

GRACE L1B RL03 Verilerinin Enerji Korunumu Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi: Öncül Sonuçlar

Metehan Uz^{1,*}, Orhan Akyılmaz¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

Özet

Fırlatıldığı 2002 yılından itibaren, GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) uydusu misyonu, Yer'in gravite alanındaki zamansal değişimler hakkındaki bilgilerimize ve Yer sistemindeki kitle yer değiştirmelerinden kaynaklanan iklime-duyarlı sinyallerin izlenmesine büyük katkılar sağlamıştır. Bu çalışmada, 2010 yılına ait tüm ayların GRACE Seviye-1B (Level-1B) RL02 ve RL03 verileri kullanılarak 60 derece açınımına sahip zaman değişkenli gravite alanı modelleri enerji denge yaklaşımı (Energy Balance Approach - EBA) ile üretilmiştir. Üretilen modeller sırasıyla, CSR (Center for Space Research), JPL (Jet Propulsion Laboratory) ve GFZ (German Research Center for Geoscience) kurumlarına ait Seviye-2 (Level-2 - L2) hem RL05 hem de RL06 aylık modelleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular uydusu misyonuna ait son olarak yayınlanmış (RL03) yıldız kamera (Star Camera - SCA1B) ve K/Ka Band (K/Ka Band Ranging - KBR1B) gözlemlerinin hem gravite potansiyel farklarında hem de aylık model katsayılarında (küresel harmonik katsayılar) anlamlı bir iyileşme olduğunu ortaya koymuştur. Uydusu yörüngesi boyunca tanımlı anlık gravite potansiyeli farkları CSR, JPL ve GFZ RL05 L2 çözümlerinden türetilen farklar ile ortalama 0.89 korelasyonlu iken son çözüm olan RL06 L2 modelleri ile ortalama 0.93 korelasyona sahip olarak elde edilmiştir. Zaman değişkenli gravite alanı modelleri bu farklar kullanılarak hesaplanmıştır. Modellere ait düşük derece harmonik katsayılar L2 modelleri ile birebir uyum sağlanıyorken yüksek dereceli katsayılarda farklılaşmaların varlığı tespit edilmiştir. Ayrıca üretilen aylık model katsayılarında uydusu yörüngesi ile korelasyonlu olan Kuzey-Güney yönlü bozulmalar (North-South stripes) belirgin şekilde azalmıştır. Böylece enerji korunumu yaklaşımı kullanılarak önceki model çözümlerine göre GRACE L2 modelleri ile daha tutarlı aylık modeller üretilmiş olup aynı zamanda bölgesel çözümlere yönelik yüksek doğruluklu anlık gravite potansiyel farkları da elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler

GRACE Uydusu Misyonu, Enerji Korunumu Yaklaşımı, Zaman Değişkenli Gravite Alanı Modelleri

1. Giriş

GRACE uydusu misyonuna ait gözlemler ile yeryüzünde zamana bağlı kütle değişimleri hakkında bilgiler üretilmektedir. Gravite alanı modelleri, bu bilgiler kapsamında hesaplanmaktadır. Günümüzde GRACE gözlemleri kullanılarak birçok farklı kurum ve kuruluş tarafından hesaplanan hem statik hem de zaman-değişkenli gravite alanı modelleri bulunmaktadır (Barthelmes, 2016). CSR, JPL ve GFZ kurumlarının zaman-değişkenli gravite alanı modelleri, klasik dinamik yaklaşım (conventional dynamic approach) ile üretilip aylık olarak paylaşılmaktadır (Bettadpur, 2018; Dahle vd., 2018; Yuan, 2018). Bu kurumlara ait veri tabanlarından GRACE gözlemlerini içeren L1B verileri farklı versiyonları ile yayınlanmaktadır (Case vd., 2010). GRACE L2 modellerinin yanı sıra farklı kurumlara ait gravite alanı modelleri de bulunmaktadır. ITSG-Grace2018, bu modellerden biri olup kısa yaylar yaklaşımı (short-arc approach) kullanılarak hesaplanır (Mayer-Gürr, 2018).

EBA'yı (enerji denge yaklaşımı) diğer yaklaşımlardan ayıran özelliği iki aşamalı çözüme sahip olmasıdır. İlk adımda uydusu konumuna ait jeopotansiyel değerleri enerji integrali ile hesaplanır ve GRACE tipi misyonlar için farkları alınır. İkinci adımda ise bir önceki adımda hesaplanan jeopotansiyel farklar (GPD - geopotential differences) kullanılarak gravite alanı modelinin harmonik katsayıları kestirilir (Jekeli, 1999; Shang vd., 2015). Bu çalışma kapsamında, 2010 yılına ait tüm ayların GRACE L1B RL02 ve RL03 verileri kullanılarak 60 derece açınımına sahip zaman-değişkenli gravite alanı modelleri, enerji korunumu yaklaşımı ile üretilmiştir. Zaman aralığı boyunca GRACE L1B verilerine ait durum raporları incelenmiş ve bu inceleme sonucunda 2010 yılı Mayıs, Haziran ve Ekim aylarında uydusu çiftinin, ağırlık merkezi kalibrasyon manevrası (CoM- Center of Mass calibration maneuver), sabit yörünge yüksekliği modu (AHM - attitude hold mode) ve batarya deşarj işlemi (battery discharge - yaw turn) gibi yapay etkilere maruz kaldığı tespit edilmiştir. Çözüm stratejisi gereği bu etkilerin modellere olan etkisi araştırılmıştır. Enerji integralinden doğrudan hesaplanan GPD değerlerinin, GRACE L2 aylık modellerinden türetilen GPD değerleri ile korelasyonları hesaplanmıştır. Yukarıda belirtilen yapay etkilerin bulunduğu aylarda RL03 verileri kullanılarak gerçekleştirilen çözümler sonucunda korelasyonların anlamlı bir biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle bu aylarda uydusu yörünge hareketi ile ilintili olan Kuzey-Güney yönlü bozulmalar %25'lere varan oranda azaltılmıştır. Ayrıca L1B RL03 verileri kullanılarak hesaplanan aylık modellerden, sistematik hata kaynaklarına sahip Haziran ayı ile herhangi hata kaynağına ilişkin bilgi içermeyen Nisan ayı modelleri için uydusu konumunda tanımlı GPD değerleri kestirilmiştir. Benzer şekilde CSR RL06 ve ITSG-Grace2018 modellerinden de kestirilen GPD değerlerinin birbirleriyle farkları alınarak oluşturulan aylık zaman serileri güç spektrumunu analizi ile frekans alanında ve Allan varyans analizi ile zaman alanında irdelenmiştir. Böylece modellerin birbirlerine göre içerdikleri gürültülerin boyutları ve karakteristiği hakkında bilgiler edinilmiş ve yorumlanmıştır.

* Sorumlu Yazar: Tel: (0212)2856783 Faks: (0212)2856587

E-posta: uzme16@itu.edu.tr (Uz M.), akyilma2@itu.edu.tr (Akyılmaz O.)

2. Metodoloji

Genel anlamda iki aşamada gravite alanı üretimine olanak sağlayan EBA yaklaşımını farklı dört adımda da ele alabiliriz (Shang vd., 2015). Bu adımlara göre elde edilen çözüm algoritması:

- Duyarlı dinamik yörünge belirleme ve ivmeölçer kalibrasyonu,
- KBR baz hızı projeksiyonu (Shang vd., 2015),
- Enerji integrali ile anlık GPD değerlerinin hesaplanması (Guo vd., 2015),
- Statik/Zaman-değişkenli gravite inversiyonu – küresel harmonik katsayıların kestirilmesi biçiminde sıralanabilir.

2.1. Duyarlı Dinamik Yörünge Belirleme Ve Ivmeölçer Kalibrasyonu

Duyarlı dinamik yörünge belirleme, mevcut yörünge bilgisinin öncül gravite alanı modellerine göre yeniden kestirilmesi üzerine kuruludur. Böylece yörünge karakteristiği ve enerji integrali temelinde üretilen büyüklüklerin, öncül gravite alanı model farklılıklarından doğacak sistematik hatalarının önüne geçilmeye çalışılır (Shang vd., 2015, Akyılmaz vd., 2016). Korunumsuz kuvvetlerin (atmosferik sürtünme, güneş radyasyon basıncı vb.) ölçülmesini sağlayan 3 eksenli ivmeölçerlerin düzenli olarak kalibre edilmesi gerekmektedir. Sıcaklık değişimi gibi fiziksel etkilerin, ivmeölçer gözlemlerini doğrudan etkilediği ve bu nedenle kalibre edilmesi GRACE çözümlerinde sıkça uygulanan bir yaklaşımdır (Klinger ve Mayer-Gürr, 2016). Dolayısıyla günlük kalibrasyon parametreleri (bias, bias drift ve ölçek) dinamik yörünge hesabı sırasında eş zamanlı olarak hesaplanmaktadır.

2.2. KBR Baz Hızı Projeksiyonu

Uydular arası bağıl hız vektörü, enerji integrali formülasyonunda uydular arasındaki kinetik enerji farkının, Yer'in dönmesinden kaynaklanan merkezkaç potansiyelleri arasındaki farkın ve de korunumsuz kuvvetlerden kaynaklanan potansiyeller arasındaki farkın hesaplanmasında kullanılmaktadır. Dolayısıyla, hesaplanan dinamik yörüngedeki bu görece düşük doğruluklu bileşenin çok daha yüksek doğruluklu KBR baz hızı bileşeninin iki uydu ağırlık merkezlerini birleştiren uydu görüş çizgisi (line of sight) doğrultusuna izdüşümü ile değiştirilmesi, uydular arası anlık çekim potansiyeli farklarının, enerji integrali ile çok yüksek doğrulukta hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu izdüşüm bir önceki adımda hesaplanan dinamik yörünge koordinat ve hızları yardımıyla aşağıdaki şekilde kolayca gerçekleştirilebilmektedir (Guo vd., 2015; Shang vd., 2015).

$$\dot{\mathbf{x}}_{12}^{\rho} = \dot{\rho} \frac{\mathbf{x}_{12}}{|\mathbf{x}_{12}|} + \sqrt{|\dot{\mathbf{x}}_{12}|^2 - \dot{\rho}^2} \frac{\mathbf{x}_{12} \times \dot{\mathbf{x}}_{12} \times \mathbf{x}_{12}}{|\mathbf{x}_{12} \times \dot{\mathbf{x}}_{12} \times \mathbf{x}_{12}|} \quad (1)$$

Eşitlikte bulunan uydular arası \mathbf{x}_{12} ve $\dot{\mathbf{x}}_{12}$ bağıl konum ve hız vektörlerini ifade eder. Ayrıca, $\dot{\rho}$, baz hızı gözlemleri iken $\dot{\mathbf{x}}_{12}^{\rho}$ ifadesi ise baz hızı gözlemleri güncellenmiş yeni rölatif hız vektörünü temsil eder. Böylece KBR sayesinde yüksek duyarlılıkla elde edilmiş gravite sinyali, uydu hız vektörüne aktarılmış olur. Bir başka deyişle GRACE misyonunun en önemli donanımına ait gözlemler uygulamada doğrudan işleme katılmış olur.

2.3. Anlık GPD Değerlerinin Hesaplanması

Anlık jeopotansiyel değerlerinin hesaplanması amacıyla Guo vd., (2015) tarafından önerilen eşitlik,

$$V^E = \frac{1}{2} |\dot{\mathbf{x}}|^2 - \mathbf{w} \cdot (\mathbf{x} \times \dot{\mathbf{x}}) - \int_{t_0}^t \mathbf{a} \cdot (\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{w} \times \mathbf{x}) dt - E^0 \quad (2)$$

kullanılır. Eşitliğin sol tarafı tek bir uydu için jeopotansiyel değerini ifade ediyor iken sağ tarafı ise bir önceki adımda elde edilmiş konum ve hız vektörlerini, \mathbf{w} yeryuvarı açısız hızını ve $\mathbf{a} = \nabla V^R + \mathbf{f}$ ise arka plan güç modeline ait korunumlu ve korunumsuz kuvvetlerin ivmelenmelerinin toplamını ifade etmektedir. Eşitlik (2)'nin elde edilmesine yönelik detaylı bilgi Guo vd., (2015) ve Shang vd., (2015) çalışmalarında bulunabilir. GPD değerleri ise Eşitlik (2)'nin uydu çifti için ayrı ayrı uygulanıp farklarının alınması ile hesaplanmaktadır.

2.4. Gravite Alanı Modelleme

Gravite inversiyonu bir önceki adımda elde edilmiş GPD değerlerinden küresel harmonik katsayıların kestirimidir. Model katsayıları ile anlık GPD değerleri arasındaki doğrusal ilişki inversiyon işlemi kolaylaştırmaktadır. Yeryuvarı dışında herhangi bir konumdaki jeopotansiyel,

$$V = V(r, l, q) = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^{n-1} \bar{P}_{nm}(\cos(q)) \left[\bar{C}_{nm} \cos(ml) + \bar{S}_{nm} \sin(ml) \right] \quad (3)$$

ile hesaplanır. \bar{P}_{nm} , uyu konumunun küresel koordinatlarına (r, l, q) bağlı olarak hesaplanan standartlaştırılmış

Legendre polinomlarını ifade eder. \bar{C}_{nm} ve \bar{S}_{nm} ise gravite alanı model katsayılarıdır. Normal gravite, $U(r, l, q)$, alanına ait potansiyeli, Eşitlik (3)'den çıkardığımızda bozucu potansiyeli, $T(r, l, q)$, elde ederiz. Böylece gravite alanı model katsayıları ve düzeltmeleri, (D), ile aşağıdaki gibi ifade edebiliriz,

$$\mathbf{T}_{12}(r_2, l_2, q_2, r_1, l_1, q_1) + \mathbf{e}_T = \frac{GM}{R} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n (a_{nm} D \bar{C}_{nm} + b_{nm} D \bar{S}_{nm}) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'ün sol tarafı anlık GPD değerleri (enerji integralinden hesaplanan farklar) ve hatalarına ait vektör iken sağ tarafında yer alan a_{nm} ve b_{nm} ilgili katsayılar matrisinin elemanlarıdır. N_{\max} ise küresel harmonik açılımın maksimum derecesidir. GRACE gözlemleri $n=0$ ve 1 derecelere karşı duyarsız olduğu için model açılımı $n=2$ dereceden itibaren dikkate alınır. Eşitlik (4) çözüme ait fonksiyoneli modeli temsil eder. En küçük kareler yöntemiyle bilinmeyen model katsayıları $D \bar{C}_{nm}$ ve $D \bar{S}_{nm}$ kestirimi bu fonksiyonel modele göre gerçekleştirilir.

3. Zaman-Değişkenli Gravite Alanı Modelleri

EBA çözüm modelinin ilk adımı olan duyarlı dinamik yörüngeler, GRACE GNV1B yörünge bilgisi kullanılarak Tablo 1.'de sunulan öncül gravite alanı modelleri ile yeniden hesaplanmış ve eş zamanlı olarak ivmeölçer kalibrasyonu işlemi gerçekleştirilmiştir. Günlük bias ve bias drift parametreleri kestirilmiş fakat ölçek parametreleri Shang vd., (2015) çalışmasında olduğu gibi 2010 yılı öncesi için 1.0 sonrası için ise 0.98 olarak ele alınmıştır. Elde edilen yörünge bilgisi kullanılarak Eşitlik (1) ile KBR verilerine ait duyarlı gravite sinyal bilgisi, hız vektörüne aktarılmıştır. Güncellenen yörünge bilgisi ile de Eşitlik (2) kullanılarak uyu konumunda tanımlı jeopotansiyeller hesaplanıp farkları alınmıştır. Böylece EBA'nın ilk aşaması olan GPD değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Böylece hem SCA1B/KBR1B RL02 ve RL03 ile AOD1B RL05 ve RL06 verileriyle ayrı ayrı hesaplama yapılmış ve GPD değerleri elde edilmiştir. Bu değerler gravite inversiyonunda kullanılarak sırasıyla ITU RL01 ve ITU RL02 aylık modelleri kestirilmiştir.

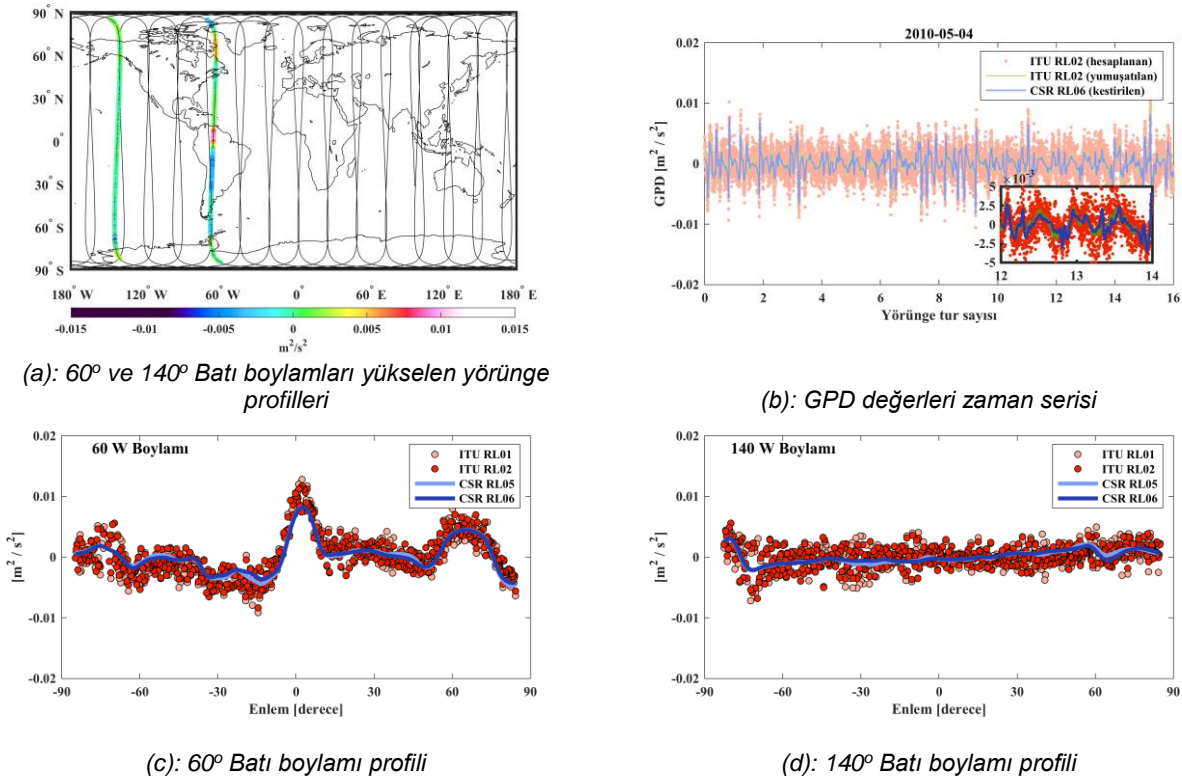
Tablo 1: Öncül gravite alanı modelleri

Model	Kaynak
Referans gravite alanı	EIGEN-6C
Gezegen (N-body) etkileri	DE421
Okyanus gelgiti	EOT11a (Rieser vd., 2012);
Atmosfer gelgiti	Biancale ve Bode (2006)
Katı-Yer gelgiti (Anelastik)	IERS 2010 (Petit ve Luzum, 2011)
Kutup-Okyanus gelgiti	
Genel relativistik etki	
Atmosfer/Okyanus katlanma etkileri	AOD1B RL05 (Dobslaw vd., 2013) AOD1B RL06 (Dobslaw vd., 2017)
Çekimsel olmayan (korunumsuz) ivmelenmeler	ACC1B/SCA1B (L1B)

3.1. Enerji İntegrali ile Hesaplanan Anlık GPD Değerleri

EBA ile hesaplanan GPD değerleri, KBR gözlemlerinin sahip olduğu gravite sinyalini doğrudan barındırır. Şekil 1'de 2010 yılı 4 Mayıs günü için enerji integralinden hesaplanan GPD değerleri farklı biçimlerde gösterilmektedir. Şekil 1.a'da bugüne ait 60° ve 140° batı boyları boyunca uydunun konumunda tanımlı GPD'lerin yörünge izi davranışının genel

gösterimi verilmiştir. Şekil 1.b ise aynı güne ait enerji integralinden hesaplanan GPD'lerin kayar ortalama yöntemi (moving average) kullanılarak yumuşatılmış değerleri ile CSR L2 modellerinden doğrudan kestirilen GPD değerlerinin zaman serileridir. Hesaplanan ve modelden kestirilen GPD değerlerin genel davranışı benzerdir. Bu benzerliği yumuşatılmış değerlerin davranışı da destekler niteliktedir. Beklenildiği üzere enerji integralinden hesaplanan GPD değerleri, aylık modelden kestirilen değerlere göre yüksek gürültü karakteristiğine sahiptir. Bu durum GPD değerlerinin hesabında GRACE L1B verilerinin enerji integrali içerisinde doğrudan kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Şekil 1.a'da renkli olarak gösterilen profillerin GPD değerleri Şekil 1.c ve 1.d sunulmuştur. Bu iki farklı profil, uydu gravimetrisi açısından GRACE gözlemleri ve bu gözlemlerden üretilen büyüklüklerin yeryüvarı gravite değişimlerine ne denli duyarlılığı olduğunu kanıtı olarak düşünülebilir. Bölgesel anlamda yeryüvarı üzerinde kütle değişimin yoğun yaşandığı Antarktika, Grönland ve Amazon bölgelerine ait uydu konumundaki GPD değerlerinin değişkenliği 60° batı boylamı için Şekil 1.c'de gösterilmiştir. Aynı zamanda Şekil 1.d'de ise 140° batı boylamı boyunca olan değişkenlik sunulmuştur. Bu iki profil, kütle değişimlerinin yoğun ve/veya az yaşandığı bölgelerdeki hesaplanan ve modellerden kestirilen GPD değerlerinin gravite sinyalindeki değişimi yansıtabilme becerisini göstermektedir.



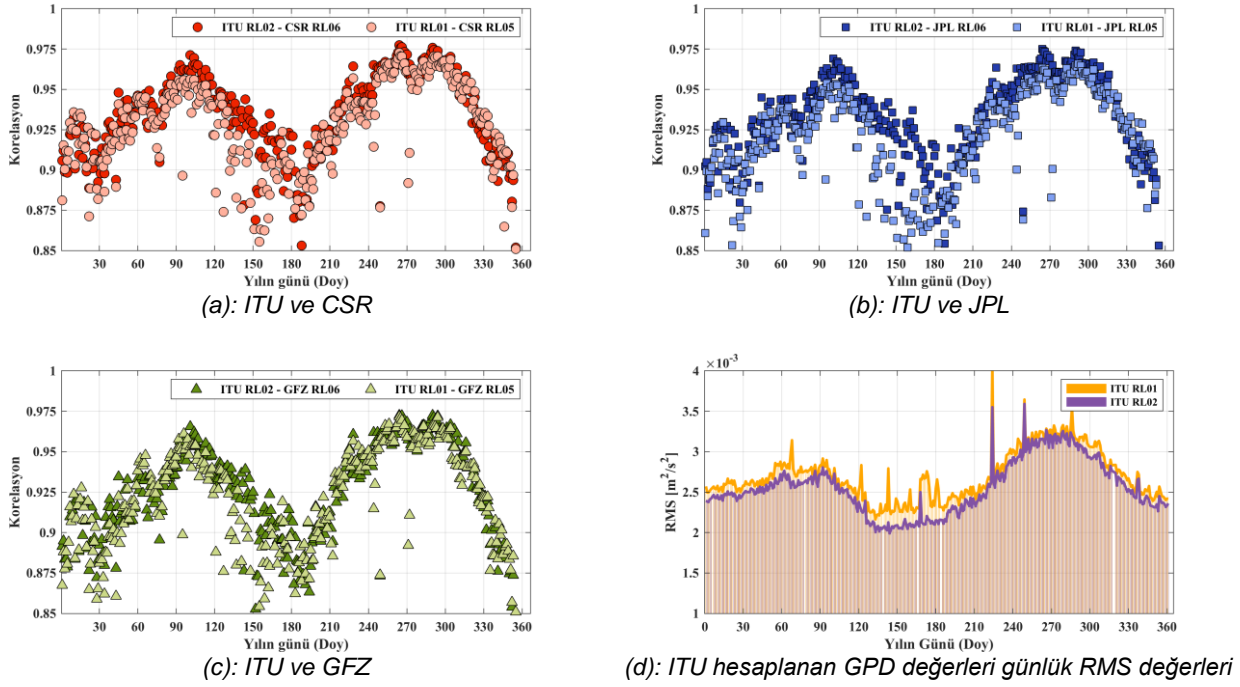
Şekil 1: Bir günlük GPD değerleri (hesaplanan, yumuşatılan ve kestirilen) zaman serisi ve 60° ve 140° W boylamı yükselen yörünge profilleri.

Bir günlük yörünge boyunca hesaplanan ve CSR, JPL ve GFZ kurumlarına ait modellerden kestirilen GPD değerlerinin korelasyonlarına da bakılmıştır. Böylece model belirsizlikleri ve uydu gözlemlerine ait gürültülerden doğrudan etkilenen enerji integrali sonuç büyüklüklerinin model değerleri ile uyumu araştırılmıştır. Şekil 2'de 2010 yılı boyunca günlük korelasyonların dağılımı ile ITU RL01 ve RL02 için hesaplanan GPD değerlerinin günlük RMS değerleri verilmiştir. Şekil 2.a, 2.b ve 2.c incelendiğinde ITU RL01 ve RL02 için hesaplanan GPD değerlerinin sırasıyla GRACE L2 RL05 ve RL06 modellerinden kestirilen GPD değerleri arasında yıllık ortalama 0.93 korelasyona sahip oldukları söylenebilir. Kestirilen GPD'ler ile modellerden hesaplanan GPD değerleri ile hemen hemen benzer korelasyonlar elde edilmektedir fakat bir yıllık periyotta farklılığın görüldüğü aylar Mayıs (Doy: 121-151) ve Haziran'dır (Doy: 152-181). GRACE L1B RL03 verileri kullanılarak kestirilen ve modellerden hesaplanan GPD değerleri arasında bu aylarda daha yüksek korelasyonlar bulunmuştur. Mayıs ve Haziran ayları ortalama korelasyonlar ITU RL01 için sırasıyla 0.88 ve 0.86 iken ITU RL02 çözümlerinde 0.93 ve 0.90 olarak elde edilmiştir. Şekil 2.d'de hesaplanan GPD değerlerinin RMS'lerinin yıllık dağılımı gösterilmiş olup Mayıs ve Haziran ayları dışında genel olarak benzer değerler hesaplanmıştır.

Günlük korelasyonlar ITU RL01 ve RL02 modellerini üretmek amacıyla enerji integralinden hesaplanan GPD değerlerinin hem L2 modelleri hem de kendi aralarında uyum içerisinde olduklarını göstermektedir. Bir yıllık periyotta farklı sonuçlar Mayıs ve Haziran ayı için elde edilmiştir. Bu aylarda ITU RL02 üretiminde kullanılan GPD kestirim değerlerinin önceki çözüme göre resmi L2 modelleri ile daha stabil ve yüksek korelasyona sahip oldukları görülmüştür.

Bu aylara ait günlük RMS değerlerinde de benzer durum söz konusudur. Bir başka deyişle önceki çözüm GPD değerlerinin genlikleri daha yüksek olup daha yüksek gürültü barındırmaktadır denilebilir. Ayrıca bu iki ay dışında Ekim (Doy: 274-304) ayı günlük RMS sonuçları zaman serisinin en yüksek değerlerine sahip olarak elde edilmiştir. Fakat korelasyonlar incelendiğinde günlük korelasyonlarının hem ITU RL01 hem de ITU RL02 için benzer sonuçlar olduğu görülmektedir. Bu durum günlük korelasyonların hesaplanan GPD değerleri için tek başına bir doğruluk ölçütü olmadığı fakat modelden türetilen GPD değerleri ile uyum içerisinde olduklarının sonucudur.

GRACE L1B verilerinin yapısı hakkında bilgiler aylık raporlardan elde edilebilir. Bu raporlar incelendiğinde Mayıs ayında; GRACE-B uydusuna 19 Mayıs günü yaklaşık 90 sn süreliğine yörünge bakım manevrası (orbital maintenance maneuver) gerçekleştirilmiş ve 22 – 23 Mayıs günleri aralığında ise yaklaşık 10 saatlik KBR1B veri kaybı yaşanmıştır. Haziran ayında; uydu çiftine CoM kalibrasyon manevrası ile sabit yörünge yüksekliği modu işlemleri



Şekil 2: ITU RL01 ve RL02 modelleri için enerji integralinden hesaplanan GPD değerlerinin, CSR, JPL ve GFZ RL05 ve RL06 L2 modellerinden hesaplanan GPD değerleri ile olan günlük korelasyonları ve hesaplanan GPD değerlerinin günlük RMS değerleri.

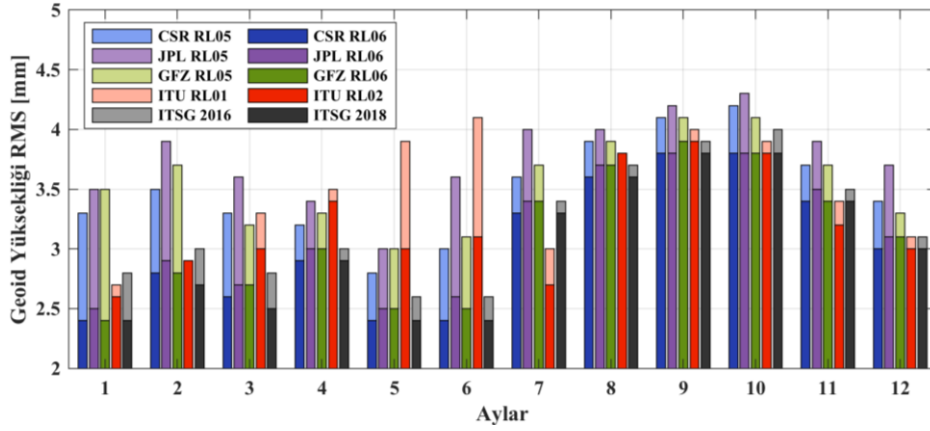
uygulanmıştır. Ekim ayında ise, CoM kalibrasyon manevrası ve uydu sıcaklığı artışına bağlı olarak batarya deşarj işlemi uygulanmıştır. Bu yapay etkiler doğrudan L1B verilerine (özellikle sensörlere bağlı KBR1B, SCA1B ve ACC1B) sistematik hatalar olarak yansımaktadır. Dolayısıyla yukarıda açıklanan sonuçlar ile mevcut enerji integralinden hesaplanan GPD değerlerinin çözüm modeli gereği bu hataları doğrudan yapısında barındırdığı ortaya konmuştur. Bir sonraki bölümde hesaplanan GPD değerlerinden türetilen zaman-değişkenli gravite alanı modelleri ve yukarıda sıralanan sistematik hata kaynaklarının modellere olan etkisi ele alınmıştır.

3.2. Gravite İncersiyonu – Küresel Harmonik Katsayıların Kestirimi

Bir önceki bölümde enerji integralinden hesaplanan GPD değerleri Eşitlik (4)'te kullanılarak ITU RL01 ve RL02 modelleri 60 derece açınma sahip ve GIF48 (Ries vd., 2011) statik alanından farklar şeklinde kestirilmiştir. Modellerin değerlendirilmesi ise CSR, GFZ ve JPL kurumlarına ait hem RL05 hem de RL06 L2 modellerinin 60'ıncı dereceye kadar açınım katsayıları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzer şekilde Graz Üniversitesine ait ITSG-Grace2018 (Mayer-Gürr vd., 2018) aylık modelleri de değerlendirmede dikkate alınmıştır. Karşılaştırmada tüm modellerin C_{20} katsayıları, ilgili sürümlere yönelik tavsiye edilen GRACE TN-07 ve TN-11 (Cheng vd., 2013) değerleri ile yer değiştirilmiştir. Modellerin gürültü karakteristiğini daha iyi anlamak amacıyla herhangi bir filtreleme yaklaşımı (post-processing) kullanılmamıştır. Ayrıca modellerin Kuzey-Güney yönlü bozulmalarını daha net görmek amacıyla geoid yüksekliği değişimleri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır.

ITU RL01 ve RL02 modelleri elde edildikten sonra tüm aylık modellerin GIF48 statik alana göre geoid değişimlerinin hesaplanan RMS değerleri Şekil 3'te verilmiştir. RMS değerleri her bir modelin mevcut gürültü yapıları ve statik alana göre kütle değişimlerini ne derecede barındırdığı hakkında öncül bilgi vermektedir. Dolayısıyla Şekil 3 incelendiğinde ITU RL01 modeli CSR, JPL ve GFZ RL05 modelleri ile uyum içerisinde iken bu çalışmanın sonucu olan ITU RL02

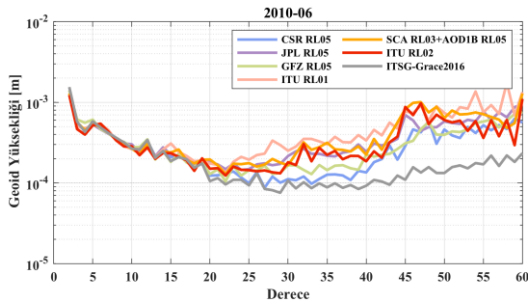
modelleri ise aynı kurumların RL06 modelleri ile tutarlılık göstermektedir. Bölüm 3.1’de olduğu gibi Mayıs ve Haziran aylarında ITU RL01 modelinin göze çarpan biçimde RL05 modellerinden farklı RMS değerlerine sahip olduğu gözükmektedir. Benzer durum ITU RL02 modelleri ile RL06 L2 modelleri arasında da görülmektedir. Ayrıca Ekim ayında RMS değerleri en yüksek değerler olarak elde edilmiştir.



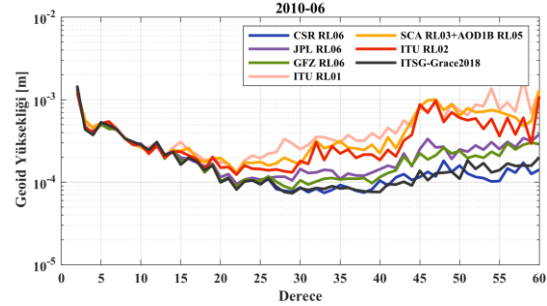
Şekil 3: ITU RL01 ve RL02 modelleri ile CSR, JPL ve GFZ kurumlarına ait aylık modellerin GIF48 statik alanına göre geoid değişiminin RMS değerleri.

3.2.1. 2010 Yılı Haziran Ayı Sonuçları

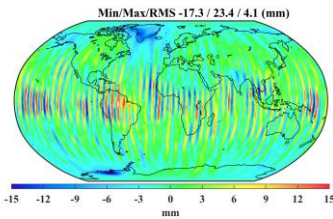
Çalışma kapsamında üretilen aylık modellerin daha iyi anlaşılması amacıyla farklılıkların yaşandığı Haziran ayının yanı sıra herhangi bir sistematik etkinin olmadığı Nisan ayı sonuçları da detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Şekil 4’te Haziran ayına ait GIF48 statik alanına göre zamana bağlı geoid değişimleri gösterilmiştir. Modellerin geoid yüksekliği türünden derece varyans güç spektrumları Şekil 4.a ve 4.b’de sunulmuştur. Şekil 4.c, 4.d ve 4.e’de ise Kuzey-Güney yönlü bozulmaları incelemek üzere yeryüvarı üzerinde geoid değişimlerinin gösterimi gerçekleştirilmiştir.



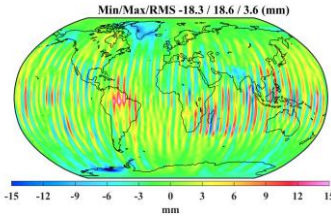
(a): Derece varyans güç spektrum



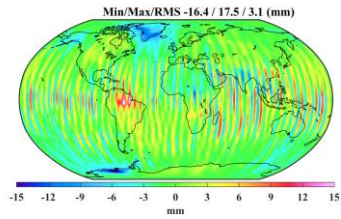
(b): Derece varyans güç spektrumu



(c): SCA1B RL02 + AOD1B RL05
(ITU RL01)



(d): SCA1B RL03 + AOD1B RL05

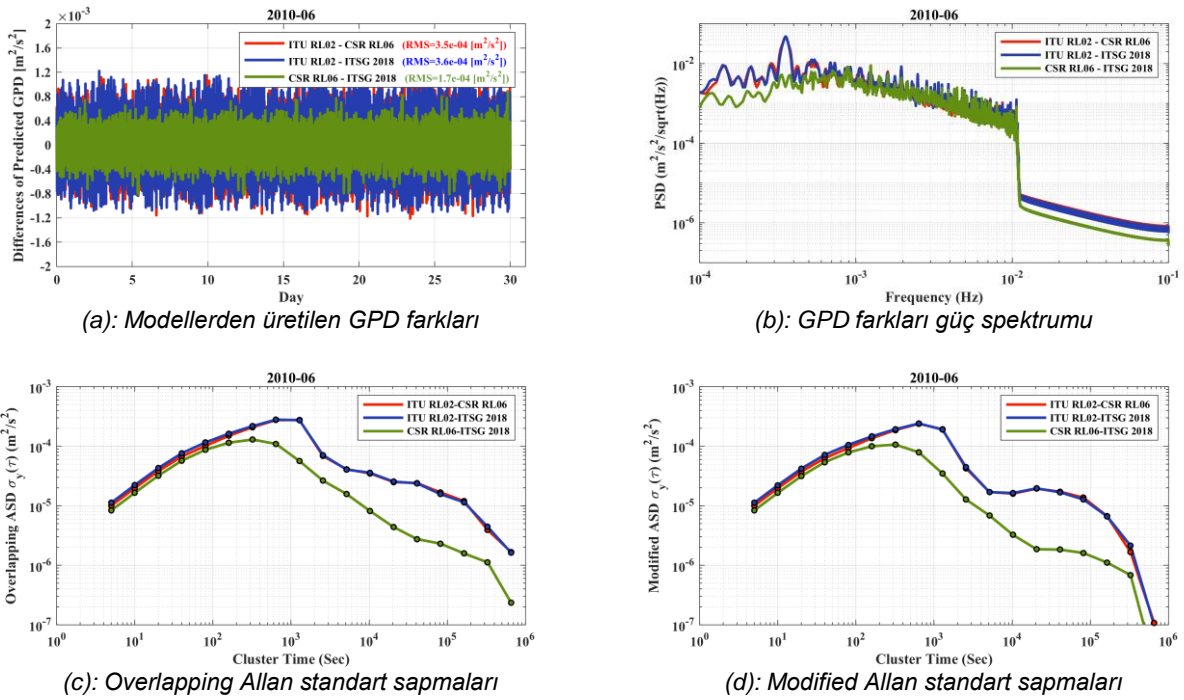


(e): SCA1B RL03 + AOD1B RL06
(ITU RL02)

Şekil 4: 2010 yılı Haziran ayı (a): CSR, JPL, GFZ RL05 ve ITSG modelleri ile ITU çözümleri geoid yüksekliği türünden derece varyans güç spektrumu, (b): CSR, JPL, GFZ RL06 ve ITSG modelleri ile ITU çözümleri geoid yüksekliği türünden derece varyans güç spektrumu, (c): ITU RL01(SCA1B RL02+AOD1B RL05) geoid değişimleri, (d): çözümlerde sadece SCA1B RL03 veri güncellemesi yapılarak elde edilen geoid değişimleri, (e): ITU RL02(SCA1B RL03 + AOD1B RL06) geoid değişimleri.

ITU RL01 ile RL02 modelleri arasındaki fark yeni sürüm L1B verilerinin kullanılıyor olmasıdır. Dolayısıyla hangi veri setinin ne kadar katkı sağladığını araştırmak amacıyla ara bir çözüm olarak sadece SCA1B RL03 verilerinin kullanıldığı sonuçlar da irdelenmiştir. Şekil 4.a'da ITU çözümlerinin GRACE L2 RL05 çözümleri ve ITSG-Grace2016 aylık modeli ile karşılaştırılması yapılmış ve ITU RL02 çözümünün özellikle yüksek derece katsayılarında L2 modelleriyle daha iyi uyum sağladığı görülmüştür. ITSG-Grace2016 modeli ise diğer çözümlere göre daha stabil sonuçlara sahiptir. Şekil 4.b'de ise çözümlerimizin yeni sürüm L2 RL06 modelleri ile yüksek derece katsayılarıdaki uyumu daha kötü olarak elde edilmiştir. Benzer durum ITSG-Grace2018 sonuçları içinde geçerlidir. GRACE L2 RL06 ve ITSG-Grace2018 çözümlerinde öncül gravite alanı modelleri güncellenmiştir. Dolayısıyla özellikle yüksek frekanslı gravite sinyaline sahip öncül modellerin kullanıldığı bu çözümler ile yüksek derece katsayılarında uyum farkları oluşmuştur. Şekil 4.c, 4.d, ve 4.e'de ise ITU RL02 çözümlerinin gürültüleri, önceki çözüm ITU RL01'e göre Kuzey-Güney yönlü bozulmalar açısından anlamlı şekilde azaltılmıştır. Geoid değişimine ait RMS değeri sadece SCA1B verileri güncellendiğinde 4.1 mm'den 3.6 mm'ye düşürülmüştür. Ayrıca yeni sürüm AOD1B RL06 verileri de dikkate alındığında RMS değeri 3.1 mm olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla Haziran ayı ITU RL02 çözümlerinde, model gürültüleri %25'e varan oranda azaltılmıştır denilebilir.

Mevcut öncül gravite alanı model belirsizlikleri ve uydu konum bilgisinin doğruluğu, modeller için gürültü kaynaklarıdır. Dolayısıyla ITU RL02, CSR RL06 ve ITSG-Grace2018 modellerinden kestirilen GPD değerlerinin birbirlerine göre farkları hesaplanmıştır. Bu farkların oluşturduğu aylık zaman serilerinin hem frekans hem de zaman alanında spektral analizi gerçekleştirilmiştir. Baskın gürültülerin frekans alanında incelenmesi güç spektrum yoğunluğu analizi (PSD) ile gerçekleştirilmişken, zaman alanında ise Allan varyans analizi ile gürültü türlerinin araştırılması yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda farklara ait logaritmik ölçekte sigma-tau çizimleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı türde değerlendirme bir arada yapılmış ve bu aya ait GPD farkları için gürültü karakteristiği ve korelasyonlarının varlığı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Allan standart sapma sonuçları hem Overlapping hem de Modified türde hesaplanmıştır. Zaman serisi boyunca Overlapping Allan standart sapma değerleri farklı aralıklarda tanımlı varyans/standart sapmaların boyutları hakkında bilgi vermekte iken Modified Allan standart sapma değerleri ise ilgili sigma-tau çizimlerinin eğim bilgisi ile mevcut gürültü türleri hakkında bilgi vermektedir.



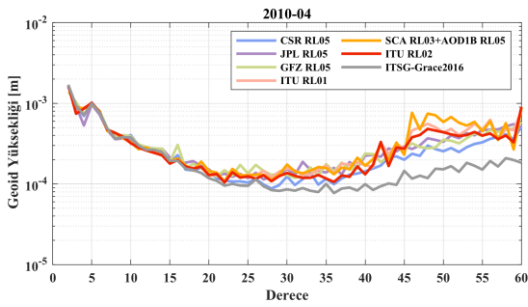
Şekil 5: 2010 yılı Haziran ayı, (a): ITU RL02, CSR RL06 ve ITSG-Grace2018 modellerinden türetilen GPD değerlerine ait farklar, (b): elde edilen farkların frekans alanında PSD analizi, (c) ve (d): elde edilen farkların zaman alanında Overlapping ve Modified Allan standart sapma analizi.

Şekil 5.a'da bulunan bir aylık GPD farkları için ITSG-Grace2018 ile CSR RL06 modellerinin genliği, ITU RL02 modeli ile olan farklardan daha düşük olup RMS değeri 0.0017 m²/s² olarak elde edilmiştir ve gürültü varlığı daha düşük seviyededir. ITU RL02 modeli ise diğer iki model ile ~0.0035 m²/s² RMS değerine sahiptir. Farkların frekans alanı güç spektrumu sonuçları Şekil 5.b'de gösterilmiş olup, zaman alanında Overlapping ve Modified Allan standart sapmaları ise Şekil 5.c ve 5.d'de verilmiştir. Şekil 5.b'de görüldüğü üzere yüksek frekanslarda gürültü boyutları düşük seviyede olup düşük frekans alanında ise yüksek genliğe sahiptir. Ayrıca ITU RL02 modelinin diğer modellere göre farkları düşük frekans alanında daha yüksek genlikte ve boyuttadır. Genel olarak benzer durum Allan varyans analizi sonuçlarında da

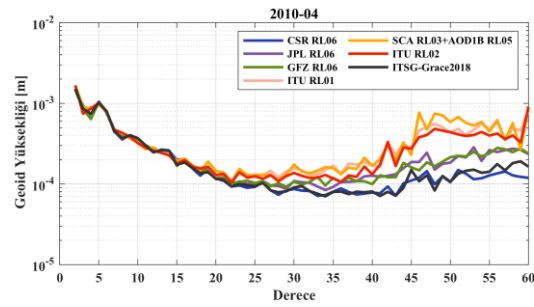
bulunmaktadır. Zaman serisi boyunca yüksek periyotlarda (düşük frekans) ITU RL02 modelinin diğer modeller ile farkları arasındaki gürültü boyutları ve karakteristiği bakımından anlamlı bir değişim söz konusudur. Özellikle $10^3 - 10^4$ zaman periyodunda gürültü karakteristiği CSR ile ITSG çözümlerine göre farklıdır. Haziran ayında mevcut sistematik hata kaynaklarından CoM kalibrasyon manevrası gravite alanı modeline doğrudan yansımıştır denilebilir. Bu durum KBR1B verilerinin herhangi bir kestirim yöntemi kullanılmadan doğrudan hesaba katılmasından ileri gelmektedir. Dolayısıyla CoM kalibrasyon manevrası gibi yapay bir etki KBR gözlemlerinin gürültü boyut ve karakteristiğini etkilemiş ve enerji integrali ile hesaplanan GPD değerlerinden üretilen Haziran ayı çözümü de yapısında bu etkileri barındırmıştır denilebilir.

3.2.2. 2010 Yılı Nisan Ayı Sonuçları

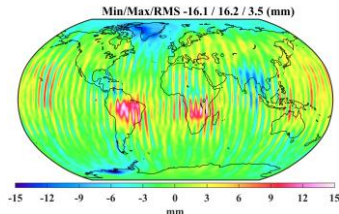
Nisan sonuçları incelendiğinde Şekil 6'da bulunan derece varyans değerlerinin ITU RL01 ve RL02 çözümleri için benzer oldukları görülmektedir. Ayrıca her iki çözüm GRACE L2 çözümlerinden RL05 sürümleriyle uyum içerisindedir. Sadece SCA1B ve KBR1B verilerinin dikkate alındığı çözümde ise uyum açısından yüksek dereceli katsayılarla oluşan farklılık göze çarpmaktadır. ITU çözümlerinden hesaplanan geoid değişimleri RMS değerleri ise yaklaşık 3.5 mm olarak elde edilmiştir. Haziran ayında sağlanan iyileşme bu zaman periyodunda yakalanamamıştır. Bu



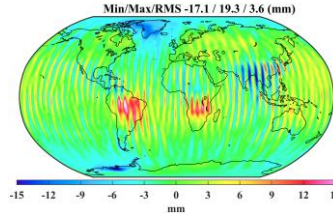
(a): Derece varyans güç spektrum



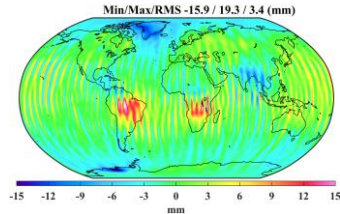
(b): Derece varyans güç spektrumu



(c): SCA1B RL02 + AOD1B RL05 (ITU RL01)



(d): SCA1B RL03 + AOD1B RL05



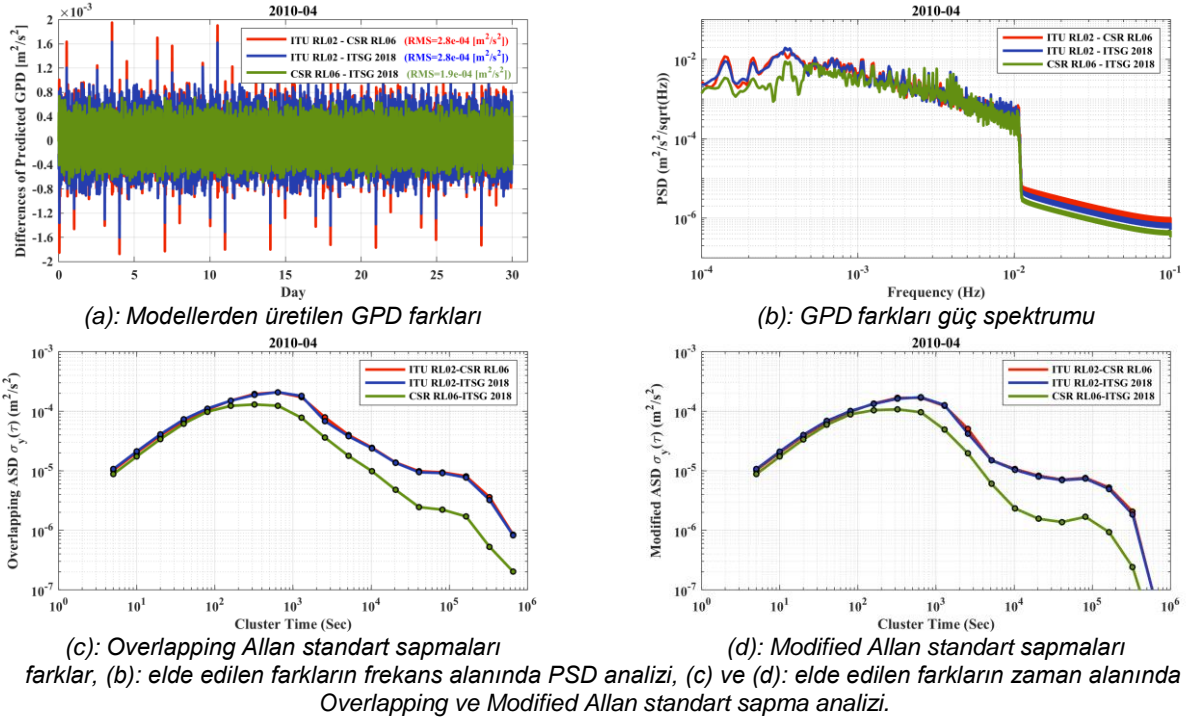
(e): SCA1B RL03 + AOD1B RL06 (ITU RL02)

Şekil 6: 2010 yılı Haziran ayı (a): CSR, JPL, GFZ RL05 ve ITSG modelleri ile ITU çözümleri geoid yüksekliği türünden derece varyans güç spektrumu, (b): CSR, JPL, GFZ RL06 ve ITSG modelleri ile ITU çözümleri geoid yüksekliği türünden derece varyans güç spektrumu, (c): ITU RL01(SCA1B RL02+AOD1B RL05) geoid değişimleri, (d): çözümlerde sadece SCA1B RL03 veri güncellemesi yapılarak elde edilen geoid değişimleri, (e): ITU RL02(SCA1B RL03 + AOD1B RL06) geoid değişimleri

durum L1B RL03 ile AOD1B RL06 verilerinin sağladığı herhangi bir katkının olmadığı gibi görünse de Nisan ayında GRACE gözlemlerini etkileyen herhangi bir sistematik hata kaynağı olmadığından ITU RL02 çözümleri önceki çözüm ITU RL01 ile aynı kalitededir şeklinde açıklanabilir. Ayrıca Şekil 6.b'de görüldüğü üzere ITU çözümlerinin, CSR, JPL ve GFZ RL06 ile ITSG-Grace2018 çözümleri ile yüksek dereceli katsayılardaki uyumu azalmıştır. Bu sonuç yüksek frekanslı öncül gravite alanı modellerinin güncellenmesi gereksinimi doğurmaktadır.

Modellerden hesaplanan GPD değerlerinin farklarının zaman serisi, güç spektrumu ve Allan varyans analiz sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. GPD farklarına ait zaman serisinin RMS değerleri CSR RL06 ve ITSG-Grace2018 modelleri için $0.0019 \text{ m}^2/\text{s}^2$ iken ITU RL02 ile olan farklar için $0.0028 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla herhangi sistematik etkinin varlığı olmamasına rağmen ITU RL02 modeli daha yüksek gürültü değerlerine sahiptir. Şekil 7.b'de yer alan güç spektrumu ile Haziran ayı sonuçlarına benzer frekanslarda gürültü baskınlığı elde edilmiştir. Fakat yüksek frekans aralığında tüm model farklarının birbirine daha yakın boyutta oldukları görülmektedir. Ayrıca Şekil 7.c ve 7.d incelendiğinde ise Allan varyans analiz sonuçlarının hemen hemen her bir periyot aralığında benzer davranışa ve boyutlara sahip ve gürültü karakteristiğinin benzer olduğu görülmektedir.

Şekil 7: 2010 yılı Haziran ayı, (a): ITU RL02, CSR RL06 ve ITSG-Grace2018 modellerinden türetilen GPD değerlerine ait



4. Sonuçlar ve Öneriler

GRACE uydu misyonunun yeni yayınlanan SCA ve KBR RL03 ile AOD1B RL06 verileri kullanılarak CoM kalibrasyon manevrası ve/veya ısınmaya bağlı batarya deşarj etkisi gibi sistematik hata kaynaklarının aylık modeller üzerinde olan etkisinin azalmış olduğu ortaya çıkarılmıştır. Böylece aylık model gürültülerinin % 25'e varan oranda azaltılmış olduğu tespit edilmiştir. Klasik yaklaşımlar ile üretilen GRACE L2 ve kısa-yaylar yaklaşımı ile üretilen ITSG-Grace2018 gibi başka kurumlara ait modellerle, EBA yöntemiyle üretilen ITU RL02 modeli 20. Derece açınımına kadar uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Yüksek dereceli katsayılarla yaşanan farkların kullanılan öncül gravite alanı modellerinin (özellikle okyanus gelgit etkisi gibi yüksek frekanslı modellerin) farklılıklarından kaynaklandığı ve güncellenmesi gerektiği düşünülmektedir. Enerji Korunumu Yaklaşımında KBR gözlemlerinin herhangi bir kestirim yöntemi kullanılmadan hesaba katılması, gravite alanının mevcut sistematik ölçü hatalarından doğrudan etkilenmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla iki farklı hata karakteristiğine sahip aylık çözümler, güç spektrumu ve Allan varyans analizi ile incelenerek modeller üzerindeki bu etki ortaya çıkarılmıştır.

EBA ile üretilen aylık modellerin doğruluğu yörünge bilgisinin ne kadar doğru olduğu ile orantılıdır. Dolayısıyla bu çalışma sonuçları da göstermiştir ki duyarlı dinamik yörünge belirleme işlemi ve bu işlem sırasında ivmeölçer kalibrasyonu, L1B verilerinin hatalarını da dikkate alacak biçimde gerçekleştirilmelidir. Enerji integrali ile hesaplanan GPD değerleri zamana bağlı olarak farklı korelasyonlara; bir başka deyişle farklı gürültü kaynaklarına sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada gravite inversiyonu basit bir stokastik model kurgusu ile gerçekleştirilmiş ve tüm hesaplanan GPD değerlerinin ağırlıkları eşit kabul edilmiştir. GPD değerlerinin zamansal korelasyonlarını dikkate alarak oluşturulacak stokastik model ile inversiyon işlemi gerçekleştirmek zaman değişkenli gravite çözümlerini anlamlı bir biçimde iyileştireceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. CK Shum'a, Prof. Dr. Junyi Guo'ya ve Dr. Kun Shang'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Akyılmaz, O., Üstün, A., Aydın, C., Arslan, N.; Doğanalp, S., Güney, C., Mercan, H., Uygur, S.O., Uz, M., Yağcı, O. (2016): ITU_GRACE16 The global gravity field model including GRACE data up to degree and order 180 of ITU and other collaborating institutions. GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/icgem.2016.006>
- Barthelmes, D. F. (2016). International centre for global earth models (ICGEM).

- Bettadpur, S. (2018). *UTCSR Level-2 processing standards document for level-2 product release 0006*, GRACE 327-742, CSR Publ. GR-12-xx, Rev, 5, 16.
- Biancale, R., & Bode, A. (2006). *Mean annual and seasonal atmospheric tide models based on 3-hourly and 6-hourly ECMWF surface pressure data*. Geoforschungszentrum.
- Case, K., Kruizinga, G., & Wu, S. (2010). *GRACE level 1B data product user handbook*. JPL Publication D-22027.
- Cheng, M., Tapley, B. D., & Ries, J. C. (2013). *Deceleration in the Earth's oblateness*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(2), 740-747.
- Dahle, C., Flechtner, F., Murböck, M., Michalak G., Neumayer, H., Abrykosov, O. Reinhold, A. and König, R. (2018). *GFZ Level-2 processing standards document for level-2 product release 06*, GRACE 327-743, GR-12-xx, Rev, 0, 20.
- Dobslaw, H., Flechtner, F., Bergmann- Wolf, I., Dahle, C., Dill, R., Esselborn, S., & Thomas, M. (2013). *Simulating high-frequency atmosphere-ocean mass variability for dealiasing of satellite gravity observations: AOD1B RL05*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 118(7), 3704-3711.
- Dobslaw, H., Bergmann-Wolf, I., Dill, R., Poropat, L., Thomas, M., Dahle, C., & Flechtner, F. (2017). *A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL06*. Geophysical Journal International, 211(1), 263-269
- Guo, J. Y., Shang, K., Jekeli, C., & Shum, C. K. (2015). *On the energy integral formulation of gravitational potential differences from satellite-to-satellite tracking*. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 121(4), 415-429.
- Jekeli, C. (1999). *The determination of gravitational potential differences from satellite-to-satellite tracking*. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 75(2), 85-101.
- Klinger, B., & Mayer-Gürr, T. (2016). *The role of accelerometer data calibration within GRACE gravity field recovery: Results from ITSG-Grace2016*. Advances in space research, 58(9), 1597-1609.
- Mayer-Gürr, T., Behzadpur, S., Ellmer, M., Kvas, A., Klinger, B., Strasser, S., Zehentner, N., (2018): *ITSG-Grace2018 - Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE*. GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/ICGEM.2018.003>
- Petit, G., & Luzum, B. (2010). *IERS conventions*. IERS Technical Note, 36(1), 2010
- Ries, J. C., Bettadpur, S., Poole, S., & Richter, T. (2011). *Mean background gravity fields for GRACE processing*. In *GRACE science team meeting, Austin, TX* (pp. 8-10).
- Rieser, D., Mayer-Gürr, T., Savcenko, R., Bosch, W., Wunsch, J., Dahle, C., & Flechtner, F. (2012). *The ocean tide model EOT11a in spherical harmonics representation*. Technical Note.
- Shako, R., Förste, C., Abrikosov, O., Bruinsma, S., Marty, J. C., Lemoine, J. M., & Dahle, C. (2014). *EIGEN-6C: a high-resolution global gravity combination model including GOCE data*. In *Observation of the System Earth from Space-CHAMP, GRACE, GOCE and future missions* (pp. 155-161). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Shang, K., Guo, J., Shum, C. K., Dai, C., & Luo, J. (2015). *GRACE time-variable gravity field recovery using an improved energy balance approach*. Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 203(3), 1773-1786.
- Yuan, D. N. (2018). *JPL Level-2 processing standards document for Level-2 product release 06*. GRACE Document: Pasadena, CA, USA, 327-744.