

**SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN
TEST VE KALİBRASYON ÖLÇMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raşit ULUĞ

Geomatik Mühendisliği Bölümü

Geomatik Mühendisliği Programı

Haziran 2017

**SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN
TEST VE KALİBRASYON ÖLÇMELERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Raşit ULUĞ
(501151647)**

Geomatik Mühendisliği Bölümü

Geomatik Mühendisliği Programı

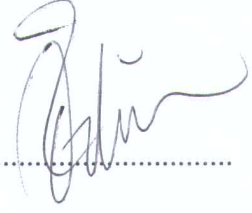
Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Tevfik ÖZLÜDEMİR

Haziran 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501151647 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Raşit ULUĞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN TEST VE KALİBRASYON ÖLÇMELERİ" başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

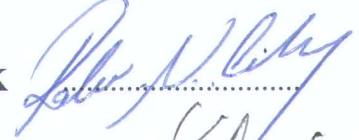
Tez Danışmanı : **Doç. Dr. M. Tefrik ÖZLÜDEMİR**

İstanbul Teknik Üniversitesi



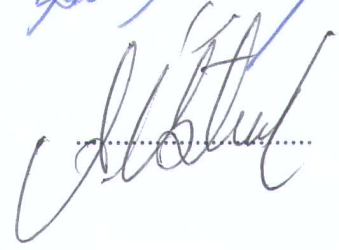
Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK**

İstanbul Teknik Üniversitesi



Doç. Dr. Aydın ÜSTÜN

Kocaeli Üniversitesi



Teslim Tarihi : 5 Mayıs 2017
Savunma Tarihi : 8 Haziran 2017





Ailem ve Müstakbel Eşime



ÖNSÖZ

Tecrübe, küçük bir kelime gibi görünebilir fakat tecrübenin kaynağı telafisi olmayan zamandır. Küçük bir adım ile başladığım bu yolda karşılaştığım engelleri aşmamı sağlayan ise tecrübe ve bilgisini benimle çekinmeden paylaştan güzel insanlardır.

Öncelikle bu tez çalışması için beni motive eden, tecrübe ve bilgi birikimini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman bizimle birlikte olduğunu gösteren ve TÜBİTAK 115Y237 numaralı projede bana da yer veren danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Tefik Özlüdemir'e teşekkürlerimi sunarım.

Edindiği bilgi ve tecrübeleri, çalışmaları ve hayatı paylaştan, karşılaştığım her zorlukta bana yön gösteren, tez kapsamında yer alan gerek yazılım gerekse donanım çalışmalarında bir öncü olarak belirlediğim, bizlere her zaman en iyi katkıyı vermeye çalışın değerli hocam Sayın Dr. Kerem Halıcıoğlu'na çok teşekkür ederim. Türkiye'de sizinle başlayan Sayısal Zenit Kamera Sistemi çalışmaları sizin izinizde ilerlemeye devam edecektir.

Proje çalışması boyunca gecesini gündüzüne katarak çalışmaya devam eden, her zaman yanımda bulunan, zorlukları birlikte aşmaya çalıştığımız değerli proje arkadaşlarım Sayın Arş. Gör. Müge Albayrak ve Sayın Burak Başoğlu'na çok teşekkür ederim.

Yaşamları boyunca benim için çalışın, her zaman daha iyisine sahip olmam için çabalayan, başta ben ve kardeşlerim için elinden geleni yapan annem Emine Uluğ, babam Ramazan Uluğ'a ve tüm aileme sonsuz minnettarım.

Yaptığım çalışmalar boyunca bana her zaman destek veren, benimle birlikte zorlu zamanlara katlanan, her zaman yanımda yer alan, ilerlediğim bu yola anlam katan ve yaptığım her çalışmada motivasyonumu sağlayan nişanlım Elif Uğur'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2017

Raşit ULUĞ
(Harita Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Zenit Kameranın Tarihi Gelişimi ve Astro-Jeodezik Çalışmalar	3
1.3 Türkiye’de Gerçekleştirilen Zenit Kamera ve Astro-Jeodezik Çalışmalar.....	6
2. ÇEKÜL SAPMASININ JEODEZİK TEMELLERİ	11
2.1 Jeodezide Kullanılan Koordinat Sistemleri	11
2.1.1 Presesyon, nütasyon ve kutup hareketi.....	12
2.1.2 Yersel koordinat sistemleri	14
2.1.2.1 Uluslararası yersel referans sistemi (ITRF).....	14
2.1.2.2 Dünya jeodezik sistemi-84 (WGS-84).....	15
2.1.2.3 Astronomik (Doğal) koordinatlar	16
2.1.3 Göksel koordinat sistemleri	19
2.1.3.1 Ufuk koordinat sistemi	20
2.1.3.2 Rektasansiyon (Ekvator) koordinat sistemi	22
2.2 Jeodezide Kullanılan Zaman Sistemleri	23
2.2.1 Yerin kendi eksenini etrafındaki rotasyona dayalı zaman sistemleri.....	23
2.2.2 Dinamik zaman sistemleri	25
2.2.3 Atomik zaman sistemleri.....	25
2.3 Yıldız Kataloqları	26
3. ÇEKÜL SAPMASI, GEOİT ve GEOİT BELİRLEME YÖNTEMLERİ	29
3.1 Çekül Sapması Türleri ve Elde Edilme Yöntemleri	29
3.1.1 Astro-jeodezik çekül sapması.....	32
3.1.2 Gravimetrik çekül sapması	33
3.1.3 Topoğrafik-İzostatik çekül sapması	35
3.2 Geoit	35
3.3 Geoit Belirleme Yöntemleri	38
3.3.1 Harmonik katsayılarla jeopeotansiyel modelin oluşturulması ve Bruns eşitliği ile geoit yüksekliğinin belirlenmesi	38

3.3.2	Gravite ölçülerinden Stokes integrali kullanılarak gravimetrik geoit yüksekliğinin belirlenmesi.....	39
3.3.3	GNSS/Nivelman yöntemi.....	39
3.3.4	Astro-jeodezik çekül sapmaları yardımıyla astronomik nivelman yöntemi ile geoit yüksekliğinin belirlenmesi	40
3.3.5	Kaldır-Yerine Koy-KYK (Remove-Restore-RR) tekniği ile geoidin belirlenmesi	42
4.	YENİLENEN SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ	45
4.1	Sistem Donanım ve Yazılımları.....	46
4.1.1	Teleskop.....	46
4.1.2	CCD kamera	48
4.1.3	Eğimölçerler	50
4.1.4	Focuser	53
4.1.5	Zaman belirleme donanımı.....	54
4.1.6	Değerlendirme yazılımları.....	54
4.2	Kalibrasyon.....	62
4.2.1	Teleskop kalibrasyonu	62
4.2.2	CCD kamera shutter gecikmesi	62
4.2.3	Azimut ve göksel kalibrasyon	64
4.2.4	Görüntü kalibrasyonu	65
4.2.5	Eğimölçerlerin kalibrasyonu	66
4.3	Astro-jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesi	71
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	77
	KAYNAKLAR.....	81
	EKLER	85
	EK A.1	87
	EK B.1	91
	EK C.1	93
	ÖZGEÇMİŞ	110

KISALTMALAR

SZKS	: Sayısal Zenit Kamera Sistemi
GPS	: Global Positioning System
GNSS	: Global Navigation Satellite System
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
LLR	: Lunar Laser Ranging
SLR	: Satellite Laser Ranging
TZK	: Transportable Zenith Camera
GIS	: Geographic Information Systems
CCD	: Charged Couple Device
ICRS	: International Celestial Reference System
ITRF	: International Terrestrial Reference System
IAU	: International Astronomical Union
IUGG	: International Union of Geodesy and Geophysics
GAST	: Greenwich Apparent Sideral Time
IERS	: International Earth Rotation and Reference System Service
CIO	: International Celestial Origin
WGS84	: World Geodetic System-1984
UT	: Universal Time
TAI	: International Atomic Time
ST	: Sideral Time
LAST	: Local Apparent Sideral Time
LMST	: Local Mean Sideral Time
GMST	: Greenwich Mean Sideral Time
UTC	: Coordinated Universal Time
TDT	: Terrestrial Dynamic Time
TT	: Terrestrial Time
EP	: Ephemeris Time
UCAC	: USNO CCD Astrograph Catalog
HGK	: Harita Genel Komutanlığı
MTA	: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
TPAO	: Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı
ICGEM	: International Center for Global Earth Models
NGA	: National Geospatial Intelligence Agency
EGM	: Earth Gravity Model
GGM	: Global Gravity Model
RCR	: Remove-Compute-Restore
HRTM	: High Resolution Tiltmeter
ACSYS	: Astro-geodetic Camera System



SEMBOLLER

h	: Elipsoidal yükseklik
H	: Ortometrik yükseklik
N	: Geoit yüksekliği (ondülasyonu)
φ	: Jeodezik enlem
λ	: Jeodezik boylam
Λ	: Astronomik boylam
Φ	: Astronomik enlem
α	: Rektasansiyon
δ	: Deklinasyon
\vec{g}	: Gravite vektörü
A	: Azimut
R	: Yer yuvarı yarıçapı
Υ	: İlkbahar Ekinoksu
$\Delta\psi$: Ekliptik boylamı nütasyonu
Ω	: Ay yörünge noktası boylamı
Δn	: Ekinoks eşitliği
ε_0	: Ekliptik ortalama eğimi
$\Delta\Psi$: Ekliptiğin boylamı
θ	: Çekül sapması açısı
ζ	: Yükseklik anomalisi
Δg	: Gravite anomalisi
γ	: Normal gravite
σ	: Birim kürenin yüzü
$S(\psi)$: Stokes fonksiyonu
ε	: Çekül Sapması
ξ	: Çekül sapması kuzey-güney bileşeni
η	: Çekül sapması doğu-batı bileşeni



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: UCAC katalogları özellikleri.....	27
Çizelge 4.1: Nivel210 ve HRTM eğimölçer özellikleri.....	52
Çizelge 4.2: Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net yazılımları kullanılarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.	61
Çizelge 4.3: Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net (downsample 2) yazılımları kullanılarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.....	61
Çizelge 4.4: Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net (downsample 4) yazılımları kullanılarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.....	61
Çizelge 4.5: Kalibrasyon gözlemi tarih ve süreleri.....	68



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : TZK1 (Transportable Zenith Camera).....	4
Şekil 1.2 : TZK2 (solda), TZK3 (sağda).....	5
Şekil 1.3 : Astro-jeodezik çekül sapmaları [2].....	7
Şekil 1.4 : 1976 Türkiye Geoidi.....	7
Şekil 1.5 : 1978 Türkiye Geoidi.....	8
Şekil 1.6 : Türkiye Geoidi 1994.....	9
Şekil 2.1 : Presesyon ve nütasyon.....	13
Şekil 2.2 : Kutup hareketi.	13
Şekil 2.3 : ITRF noktalarının dağılımı.....	15
Şekil 2.4 : ITRF koordinat sistemi.....	15
Şekil 2.5 : Jeodezik (Elipsoidal) koordinatlar.	16
Şekil 2.6 : Astronomik koordinat sistemi ve astronomik koordinatlar.	17
Şekil 2.7 : Çekül eğrisi.....	19
Şekil 2.8 : Ufuk koordinat sistemi.	20
Şekil 2.9 : Jeosentrik paralaks.....	21
Şekil 2.10 : Rektesansiyon koordinat sistemi.	22
Şekil 2.11 : Yıldız zamanı.....	24
Şekil 2.12 : Zaman sistemleri arasındaki farklar.....	26
Şekil 3.1 : Helmert, Pizzetti ve Molodensky'e göre çekül sapmaları.	30
Şekil 3.2 : Çekül sapması bileşenleri [30].	31
Şekil 3.3 : Çekül sapmasının astronomik gözlemlerle belirlenmesi.	32
Şekil 3.4 : Vening-Meinsz integrali bileşenlerini gösteren birim küre.	34
Şekil 3.5 : Geoit ve ortalama deniz yüzeyi [40].....	36
Şekil 3.6 : Geoidin eğimi.	41
Şekil 3.7 : Astronomik nivelman [2].....	42
Şekil 4.1 : İlk ulusal SZKS.	45
Şekil 4.2 : Yeni ulusal SZKS.	47
Şekil 4.3 : SZKS kullanılan optik bileşen.....	48
Şekil 4.4 : Apogee Alta F32 CCD.	49
Şekil 4.5 : CCD kuantum etkinlik grafiği.	49
Şekil 4.6 : Leica Nivel210 eğimölçer.....	51
Şekil 4.7 : Yüksek çözünürlüklü eğimölçer (HRTM).	51
Şekil 4.8 : HRTM iç yapısı [50].....	52
Şekil 4.9 : Optic TCF-S ısı duyarlı Focuser.....	53
Şekil 4.10 : Zaman belirlemede kullanılan donanım ve yazılımlar [2].....	55
Şekil 4.11 : Görüntü elde etme sırasında kullanılan yazılımlar.	55
Şekil 4.12 : Rterm yazılımı arayüzü.	57

Şekil 4.13	: Astrometry.net yazılımı ile yıldız poligonları oluşturulması örneği..	57
Şekil 4.14	: Asrometry.net yazılımı standart çıktıları.	58
Şekil 4.15	: Astrometry.net yazılımı -indx.png çıktı dosyası.....	59
Şekil 4.16	: Shutter gecikmesi.	63
Şekil 4.17	: Shutter gecikmesi test görüntüleri.	64
Şekil 4.18	: Azimut kalibrasyonu [5].	65
Şekil 4.19	: Görüntü kalibrasyonu işlem adımları.	66
Şekil 4.20	: Eğimölçer kalibrasyon düzeneği.	67
Şekil 4.21	: HRTM ile kaydedilen eğim, sıcaklık ve nem değerleri.	69
Şekil 4.22	: Sarsma tablasının kullanılması.	70
Şekil 4.23	: Hızlı sıcaklık değişiminin HRTM üzerine etkisi.	72
Şekil 4.24	: Hızlı sıcaklık değişiminin Nivel210 üzerine etkisi.....	73
Şekil 4.25	: Sarsma testi sonuçları.	74
Şekil 4.26	: PSF ile yıldız orta noktalarının belirlenmesi.	75
Şekil 4.27	: Rektasansiyon ve astronomik koordinat sistemleri arasındaki ilişki.	76
Şekil A.1	: 30 günlük gözlemden örnekler (Nivel210).....	87
Şekil A.2	: 30 günlük gözlemden örnekler (Nivel210).....	88
Şekil A.3	: 30 günlük gözlemden örnekler (HRTM)	89
Şekil A.4	: 30 günlük gözlemden örnekler (HRTM)	90
Şekil B.1	: Sarsma testi sonuçları 1	91
Şekil B.2	: Sarsma testi sonuçları 2	92

SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN TEST VE KALİBRASYON ÖLÇMELERİ

ÖZET

Yüksek doğruluklu global bir geoit modeli oluşturulması kuşkusuz jeodezi çalışmaları arasında çağımızın en büyük uğraşlarından birisidir. Nitekim GNSS’yi en etkin şekilde kullanabilmenin yolu yüksek doğruluklu geoit belirleme ile mümkündür . Farklı geoit belirleme yöntemleri arasında çekül sapmalarının önemi 17. yüzyıldan itibaren bilinmesine rağmen ölçme zorlukları çekül sapmalarının arka planda kalmasına neden olmuştur.

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren CCD teknolojisinin icadıyla birlikte birçok alanda büyük gelişmelerin önü açılmış ve jeodezi bu gelişmelerden etkilenen alanlardan birisi olmuştur. CCD teknolojisi ile birlikte astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesinde geleneksel yöntemin neden olduğu zorluklar ortadan kalkmış ve tamamen otomatize sistemler geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Aynı zamanda yüksek doğruluklu yıldız kataloglarının yardımıyla astronomik koordinatların elde edilme doğruluğu artmıştır.

Yüksek kuantum çözümüne sahip CCD kameralar ve GPS donanımlarıyla birlikte geliştirilen Sayısal Zenit Kamera Sistemleri (SZKS) Avrupa genelinde Almanya, Polonya, Sırbistan, Avusturya, Letonya, İsviçre, Asya’da Çin ve son olarak Türkiye’de üretilmiş ve gözlemleri başarılı olarak gerçekleştirmiştir. Kerem Halıcıoğlu tarafından geliştirilen ve Türkiyenin ilk ulusal SZKS olma özelliğini taşıyan bu sistem 2015 yılında tamamlanmış ve İstanbul metropoliten Alanının Anadolu yakasında 4 noktada başarılı şekilde astro-jeodezik çekül sapmaları belirlenmiştir.

ACSYS (Astro-geodetic Camera System) bir prototip sistem olarak tasarlanmış olmasına rağmen kısmen otomatik olarak çalışmaktaydı. Donanımsal özellikleri nedeniyle uzun ölçme hazırlık aşamaları gerekmekteydi. Ölçme süresinin asgari düzeye indirilmesi, astro-jeodezik çekül sapmasının elde edilme doğruluğunun artırılması için 2016 yılının başlangıcından itibaren ilk ulusal SZKS’de donanım ve yazılım modernizasyonuna gidilmiştir. Modernizasyon sürecinde görüntü elde etme ve işleme süreçlerinin otomatize hale getirilmesi ve yenilenen SZKS taşıyıcı altyapı sistemi ile birlikte temin edilen Yüksek Prezisyonlu Eğimölçer (High Resolution Tiltmeter-HRTM) ve yıldız görüntülerinin odaklanması için kullanılan focuser sisteminin entegrasyonu gündeme gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yenilenen ulusal SZKS’nin tüm mekanik ve optik bileşenlerinin test ve kalibrasyon ölçüleri gerçekleştirilmiş, donanımların sisteme entegrasyonundan önce karakteristik özellikleri ortaya konulmaya çalışılmış ve yenilenen sistemin ölçme hassasiyeti ve doğruluğu belirlenmeye çalışılmıştır. Sıcaklık ve nem değişiminin eğimölçerler üzerindeki etkileri incelenmiş, farklı çevre koşullarında sistemin gözlem stabilitesi test edilmiştir.

Sistem bileşenlerinin kalibrasyon çalışmaları için teleskop kalibrasyonu, CCD kameranın shutter gecikmesi, azimut ve göksel kalibrasyon çalışmaları, görüntü kalibrasyonu ve son olarak eğimölçer kalibrasyonu tamamlanmıştır.

Teleskop kalibrasyonu için teleskop gökyüzünde parlak bir yıldızla yönlendirilmiş, görüntü sistematik olarak bozulmuş ve bozulan görüntünün oluşturduğu daire görüntüleri kaydedilmiştir. İşlem sonucunda iç ve dış aynalar tarafında oluşan daire merkezlerinin çakıştığı görülmüştür. CCD kameranın shutter gecikmesini belirlemek için ise MaximDL yazılımı kullanılmıştır. Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü'nde yapılan deneylerde shutter gecikmesi 0.02 saniye olarak belirlenmiştir. Zenit kamera sistemi ile elde edilen çekül sapmaları azimuta bağımlıdır bu yüzden azimut kalibrasyonu yapılarak gözlem yapılan her bir yıldızla ait azimut değeri belirlenmiştir. Görüntü kalibrasyonu ile görüntülerde bulunan termik, kozmik, kamera veya atmosferik kaynaklı gürültüler (noise) elimine edilmiştir. Görüntülerdeki yıldızların belirlenmesi için ise Astrometry.net yazılımı kullanılmıştır. Eğimölçer kalibrasyonları üzerinde en çok uğraşılan konu olmuştur. İmal ettirilen bir plaka üzerine yerleştirilen iki eğimölçer ile yaklaşık 30 gün boyunca eğim değerleri kaydedilmiş ve farklı çevre koşulları, sıcaklık gibi etkenlerin eğimölçerler üzerindeki ilişkisi incelenmiştir. Plaka üzerine yerleştirilen eğimölçerler ile aynı çevresel koşullarda gözlem yapıldığı için değerlendirmelerde eğimölçerlerin birlikte ve bağımsız kullanımları incelenmiştir. HRTM'nin yüksek performans ile kullanılabilmesi için Rterm ACSYS Levelling Software programı Matlab kullanılarak geliştirilmiştir. 30 günlük gözlem süresinde kullanılan eğim düzeneğinin sıcaklık değişimlerinden etkilendiği düşünülerek eğimölçerler Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Laboratuvarı'nda sarsma tablası ve hava odası kullanılarak tekrar incelenmiştir. Çalışma sonucunda sıcaklık ve eğimölçerler arasında ihmal edilemeyecek düzeyde korelasyon olduğu belirlenmiştir.

Yenileme çalışmaları devam eden SZKS'ye ait ön bilgiler sunulmuş, sistem donanım ve yazılımları detaylı olarak incelenmiş ve modernizasyon sonrası yenilenen SZKS'ye ait çalışmalar incelenmiştir.

Bu çalışma TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından 115Y237 numaralı proje kapsamında desteklenmektedir.

CALIBRATION AND TESTING OF DIGITAL ZENITH CAMERA COMPONENTS

SUMMARY

Determination of a high accuracy geoid models is doubtlessly one of the main tasks among geodesists in our age. Thus the most efficient way to use the developing GNSS technology is dependent on the development of a geoid model with an accuracy at cm level. Though the importance of vertical deflection determination out of other geoid modelling methods has been known since the beginning of the 17th century, it was ignored because of difficult measurement procedures.

Starting from the second half of the 20th century, thanks to the invention of CCD (Charged Couple Device) technology, many disciplines, including geodesy, went under great changes. With the invention of CCD technology, the difficulties of traditional observation methods have been overcome with the progress that had taken place with the use fully or partly automatic systems. At the same time thanks to the star catalogues covering all the sky, determination of astronomical coordinates has become easier.

With the integration of GNSS and CCD technology, Digital Zenith Camera Systems (DZCS) have been developed in many European countries such as Germany, Poland, Serbia, Austria, Latvia, Swiss, Turkey and China in Asia. Using Turkey's first national DZCS, developed by Kerem Halıcıoğlu in 2016, deflections of vertical were successfully determined at 4 points on the Anatolian side of Istanbul.

In the first DZCS of Turkey, retrieval and processing of star images were done partly automatically. Levelling of the whole system and turning it to the azimuth direction were done manually by the observer. Therefore, skilled and experienced observers were needed and due to hardware shortcomings, long observation periods were required. To minimize the observation period and increase the accuracy of vertical deflection, with the beginning of 2016, DZCS of Turkey went under modernization process. The main objective of the modernization process is to minimize the observation period by implementing a fully automatic system and increase accuracy of vertical deflection by removing disruptive effect like wind, levelling etc.

Levelling the system is one of the major point when determining the astro-geodetic deflection of vertical using DZCS, because the mathematical models apply only to the zenith point. Thus DZCS should be oriented towards local plumb line. Levelling process in the old DZCS was done manually using a pair of Nivel 210 inclination sensors and a standart tripod. It generally took one hour or more. Resolution of Nivel 210 inclination sensor is 0.001 mrad. To meet the growing need for a better levelling accuracy, one of the Nivel 210 sensors was substituted with a High Resolution Tiltmeter (HRTM) of which resolution is smaller than 1 nrad. Also instead of standart tripod system, a carrier based system was produced. For sharpening the star images, which obtained from DZCS, a new temperature sensitive focuser was provided. Kerem Halıcıoğlu used Pinpoint Astrometry Engine Software V.5 (PAE) for matching stars in the images

to the star catalogues. Instead of PAE, new star matching software Astrometry.net was used.

The calibration phase consisted of two steps. Firstly, all components were calibrated using different calibration methods. Secondly testing of all components was carried out. All calibration and testing procedures were carried out in Bogazici University's Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute. Star images have been used for calibration of the telescope. Telescope is directed to shining star in the sky. Star images were systematically corrupted and saved. Corrupted stars in the images lose point view and become circle. If the centres of the circles formed in the inner and outer mirrors coincide, calibration of telescope is completed. Observation results showed that centres of two mirrors coincided. When obtaining astro-geodetic deflections of vertical, time is one of the most important factor. Therefore, shutter latency should be determined. A test environment was created in Bogazici University and using MaximDL software, shutter latency was determined 0.02 second. According to the studies carried out in Europe, astro-geodetic deflection of vertical depend on the azimuth values. After azimuth calibration, azimuths of all stars in the images were determined. Due to the thermal, cosmic, atmospheric and camera effects, star images include noises. To eliminate this noise from images, which include same disruptive effects were used.

The calibration of inclination sensors has been the most time consuming issue. Firstly, in accordance with the Nivel 210 user's manual, a calibration plate was proceced. Using calibration plate and a standard tripod an observation system was created to investigate temperature dependent characteristics of inclination sensors, sensors stability and environmental effects on the inclination sensors. Nearly 30 days observations were carried out. Leica SpiderQC software enables data acquisition from Nivel 210 inclination sensor. Tilt and temperature values are saved automatically and these values can be seen simultaneously. Although Hterm software provides data received from the HRTM inclination sensor, it does not have an automatic saving feature and the corresponding values an only can be seen as electronic bit. Also by the use of Hterm, 300 seconds data is lost on avarage on hour. To fully control the HRTM, save data automatically, to synchronize it with the Nivel 210 and to decrease the data loss, a software, namely Rterm ACSYS Levelling Software V.1, was developed using Matlab. Thanks to the Rterm software, data loss dropped from 30 seconds to 3 seconds, tilt and temperature values can be seen simultaneously. However, the connection has not been established for the Nivel 210 inclination sensor via Matlab and the reason is not clear yet. Because the laboratory is used in working hours, the observation between 07:00 and 19:00 were not processed. 30 days observations results showed a high correlation between temperature and inclination sensors output. However, this correlation could be taking place as a result of tripod expansion. To determine whether or not there is a correlation between temperature changes and tilt values, a vibration table and air chamber was used in Bogazici University's Earquake Laboratory. Effects of rapid temperature changes on inclination sensors were investigated.

According to the results from obtained air chamber, there is a correlation between temperature and tilt values and this correlation can't be negligible because temperature may change in observation time, which last nearly two hours or more. In addition, using vibration table both inclination sensors response to the acceleration were determined. Natural frequency of the Nivel 210 and HRTM were found as 1 and 0.1

Hz, respectively. A new star detecting and matching software called Astrometry.net was used with new star catalogue. In this thesis, integration of all components to the modernized DZCS of Turkey, creation process of an optimal structure, the first results of modernized DZCS of Turkey and future plans are discussed.

This study was supported by TUBITAK Scientific and Technological Research Projects Funding Program with the grant number 115Y237.





1. GİRİŞ

Helmert'in 1880 yılına göre jeodezi, yeryüzeyinin ölçülmesi ve haritaya aktarılmasını sağlayan bilim dalıdır. Bu tanım günümüzde dahi geçerlidir. Bu kısa tanımdan da anlaşıldığı gibi jeodezinin temel problemi yeryüzünün ve diğer gök cisimlerinin şeklinin ve gravite alanının zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenmesidir [1]. Yeryüzünün gerçek şeklinin belirlenmesi tarih boyunca cevabı aranılan sorulardan biri olmuş ve bu soruya cevap bulmak için önemli çalışmalar yapılmıştır. Özellikle 16. yüzyılın son dönemlerinde alet teknolojilerinde ve ölçme yöntemlerinde yaşanan gelişmeler gözlemevlerinin kurulmasına ve jeodezik yöntemlerle meridyen yayı ölçme çalışmalarının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır. İlk kez Hollandalı Snellius tarafından kurulan 33 üçgenden oluşan bir jeodezik ağ yardımıyla dolaylı olarak meridyen yayları ölçülmeye başlanmıştır [2].

Yeryuvarının gerçek şeklinin belirlenmesi çalışmalarında En Küçük Kareler (EKK) yönteminin geliştirilmesi jeodezik astronominin çalışma alanını genişletmiş, meridyen, paralel daire ve meridyene göre eğik yayların ölçü olarak kullanıldığı dengeleme modelleriyle elipsoit parametrelerinin belirlenmesi olanaklı hale gelmiştir [2]. 1745 yılında Bouguer tarafından gravite ve yükseklik arasında bir bağıklık olduğu ortaya çıkarılmış ve bunun sonucu olarak ölçülerin bir referans yüzeyine indirgenmesi tartışılmaya başlanmıştır. Yeryuvarının şekli üzerinde çalışmalar sürerken Carl Friedrich Gauss durgun deniz yüzeyinin karaların altında devam ettiği varsayımıyla oluşturulan eşpotansiyel yüzeyin yeryuvarının gerçek şekli olarak alınmasını önermiştir. J.F. Listing tarafından 1873 yılında bu eşpotansiyel yüzey Geoid olarak adlandırılmıştır.

19. yüzyıl başlarında yeryuvarına en uygun elipsoidin boyutlarının belirlenmesi amacıyla yerin değişik kesimlerinde yapılan astrojeodezik ölçülerin birlikte değerlendirilmesinde astronomik değerlerle jeodezik değerler arasında beklenmeyen ve ölçü hataları ile açıklanamayan farklar ortaya çıkmıştır. Sonraları çekül sapmaları olarak adlandırılan bu farkların Gauss tarafından (1828) belirlenmesiyle geoid kavram olarak

ilk kez açıklanmıştır. Geoit kitlelerin birbirini çekim kuvveti ve merkezkaç kuvvetine göre şekillenir ve kitlelerin düzenli bir yapıda olmaması nedeniyle sadece yaklaşıklıkla ifade edilebilir [3].

Geoidin belirlenmek istenmesindeki asıl amaç ise geoit yüksekliği olarak bilinen düzensiz ondülasyonlu yüzeyin belirli noktalarda referans elipsoidinden, onun normal doğrultusundaki uzaklığın bulunması ve eş değerli ondülasyon eğrileri ile temsil edilmesidir [3]. Geoit yüksekliği N ile gösterilir ve daha basit bir şekilde yeryüzünde bir noktanın geoide olan uzaklığı ile elipsoide olan uzaklığı arasındaki farktır. Geoit yüksekliklerinin elde edilmesinde kullanılan çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemlerden biri ise bu tez çalışmasında bileşenlerinin test ve kalibrasyon ölçmeleri ele alınan SZKS kullanılarak elde edilen çekül sapmaları ile geoit yüksekliğinin belirlenmesidir.

1.1 Tezin Amacı

Özellikle 1980'li yıllardan bu yana hızlı bir şekilde gelişen ve gelişmekte olan Global Konum Belirleme Sistemi (GPS) ve Global Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) konum bilgilerini yüksek doğrulukla elde etmeyi mümkün kılmış, zaman, enerji ve maliyet açısından büyük tasarruf sağlamıştır. Genel olarak GNSS sistemleriyle elde edilen yatay konum bilgileri istenilen doğrulukta olmasına rağmen, bu sistemler tarafından elde edilen yükseklik bilgileri yatayda elde edilen doğruluğa henüz ulaşamamıştır. Bunun yanı sıra GNSS sistemleri kullanılarak elde edilen yükseklik referans olarak seçilen dönel elipsoit yüzeyinden referans noktasına kadar olan yüksekliktir ve elipsoidal yükseklik (h) olarak adlandırılır. Elipsoidal yükseklikler geometrik anlamdadır ve fiziksel olarak anlam içermez, yani elipsoidal yükseklikler potansiyelden bağımsızdır suyun akış yönünü göstermez. Fakat değişik mesleki disiplinlere ait pek çok mühendislik projesinde yer alan uygulamalar yerin yüzeyindeki nokta yüksekliklerinin yerin gravite alanına bağlı olarak belirlenmesini gerektirir [4].

Geoitden referans yüzeyine olan ve yerin gravite alanına bağlı, fiziksel anlam içeren yükseklik ise ortometrik yükseklik (H) olarak adlandırılır. Pratik uygulamalarda GNSS teknolojisi ile elde edilen elipsoidal yüksekliğin ortometrik yüksekliğe dönüştürülmesi gerekir. Bu iki yükseklik sistemi arasındaki dönüşüm geoit yüksekliği (N) ile sağlanır ve bu yüksekliğin elde edilmesi için geoidin tanımlanması gereklidir. Geoidin

belirlenmesi ise uzun yıllardır jeodezinin temel konularından biri olmuştur. Özellikle GNSS teknolojisinden daha etkin bir şekilde faydalanabilmek için geoidin belirlenmesi büyük önem taşır. Bu çerçevede duyulan gereksinim ulusal ve uluslararası bilimsel platformlarda sıkça dile getirilmektedir.

Bu tez çalışmasında yüksek doğruluklu geoid belirleme yöntemlerinden biri olan astro-jeodezik nivelman yöntemiyle geoid belirlenmesinde kullanılan çekül sapmalarının Sayısal Zenit Kamera Sistemi (SZKS) ile elde edilmesi, SZKS'nin çalışma ilkeleri ve SZKS ile entegre kullanılan sistemlerin kalibrasyonu konularını ele almaktadır. [2] tarafından geliştirilen ve bu çalışmanın gerçekleştirildiği dönemde Türkiye'nin ilk ve tek sayısal zenit kamerası olma özelliğini taşıyan bu sistemde test ölçüleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. 01.01.2016 tarihinde ise yenilenen ulusal SZKS ile İstanbul metropolitan alanı için yüksek doğruluklu geoid belirlemeyi amaçlayan ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 115Y237 numaralı bir proje başlatılmıştır. Modernizasyon çalışmalarıyla birlikte temin edilen mekanik donanımların sisteme entegrasyonu, bütün mekanik bileşenlerin ortak çalışabilirliği ve bileşenlerin kalibrasyonu gündeme gelmiştir. Proje kapsamında yenilenen SZKS bileşenlerinin kalibrasyon işlem adımları ve yenilenen sistemin test ölçmeleri tez çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasıyla gelişen ve geliştirilecek olan sayısal zenit kameralara bir altlık sunulması amaçlanmıştır.

1.2 Zenit Kameranın Tarihi Gelişimi ve Astro-Jeodezik Çalışmalar

17. yüzyılın ilk dönemlerinde zenit kameralar (zenit tubeler) nütasyon ve aberasyonu belirlemek için kullanılırdı [5]. Fotoğraf teknolojisindeki gelişmelerle birlikte Photographic Zenith Tube'ler kullanılmaya başlanmış ve böylelikle görüntü elde edebilme süreci hızlandırmıştır. 19. yüzyılın sonlarında coğrafi koordinatların zenit kameralar kullanılarak elde edilen fotoğraflarla bulunmasına dair çalışmalar yapılmıştır. Zenit kamera kullanılarak zenit doğrultusunda elde edilmiş fotoğraflardan enlem ve boylam hesaplanması için zenit kameranın fotoğrafik aparatlarla birlikte kullanılması teklifi ilk kez 1893'te Proud tarafından yapılmıştır. Runge, fotoğraf tabakaları kullanarak Hannover'de bir gözlem noktasının coğrafi konumunu 30'' doğrulukla belirledi [5]. 1913 yılında Helmert tarafından Kuzey Almanya Harz

dağlarında, 1968 yılında Heitz tarafından Almanya genelinde ve 1971 yılında ise Bomford tarafından Avrupa'da astro-jeodezik ölçüm belirlenmiştir. Klasik optik-mekanik ölçme donanımlarıyla gerçekleştirilen bu gözlemlerde deneyimli gözlemciler ve uzun değerlendirme süreçlerine gereksinim duyulmaktaydı [2].

Çok Uzun Bazlı Interferometri (Very Long Baseline Interferometry-VLBI), Aya Lazer Ölçmeleri (Lunar Laser Ranging -LLR), Uydulara Uzaklık Ölçmeleri (Satellite Laser Ranging-SLR) ve GNSS gibi gelişen ve yaygınlaşan, kullanımı kolay ve yüksek doğruluk içeren uydu tekniklerinin ortaya çıkmasıyla, bu tekniklere göre daha uzun süreler gerektiren zenit kamera tekniği arka planda kalmıştır.

Taşınabilir ilk zenit kamera sistemi olan TZK1'in (Transportable Zenith Camera) Almanya'da geliştirilmesiyle birlikte astro-jeodezik ölçmeler hız kazanmıştır (Şekil 1.1). TZK1 800 mm odak uzaklığına sahip ve 16 cm çapında bir optik sisteme entegre edilmiş bir fotoğraf makinasından oluşuyordu [2]. Almanya'da test edilen TZK1'in prezisyonu 1'' olarak yayımlanmıştır.

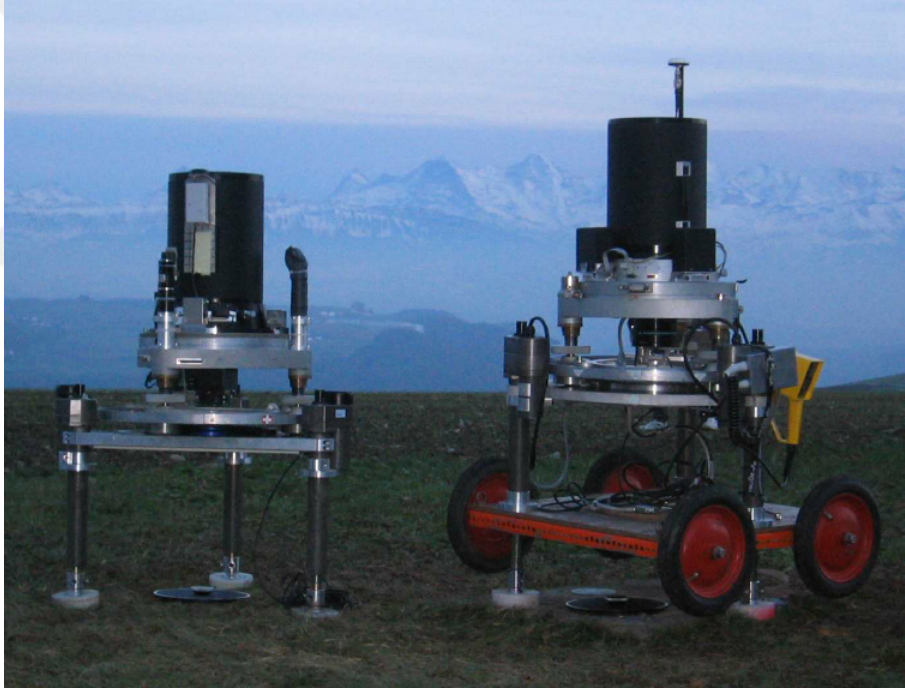


Şekil 1.1 : TZK1 (Transportable Zenith Camera).

1970'li yıllarda CCD (Charged Coupled Devices) teknolojisinin ortaya çıkması büyük değişikliklere yol açmış, astro-jeodezi ve astronomi alanlarında bu teknolojik

gelişmeyle birlikte önemli ilerlemeler yaşanmıştır. Zenit kamera sistemlerinin otomatizasyonunu mümkün kılan bu gelişmeye paralel olarak analog sistemlerin yerini, CCD kamera ve sayısal eğim sensörleri ile donatılmış sayısal zenit kamera sistemleri almaya başlamıştır.

Almanya Münih Teknik Üniversitesi'nde [6] tarafından 1994 yılında DGPS/CCD yıldız kamera sistemi geliştirilmiş ve $\pm 0.2'' - \pm 0.4''$ doğruluğuna ulaştığı bildirilmiştir. Bu sistemlerden [7] tarafından Almanya'da üretilen sistem istenilen sonucu vermezken [8] tarafından geliştirilen sistemde astronomik koordinatlar $0.3''$ doğrulukla belirlenmiştir. Almanya Hannover'de [9] tarafından TZK2 ve İsviçre ETH Zürih'te [10] tarafından TZK3 adlı sistemler tasarlanmıştır (Şekil 1.2). İkiz sistemler olarak tasarlanan TZK2 ve TZK3 ile Avrupa'da 433 istasyonda çekül sapmalarını belirlenmiş ve ulaşılan doğruluklar $\pm 0.3'' - \pm 0.5''$ olarak yayınlanmıştır [11, 12].



Şekil 1.2 : TZK2 (solda), TZK3 (sağda).

Sayısal zenit kameralarda başarılı sonuçların elde edilmesi, farklı ülkelerde farklı sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmaların önünü açmıştır. Bunlardan Polonya [13, 14], Sırbistan [15], Avusturya [16], Letonya [17, 18] kendi zenit kamera sistemlerini geliştirmiş ve sonuçları paylaşmışlardır. Avrupa genelinde ise İsviçre ve Rusya'nın da sayısal zenit kamera çalışmaları yürüttüğü bilinmesine rağmen henüz bir

açıklama yapılmamıştır. Son olarak Çin’de [19] tarafından sayısal zenit kamera sistemi geliştirilmiştir.

Astro-jeodezik çekül sapmaları nokta gravimetre değerlerinin aksine 2 boyutludur, bu özellik astro-jeodezik çekül sapmaları kullanılarak geoidin eğiminin belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tarafından geoidin eğiminin belirlenmesi amacıyla Geoid Slope Validation Survey isimli bir çalışma 2011 yılında başlatılmış ve halen devam etmektedir [20]. Ayrıca [16, 21, 22]’e göre astro-jeodezik çekül sapmalarının kitle dağılımından gravimetrik çekül sapmasına göre daha az etkilendikleri için gravimetrik çekül sapmasına göre 30:1 veya 20:1 oranında daha fazla ağırlıklandırılmaları gerekmektedir. ABD, Avrupa, Çin, Rusya ve Türkiye’de devam etmekte olan sayısal zenit kamera ve astro-jeodezik çekül sapmaları belirleme çalışmaları astro-jeodezik ve gravimetrik ölçüler arasındaki ağırlıklandırma çalışmalarına dair somut yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

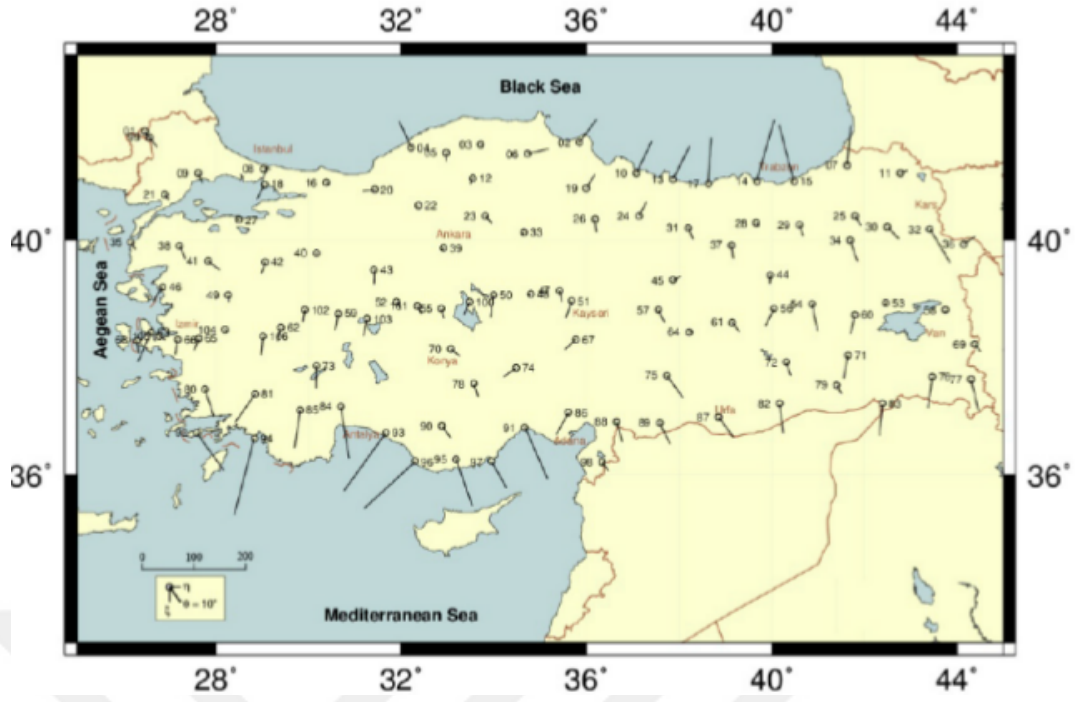
1.3 Türkiye’de Gerçekleştirilen Zenit Kamera ve Astro-Jeodezik Çalışmalar

Türkiye’de geoid belirleme çalışmaları büyük ölçüde GNSS/Nivelman yöntemine dayanmaktadır. Ülkemizde gerçekleştirilen ilk astro-jeodezik çalışmalar 1942 yılında Türkiye Ulusal Nirengi Ağının yönlendirilmesi ve dengelenmesi amacıyla yapılmıştır. 1953 yılına kadar Türkiye Ulusal Nirengi Ağına ait 98 adet I. derece noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır. 1953 yılından 1961 yılına kadar ise astro-jeodezik geoidin belirlenmesi amacıyla 21 noktada gözlem yapılmış ve bunlardan 19’unda sadece astronomik enlem ve boylam belirlenmişken, diğer 2 noktada bunlara ek olarak azimut gözlemi de yapılmıştır (Şekil 1.3).

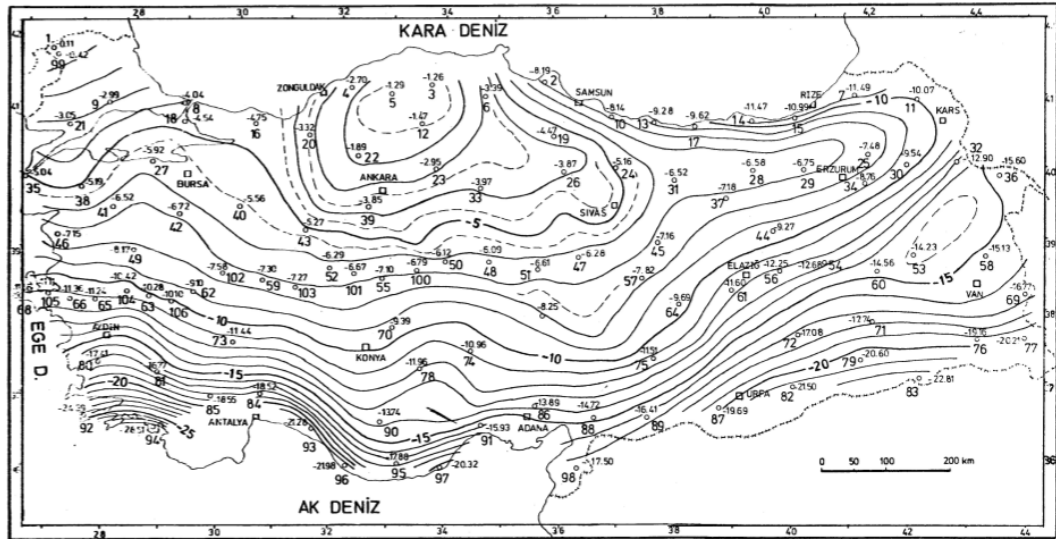
1977-1990 yılları arasında ise 161 noktada astronomik enlem ve boylam gözlemi yapılmış ve bunların içindeki 30 noktada buna ek olarak azimut gözlemi gerçekleştirilmiştir.

Ülkemizde astronomik gözlemler kullanılarak ilk astro-jeodezik geoid belirleme çalışması 1976 yılında Prof. Dr. Tevfik AYAN tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.4).

1976 Türkiye Geoidinin belirlenmesinde sadece 106 adet Laplace noktasında elde edilen astro-jeodezik çekül sapmaları kullanılmıştır. Çekül sapmalarının ait



Şekil 1.3 : Astro-jeodezik çökel sapmaları [2].

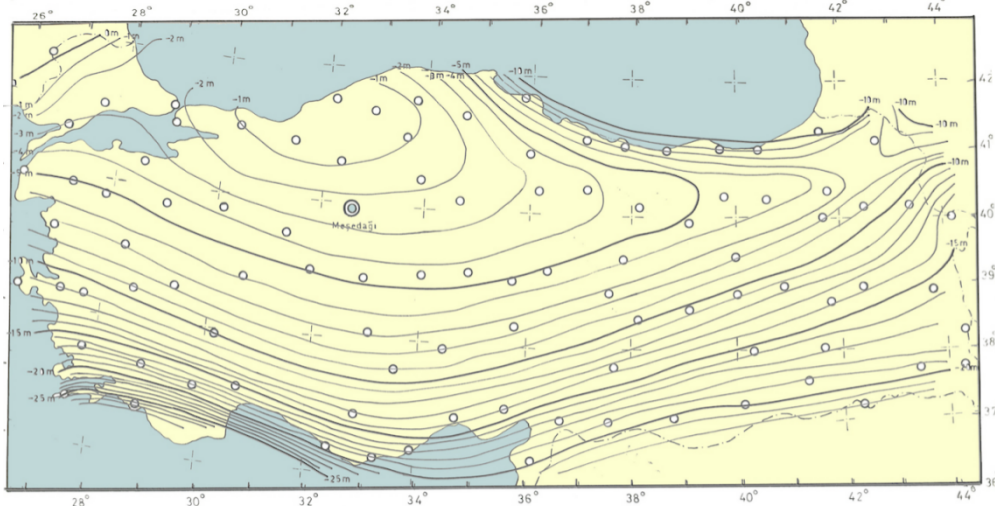


Şekil 1.4 : 1976 Türkiye Geoidi.

olduğu noktalardaki geoid yükseklikleri üç ayrı model ağın dengeleme sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Geoid yükseklikleri açısından öncelikle dönemin ulusal datum başlangıç noktası ve Laplace noktalarından biri olan Meşedağ noktasının geoid yüksekliği sıfır kabul edilmiştir. Dengeleme sonrası sonuçların Avrupa geoidi ile ilişkilendirilmesi için Meşedağ noktasının geoid ondülasyonu -3.85 metre kaydırılmıştır. Eşdeğerli ondülasyon eğrilerinin belirlenmesinde ise kübik parabol ile enterpolasyon yöntemi kullanılmıştır. 1976 Türkiye Geoidi aynı dönemde Avrupa için hesaplanan LEVALLOIS-MONGE geoidi ile büyük ölçüde uyum sağlamaktadır.

Nokta yükseklikleri arasındaki farklar genellikle 1 metrenin altında kalmakla birlikte maksimum fark 2.8 metre ve geoid belirleme doğruluğu ise ± 1.5 metre olarak bildirilmektedir [3].

Prof. Dr. Onur Gürkan tarafından gerçekleştirilen astro-jeodezik çekül belirleme çalışmaları ile 1978 Türkiye Geoidi 98 adet Laplace noktası kullanılarak, iki değişkenli polinom yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 1.5). 1978 Türkiye Geoidi için bir doğruluk verilmemiştir [2].



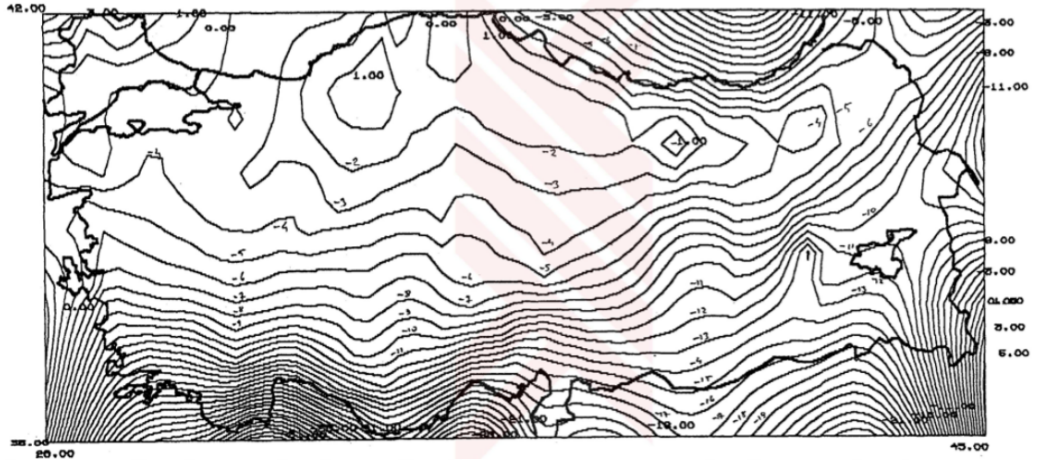
Şekil 1.5 : 1978 Türkiye Geoidi.

Ülkemizde geoid belirleme çalışmaları 1990'lı yıllardan sonra hız kazanmıştır. 1991 yılında Türkiye Geoidi 91 (TG-91) Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından belirlenmiştir [23]. Ülkede genelinde 200 noktada çekül sapması bileşenleri ve astro-gravimetrik nivelman yöntemiyle elde edilmiş veriler kullanılarak Türkiye Astro-Jeodezik Geoidi (TAG-94), 1994 yılında hesaplanmıştır [23].

Osman Alp tarafından yapılan çalışmada daha önceki geoid belirleme çalışmalarında kullanılan 98 Laplace noktası, duyarlılığının diğer ölçülere göre düşük olduğu 23 usturlap noktasının dahil edilmediği 274 nokta, usturlap ölçülerinin etkisinin belirlenmesi amacıyla bu ölçülerin diğer noktalarla birlikte işleme alındığı 297 nokta ve astro-jeodezik çekül sapması ile astro-gravimetrik çekül sapmasının test edilmesi amacıyla 278 noktalık 4 farklı nokta kümesi oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında oluşturulan Türkiye Geoidi 1994 Şekil 1.6'da görülmektedir.

Her nokta kümesinden oluşturulan farklı geoid modelleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. 98 adet Laplace noktası kullanılarak oluşturulan astro-jeodezik geoid diğer çözümlerle

uyuşumlu çıkmamış ve bunun nedeni nokta sayısının az olması olarak açıklanmıştır. Usturlap ölçülerinin dahil edilmediği 255 noktalı astro-gravimetrik geoidin en uygun sonucu verdiği belirtilmiştir. Prof. Dr. Tefvik Ayan'ın çalışmasında yaptığı gibi Meşedağ noktasındaki geoid ondülasyonu sıfır kabul edilmiştir, dengeleme sonrası ise $N = -3.85$ metre alınarak diğer noktalar 1950 Avrupa Datumuna (European Datum 1950-ED50) bağlanmıştır. Referans alınan Meşedağ noktasından uzaklaştıkça standart sapmanın yükseldiği belirtilmiş ayrıca Güneydoğu ve Akdeniz bölgelerindeki nokta sayısının azlığı, bu bölgelerdeki standart sapma büyüklüğünün ± 1.5 metrenin üstünde olmasına neden olmuştur [23].



Şekil 1.6 : Türkiye Geoidi 1994.

2010 yılında [24] tarafından Konya ilinde 6 noktada yıldız gözlemi için Kern DKM 3-A universal teodoliti ve zaman senkronizasyonu için Omega OTR-6 kronografi kullanılarak yıldız çiftleri yardımıyla astronomik enlem ve boylam belirlenmiştir. Enlem ölçme doğruluğu $0.3''$, boylam ölçme doğruluğu $1''$ ve çekül sapmalarının ortalama hatası $0.59''$ olarak verilmiştir. Astronomik boylam belirleme doğruluğunun düşük olmasının temel nedeni zaman senkronizasyonunda kullanılan kronografin zaman belirleme doğruluğunun düşük olmasından kaynaklanmasıdır. [25] tarafından astronomik enlem ve boylam doğruluğunun yerel jeoit modellerine etkisi incelenmiş ve 6 noktalı ağda gerçekleştirilen astronomik nivalman sonucu geoid yüksekliklerinin $\text{km}'de$ karesel ortalama hata değeri ± 18 ppm olarak paylaşılmıştır.

2015 yılında ise [2] tarafından geliştirilen Türkiye'nin ilk SZKS donanımı ile test gözlemleri başarıyla gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan SZKS astronomik gözlemlerin zorluklarını büyük oranda ortadan kaldırmış, veri elde edilmesinin kısmen, veri işlenmesi adımlarının ise tamamen otomatize edilmesiyle astro-jeodezik geoid

kavramını yeniden gündeme getirmiştir. Ülkemizde bir “cm” geoidi belirleme çalışmaları devam etmektedir. Yüksek doğruluklu bir geoid belirleme çalışmalarında ise astro-jeodezik verilerin göz ardı edilemeyeceği Avrupa ve ABD’de yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Ulusal SZKS ölçü süresini kısaltmış, insan gücüne olan ihtiyacı büyük oranda ortadan kaldırmış ve astro-jeodezik çekül sapması verilerini yüksek doğruluklu elde etmeyi mümkün kılmıştır. TÜBİTAK tarafından desteklenen 115Y237 numaralı proje kapsamında SZKS ölçülerinde yararlanılarak İstanbul metropolitan alanı için yüksek doğruluklu oluşturulacak geoid modeli, ülkemizde devam eden Yükseklik Sistemlerinin Modernizasyonu projesine de katkıda bulunacaktır.



2. ÇEKÜL SAPMASININ JEODEZİK TEMELLERİ

Astro-jeodezik çekül sapmalarının sayısal zenit kamera sistemleri ile elde edilebilmesi için jeodezide kullanılan koordinat ve zaman sistemlerinin detaylı bir şekilde ele alınması ve bu sistemler arasındaki dönüşümlerin sağlanabilmesi çok önemlidir. Nitekim jeodezik astronominin ilk dönemlerinde yeryuvarının dönme ekseninin hareketinin güneş ve ayın çekim etkisi ile hareket eden rijit yeryuvarı modeli ile hesaplanması yeterliydi. Günümüzde ise yerin rijit olmayan davranışını tanımlamak için elastik model, sıvı çekirdekli model gibi daha gerçekçi modeller kullanılmaktadır. LLR, SLR, VLBI ve GNSS gibi yüksek presizyon sağlayan uygulamalarda bu presizyona uyum sağlayacak yüksek presizyonlu koordinat ve zaman sistemlerinin tanımlanması gereklidir.

2.1 Jeodezide Kullanılan Koordinat Sistemleri

Jeodezide temel olarak yeryuvarı ile birlikte hareket eden cisimlerin koordinatlarını zamana bağlı olarak tanımlamak için yersel (earth-fixed), yeryuvarı ile birlikte hareket etmeyen gök cisimlerinin konumlarını zamana bağlı olarak tanımlamak için göksel (celestial) ve bu sistemler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için yörüngesel (orbital) koordinat sistemleri kullanılır. Koordinat sistemi olarak tanımlanan Zaman sistemleri ise koordinat sistemlerini birbirine bağlanması işleminde kullanılır.

Konvansiyonel Göksel Referans Sistemi (International Celestial Reference System-ICRS) ve Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi (International Terrestrial Reference System-ITRS) Uluslararası Astronomi Birliği (International Astronomical Union-IAU) ve Uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliği (International Union of Geodesy and Geophysics-IUGG) tarafından tanımlanmakta ve referans çerçeveleri bu kurumlar tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu iki sistem arasındaki dönüşüm yer dönme parametreleri olarak bilinen presesyon, nütasyon, kutup hareketi ve Greenwich Görünen Yıldız Zamanı (Greenwich Apparent Sideral Time-GAST) kullanılarak sağlanır. Bu sistemlerin güncellenmesi ve gerçekleştirilmesi ise Uluslararası Yer

ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference System Service-IERS) tarafından yürütülür.

SZKS ile elde edilen görüntülerdeki yıldız koordinatları rektesansiyon koordinat sisteminde tanımlanmıştır. Rektesansiyon koordinat sistemi ise temel gök koordinat sistemi olarak alınmakta ve bu sistemden dönüşüm yer dönme parametreleri ile sağlanmaktadır.

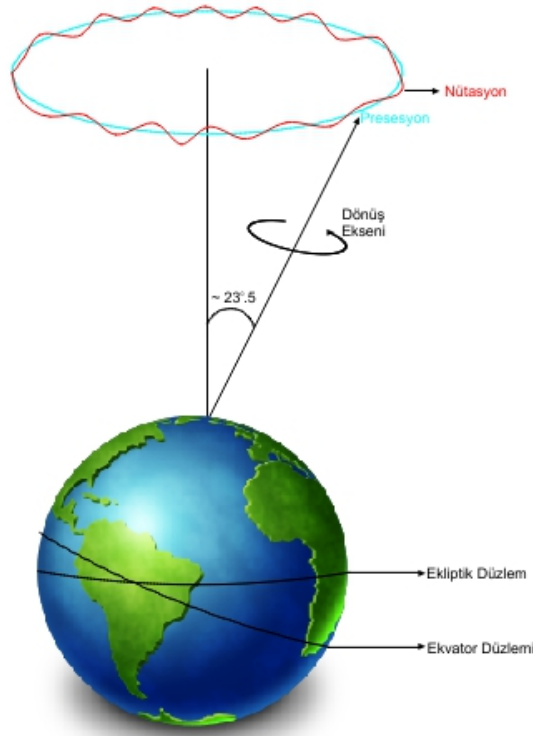
2.1.1 Presesyon, nütasyon ve kutup hareketi

Güneşin, ayın ve diğer gök cisimlerinin yeryuvarı üzerindeki çekimsel etkileri yeryuvarının dönme ekseninde değişime neden olmaktadır. Bu etkiler presesyon ve nütasyon olarak iki farklı başlık altında ele alınmaktadır. Presesyon, diğer bir isimle lunisolar presesyon gök kutbunun ekliptik kutbu etrafında ekliptik düzleme paralel ve ortalama eğimi $23^{\circ}26'21.4''$ bir daire çizmesine neden olur (Şekil 2.1). Lunisolar presesyon yaklaşık olarak 25800 yıl olan uzun dönemli bir periyoda sahiptir. En büyük etkiye güneş ve ay neden olmaktadır. Bu etki yaklaşık olarak $50.3''/yıl$ dolayındadır [1].

Presesyonun üzerinde ise kısa dönemli etki olarak da isimlendirilen nütasyon bulunur. Nütasyonun periyodu 5 gün ile 18.6 yıl arasında değişmektedir. Nütasyonun temel nedeni ayın yörüngesinin ekliptik eksene karşı yaklaşık 5° eğimli olmasıdır. Diğer etkiler ise 1/2 yıllık ve 1/2 aylık periyotlara ayrılır ve güneş ve ayın salınımından dolayı yeryuvarının kuzey ve güney yarım kürelerinin arasında oluşan etki olarak bilinir.

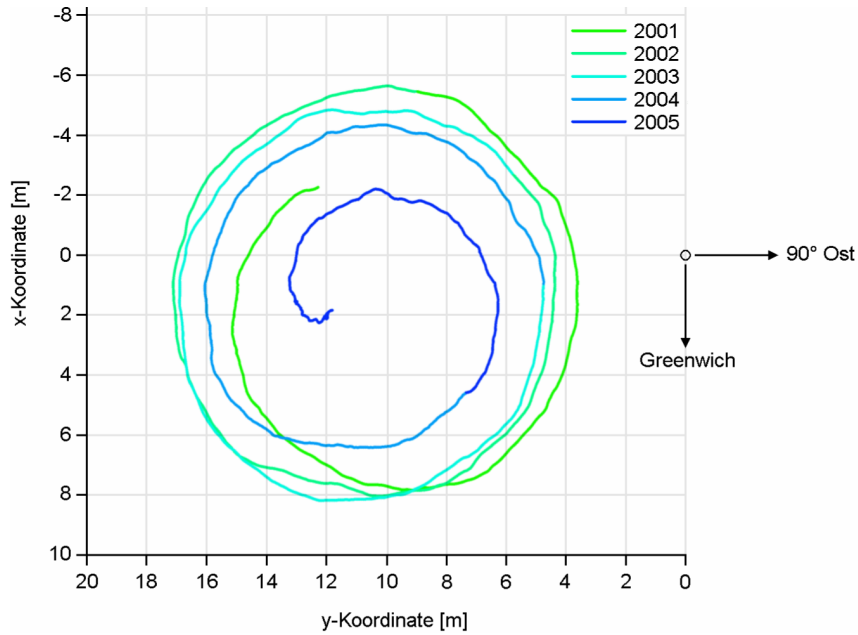
Presesyon ve nütasyon zamanın bir fonksiyonu olarak modellenenebilir. Günümüzde IAU2000/2006 presesyon ve nütasyon modelleri kullanılmaktadır. [26, 27] tarafından oluşturulan bu model P03 presesyon teorisine dayanmaktadır ve nütasyon 1365 trigonometrik terim kullanılarak [28] tarafından hesaplanmıştır. SZKS'de IAU2006 presesyon ve IAU2000 nütasyon modelleri Novas kütüphaneleri yardımıyla kullanılmıştır.

Kutup Hareketleri ise yeryuvarının dönme ekseninin ortalama kabul edilen bir eksen etrafındaki hareketleri olarak tanımlanabilir (Şekil 2.2). Kutup noktasının ortalama konumundan sapması yaklaşık 14 haftalık periyoda sahip olan Chandler Wooble'dan kaynaklanmaktadır. Kutup gezinimi olarak da bilinen kutup hareketinin periyodu



Şekil 2.1 : Presesyon ve nütasyon.

yaklaşık olarak 435 haftadır. Ortalama kutup noktası ve anlık kutup noktası arasındaki fark $1''$ 'nin altında kalmakta birlikte, çok küçük değişimler olmaktadır. Kutup hareketi IERS tarafından günlük olarak VLBI, SLR, LLR ve GNSS gözlemleri yardımıyla hesaplanmakta ve kullanıcılara sunulmaktadır.



Şekil 2.2 : Kutup hareketi.

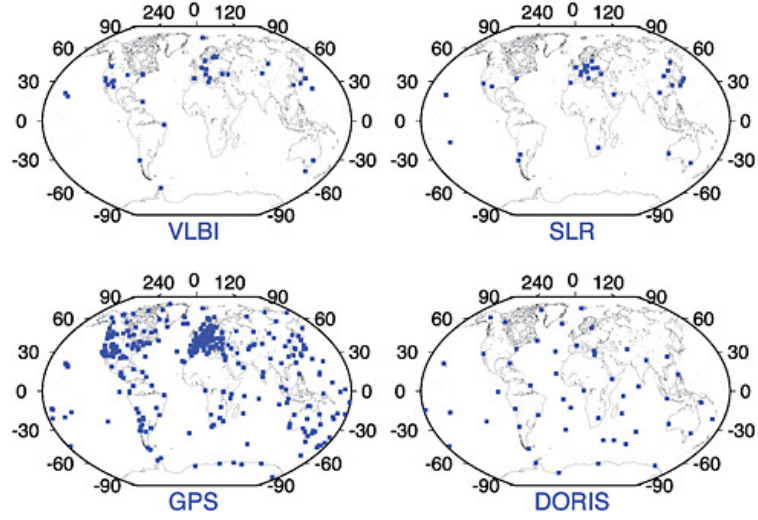
2.1.2 Yersel koordinat sistemleri

Yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönüşünden etkilenen, diğer bir ifade ile yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönmesi ile birlikte uzaydaki konumu değişen cisimlerin, bu etkiden arındırılmış bir koordinat sisteminde tanımlanması gereklidir. Bu nedenle yeryuvarı ile birlikte hareket eden cisimlerin koordinatlarını zamana bağlı olarak tanımlamak için yersel koordinat sistemleri kullanılır. Yeryuvarının fiziksel yapısı bir koordinat sistemi tanımlanmasını olanaklı kılacak kadar düzenli olmadığı için, yeryuvarının matematiksel modeli olarak kutup noktalarından basık bir dönel elipsoit seçilir. Dönel elipsoit aslında bir elipsin küçük eksenini etrafında 360° döndürülmesiyle elde edilir. Bu durumda elipsi tanımlayan büyük yarı eksen a , küçük yarı eksen b , basıklık f , birinci dış merkezlilik e veya ikinci dış merkezlilik e' eksentrisite değerlerinden herhangi iki tanesi yeterlidir. Uygulamalarda dönel elipsoidin genellikle büyük yarı eksen ve basıklık ile ifade edilmesi tercih edilir. Yersel koordinat sistemlerinin başlıca bilinenleri Uluslararası Yersel Referans Sistemi (International Terrestrial Reference Frame-ITRF), GPS sisteminin kullandığı Dünya Jeodezik Sistemi-84 (World Geodetic System-84-WGS84) ve çekül sapması belirlemede kullanılan Astronomik (Doğal) koordinat sistemidir.

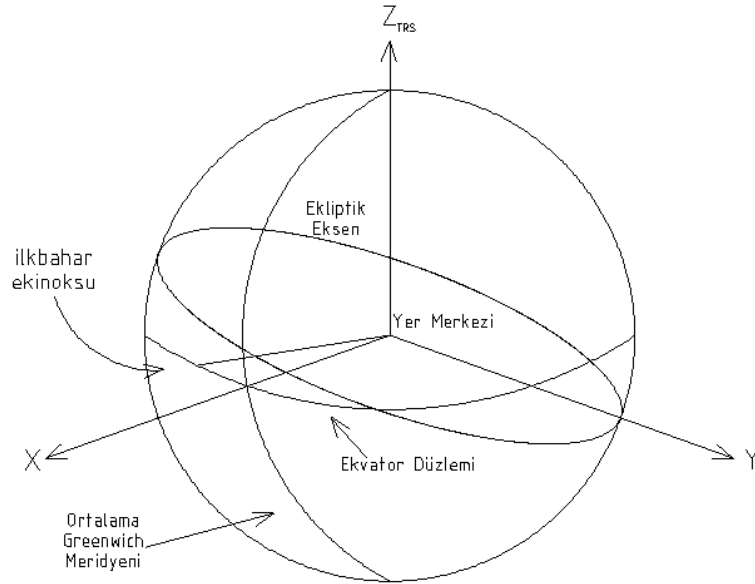
2.1.2.1 Uluslararası yersel referans sistemi (ITRF)

ITRF ulusal jeodezik ağların kurulmasından, yer dönme parametrelerinin belirlenmesi, uydu sistemlerine altlık oluşturması ve deformasyon çalışmalarına yardımcı olması amacıyla yeryuvarı için standart bir koordinat sistemi olarak planlanmıştır. Dünya genelinde 250'den fazla noktada VLBI, SLR, Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) ve sürekli GNSS gözlemleri yapılarak kinematik bir ağ oluşturulmuştur. Şekil 2.3'te ITRF ağı noktalarının yeryuvarındaki dağılımı ölçü gruplarına göre gösterilmektedir. ITRF sistemi 1994, 1996, 2000, 2005, 2008 ve son olarak 2014 yılında güncellenmiştir.

Yer Merkezli-Yer Sabit olan bu sistemin merkezi okyanusların ve atmosferin dahil edildiği yeryuvarının ağırlık merkezidir. +X eksenini Greenwich boylamı ile ekvatorun kesişiminden geçer. +Z eksenini ise CIO (Konvansiyonel Uluslararası Orijin) olarak isimlendirilen ortalama kutup noktasına yönelmiştir. +Y eksenini sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde bu iki eksene diktir (Şekil 2.4).



Şekil 2.3 : ITRF noktalarının dağılımı.



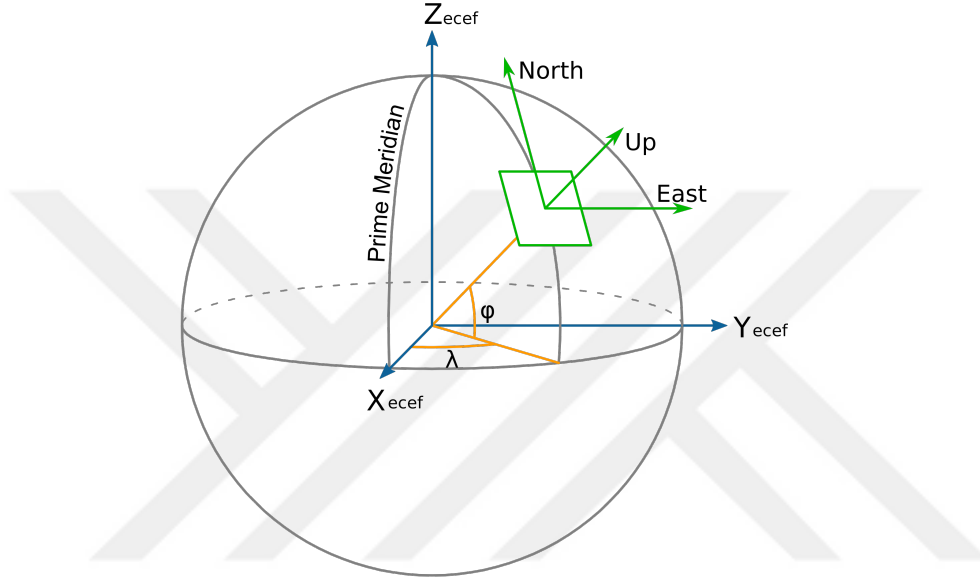
Şekil 2.4 : ITRF koordinat sistemi.

2.1.2.2 Dünya jeodezik sistemi-84 (WGS-84)

1987 yılında ABD Savunma Bakanlığı tarafından GPS sistemi için oluşturulan bir koordinat sistemidir. WGS-84'ün ITRF'ten en büyük farkı ITRF sisteminin kinematik bir sistem olmasına rağmen WGS-84 sisteminin statik bir sistem olmasıdır. Diğer bir fark ise ITRF sisteminde elipsoit olarak GRS-80 elipsoidinin kullanılması, WGS-84 sisteminde ise yine aynı ismi taşıyan WGS-84 elipsoidinin kullanılmasıdır. SZKS'de yersel koordinatların elde edilmesi işlemi kullanılan GPS antenlerinin koordinatları da bu sistemde tanımlanmaktadır. Sistem ITRF ile benzer şekilde +X eksenini Greenwich boylamı, ekvatorun kesişiminden geçer. +Z eksenini ise CIO (Konvansiyonel Uluslararası Orijin) olarak isimlendirilen ortalama kutup noktasına

yönelmiştir. $+Y$ eksenini sağ el koordinat sistemi oluşturacak şekilde bu iki eksene diktir.

ITRF ve WGS-84'te elde edilen koordinatlar aynı zamanda jeodezik (elipsoidal) koordinatlardır. Jeodezik koordinatlar jeodezik enlem φ , jeodezik boylam λ olarak ifade edilir. Jeodezik enlem ekvator düzleminde ilgili noktanın normaline kadar olan açığı ifade ederken, jeodezik boylam ekvator düzlemindeki başlangıç meridyeni ile ilgili noktadaki meridyen arasındaki açı olarak tanımlanır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Jeodezik (Elipsoidal) koordinatlar.

Jeodezik enlem ve boylam çökül sapması bileşenlerinin elde edilmesinde kullanılan temel büyüklüklerdir. Bu yüzden çökül sapmaları seçilen referans elipsoidine bağlıdır. Jeodezik enlem ve boylam değerlerinin elde edilme doğruluğu çökül sapması doğruluğunu etkileyen en önemli unsurlardandır. GNSS yani küresel konum belirleme sistemleri kullanılarak istenilen doğruluğa kolay bir şekilde ulaşmak mümkündür. Jeodezik enlem ve boylam değerlerinin elde edilme doğruluğu ise $0.01''$ büyüklüğünün altındadır.

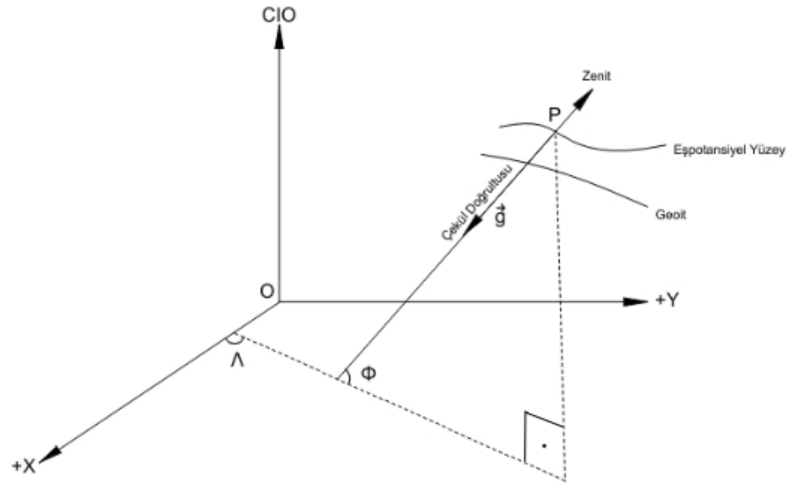
2.1.2.3 Astronomik (Doğal) koordinatlar

Fiziki olarak var olan, yeryuvarının ağırlık merkezinin veya yeryüzündeki herhangi bir noktanın başlangıç alındığı üç boyutlu dik koordinat sistemleri olarak tanımlanabilir. Yeryüzünde yapılan jeodezik çalışmalar bu koordinat sistemiyle doğrudan ilişkilidir [29]. Jeodezik çalışmalar daima çökül çizgisi teğeti yani gravite vektörü doğrultusunda yapılır. Gravite vektörü ise yerin kütle dağılımına bağlıdır. Gravite her

noktada farklılık gösterdiğinden dolayı gravite vektörü de noktadan noktaya farklılık gösterecektir. Bu durumda gravite vektörü bir doğrudan ziyade eğri şeklini alacaktır. Bu sebepten dolayı gravite vektörü doğrultusu kavramı bahsedilen noktadaki çekül eğrisinin teğeti olarak ele alınmalıdır [2]. Doğal koordinat sisteminin merkezi diğer yersel koordinat sistemleri gibi okyanusların ve atmosferin dahil edildiği yeryuvarının ağırlık merkezidir. $+X$ eksen Greenwich boylamı ve ekvatorun kesişiminden geçer. Sistemin $+Z$ eksen ise yerin dönme eksenine tanımlıdır ve ortalama kutup noktasından geçer.

“Astronomik meridyen düzlemi ise çekül eğrisinin teğetini de kapsayan ve Z eksenine paralel olan eksen olarak tanımlanır. Jeodezik meridyen düzleminde farklı olarak astronomik meridyen düzlemi Z eksenini içermez” [2].

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi uzay eğrisi olması nedeniyle gravite vektörü yeryuvarının merkeziyle yani dönüş eksenine çakışmaz. P noktasının yerin dönme eksenine paralel vektörü ile çekül eğrisine teğet olan vektörü birlikte bir düzlem tanımlar. Bu düzleme astronomik meridyen düzlemi denir. Şekil 2.6’da görülen Λ astronomik boylamı ifade eder ve ekvator düzleminde $+X$ eksen ile astronomik meridyen düzlemi arasındaki açıyı ifade eder. Astronomik enlem Φ ise ekvator düzleminde çekül eğrisinin teğetine kadar olan açıdır.



Şekil 2.6 : Astronomik koordinat sistemi ve astronomik koordinatlar.

“Astronomik zenit açısı veya zenit uzaklığı düşey düzlemde çekül eğrisi teğetinden hedef noktaya olan açı olarak tanımlanır” [2]. Astronomik azimut ise astronomik

meridyen düzlemi ile gözlenen nokta arasındaki kuzeyden olan açıdır ve A harfi ile ifade edilir.

Astronomik enlem Φ , boylam Λ ve azimut A gözlem noktasının jeopotansiyel yüzeylere göre tanımlanır ve bundan dolayı her gözlem noktası için farklı sistemler oluşmaktadır. Sistemler arasındaki dönüşüm ve ilişkiler ortalama dönme eksenine ve geoide indirgeme ile sağlanmaktadır.

Newton'un ünlü çekim yasasına göre kütleler karşılıklı olarak bir çekim alanı yaratır. Yeryüzünü oluşturan kütleler bu çekim yasasından bağımsız tutulamaz. Bu nedenle herhangi bir noktada yeryuvarını oluşturan kütlelerin çekimi ve yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvvetinin bileşkesi olan bir çekim kuvveti diğer bir ifadeyle bir çekim ivmesi tanımlanır. Birim kütleye uygulanan bu kuvvete gerçek gravite vektörü (\vec{g}) denir. Vektörün yönü kütlelerin ağırlık merkezine doğrudur ve bu yöne astronomik ayakucu (Nadir), ters yöndeki doğrultuya ise astronomik başucu (Zenit) adı verilir [30].

Gerçek gravite vektörü (\vec{g}) büyüklüğü ve yönü ölçülebilen bir vektördür ve astronomik enlem Φ , astronomik boylam Λ yani astronomik koordinatlar yardımıyla belirlenebilir. Gerçek gravite vektörünün oluşturduğu alan gerçek gravite potansiyeli ile ifade edilebilir (Eşitlik 2.1). Fonksiyonun gradyenti ise fonksiyonun 3 boyutlu bileşenlerini verir (Eşitlik 2.2).

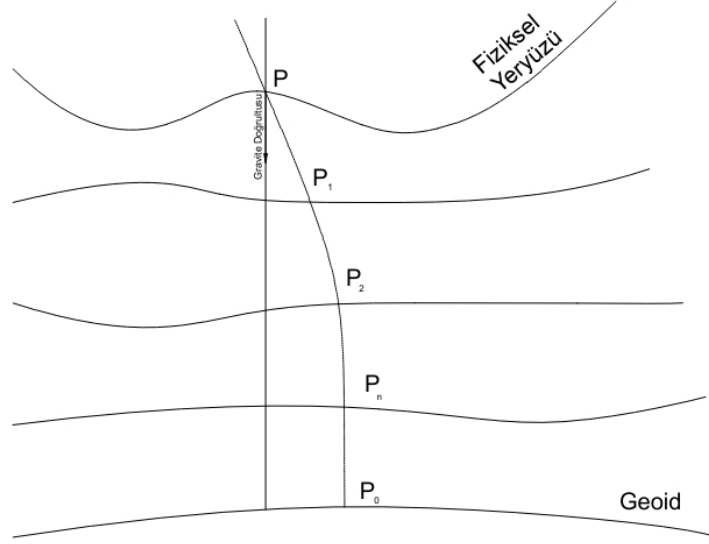
$$W = W(X, Y, Z) \quad (2.1)$$

$$\text{grad}(W) = \vec{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta W}{\delta X} \\ \frac{\delta W}{\delta Y} \\ \frac{\delta W}{\delta Z} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Gravite potansiyeli W uzayda her noktasından eşit değerler aldığı birbiri ile kesişmeyen sonsuz sayıda kapalı yüzeyler oluşturur. Bu yüzeylere jeopotansiyel yüzey ya da kısaca jeop denir.

Geoit ile yeryüzü arasında eşit aralıklarla oluşturulan bir eşpotansiyel yüzey serisinde, yeryüzünden geoide doğru uzanan bir gravite vektörü her noktada farklı bir gravite değeri alacağından dolayı ortaya çıkan şekil bir doğru değil eğri olur. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi kütle dağılımının homojen olmaması, farklı yoğunluğa sahip kütlelerin Newton kanununa göre farklı çekim ivmelerinde bulunması nedeniyle

yeryüzü üzerinde bulunan P noktasından geçen ve geoidi P_0 noktasında kesen gravite vektörü bir eğri çizmektedir. Bu eğriye çekül eğrisi denir. Jeodezide bu eğrinin uzunluğu ortometrik yükseklik olarak adlandırılmaktadır. Çekül doğrultusu kavramı ise gravite vektörünün ilgili noktadaki teğeti olarak düşünülmelidir.



Şekil 2.7 : Çekül eğrisi.

2.1.3 Göksel koordinat sistemleri

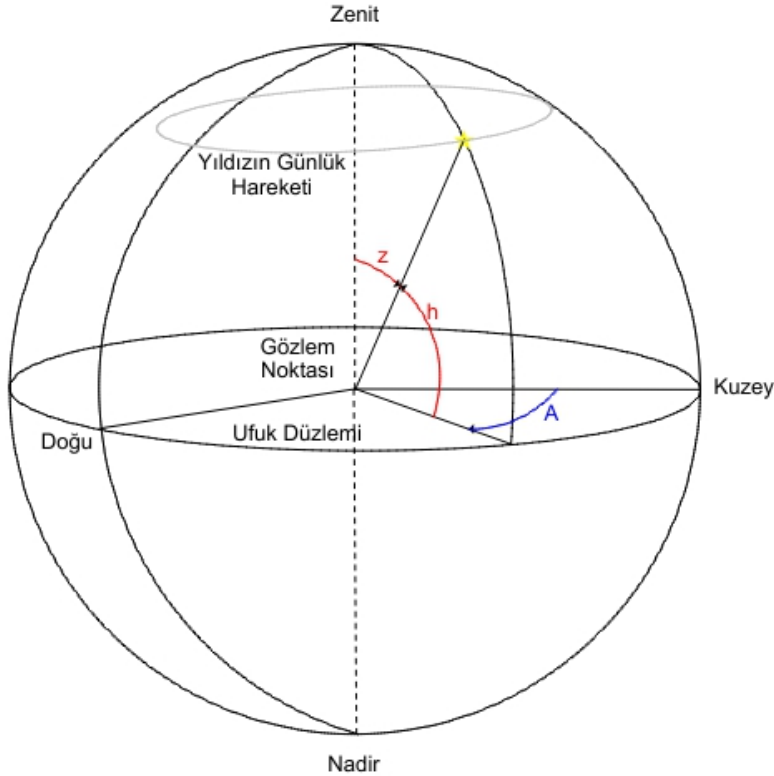
Gök koordinat sistemi merkezi güneş sisteminin ağırlık merkezi ile çakışık ve yarıçapı sonsuza uzanan bir küre olarak düşünülebilir. Sistemin orijini güneş sisteminin ağırlık merkezi olarak tanımlanmasına rağmen sonsuz bir gökküresi düşünüldüğünde sistemin merkezinin yeryuvarının ağırlık merkezi olarak ele alınması herhangi bir değişikliğe neden olmayacaktır. Gök cisimlerine ait koordinatlar ise rektasansiyon, deklinasyon sisteminde tanımlanmıştır. Geçmişte Fundamental Catalog 5 (FK5) kapsamında 1535 yıldız kullanılarak J2000.0 epoğunda $0.01''-0.03''$ doğruluğunda gerçekleştirilmiş olan bu sistem, uzay bazlı sistemlerin gelişmesiyle birlikte Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency-ESA) tarafından gerçekleştirilen Hipparcos astronomi görevi ile 120000 yıldız kullanılarak $0.005''-0.01''$ doğruluğuna ulaşmıştır [2].

Yarıçapı sonsuzluğa uzanan gökküresi temel yaklaşımında gözlemcinin bulunduğu konumun gökküresini deldiği yer zenit noktası olarak ifade edilir. Cisimlerin gözlem noktasından çok uzak olması nedeniyle bu sistemde tanımlı koordinatlar doğrultu ve azimutlar yardımıyla belirlenir. Gökküre sistemi astronomik gözlemlerin gerçekleştirildiği Ufuk Koordinat Sistemi ve gök cisimlerinin koordinatlarının

tanımlandığı Ekvator (Rektesansiyon) Koordinat Sistemi olarak iki ana başlık altında incelenebilir. Saat Açısı Sistemi yardımıyla bu iki sistem arasında bir ilişki kurulabilir.

2.1.3.1 Ufuk koordinat sistemi

Gökküresi üzerindeki herhangi bir konumun belirlenmesi için bir düzleme ve iki noktaya ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemler genellikle seçilen düzleme göre isimlendirilir. Ufuk koordinat sisteminde temel düzlem gözlem yerinin ufkunda bulunan bir yıldızın yüksekliği ve bu yıldızın azimutu ile tanımlanır. Diğer bir ifade ile bu sistemde koordinatlar gravite doğrultusu ve yeryuvarının dönme eksenini ile tanımlanır. Bu sistemde yeryuvarı üst küre ve alt küre olarak ikiye ayrılır. yeryuvarını şekli nedeniyle alt kürenin altında kalan gök cisimleri gözlenemez. Bu yüzden sistemde azimuth değeri $0^\circ - 360^\circ$ arasında değişim gösterirken yıldızın yüksekliği ise $0^\circ - 180^\circ$ arasında değişir. Yıldız yüksekliği yerine bazı kaynaklar Zenit uzaklığını kullanır, yaygın olarak zenit uzaklığı (z), azimut açısı (A) ve yıldız yüksekliği ise (h) olarak gösterilir (Şekil 2.8).

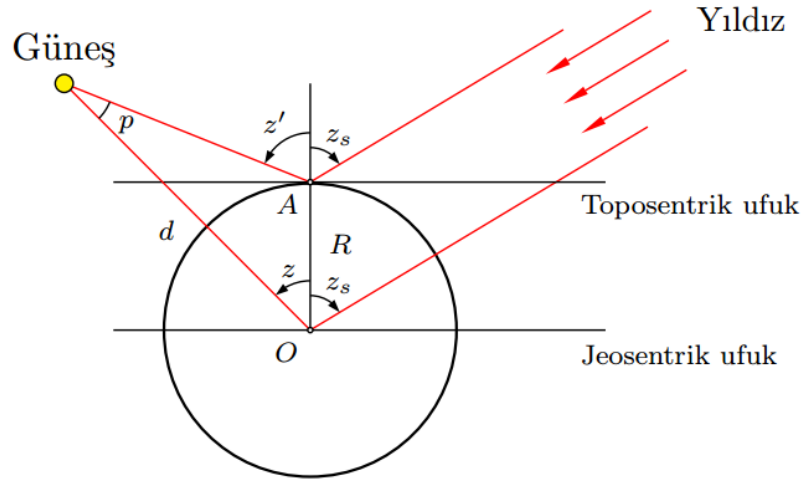


Şekil 2.8 : Ufuk koordinat sistemi.

Sistemin $+x$ eksenini güney doğrultusunu, $+z$ eksenini ise zenit doğrultusunu ifade eder. Ufuk koordinat sistemi yer-merkezli yer-sabit bir sistemdir. yeryuvarının hareketinden

dolayı koordinatlar zamanın bir fonksiyonu olarak değişir. Şekil 2.8'den anlaşılacağı gibi jeosentrik ufuk sisteminde koordinatlar yeryuvarının merkezinden esas alınır; fakat pratikte bu m¼mk¼n değildir. Bu nedenle yeryuvarı ¼zerinde geręekleřtirilen ¼l¼meler sonucu elde edilen koordinatlar jeosentrik ufuk sistemi yerine toposentrik ufuk sistemi koordinatları olarak ifade edilir.

Jeosentrik ve toposentrik sistemlerin aynı temeller ¼zerine kurulması, bu sistemler arasında d¼n¼ř¼m yapmayı m¼mk¼n kılmaktadır. Her iki sistem nadir noktası i¼in çek¼l doğrultusunu esas aldığından iki sistemdeki azimut değerleri aynı olacaktır. Sonsuz yarı ¼aplı k¼re d¼ř¼n¼ld¼ę¼nde yeryuvarının ağırlık merkezi ve g¼neř sisteminin ağırlık merkezi arasında bir fark olmadığı ifade edilmişti. Benzer Şekilde uzak yıldızlara yapılan g¼zlemlerde toposentrik g¼zlem noktası ve jeosentrik sistemin merkezi paralel kabul edilebilir. Fakat Şekil 2.9'da g¼r¼ld¼ę¼ gibi g¼neř sistemindeki g¼k cisimleri i¼in iki sistemdeki zenit uzaklıkları birbirine eşit değildir [2, 31].



Şekil 2.9 : Jeosentrik paralaks.

Şekil 2.9'da g¼r¼ld¼ę¼ gibi toposentrik sistemdeki zenit uzaklığı z' , jeosentrik sistemdeki zenit uzaklığı z , yeryuvarının yarı¼apı R ve g¼k cisminin uzaklığı d olmak ¼zere;

$$\frac{\sin(z' - z)}{R} = \frac{p}{R} = \frac{\sin(z')}{d} \quad (2.3)$$

$$\sin(p) = \frac{R}{d} \sin(z') \quad (2.4)$$

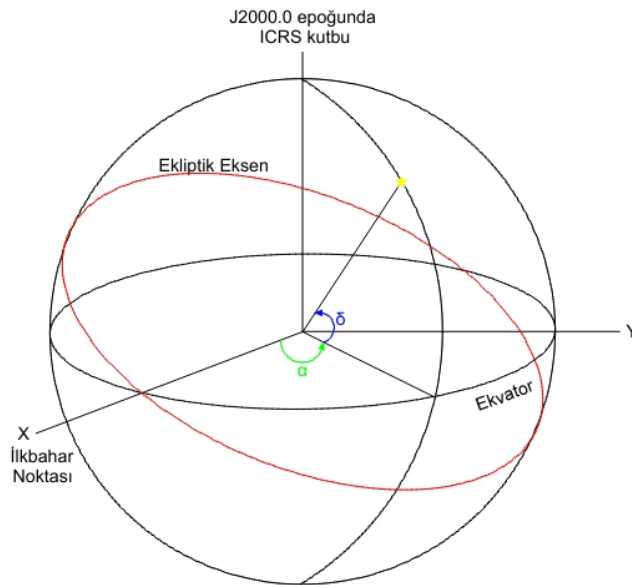
eşitlikleri ortaya ¼ıkacaktır. Eşitlik 2.4'de yer alan $\sin(p)$ yani $\frac{R}{d}$ değeri ufuksal paralaks olarak isimlendirilir.

2.1.3.2 Rektansiyon (Ekvator) koordinat sistemi

Rektansiyon koordinat sisteminde $+x$ eksenini ilkbahar noktası (Υ) ile ekliptik ekseninin kesişiminden geçer. Sistemin $+z$ eksenini yeryuvarının dönme eksenini doğrultusunda ve kuzey kutbundan geçer. Sistem bir sağ el koordinat sistemi oluşturulacak şekilde $+y$ eksenini bu iki eksene dik olarak tasarlanmıştır. Asal daire ise, dönme eksenine dik düzlemin gökküre ile ara kesitidir ve gök ekvatoru olarak adlandırılır.

Gök ekvatoru ile ekliptik arasında $23^{\circ}.44$ açı farkı bulunmaktadır. Rektansiyon ise ilkbahar noktası (Υ) ile ekliptik ekseninin ve ekvator düzleminin kesişiminden doğuya doğru gök cismine kadar ölçülen açıdır ve α sembolü ile gösterilir. Deklinasyon ise ekvatorundan gök cismine kadar ölçülen düşey açıdır ve δ sembolü ile gösterilir (Şekil 2.10).

Astro-jeodezik çalışmalarda gök cisimlerinin koordinatları yıldız katalogları yardımıyla elde edilir. Rektansiyon sistemi yer-merkezli gök-sabit bir sistem olduğu için yeryuvarının hareketinden bağımsızdır ve gök cisimlerinin koordinatları değişmez. Yıldız katalogları yıldızların koordinatlarının yanı sıra öz hareketleri hakkında da bilgi verir. Katologlardan elde edilen yıldız koordinatları yardımıyla SZKS'de fotoğraf orta noktasının koordinatları enterpole edilebilmektedir. Fotoğraf orta noktası koordinatları ise astronomik koordinatlara dönüştürülerek, gravite doğrultusunu tanımlamaktadır. Rektansiyon koordinat sisteminde elde edilen resim orta noktası koordinatlarının doğruluğu doğrudan astro-jeodezik çekül sapmaları ile ilişkilidir.



Şekil 2.10 : Rektansiyon koordinat sistemi.

2.2 Jeodezide Kullanılan Zaman Sistemleri

Farklı koordinat sistemlerinin birbirine bağlanması ve arasındaki ilişkinin kurulmasında, yıldızların ve diğer gök cisimlerinin öz hareketlerinin tanımlanmasında yüksek hassasiyetli zaman bilgisi gerekmektedir. Çekül sapmalarının elde edilmesinde anlık zamanın belirlenebilmesi, göksel koordinat sisteminden yersel koordinat sistemine geçişin sağlanabilmesi için uniform zaman sistemlerine ihtiyaç vardır. Zaman sistemleri genel olarak 3 farklı başlık altında incelenebilir. Bunlar;

- Yeryuvarının kendi eksenini etrafındaki rotasyonuna dayalı zaman sistemleri
- Dinamik zaman sistemleri
- Atomik zaman sistemleri

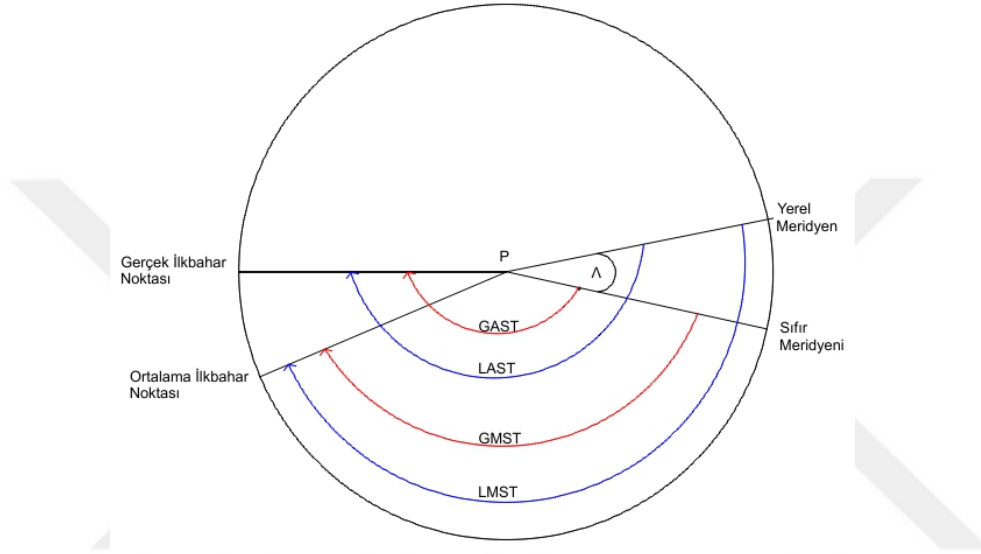
2.2.1 Yerin kendi eksenini etrafındaki rotasyona dayalı zaman sistemleri

Yerin kendi eksenini etrafındaki rotasyonuna bağlı oluşan bu zaman sistemleri Yıldız zamanı (Sideral Time), Güneş zamanı (Solar Time) ve Dünya zamanı (Universal Time-UT) olarak üçe ayrılır. Yıldız zamanı ilkbahar ekinoksunun saat açısına eşittir ve bu yüzden gözlem noktasına bağlıdır. Yıldız zamanı ilbahar ekinoksundan (Υ) herhangi bir meridyenin iki üst geçisi arasındaki zaman olarak ifade edilir. Güneş zamanı ise benzer şekilde güneşin aynı meridyenden iki üst geçisi arasındaki zaman farkıdır. Yıldız Zamanı, Yerel Anlık Yıldız Zamanı (Local Apparent Sideral Time-LAST) ve Greenwich Anlık Yıldız Zamanı (Greenwich Apparent Sideral Time-GAST) olarak ikiye ayrılır. LAST ilkbahar ekinoksundan gözlem meridyenine kadar ölçülürken, GAST, başlangıç meridyeni olan Greenwich meridyeninden ilkbahar ekinoksuna kadar ölçülür. İlkbahar ekinoksu nütasyondan etkilenir. Bu etkinin ortadan kaldırıldığı ortalama yıldız zamanları olan Greenwich Ortalama Yıldız Zamanı (Greenwich Mean Sideral Time-GMST) ve Yerel Ortalama Yıldız Zamanı (Local Mean Sideral Time-LMST) elde edilir. Bu zaman sistemleri arasındaki bağlantı Şekil 2.11'de görülmektedir. GAST ve GMST arasındaki ilişki ise eşitlik 2.5 ve 2.6 kullanılarak sağlanmaktadır. İki zaman sistemi de yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönmesi sonucu oluşur. Bu yüzden güneş zamanı, yıldız zamanının özel bir türü olarak

düşünülebilir. yeryuvarı güneşin etrafındaki bir tam tur dönüşünü yani 360° 'yi 365 günde tamamladığı için (yaklaşık $1^\circ/\text{gün}$), 1 ortalama yıldız günü, 1 ortalama güneş günü - $3'55.909''$ ifadesine karşılık gelmektedir. [32,33]

$$GMST - GAST = \Delta\psi \cos \epsilon \quad (2.5)$$

$$\Lambda = GAST - GMST = LAST - LMST \quad (2.6)$$



Şekil 2.11 : Yıldız zamanı.

Eşitlikte yer alan $\Delta\psi$ ekliptiğin boylam nütasyonunu, ϵ ise ekliptik eğikliği nütasyonunu ifade eder. SZKS'de elde edilen yıldız görüntülerinin kataloglar ile eşlenmesi için yaklaşık koordinat bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. LAST açısı yaklaşık rektesansiyonu tanımlamada kullanılır.

Güneşin, ayın ve diğer gezegenlerin yeryuvarı üzerindeki etkisinden dolayı yıldız zamanı uniform bir zaman sistemi değildir. Bu düzensizliklerden dolayı daha uniform bir zaman sistemi olan UT tanımlanmıştır. UT sisteminde güneşin ekvator üzerinde sabit bir hızla gittiği düşünülmüştür. UT sisteminden UT0, UT1, UT2 ve Koordinatlandırılmış Dünya Zamanı (UTC) elde edilebilmektedir. UT0 sistemi UT sisteminde doğrudan elde edilen değerlerden oluşmaktadır. UT1 sistemi ise kutup hareketi ve dönme eksenindeki değişimlerin UT0'da düzeltilmesi ile elde edilir. Bu değişimlere mevsimsel etkilerin eklenmesiyle UT2 hesaplanmaktadır. UT2 sistemi bilimsel amaçlar dışında pratikte önem taşımaz. UT1 sistemi uniform bir sistem olan

UTC'nin tanımlanmasında kullanılır. UTC-UT1 farkı 1 saniyeyi geçmeyecek şekilde IERS tarafından güncellenmektedir.

2.2.2 Dinamik zaman sistemleri

Yersel Dinamik Zaman (Terrestrial Dynamic Time-TDT) ve Barisentrik Dinamik Zaman (Barycentric Dynamic Time-TDB) sistemlerinin oluşturduğu ve uzaydaki gök cisimlerinin konumlarının belirlenmesinde kullanılan uniform zaman sistemleridir. İlk kez 1952 yılında Efemeris Zamanının (Ephemeris Time-EP)) kullanılması ile gündeme gelmişlerdir. 1977 yılında IAU tarafından relativistik yörünge hareketlerinin tanımlanması için TDB, yermerkezli efemeris için ise TDT kabul edilmiştir. 1991 yılında ise IAU TDT sistemini güncelleyerek Yersel Zaman (Terrestrial Time-TT) kavramını öne sürmüştü ve yer yakın uyduların rölativistik zaman hareketlerinin belirlenmesi için temel zaman birimini TT olarak seçmiştir.

2.2.3 Atomik zaman sistemleri

UT sisteminden elde edilen UTC, Uluslararası Atomik Zaman (International Atomic Time-TAI) ve GPS Zamanının (GPS Time-GPST) örnek olarak gösterilebileceği bu zaman sistemleri en uniform zaman sistemi özelliğine sahiptir. TAI yeryuvarı genelinde dağılmış 300'e yakın atomik saatin ağırlıklı ortalaması sonucu elde edilir. Diğer sistemler arasındaki ilişkinin kurulmasında temel alınan birimdir. Bunun yanı sıra GNSS gibi sistemlerde kullanılması için de UTC tanımlanmıştır. UTC ve TAI ile tam olarak çakışmaktadır. UTC ile UT1 arasındaki farkın 0.9" değerini geçmesi durumunda ise UTC'ye 1 saniye eklenmektedir. Zaman sistemleri arasındaki farklar ise 2.7-2.10 eşitlikleri ile sağlanmaktadır. 01.01.2017 tarihinden itibaren IERS TAI-UTC farkını 37" olarak açıklamıştır. Şekil 2.12'de zaman sistemleri arasındaki ilişkiler gösterilmektedir.

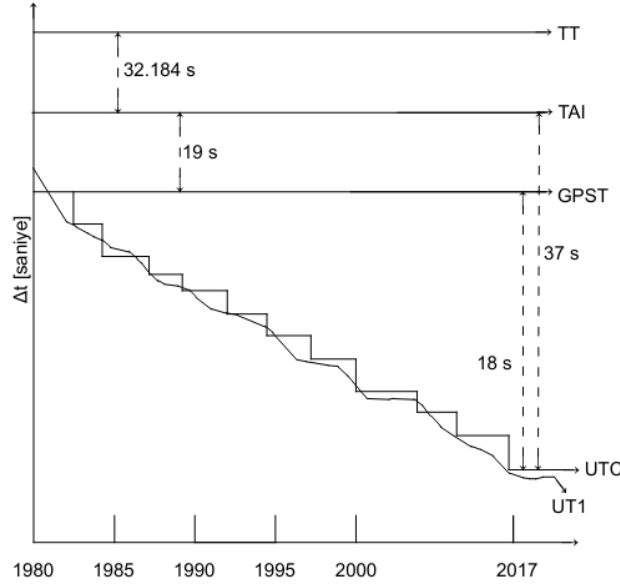
$$TT = TAI + 32.184'' \quad (2.7)$$

$$GPST = TAI - 19'' \quad (2.8)$$

$$UTC = TAI - 37'' \quad (2.9)$$

$$UTC - UT1 < 0.''9 \quad (2.10)$$

Yıldız görüntülerinin tanımlandığı rektesansiyon koordinat sisteminden astronomik koordinatlara (Λ, Φ) dönüşüm yapılabilmesi için GAST'nin hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 2.12 : Zaman sistemleri arasındaki farklar.

tedir. GPST'nin yüksek hassasiyet ile elde edilebildiği SZKS'de GPST'den GAST değerinin elde edilmesinde eşitlik 2.12 kullanılır.

$$\Delta m = \Delta\Psi * \cos\varepsilon_0 + 0.00264'' * \sin\Omega + 0.000063'' * \sin 2\Omega \quad (2.11)$$

$$GAST = GMST + \Delta m \quad (2.12)$$

Eşitlik 2.11'de yer alan $\Delta\Psi$ ekliptiğin boylam nütasyonunu, ε_0 ekliptiğin ortalama eğikliğini, Ω ay yörünge noktasının boylamını, Δm ise ekinoks eşitliğini ifade eden nütasyon parametreleri olarak tanımlanır.

2.3 Yıldız Katalogları

Yıldız katalogları yıldızların rektasensiyon koordinatlarının, öz hareketlerinin, parlaklık değerlerinin ve spektral özelliklerinin yer aldığı tablolardır. SZKS'de yıldız katalogları kullanılarak görüntüde yer alan yıldızların rektasensiyon ve deklinasyon koordinatları belirlenir.

Astronomik gözlemler için oluşturulmuş farklı doğruluklara sahip ve farklı yıldız yoğunluğu içeren çok sayıda yıldız kataloğu bulunmaktadır. Bilinen başlıca kataloglar ise Tyco-2, UCAC, UCAC2, UCAC3 ve UCAC4 (USNO CCD Astrograph Catalog) kataloglarıdır. Ulusal SZKS'de ise UCAC2 ve UCAC3 yıldız katalogları kullanılmıştır.

2003 yılında US Naval Observatory tarafından yayınlanan ve yersel gözlemlerle elde edilen UCAC2 yıldız kataloğu gökyüzünde -90° ve $+40^\circ$ alanları kapsamaktadır.

Bazı bölgelerde ise deklinasyon değeri $+52^\circ$ kadar çıkmaktadır. Parlaklığı 16^{mag} kadar olan J2000.0 epogunda tanımlanmış yaklaşık 50 milyon yıldız bilgisi içerilmektedir. Doğruluk bilgisi ise yıldızların parlaklığına bağlı olarak değişmektedir [34]. Yıldız parlaklığının ölçüm birimi olarak mag değerinin artması yıldızın parlaklığının azalması anlamına gelmektedir. Çıplak gözle 6^{mag} parlaklığa kadar olan yıldızlar görülebilir.

SuperCosmos ve 2MASS kataloglarından fotogrametrik veriler kullanılarak tamamlanan UCAC3 yıldız kataloğu UCAC2'den farklı olarak tüm gökyüzünü kapsamaktadır. Parlaklığı 16^{mag} kadar olan yıldızların yer aldığı bu katalogta 100 milyondan fazla yıldız bilgileri bulunmaktadır [35].

Yenilenen Ulusal SZKS'de ise USNO tarafından 2012 yılının Ağustos ayında yayınlanan en güncel ve yüksek doğruluk içeren UCAC4 yıldız kataloğu kullanılmaktadır. UCAC4 yıldız kataloğu parlaklığı 16^{mag} kadar olan 113 milyondan fazla yıldız bilgisi içermektedir [36]. Tablo 2.1'de UCAC katalogları özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.1 : UCAC katalogları özellikleri.

Özellikler	UCAC2	UCAC3	UCAC4
Yayınlanma Yılı	2003	2009	2012
Referans Sistemi	ICRS	ICRS	ICRS
Standart Epok	J2000.0	J2000.0	J2000.0
Yıldız Sayısı	50 milyon	>100 milyon	>113 milyon
Geçerli Alan	-90° — $+40^\circ$	Tüm Gökyüzü	Tüm Gökyüzü
Magnitude (max)	16	16	16
Yoğunluk (yıldız/derece ²)	1360	>2000	>2000

1 Eylül 2016'da 1 milyardan fazla yıldız içeren Gaia yıldız kataloğu ESA tarafından yayınlanmıştır. Gaia yıldız kataloğu en çok yıldız içeren katalog olmasına rağmen, tüm gökyüzünü kapsamamaktadır. Bunun yanı sıra Gaia yıldız kataloğunun yüksek sayıda yıldız içermesi katalog boyutlarını arttırmış ve yıldızların kataloglar ile eşlenmesi süresini uzatmıştır. Bu nedenle tez kapsamında Gaia yıldız kataloğu kullanılmamıştır.

SZKS ile elde edilen görüntülerdeki kataloglarla eşleşmesi için WGS tools, IDL, Maxim DL gibi yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar Bölüm 4.1.6'da detaylı olarak incelenmiştir.



3. ÇEKÜL SAPMASI, GEOİT ve GEOİT BELİRLEME YÖNTEMLERİ

3.1 Çekül Sapması Türleri ve Elde Edilme Yöntemleri

Çekül doğrultusu ya da diğer adıyla düşey doğrultu kavramı günlük hayatın her evresinde karşımıza çıkan kavramlardan biridir. Herhangi bir dış etkiden arındırılmış çekülün yönü pratikte bu doğrultu ile çakışıktır. Çekül doğrultusu kavramı jeodezide özel bir kavram olmasına karşın, çekül sapması kavramı jeodeziye özgü bir kavramdır. Çekül sapması Helmert, Pizzetti ve Molodensky tarafından 3 farklı biçimde tanımlanmıştır (Şekil 3.1). Helmert çekül sapmasını yeryüzü üzerindeki bir noktanın elipsoidal normali ile gravite normali arasındaki açısal fark (θ) olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.1a). Helmert'in yapmış olduğu bu tanımda her noktada farklı eşpotansiyel yüzeyler geçeceğinden θ açısı eşpotansiyel yüzeyler yardımıyla belirlenir. Çekül sapmasının kullanıldığı alanlar ise kısaca;

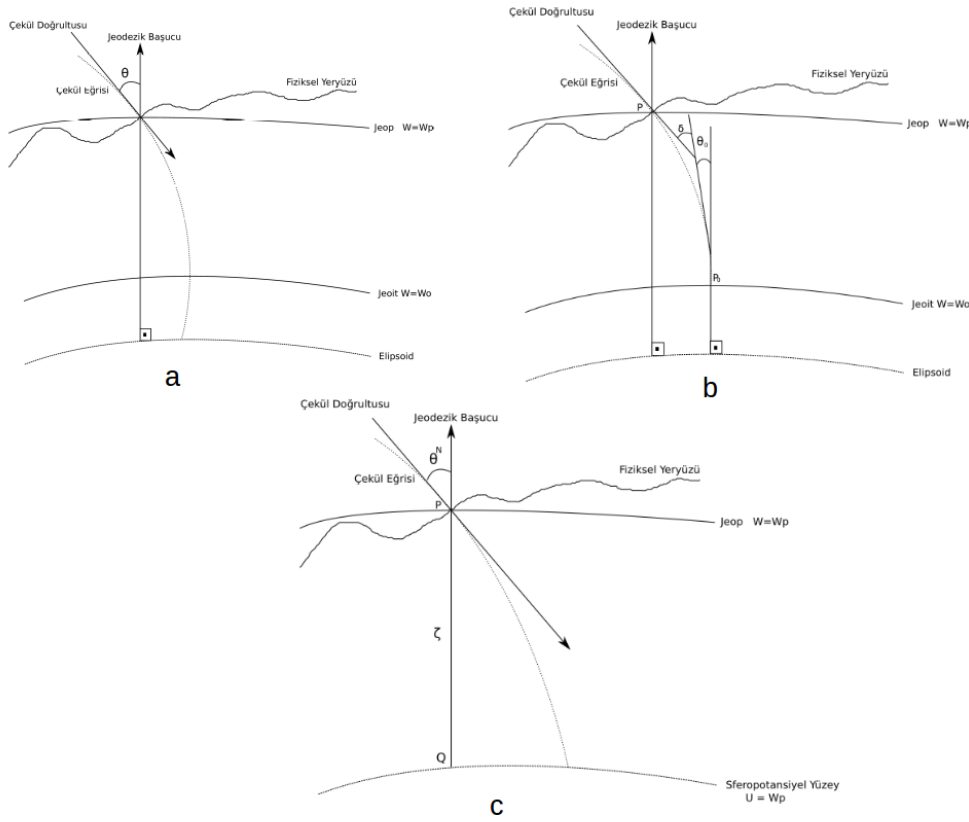
- Astronomik koordinatların jeodezik koordinatlara dönüşümü,
- Astronomik azimutun jeodezik azimuta dönüştürülmesi,
- Yatay ve düşey açıların elipsoit düzlemine indirgenmesi,
- Yüksek doğruluklu geoit belirlenmesi,
- Geoitin eğiminin belirlenmesi olarak sıralanabilir [37].

Pizzetti'ye göre çekül sapması Şekil 3.1b'de görüldüğü gibi yeryüzü üzerindeki bir noktanın çekül eğrisi ile geoit üzerine izdüşümü olan P_0 noktasındaki çekül çizgisinin teğeti ile P_0 'dan elipsoit yüzeyine inilen dikme arasındaki θ_0 açısıdır [2]. Helmert'in yapmış olduğu tanıma kıyasla Pizzetti'nin tanımı fiziksel olarak daha gerçekçidir. Fakat çekül eğriliğinin dikkate alınması gerekmektedir. Çekül eğriliği ise genellikle $1''$ 'nin altında olmakla birlikte engebeli arazilerde daha büyük değerlere ulaşabilmektedir [2, 5, 38].

$$\delta = \theta - \theta_0 \quad (3.1)$$

Molodensky'e göre çekül sapması ise yeryüzündeki bir noktanın çekül eğrisi ile noktanın bulunduğu potansiyele eşit sferopotansiyel yüzeyin normali arasındaki θ^N açısıdır. İki yüzey arasında görülen ζ ise yükseklik anomalisi olarak ifade edilir (Şekil 3.1c).

SZKS'de elde edilen çekül sapmaları Helmert'in tanımlamış olduğu çekül sapmalarıdır. Bu yüzden bunlara Helmert çekül sapması da denir. Pizzetti'nin tanımına uygun olan çekül sapmalarının belirlenebilmesi için ise çekül eğriliğine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1 : Helmert, Pizzetti ve Molodensky'e göre çekül sapmaları.

Çekül sapması (θ), kuzey-güney (ξ) ve doğu-batı (η) bileşenleri ile elde edilir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi kuzey-güney (ξ) bileşeni astronomik enlem ile elipsoidal enlem arasında kalan açıdır. Doğü-batı (η) bileşeni ise astronomik boylam ile elipsoidal boylam arasında kalan açı olarak ifade edilir. Çekül sapması bileşenlerinin elde edilmesinde ise 3.2 ve 3.3 eşitlikleri kullanılır. Eşitlik 3.3'ün jeodezik enlem (φ) ile çarpılmasının temel nedeni yuvarının elipsoidal bir şekle sahip olmasından dolayı enlemler arasındaki mesafenin kutuplara doğru azalmasından kaynaklanmaktadır.

$$\xi = \Phi - \varphi \quad (3.2)$$

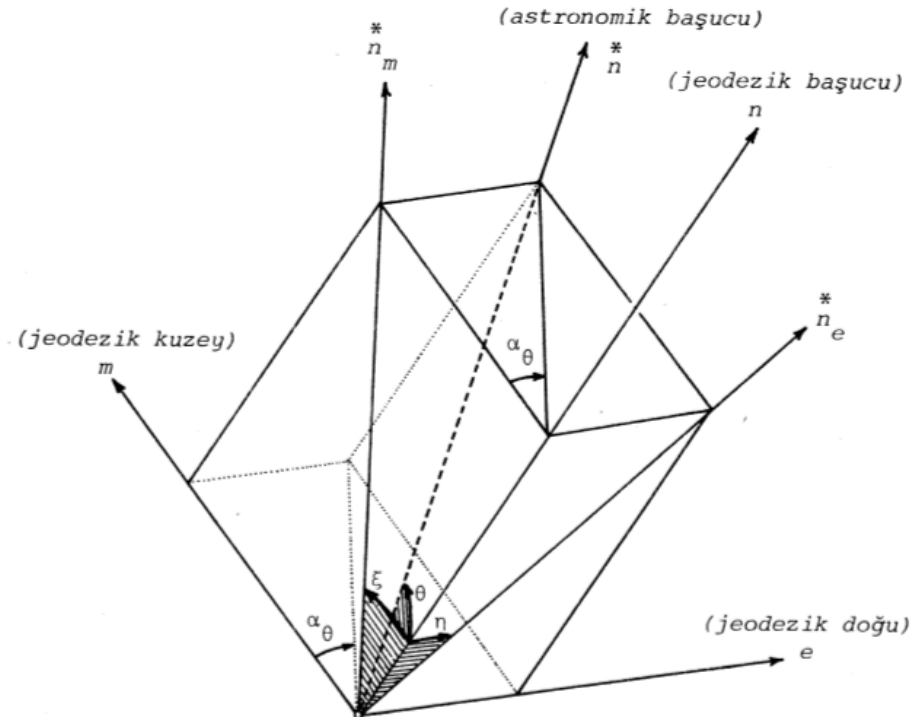
$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \quad (3.3)$$

Herhangi bir noktadaki çekül sapması (ε) değeri ise;

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (3.4)$$

eşitliği kullanılarak elde edilir. Şekil 3.2'den de anlaşılacağı gibi çekül sapması azimuta bağlıdır. Herhangi bir doğrultudaki çekül sapmasının değerinin belirlenmesi için α azimut olmak üzere eşitlik 3.5 kullanılır.

$$\varepsilon(\alpha) = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \quad (3.5)$$



Şekil 3.2 : Çekül sapması bileşenleri [30].

Çekül sapmaları, elde edilme şekline bağlı olarak üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar SZKS ile elde edilen astro-jeodezik çekül sapmaları, nokta gravite ölçüleri kullanılarak elde edilen gravimetrik çekül sapmaları ve topoğrafya yoğunluğu kullanılarak elde edilen topoğrafik-izostatik çekül sapmalarıdır.

Çekül sapmaları kullanılarak geoid ondülasyonunun dolayısıyla geoidin belirlenmesinin temel işlem ve ilkeleri, astronomik nivelman yöntemi ve temel prensibi Bölüm 3.3.4'te ayrıntılar ile ele alınmıştır.

Astro-jeodezik çekül sapmaları hesaplanırken iki sistemin eksen durumları çok önemlidir. Eğer iki sistemin eksenlerinde hem paralellik hem de özdeşlik sağlanmış ise elde edilen çekül sapmaları mutlak çekül sapmaları, sadece paralelliğin sağlanıp özdeşliğin sağlanmadığı durumlarda ise rölatif (bağlı) çekül sapmaları elde edilir.

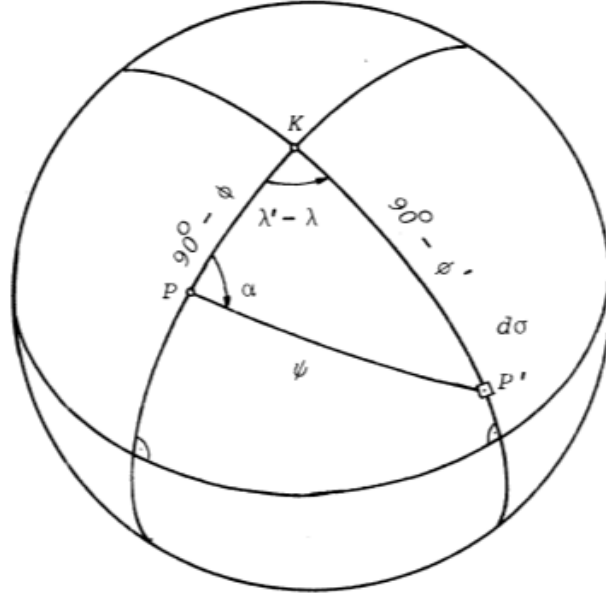
3.1.2 Gravimetrik çekül sapması

Bir başka çekül sapması elde etme yöntemi olan gravimetrik çekül sapmasında ise jeopla sfereopun normallari arasındaki açının bileşkesi hesaplanır. Δg gravite anomalilerinin kullanıldığı ve 1928 yılında Vening-Meinesz tarafından türetilen ve aynı isimle bilinen

$$\begin{Bmatrix} \eta^g \\ \xi^g \end{Bmatrix} = \frac{1}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g \frac{ds(\psi)}{d(\psi)} \begin{Bmatrix} \sin\alpha \\ \cos\alpha \end{Bmatrix} d\sigma \quad (3.6)$$

integrali kullanılır. İntegralde görülen

- η^g ve ξ^g : sırasıyla gravimetrik çekül sapmasının doğu-batı ve kuzey-güney bileşenini,
- γ : ilgili noktadaki normal gravite değerini,
- Δg : gravite anomalisini,
- $\frac{ds(\psi)}{d(\psi)}$, $S(\psi)$: Stokes fonksiyonunun, ψ küresel uzaklığa göre türevi olan ve Vening-Meinesz fonksiyonu olarak bilinen fonksiyonu,
- σ : birim kürenin yüzü veya bir tam uzay açısını,
- $d\sigma$, yüzey elemanını,
- α , çekül sapması hesaplanacak P noktasından $d\sigma$ yüzey elemanına olan küresel uzaklığı (Şekil 3.4),
- ψ : çekül sapması hesaplanacak P noktasıyla $d\sigma$ yüzey elemanı arasındaki küresel uzaklığı (Şekil3.4) ifade eder [23, 30]. Δg değerleri geoit yüzeyine ait ise çekül sapmaları değerleri de geoit yüzeyindedir. Vening-Meinesz integralinde kullanılan gravite anomalilerinin türü de çok önemlidir. Hesaplanmış türlerine göre gravite anomalileri serbest hava, Bouguer ve izostatik gibi isimler alır.



Şekil 3.4 : Vening-Meinsz integrali bileşenlerini gösteren birim küre.

Gravimetrik çekül sapmaları ve astro-jeodezik çekül sapmalarının karşılaştırılması için öncelikle astro-jeodezik çekül sapmalarının mutlak olması gerekmektedir. Gravimetrik çekül sapmaları ise ölçü hatalarından ve dolaylı etkilerden arındırılmış olmalıdır. Bunun yanı sıra her iki ölçü birimi de geoit yüzeyi veya fiziksel yeryüzünde, diğer bir ifade ile aynı yüzeyde olmalıdır. Aynı noktalara ait bağıl çekül sapması özelliği gösteren astro-jeodezik çekül sapmaları ve dolaylı etkilerden arındırılmış gravimetrik çekül sapmaları arasındaki farklar ölçü hataları ve hesaplamalarda gözardı edilen miktarlarla açıklanabilen ve rastgele dağılıma uyması gereken kesimlerden başka bir eksenin değerine göre konumunu belirleyen parametreler de içerir. Bu özellik gravimetrik çekül sapmalarının sık, astro-jeodezik çekül sapmalarının seyrek olduğu bölgelerde astro-jeodezik çekül sapmalarının enterpolasyonu için kullanılır [39].

Gravimetrik çekül sapmalarının en büyük dezavantajı gravimetrik verinin elde edilmesi olarak açıklanabilir. Ülkemizde gravite ölçüleri Harita Genel Komutanlığı (HGK), Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (MTA) ve Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO) tarafından yapılmakta ancak yayınlanmamaktadır. Bunun dışında gravite ölçen mekanizmaların maliyeti yüksek ve elde edilmesi zordur.

3.1.3 Topoğrafik-İzostatik çekül sapması

Topoğrafik-izostatik çekül sapmaları diğer yöntemlerin aksine ölçme işlemi gerektirmeyen, gerekli ölçülerin topoğrafik haritalardan elde edildiği bir yöntemle elde edilebilir. Yöntemin temel ilkesi yeryuvarını oluşturan kitlelerin yoğunluk dağılımına dayanmaktadır.

Gerçek ve standart gravite alanlarının birbirine özdeş olduklarını söyleyebilmek için yoğunluk dağılımına dair sonsuz sayıda varsayım öne sürülebilir. Bunların arasından aşağıdaki iki varsayım hesaplama kolaylığı sağlamaktadır.

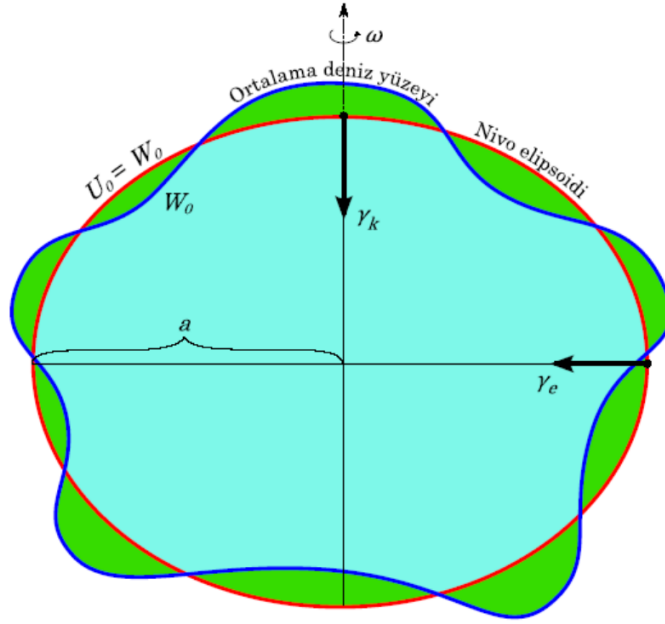
- Eğer, geoidin dışında hiç kitle yok ise,
- ve geoidin içinde kalan kitlelerin yoğunluk dağılımı homojen ise

geoit bir dönel elipsoittir. Bu iki koşulun birlikte gerçekleşmesi halinde geoit ve elipsoit özdeş olacaktır. Bunun anlamı ise yeryüzünde herhangi bir noktada gerçek ve normal gravite değeri arasında bir fark olmamasıdır. Ancak kitlelerin altındaki yoğunluğun eşit olması durumunda bile, kitlelerin üzerinde homojen bir yoğunluk olmadığı bir gerçektir. Bunların çekül doğrultusuna olan etkilerine topoğrafik-izostatik çekül sapması denir [30]. Daha fazla detay [30] tarafından verilmektedir.

3.2 Geoit

Helmert tarafından yapılan, her jeodezicinin bildiği ve jeodezide klasikleşen tanıma göre: Geoit kısmen durgun deniz yüzeyinin karaların altından devam ettiği varsayılarak oluşturulan ve her noktasında çekül eğrilerini dik açılarla kesen kapalı bir yüzeydir (Şekil 3.5).

Fiziksel yeryüzünün gerçek şeklini ortaya koyan geoit tüm mühendislik ve yer bilimleri disiplinlerinde büyük öneme sahiptir. GNSS sistemlerinden elde edilen elipsoidal yüksekliğin fiziksel anlamı olan ortometrik yüksekliğe dönüştürülmesinde geoit büyük önem taşır. Yeryuvarı için yüksek doğruluklu global bir geoit modelinin oluşturulması çalışmaları ise büyük ölçüde sürmektedir. Ulusal kuruluşlar ve uluslararası ortak çalışma yürüten kuruluşlar nokta gravite, uydu gravite, uydu altimetre, ve astro-jeodezik yöntemleri kullanarak geoit modelleri oluşturmakta ve bunları yayınlamaktadırlar. Nitekim yeryuvarı Modelleri için Uluslararası Merkezi



Şekil 3.5 : Geoit ve ortalama deniz yüzeyi [40].

(International Centre for Global Earth Models-ICGEM) yeryüvarı için küresel anlamda geliştirilen modelleri derlemekte ve yayınlamaktadır. Bu modellerden en bilineni ABD kuruluşu NGA (National Geospatial Intelligence Agency) tarafından yayınlanan EGM-96 (Earth Gravity Model 1996) modelidir. Yerçekimi küresel harmonik açılımı ile belirlenen bu modelin datumu WGS-84'tür. WGS84-EGM96, $n=m=360^0$ mertebeye kadar açılımı olan 130321 katsayıdan oluşmaktadır.

EGM96 modeli kullanılarak yeryüzü üzerinde $30' \times 30'$ büyüklüğündeki alanlarda ortalama gerçek gravite değeri elde edilebilmektedir. NGA tarafından hesaplanan bu modelde geoit yüksekliğinin doğruluğu $\pm 0.5 - 0.1m$ olarak verilmiştir.

Günümüzde kullanılan EGM modeli ise okyanus ve topoğrafya modelleri kullanılarak güncellenen EGM2008 modelidir. Bu model 4.6 milyon katsayı ile yeryüzü üzerinde $5' \times 5'$ büyüklüğündeki alanlarda gerçek gravite değerleri elde edilebilecek bir şekilde hesaplanmıştır. Model ile yeryüvarının her yerinde ± 15 cm doğrulukla geoit yüksekliği elde edilebilmektedir. Bu model birçok bilimsel araştırma ve geoit belirleme çalışmalarında referans olarak kullanılmaktadır [41].

Bilimsel araştırma ve çalışmalarda kullanılan bir diğer model ise GGMplus (Global Gravity Model plus) modelidir. Bu model GOCE ve GRACE gravite uydularının ölçüleri ve EGM2008'in kısa dalga boyları kullanılarak oluşturulmuştur. $5^\circ \times 5^\circ$

çözünürlüğe sahip olan GGMplus Curtin ve Münih Teknik Üniversitelerinin iş birliği ile oluşturulmuştur [42].

Geoidin belirlenmesi ve yüksek doğruluklu global bir geoid oluşturulması çalışmaları ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından sürdürülürken, geliştirilen geoid modellerinin oluşturulma yöntemleri ön plana çıkmaktadır. GOCE, GRACE ve CHAMP gibi gravite uydularının yüksek dalga boylu gravite verilerini sağlaması, yersel ve airborne gravite ölçmelerinin hız kazanması geoid belirlemede graviteyi ön plana çıkarmıştır. Uzun ölçme süreleri ve açık bir gökyüzü gerektiren astro-jeodezik çekül sapmaları ise veri elde etme zorluklarından dolayı uzun bir süre arka planda kalmıştır.

Başlıca geoid belirleme yöntemleri harmonik katsayılarla jeopotansiyel modelin oluşturulması ve Bruns eşitliği ile geoid yüksekliğinin belirlenmesi, nokta gravite ölçülerinden Stokes integrali kullanılarak gravimetrik geoid yüksekliğinin belirlenmesi, GNSS/Nivelman tekniği ve bu tezde yer alan astro-jeodezik çekül sapmaları yardımıyla astronomik nivelman yöntemi ile geoid yüksekliğinin belirlenmesi ve bu yöntemlerin bir kombinasyonu olan Kaldır-Yerine Koy-KYK (Remove-Restore-RR)) yöntemi olarak sıralanabilir.

Her modelin kendisine özgü avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. Oluşturulmak istenen geoid modeli için veri türüne bağlı olarak en uygun geoid belirleme yöntemi seçilmelidir. Tez konusunu oluşturan astro-jeodezik çekül sapmasının avantajları ve dezavantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Avantajları;

- Çekül sapması bileşenleri kullanılarak geoidin eğimi belirlenebilir.
- Yeryuvarının kitle değişiminden daha az etkilenir.
- 1 Astro-jeodezik çekül sapmasının 30 gravimetrik noktaya (dağlık alanlarda 20 gravimetrik noktaya) eş değer olduğu düşünülmektedir.
- Kıyı kesimlerinde diğer yöntemlere göre daha doğru sonuç vermektedir.
- Gravimetrik veriler kullanılarak oluşturulan geoid modellerinin test edilmesinde kullanılabilir.

Dezavantajları;

- Gözlemler sadece bulutsuz bir gökyüzünde geceleri yapılabilmektedir. Bu nedenle ölçme yapılabilecek günler kısıtlıdır.
- Çevresel koşullardan kaynaklı etkilere (rüzgar, sıcaklık gibi) açıktır.
- Gözlemler uzun ölçme süreleri gerektirmektedir. Fakat gelişmekte olan teknoloji ile birlikte ölçme sürelerinin kısaltılabileceği düşünülmektedir.

3.3 Geoit Belirleme Yöntemleri

3.3.1 Harmonik katsayılarla jeopotansiyel modelin oluşturulması ve Bruns eşitliği ile geoit yüksekliğinin belirlenmesi

Diğer yöntemlerin aksine bu modelde süreklilik söz konusudur. yeryuvarının gravite alanının küresel harmonik ifadesi W;

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda \dots + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} + \phi \quad (3.7)$$

olarak verilmektedir. Eşitlik 3.7'de yer alan;

- r, jeosentrik yarıçapı,
- GM, çekim sabitini,
- θ , enlemlerin 90° 'den farkını,
- λ , boylamı,
- $P_{nm}(\cos \theta)$, tam normalleştirilmiş Legendre fonksiyonunu,
- C_{nm}, S_{nm} , yeryuvarı gravite alanının tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayılarını ve
- ϕ , merkezkaç potansiyelini

göstermektedir. Geoit ondülasyonlarının elde edilmesi için γ , $P(r, \theta, \lambda)$ noktasındaki normal gravite değerini göstermek üzere Eşitlik 3.8 geçerli olur.

$$N(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r\gamma} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda \dots + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} \quad (3.8)$$

3.3.2 Gravite ölçülerinden Stokes integrali kullanılarak gravimetrik geoit yüksekliğinin belirlenmesi

Nokta gravite ölçülerinin kullanıldığı bu yöntemde Stokes integrali ile geoit ondülasyonu N elde edilir. Stokes integrali ise;

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{R}{4\pi\gamma} = \iint_{\sigma} S(\Psi)\Delta g d\sigma \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir. İntegralde yer alan Δg gravite anomalisini ifade eder. Yüksek doğruluklu gravimetrik geoit elde etmek için ise sık gravimetre bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi ülkemizde gravite ölçme yetkisine sadece belirli kurumların sahip olması bir gravimetrik geoit modeli oluşturulması çabalarını yavaşlatmaktadır. Gravite jeolojik yoğunluk değişimlerinden çok fazla etkilenir, bu yüzden engebeli arazilerde çok sık gravite ölçümü ($1mGal/2km$) gereklidir. Stokes integralinde yer alan Bouguer ve diğer anomalilerin elde edilmesindeki doğruluk gereksinimi ise yüksek çözünürlüklü sayısal arazi modelleri ile mümkündür.

3.3.3 GNSS/Nivelman yöntemi

Yeryüzünde nivelman yöntemi ile ortometrik yüksekliği (H) ve GNSS tekniği ile elipsoidal yüksekliği (h) bilinen herhangi bir noktanın geoit yüksekliği arasındaki ilişki;

$$N = h - H \quad (3.10)$$

eşitliği yardımıyla bulunabilir. Basit bir hesaplama ile ondülasyon değerleri elde edilmesine rağmen bu yöntemin dezavantajı ortometrik yüksekliklerin zahmetli bir yöntem olan nivelman yöntemi ile elde edilmesidir. Örneğin Türkiye gibi bir ülkede tüm ülkeyi saran bir nivelman ağının oluşturulması, yoğun iş gücü ve yüksek maliyet gerektirmektedir. Ülke nivelman ağının oluşturulması ise birkaç yıl sürecektir. Nitekim Türkiye Ulusal Düşey Kontrol Ağı (TUDKA) uzun yıllar süren tesis, yenileme ve bakım çalışmaları sonucunda oluşturulmuş bir kontrol ağıdır [43].

GNSS/Nivelman yöntemi ile geoit belirlemek için geoit dayanak noktalarından oluşan bir ağa ihtiyaç vardır. Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliğinde (BÖHHBÜY) geoit dayanak noktaları yoğunluğu $20 km^2$ 'ye 1 nokta olarak belirlenmiştir [44]. Bu yöntem kullanılarak elde edilen geoit

modelinin doğruluğu ortometrik ve elipsoidal yüksekliklerin doğruluğuna bağlıdır. GNSS/Nivelman yöntemi ile elde edilen nokta geoid yüksekliklerinden bir geoid modeli oluşturulması için polinomlarla yüzey geçirme, enterpolasyon, kollokasyon ve sonlu elemanlar gibi matematiksel yöntemler kullanılır. Örneğin İstanbul metropoliten alanı için oluşturulan GNSS/Nivelman geoidi, 6000 km^2 'lik bir alanda yaklaşık 400 geoid dayanak noktası ile iki parametrelili 5. derece polinom modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Nivelman sonucu elde edilen doğruluk $\pm 35 \text{ mm/km}$ ve geoid yükseklikleri ile oluşturulan modelin uyumu $\pm 4 \text{ cm}$ olarak bulunmuştur [45].

3.3.4 Astro-jeodezik çekül sapmaları yardımıyla astronomik nivelman yöntemi ile geoid yüksekliğinin belirlenmesi

Astronomik nivelman yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde çekül sapması bilinen iki nokta arasında geoid eğimi kullanılarak geoid ondülasyonu bulunabilir. Dolayısıyla herhangi iki astronomik nokta arasındaki geoid ondülasyonu farkı iki nokta arasındaki yatay uzunluk kullanılarak belirlenebilir.

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi geoid üzerinde yer alan ve geoid ondülasyonu N olan bir P noktasından diferansiyel anlamda ds kadar uzaklıkta bulunan ve geoid ondülasyonu N' olan bir P' noktasının geoid ondülasyonları arasındaki bağlantı;

$$N - N' = \Delta N = \int_P^{P'} dN = - \int_P^{P'} ds \tan \varepsilon \quad (3.11)$$

$$\Delta N = \int_P^{P'} \varepsilon ds = - \frac{\varepsilon}{\rho} S \quad (3.12)$$

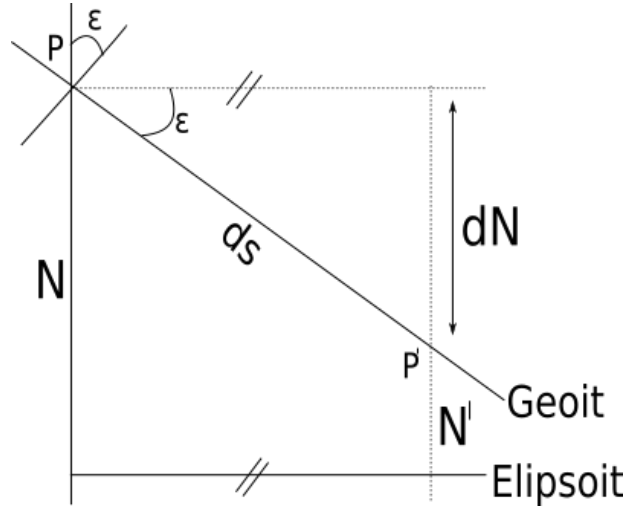
3.11 ve 3.12 eşitlikleri ile verilir.

Eşitliklerde kullanılan çekül sapmaları doğrudan geoid yüzeyinde elde edilmiş yani Pizzetti çekül sapmalarıdır. Bu eşitliklerde Helmert çekül sapmalarının kullanılması durumunda ise;

$$\Delta N_{1,2} = -S_{1,2} \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (3.13)$$

eşitliği kullanılır.

Şekil 3.6'dan da anlaşılacağı gibi geoid eğiminin artış yönü ve çekül sapması arasında zıt bir ilişki vardır. Bu, eşitliklerin sol tarafının eksi işareti ile çarpılması sonucu giderilir.



Şekil 3.6 : Geoidin eğimi.

Helmert çekül sapmaları fiziksel yeryüzü üzerinde belirlenir ve çekül eğriliğinden dolayı geoit üzerindeki çekül sapması değerlerinden ihmal edilebilecek düzeyde saparlar. Bu küçük açı farkı Şekil 3.7’de $\Delta\varepsilon$ olarak gösterilmiştir ve bu açıdan kaynaklanan ΔE_{12} düzeltmesi ise ortometrik düzeltme olarak adlandırılır. Çekül eğriliğinden kaynaklanan bu farkın belirlenmesi için gravite ölçülerine ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulamada gravite değerlerine ulaşmak çok zor ve zaman alıcıdır. Bunun yanı sıra [2, 3, 5, 9, 46] tarafından yapılan çalışmalarda bu farkın ihmal edilebileceği, geoit ondülasyonunun elde edilmesinde bu farkın doğruluğa büyük etkisi olmadığı gösterilmiştir.

Nokta gravite değerlerinin bulunması durumunda ortometrik düzeltme;

$$\Delta E = \frac{1}{g_0} \int_{P_1}^{P_2} (g - g_0) dz + (\bar{g}_1 - g_0) H_1 - (\bar{g}_2 - g_0) H_2 \quad (3.14)$$

eşitliği kullanılarak belirlenir. Eşitliklerde yer alan

dz ; Nivelman ile elde edilen yükseklik farkını,

g ; Gravite ölçüsünü,

\bar{g}_1, \bar{g}_2 ; P_1 ve P_2 noktalarındaki ortalama gravite değerini,

\bar{H}_1, \bar{H}_2 ; P_1 ve P_2 noktalarının ortalama yüksekliğini göstermektedir.

P_1 ve P_2 noktaları arasında çekül sapmasının lineer olarak değişime uğradığı düşünülür.

Bu durumda bir astronomik bir hat güzergahı üzerinde bulunan iki nokta arasındaki geoit yüksekliğinin belirlenmesi için çekül sapması değeri;

$$\varepsilon_{ort} = \frac{\varepsilon_{12} + \varepsilon_{21}}{2} \quad (3.15)$$

Stokes integralinde etkisinden sonra kaldırılan etkilerin tekrar eklenmesi olarak ifade edilebilir [48].

KYK yönteminin avantajı uyşumsuz ölçü belirlenmesi için yapılan istatistik testlerin kolay olması ve sınırlı veri toplama alanı gerektirmesidir. KYK'da bölgesel geoit;

$$N = N_{Model} - N_{Red} \quad (3.16)$$

olarak hesaplanır [2].

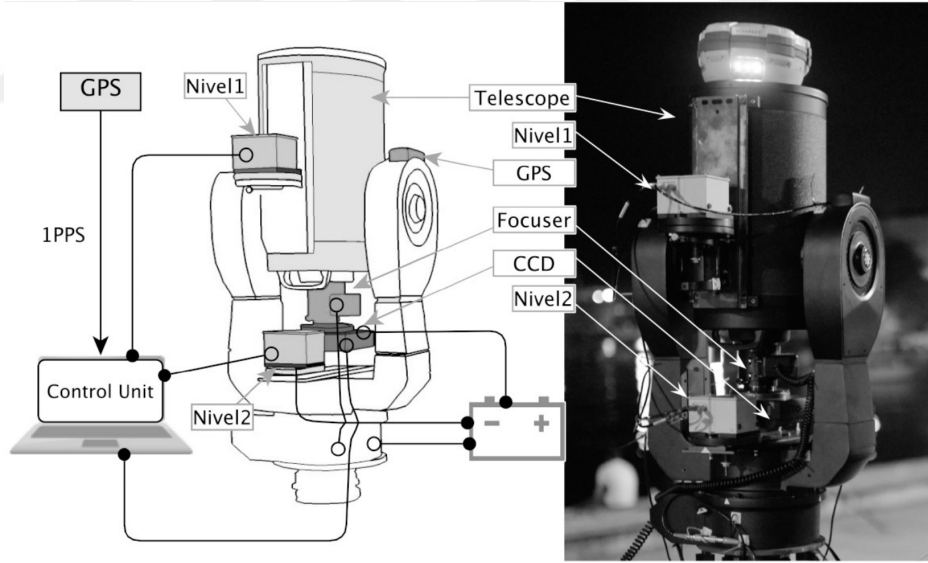




4. YENİLENEN SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi [2] tarafından geliştirilen ilk ulusal SZKS (Şekil 4.1) ile İstanbul metropoliten alanının Anadolu yakasında yer alan 4 noktada çekül sapmaları başarılı şekilde belirlenmiştir. İlk Ulusal SZKS standart endüstriyel bir tribrah altlık ile birlikte kullanılmaktaydı. Sistemin düzeçlenmesi tamamen kullanıcı tarafından yapılmaktaydı. Sistemin ölçmeye hazır hale getirilmesi uzun zaman gerektirmekte ve kullanıcının tecrübeli ve astronomide bilgili olması gerekmektedir.

SZKS ile yapılan gözlemler yalnızca geceleri bulutsuz bir gökyüzünde gerçekleştirilebildiği için zaman, ölçümler sırasında en önemli faktörlerden birisini oluşturmaktadır. Nitekim astro-jeodezik çekül sapmalarının uzun bir süre gözardı edilmesindeki temel neden ölçme zorluklarıdır.



Şekil 4.1 : İlk ulusal SZKS.

Söz konusu olan eksikliklerin giderilmesi, SZKS ile yapılan gözlemlerin sürelerinin asgari düzeye çekilmesi ve SZKS ile elde edilen astro-jeodezik çekül sapmalarının doğruluklarının artırılması için 2016 yılı başlangıcından itibaren sistem modernizasyonu sürecine girilmiştir.

Bu modernizasyon sürecinde zaman kaybının büyük bir bölümünü oluşturan standart tribrah, SZKS'nin bir bileşeni olmaktan çıkarılmış, bunun yerine SZKS'nin kolay

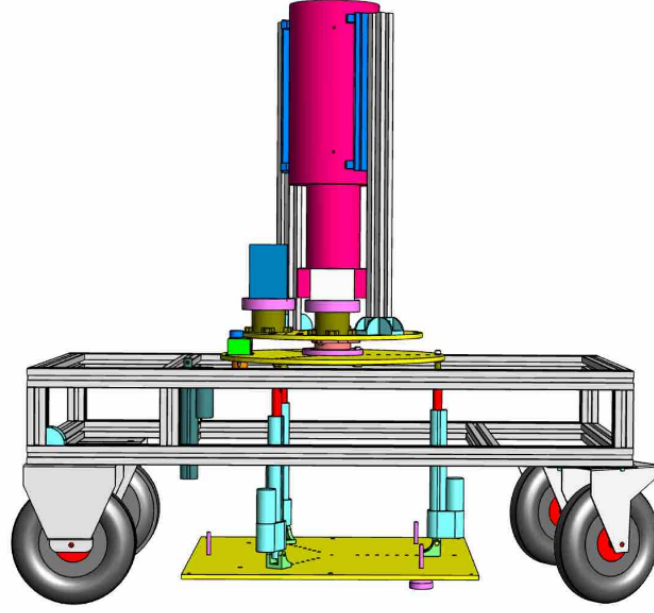
taşınabileceği, sistem düzeçlemesinin bilgisayar yardımıyla yapıldığı, tüm SZKS bileşenlerini içeren bir taşıyıcı altlık imal ettirilmiştir. Taşıyıcı altlık kullanılarak SZKS'nin düzeçlenmesi yüksek doğrulukla kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. Buna ek olarak SZKS'nin düşey doğrultusunun gravite doğrultusu ile çakışmasını sağlayan Nivel210 eğimölçer daha yüksek çözünürlüğe sahip başka bir eğimölçer ile değiştirilmiş ve düzeçleme doğruluğu artırılmıştır. Gözlem esnasında elde edilen görüntüde netleştirmeyi sağlamak amacıyla sıcaklığa duyarlı donanıma sahip focuser temin edilmiştir. Şekil 4.2'de modernizasyon sonrası oluşturulması planlanan SZKS görülmektedir. 4.2'de görüldüğü gibi yenilenen sistemin yüksekliği kısaltılmıştır. Bunun temel nedeni ölçümler boyunca sistemin düzecini bozabilecek rüzgar etkisini asgari düzeyde tutabilmektir.

Yenilenen SZKS'de 4 tekerlekli bir sistemden oluşan taşıyıcı altlık sistemin taşınmasında kolaylık sağlamanın yanı sıra, taşıma esnasındaki güvenliği de arttırmıştır. Kumanda yardımıyla sistemde bulunan step motorlar sistemin zemine oturmasını sağlamaktadır. Yenilenen sistemin üst kısmında görülen sarı renkli halka, bir başka motor sistemi yardımıyla sistemin geri kalanından bağımsız olarak döndürülebilmektedir. Şekil 4.2'de alt kısımda 3 adet ayak şeklinde açık mavi renk ile görülen step motorlar yardımıyla ise sistemin düzeçlenmesi yapılabilmektedir. Devam eden modernizasyon süreci sonunda yenilenen SZKS'nin son tasarımında ise düzeçleme ve azimut döndürme işlem adımlarını da içeren tüm gözlem işlemlerinin programlar yardımıyla otomatik olarak yapılması planlanmaktadır.

4.1 Sistem Donanım ve Yazılımları

4.1.1 Teleskop

Sistemin optik bileşenini oluşturan teleskop seçiminde ayna çapının büyüklüğü, odak uzaklığı ve taşınabilirliği göz önüne alınmıştır. Ayna çapının büyüklüğü teleskoba gelen ışın ile doğru orantılıdır; diğer bir ifade ile ayna çapı büyüdükçe gökyüzünde görülebilen alan artacak, bununla birlikte bir fotoğrafta görüntülenebilen yıldız sayısı da artacaktır. Fakat ayna çapı büyüklüğünün yanı sıra taşınabilir bir yapının oluşturulması önemlidir. Nitekim teleskop SZKS bileşenleri içinde en çok ağırlık taşıyan bileşen olarak ilk sırada yer almaktadır. Teleskobun odak uzaklığı



Şekil 4.2 : Yeni ulusal SZKS.

ise ışığın okülerde resim oluşturana kadar aldığı yolun uzunluğudur. Odak uzaklığı teleskobun büyütme oranını belirlemektedir. Ayna açıklığına ters olarak odak uzaklığı büyüdükçe gökyüzünde görülebilen alan azalacaktır fakat aynı oranda görüntüleme gücü de artacaktır. [2] tarafından yapılan araştırmada maliyet, taşınabilirlik ve ayna çapı göz önünde bulundurularak Meade firması tarafından üretilen 20 cm ayna açıklığına ve 2000 mm odak uzaklığına sahip Meade LX200 GPS teleskop modeli seçilmiştir (Şekil 4.3a). Bilgisayar ortamında teleskop kontrolü için Matlab, MaximDL gibi yazılımlar kullanılabilir. Çalışma kapsamında ise MaximDL yazılımı kullanılarak teleskop kontrolü otomatik olarak sağlanmıştır.

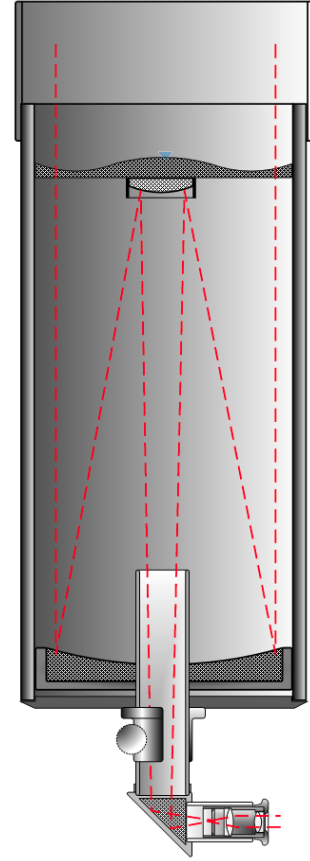
Teleskop sistemi Schmidt-Cassegrain optik mimarisini sahiptir (Şekil 4.3b). Bu optik mimari ışık kirliliği bulunan gözlem istasyonlarında sistemin yüksek performans ile çalışmasını sağlamaktadır.

SZKS’de kullanılan optik donanımlardan kaynaklanan hataları belirlemek oldukça zordur. Bu yüzden SZKS’de farklı azimutlarda yıldız görüntüleri alınarak donanımdan kaynaklanacak hataları özellikle de teleskop ve eğimölçer hatalarını asgari düzeye indirmek amaçlanır. [5, 10] tarafından yapılan gözlemlerde SZKS ile 2 farklı azimutta yıldız görüntüsü elde edilirken, [2] tarafından yapılan çalışmada 4 farklı azimutta yıldız görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca Avrupa genelinde yapılan çalışmalarda farklı azimutlarda yapılan gözlemlerin zenit noktasını etkilediği

görülmüştür. Bu etkiyi minimum düzeye düşürmek için azimut kalibrasyonu yapılmaktadır. Azimut kalibrasyonu ise Bölüm 4.5’de detaylı olarak ele alınmaktadır. [2] tarafından 4 farklı azimutta elde edilen eğim değerleri kullanılarak iteratif düzeçleme yöntemi geliştirilmiştir.



(a) Meade LX200 GPS teleskop



(b) Schmidt-Cassegrain mimari

Şekil 4.3 : SZKS kullanılan optik bileşen.

4.1.2 CCD kamera

SZKS’lerin geliştirilmesine olanak sağlayan teknolojik gelişmelerin başında Charge Coupled Device (CCD) kameraları gelir. 1969 yılında Bell laboratuvarında Willard Boyle ve George Smith tarafından temelleri atılan CCD teknolojisi tüm astronomide köklü bir değişime neden olmuş ve bu değişimden jeodezi de büyük ölçüde etkilenmiştir. İlk CCD görüntüsü 1974 yılında Fairchild’in 8 inch’lik teleskop ve 100×100 piksellik CCD ile aldığı Ay görüntüsüdür. Yüksek görüş gücüne sahip teleskoplarla bile farkedilemeyen sönük yıldızlar ve gök cisimleri, CCD teknolojisi ile belirlenebilir hale gelmiştir.

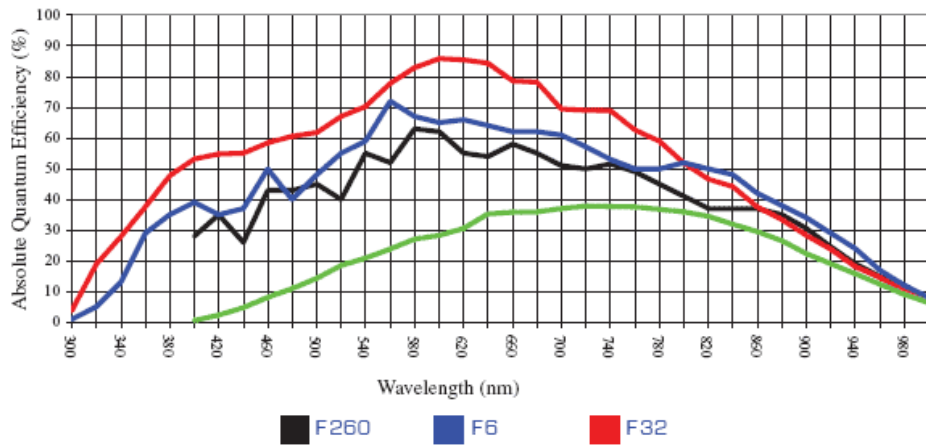
Üzerine düşen ışığın şiddeti ile orantılı olarak tepki veren CCD teknolojisi ışığa duyarlı silisyum hücrelerinden oluşur. CCD algılayıcı sadece ışığın şiddetini ölçebilir yani renkli bir görüntü elde edilmesine olanak sağlamaz.

SZKS’de Apogee firması tarafından üretilen kısa poz sürelerinde yüksek oranda yıldız yakalayabilen yüksek kuantum etkinliğine sahip Apogee Alta F32 modeli CCD kamera kullanılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Apogee Alta F32 CCD.

3.2 Megapiksel kameraya sahip olan CCD 2184×1472 piksel dizi boyutlarından oluşur. $6\mu m \times 6\mu m$ piksel boyutlarına sahip olan CCD teleskop ile birlikte kullanıldığında gökyüzünde yaklaşık $25' \times 17'$ ($\sim 0.12 \text{ deg}^2$) alanı fotoğraflayabilir. Ayrıca sıcaklık kaynaklı oluşabilecek hataların en düşük seviyeye indirilmesi için soğutucu donanım yardımıyla -20 C° 'ye kadar soğutulur. CCD'ye ait kuantum etkinliği grafiği Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5 : CCD kuantum etkinlik grafiği.

CCD kamera ile elde edilen yıldız görüntülerinde pozlama süresi büyük önem taşır. Yüksek pozlama sürelerinde elde edilen görüntülerdeki yıldızlar, yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönüşünden dolayı dairesel bir görünümünden daha çok spiral bir

yapıda görünecektir. Oluşan spiral görüntü nedeniyle yıldızların gerçek merkezinin belirlenmesi mümkün olmayacaktır. Bu nedenle resim ve yıldız koordinatları arasında yapılan koordinat dönüşümü hata içerecektir. Yıldızların öz hareketlerinin yıllık ortalama yaklaşık 0.1 yay saniyesi olduğu düşünülünce bu etkinin temel olarak yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönüşünden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Pozlama süresi 0.5 sn ve daha kısa tutularak bu bozulma giderilebilmektedir.

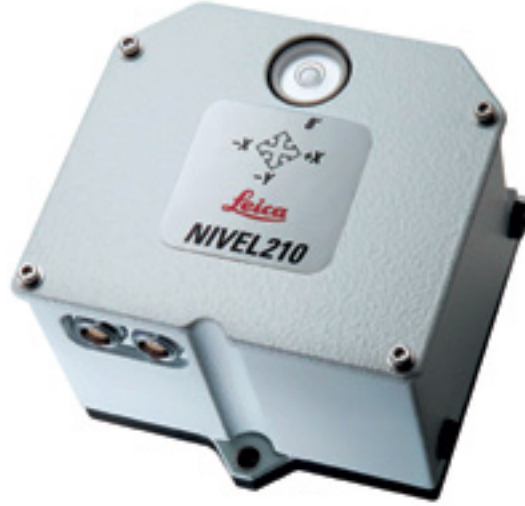
CCD kameranın kontrolü MaximDL yazılımı yardımıyla sağlanmıştır. Shutter gecikmesi ise yine aynı yazılım kullanılarak belirlenmiştir. Bu konuya ilişkin ayrıntılar 4.1.6'da sunulmaktadır.

4.1.3 Eğimölçerler

Bölüm 3'de anlatılan astro-jeodezik çekül sapmalarının SZKS kullanılarak elde edilmesi sadece zenit noktası için geçerlidir. Bu nedenle SZKS'nin mutlak zenit noktasına yöneltilmesi hayati önem taşır. Gerek donanım gerekse yazılımlardan kaynaklanan hatalardan dolayı SZKS'nin düşey eksenini ile çekül doğrultusunun çakıştırılması çok zordur. Fakat ulaşılabilen en yüksek doğruluk ile zenit noktasının belirlenmesi SZKS ile astro-jeodezik çekül sapmaları belirlemenin en önemli unsurlarından birisi olarak ifade edilebilir. Yüksek doğruluk ile zenit noktasının belirlenmesi resim orta noktasının yüksek doğruluk ile belirlenmesine bağlıdır, daha yalın bir ifade ile SZKS'nin mutlak gravite doğrultusu ile çakışık olması gerekmektedir. Bu koşulun sağlanması ise yüksek çözünürlüklü eğimölçerler ile sağlanmaktadır.

[2] tarafından geliştirilen SZKS'de iki adet Leica Nivel210 eğimölçerler kullanılmıştır (Şekil 4.6). Nivel210 eğimölçer 300 ms ölçme zamanı aralığına sahiptir 0.001 mrad (0.2'') çözünürlükte iki eksenli bir opto-elektronik bir sistemdir. Eğimölçer kontrolü Leica SpiderQC yazılımı kullanılarak RS232 port bağlantı sistemi ile sağlanmıştır. Eğim verileri 1 saniye aralıklarla kaydedilerek görüntü epokları ile ilişkilendirilmiştir. Nivel210 eğimölçerler durgun bir sıvı yüzeyinden olan sapmaları belirleme ilkesi ile çalışmaktadır. Bu nedenle SZKS'nin her hareketinden sonra Nivel210 eğimölçerden eğim değerlerinin kaydedilmesi için yaklaşık 1 dakika beklenmelidir [2].

SZKS modernizasyonu ile birlikte Nivel210'a göre daha yüksek çözünürlüğe sahip olan Lippmann tarafından üretilen ve [5, 10, 17, 18, 19] gibi Avrupa ve dünya



Şekil 4.6 : Leica Nivel210 eğimölçer.

genelinde SZKS'lerde kullanılan Yüksek Çözünürlüklü Eğimölçer (High Resolution Tiltmeter-HRTM) temin edilmiştir (Şekil 4.7). HRTM'nin çözünürlüğü 1 nrad'dan daha düşük olarak belirtilmektedir. Nivel210 eğimölçerden farklı olarak HRTM'nin eğim ölçme ilkesi serbest salınım yapan bir sarkacın yatay yöndeki hareket değişimlerinin ölçülmesine dayanır. Nivel210 ve HRTM eğimölçerlerin genel özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

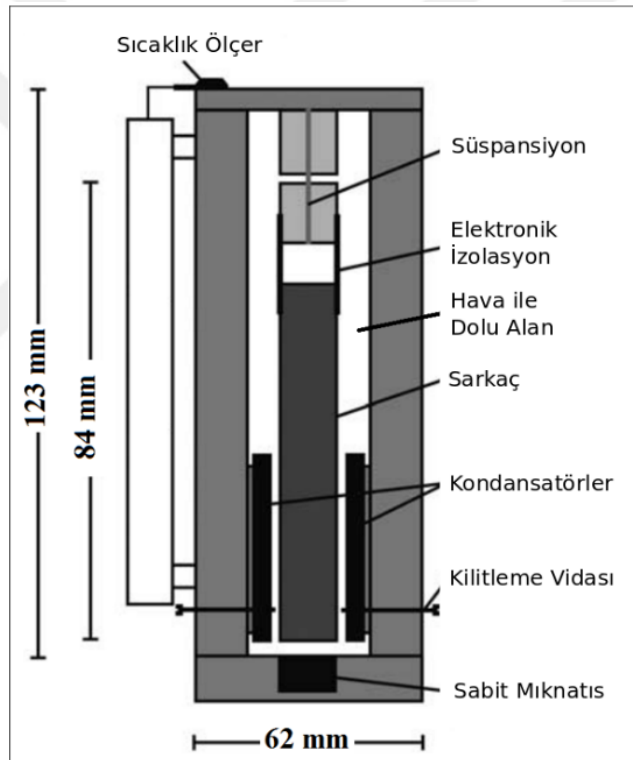


Şekil 4.7 : Yüksek çözünürlüklü eğimölçer (HRTM).

Çizelge 4.1 : Nivel210 ve HRTM eğimölçer özellikleri.

	Nivel210	HRTM
Boyut	95 x 91 x 68 mm	84 x 62 x 123 mm
Çözünürlük	0.001 mrad	< 1 nrad
Çıkış Veri Türü	Xtilt, Ytilt, Sıcaklık, Tarih	Xtilt, Ytilt, Sıcaklık, Tarih, Nem
Veri Hızı	1 Hz	10 Hz
Çalışma Sıcaklığı	-20 – +50 C°	Belirtilmemiş
Bağlantı	RS232	RS232, RS484
Güç Kaynağı	220 Volt	12 Volt

Nivel210 eğimölçerin detayları [2, 49] tarafından verilmektedir; fakat modernizasyon kapsamından temin edilen HRTM eğimölçer ile ilgili ülkemizde henüz yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle HRTM eğimölçer detayları ile incelenecektir. Şekil 4.8’de HRTM eğimölçerin iç yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.8 : HRTM iç yapısı [50].

Şekil 4.8’de yer alan sıcaklık ölçer ile ıslak ve kuru sıcaklık ölçülebilmektedir. Süspansiyon bölümünün orta kısmında 50 µm genişliğinde çelik bir tel bulunmaktadır. Bu ince tel küçük eğim değişimlerini saptayabilmektedir. İç yapıda yer alan boşluk sıvı yerine hava ile doldurulmuştur, böylelikle Nivel210’un aksine HRTM eğimölçerin hareketinin ardından ölçüm alınabilmesi için birkaç saniye beklenmesi yeterli olmaktadır [33]. Bu süreyi kısaltan bir diğer donanım ise HRTM’nin alt kısmında yer alan sabit mıknatıstır. [50] tarafından yapılan çalışmada sabit mıknatıs

çıkarıldığında HRTM'nin ölçüme hazır hale gelmesi için gereken süre 15 saniye olarak belirlenirken, sabit mıknatıs ile bu sürenin 3 saniyeye düştüğü görülmüştür.

Şekil 4.8'de görülen kilitleme vidaları, temin edinilen HRTM eğimölçerde bulunmamaktadır. Kilitleme vidaları taşıma esnasında HRTM eğimölçerin asgari düzeyde zarar görmesini sağlamak amacıyla sarkaç sistemini kilitleyecek şekilde tasarlanmıştır, fakat nedeni bilinmemekle birlikte daha sonra üretilen modellerde kilitleme vidaları çıkarılmıştır. Kullanılan sarkaç ise alüminyumdan yapılmış, 3 mm genişliğinde ve gravite değişimine karşı duyarlıdır. Sarkacın alt kısmında ise her iki tarafta yer alan kondansatörler bulunmaktadır. Kondansatörler eğimölçerin belirli bir eşik aralığında ölçüme başlamasının yanı sıra, sabit mıknatısın çalışma zamanını da belirlemektedir.

4.1.4 Focuser

Gözlemler sırasında değişen hava sıcaklıkları CCD kamera tarafından elde edilen görüntülerde bozulmalara neden olmaktadır. Bozulan görüntü nedeniyle yıldızların belirlenmesi ve yıldız katalogları ile eşleşmesi daha zor hale gelmektedir. Bu bozucu etkiyi ortadan kaldırmak için CCD kamera ve teleskop arasına bir focuser (odaklayıcı) yerleştirilmiştir. İlk ulusal SZKS'de Meade firmasına ait bir focuser kullanılmaktaydı. Modernizasyon çalışmalarıyla sıcaklığa duyarlı ve otomatize Optec firması tarafından üretilen TCF-S Temperature Compensating Focuser temin edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Optic TCF-S ısı duyarlı Focuser.

Şekil 4.9'da focuserin sol tarafında yer alan küçük parça ortam sıcaklığını otomatik olarak ölçmekte ve buna bağlı olarak en net görüntüyü alabilmek için odak uzaklığını

değiştirmektedir. Değişen odak uzaklığı ise MaximDL programı kullanılarak kayıt edilmekte ve gözlemlere düzeltme olarak getirilmektedir.

4.1.5 Zaman belirleme donanımı

Zamanın yüksek presizyonlu olarak belirlenmesi astro-jeodezik çekül sapmalarını belirlemede büyük önem taşıyan bir konudur. Yıldız görüntülerinden elde edilen koordinatlar bilindiği gibi rektansiyon ve deklinasyon sistemindedir. Astronomik enlem (Φ) ve astronomik boylam (Λ) değerlerinin bu sistemden elde edilmesi için eşitlik 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.

$$\Phi = \delta \quad (4.1)$$

$$\Lambda = \alpha - GAST \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2'de görüldüğü gibi astronomik boylamın, rektansiyon sisteminden elde edilebilmesi için GAST değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Novas kütüphaneleri kullanılan GAST değeri içinse yüksek presizyonlu zaman bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. "İlk ulusal SZKS'de zaman belirleme amacıyla Motorola M12+GPS alıcısı ile birlikte çalışan Timing3000 anten, izleme ve senkronizasyon yazılımı TAC32 Plus'tan oluşan bir konfigürasyon belirlenmiştir" (Şekil 4.10) [2].

Kullanılan bu konfigürasyon ile zaman bilgisi 25 nanosaniye hassasiyetinde elde edilebilmektedir [51]. SZKS'ler için yeterli doğruluğu sağlayan bu sistem modernizasyon çalışmalarında değiştirilmemiştir. Böylelikle modernizasyon çalışmalarında mali açıdan kazanç ve yeni bir sistem entegrasyonu gerektirmediği için zaman kazanımı sağlanmıştır.

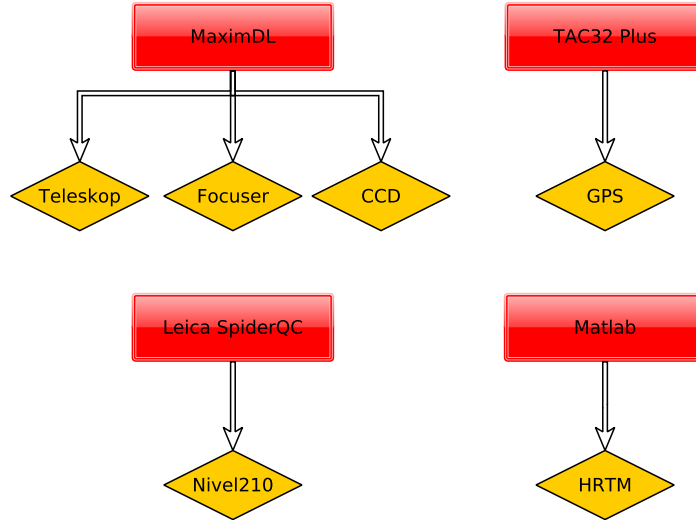
4.1.6 Değerlendirme yazılımları

SZKS ile gerek yıldız görüntülerini elde etmede gerekse bu görüntülerin işlenmesi sırasında çok sayıda farklı yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılımların mümkün olan en iyi performansla çalışması ve yazılımlar arası koordinasyonu sağlamak zahmetli ve yorucu olduğu kadar uzun işlem süreleri gerektirmektedir. SZKS'de kullanılan yazılımlar görüntü elde etme sırasında ve sonrasında kullanılan yazılımlar olarak iki grup altında toplanabilir. Görüntü elde etme sırasında kullanılan yazılımlar teleskop, focuser, CCD kamera ve eğimölçerlerin kontrolünü sağlar. Şekil 4.11'de



Şekil 4.10 : Zaman belirlemede kullanılan donanım ve yazılımlar [2].

görüldüğü gibi MaximDL yazılımı kullanılarak teleskop, focuser ve CCD kamera kontrol edilebilir. Zaman belirlemede kullanılan GPS donanımı için Tac32 Plus yazılımı tercih edilmiştir. İlk ulusal SZKS’de olduğu gibi Nivel210 eğimölçerden veri akışını sağlamak için Leica SpiderQC yazılımı kullanılmıştır. Kontrol ve veri aktarımının sağlanması için en çok vakit harcanan donanım ise HRTM olmuştur.



Şekil 4.11 : Görüntü elde etme sırasında kullanılan yazılımlar.

HRTM’den veri akışının sağlanması için üretici firma tarafından üretilen Hterm isimli bir yazılım mevcuttur. Fakat Hterm yazılımı çıktıları bit biriminde vermekte ve otomatik olarak kayıt sağlamamaktadır. Ayrıca uzun süren kayıt işlemlerinde programın saatlik ortalama 30 saniyelik veri kaybına neden olduğu görülmüştür.

Oluşan veri kaybının asgari düzeye indirgenmesi, çıktıların ölçüm esnasında SZKS’yi düzellemede kullanılacak bir formatta (X ve Y yönündeki eğim değerlerinin

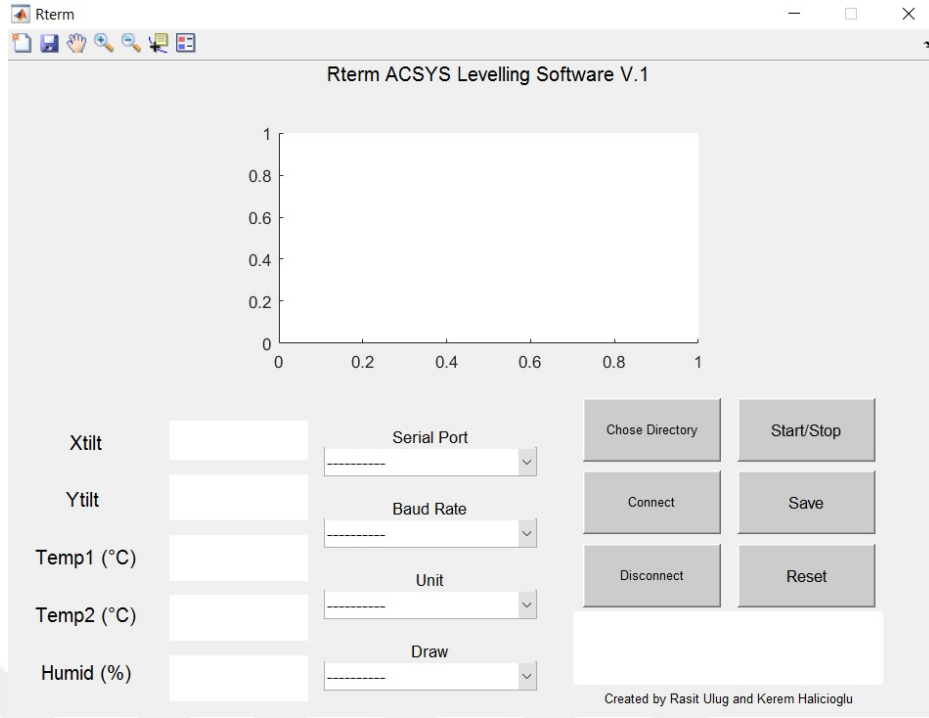
radyan veya yay saniyesi biriminde, sıcaklık değerinin C° biriminde) elde edilmesi ve HRTM'nin tam kontrolünün sağlanması amacıyla Matlab programı kullanılarak Rterm isimli bir program oluşturulmuştur. Şekil 4.12'de Rterm programının arayüzü görülmektedir. Program, X ve Y yönündeki eğimi, ölçme yapılan ortamın kuru, ıslak sıcaklığını ve nem değerlerini arayüzün sol kısmında görülen ilgili satırda göstermektedir. Rterm yazılımında verilerin istenilen dosyaya kaydedilebilmesi için bir buton eklenmiştir. Programa çizim butonu eklenmiştir. Bu buton yardımıyla X ve Y yönündeki eğim değerlerinin sıfırdan farkları mili-radyan veya yay saniyesi biriminde çizdirilebilmektedir. Ayrıca Nivel210 ile HRTM arasında çıktı uyumunu sağlamak için Rterm programı dosyaları saatlik olarak kaydetmektedir. Standart bir çıktı formatı H1_GGAAYYYYY_SS0000.log ismi ile kayıt edilmektedir. Burada;

- H1, HRTM eğimölçeri,
- GG, ölçüm anındaki ayın gününü,
- AA, ölçüm anındaki yılın ayını,
- YYYY, ölçüm anındaki yılı,
- SS, ölçüm anındaki saati

göstermektedir.

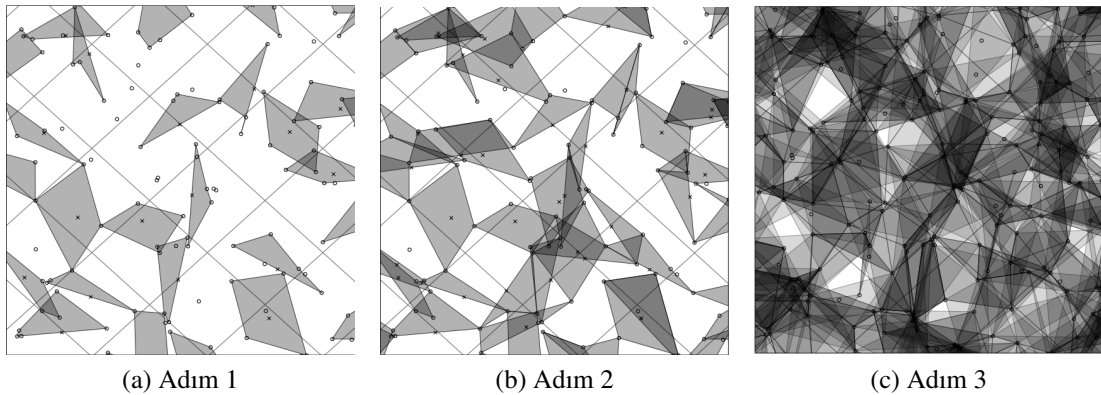
SZKS'de görüntü elde etme sonrası kullanılan yazılımlar görüntülerdeki yıldızların tanımlanmasında, görüntülerin başlık (header) bilgilerinin düzenlenmesinde ve resim orta noktası koordinatlarının rektesansiyon ve deklinasyon koordinat sisteminde bulunmasında kullanılır. [2] tarafından yapılan ilk çalışmada görüntüdeki yıldızların tanımlanması ve resim orta noktasının J2000.0 epoğundaki koordinatlarının elde edilmesi için Pinpoint Astrometry Engine V.5, IRAF, Astrometry.net, Astrometrica ve IDL yazılımları kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında ise elde edilen görüntülerdeki yıldızların tanımlanması ve resim orta noktasının rektesansiyon ve deklinasyon sistemindeki koordinatlarının bulunması için [52] tarafından üretilen Astrometry.net yazılımı kullanılmıştır. Astrometry.net yazılımı herhangi bir arayüze sahip değildir. Python 2.7 ve C programlama dilleri, WCSTools, SExtractor astronomi yazılımları kullanılarak oluşturulan bu yazılım



Şekil 4.12 : Rterm yazılımı arayüzü.

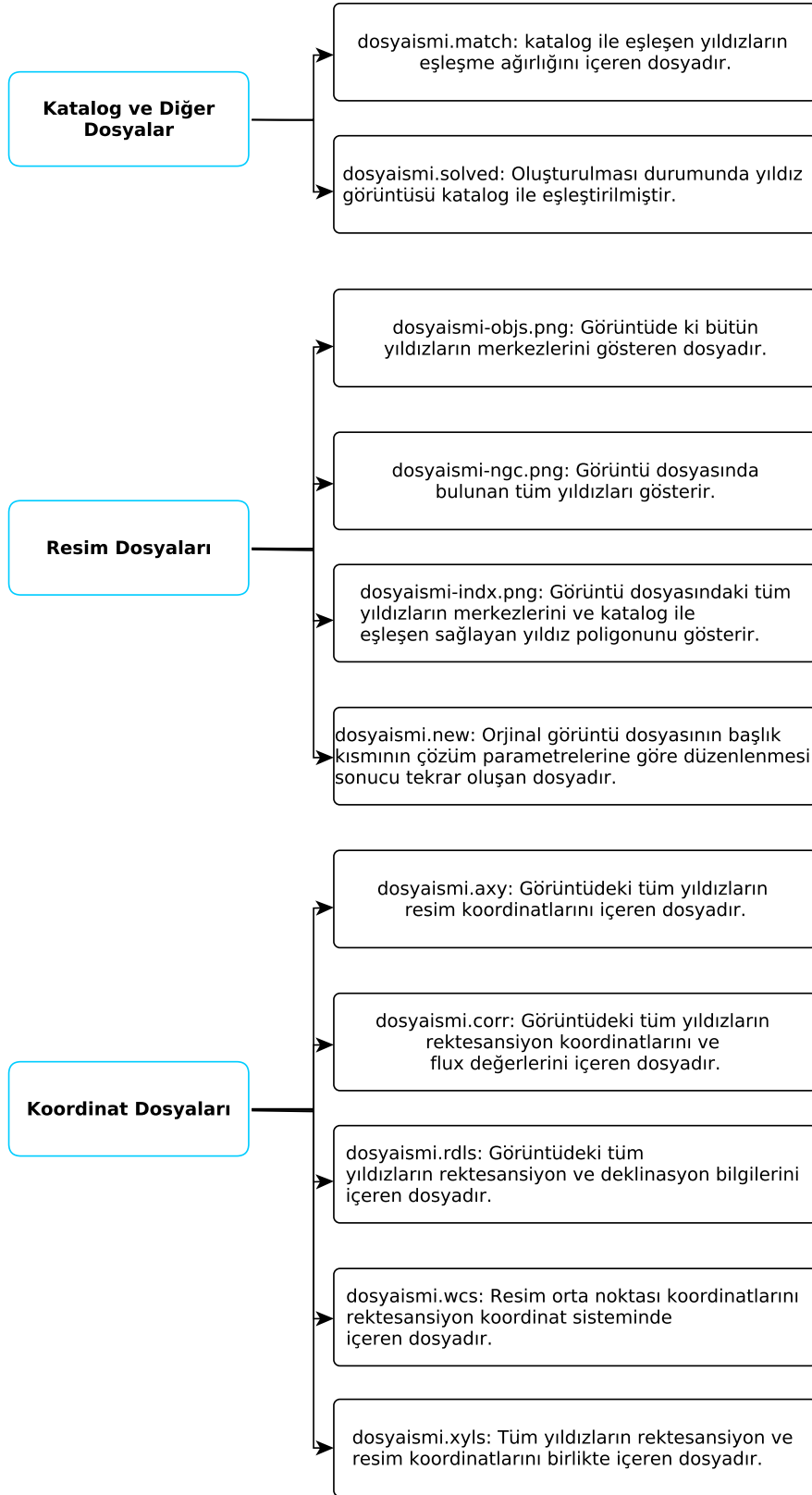
gökküredeki yıldızları ilgili yıldız kataloglarını kullanarak 4 veya 5'li gruplara böler ve bu gruplardan yıldız poligonları oluşturur (Şekil 4.13). SZKS ile elde edilen yıldız görüntülerindeki belirlenen yıldızların oluşturduğu geometrik şekiller ile Astrometry.net yazılımının oluşturduğu bu geometrik şekiller arasında karşılaştırma yapılır. Astrometry.net yazılımı her iki yıldız görüntüsündeki geometrik şekiller arasında eşleşme sağlarsa yıldız tanımlama işlemine başlar. Tanımlanan tüm yıldızların rektesansiyon ve deklinasyon sistemindeki koordinatları bulunarak resim orta noktası koordinatı enterpole edilir.



Şekil 4.13 : Astrometry.net yazılımı ile yıldız poligonları oluşturulması örneği.

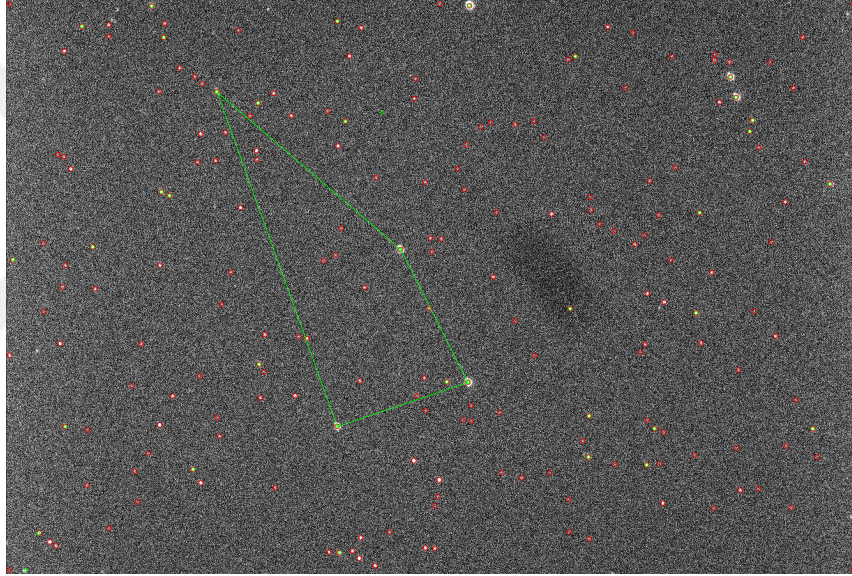
Astrometry.net tarafından başarılı bir şekilde çözümü gerçekleştirilen bir yıldız görüntüsü sonrasında programın her aşamasını ve sonuçlarını içeren çıktı dosyaları

oluşturulmaktadır. Oluşturulan dosya uzantıları ve özellikleri Şekil 4.14’de görülmektedir.



Şekil 4.14 : Asrometry.net yazılımı standart çıktıları.

Astrometry.net yazılımı ile yıldız görüntüleri içeren bir dosyadaki yıldızların tespit edilmesi, uygun yıldız kataloğu ile eşlenmesi ve resim orta noktasının merkezinin bulunması işlemi 10-20 saniye arası sürmektedir. Kullanıcının isteğine bağlı olarak görüntü dosyalarının bir kısmı üretilmeyebilir. Oluşturulmayan bu dosyalar ise çözümlene süresini yaklaşık 5-8 saniyeye kadar düşürmektedir. Bir gözlem noktasında ise ortalama 400 yıldız görüntüsü alınmaktadır. Tüm görüntü dosyalarının işlenmesi uzun bir süre gerektirmektedir. Unix tabanlı Linux işletim sisteminde yazılan kabuk programları (shell script) yardımıyla bu işlem otomatik olarak yapılabilmektedir. Astrometry.net yazılımı ile görüntüdeki yıldızların (beyaz daire), yıldız merkezlerinin (kırmızı daire) ve katalog ile eşleşimi sağlayan yıldız poligonunun (yeşil çokgen) belirlendiği örnek bir görüntü Şekil 4.15’de verilmektedir.



Şekil 4.15 : Astrometry.net yazılımı -indx.png çıktı dosyası.

Astrometry.net yazılımı ticari amaç olmaksızın ücretsiz olarak kullanılabilme imkanı sunmaktadır. [2] tarafından Pinpoint Astrometry Engine V.5 programı ile UCAC2 yıldız kataloğu kullanılarak elde edilen yıldız görüntüleri ana noktası ile Astrometry.net yazılımında UCAC4 yıldız katalogları kullanılarak elde edilen resim orta noktası arasındaki koordinat farkları Astrometry.net yazılımında bulunan downsample komutu sırasıyla 0, 2 ve 4 alınarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4’de görülmektedir. Resim orta noktası enterpolasyonu yapılmamasına rağmen farklar $1''$ nin altındadır. Hatırlanması gereken bir diğer konu ise yazılımlardan elde edilen resim orta noktası koordinatlarının doğrudan kullanılmadığıdır. Diğer bir ifade ile kullanılan programların resim orta noktasının koordinatlarını

belirleme doğruluğundan ziyade herbir yıldıza ait rektansiyon ve deklinasyon değerlerini belirleme doğruluğu önemlidir. Astrometry.net yazılımı görüntülerde yer alan yıldızların koordinatlarını yeterli doğrulukta belirleyebildiğini kanıtlamıştır. Çizelgelerde görüldüğü gibi farklı azimutlarda alınan yıldız görüntülerinde en uyumlu sonuç `downsample 2` komutu ile sağlanmıştır. Astrometry.net yazılımında kullanılan `downsample` komutu yıldız görüntülerinde veri bölme (data-binning), veri ön işleme tekniğini uygulamaktadır [53]. Veriler küçük gruplara bölünerek gözlem hatalarının etkileri azaltılır, böylece görüntülerde daha fazla sayıda yıldız belirlenebilmektedir. `Downsample 2` ve `4` komutu sırasıyla görüntüdeki pixelleri 2×2 ve 4×4 'lük gruplara ayırarak işlem yapmaktadır.

Kullanılan yazılım sıralaması ve astro-jeodezik çekül sapmalarının elipsoidal ve astronomik koordinatlar yardımıyla elde edilmesi Bölüm 4.3'de detayları ile ele alınmaktadır.

Çizelge 4.2 : Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net yazılımları kullanarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.

Azimut	Pinpoint Astrometry Engine	Astrometry.net	Fark
90	RAC 18° 25' 42.9440277695"	18° 25' 43.0280947503"	0.0840669808"
	DEC 40° 48' 09.1117355428"	40° 48' 08.4895965851"	0.6221389577"
180	RAC 18° 26' 18.5207427682"	18° 26' 18.3738403526"	0.1469024156"
	DEC 40° 45' 05.6895446145"	40° 45' 02.8026911740"	2.8868534405"
270	RAC 18° 20' 53.3220451386"	18° 20' 53.3391967239"	0.0171515853"
	DEC 41° 20' 35.3409267052"	41° 20' 36.2133478577"	0.8724211525"

Çizelge 4.3 : Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net (downsample 2) yazılımları kullanılarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.

Azimut	Pinpoint Astrometry Engine	Astrometry.net (downsample 2)	Fark
90	RAC 18° 25' 42.9440277695"	18° 25' 42.9368274419"	0.0072003276"
	DEC 40° 48' 09.1117355428"	40° 48' 09.3879565797"	0.2762210369"
180	RAC 18° 26' 18.5207427682"	18° 26' 18.4448157946"	0.0759269736"
	DEC 40° 45' 05.6895446145"	40° 45' 04.7594445056"	0.9301001089"
270	RAC 18° 20' 53.3220451386"	18° 20' 53.34037881649"	0.0183336778"
	DEC 41° 20' 35.3409267052"	41° 20' 35.5894048736"	0.2484781684"

Çizelge 4.4 : Pinpoint Astrometry Engine ve Astrometry.net (downsample 4) yazılımları kullanılarak çözülen görüntülerin ana nokta koordinat karşılaştırılması.

Azimut	Pinpoint Astrometry Engine	Astrometry.net (downsample 4)	Fark
90	RAC 18° 25' 42.9440277695"	18° 25' 42.8884305677"	0.0555972018"
	DEC 40° 48' 09.1117355428"	40° 48' 09.8130512216"	0.7013156789"
180	RAC 18° 26' 18.5207427682"	18° 26' 18.4796661282"	0.0410766400"
	DEC 40° 45' 05.6895446145"	40° 45' 04.7135112413"	0.9760333732"
270	RAC 18° 20' 53.3220451386"	18° 20' 53.3582681894"	0.0362230508"
	DEC 41° 20' 35.3409267052"	41° 20' 35.6166907220"	0.2757640168"

4.2 Kalibrasyon

Herhangi bir mekanik ölçme donanımının belirli koşullar altında ölçmesi gereken değer ile ölçtüğü değerler arasında farklılık olabilir. Bu farkın belirlenmesine ve ölçülerde düzeltilmesi işlemine ise kalibrasyon denir. Astro-jeodezik çekül sapmalarının yüksek doğrulukla belirlenmesi için SZKS’de kullanılan optik ve mekanik donanımların kalibrasyonlarının yapılması gerekmektedir. Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi’nde gerçekleştirilen kalibrasyon testleri ve sonuçları alt bölümlerde detayları ile anlatılmaktadır.

4.2.1 Teleskop kalibrasyonu

SZKS’nin tek optik bileşeni olma özelliğini taşıyan teleskobun kalibrasyonu yıldız görüntüleri yardımıyla yapılmaktadır. Gökyüzünde parlak bir yıldızla yönlendirilen teleskop görüntüsü sistematik olarak bozulmaktadır. Bozulma sonucunda oluşan yıldız görüntüsü noktasal olarak değil, iç içe geçmiş daire şeklini almaktadır. Teleskobun içinde bulunan ayna ile dış merkezde bulunan aynada oluşan dairelerin merkezinin çakışması gerekmektedir. Eğer çakışmazsa teleskop kalibrasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Danjon pavyonunda gerçekleştirilen teleskop testlerinde dairelerin merkezlerinin çakıştığı görülmüştür.

4.2.2 CCD kamera shutter gecikmesi

Shutter, belirli bir zaman aralığı içerisinde kameraya giren ışık miktarının kontrol edilebildiği ve tüm kameralarda yer alan bir kontrol mekanizmasıdır. Shutterin genel çalışma ilkesi ise görüntü anında açılması ve anlık olarak kapanmasıdır. Şekil 4.16’de bir shutterin açılma ve kapanması gösterilmektedir. Şekil 4.16’den de anlaşılacağı gibi shutter açılmaya başladığı anda kameranın orta kısmı doğrudan görüş alanına sahip olacakken, kamera sınırlarına doğru shutterin geç açılmasından dolayı oluşan görüntüde küçük zaman kaymaları olmaktadır. Bu küçük zaman kaymalarına shutter gecikmesi denir.

SZKS’de kullanılan CCD kameranın shutter gecikmesini belirlemek için Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Jeodezi Laboratuvarı’nda bir test ortamı oluşturul-



Şekil 4.16 : Shutter gecikmesi.

muştur. Oluşturulan bu test alanında shutter gecikmesini belirlemek için MaximDL yazılımı kullanılmıştır.

Shutter gecikmesini belirlemek için CCD kamera ve MaximDL programı arasında bilgisayar yardımıyla bağlantı kurulur. CCD kameranın ekranı görebileceği bir şekilde sabit bir platforma yerleştirilmesi gerekmektedir. Bunu yanı sıra CCD kameranın bilgisayar ekranında beliren temel kalibrasyon görüntüsünü net olarak algılayabilmesi için ortamın karanlık olması gerekmektedir. Poz süresi 0.5 saniye veya daha kısa olacak şekilde ayarlanmalıdır. Şekil 4.17a'da görülen temel kalibrasyon görüntüsü ilk sütundan son sütuna doğru 1 saniye içerisinde ekranda belirirken ve ilk sütunun belirmesiyle birlikte CCD kamera görüntü almaktadır. CCD kameranın görüntüleyemediği rakamlar ise shutter gecikmesini vermektedir. SZKS'de kullanılan Apogee F32 CCD kamera ile gerçekleştirilen bu testte shutter gecikmesi 0.02 saniye olarak belirlenmiştir (Şekil 4.17b). Shutter gecikmesi çevresel etkilerden bağımsızdır. Bu nedenle mekanik donanım deforme olmadığı sürece sabit kaldığı düşünülmektedir. Fakat belirli periyotlarla shutter gecikmesi belirlenerek CCD kameranın deforme olup olmadığı kontrol edilmektedir. Bu gecikmenin görüntülere düzeltme olarak eklenebilmesi için bilgisayar zamanının senkronizasyonu gereklidir. Bölüm 4.1.5'de anlatıldığı gibi bu senkronizasyon bir tek frekanslı GPS alıcısı ile sağlanmaktadır.

Shutter Latency Measurement									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9	9	9	9



(a) Shutter gecikmesi testi temel kalibrasyon görüntüsü

(b) Shutter gecikmesi testi elde edilen görüntü

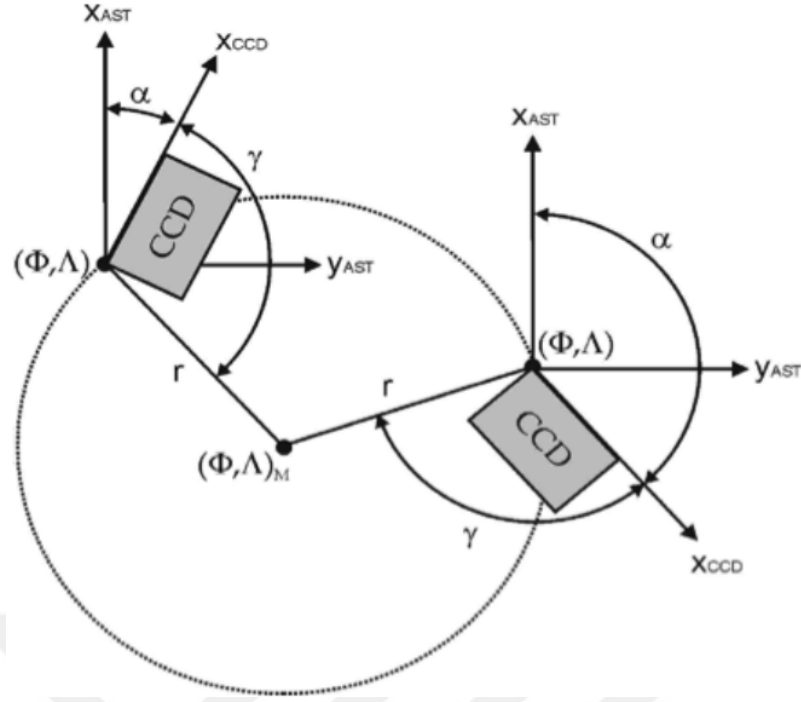
Şekil 4.17 : Shutter gecikmesi test görüntüleri.

4.2.3 Azimut ve göksel kalibrasyon

Donanımsal hataları elimine edebilmek için SZKS ile farklı azimutlarda gözlem yapıldığı önceki bölümlerde belirtilmişti. Fakat farklı azimutlarda elde edilen astronomik koordinatların azimut değişiminden etkilendiği de bilinen bir gerçektir. Farklı azimutlarda elde edilen astronomik koordinatlar olması gereken astronomik koordinatların etrafından radyal bir simetri çizecektir [5]. [5] tarafından geliştirilen tripod yöntemi ile azimut kalibrasyonu yapılabilmektedir. Tripod azimut kalibrasyon yöntemi [33, 54] tarafından sunulmaktadır. Şekil 4.18'de azimut kalibrasyonunun bileşenleri ve genel ilkeleri gösterilmektedir.

Farklı azimutlarda (α) elde edilen astronomik koordinatlar (Φ , Λ), noktaya ait gerçek astronomik koordinatlar (Φ , Λ)_M etrafında bir daire oluşturmaktadır. Azimut kalibrasyonunda belirlenmek istenen kalibrasyon bileşenleri r ve γ 'dır. Burada r , oluşan radyal simetrinin yarıçapını, γ ise CCD kameranın konumuna bağlı olarak r bileşeninden CCD kameranın bağlantı noktasına kadar ölçülen açıyı göstermektedir. [5] tarafından verilen azimut kalibrasyonu eşitliğinde (Eşitlik 4.3) görüldüğü gibi azimut kalibrasyonu bileşenlerinin (r , γ) bulunabilmesi için en az iki farklı azimutta gözlem yapılması gereklidir.

$$\begin{aligned}\Phi(X, L) &= \Phi - \Phi_M + r \cos(\alpha + \gamma) = 0 \\ \Lambda(X, L) &= \Lambda - \Lambda_M + r \cos(\alpha + \gamma) \sec(\Phi) = 0\end{aligned}\tag{4.3}$$



Şekil 4.18 : Azimut kalibrasyonu [5].

Eşitlikte yer alan Φ_M , Λ_M , gerçek gravite doğrultusunu, $\Phi(\alpha)$, $\Lambda(\alpha)$, azimuta bağlı gravite doğrultusunu, α , astronomik azimutu, $X_T(\Phi_M, \Lambda_M, r, \gamma)$, bilinmeyenler vektörünü, $L_T[(\Phi_M, \Lambda_M, \alpha)_1 \dots (\Phi_M, \Lambda_M, \alpha)_N]$, ölçüler matrisini ifade etmektedir [33].

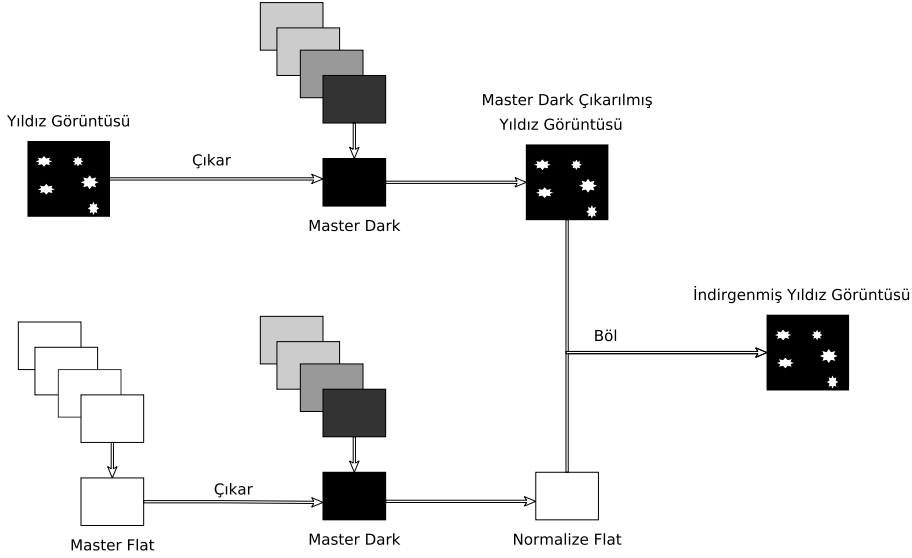
[5] tarafından geliştirilen göksel kalibrasyonda ise eğimölçerin koordinat sistemi ve CCD koordinat sistemi arasındaki dönüklük açısı, eğimölçerin eksenleri arasındaki açı ve eğimölçerlerin ölçekleri (m_1, m_2) belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında esnasında azimut ve göksel kalibrasyon işlemleri henüz gerçekleştirilmemiştir.

4.2.4 Görüntü kalibrasyonu

CCD kamera ile elde edilen görüntüler çevresel etmenlerden dolayı yüksek miktarda gürültü barındırır. Gürültünün elimine edilebilmesi için kalibrasyon gereklidir. Temel ilke ise aynı tür gürültü seviyelerine sahip görüntüler kullanılarak gürültülerin belirlenmesi ve görüntülerden arındırılması olarak tanımlanabilir [2].

Görüntü kalibrasyonunun yapılması için gözlem gecesi ve gözlem sonunda çok sayıda sıfır (bias), kara (dark) ve düzalan (flat field) görüntüleri alınır. Gece sonunda elde edilen tüm kara ve düz alan görüntüler birleştirilerek birer adet master dark ve master flat alan görüntü elde edilir. Elde edilen master dark görüntü master düz alan ve yıldız görüntülerinden çıkarılır. Bu çıkarma işlemi sonucunda master flat görüntü

normalize olmaktadır. Elde edilen normalize master flat görüntüsü yıldız görüntülerine bölünerek kalibrasyon tamamlanır. Görüntü kalibrasyonu işlem adımları Şekil 4.19’de gösterilmektedir. Görüntü kalibrasyonu sonucunda elde edilen indirgenmiş yıldız görüntüleri kullanılarak resim orta noktası koordinatları rektansiyon koordinat sisteminde belirlenir.

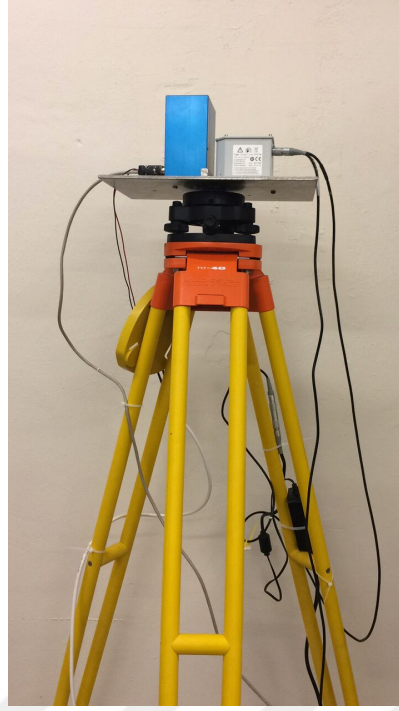


Şekil 4.19 : Görüntü kalibrasyonu işlem adımları.

4.2.5 Eğimölçerlerin kalibrasyonu

Eğimölçerlerin test ve kalibrasyon işlemleri üzerinde en çok çalışılan konu olmuştur. Sıcaklık değişimlerinin eğimölçerler üzerine etkileri, eğimölçerlerin stabilitesi ve ölçme doğruluğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Eğimölçer kalibrasyon ve sıcaklık tesleri için Nivel210 kullanım kılavuzunda yer alan kalibrasyon levhası imal ettirilmiştir. Kalibrasyon levhası üzerine vidalama ile standart bir tribrah üzerine yerleştirilen iki eğimölçer ile yaklaşık 30 gün boyunca eğim değerleri kaydedilmiştir. Gözlem süreleri Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Çizelgede göze çarpan HRTM’de meydana gelen veri kaybıdır. Veri kaybının temel nedeni HRTM’den veri almak için kullanılan Hterm yazılımının biriken yüksek boyutlu verileri hafızasında tutamaması ve programın otomatik kayıt özelliğinin bulunmamasıdır. Ayrıca yapılan gözlemlerde Hterm programının saatlik ortalama 30 saniye veri kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Veri kaybının temel nedeni Hterm yazılımının 1 saniyelik veriyi yaklaşık 1.008 saniyede işleyebilmesidir.



Şekil 4.20 : Eğimölçer kalibrasyon düzeneği.

Oluşan veri kaybının minimize edilmesi, otomatik kayıt özelliğinin kazandırılması ve HRTM'nin maksimum performans ile kullanılabilmesi için Bölüm 4.1.6'da anlatıldığı gibi Rterm yazılımı oluşturulmuştur.

Gözlemler Kandilli Rasathanesi Jeodezi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarın gündüz saatleri içerisinde kullanıldığı bu nedenle gürültü içerdiği göz önüne alınarak 19:00-06:00 saatleri arasında ölçülen eğim değerleri değerlendirilmeye alınmıştır.

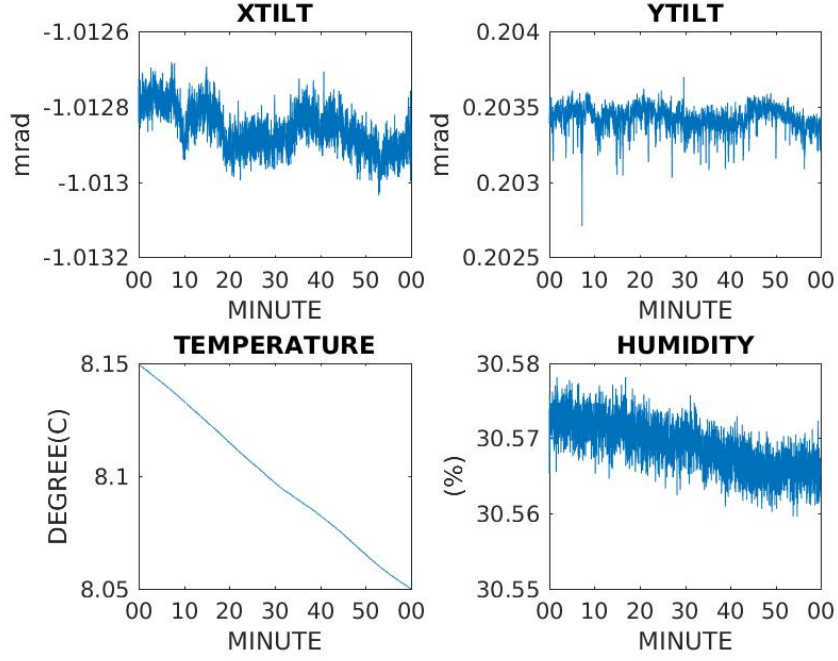
HRTM eğimölçerin yüksek çözünürlüğü düşünülerek gözlem tarihleri içinde Marmara Denizinde ve İstanbul'da meydana gelen depremler Kandilli Rasathanesi verileri kullanılarak incelenmiş fakat gözlem tarihleri içerisinde kayıt altına alınan depremlerin düşük büyüklüklere sahip olması nedeniyle eğim değerlerinde herhangi bir etki görülmemiştir.

Gözlem süreleri boyunca elde edilen eğim değerleri günlük ve saatlik olarak sınıflandırılmış ve incelenmiştir. Şekil 4.22a'da 28/11/2016 tarihinde 00:00-01:00 saatleri arasında HRTM ile elde edilen eğim, sıcaklık ve nem değerleri gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi laboratuvarın kullanılmadığı zamanlarda eğim değerlerinde değişim miktarı yalnızca birkaç mrad (~ 1 derece saniyesi) civarında görülmektedir. Bu değişimin anlamlı bir değişim olduğunun söylenmesi zordur.

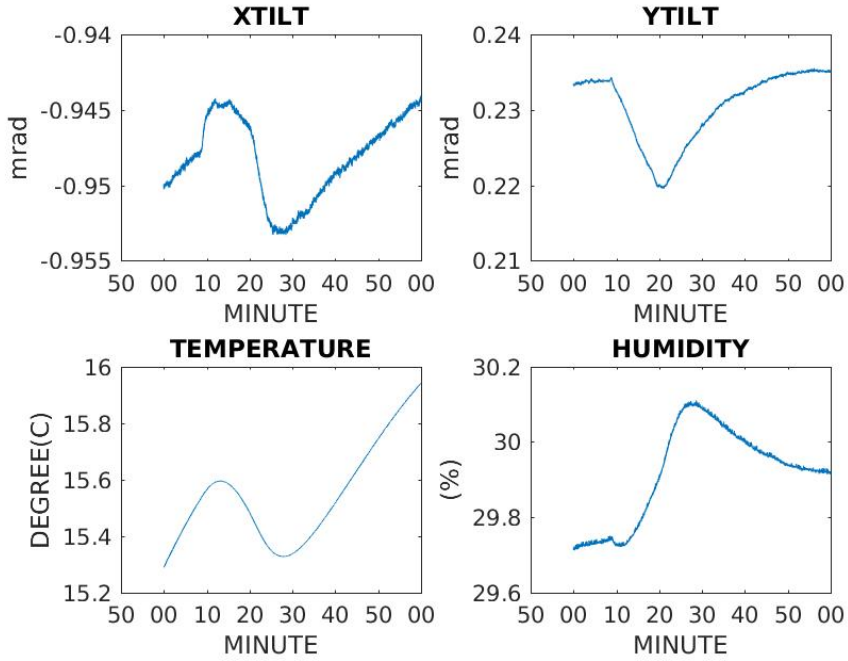
Çizelge 4.5 : Kalibrasyon gözlemi tarih ve süreleri.

Tarih	Nivel210	HRTM
23 Kasım 16	13:15:13-13:57:17	Veri Yok
24 Kasım 16	Tüm Gün	15:30:00-23:59:59
25 Kasım 16	Tüm Gün	Tüm Gün
26 Kasım 16	Tüm Gün	Tüm Gün
27 Kasım 16	Tüm Gün	Tüm Gün
28 Kasım 16	Tüm Gün	Tüm Gün
29 Kasım 16	Tüm Gün	00:00:00-11:01:18-18:00:58-23:59:59
30 Kasım 16	Tüm Gün	Tüm Gün
1 Aralık 16	Tüm Gün	00:00:00-14:21:06
2 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
3 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
4 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
5 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
6 Aralık 16	Tüm Gün	13:20:06-23:59:59
7 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
8 Aralık 16	Tüm Gün	00:00:00-10:57:50
9 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
10 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
11 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
12 Aralık 16	Tüm Gün	09:45:55-23:59:59
13 Aralık 16	Tüm Gün	00:00:00-09:41:58
14 Aralık 16	Tüm Gün	14:27:56-23:59:59
15 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
16 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
17 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
18 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
19 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
20 Aralık 16	Tüm Gün	Tüm Gün
21 Aralık 16	Tüm Gün	00:00:00-22:40:01
22 Aralık 16	Tüm Gün	Veri Yok
23 Aralık 16	13:00:01-13:39:38	Veri Yok

Fakat özellikle güneşin en sıcak olduğu öğle vakitleri incelendiğinde sıcaklık ve eğim değerlerinde bir ilişki olduğu görülmüştür. Şekil 4.22b’de aynı güne ait öğle saatlerinde elde edilen eğim değerleri incelendiğinde gözle görülür derecede belirgin bir şekilde sıcaklık ve nem değişiminin eğim değerlerini etkilediği görülmüş, dolayısıyla aralarında bir korelasyonun olduğu fikri oluşmuştur. Oluşan bu etkinin gerçek anlamıyla sıcaklık ve eğim değerleri arasında bir ilişki olduğunu ifade etmesi için, meydana gelen eğim değişikliğinin kalibrasyon için imal ettirilen alüminyum levhanın veya gözlemlerde kullanılan tribrahın genleşmesinden kaynaklanmış olup olmadığı belirlenmelidir.



(a) Gece ölçümleri



(b) Öğle ölçümleri

Şekil 4.21 : HRTM ile kaydedilen eğim, sıcaklık ve nem değerleri.

Sıcaklık ve eğimölçeler arasındaki ilişkinin açık olarak belirlenmesi için Kandilli Rasathanesi Deprem Laboratuvarı'nda bulunan sarsma tablası kullanılmıştır (Şekil 4.22a). Sarsma tablası içerisindeki sıcaklık istenilen bir dereceye çıkarılabilmekte veya düşürülebilmektedir. Eğimölçerler imal ettirilen alüminyum levhaya sabitlenmiştir. Öncelikle hızlı sıcaklık değişiminin eğimölçerler üzerindeki etkisine bakılmıştır (Şekil

4.22b). Eğimölçerlerin kablo donanımlarının plastik kaplama olması nedeniyle, yüksek sıcaklıkta zarar görebilecekleri düşünülmüş, bu nedenle sarsma tablası iç sıcaklığı 45 dakika içinde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye düşecek şekilde değiştirilmiştir. Ölçme işlemleri esnasında sıcaklık değişiminin kontrolü amacıyla sarsma tablasına temasta bulunulması eğim değerlerinde dış etmenlerden kaynaklı bir sıçrama meydana getirmiştir. Şekil 4.23 ve 4.24'de saat 13:00 ile 13:10 arasında bu etki belirgin bir şekilde görülmektedir. Değerlendirme esnasında bu sıçrama etkisi ölçümlerden çıkarılmıştır.



(a) Sarsma tablası



(b) Eğimölçerlerin sarsma tablasına bağlanması

Şekil 4.22 : Sarsma tablasının kullanılması.

Ani sıcaklık değişiminin HRTM ve Nivel210 eğimölçer üzerine etkileri Şekil 4.23 ve 4.24'de görülmektedir. Şekil 4.22b'ye yakından bakıldığında eğimölçerlerin bağlantı konumlarından dolayı Nivel210 eğimölçerin $+X$ eksenini ile aynı doğrultuda olan eksen HRTM'nin CH2 (Channel 2) diğer bir ifade ile $+Y$ eksenidir.

Şekiller incelendiğinde sıcaklığın $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ değişiminde HRTM eğimölçerinin Y yönünde 0.008 mrad (~ 0.12 derece saniyesi), X yönünde de ortalama 0.012 mrad (~ 0.24 derece saniyesi) değişim olduğu görülmektedir. Nivel210 eğimölçerde ise Y yönünde neredeyse hiç değişim olmadığı fakat X yönünde 0.005 mrad (~ 1 derece saniyesi) değişim olduğu görülmüştür. 30 günlük gözlem süreleri ve sarsma tablası ısı deneyi sonuçları uyumlu çıkmıştır. Eğimölçerler ve sıcaklık değişimi arasında ihmal edilemeyecek bir korelasyon mevcuttur. Gözlemler sırasında sıcaklık değişimleri kayıt altına alınarak ölçümlere düzeltme olarak getirilecektir.

Hızlı sıcaklık değişimi karşısında eğim değerlerinde oluşan bu farklılığın anlamlılığı araştırılmalıdır. 30 günlük gözlem süresi içinde eğim ve sıcaklık değerlerinde görülen korelasyonun temel nedeni kullanılan tribrahın sıcaklığa bağlı olarak genişmesi

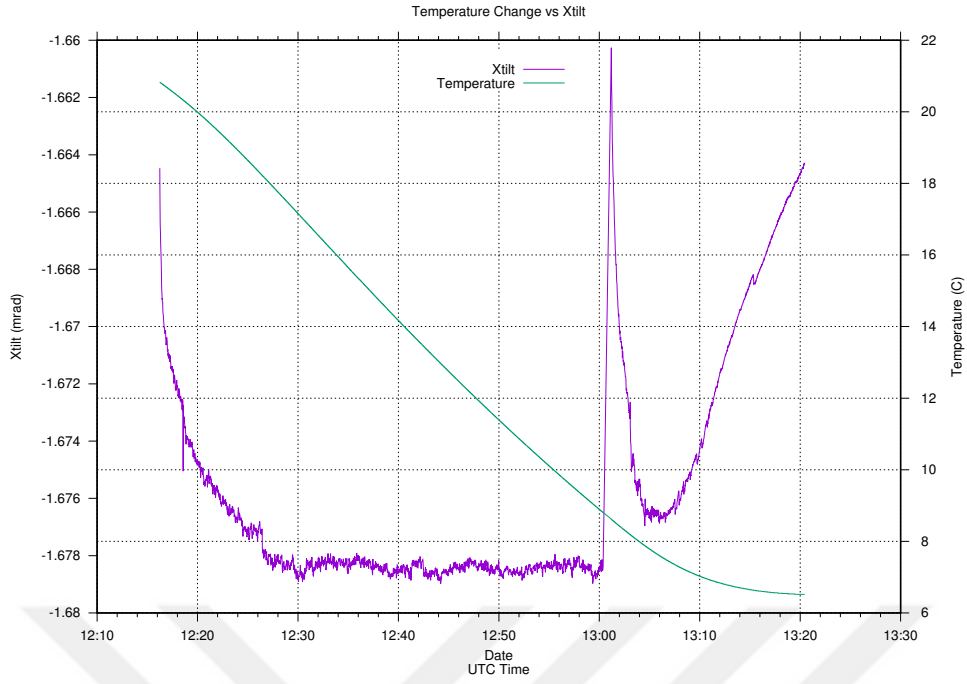
olarak düşünölmüş fakat eğimölçerler ve sıcaklık değışimi arasında bir korelasyonun olduğu ortaya çıkmıştır. SZKS ile gerçekleştirilen gözlemlerin yalnızca gece ve bulutsuz bir gökyüzünde yapılabilmesi nedeniyle gözlemler esnasında hızlı sıcaklık değışimlerinin meydana gelmesi çok düşük bir orandadır. Bu nedenle gözlemler sırasında eğimölçerlerin sıcaklık değışiminden etkilenme oranları yapılan testlere göre daha düşük kalacaktır.

Sıcaklık değışiminde kullanılan sarsma tablası eğimölçerin ölçme doğruluğunu belirleyemez fakat sarsma esnasında oluşan ivmelenme etkisinin eğimölçerler ile saptanabilmesi, eğimölçerlerin duyarlılığının belirlenmesinde kullanılabilir. Farklı frekanslarda sarsma deneyleri gerçekleştirilerek eğimölçerlerin ivme değışimlerine tepkisine ve iki eğimölçerin uyumuna bakılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde karşılaşılan en büyük sorun sarsma tablasının orta ve büyük frekanslı hareketlerinin eğimölçeri out of range (ölçme aralığı dışında) bırakmasıdır. Sarsma deneyleri sarsma tablası 2.5 Hz frekansında kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sarsma tablası ile 20 saniye boyunca 2.5 Hz frekansında sarsılma işlemi gerçekleştirilmiş ve Nivel210 ve HRTM eğimölçer tarafından kaydedilen değerler Şekil 4.25’de görölmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi Nivel210 ve HRTM eğimölçerler sarsma testinde aynı karakteristik yapıda olduklarını ve ivmelenmeyi belirleyebildiklerini kanıtlamışlardır.

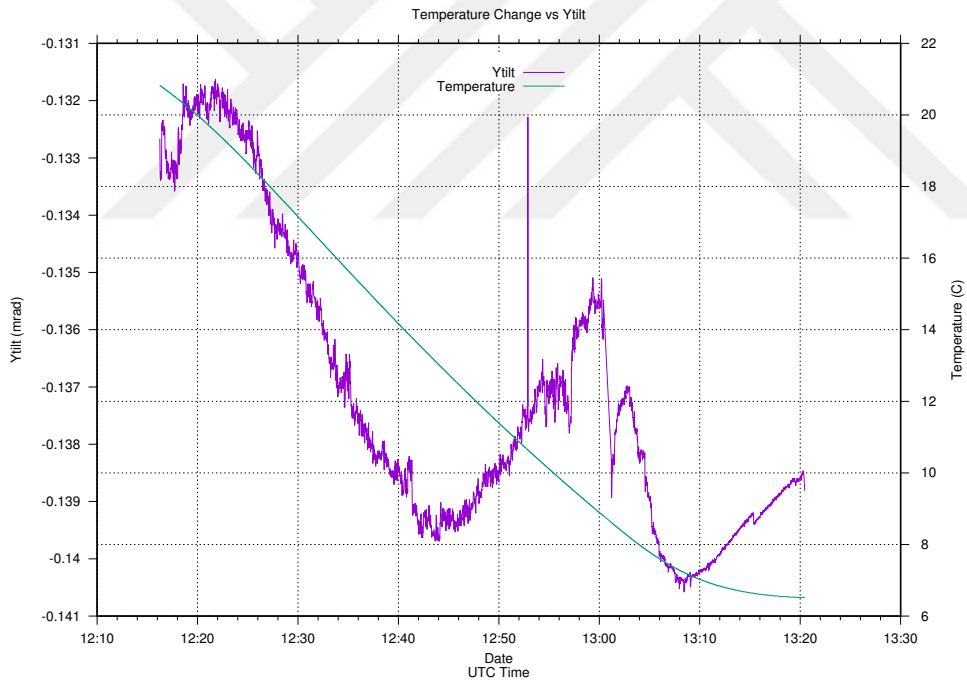
4.3 Astro-jeodezik Çeköl Sapmalarının Belirlenmesi

Birden fazla donanım ve yazılımın entegrasyonu ile astro-jeodezik çeköl sapmalarının belirlenmesine olanak sağlayan SZKS’ nin jeodezide önemi her geçen gün artmaktadır. SZKS ile bir gözlem gecesinde yaklaşık 400-500 yıldız görüntüsü alınabilmektedir. 400-500 yıldızla ait astronomik koordinatlar kullanılarak tek noktaya ait çeköl sapmasının kuzey-güney (ξ) ve doğu-batı (η) bileşenleri elde edilmektedir. Çeköl sapmalarının kullanım alanları ve önemi Bölüm 3.1’de detayları ile ele alınmıştı. SZKS ile astro-jeodezik çeköl sapmalarının belirlenmesinin işlem adımları ise kısaca aşağıdaki gibi sıralanabilir.

SZKS ile yıldız gözlemlerinin yapılabilmesi için bulutsuz bir gökyüzü gereksinimi vardır. Bulutluluk ve sıcaklık haritalarına bakılarak gözlem gecesine dair ölçme koşulları belirlenir. Genellikle gözlem öncesi gözlem yapılacak noktada istikşaf çalışması yapılarak arazi engebese, ulaşım koşulları, yakın çevre ve ışıklılık



(a) Xtilt

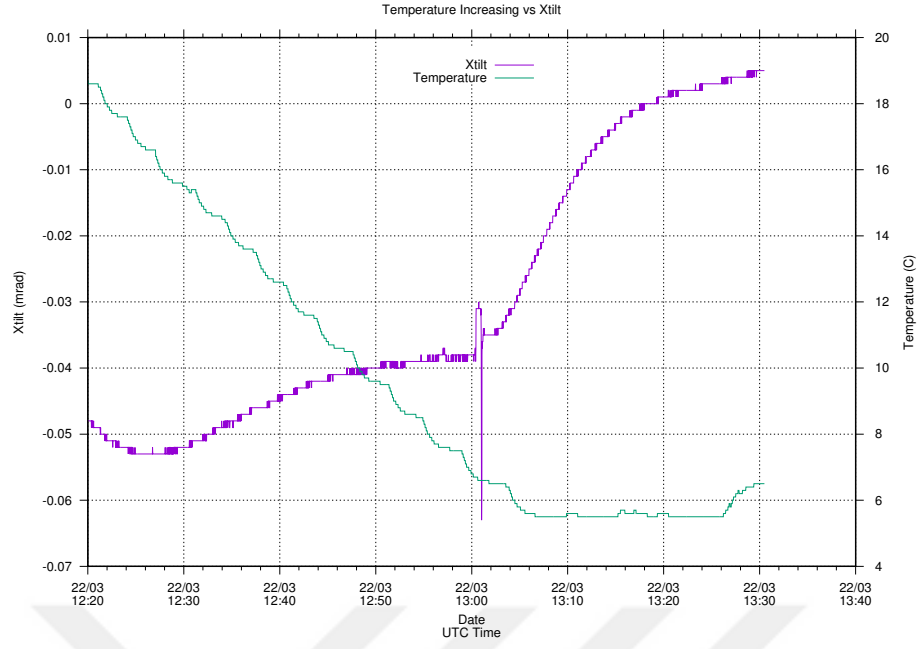


(b) Ytilt

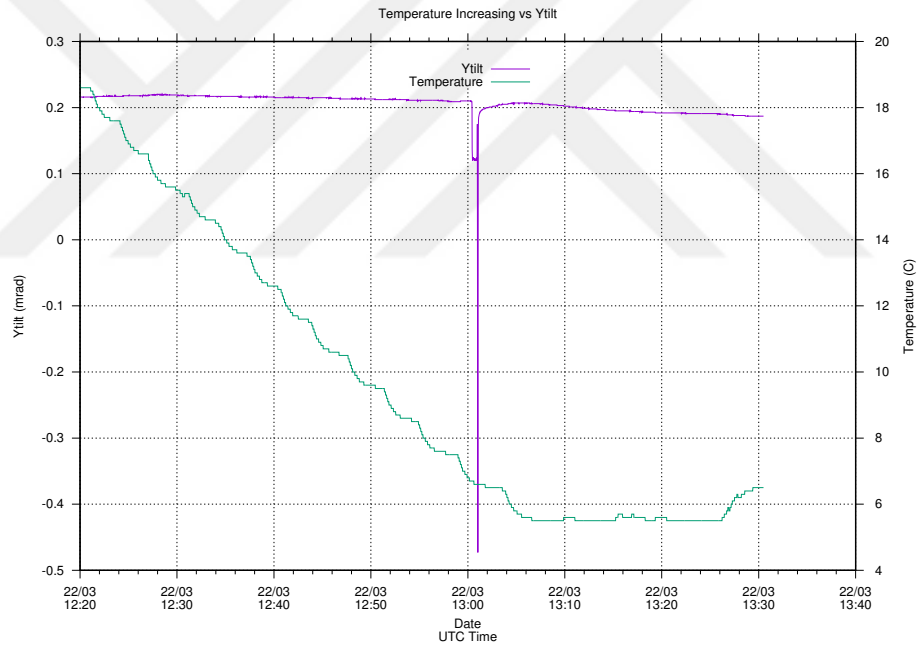
Şekil 4.23 : Hızlı sıcaklık değişiminin HRTM üzerine etkisi.

durumu değerlendirilir. SZKS'yi çekül doğrultusuna yönlendirmek için [2] tarafından geliştirilen iteratif düzeltme Nivel210 ve HRTM eğimölçerler kullanılarak gerçekleştirilir.

İteratif düzleştirme işlem adımlarında SZKS'nin 0° – 360° azimut değerlerinde eğimölçerler yardımıyla elde edilmiş x ve y eğim değerlerine en iyi uyan



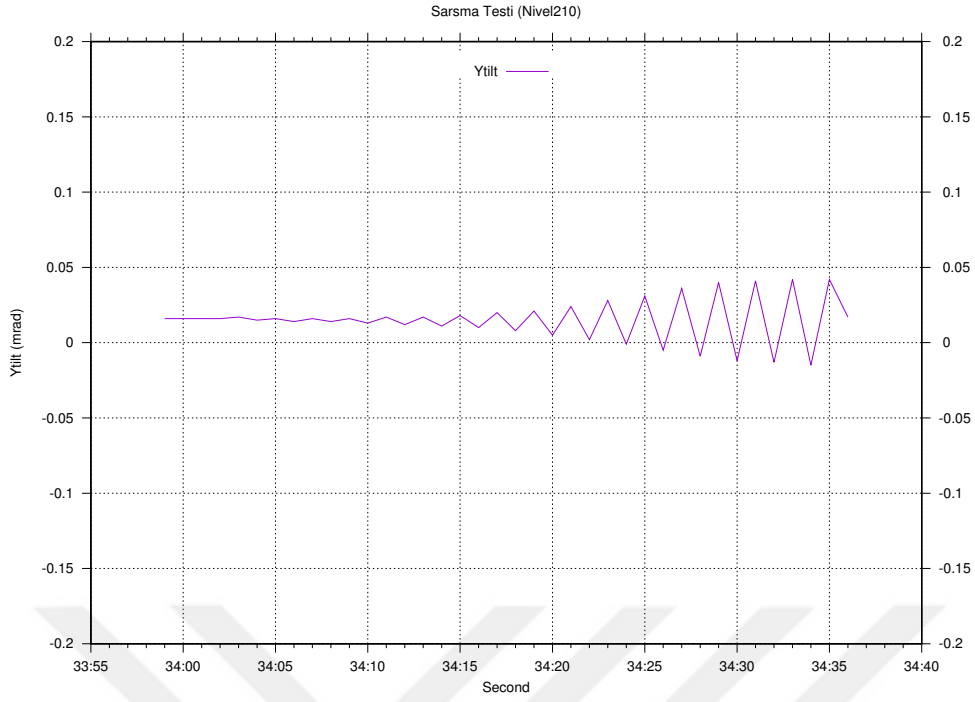
(a) Xtilt



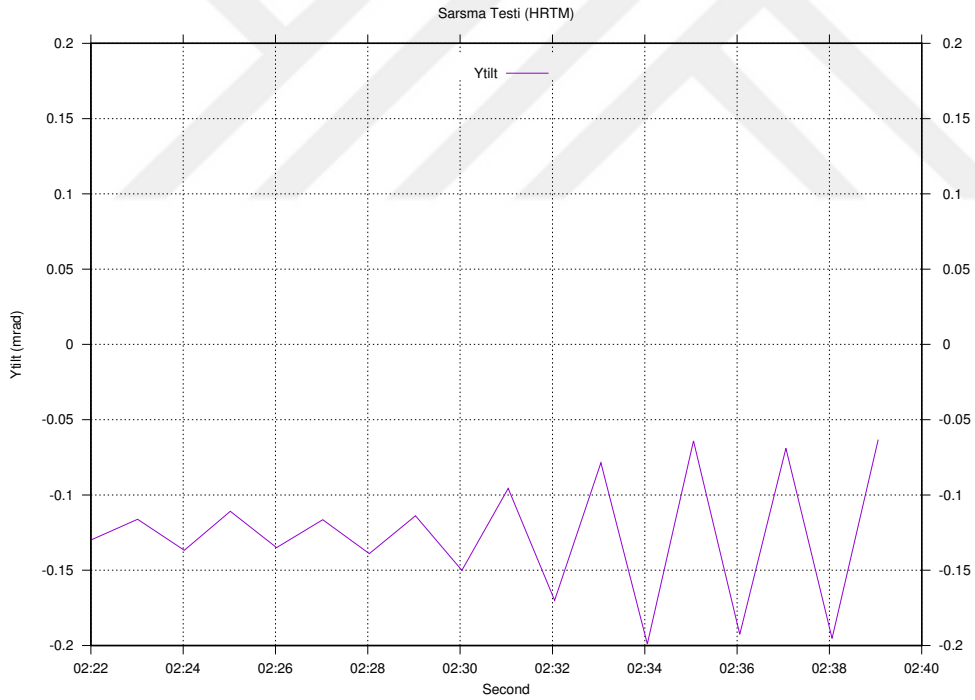
(b) Ytilt

Şekil 4.24 : Hızlı sıcaklık değişiminin Nivel210 üzerine etkisi.

daire belirlenir. Dairenin yarıçapı kadar eğim düzeltmesi getirilir ve düzeçleme tamamlanıncaya kadar işlem tekrarlanır. Mekanik donanımların hassasiyetlerinden dolayı düzeçleme işlemi belirli bir seviyeye kadar sağlanabilmektedir. Gözlem boyunca kaydedilen eğim değerleri gözlem epokları kullanılarak resim orta noktasına düzeltme olarak getirilmektedir.



(a) Nivel210 sarsma testi

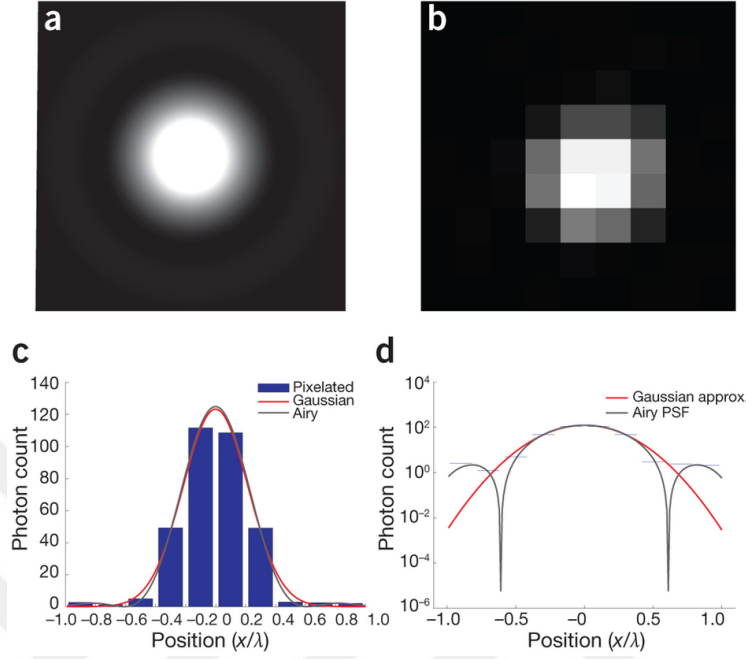


(b) HRTM sarsma testi

Şekil 4.25 : Sarsma testi sonuçları.

Düzeçlenen SZKS ile farklı azimutlarda ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) yıldız görüntüleri alınır. Yıldız koordinatları rektesansiyon koordinat sisteminde tanımlıdır. Görüntülerdeki yıldızların belirlenmesi için Point Spread Function (PSF) yöntemi kullanılır. Bu yöntem yıldızların parlaklık değerlerinin oluşturduğu Gauss eğrisi biçiminde elde

edilen gri (gray) eğrinin maksimum olduğu noktayı yıldız merkezi olarak kabul etmektedir (Şekil 4.26). PSF ve diğer yıldız belirleme algoritmalarına dair detaylı bilgi [55,56] tarafından verilmektedir.



Şekil 4.26 : PSF ile yıldız orta noktalarının belirlenmesi.

Farklı azimutlarda alınan yıldız görüntülerinin resim orta noktası koordinatları, rektansiyon koordinat sisteminden astronomik koordinat sistemine dönüştürülür. Rektansiyon ve astronomik koordinat sistemleri arasındaki ilişki Şekil 4.27'de görüldüğü gibi GAST ile kurulmaktadır. Çalışmada GAST ve LAST değerleri, Novas kütüphaneleri kullanılarak hesaplanmıştır [57]. Eşitlik 4.1 ve 4.2 genel bir eşitliktir, SZKS ile elde edilen rektansiyon koordinatlarının astronomik koordinatlara dönüştürülmesi için eşitlikler düzenlenmelidir. Düzenleme sonucunda elde edilen eşitlikler ise eşitlik 4.4 ve 4.5'de verilmektedir [2].

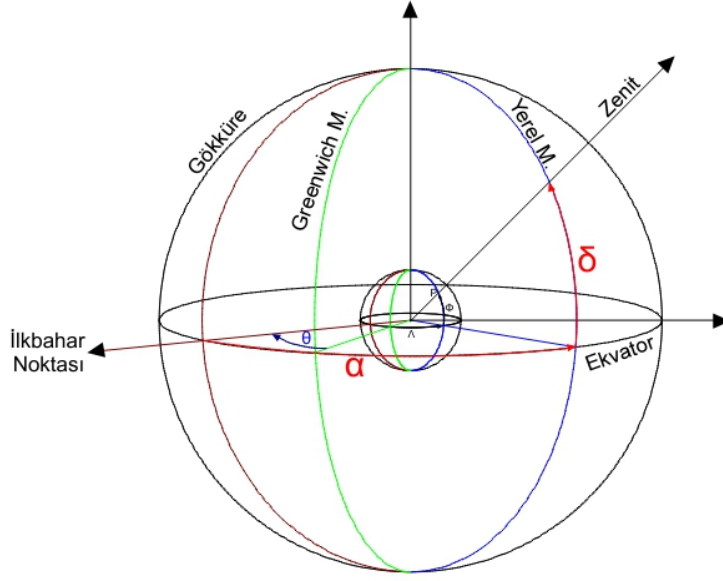
$$\Phi = \delta(\textit{katalog}, \textit{ERP}, x, y, \textit{model}, \textit{refraksiyon}) \quad (4.4)$$

+eğim düzeltmesi

$$\Lambda = \alpha(\textit{katalog}, \textit{ERP}, x, y, \textit{model}, \textit{refraksiyon}) \quad (4.5)$$

+eğim düzeltmesi – GAST (GPS Zamanı, ERP)

Çekül sapması bileşenleri (ξ, η), hesaplanan astronomik koordinatlar (Φ, Λ) ve ölçülen elipsoidal koordinatlar (φ, λ) kullanılarak belirlenir (Bölüm 4.3). Elipsoidal koordinatlar çift frekanslı GNSS alıcıları kullanarak Gerçek Zamanlı Kinematik (Real Time Kinematic-RTK) ölçme tekniği ile 15 dakika ölçüm süresi gözetilerek



Şekil 4.27 : Rektansiyon ve astronomik koordinat sistemleri arasındaki ilişki.

belirlenmektedir. GNSS'nin 7/24 ve her hava koşulunda yüksek doğruluklu faaliyet gösterebilmesi sayesinde elipsoidal koordinatlar SZKS'de en küçük hata miktarına sahip bileşenlerinden birisidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Jeodezide önemi 17. yüzyıldan itibaren bilinmesine rağmen ölçme zorlukları nedeniyle arka planda kalan astro-jeodezik çekül sapmaları, CCD teknolojisinin icadıyla birlikte tekrar gündeme gelmiştir. Farklı donanım ve yazılımların birleştirilmesiyle oluşturulan Sayısal Zenit Kamera Sistemleri ile dünya genelinde birçok ülkede astro-jeodezik çekül sapmalarının yüksek doğrulukla belirlenebildiği kanıtlanmıştır. [2] tarafından geliştirilen ve Türkiye'nin ilk ulusal SZKS'si olma özelliğini taşıyan ACSYS (Astro-geodetic Camera System) ile 2015 yılında İstanbul metropoliten alanının Anadolu yakasında 4 noktada başarılı bir şekilde gözlemler gerçekleştirilmiştir.

İlk ulusal SZKS'de sistemin kurulumu, düzeçlenmesi ve görüntülerin elde edilmesi kısmen otomatik olarak yapılmaktaydı. SZKS'de standart bir tribrah kullanıldığı için sistemin kurulum ve düzeçlemesi zaman almakta, bunun yanı sıra astronomi ve jeodezide bilgili ve tecrübeli kullanıcıya ihtiyaç duyulmaktaydı. Sistem kurulum ve düzeçlemesi bir gözlem noktasında ortalama 1 saatte tamamlanmaktaydı. SZKS ile yıldız görüntüleri ise sadece geceleri ve bulutsuz bir gökyüzünde elde edilebilmekte olduğu için zaman en önemli faktörlerden birisini oluşturmaktadır. 2016 yılının başlangıcı itibariyle ilk ulusal SZKS'nin kurulum ve düzeçleme işlem adımlarının otomatize hale getirilmesi, yüksek doğruluklu ve çözünürlüklü donanımlar kullanılarak astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenme doğruluğunun artırılması için modernizasyon sürecine girilmiştir.

Modernizasyon sürecinde sistemin kurulum ve düzeçlenmesinde kullanılan standart ölçme tribrahı SZKS'nin bir bileşeni olmaktan çıkarılmıştır. Tüm sistemin optimum hareketini sağlayabilecek, taşınmasını kolaylaştıracak ve dış etkenden kaynaklı hataları asgari düzeye indirecek bir taşıyıcı altlık tasarlanmış ve üretilmiştir. İlk ulusal SZKS'de sistemin gravite doğrultusuna yönlendirilmesi için iki adet Nivel210 eğimölçer kullanılmıştır. Modernizasyon süreci ile birlikte çözünürlüğü daha yüksek olan HRTM (High Resolution Tiltmeter) eğimölçer temin edilmiştir. Bunun yanı

sıra yıldız görüntülerinin netliğini sağlamak amacıyla sıcaklığa duyarlı focuser temin edilmiştir.

Sistem bileşenlerinin değişmesi ile birlikte bu bileşenlerin kalibrasyon ve test ölçüleri konusu gündeme gelmiştir. Yüksek doğruluklu çekül sapmalarının belirlenmesi için her mekanik ve optik bileşenin yüksek performanslı kullanılabilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasında ise SZKS'de yer alan teleskop, CCD kamera shutter gecikmesi ve eğimölçerlerin test ve kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Azimut, göksel ve görüntü kalibrasyonları yapılarak dış etkenlerden kaynaklanan hatalar elimine edilmeye çalışılmıştır. Yenilenen ulusal SZKS ile yapılan test ölçmeleri ve ilk sonuçları paylaşılmıştır.

Teleskop kalibrasyonu için teleskop gökyüzünde parlak bir yıldızla yönlendirilmiştir. Görüntü sistematik olarak bozulmuş ve kaydedilmiştir. Yıldız görüntüsü sistematik olarak bozulduğunda nokta görünümünü kaybederek bir daire şeklini almıştır. İç ve dış aynada oluşan görüntünün merkezlerinin çakıştığı görülmüş dolayısıyla SZKS'nin optik bileşeni olan teleskobun kalibrasyona ihtiyaç duymadan kullanılabileceği anlaşılmıştır. CCD kameranın shutter gecikmesinin belirlenmesi için bir laboratuvar ortamı oluşturulmuş ve MaximDL yazılımı kullanılarak shutter gecikmesi 0.2 saniye olarak belirlenmiştir. Avrupa'da yapılan çalışmalarda SZKS ile elde edilen astro-jeodezik çekül sapmalarının azimuta bağlı olduğu görülmüştür. Azimut kalibrasyonu ile görüntülerdeki yıldızların azimut açısı belirlenmiştir. SZKS ile elde edilen yıldız görüntüleri çevresel etmenlerden dolayı kozmik, termal ve atmosferik gürültü barınmaktadır. Görüntülerde yer alan bu gürültülerin elimine edilmesi için aynı çevresel etkilere sahip siyah ve düzalan görüntüleri alınarak görüntü kalibrasyonu uygulanmıştır. Görüntü kalibrasyonu sonrası görüntülerdeki gürültü giderilmiştir.

Eğimölçerlerin kalibrasyonu üzerinde en çok çalışılan konu olmuştur. HRTM eğimölçer ile ülkemizde ilk kez bilimsel çalışma yapılacak olması nedeniyle eğimölçere ait detaylar anlatılmıştır. Nivel210 eğimölçerde veri aktarımı Leica SpiderQC yazılımı kullanılarak yapılmaktadır. Eğim değerleri mrad biriminde eş zamanlı olarak ekranda yer almaktadır. HRTM'den veri aktarımını sağlamak için üretici firma tarafından üretilen Hterm isimli bir yazılım mevcuttur. Fakat Hterm yazılımı verileri sadece elektronik bit biriminde göstermekte ve otomatik olarak kayıt etmemektedir. HRTM eğimölçere otomatik kayıt özelliğinin kazandırılması, ölçülen

değerlerin (xtilt ve ytilt değerlerininin mrad veya derece saniyesi, sıcaklığın C° biriminde) istenilen birimlerde eş zamanlı olarak görülebilmesi ve eğimölçerin tam kontrolü için Rterm ACSYS Levelling Software yazılımı üretilmiştir. HRTM'den veri edinimi Rterm yazılımı kullanılarak sağlanmaktadır.

Eğimölçerlerin kalibrasyon testleri için Nivel210 kullanım klavuzunda tasvir edilen kalibrasyon levhası temin edilmiştir. Kandilli Rasathanesi Jeodezi Laboratuvarı'na bir test düzeneği oluşturulmuştur. Standart nivelman tribrahi ve imal edilen levha kullanılarak iki eğimölçer karşılıklı vidalama sureti ile düzeneğe yerleştirilmiştir. Yaklaşık 30 gün boyunca gözlem yapılmış ve gözlem sonuçları değerlendirilmiştir. Gözlem yapılan süre içinde gerçekleşen depremlerin eğimölçerler üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmeye çalışılmış fakat gözlem süresi içinde çok küçük çapta depremlerin meydana gelmesi nedeniyle eğim değerlerinde deprem etkisi gözlemlenmemiştir. 30 günlük eğim, sıcaklık ve nem değerleri incelendiğinde ise sıcaklık ve eğim değerleri arasında yüksek bir korelasyonun olduğu görülmüştür. Korelasyonun sistem düzeçlemesi için kullanılan nivelman tribrahından kaynaklanmış olabileceği düşünülmüş ve bu nedenle Boğaziçi Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda yer alan sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablası ile hızlı sıcaklık değişiminin eğimölçerlere etkisi incelenmiştir. Sarsma tablası kullanılarak yapılan test sonucu sıcaklığın $1 C^{\circ}$ değişiminde HRTM'den elde edilen X ve Y yönündeki eğim değerlerinde sırasıyla $0.25''$ ve $0.12''$ değişim görülmüştür. Nivel 210 eğimölçerde ise Y yönünde herhangi bir eğim değişimi saptanamazken, X yönünde $1 C^{\circ}$ değişimine karşılık eğim değerinde yaklaşık $1''$ değişim belirlenmiştir. Hızlı sıcaklık değişimi ve eğimölçerler arasında ihmal edilemeyecek düzeyde korelasyonun olduğu ortaya çıkmıştır. SZKS ile gerçekleştirilen gözlemlerin ortalama 2 saat sürdüğü düşünülürse eğimölçerlerde sıcaklıktan kaynaklanan değişimin ölçülere düzeltme olarak getirilmesi gerekmektedir. Sarsma tablası kullanılarak farklı frekans ve dalga boylarında eğimölçerler test edilmiştir. Eğimölçerlerin değişen ivme değerlerini yüksek doğrulukla saptayabildiği görülmüştür.

Görüntülerdeki yıldızların belirlenmesi, yıldız katalogları ile eşlenmesi ve resim orta noktasının belirlenmesi için [2]'den farklı olarak Astrometry.net yazılımı kullanılmış ve sonuçlar Pinpoint Astrometry Engine yazılımı ile uyumlu çıkmıştır.

Modernizasyon sonucu yenilenen ulusal SZKS ile astro-jeodezik çekül sapmaları belirlenerek, ülkemizde çalışmaları devam eden yükseklik sistemlerinin modernizasyonu projesine büyük katkıda bulunulacaktır. Ayrıca yenilenen SZKS ile elde edilen yüksek doğruluklu çekül sapmaları kullanılarak İstanbul metropoliten alanı için geoid belirleme çalışmaları devam etmektedir. Çalışmanın sonucu çekül sapmaları ile geoid belirlemeye ışık tutacak, global ve yerel geoidin belirlenmesinde astro-jeodezik çekül sapmalarının diğer yöntemler ile entegrasyonunu belirlemeye dair bir kilit taşı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] **Torge, W. ve Müller, J.** (2012). *Geodesy*, Walter de Gruyter.
- [2] **Halıcıoğlu, K.** (2015). Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile Astronomik Çekül Sapmasının Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [3] **Ayan, T.** (1978). 1976 Türkiye Geoidi, *Harita Dergisi*, 85(1).
- [4] **Çorumluoğlu, Ö., Özbay, Y., Kalaycı, İ. ve Şanlıoğlu, İ.** GPS Yüksekliklerinden Ortometrik Yüksekliklerin Elde Edilmesinde Yapay Sinir Ağı (YSA) Tekniklerinin Kullanımı.
- [5] **Hirt, C.** (2004). Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung, *Doktora Tezi*, Fachrichtung Vermessungswesen der Univ.
- [6] **Eissfeller, B. ve 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*, cilt 94, s.431–442.
- [7] **Schoebel, R., Hein, G. ve 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*, s.732–740.
- [8] **Fosu, C.** (1999). *Astrogeodetic levelling by the combination of GPS and CCD zenith camera*, Univ. der Bundeswehr, Fakultät für Bauingenieur-und Vermessungswesen, Studiengang Vermessungswesen.
- [9] **Hirt, C., Reese, B. ve Enslin, H.**, (2005). On the accuracy of vertical deflection measurements using the high-precision digital zenith camera system TZK2-D, *Gravity, Geoid and Space Missions*, Springer, s.197–201.
- [10] **Bürki, B.** (1988). Integrale Schwerfeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation, *Doktora Tezi*, Diss. Techn. Wiss. ETH ZÃ1/4rich, Nr. 8621, 1988. Ref.: H.-G. Kahle; Korref.: St. Mueller; Korref.: W. Torge.
- [11] **Hirt, C. ve Bürki, B.** (2006). Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century, *Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. hc Günter Seeber anlässlich seines*, 65, 81–99.
- [12] **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.

- [13] **Kudrys, J.** (2007). Automatic determination of vertical deflection components from GPS and zenithal star observations, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 4(4), 169.
- [14] **Kudrys, J.** (2009). Automatic determination of the deflections of the vertical—first scientific results, *Acta Geodynamica et Geromaterialia*, 6(3), 233–239.
- [15] **Ogrizovic, V.** (2009). A construction of an advanced measuring system for astro-geodetic determinations, *Publications de l’Observatoire Astronomique de Beograd*, 86, 145–150.
- [16] **Gerstbach, G.** (2003). Geoid monitoring by Zenith Camera and geology, *Geoscientific Cooperation Projects of Austria, Slovakia and Hungary*, TU Bratislava.
- [17] **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), 123–129.
- [18] **Janpaule, I.** (2014). Methods for the determination of high precision Latvian geoid model.
- [19] **Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W., Wang, Z., Wang, B., Yin, Z. ve Wang, H.** (2014). Digital zenith telescope prototype of China, *Chinese Science Bulletin*, 59(17), 1978–1983.
- [20] **Smith, D.A., Holmes, S.A., Li, X., Guillaume, S., Wang, Y.M., Bürki, B., Roman, D.R. ve 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.
- [21] **Gerstbach, G.** (1996). The astro-geodetic use of CCD for gravity field refinement, *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(4), 347–351.
- [22] **Gerstbach, G. ve 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.
- [23] **Alp, O.** (1993). Türkiye astrojeodezik ve astrogravimetrik jeoidinin belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [24] **Türen, Y.** (2010). Astrojeodezik Nivelman ile Yerel Jeoit Belirleme: Konya Örneği, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi.
- [25] **Türen, Y. ve Üstün, A.** (2016). 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”*.
- [26] **Capitaine, N., Wallace, P.T. ve Chapront, J.** (2003). Expressions for IAU 2000 precession quantities, *Astronomy & Astrophysics*, 412(2), 567–586.

- [27] **Capitaine, N.** (2007). Definition and realization of the celestial intermediate reference system, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S248), 367–373.
- [28] **Mathews, P.M., Herring, T.A. ve Buffett, B.A.** (2002). Modeling of nutation and precession: new nutation series for nonrigid Earth and insights into the Earth's interior, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4).
- [29] **Üstün, A.** (1996). Datum dönüşümleri, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [30] **Gürkan, O.** (1979). Çekül Sapması Kavramı ve Türleri, *Harita Dergisi*, (86), 2445.
- [31] **Ustün, A.** (2006). Jeodezik astronomi ders notları (basılmadı).
- [32] **Seeber, G.** (2003). *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*, Walter de Gruyter.
- [33] **Somieski, A.E.** (2008). Astrogeodetic geoid and isostatic considerations in the North Aegean Sea, Greece, *Doktora Tezi, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich*, Nr. 17790.
- [34] **Zacharias, N., Urban, S.E., Zacharias, M.I., Wycoff, G.L., Hall, D.M., Monet, D.G. ve Rafferty, T.J.** (2004). The second US Naval Observatory CCD astrograph catalog (UCAC2), *The Astronomical Journal*, 127(5), 3043.
- [35] **Zacharias, N., Finch, C., Girard, T., Hambly, N., Wycoff, G., Zacharias, M., Castillo, D., Corbin, T., DiVittorio, M., Dutta, S. ve diğerleri** (2010). The third US Naval Observatory CCD astrograph catalog (UCAC3), *The Astronomical Journal*, 139(6), 2184.
- [36] **Zacharias, N., Finch, C., Girard, T., Henden, A., Bartlett, J., Monet, D. ve Zacharias, M.** (2013). The fourth US naval observatory CCD astrograph catalog (UCAC4), *The Astronomical Journal*, 145(2), 44.
- [37] **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.
- [38] **Ayan, T. ve Deniz, R.** (2000). *Fiziksel Jeodezi Ders Notları*, İTÜ İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul.
- [39] **Gürkan, O.** (1978). *Astrojeodezik Ağların Deformasyonu ve Türkiye 1. Derece Triangulasyon Ağı*, Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [40] **Üstün, A.** (2006). Fiziksel Jeodezi, Lisans Ders Notları, *Selçuk Üniversitesi Harita Mühendisliği*.
- [41] **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).

- [42] **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), 4279–4283.
- [43] **DEMİR, C. ve CİNGÖZ, A.** TÜRKİYE ULUSAL DÜŞEY KONTROL AĞI (TUDKA-99).
- [44] **BÖHHBÜY** (2005). *Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği*.
- [45] **Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Çelik, R., Denli, H., Özşamlı, C., Özlüdemir, T., Erol, S., Erol, B., Acar, M., Mercan, H. ve Tekdal, E.**, (2005), İstanbul GPS Nirengi Ağı 2005-2006 Yenileme Ölçü ve Değerlendirme (İGNA 2005), Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi Anabilim Dalı.
- [46] **Hirt, C. ve Seeber, G.** (2007). High-resolution local gravity field determination at the sub-millimeter level using a digital zenith camera system, *Dynamic Planet*, Springer, s.316–321.
- [47] **Erol, B.** (2007). Investigations on local geoids for geodetic applications, *Doktora Tezi*.
- [48] **Erol, B., Çelik, R.N. ve Sideris, M.G.** (2011). Güncel global potansiyel modellerin yersel veriler ile test edilmesi, *İTÜDERGİSİ/d*, 7(6).
- [49] **Erol, B.** (2010). Presizyonlu Eğim Sensörüyle Büyük Yapıların Deformasyonlarının İzlenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [50] **Hirt, C. ve Kahlmann, T.** (2004). Hochpräzise Neigungsmessung mit dem.
- [51] **Timing, H.A. ve More, M.** (2009). CNS Clock II, Tac32, Tac32Plus and Tac32Multi Installation and Operation.
- [52] **Lang, D.** (2009). Astrometry. net: Automatic recognition and calibration of astronomical images, *Doktora Tezi*, University of Toronto.
- [53] **Cannistra, S.**, What is Binning good for?, <http://www.starrywonders.com/binning.html>, [Online; erişim 08-Nisan-2017].
- [54] **Hirt, C. ve Seeber, G.** (2008). Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover Digital Zenith Camera System TZK2-D, *Journal of Geodesy*, 82(6), 347–356.
- [55] **Zhao, Z., Hui, M., Liu, M., Dong, L., Kong, L. ve Zhao, Y.** (2017). Centroids computation and point spread function analysis for reverse Hartmann test, *Optics Communications*, 387, 328–337.
- [56] **Fosu, C., Hein, G. ve Eissfeller, B.** (2004). Determination of centroid of CCD star images, *ISPRS XXXV Congress. Istanbul, Turkey*, Springer, s.612–620.
- [57] **Halicioglu, K., Deniz, R. ve Ozener, 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.

EKLER

EK A.1 : 30 Günlük Gzlemlerden rnekler

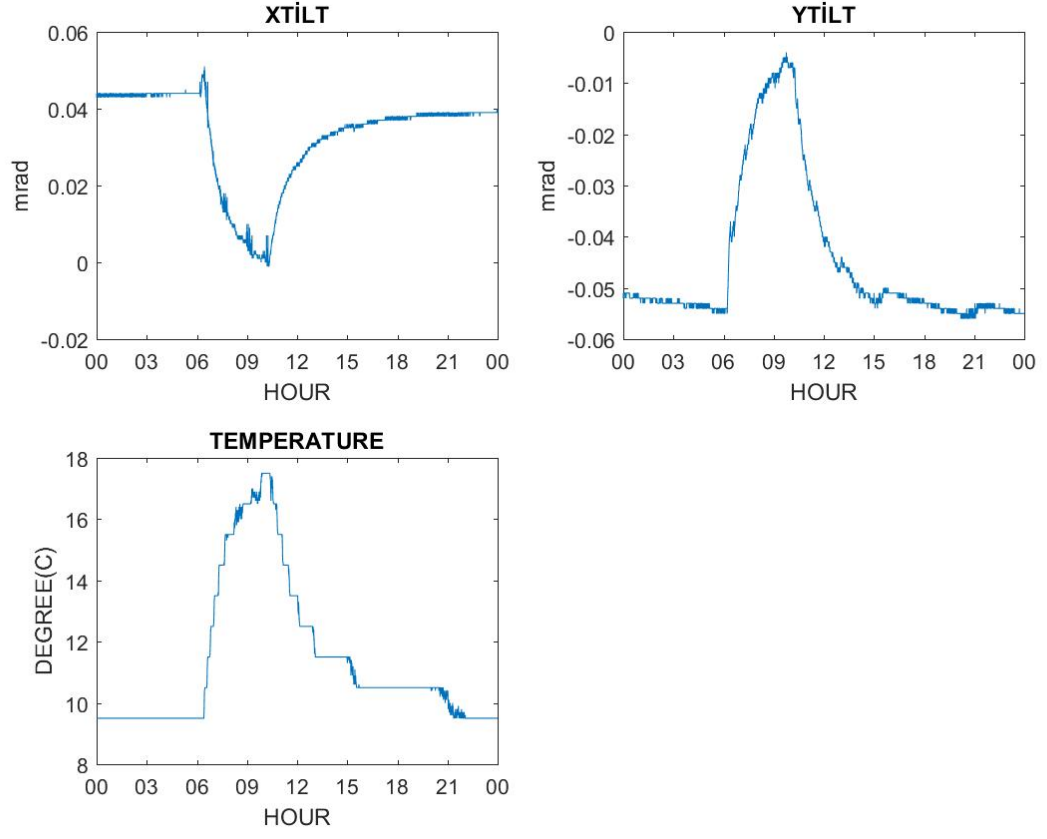
EK B.1 : Sarsma Tablası Test Sonuları

EK C.1 : RTERM Programı Kodu

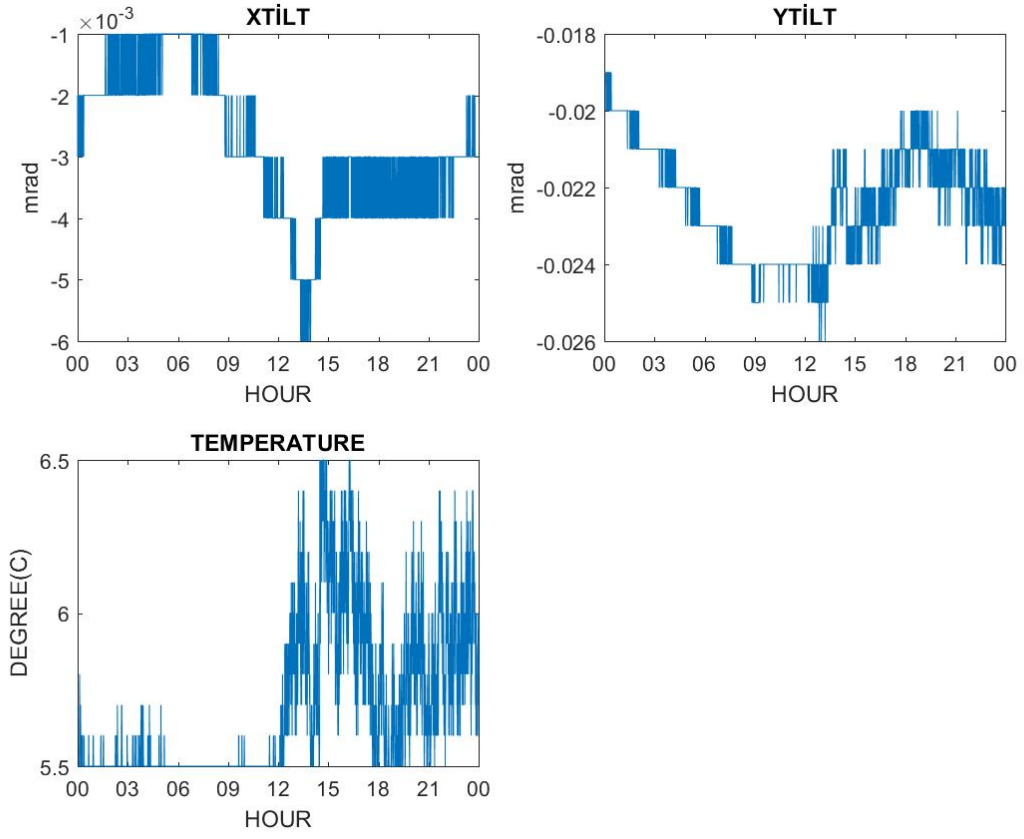




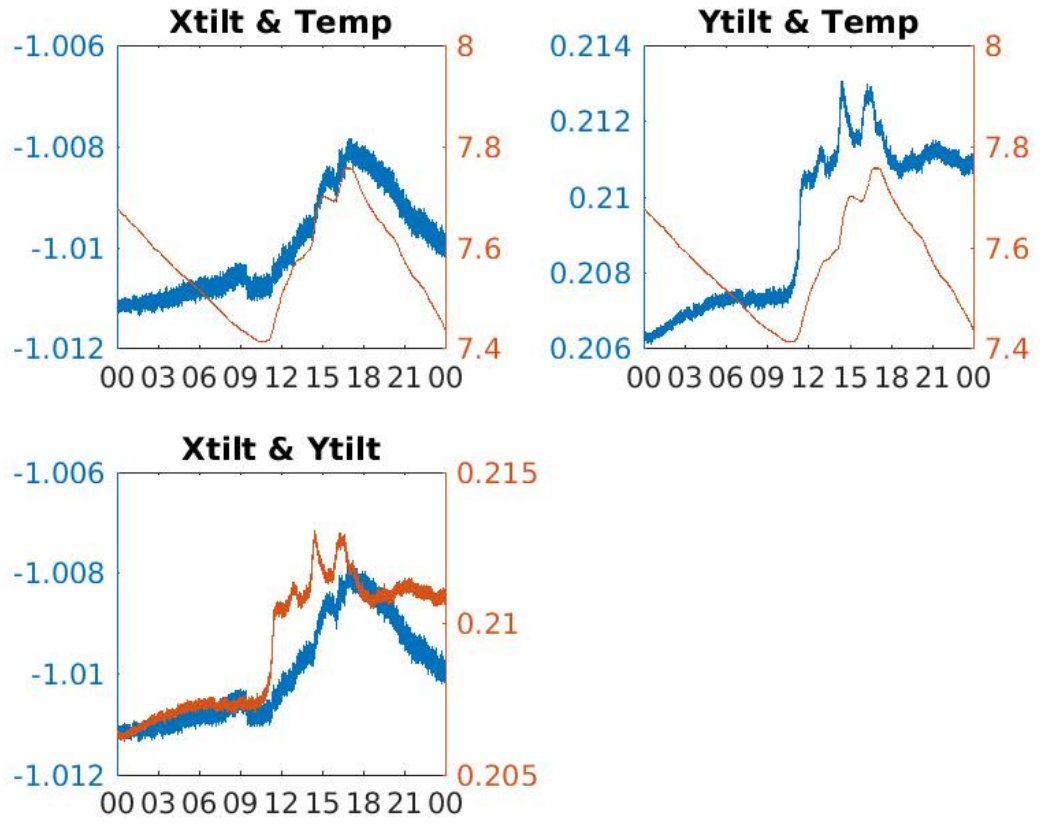
EK A.1



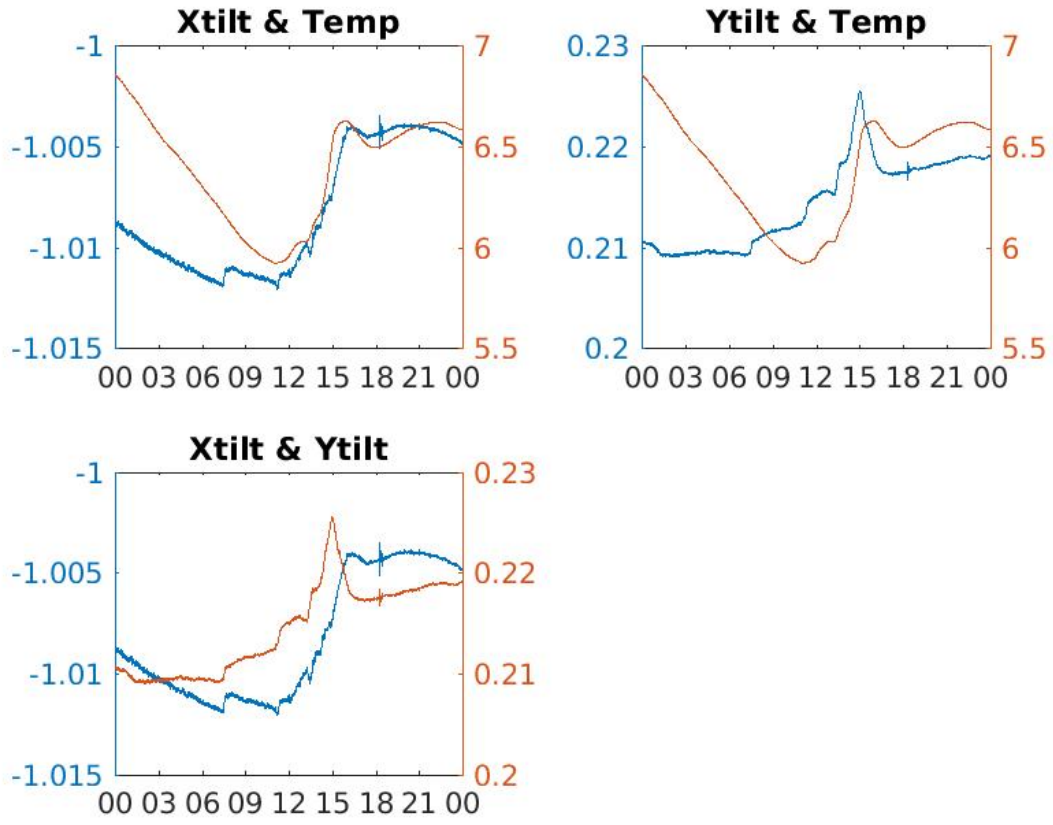
Şekil A.1 : 30 günlük gözlemden örnekler (Nivel210)



Şekil A.2 : 30 günlük gözlemden örnekler (Nivel210)

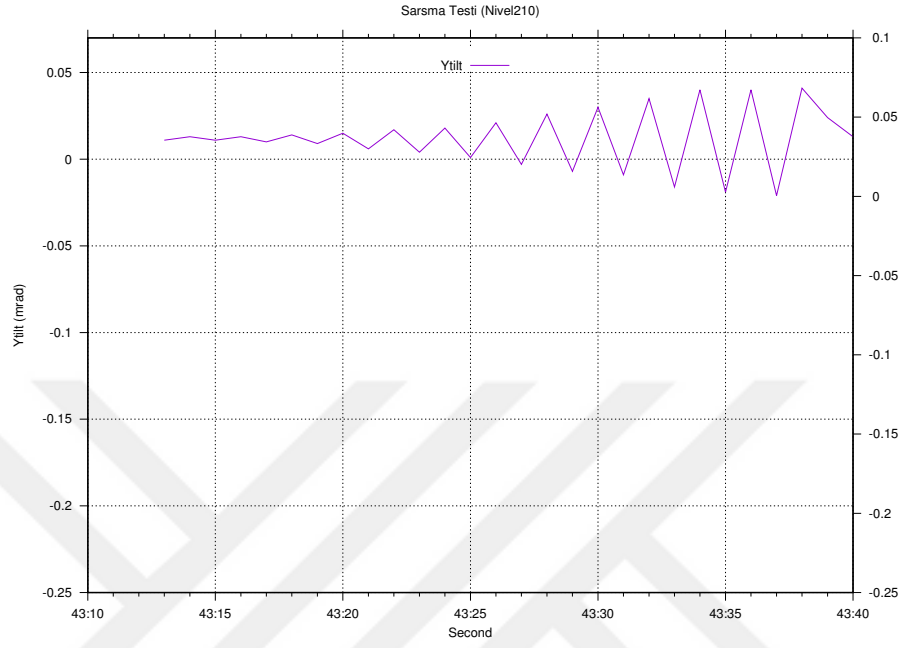


Şekil A.3 : 30 günlük gözlemden örnekler (HRTM)

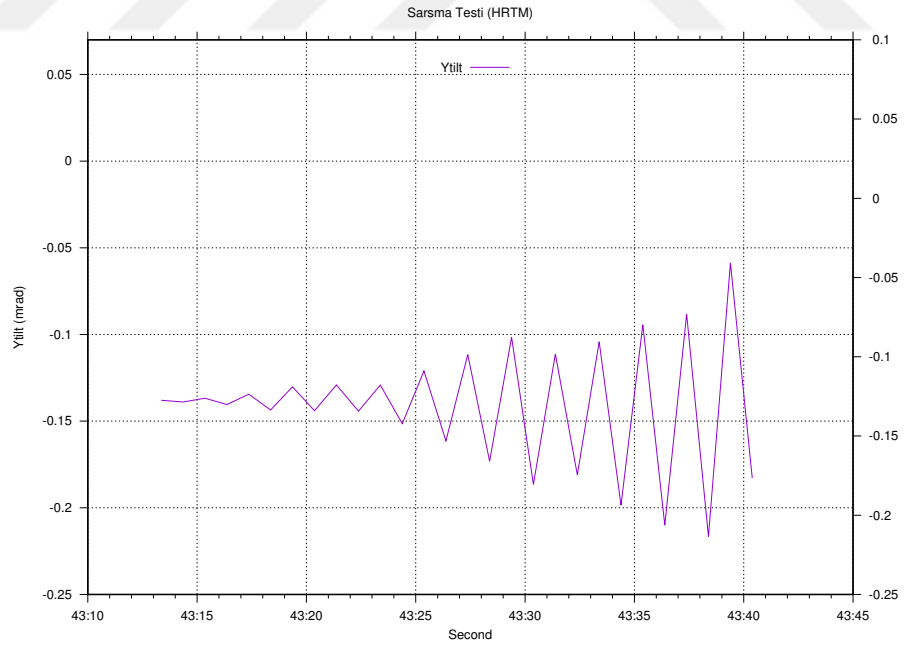


Şekil A.4 : 30 günlük gözlemden örnekler (HRTM)

EK B.1

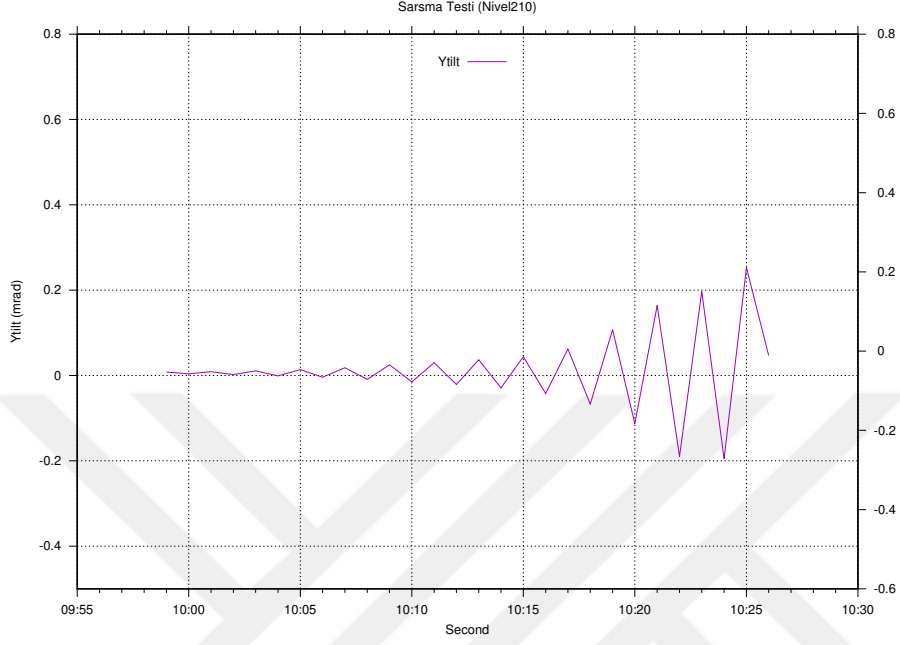


(a) Nivel210 sarsma testi

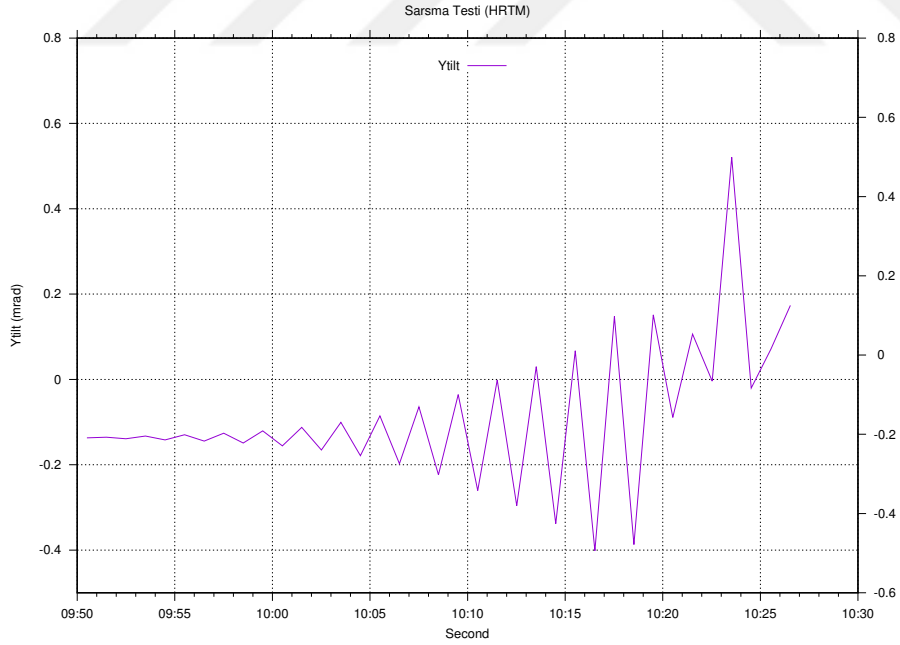


(b) HRTM sarsma testi

Şekil B.1 : Sarsma testi sonuçları 1



(a) Nivel210 sarsma testi



(b) HRTM sarsma testi

Şekil B.2 : Sarsma testi sonuçları 2

EK C.1

```
% RTERM ACSYS LEVELLING SOFTWARE %
% Created by Rasit Ulug and Kerem Halıcioglu %
% Istanbul Technical University and Bogazici University %
%-----%
function varargout = Rterm(varargin)
%RTERM MATLAB code file for Rterm.fig
% RTERM, by itself, creates a new RTERM or raises the
existing
% singleton*.
%
% H = RTERM returns the handle to a new RTERM or the
handle to
% the existing singleton*.
%
% RTERM('Property','Value',...) creates a new RTERM
using the
% given property value pairs. Unrecognized properties
are passed via
% varargin to Rterm_OpeningFcn. This calling syntax
produces a
% warning when there is an existing singleton*.
%
% RTERM('CALLBACK') and RTERM('CALLBACK',hObject,...)
call the
% local function named CALLBACK in RTERM.M with the
given input
% arguments.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI
allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
Rterm

% Last Modified by GUIDE v2.5 19-Mar-2017 01:39:21

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
```

```

gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Rterm_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Rterm_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Rterm is made visible.
function Rterm_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
% varargin   unrecognized PropertyName/PropertyValue
pairs from the
%           command handles.line (see VARARGIN)

% Choose default command handles.line output for Rterm
handles.output = hObject;

% Uphandles.date handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Rterm wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the
command handles.line.
function varargout = Rterm_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see
VARARGOUT);
% hObject    handle to figure

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Get default command handles.line output from handles
structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = returns popupmenu1 contents as cell
array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu1
handles = guidata(hObject);
switch get(handles.popupmenu1,'Value')
    case 1
        errormsg = 'Please select Serial-Port';
        set(handles.text26,'String',errmsg);
    case 2
        handles.hrtmport = 'COM1';
        set(handles.text26,'String','');
    case 3
        handles.hrtmport='COM2';
        set(handles.text26,'String','');
    case 4
        handles.hrtmport='COM3';
        set(handles.text26,'String','');
    case 5
        handles.hrtmport='COM4';
        set(handles.text26,'String','');
    case 6
        handles.hrtmport='COM5';
        set(handles.text26,'String','');
    case 7
        handles.hrtmport='COM6';
        set(handles.text26,'String','');
    case 8
        handles.hrtmport='COM7';
        set(handles.text26,'String','');
    case 9
        handles.hrtmport='COM8';

```

```

        set(handles.text26,'String','');
    case 10
        handles.hrtmport='COM9';
        set(handles.text26,'String','');
    case 11
        handles.hrtmport='COM10';
        set(handles.text26,'String','');
    case 12
        handles.hrtmport='COM11';
        set(handles.text26,'String','');
    case 13
        handles.hrtmport='COM12';
        set(handles.text26,'String','');
        otherwise
            set(handles.text26,'String',errmsg);
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white
background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu3.
function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String'))
returns popupmenu3 contents as cell array
%   contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu3

```

```

handles = guidata(hObject);
switch get(handles.popupmenu3,'Value')
    case 1
        errormsg = 'Please select Baud Rate';
        set(handles.text26,'String',errmsg);
    case 2
        handles.baudrate=4800;
        set(handles.text26,'String','');
    case 3
        handles.baudrate=7200;
        set(handles.text26,'String','');
    case 4
        handles.baudrate=9600;
        set(handles.text26,'String','');
    case 5
        handles.baudrate=14400;
        set(handles.text26,'String','');
    case 6
        handles.baudrate=19200;
        set(handles.text26,'String','');
    otherwise
        set(handles.text26,'String',errmsg);
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white
background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu5.
function popupmenu5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String'))
returns popupmenu5 contents as cell array
%   contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu5
handles = guidata(hObject);
switch get(handles.popupmenu5,'Value')
    case 1
        errormsg = 'Please select Unit';
        set(handles.text26,'String',errmsg);
    case 2
        handles.katsayi = 1000;
        handles.etikety = 'mrad';
        set(handles.text26,'String','');
    case 3
        handles.katsayi = 360*3600/(2*pi);
        handles.etikety = 'arcsec';
        set(handles.text26,'String','');
    otherwise
        set(handles.text26,'String',errmsg);
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu5_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to popupmenu5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white
background on Windows.
%   See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)

[handles.satir,~] = size(handles.Xtilt);
outname(:,6)=handles.date;
outname(:,1)=num2cell(handles.Xtilt);
outname(:,2)=num2cell(handles.Ytilt);
outname(:,3)=num2cell(handles.Temp1);
outname(:,4)=num2cell(handles.Temp2);
outname(:,5)=num2cell(handles.Humid);
filename = {datestr(now,'1_ddmmyyyy_HH0000.log')};
file=strcat(handles.dname,'\','H',filename);
if exist(file{1},'file') == 2
    fid = fopen(file{1},'a');
else
    fid = fopen(file{1},'w');
end
for l=1:handles.satir
    fprintf(fid,'% .6f % .6f % .2f % .2f % .2f
%s\n', outname{l,1},outname{l,2},
        outname{l,3},outname{l,4},outname{l,5},outname{l,6});
end
fclose(fid);
handles.Xtilt = [];handles.Ytilt=[];
handles.Temp1=[];handles.date=[];
handles.Humid=[];handles.Temp2=[];i=0;

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
set(0,'userdata',1)
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.

```

```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in togglebutton2.
function togglebutton2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to togglebutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
togglebutton2
handles = guidata(hObject);
if exist(handles.dname,'file') ~= 7
    errormsg = 'Please select Directory to save';
    set(handles.text26,'String',errmsg);
    return
end
bit = 122.07*10^(-9);
a1=1.367*10^(-10);a2=1.334*10^(-10);
a3=13.79640015;a4=13.204883;
a5=0.8747815976;a6=0.824872403;
a7=13.79640015;a8=13.204883;
a9=0.8747815976;a10=0.824872403;
i=1;
drawcond=strcmp(handles.draw,'on');
plotcond=strcmp(handles.etikety,'mrad');

```

```

if drawcond ==1 && plotcond == 1
    handles.pos=[-0.02 -0.02 0.04 0.04]
else if drawcond == 1 && plotcond == 0
    handles.pos=[-50 -50 100 100]
    end
end
errormsg = 'WORKING...';
set(handles.text26,'String',errormsg);
while get(hObject,'Value')
    guidata(hObject, handles);
    line = fgetl(handles.s);
    line = regexprep(line,' ',' ');
    line = strsplit(line);
    line = str2double(line);
    handles.date{i,1} = datestr(now,'dd mm yyyy HH MM
SS.FFF');
    handles.Xtilt(i,1) = ((line(1))*a1)*handles.katsayi;
    handles.Ytilt(i,1) = ((line(2))*a2)*handles.katsayi;
    handles.Temp1(i,1) = a3-a4*(line(3)*bit)+a5*(line(3)*bit)
handles.Temp2(i,1) = a7-a8*(line(4)*bit)+a9*(line(4)*bit)
handles.Humid(i,1) = (line(5)*bit*9.6-0.1515)/0.00636;
set(handles.text8,'String',round(handles.Xtilt(i,1),6));
set(handles.text11,'String',round(handles.Ytilt(i,1),6));
set(handles.text9,'String',round(handles.Temp1(i,1),2));
set(handles.text10,'String',round(handles.Temp2(i,1),2));
set(handles.text12,'String',round(handles.Humid(i,1),2));
if drawcond == 1
    rectangle('Position',handles.pos,'Curvature',[1 1])
    axis equal
    scatter(handles.Xtilt(i,1),handles.Ytilt(i,1),'ro');
    ax = gca;
    ax.XAxisLocation = 'origin';
    ax.YAxisLocation = 'origin';
    grid on
end
drawnow;
kytasama = strcmp(datestr(now,'MMSS'),'5959');
if kytasama == 1
    [handles.satir,~] = size(handles.Xtilt);
    outname(:,6)=handles.date;outname(:,1)
    num2cell(handles.Xtilt);outname(:,2)=num2cell(handles.Ytilt)
    outname(:,3)=num2cell(handles.Temp1);
    outname(:,4)=num2cell(handles.Temp2);
    outname(:,5)=num2cell(handles.Humid);
    filename = {datestr(now,'1_ddmmyyyy_HH0000.log')};
    file=strcat(handles.dname,'\','H',filename);
    if exist(file{1},'file') == 2
        fid = fopen(file{1},'a');
    else

```

```

        fid = fopen(file{1},'w');
    end
    for l=1:handles.satir
        fprintf(fid,'% .6f % .6f % .2f % .2f % .2f %s\n',
            outname{1,1},outname{1,2},outname{1,3},
            outname{1,4},outname{1,5},outname{1,6});
    end
    fclose(fid);
    handles.Xtilt = [];handles.Ytilt=[];
    handles.Temp1=[];handles.date=[];
    handles.Humid=[];handles.Temp2=[];i=0;
end
    i=i+1;
end
    [handles.satir,~] = size(handles.Xtilt);
    outname(:,6)=handles.date;
    outname(:,1)=num2cell(handles.Xtilt);
    outname(2)=num2cell(handles.Ytilt);
    outname(:,3)=num2cell(handles.Temp1);
    outname(:,4)=num2cell(handles.Temp2);
    outname(:,5)=num2cell(handles.Humid);
    filename = {datestr(now,'1_ddmmyyyy_HH0000.log')};
    file=strcat(handles.dname,'\','H',filename);
    if exist(file{1},'file') == 2
        fid = fopen(file{1},'a');
    else
        fid = fopen(file{1},'w');
    end
    for l=1:handles.satir
        fprintf(fid,'% .6f % .6f % .2f % .2f % .2f %s\n',
            outname{1,1},outname{1,2},outname{1,3},
            outname{1,4},outname{1,5},outname{1,6});
    end
    fclose(fid);
    handles.Xtilt = [];handles.Ytilt=[];
    handles.Temp1=[];handles.date=[];
    handles.Humid=[];handles.Temp2=[];
    i=0;handles.pos=[];
errormsg = 'FINISHED DO NOT FORGET TO DISCONNECT';
set(handles.text26,'String',errormsg);
    guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function XTILT_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to XTILT (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate XTILT

% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
handles.Xtilt = [];handles.Ytilt=[];
handles.Temp1=[];handles.date=[];
handles.Humid=[];
arrayfun(@cla,findall(0,'type','axes'));
clc
set(handles.text8,'String','');
set(handles.text11,'String','');
set(handles.text9,'String','');
set(handles.text10,'String','');
set(handles.text12,'String','');
set(handles.text26,'String','');
fclose('all');
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
fclose('all');
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to text10 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to text12 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function text26_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to text26 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject      handle to pushbutton10 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see
GUIDATA)
handles.s = serial(handles.hrtmport);
set(handles.s,'Baudrate',handles.baudrate);
set(handles.s,'DataBits',8);
set(handles.s,'StopBits',1)
set(handles.s,'terminator','CR');
handles.s.ReadAsyncMode = 'continuous';
fopen(handles.s);
portilk = strcmp(handles.s.Status,'open');
if portilk == 1
    errormsg = 'Connection Successful';
    set(handles.text26,'String',errormsg);

```

```

else
    errormsg = 'Connection Failed, Check Serial
Port';
    set(handles.text26,'String',errormsg);
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to pushbutton11 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
fclose(handles.s);
portson = strcmp(handles.s.Status,'open');
if portson == 0
errormsg = 'Port Closed';
set(handles.text26,'String',errormsg);
else
errormsg = 'An error occured when closing port';
set(handles.text26,'String',errormsg);
end

% --- Executes on selection change in popupmenu6.
function popupmenu6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String'))
returns popupmenu6 contents as cell array
%    contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu6
handles = guidata(hObject);
switch get(handles.popupmenu6,'Value')
    case 1
        errormsg = 'Please select Draw Options';
        set(handles.text26,'String',errormsg);
    case 2
        handles.draw='on';
        set(handles.text26,'String','');
    case 3
        handles.draw = 'off';
        set(handles.text26,'String','');
    otherwise

```

```

        errormsg = 'Please select Draw Options';
        set(handles.text26,'String',errormsg);
end
guidata(hObject, handles);

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu6_CreateFcn(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to popupmenu6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white
background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton13.
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata,
handles)
% hObject    handle to pushbutton13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version
of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see
GUIDATA)
handles.dname=uigetdir();
guidata(hObject, handles);

```



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Raşit Uluğ

Doğum Tarihi ve Yeri: 06.03.1991, Isparta

E-Posta: ulug15@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2014, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2014-2015, Araştırma Görevlisi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü.
- 2015-, Araştırma Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü
- 01.01.2016-, Bursiyer, TÜBİTAK 115Y237 numaralı "Astro-jeodezik ve GNSS/Nivelman Verilerinin Entegrasyonu ile Yerel Geoit Modellemesi" Projesi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Uluğ R.**, Halicioğlu, K., Ozludemir M. T., Albayrak M., Basoglu B., Deniz R., 2017. Calibration and Testing of Digital Zenith Camera System Components. *Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-16242, EGU General Assembly*, Nisan 23-28, 2017 Vienna, Avusturya.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Kucak, A., **Ulug, R.**, Akyılmaz, O., 2016, The Prediction of Nonlinear Polar Motion based on Artificial Neural Network (ANN) and Fuzzy Inference System (FIS), *30 Years of Nonlinear Dynamics in Geosciences Conference*, Rodos, Yunanistan.
- **Ulug, R.**, Ozludemir, T., 2016, An Investigation of Contribution of Glonass on Precise Point Positioning, *American Geophysical Union (AGU) 2016 Fall Meeting*, San Francisco, Amerika Birleşik Devletleri.
- Halicioglu, K., Ozludemir, T., Deniz, R., Ozener, H., Albayrak, M., **Ulug, R.**, Basoglu, B., 2017, Istanbul Astro-jeodezik Test Ağında Sayısal Zenit Kamera Sistemi Gözlemleri, *16. Harita Teknik Kurultayı*, Ankara, Türkiye.
- Basoglu B., Halicioglu, K., Albayrak M., **Ulug R.**, Ozludemir M. T., Deniz R., 2017, The Investigation on the Use of Different Centroiding Algorithms and Star Catalogs in Astro-Geodetic Observations, *Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-15974, EGU General Assembly 2017*, Viyana, Avusturalya.
- Halicioglu, K., Ozludemir M. T., Deniz R., Ozener H., Albayrak M., **Ulug R.**, Basoglu B., 2017, The integration of astro-geodetic data observed with ACSYS to the local geoid models Istanbul-Turkey, *Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-13072, EGU General Assembly 2017*, Viyana, Avusturalya.