# Analitik Ataletsel Navigasyon ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Entegrasyonuna Dayalı Hava Gravimetrisi: Türkiye'de İlk Uygulamalar

(Airborne Gravimetry Based on the Integration of Strapdown Inertial Navigation and Global Navigation Satellite Systems: The First Implimentations in Turkey)

## Mehmet SİMAV 回

Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesi Başkanlığı, Ankara mehmet.simav@harita.gov.tr

Geliş Tarihi (Received): 13.07.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

### ÖΖ

Yer gravite alanının konum-destekli analitik ataletsel navigasyon sistemi kullanılarak hava araçlarıyla ölçülmesine Analitik Hava Gravimetrisi (Strapdown Airborne Gravimetry-SAG) adı verilmektedir. Bu yöntem, yirmi yıldan daha fazla bir süredir yerden ulaşılamayan alanlar üzerinde gravite verisi toplamak amacıyla jeodezi ve jeofizikte etkin bir şekilde Türkiye kullanılmaktadır. yükseklik sisteminin modernizasyonu ve gravite altyapısının iyileştirilmesi projesi kapsamında, Harita Genel Müdürlüğü ve iMAR GmbH iş birliğiyle Navigation SAG sistemi geliştirilmiştir. 2017 ve 2018 yılları arasında başarıyla tamamlanan cihaz ve yazılım testlerinin ardından ilk üretim odaklı hava gravimetrisi kampanyası 2019 yılında Göller Bölgesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çapraz-geçiş noktalarında yapılan karşılaştırmalarda 0.8 mGal altında RMSE değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuç, ölçü duyarlılığının daha önemli olduğu jeofizik uygulamalar için dikkate değer ve kritik bir sonuçtur. Güncel yüksek-çözünürlüklü global jeopotansiyel model ile yapılan dış karşılaştırmada ise yaklaşık 1 mGal ortalama fark bulunmuştur. Bölgesel jeoit modelleme gibi jeodezik uygulamalarda gereksinim duyulan gravite alanı uzun dalga boyu kararlılığı açısından bu sonuç memnuniyet vericidir. Göller Bölgesi üzerinde nispeten geçiş bir alandaki veri boşluğu ilk defa doldurulmuştur. Hava gravimetrisi çalışmaları veri boşluklarından kavnaklanan hataların azaltılmasına ve gravite alanı haritalarının (jeoit modeli, serbest-hava, Bouguer, isostatik gravite anomalisi vb.) doğruluğunun/çözünürlüğünün geliştirilmesine ve daha doğru yorumlar yapılabilmesine hizmet edecektir.

**Anahtar Kelimeler**: Analitik Hava Gravimetrisi, Analitik Ataletsel Ölçü Ünitesi, Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri, Genişletilmiş Kalman Filtresi, Gravite Bozukluğu.

### ABSTRACT

Measuring the Earth's gravity field with positionaided strapdown inertial measurement unit using an aircraft as a mobile platform is regarded as Strapdown Airborne Gravimetry (SAG). It has been a very efficient technique in geodesy and geophysics for more than two decades that allows to acquire gravity data over areas not accessible by land. A SAG system has been developed by the cooperation of General Directorate of Mapping and iMAR Navigation GmbH within the Turkish

height system modernization and gravity recovery project. After successful completion of the instrumentation and the software test procedure between 2017 and 2018, the first production-oriented airborne campaign was carried out during the fall 2019 over the Turkish Lake District. Comparisons at the cross-over points yield RMSE values below 0.8 mGal, which is a remarkable and crucial internal precision especially for geophysical applications where the precision of the measurements is the main concern. The external comparison with the latest high-resolution global geopotential model shows mean bias of around 1 mGal, which can be considered as promising longwavelength stability for geodetic applications such as regional geoid modelling. Relatively large gravity data gaps have been covered over the Turkish Lake District for the first time that will enable us to reduce the errors stem from the data voids and to enhance the resolution of the gravity field maps (e.g. geoid model, free-air, Bouguer, isostatic gravity anomalies) for better interpretations.

**Keywords**: Strapdown Airborne Gravimetry, Strapdown Inertial Measurement Unit, Global Navigation Satellite Systems, Extended Kalman Filter, Gravity Disturbance.

### 1. GİRİŞ

Yer alanının ölçülmesi gravite ve modellenmesi jeodezi biliminin en temel ilgi alanlarından biridir. Yer'in çekim ve merkezkaç kuvvetlerinin toplamından oluşan gravite alanı, konum ve zaman uzayında değişkenlik gösteren vektörel bir alandır. Yer gravite alanı bilgisi; düşey koordinat sistemlerinin gerceklesiminden (jeoit belirleme ve nivelman ağları) hassas konumlama uygulamalarına, navigasvon ve maden/petrol/doğalgaz/jeotermal aramalarından fizik metrolojiye, deniz sevivesi ve değişimleri/buzul erimeleri/iklim değişimlerinin izlenmesinden volkanolojiye, tektonik yapıların belirlenmesinden kabuk/manto modellemesine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bir noktadaki gravite vektörünün düşey bileşeni yatay bileşenlerine oranla çok daha fazla sinyal içerdiğinden 3 boyutlu gravite vektörü genellikle 1 boyutlu düşey bileşeni ile temsil edilmektedir (Torge, 1989).

Atıf/To cite this article: Simav, M. (2021). Analitik Ataletsel Navigasyon ve Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri Entegrasyonuna Dayalı Hava Gravimetrisi: Türkiye'de İlk Uygulamalar. *Harita Dergisi*, 165, 1-16.

Yeryüzü üzerinde veya yüzeye yakın yükseklik ve derinlikte gravite büyüklüğü ölçme işlemi gravimetri olarak adlandırılmaktadır. Ölçü için kullanılan cihazlara gravimetre adı verilmektedir. Gravimetri; ölçünün yüzeye yakınlığına göre yüzey (yersel), kuyu, deniz, deniz altı, hava ve uydu gravimetrisi, kullanılan gravimetreye göre ise bağıl ve mutlak gravimetri olarak sınıflandırılmaktadır. Herbir gravimetri sınıfının doğruluk, çözünürlük, maliyet vb. kategorilerde avantaj ve dezavantajları vardır (Torge, 1989).

Hava gravimetrisi, hava araçları kullanılarak verden birkaç kilometre yükseklikte gravite vektörü bileşenlerinin ölçümü olarak tanımlanabilir. Yaklaşık yarım asırdır jeodezi ve jeofizikte kullanılmakta ve yerden ulaşımın güç ve/veya imkânsız olduğu geniş alanların hızlı ve nispeten uygun maliyetlerle ölçülmesine hizmet etmektedir (Şekil 1). Hava gravimetrisi; gözlenebilir sinyal büyüklüğü, çözünürlük ve kapsama alanı açısından yersel ve uydu gravimetrisi arasında kalan bir tekniktir ve her iki tekniğin zayıf yönlerini kapatmayı amaçlamaktadır. Örneğin; yersel tekniklerle haftalar/aylar sürebilecek bir etüt çalışması, hava gravimetrisi birkaç ile günde tamamlanabilmektedir. Ancak, hava gravimetrisi verilerinin sinyal gücü, çözünürlük/detay ayırma ve doğruluğu yersel verilere oranla daha düşük, uydu verilerine oranla daha yüksektir.



Şekil 1. Hava gravimetrisi.

Bir gravimetre esasen bir ivmeölçerdir ve Yer çekimi ivmesi ile kinematik ivmeyi birlikte ölçmektedir. Gravimetreler, hareketli platformlara monte edildiklerinde tek başına gravite belirlemek için yeterli değildir. Bunun için taşıyıcı platformun hareketini izleyebilecek ilave bilgiye veya veriye ihtiyaç vardır. Bunun yanında ivmeölçer tek bir duyarlı eksen boyunca ölçüm yapabildiğinden, platformun manevrası sırasında sensör yönlendirmesinin takip edilmesi gerekmektedir. Hava gravimetrisindeki bu iki temel problem Şekil 2'de gösterilmiştir.

problem şekilde Birinci iki farklı ele alınabilmektedir. İlkinde, ivmeölçer veya gravimetre mekanik geri bildirimli yalpa çemberi (gimbal) platformlar üzerine monte edilerek (stabilplatform sistemler), hava aracının hareketlerinden izole edilmekte ve uçuş boyunca düşeyde sabit tutulmaktadır (Forsberg ve Olesen, 2010). Stabilsistemler bölgesel gravite platform alanı etütlerinde birçok grup tarafından uzun süredir kullanılmaktadır (Brozena, 1992; Forsberg ve diğerleri, 2001; Zhong ve diğerleri, 2015; Li ve diğerleri, 2016; McCubbine ve diğerleri, 2018). Bu sistemler ile uçuş hızına bağlı olarak 4-5 km yarıdalga boyunda birkaç mGal doğrulukla gravite ölçülebilmektedir.



Şekil 2. Hava gravimetrisindeki iki temel problem ve yaygın çözümleri.

İkinci çözümde ise, ivmeölçer ve jiroskop üçlülerinden oluşan Analitik Ataletsel Navigasyon Birimi (Strapdown Inertial Measurement Unit-SIMU) hava aracına fiziksel olarak sabitlenmekte ve sensör yönlendirmesi sayısal (nümerik) olarak sağlanmaktadır. Çekim ve kinematik ivmelenme ayrıştırma problemi ise genellikle Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System-GNSS) kullanılarak çözülmektedir (Schwarz, 1983). GNSS, kinematik ivmelenmenin belirlenmesi yanında hava aracının hareketinden dolayı ortaya çıkan farklı ivmelenmelerin (Coriolis ve Eötvös) belirlenmesine de katkı sağlamaktadır.

Hava gravimetrisinin tarihi 1960'lı yılların başlangıcına uzanmaktadır (Thompson, 1959; Thompson ve LaCoste, 1960; Gumert, 1998). O tarihlerde sabit ve döner kanatlı hava araçları ile yapılan ilk denemelerde, düşük konumlama doğruluğu ve yeteri duyarlılığa sahip olmayan gravimetrelerin kullanımı nedeniyle ancak 10 mGal seviyelerinde doğruluklara erişilebilmiştir.

İlave konumlama sistemi destekli SIMU ile hava gravimetrisi çalışmaları, 1980'lerden sonra GPS sinyallerinin topluma açık hale gelmesiyle birlikte daha da önem kazanmıştır (Schwarz, 1983; Schwarz ve diğerleri, 1992; Wei ve Schwarz, 1998; Glennie ve Schwarz, 1999; Ayres-Sampaio ve diğerleri. 2015). Özellikle navigasvon amaclı calısmalar icin dizavn edilen ve kullanılan SIMU'lar, gravimetrik uvgulamalarda geleneksel stabil-platform sistemlere oranla daha cok avantaj sağlamaktadır. Düşük enerji tüketimi ve az yer kaplamaları, otonom işletimi, fiyatlarının daha düşük olması ve stabil-platform sistemlere oranla türbülansa daha az duyarlı olmalarının yanında, SAG sistemleri gravite alanının kısa dalga boylarında stabil-platform sistemlere göre daha iyi performans sergilemekletir. Bunun yanında üç eksenli bir SAG sisteminin gravite vektörü yatay belirleme bileşenlerini de potansiyeli bulunmaktadır. Becker ve diğerleri (2015), Jensen ve Forsberg (2018), Jensen ve diğerleri (2019), Simav ve diğerleri (2020), Simav (2020a) ve Simav (2020b) tarafından hava gravimetrisi için uygun SIMU'lar ile gerçekleştirilen güncel çalışmalarda, mGal altı duyarlılığa ve 2-3 km yarı dalga boyunda 1-2 mGal doğruluğa erişilebildiği gösterilmiştir.

SIMU'lar perfomanslarına göre deniz, hava, orta, taktik ve tüketici olmak üzere beş farklı kategoride sınıflandırılırlar (Groves, 2013). Denizdereceli SIMU'lar askeri gemi, denizaltı, kıtalararası balistik füze ve uzay araçlarında SIMU'ların kullanılmaktadır. Bu ataletsel navigasyon çözüm sapmaları 1.8 km/gün'den daha azdır. Hava ya da navigasyon-dereceli SIMU'lar askeri ve ticari hava araçlarında kullanılmakta olup, konum sapmaları 1-4 km/saat arasında değişmektedir. Taktik-dereceli SIMU'lar genellikle güdümlü silah ve insansız hava araçlarında kullanılırlar ve konum sapmaları 10-40 km/saat civarındadır. Tüketici-dereceli SIMU'lar ise akıllı telefonlarda ve otomobil endüstrisinde kullanılmakta olup, konum sapmaları 1-3 km/dk mertebesindedir. SIMU'ların belirli aralıklarla laboratuvarda kalibrasyona tabi tutulmaları gerekmektedir. Fiyatları ise derecesine göre birkaç on dolardan milyon dolarlara kadar değişkenlik göstermektedir. SAG çalışmalarında en az navigasyon-dereceli SIMU'lar kullanılmaktadır.

Yersel gravimetri ile doldurulamayan veri boşlukları, gravite alanı modelleme ve yorumlama çalışmalarında temel problemlerden biridir. Türkiye'de yersel gravimetri uygulamanın zor hatta imkânsız olduğu geniş su alanları, sahil şeritleri ve engebeli araziler gibi birçok coğrafi detay bulunmaktadır. Hava gravimetrisi, bu alanlardaki veri boşluklarının doldurulması için kaçınılmaz bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi" projesi (Simav ve diğerleri, 2015) kapsamında Harita Genel Müdürlüğünce navigasyon-dereceli bir SIMU tedarik edilmistir. SIMU: gravite cözümü yapamayan, sadece navigasyon amaçlı kullanılabilen ve üretici tarafından tescilli bir temin edilebildiğinden, yazılım ile tedarik süresince yazar tarafından SAG veri işleme yazılımı geliştirilmiştir. 20-24 Mart 2017 tarihleri arasında Kırıkkale-Çorum bölgesindeki test alanında gerçekleştirilen fonksiyon ve yazılım denemelerinin ardından yaklaşık 1.5 yıl boyunca iyileştirmesi sistem ve yazılım üzerinde çalışılmıştır. Bu süreç içerisinde SIMU'ya sıcaklık stabilizasyonu sistemi entegre edilmiş, analiz yazılımındaki hatalar giderilerek yeni fonksiyonlar eklenmiştir. 24-28 Eylül 2018 tarihleri arasında ikinci test çalışması gerçekleştirilmiştir. Üretim odaklı ilk hava gravimetrisi çalışmaları ise 17 Ekim-21 Kasım 2019 tarihleri arasında Göller Bölgesi üzerinde yapılmıştır (Simav, 2020b).

Bu çalışmada; SAG temelleri ile SIMU ve GNSS verilerinden uçuş yüksekliğinde gravite bozukluğu hesaplama yöntemleri anlatılmakta, Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ve veri işleme/analiz yazılımı tanıtılmakta, bugüne kadar gerçekleştirilen uygulamalara ilişkin sonuçlar sunulmakta ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

### 2. SAG TEMELLERİ

### a. Direkt Çözüm

SAG teorisi, ataletsel veya inersiyal sistemde Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır. İnersiyal sistemde (*i*) hareketli cismin kinematik ivmesi  $\ddot{x}^i$ , cisim üzerindeki spesifik kuvvet  $f^i$  ve gravite vektörünün  $g^i$ toplamına eşittir. Dolayısıyla cisme etki eden gravite ivmesi, (1) eşitliğinde gösterildiği şekilde kinematik ivme ile spesifik kuvvetin farkı olarak ifade edilebilmektedir.

$$\boldsymbol{g}^i = \ddot{\boldsymbol{x}}^i - \boldsymbol{f}^i \tag{1}$$

Pratik uygulamalar için gravite vektörünün Yer ile birlikte dönen, merkezi SIMU olan ve eksenleri Kuzey-Doğu-Düşey doğrultusunu gösteren lokal (toposentrik) koordinat sisteminde (*n*) belirlenmesi gerekmektedir. Bu koordinat sisteminde Yer'in dönmesinden ve cismin hızından kaynaklan etkilerden dolayı (1) eşitliği (2) eşitliğine dönüşmektedir. (2) numaralı eşitlikteki (*b*) üst indisi, merkezi toposentrik koordinat sistemi ile çakışık eksenleri burun, sağ kanat ve taban doğrultusunda olan SIMU ivmeölçer ve jiroskop eksenlerinin oluşturduğu gövde koordinat sistemini ifade etmektedir.

$$\boldsymbol{g}^{n} = \ddot{\boldsymbol{x}}^{n} - \boldsymbol{C}^{n}_{b} \boldsymbol{f}^{b} + (2\boldsymbol{\Omega}^{n}_{ie} + \boldsymbol{\Omega}^{n}_{en}) \dot{\boldsymbol{x}}^{n}$$
(2)

$$\boldsymbol{C}_{b}^{n} = \boldsymbol{R}_{Z}(-\psi)\boldsymbol{R}_{Y}(-\theta)\boldsymbol{R}_{X}(-\phi)$$
(3)

$$\mathbf{\Omega}_{ie}^{n} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin \varphi & 0 \\ -\omega_{ie} \sin \varphi & 0 & -\omega_{ie} \cos \varphi \\ 0 & \omega_{ie} \cos \varphi & 0 \end{bmatrix}$$
(4)

$$\mathbf{\Omega}_{en}^{n} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{v_{E}^{n} \tan \varphi}{(N+h)} & \frac{-v_{N}^{n}}{(M+h)} \\ \frac{-v_{E}^{n} \tan \varphi}{(N+h)} & 0 & \frac{-v_{E}^{n}}{(N+h)} \\ \frac{v_{N}^{n}}{(M+h)} & \frac{v_{E}^{n}}{(N+h)} & 0 \end{bmatrix}$$
(5)

(2) eşitliğindeki  $g^n$  toposentrik koordinat sisteminde gravite vektörünü, *x*<sup>n</sup> GNSS konum çözümünün ikinci türevinden elde edilen kinematik ivmeyi,  $C_b^n$  gövde koordinat sisteminden lokal koordinat sistemine dönüşüm matrisini, f<sup>b</sup> ivmeölçer spesifik kuvvet verisini,  $\Omega_{ie}^n$  ve  $\Omega_{en}^n$ terimleri Yer dönme ve taşıma hızları çarpıksimetrik matrislerini,  $\dot{x}^n$  ise yine GNSS konum çözümünün birinci türevinden elde edilen hız  $v^n$ vektörünü ifade etmektedir. Eşitliğin son terimi literatürde Eötvös düzeltmesi olarak anılmaktadır.  $\boldsymbol{C}_{b}^{n}$  dönüşüm matrisi;  $\psi$  dönme açısı (yaw),  $\theta$ yunuslama açısı (pitch) ve  $\phi$  yatış açısının (roll) ilgili rotasyon matrisine yerleştirilmesi sonrasında, üç rotasyon matrisinin çarpımı ile elde edilmektedir. (4) eşitliğindeki  $\omega_{ie} = 7.292115 \times$  $10^{-5}$  rad/s Yer dönme hızını,  $\varphi$  jeodezik enlemi temsil etmektedir. (5) eşitliğindeki  $v_N^n$  ve  $v_E^n$ terimleri kuzey ve doğu yönlerindeki hız bileşenlerini N ve M normal ve meridyen yönündeki elipsoid ana eğrilik yarıçaplarını, h ise elipsoid yüksekliğini ifade etmektedir.

Lokal koordinat sisteminde gerçek gravite vektörü, referans elipsoidinin oluşturduğu normal gravite vektörü  $\gamma^n$  ve gravite bozukluğu  $\delta g^n$  vektörlerinin toplamı cinsinden ifade edilebilmektedir. Sonuç olarak uçuş yüksekliğinde gravite bozukluğu vektörü aşağıdaki şekilde yazılmakta, normal gravite vektörü Somigliana kapalı formülü ile hesaplanabilmektedir (Moritz, 2000).

$$\delta g^n = \ddot{\mathbf{x}}^n - \boldsymbol{C}_b^n \boldsymbol{f}^b + (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n) \dot{\mathbf{x}}^n - \boldsymbol{\gamma}^n \tag{6}$$

(6) eşitliği SAG temel eşitliği olarak kabul edilir. Ataletsel dönüş hızı (açısal hız) ve ivme ölçüleri ile birlikte GNSS verilerinin entegrasyonuyla gravite bozukluğunun belirlenmesinde kullanılır. Bu vöntem literatürde direkt yöntem olarak bilinmektedir. GNSS kinematik ivme çözümleri gürültü içerdiğinden (6) eşitliği ile elde edilen gravite bozukluğu, konumsal düşük geçirgenli filtre ile filtrelenerek nihai çözüm oluşturulmaktadır (Glennie ve Schwarz, 1999; Glennie ve diğerleri, 2000; Forsberg ve diğerleri, 2001; Hwang ve diğerleri, 2006; Forsberg ve Olesen, 2010; Sampietro ve diğerleri, 2017).

#### b. Dolaylı Çözüm

SAG dolaylı gravite bozukluğu çözümü ataletsel navigasyon eşitlikleri ve ilave ölçü entegrasyonları ile elde edilir. Lokal koordinat sistemine navigasyon eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılmaktadır (Groves, 2013):

$$\dot{\boldsymbol{p}}^n = \boldsymbol{T}_r^p \boldsymbol{v}^n \tag{7}$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}^n = \boldsymbol{C}_b^n \boldsymbol{f}^b - (2\boldsymbol{\Omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\Omega}_{en}^n)\boldsymbol{\nu}^n + \boldsymbol{\gamma}^n + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{g}^n \tag{8}$$

$$\dot{\boldsymbol{C}}_{b}^{n} = \boldsymbol{C}_{b}^{n}\boldsymbol{\varOmega}_{ib}^{b} - (\boldsymbol{\varOmega}_{ie}^{n} + \boldsymbol{\varOmega}_{en}^{n})\boldsymbol{C}_{b}^{n}$$

$$\tag{9}$$

(7) eşitliğindeki  $p^n$  enlem, boylam ve elipsoid yüksekliğinden oluşan konum vektörünü,  $T_r^p$ kartezyen-eğri koordinat dönüşüm matrisini,  $v^n$ ise Yer referanslı hız vektörünü ifade etmektedir. (9) eşitliğindeki  $\Omega_{ib}^b$  matrisi ise jiroskoplar tarafından ölçülen açısal hız vektörünün çarpıksimetrik matris halidir.

SIMU ivmeölçer ve jiroskoplar çıktıları; atım  $(\boldsymbol{b}_a, \boldsymbol{b}_g)$ , ölçek  $(\boldsymbol{s}_a, \boldsymbol{s}_g)$ , yanlış hizalama/çapraz çiftleme  $(\boldsymbol{M}_a, \boldsymbol{M}_g)$  gibi hatalar ile rastlantısal gürültü  $(\boldsymbol{w}_a, \boldsymbol{w}_g)$  içermektedir (Groves, 2013).

$$\tilde{\boldsymbol{f}}^b = \boldsymbol{b}_a + \boldsymbol{M}_a \boldsymbol{f}^b + \boldsymbol{w}_a \tag{10}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{\omega}}^{b} = \boldsymbol{b}_{g} + \boldsymbol{M}_{g}\boldsymbol{\omega}^{b} + \boldsymbol{w}_{g}$$
(11)

(10) ve (11) eşitliklerindeki  $\tilde{f}^{b}$  hatalı SIMU ivmeölçer spesifik kuvvet çıktısını,  $\tilde{\omega}^{b}$  ise jiroskop açısal hız çıktısını ifade etmektedir. Bu hatalar kendi içinde statik ve dinamik bileşenlere ayrılmaktadır. Statik hata bileşenleri laboratuvar kalibrasyonları ile giderilmektedir. Ancak dinamik hata bileşenleri rastlantısal süreçler olduğundan yanlızca ilave sensör entegrasyonları yardımıyla kestirilebilmektedir. Birinci bölümde bahsedilen SIMU performansının belirlenmesi, derecelendirme ve kategorilendirme işlemi bu hataların büyüklüğü ile doğrudan ilişkilidir. İlave sensör entegrasyonu ile SIMU dinamik hatalarının kestirimi işlemi genellikle Kalman filtresi (Kalman, 1960) ile yapılmaktadır. Şekil 3'de gevşek birleştirmeli-kapalı döngü klasik bir genişletilmiş Kalman filtre (Extended Kalman Filter-EKF) akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 3. EKF ile gevşek birleştirmeli-kapalı döngü SIMU/GNSS entegrasyon akışı (Groves, 2013).

EKF dinamik sistem modeli ve lokal koordinat sisteminde 3 boyutlu konum  $(\delta p^n)$ , hız  $(\delta v^n)$  ve yönelim  $(\delta \psi^n)$  hata vektörü, gövde koordinat sisteminde 3 boyutlu ivmeölçer  $(\delta b_a^b)$  ve jiroskop dinamik atım vektörleri  $(\delta b_g^b)$  ile lokal koordinat sisteminde düşey yöndeki gravite bozukluğunu  $(\delta g^{n-D})$  içeren 16+ hata durum vektörü aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\delta \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{F}(t)\delta \boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{G}(t)\boldsymbol{w}_{\boldsymbol{s}}(t)$$
(12)

$$\delta \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \delta \boldsymbol{p}^{n}, \delta \boldsymbol{v}^{n}, \delta \boldsymbol{\psi}^{n}, \delta \boldsymbol{b}_{a}^{b}, \delta \boldsymbol{b}_{g}^{b}, \delta g^{n-D}, \dots, \dots \end{bmatrix}^{T}$$
(13)

Durum vektörü başlangıç değerlerinin belirlenmesini müteakip SIMU ve gravite modeli vardımıyla (7-9) eşitliklerinde verilen navigasyon eşitlikleri çalıştırılmakta ve bir sonraki SIMU ölçü epoğu için konum, hız ve yönelim vektörleri hesaplanmaktadır (zamanda ilerleme adımı). Yeni GNSS konum ve hız çözümü bir ile karşılaşıldığında EKF eşitlikleri çalıştırılmakta ve ölçü güncellemesi yapılmaktadır (ölçü güncelleme adımı). Bu adımın sonunda (13) eşitliğinde verilen durum hata vektörleri kestirimleri kapalı döngü düzeltme ile SIMU kestirimlerine eklenmekte, toplam durum vektöründe biriken hatalar minimize edilmektedir. Son olarak sonuç durum vektörü Rauch-Tung-Striebel (RTS) yöntemi (Rauch ve yumuşatılmaktadır. diăerleri. 1965) ile Uygulamada bu işlem ileri yönlü çözüm geri yönlü yumuşatma, geri yönlü çözüm ileri yönlü yumuşatma veya ileri+geri+ileri yönlü çözüm geri yönlü yumuşatma şeklinde yapılabilmektedir (Jensen ve Forsberg, 2018).

SIMU ivmeölçer ve jiroskop dinamik atım hataları ile gravite bozukluğu rastgele sabit, rastgele yürüyüş, N'inci derece Gauss-Markov veya bu stokastik süreçlerin kombinasyonları ile modellenebilmektedir (Becker ve diğerleri, 2015). SIMU ivmeölçer/jiroskop dinamik atım hatalarının rastgele yürüyüş, gravite bozukluğunun ise 3'üncü derece Gauss-Markov ile modellendiği bir durumda (12) eşitliğindeki sistem matrisi (*F*), sistem gürültü dağılım matrisi (*G*) ve sistem gürültü vektörü ( $w_s$ ) aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$T = \begin{bmatrix} F_{pp} & F_{pv} & F_{p\psi} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} \\ F_{vp} & F_{vv} & F_{v\psi} & C_b^n & 0_{3\times3} & \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} \\ F_{\psi p} & F_{\psi v} & F_{\psi \psi} & 0_{3\times3} & C_b^n & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} \\ 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times3} & 0_{3\times1} & 0_{3\times1} \\ 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} \\ 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0 & 1 \\ 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & 0_{1\times3} & -\beta_{\delta g}^2 & -3\beta_{\delta g}^2 \end{bmatrix}$$
(14)

ł

$$\boldsymbol{G} = blokdiag(\boldsymbol{0}_{3\times3}, \boldsymbol{C}_b^n, \boldsymbol{C}_b^n, \boldsymbol{I}_{3\times3}, \boldsymbol{I}_{3\times3}, \boldsymbol{I}_{3\times3}) \qquad (15)$$

$$\boldsymbol{w}_{s} = \left[\boldsymbol{w}_{p^{n}}, \boldsymbol{w}_{v^{n}}, \boldsymbol{w}_{\psi^{n}}, \boldsymbol{w}_{a}, \boldsymbol{w}_{g}, \boldsymbol{w}_{\delta g}^{GM3}\right]^{T}$$
(16)

(14) eşitliğindeki  $F_{xx}$  alt matrislerinin açık şekillerini Groves (2013)'de bulmak mümkündür.  $w_s$  vektörü içerisindeki stokastik terimler güç yoğunluğu spektrumu ile tanımlanan beyaz gürültü süreçleridir. Gravite bozukluğu 3'üncü derece Gauss-Markov ile modellendiği durumunda hata durum vektörüne gravite bozukluğunun birinci ve ikinci türevleri de eklenmektedir (bakınız Bölüm 2.ç).

Ölçü güncelleme adımında EKF'ye farklı türde ölçüler tanıtılabilmektedir. EKF ölçü modeli, durum vektörü ile ölçüler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi ve ölçülerin stokastik modelini içermektedir.  $\delta z_k$  bir kepoğunda ölçü yenileme vektörü,  $H_k$  ölçü matrisi ve  $w_k^z \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$  ölçü gürültü vektörü olmak üzere, doğrusal ölçü modeli aşağıdaki şekilde yazılabilir (Groves, 2013):

$$\delta \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \delta \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k^z \tag{17}$$

18 parametreli bir durum vektörü içeren EKF için uygulamada sıklıkla kullanılan konum ( $H_p$ ), hız ( $H_v$ ) ve havaalanı gravite bağlantı ölçü matrisleri ( $H_g$ ) aşağıda verilmiştir. Eşitliklerdeki  $\ell^b$ terimi GNSS anteni ile SIMU arasındaki baz vektörünü (lever arm), × işareti ise çarpık-simetrik matrise geçişi ifade etmektedir.

$$\boldsymbol{H}_{p} = [\boldsymbol{I}_{3\times3}, \boldsymbol{0}_{3\times3}, -[\boldsymbol{\mathcal{C}}_{b}^{n}\boldsymbol{\ell}^{b}\times], \boldsymbol{0}_{3\times3}, \boldsymbol{0}_{3\times3}, \boldsymbol{0}_{3\times3}]^{T}$$
(18)

$$\boldsymbol{H}_{v} = \left[\boldsymbol{0}_{3\times3}, \boldsymbol{I}_{3\times3}, -[\boldsymbol{C}_{b}^{n}\boldsymbol{\Omega}_{bb}^{b}\boldsymbol{\ell}^{b}\times], \boldsymbol{0}_{3\times3}, [\boldsymbol{C}_{b}^{n}\boldsymbol{\ell}^{b}\times], \boldsymbol{0}_{3\times3}\right]^{T}$$
(19)

$$\boldsymbol{H}_g = [\boldsymbol{0}_{3\times 3}, \boldsymbol{0}_{3\times 3}, \boldsymbol{0}_{3\times 3}, \boldsymbol{0}_{3\times 3}, \boldsymbol{0}_{3\times 3}, \boldsymbol{I}_{3\times 3}]^T$$
(20)

Özetle; dolaylı SAG çözüm yönteminde gravite bozukluğu, SIMU sensör hataları gibi ilave sistem durumu şeklinde stokastik olarak modellenmektedir. Bu yöntemde ilgili tüm büyüklük ve ölçüler tek bir sistem modeli içerisinde entegre edilmekte, tüm süreç basitleştirilmektedir (Simav, 2020a).

#### c. Dolaylı Çözümde Gravite İndirgemeleri

SAG dolaylı çözümlerindeki uzun dalga boylu hataların azaltılması amacıyla Simav (2020a) tarafından "kaldır-hesapla-geri yükle" prensibine dayalı uzun ve kısa dalga boylu gravite indirgemesi yöntemi önerilmiştir. Gravite bozukluğu; uzun dalga boylu bileşen  $\delta g_{GM}^{n-D}$ , kısa dalga boylu bileşen  $\delta g_{RTM}^{n-D}$  ve artık bileşen  $\delta g_{R}^{n-D}$ olmak üzere üç bölüme ayrıştırılabilmektedir.

$$\delta g^{n-D} = \delta g^{n-D}_{GGM} + \delta g^{n-D}_{RTM} + \delta g^{n-D}_{R}$$
(21)

boylu bilesen. Uzun dalga küresel harmoniklerle temsil edilen global jeopotansivel modellerden (GGM) harmonik sentez yöntemiyle hesaplanabilmektedir (Bucha ve Janák, 2014). Referans yüzeyin üzerinde kalan topoğrafik kütlelerin düşey yönlü çekim ivmesi diğer bir değişle kısa dalga boylu arazi etkisi, artık arazi modeli (Residual Terrain Model-RTM) kullanılarak belirlenmektedir (Forsberg, 1984; Nagy, 1966; Nagy ve diğerleri, 2000). Uçuş yüksekliğindeki GGM ve RTM etkileri, GNSS konum çözümleri kullanılarak SIMU/GNSS entegrasyonundan önce ön analiz aşamasında hesaplanmakta ve SAG çözümü sırasında toplam gravite bozukluğundan çıkarılmaktadır. SAG çözümlerinde daha düşük genlikli ve yumuşatılmış artık gravite bozukları modellenmektedir. GGM ve RTM gravite indirgemeleri SAG çözümü sonunda artık gravite bozukluklarına geri eklenmektedir.

SAG dolaylı çözümünde gravite indirgemelerinin uygulanması durumunda (8)'de verilen navigasyon eşitliğinde ve (13)'de verilen hata durum vektöründe gerekli değişiklikler ve düzenlemeler yapılmaktadır.

### ç. Gravite Bozukluğunun Birinci, İkinci ve Üçüncü Derece Gauss-Markov Stokastik Süreçleri ile Modellenmesi

Konum uzayında, hava aracı rotası boyunca gravite bozukluğunu en iyi modelleyen stokastik sürecin ne olması gerektiği konusunda çeşitli araştırmalar mevcuttur. Jekeli (1994), gerçek gravite sinyalini temsil edebilecek en uygun modelin 3 veya 4'üncü derece Gauss-Markov model olduğunu ileri sürmektedir. Ayres-Sampaio ve diğerleri (2015) ve Deurloo ve diğerleri (2015), ise 1'nci derece Gauss-Markov modelinin hatta çok daha basit rastgele yürüyüş sürecinin benzer sonuçlar üretebileceğini göstermiştir.

2'nci ve daha üst derece Gauss-Markov süreçleri, modellenen büyüklüğün zamana bağlı türevlerini içermektedir. Bu nedenle 2'nci derece Gauss-Markov süreçleri için gravite bozukluğunun birinci türevi  $\delta \dot{g}^n$ , 3'üncü derece Gauss-Markov süreçleri için ise birinci ve ikinci türevleri  $\delta \ddot{g}^n$ sistem matrisi ve sistem durum vektörüne eklenmektedir. Gauss-Markov stokastik süreçleri için sistem matrisi, sistem gürültüsü ve otokorelasyon (öz-korelasyon) fonksiyonu eşitlikleri Tablo 1'de verilmiştir. Eşitliklerdeki  $\sigma$  ve  $\beta$  terimleri sırasıyla süreç standart sapmasını ve korelasyon parametresini temsil etmektedir.

Gauss-Markov korelasyon parametresi zaman biriminde (genellikle saniye) ifade edilmektedir. Ancak gravite bozukluğu sinyalinin karakteristik tanımı konum uzayında yapılmaktadır. Dolayısıyla mesafe birimindeki gravite bozukluğu korelasyon parametresinin, zaman birimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Uzunluk ve zaman birimleri arasındaki dönüşüm veri işleme aşamasında o andaki yatay uçuş hızı bilgisi kullanılarak yapılmaktadır (Simav ve diğerleri, 2020; Simav, 2020a):

$$\beta[t] = v_h \beta[d] = \sqrt{v_N^2 + v_E^2} \beta[d]$$
(22)

80 m/s  $v_h$  yatay uçuş hızına ve 1/20 km<sup>-1</sup>  $\beta[d]$  değerine sahip tipik bir uçuşta, korelasyon parametresinin zaman birimindeki değeri  $\beta[t] 0.004$  s<sup>-1</sup>'dir.

| GM     | Sistem  | Sistem   | Oto-Korelasyon  |  |
|--------|---|--|---|--|
| Derece | Matrisi (F)   | Gürültüsü (G)  | Fonksiyonu $(R(\tau))$  |  |
| 1      | $\left[-eta^{	ext{1st}}_{\delta g} ight]$   | $2\beta_{\delta g}^{1st}\sigma_{\delta g}^2$                             | $\sigma^2 e^{-\beta \tau }$   |  |
| 2      | $egin{bmatrix} 0 & 1 \ -ig(eta_{\delta g}^{2nd}ig)^2 & -2eta_{\delta g}^{2nd} \end{bmatrix}$  | $4 \left(\beta_{\delta g}^{2nd}\right)^3 \sigma_{\delta g}^2$            | $\sigma^2 e^{-\beta \tau } (1+\beta \tau )$                                       |  |
| 3      | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -(\beta_{\delta q}^{3rd})^3 & -3(\beta_{\delta q}^{3rd})^2 & -3\beta_{\delta q}^{3rd} \end{bmatrix}$ | $\frac{16}{3} \left(\beta_{\delta g}^{3rd}\right)^5 \sigma_{\delta g}^2$ | $\sigma^2 e^{-\beta \tau } \left(1+\beta \tau +\frac{1}{3}\beta^2 \tau ^2\right)$ |  |

Tablo 1. Gauss-Markov derecesine göre gravite bozukluğu için sistem matrisi, sistem gürültüsü ve otokorelasyon fonksiyonları (Gelb, 1974; Kwon ve Jekeli, 2001). ( $\tau$ : ardışık sinyallerin zaman aralığı).

#### 3. HARİTA GENEL MÜDÜRLÜĞÜ HAVA GRAVİMETRESİ VE VERİ-İŞLEME YAZILIMI

### a. Hava Gravimetresi

SAG çalışmaları için Almanya iMAR Navigation GmbH (https://www.imar-navigation.de) firmasından eski adıyla iNAT-RQH-1001, yeni adıyla iCORUS hava gravimetresi sistemi tedarik edilmiştir. iCORUS hava gravimetresi sistemi navigasyon-dereceli bir SIMU'dur. 3 adet QA2000-030 tipinde ortogonal ivmeölçer, 3 adet yüksek kaliteli GG1320AN halka lazer jiroskop, bir adet sıcaklık sensörü, entegre NovAtel GNSS alıcısı ve bir PC karttan oluşmaktadır. PC kart, inersiyal sensörlerden ve GNSS alıcısından verileri toplayarak zaman bilgili inersiyal açısal hız spesifik kuvvet verilerini çıktı olarak ve sunmaktadır. 2017-2018 yılları arasındaki sistem ivilestirme çalışmaları sırasında SIMU'ya iTempStab isimli sıcaklık stabilizasyon sistemi eklenmiştir. Sistem, birkaç saatlik ısıtma süresinin sonunda SIMU iç sıcaklık değişimini 0.1 K aralığında tutmaktadır. Böylece sıcaklık değişimi kaynaklı ivmeölçer sürüklenmesi (dinamik atım değişimi) azaltılmakta ve gravite alanı uzun dalga boyu iyileştirilmektedir (Jensen ve diğerleri, 2019; Simav ve diğerleri, 2020). Sistem 24 V doğru akım enerji kaynağı ile çalışmakta, uçak çalıştırılmadan iPowerPack olarak bilenen havacılık önce sertifikalı batarya sisteminden güç almakta, uçak çalıştıktan sonra ise doğrudan kabin içi güç kaynağını kullanmaktadır. Kabin içi güç kaynağı kullanıldığı durumlarda iPowerPack otomatik şarj olmaktadır. iCORUS ve iPowerPack sistemi Şekil 4'de gösterilmektedir.

### b. SAG Veri İşleme Yazılımı

iCORUS hava gravimetresi, iXCOM-CMD adında üretici tarafından tescilli bir yazılım ile birlikte gelmektedir. Yazılım; iCORUS sisteminin çalıştırılması, veri toplamaya yönelik ayarlamaların yapılması ve gerçek zamanlı navigasyon çözümü yapılabilmesi için kullanılmaktadır. Gravimetri için herhangi bir modülü veya fonksiyonu bulunmamaktadır. Bu nedenle, iCORUS sistemi tedariki ve testi sürecince yazar tarafından MATLAB ortamında SAG isimli veri işleme yazılımı geliştirilmiştir.



Şekil 4. (a) iCORUS (iNAT-RQH-1001+iTempStab) hava gravimetresi, (b) iPowerPack güç ünitesi, (c) iCORUS hava gravimetresinin uçak içerisindeki görüntüsü.

Yazılım, kullanıcı ayarlarının yapılabildiği, veri işleme seçeneklerinin girilebildiği kullanıcı dostu bir arayüze sahiptir (Şekil 5). Basit bir veri işlem için öncelikle bir proje açılmakta ve projeye SIMU, GNSS (zorunlu) ve varsa gravite indirgeme dosyaları yüklenmektedir. Ardından SIMU parametreleri, zaman, sistem değişkenleri, stokastik modeller. ölcü kovarvans ve güncellemesi, gravite bağlantı noktası ve SIMU-GNSS baz vektörü ile ilgili ayarlamalar yapılmakta ve veri islem başlatılmaktadır.

Yazılım, birden çok uçuş verisini hızlı bir şekilde işleyebilmek için paralel hesaplama kabiliyetine sahiptir. Tek çekirdekili ortalama bir bilgisayarda 6 saatlik uçuş verisi bir dakikadan daha kısa sürede işlenebilmektedir.

SAG yazılımı birçok veri işlem sonrası fonksiyona sahiptir. 2-3 boyutlu çizgi, münhani

(kontur), yüzey, ham veri, çözüm vb. görüntüleme, çeşitli formatlarda çıktılama, otomatik düz uçuş hatları belirleme, otomatik çapraz geçiş noktası belirleme ve dengeleme, tekrarlı hatları bulma, oto-korelasyon analizi, farklı çözümlerin karşılaştırması gibi özellikleri mevcuttur. Yakın zaman önce yazılıma uçuş planlama fonksiyonu da eklenmiştir.



Şekil 5. SAG veri işlem yazılımı.

### 4. HAVA GRAVİMETRİSİ UYGULAMALARI

### a. Genel

Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ile 2017 ve 2018 yıllarında Kırıkkale-Çorum test bölgesi üzerinde, 2019 yılında ise Göller Bölgesi üzerinde uçuşlar gerçekleştirilmiş. Toplam uçuş süresi yaklaşık 114 saat, toplam hat zunluğu ise yaklaşık 21000 km'dir. Uçuşlar, hava aracı oto pilotu kullanılarak sabit irtifada ve olabildiğince sabit hızda yapılmıştır. Test alanı üzerindeki uçuşlar Harita Genel Müdürlüğüne ait Beechcraft King Air 200 uçağı ile Ankara havaalanından, Güvercinlik Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlar ise Beechcraft King Air B-350 uçağı ile Isparta ER Süleyman Demirel havalaanından yapılmıştır. Göller Bölgesi; Burdur-Acıgöl-Salda, Beyşehir-Suğla, Eğirdir-Karacaören, Eber-Akşehir-Ilgın ve Işıklı Gölleri şeklinde 5 gruba ayrılarak ölçülmüştür. Uçuşlara ilişkin genel bilgiler Tablo 2'de sunulmuş, uçuş hatları Şekil 6'da gösterilmiştir.

### b. Veri Toplama

SAG çalışmaları süresince, iCORUS hava gravimetresi X-ekseni burun, Y-ekseni sağ kanat ve Z-ekseni taban doğrultusunu gösterecek şekilde uçağa sabitlenmiştir. SIMU-GNSS anteni arasındaki baz vektörü total station ile hassas bir şekilde ölçülmüştür. Kalkış/iniş yapılacak havaalanında uçak hangarı girişine gravite bağlantı noktası tesis edilmiştir. Tesis edilen nokta hassas bir şekilde konumlandırılmış ve en yakın mutlak gravite noktası referans alınarak 30 µGal'den daha iyi bir duyarlıkta bağıl gravimetre ile ölçülmüştür. Diferansiyel konumlama için park pozisyonuna yakın açık bir alana GNSS referans istasyonu kurulmuş ve SIMU ile birlikte çalıştırılmıştır. Yerde yapılan çalışmalara ilişkin fotoğraflar Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 6. (a) Test-1 (siyah) ve Test-2 (kırmızı) düz uçuş hatları, (b) Göller Bölgesi düz uçuş hatları.

Her uçuştan en az 3-4 saat önce hangar içerisinde sistem çalıştırılarak SIMU iç sıcaklığının optimal sıcaklık seviyesine (~50-55 °C) ulaşması sağlanmıştır. Test-1 uçuşu sırasında sıcaklık stabilizasyon sistemi olmadığından SIMU içerisinde yaklaşık 7 °C sıcaklık değişimi meydana gelmiş, bu durum sonuçları olumsuz yönde etkilemiştir (Simav ve diğerleri, 2020). Diğer tüm uçuşlarda SIMU iç sıcaklık değişimi 0.5 °C'den daha azdır.

| Bölge                           | Başlama<br>Tarihi | Bitiş<br>Tarihi | Uçuş<br>Süresi | Hat<br>Uzunluğu | Ortalama<br>İrtifa | Ortalama<br>Hız |
|---------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|                                 | rann              |                 | [saat]         | [km]            | [m]                | [m/s]           |
| Test-1 Kırıkkale-Çorum          | 22 Mar 17         | 22 Mar 17       | 5.4            | 1545.2          | 3055.4             | 80.1            |
| Test-2 Kırıkkale-Çorum          | 27 Eyl 18         | 27 Eyl 18       | 5.1            | 1421.3          | 3180.2             | 79.9            |
| Burdur-Acıgöl-<br>Salda Gölleri | 17 Eki 19         | 24 Eki 19       | 28.7           | 5530.1          | 3108.6             | 75.9            |
| Beyşehir-Suğla Gölleri          | 30 Eki 19         | 08 Kas 19       | 28.6           | 4534.8          | 3133.8             | 74.0            |
| Eğirdir-Karacaören<br>Gölleri   | 07 Kas 19         | 13 Kas 19       | 23.7           | 4259.0          | 3146.8             | 81.4            |
| Eber-Akşehir-Ilgın<br>Gölleri   | 18 Kas 19         | 21 Kas 19       | 15.9           | 2588.6          | 3072.4             | 75.6            |
| lşıklı Gölü                     | 20 Kas 19         | 20 Kas 19       | 6.3            | 1135.6          | 3060.5             | 79.1            |

Tablo 2. Bugüne kadar Türkiye'de gerçekleştilen SAG çalışmaları hakkında genel bilgi (Simav ve diğerleri, 2020; Simav, 2020a; Simav, 2020b).

SIMU inersiyal açısal hız ve spesifik kuvvet 300 GNSS (GPS+GLONASS) verileri Hz, gözlemleri ise 1 Hz örneklem aralığında toplanmıştır. Uçak aprondaki gravite bağlantı noktasına çekilir çekilmez veri kaydı başlatılmış ve her uçuş öncesi motor çalıştırılmadan önce ve uçuş sonrası motor susturulduğunda başlangıç durum vektörü değerlerinin belirlenmesi ve statik hizalama (başlangıç yönelim değerlerinin belirlenmesi) işlemi için en az 10 dakika hareketsiz veri toplanmıştır. Hava şartlarına bağlı olarak günlük ortalama 5.2 saat uçuş yapılmış ve yaklaşık 900 km hat üzerinde veri toplanmıştır. Yaklaşık 5 saatlik klasik bir uçuşa ait ivmeölçer (Acc-X, Acc-Y, Acc-Z), jiroskop (Omg-X, Omg-Y, Omg-Z), irtifa ve sürat verisi Şekil 8'de gösterilmektedir. Grafik üzerinde hareketsiz veri toplama, kalkış, iniş, düz uçuş ve dönüşler rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.



Şekil 7. (a) Hava gravimetrisinin uçak içerisine yerleştirilmesi, (b) SIMU-GNSS anteni arası baz vektörü ölçümü, (c) Gravite bağlantı noktası ölçümü, (ç) GNSS referans istasyonu.

### c. Veri İşleme

koordinat Lokal sisteminde ve uçuş yüksekliğinde düşev gravite bozukluğu hesaplamalarında dolaylı SAG çözüm yöntemi kullanılmaktadır (Bölüm 2.b). SIMU/GNSS entegrasyonu, 18 parametreli bir durum vektörü içeren gevşek birleştirmeli-kapalı döngü EKF ile yapılmaktadır. Sistem hata durum vektörü, 3 boyutlu konum, hız, yönelim, ivmeölçer ve jiroskop atımları ile 1 boyutlu indirgenmiş düşey gravite bozukluğu, birinci ve ikinci derece gravite bozukluğu türevlerini içermektedir. Ataletsel sensör atımları rastgele yürüyüş, indirgenmiş gravite bozukluğu ise 3'ncü derece Gauss-Markov ile modellenmektedir. Gevsek birlestirmeli entegrasyon GNSS konum ve hız çözümü gerektirdiğinden öncelikle ham GNSS verileri işlenmektedir. GNSS çözümleri, NovAtel'in Waypoint GrafNav 8.90 yazılımı ile diferansiyel veya Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, iki farklı GNSS veri işleme yöntemi ile belirlenen konum ve hız çözümlerinin, gravite bozukluğu sonuçları üzerinde anlamlı bir değişime neden olmadığı görülmüştür. İkinci aşamada, GNSS konum çözümleri kullanılarak uzun ve kısa dalga boylu indirgemeleri gravite hesaplanmaktadır (Bölüm 2.c). Uzun dalga boylu indirgemeler EGM2008 global jeopotansiyel modeli (Pavlis ve diğerleri, 2008), kısa dalga boylu indirgemeler ise DTM2006.0 Yer topoğrafyası küresel harmonik katsayıları (Pavlis ve diğerleri, 2007) ve MERIT DEM yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli (Yamazaki ve diğerleri, 2017) kullanılarak, Simav (2020a)'da tarif edildiği belirlenmektedir. sekilde Son asamada. SIMU/GNSS entegrasyonu yapılmakta ve ileri yönlü gravite bozukluğu çözümleri RTS ile yumuşatılmaktadır.



Şekil 8. Yaklaşık 5 saatlik bir uçuşa ait (a) ivmeölçer spesifik kuvvet (ms-²), (b) Jiroskop açısal hız (rads-¹), (c) Deniz seviyesinden uçuş yüksekliği (m) ve hava aracı yer sürati (ms-¹).

GNSS konum ve hız çözümleri EKF'de ölçü olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında uçak park pozisyonunda gravite bağlantı noktası üzerindeyken yersel gravite ölçüsü ve sıfır-hız ölçüsü EKF'ye dâhil edilerek ölçü güncellemesinde kullanılmaktadır.

gravite çözümleri bozukluğu Sonuç tekrarlamalı olarak hesaplanmaktadır. İlk tekrarlamada sonunda mesafenin fonksiyonu olarak gravite bozukluğu oto-korelasyonu hesaplanmaktadır. Ardından Tablo 3'de verilen 3'üncü derece Gauss-Markov oto-korelasyon fonksiyonuna, hesaplanan oto-korelasyon fonksiyonu uydurularak Gauss-Markov parametreleri ( $\sigma$  ve  $\beta$ ) kestirilmektedir. Yeni parametrelerle çözüm tekrarlanmakta ve sonuç gravite bozukluğu değerleri elde edilmektedir. Veri işlem sırasında kullanılan durum değişkenleri başlangıç belirsizlikleri ve sistem gürültü değerleri Tablo 3'de sunulmuştur.

#### ç. Uygulama Sonuçları

SAG düşey gravite bozukluğu çözümlerinin iç duyarlılığı (prezisyonu), iki düz uçuş hattının yatayda kesiştiği "çapraz-geçiş" olarak bilinen noktalarda veya aynı hat üzerinde tekrarlı ölçülerle değerlendirilmektedir. Bugüne kadar gerçekleştirilen hava gravimetrisi çalışmalarında tekrarlı hat ölçüsü yapılmamış, duyarlık değerlendirmesi için çapraz-geçiş noktaları kullanılmıştır.

Her ne kadar uçuşlar oto pilot kullanılarak yapılsa da türbülans, rüzgâr gibi faktörler nominal 3 boyutlu uçuş rotasında metreler seviyesinde değişim yaratmaktadır. Bu nedenle iki uçuş hattının aynı noktada kesişmesi neredeyse imkânsızdır. Yatay kesişim noktasında bir miktar yükseklik farkı ortaya çıktığından, çapraz-geçiş noktalarının seçimi önem arz etmektedir. Gerçek düşey gravite gradyenti ile normal gravite gradyenti arasındaki farktan kaynaklanabilecek hatayı en aza indirmek için kesişim noktalarındaki yükseklik farkının belirli bir limiti aşmaması gerekir. Pratikte yükseklik farkı limiti 50-100 m arasında bir değer seçilmektedir.

Tablo 3. SAG veri işlem aşamasında kullanılan EKF parametreleri.

| Durum                          | Baslandic    | Sistem   |  |  |
|--------------------------------|--------------|--|--|--|
| Değişkeni                      | Belirsizliği | Gürültüsü  |  |  |
| Konum                          | 2 cm         | 0 m/√s   |  |  |
| Hız                            | 10 cm/s      | 5E-5 m/s/√s  |  |  |
| Yönelim $[\phi, \theta, \psi]$ | [1, 1, 5]°   | 0.2 yay-saniye/√s  |  |  |
| İvmeölçer<br>Atımı             | 100 mGal     | 0.01 mGal/√s   |  |  |
| Jiroskop<br>Atımı              | 0.001 °/h    | 0 °/h/√s   |  |  |
| Düşey<br>Gravite<br>Bozukluğu  | 0.03 mGal    | $\sigma_{dg}$ = 100 mGal<br>$\beta_{dg}^{3rd}$ = 1/20 km <sup>-1</sup> |  |  |

Gelgitler, yer altı suyu ve atmosferik basınç değişimleri, okyanus yüklemesi gibi nedenlerden kaynaklan gravite alanındaki zamana bağlı değişimler ihmal edildiğinde, bir çapraz-geçiş noktasındaki düşey gravite bozukluğu farkı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\chi_{A,B} = \delta \hat{g}_A - \delta \hat{g}_B \tag{23}$$

Eğer yeterli sayıda çapraz-geçiş noktası olması durumunda, en küçük kareler dengelemesiyle her bir uçuş hattı için öteleme parametresi  $\kappa$  hesaplanabilmektedir.  $\delta \hat{g}_{A_i}$  ve  $\delta \hat{g}_{B_j}$  sırasıyla A ve B uçuş hatlarında *i* ve *j* numaralı çapraz-geçiş noktalarındaki düşey gravite bozukluğu kestirimleri olmak üzere, dengelenmiş çapraz-geçiş artıkları  $\bar{\chi}_{A,B}$  aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\bar{\chi}_{A,B} = \left(\delta \hat{g}_{A_i} + \kappa_A\right) - \left(\delta \hat{g}_{B_j} + \kappa_B\right) \tag{24}$$

Şekil 9'da Kırıkkale-Çorum Bölgesi Test-2 uçuşuna, Şekil 10'da ise Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlara ait çapraz-geçiş nokta yerleri ve  $\bar{\chi}_{A,B}$ deăerleri gösterilmektedir. Çapraz-geçişlerin dengeleme öncesi ve sonrası istatistikleri Tablo 4'de sunulmuştur. Sıcaklık stabilizasyon sistemi olmadan gerçekleştirilen Test-1 uçuşu dışındaki diğer tüm uçuşlarda dengelenmemiş RMSE  $(RMS/\sqrt{2})$  değerleri 1 mGal seviyesindedir. Uçağın keskin manevraları ölçü prezisyonunu düşürdüğünden, beklendiği gibi yüksek  $\bar{\chi}_{AB}$ değerleri genellikle hat sonlarında dönüşlere yakın gözlenmektedir. yerlerde Çapraz-geçişlerin dengelemesi sonrası kesişim noktalarında daha küçük gravite bozukluğu farkları elde edildiğinden istatistikler oldukça iyileşmektedir. Çapraz-geçiş farklarının RMSE değerleri 0.8 mGal altına inmektedir.

Çapraz-geçişlerin dengelemesi uygulamaya bağlı bir tekniktir ve her uygulama için anlamlı değildir. Maden arama gibi jeofizik uygulamaları için dengeleme mantıklı gözükmektedir. Jeofizik uygulamaların birçoğunda gravite alanındaki lokal yapılar ana ilgi konusudur ve ölçü duyarlılığı doğruluğa oranla daha önemli bir gereksinimdir. Gravite verisinin uzun dalga boyundaki güvenirliği bu uygulamalarda genellikle göz ardı edilir.

Hava gravimetrisi sonuçlarının dış doğruluğu veya kalite doğrulaması, çalışma bölgesinde yeteri sıklıkta yersel veri olması durumunda yersel verilerin yukarı yönlü uzanımıyla karşılaştırılarak yapılmaktadır. Ancak hava gravimetrisi genellikle yersel veri boşluklarının doldurulması için kullanıldığından bu karşılaştırmayı her bölgede yapmak olanaksızdır. Alternatif olarak yüksek çözünürlüklü GGM'lerden uçuş yüksekliğinde düşey gravite bozuklukları kestirilmekte ve SAG çözümleri ile karşılaştırma yapılabilmektedir. Bu tür bir karşılaştırma hava gravimetrisi sonuçlarının dış doğruluğu hakkında bilgi verebileceği gibi aynı SAG cözümlerinin uzun zamanda dalga performansini tutarlılığını bovundaki ve göstermesi açısından da önemlidir.



Şekil 9. Kırıkkale-Çorum Test-2 uçuşuna ait dengelenmiş çapraz-geçiş farkları.



Şekil 10. Göller Bölgesi uçuşlarına ait dengelenmiş çapraz-geçiş farkları.

| Pälaa                       | Ν    | Dengelenmemiş |      |      | Dengelenmiş |      |      |
|-----------------------------|------|---------------|------|------|-------------|------|------|
| Bolge                       |      | μ             | σ    | RMSE | μ           | σ    | RMSE |
| Test-1 Kırıkkale-Çorum      | 18   | -1.85         | 3.20 | 2.56 | 0.00        | 1.67 | 1.14 |
| Test-2 Kırıkkale-Çorum      | 18   | -0.03         | 1.15 | 0.79 | 0.00        | 0.34 | 0.24 |
| Burdur-Acıgöl-Salda Gölleri | 1289 | 0.13          | 1.79 | 1.27 | 0.00        | 1.00 | 0.71 |
| Beyşehir-Suğla Gölleri      | 896  | 0.61          | 1.67 | 1.26 | 0.00        | 1.16 | 0.82 |
| Eğirdir-Karacaören Gölleri  | 898  | 0.67          | 1.85 | 1.39 | 0.00        | 1.01 | 0.71 |
| Eber-Akşehir-Ilgın Gölleri  | 540  | -0.04         | 1.42 | 1.01 | 0.00        | 0.72 | 0.51 |
| İşıklı Gölü                 | 234  | -1.35         | 1.55 | 1.45 | 0.00        | 0.64 | 0.45 |

Tablo 4. Çapraz-geçiş noktalarında dengeleme öncesi ve sonrası düşey gravite bozukluğu farkları (mGal). (N: çapraz-geçiş nokta sayısı,  $\mu$ : Ortalama,  $\sigma$ : Standart Sapma, RMSE: RMS/ $\sqrt{2}$ ).

Kırıkkale-Corum test bölaesinde veteri genişlikte ve sıklıkta yersel veri olduğundan Test-1 ve Test-2 uçuş sonuçları yersel verilerin yukarı yönlü uzanımıyla karşılaştırılmış ve sonuçları diğerleri Simav ve (2020) tarafından yayımlanmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda sıcaklık stabilizasyon sistemi ile gerçekleştirilen Test-2 uçuşu gravite bozukluğu sonuçları ile yukarı yönlü uzatılmış yersel veriler arasında yaklaşık 1 mGal civarında bir fark bulunmuştur.

Uçuş yüksekliğindeki SAG düşey gravite bozukluğu çözümleri, 3.5-4 km yarı dalga boyu konumsal çözünürlüğe sahip XGM2019e birleşik GGM (Zingerle ve diğerleri, 2019) ile karşılaştırılmıştır. Model, 5540'ıncı derece ve mertebeye kadar küresel harmonik katsayılarla temsil edilmektedir ve Global Yer Modelleri Uluslararası Merkezinin (International Centre for Global Earth Models-ICGEM) http://icgem.gfzpotsdam.de adresindeki web sitesinden indirilebilmektedir. Şekil 11'de Test-2 uçuşuna, Şekil 12'de ise Göller Bölgesi üzerindeki uçuşlara ait fark karşılaştırmaları gösterilmekte, Tablo 5'de farkların istatistikleri sunulmaktadır. Fark haritaları incelendiğinde genel olarak düşey gravite bozukluğu setleri arasındaki uyumun veya korelasyonun yüksek olduğu görülebilmektedir. Farkların ortalaması 1 mGal seviyesindedir. Literatürde SAG çözümlerinde görülen uzun dalga boylu hatalar, Simav (2020a) tarafından önerilen ve bu çalışmada da uygulanan gravite indirgeme yöntemiyle büyük oranda giderilmiştir. SAG ve XGM2019e gravite bozukluğu arasındaki farkların temel sebepleri; SAG çözümlerinin XGM2019e'ye oranla özellikle Göller Bölgesinde daha yüksek çözünürlüğe sahip olması, XGM2019e çözümleme gücü ve model hataları ve SIMU ivmeölçerlerindeki telafi edilemeyen artık hatalardır.

Göller Bölgesindeki farkların nispeten daha yüksek çıktığı alanlar yersel gravite verisinin hiç olmadığı veya çok seyrek olduğu göl üzeri ve alanlardır. XGM2019e modeli dağlık hesaplanırken bu alanlar üzerinde veri boşluğu olduğu için, göller ve dağlık bölgelerdeki gravite alanı değişimleri model tarafından çözümlenememektedir (Simav, 2020b). Bu sonuç hava gravimetrisinin veri boşluğu doldurmadaki önemini açıkça göstermektedir.



Şekil 11. Kırıkkale-Çorum Test-2 uçuşu için SAG ve XGM2019e düşey gravite bozukluğu farkları.

| Bölge                       | Minimum | Maksimum | Ortalama | S.Sapma |  |
|-----------------------------|---------|----------|----------|---------|--|
| Test-2 Kırıkkale-Çorum      | -14.55  | 13.29    | 0.59     | 4.50    |  |
| Burdur-Acıgöl-Salda Gölleri | -18.37  | 16.91    | 0.23     | 5.47    |  |
| Beyşehir-Suğla Gölleri      | -20.04  | 17.85    | 2.15     | 5.53    |  |
| Eğirdir-Karacaören Gölleri  | -25.29  | 22.96    | 0.55     | 5.77    |  |
| Eber-Akşehir-Ilgın Gölleri  | -21.62  | 16.62    | 1.45     | 6.19    |  |
| İşıklı Gölü                 | -20.01  | 6.66     | -1.22    | 4.17    |  |

Tablo 5. SAG düşey gravite bozukluğu çözümleri ile 5540'ıncı derece ve mertebeye kadar XGM2019e gravite bozukluğu kestirimleri arasındaki farkların istatistiği (mgal).



Şekil 12. Göller Bölgesinde SAG ve XGM2019e düşey gravite bozukluğu farkları.

### 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaklaşık 4 yıllık yoğun bir çalışmanın sonunda SIMU/GNSS entegrasyonuna dayalı hava gravimetrisi sistemi çalışmaları ile test tamamlanmış, veri işleme için yazılım geliştirilmiş ve Türkiye'de ilk defa üretim odaklı olarak 1 mGal'den daha iyi duyarlık ve yaklaşık 1 mGal doğrulukla Kırıkkale-Çorum test bölgesi ve Göller üzerinde gravite alanı ölçümleri Bölgesi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yeni veri işleme stratejisi ile literatürde SAG çözümlerinde görülen uzun dalga boylu gravite alanı hataları iyileştirilmiştir. Sonuçlar, Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sisteminin jeodezik ve jeofizik amaçlı gravite alanı ölçmelerinde başarıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Hava gravimetrisi ve yersel verilerin kombinasyonu ile Göller Bölgesi ve çevresi için jeoit modeli, serbets hava, Bouguer ve isostatik gravite anomali haritalarının iyileştirme çalışmalarına başlanmıştır. Önümüzdeki dönemde Marmara Denizi ve çevresindeki göller başta olmak üzere, kıyı alanları, büyük su alanları (Van Gölü, Tuz Gölü, geniş barajlar vb.) ve yerden ölçülemeyen engebeli araziler üzerinde veri toplama çalışmalarına devam edilecektir.

Harita Genel Müdürlüğü hava gravimetrisi sistemi ile gravite vektörünün yatay bileşenlerinin dolayısıyla çekül sapması bileşenlerinin belirlenmesi, sisteme yeni sensörlerin entegrasyonu ile kara ve deniz araçlarında kullanılabilirliğinin araştırılması ve son olarak düşük hızlı insanlı ve insansız hava araçlarında denenmesi önümüzdeki dönemin temel araştırma konularıdır.

### TEŞEKKÜR

SIMU/GNSS temelli analitik hava gravimetrisi çalışmaları, Harita Genel Müdürlüğü yürütülmekte koordinesinde olan T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli ve 2015K090710 numaralı "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite projesinin İyileştirilmesi" Altyapısının bir parçasıdır. Cihaz tedarikinde desteklerinden dolayı TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Müdürlüğüne, sistem geliştirme ve iyileştirme çalışmalarındaki katkılarından dolayı iMAR Navigation GmbH'a, sistemin operasyonel hale getirilmesi uçuşların başarıyla ve tamamlanmasından dolayı başta Jeodezi Dairesi Başkanlığı ve Harita Hava Grup Komutanlığı olmak üzere emeği geçen tüm Harita Genel Müdürlüğü personeline sonsuz şükranlarımı sunarım.

### ORCID

Mehmet SİMAV D https://orcid.org/0000-0002-3963-3871

# KAYNAKLAR

- 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. doi: 10.1007/s10712-015-9323-5
- 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
- Brozena, J.M. (1992). The Greenland aerogeophysics project: airborne gravity, topographic and magnetic mapping of an entire continent. O.L. Colombo (Ed.), From Mars to Greenland: Charting gravity with space and airborne instruments 203-214). (s. International Association of Geodesy Symposia, vol 110, New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4613-9255-2 19
- Bucha, B. ve Janák, J. (2014). A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders: Efficient computation at irregular surfaces. *Computer & Geosciences*, 66, 219-227. doi: 10.1016/j.cageo.2014.02.005
- Deurloo, R., Yan, W., Bos, M., Ayres-Sampaio, D., Magalhães, A., Becker, M., ... Bastos, L. (2015). A comparison of the performance of medium-and high-quality inertial systems grades for strapdown airborne gravimetry. C. Rizos, P. Willis (Ed.), IAG 150 Years (s. 323-329). International Association of Geodesy Symposia, vol 143. Springer, Cham. doi: 10.1007/1345\_2015\_18
- Forsberg, R. (1984). A study of terrain reductions, density anomalies and geophysical inversion methods in gravity field modeling. (Report No. 355). Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Forsberg, R., Olesen, A.V., Keller, K., Møller, M., Gidskehaug, A. ve Solheim, D. (2001). Airborne gravity and geoid surveys in the Arctic and Baltic Seas. Proceedings of international symposium on kinematic systems in geodesy, Geomatics and Navigation (KIS-2001). Banff, 586–593.

- Forsberg, R. ve Olesen, A.V. (2010). Airborne gravity field determination. G. Xu (Ed.), Sciences of geodesy-I (s. 83-104) içinde. Heidelberg, Germany: Springer. doi:10.1007/978-3-642-11741-1\_3
- Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation*. Cambridge: The MIT Press.
- Glennie, C.L. ve Schwarz, K.P. (1999). A comparison and analysis of airborne gravimetry results from two strapdown inertial/DGPS systems. *Journal of Geodesy*, 73 (6), 311-321. doi: 10.1007/s001900050248
- 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. *Journal of Geodesy*, 74 (5), 383-389. doi: 10.1007/s00190000082
- Groves, P.D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems.* 2nd ed. Boston, MA, USA, London, UK: Artech House.
- Gumert, W.R (1998). An historical review of airborne gravity. *The Leading Edge*, 17 (1), 113-116. doi: 340 10.1190/1.1437808.
- Hwang, C., Hsiao, Y-S. ve Shih, H-C. (2006). Data reduction in scalar airborne gravimetry: theory, software and case study in Taiwan. *Computers* & *Geosciences*, 32 (10), 1573-1584. doi: 10.1016/j.cageo.2006.02.015
- Jekeli, C. (1994). Airborne vector gravimetry using precise, position-aided inertial measurement units. *Bulletin Géodésique*, 69 (1), 1–11. doi: 10.1007/BF00807986
- Jensen, T.E. ve Forsberg, R. (2018). Helicopter test of a strapdown airborne gravimetry system. *Sensors*, 18 (9), 3121. doi: 10.3390/s18093121
- Jensen, T.E., Olesen, A.V., Forsberg, R., Olsson, P.A. ve Josefsson, Ö. (2019). New results from strapdown airborne gravimetry using temperature stabilisation. *Remote Sensing*, 11 (22): 2682. doi: 10.3390/rs11222682
- 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 (10), 690–700. doi: 10.1007/s001900000130
- Li, X., Crowley, J.W., Holmes, S.A. ve Wang, Y.M. (2016). The contribution of the GRAV-D airborne gravity to geoid determination in the Great Lakes region. *Geophysical Research Letters*, 43 (9), 4358-4365. doi: 10.1002/2016GL068374.
- McCubbine, J.C., Amos, M.J., Tontini, F.C., Smith, E., Winefied, R., Stagpoole, V. ve Featherstone, W.E. (2018). The New Zealand gravimetric quasigeoid model 2017 that incorporates nationwide airborne gravimetry. *Journal of Geodesy*, 92, 923-937. doi: 10.1007/s00190-017-1103-1
- Moritz, H. (2000). Geodetic reference system 1980. *Journal of Geodesy*, 74 (1): 128–133. doi: 10.1007/s001900050278
- Nagy, D. (1966). The prism method for terrain corrections using digital computers. *Pure and Applied Geophysics*, 63, 31-39. doi:10.1007/BF00875156
- Nagy, D., Papp, G. ve Benedek, J. (2000). The gravitational potential and its derivatives for the prism. *Journal of Geodesy*, 74, 552-560. doi: 10.1007/s001900000116
- Pavlis, N.K., Factor, J.K. ve Holmes, S.A. (2007). Terrain-related gravimetric quantities computed for the next EGM. *Harita Dergisi*, 18(Özel Sayı), 318-323.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K. (2008). An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. European Geosciences Union General Assembly, Vienna.
- Rauch, H.E., Striebel, C.T. ve Tung, F. (1965). Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. *AIAA Journal*, 3 (8): 1445-1450. doi: 10.2514/3.3166
- Sampietro, D., Capponi, M., Mans, A.H., Gatti, A., Marchetti, P. ve Sansò, F. (2017). Space-Wise approach for airborne gravity data modelling. *Journal of Geodesy*, 91, 535–545. doi: 10.1007/s00190-016-0981-y

- Schwarz, K.P. (1983). Inertial surveying and geodesy. *Reviews of Geophysics*, 21 (4), 878-890. doi: 10.1029/RG021i004p00878
- Schwarz, K.P., Colombo, O., Hein, G. ve Knickmeyer, E.T. (1992). *Requirements for airborne vector gravimetry*. O.L. Colombo (Ed.), From Mars to Greenland: Charting gravity with space and airborne instruments. International Association of Geodesy Symposia, vol 110. New York: Springer, 273-283. doi: 10.1007/978-1-4613-9255-2\_25
- Simav, M., Yıldız, H., Cingöz, A., Sezen, E., Demirsoy, N.S., Akpınar, İ., ... Doğan U. (2015). Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- Simav, M., Becker, D., Yildiz, H. ve Hoss, M. (2020). Impact of temperature stabilization on the strapdown airborne gravimetry: a case study in Central Turkey. *Journal of Geodesy*, 94, 41. doi: 10.1007/s00190-020-01369-5
- Simav, M. (2020a). The use of gravity reductions in the indirect strapdown airborne gravimetry processing. *Surveys in Geophysics*, 41, 1029-1048. doi: 10.1007/s10712-020-09596-3
- Simav, M. (2020b). Results from the first strapdown airborne gravimetry campaign over the Lake District of Turkey. *Survey Review*, doi: 10.1080/00396265.2020.182614 0
- Thompson, L.G.D. (1959). Airborne gravity meter test. *Journal of Geophysical Research*, 64 (4), 488-488. doi: 10.1029/JZ064i004p00488
- Thompson, L.G.D. ve LaCoste L.J.B. (1960). Aerial gravity measurements. *Journal of Geophysical Research*, 65 (1), 305-322. doi: 10.1029/JZ065i001p00305
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Wei, M. ve Schwarz, K.P. (1998). Flight test results from a strapdown airborne gravity system. *Journal of Geodesy*, 72 (6), 323-332. doi: 10.1007/s001900050171

- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J.C., ... Bates, P.D. (2017). A high accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44, 5844-5853. doi: 10.1002/2017GL072874
- Zhong, D., Damiani, T.M., Preaux, S.A.M. ve Kingdon, R.W. (2015). Comparison of airborne gravity processing results by GravPRO and Newton software packages. *Geophysics*, 80 (4): G107-G118. doi: 10.1190/geo2014-0519.1
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T. ve Oikonomidou, X. (2019). The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services. doi: 10.5880/ICGEM.2019.007