

Türkiye'deki Astrojeodezik Çalışmaların Dünü, Bugünü ve Yarını (Astrogeodetic Studies in Türkiye: Past, Present and Future)

Müge ALBAYRAK^{1,2,*}, Fuat CANSEVER^{2,3}, M. Tevfik ÖZLÜDEMİR⁴,
Kerem HALICIOĞLU⁵, Sébastien GUILLAUME⁶

¹Oregon State University, Civil & Construction Engineering, Corvallis, OR, ABD

²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

³Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü, Bingöl Kadastro Müdürlüğü, Bingöl, Türkiye

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

⁵Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Hannover, Almanya

⁶Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yersel Mühendislik Enstitüsü,

Geomatik Mühendisliği, Yverdon-les-Bains, İsviçre

*muge.albayrak@oregonstate.edu

Geliş Tarihi (Received): 12.03.2024

Kabul Tarihi (Accepted): 15.07.2024

ÖZ

Türkiye'de astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin elde edilmesi için gerçekleştirilen gözlemler, 1942 yılında klasik optik-mekanik astrojeodezik aletlerle başlamıştır. Teknolojinin ilerlemesine paralel olarak geliştirilen sayısal astrojeodezik sistemler, astrojeodezik gözlem süresini kısaltmış, gözlemlenen çekül sapması bileşenlerinin hassasiyetini arttırmış ve optik-mekanik aletlerdeki gözlemcinin deneyimine bağlı olma gereksinimini azaltmıştır. Bu iyileştirmeler sayesinde çekül sapması bileşenlerinin kullanım alanları çağın gereksinimlerine daha iyi yanıt verebilecek şekilde genişlemiştir. Geçmişte çekül sapması bileşenleri ağırlıklı olarak ülke nirengi ağlarının yönlendirilmesi, koordinat dönüşümü, açı ve doğrultuların indirgenmesi, jeoit modelleme gibi amaçlarla kullanılmaktayken, günümüzde resmi jeoit modellerinin veya yükseklik sistemlerinin olası noksanlıklarını göstermek, Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğrulanmasını sağlamak gibi birçok farklı görev de üstlenmiştir. Bu çalışmanın amacı, Türkiye'deki astrojeodezik çalışmaların kronolojik gelişimini incelemek ve en son teknolojiler ile gözlemlenen astrojeodezik çekül sapması verileri ile gelecekte ne tür çalışmalar gerçekleştirilebileceğine ışık tutmaktır.

Anahtar Kelimeler: Astrojeodezik Çekül Sapması, Astrojeodezik Gözlemler, QDaedalus, TG-20

ABSTRACT

Observations carried out to obtain astrogeodetic deflections of the vertical components in Türkiye began in 1942 with classical optical-mechanical astrogeodetic instruments. Thanks to digital astrogeodetic systems developed in parallel with the advancement of technology, astrogeodetic observation times have been shortened, the precision of observed deflections of the vertical components has improved, and the dependence on the observer's skill with optical-mechanical instruments has decreased. With these improvements to the systems, the usage of deflections of the vertical components has expanded considerably in line with the requirements of the times. In the past,

deflections of the vertical components were mainly used for purposes such as orientating country triangulation networks, coordinate transformation, reduction of angles and directions, and geoid modelling. However, today, they are used in many different tasks, such as showing possible deficiencies of official geoid models or height systems and ensuring the verification of Global Geopotential Models (GGMs). The aim of this study is to examine the chronological development of astrogeodetic studies in Türkiye and to shed light on potential future studies using astrogeodetic deflections of the vertical data observed with the latest technologies.

Keywords: Astrogeodetic Deflections of the Vertical, Astrogeodetic Observations, QDaedalus, TG-20

1. GİRİŞ

Astrojeodezik çekül sapması (ϵ), elipsoidal geometriyi temsil eden bir referans elipsoit normal ile bir yer noktasındaki gravite vektörünün doğrultusu arasındaki açısal farktır (Jekeli, 1999; Featherstone ve Rüeger, 2000). Çekül sapması verisi; nivelman, gravite vb. jeodezik ve jeofizik verilerden bağımsızdır. Dolayısıyla, çekül sapması verisinin herhangi bir sapma olmadan diğer verilerle karşılaştırılması gibi bir üstünlüğü bulunmaktadır. Bu sayede, günümüzde jeodezik, gravimetrik, hibrit vb. farklı veri setleri kullanılarak tanımlanan jeoit modellerinin ve yükseklik sistemlerinin doğruluklarının belirlenmesinde (kontrol edilmesinde) çekül sapması verisi öncelikli olarak tercih edilmektedir. Astrojeodezik çekül sapması verilerinin doğrudan kullanılmasıyla elde edilen yüksek doğrulukla tanımlanan İsviçre (İsviçre Jeoit Modeli 2004 CHGeo2004) ve Avusturya ulusal jeoit modelleri de mevcuttur (Marti, 2007; Kühtreiber, 2002).

Türkiye'de astrojeodezik gözlemlerle elde edilen veriler, Ulusal Nirengi Ağı'nın oluşturulmasından astrojeodezik yöntemlerle jeoit

belirlemeye kadar birçok farklı uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Alp, 1993; Ayan, 1976; Gürkan, 1978; Alp, 1993). Ayrıca, çekül sapması verileri, Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğruluğunun kontrolü veya doğrulanmasında da başvurulan bir veri setidir. Örneğin, Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından İstanbul'da gözlemlenen çekül sapması verisi, Earth Gravitational Model *EGM2008* ve Global Gravity Model *GGMplus*'ın İstanbul'daki doğruluğunun belirlenmesinde kullanılmıştır (Pavlis, Holmes, Kenyon ve Factor, 2012; Hirt ve diğerleri, 2013). Bahsedilen bu astrojeodezik çalışmalar incelendiğinde, Türkiye'nin astrojeodezi alanında köklü bir geçmişe sahip olduğu ve günümüzde de bu geleneğin devam ettiği görülmektedir.

Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar, 1942 yılında klasik optik-mekanik aletlerle başlamış ve teknolojinin gelişimine paralel olarak sürekli güncellenmiştir. Ülkemizde 1942–2023 yılları arasında Wild T3 astronomik teodolit, Wild T4 üniversal teodolit, DKM 3-A gibi optik-mekanik aletler; Astrojeodezik Kamera Sistemi AKS ve robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus astrojeodezik sistemi gibi sayısal astrojeodezik ölçme aletleri kullanılmıştır. Bu sistemlerden AKS, bir Sayısal Zenit Kamera (SZK) olmakla beraber, ülkemizde geliştirilen ilk astrojeodezik sistemdir (Halicioğlu, Deniz ve Özener, 2016). QDaedalus sistemi ise İsviçre'den temin edilerek İstanbul'da kullanılmıştır (Guillaume, Bürki, Griffet ve Durand, 2012). SZK ve robotik elektronik takeometre temelli astrojeodezik sistemler, günümüzde en yaygın ve en güncel olarak kullanılan sistemlerdir (bkz Bölüm 4). Her iki sistemin de Türkiye'de kullanılması, astrojeodezik çalışmalar konusunda ülkemiz jeodezisinin günceli yakaladığının da bir göstergesidir.

Ülkemizde 80 yılı aşkın bir süredir gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmaların devam ettirilmesi ve özellikle de jeoit modelleme çalışmalarına yeni bir ivme kazandırılması oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle, 2020 yılında geliştirilen Türkiye Jeoit Modeli-2020'nin TG-20 doğruluğunun belirli bölgelerde test veya kontrol edilmesi için QDaedalus sistemi vasıtasıyla astrojeodezik gözlem kampanyası gerçekleştirilmesi faydalı olacaktır (Yıldız ve diğerleri, 2021). Bu makalede, geçmişten günümüze Türkiye'de gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar ele alınarak, ilerde QDaedalus sistemi ile ülkemizde öncelikli olarak ne tür çalışmalar yapılabileceği tartışılmaktadır.

2. ASTROJEODEZİK ÇEKÜL SAPMASI BİLEŞENLERİNİN HESAPLANMASI

Astrojeodezik çekül sapması geleneksel olarak, astrojeodezik cihazlarla yıldızlara gözlem yapılarak, astronomik enlem ve boylamın hesaplanması ile belirlenmektedir. Gözlemlenen çekül sapması mutlak ve bağıl çekül sapması olarak iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Mutlak çekül sapması, yer merkezli bir referans sistemini (örneğin, WGS84, ITRF2020) ifade ederken, bağıl çekül sapması, yerel bir yatay jeodezik referans sistemini ve buna karşılık gelen Yer merkezli olmayan referans elipsoidini ifade etmektedir (Featherstone ve Olliver, 2013; Featherstone ve Goyal, 2022). Bu sınıflandırma, kullanılan astrojeodezik aletlerden bağımsızdır. Örneğin, Türkiye'de geçmişte kullanılan, Wild T4 üniversal teodoliti veya DKM 3-A gibi astrojeodezik aletler ile günümüzde mutlak çekül sapması bileşeni gözlemlenebilir. Bununla birlikte, ülkemizdeki GPS temelli sayısal astrojeodezik uygulamaların yaygınlaşmasından önce, optik-mekanik aletlerle yapılan gözlemlerde bağıl çekül sapması bileşenleri elde edilmiştir.

Mutlak veya bağıl çekül sapması bileşenlerinin elde edilmesi için jeodezik ve astronomik koordinat bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Günümüzde, mutlak çekül sapması elde etmek için gerekli jeodezik enlem (φ) ve boylam (λ) Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (Global Navigation Satellite System GNSS) ile elde edilirken; astronomik enlem (Φ) ve boylam (Λ), GNSS ve yük bağlaşımlı aygıt (Charged Coupled Device-CCD) teknolojilerinin entegre edildiği sayısal astrojeodezik sistemler (SZK, QDaedalus vb.) ile gözlemlenmektedir. Jeodezik ve astrojeodezik gözlemler sonucunda, Kuzey-Güney (ξ) ve Doğu-Batı (η) astrojeodezik çekül sapması bileşenleri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır (Robbins, 1951; Pick, Picha ve Vyskočil, 1973; Heiskanen ve Moritz, 1984):

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

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

Astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin gözlemlenmesi için gerekli donanım ve yazılımlar sürekli güncellenerek iyileştirilirken, (1) ve (2) eşitliğinde görüldüğü gibi temel prensip korunmuştur. Çekül sapması bileşenlerinin belirlenmesi için gerekli işlem adımları ve teorik bilgiler, Türkçe olarak, Halicioğlu (2015) tarafından detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3. TÜRKİYE'DE OPTİK-MEKANİK ALETLER İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar, 1942 yılında optik-mekanik aletler ile başlamıştır. 1942 ile 1990 yılları arasında tüm ülkeyi kapsayacak ölçekte planlanan ulusal astrojeodezik gözlemler Harita Genel Müdürlüğü tarafından Wild T3 astronomik teodoliti veya Wild T4 universal teodoliti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık yarım asır boyunca Türkiye genelinde aktif olarak kullanılan optik-mekanik aletler, daha sonraki yıllarda küçük ölçekli yerel çalışmalarda kullanılmıştır.

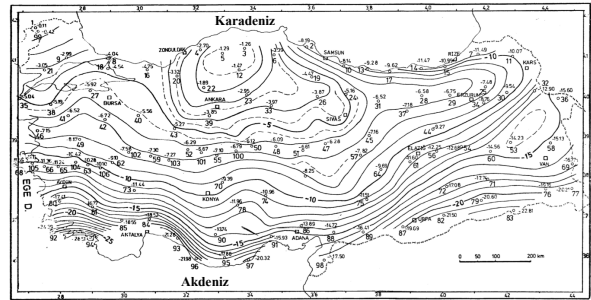
Türkiye'de astrojeodezik çalışmalar ilk olarak Ulusal Nirengi Ağı'nın yönlendirilmesi amacı ile başlatılmıştır. Bu amaçla, 1942 yılından 1953 yılına kadar ülke genelinde 98 adet I'inci derece noktada Wild T4 universal teodoliti kullanılarak astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır (Şerbetçi, 1999). Bu gözlem döneminde Türkiye'de bilgisayar teknolojisinin yetersiz olması nedeniyle, bu gözlemler ABD'de Askeri Harita Servisi'ndeki (Army Map Services) bir UNIVAC bilgisayar tarafından dengelenmiştir. Gözlem verileriyle yapılan bu dengeleme sonucunda Türkiye Ulusal Datumu 1954 (TUD-54) hesaplanmıştır (Alp, 1993).

1953–1961 yılları arasında, Wild T4 universal teodoliti kullanılmaya devam edilerek, Türkiye'nin Doğu-Batı doğrultusundaki astrojeodezik jeoit kesitini belirlemek amacıyla I, II, III ve IV'üncü derece nirengi noktalarından oluşan 21 noktada astronomik enlem ve boylam gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktalardan sadece iki tanesinde enlem ve boylam gözlemleri ile birlikte azimut gözlemi de yapılmıştır (Alp, 1993).

1970'li yıllarda astronomik ölçülere dayalı astrojeodezik jeoit belirleme çalışmaları başlamıştır. Bir yandan astrojeodezik gözlemlere devam edilirken, öte yandan geçmiş ve yeni verilerle astrojeodezik jeoit hesaplamaları sürdürülmüştür. 1977–1990 yılları arasında Wild T3 astronomik teodoliti ile uyumlu usturlap cihazı kullanılarak gözlemler gerçekleştirilmiştir (Ata, 2007). 1977–1979 yılları arasındaki gözlemlerde 30 farklı noktada sadece astronomik enlem ve boylam gözlemleri; 1979–1990 yılları arasında ise 39'unda azimut gözlemi de yapılmış olmak üzere toplam 170 farklı noktada astronomik enlem ve boylam gözlemleri tamamlanmıştır. 1978–1990 yılları arasındaki gözlemler; Akdeniz bölgesinden başlayarak saat ibresi istikametinde yatay kontrol ağındaki poligonların sıklaştırılması ile oluşturulan—astronomik enlem, boylam ve

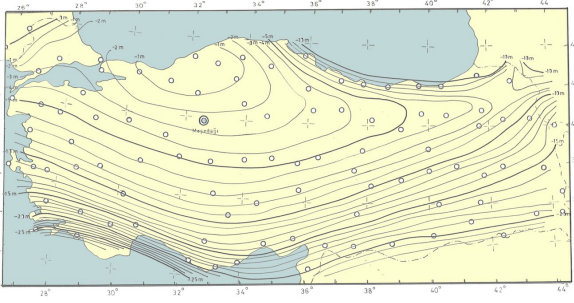
azimutu bilinen yeni Laplace noktalarında yapılmıştır. Astrojeodezik jeoit hesabında ise enterpolasyon yöntemlerinden faydalanılarak gözlem yapılmayan noktalarda çekül sapması bileşenlerinin kestirimleri yapılmıştır (Alp, 1993).

Türkiye'nin ilk geoidi, 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi, 1942–1976 yılları arasındaki astrojeodezik gözlem verileri içinden seçilen 106 Laplace noktası kullanılarak Ayan (1976) tarafından hesaplanmıştır (Şekil 1). Bu jeoit sadece astrojeodezik çekül sapması ölçüleri ile hesaplanmıştır. Geoidin datum başlangıç noktası Ankara-Meşedağ kabul edilmiş, datum olarak 1950 Avrupa Datumu (European Datum ED50) ve dolayısıyla referans elipsoidi olarak 1924 Uluslararası Hayford elipsoidi kullanılmıştır. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi hesabında, eşdeğer ondülasyon eğrileri belirlenirken kübik parabol ile enterpolasyon yöntemi kullanılmış ve çekül sapması noktalarındaki jeoit yükseklikleri, üç ayrı model ağı dengeleme sonuçlarının ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Bu jeoit, Avrupa geoidine bağlanmak üzere 106 Laplace noktasının jeoit yükseklikleri -3.85 metre kaydırılarak, Meşedağ noktası jeoit ondülasyonuna uygun hale getirilmiştir. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi, diğer jeoitlerle karşılaştırıldığında en iyi uyuşmanın Levallois-Monge geoidi (1975 Avrupa Geoidi) ile olduğu ve aralarındaki farkın genellikle 1 metrenin altında olduğu belirlenmiştir. Ayrıca jeoit belirleme doğruluğu ± 1.5 metre olarak hesaplanmıştır (Ayan, 1976).



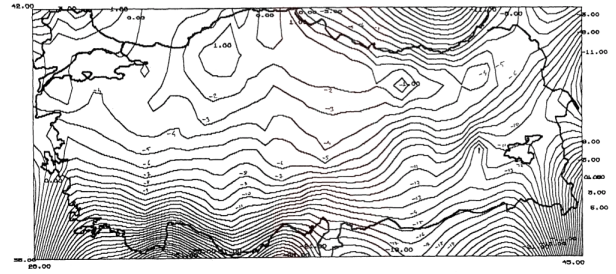
Şekil 1. 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi (Ayan, 1976).

Astrojeodezik jeoit belirleme alanında gerçekleştirilen ikinci çalışma ise Gürkan (1978) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 98 adet Laplace noktasında astrojeodezik çekül sapması verisi kullanılarak, iki değişkenli polinom yardımıyla 1978 Türkiye Astrojeodezik Geoidi hesaplanmıştır (Şekil 2), ancak bu jeoit için bir doğruluk değeri (standart sapma, karesel ortalama vb.) verilmemiştir (Gürkan, 1978).



Şekil 2. 1978 Türkiye Astrojeodezik Geoidi (Harita, Halıcıoğlu (2015, s. 8) tarafından Gürkan (1978) verileriyle oluşturulmuştur).

Türkiye'de gerçekleştirilen üçüncü astrojeodezik jeoit modelleme çalışması, Alp (1993) tarafından ilk kez astrogravimetrik nivelman yöntemi ile hesaplanan Türkiye Astrojeodezik Geoidi 1994 (TAG-94) çalışmasıdır (Şekil 3). Astrogravimetrik nivelman yöntemi, özellikle dağlık alanlarda ve uzak noktalar arasındaki yatay mesafelerin fazla olması nedeniyle verilerin yatay doğrultuda doğrusal olmayan değişimler göstermesi sorunu çözmek amacıyla tercih edilmiştir. TAG-94 çalışmasında, Türkiye genelinde 1942–1990 yılları arasında gözlemlenen 319 astronomik enlem ve boylam verisi kullanılmıştır. 1977–1979 yılları arasında astronomik noktaların sıklaştırılmasına katkı sağlayan ancak diğer ölçülere göre duyarlılığı düşük olan astrolap ölçüleri (23 astrolap ölçüsü) bu veri setine dahil edilmediğinden 297 astronomik enlem ve boylam verisi kullanılmıştır. TAG-94 için 98, 255, 274, 278 ve 297 Laplace noktasından oluşan beş farklı nokta kümesi oluşturulmuştur. Her nokta kümesinden oluşturulan farklı jeoit modelleri karşılaştırılmıştır. 98 Laplace noktası kullanılarak oluşturulan astrojeodezik jeoit modeli diğer çözümlerle uyumlu çıkmamış, bu uyumsuzluğun nokta sayısının az olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Astrolap ölçülerinin dahil edilmediği 255 noktalı astrogravimetrik jeoit modeli en uygun sonuçları vermiştir. Ayrıca Avrupa geoidine bağlanmak amacıyla Laplace noktalarının jeoit yükseklikleri Meşedağ noktası jeoit ondülasyonuna, 1976 Türkiye Astrojeodezik Geoidi'ndeki gibi, -3.85 metre kaydırılmıştır. Meşedağ noktasından uzaklaştıkça, standart sapma değerlerinin arttığı gözlemlenmiş ve özellikle Güneydoğu ve Akdeniz bölgelerindeki nokta sayısının azlığı, bu bölgelerdeki standart sapmanın ± 1.5 metrenin üzerine çıkmasına neden olmuştur (Alp, 1993).



Şekil 3. 1994 Türkiye astrojeodezik geoidi (Alp 1993, s. 86).

Türkiye'yi kapsayan ulusal ölçekteki bahsedilen çalışmalar dışında, 1998 ve 2010 yıllarında Kern DKM 3-A universal teodoliti ve OTR-6 kronografi kullanılarak astrojeodezik ağ oluşturmak amacıyla Konya'da iki farklı astrojeodezik gözlem kampanyası gerçekleştirilmiştir. 1998 yılındaki çalışmada, Acar (1999) tarafından Selçuk Üniversitesi Alaaddin Keykubat Kampüsü'nde, Kampüs GPS Test Ağı'ndaki 6 noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Test ağındaki gözlemler sonucunda, Kuzey-Güney çekül sapması bileşenlerinin (ξ) -12.49" ile 3.93" arasında, Doğu-Batı çekül sapması bileşenlerinin (η) ise -13.93" ile -2.83" arasında değiştiği belirlenmiştir. 2010 yılındaki çalışmada ise, 6 pilyeden oluşan bir GPS deformasyon ağında gözlemler yapılmıştır. Türen ve Üstün (2016) tarafından gerçekleştirilen gözlemlerde astronomik enlem ve boylam hassasiyeti, sırasıyla 0.3" ve 1" olarak belirlenmiştir. Astronomik boylamın astronomik enlem kadar hassas olmamasının sebebinin, zaman senkronizasyonunda yaşanan zorluklar olduğu yazarlar tarafından açıklanmıştır. Ayrıca, sonuç ürün olan çekül sapmalarının karesel ortalama hatasını 0.59" ve bu altı noktada astronomik nivelman ile hesaplanan jeoit ondülasyonunun km'deki karesel ortalama hata değerini ± 18 ppm olarak belirlemişlerdir.

4. TÜRKİYE'DE DİJİTAL ASTROJEODEZİK SİSTEMLER İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, İstanbul'da kullanılan iki farklı sayısal astrojeodezik sistem (Türkiye'de geliştirilen zenit kamera temelli Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS) ve İsviçre'den temin edilen robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi) ile gerçekleştirilen çalışmalardan bahsedilmektedir.

a. Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS)

Astrojeodezide optik sistemlerdeki ölçme ve veri değerlendirme sürecindeki zorluklar, bu alanda çalışan araştırmacıları fotoğrafik zenit kameraların geliştirilmesine yönlendirmiştir. Daha sonrasında ise, CCD algılayıcıların icadı ile milenyum başlangıcında ilk sayısal sistemler SZK'lar geliştirilmiştir. Standart bir SZK'nın ana bileşenleri; teleskop, CCD kamera, eğimölçer, GPS alıcısı ve anteni, odaklayıcı, sistemi taşıyan bir altyapı ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Almanya ve İsviçre'de başarıyla geliştirilen ilk SZK'lar, sırasıyla Taşınabilir Zenit Kamera 2-Dijital (Transportable Zenith Camera 2-Digital *TZK2-D* (Hirt, 2004; Hirt, Bürki, Somieski ve Seeber, 2010) ve Dijital Astronomik Sapma Ölçme Sistemi (Digital Astronomical Deflection Measuring *DIADEM* (Bürki, Müller ve Kahle, 2004; Somieski, 2008) olarak isimlendirilmiştir. Bu iki sistemin başarısı, diğer ülkelerde de benzer SZK'ların geliştirilmesi için teşvik edici olmuştur, ancak dünya genelinde geliştirilen SZK sayısı hala oldukça sınırlıdır. Almanya'da ve İsviçre'de geliştirilen SZK'lar dışında, Letonya, Çin, Türkiye, ABD ve Rusya SZK geliştirmiştir (Abele ve diğerleri, 2012; Tian ve diğerleri, 2014; Halıcıoğlu, 2015; Hughes ve diğerleri, 2019; Murzabekov, Fateev, Pruglo ve Ravdin, 2022). Son on yılda arazi çalışmalarında en aktif kullanılan SZK'lar ise İsviçre ve Letonya'da geliştirilen sistemlerdir. Geliştirilen her bir SZK, eşsiz olmakla beraber; İsviçre'de geliştirilen *DIADEM* daha sonra Kompakt Dijital Astrometrik Kamera (COmpact Digital Astrometric Camera *CODIAC*) olarak güncellenmiştir ve iki adet (Mavi ve Kırmızı *CODIAC*) üretilmiştir (Guillaume, 2015). Letonya'da geliştirilen *VERTIVAL* by STARS *VESTA* ise dört adet üretilmiştir (Varna ve diğerleri, 2023). Bahsedilen diğer SZK'lar sadece bir adet üretilmiştir.

Halıcıoğlu (2015) tarafından, Türkiye'de geliştirilen ilk SZK, Astrojeodezik Kamera Sistemi 1 *AKS1* olarak isimlendirilmiştir (Şekil 4a). *AKS1*, TÜBİTAK 111Y125 numaralı "CCD kameralar ile astrojeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi" projesi desteğiyle geliştirilmiştir (Deniz, 2014). Hassasiyetini (presizyon) belirlemek için gerekli test çalışmaları, Boğaziçi Üniversitesi (BÜ) Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (KOERI) kampüsünde bulunan, geçmişte Danjon astrolabı kullanılan, Kandilli test istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Danjon-astrolabı (veya -usturlabı), astronomik enlem ve boylamı aynı anda belirlemeye yarayan yüksek presizyonlu bir astrojeodezik alettir. Kandilli test istasyonunun seçilmesinin temel nedeni, İstanbul

Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve BÜ işbirliği ile gerçekleştirilen iki TÜBİTAK projesinin uygulama alanının BÜ Kandilli yerleşkesi olarak belirlenmiş olmasıdır. Projeler kapsamında zenit kamera gözlemlerine uygun olarak modernize edilmiş olan test istasyonu, mimari olarak yıldız gözlemleri için tasarlanmış olduğundan ve proje ekibinin gözlemlere sürekli erişimini mümkün kılması nedeniyle yer seçiminde belirleyici olmuştur. Türkiye'nin ilk zenit kamera gözlem istasyonu olarak 2012–2017 yılları arasında akademik araştırmalara hizmet veren bu laboratuvar, BÜ Kandilli kampüsünün yapılaşma ve çevre düzenleme planları kapsamında yıkılarak, yeşil alan olarak kullanıma açılmıştır. Kandilli istasyonundaki gözlemler sonucunda, astronomik enlem (Φ) ve boylam (Λ) belirleme presizyonu sırasıyla $\pm 0.19''$ ve $\pm 0.28''$ olarak belirlenmiştir (Halıcıoğlu, 2015).

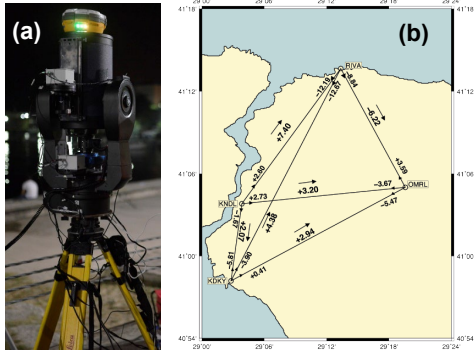
AKS1'in doğruluğu ise, İstanbul'un Anadolu yakasında dört noktadan oluşan (Kandilli test noktasıda dahil) bir test ağında belirlenmiştir (Şekil 4b). İstanbul'daki test ağında, GPS ve Nivelman ölçülerinden elde edilerek dengelenen jeoit yükseklik farkları ile astronomik nivelman yöntemi ile hesaplanan jeoit yükseklik farkları karşılaştırılmıştır ve bu karşılaştırmanın neticesinde *AKS1*'in doğruluğu tanımlanmıştır. *AKS1*'in astronomik enlem ve boylam belirleme presizyonu yaklaşık $\pm 0.3''$ olarak hesaplanmıştır. Test ağında, çekül sapmalarından hesaplanan jeoit yükseklik farklarının (ΔN) dengelenmesinden, birim ölçünün ($S = 1$ km için) karesel ortalama hatası (m_0):

$$P_{\Delta N} = 1/S_{km^2} \text{ için } m_0 = \pm 2.9 \text{ mm/km} \quad (3)$$

olarak hesaplanmıştır. Kandilli istasyonunun jeoit yüksekliğine bağlı olarak, çekül sapmalarından hesaplanan jeoit yükseklik farklarının (ΔN) en küçük kareler yöntemiyle dengelenmesinden ise birim ölçünün karesel ortalama hatası (m_0):

$$P_{\Delta N} = 1/S_{km^2} \text{ için } m_0 = \pm 3.6 \text{ mm/km} \quad (4)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerler sistemin yaklaşık doğruluğu olarak kabul edilmiştir (Halıcıoğlu, 2015).



Şekil 4. (a) Astrojeodezik Kamera Sistemi 1 (AKS1) (Halıcıoğlu, 2015, s. 69), (b) AKS1'in doğruluğunu belirlemek için oluşturulan test ağı (Halıcıoğlu, 2015, s. 99).

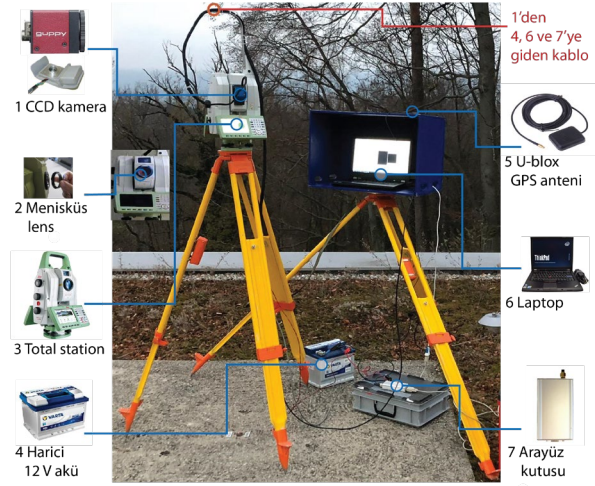
İsviçre'de geliştirilen SZK sistemleri (DIADEM, CODIAC) gibi, Türkiye'de geliştirilen AKS de güncellenerek, modernize edilmiştir. AKS1'in güncellenmesi gerektiğinin en önemli göstergesi, hassasiyeti ve doğruluğu belirlenirken karşılaşılan sorunlar (gözlem süresinin uzun olması, daha taşınabilir bir sistem geliştirme gereksinimi, düzeçleme sisteminin iyileştirilmesi vb.) olmuştur. TÜBİTAK 115Y237 numaralı "Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel jeoit modellemesi" projesi desteği ile gerekli donanım ve yazılım güncellemeleri yapılmıştır (Özlüdemir, 2018). Bu güncellemelerin ardından, kullanımı daha kolay ve ölçüm süresi yaklaşık olarak yarı yarıya azalan sistem (gözlem süresinin 3-4 saatten, 1-2 saate inmesi), AKS2 olarak yeniden isimlendirilmiştir (Şekil 5). AKS2'nin hassasiyetini belirlemek için İTÜ kampüsünde tesis edilen İTÜ test noktasında beş farklı gece boyunca gözlem gerçekleştirilerek, AKS2'nin hassasiyeti 0.3" olarak hesaplanmıştır (Özlüdemir, 2018; Albayrak ve diğerleri, 2019). AKS2'nin doğruluğu ise QDaedalus sistemi ile karşılaştırılarak belirlenmiştir (QDaedalus sistemi için bkz bir sonraki bölüm: Bölüm 4.b).



Şekil 5. Astrojeodezik Kamera Sistemi 2 (AKS2) (Albayrak ve diğerleri, 2019, s. 7).

b. QDaedalus Sistemi

SZK'ların geliştirilmesindeki zorluklar ve sistemin ağırlığı, özellikle dağlık bölgelerde kullanılamaması gibi nedenler, SZK'ya alternatif olarak robotik elektronik takeometre temelli astrojeodezik sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. İlk geliştirilen robotik elektronik takeometre temelli sistem, İsviçre'de geliştirilen ve Şekil 6'da gösterilen QDaedalus sistemidir (Guillaume ve diğerleri, 2012). İkinci sistem ise ABD'de geliştirilen elektronik takeometre astrojeodezik kontrol sistemidir (Total Station Astrogeodetic Control System TSACS (Hardy ve diğerleri, 2021)). Bu sistemlerden QDaedalus sistemi, Türkiye'de 2018 yılında 6 ay boyunca kullanılmıştır (Özlüdemir, 2018; Albayrak, 2020).



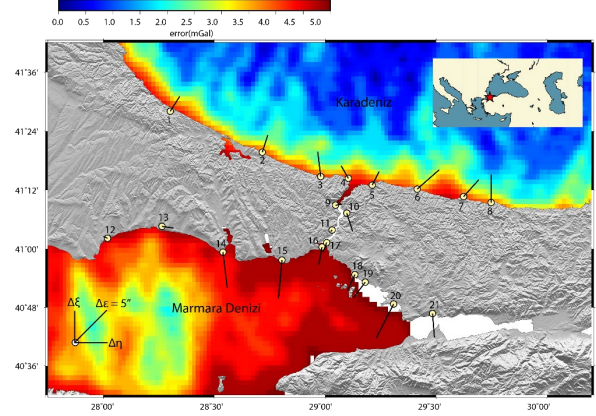
Şekil 6. QDaedalus sistemi (Albayrak, Willi ve Guillaume, 2023, s. 250).

QDaedalus sistemi, İsviçre'den temin edilerek, AKS2'nin doğruluğunun QDaedalus sistemi ile karşılaştırılarak belirlenmesi için kullanılmıştır. AKS2 için tesis edilen İTÜ test noktasında, QDaedalus sistemi ile altı farklı gece astrojeodezik gözlem gerçekleştirilmiştir. QDaedalus gözlemleri sonucu, D-B ve K-G çekül sapması bileşenlerine ait standart sapma değerleri $\sim 0.2''$ olarak saptanmıştır. AKS2'nin hassasiyetinin aynı noktada $0.3''$ olarak tespit edilmesi (bkz Bölüm 4.1) ve iki sistem arasındaki farkın, K-G ve D-B bileşenlerinde $\sim 0.2''$ olması, AKS2 ile gözlemlenen çekül sapması bileşenlerinin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermektedir (Albayrak ve diğerleri, 2019; Albayrak, 2020). AKS2'nin doğruluğunun belirlenmesi için gerçekleştirilen gözlemler aynı zamanda, QDaedalus sisteminin İsviçre'den temin edilmesinden sonra gerçekleştirilmesi gereken

test gözlemlerinin de tamamlanmasını sağlamıştır. Ayrıca bu çalışma, QDaedalus sisteminin yeni geliştirilen bir astrojeodezik sistemin (AKS2) doğruluğunu belirlemek için kullanıldığı ilk çalışma olması bakımından da önemlidir.

AKS2'nin QDaedalus sistemi gibi kolay taşınabilir bir sistem olmaması ve İstanbul'da gerçekleştirilmesi planlanan gözlemlerin dağlık veya kıyı bölgelerde olması sebebiyle, 30 nirengi noktası ile oluşturulan İstanbul Astrojeodezik Ağı'ndaki (İAA) gözlemlerde QDaedalus sisteminin kullanılması tercih edilmiştir (Özlüdemir, 2018). İAA, İstanbul GPS Nirengi Ağı İGNA verileriyle oluşturulmuştur (Ayan ve diğerleri, 2006). İGNA'dan temin edilen veriler; ITRF96 datumunda jeodezik enlem, jeodezik boylam ve elipsoidal yükseklik verileri, Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı TUDKA ile ilişkilendirilerek nivelman ölçüleri ile elde edilen ortometrik yükseklik bilgileridir. 30 nirengi noktasındaki gözlemler üç farklı astrojeodezik gözlem kampanyasıyla tamamlanmıştır (ikinci ve üçüncü gözlem kampanyalarında ek ölçülerin yanı sıra kontrol ölçüleri de gerçekleştirilmiştir). İAA, Türkiye'nin ilk yoğun astrojeodezik ağıdır ve Türkiye, QDaedalus sistemi'nin Almanya, İsviçre, Macaristan ve Avustralya'dan sonra kullanıldığı beşinci ülkedir. QDaedalus sistemiyle 2014–2019 yılları arasında dünya genelinde gerçekleştirilen tüm astrojeodezik çalışmalar, Albayrak ve Guillaume (2021) tarafından incelenmiştir.

İstanbul astrojeodezik ağını oluşturan 30 nirengi noktasının, 13'ü Asya kıtasında, geri kalan 17'si ise Avrupa kıtasındadır. İAA'nın oluşturulmasında 9 nokta İstanbul'un iç ve dağlık bölgelerinden seçilmişken, 21 nokta kıyı bölgelerinden seçilmiştir. Bu seçim, GGM doğruluğunun özellikle kıyı ve dağlık bölgelerde kontrol edilmesi amacıyla yapılmıştır. QDaedalus sistemi ile İAA'daki gözlemler, Hauk, Hirt ve Ackermann (2017) tarafından önerildiği üzere, her bir seri 15 dakika olmak üzere, bir oturumda üç ya da dört seri gözlem gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, İAA'da elde edilen astrojeodezik çekül sapması bileşenlerinin hassasiyetleri $\sim 0.2''$ olarak hesaplanmıştır. İAA'da QDaedalus ile elde edilen çekül sapması verileri, GGMplus ve EGM2008 ile karşılaştırıldığında, bazı noktalarda $6''$ büyüklüğe ulaşan farklar tespit edilmiştir (Şekil 7). Bu farkların kaynağının, uydualtimetre verilerinden elde edilen deniz gravite verilerinin hassasiyetinden kaynaklandığı Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından belirtilmiştir.



Şekil 7. İstanbul Astrojeodezik Ağı'nda QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen gözlemler ile EGM2008 modeli arasındaki farklar (Harita, Albayrak ve diğerleri (2023, s. 8) tarafından Albayrak ve diğerleri (2020) verileriyle oluşturulmuştur).

5. TARTIŞMA

Astrojeodezik çekül sapması verisi, navigasyon, konumlama ve gravite alanı tanımlama gibi amaçlarla geliştirilen uydu sistemleri olmadan önce yerel veya ulusal ölçekte jeoit modeli tanımlamak için ilk başvurulan veri seti konumundaydı. Dolayısıyla, Türkiye'de 1942–1990 yılları arasında, kuruluşunda bu yana jeodezik ölçme faaliyetlerinin aktif yürütüldüğü Harita Genel Müdürlüğü tarafından, optik-mekanik astrojeodezik aletlerle oldukça yoğun astrojeodezik gözlem kampanyaları gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık elli yıllık bir zaman diliminde optik-mekanik aletler kullanılarak zor şartlarda gerçekleştirilen gözlemler neticesinde elde edilen bu bağıl astrojeodezik çekül sapması verisinin, günümüzde kullanıcıların beklenti ve ihtiyaçlarına cevap verebilmesi için Hirt ve Wildermann (2018) tarafından Venezuela'da gerçekleştirilen çalışmadaki gibi mutlak çekül sapmasına dönüştürülmesi gerekmektedir. Ayrıca ülkemizde geçmişten günümüze gözlemlenen tüm astrojeodezik verilerin, çevrimiçi bir veri deposu aracılığıyla erişime açılması, verilerin yeniden kullanılmasını mümkün kılacak ve dolayısıyla astrojeodezi alanında daha fazla çalışma yapılmasına ön ayak olacaktır. Ülkemizde sadece sayısal astrojeodezik sistemlerle gözlemlenen çekül sapması verileri erişilebilir durumdadır. Bu verilere, doktora tezleri ve kamuoyuyla paylaşılan bilimsel makaleler vasıtasıyla ulaşılabilirlik sağlanmaktadır (Halıcıoğlu 2015; Halıcıoğlu ve diğerleri, 2016; Albayrak 2020; Albayrak ve diğerleri, 2020). Dolayısıyla, ülkemizde 80 yılı aşkın bir geçmişe sahip astrojeodezik verilerin,

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Astrojeodezik sistemler, teknolojik ilerlemelerle doğru orantılı olarak geçmişten günümüze kadar iyileştirilerek geliştirilmiştir. Klasik optik-mekanik aletlerden, sayısal astrojeodezik sistemlere geçiş, çekül sapması bileşenlerinin hızlı ve hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamış ve gözlemci kaynaklı hata olasılığını azaltmıştır. Dolayısıyla, sayısal astrojeodezik sistemlerin sağlamış oldukları kullanım kolaylığı günümüzde daha geniş kitlelere bu sistemlerin ulaşmasını sağlamaktadır.

Türkiye'de 1942–1990 yılları arasında optik-mekanik astrojeodezik aletlerle (Wild T3 astronomik teodolit, Wild T4 üniversal teodolit) gerçekleştirilen astrojeodezik gözlemlerde öncelik ulusal bir jeoit belirleme olmuştur (bkz Bölüm 3). Son yirmi yılda ise, Türkiye'de özellikle Astrojeodezik Kamera Sistemi (AKS) ve robotik elektronik takeometre temelli QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilen astrojeodezik çalışmalar (bkz Bölüm 4), çekül sapması bileşenlerinin tek başına veya hibrit bir jeoit modelleme çalışmasında kullanılması yerine günümüz şartlarına daha uygun kullanım alanlarına yönelmesi üzerine yoğunlaşmıştır (bkz Bölüm 1). Bu amaçla, Albayrak ve diğerleri (2020) tarafından, çekül sapması verisi İstanbul Astrojeodezik Ağında Global Geopotansiyel Modellerin (GGM) doğruluğunun kontrolünde kullanılmıştır (bkz Bölüm 4). Çekül sapması bileşenlerine Türkiye'de gereksinim duyulan diğer bir alan ise, ulusal ölçekte geliştirilen Türkiye Jeoit Modeli-2020'nin (TG-20) ihtiyaç duyulan bölgelerde (özellikle GNSS sinyal kalitesinin düşük olduğu alanlar (Simav ve diğerleri, 2023) ile geometrik nivelman yapmanın zor olduğu dağlık bölgeler) doğrulanmasıdır. Bu amaçla, TG-20 için GPS ve nivelman verileri ile oluşturulan, Burdur-Antalya ve Tirebolu-Torul jeodezik profillerinin, yakın bir gelecekte QDaedalus sistemi ile gerçekleştirilecek astrojeodezik gözlem kampanyaları ile test edilerek, TG-20'nin bu iki profildeki doğruluğunun kontrol edilmesi faydalı olacaktır.

İlerleyen dönemlerde astrojeodezik verilerin Türkiye genelinde daha yaygın olarak toplanması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, geçmişten günümüze kadar toplanan tüm astrojeodezik verilerin, çevrimiçi bir veri deposu oluşturularak kamuoyuyla paylaşılması gerekmektedir. Bu sayede, diğer jeodezik verilere göre daha zor elde edilen çekül sapması verisinin daha hızlı ve etkili bir şekilde bu alanda çalışan araştırmacıların hizmetine sunulması mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu makalenin özünü oluşturan 1942-1977 yıllarına ait astrojeodezik gözlem verileri için Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz. Ayrıca, makalenin literatür bölümünde referans kaynak olarak sıklıkla kullandığımız eser sahiplerine, Ayan (1976), Gürkan (1978) ve Alp (1993), geçmiş yıllara ait verilerin günümüze ulaşmasını sağladıkları ve astrojeodezi alanına yapmış oldukları katkılar için minnettarız. Son olarak, değerli yorum ve önerileri ile bu makalenin geliştirilmesine çok önemli katkı sağlayan Hakemlere, ayırmış oldukları zaman ve emekleri için teşekkür ederiz.

ORCID

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

Fuat CANSEVER  <https://orcid.org/0009-0006-3096-7142>

M. Tefvik ÖZLÜDEMİR  <https://orcid.org/0000-0002-1413-9244>

Kerem HALICIOĞLU  <https://orcid.org/0000-0002-2500-8581>

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

KAYNAKLAR

- Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmane, I., Rubans, A. ve Zariņš, A. (2012). Digital zenith camera for vertical deflection determination. *Geodesy and Cartography*, 38(4), s. 123–129. doi:10.3846/20296991.2012.755324
- Acar, M. (1999). *Astronomik gözlem sonuçları ile jeodezik gözlem sonuçlarının karşılaştırılması* (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya. Erişim adresi: <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/3147>
- Albayrak, M., Halicioğlu, K., Özlüdemir, M. T., Basoğlu, B., Deniz, R., Tyler, A. R. B. ve Aref, M. M. (2019). The use of the automated digital zenith camera system in İstanbul for the determination of astrogeodetic vertical deflection. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 25(4), 1–23. doi:10.1590/s1982-21702019000400025

- Albayrak, M. (2020). *Assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in İstanbul* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/632382>
- Albayrak, M., Hirt, C., Guillaume, S., Halicioglu, K., Özlüdemir, M. T. ve Shum, C. K. (2020). Quality assessment of global gravity models in coastal zones: A case study using astrogeodetic vertical deflections in İstanbul, Türkiye. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 64(3), 06–329. doi:10.1007/s11200-019-0591-2
- Albayrak, M. ve Guillaume, S. (2021). Astrojeodezide QDaedalus sistemi uygulamaları: Bir inceleme. *Harita Dergisi*, 165, 3-89. Erişim adresi: <https://www.harita.gov.tr/harita-dergisi>
- Albayrak, M., Willi, D. ve Guillaume, S. (2023). Field comparison of the total station-based QDaedalus and the zenith telescope-based CODIAC astrogeodetic systems for measurements of the deflection of the vertical. *Survey Review*, 55(390), 247–259. doi:10.1080/00396265.2022.2054108
- Albayrak, M., Guillaume, S., Willi, D., Hirt, C., Herrera Pinzón, I.D., Marti, U., ... Shum, C.K. (2023). Results from the third QDaedalus astrogeodetic system observation campaign in the mountainous terrain of the Surses region in Switzerland. *J. Surv. Eng.* 149(3), 05023002
- Alp, O. (1993). *Türkiye astrojeodezik ve astrogravimetrik jeoidinin belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/items/1c21e47a-e556-46d3-be1d-d1911eba076e>
- Ata, M. (2007). *Türkiye’de ulusal haritacılığın kurumsallaşma süreci* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Ankara. Erişim adresi: <https://dspace.ankara.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12575/79355?>
- Ayan, T. (1976). *Astrogeodatische geoid berechnung für das gebiet der Türkiye* (Yayımlanmamış doktora tezi). Fridericana Karlsruhe Üniversitesi, Almanya.
- 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*. İstanbul Teknik Üniversitesi Rapor 2005/3123, Vol. 1, İstanbul, Türkiye, s.186.
- Bürki, B., Müller, A. ve Kahle, H. G. (2004, Eylül). *DIADEM: The New Digital Astronomical Deflection Measuring System For High-Precision Measurements of Deflections of The Vertical At ETH Zurich*. Portekiz: Electronic Proceedings of IAG GGSM2004 Meeting In Porto.
- 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 for the reduction of survey data to a geocentric datum. *Australian Surveyor*, 45(2), 46–61. doi:10.1080/00050326.2000.10440341
- Featherstone, W. E. ve Olliver, J. G. (2013). Assessment of EGM2008 over Britain using vertical deflections, and problems with historical data. *Survey Review*, 45(332), 319–324. doi:10.1179/1752270613y.000000004
- Featherstone, W. E. ve Goyal, R. (2022). Digitisation and analysis of historical vertical deflections in India. *Survey Review*, 55(390), 268-273. doi:10.1080/00396265.2022.2088016
- Guillaume, S., Bürki, B., Griffet, S. ve Durand, H. M. (2012, Mayıs). *QDaedalus: Augmentation of total stations by CCD sensor for automated contactless high-precision metrology*. In FIG Working Week, Roma, İtalya.
- Guillaume S. (2015). *Determination of a precise gravity field for the CLIC feasibility studies* (Doktora tezi). ETH Zurich Üniversitesi, Zürih. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/126895>
- Gürkan, O. (1978). *Astrojeodezik ağların deformasyonu ve Türkiye I. derece triyagülasyon ağı*. Trabzon: KTÜ Basımevi.
- Halıcıoğlu, K. (2015). *Sayısal zenit kamera sistemi ile astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11527/16233>

- Halicioğlu, 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), 914–923. doi:10.1080/17538947.2016.1189612
- Hardy, R., Fancher, K., Erickson, B., Breidenbach, S., Ahlgren, K., van Westrum, D., ... Jordan, K. (2021, Aralık). *Performance assessment of the total station astrogeodetic control system (TSACS)*. American Geophysical Union 2021 Fall Meeting, New Orleans, Amerika Birleşik Devletleri.
- 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
- Heiskanen, W.A. ve Moritz, H. (1984). *Physical Geodesy*. Austria: Institute of Physical Geodesy, Technical University Graz.
- Hirt, C. (2004). *Entwicklung und erprobung eines digitalen zenitkamasystems für die hochpräzise lotabweichungsbestimmung* (Doktora tezi). Leibniz Üniversitesi Hannover, Hannover. Erişim adresi: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/6419>
- 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., Bürki, B., Somieski, A. ve Seeber, G. (2010). 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., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R. ve Rexer, M. (2013). New ultrahighresolution 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
- Hughes, J. C., Dunlap, J., Johnson, S., Olson, C. G., Siebert, R., Song, J. H., ... Wangler, W. (2019, Aralık). *Development of a digital zenith camera for precision determination of gravitational deflection of the vertical*. American Geophysical Union 2019 Fall Meeting, San Francisco, Amerika Birleşik Devletleri.
- 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
- Kühtreiber, N. (2002, Ağustos). *High precision geoid determination of Austria using heterogeneous data*. In Gravity and Geoid 2002, Proceedings of 3rd meeting of the Int. Gravity and Geoid Commission, Selanik, Yunanistan.
- Marti, U. (2007). *Comparison of High Precision Geoid Models in Switzerland*. Tregoning, P. ve Rizos, C. (Ed.), Dynamic Planet. International Association of Geodesy Symposia (s. 377-382) içinde. doi: 10.1007/978-3-540-49350-1_55
- Murzabekov, M., Fateev, V., Pruglo, A., Ravdin, S. (2022). *Results of Astro-Measurements of the Deflection of Vertical Using the New Observation Technique*. Freymueller, J.T. ve Sánchez, L. (Ed.), International Association of Geodesy Symposia (s. 59-65) içinde. doi: 10.1007/1345_2021_136
- Özlüdemir, M. T. (2018). *Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman verilerinin entegrasyonu ile yerel geoid modellemesi*. TÜBİTAK 1001 Projesi Sonuç Raporu (No: 115Y237), İstanbul, Türkiye.
- 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
- Pick, M., Picha, J. ve Vyskočil, V. (1973). *Theory of Earth's gravity field*. Amsterdam, London, New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Robbins, A.R. (1951). Deviation of the vertical. *Empire Survey Review*, 11(79), 28–36.
- Simav, M., Bahadır, B., Yıldız, H., Cingöz, A., Nohutcu, M. ve Sezen, E. (2023). Assessing the performance of multi-GNSS precise point positioning technique on the geoid model validation. *Survey Review*, 56(394), 51–64. doi:10.1080/00396265.2023.2167920

- Somieski, A. E. (2008). *Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece* (Doktora tezi). ETH Zurich Üniversitesi, Zürih. Erişim adresi: Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/11522>
- Şerbetçi, M. (1999). *Türk haritacılığı tarihi (1895-1995): Türk haritacılığının 100. kuruluş yılı anısına*. İstanbul: Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.
- Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., ... Wang, H. (2014). Digital zenith telescope prototype of China. *Chinese Science Bulletin*, 59(17), 1978–1983. doi:10.1007/s11434-014-0256-z
- Türen, Y. ve Üstün, A. (2016, Kasım). *Astrojeodezik nivelmanda astronomik koordinatların doğruluğunun yerel jeoit belirlemeye etkisi*. Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu Çalıştayı-2016, "Gravite ve Yükseklik Sistemleri, Prof. Dr. Rasim DENİZ'in Jeodeziye Katkıları", İstanbul.
- Varna, I., Willi, D., Guillaume, S., Albayrak, M., Zarins, A. ve Ozen, M. (2023). Comparative measurements of astrogeodetic deflection of the vertical by Latvian and Swiss digital zenith cameras. *Remote Sensing*, 15(8), 2166. doi:10.3390/rs15082166
- Yıldız, H., Simav, M., Sezen, E., Akpınar, I., Akdoğan, Y. A., Cingöz, A. ve Akabali, O. A. (2021). Determination and validation of the Turkish Geoid Model-2020 (TG-20). *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, 62(3), 495–512. doi:10.4430/bgta0346