



Yerbilimleri, 2020, 41 (3), 220-246, DOI:10.17824/yerbilimleri.740141
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Almanya Münih Bölgesinde QDaedalus sistemi ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verilerinin GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen değerlerle karşılaştırılması

Comparison of Observed Astrogeodetic Vertical Deflection Data Using QDaedalus System with the GGMplus- and EGM2008-predicted values in the Munich Region, Germany

MÜGE ALBAYRAK ^{1,2*}, EMEL ZERAY ÖZTÜRK ³, İBRAHİM ÖZTUĞ BİLDİRİCİ ³, CHRISTIAN HIRT ^{4,5}, SEBASTIEN GUILLAUME ¹, CK SHUM ²

¹ Geomatics Engineering, Institute of Territorial Engineering, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-Les-Bains, Switzerland

² Division of Geodetic Science, School of Earth Sciences, The Ohio State University, Columbus, OH, USA

³ Harita Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye

⁴ Institute for Advanced Study, Technical University of Munich, Munich, Germany

⁵ State Surveying Agency of Lower Saxony (LGLN), Hannover, Germany

Geliş (received): 1 Haziran (June) 2020 Kabul (accepted) : 6 Ekim (October) 2020

ÖZ

Astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verisi, yeryuvarının gravite alanı ile ilgili önemli bilgiler sağlaması nedeniyle, yerbilimleri alanında, özellikle jeodezi ve jeofizik gibi bilimsel disiplinlerde, yersel, hava ve uydu gravite verilerinin kontrolü ve validasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Münih bölgesinde yer alan 10 nirengi noktasında astrojeodezik çekül sapma verisi gözlemleyebilmek için total station temelli QDaedalus sisteminden yararlanılmıştır. Gözlemlenen verilerin doğruluğunun ~0.2 yaysaniyesi (") olduğu saptanmıştır. Yüksek doğruluklu bu veri seti, iki global gravite alan modelinin—Global Gravite Modeli plus (GGMplus) ve Yer Gravite Modeli 2008 (Earth Gravitational Model 2008—EGM2008)—kalitesini değerlendirebilmek için kullanılmıştır. QDaedalus sistemi ile gözlemlenen ve GGMplus



Müge ALBAYRAK muge.albayrak@heig-vd.ch, albayrak.6@osu.edu

^{1,2} MÜGE ALBAYRAK ORCID 0000-0001-6705-4044

³ EMEL ZERAY ÖZTÜRK ORCID 0000-0002-7498-5258

³ İBRAHİM ÖZTUĞ BİLDİRİCİ ORCID 0000-0001-7717-586X

^{4,5} CHRISTIAN HIRT ORCID 0000-0002-3176-7939

¹ SEBASTIEN GUILLAUME ORCID 0000-0002-0831-7833

² CK SHUM ORCID 0000-0001-9378-4067

modeli ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki farklar, hem Kuzey-Güney (K-G) hem de Doğu-Batı (D-B) bileşenlerinde yaklaşık 0.2" olmakla beraber, maksimum farklar K-G ve D-B bileşenlerinde sırasıyla ~0.3" ve ~0.4" olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar EGM2008 modeli için analiz edildiğinde ise, gözlemlenen ve EGM2008 ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki maksimum farkların K-G bileşeninde 0.9"; D-B bileşeninde ise 1.8" olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, EGM2008 ile kestirilen değerlerin, GGMplus ile kestirilen değerlere göre doğruluğunun daha düşük olduğu görülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, daha önce İstanbul'da QDaedalus gözlemleri ile EGM2008 ve GGMplus modellerinin kıyaslandığı uygulama sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Bu makale kapsamında, İstanbul ve Münih'te aynı sistem ve global gravite alan modelleri kullanılarak elde edilen çekül sapma verileri arasındaki farkların sebepleri tartışılarak, GGMplus ile kestirilen çekül sapma veri setinin, hem Münih hem de İstanbul'da daha yüksek doğruluğa sahip olmasının nedenleri açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Astrojeodezik çekül sapması, astrojeodezik gözlemler, EGM2008, global gravite alan modelleri, GGMplus, QDaedalus.

ABSTRACT

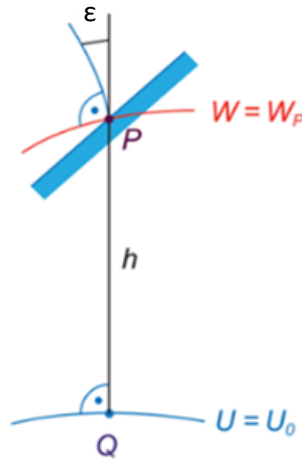
Astrogeodetic vertical deflection (VD) data observed by astrogeodetic systems, which provide important information about Earth's gravity field, are frequently used in the Earth Science disciplines, including geodesy and geophysics, to control and validate terrestrial, airborne and satellite gravity data. In this study, the total station-based QDaedalus system was used to observe astrogeodetic VD data at 10 benchmarks in the Munich region. The accuracy of these data is ~0.2 arcseconds ("). This high accuracy dataset was used to assess the quality of two global gravity field models—Global Gravitation Model Plus (GGMplus) and Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). The differences between the observed by QDaedalus and GGMplus-predicted VD data were ~0.2" for both the North-South (N-S) and East-West (E-W) VD components, and reached a maximum of ~0.3" and ~0.4" for the N-S and E-W components, respectively. However, the maximum differences between the observed and EGM2008-predicted VD data for the N-S and E-W directions were 0.9" and 1.8", respectively. Thus, we found that the EGM2008-predicted values are less accurate than the predicted GGMplus values. The results of this study were compared with the results from a prior QDaedalus, and EGM2008 and GGMplus comparison study in

Istanbul. In this article, we discuss the differences between the VD data obtained using the same QDaedalus system and global gravity field models in Istanbul and Munich, and explain the reasons for the higher accuracy of the VD data set predicted by GGMplus in both Munich and Istanbul.

Keywords: *Astrogeodetic observations, astrogeodetic vertical deflections, EGM2008, GGMplus, global gravity field models, QDaedalus.*

GİRİŞ

Bir yer noktasındaki gravite vektör doğrultusu ile seçilen referans elipsoidinin normali arasındaki açısal fark astrojeodezik çekül sapması (ϵ ; Şekil 1) olarak tanımlanmaktadır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Astrojeodezik çekül sapması, Helmert ve yüzey çekül sapması olarak da anılmaktadır ve çekül sapmasının klasik geometrik tanımını ihtiva etmektedir (Jekeli, 1999; Hirt, 2010). Bu veriyi bir noktada elde edebilmek için, o noktaya ait hem astronomik hem de jeodezik enlem ve boylam bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1. Astrojeodezik çekül sapmasının gösterimi (Torge ve Müller, 2012'den değiştirilmiştir, s. 227). h : GNSS ile elde edilen elipsoidal yüksekliği; W : gerçek gravite potansiyeli; U : normal gravite potansiyeli.

Figure 1. Astrogeodetic vertical deflection (modified from Torge and Müller, 2012, p.227). h : ellipsoidal height derived from GNSS; W : actual gravity potential; U : normal gravity potential.

Günümüzde astronomik enlem ve boylam (Φ , Λ), Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) veya total-station temelli QDaedalus sistemleri ile gözlemlenebilirken; jeodezik enlem ve boylam (φ , λ), standart çift frekanslı GNSS alıcıları ile elde edilebilmektedir

(Albayrak vd., 2019a, b). Astronomik ve jeodezik gözlemlerde, ölçme sistemlerinin gözlemlenecek nokta üzerine kurulması gerekliliğinden dolayı, gözlemler aynı noktada farklı zamanlarda yapılarak, astrojeodezik çekül sapmasına ait: Kuzey-Güney bileşeni (ξ) eşitlik (1); Doğu-Batı bileşeni (η) ise eşitlik (2) ile elde edilmektedir (Heiskanen ve Moritz, 1984). Bu eşitliklerde, ikinci ve daha yüksek dereceden terimler ihmal edilmiştir (Bkz. Pick vd., 1973; Jekeli, 1999). Toplam astrojeodezik çekül sapması (ε) ise eşitlik (3) ile elde edilmektedir. Bu eşitliklerde görüleceği üzere, astrojeodezik gözlemler sonucu Helmert tanımına göre doğrudan astrojeodezik çekül sapma verisi gözlemlenebilmektedir. Yerin gravite alanıyla ilgili önemli bilgiler içerdiğinden dolayı astrojeodezik gözlemler temel gravite alan gözlemleri olarak kabul edilmektedir.

$$\xi = \Phi - \varphi \quad (1)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \quad (2)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (3)$$

Astrojeodezik çekül sapma verisinin belirlenmesinde kullanılan astronomik ve jeodezik gözlem aletleri, daha hızlı ve daha yüksek doğrulukta veri elde edilebilmesi için teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli güncellenirken, kullanılan temel prensip günümüze kadar değişmeden ulaşmıştır. Astrojeodezik aletlerin kısa tarihi için Hirt vd. (2010a) ve Albayrak vd. (2019a)'dan yararlanılabilir. Güncel olarak kullanılan SZKS'leri geliştirmek, astrojeodezik sistemler konusunda deneyim gerektirmektedir ve bu durum yeni bir SZKS'nin üretimini güçleştirmektedir. Bununla birlikte, SZKS'lerin ağır ve boyutlarının büyük olmaları sebebiyle, gözlem yapılacak noktanın dağlık bir bölgede olması durumunda, gözlem noktasına ve/veya denizaşırı bir ülkeye uçak ile nakliyesi problem teşkil etmektedir. Bu nedenlerle, SZKS geliştiren ülke sayısı sınırlıdır ve henüz endüstriyelendirilememişlerdir. İlk SZKS'ler ikiz olarak Almanya ve İsviçre'de geliştirilmişlerdir (Hirt ve Bürki, 2003; Bürki vd., 2004; Hirt, 2004; Somieski, 2008; Hirt ve Seeber, 2008; Hirt vd., 2010a; Guillaume, 2015). SZKS'lerin geliştirildiği ve gözlem sonuçlarının paylaşıldığı diğer ülkeler kronolojik olarak şu şekilde sıralanabilir: Letonya (Abele vd., 2012; Zariņš vd., 2016; 2018; Morozova vd., 2019), Çin (Wang vd., 2014; Tian vd., 2014) ve Türkiye (Halıcıoğlu vd., 2016; Albayrak vd., 2019a). Her

bir SZKS'de kullanılan donanım ve yazılım birbirinden farklı olduğu için SZKS'ler eşsizdirler. SZKS'lerin geliştirilmelerinde ve nakliyelerinde yukarıda bahsedilen zorluklar, SZKS'lere alternatif bir sistem olarak QDaedalus sisteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır. QDaedalus, 30 yılı aşkın süredir astrojeodezik gözlem aletleri geliştirme deneyimine sahip ETH Zürich Üniversitesi Jeodezi ve Jeodinamik laboratuvarı (Geodesy and Geodynamics Lab.-GGL) tarafından tasarlanmış ve geliştirilmiştir (Bürki vd., 2010; Guillaume vd., 2012).

SZKS'ler veya QDaedalus sistemleri ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verileri, yerbilimleri alanında, özellikle jeodezi, jeofizik ve jeodinamik gibi disiplinlerde farklı amaçlarla kullanılmıştır. Jeodezi alanında gerçekleştirilen çalışmalar; geometrik-astronomik nivelman (Hirt ve Bürki, 2006; Hirt vd., 2011), astronomik-topografik nivelman (Schack vd., 2018), astrojeodezik geoit tanımlama (Hirt ve Flury, 2008), yükseklik sistemlerinin birleştirilmesi ve gravite alan modellerinin validasyonu (Smith vd., 2013; Wang vd., 2017; Schack vd., 2018), yerel jeodezik ağ uygulamaları (Volařík vd., 2013; Halicioğlu vd., 2016), anormal kırılmaların izlenmesi (Hirt, 2006; Hirt, 2012) ve global gravite modellerinin kalitesinin değerlendirilmesi (Hirt vd., 2010b; Albayrak vd., 2020a) olarak genelleştirilebilir. Jeofizik alanında ise, yer yüzeyinin yoğunluk anomalisinin tanımlanmasında (Hirt, 2001); yersel gravite verileri, gradyometre gözlemleri ve yersel sismoloji verileri ile birlikte kullanılarak, yeraltındaki sığ kütle anomalilerini açığa çıkartmada kullanılabileceği öngörülmektedir (Soler vd., 2013). Son olarak, tektonik ve jeodinamik alanındaki araştırmalar için ise, deprem öncesi ve deprem sonrası (muhtemelen Mw 8 büyüklüğünde) gerçekleştirilecek astrojeodezik gözlemlerle çekül sapma verilerinin değişimi ölçülerek, düşey yöndeki yer değişim miktarının belirlenebileceği düşünülmektedir. Örneğin, Bevis vd. (2016) tarafından, geoit ve yerkabuğunun zıt yönlerde hareket ettiği vurgulanmıştır.

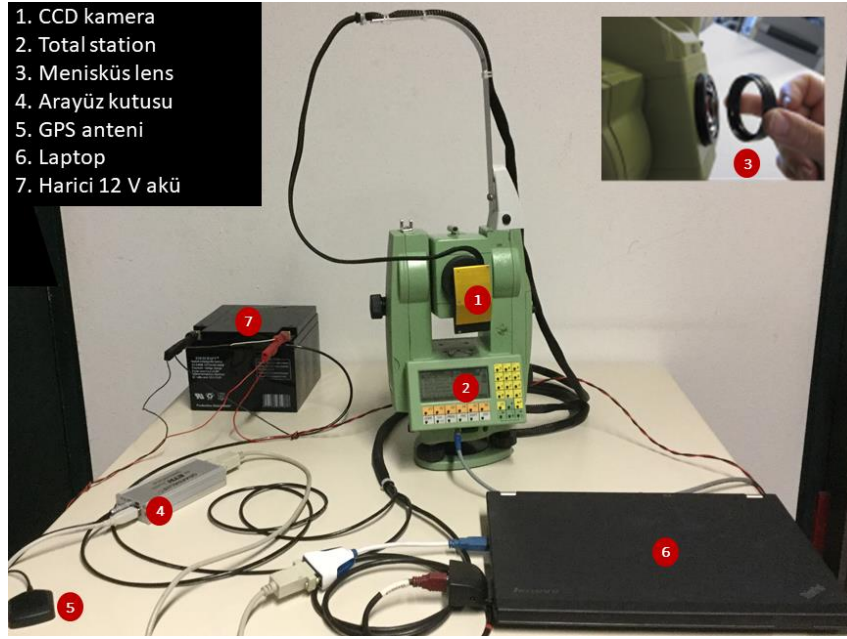
Almanya Münih bölgesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, astrojeodezik çekül sapma verisinin elde edilmesi için QDaedalus sisteminden yararlanılmıştır. Elde edilen veri setinin doğruluğu hem Kuzey-Güney (K-G) hem de Doğu-Batı (D-B) bileşenlerinde ~0.2" olarak tanımlanmıştır. Yüksek doğruluğa sahip bu veri seti, Global Gravite

Modeli Plus (GGMplus; Hirt vd., 2013) ve Yer Gravite Modeli 2008 (Earth Gravitational Model 2008–EGM2008; Pavlis vd., 2012, 2013) kullanılarak kestirilen çekül sapma verileri ile karşılaştırılarak, bu modellerin kalitesinin değerlendirilmesini sağlamışlardır. Ayrıca, bu çalışma kapsamında, GGMplus ve EGM2008 modelleri ile astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığı da açıklanmıştır.

ÇEKÜL SAPMA VERİLERİNİN ELDE EDİLMESİNDE KULLANILAN METOTLAR

QDaedalus Sistemi ile Astrojeodezik Çekül Sapma Verilerinin Gözlemlenmesi

QDaedalus sistemi, harita ölçme ekiplerinin arazide yatay ve düşey açı ölçmelerinde güncel olarak kullandığı total stationa, CCD (charge-coupled device) kameranın entegre edilmesiyle oluşturulmuş portatif ve kullanıcı dostu bir astrojeodezik ölçme aletidir (Şekil 2). Kullanılan CCD kamera, standart AVT Guppy F-080; total station ise kullanıcı tarafından seçilmektedir. Bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Geomatik Mühendisliği IGS-ISTA jeodezik değerlendirme laboratuvarından temin edilen Leica TCRM1101 total station kullanılmıştır. QDaedalus sistemine ait diğer donanımlar ise düşük ücretli u-blox LEA tek-frekanslı GPS alıcısı ve anteni (u-blox 2015), yıldız görüntüsünün GPS zamanı ile eşleştirilmesi için tüm donanımların (GPS alıcısı, total station ve laptop) birbirleriyle entegrasyonunu sağlayan bir arayüz kutusu, takılabilir menisküs lens ve firewire kablo ile iletişim kurulması için gerekli Express kart girişi olan, tüm yazılım ve donanımların kontrolünü sağlayan, resim görüntüleme ve değerlendirme yeteneği olan bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Bürki vd., 2010; Guillaume vd., 2012; Guillaume vd., 2015). Total station, CCD kamera ve arayüz kutusuna enerji, harici 12V akü ile sağlanmaktadır. Kullanılan total station robotiktir ve QDaedalus yazılımına entegre edilen Leica GeoCom yazılımı ile yönetilmektedir. Son olarak, Wielen vd. (1999) tarafından geliştirilen FK6 yıldız kataloğu kullanılmaktadır. QDaedalus sistemine ait donanım ve yazılım ile ilgili detaylı bilgiler, astrojeodezik gözlemlerin bu sistem kullanılarak nasıl gerçekleştirildiği, Guillaume vd. (2015) tarafından hazırlanan kullanma kılavuzunda ve Albayrak ve Guillaume (2021) tarafından kaleme alınan makalede ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.



Şekil 2. QDaedalus Sistemi (Albayrak vd., 2020a'dan değiştirilmiştir, s. 309).

Figure 2. The QDaedalus System (modified from Albayrak et al., 2020a, p. 309).

Astronomik koordinatların (Λ, Φ) gözlenmesi gibi hesaplanması da, jeodezik koordinatlara (φ, λ) kıyasla meşakkatlidir. Astronomik enlem ve boylamın hesaplanması için, öncelikle yerel koordinat sisteminden (International Terrestrial Reference System-ITRS), göksel koordinat sistemine (International Celestial Reference System-ICRS) dönüşüm gerçekleştirilmelidir. Bu dönüşüm, ITRS ve ICRS sistemlerinin gerçekleşmesi ve güncellenmesinden de sorumlu olan, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service-IERS) tarafından sağlanan yer dönüklük parametreleri (Earth Orientation Parameters-EOP) ile sağlanmaktadır (Sigl, 1991; Seeber, 2003; Torge ve Müller, 2012). Gözlem sonrası astronomik koordinatların elde edilmesi için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir (Guillaume vd., 2012; Vittuari vd., 2016):

$$x_{topo}(t) = T(\Lambda, \Phi) x_{ITRS}(t) = T(\Lambda, \Phi) R_2(-x_p) R_1(-y_p) R_3(GAST) N(t) P(t) x_{ICRS^*}(t) \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te;

$x_{topo}(t)$: Yerel toposentrik kartezyen sistemdeki yıldız doğrultu vektörü,

$x_{ITRS}(t)$: ITRS'deki yıldız doğrultu vektörü,

$x_{ICRS^*}(t)$: Paralaks, görelilik ve anomalik düzeltmesi getirilmiş ICRS'deki yıldız doğrultu vektörü,

$T(\Lambda, \Phi)$: ITRS'den yerel toposentrik sisteme olan transformasyon matrisi,

$R_2(-x_p) R_1(-y_p)$: Kutup hareketleri dönüşüm matrisleri,

$R_3(GAST)$: Yer dönme hareketi dönüşüm matrisi,

$GAST$: Greenwich görünen yıldız zamanı (Greenwich Apparent Sidereal Time),

$N(t)$: Nutasyon matrisi,

$P(t)$: Presesyon matrisi,

t : Yersel ölçme zamanıdır.

ICRS yıldız doğrultu vektörü, ABD Ulusal Gözlemevi (United States Naval Observatory-USNO) tarafından geliştirilen NOVAS kütüphaneleri ile hesaplanırken R_1 , R_2 , R_3 ve N matrislerini tanımlayan parametreler ise IERS web sayfasında (<http://www.iers.org/>) gözlem günü için tanımlanan parametrelerle elde edilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda hesaplanan astronomik enlem ve boylam, GNSS gözlemi ile elde edilen jeodezik enlem ve boylam ile ilişkilendirilerek (Eşitlik 1 ve 2), gözlem noktasına ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri elde edilmektedir.

Astrojeodezik sistemler ile astronomik gözlem gerçekleştirilebilmesi için gerekli şart açık gökyüzüdür; GNSS gözlemleri gibi her türlü hava şartlarında kullanılamazlar. Dolayısıyla, astronomik gözlemlerin yapılabileceği gün sayısı coğrafya ile ilintili olarak değişmektedir. Bu nedenle, QDaedalus sistemi diğer astrojeodezik sistemlerden farklı olarak sadece geceleri yıldızlara gözlem yapabilmek ile sınırlı kalmayarak, iç mekanlarda ve gün ışığında da jeodezik amaçlı çalışmalarda kullanılabilecek şekilde geliştirilmiştir. QDaedalus'un kullanıldığı jeodezik çalışmalar; mühendislik ölçmeleri ve deformasyon, titreşim ve frekans analizi (Bürki vd., 2010; Charalampous vd., 2015; Guillaume vd., 2016), yakın yersel kırılmanın özelliğinin ortaya konması (Hirt vd., 2010c), fotografik dökümantasyon (Bürki vd., 2010), GNSS anten faz merkezi değişiminin kalibrasyonu (Wili ve Guillaume, 2019) olarak sıralanabilir. QDaedalus ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmalar ise her biri farklı bir amaca hizmet etmek üzere beş farklı ülkede gerçekleştirilmiştir: İtalya (Vittuari vd., 2016), Almanya (Hauk vd., 2017; Albayrak ve Hirt, 2018a, b; Albayrak vd., 2018, 2020a), Macaristan (Tóth ve Völgyesi, 2017, 2018), Avustralya (Schack vd., 2018) ve Türkiye (Albayrak vd.,

2019a, 2020a). 2014–2019 yılları arasında bahsedilen ülkelerde yapılan tüm astrojeodezik çalışmalar, Albayrak ve Guillaume (2021) tarafından incelenmiştir.

EGM2008 ve GGMplus modelleri ile Çekül Sapma Verilerinin Hesaplanması

Uluslararası global yer modelleri merkezi (International centre for global earth models- ICGEM) tarafından, dünya çapında geliştirilen statik ve zamansal global yer gravite alan modelleri ICGEM web sayfasında (<http://icgem.gfzpotdam.de/>) yayımlanmaktadır (İnce vd., 2019). Bu çalışmada, ICGEM web sayfasında yer alan EGM2008 (Pavlis vd., 2012, 2013); Curtin ile Münih Teknik Üniversiteleri tarafından geliştirilen ve ilgili üniversitelerin web sayfasından temin edilebilen GGMplus (Hirt vd., 2013) global gravite alan modelleri kullanılmıştır. Bu iki model, diğer gravite alan modelleri gibi astrojeodezik çekül sapma verilerinden tamamen bağımsız olarak üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında, QDaedalus sistemi ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verileri, bu iki modelin kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

EGM2008 modeli, bu çalışmada hem doğrudan hem de GGMplus'ın geliştirilmesinde de kullanıldığı için dolaylı bir şekilde kullanılmıştır. EGM2008, spektrumun farklı dalga boylarında yeryuvarının gravite alanını temsil eden küresel harmonik katsayılar ile oluşturulmuş bir global jeopotansiyel modeldir (Pavlis vd., 2012). GGMplus ise, EGM2008 yersel ve altimetre-gravite verileri ve uydu gravite verileri (GRACE ve GOCE) ile birlikte, SRTM topografya verilerinden türetilen yüksek çözünürlüklü gravite ile ilişkilendirilmiş topografya verilerini de ihtiva eden bileşik bir global gravite modelidir. Bu iki global gravite modelleri arasındaki temel fark, GGMplus modeline, topografya endüklenmiş gravite alan sinyali yerel ölçekte 10 km'den yerel çözünürlükte ~220 m'ye kadar entegre edilmiştir (Hirt vd., 2013).

Global jeopotansiyel modellerden faydalanarak astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığının anlaşılabilmesi için, küresel harmonik katsayılar ile ilgili bilgi altyapısına sahip olunması gereklidir. Bu konuda, Geomatik/Harita mühendisliği eğitimi müfredatında yer alan “Fiziksel Jeodezi” ders notları Türkçe referans kaynak olarak yararlanılabilecek eserlerdir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Ayan ve Deniz, 2000; Üstün, 2006; Aydın, 2014). Ayrıca, küresel harmonik katsayılarla çekül

sapma verisinin nasıl hesaplandığı Jekeli (1999), Hirt vd. (2010b) ve Bucha ve Janák (2013) kaynaklarında da ayrıntılı olarak yer almaktadır.

Yeryuvarının dışında harmonik bir fonksiyon olarak tanımlanan V için küresel harmonik açınım şu şekilde ifade edilmektedir (Bucha ve Janák, 2013):

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \bar{S}_{n,m} \sin m\lambda) \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi) \quad (5)$$

Eşitlik 5'te;

r, φ, λ : Küresel yarıçap, jeodezik enlem ve boylam,

n, m : Küresel harmonik katsayı derecesi (degree) ve sırası (order),

n_{min}, n_{max} : Minimum ve maksimum küresel harmonik açınım derecesi,

GM, R : Jeosentrik açınım sabiti ve jeosentrik uzaklık,

$\bar{C}_{n,m}, \bar{S}_{n,m}$: Global jeopotansiyel modelle ilişkili n . dereceden m . sırada tam 4π normalleştirilmiş küresel harmonik katsayılar,

$\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)$: n . dereceden m . sırada tam 4π normalleştirilmiş Legendre fonksiyonudur.

Küresel harmonik seriler ile K-G (ξ) ve D-B (η) çekül sapma bileşenleri ise şu şekilde hesaplanmaktadır (Bucha ve Janák, 2013) :

$$\xi(r, \varphi, \lambda) = -\frac{GM}{r^2 \gamma(r, \varphi)} \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{n,m} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{n,m} \sin m\lambda) \frac{d\bar{P}_{n,m}(\sin \varphi)}{d\varphi} \quad (6)$$

$$\eta(r, \varphi, \lambda) = -\frac{GM}{r^2 \gamma(r, \varphi) \cos \varphi} \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{S}_{n,m} \cos m\lambda - \Delta \bar{C}_{n,m} \sin m\lambda) m \bar{P}_{n,m}(\sin \varphi) \quad (7)$$

Eşitlik 6 ve 7'de küresel harmonik serilerle hesaplanan çekül sapma bileşenleri, Molodensky tanımına göre hesaplanmıştır. Gözlemlenen ve modellerle kestirilen çekül sapma bileşenlerinin karşılaştırılması için Molodensky tanımından, astrojeodezik gözlemlerle doğrudan elde edilen çekül sapma bileşenlerinin tanımlandığı Helmert tanımına dönüşüm yapılması gerekmektedir. Bu dönüşüm Jekeli vd. (1999) ve Hirt vd. (2010b)'de açıklanmaktadır.

EGM2008 modeli, Pavlis vd. (2012) tarafından Fortran ortamında geliştirilmiştir. EGM2008 ile çekül sapma bileşenleri, EGM2008 web sayfasından (<https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>) DoV (Deflections of the vertical: çekül sapmaları) dosyası indirilerek, Fortran programı ile enterpolasyon uygulanarak

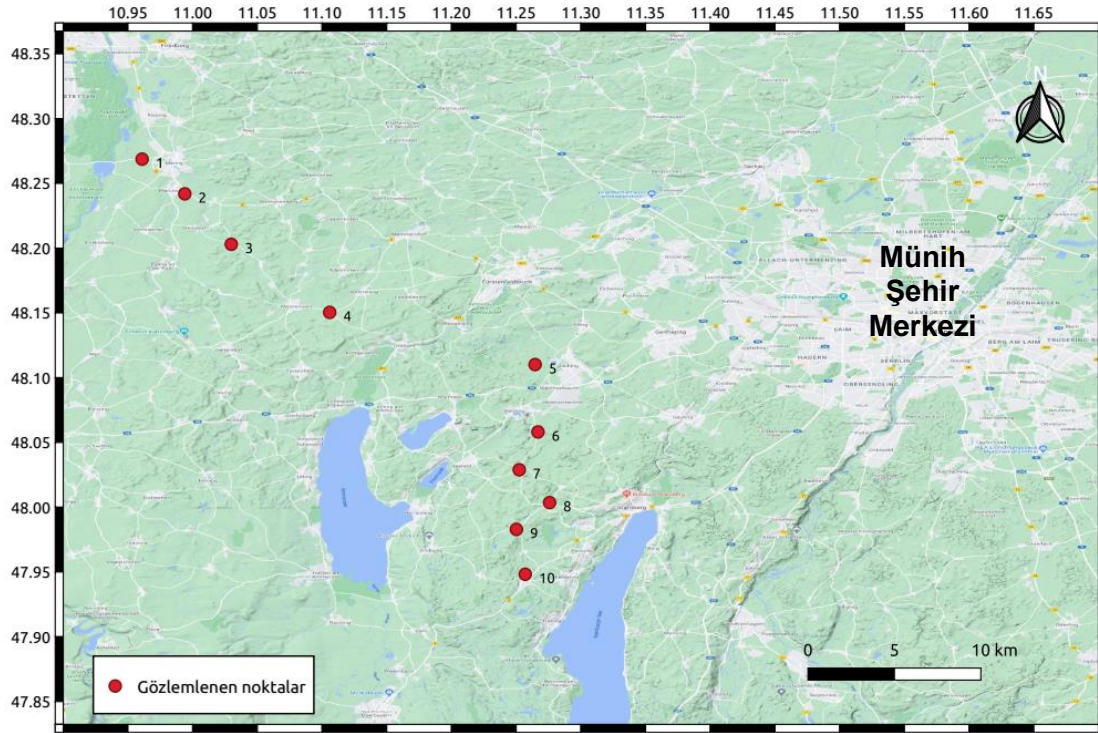
elde edilmiştir. Sonuç ürün olarak, test noktasının 2.5'x2.5' lık bir pencereye göre çevresindeki en yakın 4 noktaya ait K-G ve D-B çekül sapma bileşenleri elde edilmiştir. Bu 4 noktanın çekül sapma değerlerine yeniden enterpolasyon uygulanmış ve istenilen test noktasının K-G ve D-B çekül sapma bileşenleri hesaplanmıştır. Tüm bu işlemler Linux platformunda gerçekleştirildiğinden hesaplamalar hızlı ve ücretsiz yazılımlarla sağlanmıştır.

GGMplus, Hirt vd. (2013) tarafından Matlab ortamında geliştirilmiştir. GGMplus ile ilgili yazılım, veri, grid dosyası vb. tüm bilgilere ilgili web sayfasından (<http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/GGMplus/>) ulaşılabilir. Bu model vasıtasıyla çekül sapma bileşenlerini hesaplayabilmek için öncelikle, çalışma bölgesine ait hem xi (K-G bileşeni) hem de eta (D-B bileşeni) grid dosyası Matlab'de GGMplus'ın çalıştığı dizine kaydedilmelidir. Matlab kodlarındaki minimum ve maksimum enlem ve boylam çalışma bölgesi için düzenlenerek, yer noktasına ait GNSS gözlemleri ile elde edilen jeosentrik jeodezik enlem ve boylam bilgileri girilmelidir. Son olarak, bu kodlar çalıştırılmalı ve istenilen test noktası için K-G ve D-B çekül sapma bileşenleri elde edilmelidir. Bu sonuç ürün aynı zamanda grafik arayüz ile de kullanıcılara sunulmaktadır (Hirt vd., 2013).

ÇALIŞMA BÖLGESİ VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Çalışma Bölgesi

Almanya'nın Münih bölgesinde QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen bu çalışmada, Voigt (2013) tarafından tesis edilen ve GPS gözlemleri ile jeosentrik jeodezik koordinatları belirlenen 10 adet yer noktası kullanılmıştır (Şekil 3). Bu yer noktaları, doğruluğu yaklaşık 0.1" olan Hannover Üniversitesi tarafından geliştirilen SZKS—Taşınabilir Zenit Kamera 2-Dijital (TZK2-D; Hirt ve Seeber, 2008)—ile astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin gözlemlenmesi amacıyla tesis edilmiştir. QDaedalus sisteminin, TZK2-D ile gözlem gerçekleştirilen Münih bölgesindeki yer noktalarında kullanılmasının temel nedeni, QDaedalus sisteminin doğruluğunu yapılan karşılaştırma ile belirlemektir ve ~0.2" olarak tespit edilmiştir (Albayrak 2020; Albayrak vd., 2020a).



Şekil 3. Münih bölgesinde astrojeodezik gözlem için kullanılan noktalar.

Figure 3. The Munich region benchmarks used for astrogeodetic observations.

QDaedalus sistemi ile 10 nirengi noktasında gerçekleştirilen astronomik gözlemler, 2 kişilik bir ekiple, 5 farklı günde (Mayıs-Temmuz 2018) yapılan arazi çalışmaları sonucu bitirilebilmiştir. QDaedalus sistemi ile astronomik gözlemlere başlayabilmek için; sistemin nokta üzerine kurulumu, CCD kamera kalibrasyonu ve teleskobun referans yıldıza oryantasyonu başarılı bir biçimde tamamlanmalıdır (Bkz. Guillume vd., 2015; Hauk vd., 2017; Albayrak vd. 2020a; Albayrak ve Guillaume, 2021). Ölçme aletinin kurulduğu noktada, sistem ile yapılan astronomik ölçmelere “oturum” denilmektedir. Jeodezik ölçmelerdeki prensip ile hareket edilerek, bir oturumda arazi operatörü tarafından belirtilen her bir astronomik gözlem süresi ise “seri” olarak adlandırılmıştır. Hauk vd. (2017) tarafından bir seri gözlemin 15 dk. ve hava şartlarının açık gökyüzüne imkan verdiği oranda bir oturumda 3–4 seri gözlem yapılması önerilmiştir. Bu çalışmada, belirtilen öneri doğrultusunda, her bir seri 15 dk. olmak üzere, hava şartlarına bağlı olarak bir oturumda 2–4 seri gözlem gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen serilerin ortalamaları alınarak, o nirengi noktasına ait çekül sapma bileşenleri tanımlanmıştır. Münih’te bir oturumda gözlemlenen seri sayısı, serilerin ortalaması alınarak bir oturumda elde edilen çekül sapma bileşenleri ve standart sapmaları,

noktaların orijinal isimlendirilmesi ile birlikte Çizelge 1’de verilmiştir. Bu çizelgede, maksimum standart sapma değerlerinin K-G (ξ) bileşeninde $\pm 0.25''$; D-B (η) bileşeninde ise $\pm 0.17''$ olduğu görülmektedir. QDaedalus ve TZK2-D ile her bir yer noktasında gözlemlenen, bir oturumdan ya da oturum ortalamasından (tekrarlı gözlem yapılan noktalarda) elde edilen çekül sapma bileşenleri ve iki sistem arasındaki farklar ise Çizelge A1’de (Ekler) yer almaktadır. TZK2-D’nin QDaedalus sistemine göre daha yüksek doğrulukta olmasına rağmen, bu sistemin de hata bulundurduğu unutulmamalıdır. Ayrıca, Çizelge A1’de, 8 ve 10 numaralı nirengi noktalarında, iki sistem arasındaki farkın K-G yönünde yaklaşık $0.5''$ olmasının nedeninin, astronomik gözlemlerin aynı şartlarda yapılamamasından ve gözlemlenen yıldız sayısındaki farklılıktan kaynaklandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Münih’te QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen gözlemlerle ilgili daha ayrıntılı bilgiye, gözlemlenen her bir seriye ait çekül sapma bileşenlerine ve yer noktalarına ait jeosentrik jeodezik koordinatlara Albayrak vd. (2020a) yayınından ulaşılabilir.

Çizelge 1. Münih bölgesinde QDaedalus sistemi ile bir oturumda gözlemlenen seri sayısı, ortalama astrojeodezik çekül sapma verileri ve bunların standart sapmaları (σ). Seri, ~15 dk’lık yapılan astrojeodezik gözlem süresini ve toplam seri ise bir oturumda yapılan seri sayısını ifade etmektedir.

Table 1. The observed astrogeodetic vertical deflection (VD) sessions completed during one system installation, with the mean VD data and their standard deviations (σ) in the Munich region. Session: ~15 minute astrogeodetic observation duration. Total session: all sessions per system installation.

Nokta Adı	Orijinal Nokta Adı	Toplam Seri	ξ	η	σ_{ξ}	σ_{η}
1	7731	3	-0.14	2.01	0.07	0.17
2	593	4	-0.04	1.90	0.15	0.16
3	594	4	0.27	1.76	0.21	0.13
4	596	2	0.91	2.81	0.25	0.10
5	36900	4	1.19	3.61	0.06	0.11
6	600	2	2.02	2.57	0.11	0.02
7	601	2	2.06	2.84	0.11	0.04
8	602	2	1.16	3.41	0.14	0.06
9	603	4	1.57	3.40	0.13	0.12
10	8033	3	2.46	3.80	0.21	0.10

QDaedalus ile Gözlemlenen ve GGMplus ve EGM2008 Modelleri ile Kestirilen Çekül Sapma Verilerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, Münih bölgesinde QDaedalus sistemiyle gözlemlenen çekül sapma verileri, GGMplus ve EGM2008 global gravite alan modellerinden kestirilen çekül sapma verileri ile karşılaştırılarak (Çizelge 2), bu modellerin çalışma bölgesi için sağladığı doğruluk araştırılmıştır. Global gravite alan modeli olarak GGMplus ve EGM2008 modellerinin tercih edilmesinin nedeni, bu iki modelin daha önce bu çalışma ile aynı amaçla İstanbul'da gerçekleştirilen çalışmada kullanılmış olmasıdır. Böylece, bu çalışmadan elde edilen sonuçların, İstanbul'da yapılan çalışma ile mukayesesi mümkün olmuştur (Bkz. Tartışma bölümü).

Çizelge 2. GGMplus ve EGM2008 modelleri ile kestirilen çekül sapma verileri ve QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapmaları verileri ve birbirleriyle karşılaştırılması (tüm birimler yaysaniyesi).

Table 2. Comparison of GGMplus- and EGM2008-predicted astrogeodetic vertical deflection (VD) data and QDaedalus observed VD data (units are arcseconds).

Nokta adı	GGMplus		EGM2008		QDaedalus-GGMplus		QDaedalus-EGM2008		EGM2008-GGMplus	
	ξ	η	ξ	η	ξ	η	ξ	η	ξ	η
1	0.00	2.00	0.28	1.90	-0.14	0.01	-0.42	0.11	0.28	-0.10
2	0.00	2.08	0.34	1.76	-0.04	-0.18	-0.38	0.14	0.34	-0.32
3	0.00	2.10	0.23	2.10	0.27	-0.33	0.04	-0.34	0.23	0.01
4	0.62	2.54	0.36	2.70	0.29	0.27	0.55	0.11	-0.26	0.16
5	1.33	3.80	1.96	3.91	-0.15	-0.19	-0.77	-0.30	0.63	0.11
6	2.02	2.80	1.89	3.28	0.00	-0.23	0.13	-0.71	-0.13	0.48
7	1.93	2.57	1.27	2.38	0.13	0.27	0.79	0.46	-0.66	-0.20
8	1.43	3.29	1.60	2.28	-0.27	0.12	-0.44	1.13	0.17	-1.02
9	1.62	3.00	1.59	1.61	-0.05	0.39	-0.02	1.78	-0.03	-1.39
10	2.30	3.57	1.60	2.27	0.16	0.24	0.86	1.53	-0.70	-1.29

Çizelge 2'de, QDaedalus sistemi ve GGMplus modeli arasındaki çekül sapma bileşenleri farklarına bakıldığında, ortalama farkın hem K-G (ξ) hem de D-B (η) bileşenlerinde yaklaşık 0.2" olduğu, maksimum farkların ise K-G bileşeninde 0.3"; D-B bileşeninde 0.4" olduğu görülmektedir. QDaedalus ve EGM2008 arasındaki farklara bakıldığında ise, GGMplus'a kıyasla farkların daha fazla olduğu ve maksimum farkların K-G bileşeninde 0.9"; D-B bileşeninde ise 1.8" olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çizelgede, EGM2008 ile GGMplus modelleri arasındaki farklarının bulunduğu son iki sütun ise, modeller arasındaki omisyon hatalarını göstermektedir. Omisyon hatası,

gözlemlenen ve modellenen veriler arasındaki temel farktır (omisyon hatası için bkz. Hirt vd., 2010b; Jekeli, 2012). Çizelge 2’de görüldüğü üzere, GGMplus’ın omisyon hatası, EGM2008’e göre daha azdır. Çünkü, GGMplus ~250 m ile 10 km arasındaki yüksek frekansa sahip sinyali modelleyerek, omisyon hatasını minimize edebilmektedir (Albayrak vd., 2020a).

TARTIŞMA

EGM2008 modeli, Pavlis vd. (2012) tarafından yayımlanmış olduğu tarihten bu yana, GGMplus gibi birçok global gravite alan modelinin geliştirilmesine katkı sağlamıştır. EGM2008 modeli vasıtasıyla geliştirilen global gravite alan modellerinin birçoğuna ICGEM web sayfasından erişilebilmektedir. Örneğin; EIGEN-6C4 (Förste vd., 2014), GECO (Gilardoni vd., 2016), SGG-UGM-1 (Liang vd., 2018), XGM2016 (Pail vd., 2018). EGM2008’in bir üst sürümü olan EGM2020 modelinin geliştirilmesi çalışmaları güncel olarak devam etmektedir (Barnes vd. 2015).

Bu çalışma kapsamında, Münih bölgesinde QDaedalus ile gözlemlenen veriler, GGMplus ve EGM2008 modelleri ile kestirilen veriler ile karşılaştırıldığında, GGMplus ile elde edilen verilerin gözlemlenen verilere çok yakın olduğu, maksimum farkın D-B yönünde ~0.4" olduğu görülmüştür (Bkz. Çizelge 2). EGM2008’in ise GGMplus kadar başarılı olmadığı vurgulanmıştır. GGMplus’ın, EGM2008 verileri ile birlikte, uydu gravite ve SRTM topografya verileri ile zenginleştirilmesinden dolayı daha yüksek çözünürlüğe sahip olması daha iyi sonuç elde edilmesine neden olarak gösterilmiştir. Münih’te yapılan bu çalışmaya benzer bir uygulama, daha önce Albayrak vd. (2020a) tarafından İstanbul’da gerçekleştirilmiştir. Münih’te olduğu gibi, İstanbul’da da QDaedalus sistemi ile gözlemlenen çekül sapma verileri, EGM2008 ve GGMplus modelleri vasıtasıyla kestirilen çekül sapma verileri ile karşılaştırılmıştır.

Albayrak vd. (2020a) tarafından, İstanbul’da QDaedalus sistemi gözlemleri için, İstanbul GPS Nirengi Ağı (İGNA; Ayan vd. 2006; Albayrak vd. 2020b) projesi kapsamında tesis edilen ve GPS ölçmeleri ile jeosentrik jeodezik koordinatları belirlenen yaklaşık 1200 mevcut yer noktası arasından özellikle İstanbul’un kıyı ve dağlık bölgelerinde seçilen 30 yer noktası kullanılmıştır. Bu noktalardan 21 tanesi İstanbul’un kıyı kesiminde, 9 tanesi ise iç kesiminde yer almaktadır. QDaedalus ile

gözlemlenen veriler, GGMplus ve EGM2008 modelleri ile kestirilen veriler ile karşılaştırıldığında, kıyı ve iç kesimde elde edilen sonuçların büyük farklılıklar göstermesi sonuçların kıyı ve iç kesim olarak iki farklı sınıfta incelenmesine neden olmuştur. İstanbul'un kıyı kesimlerinde seçilen 21 noktadan 15'inde, QDaedalus ile GGMplus ve EGM2008 arasındaki farkın 2" den fazla olduğu ve 6" büyüklüğe kadar ulaştığı görülmüştür. İstanbul'un iç kesimlerinde ise, gözlemler ile modeller arasındaki farkların oldukça az olduğu görülmüştür. QDaedalus ile GGMplus arasındaki maksimum farklar K-G bileşeninde 1"; D-B bileşeninde 1.5", EGM2008 ile arasındaki maksimum farklar ise K-G bileşeninde 1.9"; D-B bileşeninde 1" olarak raporlanmıştır.

İstanbul'un kıyı bölgelerinde gözlemlenen ve modellerle kestirilen veriler arasındaki büyük farkların, EGM2008'in geliştirilmesinde kullanılan uydu radar altimetre ölçmeleriyle üretilen Danimarka Ulusal Uzay Merkezi (Danish National Space Center-DNSC; Andersen ve Knudsen, 2009; Andersen vd., 2010) verilerinden kaynaklandığı Pavlis vd. (2012) ve Albayrak vd. (2020a) tarafından vurgulanmıştır. EGM2008 uydu radar altimetre verileri GGMplus'ın geliştirilmesinde de kullanıldığı için hem EGM2008 hem de GGMplus ile kıyı bölgelerinde elde edilen veri kalitesi düşüktür, fakat GGMplus'ın gözlemlenen değerlere daha yakın olduğu kıyı bölgelerinde de görülmüştür. İstanbul'un iç kesimlerinde yapılan karşılaştırma, daha önceki mukayeselerle benzer bir sonuca ulaşmamızı; GGMplus'ın, gözlemlenen değerlere daha yakın olduğunu bir kez daha göstermiştir. Sonuç olarak, Münih'te ve İstanbul'un iç kesimlerinde, GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen değerlerde, uydu radar altimetre verileri ile üretilen deniz gravite verileri rol oynamadığından dolayı modellerle kestirilen değerlerin, QDaedalus ile gözlemlenen değerlere daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen çekül sapma verisi gravimetrik, hava ve uydu teknikleri ile üretilen gravite verilerinin hem kalite kontrolünde hem de doğruluğunun değerlendirilmesinde kullanılabilen bağımsız bir veri olması sebebiyle çok büyük bir öneme sahiptir. Ancak, dünya genelinde gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verisi oldukça azdır. Bu kadar önemli bir veri setinin, geçmişten günümüze bu denli az üretilmesine sebep olarak; (i) 2000 yılı öncesi üretilen astrojeodezik sistemlerin kullanımının ve gözlem sonrası veri değerlendirmenin zor olması, (ii) 2000'li yıllarda

CCD'nin icadı ile geliştirilen SZKS'lerin ise kısıtlı üretilmeleri ve genellikle boyutlarının büyük olmalarından dolayı nakliyelerinin meşakkatli olması gösterilmektedir (Hirt ve Wildermann, 2018). Analog astrojeodezik sistemlerde yaşanan problemlere çözüm olarak üretilen SZKS'lerle ilgili bahsedilen zorluklar, hafif ve portatif bir sistem olan total station temelli QDaedalus sisteminin geliştirilmesi ile aşılmıştır. QDaedalus sistemi ile ilgili bu makale kapsamında bahsedilen başta Münih bölgesindeki uygulama olmak üzere, Avrupa ve Avustralya'daki diğer çalışmalar, QDaedalus'un endüstrileşmesi ve dolayısıyla daha yaygın kullanılması durumunda dünyanın birçok farklı bölgesinde astrojeodezik çekül sapma verisinin kolaylıkla gözlemlenebileceğinin bir göstergesidir.

Bu çalışmada, QDaedalus sistemi ile Münih'te gözlemlenen çekül sapma verisi, GGMplus ve EGM2008 global gravite alan modellerinin kalitesini kontrol etmek için kullanılmıştır. Her iki model ile kestirilen çekül sapma verilerinin QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verilerine yakın sonuçlar verdiği, fakat GGMplus'ın, EGM2008 yersel gravite verilerini de içeren birleşik bir model olması nedeniyle, EGM2008'e göre daha yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür. Münih'te elde edilen bu sonuçlar, daha önce Albayrak vd. (2020a) tarafından İstanbul'da aynı amaçla yapılan uygulama sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. İstanbul'un iç kesimlerinde elde edilen sonuçların, Münih'te gerçekleştirilen uygulama sonuçlarına benzer olduğu, İstanbul'un kıyı kesimlerindeki sonuçların ise EGM2008'in hesaplanmasında kullanılan uydu radar altimetre verilerinin yetersizliğinden dolayı düşük doğruluğa sahip olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, hem Münih bölgesinde hem de İstanbul'un kıyı ve iç kesimlerindeki gözlemlerde, GGMplus ile elde edilen çekül sapma bileşenlerinin kalitesinin, EGM2008'den daha iyi olduğu neticesine ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmalar, mevcut ve ileride geliştirilecek global gravite alan modellerinin kalitesinin QDaedalus sistemi ile gözlemlenen ve gözlemlenecek verilerle değerlendirebileceğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Münih'te QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen arazi çalışmaları, Alman Akademik Değişim Servisi (DAAD) kısa dönem araştırma bursu, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) BİDEB 2214-A Doktora Sırası Araştırma Bursu (proje no: 1059B141601200; Albayrak ve Hirt, 2018a) ve Münih Teknik Üniversitesi

Astronomik ve Fiziksel Jeodezi Enstitüsü tarafından desteklenmiştir. Bu veri setinin EGM2008 (Pavlis vd. 2012) ve GGMplus (Hirt vd. 2013) ile karşılaştırılması ve yapılan çalışmanın makaleye dönüştürülmesi sürecindeki destekleri için ise TÜBİTAK BİDEB 2219 Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı'na (proje no: 1059B192000149) ve İsviçre La Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) Yersel Mühendislik Enstitüsü'ne teşekkür ederiz. Ayrıca bu çalışmayı inceleyen, zaman ve emek harcıyarak yayının bilimsel kalitesinin artmasına yardımcı olan Dr. Elmas Sinem İnce ve gizli hakeme katkılarından dolayı teşekkürlerimizi sunarız. Şekil 3'teki harita QGIS kullanılarak çizdirilmiştir (OpenStreetMap, 2019).

KAYNAKLAR

Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmame, I., Rubans, A., Zariņš, A., 2012. Digital zenith camera for vertical deflection determination. *Geodesy and Cartography*, 38(4),123–129. <https://doi.org/10.3846/20296991.2012.755324>.

Albayrak M., Hirt C., 2018a. Determining the Astrogeodetic Geoid Profile of the Munich Region Using the QDaedalus System. Final Report BİDEB 2214-A, The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBİTAK), Ankara, Turkey, p. 63.

Albayrak, M., Hirt, C., 2018b. Astrogeodetic observations at Geodetic Observatory Wettzell, Geodetic Observatory Wettzell, Technical Report, p.43.

Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Hauk, M., Halicioğlu, K., 2018. Testing the QDaedalus measurement system for astrogeodetic observation of the gravity field. AGU Fall Meeting 2018, Abstracts. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFM.G51F0534A>.

Albayrak, M., Halicioğlu, K., Özlüdemir, M.T., Basoğlu, B., Deniz, R., Tyler, A.R.B., Aref, M.M., 2019a. The use of the automated digital zenith camera system in Istanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. *Boletim de Ciências Geodésicas* 25(4).

Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Özlüdemir, M.T., Halicioğlu, K., Basoğlu, B., 2019b. New astrogeodetic observations of vertical deflections at the Istanbul astrogeodetic network demonstrate issues in global gravity models along coastlines. In 27th IUGG General Assembly.

Albayrak, M., 2020. Assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Halicioglu, K., Özlüdemir, M.T., Shum, C.K., 2020a. Quality assessment of global gravity field models in coastal zones: a case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul, Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica* 64 (3). <https://doi.org/10.1007/s11200-019-0591-2>.

Albayrak, M., Özlüdemir, M.T., Aref, M.M., Halicioglu, K., 2020b. Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data. *Geodesy and Geodynamics* 11 (3). <https://doi.org/10.1016/j.geog.2020.01.003>.

Albayrak, M., Guillaume, S., 2021. Astrojeodezide QDaedalus sistemi uygulamaları: Bir İnceleme (applications of the QDaedalus system in astrogeodesy: A Review), *Harita Dergisi* 165 (Baskıda).

Andersen, O.B., Knudsen, P., 2009. DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114(C11). <https://doi.org/10.1029/2008JC005179>.

Andersen, O.B., Knudsen, P., Berry, P.A., 2010. The DNSC08GRA global marine gravity field from double retracked satellite altimetry. *Journal of Geodesy* 84(3):191-9. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0355-9>.

Ayan, T., Deniz, R., 2000. Fiziksel Jeodezi Ders Notu. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.

Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Celik, R.N., Denli, H.H., Akyılmaz, O., Ozsamlı, C., Özlüdemir, M.T., Erol, S., Erol, B., Acar, M., Mercan, H., & Tekdal, E., (2006). İstanbul GPS nirengi ağı (İGNA) 2005-2006 yenileme ölçü ve değerlendirmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Rapor 2005 /3123, Vol. 1, İstanbul, Turkey, s.186.

Aydın, C., 2014. Fiziksel Jeodezi Ders Notu. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği, İstanbul, Türkiye.

Barnes, D., Factor, J.K., Holmes, S.A., Ingalls, S., Presicci, M.R., Beale, J., Fecher, T., 2015. Earth gravitational model 2020. AGU Fall Meeting 2015, Abstracts. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFM.G34A..03B/abstract>.

Bevis, M., Melini, D., Spada, G., 2016. On computing the geoelectric response to a disk load. *Geophysical Journal International* 205(3):1804-12. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw115>.

Bucha, B., Janák, J.A., 2013. MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders. *Computers and Geosciences* 56:186-96.

Bürki, B., Müller, A., Kahle, H.G., 2004. DIADEM: The new digital astronomical deflection measuring system for high-precision measurements of deflections of the vertical at ETH Zurich. In: Marti U et al. (ed) Electronic proceedings of IAG GGSM2004 meeting in Porto, Portugal. Published also in CHGeoid2003, Report 03-33 A, Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Wabern, Schweiz.

Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P., Oesch, H.P., 2010. DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for total stations. In 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2010.5646270>.

Charalampous, E., Psimoulis, P., Guillaume, S., Spiridonakos, M., Klis, R., Bürki, B., Rothacher, M., Chatzi, E., Luchsinger, R., Feltrin, G., 2015. Measuring sub-mm structural displacements using QDaedalus: A digital clip-on measuring system developed for total stations. *Applied Geomatics* 7(2):91-101. <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0150-z>.

Featherstone, W.E., Rüeger, J.M., 2000. The importance of using deviations of the vertical in the reduction of terrestrial survey data to a geocentric datum. *Trans-Tasman Surv* 1(3):46–61. <https://doi.org/10.1080/00050326.2000.10440341>. [Erratum in *The Australian Surveyor* 47(1):7] <https://doi.org/10.1080/00050356.2002.10558836>.

Förste, C., Bruinsma, S.L., Abrikosov, O., Lemoine, J.M., Marty, J.C., Flechtner, F., Balmino, G., Barthelmes, F., Biancale, R., 2014. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. GFZ Data Services, <http://doi.org/10.5880/icgem.2015.1>.

Gilardoni, M., Reguzzoni, M., Sampietro, D., 2016. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Stud Geophys Geod* 60, 228–247. <https://doi.org/10.1007/s11200-015-1114-4>.

Guillaume, S., Bürki, B., Griffet, S., Durand, H.M., 2012. QDaedalus: Augmentation of total stations by CCD sensor for automated contactless high-precision metrology. In FIG working Week.

Guillaume, S., 2015. Determination of a precise gravity field for the CLIC feasibility studies. PhD Thesis, Dissertation Nr. 22590, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010549038>.

Guillaume, S., Clerc, J., Bürki, B., 2015. QDaedalus digital clip-on measuring system for total station user manual, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Geodesy and Geodynamics Laboratory, ETH Zurich, Switzerland.

Guillaume, S., Clerc, J., Leyder, C., Ray, J., Kistler, M. 2016. Contribution of the image-assisted theodolite system QDaedalus to geodetic static and dynamic deformation monitoring. In 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring(JISDM). http://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdmsubmission66.pdf.

Halicioglu, K., Deniz, R., Özener, H., 2016. Digital astro-geodetic camera system for the measurement of the deflections of the vertical: Tests and results. *International Journal of Digital Earth* 9(9):914–23. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1189612>.

Hauk, M., Hirt, C., Ackermann, C., 2017. Experiences with the QDaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. *Survey Review* 49(355):294-301. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1171960>.

Heiskanen, W.A., Moritz, H., 1967. Fiziksel Jeodezi (Çeviri:Onur GÜRKAN), W.H. Freeman and Co., San Francisco.

Heiskanen, W.A., Moritz, H., 1984. Physical Geodesy. Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz, Austria.

Hirt, C., 2001. Automatic determination of vertical deflections in real-time by combining GPS and digital Zenith Camera for solving the "GPS-Height-Problem". In 14th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation 2001 (pp. 2540-51).

Hirt, C., Bürki, B., 2003. The digital zenith camera-a new high-precision and economic astrogeodetic observation system for real-time measurement of deflections of the vertical. In 3rd Meeting International Gravity and Geoid Commission of the International Association of Geodesy (pp. 161-6). Editions Ziti. <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/15374>.

Hirt, C., 2004. Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung. PhD Thesis, Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 253 [Almanca]. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/393223965.pdf>.

Hirt, C., 2006. Monitoring and analysis of anomalous refraction using a digital zenith camera system. Astronomy & Astrophysics 459(1):283-90. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065485>.

Hirt, C., Bürki, B., 2006. Status of geodetic astronomy at the beginning of the 21st century. In: Festschrift Univ.- Prof. Dr.- Ing. Prof. h.c. Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand, (Hirt C., Ed.), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover 258: 81–99.

Hirt, C., Flury, J., 2008. Astronomical–topographic levelling using high-precision astrogeodetic vertical deflections and digital terrain model data. Journal of Geodesy 82(4–5):231–48. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0173-x>.

Hirt, C., Seeber, G., 2008. Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D. *Journal of Geodesy* 82(6):347-56. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0184-7>.

Hirt, C., 2010. Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data. *Journal of Geodesy* 84(3): 179–90. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0354-x>.

Hirt, C., Bürki, B., Somieski, A., Seeber, G., 2010a. Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras. *Journal of Surveying Engineering* 136 (1): 1–12. <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29SU.1943-5428.0000009>.

Hirt, C., Marti, U., Bürki, B., Featherstone, W.E., 2010b. Assessment of EGM2008 in Europe using accurate astrogeodetic vertical deflections and omission error estimates from SRTM/DTM2006. 0 residual terrain model data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115(B10).

Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B., Sternberg, H., 2010c. Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115(D21). <https://doi.org/10.1029/2010JD014067>.

Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.H., Seeber, G., 2011. Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions* 15(2):149-59.

Hirt, C., 2012. Anomalous atmospheric refraction and comments on 'fast and accurate determination of astronomical coordinates...' (Balodimos et al., 2003. *Survey Review*, 37(290): 269–75). *Survey Review* 44(327):285-9. <https://doi.org/10.1179/175227012X13455477714906>.

Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., Rexer, M., 2013. New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical research letters* 40(16):4279-83.

Hirt, C., Wildermann, E., 2018. Reactivation of the Venezuelan vertical deflection data set from classical astrogeodetic observations. *Journal of South American Earth Sciences* 85: 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.003>.

Ince, E.S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., Schuh, H., 2019. ICGEM–15 years of successful collection and distribution of global

gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data* 11(2).

Jekeli, C., 1999. An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models. *Journal of Geodesy* 73(1): 10–22.

Jekeli, C., 2012. Omission error, data requirements, and the fractal dimension of the geoid. In VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy (pp. 181–187). Springer, Berlin, Heidelberg.

Liang, W., Xu, X., Li, J., Zhu, G., 2018. The determination of an ultra-high gravity field model SGG-UGM-1 by combining EGM2008 gravity anomaly and GOCE observation data, *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47 (4): 425–434, <https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2018.20170269>.

Morozova, K., Jäger, R., Balodis, J., Silabriedis, G., Kaminskis, J., Kalinka, M., Balodis, K., Mitrofanovs, I., 2019. Preliminary Results on Quasi-Geoid for Western Part of Latvia Using Digital-Zenith Camera and DFHRS V. 4.3 Software. *Geophysica*. 54(1):61-8.

OpenStreetMap, 2019. OpenStreetMap Wiki (http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Main_Page).

Pail, R., Fecher, T., Barnes, D., Factor, J.F., Holmes, S.A., Gruber, T., Zingerle, P., 2018. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. *Journal of geodesy*, 92(4), pp.443-451. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1070-6>.

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., 2012. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of geophysical research: solid earth* 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>.

Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., 2013. Correction to “The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118(5):26-33. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50167>.

Pick, M., Picha, J., Vyskočil, V., 1973. *Theory of earth's gravity field*. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.

Schack, P., Hirt, C., Hauk, M., Featherstone, W.E., Lyon, T.J., Guillaume, S., 2018. A high-precision digital astrogeodetic traverse in an area of steep geoid gradients close

to the coast of Perth, Western Australia. *Journal of Geodesy* 92(10): 1143-1153. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1107-x>.

Seeber, G., 2003. *Satellite Geodesy*. W. de Gruyter: Berlin, New York. Second edition.

Sigl, R., 1991. *Geodätische Astronomie*. Wichmann, 4. Auflage.

Smith, D.A., Holmes, S.A., Li, X., Guillaume, S., Wang, Y.M., Bürki, B., Roman, D.R., Damiani, T.M., 2013. Confirming regional 1 cm differential geoid accuracy from airborne gravimetry: the geoid slope validation survey of 2011. *Journal of Geodesy* 87(10–12):885–907. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0653-0>.

Soler, T., Han, J.Y., Weston, N.D., 2013. On deflection of the vertical components and their transformations. *Journal of Surveying Engineering* 140(2):04014005(1-15). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000126](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000126).

Somieski, A.E., 2008. *Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece* (Doctoral dissertation, ETH Zurich). <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005710420>.

Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., Wang, B., Yin, Z., Wang, H., 2014. Digital zenith telescope prototype of China. *Chinese Science Bulletin* 59(17):1978-83. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0256-z>.

Torge, W., Müller, J., 2012. *Geodesy*. 4th edition. De Gruyter, Berlin.

Tóth, G., Völgyesi, L., 2017. Data processing of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering* 5(8):147-64.

Tóth, G., Völgyesi, L., 2018. Experiences of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering* 6(9):75-86

u-blox AG, 2015. NEO-6T/LEA-6T product summary.

Üstün, A., 2006. *Fiziksel Jeodezi, Lisans Ders Notları*. Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği, Konya, Türkiye.

Vittuari, L., Tini, M.A., Sarti, P., Serantoni, E., Borghi, A., Negusini, M., Guillaume, S., 2016. A comparative study of the applied methods for estimating deflection of the vertical in terrestrial geodetic measurements. *Sensors* 16(4):565. <https://doi.org/10.3390/s16040565>.

Voigt, C., 2013. Astrogeodatische Lotabweichungen zur Validierung von Schwerefeldmodellen, Doctoral Dissertation, Hannover: Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz University [Almanca].

Volařík, T., Machotka, R., Kuruc, M., Puchrik, L., Jurčík, J., 2013. Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 10(172):437-42.

Wang, B., Tian, L., Wang, Z., Yin, Z., Liu, W., Qiao, Q., Wang, H., Han, Y., 2014. Image and data processing of digital zenith telescope (DZT-1) of China. *Chinese Science Bulletin* 59(17):1984-91. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0277-7>.

Wang, Y.M., Becker, C., Mader, G., Martin, D., Li, X., Jiang, T., Breidenbach, S., Geoghegan, C., Winester, D., Guillaume, S., Bürki, B., 2017. The Geoid slope validation survey 2014 and GRAV-D airborne gravity enhanced geoid comparison results in Iowa. *Journal of Geodesy* 91(10):1261-76. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1022-1>.

Wielen, R., Schwan, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Jahreiss, H., Jährling, R., 1999. Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I. Basic fundamental stars with direct solutions. *Veröffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, Germany*.

Willi, D., Guillaume, S., 2019. Calibration of a Six-Axis Robot for GNSS Antenna Phase Center Estimation. *Journal of Surveying Engineering*. 145(4):04019016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000291](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000291).

Zariņš, A., Rubans, A., Silabriedis, G., 2016. Digital zenith camera of the University of Latvia. *Geodesy and Cartography* 42(4):129-35. <http://dx.doi.org/10.3846/20296991.2016.1268434>.

Zariņš, A., Rubans, A., Silabriedis, G., 2018. Performance analysis of Latvian zenith camera. *Geodesy and Cartography* 44(1):1-5. <https://doi.org/10.3846/gac.2018.876>.

EKLER

Çizelge A1. Hannover SZKS TZK2-D (doğruluğu $\sim 0.1''$) ve QDaedalus sistemi (doğruluğu $\sim 0.2''$) ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma bileşenlerine ait oturma ortalamaları ve iki sistem arasındaki farklar (tüm birimler yay saniyesi).

Table A1. Nightly-mean values of observed vertical deflections using Hannover DZCS' TZK2-D (accuracy $\sim 0.1''$) and QDaedalus system (accuracy $\sim 0.2''$), and their differences (units are arcseconds).

Nokta No	TZK2-D		QDaedalus		Farklar	
	ξ	η	ξ	η	v_{ξ}	v_{η}
1	0.10	1.94	-0.14	2.01	0.24	-0.07
2	0.31	2.01	-0.04	1.90	0.35	0.11
3	0.34	1.90	0.27	1.76	0.07	0.14
4	0.77	2.59	0.91	2.81	-0.14	-0.22
5	1.41	3.45	1.19	3.61	0.23	-0.16
6	2.17	2.70	2.02	2.57	0.16	0.14
7	2.24	2.82	2.06	2.84	0.18	-0.02
8	1.61	3.39	1.16	3.41	0.45	-0.02
9	1.74	3.22	1.57	3.40	0.17	-0.18
10	2.00	3.71	2.46	3.80	-0.46	-0.09