

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİLT ÖLÇÜMLERİ İLE
YER KABUĞU DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa Kemal KOŞMA**

Anabilim Dalı : Jeofizik Mühendisliği

Programı : Jeofizik Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİLT ÖLÇÜMLERİ İLE
YER KABUĞU DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mustafa Kemal KOŞMA
(505081407)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2011

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Haluk EYİDOĞAN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Aysun GÜNEY (İTÜ)
Prof. Dr. Asım Oğuz ÖZEL (İÜ)**

HAZİRAN 2011

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans çalışmam sırasında bilgi ve tavsiyelerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocalarım Prof. Dr. Haluk Eyidoğan ve Doç. Dr. Semih Ergintav’a teşekkür ederim.

TARAL 1007 kapsamındaki 105G019 “Türkiyenin Deprem Riski Yüksek -ancak tektonik rejimleri farklı- Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması (TÜRDEP)” projesi kapsamında elde edilen verileri kullanma olanağı sağladıkları için TÜBİTAK MAM YDBE Enstitü Müdürü Doç. Dr. Sedat İnan ve Müdür Yardımcısı Doç. Dr. Semih Ergintav’a tekrar teşekkür ederim.

Mayıs 2011

Mustafa Kemal KOŞMA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. YER KABUĞU DEFORMASYONLARININ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	5
2.1 Yer Kabuğu Deformasyonlarının Sınıflandırılması	5
2.1.1 Elastik davranış	6
2.1.2 Plastik davranış	8
2.1.3 Viskoz davranış.....	9
2.2 Deformasyona Etki Eden Faktörler.....	11
2.3 Yer Kabuğu Deformasyonlarının Ölçüm Teknikleri.....	13
2.3.1 Yersel teknikler	15
2.3.1.1 Tiltmetre ölçümleri.....	15
2.3.1.2 Strainmetre ölçümleri.....	19
2.3.1.3 Kripmetre ölçümleri	20
2.3.2 Uzaysal teknikler.....	21
2.3.2.1 VLBI	21
2.3.2.2 SLR	23
2.3.2.3 InSAR.....	24
2.3.2.4 GPS	26
3. TİLTMETRE GÖZLEM AĞLARINA AİT DÜNYADAN ÖRNEKLER.....	29
4. GÖNEN VE TÜRKÖĞLU TİLTMETRE GÖZLEM AĞLARI.....	33
4.1 Çalışma Alanı	33
4.1.1 Gönen/Balıkesir	33
4.1.2 Türkoğlu/Kahramanmaraş	34
4.2 Sistem Tasarımı.....	34
4.3 İstasyonların Kurulumu.....	36
4.3.1 Gönen pilot bölgesi	36
4.3.2 Türkoğlu pilot bölgesi.....	41
4.4 Veri Toplama Stratejisi	42
5. TİLTMETRE VERİLERİNİN ANALİZİ	45
5.1 Verilerin Temizlenmesi.....	48
5.1.1 Kaymaların ve iğneciklerin giderilmesi	49
5.1.2 Gelgit etkisinin giderilmesi	50
5.2 Diğer Verilerle İlişkilerin İrdelenmesi	54
5.2.1 Meteoroloji ve hidroloji verileri.....	54
5.2.2 Deprem verileri	57
5.2.2.1 Gönen/Tütüncü depremi (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$)	59

5.2.2.2 Susurluk/Göbel depremi (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$)	61
5.2.2.3 Biga/Sinekçi depremi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$)	64
5.2.2.4 Osmaniye/Düziçi depremi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$).....	67
6. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR.....	79
EKLER.....	85
EK A. GÖNEN VE TÜRKOĞLU PİLOT BÖLGELERİNE AİT JEOLJİK	
HARİTALAR.....	87
EK B. İSTASYONLARA AİT ZAMAN SERİLERİ	89
ÖZGEÇMİŞ	93

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ALAA	: Alaattin Tiltmetre Gözlem İstasyonu
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
ATIC	: Atıcıoba Tiltmetre Gözlem İstasyonu
AYDN	: Aydıncavak Tiltmetre Gözlem İstasyonu
CDP	: Crustal Dynamics Program
CNRL	: Çınarlı Tiltmetre Gözlem İstasyonu
COBA	: Çobanhamidiye Tiltmetre Gözlem İstasyonu
DAFS	: Doğu Anadolu Fay Sistemi
DB	: Doğu-Batı
D-InSAR	: Differential - Interferometric Synthetic Aperture Radar
EAS	: Ege Açılma Sistemi
EDM	: Electronic Distance Measurement
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
HBBK	: Hacıbebek Tiltmetre Gözlem İstasyonu
HSRI	: Hot Springs Research Institute of Kanagawa
InSAR	: Interferometric Synthetic Aperture Radar
KAFS	: Kuzey Anadolu Fay Sistemi
KG	: Kuzey-Güney
KSIK	: K.S.İ. Üniversitesi Tiltmetre Gözlem İstasyonu
MAM	: Marmara Araştırma Merkezi
MB	: Megabayt
MEMS	: Microelectromechanical systems
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	: Navigation System with Time and Ranging
PBO	: The Plate Boundary Observatory
SAFOD	: San Andreas Fault Observatory at Depth
SAR	: Synthetic Aperture Radar
SLR	: Satellite Laser Ranging
TARAL	: Türkiye Araştırma Alanı
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TÜRDEP	: Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek -ancak tektonik rejimleri farklı- Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması
UNAVCO	: University NAVSTAR Consortium
USGS	: United States Geological Survey
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
VM	: Verbaandert Melchior

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Lippmann kuyu içi tiltmetrelerin teknik özellikleri.	36
Çizelge 4.2 : Gönen civarında kurulan tilt istasyonlarının konumları.....	37
Çizelge 4.3 : Türkoğlu civarında kurulan tilt istasyonlarının konumları.....	41
Çizelge 5.1 : Lipmann kuyu içi tiltmetrelere ait kullanılabilir örnekleme oranları ve karşılık gelen ortalamalar	45
Çizelge 5.2 : Örnek seri port çıktısı	46
Çizelge 5.3 : Kaydedilen dosyalara ait içerik ve format bilgileri.	46
Çizelge 5.4 : Gelgit hesabında kullanılan potansiyel modeller.	52
Çizelge 5.5 : Alaattin istasyonu gelgit analizi sonuçları.....	54
Çizelge 5.6 : Gönen bölgesinden seçilen depremler.....	57
Çizelge 5.7 : Türkoğlu bölgesinden seçilen depremler	57
Çizelge 5.8 : İncelenen depremlere ilişkin elde edilen bulgular.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yerkürenin kabuk ve mağma kesimindeki malzemenin davranışını gösteren diyagram (Hatcher, 1995).	5
Şekil 2.2 : Yayın elastik davranışı	6
Şekil 2.3 : Elastik cismin gerilme deformasyon grafiği (Dirik, 2006).	7
Şekil 2.4 : Kırılgan cismin gerilme deformasyon grafiği (Dirik, 2006).	7
Şekil 2.5 : Çevresel basınç altında deformasyona uğrayan kireçtaşının gerilme-deformasyon diyagramı. A, Plastik deformasyonun başladığı noktayı; B, eksenel yükün kaldırıldığı noktayı; C, ikinci yüklemeyi; D, plastik deformasyonu ve E, kopma noktasını göstermektedir (Dirik, 2006).	8
Şekil 2.6 : Plastik malzemenin gerilme deformasyon grafiği.....	8
Şekil 2.7 : Değişik deformasyon tiplerini modellemek için kullanılan temel iki model.	9
Şekil 2.8 : Maxwell ve Kelvin modellerinin şematik gösterimi.	10
Şekil 2.9 : İdeal mekanik modeller ve değişik karakterdeki deformasyon grafikleri.11	
Şekil 2.10 : Çevresel basıncın değişik kayaçlar üzerindeki etkisi (Paterson, 1958; Badgley, 1965).	12
Şekil 2.11 : Isı ve sıvıların mermerin deformasyonu üzerindeki etkisi.	12
Şekil 2.12 : Deformasyon ölçüm tekniklerinin karşılaştırılması. Strain, Tilt, GPS ve InSAR ölçüm tekniklerinde periyodun fonksiyonu olarak yamulma hassasiyeti eşik değerleri şematik olarak gösterilmiştir. Çapraz çizgiler GPS(yeşil çizgi) ve InSAR(mavi çizgi) için 10 km'lik baz mesafesindeki ölçüm hassasiyet eşiklerini temsil etmektedir. Buradaki yerdeğiştirme çözünürlüğü yatayda GPS için 2 mm, InSAR için 2 cm olarak öngörülmüştür. Uzun dönem deformasyonların ve levha hareketlerinin belirlenmesinde GPS ve InSAR tekniklerinde yamulma oranı ölçüm hassasiyetleri daha iyidir. Strainmetre ve tiltmetre(kırmızı çizgi) teknikleri ise 1 haftalık bir periyotta tüm yöntemler içinde azami hassasiyete ulaşırken 10 yıl ve katları olan periyotlarda GPS ve InSAR gibi tekniklere oranla hassasiyetleri azalır. Tüm tekniklerin birlikte kullanımı depremlerin, volkanik patlamaların ve levha hareketlerinin tespitinde en iyi sonucu verir. Silver ve diğ, (1999)'dan değiştirilerek alınmıştır.	14
Şekil 2.13 : Mauna Loa Volkanı'nda bulunan tiltmetre (Url-2).	15
Şekil 2.14 : Zöllner tipi tiltmetrenin şematik gösterimi.	16
Şekil 2.15 : 241 metre uzunluğundaki su tüplü tiltmetre, Pozzuoli-İtalya (Url-3). ...	17
Şekil 2.16 : Modern elektrolit solüsyonlu tiltmetrenin yapısı ve çalışma prensibi. ..	18
Şekil 2.17 : Japonya Kamioka Gözlemevi'ndeki lazer strainmetre (Url-4).	20
Şekil 2.18 : Tipik bir kriptomatrenin işleyişi (Bilham ve diğ., 2004)	21
Şekil 2.19 : VLBI çalışma prensibi.	22
Şekil 2.20 : Mount Pleasant Radyo Teleskobu, Avustralya (Url-5).	23
Şekil 2.21 : SLR çalışması, Goddard Jeofizik ve Astronomi Gözlemevi (Url-6).	24
Şekil 2.22 : InSAR çalışma prensibi.	25

Şekil 2.23 : GPS'in ana bileşenleri.	26
Şekil 3.1 : Etna Yanardağı'ndaki tiltmetre gözlem ağı ve tiltmetrenin kuyu içi yerleşimi şematik gösterimi (Ferro ve diğ., 2011).	31
Şekil 4.1 : Gönen pilot bölgesinde işletilmekte olan tiltmetre istasyonlarının konumu. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.	33
Şekil 4.2 : Türkoğlu pilot bölgesine işletilmekte olan tiltmetre istasyonlarının konumu. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.	34
Şekil 4.3 : Lippmann tiltmetresinin ve çevre birimlerlerinin bağlantısının şematik gösterimi.	35
Şekil 4.4 : Lippman kuyu içi tiltmetre cihazının iç yapısı.	35
Şekil 4.5 : Tiltmetrenin oturtulduğu zeminin betonlanması ve kuyu tabanına ilişkin boyutlar.	37
Şekil 4.6 : Tiltmetre kuyu çapının derinlikle değişimi, kuyu kapakları ve sondaj borusunun çimentolanmasını temsil eden plan (İnan, 2010).	38
Şekil 4.7 : Atıcıoba istasyonunda kuyu ağzının görünümü.	39
Şekil 4.8 : Tiltmetrelerin kuyu dibinde yer alacağı iki metrelik bölümde ayrı çapda ve altı kapalı özel çelik borular.	39
Şekil 4.9 : Tiltmetre istasyonları için tasarlanmış olan kulübeler.	40
Şekil 4.10 : İstasyona tiltmetre sisteminin yerleştirilmesi.	40
Şekil 4.11 : K.S.İ. Üniversitesi Kampüs tilt istasyonu sondaj çalışmaları.	41
Şekil 4.12 : K.S.İ. Üniversitesi Kampüs tilt istasyonu için su basmanı kaidesi üzerinde kulübenin yerleştirilmesi ve enerji kaynağının güneş panelleri ile sağlanması.	42
Şekil 4.13 : Atıcıoba istasyonu ham tilt verisine ait bir günlük zaman serisi.	42
Şekil 5.1 : Azimut düzeltmesi.	48
Şekil 5.2 : Alaattin istasyonunda gelgit etkisinin giderilmesi ait örnek. O1 ve K1 günlük, M2 ve S2 yarım günlük gelgit bileşenleridir.	49
Şekil 5.3 : Aydınkavak istasyonunda sapmaların ve iğneciklerin giderilmesine ait örnek a) ham veri, b) kaymaları giderilmiş veri, c) iğnecikleri giderilmiş veri.	50
Şekil 5.4 : Kaydedilen tilt sinyali ve içerdiği gelgit etkisi. Agnew, (2005)'ten değiştirilerek alınmıştır.	51
Şekil 5.5 : Baskın gelgit bileşenleri (Agnew, 2005).	53
Şekil 5.6 : 10-21 Aralık 1977 tarih aralığındaki meteorolojik ve hidrolojik değişim ile ilişkili tilt anomalisi (Edge ve diğ, 1981).	55
Şekil 5.7 : 27 Mayıs-21 Haziran 1978 tarih aralığındaki basınç değişimi ile ilişkili tilt anomalisi (Edge ve diğ, 1981).	56
Şekil 5.8 : Alaattin istasyonunda kaydedilmiş olan yağışa bağlı tilt anomalisi.	56
Şekil 5.9 : Gönen bölgesinde seçilen depremlerin konumları ve odak mekanizması çözümleri. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.	59
Şekil 5.10 : Türkoğlu bölgesinden seçilen depremlerin konumları ve odak mekanizması çözümleri. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.	59
Şekil 5.11 : Tütüncü (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$) depremi ile ilişkili Atıcıoba istasyonu tilt anomalisi.	60
Şekil 5.12 : Tütüncü (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.	61
Şekil 5.13 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.	62

Şekil 5.14 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Atıcıoba istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	63
Şekil 5.15 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Çobanhamidiye istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	64
Şekil 5.16 : Sinekçi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	65
Şekil 5.17 : Sinekçi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$) depremi ve Atıcıoba istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	66
Şekil 5.18 : Sinekçi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$) depremi ve Çobanhamidiye istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	67
Şekil 5.19 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Aydınkavak istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	68
Şekil 5.20 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Çınarlı istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	69
Şekil 5.21 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Hacıbebek istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	70
Şekil 5.22 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve K.S.İ. Üniversite istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.....	71
Şekil A.1 : Gönen bölgesine ait jeoloji haritası. 1:500.000 ölçekli MTA Jeoloji haritasından alınmıştır.....	87
Şekil A.2 : Türkoğlu bölgesine ait jeoloji haritası. 1:500.000 ölçekli MTA Jeoloji haritasından alınmıştır.....	88
Şekil B.1 : Atıcıoba istasyonu 2007-2008 yıllarına ait grafik.....	89
Şekil B.2 : Atıcıoba istasyonu 2007-2011 yıllarına ait grafik.....	90
Şekil B.3 : Hacıbebek istasyonu 2009-2010 yıllarına ait grafik.....	91

TİLT ÖLÇÜMLERİ İLE YER KABUĞU DEFORMASYONLARININ İZLENMESİ

ÖZET

Yeryuvarındaki kayaçlar üzerine etkiyen sürekli kuvvetler mevcuttur. Bu kuvvetlerin etkisiyle kayaçlar eğilir, bükülür ya da kırılır, kısaca deformasyon olarak adlandırılan şekilsel ya da hacimcel değişime uğrarlar. Yer kabuğunu oluşturan malzemelerin deformasyonları kabaca, kırılğan, sünek ve elastik olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Çevresel basınç, yükleme hızı, sıcaklık, kayaç içi sıvılar, zaman, boşluk basıncı, anizotropi ve inhomojenite kayaçların davranışını kontrol eden dolayısıyla deformasyon karakterini belirleyen önemli faktörlerdir.

Deformasyonların gözlemine yönelik çalışmalarda ilgili bölgede seçilen karakteristik noktalarda zamana ve etken kuvvetlere bağlı olarak anlamlı bir hareketin varlığı araştırılır. Günümüzde kabuk deformasyonları uzaysal ve yersel olarak isimlendirilen iki ana grupta farklı pek çok teknikle (VLBI, SLR, GPS, InSAR, tiltmetre, strainmetre ve kriptometre gibi) ölçülebilir. Bu çalışma kapsamında yersel tekniklerden tilt ölçümleri ve ölçümler için de 1-10 nrad hassasiyete sahip Lippmann kuyu içi tiltmetreler kullanılmıştır.

Çalışma alanı olarak doğrultu atımlı fay sistemleri üzerinde yer alan iki ayrı pilot bölge seçilmiştir. Bu bölgeler sırasıyla Kuzey Anadolu Fay (KAF) Sistemi'nin güney kolu üzerinde yer alan Gönen Pilot Bölgesi ve Doğu Anadolu Fay (DAF) Sistemi üzerinde yer alan Kahramanmaraş-Türkoğlu Pilot Bölgesi'dir. Gönen bölgesinde yaklaşık 3.5 yıldır, Türkoğlu bölgesinde ise 2 yılı aşkın bir süredir gözlemler sürdürülmektedir.

Bu çalışma kapsamında günümüze dek toplanan tiltmetre verilerinin aynı zaman aralığına denk düşen sıcaklık, basınç, günlük toplam yağış miktarları ile her bir istasyona göre 130 km yarıçap içinde meydana gelen, büyüklüğü 4.0 ve üzerindeki depremlerle ilişkileri araştırılmıştır. Tilt ölçümlerinin meteorolojik, hidrolojik olaylardan ve gelgitlerden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası dönemlerde anlamlı tilt değişimleri saptanmıştır.

Tiltmetre gözlemlerinin devam ettirilmesi, ölçüm ağlarının genişletilmesi, bundan sonra yapılacak çalışmalarda çalışma alanının modellenmesi ve çevresel etkilerin giderilerek bölgesel sismik aktiviteyle ilişkilerin daha net ortaya konması yer kabuğu deformasyonlarının ve yeryuvarı davranışlarının daha iyi anlaşılmasını mümkün kılacaktır.

MONITORING THE CRUSTAL DEFORMATIONS BY TILT MEASUREMENTS

SUMMARY

There are continuous forces that act on rocks in the earth. By the effect of these forces rocks are bent, twisted or fractured, briefly subjected to change in volume or size named as deformation. Deformations of the crustal materials can roughly be classified under three major groups: brittle, ductile and elastic. Confining pressure, loading rate, temperature, pore fluids, time, pore pressure, anisotropy and inhomogeneity are the main factors that controls the rock behavior thus determine the deformation character of the rocks.

In deformation observing studies, a meaningful movement due to time and active forces on selected characteristic points is searched on the studied area. Today the crustal deformations can be measured by many various techniques both space and terrestrial such as VLBI, SLR, GPS, InSAR, tiltmeter, strainmeter and creepmeter. In the scope of this study, the terrestrial technique tilt measurements are used with measurements taken by Lippmann borehole tiltmeters with 1-10 nrad precision.

Two separate pilot areas on strike-slip fault zone determined as study area; Gönen Pilot Area on south branch of North Anatolian Fault (NAF) Zone and Kahramanmaraş-Türkoğlu Pilot Zone on East Anatolian Fault (EAF) Zone. Observations are continuing for 3,5 years in Gönen and for over 2 years in Türkoğlu areas.

In the scope of this study, the tiltmeter data collected till today is studied as relations to the temperature, pressure, daily total rainfall and the earthquakes 4.0 and bigger happened in a 130 km radius according to each station within the same time frame. It is observed that tilt measurements are highly affected by meteorological, hydrological events and tides. Significant changes in tilt were detected in pre-, co- and post-seismic periods.

Perpetuating the tiltmeter observations, expanding the measurement networks, in the following studies, modeling of the survey area, removing the environmental impacts from measurements and showing the relation with the local seismic activities in a more clear manner will enable a better understanding of the crustal deformations and behavior of the earth.

1. GİRİŞ

Ülkemiz dünyanın aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp - Himalaya deprem kuşağındadır. Afrika levhasının güneyden kuzeybatıya, Arap levhasının da kuzeye doğru hareketi ve Avrasya levhasının durdurucu etkisi sonucu baskı altında kalan Anadolu levhası üç ana bölgede (KAFS, DAFS ve EAS) sıklıkla deprem üretmektedir. Türkiye'de yapılan istatistiksel çalışmalara göre her bir buçuk yılda bir şiddetli, her üç yılda bir çok şiddetli ve her 35 - 40 yılda bir ise yıkıcı bir deprem meydana gelmektedir. Türkiye'de son yüzyılda meydana gelen 195 hasar yapıcı deprem nedeniyle yaklaşık değerlerle 100 bin kişi ölmüş, 400 bin kişi yaralanmış veya sakat kalmış, 650 bin konut hasar görmüştür. Türkiye topraklarının yüzde 92'si değişen oranlarda deprem tehlikesiyle karşı karşıyadır. Nüfusun %95'i, büyük sanayi merkezlerinin %98'i, barajların %92'si deprem riski altındadır. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı'nın verdiği rakamlara göre ülkemizde yaşanan doğal afet kaynaklı ölümler içinde depremler %64'lük oranla en büyük paya sahiptir (Başbakanlık, 1997; JICA, 2004). Bu büyük bir problemdir ve çözümü noktasında bilim devreye girer.

Bilimin temel işlevlerinden biri insanların yaşamını kolaylaştırmaktır. Doğa bilimlerinde bu hedefe ulaşma yolunda bugün kullanılan yöntem, doğaya dair bilinmeyi tanımlamak, tanımlananı kurallara bağlamak, kurallara bağlı olanı hesaplamak ve tahmin yürütmek, tahminlerin gerçekleştiğini doğrulayarak bilinmeyi bilinen yapmak ve nihai olarak bilineni kontrol altına alabilmektir. Bu noktada deprem bilinmeyen olarak kabul edilmiştir. Günümüzde dünya üzerindeki pek çok araştırmacı depremi anlamak üzerine farklı tekniklerle özelleşmiş alanlarda çalışmalar yapmaktadır. Bu alanlardan biri de yer kabuğu deformasyonlarının belirlenmesidir.

Yer kabuğu deformasyonlarının tespiti, çalışılan bölgede belirlenmiş karakteristik noktalarda zamana ve etken kuvvetlere bağlı olarak anlamlı bir hareketin varlığının araştırılmasına dayanır. Araştırmalar VLBI (Çok Uzun Bazlı İnterferometri), SLR (Uydudan Kesitirmeli Lazer), GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi), InSAR (Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri), strainmetre, kriptometre ve tiltmetre ölçümleri gibi

farklı pek çok teknikle yapılabilir. Johnston ve Mortensen (1974)'de tiltmetreyi, ölçüm hassasiyeti, ucuzluğu, kullanım kolaylığı ve deprem öncesi gösterdiği anomalilerden ötürü deformasyon ölçmelerine en uygun cihaz olarak tanımlanmıştır.

Günümüzde tiltmetre istasyonlarının çoğu volkanik aktiviteye bağlı kabuk deformasyonlarının izlenilmesinde, erken uyarı sistemleri oluşturma amacıyla kullanılmaktadır. Ancak dünyanın farklı yerlerinde depremlerle ilişkili kabuk deformasyonlarını, heyelanları ve barajlar gibi büyük mühendislik yapılarını gözlemlemek üzere de tiltmetre gözlem ağıları mevcuttur. Benzer biçimde ülkemizde Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik "ancak tektonik rejimleri farklı" Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması (TÜRDEP) Projesi kapsamında, Gönen ve Türkoğlu bölgelerinde kurulmuş olan 7 sürekli tiltmetre gözlem istasyonu mevcuttur.

TÜRDEP projesi, TÜBİTAK TARAL 1007 kapsamında 2005-2010 yılları arasında TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü yürütücülüğünde, 14 üniversite ile ortaklaşa gerçekleştirilmiş bir projedir. Proje kapsamında çok disiplinli yaklaşımla yeryuvarının davranışlarını anlayabilmek amacıyla Türkiye'deki farklı tektonik rejimleri kapsayacak şekilde Kuzey Anadolu Fay Sistemi (KAFS), Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) ve Ege Açılma Sistemi (EAS) üzerinde mikrosismoloji, radon, kaynak suyu, GPS ve tilt ölçümleri için sürekli gözlem ağıları kurulmuştur (İnan ve diğ., 2007).

Bu çalışmada amaç ülkemizde şimdiye dek yaygın olarak kullanılmamış olan tilt gözlem ağılarının kurulması, izlenmesi, tilt verilerinin analiz edilmesi, uzun ve kısa dönem yer kabuğu deformasyonlarının tilt ölçümleri ile belirlenmesidir. Çalışmada TÜRDEP projesi kapsamında başlatılan tiltmetre ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. İkinci bölümde yer kabuğu deformasyonlarının tanımı, sınıflandırılması, ölçümünde kullanılan cihaz ve yöntemlerin karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmış ve neden tiltmetre ölçümlerinin seçildiği ayrıntılarıyla izah edilmiştir. Üçüncü bölümde tiltmetre gözlem ağılarına ait dünyadan örneklerle değerlendirilmiştir.

Uygulamada doğrultu atımlı fay sistemleri üzerinde yer alan iki ayrı pilot bölge seçilmiş ve ölçümler bu iki pilot bölgede günümüzde de sürdürülmektedir. Bu bölgelerden biri Kuzey Anadolu Fay Sistemi'nin güney kolu üzerinde yer alan

Gönen Pilot Bölgesi, diğeri ise Doğu Anadolu Fay Sistemi'nin üzerinde yer alan Kahramanmaraş-Türkoğlu Pilot Bölgesi'dir. Çalışma alanına ve istasyonların kurulumun ilişkin ayrıntılar dördüncü bölümde verilmiştir.

Beşinci bölümde istasyonlardan elde edilen tilt verileri analiz edilerek sıcaklık, basınç ve yağış miktarı gibi meteorolojik ve sismolojik verilerle ilişkileri araştırılmıştır. Gönen bölgesinde 01.11.2007 - 01.04.2011 tarih aralığında, Türkoğlu bölgesinde ise 01.04.2009 - 01.04.2011 tarih aralığında, 130 km'lik bir yarıçap içerisinde meydana gelen, büyüklüğü 4.0 ve üzerinde olan depremler seçilmiş, öne çıkan örnekler tartışılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde gelecekte bu alanda yapılabilecek diğer çalışmalara katkı sağlayabilmek amacıyla elde edilen bulgular ve kazanılan deneyime ilişkin detaylar paylaşılmıştır.

2. YER KABUĞU DEFORMASYONLARININ VE ÖLÇÜM TEKNİKLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

2.1 Yer Kabuğu Deformasyonlarının Sınıflandırılması

Topoğrafya ve yerkürenin yüzeysel nitelikleri, büyük ölçüde reolojiye bağlıdır. Reoloji, belirli bir kayacın veya malzemenin değişik basınç, sıcaklık ve diğer koşullar altında deforme olma (şekilsel ya da hacimsel değişime uğrama) tarzı anlamına gelmektedir. Yer kabuğunu oluşturan malzemelerin deformasyonları kabaca, kırılğan, sünek ve elastik olmak üzere üç gruba ayrılır.

Deformasyon tarzları, deformasyon hızıyla önemli ölçüde ilişkilidir. Eğer bir malzeme hızlı bir şekilde deforme edilirse, elastik davranış sergileyebilir. Ancak aynı malzeme daha yavaşça deforme edilirse, aynı sıcaklık ve basınç koşulları altında bile sünek davranışla cevap verebilir.

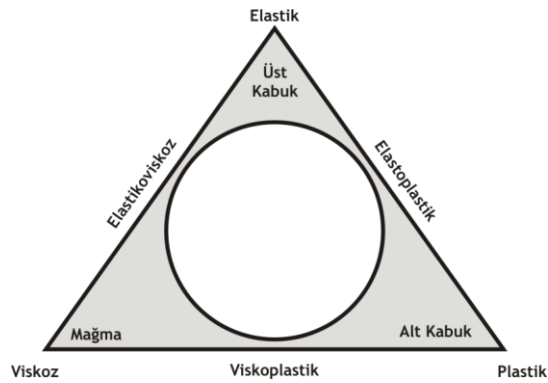
Değişik gerilme ve sıcaklık koşulları altında yer kabuğunu oluşturan malzemelerin davranışları

Elastik davranış,

Plastik davranış,

Viskoz davranış

genel olarak üç ana gruba ayrılır (Şekil 2.1).

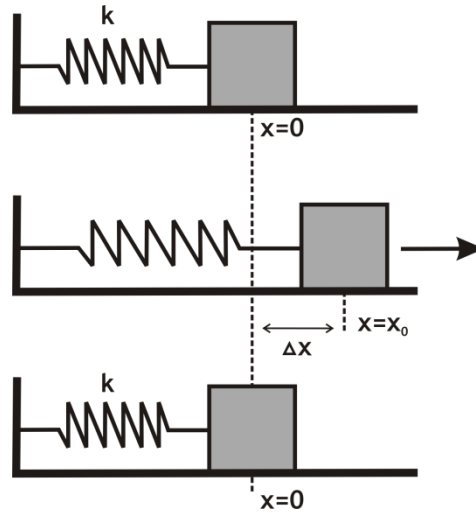


Şekil 2.1 : Yerkürenin kabuk ve magma kesimindeki malzemenin davranışını gösteren diyagram (Hatcher, 1995).

Bu ana gruplar arasında elastoplastik, viskoplastik ve elastikoviskoz olarak isimlendirilen geçiş bölgeleri vardır.

2.1.1 Elastik davranış

Elastik deformasyon geri döndürülebilir deformasyondur. Gerilime maruz kalan malzeme deforme olur ve gerilim devam ettiği sürece bu halini korur ancak gerilim ortadan kalmasıyla malzeme ilk haline döner ve deformasyon kaybolur. Örneğin bir ucu sabitlenmiş k uzunluğunda bir yaya diğer ucundan belirli bir çekme kuvveti uygulandığında yayın boyu Δx kadar uzar. Uygulanan gerilme ortadan kaldırıldığında ise yayın uzunluğu tekrar Δx kadar kısalır ve k kadar olur (şekil 2.2). Bu tip deformasyona elastik deformasyon, malzemenin davranışına da elastik davranış denir.

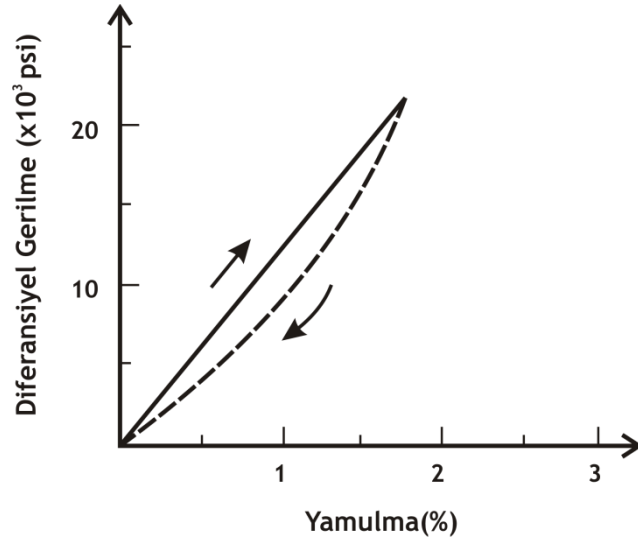


şekil 2.2 : Yayın elastik davranışı

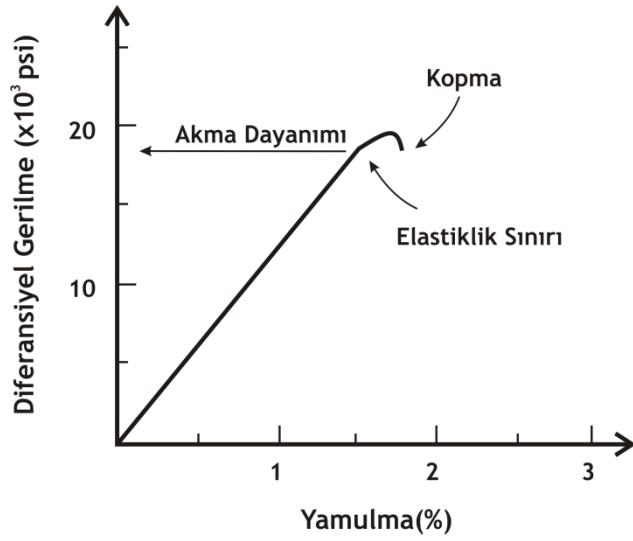
Bu olay boyunca uygulanan gerilmeye karşılık oluşan deformasyon bir grafiğe aktarıldığında gerilme-deformasyon grafiği elde edilir (şekil 2.3).

Elastik cisimlerin gerilme-deformasyon grafikleri bir doğru şeklindedir. Bu zellik ‘‘Hooke Kanunu’’ ile izah edilebilir. Hooke Kanunu’na göre mkemmek elastik bir cisimde deformasyon, gerilmenin doğrusal bir fonksiyonudur (şekil 2.3). Bütün elastik cisimler ancak belirli bir gerilme değerine kadar muhafaza edilebilirler. Bu sınır gerilmesine elastiklik sınırı denir (şekil 2.4). Bu sınırın açılması halinde yk kaldırıldıktan sonra cisimde bir miktar deformasyon kalır; bu deformasyona kalıcı deformasyon denir. Kalıcı deformasyonun kazanılması halinde gerilme-deformasyon

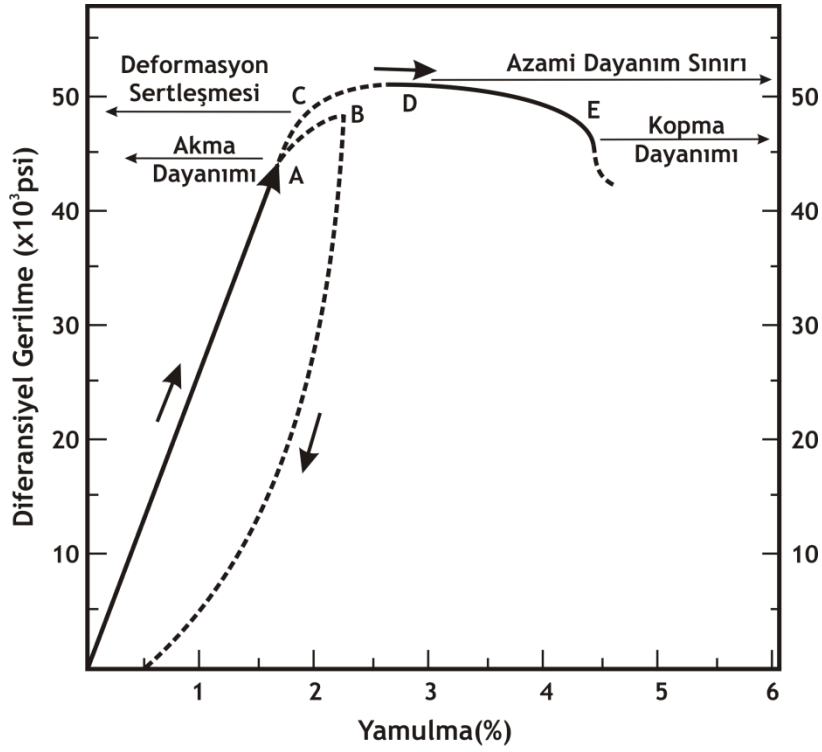
eğrisinde yükün yavaş yavaş azaltılmasına karşı gelen geri dönme aynı yoldan olmaz (Şekil 2.5). Gerilmenin belirli bir değerinde cisim kırılır (Dirik, 2006).



Şekil 2.3 : Elastik cismin gerilme deformasyon grafiği (Dirik, 2006).



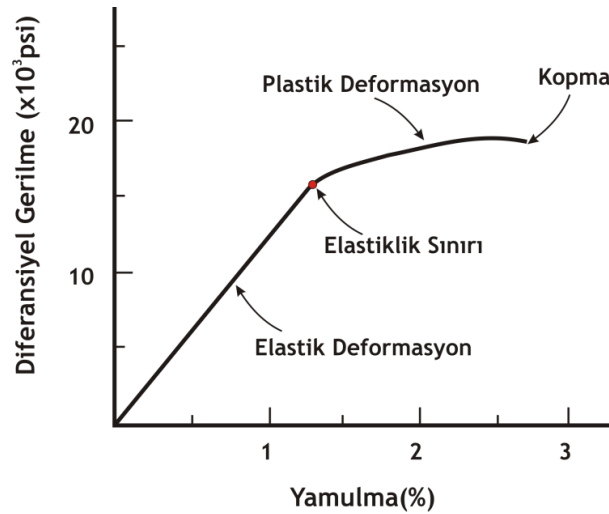
Şekil 2.4 : Kırılgan cismin gerilme deformasyon grafiği (Dirik, 2006).



Şekil 2.5 : Çevresel basınç altında deformasyona uğrayan kireçtaşının gerilim-deformasyon diyagramı. A, Plastik deformasyonun başladığı noktayı; B, eksenel yükün kaldırıldığı noktayı; C, ikinci yüklemeyi; D, plastik deformasyonu ve E, kopma noktasını göstermektedir (Dirik, 2006).

2.1.2 Plastik davranış

Gerilmenin sonlu bir değeri için, gerilme artmasa da deformasyon sürekli artıyorsa, bu tip davranış gösteren malzemeye mükemmel plastik malzeme denir. Mükemmel plastik malzemelerde gerilme, deformasyonun hızına bağlı değildir ve gerilme-deformasyon eğrileri yatay bir çizgiden ibarettir (Şekil 2.6).



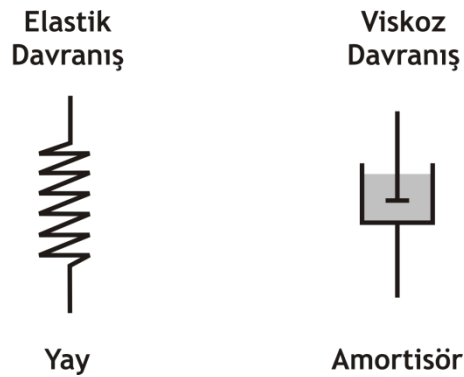
Şekil 2.6 : Plastik malzemenin gerilme deformasyon grafiği

Çoğu malzeme bu sürekli deformasyona belirli bir gerilme değerinden sonra ulaşır ve akma başlar, yani küçük gerilme değerleri için elastik bir cisim gibi davranan malzeme, belirli bir gerilme değerinden (elastiklik sınırı) sonra doğrusal deformasyon halinden ayrılır. Gerilme daha da arttırılırsa malzemede devamlı deformasyon yani uniform akma başlar (Dirik, 2006). Gerilme ortadan kalktığında tam bir geri dönüş olmaz ve malzemede kalıcı deformasyon oluşur.

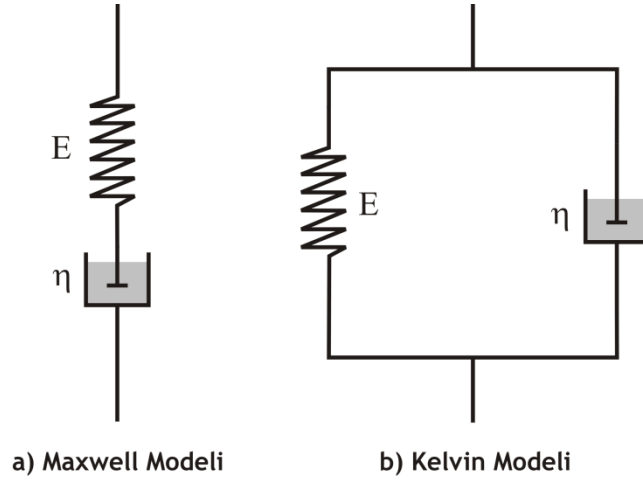
2.1.3 Viskoz davranış

Malzemenin deformasyon sırasında gösterebileceği başka bir davranış tipi de viskoz davranıştır. Bir malzemenin üzerindeki yük kaldırıldığında, şekil değişimi gecikmeli olarak gerçekleşiyorsa buna viskoz davranış denir. Viskoz malzemeler mükemmel akışkanlarla katılar arasında yer alır. Çatlak bir varilden asfaltın sızması gibi bu cisimler kendi ağırlıkları ile dahi, zamana bağlı bir deformasyon gösterirler (Dirik, 2006).

Bazı malzemelerin davranışını açıklamak için elastik, plastik ve viskoz davranış şekilleri tek başına yeterli olmamıştır. Bu durumda elastik ve viskoz davranışlar kullanarak iki malzeme davranış modeli geliştirilmiştir. Bu modeller, elastik davranışı temsil eden Hooke modeli (yay) ve viskoz davranışı temsil eden Newton (amortisör) modelidir. Bu iki modeli kullanarak farklı ve karmaşık diğer malzeme davranışlarını da modellemek mümkün olmuştur (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Değişik deformasyon tiplerini modellemek için kullanılan temel iki model.



Şekil 2.8 : Maxwell ve Kelvin modellerinin şematik gösterimi.

Şekil 2.8a’da gösterildiği gibi, bir yay ile bir amortisörün birbirine seri olarak bağlanmasıyla elde edilen modele Maxwell modeli denir. Maxwell modeli viskoz malzemelerin zamana bağlı deformasyon davranışını açıklamak amacıyla geliştirilmiştir. Birbirine seri olarak bağlanmış yay ve amortisör elemanları, (2.1) eşitliğinde görüldüğü gibi aynı gerilim (σ) altında bulunurlar, ancak oluşan deformasyon değerleri (ϵ), farklıdır (2.2).

$$\sigma_{yay} = \sigma_{amortisör} = \sigma \quad (2.1)$$

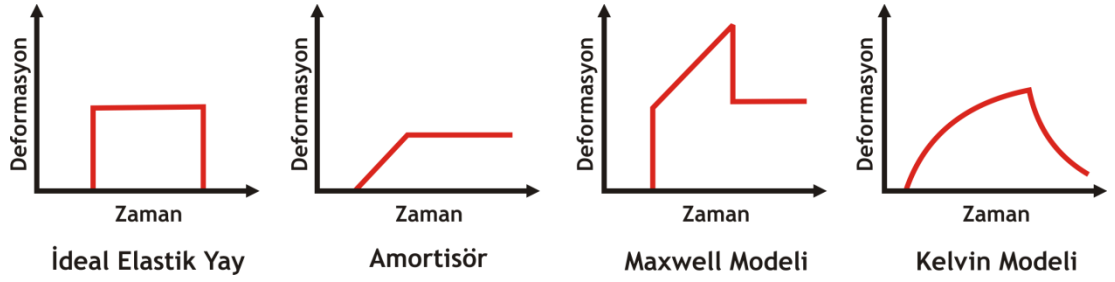
$$\epsilon = \epsilon_{yay} + \epsilon_{amortisör} \quad (2.2)$$

Şekil 2.8b’de ise, bir yay ile bir amortisörün birbirine paralel olarak bağlanmasıyla oluşan Kelvin modeli gösterilmektedir. Kelvin modeli özellikle sünek malzemenin davranışını göstermek için kullanılır. Maxwell modelinden farklı birbirine paralel bağlanmış elemanlar farklı gerilim altında (2.3), aynı deformasyon değerini gösterirler (2.4).

$$\sigma = \sigma_{yay} + \sigma_{amortisör} \quad (2.3)$$

$$\epsilon = \epsilon_{yay} = \epsilon_{amortisör} \quad (2.4)$$

Bu basit mekanik modellerin, sabit gerilim altında zamana bağlı deformasyon değişimi Şekil 2.9’da grafiklerle verilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere, elastik yayın deformasyonu zamana bağlı değildir. Amortisörün deformasyonu belirli bir eşik değerine kadar zamana bağlıdır ve bu eşik değeri aşıldığında malzemede oluşan deformasyon geri döndürülemez (Url-1).



Şekil 2.9 : İdeal mekanik modeller ve değişik karakterdeki deformasyon grafikleri.

Maxwell modelinin davranışı elastik ve viskoz davranışların birleşimi şeklindedir. Maxwell modeline kuvvet uygulandığı anda önce yay harekete geçer, yay uzamaya devam ettikçe amortisör de tepki vermeye ve açılmaya başlar. Yükleme kaldırıldığında elastik deformasyon geri kazanılırken, viskoz deformasyon geri döndürülemez.

Kelvin modeli ise viskoelastik davranış biçimini temsil etmektedir, başka bir deyişle “elastic afterworking” olarak adlandırılan olgunun ideal halidir. Yüklemeyle birlikte amortisör yavaşça açılır, başta bütün gerilme amortisörün üzerinde iken uzama arttıkça gerilim yavaş yavaş yaya geçer. Aynı şekilde yükleme kaldırıldığında deformasyon yavaşça geriye döner, yaya paralel bağlanmış amortisör, elastik yayın dengeye gelmesi sırasında direnç gösterir. Bu sebeple elastik deformasyonun geri kazanımı gecikmeli olarak gözlemlenir (Url-1).

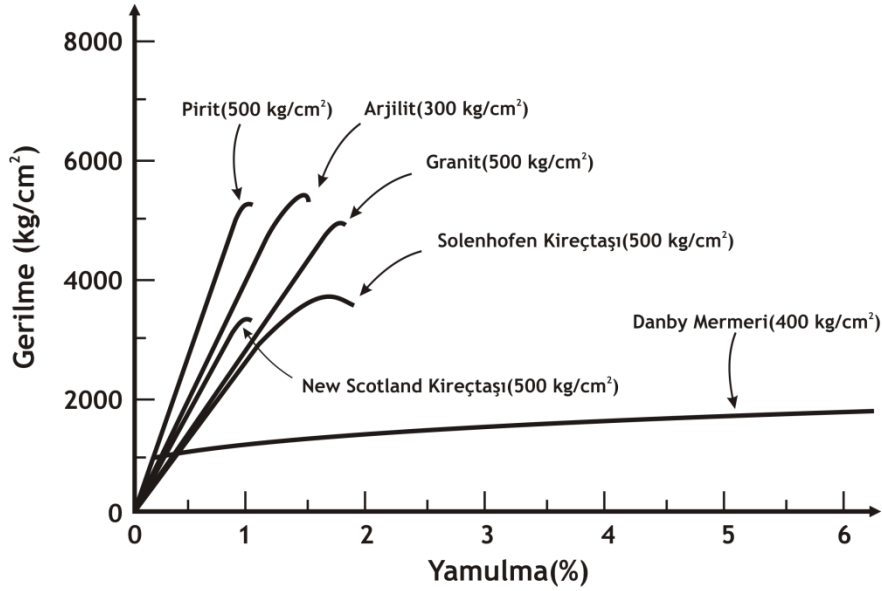
2.2 Deformasyona Etki Eden Faktörler

Çevresel basınç, yükleme hızı, sıcaklık, solüsyonlar, zaman, boşluk basıncı, anizotropi ve inhomojenite kayaçların davranışını kontrol eden önemli faktörlerdir.

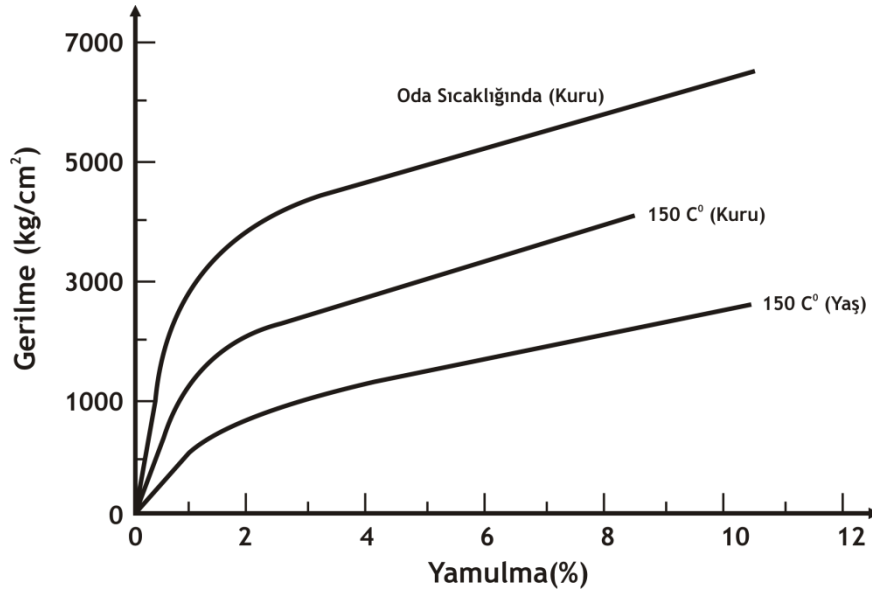
Çevresel basınç derinlikle doğru orantılı olarak artar. Çevresel basıncın artmasıyla yerin derinliklerindeki kayaçlar yüzeydeki durumlarına oranla çok daha dirençli olurlar. Şekil 2.10’da çevresel basıncın değişik kayaçlar üzerindeki etkisi görülmektedir (Paterson, 1958; Badgley, 1965).

Kayaçların direnci sıcaklıkla ters orantılı olarak değişir, yerin derinliklerine doğru sıcaklık arttıkça kayacın direnci düşer ve daha kolay plastik davranış gösterme eğilimine girer (Şekil 2.10). Kayaçların deformasyonu sırasında boşluklarında bulunan sıvılarla kayaç arasında etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşim özellikle metamorfik kayaçlarda yoğundur. Kayacın çatlaklarında gezinen solüsyonların cinsi, direnci etkiler ve meydana gelecek biçim bozulmasının şiddetini tayin eder. Sıvının

yoğunluk ve viskozitesinin artması kayacı daha çabuk yamulmaya ve kopmaya götürür. Yer içindeki malzemelerin deformasyonu gerilmenin uygulanma hızıyla da değişebilir. Yeryuvarı kısa periyotlu etkilenmelere karşı elastik ve rijid, uzun süreli etkilenmelere karşı ise plastik davranış gösterir.



Şekil 2.10 : Çevresel basıncın değişik kayaçlar üzerindeki etkisi (Paterson, 1958; Badgley, 1965).



Şekil 2.11 : Isı ve sıvıların mermerin deformasyonu üzerindeki etkisi.

Kayaçların içinde bulunan boşluklar ya da bu boşlukları dolduran sıvılar çevresel basıncın etkisine karşı koyar ve çevresel basıncı azaltıcı yönde etki yaparlar. Kayaçlar her bölümlerinde farklılık gösterebilirler, bu sebeple kayacın her kısmının tekdüze aynı davranışı göstermesi beklenemez. Örneğin kırıklar, katmanlanma ve

foliasyon kayaç dayanımının her doğrultuda aynı olmamasına sebep olur. Bileşimsel farklılıklar da kayacın farklı doğrultularda yine farklı dayanımlara sahip olmasına neden olur. Bu özelliğe kayacın inhomojenitesi adı verilir (Dirik, 2006).

2.3 Yer Kabuğu Deformasyonlarının Ölçüm Teknikleri

Deformasyonların tespiti, çalışılan bölgede belirlenmiş karakteristik noktalarda zamana ve etken kuvvetlere bağlı olarak anlamlı bir hareketin varlığının araştırılmasına dayanır. Kabuk deformasyonları farklı pek çok teknikle ölçülebilir, bu teknikler uzaysal ve yersel olarak 2 ana gruba ayrılır. Bu tez kapsamında değinilen uzaysal teknikler VLBI (Çok Uzun Bazlı İnterferometri), SLR (Uydudan Kesitirmeli Lazer), GPS (Küresel Konumlandırma Sistemi), InSAR (Yapay Açıklıklı Radar İnterferometri) ve yersel teknikler tiltmetre, strainmetre, kripmetre ölçümleridir.

VLBI kutup hareketlerinin, yeryuvarının dönme hızının, dönme eksen hareketlerinin ve kabuk deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılır. Hava koşullarından etkilenmemesi, yüksek doğruluklu bilgiler sunması gibi avantajlarına karşın yüksek maliyetlidir ve kullanılan donanımlar oldukça hacimlidir (Baykal ve Tarı, 2007; Yavaşoğlu, 2003).

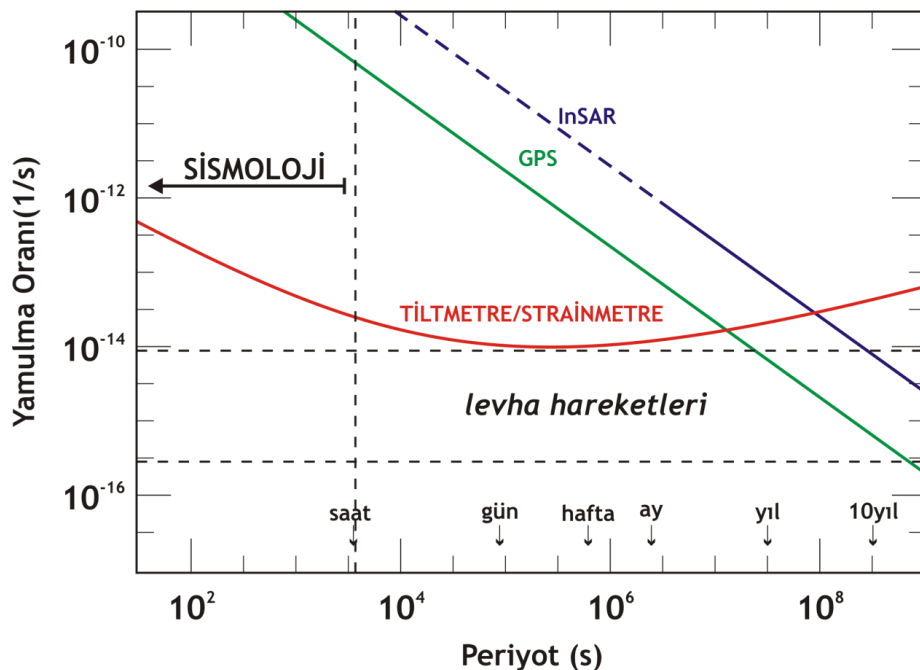
SLR küresel yer kabuğu hareketlerinin modellenmesinde ve yersel referans sisteminin/sistemlerinin oluşturulmasında kullanılır. Hava koşullarına bağımlıdır ve maliyeti yüksektir (Çakmak, 2001; Yeats ve dig., 1997).

InSAR depremlerin izlenmesi, yeraltı çökmeleri ve heyelanların araştırılmasında, yeryüzü değişimi ve hareketlerinin alansal olarak belirlenmesinde kullanılır. Bitki örtüsü, atmosfer vb. nedenlerden dolayı her durumda yeterli olamamaktadır (Baykal ve Tarı, 2007).

GPS, yer bilimlerine yönelik küresel ve lokal boyutta deformasyon çalışmalarında jeodezik ölçme tekniği özelliği ile kullanılır. Hava şartlarından etkilenmez, portatiftir, düşük maliyet ve ölçümlerde yüksek doğruluk sağlar (Çakmak, 2001).

Strainmetre doğrusal, alansal, hacimsel ya da kayma yamulmalarının zamana göre değişimini ölçer, gelgit ve tektonik deformasyon ölçümlerinde kullanılır (Agnew, 1986).

Deformasyon ölçümünde kullanılacak en uygun teknik/teknikler, araştırılacak yapı, gereken ölçüm hassasiyeti ve ekonomik limitler dahilinde seçilen tekniktir. Şekil 2.12’de PBO (The Plate Boundary Observatory) Projesi kapsamında deformasyonların izlenmesi amacı ile kullanılan ölçüm teknikleri ve bu tekniklerin zamana bağlı duyarlılık limitleri şematik olarak gösterilmiştir.



14

2.3.1 Yersel teknikler

2.3.1.1 Tiltmetre ölçümleri

Tiltmetreler, hem yer kabuğunda hem de yapılarda yataydaki çok küçük değişiklikleri ölçmek için tasarlanmış cihazlardır (Şekil 2.13). Hareket potansiyeli olan bir kütle üzerinde veya içinde yer alarak hareket yönünü ve miktarını ölçerler. Tiltmetreler uygulaması basit, kullanımı kolay cihazlardır. Tünel, madencilik, derin kazılar, baraj, iskele, istinat duvarları gibi mühendislik uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Cihazın tasarımı, kullanım amacına ve çözünürlük ihtiyacına göre farklılık gösterir. Örneğin volkanik hareketleri izlemek üzere kullanılacak cihazın son derece sağlam ve pek fazla hassasiyete sahip olması beklenmez, ancak gelgit ve uzun dönem tektonik hareketleri gözlemek amacıyla kullanılacak cihazın kararlı ve yüksek duyarlılıkta olması beklenir. Tilt ölçümlerinin hassasiyeti amaca göre gel-git ölçümleri için 10^{-8} , tektonik ölçümler içinse uzun, orta ve kısa dönem çalışmalar için değişkendir (Agnew, 1986). Tilt ölçümlerinde çoğunlukla kabarcık düzeçli, yatay/düşey sarkaçlı veya su tüplü tiltmetreler kullanılır.

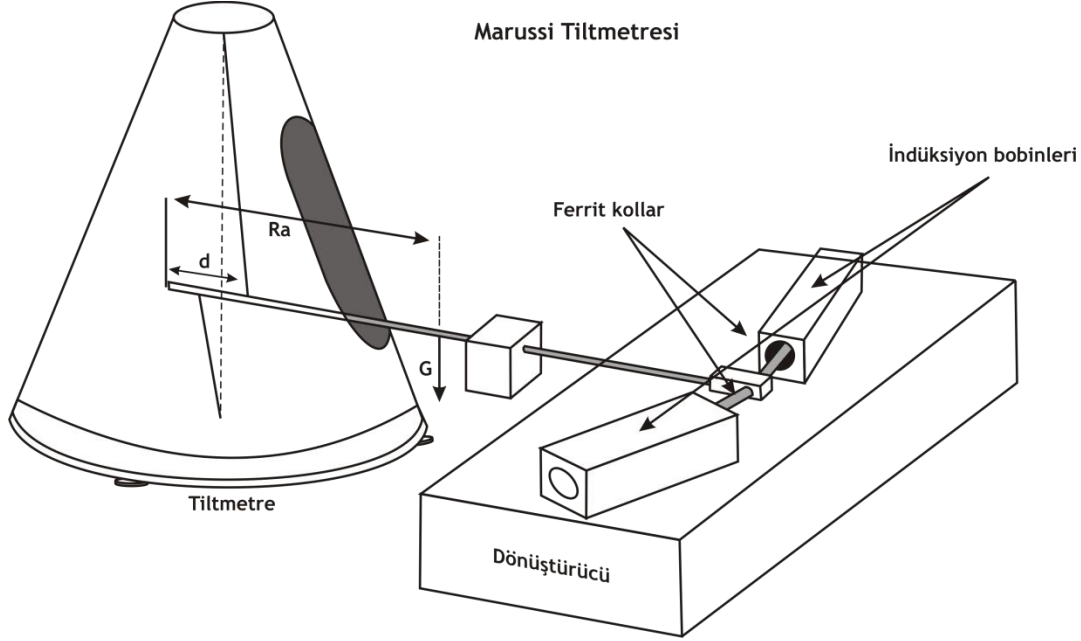


Şekil 2.13 : Mauna Loa Volkanı'nda bulunan tiltmetre (Url-2).

Düşey sarkaç sistemlerinde kütleyi tutan kol düşey olarak asılı konumdadır ve bu kolun yüzey normali boyunca yere sabitlenmiş bir referans eksenine göre eğimindeki değişim ölçülür. Sarkaç sisteminin öz frekanslarına (eigenfrequencies) göre yavaş hareketler olan statik deformasyonlar için ölçülen açı, doğrudan tilt değerini verir.

Ölçümler sondaj kuyularına yerleştirilen küçük tümleşik (Flach, 1976; Levine ve diğ., 1989) ya da daha büyük cihazlarla gerçekleştirilir (Vieira ve diğ., 1991).

Yatay sarkaç sistemlerinde kütleyi tutan kol Zöllner tipi süspansiyon prensibine göre yatay konumdadır (Şekil 2.14). Yerde gerçekleşen küçük bir tiltlenme kolda büyük bir açısal değişime sebep olur.



Şekil 2.14 : Zöllner tipi tiltmetrenin şematik gösterimi.

Statik deformasyonlar için büyütme miktarı $1/\sin(i)$ kadardır. Burada i , kolun dönme ekseninin düşeye göre eğimidir. Eğime ve zamana göre oluşan bu büyütmeden dolayı periyodik kalibrasyonların yapılması zorunludur. Eğim açısı (i) sistem serbestken periyot(T) ölçülerek belirlenebilir. Burada T ;

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \cdot \sin(i)}} \quad (2.5)$$

l , indirgenmiş sarkaç uzunluğu

g , ölçüm noktasındaki yerçekimi ivmesi

eşitliği ile belirlenir (Melchior, 1983). İndirgenmiş sarkaç uzunluğu (l) zamanla değişmeyen sabit bir büyüklüktür ve laboratuvarında ölçülür. Kalibrasyonun bir başka yolu da cihaz bilinen bir tilt değerinde iken ölçüm yapmaktır. Hassas cihazlar çok küçük tilt değişimlerini ölçebilirler, bu bakımdan bilinen bir gerilime karşılık gelen yüksek duyarlılıkta hesaplanmış bir deformasyon değeri bu cihazlara girdi olarak

verilir (Melchior, 1983). Yatay bileşenli sismometreler de yer değiştirmenin, hızın veya ivmenin yatay bileşenini ölçerken aynı prensipte işlerler.

Tiltmetrelerin büyüklükleri ve kütleleri çeşitlilik göstermektedir. Yaklaşık 7 cm'lik minyatür boyutlu tiltmetreler (Agnew, 1986; Saleh ve diğ., 1991), yaygın olarak kullanılan orta büyüklükteki VM (Verbaandert Melchior) tiltmetreleri (Ostrovsky, 1961) ya da çok daha büyük olan Marussi tiltmetreleri (Zadro, 1978) örnek olarak verilebilir. Buna ek olarak son derece büyük boyutlardaki yatay sarkaçlı bir sistem 1958 yılından bu yana Trieste Grotta Gigante mağarasında çalışmaktadır (Zadro ve Braitenberg, 1999). Mağaranın duvarlarına sabitlenmiş bu sistemde alt ve üst süspansiyonlar arasındaki yükseklik farkı 95 m'dir (Marussi, 1959). Sarkacın kütlesi 14 kg'dır ve bu cihazla 1960 Şili depreminin ürettiği yerin serbest salınımları çok net biçimde görülmüştür (Bolt ve Marussi, 1962).

Su tüplü tiltmetreler uzun bir yüzey üzerinde ölçüm yapmak üzere üretilirler (Şekil 2.15). Bir sıvı yüzeyindeki iki nokta arasındaki fark kullanılarak ölçüm yapılır.



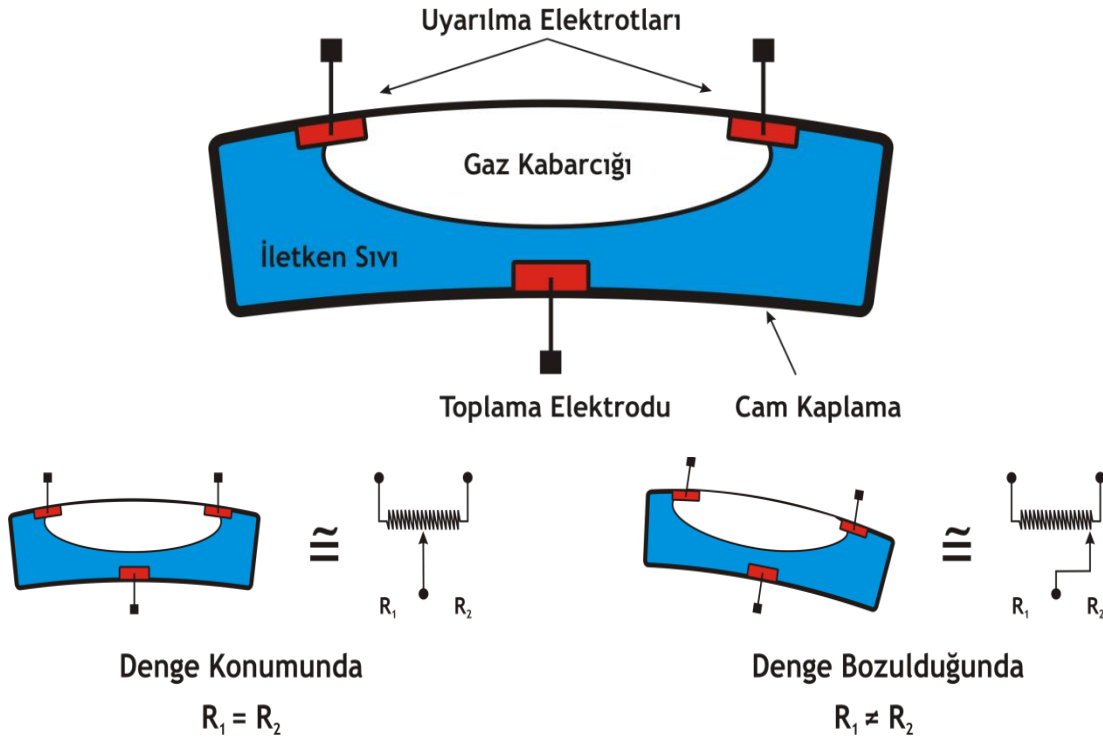
Şekil 2.15 : 241 metre uzunluğundaki su tüplü tiltmetre, Pozzuoli-İtalya (Url-3).

Göller bu çeşit tiltmetrelere doğal örneklerdir. Gölün iki kıyısındaki su seviyesi arasındaki fark, yani bu iki noktayı birleştiren bir hat tilt değerini verir (Mueller ve diğ., 1989). Tüplü tiltmetrelerde tüpün iki ucundaki sıvı seviyeleri ölçülür (Michelson, 1914; Hagiwara, 1947; Eaton, 1959). Alternatif olarak iki ayrı sıvı seviyesi ölçümü yerine, cihazın merkezinin etrafında tek basınç farkı ölçümü de yapılabilir (Horsfall ve King, 1977).

Black Forrest Gözlemesinde gelgit tespitine yönelik bir çalışmada hem kısa baz tiltmetre hem de 170 m uzunluğunda tüplü tiltmetre ile ölçümler yapılmıştır. Sonuçta elastik bir yer modelinden kestirilen değerlerle tüplü tiltmetrenin değerlerinin daha iyi örtüştüğü belirlenmiştir (Zürn ve diğ., 1986).

Kabarcık düzeçli tiltmetreler korunaklı bir istasyon kurulumu gerektirmeyen, tümleşik cihazlardır. Temel çalışma prensibi eğimli yüzeyde kabarcığın hareket miktarının ölçülmesidir. Az eğimli bir yüzeyde bile kabarcığın hareketi büyüktür (Wyatt ve diğ., 1988).

Günümüzde basit kabarcık düzeçli modern elektronik tiltmetreler diğer tiltmetrelerin yerini almıştır. Bu tip tiltmetreler elektrolit sıvı içindeki elektrotlar gaz kabarcığının konumu yüksek duyarlılıkla ölçerek oldukça hassas sonuçlar vermektedir (Şekil 2.16). Ölçümlerde en küçük değişimler dahi belirlenir ve bir veri kayıtcısı yoluyla kaydedilir. Bu tip sistemler sıcaklığa duyarsızdır ancak termal elektronik bileşenler kullanılarak bunun önüne geçmek mümkündür. Daha yeni bir teknoloji olarak bazı cihazlarda MEMS (mikroelektromekanik sistemler) kullanılmaktadır.



Şekil 2.16 : Modern elektrolit solüsyonlu tiltmetrenin yapısı ve çalışma prensibi.

Kabuk deformasyonlarının tespitinde tilt ölçümlerinin avantajları;

- tiltmetrelerin son derece yüksek hassasiyete sahip ve kolay erişilebilir cihazlar olması,

- çok geniş bir spektrumda (uzun ve kısa dönem) deformasyonların izlenmesine olanak sağlaması (Şekil 2.12),
- elde edilen verilerin sürekliliği, böylece deformasyon ve sebebi olabilecek çevresel etkilerle ilişkisinin hızlı biçimde görülebilmesi,
- sürekli ölçümlerin yapılabilmesi için kuyu açılması ve yerleştirilmesi gerekse de genelde tüm bu maliyetin yüksek çözünürlüklü bir GPS istasyonunun kurulum maliyetinden daha düşük olması,

olarak ifade edilebilir. Tilt ölçümleri bu avantajların yanı sıra her ölçüm tekniğinde olduğu gibi bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar;

- yeraltı suyu akışının yüksek olduğu sığ bir bölgede anlamlı deformasyon bilgisi elde edebilmek için çok sayıda istasyon kurulumunun gerekliliği,
- tiltmetrelerdeki elektronik ya da mekanik sistemlerden kaynaklanan, kaymaların (drift) görülmesi,

şeklinde sıralanabilir. Tilt ölçümleri tüm bu özellikleri dikkate alındığında, yer kabuğu deformasyonlarının belirlenmesinde son derece kullanışlıdır.

2.3.1.2 Strainmetre ölçümleri

Strainmetreler doğrusal, alansal, hacimsel ya da kayma yamulmalarının zaman göre değişimini ölçen cihazlardır. Yatay ya da dikey olarak yerleştirilebilirler. Gelgit ve tektonik amaçlı ölçümlerde hassasiyet 10^{-9} mertebesindedir. İlk strainmetreler 20m'lik demir bir boru ile hız çeviriciden oluşuyordu ve sismik strain ölçümü amacıyla yapılmıştı (Benioff, 1935). Daha sonraki zamanlarda ilgi daha yavaş sinyallere kaydı ve demir boruların yerini kuvars, nikel-çelik borular aldı, dolayısıyla sıcaklığa karşı hassasiyet azaldı, hız dönüştürücüler de yer değiştirme dönüştürücülerinin yerini aldı. Strainmetreler Japonya (Takemoto, 1979; Kasahara ve diğ., 1983) ve Doğu Avrupa'da (Varga ve Varga, 1995) uzun dönem yamulma ölçümleri için yaygın şekilde kullanılmıştır.

Rijit bir çubuğun taşınmasındaki problemten dolayı ölçümler çelik-nikel, kuvars ya da karbon-fiberden yapılan iki nokta arasına gerilen bir telle de yapılabilir. Cambridge çelik-nikel telli strainmetre buna güzel bir örnektir (King ve Bilham, 1976).

Laser strainmetrelerin kökeni ise 1960 yılına dek gitmektedir (Şekil 2.17). Laser strainmetrelerdeki ölçüm hassasiyeti 10^{-12} 'ye ulaşır. Bu tip strainmetrelerin sayısı karmaşık yapısına bağlı olarak diğerlerine oranla çok daha azdır. Konu ile ilgili detaylı bilgi Berger ve Lovberg (1970), Levine ve Hall (1972), Goultly ve diğ. (1974), Takemoto (1979) ve Dubrov ve Alyoshin (1992)'den elde edilebilir.



Şekil 2.17 : Japonya Kamioka Gözlemevi'ndeki lazer strainmetre (Url-4).

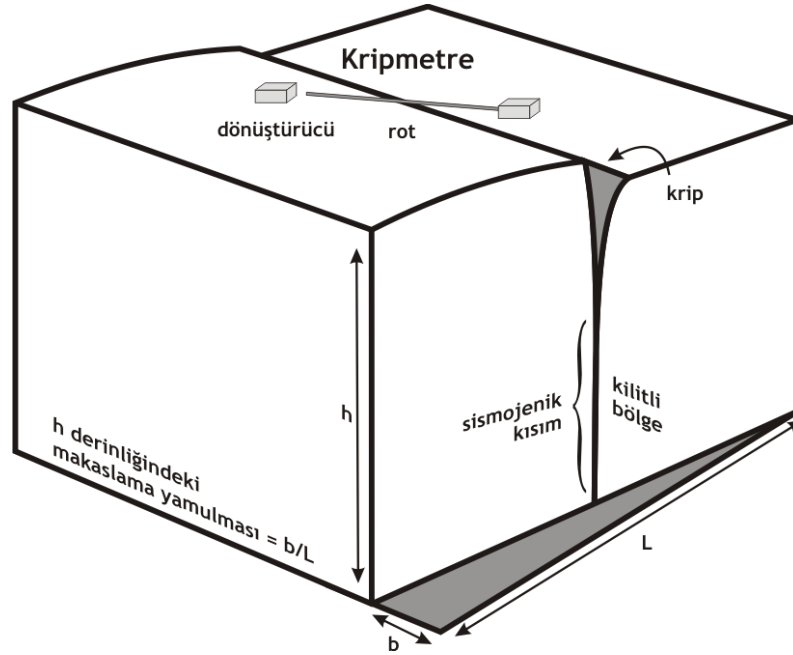
Strainmetrelerin bir başka tipi de 3 bileşenli, daha çok kuyu içi hacimsel ölçüm yapan strainmetrelerdir. Bu tip strainmetrelerin genel çalışma prensibi, içi sıvı (yağ) dolu kapalı bir konteynırın hacimsel değişime maruz kalmasıyla tepesindeki delikten sıvının bir kısmının çıkması sonucu oluşan değişimin tespit edilmesine dayanır (Sacks ve Evertson, 1970).

2.3.1.3 Kripmetre ölçümleri

Tektonik kaynaklı gerilmelere bağlı olarak fay zonlarında gözlenen belirli bir yönde, çok yavaş ve kesintisiz olan sürüklenme biçimindeki yer değiştirme hareketlerine krip (creep) bu hareketi ölçmede kullanılan cihazlara da kripmetre denir.

Kripmetre fayın karşılıklı iki tarafı boyunca yerleştirilir ve lokal alandaki yer değiştirmeyi ölçer (Şekil 2.18). Fayın bir tarafından diğer tarafına bir nikel-çelik halat gerilir ve bu halatın uzunluğu faydaki harekete bağlı olarak değişir. Halatın uzunluğundaki bu değişimden yer değiştirmeye miktarı saptanır. Kripmetreler

kurulumu kolay, düşük maliyetli cihazlardır. Ölçüm hassasiyetleri ise mikron mertebesini bulur.



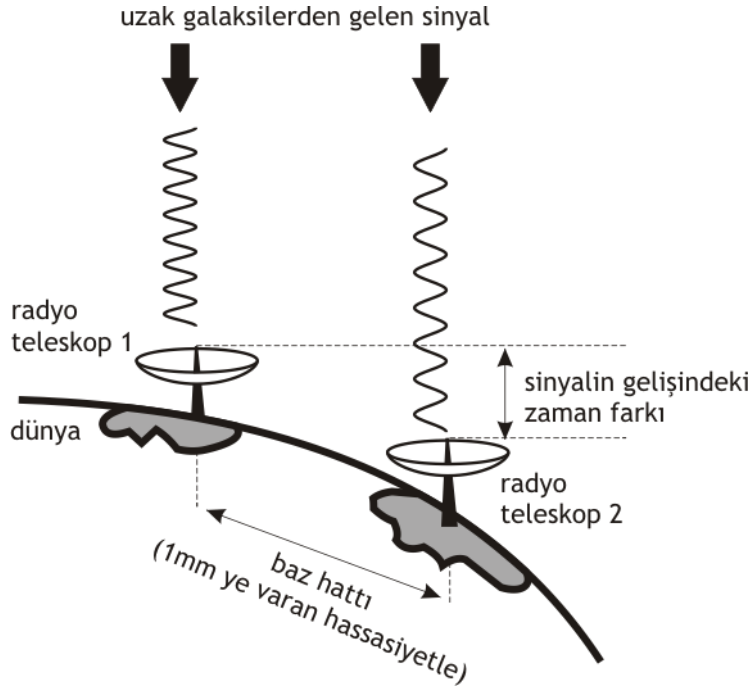
Şekil 2.18 : Tipik bir kripmetrenin işleyişi (Bilham ve diğ., 2004)

2.3.2 Uzaysal teknikler

2.3.2.1 VLBI

VLBI (Çok Uzun Bazlı İnterferometri- Very Long Baseline Interferometry), diğer uzay teknikleri ile beraber, jeodezik ve jeodinamik parametrelerin belirlenmesi ve iyileştirilmesi için kullanılan bir tekniktir. Tekniğin temeli radyo sinyallerinin yüksek çözünürlükle elde edilmesine dayanır (Çakmak, 2001). Radyo sinyallerinin toplandığı istasyon noktalarının konumları 1 cm'nin altında hassasiyetle belirlenebilmektedir (Yeats ve diğ., 1997, Dong, 1993, Murray, 1991). Uygulamada uzayda yaklaşık olarak konumu bilinen astrogalaktik radyo kaynaklarının gönderdiği 0.5 GHz - 22 GHz frekans bandındaki sinyallerin algılanabilmesi için özel antenler kullanılmaktadır (Çakmak, 2001).

Astrogalaktik kaynakların yaydığı sinyaller dünya üzerindeki radyo teleskoplar tarafından algılanmakta ve yüksek hassasiyetli atomik saatlerle zaman etiketi verilerek kaydedilmektedir. İki istasyonda kaydedilen sinyaller birbirinin aynısıdır ancak zaman etiketleri farklıdır (Şekil 2.19). İşte bu zaman farkı kullanılarak istasyonlar arası uzaklık bilgisi elde edilir (Yeats ve diğ., 1997).



Şekil 2.19 : VLBI çalışma prensibi.

VLBI istasyonlarında toplanan verilerin değerlendirilmesi ile kutup hareketleri, yeryuvarının dönme hızı, dönme ekseninin hareketleri ve kabuk deformasyonları yüksek doğrulukta tespit edilebilmektedir. Ölçme doğruluklarının artırılması için istasyon noktalarında yüksek kararlılıklı atomik saatler kullanılmakta, atmosferik etkilerin giderilmesi için iki farklı frekans kullanılmakta ve su buharı radyometreleri ile ölçmeler yapılmaktadır. VLBI ölçmeleri 1977 yılında NASA (National Aeronautics and Space Administration) tarafından CDP (Crustal Dynamics Program) kapsamında başlatılmıştır. 1990 yılına gelindiğinde küresel bir ağ haline dönüşen VLBI şu anda dünya üzerinde çok sayıda istasyona sahiptir (Murray, 1991; Yeats ve dig., 1997; Çakmak, 2001).

VLBI, uzaysal teknikler içinde en yüksek doğruluğa sahip olan tekniktir. Ayrıca hava koşullarından etkilenmemesi nedeni ile, yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde, yeryuvarının dönme hızının, dönme ekseninin hareketlerinin belirlenmesinde, göksel koordinat sisteminin temel altlığının oluşturulmasında ve birçok tektonik hareket ve sismik deformasyonların belirlenmesinde başarı ile kullanılmaktadır (Baykal ve Tarı, 2007). Kaliforniya'da San Andreas fayının GPS ölçmeleri ile kinematiğinin belirlenmesi sırasında da kullanılmıştır (Yeats ve dig., 1997; Oral, 1994). Bu avantajlarının yanı sıra taşınabilir olmaması (Şekil 2.20), yüksek maliyeti, geniş

hacimli bir donanıma ihtiyaç duyması ve dünya üzerinde homojen dağılımlı sürekli istasyonların bulunmaması gibi dezavantajları vardır (Yavaşoğlu, 2003).



Şekil 2.20 : Mount Pleasant Radyo Teleskobu, Avustralya (Url-5).

2.3.2.2 SLR

SLR (Satellite Laser Ranging-Yapay Uydularla Lazer Ölçmeleri), küresel levha hareketlerinin belirlenmesinde kullanılan diğer bir uzaysal tekniktir (Şekil 2.21). Bu teknikte istasyon noktasından uyduya yöneltilen lazer vurusunun uyduya gidiş-dönüş zamanı çok hassas biçimde ölçülmektedir. Yer istasyonu ile uydu arasındaki mesafe, lazer vurusunun uyduya gidiş-dönüş zaman farkının atmosferdeki ışık hızı ile çarpımının yarısına eşit olur (Baykal ve Tarı, 2007).

Yer istasyonlarında SLR ölçmelerine ait üç çeşit veri saklanmaktadır: uydu ile yer istasyonu arasındaki mesafeler, istasyon noktasının ölçme uzayı içinde bulunan uyduların konumları ve ölçülen zamanlar. SLR ölçmeleri ile istasyon noktalarının konum doğrulukları lazer vurularına bağlı olarak 1 – 3 cm ile 1 – 6 m arasında değişmektedir. Günümüzde dünya üzerinde pek çok SLR istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlar sayesinde küresel yer kabuğu hareketlerinin modellenmesi, yeryuvarının dönüşü, çekim alanına ilişkin parametrelerin elde edilmesi ve yersel referans sisteminin/sistemlerinin oluşturulması mümkün olmaktadır (Çakmak, 2001; Yeats ve dig., 1997).



Şekil 2.21 : SLR çalışması, Goddard Jeofizik ve Astronomi Gözlemevi (Url-6).

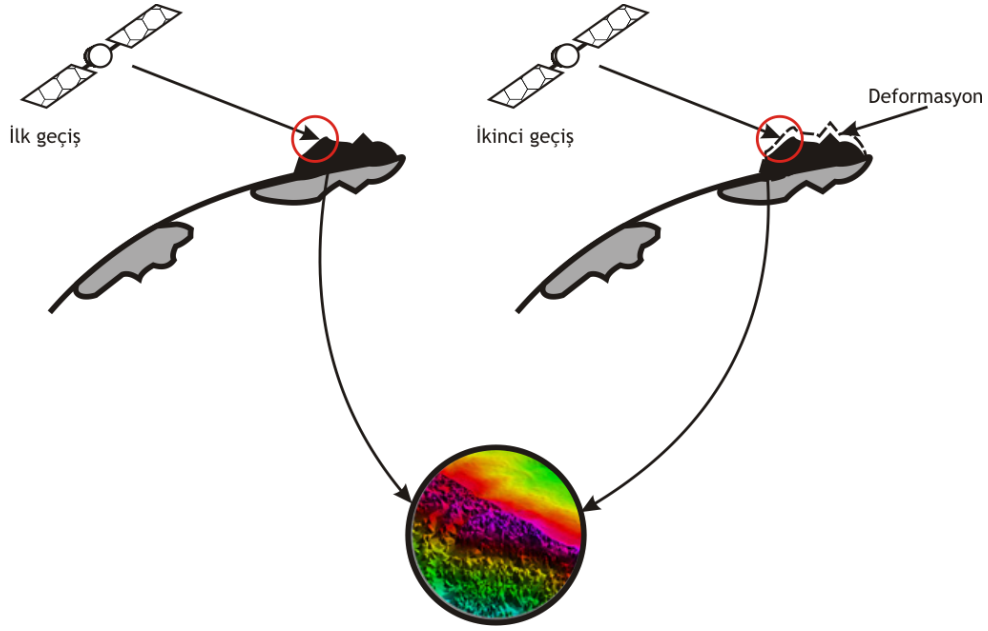
NASA tarafından SLR için gereken tüm ekipman gezici bir araç içine monte edilerek taşınabilir hale getirilmiştir. Uydularının uzun ömürlü olması da başka bir avantajdır. SLR tekniğinin en olumsuz yanları yüksek maliyeti, bulutlu günlerde çalışmaması ve sürekli uygun hava koşullarına ihtiyaç duymasıdır (Yavaşoğlu, 2003).

2.3.2.3 InSAR

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar - Sentetik Açıklık Radar İnterferometrisi) topoğrafik yükseklik, yeryüzü değişimi ve hareketlerinin alansal olarak ortaya konması için, uydu, uçak ve benzeri araçlara monte edilmiş radar sistemleri tarafından elde edilen radar görüntülerinin işlendiği bir yöntemdir (Çakır, 2003). Yöntem, SAR anteni tarafından farklı konumlarda veya farklı zamanlarda elde edilen görüntülerin interferogram oluşturmak amacıyla bir araya getirilmesi temeline dayanır (Baykal ve Tarı, 2007).

Radar sinyali içinde gerçek (real -Re) ve sanal (imaginary -Im) iki bileşen vardır. Bu bileşenler genlik ve faz bilgilerini içeren bileşenlerdir. İstendiğinde gerçek ve sanal

bileşen bilgilerinden genlik ve faz bilgileri çıkarılarak aynı yer noktasına ait, farklı bakış açıları ile alınmış iki SAR görüntüsündeki faz değerlerinin farkı oluşturulur. Bu işlem SAR tekniğinin temel çalışma prensibidir (Şekil 2.22). Aynı bölgeye ait 2 görüntüden benzer piksellerin genliklerinin ortalanması ve faz değerlerinin farklarının alınması ile yeni bir görüntü elde edilir ve bu görüntüye interferogram adı verilir. Interferogramın faz değerleri $\pm\pi$ aralığında değerler alır ve *fringe* adı verilen halkaları içerir (Baykal ve Tarı, 2007).



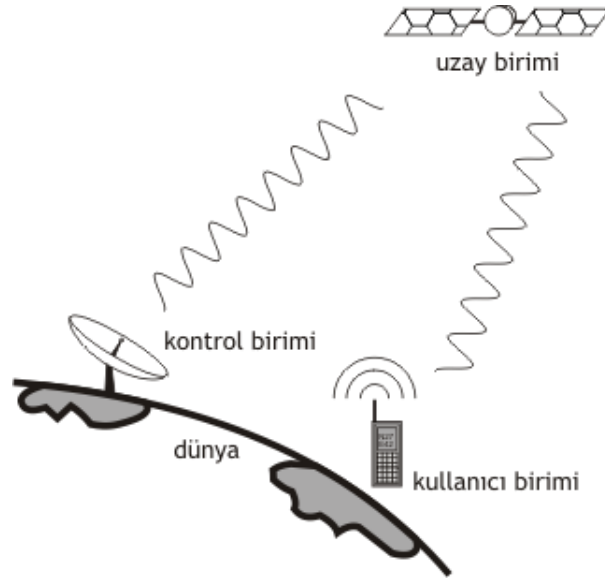
Şekil 2.22 : InSAR çalışma prensibi.

InSAR ile uygulanan en hassas yöntem D-InSAR (Differential - Farksal InSAR) tekniğidir (Gabriel ve diğ., 1989). Yeryüzünde özellikle düşey yönde oluşan değişimlere karşı hassas olan bu yöntemle santimetre ve daha düşük hassasiyetle deformasyonlar belirlenebilir. Bu işlem için en az üç SAR görüntüsü gereklidir. Üç görüntüden ikişerli iki ayrı interferogram, iki interferogramdan da bir farksal (differential) interferogram elde edilir. Oluşan yeni görüntü zamana bağlı olarak yer yüzeyinde oluşmuş değişimleri ve hareketleri gösterir.

InSAR tekniği, deprem anı ve deprem sonrası dönemlerin, yeraltı çökmelerinin, heyelanların ve volkanların izlenmesi gibi yerbilimleri araştırmalarında kullanılmaktadır. InSAR tekniğinin kullanımında karşılaşılan bozucu etkiler genel olarak; derin vadi sistemlerinin bulunduğu topoğrafya, yoğun bitki örtüsü, sulu ortamlar, atmosferik etkiler, zamansal ve bazsal uyumsuzluklar olarak sıralanabilir (Baykal ve Tarı, 2007).

2.3.2.4 GPS

ABD (Amerika Birleşik Devletleri) silahlı kuvvetleri ve NASA tarafından uzay tabanlı konumlama sistemleri 1960'lara doğru kullanılmaya başlanmıştır. 1974 yılında ABD Savunma Bakanlığı gelecekteki askeri navigasyon amaçlarını karşılamak için bir proje başlatmış ve bu proje NAVSTAR-GPS'in (Navigation Satellite Timing And Ranging-GPS) başlangıcı olmuştur. 1983 yılında ise Savunma Bakanlığı tarafından GPS (Global Positioning System – Küresel Konumlandırma Sistemi) sivil kullanıma açılmıştır. GPS uzay, kontrol ve kullanıcı olmak üzere üç ana bölümden oluşur (Şekil 2.23). Uzay bölümü modüle edilmiş iki frekansta yayın yapan ve atomik saatlerle kontrol edilen GPS uydularından oluşmaktadır. Bu uydular konum bilgilerini içeren mesajlar gönderirler. GPS sisteminin ikinci bölümü kontrol kısmıdır. Amacı uydu sinyallerini gözlemleyip uydu yörünge parametrelerini önceden belirlemek, uydu saatini kalibre etmek ve konum bildirim mesajlarını periyodik olarak güncelleştirmektir (Baykal ve Tarı, 2007). GPS sistemindeki üçüncü ve son bölüm kullanıcı bölümüdür. Kullanıcı alıcının yapısına göre elde ettiği sinyalleri değişik şekillerde değerlendirir. Navigasyon, haritacılık ve deformasyon ölçüm çalışmaları örnek verilebilir.



Şekil 2.23 : GPS'in ana bileşenleri.

GPS, yerbilimleri çalışmalarında geçmişte ve günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır (Herring, 1999; Segall ve James, 1997; Hager ve diğ., 1991; Bock, 1991). Hava şartlarından etkilenmemesi, noktaların birbirini görme şartını olmaması, üç boyutlu konum hesabında yüksek doğruluk sağlaması, diğer tekniklere göre daha

az bütçe gerektirmesi ve taşınabilir olması ona bu geniş uygulama alanını yaratmıştır (Çakmak, 2001).

GPS sistemi yüksek hassasiyetli bir sistemdir ancak tüm diğer sistemlerde olduğu gibi zayıf tarafları da vardır. GPS ölçmelerinden elde edilen sonuçlarda bazı raslantısal ve sistematik sapmalar görülebilir. Bu sapmalar GPS'nin bir çok kullanım alanı için fazla önem taşımasa da yer kabuğu deformasyonlarının gözlenmesi gibi yüksek hassasiyet gerektiren çalışmalarda dikkatle değerlendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır. Genel olarak uydulardan kaynaklanan hatalar, alıcı donanımına bağlı hatalar, ortam etkilerine bağlı hatalar bu tip sapmalara sebep olabilir. (Baykal ve Tarı, 2007).

3. TİLTMETRE GÖZLEM AĞLARINA AİT DÜNYADAN ÖRNEKLER

Günümüze dek yer kabuğu deformasyonlarının incelenmesi, yanardağ patlamalarının ve depremlerin önceden belirlenmesi, mühendislik yapılarının gözlenmesi, gelgit değişimlerinin tespiti gibi amaçlarla tiltmetre gözlem ağları kurulmuştur. Bu bölümde dünyanın çeşitli bölgelerindeki tiltmetre gözlem ağlarına ilişkin geçmişten ve günümüzden örnekler verilmektedir.

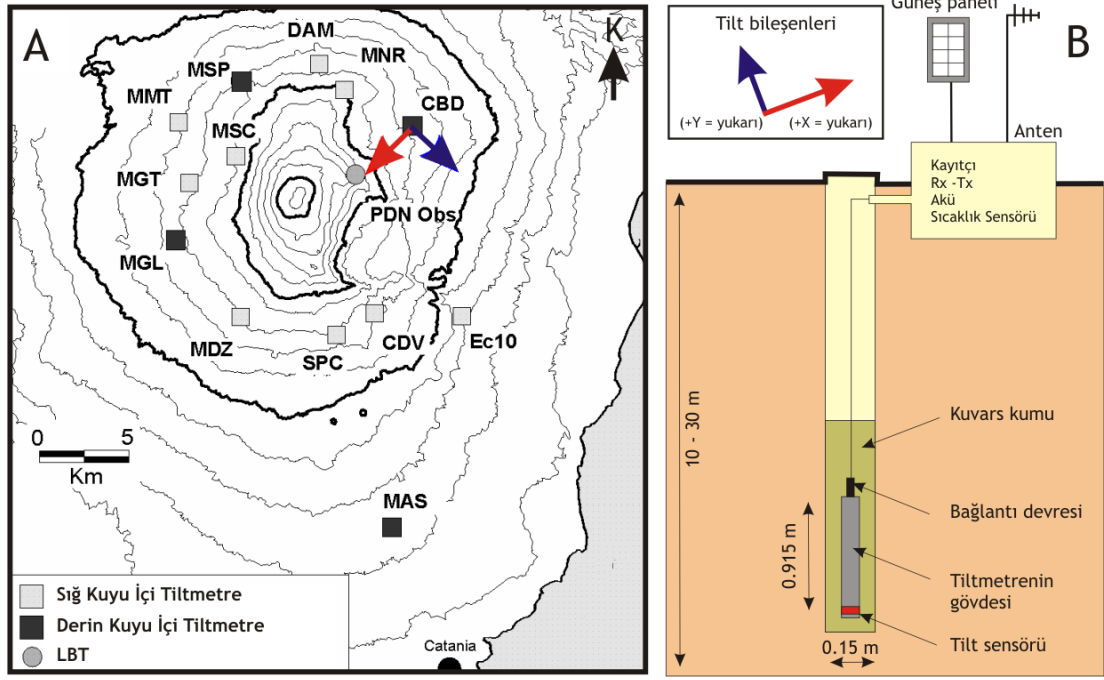
1970 yılında USGS (U.S. Geological Survey) araştırmacıları iki tiltmetre ile tilt ölçümlerine başlamışlar ve ilk defa deprem öncesi açık bir anomali tespit etmişlerdir (Wood ve Allen, 1971). 1973 Hollister depreminde yakalanan tilt anomali (Johnston ve Mortensen, 1974) ve tiltmetrelerin kolay temin edilebilen cihazlar olması sayesinde depremin önceden kestirimine yönelik tiltmetre çalışmaları hız kazanır ve 2 yıl içinde USGS'nin tiltmetre gözlem ağı 77 farklı noktada 84 cihazın işletildiği dev bir ağa dönüşür. Daha sonraki dönemde tilt verileriyle depremin önceden kestirimine yönelik çalışmalardan beklenen başarı sağlanamaz ve 1982'nin sonlarına doğru USGS deprem çalışmaları amacıyla işlettiği tiltmetre istasyonlarının çoğunu kaldırır (Mortensen, 1982) ancak sinyal/gürültü oranı daha iyi olan volkanik aktiviteyi izlemek üzere Long Valley'deki gibi istasyonlarının bir kısmını işletmeye devam eder (Mortensen ve Hopkins, 1987). Günümüzde tiltmetre istasyonlarının çoğu volkanik aktiviteye bağlı kabuk deformasyonlarının izlenilmesinde (Ferro ve diğ., 2011; Peltier ve diğ., 2011; Delorme ve Blum, 1991), erken uyarı sistemleri oluşturma amacıyla kullanılmaktadır. Ancak dünyanın farklı yerlerinde depremlerle ilişkili kabuk deformasyonlarını (Yamaki ve diğ., 1990; HSRI, 1999), heyelanları (Garcia ve diğ., 2010) ve barajlar (Deinum, 1987) gibi büyük mühendislik yapılarını gözlemlemek üzere de tiltmetre gözlem ağları mevcuttur.

UNAVCO (University NAVSTAR Consortium) konsorsiyumunun yürüttüğü PBO projesi kapsamında, Pasifik ve Kuzey Amerika aktif levha sınırları boyunca yer kabuğu deformasyonlarının sebep olduğu 3 boyutlu yamulma alanının araştırılması amacıyla, 1100 GPS alıcısı, 75 kuyu içi strainmetre, 79 kuyu içi sismometre, 6 uzun-baz lazer strainmetre, 100 meteoroloji sensörü ve 26 adet tiltmetreden oluşan bir

gözlem ağı kurulmuştur. Proje kapsamında tiltmetrelerin tamamı Alaska, St Helens ve Yellowstone'daki volkanlar üzerine kurulmuştur. Applied Geomechanics şirketi tarafından üretilen cihazlar 5 nanoradyan hassasiyetindedir. Örnekleme sıklığı istasyona bağlı olarak saniyede ya da dakikada bir örnektir. Toplanan veriler ve oluşturulan grafikler herkese açık olarak sunulmaktadır. PBO kapsamında kurulan tilt istasyonları günümüzde de aktif olarak çalışmaya devam etmektedir. Daha ayrıntılı bilgi için <http://pbo.unavco.org> adresi ziyaret edilebilir.

HSRI (Hot Springs Research Institute of Kanagawa) 1989'dan bu yana Japonya'da Izu Yarımadası'nın kuzeydoğusunda deprem döngüsüyle alakalı deformasyon gözlem çalışmaları yapmaktadır. İlgili proje kapsamında 4 GPS, 2 EDM (Electronic Distance Measurement) , 8 kuyu içi tiltmetre ve 6 yeraltı su seviyesi ölçüm cihazı ile kabuk deformasyonları sürekli ölçümlerle izlemektedir. Kannawa fayı ve Hakone Volkanı civarında, her biri ortalama 100 m derinlikte tiltmetre ve meteorolojik gözlem cihazları (biri adet termometre, yağmur ölçer ve barometre) mevcuttur. Ölçümler gerçek zamanlı olarak HSRI merkezine iletilmektedirler. Tiltmetrelerin ölçüm hassasiyeti 0.01 saniye derecedir (Yamaki ve diğ., 1990; HSRI, 1999).

Bir başka tiltmetre gözlem ağı 1990'lardan bu yana Etna Yanardağında İtalya'da işletilmektedir. Volkan kaynaklı kabuk deformasyonlarının sürekli gözlemi amaçlı tilt ağı, 13 adet sığ kuyu içi kabarcık düzeçli ve bir adet 80 m uzun-baz tiltmetreden oluşmaktadır. Bu istasyonlardan 8 adedi 90'larda 3 m civarında derinliklere yerleştirilmişlerdir. Çözünürlükleri 0.1 – 0.001 mikroradyan aralığındadır. 1997 yılında bir uzun-baz tiltmetre, birkaç yıl önce de 5 nanoradyandan daha hassas 2 adet yeni kuyu içi tiltmetre daha sisteme eklenmiştir. Bunlardan biri (MAS) 30 m derinlikte ve dağın zirvesine 20 km mesafede, diğeri (CBD) ise 10 m derinlikte ve zirveye daha yakındır. 2009 ve 2010 yıllarında 2 yeni istasyon (MSP ve MGL) daha sisteme eklenerek sistem bugün ki halini almıştır (Şekil 3.1). 15 dakika aralıkla tilt (2 bileşen) ve sıcaklık verisi toplanmaktadır (Ferro ve diğ., 2011).



Etna Yanardağı'ndaki tiltmetre gözlem ağı ve tiltmetrenin kuyu içi yerleşimi şematik gösterimi (Ferro ve diğ., 2011).

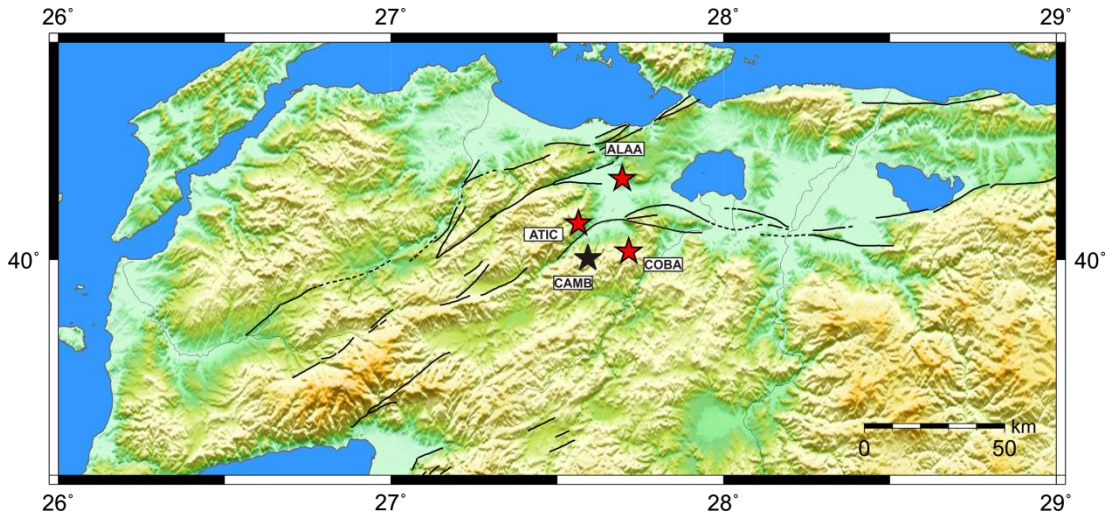
4. GÖNEN VE TÜRKOĞLU TİLTMETRE GÖZLEM AĞLARI

4.1 Çalışma Alanı

TÜRDEP projesi kapsamında başlatılan tilt ölçümleri için doğrultu atımlı fay sistemleri üzerinde yer alan iki ayrı pilot bölge seçilmiş ve ölçümler günümüzde de bu iki pilot bölgede sürdürülmektedir. Bu bölgelerden biri Kuzey Anadolu Fay Sistemi(KAFS)'nin güney kolu üzerinde yer alan **Gönen Pilot Bölgesi**, diğeri ise Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) üzerinde yer alan **Kahramanmaraş-Türkoğlu Pilot Bölgesi** dir.

4.1.1 Gönen/Balıkesir

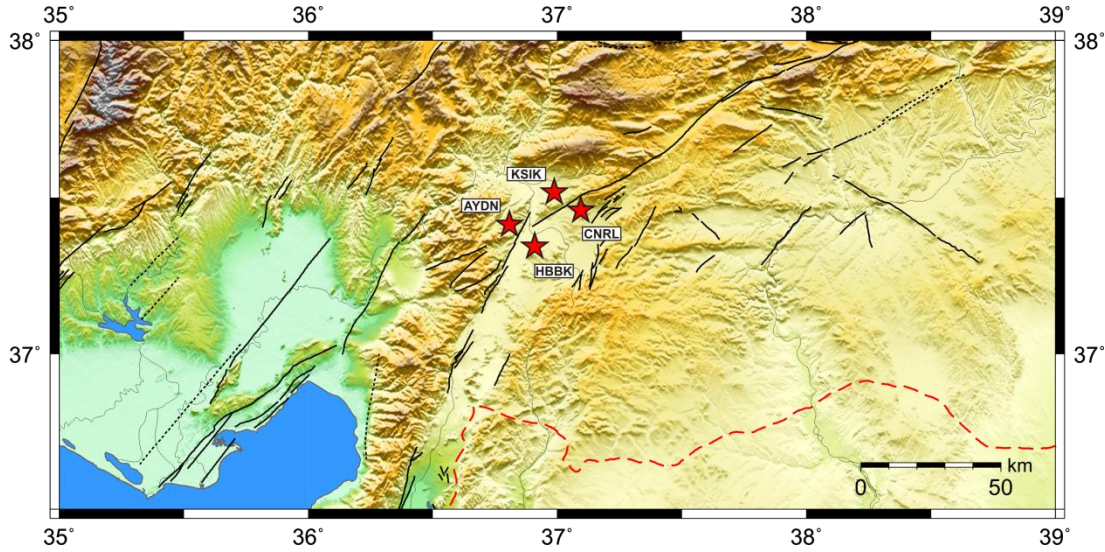
Tiltmetrelerin yerleştirileceği yörenin, aktif fay sistemi üzerinde ve tektonik hareketlere duyarlı bir bölge olmasının önemi büyüktür. Bu amaçla 4 adet tiltmetre Marmara Bölgesi'nin güney batısında, KAFS'nin güney kolu üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 4.1). Toprak radon, sürekli GPS, mikrosismoloji gibi gözlemlerin de yer aldığı bu bölge “Gönen ve Civarı Pilot Bölgesi” olarak adlandırılmıştır. Fayın önemli derecede büküm yaptığı, depremsellik yönünden aktif olan bu bölgede çok sayıda (büyüklüğü 2 ve daha küçük) mikro depremler de meydana gelmektedir (İnan, 2010).



Şekil 4.1 : Gönen pilot bölgesinde kurulmuş olan tiltmetre istasyonlarının konumu. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.

4.1.2 Türkoğlu/Kahramanmaraş

Gönen Bölgesi'nde kurulmuş olan tilt istasyonlarının bir benzeri farklı tektonik bölgede olması nedeniyle Kahramanmaraş Türkoğlu bölgesinde kurulmuştur. DAF sisteminin batıya uzanan kısmında önemli bir büküm yeri olan Türkoğlu, gerilim biriktirme yönünden potansiyel konumdadır (İnan, 2010). Bu yönüyle Kahramanmaraş Türkoğlu Pilot Bölgesi, projede ikinci pilot bölge olarak seçilmiştir. Şekil 4.2'de ikinci pilot bölgenin ve istasyonların konumu görülmektedir.

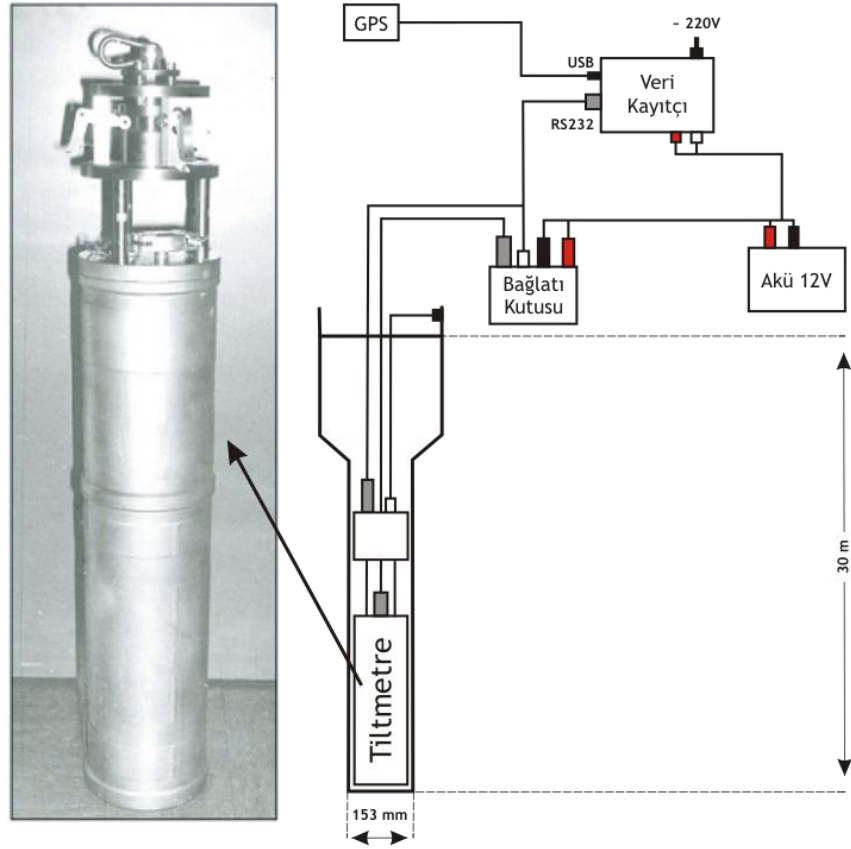


Şekil 4.2 : Türkoğlu pilot bölgesine işletilmekte olan tiltmetre istasyonlarının konumu. Faylar, Şaroğlu ve diğ. (1992)' den alınmıştır.

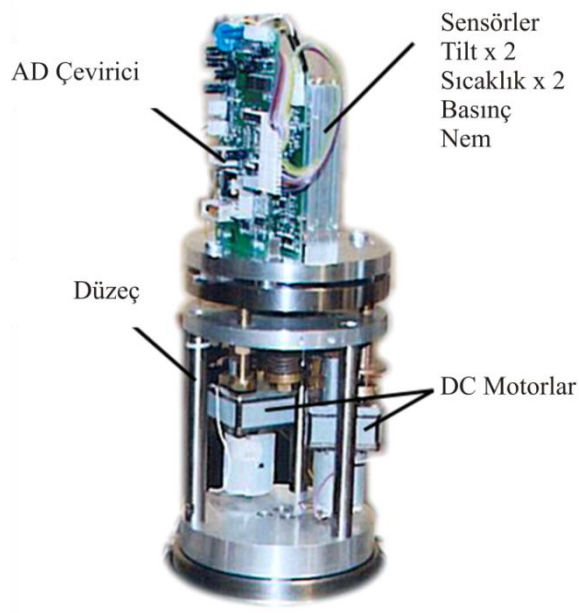
4.2 Sistem Tasarımı

Yer kabuğu deformasyonlarının belirlenmesine yönelik yapılacak olan kuyu içi tilt ölçümlerinin en az 10^{-9} civarındaki değişimleri yakalayabilecek duyarlılıkta olması gerektiğinden (Agnew, 1986), sistemler yüksek teknolojiye uygun bir şekilde üretilmelidir. Diğer taraftan bu duyarlılıkta sistemlerin ancak araştırma amaçlı kullanımları sözkonusu olduğu için, sistemlerin yaygın bir ticari pazarı bulunmamaktadır. Mühendislik uygulamalarında ise bu duyarlılık 10^{-6} düzeyine inmektedir. Ancak, bu yüksek hassasiyetli sistemler yer bilimleri dünyasında çok iyi bilinen ve büyük bütçeli projeler kapsamında özel üretilerek kullanılmaktadır. Amerika'da San Andreas Fayı'nın araştırılması kapsamında yıllar önce başlatılmış olan PBO (Plate Boundary Observatory) ve SAFOD (San Andreas Fault Observatory at Depth) projeleri bunlar arasında gösterilebilir (İnan, 2010).

Tiltmetreler ile ölçüm yapabilmek için gereken asgari sistem; tiltmetre, bağlantı kabloları, GPS ve kayıtçı birimlerinden oluşmaktadır. Sistemin tasarımına ilişkin şematik gösterim Şekil 4.3’de, sistemin iç yapısı ise Şekil 4.4’te görülmektedir.



Şekil 4.3 : Lippmann tiltmetresinin ve çevre birimlerinin bağlantısının şematik gösterimi



Şekil 4.4 : Lippman kuyu içi tiltmetre cihazının iç yapısı

Kuyu içi tilt ölçümleri konusunda uluslararası düzeyde az sayıda deneyimli araştırmacı ve kuruluş vardır. En deneyimlilerden biri 1988-1999 yılları arasında ülkemizde de benzer araştırmalara katılmış olan Darmstadt University of Technology'den Prof. Dr. Carl Gerstenecker'dir. Prof. Dr. Gerstenecker'in Lippmann şirketi ile ürettiği tiltmetreler, Askania tip tiltmetrelerle (Agnew, 1986) eşdeğer özelliktedir (İnan, 2010). Tiltmetrelerin duyarlılıkları 1-10 nrad aralığındadır. Tiltmetre istasyonları arasındaki zaman senkronizasyonu ise, sistemlerde yer alan GPS modülü ile yapılmaktadır. Verinin sayısallaştırılması, tiltmetre sisteminin kuyu içinde kalan biriminde gerçekleştirilip RS-232 formatına uygun olarak yüzeydeki veri kayıtçıya birbirine dik doğrultudaki iki adet tilt, sıcaklık, açık hava basıncı ve nemlilik verilerini taşıyan 5 kanal ile bağlanmıştır (Gerstenecker, 2009). Tiltmetrelere üretici tarafından "Lippman kuyu içi tiltmetre" adı verilmiştir. Lippmann kuyu içi tiltmetrelerin teknik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Lippmann kuyu içi tiltmetrenin teknik özellikleri.

Çelik Kasa	Çap	138 mm
	Uzunluk	850 mm
	Ağırlık	25 kg
Kuyu İçi	Azami Derinlik	100 m
	İç Çap	150 mm
Tilt Sensörü	Duyarlılık	0.2 mas
	Ölçüm Aralığı	$\pm 2.6'$
	Dengeleme Aralığı	$\pm 6^\circ$
Sıcaklık Sensörü	Duyarlılık	0.0001 °C
Basınç Sensörü	Duyarlılık	0.1 hPa
Nem Sensörü	Duyarlılık	0.10%
AD Çevirici	Örnekleme Oranı	128 Hz

4.3 İstasyonların Kurulumu

4.3.1 Gönen pilot bölgesi

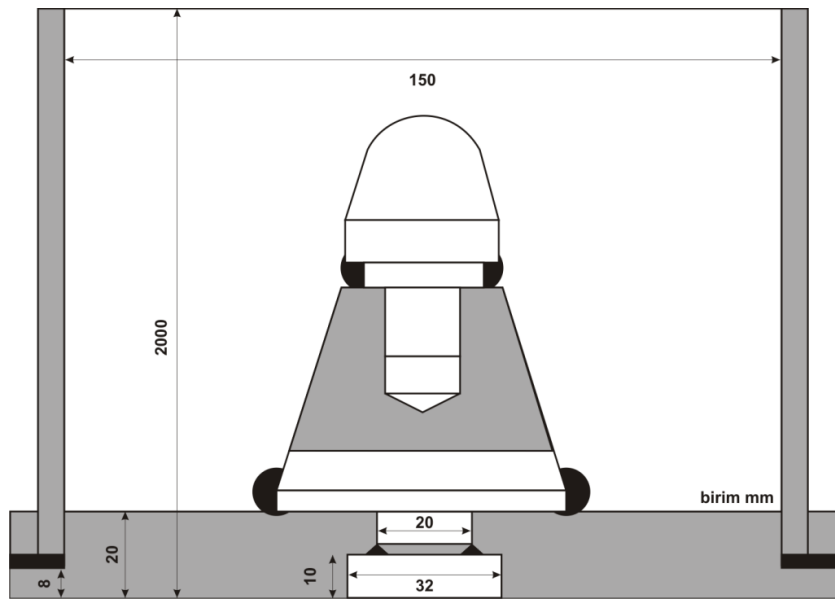
Gönen'de GPS vektörlerinden elde edilen hız 2.5 cm/yıl düzeyindedir ve oldukça dinamik olan bu bölge tilt ölçümleri için seçilmiştir. 30 Mart – 1 Nisan 2007 tarihleri arasında pilot bölgede istasyon yerlerinin seçimi amacıyla bir keşif çalışması yapılmıştır. Bu arazi çalışmasında, altere olmamış, sağlam temel kaya lokasyonları

belirlenmiş ve bu lokasyonlarda da heyelan gibi tilt ölçümlerini etkileyebilecek unsurların olmamasına dikkat edilmiştir (İnan, 2010). Keşif çalışması sonucunda belirlenen Gönen civarındaki istasyon yerleri Şekil 4.1’de ve koordinatları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bölgeye ait jeolojik harita Şekil A.1’de verilmiştir. Tiltmetrelerin ikisi fay sistemine çok yakın olarak fayın kuzeyinde ve diğer ikisi ise güneyinde yer alacak şekilde seçilmiştir.

Çizelge 4.2 : Gönen civarında kurulan tilt istasyonlarının konumları

İstasyon Kodu	Coğrafi Adı	Konumu	
ALAA	Alaattin Köyü	40.186 K	27.695 D
ATIC	Atıcıoba Köyü	40.083 K	27.563 D
CAMB	Cambaz Köyü	40.016 K	27.603 D
COBA	Çobanhamidiye Köyü	40.019 K	27.715 D

Tiltmetrelerin 30 - 40 m derinliğe sahip kuyulara yerleştirilmesi planlanmıştır. Kuyuların delinmesi ve sistemlerin kuyu içine yerleştirilmesi de sistemlerin duyarlılığı kadar önem taşımaktadır. Kuyunun tabanına tiltmetre oturtulacağı için, kuyu tabanında yapılması gereken bazı düzenlemeler vardır. Bu düzenlemelere ilişkin boyutlar Şekil 4.5’de ayrıntılı olarak yer almaktadır. Açılan kuyuda sapmanın 3 dereceyi geçmemesi de ayrıca dikkat edilmesi gereken hususlardan biridir. Kuyular tercihen eşit azimutal dağılım gösterecek şekilde, sediman örtüsünün ince olduğu, araba, tren ve endüstriyel gürültülerden uzak yerlere yerleştirilmelidir (İnan, 2010).



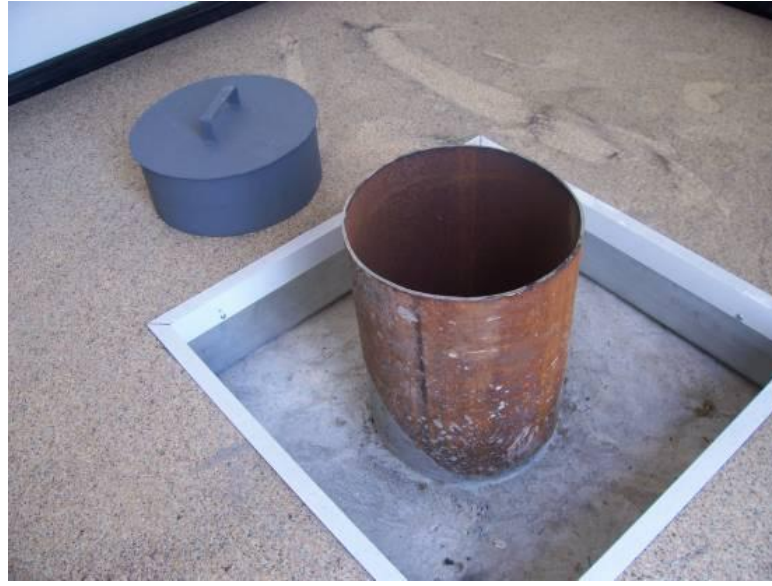
Şekil 4.5 : Tiltmetrenin oturtulduğu zeminin betonlanması ve kuyu tabanına ilişkin boyutlar.

Technical drawing of a soil investigation device (Fig. 1). The drawing shows a cross-section of the device and its components. The top part is a handle (Kapak) connected to a protective pipe (Koruma borusu). The device is inserted into the ground (Toprak) and is surrounded by concrete (Beton). The device consists of a central probe pipe (Sondaj borusu) and a surrounding concrete sleeve (Beton). The probe pipe has a diameter of 220 mm. The concrete sleeve has an outer diameter of 300 mm. The device is shown at two depths: 500 mm and 2000 mm. The top part of the device is 800 mm wide. The bottom part is 300 mm wide. The device is shown in a cross-section view.

38

Kuyu içinde yer alan tiltmetrenin atmosfer koşullarından etkilenmesini en aza indirmek amacıyla kuyu ağzında contalı kapaklar kullanılmıştır. Kapaklar aynı şekil üzerinde gösterilmiştir. Kuyu demir boru ile teçhiz edilerek, kuyu borusunun dışı çimentolanmıştır.

Açılan kuyuların herbiri, çelik borularla teçhiz edilmiş ve kuyuların içine su girmeyecek şekilde boruların dış kısmı betonlanmıştır (Şekil 4.7). Tiltmetrelerin kuyu dibinde yer alacağı 2 metrelik bölümde ayrı çapta ve altı kapalı özel çelik borular kullanılmıştır. Bu borulara ilişkin görüntü Şekil 4.8’de yer almaktadır.



Şekil 4.7 : Atıcıoba istasyonunda kuyu ağzının görünümü.



Şekil 4.8 : Tiltmetrelerin kuyu dibinde yer alacağı iki metrelik bölümde ayrı çapta ve altı kapalı özel çelik borular.

Tiltmetre kuyuları için sondajlar tamamlandıktan sonra, her bir istasyon için ölçüm sistemlerini içine alacak olan standart kulübeler tasarlanmış ve montajları yapılmıştır (Şekil 4.9). Kulübeler 2x2x2 metre boyutlarındadır. Tilt istasyonlarının kurulup çalışmaya başlamasından sonra, aynı istasyonlara 3 bileşenli geniş band sismometreler de yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9 : Tiltmetre istasyonları için tasarlanmış olan kulübeler.

İstasyonların altyapı çalışmaları tamamlandıktan sonra 28-30 Ekim 2007 tarihleri arasında tiltmetreler başarılı bir şekilde kuyulara yerleştirilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : İstasyona tiltmetre sisteminin yerleştirilmesi.

4.3.2 Türkoğlu pilot bölgesi

İkinci plot bölgede yer belirleme çalışmaları 28-30 Ekim 2008 tarihleri arasında gerçekleştirilmiştir. Aydınkavak, Çınarlı, Hacıbebek köyleri ve Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi kampüsü içinde olmak üzere dört nokta belirlenmiş ve belirlenen noktalar ana kayası ofiyolit olan birimler üzerindedir (İnan, 2010). Arazi çalışması sonucu belirlenen koordinat bilgileri, coğrafi yer adları ile birlikte Çizelge 4.3'te ve bölgeye ait jeolojik harita Şekil A.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Türkoğlu civarında kurulan tilt istasyonlarının konumları.

İstasyon Kodu	Coğrafi Adı	Konumu	
AYDN	Aydınkavak Köyü	37.41420 K	36.80670 D
CNRL	Çınarlı Köyü	37.45994 K	37.09292 D
HBBK	Hacıbebek Köyü	37.34408 K	36.90810 D
KSIK	K.S.İ. Üniversitesi Kampüsü	37.51672 K	36.98705 D

İstasyon yerlerinin belirlenmesi saha çalışmalarından sonra, Ocak-Şubat 2009 döneminde teçhizli sondaj çalışmalarına başlanmış ve dört istasyon için sondajlar Şubat sonunda tamamlanmıştır (Şekil 4.11). Sondajların teknik özellikleri Gönen Pilot Bölgesine benzer biçimde uygulanmış, aynı şekilde beton kaideler üzerine standart kulübeler (Şekil 4.12) yerleştirilmiştir.



Şekil 4.11 : K.S.İ. Üniversitesi Kampüs tilt istasyonu sondaj çalışmaları.

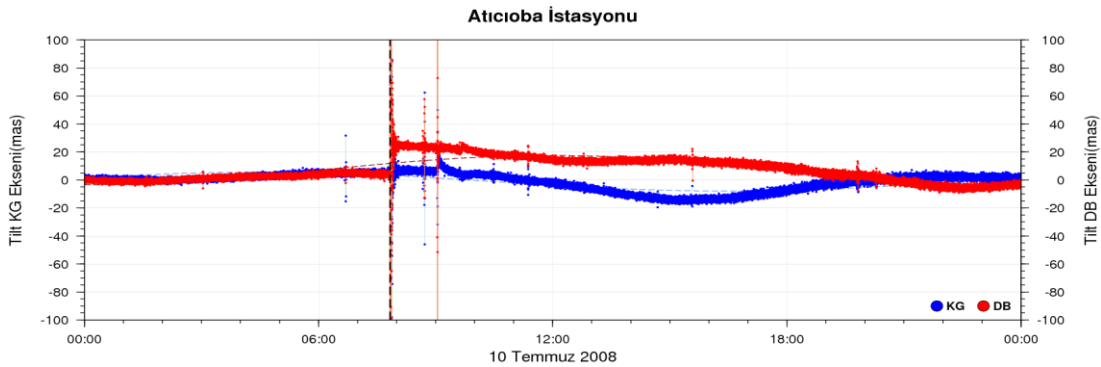


Şekil 4.12 : K.S.İ. Üniversitesi Kampüs tilt istasyonu için su basmanı kaidesi üzerinde kulübenin yerleştirilmesi ve enerji kaynağının güneş panelleri ile sağlanması.

Kulübelerin tamamlanması ve elektrik altyapısının oluşturulmasından sonra tiltmetrelerin kuyu içine yerleştirilme işlemleri 28 Şubat – 5 Mart 2009 tarihleri arasında tamamlanmıştır.

4.4 Veri Toplama Stratejisi

Gönen’de konuşlandırılan 4 kuyu içi tilt gözlem istasyonlarından veriler ilk aşamada offline bir şekilde çekilmiş ve değerlendirilmiştir. Daha sonra sisteme dahil edilen GPRS modem ve hazırlanan yazılım aracılığı ile istasyonlar online hale getirilmiştir. Ancak CAMB istasyonu kurulumundan kısa süre sonra kuyunun su alması ve önlenememesi sebebiyle devre dışı bırakılmıştır. Veriler günlük bazda Gönen’den Ocak 2008’den, Türkoğlu’ndan ise Nisan 2009’dan bu yana TÜBİTAK MAM’a gerçek zamanlı olarak gelmeye devam etmektedir. Toplanan veri kalitesine örnek olarak Atıcıoba istasyonu bir günlük ham tilt verisine ait zaman serisi Şekil 4.13’te görülmektedir.



Şekil 4.13 : Atıcıoba istasyonu ham tilt verisine ait bir günlük zaman serisi.

Tiltmetrelerin örnekleme aralığı 2 saniye (0.5 Hz) olarak seçilmiştir. Merkeze ulaşan veriler Bölüm 5’de ayrıntılı olarak anlatıldığı biçimde hergün otomatik olarak grafiklenmekte ve basınç, sıcaklık, nem gibi etkenler de göz önüne alınarak sistemin tutarlılığı denetlenmektedir.

5. TİLTMETRE VERİLERİNİN ANALİZİ

Her iki bölgede bulunan toplam 7 kuyu içi tiltmetre gözlem istasyonunda gün boyunca kaydedilen veriler 1 MB'lık dahili depolama kapasitelerine sahip olan GPRS modemler tarafından depolanmakta ve her saat başında TÜBİTAK MAM'da bulunan dosya sunucusuna aktarılmaktadır. Sunucuya ulaşan veriler bölgede bulunan meteoroloji ve sismoloji istasyonlarından gelen verilerle birlikte tiltmetre istasyonlarına hususi olarak yazılmış kabuk betikleri tarafından grafiklenmekte ve değerlendirilmektedirler.

Her gün otomatik olarak hazırlanan grafikler farklı örneklemeye sahip ve farklı zaman dilimlerini kapsamaktadırlar. Grafikler temel olarak 5 farklı zaman dilimi için çizdirilmektedirler. Bunlar sırasıyla 1 gün öncesinin, son 1 haftanın, son 2 ayın, son 1 yılın ve istasyonun kurulumundan güncel tarihe dek olan grafiklerdir. Bunların haricinde bir de işlenmemiş ham veriler grafiklenerek istasyonun durumu kontrol edilmekte ve sağlıklı işletilebilmesi sağlanmaktadır. Bu grafikler ise tilt (KG ve DB), 2 adet sıcaklık, nem ve basınç sensörlerinden elde edilen verilere dayanmaktadır.

Lippmann kuyu içi tiltmetrelerin temel örnekleme oranı 128 Hz'dir. Yani kullanıcı arzu ettiği sıklıkla 128 Hz'de alınan örneklerin ortalamasını kaydeder (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 : Lippmann kuyu içi tiltmetrelere ait kullanılabilir örnekleme oranları ve karşılık gelen ortalamalar

2 ⁿ Değerin Ortalaması	Örnekleme Oranı
3	1/16
4	1/8
5	1/4
6	1/2
7	1
8	2
9	4
10	8
11	16
12	32
13	64
14	128

Tiltmetre standart ayarlarla güç kaynağına bağlanır bağlanmaz seri port üzerinden 16 Hz'de sırasıyla tilt, basınç, nem ve sıcaklık verilerini göndermeye başlar. Ayrık ölçümler birbirinden noktalı virgülle ayrılmış ve $\pm 2^{24}$ arasında tamsayı değerleri olarak ASCII formatında okunur (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2 : Örnek seri port çıktısı

```
-432038; -613267; 7205063
-431839; -612787; 7205077
-432155; -612516; 7205079
```

Okunan bu veriler Siemens XT65 model GPRS modemler üzerinde çalışan java yazılımı sayesinde saatlik dosyalara kaydedilir ve otomatik olarak TÜBİTAK MAM'da bulunan bir dosya sunucusuna yüklenir. Veri dosyalarında ilk sütun 01.01.1970'ten günümüze milisaniye cinsinden zaman bilgisine, ikinci ve varsa üçüncü sütun ölçüm değerlerine karşılık gelir. Dosyaların isimlendirilmesinde kullanılan format <kod><yıl><gün><saat>.<tip> şeklindedir. Burada kod 4 haneli istasyon koduna, yıl iki haneli yıl bilgisine, gün julian formatında gün bilgisine, saat iki haneli saat bilgisine ve tip ise ölçüm tipine karşılık gelmektedir. Dosya sunucusuna ulaşan saatlik veriler kabuk betikleri yardımıyla Çizelge 5.3'te verilen tipte ve içerikte günlük bazda dosyalara dönüştürülür ve her gece otomatik olarak bir yedekleme sunucuna yüklenir.

Çizelge 5.3 : Kaydedilen dosyalara ait içerik ve format bilgileri.

Dosya Tipi	İçerik Bilgisi	Format Örneği
tlt	KG ve DB tilt verisi	1301064225 +-432038 -613267
tp1	KG sıcaklık verisi	1301064225 +-12048
tp2	DB sıcaklık verisi	1301064225 +-66298
pre	Basınç verisi	1301064225 +-13038
hum	Nem verisi	1301064225 +-16428

Yedekleme sunucusuna gelen verilerin analiz edilebilmesi ve anlamlı birimlere dönüştürülmesi için yapılması gereken birkaç işlem basamağı vardır. Bunlar sırasıyla;

tilt ölçümleri için;

- kaydedilen sayısal değerlerin gerilim değerine dönüştürülmesi,
- gerilim değerlerine kalibrasyon fonksiyonunun uygulanması,
- azimut düzeltilmesi

sıcaklık, basınç ve nem ölçümleri için,

- kaydedilen sayısal değerlerin gerilim değerine dönüştürülmesi,
- gerilim değerlerine kalibrasyon fonksiyonunun uygulanması

şeklindedir.

Sayısal olarak kaydedilmiş değerlerin(*ölçüm*) gerilim değerlerine dönüştürülmesi,

$$Gerilim(Volt) = 122.07 \times 10^{-9} * ölçüm \quad (5.1)$$

(5.1) eşitliği ile gerçekleştirilmektedir.

Elde edilen gerilim değerleri her bir sensöre ait kalibrasyon sabitleri (A_0 ve A_1) kullanılarak,

$$Sıcaklık(^{\circ}C)=A_0+ Gerilim(Volt) * A_1 \quad (5.2)$$

$$Basınç(mbar)=A_0+ Gerilim(Volt) * A_1 \quad (5.3)$$

$$Nem(\%)=A_0+ Gerilim(Volt) * A_1 \quad (5.4)$$

(5.2, 5.3 ve 5.4) eşitlikleri ile tilt için miliarksaniye (mas), sıcaklık için santigrat derece ($^{\circ}C$), basınç için milibar (mbar) ve nem için yüzde (%) şeklinde anlamlı birimlere dönüştürülür.

Birim dönüşümü yapılmış olan tilt verilerine azimut düzeltmesi uygulanır. Bu işlemde kullanılan azimut değeri tiltmetre kuyu içine yerleştirildiği zaman ölçülmüştür.

$$T_{KG} = t_{KG} \cdot \cos(\alpha) - t_{DB} \cdot \sin(\alpha) \quad (5.5)$$

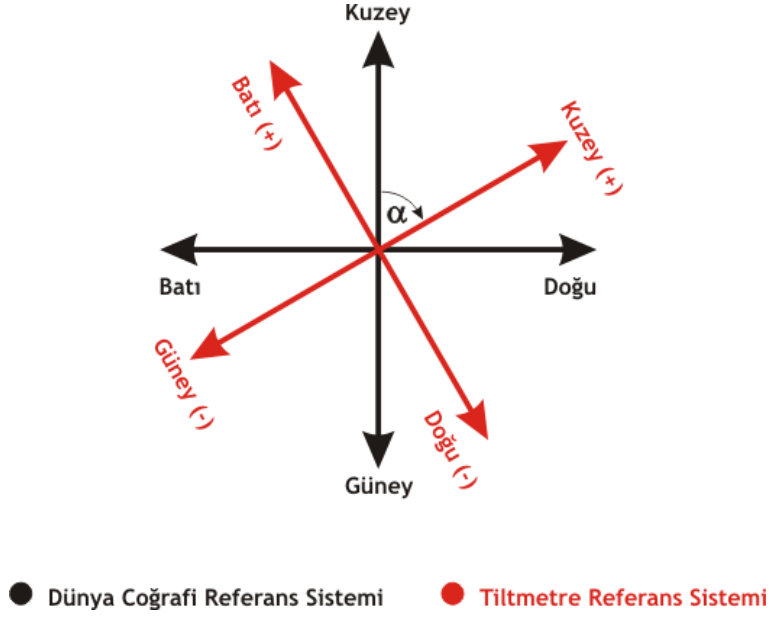
$$T_{DB} = t_{KG} \cdot \sin(\alpha) + t_{DB} \cdot \cos(\alpha) \quad (5.6)$$

t_{DB} ve t_{KG} ham tilt verisini,

T_{DB} ve T_{KG} azimut düzeltmesi uygulanmış tilt verisini,

α ise azimut değerini ifade etmektedir.

(5.5 ve 5.6) eşitlikleri kullanılarak tilt verilerine azimut düzeltmesi uygulanır ve ölçüm düzlemi coğrafi koordinat düzlemine dönüştürülmüş olur (Şekil 5.1).

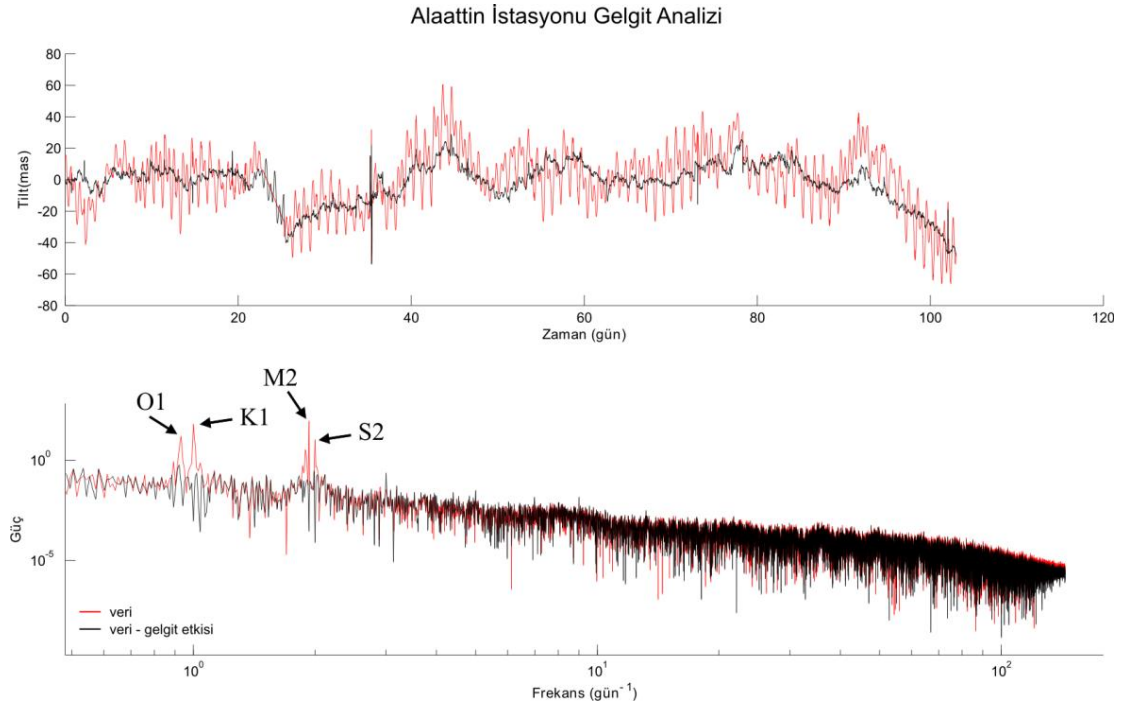


Şekil 5.1 : Azimut düzeltmesi.

5.1 Verilerin Temizlenmesi

İstasyonlardan merkeze ulaşan veriler anlamlı değerlere dönüştürüldükten sonra analiz edilmesindeki ilk iş verilerin temizlenmesidir. Bu işlem alet etkisinin, gelgit ve mevsimsel etkilerin giderilmesi olarak alt gruplara ayrılabilir. Tiltmetreye güç verildiği anda cihazın hemen tutarlı ölçüm almaya başlayamadığı görülmektedir. Normal bir ölçüm sürecinde gücün aniden kesilmesi ya da beslemede oluşan dalgalanmalar sebebiyle 2 sn aralıklı ardışık ölçüm değerleri arasında 1000-1500 mas fark gözlenebilmektedir. Bu tip bir anormal değişim doğa tarafından değil cihaz tarafından üretilmiş, yapay ve istenmeyen bir etkidir. Oluşan bu kaymalar (offset) izleyen bölümde ayrıntılarıyla aktarıldığı şekilde giderilmektedir.

Kaymaların giderilmesinin ardından elde edilen ham gözlem değerleri ETERNA 3.4 yazılımı kullanılarak gelgit etkilerinden de arındırılmıştır (Wenzel, 1996). ETERNA 3.4 ile yapılan analiz öncesinde sinyalin güç spektrumunda gözlenen günlük(O1, K1) ve yarı günlük(M2, S2) gelgit bileşenleri analiz sonrasında spektrumunda gözlenmemiştir (Şekil 5.2). Uygulamalarla ilgili ayrıntılı bilgi izleyen bölümlerde verilmiştir.



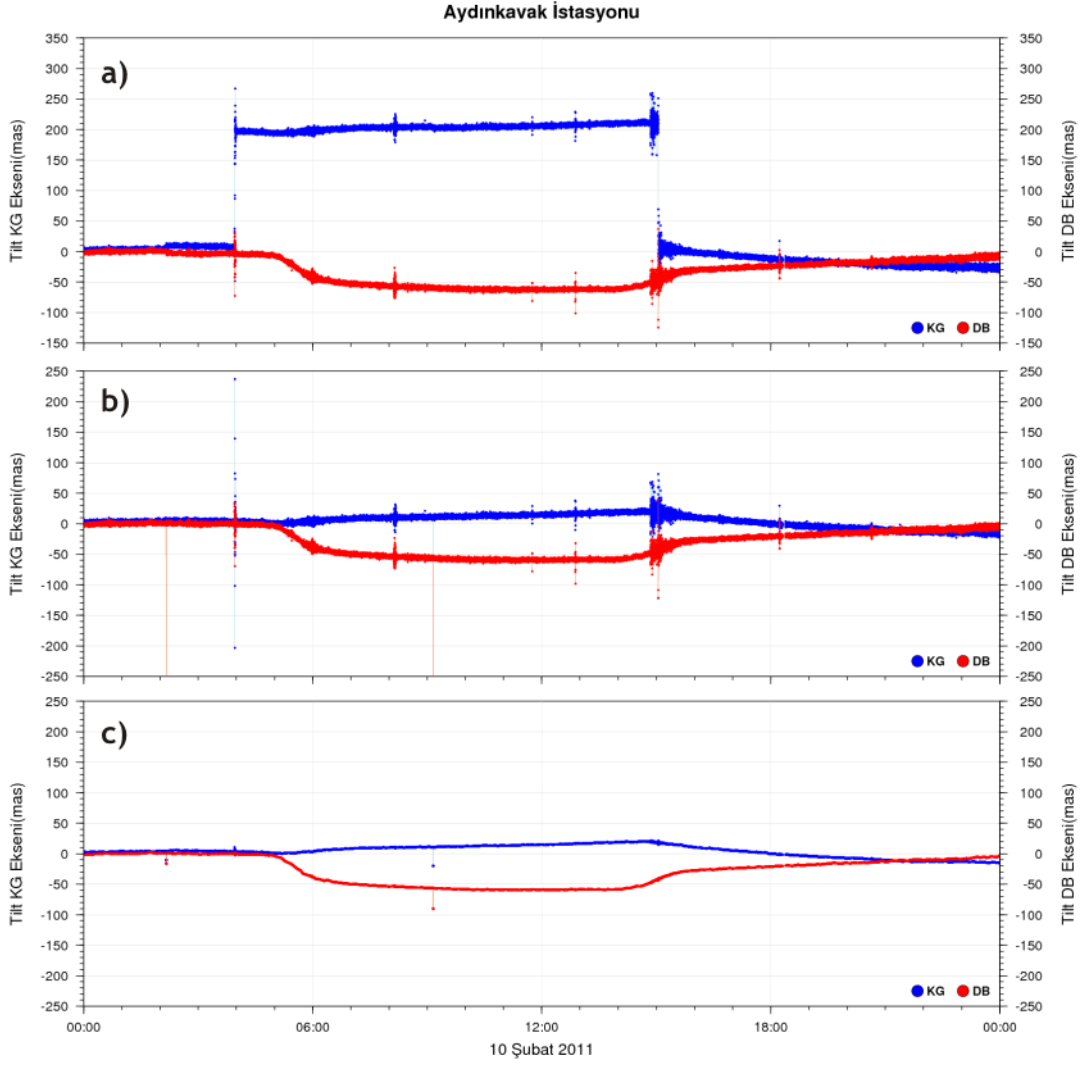
Şekil 5.2 : Alaattin istasyonunda gelgit etkisinin giderilmesi ait örnek. O1 ve K1 günlük, M2 ve S2 yarım günlük gelgit bileşenleridir.

5.1.1 Kaymaların ve iğneciklerin giderilmesi

Ham verilerde gözlenen kaymalar ve iğnecikler kabuk betikleri (*shell scripts*) yardımıyla otomatik olarak giderilmektedirler. Kodun çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir. Her biri ayrı zaman etiketine sahip ardışık iki veri arasındaki farkın mutlak değerine bakılır (5.7). Eğer bu fark başlangıçta betiğe parametre olarak verilmiş olan eşik değerinden az ise sonraki iki ardışık değere atlanır, eğer fazla ise ardışık iki nokta arasındaki fark giderilerek bu fark değeri verinin geri kalan kısmına uygulanır, ardından sonraki ardışık iki verinin incelenmesiyle devam edilir. Veri seti sonuna dek işlem benzer biçimde sürdürülerek tespit edilen ofsetler giderilmiş olur.

$$| f(t+1)-f(t) | \leq \text{limit} \quad (t=0,2,4,\dots,n) \quad (5.7)$$

Bu işlemden sonra iğneciklerin giderilmesi için kaymaları giderilmiş veriye kayan ortalama filtresi uygulanır. Kaymaların ve iğneciklerin giderilmesine ilişkin karşılaştırmalı grafik Şekil 5.3'te görülmektedir.



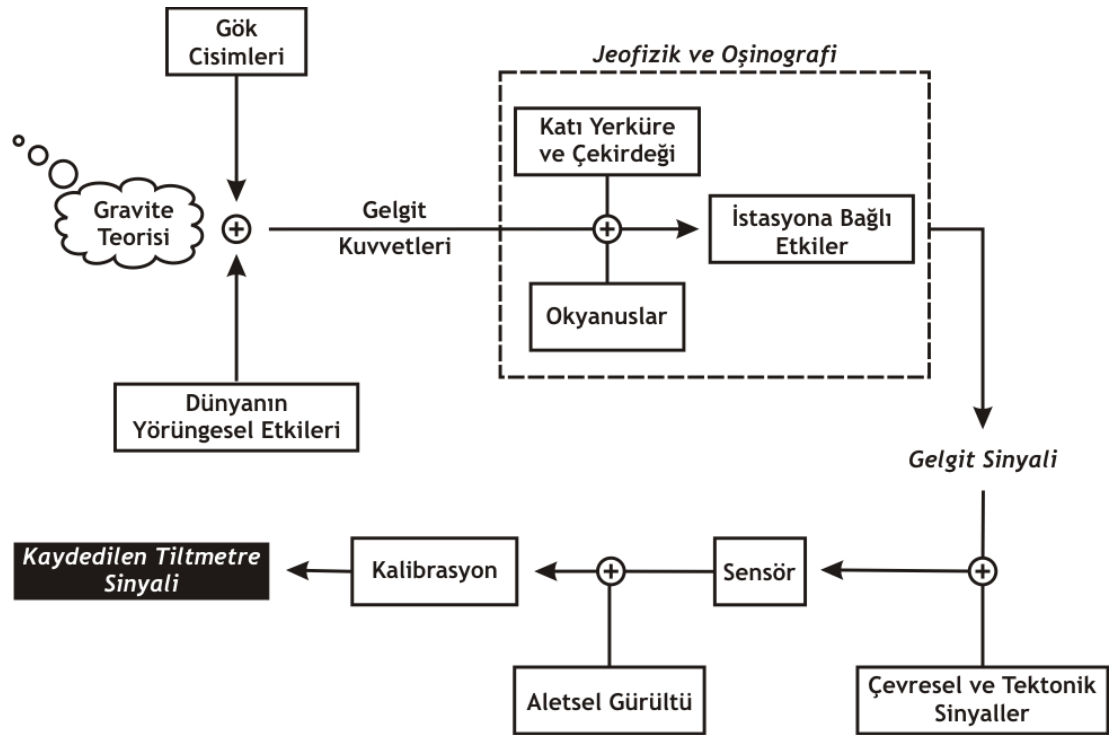
Şekil 5.3 : Aydınkavak istasyonunda kaymaların ve iğneciklerin giderilmesine ait örnek a) ham veri, b) kaymaları giderilmiş veri, c) iğnecikleri giderilmiş veri.

5.1.2 Gelgit etkisinin giderilmesi

Uzayda kütlesi olan tüm cisimler birbirine karşı çekim kuvveti uygular. Yeryuvarı, ay, güneş ve diğer gezegenlerin üzerine uyguladığı çekim kuvvetine deforme olarak tepki verir. Buna gelgit, sebep olan etkiye de gelgit etkisi denir ve modelleme yoluyla elde edilebilir. Gelgit verisinin incelenmesine de gelgit analizi denir. Jeofizikte gelgit analizi, dünyanın yapısını daha iyi anlamada, veri setlerinde gelgit etkisinin giderilmesinde ya da ölçülen herhangi bir büyüklükte (varsa) gelgit etkisinin ve ağırlığının belirlenmesinde kullanılır.

Bu bölümde amaç gelgit etkisini modelleyerek tilt gözlemlerinden ayırmaktır. Bunu yapabilmek için belirli bir sıralamayla önce gelgiti oluşturan kuvvetleri hesaplamak

gerekmektedir (Şekil 5.4). Ayın ve güneşin konumlarını, dolayısıyla yeryuvarına istenen noktada uyguladıkları kuvvetleri hesap ederek ya da harmonik seri açılımlarını kullanarak sözkonusu kuvvetler hesaplanır. Ardından yeryuvarının bu kuvvetlere göre davranışı modellenir. Yeryuvarı okyanuslarda ve karada farklı şekilde tepkiler vereceğinden bunlar ayrı ayrı hesaplanır. Karasal ve okyanusal gelgitlerin toplamı yeryuvarının bu kuvvetlere tepkisini, diğer bir deyişle teorik gelgit etkisini verir. Teorik gelgit etkisi yapılan ölçüme uygun birimle ölçümden ayrılarak gelgit etkisi giderilmiş olur. Gelgit teorisi ve matematiksel hesaplamalarla ilgili ayrıntılı bilgi Vanicek, (1973)'te verilmektedir.



Şekil 5.4 : Kaydedilen tilt sinyali ve içerdiği gelgit etkisi. Agnew, (2005)'ten değiştirilerek alınmıştır.

Gelgit analizini yapmak üzere yazılmış çeşitli yazılımlar mevcuttur. ETERNA, BAYTAPG, PIASD, Tsoft bunlardan birkaçıdır (Dierks ve Neumeyer, 2002). Ancak bu yazılımları kullanabilmek için temel birkaç noktanın iyi bilinmesi gerekir.

Gök cisimlerinin konumları zamanın birer fonksiyonları olduklarından gelgit ivmesi frekans, genlik ve fazın zamana bağlı fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Torge, 1989). Buradan hareketle gelgit hesapları yapmak için geliştirilmiş pek çok potansiyel model vardır. Bu modeller ve modellerde kullanılan dalga sayıları Çizelge 5.4'de verilmektedir.

Çizelge 5.4 : Gelgit hesabında kullanılan potansiyel modeller.

Model	Dalga Sayısı
Doodson (1921)	377
Cartwright-Tayler-Edden (1973)	505
Büllesfeld (1985)	656
Tamura (1987)	1200
Xi (1993)	3070
Tamura (1993)	2060
Roosbeck (1996)	6499
Hartmann ve Wenzel (1995)	12935

Birbirine yakın frekanslardaki okyanusal ve karasal tepkiler için gözlenen (5.9) ve kuramsal olarak hesaplanan (5.8) kuvvetlerin göreceli genlikleri (benzer biçimde fazları da) birbirine çok yakındır (Agnew, 2007).

$$F_H = A_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \quad (5.8)$$

$$F_G = B_1 \cdot \cos(2\pi f_1 t + \theta_1) + B_2 \cdot \cos(2\pi f_2 t + \theta_2) \quad (5.9)$$

Eşitlikler 5.8 ve 5.9'da

A_1, A_2, B_1, B_2 genlik değerlerini,

f_1, f_2 frekans değerlerini,

$\phi_1, \phi_2, \theta_1, \theta_2$ faz değerlerini,

F_H kuramsal olarak hesaplanan, F_G gözlenen kuvveti ifade etmektedir.

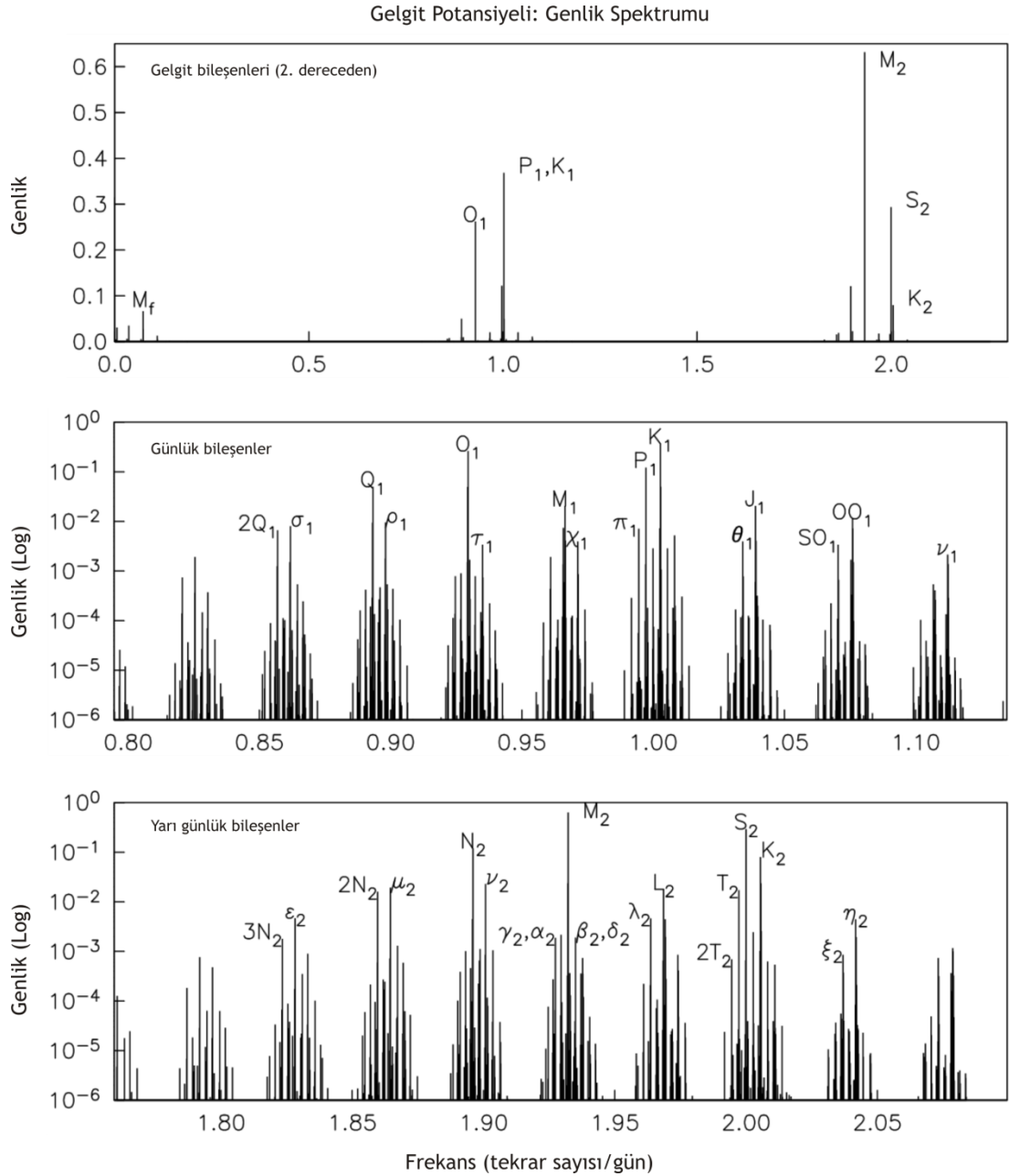
Eşitlikler 5.8 ve 5.9 için, $|f_1 - f_2| \ll f_1$ ise;

$$\frac{B_1}{B_2} \approx \frac{A_1}{A_2} \text{ ve } \theta_1 - \theta_2 \approx \phi_1 - \phi_2 \text{ kabulleri yapılır.}$$

Analizde her bir bileşen için genlik ve faz değerleri elde edilir. Elde edilen faz değeri sıfıra eşit ise $t=0$ 'da gelgit maksimumdur. Eğer faz negatif ise t 'nin pozitif olduğu noktada gelgit maksimumdur. Ölçüm noktasında fazı sıfır olan bileşene ait gelgit kuvveti maksimumdur (Agnew, 2007).

Gelgit; ay, güneş ve diğer gezegenler hesaba katıldığında pek çok bileşenden oluşmaktadır ve en baskınları ay kaynaklı olanlarıdır. Ay kaynaklı etki 1 birim kabul edilirse güneş için 0.46, Venüs için 5×10^{-5} , Jüpiter için 6×10^{-6} ve diğer gezegenler için çok daha küçük değerler elde edilir (Agnew, 2007). Buradaki en büyük etken gezegenler arası uzaklık farkıdır. Literatürde uzun (örn. M0,S0), günlük (örn.

M1,Q1) ve yarı günlük (örn. M2,S2) periyotlara sahip ana gelgit bileşenlerinden basedilir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : Baskın gelgit bileşenleri (Agnew, 2005).

Gelgit analizinde tüm tiltmetre istasyonları için kuruluşlarından beri toplanan veri setleri (Gönen için 01.11.2007 - 01.04.2011, Türkoğlu için 01.04.2009 - 01.04.2011) ve ETERNA 3.4 (Wenzel, 1996) yazılımı kullanılmıştır. ETERNA ile yapılan analizlerde Hartmann-Wenzel (1995) potansiyel kataloğu kullanılmıştır. Bu katalogla yapılan hesaplamalardaki doğruluk 1 ngal'den ($1 \text{ ngal} = 0.01 \text{ nm/s}^2$) daha kesindir (Wenzel, 1996). Analiz sonucu elde edilen düzeltilmiş gelgit parametrelerine örnek

olarak Alaattin istasyonu için hesaplanan değerler Çizelge 5.5'te verilmiştir. Alaattin istasyonunda M2 bileşenine ait genlik ve fazların standart sapmaları sırasıyla 0.02 ve 1.57 mas olarak hesaplanmıştır. Ana bileşenlerden M2 fazının duyarlılığı 0.2 mas'nin altındadır.

Çizelge 5.5 : Alaattin istasyonu gelgit analizi sonuçları.

Gelgit Bileşeni	Doğu - Batı Bileşeni		Kuzey - Güney Bileşeni	
	Genlik Faktörü	Faz	Genlik Faktörü	Faz
O1	0.75 ± 0.10	-14.27 ± 3.75	0.88 ± 0.10	-44.27 ± 18.12
O1	0.77 ± 0.06	-21.38 ± 3.04	0.77 ± 0.04	-28.74 ± 4.92
K1	1.03 ± 0.12	-17.68 ± 3.22	1.91 ± 0.12	-26.27 ± 9.57
K1	0.93 ± 0.06	-26.47 ± 2.39	0.57 ± 0.04	-16.70 ± 7.47
M2	0.67 ± 0.02	-5.26 ± 1.57	0.49 ± 0.02	-4.15 ± 2.48
M2	0.68 ± 0.02	-8.69 ± 1.25	0.54 ± 0.02	-2.84 ± 1.28

Genlik faktörü, ilgili gelgit fazına ait gözlenen ve astronomik genlikler arasındaki oran olarak tanımlanır. Elastik yeryuvarı modellerine dayanarak hesaplanan genlik faktörleri 0.7 civarındadır (Melchior, 1983). Gönen ve Türkoğlu bölgesine ait verilerle yapılan analizlerde ana gelgit bileşenlerinde genlik faktörü teoriye uygun olarak genelde 0.5 - 0.8 aralığında değerler göstermiştir.

5.2 Diğer Verilerle İlişkilerin İrdelenmesi

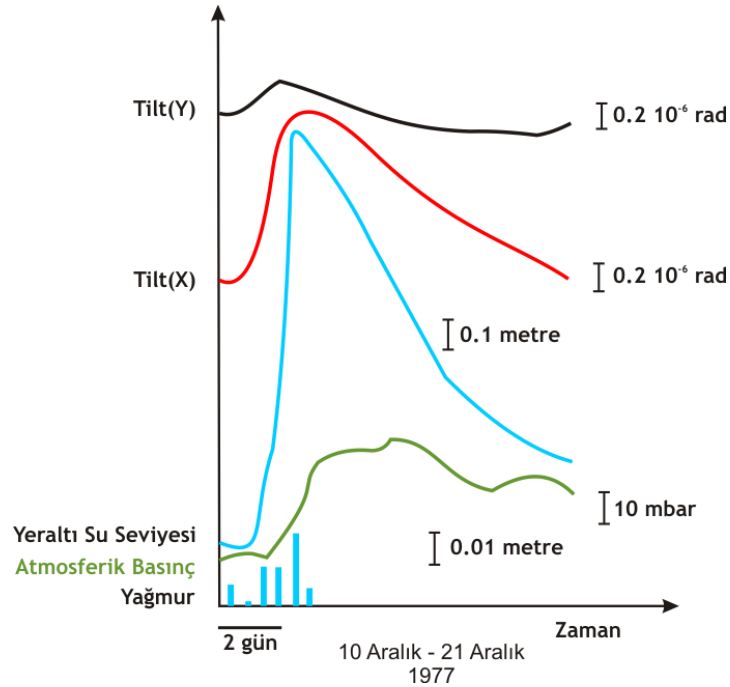
Geçmiş çalışmalar tilt ölçümlerinin meteorolojik ve hidrolojik olaylardan oldukça etkilendiğini ve bu etkilerin yapılan araştırmaya göre dikkatlice irdelenmesi gerektiğini göstermiştir (Edge ve diğ, 1981; Savage ve diğ, 1979). Bu çalışma kapsamında da aynı zaman aralığına denk düşen günlük toplam yağış miktarları, sıcaklık, basınç ve her bir istasyona göre 130 km yarıçap içinde meydana gelen, büyüklüğü 4.0 ve daha yüksek depremler dikkate alınarak verilerin yorumlanmasında kullanılmıştır.

5.2.1 Meteoroloji ve hidroloji verileri

Atmosferik ve hidrolojik etkiler, orta-kısa dönem sismotektonik deformasyonlar ve gelgiti de kapsayan geniş bir frekans bandında yer alır. Tilt verilerinin analizi sırasında da anomali ya da gürültü olarak ortaya çıkar. Analizlerin iyi sonuç verebilmesi için her bir gözlem istasyonundaki bu tip etkilerin dikkatlice

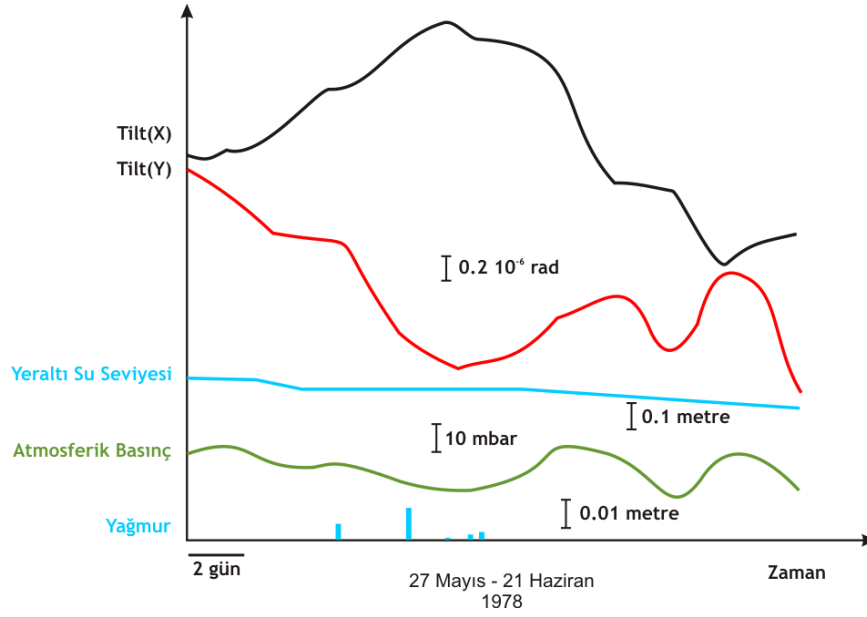
değerlendirilmesi, mümkünse sinyalden çıkartılması gerekir. Ancak barometrik basınç, yağış ve yeraltı suyu seviyesi arasında gözlenen ilişki doğrusallıktan uzaktır.

Barometrik ve hidrolojik etkileri karşılaştıran çalışmalar barometrik etkilerin genliğinin hidrolojik etkilerin genliğinden çok daha büyük olduğunu göstermiştir. Edge ve diğ., (1981)'de English Lake District bölgesinde 9 aylık kuyu içi tilt verisini değerlendirmişlerdir. Birbirine dik iki tiltmetre 12 metre derinlikte metamorfik yapı içine yerleştirilmiştir. Analizde gelgit etkileri içermeyen alçak frekanslı tilt verileri atmosferik basınç, yağış ve yeraltı su seviyesi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.6 ve 5.7). Bu çalışma sinyal içindeki bozucu basınç etkisinin hidrolojik etkiye göre 10 kat daha az olduğunu göstermiştir.

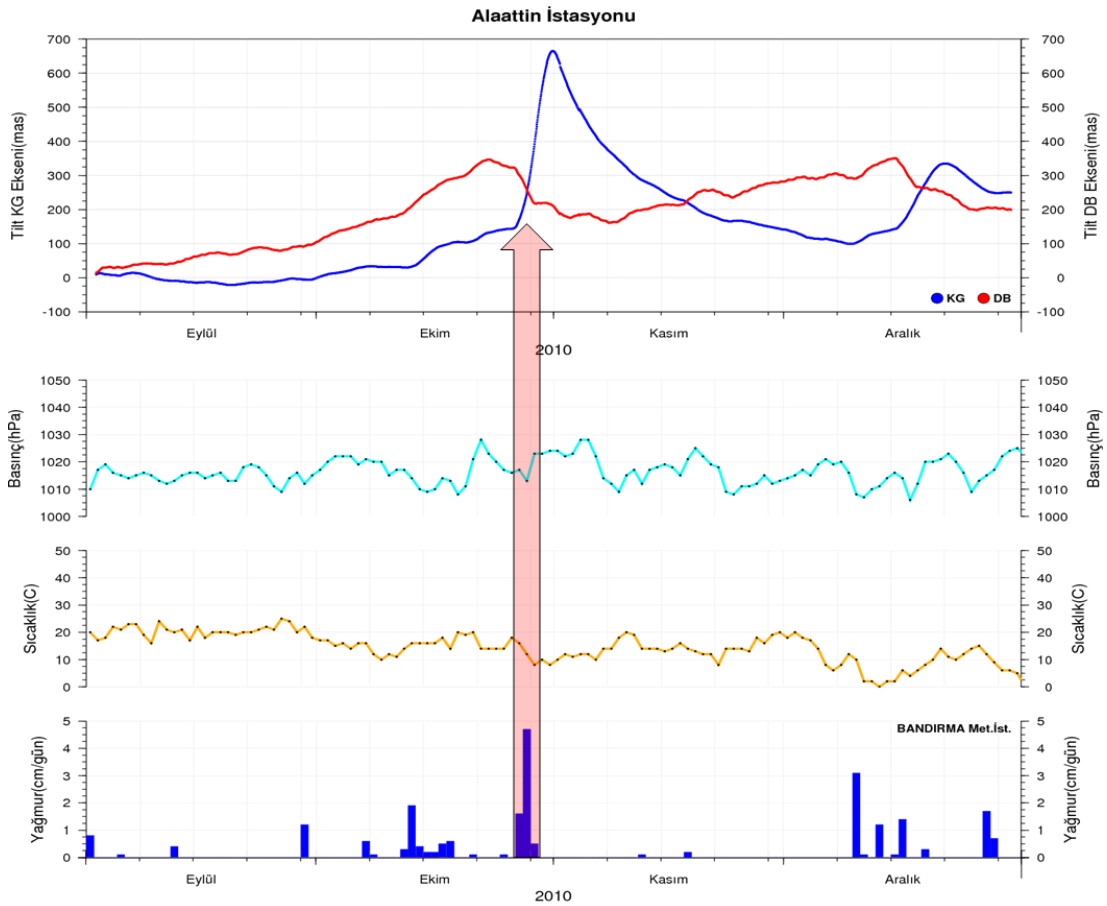


Şekil 5.6 : 10-21 Aralık 1977 tarih aralığındaki meteorolojik ve hidrolojik değişimle ilişkili tilt anomalisi (Edge ve diğ., 1981).

Literatürde deformasyon ölçümlerindeki hidrolojik etkiyi gidermek üzere oluşturulmuş çeşitli model (Yamauchi,1987; Kümpel, 1987) ve yaklaşımlar mevcuttur ve kısmen başarılı uygulamaları da olmuştur (Weise ve diğ, 1999). Ancak bu etkileri gidermek zemin şartlarına, yeraltı suyunun ortamdaki birikim ve sızma davranışlarına göre oldukça karmaşık olmakla beraber verinin kayıpsız şekilde temizlenmesini olanaksız kılmaktadır. Bu sebeple tez çalışması kapsamında tilt verileri hidrolojik ve meteorolojik verilerden arındırılmamış ancak değerlendirme aşamasında birlikte grafiklenip etkileri gözönüne alınarak yorumlanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 : 27 Mayıs-21 Haziran 1978 tarih aralığındaki basınç değişimi ile ilişkili tilt anomali (Edge ve diğ, 1981).



Şekil 5.8 : Alaattin istasyonunda kaydedilmiş olan yağışa bağlı tilt anomali.

5.2.2 Deprem verileri

Tiltmetre istasyonlarının bulunduğu noktalarda yine TÜRDEP Projesi kapsamında kurulmuş sismoloji ve GPS istasyonları da bulunmaktadır. Deprem verileriyle tilt verilerinin ilişkilerinin irdelenmesinde bu istasyonlardan elde edilen veriler kullanılmıştır.

Deprem verilerinin tilt verileriyle ilişkilendirilmesinde bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu zorluklardan biri sinyalin içeriğindeki deformasyon bilgisinin çevresel gürültüye oranla çok küçük kalmasıdır (Zadro ve Braitenberg, 1999). Deformasyon sinyali yaklaşık olarak hiposantır uzaklığının küpü ile ters orantılı olarak azalır. Sinyalin gürültü seviyesinden önemli ölçüde daha büyük olduğu yarıçap, deformasyon gözlem istasyonlarının seyrek coğrafi dağılımı ile karşılaştırıldığında genellikle küçüktür. (Zadro ve Braitenberg, 1999). Gönen pilot bölgesinde istasyonlar arası mesafe 15 km - 19 km aralığında, Türkoğlu pilot bölgesinde ise 11 km – 26 km aralığında değişmektedir. Ancak test amaçlı ve ülkemizde bu alanda yapılan ilk çalışma olması bakımından depremler seçilirken kullanılan yarıçap esnek tutulmuştur. Bu yaklaşımla Gönen ve Türkoğlu bölgesinde deprem öncesi, oluş anı ve sonrası dönemlerdeki deformasyonları araştırmak amacıyla 130 km’lik bir yarıçap içerisinde meydana gelen, büyüklüğü 4.0 ve üzerindeki depremler seçilmiş, Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de verilen öne çıkan örnekler izleyen bölümde ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.6 : Gönen bölgesinden seçilen depremler

Deprem Bilgisi						İstasyona Olan Uzaklık(km)		
Bölge	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Magnitüd(M_L)	Derinlik (km)	Alaattin	Atıcıoba	Çobanhımiye
Balıkesir/Gönen-Tütüncü	10.07.2008 10:49	40.000 K	27.730 D	5.1	12	20.71	16.69	3.14
Balıkesir/Susurluk-Göbel	24.11.2008 21:46	39.972 K	28.179 D	4.1	8.1	47.69	53.61	40.07
Çanakale/Biga-Sinekçi	08.08.2009 16:52	40.327 K	27.419 D	4.8	15.2	28.08	29.92	41.85

Çizelge 5.7 : Türkoğlu bölgesinden seçilen depremler

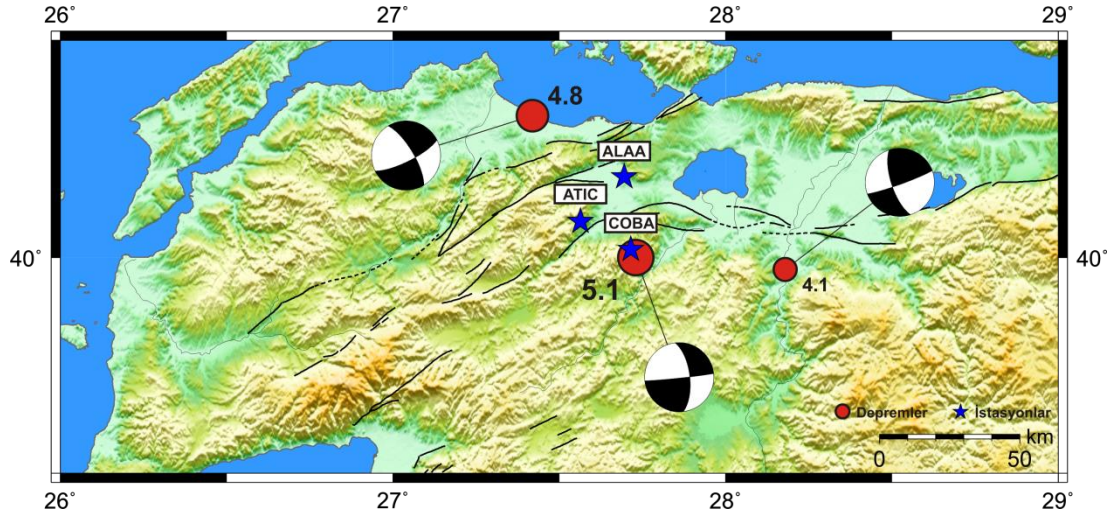
Deprem Bilgisi						İstasyona Olan Uzaklık(km)			
Bölge	Oluş Zamanı	Enlem	Boylam	Magnitüd(M_L)	Derinlik (km)	Aydıncavak	Çınarlı	Hacıbek	K.S.İ.Ü.
Osmaniye - Düziçi	16.11.2010 12:50	37.384 K	36.337 D	4.7	3.4	38.10	63.78	47.14	55.84

Depremlere ait tüm bilgiler TÜBİTAK MAM Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü deprem kataloğundan elde edilmiştir. Depremlerin konumlarına ilişkin haritalar Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir.

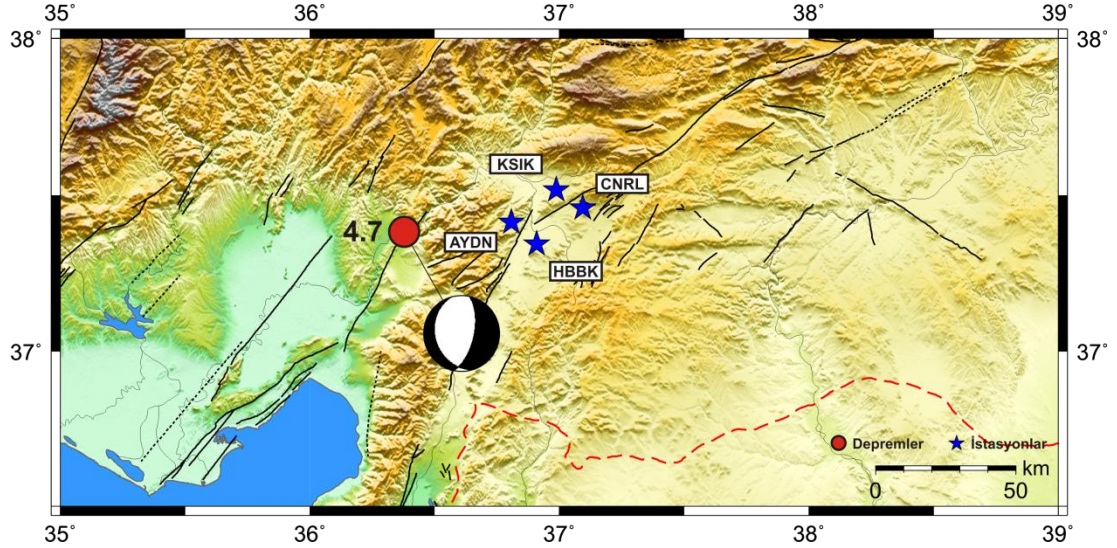
Depremlerle ilişkinin araştırılmasında kullanılan grafikler deprem öncesi, oluş anı ve sonrası dönemdeki tilt değişimleri dikkate alınarak genel trendin karakterini de göstermesi bakımından 20 günlük zaman pencereleri kullanılarak hazırlanmıştır ve elde edilen bulgular Çizelge 5.8’de özetlenmiştir. Çizelgede normal olarak ifade edilen değişim miktarları tanımlanırken yağış ve depremin olmadığı, 20 günlük (anamlı bir karşılaştırma yapılabilmesi için grafiklerde kullanılan zaman aralığı ile aynı olması bakımından) 3 farklı zaman penceresinin ortalaması kullanılmıştır.

Takemoto (1991), sürekli tilt ve strain ölçümleriyle deprem öncesi anomalileri araştırmıştır. Çalışmasında deprem öncesi haber verici nitelikte anlamlı bir anomalinin saptanabilmesi için en az iki istasyona ihtiyaç olduğunu ve M büyüklüğünde bir depremin $\log r = 0.51 \cdot M - 1.96$ formülüyle ifade edilen azami r yarıçapı dahilinde olması gerektiğini belirtmiştir. Buna göre 5.1 büyüklüğünde bir depreme ait bu tip bir anomalinin gözlenebilmesi için azami 4.38 km uzaklıkta olması beklenir. Gönen ve Türkoğlu bölgeleri için şimdiye dek kaydedilen 4 ve üzerinde büyüklüğe sahip en yakın deprem Gönen bölgesinde 10 Temmuz 2008’de yerel saatle 10:49’da meydana gelen $M_L=5.1$ Tütüncü depremidir. Bu depreme ilişkin en yakın mesafedeki kayıt da ~16.69 km uzaklıktaki Atıcıoba istasyonundan elde edilmiştir, başka bir deyişle çalışmanın yapıldığı zaman aralığında Takemoto (1991)’e göre önceden haber verici nitelikte tilt anomalisi oluşturacak yakınlık ve büyüklükte bir deprem gözlenememiştir. Ancak Takemoto (1991)’de verilen ampirik bağıntı önemli ölçüde yerel sismotektonik özelliklere bağlıdır ve başka bir bölgedeki jeolojik yapıya uygun olması oldukça zordur (Dal Moro ve Zadro, 1999). Bu sebeplerle, kurala uymamasına rağmen bazı istasyonlarda deprem öncesi anomaliler saptanmıştır (Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.21). Takemoto (1991)’de verilen veya benzer biçimde uzaklık ve büyüklük ilişkilerini içeren ampirik bağıntılar elde edilen veri setleri büyüdükçe sınanmalı ve geliştirilmelidir.

Deprem oluş zamanlarında da istasyonun depreme olan uzaklığı ve depremin büyüklüğüyle orantılı olarak yüzlerce mas’ye varan değişimler görülmüştür. Ayrıca deprem anında oluşan ve deprem sonrası dönemde de devam eden, kalıcı nitelikte tilt değişimleri saptanmıştır.



Şekil 5.9 : Gönen bölgesinde seçilen depremlerin konumları ve odak mekanizması çözümleri. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.

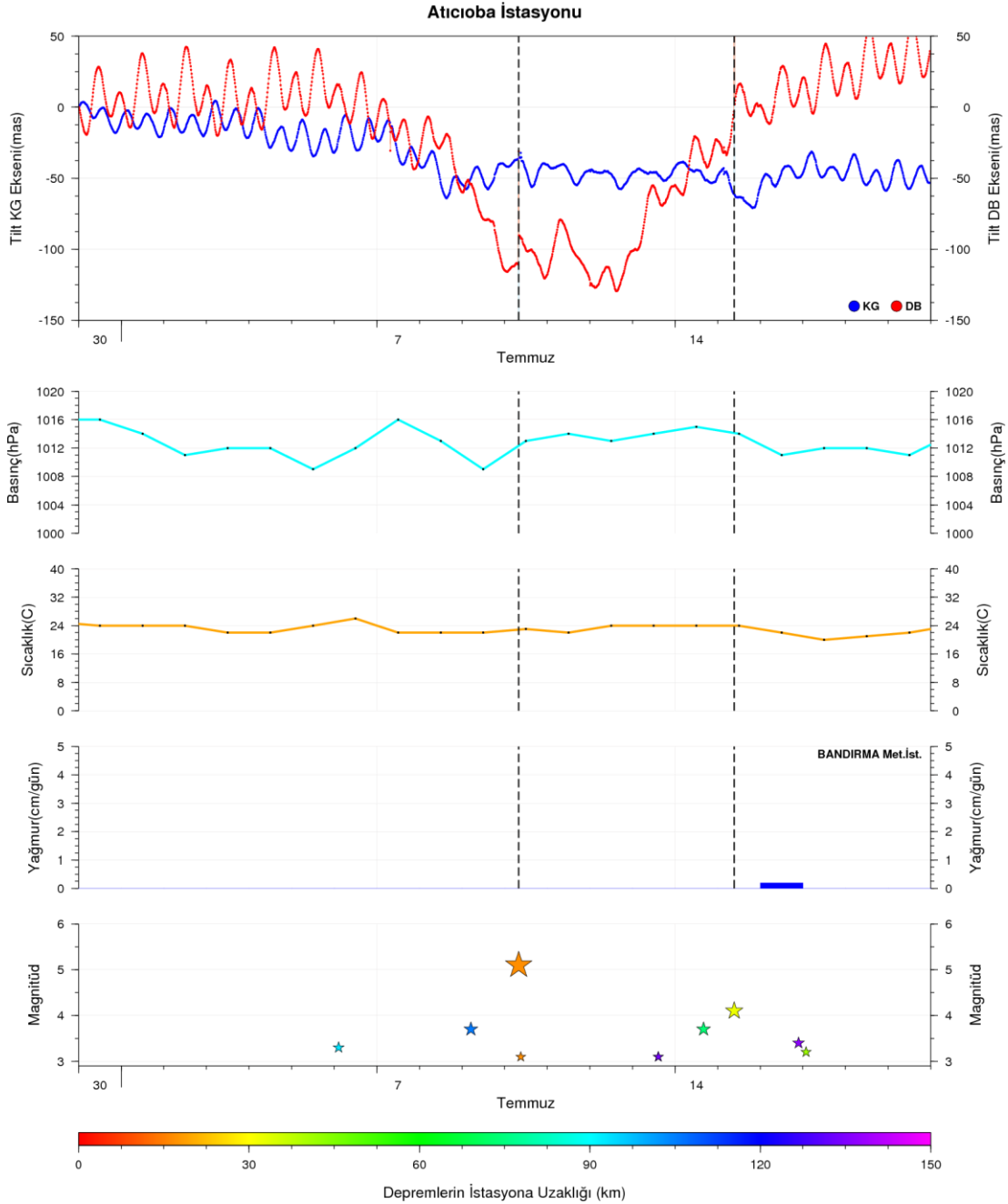


Şekil 5.10 : Türkoğlu bölgesinden seçilen depremlerin konumları ve odak mekanizması çözümleri. Faylar, Şaroğlu ve diğ, (1992)' den alınmıştır.

5.2.2.1 Gönen/Tütüncü depremi (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$)

10 Temmuz 2008 tarihinde Tütüncü mevkiinde meydana gelen 5.1 büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 20.71 km (Alaattin), 16.69 km (Atıcıoba) ve 3.14 km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır. Atıcıoba istasyonunda depremden yaklaşık 4 gün önce başlayan DB bileşeninde 125 mas ve KG bileşeninde 25 mas'lık bir anomali gözlenmiştir (Şekil 5.11). İlgili dönemde yağış olmadığı gibi, basınç ve sıcaklık değerlerinde de anlamlı bir değişim yoktur, dolayısıyla tilt anomalisinin doğrudan depremle ilişkili olduğu söylenebilir. Deprem anında KG bileşeninde 25 mas, DB

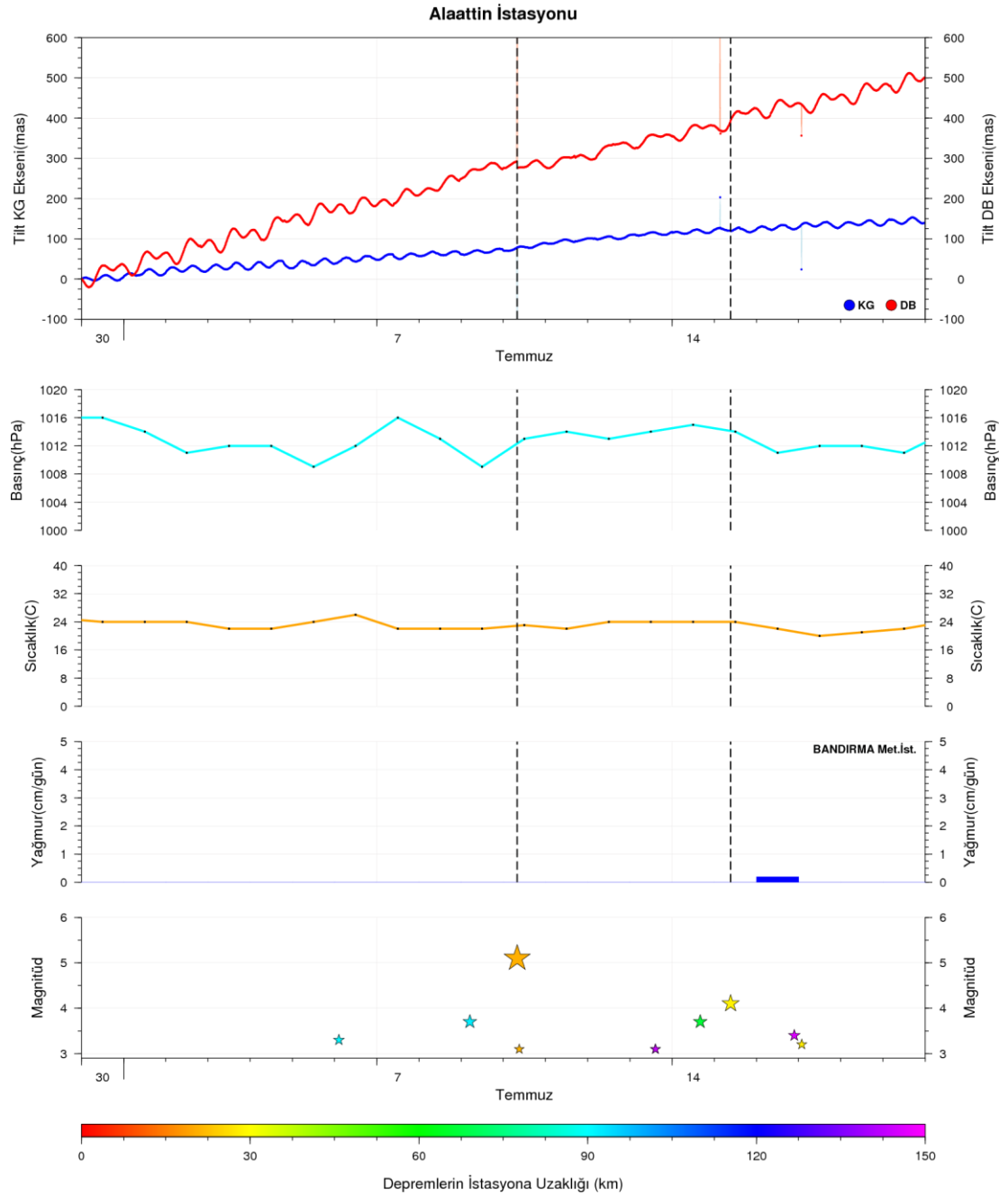
bileşeninde 150 mas'lik değişimler gözlenmiştir. Deprem sonrası dönemde ise 3 - 4 günlük toparlanma evresinden sonra genel trendin devam ettiği görülmektedir.



Şekil 5.11 : Tütüncü (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$) depremi ile ilişkili Atıcıoba istasyonu tilt anomalisi.

Alaattin istasyonunda deprem öncesi Atıcıoba istasyonundaki kadar baskın bir anomali görülmemiştir. Ancak sinyal içeriği dikkatle izlendiğinde yüksek frekanslı değişimlerin deprem öncesi 3-4 günlük zaman aralığında baskılandığı görülmektedir (Şekil 5.12). Deprem anında KG bileşeninde 100 mas, DB bileşeninde 200 mas'lik değişimler saptanmıştır. Atıcıoba istasyonuna benzer şekilde deprem sonrası 3 - 4

günlük dönemden sonra sinyalin frekans içeriğinin deprem öncesi durumuna döndüğü görülmüştür.



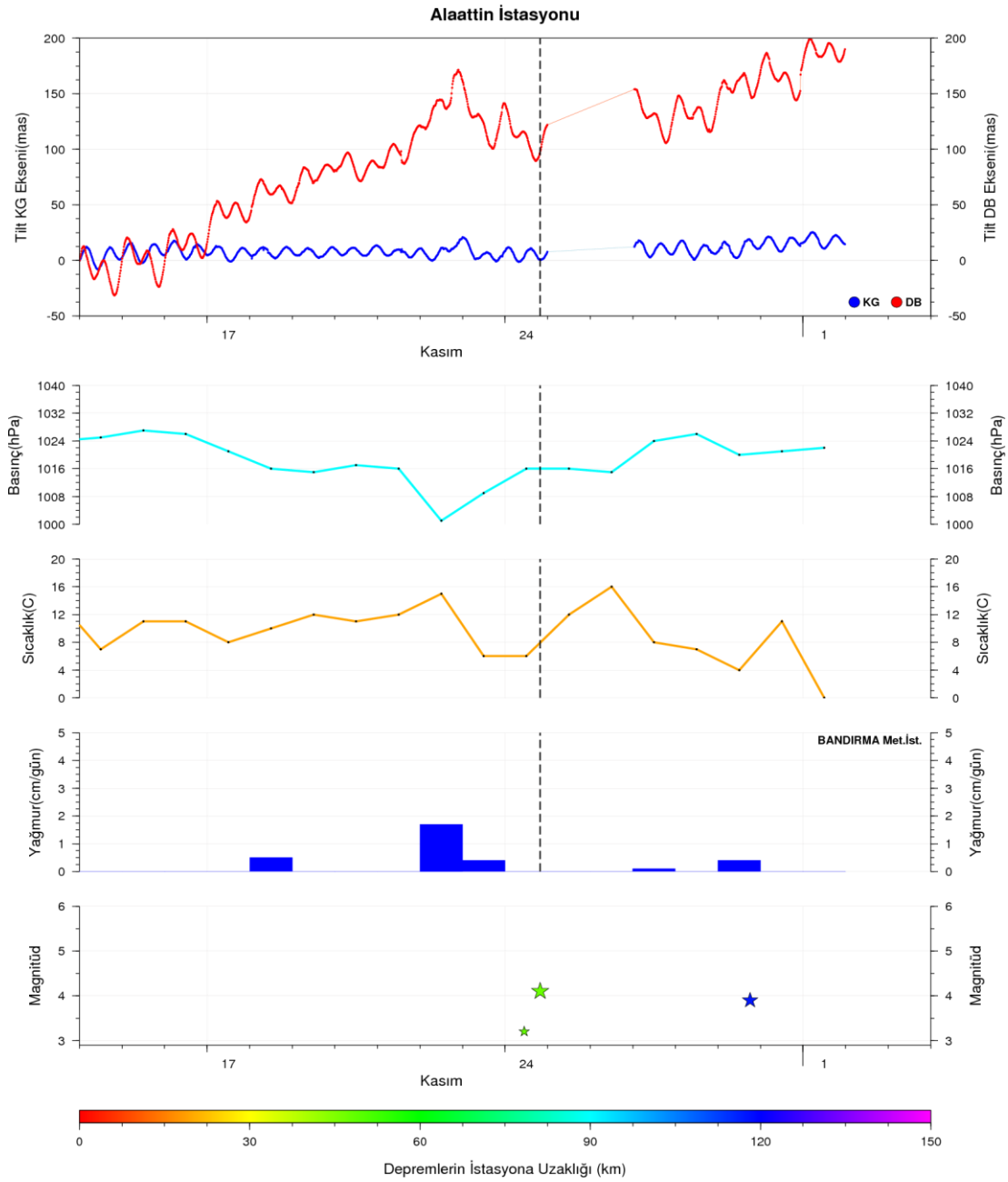
Şekil 5.12 : Tütüncü (10.07.2008 10:49, $M_L=5.1$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Çobanhamidiye istasyonunda arıza sebebiyle ilgili dönemde veri toplanamamıştır.

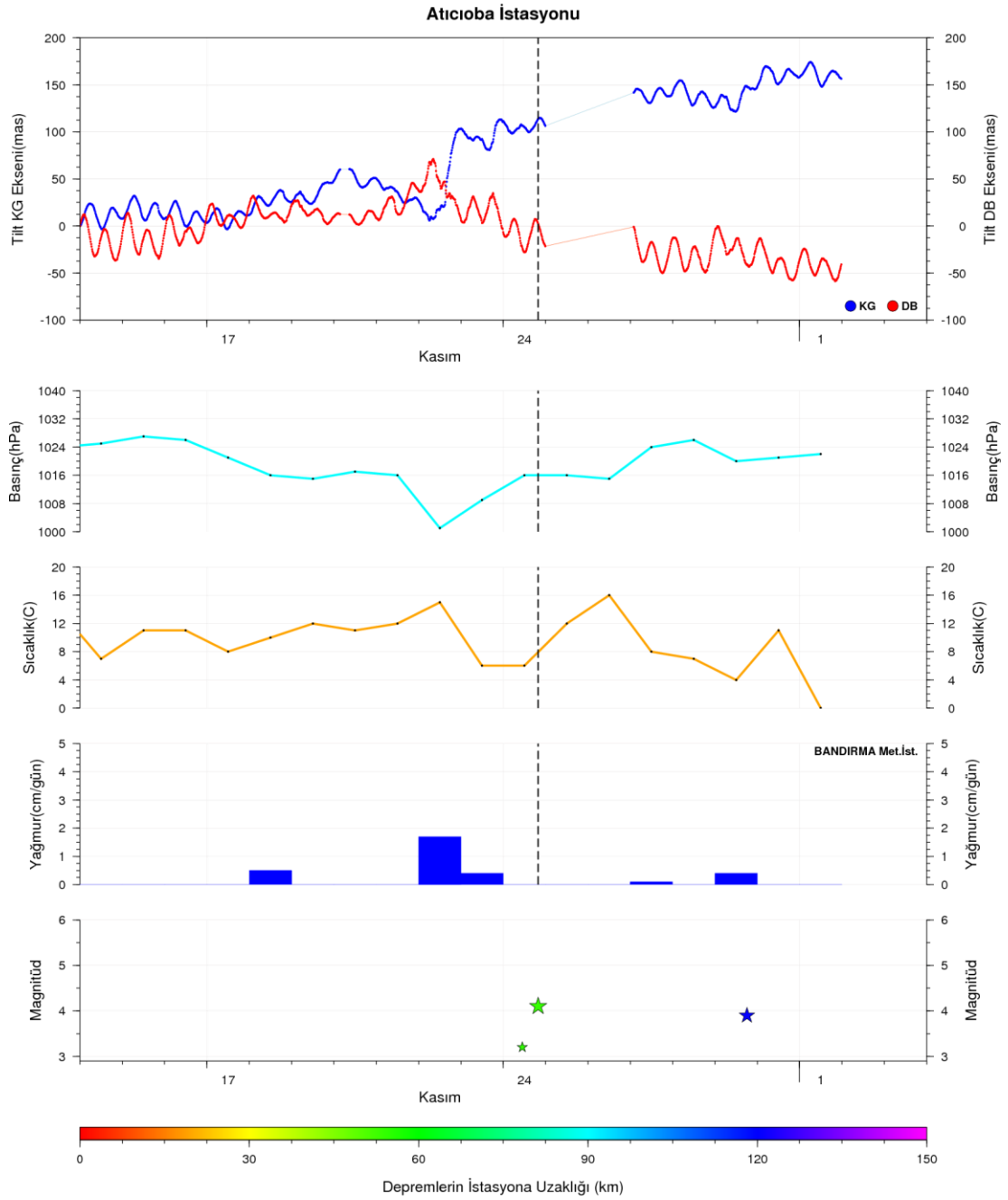
5.2.2.2 Susurluk/Göbel depremi (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$)

24 Kasım 2008 tarihinde Göbel mevkiinde meydana gelen 4.1 büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 47.69 km (Alaattin), 53.61 km (Atıcıoba) ve 40.07

km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır. Her üç istasyonda da frekans içeriğinde depremden 1 hafta önce başlayan ve depremden 3 gün önce aniden artan bir değişim görülmektedir. Bu ani artışın 22 Kasım'da ki yağış, sıcaklık ve basınç değişimleri ile ilişkili olduğu görülmektedir (Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15). Depremden 1 hafta önce başlayan değişim depremle ilişkili olabilir ancak tilt verileri meteorolojik etkenler sebebiyle maskelenmiştir ve depreme ilişkin doğrudan bir bağlantıdan söz etmek mümkün değildir. Deprem sonrası birkaç gün içinde sinyal deprem öncesi sakin dönemdeki karakterine dönmüştür ve genel trendin devam ettiği görülmektedir.

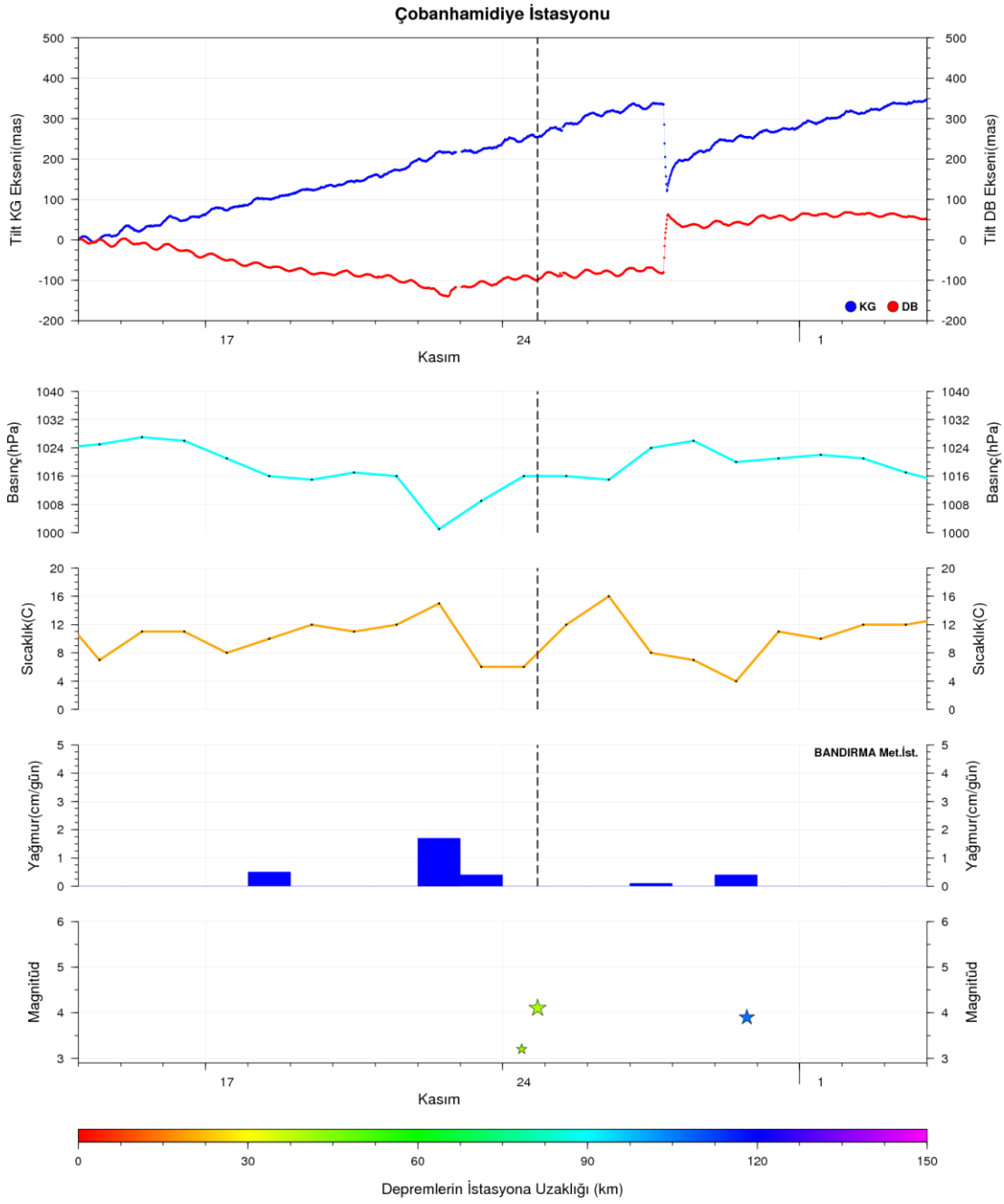


Şekil 5.13 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.



Şekil 5.14 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Atıcıoba istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

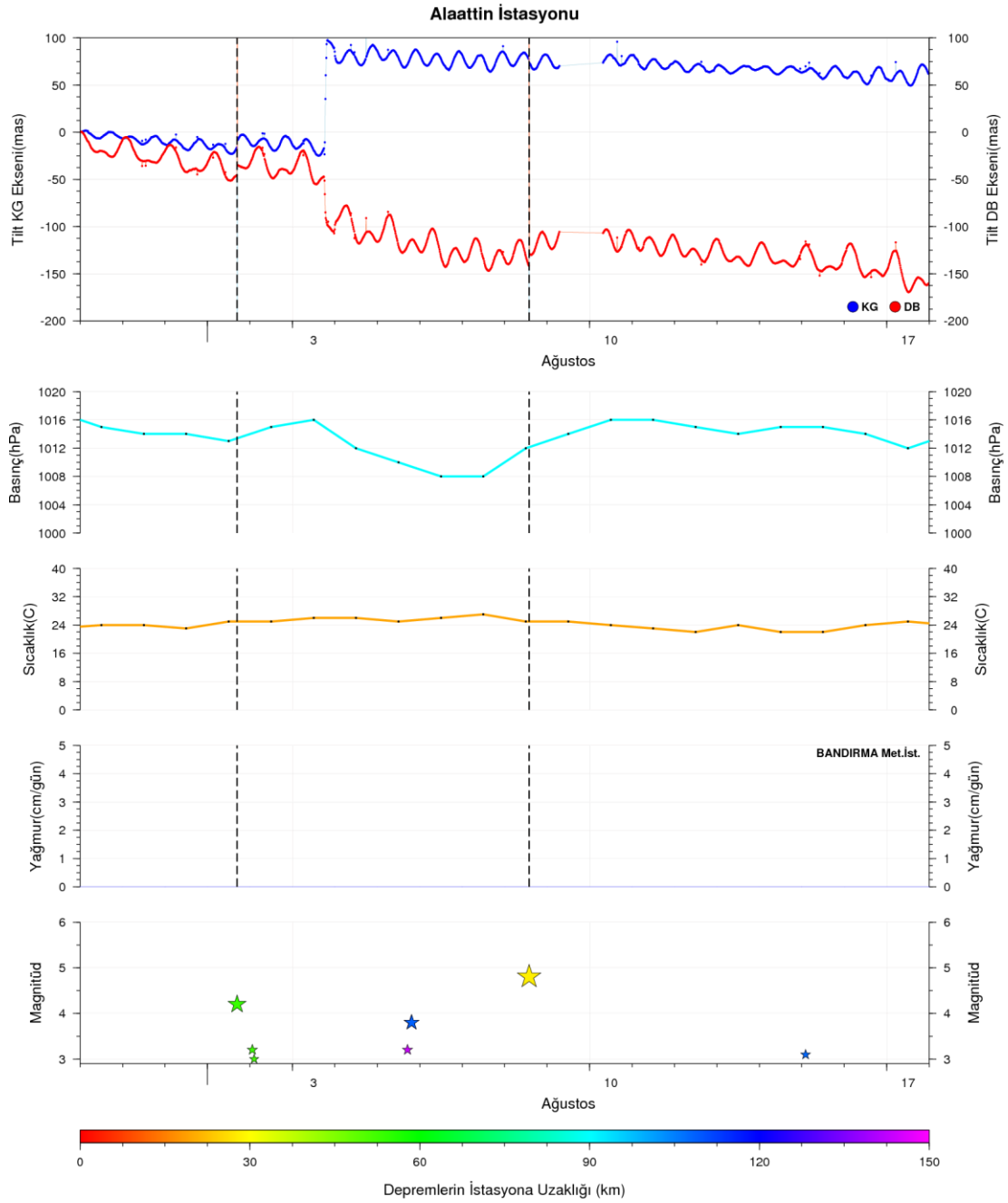
Buna ek olarak Çobanhamidiye istasyonunda 27 Kasımda her iki bileşende gözlenen yaklaşık 4 saatte tamamlanan ve sebebi tam olarak anlaşılamayan bir zıplama gözlenmiştir (Şekil 5.15). Aynı gün gerçekleşen az miktardaki yağış ya da daha önce gerçekleşen daha yoğun bir yağışın etkisi kendini gecikmeli olarak göstermiş ve buna kuyu civarında yerin verdiği bir tepki olabilir.



Şekil 5.15 : Göbel (24.11.2008 21:46, $M_L=4.1$) depremi ve Çobanhamidiye istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

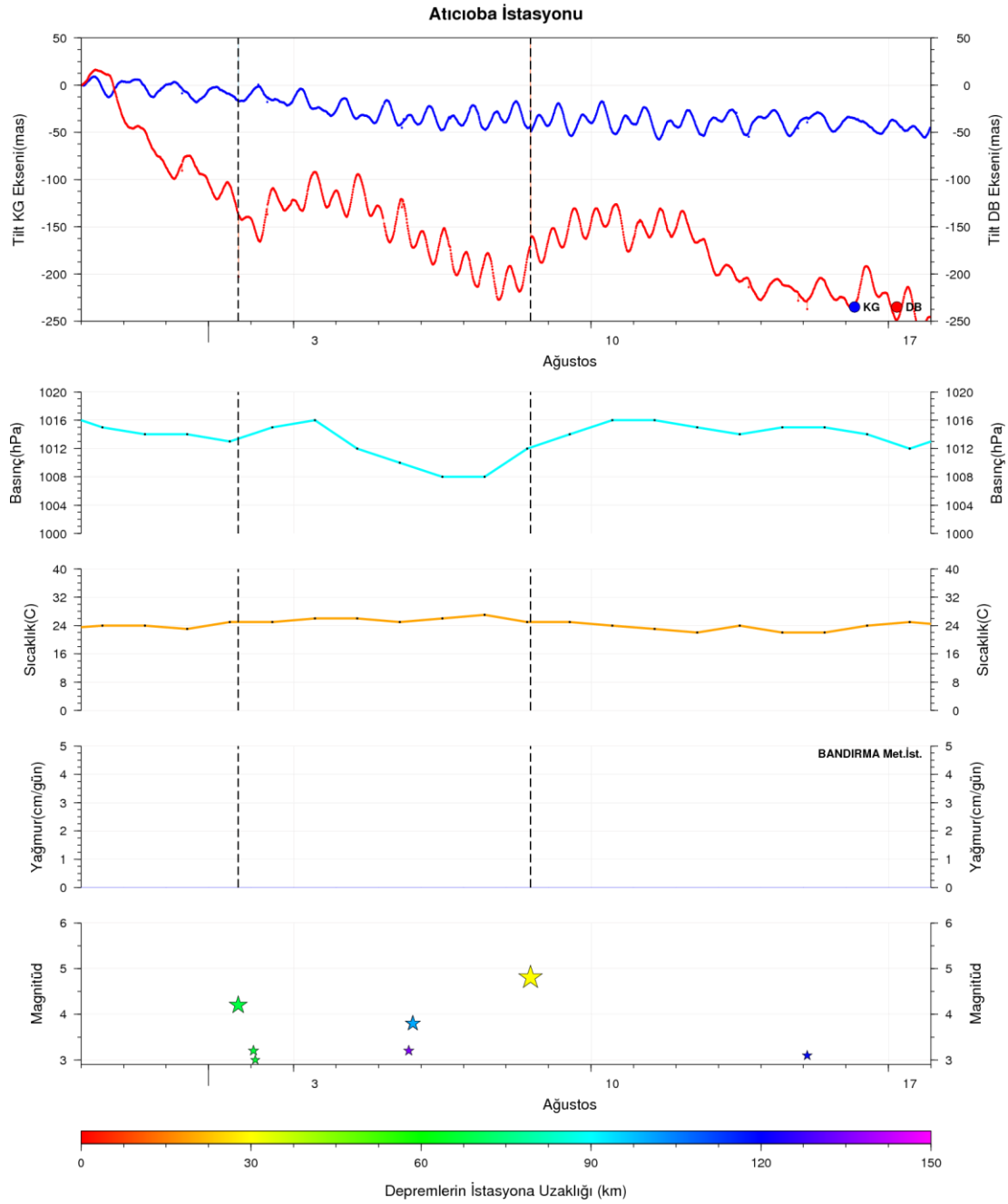
5.2.2.3 Biga/Sinekçi depremi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$)

8 Ağustos 2009 tarihinde Sinekçi mevkiinde meydana gelen 4.8 büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 28.08 km (Alaattin), 29.92 km (Atıcıoba) ve 41.85 km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır.



Şekil 5.16 : Sinikçi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$) depremi ve Alaattin istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Alattin istasyonunda 3 Ağustos günü Atıcıoba ve Çonbanhamidiye istasyonlarında gözlenemeyen, yaklaşık 1.5 saat süren ani bir değişim görülmüştür. İlgili zaman aralığında böyle bir değişime sebep olabilecek, anlamlı, meteorolojik ve sismolojik bir etken görülememiştir (Şekil 5.16). Deprem öncesi ve deprem sonrası birkaç günlük dönemde tilt verinin frekans içeriğinde görülen değişimin depremle ilişki olduğu düşünülmektedir. Deprem anında özellikle DB bileşeninde depremin etkisi görülmektedir.



Şekil 5.17 : Sinekçi (08.08.2009 16:52, $M_L=4.8$) depremi ve Atıcıoba istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Atıcıoba istasyonuna ait grafik Alaattin istasyonunda kaydedilen tilt verisi üzerinden yapılan yorumları destekler niteliktedir (Şekil 5.17). Frekans içeriğindeki değişimler ve deprem sonrası dönemde genel trende uygun davranışın tekrar kazanıldığı daha net biçimde görülmektedir. Çobanhamidiye istasyonundan elde edilen verilerin de aynı karakterde olduğu görülmektedir. Deprem anında Çobanhamidiye istasyonundan elde edilen tilt verisinde diğer iki istasyona oranla daha büyük değişim

Çobanhamidiye İstasyonu

Tilt KG Eksenini(mas)

Tilt DB Eksenini(mas)

Ağustos

Baskı(hPa)

Sıcaklık(C)

Yağmur(cm/gün)

Magnitüd

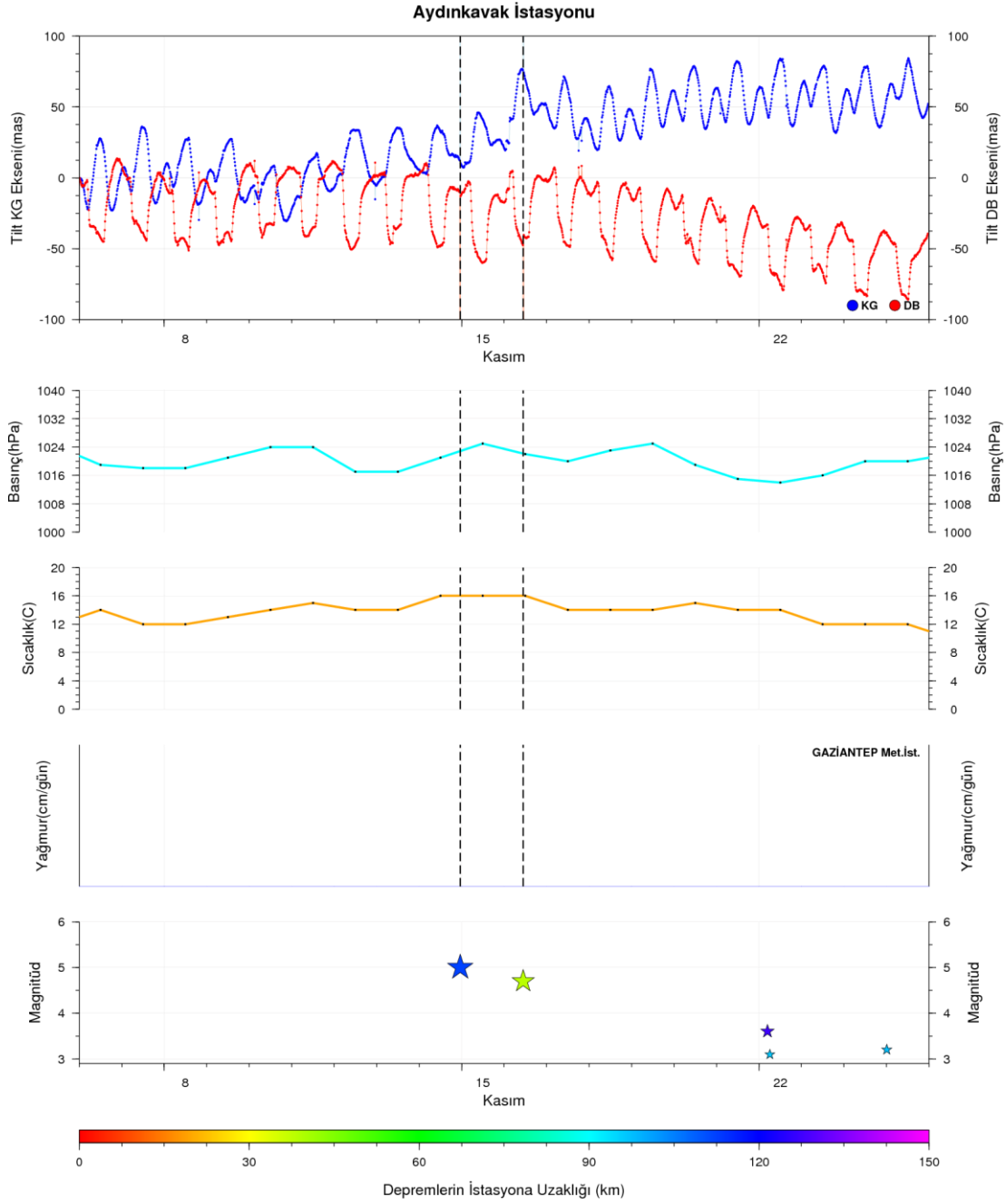
BANDIRMA Met.İst.

Depremlerin İstasyona Uzaklığı (km)

5.2.2.4 Osmaniye/Düziçi depremi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$)

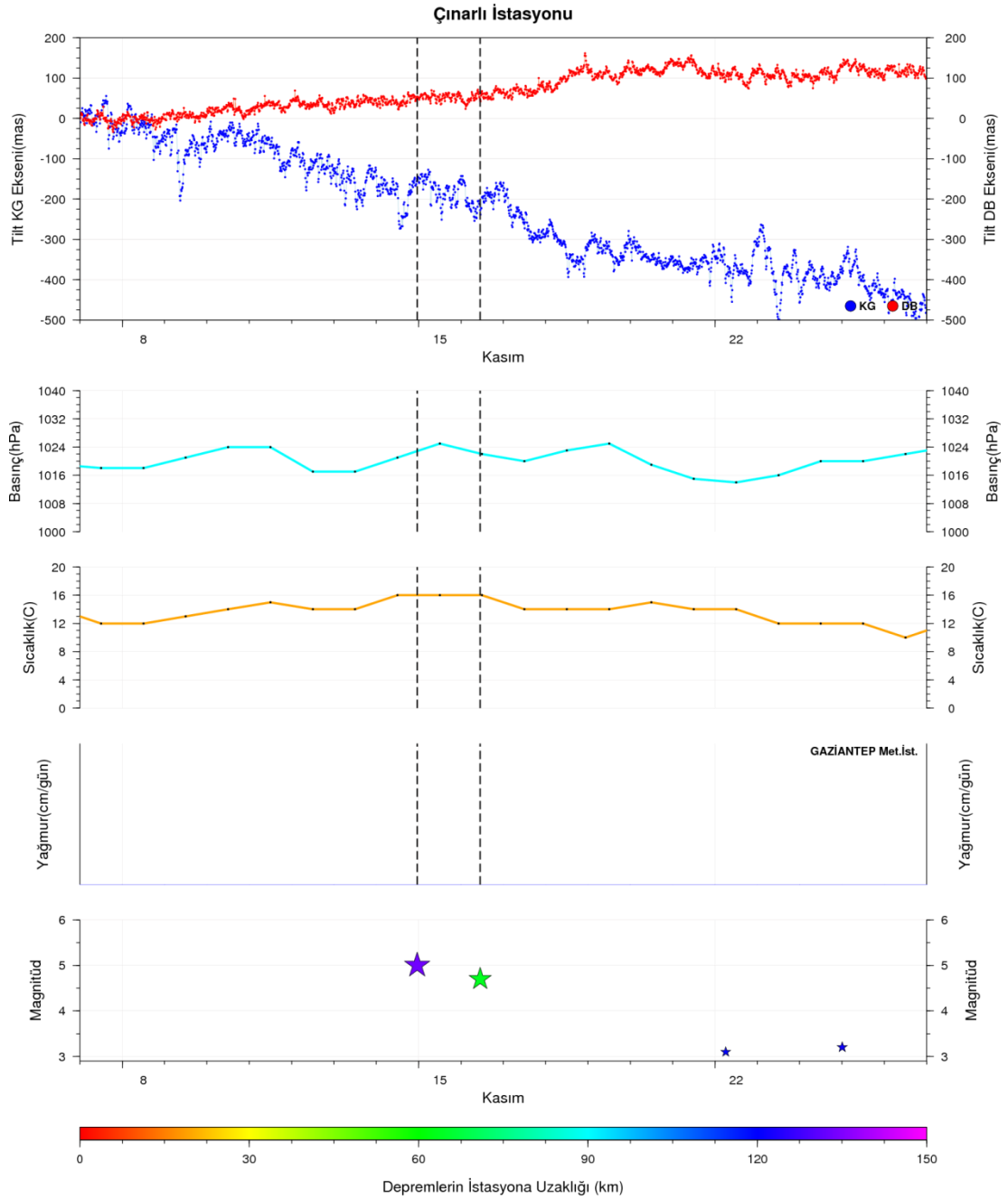
67

4 istasyonda da depreme ilişkin birkaç günden 1 haftaya varan tilt değişimlerinde söz etmek mümkündür.



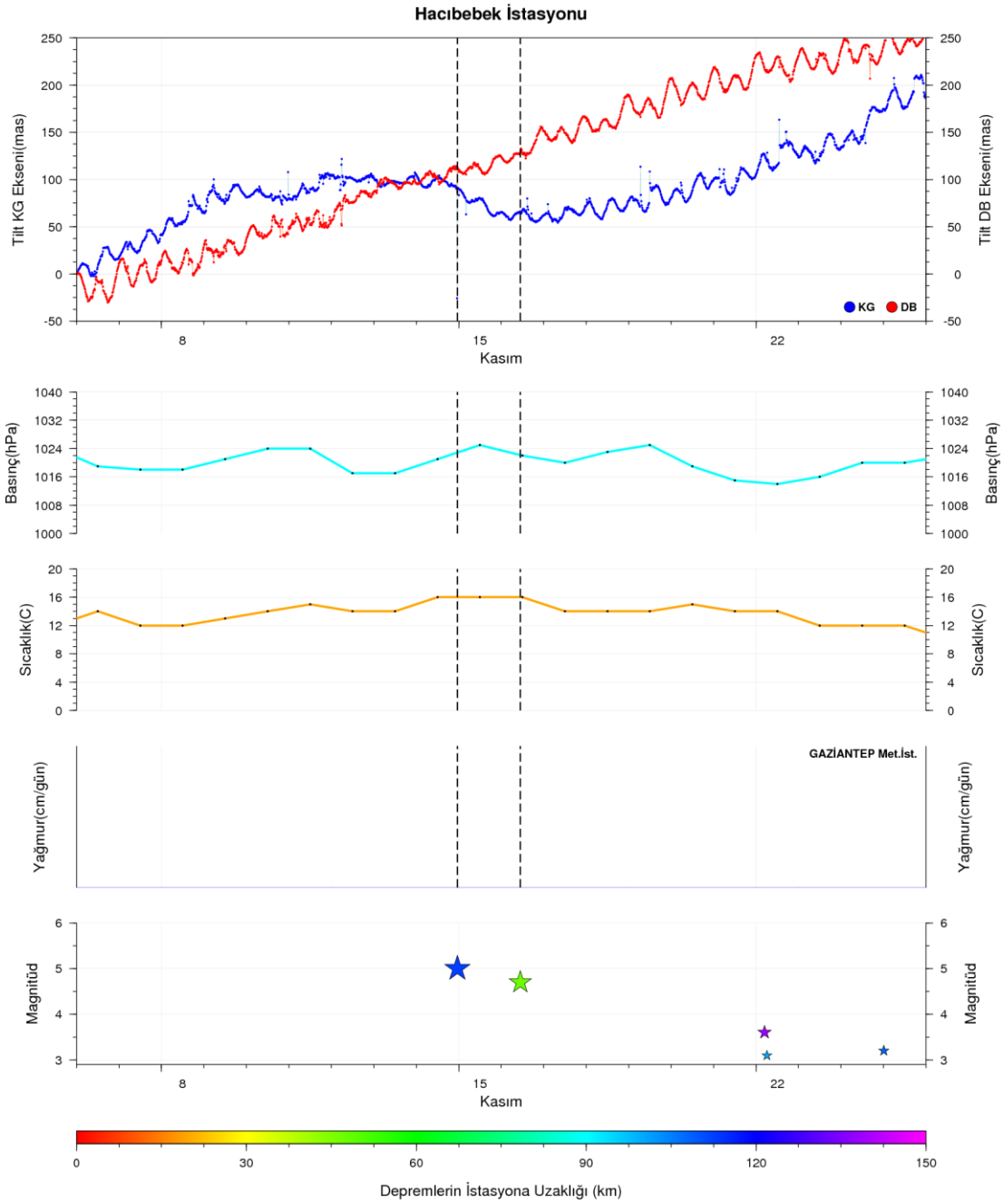
Şekil 5.19 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Aydıncavak istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Deprem anında en yakın istasyon olan Aydıncavak'ta her iki bileşende de yaklaşık 80 mas'lik değişimler gözlenmiştir.



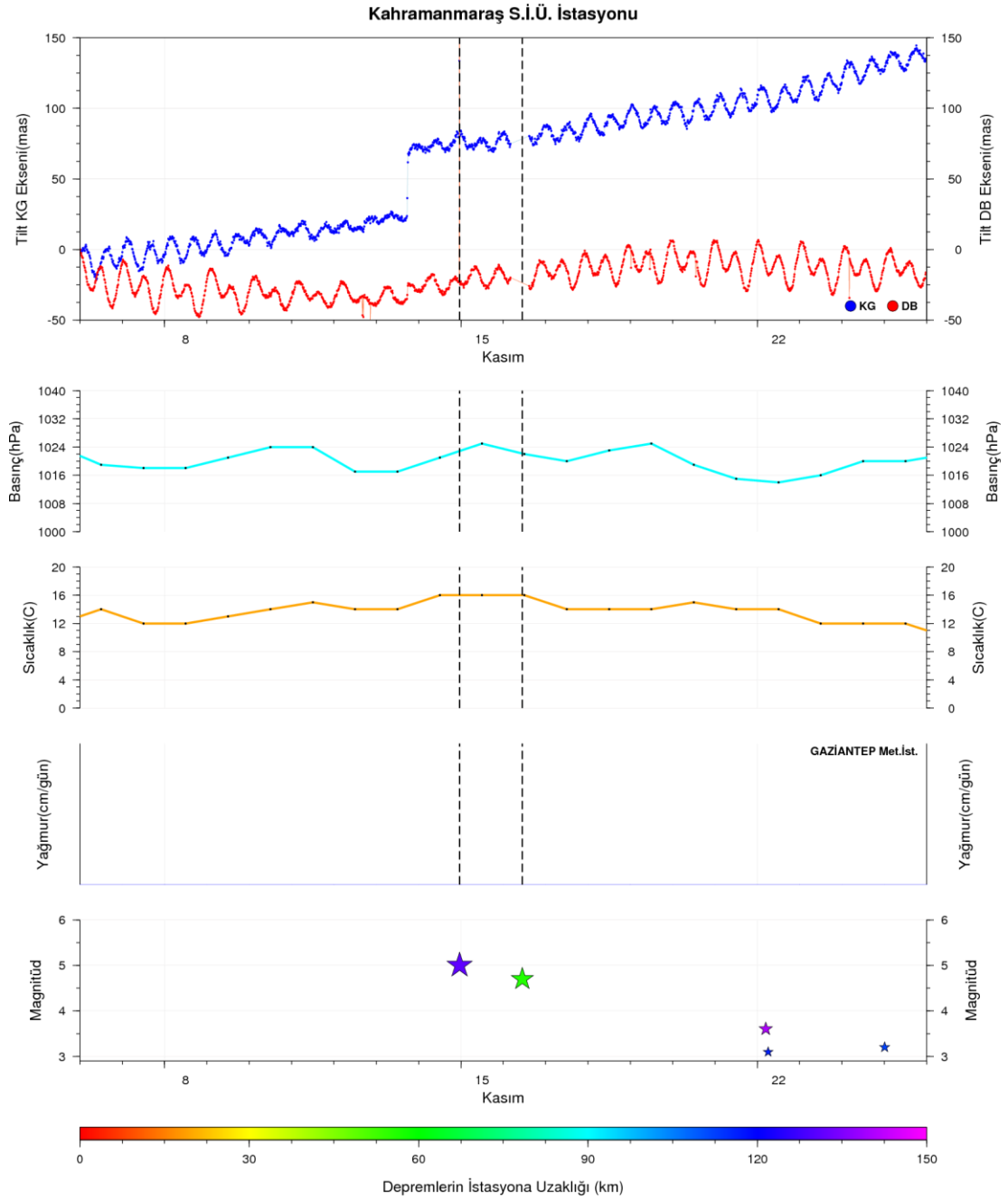
Şekil 5.20 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Çınarlı istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Özellikle Hacıbebek istasyonuna ait KG bileşeninde depremden önce 50 mas'ye varan değişim dikkat çekicidir (Şekil 5.21). İlgili dönemde yağış olmaması, sıcaklık ve basınç değerlerinin mevsim normallerinde seyretmesi sebebiyle anomalinin depremle ilişkili olduğu söylenebilir.



Şekil 5.21 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve Hacıbebek istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

Hacıbebek istasyonunda deprem anı ve deprem sonrası etkiler de açıkça görülmektedir. Benzer değişimler diğer üç istasyonda da gözlenmiştir (Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.22).



Şekil 5.22 : Düziçi (16.11.2010 12:50, $M_L=4.7$) depremi ve K.S.İ. Üniversite istasyonu tilt ölçümlerine ilişkin grafik.

K.S.İ.K. istasyonunda 13 Kasımda, KG bileşeninde yaklaşık yarım saat süren bir değişim görülmüştür. Diğer üç istasyonda bu tip bir değişim söz konusu değildir. Aynı dönemde basınç, sıcaklık ve yağış verilerinde de anlamlı bir değişim görülmemiştir. Zemin şartlarından da kaynaklanamış olabilecek bu tip bir değişimin doğrudan deprem ile ilişkili olduğunu söylemek mümkün değildir.

Çizelge 5.8 : İncelenen depremlere ilişkin elde edilen bulgular.

Bölge	Deprem	İstasyon Adı	Lokasyon		Derinlik(km)	Magnitüd(M _L)	Oluş Zamanı		Uzaklık(km)	Tilt Değeri(mas)		Basınç(hPa)			Sıcaklık(°C)			Yağış(cm)		
			Enlem ⁰	Boylam ⁰			Tarih	Saat		20 Gün için KG(değişim/normal*)	20 Gün için DB(değişim/normal*)	En Az	En Fazla	Ortalama	En Az	En Fazla	Ortalama	En Az	En Fazla	Yağışlı Gün
GÖNEN	Tütüncü	Alaattin							20.71	190/55.51	530/52.39									
		Atıcıoba	40.000 K	27.730 D	12	5.1	7/10/2008	10:49	16.69	293/99.16	245/84.60	1009	1019	1014	16	28	21	0	1.3	1
		Çobanhamidiye							3.14	arızalı	arızalı									
	Göbel	Alaattin							47.69	33/55.51	230/52.39									
		Atıcıoba	39.972 K	28.179 D	8.1	4.1	11/24/2008	21:46	53.61	177/99.16	128/84.60	1001	1027	1020	4	19	11	0	1.7	5
		Çobanhamidiye							40.07	350/98.11	208/145.80									
TÜRKÖĞLÜ	Sinekçi	Alaattin							28.08	242/55.51	235/52.39									
		Atıcıoba	40.327 K	27.419 D	15.2	4.8	8/8/2009	16:52	29.92	70/99.16	278/84.60	1006	1017	1012	20	27	23	0	0.3	1
		Çobanhamidiye							41.85	73/98.11	223/145.80									
	Düziçi	Aydıncavak							38.10	211/41.38	232/92.98									
		Çınarlı	37.384 K	36.337 D	3.4	4.7	11/16/2010	12:50	63.78	550/376.18	200/83.25	1014	1028	1021	10	16	13	0	0	0
		Hacıbebek							47.14	211/138.48	285/288.96									
		K.S.İ. Üniversitesi							55.84	162/74.32	131/61.60									

* Tilt değerleri için normal değişim miktarı yağış(günlük 1cm'den daha az ya da hiç) ve depremin (magnitüd≥4 ve uzaklık≤130 km) olmadığı 20 günlük 3 farklı zaman penceresindeki değişim miktarlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

6. SONUÇLAR

Tiltmetreler yer kabuğu deformasyonlarının ölçümlelerinde kullanılan, duyarlılığı en yüksek cihazlardan biridir. Günümüzde tiltmetrelerin çoğu basit kabarcık düzeci veya sarkaç prensibiyle işlemektedir. Bir de özel amaçlı olarak kurulan, kurulumu daha zahmetli uzun-baz tiltmetreler vardır (Bonaccorso ve diğ., 2004). Yaygın olarak kullanılan elektrolitik sıvılı tiltmetrelerin hassasiyeti 1 nanoradyana ulaşmaktadır, başka bir deyişle bu cihazlar 1000 km uzunluğundaki rijit bir çubuğun ucundaki 1 mm hareket miktarını saptayabilecek ölçüde hassastırlar (Wright ve diğ., 1998). Yaklaşık 0.2 mas (~ 1 nanoradyan)'dan daha hassas ölçüm yapabilen Askania tipi tiltmetreler ise deformasyon ölçümleri için en uygun cihazlardır (Rosenbach ve Jacoby, 1969).

Tiltmetrelerle ölçülen değerler deformasyonun kendinden ziyade deformasyon değişimidir. Gerçek deformasyonu elde etmek için ölçülen değişim miktarının integrasyonu gerekir. Ölçülen değişimi sağlayan sonsuz sayıda yüzey bulunabileceğinden bazı sınır koşullarına ihtiyaç duyulur. Davis ve diğ., (2001)'de bunu tüm ölçüm sonuçlarına uygun en düzgün yüzey olarak tanımlamıştır. Yer kabuğu hareketlerini tam olarak yansıtan bu tip bir yüzeyin tespiti için yapılacak ölçümlerin sıklığı, deformasyon alanındaki en ufak değişimleri bile kaçırmayacak şekilde yüksek olmalıdır (Davis ve diğ., 2008).

Tiltmetreler genellikle çevresel gürültülerden etkilenmemek amacıyla kuyularda kullanılırlar. Tilt ölçümlerinde çevresel gürültüleri en aza indirmek ve meteorolojik etkilere maruz kalmamak için tiltmetrelerin kuyu içinde ve yeraltı su seviyesinin de altında bir derinlikte yerleştirilip işletilmesi gerekir (Harrison ve Herbst, 1977; Weise ve diğ., 1999). Tilt ölçümlerine etkileyen barometrik ve hidrolojik etkileri karşılaştıran çalışmalar barometrik etkilerin genliğinin hidrolojik etkilerin genliğinden çok daha büyük olduğunu göstermiştir. Edge ve diğ., (1981)'de English Lake District bölgesinde 9 aylık kuyu içi tilt verisini değerlendirmişlerdir. Analizde gelgit etkileri içermeyen alçak frekanslı tilt verileri atmosferik basınç, yağış ve yeraltı su seviyesi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sinyal içindeki bozucu basınç etkisinin hidrolojik etkiye göre 10 kat daha az olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada uzun ve kısa dönem yer kabuğu deformasyonlarının tilt ölçümleri ile belirlenmesi amacıyla TÜRDEP projesi kapsamında elde edilen tilt verileri kullanılmıştır. Tilt ölçümleri için doğrultu atımlı fay sistemleri üzerinde yer alan iki ayrı pilot bölge seçilmiş ve ölçümler bu iki pilot bölgede gerçekleştirilmiştir. Bu bölgelerden biri Kuzey Anadolu Fay Sistemi'nin (KAFS) güney kolu üzerinde yer alan Gönen Pilot Bölgesi, diğeri ise Doğu Anadolu Fay Sistemi (DAFS) üzerinde yer alan Türkoğlu Pilot Bölgesi'dir. Ölçümler neticesinde elde edilen ham tilt verilerinin analizi bölüm 5'te ayrıntılı olarak aktarıldığı biçimde yapılmıştır. Analiz aşamasında veri içindeki kaymalar ve gürültüler giderilmiş, gelgit analizi yapılmış, basınç, sıcaklık, günlük ortalama yağış ve sismoloji verilerini içeren hem yıllık bazda hem de tüm zaman serilerini kapsayacak şekilde grafikler hazırlanmıştır (Şekil B.2). Değerlendirme aşamasında bu grafikler kullanılarak meteorolojik, hidrolojik, mevsimsel etkiler, depremler ve tilt verileri arasında anlamlı bir ilişkinin varlığı araştırılmıştır.

Her iki bölgede de istasyonların kuruldukları ilk yıla ait grafiklerden (Şekil B.1, Şekil B.3) sistemlerin ilk 4-5 aylık süre içinde durağan hale gelemedikleri ve kararlı değişimler gösteremedikleri görülmektedir. Buna sebep kuyuların açılması sonucu bozulan gerilme rejiminin dengeye gelememiş olmasıdır. Sonraki dönemde ölçülen değerler daha kararlı değişimler sergilemektedir.

Gönen bölgesinde tilt ölçümleri Ekim 2007'den bu yana sürdürülmektedir. Elde edilen tilt değişimleri grafiklenerek öncelikle meteorolojik verilerle ilişkileri irdelenmiştir. Tiltmetre sığ derinlikte yerleştirilmişse ölçümler meteorolojik ve hidrolojik kaynaklardan yoğun olarak etkilenir (Wyatt ve diğ., 1988; Mortensen ve Johnston, 1979). Bölgedeki 3 istasyonun da yağıştan ve mevsimsel değişimlerden etkilendiği görülmüştür. Örneğin Alaattin istasyonuna ilişkin 2010 ve 2011 yılları arasında 6 aylık dönemi kapsayan grafikte, günlük ortalama 5 cm'lik bir yağışa karşılık doğu-batı bileşeninde 200 mas, kuzey-güney bileşeninde ise 500 mas'lık bir değişim görülmüştür (Şekil 5.8). Aynı dönemde anomaliye sebep olabilecek herhangi bir deprem de mevcut değildir. Geçen zaman içinde bölgede büyüklüğü 4 ve üzerinde pekçok deprem meydana gelmiştir. Bunlardan istasyonlara olan uzaklıklarına ve büyüklüklerine bağlı olarak Tütüncü, Göbel, Sinekçi depremleri öne çıkmaktadır. Bu depremlere ilişkin detaylı grafikler bölüm 5.2.2'de verilmiştir.

Balıkesir'in Gönen ilçesine bağlı Tütüncü köyünde 10 Temmuz 2008'de yerel saatle 10:49'da meydana gelen $M_L=5.1$ büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 20.71 km (Alaattin), 16.69 km (Atıcıoba) ve 3.14 km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır. Atıcıoba istasyonunda depremden yaklaşık 4 gün önce başlayan DB bileşeninde 125 mas ve KG bileşeninde 25 mas'lik anomaliler gözlenmiştir (Şekil 5.11). Aynı zaman aralığına denk düşen yağış olmadığı gibi, basınç ve sıcaklık değerlerinde de anlamlı bir değişim yoktur, dolayısıyla tilt anomalisinin doğrudan depremle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Deprem anında KG bileşeninde 25 mas, DB bileşeninde 150 mas'lik değişimler gözlenmiştir. Deprem sonrası dönemde ise 3 - 4 günlük toparlanma evresinden sonra genel trendin devam ettiği görülmektedir. Alaattin istasyonunda deprem öncesi Atıcıoba istasyonundaki kadar baskın bir anomali görülmemiştir. Ancak sinyal içeriği dikkatle izlendiğinde yüksek frekanslı değişimlerin deprem öncesi 3-4 günlük zaman aralığında baskılandığı görülmektedir (Şekil 5.12). Deprem anında KG bileşeninde 100 mas, DB bileşeninde 200 mas'lik değişimler saptanmıştır. Atıcıoba istasyonuna benzer şekilde deprem sonrası 3 - 4 günlük dönemden sonra sinyalin frekans içeriğinin deprem öncesi durumuna döndüğü görülmüştür.

Balıkesir'in Susurluk ilçesine bağlı Göbel beldesinde 24 Kasım 2008'de yerel saatle 21:46'da meydana gelen $M_L=4.1$ büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 47.69 km (Alaattin), 53.61 km (Atıcıoba) ve 40.07 km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır. Her üç istasyonda da frekans içeriğinde depremden 1 hafta önce başlayan ve depremden 3 gün önce aniden artan bir değişim görülmüştür. Bu ani artışın 22 Kasım'da ki yağış, sıcaklık ve basınç değişimleri ile ilişkili olduğu görülmektedir (Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15). Depremden 1 hafta önce başlayan değişim depremle ilişkili olabilir ancak tilt verileri meteorolojik etkenler sebebiyle maskelenmiştir ve depreme ilişkin doğrudan bir bağlantıdan söz etmek mümkün değildir. Gözlenen tilt değerleri deprem sonrası birkaç gün içinde deprem öncesi sakin dönemdeki karakterine dönmüş ve genel trendin devam ettiği görülmüştür.

Çanakkale'nin Biga ilçesine bağlı Sinekçi köyünde 08 Ağustos 2009'da yerel saatle 16:52'de meydana gelen $M_L=4.8$ büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 28.08 km (Alaattin), 29.92 km (Atıcıoba) ve 41.85 km (Çobanhamidiye) uzaklıktadır. Deprem öncesi ve deprem sonrası birkaç günlük dönemde tilt verisinin frekans içeriğinde görülen değişimin depremle ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Deprem anında özellikle DB bileşeninde depremin etkisi görülmektedir. Atıcıoba istasyonundan elde edilen veriler Alaattin istasyonunda gözlenen değişimleri destekler niteliktedir (Şekil 5.17). Frekans içeriğindeki değişimler ve deprem sonrası dönemde genel trende uygun davranışın tekrar kazanıldığı daha net biçimde görülmüştür. Çobanhamidiye istasyonundan elde edilen verilerin de aynı karakterde olduğu görülmektedir. Deprem anında Çobanhamidiye istasyonundan elde edilen tilt değerlerinde diğer iki istasyona oranla daha büyük değişim görülmüştür, bu durumun gevşek zemin şartlarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 5.18).

Türkoğlu (Kahramanmaraş) bölgesine ait tilt ölçümleri ise Nisan 2009'dan bu yana sürdürülmektedir. Gönen bölgesindeki tilt gözlemlerine benzer biçimde yapılan değerlendirmelerde bölgedeki meteorolojik etkilere bağlı değişimler tilt sinyallerinde açıkça görülmektedir. Gözlemlerin başladığı tarihten itibaren günümüze dek büyüklük ve yakınlık ölçeğinde meydana gelen en önemli deprem Düziçi (Osmaniye) depremidir.

Osmaniye ilinin Düziçi mevkiinde 16 Kasım 2010 tarihinde yerel saatle 12:50' de meydana gelen $M_L=4.7$ büyüklüğündeki deprem tilt istasyonlarına sırasıyla 38.10 km (Aydıncavak), 63.78 km (Çınarlı), 47.14 km (Hacıbebek) ve 55.84 km (Kahramanmaraş S.İ.Ü.) uzaklıktadır. Bölgedeki 4 istasyonda da depreme ilişkin birkaç günden 1 haftaya varan tilt değişimlerinden söz etmek mümkündür. Özellikle Hacıbebek istasyonuna ait KG bileşeninde depremden önce 50 mas'ye varan değişim dikkat çekicidir (Şekil 5.21). İlgili dönemde yağış olmaması, sıcaklık ve basınç değişimi görülmemesinden dolayı anomalinin doğrudan depremle ilişkili olduğu söylenebilir. Hacıbebek istasyonunda deprem anı ve deprem sonrası etkiler de açıkça görülmektedir. Benzer değişimler diğer üç istasyonda da gözlenmiştir (Şekil 5.19, Şekil 5.20, Şekil 5.22).

Bu çalışma kapsamında meteorolojik ve yersel kökenli olmak üzere anlamlı iki tip tilt değişimi saptanmıştır. Tilt ölçümlerinin bölgesel meteorolojik, hidrolojik ve tektonik olaylardan zemin şartlarına bağlı olarak değişen oranlarda etkilendiği gözlenmiştir. Deprem öncesi, oluş anı ve sonrası dönemde depremin büyüklüğü ve uzaklığına bağlı olarak tilt zaman serilerinde anlamlı değişimler görülmüştür. Çalışmanın yapıldığı zaman aralığında Takemoto (1991)'e göre önceden haber verici nitelikte tilt anomalisi oluşturacak yakınlıkta ve büyüklükte bir deprem gözlenememiştir. Ancak Takemoto (1991)'de verilen ampirik bağıntı önemli ölçüde

yerel sismotektonik özelliklere bağlıdır ve başka bir bölgedeki jeolojik yapıya uygun olması oldukça zordur (Dal Moro ve Zadro, 1999). Bu sebeplerle, kuralla uymamasına rağmen bazı istasyonlarda deprem öncesi anomaliler saptanmıştır (Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.21). Takemoto (1991)'de verilen veya benzer biçimde uzaklık ve büyüklük ilişkilerini içeren ampirik bağıntılar elde edilen veri setleri büyüdükçe sınanmalı ve geliştirilmelidir. Deprem oluş zamanlarında da istasyonun depreme olan uzaklığı ve depremin büyüklüğüyle orantılı olarak yüzlerce mas'ye varan değişimler görülmüştür. Ayrıca deprem anında oluşan ve deprem sonrası dönemde de devam eden, kalıcı nitelikte tilt değişimleri saptanmıştır. Sonuç olarak tilt ölçümleri bölgesel meteorolojik, hidrolojik ve tektonik değişimleri önemli ölçüde yansıtmaktadır ve lokal alanda yer kabuğu deformasyonlarının izlenmesinde son derece faydalıdır. TÜRDEP projesi kapsamında test amaçlı başlatılan tiltmetre gözlem çalışmaları Gönen pilot bölgesinde 2007 yılı Kasım ayından, Türkoğlu bölgesinde ise 2009 yılı Nisan ayından bu yana sürdürülmektedir. Her iki bölgedeki yer kabuğu davranışlarının anlaşılabilmesi ve bulguların istatistiki olarak daha anlamlı sonuçlar verebilmesi için tilt gözlem çalışmalarının kesintisiz sürdürülmesinin önemi büyüktür.

KAYNAKLAR

- Agnew, D. C.**, 1986. Strainmeters and tiltmeters. *Rev. Geophys.* 24, 579-624.
- Agnew, D. C.**, 2005. *Earth Tides: An Introduction*, University of California, San Diego, CA, USA.
- Agnew, D. C.**, 2007. Before PBO: an overview of continuous strain and tilt measurements in the United States, *J. Geod.Soc. Japan*, 55, 157-182.
- Badgley, P.C.**, 1965. *Structural and Tectonic Principles*, Harper & Row, New York.
- Başbakanlık**, 1997. Doğal Afetler Genel Raporu, Başbakanlık Doğal Afetler Koordinasyon Başmüşavirliği, Ankara.
- Baykal, O. ve Tarı, E.**, 2007. Kuzey Anadolu Fayı'nın Batı Marmara Bölümünün Kinematığının GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi. 103Y033 no'lu proje sonuç raporu, TÜBİTAK.
- Benioff, H.**, 1935. A linear strain seismograph. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 25, 283-309.
- Berger, J., Lovberg, R.**, 1970. Earth strain measurements with a laser interferometer. *Science* 170, 296-303.
- Bilham, R., Suszek N., Pinkney, S.**, 2004. California Creepmeters, *Seism. Res. Lett.* 75(4), 481-492.
- Bock, Y.**, 1991. Continuous Monitoring of Crustal Deformation, *GPS World*, 40-47.
- Bolt, B. A., Marussi, A.**, 1962. Eigenvibrations of the earth observed at Trieste. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 6, 299-311.
- Bonaccorso, A., Campisi, O., Falzone, G. and Gambino, S.**, 2004. Continuous tilt monitoring: a lesson from 20 years experience at Mt. Etna, *Monograph of American Geophysical Union "Etna Volcano Laboratory"*, Calvari, S., Bonaccorso, A., Coltelli, M., Del Negro C. & Falsaperla S., eds, pp. 307-320.
- Çakır, Z.**, 2003. Analysis of the crustal deformation caused by the 1999 İzmit and Düzce earthquakes using synthetic aperture radar interferometry, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çakmak, R.**, 2001. Marmara Bölgesi'nde Kabuk Deformasyonlarının GPS Yardımıyla İzlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dal Moro, G. and Zadro, M.**, 1999. Remarkable tilt-strain anomalies preceding two seismic events in Friuli (NE Italy); their interpretation as precursors, *Earth Planet. Sci. Lett.* 170 (1999), pp. 119-129.
- Davis, E., Astakhov, D., and Wright, C.**, 2001. Precise Deformation Monitoring by High Resolution Tiltmeters. Butsuri-Tansa, *Society of Exploration Geophysicists of Japan*, Vol. 54, No. 6, pp. 425-432.

- Davis, E., Marsic, S., and Roadarmel, W.,** 2008. Deformation Monitoring Through Multi-Platform Integration. *13th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis*.
- Deinum, P. J.,** 1987. The Use of Tiltmeters for Measuring Arch Dam Displacements, *Water Power & Dam Construction*, June 1987.
- Delorme, H., Blum, P. A.,** 1991. Tiltmeter network observations at Piton de la Fournaise Volcano Reunion Island , 1985-1990. In: van Ruymbeke, M., d'Oreye, N. Eds. , *Proceedings of the Workshop: Geodynamical Instrumentation Applied to Volcanic Areas*, Walferdange, 1–3 October, 1990. Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Luxembourg, pp. 99–109.
- Dierks, O., Neumeyer, J.,** 2002. Comparison of Earth Tides Analysis Programs, *Marées terrestres : bulletin d'informations*, 135, 10669-10688.
- Dirik K.,** 2006. *Yeraltı Jeolojisi Ders Notları*, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi.
- Dong, D.,** 1993. The horizontal velocity field in southern California from a combination of terrestrial and space-geodetic data, *Ph.D Thesis*, Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Dubrov, M. N., Alyoshin, V. A.,** 1992. Laser strainmeters: new developments and earthquake prediction applications. *Tectonophysics* 202,209-213.
- Eaton, J. P.,** 1959. A portable water-tube tiltmeter. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 49, No. 4, pp. 301-316.
- Edge, R. J., Baker, T. F., Jeffries, G.,** 1981. Borehole tilt measurements: aperiodic crustal tilt in an aseismic area, *Tectonophysics* 71, 97-109.
- Ferro, A., Gambino, S., Panepinto, S., Falzone, G., Laudani, G., Ducarme, B.,** 2011. High precision tilt observation at Mt. Etna volcano, Italy. *Acta Geophysica* (17 February 2011), pp. 1-15.
- Flach, D.,** 1976. Present state of the development of the Askania borehole tiltmeter. In:G. Szadeczky-Kardoss (Editor), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Earth Tides*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, pp. 249-258.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., Zebker, H. A.,** 1989. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry, *J. Geophys. Res.*, 94(B7), 9183–9191.
- Garcia, A., Hordt, A., Fabian, M.,** 2010. Landslide monitoring with high resolution tilt measurements at the Dollendorfer Hardt landslide, Germany, *Geomorphology*, Volume 120, Issues 1-2, Landslide geomorphology in a changing environment, Pages 16-25.
- Gerstenecker, C.,** 2009. Kişisel görüşme.
- Gouly, N. R., King, C. P., Wallard, A. J.,** 1974. Iodine stilized laser strainmeter. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 9, 269-282.

- HSRI**, 1999. Planning for the “West Kanagawa Earthquake” by the Hot Springs Research Institute of Kanagawa prefecture, *Bulletin of the Hot Springs Res. Inst.*, 29-1/2, 3-40.
- Herring, T. A.**, 1999. Geodetic Applications of GPS, *Proceedings of The IEEE*, v.87, n.1, pp.92-110.
- Hager, B. H., King, R. W., Murray, M. H.**, 1991. Measurement of crustal deformation using the Global Positioning System. In: *Annual review of earth and planetary sciences*. Vol. 19 (A92-18155 05-46). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1991, p. 351-382.
- Hagiwara, T.**, 1947. Observations of changes in the inclination of the earth’s surface at Mt. Tsukuba. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo 25, 27-32.
- Hatcher, D.**, 1995. *Structural geology*, 2nd ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 525 pp.
- Horsfall, J. A. C., King, G. C. P.**, 1977. A new geophysical tiltmeter. *Nature* 274, 675-676.
- Harrison, J. C., Herbst, K.**, 1977. Thermoelastic strain and tilts revisited. *Geophys. Res. Lett.*, 4 : 535-537.
- Hartmann T., Wenzel, H. G.**, 1995. The HW95 tidal potential catalog. *Geophys. Res. Lett.*, 22(24):3553-3556
- İnan, S.**, 2010. Türkiye'nin Deprem Riski Yüksek Jeo-Stratejik "ancak tektonik rejimleri farklı" Bölgelerinde Deprem Davranışının Çok Disiplinli Yaklaşımlarla Araştırılması (TÜRDEP) Projesi. 105G019 TÜBİTAK Proje Sonuç Raporu.
- İnan, S., Ergintav, S., Saatçılar, R., Tüzel, B., İravul, Y.**, 2007. Turkey makes major investment in earthquake research, EOS, *American Geophysical Union*, 88, 34, 333-334.
- JICA**, 2004. Doğal Afetler Konulu Ülke Strateji Raporu, JICA Türkiye Ofisi, Ankara, sayfa 7-8.
- Johnston, M. J. S., Mortensen, C. E.**, 1974. Tilt precursors before earthquakes on the San Andreas Fault, California. *Science*, 186: 1031-1034.
- Kümpel, H. J.**, 1987. Model calculations for rainfall induced tilt and strain anomalies. In: *Proc. 10th Int. Symp. on Earth Tides*, pp. 889-903.
- Kasahara, M., Shichi, R. and Okada, Y.**, 1983. On the cause of long-period crustal movement, *Tectonophysics* 97, 327-336.
- King, G., Bilham, R.**, 1976. A geophysical wire strainmeter, *Bull. Seism. Soc. Am.* 66, 2039-2047.
- Levine, J., Hall, J. L.**, 1972. Design and operation of a methane absorption stabilized laser strainmeter. *J. Geophys. Res.* 77, 2595-2609.
- Levine, J., Meertens, C. M., Busby, R.**, 1989. Tilt observations using borehole tiltmeters; I. Analyses of tidal and secular tilt, *J. Geophys. Res.* 94, pp. 574-586.

- Marussi, A.**, 1959. The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante, *Proc. III Int. Symp. Earth Tides, Trieste*, pp. 45-52.
- Melchior, P.**, 1983. *The tides of the planet Earth*. Pergamon Press, Oxford, UK, 2nd edition.
- Michelson, A. A.**, 1914. Preliminary results of measurements of the rigidity of the earth. *Astrophys. J.* 39, 105-134.
- Mortensen, C. E., Hopkins, D. G.**, 1987. Tiltmeter Measurements in Long Valley Caldera, California, *J. Geophys. Res.*, 92(B13), 13,767-13,776.
- Mortensen, C. E., Johnston, M. J. S.**, 1979. Preliminary results from comparisons redundant of tiltmeters at three sites in Central California, *Tectonophysics*, 52, 85-86.
- Mortensen, C. E.**, 1982. Experimental tilt and strain instrumentation, *U.S. Geol. Surv. Open-File Report*, 82-840, 357-360.
- Mueller, R., Johnston, M.J.S., Myren, G.D.**, 1989. Lake level observations to detect crustal tilt: the San Andreas Lake, California, 1979-1989. *Geophys. Res. Lett.* 16, 661-664.
- Murray, M. H.**, 1991. Global Positioning System measurement of crustal deformation in central California, *Ph. D. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 310 pp.
- Oral, B. C.**, 1994. *GPS Measurement in Turkey (1988-1992) Kinematics of the Africa-Arabia Eurasia Plate Collision Zone*, Massachusetts Institute of Technology, ABD.
- Rosenbach, O., Jacoby, H. D.**, 1969. First experiences with the Askania borehole tiltmeter (earth tide pendulum), *Proceedings of the 3rd International Symposium on Recent Crustal Movements*, Leningrad.
- Ostrovsky, 1961.** Le clinometre a enregistrement photo-electrique. *B.I.M.* 25, 500-536.
- Paterson, M. S.**, 1958. Experimental deformation and faulting in Wombeyan marble, *Bull. geol. Soc. Am.* 69, pp. 465-476.
- Peltier, A., Bachelery, P., Staudacher, T.**, 2011. Early detection of large eruptions at Piton de La Fournaise volcano (La Reunion Island): Contribution of a distant tiltmeter station, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 199, Issues 1-2, 1 January 2011, Pages 96-104.
- Sacks, I. S., and Evertson, D. W.**, 1970. A sensitive borehole strain-rate meter, *Carnegie Institution Year Book* 68, 448-453.
- Saleh, B., Blum, P. A. and Delorme, H.**, 1991. New silica compact tiltmeter for deformations measurement, *J. Survey Eng.*, 117, 27-35.
- Savage, J.C., Prescott, W.H., Chamberlain, J.F., Lisowski, M. and Mortensen C.E.**, 1979. Geodetic tilt measurements along the San Andreas fault in central California. *Bull Seism Soc Am* 69:1965-1981
- Segall, P., James, L. D.**, 1997. GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 25: 301-36.

- Silver, P. G., Bock, Y., Agnew, D., Henyey, T., Linde, A. T., McEvilly, T. V., Minster, J. B., Romanowicz, B., Sacks, I. S., Smith, R. B., Solomon, S. C., and Stein, S. A., 1999.** A Plate Boundary Observatory, *IRIS Newsletter*, 16, 3-9.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö. ve Kuşçu, İ., 1992.** *Türkiye'nin Aktif Fay Haritası*, Maden Tetkik Arama Kurumu (MTA), Ankara.
- Takemoto, S., 1979.** Laser interferometer systems for precise measurements of ground-strains. *Bull. Disaster Prev. Res. Inst. Kyoto Univ.* 29, 65-81.
- Takemoto, S., 1991.** Some problems on detection of earthquake precursors by means of continuous monitoring of crustal strains and tilts. *J. Geophys. Res.* 96, 10377-10390.
- Vanicek, P., 1973.** *The earth tides*. Department of Surveying Engineering Lecture Notes 36, University of New Brunswick, Fredericton.
- Torge, W., 1989.** *Gravimetry*, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 465 pp.
- Url-1** Structural Geology, 12.113 Continuum mechanics and rheology, Fall 2005. (Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare), <http://ocw.mit.edu> (Accessed March 10, 2011). License: Creative Commons BY-NC-SA, alındığı tarih 02.04.2011.
- Url-2** <http://library.kiwix.org:4201/A/Mauna_Loa.html>, alındığı tarih 02.04.2011.
- Url-3** <<http://cires.colorado.edu/~bilham/PozzuoliTiltmeters/Pozzuoli.html>>, alındığı tarih 02.04.2011.
- Url-4** <<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/t-hori/>>, alındığı tarih 02.04.2011.
- Url-5** <http://en.wikipedia.org/wiki/Mount_Pleasant_Radio_Observatory>, alındığı tarih 02.04.2011.
- Url-6** <<http://www.nasa.gov/centers/goddard/images/>>, alındığı tarih 02.04.2011.
- Varga, P., Varga, T., 1995.** Horizontal deformations recorded with the extensometers. *B.I.M.* 122, 9272-9276.
- Vieira, R., Van Ruymbeke, M., Fernandez, J., Arnoso, J., Toro, C., 1991.** The Lanzarote underground laboratory. *Cahiers Centre Eur Geodyn Seismol* 4: 71-86
- Weise, A., Jentzsch, G., Kiviniemi, A., Kaariainen, J., 1999.** Comparison of long-period tilt measurements: results from the two clinometric stations Metsahovi and Lohja, Finland. *Journal of Geodynamics* 27, 237-257.
- Wenzel, H. G., 1996.** The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.3, *Bull. Inf. Marees Terr.* 124, 9425-9439.
- Wood, M. D. and Allen, R. V., 1971.** Anomalous microtilt preceding a local earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* 61, 1801-1809.
- Wright, C. A., Davis, E. J., Minner, W. A., Ward, J. F., Weijers, L. and Scheel, E. J., 1998.** Surface Tiltmeter Fracture Mapping Reaches New Depths -10,000 Feet, and Beyond, *Society of Petroleum Engineers*-39919.
- Wyatt, F. K., Morrissey, S. T., Agnew, D. C., 1988.** Shallow borehole tilt: a reprise. *J. Geophys. Res.* 93, 9127-9201.

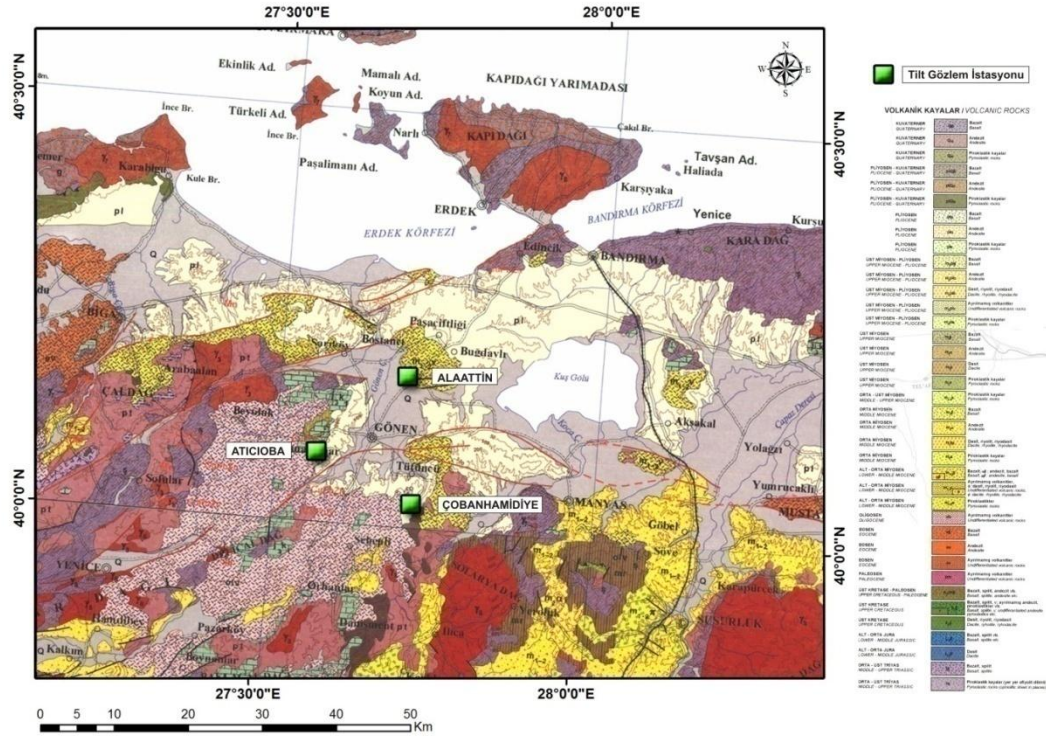
- Yamaki, K., Odaka, S., Ito, H., Tanada, T. and Oki, Y.,** 1990. Tilt change analyzing system of Hakone volcano, *Bulletin of the Hot Springs Res. Inst.*, 21-3,17-32.
- Yamauchi, T.,** 1987. Anomalous strain response to rainfall in relation to earthquake occurrence in the Tokai area, Japan. *J. Phys. Earth* 35, pp. 19-36
- Yavaşoğlu, H.,** 2003. Kuzey Anadolu Fayının Orta Bölümünün Kinematığının 2001 ve 2002 GPS Ölçmeleri ile Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi* , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Yeats, R. S., Sieh, K. and Allen, C. R.,** 1997. *The Geology Of Earthquakes*, Oxford University, New York.
- Zadro, M.,** 1978. Use of tiltmeters for the detection of forerunning events in seismic areas, *Boll. Geod. Sci. Aff.* 38.
- Zadro, M. and Braitenberg C.,** 1999. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas, *Earth-Science Reviews*, Volume 47, Issues 3-4, September 1999, pp. 151-187.
- Zürn, W., Emter, D., Heil, E., Neuberg, J., Grüninger, W.,** 1986. Comparison of short and long baseline tidal tilts. In: Vieira, R. (Ed.), *Proc. 10th Int. Symp. Earth Tides*, Cons. Sup. Inv. Cient., Madrid, pp. 61-69.

EKLER

EK A: GÖNEN VE TÜRKOĞLU PİLOT BÖLGELERİNE AİT JEOLojİK HARİTALAR

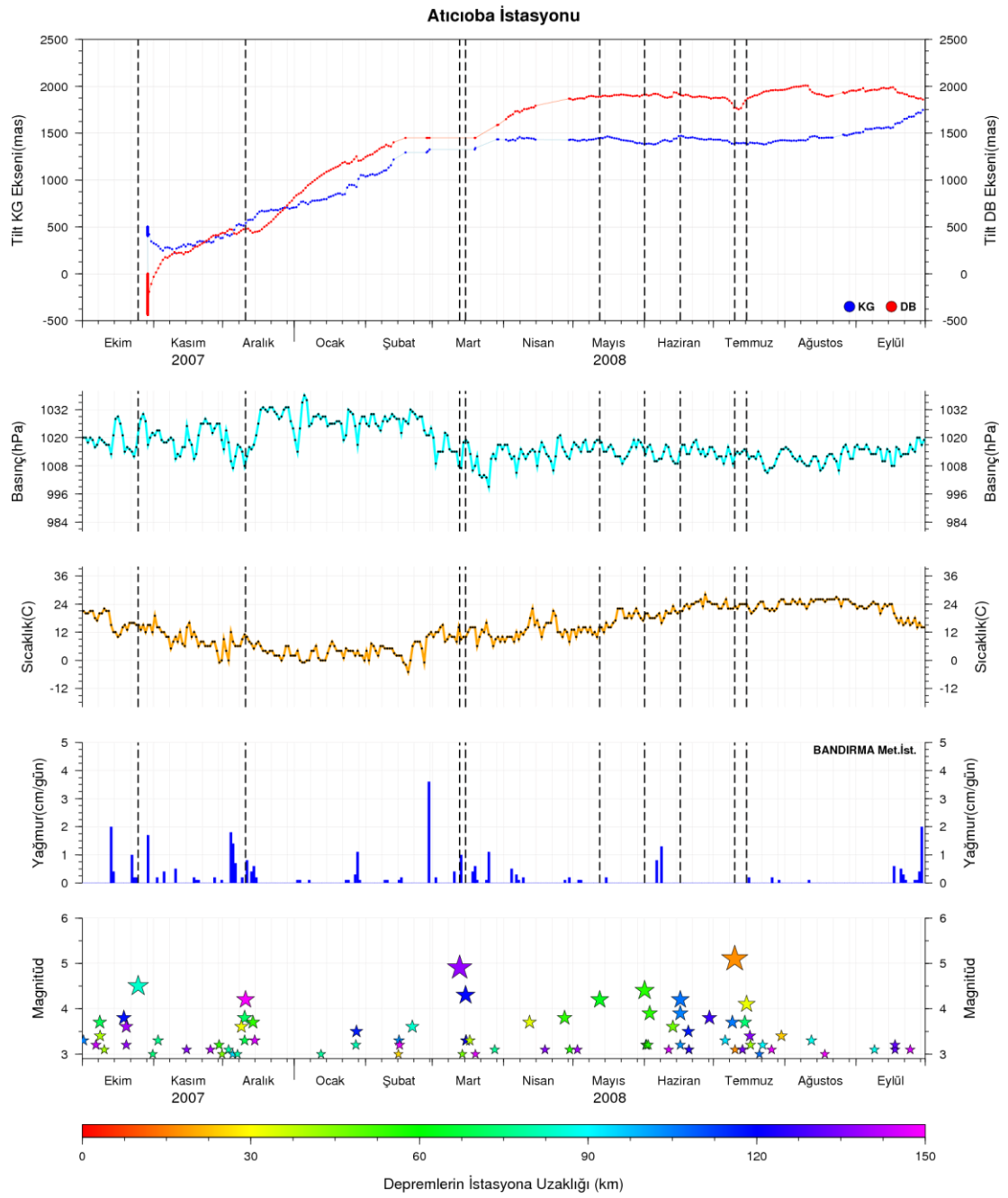
EK B: İSTASYONLARA AİT ZAMAN SERİLERİ

EK A. GÖNEN VE TÜRKÖĞLU PİLOT BÖLGELERİNE AİT JEOLojİK HARİTALAR

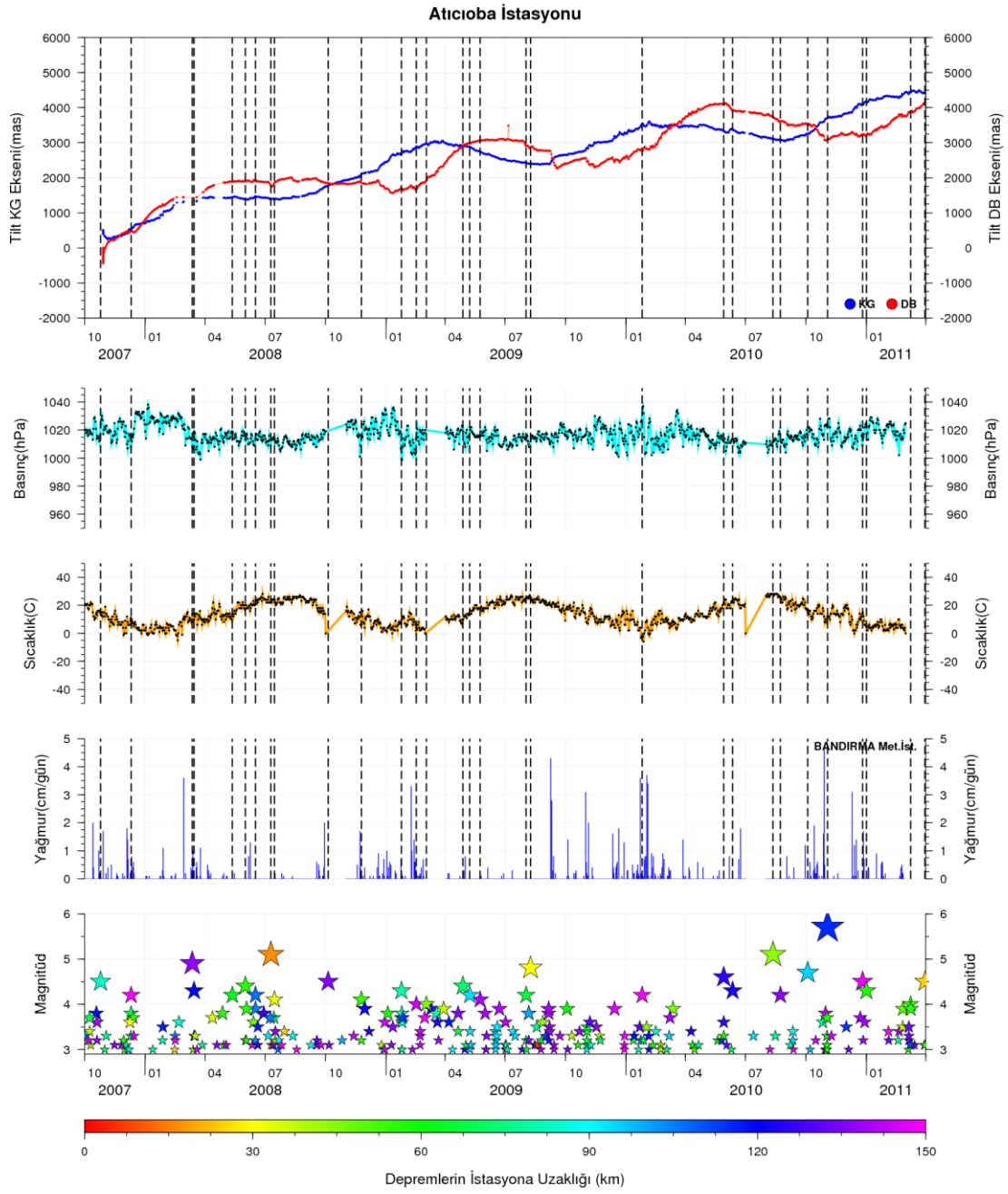


Şekil A.1 : Gönen bölgesine ait jeoloji haritası. 1:500.000 ölçekli MTA Jeoloji haritasından alınmıştır.

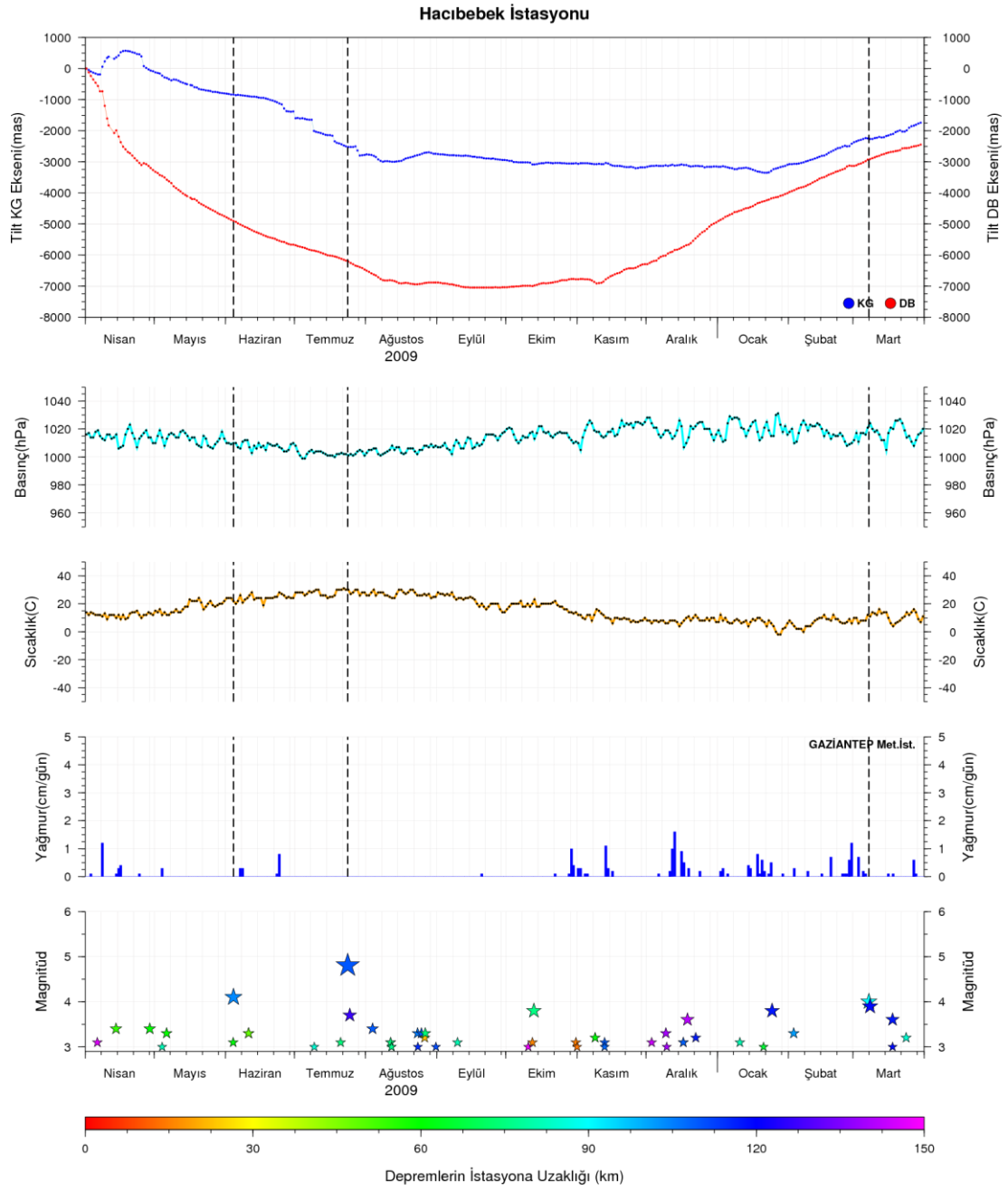
EK B. İSTASYONLARA AİT ZAMAN SERİLERİ



Şekil B.1 : Atıcıoba istasyonu 2007-2008 yıllarına ait grafik



Şekil B.2 :Atıcıoba istasyonu 2007-2011 yıllarına ait grafik



Şekil B.3 :Hacıbebek istasyonu 2009-2010 yıllarına ait grafik

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mustafa Kemal KOŞMA

Doğum Yeri ve Tarihi: Çorum, 1981

Adres: TÜBİTAK MAM, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü Gebze/KOCAELİ

Lisans Üniversite: Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği, 2007