

**TÜRKİYE'DEKİ GPS-NİVELMAN VERİLERİYLE  
GLOBAL JEOPOTANSİYEL MODELLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ  
(EVALUATION OF GLOBAL GEOPOTENTIAL MODELS  
BY GPS-LEVELING DATA IN TURKEY)**

**Serap TEPEKÖYLÜ<sup>1</sup>, Aydın ÜSTÜN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Harita Genel Komutanlığı, Ankara

<sup>2</sup>Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği, Konya  
serap.tepekoylu@hgk.mil.tr

**ÖZET**

Küresel harmonik katsayılarından ( $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ ) oluşan global jeopotansiyel modeller, yeryuvarının dış çekim alanını belirlemek amacıyla kullanılırlar. Söz konusu katsayılar uydu yörünge bozulmaları, yersel gravite anomalileri ve altimetre verilerinden elde edilir. Milyonlarca gözleme dayalı olarak kestirilen yüz binlerce katsayı ve bu katsayılara ilişkin standart sapma değerlerinden beklenen, modelin yeryuvarının dış çekim alanını en iyi biçimde temsil etmesidir. Ölçü sayısı, global ölçekte bu ölçülerin homojen dağılımı, gravite sinyalinin değişik frekanslarını yansıtan değişik ölçü türleri ve ölçme-değerlendirme teknikleri model doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. 1960'lı yıllardan başlayarak günümüze kadar gelen ve bugünlerde yeni gravite alanı belirleme amaçlı uydu misyonlarıyla yeni bir ivme kazanan global jeopotansiyel model belirleme çalışmalarının her sonuç ürünü bir dizi doğruluk testinden geçirilir.

Model doğruluğu, katsayılara ilişkin kestirilmiş hata derece varyansları üzerinden belirlenebileceği (iç duyarlılık) gibi modelden hesaplanan jeoit yüksekliği, gravite anomalisi, gravite bozukluğu ve çekül sapması bileşenlerinin yersel ölçülerle karşılaştırmasıyla (dış doğrulama) da belirlenebilir. Bu çalışmada öncelikle global jeopotansiyel modellerin elde edilmesinde kullanılan verilere açıklık getirilmiştir. Modeller arasındaki karşılaştırma hata derece varyansları ve Türkiye'deki GPS/Nivelman verileri yardımıyla yapılmıştır. Bu karşılaştırmada amaç; Türkiye jeoidi belirleme çalışmalarına en iyi katkıyı sağlayacak global jeopotansiyel modeli belirlemektir. Sonuç olarak en uygun modelin hangisi olduğuna, değişik modellerin sinyal ve hata derece spektrumu ve GPS/Nivelman verileri yardımıyla karar verilmiştir. Türkiye için en uygun model GPS/Nivelman verileriyle yapılan karşılaştırmaya göre EIGEN-CG03C modelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Global jeopotansiyel model, hata derece varyansı, jeoit yüksekliği, gravite anomalisi, gravite bozukluğu, çekül sapması bileşenleri.

**ABSTRACT**

Global geopotential models comprising of spherical harmonic coefficients ( $C_{nm}$ ,  $S_{nm}$ ) are used to determine the outer gravitational field of the earth. Aforementioned coefficients are obtained from satellite orbit perturbations, terrestrial gravity anomalies and altimetry data. The expectation for the estimated hundred thousands of coefficients based on millions of observations and their corresponding

standard deviation values is that the model represents the outer gravitational field of the earth perfectly. Measurement amount, homogenous distribution of the measurements at global scale, different measurement types reflecting the different frequencies of the gravity signal and measuring-assessment techniques affect the model accuracy directly. Starting from 1960's and lasting to the present day and also gaining new acceleration with the satellite gravity field missions, every outcome of the studies related to the determination of global geopotential model experiences a series of validation tests.

Accuracy of the model can either be determined from the estimated error degree variances concerning the coefficients (interior validation) or comparison of geoid heights, gravity anomalies, gravity disturbances and vertical deflection components calculated from the model with terrestrial measurements directly (outer validation). In this study, firstly the data used for deriving the global geopotential models are clarified. Comparison between models is carried out by using error degree variances and GPS/Leveling data in Turkey. The goal of this comparison is to find the best fit global geopotential model which will contribute to the study of Turkish geoid determination. The most appropriate model is determined by the help of signal and error degree spectrums of different models and GPS/Leveling data. The EIGEN-CG03C is the best model of the Turkey.

**Key Words:** Global geopotential model, estimated error degree variance, geoid height, gravity anomaly, gravity disturbance, components of vertical deflection.

## 1. GİRİŞ

Yeryuvarının gravite alanını ifade eden çekim potansiyeli ve fonksiyonellerini değerlendirebilmek için oluşturulan global jeopotansiyel modeller sürekli gelişim içindedir. Veri sayısı, ölçme ve değerlendirme tekniklerindeki zamana bağlı gelişmeler modellerdeki bu iyileşmenin temelini oluştururlar. Özellikle veri toplama anlamında uyduların daha fazla devreye girmesi, yeryuvarının tamamına dağılmış değişik gözlem türlerinin elde edilmesini kolaylaştırmıştır.

Uydu yörünge bozulmaları, bir global jeopotansiyel modeldeki uzun-dalga boylu bileşenlerin belirlendiği temel veri kaynaklarıdır. 2000 yılından itibaren global gravite alanının belirlenmesinde yeni bir sayfa açılmıştır. Gravite alanı belirleme amaçlı uydu misyonları önce CHAMP (<http://www.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/>), sonra da GRACE (<http://www.csr.utexas.edu/grace/>) ile devreye sokulmuştur. Bunların bir devamı olarak görülen GOCE (<http://www.esa.int/esaLP/LPgoce.html>) uydusu da önümüzdeki aylarda fırlatılacaktır. Adı geçen uydu misyonlarından elde edilen ilk sonuçlar global gravite alanındaki gelişmeleri açıkça ortaya koymaktadır (Üstün, 2006).

Tüm bu gelişmelere genel olarak bakıldığında yeryuvarının dış çekim potansiyelinin belirlenmesi problemi güncel jeodezik konuların başındadır (Schwarz vd., 1987). Çözümüne yönelik belirlenen global jeopotansiyel modeller sürekli bir gelişim içerisindedir. Sonuçlar, ülkemizde olduğu gibi bölgesel jeoit belirleme

çalışmalarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, referans olarak alınacak global modelin seçimi belirli ölçütlere göre yapılmalıdır. Bu çalışmada, öncelikle gravite alanın modellenmesi hakkında bilgi verilmekte güncel gelişmeler ve modellerde kullanılan veri türleri açıklanmaktadır. Değişik global jeopotansiyel modellerin kestirilmiş derece ve hata derece varyansları üzerinden ve dış veri kaynakları yardımıyla nasıl değerlendirilebileceği ele alınmaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'deki jeoit belirleme çalışmalarında kullanılabilecek en uygun model, modellere ilişkin derece varyans değerlerine ve Türkiye'deki GPS/nivelman verilerine göre değerlendirilmektedir.

## 2. GLOBAL JEOPOTANSİYEL MODELLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

### a. Kestirilmiş Derece Varyansları ve Hata Derece Varyansları Üzerinden Model Değerlendirme

Jeodezide herhangi bir modelin hatasının ya da doğruluğunun önceden bilinmesi, yapılacak bir uygulamada o modelin kullanılıp kullanılmayacağına karar vermeye veya kullanıldığında elde edilecek sonuçların doğruluğu hakkında fikir yürütülmesine yardımcı olacaktır. Bundan dolayıdır ki, oluşturulan her jeodezik modelin doğruluğu da beraberinde verilmelidir (örn: manyetik modeller, jeoitler, sayısal yükseklik modelleri vs.).

Global jeopotansiyel modellerin doğruluğu, modeli oluşturan küresel harmonik katsayılar ( $\bar{C}_{lm}$  ve  $\bar{S}_{lm}$ ) ve bunların standart sapma değerleri ( $\sigma_{lm}$ ) ile belirlenebilir. Global jeopotansiyel modellerin standart sapmaları, modelin oluşturulması aşamasında en küçük karelerle kollokasyon çözümünden elde edilir.

Benzer bir yaklaşımla, yer gravite alanını belirlemek amacıyla görev yapmakta olan uydu misyonlarının (CHAMP, GRACE, vb.) performansları da sinyal derece varyansları ya da hata derece varyanslarına bakılarak değerlendirilebilir. Bu amaçla küresel harmonik katsayılar kullanılarak sinyal derece varyansı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

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

(1) eşliğinde küresel harmonik katsayılar ( $\bar{C}_{lm}$  ve  $\bar{S}_{lm}$ ) yerine, modelin oluşturulması aşamasında belirlenen standart sapma değerleri ( $\sigma_C$ ,  $\sigma_S$ ) kullanılarak hata derece varyansları hesaplanabilir.

Hesaplanan bu büyüklükler (sinyal derece varyansı ve hata derece varyansı) kullanılarak, küresel harmonik katsayıların derecesi ile sinyalin gücü ve modelin hatası arasındaki ilişki kurulur.

Diğer yandan gravite alanının fonksiyonu olarak değişik büyüklere karşılık gelen sinyal (veya hata) derece varyansları da asıl varyans değerlerinden türetilir. Söz konusu büyüklüklerden bazıları aşağıdaki eşitlikler ile verilmektedir:

$$\sigma_l(T) = \frac{GM}{R} \sigma_l : \text{Bozucu potansiyel değeri (m}^2/\text{s}^2) \quad (2)$$

$$\sigma_l(N) = R \sigma_l : \text{Jeoit yüksekliği (m)} \quad (3)$$

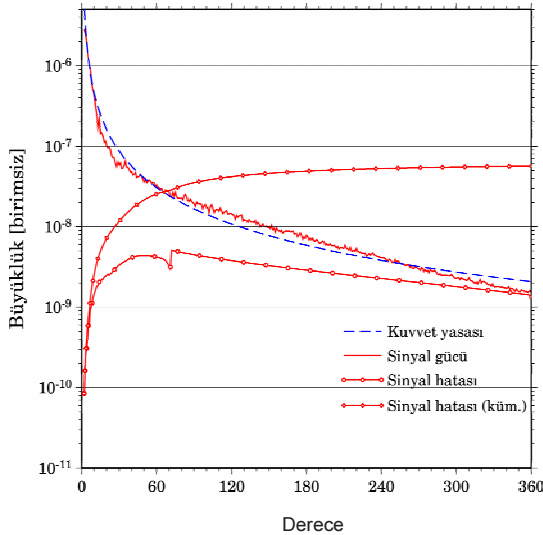
$$\sigma_l(\delta g) = \frac{GM}{R^2} (l+1) \sigma_l : \text{Gravite bozukluğu (m/s}^2) \quad (4)$$

$$\sigma_l(\Delta g) = \frac{GM}{R^2} (l-1) \sigma_l : \text{Gravite anomalisi (m/s}^2) \quad (5)$$

$$\sigma_l(g_r) = \frac{GM}{R^3} (l+1)(l+2) \sigma_l : \text{Düşey gravite gradyenti (1/s}^2) \quad (6)$$

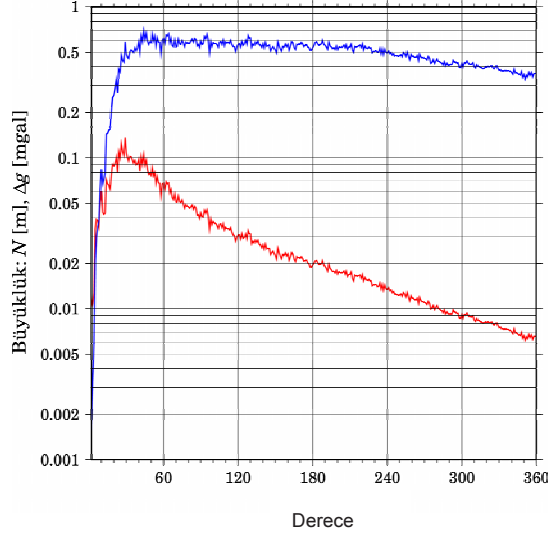
$$\sigma_l \approx \sqrt{(2l+1)} \frac{10^{-5}}{l^2} : \text{Kaula's 'rule of thumb' eşitliği (Kaula, 1966)} \quad (7)$$

Sinyal ve hata derece spektrumunun gösterimine bir örnek Şekil 1'de verilmiştir. EGM96 (Lemoine vd., 1998) model katsayılarından elde edilen bu grafikte büyüklükler birimsiz olarak gösterilmiştir. Gerektiğinde (2-7)'deki dönüşüm eşitliklerinden yararlanılarak ilgili birimlere geçiş yapılabilir. Benzer şekilde başka jeopotansiyel modeller için de elde edilebilecek bu tür grafikler, modeller arasındaki farklılıkların ortaya konulmasında kullanılmaktadır.



Şekil 1. EGM96 model katsayıları için sinyal ve hata spektrumu.

İki global jeopotansiyel model arasındaki farkın hesaplanması amacıyla, her bir modele ilişkin küresel harmonik katsayıların birbirlerinden olan farkları kullanılabilir. Böylece iki model arasındaki sinyal derece fark varyansı, her derece için hesaplanmış olur. OSU91A ve EGM96 modelleri arasındaki böyle bir karşılaştırma, Şekil 2'de örnek olarak verilmektedir. Karşılaştırma hem jeoit yükseklikleri hem de gravite anomalileri cinsinden yapılmıştır. Fark derece spektrumu iki model arasındaki aykırılığın nereden kaynaklandığının anlaşılması açısından anlamlıdır.

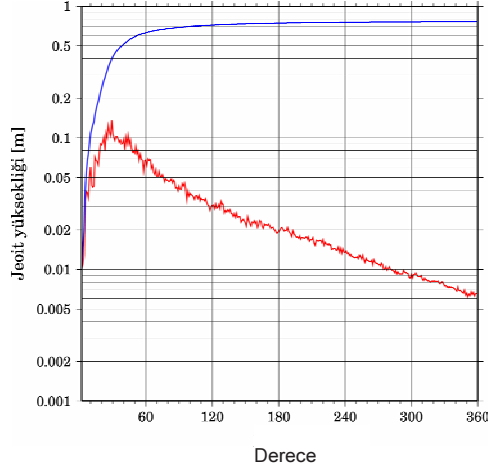


Şekil 2. EGM96 ve OSU91A arasında fark spektrumu (kırmızı: jeoit yüksekliği, mavi: gravite anomalisi).

Hata derece varyansları minimum ve maksimum derece arasında yer değiştiren güç spektrumunun (sinyal, hata, ya da fark)  $l_1$  ve  $l_2$  bant aralığının bir fonksiyonudur. Model derecesi arttıkça hata büyüklükleri kümülatif (birikimli) olarak artar:

$$\sigma_{l_1, l_2}(\text{birikimli}) = \sqrt{\sum_{l_1}^{l_2} \sigma_l^2} \quad (8)$$

Burada  $l_1$  genellikle 0 veya 2 alınır. En büyük derece ( $l_2$ ) gravite alanının konumsal çözünürlüğü veya dalgaboyu olarak adlandırılır. İki model arasındaki karşılaştırmada fark varyanslarının fonksiyonu olarak birikimli hata (aykırılık) spektrumuna örnek Şekil 3'de gösterilmektedir. Buna göre EGM96 ve OSU91A modelleri arasındaki aykırılık jeoit yüksekliği cinsinden 80 cm'ye kadar çıkmaktadır (360. derecede).



Şekil 3. EGM96 ve OSU91A modelleri arasında jeoit yüksekliği için birikimli fark spektrumu (mavi).

### b. Dış Verilerle Model Değerlendirme

Global jeopotansiyel modellerin doğruluğu daha öncede belirtildiği gibi, modeli oluşturan katsayılara ilişkin standart sapma değerleri ile belirlenir. Bunun dışında jeodezide “dış doğruluk” adı ile bilinen ve oluşturulan bir modelin veya yüzeyin; model tarafından üretilen değerlerin gerçekteki karşılıkları ile karşılaştırılması yoluyla bulunan farklar da model hakkında değerlendirme yapabilmek için önemlidir.

Bu doğrultuda global jeopotansiyel modellerin dış doğruluğu; jeopotansiyel modeller tarafından üretilen değerler ile gerçekte hesapla bulunan jeoit yüksekliği, gravite anomalisi, gravite bozukluğu ve çekül sapması bileşenleri karşılaştırılarak belirlenebilir.

Bu şekilde yapılan doğruluk araştırmasında dikkat edilmesi gereken konu; karşılaştırma sonucunda elde edilen farkların doğrudan model doğruluğu olarak adlandırılmasından önce, bir takım detayların gözden geçirilmesidir. Öncelikle kullanılacak test verilerinin doğruluğundan (ölçü aletlerinin doğruluğu, ölçü yöntemi vs.) kesin bilgi sahibi olunmalıdır. Bununla birlikte, jeopotansiyel model oluşturulurken kullanılan gravite verilerinin test bölgesini kapsayıp kapsamadığının bilinmesi de önemlidir.

Test bölgesinin, jeopotansiyel model kaynak verisini içermemesi model doğruluğunun düşük çıkmasına yol açacaktır. Aynı model daha zengin veri içeren başka bir bölgede daha iyi sonuç verebilir.

Yapılacak karşılaştırmada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise verilerin datumudur. Modelde kullanılan veriler ile test ölçülerinin datumları farklı olabilir. Eğer datum dönüşümü olanağı varsa datum dönüşümü yapılarak test yapılmalı yoksa da bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

### 3. SAYISAL UYGULAMA

#### a. Kullanılan Global Jeopotansiyel Modeller ve Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan global jeopotansiyel modeller ve onların veri yapısı Çizelge 3.1'de verilmektedir. Global jeopotansiyel modeller ile ilgili detaylı bilgi ve modellere ilişkin küresel harmonik katsayılar ve standart sapmaları Uluslararası Global Yer Modelleri Merkezi (ICGEM) internet sitesinden (<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>) temin edilebilir.

Tablo1. Global jeopotansiyel modeller ve özellikleri.

Model	Yıl	Derece	Veri*	Kaynak
DEOS CAHMP-01C	2004	70	S(Champ)	Ditmar P. , 2004
EGM96	1996	360	EGM96S, G, A	Lemoine, 1998
EIGEN-1	2002	119	S(Champ)	Reigber , 2003a
EIGEN-1S	2002	119	GRIM5, S	Reigber , 2002
EIGEN-2	2003	140	S(Champ)	Reigber , 2003b
EIGEN-CG01C	2004	360	S(Champ, Grace), G, A	Reigber , 2004c
EIGEN-CG03C	2005	360	S(Champ, Grace), G, A	Förste, 2005c
EIGEN-CHAMP03S	2004	140	S(Champ)	Reigber , 2005b
EIGEN-CHAMP03Sp	2003	140	S(Champ)	Reigber , 2004a
EIGEN-GRACE01S	2003	140	S(Grace)	Reigber , 2003c
EIGEN-GRACE02s	2004	150	S(Grace)	Reigber, 2005a
GGM01C	2003	200	TEG4, S(Grace)	UTEX CSR, 2003
GGM01S	2003	120	S(Grace)	Tapley , 2003
GGM02C	2004	200	S(Grace), G, A	UTEX CSR, 2004
GGM02S	2004	160	S(Grace)	UTEX CSR, 2004
ITG Champ01E	2003	75	S(Champ)	Ilk K. H., 2003
ITG Champ01K	2003	70	S(Champ)	Ilk K. H., 2003
ITG Champ01S	2003	70	S(Champ)	Ilk K. H., 2003
OSU91A	1991	360	GEMT2, G, A	Rapp , 1991
TUM-1S	2003	60	S(Champ)	Gerlach, 2003
TUM-2S	2004	70	S(Champ)	Wermuth M., 2004

\* S uydu izleme, G yersel gravite, A altimetre

#### b. Karşılaştırmada Kullanılan Test Verileri

Türkiye sınırları içerisinde değişik global jeopotansiyel modellerin başarısını değerlendirmek üzere 155 GPS/nivelman noktası kullanılmıştır (Şekil 4). Noktalar Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A'dan seçilmiştir. Bu nedenle GRS80 sistemindeki elipsoidal yükseklikleri TUTGA GPS kampanyaları sayesinde 1-2 cm doğruluğunda bilinmektedir. Molodensky normal ve Helmert ortometrik yükseklikler ise Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı 1999 (TUDKA99)'dan hassas nivelman tekniğiyle taşınmıştır (Ayhan vd. 2002).

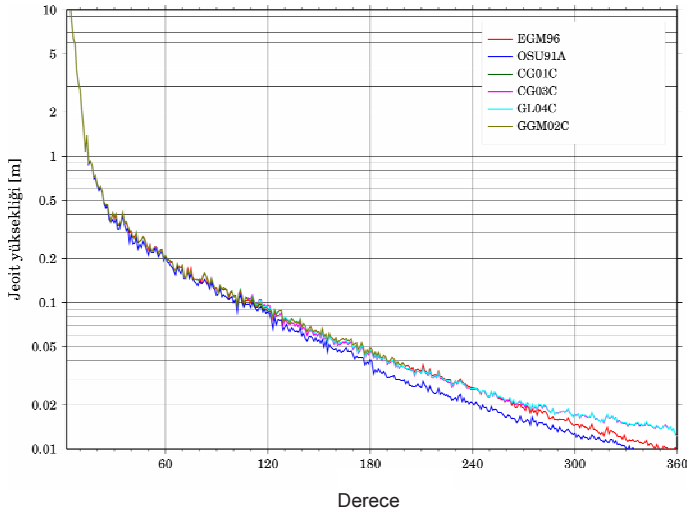


Şekil 4. Global jeopotansiyel modellerin doğruluk araştırmasında kullanılan 155 GPS/nivelman noktası.

### c. Derece Varyans Değerlerine Göre Modellerin Birbirleriyle Karşılaştırılması

Her bir model için açılımın derecesine bağlı olarak katsayılarından hesaplanan sinyal derece varyansları, birimsiz büyüklükler olarak elde edilir. Bu değerler modele ilişkin parametreler ( $GM$ ,  $R$ ) yardımıyla başka büyüklüklere (örneğin bozucu potansiyelin fonksiyonellerine) dönüştürülebilir. Modeller arasındaki karşılaştırmalarda, jeoit yüksekliğine ilişkin sinyal derece varyansları  $\sigma_i^2(N)$  temel büyüklük olarak göz önüne alınmıştır. Her modelin Stokes katsayılarının tahmini değerleri  $\sigma_C$ ,  $\sigma_S$  kullanılarak (1) eşitliğinden yararlar her derece için hata derece varyansları hesaplanmıştır.

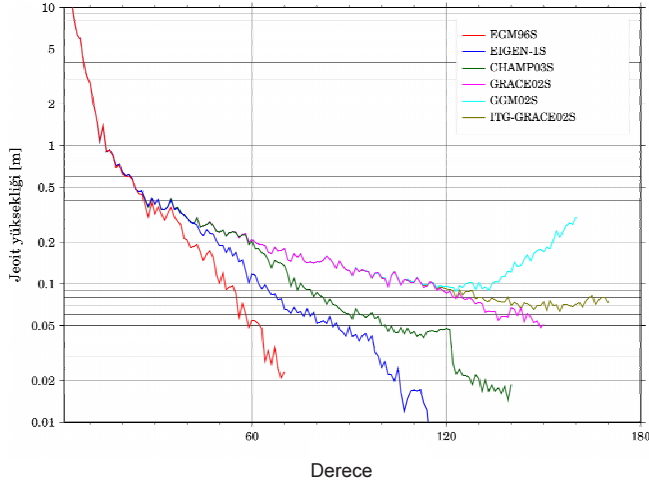
Bütünleşik bir başka deyişle uydu izleme, yersel gravite ve altimetre verileriyle belirlenen modellerin her derece için elde edilen sinyal gücü değerleri Şekil 5'de gösterilmektedir.



Şekil 5. Bütünleşik modellerin sinyal güçleri  $\sigma_i(N)$ .



Şekil 6 sadece uydu izleme verilerine dayalı jeopotansiyel modellerin sinyal güç spektrumunu ortaya koymaktadır. Modellerin bütünleşik ve uydu izleme verilerine göre ayrı ayrı değerlendirilmesinin nedeni aralarındaki farklılıkların nerelerden kaynaklandığını görmek içindir.



Şekil 6. Yalnız uydu gözlemlerini içeren modellerden elde edilen  $\sigma_l(N)$  değerleri.

Şekil 5'de GGM02C dışındaki modellerde maksimum açınım derecesi 360'dır (GGM02C'de 200). Sinyal güçleri açısından en zayıf model beklediği gibi OSU91A'dır. CHAMP ve GRACE verilerine dayanan modeller ise sinyal güçleri açısından hemen hemen denktir.

Modeller arasındaki farklılıklarda özellikle uydu verilerinin etkisi büyüktür. Bu nedenle sadece uydu verilerini içeren modellerin güç spektrumuna bakmak daha anlamlı olacaktır. Şekil 6'ya göre güncel uydu misyonlarının gravite alanının uzun dalga boylu bileşenlerinin belirlenmesine getirdiği katkı açıkça görülmektedir

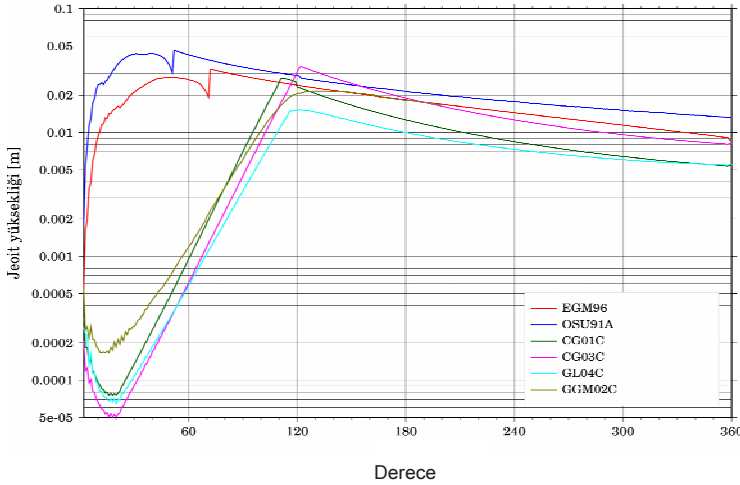
Klasik uydu izleme verilerine dayalı EGM96S modeli sadece 70. dereceye kadar çözüm sağlarken güncel uydu misyonlarının en az 120. dereceye kadar sonuç verdiği ortadadır. GRACE uydu misyonu ile bu çözüm 170. dereceye kadar sağlanabilmekte ve aynı zamanda yakalanan gravite sinyalinin gücü korunabilmektedir (ITG-GRACE02S modeli). CHAMP uydusuna dayalı çözümlerde sinyal gücündeki azalmanın 60. dereceden itibaren başladığı 120. dereceden sonra gücünü neredeyse tamamen yitirdiğinden söz edilebilir. EIGEN-1S modeli, model derecesi 99 olan GRIM5-1S modeli ile CHAMP uydu verilerinin birleşiminden oluşmaktadır. Dolayısıyla bu modeli öteki EIGEN modellerinden ayrı tutmak gerekir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi GRACE uydu verileri ile elde edilen modellerin dereceleri daha büyüktür ve modellerden elde edilen yükseklik anomali değerleri 120. dereceden sonra farklılaşmaya başlamaktadır. GRACE uydusunun CHAMP'e göre daha iyi çözüm vermesinin nedeni SST-LL (uydudan uyduya alçak-alçak) ikiz

uydu modunda çalışan ölçü tekniğini kullanması ve gravite alanının birinci türevlerini doğrudan elde etmesidir.

Bütünleşik modellerde güç spektrumunun düzgün olarak azaldığı görülmektedir. Yersel gravite ve altimetre verileri uydu verilerine göre daha güçlü sinyal içerdiğinden, yüksek frekanslarda uydu gözlemlerinde kaybolan sinyal gücünü arttırmakta dolayısıyla tüm spektrum boyunca daha düzenli bir sinyal davranışı gözlemlenmektedir.

Modellerin hata spektrumuna bakılırsa Şekil 7'deki gibi bir sonuç elde edilir. Şekil bütünleşik modellere ilişkin hata derece spektrumunu göstermektedir. Modellere ilişkin hata derece büyüklükleri ya dengeleme sonrası katsayıların sonsal standart sapmalarından ya da bağımsız model çözümlerinin karşılaştırılmasıyla bulunan (kalibre edilmiş) standart sapmalardan hesaplanır. Formal standart sapmalar kalibre edilmiş büyüklüklere göre daha iyimser sonuç verdiği için güncel modellerde genel eğilim olarak kalibre edilmiş büyüklükler verilmektedir.

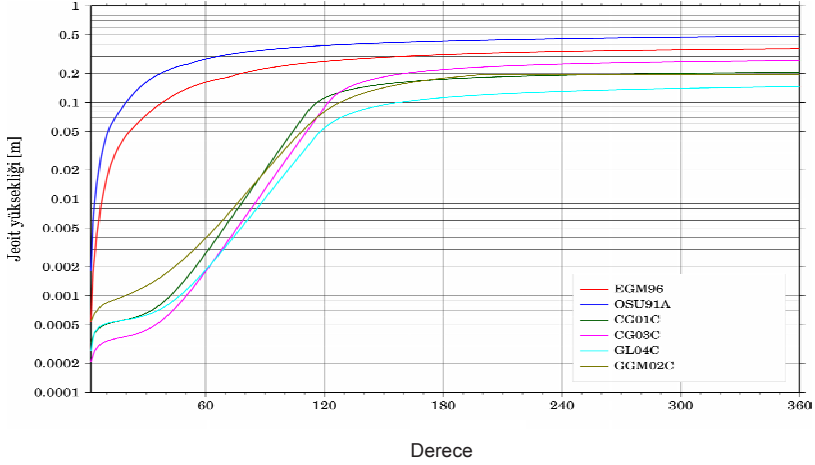


Şekil 7. Bütünleşik modellerin hata derece büyüklükleri.

Güncel modellerin hata büyüklükleri geleneksel modellerin değerlerine göre çok daha düşük olduğu şekilden açıkça görülmektedir. Bu fark özellikle 120. dereceye kadar olan uzun dalga-boylu gravite alanı kesiminde çok daha belirgindir. Güncel uydu misyonlarına dayalı tüm modellerde hata spektrumu 60. dereceye kadar jeoit yüksekliği cinsinden 1 mm'nin altındadır. Oysa ki; EGM96 ve OSU91A gibi geleneksel modellerde daha spektrumun başında (10-20. derecelerde) hata değerleri 1 cm'ye ulaşmaktadır. Şekil 7'ye göre GL04C modelinin en küçük hata değerlerine sahip olduğu görülür. Dolayısıyla diğer modellere göre GL04C modelinin katsayılarının tahmini değerlerinin daha doğru olduğu değerlendirilmektedir.

Şekil 8, hata değerlerinin gravite alanının tüm spektrumu boyunca nasıl biriktiğini ortaya koymaktadır. EGM96 ve OSU91'de jeoit yüksekliği hatasındaki ani dönüş derecesi yaklaşık olarak 30'dur. Buraya kadar hata değerlerinde çok hızlı bir yükseliş

gözlenmekte ve bu dereceden sonra yavaş bir trendle davranışını sürdürmektedir. 30. derecede EGM96 10 cm, OSU91A 20 cm lik hata değerlerine sahipken; 360. derecede sırasıyla yaklaşık 40 ve 50 cm'ye ulaşmaktadır. Öte yandan güncel modellerin birikimli hata değerleri için eşik derece değerleri 30 ve 120'dir. Neredeyse tüm güncel modellerde 30. derecedeki jeoit yüksekliği hatası 1 hatta 0.5 mm dolaylarındadır. 30. dereceden sonra hata değerleri bir yükseliş trendine girmekte ve 120. derecede kabaca 10 cm'ye çıkmaktadır. 120. dereceden sonra da düşük bir eğimle davranışını sürdürmekte ve ortalama 20 cm hata ile sonuç vermektedir.



Şekil 8. Bütünleşik modellerin hata derece büyüklükleri (birimli).

### ç. GPS/Nivelman Verileri İle Yapılan Karşılaştırmalar

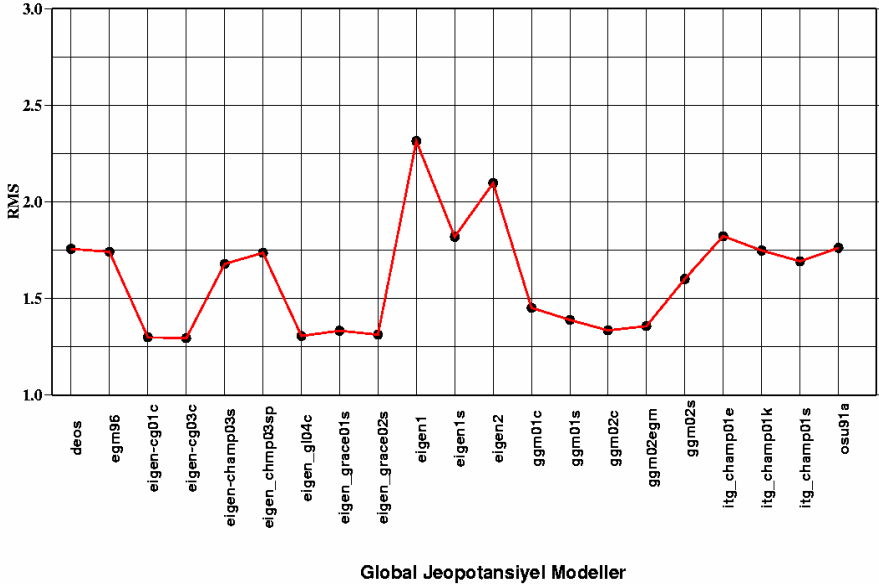
Uygulamada yararlanılan global jeopotansiyel model katsayıları; GFZ-POSTDAM tarafından işletilmekte olan Uluslararası Global Yer Modelleri Merkezi (International Center for Global Earth Models:ICGEM) internet sayfasından (<http://icgem.gfz.potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>) alınmıştır. Jeopotansiyel model ürünlerinin hesaplanmasında ise GRAVSOFIT (Tscherning, 1994) yazılım paketi modülü olan "harmexp.f" programı kullanılmıştır. Uygulama için gerekli olan GPS/nivelman noktalarına ait veriler Harita Genel Komutanlığından temin edilmiştir. Her bir model için, "harmexp.f" programı çalıştırılarak 155 adet GPS/Nivelman noktasına karşılık gelen yükseklik anomalisi ( $\zeta_{GM}$ ) değerleri hesaplanmıştır.

155 adet GPS/Nivelman noktalarına ait yükseklik anomalisi ( $\zeta_{GPS/Niv}$ ) değeri ile global jeopotansiyel modellerden elde edilen yükseklik anomalisi ( $\zeta_{GM}$ ) değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen farkların minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Yükseklik anomali değerlerinin karşılaştırılması (birim: m).

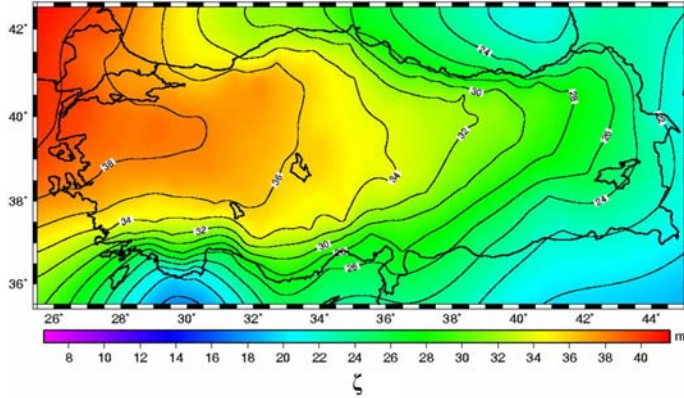
Model	Derece	Veri	Min	Max	Ort	Std.Sap	RMS
DEOS	70	S(CHAMP)	-4.40	4.57	0.38	1.72	1.76
EGM96	360	EGM96S, G, A	-4.20	4.13	0.50	1.67	1.74
CHAMP03SP	140	S(CHAMP)	-3.51	4.15	0.39	1.70	1.74
EIGEN_GL04C	360	S(GRACE), G, A	-1.50	4.10	1.02	0.82	1.31
GRACE01S	140	S(GRACE)	-2.87	3.32	0.83	1.04	1.33
GRACE02S	150	S(GRACE)	-2.35	3.05	0.91	0.95	1.31
EIGEN-1	119	S(CHAMP)	-5.76	4.43	-0.61	2.24	2.31
EIGEN-1S	119	GRIM5, S	-3.32	4.36	0.38	1.70	1.82
EIGEN-2	140	S(CHAMP)	-5.02	4.34	0.18	2.10	2.10
EIGEN_CG01C	360	S(CHAMP, GRACE), G, A	-1.79	3.62	0.99	0.84	1.30
EIGEN_CG03C	360	S(CHAMP, GRACE), G, A	-1.48	3.84	1.02	0.80	1.29
CHAMP03S	140	S(CHAMP)	-3.49	4.22	0.41	1.63	1.68
ITG_CHAMP01K	70	S(CHAMP)	-3.87	4.47	0.40	1.71	1.75
GGM01C	200	TEG4, S(GRACE)	-0.97	4.73	1.04	1.02	1.45
GGM01S	120	S(GRACE)	-2.93	3.12	0.87	1.08	1.39
GGM02C	200	S(GRACE), G, A	-0.94	4.12	1.00	0.89	1.34
GGM02S	160	S(GRACE)	-2.30	4.32	0.85	1.36	1.60
ITG_CHAMP01	75	S(CHAMP)	-3.92	4.64	0.36	1.79	1.82
ITG_CHAMP01S	70	S(CHAMP)	-3.94	4.27	0.46	1.63	1.69
OSU91A	360	GEMT2, G, A	-3.40	3.87	-0.38	1.73	1.76
TUM1S	60	S(CHAMP)	-3.83	4.67	0.31	1.94	1.95
TUM2S	70	S(CHAMP)	-3.84	4.74	0.48	1.95	2.01
TUM2SP	60	S(CHAMP)	-3.65	4.53	0.49	1.90	1.95

Tablo 2'ye göre RMS (Root Mean Square) değerleri incelendiğinde, Türkiye'deki GPS/Nivelman verileri ile en uyumlu model EIGEN-CG03C'dir. EIGEN\_CG03C modeli, CHAMP ve GRACE uydu verileri ile altimetre/yüzey gravite verilerinin birleştirilmesinden elde edilmiş, yeni ve yüksek çözünürlüklü bir modeldir. Aynı modelin standart sapma ile gösterilen ortalama aykırılık değeri ise 0.80'cm'ye kadar gerilemektedir. RMS değerlerine göre sonuçlar çizdirildiğinde Şekil 9 ortaya çıkar. Şekil'den EIGEN modellerinin üstünlüğü görülebilir.



Şekil 9. Standart sapma değerlerine göre global jeopotansiyel modellerin Türkiye sınırları içerisindeki performansı (birim: m).

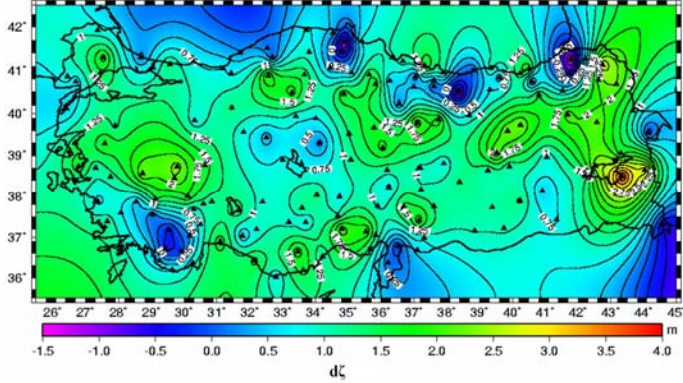
GPS/Nivelman noktalarıyla belirlenen  $\zeta_{GPS/Niv}$  yükseklik anomalisi modeli Şekil 10'da verilmektedir.



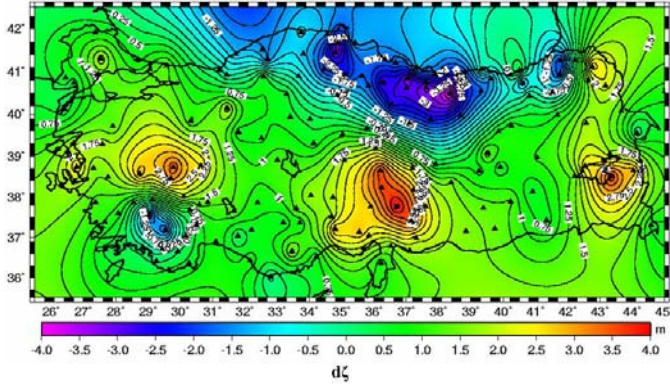
Şekil 10. Türkiye için yükseklik anomalisi ( $\zeta_{GPS/Niv}$ ) modeli.

EIGEN-CG03C modelinden elde edilen yükseklik anomali değerleri ile GPS/Nivelman noktalarının yükseklik anomalileri karşılaştırılması ise Şekil 11'de verilmektedir. Fark haritasına göre 5-6 noktada EIGEN-CG03C yükseklik anomalisi ve  $\zeta_{GPS/Niv}$  değerleri arasındaki fark 2m üzerinde çıkmıştır. Söz konusu noktaların

hemen hepsi yüksek dağlık alanlardadır. GPS/Nivelman verilerinde uyumsuz ölçüler olabileceği gibi model ile belirlenemeyen kitle yoğunluk değişimleri buna benzer sonuçların görünmesine neden olabilir. Türkiye için yapılan yerel jeoit modellemelerinde kullanılan global model olan EGM96 modelinden elde edilen yükseklik anomali değerleri ile GPS/Nivelman noktalarının yükseklik anomalileri karşılaştırılması ise Şekil 12'de verilmektedir.

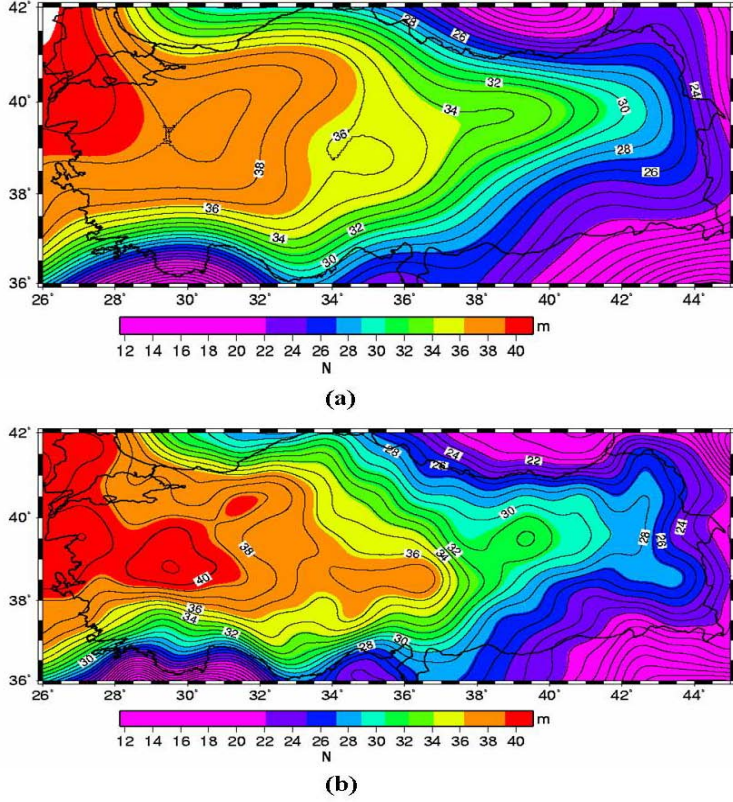


Şekil 11. EIGEN-CG03C ve GPS/Nivelman farkları.



Şekil 12. EGM96 ve GPS/Nivelman farkları.

Şekil 13 (a)'da EIGEN-CG03C ve (b)'de EGM96 global jeopotansiyel modellerinden elde edilen yükseklik anomali haritası görülmektedir. İki modelin görünümünden EIGEN-CG03C'nin daha uygun bir jeoit modelini yansıttığı eğrilerin değer aralığında aldığı değişimlere bakarak anlaşılmaktadır.



Şekil 13. EIGEN-CG03C ve EGM96 yükseklik anomalisi haritası.

#### 4. SONUÇ

Global jeopotansiyel modellerin başarılarının ölçülmesi ve değişik amaçlar için uygunluğunun araştırılması gravite alanı ile ilgili çalışmaların bir başka uygulama alanıdır. Global jeopotansiyel modellerin başarısı ve doğruluğu katsayılar ve onların standart sapmaları üzerinden değerlendirilebileceği gibi dış veri kaynaklarıyla yapılan karşılaştırmalardan da anlamlı sonuçlar bulmak sıkça başvurulan yöntemler arasında yer alır. Birinci yöntemde küresel harmonik katsayılar ( $\bar{C}_{lm}$  ve  $\bar{S}_{lm}$ ) ve standart sapma değerlerinden ( $\sigma_{lm}$ ) elde edilen sinyal ve hata derece varyansları kullanılır. Dış doğruluk analizi adı verilen ikinci yöntemde ise jeopotansiyel modellerden üretilen değerler ile ölçülerek türetilen jeoit yüksekliği, gravite anomalisi, gravite bozukluğu ve çekül sapması bileşenleri karşılaştırılır.

Bu çalışmada her iki yöntemde dayalı olarak 21 değişik modelin değerlendirilmesi yapılmıştır. İlk yöntemde modeller oluşturulma biçimlerine göre sınıflandırılarak kendi aralarında değerlendirilmiştir. Hesaplanan sinyal ve hata derece varyanslarından

birbirlerine göre farklılıkları ve bu farklılığın kaynakları incelenmiştir. Modellerin sinyal güçlerine hata spektrumlarına bakıldığında uydu tekniklerinin model belirlemede çok önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Güncel uydu misyonlarından elde edilen modeller geleneksel uydu izleme teknikleriyle belirlenen EGM96 ve OSU91A gibi modellere göre hem sinyal güçleri hem de hata spektrumları açısından çok üstündür. Sadece CHAMP uydusu EGM96 modelinde kullanılan tüm uydulara eşit bir performans sergilemiştir. GRACE uyduları ise tek başına tüm zamanların en iyi uydu modelini ortaya çıkarmaktadır. CHAMP ve GRACE global gravite alanının uzun-dalga boylu bileşenlerinin daha doğru belirlenmesini sağlamakla kalmamış verilerdeki sinyal gücü 170. dereceye kadar izlenebilmiştir. GOCE uydusuyla sinyal gücünün 250-300. derecelerde jeoit yüksekliği cinsinden 1 cm'ye kadar gözlenebileceği değerlendirilmektedir.

Uydu verilerine, altimetre ve gravite verilerinin eklendiği ve katsayı derecesi 360 olan bazı modellerden (EGM96, EIGEN-CG01C, EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C, OSU91A) elde edilen sinyal ve hata derece varyanslarına bakıldığında en iyi modelin EIGEN-GL04C olduğu görülmüştür. Bu sonuç EIGEN-GL04C modelinin katsayılarının tahmini değerlerinin daha doğru olduğunu göstermiştir.

Türkiye için kullanılacak global jeopotansiyel modelin ne olması gerektiği araştırılmıştır. Bunun için 155 adet GPS/Nivelman noktası kullanılmıştır. Global jeopotansiyel modellerden elde edilen yükseklik anomalileri ( $\zeta_{GM}$ ) ile GPS/Nivelman noktalarına ait yükseklik anomalileri ( $\zeta_{GPS/Niv}$ ) karşılaştırılıp, elde edilen farkların RMS değerleri incelendiğinde (Şekil 9 ve Tablo 2) en küçük RMS değerini EIGEN-CG03C modelinin verdiği görülmüştür. EIGEN-CG03C modeli, CHAMP ve GRACE uydu verileri ile altimetre/yüzey gravite verilerinin birleştirilmesinden elde edilmiş, yeni ve yüksek çözünürlüklü bir modeldir. Bundan sonra Türkiye için hesaplanacak jeoit modelinde EIGEN-CG03C modelinin daha iyi katkı sağlayacağı söylenebilir.

GOCE uydusunun fırlatılmasından sonra elde edilecek yeni modeller ile daha iyi sonuçlar alınması beklenmektedir. Bu uydunun verileriyle elde edilecek modellerin de yukarıda gerçekleştirilen analiz işlemlerinden geçirilmesi gerekir. Türkiye için gelecekte hesaplanacak jeoit yüksekliği hesaplarında GOCE verilerini içeren modellerin kullanılmasının daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir.

## 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, A.İ., Ocak, M., Türkezer, A., Yıldız, H., Bayazıt, N., Ata, M., Çağlar, Y. ve Özerkan, A., 2002, Türkiye Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA99A), *Harita Dergisi*, Özel Sayı:16, s.69.**

**Kaula, W. M., 1966, Theory of Satellite Geodesy, Blaisdell Publishing Comp., London.**



**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.

**Schwarz, K.P., Sideris, M.G., and Forsberg, R.,** 1987, Orthometric heights without leveling, *J. Surv. Engrg.*, ASCE, **113(2)**, s.28–40.

**Tscherning, C. C., Forsberg, R., and Knudsen, P.,** 1994, The gravsoft package for geoid determination, proc.1. continental workshop on the geoid in Europe, s.327-334.

**Üstün, A.,** 2006, Gravite alanı belirleme amaçlı uydu misyonları: CHAMP, GRACE, GOCE ve ilk sonuçlar. *Harita Dergisi*, **136**, s.16-30.