



# GRACE Zaman Serilerinden Elde Edilen Su Kütlesi Değişiminin Analizinde Otoregresif Modellerin Kullanımı

Özge Güneş<sup>1,\*</sup>, Cüneyt Aydın<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 34220 İstanbul

## Özet

Bu çalışma, Türkiye'de seçilen havzalara ilişkin 2003-2016 yılları arasındaki GSFC (Goddard Space Flight Center) GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment)-Mascon çözümlerinden elde edilen eşdeğer su kalınlığı (equivalent water thickness, EWT) değişimlerini incelemektedir. GRACE, 2002'den beri su kütlesi değişimlerinin izlenmesine olanak sağlamaktadır. GRACE çözümlerinden elde edilen EWT değişimi zaman serisinin analizi için doğrusal trend ve periyodik sinyalleri içeren standart bir fonksiyonel model olan harmonik regresyon yaklaşımı kullanılır. Diğer yandan, çoğu jeodezik zaman serisinde zamansal korelasyonlar olduğu da bilinmektedir. Bu korelasyonların ihmal edilmesi, zaman serisinden elde edilen kestirim sonuçlarını etkilemekte ve parametrelerin anlamlılığını değiştirmektedir. Daha önceden yapılan çalışmalara göre, GRACE zaman serilerinde renkli gürültülerin var olduğu bilinmektedir. Söz konusu gürültüye neden olan korelasyonlara sahip bir zaman serisinin analizinde otoregresif modeller önem arz etmektedir. Böylece kestirim sonuçlarına ait güven aralıkları daha doğru bir şekilde belirlenebilmektedir.

Çalışmanın amacı, otoregresif modelleri GRACE zaman serilerinde uygulamak ve korelasyonların kestirim sonuçlarına etkisini incelemektir. Türkiye'de seçilen Batı Karadeniz, Fırat-Dicle, Konya-Kapalı ve Sakarya havzalarında trend ve periyodik sinyallerden oluşan fonksiyonel model, ARMA(1,1) modeli altında ele alınmıştır. Burada ARMA(1,1) modeli, zaman serisinin yüklü olduğu renkli gürültü türüne uygun olduğu için seçilmiştir. Toplam su kütlesi değişim trendinin belirlenmesinde kullanılan ARMA(1,1) modeline göre trend kestirimi ve zaman serisinde ileriye yönelik tahminler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların güvenilirliği, daha önce yapılan çalışmalara göre irdelemiştir.

**Anahtar Sözcükler:** GRACE zaman serisi, su kütlesi değişimi, renkli gürültü, zamansal korelasyon, ARMA model

## Abstract

This study investigates the equivalent water thickness (EWT) variations obtained from GSFC (Goddard Space Flight Center) GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment)-Mascon solutions for the selected basins in Turkey between 2003 and 2016. Since 2002, GRACE has been enable for monitoring of total water storage changes with global coverage. Harmonic regression model, which is a standard functional model that includes linear trend and periodical signals, is used for the analysis of GRACE-EWT time series. On the other hand, it is known that there are temporal correlations in most geodetic time series. Neglecting these correlations effects the estimation results obtained from the time series and changes the significance of the parameters. According to previous studies in the literature, colored noise exists also in the GRACE time series. Autoregressive error noise models are important in the analysis of a time series including temporal correlations which causes colored noise. Thus, the confidence intervals of the estimation results can be determined more realistically.

The aim of the study is to apply autoregressive models to GRACE time series and examine the effect of correlations on the estimation results. As the study area, four hydrological basins have been selected namely, Western Black Sea, Euphrates-Tigris, Konya-Closed and Sakarya. Functional model consisting of periodic signals and trend in these basins in Turkey is discussed under ARMA (1,1) error noise model. Here, the ARMA (1,1) model has been chosen because it is suitable for the colored noise type existing in the time series. According to the ARMA (1,1) model used in determining the trend of total water storage change, forward estimates of time series also have been handled. The reliability of the results obtained has been discussed according to their own estimated confidence intervals and previous studies.

**Keywords:** GRACE time series, equivalent water thickness, colored noise, temporal correlation, ARMA model

## 1. Giriş

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. Su kütlesi değişimlerinin analizi, su potansiyelinin modellenmesi gibi konuları kapsayan ve pek çok farklı disiplini bir araya getiren bu jeodezik ve jeofiziksel çalışmalar ile hem global hem de bölgesel anlamda su kütlesi değişiminin analizinde literatüre büyük katkılar sağlanmaktadır.

Uydu ve yüzey modellerinden elde edilen veri setleri ile su kütlesi değişiminin izlenmesi ekonomik ve kolay ulaşılabilir olduğundan gün geçtikçe önem kazanmakta ve su kaynakları yönetimi açısından alternatif bir yaklaşım haline gelmektedir. Gravite alanının zamana bağlı çözümleri toplam karasal su ve buzul kütlelerinin izlenmesi, okyanuslardaki su

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0212)3835310

E-posta: ozgeg@yildiz.edu.tr (Güneş Ö), caydin@yildiz.edu.tr (Aydın C)

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 GRACE ve devamı niteliğinde olan GRACE-Follow On (GRACE-FO) uyduları da yeryüvarı gravite alanını izleyerek su kütlesi değişimine ilişkin aylık çözümler sağlamaktadır. Su kütlesi değişimleri, okyanus, atmosfer, karasal su depoları, yeraltı ve yerüstü suları, buzullardaki erimeler gibi farklı hidrolojik kaynaklardan meydana gelmektedir (Schmidt vd. 2006, Swenson ve Wahr 2003). GRACE uydusu özellikleri gereği, global ve bölgesel alanlarda meydana gelen bu hidrolojik değişimlere karşı duyarlıdır ve literatüre çok sayıda katkı sağlamıştır (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).

Su kütlesi değişiminin modellenmesinde önemli olan doğru fonksiyonel ve stokastik modeli belirlemektir. Çünkü fonksiyonel modelin yanında özellikle stokastik yapının doğru tasarlanmamış olmasından kaynaklanan hatalı kestirimler, aslında var olmayan bir fiziksel gerçekliği varmış gibi ya da var olan eğilimleri yokmuş gibi göstererek farklı yorumlamalara ve kararlara sebep olabilmektedir. Literatürde GRACE veri setleri ile yapılan çalışmalarda odak noktası genellikle fonksiyonel modelin belirlenmesi ve su kütlesindeki değişiminin gözlenebilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, zamansal korelasyonların ve renkli gürültü türlerinin dikkate alındığı çalışmalar da bulunmaktadır. Williams vd. (2014)'te stokastik yapı ele alınmış ve Antarktika bölgesi hücelere bölünerek, spektral indeks değerleri hesaplanmıştır. Spektral indeks değerlerinin, Doğu Antarktika için yaklaşık -1,5 ve Batı Antarktika için -2 olduğu ifade edilmiştir. Bu durum, zaman serisinin sadece beyaz gürültü ile yüklü olmadığını, zamansal korelasyonlardan dolayı veri setinde renkli gürültünün de var olduğuna ilişkin ipuçlarını sunmaktadır. Loomis vd. (2019)'da Mascon zaman serilerinden elde edilen su kütlesi değişim trendinin anlamlılığını istatistiksel olarak ele alınmıştır. Global Mascon çözümlerinden elde edilen trendlerin %59'unun istatistiksel olarak anlamlı olduğu ifade edilmiştir. Burada stokastik yapının etkisinin incelenmesinde Monte-Carlo yaklaşımının benimsendiğinden bahsedilmiştir. Trend değeri istatistiksel olarak anlamlı çıkan bölgelerin yoğun buz kütlesi içeren kutuplar ve su kütlesi açısından öneme sahip olan havzalar olduğu gösterilmiştir. King ve Watson (2020) ve Zhang vd. (2020) çalışmalarında buzul kütle değişiminin yoğun olduğu bölgeleri ele almış ve zaman serisini otoregresif modellerden AR(1) modeli kullanarak incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise, Türkiye'de seçilen havzalarda GSFC Mascon-EWT zaman serilerinde AR(1,1) modeli benimsenerek analizler yapılmıştır (2003-2016 GSFC Mascon çözümlerine ilişkin açıklamalar Luthcke vd. (2013)'te verilmektedir.). Farklı otoregresyon modellerinin kullanıldığı uygulamada elde edilen bulgular Sayısal Uygulama bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. 2003-2016 yıllarını kapsayan GSFC Mascon çözümleri ile ileriye yönelik tahminler de yapılmıştır. Otoregresif süreçlerin prediksyon amacı ile kullanılması hem GRACE ve GRACE-FO uydularının arasındaki boşluğun doldurulmasında alternatif bir yaklaşım sağlayıp, hem de su yönetimi/kuraklık gibi iklimsel ve hidrolojik olayların izlenmesi açısından fikir sağlamaktadır.

## 2. Yöntem

2002'de yörüngesine fırlatılan GRACE, aralarındaki başlangıç uzaklığı  $220 \pm 50$  km olacak şekilde tasarlanmış, yerden yüksekliği yaklaşık olarak 500 km ve ekvatorla eğimi  $89.5^\circ$  olan dairesel bir yörüngede serbest olarak dolaşan ikiz uydulardan oluşmaktadır. Temel ölçme tekniği, yüksek yörüngeli uydudan alçak yörüngeli uyduya izleme (Satellite to Satellite Tracking in the high-low mode, SST-hl) ve alçak yörüngede bulunan uydular ile uydudan uyduya izleme (Satellite to satellite tracking-low to low, SST-II)'dir (Tapley vd. 2004). GRACE uydusu yörüngesi buzul kütlesi veya yer altı akiferi gibi su kütlesinden geçerken, iki uydunun arasındaki uzaklık değişimleri (K-Bant Range, KBR)  $10 \mu\text{m}$  doğruluğunda ölçülebilmektedir. Böylece her yörüngede ve zaman içinde elde edilen KBR ölçümlerinin nasıl değiştiği doğru bir şekilde izlenerek, bölgeye göre değişen yerçekimi değişikliklerini yüksek hassasiyetle tespit etmek mümkün olmaktadır. Uydular, yaklaşık 30 gün içinde tüm dünya yüzeyini aşarak periyotlarını tamamlamaktadır. Tüm bu çözümler, yaklaşık 300 km'lik bir mekânsal çözünürlük ile global ve bölgesel kütle değişimlerinin aylık haritalarını üretmek için kullanılmaktadır. GRACE uydularından elde edilen çözümler Seviye-0, Seviye-1, Seviye-2, Seviye-3 ve Seviye-4 olmak üzere farklı şekillerde yayımlanmaktadır. Seviye-3 verisi, çeşitli veri merkezleri tarafından değerlendirilmiş doğrudan Seviye-1B ya da Seviye-2 verisinden elde edilen yer üzerinde nokta-nokta, havza-havza ya da bölge-bölge verilen ilgili jeopotansiyel sinyali ifade etmektedir. Bir Seviye-3 veri türü olan Mascon çözümleri CSR (Center for Space Research), JPL (Jet Propulsion Laboratory) ve GSFC gibi merkezler tarafından yayımlanan  $1^\circ \times 1^\circ$  ya da  $3^\circ \times 3^\circ$  boyutlu yüzey parçalarına ilişkin EWT değişimlerinden oluşmaktadır. Aylık yer gravite alanı çözümlerinden elde edilen EWT değişimi de bu amaçla hidrolojik ve iklim değişikliği gibi çalışmalarda sıklıkla kullanılan GRACE ürünüdür.

EWT büyüklüğü, gözlem zamanı  $t$ 'ye bağlı trend ve periyodik bileşenlerden oluşan jeopotansiyel bir fonksiyondur. EWT değişimi zaman serisinin analizi için, doğrusal trend (yıllık değişim) ve periyodik sinyalleri içeren standart bir fonksiyonel model kullanılmaktadır:

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

Burada, a, sıfır eki; b, yıllık trend; c ve s ilgili sinüs sinyalinin kosinüs ve sinüs genlikleri ve  $\omega$ , sinüzoidal sinyalin açılmal frekansıdır; T periyoduna göre,  $\omega=2\pi/T$  şeklinde tanımlanır. Yıllık ve yarıyıllık etkileri içeren bu model literatürde standart yaklaşım olarak anılmaktadır. En küçük kareler kestirimi ile yapılan çözümler sayesinde su ya da buz kütle değişiminin doğrusal trendi, yani yıllık artma ve azalma miktarları belirlenebilmektedir.

Diğer yandan, jeodezik zaman serilerinde ölçüler arasındaki zamana bağlı korelasyonların modellemede göz önüne alınması gerektiği bilinmektedir. Bu korelasyonların ihmal edilmesi, zaman serisinden elde edilen kestirim sonuçlarını, özellikle de standart sapmaları etkileyebilmektedir. Böylece su kütlesi değişimini ifade eden trend parametresinin anlamlılığı istatistiksel olarak değişmekte olup, su potansiyeli bakımından yapılacak değerlendirmelerin güven aralıklarına ilişkin yorumlamalar da değişecektir. Burada önemli olan zamana bağlı korelasyonların varlığının araştırılması ve gerekli ise ölçülerin uygun şekilde ağırlıklandırılmasıdır. Zaman serilerinde spektral analiz, frekans etki alanının diğer bir deyişle spektral yoğunluk (power spectral density, PSD) fonksiyonunun incelenmesi olarak ele alınmaktadır (Chatfield 1996, Brockwell ve Davis 2016). Yani, ilgili frekans alanında verinin sadece beyaz gürültü ile yüklü olmadığı, renkli ya da güç yasası gürültüsü (colored noise-power law noise) olarak adlandırılan farklı spektral indekslerdeki gürültü türleri ile yüklü olduğu da düşünülmelidir.

Çıkış noktalarından itibaren zamana bağlı olarak sistemi etkileyen bu gürültüler, güç yasası eşitliğine göre,

$$PSD(f) = P_0 \left( \frac{f}{f_0} \right)^\kappa = L_0 f^\kappa \quad (2)$$

şeklindeki güç spektrumuna sahiptir (Welch 1967, Mandelbrot ve Van Ness 1968). Burada,  $\kappa$ , spektral indeks;  $P_0$  ve  $f_0$ , normalizasyon sabitleri ve  $L_0$ , oldukça yavaş değişen sabit bir fonksiyondur. Spektral indeksin değerine göre,  $\kappa=0$  beyaz gürültü (white noise, WN);  $\kappa=-1$  kırışma gürültüsü (flicker noise, FN) ve  $\kappa=-2$  rasgele yürüyüş gürültüsü (random walk noise, RWN) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca tam sayılı gürültü türlerinin dışında  $-3 < \kappa < -1$  aralığında olanlar kesirli Brownian hareketi (fractional Brownian motion),  $-1 < \kappa < 1$  aralığında olanlar kesirli beyaz gürültü hareketi (fractional gaussian noises) olarak adlandırılır.

Bir sinyaldeki gürültü türlerinin belirlenmesi için, PSD değerleri desibel (dB) birimine,  $10 \log(PSD)$  fonksiyonuyla dönüştürülür. Böylece Eşitlik 2'den,

$$10 \log(PSD) = 10 \log(L_0) + 10\kappa \log(f) \quad (3)$$

çıkar. Bu fonksiyon bir "a+bx" doğrusal fonksiyonu gibi düşünülebilir ve en küçük kareler kestirimi ile spektral indeks elde edilir. Bu nedenle periodogramlarda frekansın doğal logaritmasına karşılık dB birimindeki PSD değerleri çizdirilirse (oluşan grafiğe log-log grafiği adı verilir), ortaya çıkan eğrinin eğimi spektral indeksine karşılık gelir ve gürültünün türü spektrumda tanımlanabilir.

Zaman serisi analizinde renkli gürültü modelinin ele alındığı bir diğer yöntem ise otoregresif modellerin kullanılmasıdır. Bir çoklu regresyon modelinde ilgilenilen değişkenin tahmini, prediktörlerin bir doğrusal kombinasyonu ile sağlanmaktadır. Bir otoregresyon modelinde ise, ilgilenilen bir değişkenin tahmini değişkenin geçmiş değerlerinin doğrusal kombinasyonu kullanılarak yazılır. Otoregresyon terimi değişkenin yine kendisine göre bir regresyonu olduğunu ifade eder. Böylece, p. sıradan bir otoregresif model şöyle ifade edilir:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (4)$$

ve  $\varepsilon_t$  beyaz gürültüyü temsil eder. Bu çoklu regresyona benzer ancak, prediktör (independent value, örneğin zaman) olarak laglanmış  $y_t$  değerlerine göre bir regresyonu tanımlar. Bu model kısaca bir AR(p) modeli olarak adlandırılır.

Bir regresyonda tahmin edilecek değişkenin geçmiş değerlerini kullanmak yerine, bir hareketli ortalama modeli geçmişteki hataları bir regresyon gibi ele alır:

$$y_t = c + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (5)$$

Bu q. sıradan hareketli ortalama modeli MA(q) modeli şeklinde tanımlanmaktadır. Bir zaman serisinin herhangi bir dönemine ait değerinin, daha önceki belli sayıda gözlem değerinin ve hata terimlerinin bir bileşimi şeklinde açıklandığı durum ise ARMA(p,q) (AutoRegressive Moving Average), otoregresif hareketli ortalama modeli olarak ifade edilir. Burada, p ve q otoregresif bölümün ve hareketli ortalama bölümünün sırasını temsil eder. Böylece, hem otoregresif (AR) hem de hareketli ortalama modelinin (MA) özellikleri tek bir model altında ele alınmış olur. Otoregresyonlu farklandırma ve hareketli ortalama modelinin birleştirilmesiyle, ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) modeli elde edilir. ARIMA(p,d,q) modelinde d, ilk farklandırma derecesini ifade etmektedir. Modellerde geçen p ve q sırasının

belirlenmesinde ise otokorelasyon fonksiyonu (AutoCorrelation Function, ACF) ve bununla yakından ilgili kısmi otokorelasyon fonksiyonu (Partial Autocorrelation Function, PACF) çizimlerine bakılmaktadır. Hangi ARMA/ARIMA modelinin zaman serisine daha uygun olduğunun belirlenmesindeki bir diğer ölçüt de bilgi kriterleridir. Bunlar, Akaike bilgi kriteri (Akaike's Information Criterion, AIC), düzeltilmiş Akaike bilgi kriteri (Corrected AIC, AICc) ve Bayesian bilgi kriteri (Bayesian Information Criterion, BIC) olarak sıralanabilir. Burada en küçük bilgi kriteri değerine sahip olan model en uygun olandır şeklinde yorum yapılmaktadır (Box vd. 2015, Brockwell ve Davis 2016, Hyndman ve Athanasopoulos 2018).

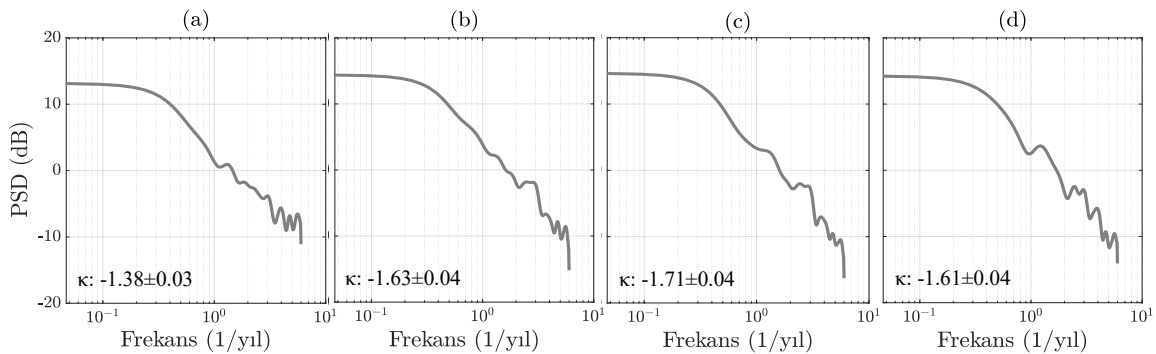
Bu bilgiler çerçevesinde MATLAB'de yazılan programda ARIMA modeller kullanılarak bir regresyon analizi yapılmıştır. Türkiye'de seçilen 4 farklı hidrolojik havzada su kütlesi değişiminin trendi belirlenmiş ve en uygun modele göre zaman serisinde ileriye yönelik tahminler yapılmıştır.

### 3. Sayısal Uygulama

Bu bölümde çalışma alanı olarak Türkiye'deki Batı Karadeniz, Sakarya, Konya-Kapalı ve Fırat-Dicle havzaları seçilmiştir. 2003-2016 periyodunu kapsayan GSFC Mascon veri seti kullanılarak, otoregresif modellerin zamansal korelasyonlar dikkate alındığı durumda trend kestirimi ve güven aralığı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

GRACE-EWT zaman serilerinin diğer jeodezik zaman serilerinde olduğu gibi zamansal korelasyonların meydana getirdiği renkli gürültü ile yüklü olduğu düşünülmektedir. Bu renkli gürültünün varlığı spektral anlamda periyodogram, pwelch gibi farklı yöntemlerle gözlenebilmektedir. Daha önce yapmış olduğumuz çalışmalardan edindiğimiz bilgilere göre GRACE çözümlerinden elde edilen zaman serilerinde gürültü karakteristiği kesirli Brownian hareketi yani spektral indeksi -1 ile -3 arasında değişen gruba dahildir. Bilinen tam sayılı gürültülerden ise çoğunlukla kırpışma gürültüsünün özelliklerini taşımaktadır. Güneş ve Aydın (2019)'da GSFC GRACE Mascon-EWT zaman serilerinin spektral indeks değerleri global ölçekteki havzalar için ortalama  $-1,30 \pm 0,30$  olarak belirlenmiştir ve bu da kırpışma gürültüsüne yakın özellikte olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada da Türkiye'de seçilen havzalarda spektral indeks değerleri kestirilmiştir. Şekil 1'de sırası ile Batı Karadeniz, Sakarya, Konya-Kapalı ve Fırat-Dicle havzalarına ait çözümlerin log-log grafiği sunulmaktadır. Veri seti sadece beyaz gürültü ile yüklü olsaydı log-log grafiğinde eğimin sıfır olması beklenirdi. Ancak, grafiğin negatif yönde eğimli olması bu zaman serisinin kırpışma/rasgele yürüyüş gürültüsü gibi bir renkli gürültü içerdiğini göstermektedir. Belirlenen renkli gürültü yapısının zaman serisi analizine dahil edilmesinde ise farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Örneğin varyans bileşenlerinin kestirim yöntemleri ile renkli gürültü büyüklükleri belirlenmekte ve stokastik yapının gürültü türüne uygun şekilde tasarımı sağlanmaktadır.

Zaman serisindeki gürültü karakteristiğinin dikkate alındığı çözümlerden bir diğeri de otoregresif süreçler ile yapılan regresyon analizidir. Otoregresif hata modelleri kısaca otoregresif modeller, veri setinin yüklü olduğu gürültü türüne uygun olacak şekilde seçildiğinde yapılan kestirimlerde çözümlerden elde edilen düzeltmelerin sadece beyaz gürültü ile yüklü olduğu duruma geldiği bilinmektedir. Böylece, zaman serisinden elde edilen parametrelerin anlamlılığı renkli gürültü varlığına uygun şekilde yorumlanabilmektedir. Her zaman serisinin farklı özellikte olması işlemlerde otomatik bir akıştan ziyade veri-sonuç odaklı çalışmasını gerektirmektedir. Örneğin, ARMA(0,0) modelinin veri setinin sadece beyaz gürültü ile yüklü olduğu varsayımından elde edilen kestirimlere; ARIMA(0,1,0) modelinin ise rasgele yürüyüş gürültü türünü temsil ettiği çözümler sağladığı literatürde zaman serisi alanında yapılan tüm çalışmalarda vurgulanmıştır. AR(1) modelinin seride kırpışma gürültüsü olduğu varsayımı altında elde edilen sonuçlara yakın çözümler verdiği literatürde belirtilmektedir. Bu çalışmada ise, Türkiye'de seçilen havzalarda AR(1,1) modeli benimsenerek incelemeler yapılmıştır.



Şekil 1. Havzalara ait log-log grafikleri ve spektral indeksler (a:Batı Karadeniz, b:Sakarya, c:Konya-Kapalı, d:Fırat Dicle)

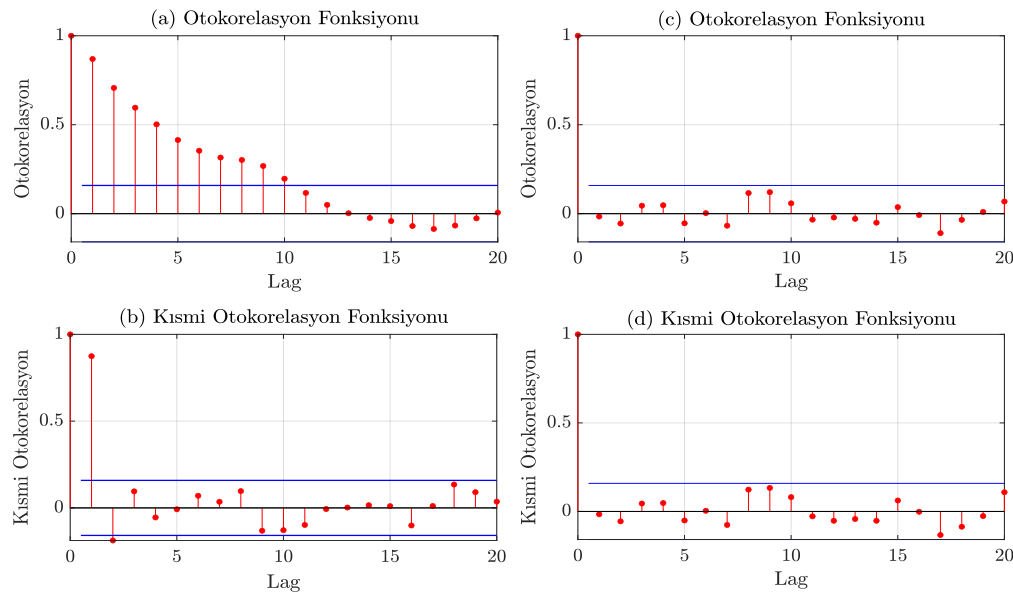
Gürültü karakterinin incelenmesinden sonra farklı özellikte otoregresif hareketli ortalama modelleriyle havzalar için analizler yapılmıştır. En uygun modelin belirlenmesindeki aşamalardan ilki, bilgi kriterleri değerlerinin

karşılaştırılmasıdır. En küçük değere sahip model, en iyi uyan model olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada ARMA(1,1) modeli diğer modellere göre en küçük bilgi kriterine sahiptir. Daha sonraki aşamada ise, otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon grafikleri, düzeltmeler ve diğer parametreler ile bilgi kriterine göre seçilen modelin doğruluğu desteklenmektedir. Tablo 1’de analizlerde kullanılan modeller ile elde edilen trend kestirimleri gösterilmektedir. Sonuçların kullanılan model ve renkli gürültü karakteristiği ile ilişkisi kurulduğunda, ARMA(1,1) ile kırışma; ARMA(0,1,0) ile rasgele yürüyüş gürültüsü içeren stokastik modelden elde edilmesi beklenen standart sapma değerlerine ulaşılmaktadır. Standart sapma bilgisinin 20 kata kadar artabileceği görülmekte olup, bu durum trendin istatistiksel olarak anlamlılığının yanlış yorumlanmasına neden olmaktadır.

Tablo 1. Modeller ve elde edilen sonuçlar

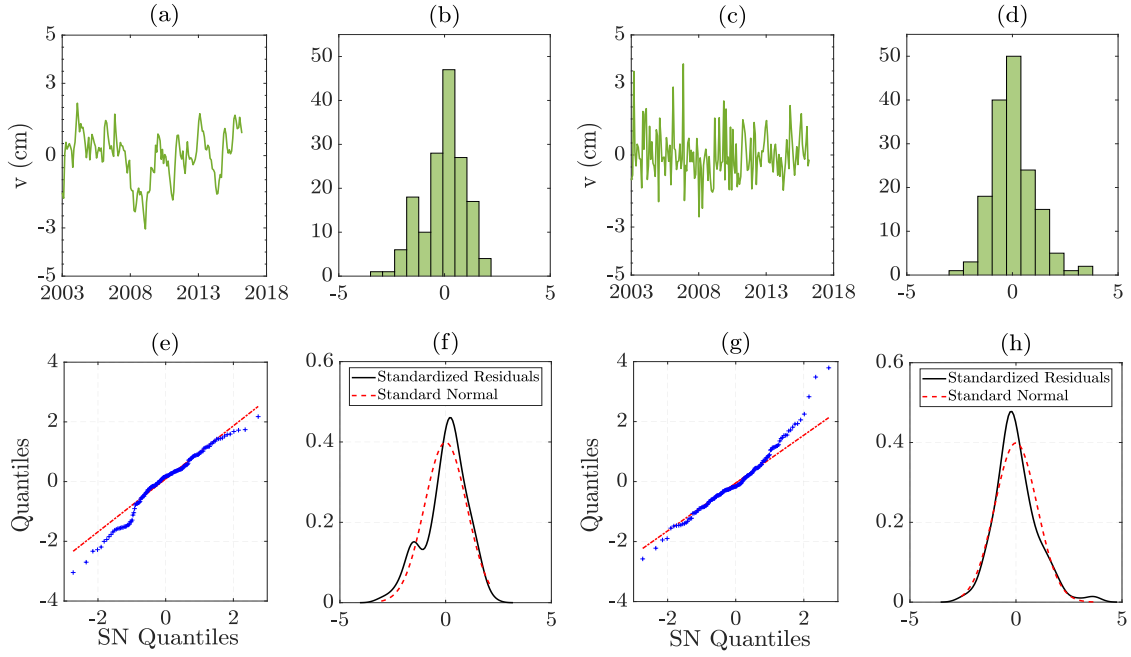
Model	Batı Karadeniz		Sakarya		Konya-Kapalı		Fırat-Dicle	
	Trend	Standart Sapma	Trend	Standart Sapma	Trend	Standart Sapma	Trend	Standart Sapma
ARMA(0,0)	0,3755	0,0784	0,1820	0,0899	-0,0477	0,0895	-0,9488	0,0859
ARMA(1,1)	0,3311	0,2666	0,1388	0,3216	-0,1141	0,2937	-0,9365	0,2848
ARMA(1,0)	0,3398	0,2507	0,1105	0,3662	-0,1459	0,3573	-0,9491	0,3444
ARMA(0,1)	0,3832	0,0915	0,1839	0,1059	-0,0581	0,1019	-0,9357	0,0933
ARIMA(0,1,0)	0,4709	1,7695	0,0148	1,9465	-0,2941	1,8918	-0,3331	2,1920
ARIMA(1,1,0)	0,4533	1,5703	0,0079	2,1257	-0,3517	2,1555	-0,3947	2,4957
ARIMA(0,1,1)	0,4514	1,4986	0,0087	2,1689	-0,3858	2,2446	-0,4234	2,5590
ARIMA(1,1,1)	0,1953	0,2458	0,0392	2,1117	-0,3704	2,1349	-0,4320	2,4539

Otoregresif hareketli ortalamalar modeli kullanılarak sonuçların elde edilmesinde kontrol edilen bir diğer bilgi olan ACF ve PACF çizimleri Şekil 2’de Fırat-Dicle havzası için verilmiştir. Veri setinin sadece beyaz gürültü içerdiği varsayımı altında (aynı zamanda ARMA(0,0) modeli ile özdeştir) elde edilen ACF ve PACF çizimi Şekil 2a ve 2b’de gösterilmiştir. İlgili laglardaki korelasyon değerlerinin güven aralığının dışında olması ve gösterdiği düşüş eğilimi veri setinin içerdiği gürültü yapısı hakkında bilgi sağlamaktadır. ARMA(1,1) modelinden elde edilen sonuçlar da Şekil 2c ve 2d’dedir. Burada, ACF ve PACF çizimlerinin güven sınırının içinde kalması kullanılan modelin zaman serisinin stokastik yapısına uygun olduğunu göstermektedir.



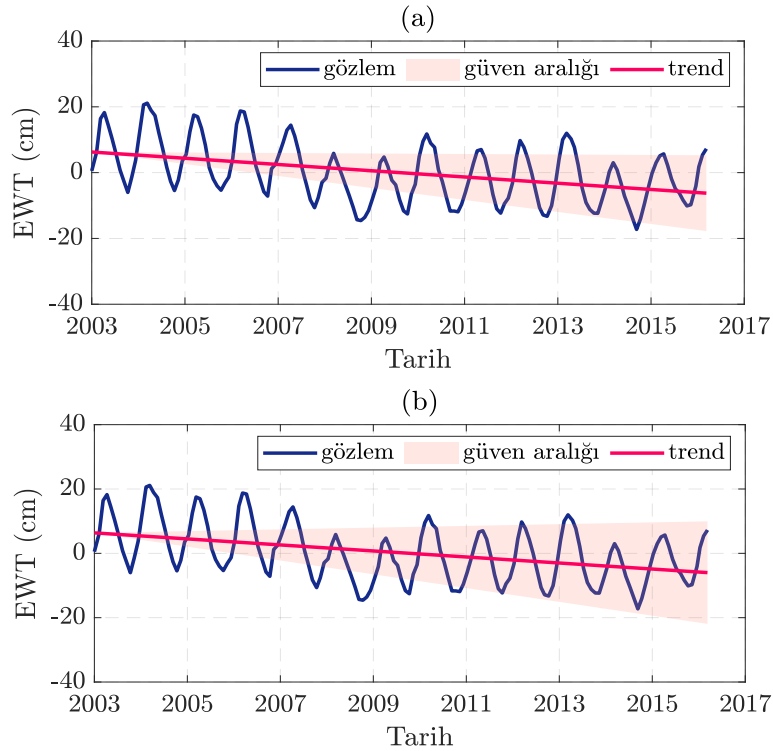
Şekil 2. (a)-(b) ARMA(0,0) ve (c)-(d) ARMA(1,1) modellerine ait ACF-PACF çizimleri (Fırat-Dicle örneği)

Şekil 3’te verilen grafikler de seçilen modelin uygunluğu hakkında ek bilgi sağlamaktadır. Şekil 3a ve 3c’deki düzeltmeler incelendiğinde, ARMA(1,1) modelinden elde edilenler (Şekil 3c) beyaz gürültüyü temsil etmektedir. Benzer şekilde Şekil 3d’de gösterilen histogram da normal dağılıma daha uygun olarak elde edilmiştir. QQ grafik çizimlerinde ise modelin uygunluğu, doğrusal olarak bir çizgi üzerinde sonuçların elde edilebilmesi ile yakından ilgilidir. Burada da ARMA(1,1)’den elde edilen çizimde (Şekil 3g) daha fazla noktanın doğru üzerinde olduğu görülmektedir. Böylece tüm kriterler bir arada değerlendirildiğinde en uygun modelin ARMA(1,1) olarak seçilmesine karar verilmiştir.



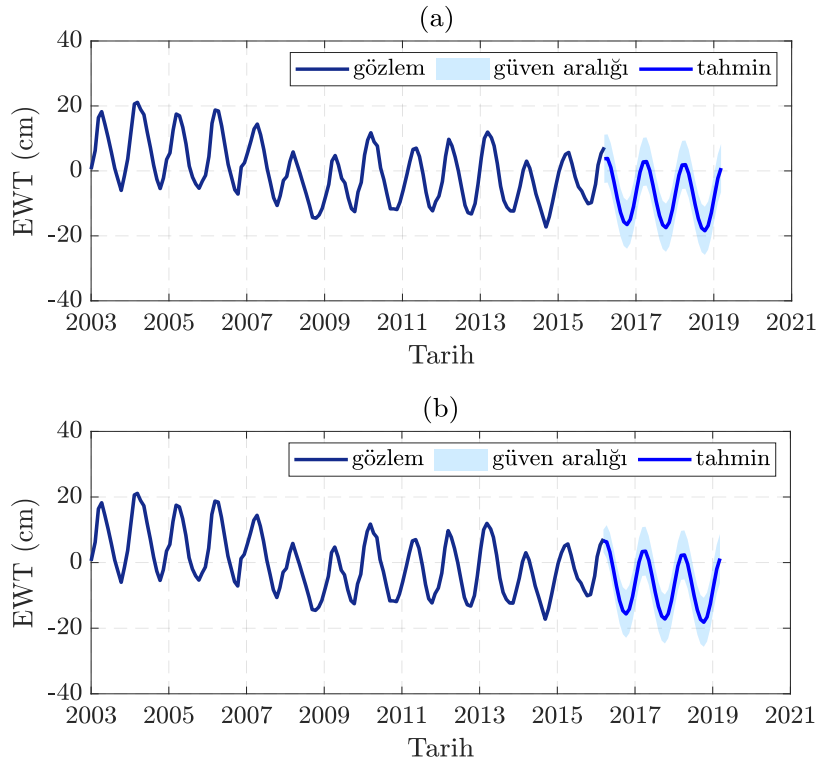
Şekil 3. (a)-(b)-(e)-(f) ARMA(0,0) ve (c)-(d)-(g)-(h) ARMA(1,1) modellerine ait bilgi kriterleri (Fırat-Dicle örneği)

Seçilen modelden elde edilen trend kestirimine ait güven aralığı grafikleri ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Tablo 1'de Fırat-Dicle havzasındaki değerler ve Şekil 4 incelendiğinde, ARMA(0,0) ve ARMA(1,1)'den elde edilen trend kestirimlerinin yakın olduğu, ancak standart sapma bakımından yaklaşık 3 kat daha büyük değerler elde edildiği görülmektedir. Daha gerçekçi güven aralıkları ile trendin belirlenmesinde ve su kütlesindeki değişimin anlamlılığının yorumlanmasında bu durumun göz önüne alınması önem ifade etmektedir.



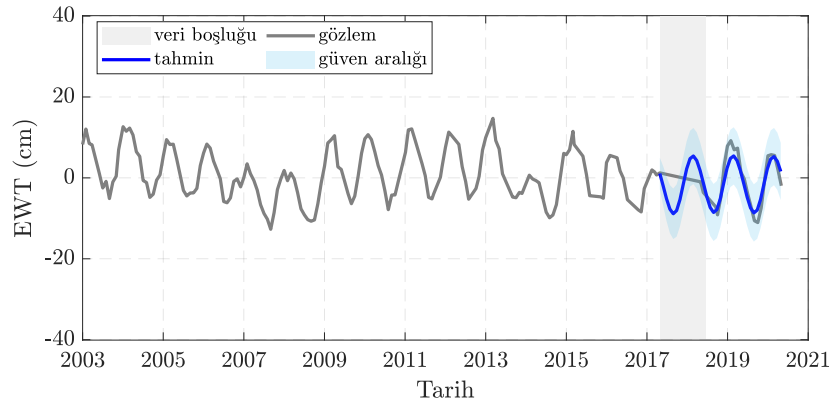
Şekil 4. (a)ARMA(0,0) ve (b)ARMA(1,1) modellerine ait trend kestirimleri ve güven aralığı (Fırat-Dicle örneği)

GSFC GRACE Mascon çözümleri 2003-2016 periyodunda olduğundan zaman serisinde 3 yıllık bir ileri tahmin yapılmıştır. Otoregresif modeller ile ileriye yönelik yapılan tahminlerde, modelin güven aralığını kestirilebilmektedir. Şekil 5'te hem ARMA(0,0) hem de ARMA(1,1) modeli altında ele alınan zaman serileri gösterilmiştir. Şekil 5a'da ileri tahmin için dalganın zaman serisi ile bütünleşmediği, Şekil 5b'de ise zaman serisinin devamı şeklinde bir dalga yapısı olduğu ortaya çıkmıştır. İleriye yönelik yapılan tahminler sayesinde çalışılan bölgede su kütlesinin değişimi hakkında güven aralığı ile bilgi sağlanarak, su potansiyeli ve kuraklık yönetimi gibi konularda izlenecek yol için de önemli bir bilgi sağlanmaktadır.



Şekil 5. (a)ARMA(0,0) ve (b)ARMA(1,1) modellerinde ileriye yönelik tahminler ve güven aralığı (Fırat-Dicle örneği)

Otoregresif süreçler ile yapılan ileriye yönelik tahminlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi amacıyla GRACE-FO veri setini içeren JPL Mascon çözümleri Batı-Karadeniz ve Konya-Kapalı havzalarında incelenmiştir (JPL Mascon çözümlerine ilişkin açıklamalar Watkins vd. (2015), Wiese vd. (2016) ve Wiese vd. (2018)'de bulunabilir.). Burada tahminlerin incelenmesinin yanı sıra, 2017-2018 periyodunda GRACE ve GRACE-FO veri setlerinde bulunan veri boşluğu da otoregresif modeller yardımı ile doldurulabilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, her iki havzada elde edilen tahminlerin güven aralıklarının gözlenen zaman serisini kapsadığı görülmüştür. Şekil 6'da Konya-Kapalı havzasındaki JPL Mascon çözümlerine ilişkin örnek zaman serisi grafiği verilmiştir.



Şekil 6. JPL Mascon zaman serisi ve ileriye yönelik tahminler (Konya-Kapalı havzası örneği)

Bununla birlikte, diğer GRACE çözümleri ile Mascon çözümünün karşılaştırılması amacıyla 2003-2016 periyodunu kapsayan Fırat-Dicle havzasına ait DDK2 veri setinde de otoregresif modeller kullanılarak analizler yapılmıştır. DDK2 veri setinin uygulanan filtre boyutu bakımından Mascon çözümlerine en yakın çözünürlükte olduğu bilinmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde GSFC Mascon zaman serisi ile benzer özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada GRACE-EWT zaman serilerinin otoregresif süreçler ile analizi incelenmiştir. Türkiye’de seçilen 4 havzadaki su kütlesi değişim trendinin kestirilmesinde renkli gürültünün etkileri farklı ARMA/ARIMA modeller ile analiz edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda ARMA(1,1) hata gürültü modelinin veri setine en iyi uyan yaklaşım olduğuna karar verilmiştir. ARMA(0,0) ve ARMA(1,1) modellerinden elde edilen su kütlesi değişim trendinin standart sapması karşılaştırıldığında 3 kata varan bir oran olduğu görülmüştür. Ayrıca, standart yaklaşım varsayımı altında yapılan analizlerde, güven aralığı pozitif eğimli bir trendi gösterirken, uygun stokastik modelin, yani gürültü türünün dikkate alındığı yaklaşımda güven aralığı eksi ve artı eğimli bir trend belirsizliğini gösterebilmektedir. Bu durum, özellikle Türkiye’nin orta ve batı bölgeleri için söz konusudur. Ancak buradan zamansal korelasyonların etkilerinin daha kötü sonuçlar verdiği anlamlı çıkarılmamalıdır. Bu sonuçlar, hidrolojik değişim konusunda literatürdeki farklı değerlendirmelerin bir yansıması olarak da görülebilmektedir. Bir başka deyişle, zamansal korelasyonların dikkate alınması sayesinde sinyal genliği küçük olan bölgelerde daha temkinli yorumlar yapılabilmektedir. Havzalarda meydana gelen kütle değişim trendlerinin yorumlanmasında bu durum önemlidir; çünkü, bir havzadaki değişimin kuraklık açısından değerlendirilmesindeki etkenlerden biri de trend değerinin anlamlılığına ilişkin bilgi sahibi olmaktan geçmektedir. Bununla birlikte, otoregresif modellerin uygulanması veri setindeki uzun boşlukların doldurulmasını ve ileriye yönelik tahminlerin güven aralığı ile elde edilmesini olanaklı kılmaktadır. Daha gerçekçi güven aralığı kestirimleri ile yapılan bu yorumlamalar, su yönetimi ve ileriye dönük planlamaların yapılmasında önemli olmaktadır.

Özellikle GRACE-FO uydu verisinin eklenmesi ile zaman serisinin uzunluğu artmaya devam etmektedir. Böylece hidrolojik olayları açıklayan sinyal daha iyi ortaya çıkarılacak ve gürültü karakteristiğinin belirlenmesi çalışmaları da hız kazanacaktır.

#### Kaynaklar

- Baur O. (2012) On the computation of mass-change trends from GRACE gravity field time-series. *Journal of Geodynamics* 61, 120-128.
- Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. (2015) *Time series analysis: Forecasting and control*, 5th edition. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Brockwell P.J., Davis R.A. (2016) *Introduction to time series and forecasting*, 3rd edition. Springer, New York.
- 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, 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, 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.
- Chatfield C., (1996) *The analysis of time series: An introduction*, 5th edition, Chapman and Hall CRC, London.
- Forsberg R., Sørensen L. ve Simonsen S. (2017) Greenland and Antarctica ice sheet mass changes and effects on global sea level. *Surveys in Geophysics* 38(1), 89-104.
- Güneş Ö., Aydın C. (2019) Noise characteristics in GRACE-Mascon solutions. *International Symposium On Applied Geoinformatics*, Kasım 7-9, İstanbul.
- Hyndman R.J., Athanasopoulos G. (2018) *Forecasting: principles and practice*. 2nd edition. OTexts.
- King M.A., Watson C.S. (2020) Antarctic surface mass balance: Natural variability, noise, and detecting new trends. *Geophysical Research Letters* 47(12), e2020GL087493.
- Loomis B.D., Luthcke S.B., Sabaka T.J. (2019) Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of geodesy*, 93(9), 1381-1398.



- 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.
- Mandelbrot B., Van Ness J. (1968) Fractional brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review* 10, 422-437.
- 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. *Journal of geodesy* 92(3), 299-319.
- Schmidt R., Schwintzer P., Flechtner F., Reigber Ch., Güntner A., Döll P., Ramillien G., Cazenave A., Petrovic S., Jochmann H., Wunsch J. (2006) GRACE observations of changes in continental water storage. *Global and Planetary Change* 50, 112-126.
- Swenson S., Wahr J. (2003) Monitoring changes in continental water storage with GRACE. *Space Science Reviews* 108, 345-354.
- 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).
- Wahr J., Swenson S., Velicogna, I. (2006) Accuracy of GRACE mass estimates, *Geophysical Research Letters* 33(6).
- 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.
- 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.
- Welch P.D., (1967) The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics* 15(2), 70-73.
- Wiese D.N., Landerer F.W., Watkins M.M. (2016) Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. *Water Resources Research* 52(9), 7490-7502.
- Wiese D.N., Yuan D.N., Boening C., Landerer F.W., Watkins M.M. (2018) JPL GRACE Mascon ocean, ice, and hydrology equivalent water height release 06 coastal resolution improvement (cri) filtered version 1.0. ver. 1.0. PO.DAAC, CA, USA. [Erişim tarihi: 20-03-15], <http://dx.doi.org/10.5067/TEMSC-3MJC6>.
- 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.
- Zhang B., Liu L., Yao Y., van Dam T., Khan S.A. (2020) 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.