

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MARMARA BÖLGESİ'NDE MUTLAK GRAVİTE ÖLÇME ve
DEĞERLENDİRMELERİ**

Harita Mühendisi Hasan Onur ÖZDİĞER

**FBE Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Geomatik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Uğur DOĞAN (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Marmara Bölgesi'nin Tektonik Yapısı.....	3
2. YERYUVARININ GRAVİTE ALANI	6
2.1 Gravite'nin Tanımı.....	6
2.2 Tarihsel Gelişimi	7
2.3 Gravitasyon Sabitinin Belirlenmesi	8
2.4 Gravite Alanı Teorisi.....	9
2.4.1 Yer Merkezli Jeosentrik Sistem	9
2.4.2 Bölgesel Gravite Alan Sistemleri	10
2.5 Gravite İvmesi ve Gravite Potansiyeli	11
2.6 Gravite Alanının Geometrisi	15
3. GRAVİTE ÖLÇME YÖNTEMLERİ	17
3.1 Yersel Gravite Ölçme Yöntemleri	17
3.1.1 Mutlak Gravite Ölçmeleri	17
3.1.2 Bağlı Gravite Ölçmeleri	18
3.1.2.1 Dinamik Yöntem	19
3.1.2.2 Statik Yöntem.....	19
3.1.3 Mutlak ve Bağlı Gravite Ölçerler.....	19
3.2 Uzaysal Gravite Ölçme Yöntemleri	21
4. GRAVİTE DEĞİŞİMLERİ ve DÜZELTMELERİ	22
4.1 Bölgesel Etkiler	22
4.1.1 Yeryüzü Üzerindeki Konuma Bağlı Etkiler	22
4.1.2 Yeryüzü Üzerindeki Yüksekliğe Bağlı Etkiler	22
4.2 Düzenli Etkiler	22
4.3 Periyodik (Mevsimsel) Etkiler	23
4.4 Gravite Düzeltmeleri	24
4.4.1 Gravite Ölçerin Yapısından Kaynaklanan Düzeltmeler	24
4.4.1.1 Gravite Ölçer Drifti	24
4.4.2 Fiziksel Koşullardan Kaynaklanan Düzeltmeler	25
4.5 Gravitenin Fiziksel Yeryüzündeki Değişimleri ile İlgili Düzeltmeler	25

4.5.1	Enlem Etkisi ve Düzeltmesi	26
4.5.2	Atmosferik Etki ve Düzeltmesi	27
4.5.3	Gravite Nokta Yüksekliğine İndirgeme	27
4.5.4	Yükseklik Etkisi ve Düzeltmesi	28
4.5.5	Gelgit İndirgemesi	29
5.	A10 MUTLAK GRAVİTE ÖLÇER	32
5.1	Aletin Yapısı ve Kullanımı	32
5.1.1	Ölçme Prensipleri	33
5.1.2	Arazi Ölçmeleri için Konum Belirleme	34
5.2	Aletin Temel Bileşenleri	35
5.2.1	Süperspring Teorisi	38
5.2.2	Düşme Birimi (Dropping Chamber)	39
5.2.2.1	Düşme Eylemine İlişkin Kontrol Paneli	41
5.2.3	İnterferometre Teorisi	41
5.2.4	Lazer Teorisi	42
5.3	Aletin Kurulması	44
5.3.1	Saçılım Genliğinin Ayarlanması	46
5.3.2	Süperspringin Ayarlanması	46
6.	UYGULAMA	49
6.1	Mutlak Gravite Ölçme ve Değerlendirmeleri	49
6.2	Basınç Değişiminin Gravite Üzerine Etkisi	64
6.3	Farklı Gelgit Modelleri Kullanılarak Gravite Ölçülerinin Değerlendirilmesi	65
6.4	Kutup Gezinmesinin Gravite Üzerine Etkisi	66
6.5	Düşey Gradyent Ölçme ve Değerlendirmeleri	67
6.6	Gravite Değişimleri Arasında Anlamlılık Testi	72
6.7	A10 Mutlak Gravite Ölçerin Uluslararası Karşılaştırması	74
7.	SONUÇ	77
	KAYNAKLAR	78
	EKLER	80
	ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGE LİSTESİ

A	Barometrik kabul faktörü ($\mu\text{Gal}/\text{mBar}$)
A	Astronomik azimut
a	Referans elipsoidin küçük yarı eksen (m)
b	Referans elipsoidin büyük yarı eksen (m)
b	Gravitasyon kuvveti
b_t	Gelgit ivmesi
b_0	Yeryüzündeki her noktaya eşit olarak etkiyen merkez kaç ivmesi
C_p	Barometrik basınç düzeltmesi (μGal)
$D(t)$	Drift fonksiyonu
e^2	Referans elipsoidin birinci dışmerkezlik elemanı
G	Gravitasyon sabiti
$g(t_0)$	Driftin modellendirildiği andaki gravite okuması
g	Gravite ivmesi
H	Ortometrik yükseklik
h	Noktanın deniz yüksekliği (m)
h_A	Aletin iç yüksekliği (A10-005 için 72 cm)
h_l	Gravite değerinin taşınmak istenildiği yükseklik (cm)
h_T	Transfer yüksekliği ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)
k	Normal gravite sabiti
l	Karşılıklı olarak birbirlerini etkileyen iki kütle arasındaki mesafe
N_0	Bilinmeyen seviye (nivo) sabitesi
P_n	Nominal basınç değeri (mBar)
P_0	Ölçülen barometrik basınç
P_z	Ölçülen basınç değeri
R	Dünyanın yarıçapı
T	Salınım zamanı
t_0	Başlangıç zamanı
V	Yerin hacmi
V_d	Deformasyon potansiyeli
V_t	Ayın ve güneşin gelgit potansiyeli
V	L gravite ölçer okumasının düzeltmesi
ω	Dünyanın açısal dönme hızı (rad/sn)
x,y	IERS sisteminde kutup koordinatları (rad)
δ	Standart sapma
δ_g	Kutup gezinmesi düzeltmesi (μGal)
φ	Jeodezik enlem (rad)
λ	Jeodezik boylam (rad)
$\Delta F(z)$	Ayar fonksiyonu
Δr_{el}	Radyaltaşınma
Λ	Astronomik boylam
Φ	Astronomik enlem
ℓ	Sarkaç boyu
γ_0	Ekvatordaki normal gravite değeri

KISALTMA LİSTESİ

AMS	Army Map Service
BIMP	Bureau International des Poids at Mesures
CIO	Conventional International Origin
DAFZ	Doğu Anadolu Fay Zonu
ESTEC	The European Space Research and Technology Center
ESA	European Space Agency
ICAG	International Comparison of Absolute Gravimeters
IERS	International Earth Rotation Service
IfAG	Institute for Applied Geodesy
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
GGD	Karasal gelgit düzeltmesi
GPS	Global Positioning System
HGK	Harita Genel Komutanlığı
KAFZ	Kuzey Anadolu Fay Zonu
KGD	Kutup gezinmesi düzeltmesi
NDY	Noktanın denizden yüksekliği
NIST	National Institute of Standarts and Technology
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OYD	Okyanus yüklenmesi düzeltmesi
SGM	Değerlendirme işleminin yapıldığı istatistiksel aralık
SI	Système international d'unité
SLR	Satellite Laser Ranging
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü
YDBE	Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Marmara Bölgesi'nin temel tektonik görünümü.....	4
Şekil 1.2 Kuzey Anadolu Fay zone	4
Şekil 2.1 Yer merkezli jeosentrik sistem	10
Şekil 2.2. Bölgesel gravite alan sistemleri	11
Şekil 2.3 Gravitasyon, merkezkaç ivmesi ve gravite	14
Şekil 2.4 Yer yüzeyi yakınlarındaki eş potansiyelli yüzeyler ve çekül doğrultuları.....	16
Şekil 3.1 Serbest düşme yöntemi ile gravite ölçmeleri	17
Şekil 3.2 Sarkaç yöntemi ile gravite ölçmeleri	18
Şekil 3.3 LaCoste Romberg, Scintrex CG-5 ve GWR SG30 marka bağıl gravite ölçerler	20
Şekil 3.4 A10 ve FG5 mutlak gravite ölçerler	21
Şekil 4.1 Enlem etkisi ve düzeltmesi	27
Şekil 4.2 Gravite nokta yüksekliğine indirgeme	28
Şekil 4.3 Gelgit İvmesi.....	29
Şekil 5.1 A10 mutlak gravite ölçer	32
Şekil 5.2 Aletin temel yapısı	33
Şekil 5.3 Mutlak g değerinin direkt ölçümü	34
Şekil 5.4 A10 mutlak gravite ölçer ve kötü hava koşullarından kaçınma.....	35
Şekil 5.5 A10 mutlak gravite ölçerin temel görünümü	36
Şekil 5.6 Kablo girişleri ile A10 mutlak gravite ölçer	37
Şekil 5.7 Elektronik kontrol panelinin önden görünümü.....	37
Şekil 5.8 Elektronik kontrol panelinin arkadan görünümü	38
Şekil 5.9 Süperspring yapısı.....	38
Şekil 5.10 Düşme birimi genel görünümü	40
Şekil 5.11 İnterferometrenin genel görünümü	42
Şekil 5.12 ML-1 iç yapısı.....	43
Şekil 5.13 Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iki kutuplaşmanın yoğunluğu.....	43
Şekil 5.14 İki kabın birbirinden ayrılması	45
Şekil 5.15 Arazi ölçmeleri için A10 mutlak gravite ölçerin taşınması	47
Şekil 5.16 Işın düşeyleyicinin gerçek görünümü	47
Şekil 5.17 Işın düşeyleyicinin şematik görünümü	48
Şekil 6.1 Mutlak gravite ağı.....	51
Şekil 6.2 Kampanyalardan görünümeler	52

Şekil 6.3 EDRN noktası setlere göre gravite değerleri	52
Şekil 6.4 ULUT noktası setlere göre gravite düzeltmeleri.....	53
Şekil 6.5 CINA noktasındaki ölçme işlemi sonrası değerlendirme aşamasında elde edilen ve 12. sete ait lazer güç-frekans düzeltmeleri	54
Şekil 6.6 KIRT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 2. sete ait düşüşler	54
Şekil 6.7 HSBT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 8. sete ait düşüşler	55
Şekil 6.8 Noktaların gravite değerleri	56
Şekil 6.9 Noktaların deniz yükseklikleri.....	57
Şekil 6.10 Kalibrasyon bazı	57
Şekil 6.11 TUBI noktası değerlendirme aşamasında 9. setin düşüşlerine ait düzeltmeler	58
Şekil 6.12 DOLT noktası setlere göre gravite değerleri	59
Şekil 6.13 BTLT noktası setlere göre gravite düzeltmeleri grafiği.....	59
Şekil 6.14 ULUT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 5. sete ait düşüşler.....	60
Şekil 6.15 Ekim 2009 kampanyası için noktaların gravite değerleri	61
Şekil 6.16 BTLT noktasının zamansal değişimi	62
Şekil 6.17 DOLT noktasının zamansal değişimi	62
Şekil 6.18 KIRT noktasının zamansal değişimi.....	63
Şekil 6.19 TUBI noktasının zamansal değişimi.....	63
Şekil 6.20 ULUT noktasının zamansal değişimi	64
Şekil 6.21 Yüksekliğe bağlı değişen nominal basınç değerinin graviteye etkisi	65
Şekil 6.22 Karasal gelgit modelinin gravite değerine etkisi	66
Şekil 6.23 Kutup gezinmesinin gravite değerine etkisi.....	67
Şekil 6.24 Düşey gradyent ölçmelerinde kullanılan çift yüzeyli platform	68
Şekil 6.25 Zamansal düşey gradyent değişimi.....	69
Şekil 6.26 Yükseklik – gradyent değişimi	70
Şekil 6.27 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş gravite farkları	71
Şekil 6.28 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş düşey gradyent değerleri.....	71
Şekil 6.29 BIPM ölçme noktaları.....	75
Şekil 6.30 A10-005 mutlak gravite ölçer ile B noktasında yapılan ölçüler	76
Şekil 6.31 Farklı mutlak gravite ölçerler ile B noktasında, farklı yıllarda yapılan ölçüler.....	76

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 6.1 2009 yılı Haziran ayı kampanyası mutlak gravite ölçmeleri sonuçları	55
Çizelge 6.2 2009 yılı Ekim ayı kampanyası mutlak gravite ölçmeleri sonuçları	60
Çizelge 6.3 İki kampanya arasında aynı noktalara ilişkin gravite farkları.....	61
Çizelge 6.4 Yükseklikle nominal basınç ve gravite değişimi	64
Çizelge 6.5 Gelgit modelinin ölçmeye etkisi	65
Çizelge 6.6 Kutup gezinmesinin gravite değerine etkisi.....	66
Çizelge 6.7 Gradyent değerlerindeki mevsimsel değişimler	69
Çizelge 6.8 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş gravite farkları	70
Çizelge 6.9 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş düşey gradyent değerleri.....	72
Çizelge 6.10 Anlamlılık testi sonuçları.....	74
Çizelge 6.11 Farklı mutlak gravite ölçerlerin karşılaştırılması.....	75

ÖNSÖZ

Özellikle lisans eğitimim sonrasında bulunduğu yapıcı telkinleriyle geleceğe dair sağlam bir adım daha atmamı sağlayan; bu çalışma süresince, belki de söylenebilecek her şeyin temelini oluşturan kendi heyecanını bana yansıtip motivasyonumu artıran ve çalışmalarına önemli bir boyut kazandıran yurt dışı deneyimimin gerçekleşmesinde büyük katkıları olan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Uğur Doğan'a ne kadar teşekkür etsem azdır.

Yurt dışında bulunduğum süre içerisinde, gerek sosyal anlamda adaptasyon sürecimi kolaylaştıran gerekse eğitimim doğrultusunda yol göstericiliğini benden esirgemeyen Prof. Dr.-Ing. Carl Gerstenecker'e, yine bu süre içerisinde özellikle gravite ölçme yöntemleri hakkında kendisinden çok şey öğrendiğim Darmstadt Teknik Üniversitesi (TUD) Fiziksel Jeodezi Enstitüsü'nden (Almanya) Prof. Dr.-Ing Matthias Becker'e, Federal Kartografya ve Jeodezi Kurum'undan (BKG-Frankfurt), ilgisini her zaman hissettiğim Dr. Reinhard Falk'a ve A-10 mutlak gravite ölçer hakkında bütün bilgisini benle paylaşıp sorularıma sabırla cevap veren ve kendisiyle arazi ölçümlerine katılma onuruna ulaştığım Jan Müller'e çok teşekkür ederim.

Marmara Bölgesi mutlak gravite ölçmeleri kampanyaları boyunca deneyimlerinden yararlanma fırsatı bulduğum TÜBİTAK-UME'den Baki Karaböce'ye ve bu kampanyalarda rol alma, aynı zamanda çalışmamda kullandığım veri setine ulaşma imkânını bana sunan TÜBİTAK-YDBE'den Sayın Doç. Dr. Semih Ergintav'a teşekkürü bir borç bilirim.

Proje kapsamında düşey gradyent ölçümlerinin CG-5 bağıl gravite ölçer kullanılarak gerçekleştirilmesinde, veri alma ve ölçüm sonrasında veri değerlendirme aşamasında sonsuz yardımlarını gördüğüm; özellikle stresli geçen arazi ölçümleri sırasında varlıklarını her zaman hissettiğim değerli arkadaşlarım Harita Mühendisi Azer İlgar'a (YTÜ) ve Jeofizik Mühendisi Gökhan Arslan'a (TÜBİTAK-YDBE) teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca içten tavsiyelerini benimle paylaşan ve her seferinde tarifsiz yardımlarıyla yanımda olan, yine değerli arkadaşlarım; Harita Mühendisi Ayşe Selendi'ye (YTÜ) ve Harita Mühendisi Bediha Çolak'a (YTÜ) çok teşekkür ederim.

Berberken ya da ayrıken sürekli benle olduğunu hissettiren; objektif eleştirileriyle hayatın bütününe, hatta içerisinde bulunduğumuz zaman parçacığına dair bütün sorunların anlamsızlığını her seferinde yüzüme vuran; çok değerli dostum Harita Mühendisi Fırat Büyükkakça'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son ve esas olarak, en başından bugüne gelebilmemin mimarları olan; annem Ferhan Özdiğer'e ve babam Salim Özdiğer'e, ilk olarak sınırsız sevgileri ve sonrasında karşılıksız güvenleri için, kardeşim Şehir ve Bölge Plancısı Zeynep Pınar Özdiğer'e sadece hayatımın tam da ortasında olduğu için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aslında hayat, biz insanların algılayabildiği anlamda bir kabın suyla dolmasından çok ta farklı değil ve bazen kendi kabımızın suyla dolduğunu gözlemlerken istemediğimiz halde bir başkasınınkinin taşıyor olduğunu görmek acı verir. Bu nedenle, mutluluğun en güzelini; yani şu an benim için bu çalışmanın sonucunu, aklımda hala onu son gördüğüm haliyle var olan kuzenim Ufuk May'ın anısına adıyorum.

ÖZET

Marmara Bölgesi'nde düşey yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi amacıyla; “Marmara Bölgesi'ndeki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Mutlak Gravite ve GPS ile Araştırılması” (108Y152 nolu 1001 Projesi) projesi kapsamında kurulan mutlak gravite ağında ve Bursa-Uludağ arasında oluşturulan kalibrasyon bazında A10-005 mutlak gravite ölçer kullanılarak mutlak gravite ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, bu noktalarda CG5-076 ve CG5-079 bağıl gravite ölçerler kullanılarak düşey gravite gradyentini belirlemeye yönelik bağıl gravite ölçmeleri yapılmıştır. Proje süresince kullanılan A10-005 mutlak gravite ölçer TÜBİTAK–Ulusal Metroloji Enstitüsü'nden ve CG5 bağıl gravite ölçerler ise TÜBİTAK–Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü'nden sağlanmıştır.

Bu çalışmada, 17 Ağustos 1999 İzmit depreminden sonra Marmara Bölgesi'nde ilk defa gerçekleştirilen mutlak gravite ölçmeleri ve bunların değerlendirme stratejisi ortaya konmaktadır. Mutlak gravite ağını ve kalibrasyon bazını kapsayan ölçme kampanyaları, ilki 25 Haziran – 1 Temmuz 2009 ve ikincisi 19 – 21 Ekim 2009 tarihlerini kapsayan süreçte; Yıldız Teknik Üniversitesi, TÜBİTAK ve Harita Genel Komutanlığı işbirliği ile gerçekleştirilmiştir. Bu iki kampanya sonrasında kalibrasyon bazındaki noktalara ilişkin gravite değişimleri yaklaşık olarak 2-18 μGal olarak belirlenmiştir.

Elde edilen veri setinin değerlendirilmesiyle bölgeye ait mutlak gravite değerleri belirlenmiş ve seçilen noktaların ağ yapısına uygunluğu irdelenmiştir. Ayrıca bölgenin düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi amacıyla yeni kampanyalar düzenlenerek periyodik gözlemler yapılmaya devam edilecektir.

Anahtar Kelimeler: Marmara Bölgesi, Mutlak gravite ölçmeleri, A10 mutlak gravite ölçer, Düşey gravite gradyenti ölçmeleri

ABSTRACT

In order to determine the vertical crustal motions along the Marmara Region as a part of the “Investigation of the Vertical Crustal Motions with Absolute Gravity and GPS in Marmara Region” (108Y152 no. 1001 Project) project, absolute gravity measurements at the absolute gravity network and at the calibration baseline which was located from Bursa to Uludağ, were performed by using A10-005 absolute gravimeter. At the same time, in order to determine the vertical gravity gradient, relative gravity measurements were also performed by using CG5-076 and CG5-079 relative gravimeters. From TUBITAK-National Metrology Institute the A10-005 and from TUBITAK-Earth and Marine Sciences Institute the CG5s were derived.

In this study, it was aimed to explain the results and the post-processing strategy of the first absolute gravity measurements after 17 August 1999 Izmit earthquake in Marmara Region. The first campaign at the absolute gravity network and at the calibration baseline was performed between 25 June and 1 July 2009, and the second one was performed between 19-21 October 2009 with a collaboration of Yildiz Technical University in Istanbul, TUBITAK in Izmit and General Command of Mapping in Ankara. The gravity changes of the sites at the calibration baseline were calculated approximately 2-18 μGal .

By post-processing the data sets which were obtained from the campaigns; the absolute gravity values of the sites in the region was determined and the availability of the sites in the network was discussed. Moreover, it will be proceeded to arrange some new periodic absolute gravity measurement campaigns to observe the vertical crustal movements more accurately.

Key words: Marmara Region, Absolute gravity measurements, A10 absolute gravimeter, Vertical gravity gradient measurements

1. GİRİŞ

Gravite, yer kabuğu hareketleri ve yeryuvarı kitle yoğunluklarının belirlenmesinde ve yükseklikler için referans yüzeyi olan jeoidin tanımlanmasında önemli bir yer tutmaktadır. Yeryuvarı yüzeyinde ölçülmesi gereken gravite değeri, ölçme bölgesi (jeodezik kullanım), yeryuvarına dâhil kütle dağılımı (jeofiziksel kullanım) ve sürekli ölçmeler sayesinde yeryuvarındaki geçici değişimler (jeodinamik kullanım) hakkında bilgi içerir. Ayrıca, gravite alanı oşinografi, astronotik ve navigasyon çalışmalarının da ihtiyaç duyduğu bir bileşendir. Son olarak, gravite fizik biliminin, özellikle metroloji (ağırlıkların ve uzunlukların bilimsel yollarla incelenmesi) alanında temel parametresidir (Torge, 1989). Yeraltının homojen olmaması ve değişik yoğunluklu kayaçların bulunması nedeniyle yeryuvarının yerçekimi ivmesinde (g) küçük değişimler meydana gelir. Bu değişimlerin yeryüzünde gravite ölçerler ile ölçülmesi ve bu ölçülerin değerlendirilmesi gravite yöntemini oluşturmaktadır (Doğan, 2007).

XVI. yüzyılın ortalarında sarkaç ve yay sistemlerinden yararlanılarak başlatılan gravite ölçmeleri; günümüzde serbest düşme (ya da yukarı fırlatma) mantığının ileri teknolojiyle birleştirilmesiyle sabit istasyonlarda ya da arazide çok hassas sonuçlar elde edilebilen mutlak gravite ölçme yöntemlerine ulaşmıştır. Bu doğrultuda, 1990'lı yılların başlarında Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST – A.B.D.), Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA – A.B.D.) ve Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (IfAG – Almanya) tarafından yürütülen ortak bir çalışmayla; arazi koşullarında da kolaylıkla kullanılabilecek bir alet tasarlanmıştır. Bu çalışmaların öncülük ettiği süreç içerisinde FG-5 mutlak gravite ölçer üretilmiş; A.B.D. ve Avrupa başta olmak üzere dünyanın birçok bölgesinde düşey deformasyonların belirlenmesinde bu aletten yararlanılmıştır.

Gravite yönteminin Türkiye'deki uygulamasına ilk olarak Maden Tetkik Arama Enstitüsü'nde başlanmış ve çoğunlukla petrol araştırmalarında kullanılmıştır. Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye I. Derece Gravite Ağını oluşturmak için 24 nokta arasında 1956-1958 yıllarında bağıl gravite ölçmeleri yapılmıştır. 1960 yılında HGK ve AMS (Army Map Service – ABD)'nin ortaklaşa çalışmasıyla ağın datumunu belirlemek amacıyla Almanya-Potsdam bağlantı ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 1960 yılında Potsdam bağlantı ölçmelerinden hemen önce Ankara-Konya arasında gravite ölçerler hava yoluyla taşınarak bazı ölçmeleri yapılmış ve bu tarihten sonra gravite ölçerlerin kalibrasyonu için bu baz kullanılmıştır. 1996 yılının Ağustos - Ekim ayları arasında; Harita Genel Komutanlığı (Ankara) ve Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (Frankfurt) işbirliği ile SLR (Satellite Laser Ranging) noktaları, Akdeniz ve Karadeniz kıyı bölgelerinde bulunan gelgit ölçümleri istasyonları ve Türkiye Ulusal Gravite Ağı'na ait bazı noktaları kapsayan toplam 13 noktada mutlak gravite ölçümleri yapılmıştır (Wilmes vd., 1997).

Marmara Bölgesi'nde yerkabuğunun içindeki deformasyonlara ilişkin bilgi edinilmesini sağlayan gravite alanındaki değişimlerin belirlenmesi 1985-1995 yılları arasında Kuzey Anadolu Fay zonunun batı kesiminde kurulan jeodezik ağda yapılan gravite ölçmeleri ile sınırlı kalmıştır (Becker vd., 1985; Akın vd., 1989; Demirel vd., 1994). Kuzey Anadolu Fayı'nın etkisiyle oluşan ve büyük yıkımlarla sonuçlanan İzmit (17 Ağustos 1999, $M=7.4$) ve Düzce (12 Kasım 1999, $M=7.2$) depremleri sonrasında, Ergintav ve diğerleri 2005 çalışmalarında, Marmara Bölgesi'ni kapsayan üç boyutlu post-sismik deformasyonları belirlemeye yönelik araştırmalarda bulunulmuş; zamana ve konuma bağlı düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi amacıyla gravite değişimleri ve GPS verileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, gravite değişimleri belirlenmiş ve bazı GPS zaman serileri, modellenemeyen mevsimsel değişimler ve GPS alanı içersindeki düşey yönlü hareket hakkında gravite değişimleri ile uyuşan önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Ayrıca; yine bu sonuçlar doğrultusunda, ağın batı ve doğu kısımlarında yükseklik, gravite ve potansiyel değişimlerinin farklı olduğu gözlemlenmiştir. Batı kısmında, yatay yer değiştirmeler ve potansiyel artışlarından kaynaklanan belirgin gerinim yüklenmeleri görülmüştür (Doğan vd., 2007).

Önemli bir deprem aktivitesine sahip olan Marmara Bölgesi'ndeki deformasyonların nedenlerini daha ayrıntılı ortaya koyabilmek amacıyla ; 17 Ağustos 1999 depreminden sonra ilk kez yapılacak olan mutlak ve bağıl gravite ölçme sonuçlarının birlikte değerlendirilmesiyle düşey yerkabuğu hareketlerinin izlenmesini hedefleyen “Marmara Bölgesi'ndeki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Mutlak Gravite ve GPS ile Araştırılması” (108Y152 nolu TÜBİTAK 1001 Projesi) isimli bir proje; Yıldız Teknik Üniversitesi, TÜBİTAK-MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü ve Harita Genel Komutanlığı tarafından başlatılmıştır. Ayrıca bu proje ile bağıl gravite ölçerlerin kalibrasyonlarına ve bunların zamana bağlı davranışlarının incelenmesine büyük katkı sağlaması hedeflenen bir kalibrasyon bazı (Bursa-Uludağ) oluşturulmuştur.

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME)'nde bulunan A10 mutlak gravite ölçer kullanılarak Marmara Bölgesi'nde oluşturulan gravite ağında ve kalibrasyon bazında Haziran-2009 ve Ekim - 2009 tarihlerinde mutlak gravite ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktalarda ayrıca, TÜBİTAK Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü (YDBE) tarafından sağlanan iki adet CG-5 bağıl gravite ölçer kullanılarak bağıl gravite ölçmeleri de gerçekleştirilmiş ve bu ölçmelerle düşey gradyent değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

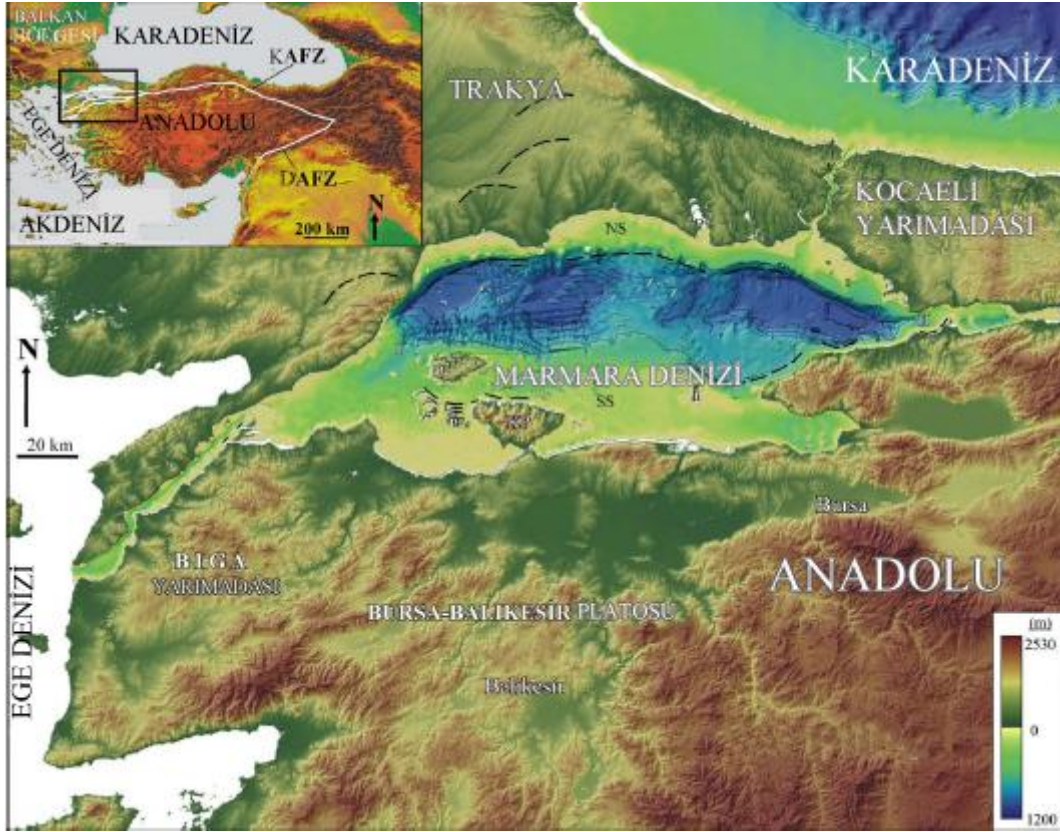
Bu çalışmada, mutlak gravite ağında ve kalibrasyon bazında ülkemizin kendi aleti olan A10 mutlak gravite ölçerin ilk kez arazi şartlarında kullanılması ile gerçekleştirilen mutlak gravite ölçmeleri ve bunların değerlendirme stratejisi ortaya konmaktadır. Ayrıca; Bölüm 1'de Marmara Bölgesi'nin tektonik yapısı, Bölüm 2.'de yeryuvarının gravite alanı, Bölüm 3.'de gravite ölçme yöntemleri,

Bölüm 4.'te gravite değişimleri ve düzeltmeleri, Bölüm 5.'te A10 mutlak gravite ölçer, Bölüm 6.'da uygulamalar, analiz ve irdelemeler verilmiş ve elde edilen sonuçlar Bölüm 7.'de özetlenmiştir.

1.1 Marmara Bölgesi'nin Tektonik Yapısı

Marmara Bölgesi, Türkiye'nin kuzeybatı kesiminde bulunup Ege, Balkan, Karadeniz ve Anadolu Bölgeleri'nin arasında yer alır. Bölge, Ege Bölgesi'nin kuzeyden güneye büyük artış gösteren topoğrafik yapısının ve Anadolu plakasının kuzey sınırını oluşturan Kuzey Anadolu Fay zonunun (KAFZ) burada kesişiyor olması nedeniyle oldukça karmaşık ve kritik bir tektonik yapıya sahiptir. Bu iki farklı tektonik rejimin birbirlerine etkilerine ait yapısal ya da morfolojik analizler henüz tam anlamıyla oluşturulamamıştır. Bölgedeki en belirgin morfotektonik yapı, Ege Denizi ve Kara Deniz'in ortasında bulunan Marmara Denizidir. Bu üç deniz birbirlerine, Çanakkale (Dardanelles) ve İstanbul (Bosporus) Boğazları ile sırasıyla güneybatı ve kuzeydoğu yönlerinden bağlanır. İstanbul Boğazı, Marmara Denizi'nin kuzey bölümünü ikiye ayırır. Bu bölümlerden batı kısımda kalan Trakya Bölgesi ve doğu kısımda kalan ise Kocaeli Yarımadası olarak adlandırılır. Yine Marmara Denizi'nin güney bölümü ise Kuzeybatı Anadolu Bölgesi olarak isimlendirilir (Şekil 1.1). Bölgedeki temel morfotektonik bileşenler aşağıdaki gibidir (Yılmaz vd., 2009):

- Trakya Bölgesi – Kocaeli Penepleni
- Marmara Denizi
- İstanbul ve Bursa – Balıkesir Platosu
- Kuzey Anadolu Fay Zonu
- Ganos Tepesi ve Armutlu Tepesi



Şekil 1.1 Marmara Bölgesi'nin temel tektonik görünümü (Yılmaz vd., 2009)

Marmara Bölgesi'nin tektonik yapısına büyük etkisi olan Kuzey Anadolu Fayı, Anadolu'nun kuzey bölümünü Sakarya Nehri ve Van Gölü arasında 1150 kilometrelik bir mesafede boydan boya kesen doğrultu atımlı ve sağ yönlü kayma hareketli, bir yırtılma fayı olmakla beraber düşey atımlar da barındıran bir faydır (Şekil 1.2). Ancak yatay yer değiştirme oranı düşey yer değiştirme oranına kıyasla 3-4 kat daha fazladır (Ketin, 1968).



Şekil 1.2 Kuzey Anadolu Fay zone

Kuzey Anadolu Fayı, Anadolu ve Avrupa plakaları arasında bir sınır oluşturacak şekilde konumlanmıştır. Afrika ve Arabistan plakalarının kuzey yönlü hareketleri Türkiye'nin neotektonik rejimine etki etmektedir. Anadolu bloğu, Kuzey ve Doğu Anadolu Fay zonları boyunca yılda ortalama 20 milimetrelik bir hızla batı yönlü bir hareket göstermektedir. Kuzey Anadolu Fay zonu, Karlıova'dan Geyve'ye dar bir bant şeklinde uzanır ve Marmara Denizi'nin doğu bölümünde üç kola ayrılır. Bu üç kol; batı yönünde Saros Körfezi ve Edremit' i, kuzey yönünde ise İzmit'i içersine alacak şekilde uzamaktadır (Alpar ve Yaltırak, 2002).

2. YERYUVARININ GRAVİTE ALANI

2.1 Gravite'nin Tanımı

Yerküre üzerinde durmakta olan bir cisme etkiyen toplam kuvvet, gravitasyonel kuvvetin ve yerkürenin dönme hareketine ait merkez kaç kuvvetinin bir sonucudur ve gravite olarak adlandırılır (Hoffmann-Wellenhof ve Moritz, 2006).

Gravite ölçmleri yardımı ile yer kabuğu ve diğer karasal kitleler üzerinde ya da yakınlarında yerçekimi ivmesinin büyüklüğünü (g) ve gradyentini (gradg) ölçmek amaçlanır.

$$g=|g| \quad (2.1)$$

Gravitenin birimi m/s^2 ve gravite gradyentinin büyüklüğü de $1/s^2$ 'dir (SI). Gravite alanının bir modelden farklılığını belirlemek ve belirsiz ölçümler gerçekleştirmek için aşağıdaki birimleri kullanmak daha uygundur:

$$1\mu m/s^2 = 10^{-6} m/s^2 \quad \text{ve} \quad 1nm/s^2 = 10^{-9} m/s^2 \quad (2.2)$$

Jeodezide ve jeofizikte, genellikle aşağıdaki birimler kullanılır:

$$1mGal = 10^{-5} m/s^2 \quad \text{ve} \quad 1\mu Gal = 10^{-8} m/s^2 \quad (2.3)$$

Bu birimler Gal biriminden elde edilir ve ismini Galilei'den alır ($1Gal = 1cm/s^2$). Birçok ülke resmi ve ticari ilişkilerinde artık bu birimleri kullanmamaktadır. Bilim alanında hala kısmen kullanılsa da Anglo-Amerikan literatüründe $1\mu m/s^2$ genel olarak gravite birimi olarak nitelendirilir.

Gravite gradyenti için, SI sistemi ile uyumlu olmamasına rağmen genellikle Eötvös birimi kullanılır.

$$1E = 10^{-9}s^{-2} = 0,1mGal/km \quad (2.4)$$

Graviteyi doğru bir şekilde formüle edebilmek için, araştırma yapılabilecek en önemli obje olan “karasal gravite alanı” bir örnek olarak kabul edilebilir. Yeryuvarın dönüş hareketine dâhil olan herhangi bir kütleye ekseni boyunca, yeryuvarın ve gök cisimlerinin çekim kuvvetleri ile (kütle çekimi) en az merkezkaç kuvveti kadar etkiyen kuvvet sonucunda gravite ivmesi (g) oluşur. Dolayısıyla gravite (g), karasal ve karasal olmayan kütle dağılımlarına ve yeryuvarının dönüş hareketine bağlıdır. Dahası kütle dağılımı ve dönüş hareketi zamana bağlı olarak değişen büyüklüklerdir. Küre üzerinde ortalama g değeri 9.80 m/s^2 ’dir.

Konumdaki (ekvator – kutup) ve yükseklikteki (yüksek dağlar – derin denizler) farklılıklar, maksimal gravite değişimlerinin $5 \times 10^{-3} g$ ’ye kadar ulaşmasına neden olur. Dağılmış kütlelerin (ana yer kabuğu modelinden sapmalar), en derinlerde (kabuk / örtü) ve en yukarılarda (üst kabuk) konumlanmaları, daha geniş ve daha küçük alanlarda sırasıyla $5 \times 10^{-4} g$ ve $5 \times 10^{-5} g$ ’ye varan değişimlere neden olur. Uzun süreli karasal kütle değişimleri sırasında periyodik gelgit etkisinin $3 \times 10^{-7} g$ değerine ulaşması sadece $10^{-8} \dots 10^{-9} g$ aralığındaki gravite değişimlerine neden olur.

Bu değişimleri ve yer küre üzerindeki bir noktanın gravite değerini belirlemek için gravite ölçerler ve gravite gradyometreleri kullanılır. Bu aletler, gravite alanından etkilenen bir kütlenin davranışlarının gözlemlenmesi prensibiyle çalışan sensörlerdir. Gravitenin konum duyarlılığı üzerine yapılan çalışmalara göre, $10^{-4} g$ ’ den başlayan bir gravimetrik ölçme duyarlılığı yeterlidir. Zamansal değişimlerin gözlemlenebilmesi için en az $10^{-8} g$ ’ lik bir doğruluk gerekmektedir. Gradyent ölçmeleri için ise $10^{-8} \dots 10^{-9} \text{ m/s}^2$ ’ lik bir doğruluk yeterlidir.

Ölçmeler; alet, ölçme ve değerlendirme yöntemlerine bağlı olarak; kullanıcı amaçları ve gravite alanının uzay zamanı yapısı doğrultusunda sonuçlar gösterir. Bu bağlamda teknolojik ve yöntemsel gelişmeler yeni amaçlara ulaşmakta etkili olmaktadır (Torge, 1989).

2.2 Tarihsel Gelişimi

XVII. ve XVIII. yüzyıldaki gravite ölçmelerini tetikleyen, katı ve şekil değiştirebilen kitlelerin mekaniğinin gelişmesi olmuştur. Gravitenin belirlenmesinde gerekli olan mesafenin ve zamanın ölçülmesi; gravite ölçmelerine ilişkin doğal nicelik anlamları ile bir uzunluk biriminin tanımlanması için ve özellikle gravitenin konum bağımlılığı fark edildikten sonra dünyanın şeklinin incelenmesi için yeterli doğruluktaydı. Sonraki yıllarda, jeodezik ölçmelerin ve jeofiziksel araştırmaların artması ve teknolojik olanakların etkileşimi ile jeodezik ve jeofiziksel amaçlar ilerleme göstermiştir. Gravite ölçmelerinin gelişmesine farklı bir örnek olarak da, son 300 yılda sürekli olarak artan kıtaların ve denizlerin gravite ölçmelerinin yükselen doğrulukları olarak gösterilmektedir.

Gravite ağlarının oluşturulması ve jeodezik-jeofiziksel sonuçların ardından (XX. yy’ın ikinci yarısı)

gravite ölçmelerinde aşağıdaki teknolojik gelişmeler meydana gelmiştir:

- Yüksek duyarlıklı ve geniş ölçüm aralığına sahip statik gravite ölçerlerin kullanılması (Sabit istasyonda $\pm 10^{-8} \text{ m/s}^2$, arazide $\pm 10^{-7} \text{ m/s}^2$),
- Benzer duyarlılıklı sabit ve taşınabilir serbest düşme aygıtlarının kullanılması,
- Deniz gravite ölçerlerinin kullanılmasıdır (Torge, 1989).

XVI. yüzyıla kadar, gravite ivmesinin belirlenmesi Aristoteles'in teorisine dayanmaktaydı. Bu teoriye göre düşen cisimlerin hızları ağırlıkla orantılıdır, fakat Galileo Galilei (1564-1642) gibi araştırmacıların düşen cisimler üzerinde yaptıkları bazı deneyler bunun tersini göstermiştir. Galilei, özellikle eğimli yüzeylerde yaptığı deneylerle serbest düşmenin düzenli ivmelenen bir hareket olduğunu fark etmiştir. Bunun sonucunda hareket halindeki bir sarkacın periyot zamanının sadece sarkacın uzunluğuna bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Christian Huygens (1629-1695) ise bu bilgiyi ileriye taşıyarak matematiksel ve fiziksel sarkaç teorisini keşfetti ve ilk sarkaç saatini üretmiştir (Torge, 1989).

Her ne kadar Aristoteles; yeryüzünün küresel şekli hakkında dünyanın merkezine doğru hareket eden cisimleri örnekleyerek bazı fiziksel tanımlar yapmış olsa da 1600'lü yılların ortalarında Isaac Newton, (1643-1727) özellikle Kepler'in gezegen hareketleri kanunlarından yola çıkarak serbest düşme ilkesinin gravitasyonda önemli bir yere sahip olduğunu ortaya koymuştur. 1687 yılında aşağıdaki gravitasyon kanunu yayımlamıştır:

$$b = G \frac{m_1 m_2}{l^2} \quad (2.5)$$

Burada; b gravitasyon kuvvetini, G gravitasyon sabitini, l ise karşılıklı olarak birbirlerini etkileyen m_1 ve m_2 kütleleri arasındaki mesafeyi tanımlamaktadır (Torge, 1989).

2.3 Gravitasyon Sabitinin Belirlenmesi

Gravitasyon sabiti (G), temel fiziksel bir niceliktir. Zamana bağlı bir sabit olma sorusunun yanında, sayısal değerinin hesaplanması yer bilimleri ve astronominin temel ilgi alanıdır. Kuvvet modelinin, (GM) biliniyor olmasıyla belirli bir gök cisminin kütlesinin (M) ve yoğunluğunun hesaplanması olasıdır. Bunun dışında G değerine, gravite ölçmeleri ve jeofiziksel modellerden elde edilen yoğunluk değerleri ile kayaların yoğunluk değerleri laboratuvar ortamında karşılaştırılırken ihtiyaç duyulmaktadır.

Uzay araştırmaları ya da uyduların yörüngesel analizleri yardımıyla gezegenlere ait hassas GM değerleri elde edilebilir. Yer yüzeyinin atmosferik kütleleri de içeren ortalama GM değeri $(398600.44 \pm 0.01) 10^3 \text{ m}^3\text{sn}^2$ şeklinde-dir. Eğer dönme hesaba katılmazsa, merkezden simetrik küresel bir yer modelinin karasal gravite verisi yardımıyla klasik belirlenmesi aşağıdaki eşitlik gibi olacaktır:

$$g = \frac{GM}{R^2} \quad (2.6)$$

Burada, GM değeri; gravite değeri (g) ve dünyanın yarıçapı (R) kullanılarak hesaplanabilir. Bu durumda, yoğunluk (ρ_m) aşağıdaki gibi hesaplanır (Torge, 1989):

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_m \quad (2.7)$$

2.4 Gravite Alanı Teorisi

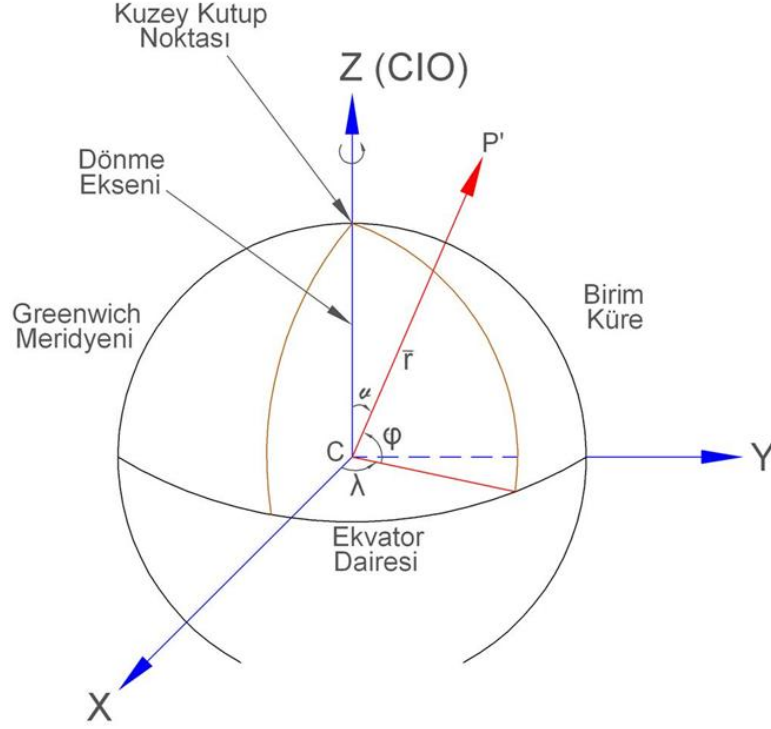
Gravite alanı teorisini ortaya koymak için gravite verisinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için gravite ölçmeleri yapılmalıdır. Gravite alanının tanımlanmasında koordinat sistemleri önemli bir yer tutmaktadırlar. Bununla beraber gravite ivmesi ve gravite potansiyeli kavramlarının bilinmesi ve ortaya konması gerekmektedir. Bu bağlamda, gravite alanını belirlemek amacıyla iki farklı koordinat sistemi geliştirilmiştir (Torge, 1989).

2.4.1 Yer Merkezli Jeosentrik Sistem

Gravite alanını küresel anlamda tanımlamak için bir Yer Sabit Jeosentrik Koordinat Sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemin orijini, yer kürenin gravite merkezindedir (C). Sistemin Z-ekseni, 1900,0 – 1906,0 arası zaman sabiti kabul edilen (Conventional International Origin) bir ortalama kutup konumu olarak zamanla değişmeyen bir rotasyon etkeni şeklinde tanımlanır. X-ekseni, ekvator düzleminde Greenwich astronomik meridyeni (Bureau International de L'Heure'a göre sıfır meridyeni) kesişimi boyunca uzanır. Y-ekseni, sistemi bir sağ el kartezyen (şekil 2.1) sistemine tamamlar (Torge, 1989).

Küresel anlamda gravite alanını küresel koordinatlar r, ν, λ ile tanımlamak avantajlıdır. Burada; r jeosentrik mesafe, $\nu = 90^\circ - \varphi$ kutup mesafesi (φ = jeosentrik enlem) ve λ coğrafi boylam olarak tanımlanır. Konum vektörü $\vec{r}$ aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır (Torge, 1989):

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \sin v * \cos \lambda \\ \sin v * \sin \lambda \\ \cos v \end{bmatrix} \quad (2.8)$$



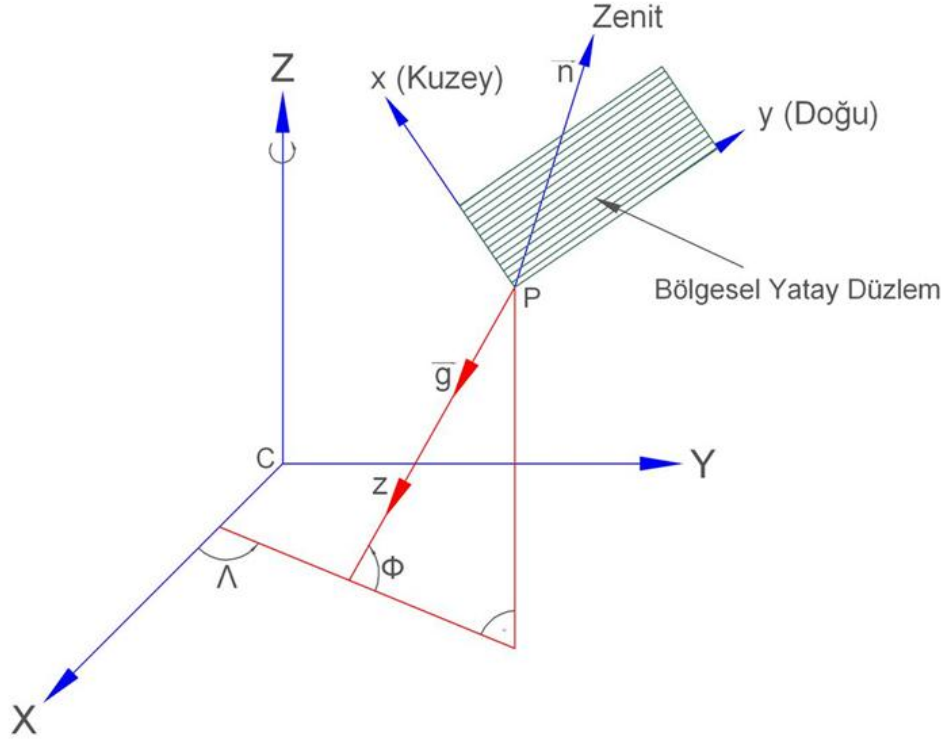
Şekil 2.1 Yer merkezli jeosentrik sistem

2.4.2 Bölgesel Gravite Alan Sistemleri

Bölgesel gravite alanı geometrisini ve bölgesel olarak sınırlandırılmış alanların bileşenlerini tanımlamak için, gravite alanı içerisinde özel olarak konumlandırılmış bir P noktasına dayanan koordinat sistemleri kullanılır (Şekil 2.2). Z-ekseni, çekül doğrultusundan ayakucu (gravite yönü) doğrultusuna uzanır; jeodezide Z-ekseni genellikle zenit açısını ifade eder. X ve Y-eksenleri, bölgesel bir düzlem oluşturacak şekilde sırasıyla kuzeyden (astronomik meridyen) güneye doğru uzanır.

Bölgesel gravite alanı sistemleri astronomik enlem Φ ve astronomik boylam Λ kullanılarak küresel sisteme dönüştürülebilir. Karasal bir objeye ait astronomik azimut A kullanılarak meridyen doğrultusu belirlenir. Jeodezik astronomi yöntemleri bu dönüşüm nicelikleri için $\pm 0,1-1'$ lik bir doğruluk sağlar. Gravite vektörü, n normal vektörü kullanılarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Torge, 1989):

$$\mathbf{g} = -\mathbf{g}\mathbf{n} = -g \begin{bmatrix} \cos \Phi * \cos \Lambda \\ \cos \Phi * \sin \Lambda \\ \sin \Phi \end{bmatrix} \quad (2.9)$$



Şekil 2.2. Bölgesel gravite alan sistemleri

2.5 Gravite İvmesi ve Gravite Potansiyeli

Dönen bir sistemde gravite ivmesi $\mathbf{g}$; gravitasyon $\mathbf{b}$ ve merkezkaç ivmesi $\mathbf{z}$ tarafından oluşturulan bir birim kütle etki eder.

$$\mathbf{g} = \mathbf{b} + \mathbf{z} \quad (2.10)$$

Gravite kuvveti $\mathbf{F}$, gravite ($\mathbf{g}$) ve kütlenin ($\mathbf{m}$) çarpımıyla elde edilir (Şekil 2.3).

$$\mathbf{F} = \mathbf{m}\mathbf{g} \quad (2.11)$$

Yerin gravitasyonu ise, Newton'un gravitasyon yasası kullanılarak;

$$b(r) = G \iiint_{yer} \frac{r' - r}{|r' - r|^3} dm \quad (2.12)$$

olur. Burada r' ve r , sırasıyla kaynak nokta P' (kütle elemanı dm) ve etkilenen nokta P ye (birim kütle, $m=1$) ait jeosentrik konum vektörleridir. Gravitasyon sabitinin değeri:

$$G = 6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad (2.13)$$

dir. Kütle elemanı dm , hacim yoğunluğu (yoğunluk) $\rho = \rho(r')$ ile ifade edilebilir ve hacim elemanı dv :

$$dm = \rho dv \quad (2.14)$$

dir. Merkezkaç ivmesi, dönen bir sistemde eylemsiz bir ivme olarak yer dönme vektörü ω ve dönme eksenini d 'ye dik olan bir mesafe kullanılarak aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır:

$$Z(r) = (\omega \times r) \times \omega = \omega^2 d \quad (2.15)$$

Burada yerin açısal hızı $\omega = 7,292115 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ dir.

Gravite alanının ve buna ilişkin hesapların tanımlanması, vektör nicelik ivme yerine skaler nicelik potansiyelin kullanılmasıyla kolaylaşır ve

$$\text{rot } b = 0 \quad , \quad \text{rot } Z = 0 \quad (2.16)$$

dir. Karşılıklı potansiyeller V ve Z aşağıdaki eşitlikler kullanılarak gravitasyon ve merkezkaç alanları yardımıyla tanımlanır:

$$b = \text{grad } V \quad , \quad Z = \text{grad } Z \quad (2.17)$$

Yerin gravitasyonel potansiyeli için (V = yerin hacmi) (2.12) ve (2.14) eşitlikleri kullanılarak,

$$V(r) = G \iiint_v \frac{\rho(r')}{|r' - r|} dv \quad , \quad \lim_{r \rightarrow \infty} V = 0 \quad (2.18)$$

elde edilir ve (2.15) eşitliği kullanılarak merkezkaç potansiyeli aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Z(r) = \frac{\omega^2}{2} d^2 \quad , \quad \lim_{d \rightarrow \infty} Z = 0 \quad (2.19)$$

Potansiyel fonksiyonlarının toplamı olarak, yerle beraber dönen bir kütleyle ait gravite potansiyeli aşağıdaki gibidir:

$$\omega(r) = V(r) + Z(r) \quad (2.20)$$

Potansiyel, gravite alanı içinde bulunan bir kütlenin yer değiştirmesiyle oluşan iş olarak tanımlanır ve potansiyel birimi $m^2 s^{-2}$ dir.

(2.18) eşitliğine benzer bir şekilde, gravite ve gravite alanı arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{g} = \text{grad } \omega \quad (2.21)$$

Gravite bileşenleri sabit bir doğrultuda, ω 'nın kısmi türevlerinden elde edilir. Bu nedenle küresel X, Y, Z sistemini veren eşitlik,

$$\mathbf{g}^T = (\omega_x, \omega_y, \omega_z) \quad (2.22)$$

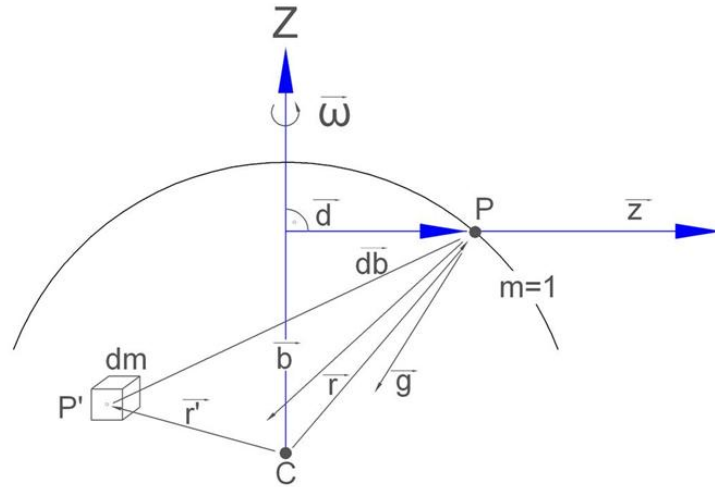
olur. $\omega_x = \partial\omega / \partial x$ kullanılarak,

$$\text{rot } \mathbf{g} = \text{rot grad } \omega = 0 \quad (2.23)$$

elde edilir.

$\omega_{xy} = \partial^2\omega / \partial x\partial y$ eşitliğinden yola çıkılarak birbirine karşılık gelen eşitlikler aşağıdaki gibidir (Torge, 1989);

$$\omega_{xy} = \omega_{yx} \quad , \quad \omega_{xz} = \omega_{zx} \quad , \quad \omega_{yz} = \omega_{zy}$$



Şekil 2.3 Gravitasyon, merkezkaç ivmesi ve gravite

2.6 Gravite Alanının Geometrisi

Gravite alanı geometrisi, sabit gravite potansiyelli yüzeyler (eş potansiyelli yüzeyler, nivelman yüzeyleri) ve çekül doğrultuları kullanılarak tanımlanabilir (Şekil 2.4).

$$\omega(r) = sbt \quad (2.24)$$

Potansiyeldeki ve konumdaki değişimler,

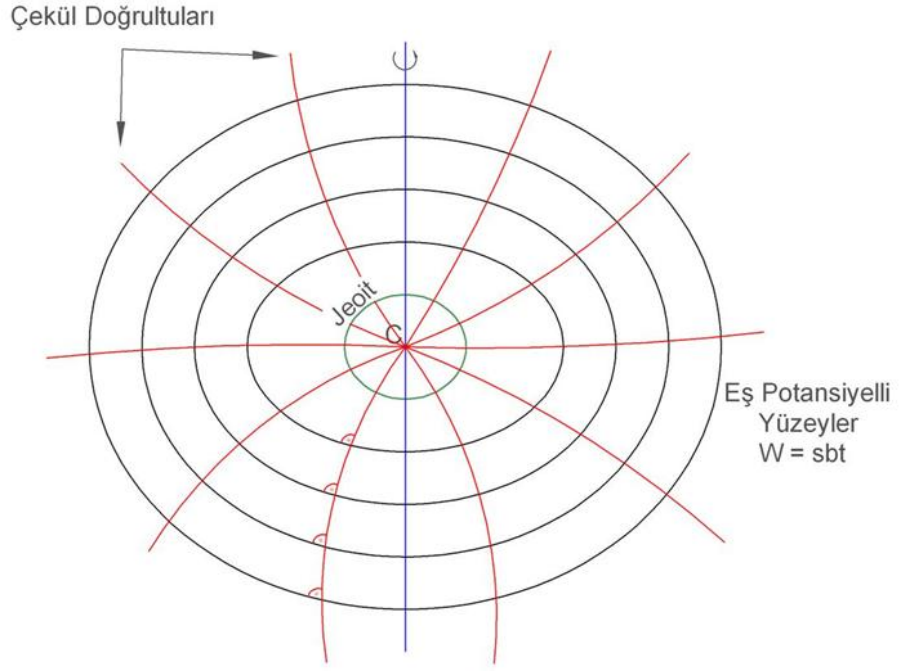
$$d\omega = g \times dr = g \, dr \cos(g \times dr) \quad (2.25)$$

dir. Bir nivelman yüzeyi boyunca $d\omega = 0$ 'dır. Bu nedenle, hiç iş yapılmamış olur ve nivelman yüzeyleri denge durumunda olan yüzeylerdir.

Çekül doğrultuları, nivelman yüzeylerine dik durumdadır. Eğer dr çekül doğrultusu (yüzey normali n) ile aynı doğrultudaysa $\cos(g, dr) = -1$ olduğu için aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$d\omega = -gdn \quad (2.26)$$

Gravite değiştiği için nivelman yüzeyleri paralel değildir. Gravite değerindeki bir yükseliş nivelman yüzeyleri arasında bir yakınsamaya neden olur. Optimal olarak durgun deniz yüzeyine yakın olan nivelman yüzeylerine jeoit denir. Jeoit, yükseklik sistemlerinin tanımlanmasında referans bir yüzey olarak kullanılır (Torge, 1989).



Şekil 2.4 Yer yüzeyi yakınlarındaki eş potansiyelli yüzeyler ve çekül doğrultuları

3. GRAVİTE ÖLÇME YÖNTEMLERİ

Gravite ölçme yöntemleri genel olarak; yersel ve uzaysal gravite ölçme yöntemleri olarak ikiye ayrılır.

3.1 Yersel Gravite Ölçme Yöntemleri

Yersel gravite ölçme yöntemleri de; mutlak ve bağıl gravite ölçme yöntemleri olarak ikiye ayrılır.

3.1.1 Mutlak Gravite Ölçmeleri

Mutlak gravite ölçmeleri temel ivme nicelikleri olan mesafe ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilir. Gravite alanı içerisinde bulunan ve serbest hareket gösteren bir sensör gözlemlenir. Yöntemin hassasiyeti $\pm 10^{-7}$ ila $10^{-9}g$ aralığındadır. Mutlak gravite ölçme yöntemleri genel olarak ikiye ayrılır.

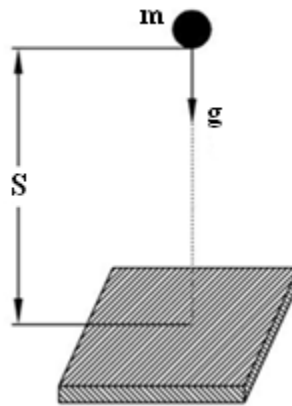
- **Serbest Düşme Yöntemi:** Serbest düşen bir cismin t_1 ve t_2 zamanlarında aldığı yol:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1/2 \cdot g \cdot t_1^2 \\ S_2 &= 1/2 \cdot g \cdot t_2^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Buna bağlı olarak mutlak gravite denklemi:

$$g = 2 \cdot \left[\frac{(S_1 t_2 - S_2 t_1)}{t_1 \cdot t_2 \cdot (t_2 - t_1)} \right] \quad (3.2)$$

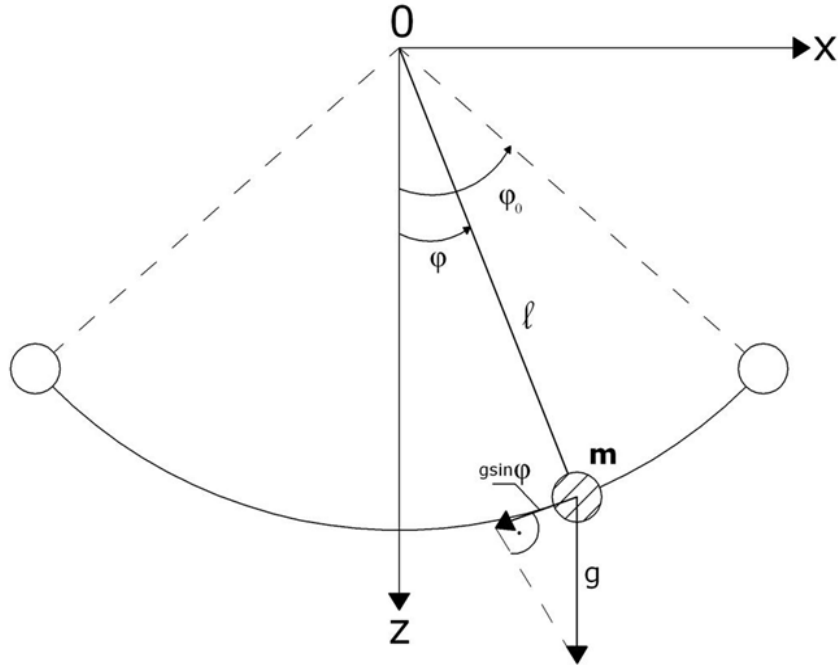
olur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Serbest düşme yöntemi ile gravite ölçmeleri

- **Sarkaç Yöntemi:** Sarkaç yöntemi, gravite alanı içerisinde bilinen bir uzunluktaki sarkacın salınım zamanının gözlemlenmesi ilkesine dayanır. Aynı sarkaca ait iki farklı sarkaç boyu ℓ_1 ve ℓ_2 , salınım zamanları T_1 ve T_2 olmak üzere gravite değeri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır (Şekil 3.2).

$$g = 4\pi^2 \left[\frac{\ell_1 - \ell_2}{T_1^2 - T_2^2} \right] \quad (3.3)$$



Şekil 3.2 Sarkaç yöntemi ile gravite ölçmeleri

3.1.2 Bağıl Gravite Ölçmeleri

Bağıl gravite ölçme yönteminde, iki temel ivme niceliği olan zaman ve uzunluktan birinin doğrudan veya dolaylı gözlemlerinin gravite sensörü ile sınırlandırılması esas alınır. Bu tanımlanamayan bir problem olup, bu niceliklerden birinin (örn: gözlemlenmeyen nicelik) sabit tutularak diğer niceliğin ikinci bir noktada gözlemlenmesiyle çözülebilir.

Gözlem noktaları arasındaki gravite farkı, zaman ya da uzunlukta gözlemlenen fark kullanılarak hesaplanır. Bağıl gravite ölçmeleri, mutlak gravite ölçmelerinden daha ekonomik sonuçlar sağlar. Bağıl gravite ölçme yöntemleri kendi aralarında iki yönteme ayrılır (Torge, 1989).

3.1.2.1 Dinamik Yöntem

Dinamik yöntem sensörün, serbest ya da sınırlandırılmış hareket içerisinde yaptığı salınım zamanının gözlemlenmesi ilkesine dayanır. Genelde sarkaç ve yay sistemleri kullanılmaktadır. Sarkaç sistemlerinde, boyu sabit bir sarkacın P_1 ve P_2 konumlarındaki iki salınım zamanı T_1 ve T_2 ölçülmektedir. Yay sistemlerinde ise, elastik bir yayın oluşturduğu enine salınım kullanılabilir. Bu durum genel olarak, bir manyetik alan içerisinde kendi rezonans frekansında salınan ve elektrik akımını iletebilen bir maddenin kullanılması mantığına dayanır. Böylece, genişletilmiş ve yayı bir geri besleme sistemi içersine sokmaya yarayan eşit frekanslı bir voltaj titreşimi oluşturulur (Torge, 1989).

3.1.2.2 Statik Yöntem

Statik yöntemde, bir denge durumu oluşturulana kadar genellikle elastik kuvvetler yardımıyla sabit tutulmuş bir sensör kullanılır. Sistem çok yavaş işler. İki gözlem noktası arasında oluşan denge konumundaki değişim ölçülür. Sensör hareketindeki sınırlamaya bağlı olarak bağıl gravite ölçerlerin kalibrasyonu oldukça önemlidir. Statik yöntem, elastik kuvvetler statik denge yay sistemleri ve elastik olmayan kuvvetler statik denge (elektrostatik basınç kuvveti) sistemleri olarak iki grupta incelenir (Torge, 1989).

3.1.3 Mutlak ve Bağıl Gravite Ölçerler

Gravite ölçerler, bölgesel gravite ağlarındaki gravite değerini belirlemeye yarayan aletlerdir. Gravite ölçer, salınım ivmelerine neden olan gürültüyü (noise) de içeren tüm titreşimleri belirleyebilen ivmeölçerlerin bir çeşididir. Bu durum, titreşimlerin izole edilmesi ve sinyallerin işlenmesi sayesinde oluşur. Tasarımlarının ana prensibi ivme ölçerlerinki ile aynı olsa da gravite ölçerler yer kabuğundaki çok küçük gravite değişimlerini de ortaya koymak adına daha hassas tasarlanırlar.

Temel olarak; mutlak ve bağıl olmak üzere iki çeşit gravite ölçer mevcuttur.

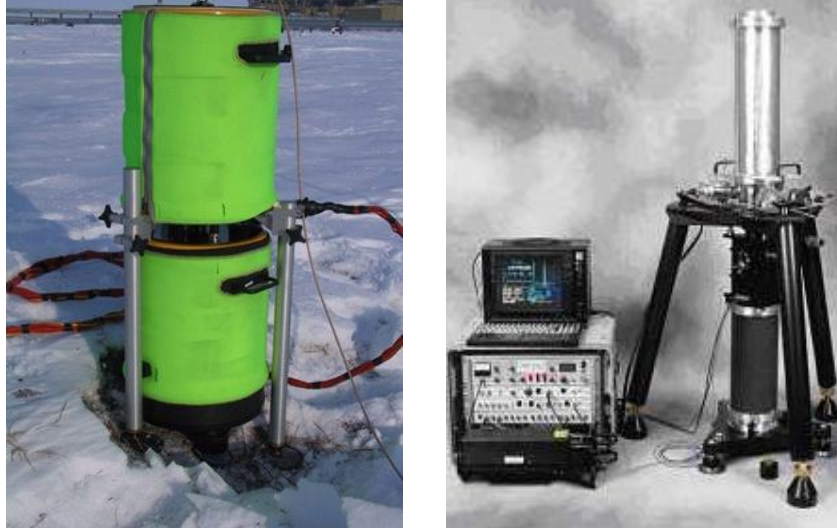
Bağıl gravite ölçerlerde genel olarak yay sistemleri kullanılır. Geniş alanlarda jeoit belirlemek amacıyla yapılan gravite ölçmelerinde kullanılırlar. Yay sistemli bağıl gravite ölçerlerde yaya bir ağırlık bağlanır ve yayın hangi ağırlıkla gerildiği ölçülür. Yayın gücünü kalibre etmek için, alet daha önceden gravite ivmesi bilinen bir noktaya konumlandırılır. Bazı bağıl gravite ölçerler de ise serbest düşme metodu kullanılır. Yansıtıcı özelliği olan bir kütle boşlukta düşürülür ve interferometrenin dış kısmında bir sinyal gözlenir. Bu sinyal bölgesel gravite ivmesinin

belirlenmesinde kullanılır. LaCoste-Romberg gravite ölçeri gibi yüksek kaliteli ve kalibre edilmiş gravite ölçerler yer kabuğunun gravite alanını $1 \mu\text{Gal}$ ($0,1 \text{ nm/s}^2$) duyarlılığında ölçebilmektedir. En hassas sonuçlar veren bağıl gravite ölçerler, süper iletken gravite ölçerlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 LaCoste Romberg (solda), Scintrex CG-5 (ortada) ve GWR SG30 (süper iletken – sağda) marka bağıl gravite ölçerler

Son zamanlarda sıkça üretilen mutlak gravite ölçerler, doğrudan serbest düşme sonucu oluşan ivmeyi ölçerler (vakumlanmış bir tüp içerisine konan yansıtıcı bir prizma yardımıyla) ve artık arazi koşullarında (düşey kontrol ağlarının oluşturulmasında) kullanılmaktadır (Şekil 3.4). Mutlak gravite ölçer, bağıl gravite ölçeri kalibre etmek için de kullanılır ve vakumlanmış bir obje içerisinde serbest düşen bir kütlenin ivme değerini ölçme mantığına dayanır. Kütle bir yansıtıcı içerir ve bir interferometrede sonlandırılır. Oluşan parazitler zaman içerisinde sayılarak kütlenin hızı ölçülebilir. Ayrıca son zamanlarda “yüksel ve düş” yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde kütle, yukarı doğru rastgele fırlatılarak, yukarı yönlü ve aşağı yönlü hareketlerin her ikisi de ölçülmektedir. Bu durum, bazı ölçme hatalarının giderilmesini sağlamaktadır. Son 300 yıl içerisinde sıkça kullanılmasına rağmen, günümüzde sarkaç yöntemlerinin kullanılması geçerliliğini yitirmiştir.



Şekil 3.4 A10 (solda) ve FG5 (sağda) mutlak gravite ölçerler

3.2 Uzaysal Gravite Ölçme Yöntemleri

Yer fiziği ve okyanus dinamiğinin daha doğru belirlenebilmesi ve uygun bir yükseklik sistemi oluşturmak için yerin gravite alanının çözünürlüğünün artırılmasına gerek duyulmaktadır. Bu nedenle, ESTEC (The European Space Research And Technology Center) ve ESA (European Space Agency) gibi kuruluşlar çeşitli uydular kullanarak uzaysal gözlemler yapmaktadır. CHAMP, GRACE ve GOCE yeni dönem uydular olarak bu çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu uydulardan alınan veri setleri 30 günlük periyotları kapsayan hız, ivme ve gravite alanları için gerilim bileşen bilgileri içermektedir.

4. GRAVİTE DEĞİŞİMLERİ ve DÜZELTMELERİ

Fiziksel yeryüzünün değişik noktaları arasında yaklaşık 5 Gal'e varan farklar olduğu gözlenir. Bunun üç temel nedeni;

- Gravite değerlerinin elde edildiği noktaların farklı yüksekliklere sahip olması,
- Yeryuvarının basıklığı (enlem farklılığı),
- Yeryuvarı kütlelerinin düzensiz dağılımıdır (Aydın, 2007).

Bu bağlamda, gravite değişimlerine etki eden faktörler aşağıdaki şekilde sıralanır:

- Bölgesel etkiler,
- Düzenli etkiler,
- Periyodik (mevsimsel) etkilerdir.

4.1 Bölgesel Etkiler

Gravite değerlerinin doğrudan değişmesine neden olan etkilerdir ve iki kısımda incelenmektedir.

4.1.1 Yeryüzü Üzerindeki Konuma Bağlı Etkiler

Enleme bağlı değişimlerdir. Gravite kuvvetinin bir bileşeni olan merkezkaç kuvvetinin bir boylam dairesi boyunca değişmesi (ekvator dairesi üzerinde en büyük iken kutuplarda “sıfır”) özelliğinin doğal bir sonucu olarak, enlem farklılığı nedeniyle gravite değerlerinde oluşan değişim sonucunda meydana gelen bir etkidir. Meridyen yayı boyunca kilometrede ± 800 mGal'lik bir fark oluşturur (Aydın, 2007).

4.1.2 Yeryüzü Üzerindeki Yüksekliğe Bağlı Etkiler

Gravite değeri nokta yüksekliği arttıkça azalır; nokta yüksekliği azaldıkça artar. Bu nedenle fiziksel yeryüzü üzerindeki noktalara ait gravite değerleri doğrudan etkilenir. Yükseklik farkı, santimetrede ± 3 μ gal'lik bir gravite değişimine neden olur.

4.2 Düzenli Etkiler

Düzenli etkiler doğrudan gravite değişimine neden olmaz, kütle değişimine neden olur. Genel olarak aşağıdaki nedenlerden dolayı oluşurlar:

- Jeolojik yer kabuğu hareketleri (yüzyılda 0.1-1 μ gal),

- Gün uzunluğunun değişmesi (yüzyılda 0.1-1 μ gal),
- Okyanus yüklenmesi (Ocean loading – 10 santimetrede 0.5-2 μ gal),
- Doğal olmayan süreçler (Gaz çıkışları – 10 yılda 5-20 μ gal).

4.3 Periyodik (Mevsimsel) Etkiler

Periyodik etkiler de doğrudan gravite değişimine neden olmaz, kütle değişimine neden olur. Genel olarak aşağıdaki nedenlerden dolayı oluşurlar:

- Kutup gezinmesi (yıllık 0-8 μ gal),
- Yer altı sularındaki değişimler (bölgeye bağlı olarak günlük ya da yıllık 1-10 μ gal),
- Atmosferik basınç değişimleri (bazı günlerde 0-20 μ gal – mevsimden mevsime 3 μ gal),
- Karasal gelgitler (günlük 100-250 μ gal),
- Mikrosismik etkiler (1-10 saniyede 2000-5000 μ gal).

Periyodik gravite değişimleri; küresel, alansal ve bölgesel anlamda oluşan karasal kütle yer değişimleri ile ilgili tekrarlı gözlemler sonucu elde edilen bilgiler kullanılarak ortaya konur.

Atmosferik etkiler, etkilenen noktanın düşey yönde ötelenmesiyle oluşan atmosferik kütlelerin yüklenmesiyle oluşur ve deformasyon potansiyeli ile sonuçlanır. Küresel bir yerkabuğu modeli için bu etki, atmosferik yüzeyin yüklenme dağılımları ile buna karşılık gelen yüklenme yardımıyla hesaplanır. Bu yaklaşım, okyanus yüklenmesinde oluşan gelgitlerin hesaplanmasına benzer bir yapıdadır. Yüklenme, küçük bir boşaltım içerirse gravitasyonel etki ağır basmaktadır. Hava kitlelerinin boyutlarının büyümesi ile, ters yönde hareket eden deformasyon etkisi artar (Torge, 1989).

Yer altı suları ve topraktaki nemin zamansal değişimi ve aynı zamanda su seviyesinin değişimi doğrudan gravitasyonel etkiler doğurmaktadır, fakat geniş yüklenmelerin gözlemlendiği durumlardan dolayı farklı etkiler de ortaya çıkar. Genelde deformasyon etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Su seviyesinden ve topraktaki nem oranından dolayı oluşan gravimetrik etki nedeniyle meydana gelen değişimler gravitasyon yasası yardımıyla hesaplanabilir. Hidrolojik veri (yağmur suları, topraktaki nem oranı, su seviyesi) ve gravite ölçer arasındaki ilişki, hidrolojik süreç ve gravite değişimleri arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla kullanılır (Torge, 1989).

Yerkabuğu, gelgit etkileri sonucunda oluşan kuvvetler tarafından esnek deformasyonlara uğramaktadır. Okyanus gelgitleri de bu deformasyonlara ek deformasyonlar oluşturur. Bu deformasyonlar fiziksel yeryüzü üzerinde gözlemlenen noktalardaki gravite değerlerinin değişimine

neden olur (Torge, 1989).

Gravimetrik karasal gelgit ölçüleri yersel ve uzaysal teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Gelgit dalgalarının genlik ve faz değişimleri; yer kürenin, gelgit sonucu oluşan kuvvetlere bir tepkisi olarak düşünülebilir. Katı bir yüzey için, kendi frekansları ile tanımlanan parçalı gelgitlerin genlikleri ve fazları astronomi sayesinde doğru bir şekilde belirlenebilir. Gözlemlenen değişimler; yer yüzeyinin, okyanusların bozucu etkilerinin ve atmosferin bozucu etkilerinin reolojikal (maddenin sıvı haldeki özelliklerini inceleyen bilim dalı) özelliklerinin bir fonksiyonudur. Karasal gelgit gözlemleri jeodezik ölçmeleri azaltmak ve jeofiziksel modeller geliştirmek için kullanılabilir (Torge, 1989).

Kutup gezinmesi (ortalama kutup noktası (CIO) yönü ile anlık dönme ekseninin hareketi), sismik süreçler tarafından bazı durumlarda sıkıştırılan esnek yeryüzünün serbest eğilimi ile meteorolojik, okyanussal ve hidrolojik süreçler tarafından oluşturulan titreşimlerin birleşimidir. Kutup gezinmesinin zamanla değişimi uzaysal yöntemlerle gözlenebilir (Torge, 1989).

4.4 Gravite Düzeltmeleri

Gravite değişimlerine getirilen düzeltmeler iki ana başlık altında toplanmaktadır.

4.4.1 Gravite Ölçerin Yapısından Kaynaklanan Düzeltmeler

Bu düzeltmeler aşağıdaki şekillerde oluşur.

- Sıfır ayarı ve ölçek faktörü düzeltmeleri,
- İç ısı düzeltmeleri,
- Drift düzeltmeleri.

4.4.1.1 Gravite Ölçer Drifti

Sabit istasyon ve arazi ölçmelerinde yay gravite ölçerleri, sıfır konumunun gösteriminde geçici bir değişim sergiler. Buna gravite ölçer drifti denir. Yayın gerilme gücünün azalması ve bazı dış etkenler drifte neden olur.

Gravite ölçer driftinin türü ve büyüklüğü aşağıdaki tanımların birer fonksiyonudur:

- Aletin türüne ve özelliklerine bağlıdır. Termolastik özellikleri nedeniyle kuvars yay sistemleri metal yay gravite ölçerlerinden daha büyük drift değerlerine sahiptir,

- Aletin yaşına ve kullanım süresine bağlıdır,
- Transport ve ölçme işlemleri sırasında değişen dışsal sıcaklık koşullarına ve özellikle ölçme sistemi üzerinde oluşturulabilecek titreşim ve şok etkilerine bağlıdır,
- Atmosferik basınç ve güç kaynağından kaynaklanabilecek voltaj değişimlerine bağlıdır (Torge, 1989).

Drifti belirleme amacıyla farklı ölçme yöntemleri oluşturulabilir. Drift polinomu belirlemek ve drift etkisini ölçülen gravite değerine eklemek için;

$g(t_0)$; driftin modellendirildiği andaki gravite okuması, t_0 ; başlangıç zamanı, $d_1, d_2, d_3, \dots, d_p$; drift katsayıları, $D(t)$; drift polinomu olmak üzere aşağıdaki eşitlikler yazılır (Torge, 1989):

$$D(t) = \sum_{p=1}^s d_p (t - t_0)^p \quad (4.1)$$

$$g(t) = g(t_0) + \sum_{p=1}^s d_p (t - t_0)^p \quad (4.2)$$

4.4.2 Fiziksel Koşullardan Kaynaklanan Düzeltmeler

Bu düzeltmeler aşağıdaki şekillerde görünür:

- Gelgit düzeltmeleri,
- Kutup gezinmesi düzeltmeleri,
- Hava basıncı ve sıcaklık değişimi düzeltmeleri,
- Yer altı su seviyesinde meydana gelen değişimler sonucu oluşan düzeltmeler,
- Yeryüzündeki kitle dağılımındaki değişimler sonucu oluşan düzeltmelerdir.

4.5 Gravitenin Fiziksel Yeryüzündeki Değişimleri ile İlgili Düzeltmeler

Yapılan gravite çalışması sonucu elde edilen ölçmelerin değerlendirilebilmesi için bazı etkilerin ölçme değerleri üzerinden giderilmesi gerekir. Bir noktada ölçülen g değerine aşağıdaki düzeltmeler uygulanmalıdır:

- Enlem etkisi ve düzeltmesi,
- Atmosferik etki ve düzeltmesi,

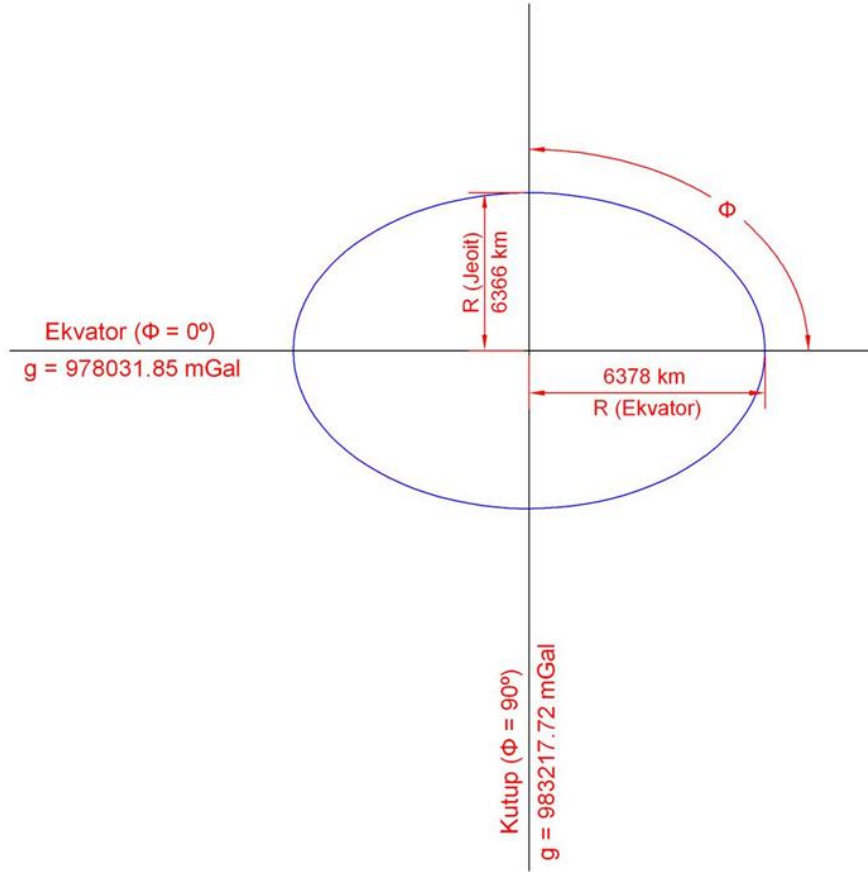
- Gravite nokta yüksekliğine indirgeme,
- Gelgit düzeltmesi,
- Yükseklik etkisi ve düzeltmesi,
- Topoğrafik etki ve düzeltmesi.

4.5.1 Enlem Etkisi ve Düzeltmesi

Yeryüzünün kutuplardaki yarıçapının ekvatordaki yarıçaptan küçük olması yani, kutuplarda basık ekvatorda şişkin olmasından dolayı g 'nin ekvatordaki değeri kutuplardaki değerinden daha küçüktür (Şekil 4.1). Buna göre;

$$\gamma = \gamma_0 \frac{1 + k \sin^2 \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (4.3)$$

eşitliği kullanılarak enleme bağlı olarak gravite değerinin değişimi hesaplanır (hatası ± 4 μgal 'dir). Burada γ_0 , ekvatordaki normal gravite değeri; φ , elipsoidal enlem; k , normal gravite sabiti; e^2 , referans elipsoidin birinci dışmerkezlik elemanıdır. GRS 80 elipsoidi için bu elmanlar şöyledir: $\gamma_0 = 978,03267715$ Gal, $k = 0,001931851353$, $e^2 = 0,00669438002290$ (Aydın, 2007).



Şekil 4.1 Enlem etkisi ve düzeltmesi

4.5.2 Atmosferik Etki ve Düzeltmesi

Fiziksel yeryüzü üzerinde oluşan farklı atmosferik basınç değerleri nedeniyle gravite değerinde değişimler gözlenir. Bu değişimler (4.5) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$P_{Z0} = 101325 * \left(1 - \frac{0,0065 * H}{288,15}\right)^{5,2559} \quad (4.4)$$

$$\Delta g_b = 0.0003 * (P_Z - P_{Z0}) \quad (\text{mgal}) \quad (4.5)$$

P_Z = Ölçülen basınç değeri,

H = Ortometrik yüksekliktir.

4.5.3 Gravite Nokta Yüksekliğine İndirgeme

Kalibre edilmiş gravite ölçer okuması (g) sıfır konumuna ilişkindir. Sıfır konumu ile gravite değeri

belirlenmek istenen nokta arasında;

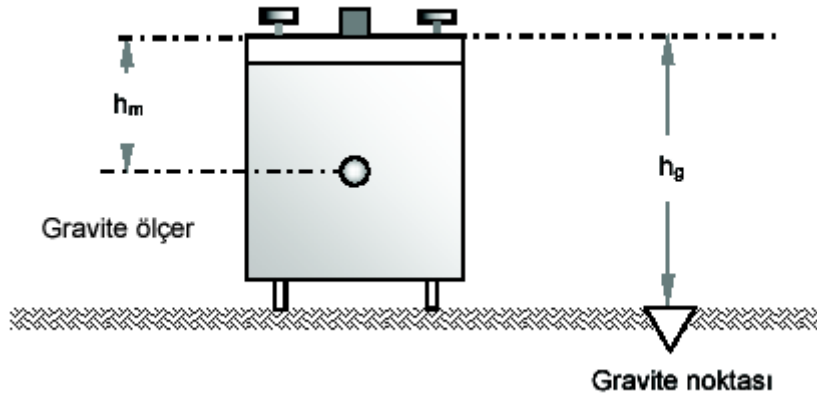
$$\delta_h = h_g - h_m \quad (4.6)$$

kadar bir yükseklik farkı bulunur. Burada h_m , gravite ölçerin üst kısmı (referans düzlemi) ile sıfır konumu arasındaki bilinen uzunluk ve h_g ise bu üst kısım ve gravite noktası arasındaki ölçülen uzunluktur (Şekil 4.2). Bu durumda g okumasına δ_h yükseklik farkı nedeniyle getirilecek düzeltme;

$$dg_b = -0.3086(\text{mGal/m}) * \delta_h \quad (4.7)$$

olur. Böylece nokta yüksekliğine indirgenmiş gravite ölçer okuması aşağıdaki biçimde elde edilir (Aydın, 2007):

$$g_{ind} = g - dg_h \quad (4.8)$$



Şekil 4.2 Gravite nokta yüksekliğine indirgeme (Aydın, 2007)

4.5.4 Yükseklik Etkisi ve Düzeltmesi

Serbest hava anomalileri, kısa dalga aralıkları içerisinde topoğrafik kütle etkisi nedeniyle nokta

yüksekliği ile doğru orantılıdır (Torge, 1989). Bu etkileşim (4.9) eşitliğinde doğrusal olarak tanımlanmıştır:

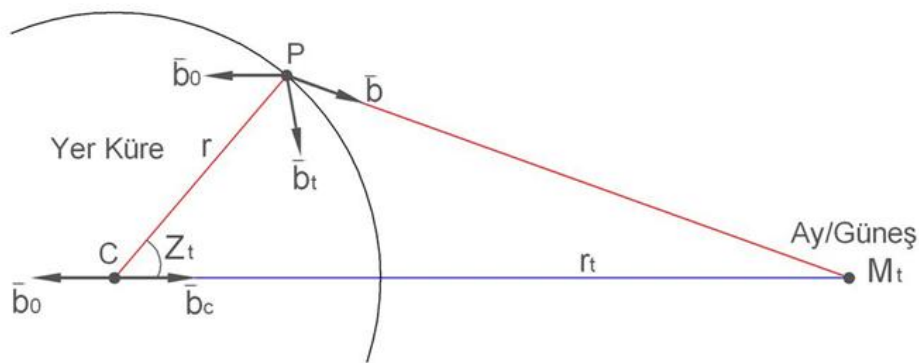
$$\Delta g = a + bH \quad (4.9)$$

Burada; a katsayısı yerkabuğundaki kütle dağılıma bağlıdır ve b ise topoğrafik kütlenin (topoğrafik ve yer altı kütlelerinin dağılımından kaynaklanan bölgesel sapmalar) yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Yine burada b katsayısı, $0.7 \cdot 10^{-6} \text{ sn}^{-2}$ ila $1.4 \cdot 10^{-6} \text{ sn}^{-2}$ arasında değişir ve ortalama $1 \cdot 10^{-6} \text{ sn}^{-2} = 1 \mu\text{msn}^{-2}$ değerindedir.

4.5.5 Gelgit İndirgemesi

Gök cisimlerinin çekim etkileri fiziksel yeryüzünde gelgit deformasyonlarına neden olmaktadır. Fiziksel yeryüzünde gerçekleştirilen her türlü gravite ölçüsü bu deformasyonun etkilerini içerir ve 200 μGal 'e kadar ulaşabilen bu etkilerden ölçülerin arındırılması gerekir; bu işleme gelgit indirgemesi adı verilir.

Gelgit ivmesi b_t , yeryüzündeki her noktaya eşit olarak etkiyen (b_0) merkez kaç ivmesi ve gelgiti oluşturan karasal kütlenin (güneş, ay) değişken gravitasyonu (b) arasındaki farkı periyodik olarak takip eder (Şekil 4.3). Sonuç olarak; sırasıyla dünyanın, güneşin ve ayın dönmesiyle coğrafi merkez (C), içersindeki uygun gravite merkezi etrafında gravitasyon yardımıyla dengelenir (sistem dengesi).



Şekil 4.3 Gelgit İvmesi

Katı yer yüzeyi için, b_t etkilenen noktanın konumuyla beraber ayın ve güneşin de konumları ve kütleleri kullanılarak hesaplanabilir. Ayın ve güneşin gelgit potansiyeli (V_t) aşağıdaki eşitlik

yardımla ifade edilebilir.

$$b_t = b + b_0 = \text{grad } V_t \quad (4.10)$$

Yer yüzeyi gelgit etkisiyle elastik deformasyonlara uğrar. Bunun yanı sıra okyanus gelgitleri de bazı yüklenmelerle ek deformasyonlar oluşturur. Bu deformasyonlar küre yüzeyinde ölçülen gravite değerinde farklılıklar oluşturur (Torge, 1989).

Yer yüzeyi üzerinde bulunan küresel simetrik ve dönmeyen bir elastik kütle için karasal gelgitler “Love Teoremi” ile açıklanabilir. V_t , etkilenen P noktasında bir Δr_{el} kadar radyal taşınmaya neden olur. Buna ilişkin kütle değişimi de bir V_d deformasyon potansiyelini doğurur. V_d ve Δr_{el} sırasıyla V_t gelgit potansiyeli ya da Δr_t yer değiştirme ile orantılıdır. Bu durumda elastik yer yüzeyine ilişkin gelgit potansiyeli aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$V_{el} = V_t + V_d - g \Delta r_{el} = V_t (1 + k - h) \quad (4.11)$$

Burada, $k = k(r)$ ve $h = h(r)$ orantı faktörleridir ve gelgit deformasyonunun küresel harmonik genişleme derecesine bağlıdır (Torge, 1989).

Ani ve süreksiz sismik değişimler bir kenara bırakıldığında gelgit etkisi gravite ölçmelerin etkiyen en büyük değişkendir. Bu etkinin belirlenmesi için ise gelgit potansiyeli iyi analiz edilmelidir. Günümüzde ayın, güneşin ve diğer gezegenlerin konumlarına bağlı olarak gelgit potansiyelini hassas bir şekilde belirlenmesine olanak sağlayan bazı modeller kullanılarak katı yer yüzeyinde oluşan gravimetrik gelgit değişimleri hesaplanabilir.

Yerküre, homojen olmayan ve tamamıyla katı bir kütle olmadığı için astronomik kuvvetlere karşı karmaşık bir yönde tepki vermektedir. Yerkürenin bu kuvvete karşı oluşturduğu tepki deformasyonlara (karsal gelgitler), boşluktaki konumunun değişimine (nutasyon ve presesyon) ve dönme hızında bazı değişimlere yol açar. En önemli gelgit parametreleri, frekansla orantılı gravimetrik gelgit faktörü (δ) ve faz çarpanı (κ) olarak bilinir. Frekans alanında δ , elipsoit yüzeyine dik olarak meydana gelen gelgit kuvvetleriyle düşey yönde oluşan gelgit değişimleri arasındaki transfer fonksiyonudur. Bu değer, yer yüzeyinde oluşan deformasyonlar ve yer altındaki kütle dağılımları şeklinde açığa çıkan karasal kütlelerin direkt etkileşimlerine bağlıdır. Faz çarpanı ise, ölçülen ve astronomik dalga arasındaki farkı temsil eder. Tamamıyla elastik bir yer yüzeyi için $\delta \cong 1.16$ ve $\kappa = 0$ olmalıdır. Bu parametreler, ölçmeler ve her frekansta oluşacak gelgit kuvvetlerinin

modellenmesiyle ortaya koyulabilir.

Günümüzde karasal gelgit kuvvetlerinin modellenmesinde farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden ikisi “Berger Metodu” ve “ETGTAB Metodu” şeklindedir. Berger metodunda gelgit potansiyeli harmonik olmayan bir hesaplama yöntemi kullanılır. ETGTAB modeli bu çözümü kullanmaz ve gelgit frekansına ait bir sinüs ve kosinüs sınırlı toplamını içerir (harmonik yöntem, günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır). Berger yönteminde, gelgit potansiyeli zamanda direkt olarak hesaplanır, her zaman noktasında ayın ve güneşin konumları belirlenir ve bu şekilde bilinen bir istasyonda gelgitler direkt olarak hesaplanabilir. Küre harmoniği içerisinde genişletilmiş bir gelgit potansiyelinin Fourier serisine açılımı bir gelgit potansiyeli serisi şeklinde sonlanır. ETGTAB modeli bu mantığa dayanmaktadır ve 1200 dalga fonksiyonu içeren “Tamura” potansiyel modelini kullanmaktadır. Bu sayede mutlak gravite ölçmeleri yüksek hassasiyette gerçekleştirilmektedir (Van Camp, 2003).

5. A10 MUTLAK GRAVİTE ÖLÇER

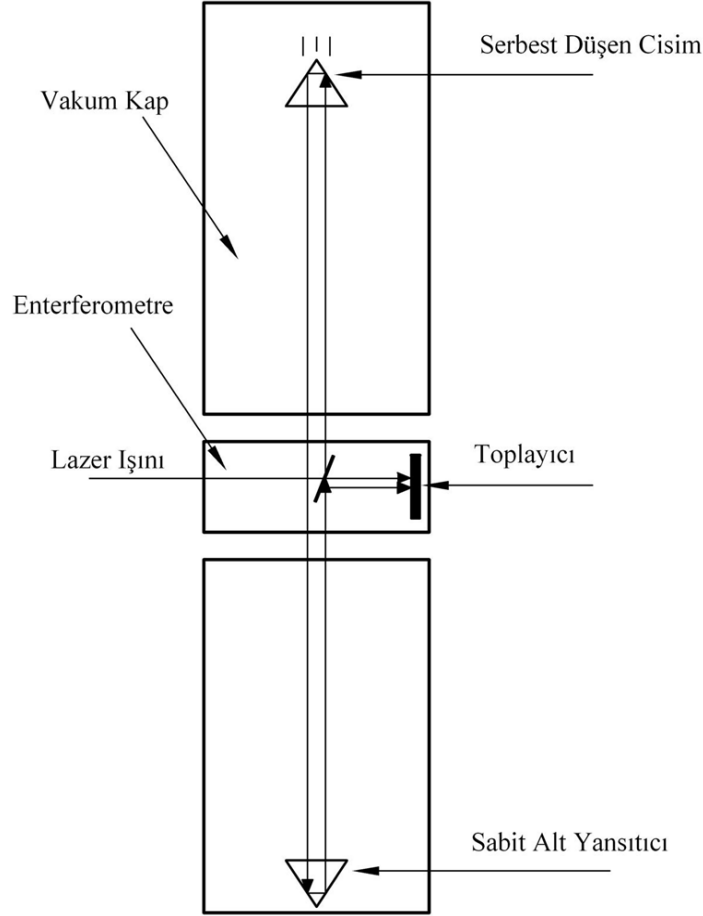
5.1 Aletin Yapısı ve Kullanımı

A10 mutlak gravite ölçer, arazi uygulamalarında mutlak gravite ölçerler arasında yapılan ölçmelerde 10 saniyelik bir düşüş aralığında yaklaşık 30 dakika ölçüm yapıldığında 1 μGal hassasiyet ve 10 μGal doğruluk sağlamaktadır. Alet dünya çapında kullanılabilir ve -15 °C'den 40 °C'ye kadar ölçüm yapabilme olanağı sunmaktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 A10 mutlak gravite ölçer

Temel prensibi, vakumlanmış bir kap içerisinde yansıtıcı bir cismin serbest düşürülmesine dayanır. Aletin orta bölümünde bulunan bir interferometre yardımıyla oluşturulan lazer ışını serbest düşen cismin gravite ivmesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Aletin temel yapısı

Vakumlanmış kap içerisinde bulunan mekanik bir sistem sayesinde serbest düşürülen cisim, düşeyde ortalama 7 cm yol almaktadır. İnterferometre lazerin dalga boyunu uzun periyotta sabit tutacak hassasiyette bir sistem barındırmakta ve gravite etkisiyle düşmekte olan cismin konumunu hassas şekilde hesaplamak için atomik saat kullanılmaktadır. Bu şekilde yer çekimi ivmesi direkt olarak hesaplanmaktadır.

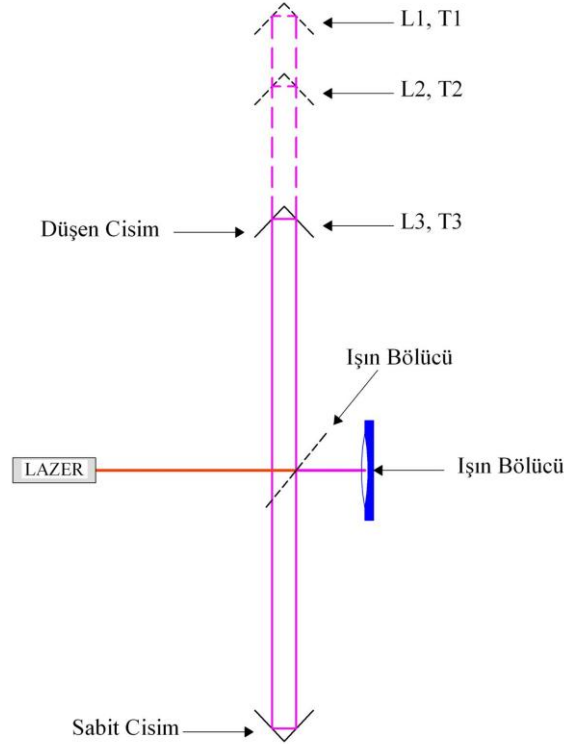
Cisim düşerken interferometrede optik saçılımlar (fringe) oluşmaktadır. Zaman ve konum çiftlerinin hassas olarak belirlenmesi için saçılımları sayan ve zamanlarını belirleyen bir atomik saat kullanılmaktadır. İnterferometre, kutuplaşması dengelenmiş bir helyum neon (He-Ne) lazer kullanarak mesafeyi, rubidyum atomik saati ise hassas olarak zamanı belirlemeye yarar. Bu yöntemde bağıl gravite ölçerlerde olduğu gibi drift ve alet ağırlığı ile ilgili düzeltmeler yapılması gerekli değildir.

5.1.1 Ölçme Prensibi

Gravite değerini belirlemenin en basit yolu, direkt olarak serbest düşen bir cismin gravite ivmesini ölçmektir. İşlem, düşen (ya da fırlatılan) bir cismin önceden belirlenmiş bir mesafe boyunca aldığı

zamanın belirlenmesi mantığına dayanır. Alet gerekli değerleri SI birim sisteminde, mesafe için metre ve zaman için saniye cinsinden hesaplar. Bu değerler dünyanın her yerinde çok yüksek hassasiyette elde edilecek şekilde hesaplanabilmektedir.

Şekil 5.3 de, A10 mutlak gravite ölçer ile gravite değerinin nasıl ölçüldüğü gösterilmektedir. Düşme bölmesinin (dropping chamber) en üst kısmında bulunan bir köşeli küp ters yansıtıcı (retro-reflector) serbest bırakılır. Sabit dalga boylu bir lazer ışını, lazer bölücü yardımıyla ikiye bölünerek düşmekte olan yansıtıcıya ve alt bölümde sabit olarak bulunan yansıtıcıya iki farklı ışın olarak akar. Sabit yansıtıcının görevi sisteme bir referans ışın sunmaktır. Kütle gravite etkisi altında bölmenin alt kısmına doğru ivmelenirken ham fringe sinyali fotodiyot yardımıyla belirlenir. Ham fringe sinyalinin içerisindeki optik fringler, kalibre edilmiş zaman ve mesafe çiftlerinin oluşturulması için kullanılırlar.



Şekil 5.3 Mutlak g değerinin direkt ölçümü

5.1.2 Arazi Ölçmeleri için Konum Belirleme

Ölçmenin ilk adımı, alet için uygun bir konum belirlenmesidir. İdeal bir konum için, otomobil ve tren trafiği gibi insanlar tarafından oluşturulan gürültü alanlarından sakınılmalıdır. Gürültüden

kaçınma ve stabilite sağlamak amacıyla noktanın taş yatağı alanlarında seçilmesi daha uygun olur. Kalibrasyon bazları; nehirler ve göller gibi su havzalarından uzaklarda konumlandırılmalıdır. Pürüzlü yüzeylerde bir üçayak kullanılabilir (sahada sıklıkla 10°'lik eğim ve 2 cm'lik pürüzlülükle karşılaşılır). Aleti güneş ışığından ve yağmurlardan korumak amacıyla çadır kullanılmalıdır (Şekil 5.4). Ayrıca ani sıcaklık değişimlerinden de kaçınılmalıdır.



Şekil 5.4 A10 mutlak gravite ölçer ve kötü hava koşullarından kaçınma

5.2 Aletin Temel Bileşenleri

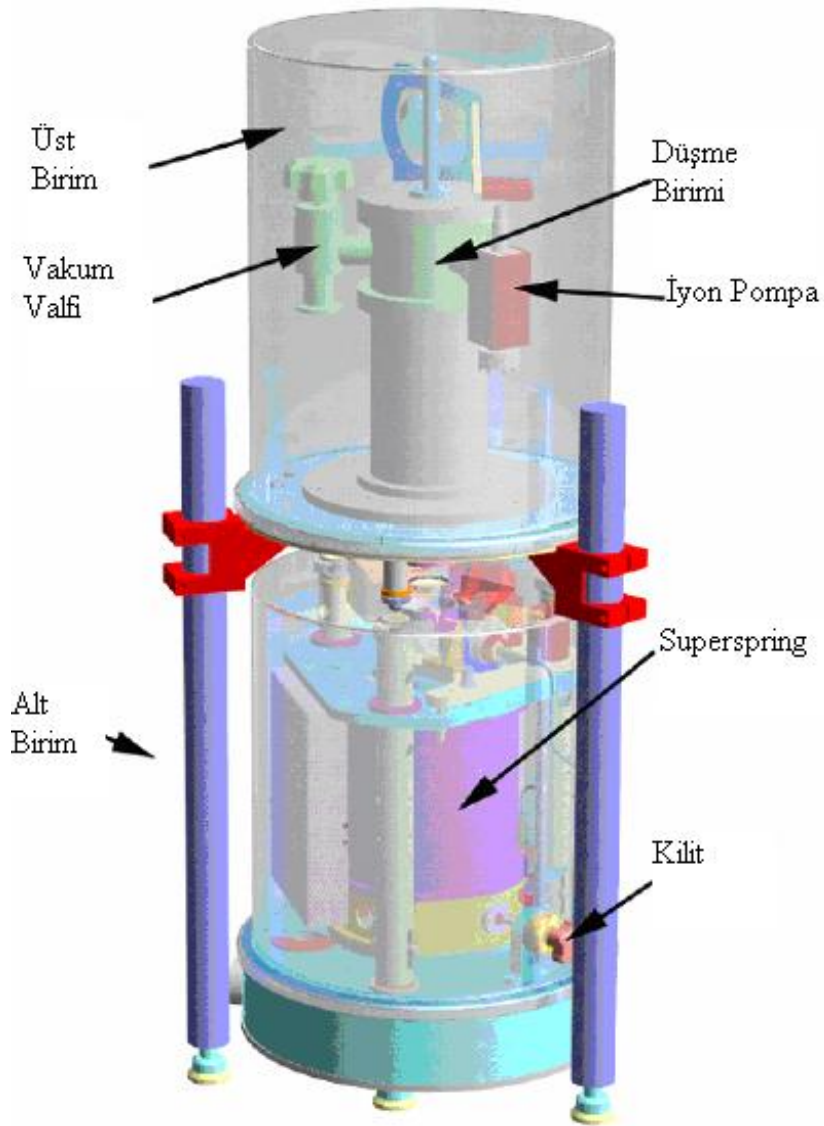
Alet aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır (Şekil 5.5 – 5.8):

- Düşme birimi (düşme bölmesi, sıcaklık kontrolü),
- İnterferometre ya da IB (lazer, yay, interferometre, düzeç, sıcaklık kontrolü),
- Bilgisayar (kutu tipi),
- Kablolar,
- Taşıma çantaları,
- Elektronik aksam,
- Düşey düzeç ayarlayıcı (Işın düşeyleme aleti “Beam Checker”),
- Arazi tablası (Tripod),
- Turbo pompa,

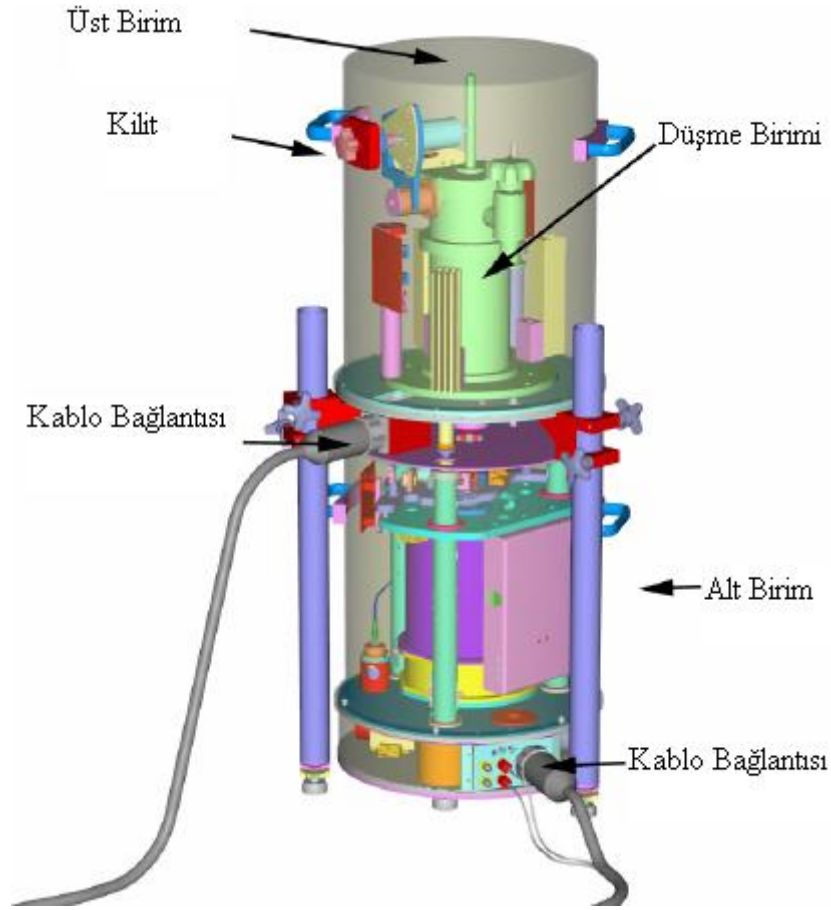
- 12 VDC derin devirli batarya,
- Batarya şarj aleti.

Tercihe bağlı bileşenler:

- Laboratuar ortamında kullanılacak güç kaynağı (100-240 VAC),
- Rüzgâr & yağmur koruması (çadır),
- Rüzgâr & güneş koruması (gölge kutusu),
- Ayırıcı kılıflar,
- Arazi osiloskobu.



Şekil 5.5 A10 mutlak gravite ölçerin temel görünümü



Şekil 5.6 Kablo girişleri ile A10 mutlak gravite ölçer



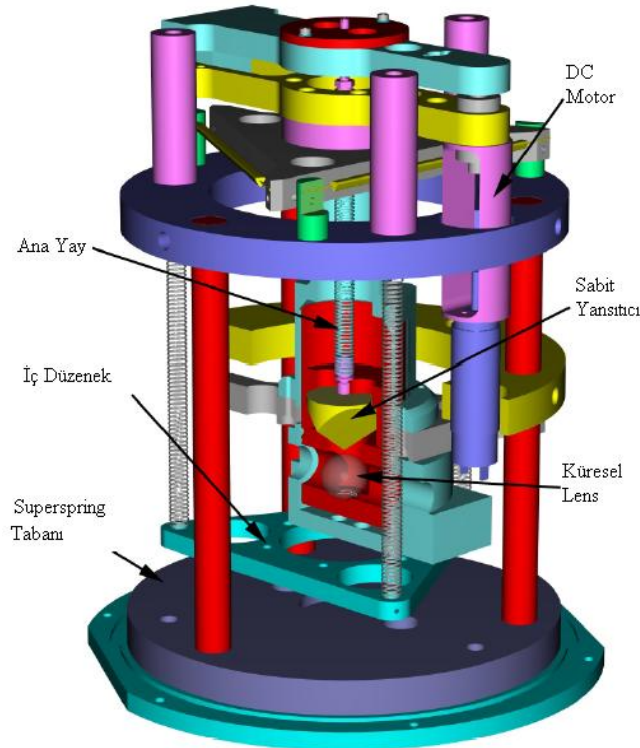
Şekil 5.7 Elektronik kontrol panelinin önden görünümü



Şekil 5.8 Elektronik kontrol panelinin arkadan görünümü

5.2.1 Süperspring Teorisi

Süperspring, aletin alt bölümünde bulunan sabit yansıtıcıyı yüksek frekanslı düşey kabuk hareketlerinden korumak amacıyla tasarlanmış uzun periyotlu, aktif bir sismik izolatördür (Şekil 5.9). Bu sayede lazer ışınının uzunluğundaki değişim sadece düşen objenin ivmesiyle ilgili olmaktadır.



Şekil 5.9 Süperspring yapısı

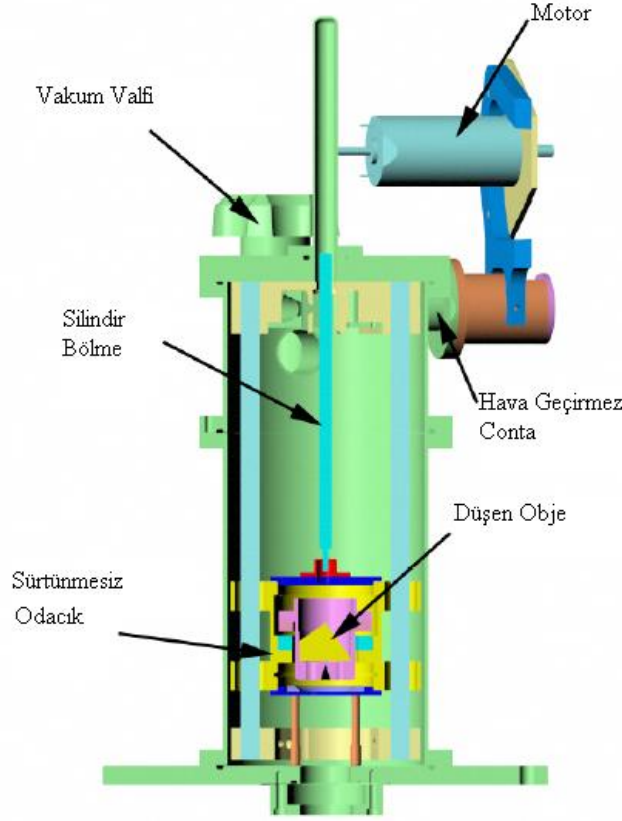
Süperspring, çift kademeli bir yay sistemidir. İç düzenekte bulunan platform, süperspringin ana yapısını yukarıya asılı tutar. Bu yapının ortasında bulunan yay ise ana yay olarak adlandırılır ve yansıtıcı cismi tutar. Bu yay yaklaşık olarak 10 cm boyundadır ve 2 Hz’lik doğal bir frekansa sahiptir. İç kısımda bulunan destek platformu aktif olarak otomatik (servo) kontrol edilebilen bir yapıdadır ve bu süperspring kütesinin düşey olarak hassas konumlanmasını sağlar. Ana yayın uzunluğu tutulabildiği kadar sabit tutularak işlem sonunda yaklaşık olarak 30 saniyelik bir periyot elde edilir. Bu sayede süperspring bu değerden fazla periyot aralıklarına sahip yer kabuğu hareketlerinin sabit yansıtıcıya olası etkilerini izole etmiş olur. Süperspring küresel detektör sistemi iç kısımda bulunan destek bölmesine bağlı olan süperspring kütesinin hareketlerini algılar. Destek bölmesine yerleştirilmiş olan ve kızıl ötesi ışın yayan bir diyot (LED), ışının süperspring kütesine bağlanmış cam bir küre boyunca akmasını sağlar. Küre, bu ışını destek bölmesinin tam karşısında bulunan ayırıcı fotodiyot detektör üzerine odaklar. Ayırıcı detektörden çıkan ışın; düşen obje ve iç bölme arasında hiçbir bağıl hareketi engellemeyecek biçimde, destek bölmesini düşey yönde geçerek otomatik (servo) bir devre oluşturacak şekilde geri gönderilir. Burada hareketi sağlayan mekanizma, destek bölmesi ve süperspring tabanı arasında konumlandırılmış doğrusal bir bobin şeklindedir. Bu durumda düşey yer hareketleri meydana geldiğinde bu doğrusal bobin destek bölmesini yukarıya ya da aşağıya hareket ettirerek ana yayın uzunluğunu sabit tutacaktır. Bu aparat, yukarıda bulunan V şeklinde dizilmiş ve aşağıda üçgen biçiminde dizilmiş bir düzenek içersine yerleştirilmiş beş adet dirsek (üçgen miller) kullanılarak meydana getirilmiş doğrusal bir sistem yardımıyla sadece düşey yönlü hareket yapabilmektedir. Otomatik (servo) devre kontrol panelinde bulunan “SS SERVO” tuşuna basılarak aktif hale getirilir. “SS SERVO” özelliğinin ve aletin alt kısmında bulunan kilidin kapalı olması durumunda yayın sistemin doğal frekansı (yaklaşık 2 Hz) serbest şekilde asılı kalacağı ve büzülüp açılacağı unutulmamalıdır.

Süperspring, düşen objenin kütesini düşey yönde menziline tutmaya yarayan (yayı sıfır konumuna getirmek) bir DC motor kullanır. Bu motor kontrol panelinde bulunan “SS ZERO ON” tuşuna basılarak aktif hale getirilir. Gravite ölçer, önceki konumundan belirgin bir gravite değişimi olacak başka bir konuma taşındığında yayın sıfır konumuna gelmesi birkaç dakika alacaktır. Sistemde kalıcı bir hasara neden olmasa da servo aktifken süperspring sıfır konumuna getirilmemelidir.

5.2.2 Düşme Birimi (Dropping Chamber)

Düşme birimi sürtünmesiz bir ortam olup köşeli küp şeklinde olan düşen cismin bulunduğu yerdir (Şekil 5.10). Bu sürtünmesiz birim içersinde bulunan bir döngü sistemi cismin düşmesini, düşey hizada kalmasını ve tutulmasını sağlamaktadır. Lazer ışını, birimin alt kısmında bulunan bir pencereden içeriye girerek düşen cisme ulaşır ve buradan yansıyarak yine aynı pencereden

interferometreye döner.



Şekil 5.10 Düşme birimi genel görünümü

Düşme eyleminin başında sürtünmesiz odacık g değerinden daha büyük bir değerle aşağı yönlü ivmelenir. Normal olarak, bu süreçte odacık ve düşen obje birbirlerinden tamamiyle ayrı bir durumda olacaklardır. Sonrasında, odacık yavaşlayıp objeyle aynı düzeye fakat birkaç milimetrelik kesin bir ayrılık seviyesine gelecektir. Son olarak, en alt kısımda odacık objeyi hassas bir şekilde yakalayacaktır. Bir kodlayıcı yardımıyla odacığın konumunu ve interferometre (fringe) yardımıyla da düşen objenin konumunu belirleyerek odacık ve obje arasındaki mesafe hesaplanır. Serbest düşme eylemi süresince, düşme birimi içerisinde bulunan odacığı kontrol etme amacıyla kullanılan bir otomatik (servo) motor döngü sistemi yardımıyla odacık ve obje arasındaki mesafe sabit tutulur.

Düşen obje, köşeli küpün optik merkezine sabitlenmiş bir destek ünitesiyle çevrelenmiş bir ters yansıtıcı şeklindedir. Köşeli küp, giren ışının tamamen paralel olarak ters yansımısını sağlayan üç yüzeyden oluşmaktadır.

İşleyiş mekanizması, düşme birimi içerisinde bir destek ünitesi şeklindedir ve bir DC otomatik (servo) motor yardımıyla çalıştırılan, yukarı ve aşağı hareket edebilen sürtünmesiz bir kap biçimindedir. Birim yine aşağıya ve yukarıya hareket edebilen bir silindirik bölmeyle motora

bağlanmıştır. Motor; birimin dış kısmında konumlandırılmıştır ve bir şaft kullanılarak dağılmış çok küçük manyetik elemanlardan oluşan bir sıvı yardımıyla hava geçirmez bir contaya bağlanmıştır. Motor ayrıca; düşme eylemine ilişkin kontrol paneline, çarkın konumuna ve hacmine ait doğru bilginin akmasını sağlayan optik bir şaft kodlayıcısını da çalıştırır.

5.2.2.1 Düşme Eylemine İlişkin Kontrol Paneli

Adından da anlaşılacağı üzere kontrol paneli sistemi harekete geçiren motoru kontrol eder ve kullanıcı ve düşme birimi arasındaki ilişkiyi kuran sistemdir.

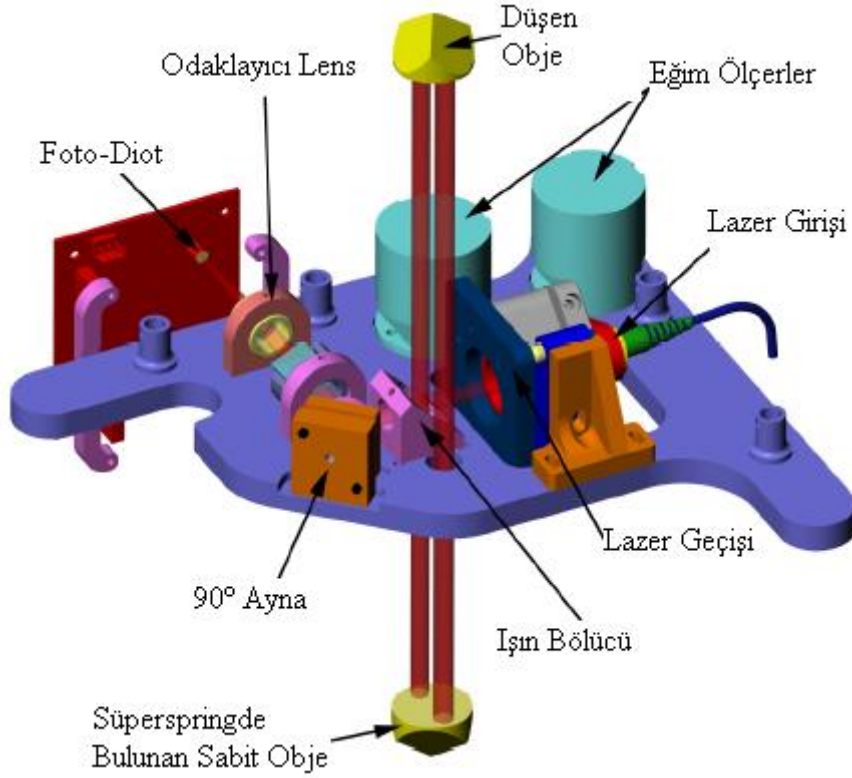
Kontrol paneli düşme birimini üç farklı şekilde işletir. Bunlar; OSC, DROP ve THROW (henüz sisteme dâhil edilmemiştir) modlarıdır. Operatör ayrıca, RESET/INIT ve TRIGGER tuşları kullanılarak düşme işlemine ilişkin başlatma işlemini de gerçekleştirir.

DROP modunda kontrol paneli, odacığı belirli bir hızda hareket ettirmek ve düşen objeyi serbest düşme eylemi boyunca düşey hizada tutmak (düşen obje ve odacık arasında belirli bir mesafe elde etmek için) amacıyla odacığı ve objeyi belirli bir yüksekliğe çıkartmak için düşme birimindeki motoru kullanır. Bir düşüşü başlatmak için, kontrol panelinden DROP tuşuna basılıp akabinde STAND BY ışıkları sönene kadar RESET/INIT tuşuna basılı tutulup son olarak ta TRIGGER tuşuna basılarak düşürücü kilitlenmelidir. Bu şekilde odacık yukarıya kaldırılacaktır. Tekrar TRIGGER tuşuna basılarak obje serbest düşürülür. DROP modunu kapatmak için, RESET/INIT tuşuna basılır ve STAND BY ışıkları kapanır. Bu şekilde trigger etkisiz hale getirilecektir.

OSC (salınım) modu, yavaş ve sabit bir şekilde birleşen fringe sinyallerini oluşturmak için odacığı yükseltip alçaltmaya yarar (obje hiçbir zaman serbest düşme yapmayacak şeklide). Bu fringe sinyalinin genliği sistemin hizada kalmasını sağlar. OSC modunu başlatmak için, öncelikle düşürücünün kilitli olmasına dikkat edilmelidir. Kontrol panelinden OSC modu seçilir ve RESET/INIT tuşuna basılır. Kontrol panelinde bulunan düşmeye ilişkin LED ışıklarının yavaşça hareket ettikleri görülecektir. OSC Modunu kapatmak için, istenilen zamanda TRIGGER tuşuna basılır. Odacık ilk aşağı indiğinde otomatik olarak orada duracaktır.

5.2.3 İnterferometre Teorisi

A10 interferometresi; alt birimin üst kısmında, düşme birimi ve süperspring arasında konumlandırılmıştır (Şekil 5.11). İnterferometrenin fonksiyonu, lazer ışınını test ve referans ışınlar olmak üzere ikiye bölmek ve yine optik detektör üzerinde bu ışınları toplamaktır.

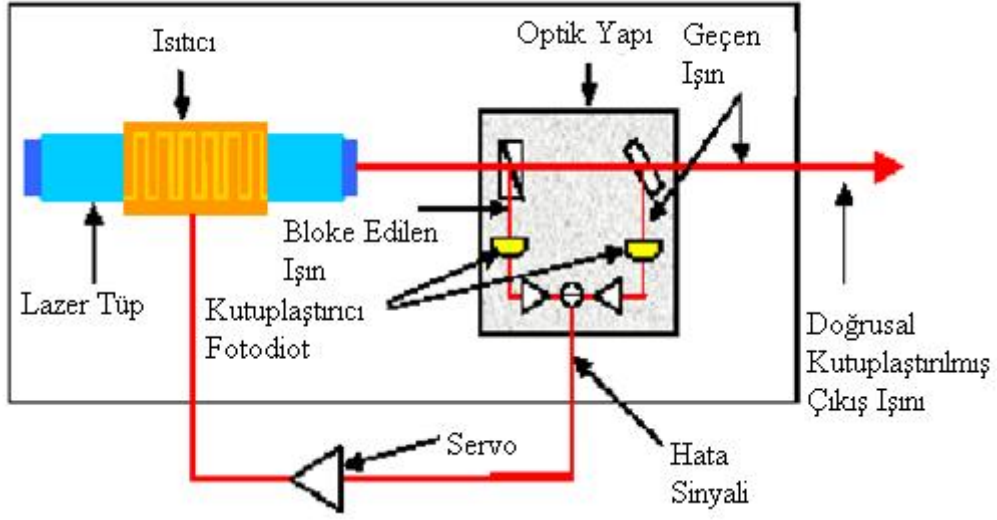


Şekil 5.11 İnterferometrenin genel görünümü

Lazer ışını, kutuplaştırılmış optik fiber yapıda olan lazer giriş biriminde sisteme girmektedir. Bu giriş, lazer ışınının interferometreye uygun bir açıya ayarlanmasını sağlar. Lazer bölücü de lazer ışınının ikiye bölünmesini sağlar. Bu bölünmeden sonra ışının yaklaşık %60'ı düşme birimine diğer %40'ı da foto-detektöre transfer edilir. Işın bölücünden sonra ışınlar tekrar bir araya gelir. Bu üst üste binen ışınlar sonrasında bir ayna tarafından foto-detektöre iletilir. Detektör ışının yoğunluğu ile orantılı bir voltaj üretir ve bir ayrıştırıcı yardımıyla her fringe sıfır konumunda olan sinyaller (Transistor, Lojik ya da TTL) üretilmektedir.

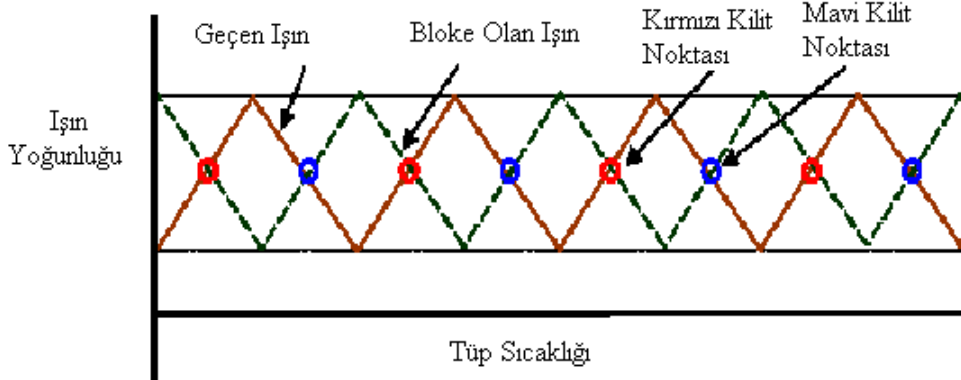
5.2.4 Lazer Teorisi

A10 mutlak gravite ölçer, kutuplaştırılmış bir HE-Ne lazeri kullanılır. Frekans stabilitesi, lazer tüp içerisinde bulunan ve iki adet TM00 modunun yoğunluklarının dengelenmesiyle elde edilir. Bu iki mod, bağımsız foto-detektörler tarafından ayrılabilmesi amacıyla ortogonal düzlemsel bir şekilde kutuplaştırılmış ışınlar şeklindedir. Işının kavis uzunluğu lazer tüp çevresine yerleştirilmiş bir ısıtıcı kullanılarak sıcaklığın değiştirilmesi suretiyle ayarlanır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 ML-1 iç yapısı

Bu uzunluktaki değişim, minimumdan maksimum seviyeye doğru değişen bloke olmuş ve geçmiş ışınların yoğunluklarını etkiler (Şekil 5.13). Fark sinyali (bloke edilmiş-geçirilmiş) lazer kavis uzunluğunun kilitlenmesinde kullanılır. Şekil 5.13'de de görüldüğü gibi kırmızı ve mavi olmak üzere iki olası kilit noktası bulunmaktadır. Bu noktalar rastgele seçimlerdir ve kesinlikle dalga boyundaki değişimler olarak nitelenmemelidir.



Şekil 5.13 Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak iki kutuplaşmanın yoğunluğu

Lazer, denge uzunluğuna gelene kadar yaklaşık 1 saat ısıtılmalıdır. Bu noktada, lazer iki modundan birine kilitlenebilir. LASER CTRL bölümü MANUAL durumuna getirilip LASER LOCK aktif hale getirildiğinde lazer kilitlenecektir. Veri toplamıyorken denge uzunluğunu sabit tutmak amacıyla lazer ısıtıcı açık tutulabilir. LASER CTRL bölümü REMOTE durumuna getirildiğinde (Sol kısımda

bulunan LED ışığı) g-8 yazılımı otomatik olarak kilitleme ve ısıtma işlemlerini düzenleyecektir. Eğer lazer kilitli değilse lazer gücünde (dolayısıyla fringe genliği) dalgalanmalar meydana geleceği unutulmamalıdır.

Sıcaklık değişimleri lazerin genliğinde yüzlerce MHz'lik değişimlere neden olur. Bu nedenle lazer, sürekli olarak belli bir sıcaklıkta bulunan farklı bir bölmede bulunmaktadır. Lazer denge sıcaklığına ulaşmadan veri toplamaya başlamak sağlıklı değildir.

Lazer, kutuplaştırılmış optik fiber bir düzeneğ üzerinden geçerek interferometreye ulaşır. Işın 5 eksenli bir sistem üzerinden bu fiber düzeneğe giriş yapar. Bu sistem fiber düzeneğin, lazer ışınının konumuyla (2 eksen), açısıyla (2 eksen) ve odağıyla (1 eksen) eşleşmesini sağlar.

Son olarak; kir, çöp ve parmak izi gibi etkiler lazer optiği üzerinde olumsuz etkiler yapabilmektedir. Bu nedenle lazer bölmesini temiz tutmak güvenilir veri elde etmek için çok önemlidir.

5.3 Aletin Kurulması

Öncelikle, alt birim araçta bulunan kutusundan çıkarılır ve ölçülecek nokta üzerine koyulur. Eğer yüzey, pürüzlü ya da eğimli ise ölçülecek nokta üzerine tripod koyularak ölçme yapılabilir. Tripod düzeç yerine gelene kadar ayakları ile oynamak suretiyle yerleştirilmelidir. Yine atletle beraber verilen bir demir çubuk yardımıyla tripodun üst kısmından ölçülecek noktaya doğru bir mesafe ölçümü yapılır. Ölçülen bu mesafe tripodun kendi yüksekliğine (2.95 cm) eklenerek yazılıma girilir ve ölçüm değerlendirme sürecinde kullanılır. Sonrasında alt kısım ayakları doğru şekilde oturularak tripod üzerine yerleştirilir.

Birimi düzeçlemek için AUTO LEVEL tuşuna basılır (LED ışığı yanacaktır). İnterferometre tabanının ilk eğimine bağlı olarak bu işlem 5 ila 45 saniye arası bir zaman alır. Işını düşey düzece sokmaya yarayan bir sistem (beam checker) kullanılarak ışın düşey doğrultuya getirilir.

Sonrasında bu alet alt birimin üzerinden çekilir ve üst birimin ayakları, alt birimin üzerinde bulunan üç yuvaya gelecek şekilde dikkatlice yerleştirilir. Bu işlem yapılırken aletin üzerinde bulunan işaret çıkartmaları kullanılabilir.

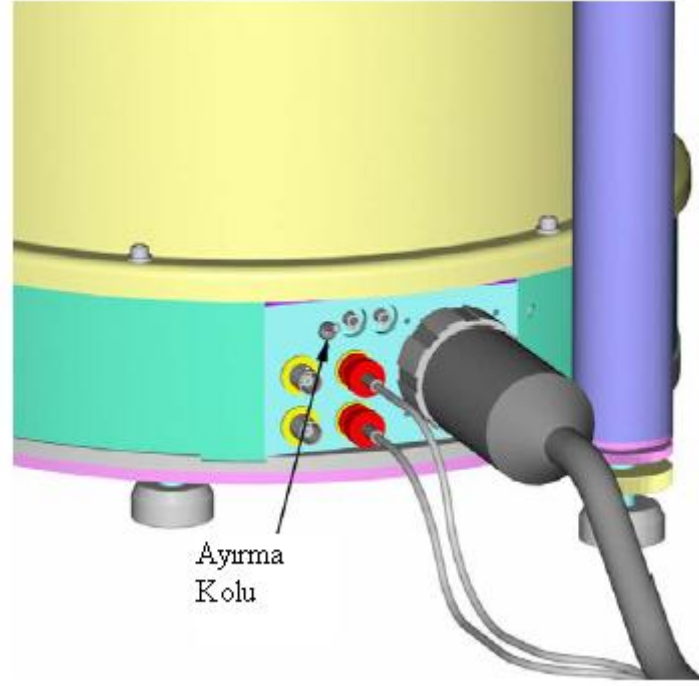
Düşme biriminin kilidi açılır. Bu işlem sırasında kilit başlığının yuvasından 5 mm kadar oynaması gerekmektedir.

Bu aşamada iki birim de birbirleriyle direkt bir temas içersindedir. AUTO LEVEL özelliğinin hala açık olması dikkat edilip üst birimin ayaklarının alt birimin üzerinde bulunan yuvalara düzgün bir şekilde oturmuş olmasına özen gösterilmelidir.

Aletin alt biriminin kablo girişinin yanında bulunan ayırma kolu aşağı yönlü hareket ettirilerek iki

kap birbirinden tamamen ayrılır (Şekil 5.14). Bu ayırım, düşme biriminde oluşabilecek herhangi bir titreşimin alt birimde bulunan süperspringe ulaşmasını engelleyecektir. Bu durum doğru işlem için hayati önem taşımaktadır. Ayrılma işlemi sona erdiğinde ayırma kolu hareket ettirildiği yönde bırakılmalı eski konumuna tekrar getirilmemelidir.

Son olarak süperspringin kilidi de yavaşça açılıp AUTO LEVEL kapatılmalıdır.



Şekil 5.14 İki kabın birbirinden ayrılması

Bu aşamadan sonra, kontrol panelinden ölçümü başlatma işlemine geçilir. İşlemi gerçekleştirmek için önerilen iki farklı mod bulunmaktadır. Bunlardan ilki OSC, ikincisi ise DROP modlarıdır. OSC modu, odacığı sabit bir hızla aşağı ve yukarı hareket ettirerek interferometreden çıkan fringe sinyalinin boyutu belirlenir. Bu mod, interferometreyi hizalarken kullanılır ve neredeyse sabit ve düşük frekanslı bir fringe sinyali elde etmeye yarar. OSC modu, sadece ilk kurulum aşamasında optik sistemin istenilen düzeyde işlemlerini sağlamak amacıyla kullanılır.

DROP modu ise odacığın gravite ölçmesi boyunca tekrarlı düşüler yapmasını sağlar. Odacığın önceden belirlenmiş bir yüksekliğe çıkartılıp aniden bırakılmasıyla serbest düşürülen obje de gravite ivmesi etkisi altında serbest düşürülmüş olur ve bilgisayar otomatik olarak bu işlemi tekrarlar.

Mod değiştirmeden önce, kontrol panelinden RESET moduna geçilir. Bunun için RESET/INIT

tuşuna basılır. Bu şekilde motor da durdurulmuş olacaktır. OSC ya da DROP modlardan birini seçmek için kilit başlığı döndürülür ve INIT tuşuna basılır. RESET/INIT ışığı sönüp seçilen işlemin ışığı yanacaktır. Başka bir moda geçmeden önce RESET tuşuna basılması önemlidir.

OSC modda, odacık basit olarak sabit hızda aşağı ve yukarı hareket etmektedir. OSC modu bitirilirken TRIGGER butonuna istenildiği zaman basılması yeterlidir. Bu şekilde odacık ilk aşağı indiği zaman sistem sonlanacaktır. OSC moddan çıkmak için her zaman TRIGGER tuşuna basılması unutulmamalıdır.

5.3.1 Saçılım Genliğinin Ayarlanması

Saçılım (fringe), test ve referans ışınlar arasındaki farklılığı ifade eder. Saçılım genliğindeki değişim özellikle sistemin düşey dengeye getirilmesi konusunda lazerin gücünün de yeterli olmasıyla ilişkilidir.

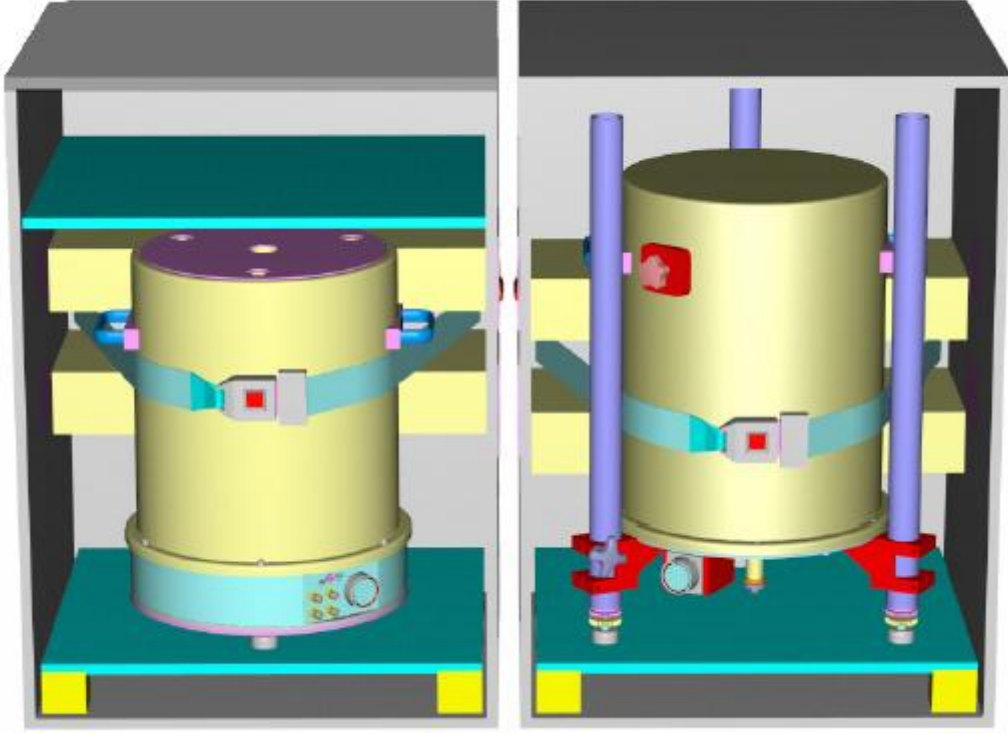
Saçılım genliğini ölçmek için kontrol paneline bir adet osiloskop adapte edilmiştir. Kontrol paneli yardımıyla sistem OSC moda alınır ve lazer MANUAL moda alındıktan sonra kilitlenir (RED/BLUE modu önemli değildir).

Bu aşamada saçılım genliğinin 2-4 V arasında ölçülmesi beklenmelidir (saçılım genliğinin 2 V civarında olması veri alma işleminde yeterlidir). Son A10 modellerinde sinyal iki yöntemle bölünmektedir; birincisi sistemin kontrol panelinin çıkış bölümünde benzeşik bir saçılım şeklinde diğeri de düşürücü kontrol panelinde gözlemlenen değerle ilgilidir.

5.3.2 Süperspringin Ayarlanması

Bu noktada, sistemin düzeçlenmiş olunmasına ve süperspringin kilidinin açılmış olunmasına dikkat edilmelidir. Bir voltmetre yardımıyla yayın konumu (SS POS), 50 mV ya da daha düşük bir değer olarak gözlemlenmelidir. Eğer bu değer 20 mV değerine yakın değilse SS ZERO modu açılmalıdır. Bu işlem yayın merkez konumuna ulaşmasını sağlayacaktır. Eğer değer, 20 mV (ya da bu aralıkta) civarında olursa SS ZERO modu kapatılır. Her ne kadar değişimler gözlemlense de yayın değişimi >10 mV civarına gelecektir ve bu konumda SS SERVO özelliği aktif hale getirilmelidir.

Kısa bir süre voltmetrede yayın konumu 1-2 mV civarında gözlemlenecektir. Eğer bu değere gözlemlenmiyorsa aletin alt bölümünde bulunana ayakların ayarlarıyla oynanıp saçılım genliği ayarlanabilir.

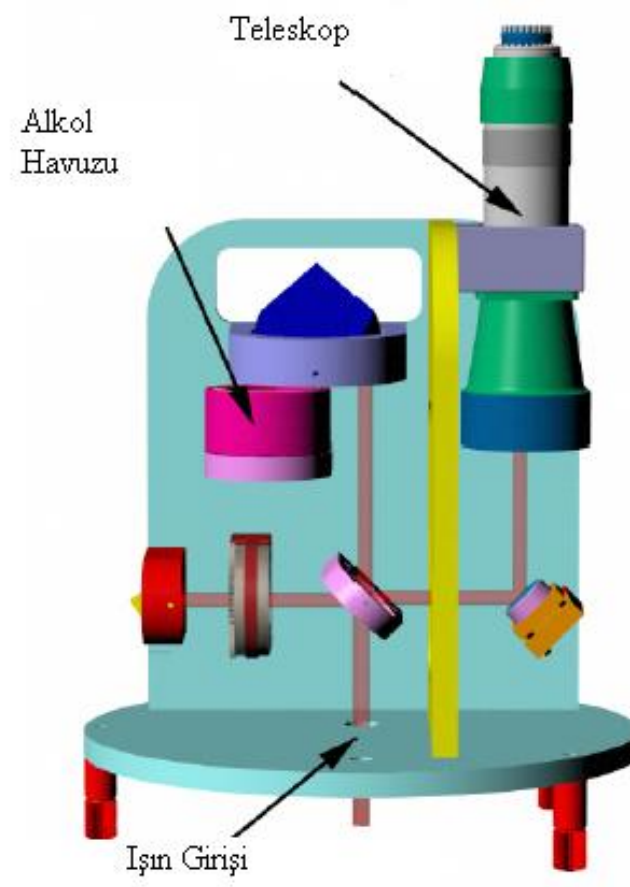


Şekil 5.15 Arazi ölçmeleri için A10 mutlak gravite ölçerin taşınması

Işın, kontrol aletine girdikten sonra ışın bölücü yardımıyla ikiye ayrılır. Bir kısmı fotodiyot üzerinden diğeri ise alkol havuzu üzerinden geri yansiyarak birleşir ve odağı sonsuzda olan teleskopta birleşmektedir (Micro-g LaCoste, 2008). Bu iki ışının teleskopta birbirleri üzerinde gözlemlenmesi lazer ışınının düşey dengeye getirilmiş olduğu anlamına gelmektedir (Şekil 5.16 – Şekil 5.17).



Şekil 5.16 Işın düşeyleyicinin gerçek görünümü



Şekil 5.17 Işın düşeyleyicinin şematik görünümü

6. UYGULAMA

Bu bölümde; “Marmara Bölgesi’ndeki Düşey Yer Kabuğu Hareketlerinin Mutlak Gravite ve GPS ile Araştırılması” projesi kapsamında yapılan mutlak gravite ve düşey gradyent ölçmelerinin ilk sonuçların belirlenmesi ve sonuçlara etkiyen etmenlerin irdelenmesi amaçlanmıştır.

6.1 Mutlak Gravite Ölçme ve Değerlendirmeleri

A-10 mutlak gravite ölçer kullanılarak gerçekleştirilen gravite ölçmelerine ilişkin sonuçlar “Micro-g8” yazılımı yardımıyla değerlendirilmekte ve ölçme boyunca yine bu yazılım kullanılarak veri toplanmaktadır.

Micro-g8 yazılımı, Micro-g Solutions Inc. tarafından aletle beraber verilen bir program olup Windows ve DOS tabanlı bir yazılım olan Olivia işletim sistemleri ile kullanılır. Program, veri toplama ve ölçme sonrasında veri değerlendirme olanağı sağlar. Veri toplama işlemi süresince program alete bağlı olan bilgisayara kurulmuş olmalıdır. Alet istenilen noktaya gerekli adımlar takip edilerek yerleştirildikten sonra ölçmeyi; başlatma, bitirme, gravite ölçüsüne etkiyen her türlü değişimi indirgeme, ölçme sırasında çeşitli gözlemler yapma, vb işlemler bu program kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Program istenildiğinde ölçülen gravite değerinin başka bir yüksekliğe taşınmasını sağlamaktadır. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır:

$$h_T = (h_A - h_i) * \text{grad} g_d \quad (6.1)$$

Burada;

h_T = Transfer yüksekliği ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$),

h_A = Aletin iç yüksekliği (A10-005 için 72 cm),

h_i = Gravite değeri taşınmak istenilen değer (cm),

g_d = Düşey gradyent değeri ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$),

dir.

Noktaya ait nominal basınç değerini, ölçülen gravite değerinden indirmek için yine bu yazılımdan yararlanılmaktadır. Her noktada ölçülen gravite değeri gözlemlenen atmosferik basınç değerine bağlı olarak bir nominal basınç belirlenmekte ve düzeltme olarak gravite değerine eklenmektedir.

Bu basınç düzeltmesi belirlenen setlere ait her düşüğe eklenmekte ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$P_n = 1013.25 * [1 - 0.065 * (h/288.15)^{5.2559}] \quad (6.2)$$

$$C_p = A (P_0 - P_n) \quad (6.3)$$

Burada;

P_n = Nominal Basınç Değeri (mBar),

h = Noktanın deniz yüksekliği (m) ,

A = Barometrik kabul faktörü ($\mu\text{Gal}/\text{mBar}$),

C_p = Barometrik basınç düzeltmesi (μGal),

P_0 = Ölçülen barometrik basınç (mBar),

dir.

Kutup gezinmesi, dünyanın dönme ekseninin gravite ölçümü yapılacak olan noktayla arasındaki mesafenin sürekli değişmesi nedeniyle merkez kaç kuvvetinin artıp azalması anlamına gelmekte ve yazılım aşağıdaki eşitliği kullanarak sonuçlara ilişkin düzeltmeleri hesaplamaktadır:

$$\delta g = -1.164 * 10^8 \omega^2 a 2\sin\varphi \cos\varphi (x\cos\lambda - y\sin\lambda) \quad (6.4)$$

Burada;

δg = Kutup gezinmesi düzeltmesi (μGal),

ω = Dünyanın açısal dönme hızı (rad/sn),

a = Referans elipsoidin küçük yarı eksen (m),

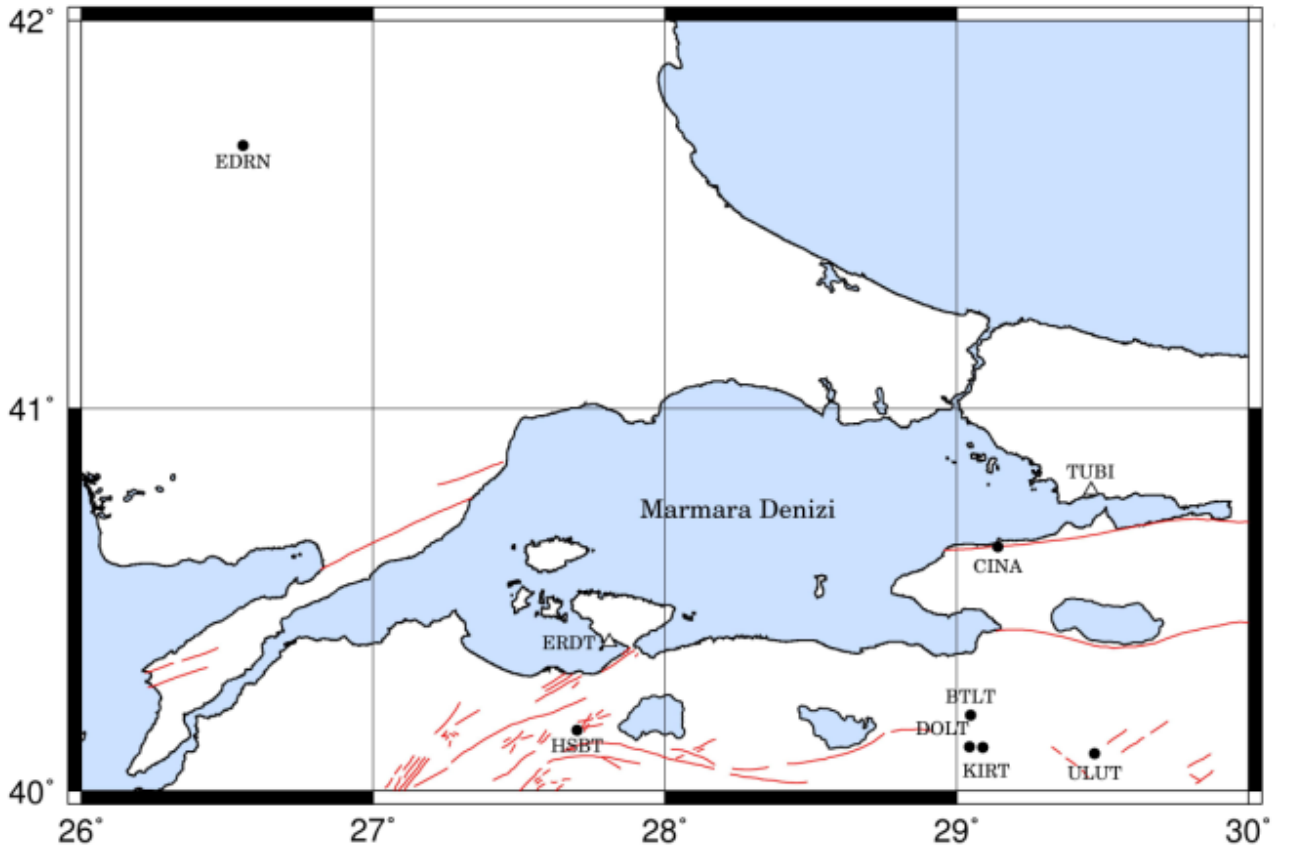
φ = Jeodezik enlem (rad),

λ = Jeodezik boylam (rad),

x,y = IERS sisteminde kutup koordinatları (rad),

dir.

Proje kapsamında, ilki Haziran-Temmuz 2009 ve ikincisi de Ekim 2009’ da olmak üzere iki mutlak gravite kampanyası gerçekleştirilmiştir. İlk kampanyada BTLT, CINA, DOLT, EDRN, EDRT, HSBT, KIRT, TUBI ve ULUT noktalarında ölçmeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.1).

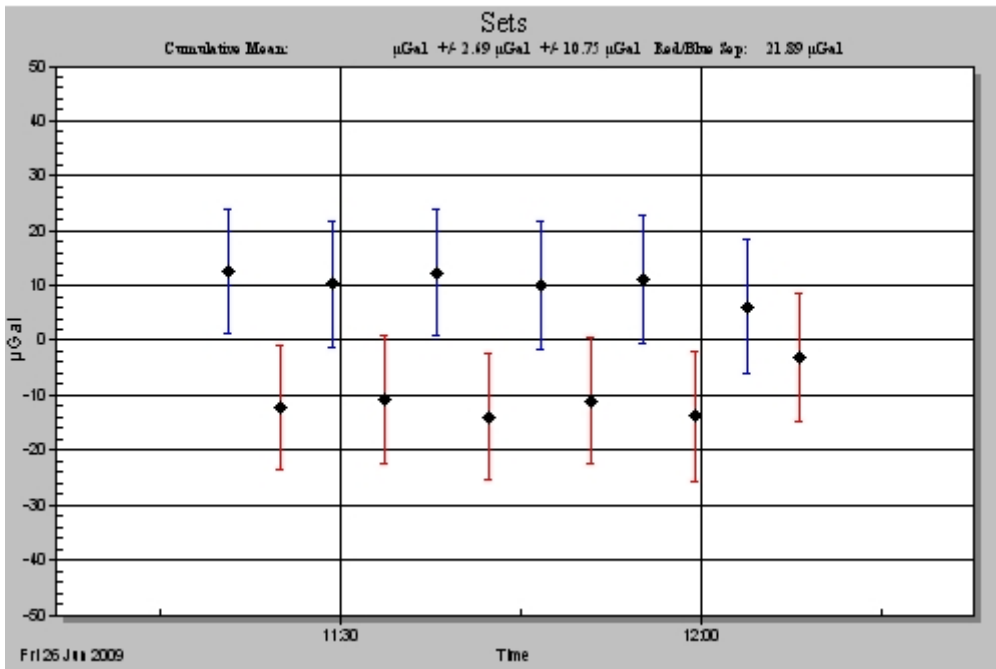


Şekil 6.1 Mutlak gravite ağı

İlk kampanya verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlara ilişkin örnekler Şekil 6.2 - 6.6 ve Çizelge 6.1’de verilmektedir.



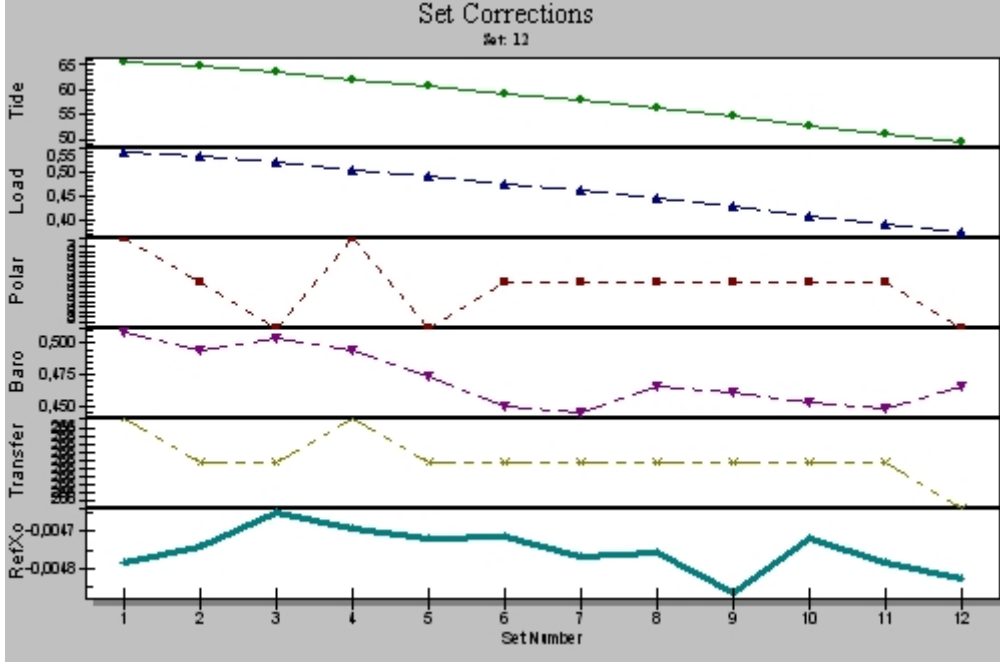
Şekil 6.2 Kampanyalardan görünüm



Şekil 6.3 EDRN noktası setlere göre gravite değerleri

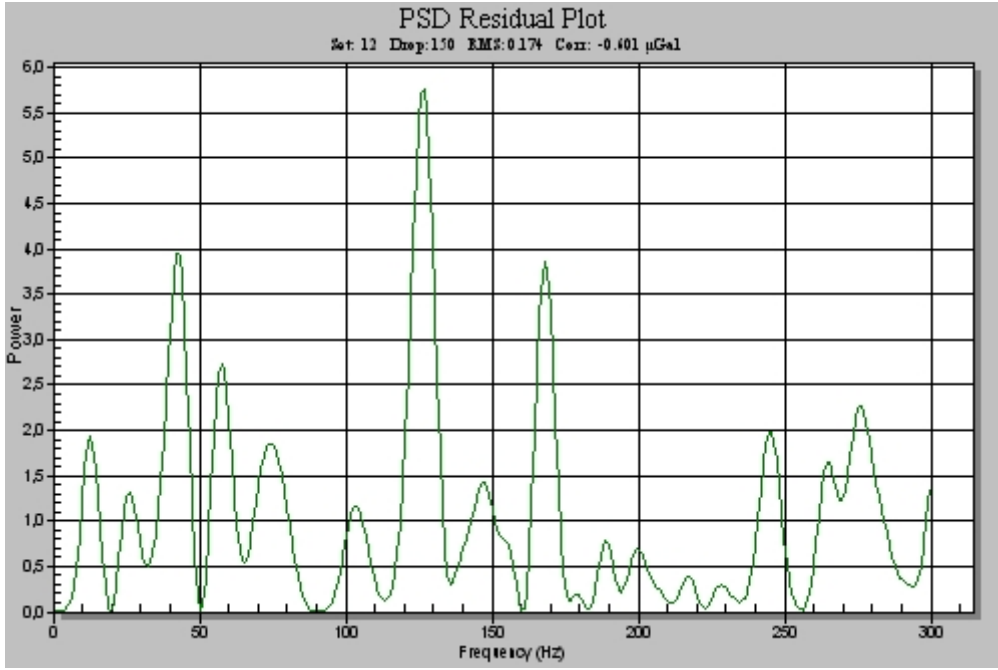
Değerlendirme işlemi süresince, karasal gelgit modeli olarak ETGTAB modeli, kutup gezinmesi koordinatlarının gerçek değerleri, ölçülerin kabul aralığı olarak; EDRN noktasında 3 sigma (δ) diğer noktalarda 2 sigma (δ) düzeyi, düşey gradyent değeri için bağıl gravite ölçmeleri ile belirlenen değerler ve noktanın nominal basınç değerini belirlemeye yarayan gerçek deniz yüksekliği değerleri kullanılarak indirgeme işlemleri yapılmıştır. Şekil 6.3’de görüldüğü gibi EDRN noktasındaki

mutlak gravite ölçmesi 12 set ve 150 düşüş olarak yapılmıştır. Şekilde lazerin mavi ve kırmızı dalga boylarına ait gravite değişimleri görülmektedir. Buna göre, setlere ait gravite değişimlerinin -15 ile +15 μGal 'lık bir aralıkta hareket ettiği gözlenmektedir.



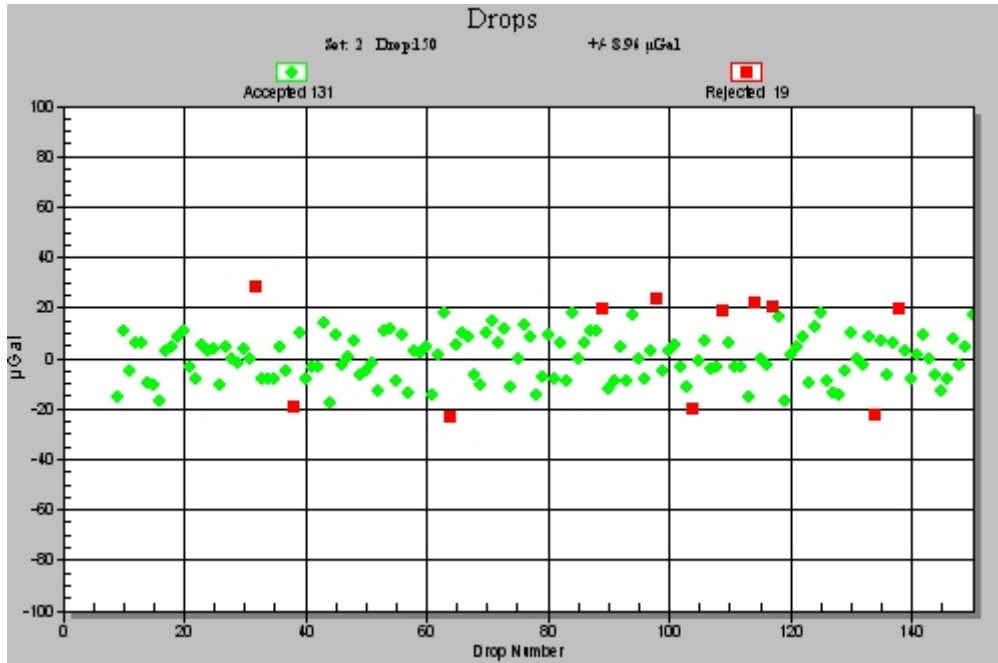
Şekil 6.4 ULUT noktası setlere göre gravite düzeltmeleri

Şekil 6.4'te ULUT noktasında yapılan mutlak gravite ölçmesine ilişkin değerlendirme işlemi sonucunda, her set için hesaplanan gravite düzeltmeleri görülmektedir. Buna göre, bu noktada yapılan ölçme esnasında karasal gelgit etkisinin 15 μGal ve okyanus yüklenmelerinin 0.15 μGal 'lık bir değişime neden olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.5 CINA noktasındaki ölçme işlemi sonrası değerlendirme aşamasında elde edilen ve 12. sete ait lazer güç-frekans düzeltmeleri

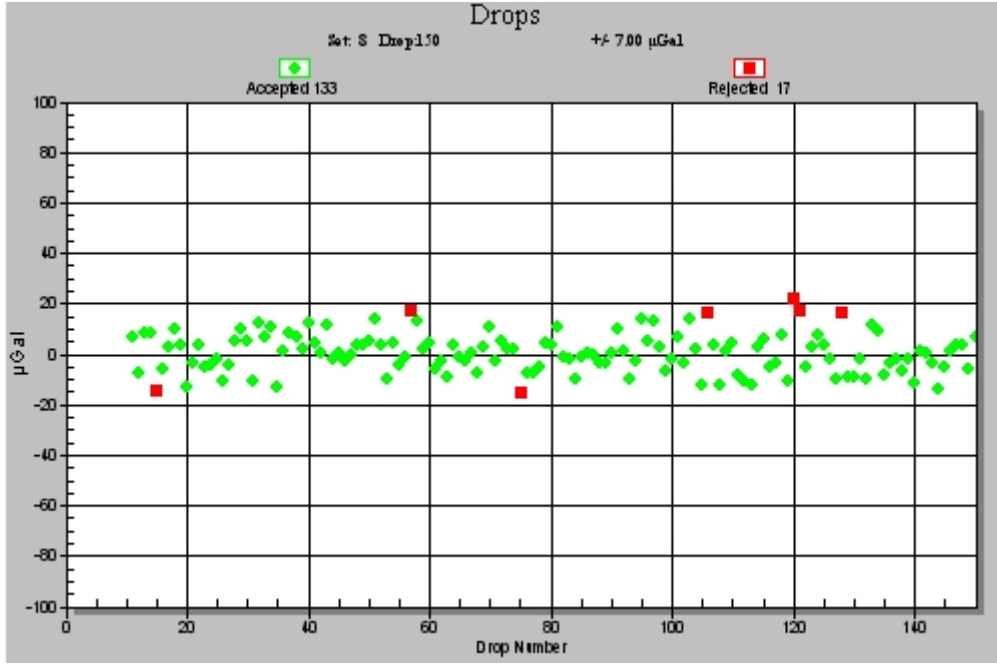
Şekil 6.5'te CINA noktasında yapılan ölçme işleminin lazer güç-frekans değişimi verilmektedir. Buna göre, oluşan düzeltme değerinin $-0.601 \mu\text{Gal}$ olduğu görülmektedir.



Şekil 6.6 KIRT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 2. sete ait düşüşler

Şekil 6.6'da KIRT noktasında yapılan ölçmenin 2. setine ait düşüşler görülmektedir. Buna göre, -20 ile $+20 \mu\text{Gal}$ aralığının dışındaki düşüşler uyumsuz ölçü olarak belirlenip değerlendirmeden

çıkarılmıştır. Şekil 6.7’da ise HSBT noktasına ait değerlendirmenin 8. setine ilişkin düşüşler grafiği verilmekte ve burada, aralığın -20 ila +20 μGal aralığından da daha küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7 HSBT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 8. sete ait düşüşler

Kampanya kapsamında yapılan mutlak gravite ölçmeleri manyetik alan etkilerinden kaçınmak amacıyla alet kuzeye yönlendirilerek ve sadece bu yönde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.1 2009 yılı Haziran ayı kampanyası mutlak gravite ölçmeleri sonuçları

Nokta Adı	δ (μGal)	GGD (μGal)	KGD (μGal)	OYD (μGal)	NDY (m)	SGM	Set
BTLT	3.23	-36.40	2.97	0.21	97.99	2	8
CINA	3.99	-8.10	2.95	-0.34	132.17	2	12
DOLT	1.98	-2.52	2.97	-0.30	1097.89	2	12
EDRN	2.69	92.40	2.61	0.72	65.00	3	12
EDRT	2.06	-14.09	2.60	-0.65	5.00	2	6
HSBT	2.78	-26.51	2.56	0.64	101.29	2	12
KIRT	2.94	-14.27	2.88	-0.37	1475.88	2	12
TUBI	2.87	62.28	3.15	-0.31	184.07	2	12
ULUT	1.56	58.04	2.99	0.46	1982.76	2	12

Burada;

δ = Standart sapma,

GGD = Karasal gelgit düzeltmesi,

KGD = Kutup gezinmesi düzeltmesi,

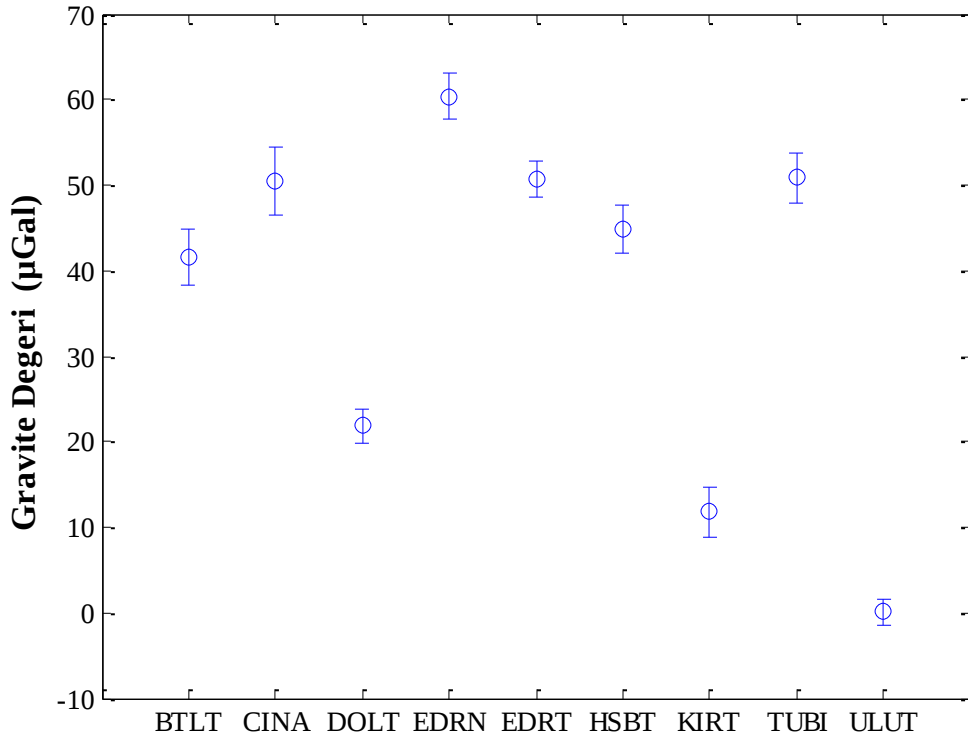
OYD = Okyanus yüklenmesi düzeltmesi,

NDY = Noktanın denizden yüksekliği,

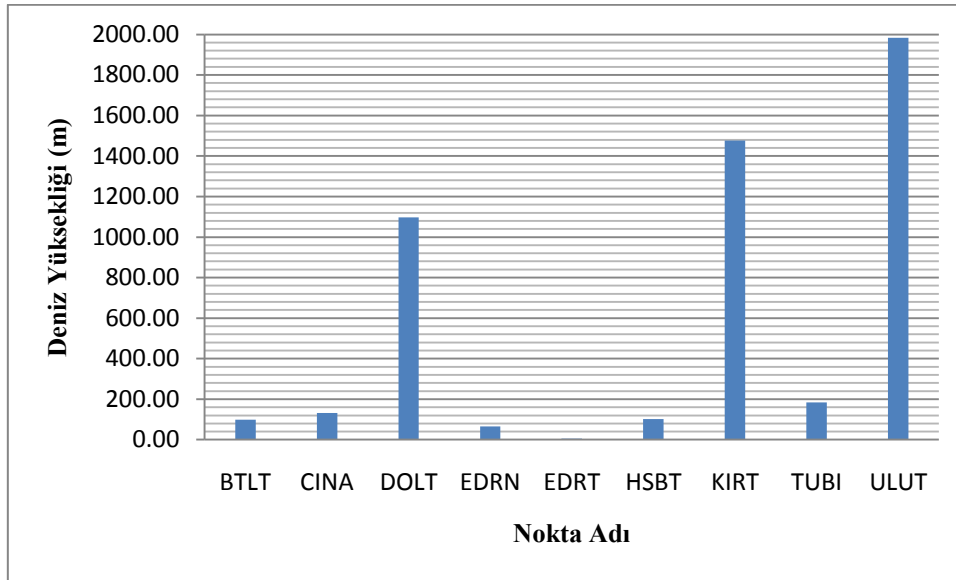
SGM = Değerlendirme işleminin yapıldığı istatistiksel aralık,

Set = Değerlendirme işlemine katılan set sayısı,

dır. Noktaların gravite ve yükseklik değerlerine ilişkin bilgiler Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da verilmektedir.

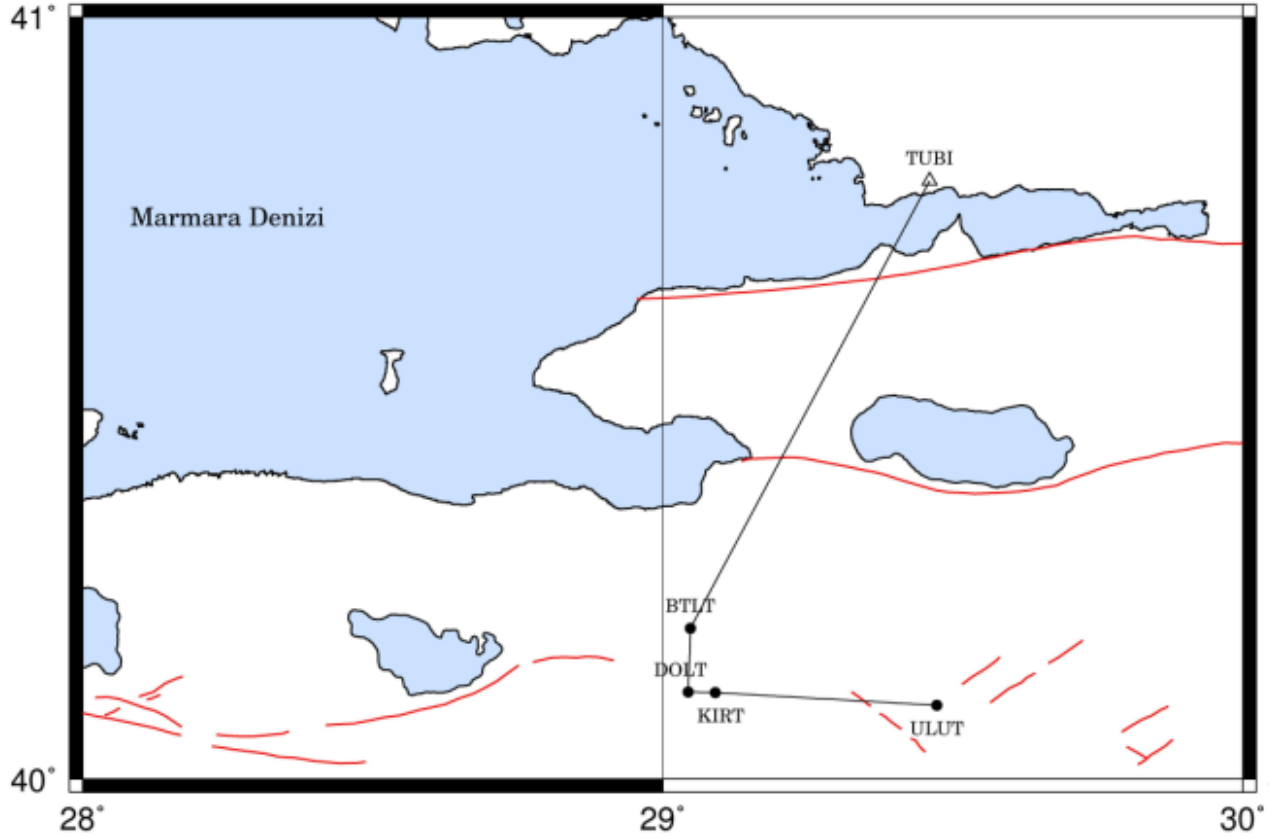


Şekil 6.8 Noktaların gravite değerleri



Şekil 6.9 Noktaların deniz yükseklikleri

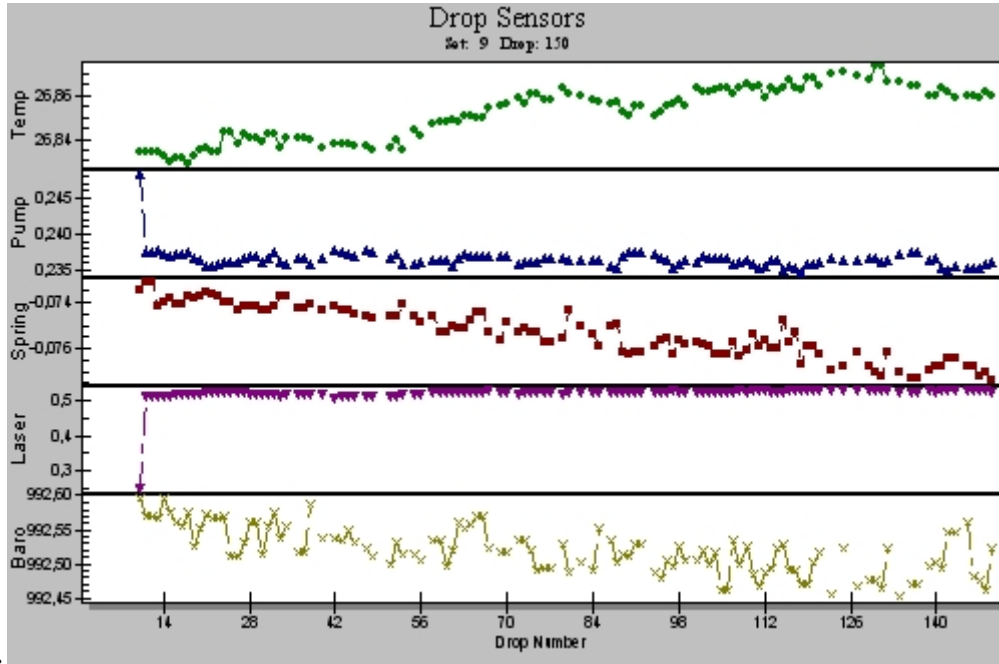
İkinci kampanyada ise sadece kalibrasyon bazı olarak belirlenen BTLT, DOLT, KIRT, TUBI ve ULUT noktalarında ölçüm yapılmıştır (Şekil 6.10). Proje kapsamında Bursa-Uludağ arasında kurulan kalibrasyon bazı için daha önceden arazide yapılan istikşaf çalışması göz önüne alınarak nokta yerleri belirlenmiştir.



Şekil 6.10 Kalibrasyon bazı

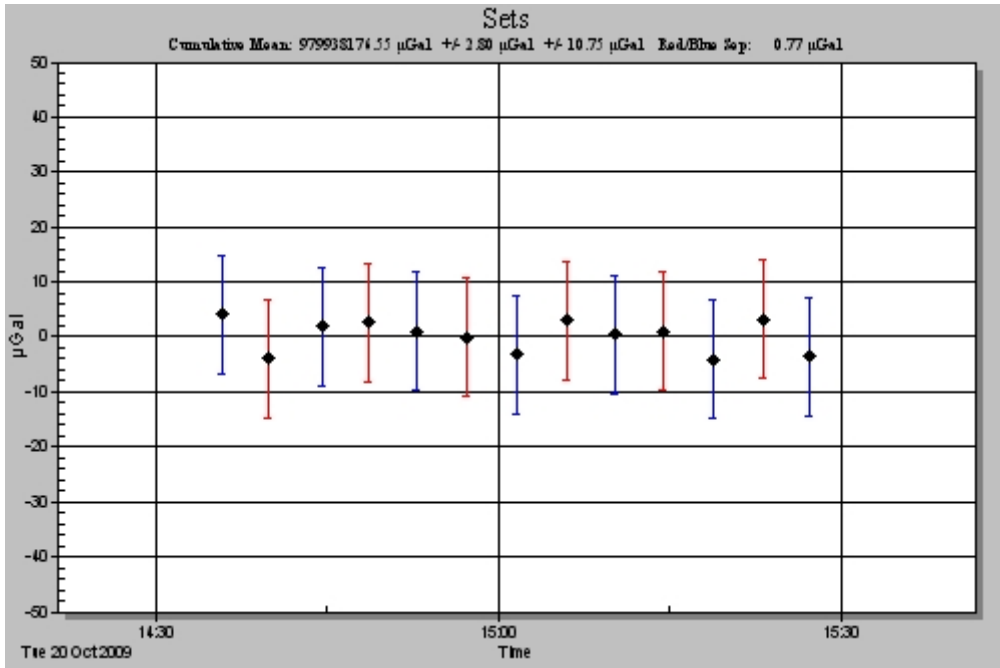
Bu kampanya sonrasında yapılan değerlendirme işlemi süresince de, karasal gelgit modeli olarak ETGTAB modeli, kutup gezinmesi koordinatlarının gerçek değerleri, düşey gradyent değeri için bağıl gravite ölçmeleri ile belirlenen değerler, noktanın nominal basınç değerini belirlemeye yarayan gerçek deniz yüksekliği değerleri ve noktaların genelinde ölçülerin kabul aralığı olarak 2 sigma düzeyi kullanılarak indirgeme işlemleri yapılmıştır.

Şekil 6.11’de TUBI noktasında yapılan ölçmeye ilişkin değerlendirme sonucunda 9. setin her bir düşüşüne ait gravite düzeltme değerleri verilmektedir. Buna göre, set boyunca basınç değerinin 0.15 mBar’lık bir değişim yaptığı gözlenmektedir.



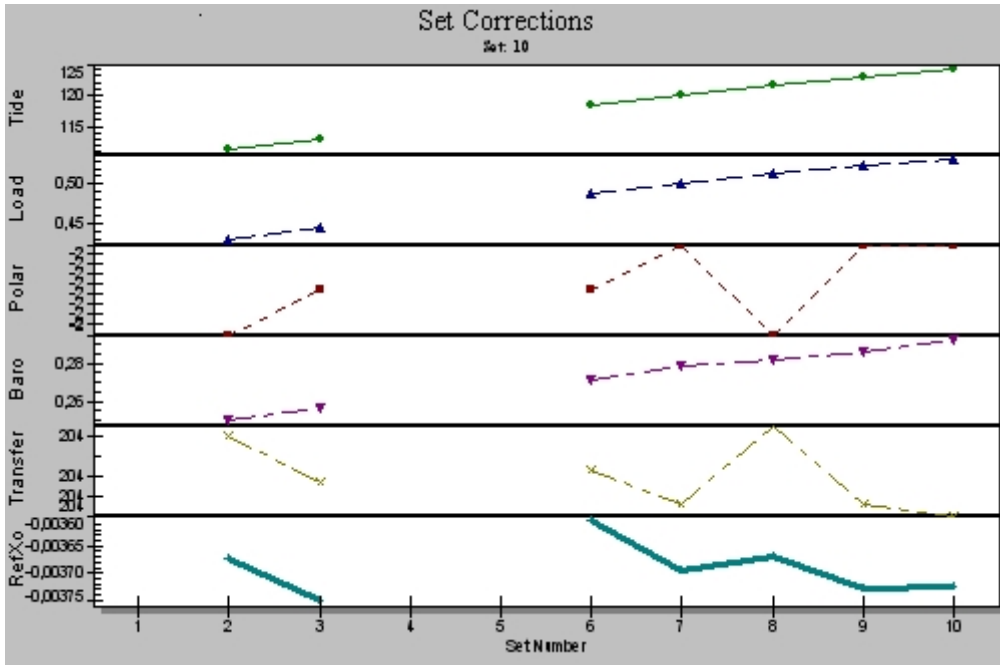
Şekil 6.11 TUBI noktası değerlendirme aşamasında 9. setin düşüşlerine ait düzeltmeler

Şekil 6.12’de DOLT noktasında, setler arası lazerin mavi ve kırmızı dalga boylarındaki değişimler verilmekte ve değişimin -15 ila +15 μGal arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12 DOLT noktası setlere göre gravite değerleri

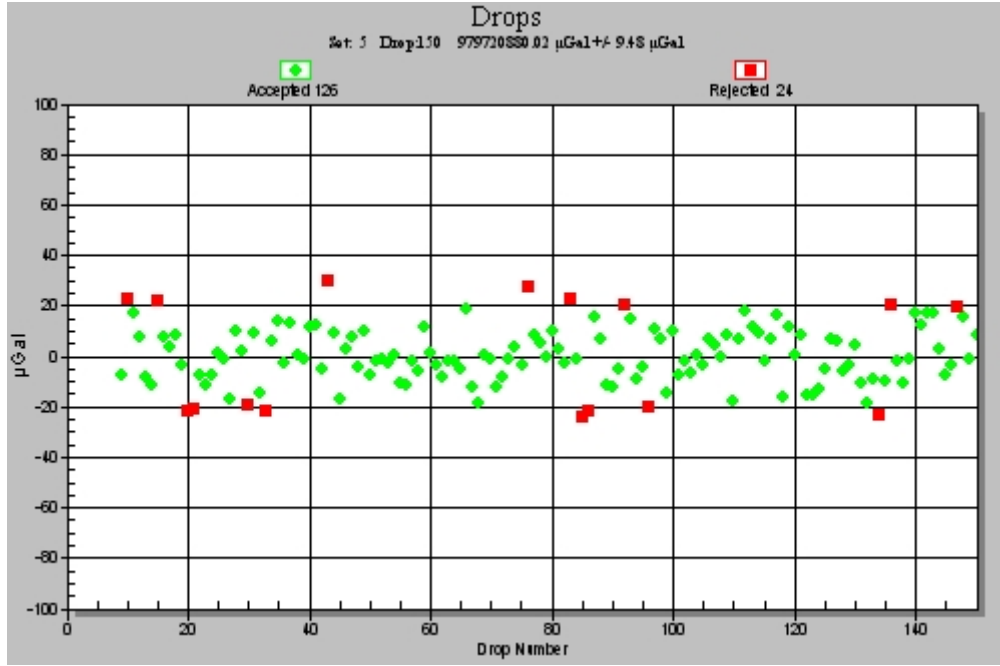
Şekil 6.13'te BTLT noktasındaki değerlendirme sonuçlarına ilişkin gravite düzeltmeleri verilmektedir. Buna göre, değerlendirme işleminin 7 set olarak yapıldığı ve ölçülen gravite değerine getirilen karasal gelgit düzeltmesinin 20 μGal 'lık bir değişim gösterdiği gözlenmektedir.



Şekil 6.13 BTLT noktası setlere göre gravite düzeltmeleri grafiği

Şekil 6.14'te ULUT noktasında yapılan mutlak gravite ölçmesinin değerlendirme aşamasına ilişkin 5. Sete ait düşüşlerin kabul aralıkları verilmektedir. Buna göre, bu noktada yapılan ölçmede set

başına 150 düşüş yapıldığı ve -20 ila +20 μGal değişim aralığında olmayan düşüşlerin ölçüden çıkarılarak gravite değerinin hesaplandığı görülmektedir.

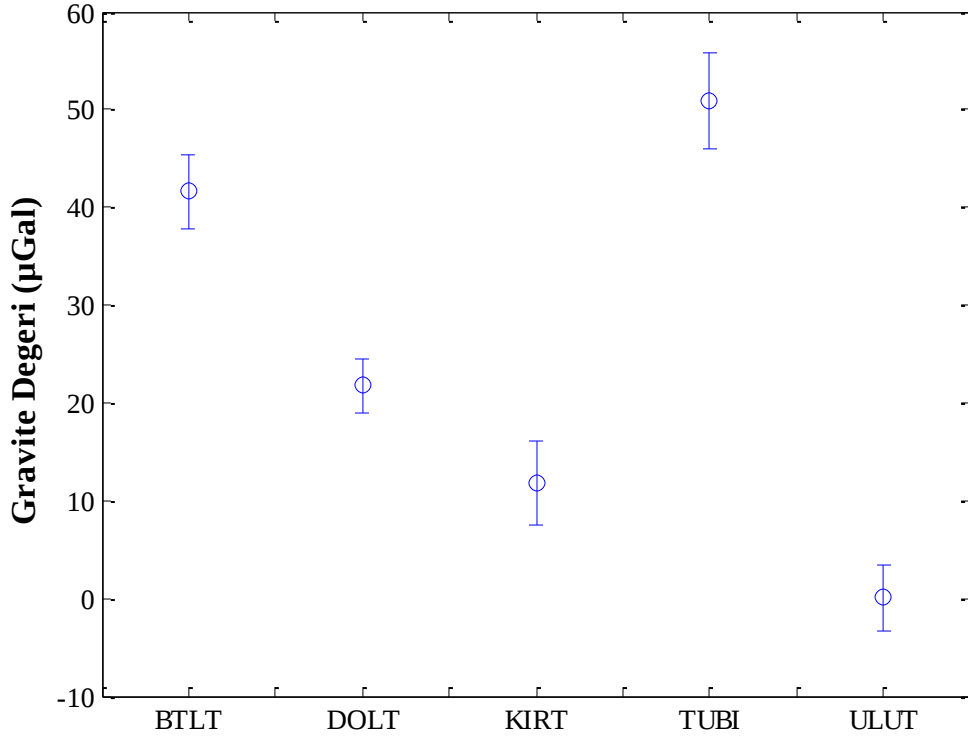


Şekil 6.14 ULUT noktası verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen 5. sete ait düşüşler

Yukarıda da anlatıldığı gibi ikinci kampanya, sadece kalibrasyon bazına ait noktaların mutlak gravite değerlerini belirlemeye yönelik ölçmeleri kapsamaktadır. Bu kampanyada da ölçmeler aynı standartlar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç farklı kampanyalar arasında bir tutarlılık sağlamaktır. Kampanya sonrasında yapılan değerlendirme işlemlerinin sonuçları Çizelge 6.2 ve Şekil 6.15'te verilmektedir.

Çizelge 6.2 2009 yılı Ekim ayı kampanyası mutlak gravite ölçmeleri sonuçları

Nokta Adı	δ (μGal)	GGD (μGal)	KGD (μGal)	OYD (μGal)	NDY (m)	SGM	Set
BTLT	3.79	118.78	-1.53	0.49	97.99	2	7
DOLT	2.76	-82.87	-1.53	-0.16	1097.89	2	14
KIRT	4.34	-39.24	-1.52	0.87	1475.88	2	8
TUBI	4.90	-79.58	-1.48	-0.80	184.07	2	10
ULUT	3.41	-41.16	-1.52	0.51	1982.76	2	8



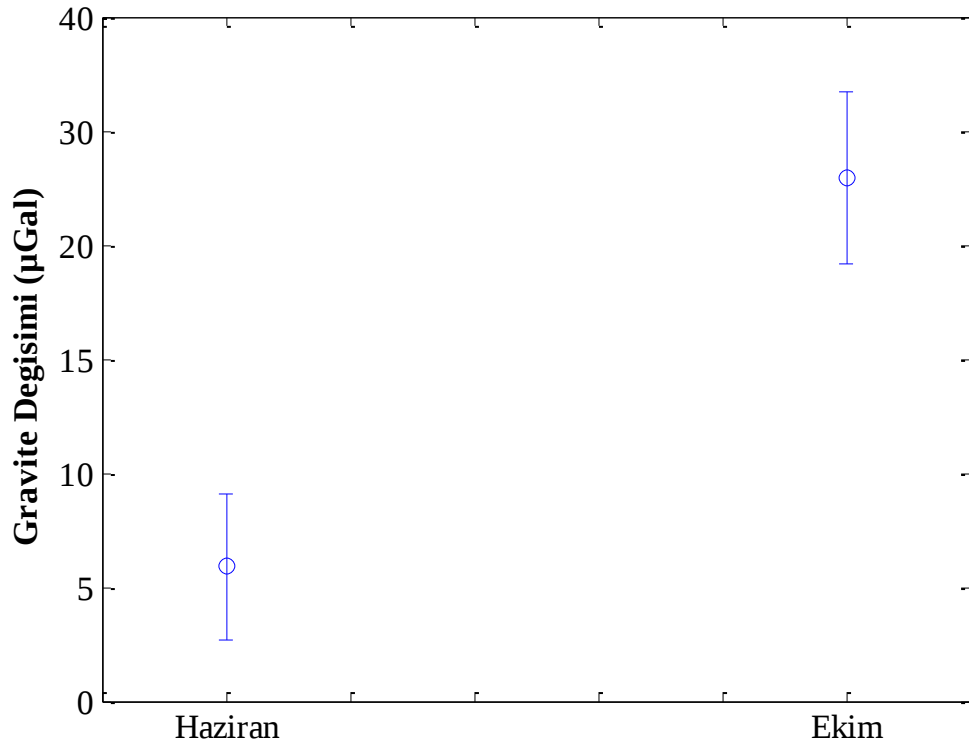
Şekil 6.15 Ekim 2009 kampanyası için noktaların gravite değerleri

İki kampanya sonrasında, aynı noktalarda yapılan ölçmelere ait sonuçlar Çizelge 6.3 ve Şekil 6.16 – 6.20 ile verilmektedir.

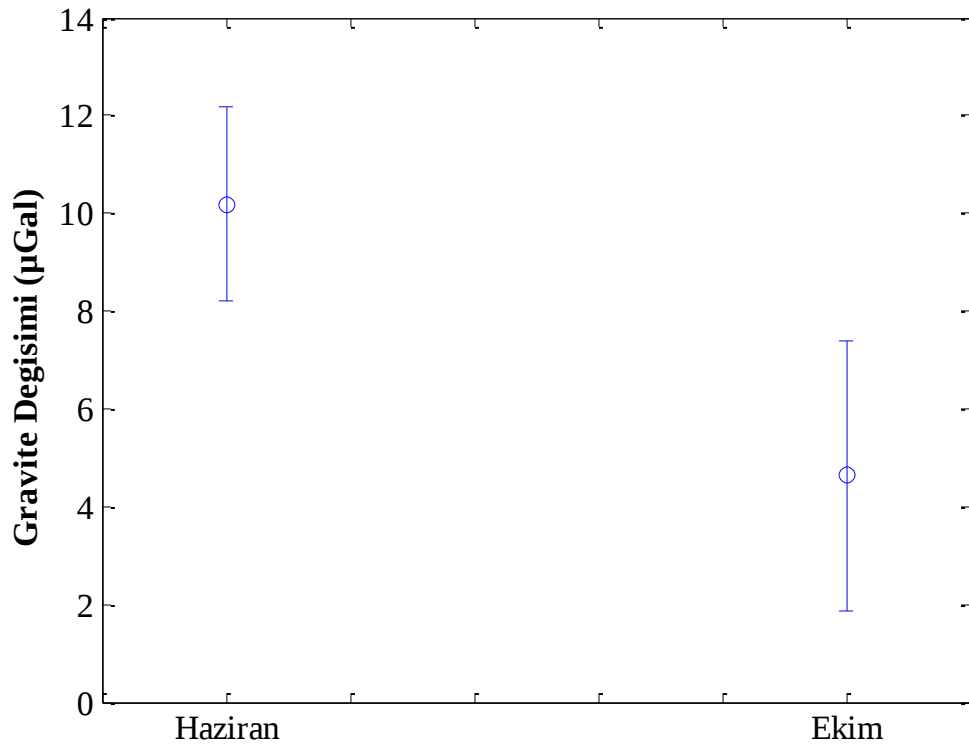
Çizelge 6.3 İki kampanya arasında aynı noktalara ilişkin gravite farkları

Nokta Adı	Gravite Farkı (μGal)
BTLT	-17,06
DOLT	5,54
KIRT	-11,87
TUBI	-50,67
ULUT	1,46

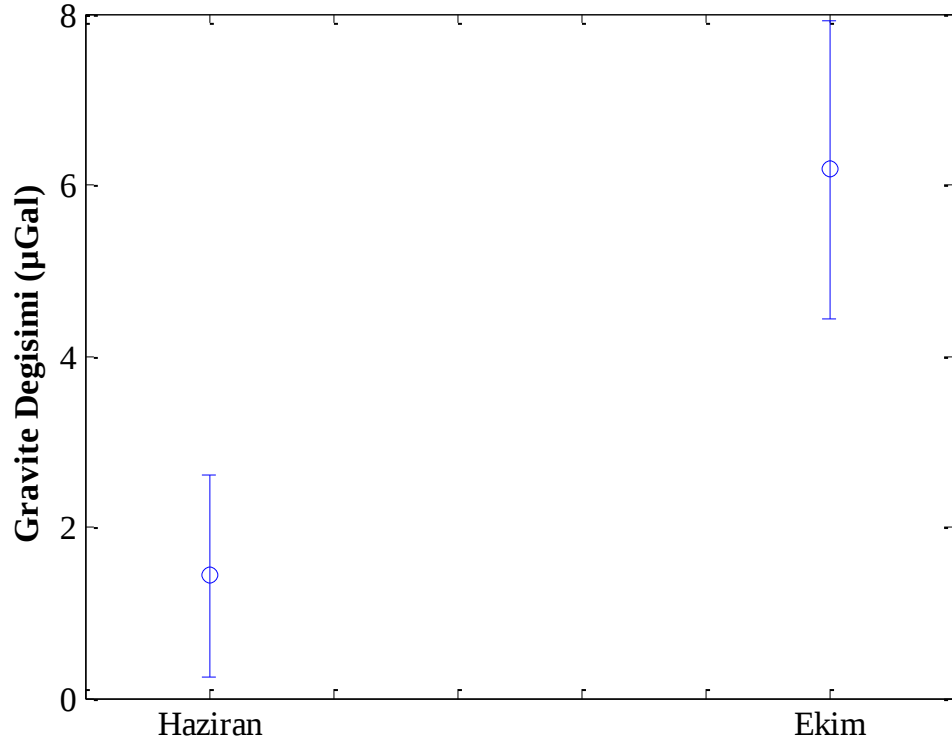
Çizelge 6.3'e göre, iki kampanya arasındaki minimum gravite değişimi ULUT noktasında (1,46 μGal), maksimum değişim ise TUBI noktasında (-50,67 μGal) görülmektedir. Bundan sonraki kampanya sonuçları doğrultusunda bu değişimlerin yorumlanması daha anlamlı olacaktır.



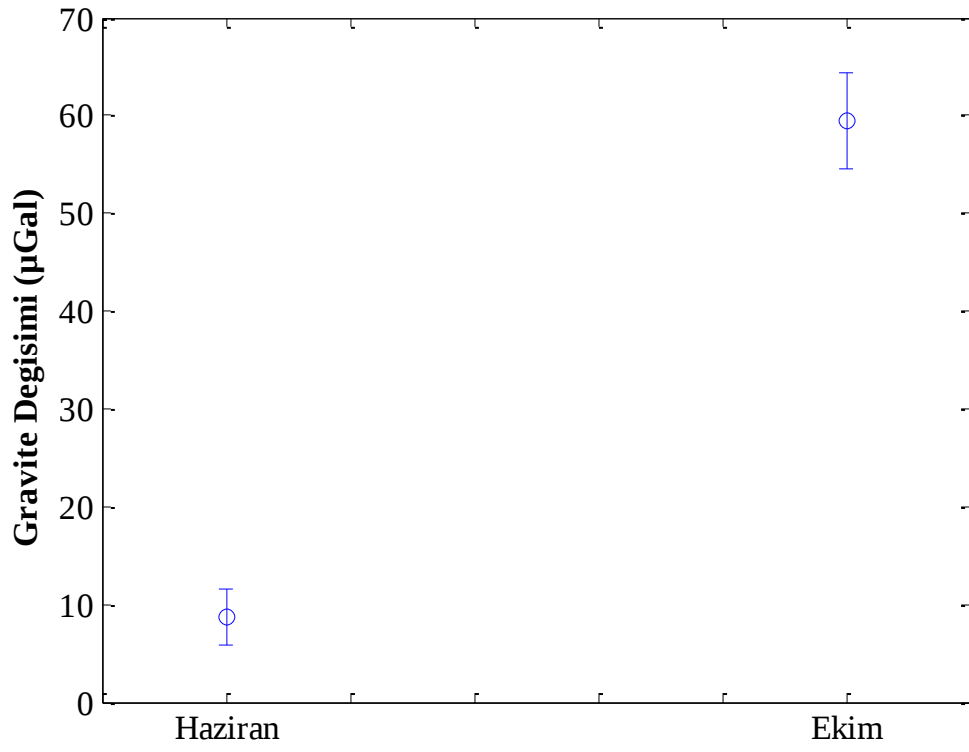
Şekil 6.16 BTLT noktasının zamansal değişimi



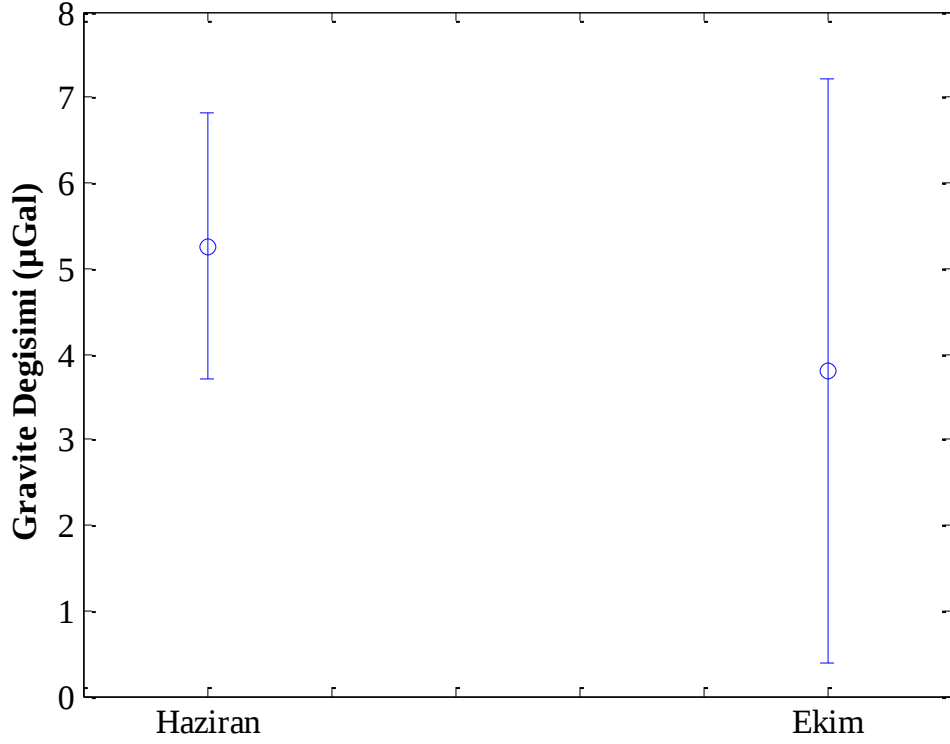
Şekil 6.17 DOLT noktasının zamansal değişimi



Şekil 6.18 KIRT noktasının zamansal değişimi



Şekil 6.19 TUBI noktasının zamansal değişimi



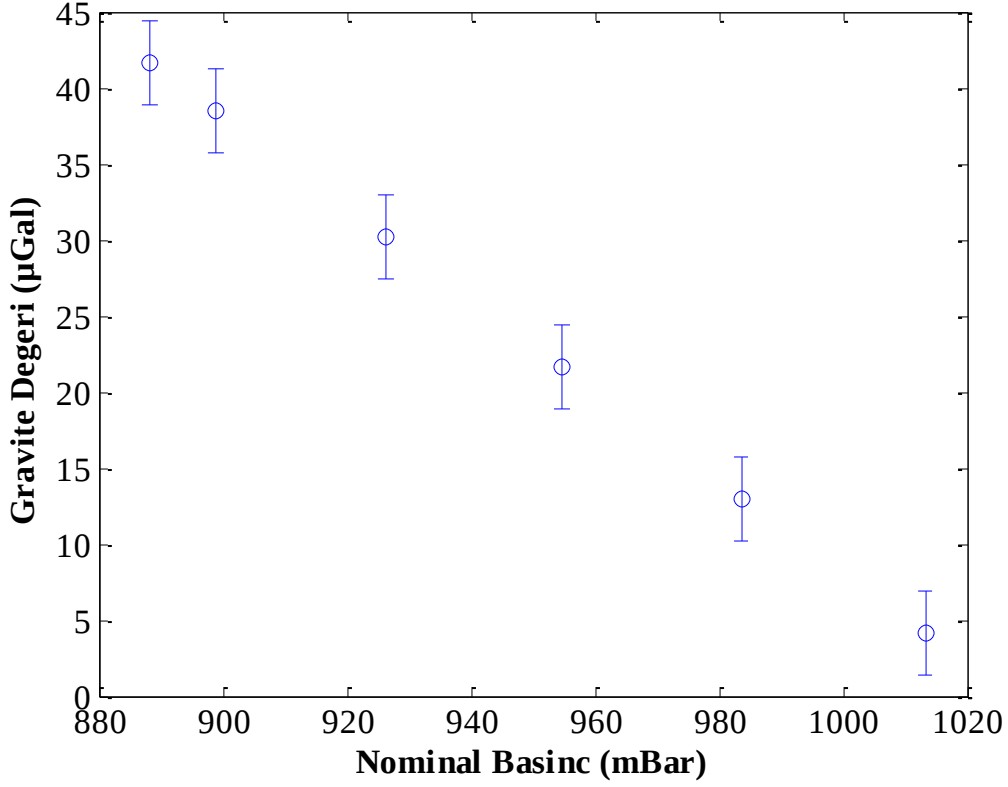
Şekil 6.20 ULUT noktasının zamansal değişimi

6.2 Basınç Değişiminin Gravite Üzerine Etkisi

Yükseklik değişimi nominal basınç değişimine neden olmaktadır. Bu durumda değerlendirme yapılırken yazılımda “DOLT” noktasına ait bütün parametreler sabit tutulup sadece deniz yüksekliği değeri değiştirilmiştir. Buna göre oluşan nominal basınç değeri ve gravite değerine ilişkin sonuçlar Çizelge 6.4 ve Şekil 6.21 ile verilmektedir.

Çizelge 6.4 Yükseklikle nominal basınç ve gravite değişimi

Deniz Yüksekliği (m)	Nominal Basınç (mBar)	Gravite (µGal)
0.00	1013.25	9.12
250.00	983.58	18.02
500.00	954.61	26.70
750.00	926.34	35.18
1000.00	898.75	43.46
1097.89	888.12	46.64



Şekil 6.21 Yüksekliğe bağlı değişen nominal basınç değerinin graviteye etkisi

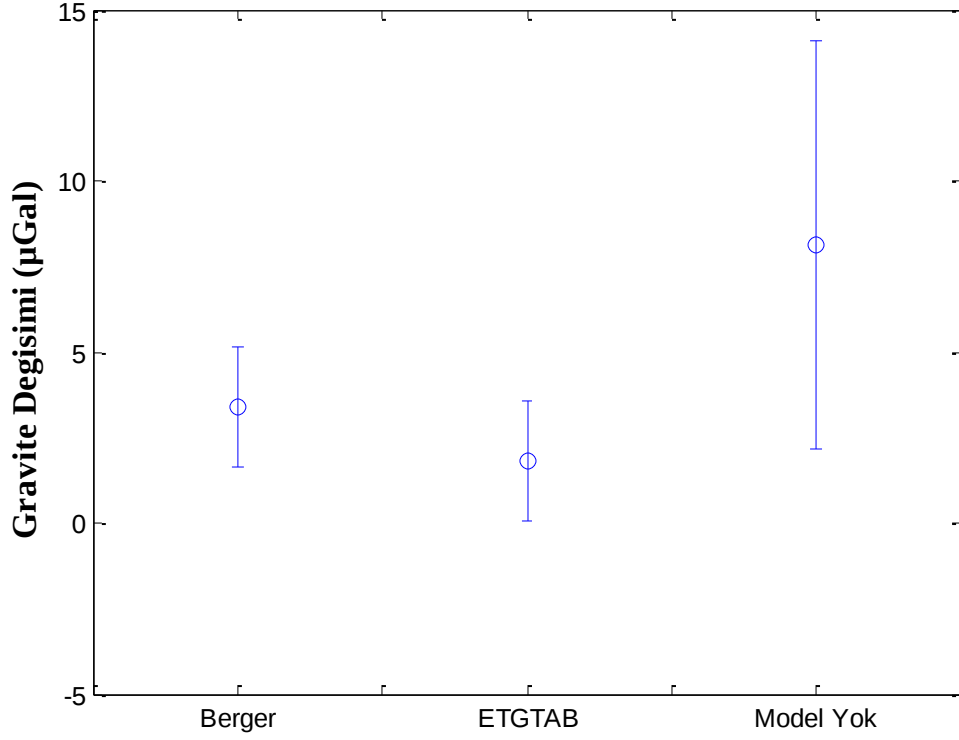
Şekil 6.21'e göre, nominal basınç yükseldiğinde gravite değerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Nominal basınç değerindeki 140 mBar'lık bir değişim yaklaşık 40 μGal 'lık bir gravite değişimine neden olmaktadır.

6.3 Farklı Gelgit Modelleri Kullanılarak Gravite Ölçülerinin Değerlendirilmesi

Ölçülen gravite değerine etkiyen bir başka faktör de karasal gelgitlerdir. Yazılım, bu faktöre ilişkin iki farklı model seçeneği sunmaktadır. Bunlardan ilki "Berger" modeli diğeri ise "ETGTAB" modelidir. Yine "DOLT" noktasına ait ölçme verisi kullanılarak bütün parametreler sabit tutulup sadece karasal gelgit modeli değiştirilerek yapılan değerlendirme işlemi sonucu Çizelge 6.5 ve Şekil 6.22 ile gösterilmektedir.

Çizelge 6.5 Gelgit modelinin ölçmeye etkisi

Karasal Gelgit Modeli	Gravite (μGal)	Standart Sapma (μGal)
Berger	11.38	1.77
ETGTAB	9.82	1.77
Model Yok	16.12	5.98



Şekil 6.22 Karasal gelgit modelinin gravite değerine etkisi

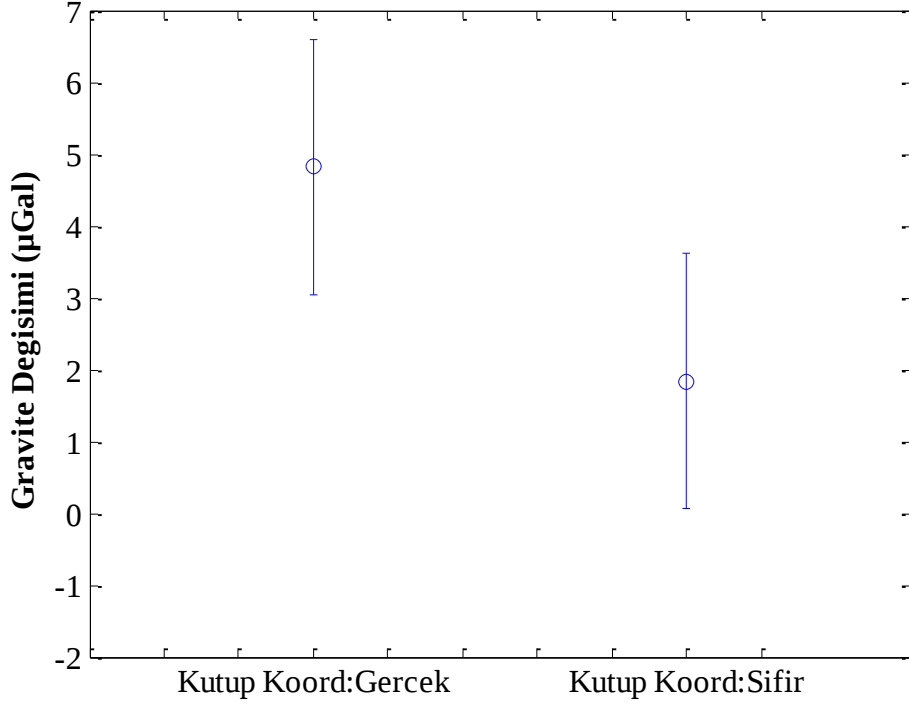
Karasal gelgit etkisi noktanın konumuna bağlı olarak değişen bir etkidir. Yukarıdaki sonuçlara göre, bu noktada karasal gelgit modeli kullanılmadan yapılan değerlendirme sonucunda yaklaşık 6 μGal 'lık bir fark oluşmakta ve yaklaşık 3 kat daha fazla standart sapma değeri elde edilmektedir.

6.4 Kutup Gezinmesinin Gravite Üzerine Etkisi

Kutup gezinmesinin gravite değerine etkisini görmek amacıyla yine "DOLT" noktasına ait veri kutup gezinmesi koordinatları işleme dâhil edilerek ve edilmeyerek iki farklı değerlendirme yapılmış ve sonuçlar Çizelge 6.6 ve Şekil 6.23 ile verilmektedir.

Çizelge 6.6 Kutup gezinmesinin gravite değerine etkisi

Gravite (μGal)	X (m)	Y (m)
9.82	0.1180 "	0.5373 "
6.84	0.0000 "	0.0000 "



Şekil 6.23 Kutup gezinmesinin gravite değerine etkisi

Bu sonuçlara göre, bu noktada yapılan ölçme işlemine kutup gezinmesi etkisinin yaklaşık 3 µGal’lık bir etki yaptığı gözlenmektedir.

6.5 Düşey Gradyent Ölçme ve Değerlendirmeleri

Gravite gradyent vektörü, bölgesel gravite alanına ait bilgiler içermektedir. Bundan dolayı, yüksek çözünürlüklü gravite alanlarının belirlenmesinde bu değere ihtiyaç duyulmaktadır. Gradyentin düşey bileşeninin belirlenmesinde, yükseklikleri 3 m’ye varan tripodlar kullanılarak tekrarlı bağıl gravite ölçmeleri yapılmaktadır (Torge, 2001).

Proje kapsamında yapılan düşey gradyent ölçmeleri, CG5 bağıl gravite ölçerler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK – YDBE’ye ait 76 ve 79 numaralı CG5 bağıl gravite ölçerler kullanılmıştır. Ölçü noktalarında; nokta adı, bağıl gravite okumaları ve düzeltmelerinde kullanılmak üzere ısı, basınç, ölçü zamanı (saat, dakika), aletlerin marka ve seri numarası, tarih (yıl, ay, gün) bilgileri kaydedilmiştir.

Bağıl gravite ölçülerinin değerlendirilmesinde aşağıdaki fonksiyonel model kullanılmıştır (Torge, 1989):

$$v = g - N_0 - \Delta F(z) + D(t) - L \quad (6.5)$$

Burada;

$L = P$ noktasında indirgenmiş; yaklaşık ayarlanmış (gravite birimine dönüştürülmüş) ve gelgit, hava basıncı ve yükseklik etkilerinden arındırılmış gravite ölçer okuması (Torge, 1989),

$v = L$ gravite ölçer okumasının düzeltilmesi,

$g = P$ noktasında bilinmeyen gravite değeri,

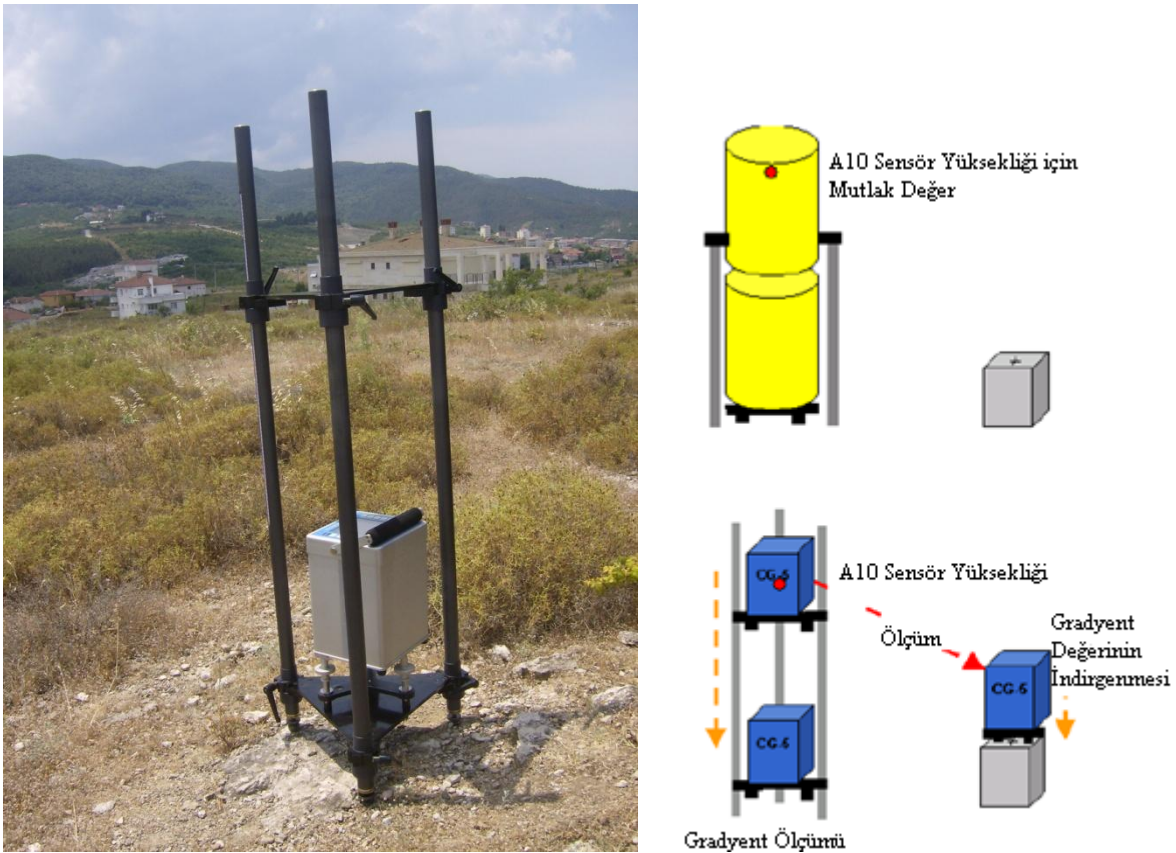
N_0 = Bilinmeyen seviye (nivo) sabitesi,

$\Delta F(z)$ = Ayar fonksiyonu,

$D(t)$ = Drift fonksiyonu (t zamanının fonksiyonu),

anlamındadır.

İki farklı yüzey barından bir platform üzerinde önce aşağıda sonra yaklaşık 1 metre yukarıda olarak tekrarlı bağıl gravite ölçmeleri yapılmış, yapılan bu ölçmelere ilişkin veriler GravAp yazılımında değerlendirilmiştir (Şekil 6.24). GravAp yazılımı, gravite ölçülerinin dengelenmesi ve farklı modeller kullanarak gravite değerleri ve gravite ölçer parametrelerini belirlemek amacı ile Münih Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Navigasyon Enstitüsü'nde geliştirilmiştir.

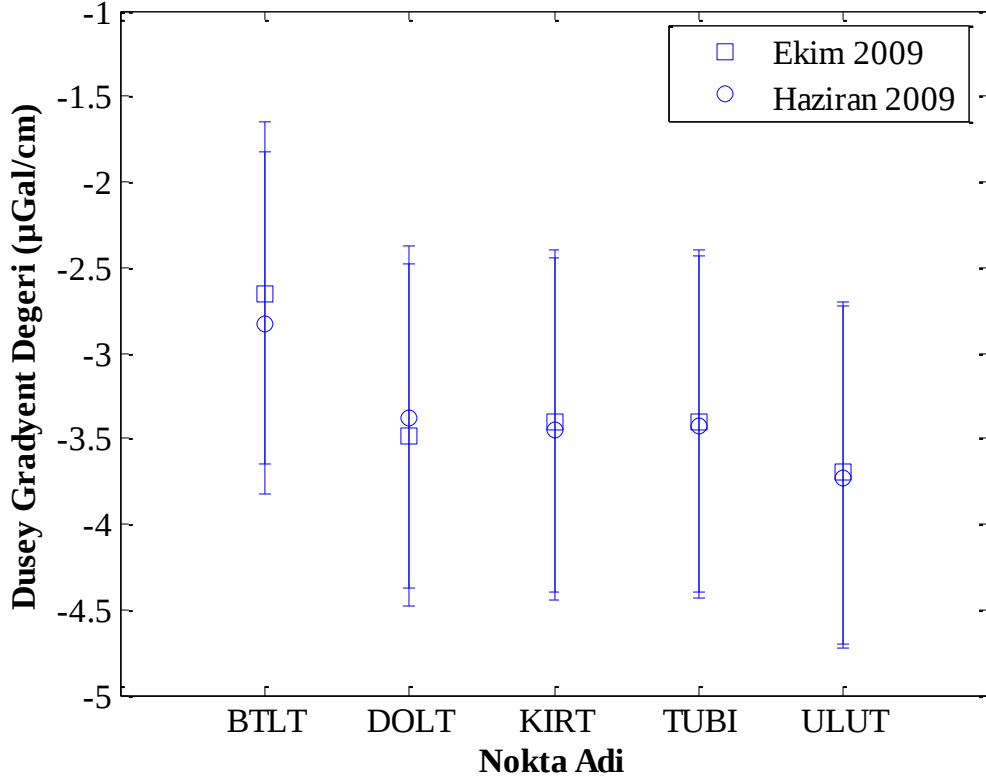


Şekil 6.24 Düşey gradyent ölçmelerinde kullanılan çift yüzeyli platform (Müller vd., 2009)

Proje kapsamında yapılan düşey gradyenti belirlemeye yönelik bağıl gravite ölçmelerine ilişkin sonuçlar Çizelge 6.7 ve Şekil 6.25 ile verilmektedir.

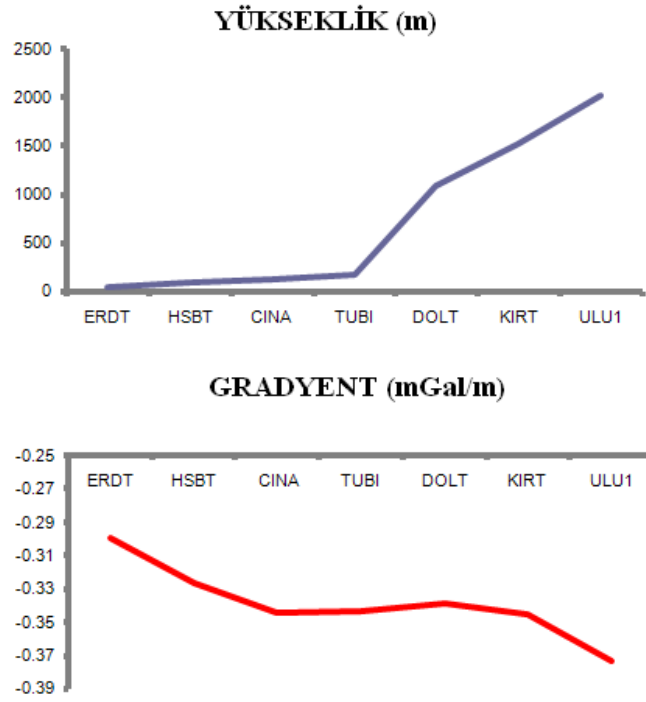
Çizelge 6.7 Gradyent değerlerindeki mevsimsel değişimler

Nokta	Haziran 2009		Ekim 2009	
	Gradyent ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)	Drift Düzeltmesi ($\mu\text{m}/\text{sn}^2/\text{s}$)	Gradyent ($\mu\text{Gal}/\text{cm}$)	Drift Düzeltmesi ($\mu\text{m}/\text{sn}^2/\text{s}$)
BTLT	-2.650	-0.0051 ± 0.0015	-2.650	-0.6585 ± 0.0941
DOLT	-3.480	0.0493 ± 0.1130	-3.480	-0.6609 ± 0.0981
KIRT	-3.450	-0.1145 ± 0.0534	-3.400	-0.7936 ± 0.0837
TUBI	-3.365	-0.0307 ± 0.1579	-3.400	-0.0649 ± 0.0683
ULUT	-3.700	-0.6974 ± 0.1592	-3.650	-0.5584 ± 0.0651



Şekil 6.25 Zamansal düşey gradyent değişimi

Düşey gradyent değerinin nokta yüksekliği ile ilişkisi Şekil 6.26'da gösterilmektedir.



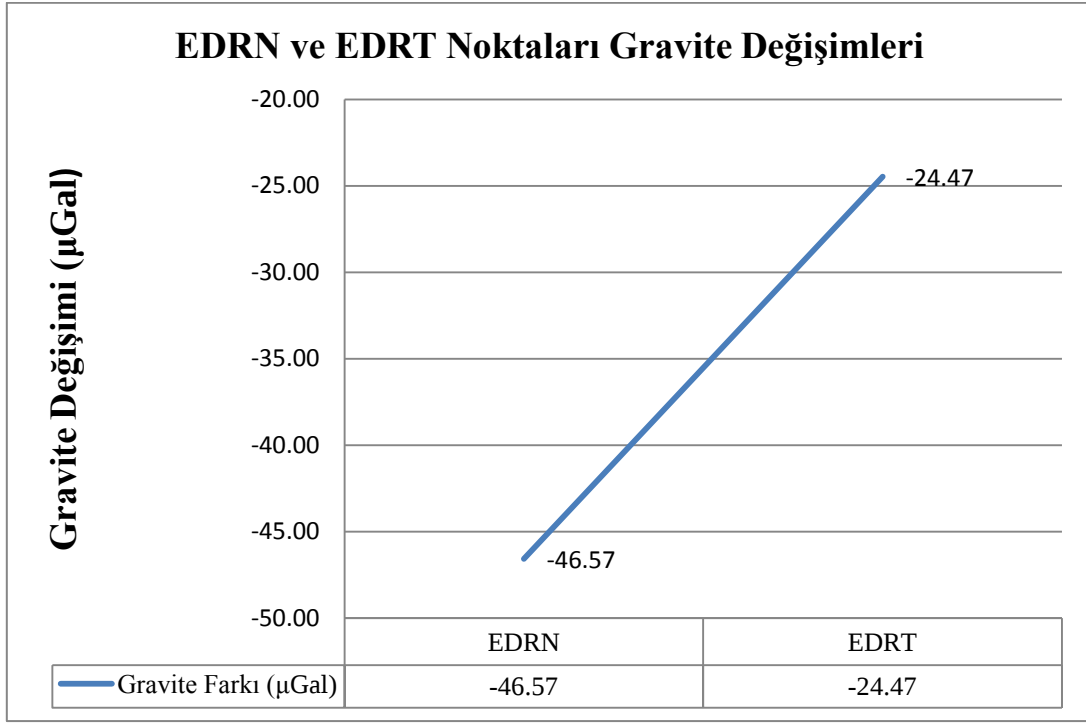
Şekil 6.26 Yükseklik – gradyent değişimi (Doğan vd., 2009)

Ülkemizde 1996 yılının Ağustos – Ekim ayları arasında, FG-5 mutlak gravite ölçer kullanılarak bir mutlak gravite ölçmeleri kampanyası düzenlenmiştir. Bu kampanya dâhilinde düşey gradyent değerini belirlemeye yönelik bağıl gravite ölçmeleri LaCoste ve Romberg, D-21F ve G-563F tipi bağıl gravite ölçerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçmeler sırasında, yüzeydeki mutlak gravite noktası üzerine sabit bir tripod adapte edilerek, yine düşey yönde farklı iki konumda ölçmeler yapılmıştır (Wilmes ve diğerleri, 1997).

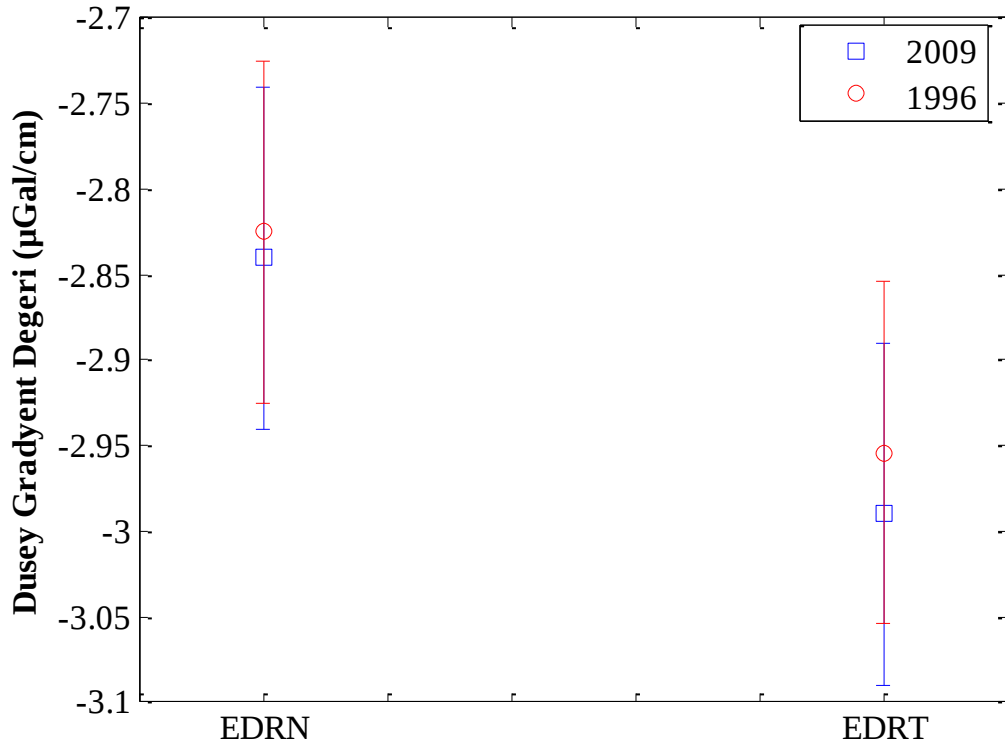
Bu bölümde, 1996 yılında yürütülen çalışmalar ile 2009 yılında düzenlenen kampanyalar sırasında kullanılan ortak noktalarda elde edilen gravite ve düşey gradyent değerleri karşılaştırılmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.8 – 6.9 ve Şekil 6.27 – 6.28’ de gösterilmektedir.

Çizelge 6.8 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş gravite farkları

Nokta	1996-2009 Yılları Arası Gravite Değişimleri (μGal)
EDRN	-46.57
EDRT	-24.47



Şekil 6.27 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş gravite farkları



Şekil 6.28 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş düşey gradyent değerleri

Çizelge 6.9 1996 ve 2009 yıllarında düzenlenen kampanyalarda ortak noktalarda ölçülmüş düşey gradyent değerleri

	Haziran 2009	Ağustos-Ekim 1996
Nokta	Gradyent ($\mu\text{Gal/cm}$)	Gradyent ($\mu\text{Gal/cm}$)
ERDN	-2.840	-2.825
ERDT	-2.990	-2.954

6.6 Gravite Değişimleri Arasında Anlamlılık Testi

Jeodezik deformasyon ölçümlerinin temel amacı, nokta konumlarındaki değişimleri ve bu değişimlere bağlı olarak oluşan obje (mühendislik yapıları, yer kabuğu vb.) deformasyonlarını ortaya koymaktır. Bu nedenle oluşturulan deformasyon ağlarında tekrarlı ölçmeler yapılır.

Deformasyon ölçmelerinde temel olarak, noktaların ülke koordinat sistemindeki konumlarının değişmediği varsayılır, başka bir deyişle yer yüzeyinin hareketsiz olduğu kabul edilir. Dengeleme sonucunda, bilinmeyen noktaların koordinatlarına ait kestirim değerleri ve doğruluk ölçütleri belirlenir. Ağa ait noktalarda yeniden ölçüm yapılmak ya da ağ sıkıştırılmak istendiğinde, daha önceden belirlenmiş olan noktalarda yeniden ölçmeler yapıp değerler test edilmelidir. Ülke jeodezik ağları tasarlanırken hiyerarşik bir düzen izlenir. Özellikle ağ, bir üst derece ağ noktalarına bağlandığında, bağlantı noktalarının konumlarında anlamlı bir değişim olup olmadığı incelenmelidir. Yapılan istatistiksel testlerin sonuçları değerlendirilerek eski noktaların konumlarının değişmediğine ya da nokta konumlarında anlamlı bir değişim olmadığına karar verilirse, bu noktalar sabit kabul edilir.

Mühendislik ölçmelerinde, ülke ölçmelerinde izlenen yolun tersine, gözlemlenen objelerde deformasyon olabileceği düşüncesinden yola çıkılır. Periyodik olarak tekrarlanan ölçümlerin değerlendirilmesi ve analiz edilmesiyle gözlemlenen objenin gerçek deformasyon yapısı belirlenebilir.

Jeodezik kontrol ağları amaca bağlı olarak yerel ve bölgesel niteliktedir. Yerel kontrol ağları 100 m ila 5 km, bölgesel kontrol ağları ise birkaç 100 km genişlikte olabilir. Zemin kaymalarının belirlenmesi amacıyla oluşturulan ağların çok basamaklı yapıda olması; noktaların sağlam zeminde, yarı kararlı ve kayan bölgelerde olması tercih edilir.

Kontrol ağlarına ilişkin ağ planlaması ve değerlendirme adımları, normal ağlarda izlenen yöntemin aynısıdır. Ancak, işlem sırasında aşağıdaki özellikler unutulmamalıdır.

- Sonuçlar ölçme zamanına bağlıdır,

- Nokta koordinatlarından çok bunların fonksiyonlarının doğrulukları ile ilgilenilir,
- Dayanak ve obje noktaları arasındaki farklılık göz önüne alınmalıdır,
- Kontrol ağları sınırlı büyüklüktedir ve ülke temel ağlarından bağımsızdır (Demirel, 1992).

Bu bağlamda, her iki kampanyada da mutlak gravite ölçmeleri yapılan noktaların aynı olması, yani ağ geometrisinin değişmemesi nedeniyle global eşdeğerlik testi uygulanmıştır.

Bir P noktası için hareket vektörü,

$$\vec{d} = |g_i^2 - g_i^1| = |d_g| \quad (6.6)$$

ve bu vektörün boyu,

$$d = \sqrt{d^T d} \quad (6.7)$$

olur. Bu eşitliklerle hesaplanan hareket vektörlerinin anlamlı olup olmadıkları her vektör için,

$$H_0 : d = 0 \quad (6.8)$$

sıfır hipotezi ile test edilmiştir. Test büyüklüğü,

$$T = \frac{d^T Q_{dd}^{-1} d}{S_0^2} \quad (6.9)$$

ile F dağılımının $F_{h,f,1-\alpha}$ sınır değeri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda,

$$T > F_{1,2,0.95} \quad (6.10)$$

durumunda P noktasının iki periyot arasında $1 - \alpha$ güven düzeyi ile hareket ettiği kabul edilmiştir

(Demirel, 2005; Denli, 1998).

İki kampanya sonucunda noktalara ilişkin gravite değerleri arasında anlamlı bir hareket olup olmadığı araştırılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Çizelge 6.10’da verilmektedir.

Çizelge 6.10 Anlamlılık testi sonuçları

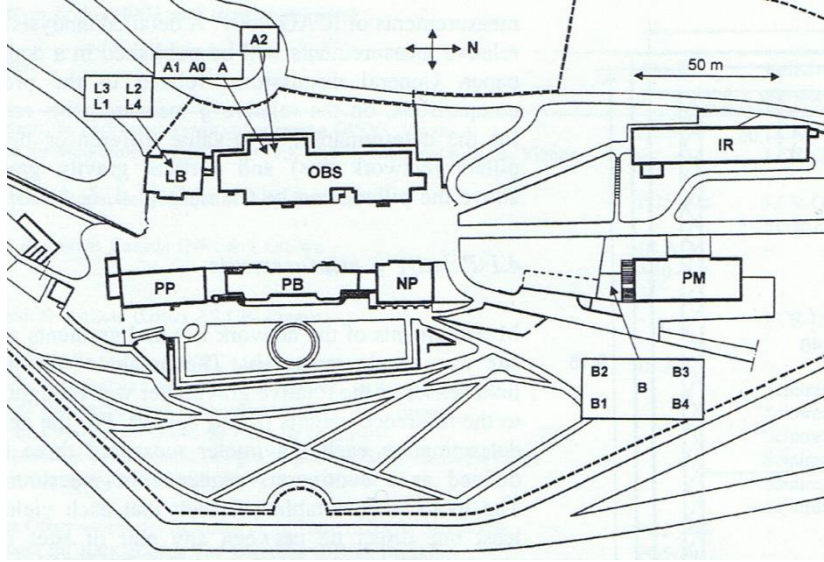
Nokta Adı	Test Değeri	$F_{h,f,1-\alpha}$	Hipotez
BTLT	16.199	18.513	Geçerli
DOLT	1.708	18.513	Geçerli
KIRT	7.842	18.513	Geçerli
TUBI	142.897	18.513	Geçersiz
ULUT	0.119	18.513	Geçerli

Çizelge 6.10’a göre, TUBI noktasındaki T değerinin $F_{h,f,1-\alpha}$ değerinden büyük olduğu gözlenmektedir. Düzenlenecek yeni kampanyalar ile bu noktadaki değişimin yorumlanması daha anlamlı olacaktır.

6.7 A10 Mutlak Gravite Ölçerin Uluslararası Karşılaştırması

1980 yılından günümüze kadar 8 kez düzenlenen Uluslararası Mutlak Gravite Ölçerlerin Karşılaştırılması (ICAG) organizasyonları ile dünyanın farklı yerlerinde bulunan mutlak gravite ölçerlerin metrolojik olarak en iyi kaliteye ulaştırılması amaçlanmaktadır. Fransa’nın başkenti Paris’te bulunan Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) gravite ağında bulunan noktalarda gerçekleştirilen ölçmelerde mutlak gravite ölçerlerin bölgesel olarak karşılaştırılmaları ve mutlak g değerine ilişkin belirsizliklerin hesaplanmasında bireysel ofset değerlerinin ortaya konması amaçlanmaktadır (Vitushkin vd., 2005).

Proje kapsamında, UME’de bulunan A10 mutlak gravite ölçer Eylül 2009’da Fransa’nın başkenti Paris’te bulunan BIPM’de gravite karşılaştırma çalışmasına katılmıştır (Şekil 6.29).

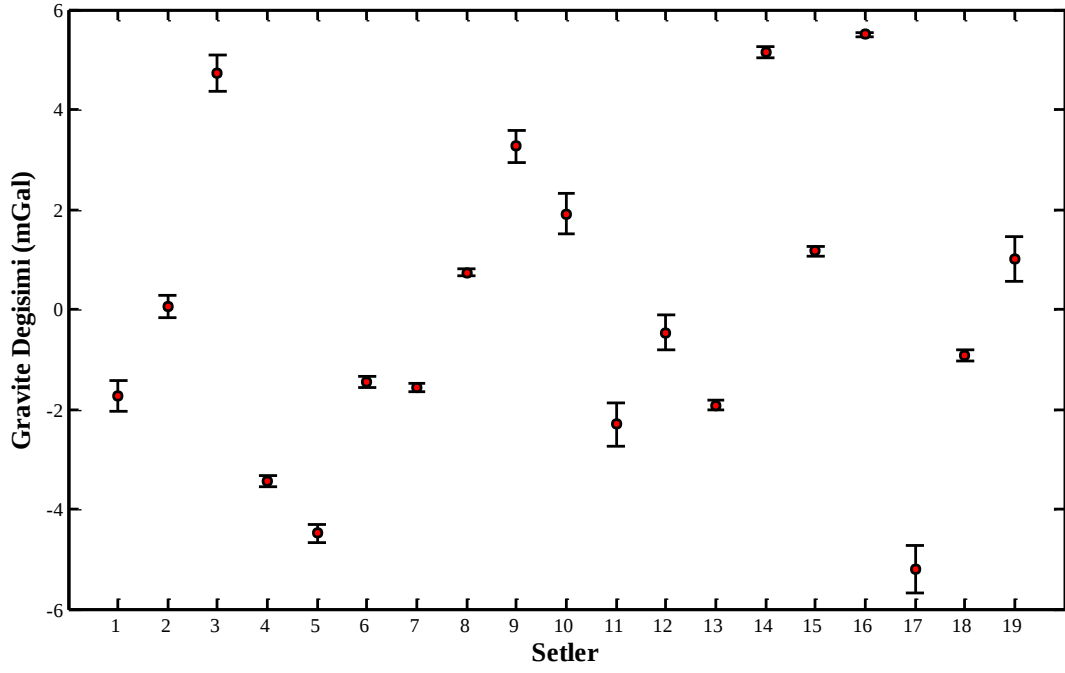


Şekil 6.29 BIPM ölçme noktaları (Vitushkin vd., 2001)

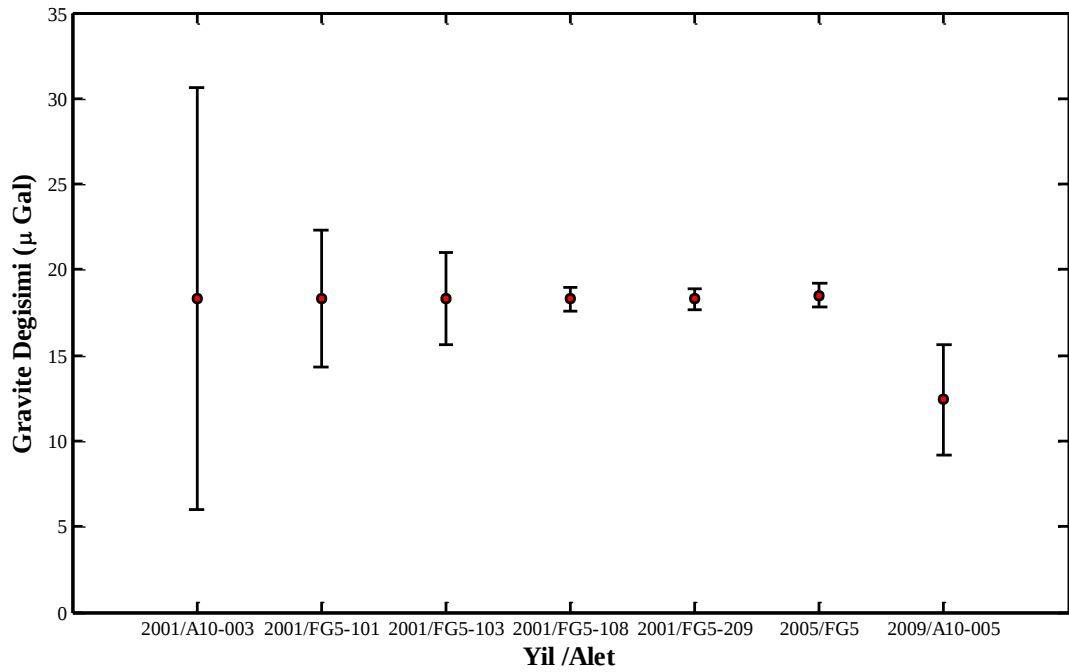
Bu çalışma boyunca elde edilen gravite verileri değerlendirilmiş, 2001 ve 2005 yılında gerçekleştirilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar; Çizelge 6.11, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31 ile verilmektedir.

Çizelge 6.11 Farklı mutlak gravite ölçerlerin karşılaştırılması

Yıl	Nokta Adı	Gravite (μGal)	Standart Sapma (μGal)	Alet
2001	B	980928018,30	12,30	A10-003
2001	B	980928018,30	4,00	FG5-101
2001	B	980928018,30	2,70	FG5-103
2001	B	980928018,30	0,70	FG5-108
2001	B	980928018,30	0,60	FG5-209
2005	B	980928018,50	0,70	FG5
2009	B	980928012,42	3,24	A10-005



Şekil 6.30 A10-005 mutlak gravite ölçer ile B noktasında yapılan ölçüler



Şekil 6.31 Farklı mutlak gravite ölçerler ile B noktasında, farklı yıllarda yapılan ölçüler

Bu sonuçlara göre, ülkemize ait olan A10-005 mutlak gravite ölçer ile farklı mutlak gravite ölçerler kullanılarak BIPM gravite ağında bulunan B noktasında yapılan ölçmeler arasında yaklaşık 6 μGal 'lik bir fark gözlenmektedir.

7. SONUÇ

Marmara Bölgesi’nde “Marmara Bölgesi’ndeki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Mutlak Gravite ve GPS ile Araştırılması” (108Y152 nolu TÜBİTAK 1001 Projesi) projesi kapsamında 17 Ağustos İzmit depreminden sonra ilk defa toplam 10 noktada mutlak gravite ölçme kampanyaları gerçekleştirilmiştir. Bu kampanyalar sonucundan elde edilen mutlak gravite verileri Micro-g8 yazılımı ile değerlendirilmiştir.

Değerlendirme aşamasında ;

- Basınç,
- Karasal gelgit,
- Kutup gezinmesi,
- Okyanus yüklenmesi,

gibi etkiler incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda; karasal gelgit etkisinin noktaya bağlı olarak yaklaşık 100 μGal ’lık bir değişime, kutup gezinmesi etkisinin yine noktaya bağlı olarak 2 μGal ’lık bir değişime ve basınç değişiminin de yine 2 μGal ’lık değişimlere yol açtığı gözlenmiştir. A-10 mutlak gravite ölçer ile mutlak gravite ölçmeleri sonuçlarına getirilecek en doğru gelgit düzeltmesi modelinin, üretici firmanın da önerdiği “ETGTAB” modeli olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, mutlak gravite noktalarında düşey gravite gradyentini belirlemeye yönelik bağlı gravite ölçmeleri gerçekleştirilmiş ve bunlar GravAP yazılımı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düşey gradyent değerinin noktanın deniz yüksekliğinin artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Düşey gravite gradyentini belirlemeye yönelik bağlı gravite ölçmelerinde izlenen yöntemin yeterli olduğu görülmüş, gradyent değerinin mutlak gravite değerine ne kadar etkideği belirlenmiş ve göz ardı edilemeyeceği sonucuna varılmıştır.

Kalibrasyon baz noktalarında yapılan mutlak gravite ölçmeleri iki periyot olarak gerçekleştirilmiş ve değişimlerin anlamlı olup olmadığı araştırılmıştır. Buna göre, oluşan sonuçlar çerçevesinde yeni kampanyalar düzenlenmesinin noktaların gravite değerlerinin yorumlanmasında yararlı olacaktır.

Ölçme ağı tasarlanırken; noktaların durağan zeminlerde seçilmeleri ve şehir merkezlerinden uzakta konumlandırılmaları gerektiği görülmüştür. Bu çalışmada özellikle “BTLT” noktasının şehir merkezinde bulunması nedeniyle araç trafiğinden çok fazla gürültü aldığı gözlenmiştir.

A-10 mutlak gravite ölçerle ölçme işlemlerinin; saniyede 1 düşüş yapılacak şekilde bir sette 150 düşüş ve toplam 12 set olarak oluşturulmasının, ölçme işleminin; manyetik etkilerden kaçınma adına kuzeye yönlendirilerek (ek bir güney ölçümü daha yapılması, bu iki ölçümün sonuçlarının karşılaştırılarak gerekirse bir kuzey ölçümü daha yapılması önerilmektedir) gerçekleştirilmesinin yeterli olacağı gözlenmiştir.

Fransa'nın başkenti Paris'te bulunan BIMP gravite ağında gerçekleştirilen mutlak gravite ölçerlerin karşılaştırılması çalışmalarında, 2009 yılında ülkemize ait A10-005 mutlak gravite ölçer de kullanılmıştır. Bu ağı ait bazı noktalarda, A10-005 mutlak gravite ölçer kullanılarak yapılan ölçmeler ile önceki senelerde farklı mutlak gravite ölçerler ile yapılan ölçmelerden elde edilen sonuçların yaklaşık 6 μGal 'lik bir fark gösterdiği görülmüştür.

Marmara Bölgesi'nde mutlak gravite ölçmeleri kampanyalarına devam edilmesi ile periyodik veri setinin çoğalması, bölgenin düşey yer kabuğu hareketlerinin ortaya konmasında önemli bir yere sahiptir. Ayrıca bu kampanyalar, ülke sınırları içersindeki başka bölgelerde oluşturulabilecek yeni projelere ışık tutacaktır. Bu bağlamda, ülkemizin tektonik yapısını ortaya koymak ve olası bir felaketten kaçınmak adına bu tür çalışmaların devam ettirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Akın, D., Aksoy, A., Demirel, H., Gerstenecker, C., (1989), Gravimetric Levelling Along the North Anatolian Fault Zone between Adapazarı and Bolu, Turkish-German Resaerch Project, edited by J. Zschau and O. Ergünay, s.67-73.
- Alpar, B., Yaltırak, C., (2002), Characteristic Features of the North Anatolian Fault in the Eastern Marmara Region and Its Tectonic Evolution, *Marine Geology*, 190: s.329-350.
- Aydın, C., (2007), Marmara Bölgesi Gravite Değişimlerinin Belirlenmesi İçin Model Tasarımı, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Becker, M., Aksoy, A., Demirel, H., Groten, E., (1985), High Precision Gravity Measurements Across the North Anatolian Fault Zone, Bureau Gravimetrique Internatioanal, Bulletin d'Information, 57: s.31-45.
- Demirel, H., (1992), Deformasyon Analizi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Ders Notları, İstanbul.
- Demirel, H., Ayhan, M.E., Demir, C., (1994), Gravimetric Works in Turkey for the Period 1990-1994, Bureau Gravimetrique International, Bulletin d'Information, 75: s.120-123.
- Demirel, H., (2005), Dengeleme Hesabı, 2. Baskı, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Demoulin, A., Ducarme, B., Everaerts, M., (2007), Seasonal Height Change Influence in GPS and Gravimetric Campaign Data, *Journal of Geodynamics*, 43: s.308-319.
- Denli, H., (1998), GPS ile Marmara Bölgesi'ndeki Yer Kabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğan, U., Demirel, H., Aydın, C., Ergintav, S., Çakmak, R., Belgen, A., Gerstenecker, C., (2007), GPS and Gravity Measurements Along the Western Part of the North Anatolian Fault and Their Relation to Crustal Deformations, *Harita Dergisi*, Özel Sayı 18: s.430-435.
- Doğan, U., Ergintav, S., Arslan, G., Karaböce, B., Gerstenecker, C., Öz, D., Çolak, B., İlgar, A., Aydın, C., Demirel, H., Çakmak, R., Belgen, A., Direnç, A., Kılıçoğlu, A., Sadıkoğlu, E., Bilgiç, E., Kırbaş, C., (2009), Monitoring of Crustal Deformations from 2003 to 2009 in Marmara Region, Turkey: Preliminary Results from Absolute Gravity and GPS Observations, Fall AGU Meeting, San Francisco.
- Doğan, U., (2007), Gravite Ölçme ve Değerlendirmeleri, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Ders Notları, İstanbul.
- Ergintav, S., Doğan, U., Gerstenecker, C., Çakmak, R., Belgen, A., Demirel, H., Aydın, C., Reilinger, R., (2007), A Snapshot (2003–2005) of the 3D Postseismic Deformation for the 1999, Mw=7.4 İzmit Earthquake in the Marmara Region, Turkey, By First Results of Joint Gravity and GPS Monitoring, *Journal of Geodynamics*, 44/1-2: s. 1-18.
- Fukuda, Y., Higashi, T., Takemoto, S., Abe, M., Dwipa, S., Kusuma, D., Andan, A., Doi, K., Imanishi, Y., Arduino, G., (2004), The First Absolute Gravity Measurements in Indonesia, *Journal of Geodynamics*, 38: s.489-501.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H., (2006), 2. Baskı, *Physical Geodesy*, Springer, Viyana-New York.
- Ketin, İ., (1969), Kuzey Anadolu Fayı Hakkında, İTÜ Maden Fakültesi, İstanbul.
- Liard, J., Gagnon, C., (2002), The New A-10 Absolute Gravimeter at the 2001 International Comparison of Absolute Gravimeters, *Metrologia*, 39: s.477-483.

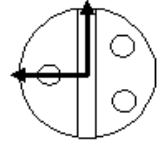
- Mäkinen, J., Amalvict, M., Shibuya, K., Fukuda, Y., (2007), Absolute Gravimetry in Antarctica: Status and Prospects, *Journal of Geodynamics*, 43: s.339-357.
- Micro-g LaCoste, (2008), A-10 Portable Gravimeter User's Manual, Erie, Colorado.
- Micro-g LaCoste, (2005), g User's Manual, Erie, Colorado.
- Müller, J., Falk, R., Wilmes, H., Wziontek, H., (2009), Terrestrische Schweremessungen mit dem Absolutgravimeter A10 in Deutschland, *Geodätische Woche 2009*, Karlsruhe.
- Nagornyi, V., (1995), A New Approach to Absolute Gravimeter Analysis, *Metrologia*, 32: s.201-208.
- Timmen, L., (2003), Precise Definition of the Effective Measurement Height of Free-Fall Absolute Gravimeters, *Metrologia*, 40: s.62-65.
- Torge, W., (2001), *Geodesy*, 3. Baskı, Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Torge, W., (1989), *Gravimetry*, Walter de Gruyter, Berlin-New York.
- Van Camp, M., (2002), Efficiency of Tidal Corrections on Absolute Gravity Measurements at the Membach Station, *Atölye Çalışmaları: IMG-2002 Instrumentation and Metrology in Gravimetry*, 22, s.99-103, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Lüksemburg.
- Van Camp, M., Williams, S., Francis, O., (2005), Uncertainty of Absolute Gravity Measurements, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, B05406 s.1-9.
- Vitushkin, L., Becker, M., Jiang, Z., Francis, O., vd., (2001), Results of the Sixth International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2001 at the Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres.
- Vitushkin, L., Jiang, Z., Robertsson, L., Becker, M., vd., (2005), Results of the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2005 at the Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres.
- Wilmes, H., Falk, R., Lothhammer, A., Kressman, A., Lang, O., Kılıçoğlu, A., (1997), Absolute Gravity Campaign in Turkey 1996 –First Results, *Second Turkish-German Joint Geodetic Days*, s.51-59, Berlin.
- Yılmaz. Y., Gökaşan, E., Erbay, Y., (2009), *Morphotectonic Development of the Marmara Region, Tectonophysics*.

EKLER

Ek 1. A10 mutlak gravite ölçer ölçüm çizelgesi

A10 MUTLAK GRAVİTE ÖLÇER ÖLÇÜM ÇİZELGESİ

Proje Adı: _____ Dosya Adı: _____ Gözlemci: _____ Tarih: _____ Saat Aralığı: _____	Hava Durumu: _____ Sıcaklık: _____ °C Basınç: _____ mBar Rüzgar: <hafif> <sert> <değişken> <yok> <_____> Yönü: _____ Rüzgar Koruması: _____																																																													
Ölçüm Noktası Bilgileri																																																														
Adı/Numarası: _____ Gradyent: _____ µgal/cm İşaretleme: <Çivi> <Taş> <Pilye> <Yok> <_____> Aletin Konumu: ? Ölçüm Noktası Üzerinde ? Ölçüm Noktası Yanında (Gradyent: _____ µgal/cm Uzaklık: _____ m Doğrultu: _____) Yeraltı Durumu: <Beton Tabanlı> <Kaya> <Asfalt> <Kum> <Buz> <_____>																																																														
Konum Boylam: _____ Enlem: _____ Yükseklik: _____ Yöntem: <Yersel Ölçümler> <GPS> <Haritadan> <_____>																																																														
Proje Bilgileri																																																														
Drop to Drop Scatter: _____ Fotoğraf: ? Hayır Ölçüm; _____ Set, _____ Drop ? Evet _____ ? Saat Kontrolü																																																														
Alet Bilgileri																																																														
	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:15%;"></th> <th style="width:15%;">Başlangıç</th> <th style="width:15%;"></th> <th style="width:15%;"></th> <th style="width:15%;"></th> <th style="width:15%;">Bitiş</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Deklinasyon 1. Durum</td> <td>X:</td> <td></td> <td>-----</td> <td>-----</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td>Y:</td> <td></td> <td>-----</td> <td>-----</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Deklinasyon 2. Durum</td> <td>X:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Fringe</td> <td>Genlik</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Titreşim Frekansı</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Sıcaklık</td> <td>1. Durum</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2. Durum</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">İyon Pompa</td> <td>Akım</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Gerilim</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Başlangıç				Bitiş	Deklinasyon 1. Durum	X:		-----	-----	-----	Y:		-----	-----	-----	Deklinasyon 2. Durum	X:					Y:					Fringe	Genlik					Titreşim Frekansı					Sıcaklık	1. Durum					2. Durum					İyon Pompa	Akım					Gerilim				
	Başlangıç				Bitiş																																																									
Deklinasyon 1. Durum	X:		-----	-----	-----																																																									
	Y:		-----	-----	-----																																																									
Deklinasyon 2. Durum	X:																																																													
	Y:																																																													
Fringe	Genlik																																																													
	Titreşim Frekansı																																																													
Sıcaklık	1. Durum																																																													
	2. Durum																																																													
İyon Pompa	Akım																																																													
	Gerilim																																																													
Tripod Kullanımı: ? Hayır ? Evet (Yüksekliği: _____ cm)																																																														
Sonuç Gravite Değeri: _____ ± _____ Gel-Git Modeli: _____ Düzeltmeler: <Polar Motion> <Barometrik> <Yükseklik>	Yorumlar																																																													



Ek 2. CINA noktasına ait değerlendirme sonrası çıktı dosyası örneği

Micro-g Solutions g Processing Report

File Created: 12/29/09, 17:19:50

Project Name: UME28Haz2009_29aralik

g Acquisition Version: 2.110500

g Processing Version: 8.090227

Company/Institution:

Operator:

Station Data

Name: Cinarcik

Site Code: CINA

Lat: 40.63947 Long: 29.14313 Elev: 132.17 m

Setup Height: 0.00 cm

Transfer Height: 0.00 cm

Actual Height: 72.00 cm

Gradient: -3.440 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$

Nominal Air Pressure: 997.47 mBar

Barometric Admittance Factor: 0.30

Polar Motion Coord: 0.1208 " 0.5367 "

Earth Tide (ETGTAB) Selected

Potential Filename: C:\Program Files\Micro-g Solutions
Inc\gwavefiles\ETCPOT.dat

Delta Factor Filename: C:\gData\OceanLoad-Cinarcik.dff

Delta Factors

Start	Stop	Amplitude	Phase Term
0.000000	0.000001	1.000000	0.0000 DC
0.000002	0.249951	1.160000	0.0000 Long
0.721500	0.906315	1.154250	0.0000 Q1
0.921941	0.974188	1.154240	0.0000 O1
0.989049	0.998028	1.149150	0.0000 P1
0.999853	1.216397	1.134890	0.0000 K1
1.719381	1.906462	1.161720	0.0000 N2
1.923766	1.976926	1.161720	0.0000 M2
1.991787	2.002885	1.161720	0.0000 S2
2.003032	2.182843	1.161720	0.0000 K2
2.753244	3.081254	1.07338	0.0000 M3
3.791964	3.937897	1.03900	0.0000 M4

Ocean Load ON, Filename: C:\gData\OceanLoad-Cinarcik.olf

Waves:	M2	S2	K1	O1	N2	P1	K2	Q1	Mf	Mm	Ssa
Amptd. (μGal):	0.675	0.242	0.173	0.143	0.139	0.058	0.065	0.031	0.021	0.008	0.004
Phase (deg):	18.8	-6.4	149.9	-204.7	32.1	148.4	-9.5	-179.1	3.0	24.4	-127.8

Instrument Data

Meter Type: A10

Meter S/N: 005

Factory Height: 72.00 cm
 Rubidium Frequency: 10000000.00600 Hz
 Offset: 0.000 μGal
 Laser: L-Series (000000)
 Blue Lock: 632.99096840 nm
 Red Lock: 632.99186660 nm

Processing Results

Date: 06/28/09
 Time: 10:29:53
 DOY: 179
 Year: 2009
 Time Offset (D h:m:s): 0 0:0:0
 Gravity: xxxxxxxxxxxx μGal
 Set Scatter: 3.99 μGal
 Measurement Precision: 1.15 μGal
 Total Uncertainty: 10.78 μGal
 Red/Blue Separation: 15.37 μGal
 Number of Sets Collected: 12
 Number of Sets Processed: 12
 Set #s Processed: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12
 Number of Sets NOT Processed: 0
 Set #s NOT Processed:
 Number of Drops/Set: 150
 Total Drops Accepted: 1495
 Total Drops Rejected: 305
 Total Fringes Acquired: 350
 Fringe Start: 10
 Processed Fringes: 280
 GuideCard Multiplex: 4
 GuideCard Scale Factor: 250

Acquisition Settings

Set Interval: 4 min
 Drop Interval: 1 sec
 Number of Sets: 12
 Number of Drops: 150

Frequency Response Enabled

Maximum Terms: 3
 Minimum Frequency: 10.000 Hz
 Significance Threshold: 0.200

Gravity Corrections

Earth Tide (ETGTAB): -8.10 μGal
 Ocean Load: -0.34 μGal
 Polar Motion: 2.95 μGal
 Barometric Pressure: -0.85 μGal
 Transfer Height: 247.68 μGal

Reference Xo: -0.00 μGal

Uncertainties

Sigma Reject: 2.00

Earth Tide Factor: 0.001

Average Earth Tide Uncertainty: 0.01 μGal

Ocean Load Factor: 0.10

Average Ocean Load Uncertainty: 0.03 μGal

Barometric: 1.00 μGal

Polar Motion: 0.05 μGal

Laser: 0.05 μGal

Clock: 0.50 μGal

System Type: 10.00 μGal

Tidal Swell: 0.00 μGal

Water Table: 0.00 μGal

Unmodeled: 0.00 μGal

System Setup: 3.00 μGal

Gradient: 2.160 μGal (0.030 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$)

Comments

Polar datasi yenilenecek.

Ek 3. ULUT noktasına ait değ rlendirme sonrası  ıktı dosyası  rneği**Micro-g Solutions g Processing Report**

File Created: 12/29/09, 17:00:38

Project Name: UME21Eki2009_29aralik

g Acquisition Version: 2.110500

g Processing Version: 8.090227

Company/Institution:

Operator:

Station Data

Name: ULUDAG

Site Code: ULUT

Lat: 40.05980 Long: 29.13230 Elev: 1982.76 m

Setup Height: 0.00 cm

Transfer Height: 0.00 cm

Actual Height: 72.00 cm

Gradient: -3.730 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$

Nominal Air Pressure: 796.65 mBar

Barometric Admittance Factor: 0.30

Polar Motion Coord: 0.2490 " 0.2815 "

Earth Tide (ETGTAB) Selected

Potential Filename: C:\Program Files\Micro-g Solutions
Inc\gwavefiles\ETCPOT.dat

Delta Factor Filename: C:\gData\OceanLoad-ULUDAG.dff

Delta Factors

Start	Stop	Amplitude	Phase Term
0.000000	0.000001	1.000000	0.0000 DC
0.000002	0.249951	1.160000	0.0000 Long
0.721500	0.906315	1.154250	0.0000 Q1
0.921941	0.974188	1.154240	0.0000 O1
0.989049	0.998028	1.149150	0.0000 P1
0.999853	1.216397	1.134890	0.0000 K1
1.719381	1.906462	1.161720	0.0000 N2
1.923766	1.976926	1.161720	0.0000 M2
1.991787	2.002885	1.161720	0.0000 S2
2.003032	2.182843	1.161720	0.0000 K2
2.753244	3.081254	1.07338	0.0000 M3
3.791964	3.937897	1.03900	0.0000 M4

Ocean Load ON, Filename: C:\gData\OceanLoad-ULUDAG.olf

Waves:	M2	S2	K1	O1	N2	P1	K2	Q1	Mf	Mm	Ssa
Amptd. (μGal):	0.676	0.243	0.181	0.145	0.139	0.061	0.066	0.032	0.019	0.008	0.003
Phase (deg):	19.1	-5.9	150.5	-204.2	32.2	149.1	-8.9	-179.2	4.8	30.4	-150.0

Instrument Data

Meter Type: A10

Meter S/N: 005

Factory Height: 72.00 cm
 Rubidium Frequency: 10000000.00600 Hz
 Offset: 0.000 μGal
 Laser: L-Series (000000)
 Blue Lock: 632.99096810 nm
 Red Lock: 632.99187503 nm

Processing Results

Date: 10/21/09
 Time: 09:39:58
 DOY: 294
 Year: 2009
 Time Offset (D h:m:s): 0 0:0:0
 Gravity: xxxxxxxxxxxx μGal
 Set Scatter: 3.41 μGal
 Measurement Precision: 1.21 μGal
 Total Uncertainty: 10.79 μGal
 Red/Blue Separation: 3.43 μGal
 Number of Sets Collected: 8
 Number of Sets Processed: 8
 Set #s Processed: 1,2,3,4,5,6,7,8
 Number of Sets NOT Processed: 0
 Set #s NOT Processed:
 Number of Drops/Set: 150
 Total Drops Accepted: 992
 Total Drops Rejected: 208
 Total Fringes Acquired: 350
 Fringe Start: 10
 Processed Fringes: 280
 GuideCard Multiplex: 4
 GuideCard Scale Factor: 250

Acquisition Settings

Set Interval: 4 min
 Drop Interval: 1 sec
 Number of Sets: 16
 Number of Drops: 150

Frequency Response Enabled

Maximum Terms: 3
 Minimum Frequency: 10.000 Hz
 Significance Threshold: 0.200

Gravity Corrections

Earth Tide (ETGTAB): -41.16 μGal
 Ocean Load: 0.51 μGal
 Polar Motion: -1.52 μGal
 Barometric Pressure: 1.40 μGal
 Transfer Height: 268.56 μGal

Reference Xo: -0.00 μGal

Uncertainties

Sigma Reject: 2.00

Earth Tide Factor: 0.001

Average Earth Tide Uncertainty: 0.04 μGal

Ocean Load Factor: 0.10

Average Ocean Load Uncertainty: 0.05 μGal

Barometric: 1.00 μGal

Polar Motion: 0.05 μGal

Laser: 0.05 μGal

Clock: 0.50 μGal

System Type: 10.00 μGal

Tidal Swell: 0.00 μGal

Water Table: 0.00 μGal

Unmodeled: 0.00 μGal

System Setup: 3.00 μGal

Gradient: 2.160 μGal (0.030 $\mu\text{Gal}/\text{cm}$)

Comments

polar yenilenecek enlem boylam ve yukselti degisecek etgtab tekrar yuklenecek

Ek 4. EDRT noktasına ait değerlendirme sonrası çıktı dosyası örneği

Set	Time	DOY	Year	Gravity	Sigma	Error	Uncert	Tide	Load	Baro	Polar	Transfer	Refxo	Temp	Pres	Chan5	Chan6	Chan7	Accept	Reject
1	10:48:24	181	2009	xxx	33.051	3.03	11.14	-11.773	-0.666	0.449	2.603	215.28	-0.004	34.96	1014.148	0.017	0	0.004	119	31
2	10:52:49	181	2009	xxx	25.241	2.661	11.046	-12.764	-0.662	0.435	2.603	215.28	-0.004	34.875	1014.101	0.024	0	0.004	90	60
3	10:57:03	181	2009	xxx	74.336	6.446	12.509	-13.684	-0.658	0.435	2.603	215.28	-0.004	34.834	1014.101	0.024	0	0.004	133	17
4	11:01:12	181	2009	xxx	63.218	5.771	12.175	-14.559	-0.653	0.445	2.603	215.28	-0.004	34.828	1014.133	0.025	0	0.004	120	30
5	11:05:32	181	2009	xxx	63.546	5.661	12.123	-15.443	-0.647	0.427	2.603	215.28	-0.004	34.886	1014.073	0.026	0	0.004	126	24
6	11:09:53	181	2009	xxx	83.276	7.304	12.972	-16.298	-0.64	0.419	2.603	215.28	-0.004	34.975	1014.047	0.026	0	0.004	130	20

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	14.10.1983
Doğum yeri	Tekirdağ
Lise	1994-2001 Çerkezköy Hacı Fahri Zümbül Anadolu Lisesi
Lisans	2002-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2007-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Müh. Anabilim Dalı, Geomatik Programı
	2008-2009 Darmstadt Teknik Üniversitesi Fiziksel Jeodezi Enstitüsü (Almanya) Erasmus Değişim Programı
Rol aldığı projeler	
	2007-2008 Florya Yolunun Ötelenmesi İnşaatı
	2009 Marmara Bölgesi'ndeki Düşey Yerkabuğu Hareketlerinin Mutlak Gravite ve GPS ile Araştırılması
	2009-Devam ediyor Atatürk Hava Limanı Önü Katlı Kavşak ve Bağlantı Yolları İnşaatı