

Sayısal Zenit Kamera Sistemi Kullanılarak Elde Edilen Astro-Jeodezik Çekül Sapmaları

Kerem Halıcıoğlu^{*1,2}, Rasim Deniz², Haluk Özener¹

¹Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeodezi Anabilim Dalı, 34684, İstanbul.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, İstanbul.

Özet

Geoit, farklı teoriye ve ölçmelere dayanan gravimetrik, astro-jeodezik, GPS/Nivelman, yersel, uydu ve uzay sistemlerinden elde edilen ölçülerle jeopotansiyel harmonik katsayılarının belirlenmesi esasına dayanan global jeopotansiyel modellerle belirlenebilir. Dünya ölçeğinde ve ülkemiz özelinde geoit belirleme çalışmaları, farklı yöntemlerin kullanıldığı bağımsız veri setleri oluşturarak modellenmeye çalışılmaktadır. Astro-jeodezik yöntem ile geçmişte uzun ölçme zamanları, deneyimli operatörler ve ölçme-değerlendirme süreçlerinin güçlüğü nedeniyle sınırlı olarak kullanılmıştır. Geleneksel optik-mekanik açı ölçme düzenleri ve kronograflarla zaman kayıtlarıyla elde edilen çekül sapmaları $\pm 1''$ doğruluk sınırına ulaşmıştır. Günümüzde ise CCD algılayıcıların yaygınlaşması, sayısal prezisyonlu düzeç donanımları ve zaman belirlemede GNSS'den yararlanılması, Sayısal Zenit Kamera Sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamış ve astro-jeodezik ölçmeler yeniden gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Otomatik kontrol ve veri işleme yazılımlarıyla birlikte Sayısal Zenit Kamera Sistemleri kullanılarak $\pm 0.2''$ (2mm/km) doğruluklarla çekül sapmalarının (geoidin eğimi) belirlenmesi, gündelik uygulamalar içine girmiştir. Ülkemizde de çekül sapmalarının belirlenmesi amacıyla bir Sayısal Zenit Kamera Sistemi (SZKS) tasarlanmıştır. Bu çalışmada ülkemizde geliştirilen SZKS tanıtılacak, bu sistem ile gerçekleştirilen test çalışmalarının sonuçları tartışılacaktır.

Anahtar Sözcükler

Astro-jeodezik Çekül Sapmaları, Geoit Belirleme, Sayısal Zenit Kamera Sistemi

1. Giriş

Jeodezi, yer bilimleri ve uzay araştırmalarında, yeryuvarı gravite alanının ve zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi ile ilgili çok sayıda güncel çalışma bulunmaktadır. Potansiyeli, ortalama deniz yüzeyi potansiyeline yakın olan jeopotansiyel yüzey "geoit", bir düşey datum olarak yükseklik sistemlerinin temelini oluşturur. Geoit her noktasında çekül doğrultularının dik olduğu yüzeydir ve denge halindeki ortalama deniz yüzeyidir. Geoit, merkezkaç kuvvetlerinin ve kütlelerin birbirini çekim kuvvetlerinin etkisi ile şekillenir. Kitlelerin gelişigüzel dağılmış olmaları nedeniyle geoit, matematiksel olarak ancak yaklaşıklıkla ifade edilebilir. Geoit belirlemedeki amaç, düzensiz ondülasyonlu olan bu yüzeyin belirli noktalarda referans elipsoidinden, onun normali doğrultusundaki N uzaklığının bulunarak eşdeğerli ondülasyon eğrileri ile temsil edilmesidir (Ayan 1978). Geoit, koordinat transformasyonu, ölçülerin indirgenmesi, yoğunluk araştırmaları ve benzeri çalışmalarda büyük öneme sahiptir. GNSS'den rasyonel bir şekilde yararlanmak için prezisyonlu geoit modellerine gereksinim duyulmaktadır.

Bu çalışmada yüksek prezisyonlu çekül sapmalarının elde edilmesi için teleskop, CCD kamera, eğim ölçerler, GPS donanımı ve sistem kontrolü için gerekli bilgisayar konfigürasyonları kullanılarak bir Sayısal Zenit Kamera Sistemi tasarlanmış ve test ölçmeleri gerçekleştirilmiştir.

1.1. Global Ölçekte Gerçekleştirilen Astro-jeodezik Çalışmalar

Astro-jeodezik gözlemler, 1900'lü yılların başlarından itibaren 1990'lı yıllara kadar olan süreçte kutup noktasının koordinatları ve zaman bilgisini içeren yer dönme parametrelerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Gravite vektörünün doğrultusu tanımlayan çekül sapmasının yerin gravite alanı ile ilgili bağımsız ölçü kümesi sağlaması, astro-jeodezik yöntemlerin özellikle Avrupa genelinde yoğun bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Astro-jeodezik gözlemler ile Helmert (1913), Heitz (1968) ve Bomford (1971) tarafından Avrupa'da astro-jeodezik geoit belirlenmiştir (Ayan ve Deniz 2000). Klasik optik-mekanik ölçme donanımları ile gerçekleştirilen bu gözlemlerde deneyimli gözlemciler ve uzun değerlendirme süreçleri gerekmektedir. Almanya'da ilk olarak taşınabilir zenit kamera sistemi TZK1'in geliştirilmesi doğruluğunun $\pm 1''$ ulaşması ile astro-jeodezik ölçmeler yeniden hız kazanmış oldu (Gessler 1975). Astronomik koordinatların belirlenmesi amacıyla geliştirilen bu sistemler daha gelişmiş donanımlarla güncellenmiş ve TZK2 adıyla Almanya-Hannover'da (Hirt 2006) ve TZK3 adıyla İsviçre ETH Zürih'teki çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır .

CCD (Charged Coupled Devices) sensörlerin 1970'li yıllarda icadının ardından astronomi ve astrometride büyük bir gelişme sağlanmıştır. Jeodezik Astronomi de optik ve analog ekipmanlarını CCD'ler ile yenileyerek bu değişimden etkilenmiştir. Analog sistemler CCD kameralarla ve sayısal eğim sensörleri ile donatılarak sayısal zenit kamera sistemlerine dönüştürülmüştür. İlk sayısal zenit kamera sistemleri Almanya (Eissfeller ve Hein 1994, Schobel vd. 2000, Hirt 2004), Viyana (Gerstbach 1996, Gerstbach ve Pichler 2003) ve İsviçre'de (Burki vd. 2003) kullanılmaya başlanmış,

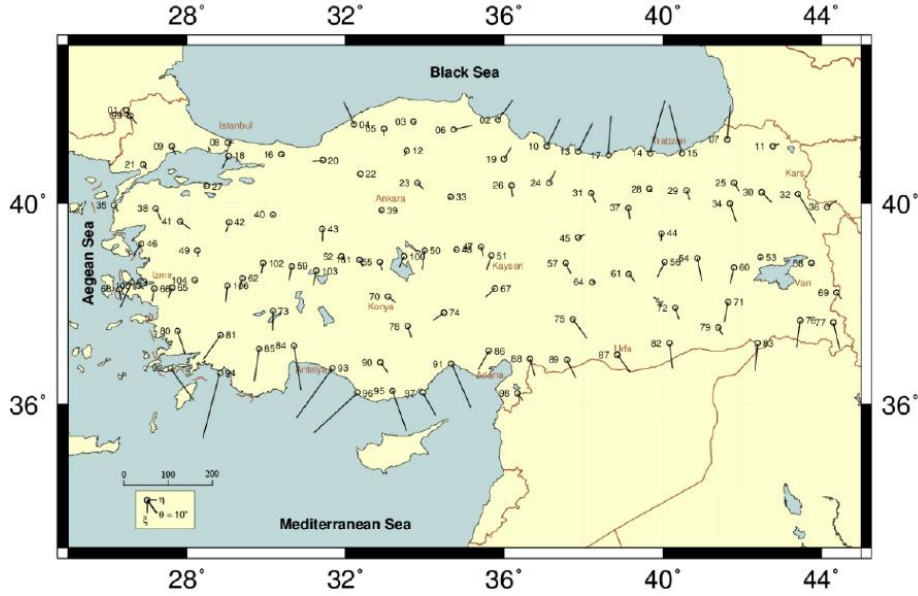
* Sorumlu Yazar: Tel: 0216 516 3265 Faks: 0216 332 0241

E-posta: kerem.halicioğlu@boun.edu.tr (Kerem Halıcıoğlu)

bu sistemleri Polonya (Kudrys 2009), Sırbistan (Ogrizovic 2009), Letonya (Abele 2012) ve Çin (Tian 2014) SZKS'leri izlemiştir.

1.2. Türkiye'de Astro-jeodezik Çalışmalar

Türkiye'de, Ulusal Nirengi Ağının yönlendirilmesi amacıyla, Laplace noktalarındaki astronomik gözlemlere 1942 yılında başlanmıştır. Nirengi ağının poligonlarının kesişme bölgeleri içinde, 1953 yılına kadar 98 adet I. derece noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır. Bu gözlemler, nirengi ağının 1954 yılında yapılan dengelenmesinde kullanılmıştır. Türkiye'de astronomik gözlemleri kullanarak, astro-jeodezik geoit belirleme çalışmaları 1970'li yıllarda başlatılmıştır. Ayan (1976), çalışmasında 106 noktadaki astro-jeodezik çekül sapmasını kullanarak (Şekil 1) 1976 Türkiye Astro-jeodezik Geoidini belirlemiştir. Gürkan (1978), 98 adet Laplace noktasındaki astro-jeodezik çekül sapmalarını kullanarak, iki değişkenli polinom yardımıyla 1978 Türkiye Geoidini belirlemiştir (Gürkan 1978).



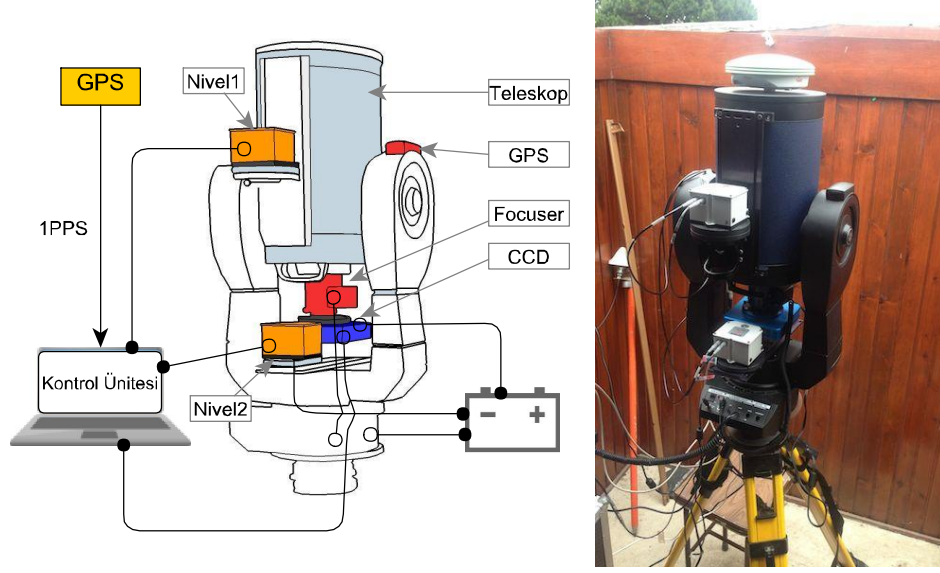
Şekil 1: Astro-jeodezik çekül sapmaları. Ayan (1976)'dan güncellenmiştir.

Ülkemizde astro-jeodezik geoit belirleme çalışmaları 1990'lı yıllarda da devam etmiştir. Ülke genelindeki 200 noktada çekül sapması bileşenleri ve astro-gravimetrik nivelman yöntemiyle elde edilmiş veriler kullanılarak Türkiye Astro-jeodezik Geoidi (TAG-94), 1994 yılında hesaplanmıştır (Alp 1993).

Halen ulusal bir "cm" geoidinin belirlenmesi çalışmalarına devam edilmektedir. Bu çerçevede astro-jeodezik çekül sapmalarından; doğrudan bir ulusal astro-jeodezik geoidini belirlemek ve diğer gözlemlerle (gravite, GPS/Niv, vb.) entegrasyonu ile ulusal geoit belirleme çalışmalarında kullanılması çalışmaları desteklenmektedir (TUJK 2012).

2. Sayısal Zenit Kamera Sistemi

Bu çalışmada yüksek presizyonlu çekül sapmalarının elde edilebilmesi için tasarlanmış ve testleri gerçekleştirilmiş bir Sayısal Zenit Kamera Sistemi (SZKS) tanıtılmaktadır (Şekil 2). SZKS'nin optik bileşeni olarak Schmidt-Cassegrain tipi 20 cm ayna çapına ve 2000 mm odak uzaklığına sahip bir teleskop kullanılmıştır. Sistemin çekül doğrultusunda yönlendirebilmesi için presizyonlu sayısal eğimölçerlerden yararlanılmıştır. Yıldız görüntüleri, görünen ışık dalga boyunda kuantum etkinliği değeri yüksek sensöre sahip bir CCD kamera ile kaydedilmektedir. Eğimölçer ve görüntülerin epok bilgisi GPS zamanı yardımıyla ilişkilendirilmektedir. Ölçme istasyonunun hesaplanan astronomik koordinatları ve jeodezik koordinatları kullanılarak çekül sapması bileşenleri hesaplanmaktadır.

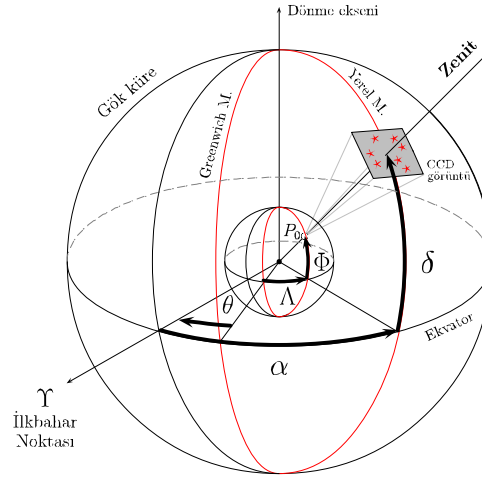


Şekil 2: Sayısal zenit kamera sistemi

3. Astronomik Koordinatların Elde Edilmesi

Astronomik koordinatlar (Φ , Λ) çekül doğrusunun uzaysal doğrultusunu Uluslararası Yersel Referans Sistemine (ITRS) göre tanımlar. SZKS ile görüntülenen yıldızların koordinatları belirli bir epok için yıldız kataloglarında Uluslararası Göksel Referans Sisteminde (ICRS), deklinasyon (δ) ve rektesansiyon (α) olarak verilmektedir. ITRS ve ICRS ise Greenwich Görünen Yıldız Zamanı (θ) ile ilişkilendirilir (Şekil 3).

Astronomik koordinatlar (Φ , Λ) yeryüzünde gözlem yapılan noktaların konumlarını tanımlarken, Rektesansiyon sistemindeki koordinatlar yıldızların gök küre üzerindeki konumlarını ifade eder.



Şekil 3: Zenit ve civarındaki yıldız görüntülerinden çekül çizgisinin doğrultusunu belirleme. (θ : Greenwich Görünen Yıldız Zamanı)

Astronomik yöntemler, zenitte konumlanmış bir yıldız için astronomik (Φ , Λ) ve Rektesansiyon sistemindeki (α , δ) koordinatların eşitliğini kullanırlar (Eşitlik 1).

$$\Phi \quad \delta \quad \Lambda \quad \alpha \quad \theta$$

Ancak bir yıldız tam olarak zenit geçişindeyken gözlemek oldukça güçtür. Bu nedenle zenit ve civarındaki yıldızlar SZKS ile görüntülenerek zenit doğrultusu, uygun kataloglar kullanılarak tanımlanan referans yıldızların koordinatları yardımıyla hesaplanır.

Yıldız görüntülerinin değerlendirilmesi sürecinde ilk adım görüntülerdeki yıldızların tanımlanmasıdır. Öncelikle elde edilen görüntülerdeki potansiyel yıldızların resim koordinatları (x,y) , merkez belirleme algoritmaları ile belirlenir (Halıcıoğlu vd. 2012). Potansiyel yıldızlar, görüntünün elde edildiği sisteme ait parametrelerle (odak uzaklığı, CCD sensör boyutu vb.) yıldız kataloglarında verilen yıldızlarla ilişkilendirilir. Bu işlem için görüntünün orta noktasının rektesensiyon sistemindeki yaklaşık koordinatlarının (α_0, δ_0) bilinmesi gerekir. Yaklaşık koordinatlar ve sistem parametre bilgileri ile tanımlanan zenit noktası civarındaki yıldızların katalog yıldızlarıyla uyumu incelenir.

Resim koordinat sisteminde tanımlanan koordinatların (x, y) rektesensiyon sistemindeki koordinatlarla (α, δ) ilişkilendirilebilmesi için küre üzerinde tanımlanan koordinatların (α, δ) ortak bir noktada (α_0, δ_0) küreye teğet olan düzleme izdüşümünün tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle gnomik izdüşüm kullanılarak teğet düzlem koordinatlarının (ξ, η) hesaplanması gerekir (Eşitlik 2).

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\cot \alpha \cot \delta \cos(\alpha - \alpha_0)}{\tan(\alpha - \alpha_0) \cos \varphi} \\ \eta &= \tan(\alpha - \alpha_0) \end{aligned} \quad (2)$$

Teğet düzlem koordinatları ve resim koordinatları arasında izdüşümsel bir dönüşüm tanımlanması gerekir. Dönüşüm parametrelerin kestirilebilmesi için her iki sistemde tanımlanabilen en az dört yıldız gereklidir. Dört yıldızdan daha çok sayıda yıldızın tanımlanabildiği durumlarda ise dönüşüm parametreleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 3).

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{Ax + By + C}{Kx + Ly + 1} \\ \eta &= \frac{Dx + Ey + F}{Kx + Ly + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

Zenit noktasının koordinatları iteratif bir işlemle enterpole edilir. İzdüşüm merkezinin doğrultusuna ait koordinatlar Eşitlik 4 ile hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \alpha_z &= \alpha_0 + \arctan \frac{\xi_z}{\cos \delta_0 - \eta_z \sin \delta_0} \\ \delta_z &= \arctan \frac{(\eta_z + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - \eta_z \tan \delta_0} \end{aligned} \quad (4)$$

Gerçekleştirilen bir kaç iterasyonun ardından koordinatlar arasındaki farklar bir kaç mili yay saniyesinin altına iner. Her bir görüntüden elde edilen zenit noktasının koordinatları yıldız kataloglarındaki koordinatların yayınlanan epogundadır (J2000.0). SZKS ile gerçekleştirilen gözlemlerde bu koordinatların toposentrik görünen koordinatlara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem Kaplan vd. (1989, 2005)'te tanımlanan algoritmalar kullanılarak ve USNO tarafından geliştirilen NOVAS C kütüphaneleri yardımıyla yapılmaktadır (Bangert vd. 2011). Toposentrik görünen koordinatlarından ölçme istasyonunun astronomik koordinatları (Φ, Λ) , \vec{N} hesaplanarak, Eşitlik 1 ile belirlenir.

4. Çekül Sapmalarının Hesaplanması

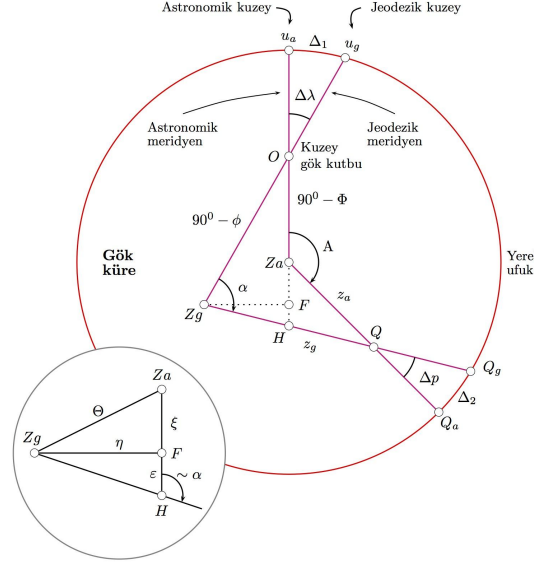
Gerçek gravite vektörünün (\vec{g}) , gerçek gravite adıyla bilinen g değeri ölçülebilen bir büyüklüktür ve doğrultusu astronomik gözlemlerle, astronomik enlem (Φ) ve astronomik boylam (Λ) ile belirlenebilir. Astronomik enlem Φ ve astronomik boylam Λ , çekül çizgisinin teğetinin doğrultusu belirlerken, jeodezik koordinatlar (φ, λ) elipsoit normalinin doğrultusunu tanımlar. Genel olarak çekül sapması, nivo yüzeyi normal ile referans (elipsoit) normali arasındaki doğrultu farkı olarak tanımlanabilir (Ayan 1978). Çekül sapması astronomik-jeodezik ölçülerden, gtavimetric ölçülerden ya da uydu gözlemlerinden hesaplanabilir (Ayan ve Deniz 2000). Çekül doğrultusunu Uluslararası Gök Koordinat Sisteminde (ICRS) ekvatoryal koordinatları (rektesensiyon α ve deklinasyonu δ) verilen gök cisimlerine ve belirli yıldızlara gerçekleştirilen gözlemler kullanılarak hesaplanır. Bir P noktasına ait astronomik normalin gökküresini deldiği yer z , jeodezik normalin gökküresini deldiği yer z' , ise bu iki nokta ile gök kutbu N bir küresel üçgen oluşturur (Şekil 4).

Çekül sapmasının bileşenleri (Eşitlik 5), eğer bir P noktasına ait astronomik ve jeodezik koordinatları biliniyorsa Eşitlik 5 ile hesaplanabilmektedir.

$$\xi = \phi - \varphi, \quad \eta = (\lambda - \lambda') \cos \varphi, \quad \varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (5)$$

Herhangi bir doğrultudaki çekül sapması değeri ise α azimut olmak üzere Eşitlik 6 ile elde edilir.

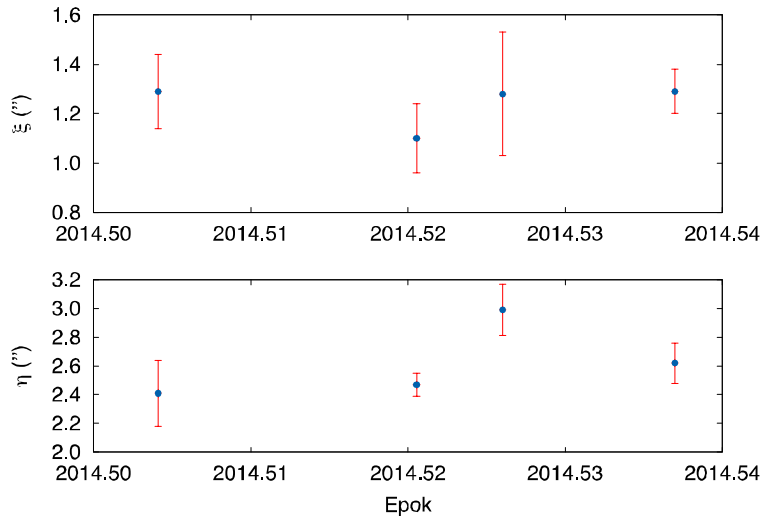
$$\varepsilon(\alpha) = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \quad (6)$$



Şekil 4: Astro-jeodezik çekül sapması, astronomik ve jeodezik azimut Jekeli (2012)'den güncellenmiştir.

5. Test Çalışmaları ve Değerlendirmeler

Sayısal Zenit Kamera Sistemi gövdesine ve tüp üzerine eğim ölçerler yeniden yerleştirildikten sonra bir dizi gözlem gerçekleştirilmiştir. Geleneksel astronomik gözlemlerde, I. ve II. gözlem durumlarında yıldız yapılan gözlemler bütünü 1 seri olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada da, buna paralel olarak 4 farklı azimut konumunda yapılan 5 kayıt (toplam 20 kayıt), 1 seri gözlem olarak tanımlanmıştır. Her bir görüntüye ait eğim değerleri kaydedilmiş ve serilere düzeltme olarak getirilmiştir. Bu gözlemlerden yüksek derecede nem içeren, atmosferik koşulların gözlemi olumsuz şekilde etkilediği gecelerde anlamlı çözüme ulaşılamayan bir kısım görüntüler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Ana test istasyonu için toplam 12 serinin ortalamasından hesaplanan çekül sapmaları ve ortalamanın karesel ortalama hataları Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5: Test istasyonunda hesaplana astro-jeodezik çekül sapmaları

Gözlemlerden elde edilen koordinatların iç doğruluğu 0.2-0.3" civarında olarak belirlenmekte ve bu değer üzerinde ölçmeler hesaplamalardan çıkarılmaktadır. Gözlemler düzeç her defasında bozularak ve düzeç tekrarı ile gerçekleştirilmiştir. Burada, düzeçleme doğruluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Simetrik gözlemlerin ortalamalarından giderilemeyen düzeç hataları, elektronik düzeçlerle gözlem anında ortalama değerlerden her bir azimut için hesaplanmakta ve astronomik koordinatların ortalama değerlerine eğim düzeltmesi getirilmektedir.

Test istasyonunda SZKS ile elde edilen çekül sapmaları ile global jeopotansiyel modellerden elde edilen çekül sapmaları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan global jeopotansiyel modeller EGM08 (Pavlis vd. 2012) ve GGM+ (Hirt vd. 2013) olarak seçilmiştir. EGM08 global jeopotansiyel modeli 2159 küresel harmonik derece ve mertebesi ile yayınlanmıştır. EGM08 modelinden hesaplanan serbest-hava gravite anomalileri ve çekül sapması bileşenlerine ait grid verisi 2.5'x2.5' çözünürlükte ücretsiz olarak yayınlanmaktadır. GGM+ global jeopotansiyel modeli ile de çekül sapması bileşenleri hesaplanabilmektedir. GGM+, 7 yıllık GRACE ve 2 yıllık GOCE uydu gravite verileri, EGM08, SRTM topografya verisi (7.5") ve SRTM_PLUS batimetri verisinin (30") birleşimi olarak oluşturulmuştur.

Tablo 1: SZKS ile belirlenen çekül sapmalarının global jeopotansiyel modellerle karşılaştırılması

	ξ''	η''	$\xi''_{SZKS} - \xi''_{Model}$	$\eta''_{SZKS} - \eta''_{Model}$
SZKS	1.29	2.62	-	-
EGM08	1.13	1.77	0.16	0.85
GGM+	1.85	1.61	-0.56	1.01

Tablo 1'de hesaplanan çekül sapmaları ve SZKS ile elde edilen çekül sapmalarından olan farklar saniye biriminde verilmiştir. SZKS ile elde edilen çekül sapması bileşenleri global jeopotansiyel modellerden hesaplanan büyüklüklerle uyuşum göstermektedir.

6. Sonuçlar ve Öneriler

Farklı amaçlar için üretilen alet, donanım ve yazılımlar entegre edilerek, bir "Sayısal Zenit Kamera Sistemi" oluşturulmuştur. Bu sistemde; GPS-CCD entegrasyonu ile CCD görüntü zamanları, görüntüdeki yıldızların tanımlanması, Greenwich görünen yıldız zamanının hesabı, yıldızların görünen ICRS koordinatlarının yıldız kataloglarından enterpolasyon ile alınması, yıldızların görüntü koordinatları (resim koordinatları) ile görünen ICRS koordinatları arasındaki iteratif dönüşüm ile istasyon koordinatlarının hesaplanması, eğimölçer değerleriyle hesaplanan istasyon koordinatlarının eğim düzeltmelerinin yapılması, GPS ile elde edilen elipsoid koordinatlar ve gözlemlerden elde edilen istasyon astronomik koordinatlarından çekül sapmalarının hesabı, otomatize biçimde gerçekleştirilmektedir. Bunlara paralel olarak; zaman belirleme doğruluğu, en uygun pozlama süresi, elektronik düzeçlerin uzun süreli stabilizasyonu, CCD kamera çözünürlüğü, çözünürlük ile teleskobun açıklığı arasındaki ve görüntülenen yıldız sayısı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca sistemin zenit doğrultusuna yönlendirilebilmesi amacıyla, ölçme sırasında görüntülerden elde edilen koordinat bilgileri de kullanılarak en uygun ölçme-değerlendirme yöntemi araştırılmıştır.

Sistemin düzeçleme presizyonu $\pm 0.1''$ ve CCD kamera ile yıldız görüntülerini çözme presizyonu $\pm 0.1-0.2''$ bulunmuştur. Sistem ile ana test istasyon olan Kandilli'de yapılan gözlemlerin değerlendirilmesinden, enlem belirleme presizyonu $\pm 0.20''$ ve boylam belirleme presizyonu $\pm 0.42''$ bulunmuştur.

Avusturya, İsviçre, Almanya gibi jeodezik altyapısı tamamlanmış ülkelerde, farklı yöntemler ile geoit modelleri geliştirilmiştir. Bu modellere astro-jeodezik çekül sapmaları önemli katkı sağlamaktadır. Astro-jeodezik çekül sapmaları ile geoit modeli oluşturmak için yaklaşık 1000 km²'ye 1 çekül sapması noktası gelecek şekilde geoit belirleme çalışmalarına dahil edilmesi önerilmektedir (Gerstbach 2003). Türkiye için de astro-jeodezik çekül sapmalarının dahil edileceği bir model ulusal yükseklik sisteminin modernizasyonu çalışmalarına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma 111Y125 nolu araştırma projesi kapsamında TÜBİTAK-ÇAYDAG tarafından desteklenmiştir. Astronomik gözlemlere destek veren Süleyman Fişek ve Hasan Onur Işık'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Abele, M., Balodis, J., Janpaule, I., Lasmane, I., Rubans, A., Zarins, A., (2012), *Digital Zenith Camera For Vertical Deflection Determination*, Geodesy and Cartography, 38(4), ss. 123–129.

- Alp, O., (1993), Türkiye astrojeodezik ve astrogravimetrik jeoidinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Ayan, T., (1976), *Astrogeodatische Geoidberechnung für das Gebiet der Türkei*. Doktora Tezi, Geodatisches Institut der Universität Fridericiana Karlsruhe, Almanya.
- Ayan, T., (1978), *1976 Türkiye Geoidi*, Harita Dergisi, 85, 5–17.
- Ayan, T ve Deniz R., (2000), *Fiziksel Jeodezi Ders Notu*, İstanbul Teknik Üniversitesi
- Bangert, J., Puatua, W., Kaplan, G., Bartlett, J., Harris, W., Fredericks, A. ve Monet, A., (2011). *User's Guide to NOVAS Version C3.1*, USNO, 2520 Washington, DC.
- Burki, B., Muller, A., Kahle, H., (2003), *DIADEM: The new digital astronomical deflection measuring system for high-precision measurements of deflections of the vertical at ETH Zurich*, Electronic Proc. IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal, ss.03–33.
- Eissfeller, B., Hein, G., (1994), *Astrogeodetic levelling with an integrated dgps/ccd star camera system*, Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation KIS, 94, ss.431–442.
- Gerstbach, G., (1996), *The astro-geodetic use of ccd for gravity field refinement*, Physics and Chemistry of the Earth, 21(4), 347–351.
- Gerstbach G, Pichler, H., (2003), *A small CCD zenith camera (ZC-G1)-developed for rapid geoid monitoring in difficult projects*, Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd, 75, 221–228.
- Gessler, J., (1975), *Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodatische Ortsbestimmungen*. Doktora Tezi, Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover, Almanya.
- Gürkan, O., (1978), *Astrojeodezik Ağların Deformasyonu ve Türkiye I. Derece Triyagülasyon Açı*, KTÜ Basımevi, Trabzon.
- Halicioğlu, K., Deniz R., Ozener, H., (2012), *Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey*, Journal of Geodesy and Geoinformation, doi: 10.9733/jgg.131212.1.
- Hirt, C., (2004), *Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkameranystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung*, Doktora Tezi, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodasie und Geoinformatik an der Universität Hannover, Almanya.
- Hirt, C., ve Bürki, B., (2006), *Status of geodetic astronomy at the beginning of the 21st century*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodasie und Geoinformatik an der Universität Hannover (C. Hirt, ed.), 258, 81–99, Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand
- Hirt, C., Claessens, S., Fecher, T., Kuhn, M., Pail, R., Rexer, M., (2013), *New ultrahigh-resolution picture of Earth's gravity field*, Geophysical Research Letters, 40(16), 4279–4283.
- Jekeli, C., (2012), *Geometric Reference Systems in Geodesy*, Division of Geodetic Science School of Earth Sciences Ohio State University, ABD
- Kaplan, G. H., Hughes, J. A., Seidelmann, P. K., Smith, C. A., & Yallop, B. D., (1989), *Mean and apparent place computations in the new IAU system. III - Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars*, Astronomical Journal (ISSN 0004-6256), vol. 97, April 1989, p. 1197-1210
- Kaplan, G. (2005). *The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales, and Earth Rotation Models: Explanation and Implementation*, US Naval Observatory Circular 179.
- Kudrys, J., (2009), *Automatic Determination of the Deflections of the Vertical-First Scientific Results*, Acta Geodynamica Et Geomaterialia, 6(3), 233–238.
- Ogrizovic, V., (2009), *A Construction of an Advanced Measuring System for Astro-Geodetic Determinations*, Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd, 86, 145–150.
- Pavlis, N.K., Simon, A., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. and Factor, J.K. (2012), *The Development and Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117(B4).
- Schoebel, R., Hein, G., Eissfeller, B., (2000), *Renaissance of Astrogeodetic Levelling Using Gps/CCD Zenith Camera*, Proceedings of the IAIN World Congress and the 56th Annual Meeting of The Institute of Navigation, Institute of Navigation (ION), San Diego, CA, ss.732–740.
- Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., Wang, B., Yin, Z., Wang, H., (2014) *Digital zenith telescope prototype of China*, Chinese Science Bulletin, 59(17), 1978–1983.

TUJK, (2012), Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu Sonuç Bildirgesi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Ulusal Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı, Zonguldak, Türkiye