

**SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ İLE
ASTRO-JEODEZİK ÇEKÜL SAPMALARININ
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Kerem HALICIOĞLU

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2015

**SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ İLE
ASTRO-JEODEZİK ÇEKÜL SAPMALARININ
BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Kerem HALICIOĞLU
(501072605)**

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim DENİZ

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501072605 numaralı Doktora Öğrencisi Kerem HALICIOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ İLE ASTRO-JEODEZİK ÇEKÜL SAPMALARININ BELİRLENMESİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Rasim DENİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Haluk ÖZENER**
Boğaziçi Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. D. Uğur ŞANLI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ersoy ARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. M. Tevfik ÖZLÜDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin KEMALDERE
Bülent Ecevit Üniversitesi

Teslim Tarihi : **20 Temmuz 2015**
Savunma Tarihi : **18 Eylül 2015**

Anneme ve Babama

ÖNSÖZ

*"Yeyüzünde teodoliti kuran herkes
hayal de kurabilir,
çünkü artık yıldızların arasında
zenittedir".*

Danışmanım Sayın Prof. Dr. Rasim Deniz'in Jeodezik Astronomi dersinde kullandığı bu ifade benim bu alanda çalışmaya karar vermemde önemli bir role sahiptir. Jeodezi'nin gezegenimiz ve evrenin dinamiklerini açıklamadaki çabası, bu çalışmaların bilgiyle ve hayallerimizle olan kavramsal ilişkisi, bu çalışma süresince karşılaştığım zorlukların aşılmasında en büyük motivasyonum olmuştur.

Öncelikle bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde büyük katkılar veren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Rasim Deniz'e bu zorlu süreçte sürekli desteği için, sistemin oluşturulması ve test çalışmaları sırasındaki sıkıntılı süreçte her zaman yol gösterdiği ve çıkış yolu bulmama yardımcı olduğu için sonsuz teşekkür etmek isterim.

Tez çalışmam süresince, çalışmamızın projelendirme sürecinden başlayarak ölçmelerin gerçekleştirilmesine değin, yoğun çalışma programına rağmen desteğini her zaman yanımda bulduğum Eş Danışmanım Sayın Prof. Dr. Haluk Özener'e çok teşekkür ederim.

Tez sürecime yorumları ve değerlendirmeleriyle katkı veren tez izleme ve savunma jürisi üyeleri Prof. Dr. Şerif Hekimoğlu, Prof. Dr. Rahmi Nurhan Çelik, Doç. Dr. Uğur Şanlı, Doç. Dr. Ersoy Arslan, Doç. Dr. Tevfik Özlüdemir ve Yrd. Doç. Dr. Hüseyin Kemaldere'ye çok teşekkür ederim.

Gece gözlemleri sırasında büyük özveri ile bana destek olan Hasan Onur Işık, Süleyman Fişek ve ayrıca Can Görkem Halıcıoğlu ve Osman Bal'a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Sistemin kurulması sürecinde donanım desteği veren ve süreç içerisinde desteğini esirgemeyen Özgür Avcı'ya, sistem bileşenlerinin tasarımı ve entegrasyonu için benimle birlikte düşünen, yorumlayan ve önerilerde bulunan Gökçe Akan, Emrah Sönmez ve Güray Batur'a, görüntülerin değerlendirilmesi sürecinde ve sistem bileşenlerinin entegrasyonunda geliştirilen yazılımlarda yorumları ve yardımlarıyla beni yönlendiren Prof. Dr. Bahadır Aktuğ, Prof. Dr. Rahmi Nurhan Çelik, Doç. Dr. Tevfik Özlüdemir, Doç. Dr. Gökhan Çınar, Doç. Dr. Bihter Erol, Doç. Dr. Serdar Erol, Alphan Kıray ve Şenol Solum'a, sistemin oluşturulması sırasında ve süresince sorularımı yanıtsız bırakmayan, ön çalışmalarda gözlemleri ile destek olan TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi astronomlarından Tuncay Özışık'a çok teşekkür ederim.

Tez sürecimde her konuda bana sonsuz destek veren, yayınlarımı ve çalışmalarımı yakından izleyen ve destekleyen, benimle birlikte jeodezik astronomi alanında ilerleyen, eşim Özgür Çiçek Halıcıoğlu'na, gece gözlemleri nedeniyle zaman zaman yanımda olamadığım oğlum Mahir Derya Halıcıoğlu'na sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak hayatları boyunca beni yüreklendiren, çalışmalarımı ve yaşamımı sonsuz destekleyen annem Sevim Halıcıoğlu, babam Emin Halıcıoğlu, kardeşim Görkem Halıcıoğlu ve teyzem Ülfet Sevin Akyıl'a her zaman yanımda oldukları için minnettarım.

Bu tez çalışması TÜBİTAK ÇAYDAG tarafından 111Y125 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Tez çalışmasının gerçekleşmesi için gerekli donanım ve diğer destekleri için TÜBİTAK'a çok teşekkür ederim.

...

EYLÜL 2015

Kerem HALICIOĞLU
(Yüksek Mühendis)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Global Ölçekte Sayısal Zenit Kamera Sistemleri ile Gerçekleştirilen Astro-Jeodezik Çalışmalar.....	2
1.2 Türkiye’de Gerçekleştirilen Astro-Jeodezik Çalışmalar	6
2. ÇEKÜL SAPMASININ BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ALTYAPISININ DEĞERLENDİRİLMESİ	11
2.1 Çekül Sapmasının Bilimsel Esasları ve Güncel Uygulamaları	11
2.1.1 Jeodezi’de koordinat sistemleri ve bu sistemlerin hareketleri	11
2.1.1.1 Göksel koordinatlar, uluslararası göksel referans sistemleri ve çerçeveleri.....	12
Presesyon ve Nütasyon.....	14
2.1.1.2 Göksel temel koordinat sistemleri	15
Ufuk koordinat sistemi.....	16
Rektasansiyon (Ekvator) koordinat sistemi.....	18
2.1.1.3 Yersel (Coğrafik) koordinatlar	19
Astronomik (doğal) koordinatlar.....	19
Jeodezik (elipsoidal) koordinatlar, uluslararası yersel referans sistemi ve çerçevesi.....	23
2.1.2 Jeodezik ve Astronomik koordinatlar arası ilişkiler; Çekül sapmaları...	25
2.1.3 Geoit belirleme yöntemlerine genel bir bakış	29
2.1.3.1 Küresel jeopotansiyel açılım modelinden yararlanarak geoit belirleme	33
2.1.3.2 Nokta gravite ölçüleri ile (gravimetrik) geoit belirleme	34
2.1.3.3 GPS ölçülerinden yararlanarak geoit belirleme	35
2.1.3.4 Kombine - Global jeopotansiyel model ve nokta gravite ölçülerinin kombinasyonu ile geoit belirleme (Remove-Restore yöntemi).....	35
2.1.3.5 Astro-jeodezik geoit belirlemenin diğer yöntemlerle karşılaştırılması.....	36
2.1.4 Zaman sistemleri	37

2.1.4.1 Zaman sistemlerinin temelleri ve aralarındaki ilişkiler	37
2.1.4.2 Zaman dönüşümleri, görünen gözlem zamanının hesabı	38
2.1.4.3 Yersel ve göksel referans sistemleri arasındaki dönüşümler	40
2.2 Astro-jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesinin Teknolojik Altyapısı ve Güncel Durumu.....	42
2.2.1 Astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesinin teknolojik gelişimi	42
2.2.2 Uydu kameraları	43
2.2.3 Sayısal zenit kamera sistemleri	46
3. ULUSAL SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ.....	51
3.1 Sistemin Tasarımı ve Sistem Bileşenlerinin Seçimi	51
3.1.1 Teleskop ve CCD kamera	52
3.1.2 Eğimölçerler	54
3.1.3 Zaman belirleme donanımı.....	54
3.1.4 Ölçme ve değerlendirme yazılımları	55
3.2 Sistem Bileşenlerinin Entegrasyonu.....	57
3.3 Kontrol ve Kalibrasyon Çalışmaları	60
3.3.1 Teleskop ve CCD'nin kalibrasyonu.....	61
3.3.2 Azimut ve göksel kalibrasyon	63
3.3.3 Görüntülerin kalibrasyonu.....	65
3.3.4 Zaman senkronizasyonu ve stabilizasyonu çalışmaları	66
3.3.5 Düzeyler ve düzeçleme ile ilgili çalışmalar	67
3.4 Astronomik Koordinatların Elde Edilmesi	71
3.4.1 Seri gözlemler ve görüntülerin değerlendirmeye hazırlanması	76
3.4.2 Görüntülerin değerlendirmesi ve hesaplar.....	77
3.4.3 Toposentrik görünen koordinatların hesaplanması.....	78
3.4.4 Zenit noktasının koordinatlarının hesabı	81
4. CCD KAMERA SİSTEMİ İLE ELDE EDİLEN ÇEKÜL SAPMALAR- ININ KONTROLÜ VE DOĞRULUKLARININ BELİRLENMESİ	85
4.1 Ana İstasyondaki Gözlemler ve Değerlendirmeler	85
4.1.1 İndirgemeler.....	87
4.2 Test Ağı Gözlemleri, Çekül Sapmaları ve Doğrulukları	89
4.3 Test Ağında Elde Edilen Çekül Sapmalarının Global Jeopotansiyel Modeller ile Karşılaştırması	94
4.4 Test Ağı Gözlemlerinin Değerlendirilmesi ve Doğruluk Analizi.....	97
4.4.1 GPS/NİV geoit yükseklik farkları ile karşılaştırma.....	97
4.4.2 Test ağında hesaplanan geoit yükseklik farklarının dengeleme analizi..	100
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	107
EKLER	113
EK A.1	115
EK A.2.....	122
ÖZGEÇMİŞ	146

KISALTMALAR

BCRS	: Barycentric Celestial Reference System
BIH	: Bureau International de l'Heure
BÖHHBÜY	: Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği
CCD	: Charge-Coupled Device
CIRS	: Celestial Intermediate Reference System
EOP	: Earth Orientation Parameters
ESA	: European Space Agency
GAST	: Greenwich Apparent Sidereal Time
GCRS	: Geocentric Celestial Reference System
GNSS	: Global Navigation and Satellite Systems
IAU	: International Astronomical Union
ICRS	: International Celestial Reference System
ICRF	: International Celestial Reference Frame
IERS	: International Earth Rotation and Reference Systems Service
ILS	: International Latitude Service
IPMS	: International Polar Motion Service
ITRS	: International Terrestrial Reference System
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
IUGG	: International Union of Geodesy and Geophysics
LAST	: Local Apparent Sidereal Time
NOVAS	: Naval Observatory Vector Astrometry Software
LLR	: Lunar Laser Ranging
SZKS	: Sayısal Zenit Kamera Sistemi
TIRS	: Terrestrial Intermediate Reference System
TUG	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Ulusal Gözlemevi
UT	: Universal Time
VLBI	: Very Long Baseline Interferometer

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Anomali dereceli varyans modeli [50].	33
Çizelge 2.2 : Zaman İndirgemeleri [21]'den güncellenmiştir.	40
Çizelge 2.3 : Sayısal Zenit Kamera Sistemleri.	49
Çizelge 3.1 : PICTRAN ve IDL yazılımları ile belirlenen yıldız merkez koordinatları.	63
Çizelge 4.1 : Test İstasyonunda elde edilen çekül sapmaları.	86
Çizelge 4.2 : Test ağındaki istasyonlara ait koordinat bilgileri. (ITRF96 sisteminde 30 derecelik dilim orta meridyenine sahip 3 ⁰ dilim genişliğindeki Gauss-Krüger projeksiyonundaki koordinatlar).	90
Çizelge 4.3 : Kadıköy (KDKY) noktasına ait görüntü koordinatları.	91
Çizelge 4.4 : Kadıköy (KDKY) noktasına ait seriler.	92
Çizelge 4.5 : KDKY noktasına ait düzeltmeler ve çekül sapmaları.	92
Çizelge 4.6 : Test ağındaki çekül sapmaları.	93
Çizelge 4.7 : Test ağı noktalarında, farklı jeopotansiyel modellere göre çekül sapması bileşenleri (n=m=360 için).	94
Çizelge 4.8 : Test ağı noktalarının farklı geoit modellerine göre geoit yükseklikleri.	95
Çizelge 4.9 : Test ağının geoit yükseklikleri farkları.	95
Çizelge 4.10: Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile elde edilmiş, EGM08 (2159 derece) ve GGM+ global jeopotansiyel model katsayıları kullanılarak hesaplanmış çekül sapmaları ve farklar.	96
Çizelge 4.11: Test ağındaki astronomik nivelman hesabı.	98
Çizelge 4.12: GPS/Niv geoit yükseklik farkları ile Test Ağı gözlem verilerinin karşılaştırılması.	99
Çizelge 4.13: Test ağının dengelenmesi sonucu elde edilmiş özet çizelge.	100
Çizelge 4.14: Test ağının dengelenmesi sonucu elde edilmiş özet çizelge.	101
Çizelge 4.15: Test ağındaki istasyonların dengelenmiş geoit yükseklikleri ve farklar.	101
Çizelge 4.16: Test ağındaki istasyonların dengelenmiş geoit yükseklik farkları..	101

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Taşınabilir Zenit Kamera Sistemi - TZK1	4
Şekil 1.2 : TZK2-D ve DIADEM Sayısal zenit kamera sistemleri.	5
Şekil 1.3 : Sayısal zenit kamera sistemi ile gerçekleştirilmiş bir uygulama [1].	5
Şekil 1.4 : Astro-jeodezik çekül sapmaları [2]'dan güncellenmiştir.	7
Şekil 1.5 : 1976 Türkiye Geoidi [2, 3].....	7
Şekil 1.6 : 1978 Türkiye Geoidi [4].	8
Şekil 1.7 : Türkiye Astro-jeodezik Geoidi - 1994 [5].	9
Şekil 2.1 : Ufuk Koordinat Sistemi.	17
Şekil 2.2 : Jeosentrik Paralaks.....	18
Şekil 2.3 : Ekvator Koordinat Sistemi.....	19
Şekil 2.4 : Astronomik meridyen düzlemi ve astronomik koordinatlar.	20
Şekil 2.5 : Çekül çizgisi.	23
Şekil 2.6 : ITRF 2008 istasyonları	24
Şekil 2.7 : Astronomik ve Jeodezik Zenit.	25
Şekil 2.8 : Çekül sapması.	26
Şekil 2.9 : Geoidin elipsoide göre eğimi.....	27
Şekil 2.10 : Astronomik Nivelman.....	28
Şekil 2.11 : Yıldız Zamanı.	37
Şekil 2.12 : Uydu gözlemleri için kullanılan prezisyonlu teodolitler.	44
Şekil 2.13 : Sabit kurulumlu fotoğrafik uydu kamera sistemi.	45
Şekil 3.1 : TUG bünyesinde elde edilen örnek bir yıldız görüntüsü.	51
Şekil 3.2 : Sayısal zenit kamera sisteminin optik bileşeni.	53
Şekil 3.3 : KAF 3200ME yongaya ait kuantum etkinliği grafiği.	53
Şekil 3.4 : SZKS ile elde edilmiş örnek bir görüntü.	54
Şekil 3.5 : Leica Nivel 210 eğimölçer.....	55
Şekil 3.6 : Zaman belirlemede kullanılan GPS donanımı ve yazılımı.	55
Şekil 3.7 : Değerlendirmede adımları.	56
Şekil 3.8 : Danjon Astrolab Pavyonu.	57
Şekil 3.9 : Test İstasyonu.	58
Şekil 3.10 : Sistem üzerindeki eğimölçer, adaptör ve ağırlıklar.	59
Şekil 3.11 : Hafifletilmiş adaptörün eğimölçer ile birlikte görünümü.	59
Şekil 3.12 : Alt yapıya ve tüpe yerleştirilen iki eğimölçer.....	60
Şekil 3.13 : Sistemin için üretilmiş taşıma kutusu ve güç kaynağı.....	60
Şekil 3.14 : Sistemin şematik gösterimi.....	61
Şekil 3.15 : Shutter gecikmesi deneyi için kalibrasyon görüntüsü.	62
Şekil 3.16 : PSF ile yıldız merkezlerinin belirlenmesi.....	62

Şekil 3.17	: Katalog ile uyuşum değerlerine göre hesaplamada kullanılan yıldızlar.	64
Şekil 3.18	: Azimut kalibrasyonu [6].	64
Şekil 3.19	: Görüntü kalibrasyonun şematik gösterimi.	66
Şekil 3.20	: Adaptör stabilizasyon testi için eğimölçer ve sıcaklık değerleri.	67
Şekil 3.21	: Farklı Azimutlar için eğim değerlerinin dağılımı.	68
Şekil 3.22	: Eğimölçer yardımıyla sistemin iteratif şekilde düzeçlenmesi.	69
Şekil 3.23	: Sistemin eğim değerleri ile gerçekleştirilen iteratif yöneltme.	69
Şekil 3.24	: RIVA istasyonuna ait iteratif düzeçleme sonuçları.	70
Şekil 3.25	: KDKY istasyonunda sistemin düzeçlenmesi.	70
Şekil 3.26	: Çekül çizgisinin doğrultusunu belirlemede basit esaslar.	71
Şekil 3.27	: Zenit kamera ve GPS gözlemlerinin birleştirilmesi ile çekül sapması bileşenlerinin astronomik nivelman tekniği ile belirlenmesi.	72
Şekil 3.28	: Yakın yıldızlardan kaynaklanan hataların belirlenmesi.	73
Şekil 3.29	: Değerlendirilen görüntüye ait koordinat bilgileri.	75
Şekil 3.30	: Görüntünün netleştirilmesinde kullanılan FWHM yöntemi.	75
Şekil 3.31	: Teğet Düzlem Koordinatları [7].	82
Şekil 4.1	: Ana istasyonda değerlendirilen toplam görüntü ve yıldız sayısı grafiği.	86
Şekil 4.2	: Sistemin iteratif düzeçlenmesi.	87
Şekil 4.3	: Test Ağı.	89
Şekil 4.4	: Anadolu yakası Geoit Dayanak Noktaları Ağı kanavası [8].	90
Şekil 4.5	: Test Ağı belirlenirken arazide gidilerek incelenen noktalar.	90
Şekil 4.6	: Test ağındaki çekül sapmaları.	93
Şekil 4.7	: Test ağı için örneklenmiş EGM08 ($n=m=2159^0$) global jeopotansiyel model grid verisi ile üretilmiş çekül sapması bileşenleri.	96
Şekil 4.8	: Test Ağının Astronomik Nivelmanı (Birim (")).	99
Şekil A.1	: Kandilli Test istasyonu dış görünümü.	115
Şekil A.2	: Kandilli Test istasyonu iç görünümü.	115
Şekil A.3	: Kadıköy istasyonu (KDKY).	116
Şekil A.4	: Kadıköy istasyonu Batı (KDKY).	116
Şekil A.5	: Ömerli istasyonu (OMRL).	117
Şekil A.6	: Ömerli istasyonu Kuzey (OMRL).	117
Şekil A.7	: Riva istasyonu (RIVA).	118
Şekil A.8	: RIVA istasyonu Kuzey (RIVA) -2	118
Şekil A.9	: RIVA istasyonunda sistemin görünümü.	119
Şekil A.10	: RIVA istasyonunda sistemin görünümü.	119
Şekil A.11	: Sistemin araç içindeki görünümü.	120
Şekil A.12	: Ömerli istasyonunda gözlem anından bir görüntü.	120
Şekil A.13	: Ömerli istasyonunda gözlem hazırlıkları.	120
Şekil A.14	: Kadıköy istasyonunda Jeodezik koordinatların ölçülmesi.	121
Şekil A.15	: Kadıköy istasyonunda gözlem anından bir görüntü.	121
Şekil A.16	: Örnek bir astronomik nivelman hesabı [2].	122
Şekil A.17	: KDKY-KNDL topoğrafik kesiti.	123
Şekil A.18	: KDKY-OMRL topoğrafik kesiti.	123

Şekil A.19 :	KDNL-RIVA topoğrafik kesiti.....	124
Şekil A.20 :	KNDL-OMRL topoğrafik kesiti.	124
Şekil A.21 :	OMRL-RIVA topoğrafik kesiti.	125
Şekil A.22 :	Dengeleme Hesabı Sonuçları $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için.	126
Şekil A.23 :	Dengeleme Hesabı Sonuçları $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için.....	127

SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ İLE ASTRO-JEODEZİK ÇEKÜL SAPMALARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

GNSS'den etkin olarak yararlanabilmenin temel koşulu bir cm-geoidinin belirlenmesi olduğundan güncel çalışmalar prezisyonlu geoit belirlemeye odaklanmıştır. Astro-jeodezik teknik, temel bir geoit belirleme yöntemi olmasına rağmen analog ekipmanlardaki ve zaman belirlemedeki kısıtlamalar, bu yöntemin kullanımını zaman içinde azaltmıştır. Geçmişte gerçekleştirilmiş çalışmalar, geleneksel optik-mekanik doğrultu ölçme ve zaman belirleme yöntemleri ile çekül sapmalarının $\pm 1''$ doğrulukla belirlenebildiğini göstermiştir.

Astro-jeodezik çekül sapmaları geoit belirleme ve yoğunluk araştırmalarında önemli ölçülerdir. CCD sensörlerin icadı ve GPS sisteminin yaygın kullanımı, astronomik çalışmalarda olduğu gibi jeodezik astronomi alanında da önemli gelişmeler sağlamıştır. Klasik optik-mekanik sistemler CCD sensörlerle, GPS donanımıyla ve prezisyonlu eğim ölçerlerle güncellenmiş ve sayısal zenit kamera sistemlerinin geliştirilmesiyle astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesi çalışmaları güncelleştirilmiştir.

Tez çalışması iki ayrı bölümde ele alınmıştır. İlk bölümde; oluşturulan sayısal zenit kamera sistemi için gerçekleştirilen ön çalışmalar, belirlenen bileşenler ve bu bileşenlerin entegrasyonu incelenmiştir. Sayısal zenit kamera sisteminde, 20 cm ayna açıklığına sahip bir teleskop, yüksek kuantum etkinliği değerine sahip CCD kamera, elektronik eğim ölçerler ve GPS alıcısı, mekanik olarak entegre edilerek taşınabilir bir sistem oluşturulmuştur. Sistem bileşenlerinin bir kontrol ünitesi olarak kullanılan bilgisayar yardımıyla veri akışı sağlanmış ve sistem kontrolü otomatize edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde ise; gerçekleştirilen gözlemler ve sonuçlar araştırılmıştır. Teleskop/CCD kamera entegrasyonu ile yıldız görüntüleri elde edilmekte, GPS ile elde edilen prezisyonlu zaman bilgisi bu görüntülerle ilişkilendirilmektedir. Sayısal eğim ölçerlerden sistemin zenit doğrultusunda yönlendirmek için yararlanılmaktadır. Oluşturulan sayısal zenit kamera sistemi ile öncelikle, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi kampüsünde bulunan, geçmişte Danjon astrolabı laboratuvarı olarak kullanılan test istasyonunda ölçmeler gerçekleştirilmiştir. En uygun tasarımın belirlenmesi için eksen kontrolleri, gerçekleştirilen yıldız gözlemleri ile test edilmiştir. Sistem ile elde edilen yıldız görüntülerinde olası yıldızlar merkez belirleme algoritmaları (Point Spread Function, Ağırlık merkezi) kullanılarak belirlenmiştir. Görüntülerde belirlenen yıldızlar, görüntünün elde edildiği sisteme ait bilgiler ile birlikte (odak uzaklığı, CCD sensör boyutları, piksel ölçeği) GSC (Guide Star Catalog), UCAC2 (U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog) ve UCAC3 kataloglarındaki referans yıldızlar kullanılarak tanımlanmıştır. Referans yıldızların koordinatları referans epogunda (J2000.0) tanımlıdır. Görüntülerde tanımlanan yıldızların, yer dönme parametreleri (zaman, kutup hareketleri, presesyon ve nütasyon), yıldızların öz hareketleri, basınç, sıcaklık, ölçme istasyonunun

jeodezik koordinatları ve güneş sistemindeki cisimlerin efemeris bilgileri kullanılarak, toposentrik görünen koordinatları hesaplanmıştır. Zenit ve civarındaki yıldızların koordinatları kullanılarak izdüşümsel transformasyon yardımıyla zenit noktasının koordinatları elde edilmiştir. Zenit noktasının ortalama koordinatları sistemin dört farklı durumundan eğim düzeltmeleri getirilerek hesaplanmış, GPS ile elde edilen jeodezik koordinatlar kullanılarak çekül sapması bileşenleri hesaplanmıştır.

Ana istasyon olan Kandilli istasyonunda enlem belirleme prezisyonu $\pm 0.19''$ ve boylam belirleme prezisyonu $\pm 0.28''$ bulunmuştur. Sistem İstanbul Anadolu yakasında belirlenen 4 noktalı, ortalama kenar uzunluğu 20 km olan bir ağda test edilmiştir. Test ağında çekül sapmasının Kuzey-Güney ve Doğu-Batı bileşenlerinde ortalamanın karesel ortalama hatasının ortalamaları sırasıyla $0.35''$ ve $0.37''$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen çekül sapmaları global jeopotansiyel modellerle (EGM08, GGM+) karşılaştırılmış ve sonuçların büyük ölçüde uyduğu gözlemlenmiştir. Test ağında elde edilen çekül sapmaları ile astronomik nivelman yöntemiyle geoit yükseklikleri hesaplanmış ve GPS/Niv yöntemiyle elde edilen geoit yükseklik farklarıyla karşılaştırılmıştır. SZKS ile GPS/Niv yöntemleri ile elde edilen farklardan 1 km'lik uzunlukta bir geoit yüksekliği belirlemenin karesel ortalama hatası, farklı ağırlıklarla; $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için $\pm 14.7mm/km$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için $\pm 2.9mm/km$ olarak bulunmuştur.

Test ağında hesaplanan geoit yüksekliği değişimleri ölçü alınarak, en küçük kareler yöntemiyle, Kandilli istasyonunun geoit yüksekliğine bağlı olarak dengelenmiş ve birim ölçünün karesel ortalama hatası; $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için $\pm 17.6mm/km$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için $\pm 3.6mm/km$ bulunmuştur. Dengeleme sonucu, hesaplanan geoit yüksekliklerinin karesel ortalama hatası $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için maksimum $\pm 57.1mm$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için maksimum $\pm 54.6mm$ olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma kapsamında SZKS ile elde edilen sonuçların GPS/Niv ölçüleri ile birlikte değerlendirilebilir doğruluklara sahip, geoit belirlemede kullanılabilir olduğu ve ulusal yükseklik sisteminin modernizasyonu çalışmalarına katkı koyabilecek nitelikte olduğu belirlenmiştir.

Geliştirilen sistem farklı amaçlar için üretilmiş donanım bileşenlerinin bir SZKS olarak tasarlanıp prezisyonlu çekül sapması bileşenlerini elde edebilecek şekilde çalışması amaçlanmıştır. Sistemin geliştirilmesi ve prezisyonun artırılması için gerekli güncellemelere ilişkin öneriler tez çalışmasının sonucunda tartışılmıştır.

Bu çalışma TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 111Y125 numaralı proje numarası ile desteklenmiştir.

DETERMINATION OF ASTRO-GEODETIC DEFLECTIONS OF THE VERTICAL USING DIGITAL ZENITH CAMERA SYSTEM

SUMMARY

Current studies on geodesy mainly focused on precise geoid modeling techniques in order to use GNSS technology efficiently. Analog instruments and the limitations on time determination methods reduced the usage of astro-geodetic observations during the past two decades. The studies performed during the analog era showed that the deflections of the vertical components can be derived with an accuracy of ± 1 arc-sec using traditional optical-mechanical direction measuring systems and time recording devices.

Geoid studies at Austria, Switzerland, and Germany integrated various data sets to their national geoid models including astro-geodetic deflections of the vertical. The contribution of astro-geodetic data set to these models considerable and improves the accuracy of the models. In order to determine a cm-geoid using astro-geodetic method, 5 – 10 *points/1000 km²* are suggested. Recently, Turkish National Geodesy Commission coordinates a new project that is still in progress for height modernization in Turkey, which is aiming to achieve 1-cm Turkish geoid model. GPS/Levelling geoid of Istanbul has been defined in 2005 for Istanbul metropolitan area covering 6000 *km²* using 1005 geoid determination points. The absolute accuracy of this geoid was published as ± 3.5 *cm*. In order to accomplish a high precision geoid model, homogenous data derived from various techniques such as GPS/Levelling, precise surface gravity observations, airborne gravity, and satellite data have to be used including astro-geodetic measurements.

Astro-geodetic deflections of the vertical are crucial measurements in geoid determination studies and density investigations. Invention of CCD sensors and the widespread usage of GNSS, lead major developments in both astronomical and geodetic applications. Traditional optical-mechanical instruments updated with CCD sensors, GNSS devices, and precise tiltmeters. As a result, digital zenith camera systems were designed beginning from the 2000s and in this way the determination of astro-geodetic deflection of the vertical components became more efficient.

This study covers two main parts. The first part, introduce the DZCS designed in this study. The DZCS is introduced in detail, including the selection of the system parts, hardware and software design, and integration of the system components. The observations were performed in 4 different positions of instrument with 5-10 (20-40 images) single observations, which is defined as one series. During the test observations, CCD and telescope calibrations, shutter latency measurements, suitable epoch determination, and image quality test were also performed. The system designed in this study is developed as a transportable instrument with the combination of a Schmidt–Cassegrain type 8'' apertured telescope, a CCD camera with high quantum efficiency between the visible light range of the electromagnetic spectrum, digital

tiltmeters, and a GPS receiver. The components of the system are controlled by a computer, and data flow designed as real time and automatically.

Second part of this study introduces the test observations and their results. Zenithal star field is captured with Telescope/CCD integrated system, and the epoch information is related with the images using GPS time. Digital tiltmeters are used in order to adjust the system towards its zenith direction. The first observations of the DZCS used in this study, are performed at the main station that is located at the campus of Bogazici University Kandilli Observatory and Earthquake Institute. Images of zenithal star field are processed in order to align the axes of the system components for the optimum solution. Potential stars captured on the images are registered using centroiding algorithms such as point spread function fitting, and moment analysis. Reference stars in the CCD images were identified using GSC (Guide Star Catalog), UCAC2 (U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog) and UCAC3 star catalogs using the parameters of the DZCS (focal length, sensor size, pixel scale). Coordinates of the reference stars are defined on the reference epoch (J2000.0) in the star catalogs. Apparent topocentric coordinates of the stars are calculated using earth rotation parameters, (time, polar motion, precession, nutation), proper motions of stars, atmospheric pressure, temperature, geodetic coordinates of the station, and ephemerides information of the bodies in the solar system. Observations that were made under high humidity and unsuitable meteorological conditions are eliminated from the results. Coordinates of the zenith point is determined using projective transformation of zenithal stars on the CCD images. Average coordinates of the zenith point are calculated applying the tilt corrections recorded from the four different instrumental position, and using the geodetic coordinates of the observing station, the deflections of the vertical components were calculated.

The precision of processing star images is about $\pm 0.1 - 0.2''$. Levelling precision of the system is reached to $\pm 0.4''$ and the system is averagely leveled within a circle with $10''$ radius. The precision of latitude determination is $\pm 0.19''$ and longitude determination is $\pm 0.28''$ at the test station.

The system is also tested on a network located at the Anatolian part of Istanbul. The observations are performed and calculated at the test network, which has an average of 20 km baselines with 4 points including the test station. At the test network the root mean square of the average value of the North-South, and East-West components of the vertical deflections are calculated as $0.35''$ and $0.37''$ respectively.

Deflection of the vertical components are compared with the values that are calculated using global geopotential models (EGM08, GGMPlus). Deflections of the vertical of the test network are in good agreement with deflections of the vertical calculated EGM08 and GGMPlus global models. Correspondence of the models with observed deflections of the vertical is about $\pm 1''$ excluding the latitudes of the stations which are near coastlines. The GPS/Levelling and DZCS derived heights of the test network are also compared in this study. The analysis of the height differences of the stations calculated using different weighting approaches, the root mean square of determining the geoid undulations for 1 km length is calculated as $\pm 14.7 \text{ mm/km}$ for $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$, and $\pm 2.9 \text{ mm/km}$ for $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$.

The geoid height differences calculated at the test network using least squares adjustment, depending on the geoid height of the Kandilli station, and the root mean square of the sample of system observations with $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ is $\pm 17.6 \text{ mm/km}$ and

with $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ is $\pm 3.6 \text{ mm/km}$. The maximum root mean square of the geoid heights after the adjustment process is $\pm 57.1 \text{ mm}$ for $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ and $\pm 54.6 \text{ mm}$ for $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$.

The results obtained at the main station and the test network indicate that zenith camera observations can be used to improve reliability of GPS/Levelling geoid, and to eliminate the systematic errors in Leveling networks. The results show that the system has the capability to contribute the modernization of the national vertical datum studies in Turkey.

As a result, in this dissertation through using various instrumentation a DZCS is designed and used to determine precise deflection of the vertical components. The results are compared with GPS/Levelling and global geopotential models, optimum observation and processing methods are investigated. The necessary hardware and software improvement suggestions also discussed as a result of this study. The improvement of the system is still an ongoing process.

This study was supported by TUBITAK Scientific and Technological Research Projects Funding Program with the grant number 111Y125.

1. GİRİŞ

Jeodezi'nin çalışma alanı, global jeodezi, ülke genelinde gerçekleştirilen ölçmeler ve düzlem ölçmeleri olarak bölümlere ayrılabilir [9]. Global jeodezi yeryuvarının şekli ve dış ağırlık kuvveti alanının belirlenmesi çalışmalarını kapsarken, ülke jeodezik ölçmeleri ulusal olarak kurulan jeodezik ve gravimetrik ağlarla ülke jeodezik altyapısının belirlenmesini ve güncellenmesini amaçlar. Bu temel ağlarda yeryüzünün eğriliği ve çekim alanı dikkate alınır. Topoğrafik, kadastral ve mühendislik ölçmelerinde ise yeryüzünün detayları elde edilir. Jeodezik ölçmeler, yatay konumun belirlenmesi için referans olarak elipsoidi kullanır.

Jeodezinin temel problemi ise; yeryuvarının ve diğer gök cisimlerinin şeklini ve dış ağırlık alanını zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlamak ve gerek yeryüzündeki gerekse uzaydaki ölçmelere dayalı olarak bir ortalama yer elipsoidini belirlemektir [9]. Antik dönemlerden başlayarak yerin şeklinin belirlenmesi çalışmaları jeodezinin güncel konuları arasındadır. Özellikle 16. yüzyılın son dönemlerinde alet teknolojilerinde ve ölçme yöntemlerinde yaşanan gelişmeler gözlem evlerinin kurulmasına ve jeodezik yöntemlerle meridyen yayı ölçmeleri çalışmalarının sıklaşmasına olanak sağlamıştır. Jeodezik ağ kavramını 1589 yılında ortaya atan astronom Tycho Brahe'nin ardından Johannes Kepler'in çalışmalarıyla, jeodezi ve astronomi için yeni bir çağ başlamıştır. İlk kez Hollandalı Snellius tarafından kurulan 33 üçgenden oluşan bir jeodezik ağ yardımıyla dolaylı olarak meridyen yayları ölçülmeye başlanmıştır [9].

Yeryuvarının şeklinin belirlenmesi çalışmalarında astro-jeodezik yöntemleri, gravimetrik teknikler izlemiştir. En küçük kareler yönteminin geliştirilmesi jeodezik astronominin uygulama alanını genişletmiş, meridyen, paralel daire ve meridyene göre eğik yayların ölçü olarak kullanıldığı dengeleme modelleriyle elipsoid parametreleri belirlenmiştir. Bouger tarafından 1745 yılında gravitenin yüksekliğe bağımlılığı gözlemlenince, ölçülerin bir referans yüzeye indirgenmesi tartışılmaya başlanmıştır.

Carl Frederich Gauss ve George Green tarafından fiziksel jeodezinin sınır değer probleminin çözümü üzerine çalışmalar sürerken Gauss, deniz seviyesindeki eş

potansiyel yüzeyi, yeryuvarının şekli olarak dikkate alınmasını önermiştir. J. F. Listing daha sonra 1873 yılında bu şekli "geoit" olarak adlandırmıştır. Stokes dış gravite alanından yerin içindeki kütle dağılımını belirlemeye yarayan integral formülü ile gravite değerlerinden geoidin hesaplanmasını geliştirmiştir.

19. yüzyıl başlarında yeryüzüne en uygun elipsoidin boyutlarını belirlemek için Gauss'un yürüttüğü yerin değişik kesimlerinde yapılan astro-jeodezik ölçülerin değerlendirilmesinde, astronomik değerlerle jeodezik değerler arasında ölçme hataları ile açıklanamayan farklar ortaya çıkmıştır. Daha sonraları çekül sapmaları olarak adlandırılan bu farkların Gauss tarafından (1828) belirlenmesiyle geoit kavramı olarak ilk kez açıklanmıştır. Yine ilk kez Helmert tarafından çekül sapmaları dikkate alınarak tanımlanan referans elipsoidine düzeltmeler uygulanmıştır.

Geoit, her noktasında çekül doğrultularının dik olduğu yüzeydir ve denge halindeki ortalama deniz yüzeyine yaklaşıp. Geoit, merkezkaç kuvvetlerinin ve kütlelerin birbirini çekim kuvvetlerinin etkisi ile şekillenir. Kitlelerin gelişigüzel dağılımı olmaları nedeniyle geoit, matematiksel olarak ancak yaklaşıklıkla ifade edilebilir [3].

Geoit belirlemedeki amaç, düzensiz ondülasyonlu olan bu yüzeyin belirli noktalarda referans elipsoidinden, onun normali doğrultusundaki N uzaklığının bulunarak eşdeğerli ondülasyon eğrileri ile temsil edilmesidir [3]. Bir noktadaki elipsoit yüzeyi ile geoit arasındaki N uzaklığına o noktadaki "geoit yüksekliği" denir.

1.1 Global Ölçekte Sayısal Zenit Kamera Sistemleri ile Gerçekleştirilen Astro-Jeodezik Çalışmalar

Astro-jeodezik gözlemler, 1900'lü yılların başlarından itibaren 1990'lı yıllara kadar olan süreçte kutup noktasının koordinatları ve zaman bilgisini içeren yer dönme parametrelerinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Optik mekanik yöntemlerle International Latitude Service (ILS) ve Bureau International de l'Heure (BIH) zenit teleskopları 1950'li yıllara kadar kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda Uluslararası Kutup Hareketleri Servisi (International Polar Motion Service (IPMS)) sabit olarak konumlandırılmış Photographic Zenith Tube'ler ile yer dönme parametrelerinin belirlenmesi otomatize hale getirilmiştir. Ancak uzay jeodezisi tekniklerinin geliştirilmesi ve yaygınlaşması ile bu ölçmeler Çok Uzun Bazlı

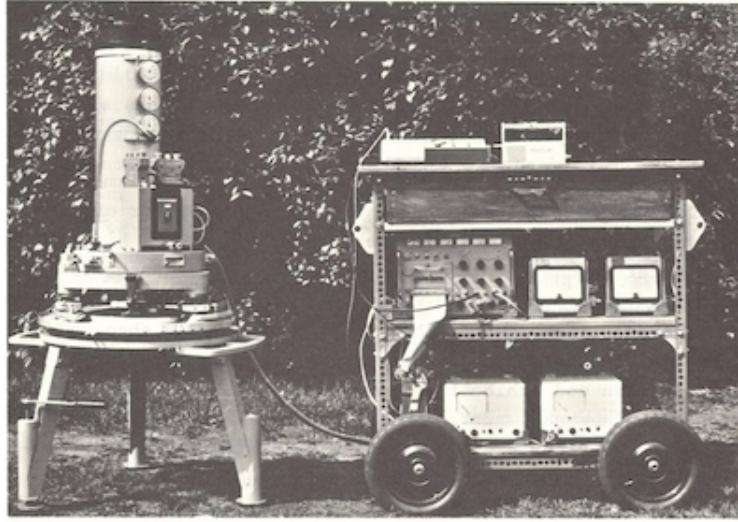
İnterferometri (Very Long Baseline Interferometry (VLBI)), Uydulara Lazer Ölçmeleri (Satellite Laser Ranging (SLR)), Aya Lazer Ölçmeleri (Lunar Laser Ranging (LLR)) ve GPS tekniğinin birlikte kullanılması ile elde edilmeye başlanmış ve bu yöntemler astro-jeodezik ölçmelerin yerini almıştır.

Gravite vektörünün doğrultusunu tanımlayan çekül sapmalarının, yerin gravite alanı ile ilgili bağımsız ölçü kümesi sağlaması, astro-jeodezik yöntemlerin özellikle Avrupa genelinde yoğun bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Astro-jeodezik amaçlı ölçmelerde DKM3A, T4 ve Astrolablarla gerçekleştirilen gözlemler ile Helmert tarafından 1913 yılında kuzey Almanya Harz Dağlarında, 1968 yılında Heitz tarafından Almanya genelinde ve 1971 yılında Bomford tarafından Avrupa'da astro-jeodezik geoit belirlenmiştir. Klasik optik-mekanik ölçme donanımları ile gerçekleştirilen bu gözlemlerde deneyimli gözlemciler ve uzun değerlendirme süreçleri gerekmektedir.

Almanya'da ilk olarak taşınabilir Zenit Kamera sistemi TZK1'in geliştirilmesi ile astro-jeodezik ölçmeler yeniden hız kazanmıştır. TZK1, 800 mm odak uzaklığına ve 16 cm çapa sahip bir optik sisteme entegre edilmiş bir fotoğraf makinesinden oluşuyordu. Ayrıca TZK1'e, sistemi düşey doğrultuda yönlendirmek amacıyla iki adet eğim sensörü entegre edilmişti (Şekil 1.1). Hannover Jeodezi Enstitüsünde geliştirilmiş bu sistem daha sonra Hannover'ın yaklaşık 100 km güney doğusunda bulunan Goslar yakınlarındaki bir test ağında denenmiş ve sistemin prezisyonu ortalama $\pm 1''$ olarak yayınlanmıştır [10].

Astronomik koordinatların belirlenmesi amacıyla geliştirilen bu sistemler daha gelişmiş donanımlarla güncellenmiş ve TZK2 adıyla Almanya-Hannover'da ve TZK3 adıyla İsviçre ETH Zürih'teki çalışmalarda kullanılmaya başlanmıştır. TZK2 ve TZK3 aynı donanımları kullanan ikiz sistemler olarak tasarlanmıştır. Bu sistemlerle Avrupa'da 433 istasyonda [11] çekül sapmaları belirlenmiş ve ulaşılan doğruluklar $\pm 0.3''$ ile $\pm 0.5''$ olarak hesaplanmıştır [12].

CCD (Charged Coupled Devices) dedektörlerinin 1970'li yıllarda icadının ardından astronomi ve astrometride büyük bir gelişme sağlanmıştır. Jeodezik Astronomi de optik ve analog ekipmanlarını CCD'ler ile yenileyerek bu değişimden etkilenmiştir. Analog sistemler CCD kameralarla ve sayısal eğim sensörleri ile donatılarak sayısal zenit kamera sistemlerine dönüştürülmüştür.

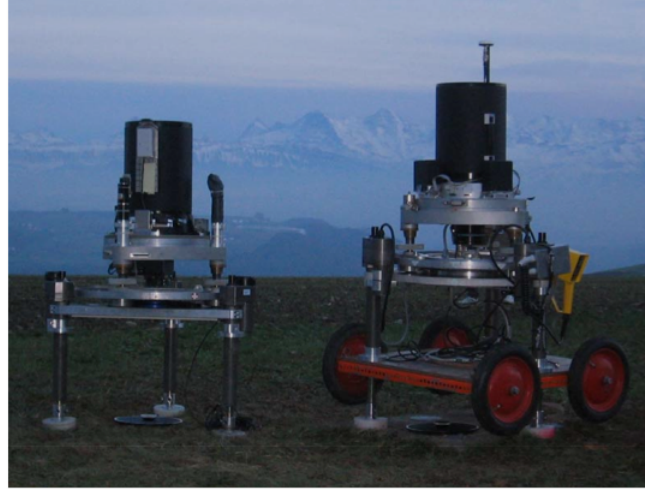


Şekil 1.1 : Taşınabilir Zenit Kamera Sistemi - TZK1 [10].

Almanya Münih Teknik Üniversitesi'nde 1994 yılında, [13] tarafından DGPS/CCD Yıldız Kamera Sistemi geliştirilmiş ve $\pm 0.2''$ - $\pm 0.4''$ doğruluklara ulaşılmış, 1996 yılında ise Viyana'da [14–17] taşınabilir küçük boyutlarda bir zenit kamera sistemi üretilmiş ve sonraki yıllarda geliştirilen sistem ile astronomik koordinatlar $\pm 1''$ doğrulukla elde edilebilmiştir.

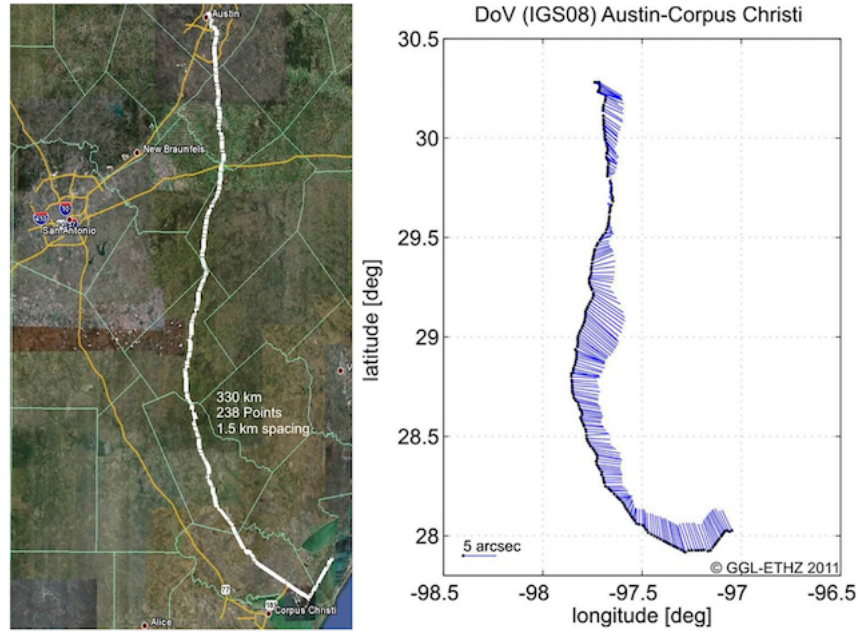
Almanya ve Viyana'daki çalışmaların sonuçları sonraki yıllarda geliştirilen sayısal zenit kamera sistemlerine öncülük etmiştir. Almanya'da [18] tarafından geliştirilen sistem beklenen sonuçları vermezken, [19] tarafından geliştirilen sistem ile astronomik koordinatlar $\pm 0.3''$ doğrulukla belirlenebilmiştir. Almanya Hannover Jeodezi Enstitüsü [6] ve İsviçre Jeodezi ve Jeodinamik Laboratuvarı'nın [20] bünyesinde sürdürülen çalışmalarda TZK2 ve TZK3 analog zenit kameraları CCD algılayıcılar ile donatılarak sayısal zenit kamera sistemlerine dönüştürülmüştür. TZK2-D ve DIADEM (Şekil 1.2) olarak adlandırılan sayısal zenit kamera sistemleri Avrupa genelinde yerel gravite alanı çalışmalarında kullanılmıştır. TZK2-D [6] ve DIADEM [20, 21], 2003 yılında Avrupa Birleştirilmiş Jeodezik Ağı (European Combined Geodetic Network - (ECGN)) çalışması kapsamındaki gözlemlerde kullanılmıştır.

Zenit kamera sistemlerinin başarısı, farklı sistemlerin de geliştirilmesini cesaretlendirmiştir. Avrupa genelinde, Viyana [16], Polonya [22, 23], Sırbistan [7], Letonya [24, 25] zenit kameraları geliştirilmiş ve son olarak da [26] tarafından Çin'in zenit kamera sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 1.2 : TZK2-D ve DIADEM Sayısal zenit kamera sistemleri.

Hannover Jeodezi Enstitüsü (IfE Hannover) ve ETH Zürih Jeodezi ve Jeodinamik Laboratuvarı (ETH GGL) 2000’li yılların başından itibaren sayısal zenit kamera sistemleri ile pek çok uygulama gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen bu sayısal zenit kamera sistemleri 2003 yılından itibaren Avrupa genelinde yerel ve bölgesel cm ve mm doğruluklarında geoitler belirleyebilmek için yaklaşık 900 yeni istasyonda çekül sapması verisi üretmiştir [27].



Şekil 1.3 : Sayısal zenit kamera sistemi ile gerçekleştirilmiş bir uygulama [1].

Hannover (Almanya) ve ETH Zürih (İsviçre)  niversiteleri, İsviçre (101 sayısal ve 433 analog gözlem), Kuzey Almanya ve Hollanda (175 gözlem), Harz dağları (120 gözlem), Bavyera Alpleri (182 gözlem), Portekiz (17 gözlem) ve Yunanistan (28 gözlem) gibi Avrupa  lkelerinde pek çok astro-jeodezik gözlem

gerçekleştirmiştir. Analog gözlemlerin doğrulukları $0.3'' - 0.5''$ arasında verilirken, sayısal zenit kameraların doğrulukları $0.1''$ olarak yayınlanmıştır [28]. Bir diğer SZKS çalışması, 2011 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde Teksas eyaletinde belirlenen 330 km uzunluğunda bir profil boyunca gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.3). Geoit eğiminin belirlenmesi amacıyla sürdürülen Geoid Slope Validation Survey isimli proje kapsamında 228 istasyonda çekül sapmaları belirlenmiş ve bu gözlemlerin doğruluğu $0.1'' - 0.05''$ olarak yayınlanmıştır [1].

Geoit modelleri değerlendirilirken astro-jeodezik ölçülerin ağırlığının gravimetrik ölçülere göre daha fazla olması gerektiği tartışma konusudur. [17]'e göre çekül sapmaları Jeolojik değişimlerden gravite anomalileri ya da gradyenlerine oranla daha az etkilendiğinden yaklaşık 30:1 oranında daha fazla ağırlıklandırılmalıdır.

Geoit belirleme çalışmalarında cm doğruluk amaçlandığında 1000 km^2 'lik bir alanda 6-10 astro-jeodezik nokta yeterli oluyorken, aynı doğruluğa ulaşmak için 100-500 gravite noktasının planlanması gerektiği ifade edilmektedir [16, 17, 29].

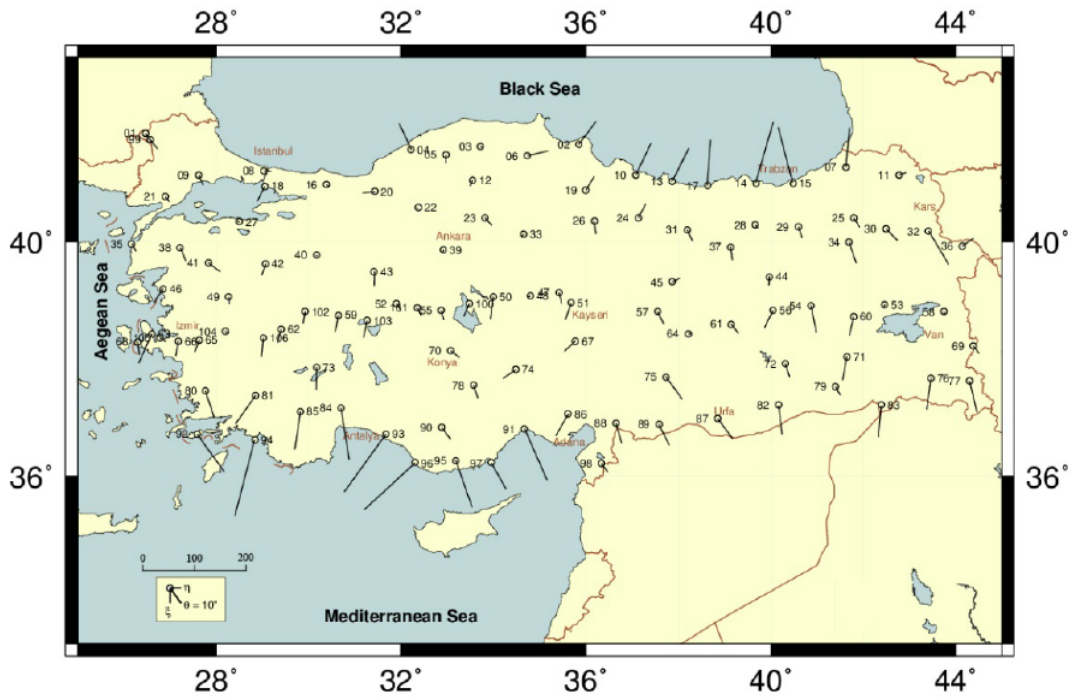
1.2 Türkiye'de Gerçekleştirilen Astro-Jeodezik Çalışmalar

Türkiye'de, Ulusal Nirengi Ağının yönlendirilmesi amacıyla, Laplace noktalarındaki astronomik gözlemlere 1942 yılında başlanmıştır. Nirengi ağının poligonlarının kesişme bölgeleri içinde, 1953 yılına kadar 98 adet I. derece noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır. Bu gözlemler, nirengi ağının 1954 yılında yapılan dengelenmesinde kullanılmıştır.

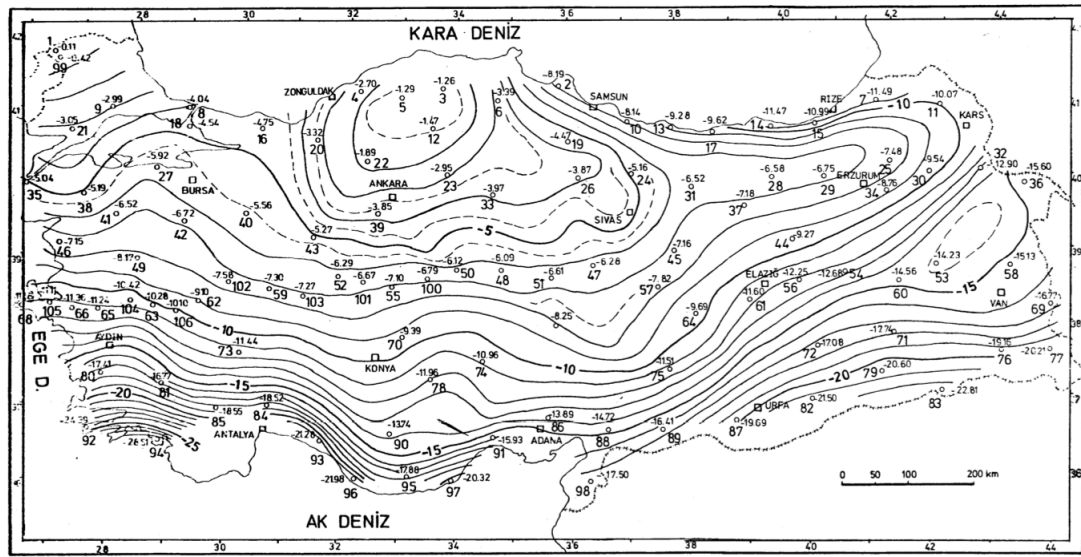
Daha sonra, 1961 yılına kadar astro-jeodezik geoit kesitinin belirlenmesi amacıyla, 19 noktada astronomik enlem ve boylam, 2 noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır.

1977-1979 yılları arasında 30 noktada, 1979-1990 yılları arasında 131 noktada astronomik enlem ve boylam ve 30 noktada astronomik enlem, boylam ve azimut gözlemleri yapılmıştır.

Türkiye'de astronomik gözlemleri kullanarak, astro-jeodezik geoit belirleme çalışmaları 1970'li yıllarda başlamıştır. [2], çalışmasında 106 noktadaki astro-jeodezik çekül sapmasını kullanarak (Şekil 1.4) 1976 Türkiye Astro-jeodezik Geoidini belirlemiştir (Şekil 1.5).



Şekil 1.4 : Astro-jeodezik çekül sapmaları [2]'dan güncellenmiştir.

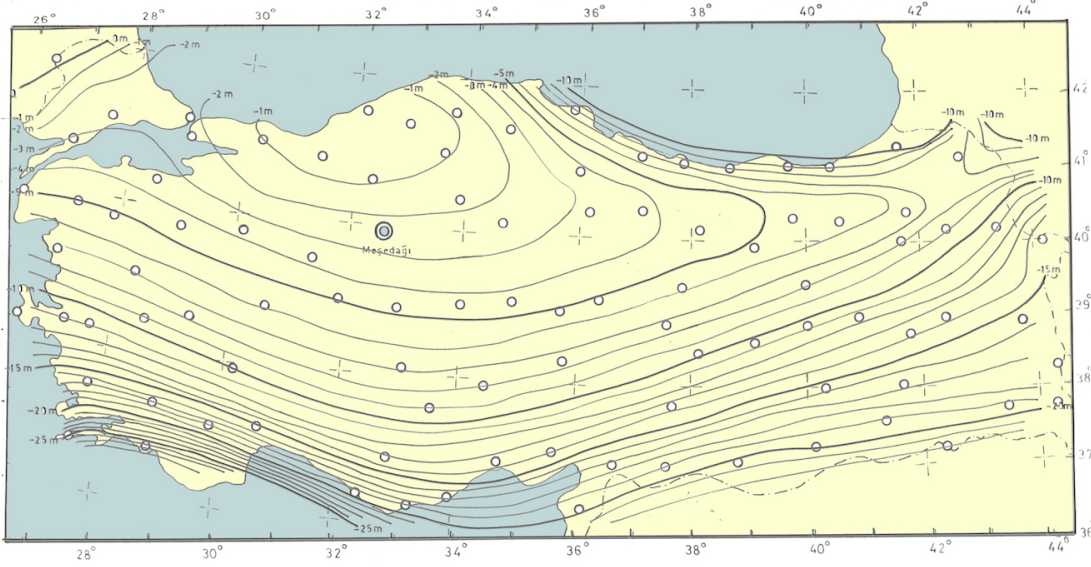


Şekil 1.5 : 1976 Türkiye Geoidi [2, 3].

Prof. Dr. Tevfik Ayan tarafından hesaplanan 1976 Türkiye Geoidi'nde [2], 1950 Avrupa Datumu esas alınmış, yalnızca astro-jeodezik çekül sapmalarından hesaplanmış, çekül sapması noktalarındaki geoid yükseklikleri, üç ayrı model ile ağın dengeleme sonuçlarının ortalamaları alınarak elde edilmiş ve eşdeğerli ondülasyon eğrilerinin hesaplanmasında kübik parabol enterpolasyonu kullanılmıştır. 1976 Türkiye Geoidi önceden hesaplanmış geoidlerle karşılaştırıldığında en iyi uyuşumun Levallouis-Monge (1975 Avrupa Geoidi) ile olduğu ve bu geoidin noktalarından olan

yükseklik farklarının çoğunlukla 1 m'nin altında olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada geoit belirleme doğruluğu yaklaşık $\pm 1.5 m$ 'dir.

Ülkemizde astro-jeodezik geoit belirleme çalışmaları Prof. Dr. Onur Gürkan tarafından sürdürülmüştür [4]. 98 adet Laplace noktasındaki astro-jeodezik çekül sapmalarını kullanılarak, iki değişkenli polinom yardımıyla 1978 Türkiye Geoidini belirlenmiştir (Şekil 1.6). Bu geoit için bir doğruluk değeri verilmemiştir.

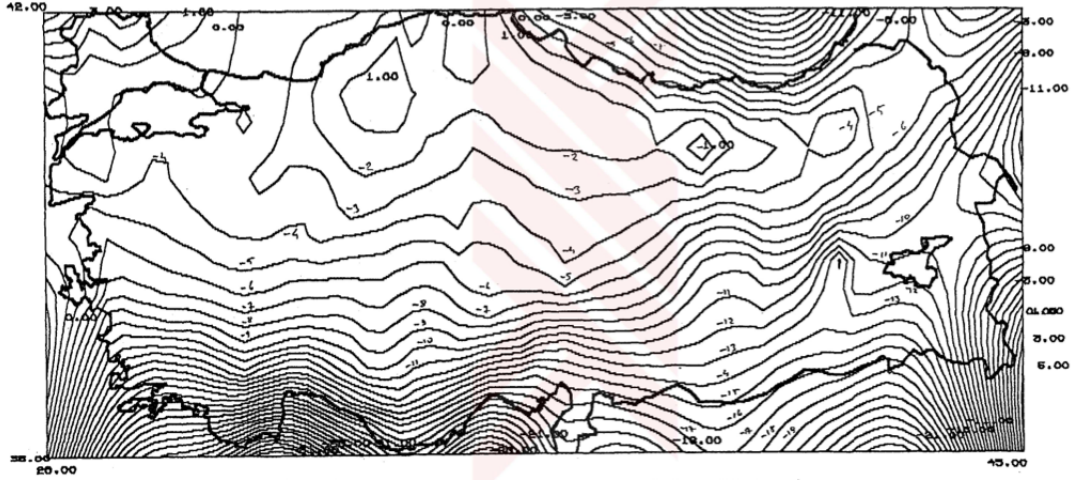


Şekil 1.6 : 1978 Türkiye Geoidi [4].

Ülkemizde astro-jeodezik geoit belirleme çalışmaları 1990'lı yıllarda da devam etmiştir. Ülke genelindeki 200 noktada çekül sapması bileşenleri ve astro-gravimetrik nivelman yöntemiyle elde edilmiş veriler kullanılarak Türkiye Astro-jeodezik Geoidi (TAG-94), 1994 yılında hesaplanmıştır [5].

Astro-jeodezik geoit belirlemek için ülke genelinde doğruluğu düşük 23 astrolab ölçüsünün dahil edildiği 297 ölçü ile ve dahil edilmediği 274 nokta ile astro-jeodezik geoit belirlenmiş ve 278 adet gravite ölçüsünden hesaplanan çekül sapmaları ile hesaplanan astro-gravimetrik geoit ile karşılaştırılmıştır [5]. Şekil 1.7, [5] kapsamında hesaplanan Türkiye astro-jeodezik geoit haritasını göstermektedir.

Bu geoidin hesaplanmasında elde edilen doğruluklar incelendiğinde Türkiye'nin sınırlarına doğru, datum noktası olan Meşedağ noktasından uzaklaştıkça geoit yüksekliklerine ait standart sapmaların arttığı gözlemlenmiş, ayrıca Güneydoğu



Şekil 1.7 : Türkiye Astro-jeodezik Geoidi - 1994 [5].

Anadolu ve Akdeniz bölgelerinde ölçü sayısının yetersizliği nedeniyle $\pm 1.5 m$ 'ye ulaşan büyüklükte standart sapmalar elde edilmiştir.

Bir ulusal “cm” geoidinin belirlenmesi çalışmalarına devam edilmektedir. Bu çerçevede astro-jeodezik çekül sapmalarının; doğrudan bir ulusal astro-jeodezik geoidini belirlemek ve diğer gözlemlerle (gravite, GPS/Niv, vb.) entegrasyonu ile ulusal geoid belirleme çalışmalarında kullanılması çalışmaları desteklenmektedir [30].

Bu tez çalışmasının amacı; yüksek prezisyonlu çekül sapmalarının elde edilmesi için Sayısal Zenit Kamera Sistemini geliştirmek, bu sistem ile çekül sapmalarını belirlemek, sonuçları global jeopotansiyel modellerle ve GPS/Niv geoidiyle karşılaştırarak astro-jeodezik teknolojinin alt yapısını hazırlamak ve uygulama ile sonuçların kullanılabilirliğini kanıtlama olarak belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında yüksek prezisyonlu çekül sapmalarının elde edilmesi için teleskop, CCD kamera, eğim ölçerler, GPS donanımı ve sistem kontrolü için gerekli bilgisayar konfigürasyonları kullanılarak bir sayısal zenit kamera sistemi tasarlanmış ve test ölçmeleri gerçekleştirilmiştir.

2. ÇEKÜL SAPMASININ BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ALTYAPISININ DEĞERLENDİRİLMESİ

2.1 Çekül Sapmasının Bilimsel Esasları ve Güncel Uygulamaları

2.1.1 Jeodezi’de koordinat sistemleri ve bu sistemlerin hareketleri

Jeodezik Astronominin ilk dönemlerinde, yeryuvarının dönme ekseninin hareketini güneş ve ayın çekim etkisi ile hareket eden rijit yeryuvarı modeli ile hesaplamak yeterliydi. Ancak günümüzde elastik model, sıvı çekirdekli model gibi yerin rijit olmayan davranışını tanımlamak için daha gerçekçi modeller kullanılmaktadır. Aya lazer ile uzunluk ölçmeleri (LLR), uydulara lazerle uzunluk ölçmeleri (SLR), çok uzun bazlı enterforometri (VLBI) ve global konum belirleme sistemleri (GNSS) uygulamalarında yüksek prezisyonlu koordinat sistemlerinin tanımlanması gereklidir [31].

Jeodezide üç temel koordinat sistemi kullanılır. Bunlar; yersel (earth-fixed) koordinat sistemi, göksel (space-fixed) koordinat sistemi ve yörüngesel (orbital) koordinat sistemidir. Yersel koordinatlar yeryüzündeki noktaların, göksel koordinatlar da gök cisimlerinin konumlarını tanımlamak için kullanılır. Yörüngesel koordinat sistemleri ise yeryuvarı çevresinde yörüngelenen uyduların konumlarını belirlemek için kullanılırlar. Ayrı bir koordinat sistemi olarak tanımlanan Zaman Sistemleri’nden ise diğer koordinat sistemlerini birbirine bağlamak için yararlanılır.

Sayısal zenit kamera sistemleri ile elde edilen görüntülerin çözülmesinde, rektasansiyon koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Rektasansiyon sistemi temel göksel koordinat sistemi olarak alınmaktadır ve bu sistemden diğer sistemlere dönüşüm yapılmaktadır.

Konvansiyonel göksel ve yersel koordinat sistemleri; 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. Uluslararası Göksel Referans Sistemi/Çerçevesi (International Reference System/Frame - ICRS/ICRF) ve Uluslararası Yersel Referans Sistemi/Çerçevesi (International Terrestrial Reference System/Frame - ITRS/ITRF) arasındaki dönüşüm yer dönme parametreleri ile gerçekleştirilir. Bu sistemlerin gerçekleştirilmesi ve güncellenmesi ise Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS) tarafından gerçekleştirilir [32].

Bunun yanında, görelilik etkisi günümüz jeodezik ölçme doğruluklarının belirleyebileceği büyüklüktedir. Bu sebeple elektromanyetik sinyaller ile gerçekleştirilen gözlemler, yüksek hızlara sahip referans sistemleri ve büyük kütlelere sahip gök cisimlerinin komşuluklarında yapılan gözlemlerde görelilik etkisinin dikkate alınması gerekir. Einstein'ın genel görelilik teorisine göre, çekim alanı etkisi dört boyutlu uzay-zaman koordinat sisteminde oluşturulan modellerde dikkate alınmalıdır. Günümüzde genel görelilik teorisi, referans sistemlerinin tanımlanmasında kullanılmakta ve uydu yörüngeleri ile uzay jeodezisi gözlemleri görelilik dikkate alınarak modellenmektedir.

2.1.1.1 Göksel koordinatlar, uluslararası göksel referans sistemleri ve çerçeveleri

Göksel referans sistemleri belirli sayıda gök cismine ait konum bilgisi ile tanımlanır. Sistemin orijini güneş sisteminin ağırlık merkezi, eksenleri ise ekvator düzlemi ve ekliptik ya da ekstrasgalaktik radyo kaynakları ile belirlidir. Gök cisimlerine ait koordinatlar, rektasansiyon ve deklinasyon olarak belli bir epok için tanımlanmıştır. Geçmişte göksel referans çerçevelerinin gerçekleştirilmesinde, 7.5^{mag} görünen parlaklığa kadar olan 1535 yıldıza ait ortalama koordinatlar (α , δ) ile $0.01'' - 0.03''$ prezisyonda ve J2000.0 epokunda tanımlanan FK5 (Fundamental Catalog) yıldız kataloğu kullanılmıştır. Daha sonraları daha sönük yıldızlar ile prezisyon artırılrsa da yer bazlı gözlem tekniklerinin yetersizliği nedeniyle göksel referans sistemlerinin gerçekleştirilmesinde ulaşılan doğruluklarda iyileşme kaydedilememiştir.

Uzay bazlı astronomik gözlemlerinin hayata geçirilmesinin ardından referans sistemlerinin gerçekleştirilmesinde ulaşılan doğruluklar dramatik olarak artmıştır. İlk olarak Avrupa Uzay Ajansı (European Space Agency - ESA) tarafından planlanan Hipparcos astrometri görevi, tüm gökyüzünü kapsayan ve parlaklıkları 11^{mag} 'e kadar ulaşan 120000 yıldız ile referans çerçevesi, J2000.0 epoku için $0.005'' - 0.01''$

doğruluğuna ulaşmıştır [33]. Referans çerçevelerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan gök cisimlerine ait konum bilgilerini düzenleyen katalogların güncellenmesi, ek gözlemlerle günümüzde de devam etmektedir. ESA tarafından 2013 yılı sonunda fırlatılan GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) görevi ile parlaklıkları 20^{mag} değerine ulaşan bir milyar yıldızın konum bilgisi hesaplanmış ve $0.020''$ doğruluklara ulaşılmıştır. NASA tarafından 2015 yılında planlanan SIM (Space Interferometry Mission) görevi ile $0.001''$ seviyesinde doğruluklar amaçlanmaktadır.

Uydu jeodezisi ve VLBI tekniklerindeki gelişmeler, yüksek doğruluklu ve çözünürlükteki zaman serilerinin üretimine olanak sağlamıştır. Bu nedenle IAU, referans sistemlerini *dört boyutlu* olarak değerlendirme ve bunlar arasındaki dönüşümleri yeniden tanımlama gereği duymuştur. Böylelikle uluslararası göksel referans sistemleri genel görelilik teorisine göre tanımlanmaya başlanmıştır [34,35].

ICRS, Barisentrik Göksel Koordinat Sistemi olarak tanımlanmış, orijini güneş sisteminin ağırlık merkezinde ve zaman koordinatı barisentrik koordinatlandırılmış zamandır (TCB). ICRS kinematik olarak ölçülebilen öz hareketi olmayan ve dünyamızdan çok uzakta bulunan (1.5 milyar ışık yılı) ekstragalaktik radyo kaynaklarına göre sabit olarak kabul edilir.

Göksel ve yersel koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm Jeosentrik Göksel Referans Sistemi (Geocentric Celestial Reference System - GCRS) ile gerçekleştirilir. Barisentrik sistemden jeosentrik sisteme geçiş için yıllık aberasyon ve yıllık paralaksın dikkate alınması gereklidir. BCRS ile GCRS arasındaki ilişki, yer küreye ait konum, hız ve ivme bilgileri ile geoide ait ağırlık kuvveti potansiyelinin de dahil edildiği görelilik dönüşümü aracılığıyla (relativity transformation) yapılır. GCRS yerin merkezi ile birlikte döner ve BCRS'ye göre sabit olarak alınır.

Göksel referans sistemlerinden yersel referans sistemlerine dönüşüm yapılırken, referans kutbun dönme eksenini etrafındaki değişimleri dikkate alınmalıdır. Bu transformasyon için IAU2000 çözümü, bir ortalama referans sistemi tanımlamıştır. Ortalama Göksel Referans Sistemi (Celestial Intermediate Reference System - CIRS) presesyon ve Nütasyona ait zamana bağlı dönme parametrelerini içerir [36]. CIRS, belirli bir epokta, ortalama ekvator, ortalama kutup ve ortalama orijin ile tanımlıdır. Bu sistemde gök cisimlerinin koordinatları, ortalama rektasansiyon ve deklinasyon ile

tanımlanır. Ortalama kutbun hareketleri IAU2000/2006 presesyon-nütasyon modelleri ile gerçekleşir ve ortalama kutup birim vektörünün X_P ve Y_P bileşenleri ile ifade edilir. nütasyon ya da gök kutbu ofsetleri olarak adlandırılan zamana bağlı ($\Delta X, \Delta Y$) büyüklükleri ise IERS tarafından VLBI, LLR ve GPS gözlemleri ile sürekli olarak hesaplanır ve yayınlanır. ICRS, IERS tarafından kurulan ve güncellenen ICRF ile gerçekleşir.

Presesyon ve Nütasyon

Güneş'in, Ay'ın ve güneş sistemindeki diğer gezegenlerin çekimsel etkileri yerin dönme eksenini üzerinde karmaşık hareketlere neden olmaktadır. Bu hareketler pratik nedenlerle iki parçaya bölünerek incelenirler. Bu hareketlerden ilki aynı yönde artan Lunisolar presesyon, ikincisi ise periyodik değişim olan nütasyondur. Lunisolar presesyon, gök kutbunun ekliptik kutbu etrafında, ekliptik düzlemine paralel, yarıçapı ε (ortalama ekliptik eğimi = $23^{\circ} 26' 21.4''$) olan bir daire çizmesine neden olur. Presesyonun etkisinin büyük bir bölümü ay ve güneşin çekiminden kaynaklanırken (yaklaşık $50''/\text{yıl}$), küçük bir parçası da diğer gezegenlerin çekimlerinden ortaya çıkar ($0.12''/\text{yıl}$).

Yerkürenin güneş etrafında, Ay'ın da yerküre etrafındaki yörüngesi ve bunun sonucu olarak bu cisimlerin neden oldukları dünya ekseninde dönme momentindeki değişimden ortaya çıkan nütasyon hareketinin terimleri $1/2$ yıllık ve $1/2$ aylık periyotlu terimlerdir. Bu terimlere kısa periyotlu nütasyon terimleri adı verilir. Ay'ın yörüngesinin ekliptiğe göre yaklaşık 5° 'lik eğimi sonucunda, nütasyonun 18.6 yıllık periyotlu asal terimleri ile ifade edilen hareket oluşur. Lunisolar presesyon sonucu, ekliptik eğiminde değişiklik olmazken nütasyon hareketi ekliptik eğimini değiştirir. Nütasyon nedeniyle gök kutbu presesyon dairesi boyunca değişik periyotlarla yüklü periyodik bir eğri çizer ve presesyon dairesi bu eğri için simetri çizgisidir. Presesyon ve nütasyon ekliptik kutbunu etkilemez ancak gök kutbu hareketine yol açarlar. Gezegenlerin ise ekliptik düzleminin konumunu değiştirme etkileri vardır. Gezegenlerin yerkürenin yörüngesine etkileri sonucu ekliptik kutbu, ortalama yörünge kutbu etrafında gezegenler presesyonu adı verilen bir presesyon hareketi yapar.

Böylece, gök kutbu ve ekliptik kutbunun uzaydaki konumları değişmekte ve bunun sonucu olarak da ilkbahar noktası ve bu noktalara göre tanımlanmış koordinat sistemlerinde noktaların koordinatları zamana bağlı değişmektedir. Bu nedenle belli bir zaman için bulunan koordinatlardan başka bir epok için koordinatlar elde edilecekse, bu iki zaman aralığındaki değişimin hesaplanması gerekir [37].

Presesyon ve nütasyon kaynaklı etkiler Uluslararası Astronomi Birliği tarafından geliştiren modellerle kestirilmektedir. Günümüzde LLR ve VLBI ölçmeleri presesyon ve nütasyon modellerine katkı sağlamaktadır. IAU2000/2006 presesyon-nütasyon modelleri [38] tarafından yayınlanan P03 presesyon teorisine dayanmaktadır ve IAU2000A/2000B nütasyon modelleri [39] tarafından 1365 trigonometrik terim kullanılarak hesaplanmıştır. Model parametreleri jeofizik modellerin VLBI ile elde edilen presesyon-nütasyon verisine uydurulması ile oluşturulmuştur. IAU2000A nütasyon modeli bir günlük çözümler için $0.0001'' - 0.0002''$ prezisyon verirken, bu modelin kısaltılmış versiyonu olan IAU2000B nütasyon modelinin prezisyonu $0.001''$ olarak verilmektedir [40].

Sayısal zenit kamera sistemi hesaplarında NOVAS kütüphaneleri kapsamında IAU2006 presesyon modeli ve IAU2000A nütasyon modeli kullanılmıştır.

2.1.1.2 Göksel temel koordinat sistemleri

Göksel koordinat sistemlerinin tanımlanmasında "Gök Küresi" temel yaklaşımı kullanılır. Merkezi dünyanın merkezinde, yarıçapı sonsuz uzaklıkta olan "Gök Küre", gök cisimlerinin kutupsal koordinatlarının tanımlanmasında birim küre olarak alınır. Gök cisimleri, dünyanın ağırlık merkezinden bu cisimlere olan doğrultuların gök küreyi deldiği noktalar ile temsil edilirler.

Gözlemcinin bulunduğu bir yer noktası da gök küresinde, bu noktadaki çekül doğrultusunun ters yönde gök küresini deldiği nokta olan Zenit Noktası (başucu noktası) ile temsil edilir. Çekül doğrultusunun gök küresini deldiği nokta ise Nadir Noktası'dır [37].

Yeryüzünde bir noktaya ait astronomik koordinatların elde edilmesi için, yeryüzündeki gözlemcinin konumuna göre gök cisimlerine doğrultu gözlemleri yapılır ve bu gözlemler gök cisminin bilinen koordinatları ile ilişkilendirilir. Gök koordinat sisteminde, gök cisimlerinin (yıldızlar ve kuasarlar) gözlemciden çok uzakta

bulunması nedeniyle tanımlı büyüklükler, doğrultular ve azimutlardır. Bu nedenle ilgilenilen cisimlerin koordinat doğrultuları, sonsuz yarıçaplı bir küre üzerindeki açılal izdüşümleri ile tanımlanırlar. Kürenin merkezi ise güneş sisteminin merkezindedir. Kaldı ki küre yarıçapının büyüklüğü nedeniyle güneş sistemindeki herhangi bir nokta ile de (yerin ağırlık merkezi gibi) tanımlanabilir. Hesaplarda istenen prezisyona göre sistemler arası dönüşüm gerektiğinde gerçekleştirilebilir. Gök Küre, zamana bağlı hareketlerin olmadığı, genel görelilik ilkelerinin ihmal edildiği "inersiyal bir sistem" (orijini ötelenen, eksenleri dönmeyen sistem) olarak tanımlanır.

Gök koordinat sistemleri, astronomik gözlemlerin gerçekleştirildiği "Ufuk Koordinat Sistemi", gök cisimlerinin koordinatlarının tanımlandığı "Ekvator (Rektasansiyon) Koordinat Sistemi" ve bu iki sistemin ilişkisi kuran "Saat Açısı Sistemi" olarak detaylandırılabilir.

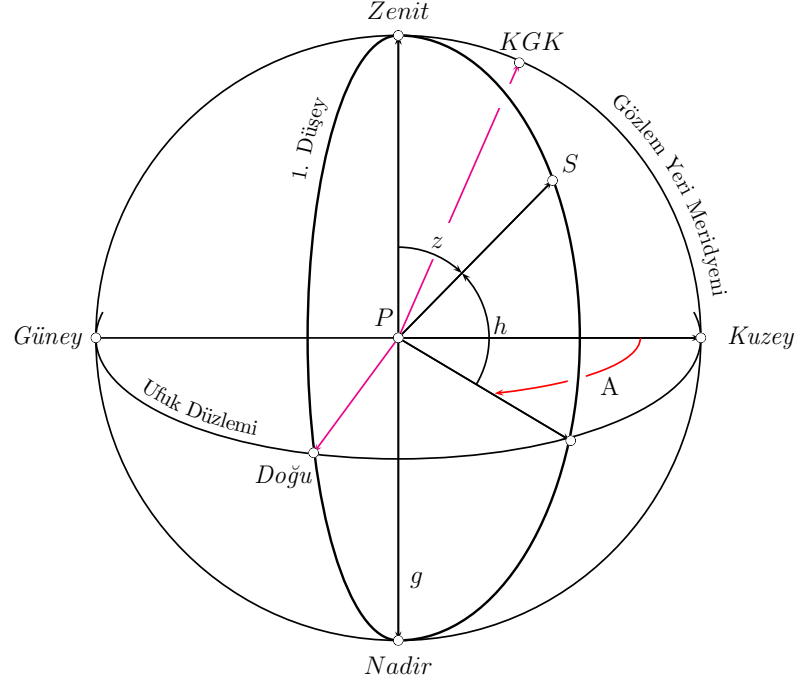
Ufuk koordinat sistemi

Ufuk koordinat sisteminde koordinatlar gök küre üzerinde, yerel gravite doğrultusu ve yerin dönme eksenini ile tanımlanır. Bu sistemde başlangıç daireleri bir gözlem yerinin meridyeni, asal daire ise çekül doğrultusuna dik büyük daire "ufuk daireleri"dir. Meridyen kuzey, güney noktaları olmak üzere ufuk dairelerini iki noktada keser. Güney doğrultusunda $+x$ eksenini, zenit doğrultusunda ise $+z$ eksenini tanımlıdır.

Ufuk dairelerine dik olan ve "düşey daire" olarak adlandırılan bütün daireler zenit noktasından geçer ve çekül doğrultusunu içine alırlar. Ufuk koordinat sisteminde bir gök cisminin ait (anlık) koordinatlar *zenit uzaklığı* (z) ve *gök cisminin astronomik azimut açısı* ya da *astronomik azimut* (A) olarak adlandırılır.

Astronomik azimut A , gök cisminin geçen düşey dairenin, ufuk daireleri üzerinde güneyden başlayarak çekül doğrultusunda ($-z$ eksenini doğrultusu) bakıldığında saat ibresi yönünde yaptığı açıdır. Zenit uzaklığı z ise, gök cisminin düşey daire üzerinde zenit noktasına uzaklığıdır. Azimut 0° ile 360° arasında, zenit uzaklığı ise 0° ile 180° arasında değer alır. Zenit uzaklığı yerine gök cisminin yüksekliği h de $h + z = 90^\circ$ bağıntısı ile tanımlıdır.

Ufuk koordinat sistemi yer-sabit bir sistemdir ve gök cisimlerinin koordinatları yer-kürenin dönüşünün bir fonksiyonu olarak değişir. Jeosentrik ufuk koordinat sisteminde azimut ve zenit uzaklığının doğrudan ölçülmesi, yerin merkezinde gözlem



Şekil 2.1 : Ufuk Koordinat Sistemi.

yapılamayacağından olanaklı değildir. Bu nedenle yeryüzünde gerçekleştirilen ölçmeler sonucunda elde edilen koordinatlar gök cisminin toposentrik ufuk sistemi koordinatları olarak adlandırılır.

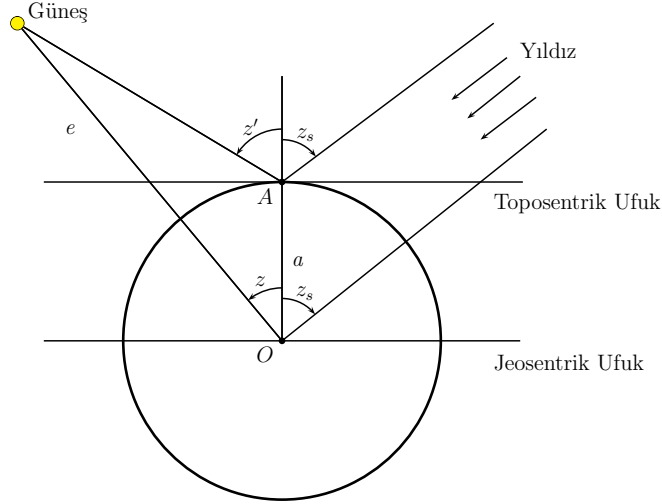
Jeosentrik ve toposentrik ufuk sistemi aynı tanımlamalar üzerine kuruludur. Dolayısıyla birinden diğerine dönüşüm mümkündür. Her iki sistemde de ufuk düzlemi çekül doğrultusuna dik olduğundan iki sistemdeki azimutlar aynı değeri alır. Uzak yıldızlara yapılan gözlemlerde, yeryüzündeki gözlem noktası ve jeosentrik sistemin merkezinden olan doğrultular, yıldızın uzaklığı nedeniyle paralel kabul edilebilir. Ancak güneş sistemindeki gök cisimleri için iki sistemdeki zenit uzaklıkları birbirine eşit değildir (Şekil 2.2).

Bu durumda bir gök cisminin toposentrik sistemdeki zenit uzaklığı z' , jeosentrik sistemdeki zenit uzaklığı z , yerkürenin yarıçapı a ve gök cisminin uzaklığı e olmak üzere,

$$\frac{\sin(z' - z)}{\sin z} = \frac{a}{e} \quad (2.1)$$

eşitliği kurulabilir. Burada $(z' - z) = \Delta z$ değeri çok küçük olduğundan, eşitlik,

$$z' - z = \frac{a}{e} \sin z' \quad (2.2)$$



Şekil 2.2 : Jeosentrik Paralaks.

olur. $z' = 90^\circ$ için en büyük değerini alır.

$$z' - z = \frac{a}{e} \quad (2.3)$$

Böylelikle $\frac{a}{e} = \pi$ değerine *ufuksal paralaks* adı verilir.

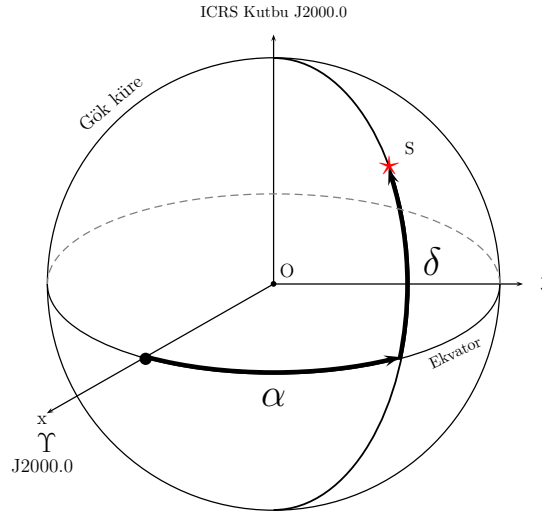
Rektasansiyon (Ekvator) koordinat sistemi

Rektasansiyon koordinat sistemlerinde dünyanın dönme eksenini, kuzey kutup doğrultusunda +z eksenini olarak alınır ve koordinat sisteminin orijini yer küresinin merkezi olarak alınır. Sistemin kutup noktası, dünya dönme ekseninin kuzey ucu kuzey kutupta olduğu gök kutbudur. Asal daire, dönme eksenine dik düzlemin gök küresi ile kesişimidir ve gök ekvatoru adını alır. Sistemin x-ekseni ilkbahar noktasından geçecek şekilde seçilmiştir.

Ekliptiğin gök ekvatorunu gök küresi üzerinde kestiği nokta ilkbahar noktası Υ 'dir ve dünyadan bakıldığında güneşin güneyden kuzeye gök ekvatorundan geçtiği noktadır. İlkbahar noktası kuzey yarımkürede baharın başlangıç zamanı olarak kabul edilir. Gök ekvatoru ve ekliptik arasındaki açı *ekliptiğin eğimi* olarak adlandırılır ve IERS 2010 Konvansiyonu'na göre $84381.''406 \pm 0.''001$ ($\sim 23.44^\circ$)'dir [32]. İlkbahar noktasından başlayarak batıdan doğuya bir gök cisminin deklinasyon dairesinin ilkbahar noktasına uzaklığı o yıldızın rektasansiyonudur (α). Gök cisminin asal daireye (ekvatora) olan uzaklığı ise deklinasyon olarak adlandırılır (δ).

Rektasansiyon koordinat sistemi bir sağ sistemdir ve koordinat değerleri dũnyanın kendi eksenini etrafında dũnmesi sonucu zamana bağlı olarak değişmezler (şekil 2.3).

Jeodezik çalışmalarda, yıldıza ya da gũk cismine ait gũksel koordinatların bilindiği kabul edilir. Rektasansiyon sistemi uzay-sabit (inersiyal) bir sistem olduğundan gũk cisimlerine ait koordinatlar da bu sistemde değişim gũstermezler. Yıldızlara ya da gũk cisimlerine ait koordinatlar yıldış kataloglarından tanımlı epok değerleri için edinilebilir. Bu kataloglar prezisyonlu çalışmalar için yıldızlara ait öz hareketleri de içermektedir. Jeodezik astronomi alanında ve özel olarak sayısal zenit kamera sistemi ölçmelerinde belirli bir epok için tanımlı yıldış koordinatları ve öz hareketleri gũzlem epoku için hesaplanmaktadır.



şekil 2.3 : Ekvator Koordinat Sistemi.

2.1.1.3 Yersel (Coğrafik) koordinatlar

Astronomik (doğal) koordinatlar

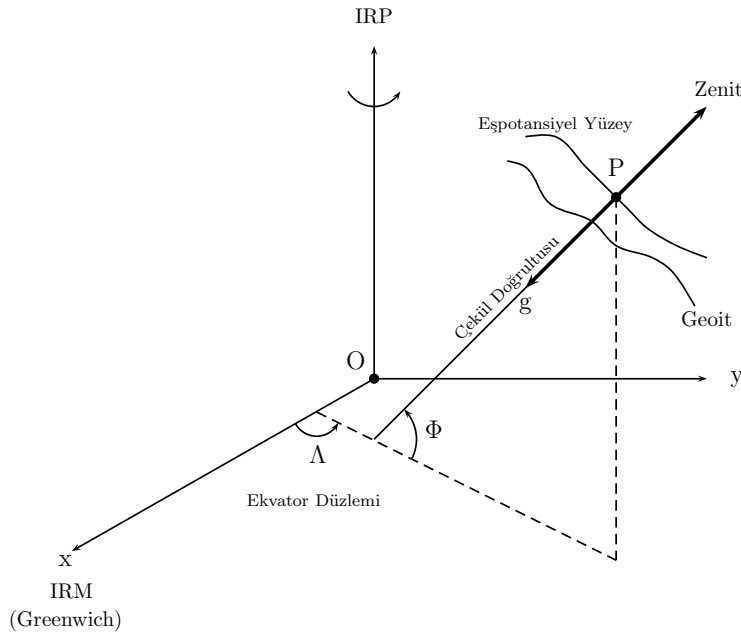
Jeodezik alışmalar kapsamında gerçekleştirilen ölçmeler (yatay doğrultular ve dũřey aılar), gravite vektũrũnũn doğrultusunda, diğer bir deyişle yerel ekũl çizgisi teğeti doğrultusunda yapılır. Gravite vektũrũnũn doğrultusu bũyũk lũde kũtle dağılımına bağlı olarak oluşur. Gravite vektũrũnũn doğrultusu noktadan noktaya değişim gũsterdięi için ekũl eğrisi bir uzay eğrisi olarak dũřũnũlmeli ve gravite vektũrũnũn doğrultusundan bahsederken o noktadaki ekũl eğrisinin teğeti dũřũnũlmelidir.

Gravite vektörü, istasyon noktasındaki jeopotansiyel yüzeye diktir. İstasyon noktasındaki jeopotansiyel yüzeye göre tanımlanan koordinatlar "Astronomik Koordinatlar" ya da "Doğal Koordinatlar" olarak adlandırılır.

Koordinat sisteminin z-ekseni yerin dönme eksenini tanımlar. Yerin dönme eksenini kutup hareketi nedeniyle yeryüzünün katı yapısına göre sabit olmadığından bir ortalama z-ekseni ve ortalama x-ekseni tanımlanır. Ortalama eksenler IERS (Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi) tarafından güncellenen ITRS, Yersel Referans Sisteminin bir parçasıdır. ITRS ayrıca Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi olarak da adlandırılır. Ortalama kutup CIO (Konvansiyonel Uluslararası Orijin) ya da IRP (IERS Referans Kutbu) olarak adlandırılır.

Ortalama z-ekseni ve ortalama x-eksenini içeren düzlem ise Ortalama Greenwich Meridyen Düzlemi ya da IERS Referans Meridyen düzlemi olarak adlandırılır.

Astronomik meridyen düzlemi çekül eğrisinin teğetini içeren ve z-eksenine paralel olan eksen olarak tanımlanır. Elipsoit üzerinde tanımlanan ve elipsoit normali ile elipsoidin küçük yarı eksenini içeren jeodezik meridyen düzleminin farklı olarak astronomik meridyen düzlemi z-eksenini içermez.



Şekil 2.4 : Astronomik meridyen düzlemi ve astronomik koordinatlar.

P noktasındaki z- eksenine paralel vektörü ve çekül eğrisine teğet olan vektör birlikte bir düzlem tanımlarlar. Bu düzlem astronomik meridyen düzlemidir ve z-eksenine

paraleldir. Gravite vektörünün doğrultusu nedeniyle yerin ağırlık merkezi ile (ya da dönme eksenini ile) çakışmazlar.

Şekil 2.4’de, Astronomik Enlem Φ , astronomik meridyen düzleminde z-eksenine dik doğrultudaki, ekvator düzleminde çekül eğrisinin teğetine kadar tanımlanan açıdır. Astronomik Boylam Λ ise, ekvator düzleminde x-ekseni ile astronomik meridyen düzlemi arasında tanımlanan açıdır.

Jeodezik koordinatların (φ, λ) elipsoidal normalini tanımladığı gibi astronomik koordinatlar da (Φ, Λ) astronomik normalin doğrultusunu tanımlar. Bir noktadaki bu iki doğrultu arasındaki fark ise "Çekül Sapması" olarak adlandırılır.

Astronomik azimut A ise, çekül eğrisine dik düzlem olan Astronomik Ufuk düzleminde, astronomik meridyenin kuzey yarısında, doğuya doğru, çekül eğrisinin teğetini ve hedef noktayı içeren (düşey) düzlem olan açıdır (Şekil 2.7).

Astronomik zenit açısı ya da zenit uzaklığı, düşey düzlemde, çekül eğrisi teğetinden (astronomik zenit) hedef noktaya olan açı olarak tanımlanır.

Astronomik enlem, boylam ve azimut, istasyon noktasının jeopotansiyel yüzeyine göre tanımlandığından, her istasyonda bir sistem oluşur. Sistemler arasındaki ilişkiler, bu koordinatlar ortalama dönme eksenini ve geoide indirgenerek sağlanmaktadır.

Yeryuvarının kütlelerine göre değişmez konumlu, her noktada, anılan iki kuvvet vektörünün bileşkesi olan kuvvet, yalın fiziksel anlamıyla bir ivme vektörüdür ve ağırlık kuvveti ivmesi veya gravite adıyla anılır. Bu vektör birim kütleye uygulanan bir kuvvet olarak düşünülür. İlgilenilen uzay kesiminin her noktasına bulunan gerçek gravite vektörleri ($\vec{g}$) yeryuvarının gerçek gravite alanını oluşturur. Yeryuvarının gravite alanı kaynağını, yeryuvarının kitleleri ile oluşan kitle çekim alanı yeryuvarının kendi eksenini etrafında dönmesinden alan bir merkezkaç kuvvet alanı, dolayısıyla bir vektör alanı olarak tanımlanabilir [41]. Bu vektörlerin doğrultularına düşey doğrultu ya da çekül doğrultusu denir. Hatalardan arındırılmış ve tam olarak düzeçlenmiş bir teodolitin asal eksenini bu doğrultu ile pratik gerçeklikte çakıştır. Vektörlerin yönü kütlelerin ağırlık merkezine doğrudur ve bu yöne astronomik ayakucu (Nadir), ters yöndeki doğrultuya ise astronomik başucu (Zenit) adı verilir.

Gerçek gravite vektörünün ($\vec{g}$), gerçek gravite adıyla bilinen g değeri ölçülebilen bir büyüklüktür ve doğrultusu astronomik gözlemlerle, astronomik enlem (Φ) ve

astronomik boylam (Λ) ile belirlenebilir. Gerçek gravite vektör alanından, potansiyel kuramına uygun olarak bir skaler potansiyel alan tanımlanabilir. Bu skaler alan, gerçek gravite potansiyeli W biçimindeki bir fonksiyonla tanımlanır (Eşitlik 2.4).

$$W = W(X, Y, Z) \quad (2.4)$$

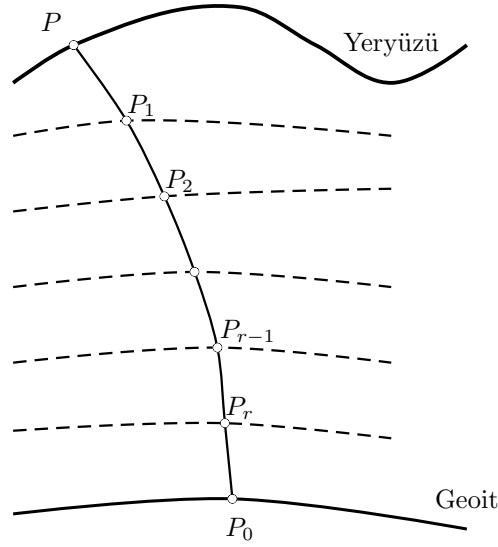
Fonksiyonun gradyeni ($grad(W)$), gerçek gravite vektörünün bileşenlerini verir.

$$grad(W) = \vec{g} = \begin{bmatrix} g_X \\ g_Y \\ g_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta W}{\delta X} \\ \frac{\delta W}{\delta Y} \\ \frac{\delta W}{\delta Z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

W gerçek gravite potansiyelinin eşit olduğu noktaların geometrik yeri uzayda kesiksiz kapalı bir yüzey oluşturur. Sonsuz sayıda birbiri ile kesişmeyen bu yüzeylere nivo yüzeyleri ya da gerçek gravite alanının eş potansiyelli yüzeyleri, jeopotansiyel yüzey ya da kısaca jeop adı verilir. Uzayda, birbirinden diferansiyel anlamda uzak olan ve bir yüzey ailesi oluşturan jeopların ardışık normalleri gerçek gravite alanının kuvvet çizgilerini oluştururlar. Ucuca eklenmiş diferansiyel anlamdaki normallerin yarattığı, birer uzay eğrisi olan bu çizgilere çekül eğrileri adı verilir. Gerçek gravite vektörleri çekül eğrilerinin teğeti olarak tanımlanır.

Genel olarak çekül sapması, nivo yüzeyi normal ile referans (elipsoit) normali arasındaki doğrultu farkı olarak tanımlanabilir [42]. Çekül sapması astronomik-jeodezik ölçülerden, gravimetrik ölçülerden ya da uydu gözlemlerinden hesaplanabilir [9]. Bu nedenle çekül sapması dayandığı ölçünün türü ile astro-jeodezik ya da gravimetrik çekül sapması gibi kavramlarla adlandırılır. Çeşitli referans yüzeyleri için farklı çekül sapması türleri hesaplanmıştır. Bunlardan pratik değeri olanlar, Helmert'e, Pizetti'ye ve Molodenski'ye göre çekül sapmaları olarak tanımlanabilir.

Yeryüzü ile geoit arasında eşit aralıklarla geçen yüzeyler düşünüldüğünde, yeryüzünün P noktasındaki çekül doğrultusu birinci yüzeyi P_1 noktasında, P_r 'deki çekül doğrultusunun da geoidi P_0 noktasında deldiği düşünülürse, yüzeyler arasında çekül doğrultularından oluşan doğru parçaları bir doğru oluşturmazlar (Şekil 2.5). Bunun nedeni Newton çekim kanuna göre, P noktasının çevresindeki asimetrik topoğrafya ve farklı yoğunluktaki yeraltı kütleleri $P_1, P_2, \dots, P_r$ noktalarını farklı şekilde etkiliyor



Şekil 2.5 : Çekül çizgisi.

olmasıdır. $PP_1, P_1P_2, \dots, P_rP_0$ çekül doğrultuları aynı doğrultuda olmazlar. Yüzeyler arasındaki aralık sonsuz küçük alınarak yüzeyler çoğaltılırsa birleştirilen poligon bir eğriye yaklaşır. Bu eğriye *çekül çizgisi* denir (Şekil 2.5). PP_0 eğri yolun uzunluğu jeodezide ortometrik yükseklik olarak adlandırılır. Teorik olarak yeryüzü üzerindeki her noktada çekül çizgisinin üç boyutta eğriliği farklıdır [9, 42].

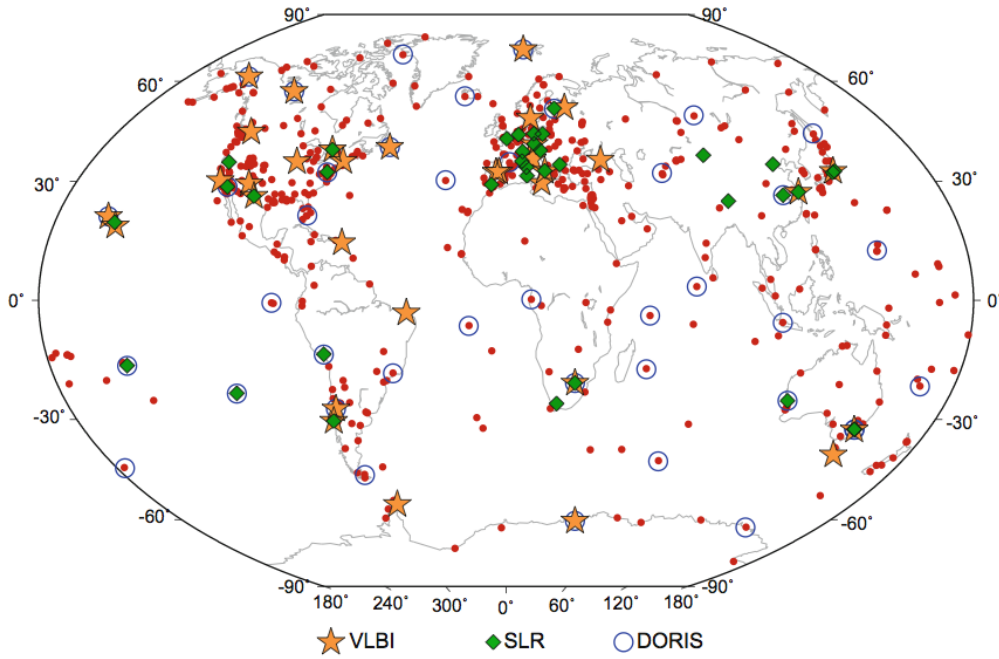
Jeodezik (elipsoidal) koordinatlar, uluslararası yersel referans sistemi ve çerçevesi

Yeryuvarının matematiksel modeline, üç boyutlu koordinat sisteminde kutup noktalarından basıklığı olan dönel bir elipsoit ile yaklaşılabılır. Dönel elipsoit bir elipsin küçük eksen etrafında dönmesi ile elde edildiğinden bir elipsoit iki geometrik parametre ile ifade edilir; küçük yarı eksen a , ve büyük yarı eksen b . Uygulamada genellikle b , basıklık f , birinci (e) ve ikinci (e') eksentrisite ile ifade edilir.

Jeodezik koordinatlar jeodezik enlem φ ve jeodezik boylam λ ile ifade edilir. Jeodezik enlem ekvator düzleminden P noktasının normaline kadar ölçülürken, jeodezik boylam ekvator düzleminde sıfır meridyeni ile P noktasından geçen meridyen düzlemine kadar tanımlanmaktadır. Ortalama global elipsoit (GRS-80), geoit ile en iyi uyum sağlayan ve ITRF eksenleri ve yerin ağırlık merkezi ile çıkışacak şekilde belirlenmiştir [43].

Uluslararası Yersel Referans Sistemi, yer merkezli bir referans sistemidir ve yerin günlük hareketi ile birlikte dönmektedir. ITRS'nin merkezi okyanusun ve atmosferin kütlelerinin de dahil edildiği yerin ağırlık merkezidir. Kutup noktası IERS referans

kutbu olarak adlandırılır ve yerin ortalama dönme eksenini ile çakışır. Başlangıç meridyeni IERS *Referans Meridyeni* olarak adlandırılan, Greenwich gözleminden geçen sıfır meridyenidir. ITRS ve ICRS arasındaki dönüşüm, gökssel ortalama kutup, ortalama ekvator ve yersel ortalama orijin ile tanımlanan Yersel Ortalama Referans Sistemi ile gerçekleştirilir (Terrestrial Intermediate Reference System - TIRS). TIRS, ITRS ile kutup hareketleri aracılığıyla ilişkilendirilir. Kutup koordinatları x_P, y_P , IERS tarafından düzenli olarak gözlemlenerek, okyanus yüklemeleri, nütasyon modellerinde yer almayan 2 günden az periyodu olan nütasyon parametreleri gibi ek bilgilerle yayınlanır. GCRS ile ITRS arasındaki ilişki her iki sistemde de özdeş olan gökssel ortalama kutup ve bu kutup etrafında yerin dönme parametreleri ile sağlanır.



Şekil 2.6 : ITRF 2008 istasyonları

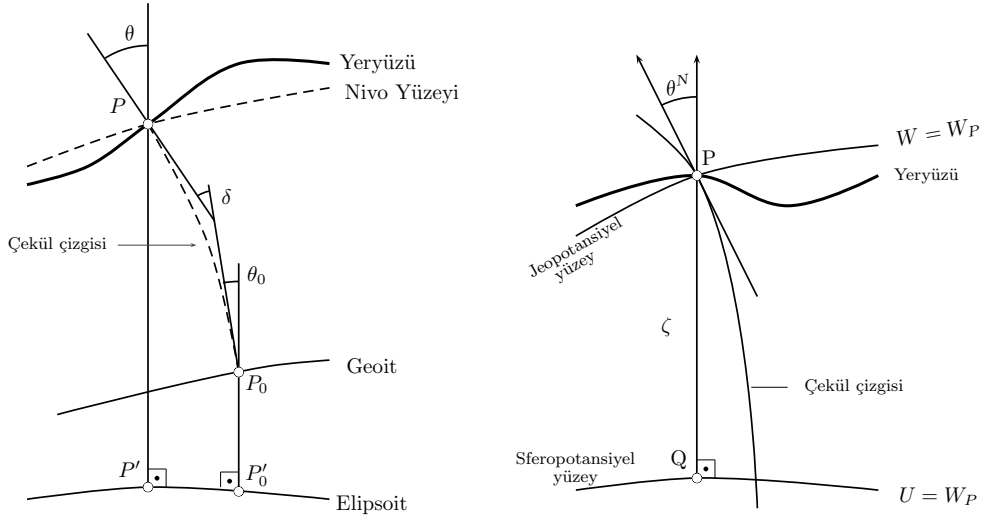
ITRF, IERS tarafından Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi olarak gerçekleştirilmiştir. ITRF'nin çözümünde dünya geneline dağılmış jeodezik gözlem istasyonlarının jeosentrik kartezyen koordinatları ve hızları kullanılmaktadır. Dünya geneline homojen olarak dağılmış sürekli gözlem yapan GPS ve DORIS istasyonlarının yanında heterojen dağılımlı VLBI ve SLR istasyonları da ITRF'nin gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır (Şekil 2.6) [44].

ITRF çözümleri IERS tarafından birkaç yıl aralıklarla güncellenmektedir. Bu çözümlerden en güncel olanları ITRF2005 ve ITRF2008'dir. ITRF2008, J2000.0 epokunda 934 istasyona ait jeosentrik koordinatlar (X, Y, Z) ve yatay hızlardan

Şekil 2.7 astronomik ufku göstermektedir. Burada, Z_a ; Astronomik Zenit, Z_g ; Jeodezik Zenit, P ; gözlem istasyonu, Θ ; astro-jeodezik çekül sapması, ξ ; çekül sapmasının Kuzey-Güney bileşeni, η ; çekül sapmasının Doğu-Batı bileşeni, Δ_1 ; astronomik ve jeodezik kuzey arasındaki fark, A ; astronomik azimutu göstermektedir.

Yeryüzü noktası P 'deki elipsoit normali ile P noktasındaki çekül çizgisinin teğeti arasındaki açı θ , Helmert tarafından çekül sapması olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.8a). Pizetti'ye göre çekül sapması ise P 'nin çekül çizgisi ile geoit üzerine izdüşümü olarak elde edilen P_0 noktasındaki çekül çizgisinin teğeti ile P_0 'dan elipsoit yüzeyine inilen dikme arasındaki θ_0 açısıdır (Şekil 2.8a).

25



(a) Helmert'e ve Pizetti'ye göre çekül sapması. (b) Molodensky'e göre çekül sapması.

Şekil 2.8 : Çekül sapması.

Helmert'in tanımında farklı yeryüzü noktalarından farklı nivo yüzeyleri geçeceğinden, her noktadaki θ farklı nivo yüzeyleri ile belirlenir. Pizetti'nin tanımında ise her noktadaki çekül doğrultusu bir tek nivo yüzeyine (geoit) diktir ve θ_0 fiziksel olarak daha gerçekçi bir tanımdır. Her iki çekül sapması arasındaki fark çekül eğriligi olarak adlandırılır.

$$\delta = \theta - \theta_0 \quad (2.6)$$

Çekül eğriligi genellikle $1''$ 'den küçük olmakla beraber engebeli topoğrafik yapılarda önemli büyüklüklere ulaşabilmektedir [9].

Astronomik gözlem ilkeleri yıllardır çok fazla değişikliğe uğramamıştır. Çekül doğrultusunu Uluslararası Gök Koordinat Sisteminde (ICRS) Ekvatoryal koordinatları (rektasansiyon α ve deklinasyonu δ) verilen gök cisimlerine ve belirli yıldızlara gerçekleştirilen doğrultu gözlemleri kullanılarak hesaplanır.

Bir P noktasına ait astronomik normalin gök küresini deldiği yer z_a , jeodezik normalin gök küresini deldiği yer z_g , ise bu iki nokta ile gök kutbu bir küresel üçgen oluşturur (Şekil 2.7).

Çekül sapmasının bileşenleri, eğer bir P noktasına ait astronomik ve jeodezik koordinatları biliniyorsa Eşitlik 2.7 ve Eşitlik 2.8 hesaplanabilmektedir. Eğer Pizetti'ye göre çekül sapması hesaplanmak istenirse P noktasının astronomik koordinatlarının çekül çizgisinin eğriligi nedeniyle düzeltilip geoit üzerindeki değerlerinin (P_0)

bulunması gerekir.

$$\xi = \Phi - \phi \quad (2.7)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \quad (2.9)$$

Herhangi bir doğrultudaki çekül sapması değeri ise α Azimut olmak üzere Eşitlik 2.10 ile elde edilir.

$$\varepsilon(\alpha) = \xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha \quad (2.10)$$

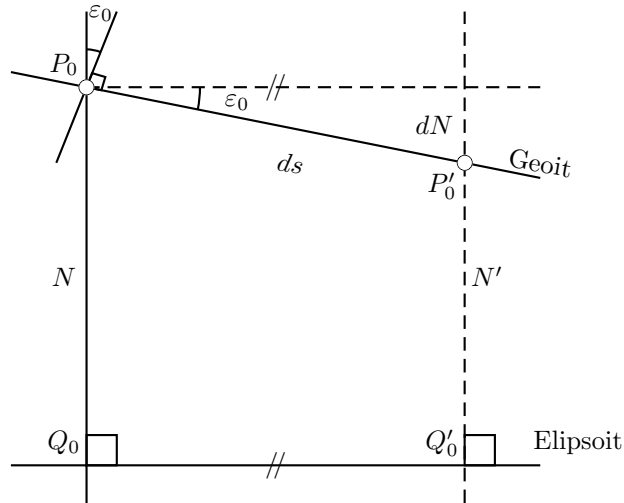
Geoit üzerinde bir P_0 noktasında çekül sapması ε_0 ve geoit yüksekliği N ise, bu noktadan diferansiyel anlamda ds kadar uzaktaki bir P'_0 noktasında N' ile gösterilirse, N ile N' arasındaki bağıntı;

$$N - N' = \Delta N = \int_{P_0}^{P'_0} dN = - \int_{P_0}^{P'_0} ds \tan \varepsilon_0 \quad (2.11)$$

ve

$$\Delta N = \int_{P_0}^{P'_0} \varepsilon_0 ds = -\frac{\varepsilon_0}{\rho} S \quad (2.12)$$

olur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : Geoidin elipsoide göre eğimi.

Eşitlik 2.12’de kullanılan Pizetti çekül sapmaları geoit üzerindeki çekül sapmalarıdır. Eğer fiziksel yeryüzündeki ölçülerden elde edilen Helmert çekül sapmaları kullanılacak olursa;

$$\Delta N_{1,2} = -S_{1,2} \frac{\varepsilon_0}{\rho} \quad (2.13)$$

olur.

Geoit yüksekliğinin artım yönü ve çekül sapmasının yönü arasındaki zıtlık eşitliğin sol tarafındaki eksi işareti ile ifade edilerek giderilmektedir.

$$\Delta N'_{1,2} = S_{1,2} \tan \varepsilon = -S_{1,2} \tan(\Delta \varepsilon + \varepsilon) \quad (2.14)$$

$$-S \frac{\varepsilon}{\rho} = -S \frac{\varepsilon_0}{\rho} = -S \frac{\Delta \varepsilon}{\rho} \quad (2.15)$$

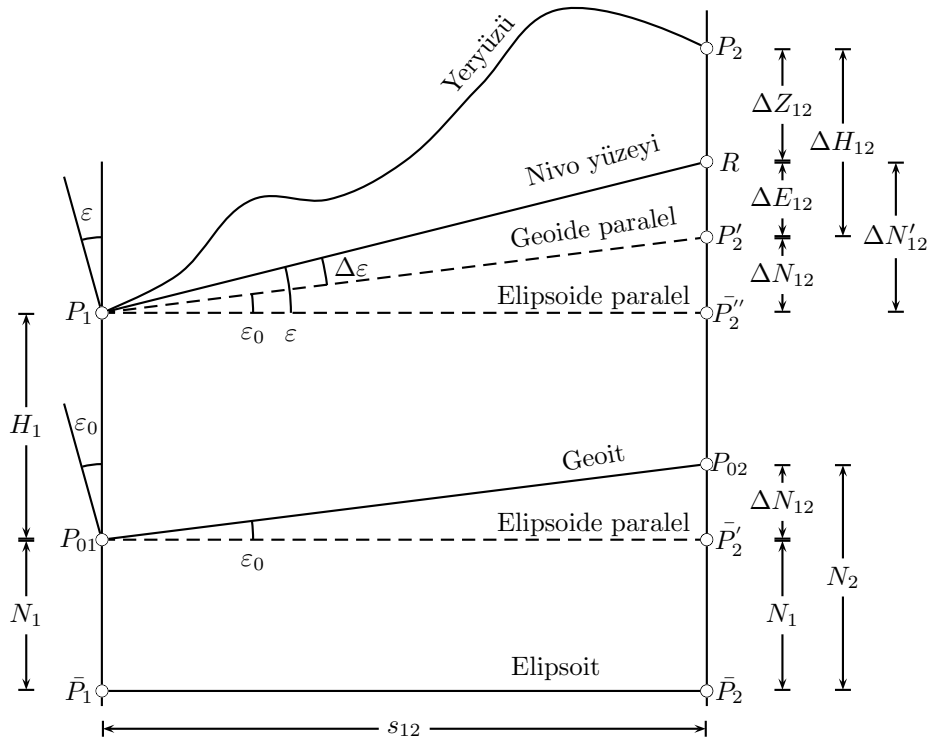
ve

$$\Delta N'_{1,2} = \Delta N_{1,2} + \Delta E_{1,2} \quad (2.16)$$

ile

$$\Delta N = \Delta N' + \Delta E \quad (2.17)$$

bulunur.



Şekil 2.10 : Astronomik Nivelman.

Şekil 2.10'dan;

$$\Delta E_{1,2} = \Delta H_{1,2} + \Delta Z_{1,2} \quad (2.18)$$

olur. Burada;

$\Delta H_{1,2}$: P_1 ve P_2 noktaları arasındaki ortometrik yükseklik farkı; $\Delta Z_{1,2}$: P_1 'den P_2 'ye yapılacak nivelmanla bulunacak yükseklik farkı; $\Delta E_{1,2}$: Ortometrik düzeltme

olarak adlandırılır. Gravite ölçülerinden ortometrik düzeltme aşağıdaki eşitlik 2.19 ile hesaplanabilir.

$$\Delta E = \frac{1}{g_0} \int_{P_1}^{P_2} (g - g_0) dz + (\bar{g}_1 - g_0) H_1 - (\bar{g}_2 - g_0) H_2 \quad (2.19)$$

eşitliklerde;

$\Delta N_{1,2}$; Geoit yüzeyine referanslanan geoit yükseklik farkı

$\Delta N'_{1,2}$; Fiziksel yer üzerinde elde edilen geoidin yükseklik farkı

d_z ; Nivelman ile elde edilen yükseklik farkı

g ; Gravite ölçüsü

$\bar{g}_1, \bar{g}_2$; P_1 ve P_2 noktalarının ortalama gravite değerleri

H_1, H_2 ; P_1 ve P_2 noktalarının ortometrik yükseklikleri

şeklinde dir.

P_1 ve P_2 noktaları arasında çekül sapmasının lineer değiştiği varsayılırsa;

$$\Delta N_{1,2} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2\rho} S \quad (2.20)$$

alınabilir.

2.1.3 Geoit belirleme yöntemlerine genel bir bakış

Dünya yükseklik sistemlerinin referans yüzeyi olarak geoit, tüm mühendislik disiplinlerince fiziksel yeryüzü ve uydu teknikleri ile elde edilen konum arasındaki doğal bağ olması nedeniyle büyük öneme sahiptir. Uydu teknikleri ile elde edilen konumun kullanılmasında geoit bir altyapı niteliği taşır. Uluslararası ölçekte, yükseklik sistemlerinin birleştirilmesi çalışmalarını Uluslararası Jeodezi Birliği (International Association of Geodesy - IAG) bünyesinde Uluslararası Gravite Servisi (International Gravimetric Bureau - BGI) ve Uluslararası Geoit Servisi (International Geoid Service - IGeS) yürütmektedir. BGI kendisini yeryüzü gravite alanına ait dünya ölçeğinde bilgi ve gözlemleri bünyesinde toplayan, bunları bilimsel amaçlı çalışmalarda kullanılmak üzere bilgisayar destekli veri tabanlarında derleyen, arşivleyen ve yayınlayan bir organizasyon olarak tanımlamaktadır [46]. Bu kuruluşlar yersel gravite ölçmeleri, gravite gradyometre, uydu altimetre ve astro-jeodezik yöntemlerin verilerini kullanarak lokal, bölgesel ve global gravite alanlarının ve geoitlerinin belirlenmesi çalışmalarını yürütmektedirler. Elde edilen bu veriler

ve modeller internet aracılığıyla bilim insanlarına sunulmaktadır. Yeryuvarının çekim alanı ve buna bağlı olarak global geoidin belirlenmesi çalışmaları yersel gravite verileri, uydu gradyometre, uydu altimetre ve astro-jeodezik çekül sapmaları kullanılarak Amerika Birleşik Devletleri kuruluşu olan NGA (National Geospatial Intelligence Agency – eski ismi ile NIMA) tarafından da gerçekleştirilmiştir. NGA, yeryuvarının çekim alanının küresel harmonik açılımı ile belirlenmesi çalışmaları sonucunda Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (World Geodetic System 1984 – WGS84) datumunda Yeryuvarı Çekim Modeli 1996’yı (Earth Gravity Model 1996-EGM96) yayınlamıştır. WGS84-EGM96, $n = m = 360^0$ ve mertebeye kadar açılımı olan 130321 katsayıdan oluşmaktadır. Yeryüzü üzerinde enlemi, boylamı ve elipsoidal yüksekliği bilinen bir noktadaki çekim potansiyeli (T , $T = W - U$, W gerçek çekim potansiyeli, U normal çekim potansiyeli) ve normal gravite (γ) değeri hesaplanabildiğinden, Bruns eşitliği yardımıyla geoit yüksekliği (N) de elde edilebilmektedir [47].

$$N = T/\gamma \quad (2.21)$$

NGA tarafından hesaplanan modelde geoit yüksekliklerinin doğrulukları $\pm 0.5 - 0.1 m$ olarak verilmekte ve EGM96 modeli ile yeryüzü üzerinde $30' \times 30'$ büyüklüğündeki alanlarda ortalama gerçek gravite değerleri elde edilebilmektedir. Günümüzde önceki global çekim modelleri, okyanus topoğrafya modelleri ve uydu verileri kullanılarak güncellenen ve EGM2008 olarak adlandırılan Yeryuvarı Çekim Modeli 2008 yayınlanmış durumdadır. EGM2008 modelinde 4.6 milyon katsayı ile ve yeryüzü üzerinde $5' \times 5'$ büyüklüğündeki alanlarda gerçek gravite değerleri elde edilebilecek bir çözünürlükte hesaplanmıştır. Yeryuvarı Jeopotansiyel Modeli 2008 (EGM08), $n=m=2159$ derece ve mertebe açılıma sahiptir. Dünya’nın her yerinde $\pm 15cm$ doğrulukla geoit yüksekliği elde edilebilmektedir. Modelin çözünürlüğü 9.3 km’dir ($5'$). Bu model, bilimsel araştırma ve geoit belirleme çalışmalarında referans model olarak kullanılmaktadır [48].

Gauss ve Helmert’ten itibaren geoit yüksekliklerinin önemi bilinmesine rağmen çekül sapması bileşenlerinin ve diğer geoit kaynaklı etkilerin belirlenmesindeki zorluklar nedeniyle jeodezik problemlerde 1970’lere kadar bu etkiler ihmal edilmiştir. İlk astro-jeodezik geoit Almanya’da 1914 yılında belirlenmiş, 1948 yılında global gravimetrik geoit $\pm 10 m$ doğrulukla belirlenebilmiştir. Tarihsel gelişim içinde geoit belirleme çalışmaları devam etmiş ve gravimetrik, astro-jeodezik, GPS/Nivelman

ve uydu altimetresi yöntemleri ile ülkeler geoitlerini belirleme çalışmalarını sürdürmüşlerdir [17].

Avrupa geoidi cm düzeyinde belirlenebilmiş ancak dağlık alanlarda veri eksikliği nedeniyle bu doğruluk sağlanamamıştır. İsviçre geoidi 300 astronomik 3000 gravimetrik nokta ile astronomik noktaların doğruluğa yaptığı katkı ile birkaç cm düzeyinde belirlenebilmiştir. 1996-1999 yılları arasında Avrupa genelinde gerçekleştirilen arazi çalışmaları sonucunda çekül sapması bileşenlerinin belirlenmesinde, gravite anomalilerinin belirlenmesi yoluyla elde edilen cm geoidinden yirmi kat daha etkili sonuçlar verdiği ileri sürülmektedir. Dolayısıyla verilerde oluşan bu eksikliğin astro-jeodezik noktalar yardımıyla giderilebildiği görülmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda 1000 km^2 'lik alanda 500-1000 gravimetrik nokta ile $\pm 2 \text{ cm}$ doğruluk elde ediliyor iken bu doğruluğa aynı büyüklükteki alanda 30 astro-jeodezik nokta ile ulaşılabilir [15].

1980'lerin sonlarında daha az kullanılır olan Astro-jeodezi, jeodezik veriler ve uydu verileri ile birlikte değerlendirildiğinde CCD kameraların gelişimine paralel olarak etkin bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. CCD kameralar ile gerçekleştirilen Astro-jeodezik ölçmeler, gravimetri ile karşılaştırıldığında bazı temel avantajlara sahiptir. Astro-jeodezik ölçmelerde nokta aralıkları gravimetrik yöntemle göre daha seyreklerdir. Astro-jeodezik noktalar yüksek doğruluklu takeometrik veriye ihtiyaç duymazlar, topoğrafik indirgemeler sayısal arazi modelleri üzerinden gerçekleştirilebilir. Nivelmana gerek duyulmadan $\pm 5 \text{ m}$ doğrulukta GPS tekniği, haritalar ya da barometreler yardımıyla elde edilen yükseklikler kullanılabilir. Avantajların yanında astro-jeodezik yöntemlerin dezavantajı, gece ve açık bir gökyüzü ortamında gerçekleştirilebilmesidir [12].

Türkiye geoit belirleme çalışmalarına 1976 yılında 13 mutlak gravite noktası ile başlamıştır. Türkiye Temel Gravite Ağı'nın (TTGA) 1. ve 2. derece sıklaştırması ise 66245 gravite noktası ile Potsdam datumunda gerçekleştirilmiştir. Türkiye Geoidi 99A'nın güncellenmiş versiyonu olan Türkiye Geoidi 2003 (TG03) Harita Genel Komutanlığı tarafından aynı yıl yayınlanmıştır. TG03, gravite, topoğrafya ve geoit yükseklikleri kullanılarak en küçük kareler kollokasyonu ile remove-restore yöntemi yardımıyla yeryuvarı jeopotansiyel modelleri referans alınarak hesaplanmıştır. TG03'un iç doğruluğu gözlem noktalarında 1 cm, dış doğruluğu

ise desimetre düzeyinde olarak açıklanmıştır. Kıyı kesimlerinde ve ülkenin dağlık bölgelerinde bu doğruluk düşmektedir. GPS ve yersel gözlemlerle birkaç cm düzeyinde konum bilgisinin üretilebildiği düşünülürse ülkemizde yüksek prezisyonlu bir geoide olan gereksinim her geçen gün artmaktadır [49].

Geoit belirleme, konumu bilinen bir noktada geoit yüksekliğinin sayısal ya da analog olarak elde edilmesini sağlayacak biçimde verilerin modellenmesini amaçlamaktadır. Geoit modelleri; lokal, bölgesel veya küresel alanlar için geliştirilebilir. Geoit belirleme yöntemleri, genel olarak teorisi, ölçüleri ve değerlendirmeleri bir bütünlük oluşturan yöntemler olarak;

- i. Nokta gravite ölçmeleri ile Stokes integrali yoluyla, gravimetrik geoit yüksekliklerinin belirlenmesi,
- ii. Harmonik fonksiyonun katsayılarının belirlenmesi yoluyla, jeopotansiyel modelin oluşturulması ve Bruns eşitliğiyle geoit yüksekliklerinin belirlenmesi,
- iii. Astro-jeodezik çekül sapmalarını kullanarak, geoit yükseklik farklarının elde edilmesi ve astronomik nivelman yoluyla geoit yüksekliklerinin belirlenmesi,
- iv. GPS ile elipsoid yüksekliklerin (h), geometrik nivelman yoluyla ortometrik yüksekliklerin (H), elde edilmesi ve geoit yüksekliklerinin $N = h - H$ olarak hesaplanması,
- v. Yukarıdaki yöntemlerin kombinasyonu ile geoit yüksekliklerinin elde edilmesi,

olarak sınıflandırılabilir.

Bu yöntemlerden, jeopotansiyel modelde süreklilik söz konusudur. Diğer yöntemlerde, noktasal ayırık geoit yükseklikleri veya geoit yükseklik farkları elde edilir. Ulusal geoit modeli, noktasal verilerden, enterpolasyona olanak sağlayan sürekli fonksiyonların veya grid verilerin elde edilmesini de amaçlar [9].

Yukarıda tanımlanan yöntemlerin her biriyle bir geoit modeli oluşturulabilir. Ancak, her modelin güçlü yönleri kadar zayıflıkları da vardır. Bu zayıflıkları azaltacak, karşılaştırmalar yoluyla kontrolün sağlandığı değerlendirme stratejileri geliştirilmiştir. Türkiye gibi büyük ülkelerde, farklı verilerin üretilmesinin maliyeti de dikkate

alındığında, bu stratejinin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu çerçevede, tüm yöntemlerin kombinasyonu olan “kaldır-koy” (Remove-Restore) stratejisi benimsenmiştir.

Kaldır-koy stratejisi, farklı verilerin kontrollü olarak geoit belirlemede kullanılmasını sağlamaktadır. Kaldır-koy stratejisinde, Tcherning ve Rapp tarafından 1974 yılında önerilen “anomali dereceli varyans modeli”nden yararlanılır. Bu modelde, jeopotansiyel alanın spektral davranışı tanımlanmaktadır (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Anomali dereceli varyans modeli [50].

Alanın Yapısı	Küresel Harmonik açılımın derecesi (l)	Dalga Boyu $360^0/(l)$	Karesel Ortalama Hata $\Delta g(mGal)$	Karesel Ortalama Hata N
Uzun dalga	2-36	$180^0 - 10^0$	± 20.2	± 30.2
Orta dalga	37-180	$10^0 - 2^0$	± 22.5	± 2.1
Kısa dalga	181-2000	$2^0 - 10'$	± 27.2	± 0.47
Ultra kısa dalga	2001-5000	20-8 km	± 10.8	± 0.02
	5001-10000	8-4 km	± 4.6	± 0.005
	10001-20000	4-2 km	± 1.4	< 0.001

Çizelge 2.1’de, gravite anomalilerinin önemli bir parçasının bölgesel jeolojik ve topoğrafik yapının neden olduğu uzun ve orta dalga bileşeni içinde olduğu görülmektedir. Ultra kısa dalga bileşeni, lokal jeolojik ve topoğrafik bozucu etkileri içermektedir. Geoit, derindeki uzun dalga boyu bileşenini oluşturan kütle anomalilerinden daha fazla etkilenmektedir. Uzun ve orta dalga boylu bileşenleri içeren $n=m=180$ derecelik bir geoit modelinden, $\pm 2.1m$ doğrulukla geoit yüksekliği elde edilebilir.

2.1.3.1 Küresel jeopotansiyel açılım modelinden yararlanarak geoit belirleme

Yeryuvarının gravite alanının küresel harmonik ifadesi W ,

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} + \phi \quad (2.22)$$

olarak verilmektedir. Burada, r ; jeosentrik yarıçap, θ , enlemlerin 90^0 ’den farkı, λ ; boylam, $P_{nm}(\cos \theta)$; tam normalleştirilmiş Legendre fonksiyonu, C_{nm}, S_{nm} ; yeryuvarı gravite alanının tam normalleştirilmiş küresel harmonik katsayıları, ϕ ; merkezkaç potansiyeli olur.

Geoit ondülasyonları için, γ , $P(r, \theta, \lambda)$ noktasındaki normal gravite değeri olmak üzere;

$$N(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r\gamma} \left\{ \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\Delta C_{nm} \cos m\lambda + \Delta S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right\} \quad (2.23)$$

bağıntıları geçerli olur.

Küresel jeopotansiyel açılım modeli, önceleri yeryuvarının şeklinin ve potansiyel alanının belirlenmesinde, daha sonra uydu yörüngelerinin hesaplanması için önemli iken günümüzde geoit yüksekliklerinin belirlenmesinde kullanıldığı için daha da önem kazanmaktadır. Birçok uluslararası çalışma jeopotansiyel katsayılar modelinin geliştirilmesi ile ilgilenmektedir.

EGM96 modeli ile gravite alanının uzun ve orta dalga bileşenlerinin geoit yüksekliğine etkileri büyük doğrulukla belirlenebilir. Geoit yüksekliğine yerel etkiler için (kısa ve çok kısa dalga boyu) bu alanlarda geoit belirleme çalışmaları yapılmalıdır [9].

2.1.3.2 Nokta gravite ölçüleri ile (gravimetrik) geoit belirleme

Geoit yükseklikleri Stokes integralinin alınması ile elde edilebilir.

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} S(\Psi) \Delta g d\sigma \quad (2.24)$$

Burada Δg Bouguer anomalisidir. Bu anomalilerin hesaplanmasında en önemli indirgeme arazi indirgemesidir. Yüksek doğruluklu bir geoit yüksekliğinin hesaplanabilmesi için çok geniş alanlarda prezisyonlu sayısal arazi modelleriyle 250x250 m gibi küçük gridlerde arazi düzeltmelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu işlem için geçmişte uzun hesaplama zamanları gerekmekte iken günümüzde hızlı Fourier transformasyon, kollokasyon, süzgeçleme, teknikleri ile işlem zamanı azaltılmıştır.

Gravite ölçme, indirgeme ve enterpolasyon hatalarının dışında en önemli hata kaynaklarından biri de jeolojik yoğunluk değişimleridir. Yüksek prezisyonlu bir geoidin belirlenebilmesi için engebeli arazilerde 2 km'den daha sık aralıklarda 1-2 mGal gravite anomalilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Avusturya ve İsviçre gibi dağlık ülkelerde gravimetrik geoitlerin doğrulukları $\pm 15 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir.

Topoğrafyanın potansiyelinin harmonik olarak modellenmesi çalışmaları, gravite verilerinin daha doğru ve güvenilir kullanılmasını olanaklı hale getirecektir [51].

2.1.3.3 GPS ölçülerinden yararlanarak geoit belirleme

Bir noktanın, GPS ile elipsoidal yüksekliğinin (h) ve geometrik nivelman ile ortometrik yüksekliğinin (H) belirlenmesi durumunda bu noktanın geoit yüksekliği (N) hesaplanabilir.

$$N = h - H \quad (2.25)$$

Yükseklik sistemleri genellikle ülke içinde rölatif bir datuma bağlandığından, global datum ile arasında bir datum ötelemesi ve eğim farkı vardır. Eşitlik 2.25 göre bir cm geoidi belirleyebilmek için ortometrik yüksekliklerin bir jeopotansiyel referans yüzeyine bağlı olarak elde edilen potansiyel sayı farklarının bir statik dengeleme modeline göre dengelenerek elde edilmesi gerekir.

GPS/Nivelman yöntemiyle geoit belirlemek için geoit dayanak noktalarından oluşan bir ağı ihtiyaç vardır. Örneğin BÖHHBÜY’de, Geoit dayanak noktalarının yoğunluğu $20km^2$ için 1 nokta olarak belirlenmiştir [52]. Geoit dayanak noktaları topoğrafyayı karakterize eden dağılımda seçilmelidir. Elde edilen geoit yüksekliğinin doğruluğu elipsoidal ve ortometrik yüksekliklerin doğruluklarına bağlıdır.

Geoit yüksekliklerinin elde edildiği eşitliğe göre noktasal olarak elde edilen geoit yüksekliklerinden sayısal enterpolasyon ile geoit yüksekliklerinin elde edilebilmesi için transformasyon, polinomlarla yüzey geçirme, enterpolasyon, kollokasyon ve sonlu elemanlar gibi yöntemlerden biri kullanılarak süreklilik sağlanmalıdır. İstanbul geoidi GPS/Nivelman yöntemi ile $6000 km^2$ ’lik alanda yaklaşık 400 geoit dayanak noktası ile iki parametrelili 5. derece bir polinomla modellenmiştir [8]. Ortometrik yükseklikler, her birinin çevresi ortalama 60 km olan 56 lüplük bir nivelman ağı ile elde edilmiştir. Nivelmanda elde edilen doğruluk $\pm 35mm/km$ ve geoit yükseklikleri ile modelin uyuşumu $\pm 4.0 cm$ bulunmuştur. Yapılan kontroller sonucu, modelden elde edilen geoit yüksekliklerinin doğruluklarının $\pm 5.0cm$ ’nin altında olduğu belirlenmiştir.

2.1.3.4 Kombine - Global jeopotansiyel model ve nokta gravite ölçülerinin kombinasyonu ile geoit belirleme (Remove-Restore yöntemi)

Gravimetrik ve astro-jeodezik geoit belirleme yöntemlerinde bölgesel ve yerel gravite alanının belirlenmesi söz konusudur. Global gravite alanının dikkate alındığı yüksek çözünürlüklü hesaplamalarda Remove-restore tekniği geliştirilmiştir. Remove-restore tekniği iki ana adımdan oluşmaktadır. Remove olarak adlandırılan adım gravite

alanının uzun dalga (yüksek dereceden açılımı global modeller için 200 km'ye kadar) ve kısa dalga boylu (dalga boyu 20 km'den 2 km ve daha az) parçaların veriden çıkarılmasıdır. Restore adımı ise indirgenmiş gravite gözlemlerine Stokes integrali uygulandıktan sonra, orijinal olan parametreleri, jeopotansiyel modelin ve topoğrafya parçasının yerine konması ile yeniden elde edilmesidir. Bu tekniğin yararı, değerlendirme için sınırlı veri toplama alanı gerektirmesi ve alandaki uyuşumsuz ölçülerin belirlenmesi için gereken istatistik analizin kolaylaşmasıdır. Tekniğe göre bölgesel geoit;

$$N = N_{Model} - N_{Red} \quad (2.26)$$

olarak hesaplanmaktadır.

2.1.3.5 Astro-jeodezik geoit belirlenimin diğer yöntemlerle karşılaştırılması

Dağlık ve homojen olmayan jeolojik yapıya sahip bölgelerde, sayısal zenit kamera sistemlerinin kullanıldığı astro-jeodezik yöntem verimlilik açısından diğer geoit belirleme yöntemlerine göre üstünlük sağlamaktadır. Sayısal zenit kamera sistemlerinin kullanıldığı astro-jeodezik ölçmeler hızlı, kolay ve otomatize olarak gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında iki boyutlu olarak yorumlanabilen astro-jeodezik çekül sapmaları, sınır etkileri içermez ve çalışma bölgesi dışında veri gerektirmez [43]. Bir astro-jeodezik geoidin güvenilirliği gravimetrik geoide oranla daha az nokta ile kontrol edilebilir [15].

Avrupa genelinde yirminin üzerinde gerçekleştirilen geoit çalışmasına ait sonuçlar kapsamında değerlendirmede astro-jeodezik çekül sapmalarının gravite anomalilerine göre 30'a 1 oranında (engebeli bölgelerde 20'ye 1 oranda) daha fazla ağırlıklandırılması gerektiği önerilmektedir [15]. Çekül sapmaları geoit normalinin doğrudan belirlenmesine olanak sağlandığından, bir skaler değil vektör olarak tanımlandığından yeraltı kitle değişimlerinden gravite anomalilerine göre daha az etkilenmektedir. Bu nedenle gravimetrik geoit ile karşılaştırıldığında çok daha az sayıda (%5 oranında) astro-jeodezik nokta yeterli olmaktadır [15, 16].

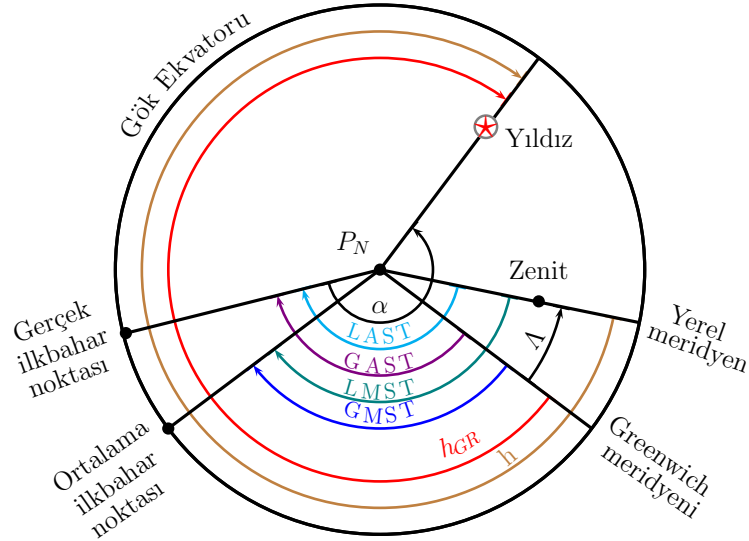
Sayısal zenit kamera sisteminin ölçme süreleri gravimetrik yöntemle göre daha uzundur. Ancak astro-jeodezik ölçmelerde sayısal zenit kamera sistemlerinin tam otomatizasyonu ve çekül sapmalarının eş zamanlı belirlenebilmesine olanak sağlayan hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesi ile ölçme-değerlendirme süreleri

kısalabilecektir. Astro-jeodezik ölçmeler geceleri gerçekleştirildiğinden, gözlemciler için yorucu ve lojistik olarak güç olabilmektedir. Ayrıca astro-jeodezik ölçmeler meteorolojik koşullara çok yüksek oranda bağlıdır. Ölçme sırasındaki meteorolojik değişimler, bir kısmı elimine edilebilse de gözlemler sonucu elde edilen görüntülere doğrudan yansımaktadır. Gözlemlerin gerçekleştirilebilmesi için açık bir gökyüzü, düşük nem, rüzgarsız ve stabil meteorolojik koşulların olduğu bir ortam gerekmektedir. Dolayısıyla gözlem gerçekleştirilebilecek gece sayısı sınırlıdır.

2.1.4 Zaman sistemleri

Zaman bilgisi, göksel koordinat sistemi ile yersel koordinat sistemi arasındaki ilişkilerin kurulması açısından jeodezide büyük öneme sahiptir. Uydu jeodezisi, konum belirlemek için elektromanyetik dalgaları ve zaman bilgisini kullandığından özellikle yapay uyduların hareketlerinin modellenmesi için uniform bir zaman ölçeğine gereksinim vardır. Bunun yanında, dünyanın güneş sistemindeki hareketinin uzaydaki konumu ile ilişkilendirmek ve gerçekleştirilen tüm gözlemleri tarihlendirmek için bir zaman sistemi tanımlanmalıdır [31].

2.1.4.1 Zaman sistemlerinin temelleri ve aralarındaki ilişkiler



Şekil 2.11 : Yıldız Zamanı.

Zaman sistemlerinde, bir zaman aralığı birimi (ölçeği), başlangıç olarak tanımlanmaktadır. Yeryüzündeki temel, yüksek doğruluk uniform zaman ölçeği, Uluslararası Atomik Zamandır (Temps Atomique International - TAI). Bu da en düşük enerji

seviyesindeki (ground state) Sezyum-133 atomunun (^{133}Cs atom çekirdeği) iki hyperfine seviye arasındaki geçiş radyasyonunun 9.192.631.770 periyoduna karşılık gelen süre olan Uluslararası Birimler Sistemine göre (SI) saniye biriminde ifade edilmektedir.

TAI, Üniversal Koordinatlandırılmış Zaman UTC'nin orijini ile senkronize bir zaman sistemidir ve aralarındaki fark 35^s 'dir ($TAI = UTC + 35''$). Bir TAI günü 86400 saniye ve bir Julian yüzyılı ise 36525 TAI günüdür. TAI, Yersel Zaman TT'nin elde edilmesi için gereklidir. TAI, 50'den fazla laboratuvarında çalıştırılan atomik saatler yardımıyla elde edilmekte ve Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) Frekans ve Gravite bölümü tarafından yayınlanmaktadır [53]. TAI'nin stabilitesi 10^{-5} saniyedir ve zamanla doğruluğu yükselmektedir.

IAU tarafından 1952 yılında yayınlanan Efemeris Zamanı (ET) güneşe yapılan uzun zamanlı gözlemler ile gerçekleşmiştir. Efemeris zamanını, güneş sisteminin ağırlık merkezine ya da yerin ağırlık merkezine referanslanan dinamik zaman sistemleri izlemiş, Barisentrik zaman gibi sistemler (Temps Dynamique Barycentrique - TDB), güneş sistemindeki gök cisimlerinin barisentrik efemerislerinin oluşturulmasında bağımsız bir ölçek olarak kullanılmıştır. Ancak yerküreye yakın uyduların yörüngedeki hareketlerini tanımlamada, uyduların yerküre ile aynı bozucu etkilere maruz kaldıklarından dolayı, Yersel Dinamik Zaman (Temps Dynamique Terrestre - TDT) kullanılmaktadır. IAU, 1991 yılından itibaren, dört boyutlu uzay-zaman referans sistemlerinde genel görelilik teorisini temel aldığından, TDT güncellenmiş ve yerine Yersel Zaman (Terrestrial Time - TT) ifadesinin kullanımını benimsemiştir.

TT kuramsal olarak, geoit üzerinde atomik bir saat tarafından ölçülebilen uniform bir zaman ölçeğidir. TAI ile TT arasındaki matematiksel ilişki TAI'nin epok tanımından kaynaklı bir fark ile;

$$TT = TAI + 32.184^s \quad (2.27)$$

2.1.4.2 Zaman dönüşümleri, görünen gözlem zamanının hesabı

Yerkürenin günlük hareketi zamanın doğal bir ölçüsünü verir. Yıldız Zamanı ve Üniversal Zaman sistemleri yer merkezli sistemlerin uzay-sabit sistemle ilişkilendirilmesini sağlar. Yıldız zamanı ve üniversal zaman yerkürenin iki temel hareketi ile ortaya çıkar. Bunlardan ilki yerkürenin dönme eksenini etrafındaki

günlük hareketidir. İkincisi ise yerkürenin güneş etrafındaki yörüngesindeki yıllık dolanımıdır. Yerküre güneşin yörünge elipsinin odak noktalarından birinde yer aldığı bir sistemde Kepler'in yasalarına uygun bir hareket izler. Ay'ın ve güneş sistemindeki diğer gezegenlerin çekim etkileri nedeniyle bu yörüngede küçük düzensizlikler olur. Yerkürenin izlediği bu yörünge ekliptik düzlemini oluşturur ve bu düzlem ekvator düzlemi ile yaklaşık $\varepsilon = 23.5^\circ$ 'lik bir açı yapar.

Yıldız zamanı da doğrudan yerin dönmesi ile ilişkilidir. Yeryüzündeki bir gözlemcinin yerel meridyeni ile ilkbahar noktası arasındaki saat açısına Yerel Görünen (Gerçek) Yıldız Zamanı (Local Apparent Sidereal Time - LAST), saat açısı Greenwich ortalama meridyeninden itibaren alınırsa da buna Greenwich Görünen Yıldız Zamanı (Greenwich Apparent Sideral Time - GAST) adı verilir. Benzer şekilde ortalama ilkbahar noktasına göre bu açısal büyüklükler, Yerel Ortalama Yıldız Zamanı (LMST) ve Greenwich Ortalama Yıldız zamanı (GMST) adını alır. IAU2000/2006 çözümlerinde GAST, Yer Dönme açısı (ERA) ifadesi ile değiştirilmiştir [54]. Astronomik boylam gözlemci ve Greenwich meridyen düzlemleri arasındaki açı olarak ifade edilir.

$$\Lambda = LAST - GAST = LMST - GMST \quad (2.28)$$

Güneşin yerküre etrafındaki görünen hareketindeki düzensizlikler ekvator üzerinde sabit bir açısal hızla hareket eden bir güneş tanımını gerekli kılmış ve bu tanımlamadaki güneşin saat açısı Ünlversal Zaman (Universal Time) olarak adlandırılmıştır. UT zaman ölçeği pek çok gözlemevinden gerçekleştirilen astronomik gözlemlerle doğrudan elde edilen bir büyüklüktür ve sonrasında UT0, UT1, UT2 ve UTC elde edilmektedir. UT0, gerçekleştirilen gözlemlere kutup hareketinin ve dönme hızındaki değişimler dahil edilerek hesaplanmakta ve gözlemlenen tüm değerlerin ağırlıklı ortalamaları alınarak UT1 hesaplanmaktadır. Daha sonra yer dönme hızındaki mevsimsel değişimlerin UT1'e getirilmesi ile UT2 elde edilmektedir.

Navigasyon gibi uygulamalarda kullanılmak için uniform bir zaman ölçeği gereksinimi UT1 ile ilişkilendirebilecek bir zaman ölçeği olan Ünlversal Koordine Zaman (Universal Coordinated Time-UTC) kavramının ortaya sürülmesine neden olmuştur. UTC zaman aralığı TAI ile tam olarak çakışmakta ve $0.9''$ 'den daha küçük bir değerle UT1 ile uyum sağlamaktadır. UTC'nin UT1'den $0.9''$ 'den daha fazla sapması

olmaması için gerekli görüldüğünde *leap second* adı verilen 1'''lik bir düzeltme yayınlanmaktadır.

Çizelge 2.2 : Zaman İndirgemeleri [21]'den güncellenmiştir.

Zaman ve Parametreler	Açıklama	Hesaplama
GPST	GPS Zamanı	GPS ile elde edilen gözlem epok'u
UTC	Universal Time Coordinated	UTC - GPST -16s
UT1	Universal Time 1	UT1 - UTC + $\Delta UT1$ $\Delta UT1 \leq 0.9s$
t	J2000.0 ile hesaplama epok'u $T_U T1$ arasında geçen Julien yüzyılı t	$t = \frac{T_U T1 - 2451545.0}{36525}$
GMST	Greenwich Ortalama Yıldız Zamanı	$GMST(0^h UT1) = 6^s 41^d 50.^s 5481 + 8640184.^s 812866 \cdot t + 0.093104 \cdot t^2 - 6.^s 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3$
TAI	Uluslararası Atomik Zaman	$TAI = UTC + 35^s$
TT	Yerel Zaman	$TT = TAI + 32.184$
t	J2000.0 ile hesaplama epoku T_{TT} arasında geçen Julien Yüzyılı	$t = \frac{T_{TT} - 2451545.0}{36525}$
$\Delta\psi, \Delta\epsilon, \epsilon_0, \Omega$	Nütasyon Parametreleri. $\Delta\psi$: Ekliptiğin boylam nütasyonu, $\Delta\epsilon$: Ekliptik eğikliği nütasyonu, ϵ_0 : Ekliptiğin ortalama eğikliği, Ω : Ay yörünge noktasının boylamı	IAU nütasyon modeli 2000
Δm	Ekinoks eşitliği	$\Delta m = \Delta\psi \cdot \cos \epsilon_0 + 0.^s 00264 \cdot \sin \Omega + 0.^s 000063 \cdot \sin 2\Omega$
GAST	Greenwich Görünen Yıldız Zamanı	$GAST = GMST + \Delta m$

Astronomik koordinatlar (Φ, Λ) ile rektasansiyon sistemi koordinatlarının (α, δ) ilişkilendirilmesi için GPS zamanı ile elde edilen yıldız görüntülerinin epok bilgisinin, GAST'a dönüşümünün gerçekleştirilmesi gerekir. Sayısal Zenit Kamera Sistemi hesaplarında zaman bilgisi GPS yardımıyla elde edilmekte ve astronomik koordinatların elde edilmesinde kullanılan GAST zamanına, Çizelge 2.2'de verilen formüller kullanılarak indirgeme ile ulaşılmaktadır.

2.1.4.3 Yersel ve göksel referans sistemleri arasındaki dönüşümler

Yersel sistemden göksel sisteme dönüşüm iki adımda gerçekleştirilir. Kutbun, presesyon ve nütasyon etkisindeki göksel sistemdeki hareketi ile kutup hareketi etkisindeki yersel sistemdeki davranışı ayrı ayrı değerlendirilir ve bu hareket Greenwich Görünen Yıldız Zamanı (GAST) ile ilişkilendirilir.

Dönüşüm, presesyon, nütasyon, yer dönme açısı ve kutup hareketlerini içeren bir dizi dönme matrisi ile gerçekleştirilir. Temelde iki ayrı dönüşüm stratejisi izlenir. IAU2000 çözümlmeleri, ekinoks tabanlı (equinox-based) ve ortalama gök kutbu tabanlı (CIO-based) stratejileri önermektedir.

Ekinoks tabanlı stratejide yer-sabit yersel referans sisteminden (ITRS) uzay-sabit jeosentrik göksel referans sistemine (GCRS) dönüşüm;

$$\mathbf{r}_{GCRS} = \mathbf{P}(t)\mathbf{N}(t)\mathbf{R}_3(-\theta(t))\mathbf{R}_2(x_p(t))\mathbf{R}_1(y_p(t))\mathbf{r}_{ITRS} \quad (2.29)$$

olarak modellenir. Burada $\mathbf{R}_i (i = 1, 2, 3)$, ilgili doğrultuda i . eksene ait dönme matrisleri, t , yersel zamanda (TT) ölçme zamanı, $\mathbf{r}_{GCRS}$ ve $\mathbf{r}_{ITRS}$ uzay-sabit ve yer-sabit sistemdeki doğrultu vektörleri, x_p, y_p kutup koordinatları ve $\mathbf{R}_2(x_p)$, $\mathbf{R}_1(y_p)$ kutup hareketinin dikkate alındığı dönüşüm matrisleridir. Yer dönme hareketi $\mathbf{R}_3(-\theta)$ matrisi içinde ifade edilir ve burada yer dönme açısı θ , Greenwich görünen yıldız zamanı (GST) olarak adlandırılır.

Eşitlik 2.29'daki dönüşüm matrisleri;

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \zeta \cos \theta \cos z & -\sin \zeta \cos \theta \cos z & -\sin \theta \cos z \\ -\sin \zeta \sin z & -\sin \zeta \sin z & \\ \cos \zeta \cos \theta \sin z & \sin \zeta \cos \theta \sin z & -\sin \theta \sin z \\ +\sin \zeta \cos z & +\cos \zeta \cos z & \\ \cos \zeta \sin \theta & -\sin \zeta \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\psi & -\sin \Delta\psi \cos \varepsilon & -\sin \Delta\psi \cos \varepsilon \\ \sin \Delta\psi \cos \varepsilon' & \cos \Delta\psi \cos \varepsilon \cos \varepsilon' & \cos \Delta\psi \sin \varepsilon \cos \varepsilon' \\ & +\sin \varepsilon \sin \varepsilon' & -\cos \varepsilon \sin \varepsilon' \\ \sin \Delta\psi \sin \varepsilon' & \cos \Delta\psi \cos \varepsilon \sin \varepsilon' & \cos \Delta\psi \sin \varepsilon \sin \varepsilon' \\ & -\sin \varepsilon \cos \varepsilon' & +\cos \varepsilon \cos \varepsilon' \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{R}_1(y_p(t))\mathbf{R}_2(x_p(t)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_3(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

olarak anılır.

Ortalama göksel kutup tabanlı (CIO-based) stratejide ise dönüşüm;

$$\mathbf{r}_{GCRS} = \mathbf{Q}(X_p(t), Y_p(t))\mathbf{R}_3(s(t))\mathbf{R}_3(-ERA)\mathbf{R}_3(s'(t))\mathbf{R}_2(x_p(t))\mathbf{R}_1(y_p(t))\mathbf{r}_{ITRS} \quad (2.33)$$

olarak ifade edilir. Burada t ; yersel zamanda gözlem zamanı, s' ; kutup hareketi, ERA ; yer dönme açısı, $\mathbf{Q}$; presesyon ve nütasyon matrisi ve x_p, y_p ; jeosentrik göksel koordinat sisteminde ortalama gök kutbu koordinatlarıdır.

Zaman bağılı yer dönme parametreleri (EOP), IERS tarafından gözlemler sonucu elde edilmekte ve web ortamında yayınlanmaktadır [45]. Yayınlanan parametreler arasında göksel kutup ofsetleri $\Delta x_p, \Delta y_p$, yersel sistemdeki kutup koordinatları x_p, y_p ve UT1-UTC ile sağlanan yer dönme açısı bulunmaktadır. Yer dönme parametrelerinin belirlenmesinde uzay jeodezisi teknikleri kullanılmaktadır. VLBI, universal zaman ve nütasyon parametrelerinin belirlenmesine katkı sağlarken, LLR ile uzun periyotlu presesyon ve nütasyon parametrelerine katkı sağlanmaktadır. Kutup hareketleri VLBI ile belirlenebilse de GPS ve DORIS istasyonlarının küresel dağılımı meteorolojik koşullardan bağımsız olması nedeniyle kutup hareketlerinin belirlenmesinde tercih edilmektedir.

Sayısal zenit kamera sistemi gözlemlerinde yıldızlara ait görünen koordinatların hesabı için presesyon ve nütasyon dikkate alınmakta, GAST ise astronomik koordinatların elde edilmesinde kullanılmaktadır. Kutup koordinatları x_p, y_p ise düzeltme olarak zenit noktasının koordinatlarının hesabına dahil edilmektedir.

2.2 Astro-jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesinin Teknolojik Altyapısı ve Güncel Durumu

2.2.1 Astro-jeodezik çekül sapmalarının belirlenmesinin teknolojik gelişimi

Astronomik gözlemler deneyimli operatörlerin gerçekleştirdiği optik-mekanik ölçmelerden sayısal otomatize sistemlere doğru gelişim göstermiştir. Yapay uyduların fotoğraf plakalarına kaydedildiği uydu kameralarından elde edilen bilimsel birikim, prezisyonlu uydu yörüngelerinin ve yüksek doğruluklu yıldız kataloglarının hesaplanmasını sağlamıştır. Bilimsel ve askeri amaçlarla kullanılan uydu kamera sistemleri tarihsel süreç içerisinde önce taşınabilir sistemlere dönüşmüş ardından da kullanımı azalmıştır.

Astronomide kullanılan uydu kameraları ile gök cisimlerinin konumları hesaplanırken, jeodezik astronomide bu süreç tersine işletilerek gök cisimlerinin koordinatlarından yararlanılarak ölçme istasyonunun konumunun belirlenmesi üzerine çalışmalar

başlamış ve zenit kamera sistemleri tasarlanmıştır. Ölçme ve görüntüleme sistemlerindeki teknolojik gelişmeler analog sistemlerin yerini sayısal sistemlerin almasına olanak sağlamıştır. Geliştirilen ilk zenit kamera sistemlerinin çekül sapması bileşenlerini belirleme doğrulukları günümüzde yeniden bu konuyu güncelleştirmiştir.

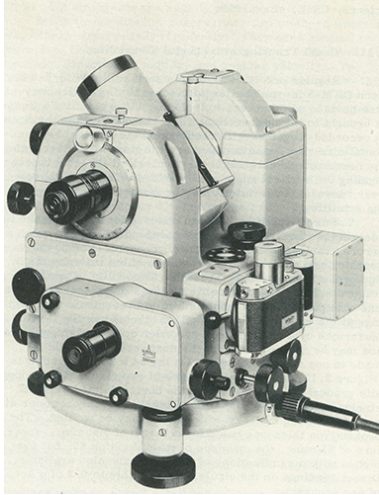
2.2.2 Uydu kameraları

Uydu jeodezisinde yapay uyduların optik yöntemlerle izlenmesi 1960'lı yılların başlarında temel araştırma alanı olmuştur. Bir yapay uydunun gözlenmesi ya da izlenmesi, uyduya ait konum bilgisinin belirli koordinat sisteminde istenilen zamanda belirlenmesini amaçlamaktadır. Gözlem tekniği görsel, fotoğrafik, fotoelektrik ve elektronik metodlar ile gerçekleştirilmiştir.

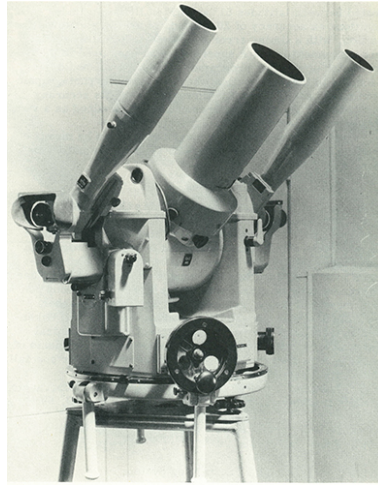
Görsel yöntemler genellikle pasif uydulara gerçekleştirilir. Bu uydular ya radyo dalgası üretmeyen ya da bir şekilde radyo yayını aktif olmayan uydulara yapılmaktaydı. Bu gözlemleri gerçekleştiren aletler genelde zaman belirleme sistemleri (kronograf vb.) entegre edilmiş küçük teleskoplar, dürbünler, teodolitler ya da kine-teodolitler olarak tasarlanmıştır. Efektif bir şekilde kullanılan bazı sistemler, Cambridge Smithsonian Astrofizik Gözlemevi (Smithsonian Astrophysical Observatory. SAO) ve Sovyetler Birliği'nde bulunmaktaydı. Bu sistemler ile çeşitli gözlem programları başlatılmıştı. Bu programlardan biri SAO bünyesinde yürütülmekteydi ve 95 istasyonda uyduya ait meridyenden geçiş zamanı ve yükseklik bilgisi kaydedilmekteydi. Bu sistem ile 11^{mag} parlaklığında uydular gözlemlenebilmekte ve elde edilen doğruluk konum ve zaman belirlemede $0.1''$ ile $1.0''$ değerlerine ulaşmaktaydı. Elde edilen sonuçlar Uydu Gözlemleri Kataloğunda yayınlanmaktaydı. Uydu gözlemleri amacıyla başlatılan bir diğer program ise Sovyetler Birliği'nde 75 istasyondan oluşan bir gözlem ağı ile gerçekleştirilmekteydi. Elde edilen sonuçların yayınlandığı Sovyet Uydularının Gözlem Sonuçları Bülteni'nde, konum doğruluğu $0.1'' - 0.3''$ ve zaman belirleme doğruluğu $0.2'' - 0.3''$ olarak bildirilmekteydi.

Uydu gözlemleri, ayrıca özel olarak tasarlanmış Wild T3 ve Kern DKM-3A gibi teodolitlerle de gerçekleştirilmekteydi. Teodolitler ile gerçekleştirilen optik gözlemler zaman belirleme sistemleri ile birlikte çalışmaktaydı ancak ulaşılan doğruluklar büyük ölçüde gözlemcinin deneyimine bağlıydı. Gözlemci kaynaklı hataların minimize edilmesi için Askania Prezisyonlu Teodolit (Askania Precision

Theodolite - TPR) gibi teodolitler bazı özel mekanik ve fotoğrafik ekipman ile donatılmıştı. Böylelikle gözlemcinin yalnızca hedef cisme odaklanması sağlanmış ve düzeç ve zaman ile ilgili bilgiler fotoğraf yardımıyla kaydediliyordu. Deneyimli bir gözlemci TPR ile birkaç dakikalık bir konum doğruluğu ve $0.01''$ zaman belirleme doğruluğuna ulaşabiliyordu (Şekil 2.12a). Daha yüksek doğruluk arayışları karmaşık yapısı olan bir kine-teodolit ile mümkün olmaktaydı. Kine-teodolit gözlemci kaynaklı hataların belirlenmesine olanak sağlasa da geometrik jeodezinin preizyon beklentilerini karşılayamıyordu. Kine-teodolit, birinin azimutu diğerinin de yüksekliği izlediği iki operatör tarafından kontrol edilen, aynı zamanda fotoğraf ile uydunun görüntülerini kaydeden yüksek doğruluklu bir teodolit olarak tasarlanmıştı. Bu sistem ile elde edilen fotoğraflarla ilişkilendirilen zaman $0.2''$ hassasiyetle belirlenebilmekteydi. Sistem ile elde edilen gök cisimlerinin parlaklığı ancak 3.5^{mag} ile 4.5^{mag} büyüklüklerine ulaşabildiğinden ancak Sputnik 2, Sputnik 3 ve Echo I gibi parlak uyduları gözlemleyebilmek mümkündü (Şekil 2.12b).



(a) Askania prezisyonlu teodolit.

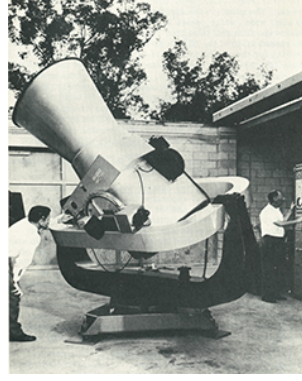


(b) Askania kine-teodolit.

Şekil 2.12 : Uydu gözlemleri için kullanılan prezisyonlu teodolitler.

Fotoğrafik yöntemlerde, uydunun konumlarının belirlenmesi, gözlem aletlerinin sabit ya da taşınabilir olması açısından iki alanda incelenebilir. Sabit uydu kameralarından en prezisyonlu sonuçlar üreten kamera sistemi, J. G. Baker ve J. Nunn tarafından geliştirilen ve Smithsonian Astrofizik Gözlemevi bünyesinde kullanılan Baker-Nunn kamera sistemiydi (Şekil 2.13a). Bu sistem rulo film makaraları ile prezisyonlu zaman bilgisini ilişkilendirmekteydi. Yöntem olarak, yıldız arka planında uydunun görüntülerini kaydedilmekteydi ve pozlama süresi olarak $0.2'' - 3.2''$ arasında bir değerde gözlem yapılmaktaydı. Bu kamera iki farklı yöntemde çalışabilecek şekilde

tasarlanmıştı. Bu yöntemlerden ilkinde kamera pozlama esnasında hareket etmemekte ve yıldız arka planında hedef uydunun birkaç santimetre uzunluğundaki izleri kaydedilmekteydi (Şekil 2.13b). Bu yöntem ile görüntülenen uydunun saniyedeki hızının 0.1^0 'den daha yavaş ve 8.5^{mag} büyüklüğünden daha parlak olması gerekiyordu.



(a) Baker-Nunn uydu kamera sistemi.



(b) Baker-Nunn sistemi ile elde edilmiş örnek bir görüntü.

Şekil 2.13 : Sabit kurulumlu fotoğrafik uydu kamera sistemi.

Ölçme yöntemlerinden ikincisi uydunun hesaplanan açısal hızına eşit bir hızda kameranın hedef uyduyu takip etmesi üzerine kuruluydu. Uyduya ait açısal hız bilgilerinin hesaplanmasındaki hatalar ve uydu yüksekliğinin değişimi nedeniyle noktasal kaydedilmesi gereken uydu görüntülerde çizgisel olarak belirmektedir ve parlaklığı çok daha düşük uyduları gözlemlemek mümkün olmaktaydı. Ayrıca bu yöntemlerin kombinasyonu olarak farklı gözlem teknikleri ile uydu konumlarını belirlemede prezisyonun artırılması hedeflenmişti.

Fotoğrafik uydu kameralarının kullanımının yaygınlaşması, taşınabilir sistemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Askeri amaçlarla geliştirilen Balistik Kameralar füze uçuş yollarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Konumu bilinen iki ya da daha fazla sayıda istasyondan ışık kaynağı yerleştirilmiş füzelere gerçekleştirilen eş zamanlı gözlemlerle yıldız arka planında füzelerin görüntüleri elde edilebiliyor ve rotaları üçgenleme yöntemiyle belirlenebiliyordu. Bu sistemler daha sonraları ışık kaynağı olan ya da güneşten aldığı ışığı yansıtan uyduların yörüngelerini belirlemek amacıyla kullanılmıştı. Uygulamada kullanılan pek çok Balistik Kameradan Wild BC-4, PC-1000 ve PC-600 bunların en önemlileriydi. Bu sistemlerle ulaşılan doğruluklar, konum belirlemede $\pm 5''$, zaman belirlemede ise $0.002''$ civarındaydı.

Uydu gözlemleri için geliştirilen kamera sistemleri, Ay'ın prezisyonlu konum bilgisinin belirlenmesi çalışmalarına da öncülük etmiştir. Yıldız arka planında, yıldızlara oranla çok daha parlak olan Ay'ın görüntüsünün kaydedilmesi özel bir kamera sisteminin tasarlanmasını gerektirmiştir. Amerika Birleşik Devletleri Deniz Kuvvetleri Gözlemevi bünyesinde W. Markowitz tarafından geliştirilen çift kameralı sistem ile $\pm 0.03''$ değerinde bir doğruluk ile ($\pm 55m$) ile konum bilgisinin elde edildiği bildirilmiştir.

2.2.3 Sayısal zenit kamera sistemleri

Uydu ve yıldız gözlemlerinde elde edilen doğruluklar ve sonucunda üretilen prezisyonlu yıldız katalogları jeodezik astronomi gözlemlerinde de yeni bir çağ başlatmıştır. Klasik optik-mekanik gözlem araçları fotoğraf sistemleri ile donatılmış ve zenit doğrultusunda gözlem yapacak şekilde sistem tasarımları yapılmıştır. Bu sistemler ile 1970'li yılların başında zenit kamera sistemleri adı altında Almanya'da ilk çalışmalarını gerçekleştirilmiştir. Bir ya da daha fazla deneyimli operatöre gereksinim duyan klasik optik-mekanik sistemlerin yerine TZK1 gibi otomatize sistemler ile kullanıcı kaynaklı hataların minimize edilmesi amaçlanmıştır. CCD algılayıcı sensörlerin icadı ve sonrasında ulaşılabilir fiyatlara elde edilmesinin ardından cam fotoğraf plakalarına görüntülenen yıldız görüntüleri sayısal bilgiler olarak kaydedilmeye başlamıştır. GPS'nin kullanıma sunulmasıyla, sayısal zenit kamera sistemlerinde zaman belirlemede yüksek doğruluklu çözümler üretilmeye başlanmıştır.

CCD algılayıcılar ve GPS alıcıları ile donatılan ilk sayısal zenit kamera sistemleri Almanya [6, 13, 18], Viyana [14–17] ve İsviçre'de [20] kullanılmaya başlandı. Bu sayısal zenit kamera sistemlerinden TZK2-D [6] ve DIADEM [20] geliştirilme süreçleri devam eden sistemler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Almanya'da Hannover Jeodezi Enstitüsünde tasarlanan [10] sistemin geliştirilmesi ile TZK2-D sayısal zenit kamera sistemi üretilmiştir. Bu sistemin optik bileşeni olan Zeiss Mirotar lens, 200 mm ayna açıklığına ve 1020 mm odak uzaklığına sahip düşük distorsiyonlu Maksutov-Cassegrain tipi bir optik mimariye sahiptir. Apogee firmasına ait Kodak KAF 1602E algılayıcısını kullanan CCD kamera, optik sistem odak düzleminin alt kısmına yerleştirilmiştir ve 14^{mag} parlaklığındaki yıldızları kaydedebilme yeteneğindedir. CCD kameranın dizi boyutları 1530×1020 piksel ve

piksel büyüklüğü $9 \mu m \times 9 \mu m$ 'dir. Elektro-mekanik bir perdeye sahip olan CCD algılayıcı ile $0.5'' - 1.0''$ pozlama süreleri aralığında görüntü kaydedilmektedir. Sistem ile gök küre üzerinde $47.2' \times 31.5''$ lık bir pencere görüntülenebilmektedir. Görüntülere ait epok bilgisinin ve elipsoidal koordinatların belirlenmesi için Z12 ve Trimble marka GNSS donanımı kullanılmaktadır. TZK2-D sisteminde yüksek çözünürlüklü, $100 Hz$ frekansında veri kaydedebilen HRTM eğimölçerler kullanılmaktadır. Görüntülerin değerlendirilmesi için USNO tarafından geliştirilen NOVAS kütüphanelerinin altyapı kullanıldığı AURIGA [6] adı verilen yazılım geliştirilmiştir. Sistemin doğruluğu $0.05''$ 'ye ulaşabilmektedir.

İsviçre Zürih ETH Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Enstitüsü tarafından geliştirilen DIADEM sayısal zenit kamera sisteminin tasarımı büyük ölçüde TZK2-D sistemi ile benzerdir. DIADEM sisteminde, Zeiss Mirotar lensine Kodak KAF 6303E algılayıcısını kullanan DTA CCD kamerası entegre edilmiştir. CCD Kameranın dizi boyutları 3088×2056 piksel ve piksel büyüklüğü $9 \mu m \times 9 \mu m$ 'dir. Sistemin gök küre üzerinde kapladığı alan $95.2' \times 6.12''$ 'dir. CCD algılayıcı ile $0.5'' - 1.0''$ pozlama süreleri aralığında elde edilen görüntülerin epok bilgisi ve elipsoidal koordinatları, sırasıyla u-blox ve Leica GNSS donanımı ile ölçülmektedir. Görüntüler [6] tarafından geliştirilen AURIGA yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Yıldız koordinatlarının elde edilmesi için TYCHO-2 ve UCAC yıldız katalogları kullanılmaktadır. HRTM eğim sensörlerini kullanan sistemin doğruluğunun $0.05''$ 'ye ulaşabildiği kanıtlanmıştır.

Viyana Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen ZC-G1 sayısal zenit kamera sisteminde 200 mm odak uzaklığına ve 50 mm açıklığa sahip bir lens kullanılmıştır. Sisteme 752×580 piksel dizisi boyutlarına ve $11 \mu m \times 12 \mu m$ piksel büyüklüğüne sahip Starlite MX 916 algılayıcı entegre edilmiştir.

Polonya AGH Bilim ve Teknoloji Üniversitesi bünyesinde gerçekleştirilen çalışmada, optik bileşen olarak MTO-11 CA lensi kullanan sisteme Starlight Xpress SXVF-M25C CCD kamera entegre edilmiştir. 3024×2016 piksel dizisi boyutlarına sahip CCD algılayıcının piksel büyüklüğü $7.8 \mu m \times 7.8 \mu m$ 'dur. Gök küre üzerinde $82' \times 54'$ boyutlarında bir alanda $1''$ 'lik pozlama sürelerinde 9^{mag} büyüklüğünde yıldızlar kaydedilebilmektedir. Yıldız koordinatlarının elde edilmesi için Tycho-2 ve GSC yıldız kataloglarından yararlanılmıştır. Görüntülerin değerlendirilmesi için

MaXimDL ve Astroart yazılımları kullanılmıştır. Astronomik koordinatların elde edilmesindeki doğruluk $2 - 3''$ olarak yayınlanmıştır.

Sırbistan Belgrad Üniversitesi Jeodezi ve Jeoinformatik Bölümü bünyesinde PZL-100 optik ölçme aletine entegre olarak SBIG ST2000-XMC CCD kamerası kullanılmıştır. CCD Kameranın piksel dizisi boyutları 1600×1200 ve piksel boyutları $7.4 \mu m \times 7.4 \mu m$ 'dir. Sistemin gök küre üzerinde kapladığı alan $20' \times 15'$ 'dir. Sistemin doğruluğu ile ilgili değerler yayınlanmamıştır.

Letonya Üniversitesi Jeodezi ve Jeoinformatik Bölümü tarafından geliştirilen sayısal zenit kamera sistemi 200 mm ayna açıklığına ve 1390 mm odak uzaklığına sahip catadioptrik teleskop kullanılarak tasarlanmıştır. Sisteme 1350×2024 piksel dizisi boyutlarına ve $9 \mu m \times 9 \mu m$ piksel büyüklüğüne sahip CCD algılayıcı entegre edilmiştir. Sistemin zenit doğrultusuna yönlendirilmesi için HRTM eğimölçerler kullanılmıştır. Yıldız görüntülerinin elde edilirken $0.1''$ pozlama sürelerinde 13^{mag} parlaklığında yıldızlar kaydedilebilmiştir. Sistem ile hedeflenen doğruluk $0.1''$ olarak yayınlanmıştır. Bu çalışmada yeni bir zenit kamera tasarımı planlanmakta olup, çözüm gücü yüksek CCD kamera ve optik bileşen ile sistemin geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir.

Çin Ulusal Astronomik Gözlemevi tarafından geliştirilen sayısal zenit kamera sistemi DZT-1, Newton tipi 1180 mm odak uzaklığına 200 mm ayna açıklığına sahip bir optik bileşene sahiptir. DZT-1 sisteminde kullanılan Kodak KAF 6303E algılayıcının piksel boyutları $9 \mu m \times 9 \mu m$ 'dir. HRTM ve Lippmann eğimölçerlerin kullanıldığı sistem $0.5''$ pozlama süresinde gök küre üzerinde $10'$ 'lik bir alan kaplamaktadır. Sistem ile elde edilen sonuçların prezisyonları $0.2 - 0.3''$ olarak yayınlanmıştır.

Geliştirilen bazı sayısal zenit kamera sistemlerinin teknik verilerinin özeti Çizelge 2.3'de görülmektedir.

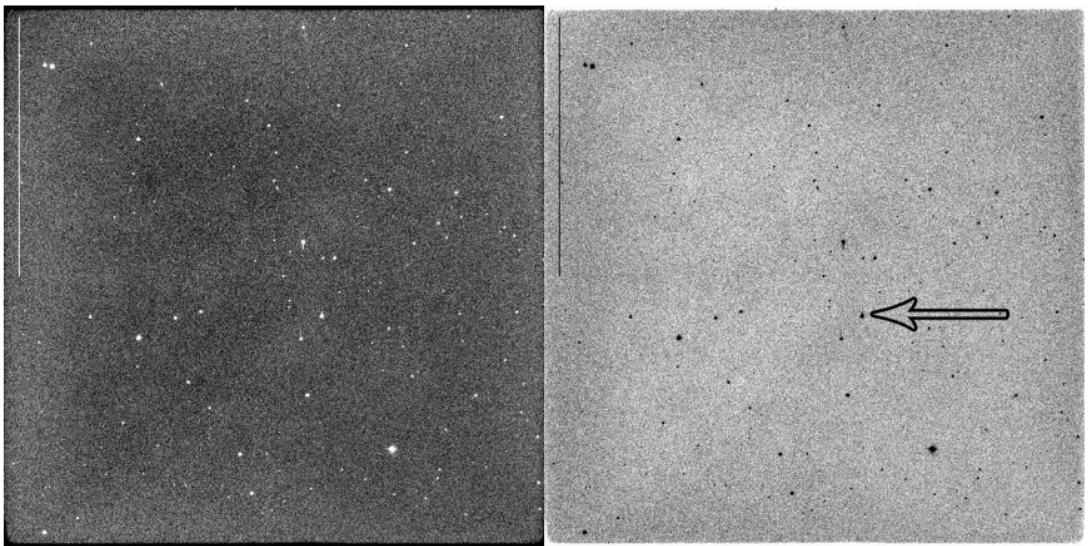
Çizelge 2.3 : Sayısal Zenit Kamera Sistemleri.

SZKS	IFE Hannover	ETH GGL	TU Vienna	Polonya	Sırbistan	Letonya	Çin
Odak Uzaklığı	TZK2-D [6] 1020 mm	DIADEM [20] 1020 mm	ZC-G1 [14] 2000 mm	[22] 1000 mm	[7] 500 mm	[24, 25] 2000 mm	DZT-1 [26] 1180
Açıklık	200 mm	200 mm	50 mm	100 mm	40 mm	200 mm	200 mm
Sensör	KAF 1602E	KAF 3603E	MX 916	SXVF-M25C	ST2000-XMC	–	KAF 6303E
CCD	Kodak	Kodak	Starlite	Starlight Xpress	SBIG	–	Kodak
Dizi Boyutları	1530 × 1020 p.	3072x2048 p.	752x580 p.	3024x2016 p.	1600x1200 p.	1350x1024 p.	3072x2048 p.
Piksel B.	9 $\mu m \times 9 \mu m$	9 $\mu m \times 9 \mu m$	11 $\mu m \times 12 \mu m$	7.8 $\mu m \times 7.8 \mu m$	7.4 $\mu m \times 7.4 \mu m$	9 $\mu m \times 9 \mu m$	
Piksel Ölçeği	1.86''/px	1.86''/px	–	1.63''/px	–	0.95''/px	–
FoV	47.2' × 31.5'	95.2' × 53.5'	–	82' × 54'	20' × 15'	0.35' × 0.27'	–
Pozlama Aralığı	0.2-0.5 s.	0.2-0.5 s.	–	1 s.	–	0.1 s.	0.5 s.
Yıldız Sayısı	20-50	80-100	20-40	4-15	–	20	–
GNSS	Z12, Ashtech	u-blox, Leica	–	CNS Sys.	–	Trimble	–
Eğim Sensörü	HRTM, Lippmann	HRTM, Lippmann	–	Wylzer Zerotronic	–	HRTM	HRTM, Lippmann
Doğruluk	< 0.05''	0.05 – 0.10''	1''	–	–	0.1''	0.2 – 0.3''

3. ULUSAL SAYISAL ZENİT KAMERA SİSTEMİ

3.1 Sistemin Tasarımı ve Sistem Bileşenlerinin Seçimi

Sistemin oluşturulması çalışmalarına ilk olarak uygun donanım ve yazılımın araştırılması ile başlanmıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi KRDAE ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Ulusal Gözlemevi (TUG) bünyesindeki donanım ve yazılımlar içinden zenit kamera gözlemlerinde kullanıma uygun, düşük maliyetli ekipmanın belirlenmesi için, farklı cihaz ve yazılımlar ile testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler kapsamında, uygun teleskop açıklığı ve kısa poz zamanlarına uygun CCD kameranın belirlenmesi ile ilgili KRDAE ve TUG bünyesinde test gözlemleri gerçekleştirilmiştir. TUG ve Akdeniz Üniversitesi'nin birlikte düzenlediği Uluslararası Astrometri kursu bünyesindeki uygulamalarda, çeşitli ülkelerden gelen ve konumsal astronomi alanında çalışmalar sürdüren bilim insanları ile projede kullanılacak donanım, yazılım ve yöntem konusunda görüşmeler gerçekleştirilmiş, 20 santimetre, 40 santimetre ve 1 metre açıklığa sahip teleskoplarla uygulamalar yapılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : TUG bünyesinde elde edilen örnek bir yıldız görüntüsü.

Sayısal zenit kamera sistemleri gözlemlerinde elde edilen görüntülerde kaydedilen yıldız sayısı önemlidir. Yıldızların noktasal görünümünün kaydedilmesi astrometrik doğruluk açısından gerekli olduğundan ve sayısal zenit kamera gözlemlerinde teleskop takip mekanizması olmadan kullanıldığından poz süreleri de mümkün olduğunca kısa tutulmaktadır. Bu çalışmada, yıldızların noktasal kayıtlarının yapılabildiği ve [6] ve [55]'de önerilen $0.4'' - 0.5''$ poz sürelerinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Kısa poz sürelerinde teleskoba düşen ışığı yüksek oranda kaydedebilen kameralara gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle gerek TUG bünyesindeki gerekse yurt dışındaki uzmanlar ile gerçekleştirilen görüşmeler sonrasında sistemin optik ve CCD bileşenleri için gerekli olan özellikler tartışılmış ve cihazların optimum özellikleri belirlenmiştir.

3.1.1 Teleskop ve CCD kamera

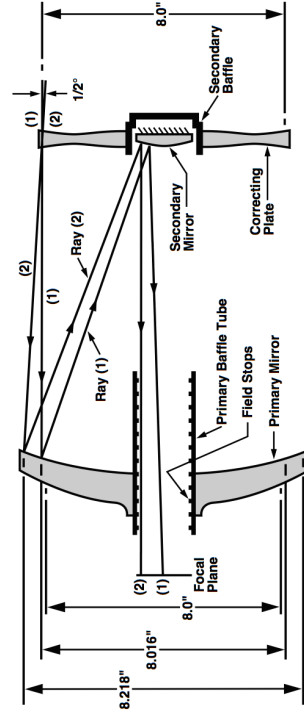
Sistemin optik bileşeni olan teleskop için ayna çapının büyüklüğünün önemli olması kadar sistemin taşınabilir olması da önemlidir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında oluşturulan sistemde, öncesinden testler ile yeterliliği belirlenen 20 cm ayna açıklığına ve 2000 mm odak uzaklığına sahip bir teleskop tercih edilmiştir. Bu bağlamda, Meade firmasına ait LX200 GPS modeli teleskop seçilmiştir (Şekil 3.2a). Elektronik kontrol donanımına sahip olan sistemin bilgisayar ortamında kontrolü için, bu çalışmaya özel geliştirilen yazılımlar ile farklı azimutlarda gözlem yapmak mümkün olmaktadır.

Teleskop Schmidt-Cassegrain optik mimarisine sahiptir (Şekil 3.2b) ve ışık kirliliği bulunan gözlem istasyonlarında yüksek performans ile çalışabilmektedir. Teleskop üzerinde 16 kanallı tek frekanslı bir GPS alıcısı ve elektronik eğim sensörü bulunmaktadır. Teleskop gözlem ön hazırlıkları operatör tarafından gerçekleştirildikten sonra $2'$ bir doğrulukla istenilen gök cismine yönelecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca Meade teleskopların ülkemiz genelinde gerek bilimsel gerekse amatör astronomi gözlemlerinde yaygın bir şekilde kullanılması ve ekonomik olması diğer bir tercih sebebi olmuştur. Ancak astronomik amaçlı gözlemler için, seçilen teleskop üzerinde sayısal zenit kamera ölçmelerine uygun olacak şekilde modifikasyonların gerçekleştirilmesi gerekmiştir.

Teleskop ile entegre bir şekilde kullanılacak olan CCD kameranın kısa poz aralıklarında yüksek oranda yıldız ışığını yakalayabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle sisteme görünür ışık dalga boylarında ($400 - 700 \text{ nm}$) yüksek kuantum etkinliği



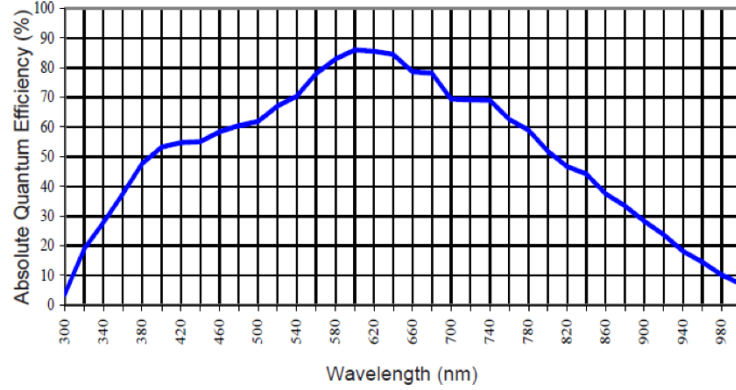
(a) Meade LX200 GPS teleskop



(b) Schmidt-Cassegrain mimari.

Şekil 3.2 : Sayısal zenit kamera sisteminin optik bileşeni.

değerine sahip (Şekil 3.3) Kodak KAF 3200ME yonga kullanan Apogee F32 model bir CCD kamera dahil edilmiştir.



Şekil 3.3 : KAF 3200ME yongaya ait kuantum etkinliği grafiği.

CCD kamera, 2184×1472 piksel dizi boyutlarına ve $6.8 \mu m \times 6.8 \mu m$ piksel boyutlarına sahiptir. Teleskop ile birlikte kullanıldığında piksel ölçeği $0.7''$ ve elde edilen görüntünün gök küre üzerinde kapladığı alan yaklaşık olarak $25' \times 17''$ 'dir. CCD yongası, görüntülerdeki sıcaklık kaynaklı etkilerin minimize edilebilmesi için, termo-elektrik soğutucu donanımı ile $-25^{\circ}C$ sıcaklığına kadar soğutulmaktadır.

Teleskop ile CCD kamera arasına yıldız görüntülerinin netlenmesi amacıyla kullanılan Meade firmasına ait Focuser yerleştirilmiştir. Ölçmeler öncesinde ve atmosferik parametrelerin görüntü netliğini etkileyecek şekilde değişmesi durumunda bu Focuser yardımıyla görüntülenen yıldızların netlenmesi gerçekleştirilmektedir. Sayısal zenit kamera sistemiyle elde edilmiş örnek bir görüntü Şekil 3.4’de verilmiştir.



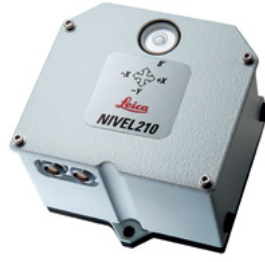
Şekil 3.4 : SZKS ile elde edilmiş örnek bir görüntü.

3.1.2 Eğimölçerler

Sistemin zenit doğrultusuna olurunca yakın düzeçlenebilmesi için prezisyonlu düzeçlere gereksinim vardır. Bu amaçla, ülkemizde pazarlanan ve düşük maliyetli Leica Nivel210 eğimölçerler seçilmiştir (Şekil 3.5). Nivel 210 eğimölçer donanımı, 300 ms ölçme zamanı aralığına sahiptir 0.001 *mrاد*(0.2'') çözünürlükte iki eksenli bir opto-elektronik bir sistemdir. Sistemin düzeçlenmesini kontrol etmek için kontrol ünitesine RS232 port üzerinden bağlanmış ve gerçek zamanlı veri akışı sağlanmıştır. Eğimölçerler ile elde edilen veriler bir saniye aralıklarla kaydedilecek biçimde görüntülerin epogu ile ilişkilendirilmiştir.

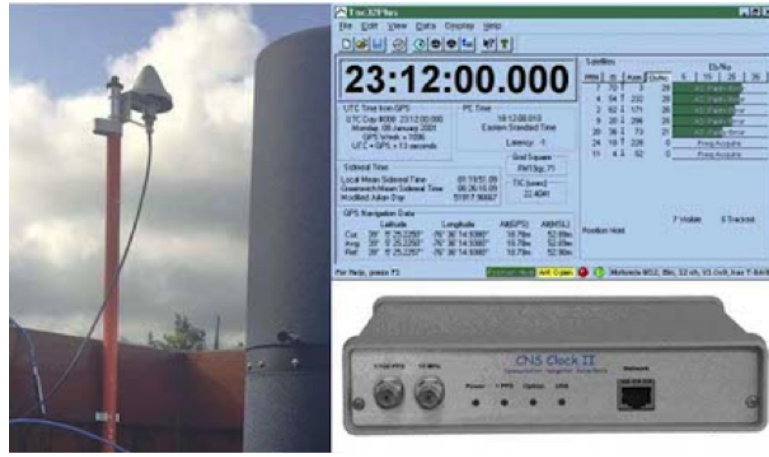
3.1.3 Zaman belirleme donanımı

Zaman belirleme amacıyla Motorola M12+ GPS alıcısı ile birlikte çalışan Timing3000 anten, izleme ve senkronizasyon yazılımı TAC32 Plus’tan oluşan bir konfigürasyon



Şekil 3.5 : Leica Nivel 210 eğimölçer.

belirlenmiştir. GPS donanımı ile gerekli kalibrasyonun yapılması durumunda, zaman bilgisi 25 nano saniye doğrulukla elde edilebilmektedir [56]. CNS Clock II donanımı bilgisayara seri port üzerinden bağlanarak kontrol ünitesinin zamanı her saniyede olmak üzere güncellenmektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Zaman belirlemede kullanılan GPS donanımı ve yazılımı.

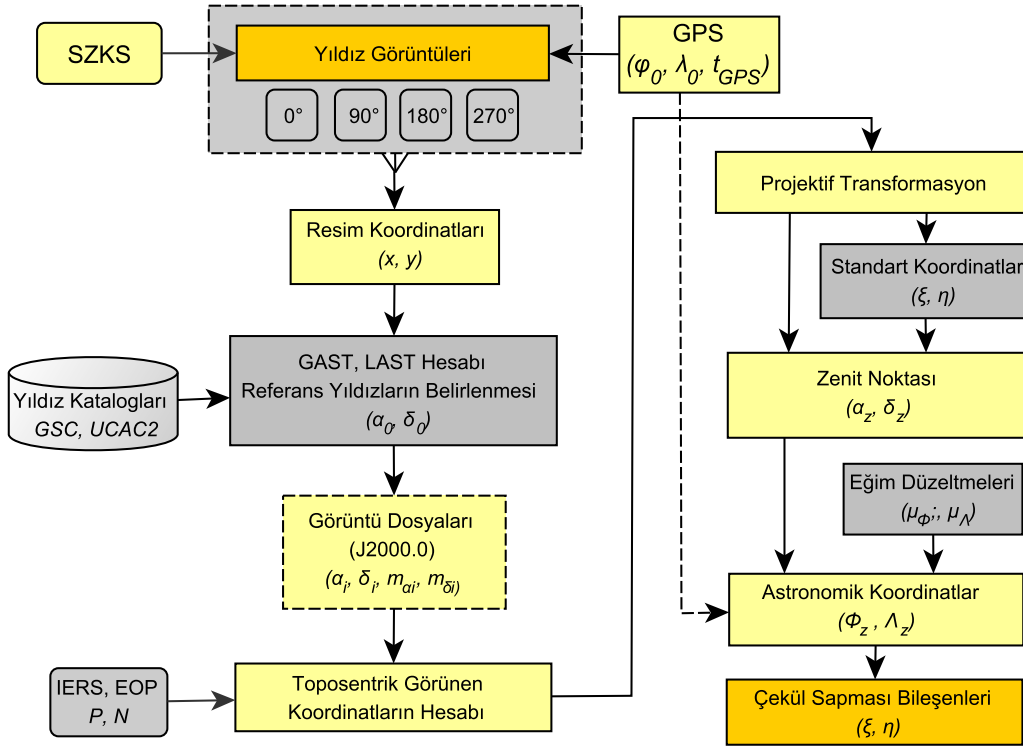
3.1.4 Ölçme ve değerlendirme yazılımları

Sayısal zenit kamera sistemi ile elde edilen veri (yıldız görüntüleri, prezisyonlu zaman bilgisi, jeodezik koordinatlar, eğim değerleri) bir kontrol bilgisayarı depolanmakta ve birbiri ile ilişkilendirilmektedir. Ölçme sırasında eğimölçer verisi Leica Spider QC yazılımı ile kontrol edilmekte ve kaydedilmektedir. Eğim bilgisi her saniyede bir ölçme zamanı ile ilişkilendirilerek değerlendirilmektedir. CCD kamera ve teleskop kontrolü Maxim DL Pro ve Matlab ile gerçekleştirilmektedir. Görüntü epöğünün belirlenmesi için kullanılan CNS Clock II donanımı TaC32 yazılımı ile birlikte kullanılmaktadır.

Elde edilen görüntülerdeki yıldızların tanımlanması, görüntülerin başlık bilgilerinin düzenlenmesi ve güncellenmesi, resim orta noktasının J2000.0 epöğündeki koordinatlarının belirlenmesi için, Pinpoint Astrometry Engine V.5, IRAF, astrometry,

Astometrica ve IDL yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Görüntülerin değerlendirilmesi, yıldızların toposentrik görünen koordinatları ve Greenwich görünen yıldız zamanının hesabı için USNO tarafından geliştirilen NOVAS C kütüphaneleri kullanılmıştır. NOVAS kütüphaneleri astrometri ve zenit kamera sistemlerinde standart değerlendirme yazılımı olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da bu algoritmalar tercih edilmiştir.

Firma ve kurumlar tarafından üretilen yazılımlar, genel amaçlı astronomik gözlemlerin değerlendirilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu yazılımlar zenit kamera sisteminin ürettiği bilgiyi doğrudan değerlendirmeye uygun yapıda değildir. Bu nedenle bu çalışmada özel yazılımlar geliştirilmiştir. Görüntülerdeki yıldızların tanımlanması ve katalog bilgilerini içeren dosyaların üretilmesi için JavaScript kodlarından yararlanılmıştır. Özel dosya yapıları ile çalışıldığından, görüntülerdeki yıldız ve katalog bilgilerinin düzenlendiği ve ön hesaplamaların yapıldığı ANSI C ortamında kodlar geliştirilmiştir. Değerlendirme adımlarının şematik gösterimi Şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7 : Değerlendirmede adımları.

3.2 Sistem Bileşenlerinin Entegrasyonu

Bileşenlerin entegrasyonu çalışmaları için Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi tarafından, geçmişte Danjon Astrolabı Pavyonu olarak kullanılan ve 1969 yılında inşa edilen gözlem kulübesi bu çalışmada kullanılmak üzere tahsis edilmiştir (Şekil 3.8). Uzun yıllardır kullanılmayan bu gözlem istasyonunun fiziki koşulları iyileştirilerek zenit kamera gözlemlerinin ana istasyonu olarak kullanılmıştır (Şekil 3.9). İstasyonda gerekli düzenlemenin ardından sistem bu istasyonda geliştirilmiş ve test gözlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8 : Danjon Astrolab Pavyonu.

Ana istasyon, çatısı açılabilen bir astronomik gözlem laboratuvarı olarak tasarlanmıştır. Ahşap olan zeminin kullanılamaz durumda olan ve zemin döşemesi bulunmayan bir bölümü, ana kayanın üzerinden yaklaşık 50 cm kalınlıkta bir beton blok inşa edilerek gözlemler için stabil duruma getirilmiştir. Platform, ölçme esnasında gözlemcinin hareketlerinin sistemin stabilitesini etkilememesi için mümkün olduğunca yapıdan bağımsız şekilde tesis edilmiştir. Danjon Astrolabı pavyonunda gerçekleştirilen yapısal revizyon çalışmaları yapıya zarar vermeden çatı mekanizması gibi çalışmayan aksamaların onarımı şeklinde planlanmış ve uygulanmıştır.

Sistem bileşenlerinin entegrasyonu için öncelikle tüm sistem bileşenleri kontrol ünitesinde ayrı ayrı birimler olarak çalıştırılmış ve her bir bileşenden sisteme veri akışı otomatize edilmiştir. CCD kamera ve görüntülerin netliği için kullanılan bir focuser cihazı, teleskop asal eksenini doğrultusunda yerleştirilmiştir. Sistem pilye ve sehpa



Şekil 3.9 : Test İstasyonu.

üzerinde çalışacak şekilde düşünülmüş ve kalibrasyonu yapılan bir tribrah üzerine yerleştirilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin tribraha yerleştirilebilmesi için bir adaptör tasarlanmış ve üretilmiştir.

Eğimölçerlerin sisteme entegrasyonu, üzerinde en çok çalışılan adım olmuştur. Eğimölçerlerin teleskoba yerleştirilmesi için düzeçlenebilir bir adaptör yardımıyla sistemin farklı konumlarında çalıştırılmış ve optimum çözümü veren tasarım için testler gerçekleştirilmiştir.

Sistemin önemli problemlerden biri de düzeçler ve düzeçleme işlemi olmaktadır. Teleskoba elektronik düzeçin monte edilmesi için üretilen parça paslanmaz çelikten imal edilmiş ve yaklaşık 1500 gram ağırlığındadır. Düzeçin ağırlığı ile toplam ağırlık 2350 gram olmaktadır. Bu ağırlığı dengelemek için eşit miktarda bir karşı ağırlık teleskobun simetriğine eklenmekte ve düzeçin entegrasyonu sonucu sistem üzerindeki toplam yük 4700 grama ulaşmaktadır. Gözlemler bu toplam ağırlık ile gerçekleştirilmiştir. Sistem üzerinde bahsedilen bu yükler Şekil 3.10'de görülmektedir.

Ancak teleskobun metal iskeletinin bu ağırlık ile deforme olabileceği düşünülmüştür. Teleskobun üzerindeki bu yükün farklı azimutlarda yaratacağı deformasyon da dikkate alınarak daha hafif karbon bileşenli güçlendirilmiş Polyoxymethylene malzemeden yeniden bir adaptör imal edilmiş (Şekil 3.11) ve böylece teleskoptan 3000 gram ağırlık kaldırılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : Sistem üzerindeki eğimölçer, adaptör ve ağırlıklar.



Şekil 3.11 : Hafifletilmiş adaptörün eğimölçer ile birlikte görünümü.

Yalnızca tüpe monte edilen eğimölçer esas alınarak yapılan düzeçlemenin sistemin tümünü yeteri kadar zenit doğrultusuna yönlendiremediği, monte yerinin esneyebileceği ve dönme ekseninin de ayrı bir düzeçle kontrol edilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Bu nedenle tüpe monte edilen eğimölçere ek olarak sistemin ana gövdesine dönme eksenini kontrol edecek ikinci bir eğimölçer yerleştirilmesine karar verilmiştir. İkinci eğimölçerin, eksen koşullarına daha doğru bir şekilde yaklaşması ve kısa iterasyon sürelerine ulaşılması hedeflenmiştir. Bu nedenle sistemin ana gövde ile alt yapısını bir arada tutan bağlantılara entegre şekilde bir adaptör tasarlanmış ve ikinci eğimölçer bu bölgeye entegre edilmiştir. İlk eğimölçer de bulunduğu konumdan daha stabil konuma ama yine teleskobun tüp kısmının üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.12). Gerçekleştirilen stabilizasyon testleri iki eğimölçerin birlikte davrandığını ve iterasyon sürelerinin kısaldığını göstermiştir.

Sayısal zenit kamera sisteminin test ağı noktalarına taşınması için bir taşıma çantası imal ettirilmiştir. Ayrıca test ağı noktalarında elektrik bağlantısının bulunmadığı noktalarda sistemin güç kaynağı görevini görecek bir akü sistemi yaptırılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12 : Alt yapıya ve tüpe yerleştirilen iki eğimölçer.

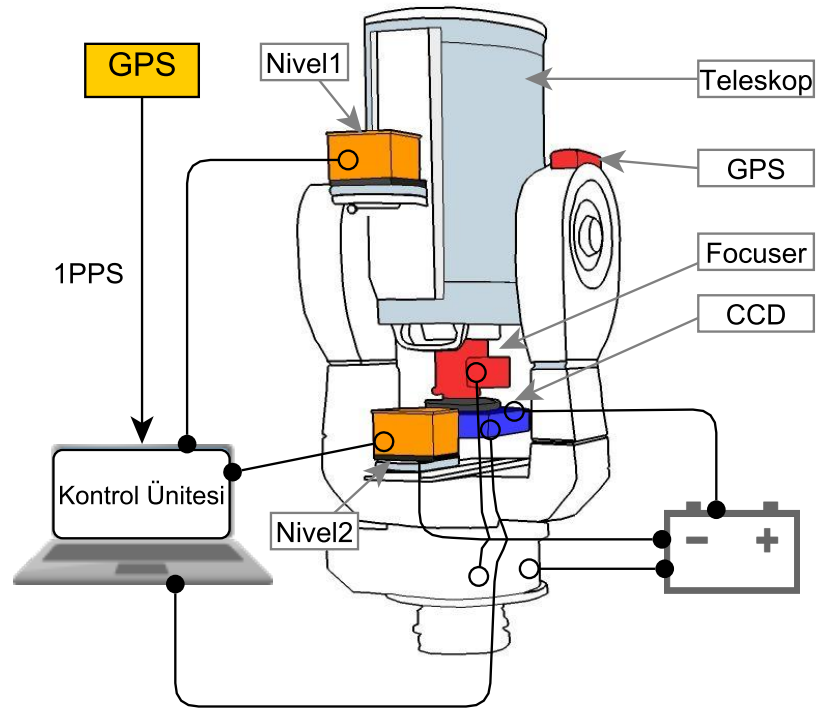


Şekil 3.13 : Sistemin için üretilmiş taşıma kutusu ve güç kaynağı.

Tasarlanan sayısal zenit kamera sisteminde sistemin düzeçlenmesi amacıyla iki adet eğimölçer, görüntülerin elde edilmesi için CCD kamera, görüntülerin netleştirilmesi için teleskop ve CCD'ye entegre focuser, zaman bilgisinin elde edilmesi amacıyla kullanılan tek frekanslı bir GPS alıcısı ve anteni ile elipsodal koordinatların elde edilmesi için jeodezik GPS donanımının entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistem tümüyle bilgisayar ortamında kontrol edilmekte ve veri akışı otomatize şekilde yönetilmektedir.

3.3 Kontrol ve Kalibrasyon Çalışmaları

TUG bünyesinde görev yapan uzmanlar ile, özellikle bu çalışma kapsamında kullanılan teleskop ve CCD kameranın kalibrasyonu çalışmaları sırasında, kalibrasyon yöntemlerine ve sonuçlarına ilişkin ortak çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14 : Sistemin şematik gösterimi.

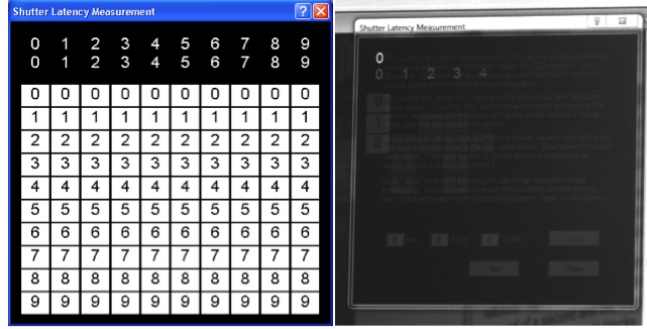
3.3.1 Teleskop ve CCD'nin kalibrasyonu

Teleskop kalibrasyonu yıldız görüntülerinden yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Gökyüzünde parlak ve yüksek bir yıldızla yönlendirilen teleskop ile elde edilen görüntüdeki netlik sistematik olarak bozularak kaydedilmektedir. Netliği bozulan görüntülerde yıldızlar noktasal görünümelerini kaybederek iç içe geçmiş daireler şeklini almaktadırlar. İkinci aynanın gölgesi olan içteki dairenin merkezi dıştaki dairenin merkezi ile çakışmak zorundadır. Eğer bu çakışma gerçekleşmiyorsa sistemin kalibre edilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen gözlemlerde yapılan ölçümler sonucu teleskop aynalarının konumlarının çakıştığı görülmüştür.

CCD kameranın kalibrasyonu kapsamında laboratuvar ortamında bir test alanı oluşturulmuştur. Bu test alanında CCD kameranın perde gecikmesi zamanı belirlenmiş ve Maxim DL Pro yazılımı yardımıyla hesaplanmıştır. Kamera Canon marka bir lens yerleştirilmiş ve monitördeki test görüntüleri bu lens yardımıyla kaydedilmiştir.

Deney ile, kamera kayıt komutu verildiği an ile görüntüsünün kaydedildiği an arasındaki zaman farkı belirlenmektedir. Bu fark gözlemlere düzeltme olarak getirilmektedir. Bu amaç için tasarlanmış bir örnek deney görüntüsü bilgisayar

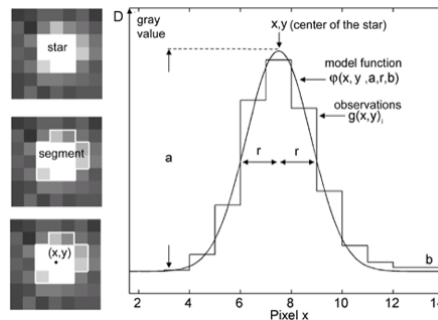
monitöründe belirlemek ve kamera bu örnek görüntüyü yakalayabilecek şekilde ayarlanmaktadır.



Şekil 3.15 : Shutter gecikmesi deneyi için kalibrasyon görüntüsü.

Ardından poz süresi 0.5 saniye ya da daha düşük bir değere getirilerek deney başlatılmaktadır. Örnek görüntü, zamana bağlı, sıralı olarak beliren rakamların olduğu bir dinamik görüntüye dönüşmekte ve bu görüntü kaydedilmektedir. Gecikme zamanı da sıralı şekilde beliren rakamlardan hangi değer yakalandığına dayalı olarak gecikme zamanı deney sonucu olarak belirlenmektedir. Elde edilen değerler saniye (sec), desisaniye (10th) ve santisaniye (100th) değeri olarak deney sonucuna girilir. Apogee F32 ile gerçekleştirilen deneyde shutter gecikmesi 0.02 saniye olarak belirlenmiştir (Şekil 3.15).

Bu değerın görüntülerle ilişkilendirilebilmesi için bilgisayar zamanının senkronizasyonu gerekmektedir. Bilgisayar zamanının senkronizasyonu için tek frekanslı bir GPS alıcısı ve anteni kullanılmakta ve zaman senkronizasyonu 25 nanosaniye mertebesinde sağlanmaktadır [56].



Şekil 3.16 : PSF ile yıldız merkezlerinin belirlenmesi.

Sistemin test çalışmaları süresince elde edilen görüntülerde kaydedilen yıldızlara ait merkez resim koordinatlarının belirlenmesi işlemi IRAF, IDL, Matlab, PICTRAN ve BAAP yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. IDL ve IRAF yazılımları

Point Spread Function (PSF) yöntemini kullanırken [55] (Şekil 3.16), fotogrametri yazılımları ağırlık fonksiyonları yardımıyla merkez belirlemektedir. Çizelge 3.1, IDL ve PICTRAN yazılımları yardımıyla elde edilen, örnek bir yıldız grubu için hesaplanan yıldız merkezlerinin resim koordinatları arasındaki karşılaştırmayı göstermektedir.

Yıldızla ait merkez resim koordinatların belirlenmesinde anlamlı farklar görülmemekle birlikte bu projedeki değerlendirmelerde astrometride yaygın olarak kullanılan Point Spread Function (PSF) yöntemine dayalı olarak yıldız merkezlerinin belirlenmesi benimsenmiştir.

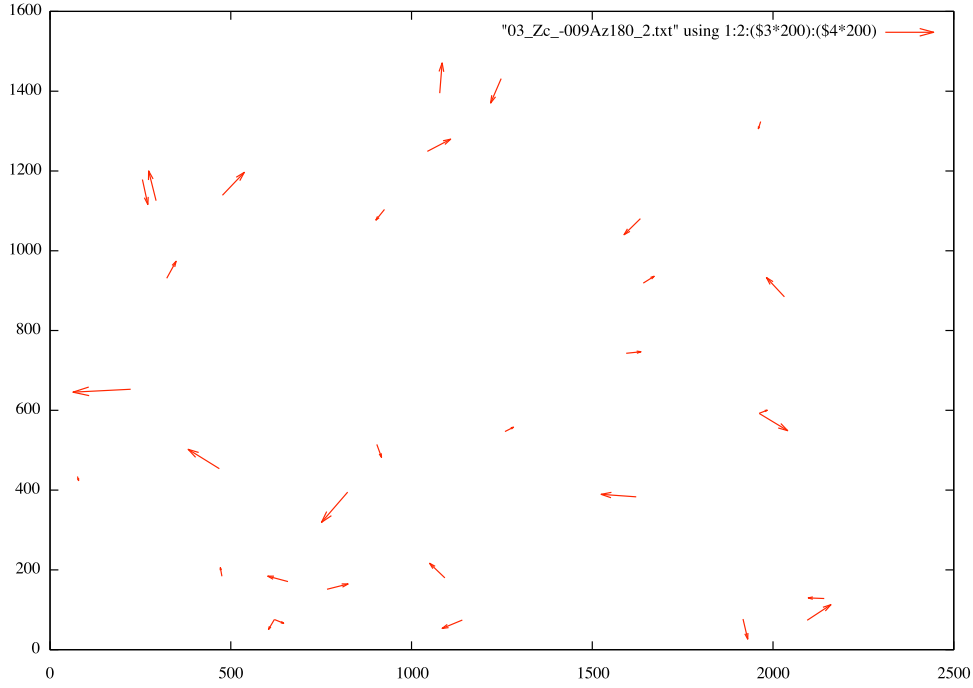
Çizelge 3.1 : PICTRAN ve IDL yazılımları ile belirlenen yıldız merkez koordinatları.

Sn	PICTRAN		IDL	
	X	Y	X	Y
1	935.583	889.583	935.262	889.553
2	905.583	678.917	905.295	678.894
3	832.212	578.904	832.048	579.247
4	886.477	346.977	886.407	347.171
5	856.750	838.341	856.504	838.268
6	617.146	998.979	617.008	998.747
7	368.896	738.229	368.550	738.206
8	51.438	708.604	51.216	708.318

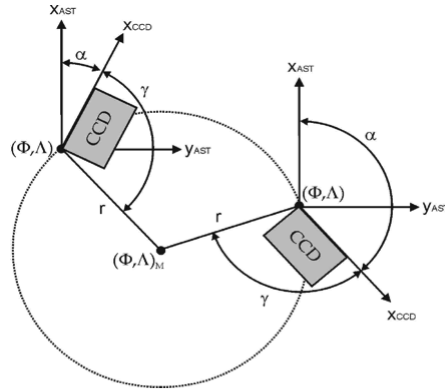
Yıldız görüntülerinde tanımlanan yıldızlara ait katalog konumları ile uyuşum parametreleri de CCD kameranın değerlendirilmesi çalışmalarında dikkate alınmıştır. Bu amaçla merkez koordinatları belirlenen yıldızlara ait katalog değerleri ile uyuşum değerleri hesaplanmış (Şekil 3.17) ve zenit noktasının enterpolasyonunda karesel ortalama hatası 0.3 yay saniyesinden daha yüksek olan yıldızlar değerlendirilmeye katılmamıştır .

3.3.2 Azimut ve göksel kalibrasyon

Zenit noktasının koordinatlarının belirlenmesi için zenit kameranın farklı azimutlardaki gözlemleri kullanılmaktadır. [10] ve [6], zenit kamera gözlemlerinde elde edilen görüntülerin azimuta bağlı değişimler gösterdiğini ve sistemde azimut kalibrasyonu işleminin gerçekleştirilmesi gerektiğine değinmişlerdir. Farklı azimutlarda elde edilen görüntülerin zenit noktası etrafında radyal bir simetri gösterdiği düşünülmektedir (Şekil 3.18).



Şekil 3.17 : Katalog ile uyuşum değerlerine göre hesaplamada kullanılan yıldızlar.



Şekil 3.18 : Azimut kalibrasyonu [6].

Azimut kalibrasyonu ile iki temel problem çözümlenmektedir. Bunlardan ilki, sayısal zenit kamera sistemi ile elde edilen her bir yıldız görüntüsüne ait azimutların hesaplanmasıdır. Farklı alet konumlarında elde edilen görüntülere ait orta nokta koordinatları dairesel bir simetri sağlamaktadır. Görüntülerinin orta noktalarına en iyi uyan dairenin yarıçapının hesaplanması ve CCD sensörün daire merkezine olan açısının belirlenmesi de ikinci problemin çözümü olmaktadır. Eşitliklerin çözümü için iki azimuta ait çözüm yeterli olsa da, aralarında 90^0 fark olan azimutlarda gözlem yaparak bilinmeyenlerin çözümü önerilmektedir [6, 10].

$$\Phi(X, L) = \Phi - \Phi_M + r \cos(\alpha + \lambda) \quad (3.1)$$

$$\Lambda(X, L) = \Lambda - \Lambda_M r \cos(\alpha + \lambda) \sec \Phi \quad (3.2)$$

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen gözlemlerde her bir görüntüye ait azimut değerleri hesaplanmakta ve bir gözlem gecesine ait ortalama zenit koordinatları elde edilmektedir.

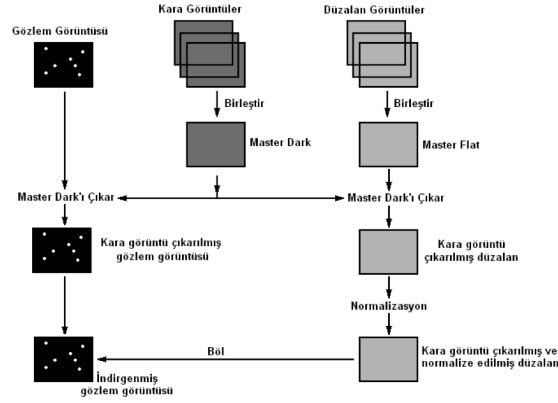
Bir diğer kalibrasyon işlemi de [6] tarafından geliştirilen göksel kalibrasyondur. Bu kalibrasyon adımı eğimölçerlerin CCD yongası ile yaptıkları açı, iki eğimölçer arasındaki dönüklük ve zenit doğrultusu hesaplanmaktadır.

3.3.3 Görüntülerin kalibrasyonu

Zenit kamera ile elde edilen görüntüler yardımcı görüntüler ile kalibre edilmiştir. CCD kamera ile elde edilen görüntüler yüksek miktarda termal, kamera kaynaklı, kozmik kaynaklı, atmosferik vb. etkilerden kaynaklanan gürültü barındırmaktadır. Bu gürültünün elimine edilebilmesi için kalibrasyona gereksinim duyulur. CCD kameranın kalibrasyonu için genel yaklaşım, verilerle aynı sistematik etkileri içeren kalibrasyon görüntülerinin alınması ve bu etkilerin düzeyinin ve karakterinin belirlenerek verilerden uzaklaştırılması işlemidir.

CCD sensörün kozmik ışınlara duyarlılığının ve rastgele hataların azaltılması için, çok sayıda sıfır (Bias), kara (Dark) ve düzalan (Flat Field) görüntüleri alınmaktadır. Bu görüntüler birleştirilerek rastgele hatalar azaltılır ve kozmik ışın etkileri uzaklaştırılır. CCD dedektörle yapılan tipik bir gözlem gecesinde ve gözlem sonundaki indirgeme işlemlerinde aşağıdaki adımlar izlenmektedir.

Gece boyunca zenit civarının seri gözlemler ile yıldız alanının görüntüleri alınmakta ve gece sonunda, gözlem sırasındakiyle aynı koşullarda kara görüntüler kaydedilmektedir. Gözlem başlangıcında ya da bitiminde, alacakaranlık ışığında düzalan görüntüleri alınmaktadır. İndirgeme aşamasında, kara (+sıfır) ve düzalan (+sıfır) görüntüleri, birer adet master dark ve master flat oluşturmak üzere birleştirilmekte, ardından master flat'den master dark çıkartılarak, master flat görüntü normalize edilmektedir. Gözlem görüntülerinden master dark görüntünün çıkarılmasının ardından, gözlem görüntüleri normalize edilmiş master flat'e (master dark çıkartılmış olan) bölünerek, kalibre edilmiş gözlem görüntüsü elde edilmektedir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 : Görüntü kalibrasyonun şematik gösterimi.

CCD Kamera gözlemlerinden elde edilen yıldız görüntülerinin çözümü, yıldız büyüklüğüne (parlaklığına) meteorolojik koşullara ve CCD kamera hatalarına bağlı olarak değişmektedir. Çözünürlüğü zayıf yıldızlar ($0.3''$ 'den daha küçük) uyuşumsuz olarak kabul edilmekte ve değerlendirmeye alınmamaktadır. Meteorolojik etkiler çok sayıda gözlem yaparak azaltılmaktadır. CCD kameranın diğer hataları, bu kamera ile en az 4 azimutta (0^0 , 90^0 , 180^0 , 270^0) simetrik görüntülerin ortalaması alınarak giderilmektedir. Bu çalışmada, CCD kamerasından beklenen, zenit noktasının koordinatlarının doğru ve güvenilir olarak belirlenmesidir. Bu belirlemenin doğruluğu istasyondaki tekrarlı gözlemlerin analiziyle bulunur. CCD görüntüleri, Şekil 3.19'da verilen görüntü şemasına uygun olarak değerlendirilmektedir.

3.3.4 Zaman senkronizasyonu ve stabilizasyonu çalışmaları

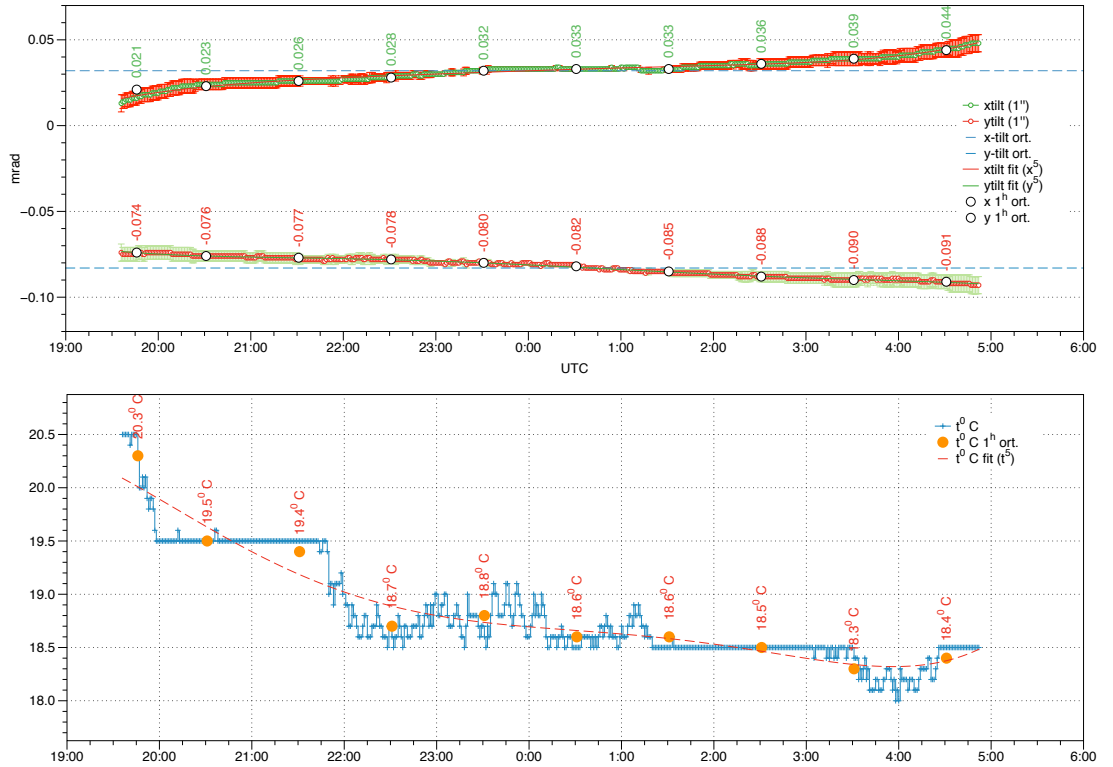
Zenit kamera gözlemlerinde, GPS zamanının yüksek doğrulukta belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışma kapsamında bir Motorola M12+ GPS alıcısı ile birlikte çalışan Timing 3000 anten, izleme ve senkronizasyon yazılımı TAC32 Plus'tan oluşan bir konfigürasyon belirlenmiştir [56]. GPS ile 25 nanosaniye civarında elde edilen zaman bilgisi CNS Clock II donanımı bilgisayara seri port üzerinden bağlanarak kontrol ünitesinin zamanını her saniyede düzenlemektedir (Şekil 3.6). Ayrıca, saniye daha sonraki değerlendirmelerde kullanılmak üzere, düzeltmeler zaman cümleleri olarak kaydedilmektedir.

GPS ile elde edilen zamanın (GPST) gözlemler sonucu hesaplanan zenit noktasının koordinatlarının belirlenmesi amacıyla $(\alpha_0, \delta_0) = (\Phi_0, \Lambda_0 + GAST)$ eşitliği ile ilişkilendirilen Greenwich görünen yıldız zamanına $GAST$ dönüşümünün (Tablo 2.2) gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Zaman indirgemelerinin gerçekleştirilmesi için Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Gözlemevi (USNO) kurumuna ait NOVAS kütüphaneleri kullanılmıştır [57].

3.3.5 Düzeler ve düzeçleme ile ilgili çalışmalar

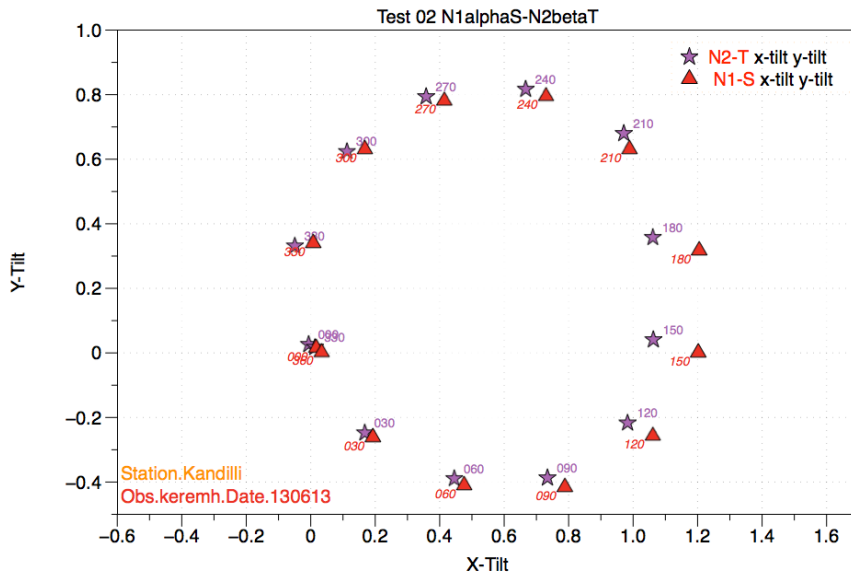
Ölçmelerin ilk aşamasında eğimölçerlerin teleskoba entegrasyonu için biri tüpe diğeri ise tribrah üzerine monte edilecek şekilde 2 adet adaptör üretilmiştir. Eğimölçerlerden elde edilen değerlere göre sistemin düzeçlenmesi öncelikle tribrah aracılığıyla ardından da ayarlanabilir eğimölçer adaptörü ile gerçekleştirilmektedir. Sistemin bütününe düzeçlenebilmesi için öncelikle üretimi yapılan adaptörlerin stabilizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde gözlem yapılacak saatlere denk gelen zaman aralığında 1 Hz sıklıkta x-tilt ve y-tilt değerleri kaydedilmiş, saat bazında bu değerlerin ortalamaları alınarak adaptörlerin eğim verileri değerlendirilmiştir. Eğimölçerler ile gerçekleştirilen ilk test çalışması, stabilizasyon testleri saat 19:00 UTC ile 05:00 UTC aralığında gerçekleştirilmiştir. Kayıt süresi uzunluğuna rağmen sistemin düzeçinde bozulma minimal düzeydedir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 : Adaptör stabilizasyon testi için eğimölçer ve sıcaklık değerleri.

Şekil 3.20, eğim testleri süresince her saniyede bir olmak üzere kaydedilen miliradyan cinsinden x ve y yönündeki eğim değerlerini ve test süresince sıcaklığın değişimini göstermektedir. Nokta semboller ile gösterilen ve grafikte sayısal olarak verilen değerler saatlik ortalamaları vermektedir.

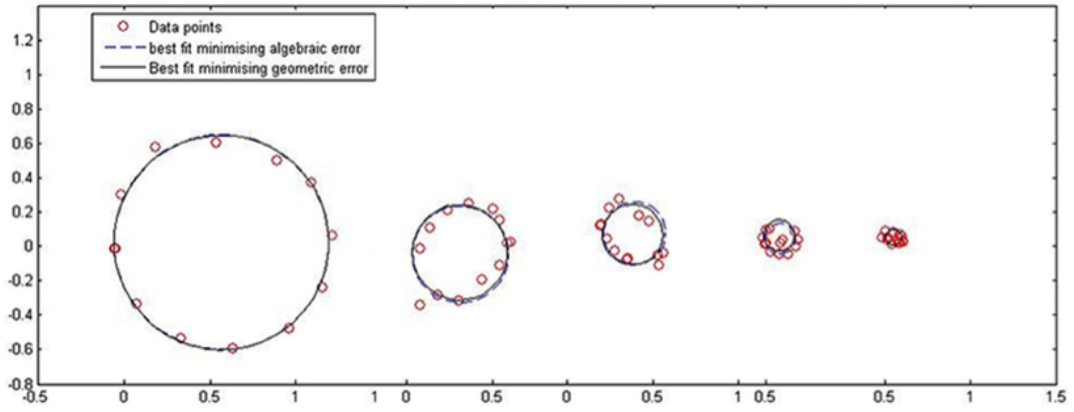
İlk test sonucunda, sistem tribrah yardımıyla düzeçlendikten sonra x ve y eğim değerleri $0^0 - 360^0$ azimut değerlerinde kaydedilmiş ve bu değerlerin bir daire tanımlaması beklenmiştir. Eğimölçerlerden bir tanesi tüpün üzerinde (N2-T) diğeri ise adaptöre yerleştirilmiştir (N1-S). Farklı azimutlarda elde edilen değerler Şekil 3.21’de görüldüğü gibidir.



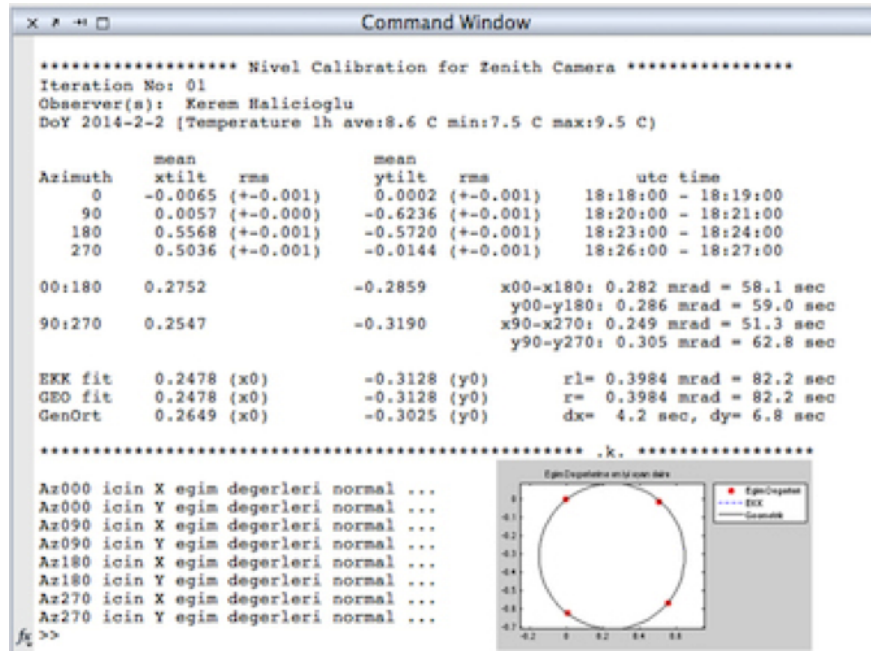
Şekil 3.21 : Farklı Azimutlar için eğim değerlerinin dağılımı.

Şekil 3.21’de, teleskobun dönme ekseninin daireye yakın bir dönüş yaptığı görülmüştür. Dairenin merkezinin koordinatları, elektronik düzeğin düzeçlendiğinde olması gereken değerdir. Bu değerler elektronik düzeğe okununcaya kadar düzeçleme vidalarıyla sistem düzeçlenmiştir. Daha sonra, elektronik düzeğin düzeçleme vidalarıyla düzeç okumaları sıfırlanarak ilk düzeç düzenleme iterasyonu tamamlanmıştır. Nokta kümesine en uygun olan daire tanımlanmış ve merkez koordinatları ile yarıçapı en küçük kareler yöntemine göre hesaplanmıştır (Şekil 3.22). İlk aşamada düzeçlerin eğim değerleri eşitleninceye kadar sistem tribrah ve tüp yardımıyla zenit doğrultusuna yönlendirilmektedir.

Ardından sabit düzeç yardımıyla gözlemlerin gerçekleştirileceği 4 farklı azimut değerinde eğim değerleri kaydedilmektedir. Şekil 3.23’de, 4 farklı azimut



Şekil 3.22 : Eğimölçer yardımıyla sistemin iteratif şekilde düzeçlenmesi.



Şekil 3.23 : Sistemin eğim değerleri ile gerçekleştirilen iteratif yöneltme.

değerine ait eğim değerlerinin ortalaması, bu değerlerin oluşturduğu en küçük kareler yöntemine göre en iyi uyan dairenin belirlenmesi ve bu dairenin yarıçapı kadar bir düzeltmenin sisteme verilmesi işlemine ait değerler görülmektedir. Ayrıca eğim değerlerine ait grafik gösterim de düzeçleme sırasında oluşturularak olası kaba hatalar gözlem sırasında incelenebilmektedir. Geliştirilen yazılım, eğim değerlerine ait standart sapmanın belirlenen limit değerden (örnekte 0.002 mrad) farklı olması durumunda, işlemin yenilenmesi konusunda gözlemciyi uyarmaktadır. Düzeltmenin ardından yarıçap küçülmekte ve gözlemlere geçilmektedir. Gözlemler süresince eğim değerleri sürekli olarak kaydedilmekte ve görüntü epokları ile ilişkilendirilerek, düzeç düzeltmesi olarak sonuç (ortalama) değerlerine getirilmektedir.

```

***** Nivel Calibration for Zenith Camera *****
Iteration No: 04
N1
Observer(s): Kerem Halicioglu, Hasan Onur Isik
DoY 2014-7-17 [Temperature 29 min ave:25.2 C min:24.5 C max:25.5 C)
Distance between azimuths:
|x0 x180| = 8.98 |y90-y270| = 23.41 in arcsec (0.044, 0.114) mrad

Azimuth      mean      rms      mean      rms      utc time
0            -0.011  (+-0.001)  0.008  (+-0.001)  22:23:00 - 22:24:00
90          -0.029  (+-0.002)  0.019  (+-0.001)  22:27:00 - 22:28:00
180         -0.049  (+-0.000)  -0.012  (+-0.000)  22:29:00 - 22:30:00
270         0.025  (+-0.000)  -0.081  (+-0.000)  22:25:00 - 22:26:00

00:180      -0.030      -0.002      x00-x180: 0.039 mrad = 7.9 sec
              y00-y180: 0.020 mrad = 4.2 sec
90:270      -0.002      -0.031      x90-x270: 0.054 mrad = 11.2 sec
              y90-y270: 0.100 mrad = 20.6 sec

EKK fit      -0.005 (x0)      -0.036 (y0)      rl= 0.0524 mrad = 10.8 sec
GE0 fit      -0.007 (x0)      -0.038 (y0)      r= 0.0526 mrad = 10.9 sec
Gen0rt      -0.016 (x0)      -0.016 (y0)      dx= -5.7 sec, dy= 5.9 sec

***** .k. *****

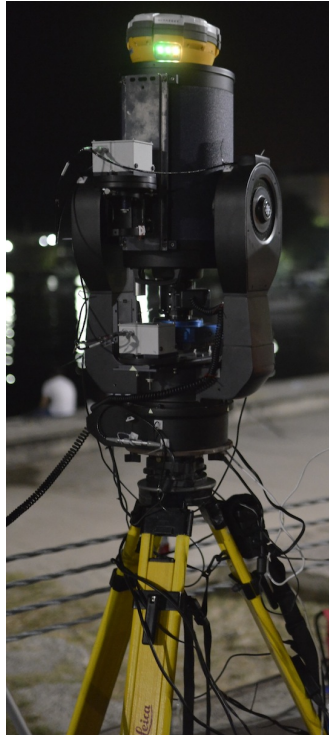
zct.txt

Az000 icin X egim degerleri normal ...
Az000 icin Y egim degerleri normal ...
Az090 icin X egim degerleri normal ...
Az090 icin Y egim degerleri normal ...
Az180 icin X egim degerleri normal ...
Az180 icin Y egim degerleri normal ...
Az270 icin X egim degerleri normal ...
Az270 icin Y egim degerleri normal ...
>>

```

Şekil 3.24 : RIVA istasyonuna ait iteratif düzeçleme sonuçları.

Her bir istasyon için, sistemin düşey doğrultuda düzeçlenmesi 2-4 iterasyonda gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.24, RIVA istasyonuna ait teleskop altyapısına yerleştirilmiş dört iterasyon sonucu elde edilen eğim değerleri verilmiştir. Sistemin eğimölçerler ile birlikte düzeçleme sırasındaki durumu Şekil 3.25’de görülmektedir.



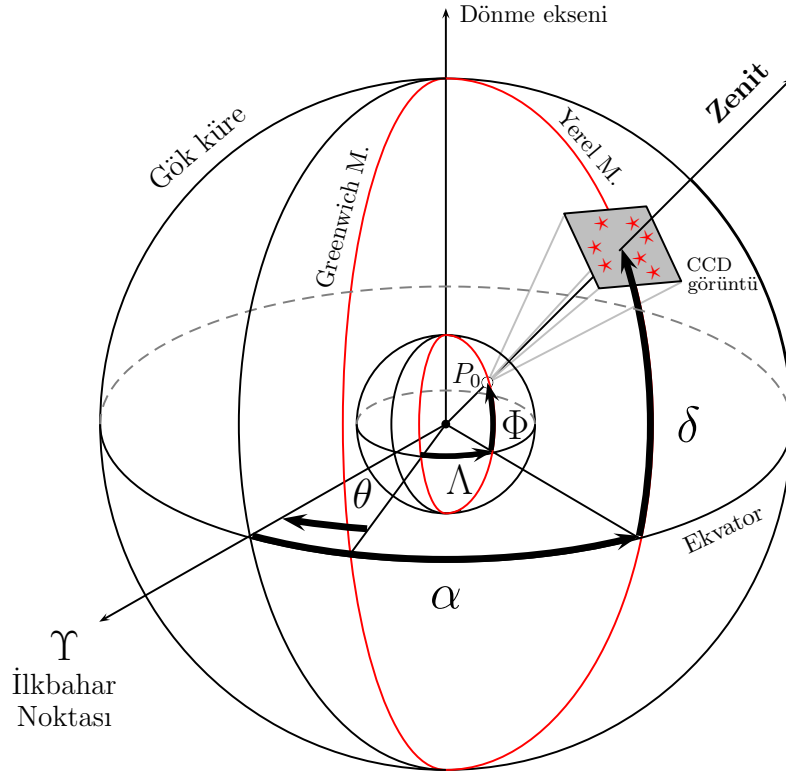
Şekil 3.25 : KDKY istasyonunda sistemin düzeçlenmesi.

3.4 Astronomik Koordinatların Elde Edilmesi

Astronomik koordinatlar (Φ, Λ) çekül doğrusunun uzaysal doğrultusunu, Uluslararası Yersel Referans Sistemine (ITRS) göre tanımlar (Bölüm 2.1.1.3). ITRS ve ICRS ise Greenwich Görünen Yıldız Zamanı ile ilişkilendirilir ve bu da yerin dönme açısının belirlenmesi ile gerçekleştirilir. Astronomik yöntemler zenitte konumlanmış bir yıldız için astronomik (Φ, Λ) ve rektasansiyon sistemindeki (α, δ) koordinatların eşitliğini kullanırlar (Eşitlik 3.3).

$$\Phi = \delta, \Lambda = \alpha - GAST \quad (3.3)$$

Ancak yıldız tam olarak zenit geçişi yaparken gözlenemediğinden, zenit çevresindeki yıldız kümesi CCD kamera ile görüntülenir ve zenit noktası enterpolasyon ile elde edilir (Şekil 3.26). Çekül sapması bileşenleri (ξ, η) lokal çekül doğrultusu ve kameranın jeodezik koordinatlarından (φ, λ) elde edilir. Jeodezik koordinatlar, ITRF koordinat sistemi ve GRS-80 datumunda, GPS tekniği ile elde edilmiştir.



Şekil 3.26 : Çekül çizgisinin doğrultusunu belirlemede basit esaslar.

Jeodezik astronomide yersel ve göksel koordinat sistemleri arasındaki ilişkinin kurulması için zaman sistemlerinden yararlanılır. CCD kameraların çekül sapması

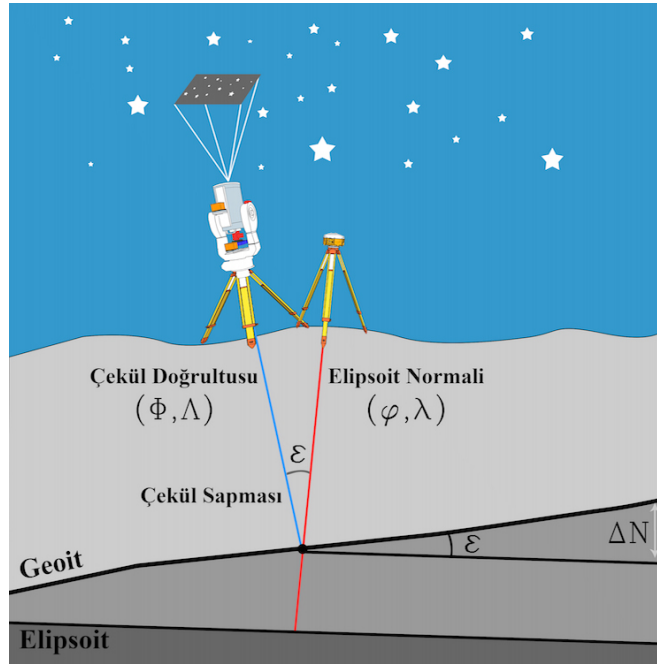
bileşenlerinin belirlenmesinde Astronomik koordinatlar (Φ, Λ) ve rektasansiyon sistemindeki koordinatlar (α, δ) arasındaki ilişki, GPS ile elde edilen pozlama epöğünün GAST'a dönüşümü ile kurulur.

$$\Phi = \delta(katalog, ERP, x, y, model, refraksiyon) + \text{eğim düzeltmesi} \quad (3.4)$$

$$\Lambda = \alpha(katalog, ERP, x, y, model, refraksiyon) + \text{eğim düzeltmesi} - GAST(GPSZamanı, ERP) \quad (3.5)$$

Zenit noktasının rektasansiyon sistemi koordinatları, doğrudan yıldız kataloglarına, ölçülen doğrultulara, transformasyon modeline, yer dönme parametrelerine ve refraksiyona dayanmaktadır. Ölçmeler esnasındaki eğim değışimleri, düzeç gözlemleriyle hesaplanan açısıl düzeltmelere göre gözlemlerin düzeltilmesi yoluyla dikkate alınmaktadır.

Günümüzde jeodezik koordinatların elde edilmesi sistem içerisinde hata kaynakları arasında en küçük değere sahip olanıdır. Referans elipsoit üzerinde tanımlanan (φ, λ) jeodezik koordinatlar GPS ile elde edilebilmektedir. Diferansiyel GPS ile cm duyarlılıkta (bir kaç miliyay saniyeye denk gelmektedir) elde edilen jeodezik koordinatlar, kullandıkları çeköl sapmalarının belirlenmesi sürecinde yeterli doğruluğa sahip olarak kabul edilmektedir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27 : Zenit kamera ve GPS gözlemlerinin birleştirilmesi ile çeköl sapması bileşenlerinin astronomik nivelman tekniğı ile belirlenmesi.

CCD görüntülerinde belirlenen yıldızların almanak bilgilerinin elde edilmesinde, birbirine yakın yıldızların görüntülerinin değerlendirilmesinde kaba hataların oluşabildiği, yine parçalı bulutluluk ve büyük yatay sıcaklık gradyanlarının de değerlendirilmelerin doğruluğunu etkilediği gözlemlenmiştir.

Şekil 3.28, örnek bir görüntüde tanımlanan yıldızlara ait bilgileri içeren dosyayı göstermektedir. İşaretlenmiş satırlarda yıldızların tanımlanmasında gerçekleşen hataların belirlenmesi ve değerlendirmeye katılmadan elimine edilmesi sağlanmaktadır.

Sayısal zenit kamera sistemi ile elde edilen yıldız görüntüleri değerlendirilirken, görüntülerde tanımlanan yıldızların hesaplanan koordinatlarındaki prezisyon, yıldız kataloglarında verilen koordinatlar ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmadan elde edilen farkların minimum olması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında benimsenen değerlendirme stratejisinde, hesaplanan ve yıldız kataloğundan alınan koordinatlar arasındaki farkı 0.3''den büyük olan yıldızlar zenit noktasının koordinatlarının belirlenmesinde değerlendirmeye katılmamıştır.

F:\20130729\01_Zc_-001Az090.fit 98.967 2 0.23 Kerem H. 19.8683142 41.0840645 0.73									
Mon Jul 29 21:25:38 UTC+0300 2013									
ImStarRA	ImStarDec	Catalog-ID	RA(h)	Dec(d)	X(px)	Y(px)	Mag	res	
19.8812623	41.0807230	2UCAC46168045	19.8812626	41.0807296	1189.010	14.45688	7.9	0.03	
19.8642639	41.1104341	2UCAC46167693	19.8642671	41.1104341	1185.000	979.8566	8.6	0.13	
19.8697823	41.0653658	2UCAC46167804	19.8697793	41.0653660	1012.163	639.1563	9.0	0.12	
19.8790557	41.2243747	2UCAC46167998	19.8790582	41.2243345	1873.221	249.1736	9.0	0.18	
19.8775397	40.8845870	2UCAC46018152	19.8775452	40.8845489	194.2559	67.10436	11.5	0.26	
19.8775436	40.8846149	2UCAC46018152	19.8775452	40.8845489	194.4273	66.90975	11.5	0.25	
19.8775568	40.8844391	2UCAC46018152	19.8775452	40.8845489	193.6800	66.03755	11.5	0.62	
19.8613463	41.0471496	2UCAC46167628	19.8613436	41.0471592	849.2090	1093.145	9.3	0.11	
19.8799301	41.2197475	2UCAC46168014	19.8799339	41.2196856	1858.235	197.0328	10.0	0.27	
19.8797454	41.1388611	2UCAC46168011	19.8797434	41.1388946	1460.196	144.2274	12.3	0.15	
19.8755658	40.9587734	2UCAC46018100	19.8755633	40.9587907	540.7402	235.0810	10.5	0.12	
19.8758218	41.2792788	2UCAC46167930	19.8758216	41.2793068	2114.159	471.4314	11.7	0.10	
19.8564865	41.1019291	2UCAC46167552	19.8564787	41.1019038	1075.650	1404.952	12.8	0.33	
19.8789487	40.9184601	2UCAC46018184	19.8789546	40.9184316	373.0608	15.17555	10.5	0.26	
19.8635926	41.0024159	2UCAC46167676	19.8635892	41.0023780	649.4560	934.0174	10.8	0.19	
19.8706607	40.9385901	2UCAC46017982	19.8706585	40.9385982	398.5844	491.9601	10.7	0.10	
19.8617449	41.1779533	2UCAC46167637	19.8617456	41.1779550	1494.152	1171.439	10.9	0.03	
19.8781362	41.2345884	2UCAC46167979	19.8781360	41.2345888	1915.227	308.1469	10.9	0.00	
19.8776290	40.9271887	2UCAC46018154	19.8776314	40.9272112	404.1662	95.53287	11.2	0.13	
19.8724459	41.1395464	2UCAC46167856	19.8724509	41.1396111	1399.221	549.1885	12.6	0.31	
19.8755640	40.9587843	2UCAC46018100	19.8755633	40.9587907	540.7779	235.1892	10.5	0.04	
19.8556712	41.0583220	2UCAC46167534	19.8556640	41.0583185	854.6973	1416.875	11.3	0.29	
19.8618018	41.2082759	2UCAC46167639	19.8618044	41.2082476	1643.220	1191.649	11.5	0.15	
19.8603486	41.0890321	2UCAC46167616	19.8603456	41.0890380	1045.954	1180.657	12.1	0.13	

Şekil 3.28 : Yakın yıldızlardan kaynaklanan hataların belirlenmesi.

Şekil 3.28’de *ImStarRA* ve *ImStarDec*; görüntülerde tanımlanan yıldızlara ait hesaplanan rektasansiyon ve deklinasyon değerleri, *CatalogID*; tanımlanan yıldızların katalog numaraları, *RA(h)*, *Dec(d)*; değerlendirilen katalogdaki yıldızlarının saat ve derece birimindeki koordinatları, *X(px)*, *Y(px)*; yıldızların piksel cinsinden

resim koordinatları, Mag ; yıldızın parlaklığı ve res ; astrometrik indirgeme ve transformasyonun ardından referans yıldızlarla görüntüdeki yıldızların eşleştirilmesi sonucu hesaplanan açısal artık hata olarak verilmiştir.

Bazı özel durumlarda ise, birbirine çok yakın piksellerde birden fazla yıldız tanımlandığı olmaktadır. Tanımlanan bu yıldızlar aslında yıldız kataloğunda tek bir yıldız karşılık gelmektedir. Şekil 3.28'de 46018152 numaralı yıldız bu duruma örnektir. Ancak CCD algılayıcı kaynaklı etmenler, yıldızın parlaklığının düşük olması, katalog çözünürlüğü ve çeşitli atmosferik koşullar aynı ya da komşu piksellerde birden fazla yıldız varmış gibi bir çözüme yol açmaktadır. Bu durumda, katalog bilgileri ile en iyi uyum gösteren yıldız zenit noktasının koordinatlarının belirlenmesinde değerlendirmeye alınmaktadır. Değerlendirme aşamasında bu eliminasyon üretilen yazılım dahilinde otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

Uyuşumsuz yıldızların değerlendirme dışı bırakılması durumunda, hesaplamalarda, zenit noktasının belirlenmesinde gerekli olan minimum 4 yıldız koşulundan çok daha fazla sayıda olduğu görülmüş ve görüntülerdeki yıldız dağılımının resim orta noktası civarında homojen dağılımlı olmasına dikkat edilmiştir.

Tanımlanan yıldızlar ile gerçekleştirilen değerlendirme sonuçlarına bir örnek, Şekil 3.29'de verilmiştir. Değerlendirilen görüntü dosyalarında, uyuşumsuz yıldızlar ve kaba hatalar elimine edilmiş yıldızlara ait koordinat, katalog ve zaman bilgileri verilmiştir.

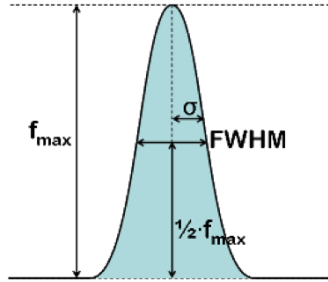
Şekil 3.29'da $RA(topo)$, $Dec(topo)$; görüntülerdeki yıldızların hesaplanan toposentrik görünen koordinatları, $CatID$; tanımlanan yıldızların katalog numarası, $RA(t0)$, $Dec(t0)$; görüntülenen yıldızların katalog epogundaki (J2000.0) koordinatları, $GAST(h)$, $LAST(h)$; saat biriminde Greenwich görünen yıldız zamanı ve yerel görünen yıldız zamanı, xi , eta ; teğet düzlem koordinatları (Şekil 3.31), xp , yp ; yıldızların piksel cinsinden resim koordinatları olarak verilmiştir.

CCD kamera ile elde edilen görüntülerin netliğinin ayarlanması işlemi bir netleştirme aparatı (Meade Focuser) yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Görüntülerin netleştirme işlemi Yarım Parlaklık Değerinde Çap Ölçümü yöntemi ile (Full Width Half Maximum – FWHM) yapılmaktadır. Bu yöntemde yıldızla ait parlaklık eğrisi dikkate alınmaktadır. Parlaklık eğrisinin maksimum değerinin yarısının eğriyi kestiği noktalar (Şekil 3.30) arasındaki uzaklığı en az olacak şekilde, gözlemlerde netleştirme

Topocentric Coordinates of Stars for Zenith Camera Calculations .kh.											
RA(topo)	Dec(topo)	CatID	RA(t0)	Dec(t0)	GAST(h)	LAST(h)	xi	eta	xp	yp	
19.88966410	41.12055594	46168045	19.88126230	41.08072300	17.94002832	19.87762259	0.00237484	0.00099754	1189.010	14.457	
19.87265342	41.14972455	46167693	19.86426390	41.11043410	17.94002832	19.87762259	-0.00097959	0.00150458	1185.000	979.857	
19.87819139	41.10479370	46167804	19.86978230	41.06536580	17.94002832	19.87762259	0.00011220	0.00071998	1012.163	639.156	
19.88744951	41.26411576	46167998	19.87905570	41.22437470	17.94002832	19.87762259	0.00193384	0.00350232	1873.221	249.174	
19.88597581	40.92414698	46018152	19.87754360	40.88461490	17.94002832	19.87762259	0.00165235	-0.00243173	194.427	66.910	
19.86974951	41.08639558	46167628	19.86134630	41.04714960	17.94002832	19.87762259	-0.00155354	0.00039992	849.209	1093.145	
19.88832114	41.25931335	46168014	19.87993010	41.21974750	17.94002832	19.87762259	0.00210552	0.00341881	1858.235	197.033	
19.88814665	41.17844832	46168011	19.87974540	41.13886110	17.94002832	19.87762259	0.00207374	0.00200737	1460.196	144.227	
19.88398805	40.99831390	46018100	19.87556400	40.95878430	17.94002832	19.87762259	0.00125774	-0.00113776	540.778	235.189	
19.88421119	41.31878373	46167930	19.87582180	41.27927880	17.94002832	19.87762259	0.00129549	0.00445557	2114.159	471.431	
19.86486663	41.14112064	46167552	19.85647690	41.10193540	17.94002832	19.87762259	-0.00251496	0.00135676	1075.598	1405.490	
19.88738384	40.95796836	46018184	19.87895570	40.91843050	17.94002832	19.87762259	0.00192989	-0.00184100	372.978	14.762	
19.87200722	41.04184596	46167676	19.86359260	41.00241590	17.94002832	19.87762259	-0.00110880	-0.00037814	649.456	934.017	
19.87908444	40.97798795	46017982	19.87066070	40.93859010	17.94002832	19.87762259	0.00028893	-0.00149317	398.584	491.960	
19.87013264	41.21724297	46167637	19.86174490	41.17795330	17.94002832	19.87762259	-0.00147500	0.00268354	1494.152	1171.439	
19.88652176	41.27410474	46167979	19.87813620	41.23458840	17.94002832	19.87762259	0.00175100	0.00367637	1915.227	308.147	
19.88605270	40.96669351	46018154	19.87762900	40.92718870	17.94002832	19.87762259	0.00166649	-0.00168913	404.166	95.533	
19.88084256	41.17899596	46167856	19.87244590	41.13954640	17.94002832	19.87762259	0.00063448	0.00201522	1399.221	549.188	
19.86407128	41.09750370	46167534	19.85567120	41.05832200	17.94002832	19.87762259	-0.00267354	0.00059585	854.697	1416.875	
19.87018248	41.24753152	46167639	19.86180180	41.20827590	17.94002832	19.87762259	-0.00146451	0.00321217	1643.220	1191.649	
19.86874117	41.12824344	46167616	19.86034690	41.08902200	17.94002832	19.87762259	-0.00175140	0.00113059	1045.890	1180.745	
19.87741236	41.26073404	46167790	19.86902940	41.22135470	17.94002832	19.87762259	-0.00004137	0.00344166	1770.570	801.672	
19.87199587	41.21425224	46167677	19.86360860	41.17496970	17.94002832	19.87762259	-0.00110812	0.00263093	1495.790	1065.843	
19.86679756	41.01607576	46017747	19.85838610	40.97686410	17.94002832	19.87762259	-0.00213832	-0.00082646	478.861	1203.842	
19.87980041	40.98235547	46017980	19.87055750	40.94296880	17.94002832	19.87762259	0.00026835	-0.00141695	419.132	501.094	
19.86805540	41.14282981	46167605	19.85966280	41.10358780	17.94002832	19.87762259	-0.00188621	0.00138538	1111.385	1229.883	
19.88162253	41.02317359	46018041	19.87320420	40.98371920	17.94002832	19.87762259	0.00079004	-0.00070430	642.110	385.787	
19.88802824	41.05407982	46168009	19.87961140	41.01453150	17.94002832	19.87762259	0.00205429	-0.00016332	850.026	54.150	
19.88377202	41.02024890	46018096	19.87535360	40.98075470	17.94002832	19.87762259	0.00121465	-0.00075497	646.590	264.114	
19.87253401	41.13884121	46167689	19.86413380	41.09955720	17.94002832	19.87762259	-0.00100330	0.00131465	1130.516	978.706	
19.87152885	40.93837247	46017840	19.86310940	40.89908890	17.94002832	19.87762259	-0.00120515	-0.00218400	139.142	881.911	
19.88196790	41.25470494	46167883	19.87358240	41.21521870	17.94002832	19.87762259	0.00085524	0.00333675	1780.297	545.116	
19.87296220	41.32994434	46167702	19.86460890	41.29040850	17.94002832	19.87762259	-0.00091620	0.00464999	2069.898	1100.202	
19.86626154	41.02122055	46017733	19.85784960	40.98200350	17.94002832	19.87762259	-0.00224403	-0.00073647	499.381	1237.579	
19.86394763	41.10830118	46167530	19.85554500	41.06905410	17.94002832	19.87762259	-0.00269749	0.00078436	906.243	1432.085	
19.86106412	40.93819577	46017619	19.85264860	40.89905490	17.94002832	19.87762259	-0.00327475	-0.00218306	47.932	1463.582	
19.87670556	41.19618148	46167777	19.86831350	41.15675540	17.94002832	19.87762259	-0.00018065	0.00231501	1447.502	791.232	
19.86857144	41.25889051	46167609	19.86019210	41.21963080	17.94002832	19.87762259	-0.00178132	0.00341087	1684.692	1289.648	
19.86857449	40.99565693	46017781	19.86016140	40.95640430	17.94002832	19.87762259	-0.00178787	-0.00118344	394.075	1089.534	
19.88358665	41.06654912	46167921	19.87516420	41.02694590	17.94002832	19.87762259	0.00117720	0.00005308	871.250	310.838	
19.86422768	41.10404355	46167540	19.85583250	41.06487550	17.94002832	19.87762259	-0.00264242	0.00070992	888.242	1412.926	
19.88600774	41.27349693	46167968	19.87761960	41.23393970	17.94002832	19.87762259	0.00164988	0.00366561	1907.509	336.270	

Şekil 3.29 : Değerlendirilen görüntüye ait koordinat bilgileri.

yapılarak istenilen değere (3-5 yay saniyesi) ulaşıldığında netliğin gerçekleştiği kabul edilmektedir.



Şekil 3.30 : Görüntünün netleştirilmesinde kullanılan FWHM yöntemi.

Görüntülerin netliği meteorolojik olaylardan yüksek oranda etkilenmektedir. Nem, sıcaklık değişimi ve yüksek katmanlarındaki bulutluluk görüntülerin netleştirilmesinde önemli faktörlerdir. Özellikle gözlem süresince değişen sıcaklık değeri netliğin bozulmasına neden olmakta ve görüntülerin netleştirme işleminin yinelenmesi gerekmektedir. Sıcaklığın değişimine duyarlı netleştirme aparatları bulunmaktadır ve bu cihazlar ile görüntülerde netlikten kaynaklanan hataların giderilebileceği ve ölçme zamanının kısılacağı değerlendirilmektedir.

3.4.1 Seri gözlemler ve görüntülerin değerlendirmeye hazırlanması

Sistemdeki düzeç hatası dışındaki hataların (optik eksenin eğikliği, CCD kamera hataları, vb.) çoğunluğu simetrik gözlemler ile giderilebilmektedir. Bu nedenle, hangi simetrik gözlemlerin kullanılabileceği araştırılmıştır. Azimutlar, 30^0 , 45^0 , 90^0 değiştirilerek yapılan gözlemler ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan eğimölçer Nivel 210, sıvı sensörlü bir cihazdır. Bu nedenle, düzeçleme ve sistemin döndürülmesi esnasında sıvının stabilleşmesi zaman almaktadır. Gözlem zamanının da optimal olabileceği simetrik gözlemlerin, 0^0 , 90^0 , 180^0 , ve 270^0 azimutlarında yapılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Sistemin döndürülmesi esnasında düzeğin stabilleşmesi için en az 1 dakika beklenmesi gerekmektedir.

Elektronik düzeçler gözlemler süresince sürekli kayıtlar yapmaktadır. Her azimutta ortalama 60 kayıt yapılmakta ve bunların ortalaması ve ortalamanın karesel ortalama hatası hesaplanmaktadır. Bu karesel ortalamalardan, düzeçlemenin karesel ortalama hatası $\pm 0.1''$ olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, seri gözlemlerin 0^0 , 90^0 , 180^0 ve 270^0 derece azimut değerlerinde 10 seri olarak her azimut değerinde 5-10 görüntü olarak yapılması optimal gözlem yöntemi olarak benimsenmiştir. Görüntüler saati GPS zamanı ile senkronize edilmiş bir kontrol bilgisayarı aracılığıyla Maxim DL yazılımı aracılığıyla elde FIT dosya formatında edilmektedir.

Elde edilen görüntülerin değerlendirmeye hazırlanması için FIT başlık bilgilerine yazdırılan ölçme epoğu yardımıyla değerlendirmede kullanılacak yaklaşık koordinatlar hesaplanmaktadır.

$$\alpha_0 = LAST, \delta_0 = \varphi \quad (3.6)$$

Hatasız bir düzeçleme sonucunda, resim ana noktası zenit doğrultusunda olacağından, zenitte konumlanmış bir yıldız için geçerli olan bağıntılar kullanılmaktadır (Eşitlik 3.3). Zenit noktasındaki yıldızın rektasansiyonu gözlem noktasındaki yerel yıldız zamanına, deklinasyonu da gözlem yapılan istasyonun enlemine eşit olacağından bu değerlerin hesaplanması gerekmektedir. GAST ve LAST, USNO tarafından geliştirilen NOVAS yazılımı kütüphaneleri kullanılarak hesaplanmaktadır [57].

Her bir görüntü için hesaplanan LAST değerleri, hazırlanan Unix Shell scriptler yardımıyla görüntü dosyalarının başlık bilgilerinde WCSTools yardımıyla gün-

cellenmektedir. Hesaplanan bu değerler astrometrik plaka indirgemesinde resim ana noktasının değerleri olarak FITS başlıklarından yaklaşık koordinatlar olarak okunmaktadır.

3.4.2 Görüntülerin değerlendirilmesi ve hesaplar

Başlık bilgileri hesaplanmış ve güncellenmiş olan görüntü dosyalarının Pinpoint Astrometry Engine (PPE) kütüphaneleri kullanılarak astrometrik plaka çözümleri gerçekleştirilmektedir. PPE astronomlar için geliştirilmiş ve ortalama koordinatları üreten bir yazılımdır. Bu yazılım astrometrik indirgeme ile ilgili ara değerler üretmediğinden, bu değerlerin elde edilmesi için bir dizi JavaScript kodu oluşturulmuştur. Bu kod yardımıyla FITS görüntülerindeki yıldızlar Point Spread Function (PSF) yöntemine göre 0.3'' doğrulukla belirlenmektedir. Belirlenen yıldızlar UCAC2 [58] yıldız kataloğu ile eşleştirilmekte ve görüntülerdeki yıldızlar tanımlanmaktadır.

Astrometrik plaka indirgemesi ve sonrasında görüntülere ait yıldız bilgilerinin yer aldığı çıktı dosyalarının elde edilmesinin ardından, astronomik koordinatların elde edilebilmesi için gerekli olan toposentrik görünen koordinatlar hesaplanmaktadır. Toposentrik görünen koordinatların hesabı için NOVAS yazılımı ile bu proje kapsamında geliştirilen yazılımdan yararlanılmaktadır.

Jeosentrik görünen koordinatlar, gerçek ekvator ve ekinoksta yerin merkezinde konumlanmış bir gözlemci için, toposentrik görünen koordinatlar ise yeryüzünde konumlanmış bir gözlemci için hesaplanmaktadır. Güneş sistemi içerisindeki gök cisimlerinin toposentrik ve jeosentrik koordinatları arasında, ağırlıklı olarak günlük aberasyondan kaynaklanan bir fark oluşur. Ancak bu fark, yıldız koordinatlarının hesaplanmasında sayısal zenit kamera gözlemleri ile elde edilen sonuçları etkilemeyecek büyüklüktedir. Sayısal zenit kamera gözlemlerinde jeodezik koordinatlar da belirlendiğinden toposentrik görünen koordinatların hesaplanması benimsenmiştir.

Hesapların gerçekleştirilmesi için görüntü dosyaları, Uluslararası Yer Dönme Servisi (IERS) tarafından yayınlanan yer dönme parametreleri, ölçme istasyonun elipsoidal enlem, boylam ve yüksekliği, basınç ve sıcaklık değerleri kullanılmaktadır.

3.4.3 Toposentrik görünen koordinatların hesaplanması

Toposentrik koordinatların hesaplanması aşamasında geliştirilen yazılımlardan ve NOVAS kütüphanelerinden yararlanılmıştır [57]. Bu bölümde yazılım bünyesinde kullanılan algoritmalar sayısal zenit kamera sistemi ile elde edilen görüntülerin hesaplanmasında izlenen adımları listeleyecek şekilde verilmiştir [59]. Referans epoğunda t_0 , ortalama koordinatları, öz hareketleri, paralaks ve radyal hız bilgileri bilinen bir yıldızın gözlem epoğu t' zamanındaki görünen koordinatları $\mathbf{u}(t')$ vektörü ile ifade edilebilir.

$$\mathbf{u}(t') = \mathbf{N}(t)\mathbf{P}(t)f\{g[\mathbf{u}(t_0)] + \dot{\mathbf{u}}(t_0) \cdot (t - t_0) - \mathbf{E}(t)\} \quad (3.7)$$

Burada;

t' : Ölçme epoğu (TDT zamanı)

t : Ölçme epoğu (TDB zamanı)

$\mathbf{u}(t_0)$: Yıldızın (t_0) epoğunda ortalama katalog koordinatları. Orijini güneş sistemi ağırlık merkezinde 3-boyutlu konum vektörü

$\dot{\mathbf{u}}(t_0)$: Yıldızın uzaysal hareket vektörü, öz hareket, paralaks ve radyal hız bileşenleri

$\mathbf{E}(t)$: Yerkürenin t ölçme epoğundaki, güneş sistemi ağırlık merkezine göre konum vektörü

$g(\dots)$: Işığın çekim etkisiyle kırılma fonksiyonu

$f(\dots)$: Işığın aberasyon etkisi fonksiyonu

$\mathbf{P}(t)$: t zamanı için Presesyon Matrisi

$\mathbf{N}(t)$: t zamanı için Nütasyon Matrisi

$\mathbf{u}(t')$: t' gözlem epoğunda yıldızın görünen koordinatlarına ait üç boyutlu konum vektörü (Yerin ağırlık merkezine göre).

Güneş sistemi merkezine göre t zamanı için güneş sistemi cisimlerine ait efemeris bilgilerinden yerküreye ait hız vektörü hesaplanır. Bu çalışmada, NASA tarafından yayınlanan efemeris bilgileri kullanılmıştır (JPL Planetary Ephemeris DE405). Yerin ağırlık merkezinin konum $\mathbf{E}(t)$ ve hız $\dot{\mathbf{E}}(t)$ vektörleri elde edilir. Güneşin t zamanındaki güneş sistemi merkezine göre konum vektörü $\mathbf{S}(t)$ hesaplanır ve bu vektör yardımıyla yerin heliosentrik konum vektörü $\mathbf{E}'(t)$ hesaplanır.

$$\mathbf{S}(t); \mathbf{E}'(t) = \mathbf{E}(t) - \mathbf{S}(t) \quad (3.8)$$

Yerkürenin güneş sisteminin ağırlık merkezine göre (barisentrik) hız vektörü aberasyon hesabı, heliosentrik konum vektörü, görelilik ilkesine göre çekim etkisinin hesabı için kullanılır. Görünen koordinatların milisaniye presizyonunda hesaplanabilmesi için vektör bileşenlerinde konum için 3, hız için ise 5 basamak presizyonda elde edilmesi gerekmektedir.

Yıldızın t_0 referans epoğundaki rektasansiyon (α) ve deklinasyonunu (δ) içeren konum vektörü $\mathbf{u}(t_0)$;

$$\mathbf{u}(t_0) = \begin{bmatrix} r \cos \delta \cos \alpha \\ r \cos \delta \sin \alpha \\ r \sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

matrisi ile elde edilir. Yıldızın ait katalog bilgilerinden elde edilen öz hareketler μ'_α , μ'_δ ve radyal hız r olmak üzere yıldızın t_0 katalog epoğundaki uzaysal hız vektörü hesaplanır.

$$\dot{\mathbf{u}}(t_0) = \begin{bmatrix} -\sin \alpha & -\cos \alpha \sin \delta & \cos \alpha \cos \delta \\ \cos \alpha & -\sin \alpha \sin \delta & \sin \alpha \cos \delta \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu'_\alpha \\ \mu'_\delta \\ r' \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Yıldızın t gözlem epoğundaki konum vektörü oluşturulur.

$$\mathbf{u}_2 = \mathbf{u}(t_0) + \dot{\mathbf{u}}(t_0) \cdot (t - t_0) \quad (3.11)$$

Güneş sistemi merkezinden yerin ağırlık merkezine dönüşüm hesaplanır.

$$\mathbf{u}_3 = \mathbf{u}_2 - \mathbf{E}(t) \quad (3.12)$$

Görelilik etkisi ve yıllık aberasyon hesaplanır:

$$\mathbf{u}_4 = |\mathbf{u}_3| \left\{ \hat{\mathbf{u}} + \frac{g_1}{g_2} [(\hat{\mathbf{u}} \cdot \hat{\mathbf{q}}) \hat{\mathbf{e}} - (\hat{\mathbf{e}} \cdot \hat{\mathbf{u}}) \hat{\mathbf{q}}] \right\} \quad (3.13)$$

$$\tau = |\mathbf{u}_4|/c', \quad \beta = |\dot{\mathbf{E}}(t)|/c', \quad \cos D = \frac{\mathbf{u}_4 \cdot \dot{\mathbf{E}}(t)}{|\mathbf{u}_4| |\dot{\mathbf{E}}(t)|} \quad (3.14)$$

olmak üzere,

$$\gamma^{-1} = \sqrt{1 - \beta^2}, \quad f_I = \beta \cos D, \quad f_2 = [1 + f_I/(1 + \gamma^{-1})] \tau \quad (3.15)$$

parametreleri hesaplanır. Ardından, aberasyon düzeltilmesi yapılmış gök cisminin doğrultu vektörü oluşturulur:

$$\mathbf{u}_5 = [\gamma^{-1} \mathbf{u}_4 + f_2 \dot{\mathbf{E}}(t)] / (1 + f_I) \quad (3.16)$$

Presesyon modeli olarak [38] tarafından oluşturulan P03 çözümleri kullanılmıştır. 3 temel presesyon açısı (ζ, θ, z) hesaplanır ve presesyon dönme matrisi $\mathbf{P}$, Eşitlik 2.30'deki gibi oluşturulur:

$$\mathbf{u}_6 = \mathbf{P}\mathbf{u}_5 \quad (3.17)$$

Nütasyon parametreleri IAU200a nütasyon modeline göre 1365 trigonometrik terim kullanılarak hesaplanmıştır [39]. Ekliptiğin ortalama $(23^0 26' 21''.406)$ ve gerçek eğimi ile nütasyon matrisi $\mathbf{N}$, Eşitlik 2.31'deki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 84381.406 - 46.836769 T - 0.0001831 T^2 + 0.00200340 T^3 \\ & - 0.576 \times 10^{-6} T^4 - 4.34 \times 10^{-8} T^5 \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon \quad (3.19)$$

$$\mathbf{u}_7 = \mathbf{N}\mathbf{u}_6 \quad (3.20)$$

elde edilir.

Gök cisminin ait gözlem epoğunda görünen koordinatları α', δ' hesaplanır.

$$\omega = \sqrt{\mathbf{u}_7(x)^2 + \mathbf{u}_7(y)^2} \quad (3.21)$$

$$\alpha' = \arctan\left(\frac{\mathbf{u}_7(y)}{\mathbf{u}_7(x)}\right) \quad (3.22)$$

$$\delta' = \arctan\left(\frac{\mathbf{u}_7(z)}{w}\right) \quad (3.23)$$

Greenwich Ortalama Yıldız Zamanı $GMST$ ve $\Delta\Phi \cos \varepsilon'$ nütasyon açısı olmak üzere,

$$\begin{aligned} GMST = & 67310^s .54841 + (876600^h + 8640184^s .812866) T_u \\ & + 0^s .093104 T_u^2 - 6^s .2 \times 10^{-6} T_u^3 \end{aligned} \quad (3.24)$$

şeklinde ifade edilir.

Toposentrik koordinatların hesaplanabilmesi için $GAST$ ve $LAST$;

$$\mathbf{GAST} = \mathbf{GMST} + \Delta\psi \cos \varepsilon' \quad (3.25)$$

$$\mathbf{LAST} = \mathbf{GAST} + \lambda \quad (3.26)$$

eşitlikleriyle elde edilir.

Gerçek ekvator ve anlık ekinoksa göre gözlemcinin jeosentrik konum ve hız vektörleri hesaplanır:

$$\mathbf{g}'(t) = \begin{bmatrix} (aC + h) \cos \phi \cos s' \\ (aC + h) \cos \phi \sin s' \\ (aS + h) \sin \phi \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\dot{\mathbf{g}}'(t) = \omega \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{g}'(t) = \begin{bmatrix} -\omega(aC+h) \cos \phi \sin s' \\ \omega(aC+h) \cos \phi \cos s' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Burada;

a : Yerin ekvatordaki yarıçapı (6 378 136.6 m)

ω : Yerin açısal dönme hızı ($7.292\,115 \times 10^{-5}$ rad/s)

f : Referans elipsoidinin basıklığı (0.00335281066474748 - WGS84)

ϕ : Gözlemcinin jeodezik enlemi

h : Gözlemcinin elipsoidal yüksekliği (m)

$\hat{\mathbf{k}}$: $+z$ doğrultusundaki (t epoğunda kuzey gök kutbu doğrultusu) birim vektör.

s : Ölçme epoğundaki Yerel Yıldız Zamanı (LAST)

Gözlemcinin konum ve hız vektörlerinden ($\mathbf{g}'(t)$, $\dot{\mathbf{g}}'(t)$), uzak-sabit koordinat koordinat sisteminde yerkürenin konum ($\mathbf{G}(t)$) ve hız ($\dot{\mathbf{G}}(t)$) vektörlerine dönüşüm yapılır.

$$\mathbf{G}(t) = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{N}^{-1} \mathbf{g}(t) = \mathbf{P}' \mathbf{N}' \mathbf{g}(t) = \mathbf{R}' \mathbf{g}(t) \quad (3.29)$$

$$\dot{\mathbf{G}}(t) = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{N}^{-1} \dot{\mathbf{g}}(t) = \mathbf{P}' \mathbf{N}' \dot{\mathbf{g}}(t) = \mathbf{R}' \dot{\mathbf{g}}(t) \quad (3.30)$$

Burada P , N ; presesyon ve nütasyon matrisleri, R ; birleştirilmiş presesyon-nütasyon matrisidir. Daha sonra Yerkürenin konum ve hız vektörleri, gözlemcinin güneş sistemi ağırlık merkezine göre konum ($\mathbf{O}(t)$) ve hız ($\dot{\mathbf{O}}(t)$) vektörlerini içerecek şekilde yeniden düzenlenir.

$$\mathbf{O}(t) = \mathbf{E}(t) + \mathbf{G}(t), \quad \dot{\mathbf{O}}(t) = \dot{\mathbf{E}}(t) + \dot{\mathbf{G}}(t) \quad (3.31)$$

Gözlem epoğunda gök cisminin toposentrik görünen koordinatları Eşitlik 3.22 ve Eşitlik 3.23 ile hesaplanır.

3.4.4 Zenit noktasının koordinatlarının hesabı

Sayısal zenit kameralar ile, zenit noktası ve civarı yakın yıldızlar gözlenerek, enterpolasyon ile zenit noktasının koordinatları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

Zenit noktasındaki teğet düzlemde tanımlanan teğet düzlem koordinatları (ξ, η) , ile (Şekil 27) rektasansiyon sitemindeki koordinatları, (α, δ) arasındaki ortogonal

alınır. ξ ve η eşitliklerinden inversiyonla, projeksiyon merkezinin enterpole edilen doğrultusu (α_z, δ_z) ;

$$\alpha_z = \alpha_0 + \arctan \frac{\xi_z}{\cos \delta_0 - \eta_z \sin \delta_0} \quad (3.39)$$

$$\delta_z = \arctan \frac{(\eta_z) + \tan \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - \eta_z \tan \delta_0} \quad (3.40)$$

ile bulunur. Ardışık koordinatlar arasında miliyay saniyesinin altındaki farklara ulaşıncaya kadar iterasyona devam edilir [7]. Böylece zenit noktasının koordinatları (α, δ) hesaplanır.

4. CCD KAMERA SİSTEMİ İLE ELDE EDİLEN ÇEKÜL SAPMALARININ KONTROLÜ VE DOĞRULUKLARININ BELİRLENMESİ

4.1 Ana İstasyondaki Gözlemler ve Değerlendirmeler

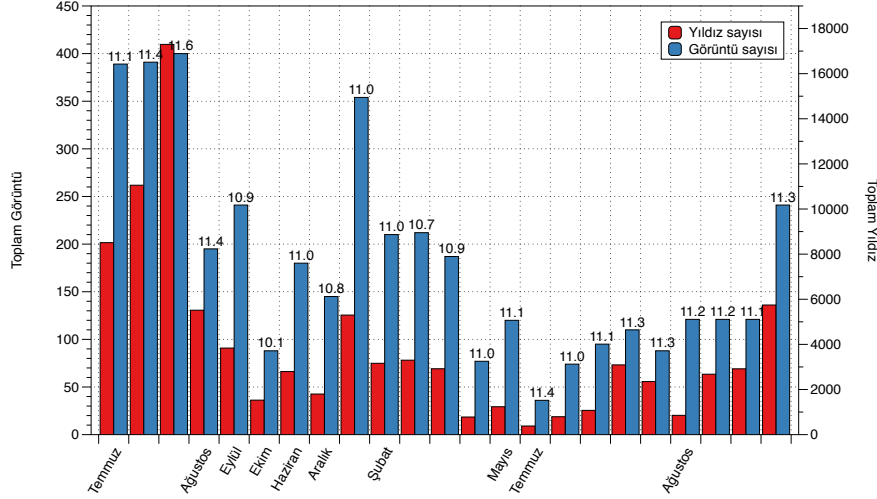
Sistemin kurulumu, kontrol ve kalibrasyon çalışmaları; Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.3’de açıklandığı gibi, kamera kalibrasyonu (perde gecikmesinin belirlenmesi), yıldızların merkezlerinin resim koordinatlarının belirlenmesi, kameranın azimut kalibrasyonu, görüntülerin kalibrasyonu adımlarını içermektedir.

Teleskobun kendi içinde $\pm 1'$ presizyon ile çalışan elektronik düzeç bulunmaktadır. Bu çalışmada beklenen düzeçleme doğruluklarına ulaşabilmek için sisteme mekanik olarak Leica Nivel 210 elektronik düzeçlerinin monte edilmesi araştırılmıştır. Farklı montaj konumlarında yapılan gözlemler değerlendirilerek, sistemin dönme ekseninin ve yatay ekseninin düzeçlerle kontrolü araştırılmış ve en uygun montaj konumları belirlenmiştir.

Önceki gözlemlerde, her azimut konumunda 10’un üzerinde görüntü alınmıştır. Ancak, sistemin her azimuta döndürülmesi ve düzeç stabilizasyonu için beklemeler gözlemler arasındaki zaman aralığını uzatmakta ve görüntüleri meteorolojik etkilere açık hale getirmektedir. Bu nedenle kayıt sayısının optimize edilmesi gerekmektedir.

Geleneksel astronomik gözlemlerde, I. ve II. gözlem durumlarında yıldıza yapılan gözlemler bütünü 1 seri olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada da, buna paralel olarak her azimut konumunda (0^0 , 90^0 , 180^0 , 270^0) yapılan 5 kayıt (böylece 4 azimutta toplam 20 kayıt), 1 seri gözlem olarak adlandırılacaktır (Bölüm 3.4.1).

Ana istasyonda 2013-2014 yılları arasında, ağırlıklı olarak yaz aylarında gözlemler gerçekleştirilmiştir. Bu gözlemlere ait bilgiler Şekil 4.1’de verilmektedir. Şekil 4.1’de ana istasyonda değerlendirilen ortalama yıldız parlaklığı ile birlikte toplam görüntü sayısı ve bu görüntülerde tanımlanarak hesaplamalara dahil edilen toplam yıldız sayısının gözlem tarihine göre grafiği verilmiştir.



Şekil 4.1 : Ana istasyonda değerlendirilen toplam görüntü ve yıldız sayısı grafiği.

Sayısal Zenit Kamera Sistemi gövdesine ve tüp üzerine eğimölçerler yeniden yerleştirildikten sonra bir dizi gözlem gerçekleştirilmiştir. Her bir görüntüye ait eğim değerleri kaydedilmiş ve seriler ortalamasına düzeltme olarak getirilmiştir. Bu gözlemlerden bir kısmı yüksek derecede nem içeren gecelerde gerçekleştirildiğinden görüntülerde anlamlı çözümlere ulaşılamamış ve değerlendirme dışı bırakılmıştır. Elde edilen görüntülerde birbiri ile uyumlu sonuçlar veren ve 4 azimut için de çözülebilen gözlemler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Seriler ortalamalarından çözüm verenler hesaplanarak değerlendirmeye dahil edilmiştir. Çizelge 4.1’de 20140703, 20140709 ve 20140711 epoklarında sırasıyla 3, 3 ve 4 seri gözlemler değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 : Test İstasyonunda elde edilen çekül sapmaları.

Epok	$\Phi^{(0)}$	$\Lambda^{(0)}$	ξ''	η''	θ''	$m_0\xi''$	$m_0\eta''$	$m_{0ort}\xi''$	$m_{0ort}\eta''$
20140703	41.0639571	29.0648031	1.49	2.41	2.83	0.48	0.94	0.30	0.45
20140709	41.0638476	29.0648238	1.10	2.47	2.70	0.49	0.27	0.28	0.16
20140711	41.0638977	29.0650167	1.28	2.99	3.25	0.87	0.60	0.50	0.35
KANDL	41.0639008	29.0648812	1.29	2.62	2.92	0.60	0.90	0.19	0.28

Çizelge 4.1’de Φ , Λ ; astronomik koordinatlar, ξ , η , θ ; çekül sapmasının kuzey-güney, doğu-batı bileşenleri ve çekül sapması, $m_0\xi''$, $m_0\eta''$; çekül sapması bileşenlerinin karesel ortalama hataları, $m_{0ort}\xi''$, $m_{0ort}\eta''$; ortalamanın karesel ortalama hatası olarak verilmiştir.

Gözlemlerden elde edilen koordinatların iç doğruluğunun $0.2'' - 0.3''$ civarında olduğu belirlenmekte ve bu değer üzerindeki ölçmeler hesaplamalardan çıkarılmaktadır. Bu

gözlemler, düzeç her defasında bozularak ve düzeçleme tekrarı ile gerçekleştirilmiştir. Her iki eğimölçerden 4 farklı azimut değerinde elde edilen eğim değerlerinden düzeltmeler;

$$\mu_{\Lambda} = \frac{d}{2} \cdot \{(x_0 - x_{180}) + (y_{90} - y_{270})\} \quad (4.1)$$

$$\mu_{\Phi} = \frac{d}{2} \cdot \{(y_0 - y_{180}) + (x_{90} - x_{270})\} \quad (4.2)$$

eşitlikleriyle hesaplanmıştır [62].

Burada; μ_{Λ} ve μ_{Φ} sırasıyla bir eğimölçere ait boylam ve enlem düzeltmesidir. d , Nivel 210 eğimölçer için 0.2 yay saniyesidir.

Sistemin iteratif şekilde düzeçlenmesi sırasındaki görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Sistemin iteratif düzeçlenmesi.

Simetrik gözlemlerin ortalamalarından giderilemeyen düzeç hataları, elektronik düzeçlerle gözlem anında ortalama değerlerden her bir azimut için hesaplanmakta ve astronomik koordinatların ortalama değerleri Eşitlik 4.1 ve Eşitlik 4.2’ye göre düzeltilmektedir [62].

4.1.1 İndirgemeler

Test istasyonundaki gözlemlerin analizi ile sistemin iç doğruluğu elde edilmektedir. Sistemin arazide kullanılabilirliği ve arazi koşullarında performansı yani dış

doğruluğu, İstanbul GPS/Niv [8] ve EGM08 [48] geoit yükseklik farkları kullanılarak yapılacak karşılaştırmalar ile belirlenebilir.

İstanbul GPS/Niv geoit yükseklikleri ± 3.5 cm doğruluğundadır [63]. Ancak, bu geoit yüksekliği ülke yükseklik sistemine göreler. Ayrıca İstanbul GPS/Niv geoidi, GRS80'e göre datum ötelemesine sahip, ülke yükseklik sisteminin distorsiyonlarının etkisinde lokal bir geoittir. Bu nedenlerle, karşılaştırmalar için geoit yükseklik farklarının kullanılması daha doğru ve güvenilirler.

Fiziksel yer üzerindeki çekül sapmalarından hesaplanan geoit yükseklik farkları ile fiziksel yer üzerindeki nivelman ve GPS gözlemlerinden hesaplanan geoit yükseklik farkları, teorik bir noksanlık olmadan karşılaştırılabilir. Ancak, EGM08 veya TG 99A geoit yükseklikleri ile İstanbul GPS/NIV geoit yüksekliklerinin karşılaştırılabilmesi için GPS/NIV geoit yüksekliklerinin geoide indirgenmesi gerekir.

Fiziksel yer üzerinde elde edilen geoit yükseklik farklarının geoide indirgenmesi (referanslanması) Eşitlik 2.19 yardımıyla yapılır [43]. Benzer biçimde, fiziksel yer üzerinde elde edilen çekül sapmaları da geoide indirgenmelidir. Fiziksel yer üzerinde elde edilen çekül sapmalarının geoide indirgenmesi aşağıdaki biçimde yapılır.

$$\xi_{Geoid} = \xi_{Yeryüzü} + \delta\xi \quad (4.3)$$

$$\eta_{Geoid} = \eta_{Yeryüzü} + \delta\eta \quad (4.4)$$

alınarak, düzeltmeler;

$$\delta\xi = -\frac{H}{g} \cdot \frac{\delta\bar{g}}{\delta x} + \frac{g-\bar{g}}{\bar{g}} \cdot \tan\beta_1 \quad (4.5)$$

$$\delta\eta \cdot \cos\varphi = -\frac{H}{g} \cdot \frac{\delta\bar{g}}{\delta y} + \frac{g-\bar{g}}{\bar{g}} \cdot \tan\beta_2 \quad (4.6)$$

olarak hesaplanır. Burada;

H ; Noktanın ortometrik yüksekliği

β_1, β_2 ; Yerel yataya göre kuzey-güney ve doğu-batı kesitlerinin eğim açıları (topoğrafik haritadan alınabilir)

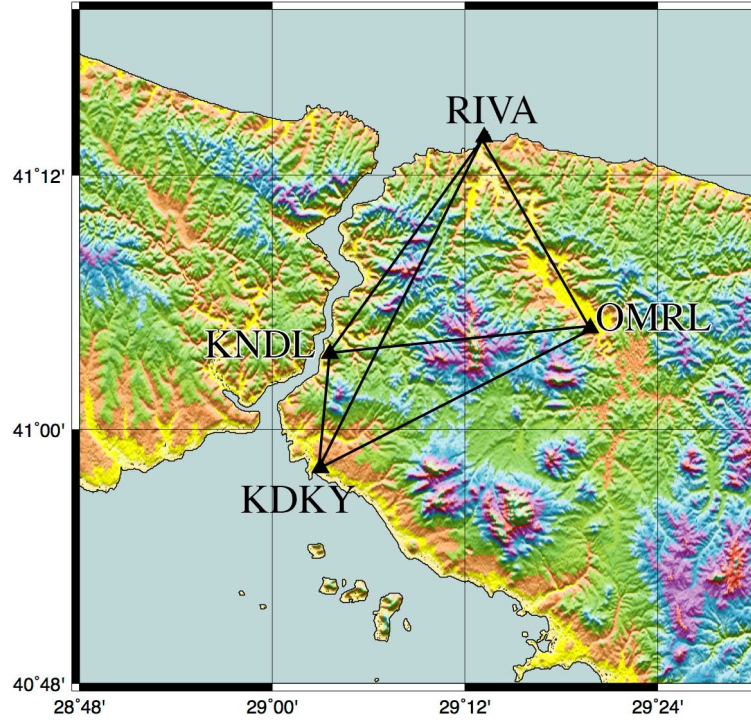
$\bar{g}$; Geoit ile yeryüzü arasındaki çekül çizgisi boyunca ortalama gravite değeri

olarak alınır. $\frac{\delta\bar{g}}{\delta x}, \frac{\delta\bar{g}}{\delta y}$ gravite gradyentleri, nokta çevresinde yoğun bir gravite ağının gözlemlerinden belirlenmelidir [64]. Geoide indirgemeler için gravite gözlemleri yapılmalıdır.

Çekül sapmalarının geoide indirgeme düzeltmesi $0.5''$ 'den daha küçüktür [2]. Bu çalışmada çekül sapmalarının geoide indirgemesi yapılmamıştır.

4.2 Test Ağı Gözlemleri, Çekül Sapmaları ve Doğrulukları

Astronomik nivelman test ağı Şekil 4.3'deki gibi seçilmiştir.



Şekil 4.3 : Test Ağı.

Test ağının seçiminde, İstanbul Metropolitan alanı Geoit Dayanak Noktaları Ağı kanavasından yararlanılmıştır (Şekil 4.4). Test ağı noktaları oluşturulurken 591 adet nokta arasından (Şekil 4.5) 58 adet nokta belirlenmiş ve bu noktalar arazide bulunarak, üzerine alet kurulabilirlik ve ulaşılabilirlik açısından çalışmaya uygunluğu değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda Şekil 4.3'de görülen dört noktalı ağ oluşturulmuştur.

Test ağının verileri, İstanbul Metropolitan GPS Nirengi Ağı projesinden [8] alınmış ve kontrol gözlemleri ile iyileştirilmiştir. Test ağının jeodezik verileri Çizelge 4.2'de verilmektedir.

Test ağı gözlemlerinde örnek olarak, Kadıköy istasyonuna görüntü koordinatları Çizelge 4.3'de, seriler ortalaması Çizelge 4.4'de, düzeltme değerleri ve çekül sapmaları Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Kadıköy (KDKY) noktasına ait görüntü koordinatları.

Görüntü	Azimet	Φ^0	Λ^0	v''_{Φ}	v''_{Λ}
05Zc001Az000	000	41.3791923	29.0840964	0.09	0.27
05Zc001Az090	090	40.9459074	29.5978996	-0.21	0.46
05Zc001Az180	180	40.5584755	29.0139978	-0.30	-0.28
05Zc001Az270	270	40.9886816	28.4995387	-0.27	-0.34
05Zc002Az000	000	41.3791761	29.0838668	0.03	-0.55
05Zc002Az090	090	40.9459572	29.5980374	-0.03	0.96
05Zc002Az180	180	40.5584909	29.0140399	-0.24	-0.13
05Zc002Az270	270	40.9887204	28.4996071	-0.13	-0.09
05Zc003Az000	000	41.3792385	29.0837358	0.26	-1.02
05Zc003Az180	180	40.5585862	29.0141303	0.10	0.20
05Zc004Az000	000	41.3791295	29.0840820	-0.14	0.22
05Zc004Az090	090	40.9459699	29.5976464	0.01	-0.45
05Zc004Az180	180	40.5586331	29.0142502	0.27	0.63
05Zc004Az270	270	40.9888591	28.4994992	0.37	-0.48
05Zc005Az000	000	41.3790998	29.0843195	-0.24	1.08
05Zc005Az090	090	40.9459583	29.5978471	-0.03	0.27
05Zc005Az180	180	40.5586083	29.0139562	0.18	-0.43
05Zc005Az270	270	40.9887640	28.4994754	0.03	-0.56
06Zc001Az000	000	41.3802456	29.0826665	0.46	0.60
06Zc001Az090	090	40.9472037	29.5965273	0.29	-0.49
06Zc001Az180	180	40.5586401	29.0169690	-0.17	-0.65
06Zc001Az270	270	40.9877090	28.4992464	0.01	-0.48
06Zc002Az000	000	41.3803270	29.0825855	0.75	0.31
06Zc002Az090	090	40.9471376	29.5966900	0.05	0.09
06Zc002Az180	180	40.5585873	29.0170044	-0.36	-0.52
06Zc002Az270	270	40.9876298	28.4995156	-0.28	0.49
06Zc003Az000	000	41.3802539	29.0824111	0.49	-0.32
06Zc003Az090	090	40.9470967	29.5968595	-0.10	0.70
06Zc003Az180	180	40.5587721	29.0171731	0.30	0.08
06Zc003Az270	270	40.9877996	28.4992879	0.33	-0.33
06Zc004Az000	000	41.3800041	29.0824948	-0.41	-0.02
06Zc004Az090	090	40.9470583	29.5966226	-0.24	-0.15
06Zc004Az180	180	40.5587196	29.0173437	0.12	0.70
06Zc004Az270	270	40.9876979	28.4993824	-0.03	0.01
06Zc005Az000	000	41.3797617	29.0823433	-1.28	-0.56
06Zc004Az090	090	40.9470583	29.5966192	0.12	-0.16
06Zc005Az180	180	40.5587183	29.0172581	0.11	0.39
06Zc005Az270	270	40.9876963	28.4994668	-0.04	0.31
10Zc001Az000	000	41.3771792	29.0810800	0.25	0.50
10Zc001Az090	090	40.9507940	29.5983981	0.08	0.27
10Zc001Az180	180	40.5633491	29.0172670	-0.26	-0.67
10Zc001Az270	270	40.9820079	28.4992912	-0.22	-0.27
10Zc002Az000	000	41.3771182	29.0807557	0.03	-0.67
10Zc002Az090	090	40.9507219	29.5982810	-0.18	-0.16
10Zc002Az180	180	40.5633980	29.0173808	-0.09	-0.26
10Zc002Az270	270	40.9820987	28.4995151	0.11	0.54
10Zc003Az000	000	41.3771468	29.0810120	0.13	0.25
10Zc003Az090	090	40.9507392	29.5983379	-0.11	0.05
10Zc003Az180	180	40.5636118	29.0174980	0.68	0.16
10Zc003Az270	270	40.9821497	28.4992987	0.29	-0.24
10Zc004Az000	000	41.3770717	29.0808604	-0.14	-0.29
10Zc004Az090	090	40.9507409	29.5982675	-0.11	-0.20
10Zc004Az180	180	40.5635367	29.0174619	0.41	0.03
10Zc004Az270	270	40.9820259	28.4993664	-0.16	0.00
10Zc005Az000	000	41.3770340	29.0809978	-0.27	0.20
10Zc005Az090	090	40.9508584	29.5983365	0.32	0.04
10Zc005Az180	180	40.5632170	29.0176598	-0.74	0.74
10Zc005Az270	270	40.9820652	28.4993610	-0.02	-0.02

Çizelge 4.4 : Kadıköy (KDKY) noktasına ait seriler.

Seri	Azimuth 0^0		Azimuth 90^0		Azimuth 180^0		Azimuth 270^0	
	Φ	Λ	Φ	Λ	Φ	Λ	Φ	Λ
1	41.3791673	29.0840201	40.9459666	29.5977720	40.5585588	29.0140749	40.9887569	28.4996318
2	41.3801184	29.0825002	40.9471241	29.5966637	40.5586875	29.0171497	40.9877065	28.4993798
3	41.3771100	29.0809412	40.9507709	29.5983242	40.5634225	29.0174535	40.9820695	28.4993665

Çizelge 4.5 : KDKY noktasına ait düzeltmeler ve çekül sapmaları.

Seri	Φ^0	Λ^0	$\mu''_{\Lambda N1}$	$\mu''_{\Phi N1}$	$\mu''_{\Lambda N2}$	$\mu''_{\Phi N2}$	Φ_z^0	Λ_z^0	$m''_{0\Phi}$	$m''_{0\Lambda}$	ξ''	η''
1	40.9681124	29.0488747	-2.07	-1.31	-2.59	-1.08	40.9677804	29.0482275	0.44	0.11	-7.12	4.44
2	40.9684091	29.0489234	-3.16	-1.25	-3.31	-1.15	40.9680758	29.0480247	0.16	0.16	-6.06	3.89
3	40.9683432	29.0490213	-3.16	-1.32	-3.11	-0.87	40.9680390	29.0481505	0.07	0.00	-6.19	4.23

Çizelge 4.4'de her bir seriye ait, 0^0 , 90^0 , 180^0 , 270^0 azimutlar için hesaplanmış astronomik enlem Φ ve astronomik boylam Λ ortalamaları gösterilmektedir. Çizelge 4.5'de, Φ^0 , Λ^0 ; her bir seri için dört farklı azimutun ortalamaları, $\mu''_{\Lambda N1}$, $\mu''_{\Phi N1}$, $\mu''_{\Lambda N2}$, $\mu''_{\Phi N2}$; birinci (N_1) ve ikinci (N_2) eğimölçer ile elde edilen, astronomik enlem ve boylam için eğim düzeltmeleri, Φ_z^0 , Λ_z^0 ; eğim düzeltmesi getirilmiş astronomik koordinatlar, $m''_{0\Phi}$, $m''_{0\Lambda}$; astronomik enlem ve boylama ait karesel ortalama hatalar ve ξ'' , η'' ; çekül sapmasının sırasıyla kuzey-güney ve doğu-batı bileşenlerini göstermektedir.

Çizelge 4.6’da m_0 bir serinin karesel ortalama hatasını, m_{0ort} , ortalamanın karesel ortalama hatasını ifade etmektedir. Test ağındaki gözlemlere ilişkin görüntüler Ek A’da verilmektedir.

4.3 Test Ağında Elde Edilen Çekül Sapmalarının Global Jeopotansiyel Modeller ile Karşılaştırması

Jeopotansiyel alanın spektral özelliği nedeniyle, gözlenen çekül sapmalarının EGM08’in hangi derece ve mertebesine karşılık geldiği de deneysel olarak belirlenmelidir. Ancak bu çalışmada elde edilebilir verilerle karşılaştırmalar yapılmaktadır. Çizelge 4.7’de farklı jeopotansiyel modellerden hesaplanan çekül sapması bileşenleri verilmektedir.

Çizelge 4.7 : Test ağı noktalarında,farklı jeopotansiyel modellere göre çekül sapması bileşenleri (n=m=360 için).

İstasyon	EGM96		EIGEN CG03C		EGM08	
	ξ''_0	η''_0	ξ''_0	η''_0	ξ''_0	η''_0
RİVA	7.827	2.912	8.910	1.672	8.770	5.245
ÖMERLİ	6.051	2.115	7.199	0.524	7.445	2.524
KADIKÖY	2.966	-1.053	4.106	-2.230	2.602	-0.489
KANDİLLİ	4.002	-0.299	4.936	-1.435	3.492	1.219

İstanbul ve İzmit çevresindeki GPS/Niv geoidi belirleme çalışmalarından, TG 99A’nın deniz kıyılarında iyi sonuçlar veremediği belirlenmiştir. Bu nedenlerle bu modellerin kaba hata araştırmasında kullanılabileceği ancak yüksek doğruluk belirlemelerinde referans olarak alınamayacağı değerlendirilmiştir.

Test ağı noktalarının, İstanbul GPS/Niv geoidi, EGM96, EGM08 ve EIGEN GL004C jeopotansiyel modellerden hesaplanan (n=m=360 için) geoid yükseklikleri Çizelge 4.8’de verilmektedir.

Test ağı noktalarının, İstanbul GPS/Niv geoidi, EGM96, EGM08 ve EIGEN GL004C jeopotansiyel modellerden hesaplanan geoid yükseklik farkları Çizelge 4.9’de verilmektedir.

Çizelge 4.8 : Test ağı noktalarının farklı geoit modellerine göre geoit yükseklikleri.

İstasyon	GPS/NİV	EGM96 360 ⁰	EIGEN -GL004C 360 ⁰	EGM08 360 ⁰	EGM08 -GPS/NİV	EIGEN -GPS/NİV	EGM08 -EGM96
RİVA	35.875	37.278	36.568	36.907	1.032	0.692	1.403
ÖMERLİ	36.312	37.72	37.233	37.378	1.066	0.920	1.408
KADIKÖY	36.688	38.032	37.461	37.794	1.106	0.773	1.344
KANDİLLİ	36.796	37.858	37.196	37.636	0.840	0.400	1.062
				Ortalama	1.011	0.697	1.304

Çizelge 4.9 : Test ağının geoit yükseklikleri farkları.

İstasyon	GPS/NİV (m)	EGM96 360 ⁰	EIGEN-GL004C 360 ⁰	EGM08 360 ⁰
KANDİLLİ -RİVA	-0.921	-0.580	-0.628	-0.729
KANDİLLİ - ÖMERLİ	-0.484	-0.138	0.037	-0.258
KANDİLLİ - KADIKÖY	-0.108	0.174	0.265	0.158
RİVA-ÖMERLİ	0.437	0.442	0.665	0.472
ÖMERLİ-KADIKÖY	0.376	0.312	0.228	0.416
KADIKÖY-RİVA	-0.813	0.754	-0.893	-0.887

Çizelge 4.8'deki geoit yükseklikleri karşılaştırıldığında, ortalama olarak, EGM08 ile GPS/NİV arasında 1.010 m'lik, EIGEN-GPS/NİV arasında 0.697 m'lik ve EGM96 ile GPS/NİV arasında 1.304 m'lik datum ötelemelerinin olduğu belirlenmiştir.

Geoit yükseklikleri farkları irdelendiğinde, GPS/NİV geoit yükseklik farklarına en uygun modelin EGM08 olduğu, ancak farkların bazı noktalarda 22 cm'ye ulaştığı görülmektedir.

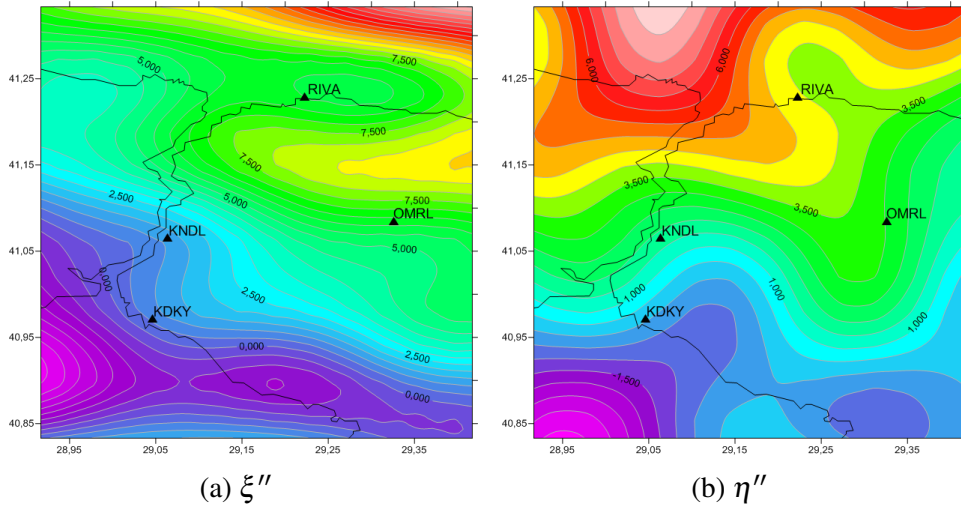
Test ağında gözlenen çekül sapmaları ile jeopotansiyel modellerden ($n = m = 2159$ açılımlı) hesaplanan çekül sapmaları arasındaki farklar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Test ağı noktaları için $2.5' \times 2.5'$ grid verisi ile (Şekil 4.7) EGM08 global jeopotansiyel katsayıları kullanılarak 2159 derece açınımla çekül sapması bileşenleri hesaplanmıştır.

Ayrıca test ağı noktaları [65] tarafından yayınlanan GGM+ Global modeli ile de hesaplanarak Sayısal Zenit Kamera ile ölçülen çekül sapmaları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.10). [65], model ile hesaplanan çekül sapmalarının doğruluklarını; Avrupa için $\pm 1''$ Asya için ise $\pm 3'' - 5''$ olarak vermektedir.

Çizelge 4.10 : Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile elde edilmiş, EGM08 (2159 derece) ve GGM+ global jeopotansiyel model katsayıları kullanılarak hesaplanmış çekül sapmaları ve farklar.

İst.	SZKS		EGM08 _(2190°)		GGM+		SZKS – EGM08		SZKS – GGM+	
	ξ''	η''	ξ_0''	η_0''	ξ_0''	η_0''	$\delta\xi''$	$\delta\eta''$	$\delta\xi''$	$\delta\eta''$
KDKY	-6.46	4.18	0.56	0.03	-0.46	-0.32	-6.00	4.50	-7.02	4.15
OMRL	5.75	3.16	6.20	2.96	6.80	3.16	-0.45	0.00	1.05	0.00
RIVA	12.18	4.07	6.02	4.10	5.92	3.97	6.26	0.10	6.16	-0.03
KNDL	1.29	2.62	1.13	1.77	1.85	1.61	-0.56	1.01	0.16	0.85



Şekil 4.7 : Test ağı için örneklenmiş EGM08 (n=m=2159°) global jeopotansiyel model grid verisi ile üretilmiş çekül sapması bileşenleri.

GGM+ global jeopotansiyel modeli GRACE ve GOCE uydu gravite verileri ve EGM08'in birleşimi olarak oluşturulmuştur. GGM+, 7 yıllık GRACE uydu verisi, 2 yıllık GOCE uydu verisi, EGM08 global jeopotansiyel modeli, 7.5 yay saniyelik SRTM topoğrafya verisi ve 30 yay saniyesi SRTM _ PLUS batimetri verisi kullanılarak hesaplanmıştır [65].

Çizelge 4.10'da; Kadıköy ve Riva istasyonlarında, kuzey-güney bileşenindeki farkların beklenenden büyük, diğer bileşenlerin uyumlu olduğu söylenebilir. Kadıköy ve Riva noktaları denize yakındır. Bu farklar, global modellerin kara-deniz geçişlerindeki (uydu altimetre değerlendirmelerinden kaynaklanan) yetersizlikler nedeniyle de oluşabilir.

4.4 Test Ağı Gözlemlerinin Değerlendirilmesi ve Doğruluk Analizi

4.4.1 GPS/NİV geoit yükseklik farkları ile karşılaştırma

Astro-jeodezik çekül sapmaları, astro-jeodezik geoit belirlemede ölçü olarak kullanılır. Tüm noktalarında çekül sapması bileşenlerinin belirlendiği astro-jeodezik ağda, noktalar arasındaki ortalama çekül sapmaları;

$$\varepsilon_{ij} = \xi_i \cos \alpha_{ij} + \eta_i \sin \alpha_{ij} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{ji} = \xi_j \cos \alpha_{ji} + \eta_j \sin \alpha_{ji} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{ort} = (\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji})/2 \quad (4.9)$$

ile noktalar arasındaki geoit yükseklik değişimleri;

$$\Delta N_{ij} = -s_{ij} \cdot \varepsilon_{ort} / \rho \quad (4.10)$$

olarak bulunur. Eşitlik 4.9'den bulunacak ortalama değer; iki noktayı birleştiren kirişi gören açı olarak, [2]'de açıklanan algoritmaya uygun olarak hesaplanır.

Test ağında hesaplanan geoit yükseklik farkları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Örnek bir astronomik nivelman hesabı Şekil A.16'da görülmektedir [2].

Çizelge 4.11 : Test ağındaki astronomik nivelman hesabı.

i. İst.	j. İst.	Azimutlar**		Kenar*** (m)		$\varepsilon_{ij}('')$	$\varepsilon_{ji}('')$	$\frac{* \varepsilon_{ort}'' = \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji}}{2}$	$\Delta N_{ij}(m) = -\frac{\varepsilon_{ort}''}{\rho''} \cdot S_{ij}$	(m)	Fark (m)
ξ''	η''	ξ''	η''	α_{ij}^s	α_{ji}^s	S_{ij}	$\varepsilon_{ij}('')$	$\varepsilon_{ji}('')$	$\Delta N_{ij}(m) = -\frac{\varepsilon_{ort}''}{\rho''} \cdot S_{ij}$	GPS/NİV	GPS/NİV - Ölçü
KNDL	RIVA	40.84219581	240.84015854	22589.6	2.601	-12.194	7.398	-0.810	-0.921	-0.111	
1.29	2.62	12.18	4.07								
KNDL	OMRL	94.22733731	294.22712478	22167.7	2.726	-3.668	3.197	-0.344	-0.484	-0.140	
1.29	2.62	5.75	3.16								
KNDL	KDKY	209.53548870	9.53678311	10525.6	-1.667	-5.812	2.073	-1.106	-0.108	-0.002	
1.29	2.62	-6.46	3.86								
RIVA	OMRL	168.88049599	368.88202955	18225.8	-8.842	3.593	-6.218	0.549	0.437	-0.112	
12.18	4.07	5.75	3.16								
KDKY	OMRL	69.22245356	269.22112381	26708.4	0.415	-5.471	2.943	-0.381	-0.376	+0.005	
-6.46	3.86	5.75	3.16								
KDKY	RIVA	30.99407793	230.99083404	32253.3	-3.904	-12.669	4.383	-0.685	-0.813	-0.128	
-6.46	3.86	5.75	3.16								

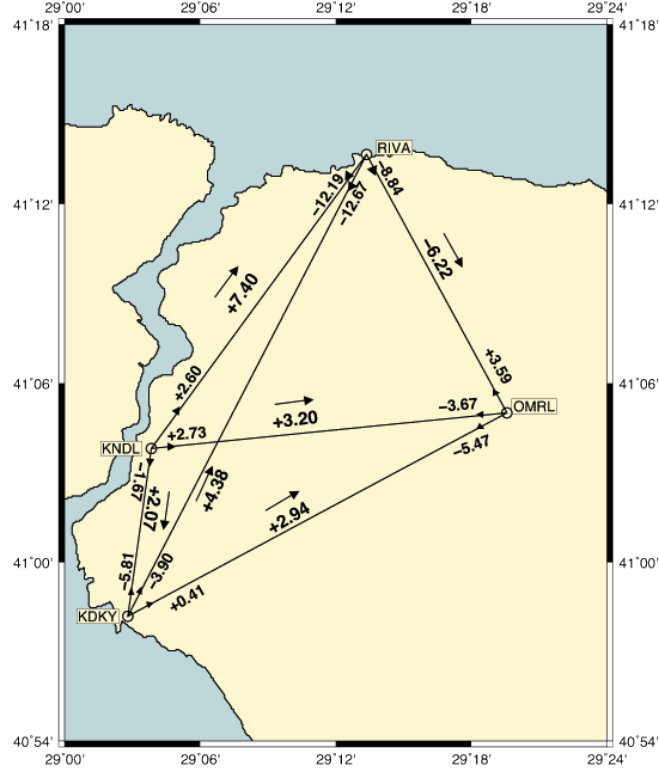
* ε_{ort} değerlerinin hesaplanmasına örnekler aşağıdadır. ε_{ort} değerleri [2]'deki algoritmaya göre hesaplanmıştır.

Örneğin; Kandilli - Riva doğrultusunda $\varepsilon_{ij} = 2.601$, $\varepsilon_{ji} = -12.194$ hesaplanmıştır. $\varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji} = -9.593/2 = -4.797$, $\varepsilon_{ort} = 2.601 - (-4.797) = 7.398$

** Elipsoid Azimutlar.

*** Ortalama elipsoidal yüksekliğe çıkarılmış elipsoidal uzunluklar. Ortalama eğrilik yarıçapı 6375423.195 m alınmıştır.

Test ağındahesaplanan çekül sapmaları Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8 : Test Ağı'nın Astronomik Nivelmanı (Birim ('')).

Yer üzerindeki geoid yükseklik farkları, yine yer üzerindeki değerlerle dengelenmiş İstanbul GPS/Niv geoid yüksekliği değişimleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 4.12’de verilmektedir.

Çizelge 4.12 : GPS/Niv geoid yükseklik farkları ile Test Ağı gözlem verilerinin karşılaştırılması.

Kenar	Uzunluk S (km)	GPS/NİV $\Delta N_{GPS/Niv}$ (m)	Gözlenen ΔN_G (m)	d=Fark (mm) $\Delta N_{GPS/Niv} - \Delta N_G$	[Pdd] ($1/S_{km}$)	[Pdd] ($1/S_{km}^2$)	Hata Sınırı $50mm + 15\sqrt{S_{km}}$
KNDL-RIVA	22.57	-0.921	-0.810	-111	544.5882	24.1245	121.0
KNDL-OMRL	22.15	-0.484	-0.346	-138	856.9800	38.6593	120.6
KNDL-KDKY	10.52	-0.108	-0.106	-2	0.3808	0.0363	98.7
RIVA-OMRL	18.21	0.437	0.549	112	688.6656	37.8829	114.0
KDKY-OMRL	26.69	-0.376	-0.381	5	0.9375	0.0351	127.5
KDKY-RIVA	30.39	-0.813	-0.685	-128	507.9040	1.5729	132.2

Çizelge 4.12'deki farklardan 1 km'lik uzunlukta bir geoit yüksekliği belirlemenin karesel ortalama hatası, farklı ağırlıklarla;

$$P_{\Delta N} = \frac{1}{S_{km}} \text{ için } m_0 = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \cdot \frac{dd}{S}} = \pm 14.7 \text{ mm/km} \quad (4.11)$$

$$P_{\Delta N} = \frac{1}{S_{km}^2} \text{ için } m_0 = \pm 2.9 \text{ mm/km} \quad (4.12)$$

olarak bulunmuştur.

GPS/Niv farkları da ölçme hatalarını içermektedir. Bu durum da dikkate alındığında, bu sonuç Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Yönetmeliğine göre geoit dayanak noktalarının ortometrik yüksekliklerinin belirlenmesi için verilen hata sınırı ile karşılaştırılabilir. Yönetmelikte, Geoit dayanak noktalarının yüksekliklerinin belirlenmesinde $\pm 15 \text{ mm/km}$ (Ara Nivelman) hata sınırı verilmektedir. Geoit yükseklik presizyonu $\pm 35 \text{ mm}$ alınırsa, buradan iki nokta arasındaki geoit yükseklik farkının karesel ortalama hatası $\pm 35\sqrt{2}$ olacaktır. Bu durumda $\Delta N_{GPS/Niv}$ ile ΔN_G arasındaki farklar için hata sınırı için $50 \text{ mm} + 15\sqrt{S_{km}}$ alınabilir. Çizelge 4.12'nin son sütunundaki sınır değerlerle farklar karşılaştırıldığında 4 istasyondaki sonuçların da uyumlu olduğu söylenebilir.

4.4.2 Test ağında hesaplanan geoit yükseklik farklarının dengeleme analizi

Test ağında hesaplanan geoit yüksekliği değişimleri ölçü alınarak, Gauss-Markov modelinde, en küçük kareler yöntemiyle, Kandilli istasyonunun geoit yüksekliğine bağlı olarak dengelenmiştir (Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14). Dengelemeler, ağırlıklar $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ ve $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ alınarak yapılmıştır.

Çizelge 4.13 : Test ağının dengelenmesi sonucu elde edilmiş özet çizelge.

DN - BN	Ölçü (m)	v (mm)	Dengeli Ölçü (m)	Kontrol (mm)	Ağırlık P	K.O.H (mm)
KNDL - RIVA	-0.81000	-30.9242	-0.84092	0.000	0.044	83.4535
KNDL - OMRL	-0.34400	-12.6121	-0.35661	0.000	0.045	82.6705
KNDL - KDKY	-0.10600	20.3975	-0.08560	0.000	0.095	56.9657
RIVA - OMRL	0.54900	-64.6880	0.48431	0.000	0.055	74.9607
KDKY - OMRL	-0.38100	109.9904	-0.27101	0.000	0.037	90.7432
KDKY - RIVA	-0.68500	-70.3217	-0.75532	0.000	0.031	99.7189

$P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ alınarak yapılan dengeleme sonrası birim ağırlıklı ölçünün ($S = 1 km$ için $P_{\Delta N} = 1$) karesel ortalama hatası $m_0 = \pm 17.6 mm/km$ bulunmuştur.

Çizelge 4.14 : Test ağının dengelenmesi sonucu elde edilmiş özet çizelge.

DN - BN	Ölçü (m)	v (mm)	Dengeli Ölçü (m)	Kontrol (mm)	Ağırlık P	K.O.H (mm)
KNDL - RIVA	-0.81000	-42.0516	-0.85205	0.000	0.002	80.8496
KNDL - OMRL	-0.34400	-9.5213	-0.35352	0.000	0.002	79.3395
KNDL - KDKY	-0.10600	11.2763	-0.09472	0.000	0.009	37.6718
RIVA - OMRL	0.54900	-50.4697	0.49853	0.000	0.003	65.2312
KDKY - OMRL	-0.38100	122.2024	-0.25880	0.000	0.001	95.5910
KDKY - RIVA	-0.68500	-72.3279	-0.75733	0.000	0.001	115.4365

$P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ alınarak yapılan dengeleme sonucu birim ağırlıklı ölçünün ($S = 1 km$ için $P_{\Delta N} = 1$) karesel ortalama hatası $m_0 = \pm 3.6 mm/km$ bulunmuştur.

Dengeleme sonucu, hesaplanan geoit yükseklikleri ve karesel ortalama hataları ile, GPS/Niv geoidi ile olan farklar Çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.15 : Test ağındaki istasyonların dengelenmiş geoit yükseklikleri ve farklar.

Istasyon	$N_{GPS/Niv}$ (m)	$N_{1/S_{km}}$ (m)	N_{1/S_{km}^2} (m)	$(GPS/Niv) - (1/S_{km})$ $\delta N(mm)$	$K.O.H(mm)$	$(GPS/Niv) - (1/S_{km}^2)$ $\delta N(mm)$	$K.O.H(mm)$
RIVA	35.8751	35.8667	35.8555	8.4	57.1	19.6	54.6
OMRL	36.3122	36.3510	36.3541	-38.8	56.1	-41.9	52.8
KDKY	36.6884	36.6220	36.6129	66.4	48.0	75.5	34.9
KNDL	36.7079	-	-				

Çizelge 4.16 : Test ağındaki istasyonların dengelenmiş geoit yükseklik farkları.

Kenar	$\Delta N_{GPS/Niv}$ (m)	$\Delta N_{1/S_{km}}$ (m)	$\Delta N_{1/S_{km}^2}$ (m)	$(GPS/Niv) - (1/S_{km})$ $\delta N(m)$	$K.O.H(mm)$	$(GPS/Niv) - (1/S_{km}^2)$ $\delta N(m)$	$K.O.H(mm)$
KNDL-RIVA	-0.921	-0.841	-0.852	-0.080	83.5	-0.069	80.8
KNDL-OMRL	-0.484	-0.357	-0.354	-0.127	82.7	-0.130	79.3
KNDL-KDKY	-0.108	-0.086	-0.095	-0.022	57.0	-0.013	37.7
RIVA-OMRL	0.437	0.484	0.499	-0.047	75.0	-0.062	65.2
KDKY-OMRL	-0.376	-0.271	-0.259	-0.105	90.7	-0.117	95.6
KDKY-RIVA	-0.813	-0.755	-0.757	-0.058	99.7	-0.056	115.4

Dengeleme sonucu bulunan geoit yüksekliklerinin karesel ortalama hataları,

$$P_{\Delta N} = 1/S_{km} \text{ için } \pm 57.1mm (max.)$$

$$P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2 \text{ için } \pm 54.6mm (max.)$$

bulunmuştur. Bu sonuçlar, Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği [52] Madde:42g’de ifade edilen uyuşum doğruluğu $\sigma = \pm 5 cm$ değerine yakın değerlerdir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı amaçlar için üretilen alet, donanım ve yazılımlar entegre edilerek, bir "Sayısal Zenit Kamera Sistemi" oluşturulmuştur (Bölüm 3.1). Bu sistemde; GPS-CCD entegrasyonu ile CCD görüntü zamanları, görüntüdeki yıldızların tanımlanması, Greenwich görünen yıldız zamanının hesabı, yıldızların görünen ICRS koordinatlarının almanaktan enterpolasyon ile alınması, yıldızların görüntü koordinatları (resim koordinatları) ile görünen ICRS koordinatları arasındaki iteratif dönüşüm ile istasyon koordinatlarının hesaplanması, eğimölçer değerleriyle hesaplanan istasyon koordinatlarının eğim düzeltmelerinin yapılması, GPS'den elde edilen elipsoidal koordinatlar ve gözlemlerden elde edilen istasyonun astronomik koordinatlarından çekül sapmalarının hesabı, olurunca otomatize biçimde gerçekleştirilmektedir.

Bunlara paralel olarak; zaman belirleme doğruluğu, en uygun pozlama süresi, elektronik düzeçlerin uzun süreli stabilizasyonu, CCD kamera çözünürlüğü, çözünürlük ile teleskobun açıklığı arasındaki ve görüntülenen yıldız sayısı arasındaki ilişkiler araştırılmıştır (Bölüm 3.3). Ayrıca sistemin zenit doğrultusuna yönlendirilebilmesi amacıyla, ölçme sırasında görüntülerden elde edilen koordinat bilgileri de kullanılarak en uygun ölçme-değerlendirme yöntemi araştırılmıştır. 0^0 , 90^0 , 180^0 , 270^0 azimutlarında simetrik gözlemlerin yapılması, en optimal çözüm olarak belirlenmiştir.

Sistemin düzeçleme presizyonu $\pm 0.1''$ ve CCD kamera ile yıldız görüntülerini çözme presizyonu $\pm 0.1 - 0.2''$ bulunmuştur.

Sistem ile ana istasyon Kandilli'de yapılan gözlemlerin değerlendirilmesinden, enlem belirleme presizyonu $\pm 0.19''$ ve boylam belirleme presizyonu $\pm 0.28''$, test ağı gözlemlerinin değerlendirilmesinden ise, enlem ve boylam belirleme prezisyonlarının ortalama $\pm 0.3''$ alınabileceği görülmektedir (Çizelge 4.6).

Sistem ile test ağında elde edilen çekül sapmaları; EGM96 ve EGM08 jeopotansiyel modelden, $n=m=360$, $n=m=2159$ açılımlarından hesaplanan çekül sapmaları ile

karşılaştırılmıştır. EGM08'in 2159 açılımından elde edilen sonuçlarla büyük ölçüde uyuşmaktadır (Bölüm 4.3).

Test ağının GPS ve Nivelman ölçmelerinden elde edilen ve dengelenen İstanbul GPS/NİV geoidi değerlerinden hesaplanan geoit yükseklik farkları ile çekül sapmalarından hesaplanan geoit yükseklik farkları karşılaştırılmıştır. Birim ölçünün ($S=1$ km için) karesel ortalama hatası; $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için $\pm 14.7mm/km$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için $\pm 2.9mm/km$ olarak bulunmuştur. Test ağında, çekül sapmalarından hesaplanan geoit yükseklik farklarının en küçük kareler yöntemiyle dengelenmesinden, birim ölçünün karesel ortalama hatası; $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için $\pm 17.6mm/km$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için $\pm 3.6mm/km$ bulunmuştur.

Dengeleme sonucu, hesaplanan geoit yüksekliklerinin karesel ortalama hatası $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için maksimum $\pm 57.1mm$, $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ için maksimum $\pm 54.6mm$ bulunmuştur.

Astronomik nivelman değerlendirmelerinde ağırlıkların $P_{\Delta N} = 1/S_{km}^2$ alınmasının uygun olduğu görülmektedir, bu değer [2] ile de uyuşmaktadır.

Yazılım ve donanımda güncellemelerin yapılması durumunda sistem ile daha doğru sonuçlar elde edilebilir. Sistemin düzeçlenmesi için kullanılan eğimölçerler sıvı dengesi prensibi ile çalışmakta ve her azimutta ölçmeler öncesinde eğim değerlerinin stabilizasyonu için ortalama bir dakikalık sürelerde kayıt almak gerekmektedir (Bölüm 3.1.2). Bu işlem de ölçme süresine ek bir zaman olarak katılmaktadır. Yeni donanımlarla sisteme entegre edilen eğimölçerlerin çözünürlüğünün 1 nano radyan seviyesine yükseltilmesi ve ölçme sıklığının artırılması mümkündür. Böylesi güncellemelerle sistem daha prezisyonlu ve hızlı bir şekilde düzeçlenebilecektir.

Elde edilen görüntülerdeki yıldızların netliği ortam sıcaklığına bağlı olarak değişmekte ve ölçme süresince ek gözlemlerle yıldızların netlenmesi gerekmiştir. Sıcaklığa duyarlı netleme aparatları ile bu işlem otomatik olarak yapılabilmekte ve ölçme sürelerinin kısaltılması mümkün olmaktadır.

Sistemin düzeçlenmesinde kullanılan altlık (tribrach) standart bir altlıktır. Bu altlığın düzeçleme vidalarının duyarlılığı ile elektronik düzeçlerin duyarlılıkları uyuşmamaktadır. Düzeçleme duyarlılığının artırmak ve düzeçleme zamanını azaltmak için endüstriyel gözlemlerde kullanılan daha geniş bir altlığın kullanılması gerekmektedir.

Yıldız katalogları, yeni uzay görevleri ile sürekli olarak güncellenmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılan UCAC2 yıldız kataloğunun doğruluğu çalışmanın gereksinimlerini karşılarsa da ($0.005'' - 0.01''$) güncel uzay görevleri ile katalogların preizasyonları yükselmektedir (Bölüm 2.1.1.1). Yıldız kataloglarındaki doğruluk ve dosya yapısı ile ilgili güncellemeler, yazılımların da bu gelişimlere uyarlanması gerektirmektedir. Sistemin otomatizasyonu ve yayımlanacak katalogların değerlendirmeye dahil edilmesi için bu çalışma bünyesinde geliştirilen yazılımların da güncellenmesi yerinde olacaktır.

Sayısal zenit kamera sistemleri genel olarak statik sistemlerdir. Diğer bir deyişle klasik astronomik gözlemlerde olduğu gibi yıldızlar teleskop ile takip edilmemekte ve bu nedenle pozlama süreleri kısıtlı olmaktadır ($0.2'' - 0.4''$). Günümüzde sayısal zenit kamara sistemlerinin düzeçlenmesi için sabit altyapı sistemlerinden dinamik altyapı sistemlerine geçiş araştırmaları yapılmaktadır [66]. Dolayısıyla sayısal zenit kamera sistemlerinde teknoloji ve yöntemlerin sürekli olarak geliştirilmesi çalışmaları günceldir. Bu çalışma kapsamında tasarımı ve testleri gerçekleştirilen prototip sistemin kolay taşınabilir, kısa gözlem sürelerinde sonuç üretebilir ve daha otomatize bir şekilde kullanılabilmesi için çalışmalara devam edilecektir.

Astro-jeodezik ağı yoğunluğu artırılarak, EGM08 ile daha düşük derece ve mertebede çakışma sağlanabilir. Bu yoğunluk, beklenen doğruluk ve maliyet dikkate alınarak belirlenmelidir. Türkiye'nin deniz ve göl kıyılarında, sınırlarda nivelmanın yapılamadığı dağlık bölgelerde planlanacak astro-jeodezik noktaların sayısı 300-500 civarındadır. Bunun için, yılda 150 gün gözlem astronomik gözlemin yapılabilirdiği varsayımı ile 2-3 sayısal zenit Kamera sistemi seti ile, bir yıllık bir çalışma gerekmektedir.

Avusturya, İsviçre, Almanya gibi jeodezik altyapısı tamamlanmış ülkelerde, farklı yöntemler ile geoit modelleri geliştirilmiştir. Astro-jeodezik çekül sapmaları ile geoit modeli oluşturmak için yaklaşık $1000km^2$ 'ye 1 çekül sapması noktası ile $\pm 15cm$ doğruluklara ulaşılmıştır [67]. Türkiye'ye özgü bir astro-jeodezik geoit modeli için, topografyayı karakterize eden noktalarda seçilecek 800-1000 astro-jeodezik çekül sapması gerekmektedir [14, 16, 29]. Yılda 150 gün çalışma varsayımı ile gözlemlerin 1 yılda tamamlanması için en az 6 kamera seti gerekmektedir.

Sonuç olarak; Bölüm 4.2, Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4'deki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, astro-jeodezik veriler yukarıda açıkladığı biçimde GPS/NİV ölçüleriyle birlikte değerlendirilebilir doğruluklara sahiptir ve geoit belirlemede kullanılabilir niteliktedir. Geliştirilen sistem, kullanılan bileşenleri ve dizaynı ile prototiptir ve en düşük maliyetli sistemlerden biridir.

KAYNAKLAR

- [1] **Smith, D., Holmes, S., Li, X., Wang, Y., Archer-Shee, M. ve Singh, A. Guillaume, S.** (2011). Initial Results of the Geoid Slope Validation Survey of 2011. *Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting*. American Geophysical Union 2011, San Francisco, CA, USA.
- [2] **Ayan, T.** (1976). *Astrogeodatische Geoidberechnung für das Gebiet der Türkei*. (Doktora Tezi). Geodätisches Institut der Universität Fridericiana Karlsruhe.
- [3] **Ayan, T.** (1978). 1976 Türkiye Geoidi. *Harita Dergisi*. 85(1), 5–17.
- [4] **Gürkan, O.** (1978). *Astrojeodezik Ağların Deformasyonu ve Türkiye I. Derece Triangülasyon Ağı*. Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- [5] **Alp, O.** (1993). *Türkiye Astrojeodezik ve Astrogravimetrik Jeoidinin Belirlenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Hirt, C.** (2004). *Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamarasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung*. (Doktora Tezi). Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover.
- [7] **Ogrizovic, V.** (2009). A Construction of an Advanced Measuring System for Astro-Geodetic Determinations. *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd*. 86, 145–150.
- [8] **Ayan, T., Deniz, R., Arslan, E., Çelik, R., Denli, H. ve Özşamlı, C. Tekdal, E.** (2006). *İstanbul GPS Nirengi Ağı 2005-2006 Yenileme Ölçü ve Değerlendirmesi (İGNA 2005)*. (Teknik Rapor). İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi Anabilim Dalı.
- [9] **Ayan, T. ve Deniz, R.** (2000). *Fiziksel Jeodezi Ders Notu*. İTÜ İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul.
- [10] **Gessler, J.** (1975). *Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen*. (Doktora Tezi). Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover.
- [11] **Burki, B.** (1989). *Integrale Schwerefeldbestimmung in der Ivrea-Zone und deren geophysikalische Interpretation*. (Doktora Tezi). Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

- [12] **Hirt, C. ve Bürki, B.** (2006). Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century. *C. Hirt, (düzenleyen), Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik an der Universität Hannover*. 258. Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Günter Seeber anlässlich seines 65. Geburtstages und der Verabschiedung in den Ruhestand. s.81–99.
- [13] **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.
- [14] **Gerstbach, G.** (1996). How to get an European centimeter geoid (astro-geological geoid). *Physics and Chemistry of the Earth*. 21(4), 343–346.
- [15] **Gerstbach, G.** (1996). The astro-geodetic use of CCD for gravity field refinement. *Physics and Chemistry of the Earth*. 21(4), 347–351.
- [16] **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.
- [17] **Gerstbach, G.** (2003). Geoid monitoring by Zenith Camera and geology. *Geoscientific Cooperation Projects of Austria, Slovakia and Hungary, TU Bratislava*.
- [18] **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.
- [19] **Fosu, C.** (1999). *Astrogeodetic levelling by the combination of GPS and CCD zenith camera*. (Doktora Tezi). Univ. der Bundeswehr, Fakultät für Bauingenieur-und Vermessungswesen, Studiengang Vermessungswesen.
- [20] **Burki, B., Muller, A. ve Kahle, H.** (2003). DIADEM: the new digital astronomical deflection measuring system for high-precision measurements of deflections of the vertical at ETH Zurich. *Electronic Proc. IAG GGSM2004 Meeting in Porto, Portugal*. Published also in: *CHGeoid*. s.03–33.
- [21] **Somieski, A.E.** (2008). *Astrogeodetic Geoid and Isostatic Considerations in the North Aegean Sea, Greece*. (Doktora Tezi). ETH Zurich.
- [22] **Kudrys, J.** (2007). Automatic determination of vertical deflection components from GPS and zenithal star observations. *ACTA Geodynamica et Geomaterialia*. 4(4), 169.
- [23] **Kudrys, J.** (2009). Automatic determination of the deflections of the vertical-first scientific results. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 6(3), 233–238.
- [24] **Abele, M., Janis.Balodis, Janpaule, I., Lasmane, I., Rubans, A. ve Zarins, A.** (2012). Digital zenith camera for vertical deflection determination. *Geodesy and Cartography*. 38(4), 123–129.

- [25] **Janpaule, I.** (2014). *Methods for the Determination of High Precision Latvian Geoid Model*. (Doktora Tezi). Riga Technical University.
- [26] **Tian, L., Guo, J., Han, Y., Lu, X., Liu, W. ve Wang, Z. Wang, H.** (2014). Digital zenith telescope prototype of China. *Chinese Science Bulletin*. 59(17), 1978–1983.
- [27] **Hirt, C., Beat Bürki, S.G. ve Featherstone, W.** (2010). Digital zenith cameras – state-of-the-art astrogeodetic technology for Australian geodesy. *FIG Congress 2010 Proceedings*. FIG Congress 2010, Sydney, Australia.
- [28] **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.
- [29] **Gerstbach, G.** (1986). Rapid computation of vertical deflection effects on crustal deformation networks. *Tectonophysics*. 130(1), 427–436.
- [30] **Türkezer, A., Kutoğlu, H.Ş. ve Sezen, E.** (2013). *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu, Türkiye Ulusal Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı, TUJK 2012 Bilimsel Toplantısı*. Bülent Ecevit Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye.
- [31] **Deniz, R.** (2000). Uydu Jeodezisi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı, İstanbul.
- [32] **Petit, G. ve Luzum, B.** (2010). *IERS conventions (2010)*. (Teknik Rapor). DTIC Document.
- [33] **Perryman, M.A., Lindegren, L., Kovalevsky, J., Hoeg, E., Bastian, U. ve Bernacca, P.L. Petersen, C.S.** (1997). The HIPPARCOS catalogue. *Astronomy and Astrophysics*. 323, L49–L52.
- [34] **Klioner, S.A., Seidelmann, P.K. ve Soffel, M.H.** (2010). *Relativity in Fundamental Astronomy (IAU S261): Dynamics, Reference Frames, and Data Analysis*. Cambridge University Press.
- [35] **Petit, G.** (2009). Relativity in the IERS Conventions. *Proceedings of the International Astronomical Union*. 5(S261), 16–21.
- [36] **W. J. Jin, I.P. ve Perryman, M.A.C.,** (düzenleyenler). (2007). Definition and Realization of Celestial Intermediate Reference System. 248. A Giant Step: from Milli- to Micro-arcsecond Astrometry Proceedings IAU Symposium. International Astronomical Union.
- [37] **Aksoy, A.** (1975). *Jeodezik Astronominin Temel Bilgileri (Küresel Astronomi)*. İTÜ Matbaası.
- [38] **Capitaine, N., Wallace, P. ve Chapront, J.** (2003). Expressions for IAU 2000 precession quantities. *Astronomy and astrophysics*. 412(2), 567–586.

- [39] **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* (1978–2012). 107(B4), ETG–3.
- [40] **Capitaine, N., Mathews, P., Dehant, V., Wallace, P. ve Lambert, S.** (2009). On the IAU 2000/2006 precession–nutation and comparison with other models and VLBI observations. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 103(2), 179–190.
- [41] **Gürkan, O.** (1979). Çekül Sapması Kavramı ve Türleri. *Harita Dergisi*. 86(1), 24–45.
- [42] **Ayan, T.** (1978). Astro-Jeodezik Çekül Sapması. *İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi*. 36(6), 67–70.
- [43] **Torge, W.** (2001). *Geodesy*. Walter de Gruyter.
- [44] **Altamimi, Z., Collilieux, X. ve Métivier, L.** (2011). ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*. 85(8), 457–473.
- [45] **Url-1.** <<http://www.iers.org>>. erişim tarihi: 12.02.2015.
- [46] **Url-2.** <<http://bgi.omp.obs-mip.fr>>. erişim tarihi: 12.02.2015.
- [47] **Deniz, R. ve Çelik, R.N.** (1998). *Güncel Gelişmeler ışığında Mekansal Bilgi Aistemleri için Altyapı ve Problemler*. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Yayınları.
- [48] **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* (1978–2012). 117(B4).
- [49] **Erol, B.** (2007). *Investigation on Local Geoids for Geodetic Applications*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [50] **Torge, W.** (1989). *Gravimetry*. Berlin; New York: W. de Gruyter.
- [51] **Claessens, S. ve Hirt, C.** (2013). Ellipsoidal topographic potential: New solutions for spectral forward gravity modeling of topography with respect to a reference ellipsoid. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 118(11), 5991–6002.
- [52] **Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği.** (2005). *T. C. Resmi Gazete*, 25876, 23 Haziran 2005.
- [53] **Url-3.** <<http://www.bipm.org>>. erişim tarihi: 12.02.2015.
- [54] **Torge, W. ve Müller, J.** (2012). *Geodesy*. Walter de Gruyter.
- [55] **Hirt, C., Burki, B., Somieski, A. ve Seeber, G.** (2010). Modern Determination of Vertical Deflections Using Digital Zenith Cameras. *Journal of Surveying Engineering*. 136(1).

- [56] **Hambly, R.M.** (2012). CNS Clock II, Tac32, Tac32 Plus, and Tac32Multi Installation and Operation Manual. (Teknik Rapor). CNS Systems.
- [57] **Bangert, J., Puatua, W., Kaplan, G., Bartlett, J., Harris, W., Fredericks, A. ve Monet, A.** (2011). User's Guide to NOVAS Version C3.1. USNO. Washington, DC.
- [58] **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 astrophotograph catalog (UCAC2). *The Astronomical Journal*. 127(5), 3043.
- [59] **Kaplan, G.H., Hughes, J.A., Seidelmann, P.K., Smith, C.A. ve Yallop, B.D.** (1989). Mean and apparent place computations in the new IAU system. III - Apparent, topocentric, and astrometric places of planets and stars. *The Astronomical Journal*, 97, 1197–1210.
- [60] **Seeber, G.** (2003). *Satellite geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter.
- [61] **Kovalevsky, J. ve Seidelmann, P.K.** (2004). *Fundamentals of Astrometry*. Cambridge University Press.
- [62] **Mueller, I.I.** (1969). *Spherical and practical astronomy, as applied to geodesy*. New York, F. Ungar Pub. Co.
- [63] **Yılmaz, M.** (2005). *İstanbul Metropolitan Alanında Geoit Araştırması*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [64] **Heiskanen, W. ve Moritz, H.** (1984). *Fiziksel Jeodezi*. Onur Gürkan (Çev.), KTÜ Basımevi, Trabzon.
- [65] **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.
- [66] **Hirt, C., Papp, G., Pál, A., Benedek, J. ve Szűcs, E.** (2014). Expected accuracy of tilt measurements on a novel hexapod-based digital zenith camera system: a Monte-Carlo simulation study. *Measurement Science and Technology*. 25(8), 0850041–9.
- [67] **Tziavos, I.** (1996). *Techniques for Local Geoid Determination*. (Teknik Rapor). Reports of the Finnish Geodetic Institute, 96:2, Masala.

EKLER

EK A.1 : Ana İstasyon ve Test Ağı

EK A.2 : Haritalar ve Geliştirilen Yazılımlar

EK A.1

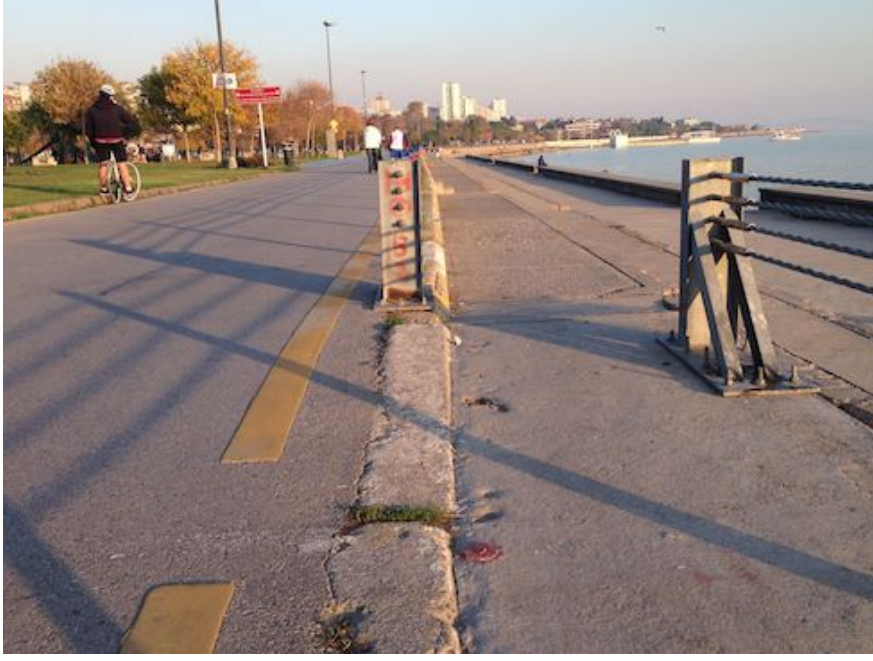
Ana İstasyon ve test ağına ait görüntüler.



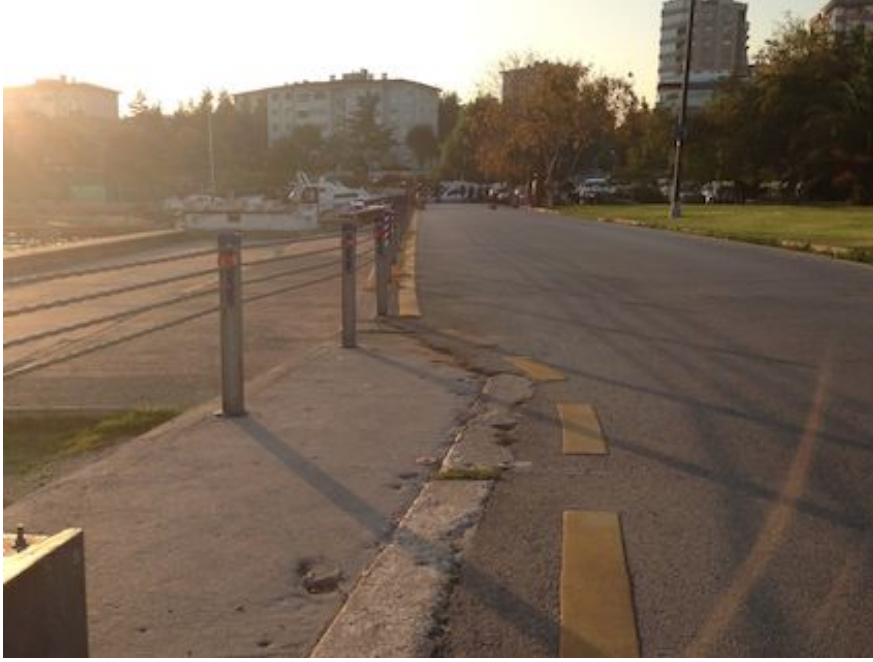
Şekil A.1 : Kandilli Test istasyonu dış görünümü.



Şekil A.2 : Kandilli Test istasyonu iç görünümü.



Şekil A.3 : Kadıköy istasyonu (KDKY).



Şekil A.4 : Kadıköy istasyonu Batı (KDKY).



Şekil A.5 : Ömerli istasyonu (OMRL).



Şekil A.6 : Ömerli istasyonu Kuzey (OMRL).



Şekil A.7 : Riva istasyonu (RIVA).



Şekil A.8 : RİVA istasyonu Kuzey (RIVA) -2 .



Şekil A.9 : RIVA istasyonunda sistemin görünümü.



Şekil A.10 : RIVA istasyonunda sistemin görünümü.



Şekil A.11 : Sistemin araç içindeki görünümü.



Şekil A.12 : Ömerli istasyonunda gözlem anından bir görüntü.



Şekil A.13 : Ömerli istasyonunda gözlem hazırlıkları.

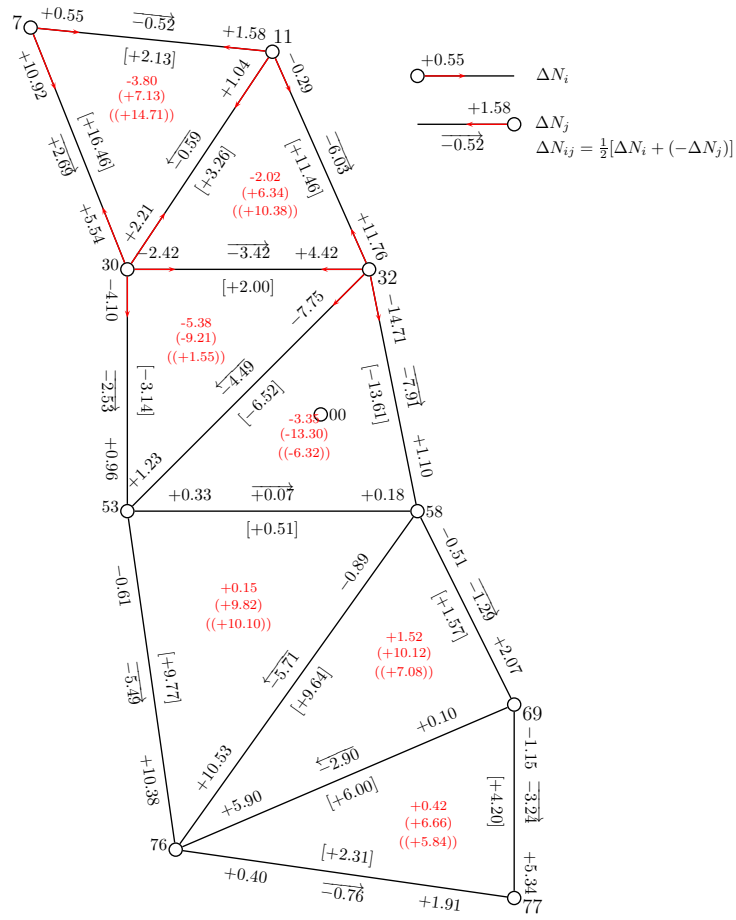


Şekil A.14 : Kadıköy istasyonunda Jeodezik koordinatların ölçülmesi.

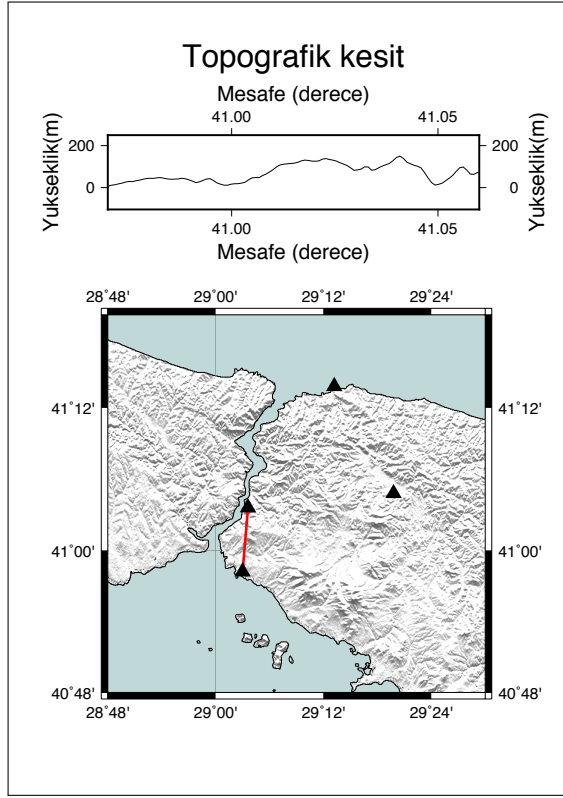


Şekil A.15 : Kadıköy istasyonunda gözlem anından bir görüntü.

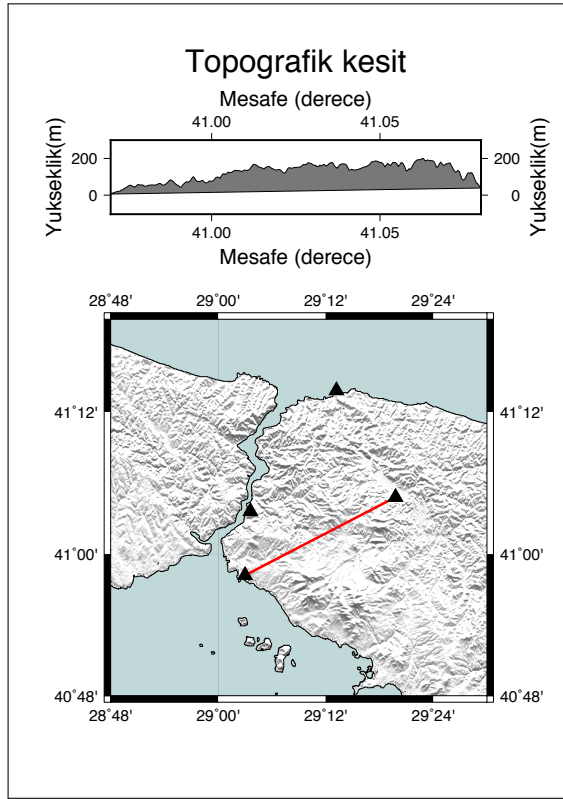
EK A.2



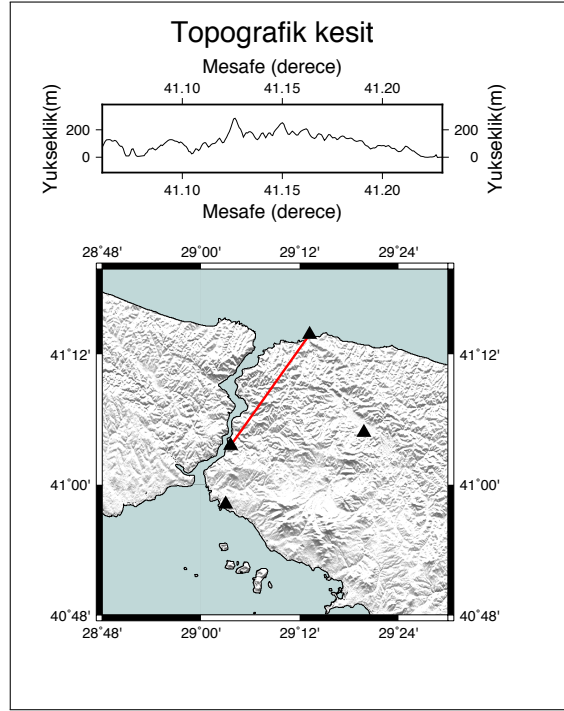
Şekil A.16 : Örnek bir astronomik nivelman hesabı [2].



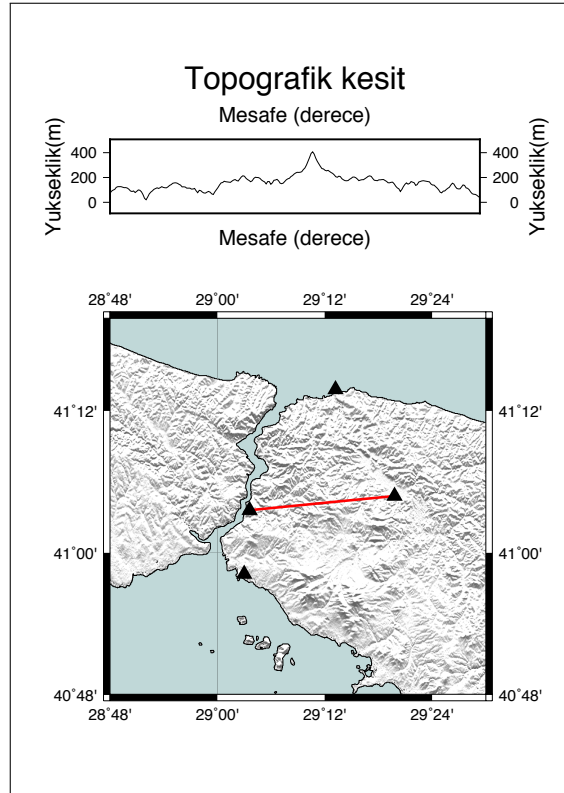
Şekil A.17 : KDKY-KNDL topoğrafik kesiti.



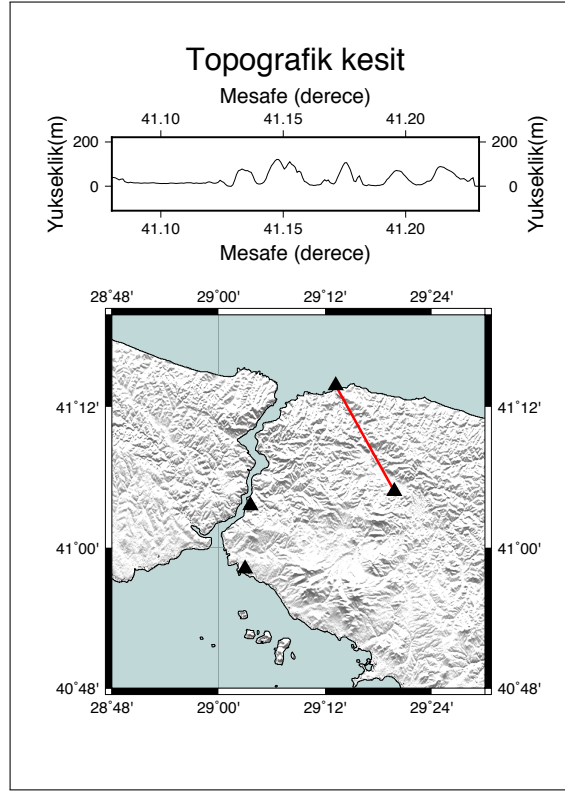
Şekil A.18 : KDKY-OMRL topoğrafik kesiti.



Şekil A.19 : KDNL-RIVA topoğrafik kesiti.



Şekil A.20 : KNDL-OMRL topoğrafik kesiti.



Şekil A.21 : OMRL-RIVA topoğrafik kesiti.

SZKS GEOID 1/Skm
İSTANBUL

Agdaki Nokta Sayisi : 4
Bilinmeyen Sayisi : 3
Sabit Nokta Sayisi : 1
Olcu Sayisi : 6

S A B I T K O T L A R	
N.N.	KOT (m)
KNDL	36.7076

YAKLAŞIK KOTLAR	
N.N.	KOT (m)
RIVA	35.8751
OMRL	36.3122
KDKY	36.6884

OLCULEN YUKSEKLİK FARKLARI

D.N.	B.N.	dN (m)	Skm	(dNo - dN) (mm)
KNDL	RIVA	-0.81000	22.5896	-22.500
KNDL	OMRL	-0.34400	22.1677	-51.400
KNDL	KDKY	-0.10600	10.5256	86.800
RIVA	OMRL	0.54900	18.2258	-111.900
KDKY	OMRL	-0.38100	26.7084	4.800
KDKY	RIVA	-0.68500	32.2533	-128.300

DENGELLENMİŞ KOTLAR

N.N.	No (m)	Bilinmeyen (mm)	N (m)	mdN (mm)
RIVA	35.8751	-8.42419	35.8667	57.132
OMRL	36.3122	38.78788	36.3510	56.107
KDKY	36.6884	-66.40246	36.6220	48.013

OZET CİZELGE

D.N. - B.N.	OLCU (m)	v (mm)	DENGELİ OLCU (m)	KONTROL (mm)	AGIRLIK P	K.O.H. (mm)
KNDL - RIVA	-0.81000	-30.9242	-0.84092	-0.000	0.044	83.4535
KNDL - OMRL	-0.34400	-12.6121	-0.35661	-0.000	0.045	82.6705
KNDL - KDKY	-0.10600	20.3975	-0.08560	0.000	0.095	56.9657
RIVA - OMRL	0.54900	-64.6880	0.48431	0.000	0.055	74.9607
KDKY - OMRL	-0.38100	109.9904	-0.27101	-0.000	0.037	90.7432
KDKY - RIVA	-0.68500	-70.3217	-0.75532	-0.000	0.031	99.7189

Birim Ağırlıklı Olcunun K.O.H.
Mo = 17.559 mm

Şekil A.22 : Dengeleme Hesabı Sonuçları $P_{\Delta N} = 1/S_{km}$ için.

SZKS GEOID 1/Skm²
İSTANBUL

Agdaki Nokta Sayisi : 4
Bilinmeyen Sayisi : 3
Sabit Nokta Sayisi : 1
Olcu Sayisi : 6

S A B I T K O T L A R	
N.N.	KOT (m)
KNDL	36.7076

YAKLASIK KOTLAR	
N.N.	KOT (m)
RIVA	35.8751
OMRL	36.3122
KDKY	36.6884

O L C U L E N Y U K S E K L I K F A R K L A R I

D.N.	B.N.	dN (m)	Skm ²	(dNo - dN) (mm)
KNDL	RIVA	-0.81000	510.2900	-22.500
KNDL	OMRL	-0.34400	491.4069	-51.400
KNDL	KDKY	-0.10600	110.7882	86.800
RIVA	OMRL	0.54900	332.1797	-KNDL.900
KDKY	OMRL	-0.38100	713.3386	4.800
KDKY	RIVA	-0.68500	1040.2753	-128.300

D E N G E L E N M İ S K O T L A R

N.N.	No (m)	Bilinmeyen (mm)	N (m)	mdN (mm)
RIVA	35.8751	-19.55161	35.8555	54.643
OMRL	36.3122	41.87871	36.3541	52.762
KDKY	36.6884	-75.52366	36.6129	34.915

O Z E T C İ Z E L G E

D.N. - B.N.	OLCU (m)	v (mm)	DENGELİ OLCU (m)	KONTROL (mm)	AGIRLIK P	K.O.H. (mm)
KNDL - RIVA	-0.81000	-42.0516	-0.85205	0.000	0.002	80.8496
KNDL - OMRL	-0.34400	-9.5213	-0.35352	0.000	0.002	79.3395
KNDL - KDKY	-0.10600	11.2763	-0.09472	-0.000	0.009	37.6718
RIVA - OMRL	0.54900	-50.4697	0.49853	-0.000	0.003	65.2312
KDKY - OMRL	-0.38100	122.2024	-0.25880	0.000	0.001	95.5910
KDKY - RIVA	-0.68500	-72.3279	-0.75733	0.000	0.001	115.4365

Birim Ağırlıklı Olcunun K.O.H.

Mo = 3.579 mm

Şekil A.23 : Dengeleme Hesabı Sonuçları $P_{\Delta N} = 1/S^2_{km}$ için.

zenith-kh.c

```
1  /*
2  *          File : zenith_kh.c
3  *          Author : Kerem Halicioglu
4  *          Last Modified : Feb, 13, 2014
5  *          Topic : SZKS calculations
6  *          IERS data : http://www.iers.org/IERS/EN/ ↵
7  *          ↵ Publications/Bulletins/bulletins.html
8  */
9  #include <stdio.h>
10 #include <stdlib.h>
11 #include <math.h>
12 #include <string.h>
13 #define FRAME_PATH "/Users/Kerem/observations/InputFiles/ 20140703/"
14 #define OUTPUT_PATH "/Users/Kerem/observations/OutputFiles/ ↵
15 ↵ 20140703out/"
16 #define EPOCH_FILE_PATH "/Users/Kerem/observations/Epoch/ ↵
17 ↵ 20140703_epoch_list.txt"
18 #define KATALOG_FILE_PATH "/Users/Kerem/observations/CatalogFiles/ ↵
19 ↵ ucac2_20140703_258x41_30x5.txt"
20 #include "frameFileName.h"
21 #include "epoch.h"
22 #include "frame.h"
23 #include "katalog.h"
24 #include "eph_manager.h"
25 #include "novas.h"
26
27 int main(void)
28 {
29     FILE *ofp = NULL;
30     char outputString[256];
31     /*
32     // ***** NOVAS Constants for a day
33     // Constant Values of day 2014-7-3 MJD=56841
34
35     const short int year = 2014;
36     const short int month = 7;
37     const short int day = 3;
38     const short int leap_secs = 35.0;
39     const short int accuracy = 0;
40
41     short int error = 0;
42     short int de_num = 0;
43
44     const double ut1_utc = -0.30267;
45     const double x_pole = 0.1732;
46     const double y_pole = 0.4128;
47
48     // END of Constant Values of day 2014-7-3
49
50     // Observation Site Kandilli Test Station
51     const double latitude = 41.06354239;
52     const double longitude = 29.06391412;
53
54     const double height = 169.504; // use ellipsoidal h (WGS-84)
55     const double temperature = 26.2;
```

```

54  const double pressure = 1010.0;
55  const double prlx_kh = 0.000000000000000001;
56  const double ro_kh = M_PI/180;
57  // *****
58
59  double jd_beg , jd_end , jd_utc , jd_tt , jd_ut1 , jd_tdb , delta_t , ra ,
60  dec , dis , rat , dect , dist , zd , az , rar , decr , gast , last , theta ,
61  jd[2] , pos[3] , vel[3] , pose[3] , elon , elat , r , lon_rad , lat_rad ,
62  sin_lon , cos_lon , sin_lat , cos_lat , vter[3] , vcel[3] , teta_kh , ↵
    ↵ lmd_kh;
63
64  on_surface geo_loc;
65  observer obs_loc;
66  cat_entry star;
67
68  const double acotq = M_PI/2; // acot(x) = PI/2 - atan(x)
69  double ksi , q , eta , dec0_rad , last_rad , dect_rad , rat_rad;
70
71  katalogElement *fullKatalog = NULL, *foundKatalog = NULL;
72  frameElement *fullFrame = NULL, *frameNode = NULL;
73
74  FILE *lastFile = NULL;
75  FILE *gastFile = NULL;
76
77  fullKatalog = fillKatalog();
78  fullFrame = getFullFrame();
79  frameNode = fullFrame;
80  /*
81  Make structures of type 'on_surface' and 'observer-on-surface' ↵
    ↵ containing
82  the observer's position and weather (latitude , longitude , height ,
83  temperature , and atmospheric pressure).
84  */
85  make_on_surface (latitude , longitude , height , temperature , pressure , ↵
    ↵ &geo_loc);
86  make_observer_on_surface ↵
    ↵ (latitude , longitude , height , temperature , pressure ,
87      &obs_loc);
88  while(frameNode != NULL){
89
90      foundKatalog = findFrameFromKatalog(fullKatalog , frameNode);
91
92      if(foundKatalog == NULL){
93          frameNode = frameNode->next;
94          continue;
95      }
96
97  // ***** Taken from ktopostar.c for single obs.
98  /*
99  Make catalog entry for each star
100  */
101
102  long int intCatalog = atol(frameNode->catalog);
103  printf("%ld\n" , intCatalog);
104  make_cat_entry ("SZK 0925" , "UC2" , intCatalog , frameNode->col4 , ↵
    ↵ frameNode->col5 , foundKatalog->pmra/10 , ↵
    ↵ foundKatalog->pmdec/10 , prlx_kh , 0 , &star);
105  /*
106  Open the JPL binary ephemeris file , here named "JPLEPH".

```

```

107  */
108  if ((error = ephemeris_open ("JPLEPH", &jd_beg,&jd_end,&de_num)) != 0)
109  {
110      if (error == 1)
111          printf ("JPL ephemeris file not found.\n");
112      else
113          printf ("Error reading JPL ephemeris file header.\n");
114      return (error);
115  }
116  /*
117      Establish time arguments.
118  */
119  jd_utc = julian_date (year,month,day,frameNode->saat);
120  jd_tt = jd_utc + ((double) leap_secs + 32.184) / 86400.0;
121  jd_ut1 = jd_utc + ut1_utc / 86400.0;
122  delta_t = 32.184 + leap_secs - ut1_utc;
123  jd_tdb = jd_tt; /* Approximation good to 0.0017 seconds. */
124
125  /*
126  Apparent and topocentric place of given Zenith Point of Image.
127  */
128  if ((error = app_star (jd_tt,&star,accuracy, &ra,&dec)) != 0)
129  {
130      printf ("Error %d from app_star.\n", error);
131      return (error);
132  }
133
134  if ((error = topo_star (jd_tt,delta_t,&star,&geo_loc, accuracy,
135                          &rat,&decr)) != 0)
136  {
137      printf ("Error %d from topo_star.\n", error);
138      return (error);
139  }
140  /*
141  Greenwich and local apparent sidereal time and Earth Rotation
142  Angle.
143  */
144  if ((error = sidereal_time (jd_ut1,0.0,delta_t,1,1,accuracy,
145                             &gast)) != 0)
146  {
147      printf ("Error %d from sidereal_time.", error);
148      return (error);
149  }
150
151  last = gast + geo_loc.longitude / 15.0;
152  if (last >= 24.0)
153      last -= 24.0;
154  if (last < 0.0)
155      last += 24.0;
156
157  theta = era (jd_ut1,0.0);
158  equ2hor (jd_ut1, delta_t, accuracy, x_pole, y_pole, &geo_loc,
159           &rat, &dec, 1, &zd, &az, &rar, &decr);
160
161  lmd_kh=rat-gast;
162
163  if (lmd_kh < 0.0)
164      lmd_kh += 24.0;

```

```

162
163 rat_rad = rat * 15 * ro_kh;
164 dect_rad = dect * ro_kh;
165 dec0_rad = latitude * ro_kh;
166 last_rad = last * 15 * ro_kh;
167
168 q = acotq - atan(((1 / tan(dect_rad))) * (cos(rat_rad - last_rad ↵
    ↵ ))));
169 ksi = ((tan(rat_rad - last_rad))*(cos(q))) / (cos(q - dec0_rad));
170 eta = tan(q - dec0_rad);
171
172 char buffer[256];
173 char fullPath[256];
174
175 char gastFileName[256];
176 char lastFileName[256];
177
178 if(ofp == NULL){
179     strcpy(fullPath, frameNode->fileName);
180     strcpy(buffer, OUTPUT_PATH);
181     strcat(buffer, frameNode->fileName);
182     strcat(buffer, ".txt");
183     ofp = fopen(buffer, "w");
184
185     fprintf(ofp, "%s\n", "Topocentric Coordinates of Stars for ↵
    ↵ Zenith Camera Calculations .kh.");
186     fprintf(ofp, "%s\n", "RA(topo)    Dec(topo)    CatID    ↵
    ↵ RA(t0)        Dec(t0)        GAST(h)    LAST(h)    ksi        eta    ↵
    ↵          xp          yp ");
187
188     strcpy(gastFileName, OUTPUT_PATH);
189     strcat(gastFileName, "gastOutput.txt");
190     gastFile = fopen(gastFileName, "w");
191     fprintf(gastFile, "%s %.8lf\n", frameNode->fileName, ↵
    ↵ gast*15);
192
193     strcpy(lastFileName, OUTPUT_PATH);
194     strcat(lastFileName, "lastOutput.txt");
195     lastFile = fopen(lastFileName, "w");
196     fprintf(lastFile, "%s %.8lf\n", frameNode->fileName, ↵
    ↵ last*15);
197
198 } else {
199
200     if(0 != strcmp(frameNode->fileName, fullPath)){
201         fclose(ofp);
202         strcpy(fullPath, frameNode->fileName);
203         strcpy(buffer, OUTPUT_PATH);
204         strcat(buffer, frameNode->fileName);
205         strcat(buffer, ".txt");
206         ofp = fopen(buffer, "w");
207
208         fprintf(ofp, "%s\n", "Topocentric Coordinates of Stars ↵
    ↵ for Zenith Camera Calculations .kh.");
209         fprintf(ofp, "%s\n", "RA(topo)    Dec(topo)    CatID    ↵
    ↵ RA(t0)        Dec(t0)        GAST(h)    LAST(h)    ksi        eta    ↵
    ↵          xp          yp ");
210

```

```

211         fprintf(gastFile , "%s %.8lf\n" , frameNode->fileName , ↵
↵ gast*15);
212         fprintf(lastFile , "%s %.8lf\n" , frameNode->fileName , ↵
↵ last*15);
213
214     }
215 }
216
217     fprintf(ofp , "%.8lf %.8lf %s %.8lf %.8lf %.8lf %.8lf %.8lf ↵
↵ %.8lf %04.3f %04.3f\n" , rat , dect , frameNode->catalog , ↵
↵ frameNode->col4 , frameNode->col5 , gast , last , ksi , eta , ↵
↵ frameNode->x , frameNode->y );
218
219     frameNode = frameNode->next;
220 }
221
222 fullKatalog = freeKatalog(fullKatalog);
223 fullFrame = freeFrame(fullFrame);
224
225     fclose(ofp);
226     fclose(lastFile);
227     fclose(gastFile);
228     return 0;
229 }

```

epoch.h

```
1 /*
2  *           File: epoch.h
3  *           Author: Kerem Halicioglu
4  * Last Modified: Feb, 13, 2014
5  *           Topic: epoch files
6  * -----
7  */
8
9 #define EPOCH_FILE_ERROR "Epoch dosyasi okunamadi\n"
10 #define EPOCH_HEAD_ERROR "Epoch head null\n"
11 #define READ_EPOCH_ROW_SIZE 2
12
13 struct epochElement{
14     char frameFile[20];
15     double saat;
16     struct epochElement * next;
17 };
18 typedef struct epochElement epochElement;
19
20 epochElement* insertEpochElement(epochElement *head, epochElement *
    ↵ *node){
21
22     epochElement *p;
23     if(node == NULL){
24         return head;
25     }
26
27     if(head == NULL){
28         head = node;
29         return head;
30     }
31     p = head;
32     while(p->next != NULL){
33         p = p->next;
34     }
35     p->next = node;
36     return head;
37 }
38
39 epochElement* freeEpoch(epochElement *head){
40
41     epochElement *p;
42     int freedElements = 0;
43
44     if(head == NULL){
45         printf(EPOCH_HEAD_ERROR);
46         return head;
47     }
48
49     while(head != NULL){
50
51         p = head->next;
52         free(head);
53         head = p;
54         ++freedElements;
55     }
56     printf("%d epoch elements freed\n", freedElements);
```

```

57
58     return NULL;
59 }
60
61 void listEpoch(epochElement *head){
62
63     epochElement *p = head;
64     int listedData = 0;
65
66     while(p != NULL){
67         printf("%s %.9lf\n", p->frameFile, p->saat);
68         p = p->next;
69
70         ++listedData;
71     }
72     printf("%d rows listed\n", listedData);
73 }
74
75 char** createEpochRow(char** epochRow){
76
77     int j = 0;
78     epochRow = (char**) malloc(sizeof(char*) * READ_EPOCH_ROW_SIZE);
79
80     for(j = 0; j < READ_EPOCH_ROW_SIZE; ++j){
81         epochRow[j] = (char*) malloc(sizeof(char) * 20);
82     }
83     return epochRow;
84 }
85
86 char** removeEpochRow(char** epochRow){
87
88     int j = 0;
89
90     for(j = 0; j < READ_EPOCH_ROW_SIZE; ++j){
91         free(epochRow[j]);
92     }
93
94     free(epochRow);
95     return epochRow;
96 }
97
98 epochElement* fillEpoch(){
99
100     FILE *epoch = NULL;
101     epochElement *head = NULL;
102     epochElement *node = NULL;
103     char **epochRow = NULL;
104
105     int readData = 0;
106
107     epoch = fopen(EPOCH_FILE_PATH, "r");
108
109     if(epoch == NULL){
110
111         printf(EPOCH_FILE_ERROR);
112         return NULL;
113     }
114
115     epochRow = createEpochRow(epochRow);

```

```

116
117 while (!feof(epoch)){
118
119     int error = fscanf(epoch, "%s %s", epochRow[0], epochRow[1]);
120
121     if(error == EOF){
122         break;
123     }
124
125     node = (epochElement*) malloc(sizeof(epochElement) * 1);
126
127     strcpy(node->frameFile, epochRow[0]);
128     node->saat = atof(epochRow[1]);
129
130     node->next = NULL;
131
132     head = insertEpochElement(head, node);
133
134     ++readData;
135 }
136 printf("%d rows epoch read from %s\n", readData, EPOCH_FILE_PATH);
137 fclose(epoch);
138 epochRow = removeEpochRow(epochRow);
139
140 return head;
141 }
142
143 double* findEpochFromFileName(epochElement *fullEpoch, char* ↵
    ↵ fileName){
144
145     epochElement *q = NULL;
146     double *value = NULL;
147
148     if(fullEpoch == NULL || fileName == NULL){
149         return NULL;
150     }
151
152     q = fullEpoch;
153
154     while(q != NULL){
155
156         if(0 == strcmp(q->frameFile, fileName)){
157             value = &q->saat;
158             break;
159         }
160         q = q->next;
161     }
162
163     return value;
164 }

```

frameFileName.h

```
1  /*
2  *          File : frameFileName.h
3  *          Author : Kerem Halicioglu
4  *          Last Modified : Feb, 13, 2014
5  *          Topic : frame files
6  *          -----
7  */
8
9  #define FILENAME_HEAD_ERROR "Epoch head null\n"
10
11 struct fileNameElement{
12     char fileName[20];
13     struct fileNameElement * next;
14 };
15 typedef struct fileNameElement fileNameElement;
16
17 fileNameElement* insertFileNameElement(fileNameElement *head, ↵
18     ↵ fileNameElement *node){
19
20     fileNameElement *p;
21     if(node == NULL){
22         return head;
23     }
24     if(head == NULL){
25         head = node;
26         return head;
27     }
28     p = head;
29     while(p->next != NULL){
30         p = p->next;
31     }
32     p->next = node;
33     return head;
34 }
35
36 fileNameElement* freeFileName(fileNameElement *head){
37
38     fileNameElement *p;
39     int freedElements = 0;
40
41     if(head == NULL){
42         printf(FILENAME_HEAD_ERROR);
43         return head;
44     }
45
46     while(head != NULL){
47
48         p = head->next;
49         free(head);
50         head = p;
51         ++freedElements;
52     }
53
54     printf("%d file name elements freed\n", freedElements);
55
56     return NULL;
```

```

57 }
58
59 void listFileName(fileNameElement *head){
60
61     fileNameElement *p = head;
62     int listedData = 0;
63
64     while(p != NULL){
65         printf("%s\n", p->fileName);
66         p = p->next;
67
68         ++listedData;
69     }
70     printf("%d rows listed\n", listedData);
71 }
72
73 fileNameElement* fillFileName(){
74
75     fileNameElement *head = NULL;
76     fileNameElement *node = NULL;
77     char numbersFirst[10][3] = { "01", "02", "03", "04", "05", "06", ↵
        ↵ "07", "08", "09", "10"};
78     char numbersSecond[10][4] = { "001", "002", "003", "004", "005", ↵
        ↵ "006", "007", "008", "009", "010"};
79     char angles[4][4] = { "000", "090", "180", "270"};
80
81     int noOffirst = 10;
82     int noOfSecond = 10;
83     int noOfAngles = 4;
84
85     int i = 0, j = 0, k = 0;
86
87     int readData = 0;
88
89     for(i = 0; i < noOffirst; ++i){
90         for(j = 0; j < noOfSecond; ++j ){
91             for(k = 0; k < noOfAngles; ++k){
92
93                 node = (fileNameElement*) malloc(sizeof(fileNameElement) * ↵
                    ↵ 1);
94
95                 strcpy(node->fileName, numbersFirst[i]);
96                 strcat(node->fileName, "_Zc_");
97                 strcat(node->fileName, numbersSecond[j]);
98                 strcat(node->fileName, "Az");
99                 strcat(node->fileName, angles[k]);
100
101                 node->next = NULL;
102
103                 head = insertFileNameElement(head, node);
104
105                 ++readData;
106             }
107         }
108     }
109     printf("%d rows file name created\n", readData);
110
111     return head;
112 }

```

katalog.h

```
1  /*
2  *          File : katalog.h
3  *          Author : Kerem Halicioglu
4  *          Last Modified : Feb, 13, 2014
5  *          Topic : catalog files
6  *          -----
7  */
8
9  #define KATALOG_FILE_ERROR "Katalog dosyasi okunamadi\n"
10 #define KATALOG_HEAD_ERROR "Katalog head null\n"
11 #define READ_KATALOG_ROW_SIZE 24
12
13 struct katalogElement{
14     char starName[20];
15     double pmra;
16     double pmdec;
17     struct katalogElement * next;
18 };
19 typedef struct katalogElement katalogElement;
20
21 katalogElement* insertKatalogElement(katalogElement *head, ↵
    katalogElement *node){
22
23     katalogElement *p;
24     if(node == NULL){
25         return head;
26     }
27
28     if(head == NULL){
29         head = node;
30         return head;
31     }
32     p = head;
33     while(p->next != NULL){
34         p = p->next;
35     }
36     p->next = node;
37     return head;
38 }
39
40 katalogElement* freeKatalog(katalogElement *head){
41
42     katalogElement *p;
43     int freedElements = 0;
44
45     if(head == NULL){
46         printf(KATALOG_HEAD_ERROR);
47         return head;
48     }
49
50     while(head != NULL){
51
52         p = head->next;
53         free(head);
54         head = p;
55         ++freedElements;
56     }
```

```

57
58     printf("%d elements freed from katalog\n", freedElements);
59
60     return NULL;
61 }
62
63 void listKatalog(katalogElement *head){
64
65     katalogElement *p = head;
66     int listedData = 0;
67
68     while(p != NULL){
69         printf("%s %.7lf %.7lf\n", p->starName, p->pmra, p->pmdec);
70         p = p->next;
71
72         ++listedData;
73     }
74     printf("%d rows listed\n", listedData);
75 }
76
77 char** createKatalogRow(char** katalogRow){
78
79     int j = 0;
80     katalogRow = (char**) malloc(sizeof(char*) * ↵
        ↵ READ_KATALOG_ROW_SIZE);
81
82     for(j = 0; j < READ_KATALOG_ROW_SIZE; ++j){
83         katalogRow[j] = (char*) malloc(sizeof(char) * 15);
84     }
85
86     return katalogRow;
87 }
88
89 char** removeKatalogRow(char** katalogRow){
90
91     int j = 0;
92
93     for(j = 0; j < READ_KATALOG_ROW_SIZE; ++j){
94         free(katalogRow[j]);
95     }
96
97     free(katalogRow);
98
99     return katalogRow;
100 }
101
102 katalogElement* fillKatalog(){
103
104     FILE *katalog = NULL;
105     katalogElement *head = NULL;
106     katalogElement *node = NULL;
107     char **katalogRow = NULL;
108     int readData = 0;
109
110     katalog = fopen(KATALOG_FILE_PATH, "r");
111
112     if(katalog == NULL){
113
114         printf(KATALOG_FILE_ERROR);

```



```
167     q = q->next;
168 }
169
170 return returnValue;
171 }
```

JavaScript

```
1  /*
2  *           File : kh_GetRefStars.js
3  *           Author : Kerem Halicioglu
4  *   Last Modified : Feb, 13, 2014
5  *           Topic : Plate solve , write frame files J2000.0
6  *   -----
7  */
8  var fso = new ActiveXObject("Scripting.FileSystemObject");
9
10 var seri=new Array(11);
11 seri[1]="01"; seri[2]="02"; seri[3]="03"; seri[4]="04"; ↵
    ↵ seri[5]="05";
12 seri[6]="06"; seri[7]="07"; seri[8]="08"; seri[9]="09"; ↵
    ↵ seri[10]="10";
13 //exposure
14 var expo=new Array(11);
15 expo[1]="01"; expo[2]="02"; expo[3]="03"; expo[4]="04"; ↵
    ↵ expo[5]="05";
16 expo[6]="06"; expo[7]="07"; expo[8]="08"; expo[9]="09"; ↵
    ↵ expo[10]="10";
17
18
19 var azim=new Array(5);
20 azim(5);
21 azim[1]="000";
22 azim[2]="090";
23 azim[3]="180";
24 azim[4]="270";
25 var myfilee=new Array(401);
26 var attachf=new Array(401);
27 var filenamekrm=new Array(401);
28 var fitnamekrm=new Array(401);
29 Count=1;
30 for (serii=9;serii <=9;serii++)
31 {
32     for (azimm=1;azimm<=4;azimm++)
33     {
34         for(expoo=1;expoo<=10;expoo++)
35         {
36             filenamekrm[Count]= "C:\\Images\\20140701\\"+seri[serii]+ ↵
                ↵ "_Zc_-0" + expo[expoo] + "Az" + azim[azimm]+ ".txt"
37             fitnamekrm[Count]= "I:\\20140701\\HE\\"+seri[serii]+ "_Zc_-0" + ↵
                ↵ expo[expoo] + "Az" + azim[azimm]+ ".fit"
38             try{
39                 var myfile = fso.OpenTextFile (filenamekrm[Count],2, true , 0);
40                 var p = new ActiveXObject("Pinpoint.Plate");
41                 // no file then go on
42                 p.AttachFITS(fitnamekrm[Count]);
43             }catch(err){
44                 continue;
45             }
46             p.Catalog = 6; //for UCAC2
47             p.CatalogPath = "C:\\UCAC2\\"; // for UCAC2
48             p.CentroidAlgorithm = 2
49             p.ArcsecPerPixelHoriz = 0.72;
50             p.ArcsecPerPixelVert = 0.72;
51             p.MaxSolveTime = 30;
```

```

52     p.WCSValid;
53     var pwcs = p.WCSValid;
54     // WScript.Echo(pwcs);
55     if (pwcs==true){
56     //     continue;
57     p.Solve();
58     // WScript.Echo(p.Solved());
59     // WScript.Echo("Solved by kh.");
60     var col = p.MatchedStars;
61     var stars = new Enumerator(col);
62     var star;
63     myfile.Write(p.FileName + ' ' + ↵
↵ p.PositionAngle.toPrecision(5) + ' ' +
64     p.CentroidAlgorithm + ' ' + p.MatchRMSResidual.toFixed(2) + ↵
↵ ' ' + p.Observer + ' ' + p.RightAscension.toPrecision(9) + ↵
↵ ' ' + ' ' + p.Declination.toPrecision(9) + ' ' + ↵
↵ p.ArcsecPerPixelHoriz.toFixed(2) + ' ' + p.ExposureStartTime ↵
↵ );
65     myfile.WriteBlankLines(1) ;
66     myfile.Write('ImStarRA ' + ' ' + 'ImStar Dec ' + ' ' + ↵
↵ + 'Catalog-ID ' + ' ' + 'RA(h)' + ' ' + 'Dec(d)' + ' ' + ↵
↵ + 'X(px)' +
67     ' ' + 'Y(px)' + ' ' + 'Mag' + ' rms');
68
69     myfile.WriteBlankLines(1) ;
70     for (; !stars.atEnd(); stars.moveNext())
71     {
72         star = stars.item();
73         myfile.Write(star.RightAscension.toFixed(7) + ' ' + ↵
↵ star.declination.toFixed(7) + ' ' +
74         star.MatchedCatalogStar.Identification + ' ' +
75         star.MatchedCatalogStar.RightAscension.toFixed(7) + ' ' +
76         star.MatchedCatalogStar.Declination.toFixed(7) + ' ' + ↵
↵ star.X.toPrecision(7) + ' ' +
77         star.Y.toPrecision(7) + ' ' + ↵
↵ star.MatchedCatalogStar.Magnitude.toFixed(1) + ' ' +
78         star.Residual.toFixed(2) + ' ' + ' **/ ');
79         myfile.WriteBlankLines(1) ;
80     }
81     Count=Count+1
82     }
83 }
84 }
85 }
86 myfile.Close();

```


ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Kerem Halicioğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmir, 20 Mart 1979

Adres: Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü
Jeodezi Anabilim Dalı Çengelköy Üsküdar İstanbul

E-Posta: keremhalicioglu@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği

Y. Lisans: Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü
Jeodezi Anabilim Dalı

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği, Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu Teşvik Ödülü

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Halicioğlu, K.**, Deniz R., and Ozener, H., 2015: Determining astro-geodetic deflections of the vertical using digital zenith camera system. 26. *IUGG General Assembly 2015*, 22 Haziran - 2 Temmuz 2015, Prag, Çek Cumhuriyeti.
- **Halicioğlu, K.**, Deniz R., and Ozener, H., 2015: Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile elde edilen Astro-Jeodetik Çekül Sapmaları. 15. *Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 25- 28 Mart 2015, Ankara, Türkiye
- **Halicioğlu, K.**, Deniz, R., Ozener, O., 2013: Preliminary results of digital zenith camera system in Istanbul for astro-geodetic observations in Turkey. *AGU 2013 Fall Meeting*, 9-13 Aralık 2013, San Francisco, CA, ABD.
- **Halicioğlu, K.**, Deniz R., and Ozener, H., 2013: Astro-geodetic Observation using digital zenith camera system in Istanbul, Turkey. *IAG 2013*, 1-6 Eylül 2013, Postdam, Almanya.
- **Halicioğlu, K.**, Deniz, R. Özener, H., 2012: Digital zenith camera system for Astro-Geodetic applications in Turkey. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, Vol.1, Iss.2 pp.115-120, Kasım 2012 Journal No.106
- **Halicioğlu, K.**, Deniz, R. Özener, H., 2012: Türkiye'deki astro-jeodezik uygulamalar için sayısal zenit kamera sistemi. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, Vol.1, Iss.2 pp. 149–154, Kasım 2012 Journal No.106

- **Halicioğlu, K.**, Deniz R., and Ozener, H., 2012: Determination of Astro-Geodetic Vertical Deflections Using Digital Zenith Camera System in Istanbul, Turkey, *FIG Working Week 2012*, 6-10 Mayıs 2012, Roma, İtalya.
- **Halicioğlu, K.**, Deniz, R., Özener, H., 2012: Sayısal Zenit Kameralar ile Astro-jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesi. *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu, Türkiye Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı*, 28-30 Mart 2012, Zonguldak, Türkiye.
- **Halicioğlu, K.**, Haluk Ozener, Rasim Deniz, 2011: Astro-geodetic Measurements using Digital Zenith Camera System in Istanbul-Turkey. *EGU General Assembly 2011*, 04-09 Nisan 2011, Viyana, Avusturya.
- **Halicioğlu, K.**, Ozener, H., Deniz, R., 2008: Current Geoid Studies in Turkey and the need for Local High-Precision Astrogeodetic Geoid Determination Using CCD/Zenith Cameras. *AGU 2008 Fall Meeting*, 15-19 Aralık 2008, San Francisco, CA, ABD.