

Türkiye’de Güncel Yersel Gravimetri Çalışmaları (Recent Terrestrial Gravimetry Studies in Turkey)

Mehmet SİMAV*^{ID}, İlyas AKPINAR^{ID}, Yunus Aytaç AKDOĞAN^{ID}, Hasan YILDIZ^{ID}
Harita Genel Müdürlüğü, Ankara

*Sorumlu yazar: mehmet.simav@harita.gov.tr

Geliş Tarihi (Received): 22.03.2021

Kabul Tarihi (Accepted): 27.05.2021

ÖZ

Harita Genel Müdürlüğü koordinatörlüğünde gerçekleştirilen “Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020)” projesinin temel hedeflerinden biri, yersel ve hava gravimetrisi yöntemleriyle ulusal gravite veri tabanını geliştirmek ve Türkiye bölgesel gravite alanı modelini iyileştirmektir. Proje kapsamında 2016 yılından itibaren, beş ulusal kurumun iş birliğiyle ülke genelinde yoğun yersel gravimetri çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların başında, Ankara ili içerisinde yaklaşık 20 km’lik bir mesafede 210 mGal gravite farkı olan iki noktalı bir kalibrasyon bazı tesis edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan bağıl gravimetrelerin kalibrasyon katsayıları bu bazda yapılan ölçümlerle güncellenmiştir. Doğal, çevresel ve insan kaynaklı gürültülerden olabildiğince arındırılmış bir laboratuvar (TRGrav-Lab) kurulmuştur. Bağıl gravimetrelerin gürültü karakteristikleri ve sürüklenme katsayıları bu laboratuvarında düzenli aralıklarla izlenmiştir. TRGrav-Web veri portalı kurulmuş, ham ölçüler ve meta verileri ölçü ekipleri tarafından gün sonunda portala düzenli olarak yüklenmiştir. 100 tanesi mutlak gravimetri noktası olmak üzere 11783 noktadan oluşan yaklaşık 5’x5’ konumsal çözünürlüğe sahip yeni bir ulusal gravite standardizasyon ağı (TRGrav-Net) oluşturulmuştur. Çevresel ve aletsel etkilerden arındırılmış gravite gözlemlerinin ağırlıklı en küçük kareler dengelemesi sonunda TRGrav-Net noktalarında ortalama hata 35 µGal olarak belirlenmiştir. TRGrav-Net kurulum çalışmaları devam ederken İstanbul, Ankara, Tekirdağ illeri ile Kırıkkale-Çorum hava gravimetrisi test alanı, Marmara Denizi’nde 1.5 km²’den daha büyük adaların tamamı, Gökçeada ve Bozcaada ile Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti genelinde birkaç kilometre konumsal çözünürlükte gravite sıklaştırma çalışmaları yapılmıştır. Son olarak, ülke genelinde jeoit modeli kontrolü için farklı bölgelerde tesis edilen 7 farklı nivelman hattına ait 1757 noktada yersel gravimetri çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen yeni yersel gravite verileri, tarihsel gravite verilerinin kalite kontrolünde kullanılmış ve tarihsel verilerdeki kaba hata ve tutarsızlıkların giderilmesini sağlamıştır. Kırıkkale-Çorum bölgesindeki sıklaştırma verilerinin yukarı yönlü uzanımı, hava gravimetrisi testlerinde referans veri seti olarak kullanılmıştır. 2020 yılı sonuna kadar toplanan güncel yersel gravite verileri, kalite kontrolü yapılmış tarihsel gravite verileri ile birlikte yüksek çözünürlüklü ve doğruluklu Türkiye Jeoit Modeli-2020 hesaplamalarının temel girdisi olarak kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yersel Gravimetri, TRGrav-Net, TRGrav-Lab, TRGrav-Web, Yükseklik Sistemi Modernizasyonu.

ABSTRACT

One of the major objectives of the “Turkish Height System Modernization and Gravity Recovery (2015-2020)” project coordinated by the General Directorate of Mapping is to recover the national gravity database and improve the Turkish regional gravity field model from terrestrial and airborne gravimetry. Intensive terrestrial gravimetry campaigns have been conducted throughout the country since 2016 by the collaborative works of five national institutions within the project. In the beginning of the fieldworks, a new calibration baseline consisting of two absolute gravity sites with average distance of 20 km apart and gravity ranges up to 210 mGal was constructed in Ankara city. The calibration constants of the relative gravimeters used in the project were updated based upon the observations on the calibration base. A laboratory (TRGrav-Lab), decontaminated from the natural, environmental, and man-made noises, was built. The noise characteristics and the drifts of the gravimeters were monitored at regular intervals in this laboratory. TRGrav-Web portal was set up for the survey teams to upload the daily raw observations along with their metadata at the end of the survey day. A national gravity standardization network (TRGrav-Net) consisting of 11783 sites, 100 of which are absolute points, with a spatial resolution of about 5’x5’ were established. The weighed constrained least squares adjustment of the gravity observations reduced for the environmental and instrumental effects resulted in a mean formal error of 35 µGal at TRGrav-Net sites. Gravity densifications at a few kilometers’ spatial resolution over İstanbul, Ankara, Tekirdağ cities and Kırıkkale-Çorum airborne gravimetry test region, islands larger than 1.5 km² in the Sea of Marmara, Gökçeada, Bozcaada and Turkish Republic of Northern Cyprus have also been completed during the TRGrav-Net establishment. Lastly, terrestrial gravimetry was performed at the 1757 levelling benchmarks over 7 discrete levelling profiles constructed at different regions in the country for the geoid model validation. The recent terrestrial gravity data have been used for the quality control of the historical data and they have provided to remove the gross errors and discrepancies in the historical gravity datasets. The upward-continuation of the densified data in Kırıkkale-Çorum region have been utilized as reference dataset for the airborne gravimetry test studies. The recent terrestrial gravity data acquired until the end of 2020 along with

the quality controlled historical gravity data have been used as the major input for the computation of high resolution and accurate Turkish Geoid Model-2020.

Keywords: Terrestrial Gravimetry, TRGrav-Net, TRGrav-Lab, TRGrav-Web, Height System Modernization.

1. GİRİŞ

Maupertuis, Bouguer, Condamine, Cassini gibi bilim insanları tarafından 18'inci yüzyılda sarkaç aparatları ile başlayan yersel gravimetri, jeodezi biliminin sacayaklarından biri olan Yer gravite alanının ölçülmesi ve modellenmesinde 300 yıla yakın bir zamandır kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde yersel gravimetri çalışmaları, yaylı bağıl gravimetreler ve lazer interferometrik serbest düşme ilkesine dayalı mutlak gravimetreler ile μGal mertebesinde yüksek doğruluk ve duyarlıkla gerçekleştirilmektedir (Torge, 1989). Yersel gravimetride gözlemler yeryüzünde yapıldığından, çekim kaynağına yakınlık nedeniyle bu gözlemlerinin gravite alanını çözme gücü diğer gravimetri yöntemlerine göre daha yüksektir. Yersel gravite gözlemleri, Yer gravite alanının uzun, orta ve kısa dalga boylu sinyallerinin tamamını içermektedir. Ölçümler bir nokta üzerinde durağan biçimde yapılmaktadır. Bu nedenle, hava ve deniz gravimetrisindeki gibi hareketten kaynaklanabilecek bozucu etkilere maruz kalınmadığından, ölçü doğruluğu ve duyarlığı önemli ölçüde artmaktadır. Yersel gravimetri; düşey koordinat sistemlerinin gerçekleştirimi (jeoit belirleme ve nivelman ağları), hassas konumlama ve navigasyon, yapay uydu yörüngelerinin belirlenmesi, maden/petrol/doğalgaz/jeotermal aramaları, fizik ve metroloji, deniz seviyesi değişimleri/buzul erimeleri/iklim değişimlerinin izlenmesi, volkanoloji, tektonik yapıların belirlenmesi ve kabuk/manto modellenmesi gibi yer ve uzay bilimlerinin hemen hemen tüm alanlarında kullanılmaktadır.

Ülkemizde yersel gravimetri çalışmaları 1950'li yıllarda Türkiye Temel Gravite Ağı (TTGA-56) kurulum çalışmaları ile başlamıştır (Ayhan ve diğerleri, 1992). Bu tarihten sonra, jeodezik, jeofizik ve jeolojik amaçlarla, Harita Genel Müdürlüğü, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) tarafından ülke genelinde yersel gravimetri çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında daha küçük alanlarda çeşitli üniversite ve araştırma kurumlarınca da yersel gravite ölçüleri yapılmaktadır. MTA ve TPAO envanterinden derlenen yersel gravite verileri, Harita Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye Jeoit Modeli

hesaplamalarında kullanılmıştır. Ancak, ülkemizde yersel gravimetri ve meta veri saklama konusunda kurumlar arası standartların henüz sağlanmamış olması sebebiyle, derlenen veriler arasında birtakım sistematik ve kaba hatalardan kaynaklanan tutarsızlıklara rastlanılmıştır (Simav ve diğerleri, 2012). Söz konusu veriler, ayrıntılı kalite kontrolden geçirilerek gravimetrik jeoit modeli hesaplamalarında kullanılmıştır (Kılıçoğlu ve diğerleri, 2006; Kılıçoğlu ve diğerleri, 2011; Yıldız ve diğerleri, 2021).

Ülke yükseklik sisteminin, bilimsel ve teknolojik gelişmeler ışığında ve dünyadaki yeni yaklaşımlarla modernize edilmesi amacıyla, Harita Genel Müdürlüğü koordinatörlüğünde, MTA, TPAO, TÜBİTAK MAM ve TÜBİTAK UME iş birliğiyle 2015 yılında "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020)" projesi başlatılmıştır (Simav ve diğerleri, 2015). T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli projenin temel hedeflerinden biri, yersel ve hava gravimetrisi yöntemleriyle ulusal gravite veri altyapısını geliştirmek ve Türkiye bölgesel gravite alanı modelini iyileştirmektir. Projenin nihai hedefi ise 1-3 km konumsal çözünürlükte 1-3 cm doğrulukla Türkiye Jeoit Modelini hesaplamaktır. Projenin 2015 yılı yatırım programında yayımlanmasını müteakip, ölçü ekipmanlarının tedariki ile başlayan yersel gravimetri çalışmalarına 2020 yılı sonuna kadar devam edilmiştir. Arazi çalışmaları öncesinde, yersel gravimetri ölçü ve değerlendirme standartları oluşturulmuş, eğitim, test ve kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Nisan 2016'dan sonra yeni ulusal gravite standardizasyon ağının (TRGrav-Net) kurulumuna ve bu ağa dayalı sıklaştırma çalışmalarına başlanmıştır.

Simav ve Yıldız (2019) tarafından yersel gravimetri ölçü ve değerlendirme standartları ayrıntılı bir şekilde ele alınmış, TRGrav-Net'in 26°E-31°E ve 36°N-40°N arasında kalan bölümüne ilişkin sonuçlar yayımlanmıştır. Bu çalışmada ise, 2020 yılı sonu itibarıyla ülke genelini kapsayan ölçülerin tamamlanması sonrası, TRGrav-Net'in tamamına ilişkin sonuçlar verilmektedir. Bunun yanında; TRGrav-Lab gravimetri laboratuvarı ve TRGrav-Web veri portalı tanıtılmakta, TRGrav-Net'e dayalı yersel gravimetri sıklaştırma çalışmaları anlatılmaktadır. Yeni yersel gravimetri verileri ile gerçekleştirilen uygulamaların sonuçları sunulmakta ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2. YERSEL GRAVİMETRİ STANDARTLARI

Gravimetrik yöntemlerde ulusal/uluslararası standartlara ulaşabilmek için aynı gravite alanına ilişkin ölçülerin, değişkenlerin, modellerin, büyüklüklerin ve yaklaşımların ortak bir anlayış ile değerlendirilmesi ve anlaşılması gerekmektedir (Kılıçoğlu ve diğerleri, 2010). Ülkemizde yersel gravimetri çalışmaları farklı amaçlara yönelik olarak değişik kurum ve kuruluşlar tarafından yapılmaktadır. Ancak ölçme ve değerlendirmede ulusal düzeyde bir standart olmadığından, kurumlardan derlenen veriler arasında tutarsızlıklar ortaya çıkmaktadır. Veriler arasındaki tutarsızlığa; (i) Nokta konumlandırma farklı referans sistemlerinin kullanımı, (ii) Düşük doğruluklu nokta konumlandırma teknikleri ve iyi kalibre edilmemiş gravimetrelerin kullanımı, (iii) Sistematik hataları giderecek uygun ölçü yöntemlerinin uygulanmaması, (iv) Gravite ölçülerine uygun indirgemelerin (düzeltmelerin) getirilmemesi gibi nedenleri sıralamak mümkündür. Simav ve diğerleri (2012) tarafından önerildiği şekilde, proje kapsamında 2016 yılında yersel gravimetri ölçülerine başlanmadan önce nokta yeri seçiminden, konumlamaya, mutlak ve bağıl gravimetri ölçü yöntemlerinden veri işlem aşamasına kadar standartlar belirlenmiş ve titizlikle uygulanmıştır.

a. Nokta Yeri Seçimi

TRGrav-Net ve yersel gravimetri sıklaştırma noktalarının yaklaşık konumları arazi çalışmaları öncesinde topoğrafik haritalar ve yüksek çözünürlüklü ortogörüntüler üzerinden belirlenmiştir. Gravite gözlemlerinin mikrosismisiteden etkilenmemesi için yer seçiminde noktaların su havzaları, ana yol, demir yolu, maden sahaları ve bataklık alanlardan uzak olmasına özen gösterilmiştir. Noktaların kesin yerleri arazide keşif çalışması ile belirlenmiş, TRGrav-Net noktaları yaklaşık 10 mm çapında demir çubukla yere işaretlenmiştir. Tesis edilen noktaların uzun süre kalıcılığının sağlanması ve tahrip olmaması için yerleşim yerleri içerisinde cami, okul, kamu binaları ve anıtsal yapılar, yerleşim yerleri dışında ise araçla ulaşımın mümkün olduğu sabit yerli kayalar nokta yeri olarak seçilmiştir. Örnek nokta fotoğrafları Şekil 1'de gösterilmektedir.

b. Konum Belirleme

Yer gravite alanı ölçmelerinde konum doğruluğu, en az gravimetrik ölçümlerin doğruluğu kadar önemlidir. Konum belirlemede kullanılan koordinat referans çerçevesi Yer merkezli ve

global olmalıdır. Çünkü teorik olarak bütün tanımlar ve modeller Yer'in tamamı için ve Yer merkezli bir koordinat sistemine göre yapılmaktadır. TRGrav-Net ve yersel gravimetri sıklaştırma noktalarının 3 boyutlu koordinatları çoğunlukla TUSAGA-Aktif sisteminden yararlanarak TUREF referans çerçevesinde (Aktuğ, 2005) belirlenmiştir. Konum belirlemede standardizasyonu sağlamak için tüm ölçü ekipleri aynı özelliklere sahip benzer anten/alıcı sistemini kullanmıştır. Alıcının nokta üzerinde sabitlenip gerekli düzeltmeleri almasını müteakip, 10 epok okuma toplanmış ve okumaların ortalaması ile bulunan 3 boyutlu koordinatlar esas alınmıştır. Sabitleme problemi ile karşılaşılması durumunda, en az 45 dakika statik gözlem yapılarak çözümlene yapılmıştır. Yersel gravimetri noktalarının yatay koordinatları birkaç cm, elipsoit yüksekliği ise 1 dm'den daha iyi duyarlılıkta belirlenmiştir.



Şekil 1. Örnek nokta tesisleri ve konum belirleme.

c. Mutlak Gravimetri

TRGrav-Net ve kalibrasyon bazı mutlak gravimetri noktalarında A10 (#044) mutlak gravimetresi kullanılarak, kuzey ve güney yönlü olmak üzere iki farklı oturum gerçekleştirilmiştir. Her bir oturumda 8 set gözlem yapılmıştır. Bir set

1 saniye aralıklı 120 serbest düşmeden oluşmaktadır. Birinci oturumda mutlak gravimetre kuzey, ikinci oturumda ise sökülüp tekrar kurularak güney doğrultusuna yönlendirilmektedir. Böylece kurulum ve düzeçlemeden kaynaklanabilecek kaba hataların önüne geçilmektedir. İki oturum arasındaki farkın $10 \mu\text{Gal}$ 'i geçmesi durumunda ilave üçüncü ya da dördüncü oturum yapılmaktadır (Akdoğan ve diğerleri, 2019). Mutlak gravimetre ve elektronik üniteleri, içerisinde kesintisiz güç kaynağı olan özel olarak tasarlanmış bir araç ile taşınmaktadır. Mutlak gravite okumalarının, cihazın efektif (referans) yüksekliğinden nokta yüzeyine indirgenmesi amacıyla, her bir mutlak gravite noktasında bağıl gravimetre ile düşey gravite gradyenti ölçüleri yapılmaktadır. Efektif yükseklik, mutlak gravimetrenin serbest düşüş yolu üzerinde yer alan ve sonuç gravite değerinin, kullanılan düşey gradyent değerinden bağımsız olduğu referans yüksekliği olarak tanımlanmaktadır (Timmen, 2003).



Şekil 2. Düşey gravite gradyenti ve mutlak gravite ölçümleri.

Bunun için yerden yüksekliği 25-95-150 cm olan üç farklı yüksekliğe sahip özel bir platform tasarlanmıştır. Bağıl gravite okumaları; A-O-Ü-O-A-Ü-A-O-Ü (A: alt, O: orta, U: üst) sıralamasıyla,

her seviyede 60 saniye süreli ve 3 okuma olacak şekilde yapılarak, hem serbestlik derecesi artırılmış hem de gradyent kestiriminde doğrusal olmayan terim de belirlenebilmiştir (Akdoğan ve diğerleri, 2019). Bir mutlak gravimetri noktası üzerinde gerçekleştirilen düşey gravite gradyent ve mutlak gravite ölçülerine ilişkin görseller Şekil 2'de sunulmuştur.

ç. Bağıl Gravimetri

Bağıl gravimetri ölçmelerinde Scintrex CG-5 ve CG-6 gravimetreleri kullanılmıştır. Gravimetrelerin günlük sürüklenme (drift) değerlerini belirleyebilmek amacıyla, A-B-C-D-E-C-B-A ölçü sıralamasına sahip profil yöntemi uygulanmıştır. Gravimetreler, noktalar arasında standart taşıma çantaları içerisinde ve arazi araçlarıyla taşınmıştır. Rüzgâr ve direkt güneş ışınlarından korumak için rüzgâr koruyucu veya şemsiye kullanılmıştır.



Şekil 3. Bağıl gravimetri çalışmaları.

Gravimetreler nokta üzerinde yerleştirildiğinde pusula yardımıyla kuzeye yönlendirilmiş, düzeçleme sonrasında iç sıcaklığın ve sensörün durağan hale gelmesi için en az 10 dakika bekletilmiştir. 6 Hz örneklem aralıklı gözlemlerin ortalamasından oluşan 60 saniye süreli en az 5 okuma gerçekleştirilmiştir. Son 5 okuma arasında

5 μGal 'den daha az bir değişim olması ve okumalarda yukarı/aşağı yönlü bir eğilim görülmemesi durumunda ölçüm tamamlanmıştır. Düzeltme kaymaları 5 yay saniyesinden ve standart sapması 0.3 mGal 'den yüksek okumalar değerlendirme dışında bırakılmıştır. Her bir gravite okuması sonrası atmosferik basınç ve sıcaklık değerleri kaydedilmiştir. Ölçümler sırasında gravimetreye özgü iç düzeltmeler (gelgit düzeltmesi vb.) ve filtreler (sürekli düzeç eğimi düzeltmesi, sismik filtre vb.) aktif hale getirilmiştir. Bağıl gravimetri çalışmalarına ilişkin görseller Şekil 3'te sunulmuştur.

d. Veri İşlem

(1) Mutlak Gravimetri

Mutlak gravite ölçümleri, Micro-g LaCoste tarafından sağlanan g9 yazılımı (Micro-g LaCoste, 2012) ile işlenmiştir. Vakumlu ortamda ilk hızı v_0 , başlangıç konumu x_0 ve düşey gravite gradyent değeri γ bilenen bir test kütesinin serbest düşüşü sırasında, lazer interferometre ile hassas bir şekilde izlenmekte, konum x_i ve zaman ölçümleri t_i yapılmaktadır. (1) eşitliği ile verilen gözlem eşitliğinin en küçük karelerle çözümü ile mutlak gravite değeri g_0 hesaplanabilmektedir (Micro-g LaCoste, 2012).

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma x_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma v_0 \tilde{t}_i^3}{6} + \frac{\gamma g_0 \tilde{t}_i^4}{24}$$

$$\tilde{t}_i = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c} \quad (1)$$

Çevresel etkilerden kaynaklanan gravite indirgemeleri yazılım tarafından hesaplanmakta ve ham ölçülere uygulanmaktadır. Katı Yer gelgitleri için ETGTAB programı (Wenzel H-G, 1996), 1200 dalgalı Tamura (1987) gelgit potansiyeli kataloğuyla birlikte kullanılmıştır. Okyanus yüklemesi etkisi FES2004 okyanus gelgiti modeli (Lyard ve diğerleri, 2006) kullanılarak belirlenmiştir. Kutup gezinmesi düzeltmesi için IERS Bülten B'de verilen günlük kutup koordinatları ve 1.16 genlik faktörü kullanılmıştır. Atmosferik kütle değişimlerinden kaynaklı gravite indirgemeleri için 0.3 $\mu\text{Gal.hPa}^{-1}$ deneysel katsayı uygulanmıştır. Mutlak gravite değerleri, cihazın efektif yükseklik noktasında belirlenmiştir. A10 (#044) mutlak gravimetresi efektif yüksekliği, yapılan denemeler sonucunda fabrika alet yüksekliğinin 3.74 cm altında bulunmuştur (Simav ve Yıldız, 2019). Sistem ve set dağılım belirsizliklerini de içerecek şekilde bugüne kadar tesis edilen 100 adet mutlak gravimetri noktasında toplam belirsizlik 10 μGal seviyesindedir.

Efektif yükseklikteki gravite değerinin farklı bir yükseklikteki karşılığını bulmak için düşey gravite gradyent değerleri $\gamma(h_i)$, gereklidir. Bu değerler, 2.c bölümünde açıklanan farklı yüksekliklerdeki $R^c(h)$ indirgenmiş bağıl gravite okumalarına, (2) eşitliğindeki kuadratik fonksiyonun uydurulması ve elde edilen a ve b polinom katsayılarının (3) eşitliğinde kullanılmasıyla hesaplanmıştır. (3) eşitliğindeki h_i terimi efektif yüksekliği ifade etmektedir ve A10 (#044) gravimetresi için 68.26 cm'dir (Simav ve Yıldız, 2019).

$$R^c(h) = a.h^2 + b.h + c \quad (2)$$

$$\gamma(h_i) = a.h_i + b \quad (3)$$

100 adet mutlak gravimetri noktasında efektif yükseklikte kestirilen $\gamma(h_i)$ değerleri 0.2392-0.4125 mGal/m arasında değişkenlik göstermekte olup, konumsal dağılımı Şekil 4(a)'da, nokta yüksekliğine göre değişimi ise Şekil 4(b)'de sunulmuştur.

(2) Bağıl Gravimetri

Ham bağıl gravimetri okumaları; katı Yer ve okyanus gelgitleri, atmosferik kütle hareketleri, kutup gezinmesi, yeraltı suyu ve toprak nemi değişimleri ve aletsel sürüklenme gibi ham ölçülere düzeltme olarak getirilmesi gereken çeşitli çevresel ve aletsel sistematik etkileri içermektedir (Torge, 1989; Timmen, 2010). Scintrex CG-5 ve CG-6 gravimetreleri, gravite okumalarına gerçek zamanlı olarak Yer gelgiti, uzun dönemli sürüklenme, düzeç sapması ve sıcaklık düzeltmesi uygulayabilmektedir (Scintrex, 2009; Scintrex, 2018). Ancak, gravimetre işlemcisi tarafından hesaplanan bu düzeltmeler basit birinci-derece modellere dayalı olduğundan yaklaşık sonuçlar sağlar. Ayrıca gravimetreler basınç, kutup gezinmesi ve okyanus yüklemesi gibi toplamda 10-20 μGal 'e erişebilen düzeltmeleri ise gerçek zamanlı olarak uygulayamaz (Cattin ve diğerleri, 2015). Literatürdeki çalışmalarla da uyumlu olacak şekilde ön-işlem aşamasında Scintrex gravimetrelerinin gerçek-zamanlı düzeltmeleri gravite okumalarından çıkarılır ve bunların yerine daha doğru/tam düzeltmeler hesaplanarak gravite okumalarına eklenir (Jousset ve diğerleri, 1995; Bonvalot ve diğerleri, 1998; Gabalda ve diğerleri, 2003; Lederer, 2009; Hector ve Hinderer, 2016).

R^R ham gravite okuması, Δg^T , Δg^A , Δg^P , Δg^O , Δg^H , Δg^D sırasıyla katı Yer gelgiti, atmosferik basınç, kutup gezinmesi, okyanus yüklemesi, gravimetre yükseklik değişimi ve sürüklenme

düzeltilmesi, k ise kalibrasyonla bulunan ölçek katsayısı olmak üzere bir t anında düzeltilmiş/indirgenmiş gravite okumaları R^c aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$R^c(t) = (R^R(t) + \Delta g^T(t) + \Delta g^A(t) + \Delta g^P(t) + \Delta g^O(t) + \Delta g^H(t) + \Delta g^D(t)) \times k \quad (4)$$

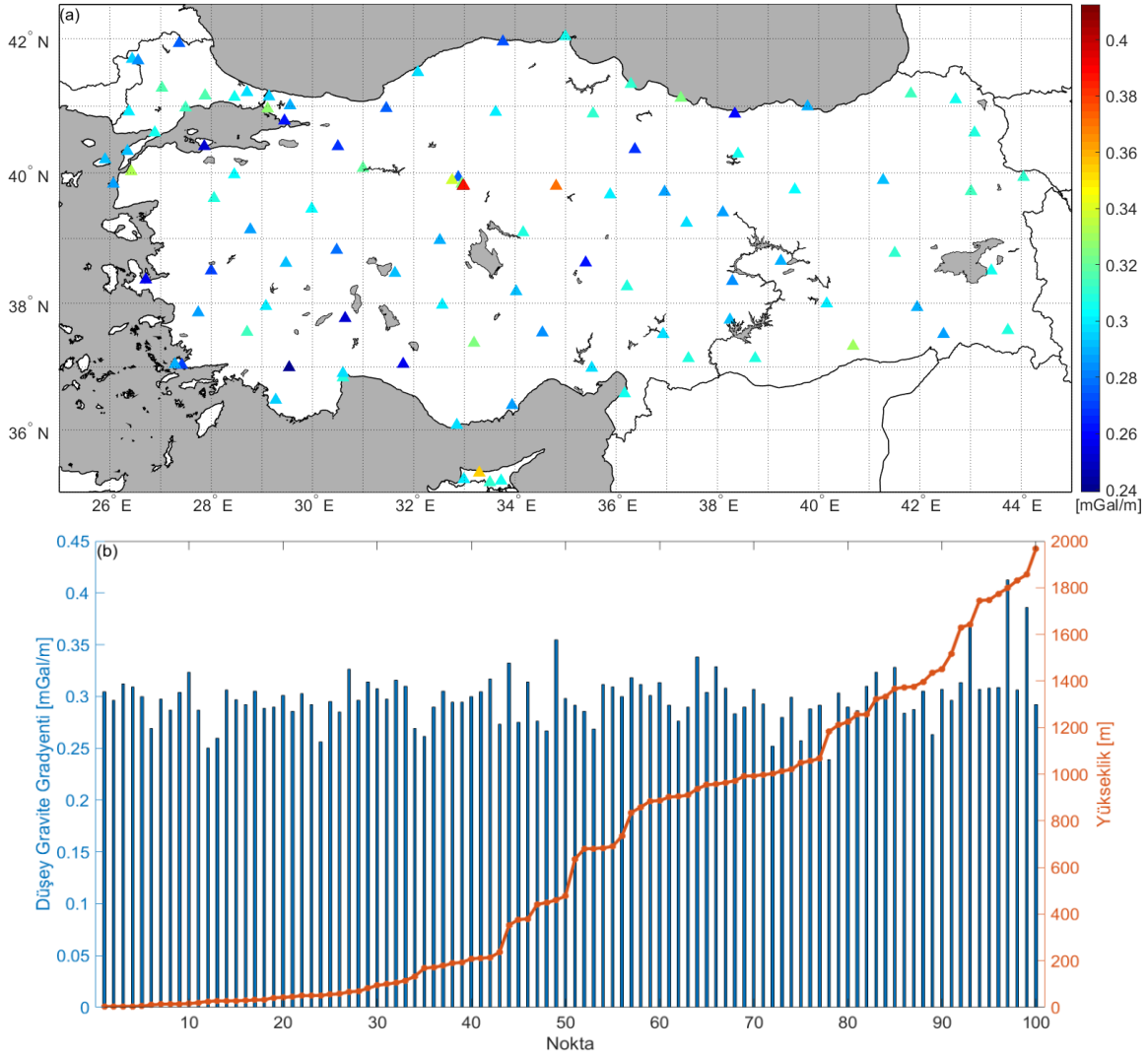
Yersel gravimetri noktalarında yeraltı su tablosu ile gravite okumaları arasındaki transfer fonksiyonu bilinmediğinden, ham okumalara yeraltı suyu ve toprak nemi değişimi düzeltmeleri uygulanmamıştır. (4) eşitliğinde verilen düzeltmelerin açık halleri Simav ve Yıldız (2019)'da verilmiş olup, hesaplamalar MATLAB ortamında geliştirilmiş bağıl gravimetri veri işlem yazılımı ile yapılmaktadır.

Bağıl gravimetri çalışmaları için kullanılan profil yönteminde ölçü bir noktadan başlayıp tekrar aynı

nokta üzerinde tamamlandığından, (5) eşitliği ile verilen günlük kapanma hatası, düzeltmelerin doğru uygulanıp uygulanmadığı, okumalarda kaba hata olup olmadığı konusunda bilgi verebilecek bir kontrol ölçütüdür.

$$C^{d,gr} = \sum \Delta R_{ij}^{d,gr} + \varepsilon_c \quad (5)$$

Her bir gün ve her bir gravimetre için belirlenen günlük kapanma hatasının $C^{d,gr}$ beklenen değeri sıfırdır. (5) eşitliğindeki $\Delta R_{ij}^{d,gr}$ terimi; d gününde gr gravimetresi ile ölçülen, i ve j noktaları arasındaki indirgenmiş okuma farkını, ε_c terimi ise modellenemeyen artık hataları ifade etmektedir. TRGrav-Net ve yersel gravimetri sıklaştırma çalışmaları kapsamında hesaplanan günlük kapanma hataları ortalama ± 5 μGal seviyesindedir.



Şekil 4. 100 mutlak gravite noktasındaki düşey gravite gradyentleri. (a) Konumsal dağılımı, (b) Nokta yüksekliğine göre değişimi.

Bağıl gravimetri okuma farkları ölçü olarak alınarak ve aşağıdaki gözlem modeli kullanılarak ağırlıklı ve zorlamalı en küçük kareler yöntemi ile dengelenmektedir (Simav ve Yıldız, 2019).

$$\Delta l_{ij}^{gr} + v_{ij} = g_j - g_i + \sum_{n=1}^N d_n^{gr} (t_j - t_i) \quad (6)$$

$$\Delta l_{ij}^{gr} = R_j^{wm} - R_i^{wm} \quad (7)$$

$$R_i^{wm} = \frac{\sum_{n=1}^{NR} \frac{R_n^c}{SE_n^2}}{\sum_{n=1}^{NR} \frac{1}{SE_n^2}} \quad (8)$$

$$\sigma_i^{wm} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{n=1}^{NR} \frac{1}{SE_n^2}}} \quad (9)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{(\sigma_i^{wm})^2 + (\sigma_j^{wm})^2} \quad (10)$$

Bir yersel gravimetri noktası üzerinde bölüm 2.ç'de bahsedildiği gibi birden çok gravite okuması yapılmaktadır. Nokta üzerindeki ağırlıklı ortalama okuma değeri R_i^{wm} ve standart sapması σ_i^{wm} , (8) ve (9) eşitliklerinde gösterildiği şekilde NR adet okumanın ağırlıklı ortalaması şeklinde hesaplanmaktadır. (8) eşitliğindeki R_n^c terimi n 'inci indirgeniş gravite okumasını, SE terimi ise bu okumaya karşılık gelen standart hatayı ifade etmektedir. i ve j noktaları arasında t_i ve t_j zamanlarında gr bağıl gravimetresi ile bulunan okuma farkı ve bu farka ait standart sapma (7) ve (10) eşitlikleri ile verilmektedir. g_i ve g_j , noktaların gravite değerleri, d_n^{gr} ise gr gravimetresinin artık sürüklenme katsayısıdır.

(6) eşitliğinin en küçük kareler çözümü, değişik çözümler de olmakla birlikte, en az bir mutlak gravite noktasının datum noktası olarak sabit alınması veya ağırlık zorlanması ile elde edilebilir (Hwang ve diğerleri, 2002). n gözlem denklemleri sayısı, r zorlamalı çözümde kullanılacak ilave gözlem sayısı, u kestirilecek parametre sayısı, L , $n \times 1$ boyutlu ve Δl_{ij}^{gr} değerlerinden oluşan gözlem vektörü, P , $n \times n$ boyutlu σ_{ij}^2 gözlem varyanslarına bağlı oluşturulan ağırlık matrisi, A , $n \times u$ boyutlu dizayn matrisi, L_g , öncül mutlak gravite değerlerinden oluşan ilave gözlem vektörü, P_g ve A_g ilave gözlemlere ilişkin ağırlık ve dizayn matrisi olmak üzere en küçük kareler çözümü

aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir (Simav ve Yıldız, 2019).

$$\hat{X} = (A^T P A + A_g^T P_g A_g)^{-1} (A^T P L + A_g^T P_g L_g) \quad (11)$$

$$V = \begin{bmatrix} v \\ v_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A_g \end{bmatrix} \hat{X} - \begin{bmatrix} L \\ L_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V_g^T P_g V_g}{n+r-u} \quad (13)$$

$$C_{\hat{X}} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A + A_g^T P_g A_g)^{-1} \quad (14)$$

Dengeleme sonrası Chi-kare χ^2 global varyans testi (Koch, 1987) ve kaba hatalı ölçülerin belirlenmesi için Pope τ -testi (Pope, 1976) uygulanmaktadır.

3. ANKARA KALİBRASYON BAZI VE BAĞIL GRAVİMETRELERİN KALİBRASYONU

Bağıl gravimetri doğruluğunu etkileyen en önemli hususlardan biri kullanılan gravimetrelerin kalibrasyonudur (Torge, 1989; Hugill, 1990; Seigel ve diğerleri, 1995; Becker ve diğerleri, 1995). Yüksek doğruluklu ve duyarlı gözlemler için bağıl gravimetre kalibrasyon veya ölçek faktörünün %0.01 görece doğruluk (10 mGal gravite aralığında 1 μ Gal ölçü hatası) ile belirlenmesi gerekir (Gabalda ve diğerleri, 2003). Scintrex CG-5 ve CG-6 gravimetrelerinin GCAL1 isimli kalibrasyon sabiti, üretici tarafından Toronto/Kanada bölgesindeki kalibrasyon bazında belirlenmektedir. Ancak bu sabitin, gravimetre sensöründeki yaşlanmaya bağlı olarak belirli aralıklarla kontrol edilmesi ve gerekirse gravimetrenin yeniden kalibre edilmesi önerilmektedir (Scintrex, 2009; Scintrex, 2018). (15) ve (16) eşitliklerinde gösterildiği gibi, doğrusal ölçek faktörü k 'nin doğruluğu, kalibrasyon bazı noktaları arasındaki gravite farkına Δg_{ij} , noktalar arasındaki okuma farkına ΔR_{ij} ve bu değerlerin doğruluğuna ($\sigma_{\Delta g}$ ve $\sigma_{\Delta R}$) bağlıdır.

$$\Delta g_{ij} = k \cdot \Delta R_{ij} \quad (15)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\Delta R_{ij}} \cdot \sqrt{\sigma_{\Delta g}^2 + \sigma_{\Delta R}^2 \frac{\Delta g_{ij}^2}{\Delta R_{ij}^2}} \quad (16)$$

Ankara ili sınırları içerisinde Şekil 5'de konumları gösterilen ve iki mutlak gravite noktasından oluşan (Cebeci ve Elmadağ) kalibrasyon bazı kurulmuştur. Bu yeni bazın en önemli yararı, noktaların coğrafi olarak birbirlerine yakın olması (~20 km, 15-20 dk. sürüş mesafesi)

ve noktalar arası yüksek gravite farkıdır (~210 mGal). Mesafenin kısa olması, gün içerisinde noktalar arasında çok sayıda ölçü alınabilmesine ve serbestlik derecesinin artırılmasına olanak sağlamaktadır.

Kalibrasyon bazı noktaları A10 (#044) mutlak gravimetresi ile Bölüm 2.c'de belirtilen standartlarda ölçülmüş ve Bölüm 2.d(1)'de anlatıldığı şekilde analiz edilmiştir. TRGrav-Net ve sıkıştırma çalışmalarında kullanılan Scintrex CG-5 ve CG-6 gravimetreleri, söz konusu bazda kalibrasyona tabi tutulmuş ve yeni ölçek katsayıları hesaplanmıştır (Simav ve Yıldız, 2019).



Şekil 5. Ankara kalibrasyon bazı noktalarının konumları ve Elmadağ kalibrasyon noktası.

4. TRGRAV-LAB LABORATUVARI

TRGrav-Net ve yersel sıkıştırma çalışmalarında kullanılan bağıl ve mutlak gravimetreler 2015 yılı Kasım ayında teslim alınmıştır. Üretici tavsiyesi dikkate alınarak, gravimetreler arazi çalışmaları öncesinde uzun süreli sabit gözlemlerle bir dizi kontrole tabi tutulmuş, gürültü karakteristikleri ve sürüklenme katsayıları düzenli aralıklarla izlenmiştir. Bu maksatla; doğal, çevresel ve insan kaynaklı gürültülerden olabildiğince arındırılmış, bina

temelinden bağımsız ve ana kaya üzerine oturtulmuş 4 adet sismik kütle platformundan oluşan bir laboratuvar (TRGrav-Lab) tesis edilmiştir. TRGrav-Lab, kesintisiz güç kaynağı ve bina çatısına yerleştirilmiş GNSS anteni, yangın algılama/uyarı/söndürme sistemi ile 10-40°C arası sıcaklık değişimi sağlayabilecek ısıtma/soğutma sistemine sahiptir. Laboratuvara ait görseller Şekil 6'da sunulmuştur.

Laboratuvarda gerçekleştirilen sürekli gözlemlerle bağıl gravimetrelerin gravite sensörü, gürültü karakteristikleri, sürüklenme katsayıları, sıcaklık değişimlerine duyarlılığı, düzeç sensörleri, bataryaları ve saat sapmaları (Scintrex, 2009; Scintrex, 2018) düzenli aralıklarla izlenmiştir.



Şekil 6. TRGrav-Lab laboratuvarı.

İlk birkaç ay boyunca, bağıl gravimetrelerin sürüklenme hızlarının 2.5 mGal/gün'e kadar ulaştığı ve zamanla azalarak 1mGal/gün altına indiği gözlenmiştir. Laboratuvar ve arazi şartlarında gerçekleştirilen tekrarlı gözlemlerin standart sapması, Scintrex CG-5 ve CG-6 gravimetrelerinin üretici kataloglarında (Scintrex, 2009; Scintrex, 2018) belirtildiği şekilde $\pm 5-10$ μ Gal aralığında bulunmuştur (Simav ve Yıldız, 2019).

A-10 (#044) mutlak gravimetresinin TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü laboratuvarında saat ve lazer kalibrasyonları yapılmış, FG-5X (#254) gravimetresi ile eş zamanlı olarak karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma sonuçları ve tekrarlıkları değerlendirildiğinde, A-10 (#044) gravimetresinin üretici kataloğuyla uyumlu sonuçlar (≤ 10 μ Gal) verdiği gözlenmiştir (Micro-g LaCoste, 2008). FG-5X (#254) ve A-10 (#044) karşılaştırmasına ilişkin bir görsel Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. FG-5X (#254) ve A-10 (#044) mutlak gravimetre karşılaştırması için laboratuvar çalışması.

5. TRGRAV-WEB VERİ PORTALI

Yersel gravimetri standardizasyonunun önemli unsurlarından biri de veri yönetimi ve sunumudur. Gravite alanı ölçümlerinde farklı tür ve formatta toplanan verilerin, ölçümün yapıldığı gün çevrimiçi olarak ilişiksel bir veri tabanına yüklenmesi, yükleme sırasında bir dizi kontrolden geçirilmesi, verilerin belirli bir düzen içerisinde meta verileri ile birlikte depolanması ve altlık harita destekli görsel bir platform üzerinden sunulması gerekli sorgulamaların yapılabilmesi amacıyla TRGrav-Web portalı geliştirilmiştir (Simav ve diğerleri, 2016).

<https://trgrav.harita.gov.tr> adresinden hizmet veren uygulama, PostGIS/PostgreSQL veri tabanı

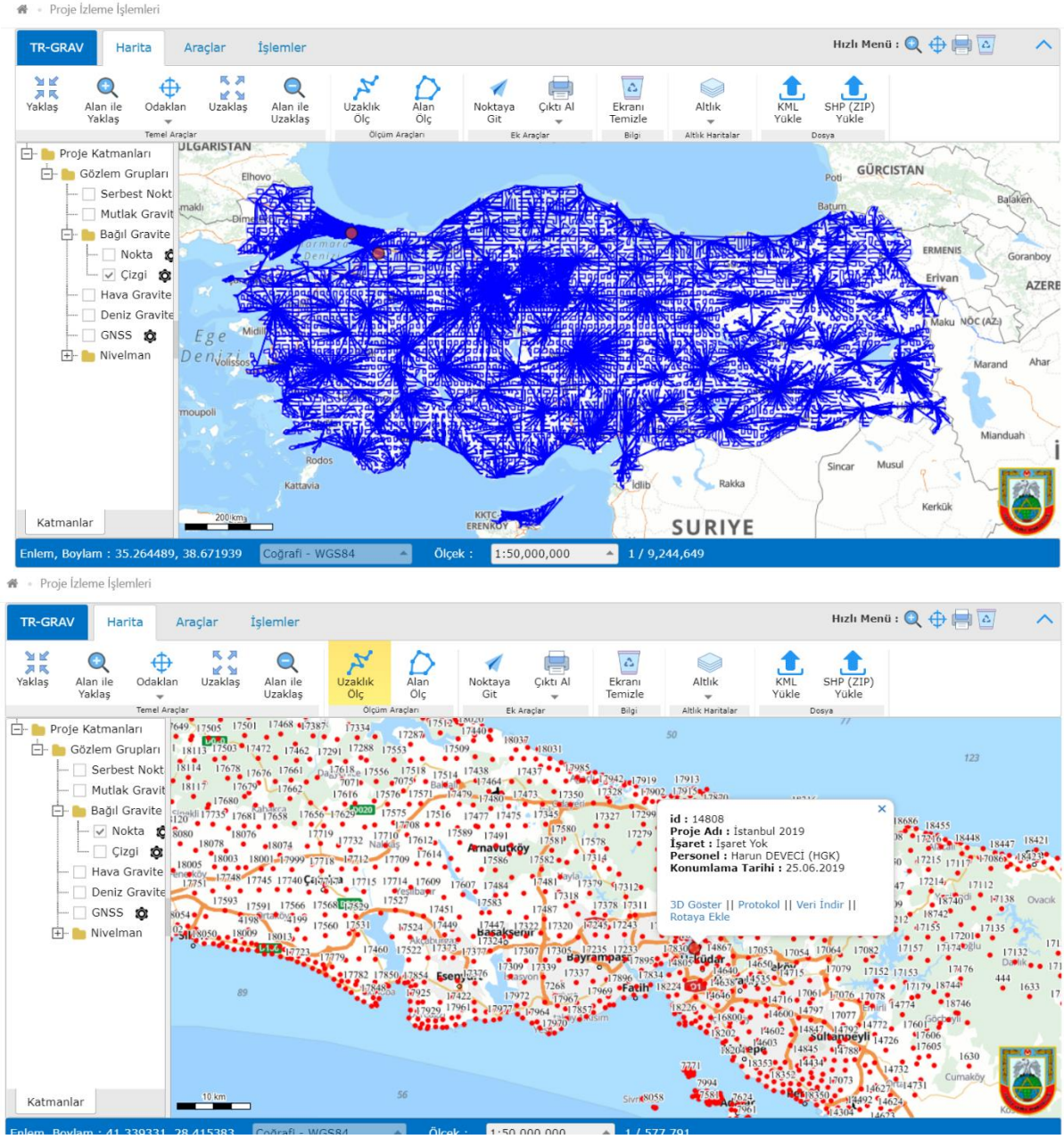
üzerine inşa edilmiştir. C# ve JavaScript dilleri kullanılarak geliştirilen arayüzlere, sadece sisteme tanımlı kullanıcılar erişebilmektedir. Tanımlı bir kullanıcı iki aşamalı kimlik doğrulamadan geçirildikten sonra sadece yetkili olduğu sayfalara ve projelere erişim sağlayabilmektedir.

Tanımlı ve yetkili bir kullanıcı, ölçü noktasının konumu ve konuma ilişkin meta verileri tanımlayabilmekte, listeleyebilmekte, görüntüleyebilmekte, düzenleyip silebilmektedir. Nokta protokolleri PDF dosyası olarak anlık hazırlanmaktadır. Sisteme; Scintrex CG-5 ve CG-6 bağıl gravimetre çıktı dosyası, Micro g LaCoste FG5X ve A10 mutlak gravimetre çıktı dosyası, GNSS RINEX dosyaları, nivelman gözlem dosyası, hava gravimetrisi gözlem dosyaları kontrollü bir şekilde yüklenebilmektedir. Görselleştirmede farklı türlerde sayısal harita altlıkları seçilebilmekte, semboloji, yazı tipi/büyüklüğü değiştirme gibi kartografik zenginleştirmeler uygulanabilmektedir. TRGrav-Web portalına ait görüntüler Şekil 8'de sunulmuştur.

6. TRGRAV-NET ULUSAL GRAVİTE STANDARDİZASYON AĞI

Bağıl gravimetri, noktalar arası gravite farklarının ölçülmesi olarak tanımlanabilir. Ancak görelî ölçülerin datumunun ve ölçeğinin belirlenebilmesi için bir gravite referans sistemine bağlanması gerekmektedir. Bu amaçla, referans noktalarından oluşan gravite standardizasyon ağları kurulmakta ve yaşatılmaktadır (Torge, 1989).

Türkiye'de ilk gravite ağı Harita Genel Müdürlüğü tarafından 1956-1960 yılları arasında kurulmuş, Norgaard gravimetresi ile ölçülmüş toplam 24 noktadan oluşan bir ağıdır. TTGA-56 olarak adlandırılan bu ağın doğruluğu zaman içinde jeodezik, jeofizik, jeodinamik ve mühendislik amaçlı çalışmalarda beklenenleri karşılamaktan uzak kalmıştır (Ayhan ve diğerleri, 1992). TTGA-56 datumunun tek nokta ile belirlenmesindeki olumsuzluk ve nokta gravite değerinin düşük doğrulukta olması nedeniyle bu ağın daha duyarlı gravimetreler ile yeniden ölçülmesi ve farklı kurumlar tarafından farklı bölgelerde tesis edilen kalibrasyon ağlarının birleştirilerek doğruluğu yüksek bir kalibrasyon bazının kurulması, Harita Genel Müdürlüğü ve MTA arasında 1993 yılında imzalanan protokol kapsamına alınmıştır. 1993-2001 yılları arasında yapılan çalışmalarla Türkiye Temel Gravite Ağı-1999 (TTGA-99) oluşturulmuştur (Demir ve diğerleri, 2006).



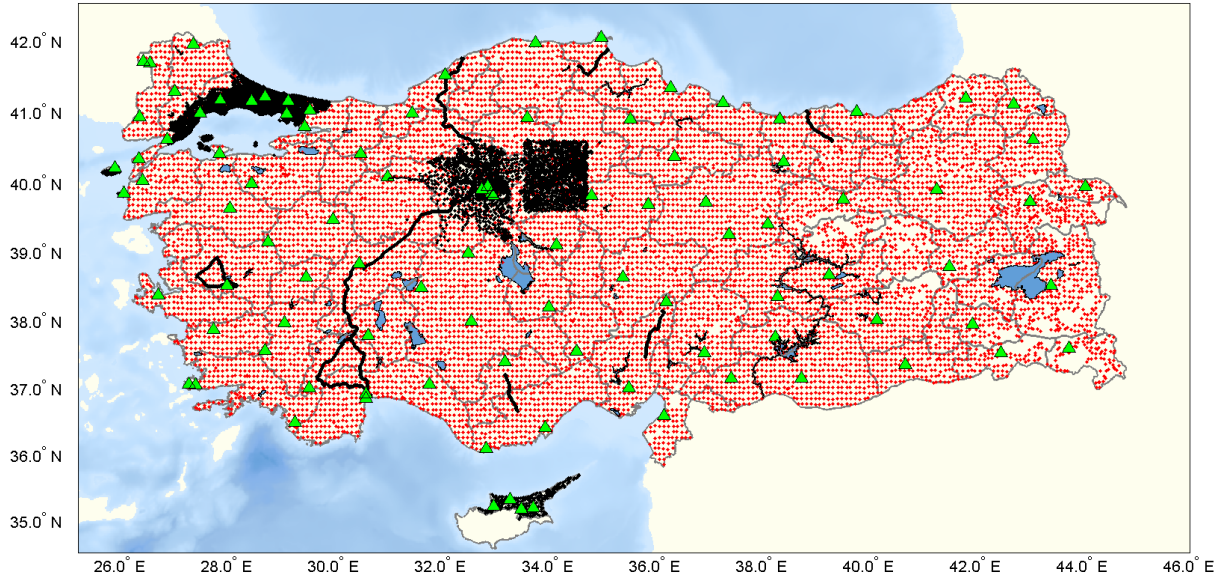
Şekil 8. TRGrav-Web portalı.

TTGA-99, 55 adet birinci derece ve 13 mutlak gravite noktası (Wilmes ve diğerleri, 1997) olmak üzere toplam 68 noktadan oluşmaktadır. TTGA-99 noktaları arasındaki 132 bağlantı ölçüsü, iki LCR-G gravimetresi ile gerçekleştirilmiştir. TTGA-99'un nokta sayısının az, dağılımın ise düzensiz olması, bunun yanında aradan geçen sürede noktaların doğal ve insan kaynaklı etkilere maruz kalarak tahrip olması sebebiyle yeni bir ulusal standardizasyon ağının kurulmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020)

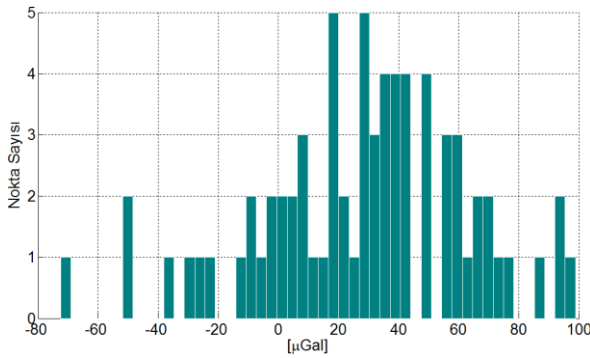
projesi kapsamında; 2016-2020 yılları arasında Harita Genel Müdürlüğü, MTA, TPAO, TÜBİTAK-MAM ve TÜBİTAK UME iş birliği ile gerçekleştirilen mutlak ve bağıl gravimetri çalışmaları sonucu 100 adedi mutlak olmak üzere toplam 11783 noktadan oluşan yeni gravite standardizasyon ağı TRGrav-Net oluşturulmuştur (Şekil 9).

Her bir il sınırı içerisine en az bir mutlak gravite noktası düşecek şekilde TRGrav-Net ağ noktaları arası yaklaşık 10 km olarak seçilmiştir. Nokta yeri seçiminde, konumlamada ve gravite ölçümlerinde 2'nci bölümdeki standartlar uygulanmıştır.



Şekil 9. TRGrav-Net Ulusal Gravite Standardizasyon Ağı noktaları (kırmızı), TRGrav-Net mutlak gravimetri noktaları (yeşil), yersel gravite sıkılaştırma ve gravite ölçüsü yapılan nivelman noktaları (siyah).

Ağın iç duyarlılığını test etmek ve varsa kaba ve sistematik hataları belirleyebilmek amacıyla ağ önce bir mutlak gravite noktası sabit alınarak minimum zorlamalı olarak dengelenmiştir. İlk iterasyon sonunda istatistiksel değerleri %95 güven düzeyinde kritik τ değerlerine yakın birkaç kaba hatalı ölçü tespit edilmiştir. Kritik değere yakın olması sebebiyle kaba hatalı ölçüler ölçü listesinden çıkarılmayıp ağırlıkları düşürülerek ikinci iterasyon çalıştırılmıştır. Bu iterasyon sonunda aposteriori varyans faktörü 1.001 olarak bulunmuş ve global testi başarıyla geçmiştir. Minimum zorlamada kullanılmayan 99 mutlak gravimetri noktasının A10 (#044) ile belirlenen gravite değerleri ile dengeleme sonrası bulunan değerleri arasında 28.2 μGal 'lik bir ortalama ve 34.9 μGal 'lik standart sapmaya sahip iyi bir uyum bulunmuştur (Şekil 10).



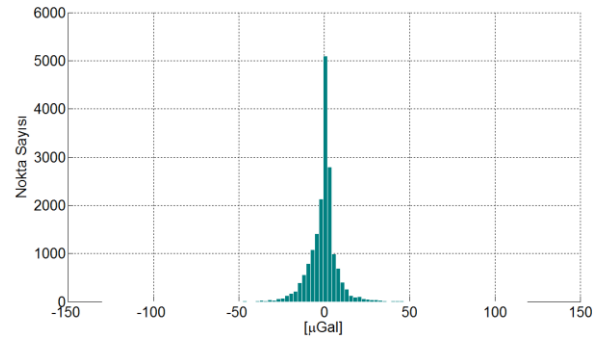
Şekil 10. Minimum zorlamalı ağ çözümünün mutlak gravimetri noktalarında karşılaştırılması.

Tüm mutlak gravimetri noktalarının dengelemeye dâhil edildiği zorlamalı çözüm sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: TRGrav-Net ağırlıklı ve zorlamalı en küçük kareler dengeleme istatistikleri (σ : Nokta gravite değeri standart sapmaları, v : Gözlem düzeltmeleri).

	Maks.	Min.	Ort.	RMS
σ (μGal)	65.2	10.1	34.9	35.3
v (μGal)	118.9	-129.8	-0.5	9.7

Gözlem düzeltmelerine (v) uygulanan tek-örneklem Kolmogorov-Smirnow testi, gözlem düzeltmelerinin %5 anlamlılık seviyesinde sıfır ortalama ve 10 μGal standart sapma ile normal dağılıma uyduğunu göstermektedir (Şekil 11).



Şekil 11. TRGrav-Net zorlamalı ağ dengelemesi gözlem düzeltmeleri.

7. SIKLAŞTIRMA ÇALIŞMALARI

TRGrav-Net ağ kurulum çalışmaları devam ederken, İstanbul, Ankara, Tekirdağ illeri ile ~110 x 100 km genişliğindeki Kırıkkale-Çorum hava gravimetrisi test alanında, Marmara Denizi'nde 1.5 km²'den daha büyük adaların tamamında, Gökçeada ve Bozcada ile KKTC genelinde birkaç kilometre konumsal çözünürlükte gravite sıklaştırma çalışmaları yapılmıştır. Bunun yanında ülke genelinde jeoit modeli kontrolü için farklı bölgelerde tesis edilen 7 farklı nivelman hattına ait 1757 noktada yersel gravimetri çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 9). 2021 yılı içerisinde, Ankara'nın güney ve batı kesiminde, Tekirdağ'ın kuzey kesiminde ve Çanakkale ili genelinde sıklaştırma çalışmalarına devam edilmektedir. Sıklaştırma çalışmaları ikinci bölümde bahsedilen standartlara uygun olarak yürütülmekte olup, ilk dengeleme sonuçları TRGrav-Net ağ duyarlılığı ve doğruluğuna çok yakındır.

8. GÜNCEL YERSEL GRAVİTE VERİLERİYLE GERÇEKLEŞTİRİLEN UYGULAMALAR

2016 yılından itibaren devam etmekte olan yersel gravimetri çalışmaları kapsamında elde edilen yüksek konum ve ölçüm doğruluğuna sahip gravite verileri; tarihsel gravite verilerinin kalite kontrolünde, hava gravimetrisi test çalışmalarında ve TG-20 jeoit modeli hesaplamalarında kullanılmıştır.

a. Tarihsel Gravite Verilerinin Kalite Kontrolü

Tarihsel gravite verileri, MTA ve TPAO'dan temin edilen yaklaşık 300.000 nokta verisinden oluşmaktadır. Bu verilerin toplanması ve işlenmesi sırasında yeterli düzeyde kayıt tutulmaması, meta verilerinin olmaması, konum doğruluklarının düşük olması, koordinat ve gravite referans sistemlerinin farklı olması temel problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Tarihsel veriler, koordinat referans sistemleri ile ilgili gerekli dönüşümlerin yapılmasını müteakip, en küçük karelerle kolokasyon tekniği ile (Tscherning, 1991) kontrol edilmiştir. Bu kontrol sonucunda, MTA verilerinin bir kısmında 14 mGal civarında sistematik bir kayıklık tespit edilmiştir. Bu farkın gravite datumundan kaynaklandığı sonucuna varılmış ve gerekli datum düzeltmesi yapılmıştır. Ardından iteratif olarak $\pm 3\sigma$ kriteri uygulanarak tarihsel veriler içerisindeki olası hatalı veriler tespit edilmiştir. Bu analiz sonucunda veri kümesinin yaklaşık %5.2'sinin kaba hatalı olduğu sonuna

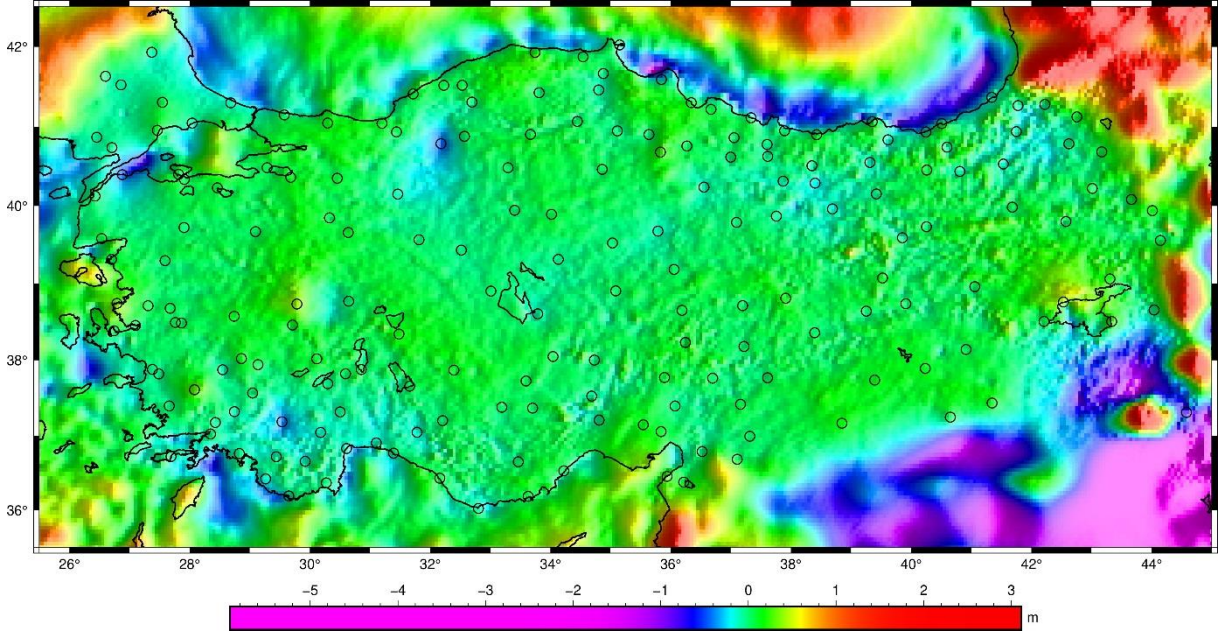
varılmış ve listeden çıkarılmıştır (Yıldız ve diğerleri, 2021).

b. Hava Gravimetrisi Test Alanında Uygulamalar

Kırıkkale-Çorum hava gravimetrisi test alanında gerçekleştirilen yersel gravimetri sıklaştırma verileri, 2017 ve 2018 yıllarında gerçekleştirilen ataletsel navigasyon/GNSS entegrasyonuna dayalı hava gravimetrisi testlerinde referans veri seti olarak kullanılmıştır. Yersel veriler en küçük karelerle kolokasyon yöntemiyle uçuş yüksekliğine yukarı yönlü olarak uzatılmış ve hava gravimetrisi çözümleri ile karşılaştırılmıştır. Her biri yaklaşık 100 km uzunluğundaki toplam 9 uçuş hattında yapılan karşılaştırmada, yersel veriler hava gravimetrisi çözümlerini uçuş yüksekliğinde ortalama 1 mGal uyumla doğrulamıştır (Simav ve diğerleri, 2020)

c. Türkiye Jeoit Modeli-2020

Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020) projesinin nihai hedefi 1-3 km konumsal çözünürlükte 1-3 cm doğruluklu Türkiye Jeoit Modelini hesaplamaktır. Gravimetrik jeoit modeli çözünürlüğü ve doğruluğu, çözüme giren yersel verilerin dağılımı ve kalitesi ile yakından ilişkilidir. Proje kapsamında toplanan yüksek konum ve gravimetrik doğruluğuna sahip yersel veriler ve kalite kontrolü yapılmış tarihsel veriler, GOCE tabanlı güncel global jeopotansiyel model ve yüksek çözünürlüklü sayısal arazi modeli kullanılarak En Küçük Karelerle Stokes Modifikasyonu-İlave Düzeltmeler yöntemi (Sjöberg, 2003) ile Türkiye Jeoit Modeli-2020 hesaplanmıştır (Yıldız ve diğerleri, 2021). Proje kapsamında toplanan yeni GNSS/nivelman noktalarında yapılan karşılaştırmalarda TG-20'nin 1.2 - 6.3 cm doğruluğa eriştiği görülmüştür. Özellikle yeni yersel verinin sık olduğu Kırıkkale-Çorum bölgesindeki GNSS/nivelman noktalarında standart sapma değeri 1 cm civarında hesaplanmıştır (Yıldız ve diğerleri, 2021). Bu sonuç; yoğun ve doğru yersel gravite verisinin, gravimetrik jeoit modeli doğruluğuna etkisini göstermesi açısından önemlidir. Sonuç olarak, güncel yersel gravimetri verileri nihai proje hedefine ulaşılmasına, önceki jeoit modeli TG-03'e (Kılıçoğlu ve diğerleri, 2006) oranla, ülke sınırları içerisinde belirli karasal alanlarında maksimum 82 cm'ye (Şekil 12) ulaşan iyileştirmeler yapılmasına büyük katkı sağlamıştır.



Şekil 12. TG-20 ve TG-03 jeoit modelleri arasındaki farklar ve iyileşmeler (Yıldız ve diğerleri, 2021).

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020) projesi kapsamında, 2016 yılından itibaren beş kurumun iş birliğiyle ülke genelinde yoğun yersel gravimetri çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların temel hedefi ulusal gravite veri altyapısını geliştirmek ve Türkiye bölgesel gravite alanı modelini iyileştirmektir. Yersel gravimetri çalışmaları öncesinde veri toplama ve işleme standartları belirlenmiş, yeni bir kalibrasyon bazı oluşturulmuş, inşa edilen gravimetri laboratuvarında (TRGrav-Lab) çalışmalarda kullanılan gravimetrelerin performansı sürekli olarak izlenmiş ve bir veri portalı (TRGrav-Web) kurulmuştur. 2016 yılı Nisan ayından sonra ise mutlak ve bağıl gravimetri çalışmalarına başlanarak 11783 noktadan oluşan yeni bir gravite standardizasyon ağı (TRGrav-Net) oluşturulmuştur. Eş zamanlı olarak bu ağa dayalı olarak İstanbul, Ankara, Tekirdağ illeri ile Kırıkkale-Çorum hava gravimetrisi test alanında, Marmara Denizi adalarında, Gökçeada, Bozcaada ve KKTC'de sıklaştırma çalışmaları icra edilmiştir. 1707 km ve 1754 noktadan oluşan 7 farklı bölgedeki nivelman hatlarında gravite ölçümleri yapılmıştır. Bugüne kadar toplanan yüksek konum ve gravite doğruluğuna sahip yersel gravimetri verileri, tarihsel gravite verilerinin kalite kontrolünde, hava gravimetrisi test çalışmalarında ve TG-20 jeoit modeli hesaplamalarında kullanılmış ve proje hedefine ulaşılmasına önemli katkı sağlamıştır.

Halen Tekirdağ ve Çanakkale il sınırları içerisinde sıklaştırma çalışmalarına devam edilmektedir. Gelecek dönemde de büyük şehirler başta olmak üzere yersel, hava ve mobil gravimetri ile sıklaştırma işlerine devam edilecektir. Yeni verilerle Türkiye Jeoit modeli güncellenerek kullanıcıların hizmetine sunulacaktır.


TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Harita Genel Müdürlüğü koordinatörlüğünde yürütülmüş olan T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı destekli ve 2015K090710 numaralı "Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi (2015-2020)" projesinin bir parçasıdır. Yersel gravimetri çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğüne, Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığına, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ve Ulusal Metroloji Enstitüsü Müdürlüğüne ve çalışmalarda emeği geçen tüm Harita Genel Müdürlüğü personeline sonsuz şükranlarımızı sunarız.

ORCID

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

İlyas AKPINAR  <https://orcid.org/0000-0001-8606-140X>

Yunus Aytaç AKDOĞAN 
https://orcid.org/0000-0003-2232-5327

Hasan YILDIZ 
https://orcid.org/0000-0003-0104-7778

KAYNAKLAR

- Akdoğan, Y. A., Yıldız, H. ve Ahi, G. O. (2019). Evaluation of global gravity models from absolute gravity and vertical gravity gradient measurements in Turkey. *Measurement Science and Technology*, 30(11). doi:10.1088/1361-6501/ab2f1c
- Ayhan, M. E., Demir, C. ve Alas, B. (1992). Türkiye Temel Gravite Ağı 1956 (TTGA-56)'nın Yeniden Dengelenmesi. *Harita Dergisi*, 108, 43-58.
- Aktuğ, B. (2005). Referans sistemlerinin zamansal evrimi ve Türkiye için ulusal bir model: TURES-96. *Harita Dergisi*, 133, 1-26.
- Becker, M., Balestri, L., Bartell, R., Berrino, G., Bonvalot, S., Csapo, G., ... Gagnon, C. (1995). Microgravimetric measurements at the 1994 international comparison of absolute gravimeters. *Metrologia*, 32(3), 145. doi:10.1088/0026-1394/32/3/002
- Bonvalot, S., Diament, M. ve Gabalda, G. (1998). Continuous gravity recording with Scintrex CG-3M meters: a promising tool for monitoring active zones. *Geophysical Journal International*, 135(2), 470-494. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00653.x
- Cattin, R., Mazzotti, S. ve Baratin, L.-M. (2015). GravProcess: An easy-to-use MATLAB software to process campaign gravity data and evaluate the associated uncertainties. *Computers & Geosciences*, 81, 20-27. doi:10.1016/j.cageo.2015.04.005
- Demir, C., Kılıçoğlu, A. ve Fırat, O. (2006). Türkiye Temel Gravite Ağı-1999 (TTGA-99). *Harita Dergisi*, 136, 49-63.
- Gabalda, G., Bonvalot, S. ve Hipkin, R. (2003). CG3TOOL: an interactive computer program to process Scintrex CG-3/3M gravity data for high-resolution applications. *Computers & Geosciences*, 29(2), 155-171. doi:10.1016/S0098-3004(02)00114-0
- Hector, B. ve Hinderer, J. (2016). pyGrav, a Python-based program for handling and processing relative gravity data. *Computers & Geosciences*, 91, 90-97. doi:10.1016/j.cageo.2016.03.010
- Hugill, A. (1990). Scintrex CG-3 automated gravity meter: Description and field results. İçinde *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1990* (ss. 601-604). Society of Exploration Geophysicists. doi:10.1190/1.1890276
- Hwang, C., Wang, C.-G. ve Lee, L.-H. (2002). Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1005-1015. doi:10.1016/S0098-3004(02)00005-5
- Jousset, P., Van Ruymbeke, M., Bonvalot, S. ve Diament, M. (1995). Performance of two Scintrex CG3-M gravity meters at the 4th International Absolute Intercomparison, Sèvres, France. *Metrologia*, 135, 231-244. doi:10.1088/0026-1394/32/3/012
- Kılıçoğlu, A., Lenk, O., Direnç, A., Simav, M., Yıldız, H., Aktuğ, B., ... Akçakaya, M. (2010). Türkiye İzostatik Gravite Anomali Haritası. *Harita Dergisi*, 144, 1-19.
- Kılıçoğlu, A., Fırat, O. ve Demir, C. (2006). Yeni Türkiye Jeoidi (TG-03)'nin hesabında kullanılan ölçüler ve yöntemler. *TUJK 2005 Yılı Bilimsel Toplantısı, Jeoid ve Düşey Datum Çalıştayı Bildiriler ve Konuşma Tutanakları Kitabı*, 53-76, ISBN:975-6983-48-5, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon. (Editörler: Ahmet Kaya, Mualla Yalçınkaya, Faruk Yıldırım).
- Kılıçoğlu, A., Direnç, A., Yıldız, H., Bölme, M., Aktuğ, B., Simav, M. ve Lenk, O. (2011). Regional gravimetric quasi-geoid model and transformation surface to national height system for Turkey (THG-09). *Stud Geophys Geod*, 55, 557. doi:10.1007/s11200-010-9023-z
- Koch, K.-R. (2013). *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Springer Science & Business Media.
- Micro-g LaCoste. (2008). A-10 Portable Gravimeter User's Manual. *Micro-g LaCoste Inc.*, USA.
- Micro-g LaCoste. (2012). g9 absolute gravity data acquisition and processing software. *Micro-g LaCoste Inc.*, USA.

- Lederer, M. (2009). Accuracy of the relative gravity measurement. *Acta Geodyn. Geomater*, 6(3), 155.
- Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T. ve Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean dynamics*, 56(5-6), 394-415. doi: 10.1007/s10236-006-0086-x
- Pope, A.J. (1976). The statistics of residuals and the detection of outliers. *MD: NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1*, Rockville.
- Scintrex (2009). *CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual, Revision 5* (s. 304). Scintrex Limited Concord, Ontario.
- Scintrex (2018). *CG-6 Autograv Gravity Meter Operation Manual*. Scintrex Limited Concord, Ontario.
- Seigel, H. O., Brcic, I. ve Mistry, P. (1995). A guide to high precision land gravimeter surveys. *Scintrex Limited*, 222(1), 1-122.
- Simav, M., Becker, D., Yıldız, H. ve Hoss, M. (2020). Impact of temperature stabilization on the strapdown airborne gravimetry: a case study in Central Turkey. *Journal of Geodesy*, 94(4), 1-11. doi: 10.1007/s00190-020-01369-5
- Simav, M. ve Yıldız, H. (2019). Evaluation of EGM2008 and latest GOCE-based satellite only global gravity field models using densified gravity network: A case study in south-western Turkey. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 60(1), 49-68. doi:10.4430/bgta0255
- Simav, M., Akpınar, İ., Sezen, E., Cingöz, A. ve Yıldız, H. (2016). TR-GRAV: National Center for Turkish Gravity Field, *EGU General Assembly, Geophysical Research Abstracts*, 18, 14110.
- Simav, M., Yıldız, H., Cingöz, A., Sezen, E., Demirsoy, N. S., Akpınar, İ., ... Yılmaz, S. (2015). Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu ve Gravite Altyapısının İyileştirilmesi Projesi, 15. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 25-28.
- Simav, M., Direnç, A., Türkezer, A., Kurt, A.İ. ve Kurt, M. (2012). Türkiye Yersel Gravite Veri Kütüğü Hakkında Değerlendirme. *TUJK 2012, Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı*, 28-30 Mart, Zonguldak.
- Sjöberg, L. E. (2003). A solution to the downward continuation effect on the geoid determined by Stokes' formula. *Journal of Geodesy*, 77, 94-100. doi: 10.1007/s00190-002-0306-1
- Tamura, Y. (1987) A harmonic development of the tide-generating potential. *Bull. Inf. Marées Terr.*, 99, 6813-6855.
- Timmen, L. (2003). Precise definition of the effective measurement height of free-fall absolute gravimeters. *Metrologia*, 40(2), 62-65. doi: 10.1088/0026-1394/40/2/310
- Timmen, L. (2010). Absolute and relative gravimetry. İçinde *Sciences of Geodesy-I* (ss. 1-48). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-11741-1_1
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Walter de Gruyter, Berlin.
- Tscherning, C.C. (1991). The use of optimal estimation for gross-error detection in databases of spatially correlated data. *Bulletin d'Information*, 68, 79-89, Bureau Gravimetrique International.
- Wenzel, H.-G. (1996). The nanoGal software: Earth tide data processing package: Eterna 3.3. *Bull. Info. Marées Terr.*, 124, 9425-9439.
- Wilmes, H., Falk, R., Lothhammer, A., Kressman, A., Lang, O. ve Kılıçoğlu, A. (1997). Absolute Gravity Campaign in Turkey 1996-First Results. *Proceedings of the Second Turkish-German Joint Geodetic Days* (Eds. O. Altan, L. Grundig), 27-29.
- Yıldız, H., Simav, M., Sezen, E., Akpınar, İ., Akdoğan, Y.A., Cingöz, A. ve Akabalı, O.A. (2021). Determination and validation of the Turkish Geoid-2020 (TG-20). *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, doi.org:10.4430/bgta0346.