

Düşey gravite gradyentinin yersel ve global değişiminin izlenmesi: Sümela Manastırı örneği

Observation of local and global changes of vertical gravity gradient: the case of Sumela Monastery

Mehmet TÜTÜNCÜ^{*1}, Nazan YILMAZ²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Kelkit Aydın Doğan Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, 29100, Gümüşhane

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 27.02.2025

• Kabul tarihi / Accepted: 12.04.2025

Öz

Düşey gravite gradyenti (DGG) topoğrafyada ölçülen gravitenin jeoide indirgenmesi için önemlidir. DGG'nin ölçümünün zor olması, uzun zaman almasından dolayı çalışmalarda genellikle global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG değerleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Trabzon Sümela Manastırı çevresinde sarp ve dağlık bir güzergahta eş zamanlı olarak 115 noktada yapılan gravite ölçüleri ile hassas nivelman ölçüleri yardımıyla yersel olarak DGG değerleri belirlenmiştir. Çalışma sahasında aynı zamanda GNSS ölçüleri de yapılarak global yerpotansiyel modeller (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019) yardımıyla global DGG değerleri hesaplanmıştır. Yersel ölçülerden elde edilen DGG değerleri ile global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG değerleri karşılaştırılmıştır ve yersel DGG değerlerinin yükseklikle değişimi lineer ve kuadratik (non-lineer) denklemlerle ifade edilmiştir. Karşılaştırılan DGG büyüklük farklarına ait minimum, maksimum, ortalama ve karesel ortalama hata değerleri (KOH) hesaplanmıştır. DGG farklarına ait en küçük KOH değerine göre yersel ölçülere en iyi uyum sağlayan global yerpotansiyel modelin ITU_GGC16 olduğu tespit edilmiştir. İstatistiksel sonuçlar incelendiğinde, global yerpotansiyel modeller yerine yeryüzünde doğrudan ölçülen düşey gravite gradyenti değerlerinin kullanılmasının gerekliliği bir daha ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Düşey gravite gradyenti, Gravite, Global yerpotansiyel model

Abstract

The vertical gravity gradient (VGG) is crucial for reducing gravity values measured on the topography to the geoid. Due to the difficulty and time-consuming nature of VGG measurements, values derived from global geopotential models are commonly used in practical studies. In this study, terrestrial VGG values were determined based on gravity observations conducted simultaneously at 115 stations, along with precise leveling measurements, along a steep and mountainous route in the vicinity of the Sumela Monastery in Trabzon, Türkiye. In addition, GNSS observations were carried out in the study area, and global VGG values were computed using various global geopotential models (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019). The terrestrial VGG values were then compared with the model-derived values, and the variation of the terrestrial VGG with height was modeled using both linear and quadratic (non-linear) equations. The minimum, maximum, mean, and root mean square error (RMSE) values of the differences between terrestrial and model-based VGG values were calculated. Based on the lowest RMSE among the compared models, the ITU_GGC16 model was found to provide the best agreement with the terrestrial measurements. When the statistical information was analyzed, it was observed that using directly measured vertical gravity gradient values on the ground instead of global geopotential models gave better results.

Keywords: Vertical gravity gradient, Gravity, Global geopotential model

*Mehmet TÜTÜNCÜ; mehmettutuncu@gumushane.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Günümüzde jeodezik, jeofizik ve jeolojik amaçlarla gravite alanına bağlı gravite ölçüleri yapılmaktadır. Fiziksel yeryüzünün gravite alanını tespit etmek için üç farklı ölçme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler yersel yöntem, hava gravimetrisi ve uzaysal yöntemlerdir. Fiziksel yeryüzündeki bir noktanın gravite değerinin μGal biriminde belirlenebilmesi için yapılan ölçmeler yersel yöntem olarak isimlendirilir. Yersel yöntemler mutlak gravimetrik yöntem ve bağıl gravimetrik yöntem olmak üzere iki kısımda incelenir. Mutlak gravimetrik yöntemde nokta gravite değeri doğrudan bulunur. Bağıl gravimetrik yöntemde ise bir bölgedeki birden fazla noktaya ait gravite değerlerindeki değişimler belirlenir. Bağıl gravimetrik yöntemde sadece zaman veya sadece uzunluk ölçülerek iki nokta arasındaki gravite değerlerinin farkı belirlenir. Düşey gravite gradyanı, mutlak/bağıl gravite ölçüm sürecinde ve gravite ölçüm sonuçlarını aletin referans yüksekliğinden kıyas noktasına indirmek için gravimetrik ve nivelman ağlarının kurulmasında önemlidir. Temel jeodezi görevlerinden biri, ortalama deniz seviyesi yüzeyi ile çakışan eşpotansiyel yüzeyi temsil eden jeoidin belirlenmesidir. Bu anlamda gravitenin belirlenmesi ve gravite ölçülerinin jeodezik ölçütler seviyesine indirgenmesi jeodezinin önemli faaliyetler arasındadır. Gravite değerinin jeoide indirgenmesi için gravite gradyent değerinin bilinmesi gerekir. Düşey gravite gradyenti (DGG), yükseklikle gravitenin korelasyonunu temsil etmektedir (Simav vd., 2021). Farklı yüksekliklerdeki gravite farklarının yüksekliğe oranı ile DGG hesaplanır (Odalovic vd., 2022). Yerkabuğunun altındaki katmanlarda yoğunluk anomalileri, lokal ve bölgesel topografyanın etkisi nedeniyle, düşey gradyentin gerçek değeri normal gravite değerinden önemli ölçüde farklı olabilir. DGG, bir noktanın yalnızca yüksekliğiyle değil aynı zamanda noktanın etrafındaki topografya ve jeolojisiyle değişmektedir (Hunt vd., 2002).

DGG'nin modellenmesine ilişkin çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Rocky Dağları'nda yapılan bir araştırmada, jeoid modellemesi için ortalama gravite gradyentini belirlemek amacıyla aşağı uzanım tekniği kullanılmıştır (Vaníček vd., 2002). Macaristan'ın Cegled bölgesinde ise gravite gradyent verilerine dayanarak bir jeoid modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmada, normal gradyent değerleri yerine modellenmiş gradyentlerin kullanılmasının gravite alanı modellemesini daha da iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. (Völgyesi, 2001). Macaristan'da 3 farklı gravite ölçer kullanarak farklı yükseklikte 3-4 seri gravite ölçüsü yapılarak düşey gradyentin doğrusal olmayışı araştırılmıştır. Düşey gradyent değerini, lineer ve kuadratik yaklaşımlarla dengeleyerek belirlemişler, ardından farklı yaklaşım sonuçlarını karşılaştırmışlardır (Csapo & Völgyesi, 2004). Macaristan'ın Sósút kentinde, Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve prizma entegrasyonu yöntemi kullanılarak DGG değerleri hesaplanmıştır. (Rózsa & Tóth, 2005).

Kanada'daki Rocky Dağları'nda yapılan bir çalışmada, gravite indirgemesi için ortalama gravite gradyenti kullanılmıştır. Araştırmada, topoğrafyadaki kütle yoğunluğu dağılımının, yeryuvarının şeklinin ve gravite gradyentinin derinlikle değişiminin ortalama gravite gradyentine etkisi incelenmiştir. Çekül eğrisi boyunca topoğrafyadaki ortalama gravite gradyent değeri bir eşitlik yardımıyla ifade edilmiştir (Tenzer & Ellmann, 2009). Polonya'da yapılan bir çalışmada, özellikle dağlık bölgelerde, mutlak gravite indirgemesinde normal DGG'nin kullanılmasının, 1 metre için $100 \mu\text{Gal}$ 'i aşan hatalara yol açtığı tespit edilmiştir. (Dykowski, 2012). İspanya'da bulunan Tenerife adasında çözünürlüğü yüksek SYM kullanılarak düşey gravite gradyent değerleri elde edilmiştir (Marušiak vd., 2013). Çalışmada, modellenen değerlerin normal değerlere göre %60'a kadar farklılık gösterebildiği belirlenmiştir. Özellikle volkanik alanlardaki mikrogravimetrik ölçümlerde, modellenen değerlerin kullanılmasının önemli olduğu vurgulanmıştır. Düşey gravite gradyenti modellemesi için Toposk adlı bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım, topoğrafyanın etkisini normal düşey gravite gradyentine ekleyerek ilgili noktadaki DGG değerini hesaplamıştır. İtalya'da Teide volkanı çevresinde yapılan bir çalışmada modellenen ve ölçülen DGG değerleri arasında düz alanlarda uyumlu sonuçlar elde edilirken dik topoğrafyalarda daha uyumsuz sonuçlar elde edilmiştir (Zahorec vd., 2016). Slovenya ve Sırbistan'da yapılan çalışmada yerçekimi ölçümleri ya da global yerpotansiyel modeller gibi ek veriler kullanılmadan, yalnızca normal yerçekimi alanı ve dijital arazi modelleri kullanılarak düşey yerçekimi gradyanının modellenebileceği gösterilmiştir. Düşey gradyan değerleri ile ölçüm sonuçları arasındaki farkların, kullanılan arazi modelinin çözünürlüğüne bağlı olarak değiştiği, yüksek çözünürlüklü modellerle çok daha hassas sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Odalovic vd., 2022). İtalya'da Teide volkanı çevresinde yapılan başka bir çalışmada DGG ölçümleri gerçekleştirilmiş ölçülemeyen noktalarda sabit bir normal gradyan değeri ($-308.6 \mu\text{Gal/m}$) kullanılmakta ancak bu durum özellikle dağlık ve volkanik alanlarda %90'a kadar hatalara yol açtığı görülmüştür. Bunun için topografik etkilerin modellenmesine dayalı yerel VGG tahmini yöntemi önerilmiştir (Zahorec vd., 2024).

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Karadeniz Bölgesinde bulunan Sümela Manastırı çevresinde dağlık ve sarp bir topoğrafyada eş zamanlı olarak bağıl gravimetrik ölçümler, hassas nivelman ölçümleri ve GNSS ölçümleri yapılarak DGG tespit edilmiştir. DGG değerlerinin yükseklikle değişimi irdelenmiştir. Ayrıca global yerpotansiyel modeller (EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019) kullanılarak elde edilen sonuçlarla yeryüzündeki gravimetrik ölçümlerden elde edilen DGG değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiş ve istatistiksel değerleri sunulmuştur. Test bölgesi yaklaşık 1 km uzunluğunda olup 210 metre bir yükseklik değişimine sahip çok dik bir topografyadır. Bu özelliği sebebiyle seçilen bu test bölgesi böylesi bir çalışma için ender rastlanacak bir alandır.

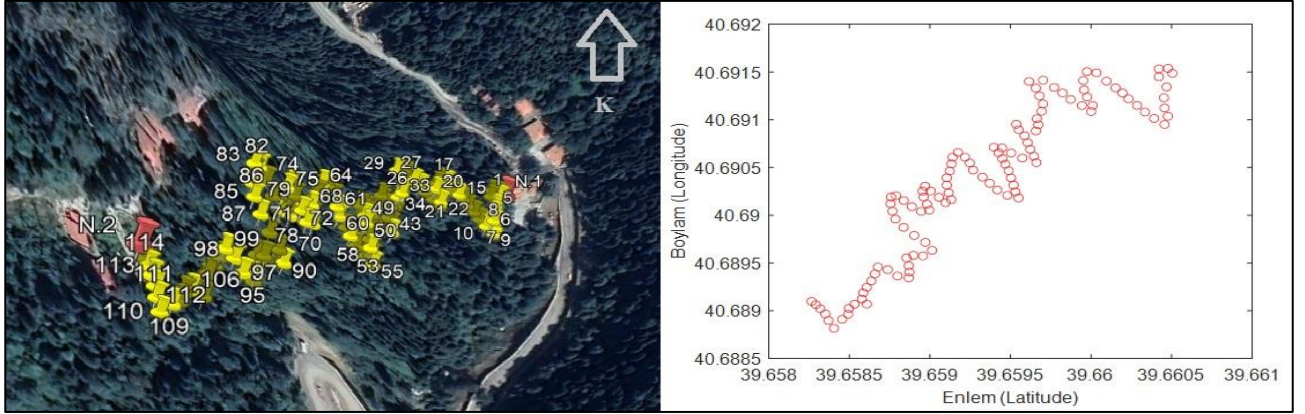
2. Materyal

2. Material

2.1. Çalışma alanı

2.1. Study area

Bu çalışmada kullanılan gravite ve Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS)/Nivelman ölçümlerinin tamamı, Trabzon ili Maçka ilçesi Sümela Manastırı çevresinde belirlenen bir güzergâhta gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı sarp ve dağlık bir topoğrafyaya sahip olup güzergâh uzunluğu yaklaşık 1 km ve ortalama yüksekliği 1200 m'dir. Ölçü güzergâhına ait Google Earth görüntüsü ve ölçü güzergâhı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ölçü Güzergahı

Figure 1. Measurement Route

2.2. Arazi ölçümleri

2.2. Land measurements

Tüm ölçümler $40^{\circ}41'7412 < \varphi < 40^{\circ}41'5368''$ enlem ve $39^{\circ}39'6172 < \lambda < 39^{\circ}39'9044''$ boylam değerlerini kuşatan bir bölgede 2023 yılının Ekim ayında toplanmıştır. Kullanılan ölçüm cihazları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Arazide kullanılan cihazlar (a) Bağıl gravimetre (b) Nivo (c) GNSS RTK alıcı

Figure 2. Equipment used in the field (a) levelling instrument (b) relative gravimetre (c) GNSS RTK receiver

2.2.1. Hassas nivelman ölçüleri

2.2.1. Precision levelling measurements

Şekil-1’de gösterilen güzergâh boyunca hassas nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiş ve noktaların ortometrik yükseklikleri belirlenmiştir. Nivelman ölçüleri Topcon DL-501 dijital nivo ile yapılmıştır (Şekil-2b). Miranın düşey konumda ve zemine sağlam şekilde yerleştirilmesini sağlayan, ölçüm doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artıran mira altlığı kullanılmıştır. Hassas nivelman çalışmalarında ölçü doğruluğunu artırmak ve sistematik hataları minimize etmek amacıyla geri, ileri, ileri, geri (GIIG) ölçü yöntemi uygulanmıştır. Önce 1. miraya geri, sonra 2. miraya ileri, ileri daha sonra 1. miraya tekrar geri okuma yapılmıştır. Böylece, miradaki bölme hatası, mira eğikliği ve gözlemci kaynaklı okuma sapmaları gibi sistematik hatalar karşılıklı olarak dengelenmiştir. Ölçümler sırasında cihaz, geri ve ileri mira arasına eşit mesafelerde olmasına dikkat edilmiştir. Bu yöntem, özellikle milimetre mertebesinde doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarda tercih edilmekte olup, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır. Her noktaya üç okuma yapıp ölçümlerin ortalaması alınmış ve ölçüm noktası arasındaki yükseklik farkı hesaplanmıştır. Kullanılan cihazın hassasiyeti yatayda ± 10 mm düşeyde ± 1 mm’dir.

2.2.2. Gravite ölçüleri

2.2.2. Gravity measurements

Şekil-1’de verilen güzergâh boyunca noktalar arasındaki bağıl gravite değerleri belirlenerek noktalara ait mutlak gravite değerleri hesaplanmıştır. Gravite ölçümleri kalibre edilmiş Scintrex CG-5 gravimetreyle ölçülmüştür (Şekil-2b). Gravite verilerinin kalitesinin sağlanması amacıyla ölçüm sürecinde kapsamlı bir kontrol mekanizması uygulanmıştır. Bu kapsamda, her ölçüm noktasında tekrarlı ölçümler alınarak cihazın ölçüm tekrarlanabilirliği test edilmiş, gün başı ve gün sonu yapılan referans ölçümleri ile cihazın günlük sürüklenme (drift) değeri belirlenmiş ve tüm ölçümlere drift düzeltmesi uygulanmıştır. Ölçüm zamanlarının UTC sistemine uygun biçimde kaydedilmesiyle birlikte, cihaz tarafından otomatik olarak gelgit düzeltmeleri (tidal corrections) gerçekleştirilmiştir. Her noktada gravimetre 3 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Her dakika için kaydedilen son değer, 60 saniyelik ölçümlerin ortalaması olarak alınmıştır. Geleneksel yerçekimi gradyan birimi, Eötvös birimi olarak adlandırılır ($1(E)Eötvös=10^{-9}sn^{-2} = 0.1 \mu gal/m$) (Hunt vd., 2002).

2.2.3. GNSS ölçüleri

2.2.3. GNSS measurements

Güzergahtaki noktaların koordinatları CHCNAV i93 Visual IMU-RTK GNSS yardımıyla Ağ-RTK yöntemiyle arazide belirlenmiştir (Şekil-2c). WGS-84 elipsoidi ITRF96 datumunda UTM 3⁰’lik koordinat sisteminde ölçüler gerçekleştirilmiştir.

2.2.3.1. Ağ-RTK tekniği

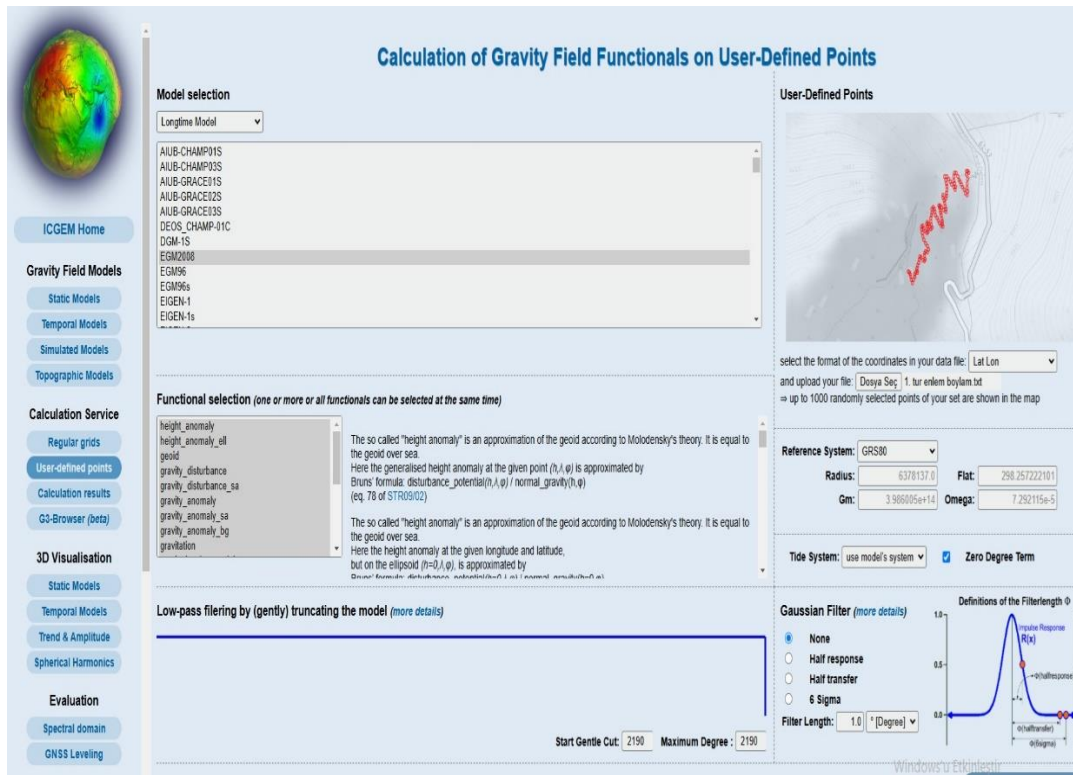
2.2.3.1. Network-RTK technique

GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, OZSS uydularından veri alan CHCNAV i93 Visual IMU-RTK GNSS alıcı cihazı bir nokta üzerine kurulmuştur. İnternet bağlantısı yardımıyla alıcı cihaza bağlanıp TUSAGA-Aktif istasyonları yardımıyla cihazın kurulduğu noktanın koordinatı daha sonra gezici GNSS ve el ünitesi yardımıyla güzergahtaki 115 noktanın koordinatları belirlenmiştir. Konum doğruluğu yatayda 10 mm düşeyde 15 mm hassasiyetinde gerçekleştirilmiştir.

2.2.4. Global yerpotansiyel modeller

2.2.4. Global geopotential models

Jeodezik çalışmalarda CHAMP, GRACE ve GOCE gibi alçak yörüngeli uydulardan yeryuvarı gravite alanı bilgileri doğrultusunda elde edilen global yerpotansiyel modelleri ve bu modellere ait veriler ICGEM (International Centre for Global Earth Models) web sayfasında yayınlanmaktadır (Şekil 3) (ICGEM, 2024). ICGEM web sayfasında bugüne kadar oluşturulmuş 180 adet global yer potansiyel modeli mevcuttur (ICGEM, 2024). Modellerin seçiminde üretim yılı, veri kaynağı, bölgesel uyumluluk ve küresel harmonik açılımının derecesi dikkate alınmıştır. EGM2008 ve XGM2019 küresel modeller olduklarından, ITU_GGC16 bölgesel model olduğundan seçilmiştir. XGM2019 modeli yüksek çözünürlüğe sahip ve EGM2008 modeline göre daha güncel bir modeldir. ITU_GGC16 modeli ülkemizde üretilen ülkemiz için optimize edilen bir modeldir.



Şekil 3. ICGEM (Uluslararası Küresel Yer Modelleri Merkezi)
Figure 3. ICGEM (International Centre for Global Earth Models)

Bu çalışma için belirlenen ve ICGEM sayfasından elde edilen global yerpotansiyel modelleri hakkında bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Bu çalışma için ICGEM sayfasından modellerin gravite verilerine ulaşılmış ardından hassas nivelman ölçülerinden elde edilen yükseklikler ve GNSS ölçülerinden elde edilen coğrafi koordinatlar yardımıyla istenilen modele ait düşey gravite gradyent değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 1. ICGEM sayfasından elde edilen global yerpotansiyel modellere ait bilgiler
Table 1. Information on global geopotential models obtained from the ICGEM website

Model Adı	Yıl	Derece	Veri Kaynağı	Referans
EGM2008	2008	2190	A, G, S (Grace)	Pavlis, N.K. et al, 2012
ITU_GGC16	2016	280	S (Goce, Grace)	Akyılmaz et al, 2016
XGM2019	2019	2190	A, G, S (GOCO06s), T	Zingerle, P. et al, 2019

3. Metot

3. Method

Yeryüzünde duran bir cisme yerçekimi ve merkezkaç kuvvetlerinin bileşke kuvveti etki eder. Yerçekimi, dünyanın kütlesi nedeniyle cisimlere uyguladığı çekim kuvvetidir. Merkezkaç kuvveti ise dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu ortaya çıkar. Bu iki kuvvetin bileşkesi, gravite olarak adlandırılır. Gravitenin potansiyeli,

$$W = V + \Phi = G \iiint_{\text{yeryuvarı}} \frac{\rho}{r} dv + \frac{1}{2} \omega^2 (x^2 + y^2) \quad (1)$$

denklemindeki yerçekimi ve merkezkaç potansiyellerinin toplamına eşittir. Eşitlik-1’de V ; çekim potansiyelini Φ ; merkezkaç potansiyelini ifade etmektedir. Gravite potansiyelinin gradyent vektörleri,

$$g = \text{grad } W = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad g_x = \frac{\partial W}{\partial x}, g_y = \frac{\partial W}{\partial y}, g_z = \frac{\partial W}{\partial z} \quad (2)$$

denkleminde ifade edilir. Eşitlik-2’de g ; gravite vektörünü, $\frac{\partial W}{\partial x}(g_x), \frac{\partial W}{\partial y}(g_y), \frac{\partial W}{\partial z}(g_z)$ gravite vektörünün bileşenlerini oluşturur (Heiskanen & Moritz, 1967).

Gravitenin düşey gradyenti ($\Delta g/\partial H$) (Akdoğan vd., 2024), arazide yapılan eş zamanlı gravite ve hassas nivelman ölçülerine bağlı olarak eşitlik-3 kullanılarak hesaplanmıştır. Topografyanın karmaşıklığı, gravite farklarının ölçümünde kısa mesafede büyük değişimlere neden olmuş, bu da gravite gradyanının duyarlılığını test etme açısından önemli bir fırsat sunmuştur.

$$W_{zz}(h_i) = \frac{g(h_1) - g(h_2)}{\Delta h} \quad (3)$$

$g(h_i)$ ölçüm seviyesindeki gravite değeri, $g(h_0)$ referans yüksekliğindeki gravite değeri, Δh noktalar arasındaki yükseklik farkı ve $W_{zz}(h_i)$ ise DGG'dir (Akdoğan, 2020).

Güzergahta ölçülen gravite değerlerinden hesaplanan gerçek DGG değerleri ile global yer potansiyel modellerden elde edilen gravite değerlerinden hesaplanan DGG değerleri arasındaki farklar eşitlik-4 kullanılarak bulunmuştur.

$$\Delta W_{zz} = W_{zz_{gerçek}} - W_{zz_{model}} \quad (4)$$

Eşitlik-4'te ΔW_{zz} DGG farkını, $W_{zz_{gerçek}}$ arazide ölçülen gravite değerinden hesaplanan DGG değerini, $W_{zz_{model}}$ global yer potansiyel modelin gravite değerinden hesaplanan DGG değerini ifade etmektedir.

Ölçülen değerler ile modellenen değerler arasındaki farkların büyüklüğü hakkında bilgi veren karesel ortalama hata (RMSE) değerleri eşitlik-5'e göre hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_{zz_{gerçek}} - W_{zz_{model}})^2} \quad (5)$$

Eşitlik-5'te $W_{zz_{gerçek}}$ ölçülerden elde edilen DGG değerini $W_{zz_{model}}$ modellerden elde edilen DGG değerini, n ölçü sayısını ifade etmektedir.

3.1. Lineer regresyon yöntemi

3.1. Linear regression equation

Bir bağımlı değişken (y) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (x) arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan temel bir istatistiksel yöntemdir. Bu denklem, bağımsız değişkenin değişimlerine bağlı olarak bağımlı değişkenin nasıl değiştiğini anlamamıza yardımcı olur. Veriler arasındaki doğrusal ilişkiyi anlamak ve tahminler yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Verilerin eğilimlerini çözümleyerek gelecekteki değerleri tahmin etmede, ilişkileri analiz etmede ve kararlar almada kullanılabilir. Lineer regresyon için ;

$$y = ax + b \quad (6)$$

denklemini kullanılmıştır (Bruce vd., 2020). Eşitlik-6'da a ve b katsayıları gösterirken, x bağımsız değişkendir.

3.2. Kuadratik (non-linear) regresyon yöntemi

3.2. Quadratic (non-linear) regression equation

Bir bağımlı değişkenin (y) bağımsız değişkenlere (x) doğrusal olmayan bir ilişkiyle bağlı olduğu durumlarda kullanılan bir analiz yöntemidir. Bu tür regresyon, doğrusal olmayan matematiksel denklemlerle veri arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılır. Lineer regresyonun aksine, non-linear regresyon denklemi, daha karmaşık bir ilişkiyi ifade eder. Non-linear regresyon, özellikle doğrusal ilişkilerin yeterli olmadığı ve daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılır. Bu çalışmada DGG değerinin yükseklikle değişimi kuadratik (non-linear) denklemlerle ifade edilmiştir (Bruce vd., 2020). Kuadratik regresyon için ;

$$y = ax^2 + bx + c \quad (7)$$

denklemini kullanılmıştır. Eşitlik-7'de a, b ve c katsayıları gösterirken, x bağımsız değişkendir.

4. Bulgular ve tartışma

4. Results and discussion

Çalışma bölgesinde, toplamda 115 noktada bağıl gravimetre yardımıyla yapılan gravite ölçümleri belirlenmiştir. Gravite ölçümleriyle eş zamanlı yapılan nivelman ölçümlerinden elde edilen yükseklik farkları hesaplanmıştır. Gravite ve nivelman ölçülerinin analiz edilmesi sonucu, gerçek DGG değeri hesaplanmış ve hesaplanan değerlere ait istatistiksel bilgiler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Gerçek DGG değerine ait istatistiksel bilgiler

Table 2. Statistical information on the actual DGG value

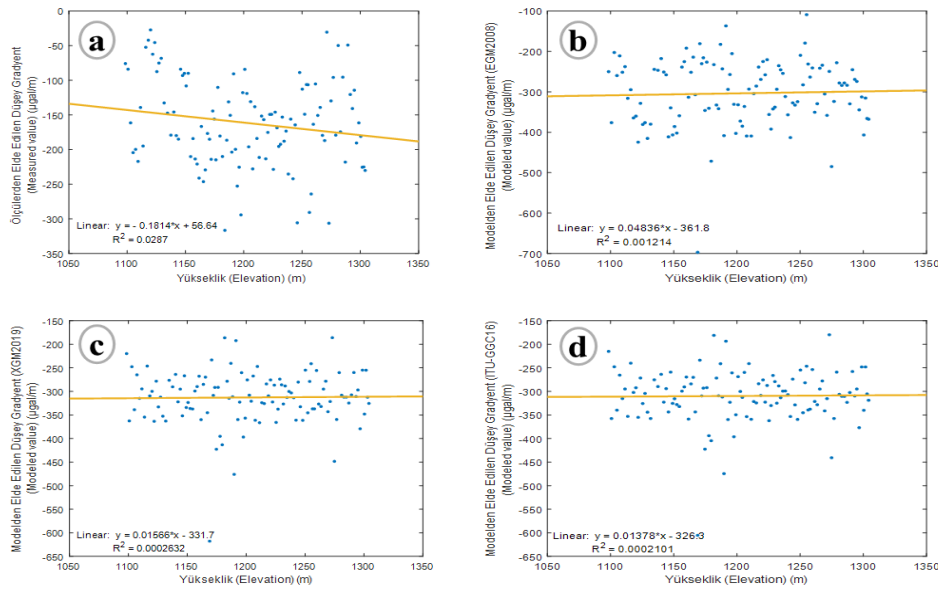
	Min. (Eötvös)	Max. (Eötvös)	Ort. (Eötvös)	Std. Dev. (Eötvös)	RMSE (Eötvös)
DGG _{gerçek}	272	3166	1618	627	1734

Araziden alınan gravite değerlerinden elde edilen gerçek DGG değerleri ile ICGEM sayfasından alınan modellerin gravite değerlerinden hesaplanan DGG değerlerinin yükseklikle değişimine bakılmıştır. Gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerlerinin yükseklikle değişiminin lineer ilişkisi şekil 4’te, kuadratik ilişkisi şekil 5’te gösterilmiştir. DGG değerlerinin yüksekliğe bağlı değişimini temsil eden lineer ve kuadratik denklemlerin katsayıları ve determinasyon katsayıları hesaplanmıştır. Lineer ve kuadratik denklemlerin parametreleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Lineer ve kuadratik denklemlerin parametreleri

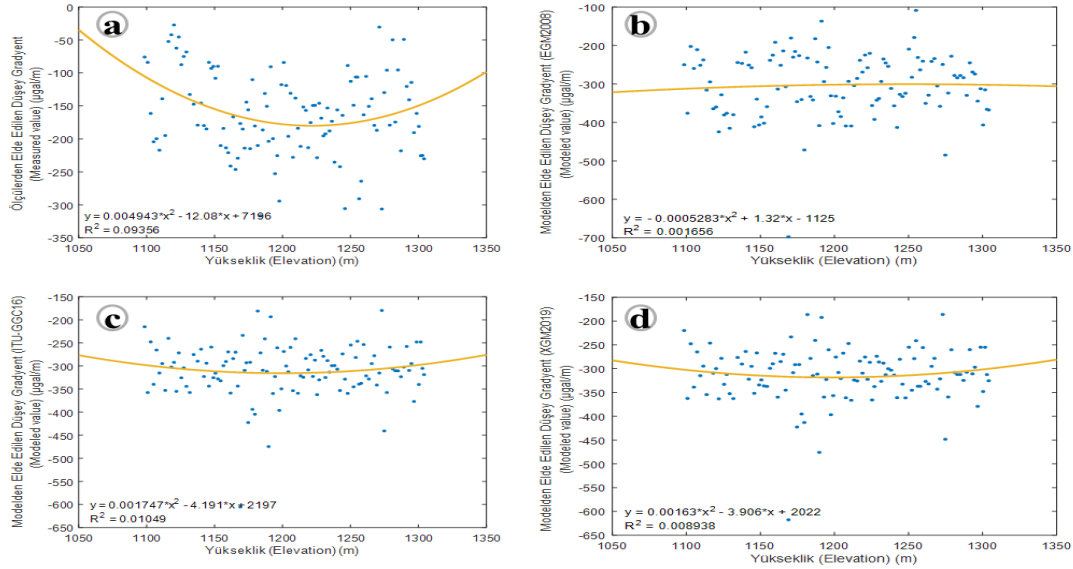
Table 3. Parameters of linear and quadratic equations

	Lineer			Kuadratik (Non-linear)			
	a	b	R ²	a	b	c	R ²
DGG	-0.1814	56.64	0.029	0.0049	-12.07	7194	0.094
EGM2008	0.0484	-361.80	0.001	0.0005	1.32	-1125	0.002
ITU_GGC16	0.0138	-326.30	0.000	0.0018	-4.19	2197	0.011
XGM2019	0.0157	-331.70	0.000	0.0016	-3.90	2020	0.009



Şekil 4. Gravite gradyent değerlerinin yükseklikle değişimi (lineer) (a) Yükseklik-DGG_{gerçek}. (b) Yükseklik-DGG_{EGM2008}. (c) Yükseklik-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Yükseklik-DGG_{XGM2019}.

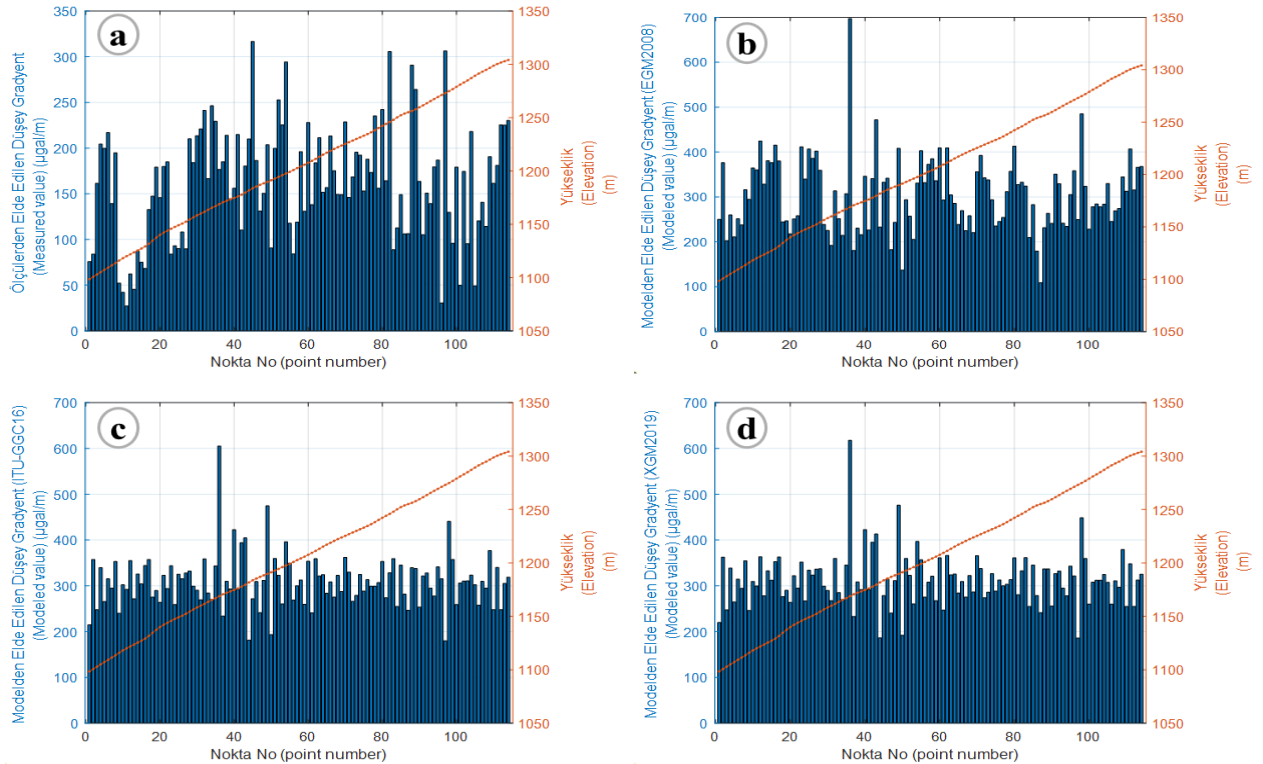
Figure 4. Variation of gravity gradient values with elevation (linear) (a) Elevation-DGG_{real}. (b) Elevation-DGG_{EGM2008}. (c) Elevation-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Elevation-DGG_{XGM2019}.



Şekil 5. Gravite gradyent değerlerinin yükseklikle değişimi (kuadratik) (a) Yükseklik-DGG_{gerçek}. (b) Yükseklik-DGG_{EGM2008}. (c) Yükseklik-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Yükseklik-DGG_{XGM2019}.

Figure 4. Variation of gravity gradient values with elevation (quadratic) (a) Elevation-DGG_{real}. (b) Elevation-DGG_{EGM2008}. (c) Elevation-DGG_{ITU_GGC16}. (d) Elevation-DGG_{XGM2019}.

Lineer ve kuadratik (non-linear) denklemlerin R^2 değerlerine göre DGG değerlerinin yükseklikle arasındaki ilişkinin düşük olduğu görülmektedir. Denklemlerin düşük eğilim göstermesi DGG değerlerinin yükseklik dışında literatürü destekleyen başka parametrelere bağlı olduğunu göstermektedir. Gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerlerinin nokta yüksekliğine göre değişimi gösteren histogram Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. DGG değerlerinin nokta yüksekliklerine göre değişimi (a) DGG_{gerçek}-nokta yüksekliği (b) DGG_{EGM2008}-nokta yüksekliği (c) DGG_{ITU_GGC16}-nokta yüksekliği (d) DGG_{XGM2019}-nokta yüksekliği

Figure 6. Variation of DGG values with point elevations (a) DGG_{gerçek}-point elevation (b) DGG_{EGM2008}- point elevation (b) DGG_{ITU_GGC16}- point elevation (b) DGG_{XGM2019}- point elevation

ICGEM sayfasında hesaplatılan 3 adet global model için DGG değerleri ile gerçek DGG değerleri arasındaki farklar alınmış ve bu farklara ilişkin istatistiki bilgiler Tablo 4'te sunulmuştur.

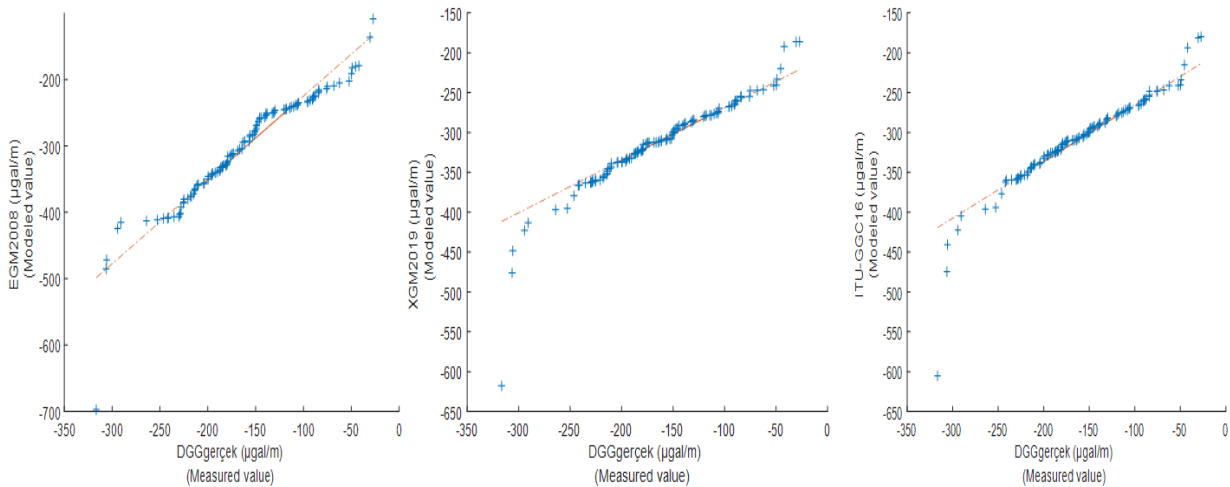
Tablo 4. Gerçek DGG değerleri ile global modellerden elde edilen DGG değerleri arasındaki farklara ilişkin istatistiki bilgiler

Table 4. Statistical information on the differences between the actual DGG values and the DGG values obtained from the global models

	Min. (Eötvös)	Max. (Eötvös)	Ort. (Eötvös)	RMSE (Eötvös)
EGM2008	7	5204	1453	1788
ITU_GGC16	226	4286	1514	1684
XGM 2019	234	4410	1542	1718

RMSE hata değerlerine bakıldığında; gerçek DGG değeriyle en iyi uyum sağlayan global modelin ITU_GGC16 modeli olduğu ve buna karşın en az uyumun ise EGM2008 modeli ile olduğu görülmektedir.

Şekil 7, gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerleri arasındaki korelasyonu göstermektedir. Grafikler DGG değerlerinin teorik bir dağılımla uyumunu görselleştirmiştir. Grafikteki turuncu çizgiler $y=ax+b$ şeklinde doğrusal regresyon eğilimini göstermektedir. Şekil 7'ye göre; EGM2008 modelinden elde edilen DGG değerlerinin gerçek DGG değerlerine göre daha hızlı bir şekilde arttığını gösterir. 1.262'lik eğim, EGM2008 modelinin gerçek DGG'ye kıyasla sistematik olarak daha yüksek bir eğilim gösterdiği anlamına gelir. Bu sonuçlara göre, modelin genel olarak başarılı bir uyum sağladığı, ancak sistematik bir sapma içerdiği söylenebilir. 0.711'lik eğim ITU_GGC16 modelinden elde edilen DGG değerlerinin, gerçek DGG değerlerine kıyasla daha yavaş bir artış gösterdiğini ifade eder. ITU_GGC16 modelinin gerçek DGG değerleriyle doğrusal bir ilişki sergilediğini ancak ölçümlerle birebir uyumlu olmadığını göstermektedir. 0.658 eğimi, XGM2019 modelinden elde edilen değerlerin gerçek DGG değerleriyle birebir oranda artmadığını, ancak belirli bir pozitif ilişki olduğunu göstermektedir. Gerçek DGG değerleriyle XGM2019 modelinin DGG değerleri arasında genel bir doğrusal ilişki olduğu ancak bazı uç durumlarda sapmaların bulunduğu görülmektedir. XGM2019 modeli makul bir doğrulukla gerçek DGG değerleriyle ilişkili olsa da ancak bire bir uyumlu olmadığı görülmektedir. DGG değerleri ile en uyumlu modelin ITU_GGC16 olduğu ancak eğim değerlerinin 1'den uzaklaştığı için modellerin çok fazla uyum göstermediği görülmüştür. Sonuç olarak gerçek test bölgesindeki eğim farklılıklarının, global yer potansiyel modelleriyle kıyaslandığında sapmalara neden olduğu belirlenmiştir. Bu durum, bölgeye özgü topoğrafyanın, modelleme sonuçları üzerinde belirgin etki yarattığını göstermektedir.



Şekil 7. DGG değerlerinin nokta yüksekliklerine göre değişimi

Figure 7. Tendency of Linear Regression between DGG obtained with Measurements and DGG obtained with Models

5. Sonuç

5. Conclusion

Bu çalışmada Trabzon ili Sümela Manastırı çevresinde dağlık ve sarp bir bölgede düşey gravite gradyent tespiti için eş zamanlı gravite ve GNSS/Nivelman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın dağlık ve sarp topoğrafyada gerçekleştirilmiş olması, yöntemsel yaklaşımın sınanmasına ve gravite gradyan değerlerinin doğrusal olmayan dağılımının belirlenmesine olanak tanımıştır. Bu yönüyle, yalnızca Türkiye için değil, benzer morfolojik özellikler taşıyan küresel bölgeler için de örnek teşkil etmektedir. Topografik açıdan benzersiz bir alanda gerçekleştirilmesi sayesinde, mevcut yöntemlerin esneklik ve uygulanabilirlik sınırlarını ortaya koymuştur. Arazi koşullarının alışılmışın dışında olması, çalışmanın yalnızca yerel bağlamda değil, benzer topografik özellikler taşıyan diğer bölgelerde de referans alınabilecek bir yöntem ortaya koymasını sağlamıştır. Gravite ve GNSS/Nivelman ölçülerinden elde edilen DGG değerlerinin yükseklikle değişimi ve global yerpotansiyel modellerle arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun için EGM2008, ITU_GGC16, XGM2019 global yerpotansiyel modelleri kullanılmıştır. Lineer ve kuadratik denklemlerin R^2 değerleri incelendiğinde DGG değerleri ile yükseklik arasında zayıf bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Bu ilişki literatürde destekleyen (Hunt vd., 2002) DGG'nin yükseklikten ziyade başka faktörlere (topoğrafya, jeoloji) bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca ölçülerden elde edilen DGG'ler global yerpotansiyel modellerden elde edilen DGG'ler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma alanında ölçülen gravite ve yükseklik değerlerinden elde edilen gerçek DGG değerleri ile modellerden elde edilen DGG değerleri ile arasındaki ilişki incelendiğinde RMSE değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla ITU_GGC16, XGM2019 ve EGM2008 şeklindedir. Bu karşılaştırmalara göre gerçek DGG değerleriyle en uygun modelin ITU_GGC16 olduğu görülmektedir. Sonuç olarak global yerpotansiyel modeller kullanılarak belirlenen düşey gravite gradyenti değerleri yerine yeryüzünde ölçülen düşey gravite gradyent değerlerinin dikkate alınmasının sonucu ortaya çıkmıştır.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP06 kodlu 10862 proje numarası ile maddi olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne ve makalenin inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakem/hakemlere teşekkür ederiz.

Yazar katkısı

Author contribution

Bu çalışmaya tüm yazarlar tarafından eşit şekilde katkı verilmiştir.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Akdoğan, Y. A., Ahi, G. O., & Yildiz, H. (2024). Computation of gravimetric geoid model using free air vertical gravity gradient anomaly in geoid-quasigeoid formula. *Journal of Applied Geophysics*, 220, 105277. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105277>
- Akdoğan, Y. A. (2020). *Yersel düşey gravite gradyent verilerinin bölgesel gravimetrik jeoit modellemeye katkısının incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].

- Bruce, P., Bruce, A., & Gedeck, P. (2020). *Practical statistics for data scientists: 50+ essential concepts using R and Python*. O'Reilly Media. Second Edition.2020
- Csapó, G., & Völgyesi, L. (2004). New measurements for the determination of local vertical gradients. *Reports on Geodesy*, 69(2), 303-308.
- Dykowski, P. (2012). Vertical gravity gradient determination for the needs of contemporary absolute gravity measurements-first results. *Reports on Geodesy*, (1/92), 23-36.
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). *Physical geodesy*. (O. Gürkan, Çeviri). Karadeniz Üniversitesi Basımevi. (1984)
- Hunt, T., Sugihara, M., Sato, T., & Takemura, T. (2002). Measurement and use of the vertical gravity gradient in correcting repeat microgravity measurements for the effects of ground subsidence in geothermal systems. *Geothermics*, 31(5), 525-543.
- ICGEM (2024, Aralık 4), *Calculation of Gravity Field Functionals on User-Defined Points*. <https://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>
- Odalovic, O., Medved, K., & Naod, S. (2022). Modeling of vertical gravity gradient by normal gravity field and digital terrain models. *Journal of Geodesy*, 96(10), 74.
- Rózsa, S., & Tóth, G. (2005). Prediction of vertical gravity gradients using gravity and elevation data. *In A Window on the Future of Geodesy*. 344-349.
- Simav, M., Akpınar, İ., Akdoğan, Y. A., & Yıldız, H. (2021). Türkiye’de Güncel Yersel Gravimetri Çalışmaları. *Harita Dergisi Ankara*, 166, 10-24.
- Tenzer, R., & Ellmann, A. (2009). On evaluation of the mean gravity gradient within the topography. *In Observing our Changing Earth*, 253-261
- Vanicek, P., Janák, J., & Huang, J. (2002). Mean vertical gradient of gravity. *In Gravity, Geoid and Geodynamics*. 59-262.
- Völgyesi, L. (2001). Local geoid determination based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 36(2), 153-162.
- Zahorec, P., Vajda, P., Papčo, J., Aparicio, S. S. M., & De Pablo, J. P. (2016). Prediction of vertical gradient of gravity and its significance for volcano monitoring—Example from Teide volcano. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 46(3), 203-220.
- Zahorec, P., Papčo, J., Greco, F., Vajda, P., Pašteka, R., Cantarero, M., & Carbone, D. (2024). Observation and Local Prediction of the Vertical Gravity Gradient. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 27(6), 11-16.