



GRACE zaman serilerinin gürültü karakteri analizi

Özge Güneş^{*1}, Cüneyt Aydın¹

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, ozgeg@yildiz.edu.tr; caydin@yildiz.edu.tr

Kaynak Göster: Güneş, Ö., & Aydın, C. (2024). GRACE zaman serilerinin gürültü karakteri analizi. Geomatik, 9 (1), 45-53

<https://doi.org/10.29128/geomatik.1307208>

Anahtar Kelimeler

GRACE
Renkli Gürültü
Zamansal Korelasyon
Stokastik Model
Welch Yöntemi

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.07.2023
Revize: 22.08.2023
Kabul: 30.08.2023
Yayınlanma: 05.02.2024



Öz

GRACE uydu sistemi 2002'den beri toplam su bütçesi değişimlerinin küresel ölçekte izlenmesine olanak sağlamaktadır. Eşdeğer su kütlesi değişimi cinsinden ifade edilen toplam su bütçesi zaman serilerinin analizinde trend ve mevsimsel sinyalleri içeren fonksiyonel model olan harmonik regresyon yaklaşımı kullanılır. Bu modelde gözlemlerin eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz olduğu varsayılmaktadır. Yani, stokastik modelin sadece beyaz gürültüden oluştuğu kabul edilir. Ancak, zaman serisi spektral anlamda analiz edildiğinde zamansal korelasyonların var olduğu ve renkli gürültüyü meydana getirdiği görülmektedir. Bu çalışmada, söz konusu bu gürültüye ilişkin spektral güç yoğunluk değerleri 2002-2022 periyodunu kapsayan, aylık örnekleme Goddard Space Flight Center mascon veri seti kullanılarak analiz edilmiştir. Toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinde negatif spektral indekse sahip renkli gürültü yapısı görülmüştür. Küresel ölçekte gerçekleştirilen analizlerde karasal alanları temsil eden mascon (mass concentration) zaman serilerinde kırışma gürültüsüne benzer özellikte kesirli Brownian güç spektrumunda tanımlı renkli gürültü olduğu ortaya çıkarılmıştır. Aynı zamanda küresel aylık harmonik katsayılarından filtrelenerek üretilen DDK (Decorrelation Filter) veri seti ile de çalışılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Analysis of GRACE time series noise characteristics

Keywords

GRACE
Colored Noise
Temporal Correlation
Stochastic Model
Welch Method

Research Article

Received: 07.07.2023
Revised: 22.08.2023
Accepted: 30.08.2023
Published: 05.02.2024

Abstract

Total water storage variations have been monitored using the GRACE satellite system since its launch in 2002. In the analysis of total water storage time series, which are defined in terms of equivalent water thickness, the harmonic regression method, a functional model incorporating trend and seasonal signals, is used. In this model, the observations are presumed to be equally weighted and uncorrelated. In other words, only white noise is included in the stochastic model. However, a spectrum analysis of the time series reveals temporal correlations, which result in colored noise. In this study, the power spectral of these colored noise characteristics is examined using the Goddard Space Flight Center mascon dataset with monthly sampling from 2002 to 2022. The total water storage change time series shows a colored noise pattern with a negative spectral index. In global analyses, it has been shown that the mascon (mass concentration) time series representing terrestrial regions has a characteristic of colored noise defined in the fractional Brownian power spectrum, which is similar to flicker noise. Furthermore, the DDK (Decorrelation Filter) dataset, which is derived from monthly spherical harmonic coefficients, is also used, and similar results are obtained.

1. Giriş

Günümüzde değişen iklim koşulları ve küresel ısınmanın etkilerinin artmasıyla su kütlesi değişimlerinin analizi çalışmaları bilimsel olarak önemli bir yer tutmaktadır. 2002'den bugüne, GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve onun devamı olan GRACE-FO (GRACE-Follow On), küresel ve bölgesel ölçeklerde toplam su bütçesi (TSB) değişimini izlemek için kullanılmaktadır. GRACE uydu sistemi karalarda, okyanuslarda ve özellikle buzullarda hidrolojik değişimlere karşı duyarlı gözlemler sağlamaktadır (Humphrey ve ark., 2016; Rodell ve ark., 2018; Tapley ve ark., 2019).

GRACE TSB zaman serilerinin analizinde doğrusal trend ve mevsimsel sinyalleri içeren fonksiyonel model kullanılmaktadır (Schmidt ve ark., 2008; Steffen ve ark., 2009). Gözlemlerin eşit ağırlıklı ve korelasyonsuz kabul edildiği bu analizde stokastik model veri setinde yalnızca beyaz gürültü olduğu varsayımı üzerine kurulmaktadır (Williams ve ark., 2014). Ancak günümüzde jeodezik zaman serilerinin zamansal korelasyondan kaynaklanan renkli gürültüye sahip olduğu bilinmektedir. Renkli gürültü, zaman serisindeki değerlerin zamana bağlı olarak korelasyonlu olmasına neden olur. Bu nedenle zaman serilerinde renkli gürültü, zamansal korelasyonlu gürültü olarak da adlandırılır. Spektral indeksin değerine göre beyaz gürültü, kırpışma gürültüsü, rasgele yürüyüş gürültüsü, mavi gürültü ve gri gürültü gibi renkli gürültü türleri zaman serilerinde yer almaktadır. Örneğin, beyaz gürültü farklı frekanslarda sabit bir spektral yoğunluğa sahipken; kırpışma gürültüsü belirli bir frekans aralığında gürültü frekansıyla ters orantılı olarak değişen bir spektral yoğunluk fonksiyonuna sahiptir. Benzer şekilde, rasgele yürüyüş gürültüsü de belirli bir frekans aralığında, gürültü frekansının karesiyle ters orantılı olarak değişen bir spektral yoğunluk fonksiyonuna sahiptir. Bu bağlamda, beyaz gürültü frekans alanında belirgin bir eğilim göstermeyen bir spektral yoğunluğa sahipken; renkli gürültü türleri, beyaz gürültüden farklı olarak ilgili frekans aralığında belirgin bir eğime sahiptir.

Birçok jeodezik zaman serisinde, bu renkli gürültü türlerinden kırpışma ve rasgele yürüyüş gürültüsü beyaz gürültüyle birlikte yer almaktadır (Williams, 2003). Kırpışma gürültüsünün, güneş lekeleri değişiminden, yer dönme parametrelerindeki düzensizliklerden, atomik saat zaman hatalarından rasgele yürüyüş gürültüsünün ise lokal nokta hareketlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunların yanı sıra iklim ve deniz seviyesi değişimleri, yer kabuğu hareketleri gibi jeofiziksel süreçlerin de jeodezik zaman serilerinde renkli gürültü yapısına katkı sağladığı söylenebilmektedir (Gardner, 1978; Mandelbrot, 1983; Williams, 2003; Amiri-Simkooei ve ark., 2007; Williams ve ark., 2014).

Bu kapsamda GNSS (Global Navigation Satellite Systems) zaman serilerinde zamansal korelasyonları ve renkli gürültü yapısını dikkate alan pek çok çalışma literatüre kazandırılmıştır (Williams, 2003; Amiri-Simkooei ve ark., 2007; Santamaria-Gomez ve ark., 2011; Bos ve ark., 2014; Bogusz ve Klos, 2016; Langbein, 2017; Başçiftçi, 2021; Aydın ve ark., 2021). Mao ve ark. (1999), küresel olarak dağılmış 23 noktadan oluşan bir GPS

(Global Positioning System) ağında 3 yıldan oluşan veri setine spektral analiz uygulamıştır. Zaman serilerinin beyaz gürültünün yanı sıra kırpışma gürültüsü içerdiğini göstermiş ve buna uygun bir stokastik yapı kurmuştur. Santamaria-Gomez ve ark. (2011), beyaz gürültü ile güç yasası spektrumunda yer alan renkli gürültü modeli kombinasyonunun GNSS zaman serilerinin stokastik davranışının sadece beyaz gürültüye oranla daha iyi şekilde tanımladığını göstermiştir. Langbein (2012), literatürdeki diğer çalışmalara bir katkı olarak, beyaz gürültü ve güç yasası spektrumunda yer alan renkli gürültü kombinasyonu kullanıldığında, tahmin edilen belirsizliklerin yalnızca beyaz gürültüden oluşan bir modele göre daha gerçekçi bir şekilde elde edilebileceğini öne sürmüştür. GNSS çalışmalarının yanı sıra, Bos ve ark. (2014), renkli gürültünün deniz seviyesi zaman serilerindeki etkilerini incelemiştir. Diğer çalışmalara benzer olarak renkli gürültü yapısının dikkate alınmadığı durumda, doğrusal trend belirsizliğinin 1,5-2 kat daha az tahmin edildiğini göstermişlerdir. Belirtildiği gibi, pek çok jeodezik zaman serilerinde zamansal korelasyonlar incelenmiştir. Ancak diğer jeodezik zaman serilerinin aksine GRACE zaman serilerinde zamansal korelasyonlara daha az odaklanılmıştır. Williams ve ark. (2014), Guo ve ark. (2018) King ve Watson (2020) ile Gunes ve Aydin (2022), GRACE zaman serilerinde zamansal korelasyonlardan bahseden sınırlı sayıdaki çalışmalardandır.

GRACE zaman serilerinde gerçekleştirilen çalışmaların öncülerinden biri olan Williams ve ark. (2014)'te renkli gürültü yapısının etkilerini Antarktika'daki toplam su bütçesi değişimi zaman serileri üzerinden araştırmıştır. Doğrusal trendin yanı sıra modele ivme parametresi de eklenmiştir. Zaman serilerinde kırpışma gürültüsünden rasgele yürüyüş gürültüsüne doğru değişen bir aralıkta renkli gürültü varlığı tespit edilmiştir. Daha sonrasında ise bu gürültü türlerinin parametre kestirimi üzerindeki etkileri otokorelasyon modellerinden olan AR(1) modeli kullanarak incelenmiştir. Analizlerin Antarktika bölgesine ait zaman serilerine uygulandığını ancak diğer bölgeler için de benzer zamansal korelasyonların ve gürültü yapısının var olduğunu vurgulamışlardır. Literatürde 2020'li yıllara kadar bu konu ile ilgili katkı veren çalışmalar pek yer almamıştır. King ve Watson (2020) Antarktika özelinde bir çalışma yapmış ve RACMO2.3p2 iklim modelinden türetilen kütle değişimi zaman serilerinde zamansal korelasyonların dikkate alındığı otoregresif modellerden AR modeli kullanarak, trend parametresinin belirsizliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Söz konusu çalışmada, renkli gürültü karakteri ayrıca incelenmemiştir. Bu amaçla, bu çalışmada GSFC (Goddard Space Flight Center) veri merkezi tarafından yayımlanan mascon (mass concentration) çözümleri kullanılarak, GRACE gözlemlerinden türetilen toplam su bütçesi değişimi zaman serilerinde gürültü karakteri 2002-2017 ve 2002-2022 periyodu için analiz edilmiştir. Sonuçlar küresel harmonik katsayılarından elde edilen DDK (Decorrelation Filter) zaman serileri ile de karşılaştırılmıştır. DDK zaman serileri GRACE Seviye-2 ürünü olan aylık küresel harmonik katsayılarından hesaplanan filtrelenmiş bir veri setidir ve toplam su kütlesi değişimini temsil etmektedir.

Veri setinin filtreleme adımları ve kullanılan algoritmalar [Kusche ve ark. \(2009\)](#)'da açıklanmaktadır. DDK filtrelemesi ile kuzey-güney yönlü şerit hatalarının büyük bir kısmı giderilirken, hidrolojik sinyalin korunması da amaçlanmaktadır. DDK zaman serileri DDK1'den DDK8'e kadar farklı filtre yarıçaplarıyla farklı mekânsal çözünürlüklerde üretilebilir. Örneğin DDK1 filtresi 530 km, DDK2 340 km ve DDK3 240 km yarıçaplı Gauss filtresine eşdeğer bir mekânsal çözünürlüğe sahipken ([Flehtner ve ark., 2014](#)); DDK5 ve DDK7 filtrelerinin sırasıyla yaklaşık 180 km ve 145 km yarıçaplı Gauss filtresine eşdeğer olduğu bilinmektedir ([Gauer ve ark., 2023](#)). Çalışma, veri setinin ve renkli gürültünün analizinde uygulanan adımların verildiği Materyal ve Yöntem; analiz sonuçlarının tartışıldığı Bulgular ile devam etmekte ve Sonuçlar bölümü ile tamamlanmaktadır.

2. Yöntem ve Veri Seti

GRACE ve devamı olan GRACE-FO uydusu sistemi 2002'den günümüze küresel ölçekte TSB değişimini yaklaşık 300 km'lik bir uzamsal çözünürlükle izlemektedir. GRACE uydusu görevini 2017 yılında tamamlamış olup, 2018'den beri de GRACE-FO uydusu veri sağlamaktadır. Her iki uydusu sisteminin tasarımı benzerdir ve çalışma prensipleri Dünya yörüngesindeki iki ikiz uydusu arasındaki mesafe değişikliklerini (K-Band Ranging, KBR) ölçmek üzerine kurulmuştur ([Tapley ve ark., 2019](#)). GRACE uydusu sistemlerinden elde edilen gözlemler hidrolojik olaylara ve bunların ilgili zamansal değişimlere karşı yüksek hassasiyet sağlar. Böylece yeraltı suyu, yüzey suyu, kar ve buzullardan gelen su kütlesi dahil olmak üzere karasal hidrosferdeki toplam su kütlesinin varyasyonlarını kapsayan TSB değişimleri izlenebilmektedir. Bu gözlemler, Seviye-0'dan Seviye 4'e, farklı şekillerde yayınlanmaktadır. Aylık küresel harmonik katsayılarından üretilen DDK çözümleri Seviye-2 verilerinin, mascon ise Seviye-3 verilerinin en son versiyonudur. Mascon çözümleri, gridler, havzalar ya da bölgelere göre filtrelenmiş, düzeltilmiş ve kullanıma hazır TSB değişimleri veri seti olarak sunulmaktadır ([Luthcke ve ark., 2013](#); [Loomis ve ark., 2019](#)).

TSB değişimi, gözlem zamanı t 'ye bağlı jeopotansiyel bir fonksiyondur. Eşdeğer su kütlesi değişimi cinsinden (cm) ifade edilen TSB zaman serilerinin analizinde trend ve periyodik sinyalleri içeren standart bir fonksiyonel model kullanılmaktadır ([Eşitlik 1](#)):

$$y(t_j) + e_j = a + bt_j + \sum_{i=1}^2 \{c_i \cos(\omega_i t_j) + s_i \sin(\omega_i t_j)\} \quad (1)$$

Burada, y , TSB değişimleri olmak üzere, a , sıfır eki; b , yıllık trend; c ve s ilgili sinüs sinyalinin kosinüs ve sinüs genlikleri, e modelin toplam hatası ve ω , sinüzoidal sinyalin açısal frekansıdır. T periyoduna göre, $\omega = 2\pi/T$ şeklinde tanımlanmaktadır. En küçük kareler kestirimi ile yapılan çözümler sayesinde toplam su bütçesindeki meydana gelen kütle değişiminin doğrusal trendi, yani yıllık artma ve azalma miktarları belirlenebilmektedir.

[Eşitlik \(1\)](#)'den en küçük kareler yöntemine göre çözüm aşağıdaki biçimde gerçekleştirilir ([Eşitlik 2-5](#)):

$$\begin{pmatrix} \vdots \\ \Delta y(t_j) \\ \vdots \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \vdots \\ e(t_j) \\ \vdots \end{pmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (2)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_j & \cos(\omega_1 t_j) & \sin(\omega_1 t_j) & \cos(\omega_2 t_j) & \sin(\omega_2 t_j) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c_1 \\ s_1 \\ c_2 \\ s_2 \end{pmatrix} = \mathbf{x} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{y} \quad (4)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (5)$$

Burada, \mathbf{A} , katsayılar matrisi; \mathbf{x} , bilinmeyenler vektörü ve \mathbf{P} , TSB değişimlerinin ağırlık matrisidir. Literatürde, doğrusal trend ile mevsimsel sinyalleri içeren bu model, standart harmonik regresyon yaklaşımı olarak anılmaktadır. Dahası, TSB değişimlerinin korelasyonsuz ve birim ağırlıklı olduğu kabul edilir ($P=I$). Ancak, jeodezik zaman serilerinde gözlemler arasında zamana bağlı korelasyonların olduğu ve bu korelasyonların renkli gürültüyü meydana getirdiği bilinmektedir. Bu korelasyonların ihmal edilmesi, zaman serisinden elde edilen kestirim sonuçlarını, özellikle de standart sapmaları etkileyebilmektedir. Bu nedenle, trend parametresinin anlamlılığı istatistiksel olarak değişmekte olup, su potansiyeli bakımından yapılacak değerlendirmelerin güven aralıklarına ilişkin yorumlamalar da değişebilmektedir.

Burada önemli olan, zamana bağlı korelasyonların varlığının araştırılması ve gerekli ise ölçülerin uygun şekilde ağırlıklandırılmasıdır. Bir zaman serisindeki gürültü karakteristiğinin belirlenmesi için, zaman serisi spektral anlamda analiz edilmelidir. Spektral analiz, frekans etki alanının diğer bir deyişle spektral yoğunluk (power spectral density, PSD) fonksiyonunun incelenmesi olarak ele alınmaktadır ([Chatfield, 2003](#); [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 indekse sahip gürültü türleri ile yüklü olduğu da düşünülmelidir. Periodogram, Lomb-Scargle ve Welch yöntemleri zaman serisini spektral açıdan analiz etmek amacıyla kullanılan yöntemlerden birkaçıdır.

Zamana bağlı olarak sistemi etkileyen gürültü türleri, güç yasası eşitliğine göre, güç spektrumuna sahiptir ([Welch, 1967](#); [Mandelbrot ve Van Ness, 1968](#); [Agnew, 1992](#)). Burada, κ , 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); $\kappa=-1$ kırpışma

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 (Eşitlik 6).

$$PSD(f) = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^\kappa = L_0 f^\kappa \quad (6)$$

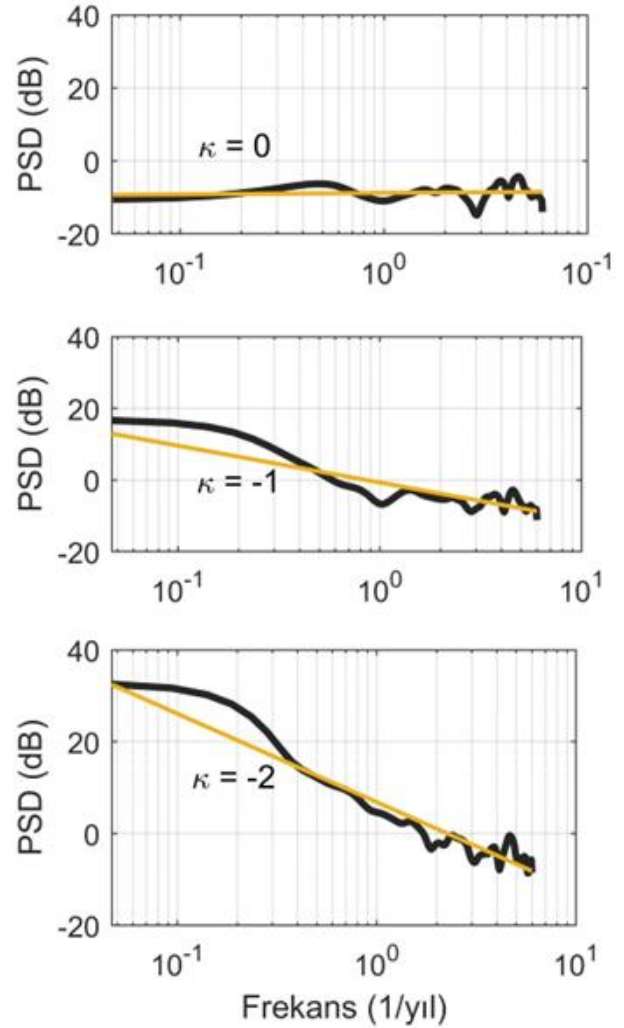
Bir sinyaldeki gürültünün belirlenmesi için, spektral analiz yöntemleriyle elde edilen PSD değerleri desibel (dB) birimine, $10\log(PSD)$ fonksiyonuyla dönüştürülür. Böylece, Eşitlik 3'te verilen PSD, dB biriminde ifade edilebilir (Eşitlik 7):

$$10\log(PSD) = 10\log(L_0) + 10\kappa\log(f) \quad (7)$$

Bu fonksiyon basit bir doğrusal fonksiyon olarak ($a+bx$ gibi) ele alındığında, en küçük kareler kestirimi ile spektral indeks elde edilir. Bu nedenle periyodogramda frekansın doğal logaritmasına karşılık dB birimindeki PSD değerleri çizdirilirse (oluşan grafik log-log grafiği olarak adlandırılmaktadır), ortaya çıkan eğrinin eğimi spektral indeksine karşılık gelir ve gürültünün türü güç spektrumunda tanımlanabilir. Veri setine ait log-log PSD-frekans grafikleri çizdirildiğinde grafiğin eğimi en temel anlamda verinin yüklü olduğu hata türü ile ilgili bilgi sunmaktadır. Sadece beyaz gürültü bulunan veri setlerinin log-log grafiklerinde eğim gözlenmez; bu nedenle spektral indeks $\kappa=0$ olarak tanımlanır. Negatif yönlü eğimli log-log grafikleri ise zaman serisinin kesirli Brownian hareketi spektrumuna sahip olduğunu veya bu aralıktaki bilinen tam sayılı bir gürültü türünü (örneğin kırpışma gürültüsü, rasgele yürüyüş gürültüsü gibi) işaret edebilir. Gürültü türlerinin güç spektrumlarını açıklamak amacıyla, Şekil 1'de beyaz gürültü, kırpışma gürültüsü ve rasgele yürüyüş gürültüsünü içeren, aylık örnekleme ve 20 yıllık periyoda sahip rasgele oluşturulmuş zaman serilerinin log-log grafikleri sunulmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü üzere; $\kappa=0$, yani sadece beyaz gürültü içeren bir zaman serisinin 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 serisinde, negatif yönlü bir eğim gözlenir. Beklenildiği üzere, rasgele yürüyüş gürültüsünün eğiminin kırpışma gürültüsünden daha yüksek olduğu Şekil 1'de görülmektedir.

Bu çalışmada GRACE TSB zaman serilerinde renkli gürültü karakterinin analizi için 2002-2022 (Nisan 2002-Aralık 2021) periyoduna sahip, aylık örnekleme RL06v02 GSFC mascon veri seti kullanılmıştır. Dünya üzerinde karasal alanları temsil eden 13028 mascon zaman serisi ile analizler gerçekleştirilmiştir. GSFC mascon çözümleri, 1x1 derecelik gridler ya da havzalara göre türetilen zaman serilerini içerir. Bu mascon çözümleri, GGM05C arka plan statik alanı kaldırılarak üretilir (Ries ve ark., 2016). Yermerkezi ile ilgili

parametre düzeltmesi yapılır ve C20, C30 katsayıları değiştirilir (Loomis ve ark., 2020; Sun ve ark., 2016). Atmosfer ve okyanus yumuşatma etkileri, Dobslaw ve ark. (2017)'ye göre ortadan kaldırılır. Ayrıca, Buzul Çağı Sonrası (GIA) etkisi, ICE-6G_D modeli (Peltier ve ark., 2015) kullanılarak düzeltilir. Loomis ve ark. (2019)'da veri setinin güven aralığı yani belirsizlik durumuyla ilgili bilgi sunan hata ve sızıntı (bias) etkileri de detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Sonuç olarak, TSB 2004.0-2010.0 zaman aralığındaki ortalama kaldırıldıktan sonra TSB değişimleri zaman serisi olarak yayınlanır. Arka planda uygulanan modeller ve açıklamalar ile ilgili ayrıntılı bilgilerin en güncel hali Loomis ve ark. (2019)'da verilmektedir.



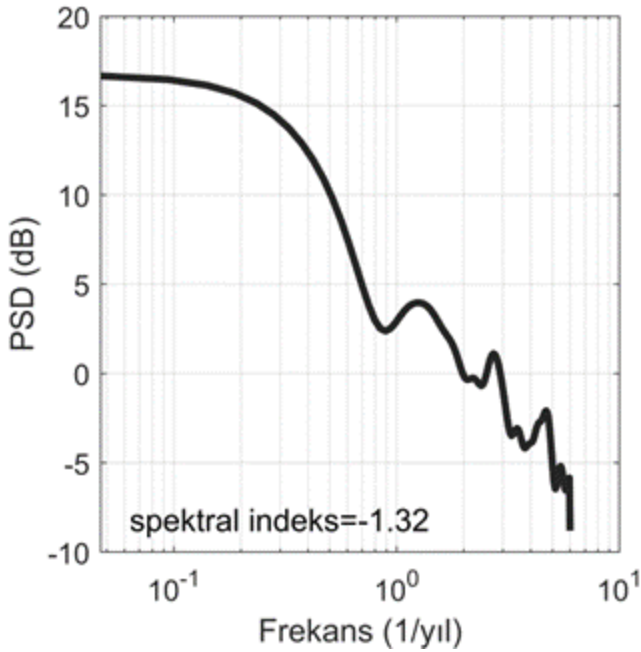
Şekil 1. Beyaz gürültü ($\kappa=0$), kırpışma gürültüsü ($\kappa=-1$) ve rasgele yürüyüş gürültüsü ($\kappa=-2$) yüklü zaman serilerinin PSD-Frekans grafiği (Siyah çizgi, Welch yöntemiyle hesaplanan periyodogramı temsil ederken; sarı çizgi, ilgili gürültü modelini yansıtmaktadır.)

3. Bulgular

GRACE mascon TSB zaman serilerinde gürültü karakterinin zamana bağlı değişimini incelemek için hem GRACE periyodu olarak adlandırılan "2002-2017" hem de GRACE+GRACE-FO periyodu olan "2002-2022" zaman aralığı ayrı ayrı ele alınmıştır. Buna ek olarak, zamansal korelasyonların mascon çözümlerinden bağımsız olduğunu incelemek amacıyla Seviye-2 verileri olan aylık

küresel harmonik katsayılarından hesaplanan ve DDK5 filtresi uygulanmış veri seti de analizlere dahil edilmiştir.

Öncelikle, Eşitlik 1 ve 2’de özetlendiği şekilde modelleme yapılarak en küçük kareler yöntemiyle zaman serilerine ilişkin düzeltmeler (-e) elde edilmiştir. Bu düzeltmeler yardımıyla, PSD-frekans grafikleri (log-log grafiği) Welch yöntemi kullanılarak tüm zaman serileri için oluşturulmuştur (Şekil 2). Elde edilen spektral yoğunluk ve frekans değerleri Eşitlik 4’te yerine konulmuş ve spektral indeks (κ) değerleri kestirilmiştir. Çalışma bölgesinden rasgele seçilen bir mascon zaman serisi için log-log grafiği örneği Şekil 2’de sunulmuştur. Bu grafik incelendiğinde zaman serisinin negatif yönlü bir eğime sahip olduğu görülürken; spektral indeks değeri spektral yoğunluk ve frekans değerleri kullanılarak -1.32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Rasgele seçilen mascon hüresine (enlem: 53o, boylam:22,5o) ait PSD-Frekans grafiği

Masconların 2002-2017 zaman aralığı için elde edilen spektral indekslerine ilişkin istatistikler Tablo 1’de özetlenmiştir. Bu istatistik sonuçlarına göre, zaman serilerinin %59’u, yani büyük bir çoğunluğu, -1 ile -1,5 arasında spektral indeks değerine sahip renkli gürültü özelliği göstermektedir. %28’i beyaz gürültü ve kırpışma gürültüsüne, %13’ü ise rasgele yürüyüş gürültüsüne yakın olan bir özellik sergilemektedir. Son gruptaki mascon gridlerinden yalnızca 20 adedi için -2’den daha yüksek spektral indeks edilmiştir ki, bu da toplam mascon sayısının %0,12’sine karşılık gelmektedir. Tüm zaman serileri için $-1,18 \pm 0,30$ ortalama değeri bulunmuştur. Bu nedenle, TSB zaman serilerinin genel olarak kırpışma gürültüsüne yakın bir gürültüye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 1. Mascon TSB zaman serilerinden kestirilen spektral indekslerin dağılımı (2002-2017 periyodu).

Spektral indeks	Mascon sayısı	Yüzdesi (%)
0 ile -1 arasında	3631	28
-1 ile -1,5 arasında	7639	59
<-1,5	1758	13

2002-2017 ve 2002-2022 zaman aralıkları için mascon gridlerindeki spektral indeks değerleri Şekil 3’teki global haritalarda gösterilmektedir. Şekil 3’te, kırmızı ile temsil edilen alanlar rasgele yürüyüş gürültüsüne karşılık gelen yerleri, sarı ise kırpışma gürültüsüne karşılık gelen yerleri göstermektedir. Yeşil-mavi tonlarına sahip olan yerler ise beyaz gürültüye en yakın olan yerlerdir. Şekil 3a (ya da Şekil 3b) daha ayrıntılı incelendiğinde, büyük nehirlerin geçtiği bölgelerde -2’ye yakın spektral indeksli renkli gürültünün yoğunlaştığı görülmektedir. Diğer taraftan, su aktivitesinin az olduğu kuzey Afrika bölgesinde ve Arap yarımadasında spektral indeks -0,5 civarındadır. Kutup bölgeleri incelendiğinde ise, buzul kütle erimesinin yoğun olduğu Batı Antarktika ve Antarktik yarımadası ile kuzeyde Grönland kıyılarında spektral indekslerin kırpışma gürültüsünden rasgele yürüyüş gürültüsüne doğru bir spektrumda yer aldığı görülmektedir. Bu sonuçlar TSB’deki gürültü karakterinin su döngüsünün yoğunluğuna ve değişkenliğine bağlı olduğunu göstermektedir.

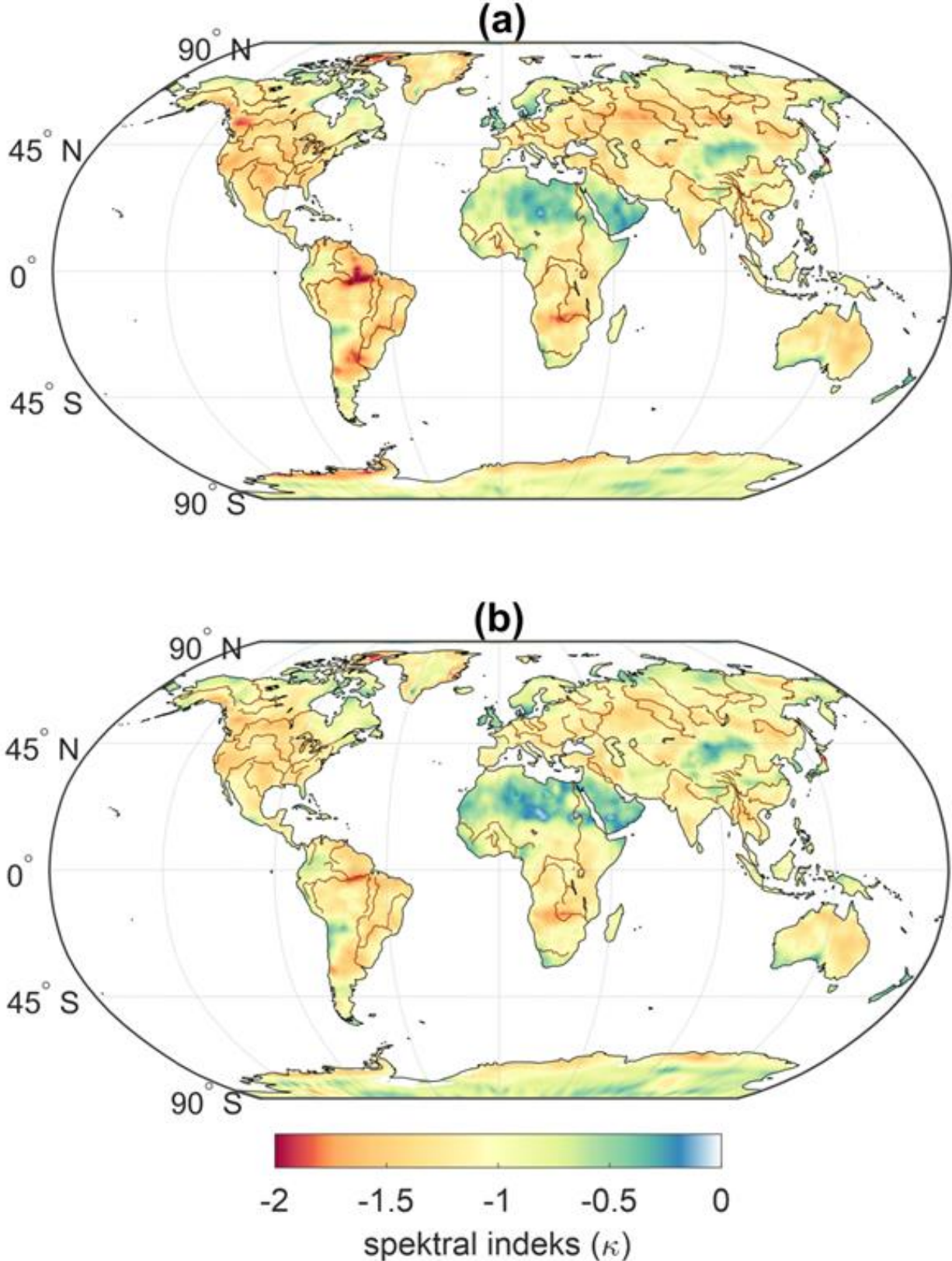
Gürültü karakterinin zamana bağlı nasıl değiştiğini incelemek amacıyla 2002-2022 yıllarını içeren tüm periyotlar için yukarıdaki analizler tekrarlanmış; sonuçlar Şekil 3b’de gösterilmiştir. Spektral indeks değerlerinin -2 ile 0 arasında değiştiği, kutup bölgelerinin kıyı kesimlerinde ve büyük nehirlerin olduğu bölgelerde 2002-2017 periyoduna benzer şekilde ortalama -1,5 değerlerine ulaştığı görülmüştür. Yaklaşık 20 yıllık bu zaman serileri için ortalama spektral indeks değeri $-1 \pm 0,32$ olarak hesaplanmıştır. 2002-2017 GRACE periyodu için elde edilen sonuçlar $(-1,18 \pm 0,30)$ ile karşılaştırıldığında, sonuçların benzer olduğu ancak, zaman serisinin uzunluğu arttıkça gürültünün bilinen tam sayılı gürültü türlerinden kırpışma gürültüsüne biraz daha yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, renkli gürültünün zamansal olarak korelasyonlu olduğunu desteklerken, 2017 ile 2022 yılları arasında gerçekleşen hidrolojik ya da iklimsel olayların gürültü karakterini etkilediği düşünülmektedir.

Renkli gürültü karakterinin yalnızca mascon çözümlerine özgü olup olmadığını incelemek için, yukarıdaki analizler DDK veri seti için tekrarlanmıştır. Bu amaçla, nehir havzalarında CSR (Center for Space Research), GFZ (GeoForschung Zentrum) ve JPL (Jet Propulsion Laboratory) veri merkezlerinden temin edilen aylık küresel harmonik katsayıların filtrelenmesiyle oluşturulan DDK5 çözümleri kullanılmıştır (Zaman serileri CNES/GRGS tarafından yönetilen GRACE plotter sayfasından (thegraceplotter.com) elde edilmiştir).

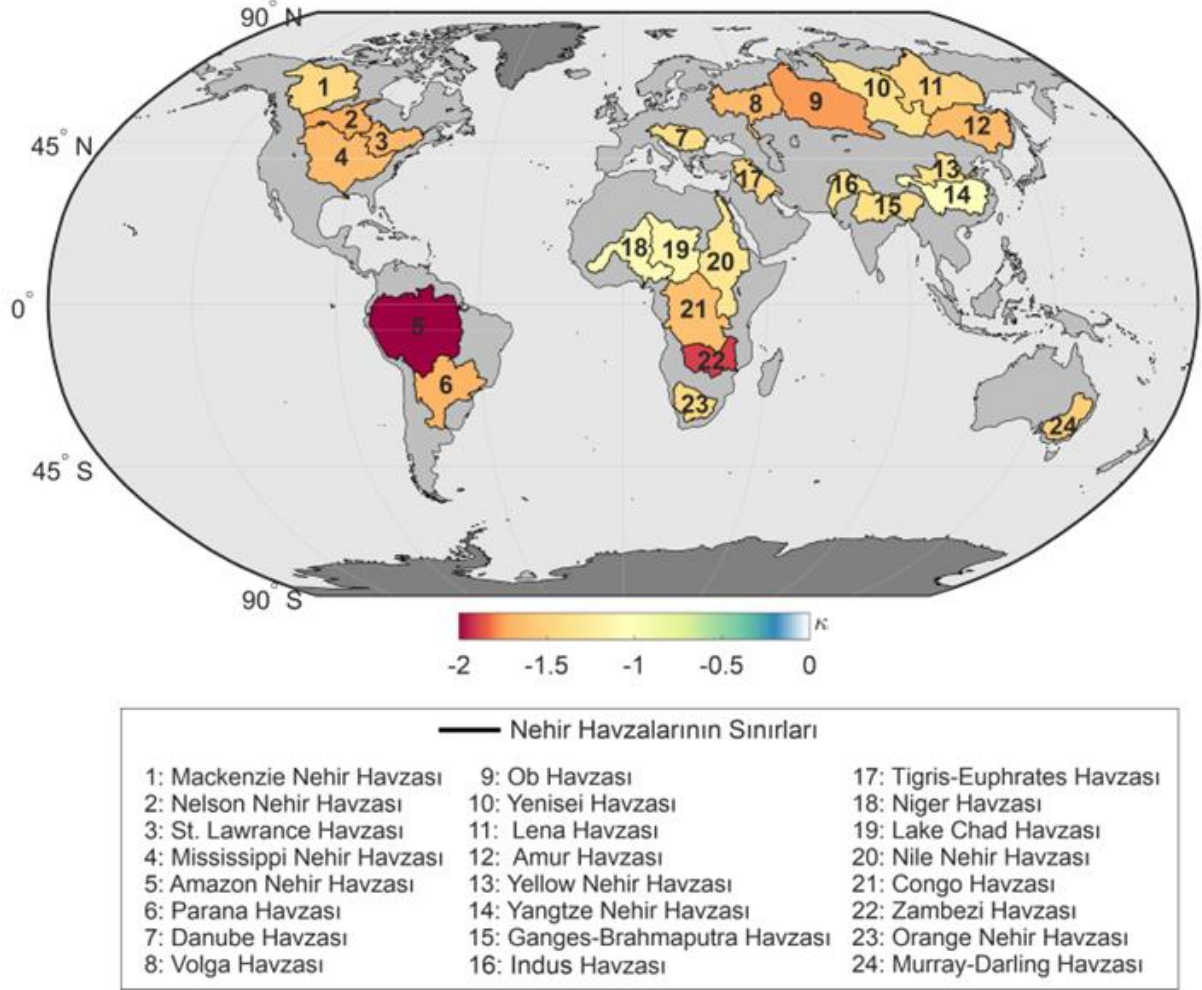
Büyük nehir havzalarının TSB zaman serileri hem GSFC mascon çözümleri hem de DDK5 çözümleri için kullanıcılara doğrudan sunulmaktadır. Böylece Şekil 4’te verilen büyük nehir havzalarına ait zaman serileri ile analizler yapılmış ve mascon çözümlerine ait TSB gürültü karakteri ayrıca gösterilmiştir. Şekil 4’te görüldüğü üzere, büyük nehir havzalarında spektral indeks değerleri -1 ile -2 arasında yer almakta olup; 5 ve 22 no’lu Amazon Nehir ve Zambezi havzalarında rasgele yürüyüş gürültüsüne benzer özellik gözlenmektedir. Bu havzaların yoğun şekilde su aktivitesine maruz kaldığı bilinmektedir. Şekil 4’teki büyük nehir havzalarının

spektral indeksleri, CSR, GFZ ve JPL veri merkezlerine ait DDK5 TSB zaman serileri kullanılarak 2002-2017 zaman aralığında hesaplanmıştır. Havzaların spektral indekslerinin ortalamaları CSR, GFZ ve JPL için sırasıyla, $-1,27 \pm 0,28$; $-1,19 \pm 0,25$ ve $-1,15 \pm 0,27$ şeklinde elde edilmiştir. 2002-2022 periyodunda ise bu değerler sırasıyla $-1,33 \pm 0,28$; $-1,22 \pm 0,29$; $-1,27 \pm 0,28$ olarak kestirilmiştir. Farklı veri merkezlerine ait zaman

serilerinden elde edilen ortalamalar mascon çözümlerinden elde edilen sonuçlar ile benzerdir; oluşan küçük farkların, veri işleme stratejilerindeki farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece, renkli gürültünün yalnızca mascon çözümlerine özgü olmadığı, GRACE sinyalinin kendisinden ileri geldiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 3. (a) 2002-2017 ve (b) 2002-2022 yılları arasında mascon TSB değişimi zaman serileri spektral indeks değerleri (kahverengi çizgiler ana nehirleri göstermektedir).



Şekil 4. Büyük nehir havzalarında mascon TSB değişimi zaman serileri spektral indeks değerleri (2002-2017).

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, GRACE TSB değişimi zaman serilerinin gürültü karakteri analiz edilmiştir. GSFC mascon çözümlerinin kullanıldığı analizlerde karasal alanları temsil eden mascon hücreleri ele alınmıştır. PSD-frekans grafikleri incelendiğinde zaman serilerinin negatif yönlü bir eğime sahip olduğu; kestirilen spektral indekslerin büyük bir çoğunluğunun -1 ile -1,5 arasında değiştiği, ortalama olarak -1 değerine yakın olduğu belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, TSB değişimi zaman serilerinin genel olarak kırpışma gürültüsüne benzer bir renkli gürültü ile yüklü olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Seviye-2 verisi olan DDK çözümleri ile de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Zaman serisindeki renkli gürültünün trend ve genlik gibi fonksiyonel model parametrelerinin standart sapmalarını etkilediği, modelde dikkate alınmaması neticesinde olması gerekenden daha küçük standart sapmaların elde edildiği bilinmektedir. Bu nedenle, GRACE zaman serilerinin analizinde söz konusu gürültü türlerinin dikkate alınması gerekmektedir; su kütlesi değişimleri için doğru bir istatistiki değerlendirmenin yapılabilmesi buna bağlıdır.

Spektral indekslerin sıfırdan yani beyaz gürültüden farklılaştığı bölgeler, büyük nehirlerin geçtiği yerler, havzalar ve de kutup bölgeleri kıyılarıdır. Su çevriminin az olduğu kuzey Afrika ve Arap yarımadasında ise neredeyse beyaz gürültü özelliğine sahip su bütçesi

zaman serileri gözlenmektedir. Her iki durum, GRACE su bütçesindeki renkli gürültü yoğunluğu ile su çevriminin yoğunluğu ve değişkenliği arasında ciddi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. İlerideki çalışmalarda bu korelasyon özelinde incelemeler yapılacaktır.

Bilgilendirme/Teşekkür

Yazarlar, GRACE mascon zaman serisini sağlayan NASA, GSFC veri merkezine ve DDK verisini sağlayan CNES/GRGS servisine teşekkür eder. Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2021-4341 proje numarası ile desteklenmiştir.

Araştırmacıların katkı oranı

Özge Güneş: Analiz, Makale yazımı, Düzenleme, **Cüneyt Aydın:** Makale yazımı, Düzenleme.

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- 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>
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C. J. M., & Teunissen, P. J. G. (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>
- 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](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000341)
- Başçıftçi, F. (2021). TUSAGA-AKTİF Noktalarında Gürültü Analizi, Türkiye'nin Güneydoğusu Örneği. *Geomatik*, 6(2), 135-147. <https://doi.org/10.29128/geomatik.731486>
- 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., 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>
- Brockwell, P. J., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to time-series and forecasting* (3rd ed.). New York: Springer.
- Chatfield, C. (2003). *The analysis of time series: An introduction* (6th ed.). London: Chapman and Hall CRC.
- 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.
- Flechtner, F., Sneeuw, N., & Schuh, W. D. (2014). Observation of the system earth from space: CHAMP, GRACE, GOCE and future missions. Berlin, Germany: Springer.
- Gardner, M. (1978). Mathematical games: White and brown music, fractal curves and one-over-f fluctuations. *Scientific American*, 238(4), 16-32.
- 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*, e2022JB025561. <https://doi.org/10.1029/2022JB025561>
- Gunes, O., & Aydin, C. (2022). Applying autoregressive models in analysis of GRACE-Mascon time-series. *Advances in Geodesy and Geoinformation*, 71(2), e25. <https://doi.org/10.24425/agg.2022.141299>
- 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>
- 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>
- King, M. A., & Watson, C. S. (2020). Antarctic surface mass balance: Natural variability, noise, and detecting new trends. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL087493. <https://doi.org/10.1029/2020GL087493>
- Kusche, J., Schmidt, R., Petrovic, S., & Rietbroek, R. (2009). Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. *Journal of Geodesy*, 83, 903-913. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0308-3>
- Langbein, J. (2012). Estimating rate uncertainty with maximum likelihood: differences between power-law and flicker-random-walk models. *Journal of Geodesy*, 86(9), 775-783. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0556-5>
- 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>
- Loomis, B. D., Luthcke, S. B., & Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of Geodesy*, 93, 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. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W.H. Freeman and Company
- Mandelbrot, B. B., & Van Ness, J. W. (1968). Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, 10(4), 422-437. <https://doi.org/10.1137/1010093>
- Mao, A., Harrison, C. G., & Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B2), 2797-2816. <https://doi.org/10.1029/1998JB900033>
- 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>
- Ries, J., Bettadpur, S., Eanes, R., Kang, Z., Ko, U., McCullough, C., Nagel, P., Pie, N., Poole, S., Richter, T., Save, H., & Tapley, B. (2016). *The Combined Gravity Model GGM05C*. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/icgem.2016.002>

- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaulieu, 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>
- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M. N., Collilieux, X., & Wöppelmann, G. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B1). <https://doi.org/10.1029/2010JB007701>
- Schmidt, R., Petrovic, S., Güntner, A., Barthelmes, F., Wunsch, J., & Kusche, J. (2008). Periodic components of water storage changes from GRACE and global hydrology models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8). <https://doi.org/10.1029/2007JB005363>
- Steffen, H., Petrovic, S., Müller, J., Schmidt, R., Wunsch, J., Barthelmes, F., & Kusche, J. (2009). Significance of secular trends of mass variations determined from GRACE solutions. *Journal of Geodynamics*, 48(3-5), 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2009.09.029>
- 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>
- 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>
- 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>



© Author(s) 2024. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>