

**GRAVİTE ALANI BELİRLEME AMAÇLI UYDU MİSYONLARI:
CHAMP, GRACE, GOCE VE İLK SONUÇLAR
(DEDICATED SATELLITE GRAVITY MISSIONS:
CHAMP, GRACE, GOCE AND FIRST RESULTS)**

Aydın ÜSTÜN

Selçuk Üniversitesi

Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Konya
aydinustun2002@yahoo.com

ÖZET

CHAMP, GRACE ve GOCE yeryuvarının gravite alanının belirlenmesinde kullanılacak yakın yer uydularıdır. Uyduların görevi, jeodezik ve jeodinamik amaçlar için yeryuvarı sisteminin global olarak izlenmesine izin verecek doğrulukta gravite alanı bilgisi sağlamaktır. Tasarım, yörünge, ölçme ve değerlendirme teknikleri gibi bu uydulara özgü nitelikler, gravite alanı belirlemeye yeni yaklaşımlar getirmektedir. EIGEN olarak adlandırılan yeni yer potansiyeli modelleri, uygulamaya geçirilen CHAMP ve GRACE uydularının ilk ürünleridir. Model katsayılarına ilişkin hata analizleri, gravite alanı spektrumunun özellikle uzun ve orta dalga boylu bileşenlerinde anlamlı bir iyileşmeyi ortaya koymaktadır. EIGEN modelleri ve EGM96 modeli arasında yapılan global ve bölgesel karşılaştırma, hem bu iyileşmeyi doğrulamakta hem de EIGEN modelleri ile elde edilen çözümün homojen bir doğruluk sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeryuvarının gravite alanı, uydu misyonları, CHAMP-GRACE-GOCE, global jeopotansiyel model, jeoit.

ABSTRACT

CHAMP, GRACE and GOCE satellites are low Earth orbiters which will be used for the determination of the Earth's gravity field. The mission of the satellites is to provide the knowledge for the gravity field that leads to observe the Earth system for geodetic and geodynamic purposes with a sufficient accuracy. The characteristics specific to the satellites such as design, orbit, measurement and processing techniques have provided new approaches for the global gravity field determination. The new gravity field models, namely EIGEN, are the first models of activated CHAMP and GRACE missions. Error analyses concerning the coefficients of EIGEN models reveal a significant improvement in long- and medium-wavelengths of the spectrum. Comparisons at different scales, global and regional, between EIGEN models and EGM96 verify this improvement and show that the solutions obtained by the new models give globally a homogeneous accuracy.

Key words: Earth's gravity field, satellite missions, CHAMP-GRACE-GOCE, global geopotential model, geoid.

1. GİRİŞ

Yeryuvarının basıklığı ve kitle dağılımındaki düzensizlikler nedeniyle, Kepler'in açıkladığı düzgün (ideal) hareketten farklı olarak, yapay yer uydularının yörüngelerinde sapmalar görülür. Uydunun yörüngesinde izlediği anlık dinamik davranışı gözlenirse, onu bu harekete zorlayan kuvvetlerin oluşturduğu gravite alanının üç boyutlu haritası çıkarılabilir. Ancak, uydunun bozulmuş yörünge hareketinde, küçük de olsa, öteki gök cisimlerinin çekim etkisi, hava sürtünmesi, radyasyon basıncı gibi yerçekimi ile ilişkisi olmayan kuvvetlerin de payı vardır. Bu nedenle, gravite alanını belirlemek için, gözlem değerlerini bu bozucu etkilerden arındırmak gerekir (Seeber, 2003).

Yapay yer uydularının jeodezideki en önemli kullanım amaçlarından biri, yeryuvarının dış çekim alanının belirlenmesidir. Sputnik 1'den (1957) bu yana, sadece jeodezik amaçlar için çok az sayıda uydu uzaya fırlatılmış olmasına karşın, gravite alanının içinde hareket eden bir algılayıcı olarak gözlenebildiği sürece, pratikte tüm yapay uydulardan yararlanılabilir. Kepler yörünge elemanları ile ifade edilen uydunun dinamik davranışının izlenmesine dayanan gravite alanı belirleme tekniği, 1960'lı yıllardan günümüze değin başarıyla uygulanmıştır. Bu yöntemle, gravite alanının standart gösterimi sayılan küresel harmonik serilerin katsayıları belirlenmektedir (Kuala, 1966). Uydu izleme verileriyle global gravite alanının uzun dalga boylu bileşenleri hesaplanabilmektedir. Veri (uydu) sayısı arttıkça ve onların homojen dağılımı sağlandıkça harmonik serinin derecesi, başka bir deyişle, belirlenecek katsayıların sayısı çoğalmaktadır. İlk kez, 1966 yılında 8'e kadar hesaplanan yerpotansiyeli modellerinin derece ve sırası, 2000'li yıllara gelindiğinde 100'e (sadece uydu izleme verilerine dayalı) yükselmiştir (Rapp, 1997; Biancale, vd., 2000).

Bugün, yukarıda sözü edilen ve geleneksel olarak adlandırılan çözümde, doğal bir sınıra dayanılmıştır. Uydunun yörünge yüksekliği ile global gravite alanının çözünürlüğü, yani küresel harmonik serinin maksimum derecesi arasında doğrudan bir ilişki vardır. Uydu yeryuvarından uzaklaştıkça, Newton'un çekim yasası gereğince alınan gravite sinyalinin gücünde azalma görülür. Buna, yüksekliğe bağlı güç kaybı (attenuation effect) denir (Rummel, vd., 1993). Uydu izleme verilerine dayalı olarak gravite alanını modellendirmedeki sorunlar, yalnızca uydu yüksekliği ile sınırlı kalmaz. Uydu dağılımının homojen olmaması, sınırlı doğruluğa sahip gözlemlerin sadece yerden ve kısa aralıklarla yapıyor olması ve gravite alanı ile ilişkili olmayan kuvvetlerin modellendirilmesindeki güçlükler geleneksel yöntemin zayıf yanlarıdır. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, global gravite alanının çözünürlüğünü ve doğruluğunu arttırabilmek için özel olarak tasarlanmış uydulara ve yeni ölçme-değerlendirme tekniklerine gereksinim vardır. Bu gereksinimleri karşılayacak özel uydu programları, Temmuz 2000'de CHAMP (CHALLENGING Mini-satellite Payload for geophysical research and application) (http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/index_CHAMP.html) ve Mart 2002'de GRACE'in (Gravity Recovery And Climate Experiment) (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>) fırlatılmasıyla hayata geçirilmiştir. Bu uydulara, 2006 yılında GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) (<http://www.esa.int/export/esaLP/goce.html>) uydusu katılacaktır.

Üç uydunun da kutba yakın bir yörüngede, 250-500 km arasında değişen yüksekliklerde uçması, global anlamda homojen ve detaylı bir gravite alanı haritası çıkartmak için yeterlidir. Konuyla ilgili yayımlar, yeryuvarının çekim alanı için özellikle uzun dalga boylu bileşende anlamlı bir iyileşmenin görüleceğini işaret etmektedir (Balmino, vd., 1999; Balmino, 2001; Featherstone, 2002; Rummel, vd., 2002). Gravite alanının ve dolayısıyla jeoidin (gravite alanı ile ilişkili yükseklik sistemleri için referans yüzeyi) çözünürlüğünün ve doğruluğunun artırılması, gravite alanı ile doğrudan ilişkili kitle dağılımı ve onun değişimiyle ilgilenen yerbilimlerini de ilgilendirmektedir. (National Research Council, 1997; İlk, vd., 2005), yeni nesil uydu programlarından elde edilmesi beklenen sonuçların okyanus sirkülasyonu, buzul hareketleri ve deniz düzeyi değişimi gibi yer dinamiklerinin gözlenmesine sağlayacağı katkıyı incelemektedir. Bir bütün olarak yeryuvarı sisteminin ve onun işleyişinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak, anılan projelerin en önemli başarısı olacaktır.

Bu çalışmada, gravite alanı belirleme amaçlı güncel uydu programları tanıtılmakta; şu ana dek elde edilen ve beklenen sonuçlar, gravite alanı ve jeoidin belirlenmesi açısından değerlendirilmekte; CHAMP ve GRACE'den türetilen ilk modellerin performansını ölçmek amacıyla, model hata analizi ve EGM96 ile global ve bölgesel ölçekte karşılaştırma yapılmaktadır.

2. YENİ NESİL GRAVİTE ALANI BELİRLEME UYDULARI

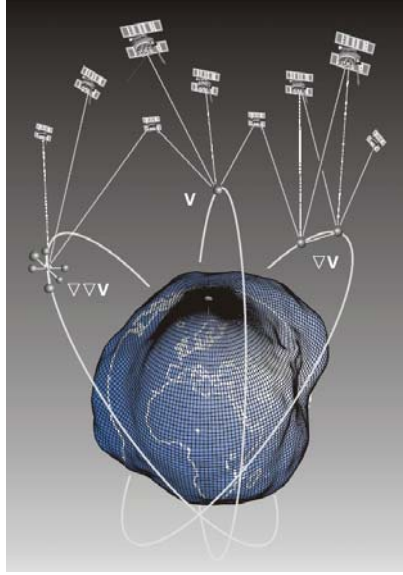
Yeryuvarının fiziksel yapısının ve iç dinamiklerinin tam olarak anlaşılması, konumsal doğruluğu yüksek global gravite alanı bilgisini gerektirir. Bu alanının belirlenmesi, jeodezik uzay tekniklerinin aynı çatı altında birleştirildiği IGGOS'un (Rummel, vd., 2002) gerçekleşmesinin de önemli aşamalarından biridir. Ancak, var olan bilginin çözünürlüğü, jeodezik ve jeodinamik gereksinimleri karşılamaktan uzaktır. Yerpotansiyeline ilişkin model katsayılarının kestirimi için yersel uydu verilerinin (geleneksel yöntem) sağlayacağı maksimum çözünürlük, başka bir deyişle küresel harmonik açılımın en büyük derecesi (N), 70-100 arasındadır (Lemoine, vd., 1998; Biancale, 2000); konumsal olarak, yeryuvarın yaklaşık yarı-çevre uzunluğunun N 'ye bölünmesiyle elde edilen yarı-dalga boyu ($\approx 20\ 000/N$) cinsinden ifade edilir. Konumsal çözünürlüğü ve doğruluğu arttırmak, aktif olarak gravite alanı bilgisi toplayan yakın yer uydularının kullanılmasına bağlıdır.

Global gravite alanının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar 30-40 yıllık geçmişe sahiptir. İlk düşünce, (Wolff, 1969)'un, uydu çiftlerini kullanarak gravite potansiyelinin doğrudan gözlenebileceğini açıklayan yayınıyla ortaya çıkmıştır. Daha sonra, gradyometre teknolojisinin de gelişmesiyle, NASA ve ESA öncülüğünde çok sayıda proje önerilmiş, ancak hayata geçirilememiştir. (İlk), gelişim sürecinin geniş bir özetini vermektedir.

Bugüne gelindiğinde, "uydu gözlem teknikleri ne olmalı?" sorusuna yanıt olarak iki kavramdan söz edilmektedir: uydudan uyduya izleme (SST) ve uydu gravite gradyometresi (SGG). (Johannessen, vd., 2003)'ye göre, geleneksel yöntemlerdeki sorunların üstesinden gelmek ve doğruluk-çözünürlük beklentilerini en yüksek

düzeyde karşılamak için gerekli ölçütler şunlardır:

- Uydu(lar) üç boyutta kesintisiz olarak izlenmeli,
- Gravite alanı ile ilişkili olmayan kuvvetlerin etkisi yok edilmeli veya en aza indirgenmeli,
- Yörünge yüksekliği olabildiğince düşük olmalı (<500 km),
- Yörünge yüksekliğine bağımlı gravite sinyalinin gücündeki azalmaya karşı duyarlı ölçme teknikleri kullanılmalı.



Şekil 1. Global gravite alanının yakın yer uyduları yardımıyla belirlenmesinde değişik ölçme teknikleri: soldan sağa sırasıyla SGG, SST-hl ve SST-II (İlk).

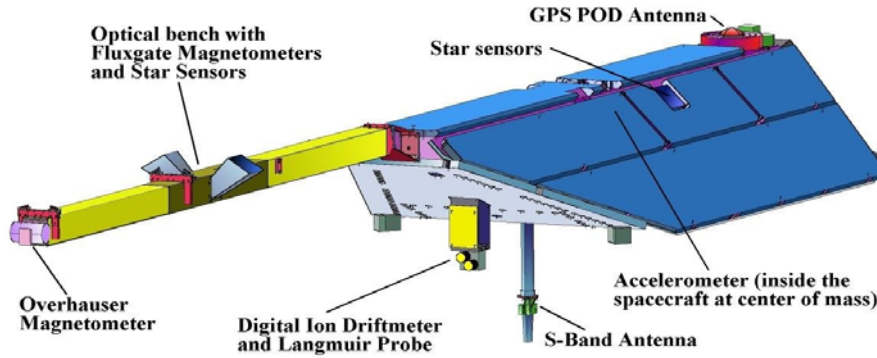
Buna göre; düşük yörüngeli yer uydusu LEO (Low Earth Orbiter) ve yüksek yörüngeli GPS-GLONASS uydu sistemi, yukarıdaki ilk üç maddenin yerine getirilmesine elverişlidir. Buna, uydudan uyduya izlemeye dayalı yüksek-düşük (SST-hl) ölçme sistemi adı verilir. LEO üzerindeki GPS alıcısı ve ivmeölçer, sırasıyla, anlık üç boyutlu konum ve uydunun gravite alanı ile ilişkisi olmayan ivmelenmelerini ölçer. Dördüncü madde ise, gravite potansiyelinin türevlerinin gözlemlendiği ölçme sistemleri ile sağlanmakta, sistem iki değişik şekilde çalışmaktadır. Birinci durumda, aynı yörüngeli iki LEO uydusu (SST-II) aralarındaki uzaklık değişimini ölçerek gravite potansiyelinin birinci türevini belirlerken; ikincisinde bir LEO uydusundaki gradyometre yardımıyla ikinci türevler (tensör bileşenleri) doğrudan gözlenebilmektedir. Şekil 1, 3 ölçme tekniğini de göstermektedir.

a. CHAMP

Yürütücülüğünü Potsdam'daki Yer Araştırmaları Merkezi'nin (GFZ) yaptığı CHAMP, gravite alanı belirlemeye yönelik olarak gerçekleştirilmiş ilk uydu programı olma özelliğini taşımaktadır (Reigber, vd., 2002). Maddi desteği Almanya Eğitim ve Araştırma Bakanlığı, GFZ ve DLR (Alman Uzay Araştırmaları Merkezi) tarafından sağlanan proje kapsamında, gravite alanı ile birlikte manyetik ve atmosferik

araştırmalar da gerçekleştirilmektedir. 15 Temmuz 2000’de fırlatılan uydu, dairesel ve kutba çok yakın bir yörüngeye (yörünge düzleminin eğikliği 87.3°) yerleştirilmiştir. Bu eğiklik, kutup civarındaki küçük bir bölge dışında, uydunun yeryuvarının tamamını kapsayacak şekilde dolaşmasını sağlamaktadır. Başlangıçtaki yörünge yüksekliği (454 km) görev süresince yavaşça azalarak 300 km’ye kadar dūőecektir. Uydunun görev süresinin 2008’de sona ermesi öngörölmüştür.

Uydu platformuna, yörünge ve gravite alanı belirlemek amacıyla NASA’nın “BlackJack” GPS alıcısı, hava sūrtünmesi, güneş ve yerin radyasyon basıncı gibi gravitasyonel olmayan ivmelenmeleri ölçmek için üç eksenli elektrotatik ivmeölçer ve bir pasif Laser Retro Reflektör (LRR) yerleştirilmiştir. Elektrotatik ivmeölçer tam olarak uydunun ağırlık merkezinde olup eksenleri, ivmeölçeri inersiyal sistemde yönlendiren iki yıldız algılayıcıya bağlanmıştır. Laser Retro Reflektör ise uydunun yer istasyonlarından izlenmesine olanak sağlar. Uydu, ayrıca, manyetik ve atmosferik ölçmeler için manyetometre ve iyon driftöler ile donatılmıştır (şekil 2).

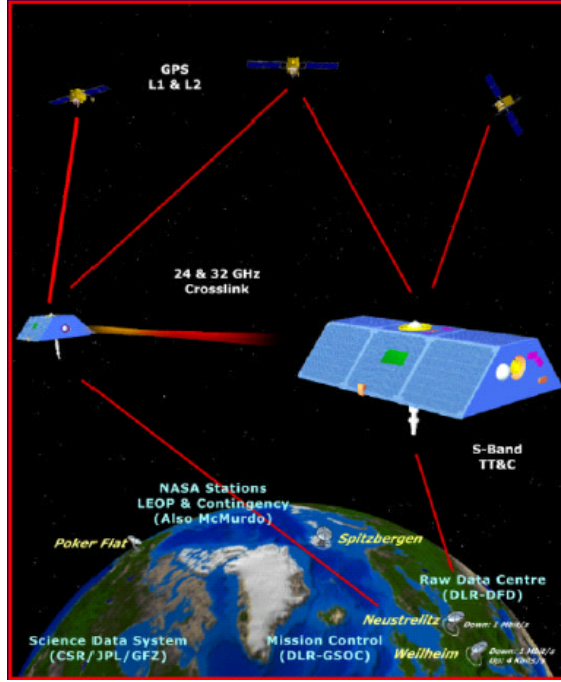


şekil 2. CHAMP uydusunun önden görünümü ve ölçme donanımı (GFZ’den).

Sahip olduğu konfigrasyonuyla CHAMP, gravite alanının uzun-dalga boylu bileşenlerinin belirlenmesine yeni boyut kazandırmıştır. Çok sayıda uydu ve milyonlarca gözlemden üretilen GRIM5-S1 ve EGM96S modelleriyle karşılaştırıldığında, birkaç aylık CHAMP yörünge izleme verileriyle belirlenen gravite alanı çözünürlüğünün daha yüksek olduğu görölmektedir. EIGEN-2 olarak adlandırılan modelin çözünürlüğü 550 km’dir (yarı-dalga boyu). Bu çözünürlükteki doğruluk, jeoit yüksekliği ve gravite anomalisi için sırasıyla 10 cm ve 0.5 mGal’dır (Reigber, vd., 2003).

b. GRACE

GRACE misyonu aynı yörüngede birbirini izleyen ve aralarındaki uzaklık değişimini gözleyen ikiz uydu (SST-II) modunda çalışmaktadır (şekil 3). 17 Mart 2002’de fırlatılan GRACE uydularının görevi, 400-40000 km arasında değişen çözünürlükte global gravite alanının haritasını çıkarmak ve beş yıllık görev süresince bu alanın değişimlerini gözlemektir (Tapley, vd., 2004). CHAMP’in devamı niteliğindeki GRACE misyonu, NASA ve DLR işbirliğinin bir ürünüdür. Proje sorumluluğunu Texas Üniversitesi Uzay Araştırmaları Merkezi (CSR) üstlenmiştir.



Şekil 3. GRACE uyduları ve çalışma sistemi (CSR'den).

GRACE uydularının yörünge düzlemi ekvatorla 89.5° lik açı yapar. Dairesel bir yörüngede dolanan uydular, başlangıç olarak yaklaşık 500 km lik yörünge yüksekliğine yerleştirilmiştir. Bu yükseklik düzenli bir şekilde 1.1 km/ay oranında azalır. Her iki uydu, yörünge bozulmalarından gravite alanı belirleyebilmek için CHAMP'te olduğu gibi GPS alıcısı, LRR, ivmeölçer ve yönlendirme algılayıcıları taşır. GRACE uydularının uçuşu sırasında, gravite alanındaki değişim, uyduların birbirlerine göre olan konumunu değiştirir. Çift frekanslı ve karşılıklı çalışan K band radar (KBR) sistem bağlantısı yardımıyla, 170-270 km aralığında değişen iki uydu arasındaki uzaklık ve bağıl hız değişimi, mikron düzeyinde ölçülebilmektedir (Dunn, vd., 2003).

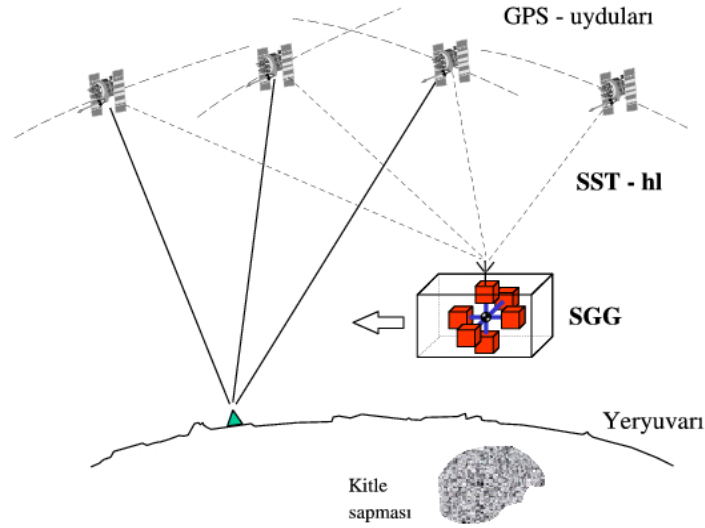
GRACE verilerinden üretilen statik gravite alanının çözünürlüğü öncekilerden daha üstündür. Üstelik, sistem mimarisi yeryuvarının su ve buzul kitlelerinin taşınımından kaynaklanan gravite alanı değişiminin aylık periyotlarla izlenmesini de olanaklı kılmaktadır. (Tapley, vd., 2004), 110 günlük GRACE verileriyle belirlenen GGM01S yer gravite modelini üç ayrı kontrol işlemiyle test etmiş, sonuçları EGM96 ile karşılaştırmıştır. Sonuçlar global gravite alanının iyileştirilmesinde dikkate değer bir başarı kazanıldığını göstermektedir.

c. GOCE

2006 yılında fırlatılması öngörülen GOCE, yeryuvarının gravite alanının belirlenmesi amacıyla hazırlanmış üçüncü uydu programıdır. GOCE misyonu, ESA'nın Yaşayan Gezegen Programının (Living Planet Programme) ilk çekirdek projesidir (ESA, 1999). Proje ile uydunun taşıdığı nitelikler ve değerlendirme tekniğinde bazı ilklere imza atılacaktır: 1) Uydu çok düşük bir yörünge yüksekliğine sahip olacak (250 km), 2) Gravite alanını modellendirmede, yörünge verileriyle birlikte

ilk kez gradyometre ile ölçülen yüksek doğruluklu gravite tensör verileri de kullanılacak (gradyometre üç ana eksen üzerinde birbirinden 0.50 m aralıklarla yerleştirilmiş altı ivmeölçerden oluşmaktadır), 3) Hava sürtünmesi, dengeleyici roketlerle doğrudan düzeltilecek, 4) Görev süresi çok kısa olacak (yaklaşık 20 ay), 5) Termal etkiyi düzenli tutmak ve enerji desteği sağlamak için uydu, sürekli güneşi görecektir ve ona karşı yönü değişmeyen bir yörüngede uçacaktır.

GOCE uydusuna dayalı gravite alanı modellendirmede, SST-hl ve SGG tekniği birlikte kullanılacaktır (Şekil 4). Yeryuvarının gravite alanının düşük- ve orta-frekanslı özellikleri GPS (+GLONASS) uydularıyla izlenen yörünge bozulmalarından (SST-hl), orta- ve yüksek-frekanslı özellikleri de elektrostatik uydu gradyometresinden (SGG) çıkarılacaktır. Bir yerpotansiyeli modeline ilişkin yüksek frekanslı bileşenlerin ilk kez uydu gözlemleriyle belirlenmesi, bugüne değin ulaşılamamış bir doğruluğun elde edilmesi anlamına gelmektedir.



Şekil 4. GOCE uydusu için SST-SGG tekniği (ESA, 1999).

Düşük yörünge yüksekliğinde, gravite potansiyelinin ikinci türevlerinin gözlenmesi gravite sinyalinin daha kuvvetli alınmasını sağlamaktadır. Üstelik bu sinyal, kitle düzensizliğinin yüksek frekanslı özelliklerini de içerdiğinden, belirlenecek jeopotansiyel modelin çözünürlüğünde de bir artışa neden olacaktır. Anılan özelliklere sahip GOCE misyonundan, 100 km lik konumsal çözünürlükle gravite anomalisi için 1 mGal ve gravite alanının eşpotansiyelli yüzeylerinden biri olan jeoit için 1 cm doğruluk hedeflenmiştir (Drinkwater, vd., 2003).

3. UYDU MİSYONLARININ BAŞARISI

Gravite alanı belirleme amaçlı güncel uydu programlarında kullanılacak gözlem türlerinin geçerliliği, kalibrasyonu ve beklenen sonuçlar, jeodezi ve jeofizik topluluğu tarafından üzerinde en çok tartışılan konuların başında gelmektedir. Son on yıllık süreçte, simülasyona dayalı çok sayıda araştırma literatürde geniş yer tutmaktadır. Bugünlerde, CHAMP ve GRACE uydularının gerçek verilerden hesaplanan ilk yer

potansiyeli modelleri yayımlanmaya başlanmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, şu ana değin, anılan uydu misyonlarının beklenen ve gerçekleşen başarısı ele alınacaktır.

CHAMP'ın 2000'de, GRACE'nin 2002'de fırlatılmasından bu yana 10'a yakın yerpotansiyeli modeli üretilmiştir. GFZ ve UTCSR'de oluşturulan bu modellerin listesi Tablo 1'de verilmektedir. CHAMP ve GRACE uydularından toplanan verilerin sayısı arttıkça ve değerlendirme teknikleri geliştikçe listenin daha da uzaması kaçınılmazdır. Hesaplanan her yeni modelle, gravite alanının spektrumu genişlemekte ve buna paralel olarak model doğruluğu daha da yükselmektedir.

Tablo 1. CHAMP ve GRACE yerpotansiyeli modelleri.

Model	Maks. Çöz. Derece	Uydu	Veri kapsamı	Kuruluş	Kaynak
EIGEN-1S	100	CHAMP ¹	88 günlük	GFZ	(Reigber, vd., 2002)
EIGEN-2	120	CHAMP	2x6 aylık	GFZ	(Reigber, vd., 2003)
EIGEN-3P	120	CHAMP	3 yıllık	GFZ	(Reigber, vd., 2005)
EIGEN-CHAMP03S	120	CHAMP	33 aylık	GFZ	(Reigber, vd., 2005)
EIGEN-GRACE01S	120	GRACE	39 günlük	GFZ	URL ⁴
EIGEN-GRACE02S	150	GRACE	110 günlük	GFZ	(Reigber, vd., 2005)
EIGEN-CG01C	360	Bütünleşik ²		GFZ	(Reigber, vd., 2004)
GGM-01	120	GRACE	111 günlük	UTCSR	(Tapley, vd., 2004)
GGM-02S	160	GRACE	363 günlük	UTCSR	URL ⁵
GGM-02C	200	GRACE ³	363 günlük	UTCSR	URL ⁵

¹ Lageos 1-2, Starlette ve Stella uyduları ile birlikte

² CHAMP+GRACE+altimetre+yersel gravite verileri

³ Yersel gravite verileriyle zorlanmış çözüm

⁴ <http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/>

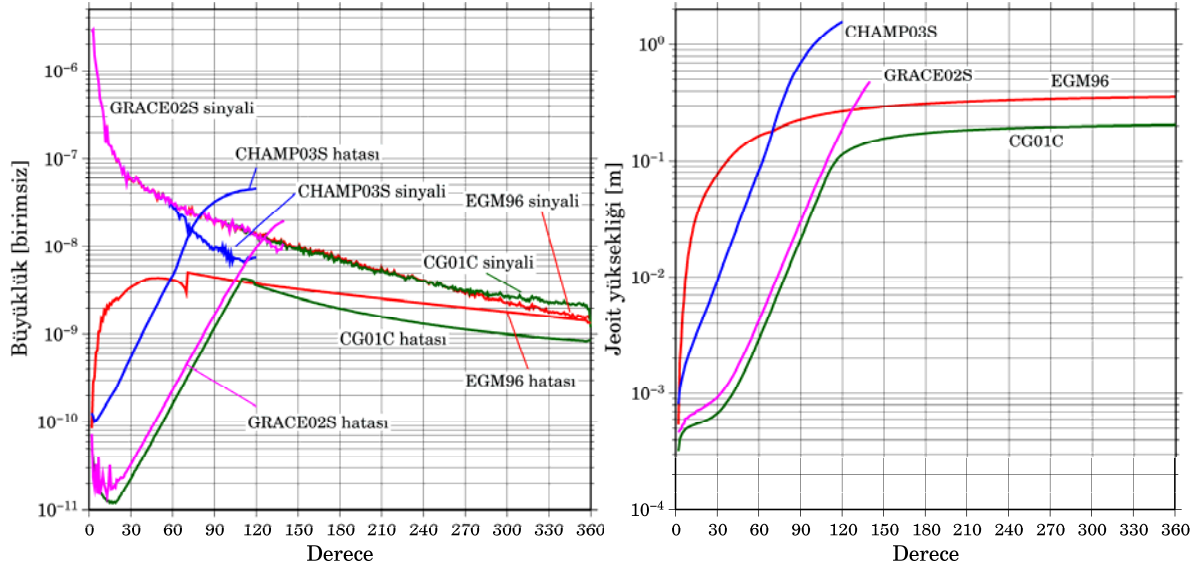
⁵ <http://www.csr.utexas.edu/grace/>

CHAMP, GRACE ve GOCE uyduları, duyarlılığı farklı ölçme sistemlerini kullanmaktadır. Belirli bir uydu misyonuna ilişkin gravite alanının doğruluğundan söz edebilmek için uyduya özgü ölçme sistemlerinin duyarlılığı referans alınmalıdır. Küresel harmonik açılımın katsayıları (\bar{C}_{lm} ve \bar{S}_{lm}) ve standart sapma (σ_{lm}) değerleri, aranan bu nicelikler hakkında önemli izler taşır. Standart sapmalar, modelin oluşturulması aşamasında en küçük kareler ilkesine dayanan çözümle ya da bağımsız çözümlerin karşılaştırılmasıyla hesaplanır. GOCE'de olduğu gibi fırlatılmamış bir uydunun performansı ise simülasyonla elde edilen ölçüler yardımıyla oluşturulan yer potansiyeli modelleri üzerinden değerlendirilebilir. Burada simülasyonların gerçekçi olması için ölçüleri etkileyen hata kaynakları ve onların stokastik özellikleri (varyans-kovaryansları) göz önünde bulundurulur (ESA, 1999; Oberndorfer, vd., 2002).

Uydu misyonu performansının değerlendirilmesinde, modele ilişkin sinyal ve/veya hata derece varyansları ölçüt alınır. Bu yöntemle ölçü olarak kullanılan gravite sinyalinin güç spektrumu ve hata spektrumu belirlenir. Sinyal derece varyansı,

$$\sigma_l^2 = \sum_{m=0}^l (\bar{C}_{lm}^2 + \bar{S}_{lm}^2) \quad (1)$$

ile tanımlanır. \bar{C}_{lm} ve \bar{S}_{lm} değerleri yerine dengeleme ile kestirilen σ_{lm} standart sapmaları kullanılırsa hata derece varyansları elde edilir. Hesaplanan büyüklüklerle açılımın derecesine bağlı olarak sinyal gücünün (veya model hatasının) nasıl bir değişim gösterdiği ortaya çıkarılmış olur.



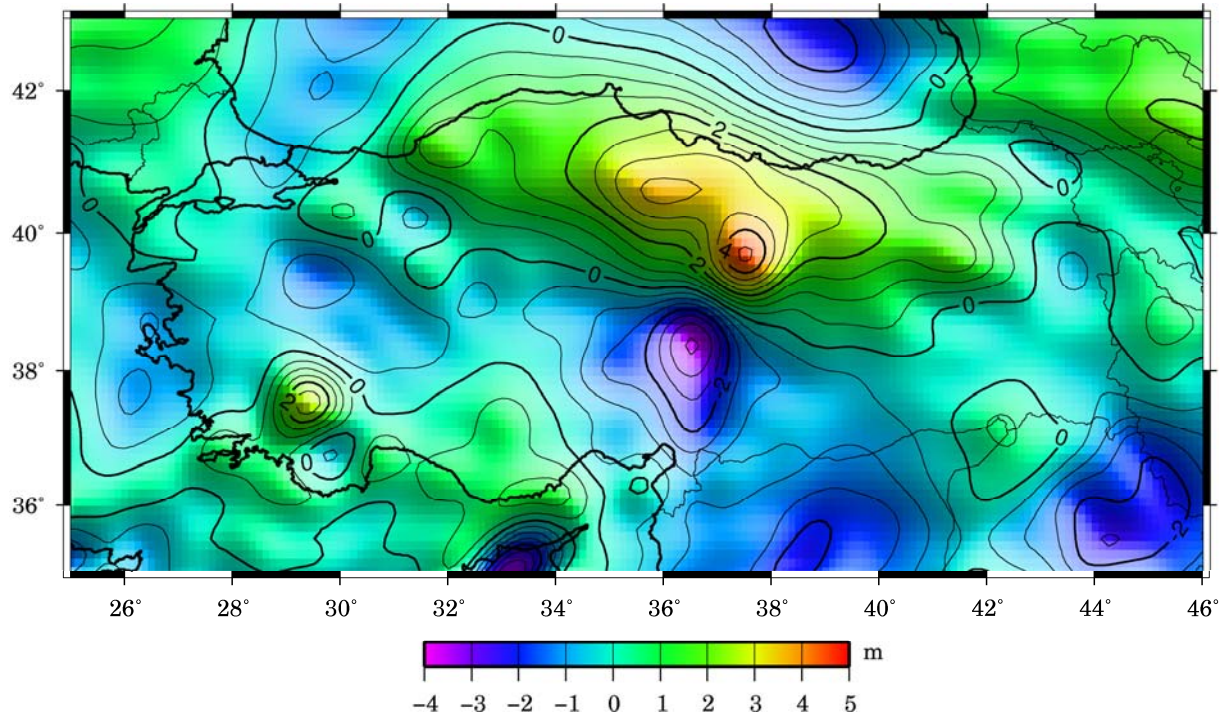
Şekil 5. Güncel yer potansiyeli modelleri için sinyal ve hata derece varyansları (sol: sinyal derece büyüklükleri, sağ: jeoit yüksekliği cinsinden kümülatif hata).

CHAMP ve GRACE'den türetilen güncel modellerin güç ve hata derece varyansları Şekil 5'te görülmektedir. Karşılaştırma yapmak amacıyla bilinen en iyi yer potansiyeli modeli kabul edilen EGM96'ya ait büyüklükler de grafikte gösterilmiştir. EGM96'nın uzun-dalga boylu (derece 70'e kadar olan) bileşenleri, yıllardır gözlenen çok sayıda uydu yardımıyla belirlenmiştir. Aynı çözüme, sadece CHAMP uydusu kullanılarak ulaşılabileceği şekilden açıkça anlaşılmaktadır. Bununla beraber 60. dereceye kadar, model katsayılarıdaki hata EGM96'ninkinden daha düşüktür. Yalnızca uydu verilerinin kullanıldığı global yer potansiyeli modellemede bugüne kadarki en yüksek doğruluğa ise EIGEN-GRACE02S çözümüyle ulaşılmıştır. 350 km'lik (yarı-dalga boyu) çözünürlükte kümülatif jeoit yüksekliği hatası yaklaşık 1 cm dir. Bu çözünürlük ve doğruluk, gravite alanının sadece statik (ortalama) kesimini modellemekle kalmaz, aynı zamanda geçici değişimlerinin de belirlenmesini kolaylaştırır. Gravite alanının kalıcı olmayan kısmı, özellikle okyanuslardaki kitle taşınmasıyla ilgili oşinografik çalışmalar açısından anlamlıdır.

CHAMP, GRACE ve yersel gravite verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan ilk model EIGEN-CG01C dir. Model katsayıları 360. derece ve sıraya kadar belirlenmiştir. Farklı çözümlerden hesaplanan standart sapmalar göz önünde bulundurulduğunda, EGM96'ya göre biraz daha gelişmiş bir modelden söz edilebilir. Modeldeki iyileşmede GRACE verilerinin payı büyüktür. 55 km lik çözünürlüğe karşılık gelen maksimum açınımında jeoit yüksekliği için yaklaşık 20 cm, gravite anomalisi için 5 mGal lik doğruluğa ulaşılmaktadır.

Yer potansiyeli modelleri, yukarıda verilen hata değerlerine dayanan doğruluk analizi dışında, kestirim sürecinden bağımsız olarak dış verilerle de sınanabilir. Değişik uydu gözlemlerine dayanan yörünge izleme verileri, GPS-nivelman jeoit yükseklikleri (veya denizlerde uydu altimetresiyle belirlenen gravite anomalileri) ve deniz düzeyi topoğrafyası modelden bağımsız veriler arasında yer almaktadır. Anılan üç veri kümesi, modelin farklı çözünürlükteki doğruluğunu test etmek için kullanılabilir. Özellikle, yeryüzünde alınan gravite sinyalinin tüm frekanslarını içeren GPS-nivelman verileri en yaygın test aracı olarak görülmektedir. Ancak, çözümü belirli bir frekans ile sınırlı bir modelin, gravite alanının tüm sinyalini içeren verilerle sınanması, dış doğruluğun ölçülmesini güçleştirir. Bu nedenle, veriler ve test işlemi dikkatle ele alınmalıdır. (Gruber, 2004) ve (Ilk, vd., 2005), yer potansiyeli modellerinin geçerliliğinin sınanmasına elverişli dış veri kaynaklarını ve karşılaştırma stratejisinin nasıl uygulanacağını açıklamıştır.

Çalışmanın bu bölümünde, güncel yer potansiyeli modelleri (CHAMP03S, GRACE02S ve CG01C) EGM96 modeliyle karşılaştırılacaktır. Yeni modellerin ne kazandığı, bölgesel ve global anlamda incelenecektir. Bölgesel analiz, Türkiye'yi içine alan $35^{\circ} \leq \varphi \leq 43^{\circ}$ ve $25^{\circ} \leq \lambda \leq 46^{\circ}$ coğrafi sınırlarını kapsamaktadır. Karşılaştırmada, modeller arasındaki jeoit yüksekliği farkları ve model derecesinin bir fonksiyonu olarak hesaplanan standart sapmalar temel alınmıştır.

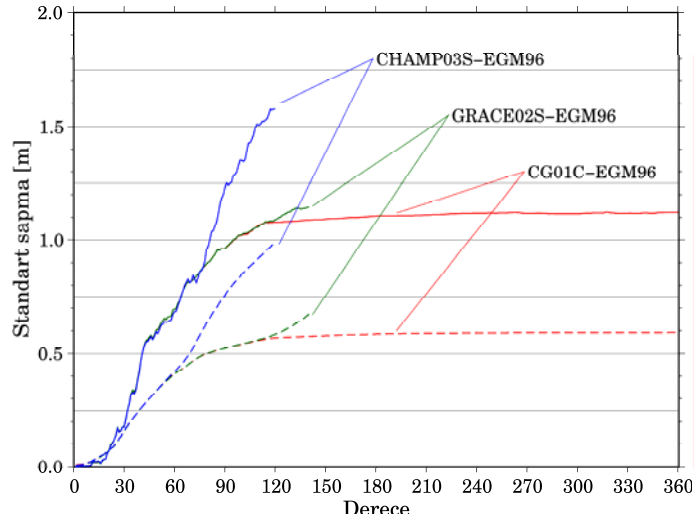


Şekil 6. EGM96 ve EIGEN-CG01C jeoit yükseklikleri arasındaki farklar.

Jeoit yükseklikleri, bölgesel ve global karşılaştırma için sırasıyla $7.5' \times 7.5'$ ve $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ grid aralıklarıyla hesaplanmıştır. Şekil 6, maksimum açınım derecesi 360'a göre EIGEN-CG01C ve EGM96 jeoit yükseklikleri arasındaki farkları göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere farklar -4 ile +5 m arasında değişmektedir. Türkiye'yi kapsayan alan içerisindeki değerler global ölçekteki ortalama aykırılıktan daha

yüksektir. Yüksek değerlerin hangi modelden kaynaklandığını anlamak için öncelikle Türkiye’de gerçekleştirilen önceki EGM96 ve GPS-nivelman jeoitleri arasındaki karşılaştırmalara bakılmalıdır. Nitekim 3-4 m’ye varan farklarla karşılaşıldığı bilinmektedir (Üstün, 2002; Ayhan, 2002). Üstelik EGM96-EIGEN-CG01C ile EGM96-GPS-nivelman karşılaştırmaları arasında büyük sapma değerlerinin görüldüğü yerler (örneğin Karadeniz bölgesi) açısından da bir tutarlılık söz konusudur. Sonuç olarak güncel uydu verilerine dayalı global gravite modellerinin ülkemizdeki GPS-nivelman verileriyle daha tutarlı olması beklenmektedir.

Burada üzerinde durulması gereken konulardan biri, EGM96 ile EIGEN-CG01C modelleri arasındaki bu büyük sapmaların nereden kaynaklandığını araştırmaktır. Bu amaçla her iki model arasındaki farklar derece bazında hesaplanmış ve modeller arasındaki uyumu gösteren standart sapma değerleri, 2’den başlayarak her EIGEN modelinin maksimum açınım derecesine kadar belirlenmiştir. EIGEN modelleri ve EGM96 arasındaki uyum spektrumu hem bölgesel hem de global ölçekte çıkarılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Standart sapma değerlerine göre farklı ölçeklerde (global: kesik çizgi, Türkiye: dolu çizgi) EGM96 ve EIGEN modelleri arasındaki uyum spektrumu.

EIGEN-CG01C ve EGM96 modelleri için küresel harmonik açınımın en yüksek derecesinde (360), jeoit yüksekliği farkları Türkiye’nin bulunduğu bölgede global ölçektekinden ortalama 50 cm kadar ayrılmaktadır. Ancak, spektrum boyunca EIGEN modelleri ile EGM96 arasındaki uyum, global ve Türkiye ölçeğinde birbirinden oldukça farklı bir davranış sergilemektedir. Bu farkın kaynağı, gravite alanının uzun ve orta dalga boylu bileşenlerine karşılık gelen kesimde (30 ve 120. dereceler arasında) yatmaktadır (Şekil 7). Söz konusu dalga boylarına karşılık gelen katsayılar EIGEN ve EGM96 modellerinde, birbirinden anlamlı ölçüde farklıdır. Üstelik, EGM96 modelinin oluşturulması aşamasında, Türkiye gibi yersel gravite ölçülerinin kullanılmadığı alanlarda bu aykırılık daha da belirginleşmektedir. Avrupa, ABD ve Kanada’daki uyum Türkiye’deki uyuma oranla daha iyidir (bak. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>). Sonuç olarak, EIGEN modellerine göre EGM96 modelinin uzun ve orta dalga boylu bileşenleri yersel gravite ölçülerine daha

duyarlıdır. Bu nedenle güncel yer potansiyeli modelleriyle global gravite alanı spektrumunun uzun ve orta dalga boylu bileşenlerinde sağlanan iyileşmenin özellikle yersel gravite verilerinin yetersiz olduğu bölgelerde daha açık şekilde anlaşıldığından söz edebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, güncel uydu misyonları CHAMP, GRACE ve GOCE'nin yeryuvarının global gravite alanı haritasının çıkarılmasına sağlayacağı katkı ele alınmıştır. CHAMP ve GRACE uydularından elde edilen ilk EIGEN modellerinin global gravite alanının uzun ve orta dalga boylu bileşenlerinde sağladığı iyileşme, bir sayısal uygulama ile birlikte ortaya konmuştur. Uyduların kutupsal yörüngeye çok yakın uçmaları, GPS uyduları ile kesintisiz olarak izlenmeleri ve yörüngelerinin çok düşük olması anılan iyileşmeyi sağlayan başlıca unsurlardır. 2006 yılında fırlatılması beklenen GOCE uydusu ile global gravite alanı bilgisinin çözünürlüğü ve doğruluğunun daha da artırılması amaçlanmıştır. Bu iyileşme, ilk kez bir uyduda kullanılacak çok yüksek duyarlıklı gradyometre ve yerçekimi ile ilişkisi olmayan kuvvetleri doğrudan ölçen ya da uydu üzerinde dengeleyen öteki donanımlar ile sağlanacaktır.

Geleneksel yöntemlere dayanan global yer potansiyeli modelleri (örneğin EGM96) güncel modellerle karşılaştırıldığında, güncel modellerin üstünlüğü, sadece çözünürlük ve doğrulukla sınırlı kalmaz. Yakın yer uyduları yer potansiyel modelinin düşük dereceli katsayılarının kestirilmesinde kullanılır. Uyduların yörünge yükseklikleri, yörünge eğim açıları (uydu dağılımı) ve gravite alanı parametrelerini belirlemeye uygun donanıma sahip olup olmadığı, belirlenecek modelin çözünürlüğü ve doğruluğunun yanı sıra bu bilgilerin homojenliğini de etkileyen en önemli ölçütlerdir. EIGEN modellerinin üstün yanı bu ölçütlerdir ve yer potansiyeli modelinin doğruluğuna global anlamda homojenlik kazandırmaktadır. EIGEN modelleri ve EGM96'nın katsayı ve standart sapmalarında görülen farkların etkisi, global ve Türkiye ölçeğinde çalışılmış, jeoit yüksekliklerinde anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir.

Yeryuvarı sisteminin jeodezik ve jeodinamik amaçlar için izlenmesi, global gravite alanının yüksek doğrulukla belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Okyanus devinimi, buzul hareketleri gibi düzenli (ya da düzensiz) kitle taşınmaları, sistemin dinamik yapısının bir sonucudur. Bu nedenle gravite alanının belirlenmesi problemi, dördüncü boyut olarak zamanı da kapsar. Özellikle GRACE uyduları, geçici gravite alanı değişiminin izlenmesini (300 km'den daha uzun dalga boylarda) sağlayacak biçimde tasarlanmıştır.

CHAMP ve GRACE uydularıyla belirlenen durağan (statik) ve değişken (temporal) gravite alanına ilişkin ilk sonuçlar, beklenenin biraz altında doğruluk verse de (bak. (Ilk, vd., 2005)); yakın yer uyduları misyonu tamamlanmış değildir. Veri toplama sürecinin devam etmesi, değerlendirme tekniklerindeki potansiyel gelişmeler ve GOCE uydusunun göreve başlayacak olması öngörülen hedeflere büyük ölçüde ulaşılacağını göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Ayhan, M.E., Demir, C., Lenk, O., Kılıçoğlu, A., Aktuğ, B., Açıkgöz, M., Fırat, O., Şengün, Y.S., Cingöz, A., Gürdal, M.A., Kurt, İ., Ocak, M., Türkezer, A., Yıldız, H., Bayazıt, N., Ata, M., Çağlar, Y., Özerkan, A.,** 2002, Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A. *Harita Dergisi, Özel Sayı:16*.
- Balmino, G.,** 2001, New space Missions for Mapping the Earth's Gravity Field. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IV Physics, 2 (9)*,1353–1359.
- Balmino, G., Perosanz, F., Rummel, R., Sneeuw, N., Sünkel, H.** 1999, CHAMP GRACE and GOCE: Mission Concepts and Simulations. *Bolletino di Geofisica Teoria ed Applicata, 40*, 555–563.
- Biancale, R., Balmino, G., Lemoine, J.M., Marty, J.C., Moynot, B., Barlier, F., Exertier, P., Laurain, O., Gegout, P., Schwintzer, P., Reigber, Ch., Bode, A., Koenig, R., Massmann, F.H., Raimondo, J.C., Schmidt, R., Zhu, S.Y.** 2000, A new Global Earth's Gravity Field Model from Satellite Orbit Perturbations: GRIM5-S1. *Geophysical Research Letters, 27*, 3611–3614.
- Drinkwater, M.R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., Popescu, A.,** 2003, GOCE: ESA's first Earth Explorer Core Mission. *Space Science Reviews, 00*, 1–14
- Dunn, C., Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Desai, S., Haines, B., Kuang, D., Franklin, G., Haris, I., Kruizinga, G., Meehan, T., Nvei, S., Nguyen, D., Rogstad, T., Thomas, J.B., Tien, J., Romans, L., Watkin, M. s, Wu, S-C., Bettadpur, S., Kim, J.,** 2003, Instrument of GRACE: GPS Augments Gravity Measurements. *GPS World, 14(2)*,16–28.
- ESA,** 1999, The Four Candidate Earth Explorer Core Missions: Gravity field and steady-state ocean circulation mission. Technical Report SP-1233 1, ESA.
- Featherstone, W.E.,** 2002, Expected contributions of dedicated satellite gravity field missions to regional geoid determination with some examples from Australia. *Journal of Geospatial Engineering, 4(1)*,1–19.
- Gruber, T.,** 2004, Validation concepts for gravity field models from new satellite missions. In *The Second International GOCE User Workshop*.
- Ilk, K.H.,** 2005, Envisaging a new era of gravity field research. In R. Rummel, H. Drewes, W. Bosch, and H. Hornik (ed) *Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), IAG Symposium*, Berlin, Springer, **volume 120**, 53-62
- Ilk, K.H., Flury, J., Rummel, R., Schwintzer, P., Bosch, W., Haas, C., Schröter, J., Stammer, D., Zahel, W., Miller, H., Dietrich, R., Huybrechts, P., Schmeling, H., Wolf, D., Götze, H.J., Riegger, J., Bardossy, A., Güntner, A., Gruber, Th.** 2005, *Mass Transport and Mass Distribution in the Earth System*. GeoForschungsZentrum, Potsdam, 2. edition.

Johannessen, J.A., Balmino, G., Le Provost, C., Rummel, R., Sabadini, R., Sünkel, H., Tscherning, C.C., Visser, P., Woodworth, P., Hughes, C.W., Legrve, P., Sneeuw, N., Perosanz, F., Aguirre-Martinez, M., Rebhan, H., Drinkwater, M.R., 2003, The European gravity field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission: Its impact on geophysics. *Surveys in Geophysics*, 24,339–386.

Kuala, W.M., 1966, *Theory of Satellite Geodesy*. Blaisdell Publishing Company, 30, Waltham, Massachusetts.

Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chinn, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, S.B., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H., Olson, T.R., 1998, The development of the joint NASA GSFC and NIMA geopotential model EGM96. Technical Report NASA/TP-1998-206861, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland

National Research Council (1997), *Satellite Gravity and The Geosphere*. National Academy Press, Washington D.C.

Oberndorfer, H., Müller, J., Rummel, R., Sneeuw, N., 2002, A simulation tool for the new gravity field satellite missions. *Adv. Space Res.*, **30(2),227–232.**

Rapp, R.H., 1997, Past and future developments in geopotential modelling. In R. Forsberg, M. Feissl, and R. Dietrich, editors, *Geodesy on the Move*, pages 58–78, Berlin, 1997. Springer.

Reigber, Ch., Balmino, G., Schwintzer, P., Biancale, R., Bode, A., Lemoine, J.M., Koenig, R., Loyer, S., Neumayer, H., Marty, J.C., Barthelmes, F., Perosanz, F., Zhu, Y., 2002, A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and accelerometry (EIGEN-1S). *Geophysical Research Letters*, **29(14),10.1029/2002GL015064.**

Reigber, Ch., Jochmann, H., Wunsch, J., Petrovic, S., Schwintzer, P., Barthelmes, F., Neumayer, K.H., König, R., Förste, Ch., Balmino, G., Biancale, R., Lemoine, J.M., Loyer, S., Perosanz, F., 2005, Earth Gravity Field and Seasonal Variability from CHAMP. In Ch. Reigber, H. Lühr, P. Schwintzer, and J. Wickert, editors, *Earth Observation with CHAMP - Results from Three Years in Orbit*, pages 25–30, Berlin, Springer.

Reigber, Ch., Lühr, H., Schwintzer, P., 2002, CHAMP Mission Status. *Adv. Space Res.*, **30(2),129–134.**

Reigber, Ch., Schmidt, R., Flechtner, F., König, R., Meyer, U., Neumayer, K.H., Schwintzer, P., Zhu, S.Y., 2005, An Earth Gravity Field Model Complete to Degree and Order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S. *Journal of Geodynamics*, **39(1):1-10.**

Reigber, Ch., Schwintzer, P., Barthelmes, F., König, R., Förste, Ch., Balmino, G., Biancale, R., Lemoine, J.M., Loyer, S., Perosanz, F., Fayard, T., 2003, The CHAMP-only Earth Gravity Field Model EIGEN-2. *Adv. Space Res.*, **31(8)**, 1883-1888.

Reigber, Ch., Schwintzer, P., Stubenvoll, R., Schmidt, R., Flechtner, F., Meyer, U., König, R., Neumayer, H., Förste, Ch., Barthelmes, F., Zhu, S. Y., Balmino, G., Biancale, R., Meixner, H., Lemoine, J. M., Raimondo, J.C. 2004, A High Resolution Global Gravity Field Model Combining CHAMP And GRACE Satellite Mission and Surface Gravity Data: EIGEN-CG01C. *Journal of Geodesy*, (submitted).

Rummel, R., Balmino, G., Johannessen, J., Visser, P. ve Woodworth, P., 2002, Dedicated Gravity Field Missions – principles and aims. *Journal of Geodynamics*, **33**, 3–20.

Rumme, R. I, Drewes, H., Bosch, W., ve Hornik (eds), H., (2000), Towards an Integrated Global Geodetic Observing System (IGGOS), *IAG Symposium*, volume 120, Berlin, Springer.

Rummel, R., Van Gelderen, M., Koop, R., Schrama, E., Sanso, F., Brovelli, M., Migliaccio, F. ve Sacerdote, F., 1993, Spherical Harmonic Analysis of Satellite Gradiometry. Technical Report 39, Netherlands Geodetic Commission, Delft.

Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter, Berlin, 2. edition.

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins M. ve Reigber, C., (2004), The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, *Geophysical Research Letters*, 31:L09607, doi:10.1029/2004GL019920

Üstün, A., (2002), Bölgesel ve Global Yükseklik Sistemlerinin Oluşturulmasında GPS'nin Katkısı Üzerine Bir İnceleme: Antalya-Samsun mareograf istasyonları arasında GPS nivelmanı örneği, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Wolff, M., (1969), Direct Measurements of the Earth's Gravitational Potential Using a Satellite Pair, *Journal of Geophysical Research*, **74(22)**, 5295–5300.