GRACE VE GOCE UYDU GÖREVLERİ KULLANILAN UYDU BAZLI JEOPOTANSİYEL MODELLERİN TÜRKİYE İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Beyza KARA

Danışman
Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Nisan 2026

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRACE VE GOCE UYDU GÖREVLERİ KULLANILAN UYDU BAZLI JEOPOTANSİYEL MODELLERİN TÜRKİYE İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Beyza KARA

Danışman
Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİSAN 2026

TEZ ONAY SAYFASI

Beyza KARA tarafından hazırlanan "Grace ve Goce Uydu Görevleri Kullanılan Uydu Bazlı Jeopotansiyel Modellerin Türkiye İçin Değerlendirilmesi" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 07 / 04 / 2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman **:** Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

Başkan **:** Dr. Öğr. Üyesi Abdullah VARLIK …… İmza ……
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye **:** Prof. Dr. Mustafa YILMAZ …… İmza ……
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye **:** Dr. Öğr. Üyesi Ömer Gökberk NARİN …… İmza ……
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... /..... /..... tarih ve
……. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

…….
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07 / 04 / 2026

Beyza KARA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRACE VE GOCE UYDU GÖREVLERİ KULLANILAN UYDU BAZLI JEOPOTANSİYEL MODELLERİN TÜRKİYE İÇİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Beyza KARA

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YILMAZ

Bu tezin amacı Türkiye için en uygun uydu bazlı jeopotansiyel modelin belirlenmesi amacıyla GRACE ve GOCE uydu verilerinin karşılaştırılmasıdır. Bu amaçla, ICGEM hesaplama modülü kullanılarak yalnızca GRACE ve yalnızca GOCE verilerini içeren modeller seçilmiş ve $36° < \varphi < 42°$ enlem, $26° < \lambda < 44°$ boylam aralığında $5' \times 5'$ çözünürlüğünde hesaplamalar yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, Harita Genel Müdürlüğü tarafından sağlanan TG-20 jeoid yüksekliği ($5' \times 5'$ çözünürlüğünde) verileriyle karşılaştırılarak hangi modelin daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. GRACE ve GOCE uydularının, Dünya'nın gravite alanını belirlemek amacıyla geliştirilmiş uydu görevleridir. Bu tez çalışmasında, her iki uydunun sağladığı veriler değerlendirilerek Türkiye için en uygun jeopotansiyel model seçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında 2015 ve sonrası için GRACE ve GOCE uydu verilerini içeren 12 farklı uydu bazlı jeopotansiyel model değerlendirmeye alınmıştır. ICGEM hesaplama modülü kullanılarak her bir model için jeoid yükseklik değerleri hesaplanmış ve TG-20 jeoid yüksekliği ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların analizinde Surfer® programı kullanılarak jeoid yükseklik farklarının karesel ortalama hatası hesaplanmıştır.

Verilerin karşılaştırılması sonucunda, Türkiye için en uygun uydu bazlı jeopotansiyel model GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 olarak belirlenmiş ve GRACE ile GOCE'nin güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, jeodezik ve jeofizik çalışmalar başta olmak üzere farklı disiplinlere ait uygulama alanları için en uygun modelin seçilmesine katkı sağlayacaktır.

2026, ix + 53 sayfa

Anahtar Kelimeler: ICGEM, GRACE, GOCE, Jeopotansiyel

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EVALUATION OF STALLITE-BASED GEOPOTENTIAL MODELS DERIVED FROM THE GRACE AND GOCE STALLITE MISSIONS FOR TÜRKİYE

Beyza KARA

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Geomatics Engineering

Supervisor: Prof. Mustafa YILMAZ

The aim of this thesis is to determine the most suitable satellite-based geopotential model for Türkiye by comparing GRACE and GOCE satellite data. For this purpose, models containing only GRACE and only GOCE data were selected using the ICGEM calculation service, and computations were carried out within the latitude range of $36° < \varphi < 42°$ and longitude range of $26° < \lambda < 44°$ at a resolution of $5' \times 5'$.

The obtained results were compared with the TG-20 geoid heights ($5' \times 5'$ resolution) provided by the General Directorate of Mapping to identify the model with the best performance. GRACE and GOCE are satellite missions developed to determine the Earth's gravity field. In this study, the data obtained from both missions were evaluated to select the most suitable geopotential model for Türkiye.

Within the scope of the study, 12 different satellite-based geopotential models containing GRACE and GOCE data for the period after 2015 were analyzed. Geoid height values for each model were computed using the ICGEM calculation service and compared with TG-20 geoid heights. The root mean square error (RMSE) of geoid height differences was calculated using the Surfer® software.

As a result of the analysis, the most suitable satellite-based geopotential model for Türkiye was identified as GO_CONS_GCF_2_TIM_R6, and the strengths and weaknesses of GRACE and GOCE-based models were revealed. The findings are expected to contribute to the selection of the most appropriate model for applications in geodesy, geophysics, and related disciplines.

2026, ix + 53 pages

Keywords: ICGEM, GRACE, GOCE, Geopotential

TEŞEKKÜR

"GRACE ve GOCE Uydu Görevleri Kullanılan Uydu Bazlı Jeopotansiyel Modellerin Türkiye için Değerlendirilmesi" konulu Yüksek Lisans çalışmasının her aşamasında bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yol gösterici katkılarıyla çalışmanın şekillenmesinde büyük rol oynayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mustafa YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu çalışma kapsamında kullanılan verilerin erişimini sağlayan Harita Genel Müdürlüğü'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Beyza KARA

Afyonkarahisar 2026

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
2. JEOPOTANSİYEL 5
2.1 Jeopotansiyelin Tanımı 5
2.2 Jeopotansiyelin Matematiksel İfadesi 5
2.3 Jeopotansiyel ile İlişkili Büyüklükler 7
2.4 Jeopotansiyelin Uygulama Alanları 7
2.5 Jeopotansiyelin Ölçüm ve Modellemesi 8
3. UYDU BAZLI JEOPOTANSİYEL MODELLER 9
3.1 Uydu Bazlı Jeopotansiyel Tanımı 9
3.2 Uydu Bazlı Jeopotansiyel Modellerin Çalışma Prensipleri ve Veri Türleri 9
3.2.1 Uydu-Yer Ölçümleri (Satellite-to-Ground Observations) 10
3.2.2 Uydu-Uydu Ölçümleri (Satellite-to-Satellite Tracking, SST) 10
3.2.3 Uydu Gradyometresi Ölçümleri (Satellite Gravity Gradiometry, SGG) 11
3.2.4 Kombine Yaklaşımlar 11
3.3 Türkiye için Jeopotansiyel Modellerin Değerlendirilmesi 12
3.3.1 Jeoid Tespiti 12
3.3.2 Yerçekimi Alanındaki Değişikliklerin İzlenmesi 13
3.3.3 Deniz Seviyesi Değişimlerinin İzlenmesi 13
3.3.4 Deprem Risklerinin Belirlenmesi 14
4. BAŞLICA JEOPOTANSİYEL MODELLER VE UYDU GÖREVLERİ 15
4.1 EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) 15
4.2 EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) 16
4.3 CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) 17
4.4 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 18
4.5 GRACE-FO (GRACE Follow-On) 20

4.6 GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) 21
4.7 Modellerin ve Uydu Görevlerinin Karşılaştırması ve Kullanım Alanları 22
5. ÇALIŞMA ALANI VE DEĞERLENDİRMEDE KULLANILAN UYDU BAZLI GLOBAL JEOPOTANSİYEL MODELLER 23
5.1 Çalışma Alanı 23
5.2 Uydu Bazlı Global Jeopotansiyel Modeller 24
5.2.1 GOSG02S 25
5.2.2 ITSG-Grace2018s 26
5.2.3 GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 27
5.2.4 Tongji-Grace02k 27
5.2.5 GOSG01S 28
5.2.6 IGGT_R1 28
5.2.7 IfE_GOCE05s 28
5.2.8 GO_CONS_GCF_2_SPW_R5 29
5.2.9 Tongji-Grace02s 29
5.2.10 NULP-02s 30
5.2.11 HUST-Grace2016s 31
5.2.12 ITU_GRACE16 32
5.3 Sayısal Uygulama 33
5.3.1. Bölgesel ve Topografik Değerlendirme 40
5.4. Veri Sonuçlarına Dayalı Yapılan Karşılaştırmalar 42
6. SONUÇ 45
7. KAYNAKLAR 48
ÖZGEÇMİŞ 53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

W	Jeopotansiyel (Dünya'nın toplam yerçekimi potansiyel alanı)
V	Gravite potansiyeli
Φ	Merkezkaç potansiyeli
ω	Dünya'nın açısal dönme hızı
r	Dünya merkezinden olan uzaklık
φ	Jeosentrik enlem
θ	Jeosentrik enlem
λ	Jeosentrik boylam
G	Evrensel çekim sabiti
M	Dünya'nın kütlesi
GM	Dünya'nın jeosentrik yerçekimi sabiti
R	Referans yarıçapı
n	Küresel harmonik derece
m	Küresel harmonik mertebe
$\overline{C}_{nm}$, $\overline{S}_{nm}$	Normalize edilmiş küresel harmonik Stokes katsayıları
$\overline{P}_{nm}$	Tam normalize edilmiş Legendre fonksiyonları
Σ	Toplam işareti
g	Gravite ivmesi
Δg	Gravite anomalisi
ξ, η	Çekül sapması
N	Jeoid yüksekliği
h	Elipsoidal yükseklik
H	Ortometrik yükseklik
ΔN	Jeoid yüksekliği farkı
d/o	Degree and Order
i	İndeks
x_i	i'inci gözlenen değer
x_i*	İ'inci referans (gerçek / karşılaştırma) değer
Σ	Toplam alma işlemi
√	Karekök

Kısaltmalar

AOD1B	Atmosphere and Ocean Dealiasing Level-1B
CHAMP	Challenging Minisatellite Payload
DIR	Direct Approach
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EGM2008	Earth Gravitational Model of 1996
EGM96	Earth Gravitational Model of 2008
ESA	European Space Agency
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRACE-FO	GRACE Follow-On

GRS80	Geodetic Reference System 1980
HGM	Harita Genel Müdürlüğü
HUST	Huazhong University of Science and Technology
ICGEM	International Centre for Global Earth Models
IfE	Institut für Erdmessung
IGGT	Invariants of the GOCE Gravity Gradient Tensor
ITSG	Institute of Theoretical and Satellite Geodesy
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
JPM	Jeopotansiyel Modelleme
KOH	Karesel Ortalama Hata
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RMSE	Root Mean Square Error
SGG	Satellite Gravity Gradiometry
SGO	Satellite-to-Ground Observations
SLR	Satellite Laser Ranging
SPW	Space-wise
SST	Satellite-to-Satellite Tracking
TG20	Türkiye Jeoidi 2020
TIM	Time-wise
TUM	Technical University of Munich

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1 EGM96 tarafından sağlanan Dünya'nın jeodinin bir görüntüsü 16
Şekil 4.2 EGM2008 jeoid modeli. 17
Şekil 4.3 CHAMP uydusunun üstten görünümü. 18
Şekil 4.4 GRACE ikiz uydu sistemi. 19
Şekil 4.5 GRACE-FO ikiz uyduları. 20
Şekil 4.6 GOCE uydusu 21
Şekil 5.1 GOSG02S modeline ait fark haritası. 35
Şekil 5.2 ITSG-Grace2018s modeline ait fark haritası. 35
Şekil 5.3 GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modeline ait fark haritası. 36
Şekil 5.4 Tongji-Grace02k modeline ait fark haritası. 36
Şekil 5.5 GOSG01S modeline ait fark haritası. 37
Şekil 5.6 IGGT_R1 modeline ait fark haritası. 37
Şekil 5.7 IfE_GOCE05s modeline ait fark haritası. 38
Şekil 5.8 GO_CONS_GCF_2_SPW_R5 modeline ait fark haritası 38
Şekil 5.9 Tongji-Grace02s modeline ait fark haritası. 39
Şekil 5.10 NULP-02s modeline ait fark haritası. 39
Şekil 5.11 HUST-Grace2016s modeline ait fark haritası. 40
Şekil 5.12 ITU_GRACE16 modeline ait fark haritası. 40
Şekil 5.13 Uydu bazlı global jeopotansiyel modellerin karesel ortalama hata (KOH) değerlerine göre en düşükten en yükseğe sıralanması 43

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1 Başlıca jeopotansiyel modellerin karşılaştırılması ve kullanım alanları..... 22

Çizelge 5.1 Uydu bazlı jeopotansiyel modeller ve özellikleri..... 25

Çizelge 5.2 Uydu bazlı global jeopotansiyel modeller ile TG20 jeoid modeli arasındaki jeoid yükseklik farkları (m cinsinden)..... 42

1.GİRİŞ

Dünya'nın yerçekimi alanının doğru ve detaylı bir şekilde modellenmesi, modern jeodezi ve yer bilimlerinin başlıca araştırma konularından biri haline gelmiştir. Yerçekimi alanı sadece fiziksel yükseklik sistemlerinin tanımlanmasında değil, aynı zamanda jeoid belirleme, okyanus ve atmosfer dinamiklerinin anlaşılması, tektonik hareketlerin değerlendirilmesi, kütle taşınımının izlenmesi ve hidrolojik süreçlerin gözlemlenmesi gibi geniş bir uygulama alanında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle yerçekimi alanına ilişkin bilgilerin doğruluğu, birçok bilimsel ve mühendislik uygulamasının güvenilirliği açısından doğrudan önem taşır (Torge ve Müller, 2012).

Geleneksel yersel gravite ölçümleri, yeryüzünün belirli alanlarında yüksek hassasiyetle veri üretebiliyor olsa da geniş bölgelerde homojen dağılım sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Dağlık bölgeler, erişilmesi zor lokasyonlar veya siyasi kısıtlamalar nedeniyle bazı bölgelerde veri boşlukları oluşmakta, bu durum küresel veya bölgesel ölçekte tutarlı gravite modellerinin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda küresel ölçekte sürekli ve homojen veri sağlayabilen uydu temelli ölçüm tekniklerinin önemi artmıştır. Uydu teknolojilerindeki yenilikler, bu sınırlılıkların büyük ölçüde aşılmasını mümkün kılarak yerçekimi alanının küresel ölçekte yüksek doğruluk ve mekânsal süreklilikle belirlenmesine olanak tanımıştır.

Bu doğrultuda geliştirilen iki önemli uydu görevi olan GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), küresel yerçekimi modellemesinde devrim niteliğinde veriler sunmuştur. GRACE görevi, iki uydu arasındaki mesafe değişimlerini son derece hassas bir biçimde ölçerek Dünya üzerindeki kütle değişimlerinin zamansal davranışını gözler önüne sermiştir. Böylece buzul kütlelerinin azalması, yeraltı su rezervlerindeki değişim, okyanus kütle hareketleri gibi süreçler küresel ölçekte izlenebilir hâle gelmiştir. GOCE görevi ise yüksek hassasiyetli gravite gradyometresi ile kısa dalga boylarında detaylı gravite bilgisi üreterek küresel jeoidin yüksek çözünürlükte modellenmesine imkân tanımıştır. Bu iki uydu misyonunun sağladığı veriler bir araya getirildiğinde hem uzun hem kısa dalga boylarında güçlü bir yerçekimi alanı tanımı elde edilmektedir.

Araştırmanın kapsamını belirlemek amacıyla literatürde yer alan benzer çalışmalar incelenmiştir. Xu vd. (2017) GOCE uydu verilerine dayanarak GOSG01S küresel yerçekimi modelini geliştirmiş ve bu süreçte uydu gravite gradyometrisi (SGG) ile uydu-uydu izleme (SST) verilerini en küçük kareler yöntemi kapsamında bütünleştirmiştir. Geliştirilen model, farklı küresel jeopotansiyel modeller ile karşılaştırılmış ve GPS/nivelman verileri aracılığıyla doğrulanmıştır. Elde edilen bulgular, özellikle kara gravite verisinin sınırlı olduğu bölgelerde GOCE tabanlı modellerin EGM2008 modeline kıyasla daha yüksek doğruluk sağladığını ve model doğruluğunun belirli spektral aralıklarda kayda değer biçimde iyileştiğini göstermiştir. Buna karşın, Kozlu vd. (2025) Türkiye'de farklı topografik özelliklere sahip alanlarda çeşitli global jeopotansiyel modelleri TG-20 jeoid modeli ile karşılaştırarak modellerin performanslarını karesel ortalama hata (KOH) metriği temelinde değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda, global jeopotansiyel modellerin doğruluğunun bölgesel topografik koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve farklı bölgeler için en uygun model seçiminin önem arz ettiği ortaya konmuştur.

Literatürde, uydu temelli jeopotansiyel modellerin doğruluğunu geliştirmeye yönelik çalışmaların önemli bir bölümü, farklı veri kaynaklarının birbiriyle bağlantılı olarak kullanılmasına odaklanmaktadır. Fecher vd. (2015) GOCE ve GRACE uydu verilerini yersel ve altimetrik ölçülerle entegre ederek yüksek çözünürlüklü (d/o 720) TUM2013C küresel yerçekimi modelini oluşturmuştur. Bu araştırmada, farklı veri setleri en küçük kareler yöntemi çerçevesinde optimal ağırlıklandırma yaklaşımları kullanılarak bir araya getirilmiş ve elde edilen modelin doğruluğu, bağımsız modeller ile GPS/nivelman verileri aracılığıyla sınanmıştır. Elde edilen bulgular, GOCE verilerinin özellikle orta ve kısa dalga boyu bileşenlerde sağladığı katkı sayesinde model doğruluğunun önemli ölçüde arttığını ve EGM2008 modeline kıyasla belirgin iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Aynı zamanda Avşar vd. (2015) Türkiye'de güncel GOCE tabanlı küresel jeopotansiyel modellerin performansını GNSS/nivelman verileri yardımıyla incelemiştir. Farklı GOCE modellerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada, özellikle EIGEN-6C4 ve EIGEN-6C3stat gibi birleştirilmiş modellerin yaklaşık 9 cm düzeyinde standart sapma ile yüksek doğruluk sunduğu ve EGM2008 modeline kıyasla daha üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, GOCE verilerinin bölgesel jeoid modelleme çalışmalarına katkı sağladığı ve

Türkiye'de yükseklik sisteminin iyileştirilmesine yönelik potansiyel taşıdığı anlaşılmaktadır.

Pail vd. (2010), GOCE uydu verilerinden yararlanarak time-wise (TIM) yöntemi kapsamında yüksek çözünürlüklü (d/o 250) bir küresel yerçekimi modeli üretmiş ve bu modelin herhangi bir öncül yerçekimi bilgisine gereksinim duymaksızın sadece GOCE verilerine dayalı olarak oluşturulduğunu ortaya koymuştur. Geliştirilen modelin doğruluğu, diğer küresel modeller ve GPS/nivelman verileri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve özellikle orta ile kısa dalga boylu bileşenlerde yüksek doğruluk düzeyine ulaşıldığı belirlenmiştir. Isik vd. (2022) ise GOCE tabanlı küresel jeopotansiyel modellerin Türkiye'de gravimetrik jeoid modellemesine katkısı incelenmiş ve farklı model serileri (DIR, TIM, SPW ve GOCO) arasında en iyi performansı sergileyen modelin TIM-R6 olduğunu tespit etmiştir. Araştırmada, GOCE verileri ile EGM2008 modelinin doğrusal olarak birleştirilmesi sonucunda bölgesel jeoid model doğruluğunda %23 oranında iyileşme sağlandığı ve en yüksek doğruluğun 7.7 cm seviyesine ulaştığı ortaya konmuştur.

Demir vd. (2018) CHAMP, GRACE ve GOCE uydu verilerine dayanan yeni nesil küresel jeopotansiyel modelleri kullanarak Konya Kapalı Havzası'nda gravimetrik jeoid modelleri üretmiş ve bu modelleri GPS/nivelman verileri ile karşılaştırarak bölgesel doğruluk analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmadan elde ettikleri veriler, model açınım derecesinin artmasına bağlı olarak doğruluğun iyileştiğini ve özellikle GRACE ile GOCE verilerinin birlikte değerlendirildiği modellerin daha yüksek doğruluk sunduğunu göstermiştir. Ayrıca, gravimetrik jeoid doğruluğunu belirleyen temel unsurlardan birinin yersel gravite verilerinin kalitesi olduğu vurgulanmıştır. Yilmaz ve Karaali (2010) araştırmasında ise Türkiye'de farklı küresel jeoid modellerini (OSU91A, EGM96, EIGENCG03C, GGM02S, GGM02C ve EGM2008) yerel GPS/nivelman jeoidi ile karşılaştırarak en uygun modelin belirlenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, EGM2008 modelinin diğer modellere kıyasla daha düşük KOH değeri ile GPS/nivelman verileriyle en yüksek uyumu sağladığı belirlenmiş ve model çözünürlüğünün artmasına paralel olarak doğruluk düzeyinin önemli ölçüde iyileştiği ortaya konmuştur.

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde, küresel jeopotansiyel modellerin doğruluğunun kullanılan veri türüne, tercih edilen modelleme yaklaşımına ve bölgesel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Türkiye, karmaşık tektonik yapısı, belirgin topografik çeşitliliği ve aktif jeodinamik süreçleri nedeniyle uydu bazlı jeopotansiyel modellerin performansının incelenmesine uygun elverişli bir çalışma sahası sunmaktadır. GRACE ve GOCE verilerine dayanan küresel modellerin Türkiye üzerindeki doğruluklarının değerlendirilmesi, bölgesel jeoid çalışmalarının ilerlemesine ve ulusal yükseklik sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışma, GRACE ve GOCE uydu görevleri aracılığıyla üretilen çeşitli jeopotansiyel modellerin Türkiye üzerindeki performansını karşılaştırmalı olarak incelemeyi, modellerin güçlü ve zayıf taraflarını ortaya koymayı ve bu modellerin Türkiye bölgesi uygulamaları için uygunluğunu bilimsel bir temelle değerlendirmeyi hedeflemektedir.

2. JEOPOTANSİYEL

2.1 Jeopotansiyelin Tanımı

Jeopotansiyel, Dünya üzerindeki kütle dağılımının neden olduğu yerçekimi alanının potansiyel fonksiyonudur ve fiziksel jeodezinin temel kavramlarından biridir. Jeodezik uygulamalarda, özellikle düşey datum tanımı, jeoidin belirlenmesi ve yükseklik sistemlerinin dönüşümünde jeopotansiyelin doğru bir biçimde modellenmesi kritik rol oynar. Yerçekimi alanının potansiyel fonksiyonla temsil edilebilmesi, alanın türevlerinin alınabilmesi, düzgün ve sürekli bir fonksiyon olmasından kaynaklanmaktadır (Heiskanen ve Moritz, 1967).

2.2 Jeopotansiyelin Matematiksel İfadesi

Jeopotansiyel modelleme (JPM), fiziksel jeodezinin temel bir disiplini olup, Dünya'nın yerçekimi potansiyel alanını (W) matematiksel olarak temsil etmeye odaklanmaktadır. Bu potansiyel alan, kütle dağılımından kaynaklanan gravite potansiyeli ile Dünya'nın dönme hareketinden türetilen merkezkaç potansiyelinin toplamını kapsamaktadır. Bu alanın modellenmesi, düşey yükseklik sistemlerinde yaygın olarak kullanılan temel fiziksel referans yüzeyi olan jeoidin (okyanusların akıntı, gelgit veya atmosferik etkilerle bozulmadan temsil ettiği ortalama seviyeyi ifade eden eşpotansiyel yüzey) doğru bir biçimde tanımlanması açısından son derece önemlidir (Heiskanen ve Moritz, 1967).

Jeopotansiyel, Dünya kütlesinin oluşturduğu gravite potansiyeli (V) ile dönme potansiyeli (Φ) toplamından oluşur:

$$W = V + \Phi \tag{2.1}$$

Denklemde (2.1) görüldüğü üzere (V) Dünya kütlesinin kütle çekim etkisini, (Φ) ise Dünya’nın kendi ekseni etrafında dönmesinden doğan merkezkaç etkisini ifade eder. Böylece jeopotansiyel yüzeyleri, eşpotansiyel yüzeyler olarak tanımlanır ve teorik olarak

denizlerin serbest yüzeyi bu yüzeylerle çakışır. Bu nedenle jeoid, "ortalama deniz seviyesine en iyi yaklaşan eşpotansiyel yüzey" olarak tanımlanır (Torge ve Müller, 2012).

Denklemde (2.2) dönme potansiyeli:

$$\Phi = \tfrac{1}{2}\,\omega^2\,r^2\cos^2\varphi \tag{2.2}$$

- ω, Dünya'nın açısal dönme hızı
- Φ, Jeosentrik enlem

Bu ifade, jeoid ve eşpotansiyel yüzeylerin tanımında kullanılır (Heiskanen ve Moritz, 1967). Matematiksel olarak jeopotansiyel, küresel harmonik serilerle ifade edilir. Yarıçap (r), kutup uzaklığı (θ) ve boylam (λ) ile tanımlanan bir noktadaki potansiyel şu şekilde yazılabilir:

$$V(r,\theta,\lambda) = \frac{GM}{r}\left[1 + \sum_{n=2}^{\infty}\left(\frac{R^n}{r}\right)\sum_{m=0}^{n}\left(\bar{C}_{nm}\cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm}\sin(m\lambda)\right)\bar{P}_{nm}(\cos\theta)\right. \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'de;

- (GM), Dünya'nın kütleçekim parametresini,
- (R), Referans yarıçapını,
- (r), Dünya merkezinden uzaklığı,
- (θ), Jeosentrik kutup uzaklığını,
- $(\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm})$, Normalize edilmiş küresel harmonik Stokes katsayılarını,
- $(\bar{P}_{nm})$, Normalize edilmiş Legendre fonksiyonlarını, ifade eder.

Küresel harmonik modelin derecesi ve mertebesi arttıkça, Dünya yüzeyindeki daha küçük dalga boylu (yüksek frekanslı) gravite anomalileri de tanımlanabilir (Sansò ve Sideris, 2013; Sneeuw, 2000).

2.3 Jeopotansiyel ile İlişkili Büyüklükler

Jeopotansiyel, doğrudan gözlemlenemeyen bir büyüklük olmasına rağmen, çeşitli türevsel büyüklükler aracılığıyla ölçülebilir ve modellenebilir:

- Gravite ivmesi (g): Jeopotansiyelin konumsal türevidir ve bu doğrudan gravimetrelerle ölçülür.
- Gravite anomalisi (Δg): Ölçülen gravite değerinden normal (referans elipsoide göre hesaplanan) gravitenin çıkarılmasıyla elde edilir.
- Çekül sapması (ξ, η): Jeoid normali ile referans elipsoidinin normali arasındaki farktır; bu fark astronomik ve jeodezik koordinatlar arasındaki farklılıkla hesaplanır.
- Jeoid yüksekliği (N): Elipsoidal yükseklik (h) ile ortometrik yükseklik (H) arasındaki farktır ($h = H + N$).

Bu büyüklüklerin hepsi jeopotansiyel modellerinden türetilebildiği gibi, aynı zamanda bu büyüklüklerin yersel ölçümler sonucu bulunan büyüklükleri de modelin doğrulanması için kullanılmaktadır (Hofmann-Wellenhof ve Moritz, 2006).

2.4 Jeopotansiyelin Uygulama Alanları

Jeopotansiyelin doğru bir şekilde modellenmesi birçok alanda büyük bir önem taşımaktadır:

- Jeoid belirlenmesi: Küresel Uydu Konumlama Sistemleri (GNSS) ile elde edilen elipsoidal yüksekliklerin ortometrik yüksekliklere dönüştürülmesinde jeoid yüksekliği kullanılmaktadır. Bu durum jeopotansiyelin hassas bilinmesini gerektirir.
- Oşinografi: Ortalama deniz seviyesinin değerlendirilmesi, jeopotansiyel farklarının hesaplanmasıyla gerçekleştirilir. Jeopotansiyel yüzeyler aynı zamanda okyanus akıntılarının dinamik topografyasının belirlenmesinde rol oynar (Rapp, 1997).

- Jeofizik: Yer kabuğu yapılarının incelenmesi ve yoğunluk anomalilerinin tespiti jeopotansiyel verilerine dayanır. Gravite anomalileri, tektonik yapıların ve magmatik kütlelerin modellenmesinde sıkça kullanılmaktadır.
- Mühendislik ve altyapı: Baraj, tünel ve uzun mesafeli boru hatları gibi mühendislik projelerinde yüksekliğin doğru ve homojen tanımlanması için jeopotansiyel tabanlı yükseklik sistemleri tercih edilmektedir.

2.5 Jeopotansiyelin Ölçüm ve Modellemesi

Jeopotansiyel doğrudan ölçülemediği için, çeşitli veri kaynakları kullanılarak modellenir:

- Yeryüzü gravite ölçüleri: Özellikle kısa dalga boylu (yüksek frekanslı) bileşenlerin modellenmesinde etkilidir.
- Astronomik gözlemler: Çekül sapmalarının ölçülmesiyle jeopotansiyel hakkında bilgi edinilir.
- GNSS/nivelman verileri: Elipsoidal ile ortometrik yükseklik farklarından jeoid yüksekliği ve dolayısıyla jeopotansiyel hakkında bilgi sağlanır.
- Uydu verileri: Uyduların yörüngesindeki bozulmalar ve gravite misyonları (örneğin GRACE, GOCE) uzun dalga boylu jeopotansiyel bileşenlerini modellemede büyük öneme sahiptir.

3. UYDU BAZLI JEOPOTANSİYEL MODELLER

3.1 Uydu Bazlı Jeopotansiyel Tanımı

Uydu bazlı jeopotansiyel, Dünya'nın kütle dağılımı sonucunda meydana gelen yerçekimi alanının, yapay uydular sayesinde elde edilen dinamik ve kinematik verilerle matematiksel olarak modellenmiş hâlidir. Klasik anlamda jeopotansiyel, yerçekimi potansiyeli ile Dünya'nın dönme hareketinden kaynaklanan merkezkaç potansiyelinin toplamı şeklinde ifade edilse de (Heiskanen ve Moritz, 1967) ancak uydu teknolojilerinin gelişmesiyle bu potansiyelin daha yüksek hassasiyet ve uzaysal çözünürlükte belirlenmesi mümkün hâle gelmiştir.

Uydu bazlı jeopotansiyel modelleri, uyduların yörünge dinamiklerinde meydana gelen çok küçük değişimlerin hassas biçimde ölçülmesine dayanır. Uyduların konum, hız ve ivme bilgilerindeki sapmalar, Dünya'nın yerçekimi alanındaki düzensizlikleri doğrudan yansıtmaktadır. Bu nedenle, bu ölçümler küresel jeopotansiyel katsayılarının belirlenmesinde temel veri kaynağı olarak kullanılmaktadır (Sneeuw, 2000).

Günümüzde Uydu Lazer Ölçümü (Satellite Laser Ranging, SLR), GNSS, uydu-uydu takip ölçümleri (örneğin GRACE görevi) ve yerçekimi gradyan ölçümleri (örneğin GOCE görevi) sayesinde statik ve zamana bağlı jeopotansiyel alanları yüksek doğrulukla modellenebilmektedir (Rummel vd., 2011; Tapley vd., 2004).

Bu bağlamda uydu bazlı jeopotansiyel, küresel ölçekte yerçekimi alanını yansıtan küresel harmonik serilerle ifade edilen katsayıların, büyük oranda uydu gözlemlerinden türetilmiş hâlidir. Bu modeller, statik yerçekimi alanının daha ayrıntılı incelenmesi ve buzullar, yeraltı suyu ve okyanus gibi kaynakların neden olduğu kütle değişimlerinin izlenmesinde modern jeodezi için temel altyapılar oluşturmuştur (Tapley vd., 2019; Wahr vd., 1998).

3.2 Uydu Bazlı Jeopotansiyel Modellerin Çalışma Prensipleri ve Veri Türleri

Uydu bazlı jeopotansiyel modeller, yerçekimi alanının matematiksel ifadesi olmanın ötesinde, uydu verilerinden elde edilen çeşitli veri türlerinin birleşimiyle oluşturulmuş

karmaşık sistemlerdir. Bu modeller, yerçekimi alanının küresel ölçekli ve sürekli bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Uydu tabanlı modellerin çalışma prensibi, kullanılan ölçüm tekniğine bağlı olarak farklılık gösterir ve genel olarak üç temel yaklaşıma ayrılır:

3.2.1 Uydu-Yer Ölçümleri (Satellite-to-Ground Observations)

Bu yaklaşımda, uydu üzerinde bulunan hassas ölçüm sistemleri ile yeryüzündeki referans istasyonları arasındaki ölçümler kullanılarak yerçekimi alanının etkileri belirlenir. Özellikle Uydu Lazer Ölçümü (SLR) bu kategori altında yer almaktadır. Uydu–yer ölçümleri, yerçekimi alanının hem bölgesel hem de küresel ölçekte belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Jeoid yüksekliğinin belirlenmesi,

- Ulusal yükseklik sistemlerinin oluşturulması,
- Yersel gravite istasyonlarının doğrulama ve kalibrasyonu gibi uygulamalarda büyük önem taşır. Ayrıca bu tür ölçümler, yersel gravimetrelerin eksikliklerini gidererek homojen veri elde edilmesine katkı sağlar.

3.2.2 Uydu-Uydu Ölçümleri (Satellite-to-Satellite Tracking, SST)

Uydu-uydu ölçümleri, iki veya daha fazla uydu arasındaki mesafe ve hız değişimlerini son derece hassas bir şekilde tespit etmeye dayanır. Mesafe değişimleri, Dünya'nın kütle dağılımındaki düzensizliklerden kaynaklanır. SST yönteminin temel özellikleri şunlardır:

- Uzun dalga boylarına duyarlılık**:** Geniş ölçekli gravite bileşenlerinin belirlenmesinde etkilidir.
- Zamansal Çözünürlük: Uyduların yörüngesel hareketleri ile kütle değişimleri sürekli olarak izlenebilir.
- Küresel Kapsam: Yersel ölçümlerin ulaşamadığı denizler, kutuplar ve yüksek dağlık alanlarda veri sağlar.

Bu yaklaşım, GRACE misyonunda kullanılan temel ölçüm yöntemi olup, hidrolojik döngüler, okyanus kütle değişimleri ve buzul dinamikleri gibi süreçlerin uzun dalga boylarında hassas bir şekilde izlenmesine olanak tanımıştır (Tapley vd., 2004).

3.2.3 Uydu Gradyometresi Ölçümleri (Satellite Gravity Gradiometry, SGG)

Uydu yerçekimi gradyometresi, yerçekimi alanının uzaydaki farklı yönlerdeki değişimlerini ölçmeye yönelik hassas sensörler kullanır. Bu ölçümler özellikle kısa dalga boylu gravite bileşenlerinin belirlenmesinde etkilidir.

SGG verilerinin başlıca avantajları:

- Yüksek Mekânsal Çözünürlük: Detaylı topoğrafik alanlarda gravite alanının ayrıntıları belirlenebilir.
- Kısa Dalga Boyu Bileşenleri: Bölgesel jeoid ve mühendislik projeleri için kritik öneme sahiptir.
- Hassas Jeopotansiyel Modeller: Yüksek çözünürlüklü küresel modellerin geliştirilmesini sağlar (Rummel vd., 2011).

GOCE görevi, bu tür ölçümlerin ilk başarılı uygulaması olarak, modern uydu bazlı jeopotansiyel modellemeye önemli katkılar sağlamıştır (Rummel vd., 2011).

3.2.4 Kombine Yaklaşımlar

Günümüzde kullanılan modern uydu bazlı jeopotansiyel modelleri, farklı ölçüm tekniklerinden elde edilen verilerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Bu kombine yaklaşım sayesinde hem uzun dalga boylu hem de kısa dalga boylu gravite bileşenleri aynı model içerisinde temsil edilebilmektedir.
Kombine modeller:

- Küresel gravite alanı yüksek doğrulukla belirlenir,
- Zamansal değişimler izlenebilir,

- Yersel ölçümlerle uyumlu ve sürekliliği sağlanmış modeller oluşturulur.

Bu nedenle kombine uydu bazlı jeopotansiyel modeller, jeoid belirleme çalışmaları, ulusal yükseklik sistemlerinin geliştirilmesi ve jeofizik süreçlerin incelenmesinde temel veri kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır.

3.3 Türkiye için Jeopotansiyel Modellerin Değerlendirilmesi

Türkiye, karmaşık tektonik yapısı, belirgin topografik farklılıkları ve aktif jeodinamik süreçleri nedeniyle uydu bazlı jeopotansiyel modellerin performansının incelenmesi açısından uygun bir saha sunmaktadır. Bu modellerin Türkiye'deki uygulamaları özellikle jeoid tespiti, yerçekimi alanındaki değişikliklerin izlenmesi, deniz seviyesi değişimleri ve deprem risklerinin belirlenmesi alanlarında önemlidir.

3.3.1 Jeoid Tespiti

Jeoid, deniz seviyesinin Dünya üzerindeki ideal yüzeysel uzantısını temsil eder ve yükseklik ölçümlerinde referans düzlemi olarak kullanılır. Türkiye'de topografik çeşitliliğin yüksek olması, özellikle dağlık bölgelerde jeoidin doğruluğunu kritik hâle getirir.

- Kısa dalga boylu gravite bileşenleri, dağlık ve engebeli bölgelerde jeoidin ayrıntılı şekilde modellenmesini sağlar.
- Uzun dalga boylu bileşenler, Türkiye'nin genel gravite yapısını belirlemek için önemlidir.
- GRACE ve GOCE verileri, yersel ölçümlerle birleştirilerek yüksek çözünürlüklü bölgesel jeoid modelleri oluşturulabilir.
- Türkiye'de yürütülen bölgesel jeoid belirleme çalışmalarında, uydu bazlı jeopotansiyel modellerinin yersel verilerle birlikte kullanılması, elde edilen jeoid modellerinin doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır.

Jeoid tespiti, özellikle hidrolik mühendisliği projelerinde, büyük altyapı projelerinde ve hassas konumlandırma sistemlerinde kritik bir veri sağlar.

3.3.2 Yerçekimi Alanındaki Değişikliklerin İzlenmesi

Yerçekimi alanındaki değişiklikler, Türkiye'deki jeodinamik süreçlerin ve kütle hareketlerinin izlenmesinde önemli bilgiler sunar. Uydu bazlı jeopotansiyel modeller:

- Hidrolojik süreçleri gözlemler: Yeraltı suyu değişimleri, göl ve nehir hacimlerinin takibi için uzun dalga boylu gravite bileşenleri kullanılabilir.
- Tektonik deformasyonları izler: Tektonik deformasyonların bölgesel ve uzun dalga boylu bileşenleri, uydu bazlı gravite verileriyle analiz edilebilir."
- Zamansal çözünürlük sayesinde, kütle değişimleri aylık veya yıllık periyotlarla takip edilebilir.

Özellikle GRACE uydu verileri, Türkiye'nin genel kütle değişimlerinin uzun dalga boylarındaki etkilerini izleyerek bölgesel hidrolojik çalışmalar ve yerçekimi alanı analizlerine katkı sağlar (Tapley vd., 2004)

3.3.3 Deniz Seviyesi Değişimlerinin İzlenmesi

Jeopotansiyel modeller, deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesinde kritik bir rol oynar. Türkiye'de Akdeniz, Ege ve Marmara Denizi'nde deniz seviyesi gözlemleri ile uydu bazlı gravite verileri birleştirildiğinde:

- Bölgesel deniz seviyesi değişimleri, kıyı erozyonu, taşkın riski ve liman planlaması açısından değerlendirmek mümkün olur.
- GRACE verileri, deniz seviyesi ile ilişkili kütle değişimlerini uzun dalga boylarında izleyerek, hidrolojik ve oşinografik süreçlerin Türkiye kıyılarındaki etkilerini ortaya koyar.
- Kısa dalga boylu gravite verileri, yerel deniz seviyesi değişimlerinin hassas şekilde modellenmesine katkı sağlar.

Bu bilgiler, deniz seviyesi izleme projelerinde ve kıyı planlamasında bilimsel kararların alınmasına katkı sağlar.

3.3.4 Deprem Risklerinin Belirlenmesi

Türkiye, aktif fay hatları ve sık sık görülen depremler nedeniyle yüksek jeodinamik risk barındırmaktadır. Uydu bazlı jeopotansiyel modeller, deprem risklerinin belirlenmesinde dolaylı olarak şu şekillerde katkı sağlar:

- Fay hatlarındaki kütle değişimlerini ve yerçekimi anomalilerini izleme: Kısa dalga boylu gravite verileri, levha sınırları ve aktif fay hatları boyunca yerel değişimleri ortaya çıkarır.
- Tektonik deformasyon analizleri: Gravite değişimleri, uzun dönemde levha hareketleri ve stres birikimi hakkında bilgi sağlar.
- Risk analizleri ve erken uyarı sistemleri: Uzun dönemli deprem risk analizlerinin geliştirilmesine bilimsel katkı sağlar.

Bu yöntemler, özellikle Marmara, Doğu Anadolu ve Ege bölgelerinde, deprem riskinin daha doğru ve bilimsel temelli olarak belirlenmesini sağlar.

Türkiye ölçeğinde jeopotansiyel modellerin değerlendirilmesi hem bilimsel araştırmalar hem de mühendislik ve afet yönetimi uygulamaları için kritik önem taşır.

- Jeoid tespiti, ulusal yükseklik sistemleri ve altyapı projeleri için temel veri sağlar.
- Yerçekimi alanındaki değişikliklerin izlenmesi, hidrolojik ve tektonik süreçlerin anlaşılmasını destekler.
- Deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi, kıyı yönetimi ve çevresel planlama için gereklidir.
- Deprem risklerinin belirlenmesi, Türkiye'nin jeodinamik risklerini azaltmak için bilimsel bir temel oluşturur.

Uydu bazlı jeopotansiyel modeller, bu dört alanda sağladıkları veri ve analiz imkânları ile Türkiye'nin farklı bilimsel ve mühendislik ihtiyaçlarını karşılayabilecek güçlü bir araç olarak öne çıkar.

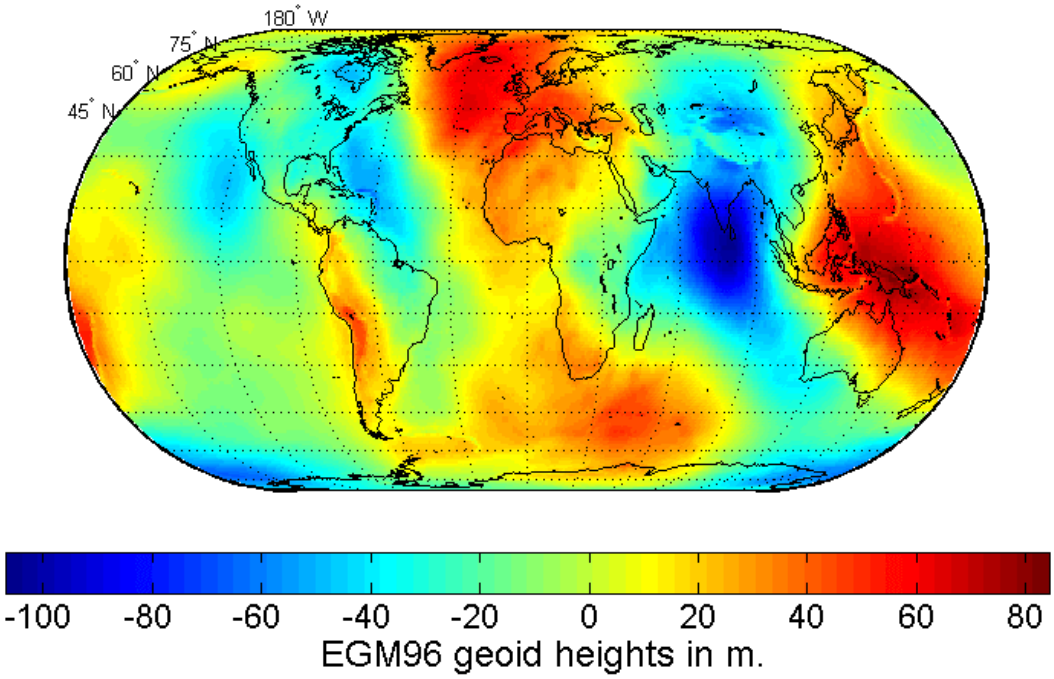
4. BAŞLICA JEOPOTANSİYEL MODELLER VE UYDU GÖREVLERİ

4.1 EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)

1996 yılında yayımlanan EGM96 modeli, küresel yerçekimi alanının temsilinde uzun yıllar temel başvuru modeli olarak kullanılmış önemli bir küresel jeopotansiyel modeldir. Model, 360. dereceye ve mertebeye kadar küresel harmonik katsayıları içermekte olup, yersel gravite verileri, uydu izleme/yörünge verileri ve altimetri kaynaklı deniz yüzeyi verilerinin birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulmuştur.

Şekil 4.1'de görülen EGM96, yayımlandığı dönemde küresel jeoid belirleme, ortometrik yükseklik dönüşümleri, haritacılık uygulamaları ve çeşitli mühendislik çalışmalarında yaygın biçimde kullanılmıştır. Özellikle orta ve uzun dalga boylu gravite bileşenlerinin modellenmesinde önemli katkı sağlamıştır. Bununla birlikte derece sınırının 360 olması nedeniyle kısa dalga boylu yerçekimi detaylarının temsilinde sonraki modellere göre daha sınırlı kalmaktadır (Lemoine vd., 1998).

- Maksimum derece/mertebe: EGM96 modeli, küresel harmonik katsayılarını 360 dereceye ve mertebeye kadar sunmaktadır. Bu yapı, modelin özellikle orta ve uzun dalga boylu gravite alanı bileşenlerini temsil etmesine olanak sağlamaktadır.
- Veri Kaynakları: Yersel gravite ölçümleri, uydu yörünge verileri ve deniz seviyesi ölçümlerinden elde edilen veriler birleştirilmiştir.
- Uygulamalar: EGM96, yayımlandığı dönemde küresel jeoid belirleme çalışmaları, yükseklik sistemleri arasında dönüşüm işlemleri, harita üretimi, navigasyon uygulamaları ve mühendislik projelerinde referans model olarak yaygın biçimde kullanılmıştır.
- Özellikleri: Model, dönemi açısından güvenilir ve küresel ölçekte tutarlı bir gravite alanı temsili sunmuş, özellikle daha sonra geliştirilen modeller için temel karşılaştırma altyapısı oluşturmuştur. Ancak derece sınırı nedeniyle kısa dalga boylu ayrıntıların temsilinde sınırlı kalmaktadır (Lemoine vd., 1998).



Şekil 4.1 EGM96 tarafından sağlanan Dünya'nın jeodinin bir görüntüsü (NASA, 1998).

4.2 EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008)

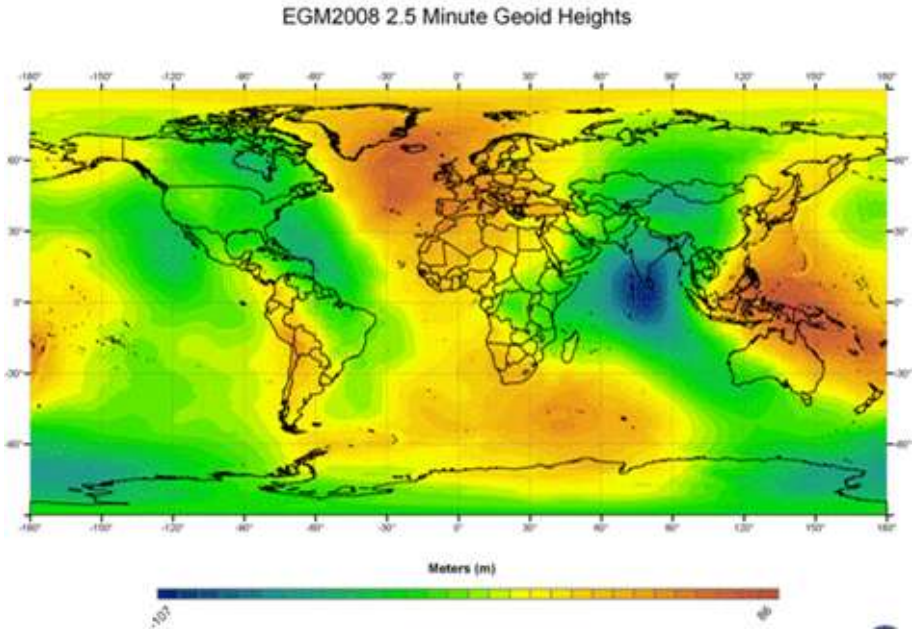
2008 yılında yayımlanan EGM2008, EGM96 sonrasında geliştirilen daha yüksek çözünürlüklü küresel jeopotansiyel modeldir. Model, 2159. dereceye ve mertebeye kadar küresel harmonik katsayıları içermekte, ayrıca belirli bileşenlerde daha yüksek dereceli ek katsayılar sunmaktadır. Bu yönüyle EGM96'ya kıyasla çok daha ayrıntılı bir gravite alanı temsili sağlamaktadır.

Şekil 4.2'de görülen EGM2008, gelişmiş uydu verileri, yoğunlaştırılmış yersel gravite gözlemleri ve topoğrafik veri katkılarıyla oluşturulmuştur. Özellikle kısa dalga boylu gravite anomalilerinin modellenmesinde, bölgesel jeoid hesaplarında ve yüksek çözünürlük gerektiren mühendislik uygulamalarında önemli avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle günümüzde pek çok jeodezik ve mühendislik uygulamasında yaygın olarak tercih edilmektedir (Pavlis vd., 2012).

- Maksimum derece/mertebe: EGM2008 modeli, 2159 derece ve mertebeye kadar küresel harmonik katsayıları içermektedir. Bu yüksek derece kapasitesi sayesinde

gravite alanının hem uzun hem de kısa dalga boylu bileşenleri ayrıntılı biçimde modellenebilmektedir.

- Avantajlar: Model, EGM96'ya göre daha yüksek mekansal çözünürlük sunmakta olup özellikle kısa boylu gravite anomalilerinin ve karmaşık topoğrafik yapıların modellenmesinde üstünlük sağlamaktadır.
- Kullanım Alanları: EGM2008; ulusal ve uluslararası jeodezik çalışmalarda, bölgesel jeoid belirleme uygulamalarında, deniz seviyesi analizlerinde, mühendislik projelerinde ve haritacılık çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Pavlis vd., 2012).



Şekil 4.2 EGM2008 jeoid modeli (NGA, 2008).

4.3 CHAMP (Challenging Minisatellite Payload)

Şekil 4.3'de görülen CHAMP görevinin temel ölçüm yaklaşımı, uydu-yörünge bozulmalarının GNSS ve SLR teknikleriyle izlenmesine dayanmaktadır. Bu ölçümler sayesinde Dünya'nın uzun dalga boylu jeopotansiyel bileşenleri belirlenebilmiş ve önceki küresel modellerin doğruluğu önemli ölçüde artırılmıştır (Reigber vd., 2002).

Her ne kadar CHAMP, daha sonraki görevlerle karşılaştırıldığında sınırlı çözünürlüğe sahip olsa da çok çeşitli alanlarda veri sağlamıştır:

- GRACE ve GOCE görevlerinin tasarımında referans oluşturmuş,
- Küresel harmonik katsayıların düşük derecelerinde önemli iyileştirmeler sağlamış,
- Uydu bazlı gravite modellemenin uygulanabilirliğini kanıtlamıştır.

Bu yönüyle CHAMP, uydu gravite görevleri arasında geçiş niteliği taşıyan kritik bir misyondur.

- Görev Dönemi: 2000-2010
- Temel Amaç: Küresel gravite ve manyetik alanın yüksek doğrulukla belirlenmesi.
- Ölçüm Yöntemi: Uydu yörünge bozulmaları GNSS ve SLR ölçümleriyle izlenmiştir.

Uygulama: Küresel ve bölgesel modeller için ara veri sağlar; GRACE ve GOCE öncesi referans niteliğindedir.



Şekil 4.3 CHAMP uydusunun üstten görünümü (GFZ, 2000).

4.4 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)

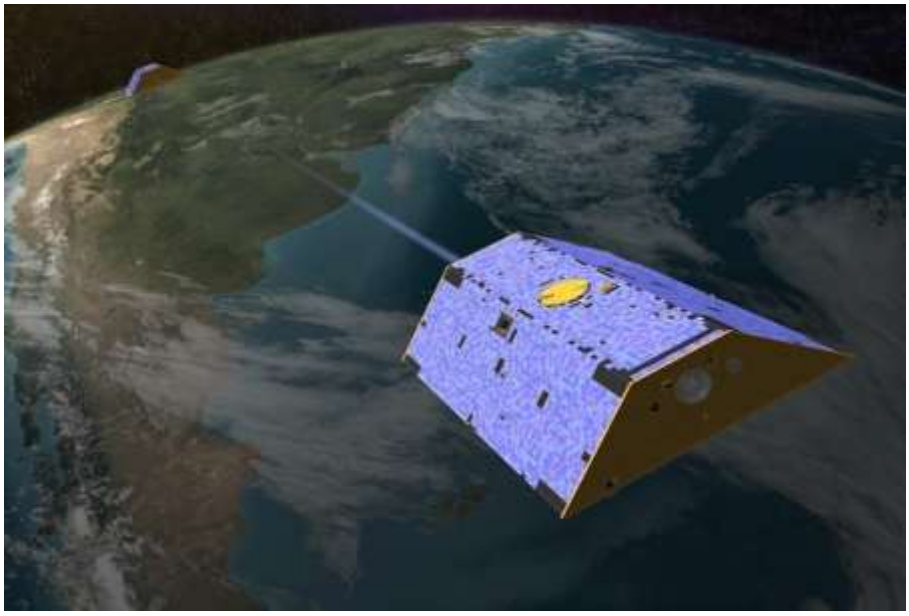
GRACE görevlerinin temel ölçüm prensibi, iki uydu arasındaki mesafe değişimlerinin mikrometre hassasiyetinde ölçülmesine dayanan Uydu–Uydu Takibi (Satellite-to-Satellite Tracking, SST) yöntemidir. Uydular Dünya çevresinde hareket ederken, yerçekimi alanındaki kütle anomalileri uyduların hız ve konumlarında küçük değişimlere

neden olur. Bu değişimler, iki uydu arasındaki mesafe ölçümleri aracılığıyla doğrudan gravite alanı bilgisine dönüştürülmektedir (Tapley vd., 2004).

Şekil 4.4'de görülen GRACE görevlerinin jeopotansiyel modellemeye en önemli katkısı, zamana bağlı yerçekimi alanı değişimlerinin ilk kez küresel ölçekte izlenebilmesini sağlamasıdır. Bu sayede: yeraltı suyu değişimleri, buz tabakalarının erimesi, okyanus kütle taşınımları, büyük ölçekli hidrolojik süreçler aylık zaman çözünürlüğünde modellenebilmiştir (Tapley vd., 2019; Wahr vd., 1998).

Ancak GRACE görevleri, uzun dalga boylarına yüksek duyarlılık göstermesine rağmen, kısa dalga boylu gravite bileşenlerinde sınırlı çözünürlüğe sahiptir. Bu durum, GRACE verilerinin çoğunlukla diğer uydu ve yersel verilerle kombine edilmesini gerekli kılmıştır.

- Görev Dönemi: 2002-2017 (NASA ve DLR iş birliği)
- Temel Amaç: Yerçekimi alanındaki değişikliklerin zamansal olarak izlenmesi.
- Ölçüm Prensibi: İki uydu arasındaki mesafe değişiklikleri hassas bir şekilde ölçülerek kütle değişimleri belirlenir.
- Uygulama Alanları: Hidrolojik döngü, buzulların erimesi, okyanus kütleleri ve genel kütle taşınımı analizleri (Tapley vd., 2004).



Şekil 4.4 GRACE ikiz uydu sistemi (NASA, 2002).

4.5 GRACE-FO (GRACE Follow-On)

Şekil 4.5'de görülen GRACE-FO, GRACE misyonunun devamı niteliğinde 2018 yılında başlatılmıştır. Önceki görevde kullanılan prensipler korunmuş, ölçüm sistemleri teknolojik olarak geliştirilmiş ve uzun dönemli kütle değişimlerinin daha hassas takibi mümkün hâle getirilmiştir. GRACE-FO, küresel hidrolojik döngü, buzullar ve kara kütlelerinin zamansal analizlerinde modern araştırmacılar için kritik bir veri kaynağı sağlamaktadır.

- Görev Dönemi: 2018-günümüz
- İyileştirmeler: Daha hassas ölçüm sistemi ve teknolojik geliştirmelerle uzun dönemli kütle değişimlerinin daha doğru takibi.
- Kapsam: Küresel hidrolojik döngü, buzullar, okyanus ve kara kütle değişimleri.

GRACE-FO, özellikle iklim değişikliği ve su kaynakları yönetimi çalışmalarında kritik veri sağlar.



Şekil 4.5 GRACE-FO ikiz uyduları (NASA ve JPL, 2018).

4.6 GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)

Avrupa Uzay Ajansı tarafından 2009-2013 yılları arasında yürütülen GOCE görevi, kısa dalga boylarında yüksek çözünürlüklü gravite verisi sağlamasıyla öne çıkmıştır. Uydu gradyometresi aracılığıyla ölçülen veriler, bölgesel jeoid ayrıntılarının ve tektonik yapıların gravite alanındaki izlerinin incelenmesine olanak tanımıştır. GOCE verileri, mühendislik uygulamaları, jeodinamik analizler ve yüksek çözünürlüklü jeoid çalışmaları için modern jeodezinin vazgeçilmez bir bileşenidir. Görev, özellikle kısa dalga boylarındaki gravite detaylarının ortaya çıkarılması açısından önemli bir katkı sunmuştur (Rummel vd., 2011). Şekil 4.6'da GOCE uydusunun görseli verilmektedir.

- Görev Dönemi: 2009-2013 (ESA)
- Temel Amaç: Yüksek hassasiyetle jeopotansiyel alan ölçümü.
- Ölçüm Prensibi: Uydu gradyometresi (SGG) ile kısa dalga boylarında gravite alanı detaylı ölçülür.
- Uygulama: Yüksek çözünürlüklü jeoid, tektonik deformasyon analizi ve mühendislik uygulamaları (Rummel vd., 2011).



Şekil 4.6 GOCE uydusu (ESA, 2009).

4.7 Modellerin ve Uydu Görevlerinin Karşılaştırması ve Kullanım Alanları

Klasik küresel jeopotansiyel modellerin ve uydu görevlerinin temel özellikleri, kapsadıkları harmonik dereceler, dalga boyu duyarlılıkları ve başlıca kullanım alanları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1 Başlıca jeopotansiyel modellerin karşılaştırılması ve kullanım alanları

Model	Görev Dönemi	Harmonik Derece	Dalga Boyu	Kullanım Alanı
EGM96	1996	360	Uzun	Küresel gravite, jeoid, ulusal yükseklik sistemi
EGM2008	2008	2159	Uzun + Kısa	Yüksek çözünürlük, jeoid ve gravite haritaları
CHAMP	2000–2010	70–120	Orta	Küresel ve bölgesel gravite, ara veri
GRACE	2002–2017	~60–120	Uzun	Kütle değişimi, hidroloji, okyanus, buzullar
GRACE-FO	2018 – Günümüz	~60–120	Uzun	Uzun dönemli kütle değişimleri
GOCE	2009–2013	~250–300	Kısa	Yüksek çözünürlüklü jeoid, tektonik analiz

Jeopotansiyel modellerin karşılaştırılmasında dikkate alınan temel ölçütlerden biri küresel harmonik derece ve sıra değerleridir. Model derecesi, yerçekimi alanının hangi ayrıntı seviyesinde temsil edilebildiğini göstermektedir. Düşük derece değerleri daha çok uzun dalga boylu ve geniş ölçekli gravite bileşenlerini ifade ederken, yüksek derece değerleri ile kısa dalga boylu ve yerel gravite değişimlerinin modellenmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle derece sayısının artması modelin mekansal çözünürlüğünü yükseltmekte ve daha ayrıntılı temsil gücü sunmaktadır. Bununla birlikte derece artışının yüksek olması daha yüksek doğruluk anlamına gelmemekte; kullanılan veri kalitesi, gözlem yoğunluğu, hesap yönetimi ve gürültü düzeyi de model başarısını doğrudan etkilemektedir.

5. ÇALIŞMA ALANI VE DEĞERLENDİRMEDE KULLANILAN UYDU BAZLI GLOBAL JEOPOTANSİYEL MODELLER

5.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada jeoid hesaplama alanı olarak, $36° < \varphi < 42°$ enlem ve $26° < \lambda < 44°$ boylam değerleri aralığını kapsayan bölge uygulama alanı olarak seçilmiştir. Çalışma alanının sınırları, Harita Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan TG20 jeoid modelinin kapsama alanı ve grid yapısı dikkate alınarak tanımlanmıştır. TG20 modelinde enlem ve boylam başlangıç-bitiş değerleri esas alınmış, jeoid yüksekliklerinin karşılaştırmalı analizlerinde enterpolasyon gereksiniminin ortadan kaldırılması amacıyla çalışma alanı sınırları bu değerlere uygun biçimde belirlenmiştir (Harita Genel Müdürlüğü, 2020).

Çalışmada kullanılan grid çözünürlüğü $5' \times 5'$ olup bu değer açısal olarak yaklaşık 0.083333° x 0.083333° aralığa karşılık gelmektedir. Enlem yönüne 1° yaklaşık 111.32 km kabul edildiğinden, kuzey-güney doğrultusundaki $5'$ grid aralığı Denklem (5.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\mathrm{d}_{\varphi} = \frac{5}{60}\, x\, 111.32 = 9.27\, km \tag{5.1}$$

Boylam yönündeki grid aralığı ise enleme bağlı olarak değişmekte olup Denklem (5.2) ile ifade edilmektedir.

$$\mathrm{d}_{\lambda} = \frac{5}{60}\, x\, 111.32 \cos \varphi \tag{5.2}$$

Burada φ, enlem değerini göstermektedir. Türkiye çalışma alanının orta enlemi yaklaşık 39° kabul edildiğinde doğu-batı yönündeki grid aralığı Denklem (5.3) ile hesaplanmıştır.

$$\mathrm{d}_{\lambda} = 0.083333\, x\, 111.32\, x \cos 39° = 7.21 \text{ km} \tag{5.3}$$

Buna göre çalışmada kullanılan $5' \times 5'$ grid yapısı yaklaşık olarak 9.27 km x 7.21 km mekansal çözünürlüğe sahiptir.

Belirlenen sınırlar içerisinde grid yapısı enlem yönünde 73, boylam yönünde 217 noktadan oluşmaktadır. Toplam grid nokta sayısı Denklem (5.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$N = 73 \text{ x } 217 = 15.841 \tag{5.4}$$

Böylece hem TG20 modelinden hem de ICGEM hesaplama servisinden elde edilen jeoid yükseklikleri toplam 15.841 ortak grid noktasında doğrudan karşılaştırılmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde ICGEM hesaplama servisinden elde edilen jeoid yükseklikleri ile TG20 jeoid modeline ait yükseklikler ortak grid noktaları üzerinde değerlendirilmiş, herhangi bir enterpolasyon işlemine başvurulmamıştır. Böylece enterpolasyondan kaynaklanabilecek ek hataların önüne geçilmiş ve istatistiksel karşılaştırmaların güvenilirliği artırılmıştır.

Çalışmada ICGEM statik modeller bölümünde yer alan ve 2015 yılı sonrası yayımlanmış, yalnızca GRACE ve yalnızca GOCE uydu verilerine dayanan global jeopotansiyel modeller değerlendirmeye alınmıştır.

5.2 Uydu Bazlı Global Jeopotansiyel Modeller

Bu çalışmada;

GOSG02S, ITSG-Grace2018s, GO_CONS_GCF_2_TIM_R6, Tongji-Grace02k, GOSG01S, IGGT_R1, IfE_GOCE05s, GO_CONS_GCF_2_SPW_R5, Tongji-Grace02s, NULP-02s, HUST-Grace2016s, ITU_GRACE16 modeli olmak üzere toplam 12 adet jeopotansiyel model kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan uydu bazlı global jeopotansiyel modellere ilişkin veri yapısı Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 Uydu bazlı jeopotansiyel modeller ve özellikleri

MODEL	YIL	DERECE	VERİ
GOSG02S	2023	300	S(Goce)
ITSG-Grace2018s	2019	200	S(Grace)
GO_CONS_GCF_2_TIM_R6	2019	300	S(Goce)
Tongji-Grace02k	2018	180	S(Grace)
GOSG01S	2018	220	S(Goce)
IGGT_R1	2017	240	S(Goce)
IfE_GOCE05s	2017	250	S(Goce)
GO_CONS_GCF_2_SPW_R5	2017	330	S(Goce)
Tongji-Grace02s	2017	180	S(Grace)
NULP-02s	2017	250	S(Goce)
HUST-Grace2016s	2016	160	S(Grace)
ITU_GRACE16	2016	180	S(Grace)

S $\rightarrow$ Uydu (Satellite)

5.2.1 GOSG02S

GOSG02S, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından yürütülen GOCE (*Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer*) misyonuna ait veriler kullanılarak elde edilmiş, uydu-yalnız (*GOCE-only*) bir statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Modelin temel veri kaynağını, GOCE uydusu üzerinde konumlandırılmış üç eksenli elektrostatik yerçekimi gradyometresi (SGG) tarafından ölçülen yerçekimi potansiyelinin ikinci türev bileşenleri oluşturmaktadır. Buna ek olarak, modelin dinamik çözüm sürecinde, yörünge belirleme hassasiyetini artırmak amacıyla elde edilen uydu-uydu izleme (SST) verileri de entegre edilmiştir (Pail vd., 2010; Xu vd., 2023).

GOSG02S, küresel harmonik açılımda 300. derece ve mertebeye kadar geliştirilmiş olup, bu yüksek açılım, modelin kısa ve orta dalga boylu yerçekimi sinyallerini olağanüstü bir mekânsal çözünürlükle belirlemesini sağlamaktadır. Bu üstünlük, özellikle jeoid dalgalanmalarının yüksek frekanslı bileşenlerinin modellenmesinde ve yerçekimi gradyanlarının türev tabanlı analizlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. GOCE-only karakteristiği nedeniyle kara ve okyanus alanlarında homojen doğruluk sergilemekle birlikte, modelin performansı, çok uzun dalga boylarında (*düşük harmonik dereceler*) GRACE tabanlı modellere kıyasla sınırlı duyarlılık göstermektedir (ICGEM, 2026; Xu vd., 2023).

5.2.2 ITSG-Grace2018s

ITSG-Grace2018s, Graz Teknoloji Üniversitesi (TU Graz) bünyesindeki jeodezi Enstitüsü (ITSG) tarafından geliştirilmiş, uydu-yalnız (*GRACE-only*) statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Modelin temeli, GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) uydu çifti arasındaki mesafedeki değişimlerin (K-bandı mesafe hızı) yüksek hassasiyetle ölçülmesine dayanmaktadır. Bu veriler, uyduların üzerindeki ivmeölçer bilgileri ve GPS'ten elde edilen yörünge verileri ile birlikte, yerçekimi potansiyelini dinamik yörünge denklemleri aracılığıyla çözmek için kullanılmıştır (Kvas vd., 2019).

ITSG-Grace2018 model ailesi içinde yer alan ve sonundaki "s" eki ile belirtilen bu model, uzun dönemli GRACE verilerinin ortalamasına dayalı statik yerçekimi alanını temsil eder. Modelin hesaplanması sırasında, atmosfer ve okyanus kaynaklı yüksek frekanslı kütle değişimleri, AOD1B ürünleri kullanılarak çözümden çıkarılmış ve böylece zamansal kütle değişimlerinden arındırılmış bir referans yerçekimi alanı elde edilmiştir. Bu özelliği sayesinde ITSG-Grace2018s, özellikle hidroloji, buz tabakası, kütle dengesi ve deniz seviyesi değişimleri gibi zamana bağlı yerçekimi analizleri için temel ve güvenilir bir referans statik alan olarak yaygın biçimde tercih edilmektedir (Mayer-Gürr vd., 2018).

5.2.3 GO_CONS_GCF_2_TIM_R6

GO_CONS_GCF_2_TIM_R6, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından finanse edilen GOCE Konsorsiyumu tarafından yayımlanan GOCE resmi 6. sürüm (*Release 6*) yerçekimi alanı modelidir. Bu modelin türetilmesi, temel olarak TIM çözüm yaklaşımını kullanmıştır. Bu metodolojide, GOCE gradyan ölçümleri, uydunun yörüngesi boyunca zamana göre detaylıca filtrelenmekte ve gözlemler arasındaki zamansal korelasyonlar dikkate alınarak küresel harmonik katsayılar kestirilmektedir (Pail vd., 2010; Scheinert vd., 2016).

R6 sürümü, önceki iterasyonlara kıyasla daha uzun bir veri kapsamı, optimize edilmiş kalibrasyon parametreleri ve geliştirilmiş gürültü modellemesi içermesi sayesinde önemli iyileştirmeler sunmaktadır. TIM yaklaşımı, özellikle orta harmonik derecelerde daha kararlı ve güvenilir çözümler sağlaması nedeniyle bilimsel literatürde sıkça tercih edilmektedir. Bu bağlamda, GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modeli, GOCE verilerine dayalı jeodezik çalışmalarda resmî ve güncel referans model niteliği taşımaktadır (Brockmann vd., 2019; Zingerle vd., 2019).

5.2.4 Tongji-Grace02k

Tongji-Grace02k, Tongji Üniversitesi tarafından geliştirilen GRACE-only statik küresel yerçekimi alanı modeli serisinin bir üyesidir. Model, GRACE uydu-uydu mesafe hızı, ivmeölçer ve hassas yörünge verilerinin birlikte kullanıldığı modifiye dinamik yaklaşım ile elde edilmiştir (Chen vd., 2016; Tapley vd., 2004).

Tongji-Grace02 serisinde yer alan 02s ve 02k çözümleri, farklı çözüm stratejilerine dayanmaktadır. Literatürde 02k çözümünün, belirli derece bantlarında gürültü azaltımı ve sinyal korunumu açısından iyileştirmeler sunduğu raporlanmıştır. Bu modeller, özellikle Asya ve Avrasya bölgelerinde bölgesel yerçekimi uygulamaları için sıkça kullanılmaktadır (Chen vd., 2016).

5.2.5 GOSG01S

GOSG01S, GOCE misyonunun erken evrelerinde üretilmiş ilk GOCE-only statik yerçekimi alanı modellerinden biridir. Model, yerçekimi gradyometresi verilerine dayalı olarak 220. dereceye kadar geliştirilmiştir (Pail vd., 2010; Xu vd., 2017).

Bu model, GOCE misyonunun yerçekimi alanı belirleme potansiyelini göstermek açısından tarihsel öneme sahiptir. Daha sonraki GOSG02S ve TIM/SPW çözümleri, GOSG01S'ye kıyasla hem çözünürlük hem de doğruluk açısından belirgin iyileştirmeler sunmuştur. Buna rağmen GOSG01S, metodolojik karşılaştırmalar için literatürde referans olarak yer almaktadır (Xu vd., 2017).

5.2.6 IGGT_R1

IGGT_R1, GOCE yerçekimi gradyan tensörünün dönüşüme duyarsız sabitleri (IGGT) kullanılarak elde edilmiş yenilikçi bir yerçekimi alanı modelidir. Klasik çözüm yaklaşımlarının aksine, bu yaklaşım, gradyan bileşenlerinin uydu koordinat sisteminden Dünya koordinat sistemine dönüştürülmesi sırasında ortaya çıkan ve çözüme dahil olan uydu davranış hatalarının (*attitude errors*) önemli bir gürültü kaynağı oluşturması sorununu minimize etmeyi amaçlamaktadır. IGGT metodolojisi, özellikle yüksek dereceli harmoniklerde gürültü kontrolü ve çözüm kararlılığı açısından teorik olarak güçlü bir temeldir (Lu vd., 2018).

Bu sayede IGGT_R1 modeli, yerçekimi alanı geri kazanımında uydu tutum modellemesi kaynaklı hataları aşmayı hedefleyen alternatif bir yaklaşım sunması bakımından akademik literatürde ve uzay jeodezisi alanında önemli bir yere sahiptir.

5.2.7 IfE_GOCE05s

IfE_GOCE05s, Leibniz Universität Hannover'e bağlı Institut für Erdmessung (IfE) tarafından geliştirilen GOCE-only statik yerçekimi alanı modelidir. Model, GOCE'nin

2009–2013 yılları arasındaki gözlemlerini kapsamaktadır ve bağımsız bir akademik çözüm olarak üretilmiştir (Drinkwater vd., 2003; Wu vd., 2016).

IfE modelleri, genellikle detaylı hata analizi ve alternatif regularizasyon stratejileri ile dikkat çekmektedir. IfE_GOCE05s, ESA'nın resmî çözümleriyle karşılaştırmalı değerlendirmelerde sıklıkla kullanılmaktadır (Wu vd., 2016).

5.2.8 GO_CONS_GCF_2_SPW_R5

GO_CONS_GCF_2_SPW_R5, Avrupa Uzay Ajansı (ESA) GOCE Konsorsiyumu tarafından geliştirilmiş, space-wise (SPW) çözüm yaklaşımına dayalı 5. sürüm statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Bu modelin temel metodolojisi olan SPW yaklaşımında, GOCE gradyan ölçümleri, uydunun yörüngesi boyunca tek tek zaman serileri olarak ele alınmak yerine, uzaysal olarak tanımlanmış hücreler üzerinde toplanmakta ve bu uzamsal değerlendirmeden küresel harmonik katsayılar türetilmektedir. (Gatti vd., 2016).

GO_CONS_GCF_2_SPW_R5, TIM çözüm yaklaşımlarına kıyasla farklı hata yayılım özelliklerine sahiptir ve bu durum, iki temel metodolojinin (SPW vs. TIM) bilimsel karşılaştırmalı analizlerinde önemli bir rol oynamasını sağlamaktadır. R5 sürümü, GOCE'nin resmi ürünleri arasında yer almış ve özellikle TIM çözümlerinin daha yeni R6 sürümü yayımlanmadan önceki dönemde yaygın olarak kullanılmıştır (Gatti vd., 2016).

5.2.9 Tongji-Grace02s

Tongji-Grace02s, Tongji Üniversitesi tarafından üretilmiş GRACE-only statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Model, 180. dereceye kadar geliştirilmiş ve modifiye kısa yay (short-arc) yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır (Chen vd., 2015, 2018).

Bu model, küresel ölçekte dengeli doğruluk sağlaması ve açık erişimli olması nedeniyle çok sayıda bölgesel çalışmada referans olarak kullanılmaktadır.

5.2.10 NULP-02s

NULP-02s, Lviv Politeknik Ulusal Üniversitesi (National University "Lviv Polytechnic") bünyesinde geliştirilen ve GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) misyonuna ait radyal yerçekimi gradyanı gözlemlerine dayanan space-wise (uzaysal temelli) bir statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Modelin oluşturulmasında, GOCE gradyometresinden elde edilen ikinci türev yerçekimi ölçüleri, uzaysal hücreler üzerinde değerlendirilmiş ve küresel harmonik katsayıların kestirimi Gauss integrasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, gradyan gözlemlerinin küresel harmonik alanla ilişkilendirilmesinde klasik en küçük kareler yaklaşımlarına alternatif bir çözüm sunmaktadır (Marchenko vd., 2016; Rummel vd., 2011).

NULP-02s modeli, küresel harmonik açılımda 250. derece ve mertebeye kadar geliştirilmiş olup, bu sayede orta ve kısa dalga boylu yerçekimi sinyallerinin temsiline olanak sağlamaktadır. Özellikle GOCE radyal gradyan bileşeninin yüksek hassasiyeti, modelin jeoid dalgalanmalarının daha küçük ölçekli yapılarının belirlenmesinde etkin bir performans sergilemesine katkıda bulunmuştur. Space-wise yaklaşımın doğası gereği, gözlemler belirli uzaysal bloklar içerisinde değerlendirildiğinden, veri yoğunluğunun ve gürültü özelliklerinin bölgesel olarak kontrol edilmesi mümkün olmuştur (Marchenko vd., 2016).

Bu yaklaşım, özellikle bölgesel jeoid belirleme ve yerçekimi alanının yerel iyileştirilmesi çalışmalarında test edilmiş; NULP-02s modelinin, referans küresel modellerle birleştirildiğinde bölgesel doğruluğu artırabildiği gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, modelin orta derecelerdeki performansının, resmî GOCE çözümleriyle tutarlı olduğu ve özellikle topografik olarak karmaşık bölgelerde jeoid çözümüne anlamlı katkı sağladığı raporlanmıştır. Bu bağlamda NULP-02s, GOCE verilerinin alternatif değerlendirme stratejilerini ortaya koyması bakımından literatürde önemli bir örnek teşkil etmektedir (Marchenko vd., 2016).

5.2.11 HUST-Grace2016s

HUST-Grace2016s, Huazhong University of Science and Technology (HUST) tarafından geliştirilen ve GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) uydu misyonuna ait gözlemler kullanılarak elde edilmiş GRACE-only statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Modelin oluşturulmasında, yaklaşık 2003–2015 yılları arasını kapsayan uzun dönemli GRACE Level-1B verileri değerlendirilmiş; bu sayede yerçekimi alanının zamansal değişimlerinden arındırılmış, uzun dönem ortalamayı temsil eden bir statik alan elde edilmesi hedeflenmiştir (Zhou vd., 2017).

HUST-Grace2016s modeli, küresel harmonik açılımda 160. derece ve mertebeye kadar geliştirilmiştir. Bu derece seviyesi, özellikle uzun ve orta dalga boylu yerçekimi sinyallerinin güvenilir biçimde temsil edilmesine olanak sağlamaktadır. Modelin hesaplanmasında kısıtsız (*unconstrained*) çözüm yaklaşımı benimsenmiş olup, bu yaklaşımda yüksek derecelerde herhangi bir harici referans modele bağlanma veya yapay sönümleme uygulanmamıştır. Böylece, GRACE gözlemlerinin bilgi içeriği doğrudan çözüme yansıtılmış ve olası model bağımlılıklarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Model üretim sürecinde, GRACE uydu çifti arasındaki uydu-uydu mesafe hızı (*range-rate*) ölçüleri temel gözlem türü olarak kullanılmış; ivmeölçer verileri ve hassas yörünge bilgileri ile birlikte dinamik yörünge denklemleri aracılığıyla yerçekimi alanı katsayıları kestirilmiştir. Ayrıca atmosfer ve okyanus kaynaklı yüksek frekanslı kütle değişimleri, standart örtüşme giderme (dealiasing) ürünleri yardımıyla çözümden ayrıştırılmıştır. Bu işlem, statik yerçekimi alanının fiziksel anlamda daha tutarlı biçimde elde edilmesini sağlamıştır (Zhou vd., 2017).

HUST-Grace2016s modeli, özellikle küresel ve bölgesel jeoid belirleme, uzun dalga boylu yerçekimi anomalilerinin analizi ve referans yerçekimi alanı oluşturma çalışmalarında kullanılmaktadır. Yapılan karşılaştırmalı değerlendirmelerde, modelin düşük ve orta derecelerdeki performansının diğer çağdaş GRACE-only statik modellerle uyumlu olduğu, kısıtsız çözüm stratejisine rağmen kabul edilebilir gürültü seviyeleri sunduğu raporlanmıştır. Bu yönüyle HUST-Grace2016s, GRACE verilerinin bağımsız ve

alternatif değerlendirilmesine yönelik önemli bir katkı olarak literatürde yerini almıştır (Zhou vd., 2017).

5.2.12 ITU_GRACE16

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) öncülüğünde geliştirilen ve GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) uydu misyonuna ait uydu-uydu izleme (Satellite-to-Satellite Tracking, SST) verilerine dayanan GRACE-only statik küresel yerçekimi alanı modelidir. Modelin üretiminde, GRACE uydu çifti arasındaki yüksek hassasiyetli K-band mesafe ve mesafe hızı ölçümleri, hassas yörünge bilgileri ve ivmeölçer verileri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu veriler, yerçekimi alanı parametrelerinin dinamik yörünge denklemleri aracılığıyla kestirilmesini sağlayan klasik GRACE çözüm yaklaşımı çerçevesinde işlenmiştir (Akyilmaz vd., 2016; Kvas vd., 2019).

ITU_GRACE16 modeli, yaklaşık 50 aylık GRACE gözlem verisi kullanılarak elde edilmiş olup, küresel harmonik açılımda 180. derece ve mertebeye kadar geliştirilmiştir. Bu derece seviyesi, özellikle orta ve uzun dalga boylu yerçekimi sinyallerinin güvenilir biçimde temsil edilmesine olanak tanımakta ve modelin jeoid dalgalanmaları ile uzun dalga boylu yerçekimi anomalilerinin belirlenmesinde etkin biçimde kullanılmasını sağlamaktadır (Akyilmaz vd., 2016). Çözüm sürecinde, atmosfer ve okyanus kaynaklı kısa periyotlu kütle değişimleri, standart örnekleme hatası ürünleri yardımıyla modelden ayrıştırılmış; böylece zamansal değişimlerden arındırılmış bir statik referans yerçekimi alanı elde edilmiştir (Shang vd., 2015).

Modelin geliştirilmesi, Türkiye'de küresel ölçekte yerçekimi alanı modellemesi konusunda gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmadan biri olması bakımından bilimsel ve kurumsal açıdan özel bir öneme sahiptir. ITU_GRACE16, yalnızca ulusal bir katkı olarak değil, aynı zamanda GRACE verilerinin bağımsız ve alternatif bir çözüm stratejisiyle değerlendirilmesi açısından da literatürde yerini almıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizlerde, modelin düşük ve orta derecelerdeki performansının çağdaş GRACE-only statik modellerle uyumlu olduğu ve özellikle referans yerçekimi alanı oluşturma

çalışmalarında kullanılabilir nitelikte olduğu gösterilmiştir (Akyilmaz vd., 2016; Kvas vd., 2019; Shang vd., 2015).

Bu bağlamda ITU_GRACE16, küresel ve bölgesel jeoid belirleme, GNSS–nivelman entegrasyonu, yerçekimi anomalilerinin analizi ve ulusal yükseklik sistemlerinin iyileştirilmesi gibi uygulamalarda temel bir referans model olarak değerlendirilebilecek nitelikte olup, Türkiye kaynaklı yerbilimleri literatürüne önemli bir katkı sunmaktadır.

5.3 Sayısal Uygulama

Bu çalışmada değerlendirme süreci kapsamında, seçilen uydu bazlı global jeopotansiyel modellere ait jeoid yükseklikleri, ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) veri tabanında yer alan hesaplama servisi (*calculation service*) kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplamalarda GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*) referans elipsoidi esas alınmış ve belirlenen çalışma alanı sınırları içerisinde $5' \times 5'$ grid aralığında ilgili modellere ait jeoid yükseklikleri hesaplatılmıştır.

Global jeopotansiyel modellerden elde edilen jeoid yükseklikleri, Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından yayımlanan $5' \times 5'$ çözünürlüklü TG20 jeoid modeline ait jeoid yükseklikleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma alanı sınırları, TG20 modelinin grid yapısına uyumlu olacak şekilde belirlendiğinden karşılaştırmalar toplam 15,841 ortak grid noktası üzerinde doğrudan gerçekleştirilmiştir. (Harita Genel Müdürlüğü, 2020).

Global jeopotansiyel modellerden hesaplanan jeoid yükseklikleri HGM tarafından yayımlanan TG20 jeoid modeli ile karşılaştırılmıştır. TG20, Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi (2015-2020) çerçevesinde geliştirilmiş olup, yaklaşık 265.000 kara gravite verisi, GOCO06S global jeopotansiyel modeli, 7.2 yay saniyesi çözünürlüklü SRTM V4.1 sayısal yükseklik modeli ve çevre denizlerdeki veri boşluklarının giderilmesi amacıyla XGM2019e modeli kullanılarak üretilmiş resmi ulusal hibrit jeoid modelidir. Modelin mutlak doğrulaması, ülke geneline dağılmış 278 GPS/nivelman noktasında gerçekleştirilmiş olup, farkların standart sapmasının birçok test profilinde 2 cm'nin altında olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle TG20, çalışma kapsamında güvenilir bir referans model olarak değerlendirilmiştir. Ancak, her referans

modelde olduğu gibi TG20 modelinin de belirli hata bileşenleri bulunabileceğinden, bu çalışmada elde edilen sonuçlar modellerin mutlak doğruluğunu değil, TG20 modeli ile olan göreli uyum düzeyini ifade etmektedir.

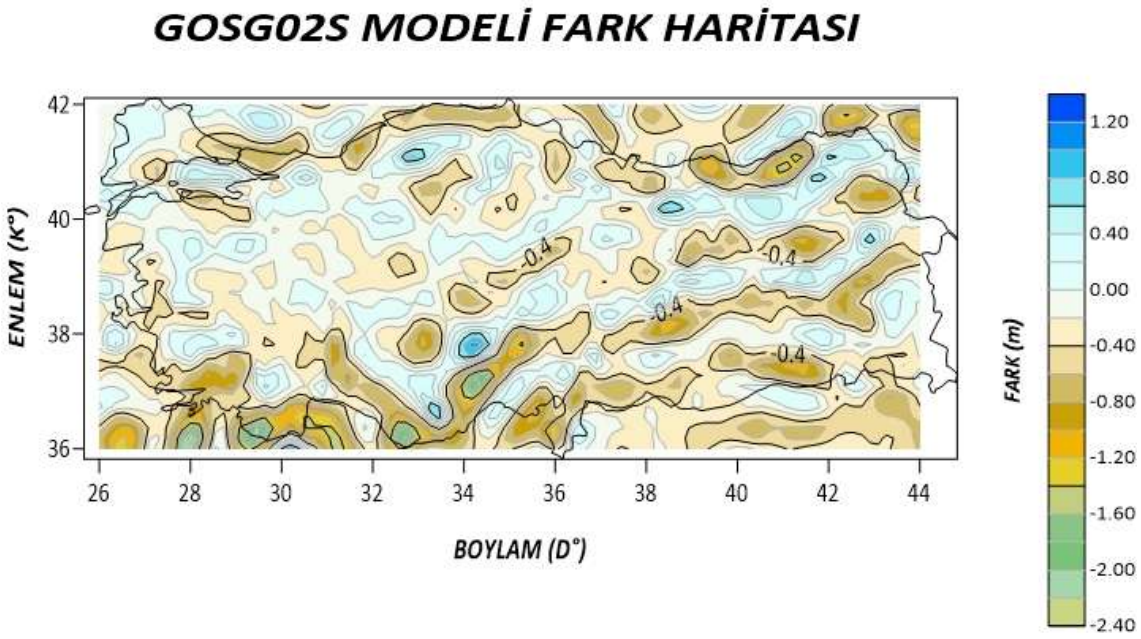
Her bir uydu bazlı global jeopotansiyel model için hesaplanan jeoid yükseklikleri ile TG20 jeoid modeline ait jeoid yükseklikleri arasındaki farklar Denklem (5.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta N = N_{\{GJM\}} - N_{\{TG20\}} \tag{5.5}$$

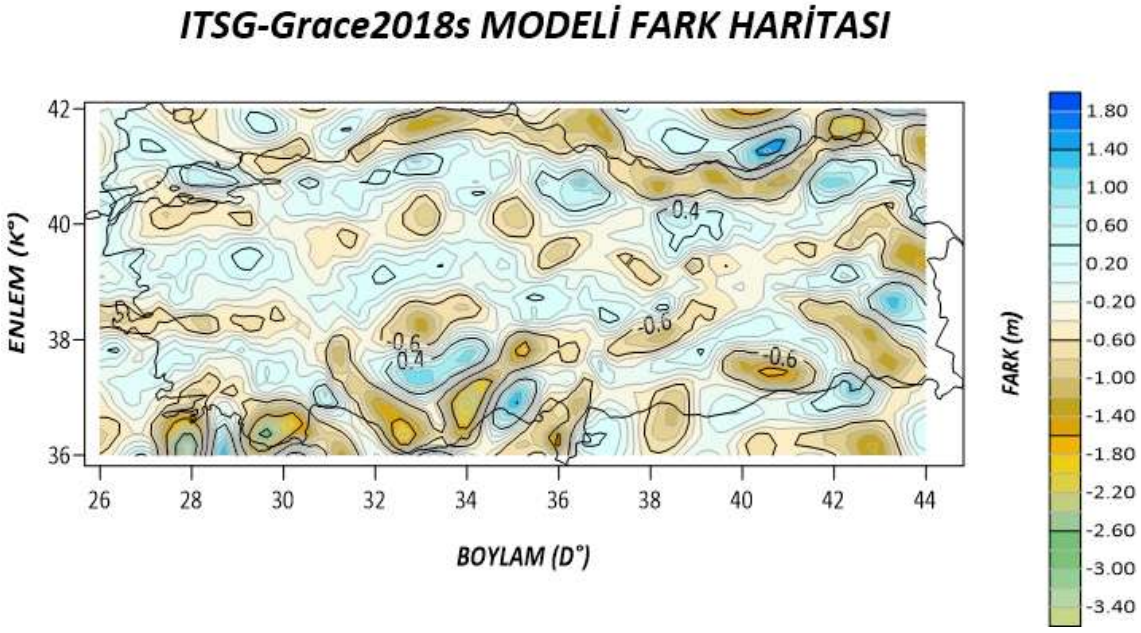
Burada $N_{\{GJM\}}$ ICGEM hesaplama servisinden elde edilen uydu bazlı global jeopotansiyel model jeoid yüksekliğini, $N_{\{TG20\}}$ ise Harita Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan TG20 jeoid modeline ait jeoid yüksekliğini ifade etmektedir (Harita Genel Müdürlüğü, 2020). TG20 jeoid modeli ile uydu bazlı global jeopotansiyel modellerden elde edilen jeoid yükseklik farklarına ait haritalar, Surfer yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca, Surfer yazılımı aracılığıyla jeoid yükseklik farklarına ait minimum, maksimum, ortalama ve aralık değerleri ile KOH (5.6) hesaplanmıştır.

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(x_i^* - x_i)^2} \tag{5.6}$$

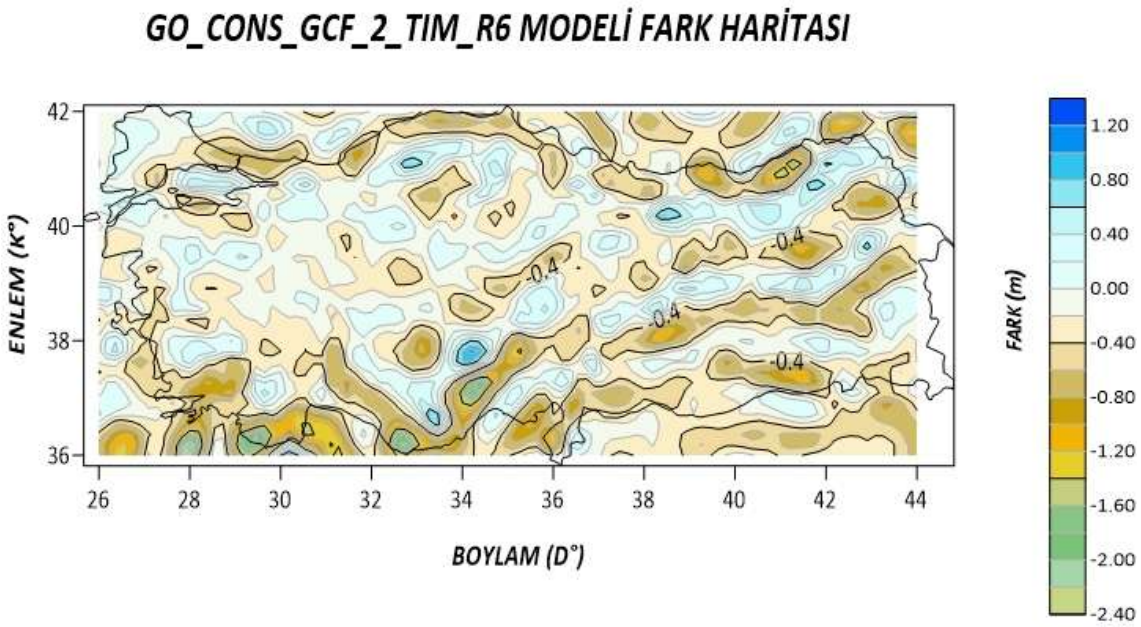
KOH, global jeopotansiyel modellerin çalışma alanı için jeoid belirleme performanslarının nicel olarak değerlendirilmesinde temel ölçüt olarak kullanılmıştır.



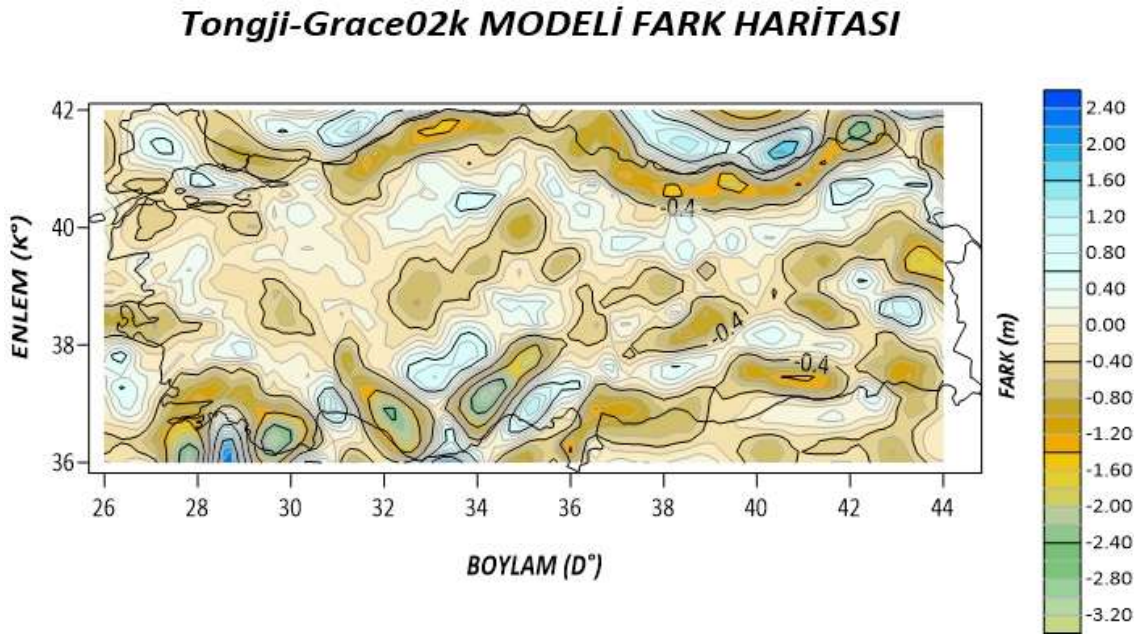
Şekil 5.1 GOSG02S modeline ait fark haritası.



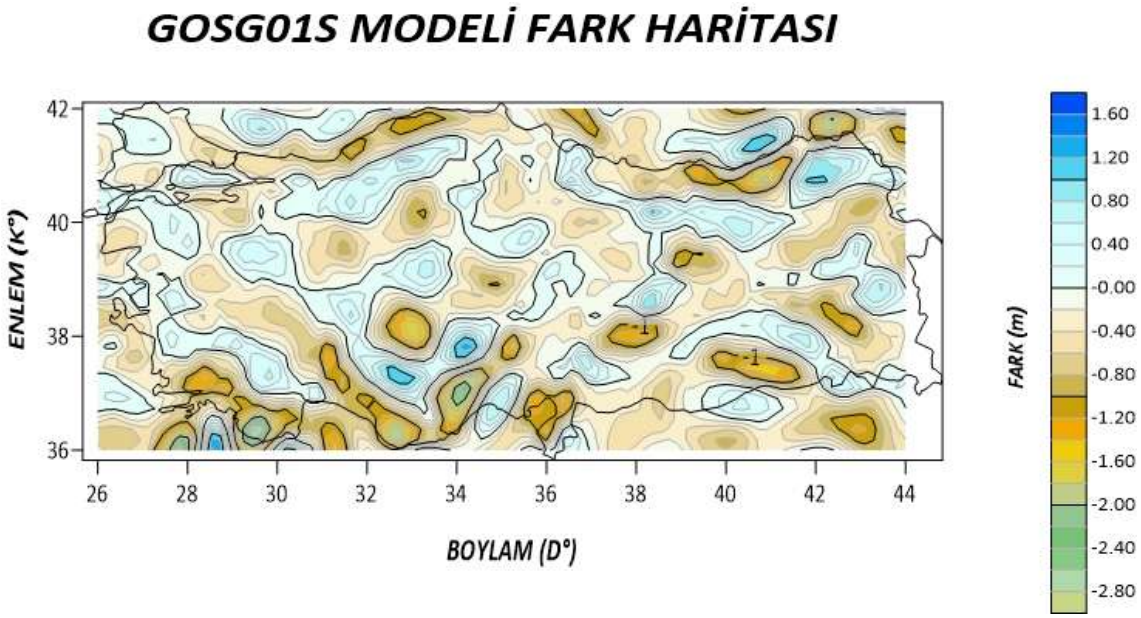
Şekil 5.2 ITSG-Grace2018s modeline ait fark haritası.



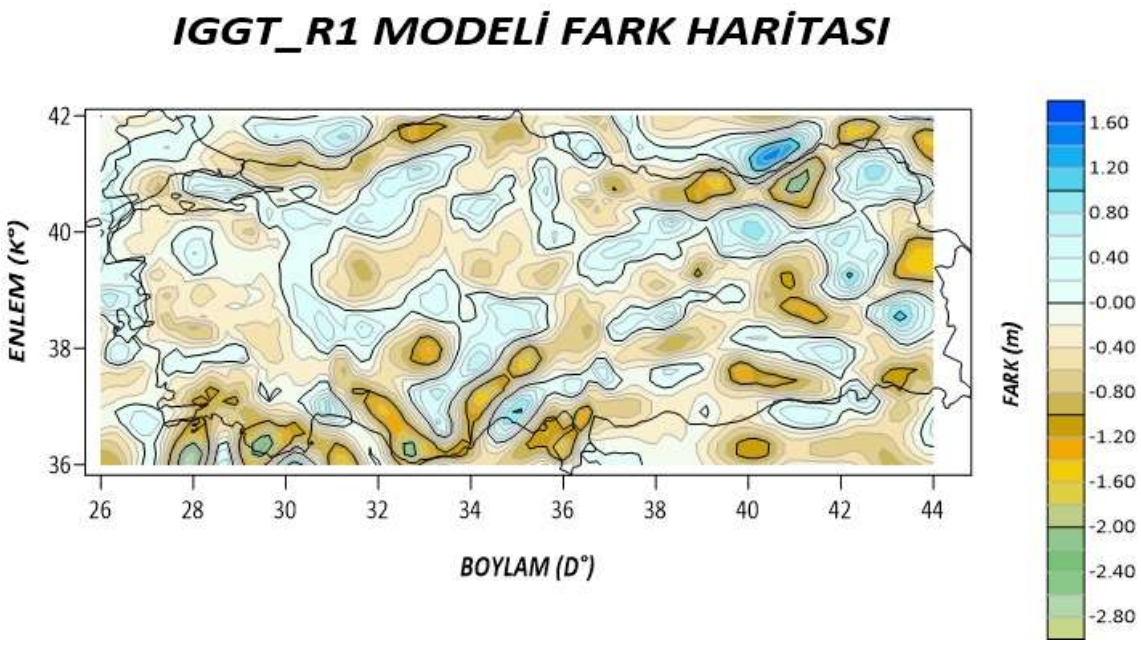
Şekil 5.3 GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modeline ait fark haritası.



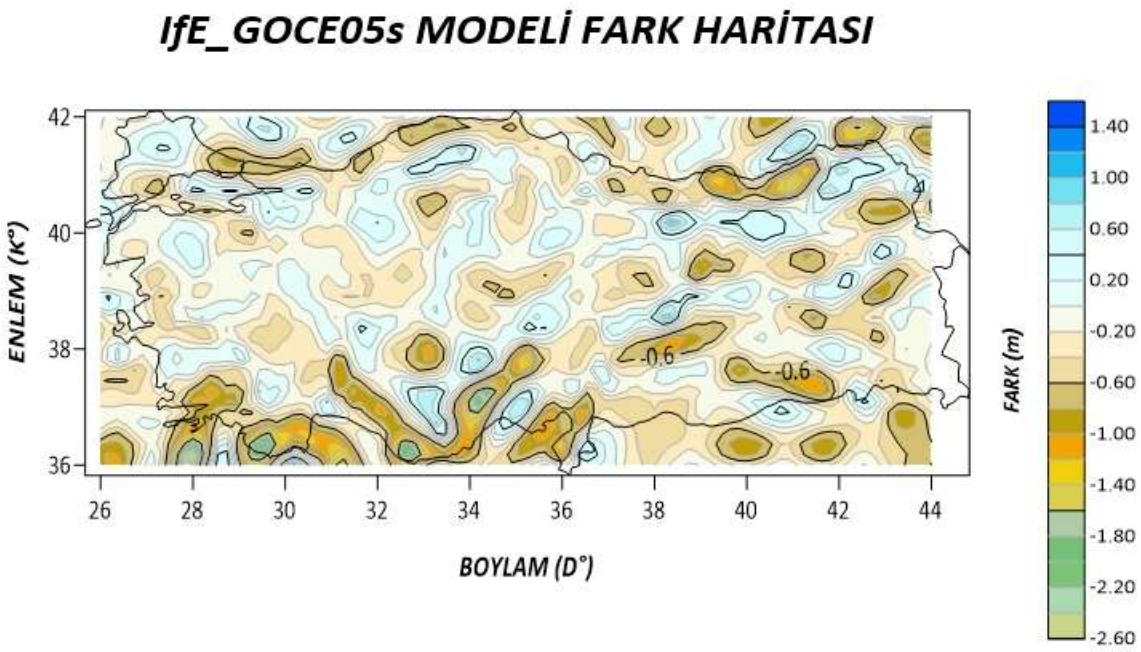
Şekil 5.4 Tongji-Grace02k modeline ait fark haritası.



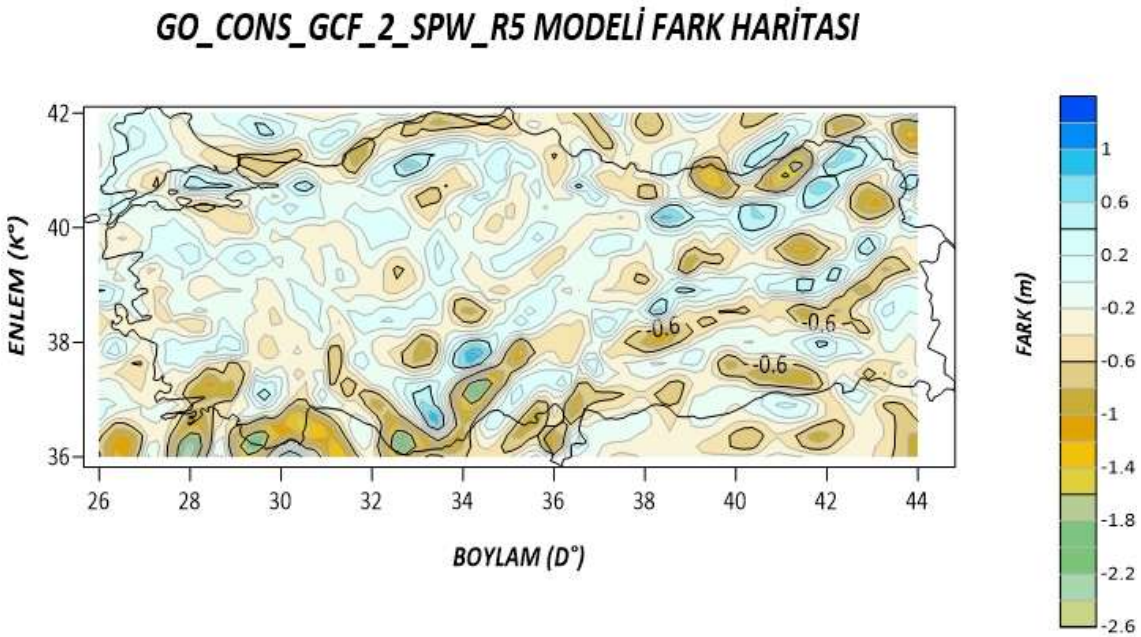
Şekil 5.5 GOSG01S modeline ait fark haritası.



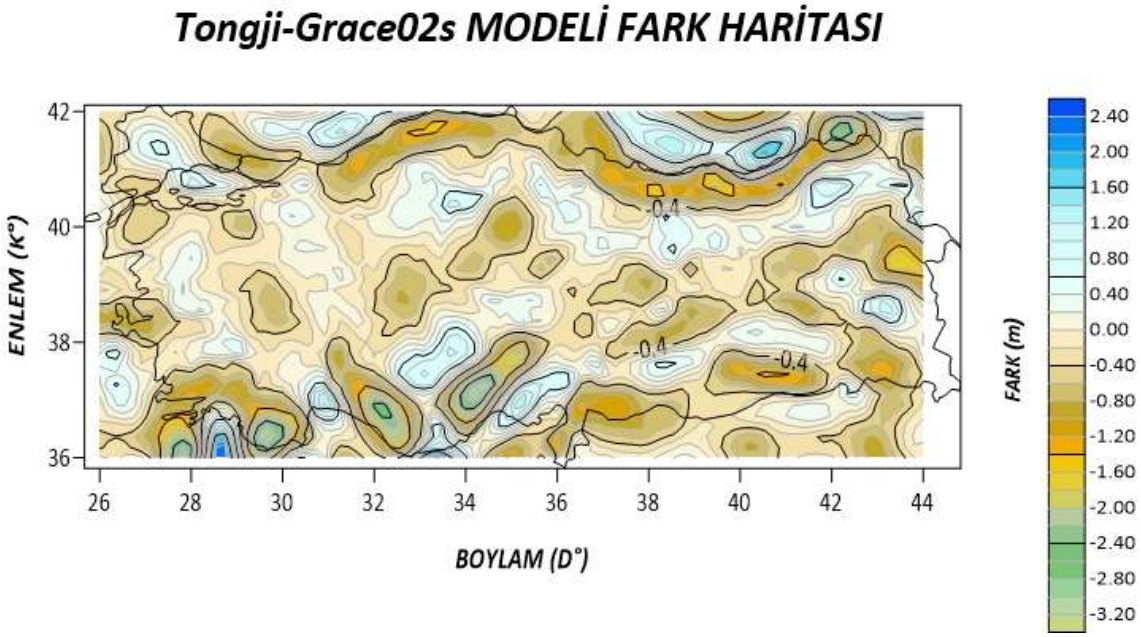
Şekil 5.6 IGGT_R1 modeline ait fark haritası.



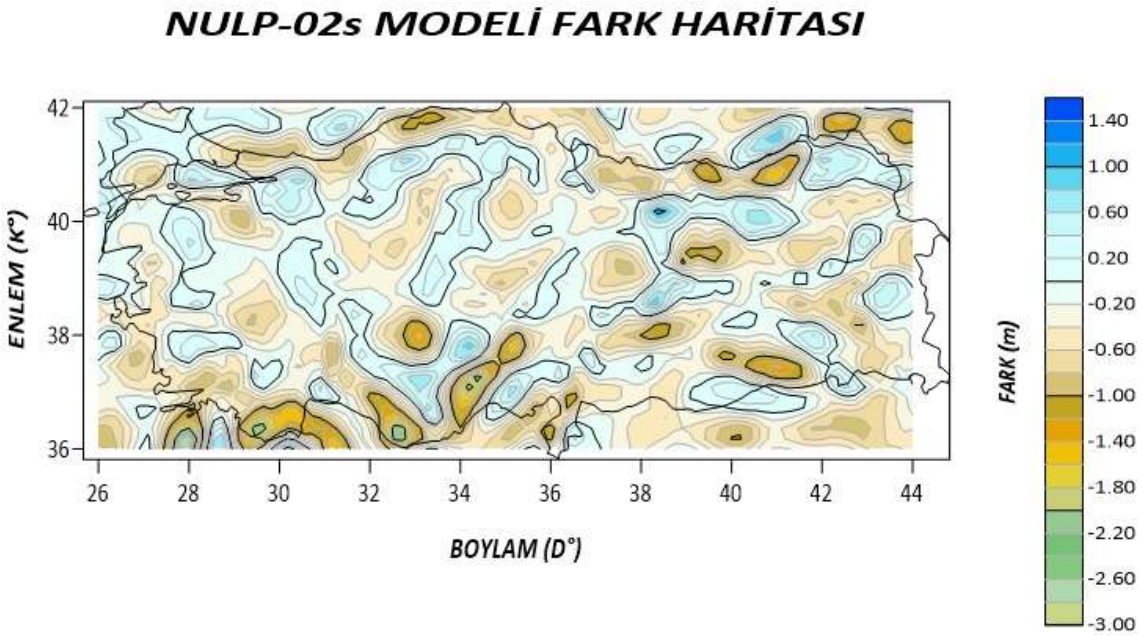
Şekil 5.7 IfE_GOCE05s modeline ait fark haritası.



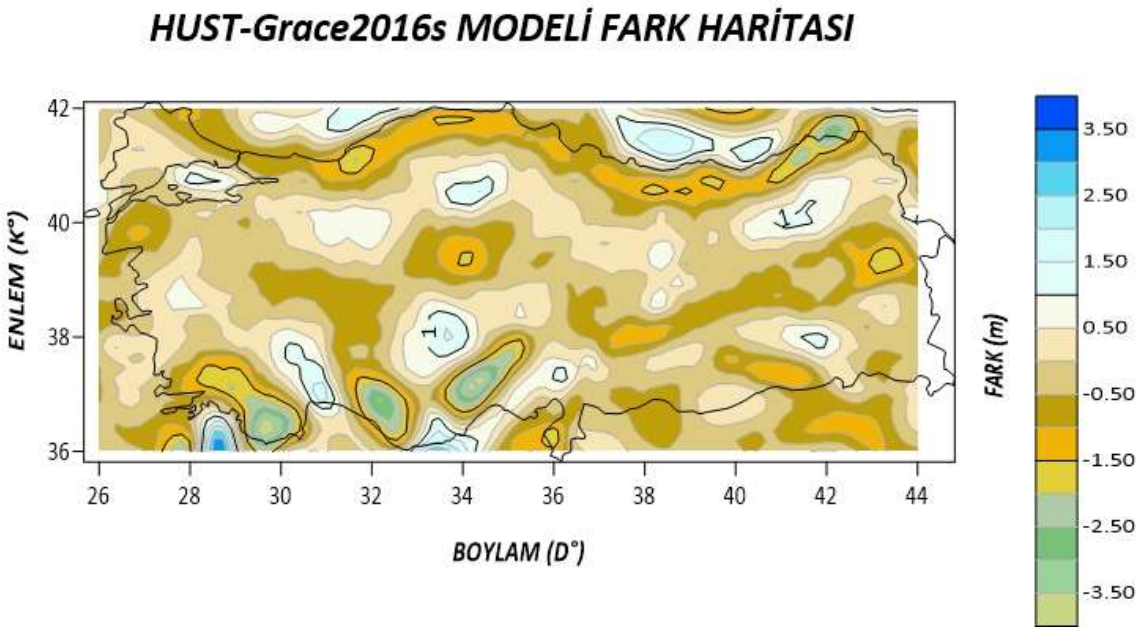
Şekil 5.8 GO_CONS_GCF_2_SPW_R5 modeline ait fark haritası



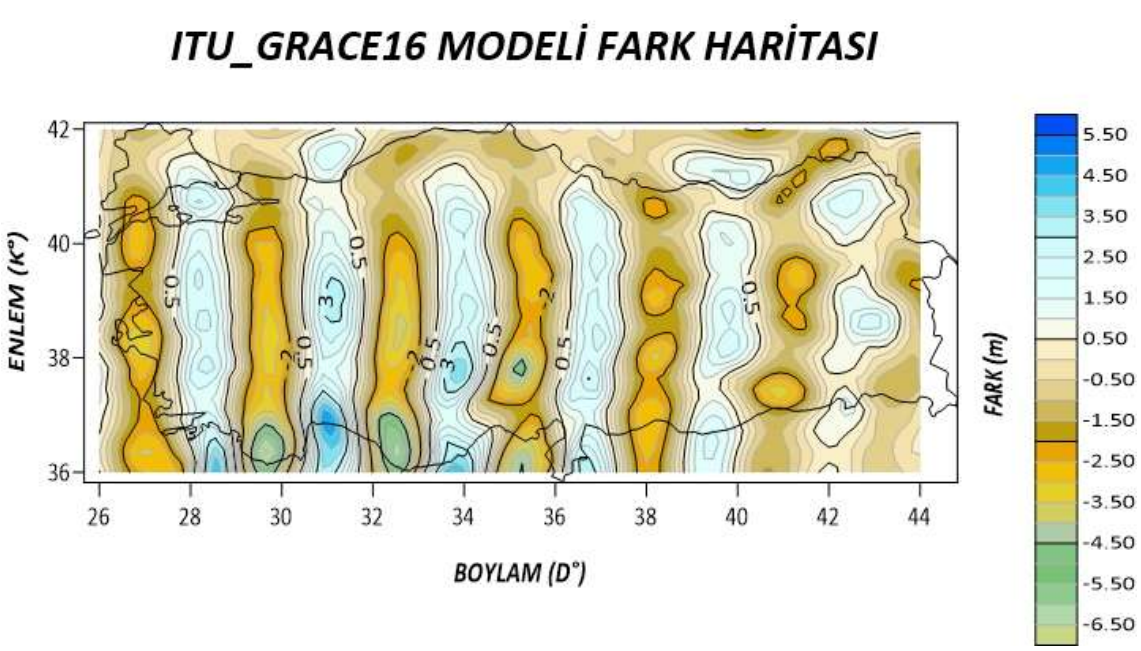
Şekil 5.9 Tongji-Grace02s modeline ait fark haritası.



Şekil 5.10 NULP-02s modeline ait fark haritası.



Şekil 5.11 HUST-Grace2016s modeline ait fark haritası.



Şekil 5.12 ITU_GRACE16 modeline ait fark haritası.

5.3.1. Bölgesel ve Topografik Değerlendirme

Uydu tabanlı global jeopotansiyel modeller ile TG20 jeoid modeli arasındaki jeoid yükseklik farklarını gösteren haritalar değerlendirildiğinde, farkların Türkiye genelinde eşit biçimde yayılmadığı, aksine bazı bölgelerde yoğunlaşma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 5.1 - Şekil 5.12). Özellikle topoğrafik rölyefin belirgin olduğu,

eğim değerlerinin yükseldiği ve arazi morfolojisinin karmaşık bir yapı sergilediği Doğu Anadolu, Kuzeydoğu Anadolu ve Doğu Karadeniz kuşağında fark büyüklüklerinin yer yer arttığı görülmektedir. Buna karşılık topoğrafyanın daha yalın olduğu ve yüzey şekillerinin nispeten düzenli dağılım gösterdiği İç Anadolu Platosu, Trakya ve bazı kıyı ovalarında farkların daha istikrarlı ve düşük genlikli bir yapı sergilediği tespit edilmiştir.

Bu durum, topoğrafik yükseltinin fazla olduğu bölgelerde gravite alanına ait kısa dalga boylu bileşenlerin daha belirgin hale gelmesi, kütle dağılımındaki ani değişimlerin yoğunlaşması ve bölgesel jeoid yapısının daha karmaşık bir nitelik göstermesi ile ilişkilendirilebilir. Özellikle dağlık sahalarda yükseklik farklarının kısa mesafeler içinde hızlı biçimde değişmesi, global jeopotansiyel modellerin bölgesel ayrıntıları temsil etme kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle topoğrafik çeşitliliğin yüksek olduğu bölgelerde model farklarının artış göstermesi beklenen bir sonuçtur.

GOCE tabanlı modellere ait fark haritaları değerlendirildiğinde, özellikle GOSG02S, GO_CONS_GCF_2_TIM_R6, IfE_GOCE05s ve GO_CONS_GCF_2_SPW_R5 modellerinde (Şekil 5.1, Şekil 5.3, Şekil 5.7, Şekil 5.8) Türkiye genelinde daha dengeli ve düşük genlikli fark dağılımlarının elde edildiği görülmektedir. Bu modellerde farkların çoğunlukla ±1 m civarında toplandığı ve bölgesel sapmaların sınırlı düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu durum, GOCE uydu misyonunun yerçekimi gradyan ölçülerine dayanan yapısı sayesinde orta ve kısa dalga boylu gravite bileşenlerini daha başarılı temsil etmesiyle açıklanabilir.

GRACE tabanlı modeller incelendiğinde ise özellikle Tongji-Grace02k, Tongji-Grace02s, HUST-Grace2016s ve ITU_GRACE16 modellerinde (Şekil 5.4, Şekil 5.9, Şekil 5.11, Şekil 5.12) bazı bölgelerde daha geniş genlikli fark alanlarının oluştuğu gözlenmiştir. Özellikle ITU_GRACE16 modelinde batı-doğu doğrultusunda şerit karakterli desenlerin ortaya çıkması, modelin çalışma alanı içerisindeki bölgesel uyumunun diğer modellere göre daha zayıf olduğunu göstermektedir. Bu modelin KOH değeri de bu sonuca paralel olarak en yüksek hata değerine sahip olmuştur (1.69673m) (Çizelge 5.2). Benzer biçimde HUST-Grace2016s modeli de (0.77738m) KOH değeri ile görece yüksek hata üretmiş ve özellikle güney ile kuzey kuşaklarında belirgin negatif fark

alanları göstermiştir. Buna karşılık diğer GRACE tabanlı modeller arasında KOH değerleri daha dengeli sonuçlar vermiştir.

Tüm modeller arasında en düşük KOH değeri 0.38451m ile GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modelinde elde edilmiştir. Bu modeli 0.38824m ve GOSG02S ve 0.39762m ile GO_CONS_GCF_2_SPW_R5 modelleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, Türkiye gibi topoğrafik çeşitliliğin yüksek olduğu bir çalışma alanında GOCE tabanlı modellerin TG20 jeoid modeli ile daha uyumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Fark haritaları ile istatistiksel bulguların birlikte incelenmesi sonucunda topoğrafik çeşitliliğin model performansı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle dağlık ve engebeli sahalarda farkların artma eğilimi gösterdiği, daha sade topoğrafik özelliklere sahip bölgelerde ise modeller arasındaki uyumun güçlendiği görülmektedir. Bu nedenle Türkiye gibi kısa mesafelerde topoğrafik değişimin yüksek olduğu ülkelerde, bölgesel uygulamalar bakımından yüksek çözünürlüklü ve kısa dalga boylu bileşenleri daha başarılı temsil eden modellerin tercih edilmesi önem taşımaktadır.

5.4. Veri Sonuçlarına Dayalı Yapılan Karşılaştırmalar

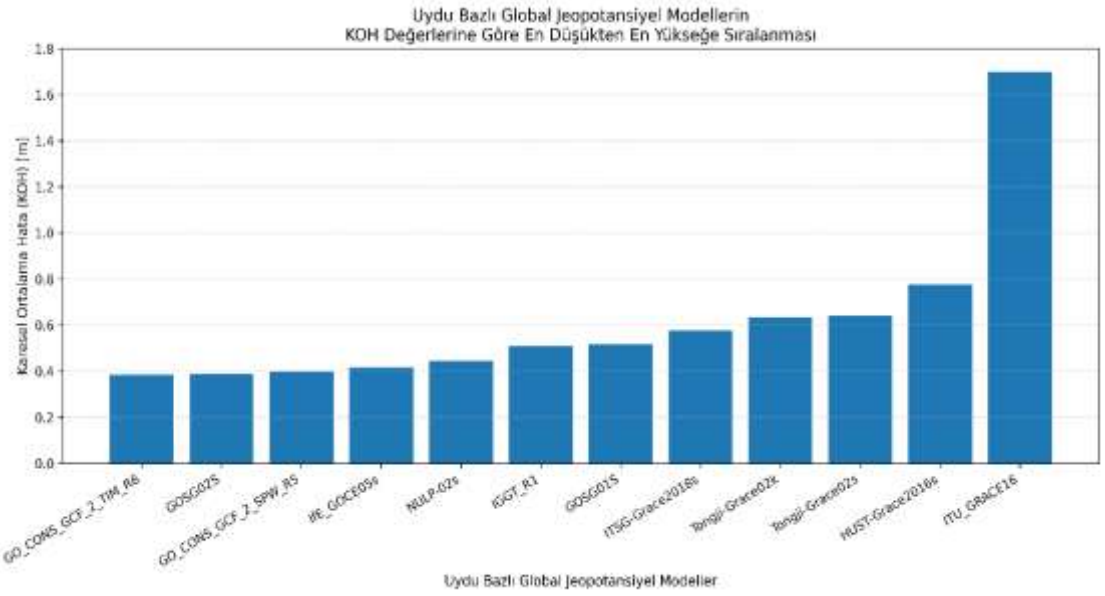
Çizelge 5.2 Uydu bazlı global jeopotansiyel modeller ile TG20 jeoid modeli arasındaki jeoid yükseklik farkları (m cinsinden)

MODEL	MİN.	MAKS.	ORTALAMA	ARALIK	KOH
GOSG02S	-2.49448	1.12847	-0.25413	3.62295	0.38824
ITSG-Grace2018s	-3.71629	1.78659	-0.272	5.50288	0.57523
GO_CONS_GCF_2_TIM_R6	-2.47176	1.10156	-0.26436	3.57332	0.38451
Tongji-Grace02k	-3.32749	2.63766	-0.25753	5.96515	0.63392
GOSG01S	-2.96282	1.65409	-0.25775	4.61691	0.51795
IGGT_R1	-3.02383	1.71484	-0.2531	4.73867	0.50974
IfE_GOCE05s	-2.7745	1.30859	-0.24005	4.08309	0.41741
GO_CONS_GCF_2_SPW_R5	-2.58743	1.14538	-0.25736	3.73281	0.39762

Çizelge 5.2 (Devam) Uydu bazlı global jeopotansiyel modeller ile TG20 jeoid modeli arasındaki jeoid yükseklik farkları (m cinsinden)

MODEL	MİN.	MAKS.	ORTALAMA	ARALIK	KOH
NULP-02s	-3.06634	1.2946	-0.27979	4.36094	0.44496
HUST-Grace2016s	-4.02768	3.68627	-0.26073	7.71395	0.77738
ITU_GRACE16	-6.68393	5.06532	-0.29882	11.7492	1.69673

ICGEM statik, uydu bazlı global jeopotansiyel modelleri kapsamında yer alan GRACE ve GOCE görevlerinden türetilmiş modellerden hesaplanan jeoid yükseklikleri ile TG20 jeoid yükseklikleri arasındaki farklara ait minimum, maksimum, ortalama, aralık ve KOH değerleri metre (m) cinsinden Çizelge 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.13 Uydu bazlı global jeopotansiyel modellerin karesel ortalama hata (KOH) değerlerine göre en düşükten en yükseğe sıralanması

Şekil 5.13'e göre karesel ortalama hata (KOH) değerleri incelendiğinde, çalışma alanı için TG20 jeoid yükseklikleri ile en uyumlu sonuçları veren modelin, GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 olduğu görülmektedir.

GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modeli, GOCE uydu görevinden elde edilen gözlemlere dayalı olarak oluşturulmuş, statik ve uydu bazlı global jeopotansiyel modellerdir. Çalışma alanında seçilen 12 adet ICGEM statik global jeopotansiyel modelinden elde edilen jeoid yükseklikleri ile HGM 5′ × 5′ jeoid yükseklikleri arasındaki farklar değerlendirildiğinde,

GOCE tabanlı modellerin genel olarak GRACE tabanlı modellere kıyasla daha düşük KOH değerleri verdiği belirlenmiştir. Dolayısıyla GOCE tabanlı global jeopotansiyel modellerin jeoid belirleme açısından GRACE tabanlı modellere göre daha başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, ilk olarak neden uydu bazlı jeopotansiyel modellere ihtiyaç duyulmaktadır açıklanmıştır. Uydu görevlerinden elde edilen veriler, jeoid belirleme, fiziksel yükseklik sistemlerinin oluşturulması ve kütle taşınımının izlenmesi gibi temel uygulamalara yüksek hassasiyet kazandırarak modern jeodeziye önemli katkılarda bulunmaktadır. Sonuç olarak, uydu gravimetrisi günümüzde Dünya'nın yerçekimi alanının hem mekânsal hem de zamansal değişimlerini güvenilir bir şekilde modelleyebilen vazgeçilmez bir yöntem haline gelmiştir.

Türkiye için uydu bazlı jeopotansiyel modellerin performanslarının karşılaştırılması amacıyla sadece GRACE ve sadece GOCE verilerini kullanan küresel jeopotansiyel modeller değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, jeoid belirleme sürecinde bu iki uydu misyonunun sağladığı katkıyı nicel olarak ortaya koymak ve Türkiye'nin belirlenen çalışma alanı $36\,^\circ < \varphi < 42\,^\circ$ enlem ve $26\,^\circ < \lambda < 44^\circ$ boylam değerleri içerisinde hangi misyonun daha yüksek doğruluk sunduğunu belirlemektir.

Bu doğrultuda ICGEM veri tabanında yer alan statik modeller arasından 2015 yılı ve sonrası için GRACE ve GOCE verilerini kullanan GOSG02S, ITSG-Grace2018s, GO_CONS_GCF_2_TIM_R6, Tongji-Grace02k, GOSG01S, IGGT_R1, IfE_GOCE05s, GO_CONS_GCF_2_SPW_R5, Tongji-Grace02s, NULP-02s, HUST-Grace2016s ve ITU_GRACE16 olmak üzere toplam 12 model seçilmiş ve çalışma alanı için $5' \times 5'$ çözünürlükte jeoid yükseklikleri hesaplanmıştır.

Hesaplama sonuçları, Harita Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan TG-20 jeoid yüksekliği ($5' \times 5'$ çözünürlüğünde) karşılaştırılmış; fark gridleri üzerinden Surfer programı kullanılarak karesel ortalama hata (KOH) değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen KOH değerleri incelendiğinde, modellerin performanslarının belirgin şekilde farklılaştığı, özellikle GRACE ve GOCE temelli çözümlerin dalga boyu içeriklerinden kaynaklanan ayrışmalarının sonuçlara yansıdığı görülmektedir. KOH değerinin düşük

olması, modelin TG-20 jeoid modeli ile yüksek uyum gösterdiğine işaret ettiğinden, değerlendirme sürecinde bu ölçüt temel karşılaştırma parametresi olarak kullanılmıştır.

Ayrıntılı analizler, en yüksek performansın GOCE tabanlı modeller tarafından sağlandığını göstermektedir. Özellikle GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 (0.38451) modeli, çalışma alanı üzerinde TG-20 jeoid modeline en yakın sonuçları üretmiştir. Bu bulgu, kısa dalga boyu bileşenlerine duyarlı GOCE ölçümlerinin bölgesel gravite alanının ayrıntılarını daha etkin biçimde temsil etme kapasitesine işaret etmektedir.

Genel değerlendirme kapsamında, bu çalışma Türkiye için GOCE tabanlı jeopotansiyel modellerin GRACE tabanlı modellere kıyasla daha yüksek doğruluk sunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, GOCE misyonunun yüksek mekânsal çözünürlüklü gravite gradyan ölçümlerinin, Türkiye'nin topografik ve tektonik açıdan karmaşık yapısının modellenmesinde belirgin avantaj sunduğunu göstermektedir. Diğer yandan GRACE modelleri ise uzun dalga boyu bileşenlerini başarıyla temsil etmesine karşın, bu çalışmanın çözünürlüğünde TG-20 jeoidiyle uyum açısından GOCE modellerinin gerisinde kalmıştır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular mühendislik uygulamaları açısından da önemli katkılar sağlamaktadır. Türkiye için daha uyumlu sonuç veren global jeopotansiyel modellerin belirlenmesi; GNSS tabanlı yükseklik dönüşümleri, mühendislik ölçmeleri, altyapı projeleri, baraj ve ulaşım yapıları, deformasyon izleme çalışmaları ile hassas nivelman uygulamalarında daha güvenilir yükseklik bilgilerinin üretilmesine katkı sunmaktadır. Özellikle geniş alanlı mühendislik projelerinde doğru jeoid model seçimi, maliyetlerin azaltılması ve ölçme doğruluğunun artırılması bakımından önem taşımaktadır.

Bunun yanında deprem mühendisliği ve afet yönetimi açısından da doğru jeopotansiyel model seçimi önemli bir gerekliliktir. Türkiye gibi aktif tektonik kuşakta yer alan ülkelerde kabuk hareketlerinin izlenmesi, düşey deformasyonların belirlenmesi, gravite alanındaki zamansal değişimlerin değerlendirilmesi ve GNSS tabanlı izleme ağlarının desteklenmesi açısından güvenilir jeopotansiyel modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Araştırma çıkarımları, jeodezik ve jeofizik temelli deprem araştırmalarına, risk

analizlerine ve afet sonrası yeniden ölçme çalışmalarına karar destek sağlayabilecek niteliktedir.

Sonuç olarak, çalışma bulguları Türkiye bölgesinde GO_CONS_GCF_2_TIM_R6 modelinin jeoid belirleme açısından en uygun uydu tabanlı jeopotansiyel modeller olduğunu göstermektedir.

7. KAYNAKLAR

Akyilmaz, O., Ustun, A., Aydın, C., Arslan, N., Doganalp, S., Guney, C., Mercan, H., Uygur, S. O., Uz, M., & Yağci, O. (2016). High resolution gravity field determination and monitoring of regional mass variations using low-earth orbit satellites. *ICGEM, GFZ Data Services*.

Avşar, N. B., Erol, B., & Kutoğlu, Ş. H. (2015). Türkiye'de Güncel GOCE Global Jeopotansiyel Modellerinin Değerlendirilmesi. *15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*.

Brockmann, J. M., Schubert, T., Mayer-Gürr, T., & Schuh, W.-D. (2019). *The Earth's gravity field as seen by the GOCE satellite—An improved sixth release derived with the time-wise approach (GO_CONS_GCF_2_TIM_R6)* [Dataset]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.003

Chen, Q., Shen, Y., Chen, W., Zhang, X., & Hsu, H. (2016). An improved GRACE monthly gravity field solution by modeling the non-conservative acceleration and attitude observation errors. *Journal of Geodesy*, *90*(6), 503-523. https://doi.org/10.1007/s00190-016-0889-6

Chen, Q., Shen, Y., Francis, O., Chen, W., Zhang, X., & Hsu, H. (2018). Tongji-Grace02s and Tongji-Grace02k: High-Precision Static GRACE-Only Global Earth's Gravity Field Models Derived by Refined Data Processing Strategies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *123*(7), 6111-6137. https://doi.org/10.1029/2018JB015641

Chen, Q., Shen, Y., Zhang, X., Hsu, H., Chen, W., Ju, X., & Lou, L. (2015). Monthly gravity field models derived from GRACE Level 1B data using a modified short-arc approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *120*(3), 1804-1819. https://doi.org/10.1002/2014JB011470

Demir, S., Abbak, R. A., & İl, H. T. A. (2018). Global yerpotansiyel modellerin gravimetrik jeoit belirlemeye katkısı. *Geomatik*, *3*(3), 213-224.

Drinkwater, M. R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., & Popescu, A. (2003). VII: Closing Session: GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission. *Space Science Reviews*, *108*(1-2), 419-432. https://doi.org/10.1023/A:1026104216284

ESA. (2009). *GOCE Mission Overview*. Observing the Earth. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/GOCE

Fecher, T., Pail, R., & Gruber, T. (2015). Global gravity field modeling based on GOCE and complementary gravity data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *35*, 120-127. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.10.005

Gatti, A., Reguzzoni, M., Migliaccio, F., & Sansò, F. (2016). Computation and Assessment of the Fifth Release of the GOCE-Only Space-Wise Solution. *Proceedings of the 1st Joint Commission 2 and IGFS Meeting*. 1st Joint Commission 2 and IGFS Meeting, Thessaloníki, Greece.

GFZ. (2000). *CHAMP Mission Overview*. German Research Centre for Geosciences. https://www.gfz-potsdam.de/en/champ/

Harita Genel Müdürlüğü. (2020). *TG20 Türkiye Jeoidi Teknik Raporu*. Harita Genel Müdürlüğü (HGM).

Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. W. H. Freeman and Company.

Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy* (2. bs). Springer Science & Business Media.

ICGEM. (2026). *Table of Models – Long Time Series* [GFZ German Research Centre for Geosciences]. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). https://icgem.gfz.de/tom_longtime

Isik, M. S., Çevikalp, M. R., Erol, B., & Erol, S. (2022). Improvement of GOCE-Based Global Geopotential Models for Gravimetric Geoid Modeling in Turkey. *Geosciences*, *12*(12), 432. https://doi.org/10.3390/geosciences12120432

Kozlu, B., Kuru, B., & Yilmaz, M. (2025). Güncel Global Jeopotansiyel Modellerin Farklı Topografik Özellikler Gösteren Bölgelerde Türkiye Jeoid Modeli-2020 (TG-20)'ye Göre Değerlendirilmesi. *Geomatik*, *10*(3), 351-363.

Kvas, A., Behzadpour, S., Ellmer, M., Klinger, B., Strasser, S., Zehentner, N., & Mayer-Gürr, T. (2019). ITSG-Grace2018: Overview and Evaluation of a New GRACE-Only Gravity Field Time Series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *124*(8), 9332-9344. https://doi.org/10.1029/2019JB017415

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. (1998). *The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96*. https://ntrs.nasa.gov/citations/19980218814

Lu, B., Luo, Z., Zhong, B., Zhou, H., Flechtner, F., Förste, C., Barthelmes, F., & Zhou, R. (2018). The gravity field model IGGT_R1 based on the second invariant of the GOCE gravitational gradient tensor. *Journal of Geodesy*, *92*(5), 561-572. https://doi.org/10.1007/s00190-017-1089-8

Marchenko, A. N., Marchenko, D. A., & Lopushansky, A. N. (2016). Gravity field models derived from the second degree radial derivatives of the GOCE mission: A case study. *Annals of geophysics*, *59*(6), S0649-S0649.

Mayer-Gürr, T., Behzadpur, S., Ellmer, M., Kvas, A., Klinger, B., Strasser, S., & Zehentner, N. (2018). *ITSG-Grace2018—Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE* [Dataset]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/ICGEM.2018.003

NASA. (1998). *EGM96: The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model*. NASA Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS). https://cddis.nasa.gov/926/egm96/contents.html

NASA. (2002). *GRACE Mission Overview*. NASA GRACE Mission. https://grace.jpl.nasa.gov/

NASA & JPL. (2018). *GRACE Follow-On Mission Overview*. NASA GRACE-FO Mission. https://gracefo.jpl.nasa.gov/

NGA. (2008). *Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*. National Geospatial-Intelligence Agency. https://earth-info.nga.mil/

Pail, R., Goiginger, H., Schuh, W. -D., Höck, E., Brockmann, J. M., Fecher, T., Gruber, T., Mayer-Gürr, T., Kusche, J., Jäggi, A., & Rieser, D. (2010). Combined satellite gravity field model *GOCO01S* derived from GOCE and GRACE. *Geophysical Research Letters*, *37*(20), 1-5. https://doi.org/10.1029/2010GL044906

Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *117*(B4), 1-38. https://doi.org/10.1029/2011JB008916

Reigber, Ch., Lühr, H., & Schwintzer, P. (2002). CHAMP mission status. *Advances in Space Research*, *30*(2), 129-134. https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00276-4

Rummel, R., Yi, W., & Stummer, C. (2011). GOCE gravitational gradiometry. *Journal of Geodesy*, *85*(11), 777-790. https://doi.org/10.1007/s00190-011-0500-0

Sansò, F., & Sideris, M. G. (Ed.). (2013). *Geoid Determination: Theory and Methods* (C. 110). Springer Berlin Heidelberg. https://link.springer.com/10.1007/978-3-540-74700-0

Scheinert, M., Ferraccioli, F., Schwabe, J., Bell, R., Studinger, M., Damaske, D., Jokat, W., Aleshkova, N., Jordan, T., Leitchenkov, G., Blankenship, D. D., Damiani, T. M., Young, D., Cochran, J. R., & Richter, T. D. (2016). New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica. *Geophysical Research Letters*, *43*(2), 600-610. https://doi.org/10.1002/2015GL067439

Shang, K., Guo, J., Shum, C. K., Dai, C., & Luo, J. (2015). GRACE time-variable gravity field recovery using an improved energy balance approach. *Geophysical Journal International*, *203*(3), 1773-1786. https://doi.org/10.1093/gji/ggv392

Sneeuw, N. (2000). *A Semi-Analytical Approach to Gravity Field Analysis from Satellite Observations* [Doktora Tezi]. Technische Universität München.

Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. *Science*, *305*(5683), 503-505. https://doi.org/10.1126/science.1099192

Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., & Chambers, D. P. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature climate change*, *9*(5), 358-369.

Torge, W., & Müller, J. (2012). *Geodesy:* De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110250008

Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *103*(B12), 30205-30229. https://doi.org/10.1029/98JB02844

Wu, H., Müller, J., & Brieden, P. (2016). The IfE Global Gravity Field Model from GOCE-Only Observations. *Proceedings of the International Symposium on Gravity, Geoid and Height Systems*, 19-23.

Xu, X., Li, J., Zhao, Y., & Wei, H. (2023). *A GOCE only gravity model GOSG02S based on the SGG and SST observations*. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/ICGEM.2023.002

Xu, X., Zhao, Y., Reubelt, T., & Tenzer, R. (2017). A GOCE only gravity model GOSG01S and the validation of GOCE related satellite gravity models. *Geodesy and Geodynamics*, *8*(4), 260-272. https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.03.013

Yilmaz, N., & Karaali, C. (2010). Comparison of global and local gravimetric geoid models in Turkey. *Scientific research and essays*, *5*(14), 1829-1839.

Zhou, H., Luo, Z., Zhou, Z., Zhong, B., & Hsu, H. (2017). HUST-Grace2016s: A new GRACE static gravity field model derived from a modified dynamic approach over a 13-year observation period. *Advances in Space Research*, *60*(3), 597-611.

Zingerle, P., Brockmann, J. M., Pail, R., Gruber, T., & Willberg, M. (2019). *The polar extended gravity field model TIM_R6e* [Dataset]. GFZ Data Services. https://doi.org/10.5880/ICGEM.2019.005

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Beyza KARA

Doğum Yeri ve Tarihi : Nazilli 10.01.2000

Yabancı Dili : İngilizce

İletişim (Telefon / e-posta) : 05075125515 beyzakara098@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Nazilli Anadolu Lisesi (2014-2017), Özel Nazilli Final Temel Lisesi (2017-2018)

Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, (2018-2022)

Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, (2023-2026)