

Güncel Global Jeopotansiyel Modellerin Farklı Topografik Özellikler Gösteren Bölgelerde Türkiye Jeoid Modeli-2020 (TG-20)' ye Göre Değerlendirilmesi

Bürhan KOZLU¹, Birol KURU², Mustafa YILMAZ³

¹ Uşak Üniversitesi, Sivash Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Uşak, Türkiye

² Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Köprübaşı Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Manisa, Türkiye

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

Kaynak Göster: Kozlu, B., Kuru, B., & Yılmaz, 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.

DOI: 10.29128/geomatik.1627704

Anahtar Kelimeler

Jeoid
Jeopotansiyel Model
Jeoid Ondülasyonu
TG-20

Araştırma Makalesi

Geliş:27.01.2025
Reviz:10.03.2025
Kabul:25.03.2025
Yayınlanma:01.12.2025



Öz

Yerçekimi alanının hassas modellenmesi, jeodezi, jeofizik, mühendislik ve jeodinamik gibi birçok alanda kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle global jeopotansiyel modeller (GGM'ler), uydu bazlı gravite gözlemleri ile yer bazlı gravite ölçümlerini birleştirerek dünya genelinde yerçekimi alanını tanımlamak ve jeoid yüzeyini belirlemek için kullanılmaktadır. Ancak, bu modellerin doğruluğu bölgesel ölçekte değişkenlik gösterebilmekte, topografik ve jeolojik koşullara bağlı olarak farklı model performansları gözlemlenebilmektedir. Dolayısıyla, belirli bir bölge için en uygun GGM'nin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin üç farklı bölgesinde GECO, EIGEN-6C4, EGM2008, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 ve XGM2019e_2159 olmak üzere altı güncel GGM, TG-20 (Türkiye Jeoid Modeli-2020) ile karşılaştırılarak karesel ortalama hata yönünden analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde, TG-20 modeli ile GGM'lerin karşılaştırılmasına yönelik bölgesel ölçekli çalışmalar sınırlıdır. Çalışmanın temel amacı, GGM'lerin TG-20 ile uyumunu inceleyerek enlem-boylam etkisinden bağımsız olarak farklı topografik koşullar altındaki performanslarını değerlendirmektir. Çalışmanın sonuçları, GGM'lerin farklı topografik özelliklere sahip bölgelerde değişen performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, Türkiye özelinde bölgesel model seçiminde, topografyaya bağlı dikkat edilmesi gereken hususları belirlemeye yönelik önemli bulgular sunmaktadır.

Evaluation of Recent Global Geopotential Models in Regions with Different Topographic Features According to Turkey Geoid Model-2020 (TG-20)

Keywords

Geoid
Geopotential model
Geoid undulation
TG-20

Research Article

Received: 27.01.2025
Revised: 10.03.2025
Accepted: 25.03.2025
Published: 01.12.2025

Abstract

Precise modeling of the gravity field plays a critical role in many fields such as geodesy, geophysics, engineering and geodynamics. In particular, global geopotential models (GGMs) are used to define the gravity field and determine the geoid surface worldwide by combining satellite-based gravity observations with ground-based gravity measurements. However, the accuracy of these models may vary at the regional scale, and different model performances may be observed depending on topographic and geological conditions. Therefore, determining the most appropriate GGM for a particular region is of great importance. In this study, six current GGMs, namely GECO, EIGEN-6C4, EGM2008, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2 and XGM2019e_2159, were compared with TG-20 (Turkey Geoid Model-2020) in three different regions of Turkey and analyzed in terms of root mean square error. In the literature, regional scale studies comparing the TG-20 model with GGMs are limited. The main purpose of the study is to evaluate the performance of GGMs under different topographic conditions, independent of latitude-longitude effects, by examining their compatibility with TG-20. The results of the study reveal that GGMs show varying performance in regions with different topographic features. In addition, it provides important findings to determine the issues that need to be taken into consideration in the selection of regional models, specific to Turkey, depending on topography.

1. Giriş

Fiziksel jeodezinin ana amacı, yerin gravite alanını ve bu alanın eşpotansiyel yüzeylerinden biri olan jeoidi tespit etmektir. Jeoid, her noktasında çekül doğrultusuna dik olan ve ortalama deniz seviyesiyle örtüştüğü varsayılan eşpotansiyel değere sahip noktaların oluşturduğu kapalı bir yüzey olarak tanımlanır. Fiziksel yeryüzünde meydana gelen değişikliklerin, özellikle mühendislik uygulamaları açısından büyük önem taşıyan su hareketlerinin izlenebilmesi ve yükseklik sistemlerinde kullanılacak ideal bir referans yüzeyinin oluşturulabilmesi, ancak jeoidin doğru bir şekilde tanımlanmasıyla mümkün olur (İl ve ark., 2018; Turgut, 1996).

Jeoid yüzeyi, topografik yükseklikleri veya okyanus derinliklerini tespit etmek için bir referans yüzeyi görevi görür (Yılmaz ve Kuru, 2019). Jeodezik uygulamalarda yüksek doğruluk elde etmek için yerçekimi alanı gibi parametre bilgilerinin bilinmesi gerekir (Tusat ve Ozyuksel, 2018). Yeni uydu gravite anomalilerinden meydana gelen bilgiler, yer gravite alanının belirlenmesini büyük ölçüde geliştirmiştir, öyle ki yerçekimi alanını temsil eden global jeopotansiyel modeller (GGM'ler) tüm yer bilimlari için büyük önem kazanmıştır (Yılmaz ve ark., 2016).

Uydu ölçme teknikleri ve hesaplama algoritmalarındaki teknolojik ve bilimsel gelişmeler, küresel gravite alan modellerinin belirlenmesinde önemli ölçüde gelişmeler sağlamaktadır. CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve GOCE (The Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) uydularının görevlerinin başlatılmasından bu yana çok sayıda GGM kullanılabilir hale gelmiştir (Konukseven ve ark., 2022; Yılmaz, 2023).

Yeryüzünün gravite alanı, küresel ölçekte CHAMP, GRACE ve GOCE uyduları aracılığıyla, bölgesel olarak astrojeodetik, altimetre ve gravimetrik gibi farklı yöntemlerle havadan, denizden ve yeryüzünden toplanan gravite ölçümleriyle belirlenebilir. Yeryuvarının tamamına yayılan homojen gravite gözlemleri kullanılarak GGM'ler oluşturulur. Literatür incelendiğinde, 160'dan fazla modelin mevcut olduğu görülmektedir (Azmin ve ark., 2024; Demir ve ark., 2018).

Kamuya açık olan bu GGM'ler ICGEM (Uluslararası Küresel Yer Modelleri Merkezi) aracılığıyla bilim camiasının kullanımına açılmıştır (Ince ve ark., 2019; Yılmaz, 2023).

Özellikle NGA (Ulusal Jeodezi Ajansı) (Pavlis ve ark., 2008) tarafından yayınlanan EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) ve GFZ (Geo Forschungs Zentrum) Postdam-GRGS (Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale) Toulouse işbirliği (Förste ve ark., 2014) tarafından yeni tekniklerle yayınlanan EIGEN-6C4 (European Improved Gravity model of the Earth by New techniques – 6C4) ve (Gillardoni ve ark., 2016) tarafından yayınlanan GECO (GOCE-EGM2008 Combined Model) modelleri ortalama yerçekimi alanının doğru bir şekilde belirlenmesinde önemli başarılar sağlamaktadır.

Jeodezi alanında çalışan bilim insanları, GGM'leri geliştirmek ve değerlendirmek için çeşitli teknikleri ve bağımsız veri kaynaklarını kullanarak GGM'lerin karşılaştırılması ve doğrulanması için kapsamlı çalışmalar gerçekleştirmiştir (Doğanalp, 2022). Yerel jeoid modellerinin iyileştirilmesi için, incelenen alana en uygun GGM'nin seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Mphuthi, 2025; Yılmaz ve Kozlu, 2018).

GGM'lerde yersel gravite alanı ölçümlerinin etkisi son derece önemlidir. Bu nedenle, modelden türetilen gravite anomalisi, jeoid yüksekliği gibi değerlerin hassasiyetleri bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir. GGM'ler üç ana kategoride incelenebilir:

- Yalnızca yapay uydu verileri kullanılarak hesaplanan modeller,
- Yapay uydu verilerinin yersel gravite, uydu altimetre ve hava gravite (airborne gravimetry) verileri ile birleştirilerek hesaplanan modeller,
- Birinci ya da ikinci gruba giren modellerin, belirli bölgelerdeki yerel gravite verileri kullanılarak iyileştirilmesiyle elde edilen modeller (Al Shouny ve ark., 2023; Erdem ve Demirel, 2022; Erol ve ark., 2008; Yılmaz ve Çakır, 2025).

GGM'lerin oluşturulması sırasında küresel veri dağılımının yetersizliği ve veri doğruluğunun düşük olması gibi faktörler, modellerin doğruluğunu olumsuz etkileyen temel nedenlerdir. Model doğruluğu, parametre kestirim değerlerinin analizi veya GGM'lerden elde edilen gravite anomalisi ve jeoid yüksekliği gibi değerler, bölgesel yersel gravite alanı ölçümleri ile karşılaştırılarak test edilebilir (Gökçe, 2018).

Literatür incelendiğinde Türkiye jeoid modelleri ile GGM'lerin karşılaştırıldığı çalışmalardan bazıları; Turgut ve ark. (2002) yaptıkları çalışmada WGS84 datumunda enlem, boylam ve elipsoid yüksekliği bilinen noktaların jeoid ondülasyonunu, EGM96 jeopotansiyel modeli ve Türkiye Mutlak Jeoidi TG99'a göre hesaplamışlardır. Hesaplanan ondülasyon değerlerini GPS/Nivelman ile elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır.

Kiliçoğlu ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada EGM2008 modeli ile TG03 Türkiye jeoid modelini tüm Türkiye genelinde karşılaştırmışlardır.

Erol ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada TG03 modeli ile EIGEN-CG03C, EIGEN-GL04C, EGM96, EIGEN-CH03S, GGM02S GGM'lerini Türkiye genelinde karşılaştırmışlardır.

Kurt ve Güngörmez (2023) ise yaptıkları çalışmada Türkiye genelinde TG-20'den türetilen jeoid yükseklikleri ile EGM2008 modelinden hesaplanan yükseklikleri karşılaştırarak, iki model arasındaki farkları gözlemlenmişlerdir. EGM2008'in TG-20'den çıkarılmasıyla hesaplanan Jeoid yükseklik farklarını gözlenen değerler olarak alıp, Jeoid yüksekliklerinin EGM2008 modelinden TG-20 modeline dönüştürülmesi için bir polinomsal yüzey modeli geliştirmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında, yukarıda belirtilen GGM'lerden yüksek dereceli ve güncel olan EGM2008, EIGEN-6C4, GECO, SGG-UGM-1, SGG-UGM-2, XGM2019e_2159 modelleri kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, farklı topografik özelliklere sahip Türkiye'nin 2°×2°'lık üç farklı bölgesinde GGM'lerin TG-20'e göre performanslarını karşılaştırarak, GGM seçiminde topografyanın etkisini analiz etmektir. Literatürde, TG-

20 jeoid modeli ile GGM'lerin bölgesel ölçekte detaylı bir karşılaştırmasının eksik olduğu görülmektedir. Çalışma, Türkiye'nin farklı topografik özellikler gösteren bölgelerinde GGM'lerin performanslarını detaylı bir şekilde analiz ederek, jeoid belirleme çalışmalarına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2. Yöntem

2.1 Jeoid Belirlemede Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri

Enterpolasyon, matematiğin sayısal analiz alanında yer alan ve bilinen veri noktalarından hareketle, bilinmeyen bir noktadaki değeri tahmin etmeye yönelik bir yöntem olarak tanımlanır. Genellikle mühendislik ve benzeri bilim dallarında, elde edilen verilerin bir fonksiyon eğrisine dönüştürülmesinde kullanılır. Özellikle veriler arasındaki boşluklar, ağırlıklı ortalama, polinom, kuadratik ya da lineer vb. enterpolasyon yöntemleri ile hesaplanabilir. Enterpolasyon ile elde edilen sonuçların gerçek değerlerle tam olarak örtüşmesi beklenir, ancak pratikte bu her zaman mümkün olmaz. Bir alandaki en uygun enterpolasyon, gerçek değere en yakın sonucu veren yöntemdir. Enterpolasyon problemlerinde, tüm bölgeyi kapsayan tek bir fonksiyonla enterpolasyon, yerel olarak tanımlanan parça parça fonksiyonlarla enterpolasyon ve noktasal enterpolasyon olmak üzere üç farklı yaklaşım bulunmaktadır. Jeoid belirlemede enterpolasyon işlemleri, çeşitli yöntemler ve tekniklerle uygulanabilir (Çiftçi, 2019; King ve ark., 1985; Kirici Yıldırım ve ark., 2023; Simith ve ark., 2007; Yılmaz ve Kuru, 2019).

Kuru (2018), jeoid belirlemede kullanılan enterpolasyon yöntemlerini karşılaştırmak amacıyla gerçekleştirdiği çalışmada, makro ve mikro ölçekteki 2 test ağında lokal jeoid modeli belirlerken Ters Mesafe ile Ağırlıklı (TMA) enterpolasyon metodu, Kriging (KRG) enterpolasyon metodu, En Küçük Eğrilik (EKE) enterpolasyon metodu, Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF) ile enterpolasyon metodu ve Geliştirilmiş Shepard (GSH) enterpolasyon metodlarını kullanarak en doğru sonucu veren enterpolasyon yönteminin belirlenmesini hedeflemiştir. Çalışma bulgularına göre makro ölçekteki test bölgesinde GSH yöntemi, mikro ölçekteki test bölgesinde EKE yöntemi en başarılı sonuçları vermiştir.

Bu çalışmada, Kuru (2018) çalışma sonuçları dikkate alınarak KRG, TMA, EKE, RBF ve GSH enterpolasyon yöntemleriyle elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre en iyi sonucu tüm çalışma bölgelerinde KRG enterpolasyon yöntemi verdiği için çalışmadaki analizler KRG enterpolasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.2 Global Jeopotansiyel Modellerin Karşılaştırılması

Çalışma alanı içerisinde jeoid yükseklik hesabı için kullanılan GGM'ler özelliklerine göre Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Değerlendirme için kullanılan GGM'ler (S: Uydu, G: Gravite, A: Altimetre, T: Topografya)

Model	Yıl	Derece	Veri
EGM2008	2008	2190	S(GRACE), G, A
EIGEN-6C4	2014	2190	S(GOCE, GRACE, LAGEOS), G, A
GECO	2015	2190	S(Goce), EGM2008
XGM2019e_2159	2019	2190	A, G, S(GOCC06S), T
SGG-UGM-1	2018	2159	EGM2008, S(Goce)
SGG-UGM-2	2020	2190	A, EGM2008, S(Goce), S(Grace)

GGM performanslarının değerlendirilmesi, TG-20 jeoid modelinden elde edilen jeoid yüksekliklerinden GGM'lerden elde edilen jeoid yüksekliklerinin farkları analiz edilerek Eşitlik 1'e göre hesaplanır.

$$\Delta N = N_{TG-20} - N_{GGM} \quad (1)$$

Jeoid yükseklik farklarının istatistiksel analizi için, ΔN 'nin minimum ve maksimum değerleri belirlenir ve GGM'lerin genel performansı, Karesel ortalama hata Eşitlik 2 ile hesaplanır:

$$KOH = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta N)^2} \quad (2)$$

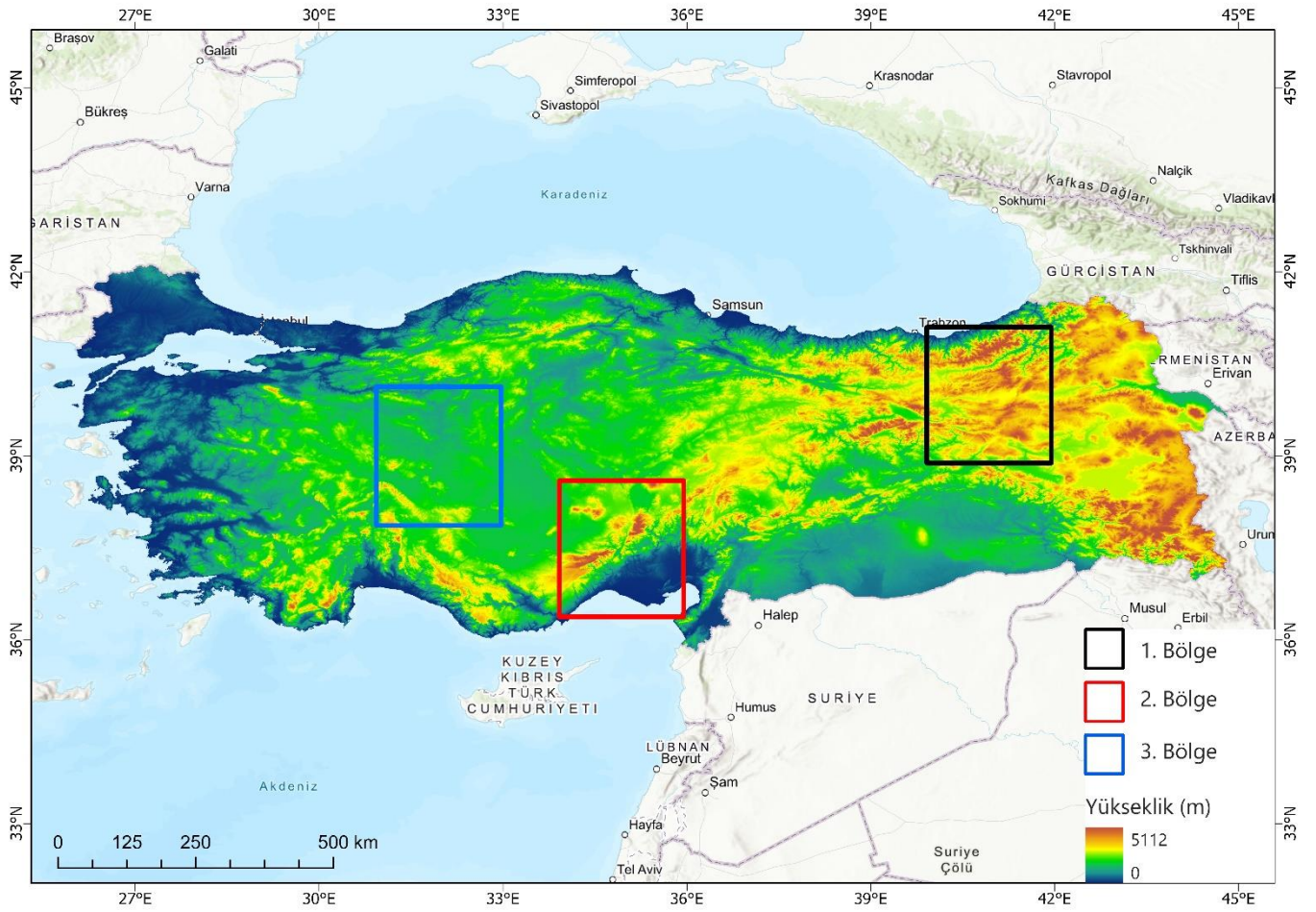
Burada n , kullanılan nokta sayısını ifade etmektedir.

3. Çalışma Alanı ve Kaynak Veriler

3.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Türkiye'de farklı topografik özellikler gösteren $2^\circ \times 2''$ lik üç çalışma bölgesi seçilmiş ve Şekil 1' de gösterilmiştir.

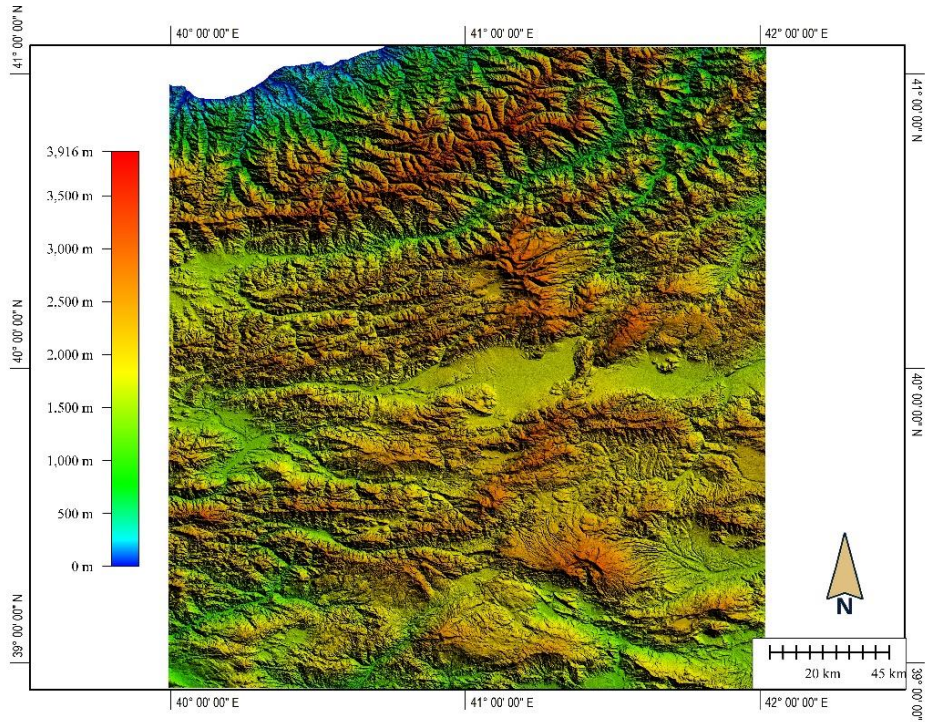
Seçilen GGM'lerin enlem(φ)-boylam(λ) etkisinden bağımsız olarak sadece topografik yapıya bağlı performanslarının karşılaştırılması amacıyla, Şekil 2'de birinci bölge arazi yükseklik değerlerinin fazla olduğu dağlık topografya, Şekil 3'de ikinci bölge arazi yükseklik değerlerinin geçişli olduğu dalgalı topografya ve Şekil 4'de üçüncü bölge ise arazi yükseklik değerlerinin düşük olduğu daha düzlük bir topografya olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Çalışma Bölgeleri

1. Bölge : $39^{\circ} K < \varphi < 41^{\circ} K$, $40^{\circ} D < \lambda < 42^{\circ} D$

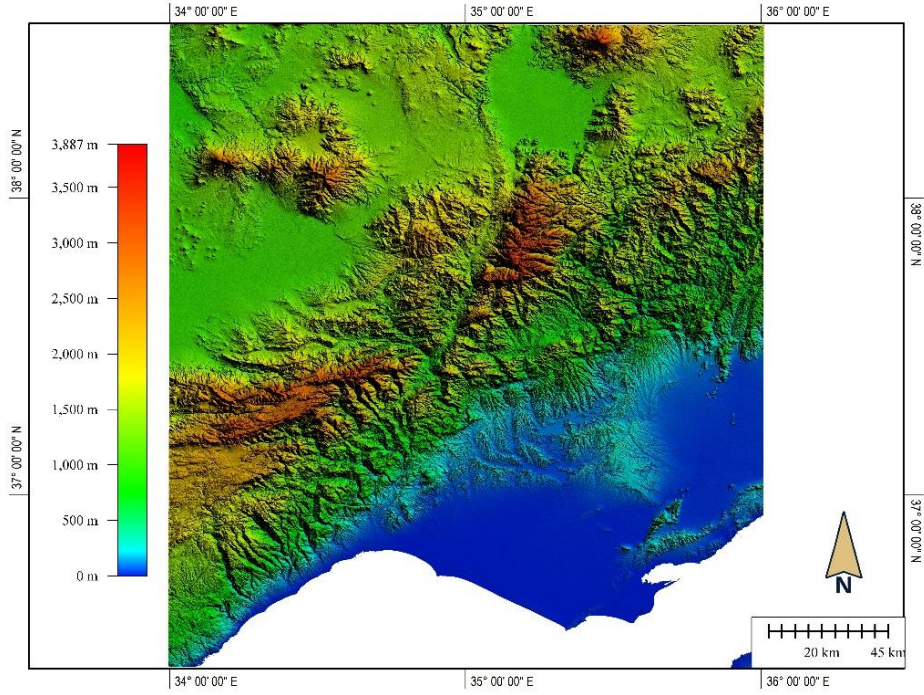
Bu bölge, Kuzeydoğu Anadolu'da, Doğu Karadeniz ve Doğu Anadolu geçiş hattında yer almaktadır. Dağlık ve engebeli bir araziye sahip olan bölgede başlıca yükselti arasında Doğu Karadeniz Dağları ve Çoruh Vadisi bulunur.



Şekil 2. 1. Çalışma Bölgesi Topografik Haritası

2. Bölge : $36.5^{\circ} K < \varphi < 38.5^{\circ} K$, $34^{\circ} D < \lambda < 36^{\circ} D$

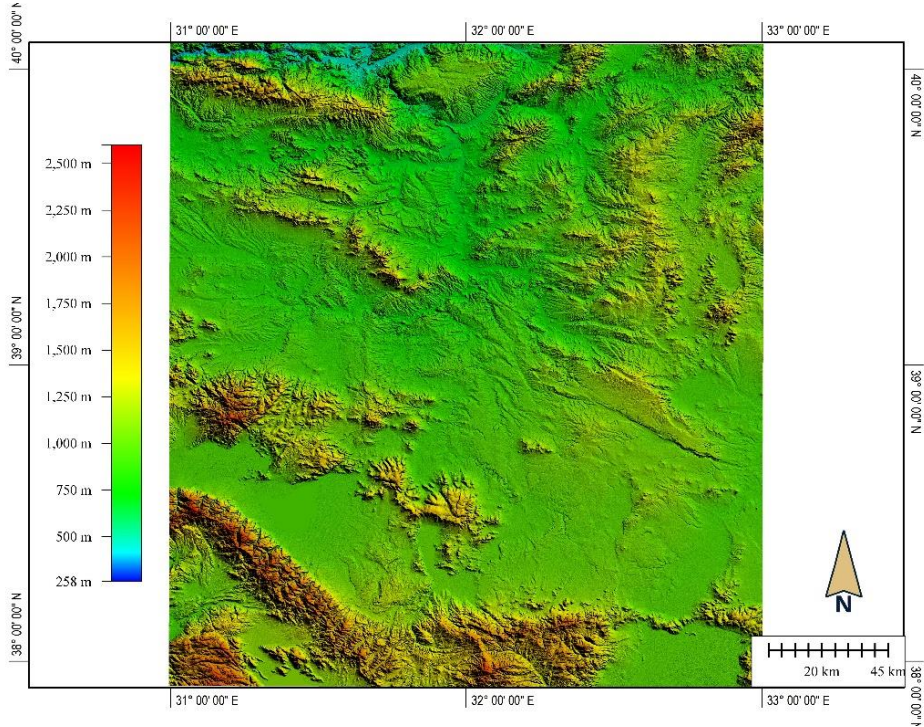
Bu bölge, İç Anadolu'nun güneyi ve Akdeniz Bölgesi'nin kuzeyi arasında bir geçiş bölgesidir. Toros Dağları'nın kuzeye bakan yamaçları bu alanda yer alır. Bölgenin batısında yüksek dağlık alanlar, doğusunda ise plato karakteristiği görülür.



Şekil 3. 2. Çalışma Bölgesi Topografik Haritası

3. Bölge : $38^{\circ} K < \varphi < 40^{\circ} K$, $31^{\circ} D < \lambda < 33^{\circ} D$

Bu bölge, İç Batı Anadolu'da yer almaktadır. Orta yükseklikte platolar ve vadilerle karakterizedir.



Şekil 4. 3. Çalışma Bölgesi Topografik Haritası

3.2. Kaynak Veriler

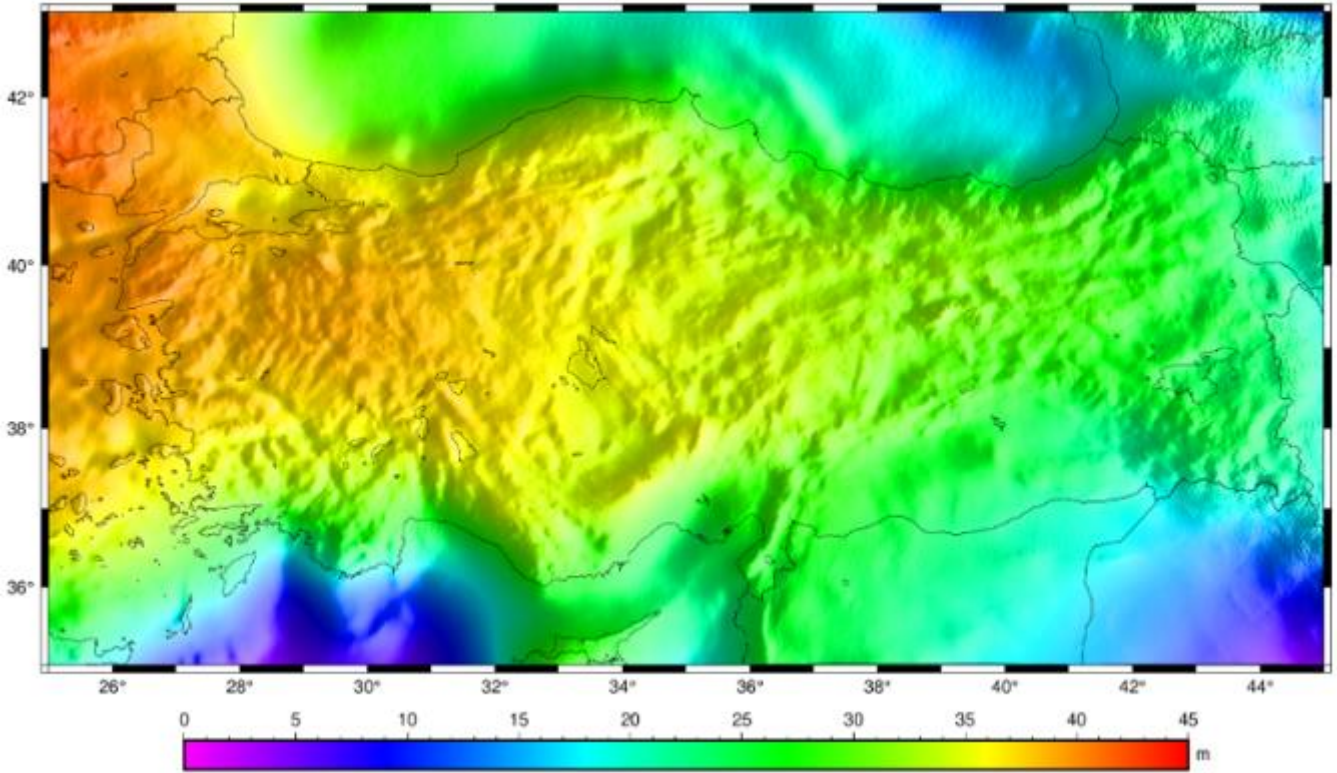
Çalışma kapsamında iki kaynak veri seti kullanılmıştır. Veri setlerinden birincisi ICGEM (URL-2) hesaplama servisinde elde edilen GGM verileri iken, ikinci veri seti GGM performanslarını karşılaştırmak amacıyla kullanılan TG-20 model verileri Harita Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (URL-1).

3.2.1 Türkiye Jeoid Modeli-2020 (TG-20)

TG-20, Harita Genel Müdürlüğü'nün koordinatörlüğünde yürütülen "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi (2015-2020)" kapsamında geliştirilmiştir. TG-20, 35°K-43°K ve 25°D-45°D arasındaki bölgeyi kapsayan ve Türkiye ile çevresi için geçerli olan resmi jeoid modelidir. TG-20 hibrit bir model olup, modelin hesaplamalarında yaklaşık 265.000 kara gravite verisi, GOCO06S GGM ve 7.2 yay saniyesi çözünürlüğe sahip SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) V4.1 sayısal yükseklik modeli kullanılmıştır. Çevre denizlerimizdeki gravite veri eksiklikleri, XGM2019e GGM kullanılarak giderilmiştir. Hesaplamalar, LSMS-GEOLAB yazılımı kullanılarak

Stokes Fonksiyonunun En Küçük Karelerle (EKK) Modifikasyonu – İlave Düzeltmeler (LSMSA) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (Simav ve ark., 2021; URL-1)

TG-20 gravimetrik modelinin mevcut yükseklik sistemine dönüşümü, Türkiye genelinde homojen şekilde dağılmış 182 GPS (Global Positioning System) /Nivelman noktası kullanılarak 4 parametrelili bir dönüşümle yapılmıştır. 4 parametrelili dönüşüm, bir koordinat sisteminden başka bir koordinat sistemine dönüşüm yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu dönüşümde, verilerin iki farklı referans sistemine (örneğin, eski bir jeoid modelinden yeni bir modele) uyumlu hale getirilmesi için dört parametre kullanılır. TG-20'nin hibrit modeline geçiş sürecinde, eski GPS verilerinin yeni modele uyumlu hale getirilmesi amacıyla bu dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Bu dönüşüm, eski verilerin, yeni gravimetrik jeoid modeline uygun şekilde hizalanmasını ve doğruluğun artırılmasını sağlar. Modelin mutlak doğruluğu, Türkiye genelinde jeoid eğiminin hızlı değiştiği bölgelerde yer alan 7 farklı test profilinde eş zamanlı olarak toplanan 278 GPS/Nivelman noktasında test edilmiştir. Farkların standart sapması birçok test profilinde 2 cm'nin altındadır (URL-1; Yıldız ve ark., 2021).



Şekil 5. Türkiye Jeoid Modeli -2020(TG-20)

3.2.2 Global Jeopotansiyel Modeller

Bilim ve mühendisliğin farklı alanlarında, yörünge ve yükseklik sistemlerinin daha iyi belirlenmesi için, yerçekimi alanı hakkındaki bilgimizi hem doğruluk hem de çözünürlük açısından önemli ölçüde geliştirmek gereklidir (Rummel ve ark., 2002). GGM'ler yerin gravite alanını ve jeoid yüzeyini küresel olarak temsil etmek için küresel harmonik seriler kullanır. Bu seriler, Laplace denkleminin çözümü olan küresel harmonik fonksiyonlarla ifade edilir ve Legendre polinomları ile modellenir. Bu fonksiyonların derecesi ve sırası, modelin çözünürlüğünü ve detay seviyesini belirler. GGM'lerde derece, sıra ve model çözünürlüğü, modelin yerçekimi alanını ne kadar ayrıntılı temsil edebildiğini belirleyen temel kavramlardır (Kosarev ve ark., 2025).

Gravite alanının uzun dalga boyu kısmı, tamamen normalleştirilmiş, küresel harmonik katsayılarından oluşan GGM'ler tarafından belirlenir (Mainville ve ark., 1992). Küresel harmonik katsayılar, Dünya'nın kütleçekim potansiyelinin matematiksel bir modelle temsil edilmesi için kullanılan katsayılardır. Küresel harmonik katsayılar, uydu izleme verileri, yersel-havadan yerçekimi verileri ve uydu altimetrisi birleştirilerek jeopotansiyel çözümlerden elde edilir (Rapp, 1997). Eşitlik 3'te Jeoid yüksekliği (N), küresel harmonik katsayılarla elde edilebilir (Heiskanen ve Moritz, 1967):

$$N(\theta, \lambda) \approx R \sum_{l=2}^{l_{max}} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin \theta) [\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda] \quad (3)$$

Burada (θ, λ) hesaplama noktasının ortak enlemi ve boylamı, R ortalama yer yarıçapı, $\bar{P}_{lm}$ ilgili Legendre polinomları, $\bar{C}_{lm}$ ve $\bar{S}_{lm}$ sırasıyla l derecesi ve m sırası için küresel harmonik katsayılarıdır.

3.2.2.1 EGM2008 Modeli

EGM2008, 2159 derece ve sırasına kadar tanımlanan, ilave küresel harmonik katsayılarla 2190 dereceye ve 2159 sırasına kadar uzanan, yerçekimi alanının küresel bir harmonik modelidir. Model, ITG-GRACE03S yerçekimi modeli ve onun hata kovaryans matrisi ile serbest hava gravite anomali (free-air gravity anomalies) verilerinin EKK yöntemi ile birleştirilmesiyle oluşturulmuş ve elipsoid harmoniklerde 2160 derece ve sırada geliştirilip küresel harmoniklere dönüştürülmüştür. EGM2008 modeli, aşağıdaki veri kaynaklarının EKK yöntemi kullanılarak birleştirilmesiyle oluşturulmuştur:

- GRACE uydusundan elde edilen uzun dalga boylu yerçekimi verileri.
- Yersel gravite verileri (Jeodezik ve gravimetrik ölçümler)
- Altimetrik veriler (Okyanus üzerindeki deniz seviyesi yükseklikleri)
- Hava gravite verileri (Hava araçları ile toplanan yerçekimi ölçümleri)

EGM2008'in spektral içeriği, yalnızca daha düşük çözünürlüklü gravite verilerinin olduğu alanlarda topografya ile belirtilen yerçekimi bilgileri tarafından

sağlanmaktadır (Pavlis ve ark., 2012). Türkiye toprakları için ulusal jeoid modeli, Türkiye Hibrit Jeoid 2009 (THG-09) EGM2008'e bağlı olarak hesaplanmıştır (Kiliçoğlu ve ark., 2011).

3.2.2.2 EIGEN-6C4 Modeli

LAGEOS, GRACE, GOCE uydu verilerinden oluşan EIGEN-6C4, 2190 derece ve sırasına kadar olan birleşik küresel gravite alan modelidir. GFZ Potsdam ve GRGS Toulouse tarafından ortaklaşa geliştirilmiştir. Aşağıdaki verileri içerir;

- LAGEOS (2-30 derece): 1985 - 2010
- GRACE RL03 GRGS (2-130 derece): 2003-2012
- GOCE-SGG verileri (2009-2013)
- DTU12 okyanus jeoid verileri ile kıtalarda EGM2008 jeoid verileri.

Farklı uydu ve yüzey veri setleri, küresel harmonik katsayılar için gözlem denklemlerinden oluşturulan, bant sınırlı normal denklemlerle (maksimum derece 370'e kadar) birleştirilmiştir. Derece ve sıra 370'e kadar elde edilen model, DTU10 küresel gravite anomali veri seti kullanılarak bir köşegen blok çözümüyle derece ve sıra 2190'a genişletilmiştir (Förste ve ark., 2014).

3.2.2.3 GECO Modeli

EGM2008 jeopotansiyel modeline yalnızca GOCE'ye özel TIM-R5 çözümünün dâhil edilmesiyle hesaplanan küresel yerçekimi modelidir. GECO'nun girdi verileri:

- EGM2008 modelinin küresel jeoid hata standart sapmaları (5'x5' çözünürlüklü),
- GOCE TIM-R5'in küresel harmonik katsayıları,
- EGM2008 küresel harmonik katsayıları ve hata standart sapmaları,
- GOCE TIM-R5'in blok diyagonal katsayı hata kovaryans matrisini içerisinde bulundurmaktadır.

EGM2008 jeoid dalgalanmaları, 359 dereceye kadar olan EGM2008 katsayılarının birleştirilmesiyle, 0.5° x 0.5° çözünürlüğe sahip küresel bir grid üzerinde hesaplanmıştır. Aynı grid üzerindeki GOCE jeoidi ise, TIM-R5 katsayıları 250 dereceye kadar birleştirilerek hesaplanmıştır. İki jeoid gridi, EKK yöntemiyle birleştirilmiştir. Son olarak, birleştirilmiş küresel jeoid gridinin analiz edilmesiyle GECO küresel harmonik katsayıları elde edilmiştir. Analiz, 359 dereceye kadar (0.5° x 0.5° çözünürlüğe uygun olarak) gerçekleştirilmiştir. 360 dereceden 2190 dereceye kadar GECO katsayıları, EGM2008 ile aynıdır. GECO katsayı hataları, EGM2008 ve TIM-R5 çözümünün katsayı hatalarının ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanmıştır (Gilardoni ve ark., 2016).

3.2.2.4 XGM2019e_2159 Modeli

XGM2019e_2159, 2' (~4 km) çözünürlüğe karşılık gelen, 5399 derece ve sırasına kadar küresel harmoniklerle temsil edilen birleşik bir küresel yerçekimi alanı modelidir. XGM2019e_2159 üç ana veri kaynağından oluşur:

- GOCO06s uydu yerçekimi alanı modeli,

- NGA tarafından sağlanan 15' yer çekimi anomalisi veri seti,
- Okyanuslar ve topografya üzerindeki altimetre ölçümlerinden türetilen yerçekimi anomalilerinden oluşan 1' veri seti

XGM2019e_2159 modelinin oluşturulmasında iki aşama bulunmaktadır; İlk olarak, GOCO06s modeli ile 15' yersel gravite veri seti birleştirilmiştir. Bunun sonucunda 719 derece ve sırasına sahip bir model oluşturulmuştur, bu model XGM2019 olarak adlandırılmıştır. Çünkü bu model, mantıksal olarak XGM serisi yer gravite alanı modellerinin bir devamıdır. İkinci aşamada ise XGM2019 modeline daha detaylı yerçekimi verileri ve topografik verilerde eklenerek XGM2019e_2159 modeli oluşturulmuştur (Zingerle ve ark., 2020).

3.2.2.5 SGG-UGM- 1 Modeli

SGG-UGM-1, EGM2008'den türetilmiş gravite anomalileri ve GOCE uydusunun verilerini kullanarak oluşturulmuş statik bir yerçekimi alanı modelidir. Veri kaynakları:

- EGM2008 Türetilmiş Gravite Anomalileri: EGM2008 modeli, yersel gözlemler, uydu altimetresi ve RTM (Residual Terrain Model) ileri modelleme ile elde edilen gravite anomalilerini içerir.
- GOCE Verileri: GOCE uydusunun gravite gradyometresi (SGG) ve uydudan uyduya izleme (SST)

SST gözlemleri kullanılarak, yüksek çözünürlükte yerçekimi verileri elde edilmiştir. SGG-UGM-1, Wuhan Üniversitesi tarafından geliştirilmiş ve ICGEM tarafından yayımlanmıştır. SGG-UGM-1 modeli, 2159 derece ve sıraya kadar olan küresel harmonik katsayıları içerir (Liang ve ark., 2018).

3.2.2.6 SGG-UGM- 2 Modeli

SGG-UGM-2 modeli, SGG-UGM-1 modelinin geliştirilmiş versiyonudur. Yer gravite alanını daha yüksek doğrulukla temsil etmeyi amaçlar. Bu model, EGM2008 ve GOCE verilerinin yanı sıra altimetre gibi yeni eklemeler ve iyileştirmeler içermektedir. SGG-UGM-2 modeli, 2190 derece ve sıraya kadar küresel harmonik katsayılarını içerir. Bu yüksek derece ve sıra, modelin yerçekimi alanındaki ince detayları bile yüksek çözünürlükte temsil etmesini sağlar. Veri kaynakları:

- EGM2008 Türetilmiş Gravite Anomalileri: EGM2008, yersel gözlemler, uydu altimetresi ve RTM ileri modelleme ile elde edilen gravite anomalilerini içerir.
- GOCE Verileri: GOCE uydusunun SGG ve SST gözlemleri kullanılarak elde edilen yüksek çözünürlükte yerçekimi verileri.
- GRACE Verileri: GRACE verileri de modelin doğruluğunu artırmak için kullanılmıştır (Liang ve ark., 2020).

4. Bulgular

Değerlendirme sürecinde, ICGEM web sitesinde bulunan hesaplama servisi kullanılarak çalışma bölgelerinin sınır değerleri her bir model için girilmiş, 5'lık grid aralığı belirlenmiş ve her bir modelden elde edilen jeoid yüksekliği değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacıyla TG-20 Jeoid modelinin 5'lık versiyonu kullanılmıştır. Gridleme sonucunda üç bölge için ayrı ayrı elde edilen 675 test noktasına ait jeoid yükseklik değerleri, TG-20 Jeoid modeli kullanılarak Surfer yazılımı aracılığıyla hesaplanmıştır. TG-20 modelinden elde edilen jeoid yükseklik değerleri ile modellerden elde edilen jeoid yükseklik değerleri arasındaki farklar hesaplanmış ve analiz sonuçları Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 2. 1. çalışma bölgesi jeoid yüksekliği değerlerinin analizi (birim m.)

Jeoid Yüksekliği	Min.	Maks.	Ort.	KOH
$N_{EGM2008}$	0,1252	1,2150	0,6739	0,1515
$N_{EIGEN-6C4}$	0,1991	1,2061	0,7421	0,1686
N_{GECO}	0,1453	1,3181	0,7387	0,2157
$N_{XGM2019e}$	0,2153	1,3095	0,7567	0,1940
$N_{SGG-UGM-1}$	0,2013	1,1260	0,7408	0,1607
$N_{SGG-UGM-2}$	0,2650	1,1828	0,7463	0,1532

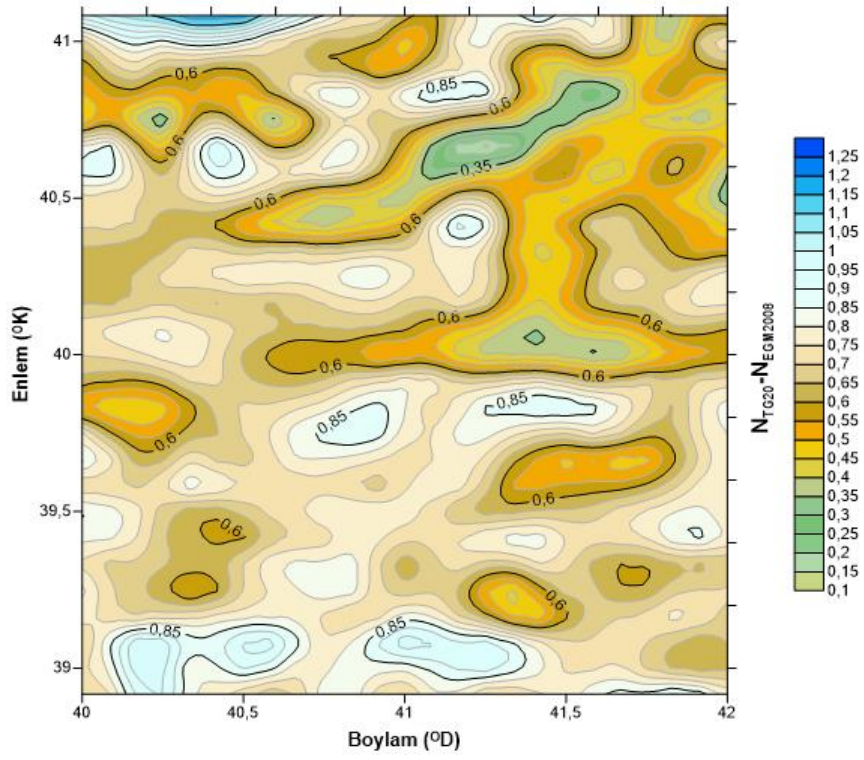
Tablo 3. 2. çalışma bölgesi jeoid yüksekliği değerlerinin analizi (birim m.)

Jeoid Yüksekliği	Min.	Maks.	Ort.	KOH
$N_{EGM2008}$	-0,1318	1,0143	0,5576	0,2392
$N_{EIGEN-6C4}$	-0,1390	1,0900	0,5691	0,2579
N_{GECO}	-0,1333	1,0720	0,5713	0,2658
$N_{XGM2019e}$	-0,1627	1,1352	0,5645	0,2671
$N_{SGG-UGM-1}$	-0,1125	1,1056	0,5708	0,2518
$N_{SGG-UGM-2}$	-0,1171	1,1006	0,5686	0,2529

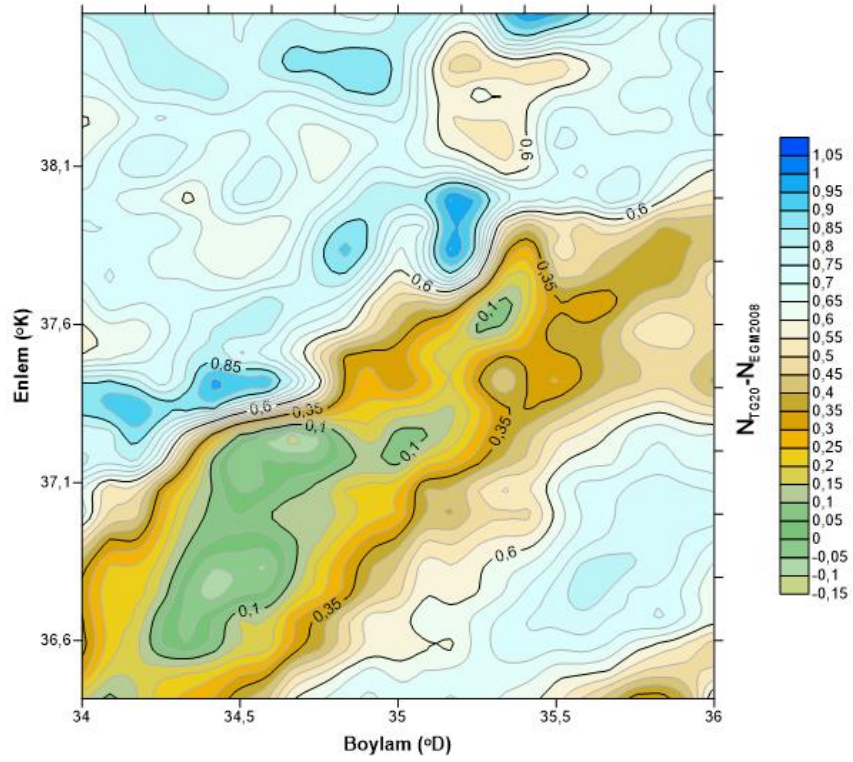
Tablo 4. 3. çalışma bölgesi jeoid yüksekliği değerlerinin analizi (birim m.)

Jeoid Yüksekliği	Min.	Maks.	Ort.	KOH
$N_{EGM2008}$	0,5565	1,0667	0,8180	0,0814
$N_{EIGEN-6C4}$	0,5036	1,0605	0,7523	0,0734
N_{GECO}	0,4885	1,0293	0,7528	0,0848
$N_{XGM2019e}$	0,5094	1,0223	0,7576	0,0700
$N_{SGG-UGM-1}$	0,5271	1,0278	0,7605	0,0697
$N_{SGG-UGM-2}$	0,2650	1,0376	0,7541	0,0690

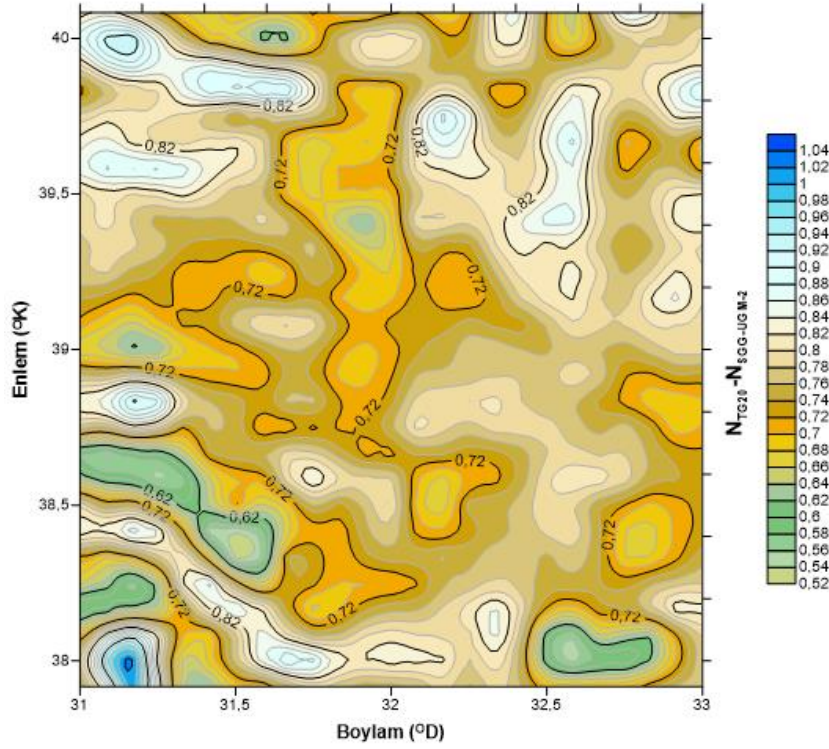
Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4'deki bulgulara göre çalışma bölgelerinde en iyi performans gösteren GGM'ler sırasıyla EGM2008, EGM2008, SGG-UGM-2'dir. En iyi performansı gösteren GGM'lerden elde edilen jeoid yükseklik değerleriyle TG-20 modelinden elde edilen jeoid yükseklik değerleri arasındaki farklara göre oluşturulan haritalar, Surfer® 13 programı kullanılarak üretilmiş ve Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 1. Çalışma bölgesi TG-20 - EGM2008 fark haritası(m)



Şekil 7. 2. Çalışma bölgesi TG-20 - EGM2008 fark haritası(m)



Şekil 8. 3. Çalışma bölgesi TG-20 - SGG-UGM-2 fark haritası(m)

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, Türkiye'nin farklı topografik özelliklere sahip $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 'lık üç farklı çalışma bölgesinde, güncel altı GGM'nin jeoid hesaplama performanslarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Jeoid yüksekliğine ilişkin bulgular incelendiğinde, yüksekliğin fazla olduğu 1. Bölge'de en iyi performansı EGM2008 modeli en kötü performansı GECO modeli, yükseklik farklarının fazla olduğu dalgalı geçiş olarak ön görülen 2. Bölge'de en iyi performansı EGM2008 modeli en kötü performansı XGM2019e_2159 modeli, yüksekliğin az olduğu daha düzlük arazilerin yer aldığı 3. Bölge'de ise en iyi performansı SGG-UGM-2 modelinin en kötü performansı GECO modelinin gösterdiği gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, topografik özellikleri değişkenlik gösteren bölgelerde farklı jeopotansiyel modellerin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Modellerde kullanılan altimetre verileri, okyanus yüzeyi veya kara üzerindeki yerçekimi değişimlerini belirlemek için kullanılan uydu tabanlı ölçümlerdir. Ancak Doğu Karadeniz'deki yüksek ağaçlar, altimetre sinyallerinin toprak yüzeyi yerine orman örtüsünden yansımaya neden olabilir. Bu durum, ağaç yüksekliğinin yer yüzeyi gibi algılanmasına ve hatalı yükseklik ölçümlerine yol açabilir. Özellikle yoğun ormanlık alanlarda altimetre sinyalleri yüzeyin gerçek yüksekliğinden daha yukarıdan yansır, bu da yerçekimi modelinde yanlış yükseklik değerleri oluşturabilir. Özellikle Doğu Karadeniz gibi yoğun bitki örtüsüne sahip bu bölgelerde, GGM modelleri altimetre verilerine dayalı gravite hesaplamalarında hata payını artırabilir. Altimetre verilerini kullanan GGM'ler altimetre verilerini kullanmalarına rağmen, Doğu Karadeniz gibi yoğun bitki örtüsüne sahip bölgelerde doğrudan hatalı sonuç üretmez. Bunun nedeni, modellerin yalnızca altimetreye dayanmayıp, farklı veri

kaynaklarını birleştirerek hataları minimize etmesidir. Altimetre verileri modellerde yer alsa da, modellerin kara alanlarındaki yerçekimi hesaplamaları yalnızca altimetreye bağlı değildir. Örneğin, Doğu Karadeniz gibi yoğun bitki örtüsüne ve engebeli topografyaya sahip bölgelerde, EGM2008 modeli olası hataları düzeltmek için ek veri setleri kullanır. Altimetre verileri doğrudan kara alanlarında kullanılmaz, çünkü bu bölgelerde ağaçlardan ve topografik engellerden kaynaklanan hatalar oluşabilir. EGM2008, kara alanlarında yersel gravite verileri ve topografik modellerle (örneğin SRTM) bu hataları düzeltir. Bu düzeltmeler sayesinde, ormanlık ve dağlık alanlardaki ölçüm hataları en aza indirilmeye çalışılır. Benzer şekilde altimetre verileri kullanılan diğer modellerde de karasal alanlarda yersel gravite verileri ve topografik modellerle hatalar düzeltilir ve bu sebeple sonuçlara doğrudan etki etmez. Altimetre verileri, esas olarak okyanuslar ve büyük su kütleleri üzerindeki yerçekimi anomalilerini belirlemek için kullanılır (Yıldız, 2012). Sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

1. Bölge: $39^{\circ} K < \varphi < 41^{\circ} K$, $40^{\circ} D < \lambda < 42^{\circ} D$

En İyi Performans Gösteren Model: EGM2008

Bu bölge, Kuzeydoğu Anadolu ile Doğu Karadeniz geçiş hattını kapsayan ve oldukça engebeli bir topografyaya sahip olan bir alanı içermektedir. Jeoid hesaplamaları açısından bu tür topografik alanlar, modellerin doğruluğunun test edilmesi için kritik öneme sahiptir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, bu bölge için EGM2008 modelinin TG-20 ile en iyi uyumu sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun temel sebepleri, EGM2008'in yüksek çözünürlüklü yersel gravite verilerini içermesi ve diğer modellerin aksine, EGM2008'in deniz-kara geçiş bölgelerindeki yerçekimi değişimlerini daha iyi temsil etmesi olabilir. Özellikle uzun dalga boylu gravite

sinyallerinin modellenmesinde başarı sağladığı bilinmektedir (Zeray Öztürk, 2015).

2. Bölge: $36.5^{\circ} K < \varphi < 38.5^{\circ} K$, $34^{\circ} D < \lambda < 36^{\circ} D$

En İyi Performans Gösteren Model: EGM2008

İç Anadolu'nun güneyi ve Toros Dağları'nın kuzeyini kapsayan bu bölge, nispeten daha düşük rakımlı ovalarla birlikte yer yer yükseltilerin görüldüğü bir yapıya sahiptir. Bu bölge, İç Anadolu'nun güneyi ve Akdeniz Bölgesi'nin kuzeyi arasında bir geçiş bölgesidir. Çalışma sonuçları, bu bölgede de EGM2008 modelinin en iyi performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. EGM2008'in içerdiği yüksek çözünürlüklü yersel gravite verileri ve geniş veri setleri sayesinde bölgedeki gravite değişimlerini iyi bir şekilde temsil ettiği değerlendirilmektedir.

3. Bölge: $38^{\circ} K < \varphi < 40^{\circ} K$, $31^{\circ} D < \lambda < 33^{\circ} D$

En İyi Performans Gösteren Model: SGG-UGM-2

Bu bölge, İç Batı Anadolu'da yer almakta olup, genel olarak plato ve vadilerden oluşan bir topografyaya sahiptir ve yükseklik değişimleri orta seviyededir. Bu bölgede yapılan jeoid hesaplamalarında en iyi performansı SGG-UGM-2 modeli vermiştir. Bu modelin, GOCE ve GRACE uydu verilerini daha güncel bir şekilde değerlendirmesi nedeniyle, özellikle gravite alanındaki küçük ölçekli değişimlere daha duyarlı olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma, Türkiye'nin farklı topografik özelliklere sahip üç bölgesinde GGM'lerin jeoid hesaplama performanslarını karşılaştırarak önemli bulgular elde etmiştir. EGM2008 ve SGG-UGM-2 modellerinin bölgesel performansları, her bir modelin belirli coğrafi ve topografik koşullarda üstünlük sağlayıp sağlamadığını göstermektedir. Genel olarak elde edilen bulgular, GGM performanslarının topografyaya bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. EGM2008 modeli, geniş çaplı yersel veri içeriği sayesinde büyük ölçekte başarılı sonuçlar vermeye devam etmektedir. Ancak, SGG-UGM-2 gibi daha yeni modellerin, topografyaya bağlı olarak bazı alanlarda daha iyi bölgesel sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yeni uydu misyonlarından elde edilen verilerin model doğruluğuna sağladığı katkıyı açıkça ortaya koymaktadır.

Ayrıca Doğanalp (2022) çalışmasında güncel yedi GGM'nin performanslarını incelemiş ve en iyi modeli Auvergne test alanında belirlemiştir. Genel olarak, tüm hesaplamalarda EGM2008, XGM2019e ve SGG-UGM-2 modellerinin en iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir. Carrión ve ark. (2023) çalışmasında ekvator bölgesinde güncel GGM'lerden elde edilen jeoid yükseklik değerleri ile GNNS(Global Navigation Satellite Systems)/ Nivelman verilerinden elde edilen jeoid yüksekliklerini karşılaştırmış ve en iyi performans gösteren modelin XGM2019e olduğu sonucuna varmıştır. Al Shouny ve ark. (2023) çalışmasında Mısır'ın Akdeniz ve Kızıldeniz kıyılarındaki alanlarda çeşitli GGM'lerin doğruluğunu değerlendirmeyi amaçlamışlardır. GGM'lerden elde edilen jeoid yükseklik değerleri ile GNNS/Nivelman verilerinden elde edilen jeoid yükseklik değerlerini karşılaştırmış ve Kızıldeniz kıyılarındaki bölge için XGM2019e_2159 modelinin en iyi performans gösterdiğini analiz etmiştir.

Bu sonuçlar, bölgesel jeoid hesaplamaları ve yerçekimi modellemelerinde kullanılan GGM seçiminin, çalışma alanının topografik özelliklerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Enlem-boylam etkisi ve bitki örtüsü de dikkate alınarak oluşturulacak farklı çalışma alanlarında, daha fazla sayıda ve uygun dağılımlı veri ve model kombinasyonları kullanarak gerçekleştirilecek çalışmaların, GGM'lerin performanslarını belirlemeye ve iyileştirmeye yönelik önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir.

Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan TG-20 Jeoid verilerini bizimle paylaşan Harita Genel Müdürlüğüne ve Global Jeopotansiyel modelleri kullanıcılar ile paylaşan ICGEM'e katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Araştırmacıların katkı oranı

Bürhan Kozlu: Analiz, Düzenleme, Metin Yazımı, **Bırol Kuru:** Düzenleme, Metin Yazımı, **Mustafa Yılmaz:** Revizyon, Düzenleme, Yorumlama.

Çatışma Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynakça

- Al Shouny, A., Khalil, R., Kamel, A., & Miky, Y. (2023). Assessments of recent Global Geopotential Models based on GPS/levelling and gravity data along coastal zones of Egypt. *Open Geosciences*, 15(1), 20220450. <https://doi.org/10.1515/geo-2022-0450>
- Azmin, N. S. H. N., Pa'suya, M. F., Din, A. H. M., Aziz, M. A. C., & Othman, N. A. (2024). Evaluating the Impact of the Recent Combined and Satellite-Only Global Geopotential Model on the Gravimetric Geoid Model. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1316, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- Carrión, J., Flores, F., Rodríguez, F., & Pozo, M. (2023). Global Geopotential Models assessment in Ecuador based on geoid heights and geopotential values. *Journal of Geodetic Science*, 13(1), 20220165. <https://doi.org/10.1515/jogs-2022-0165>
- Çiftçi, M. (2019). Lokal jeoit belirlemede kullanılan çeşitli enterpolasyon yöntemlerinin farklı alanlardaki uygulamalarının karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demir, S., Abbak, R. A., & İl, H. T. A. (2018). Global Yerpotansiyel Modellerin Gravimetrik Jeoit Belirlemeye Katkısı. *Geomatik*, 3(3), 213-224. <https://doi.org/10.29128/geomatik.403776>
- Doğanalp, S. (2022). Assessment of recent global geopotential models based on the Auvergne test area data. *Engineering Research Express*, 4(4), 045017.
- Erdem, N., & Demirel, A. (2022). The Current State of Use of Satellite-Based Positioning Systems in Turkey. *Advanced Geomatics*, 2(1), 23-29.
- Erol, B., Çelik, R. N., & Sideris, M. G. (2008). Güncel global potansiyel modellerin yersel veriler ile test edilmesi. *İTÜ Dergisi/d*, 7(6), 47- 58.

- Erol, B., Sideris, M. G., & Çelik, R. N. (2009). Comparison of global geopotential models from the champ and grace missions for regional geoid modelling in Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 53, 419-441.
- Förste, C., Bruinsma, S. L., Abrikosov, O., Lemoine, J. M., Marty, J. C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., & Biancale, R. (2014). EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Postdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services. <http://dx.doi.org/10.5880/icgem.2015.1>
- Gilardoni, M., Reguzzoni, M., & Sampietro, D. (2016). GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 228-247. <https://doi.org/10.1007/s11200-015-1114-4>
- Gökçe, G. (2018). Türkiye için güncel jeopotansiyel modellerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical Geodesy*. W.H. Freeman, San Francisco.
- Ince, E. S., Reißland, S., & Barthelmes, F. (2019). International Centre for Global Earth Models (ICGEM).
- İl, H. T. A., Abbak, R. A., Bildirici, İ. Ö., & Demir, S. (2018). SRTM1 ve ASTER Sayısal Yükseklik Modellerinin Gravimetrik Jeoit Belirlemeye Katkısı. *Geomatik*, 3(3), 203-212. <https://doi.org/10.29128/geomatik.402331>
- Kiliçoğlu, A., Direnç, A., Simav, M., Lenk, O., Aktuğ, B., & Yıldız, H. (2009). Evaluation of the earth gravitational model 2008 in Turkey. *Newton's Bulletin*, 4, 164-171.
- Kiliçoğlu, A., Direnç, A., Yıldız, H., Bölme, M., Aktuğ, B., Simav, M., & Lenk, O. (2011). Regional gravimetric quasi-geoid model and transformation surface to national height system for Turkey (THG-09). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 55, 557-578. <https://doi.org/10.1007/s11200-010-9023-z>
- King, R., Master, E.G., Rizos, C., Stolz, A., Coolins, J. (1985). *Surveying with Global Positioning System*, Bonn, Germany.
- Kirici Yildirim, U., Dilmac, H., & Sisman, Y. (2023). The Outlier Detection with Robust Methods: Least Absolute Value and Least Trimmed Square. *Advanced Geomatics*, 3(1), 28-32.
- Konukseven, C., Öğütçü, S. ., & Alçay, S. . (2022). GNSS Frequency Availability Analysis. *Advanced Geomatics*, 2(1), 14-16.
- Kosarev, N., Goldobin, D., Sermiagin, R., Kemberbayev, N. & Sholomitskii, A. (2025). Evaluation of the high-degree global gravity field models in the territory of Kazakhstan, 10 (1), 14-21. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1485621>
- Kurt, Orhan & Güngörmez, Özhan. (2023). A Polynomial Correction Based on TG20 Grid Values to Compute Geoid Heights on Turkey better with EGM08.
- Kuru, B. (2018). Lokal Jeoid Belirlemede Kullanılan Enterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Liang, W., Xu, X., Li, J., & Zhu, G. (2018). The Determination of an Ultra-high Gravity Field Model SGG-UGM-1 by Combining EGM2008 Gravity Anomaly and GOCE Observation Data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(4): 425-434. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170269.
- Liang, W., Li, J., Xu, X., Zhang, S., & Zhao, Y. (2020). A high-resolution Earth's gravity field model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008. *Engineering*, 6(8), 860-878. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008>
- Mainville, A., Forsberg, R., & Sideris, M. G. (1992). Global positioning system testing of geoids computed from geopotential model and local gravity data: a case study. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B7), 11137-11147. <https://doi.org/10.1029/92JB00352>.
- Mphuthi, M. S. (2025). Evaluation of recent Global Geopotential Models over South Africa. *South African Journal of Geomatics*, 14(1), 57-68. <https://dx.doi.org/10.4314/sajg.v14i1.5>
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., & Factor, J. K. (2008). An earth gravitational model to degree 2160:EGM2008. General Assembly of the European Geosciences Union, 13-18 April, Vienna, Austria.
- 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*, 117, B04406. <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>.
- Rapp, R. H. (1997). Past and future developments in geopotential modelling, in: Forsberg, R, Feissl, M., Dietrich, R. (Eds.) *Geodesy on the Move*, Springer, Berlin, pp. 58-78.
- Rummel, R., Balmino, G., Johannessen, J., Visser, P., & Woodworth, P. (2002). Dedicated gravity field missions-principles and aims. *Journal of Geodynamics*, 33, 3-20. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(01\)00050-3](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(01)00050-3)
- Simav, M., Akpınar, İ., Akdoğan, Y.A. ve Yıldız, H. (2021). Türkiye'de Güncel Yersel Gravimetri Çalışmaları. *Harita Dergisi*, 166, 10-24.
- Smith, M.J., Goodchild, M.F., Longley. P.A. (2007). *Geospatial Analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. 2. edition, USA.
- Turgut, B. (1996). *Fiziksel Jeodezi Ders Notları*. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Konya.
- Turgut, B., İnal, C., & Yiğit, C. Ö. (2002). EGM96 Jeopotansiyel Modeli, TG99 Türkiye Jeoidi Ve Gps/Nivelman ile Elde Edilen Jeoit Ondüasyonlarının Karşılaştırılması, Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, Konya.
- Tusat, E., & Ozyuksel, F. (2018). Comparison of GPS satellite coordinates computed from broadcast and IGS final ephemerides. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 3(1), 12-19. <https://doi.org/10.26833/ijeg.337806>
- URL-1: <https://www.harita.gov.tr/jeo/tg20.php>
Erişim tarihi: 17 Şubat 2025
- URL-2: <https://icgem.gfz-potsdam.de/home>
Erişim tarihi: 17 Şubat 2025

- Yıldız, H. (2012). Yükseklik Modernizasyonu Yaklaşımı: Türkiye İçin Bir İnceleme. *Harita Dergisi*, 147, 1-12.
- Yılmaz, M., & Kozlu, B. (2018). The Comparison of gravity anomalies based on recent high-degree global models. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 981-990. DOI: 10.5578/fmbd.67502
- Yılmaz, M., & Kuru, B. (2019). Makro ve mikro ölçekteki lokal jeoid tespiti için enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması. *Geomatik*, 4(1), 41-48. <https://doi.org/10.29128/geomatik.465050>
- Yılmaz, N. (2023). Assessment of latest global gravity field models by GNSS/Levelling Geoid. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2), 111-118. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1070042>
- Yıldız, H., Simav, M., Sezen, E., Akpınar, I., Akdoğan, Y. A., Cingöz, A., & Akabali, O. A. (2021). Determination and validation of the Turkish Geoid Model-2020 (TG-20). *Bull. Geophys. Oceanogr*, 62, 495-512.
- Yılmaz, M., Turgut, B., Gullu, M., Yılmaz, İ. (2016). Evaluation of recent global geopotential models by GNSS/levelling data: Internal Aegean region. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 1(1), 18-23. <https://doi.org/10.26833/ijeg.285221>
- Yılmaz, N., & Çakır, L. (2025). Contribution of the global geopotential models on gravimetric geoid determination: a case study of Colorado, USA. *Survey Review*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/00396265.2025.2452795>
- Zeray Öztürk, E. (2015). EGM2008 modelinin SRTM sayısal yükseklik modeline katkısının araştırılması: Türkiye örneği. Yüksek Lisans Tezi. Konya Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7). <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>



© Author(s) 2025. This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>