

Türkiye’de Güncel GOCE Global Jeopotansiyel Modellerinin Değerlendirilmesi

Nevin Betül Avşar^{1,*}, Bihter Erol², Şenol Hakan Kutoğlu¹

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

Özet

Gravite alanı belirleme amaçlı son uydu misyonu Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE), yeryuvarının gravite alanının yüksek doğruluk ve çözünürlükle belirlenmesine imkan vermiştir. 2010 yılından itibaren GOCE uydu verilerine dayalı birçok Global Jeopotansiyel Model yayınlanmıştır. Bu çalışmada 9 farklı GOCE modelinden (EIGEN-6C4, EIGEN_6C3stat, JYY_GOCE04S, GOGRA04S, GO_CONS_GCF_2_TIM_Release 1, 2, 3, 4 ve 5) yararlanılarak, GOCE uydu verilerinin Türkiye’de gravite alanının yüksek bir doğrulukla temsil edilmesine yapabilecekleri katkılar araştırılmaktadır. Bu anlamda GOCE Global Jeopotansiyel Modellerinin değerlendirilmesi, Türkiye yükseklik sisteminin modernize edilmesi çalışmaları için de önemlidir. GOCE modellerinin Türkiye bölgesindeki doğrulukları, Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü M3 Projesi kapsamında kurulan jeodezik ağa ait 433 GNSS/nivelman noktası yardımıyla test edilmiştir. Ultra-yüksek çözünürlüklü birleştirilmiş modeller EIGEN-6C3stat ve EIGEN-6C4 ile GNSS/nivelman verileri arasında standart sapmalar cinsinden, sırasıyla 9.1 cm ve 9.4 cm’lik uyum belirlenmiştir. Sonuçlar, Türkiye Hibrid Geoidi 2009 (THG-09)’un hesabında kullanılan yüksek çözünürlüklü model Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)’in performansı ile karşılaştırıldığında, ilgili modellerin üstün bir performans sergilediği gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler

GOCE, Geoit Yüksekliği, Global Jeopotansiyel Modeller, GNSS/nivelman

1. Giriş

Başlıca hedefleri, 100 km’den daha iyi bir konumsal çözünürlükte yeryuvarının statik gravite alanını 1 mGal doğruluk ile sağlamak ve buna dayanarak 1-2 cm doğruluğunda bir global geoid elde etmek olarak belirlenen GOCE uydusu, Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency - ESA) tarafından 17 Mart 2009’da fırlatılmıştır (Drinkwater vd. 2003; Floberghagen vd. 2011). Bu hedefleri başarabilmek için, gravite alanı belirleme amaçlı diğer uydu misyonlarından farklı olarak düşük yörünge yüksekliği (~260 km) ve donanımındaki uydu gravite gradyometresi ile gravite alanının kısa ve orta dalga boylu bileşenlerinin de modellenmesi amaçlanmıştır.

GOCE uydusunun 4 yılı aşan görev süresi boyunca toplanan veriler ile birçok Global Jeopotansiyel Model (Global Geopotential Model - GGM) hesaplanmıştır (Gruber vd. 2014; ICGEM 2014). Uydu misyonunun ilk veriyi sağladığı Kasım 2009’dan günümüze, gravite alanı çözümlerinin 5 farklı jenerasyonu yayınlanmıştır. 1. jenerasyon ~2 aylık, 2. jenerasyon ~8 aylık, 3. jenerasyon ~12 aylık, 4. jenerasyon yeniden işlenmiş ~27 aylık GOCE gözlem verilerine dayanırken, 5. jenerasyon çözümler için GOCE uydusunun bütün görev süresini kapsayan yeniden işlenmiş ~42 aylık veriler kullanılmıştır (ESA 2014). ESA’nın GOCE High Level Processing Facility (HBF) projesi kapsamında GOCE GGM’lerin hesaplanmasında 3 farklı yaklaşım uygulanmaktadır: direct (DIR), time-wise (TIM) ve space-wise (SPW) (Pail vd. 2011). Aynı zamanda farklı kuruluşlar tarafından farklı metotlarla üretilen birçok GOCE modeli de vardır. Alman Yer Bilimleri Araştırma Merkezi (GeoForschungsZentrum - GFZ) ve Fransız Uzay Jeodezisi Araştırma Grubu (Le Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale - GRGS) işbirliğinde geliştirilen EIGEN (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques) GGM’leri bu modellere örnek olarak verilebilir (GFZ 2015).

Nivelman ölçmelerine gerek duyulmadan, GNSS ile ortometrik (ya da normal) yüksekliklerin pratik olarak üretilmesi için yüksekliklerin doğruluk gereksinimi karşılayacak 2-3 cm doğruluklu bir bölgesel geoid modeline ihtiyaç vardır. Bilinen en son Türkiye geoid modeli THG-09’un dış doğruluğu ±8.4 cm’dir (Kılıçoğlu vd. 2011). Buna göre, Türkiye yükseklik sisteminin modernizasyonunda, yüksek doğruluklu bir bölgesel geoid duyulan ihtiyaç ortadadır. Gravite alanı belirleme amaçlı uydu misyonlarının katkıları ile günümüzde global model doğruluklarının iyileştirildiği açıktır. Bu durumda, homojen dağılmış, iyi doğrulukta yersel gravite ölçüleri ile desteklenerek, yüksek doğruluklu bir bölgesel gravimetrik geoid hesaplamak artık mümkün olabilmektedir (Featherstone 2002). Bu doğrultuda, bu çalışmanın amacı GOCE modellerinin Türkiye için yüksek doğruluklu bir bölgesel gravimetrik geoid modelinin belirlenmesine ne derecede katkı sağlayacağına araştırılmasıdır.

GGM’lerin üretilmesi sürecinde global veri dağılımının yetersiz ve farklı doğruluklarda olması, bu modellerin doğruluklarını sınırlandıran başlıca etkenlerdir. Buna göre GGM’lerden hesaplanacak büyüklüklerin doğruluk seviyeleri bölgeden bölgeye değişmektedir. GGM’lerin doğruluğu, modelin parametre kestirim değerlerinin analizi ya da modelden hesaplanan geoid yüksekliği, gravite anomalisi vb. büyüklüklerin yersel ölçüler ile karşılaştırılması ile belirlenebilir (Abbak 2011; Tepeköylü ve Üstün 2008). Bu anlamda, Türkiye’de de geoid modelleme çalışmalarında kullanılacak en uygun GGM’nin değerlendirilmesine ilişkin çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Erol 2012; Erol vd. 2008; Erol vd. 2009; Tepeköylü ve Üstün 2008; Üstün ve Abbak 2010).

* Sorumlu Yazar: Tel: +90 (372) 2911652 Faks: +90 (372) 2572996

E-posta: nb_avsar@beun.edu.tr (Avşar, N.B.), bihter@itu.edu.tr (Erol, B.), kutoglu@hotmail.com (Kutoğlu, Ş.H.)

Bir bölgenin gravite alanına en iyi uyan GGM’nin belirlenmesi için literatürde en çok uygulanan yöntem, bağımsız veri setlerinden yararlanılarak GGM’lerin karşılaştırılmasıdır. Bu doğrultuda, GOCE modellerinin performanslarının değerlendirilmesi için dünyanın farklı bölgelerinde yapılan çalışmalar vardır: Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri’nde Amjadiparvar vd. (2013), Sudan’da Godah ve Krynski (2013), Brezilya’da Guimaraes vd. (2012), Orta Avrupa’da Janak ve Pitonak (2011) vb.

Bu çalışmada, güncel GOCE GGM’lerinin Türkiye bölgesindeki performansları, lokal bir ağı GNSS/nivelman noktaları yardımıyla test edilmiştir. Bununla birlikte, GOCE verilerinden bağımsız, ultra yüksek çözünürlüklü model EGM2008’in test alanındaki doğruluğu da analiz edilmiştir. Böylelikle GOCE modellerinin, Türkiye’nin son bölgesel geoid modeli THG-09’un hesaplanmasında referans global model olarak kullanılan EGM2008 ile istatistiksel anlamda karşılaştırılmaları da sağlanmıştır.

2. Global Jeopotansiyel Modellerin GNSS/Nivelman Verileri İle Değerlendirilmesi

Global Jeopotansiyel Modeller, spektrumun farklı dalga boylarında yeryuvarının gravite alanını temsil eden bir küresel harmonik katsayılar setidir. Bu katsayılar; uydu yörünge bozulmaları, uydu gravite gradyometresi, uydu altimetresi ve/veya gravimetre verilerinden elde edilmektedir. Bu kapsamda GGM’ler genel olarak 3 gruba ayrılır (Featherstone 2002): 1. Yalnızca uydu gravite verilerinden hesaplanan modeller, 2. Uydu gravite verilerinin, uydu altimetre ve/veya yersel gravite verileri ile birleştirilmesi ile üretilen modeller, 3. Uydu bazlı ya da birleştirilmiş GGM’lerin belirli bir bölge için lokal gravite verileri iyileştirilmesi ile elde edilen modeller.

Yeryuvarının dış çekim alanı ve fonksiyonelleri (bozucu potansiyel, gravite anomalisi, çekül sapması bileşenleri vb.), GGM’ler kullanılarak küresel harmonik seriler ile ifade edilebilir. Buna göre geoid yüksekliği, küresel koordinatları (r , θ , λ) bilinen bir noktada Bruns formülü yardımıyla,

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{R}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir (Hofmann-Wellenhop ve Moritz 2005). Eşitlikte, GM evrensel çekim sabiti ile yeryuvarının kütlesi çarpımını, kısaca yer merkezli çekim sabitini, γ normal graviteyi, R yeryuvarının ekvatorial yarıçapını, n_{max} açılımın maksimum derecesini \bar{C}_{nm} ve \bar{S}_{nm} n . derece ve m . sıradaki tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayıları, $\bar{P}_{nm}(\cos \theta)$ ise tam normalleştirilmiş birinci tür bütünlük Legendre fonksiyonunu temsil eder. $\Delta \bar{C}_{nm}$, gerçek gravite alanının kuşak harmonik katsayılarından ($m=0$), normal gravite alanının katsayılarının çıkarılması ile belirlenir. Ancak geoid yüksekliğinin hesaplanmasında küresel harmonik katsayılar doğrudan kullanılamaz. Bu konuda detaylı bilgi Rapp (1997)’de bulunabilir. Buna göre yeryuvarının kütlesi ve geoidin potansiyeli tam olarak bilinmediğinden, geoid yüksekliği hesaplamalarına “zero-degree term” denilen bir doğrulama terimi uygulanmalıdır. Aynı zamanda her GGM, bir “permanent tide system (mean, zero ya da tide-free)” içermelidir.

GGM’nin dolayısıyla açılımın maksimum derecesi, modelin konumsal çözünürlüğünü tanımlar $20000\text{km}/n$. Ancak bir GGM’nin etkin çözünürlüğü modelin hesabında kullanılan verilerin kalitesi ve çözünürlüğüne bağlı olduğundan global anlamda homojen değildir.

Bir GGM’nin global/bölgesel gravite alanını temsil etmedeki başarısının analizi için bağımsız veri setleri olarak; çekül sapmaları, yer bazlı gözlemler ile elde edilmiş gravite anomalileri ve GNSS/nivelmanından türetilen geoid yükseklikleri gibi büyüklükler kullanılmaktadır (Amos ve Featherstone 2003; Hirt 2011; Kılıçoğlu vd. 2009).

GNSS ölçmelerinden h elipsoidal yüksekliği ve nivelman ölçmelerinden H ortometrik yüksekliği elde edilen bir noktada N geoid yüksekliği,

$$N = h - H \quad (2)$$

ile hesaplanır. Eşitlikte, geoid ile elipsoid normalleri arasındaki doğrultu farkının etkisi milimetrenin altında olacağından ihmal edilebilir (Fotopoulos 2003). Ancak yine de GNSS ve nivelman ölçmelerindeki rasgele ve sistematik hataların, GGM’lerin değerlendirilmesinde dış veri grubu olarak kullanılan geoid yüksekliklerinin doğruluğunu etkilediği de göz önüne alınmalıdır.

2.1. Veri Setleri

2.1.1. Global Jeopotansiyel Modeller

Çalışmada, farklı veri grupları ve hesaplama algoritmaları üretilen 9 GOCE modelinin, Türkiye gravite alanına uygunluğu incelenmiştir. Modellere ilişkin bilgiler Tablo 1’de özetlenmiştir; detaylı bilgiler ise verilen referanslarda bulunabilir.

Tablo 1: Test edilen Global Jeopotansiyel Modeller (ICGEM 2014)

GGM	Yıl	n_{max}	Veri	Referans
EIGEN-6C4	2014	2190	S (GOCE, GRACE, LAGEOS), G, A	Förste vd. (2014)
EIGEN-6C3stat	2014	1949	S (GOCE, GRACE, LAGEOS), G, A	Förste vd. (2013)
JYY GOCE04S	2014	230	S (GOCE)	Yi vd. (2013)
GOGRA04S	2014	230	S (GOCE, GRACE)	Yi vd. (2013)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	2014	280	S (GOCE)	Brockmann vd. (2014)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R4	2013	250	S (GOCE)	Pail vd. (2011)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R3	2011	250	S (GOCE)	Pail vd. (2011)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R2	2011	250	S (GOCE)	Pail vd. (2011)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R1	2010	224	S (GOCE)	Pail vd. (2010)
EGM2008	2008	2190	S (GRACE), G, A	Pavlis vd. (2008)

n_{max} : Maksimum açınım derecesi
S: Uydu verileri, G: Yersel gravite verileri, A: Altimetre verileri
GRACE: Gravity Recovery And Climate Experiment
LAGEOS: LAsEr GEodynamics Satellites

GOCE GGM'leri dışında çalışmada değerlendirilen diğer bir model de, THG-09'un referans global modeli EGM2008'dir. Yalnızca uydu verilerine dayanan bölgeler için EGM2008'nin konumsal çözünürlüğünün daha düşük olması beklenir. Kılıçoğlu vd. (2009), EGM2008'in hesabında Türkiye bölgesinden yersel veri kullanılmadığına dikkat çekmiş, bölgedeki mevcut yüzey gravite anomalilerinin, modelden türetilen değerler ile uyumluluğunu standart sapmalar cinsinden 18.36 mGal olarak ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, GPS/nivelmanından türetilen kuasi-geoit yükseklikleri ile de 18.90 cm'lik bir uyum belirlenmiştir.

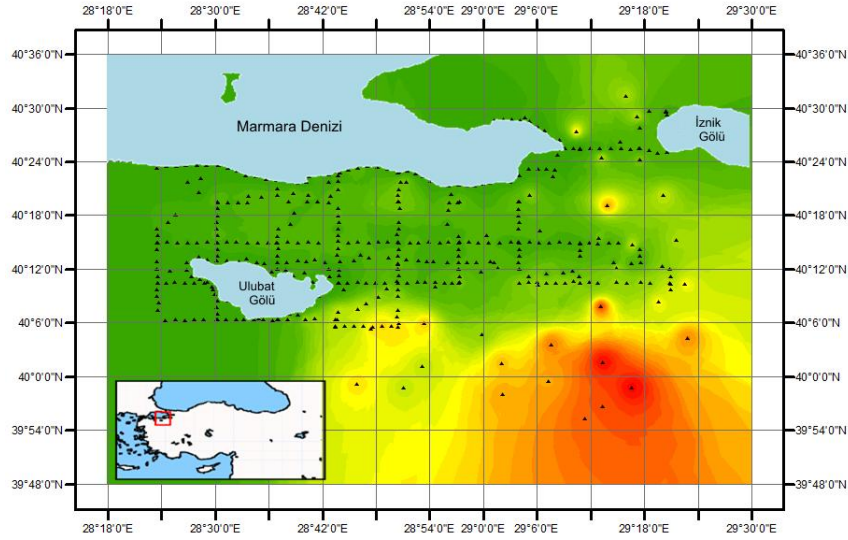
2.1.2. GNSS/Nivelman Verileri

GOCE GGM'lerinin Türkiye bölgesinde değerlendirilmeleri için, BUSKİ M3 Projesi kapsamında kurulan lokal GNSS/nivelman ağı gözlemlerinden yararlanılmıştır. Ağ noktalarının, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı 1999 (TUDKA99)'da tanımlanmış Helmert ortometrik yüksekliklerinin mutlak doğrulukları yaklaşık ± 2 cm'dir. GNSS ölçmelerinden elde edilen mutlak konum doğrulukları ise enlem ve boylam için yaklaşık ± 1.5 cm, elipsoidal yükseklikler için yaklaşık ± 2 cm'dir. Bu anlamda, GNSS ve nivelman verilerinin yüksek doğruluklu olması, testlerin belirtilen lokal alanda gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Test ağı ile ilgili temel bilgiler Tablo 2'de verilmiştir, daha ayrıntılı bilgi ise BUSKİ (2009)'da bulunabilir.

GGM'lerin test edilmesi için; Bursa jeodezik ağındaki 1287 noktadan, ilgili projede lokal geoide dayanak olarak belirlenen 433 GNSS/nivelman noktası kullanılmıştır. GNSS/nivelman noktalarının dağılımları Şekil 1'de gösterilmiştir. Yine Şekil 1'den, Bursa test alanının değişken bir topografik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Test alanının ortalama yüksekliği 157.6212 m'dir. Genel olarak düşük topografyanın hakim olduğu alanın güneydoğusunda ise Uludağ bulunmaktadır.

Tablo 2: Lokal GNSS/nivelman ağına ilişkin temel bilgiler

Ağın temel özellikleri	Alan (km ²)	50 x 70					
	Nokta sayısı	1287					
	km ² başına düşen nokta sayısı	~ 8					
GNSS ölçmeleri	Yöntem	Statik ve Hızlı Statik					
	Datum	ITRF96*					
	Nokta türü	C1, C2, C3 derece					
Nivelman ölçmeleri	Yöntem	Geometrik					
	Datum	Türkiye Ulusal Düşey Datumu					
	Nokta türü	Ana ve ara nivelman ağı noktaları					
Enlem		Boylam		Elipsoidal Yükseklik (WGS84*)		Helmert Ortometrik Yüksekliği	
Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
39° 55' 16.2182"	40° 31' 22.9152"	28° 23' 33.2959"	29° 22' 55.9823"	38.6063 m	1354.2623 m	0.8664 m	1315.2489 m
*ITRF96: International Terrestrial Reference Frame 1996							
*WGS84: World Geodetic System 1984							



Şekil 1: Bursa test alanının topografyası ve 433 GNSS/nivelman noktasının dağılımı

2.2. Sayısal Testler

GGM'lerin performanslarının değerlendirilmesinde, GNSS/nivelmanından ve modellerden türetilen geoit yüksekliklerinin farkları esas alınmıştır. Buna göre, test ağının her noktası için geoit yükseklikleri, (2) eşitliği ile elde edilmiştir ($N_{GNSS/nivelman}$). Noktalardan 2 tanesi, 3. dereceden bir polinom yüzeyi yardımıyla kaba hatalı olarak belirlenmiş ve elimine edilmiştir.

Diğer taraftan, geoit yükseklikleri seçilen GGM'ler ile de "International Centre for Global Earth Models (ICGEM) Calculation Service" kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, referans sistemi olarak Jeodezik Referans Sistemi 1980 (Geodetic Reference System 1980 - GRS80), gelgit etkisi ilişkili olarak da tide-free system seçilmiştir. Ayrıca bütün hesaplamalar zero-degree term içermektedir. Geoit yükseklikleri, 30"x30"lik grid aralıklarında belirlenmiş ve test ağındaki noktalar için Uzaklıkla Ters Orantılı Ağırlıklandırma (Inverse Distance Weighting - IDW) enterpolasyon yöntemi ile elde edilmiştir.

Çalışmada, geoit yüksekliklerinin iki seti mutlak anlamda karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifadeyle, geoit yükseklikleri farkları (ΔN) ağın her noktası için elde edilmiştir.

$$\Delta N = N_{GNSS/nivelman} - N_{GGM} \quad (3)$$

Geoit yükseklikleri farklarına ilişkin istatistikler Tablo 3'de verilmektedir. Farkların ortalama değerleri ve standart sapmaları incelendiğinde, birleştirilmiş GGM'lerden (EIGEN-6C4, EIGEN-6C3stat ve EGM2008) hesaplanan geoit yüksekliklerinin, salt uydu verilerinden hesaplanan GGM'lere kıyasla, GNSS/nivelmanından hesaplanan geoit yükseklikleri ile daha iyi uyum gösterdiği görülmektedir.

TIM_R1 modeli, time-wise yaklaşımı ile hesaplanmış GOCE GGM'leri arasında en eski veri periyodu (01.11.2009 – 01.01.2010) ve en düşük çözünürlüğe ($n = 224$) sahip olmasına rağmen, salt uydu verilerine dayanan diğer GOCE GGM'lerinden daha düşük bir standart sapma sergilemiştir. Hem GOCE hem de GRACE verilerine dayanan GOGRA04S modeli ise, test alanında beklenen doğruluğu sağlamamaktadır. Sonuçlar, yüksek çözünürlüklü birleştirilmiş model EIGEN-6C4 ile öncü modeli EIGEN-6C3stat'ın diğer modellere göre üstün performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Her iki modelin, GNSS/nivelman verileri ile uyumluluğu sırasıyla 9.4 cm ve 9.1 cm olmuştur. Ayrıca farkların ortalama değerleri, EIGEN-6C4 modeli için -2.8 cm ve EIGEN-6C3stat modeli için de -3.5 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre, söz konusu iki model ile lokal düşey datum arasında anlamlı bir kayıklık (bias) da görülmemiştir. Bursa test alanında; GOCE verilerinin kullanıldığı birleştirilmiş modeller, GOCE verisi içermeyen EGM2008'den de daha iyi bir performans sağlamıştır.

GNSS/nivelmanından ve çalışmada değerlendirilen 10 GGM'den hesaplanan geoit yükseklikleri arasındaki farklar, Şekil 2 ve Şekil 3'de haritalanmıştır. Şekillerde, yüksekliğin artmasına bağlı olarak farkların da arttığı dikkati çekmektedir. Buna göre, birleştirilmiş GGM'lerin, özellikle test alanının güneydoğusundaki dağlık alanda, sadece uydu verilerine dayanan GGM'lerden daha gerçekçi sonuçlar ortaya koyduğu görülmektedir. Açık ki birleştirilmiş modeller, yersel veriler ile ilişkili daha yüksek frekanslı veri içeriklerinden dolayı, topografyaya bağımlı gravite alanı özelliklerini daha iyi yansıtmaktadır. Buna karşın, TIM modellerinin son jenerasyonu TIM_R5'in de, dağlık alanda birleştirilmiş GGM'lere benzer bir performans sergilediği gözlenmektedir.

Tablo 3: GGM'lerden ve GNSS/nivelmanından türetilen geoit yüksekliklerinin farklarına ait istatistikler (cm)

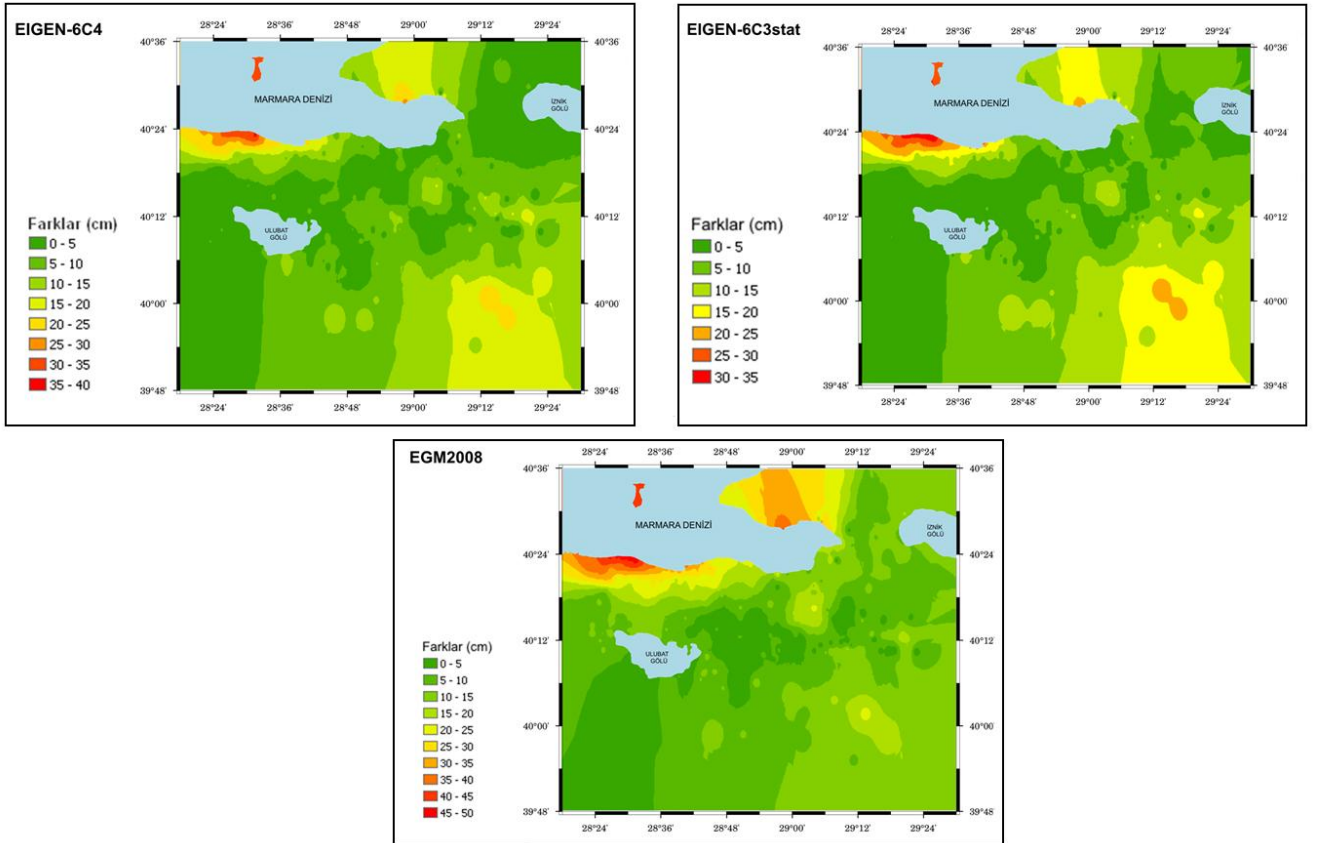
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart Sapma	Karesel Ortalama Hata
EIGEN-6C4	-36.5	20.9	-2.8	9.4	9.8
EIGEN-6C3stat	-35.0	19.4	-3.5	9.1	9.7
JYY_GOCE04S	-26.0	65.9	15.9	17.9	23.9
GOGRA04S	-27.6	64.9	15.0	18.1	23.5
GO_CONS_GCF_2_TIM_R1	-21.1	64.3	8.9	14.2	16.8
GO_CONS_GCF_2_TIM_R2	-27.5	60.0	7.2	15.1	16.7
GO_CONS_GCF_2_TIM_R3	-33.7	74.6	21.0	19.7	28.8
GO_CONS_GCF_2_TIM_R4	-30.9	66.6	22.8	20.3	30.5
GO_CONS_GCF_2_TIM_R5	-37.7	65.7	11.4	23.0	25.6
EGM2008	-49.2	19.7	-9.9	11.4	15.1

3. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Bursa bölgesindeki mevcut GNSS/nivelman verileri kullanılarak, güncel GOCE GGM'lerinin Türkiye gravite alanındaki doğrulukları araştırılmıştır. Sonuçlar, GOCE verilerinden hesaplanan birleştirilmiş GGM'lerin, Türkiye'de doğruluğu iyileştirilmiş bir gravimetrik geoidin belirlenebilmesi için referans global modeller olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Lokal test alanındaki sonuçlara dayanılarak EIGEN-6C4 ve EIGEN-6C3stat modellerinin, THG-09'un referans global modeli EGM2008'den daha iyi bir performans ortaya koyduğu söylenebilir.

Diğer yandan global modellerin çözünürlükleri göz önüne alındığında; ülke geneline homojen olarak dağılmış, topografyanın değişimlerini iyi karakterize eden, olabildiğince sık ve konum doğruluğu yüksek GNSS/nivelman noktaları kullanılarak modellerin performanslarının değerlendirilmesinin bölgesel geoid modelleme çalışmaları için daha net sonuçlar sağlayacağı tartışılmazdır. Bu anlamda, bu çalışma lokal bir test alanında gerçekleştirildiğinden elde edilen sonuçlar, yüksek doğruluklu bir bölgesel geoid modelinin hesaplanabilmesi için umut verici olarak değerlendirilebilir.

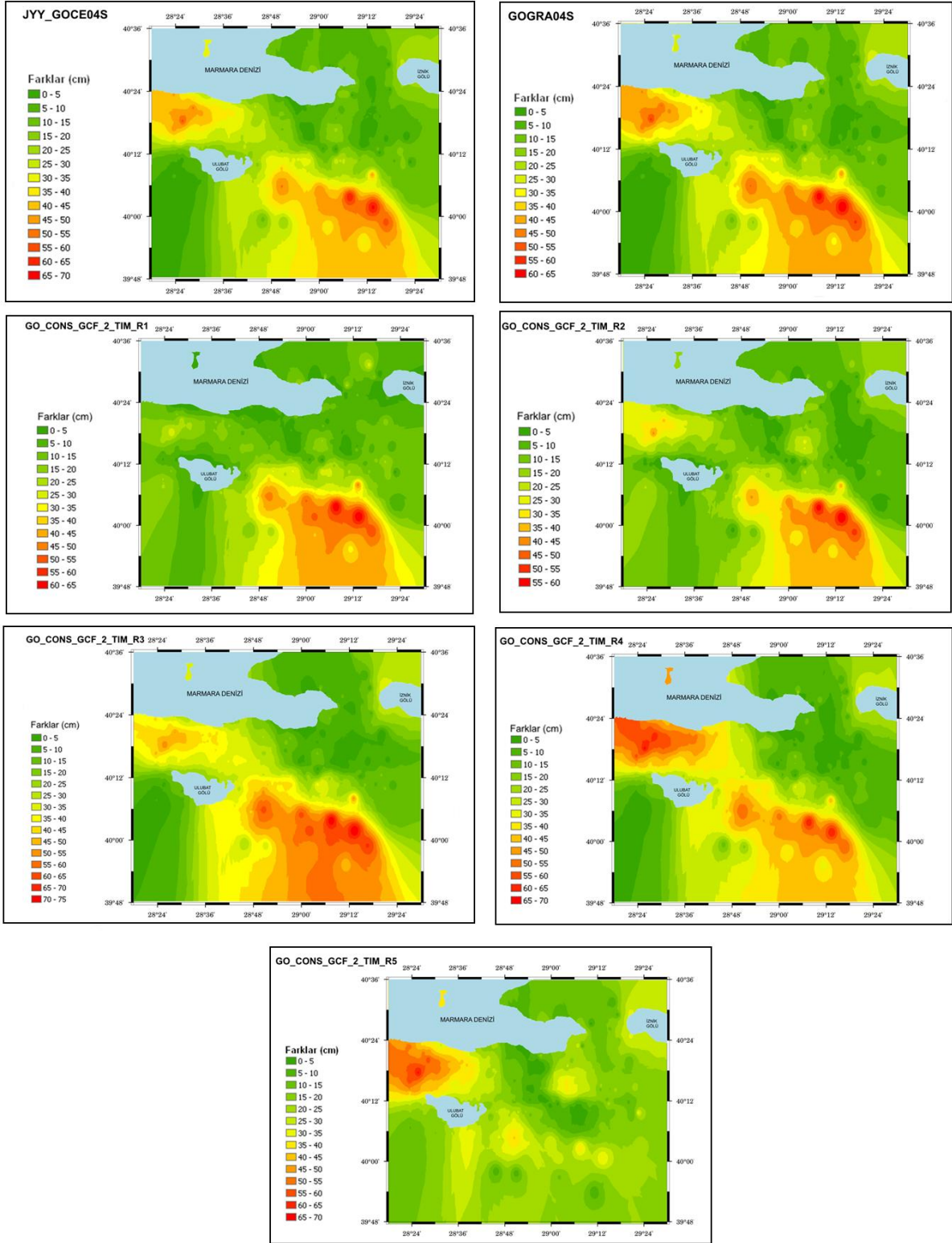
GNSS/nivelman verileri, gravite alanının tam spektrumunu temsil etmektedir. Ancak bu durum, bir GGM'nin spektral çözünürlüğü ile ilişkilidir. GNSS/nivelman verilerinin düşük frekanslı bileşenlerinin, GGM'den türetilen geoid yükseklikleri ile karşılaştırılması modelin doğruluğunun değerlendirilmesinde daha hassas sonuçlar verecektir. Buna göre, modellerin spektral analizlerinin yapılması ile de daha kapsamlı bir değerlendirme önerilmektedir.



Şekil 2: Test alanında, birleştirilmiş GGM'lerden ve GNSS/nivelmanından türetilen geoit yüksekliklerinin farkları

Çalışmada güncel GOCE modelleri yanında, TIM modellerinin bütün jenerasyonları da değerlendirilmiş; bir sonraki jenerasyonun doğruluğunun bir öncekine göre düştüğü gözlenmiştir. Bu durumun nedeni, yine her jenerasyonunun spektral özelliklerinin araştırılması ile ortaya konulmalıdır.

Sonuç olarak, GOCE global modellerinin katkılarıyla Türkiye için doğruluğu iyileştirilmiş bir gravimetrik geoid modellenmesinin mümkün olacağı değerlendirilmektedir. Yükseklik sisteminin önemli bir bileşeni olan geoidin doğruluğunun artırılması ile, GNSS ölçmelerinden ortometrik yüksekliklerin pratik olarak belirlenmesi gibi jeodezik uygulamalar da istenilen doğrulukta sağlanabilecektir.



Şekil 3: Test alanında, salt uydur verilerinden hesaplanmış GGM'lerden ve GNSS/nivelmanından türetilen geoid yüksekliklerinin farkları

Kaynaklar

- Abbak R.A., (2011), *Global yerpotansiyel modellerinin spektral yöntemlerle değerlendirilmesi ve jeoit belirleme için yerel olarak iyileştirilmesi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Amjadiyarvar B., Rangelova E.V., Sideris M.G., (2013), *North American height datums and their offsets: Evaluation of the GOCE-based global geopotential models in Canada and the USA*, Journal of Applied Geodesy, 7, 191–203, doi: 10.1515/jag-2012-0033.
- Amos M.J., Featherstone W.E., (2003), *Comparisons of recent global geopotential models with terrestrial gravity field data over New Zealand and Australia*, Geomatics Research Australasia, 79, 1–20.
- Brockmann J.M., Zehentner N., Höck E., Pail R., Loth I., Mayer-Gürr T., Schuh W.D., (2014), *EGM_TIM_RL05: An independent geoid with centimeter accuracy purely based on the GOCE mission*, Geophysical Research Letters, 41(22), 8089–8099, doi: 10.1002/2014GL061904.
- BUSKİ, (2009), *Bursa Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (BUSKİ), Bursa Büyükşehir Belediyesi Sınırları İçerisinde Yaklaşık 3500 km² Alanda 1-1000 ve 1-5000 Ölçekli Fotogrametrik Vektör ve Ortofoto Harita Üretimi (M3) Projesi*, Jeodezik Raporu, Cilt 1, Bursa, 15ss.
- Drinkwater M.R., Floberghagen R., Haagmans R., Muzi D., Popescu A., (2003), *GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission*, Earth Gravity Field from Space - from Sensors to Earth Sciences, The Space Sciences Series of ISSI'ın İçinde, (Beutler G.B., Drinkwater M.R., Rummel R., von Steiger R., Ed.), Vol. 18, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, ss.419–432.
- Erol B., (2012), *Spectral evaluation of Earth geopotential models and an experiment on its regional improvement for geoid modelling*, Journal of Earth System Science, 121(3), 823–835, doi: 10.1007/s12040-012-0190-x.
- Erol B., Çelik R.N., Sideris M.G., (2008), *Güncel global potansiyel modellerin yersel veriler ile test edilmesi*, İTÜDERGİSİ/d, 7(6), 47–58.
- Erol B., Sideris M.G., Celik R.N., (2009), *Comparison of global geopotential models from the CHAMP and GRACE missions for regional geoid modelling in Turkey*, Studia Geophysica et Geodaetica, 53(4), 419–441, doi: 10.1007/s11200-009-0032-8.
- ESA, (2014), *ESA releases the fifth generation of GOCE gravity field solutions*, ESA European Space Agency, <https://earth.esa.int/web/guest/content/-/article/esa-releases-the-fifth-generation-of-goce-gravity-field-solutions>, [Erişim 12 Şubat 2015].
- 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.
- Floberghagen R., Fehring M., Lamarre D., Muzi D., Frommknecht B., Steiger C., Pineiro, J., Costa A., (2011), *Mission design, operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission*, Journal of Geodesy, 85, 749–758, doi: 10.1007/s00190-011-0498-3.
- Fotopoulos G., (2003), *An analysis on the optimal combination of geoid, orthometric and ellipsoidal height data*, Doktora Tezi, University of Calgary, Calgary, Kanada.
- Förste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.M., Schaller T., Götze H.J., Ebbing J., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Biancale R., (2014), *EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse*, Proceedings of the 5th GOCE User Workshop, November 25–28, Paris, France.
- Förste C., Bruinsma S., Marty J.C., Flechtner F., Abrikosov O., Dahle C., Lemoine J.M., Neumayer K.H., Biancale R., Barthelmes F., König R., (2013), *EIGEN-6C3stat -the newest high resolution global combined gravity field model based on the 4th release of the direct approach*. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/documents/Foerste-et-al-EIGEN-6C3stat.pdf>, [Erişim 20 Aralık 2014].
- GFZ, (2015), *Gravity field results, static gravity field models*. GFZ German Research Centre for Geosciences. <http://www.gfz-potsdam.de/en/research/organizational-units/departments/department-1/global-geomonitoring-and-gravity-field/topics/development-operation-and-analysis-of-gravity-field-satellite-missions/grace/gravity-field-results/>, [Erişim 12 Şubat 2015].
- Godah W., Krynski J., (2013), *Comparisons of GGMs based on one year GOCE observations with the EGM08 and terrestrial data over the area of Sudan*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 35, 128–135, doi: 10.1016/j.jag.2013.11.003.
- Gruber Th., Rummel R., HBF Team, (2014), *GOCE Gravity Field Models – Overview and Performance Analysis*, Proceedings of the 3rd International Gravity Field Service General Assembly (IGFS 2014), June 30 - July 6, Shanghai, China.
- Guimaraes G., Matos A., Blitzkow D., (2012), *An evaluation of recent GOCE geopotential models in Brazil*, Journal of Geodetic Science, 2(2), 144–155, doi: 10.2478/v10156-011-0033-8.
- Hirt C., (2011), *Assessment of EGM2008 over Germany using accurate quasigeoid heights from vertical deflections, GCG05 and GPS/levelling*, Zeitschrift fuer Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 136(3), 138–149.
- Hofmann-Wellenhof B., Moritz H., (2005), *Physical Geodesy*, Springer Wien, New York, 403ss.
- ICGEM, (2014), *International Centre for Global Earth Models (ICGEM)*. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>, [Erişim 20 Aralık 2014].
- Janak J., Pitonak M., (2011), *Comparison and testing of GOCE global gravity models in Central Europe*, Journal of Geodetic Science, 1(4), 333–347, doi: 10.2478/v10156-011-0010-2.
- Kılıçoğlu A., Direnç A., Simav M., Lenk O., Aktuğ B., Yıldız H., (2009), *Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 in Turkey*, Newton's Bull, Special Issue: "External Quality Evaluation Reports of EGM08", 4, 164–171. ISSN: 1810–8555.
- Kılıçoğlu A., Direnç A., Yıldız H., Bölme M., Aktuğ B., Simav M., Lenk O., (2011), *Regional gravimetric quasi-geoid model and transformation surface to national height system for Turkey (THG-09)*, Studia Geophysica et Geodaetica, 55(4), 557–578, doi: 10.1007/s11200-010-9023-z.
- Pail R., Bruinsma S.L., Migliaccio F., Foerste C., Goiginger H., Schuh W.D., Hoeck E., Reguzzoni M., Brockmann J.M., Abrikosov O., Veicherts M., Fecher T., Mayrhofer R., Krasbutter I., Sanso F., Tscherning C.C., (2011), *First GOCE gravity field models derived by three different approaches*, Journal of Geodesy, 85, 819–843, doi: 10.1007/s00190-011-0467-x.
- Pail R., Goiginger H., Mayrhofer R., Schuh W., Brockmann J.M., Krasbutter I., Hoeck E., Fecher T., (2010), *GOCE gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method*, Proceedings of the ESA Living Planet Symposium 2010, June 27 - July 2, Bergen, Norway.

- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K., (2008), *An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008*, Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union, April 13–18, Vienna, Austria.
- Rapp R.H., (1997), *Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly/geoid undulation difference*, Journal of Geodesy, 71, 282–289.
- Tepeköylü S., Üstün, A., (2008), *Türkiye’deki GPS/nivelman verileriyle global jeopotansiyel modellerin değerlendirilmesi*, Harita Dergisi, 139, 49–65.
- Üstün A., Abbak R.A., (2010), *On global and regional spectral evaluation of global geopotential models*, Journal of Geophysics and Engineering, 7, 369–379, doi: 10.1088/1742-2132/7/4/003.
- Yi W., Rummel R., Gruber T., (2013), *Gravity field contribution analysis of GOCE gravitational gradient components*, Studia Geophysica et Geodaetica, 57(2), 174–202, doi: 10.1007/s11200-011-1178-8.