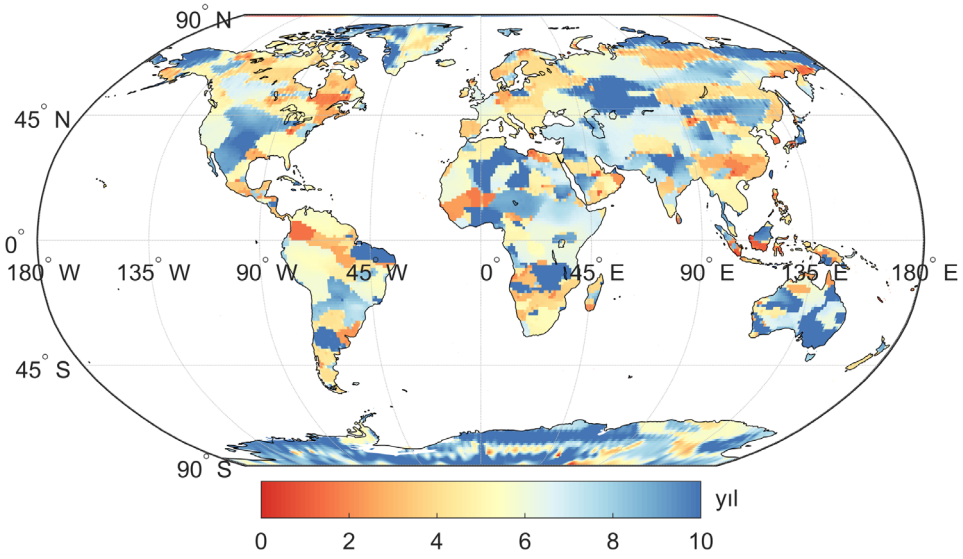
$$R = 1 - \frac{\Omega_{ek}}{\Omega_o} \tag{3.13}$$

ile hesaplanmaktadır. Her bir zaman serisi için Fisher model testini geçen genişletilmiş modeller arasında en büyük R-kare değerine sahip model, ek sinyalin periyodu olarak belirlenmiştir.

Nisan 2002 ve Mayıs 2023 periyodu için 1x1 derecelik gridlenmiş mascon çözümleri için gerçekleştirilen bu analizler sonucunda T_3 ek sinyalinin periyodu belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, zaman serilerinin %32'sinde ek sinyalin periyodu 1,1 ile 5 yıl arasında değişirken, %39'unda 5,1 ile 8 yıl arasında değişmektedir. Zaman serilerinin %15'inde ise ek sinyalin periyodu en büyük değer

olan 10 yıl olarak belirlenmiştir. Mascon çözümlerinin yaklaşık %0,02'si yani 13028 toplam su bütçesi değişiminin 2'si Fisher model testini testi geçememiş ve doğrusal trend ile yıllık ve yarıyıllık mevsimsel sinyallerden oluşan standart model geçerli kabul edilmiştir.

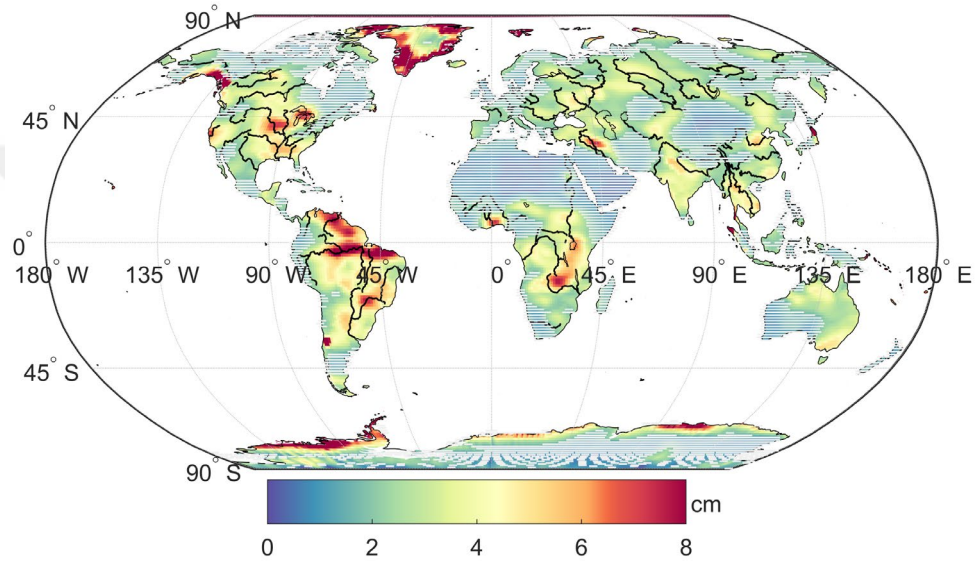
Şekil 3.25'te ek sinyalin periyodu harita üzerinde gösterilmiştir. Sonuçlar, global ölçekte bir ara değerlendirildiğinde ortalama değeri 6,4 yıl ve standart sapması ise 2,7 yıl olarak belirlenmiştir. Bu değerlere, parametre testi uygulandığında karşılaştırma değeri 6,4/2,4=2,7 olarak hesaplanmıştır. Test değeri, t-student dağılımının α=%5 yanılma olasılığı için karşılaştırma değeri t=1,97'den büyüktür. Yani, incelenen ek sinyalin periyodu istatistiksel olarak anlamlıdır. Diğer bir deyişle, 1σ hata için ek sinyal 4 ile 8,8 yıl arasında değişmektedir. Bu sonuçlar literatürde verilen değerlerle de uyum içindedir (Moreira vd., 2021; Pfeffer vd., 2023).



Şekil 3.25 Uzun dönemli ek periyodik sinyalin periyodu

Uzun dönemli ek sinyalin periyodunun yanısıra genliği de sinyalin baskın olduğu bölgelerin belirlenebilmesi için önemlidir. Sinyalin genliği, c_3 ve s_3 kosinüs ve sinüs bileşenlerine göre genlik=$\sqrt{c_3^2 + s_3^2}$ olarak hesaplanmaktadır. Ek periyodik sinyalin genlik ortalaması 3 cm olmakta birlikte en büyük değerler 64 cm'ye kadar ulaşmaktadır. Şekil 3.26'da genliklerin dağılımları mekânsal olarak ele alındığında, tropikal bölgelerde, Tigris-Euphrates havzası yakınında, kutup bölgelerinin kıyılarında, Alaska ve Mississippi havzasına yakın bölgelerde daha büyük değerler elde edildiği görülmektedir. Tropikal bölgeler, Amazon havzası ve çevresi,

Afrika'nın ortasındaki Congo ve Zambezi havzası alanları ile Asya'nın güneyi gibi ±25° içindeki bölgeyi içermektedir. Bu bağlamda, periyodik ek sinyalin, hidrosferde yıllar arası zaman ölçeğinde meydana gelen değişikliklerden etkilendiği anlaşılmaktadır. GRACE ve GRACE-FO uydularından elde edilen sinyalin gürültüsü yaklaşık 2 cm (Chen vd., 2022b) olduğu için genliği 2 cm'nin altında kalan bölgeler Şekil 3.26'da beyaz taralı alanlar ile gösterilmektedir. Bu bölgelerde, GRACE sinyalinin sinyal-gürültü oranının düşük olması nedeniyle ek periyodik sinyalin fiziksel bağlamda ayırt edilebilmesinin daha zor olacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.26 Uzun dönemli ek periyodik sinyalin genliği
(Beyaz taralı alanlar genliğin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir)

Bulgular, Pfeffer vd. (2023) ile karşılaştırıldığında periyodik ek sinyale ait en büyük genlik değerlerinin elde edildiği bölgelerin benzer olduğu görülmektedir. Örneğin, Güney yarımkürede yani Amazon ve Congo Nehri havza alanlarının yakınında ek sinyalin genliğinin 6 cm'den daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Grönland'ın güney kıyıları ve Antarktika yarımadası da diğer bölgelere kıyasla daha büyük genlik değerlerine sahiptir. Çalışmalar arasındaki benzerlikler sadece ek sinyalin baskın olduğu bölgelerle sınırlı değildir; periyodik sinyal genliklerinin baskın olmadığı bölgeler de uyumludur. Bu bölgeler, Afrika'nın kuzey kısımları, Arap yarımadası, Doğu Antarktika ve Orta Asya'daki Moğolistan ve çevresini içermektedir.

Ayrıca, Bölüm 3.4.4'te tartışılan wavelet analizinden elde edilen uzun dönemli sinyalde 6 yıllık bu periyodik etki sinyalin alt bileşenlerinde dikkate alınmıştı. Bu

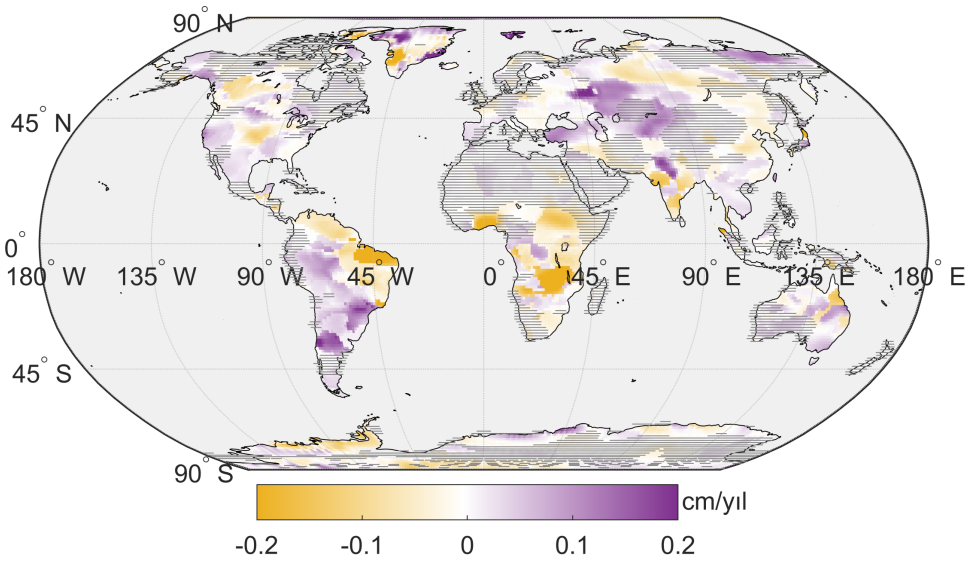
nedenle, Şekil 3.19b'de uzun dönemli sinyal ile polinomal trend bahsedilen bu ek periyodik sinyal nedeniyle farklılaşmıştı. Benzer şekilde, Şekil 3.20'de wavelet analizi ile polinomal fonksiyonel model arasındaki farkların daha büyük olduğu bölgeler, Şekil 3.26'da baskın ek periyodik sinyalin görüldüğü bölgeler ile örtüşmektedir. Bu algoritmanın önerilmesiyle, ek periyodik sinyalin fonksiyonel modele parametre olarak dahil edilmesi, parametrik olmayan yöntemlere alternatif bir yaklaşım sunmuştur. Sonuç olarak, fonksiyonel model periyodik sinyallerin dikkate alınacağı şekilde bir adım daha geliştirilmiştir.

Ek sinyal ile genişletilmiş modelin zaman serisine parametre düzeyinde katkıları da incelenmiştir. Hem standart fonksiyonel model hem ek sinyal modelinden kestirilen doğrusal trend ile yıllık ve yarıyıllık parametreler arasındaki farklar genişletilmiş modelden standart model değerlerinin çıkarılmasıyla hesaplanmıştır. Tüm mascon çözümleri için yapılan değerlendirmelerde, trend parametresinde ortalama olarak -0,005 cm/yıl değerine ulaşan çok küçük farklar olduğu görülmüştür. Bu durum her iki modelden özdeş sonuçlar elde edildiğini göstermektedir.

Şekil 3.27'de farkların dağılımı gösterilmiştir. Renk skalasında, fark değerlerinin turuncudan mora doğru ilerlemesi (negatiften pozitife) genişletilmiş modelden daha büyük trend kestirimleri yapıldığını göstermektedir. Ek sinyalin genliğinin 2 cm'den büyük olduğu yerlerde farkların da sıfırdan uzaklaştığı görülmektedir. Benzer şekilde, iki modelden elde edilen yıllık ve yarıyıllık mevsimsel sinyallerin genlikleri arasındaki farkların sıfıra yakın olduğu bulunmuştur. Standart ve ek sinyal fonksiyonel modelde yıllık genlik için sırasıyla ortalama değerler 6,59 cm ve 6,60 cm olarak hesaplanırken; yarıyıllık genlikler için bu değerler 1,48 cm ve 1,47 cm olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar, parametrelerin standart hatası bakımından ele alındığında, trendin standart hatasında yaklaşık %7 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, ek sinyalin dahil edildiği fonksiyonel modelden daha küçük standart hatalar elde edilmiştir. Bu durum, ek sinyal modellenmediğinde, zaman serisinin stokastik kısmına taşınarak gürültü gibi etki ettiğini işaret etmektedir. Bu nedenle, ek sinyalin dikkate alındığı modelin düzeltmelerinden spektral indeks değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler, tüm mascon çözümlerinin ortalaması için -0,92 olup -1,80 ile 0,12 arasında değişmektedir. Sonuçlar, standart fonksiyonel modelin spektral indeks değerleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %11 oranında indekslerin

azaldığı ve sıfıra yaklaştığı görülmektedir. Bu bağlamda, fonksiyonel modelin geliştirilmesinin stokastik kısımda gürültü tanımının daha gerçekçi olarak yapılmasına olanak sağladığı görülmektedir.

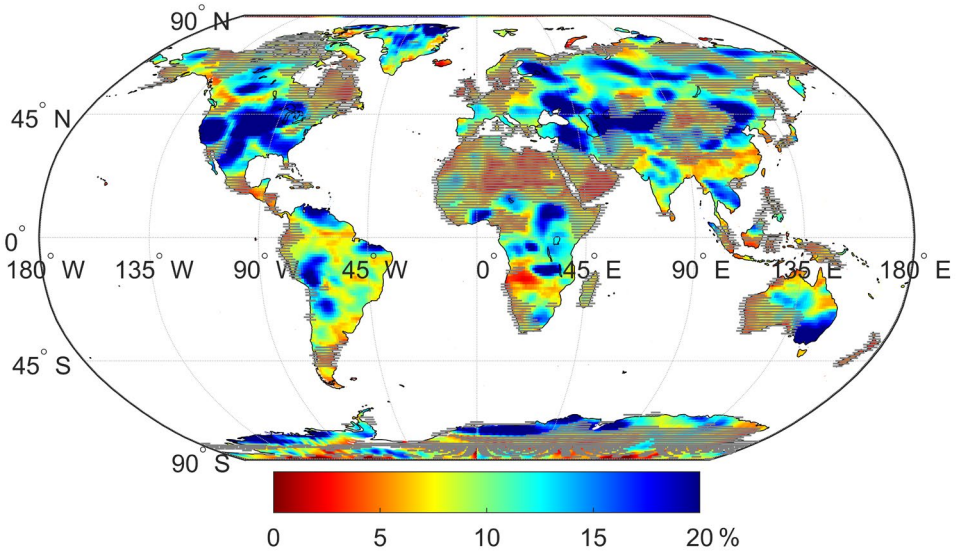


Şekil 3.27 Standart ve ek sinyal fonksiyonel modellerinden kestirilen trendin farkı (Gri taralı alanlar ek periyodik sinyalin genliğinin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir)

Tüm bu iyileşmeler, modelin düzeltmelerinin RMS değerlerine de yansımaktadır. Eşitlik (3.8)'de verilen iyileşme oranı ek sinyal modeli için yazılırsa, $\delta = \left(\frac{\mathrm{RMS}_{doğrusal} - \mathrm{RMS}_{ek\ sinyal}}{\mathrm{RMS}_{doğrusal}}\right) \times 100$ olarak güncellenmektedir. Buna göre, doğrusal trendi içeren standart fonksiyonel modelin RMS değerleri ortalama %20 oranında azalmış, yani iyileşmiştir.

Şekil 3.28'de ek periyodik sinyalin modele sağladığı katkı görülmektedir. Kırmızıdan maviye doğru gidildikçe, ek periyodik sinyalin daha fazla iyileşme sağladığı bölgeler bu şekilden kolayca ayırt edilebilmektedir. Koyu mavi ile gösterilen alanlarda en yüksek iyileşme oranı %46'ya kadar çıkmaktadır. Bölgeler incelendiğinde, Güney yarımkürede özellikle Amazon nehrine yakın bölgelerde, Orta Afrika'da, Avustralya'da Murray-Darling nehir havzasında; Kuzey yarımkürede ise batıda Central Valley ve Mississippi havzası çevrelerinde, doğuda Hindistan yarımadasında, Güneydoğu ve Orta Asya ile Hazar Denizi çevresinde daha fazla iyileşme olduğu görülmüştür. Bu bölgelerin ortak özelliği, hidrosferdeki değişimin yoğun olduğu ve çeşitli iklim modlarının ek sinyali etkileyebileceği su kütlesi değişimi bakımından aktif bölgeler olmalarıdır. Daha az katkının sağlandığı

kırmızıyla temsil edilen bölgeler ise, Afrika'nın kuzeyi ile Arap yarımadasında yoğunlaşmıştır. Bu bölgelerde su kütlesindeki değişimin göreceli olarak daha az olduğu ve GRACE'in sinyal-gürültü oranının düşük olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda bu bölgeler, ek sinyalin genliğinin 2 cm'den az olduğu yerlerle de örtüşmektedir.



Şekil 3.28 Ek sinyalin düzeltmelerin RMS değerlerine katkısı
(Gri taralı alanlar ek periyodik sinyalin genliğinin 2 cm'den küçük olduğu bölgeleri göstermektedir)

- **Nehir Havzaları için Ek Periyodik Sinyalin Belirlenmesi**

Mascon zaman serilerinin GRACE'in mekânsal çözünürlüğünden daha düşük olması nedeniyle, önemli su kaynakları olan nehir havzalarındaki hidrolojik sinyalin daha genel ve tutarlı yorumlanabilmesi için bu algoritma, havza bazında üretilen mascon zaman serileri için de kullanılmıştır.

Tablo 3.3'te seçilen 24 nehir havzasına ait ek sinyalin periyodu ve genliği sunulmaktadır. Analiz sonuçları, gridlenmiş mascon çözümleri ile oldukça uyumlu olup, ek sinyalin periyodu ortalama 6,7±2,6 yıl genliği ise 2,4 cm olarak elde edilmiştir. Ek periyodik sinyalin test değeri t-student dağılımının güven sınırından büyük olduğu için anlamlı kabul edilmiştir.

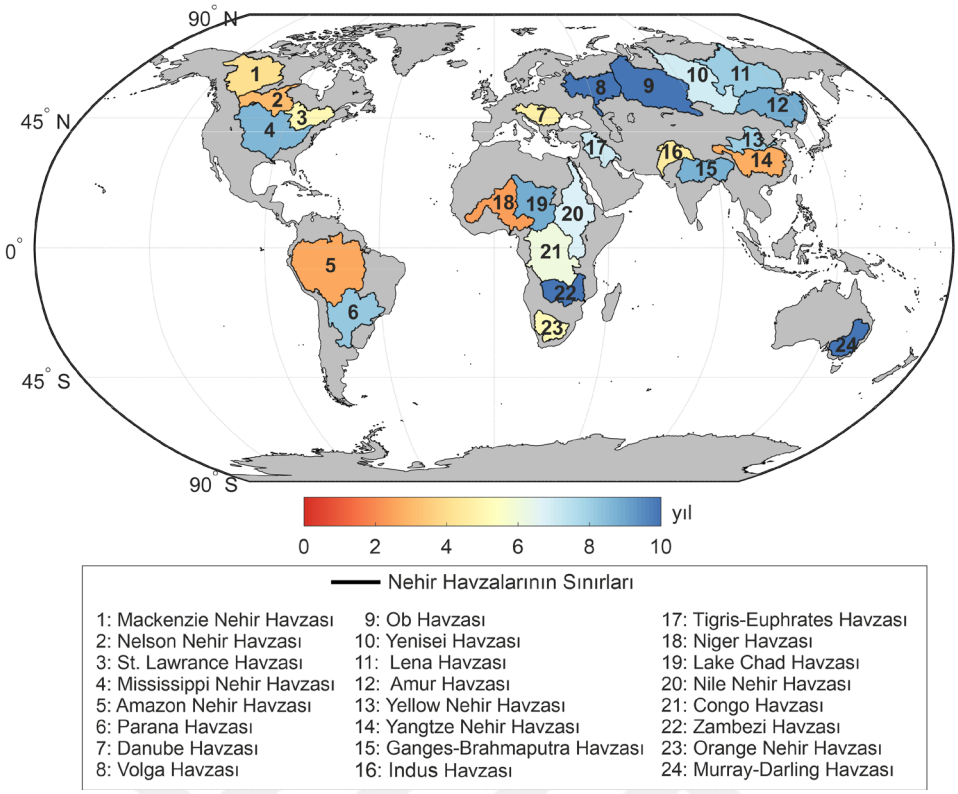
Sinyalin genliğine bakıldığında, GRACE'in sinyal-gürültü oranının düşük olduğu bölgelerde havzalardaki ek sinyal genliklerinin daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, hidrolojik değişimin bu bölgelerde daha az belirgin olduğunu ve dolayısıyla ek sinyalin zaman serisinin modellemesinde daha az etkili

olduğunu göstermektedir. Bu bölgeler arasında, Tablo 3.3'te gri gölgeli satırlarla işaretlenen Yenisei ve Lena nehir havzaları (Kuzey Asya), Tibet platosunun doğusundaki Yellow ve Yangtze nehir havzaları ve Afrika'nın kuzeyine yakın birkaç havza yer almaktadır.

Tablo 3.3 Nehir havzalarında belirlenen ek sinyalin periyodu ve genliği (Genliği 2 cm'den küçük havzalara ait satırlar gri ile gölgelenmiştir)

	Havza	Periyot (yıl)	Genlik (cm)
1	Mackenzie	4,0	2,08
2	Nelson	3,0	2,71
3	St. Lawrence	5,1	3,01
4	Mississippi	8,6	3,36
5	Amazon	2,6	2,43
6	Parana	8,2	3,48
7	Danube	4,7	2,69
8	Volga	10,0	2,15
9	Ob	10,0	2,04
10	Yenisei	6,9	1,40
11	Lena	8,0	1,56
12	Amur	8,8	2,18
13	Yellow	8,1	1,66
14	Yangtze	2,7	1,41
15	GB	8,7	2,05
16	Indus	4,5	2,02
17	TE	7,1	3,68
18	Niger	2,4	0,96
19	Lake Chad	8,8	1,51
20	Nile	6,7	1,79
21	Congo	6,1	3,28
22	Zambezi	10,0	4,66
23	Orange	5,2	1,83
24	MD	10,0	3,28

Şekil 3.29'da ana nehir havzalarına ait zaman serileri üzerinden elde edilen ek sinyalin periyodu, havzaların coğrafi konumlarıyla birlikte sunulmuştur. Bu analizler, dünya genelindeki karasal alanları temsil eden jeodezik zaman serilerinde incelenen ek sinyallerin etkisini detaylandırmaktadır. Yerin dönmesi, artık gün uzunluğu, dönemsel yağışlar (muson yağmurları) veya El Niño ve La Niña gibi uzun dönemli salınımlar gibi çeşitli fiziksel olaylar ile ek sinyal arasındaki ilişki, literatürde açıklanmaya çalışılan bir konudur. Bu nedenle, geliştirilen algoritma ile bu uzun dönemli periyodik parametrelerin parametrik olarak ifade edilmesi, hidrojeodezi alanında önemli bir bilgi kaynağı olan GRACE verilerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.



Şekil 3.29 Nehir havzalarında ek sinyalin periyodu

4
STOKASTİK VE FONKSİYONEL MODELİ GELİŞTİRİLMİŞ HARMONİK REGRESYON YAKLAŞIMI İLE TOPLAM SU BÜTÇESİNİN ANALİZİ

Çalışma kapsamında bu bölüme kadar stokastik ve fonksiyonel modelin geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Üçüncü bölümde detaylandırılan stokastik model tasarımında, GRACE ve GRACE-FO zaman serilerinin gürültü yapısına en iyi uyum sağlayan modellerin AR(1) veya ARMA(1,1) olduğu belirlenmişti. Fonksiyonel model tasarımında ise doğrusal olmayan trendleri modelleyen polinomal fonksiyonlarla ek periyodik sinyal parametrik olarak modele dahil edilmişti. Bu bölümde ise, toplam su bütçesi zaman serilerinin stokastik ve fonksiyonel modeli geliştirilmiş olarak bir arada kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın, zaman serisinin hidrolojik değişimlerini en iyi şekilde modellemeye nasıl katkı sağladığı incelenmektedir. Takip eden alt bölümlerde çalışma süresince geliştirilen program ve nehir havzalarında elde edilen geliştirilmiş harmonik regresyon yaklaşımı sonuçları detaylı olarak sunulmaktadır.

4.1 ARTS Programının Geliştirilmesi

Doktora çalışması kapsamında MATLAB ortamında hazırlanan ARTS programı, çalışma süresinde fonksiyonel ve stokastik modelin tasarımında kaydedilen tüm gelişmeleri içerecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece hem standart harmonik regresyon yaklaşımına göre analizler kolaylıkla yapılabilmekte, modellemeye katkı sağlanan kısımlar için uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir.

ARTS programı fonksiyonel model tasarımı açıdan ele alındığında;

- Doğrusal trend ile yıllık yarıyıllık mevsimsel sinyallerden oluşan standart fonksiyonel model ile,
- Doğrusal olmayan trendin polinom fonksiyonlarıyla parametrik olarak tanımlandığı polinomal fonksiyonel model ile,
- Uzun dönemli ek periyodik sinyalin fonksiyonel modele parametrik olarak eklenmesiyle geliştirilen ek sinyal fonksiyonel modeli ile

ayrı ayrı ya da,

- Hem polinomal fonksiyonların hem de ek periyodik sinyalin bir arada kullanıldığı birleştirilmiş fonksiyonel model ile,

analizler gerçekleştirilebilmektedir.

Program, fonksiyonel model tasarımına ek olarak, Bölüm 3.2 ve Bölüm 3.3'te incelenen stokastik model tasarımını da kapsamaktadır. Stokastik model tasarımında;

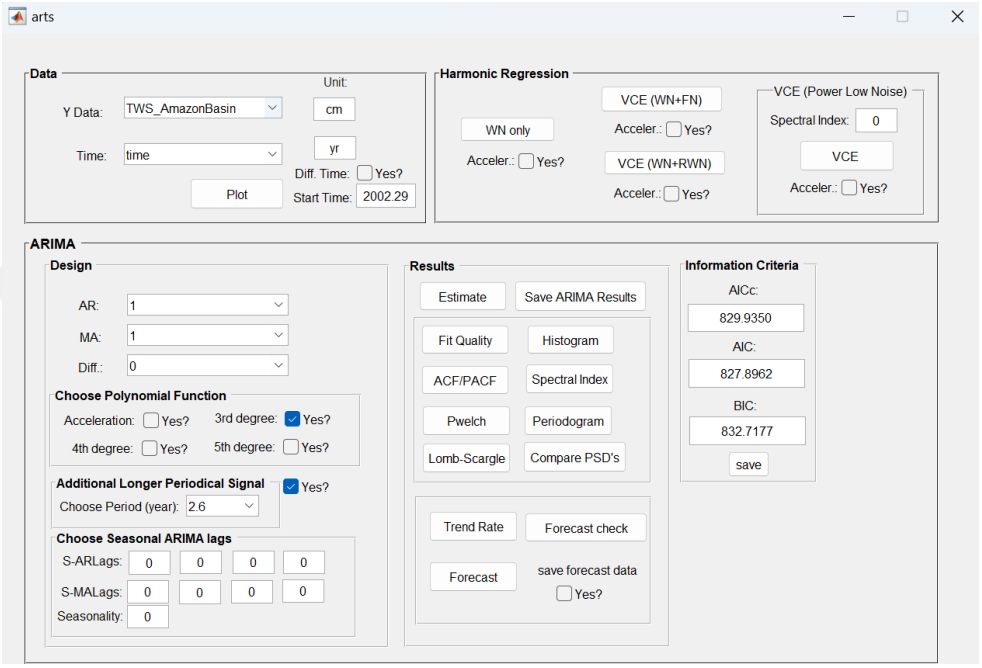
- Sadece beyaz gürültü içeren standart stokastik modeli ile,
- Varyans bileşenlerinin kestirimi yöntemi ile,
- Otoregresif modellerin kullanımı ile

analizler gerçekleştirilebilmektedir. ARTS ismi de bu adımdan gelmekte ve AR modeller ile zaman serilerinin analizini gerçekleştiren program arayüzü anlamında kullanılmaktadır.

Programın en büyük katkısı, toplam su bütçesi zaman serilerine en uygun fonksiyonel ve stokastik modelin geliştirilmesiyle ulaşılan son model olan, otoregresif modeller ile tanımlanan bir stokastik yapı ile polinomal trend ve ek periyodik sinyal ile genişletilmiş bir fonksiyonel modelin analizini tek bir ekran üzerinde gerçekleştirmesidir. Şekil 4.1'de ARTS programının arayüzü gösterilmektedir. Program arayüzünde bulunan 'data' ekranı, analizde kullanılacak veri setini seçmek içindir. 'Harmonik regresyon' ekranı standart fonksiyonel model ile zaman serisinin beyaz gürültü ya da varyans bileşenlerinin kestirimi yöntemine göre stokastik modelini oluşturarak analizleri gerçekleştirmektedir. Toplam su bütçesi zaman serilerinde en çok karşılaşılan gürültü türleri beyaz gürültü + kırpışma gürültüsü ya da beyaz gürültü + rasgele yürüyüş gürültüsü kombinasyonları olduğundan bu iki tür gürültü için butonlar eklenmiştir. Bununla birlikte, istenilen spektral indeksler için de analizler yapılabilmektedir.

'ARIMA' ekranı programın en önemli kısmını oluşturmaktadır. Burada, otoregresif süreçlerin AR, I veya MA bileşenleri için dereceler seçilebilmekte böylece ARIMA model tasarlanabilmektedir. Analizler ek seçim yapılmadığında, yıllık ve yarıyıllık sinyallerle birlikte doğrusal trendin olduğu standart fonksiyonel modele göre yapılmaktadır. Ancak, bu çalışmanın katkılarından biri olan polinomal fonksiyonel

model ile analizler de adapte edilmiştir. Bu sayede, 3, 4 ya da 5. dereceden polinomal trend ile fonksiyonel model genişletilebilir. Çalışmanın bir diğer katkısı olan ek periyodik sinyalin parametrik olarak eklenmesiyle de 1,1 ile 10 yıl arasında değişen ek sinyal periyodu modele dahil edilebilmektedir. Modellerle ayrı ayrı analizler gerçekleştirebileceği gibi yeni eklenen parametrelerin tümü bir arada da kullanılabilmektedir.



Şekil 4.1 ARTS programının arayüzü

'Seasonal ARIMA' ekranı ise mevsimsel olarak lag zamanlarının eklenmesini ve zaman serisinin daha farklı açılardan ele alınmasını sağlamaktadır. Otokorelasyon grafiklerinde görülen güven aralığını aşan lag zamanlarının fonksiyonel modelde dikkate alınması ile ilgilidir.

'Results' paneli ise tanımlanan modele göre analizlerin yapılması, elde edilen sonuçların görselleştirilmesi ve kaydedilmesi kısmını içermektedir. Estimate modülü, regarima fonksiyonu ile tasarlanan modele göre analiz yapmakta; orta panelde bulunan butonlar ile analiz sonuçlarının çeşitli grafik çizimleri gerçekleştirilmektedir. Son panel olan 'Information Criteria' penceresi ise seçilen parametrelere göre yapılan ARIMA analizinden elde edilen bilgi kriterlerini AIC, AICc ve BIC olarak göstermektedir. Bu sayede, zaman serileri ARTS programı kullanılarak farklı fonksiyonel modeller ve otoregresif modellerle etkili bir şekilde analiz edilebilmektedir.

4.2 Nehir Havzalarında Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde, başlıca nehir havzalarında toplam su bütçesi zaman serisine en iyi uyan otoregresif modeller ile genişletilen fonksiyonel modeller kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Zaman serisinin periyodu Nisan 2002 - Mayıs 2023 arasındadır. Analizler başlıklar altında ele alınacak olursa,

- Stokastik model olarak sadece beyaz gürültü içeren model (ARMA(0,0) ile eşdeğerdir), AR(1) ve ARMA(1,1) gürültü modelleri kullanılmıştır.

Bahsedilen her bir stokastik model tasarımı ile de aşağıda verilen fonksiyonel modeller sırasıyla çalışılmıştır:

- Doğrusal trend ve yıllık, yarıyıllık sinyalleri içeren standart model (Model-1),
- Standart modele ek sinyalin dahil edilmesiyle genişletilmiş model (Model-2)
- Polinomal trend ile tanımlanan model (Model-3),
- Tüm bu iyileştirmeleri bir arada içeren birleştirilmiş model (polinomal trend+ ek sinyal) (Model-4)

Son maddede verilen birleştirilmiş fonksiyonel model (Model-4) Eşitlik (3.1)'de verilen standart modelin genişletilmesiyle aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} y_j - e_j = a + \sum_{k=1}^{p} b_k t_j^k + c_1 cos\left(\omega_1 t_j\right) + s_1 sin\left(\omega_1 t_j\right) + ... \\ c_2 cos\left(\omega_2 t_j\right) + s_2 sin\left(\omega_2 t_j\right) + c_3 cos\left(\omega_3 t_j\right) + s_3 sin\left(\omega_3 t_j\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Bu analizlerde, sadece beyaz gürültü içeren stokastik modelin sonuçları karşılaştırılmaların yapılabilmesi için gereklidir. AR(1) model ve ARMA(1,1) model ise zaman serilerine en iyi uyan gürültü modelleri olarak belirlendiğinden fonksiyonel modellerin katkısı bu stokastik yapılar ile tekrar ele alınmıştır. Bu şekilde tasarlanarak 3 farklı stokastik model 4 farklı fonksiyonel model ile kullanılmış ve 12 farklı durum ortaya çıkmıştır. Gerçekleştirilen analizlerin bilgi kriteri değerleri (AICc) en uygun modeli belirlemek için Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Farklı stokastik ve fonksiyonel modellerin bilgi kriterleri (kırmızı değerler en küçük bilgi kriterini ifade etmektedir)

Havza	Sadece beyaz gürültü (standart model)				AR(1)				ARMA(1,1)			
	Model-1	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*	*Model-1*	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*	*Model-1*	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*
Mississippi	1202,58	1080,46	1179,10	**1074,87**	827,68	**823,47**	828,55	825,42	828,40	**825,11**	829,35	827,02
Nelson	1287,71	1243,07	1164,51	**1058,28**	837,84	821,30	833,23	**812,50**	839,25	823,36	834,11	**814,72**
St. Lawrence	1249,37	1175,54	1206,80	**1125,90**	860,57	**853,07**	862,32	854,70	860,85	**853,12**	862,89	855,57
Mackenzie	1080,37	1005,48	1070,72	**993,73**	753,12	**743,03**	756,39	746,93	752,60	**743,54**	755,73	747,71
Amazon	1326,54	1299,28	1324,85	**1298,55**	986,01	**983,99**	989,09	987,26	**966,42**	967,09	969,73	970,54
Parana	1319,67	1259,36	1236,26	**1197,74**	986,65	984,86	984,30	**982,28**	982,63	979,47	977,29	**973,76**
Danube	1240,41	1185,04	1221,34	**1174,20**	1009,68	**1007,52**	1014,00	1011,65	1010,67	**1009,11**	1015,47	1013,61
Volga	1184,20	1146,70	1147,79	**1117,74**	942,31	**939,66**	944,70	941,63	943,38	**940,32**	945,14	941,22
Amur	1119,67	1058,57	1079,24	**1046,84**	815,61	**813,80**	819,66	819,49	816,31	**813,71**	819,47	818,81
Yellow	1022,55	972,34	965,50	914,64	790,79	789,82	787,25	**783,01**	791,44	791,18	788,85	**785,03**
Yangtze	1091,65	1064,39	1054,53	**1030,05**	948,41	947,38	945,76	**942,79**	949,82	948,89	947,83	**945,02**
G.B.	1160,10	**1118,73**	1149,53	1122,08	987,38	**984,43**	991,44	990,45	989,18	986,62	993,58	**992,74**

Tablo 4.1 Farklı stokastik ve fonksiyonel modellerin bilgi kriterleri (kırmızı değerler en küçük bilgi kriterini ifade etmektedir) (devamı)

Havza	Sadece beyaz gürültü (standart model)				AR(1)				ARMA(1,1)			
	Model-1	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*	*Model-1*	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*	*Model-1*	*Model-2*	*Model-3*	*Model 4*
Indus	1178,14	1140,21	1091,97	**1063,59**	945,37	938,39	937,09	**931,28**	947,08	940,22	939,29	**933,40**
Lena	1008,20	952,49	915,83	**896,89**	810,24	802,67	800,36	**798,20**	804,49	799,61	797,84	**796,87**
Yenisei	959,48	913,73	922,10	**884,88**	790,27	786,03	787,71	**782,68**	780,11	778,44	780,15	**777,92**
Ob	1154,46	1111,78	1055,56	**927,61**	773,07	771,67	771,30	**761,38**	774,03	772,10	773,11	**763,61**
T.E.	1276,07	1170,28	1098,89	**1020,11**	849,00	840,63	841,37	**833,71**	849,51	841,98	843,47	**835,99**
Niger	914,87	887,06	846,93	**820,57**	780,50	777,73	769,64	**764,21**	780,23	777,72	771,30	**764,51**
Nile	1043,26	990,83	952,73	**879,11**	784,01	783,55	776,41	**765,64**	783,89	784,32	778,40	**767,77**
Congo	1241,65	1155,94	1156,22	**1036,13**	877,71	874,95	874,33	**862,81**	879,83	877,19	876,01	**863,15**
Zambezi	1455,52	1402,15	1301,73	**1223,04**	1004,70	1002,20	1006,08	**997,14**	1004,37	1001,67	1004,28	**992,81**
Orange	1061,78	1001,19	943,03	**912,49**	784,50	782,67	779,63	**778,21**	782,60	781,91	780,67	**779,96**
Lake Chad	991,61	940,53	799,57	**782,08**	708,10	706,98	685,81	**684,95**	704,42	704,88	687,94	**687,25**
Murray Darling	1243,26	1153,18	1117,74	**1081,01**	892,55	887,10	887,96	**886,14**	894,64	889,34	890,12	**888,19**

Tablo 4.1'de nehir havzaları için verilen Model-3 ve Model-4 sonuçlarında polinomal fonksiyonların derecesi havzaların bulunduğu bölgede belirlenen gridlenmiş mascon çözümlerine göre belirlenmiştir. Buna göre, Mackenzie, Nelson, St. Lawrance, Mississippi, Amazon ve Parana nehir havzalarında 3. derece polinomal fonksiyon, Danube, Volga, Ob, Yenisei, Lena, Amur, Yellow, Yangtze, Ganges-Brahmaputra, Indus, Tigris-Euphrates, Niger, Lake Chad, Nile, Congo, Zambezi ve Orange nehir havzalarında 4. derece polinomal fonksiyon, Murray-Darling nehir havzasında ise 5. derece polinomal fonksiyon kullanılmıştır. Ek sinyalin periyodu ise Tablo 3.3'te verilen değerler kullanılmıştır.

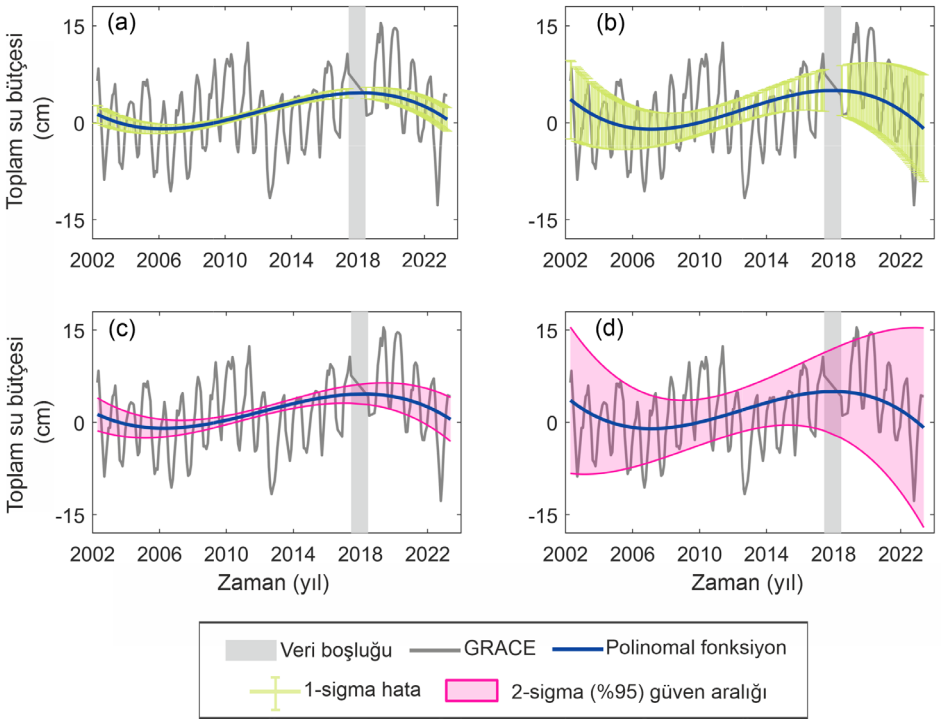
Stokastik model tasarımına göre bilgi kriterleri incelendiğinde, sadece beyaz gürültü içeren stokastik yapının en büyük değerlere sahip olduğu görülmüştür. ARMA(1,1) ya da AR(1) modeller ise daha küçük olmakla birlikte birbirine oldukça yakın değerler vermektedir. Bu sonuçlar, renkli gürültünün yani zamansal korelasyonların dikkate alınmasının modelin gürültü karakterine uygun tasarımın yapıldığını göstermektedir. Her bir stokastik model içindeki farklı fonksiyonel modeller kıyaslandığında ise,

- Sadece beyaz gürültü ile analizler gerçekleştirilse bile, en iyi uyan fonksiyonel model Model-4 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla zaman serisindeki gürültü karakteri göz ardı edilse de fonksiyonel modelin su kütlesindeki değişimi daha iyi ifade edecek şekilde genişletilmesinin katkı verdiği açıkça görülmektedir.
- AR(1) gürültü modeli için, nehir havzalarının yaklaşık %70'inde Model-4'ün daha başarılı olduğu görülmektedir. Geriye kalan havzalarda ise ek periyodik sinyal yapısının dikkate alındığı genişletilmiş model olan Model-2, zaman serisini en iyi temsil eden model olarak belirlenmiştir. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken nokta bilgi kriteri değerlerinin her iki fonksiyonel model için birbirine oldukça yakın olmasıdır.
- ARMA(1,1) gürültü modeli için fonksiyonel modeller ele alındığında ise havzaların %80'nine yakınında birleştirilmiş model Model-4'ün en iyi uyan model olarak seçildiği görülmektedir. Burada da Model-2'nin daha küçük bilgi kriteri değerine sahip olduğu havzalarda, Model-4'ün sonuçları ile arasındaki farkın küçük olduğu görülmektedir.

Tüm stokastik ve fonksiyonel modeller bir arada değerlendirildiğinde ise, beklenildiği üzere havzaların yaklaşık olarak %70'inde Model-4'ün en uygun

model olduğu söylenebilmektedir. Bilgi kriteri değerleri benzer olmakla birlikte AR(1) ve ARMA(1,1) modelleri zaman serisinin gürültü türünü en iyi ifade eden modeller olarak kabul edilebilmektedir. Model-4'ün geçerli model olarak kabul edilen havzaların daha önceki bölümlerde ele alınan hidrolojik aktiviteler açısından oldukça önemli bölgeler olduğu ve pek çok farklı iklim değişkeninin, yağışlar ve kuraklığın gözlendiği bölgelerle örtüştüğü görülmektedir.

Farklı stokastik ve fonksiyonel model yaklaşımlarının parametre kestirimi üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Daha önceki bölümlerde, renkli gürültü karakteri dikkate alınmadığında doğrusal trendin belirsizliğinin yaklaşık olarak 3 kat daha az kestirildiği ve bunun da güven aralıklarının değişmesine neden olduğu belirlenmişti. Bu bölümde ise, otoregresif modeller ile polinomal fonksiyonların güven aralıkları incelenmiştir. Mississippi havzasının zaman serisi örneği Şekil 4.2'de verilmektedir.

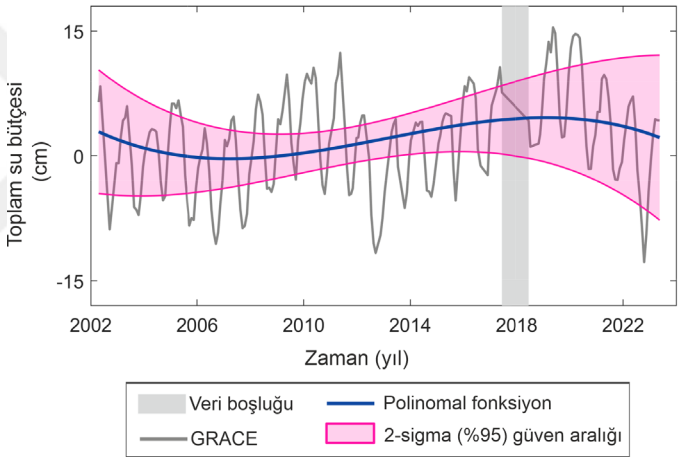


Şekil 4.2 Mississippi nehir havzasında üçüncü dereceden polinomal trend ve belirsizliği (a) ve (c) sadece beyaz gürültü modeli; (b) ve (d) ARMA(1,1) modeli

Şekil 4.2a'da sadece beyaz gürültü içeren stokastik modelden; Şekil 4.2b'de ise ARMA(1,1) modelinden 3. derece polinomal trend ve 1-sigma hatası gösterilmektedir. Beklenildiği üzere, renkli gürültünün dikkate alınması ile standart sapma değerleri daha büyük elde edilmiştir. Bu durum Şekil 4.2c ve 4.2d'de

gösterildiği üzere, polinomal trendin güven aralığının daha geniş bir aralıkta elde edilmesini sağlamaktadır. Böylece her iki stokastik modelden elde edilen trendin %95 olasılıklı güven aralığı verilebilmektedir.

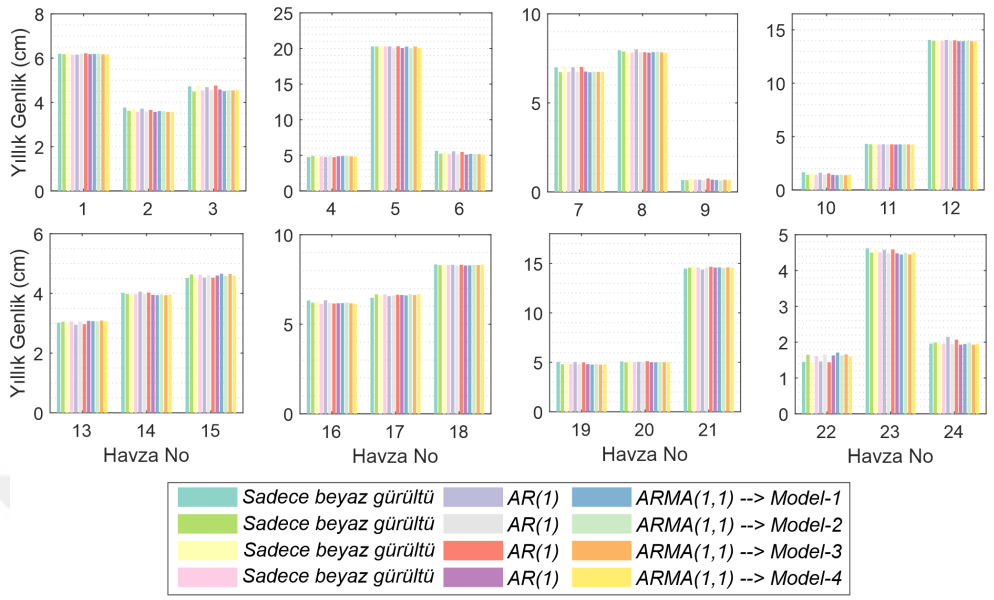
Şekil 4.3'te ise fonksiyonel modellerden Model-4 ile ARMA(1,1) gürültü modeli bir arada çalışılmıştır. Bu fonksiyonel model seçiminde 3. dereceden polinomal trende, Fisher model testine dayalı geliştirilen algoritmadan belirlenen 8,6 yıllık ek periyodik sinyal de dahil edilmiştir. Bu yaklaşımda polinomal trende ait standart sapma bilgisinin sadece polinomları içeren fonksiyonel modele (Model-3) göre daha küçük olduğu ve güven aralığının da buna bağlı olarak daha küçük bir alanı kapsadığı görülmektedir. Çalışmada kullanılan 24 nehir havzası için, Model-4 ve ARMA(1,1) gürültü modeli kullanılarak belirlenen polinomal trendin %95 güven aralıklı zaman serisi grafikleri Ek D'de verilmektedir.



Şekil 4.3 Mississippi nehir havzasında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı

Stokastik ve fonksiyonel modelin yıllık ve yarıyıllık genlikler üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Daha önce gösterildiği üzere, renkli gürültü karakterinin yıllık genlik ve belirsizliği üzerinde trend parametresinde olduğu gibi bir etkisi yoktu. Benzer durum fonksiyonel modeller için de geçerli olup, modelin geliştirilmesinin yıllık genlik ve anlamlılığı üzerinde etkisi görülmemiştir. Şekil 4.4'te Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yıllık genlik değerlerinin dağılımı verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, her bir havzada uygulanan tüm modellerde yıllık genliğin anlamlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, renkli gürültünün ya da fonksiyonel modeldeki etkilerin dikkate alınmasının yıllık genliğin standart sapma

değerlerini az da olsa küçülttüğü ve test değerinin artmasına katkı verdiği de ulaşılan sonuçlardan biridir.



Şekil 4.4 Nehir havzalarında Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yıllık genlikler

Yarıyıllık genlikler için ise renkli gürültü dikkate alındığında standart sapmalarının azaldığı ve anlamlılıklarının arttığı standart fonksiyonel model ile gerçekleştirilen analizlerden bilinmekteydi. Bu analizlerde de fonksiyonel modelden bağımsız olarak, renkli gürültü modelinin standart sapma değerlerini azalttığı ve anlamlılığa katkı sağladığı gösterilmiştir. Aynı gürültü modeli altında farklı fonksiyonel modeller karşılaştırıldığında ise Model-4'ten daha küçük standart sapmalar elde edilmiştir.

Şekil 4.5'te Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yarıyıllık genlik değerlerinin anlamlılıkları her bir havza için verilmektedir. Satırlar 24 farklı nehir havzasını temsil ederken sütunlar 1'den 12'ye kullanılan modelleri tanımlamaktadır. Modellerin sırası Tablo 4.1'de verilen sütunlar ile aynıdır. İlk 4 sütunda stokastik yapı olarak sadece beyaz gürültü modeli kullanılırken diğer sütunlarda AR(1) (4-8) ve ARMA(1,1) (8-12) modelleri kullanılmıştır. Renk haritasındaki değerler açık maviden koyu maviye doğru ilerledikçe test değeri artan anlamlılığı göstermektedir. Böylece renkli gürültü ile beyaz gürültü modelinin sonuçları arasındaki farklar açıkça görülebilmektedir. Sonuç olarak anlamsız olan bazı yarıyıllık değerlerinin anlamlı hale geldiği görülmüş, renkli gürültünün zaman

serisinde modelin tamamına katkı sağlayarak, gürültü karakterinden etkilenen standart hatayı değiştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Havza No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3.68	4.44	3.69	4.30	9.50	9.36	9.50	9.36	10.23	9.36	9.43	9.36
2	2.95	3.57	3.25	4.44	8.71	8.13	8.79	8.13	8.79	8.71	8.20	8.13
3	2.03	2.59	1.97	2.70	4.86	4.73	4.79	4.67	4.93	5.14	4.86	5.07
4	2.27	2.14	2.38	2.33	4.46	4.50	4.54	4.50	5.00	4.67	5.08	4.67
5	2.07	2.30	2.13	2.36	4.26	4.35	4.30	4.39	3.57	3.54	3.57	3.54
6	1.23	1.27	0.95	1.06	1.83	1.68	1.68	1.68	2.00	1.85	1.90	1.81
7	0.71	1.35	0.53	1.39	0.90	1.14	0.90	1.09	0.95	1.10	0.90	1.14
8	2.56	2.47	2.57	2.45	3.00	2.85	3.05	2.85	2.85	2.76	2.95	2.71
9	1.57	1.46	1.28	1.39	2.67	2.60	2.67	2.60	2.56	2.50	2.50	2.35
10	2.96	3.00	3.10	3.28	4.29	3.93	4.00	4.14	4.36	4.29	4.07	3.93
11	3.68	3.85	3.59	3.84	4.13	4.09	4.22	4.00	4.27	4.18	4.22	4.00
12	14.44	15.13	14.37	15.17	19.96	19.87	19.12	19.08	19.91	19.87	19.96	19.08
13	5.88	5.83	7.63	7.52	8.86	9.15	9.35	9.15	9.30	9.63	8.90	8.71
14	7.27	8.15	8.74	9.22	10.64	10.71	10.07	10.07	11.38	11.38	11.46	11.54
15	6.80	7.61	7.16	8.06	9.64	9.64	9.57	9.57	10.75	10.75	10.75	10.75
16	3.83	3.93	4.42	5.33	8.42	8.42	8.50	8.25	8.42	8.33	8.42	7.62
17	1.17	1.44	1.66	2.00	2.81	2.81	2.69	2.75	2.93	2.93	2.69	2.75
18	12.05	13.53	13.88	14.93	16.43	16.43	15.20	15.27	17.54	17.62	14.25	14.25
19	4.33	4.52	4.60	5.06	6.14	6.07	6.14	6.07	6.54	6.46	6.14	6.14
20	4.16	5.28	5.10	6.68	9.88	9.81	9.88	9.29	9.88	9.81	9.81	9.29
21	5.97	6.28	7.93	8.68	15.00	14.40	14.36	14.32	14.44	13.88	13.88	13.81
22	3.21	3.81	3.26	3.76	5.08	5.23	5.08	5.15	5.42	5.50	5.00	5.08
23	9.27	10.42	13.71	13.71	17.45	15.92	16.00	16.00	17.45	17.36	16.00	16.00
24	0.87	0.81	1.03	0.89	0.89	0.83	1.00	0.94	0.89	0.83	0.95	0.89

Kullanılan modeller

Şekil 4.5 Nehir havzalarında Tablo 4.1'de verilen modellerden elde edilen yarıyıllık genliklerin anlamlılığı

Fonksiyonel modelde yer alan ek periyodik sinyalin genliği de incelenmiştir. Tablo 4.2'de ek periyodik sinyal ile genişletilen modelden (Model-2) ve birleştirilmiş modelden (Model-4) elde edilen ek sinyal genliklerinin en küçük, en büyük ve ortalama değerleri ile standart hatalarının stokastik modellerle birlikte nasıl değiştiği gösterilmektedir. Sadece beyaz gürültü stokastik yaklaşımı altında Model-2'den elde edilen ek sinyalin genliği 1 ile 4,7 cm arasında değişirken; bu değerler Model-4 için 0,7 ile 4,1 cm arasında değişmektedir. AR(1) ve ARMA(1,1) modeller ile analizler gerçekleştirildiğinde ise, ek sinyalin genliğinin belirsizliği yaklaşık 2,5 kat daha büyük elde edilmektedir. Ancak bu durumda da yine ek sinyalin %95 güven düzeyi için istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Burada, GRACE toplam su bütçesinin sinyal-gürültü oranının yaklaşık 2 cm olduğu dikkate alınmalı ve istatistiksel olarak anlamlı çıksa da 2 cm'den küçük genliklerin fiziksel karşılığı incelenirken daha dikkatli olunması gerektiği önerilmektedir.

Tablo 4.2 Model-2 ve Model-4 fonksiyonel modellerinde farklı stokastik modeller kullanılarak ek periyodik sinyal genliğinin anlamlılığı

Model-2									
Değer	**Sadece beyaz gürültü**			**AR(1)**			**ARMA(1,1)**		
	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık
En küçük	0,96	0,18	4,88	0,87	0,29	2,25	0,84	0,28	1,78
En büyük	4,66	0,61	11,51	5,46	2,25	4,16	5,37	2,17	3,94
Ortalama	2,38	0,32	7,44	2,40	0,79	3,09	2,38	0,81	2,96
Model-4									
Değer	**Sadece beyaz gürültü**			**AR(1)**			**ARMA(1,1)**		
	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık	Genlik	Std. sapma	Anlamlılık
En küçük	0,66	0,15	3,87	0,66	0,22	1,99	0,66	0,21	1,81
En büyük	4,12	0,69	13,81	4,86	1,62	5,43	4,72	1,58	5,54
Ortalama	2,14	0,31	6,97	2,17	0,69	3,24	2,13	0,68	3,20

Sonuç olarak, bu aşamalar, toplam su bütçesi zaman serilerinin fonksiyonel ve stokastik yönlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesini sağlamıştır. Zaman serilerinin gürültü karakterini doğru modellemek, parametre kestirimlerinin belirsizliğini incelemek ve doğrusal olmayan değişimleri etkin şekilde modellemek için çeşitli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu kapsamda, çalışmanın sonuçlarının hidrojeodezik çalışmalarda su bütçesinin izlenmesi ve modellenmesi literatürüne önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

5
SONUÇ

Bu çalışmada, GRACE ve GRACE-FO tarafından gözlenen toplam su bütçesi zaman serilerinin modellenmesi ele alınmıştır. Analizleri gerçekleştirmek için GSFC için mascon çözümleri kullanılmıştır. Zaman serisinde önce gürültü karakteri incelenmiş, ardından bu karaktere uygun stokastik model tasarımına geçilmiştir. Stokastik model tasarımında varyans bileşenlerinin kestirimi ve otoregresif gürültü modelleri kullanılmıştır. Daha sonra fonksiyonel modelin tasarım aşamasına geçilmiştir. Standart modeldeki doğrusal trend yerine polinomal fonksiyonlar kullanılarak doğrusal olmayan trendin parametrik ifadesi tartışılmıştır. Son aşama olarak da jeodezik zaman serilerindeki ek periyodik sinyal araştırılmıştır. Böylece, zaman serisinden hidrolojik değişimlerin en uygun şekilde modellenmesi ve bu değişimlerinin fiziksel nedenlerine odaklanılmıştır.

Çalışmanın ana konu başlıklarından elde edilen sonuçlardan kısaca bahsedilecek olursa, analizler, toplam su bütçesi zaman serisinde spektral güç yoğunluk fonksiyonunun negatif eğime sahip olduğunu göstermektedir. Bu eğimler, veri setinde renkli gürültünün ve zamansal korelasyonların varlığını işaret etmektedir. Renkli gürültü karakterinin ortalama spektral indeksi, GRACE dönemi için -1,11±0,28 ve GRACE+GRACE-FO dönemi için -1,06±0,27 olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden zaman serisinde kırpışma gürültüsüne benzer özellikte bir renkli gürültü mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Spektral indeksin, nehirlerin bulunduğu bölgelerde ve önemli buzul kütlesi azalmasının yaşandığı kutup bölgelerinde sıfırdan yani beyaz gürültüden daha da uzaklaştığı görülmüştür. GRACE uydusunun farklı çözümleri (GSFC, JPL mascon ve DDK-5 zaman serileri) için yapılan gürültü karakteri analizlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Renkli gürültünün sadece mascon çözümlerine veya küresel harmoniklere özgü olmadığı, GRACE hidrolojik sinyalinin temsil ettiği fiziksel değişimlerin durağan olmayan süreçlere neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, renkli gürültü ile modellenmemiş veya öngörülmemiş hidrolojik olaylar arasında olası bir korelasyon olduğunu ve bunun hem fonksiyonel hem de stokastik modellerde göz önüne alınması gerektiğini ortaya koymuştur.

Bu motivasyonla, toplam su bütçesi analizine renkli gürültüyü dahil etmek için stokastik model hem varyans bileşenlerinin kestirimi hem de otoregresif süreçlerle ele alınmıştır. Otoregresif modellerin gürültüyü modellemede daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Türkiye ve nehir havzalarında ARMA(1,1) modelinin zaman serisine en iyi uyan model olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu modelin sonuçları incelendiğinde, beklendiği gibi, zamansal korelasyonların trendin belirsizliğini etkilediği gösterilmiştir. Sadece beyaz gürültü modeliyle, trend oranları için ARMA(1,1) modeline göre yaklaşık üç kat daha küçük standart hatalar elde edilmektedir. Bu sonuç, sadece beyaz gürültüyü kabul eden stokastik yaklaşımda sinyal-gürültü oranını artırarak trendin istatistiksel anlamlılığının değişeceğini göstermektedir.

Sonuçlar, trendin anlamlılığı için değerlendirildiğinde, standart yaklaşımda Türkiye bölgesindeki hemen hemen tüm mascon zaman serileri için anlamlı trend elde edilirken, diğer gürültü modelleri, bu serilerin yaklaşık yarısı için trendin anlamlı olduğunu göstermektedir. ARMA(1,1) ve beyaz gürültü + kırpışma varyans bileşenlerinin kestirimi renkli gürültü modelleri, Türkiye'nin merkezi ve batı kesimlerinde anlamlı su bütçesi değişimi olduğunu ifade ederken, ARMA(1,1) gürültü modeli varyans bileşenlerinin kestiriminden farklı olarak Kızılırmak ve Yeşilırmak nehirlerinin Karadeniz'e ulaştığı bölgenin en kuzey kesiminde yaklaşık 0,5 cm/yıl anlamlı trend olduğunu göstermektedir. Otoregresif süreçlerle yapılan analizlerin daha tutarlı olduğu düşünülmektedir.

Benzer sonuçlar, nehir havzaları için de elde edilmiştir. Sadece beyaz gürültü modelinden, AR(1) ve ARMA(1,1) modellerine göre yaklaşık üç kat daha küçük standart hatalar hesaplanmaktadır. ARMA(1,1) modeline göre anlamlı trend değerleri Mackenzie, Nelson, St. Lawrence, Yellow, Yangtze, Ganges-Brahmaputra, Tigris-Euphrates, Niger, Lake Chad, Zambezi ve Murray-Darling gibi havzalardan oluşmaktadır. ARIMA(1,1,0) ve ARIMA(1,1,1) modelleri ise beyaz gürültüye göre yaklaşık 25 kat daha büyük standart hataların belirlenmesine, dolayısıyla Ganges-Brahmaputra ve Tigris-Euphrates havzaları gibi yüksek su kütle kaybı olan bölgeler için bile trendin istatistiksel olarak anlamsız yorumlanmasına sebep olmaktadır. Tüm bu sonuçlar, zaman serisinin en uygun renkli gürültü varsayımı altında ele alınarak trende ait belirsizlik bilgisinin ve dolayısıyla güven

aralıklarının daha gerçekçi kestirimine ve yorumlanmasına dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Renkli gürültü karakterinin parametre kestirimine etkisi bir başka bakış açısıyla ele alındığında, doğrusal trendin zaman serisindeki değişimi ifade etmeye yetmediği düşünülmektedir. Yani, trend doğrusal modelle sınırlı kalmamalı, farklı derecelerden polinomlarla tanımlanmalıdır. Diğeri ise, zaman serisinde modellenmeyen parametrelerin (trendin veya diğer periyodik etkilerin) stokastik yapıya taşınarak gürültünün indeksini etkilemesidir. Bu nedenle sadece doğru stokastik modelin kurulması yeterli kalmamakta, fonksiyonel modelin de geliştirilmesi önerilmektedir.

Bu kapsamda, toplam su bütçesindeki doğrusal olmayan değişimler önce parametrik olmayan wavelet analizi ile incelenmiştir. Bu analize göre, zaman serisinde doğrusal olmayan değişimleri ifade ettiği düşünülen uzun dönemli bileşenin hidrolojik sinyalin karasal alanlarda %80'nini temsil ettiği görülmüştür. Daha sonra, bu doğrusal olmayan eğilimi parametrik olarak fonksiyonel modelde tanımlayabilmek için polinomal fonksiyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Polinomal trendin derecesi t-student dağılımına göre anlamlılık testi yapılarak belirlenmiştir. Buna göre, 3. derece polinomal trend (en küçük derece) Kuzey ve Güney Amerika ile Alaska bölgesini temsil ederken; 4. derece polinomal trend Avrupa, Asya, Afrika ve kutup bölgelerinde, 5. derece polinomal trend ise Japonya ve Avustralya'da fonksiyonel modele dahil edilmiştir.

Fonksiyonel model tanımlandıktan sonra, polinomal trendin doğrusal trendden farkı incelenmiştir. St. Lawrence, Mackenzie, Nelson ve Mississippi nehir havzalarında, Alaska'da ve Güney Amerika bölgesinin çoğunda, iki model arasındaki farkların standart sapmasının 5 cm'den fazla olduğu görülmüştür. Afrika'nın güneyindeki Zambezi ve Congo nehir havza alanlarına ek olarak, özellikle Orta Doğu'da, Tigris-Euphrates ile Asya'nın güneyi ve Sumatra-Andaman bölgesinde, Japonya ve Avustralya'nın da içinde olduğu geniş bir alanda zaman serilerinde polinomal trendin baskın olduğu gözlenmiştir. Polinomal fonksiyonel model sonuçları wavelet analizi sonuçları ile de uyumludur. Aynı zamanda polinomal trendin SPEI iklim indeksi ile de uyumlu olduğu görülmektedir. Modelin zaman serisine katkısı, düzeltmelerin RMS değerlerindeki iyileşmeler ve bu doğrusal olmayan değişimlerin olası fiziksel kaynakları üçüncü bölümde

derinlemesine tartışılmıştır. Genel sonuçlar, yeniden tanımlanan modelin, çeşitli fiziksel etmenlerin neden olduğu ve zaman serilerinde var olan yıllar arası değişiklikler için doğrusal olmayan trendin parametrize edilmesini açıklayabildiğinden toplam su bütçesi zaman serisi analizine katkı verdiği yönündedir. Polinomal fonksiyonel modelin bir diğer katkısı, doğrusal olmayan değişimlerin parametrik olarak tanımlanmasıyla etkilerinin stokastik modele gürültü gibi yansımasını önlemesidir. Böylece, bu uzun dönemli trend etkisinin modellenmesi, kısa dönemli hidrolojik olayların modelden kalan düzeltmelerin spektral indeksleriyle bölgesel olarak daha kolay ayırt edilebilmesine de katkı sağlamaktadır.

Fonksiyonel model, trend için yeniden tanımlanmasının yanı sıra yıllık mevsimsel sinyalden daha uzun dönemli olan ek periyodik sinyal için de geliştirilmiştir. Literatürde yaklaşık 6 yıl olduğu kabul edilen bu sinyal pek çok jeodezik zaman serisinde tartışılmaktadır. GRACE toplam su bütçesi değişimindeki etkisinin de araştırılması için bir algoritma önerilmiştir. Buna göre, zaman serisindeki ek sinyalin periyodu Fisher model testi kullanılarak belirlenmiştir. Fisher model testini geçen bu modeller arasında en büyük R-kare değerine sahip model, toplam su bütçesi zaman serisine en iyi uyan ek periyodik sinyalin periyodunu veren model olarak kabul edilir. Böylece ek sinyal fonksiyonel modele parametre olarak dahil edilir.

Tüm bu aşamalar sayesinde toplam su bütçesi zaman serilerinin fonksiyonel ve stokastik kısımları ayrıntılı olarak incelenebilmiştir. Bu analizlerden hareketle zaman serilerinin trendin polinomal fonksiyonlarla tanımlandığı ve ek sinyalin diğer mevsimsel sinyallerle birlikte modele dahil edildiği geliştirilmiş fonksiyonel model ile ARMA(1,1) gürültü modelinin stokastik kısma karşılık geldiği modelin, zaman serisini en iyi şekilde temsil eden model olduğu gösterilmiştir. Böylesi bir modelin, zaman serisinin gürültü karakterini temsil ettiği, trend kestirimlerinin belirsizliğini daha güvenilir bir şekilde sağladığı, polinomal trend ile doğrusal olmayan değişimleri modellediği ve uzun dönemli ek periyodik sinyalin etkilerini içerdiği göz önüne alındığında; hidrojeodezik alanda gerçekleştirilen su bütçesinin izlenmesi ve modellenmesi çalışmalarına önemli bir katkı vereceği düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

Abarca del Rio R., Gambis, D., & Salstein, D. A. (2000). Interannual signals in length of day and atmospheric angular momentum. *In Annales Geophysicae, 18*(3), 347-364. https://doi.org/10.1007/s00585-000-0347-9

Abart, C. (2005). *Assessment of Solution Strategies for GRACE Gravity Field Processing* [Master's thesis, Graz University of Technology].

Abdelmohsen, K., Sultan, M., Save, H., Abotalib, A. Z., Yan, E., & Zahran, K. H. (2022). Buffering the impacts of extreme climate variability in the highly engineered Tigris Euphrates river system. *Scientific Reports, 12*(1), 4178. https://doi.org/10.1038/s41598-022-07891-0

Abelen, S., Seitz, F., Abarca-del-Rio, R., & Güntner, A. (2015). Droughts and floods in the La Plata basin in soil moisture data and GRACE. *Remote Sensing, 7*(6), 7324-7349. https://doi.org/10.3390/rs70607324

Agnew, D. C. (1992). The time-domain behavior of power-law noises. *Geophysical research letters, 19*(4), 333-336. https://doi.org/10.1029/91GL02832

Ahi, G. O., & Cekim, H. O. (2021). Long-term temporal prediction of terrestrial water storage changes over global basins using GRACE and limited GRACE-FO data. *Acta Geodaetica et Geophysica, 56*(2), 321-344. https://doi.org/10.1007/s40328-021-00338-4

Ahmed, M., Sultan, M., Wahr, J., & Yan, E. (2014). The use of GRACE data to monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa. *Earth-Science Reviews, 136*, 289-300. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.009

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control, 19*(6), 716-723.

Al-Karablieh, E., & Salman, A. (2016). *Water resources, use and management in Jordan. A focus on groundwater*. IWMI project publication–Groundwater governance in the Arab World–taking stock and addressing the challenges.

Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C., & Teunissen, P. J. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: methodology and results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112*(B7). https://doi.org/10.1029/2006JB004913

Amiri-Simkooei, A. R. (2016). Non-negative least-squares variance component estimation with application to GPS time series. *Journal of Geodesy, 90*, 451-466. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0886-9

Aydin, C. (2017). Effects of displaced reference points on deformation analysis. *Journal of Surveying Engineering, 143*(3), 04017001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000216

Aydin, C., Duman, H., Günes, Ö., & Ugur Sanli, D. (2021). Effect of stochastic model errors on significance test for velocities in analysis of GPS position time series. *Journal of Surveying Engineering, 147*(1), 04020025. https://doi.org/10.1061/(asce)su.1943-5428.0000341

Baur, O. (2012). On the computation of mass-change trends from GRACE gravity field time-series. *Journal of Geodynamics, 61*, 120-128.

Bergmann, I., Ramillien, G., & Frappart, F. (2012). Climate-driven interannual ice mass evolution in Greenland. *Global and Planetary Change, 82*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.11.005

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

Bevis, M., Harig, C., Khan, S. A., Brown, A., Simons, F. J., Willis, M., ... & Nylen, T. (2019). Accelerating changes in ice mass within Greenland, and the ice sheet's sensitivity to atmospheric forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(6), 1934-1939. https://doi.org/10.1073/pnas.1806562116

Blöschl, G., Nester, T., Komma, J., Parajka, J., & Perdigão, R. A. (2013). The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(12), 5197-5212. https://doi.org/10.5194/hess-17-5197-2013

Bodart, J. A., & Bingham, R. J. (2019). The impact of the extreme 2015–2016 El Niño on the mass balance of the Antarctic ice sheet. *Geophysical Research Letters, 46*(23), 13862-13871. https://doi.org/10.1029/2019GL084466

Boening, C., Willis, J. K., Landerer, F. W., Nerem, R. S., & Fasullo, J. (2012). The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters, 39*(19). https://doi.org/10.1029/2012GL053055

Bogusz, J. (2015) Geodetic aspects of GPS permanent station non-linearity studies. *Acta Geodyn. Geomater, 12*(4). https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0033

Bogusz, J., & Klos, A. (2016). On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. *GPS solutions, 20*, 655-664. https://doi.org/10.1007/s10291-015-0478-9

Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *Journal of Geodesy, 87*(4), 351-360. https://doi.org/10.1007/s00190-012-0605-0

Bos, M. S., Williams, S. D. P., Araújo, I. B., & Bastos, L. (2014). The effect of temporal correlated noise on the sea level rate and acceleration uncertainty. *Geophysical Journal International, 196*(3), 1423-1430. https://doi.org/10.1093/gji/ggt481

Bos, M. S., Montillet, J. P., Williams, S. D. P., & Fernandes, R. M. S. (2020). Introduction to Geodetic Time Series Analysis. In J. P. Montillet & M. Bos (Eds.), *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences* (pp 29–52). Springer Geophysics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21718-1_2

Box, G., & Jenkins, G. M. (1970). *Time series analysis: Forecasting and control.* Holden-Day.

Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time-series analysis: Forecasting and control*. (5th ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.

Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to time-series and forecasting* (3rd ed.). New York: Springer.

Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach* (2nd ed.). New York: Springer.

Carbonari, R., Riccardi, U., De Martino, P., Cecere, G., & Di Maio, R. (2023). Wavelet-like denoising of GNSS data through machine learning. Application to the time series of the Campi Flegrei volcanic area (Southern Italy). Geomatics, *Natural Hazards and Risk, 14*(1), 2187271. https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2187271

Case, K., Kruizinga, G. L. H., & Wu, S. C. (2004). *GRACE Level 1B Data Product User Handbook*, JPL.

Cazenave, A., & Chen, J. (2010). Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system. *Earth and Planetary Science Letters, 298*(3-4), 263-274.

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*(2), 415-419

Chao, N., Luo, Z., Wang, Z., & Jin, T. (2018). Retrieving groundwater depletion and drought in the Tigris-Euphrates Basin between 2003 and 2015. *Groundwater, 56*(5), 770-782

Chao, B. F., & Yu, Y. (2020). Variation of the equatorial moments of inertia associated with a 6-year westward rotary motion in the Earth. *Earth and Planetary Science Letters, 542*, 116316

Chatfield, C. (2003). *The analysis of time series: An introduction* (6th ed.). London: Chapman and Hall CRC.

Chen, A., Guan, H., & Batelaan, O. (2022a). Non-linear interactions between vegetation and terrestrial water storage in Australia. *Journal of Hydrology, 613*, 128336. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128336

Chen, J., Cazenave, A., Dahle, C., Llovel, W., Panet, I., Pfeffer, J., & Moreira, L. (2022b). Applications and challenges of GRACE and GRACE Follow-On satellite gravimetry. *Surveys in Geophysics, 43*(1), 305-345

Chen, J., Tapley, B., Rodell, M., Seo, K. W., Wilson, C., Scanlon, B. R., & Pokhrel, Y. (2020). Basin-scale river runoff estimation from GRACE gravity satellites, climate models, and in situ observations: A case study in the Amazon basin. *Water resources research, 56*(10), e2020WR028032

Chen, J. L., Tapley, B. D., & Wilson, C. R. (2006). Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters, 248*(1-2), 368-378. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.05.039

Chen, J. L., Wilson, C. R., & Tapley, B. D. (2010). The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE. *Water Resources Research, 46*(12). https://doi.org/10.1029/2010WR009383

Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., & Grand, S. (2007). GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Research Letters, 34*(13).

Chew, C. C., & Small, E. E. (2014). Terrestrial water storage response to the 2012 drought estimated from GPS vertical position anomalies. *Geophysical Research Letters, 41*(17), 6145-6151. https://doi.org/10.1002/2014GL061206

Chuter, S. J., Zammit-Mangion, A., Rougier, J., Dawson, G., & Bamber, J. L. (2022). Mass evolution of the Antarctic Peninsula over the last 2 decades from a joint Bayesian inversion. *The Cryosphere, 16*(4), 1349-1367. https://doi.org/10.5194/tc-16-1349-2022

Deggim, S., Eicker, A., Schawohl, L., Gerdener, H., Schulze, K., Engels, O., ... & Longuevergne, L. (2021) RECOG RL01: correcting GRACE total water storage estimates for global lakes/reservoirs and earthquakes. *Earth System Science Data, 13*, 2227–2244. https://doi.org/10.5194/essd-13-2227-2021

Ding, H. (2019). Attenuation and excitation of the∼ 6 year oscillation in the length-of-day variation. *Earth and Planetary Science Letters, 507*, 131-139. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.12.003

Ding, H., & Chao, B. F. (2018). A 6-year westward rotary motion in the Earth: Detection and possible MICG coupling mechanism. *Earth and Planetary Science Letters, 495*, 50-55

Dobslaw, H., Bergmann-Wolf, I., Dill, R., Poropat, L., & Flechtner, F. (2017). *Product Description Document for AOD1B Release 06, GRACE 327-750, GFZ German Research Centre for Geosciences*, Department 1: Geodesy and Remote Sensing.

Duan, Z., Chen, Q., Chen, C., Liu, J., Gao, H., Song, X., & Wei, M. (2019). Spatiotemporal analysis of nonlinear trends in precipitation over Germany during 1951–2013 from multiple observation-based gridded products. International *Journal of Climatology, 39*(4), 2120-2135. https://doi.org/10.1002/joc.5939

Eicker, A., Forootan, E., Springer, A., Longuevergne, L., & Kusche, J. (2016). Does GRACE see the terrestrial water cycle "intensifying"?, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121*(2), 733-745

Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., & Jimenez, J. C. (2022). The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes, 35*, 100406. https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406

Farrell, W. E. (1972). Deformation of the Earth by surface loads, *Reviews of Geophysics, 10*(3), 761–797.

Feissel-Vernier, M., De Viron, O., & Le Bail, K. (2007). Stability of VLBI, SLR, DORIS, and GPS positioning. *Earth, planets and space, 59*, 475-497. https://doi.org/10.1186/BF03352712

Flechtner, F., Neumayer, K. H., Dahle, C., Dobslaw, H., Fagiolini, E., Raimondo, J. C., & Güntner, A. (2016) What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications?, *Surveys in Geophysics 37*, 453–470. https://doi.org/10.1007/s10712-015-9338-y

Forootan, E., Awange, J. L., Kusche, J., Heck, B., & Eicker, A. (2012). Independent patterns of water mass anomalies over Australia from satellite data and models.

Remote Sensing of Environment, 124, 427-443. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.023

Forootan, E., Safari, A., Mostafaie, A., Schumacher, M., Delavar, M., & Awange, J. L. (2017). Large-scale total water storage and water flux changes over the arid and semiarid parts of the Middle East from GRACE and reanalysis products. *Surveys in Geophysics, 38*, 591-615. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9403-1

Forsberg, R., Sørensen, L., & Simonsen, S. (2017) Greenland and Antarctica Ice Sheet Mass Changes and Effects on Global Sea Level. *Surveys in Geophysics, 38*(1), 89-104

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. https://doi.org/10.1007/s00190-005-0449-y

Gauer, L. M., Chanard, K., & Fleitout, L. (2023). Data-driven gap filling and spatio-temporal filtering of the GRACE and GRACE-FO records. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128*(5), e2022JB025561. https://doi.org/10.1029/2022JB025561

Getirana, A., Kumar, S., Girotto, M., & Rodell, M. (2017). Rivers and floodplains as key components of global terrestrial water storage variability. *Geophysical Research Letters, 44*(20), 10-359. https://doi.org/10.1002/2017GL074684

Guo, L., Li, T., Chen, D., Liu, J., He, B., & Zhang, Y. (2021). Links between global terrestrial water storage and large-scale modes of climatic variability. *Journal of Hydrology, 598*, 126419. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126419

Gunes, O., & Aydin, C. (2018, Mayıs 30 – Haziran 2). *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, İzmir, Türkiye.

Gunes, O., & Aydin, C. (2022). Applying autoregressive models in analysis of GRACE-Mascon time-series. *Advances in Geodesy and Geoinformation, 71*(2), https://doi.org/10.24425/agg.2022.141299

Gunes, O., & Aydin, C. (2024). Colored Noise in GRACE Total Water Storage Time Series: Its Impact on Trend Significance in the Türkiye Region and Major World River Basins. *Advances in Space Research, 74*(4). https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.051

Güneş, Ö., & Aydın, C. (2024). GRACE zaman serilerinin gürültü karakteri analizi. *Geomatik, 9*(1), 45-53. https://doi.org/10.29128/geomatik.1307208

Guo, X., Zhao, Q., Ditmar, P., Sun, Y., & Liu, J. (2018). Improvements in the monthly gravity field solutions through modeling the colored noise in the GRACE data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123*(8), 7040-7054. https://doi.org/10.1029/2018JB015601

Han, S. C., Shum, C. K., Bevis, M., Ji, C., & Kuo, C. Y. (2006). Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science, 313*(5787), 658-662. https://doi.org/10.1126/science.1128661

Hardy, R. A., Nerem, R. S., & Wiese, D. N. (2017). The impact of atmospheric modeling errors on GRACE estimates of mass loss in Greenland and

Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122*(12), 10-440. https://doi.org/10.1002/2017JB014556

Harig, C., & Simons, F. J. (2015). Accelerated West Antarctic ice mass loss continues to outpace East Antarctic gains. *Earth and Planetary Science Letters, 415*, 134-141

Hasan, E., Tamisiea, M., Save, H., & Bettadpur, S. (2022). *Nonstationarity in global hydrological systems: Evidence-based on GRACE satellite gravimetry missions*. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1766113/v1

Hasan, E., Tarhule, A., Zume, J. T., & Kirstetter, P. E. (2019). + 50 years of terrestrial hydroclimatic variability in Africa's transboundary waters. *Scientific Reports, 9*(1), 12327. https://doi.org/10.1038/s41598-019-48813-x

Heimhuber, V., Tulbure, M. G., Broich, M., Xie, Z., & Hurriyet, M. (2019). The role of GRACE total water storage anomalies, streamflow and rainfall in stream salinity trends across Australia's Murray-Darling Basin during and post the Millennium Drought. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 83*, 101927. https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101927

Hoerling, M., Eischeid, J., Kumar, A., Leung, R., Mariotti, A., Mo, K., ... & Seager, R. (2014). Causes and predictability of the 2012 Great Plains drought. *Bulletin of the American Meteorological Society, 95*(2), 269-282. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00055.1

Horn, S. D., & Horn, R. A. (1975). Comparison of estimators of heteroscedastic variances in linear models. *Journal of the American Statistical Association, 70*(352), 872-879. https://doi.org/10.1080/01621459.1975.10480316

Hosking, J. R. M. (1981). Fractional differencing. *Biometrika, 68*(1), 165–176. https://doi.org/10.1093/biomet/68.1.165

Hsu, C. C., Duan, P. S., Xu, X. Q., Zhou, Y. H., & Huang, C. L. (2021). On the~ 7 year periodic signal in length of day from a frequency domain stepwise regression method. *Journal of Geodesy, 95*(5), 55. https://doi.org/10.1007/s00190-021-01503-x

Humphrey, V., Gudmundsson, L., & Seneviratne, S. I. (2016). Assessing global water storage variability from GRACE: Trends, seasonal cycle, subseasonal anomalies and extremes. *Surveys in geophysics, 37*, 357-395. https://doi.org/10.1007/s10712-016-9367-1

Hyndman, R. J. & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice* (2nd ed.). OTexts

Jensen, L., Eicker, A., Dobslaw, H., & Pail, R. (2020). Emerging changes in Terrestrial Water Storage variability as a target for future satellite gravity missions. *Remote sensing, 12*(23), 3898. https://doi.org/10.3390/rs12233898

Jeon, T., Seo, K. W., Youm, K., Chen, J., & Wilson, C. R. (2018). Global sea level change signatures observed by GRACE satellite gravimetry. *Scientific Reports, 8*(1), 13519. https://doi.org/10.1038/s41598-018-31972-8

Jin, S., & Feng, G. (2013). Large-scale variations of global groundwater from satellite gravimetry and hydrological models, 2002–2012. *Global and Planetary Change, 106*, 20-30. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.02.008

Jin, S., & 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.

Kayastha, M. B., Ye, X., Huang, C., & Xue, P. (2022). Future rise of the Great Lakes water levels under climate change. *Journal of Hydrology, 612*, 128205. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128205

Khandu, Forootan, E., Schumacher, M., Awange, J. L., & Mueller Schmied, H. (2016). Exploring the influence of precipitation extremes and human water use on total water storage (TWS) changes in the G anges-B rahmaputra-M eghna River Basin. *Water Resources Research, 52*(3), 2240-2258. https://doi.org/10.1002/2015WR018113

King, M. A., Bingham, R. J., Moore, P., Whitehouse, P. L., Bentley, M. J., & Milne, G. A. (2012). Lower satellite-gravimetry estimates of Antarctic sea-level contribution. *Nature, 491*(7425), 586-589. https://doi.org/10.1038/nature11621

Klinger, B. (2018). *A contribution to GRACE time-variable gravity field Recovery: Improved Level-1B Data Pre-Processing Methodologies* [Doctoral dissertation, Graz University of Technology].

Klos, A., Bos, M. S., & Bogusz, J. (2018). Detecting time-varying seasonal signal in GPS position time series with different noise levels. *GPS solutions, 22*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s10291-017-0686-6

Klos, A., Dobslaw, H., Dill, R., & Bogusz, J. (2021). Identifying the sensitivity of GPS to non-tidal loadings at various time resolutions: examining vertical displacements from continental Eurasia. *GPS Solutions, 25*(3), 89. https://doi.org/10.1007/s10291-021-01135-w

Kolusu, S. R., Shamsudduha, M., Todd, M. C., Taylor, R. G., Seddon, D., Kashaigili, J. J., ... & MacLeod, D. A. (2019). The El Niño event of 2015–2016: climate anomalies and their impact on groundwater resources in East and Southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences, 23*(3), 1751-1762. https://doi.org/10.5194/hess-23-1751-2019

Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020). Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. *Nature communications, 11*(1), 3044. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w

Kornfeld, R. P., Arnold, B. W., Gross, M. A., Dahya, N. T., Klipstein, W. M., Gath, P. F., & Bettadpur, S. (2019). GRACE-FO: the gravity recovery and climate experiment follow-on mission. *Journal of spacecraft and rockets, 56*(3), 931-951. https://doi.org/10.2514/1.A34326

Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., ... & Yuan, D. N. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters, 47*(12), e2020GL088306. https://doi.org/10.1029/2020GL088306

Langbein, J. (2017). Improved efficiency of maximum likelihood analysis of time series with temporally correlated errors. *Journal of Geodesy, 91*, 985-994. https://doi.org/10.1007/s00190-017-1002-5

Langbein, J., & Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102*(B1), 591-603. https://doi.org/10.1029/96JB02945

Langbein, J., & Svarc, J. L. (2019). Evaluation of temporally correlated noise in Global Navigation Satellite System time series: Geodetic monument performance. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124*(1), 925-942. https://doi.org/10.1029/2018JB016783

Li, J., & Wang, S. (2022). Seasonal variations and long-term trends of groundwater over the Canadian landmass. *Hydrogeology Journal, 30*(2), 401-415. https://doi.org/10.1007/s10040-022-02460-1

Liesch, T., & Ohmer, M. (2016). Comparison of GRACE data and groundwater levels for the assessment of groundwater depletion in Jordan. *Hydrogeology Journal, 24*(6), 1547. https://doi.org/10.1007/s10040-016-1416-9

Liu, X. (2008). *Global Gravity Field Recovery from Satellite-to-Satellite Tracking Data with the Acceleration Approach* [Doctoral dissertation, Delft University of Technology].

Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and space science, 39*, 447-462.

Long, D., Scanlon, B. R., Longuevergne, L., Sun, A. Y., Fernando, D. N., & Save, H. (2013). GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters, 40*(13), 3395-3401. https://doi.org/10.1002/grl.50655

Longuevergne, L., Wilson, C. R., Scanlon, B. R., & Crétaux, J. F. (2013). GRACE water storage estimates for the Middle East and other regions with significant reservoir and lake storage. *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(12), 4817-4830. https://doi.org/10.5194/hess-17-4817-2013

Loomis, B. D., Luthcke, S. B., & Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of geodesy, 93*(9), 1381-1398. https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y

Loomis, B. D., Rachlin, K. E., Wiese, D. N., Landerer, F. W., & Luthcke, S. B. (2020). Replacing GRACE/GRACE-FO with satellite laser ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet mass change. *Geophysical Research Letters, 47*(3), e2019GL085488. https://doi.org/10.1029/2019GL085488

Luthcke, S. B., Sabaka, T. J., Loomis, B. D., Arendt, A. A., McCarthy, J. J., & 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. https://doi.org/10.3189/2013JoG12J147

Mandelbrot, B. B., & Van Ness, J. W. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM review, 10*(4), 422-437.

Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. International *Journal of Climatology, 36*(3), 1033–1050. https://doi.org/10.1002/joc.4420

Marengo, J. A., Souza Jr, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., ... & Soares, W. R. (2018). Changes in climate and land use over the

Amazon region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science, 6*, 228. https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228

Matsulev, A. (2020, June 10) *Analysis and Interpretation of GRACE and GRACE-FO Mission Data*. CEUR Workshop Proceedings, pp. 83-91.

Meyer, Y. (1990) *Ondelettes et Opérateurs*, vol I–III. Hermann, Paris.

Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., & Poggi, J. M. (2000). *Wavelet toolbox*. The MathWorks Inc.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January 17 –22). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California.

Modarres, R., & Ouarda, T. B. (2013). Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity modelling of hydrologic time series. *Hydrological Processes, 27*(22), 3174-3191. https://doi.org/10.1002/hyp.9452

Moreira, L., Cazenave, A., & Palanisamy, H. (2021). Influence of interannual variability in estimating the rate and acceleration of present-day global mean sea level. *Global and Planetary Change, 199*, 103450.

Mouginot, J., Rignot, E., & Scheuchl, B. (2014). Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013. *Geophysical Research Letters, 41*(5), 1576-1584. https://doi.org/10.1002/2013GL059069

Ojha, C., Werth, S., & Shirzaei, M. (2019). Groundwater loss and aquifer system compaction in San Joaquin Valley during 2012–2015 drought. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124*(3), 3127-3143. https://doi.org/10.1029/2018JB016083

Opie, S., Taylor, R. G., Brierley, C. M., Shamsudduha, M., & Cuthbert, M. O. (2020). Climate–groundwater dynamics inferred from GRACE and the role of hydraulic memory. *Earth System Dynamics, 11*(3), 775-791. https://doi.org/10.5194/esd-11-775-2020

Palash, W., Akanda, A. S., & Islam, S. (2020). The record 2017 flood in South Asia: State of prediction and performance of a data-driven requisitely simple forecast model. *Journal of Hydrology, 589*, 125190. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125190

Panet, I., Bonvalot, S., Narteau, C., Remy, D., & Lemoine, J. M. (2018). Migrating pattern of deformation prior to the Tohoku-Oki earthquake revealed by GRACE data. *Nature geoscience, 11*(5), 367-373. https://doi.org/10.1038/s41561-018-0099-3

Parajuli, B., Zhang, X., Deuja, S., & Liu, Y. (2021). Regional and seasonal precipitation and drought trends in ganga–brahmaputra basin. *Water, 13*(16), 2218. https://doi.org/10.3390/w13162218

Peltier, W. R., Argus, D. F., & Drummond, R. (2015). Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G_C (VM5a) model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120*(1), 450-487. https://doi.org/10.1002/2014JB011176

Pfeffer, J., Cazenave, A., & Barnoud, A. (2022). Analysis of the interannual variability in satellite gravity solutions: detection of climate modes fingerprints in water mass displacements across continents and oceans. *Climate Dynamics, 58*(3), 1065-1084. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05953-z

Pfeffer, J., Cazenave, A., Rosat, S., Moreira, L., Mandea, M., Dehant, V., & Coupry, B. (2023). A 6-year cycle in the Earth system. *Global and Planetary Change, 229*, 104245. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104245

Press W. H., Teukolsky ,S. A., Vetterling, W. T., & Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing* (3rd edition). Cambridge university press.

Rajner, M. (2018). Detection of ice mass variation using GNSS measurements at Svalbard. *Journal of Geodynamics, 121*, 20-25. https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.06.001.

Ramillien, G., Famiglietti, J. S., & Wahr, J. (2008). Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review. *Surveys in geophysics, 29*, 361-374. https://doi.org/10.1007/s10712-008-9048-9

Ran, J., Ditmar, P., Klees, R., & Farahani, H. H. (2018). Statistically optimal estimation of Greenland Ice Sheet mass variations from GRACE monthly solutions using an improved mascon approach. J*ournal of Geodesy, 92*, 299-319. https://doi.org/10.1007/s00190-017-1063-5

Rateb, A., Scanlon, B. R., & Kuo, C. -Y. (2021) Multi-decadal assessment of water budget and hydrological extremes in the Tigris-Euphrates Basin using satellites, modeling, and in-situ data. *Science of The Total Environment 766*, 144337. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144337

Ray, R. (1999). *A global ocean tide model from Topex/Poseidon altimetry: GOT99.2*. NASA Tech. Memo 209478.

Ray, J. D., Vijayan, M. S. M., & Kumar, A. (2019). Noise characteristics of GPS time series and their influence on velocity uncertainties. *Journal of Earth System Science, 128*(6), 146. https://doi.org/10.1007/s12040-019-1179-5

Reager, J. T., Gardner, A. S., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Eicker, A., & Lo, M. H. (2016). A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. *Science, 351*(6274), 699-703. https://doi.org/10.1126/science.aad8386

Ries, J., Bettadpur, S., Eanes, R., Kang, Z., Ko, U., McCullough, C., ... & Tapley, B. (2016). *The Combined Gravity Model GGM05C*. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/icgem.2016.002

Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Van Den Broeke, M., Van Wessem, M. J., & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 116*(4), 1095-1103.

Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoing, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature, 557*(7707), 651-659. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1

Rosat, S., & Gillet, N. (2023). Intradecadal variations in length of day: Coherence with models of the Earth's core dynamics. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *341*, 107053. https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107053

Sasgen, I., Wouters, B., Gardner, A. S., King, M. D., Tedesco, M., Landerer, F. W., ... & Fettweis, X. (2020). Return to rapid ice loss in Greenland and record loss in 2019 detected by the GRACE-FO satellites. *Communications Earth & Environment, 1*(1), 1-8. https://doi.org/10.1038/s43247-020-0010-1

Saulquin, B., Fablet, R., Mangin, A., Mercier, G., Antoine, D., & Fanton d'Andon, O. (2013). Detection of linear trends in multisensor time series in the presence of autocorrelated noise: Application to the chlorophyll-a SeaWiFS and MERIS data sets and extrapolation to the incoming Sentinel 3-OLCI mission. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 118*(8), 3752-3763. https://doi.org/10.1002/jgrc.20264

Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121*(10), 7547-7569.

Scanlon, B. R., Rateb, A., Anyamba, A., Kebede, S., MacDonald, A. M., Shamsudduha, M., ... & Xie, H. (2022). Linkages between GRACE water storage, hydrologic extremes, and climate teleconnections in major African aquifers. *Environmental Research Letters, 17*(1), 014046. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3bfc

Scanlon, B. R., Zhang, Z., Reedy, R. C., Pool, D. R., Save, H., Long, D., ... & Winester, D. (2015). Hydrologic implications of GRACE satellite data in the Colorado River Basin. *Water Resources Research, 51*(12), 9891-9903. https://doi.org/10.1002/2015WR018090

Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Sun, A. Y., Müller Schmied, H., Van Beek, L. P., ... & Bierkens, M. F. (2018). Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(6), E1080-E1089. https://doi.org/10.1073/pnas.1704665115

Scanlon, B. R., Zhang, Z., Save, H., Wiese, D. N., Landerer, F. W., Long, D., ... & Chen, J. (2016). Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications. *Water Resources Research, 52*(12), 9412-9429. https://doi.org/10.1002/2016WR019494

Scanlon, B. R., Zhang, Z., Rateb, A., Sun, A., Wiese, D., Save, H., ... & Reedy, R. C. (2019). Tracking seasonal fluctuations in land water storage using global models and GRACE satellites. *Geophysical Research Letters, 46*(10), 5254-5264.

Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal, 263*(1), 835-853.

Schmidt, R., Flechtner, F., Meyer, U., Neumayer, K. H., Dahle, C., König, R., & Kusche, J. (2008a). Hydrological signals observed by the GRACE satellites. *Surveys in Geophysics, 29*(4), 319-334. https://doi.org/10.1007/s10712-008-9033-3

Schmidt, R., Petrovic, S., Güntner, A., Barthelmes, F., Wünsch, J., & Kusche, J., (2008b). Periodic components of water storage changes from GRACE and global hydrological models. *Journal of Geophysical Research, 113*, 1-14.

Schumacher, M., Forootan, E., van Dijk, A. I., Schmied, H. M., Crosbie, R. S., Kusche, J., & Döll, P. (2018). Improving drought simulations within the Murray-Darling Basin by combined calibration/assimilation of GRACE data into the WaterGAP Global Hydrology Model. *Remote Sensing of Environment, 204*, 212-228. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.029

Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, *(6)*2, 461-464.

Shamsudduha, M., & Taylor, R. G. (2020). Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics, 11*(3), 755-774. https://doi.org/10.5194/esd-11-755-2020

Sun, Y., Riva, R., & Ditmar, P. (2016). Optimizing estimates of annual variations and trends in geocenter motion and J2 from a combination of GRACE data and geophysical models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121*(11), 8352-8370. https://doi.org/10.1002/2016JB013073

Sun, Z., Zhu, X., Pan, Y., & Zhang, J. (2017). Assessing terrestrial water storage and flood potential using GRACE data in the Yangtze River basin, China. *Remote Sensing, 9*(10), 1011. https://doi.org/10.3390/rs9101011

Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical research letters, 31*(9). https://doi.org/10.1029/2004GL019920

Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., ... & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change, 9*(5), 358-369. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2

Teunissen, P. J., & Amiri-Simkooei, A. R. (2008). Least-squares variance component estimation. *Journal of geodesy, 82*, 65-82. https://doi.org/10.1007/s00190-007-0157-x

The IMBIE Team, (2020). Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature, 579*, 233–239. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical review, 38(1), 55-94. https://doi.org/10.2307/210739

Tu, T., Comte, L., & Ruhi, A. (2023). The color of environmental noise in river networks. *Nature Communications, 14*(1), 1728. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37062-2

van Angelen, J. H., Van den Broeke, M. R., Wouters, B., & Lenaerts, J. T. (2014). Contemporary (1960–2012) evolution of the climate and surface mass balance of the Greenland ice sheet. *Surveys in Geophysics, 35*, 1155-1174. https://doi.org/10.1007/s10712-013-9261-z

Van Dijk, A. I., Beck, H. E., Crosbie, R. S., De Jeu, R. A., Liu, Y. Y., Podger, G. M., ... & Viney, N. R. (2013). The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources,

ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research, 49*(2), 1040-1057. https://doi.org/10.1002/wrcr.20123

Velicogna, I. (2009). Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. *Geophysical Research Letters, 36*(19). https://doi.org/10.1029/2009GL040222

Velicogna, I., Mohajerani, Y., Landerer, F., Mouginot, J., Noel, B., Rignot, E., ... & Wiese, D. (2020). Continuity of ice sheet mass loss in Greenland and Antarctica from the GRACE and GRACE Follow-On missions. *Geophysical Research Letters, 47*(8), e2020GL087291. https://doi.org/10.1029/2020GL087291

Velicogna, I., Sutterley, T. C., & Van Den Broeke, M. R. (2014). Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophysical Research Letters, 41*(22), 8130-8137. https://doi.org/10.1002/2014GL061052

Velicogna, I., & 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.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate, 23*(7), 1696-1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Vishwakarma, B. D., Bates, P., Sneeuw, N., Westaway, R. M., & Bamber, J. L. (2021). Re-assessing global water storage trends from GRACE time series. *Environmental Research Letters, 16*(3), 034005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd4a9

Voss, K. A., Famiglietti, J. S., Lo, M., De Linage, C., Rodell, M., & Swenson, S. C. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water resources research, 49*(2), 904-914. https://doi.org/10.1002/wrcr.20078

Wahr, J., Molenaar, M., & 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.

Wahr, J., Swenson, S., & Velicogna, I. (2006). Accuracy of GRACE mass estimates. *Geophysical Research Letters, 33*(6). https://doi.org/10.1029/2005GL025305

Wahr, J., Swenson, S., Zlotnicki, V., & Velicogna, I. (2004). Time-variable gravity from GRACE: First results. *Geophysical Research Letters, 31*(11). https://doi.org/10.1029/2004GL019779

Wang, H., Song, S., Zhang, G., Ayantobo, O. O., & Guo, T. (2023). Stochastic volatility modeling of daily streamflow time series. *Water Resources Research, 59*(1), e2021WR031662. https://doi.org/10.1029/2021WR031662

Wang, H., Xiang, L., Jia, L., Wu, P., Steffen, H., Jiang, L., & Shen, Q. (2015). Water storage changes in North America retrieved from GRACE gravity and

GPS data. *Geodesy and Geodynamics, 6*(4), 267-273. https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.07.002

Wang, L., Shum, C. K., Simons, F. J., Tapley, B., & Dai, C. (2012). Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry. *Geophysical Research Letters, 39*(7). https://doi.org/10.1029/2012GL051104

Wang, L., Chen, C., Ma, X., Fu, Z., Zheng, Y., & Peng, Z. (2020). Evaluation of GRACE mascon solutions using in-situ geodetic data: The case of hydrologic-induced crust displacement in the Yangtze River Basin. *Science of the total environment, 707*, 135606. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135606

Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D. N., Boening, C., & Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120*(4), 2648-2671. https://doi.org/10.1002/2014JB011547

Watkins, A., Fu, Y., & Gross, R. (2018). Earth's subdecadal angular momentum balance from deformation and rotation data. *Scientific reports, 8*(1), 13761.

Wei, L., Jiang, S., Ren, L., Tan, H., Ta, W., Liu, Y., ... & Duan, Z. (2021). Spatiotemporal changes of terrestrial water storage and possible causes in the closed Qaidam Basin, China using GRACE and GRACE Follow-On data. *Journal of Hydrology, 598*, 126274. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126274

Welch, P. (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. https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901

Williams, S. D. P. (2003). The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series. *Journal of Geodesy, 76*, 483-494. https://doi.org/10.1007/s00190-002-0283-4

Williams, S. D., Moore, P., King, M. A., & Whitehouse, P. L. (2014). Revisiting GRACE Antarctic ice mass trends and accelerations considering autocorrelation. *Earth and Planetary Science Letters, 385*, 12-21. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.016

Williams, S. D., & Willis, P. (2006). Error analysis of weekly station coordinates in the DORIS network. *Journal of Geodesy, 80*, 525-539. https://doi.org/10.1007/s00190-006-0056-6

Williams, S. D., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R. M., Prawirodirdjo, L., ... & Johnson, D. J. (2004). Error analysis of continuous GPS position time series. *Journal of geophysical research 109*(B03412). https://doi.org/10.1029/2003jb002741

Wouters, B., Bamber, J. L., Van den Broeke, M. R., Lenaerts, J. T. M., & Sasgen, I. (2013). Limits in detecting acceleration of ice sheet mass loss due to climate variability. *Nature Geoscience, 6*(8), 613-616. https://doi.org/10.1038/ngeo1874

Wouters, B., Gardner, A. S., & Moholdt, G. (2019). Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002-2016). *Frontiers in earth science, 7*, 96. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00096

Wu, H., Li, K., Shi, W., Clarke, K. C., Zhang, J., & Li, H. (2015). A wavelet-based hybrid approach to remove the flicker noise and the white noise from GPS coordinate time series. *GPS solutions, 19*, 511-523. https://doi.org/10.1007/s10291-014-0412-6

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes, 16*(9), 1807-1829. https://doi.org/10.1002/hyp.1095

Yue, S., & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water resources management, 18*(3), 201-218. https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60

Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., ... & Behr, J. (1997). Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities. *Journal of geophysical research: solid earth, 102*(B8), 18035-18055. https://doi.org/10.1029/97jb01380

Zhang, C., Shum, C. K., Bezděk, A., Bevis, M., de Teixeira da Encarnação, J., Tapley, B. D., ... & Shen, Q. (2021). Rapid mass loss in West Antarctica revealed by Swarm gravimetry in the absence of GRACE. *Geophysical Research Letters, 48*(23), e2021GL095141. https://doi.org/10.1029/2021GL095141

Zhang, B., Liu, L., Yao, Y., van Dam, T., & Khan, S. A. (2020a). Improving the estimate of the secular variation of Greenland ice mass in the recent decades by incorporating a stochastic process. *Earth and Planetary Science Letters, 549*, 116518. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116518

Zhang, L., Tang, H., Chang, L., & Sun, W. (2020b). Performance of GRACE mascon solutions in studying seismic deformations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125*(10), e2020JB019510. https://doi.org/10.1029/2020JB019510

Zhao, M., Geruo, A., Velicogna, I., & Kimball, J. S. (2017). A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002–14: Comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia millennium drought. *Journal of Hydrometeorology, 18*(8), 2117-2129. https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0182.1

A
IAUE YÖNTEMİ İLE VARYANS BİLEŞENLERİNİN KESTİRİMİ

Iterative Almost Unbiased Estimation (IAUE) yöntemi jeodezik literatürde basitleştirilmiş varyans bileşenlerinin kestirimi yöntemi olarak bilinmektedir (Fotopoulos, 2005). Teorik altyapısı Horn ve Horn (1975) tarafından verilen bu yöntemde Eşitlik (3.5)'te geçen varyans bileşeni σ_j^2 iteratif olarak aşağıdaki şekilde kestirilmektedir:

$$\sigma_j^2 = \frac{\mathbf{y}^T \mathbf{P}_X^{\perp} \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{Q}_j \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{P}_X^{\perp} \mathbf{y}}{tr(\mathbf{Q}_i \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{P}_X^{\perp} \mathbf{Q}_j \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{P}_X^{\perp})} \quad , \quad (j = 1, \dots, c) \tag{A.1}$$

Burada $tr(\dots)$ iz operatörü; $\tilde{\mathbf{C}}_{yy}$ ise yaklaşık kovaryans matrisidir. $\mathbf{P}_X^{\perp}$ de $\mathbf{P}_X^{\perp} = \mathbf{I} - \mathbf{X}(\mathbf{X}^T \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \tilde{\mathbf{C}}_{yy}^{-1}$ şeklinde tanımlanan izdüşüm matrisidir.

Başlangıç aşamasında, kovaryans matrisi $\tilde{\mathbf{C}}_{yy} = \sum_{j=1}^{c} \mathbf{Q}_{jj}$ şeklinde oluşturulur ve varyans bileşenlerinin birim olduğu kabul edilir. Daha sonra, kestirimde, önceki iterasyonda elde edilen varyans bileşenlerine dayalı olarak güncellenmiş kovaryans matrisi $\tilde{\mathbf{C}}_{yy} = \sum_{j=1}^{c} \sigma_i^2 \mathbf{Q}_{jj}$ kullanılarak tekrar edilir ve varyans bileşenlerinin kestirim değerleri 1'e yakınsayana kadar iterasyona devam edilir. Sonuç olarak, varyans bileşenleri ve dolayısıyla, gürültü büyüklükleri belirlenir.

B
OTOREGRESİF MODELLER İÇİN AICc DEĞERLERİ

Tablo B.1, Türkiye bölgesi için Şekil 3.3'te gösterilen 90 mascon zaman serisine ait hem sadece beyaz gürültü modeli hem de ARMA(1,1) modelleriyle gerçekleştirilen analizlerin bilgi kriteri değerlerini (AICc) göstermektedir.

Tablo B.1 Türkiye bölgesindeki 90 mascon zaman serisi için modellerin bilgi kriterleri (Koyu yazılan değerler, en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir.)

	Sadece Beyaz Gürültü	ARMA(1,1)		Sadece Beyaz Gürültü	ARMA(1,1)		Sadece Beyaz Gürültü	ARMA(1,1)
1	1050,14	**879,36**	31	1055,04	**872,98**	61	1038,09	**818,68**
2	1030,75	**868,46**	32	1046,68	**853,17**	62	1037,66	**808,34**
3	1045,63	**861,06**	33	1047,39	**856,86**	63	1031,44	**822,54**
4	1034,05	**849,19**	34	1069,38	**890,13**	64	1004,02	**790,75**
5	1014,56	**836,21**	35	1063,35	**887,68**	65	994,49	**789,68**
6	990,40	**858,40**	36	1057,48	**873,44**	66	986,38	**782,74**
7	991,70	**868,23**	37	1064,23	**887,31**	67	1037,89	**842,76**
8	1032,17	**825,13**	38	1038,99	**844,32**	68	1034,41	**851,13**
9	996,28	**818,48**	39	1105,78	**944,71**	69	1027,72	**848,86**
10	1005,31	**827,69**	40	1113,86	**945,35**	70	1021,80	**840,15**
11	1023,26	**849,86**	41	1114,06	**923,05**	71	1014,30	**815,78**
12	1026,34	**858,61**	42	1103,86	**906,66**	72	1032,98	**852,15**
13	1022,75	**852,11**	43	1092,16	**917,09**	73	1026,14	**851,08**
14	1014,57	**840,86**	44	1076,02	**913,18**	74	1021,30	**847,59**
15	1009,83	**834,57**	45	1055,87	**883,75**	75	1016,79	**832,76**
16	1015,65	**836,67**	46	1042,46	**860,61**	76	1005,71	**804,71**
17	1035,31	**850,36**	47	1161,98	**1015,52**	77	991,71	**785,41**
18	1043,19	**834,74**	48	1157,74	**982,76**	78	1009,64	**843,80**
19	1032,73	**847,90**	49	1145,35	**939,62**	79	1011,45	**840,05**
20	1018,22	**828,39**	50	1120,00	**932,98**	80	1018,56	**838,69**
21	1020,91	**828,69**	51	1087,11	**928,92**	81	1022,27	**826,37**
22	1041,16	**850,57**	52	1056,32	**901,11**	82	1012,91	**800,23**
23	1045,02	**857,16**	53	1033,35	**880,28**	83	1004,79	**783,32**
24	1040,27	**847,22**	54	1019,09	**864,08**	84	977,19	**814,87**
25	1039,13	**844,39**	55	1075,94	**929,23**	85	996,82	**817,61**
26	1033,68	**846,16**	56	979,60	**851,85**	86	1020,24	**819,40**
27	1027,51	**843,08**	57	1059,51	**839,43**	87	1031,29	**806,54**
28	1034,85	**854,51**	58	1086,13	**871,42**	88	1031,11	**790,64**
29	1057,13	**859,25**	59	1054,40	**817,96**	89	1026,05	**771,76**
30	1060,40	**870,61**	60	1064,57	**835,77**	90	969,25	**831,77**

Tablo B.1'de verilen sonuçlar, beyaz gürültü modeli ile otoregresif gürültü modeli arasında bilgi kriterleri bakımından önemli bir fark olduğunu açık bir şekilde yansıtmaktadır. Bu durum, renkli gürültü modelinin yani ARMA(1,1)'in zaman serisini daha iyi modellendiğini ve mevcut renkli gürültünün dikkate alındığını göstermektedir.

Tablo B.2, nehir havzalarında gerçekleştirilen ve sonuçları Tablo 3.1'de (Bölüm 3.3.4) sunulan analizlerin bilgi kriteri değerlerini (AICc) göstermektedir. Bu değerlerden hareketle, beyaz gürültü içeren model ile otoregresif gürültü modelleri arasında önemli farklar olduğu anlaşılmaktadır. AR(1) ve ARMA(1,1) modellerinin diğer renkli gürültü modellerine kıyasla zaman serisini daha iyi temsil ettiği anlaşılmaktadır.

Tablo B.2 Nehir havzalarında AICc değerleri

(Koyu yazılan değerler en küçük AICc değerine sahip çözümü gösterir. Kısaltmalar: Ganges-Brahmaputra için GB; Tigris-Euphrates için TE; Murray-Darling için MD)

	Havza	Sadece Beyaz Gürültü	ARMA(1,0)	ARMA(1,1)	ARIMA(1,1,0)	ARIMA(1,1,1)
1	Mackenzie	737,19	546,93	**545,94**	565,81	549,11
2	Nelson	936,76	640,19	**639,35**	647,96	650,03
3	St Lawrence	994,73	**668,22**	670,04	676,44	675,39
4	Mississippi	933,29	631,82	**631,76**	641,08	641,21
5	Amazon	1137,74	772,16	**739,12**	748,17	748,89
6	Parana	1018,16	776,02	**758,97**	778,43	776,02
7	Danube	1038,70	**804,83**	807,06	818,51	820,55
8	Volga	987,82	755,99	**753,45**	769,30	763,12
9	Ob	980,17	**614,32**	614,82	622,13	619,23
10	Yenisei	789,47	**612,09**	614,00	630,25	618,92
11	Lena	847,08	639,17	**633,00**	655,43	645,99
12	Amur	919,81	643,87	**639,53**	654,04	649,01
13	Yellow	845,68	611,87	**613,66**	625,62	613,88
14	Yangtze	842,83	744,62	**741,96**	778,13	748,48
15	GB	948,77	**789,08**	791,21	810,23	792,64
16	Indus	874,98	717,17	**710,47**	739,79	738,28
17	TE	902,56	649,40	**651,28**	659,97	653,95
18	Niger	705,10	608,52	**602,41**	642,97	610,81
19	Lake Chad	641,86	**531,05**	533,11	559,52	536,85
20	Nile	767,24	**601,74**	601,78	622,15	608,85
21	Congo	933,08	662,14	**657,39**	671,56	671,73
22	Zambezi	1223,98	808,62	**799,23**	808,21	804,62
23	Orange	841,21	**640,22**	640,72	657,27	642,54
24	MD	970,87	**700,15**	702,37	711,06	705,17

C
WAVELET ANALİZİ

Wavelet analizi, uzun dönemli zamansal ölçeklerde doğrusal olmayan değişimleri incelemek, mevsimsel sinyalleri modellemek ve kısa dönemli sinyali ayrıştırmak için kullanılan, durağan olmayan süreçlerin zaman frekans analizine yönelik bir yöntemdir (Carbonari vd., 2023; Klos vd., 2018; Wu vd., 2015). Meyer mother wavelet, sinyalin bilgi kaybı olmadan ayrıştırılmasına olanak sağlayan birkaç yöntemden biridir (Bogusz, 2015; Klos vd., 2021; Meyer, 1990).

Wavelet analizinde, zaman veya frekans bilgisine bağlı olarak ayrıştırılan sinyalin pencere boyutu değiştirilebilmektedir. Böylece, değişken zaman frekans çözünürlüğüne sahip wavelet yani ayrıştırılan sinyalin bileşenleri hem yüksek hem de düşük frekans bileşenlerine sahip sinyallerin incelenmesine olanak tanımaktadır. Temel fonksiyonlar bu ana sinyalin kaydırılması ve ölçeklendirilmesiyle oluşturulur. Bu nedenle analiz, sinyalin daha küçük parçalara bölünmesini ve bunların kaydırılmış ve ölçeklendirilmiş sinyallerle karşılaştırılmasını içerir. Buradan, orijinal sinyalin ana sinyal (mother wavelet) ile ne derece uyumlu olduğunu gösteren wavelet katsayıları hesaplanır (Box ve Jenkins, 1970):

$$C_x\left(r,\tau\right)=\int_{-\infty}^{+\infty} y(t)\psi^{*}{}_{r,\tau}\left(t\right)dt \tag{C.1}$$

Burada * wavelet dönüşümünün karmaşık eşleniğini temsil eder ve sinyalin faz bilgilerini analiz etmek için kullanılır. Orijinal sinyali tüm frekans seviyelerinde etkili bir şekilde temsil etmek için, ana sinyal (mother wavelet) ψ(t) r ile ölçeklendirilir ve τ ile kaydırılır.

$$\psi_{r,\tau}\left(t\right)=\frac{1}{\sqrt{r}}\psi\left(\frac{t-\tau}{r}\right) \tag{C.2}$$

Wavelet dönüşümü, zaman frekans ilişkisinden ziyade zaman ölçek ilişkisine dayanır. Misiti vd. (2000) tarafından açıklanan merkez frekans kavramı, ölçek ve frekans arasındaki ilişkiyi kurmak için esastır:

$$f_r = \frac{f_c}{r \cdot T'} \tag{C.3}$$

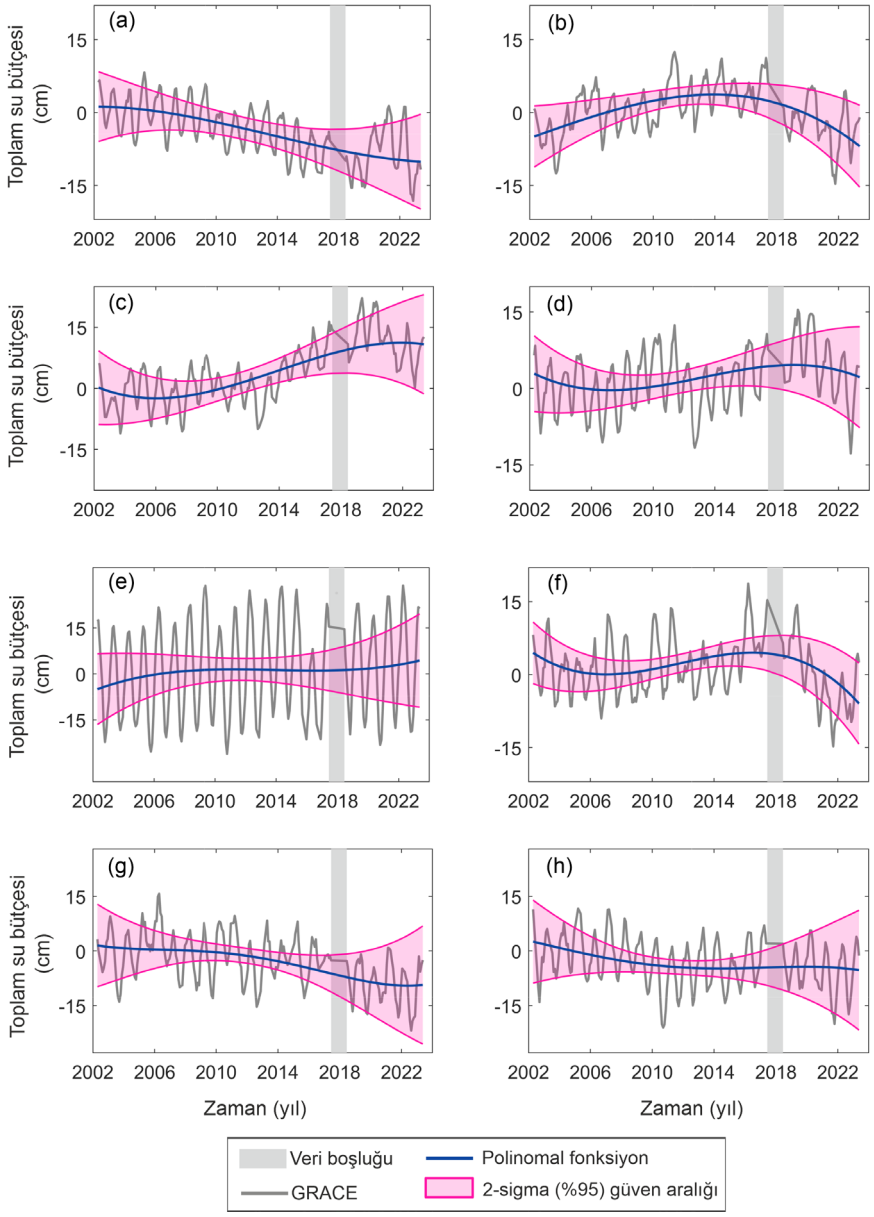
Bu denklemde r, ölçeklendirme indeksini, T' örnekleme aralığını, f_c ortalama frekansı ve f_r ise r ölçeklendirme indeksine karşılık gelen pseudo-frekansı temsil eder. Pseudo-frekans kavramı, wavelet analizinin zaman frekans çözümlemesindeki esnekliğini yansıtır.

Zaman serisi analizinde, Eşitlik (C.1)'de açıklanan sürekli wavelet dönüşümü yerine genellikle ayrık wavelet dönüşümü kullanılır. Ayrıştırma sonrasında, zaman serisinde kısa dönemli, mevsimsel ve uzun dönemli alt sinyallerin varyans yüzdeleri hesaplanır.

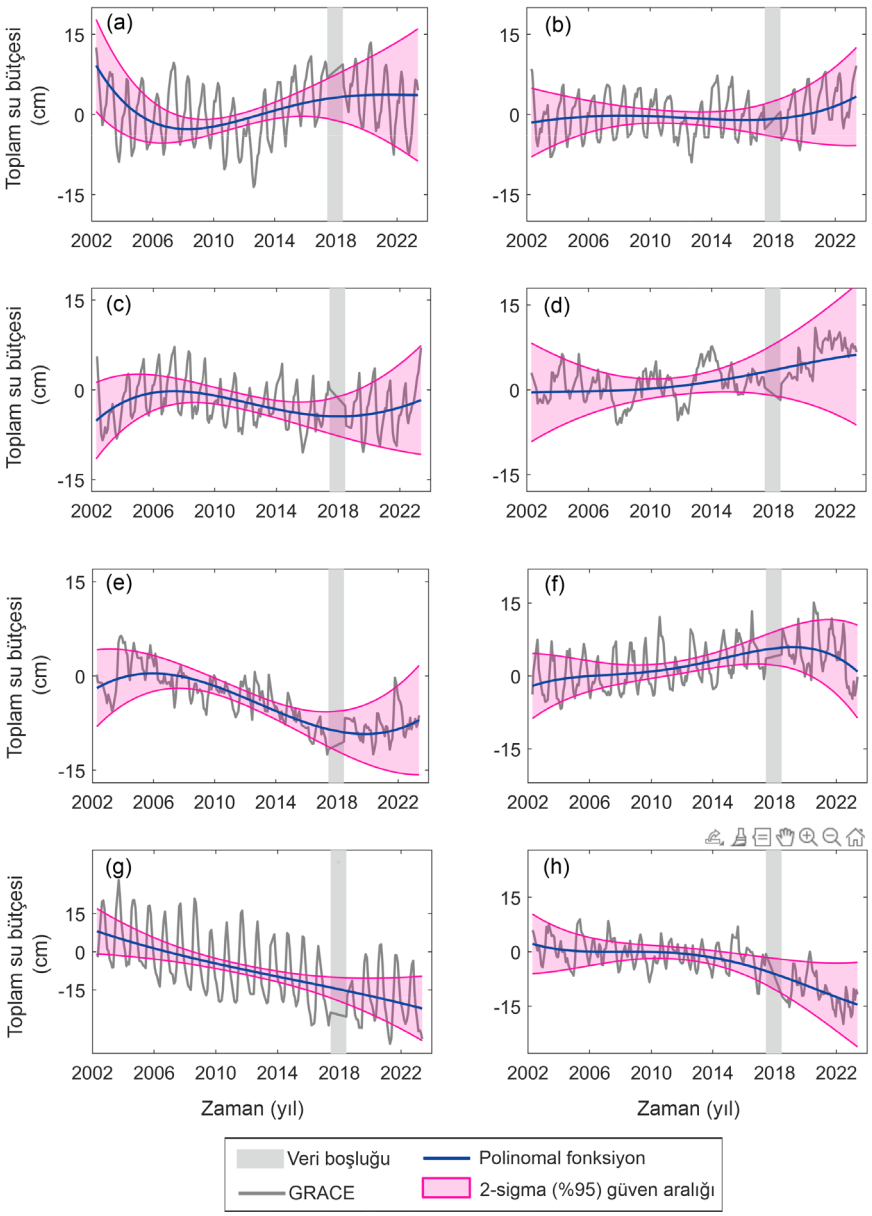
Bu çalışmada, MATLAB ortamında toplam su bütçesi zaman serisi, uzun dönemli (>1,1 yıl), mevsimsel (4 ay – 1,4 yıl) ve kısa dönemli (<5 ay) bileşenlere Meyer mother wavelet yöntemi ile ayrıştırılmıştır. Bu bileşenlerin varyans yüzdeleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

D

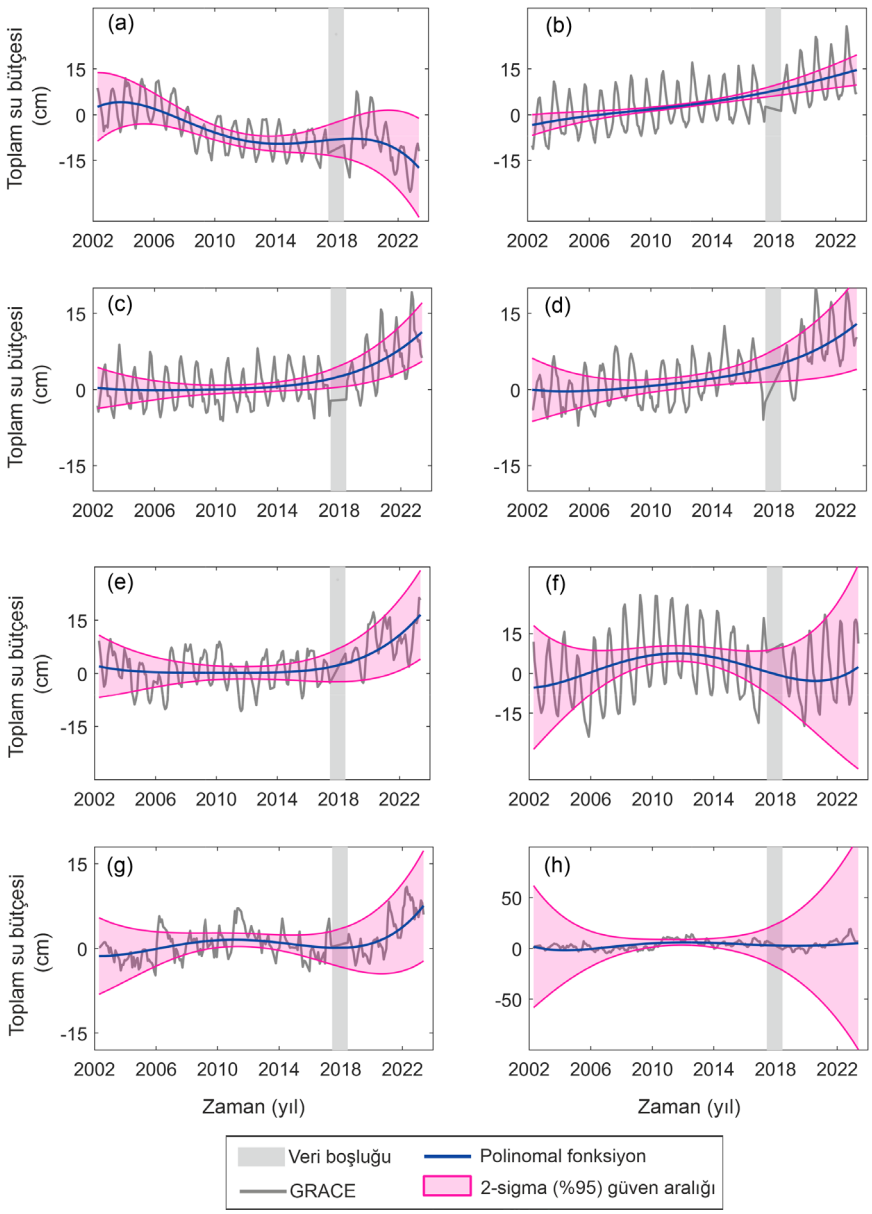
NEHİR HAVZALARINDA MODEL-4 SONUÇLARINA GÖRE ZAMAN SERİLERİ



Şekil D.1 (a) Mackenzie, (b) Nelson, (c) St.Lawrance, (d) Mississippi, (e) Amazon, (f) Parana, (g) Danube ve (h) Volga nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı



Şekil D.2 (a) Ob, (b) Yenisei, (c) Lena, (d) Amur, (e) Yellow, (f) Yangtze, (g) Ganges-Brahmaputra ve (h) Indus nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı



Şekil D.3 (a) Tigris-Euphrates, (b) Niger, (c) Lake Chad, (d) Nile, (e) Congo, (f) Zambezi, (g) Orange ve (h) Murray-Darling nehir havzalarında ARMA(1,1) gürültü modeli ile Model-4'ten (polinomal trend + ek periyodik sinyal) elde edilen polinomal trend ve %95 olasılıklı güven aralığı

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Güneş, Ö. & Aydın, C. (2023, Kasım 29–Aralık 1). *GRACE Zaman Serilerinde Uzun Dönemli Periyodik Sinyalin İncelenmesi*. Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) XXII. Sempozyumu, Trabzon, Türkiye.

2. Gunes, O., Klos, A., Lenczuk, A., Aydin, C. & Bogusz, J. (2023, July 11–20). A *New Assessment of Temporal Correlations in GRACE TWS Time Series*. International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly 2023, Berlin, Germany.

3. Gunes, O. & Aydin, C. (2023, April 23–28). *Role of Temporal Correlations in the Uncertainties of the GRACE Hydrological Trend.* EGU General Assembly 2023, Vienna, Australia.

4. Gunes, O., Klos, A., Lenczuk, A., Aydin, C. & Bogusz, J. (2023, March 28–29). *Redefining the Deterministic Model for the GRACE Total Water Storage Time Series.* 2. ICCC Workshop: Geodesy for Climate Research, 2023.

5. Klos, A., Gunes, O., Lenczuk, A., Aydin, C. & Bogusz, J. (2022, December 12–16). *Re-defining the Functional Model of the GRACE Total Water Storage Time Series*. AGU Fall Meeting 2022, Illinois, United States of America.

6. Gunes, O. & Aydin, C. (2021, December 2–3). *Applying Autoregressive Models to Analysis of GRACE Mascon Time Series*. International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG) 2021, Riga, Latvia.

7. Güneş, Ö. & Aydın, C. (2021, Mayıs 26–29). *GRACE Zaman Serilerinden Elde Edilen Su Kütlesi Değişiminin Analizinde Otoregresif Modellerin Kullanımı*. 18. Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Türkiye.

8. Gunes, O. & Aydin, C. (2019, November, 7–9). *Noise Characteristics in GRACE-Mascon Solutions*. International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG) 2019, İstanbul, Türkiye.

Makaleler

1. Gunes, O. & Aydin, C. (2024). Colored Noise in GRACE Total Water Storage Time Series: Its Impact on Trend Significance in the Türkiye Region and Major World River Basins. *Advances in Space Research, 74*(4). https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.05.051

2. Güneş, Ö. & Aydın, C. (2024). GRACE Zaman Serilerinin Gürültü Karakteri Analizi. *Geomatik, 9*(1), 45–53. https://doi.org/10.29128/geomatik.1307208

3. Gunes, O. & Aydin, C. (2022). Applying Autoregressive Models in Analysis of GRACE-Mascon Time-Series. *Advances in Geodesy and Geoinformation, 71*(2). https://doi.org/10.24425/agg.2022.141299

Projeler

1. Su Kütlesi Değişiminin Uydu Gravite Çözümleriyle İncelenmesi ve Modellenmesi. Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Cüneyt AYDIN. Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje FDK-2021-4341. 2021 – 2024 (Araştırmacı)