

Astrojeodezide QDaedalus Sistemi Uygulamaları: Bir İnceleme (Applications of the QDaedalus System in Astrogeodesy: A Review)

Müge ALBAYRAK*^{ID}, Sébastien GUILLAUME^{ID}

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yersel Mühendislik Enstitüsü,
Geomatik Mühendisliği, Yverdon-les-Bains, İsviçre

*Sorumlu yazar: muge.albayrak@heig-vd.ch

Geliş Tarihi (Received): 13.04.2020

Kabul Tarihi (Accepted): 31.12.2020

ÖZ

Astrojeodezik çekül sapma verisi, Yer'in gravite alanı ile ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu veriyi bir noktada elde edebilmek için, o noktaya ait astronomik ve jeodezik koordinatların (enlem ve boylam) bilinmesi gereklidir. Günümüzde jeodezik enlem ve boylam çift-frekanslı GNSS alıcıları ile elde edilebilirken; astronomik enlem ve boylam Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) veya elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gözlemlenebilmektedir. SZKS'ler yüksek doğrulukta çekül sapma verisi (0.05"-0.1") sağlamalarına rağmen, genellikle geliştirilmeleri pahalı ve naklieleri zordur. Bu güçlükler, astrojeodezik sistem geliştirme alanında öncü araştırma kuruluşlarından biri olan ETH Zürih'teki araştırmacıları, SZKS'lere alternatif bir sistem geliştirmeye yöneltmiştir ve QDaedalus sistemi (doğruluğu ~0.2") bu şekilde ortaya çıkmıştır. QDaedalus sistemi, SZKS'lerden farklı olarak gün ışığında jeodezik amaçlı çalışmalarda da kullanılabilir. QDaedalus sistemi; elektronik takeometre, CCD kamera, takılabilir menisküs lens, u-blox tek-frekanslı GNSS alıcısı ve anteni, bir arayüz kutusu ve bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır. Bu makalede, QDaedalus sistemi hakkında detaylı bilgi sunularak, astrojeodezik gözlemlerin nasıl yapıldığı ve gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Ayrıca, QDaedalus sistemi ile 2014-2019 yılları arasında gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Astrojeodezik Çekül Sapması, Astrojeodezik Gözlemler, Astrojeodezik Ölçme Aletleri, QDaedalus Sistemi, Sayısal Zenit Kamera Sistemi

ABSTRACT

Astrogeodetic vertical deflections (VDs) data provide valuable information about the structure of Earth's gravity field. To obtain astrogeodetic VDs at a point, the astronomic and geodetic coordinates (latitude and longitude) of this point need to be known. Currently, geodetic coordinates are obtained by dual-frequency GNSS receivers, while astronomical coordinates are obtained by the Digital Zenith Camera System (DZCS) or the total station-based QDaedalus system. Although DZCSs provide highly accurate (0.05"-0.1") VDs data, the DZCSs are usually very expensive to construct and

difficult to transport. For these reasons, researchers at ETH Zurich, a leading developer of astrogeodetic instruments, attempted to develop an alternative instrument to the DZCS: the QDaedalus system (accuracy ~0.2"). Unlike the DZCS, the QDaedalus system can be used for geodetic work during daytime. The QDaedalus system consists of a total station, a CCD camera, a mountable meniscus lens, a single-frequency GNSS receiver and antenna, an interface box, and a laptop. In this paper, the QDaedalus system is presented in detail, and the methods for completing astrogeodetic observations and obtaining astrogeodetic VDs are explained. This paper also reviews all astrogeodetic studies conducted with the QDaedalus system from 2014-2019.

Keywords: Astrogeodetic Vertical Deflection, Astrogeodetic Observations, Astrogeodetic Measurement Systems, QDaedalus System, Digital Zenith Camera System

1. GİRİŞ

Astrojeodezik çekül sapması (ϵ), bir yer noktasındaki gravite vektör doğrultusu ile seçilen referans elipsoidinin normalı arasındaki açısal farktır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Yer'in gravite alanı ile ilgili önemli bilgiler içeren astrojeodezik çekül sapma verisi, diğer jeodezik teknikler ile ölçülen/gözlemlenen veriler (jeodezik koordinatlar, yükseklik farkı vb.) kadar kolay elde edilememektedir. Bu veriyi temin edebilmek için, jeodezik ve astronomik enlem ve boylam bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde jeodezik enlem ve boylam (ϕ , λ) GNSS alıcıları ile elde edilebilirken; astronomik enlem ve boylam (Φ , Λ) Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) veya elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gözlemlenebilmektedir. Jeodezik ve astronomik sistemler ile gerçekleştirilen gözlemlerde, sistemlerin nokta üzerine kurulması gerekliliğinden dolayı, gözlemler aynı noktada farklı zamanlarda yapılmaktadır. Bu gözlemler sonucu Kuzey-Güney (ξ) ve Doğu-Batı (η) astrojeodezik çekül sapma bileşenleri aşağıdaki eşitlikler ile elde edilmektedir (Pick, Picha ve Vyskočil, 1973; Jekeli, 1999):

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

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

Eşitlik 1 ve 2’de, ikinci ve daha yüksek dereceden terimler ihmal edilmiştir. Eşitliğin ihmal edilen terimleri için, Pick ve diğerleri (1973) ve Jekeli (1999) makalelerinden yararlanılabilir. Toplam astrojeodezik çekül sapması ise aşağıdaki eşitlik ile elde edilmektedir:

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

Astrojeodezik çekül sapması, Helmert çekül sapması olarak da anılmaktadır. Ancak, astrojeodezik çekül sapması daha yaygın bir kullanım olarak bilinmektedir (Jekeli, 1999; Hirt, 2010). Astrojeodezik çekül sapması dışında Molodensky ve Pizetti çekül sapmaları da bulunmaktadır. Bu üç çekül sapması birbirinden, seçilen referans doğrultusuna göre ayrılmışlardır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Bu makale kapsamında sadece astrojeodezik çekül sapma verileri kullanıldığından, makalenin devamında çekül sapma terimi tek başına kullanılmış ve astrojeodezik çekül sapmasını nitelemiştir.

Geçmişten günümüze jeodezik ve astronomik koordinatların gözlemlendiği aletler daha hızlı ve yüksek doğrulukta veri elde edilebilmesi için teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli güncellenmiştir. Ancak, bu iki koordinat bilgisi ile üretilen astrojeodezik çekül sapma verisinin belirlenmesinde kullanılan temel prensip günümüze kadar değişmeden ulaşmıştır (Eşitlik 1 ve 2). Çekül sapma bileşenlerinin elde edilmesindeki zorluğun asıl sebebi astronomik koordinatların gözlenmesindeki güçlülüdür. 1970’li yıllara kadar astrojeodezik çekül sapma bileşenlerinin elde edilmesi için usturlab, T4 ve DM3A teodolitleri kullanılmıştır. Bu aletlerden DKM3A teodolitinin doğruluğunun Omega OTR kronografı ile birlikte kullanıldığında ~0.5" olduğu, Türen ve Üstün (2013) tarafından belirtilmiştir. 1970’li yıllardan sonra ise fotografik zenit kamera sistemleri aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır.

2000’lerde yük bağlaşımlı aygıt (Charge Coupled Device-CCD) algılayıcıların icadı sonrasında, bu algılayıcıların teleskoplar ile birlikte kullanılması kısa poz aralıklarında yüksek oranda yıldız ışığı yakalanmasını mümkün kılmıştır (Halicioğlu, 2015). Astronomide bir milat olarak kabul edilen CCD kameraların bu başarısı, jeodezik astronomi çalışmalarına da yeni bir soluk kazandırmıştır. En yaygın kullanılan iki fotografik

zenit kamera sistemi; Almanya Hannover ve İsviçre ETH Zürih Üniversiteleri tarafından geliştirilen Taşınabilir Zenit Kameralar (TZK)—TZK2 (Gessler, 1975; Wissel, 1982) ve TZK3 (Bürki, 1989)—CCD kameralar ile entegre edilerek, modernize edilmişlerdir. CCD bütünleştirilen Hannover’deki TZK2, TZK2-Dijital sistem (TZK2-D; Hirt, 2004); ETH Zürih’teki TZK-3 ise Dijital Astronomik Sapma Ölçme Sistemi (Digital Astronomical Deflection Measuring system-DIADEM; Somieski, 2008) olarak yeniden isimlendirilmişlerdir. DIADEM, Avrupa ve Kuzey Amerika’daki birçok astrojeodezik çalışmada kullanıldıktan sonra (Hirt, Bürki, Somieski ve Seeber, 2010a), hem boyutunun küçültülmesi hem de daha ekonomik bir fiyata mal edilerek endüstrileşmesi için tekrar güncellenmiş ve Kompakt Dijital Astronomik Kamera (Compact Digital Astronomical Camera-CODIAC; Guillaume, 2015) olarak yeniden isimlendirilmiştir. CODIAC, ilk olarak 2011 yılında DIADEM ile gerçekleştirilen “Amerika Düşey Datumunun Yeniden Tanımlanması İçin Gravite (Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum)” projesi kapsamındaki “Geoit eğimi validasyon ölçmeleri (Geoid Slope Validation Surveys 2011-GSVS11; Smith ve diğerleri, 2013)” çalışmasının devamı niteliğindeki iki projede de kullanılmıştır. Bu projeler: Wang ve diğerleri (2017) tarafından tamamlanan GSVS14 ve Van Westrum ve diğerleri (2021) tarafından gerçekleştirilen GSVS17 projeleridir.

CCD kameranın, elektronik takeometreye entegre edilerek astrojeodezik gözlemlerde kullanılması fikri, TZK2-D ve DIADEM’in geliştirildiği dönemde ortaya çıkmıştır. 2005 yılında, CCD bütünleştirilen elektronik takeometre, ICARUS sistemi olarak adlandırılarak, astrojeodezik çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede bahsi geçen QDaedalus sistemi, 30 yılı aşkın süredir astrojeodezik gözlem aletleri geliştirme deneyimine sahip ETH Zürih Üniversitesi Jeodezi ve Jeodinamik Laboratuvarı (Geodesy and Geodynamics Lab.-GGL) tarafından ICARUS sisteminin modernize edilmesiyle geliştirilmiştir. QDaedalus, ICARUS ile aynı astronomik gözlem prensibine sahiptir. Bu nedenle, ICARUS sisteminden kısaca bahsetmek yerinde olacaktır.

ICARUS’un temel bileşenleri; elektronik takeometre, CCD kamera, tek frekanslı bir GPS alıcısı ve anteni ve ICARUS yazılımının yüklendiği bir dizüstü bilgisayardır. GGL tarafından geliştirilen ICARUS yazılım paketinde (Bürki, 2005), gözlemlenen yıldızların yıldız katalogları ile eşleştirilmesi için Fricke ve diğerleri (1988)

tarafından geliştirilen Beşinci temel katalog (Fifth fundamental catalogue-FK5) kullanılmıştır.

ICARUS'un QDaedalus olarak modernize edilmesindeki temel amaç, sistemin doğruluğunu arttırmak ve astronomik gözlemlerin süresini kısaltmaktır. Bu konuda hedeflenen amaca ulaşıldığı söylenebilir: (i) ICARUS ile gerçekleştirilen astronomik gözlemler sonucu elde edilen çekül sapma verileri yaklaşık 0.5" doğruluğa sahip (Hirt ve Bürki, 2006) iken, QDaedalus'un doğruluğu ~0.2" dir (Hauk, Hirt ve Ackermann, 2017; Albayrak ve diğerleri, 2020a). (ii) ICARUS ile 60-90 dakikalık bir zaman diliminde, her bir yıldız 6 adet gözlem yapılarak 25 adet yıldız gözlemlenebilmekteyken (Wiesenhofer ve Kühtreiber, 2007), QDaedalus sistemi ile 15 dakikalık bir sürede, her bir yıldız en az 4 adet gözlem yapılarak yaklaşık 70 adet yıldız gözlemlenebilmektedir (Hauk ve diğerleri, 2017).

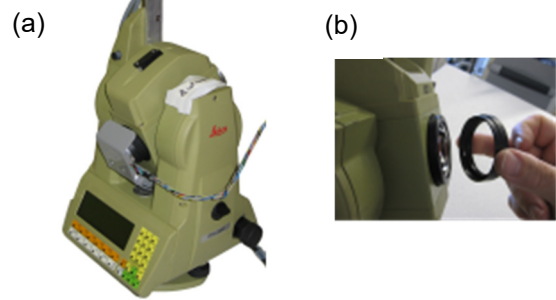
ICARUS, QDaedalus olarak modernize edilmeden önce Daedalus olarak güncellenmiştir. ICARUS ve Daedalus, sadece geceleri yıldızlara gözlem yaparak astrojeodezik çalışmalarda kullanılmak maksadıyla geliştirilmişken; Daedalus'un QDaedalus olarak modernize edilmesinin ana nedeni, sistemin hem astrojeodezik çalışmalarda hem de gündüzleri jeodezik çalışmalarda kullanılmasını sağlamaktır. Örneğin, QDaedalus sistemi mühendislik ölçmeleri ve deformasyon, titreşim ve frekans analizi (Bürki, Guillaume, Sorber ve Oesch, 2010; Charalampous ve diğerleri, 2015; Guillaume, Clerc, Leyder, Ray ve Kistler, 2016), yakın yersel kırılmanın özelliğinin ortaya konması (Hirt, Guillaume, Wisbar, Bürki ve Sternberg, 2010b), fotografik dokümantasyon (Bürki ve diğerleri, 2010), GNSS anten faz merkezi değişiminin kalibrasyonu (Wili ve Guillaume, 2019) gibi birçok jeodezik çalışmada başarı ile kullanılmıştır. Bu makalede, yalnızca QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik uygulamalar ele alınmıştır.

Astrojeodezik çekül sapma verisi, GNSS ve nivelman verilerinin kombinasyonu vasıtasıyla da hesaplanmaktadır (Soler, Carlson ve Evans, 1989; Ceylan, 2009; Vittuari ve diğerleri, 2016); fakat astrojeodezik sistemler ile gözlemlenen çekül sapma verisi kadar yüksek duyarlılığa sahip değildir (bkz. Bölüm 4b; Vittuari ve diğerleri, 2016).

2. QDAEDALUS SİSTEMİ

a. QDaedalus Sistemi Bileşenleri

QDaedalus sisteminin temel prensibi, robotik bir elektronik takeometre cihazının oküler aracılığıyla sağladığı görüş olanağının, prizma hedefi olmaksızın CCD kamera ve otomatik nesne tanıma (Automatic Target Recognition-ATR; Knoblach, 2009) teknolojisi ile sağlanmasıdır. ATR teknolojisi, görünen objelerin mekansal doğrultusunun tamamen otomatik ve yüksek doğrulukla ölçülmesini olanaklı hale getirmektedir (Guillaume, Bürki, Griffet ve Durand, 2012; Guillaume, Clerc ve Bürki, 2015). Bu amaçla, Şekil 1 (a)'da görüldüğü üzere, elektronik takeometreye ait oküler çıkartılarak, hiç bir modifikasyon yapmadan yerine CCD kamera takılmıştır. Uzak nesnelere, özellikle astronomik gözlemler sırasında yıldızlara gözlem yaparken, dürbünün büyütme gücünü arttırmak için ise dürbüne menisküs lens takılmıştır (Şekil 1b). Menisküs lens, CCD'nin görüntü düzlemindeki nesneyi yaklaşık 4mm odak noktasına kaydırarak, görüntünün net olmasını sağlamaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2015).

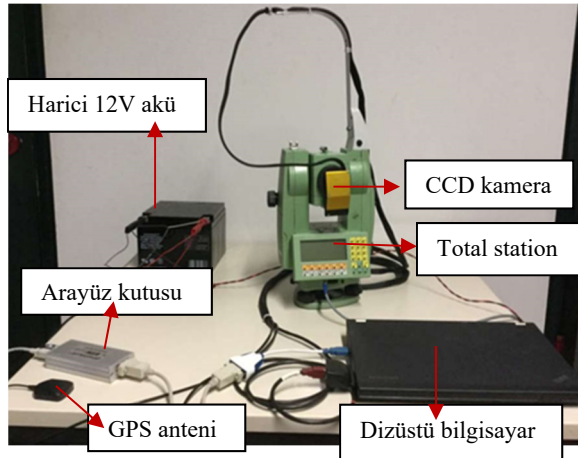


Şekil 1. (a) Elektronik takeometreye ait oküler çıkartılarak yerine CCD kameranın takılması, (b) elektronik takeometre dürbününe menisküs lens yerleştirilmesi (Guillaume ve diğerleri, 2012).

QDaedalus sistemi (Şekil 2), elektronik takeometre, AVT Guppy F-080 CCD kamera, takılabilir menisküs lens, düşük ücretli u-blox LEA tek-frekanslı GNSS alıcısı ve anteni (u-blox, 2015), yıldız görüntüsünü GNSS zamanı ile eşleştirilmesi için tüm donanımların (GNSS alıcısı, elektronik takeometre ve dizüstü bilgisayar) birbirleriyle entegrasyonunu sağlayan bir arayüz kutusu ve firewire kablo ile iletişim kurulması için gerekli Express kart girişine sahip, tüm yazılım ve donanımların kontrolünü sağlayan, resim görüntüleme ve değerlendirilebilme yeteneği olan bir dizüstü bilgisayardan oluşmaktadır (Bürki ve diğerleri, 2010). Elektronik takeometre, CCD kamera ve arayüz kutusuna enerji, harici 12V akü ile sağlanmaktadır. Robotik elektronik takeometre,

QDaedalus yazılımına entegre edilmiş Leica GeoCom yazılımı ile yönetilmektedir (Geosystems, 2004). Son olarak, FK6 yıldız kataloğu kullanılmaktadır (Wielen ve diğerleri, 1999).

GGL tarafından, QDaedalus sistemleri farklı özellikteki elektronik takeometrelere entegre edilebilecek biçimde tasarlanmışlardır. Elektronik takeometre dışında QDaedalus'a ait tüm donanımlar aynıdır. QDaedalus sistemleri ile şu ana kadar kullanılan tüm elektronik takeometreler, Leica firmasına aittir ve robotiklerdir: TCA1800, TPS1202+, TCA2003, TDA5005 ve TCRM1101. Bu elektronik takeometreler, sabit bir zenit açısında tek frekanslı bir GNSS alıcısı tarafından sağlanan zaman bilgisi ve QDaedalus yazılımı sayesinde, gözlem anında FK6 yıldız kataloğundaki yıldızların yaklaşık konumuna yönelmekte ve her bir yıldız en az 4 adet gözlem gerçekleştirmektedir.



Şekil 2. QDaedalus sistemi.

b. QDaedalus Sistemi ile Astronomik Gözlem Gerçekleştirilmesi

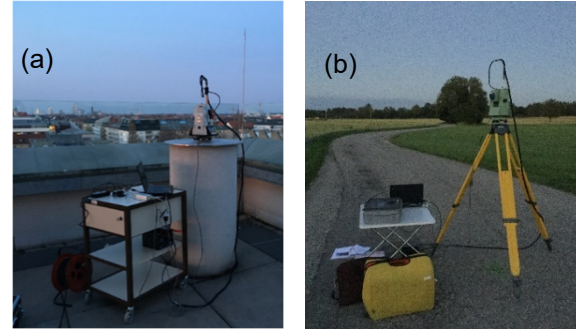
QDaedalus sistemi ile astronomik gözleme başlayabilmek için öncelikli olarak başarılı bir şekilde tamamlanması gereken 3 aşama bulunmaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2015):

(1) QDaedalus sisteminin kurulumu: Bu aşamada, QDaedalus sisteminin hem arazide tesis edilmiş bir nokta üzerine kurulumu hem de tüm sistem bileşenlerinin QDaedalus yazılımı ile bağlantılarının kurulumundan bahsedilmektedir.

QDaedalus'un pilye tesisli noktalara kurulum süresi, çivi ile tesis edilmiş yer noktalarına kurulum süresine göre daha hızlıdır (Şekil 3). Her iki kurulumda da dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, gözlem süresince gözlemci tarafından

tutulmak zorunda olan CCD kamera kablosunun en üstte olması için en son takılmasıdır. Bunun nedeni, farklı yıldızlara gözlem yapmak amacıyla dönmek zorunda olan dürbüne bağlı CCD kamera kablosunun, diğer kablolarla ve/veya elektronik takeometreye dolaşmasını engellemektir.

QDaedalus sisteminin nokta üzerine kurulumu tamamlandıktan sonra dizüstü bilgisayar çalıştırılmalı ve QDaedalus yazılımı açılmalıdır. Tüm cihazların (elektronik takeometre, CCD kamera ve GNSS) QDaedalus yazılımında bulunan "Bağlan" düğmesi ile bağlantıları sırasıyla tek tek yapılmalıdır. GNSS alıcısı ile bağlantı kurulduktan sonra, dizüstü bilgisayar saatinde değişiklik yapılarak; GNSS ile dizüstü bilgisayar zamanı arasındaki farkın 2 saniyeden az olması sağlanmalıdır. Bunun nedeni, elektronik takeometre dürbününün yıldızlara yönelmesinin GNSS zamanına göre senkronize edilmesidir.



Şekil 3. QDaedalus sisteminin (a) Münih Teknik Üniversitesinin (TUM) terasında bulunan pilye tesisli astrojeodezik test/kontrol istasyonuna kurulumu, (b) Münih astrojeodezik gözlem profilindeki çivi tesisli bir yer noktasına kurulumu (Nokta numarası: 36900).

(2) CCD kamera kalibrasyonu: CCD kamera kalibrasyonunun temel amacı, CCD (düzlem; 2B-Boyutlu) ve elektronik takeometre (küresel; 3B) koordinatları arasında dönüşüm yapılabilmesi için gerekli kalibrasyon parametrelerini elde etmektir. Kalibrasyon yöntemi olarak, Guillaume ve diğerleri (2015) tarafından grid yöntemi tercih edilmiştir. Kalibrasyon aşamasına, elektronik takeometre dürbününün el feneri gibi yapay bir ışığa, yöneltilmesi ile başlanmaktadır. Bu yapay ışık ile yıldızların ışık karakteri, elektronik takeometreye göre benzerdir. Dürbün, üzerindeki yöneltme elemanı yardımıyla seçilen yapay ışık kaynağına yöneltilmelidir. Gözlemlerin gece yapılmasından dolayı dürbün üzerindeki yöneltme elemanının ayrı bir yapay ışık kaynağı ile aydınlatılması gereklidir. Dürbün yapay ışığa yönlendirildikten sonra, ince yöneltmenin başarılı olabilmesi için

dürbünün göze uydurulması ve görüntünün netleştirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada dizüstü bilgisayar ekranından yararlanılacağı için, dizüstü bilgisayar yer seçimi oldukça önemlidir. Yapay ışığa yönlendirme yapıldıktan sonra, dizüstü bilgisayar ekranında ilk olarak simit biçiminde görünen yapay ışık kaynağının, elektronik takeometrenin görüntü netleştirme vidasının çok yavaş hareketlerle çevrilmesiyle daire görüntüsünü almasından sonra “kalibrasyon” düğmesine basılmalıdır. Bu durumda iken, “çekim süresi” ve “kazanç” ortamın ışığına göre ayarlanmalıdır. Eğer ortam yeteri kadar karanlık ise, “çekim süresi” ve “kazanç”, sırasıyla 40 ve 400 olarak ayarlanmalıdır. Grid kalibrasyon yönteminde nesne, CCD kamera tarafından birçok farklı noktasından ölçülmektedir. Bununla birlikte, ölçümler, elektronik takeometrenin 1. ve 2. durumunda yapılmaktadır. Böylece standart sistematik hataların ölçümlere etkisi azaltılmaktadır (Guillaume ve diğerleri, 2012; Hauk ve diğerleri, 2017).

(3) Teleskobun referans yıldız oryantasyonu: Astrojeodezik gözlem yapan gözlemcinin, elektronik takeometre dürbününü sabit bir yıldızla yönlendirmesi ve bu yıldızla oryantasyon gerçekleştirmesi gerekmektedir. QDaedalus ile gerçekleştirilen tüm astronomik gözlemlerde sabit/referans yıldız olarak kuzey yarım kürede Alpha Ursae Minoris/Kutup yıldızı (Polaris); Güney Yarım Kürede ise Sigma Octantis seçilmiştir. Bunun nedeni, bu yıldızların, Dünya'nın dönüş eksenini ile aynı doğrultuda bulunması dolayısıyla, gözlemcilere göre sabit olarak algılanmasıdır. Kuzey yarım kürede kutup yıldızına elektronik takeometrenin dürbününü yönlendirmek amacıyla gerekli azimutu hesaplamak için 90° den bulunan noktanın enlemi çıkartılmalıdır. Böylelikle, bulunan değer ile dürbünün yaklaşık ne kadar bir azimut açısına sahip olması gerektiği hesaplanmış olur. Örneğin, TUM istasyonunun enlemi 48° olduğu için yaklaşık 42° lik bir azimut açısına elektronik takeometre dürbünü sahip olmalıdır. QDaedalus yazılımının yeni astronomik gözlemler sekmesinde “zenit açısı” bölümüne bu değer (42°) girilmelidir. Daha sonra dürbünün bu açısında, operatör dürbünü kutup yıldızına kendi becerisi ile yöneltmelidir. Bu aşamada amatör kullanıcılar için Stellarium gibi mobil ve masaüstü uygulamaları faydalı olabilir (Gates, Zotti, Wolf ve Gerdes, 2016). Dürbün, referans yıldızla yönlendirildikten sonra, CCD'deki görüntü, kalibrasyon aşamasındaki gibi netleştirme vidası ile netleştirilmeli ve “Oryantasyon” düğmesine basıldıktan sonra, “oryantasyon başarılıdır” yazısı ekranda

görünmelidir. Böylece, bu aşama tamamlanmış olur.

Yukarıda bahsedilen 3 aşama başarılı bir biçimde tamamlandıktan sonra, son aşama olan astronomik gözlem aşamasına geçilebilmektedir. Astronomik gözlemler için azimut açısı 30° seçilmeli ve “çekim süresi”, “kazanç” gibi gözleme dair tüm bilgiler gözlemci tarafından eksiksiz girilerek, görünen tüm yıldızların otomatik olarak seçilmesi için; “sonraki yıldızları otomatik seç” butonu seçili olmalıdır. Parlaklık derecesi (kadir) yüksek olan yıldızlar daha sönüktür. CCD ile yapılan astronomik gözlemlerde, 1 ile 6 kadirdeki yıldızlar seçilebilmektedir. QDaedalus ile astronomik gözlem gerçekleştirirken, görünen yıldızların sıralaması yıldızların kadirine göre değil de ilişkilerine göre yapılmaktadır. Bu nedenle, gözlem sırasında “yıldızları ilişkilerine göre sırala” seçilmelidir. İlk yıldız seçtikten sonra, “başlat” düğmesine basılarak gözleme başlanmalı ve bir sonraki yıldız, yazılım tarafından otomatik seçilmelidir. Gözlem yapılan yıldızdan sonra hangi yıldızla gözlem yapılacağı ekranda seçilen yıldızın altında görülmektedir. Başlat düğmesine basıldığında aynı zamanda bir oturuma ait ilk seriye de başlanılmaktadır.

“Oturum” kavramı, gözlem noktasında aletin kurulması ve gözlem bitene kadarki tüm süreci ifade ederken; “seri” kavramı gözlemci tarafından belirlenen süre içinde gerçekleştirilen astronomik gözlemi ifade etmektedir. Hauk ve diğerleri (2017) tarafından QDaedalus ile gerçekleştirilen astronomik test çalışmalarında (bkz. Bölüm 3), her bir serinin yaklaşık 15 dk olması ve yıldızların görülebileceği açık gökyüzü mümkün olduğu sürece bir oturumun 3–4 seri yapılması önerilmiştir. Gerçekleştirilen tüm serilerin ortalaması alınarak, oturuma ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri hesaplanmaktadır. Gözlem sırasında, gökyüzünün bulutlarla kaplanması, sis vb. meteorolojik olaylardan dolayı her zaman 3–4 seri gözlem yapılamamaktadır. Bu gibi durumlarda, eğer o istasyonda tekrar gözlemi yapma imkanı da olmazsa, yapılan 1–2 seri gözlem değerlendirilerek o istasyona ait çekül sapma bileşenleri tanımlanmaktadır.

c. QDaedalus Sistemi ile Astronomik Koordinatların Elde Edilmesi

Bir astrojeodezik ölçme aleti ile gerçekleştirilen astronomik gözlem sonrası astronomik koordinatların hesabı için, Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service-IERS) tarafından sağlanan yer

dönüklük parametreleri (Earth Orientation Parameters-EOP) kullanılmaktadır. Bu parametreler, yersel koordinat sisteminden (International Terrestrial Reference System-ITRS), göksel koordinat sistemine (International Celestial Reference System-ICRS) dönüşümün gerçekleştirilmesini sağlamaktadırlar (Sigl, 1991; Seeber, 2003; Torge ve Müller, 2012). QDaedalus yazılımında gözlem sonrası astronomik koordinatların elde edilmesi için kullanılan eşitlik aşağıdaki gibidir (Guillaume ve diğerleri, 2012; Vittuari ve diğerleri, 2016):

$$x_{topo}(t) = T(\Lambda, \Phi) x_{ITRS}(t) \quad (4)$$

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

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.

R_1 , R_2 , R_3 ve N matrislerini tanımlayan parametreler, gözlem günü için IERS web sayfasından (<http://www.iers.org/>) temin edilirken, ICRS yıldız doğrultu vektörü, ABD Ulusal Gözlemevi (United States Naval Observatory-USNO) tarafından geliştirilen NOVAS kütüphaneleri ile hesaplanmaktadır.

Yukarıda anlatılan astronomik koordinatların hesabı, QDaedalus yazılımında bulunan "Dengeleme" sekmesi ile gözlemlerden 24 saat sonra yapılmaktadır. Bu 1 günlük beklemenin sebebi, IERS web sayfasından temin edilen Uluslararası Astronomi Birliği 1980 (The International Astronomical Union-IAU1980) final (son) yer dönüklük parametrelerinin, her 24 saatte bir yayımlanmasıdır. QDaedalus yazılımına, gözlem gününe ait IAU1980 yer dönme parametreleri ile birlikte gözlem yapılan istasyona ait jeosentrik jeodezik koordinatlar girilmektedir. Bu veri girişi tamamlandıktan sonra, dengeleme sekmesinde tek bir tuş ile bir oturumdaki her bir seriye ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri

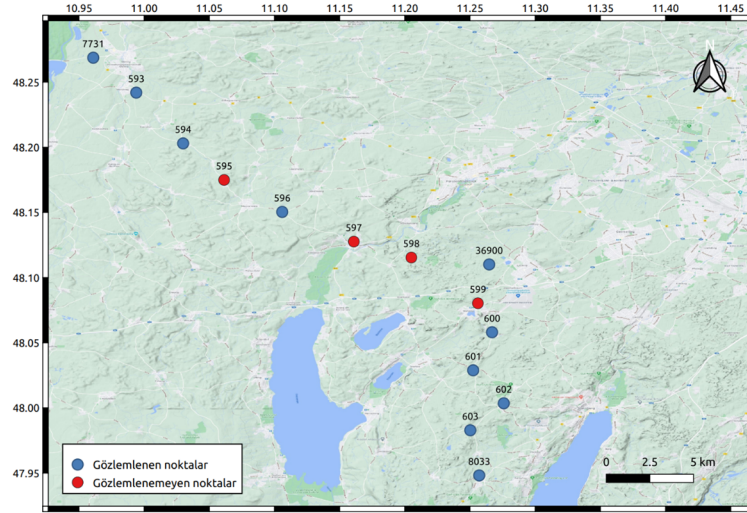
hesaplanmaktadır. Bir oturumdaki gözlemlenen tüm serilerin ortalaması alınarak, o oturuma ait astrojeodezik çekül sapma bileşenleri elde edilmektedir. Aynı istasyonda, yeni/tekrarlı gözlemler yapılması durumunda, her oturumdan elde edilen sonuçların ortalaması alınarak, o istasyona ait gözlemlenen çekül sapma bileşenleri kesin değer olarak raporlanmaktadır.

3. QDAEDALUS SİSTEMİNİN DUYARLILIĞI VE DOĞRULUĞUNUN BELİRLENMESİ

Astrojeodezik sistemlerin duyarlılığı (iç doğruluğu) aynı istasyonda yapılan tekrarlı gözlemler ile belirlenirken; doğruluğu (dış doğruluğu) geleneksel olarak başka bir astrojeodezik alet ile aynı istasyonda yapılan ölçmelerin karşılaştırılması ile belirlenmektedir (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a). TUM Astronomik ve Fiziksel Jeodezi Enstitüsü'nün (Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie-IAPG) 4. katındaki terasta bulunan pilye, Leica TCA2003, TDA5005 ve TCRM1101 elektronik takeometre bütünleştirilen QDaedalus sistemlerinin duyarlılıklarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu amaçla, TCA2003, 2014 yılında Hauk ve diğerleri (2017); TDA5005, 2015–2018 yılları arasında ve TCRM1101 ise 2018 yılında Albayrak, Hirt, Guillaume, Hauk ve Halicioğlu (2018) ve Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından kullanılmıştır. Üç farklı elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemleriyle gözlemlenen çekül sapma verilerinin standart sapma değerleri, toplam seri ve oturum sayısı için hesaplanmıştır (Tablo 1). Bu tabloda, üç sistemin çekül sapma bileşenlerinin Kuzey-Güney (K-G) doğrultusunda 0.14" ile 0.20"; Doğu-Batı (D-B) doğrultusunda ise 0.15" ile 0.24" arasında değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlar, Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından, QDaedalus sistemlerinin duyarlılıklarının hem K-G hem de D-B bileşenlerinde ~0.20" olduğu ve tüm ölçümlerin birbirleri ile uyumlu olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Tablo 1. TUM test/kontrol istasyonunda üç farklı elektronik takeometre ile gözlemlenen çekül sapma bileşenlerine ait toplam seri ve oturum sayıları ile hesaplanan standart sapma (σ) değerleri.

Elektronik takeometre	Toplam Seri	Toplam Oturum	σ_{ξ} ["]	σ_{η} ["]
TCA2003	30	4	0.20	0.15
TDA5005	56	18	0.15	0.24
TCRM1101	32	12	0.14	0.15



Şekil 4. Münih bölgesinde Hannover TZK2-D SZKS için tesis edilen ve TCRM1101 elektronik takeometre temelli QDaedalus sisteminin doğruluğunu belirlemek için kullanılan nirengi noktaları.

QDaedalus sistemi bütünleştirilerek duyarlılıkları belirlenen 3 elektronik takeometreden 2'si—TCA2003 ve TCRM1101—doğruluklarının belirlenmesi için Hannover TZK2-D SZKS (doğruluğu $\sim 0.1''$) ile daha önce astrojeodezik gözlem gerçekleştirilmiş nirengi noktalarında kullanılmışlardır. TCA2003 temelli QDaedalus sistemi Hauk ve diğerleri (2017) tarafından Bavyera Alpleri'nde 6 nirengi noktasında; TCRM1101 temelli QDaedalus sistemi ise Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından Münih bölgesinde 10 nirengi noktasında test edilmiştir (Şekil 4).

Bavyera Alpleri'nde, TCA2003 ile gözlemlenen çekül sapma verisi, TZK2-D SZKS ile gözlemlenen değerlerle (Hirt ve Flury, 2008) karşılaştırıldığında, K-G ve D-B çekül sapma bileşenlerindeki farkların $\sim 0.2''$ olduğu görülmüştür (Hauk ve diğerleri, 2017). Münih bölgesinde, TCRM1101 ile TZK2-D SZKS arasında yapılan karşılaştırmalarda, Bavyera Alpleri'ndekine benzer sonuçlar elde edilmiştir (Albayrak ve diğerleri, 2020a). Elektronik takeometrelerin doğruluklarının aynı SZKS ile belirlendiği bu iki çalışmada, nihai olarak TCA2003 ve TCRM1101 ile elde edilen çekül sapma verilerinin uyumlu olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Albayrak ve diğerleri, 2020a). Nitekim, TUM kontrol istasyonundaki sonuçlarda da elektronik takeometrelerin uyumlu olduğu vurgulanmıştır.

Astronomik gözlemlerin, jeodezik gözlemler gibi aynı koşullar altında yapılamaması, gözlem yapılan noktanın zamana bağlı meteorolojik etmenlerle doğrudan ilintili olması, QDaedalus sistemi ile gözlemlenen çekül sapma

bileşenlerinin duyarlılık ve doğruluğunun belirlenmesinde kötümser değerlendirme yapılmasına neden olmaktadır. Gözlem istasyonu, gözlem tarihi ve zamanına göre değişmekte olan meteorolojik olaylardan (gözlem sırasında gökyüzünün bulut ile kaplanması, nem oranının yüksek olması, sis çökmesi vb.) ve ışık kirliliğinden yüksek derecede etkilenmektedir. Örneğin, sık karşılaşılan gözlem sırasında gökyüzünün bulut ile kaplanması sorunda, gözlemci başlatılan seri gözlemi sonlandırmaktansa bulutların geçmesini, yani yıldızların tekrar görülebileceği açık gökyüzünü beklemeyi tercih etmektedir. Açık gökyüzünün beklenmesi bazen 1 saat gibi bir süreyi bulmakta ve bu durum da dizüstü bilgisayar bataryasının bitmesi gibi bir soruna neden olabilmektedir. Karşılaşılan bu tür durumlar, bir oturumda 3–4 seri gözlem yapılamamasının temel nedenidir. Ayrıca, her seride gözlemlenen yıldız sayısı da, yukarıda belirtilen benzer meteorolojik faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, QDaedalus'un duyarlılığı ile ilgili yapılan testlerde ölçülerin (referans değerden olan çekül sapması) aralığının bazen $0.5''$ değerine kadar yayılmasının nedeninin farklı gözlem koşulları ve gözlemlenen yıldız sayısındaki değişiklikten kaynaklandığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Astrojeodezik sistemlerin duyarlılığı ve doğruluğu belirlendikten sonra sistemler çeşitli arazi uygulamalarında kullanılabilmektedirler. Ancak, başka bir coğrafi bölgeye nakliyesinin yapılması durumunda, sistemin nakliye sırasında zarar görüp görmediğini tespit edebilmek için, nakliyesi yapılan yerde yeni bir test noktası tesis edilmeli ve mutlaka birkaç gece bu test noktasında tekrarlı astrojeodezik gözlemler

gerçekleştirilmelidir. Bununla birlikte, arazi çalışmaları sırasında gözlemlenen, örn. 5–7 nirengi noktasından sonra tekrar gözlemlerinin yapıldığı test noktasında yeni gözlemlerin yapılması verilerin güvenilirliğini sağlamak adına oldukça önemlidir. Çünkü tüm ölçme sistemlerinde olduğu gibi, astrojeodezik sistemlerde de olası bir problemin oluşması durumunda erken teşhis edilmesi ve gözlemlenen verilerin güvenilirliğin sağlanması için en üst düzeyde önlemler alınması gerekmektedir. Tekrarlı gözlemlerde, gözlemlenen yeni veri setindeki farklılığın tespiti durumunda, sistemin kalibrasyonu, hata tespiti vb. yapılmalıdır.

4. QDAEDALUS SİSTEMİ İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ASTROJEODEZİK ÇALIŞMALAR

Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) birçok farklı astrojeodezik uygulamada başarılı bir biçimde kullanılmıştır. En yaygın kullanıldıkları uygulamalar şu şekilde sıralanabilir: Geometrik-astronomik nivelman (Hirt ve Bürki, 2006; Hirt ve diğerleri, 2011), astrojeodezik geoit belirleme (Hirt ve Flury 2008), yükseklik sistemlerinin validasyonu ve gravite alanı modelleme (Smith ve diğerleri, 2013; Wang ve diğerleri, 2017), yerel jeodezik ağ uygulamaları (Volafík, Machotka, Kuruc, Puchrik ve Jurčík, 2013; Halıcıoğlu, Deniz ve Özener, 2016) ve anormal kırılmaların izlenmesi (Hirt, 2006; Hirt, 2012). SZKS'ler gibi QDaedalus sistemleri de çok çeşitli astrojeodezik uygulamalarda kullanılmıştır. QDaedalus sistemlerinin, SZKS'lere göre nakliyesinin çok daha kolay yapılabilmesi ve çetin arazi koşullarında rahatlıkla kullanılabilmesi, QDaedalus'un geliştirildiği ülke olan İsviçre dışında beş farklı ülkede daha kullanılmasını sağlamıştır. QDaedalus sistemi ile İsviçre'de yapılan ve sonuçları paylaşılan çalışmalar, gün ışığında ya da iç mekanlarda yapılan jeodezik çalışmalardır (bkz. Bölüm 1). QDaedalus ile Almanya, İtalya, Macaristan, Avustralya ve

Türkiye olmak üzere beş farklı ülkede gerçekleştirilen uygulamalar astrojeodezik amaçlı çalışmalardır (Tablo 2) ve gerçekleştirildiği coğrafi bölgeye göre bu bölümün devamında açıklanmıştır.

a. Almanya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Almanya, astrojeodezik sistem geliştirme deneyimi bakımından, İsviçre ile birlikte dünyada öncü bir rol üstlenmiştir. Hannover TZK2-D SZKS, Almanya dışında Avrupa'da birçok farklı ülkede

kullanılmıştır (Hirt ve Bürki, 2006). Bölüm 3'te, QDaedalus sisteminin doğruluğunu belirlemek için TZK2-D ile astrojeodezik gözlem yapılan Bavyera Alpleri ve Münih bölgesindeki mevcut nirengi noktaları kullanıldığından, 3 farklı elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemlerinin duyarlılığının ise TUM'deki kontrol istasyonunda belirlendiğinden bahsedilmişti. Almanya'da TUM IAPG 1 adet QDaedalus sistemine sahip olduğu için Almanya QDaedalus sistemi ile astrojeodezik gözlemlerin en yoğun yapıldığı adreslerden biri olmuştur. Avustralya ve Türkiye'de QDaedalus ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmalara ise TUM IAPG ve ETH Zürih GGL destek vererek katkı sağlamışlardır. Almanya'da bahsedilen çalışmaların dışında, Albayrak ve Hirt (2018) tarafından Wettzell Jeodezik Gözlemevinde (Geodetic Observatory Wettzell-GOW) Leica TCRM1101 ve TDA5005'lerle bütünleştirilen QDaedalus sistemleri vasıtasıyla astrojeodezik çalışmalar yürütülmüştür.

616 m yükseklikteki Wagnerberg dağında bulunan GOW, Wettzell köyünün batısında, Almanya'nın Bavyera ormanlarında yer almaktadır. GOW, dünyanın en önemli jeodezik gözlemlerlerinden biri olmakla birlikte, jeodezik uydru teknikleri çalışmaları için (VLBI, SLR, GNSS ve DORIS), Almanya Kartografya ve Jeodezi federal dairesi (Federal Agency for Cartography and Geodesy-BKG) ve TUM tarafından yönetilmektedir (Klügel, Mähler ve Schade, 2011). GOW'da QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemler, gravite veri setleri arasındaki farklılıkların giderilmesi ve farklı elektronik takeometrelerle aynı pilyelerde elde edilen verilerin uyumlu olup olmadığının tespit edilmesi amaçlarıyla gerçekleştirilmiştir. GOW'daki 36 pilye arasından, tüm alanı kapsayacak biçimde 6 pilye astrojeodezik gözlemler için seçilmiştir.

GOW'da 6 pilyede gerçekleştirilen gözlemler, TCRM1101 ve TDA5005 temelli QDaedalus sistemleri ile birbirini takip eden iki gecede tamamlanabilmiştir. Birinci gece her bir elektronik takeometre ile 3 istasyonda (WT: Wettzell istasyonu) gözlem gerçekleştirilmiştir. İkinci gece, ilk gece kullanılan istasyonda kullanılan farklı bir elektronik takeometre istasyonlarda kullanılmıştır. Ancak, ikinci gece TDA5005'te sorun yaşanmış ve sadece bir istasyonda (WT3) kullanılabilmektedir. Bu nedenle, 4 pilyede tekrarlı gözlem yapılabilmektedir. İki farklı elektronik takeometrenin kullanıldığı pilyelerde, iki farklı oturumun ortalaması ile o pilyeye ait çekül sapma değerleri, aletsel sistematik hataların etkisi azaltılmış olarak hesaplanmıştır. Astrojeodezik

gözlemler sonucu çekül sapma verilerine ait elde edilen standart sapma değerleri (her bir oturum için); TCRM1101 için K-G ve D-B bileşenlerinde ~0.2"; TDA5005 için K-G ve D-B bileşenlerinde ise ~0.1" olarak tespit edilmiştir (Albayrak ve Hirt, 2018; Albayrak, 2020). Her bir oturumda elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise iki QDaedalus sistemine ait standart sapma değerlerinin, bu iki sisteme ait belirtilen presizyon değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gravite veri setleri ile ilgili daha önce bahsedilen çalışma henüz tamamlanamamıştır.

b. İtalya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Vittuari ve diğerleri (2016) tarafından, İtalya'nın Medicina (Kuzey İtalya) ve Noto (Sicilya, İtalya) şehirlerinde yer alan ve şehrin isimleriyle anılan gözlemevleri, farklı jeomorfolojik koşullar altında, üç farklı teknikle çekül sapma bileşenlerinin belirlenmesi için seçilmiştir. Medicina gözlemevi düz bir jeomorfolojiye sahip iken, Noto gözlemevi oldukça dağlık olmakla birlikte Kuzey ve Güney kısımlarında tepe yükseklikleri birkaç yüz metreyi bulmaktadır. Bu gözlemevlerindeki çekül sapma bileşenleri: (i) Leica TCA2003 temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemler, (ii) Yüksek presizyonlu geometrik nivelman ve GNSS ölçmeleri, (iii) Yüksek doğruluğa sahip İtalyan gravimetrik geoit modelinden (ITALGEO2005; Barzaghi, Borghi, Carrion ve Sona, 2007) elde edilmiştir.

Medicina ve Noto gözlemevlerinde, üç farklı teknik kullanılarak elde edilen çekül sapma verileri

birbirleriyle karşılaştırıldığında Vittuari ve diğerleri (2016) tarafından şu sonuçlara ulaşılmıştır:

(i) Her iki gözleminde üç teknik ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumludur.

(ii) İki gözleminde de K-G ve D-B çekül sapma bileşenlerine ait standart sapma değerleri, GNSS/Nivelman tekniği için 0.5" ile 0.7" arasında iken, QDaedalus gözlemleri için 0.1" ile 0.4" arasındadır. Bu sonuçlar, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verilerinin presizyonunun, GNSS/Nivelman tekniğine göre biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, QDaedalus ile GNSS/Nivelman tekniğine göre daha hızlı çekül sapma verisi elde edilebilmektedir.

(iii) ITALGEO2005 ile kestirilen çekül sapma verileri diğer iki teknik ile elde edilen çekül sapma verileri ile uyumludur ve gözlemlenen çekül sapma verisinin bulunmaması durumunda güvenle kullanılabilir. (iv) İki gözlemevi arasındaki jeomorfolojik farklılıklardan dolayı, Noto gözlemeviden elde edilen çekül sapma değerleri Medicina gözlemevine göre iki kat daha fazladır.

Bu sonuçlarla birlikte, Vittuari ve diğerleri (2016), QDaedalus sisteminin temininin kısıtlı olmasından, özellikle GNSS ve Nivelman ölçü aletleri gibi bir endüstrileşme veya ticarileşme olmamasından dolayı QDaedalus'un yaygın kullanılmadığını belirtmişlerdir.

Tablo 2. QDaedalus sistemi ile beş farklı ülkede gerçekleştirilen uygulamalar.

Ülke	Yer	Elektronik takeometre	Tarih	Gözlemlenen nokta sayısı	Verilerin duyarlılığı	İlgili Yayın
Almanya	TUM	TCA2003	2014	Test noktası	0.2"	Hauk ve diğerleri (2017)
		TCRM1101	2018		0.2"	Albayrak ve diğerleri (2018, 2020a)
		TDA5005	2015-18		0.2"	Albayrak ve diğerleri (2018, 2020a)
	Bavyera Böl.	TCA2003	2014	6	0.2"	Hauk ve diğerleri (2017)
	Münih Böl.	TCRM1101	2018	10	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2020a)
	GOW	TCRM1101	2018	6	0.2"	Albayrak ve Hirt (2018)
		TDA5005		4	0.1"	
İtalya	Medicina	TCA2003	2015	1	0.1"	Vittuari ve diğerleri (2016)
	Noto			4	0.1" -0.4"	
Macaristan	Budapest	TCA2003	2016	Test noktası	0.1"	Toth ve Völgyesi (2017)
			2016-18		0.1"	Toth ve Völgyesi (2018)
Avustralya	Pert	TCA2003	2016	39	0.2"	Schack ve diğerleri (2018)
Türkiye	İTÜ	TCRM1101	2018	Test noktası	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2019)
	İstanbul			29	0.2"	Albayrak ve diğerleri (2020a)

c. Macaristan'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Macaristan'daki astrojeodezik gözlemlerin adresi, Budapeşte şehrinin güneyinde yer alan Pistahegy istasyonu olmuştur. Bu istasyonda yapılan ilk çalışmalar, Tóth ve Völgyesi (2017) tarafından ve ilk çalışmaları da kapsayan bir diğer çalışma ise Tóth ve Völgyesi (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir. Her iki çalışmanın da odak noktası, Leica TCA1800 temelli QDaedalus ile gerçekleştirilen gözlemlerle, astronomik koordinatların elde edilebilmesinde en kritik nokta olan zenit doğrultusunun daha yüksek doğrulukla belirlenmesidir.

Tóth ve Völgyesi (2017) tarafından yapılan çalışmada her bir seri, ortalama 50 dk. olmak üzere, 33 farklı gecede bağımsız 70 oturum gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen bu veri seti, iki farklı ters çözüm tekniği; En Küçük Kareler Danimarka metodu ve Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodu ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde, M-inversiyonunu kullanan Cauchy-Steiner metodunun 70 bağımsız seride daha iyi sonuç verdiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın neticesinde, 15-30 dakikalık bir astrojeodezik gözlem süresinde 0.1" duyarlılığa ulaşabilmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Tóth ve Völgyesi (2018) tarafından ise Pistahegy istasyonunda daha önce gözlemlenen 70 seriyi de kapsayan ve 3 yıl süre zarfında gözlemlenen toplam 180 bağımsız veri seti, daha önce de kullanılan En Küçük Kareler Danimarka metodu ve Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodu ile analiz edilmiştir. Daha fazla verinin değerlendirildiği bu çalışmada da Cauchy-Steiner ağırlıklandırma metodunun daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, artık verilere (residual) zamansal veri analizi uygulanarak, QDaedalus sistemi ile yapılan gözlemlerde CCD kamera kalibrasyonu veya bilgisayar saat ayarında yapılabilecek bir hatanın veri setine nasıl yansıtacağı üzerinde durulmuştur.

ç. Avustralya'da QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Schack ve diğerleri (2018) tarafından, Avustralya'nın Batısındaki Perth şehrinde 39 nirengi noktası ile oluşturulan bir astrojeodezik geçkide QDaedalus sistemi kullanılmıştır. Bu geçkinin ilk noktası okyanus kıyısına yakın olmak üzere nokta sıklığı ~1 km ve toplam geçki uzunluğu ~38 km'dir. 39 nirengi noktasından 6 tanesinde farklı gecelerde tekrarlı gözlemler yapılarak, gözlemlerin güvenilirliği artırılmıştır. Bu

çalışmada elde edilen çekül sapma bileşenlerine ait standart sapma (K-G bileşeni için 0.17" ve D-B bileşeni için 0.23") değerlerinin, Almanya'daki çalışmalarda (bkz. Bölüm 3 ve 4.1) elde edilen değerlerle (~0.20") uyumlu olduğu görülmüştür.

Schack ve diğerleri (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın önemi ve elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

(i) Güney yarım kürede, astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen çekül sapma verisi oldukça azdır (Hirt ve Wildermann, 2018). Bu çalışma, dijital bir sistemden yararlanılarak çekül sapma verisi elde edilen güney yarım küredeki ilk çalışmadır ve gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verileri ~0.2" gibi yüksek bir duyarlılık ile elde edilmiştir. Ayrıca, astrojeodezik gözlemlerin güney yarım kürede yapılması nedeniyle, referans yıldız olarak Sigma Octantis kullanılarak, ilk kez QDaedalus sisteminde, Kutup yıldızı/Polaris dışında bir yıldız oryantasyon yapılmıştır.

(ii) Gözlemlenen çekül sapma bileşenleri, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) tarafından üretilen topografya bilgisi ile birlikte kullanılarak, astronomik-topografik nivelman tekniği ile quasi-jeoit yükseklik farklarına dönüştürülmüştür.

(iii) Gözlemlenen çekül sapma verisi bağımsız bir veri setidir ve bu nedenle geliştirilen ve geliştirilecek global gravite modellerinin (GGM) kalitesinin ölçülmesinde kullanılabilirler. QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisi, 3 farklı GGM ve SRTM ile birleştirilen çekül sapma verileri ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan GGM'ler; Hirt ve diğerleri (2013) tarafından geliştirilen Global Gravite Modeli plus (GGMplus) ve Featherstone ve diğerleri (2011) ve (2017) tarafından geliştirilen, Avustralya gravimetrik quasi-jeoit 2009 ve 2017 (AGQG2009 ve AGQG2017) modelleridir. GGM'ler tarafından kestirilen çekül sapma bileşenlerinin, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma bileşenleri ile ortalama karekök (RMS) değerleri uyumludur: K-G bileşeninde ~0.5" ile ~0.9" arasında değişmekteyken, D-B bileşeninde daha iyi olmakla beraber ~0.3" dir. Bu sonuçlar, QDaedalus ile gerçekleştirilen diğer uygulama sonuçlarında bir birlik olduğunu göstermiştir.

Schack ve diğerleri (2018) tarafından yürütülen bu çalışma, okyanus aşırı bir ülkede 10.000 AUD gibi oldukça az bir bütçe ile, 39 nirengi noktasından oluşan bir geçkide QDaedalus sisteminin kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada, gözlemlenen çekül sapma verisi bulunmayan ya da yetersiz veri bulunduran diğer kıtalarda (Asya, Afrika, Güney Amerika ve Antartika) QDaedalus sisteminin

kullanılabilirliğini ve geliştirilecek GGM'lerin kalitesinin yeni veri setleri ile değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

d. Türkiye’de QDaedalus Sistemi ile Gerçekleştirilen Çalışmalar

Türkiye’de son 10 yıldır astrojeodezi çalışmalarında büyük bir atılım yaşanmıştır. Halicioğlu ve diğerleri (2016) tarafından TÜBİTAK ÇAYDAG (111Y125; Deniz, 2015) desteğiyle geliştirilen ve Türkiye’nin ilk SZKS olan Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS); Albayrak ve diğerleri (2019) tarafından yine TÜBİTAK ÇAYDAG (115Y237; Özlüdemir, 2018) desteğiyle modernize edilerek güncellenmiştir. Her iki çalışmada adresi İstanbul olmakla beraber, QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen çalışmalar da İstanbul’da yürütülmüştür.

Albayrak ve diğerleri (2020a) tarafından, İstanbul’daki astrojeodezik gözlemler, TCRM1101 temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemin TUM kontrol istasyonunda presizyonu ve Münih bölgesinde TZK2-D SZKS’ye ait astrojeodezik profilde doğruluğu belirlenmiştir (bkz. Bölüm 3). İstanbul’daki çalışmalar QDaedalus ile 7 aylık (Şubat–Ağustos, 2018) bir zaman diliminde tamamlanmıştır. Yapılan çalışmalar çok yönlü olmakla birlikte, şu şekilde özetlenebilir:

(i) AKS2 olarak yeniden isimlendirilen SZKS’nin presizyonu, İTÜ İnşaat Fakültesi’nin otoparkına tesis edilen bir nirengi noktasında 5 farklı gece yapılan tekrarlı gözlemler ile belirlenirken (0.3”), AKS2’nin doğruluğu QDaedalus sistemi ile 6 farklı gece yapılan gözlemler ile belirlenmiştir (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a). QDaedalus’un, yeni geliştirilen bir astrojeodezik aletin doğruluğunu belirlemede kullanıldığı ilk çalışmadır. Bu çalışma, ilerde geliştirilecek astrojeodezik sistemlerin doğruluğunun belirlenmesinde, QDaedalus sisteminden yararlanılabileceğini göstermiştir.

(ii) İTÜ test istasyonundaki QDaedalus ile yapılan gözlemler, QDaedalus sisteminin nakliyesi sırasında bir hasar olup olmadığını tespit etmek için de kullanılmıştır. Test gözlemleri sonucu, daha önce QDaedalus ile gerçekleştirilen diğer çalışmalarda gibi sistemin presizyonu her iki çekül sapma bileşeninde $\sim 0.2''$ olarak tanımlanmıştır (Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a).

(iii) QDaedalus sistemi, astrojeodezik gözlemler için oluşturulan İstanbul Astrojeodezik Ağında (İAA) kullanılmıştır. Bu ağ, İstanbul GPS Nirengi Ağı (İGNA) ve İstanbul Nivelman Ağına (İNA) ortak olan ~ 1183 mevcut nirengi noktası

arasından seçilen 30 nokta ile oluşturulmuştur. İGNA’dan jeodezik koordinatlar (jeosentrik jeodezik enlem ve boylam, elipsoid yükseklik) elde edilirken, İNA’dan ortometrik yükseklik bilgisi elde edilmiştir (Ayan ve diğerleri, 2006; Albayrak, Özlüdemir, Aref ve Halicioğlu, 2020b). İGNA’ya ait noktaların kullanılmasının iki temel avantajı vardır: (a) yeni bir GPS gözlemi yapılmasına gerek olmamasından dolayı iş ve zamandan kazanç sağlanmıştır. (b) İGNA için tesis edilen pilyelerin, çivi ile tesis edilen noktalara göre daha uzun ömürlü olması sebebiyle, ilerde yapılması olası tekrar gözlemlerinde, İGNA noktalarının kullanılabilirliği ihtimali artırılmıştır. Yeni tesis edilen çivi tesisli noktaların ömürlerinin kısa olmasının sebebi, dünyanın en büyük metropollerinden biri olan İstanbul’da, sıklıkla gerçekleştirilen yol, inşaat vb. çalışmalar nedeniyle bu tip yer noktalarının tahrip ya da yok edilmesidir. Bu nedenle, İAA’yı oluşturan 30 nirengi noktasından 15’inin pilye tesisli olması öncelikli olarak tercih edilmiştir. Ayrıca, İAA’yı oluşturan 21 nirengi noktası İstanbul’un kıyı kesiminde ve 9’u kısmen dağlık alanlarda olmakla birlikte İstanbul’un iç kesiminde seçilmiştir. Son olarak, 17’si İstanbul’un Avrupa kıtasında (İTÜ test noktası dahil) ve 13’ü ise Asya kıtasında yer almaktadır.

İAA’daki astrojeodezik gözlemler, toplamda 3 farklı kampanya ile tamamlanmıştır. Birinci kampanyada (Şubat–Mayıs 2018) 24 adet nirengi noktasında gözlem yapılmıştır. İkinci ve üçüncü kampanya Haziran ve Ağustos 2018 tarihlerinde tamamlanarak, İkinci kampanyada, 4 noktada tekrarlı gözlem ve 3 yeni noktada da ilk kez gözlem yapılmıştır. Üçüncü kampanyada ise, 6 noktada tekrarlı gözlem ve 3 noktada ilk kez gözlem gerçekleştirilmiştir. İkinci kampanyanın temel amacı, ilk kampanyada QDaedalus ile gözlemlenen ve GGMplus (Hirt ve diğerleri, 2013) ile karşılaştırıldığında aralarındaki farkın çok fazla ve az olduğu noktalarda kontrol gözlemi yapmaktır. Üçüncü kampanyanın amacı ise, birinci ve ikinci kampanyalardaki gözlemleri tekrarlı gözlemler ile kontrol etmek ve İAA’ya yeni noktalar eklemektir. Üç kampanyadan elde edilen verilerin standart sapma değerleri çekül sapma bileşeninin her iki doğrultusunda da $\sim 0.2''$ olarak tanımlanmıştır.

(iv) QDaedalus ile gerçekleştirilen toplam 3 kampanya sonucu gözlemlenen çekül sapma verileri, GGMplus ve Yer Gravite Modeli 2008 (Earth Gravitational Model 2008-EGM2008; Pavlis, Holmes, Kenyon ve Factor, 2012, 2013) global gravite alan modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu modeller ile çekül sapma bileşenlerinin nasıl hesaplandığı Albayrak ve diğerleri (2020c)

tarafından da açıklanmıştır. QDaedalus ile gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma verileri karşılaştırıldığında İstanbul'un kıyı kesiminde seçilen 21 noktadan 15'inin K-G bileşeninde farkın 2" den fazla olduğu ve ~6" kadar ulaştığı görülmüştür. D-B bileşeninde ise sadece 3 noktada, gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki fark 2" den fazladır ve bu noktalar K-G bileşeninde 2" den büyük olan noktalarla aynı noktalardır. EGM2008 ile kestirilen değerler, GGMplus ile kestirilen değerlere benzer sonuçlar vermiştir ve gözlemlenen değerlerle aralarındaki fark daha önce de vurgulandığı üzere oldukça fazladır. Gözlemlenen ve GGMplus ile kestirilen çekül sapma bileşenleri arasındaki yüksek farkın daha iyi analizinin yapılabilmesi için bu iki veri seti arasındaki çekül sapma bileşenleri farkı, uydu radar altimetre ölçmeleriyle üretilen Danimarka Ulusal Uzay Merkezi (Danish National Space Center-DNSC) verilerinin de kullanıldığı bir haritada gösterilmiştir. Gözlemlenen ve kestirilen çekül sapma verileri arasındaki farkın fazla olduğu kıyı bölgelerinde DNSC verilerinin düzensiz olduğu görülmüştür.

İstanbul'da gerçekleştirilen bu çalışmanın sonuçları, Albayrak ve diğerleri (2020c) tarafından Münih bölgesinde gözlemlenen çekül sapma verilerinin GGMplus ve EGM2008 modelleri ile karşılaştırıldığı çalışma sonuçları ile de kıyaslanmıştır. Münih'te, Qdaedalus ile gözlemlenen ve modellerden kestirilen veri seti arasındaki farkların, İstanbul'un iç kesimlerinde elde edilen farklarla benzer olduğu raporlanmıştır. İstanbul'un kıyı kesimlerindeki sonuçların ise EGM2008'in hesaplanmasında kullanılan uydu radar altimetre verilerinin yetersizliğinden dolayı düşük doğruluğa sahip olduğu Albayrak ve diğerleri (2020c) tarafından tekrar vurgulanmıştır.

5. GENEL BAKIŞ VE ÖNERİLER

Astrojeodezik çekül sapma verisinin elde edilmesindeki güçlük teknolojinin gelişimi ile beraber kısmen aşılmıştır. Yaklaşık son 20 yıldır astrojeodezik çalışmalarda kullanılan Sayısal Zenit Kamera Sistemlerinin (SZKS) geliştirilmesindeki zorluklar, QDaedalus sisteminin SZKS'lere alternatif olarak geliştirilmesini sağlamıştır. En çok bilinen ve kullanılan SZKS'lerin— Hannover TZK2-D ve ETH Zürih DIADEM ve CODIAC'ın—doğruluğu ~0.1" iken, QDaedalus sisteminin doğruluğu ~0.2" olarak tanımlanmaktadır. Fakat, QDaedalus'un nakliyesinin kolay yapılabilmesi, özellikle uçak kabininde taşınabilmesi nedeniyle okyanus aşırı ülkelerde gözlem yapılabilmesi (örneğin,

Avustralya'da yapılan gözlemler) ve nirengi noktasına erişimin çok zor olduğu yerlerde elde taşınabilmesi (örneğin İstanbul'da kıyı ve dağlık bölgelerde yapılan gözlemler) QDaedalus sisteminin gelecekte SZKS'lerden daha fazla kullanılabilir olmasını sağlayabilir. İTÜ test noktasında presizyonu belirlenen AKS2'nin doğruluğunun QDaedalus ile belirlenebilmesi (bkz. Bölüm 4.d), ileride geliştirilecek astrojeodezik sistemlerin doğruluğunun da QDaedalus ile belirlenebileceğini ve QDaedalus'un alternatiften daha fazlası olduğunu göstermiştir. Ayrıca, QDaedalus, SZKS'lerden farklı olarak, sadece yıldızlara gözlem yaparak astronomik enlem ve boylam belirlemek ile sınırlı kalmayarak, mühendislik ölçmeleri ve deformasyon gibi birçok jeodezik amaçlı çalışmada başarıyla kullanılmaktadır (diğer jeodezik çalışmalar için bkz. Bölüm 1).

QDaedalus ile 2014–2019 yılları arasında yürütülen astrojeodezik çalışmaların incelendiği bu makalede, Türkiye'yi de kapsayan beş farklı ülkede gerçekleştirilen çalışmalarda her bir uygulamanın amacının farklı olması sebebiyle; QDaedalus ile yapılan çalışmaların çeşitliliği ortaya konulmuştur. QDaedalus ile yapılan bu orijinal çalışmalar:

(i) Almanya'daki çalışmalar, farklı elektronik takeometreler ile bütünleştirilen QDaedalus sistemlerinin presizyonunu ve doğruluğunu belirlemeye odaklanmıştır. Ayrıca, Türkiye ve Avustralya'da gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemlerin güvenilir olmasını mümkün kılmıştır (bkz. Bölüm 3 ve 4a; Hauk ve diğerleri, 2017; Albayrak ve Hirt, 2018; Albayrak ve diğerleri, 2020a).

(ii) İtalya'daki çalışmalar iki farklı jeomorfolojiye sahip VLBI ve GNSS ölçmelerinin sürekli yapıldığı gözlemlerinde, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisini de içeren üç farklı teknik ile elde edilen çekül sapma bileşenlerinin karşılaştırılmasını konu edinmiştir (bkz. Bölüm 4b; Vittuari ve diğerleri, 2016).

(iii) Macaristan'da yapılan çalışmalar, temel olarak QDaedalus'un doğruluğunun iyileştirilmesi üzerinedir (bkz. Bölüm 4c; Tóth ve Völgyesi, 2017, 2018).

(iv) Avustralya'daki çalışmalarda, QDaedalus ile gözlemlenen çekül sapma verisine astronomik-topografik nivelman tekniği uygulanması ve quasi-jeoit yüksekliklerine dönüştürülmesi; QDaedalus gözlemlerinden elde edilen sonuçların, farklı GGM'lerden kestirilen sonuçlarla karşılaştırılarak GGM'lerin kalitesinin ölçülmesi; jeodezik

astronomi alanındaki teorik alt yapının da sunulmasını konu edindiği için literatüre oldukça önemli katkılar sağlamıştır. Ayrıca, Avustralya'daki gözlemler, Güney yarım kürede gerçekleştirilmesi bakımından da özeldir (bkz. Bölüm 4ç; Shack ve diğerleri, 2018).

(v) Türkiye'de QDaedalus ile gerçekleştirilen çalışmalarda, İstanbul'un kıyı şeridinde gözlemlenen çekül sapma verisi ile GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen çekül sapma verisi arasındaki farkın oldukça fazla olduğu ve bunun uydu-altimetre verilerinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, Türkiye'de İTÜ tarafından geliştirilerek modernize edilen SZKS'nin doğruluğu QDaedalus ile belirlenmiştir (bkz. Bölüm 4d; Albayrak ve diğerleri, 2019, 2020a).

Yukarıda özetlenen astrojeodezik çalışmalar, QDaedalus sisteminin geliştirildiği 2014 yılından bu yana sistemin çok geniş bir ölçekte ve çok yönlü kullanıldığını göstermiştir. QDaedalus sisteminin temininin daha yaygın olması durumunda, SZKS'ler ile gerçekleştirilen astrojeodezik geoit belirleme vb. birçok farklı uygulamanın QDaedalus ile de yapılabileceği ve gerçekleştirilebilecek jeodezik amaçlı uygulamaların çeşitliliğinin ve sayısının da artacağı öngörülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu makalede ayrıntılı olarak anlatılan QDaedalus Sistemi, ETH Zürih Üniversitesi Jeodezi ve Jeofizik Laboratuvarı (GGL) tarafından geliştirilmiştir. 2014-2019 yılları arasında QDaedalus ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmaların incelenmesinde referans kaynak olarak kullandığımız eserlerin yazarlarına teşekkür ederiz. Bu makalenin yazım sürecindeki desteklerinden dolayı, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) BİDEB 2219 Doktora Sonrası Araştırma Bus Programı'na (proje no: 1059B192000149) ve İsviçre Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) Yersel Mühendislik Enstitüsü Geomatik Mühendisliği bölümüne teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca, değerli yorum ve önerileri ile bu makalenin geliştirilmesine çok önemli katkı sağlayan Hakemlere, ayırmış oldukları zaman ve emekleri için çok teşekkür ederiz. Şekil 4'teki harita QGIS kullanılarak çizdirilmiştir (QGIS, 2020; OpenStreetMap, 2015).

ORCID

Müge ALBAYRAK  <https://orcid.org/0000-0001-6705-4044>

Sébastien GUILLAUME  <https://orcid.org/0000-0002-0831-7833>

KAYNAKLAR

- Albayrak, M. ve Hirt, C. (2018). Astrogeodetic observations at Geodetic Observatory Wettzell, Report, p.43, Munich, Germany.
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Hauk, M. ve Halicioglu, K. (2018, December). Testing the QDaedalus measurement system for astrogeodetic observation of the gravity field. In AGU Fall Meeting 2018, Washington DC, USA. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2018AGUFM.G51F0534A>
- Albayrak, M., Halicioglu, K., Özlüdemir, M.T., Basoglu, B., Deniz, R., Tyler, A.R.B. ve Aref, M.M. (2019). The use of the automated digital zenith camera system in Istanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 25(4). doi:10.1590/s1982-21702019000400025
- Albayrak, M. (2020). Assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul (PhD Thesis). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Halicioglu, K., Özlüdemir, M.T. ve Shum, C.K. (2020a). Quality assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in Istanbul, Turkey. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 64(3), 306–329. doi:10.1007/s11200-019-0591-2
- Albayrak, M., Özlüdemir, M.T., Aref, M.M. ve Halicioglu, K. (2020b). Determination of Istanbul geoid using GNSS/levelling and valley cross levelling data. *Geodesy and Geodynamics*, 11(3), 163–173. doi:10.1016/j.geog.2020.01.003
- Albayrak, M., Zeray Öztürk, E., Bildirici, İ., Hirt, C., Guillaume, S. ve Shum, CK. (2020c). Almanya Münih Bölgesinde QDaedalus sistemi ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapma verilerinin GGMplus ve EGM2008 ile kestirilen değerlerle karşılaştırılması. *Yerbilimleri*, 41(3), 220–246. doi: 10.17824/yerbilimleri.740141
- Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Celik, R.N., Denli, H.H., Akyılmaz, O., ... Tekdal, E. (2006). *İstanbul GPS nirengi ağı (İGNA) 2005-2006 yenileme ölçü ve değerlendirmesi*. Istanbul Teknik Üniversitesi Rapor 2005/3123, Vol. 1, Istanbul, Turkey, s.186.

- Barzaghi, R., Borghi, A., Carrion, D. ve Sona, G. (2007). Refining the estimate of the italian quasi-geoid. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, 66, 145–160. <http://hdl.handle.net/11311/250536>
- Bürki, B. (1989). Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Nr. 40, Schweizerische Geodätische Kommission.
- Bürki, B. (2005). ICARUS, Astro-geodetic on-line observation system–User manual V.05. Geodesy and Geodynamics Lab (GGL) at ETH Zurich.
- Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P. ve Oesch, H.P. (2010, September). DAEDALUS: A versatile usable digital clip-on measuring system for total stations. In 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Zurich, Switzerland. doi:10.1109/IPIN.2010.5646270
- Ceylan, A. (2009). Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey. *Scientific Research and Essays*, 4(12), 1438–1444. Erişim adresi: <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-full-text-pdf/E6CB7F919837>
- Charalampous, E., Psimoulis, P., Guillaume, S., Spiridonakos, M., Klis, R., Bürki, B., ... 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. doi:10.1007/s12518-014-0150-z
- Deniz, R. (2014). *CCD kameralar ile astrojeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi*. TÜBİTAK 1001 Projesi Sonuç Raporu (No: 111Y125), Ankara, Türkiye.
- Featherstone, W.E. ve Rüeger, J.M. (2000). The importance of using deviations of the vertical in the reduction of terrestrial survey data to a geocentric datum. *Australian Surveyor*, 45(2), 46–61. (Erratum in The Australian Surveyor 47(1), 7). doi: 10.1080/00050354.2000.10558815
- Featherstone, W.E., Kirby, J.F., Hirt, C., Filmer, M.S., Claessens, S.J., Brown, N.J., ... Johnston, G.M. (2011). The AUSGeoid09 model of the Australian height datum. *Journal of Geodesy*, 85(3), 133–150. doi:10.1007/s00190-010-0422-2
- Featherstone, W.E., McCubbine, J.C., Brown, N.J., Claessens, S.J., Filmer, M.S. ve Kirby, J.F. (2017). The first Australian gravimetric quasigeoid model with location-specific uncertainty estimates. *Journal of Geodesy*, 92(2), 149–168. doi:10.1007/s00190-017-1053-7
- Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., Bastian, U., Bien, R., Burkhardt, G., ... Röser, S. (1988). Fifth fundamental catalogue (FK5). part 1. the basic fundamental stars. *VeARI*. 32, 1–106.
- Gates, M., Zotti, G., Wolf, A. ve Gerdes, B. (2016). *Stellarium: User Guide*. Samurai Media Limited.
- Geosystems, L. (2004). *GeoCOM Reference Manual*. Heerbrugg, Switzerland.
- Gessler, J. (1975). Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen. *Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover* Nr. 60.
- Guillaume, S., Bürki, B., Griffet, S. ve Durand, H.M. (2012, May). QDaedalus: Augmentation of total stations by CCD sensor for automated contactless high-precision metrology. In FIG Working Week, Rome, Italy. Erişim adresi: http://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts09i/TS09i_guillaume_buerki_et_al_6002.pdf
- 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. doi:10.3929/ethz-a-010549038
- Guillaume, S., Clerc, J. ve 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. ve Kistler, M. (2016, March). Contribution of the image-assisted theodolite system QDaedalus to geodetic static and dynamic deformation monitoring. In 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria. Erişim adresi: http://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms_pdf/nonreviewed/JISDM_2016_submission_66.pdf
- Halıcıoğlu, K. (2015). *Sayısal zenit kamera sistemi ile astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Halıcıoğlu, K., Deniz, R. ve 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. doi:10.1080/17538947.2016.1189612
- Hauk, M., Hirt, C. ve Ackermann, C. (2017). Experiences with the QDaedalus system for astrogeodetic determination of deflections of the vertical. *Survey Review*, 49(355), 294–301. doi:10.1080/00396265.2016.1171960
- Hirt, C. (2004). *Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung* (PhD Thesis). Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 253. Erişim adresi: <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 ve Astrophysics*, 459(1), 283–90. doi: 10.1051/0004-6361:20065485
- Hirt, C. ve 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. Erişim adresi: http://ddfe.curtin.edu.au/gravitymodels/ERTM2160/pdf/Hirt_Buerki2006_status_geodetic_astronomy.pdf
- Hirt, C. ve 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. doi:10.1007/s00190-007-0173-x
- 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. doi:10.1007/s00190-009-0354-x
- Hirt, C., Bürki, B., Somieski, A. ve Seeber, G. (2010a). Modern determination of vertical deflections using digital zenith cameras. *Journal of Surveying Engineering*, 136(1), 1–12. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000009
- Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B. ve Sternberg, H. (2010b). 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). doi:10.1029/2010JD014067
- Hirt, C., Schmitz, M., Feldmann-Westendorff, U., Wübbena, G., Jahn, C.H. ve Seeber, G. (2011). Mutual validation of GNSS height measurements and high-precision geometric-astronomical leveling. *GPS Solutions*, 15(2), 149–59. doi:10.1007/s10291-010-0179-3
- 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. doi:10.1179/175227012X13455477714906
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R. ve Rexer, M. (2013). New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field. *Geophysical research letters*, 40(16), 4279–83. doi:10.1002/grl.50838
- Hirt, C. ve Wildermann, E. (2018). Reactivation of the Venezuelan vertical deflection data set from classical astrogeodetic observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 97–107. doi:10.1016/j.jsames.2018.05.003
- Jekeli, C. (1999). An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models. *Journal of Geodesy*, 73(1), 10–22. doi:10.1007/s001900050213

- Klūgel, T., Māhler, S. ve Schade, C. (2011). Ground survey and local ties at the Geodetic Observatory Wettzell. In 17th Workshop on Laser Ranging, Bad Kōtzting, Germany.
- Knoblach, S. (2009). Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstūtzten Hāngetachymeters (PhD Thesis). Techn. Univ. Dresden, Dresden, Gemany.
- OpenStreetMap contributors. (2015). Planet dump [Data file from December, 2020 of database dump]. Retrieved from <https://planet.openstreetmap.org>
- Özlūdemir, M.T. (2015). *Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel geoid modellemesi*. TUBITAK 1001 Projesi Sonuē Raporu (No: 115Y237), Ankara, Tūrkiye.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4). doi:10.1029/2011JB008916
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve 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. doi:10.1002/jgrb.50167
- Pick, M., Picha, J. ve Vyskoēil, V. (1973). Theory of earth's gravity field. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- QGIS Development Team, (2020). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Schack, P., Hirt, C., Hauk, M., Featherstone, W.E., Lyon, T.J. ve 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), 1143–53. doi:10.1007/s00190-017-1107-x
- Seeber, G. (2003). Satellite Geodesy. 2nd edition. Berlin: Walter de Gruyter.
- Sigl, R. (1991). Geodātische Astronomie. Wichmann, 4. Auflage.
- Smith, D.A., Holmes, S.A., Li, X., Guillaume, S., Wang, Y.M., Būrki, B., ... 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. doi:10.1007/s00190-013-0653-0
- Soler, T., Carlson, Jr A.E. ve Evans, A.G. (1989). Determination of vertical deflections using the Global Positioning System and geodetic levelling. *Geophysical Research Letters*, 16(7), 695–698.
- Somieski, A.E. (2008). Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece (PhD Thesis). ETH Zurich, Switzerland. doi:10.3929/ethz-a-005710420
- Torge, W. ve Mūller, J. (2012). Geodesy. 4th edition. Berlin: De Gruyter.
- Tōth, G. ve Vōlgyesi, L. (2017). Data processing of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering*, 5(8), 147–64. Eriēim adresi: http://volgyesi.hotserver.hu/gravity/miskolc_2016.pdf
- Tōth, G. ve Vōlgyesi, L. (2018). Experiences of QDaedalus measurements. *Geosciences and Engineering*, 6(9), 75–86.
- Tūren, Y. ve Ūstūn, A. (2013, Mayıs) Astrojeodezik ēekūl Sapması Bileēenlerinin ve Jeoit Yūkseklk Farklarının Kern DKM3A ile Belirlenmesi: Konya Őrneēi. TMMOB Harita ve Kadastro Mūhendisleri Odası, 14. Tūrkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- u-blox AG (2015). NEO-6T/LEA-6T product summary
- van Westrum, D., Ahlgren, K., Hirt, C. ve Guillaume, S. (2021). A Geoid Slope Validation Survey (2017) in the rugged terrain of Colorado, USA. *Journal of Geodesy*, 95(1), 1-19. doi:10.1007/s00190-020-01463-8
- Vittuari, L., Tini, M.A., Sarti, P., Serantoni, E., Borghi, A., Negusini, M. ve Guillaume, S. (2016). A comparative study of the applied methods for estimating deflection of the vertical in terrestrial geodetic measurements. *Sensors*, 16(4), 565. doi:10.3390/s16040565

- Volařík, T., Machotka, R., Kuruc, M., Puchrik, L. ve Jurčík, J. (2013). Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10(172), 437–442.
- Wang, Y.M., Becker, C., Mader, G., Martin, D., Li, X., Jiang, T., ... 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), 1261–1276. doi:10.1007/s00190-017-1022-1
- Wielen, R., Schwan, H., Dettbarn, C., Lenhardt, H., Jahreiss, H. ve Jährling, R. (1999). Sixth Catalogue of Fundamental Stars (FK6). Part I. Basic fundamental stars with direct solutions. Veröffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg, Germany.
- Wiesenhofer, B. ve Kühtreiber, N. (2007). Combination of Deflections of the Vertical and Gravity Anomalies in Difficult Geological Regions, A Case Study. In Proceedings 1st International Symposium of the IGFS "Gravity Field of the Earth", *Harita Dergisi*, Özel sayı 18:108–12.
- Willi, D. ve Guillaume, S. (2019). Calibration of a Six-Axis Robot for GNSS Antenna Phase Center Estimation. *Journal of Surveying Engineering*, 145(4), 04019016. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000291
- Wissel, H. (1982). *Zur Leistungsfähigkeit von transportablen zenitkameras bei der lotabweichungsbestimmung*. Wissen. Arb. Fach. Vermessungswesen Univ. Hannover Nr. 107.