

GRACE çözümlerinde korelasyon etkilerinin yüksek dereceden polinomlarla giderilmesi

Emine Simay Atayer*, Cüneyt Aydın

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi Anabilim Dalı, Davutpaşa, İstanbul

Özet

Kabul: 30 Nisan 2012
Alındı: 12 Ocak 2012
Web Yayın: 10 July 2012

Cilt: 1
Sayı: 1
Sayfa: 35 - 42
Mayıs 2012

Yeryuvarının gravite alanındaki zamansal değişimleri belirlemek amacıyla tasarlanan GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) uydu sisteminin sonuç ürünleri son on yıldır çeşitli veri merkezleri tarafından kullanıcılara sunulmaktadır. L2 (Seviye - 2) verisi olarak adlandırılan bu veri türü, tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayılarından ve standart sapmalarından oluşmaktadır. Aylık GRACE harmonik katsayıları yardımıyla yer sistemi içerisindeki kütle değişimlerinin izlenebilmesi için, çözümler içinde var olan bazı sistematik hataların giderilmesi gerekmektedir. GRACE gravite alanı çözümlerinde yer alan hataların giderilmesi ya da etkilerinin azaltılması için çeşitli filtre yöntemleri tasarlanmıştır. Bunlardan en bilineni Gauss filtresidir. Ancak, söz konusu filtre çözümlerdeki sistematik hataların tamamen giderilmesinde yeterli olmayıp, bu filtre sonunda yüzey kütle yoğunluğu veya eşdeğer su kalınlığı haritalarında halen bazı sistematik hataların varlığı görülmektedir. Katsayılar arasındaki korelasyonların neden olduğu bu hataları gidermek için Gauss filtresinin yanında korelasyon etkilerini de giderecek ek bir filtreye ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, Chambers (2006) tarafından uygulanan bir yöntem ele alınmaktadır. Uygulamalar için UTCSR (University of Texas at Austin Center for Space Research) veri merkezinden alınan 2003–2010 yıl aralığına ait aylık L2 verisi kullanılmaktadır. Söz konusu katsayılarla 7. dereceden polinom ve farklı yumuşatma yarıçapına sahip Gauss filtreleri uygulanarak elde edilen değişimler incelenmektedir.

Anahtar Sözcükler

GRACE, Korelasyon, Filtreleme, L2 Verisi

Abstract

Destripping of GRACE solutions by fitting high-degree polynomials

Accepted: 13 May 2012
Received: 12 January 2012
Pub. Online: 10 Temmuz 2012

Volume: 1
Number: 1
Page: 35 - 42
May 2012

The gravity field solutions from GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) system, designed for the determination of the temporal variations in the Earth's gravity field, has been provided by some data centers during the last decade. These solutions, the so-called Level 2 (L2) Data, consist of fully normalized spherical harmonic coefficients and their standard deviations. In order to monitor the mass variations in the Earth system based on GRACE monthly harmonic coefficients, some systematic errors existing in the solutions should be removed. Several filtering methods have been developed to eliminate or reduce the effects of these errors in the GRACE gravity field solutions. Among them, Gaussian filter is one of the most well known filtering methods. However, this filter is not enough to remove all the systematic errors in the solutions, thus there still remains some errors in the surface mass density or equivalent water thickness maps. To reduce these remaining errors caused by the correlations between the coefficients, an extra de-correlating filter is necessary in addition to the Gaussian filter. In this study, we focus on the de-correlation method proposed by Chambers (2006). The monthly L2 data provided by UTCSR for the time period 2003–2010 are used. The temporal variations are discussed by applying a seventh degree polynomial and Gaussian filters with different smoothing radii.

Keywords

GRACE, Correlation, Filtering, L2 Data

*Sorumlu Yazar: Tel: +90 (212) 3835283 Faks: +90 (212) 3835274

E-posta: atayer@yildiz.edu.tr (Atayer E.S.), caydin@yildiz.edu.tr (Aydın C.)

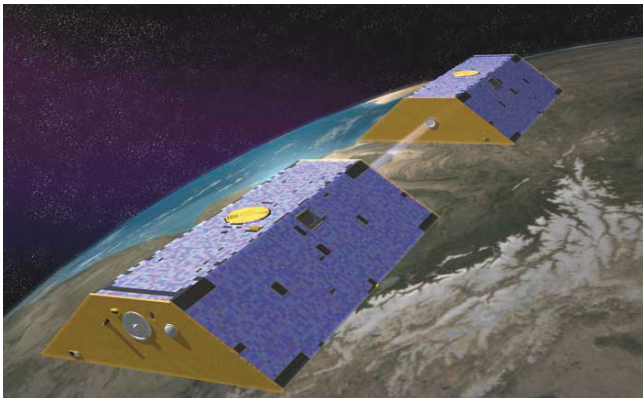
1. Giriş

Yeryuvarının gravite alanındaki değişimleri belirlemek amacıyla Alman–Amerikan ortaklığı ile 17 Mart 2002’de GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ikiz uydusu sistemi uzaya fırlatılmıştır. Yaklaşık 500 km yüksekliğindeki yörünge düzlemine yerleştirilen GRACE uydusu sisteminin diğer uydusu gravimetrisi sistemlerinden farkı, aynı yörüngede birbirlerini 220 ± 50 km mesafeyle izleyen iki adet alçak yörüngeli (LEO) uydudan oluşmasıdır (Şekil 1).

Başlangıçta kullanım ömrü 5 yıl olarak tasarlanan GRACE, kullanıcılarına 2015 yılına kadar veri sağlayacaktır (Url 2). Bu sistemden elde edilen uydudan uyduya olan mesafeler, çekim dışı ivmelenmeler (non-gravitational accelerations) vb. veri türleri L1 (Seviye - 1) verisini oluşturmaktadır. Aylık jeopotansiyel çözümlerini temsil eden tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayılar kalibre edilmiş L1 verisinden üretilir ve L2 verisi olarak adlandırılır (Case vd. 2004; Bettadpur 2007; Liu 2008; Elsaka 2010). En güncel L2 verisi; CSR, GFZ (GeoForschung Zentrum, Postdam), JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena), CNES/GRGS (Centre National d’Etudes Spatiales/Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale) ve DMT–1 (Delft Mass Transport model, release 1) çözümleri şeklinde kullanıcılara sunulmaktadır (Url 3).

GRACE gravite alanı çözümleri, okyanuslardaki su kütlesi değişimleri (Chambers 2009), buzulların erime miktarı (Slobbe vd. 2009), yer altı su kaynaklarındaki seviye değişimleri (Swenson ve Wahr 2003; Schmidt vd. 2006; Chen vd. 2008; Cazenave ve Chen 2010) gibi kütle hareketlerini ilgilendiren çalışmaların yanı sıra tektonik hareketlerin incelenmesi (Mikhailov vd. 2004; Choi vd. 2006; Han ve Simons 2008) gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Global ve bölgesel düzeyde meydana gelen hidrolojik değişimlere karşı duyarlılığı yüksek olduğu için GRACE gravite alanı çözümleri genellikle eşdeğer su kalınlığı (equivalent water thickness–EWT) adı verilen kütle değişim miktarının hesaplanmasında kullanılır (Wahr vd. 2006, Cazenave ve Chen 2010).

GRACE harmonik katsayıları çeşitli hatalarla yüküldür (Swenson ve Wahr 2006; Wahr vd. 2006). Gravite alanının kısa dalga boylu kısmına ilişkin yüksek dereceli katsayılar ise daha büyük genlikli hatalar içerir. Bu hataların giderilmesi veya etkilerinin azaltılması için çeşitli filtre yöntemleri tasarlanmıştır (Wahr vd. 1998; Swenson ve Wahr 2006; Han vd. 2005; Seo ve Wilson 2005). Bunlardan en bilineni Gauss yumuşatma filtresidir (Jekeli 1981; Wahr vd. 1998;



Şekil 1: GRACE Uyduları (Url 1)

Wahr 2007; Van Der Wal 2009). Ancak, söz konusu filtre yöntemleri uygulansa da, yüzey kütle yoğunluğu haritalarında halen kuzey–güney yönünde gözlenen bazı sistematik hatalar (şeritler–stripes) kalır. Swenson ve Wahr (2006), kuzey–güney yönündeki bu şeritlerin bazı katsayılar arasındaki korelasyondan kaynaklandığını göstermiş ve spektral alanda polinomlarla korelasyon giderici bir filtre önermiştir. Hem veriyi koruyacak hem de korelasyon etkilerini azaltacak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Swenson ve Wahr 2006; Chambers 2006; Chen vd. 2007; Schrama vd. 2007; Wouters ve Schrama 2007; Kusche 2007; Davis vd. 2008; Kless vd. 2008; Kusche vd. 2009). Bunlardan Kusche (2007) ve Kusche vd. (2009) tarafından açıklanan yöntemlere göre filtrelenmiş DDK–1, 2 ve 3 olarak adlandırılan L2 verisi de, yukarıda değinilen veri işlem merkezleri tarafından kullanıcılara sunulmaktadır.

Bu çalışmada Chambers (2006) tarafından önerilen “yüksek dereceli polinom yaklaşımı” incelenmektedir. Çalışmanın sonraki bölümlerinde, sırasıyla, eşdeğer su kalınlığı değişimine, Gauss yumuşatma filtresine ve söz konusu polinom yaklaşımına değinilmekte, CSR veri merkezinden alınan L2 verisi ile yapılan sayısal çözümler sunulurken elde edilen sonuçlara yer verilmektedir.

2. Kütle Değişimi (Eşdeğer Su Kalınlığı Değişimi)

Bir aya ilişkin L2 veri dosyası; ilgili derece (n) ve sıra (m) için tam normalleştirilmiş harmonik katsayıları (C_{nm} , S_{nm}) ve bunların standart sapmalarını ($\sigma_{C_{nm}}$, $\sigma_{S_{nm}}$) içermektedir.

GRACE gravite alanı çözümleri kullanılarak değişimlerin incelenmesi için referans alınacak bir gravite alanı modeline ihtiyaç vardır. Bu amaçla ilgili ardışık aylık çözümlere uygulanan en küçük kareler yöntemi ile GRACE modelinin ilgili katsayıları (\bar{C}_{nm} , \bar{S}_{nm}) ve standart sapmaları ($\sigma_{\bar{C}_{nm}}$, $\sigma_{\bar{S}_{nm}}$) aritmetik ortalama biçiminde türetilir. Böylece harmonik katsayı değişimleri (ΔC_{nm} , ΔS_{nm}) bulunur:

$$\Delta C_{nm} = \begin{cases} C_{nm}(t) - \bar{C}_{nm} \\ \text{veya} \\ \bar{C}_{nm,i} - \bar{C}_{nm,j} \end{cases}, \quad \Delta S_{nm} = \begin{cases} S_{nm}(t) - \bar{S}_{nm} \\ \text{veya} \\ \bar{S}_{nm,i} - \bar{S}_{nm,j} \end{cases} \quad (1)$$

Burada, t , ilgili periyodu; i ve j ise ilgili yıllık GRACE modelini ifade etmektedir. Bu eşitliklere varyans yayılma kuralı uygulanarak değişimlerin varyansları ($\sigma_{\Delta C_{nm}}^2$, $\sigma_{\Delta S_{nm}}^2$) elde edilir.

Aylık GRACE gravite alanı çözümleriyle çalışırken, genellikle yeryuvarı kütle yoğunluğu kavramı kullanılır. Herhangi bir enlem ve boylamdaki yüzey kütle yoğunluğu (surface mass density) değişimi (Wahr vd. 1998),

$$\Delta\sigma(\vartheta, \lambda) = a\rho_w \sum_{n=2}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n (\Delta\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\vartheta) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikteki a , referans elipsoidinin büyük yarı eksenini; ρ_w , suyun yoğunluğunu (1000 kg/m³); $\Delta\bar{C}_{nm}$ ve $\Delta\bar{S}_{nm}$, Stoke’s katsayılarındaki değişimleri ve P_{nm} , n . derece ve m . sıradan Legendre fonksiyonunu ifade eder.

Yoğunluk değişimine karşılık gelen su kalınlığındaki değişim (EWT değişimi),

$$\Delta e(\vartheta, \lambda) = \frac{\Delta \sigma(\vartheta, \lambda)}{\rho_w} \quad (3)$$

ile tanımlanır. a ile ölçeklendirilmiş yüzey yoğunluk katsayı değişimleri ve gravite potansiyeli arasında,

$$a \begin{Bmatrix} \Delta \check{C}_{nm} \\ \Delta \check{S}_{nm} \end{Bmatrix} = a \frac{\rho_{ave}(2n+1)}{3\rho_w(1+k_n)} \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} = K_n \begin{Bmatrix} \Delta C_{nm} \\ \Delta S_{nm} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

biçiminde bir ilişki vardır (Wahr vd. 1998; Wahr 2007; Liu 2008) Burada, ρ_{ave} , yeryüvarı ortalama yoğunluğunu (5517 kg/m³); k_n , n derecesine bağlı Love yüklemeye sayılarını gösterir. Love sayılarının 200 dereceye kadar hesaplanmış bazı değerleri Tablo 1’de verilmiştir (Wahr vd. 1998; Wahr 2007). Kaynaklarda gösterilmeyen ara derecelere ilişkin Love yüklemeye sayıları basit interpolasyon yöntemleriyle hesaplanır.

(4) eşitliği ile verilen katsayı değişimleri (2)’de göz önüne alınır ve elde edilen yoğunluk değişimi (3)’de yerine yazılırsa, EWT değişiminin GRACE harmonik katsayı değişimlerine bağlı doğrusal bir ifadesi bulunur;

$$\Delta e(\vartheta, \lambda) = \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) K_n P_{nm}(\cos \vartheta) \quad (5)$$

3. Harmonik Katsayılarının Filtrelenmesi

GRACE aylık çözümlerinin yüksek dereceden katsayılarındaki hataların etkileri EWT değişimlerinin çözümlerinde büyük sapmalara neden olur. Bu nedenle, harmonik katsayılarındaki bu hataların giderilmesi veya yumuşatılması gerekir. Bunun için çeşitli filtreleme yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlardan en bilineni, Gauss-filtresidir (Jekeli 1981; Wahr vd. 1998; Wahr 2007; Van Der Wal 2009). Yanı sıra, GRACE çözümlerinin bazı katsayıları arasında var olan korelasyonlar yumuşatma filtreleri uygulansa da giderilmemektedir. Bu amaçla, ilgili korelasyonların giderilmesi için ek filtreleme işlemi yapılır.

3. 1. Gauss-Filtresi

Yüksek dereceli katsayılarındaki hataların etkisini azaltmak için, Gauss-ağırlık fonksiyonu (W_n) kullanılır. Bu fonksiyon aşağıdaki iteratif eşitlik ile tanımlanır (Jekeli 1981; Wahr 2007; Van Der Wal 2009):

$$W_n = \begin{cases} 1 & , n = 0 \text{ için} \\ [(1+e^{-2b}) / (1-e^{-2b}) - 1/b] & , n = 1 \text{ için} \\ [-(2n+1/b)W_{n-1} + W_{n-2}] & , n \geq 2 \text{ için} \end{cases} \quad (6)$$

Burada b katsayısı, ilgili noktadan itibaren ağırlığın diğer sinyallere etkisinin önemsizleştiği uzaklığın yarısı olan yumuşatma yarıçapı R ’ye bağlı bir fonksiyondur;

$$b = \frac{\ln(2)}{1 - \cos(R/a)} \quad (7)$$

Tablo 1: Love Yüklemeye Sayıları (Wahr vd. 1998)

n	0	1	2	3	4	...	100	150	200
k_n	0,000	0,027	-0,303	-0,194	-0,132	...	-0,014	-0,010	-0,007

(5) eşitliğindeki EWT değişimi W_n ile ağırlıklandırıldığında,

$$\Delta e(\vartheta, \lambda) = \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) W_n K_n P_{nm}(\cos \vartheta) \quad (8)$$

ilgili katsayılar da filtrelenmiş olur. (8) eşitliğine varyans yayılma kuralı uygulanırsa eşdeğer su kalınlığı değişiminin varyansı bulunur;

$$\sigma_{\Delta e}^2 = \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (\sigma_{\Delta C_{nm}}^2 \cos^2 m\lambda + \sigma_{\Delta S_{nm}}^2 \sin^2 m\lambda) W_n^2 K_n^2 (P_{nm}(\cos \vartheta))^2 \quad (9)$$

Yumuşatma yarıçapı R keyfi bir değer olmasına karşın GRACE uygulamalarında genellikle 300–1000 km arasında bir değer olarak seçilir. $R = 300, 500$ ve 700 km yumuşatma yarıçapları ve $n_{max} = 60$ için, (6) eşitliği ile elde edilen ağırlık fonksiyonu eğrileri, Şekil 2’de gösterilmiştir. Buradan, yarıçap arttırıldığında ağırlık fonksiyonunun daha küçük derecelerde 0’a ulaştığı görülmektedir. Bir başka deyişle, ilgililenilen sinyalin kısa-dalga boyunu temsil eden büyük hatalı yüksek dereceden katsayılar çözümde etkisizleştirilir.

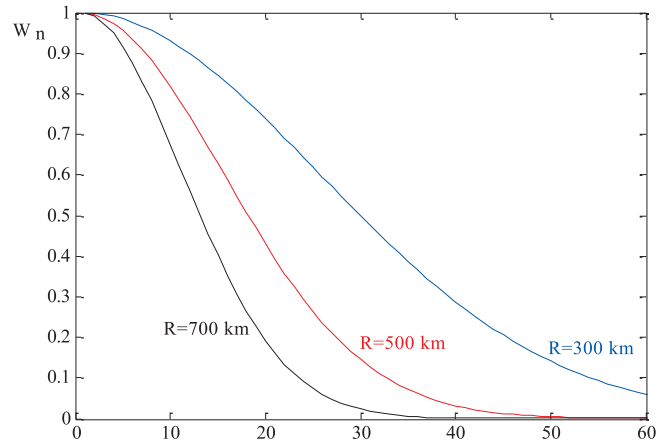
3. 2. Korelasyon Etkilerinin Giderilmesi

Belli bir m -inci sıraya ilişkin katsayı değişimleri aşağıdaki gibi gösterilsin;

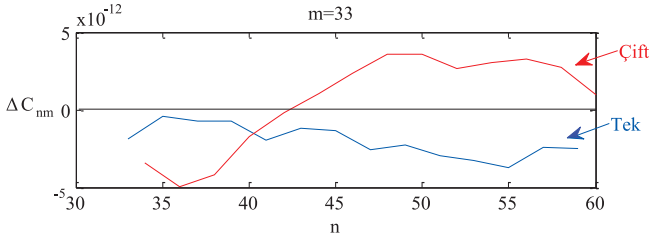
$$\begin{cases} \Delta C_{nm}, \Delta C_{(n+1)m}, \Delta C_{(n+2)m}, \dots, \Delta C_{n_{max}m} \\ \Delta S_{nm}, \Delta S_{(n+1)m}, \Delta S_{(n+2)m}, \dots, \Delta S_{n_{max}m} \end{cases} \quad (n \geq m) \quad (10)$$

Bu katsayı değişimlerinin beklenen değerleri 0’dır; yani dereceleri x koordinatlarını oluşturacak biçimde (yalnız C veya yalnız S ’ler) bir xy eksen takımında işaretlenseler, bunların $y = 0$ doğrusu etrafında rasgele salınmaları beklenir. Çoğunlukla böylesi bir beklentiye sağlayan çizimler elde edilir (Swenson ve Wahr 2006). Ancak bu katsayılar derecelerinin tek ve çift olmasına göre gruplandırılrsa, ilgili eksen takımında her bir grup için bir eğri gözlenir (Şekil 3). Bir başka deyişle, ilgili katsayı değişimleri birbirleriyle korelasyonludur.

Swenson ve Wahr (2006) tarafından ilk kez harmonik katsayı düzeyinde gözlenen bu korelasyonlar, bir önceki bölümde açıklanan yumuşatma filtresine karşın, kendilerini konumsal alanda sistematik hatalar olarak gösterirler. Daha



Şekil 2: Gauss-ağırlık fonksiyonu eğrileri



Şekil 3: Tek ve çift dereceli harmonik katsayı eğrileri

önce ifade edildiği gibi haritada gözlenen bu hatalara, şerit (stripes), bu hatalara neden olan korelasyonların katsayı düzeyinde giderilmesi işlemine ise “korelasyon etkilerini giderme” (destriping veya decorrelation) adı verilir. Bu amaçla geliştirilmiş birçok yöntem bulunur (Swenson ve Wahr 2006; Chambers 2006; Chen vd. 2007; Schrama vd. 2007; Wouters ve Schrama 2007; Davis vd. 2008; Kusche 2007; Kless vd. 2008; Kusche vd. 2009).

Geliştirilen ilk korelasyon filtresi (Swenson ve Wahr 2006), dereceye bağlı w genişliğindeki hareketli bir pencerede ilgili grubun ilgili pencereye düşen katsayılarına düşük dereceden bir polinom denklemi uydurulması ve elde edilen düzeltmelerin ters işaretlisinin korelasyonlu katsayı değişimleri yerine atanmasından ibarettir. Genellikle, hangi sıradan başlanacağı ve dengeleyici polinomun derecesi belli değildir. Ancak, uygulamada genellikle, $m = 10$ sıradan başlanır ve 3. dereceden bir polinom öngörülür. Bu şekilde uygulanan bir filtre için “P3M10” kısaltması kullanılır (bkz., Liu 2008).

Yukarıda söz edilen korelasyon filtresine göre uygulanması daha kolay olan bir yöntem Chambers (2006) tarafından verilmiştir: Bu yöntemde, Şekil 3’deki gibi gözlenen ilgili grubun her birine yüksek dereceden (5 veya 7. dereceden) bir polinom denklemi öngörülür. Denklemin katsayıları (polinom katsayıları) en küçük kareler yöntemiyle kestirilir. Örneğin, (10) eşitliğindeki C katsayılarından dereceleri tek veya çift olanlar ile aşağıdaki ölçü grubu oluşturulsun;

$$\{\Delta C_{n_1 m}, \dots, \Delta C_{n_q m}\}, n_q \leq n_{\max}; n_i = n_{i-1} + 2 \quad (i = 1, \dots, q); n_1 \geq m \quad (11)$$

Dengeleyici polinomun katsayıları olan harmonik derecelerini ve bunların ilgili kuvvetlerini düzeltme denklemlerinde doğrudan kullanmak, sistemin çözümünde nümerik hatalara neden olur. Bu nedenle, ilgili harmonik dereceleri normlandırılır;

$$\Delta n_i = \frac{n_i - \bar{n}}{(n_1 - \bar{n})^2 + \dots + (n_q - \bar{n})^2}, \quad \bar{n} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q n_i \quad (12)$$

Böylece düzeltme denklemleri, 7. dereceden bir polinom için aşağıdaki biçimde oluşturulur;

$$\begin{cases} \Delta C_{n_1 m} + v_1 = a_0 + a_1 \Delta n_1 + a_2 \Delta n_1^2 + \dots + a_7 \Delta n_1^7 \\ \vdots \\ \Delta C_{n_q m} + v_q = a_0 + a_1 \Delta n_q + a_2 \Delta n_q^2 + \dots + a_7 \Delta n_q^7 \end{cases}$$

Ölçüler eşit ağırlıklı öngörülerek, en küçük kareler yöntemi uygulanır. Elde edilen i . düzeltmenin ters işaretlisi ($-v_i$), korelasyon etkisi giderilmiş harmonik katsayıyı verir;

$$\Delta C_{n_i m}^* = -v_i, \quad (i = 1, \dots, q) \quad (13)$$

Benzer işlemler S katsayıları için de uygulanarak, korelasyon etkileri giderilmiş yeni harmonik katsayılar elde edilir.

Böylece (8) eşitliğiyle verilen yumuşatma filtresi uygulanmış EWT değişimi, korelasyon etkileri giderilmiş katsayı değişimleri ($\Delta C_{nm}^*, \Delta S_{nm}^*$) ile,

$$\Delta e(\vartheta, \lambda) = \sum_{n=2}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm}^* \cos m\lambda + \Delta S_{nm}^* \sin m\lambda) W_n K_n P_{nm}(\cos \vartheta) \quad (14)$$

şeklini alır. Yukarıdaki eşitliğe varyans yayılma kuralı uygulandığında korelasyon etkisi giderilmiş EWT değişiminin varyansı elde edilir;

$$\sigma_{\Delta e}^2 = \sum_{n=2}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n (\sigma_{\Delta C_{nm}^*}^2 \cos^2 m\lambda + \sigma_{\Delta S_{nm}^*}^2 \sin^2 m\lambda) W_n^2 K_n^2 (P_{nm}(\cos \vartheta))^2 \quad (15)$$

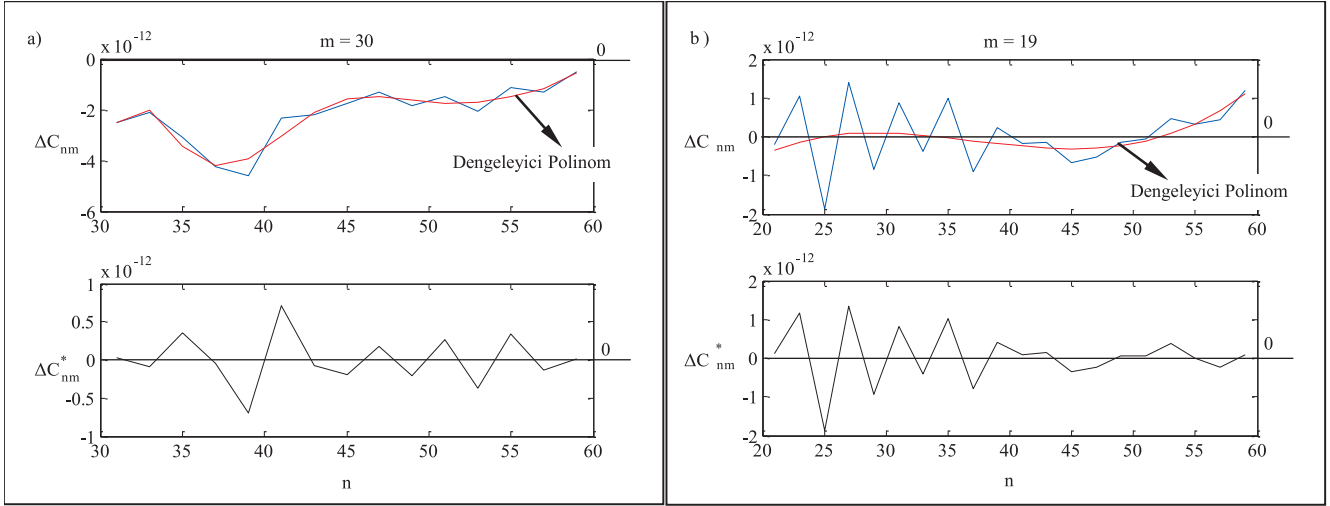
Burada $\sigma_{\Delta C_{nm}^*}^2$ ve $\sigma_{\Delta S_{nm}^*}^2$, (13) eşitliğine göre bulunan katsayıların varyanslarıdır.

Şekil 4, korelasyon etkilerinin giderildiği iki örneği göstermektedir. Şekil 4a’da verilen ilk örnekte ilgili harmonik katsayılar 0 doğrusunun altında harmonik derecesine bağlı bir fonksiyon özelliği gösterirken, Şekil 4b’deki ikinci örnekte harmonik katsayılarda böylesi bir ilişki bulunmamaktadır. Yukarıdaki yöntemin uygulanması sonucunda ilk örnekteki söz konusu korelasyonun giderildiği, yani, dereceyle olan fonksiyonel ilişkinin ortadan kalktığı görülmektedir. İkinci örnekte ise yöntem, arzu edildiği gibi, korelasyonsuz katsayılarda bozucu bir değişikliğe neden olmamıştır (ilgili örnekte, 45. dereceden sonraki katsayılarda bir eğim olarak görülen düşük korelasyonun da yöntemle giderildiğine dikkat edilmelidir). Bu örneklerden de görüldüğü gibi yöntem hem korelasyonlu hem de korelasyonsuz harmonik katsayılar için uygun biçimde çalışmaktadır.

Ancak, uygulanan her yöntemde olduğu gibi, bu yöntemde de korelasyon incelemesine hangi sıradan başlanacağı belirsizdir. Uygulamadan elde edilen sonuçlara göre karar verilmelidir. Eğer incelemeye başlanacak sıra çok küçük seçilirse, incelenen jeopotansiyel sinyal de kaybolmakta, tam tersine büyük seçilirse, korelasyonlar çözüm sonuçlarında etkilerini az veya çok göstermektedir. Yanı sıra, yumuşatma yarıçapı arttırıldığında korelasyon etkileri de kaybolmaktadır. Ancak, bu, söz konusu sinyalin de kaybolmaya başlaması demektir. Bu nedenle amaç, hem sinyali korumak (yani yumuşatma yarıçapını küçük tutmak) hem de korelasyon etkilerini gidermektir.

4. Sayısal Uygulama

Sayısal uygulama için ICGEM (International Centre for Global Earth Models) internet sayfasındaki CSR veri merkezi tarafından değerlendirilmiş 2003–2010 yılları arasındaki 92 aya ilişkin harmonik katsayılar ($n_{\max} = 60$) kullanılmıştır. Dinamik form çarpanı olarak da bilinen C_{20} katsayısı çözümlerde aynen korunmuş (bkz., Chambers 2006); sinyal akma-



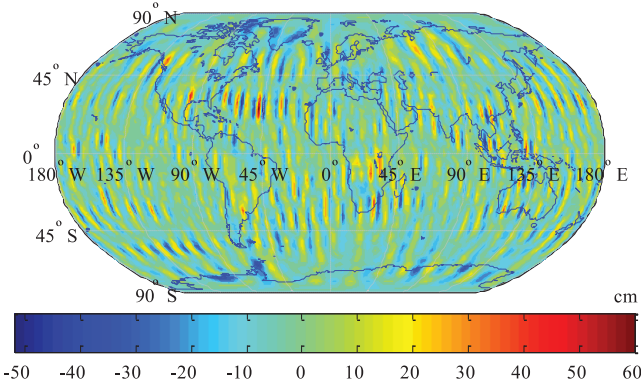
Şekil 4: ΔC_{nm} küresel harmonik katsayıları için öngörülen 7.dereceden polinom ve korelasyon etkileri giderilmiş ΔC_{nm}^* küresel harmonik katsayıları

sı (leakage), sinyal kaybı gibi amaçlar için kullanılan özel filtre yöntemleri uygulanmamış; çalışmanın kapsamı dışında olduğu için Grönland, Kuzey Amerika ve İskandinavya bölgelerindeki PGR (Postglacial Rebound) etkisi göz önüne alınmamıştır.

(5) eşitliğiyle verilen korelasyon etkisi giderilmemiş ve yumuşatılmamış EWT değişimi hesaplanarak haritada gösterilse, katsayılardaki hataların etkileri belirgin bir şekilde ortaya çıkacaktır. Şekil 5, böylece bir çözümle yıllık GRACE modelleri kullanılarak 2006–2007 yılları arasında elde edilen EWT değişimlerini göstermektedir. İlgili şekilden de görüldüğü gibi kuzey–güney yönünde ortaya çıkan bu sistematik hataları gidermek için önceki bölümlerde açıklanan filtre yöntemleri uygulanmalıdır.

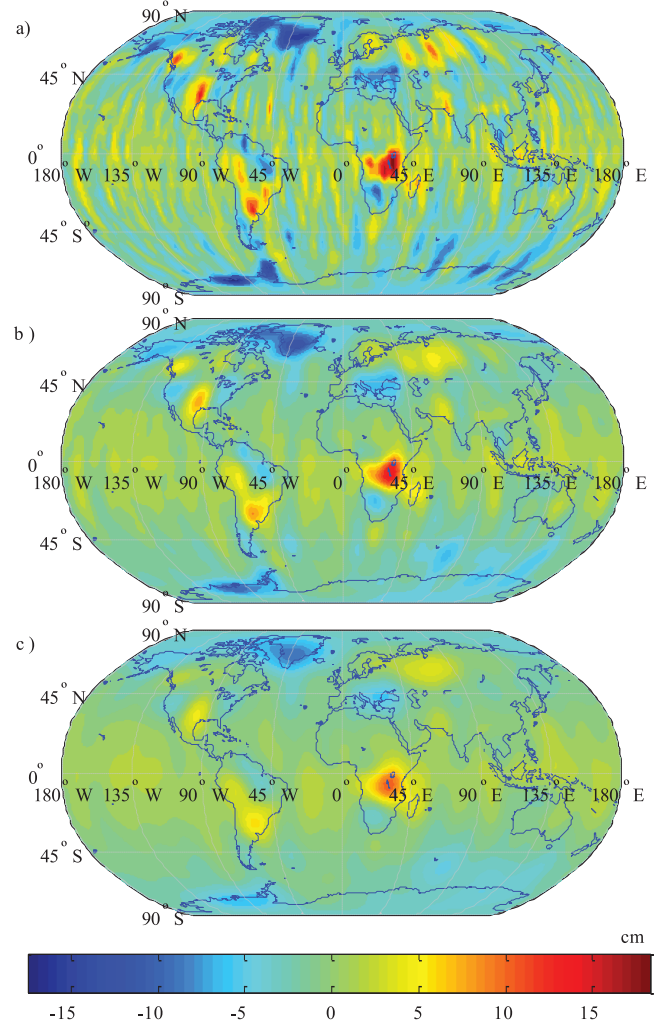
Bölüm 4.1’de verilen Gauss filtresinin $R = 300, 500$ ve 750 km’lik yarıçapları için yumuşatılmış 2006–2007 yılları arasındaki EWT değişimleri Şekil 6’da gösterilmektedir. Buradan, yumuşatma yarıçapı arttırıldığında söz konusu hataların (haritadaki şeritlerin) yok olmaya başladığı, ancak bununla birlikte incelenen sinyalin de kaybolduğu görülmektedir. Kısaca, yumuşatma yarıçapı arttırıldığında daha küçük derecelerdeki harmonik katsayılar çözüme dahil edilmekte, dolayısıyla incelenen EWT değişiminin kısa-dalgı boyulu kısmına ilişkin bilgi çözümden uzaklaştırılmaktadır.

Daha önce ifade edildiği gibi, çözümden amaç, sinyali kaybetmeden mevcut şeritleri temizlemektir. Bunun için yumuşatma sonrası, örneğin $R = 300$ km’lik çözümde halen var olan şeritlerin yok edilmesi amacıyla katsayı değişimlerin-

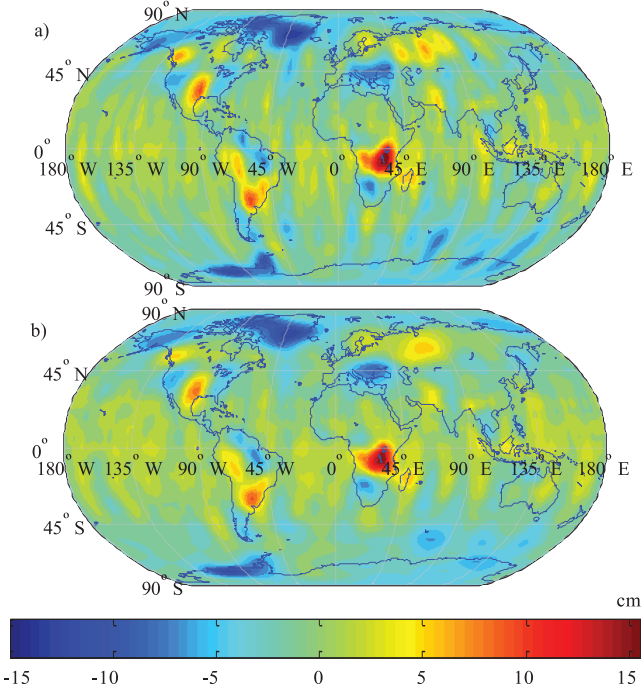


Şekil 5: 2006–2007 yılları arasındaki EWT değişimi

deki korelasyonların incelenmesi ve bunların giderilmesi gerekmektedir. Bölüm 3.2’deki korelasyon etkilerini giderme yöntemi, $m = 8$ ’den başlanarak ve 7. dereceden polinom kullanılarak (bu filtre C–P7M8 olarak adlandırılmıştır) söz konusu zaman aralığına ilişkin harmonik katsayı değişimlerine uygulanmış, ancak yöntem $R = 300$ km yumuşatma filtrel-



Şekil 6: (a) 300 km; (b) 500 km ve (c) 750 km yarıçaplı Gauss filtreleri kullanılarak elde edilen EWT değişimleri (2006–2007)



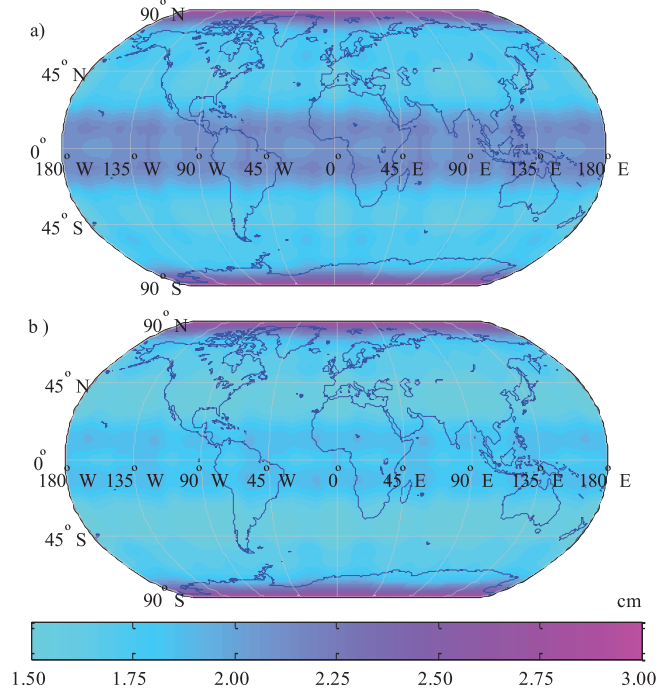
Şekil 7: 400 km yarıçaplı Gauss filtresi için (a) korelasyon etkisi giderilmemiş ve (b) giderilmiş (C-P7M8) veriden elde edilen EWT değişimleri (2006–2007)

çözümde ilgili hataları tam olarak giderememiştir. Bu amaçla, $R = 400$ km yarıçaplı Gauss filtresi ve C-P7M8 korelasyon etkilerini giderme yöntemi uygulanmıştır. Şekil 7a, (8) eşitliğine göre hesaplanan yalnız $R = 400$ km yarıçaplı Gauss yumuşatma filtresi uygulanmış çözümü, Şekil 7b ise, (14) eşitliğine göre elde edilen hem $R = 400$ km yarıçaplı Gauss filtresi uygulanmış hem de C - P7M8 yöntemiyle korelasyonları giderilmiş çözümü göstermektedir. Buradan, Şekil 7a'da ortaya çıkmış şeritvari hataların çözümden arındırıldığı, $R = 400$ km'lik filtre uygulandığı için de Şekil 6b'deki $R = 500$ km'lik filtreli çözüme göre sinyalin daha çok konduğu gözlenmektedir (Güney Amerika, Afrika'nın güney doğusu, Sibiry ve Kuzey Amerika'nın güneyinde gözlenen anomalilerin söz konusu hataları içermeyecek şekilde daha büyük genlikli olduğuna dikkat edilmelidir.).

Şekil 8, Şekil 7'ye ilişkin çözümlerin (9) ve (15) varyans eşitlikleriyle hesaplanan standart sapmalarını göstermektedir. Buradan, korelasyon etkileri giderilmiş çözümün diğerine göre daha küçük standart sapmalı olduğu görülmektedir. Ayrıca ekvator bölgesinde (ve kutup bölgelerinde) standart sapmalar daha yüksektir: Bu beklenen bir durumdur.

GRACE veri işlem merkezleri 2002 yılından günümüze aylık çözümleri yayımlamaktadırlar. Sonuçta yeryüvarı gravite alanına ilişkin 9 yıllık gibi uzun dönemli bir zaman serisi bulunmaktadır. Aşağıda söz konusu korelasyon etkilerini giderme yöntemi, bu zaman serilerinden elde edilen EWT hızları için irdelenmektedir:

Hız kestirimleri için 2003 yılından 2010 yılının Eylül ayına kadarki 92 aya ilişkin harmonik katsayılar ele alınmıştır. Referans gravite alanı modeli, 2003–2008 yılları arasındaki aylık GRACE çözümlerinden aritmetik ortalama ile türetilmiş ve bu referans modele göre her bir aya ilişkin EWT değişimleri (14) eşitliğiyle hesaplanmıştır. Analiz işlemleri, üç farklı yumuşatma yarıçapı ($R = 300, 500$ ve 700 km) için



Şekil 8: (a) Korelasyon etkisi giderilmemiş ve (b) giderilmiş (C-P7M8) veriden elde edilen EWT değişimlerinin standart sapmaları ($R=400$ km)

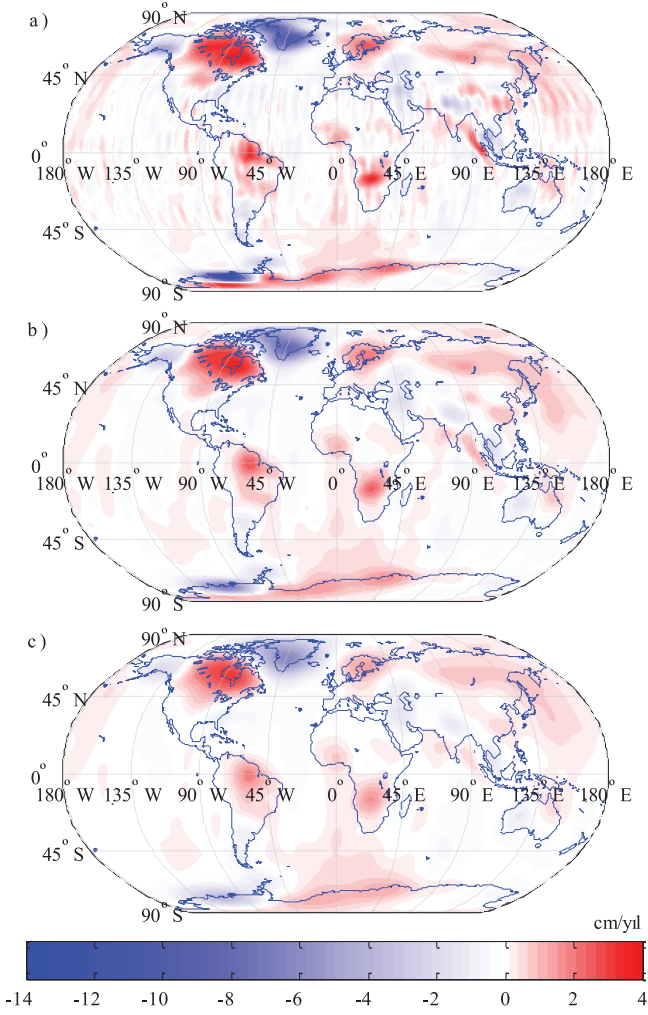
C-P7M8 polinomuyla yapılmıştır. Bir nokta için t zamanında elde edilen EWT değişiminin beklenen değeri,

$$E\{\Delta e(t)\} = b_0 + b_1 t + b_2 \cos 2\pi t + b_3 \sin 2\pi t + b_4 \cos 4\pi t + b_5 \sin 4\pi t$$

biçiminde öngörülerek (bkz., Steffen vd. 2009; Rangelova ve Sideris 2008), noktanın b_1 hızı, 92 aya ilişkin yukarıdaki biçimde yazılan düzeltme denklemlerinden en küçük kareler dengelemesiyle kestirilmiştir.

Şekil 9, sırasıyla $R = 300, 500$ ve 700 km'lik yumuşatma yarıçapları için yukarıdaki biçimde elde edilen EWT hızlarının konumsal alandaki dağılımını göstermektedir. Şekil 9a'dan, 300 km'lik yumuşatma yarıçapı için söz konusu C-P7M8 yönteminin orta enlem bölgesindeki (45° Kuzey ve 45° Güney) korelasyonların hızlara etkilerini tam olarak gideremediği görülmektedir. $R = 500$ km'den sonra ise söz konusu korelasyonlar ortadan kalkmıştır. 700 km'lik filtre ile incelenen sinyalin genliği de kaybolmaya başladığından, çözüm için 500 km'lik filtrenin daha uygun olduğu söylenebilir.

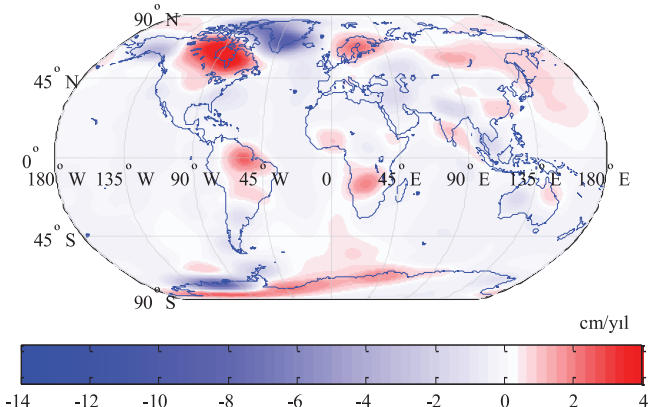
300 km'lik Gauss filtresinde kullanılan ağırlık fonksiyonu, Şekil 3'den görüldüğü üzere, ele alınan CSR verisindeki tüm katsayıları çözüme dahil etmektedir; ağırlık fonksiyonu hiçbir zaman sıfır olmamaktadır. Dolayısıyla yüksek dereceden katsayılardaki hatalar, ele alınan korelasyon etkilerini giderme yöntemine karşın kendilerini çözümde göstermektedirler. Diğer taraftan, ilgili şekildeki 500 km'lik ağırlık fonksiyonu, yaklaşık 50 dereceden sonra sıfıra gitmekte, buradan 60 dereceye kadar olan katsayıları çözüme almamaktadır. Burada elde edilen hız sonuçlarına göre 300 km'den sonraki yumuşatma yarıçaplarında korelasyon etkilerinin kaybolduğu bilindiğinden, 300 km'lik filtreli çözümde görülen söz konusu sistematik hataların 50 ve 60 derece arasında yer alan harmonik katsayılardaki giderilememiş korelasyonlardan kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır. Bu nedenle söz konusu aralığa düşen harmonik katsayılar için daha farklı de-



Şekil 9: (a) 300 km; (b) 500 km ve (c) 700 km yarıçaplı Gauss filtresi kullanılarak elde edilen yıllık EWT değişimleri (C-P7M8)

recelerden polinomlar kullanılarak yöntem geliştirilmelidir.

Son olarak, CSR veri merkezinden aynı dönem için sağlanan DDK1 harmonik katsayıları ile elde edilen yıllık EWT değişimleri Şekil 10'da gösterilmektedir. Herhangi bir filtre işlemi uygulamadan kestirilen bu hızlar ile Şekil 9'daki EWT hızları karşılaştırıldığında, DDK1 çözümünün sistematik hatalar içermediği ancak hızın büyüklüğünde bir azalma olduğu görülmektedir. Her ne kadar herhangi bir filtreleme yapılmadığı için DDK1 çözümleri uygulamada kolaylık sağlasa da, söz konusu sinyal kaybı, küçük bölgelerde etkilerini



Şekil 10: DDK1 verisi kullanılarak elde edilen yıllık EWT değişimleri

daha çok öne çıkarmaktadır. Ancak, yine de, filtreli çözüm ve DDK çözüm karşılaştırmalarının istatistikî yöntemler ile yapılması, görünen sinyal kaybının anlamlı olup olmadığının test edilmesi gerekmektedir.

5. Sonuçlar ve Öneriler

2002 yılından günümüze GRACE harmonik katsayıları aylık olarak çeşitli veri işlem merkezleri tarafından kullanıcılara sunulmaktadır. L2 verisi olarak da adlandırılan bu katsayılar kullanılarak yeryuvarı gravite alanına ilişkin zamansal değişimleri (eşdeğer su kalınlığı değişimi-EWT-, jeoit ve gravite değişimi) inceleyebilmek için katsayılardaki belli hataların giderilmesi gerekir. Bunun için genellikle izotropik, yani harmonik katsayının yalnız derecesine bağlı, Gauss filtresi uygulanır. Bu filtre bir ağırlık fonksiyonuna dayanır ve seçilen yumuşatma yarıçapı için bu fonksiyon belli bir dereceden sonraki katsayılar için sıfır olmaya başlar. Bir başka deyişle, ilgili katsayılar çözümde etkisizleştirilir. Böylece, yüksek derecelerdeki büyük genlikli hataların çözüme etkileri giderilir. Ancak küresel harmonik açınım kuramından da bilindiği üzere yüksek dereceden katsayılar ilgili sinyalin kısa-dalgı boyuna ilişkindir, yani, yerküre üzerinde daha küçük alandaki sinyali temsil ederler. Bu nedenle, sözü edilen hatalar giderilirken, sinyal de ortadan kaybolmaya başlar ve çözünürlük düşer.

GRACE uygulamalarında, Gauss filtresinin yarıçapı, genellikle, 300 km'den büyük seçilir. Filtreye karşın konumsal alandaki değişimlerde kuzey-güney yönünde yayılım gösteren bazı sistematik hatalar kalır. Yumuşatma yarıçapı ile bu türden hataların yoğunluğu ve genliği ters orantılıdır. Uygulamada, şerit (stripe) olarak adlandırılan bu hataların harmonik katsayıların belli türlerinde (çift ve tek dereceli olanları arasında) var olan korelasyonların sonucu olduğu bilinmektedir. Yumuşatma filtresi yanında, harmonik katsayı düzeyinde bu korelasyonların da giderilmesi gerekir. Korelasyon etkilerini giderme olarak adlandırılan bu filtre yöntemleri ile her bir harmonik sıraya ilişkin katsayılar incelenir ve dereceyle olan fonksiyonel yapı çeşitli yöntemlerle ortadan kaldırılır. Bu yöntemlerden biri de ilgili katsayılarla yüksek dereceden öngörülen dengeleyici polinomun en küçük kareler yöntemiyle kestirimine dayanır. Bu çalışmada bu yöntem irdelenmiş, harmonik katsayı derecelerinin kuvvetlerinden dolayı oluşan kondisyon hatasının nasıl giderileceği açıklanmış ve CSR veri merkezinden alınan harmonik katsayılarla EWT değişimlerinin incelenmesinde uygulanmıştır. Uygulama sonuçlarından da görüldüğü gibi, burada seçilen sabit bir polinom eşitliği (C-P7M8: 8. sıradan itibaren 7. dereceden polinom) ile 300 km'lik filtreli çözümlerde sistematik hataların kaldığı görülmektedir. Amaç sinyalin korunması ve çözünürlüğü arttırmak olduğundan, küçük yarıçaplı filtre uygulanırken ilgili sistematik hataların sinyali kaybetmeden harmonik katsayı düzeyinde giderilmesi gerekir. Bu nedenle, söz konusu yöntemde sabit polinom yaklaşımı yerine değişik dereceden polinomlar kullanılması gerektiği sonucu çıkmaktadır.

Kaynaklar

- Bettadpur S., (2007), *GRACE Level-2 Gravity Field Product User Handbook*, Center for Space Research, the University of Texas at Austin.
- 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, 263-274.
- Chambers D.P., (2006), *Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean*, Geophysical Research Letters, 33 (L17603).
- 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.
- 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(L13302).
- Chen Y., Schaffrin B., Shum C.K., (2008), *Continental water storage changes from GRACE line-of-sight range acceleration measurements*, VI Houtine-Marussi Symposium on Theoretical and Computational Geodesy'nin içinde, Cilt 132, Bölüm I, 62-66.
- Choi S., Oh C.W., Luehr H., (2006), *Tectonic relation between northeastern China and the Korean peninsula revealed by interpretation of GRACE satellite gravity data*, Gondwana Research, 9, 62-67.
- Davis J. L., Tamisiea M. E., Elósegui P., Mitrovica J. X., Hill E. M., (2008), *A statistical filtering approach for gravity recovery and climate experiment (GRACE) gravity data*, Journal of Geophysical Research, 113(B04410).
- Elsaka B., (2010), *Simulated Satellite Formation Flights for Detecting the Temporal Variations of the Earth's Gravity Field*, Doktora tezi, Institut für Geodaesie und Geoinformation, Universitaet Bonn, Bonn.
- Han S. C., Shum C.K., Jekeli C., Kuo C.Y., Wilson C., Seo K.W., (2005), *Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement*, Geophysical Journal International, 163, 18-25.
- Han S.C., Simons F.J., (2008), *Spatiospectral localization of global geopotential fields from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) reveals the coseismic gravity change owing to the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake*, Journal of Geophysical Research, 113(B01405).
- Jekeli C., (1981), *Alternative methods to smooth the Earth's gravity field*, Bildiri no. 327, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Kless R., Revtova A., Gunter B.C., Ditmar P., Oudman E., Winsemius H. C., Savenije H. H. G., (2008), *The design of an optimal filter for monthly GRACE gravity models*, Geophysical Journal International, 175, 417-432.
- Kusche J., (2007), *Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-Type gravity field models*, Journal of Geodesy, 81, 733-749.
- 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.
- Liu X., (2008), *Global Gravity Field Recovery from Satellite-To-Satellite Tracking Data with the Acceleration Approach*, Doktora Tezi, Delft University of Technology, Delft.
- Mikhailov V., Tikhotsky S., Diament M., Panet I., Ballu V., (2004), *Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data?*, Earth and Planetary Science Letters, 228, 281-297.
- Rangelova E., Sideris M.G., (2008), *Contributions of terrestrial and GRACE data to the study of the secular geoid changes in North America*, Journal of Geodynamics, 46, 131-143.
- Schmidt R., Schwintzer P., Flechtner F., Reigber C.H., 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.
- Schrama E.J.O., Wouters B., Lavallée D.A., (2007), *Signal and noise in gravity recovery and climate experiment (GRACE) observed surface mass variations*, Journal of Geophysical Research, 112(B08407).
- Seo K.W., Wilson C.R., (2005), *Simulated estimation of hydrological loads from GRACE*, Journal of Geodesy, 78, 442-456.
- Slobbe D.C., Ditmar P., Lindenbergh R.C., (2009), *Estimating the rates of mass change, ice volume change and snow volume change in greenland from ICESat and GRACE data*, Geophysical Journal International, 176, 95-106.
- 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, 157-165.
- Swenson S., Wahr J., (2003), *Monitoring changes in continental water storage with GRACE*, Space Science Reviews, 108, 345-354.
- Swenson S., Wahr J., (2006), *Post-processing removal of correlated errors in GRACE data*, Geophysical Research Letters, 33(L08402).
- Wahr J., Molenaar M., (1998), *Time-variability of the earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE*, Journal of Geophysical Research, 103, 30205-30229.
- Wahr J., Swenson S., Velicogna I., (2006), *Accuracy of grace mass estimates*, Geophysical Research Letters, 33 (L06401).
- Wahr J., (2007), *Time-Variable Gravity from Satellites*, Treatise on Geophysics, 3, 231-237.
- Wouters B., Schrama E.J.O., (2007), *Improved accuracy of GRACE gravity solutions through empirical orthogonal function filtering of spherical harmonics*, Geophysical Research Letters, 34(L23711).
- Van Der Wal W., (2009), *Contributions of Space Gravimetry to Postglacial Rebound Modeling with Different Rheologies*, Doktora Tezi, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta.
- Url 1, *Earth observatory, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*, [http:// earthobservatory.nasa.gov/ Features/ GRACE/](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE/), [Erişim 13 Ekim 2011].
- Url 2, *Jet Propulsion Laboratory, NASA and DLR Sign Agreement to Continue Grace Mission Through 2015*, <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2010-195>, [Erişim 14 Ekim 2011].
- Url 3, *GFZ, International Centre for Global Earth Models (ICGEM)*, <http://icgem.gfz-postdam.de/ICGEM/>, [Erişim 13 Ekim 2011].