

EKF Tabanlı GNSS/SIMU Entegrasyonu İçin Öncül Gauss-Markov Korelasyon Parametrelerinin Global Model Kullanılarak Belirlenmesi

(Determination of A Priori Gauss-Markov Correlation Parameters Using a Global Model for EKF-Based GNSS/SIMU Integration)

Mehmet Emir YAYLA¹, Yunus Aytaç AKDOĞAN¹, Murat DURMAZ²

¹Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Daire Başkanlığı, Cebeci, ANKARA

²Hacettepe Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Çankaya, ANKARA

mehmetemir.yayla@harita.gov.tr, yunusaytac.akdogan@harita.gov.tr, muratdurmaz@hacettepe.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 17.04.2026

Kabul Tarihi (Accepted): 09.07.2026

ÖZ

Bu çalışmada, sıcaklık stabilizasyonlu ataletsel ölçüm birimi (SIMU) ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) entegrasyonuna dayalı mobil gravimetri uygulamalarında, farklı bölgesel gravite alanı özelliklerinin Gauss-Markov (GM) model parametreleri ve Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) performansını üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında ICGEM platformu ve EGM2008 modeli kullanılarak; dağlık (Giresun), düz (Ankara) ve karma (İzmir-Çanakkale) topoğrafik yapıları sahip bölgeler için gravite bozukluğu veri setleri üretilmiştir. Bu veriler üzerinde 1. dereceden 4. dereceye kadar GM modelleri uygulanarak mekânsal otokorelasyon fonksiyonları (ACF) analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, topoğrafik yapının stokastik parametreler üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Düz bir topoğrafyaya sahip Ankara bölgesinde varyans değeri yaklaşık 13-14 mGal ve korelasyon uzunluğu 31-37 km aralığında hesaplanırken, dağlık Giresun bölgesinde varyans 33-36 mGal seviyelerine yükselmiş ve korelasyon uzunluğu 18-21 km'ye düşmüştür. Elde edilen bu stokastik model parametreleri, EKF'nin sistem gürültü kovaryans matrisinin tasarımı entegre edilmiştir. Sonuç olarak, mobil gravimetri uygulamalarında kullanılan stokastik model parametrelerinin, hem bölgesel topoğrafik özelliklere hem de seçilen GM model derecesine bağlı olarak değiştiği ve bu durumun modelleme sürecinde göz önünde bulundurulmasının faydalı olabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mobil Gravimetri, SIMU/GNSS, Gauss-Markov Süreci, Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF), Topoğrafik Korelasyon.

ABSTRACT

In this study, the effects of different regional gravity field characteristics on Gauss-Markov (GM) model parameters and Extended Kalman Filter (EKF) performance were investigated for mobile gravimetry applications based on the integration of a Temperature-Stabilized Inertial Measurement Unit (SIMU) and a Global Navigation Satellite System (GNSS). Within the scope of the study, gravity disturbance data sets were generated for regions with mountainous (Giresun), flat (Ankara), and mixed (İzmir-Çanakkale) topographic

characteristics using the ICGEM platform and the EGM2008 global gravity model. On these data sets, first- to fourth-order Gauss-Markov models were applied and spatial autocorrelation functions were analyzed. The results indicate that topography is a dominant factor in determining stochastic model parameters. For the flat Ankara region, the variance was estimated to be approximately 13-14 mGal with correlation lengths in the range of 31-37 km, whereas for the mountainous Giresun region, the variance increased to 33-36 mGal and the correlation length decreased to 18-21 km. These stochastic model parameters were incorporated into the design of the EKF system noise covariance matrix. In conclusion, it has been observed that the stochastic model parameters used in mobile gravimetry applications may vary depending on both regional topographic characteristics and the selected Gauss-Markov (GM) model order, and that considering this variability in the modeling process may be beneficial.

Keywords: Mobile Gravimetry, SIMU/GNSS, Gauss-Markov Process, Extended Kalman Filter (EKF), Topographic Correlation.

1. GİRİŞ

Yerçekimi alanı; yer kabuğunun yoğunluk dağılımı, kütle hareketleri, yüzey ve yer içi dinamikleri hakkında bilgi sunarak Dünya'nın fiziksel yapısının belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Yerçekimi alanının ölçülmesi ve modellenmesi jeodezi biliminin en temel çalışma alanlarından birini oluşturmaktadır. Yer'in çekim kuvveti ile merkezkaç kuvvetinin bileşiminden oluşan gravite alanı hem zamana hem de mekâna bağlı olarak değişim gösteren vektörel bir büyüklüktür. Gravite alanına ilişkin bilgiler; düşey referans sistemlerinin tanımlanması, yüksek doğruluklu konumlama ve navigasyon, maden aramaları ve iklim süreçlerinin izlenmesi gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır (Torge ve Müller, 2012).

Dünya'nın yerçekimi alanı farklı gözlem teknikleriyle belirlenebilir; bunlardan biri olan

gravimetri, ölçüm konumuna bağlı olarak yüzey (yersel), kuyu, deniz, deniz altı, hava ve uydu gravimetrisi olarak sınıflandırılmaktadır. Söz konusu sınıflandırma içerisinde yer alan havadan ve yersel mobil gravimetri uygulamalarında; konum, hız, ivme ve yönelim bilgisinin yüksek hassasiyetle belirlenerek gravite sinyalinin elde edilmesi amacıyla, GNSS ve SIMU entegrasyonuna dayalı sistemler kullanılmaktadır (Forsberg ve Olesen, 2010; Jekeli, 2001).

Gravimetre veya ivmeölçer bir hareketli platform üzerine yerleştirildiğinde, yerçekimi bileşeninin kinematik ivmelerden ayrıştırılabilmesi için platform hareketlerinin ayrıca izlenmesi gerekmektedir (Groves, 2013). Bu yöntemlerden biri olan ve bu çalışmada benimsenen dolaylı (indirect) yaklaşımda, üç eksenli ivmeölçerler ve jiroskoplardan oluşan analitik SIMU doğrudan hareketli platforma entegre edilmekte ve sensör yönelimi sayısal olarak hesaplanmaktadır.

Bu dolaylı yaklaşımın temelini oluşturan SIMU sistemleri, başlangıçta seyrüsefer amaçlı geliştirilmiş olmakla birlikte, 1980'li yıllardan itibaren GNSS teknolojisindeki gelişmelerle birlikte gravimetrik uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu dönemde özellikle hava gravimetrisinde skaler ve vektörel analitik gravimetri çalışmaları ivme kazanmış; uygun SIMU kullanımıyla uçuş yüksekliğinde mGal altı duyarlılık ve 1–2 mGal doğruluk düzeylerine ulaşılabildiği gösterilmiştir. (Schwarz, Colombo, Hein ve Knickmeyer, 1992; Glennie ve diğerleri, 2000; Kwon ve Jekeli, 2001; Gerlach, Dorobantu, Ackermann, Kjorsvik ve Boedecker, 2010; Becker, 2016; Jensen, 2018; Yıldız, Simav, Akpınar ve Akdoğan, 2021).

Literatürdeki yer alan yersel mobil gravimetri çalışmaları incelendiğinde ise, farklı topoğrafik ve çevresel koşullarda araç tabanlı SIMU/GNSS sistemleri kullanılarak gerçekleştirilen yersel mobil gravimetri çalışmalarında, gravite verilerinin genel olarak 1–3 mGal doğruluk düzeyinde elde edilebildiği görülmektedir (Gerlach, Ackermann, Dorobantu ve Boedecker, 2006; Li, 2007; Yu, Wang ve Wang, 2015; Schack, 2021).

Türkiye’de yersel mobil gravimetri kapsamında, Ankara Cebeci-Elmadağ güzergâhı boyunca, sıcaklık stabilizasyonuna sahip bir SIMU (iCORUS-2) ile GNSS entegrasyonuna dayalı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Gravite bozukluğu, üçüncü dereceden GM süreci olarak modellenmiş ve SIMU/GNSS entegrasyonu için EKF uygulanmıştır. Özellikle yaklaşık 2 km aralıklarla

yapılan gravite güncellemeleriyle karesel ortalama hata (RMSE) değeri 0.95 mGal seviyesine düşürülerek mGal altı doğruluk elde edilmiştir (Akdoğan, Durmaz ve Yıldız, 2025).

SIMU/GNSS entegrasyonu ile elde edilen gravite bozukluğu değerlerinin modellenmesinde GM süreçleri yaygın bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır. Konum uzayında, mobil gravimetri aracının rotası boyunca gravite bozukluğunu en iyi modelleyen stokastik sürecin ne olması gerektiği konusunda da çeşitli araştırmalar mevcuttur. Jekeli (1994), gerçek gravite sinyalinin temsil edebilecek en uygun modelin 3 veya 4’üncü derece GM model olduğunu ileri sürmektedir. Ayres-Sampaio, Deurloo, Bos, Magalhães ve Bastos (2015) ve Deurloo, Yan, Bos ve Bastos (2015) ise 1’nci derece GM modelinin hatta çok daha basit rastgele yürüyüş sürecinin benzer sonuçlar üretebileceğini göstermiştir.

Bu çalışma kapsamında, Türkiye’de farklı topoğrafik özellikleri temsil eden üç ayrı bölgede belirlenen test güzergâhları için gravite bozukluğu değerleri, Uluslararası Küresel Yer Modelleri Merkezi (International Centre for Global Earth Models, ICGEM) platformu üzerinden sağlanan global jeopotansiyel modeli (Earth Gravitational Model 2008- EGM2008) kullanılarak hesaplanmıştır (Pavlis, Holmes, Kenyon ve Factor, 2012; İnce ve diğerleri, 2019). Elde edilen veriler doğrultusunda, farklı topoğrafik koşulların GM korelasyon parametrelerine etkisi ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın odak noktası, mobil gravimetri arazi ölçümleri gerçekleştirilmeden önce, bölgesel gravite alanının karakteristiğine uygun öncül stokastik parametrelerin belirlenmesidir. Küresel jeopotansiyel modellerden elde edilen gravite bozukluğu verileri üzerinden hesaplanan mekânsal korelasyon parametreleri, EKF tasarımı için öncül değer olarak kullanılabilir. Bu yaklaşımla Q matrisi, arazinin fiziksel yapısına göre önceden yapılandırılarak, pratik uygulamalarda genellikle deneme-yanılma yöntemlerine dayanan EKF’nin ince ayar aşamasının anlamlı ölçüde kısaltılmasına ve filtrenin yakınsama performansının iyileştirilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

a. SIMU/GNSS Entegrasyonu ve Matematiksel Model

Bu çalışmada, mobil gravimetri uygulamalarında gravite bozukluğunun kestirimi, SIMU ve GNSS ölçülerinin EKF çatısı altında entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu kapsamda gravite bozukluğu Kalman filtresine ilave durum değişkenleri eklenerek bir GM stokastik süreci olarak ele alınabilir.

Sistemin dinamik davranışı, lokal koordinat sisteminde (navigation- frame) yazılan navigasyon eşitlikleri ile ifade edilmektedir (Groves, 2013):

$$\dot{p}^n = T_r^p v^n \quad (1)$$

$$\dot{v}^n = C_b^n f^b - (2\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) v^n + \gamma^n + \delta g^n \quad (2)$$

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \Omega_{ib}^b - (\Omega_{ie}^n + \Omega_{en}^n) C_b^n \quad (3)$$

Burada $p^n \in R^3$ konumu, $T_r^p \in R^{3 \times 3}$ coğrafi koordinatlardan kartezyen koordinatlara dönüşüm matrisini, $v^n \in R^3$ hız vektörünü, $C_b^n \in R^{3 \times 3}$ gövde ekseninden lokal eksene dönüşüm matrisini (yönelim) ifade eder. $f^b \in R^3$ ve $\Omega_{ib}^b \in R^3$ ise sırasıyla ivmeölçer ve jiroskop sensörlerinden gelen ham ölçülerdir. Ancak bu sensörler, üretim yapılarından kaynaklı sistematik ve stokastik hatalar (bias, ölçek faktörü, gürültü vb.) içerir. Bu nedenle söz konusu hatalar, gravite bozukluğu ile birlikte EKF durum vektörüne dahil edilerek kestirilmektedir (Groves, 2013; Kalman, 1960).

Bu çerçevede sistemin hata durum vektörü (δx); üç boyutlu konum (δp^n), hız (δv^n) ve yönelim hataları ($\delta \psi^n$) ile ivmeölçer (δb_a) ve jiroskop (δb_g) biaslarının yanı sıra, 3. derece GM süreci ile modellenen gravite bozukluğu parametrelerinden oluşmaktadır (Eşitlik 4).

$$\delta x = [\delta p^n, \delta v^n, \delta \psi^n, \delta b_a, \delta b_g, \delta g, \delta \dot{g}, \delta \ddot{g}]^T \quad (4)$$

Bu durum vektörünün zamana bağlı değişimi, lineerleştirilmiş sistem dinamik modeli ile ifade edilmektedir (Eşitlik 5).

$$\delta \dot{x}(t) = F(t) \delta x(t) + G(t) w_s(t) \quad (5)$$

Çalışmada kullanılan ve Eşitlik (6)'da açık hali verilen F matrisi, üç temel bloğun birleşiminden

oluşmaktadır. Ataletsel navigasyon hataları, matrisin sol üst bloğunda yer alan F_{pp} , F_{pv} , $F_{v\psi}$ gibi terimler, konum, hız ve yönelim hatalarının birbirleriyle olan kinematik ilişkisini temsil eder. Sensör hata modelleri, ivmeölçer (F_{vb_a}) ve jiroskop ($F_{\psi b_\omega}$) atım hatalarının navigasyon çözümüne etkisi, matris içerisindeki dönüşüm matrisleri (C_b^n) vasıtasıyla hız ve yönelim türevlerine yansıtılır. Sensör hatalarının kendileri genellikle "Rastgele Yürüyüş" ile modellendiğinden, ilgili satırlarda türevler sıfır katsayılarını içerir (Becker ve diğerleri, 2015). Gravite bozukluğu modeli, Eşitlik (6)'nın sağ alt köşesindeki blok, gravite bozukluğunun stokastik modelini ifade eder. Çalışmada gravite bozukluğu 3. Derece GM süreci olarak modellendiğinde, sistem matrisine gravite bozukluğunun türevleri arasındaki geçişler eklenir. Eşitlikte görülen $-\beta^3$, $-3\beta^2$ ve -3β terimleri, 3. derece diferansiyel denklemin karakteristik katsayılarıdır ve sürecin korelasyon yapısını belirler.

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_{pp} & F_{pv} & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ F_{vp} & F_{vv} & F_{v\psi} & F_{vb_a} & 0_3 & I_3 & 0_3 & 0_3 \\ F_{\psi p} & F_{\psi v} & F_{\psi \psi} & 0_3 & F_{\psi b_\omega} & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & I_3 & 0_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & I_3 \\ 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & 0_3 & -\beta_{3,g}^3 & -3\beta_{3,g}^2 & -3\beta_{3,g} \end{bmatrix} \quad (6)$$

EKF'nin ölçü güncelleme adımında ise GNSS'den elde edilen konum ve hız ölçüleri kullanılarak hata durum vektörü güncellenmekte, böylece hem sensör hataları kalibre edilmekte hem de kinematik etkilerden arındırılmış gravite bozukluğu bileşeni kestirilmektedir.

b. Gravite Bozukluğu Stokastik Modellemesi: GM Süreçleri

Gravite bozukluğu alanı, jeolojik ve topoğrafik çeşitlilikler nedeniyle uzaysal süreklilik gösteren, düşük frekanslı bileşenlerle yüksek frekanslı değişimleri bir arada barındıran bir sinyaldir. Bu nedenle alanın istatistiksel doğası, tamamen beyaz gürültü varsayımıyla modellenemez.

Literatürde yaygın olarak kabul edildiği üzere, gravite bozukluğu zayıf durağan ve eksponansiyel türde sönümlenen otokorelasyon yapısına sahiptir (Jekeli, 1994).

Süreç gürültüsü varyansı σ^2 , GM sürecinin rastgelelik düzeyini ve enerji içeriğini tanımlayan parametredir. Bu büyüklük, sistemdeki stokastik

uyarımın genliğini temsil eder ve sürecin ne kadar “dalgalı” veya değişken olduğunu belirler.

Korelasyon katsayısı β , GM sürecinde ardışık gözlemler arasındaki bağımlılığın ne kadar hızlı zayıfladığını belirleyen temel parametredir. β Değerinin büyümesi, sürecin kısa mesafe veya kısa zaman aralıklarında bile korelasyonunu hızla kaybettiğini; küçük β değerleri ise sürecin uzun mesafeler veya zaman dilimleri boyunca yüksek korelasyon sergilediğini ifade eder.

Bu bağlamda sürecin karakteristik korelasyon uzunluğu (veya zamanı) aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$T_c = \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

Burada T_c , sürecin anlamlı korelasyon taşıdığı ortalama mesafe veya zaman aralığını temsil eder. Jeofizik uygulamalarında bu büyüklük, gravite bozukluğunun mekânsal sürekliliğini ifade etmek açısından büyük önem taşır.

Birinci derece GM süreci için Kalman Filtresi süreç gürültüsü kovaryansı şu şekilde ifade edilir:

$$Q = 2\sigma^2\beta \quad (8)$$

Bu ifade, sürecin varyans yapısının yalnızca σ^2 'ye değil, aynı zamanda korelasyon katsayısı β 'ya da bağlı olduğunu göstermektedir.

Jeodezik ve gravimetrik uygulamalarda σ^2 parametresi, ölçülen büyüklüğün rastgele hata bileşeninin büyüklüğünü temsil ederken; β ile birlikte değerlendirildiğinde bu hatanın mekânsal veya zamansal davranışı bütüncül olarak modellenmiş olur.

Gravite bozukluğunun stokastik modellenmesinde, alanın korelasyon davranışını temsil edebilecek bir GM model derecesinin seçilmesi gerekmektedir.

GM sürecinin derecesi, ACF şekli üzerinden gravite alanının mekânsal değişim karakterini tanımlar. Birinci derece GM modeli, üstel olarak azalan basit bir otokorelasyon yapısına sahiptir ve gravite bozukluğunun hızlı değişim gösterdiği durumlar için yeterli bir yaklaşımdır. Daha yüksek dereceli GM modelleri ise daha düzgün ve uzun

menzilli bir korelasyon yapısı sunarak gravite alanının sürekliliğini daha iyi temsil eder.

Gravite bozukluğundan mekânsal uzayda elde edilen korelasyon katsayısının zaman uzayında tanımlı EKF'ye entegrasyonu için Eşitlik 9'da yer alan dönüşüm kullanılmaktadır (Akdoğan ve diğerleri, 2025).

$$\beta[\text{zaman}] = v_h \beta[\text{mesafe}] \quad (9)$$

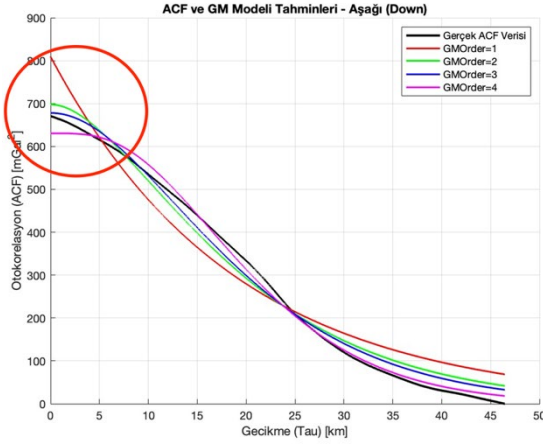
Burada v_h hareketli platformun o anki yatay hızını, $\beta[\text{zaman}]$ zaman uzayında korelasyon katsayısını ve $\beta[\text{mesafe}]$ mekânsal uzayda korelasyon katsayısını ifade etmektedir.

Tablo 1. Gauss-Markov model derecelerine göre Otokorelasyon Fonksiyonları

Gauss Markov Derecesi	Otokorelasyon Fonksiyonu ($R(\tau)$)
1	$\sigma^2 e^{-\beta_1 \tau }$
2	$\sigma^2 e^{-\beta_2 \tau } (1 + \beta_2 \tau)$
3	$\sigma^2 e^{-\beta_3 \tau } \left(1 + \beta_3 \tau + \frac{1}{3} \beta_3^2 \tau ^2 \right)$
n	$\sigma^2 e^{-\beta_n \tau } \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\tau(n) (2\beta_n \tau)^{(n-k-1)}}{(2n-2)! k! \tau(n-k)}$

Tablo 1'de farklı GM model derecelerine ait teorik ACF verilmiş olup, buradaki τ gravite bozukluğu ölçümlerinin otokorelasyon fonksiyonu sonucunda elde edilen ve verilerin birbirinden mekânsal olarak uzaklaştıkça gösterdiği benzerlik ilişkisini mesafe cinsinden tanımlayan fiziksel parametredir. Şekil 1'de ise model derecesinin artmasıyla otokorelasyon davranışındaki değişim grafiksel olarak gösterilmiştir. Buna göre model derecesi arttıkça korelasyon fonksiyonunun daha yumuşak bir yapı kazandığı görülmektedir. Matematiksel bağlamda buradaki 'yumuşak yapı', otokorelasyon fonksiyonunun orijinde ($\tau = 0$) türevlenebilirliği ile ilgilidir. Şekil 1'de kırmızı daire içerisinde gösterildiği üzere birinci derece GM modelinin fonksiyonu orijinde keskin bir dönüş (tanımsız türeve) sahipken, yüksek dereceli modellerin (2., 3. ve 4. derece) eğrileri orijinde sıfır eğime sahiptir ve türevlenebilir düzgün bir geçiş

sunar. Yüksek dereceli bu modeller, sinyalin daha yüksek türevlerini de içerdiğinden yüksek frekanslı gürültüleri filtreleyerek düşük frekanslı, uzun dalga boylu bileşenleri öne çıkarır.



Şekil 1. GM model derecelerinin grafiksel gösterimi.

Bu bağlamda, gravite bozukluğu stokastik modellemesinde GM model derecesi, gravite alanının mekânsal sürekliliğini en iyi temsil edecek şekilde belirlenmelidir. Nitekim, çalışmanın 3.bölümünde detaylandırıldığı üzere; düz topoğrafyaya sahip Ankara bölgesinde yüksek mekânsal süreklilik (düşük varyans ve uzun korelasyon mesafesi) gözlenirken, dağlık Giresun bölgesinde hızlı mekânsal değişimler (yüksek varyans ve kısa korelasyon mesafesi) tespit edilmiş olması (Bkz. Tablo 2,3,4 ve 5), bölgesel topoğrafyaya uygun GM model derecesinin seçilmesi gerekliliğini doğrulamaktadır.

c. GM Parametrelerinin EKF Sistem Gürültü Matrisine Entegrasyonu

GM korelasyon parametreleri (σ ve β), doğrudan EKF'nin temel bileşeni olan Sistem Gürültü Kovaryans Matrisi (Q) matrisinin tasarımında kullanılır. Q Matrisi, sistemdeki modelleme belirsizliklerinin varyansını temsil eder ve EKF'nin tahmin adımında Hata Kovaryans Matrisinin P (Eşitlik 10) güncellenmesinde rol oynar.

$$P_k = F_{k-1} P_{k-1|k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (10)$$

Bu çalışmada EKF'ye ait matematiksel modeller ve hata durum denklemleri temel çerçevesiyle sunulmuştur. Bu teorik altyapı; bölgesel olarak hesaplanan Gauss-Markov

stokastik parametrelerinin, Q matrisine nasıl entegre edileceğini somutlaştırmak amacıyla verilmiştir. Sunulan denklemler sayesinde, elde edilen bu öncül değerlerin filtre mimarisinde fiziksel bir altlık oluşturması ve pratik uygulamalardaki ince ayar (tuning) sürecine yapacağı kavramsal katkı açıkça ortaya konulmuştur.

ç. Veri Seti

Bu çalışmada, GM korelasyon parametrelerinin farklı topoğrafik ve gravite alanı koşullarındaki davranışını değerlendirmek amacıyla ICGEM platformu üzerinden EGM2008 modeli kullanılarak belirlenen test güzergahlarında gravite bozuklukları elde edilmiştir.

Her bir veri seti, OpenStreetMap tabanlı güzergâh tanımlamaları üzerinden belirlenen koordinat noktaları için gravite bozukluğu (δg) değerlerinin hesaplanması yoluyla elde edilmiştir. Noktalar arasındaki mesafe, seçilen bölgenin topoğrafik karmaşıklık seviyesine uyumlu olacak şekilde belirlenmiştir.

(1) Giresun Test Seti

Bu veri seti, havadan mobil gravimetri sistemleri için örnek bir test ortamı oluşturmak amacıyla, Karadeniz Bölgesi'nin topoğrafik açıdan değişken bölgelerinden biri olan Giresun ili bölgesinde oluşturulmuştur. Aynı boylam üzerinde kuzeyden güneye doğru uzanan 500 nokta seçilmiş ve noktalar arası mesafe yaklaşık 200 m olarak tanımlanmıştır. Her noktanın coğrafi koordinatı OpenStreetMap kaynaklı olarak belirlenmiştir. Giresun bölgesinde seçilen 500 nokta Şekil 2' de gösterilmektedir.

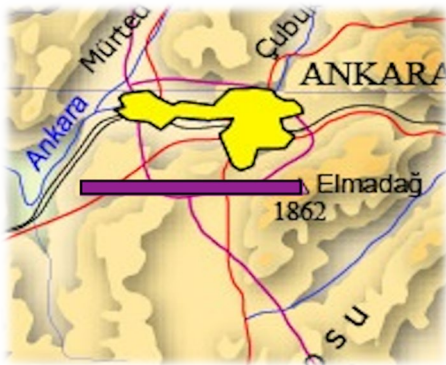


Şekil 2. Giresun veri setindeki toplanan noktaların harita üzerinde gösterimi

Bölgedeki topoğrafik gradyanların yüksek olması, gravite alanında yüksek frekanslı değişimlere neden olmaktadır. Bu durum GM modellemesinde yüksek varyans (σ) ve yüksek sönüm katsayısı (β) değerleri ile temsil edilir. Dolayısıyla Giresun veri seti, kısa korelasyon uzunluklarının baskın olduğu, hızlı değişen gravite anomalilerini karakterize etmek için uygun bir test ortamı sağlamaktadır.

(2) Ankara Test Seti

İç Anadolu'nun homojen topoğrafyasını temsil eden Ankara veri seti, yaklaşık 39,9°N enlemi boyunca doğu-batı doğrultusunda seçilen 500 noktadan oluşturulmuştur. Bu bölge, Karadeniz kıyılarına kıyasla düşük topoğrafik varyasyon göstermektedir. Düz bir uçuş rotasını simüle edecek şekilde kurgulanan bu veri setinde, gravite bozukluğu değerleri, Giresun'a göre daha düşük genlikli ve daha düzenli bir dağılım sergiler. Ankara bölgesinde seçilen 500 nokta Şekil 3' de gösterilmektedir.



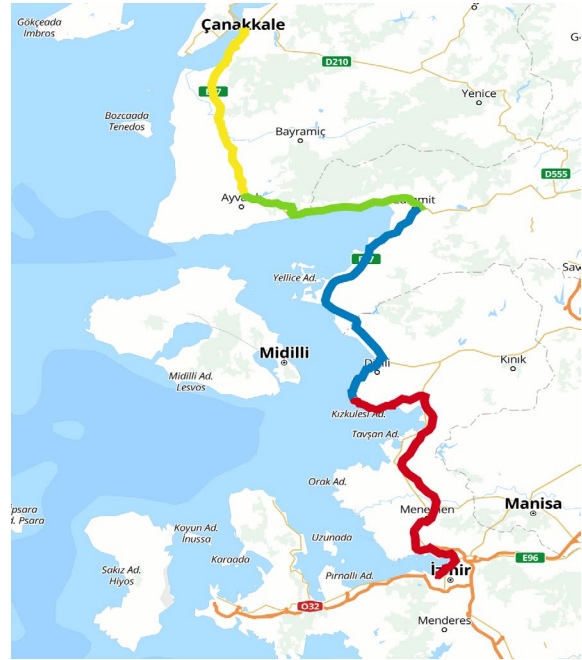
Şekil 3. Ankara veri setindeki toplanan noktaların harita üzerinde gösterimi

Buna bağlı olarak, Ankara veri seti genellikle daha düşük varyans (σ) ve daha küçük sönüm katsayısı (β) değerleri ile modellenmektedir. Bu özellikleri nedeniyle Ankara seti, uzun korelasyon uzunluklarının hakim olduğu nispeten sakin gravite alanlarını temsil eden bir test bölgesidir.

(3) İzmir-Çanakkale Test Seti

Yersel mobil gravimetri uygulamalarındaki kara araçlarının izlediği rotaya örnek teşkil etmesi amacıyla İzmir ile Çanakkale arasındaki güzergâh boyunca OpenStreetMap tabanlı bir rota planlayıcısı ile bu test seti oluşturulmuştur. Rota dört segment halinde modellenmiştir ve her

segment yaklaşık 90 km uzunluğundadır. Güzergâh kıyı bölgeleri, ova alanları ve dağlık kütleler gibi farklı topoğrafik sınıfları içerdiğinden, gravite bozukluğu dağılımında geniş bir spektral çeşitlilik sunmaktadır. İzmir-Çanakkale güzergahında seçilen 4 etaplı güzergâh Şekil 4' de gösterilmektedir.



Şekil 4. İzmir – Çanakkale istikametinde 1.etap (Kırmızı), 2.etap (Mavi), 3.etap (Yeşil) ve 4.etap(sarı) veri setinin harita üzerinde gösterimi.

Bu yapı, bölgeler arasındaki korelasyon parametresi değişimlerinin sistematik olarak analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

3. UYGULAMA VE BULGULAR

Giresun, Ankara ve İzmir-Çanakkale bölgelerinden elde edilen gravite bozukluğu veri setlerine yönelik gerçekleştirilen GM model analizi üç temel aşamadan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle verilerin mekânsal ACF hesaplanmış; ardından 1'nci dereceden 4'üncü dereceye kadar olan GM modelleri bu fonksiyon üzerine uygulanmıştır. Analiz süreci, ilgili bölgelerin topoğrafik yapısıyla en uyumlu GM korelasyon parametrelerinin belirlenmesiyle tamamlanmaktadır.

Model derecesi arttıkça sinyalin daha yüksek türevleri modele dahil edildiğinden ACF eğrisine uyum artmakta ve sonuç olarak σ değerinde kademeli bir azalma gözlenmektedir (Jordan,

1972). Bu durum, yüksek dereceli modellerin sinyali daha fazla yumuşatarak düşük frekanslı bileşenleri baskın hâle getirmesinden kaynaklanmaktadır (Jekeli, 2001).

Tablo 2, 3, 4 ve 5, Ankara, Giresun ve İzmir-Çanakkale bölgelerinde her bir GM model derecesi için elde edilen karşılaştırmalı korelasyon parametrelerini göstermektedir.

Tablo 2. 1'inci Derece Gauss-Markov Modeli İçin Bölgelere Göre Parametre Karşılaştırması

Bölge (Topoğrafya)	σ (mGal)	$1/\beta$ (km)	Korelasyon Uzunluğu (km)
Ankara	14.5842	31.5075	31.5075
Giresun	36.6609	18.2262	18.2262
İzmir – Çanakkale 1. Etap	9.4720	45.3349	45.3349
İzmir – Çanakkale 2. Etap	6.4010	56.1188	56.1188
İzmir – Çanakkale 3. Etap	31.5840	22.6091	22.6091
İzmir – Çanakkale 4. Etap	5.1340	33.2106	32.2106

Tablo 3. 2'nci Derece Gauss-Markov Modeli İçin Bölgelere Göre Parametre Karşılaştırması

Bölge (Topoğrafya)	σ (mGal)	$1/\beta$ (km)	Korelasyon Uzunluğu (km)
Ankara	13.5498	16.8585	36.1784
Giresun	33.9358	9.8750	21.1918
İzmir – Çanakkale 1. Etap	8.8137	24.0834	51.6829
İzmir – Çanakkale 2. Etap	5.9665	29.7227	63.7850
İzmir – Çanakkale 3. Etap	29.0425	12.5673	26.9695
İzmir – Çanakkale 4. Etap	4.7893	17.4529	37.4540

Tablo 4. 3'üncü Derece Gauss-Markov Modeli İçin Bölgelere Göre Parametre Karşılaştırması

Bölge (Topoğrafya)	σ (mGal)	$1/\beta$ (km)	Korelasyon Uzunluğu (km)
Ankara	13.3538	12.7481	37.0078
Giresun	33.4117	7.4917	21.7485
İzmir – Çanakkale 1. Etap	8.6915	18.1699	52.7472
İzmir – Çanakkale 2. Etap	5.8878	22.3881	64.9927
İzmir – Çanakkale 3. Etap	28.5469	9.5688	27.7783
İzmir – Çanakkale 4. Etap	4.7265	13.1265	38.1062

Tablo 5. 4'üncü Derece Gauss-Markov Modeli İçin Bölgelere Göre Parametre Karşılaştırması

Bölge (Topoğrafya)	σ (mGal)	$1/\beta$ (km)	Korelasyon Uzunluğu (km)
Ankara	12.8596	8.8811	31.1905
Giresun	32.1202	5.2444	18.4183
İzmir – Çanakkale 1. Etap	8.3779	12.6250	44.3392
İzmir – Çanakkale 2. Etap	5.6842	15.4979	54.4287
İzmir – Çanakkale 3. Etap	27.4387	6.6462	23.3415
İzmir – Çanakkale 4. Etap	4.5631	9.0689	31.8503

Model çıktıları, korelasyon parametrelerinin bölgesel topoğrafyanın yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir. Düz ve homojen topoğrafyaya sahip Ankara bölgesinde gravite bozukluğu düşük varyans (≈ 13 mGal) ve yüksek korelasyon uzunluğu ($\approx 31-37$ km) ile karakterizedir. Bu durum, alanın düşük frekanslı bileşenlerin baskın olduğu, mekânsal olarak yumuşak ve süreklilik gösteren bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Dağlık topoğrafyaya sahip Giresun bölgesinde gravite bozukluğu yüksek varyans (≈ 33 mGal) ve kısa korelasyon uzunluğu ($\approx 18-21$ km) ile

karakterizedir. Bu durum, gravite sinyalinde yüksek frekanslı bileşenlerin ve kısa mesafeli değişimlerin baskın olduğunu, dolayısıyla alanın hızlı ve düzensiz mekânsal değişimler sergilediğini göstermektedir.

Orta karmaşıklıkta topoğrafyaya sahip İzmir-Çanakkale Bölgesi için σ ve β değerlerinin bölgesel olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, gravite bozukluğunun mekânsal yapısının homojen olmadığını ve farklı alt bölgelerde farklı frekans içerikleri ile korelasyon özelliklerinin ortaya çıktığını göstermektedir.

GM model analizinden elde edilen sonuçlar; yalnızca yüzey topoğrafyasının değil, aynı zamanda yerkabuğu yoğunluk dağılımı, jeolojik yapı ve izostatik etkilerin bütünleşik bir sonucu olan bölgesel gravite alanı özellikleri ile gravite bozukluğunun istatistiksel karakteri arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, mobil gravimetride kullanılacak stokastik modellerin parametre kestirimlerinde bölgesel gravite alanının karakteristik özelliklerine göre seçim yapılmasının önemini açıkça ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, ICGEM platformu üzerinden EGM2008 modeli kullanılarak elde edilen gravite bozukluğu sinyalinin mekânsal korelasyon yapısının, bölgesel topoğrafya ve jeolojik yapıya bağlı olduğu sayısal parametrelerle göstermiştir. Gravite bozukluğu; düşük topoğrafik gradyana ve nispeten homojen jeolojik yapıya sahip bölgelerde daha uzun korelasyon mesafeleri ve düşük varyans sergilerken, karmaşık yoğunluk dağılımlarının ve yüksek eğimli yapıların bulunduğu bölgeler kısa korelasyon mesafeleri ve yüksek varyans ile karakterize edilmiştir. EKF'nin performansı, ACF eğrisine en yakın uyumu sağlayan GM korelasyon parametrelerinin seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Çalışma kapsamında veri kaynağı olarak kullanılan EGM2008 modeli, belirli bir uzaysal çözünürlüğe sahip sonlu bir küresel harmonik model olması nedeniyle, kısa dalga boyulu (yüksek frekanslı) gravite anomalilerini yapısı gereği filtrelemektedir. Bu bağlamda, analizler sonucunda elde edilen korelasyon uzunlukları ve varyans değerlerinin, mutlak gerçek gravite alanının değil, EGM2008'in mekânsal çözünürlüğü sınırlarında temsil edilebilen bölgesel gravite alanının stokastik karakteristiğini yansıttığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte,

dinamik saha ölçümleri öncesinde Q matrisinin yapılandırılması ve başlangıç değerlerinin atanması süreçlerine altlık oluşturmaktadır.

Elde edilen GM parametreleri, EKF'nin ince ayar (tuning) aşamasına doğrudan katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, çalışma bölgesinin topoğrafik özelliklerine ve GM model derecesine bağlı olarak değişen σ ve β parametreleri dikkate alınarak, en uygun GM model derecesinin (1., 2. veya 3. derece) belirlenmesi ve EKF tasarımında kullanılması önerilmektedir.

Sistem performansının ve korelasyon yapısının topoğrafik gradyana bağlı değişimi, en az 3 farklı topoğrafik gradyan (düzlük, dağlık, kıyı) içeren bölgelerde test edilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada elde edilen korelasyon parametreleri ve hata modelleri, Harita Genel Müdürlüğüne gerçekleştirilecek yersel ve hava mobil gravimetri çalışmalarına yöntemsel temel sunmaktadır.

ORCID

Mehmet Emir YAYLA 

<https://orcid.org/0009-0001-4127-4679>

Yunus Aytaç AKDOĞAN 

<https://orcid.org/0000-0003-2232-5327>

Murat DURMAZ 

<https://orcid.org/0000-0002-6565-6639>

KAYNAKLAR

- Akdoğan, Y. A., Durmaz, M., Yıldız, H. (2025). Terrestrial mobile gravimetry using a temperature stabilized IMU. *Measurement Science and Technology*, 36(3), 035113. doi: [10.1088/1361-6501/adb775](https://doi.org/10.1088/1361-6501/adb775)
- Ayres-Sampaio, D., Deurloo, R., Bos, M., Magalhães, A. ve Bastos, L. (2015). A comparison between three IMUs for strapdown airborne gravimetry. *Surveys in Geophysics*, 36(4), 571–586.
- Bastos, L., Pascoa, J. ve Silva, J. (2001). The Portuguese precise geoid—a leap forward. *Journal of Geodesy*, 75(5-6), 278–286.

- Becker, D. (2016). *Advanced calibration and data evaluation methods for airborne gravimetry* (Doktora Tezi). Münih Teknik Üniversitesi, Almanya.
- Becker, D., Nielsen, J. E., Ayres-Sampaio, D., Forsberg, R., Becker, M. ve Bastos, L. (2015). Drift reduction in strapdown airborne gravimetry using a simple thermal correction. *Journal of Geodesy*, 89, 1133-1144. doi:10.1007/s00190-015-0839-8
- Deurloo, R., Yan, W., Bos, M. ve Bastos, L. (2015). Validation of GOCE gravity field models using Portuguese gravity data. *International Association of Geodesy Symposia*, 143, 323–329.
- Forsberg, R. ve Olesen, A. V. (2010). *Airborne gravimetry - Theory and applications (Lecture Notes in Geodesy)*. Kopenhag: DTU Space.
- Gerlach, C., Dorobantu, R., Ackermann, C., Kjörsvik, N. S. ve Boedecker, G. (2010). Preliminary results of a GPS/INS airborne gravimetry experiment over the German Alps. *Gravity, Geoid and Earth Observation* içinde (s. 235-241). Berlin, Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-642-10634-7_31
- Gerlach, C., Ackermann, C., Dorobantu, R. ve Boedecker, G. (2005). A testbed for airborne inertial geodesy: Terrestrial gravimetry experiment by INS/GPS.
- Glennie, C. L., Schwarz, K. P., Bruton, A. M., Forsberg, R., Olesen, A. V. ve Keller, K. (2000). A comparison of stable platform and strapdown airborne gravity systems. *Journal of Geodesy*, 74(7-8), 591-602.
- Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems* (2. baskı). Boston: Artech House.
- İnce, E. S., Barthelmes, F., Reiland, S., ElgerForste, C., Flechtner, F. ve Schuh, H. (2019). ICGEM—15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth Syst.Sci.*
- Jekeli, C. (1994). Airborne vector gravimetry using precise, position-aided inertial measurement units. *Bulletin Géodésique*, 68(1), 17-36.
- Jekeli, C. (2001). *Inertial navigation systems with geodetic applications*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Jensen, T. E. (2018). *Airborne gravimetry: Improvements from new IMU technologies and processing strategies* (Doktora Tezi). DTU Space, Danimarka Teknik Üniversitesi, Danimarka.
- Jordan, S. K. (1972). Self-consistent statistical models for the gravity anomaly, vertical deflections, and undulation of the geoid. *Journal of Geophysical Research*, 77(20), 3660-3670.
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. ASME Transactions, Series D: *Journal of Basic Engineering*, 82, 35-45.
- Kwon, J. H. ve Jekeli, C. (2001). A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS. *Journal of Geodesy*, 74, 690–700. doi: 10.1007/s001900000130
- Li, X. (2007). Practicalities of analyzing airborne gravity data. *The Leading Edge*, 26(8), 1010-1015.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C. ve Factor, J. K. (2012). The development and evaluation of the earth gravitational model 2008 (EGM2008). *J. Geophys. Res.*, 117.
- Schack, P. (2021). *Investigation of systematic errors in airborne vector gravimetry* (Doktora Tezi). Danimarka Teknik Üniversitesi, Danimarka.
- Schwarz, K. P., Colombo, O., Hein, G. ve Knickmeyer, E. T. (1992). Airborne gravimetry for geoid determination. *Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning* içinde (Cilt 110, ss. 273-283). Columbus: Ohio State University.
- Torge, W. ve Müller, J. (2012). *Geodesy* (4. baskı). Berlin: Walter de Gruyter.
- Yıldız, H., Simav, M., Akpınar, İ. ve Akdoğan, Y. A. (2021). Türkiye’de güncel yersel gravimetri çalışmaları. *Harita Dergisi*, 166, 10-24.
- Yu, H., Wang, J. ve Wang, L. (2015). The performance of the strapdown airborne gravimeter SAG-2. *International Association of Geodesy Symposia*, 143, 331-336.