



**GNSS ve PS-InSAR Yöntemleri Kullanılarak Heyelanların
İzlenmesi ve Afet Bilgi Sistemi Tabanlı Risk Analizlerinin
Gerçekleştirilmesi: Koyulhisar (Sivas) Heyelanları**

Program Kodu: 3501

Proje No: 111Y111

**Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Kemal Özgür HASTAOĞLU**

Araştırmacı(lar):

Doç. Dr. Tarık TÜRK
Doç. Dr. Fikret KOÇBULUT
Doç. Dr. Fusun BALIK ŞANLI
Yrd. Doç. Dr. Fatih POYRAZ

Danışman(lar):

Prof. Dr. Işık YILMAZ
Doç. Dr. Doğan Uğur ŞANLI

Bursiyer(ler):

Mehmet DEMİREL
Ramazan Alper KUÇAK
Furkan NEBİPAŞAGİL
Şeyma CEYLAN

OCAK 2015
SİVAS

Önsöz

Bu proje kapsamında, GNSS ve PS-InSAR Yöntemleri Kullanılarak Heyelanların izlenebilirliğinin araştırılması planlanmıştır. Bu amaçla Sivas ili Koyulhisar ilçesindeki mevcut heyelan sahası çalışma alanı olarak belirlenmiş ve gerekli çalışmalar TUBİTAK tarafından desteklenen 111Y111 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

İçindekiler

1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMA SAHASI.....	13
2.1 Meteorolojik Özellikler	15
2.2 Jeomorfolojik Özellikler	19
2.3 Stratigrafik Özellikler	22
2.4 Litolojik Özellikler	26
2.5 Yapısal Jeoloji.....	32
2.5.1 Çalışma bölgesinde yeralan süreksizlik yapıları (Eklem,Kırık ve Çatlaklar)	32
2.5.2 Çalışma Bölgesinde Yer Alan Fay Toplulukları Ve Kinematik Analizi	35
2.6 Hidrojeolojik Özellikler ve Yer Altı Su Seviyesi Ölçümleri	58
2.7 Heyelanlar	67
2.8 Depremsellik	76
3. GNSS ÖLÇÜ VE DEĞERLENDİRME	79
3.1 GNSS İstikşaf Çalışması ve Nokta Tesisi	79
3.2 GNSS Ölçümleri	84
3.3 GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi	87
3.3.1 IKYK ve TKYK Noktalarına ait GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi	88
3.3.2 Heyelan Sahası İçerisinde Bulunan 51 Noktaya ait GNSS Hızlı Statik Verilerinin Değerlendirilmesi:.....	92
3.4 GNSS Verilerinden Hız Kestirimi	99
3.4.1 Kinematik Deformasyon Modeline Göre Kalman Filtresi.....	99
3.4.2 Heyelan Sahası İçerisindeki 51 noktaya ait Hız Değerlerinin Kalman Filtresi kullanılarak Belirlenmesi	102
3.4.3 Dinamik Deformasyon Modeli Kullanılarak GNSS Noktalarına Kalman Filtresi Uygulanması	116
3.5 GNSS Sonuçları Yardımıyla Gerilim Analizi	130
3.5.1 Gerilim Analizi	130
3.5.2 Bölgede Daha Önce Gerçekleştirilen GNSS çalışmalarından Hesaplanan Gerilim Değerleri	134
3.5.3 Proje Kapsamında elde edilen GNSS sonuçlarından Hesaplanan Gerilim Değerleri	136
4. PSInSAR ÇALIŞMALARI	139
4.1. ENVISAT Görüntülerinin Temini ve Değerlendirilmesi	141
4.2. TerraSAR-X Görüntülerinin Temini ve Değerlendirilmesi.....	153
5. PSINSAR SONUÇLARI İLE GNSS SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	161

5.1	ENVISAT Arşiv Görüntü Sonuçları ile Aynı Tarihler Gerçekleştirilmiş GNSS Çalışması	
	Sonuçlarının Karşılaştırılması	161
5.2	TerraSAR-X Güncel Görüntülerinden Elde Edilen PS Sonuçları İle Proje Kapsamında	
	Ölçülen GNSS Sonuçlarının Karşılaştırılması	169
6.	AFET BİLGİ SİSTEMİ (ABS) ALTYAPISININ OLUŞTURULMASI	177
7.	TARTIŞMA VE SONUÇ	184

Şekil Listesi

Şekil 2.1. Çalışma Sahası	14
Şekil 2.2. Çalışma sahasına tesisi edilen meteoroloji istasyonu (06.06.2012 E: 40.302123, B: 37.823654).....	15
Şekil 2.3. Meteoroloji istasyonundan toplanan günlük veriler	16
Şekil 2.4. GNSS ölçü günlerinde ortalama, sıcaklık, yağış miktarı ve toprak nemlilik değerleri	18
Şekil 2.5. Çalışma bölgesinin Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üzerinde gösterimi	19
Şekil 2.6. Çalışma alanına ait SYM verisiyle üretilen kabartma haritası	20
Şekil 2.7. Çalışma alanına ait eğim haritası	21
Şekil 2.8. Yukarıkale Köyü civarında yüzeyleyen Aşağıkale formasyonuna ait görünüm (08.07.2013 E: 40.297200, B: 37.863759)	22
Şekil 2.9. Eğriçimen yaylası civarı yüzeyleyen İğdir Formasyonundan görünüm (03.07.2013 E: 40.341046, B: 37.807076)	23
Şekil 2.10. Şıhlar Mahallesi kuzeyinde yüzeyleyen Şıhlar Formasyonuna ait görünüm (04.07.2013 E: 40.288780, B: 37.812436)	24
Şekil 2.11. a) Çamlıyaka mahallesi ve b) Saytepe civarında yüzeyleyen Düdenyaylası Formasyonundan görünüm (Foto a : 03.07.2013 E: 40.287993, B: 37.818257, Foto b : 23.04.2014 E: 40.317103, B: 37.830662)	24
Şekil 2.12. Dumanlıca Tepesi üzerinde yüzeyleyen Dumanlıca Formasyonundan görünüm (22.04.2014 E: 40.342094, B: 37.856984)	25
Şekil 2.13. Koyulhisar- Mesudiye karayolu civarı yol yarmasında yüzeyleyen Koyulhisar Formasyonuna ait görünüm (24.04.2014 E: 40.293842, B: 37.824685)	25
Şekil 2.14. Koyulhisar Formasyonuna ait genel görünüm (24.04.2014 E: 40.325784, B: 37.832827). 26	
Şekil 2.15. Alivyon Formasyona ait genel görünüm (05.07.2013 E: 40.286484, B: 37.796060).....	26
Şekil 2.16. Çalışma alanına ait Jeoloji haritası ve kesiti	27
Şekil 2.17. Kullanılan sondaj loguna ait örnek görünüm (Hatiboğlu O., 2009).....	29
Şekil 2.18. Sondaj noktalarının uydu görüntüsü üzerinde gösterimi ve birimlerin kesit görünümü.....	30
Şekil 2.19. Sondaj verileri yardımıyla elde edilen yüzeylerin gösterildiği üçboyutlu model	31
Şekil 2.20. Heyelan bölgesi yakın çevresinde yapılan eklem ölçümlerinin gül diyagramı şeklinde gösterimi.....	33
Şekil 2.21. Metin içerisindeki kullanılan simgelerin bir normal fay üzerindeki gösterimleri.....	39
Şekil 2.22. Ölçüm yapılan istasyonların jeoloji haritası üzerinde dağılımı ve kinematik analiz sonuçları	41
Şekil 2.23. İstasyon 1’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 42	
Şekil 2.24. İstasyon 2’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 43	
Şekil 2.25. İstasyon 3’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 44	
Şekil 2.26. İstasyon 4’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 45	
Şekil 2.27. İstasyon 5’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 46	
Şekil 2.28. İstasyon 6’da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b). 47	

Şekil 2.29. İstasyon 7’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	48
Şekil 2.30. İstasyon 8’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	49
Şekil 2.31. İstasyon 9’da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	50
Şekil 2.32. İstasyon 10’da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	51
Şekil 2.33. İstasyon 11’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	52
Şekil 2.34. İstasyon 12’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	53
Şekil 2.35. İstasyon 13’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	54
Şekil 2.36. İstasyon 14’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	55
Şekil 2.37. İstasyon 15’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	56
Şekil 2.38. İstasyon 16’da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).	57
Şekil 2.39. Deformasyon sonucu özellikle kireçtaşı, kumtaşı gibi kayalarda ezik ve parçalanmış zonların görünümü	58
Şekil 2.40. Eosen yaşlı Koyulhisar Formasyonuna ait killi ve marnlı seviyelerin görünümü.....	59
Şekil 2.41. Heyelanın kaynak bölgesinde görülen su kaynaklarından görünüm	59
Şekil 2.42. Heyelanlı kütle içerisinde yer alan küçük gölcüklerin görünümü	60
Şekil 2.43. Kitle hareketinin ana kaynak alanında yer alan göllerden görünüm.	61
Şekil 2.44. Koyulhisar heyelan bölgesi, kitle hareketinin ana kaynak alanındaki su kaynakları ve göllerin uydu görüntüsündeki konumu	61
Şekil 2.45. DPT-120220K nolu proje kapsamında açılan ve yer altı su seviyeleri ölçülen kuyular	63
Şekil 2.46. Yeraltı su seviyesi ölçümleri	64
Şekil 2.47. Yer altı su seviyesi ölçüm sondaj kuyularına ait lokasyonlar	64
Şekil 2.48. Yourmlarda kullanılmayan ISK9, ISK5,ISK13 nolu kuyulara ait yeraltı su seviyesi değerleri.	65
Şekil 2.49. Yorumlarda kullanılan ve heyelan sahasındaki yer altı su seviyesi değişimini gösteren kuyulara ait yeraltı su seviyesi değişimi değerleri.	66
Şekil 2.50. Basitleştirilmiş olarak heyelanın bölümlerinin görünümü.	67
Şekil 2.51. Koyulhisar heyelanı Taç kısmından görünüm (Nisan 2014)	70
Şekil 2.52. 1979 ve ve 2013 yıllarına ait sayısal yükseklik verilerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen malzeme hareketi.	71
Şekil 2.53. Heyelan içerisinde meydana gelen a ve c gerilme çatlakları b kayma yüzeyinden görünüm (Nisan 2014)	72
Şekil 2.54. Heyelan içerisinde gözlemlenen basamaklar (Nisan 2013)	73
Şekil 2.55. Kayma yüzeyi ve sondaj verileri yardımıyla elde edilen jeolojik birimlerin kesit gösterimi.	74
Şekil 2.56. Koyulhisar ilçe merkezi karayolu kenarında gelişen heyelan (Nisan 2014)	75
Şekil 2.57. Bölgedeki diğer heyelanlar ve kaya düşmesi (Nisan 2014).....	75
Şekil 2.58. MTA tarafından 2012 yılında güncellenen Türkiye diri fay haritası ve çalışma alanı Google earth üzerinde gösterimi.....	76

Şekil 2.59. Bölgedeki depremlerin uydu görüntüsü üzerindeki dağılımları.....	78
Şekil 3.1. Koyulhisar ilçesi Jeolojik Haritası (Yılmaz 2009).....	79
Şekil 3.2. Emniyet Binası ve civarındaki deformasyonlar (Hastaoglu vd., 2011).	80
Şekil 3.3. Emniyet binasının temelinde açılan su kuyusu (Haziran 2012).....	81
Şekil 3.4. Heyelan sahasına tesis edilen bütün GNSS noktaları (60 adet).	81
Şekil 3.5. Sadece Emniyet binası civarındaki 50 m aralıklarla tesis edilen GNSS noktaları.	82
Şekil 3.6. Emniyet binası civarındaki noktalar dışında kalan yaklaşık 100-200 m aralılarla tesis edilen diğer noktalar	82
Şekil 3.7. Bazı GNSS noktalarına ilişkin tesis fotoğrafları (Mart 2012)	84
Şekil 3.8. Koyulhisar ilçesine ait aylara göre sıcaklık ve toplam yağış miktarları.(Sıcaklıklar derece yağış miktarları m ² başına düşen ortalama m ³ biriminde verilmiştir.).....	85
Şekil 3.9. GNSS ölçümlerine ilişkin fotoğraflar	87
Şekil 3.10. IKYK ve TKYK noktalarına ait koordinat tekrarlılıkları	91
Şekil 3.11. GNSS gözlem süreleri	93
Şekil 3.12. LGO yazılımı ile değerlendirilen bazlar	93
Şekil 3.13. Heyelan Sahasındaki 51 GNSS noktasına ait on periyotluk GNSS değerlendirilmesinden elde edilen koordinat farkları.....	98
Şekil 3.14. Bölgelere ayrılmış çalışma sahası ve GNSS noktalarına ait hız vektörleri	104
Şekil 3.15. I. Bölge (Eski heyelan Kütlesi üzeri) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit	105
Şekil 3.16. II. Bölge (Şehir Merkezi Kuzey Bölümü) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit	106
Şekil 3.17. DH20 ve DH21 nolu noktalar civarındaki binalarda oluşan deformasyonlar.	107
Şekil 3.18. III. Bölge (Şehir Merkezi Emniyet Binası Civarı) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boykesit	108
Şekil 3.19. DH21 ve DH22 nolu noktalardaki kayma yönleri ve oluşan basamaklar.	109
Şekil 3.20. OH16 nolu nokta ve civarındaki kayma düzlemi ve yönü (17.02.2015, E: 40.297240, B: 37.832188)	110
Şekil 3.21. V. Bölge (Şehir Merkezi Batı kesimi) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boykesit	111
Şekil 3.22. IV. Bölge (Şehir Merkezi Güneyi Heyelan Sahası Topuk Kısmı) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit.....	113
Şekil 3.23. Heyelan Sahası GNSS noktalarından enterpole edilen hız değerleri ve heyelan sahası boyunca kuzey-güney doğrultuda alınan kesit üzerindeki hız değerleri a. Yükseklik bileşeni b. Kuzey bileşen c. Doğu bileşeni.....	114
Şekil 3.24. Heyelan Sahası GNSS noktaları bileşke hız vektörlerinden elde edilen çökme yükselme yönündeki Enterpolasyon haritası ve Kuzey Güney Yönünde boy kesit ile bu değerlere ait kabartma harita.	115
Şekil 3.25. Hastaoglu 2009' da yaptığı çalışmada kullanılan GNSS noktalarının lokasyonları	116
Şekil 3.26. Sıcaklık değişimi ile yer değiştirme arasındaki ilişki	117
Şekil 3.27. Dinamik ve Kinematik Deformasyon modelleri Kullanılarak Kalman Filtresinde KH07 nolu nokta için Ölçülen (measured), Predikte (predicted) ve Filtre (filtered) değerler.	119
Şekil 3.28. OH16 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri.....	123
Şekil 3.29. OH16 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri.....	124

Şekil 3.30. DH20 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri.....	126
Şekil 3.31. DH20 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri.....	127
Şekil 3.32. DH21 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri.....	128
Şekil 3.33. DH21 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri.....	129
Şekil 3.34. (a) Homojen deformasyon, (b) Homojen olmayan deformasyon.....	131
Şekil 3.35. Gerilme elipsi maksimum ve minimum asal gerinim parametreleri (Doğan, 2002)	134
Şekil 3.36. Koyulhisar bölgesinin üç bölgeye ayrılarak elde edilen gerilim asal eksenleri (Poyraz, 2015)	135
Şekil 3.37. Güncel GNSS sonuçlarından elde edilen sıkışma ve çekme yönleri.....	137
Şekil 3.38. Güncel GNSS sonuçlarından elde edilen sıkışma ve çekme yönleri ve bölge içerisinde bulunan faylar için yapılan fay kinematik analizi.....	138
Şekil 4.1. PS-InSAR ölçme prensibi	139
Şekil 4.2. DORIS programı kullanılarak elde edilen interferogramlar.....	140
Şekil 4.3 STAMPS programı ile değerlendirme sonucunda hatalardan (yörünge hatası, atmosfer hatası) arındırılmış PS noktalarına ait genel görüntü (radyan birimli)	140
Şekil 4.4. STAMPS programı ile değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktalarına ait hız bilgileri(mm/yıl).....	141
Şekil 4.5. StaMPS yazılımı kullanılarak değerlendirilen ENVISAT ASAR görüntüleri ve seçilen master görüntüden tarih ve baz mesafesi farkları.	142
Şekil 4.6. ENVISAT-ASAR 78 iz numaralı alçalan uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.	143
Şekil 4.7. ENVISAT-ASAR 307 iz numaralı alçalan uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.	144
Şekil 4.8. ENVISAT-ASAR 171 iz numaralı yükselen uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.....	145
Şekil 4.9. ENVISAT-ASAR 443 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.	146
Şekil 4.10. ENVISAT-ASAR 78 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.....	148
Şekil 4.11. ENVISAT-ASAR 307 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.....	149
Şekil 4.12. ENVISAT-ASAR 171 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.....	150
Şekil 4.13. ENVISAT-ASAR 443 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.....	151
Şekil 4.14. ENVISAT ASAR görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi.....	152
Şekil 4.15. StaMPS yazılımı kullanılarak değerlendirilen TerraSAR görüntüleri ve seçilen master görüntüden tarih ve baz mesafesi farkları.	153
Şekil 4.16. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.....	155
Şekil 4.17. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.	156

Şekil 4.18. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen entropole hız haritası ve boy kesit.	157
Şekil 4.19. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen entropole hız haritası ve boy kesit.	158
Şekil 4.20. TerraSAR-X görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi.....	160
Şekil 4.21. ENVISAT ve TerraSAR-X görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi	160
Şekil 5.1. 10 adet ENVİSAT 78 iz numaralı uyduya ait görüntüden elde edilen PS noktaları için LOS yönündeki yıllık hız değerleri, kesit ve GNSS noktaları.....	163
Şekil 5.2. Seçilen kesit boyunca GNSS ve PS noktalarına ait hız değerleri.....	164
Şekil 5.3. Sarıyan-bakış geometrisi ve açılal parametreler	164
Şekil 5.4. KH07 nolu nokta ve civarındaki PS noktaları.....	166
Şekil 5.5. Seçilen kesit boyunca KH07 nolu nokta hariç GNSS ve PS noktalarına ait hız değerleri	167
Şekil 5.6. GNSS ve PS noktaları için fit edilen eğriler.	168
Şekil 5.7. a) Seçilen kesit boyunca TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri, b) Seçilen kesit boyunca PS noktaları ve GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri.	170
Şekil 5.8. a) Seçilen kesit boyunca TerraSAR-X Stripmap130 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri, b) Seçilen kesit boyunca PS noktaları ve GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri.	170
Şekil 5.9. Heyelan sahası genel karakterini göstermek amaçlı seçilen GNSS noktaları.	171
Şekil 5.10. Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri, TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için ikinci dereceden fit edilen eğriler.	172
Şekil 5.11. Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri, TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için ikinci dereceden fit edilen eğriler.	173
Şekil 5.12. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uydu için GNSS ve PS noktalarından üretilen entropole LOS yönündeki hız değerleri ve kesit boyunca bu hız değerlerinin değişimi.....	175
Şekil 5.13. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uydu için GNSS ve PS noktalarından üretilen entropole LOS yönündeki hız değerleri ve kesit boyunca bu hız değerlerinin değişimi.....	176
Şekil 6.1. GNSS sonuçlarından üretilen düşey hız vektörleri ve jeolojik bilgiler.....	178
Şekil 6.2. ABS ortamında çalışma bölgesi jeoloji haritası	179
Şekil 6.3. CBS yazılımı ortamında çalışan kullanıcı arayüz programı	180
Şekil 6.4. GNSS hız değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası	181
Şekil 6.5. PS-INSAR hız değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası .	182
Şekil 6.6. GNSS, PS-INSAR ve eğim değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası.....	183

Tablo Listesi

Tablo 2.1. İlçe merkezinde açılan sondajların konum bilgileri ve kesilen birimlerin derinlikleri.....	28
Tablo 2.2. Çalışma alanındaki birimlere ait eklemlerin jeenetik ve kökensel sınıflamaları(Sendir, H. 2001.'den düzenlenmiştir).	34
Tablo 2.3. Bölgedeki eklemlerin mühendislik jeolojisi açısından süreksizlik özelliklerinin sınıflamaları(Sendir, H. 2001.'den düzenlenmiştir).....	35
Tablo 2.4. Çalışma alanı fay düzlemlerine ait verilerin ölçüldüğü istasyonların noktasal yerleri.....	40
Tablo 2.5. Heyelanların hareket ve malzeme türüne göre sınıflandırılması (Varnes'den (1978) düzenlenerek alınmıştır).....	68
Tablo 2.6. Bölgede meydana gelen depremler	76
Tablo 3.1. GNSS BERNESE yazılımı versiyon 5.0' ın fonksiyonel akış diyagramı	89
Tablo 3.2. Değerlendirmede Kullanılan Modeller	90
Tablo 3.3. Noktalara ait yıllık hız değerleri	90
Tablo 3.4. Kalman Filtresi iş akış diyagramı (Bayrak 2003.).....	101
Tablo 3.5. GNSS noktalarına ait yıllık hız değerleri.....	103
Tablo 3.6. Dinamik model kullanılarak Kalman Filtresinden kestirilen sıcaklık katsayı değerleri	118
Tablo 3.7. KH07 nolu nokta ölçü, predikte ve filtre değerlerinden elde edilen yer değiştirme miktarları arasındaki korelasyon ve R^2 değerleri	120
Tablo 3.8. Beş farklı modelden elde edilen predikte ve filtre sonuçların ölçü değerlerinden farkları yardımı ile hesaplanmış standart sapma değerleri	130
Tablo 4.1. ENVISAT ASAR uydu verilerinden kesit boyunca elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değerleri.....	152
Tablo 4.2. TerraSAR-X ve ENVISAT uydu verilerinden kesit boyunca elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değerleri.....	159
Tablo 5.1. Hastaoglu 2013 tarafından belirlenen GNSS noktalarına ait hız değerleri	162

Özet

PS-InSAR tekniği son yıllarda genellikle, deprem nedeni ile oluşan deformasyonların, volkanik alanlardaki yer değişimlerinin ve hidrolojik, jeolojik, madencilik ya da şehir alanlarında oluşan çökmelerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak heyelanların hareketlerinin belirlenmesinde belki de görelî olarak yeni bir yöntem olması nedeniyle çok sık kullanımı söz konusu olmamıştır. Buna karşın az da olsa yapılmış bu amaçlı çalışmalarda heyelan hareketlerinin izlenmesinde PS-InSAR yönteminin başarılı olacağı görülmektedir. Önerilen bu projenin temel amacı modern uzaysal yöntemler olan PS-InSAR ve GNSS yöntemlerini kullanarak heyelan sahalarındaki mevcut alansal deformasyonun belirlenmesidir. Bu iki yöntem ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak PS-InSAR yönteminin heyelanlarda uygulanabilirliği araştırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda çalışma alanı olarak Koyulhisar ilçesi heyelan sahası seçilmiş olup heyelan sahasına toplamda 53 adet GNSS noktası tesis edilmiştir. Bu noktalarda 10 periyot 3 gün tekrarlı Hızlı Statik ölçme yöntemine göre birer saatlik ölçüler gerçekleştirilmiş ve GNSS noktalarına üç boyutlu (kuzey, doğu ve yükseklik) ait yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra yine heyelan sahasına için Envisat ve Terrasar-x radar uydularına ait SAR görüntüleri Alman ve Avrupa Uzay Ajanslarına önerilen projeler çerçevesinde temin edilmiş ve STAMPS yazılımı kullanarak değerlendirilmiştir. Böylelikle heyelan sahasına ait uydu bakış doğrultusundaki kayma yüzeyleri PS-InSAR yöntemi ile elde edilmiştir. PS-InSAR yöntemi ile elde edilen yıllık hız değerleri tek boyutlu olup bu hız değerlerinin GNSS sonuçları ile doğrudan karşılaştırılması uygun olmamaktadır. Bu yüzden GNSS den elde edilen hız değerleri LOS (Line of sight (Uydu bakış doğrultusu)) yönüne çevrilerek GNSS ve PS-InSAR sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi için GNSS ve PS-InSAR yöntemlerinden elde edilen noktalasal veriler kullanarak tüm heyelan sahasına ait enterpolasyon haritaları oluşturulmuştur. Karşılaştırmalar sonucunda özellikle noktasal anlamda lokal deformasyonların belirlenmesinde GNSS yöntemi etkili iken tüm heyelan sahasının genel alansal hareket eğiliminin belirlenmesinde PS yöntemi daha etkili olduğu gözlenmiştir. Ancak Koyulhisar heyelan sahası gibi ana kütle nin hareketinden bağımsız lokal hareketlerinde bulunduğu heyelan sahalarında her iki yöntemin birlikte kullanımı ile daha doğru sonuçlara erişileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: PSInSAR, GNSS, Heyelan

Abstract

Recently PS-InSAR method is generally used to determine deformations caused by earthquake, movements in volcanic areas, subsidence in hydrological, geological, mining or urban areas. However this method is not used so often in determining the movements of landslides perhaps because of being a relatively new method. But it is seen in the few studies done for this aim that PS-InSAR method can be successful in monitoring landslide movements. The main purpose of this proposed project is to determine the existing areal deformation by using modern and spatial PS-InSAR and GNSS methods. By comparing the results that are obtained by using these two methods the useage of PSInSAR on landslide will be searched. According to this purpose, Koyulhisar region has been selected as the study site. 53 GPS points has been established throughout the region. At these GPS points, based on Rapid Static, one-hour period measurements has been made 10 times each day within 3 days in order to obtain GPS points' three dimensional (North, east, up) velocity values. In addition, Envisat and Terrasar-x radar satellites' SAR images have been obtained, via the projects that were offered to German Aerospace Center and European Space Agency. These images have been evaluated with STAMPS software. Thus, slip surfaces of the landslide region in the direction of the line of sight (LOS) was obtained by PS-InSAR method. Velocity values obtained by PS-InSAR method are one dimensional, therefore these values are not suitable for comparison with the GPS results. Because of this, GPS based velocity values' directions were converted into the LOS direction to be compared with PS-InSAR results. For comparison process, point data obtained from both GPS and PS-InSAR methods were used to create interpolated maps of the landslide region. As a result of this comparison, GPS method was found more effective when obtaining local deformations based on point data while PS-InSAR method was better at areal movement obtainment of the landslide region. However, considering Koyulhisar landslide region as it engages in movements independent from main mass movement, using both methods together will gather better results.

Anahtar Kelimeler: PSInSAR, GNSS, Landsilde.

1. GİRİŞ

Geçmişten bugüne, heyelan sahalarındaki hareketin jeodezik yönden izlenmesi için çok çeşitli ölçme yöntemleri kullanılmaktadır. Noktalar arası uzunluk değişimlerinin ölçülmesi için çelik şeritler veya invar teller kullanılırken, uzunluk değişimlerinin belirlenmesi için Extensometreler kullanılmakta idi. Teodolit ve Nivoların kombine kullanımı, Elektronik mesafe ölçer ve GNSS sayesinde noktalara ait 3 boyutlu koordinat değişimleri belirlenmektedir.

Heyelan sahasındaki alansal deformasyonları incelemek amacıyla, hava ya da yersel Fotogrametrinin yanı sıra uydu görüntüleri yardımıyla nokta koordinatları, eş yükseklik haritaları ve sayısal yükseklik modelleri elde edilebilmektedir. Heyelanların izlenmesinde özellikle son yıllarda ölçme robotları ve INSAR tekniği de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. (Coe v.d. 2003; Malet v.d., 2002; Dercourt, 2000; Gili v.d., 2000).

InSAR modern bir ölçme tekniğidir ve yer yüzeyindeki günlük ya da yıllar süren değişimleri mm hassasiyetinde bir doğrulukla güvenilir şekilde ölçebilmektedir (Gens ve Vangenderen, 1996; Gens, 1998). Kompleks radar sinyallerinin faz bileşenlerinin InSAR tekniğine uygun olarak analiz edilmesi sonucunda yeryüzünün 3 boyutlu bilgilerine ulaşılabileceği konusu 1960'lı yıllara dayanmaktadır. 1986 yılına kadar süren teorik çalışmalardan sonra Zebker ve Goldstein tarafından Jet Propulsion Laboratory (JPL)'de uygulamalı InSAR çalışmaları yapılmıştır. Uydulara yerleştirilen SAR sistemleri ile görüntülerin elde edilmesi, InSAR tekniğinin daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. InSAR tekniğinin teorisi ve uygulamaları hakkında detaylı bilgilere Gens ve Genderen (1996), Massonnet (1998), Madsen vd., (1993), Rosen vd., (2000)'den, ulaşılabilir.

Ancak deformasyon nedeni ile oluşan yer kabuğu hareketlerinin saptanmasında diferansiyel interferometri adı verilen DInSAR tekniğinden yararlanılır. Diferansiyel SAR interferometrisi (Differential Interferometric SAR), düşey yöndeki küçük ölçekli hareketlerin ölçümü için kullanılır DInSAR uzun zaman aralıklı alımlara rağmen konumsal olarak değişimin yakalanması ve yüzey ötelemelerinin haritalarının oluşturulmasını sağlayan tek yöntemdir. Bu nedenle deprem ve volkanik araştırmalar, buzul hareketleri, tektonik hareketler, maden, gaz, su, petrol kazıları nedeniyle oluşan yer çökmelerinin görüntülenmesi bu teknik ile önem kazanmıştır ve cm.nin altında doğrulukla veri elde edilir. Diferansiyel interferometride ölçülen öteleme düşey yönlü değildir, görüş doğrultusu boyunca oluşan öteleme üretilir (Bamler ve Hartl, 1998). Diferansiyel SAR interferometri tekniği, düşey yöndeki küçük ölçekli hareketlerin ölçümü için kullanılır. Bu teknik, farklı zamanlarda alınan SAR (Synthetic Aperture Radar = Sentetik Açıklıklı Radar) uydu görüntüleri kullanılarak konumsal değişimin yakalanması ve yüzey ötelemelerinin haritalarının oluşturulmasını sağlayan tek yöntemdir. Bu nedenle deprem

ve volkanik araştırmalar, buzul hareketleri, tektonik hareketler, maden, gaz, su, petrol kazıları nedeniyle oluşan yer çökmelerinin görüntülenmesi ve izlenmesi bu teknik ile önem kazanmıştır. Ayrıca cm'nin altında doğrulukla veri elde edildiği yapılan çalışmalarla ispatlanmıştır (Massonet ve Feigl, 1998; Bamler ve Hartl, 1998; Hanssen 2005). Bazı faylarda gözlenen krip ve heyalan benzeri çok yavaş cereyan eden hareketler (< 1 cm) InSAR yöntemiyle başarıyla ortaya çıkartılabilmektedir (Burgmann vd., 1998, Burgmann vd., 2006, Çakır vd., 2005,).

İnterferometrik SAR görüntüleri ile deformasyonların izlenmesinde en büyük handikaplardan bir tanesi uygun interferometrik görüntü çiftlerinin sağlanamamasıdır. Uydu sistemlerinin özellikleri (geliş açısı, mekansal çözünürlük, ölçümdeki faz sapmaları, görüntünün yanlış eşlenmesi, sistem gürültüleri), yörünge (bazın neden olduğu koherans ve geometrik hatalar, tekrarlı geçişlerdeki zamana bağlı korelasyon düşüklüğü, paralel olmayan yörüngeler), sinyal (frekans, polarizasyon, bant genişliği, gürültü/ benek hataları), topoğrafya (faz farkı nedeni ile hacim geri saçılması, bakı ve eğim nedeni ile faz eğim açısı ve nem , pürüzlülük gibi yer yüzeyinin karakteristik özellikleri), hava koşulları (rüzgarın gerisaçılımı etkilemesi veya kar örtüsünün korelasyon düşüklüğüne neden olması), ve atmosferik koşullar (bulut içeriği ben oranı) gibi etkenler (Delacourt vd., 2003, Strozzi vd., 2003) interferometrik SAR görüntü çiftlerini etkileyen faktörlerdir. Diferansiyel SAR İnterferometri (DInSAR), yer kabuğu hareketlerinin ölçülmesinde oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak bu yöntemde interferogramların hemen hemen hepsi çok büyük alanları kapsarlar bu durumda sinyallerin ilintisizleşmesine (decorrelate) ve ölçüm yapılamamasına sebep olmaktadır. Son yıllara geliştirilen PS-InSAR (Persistent scatterer interferometry) yöntemi sayesinde bu sorun ortadan kaldırılmıştır (Sousa v.d. 2010). Sayılan güçlükleri aşmak için yine son yıllarda "Permanent Scatterers InSAR" (PSInSAR) yöntemi kullanılmaktadır (Ferretti vd., 2001, Meisina vd., 2006, Colesanti vd., 2003a). Bu yöntem bir bölgede aynı çerçevede mevcut bir çok (> 20) radar görüntüsünün olması durumunda kullanılabilmektedir. Hep aynı (permanent) yansıtma özelliği gösteren hedeflerden (scatters) gelen sinyaller kullanılarak bölgede meydana gelen milimetre büyüklüğündeki değişimler alansal ve zamansal olarak tespit edilebilmektedir. Ölçümlerdeki ve hata payı istatistiksel olarak görüntü miktarı ve zamansal dağılımına bağlıdır.

PS İnterferometri 1990 ların sonlarında Milano Teknik Üniversitesinden (POLIMI) A. Ferretti, F. Rocca ve C. Prati tarafından SAR tekrarlı geçiş interferometrisinin neden olduğu zamansal ve geometrik korelasyon bozuklukları ile atmosfer koşullarının değişmesinden dolayı oluşan kısıtlamaları gidermek amacı ile geliştirilmiştir. Deformasyon belirlemede klasik bir yöntem olan DInSAR tekniği pek çok uygulamada başarı ile uygulanmıştır (volkan, deprem, buzul hareketleri, yeraltı su hareketleri, heyelan). PS-InSAR tekniği ise yavaş hareket eden ve sürekli gerçekleşen çökmeleri belirlemek amacı ile geliştirilmiştir. Baz uzunluğu ve zamansal

korelasyon kısıtlamalarının azaltılması, atmosferik etkinin düzeltilmesi ve zaman serileri analizinin kolay işlenmesi konularında avantaja sahiptir. (Jung ve Min, 2005)

Tekrarlı geçiş interferometri yöntemi, geniş alanların yükseklik modelini üretmede ve yüzey deformasyonu görüntülemeye kullanılan bir yöntemdir. Teknik, farklı zamanlarda alınmış, farklı baz uzunluklarına sahip interferometrik SAR fazlarını karşılaştırarak m. doğruluğa sahip Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) ve mm. doğruluğa sahip deformasyon belirlemede kullanılır (Zebker vd., 1994, Gens ve van Genderen, 1996). Ancak bitki örtüsünün olduğu yerlerde ve yeryüzündeki nesnelerin zaman içinde değişmesi zamansal korelasyon bozukluğuna neden olmaktadır. Geometrik korelasyon bozuklukları da görüntü alım sayısına kısıtlamalar getirerek interferometrik uygulamalarda uygun çiftlerin seçilememesine neden olmaktadır. Görüntüler farklı zamanlarda alındığı için görüntü alımları sırasındaki atmosferik özellikler de farklı olacaktır. Görüntüler bu etkileri taşıdığı için her görüntünün farklı atmosferik etki bileşeni olacaktır. Bu etki de deformasyonun doğru şekilde elde edilmesini engelleyecektir. İnterferometrik yöntemi etkileyecek kısıtlamaları gidermek için geliştirilen PSInSAR yönteminde $n > 20$ olmak üzere n adet görüntü kullanarak (Colesanti vd., 2001a, Perissin vd., 2007) $n-1$ adet interferogram oluşturulmakta ve mm/yıl doğrulukta sonuçlar elde etmek mümkündür. Yüksek uyumluluğa (coherent) sahip hedefleri belirlemek için çoklu interferogram kümesi oluşturulur. Bunun için tek bir master görüntü kullanılarak oluşturulmuş diferansiyel interferogram kümesi hazırlanır. İnterferogramların oluşturulmasında topografya etkisinin giderilmesi için SYM kullanılmalıdır. Eş yükseklik eğrilerinden ya da stereo yöntemle üretilen SYM ler dışında InSAR görüntülerinden de elde edilebilir. Ancak baz uzunluğuna dikkat etmek gerekir. Çünkü SYM için kısa baz uzunluğu kullanılırken, PSInSAR tekniğinde kritik değere kadar baz uzunluğunun artması, piksel çözünürlüğünün altında kalan saçıcıların (scatterers) faz ölçümüne izin verir.

Sabit hedef noktaları belirlemek için interferogramlara ait uyum haritaları kullanılır. Değerlendirmede korelasyon eşik değeri belirlemek en basit yöntem olarak kullanılmaktadır. Eğer bir hedef uygun bir değerden daha fazla uyum değeri gösteriyorsa bu nokta PS (Permenent Scatterer = sabit saçıcı) adayı olarak seçilir. Ancak baz uzunluğu ve SYM doğruluğu gibi kısıtlamalar yüzünden uyum haritaları kullanılamayabilir. Daha anlamlı bir uyum haritası oluşturmak için daha küçük pencere boyutuna sahip uyum haritası oluşturulabilir. PS nokta sayısını artırmak için SAR görüntü sayısı en az > 20 olması tavsiye edilir. Bir pikselin her görüntüdeki genlik değerleri zaman serisini oluşturur. Geometrik ve zamansal korelasyon bozukluğundan etkilenmiş ve sabit genlik değer dizisine sahip pikseller PS noktası olarak seçilir. Başka bir yaklaşım dağılım indeksi (dispersion index) hesabıdır (Ferretti vd., 2001, Colesanti vd., 2003a). Dağılım indeksi değeri; genlik bilgisinin, standart sapmasının ortalama değere olan oranı ile elde edilir. Çalışma alanındaki piksellerin bağıl genlik değerlerinden

dağılım indeksi hesaplanır ve indekse verilen eşik değerle de PS noktaları seçilebilmektedir. Şehir alanlarında PS noktaları genellikle insan yapımı olan nesnelerdir (binalar, yollar, köprüler, direkler, limanlar, vb.)

PSInSAR tekniği, deprem nedeni ile oluşan deformasyon (Colesanti vd., 2001b, Bürgmann vd. 2006), heyelan (Colesanti ve Wasowski, 2006, Farina vd. 2006), volkanik alanlardaki yer değişimleri (Hooper vd. 2004 Hooper vd., 2007), ve hidrolojik (Gao ve Zeng, 2007), jeolojik (Meisina vd., 2006), madencilik (Jung vd., 2007) ya da şehir alanlarında (Bamler vd., 2005, Bovenga vd, 2006, Ng ve Ge, 2007, Kim vd., 2007) meydana gelen çökmeler gibi uzun sürede meydana gelen hareketlerin belirlenmesinde son on yılda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla daha fazla görüntü olduğu için ERS1 ve ERS2 görüntüleri tercih edilmektedir. Bunları ENVISAT-ASAR, JERS ve RADARSAT-1 algılayıcıları izlemektedir. Yeni fırlatılan ve PSInSAR yöntemi için henüz yeterli veriye sahip olamayan ALOS-PALSAR, RADARSAT-2, TerraSAR ve COSMO-SkyMed uyduları da önümüzdeki yıllarda PS-InSAR uygulamaları için kullanılabilir.

Konu ile ilgili daha önce yapılmış bilimsel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir; PS İnterferometri tekniği RADARSAT görüntülerine ilk kez Colesanti vd (2003a) tarafından uygulanmıştır. Çalışmada aynı bölgeye ait RADARSAT ve ERS kullanılarak PSInSAR analizi yapılarak karşılaştırılmış ve RADARSAT görüntülerinin PS analizi için kullanılabilirliği araştırılmıştır. RADARSAT uygulamasında sadece 2001–2002 yıllarına ait 12 standart ışın modunda (S1) görüntü kullanılırken aynı bölgeye ait 40 adet de 1992–2000 yıllarına ait ERS görüntüsü alınmıştır. Görüntüler Tokyo şehrinde 6.5 x 9 km²'lik bir alanı kapsamaktadır. PSInSAR analizi sonucunda 25-35 PS/km² olmak üzere RADARSAT görüntüsünden 1300 PS noktası ve ERS görüntüsünden 2000 PS noktası elde edilmiştir. Yeterli RADARSAT görüntüsü olmamasına rağmen sonuçlar RADARSAT'ın kullanılabilirliğini göstermektedir.

Colesanti vd. (2003b) İtalya'nın merkezindeki Ancona heyelanının analizi için PS İnterferometri tekniğini kullanmışlardır. Bu çalışmada Haziran 1992 ile Aralık 2000 tarihleri arasında alınmış 61 adet ERS görüntüsü kullanılmış. Çalışma alanı 2x1.75 km²'lik alanı kapsamaktadır. Bölgeye ait ERS görüntülerinin baz uzunluklarındaki uyumsuzluklar nedeni ile Diferansiyel InSAR uygulaması için kullanışlı olmadığı saptanmıştır. Analiz için PSInSAR yöntemi nivelman ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Nivelman yöntemi 1983, 1985, 1988, 1989, 1990, 1997 ve 1998 yıllarında yapılmış ve birkaç mm/yıl oranında hassasiyetle deformasyon belirlenmiş. Ancak nivelman yöntemi PS yöntemine göre daha az yer noktası içermektedir ve daha pahalı bir yöntemdir. Bu çalışma nivelman noktasına göre PS noktasının çok olması nedeniyle (820 PS noktası tanımlanmıştır) geniş alanların deformasyon analizinde PSInSAR yönteminin daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Deformasyon sonuçları -6 ile +6 mm/yıl olarak belirlenmiştir.

Walter vd., 2004 yılında Almanya'nın Ruhr bölgesinde kömür madenciliğinin neden olduğu yüzey çökmelerinin belirlenmesinde PS İnterferometri tekniği kullanmışlardır. Çalışmada 1992–2000 yılları arasında alınmış 78 ERS görüntüsü işlenmiştir. Görüntülerin dik baz uzunlukları 7m. ile 1037 m. arasında değişmektedir. Öncelikle bir görüntü seçilerek diğer görüntüler bu görüntüye göre geometrik olarak düzeltilmiş ve doğruluğu 2-22 m. arasında değişen sayısal yükseklik modeli ile de 77 adet interferogram üretilmiştir. Çoğu interferogramın ortalama koherens değeri düşüktür ve en yüksek 0.31 olarak belirlenmiştir. Bölgede bitki örtüsünün olması ve çökme oranının çok olmasından dolayı koherens değerleri düşüktür. Bölgede noktasal saçıcı olarak endüstri binaları, seralar ve insan yapımı özelliklere sahip nesneler kullanılmıştır ve çökme oranı -100-0 mm/yıl olarak bulunmuştur.

Diğer bir kömür ocağı çalışması Jung ve Min tarafından 2005 yılında Kore Gaeun bölgesinde, L bandına sahip JERS görüntüleri kullanılarak yapılmıştır. Bölgede kalsit çözülüm görüldüğü için yer değiştirme görülmektedir. Bu nedenle kömür ocakları kapatılmaktadır. Çalışmanın amacı kapatılan kömür ocaklarında meydana gelen yavaş ve sürekli çökmeleri belirlemektir. Çalışma alanı 4 km²'dir. Kasım 1992 ve Ekim 1998 yılları arasını kapsayan 6 yıllık interferometrik faz zaman serisi oluşturularak bölgedeki deformasyon miktarını belirlenmeye çalışmışlardır. PSInSAR için 25 JERS görüntüsü kullanılmıştır. Görüntülerden 6 çiftin koherens değeri 0.3'ün üzerindedir. Kritik baz uzunluğu olarak 5.7 km. belirlenmiştir ve 10 çift görüntü 1500 m. den büyük dik baz uzunluğuna sahiptir. PS nokta seçiminde dik baz uzunluğu 1500 m. den küçük interferogramlarda, genlik dağılım indeksi 0.25'ten küçük, koherens değeri 0.4'ten büyük olan noktalar ele alınmıştır. Yapılan çalışma bölgedeki kırık alanın arazi ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Kırık miktarının çok olduğu bölgede, görüş doğrultusu (LOS=line of sight) oluşan ortalama çökme miktarı 0.61 cm/yıl olarak belirlenmiştir. İnterferometrik olarak en fazla çökme miktarı da 11,2 cm.dir. Sonuçlar yersel ölçüler ile yakın korelasyon göstermiştir. Şehir alanındaki yer değiştirmeyi belirlemek için Meisina vd. 2006 yılında İtalyanın kuzeyinde yer alan Oltrepo Pavese bölgesinde çalışma yürütmüşlerdir. 1100 km²'lik çalışma alanı karmaşık jeolojik bir yapıya sahiptir ve kilce zengin sediment oluşumu görülmektedir. Bu karakteristik özellikler bu bölgede yüzeysel ve derin heyelanların, çökmelerin, killi toprağın kabarması ve/veya çekmesi gibi afetlerin meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada da yer değiştirmenin belirlenebilmesinde kısıtlamalardan kaçınmak amacıyla klasik interferometrik yöntem yerine PSInSAR tekniği kullanılmıştır. 1992–2001 yıllarında alınmış 77 alçalan yörüngede ERS görüntüsü ve 26 yükselen yörüngede ERS görüntüsü kullanılarak elde edilmiştir. Alçalan yörüngede daha fazla görüntü olduğu için 95000 PS noktası ele alınırken yükselen yörüngede 3800 PS noktası alınabilmektedir. Görüntü alım geometrisinin uygun olmaması da PS nokta seçimini etkilememektedir. PS seçiminde koherens değerleri önem kazanmaktadır. Bu çalışmada koherens değerleri (c) üç sınıfa ayrılmıştır; $c < 0.65$, $0.65 \leq$

$c < 0.85$, $c \geq 0.85$. Koherens değeri 0.65 ten küçük olan değerler işleme alınmamıştır. Elde edilen PS notalarının çoğunluğu yerleşim yerlerine aittir, insan yapımı yapılar (binalar, antenler, direkler, köprüler) bu noktaların çoğunluğunu oluşturmaktadır. Bitki örtüsünden dolayı dağlık ve tarım alanlarından çok az PS noktası elde edilmiştir. Üretilen veriler doğrultusunda yer değiştirme oranı +5 ile -16 mm/yıl olarak hesaplanmıştır PSInSAR tekniği ile bölgede bilinmeyen, durağan olmayan eğimli bölgeler ve yükselen alanlar tanımlanmıştır. Hooper vd. PS İnterferometri tekniğini farklı bir yaklaşımla ele alarak 2007 yılında yaptıkları kabuk hareketlerinin deformasyon analizinde StaMPS (Stanford Method for PS) yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yöntem, bina gibi belirgin nesneler olsun olmasın, her arazi türünde analiz yapmak için düşük faz değişimi gösteren pikselleri bulmada interferometrik fazın mekansal korelasyonunu kullanmaktadır. Çalışma alanı Galapagos adasındaki tek aktif volkan olan Alcedo Volkanıdır. 1992–1999 yılları arasında yükselen yörüngede alınmış 14 ERS-2 ile alçalan yörüngede alınmış 14 ERS-2 ve 1 ERS1 olmak üzere 29 adet görüntü kullanılmıştır. Alçalan konumda -15 ile + 30 arasında mm/yıl çökme ölçülürken, yükselen konumda 0–20 mm/yıl çökme ölçülmüştür. Genel PSInSAR uygulamalarının aksine 20 görüntüden az görüntü ile deformasyon analizi belirlenmiştir.

Farklı yörünge izinde alınan görüntülerin analizini değerlendirmek için Perissin vd. 2007 yılında Şanghay bölgesine ait ERS ve ASAR görüntülerini kullanmışlardır. Bölgeye ait ASAR görüntülerinin az olması nedeni ile tek yörünge izinde alınan ERS görüntüleri ile iki farklı yörünge izinde alınan 14 ve 12 ASAR görüntüsü, ERS-ASAR kombinasyonu kullanarak şehir alanının yer değiştirmesi araştırılmıştır. Yöntemde seçilen bir ERS görüntüsü birinci görüntü olmak üzere ERS ve ASAR görüntüleri bu görüntüye karşılaştırılmıştır. Ancak farklı algılayıcılara ait görüntüler olduğu için korelasyonun düşük olması bu yöntemin dezavantajıdır. Eğer iki veri kümesi korelasyonlu olarak birleştirilemiyorsa veri kümeleri ayrı ayrı değerlendirilir. Bu çalışmada da ASAR verileri için iki adet birinci (master) görüntü ele alınmıştır. Her yörüngede alınan ASAR verileri kendi içlerinde değerlendirilmiştir. Alçalan yörüngede alınmış ERS görüntüleri ile yaklaşık 30000 PS noktası elde edilirken, yükselen yörüngede alınmış iki ASAR izinden oluşturulan PS uygulamasında 400 km²'lik alanda 5000 nokta seçilmiştir. Her iki uygulamada da 0 ile - 28 mm/yıl arasında yer değiştirme korelasyonlu olarak elde edilmiştir. Bu uygulamada genellikle tek yörünge izinde alınan görüntülerle uygulanan PSInSAR yöntemine alternatif olarak çoklu yörüngede alınan görüntülerin de kullanılabileceği belirtilmiştir.

PS-InSAR analizini etkileyen parametreleri incelemek için Prati vd. 2004 yılında Tokyo şehrine ait JERS, ERS ve RADARSAT algılayıcıdan alınan görüntüleri incelemişlerdir. Farklı dalga boyları, tekrarlı geçiş süreleri, polarizasyon modları, platform konumu durum vektör doğruluğu gibi parametreler interferometrik analizde etkili olmaktadır. Çalışmada L ve C bandına sahip

görüntülerin uyum haritasındaki etkileri araştırılmış. C Band-VV polarizasyonda ve 35 gün ara ile görüntü alımına sahip ERS algılayıcısından 30 adet, C-band-HH polarizasyonda ve 24 gün ara ile görüntü alan RADARSAT algılayıcısından 30 adet ve L band-HH polarizasyonda, 44 gün ara ile alım yapan JERS algılayıcısında 46 adet olmak üzere toplam 106 çerçeve görüntü PSInSAR analizleri için kullanılmıştır. Uyum eşik değeri 0,8 kabul edilmiştir ve 240 PS/km² JERS, 270 PS/km² ERS ve 680 PS/km² RADARSAT elde edilmiştir. Daha kısa sürede görüntü alan RADARSAT daha iyi sonuçlar vermiştir. Faz ölçümlerindeki atmosferik gecikme etkisi karşılaştırıldığında L bandın C banda göre 4 kat daha az olduğu gözlenmiştir. JERS sonuçları beklenenin altında PS yoğunluğu göstermektedir. Her üç görüntüde de 0-70 mm. arasında çökmeler ölçülmüştür.

Browitt ve Aktar (2006) ise İstanbul kentinin 50x30 km'lik alanını kapsayan kentsel alanda çökmeleri PSInSAR tekniği ile izlemiştir. 1992-2002 yılları arasında alınmış 50 çerçeve ERS görüntüsü ile yapılan PSInSAR uygulamasında -5 ile 5 mm./yıl çökme olduğu gözlenmiştir. En fazla çökmenin Zeytinburnu bölgesinde olduğu belirlendi. İstanbul'un doğu bölgesinde ise sadece bölgesel çökmeler olduğu görülmüştür (eski nehir yatakları ve doldurulan kıyı şeritleri). Bu çalışma ile İstanbul ili sınırlarında nehir yataklarındaki ani yükselmeler ve seller yüzünden geride derin ve dar vadiler oluştuğu ve vadilerin zamanla kum ve çakıl ile dolarak kenti aşağı doğru çektiği saptanmıştır.

Heyelan araştırmalarında PS-InSAR tekniği yine Farina vd. (2006) tarafından büyük hareketlerin olduğu İtalya'daki Arno nehir yatağını kaplayan bir alanda kullanılmıştır. 350 çerçeve SAR (ERS1/ERS2) görüntüsü kullanılmış ve 600000 PS noktası tespit edilmiştir. Çalışmada yanı zamanda optik uydu görüntüleri de kullanılarak PS noktalarının herbiri hakkında bilgi elde edilmiştir. Bu çalışma ile mevcut heyelan envanterinin PS-InSAR tekniği ile güncellenebileceği ispatlanmıştır.

Cascini vd. (2009) daki çalışmalarında DinSAR yöntemini kullanarak radar görüntülerinin heyelan çalışmalarındaki potansiyelini araştırmışlardır. Bu çalışmada National Basin Authority of Liri-Garigliano ve Volturno River (Central-Southern Italy) bölgeleri incelenmiştir. Sonuçta DinSAR yöntemi kullanarak her iki bölge içinde arazi kullanımı ve heyelan etki haritaları elde edilmiştir. DinSAR sonuçlarından elde edilen heyelan alanları 1:25 000 lik bir haritaya işlenerek bölgeye ait mevcut heyelan envanteri çıkarılmıştır.

Perski vd. (2009) yaptıkları çalışmada Wieliczka-Poland bölgesindeki yerel deformasyonları ERS-1 ve ERS-2 uydularına ait SAR cerilerini kullanarak belirlemişlerdir. Wieliczka bölgesindeki deformasyonların üç farklı sebebi bulunmakta idi bunlar; i) Bölgedeki tuz madenciliği oçalışmaları, ii) Su girişlerinin neden olduğu kadastral bozulmalar, iii) Bölgenin güneyindeki heyelanlardır. Farklı deformasyon rejimlerinin ayırt edilebilmesi için bu projede DinSAR ve PS-InSAR teknikleri kullanılmıştır. Elde edilen SAR sonuçları bölgede

gerçekleştirilen Nivelman sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Su geçişlerinin neden olduğu hızlı çökmeler InSAR tekniği ile aydınlatılamamıştır. Bunun yanı sıra DinSAR ve PS-InSAR sonuçlarından maden yakınındaki yavaş çökmelere ait bilgiler elde edilmiştir. Bu çökme bilgileri nivelman verileri ile birleştirilmiş ve sunulmuştur. PS-InSAR ile 25 mm/yıl, nivelman yöntemi ile ise 40 mm/yıl ortalama çökme belirlenmiştir. Sınırlı sayıda heyelan sahasında belirlenmiştir. Heyelandan dolayı hasar görmüş binalar yansıtıcı yüzey olarak belirlenmiş ve bu binalardaki deformasyonlar daha rahat gözlenmiştir.

Seelem vd 2001' de Sinai Peninsula (Egypt) güneyinde gerçekleştirdikleri çalışmada Sham El-Shick bölgesindeki yersel deformasyonları PS-InSAR yöntemi kullanarak izlemişlerdir. Bu çalışmada yersel deformasyonlar üzerindeki atmosferik etkilerin azaltılması için özel teknikler kullanılmıştır. Bu amaçla 2003-2009 yılları arasında yirmi altı ENVISAT ASAR görüntüsü değerlendirilmiştir. Interferometric değerlendirme sonucunda çalışma alanında çökme ve yükselmeler belirlenmiştir. Özellikle Sharm El-Shiek' deki kıyı kesimi boyunca binalarda kuzey-güney yönlü bir çökme gözlenmiştir. Bu çökme uçuş yönünde 5-7 mm/yıl olarak belirlenmiştir. Heleno vd .2011' de yaptıkları çalışmada PS-InSAR yöntemini kullanarak Lizbon Metropolitan alanında daha önceden bilinmeyen iki farklı çökme alanı belirlemişlerdir. Bunlardan birincisi Lisbon' nun merkezi diğeri ise Lisbon' nun Sanayi bölgesinde belirlenmiştir. Bu çalışmada PS-InSAR sonuçları ile GNSS ve nivelman sonuçları entegre kullanılmış ve çökmeler daha ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Vilardo vd. 2009 da yaptıkları bir çalışmada İtalya'nın güneyinde 13,600km² lik bir alanda PSInSAR tekniği ile oluşan deformasyonları belirlemişlerdir. Çalışma bölgesi kent alanı olmakla beraber içerisinde aktif bir volkan mevcut olan aynı zamanda sismik bir yapısı olup üzerinde heyelanlar gerçekleşen bir alandır. PS-InSAR ile deformasyonların hareketleri doğru bir şekilde belirlenebilmiştir. 1992 ve 2001 yılları arasında alınmış olan ERS uydu görüntüleri kullanılmış ve 1.7.106 PS noktası tanımlanmıştır. Bu noktalardan senede +28 mm/yıl dan -39mm/yıla kadar deformasyon belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar yapılan GNSS ölçümleri ile elde edilen hız vektörleri ile uyumlu çıkmıştır.

Heyelan hareketinin detaylı analizi, konumların üç boyutta belirlenmesini gerektirir (Malet v.d., 2002; Dercourt, 2000). GNSS sistemi, faz ölçüleri kullanmak suretiyle mm duyarlıkta nokta konumlarını üç boyutlu olarak aynı anda belirlemektedir. Bu duyarlılığa sahip olan GNSS küçük ve yavaş yer değişimi gösteren heyelanların izlenmesi için de rahatlıkla kullanılabilir (Coe v.d. 2003; Malet v.d., 2002; Dercourt, 2000; Gili v.d., 2000; Brunner, 1997;1994; Bayrak, 2003).

GNSS kullanarak heyelanları izlemek için iki yöntem mevcuttur: periyodik ölçüler ve sürekli izleme. Her iki yaklaşımda da hareketi belirleyebilmek için sağlam zeminlere tesis edilmiş noktalara gereksinim vardır. Sürekli izleme yönteminde izlenecek nokta sayısı kadar GNSS alıcısı gerektirmesi maliyetin artmasına neden olur. Heyelanların GNSS ile anlık izlenmesiyle

ilgili bazı çalışmalar olan Malet v.d. (2002) ve Brunner (1997) örnek olarak verilebilir. Heyelanların periyodik GNSS ölçüleri ile izlenmesine örnek olarak Gili v.d. (2000) ve Moss v.d. (1999) tarafından yapılmış çalışmalar verilebilir.

Özellikle periyodik ölçme yaklaşımında her periyotta gerçekleştirilen ölçülerin eşit doğrulukta olması istenir. GNSS ile konum belirlemede çeşitli ölçüm yöntemleri uygulanmakta ve bunlardan sıkça kullanılanları statik, Hızlı statik ve gerçek zamanlı kinematik GNSS' tir (Stewart ve Rizos 2002; Featherstone v.d., 1998).

Hızlı statik ölçüm metodu geleneksel statik ölçüm metoduna benzemektedir, yalnızca gözlem süresi ve baz uzunlukları daha kısadır. Hızlı statik ölçümde uygun ölçüm geometrisi ve sinyaldeki çok yolluluk (multipath) gibi etkilerin minimum olması gerekmektedir (Rizos, 1999). Sonuç olarak iki frekanslı alıcılar ve uygun bir uydu geometrisi gerekmektedir. Bu teknik 20 km ile sınırlandırılmaktadır ve doğruluk cm mertebesinde (Hofmann v.d., 2001). Hızlı statik ölçüm metodu kontrol ölçümleri ve mühendislik ölçümleri gibi küçük alanlı uygulamalar için çok uygundur (Rizos, 1999).

Özellikle heyelanların GNSS ile izlenmesinde belirli bir oturum planlaması olmayıp, her çalışma grubu farklı yöntemler kullanmıştır. Örneğin Coe v.d.(2003) ve Mora v.d.(2002), yaptıkları çalışmalarda 8 dakika ile 1 saat arasında değişen Hızlı statik ölçme yöntemini kullanırken, Gili v.d. (2000), hem RTK hem de Hızlı statik yöntemi kullanmışlardır. Bayrak (2003), yaptığı çalışmada Statik yöntemi kullanırken, Malet v.d. (2002), sürekli ölçme yöntemi ve statik ölçme yöntemini kullanmışlardır. Mora v.d.(2003)'de ise hem sürekli hemde Hızlı statik yöntem kullanılmıştır. Bunun yanı sıra Squarzone v.d. (2005), tek frekanslı alıcıları ile ölçüm gerçekleştirmişlerdir. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere, özellikle heyelanların GNSS ile izlenmesinde belirli bir yöntem olmayıp her çalışma grubu farklı bir yöntemi benimsemektedir. Fakat son yıllarda, jeodezik GNSS ağıları yardımı ile heyelan ve volkan izleme çalışmalarında hızlı statik yöntem ve gerçek zamanlı kinematik yöntem oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Gili v.d. 2000; Matsushima ve Takagi 2000; Moss 2000; Mora v.d. . 2003; Coe v.d.. 2003).

Malet v.d. (2002) yaptıkları çalışmada; heyelanların sürekli GNSS ölçüleri ile izlenmesinde, GNSS ölçülerinden elde edilen doğruluk miktarı deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak 1 saatlik ölçüler sonucunda doğruluk 2.7, 2.2, 5.0 mm olarak belirlenmiştir. Bazlar arasındaki maksimum uzunluk 1.4 km olup yükseklik farkı ise 200m olarak verilmiştir. GNSS verilerinin değerlendirilme aşamasında GAMIT programı kullanılmış ve 24, 12, 6, 3 ve 1 saatlik veriler yardımı ile gözlem süresinin bir fonksiyonu olarak doğruluk belirlenmiştir Bunun yanı sıra GNSS ölçüleri ile yüzey hızlarındaki sezonsal ve geçici akamalarda belirlenmiştir. Yağmur suları ve yeraltı su seviyesi ile hareket miktarları arasındaki ilişki analiz edilerek gözenek su basınç değeri için hareketin ivmelenmeye başladığı anda bir eşik değeri belirlenmiştir.

Gili v.d. (2000) yaptıkları çalışmada, hızlı statik ve gerçek zamanlı kinematik (RTK) GNSS yöntemlerinin, heyelanların izlenmesinde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonunda RTK ölçüleri için 16mm yatayda 24mm düşeyde, hızlı statik ölçüler içinse 12mm yatay ve 18 mm düşey duyarlık elde edilebileceği söylenmiştir.

Mora v.d.(2003)' de digital fotogrametri ile GNSS ölçümlerini birleştirmiş ve bu yöntemin kullanıla birliğini araştırmıştır. Mora v.d. (2003) yaptıkları çalışmada; GNSS ile digital fotogrametri birleştirmiş ve fotogrametri sayesinde sayısal yükseklik modeli (SYM) oluşturmuşlardır. Ölçümler sırasında üç farklı GNSS yöntemi kullanmışlardır; hızlı statik yöntem ile heyelan boyunca işaretlenmiş noktalar ölçülmüş, RTK yöntemle ise heyelanın (1*1m kare ağı) yüzeyi çıkarılmış ve bu sayede hassas bir SYM elde edilmiştir. Tüm bunların yanı sıra iki noktada 7 ay süre ile sürekli GNSS aleti çalıştırılmış bunlardan biri hareketli bölgede diğeri ise hareketsiz bölgede konumlandırılmıştır. Sabit ve sürekli iki GNSS noktasında günlük baz çözümü gerçekleştirilmiştir. hızlı statik için 13 nokta seçilmiş ve 10 ar dakikalık ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Heyelanları tetikleyen en önemli sebeplerden biri de yağmur ve kar suyu miktarındaki artış olarak gösterilebilir. GNSS ölçülerinden elde edilen deformasyon miktarları ile meteorolojik verilerin korelasyonunu inceleyen çalışmalara Yalçınkaya v.d. (2005) ve Coe v.d. (2003) verilebilir.

Coe v.d. (2003) yaptıkları çalışmada, hidrolojik ve meteorolojik verilerden elde edilen sonuçlar ile GNSS' den edilen hareket miktarları ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Bayrak (2003) ise heyelanlardaki yeraltı suyu seviye değişimleri dinamik değişken olarak almış ve GNSS ile elde edilen konum bilgilerinden dinamik deformasyon modeli oluşturmuştur. Coe v.d. (2003) yaptıkları çalışmada, hidrolojik ve meteorolojik verilerden elde edilen sonuçlar ile GNSS'den edilen hareket miktarları ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Güneybatı Colorado'daki Slumgullien heyelan bölgesi üç buçuk yıl boyunca dönemsel olarak GNSS ve extensometre ile gözlemlemiş ve mevsimsel olarak günlük hızları belirlemişlerdir. 17 ile 147 gün arasında değişen periyotlarla hızlı statik GNSS gözlemleri gerçekleştirilmiştir. Nokta hızları ilkbaharın ilk günlerinde ve yaz aylarında zirve yapmıştır. Kış ortasında, hava ve toprak sıcaklıkları düştüğü ve kar şeklinde olan yağış miktarları da azaldığı için bu mevsimde ise hızlar yavaşlamaktadır. Yeraltı su seviyesindeki değişimin heyelan materyali içerisine sızan yüzey sularının değiştirdiği tespit edilmiş bu yüzden yüzey sularının sürekli izlenmesi gerektiği vurgusu yapılmıştır. Çalışma sonucunda yüzey sularındaki değişimin doğrudan heyelan hızları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Bayrak (2003) yaptığı çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ili, Çağlayan ilçesi, Kutlugün köyü uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bölgede heyelanın en önemli nedeni olan yeraltı suyu seviye değişimleri dinamik değişken olarak dinamik modelin oluşturulmasında dikkate alınmıştır. Heyelanın güncel sınırlarına göre bölgede bir Jeodezik deformasyon ağı kurulmuştur. Bu ağda, meteorolojik verilerle saptanan ölçü zamanlarında altı periyotluk GNSS gözlemleri yapılmıştır. Aynı periyotlarda, jeolojik ve jeofizik gözlemlerle yeraltı suyu seviyeleri de ölçülmüştür. Dinamik modelin oluşturulmasında ön bilgi edinmek için daha basit modeller olan statik deformasyon modeli ve kinematik deformasyon modelleri ile deformasyon analizi yapılmıştır. Bu model sonuçları ve yeraltı suyu seviye değişimleri dikkate alınarak heyelan için dinamik deformasyon modelleri oluşturulmuştur. Heyelan oluşumunda yeraltı suyunun değişim etkisinin çok önemli olduğu dinamik model sonuçlarından görülmüştür. Böylece hareketler fiziksel gerçeklere göre daha uygun yorumlanabilmiştir.

Özellikle heyelanların GNSS ve SAR yöntemleri birlikte kullanılarak izlenmesine Squarzoni v.d. (2005) ve Peyret v.d. (2008) örnek verilebilir. Squarzoni v.d. (2005) yaptıkları çalışmada Güney Fransa Alplerindeki La Valette heyelanını izlemişlerdir. Yağmur sularından etkilendiği düşünülen heyelan üzerine iki adet tek frekanslı GNSS kullanarak 9 nokta ölçülmüş bunlardan ikisi sabit diğerleri hareketlidir. Değerlendirme yazılı olarak Magellan MSTAR kullanılmıştır. Sabit noktada gün boyu ölçüm yapılırken hareketli noktalarda 1 saat ölçü gerçekleştirilmiştir. Ekim 2000 ile Ekim 2002 arasında sekiz periyot ölçü gerçekleştirilmiş ve ortalama 3cm/gün hareket belirlenmiştir. GNSS sonuçları EDM sonuçları ile karşılaştırılmış ve benzer hızlar elde edilmiştir. 1995, 1996, 1997 yıllarına ait radar görüntülerinden DInSAR yöntemi kullanılarak elde edilen interferogram sonuçları ile 2000-2002 yılları arasındaki GNSS sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçta her iki yöntemle de elde edilen bağıl hız değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler içerdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuç bölümünde GNSS yönteminin sadece noktasal anlamda 3 boyutlu ve duyarlı olarak deformasyonları belirlemesine karşın SAR yönteminin alansal deformasyonların belirlenmesinde daha etkili olduğu ancak sadece tek boyutta sonuç elde edilebildiği üzerine vurgu yapılmıştır.

Peyret v.d. (2008)'de İran'ın Haraz vadisindeki Kahrod heyelanına ait yüzey hareketlerinin zamana bağlı olarak değişimi belirlenmiş ve analiz edilmiştir. GNSS tekniği ile 3 farklı set halinde ölçüler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak sekiz noktalı bir ağ 1 yıllık periyotlar halinde 4 kere ölçülmüştür. Bu sayede heyelandaki kayma miktarları doğru olarak belirlenmiş ve heyelanın mekanizması tanımlanmıştır. Daha sonra 57 nokta ile ağ sıkılaştırılmış ve 6 ay içerisinde 2 defa hızlı statik yöntem ile ölçülmüştür. Böylelikle bütün heyelan sahasına ait yüzey deformasyonu tanımlanmıştır. Son olarak ise 1 yıl boyunca sürekli GNSS ölçümü yapılarak yağmur suları ile deformasyon miktarı karşılaştırılmıştır. GNSS çalışmasının yanı sıra aynı tarihleri kapsayan (DInSAR) Envisat Radar Diferansiyel İnterferogramlar analiz edilmiştir. Bu

jeodezik veri güncel kayma zonunun belirlenmesi ve yüzey hareketlerinin zamansal ve uzaysal olarak duyarlı bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır. Arazi gözlemleri ve jeodezi kombinasyonu sayesinde Kahrod heyelanının geçmiş ve günümüzdeki davranışı duyarlı olarak tanımlanmıştır. Ölçümler boyunca deformasyon oldukça az olduğundan yağmur suları ile deformasyon arasındaki ilişki için gelecekteki verilere de ihtiyaç duyulmuş mevcut veriyle anlamlı bir yorum yapılamamıştır. Çalışmada GNSS, InSAR birlikte kullanımı kütle kaymalarının izlenmesinde fayda sağlasa da asıl büyük aktivitelerin (deprem v.b.) izlenmesinde fayda sağladığına vurgu yapılmıştır.

Hastaoğlu 2009' da gerçekleştirdiği çalışmada Sivas Koyulhisar heyelan bölgesinde 2 si sabit olmak üzere 12 GNSS noktası tesis etmiştir. Bu noktalarda 3 gün tekrarlı ortalama 12 saatlik ölçümler gerçekleştirmiştir. Bu ölçümler toplam 6 periyotdur. Ölçü periyotları oluşturulurken mevsimsel değişim göz önünde bulundurulmuş ve 2007 yılı nisan, temmuz ve kasım ayları ile 2008 yılı nisan, temmuz ve kasım aylarında toplam 6 periyot ölçüm gerçekleştirilmiştir. GNSS ölçümleri Bernese 5.0 akademik yazılımı kullanılarak değerlendirilmiş ve noktalara ilişkin hız alanları kestirilmiştir. Hız alanları 12 saatlik GNSS verilerinin yanı sıra 15 dakikalık GNSS verileride kullanılarak kestirilmiş ve iki farklı yöntem sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçta hızlı statik yöntem ile elde edilen sonuçların statik yöntem sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Heyelan sahasının küçük olmasından dolayı şayet noktalar arası yükseklik farkı 500'm den daha küçük bazlar kullanılır ise 15 dakikalık GNSS gözlemlerinin hız kestirimi için yeterli olacağı gözlenmiştir. Sonuçta gerek heyelanın taç bölgesinde gerekse heyelan kütlesi üzerindeki noktalarda anlamlı bir hız değeri elde edilmemiştir. İlçe merkezindeki bir noktada güney-doğu yönünde yılda yaklaşık 8cm'lik bir yatay kayma belirlenmiştir. Bu noktanın bulunduğu mevki, Koyulhisar ilçesinin kalbi olarak nitelendirilebilir çünkü bu alanda Emniyet binası, Askerlik Şubesi, Devlet Hastanesi, İtfaiye Binası ve Jandarma binası bulunmaktadır. Gerek Emniyet Binası gerekse boşaltılan Kuran Kursu binasında bu hareketten kaynaklanan çatlamlar meydana gelmiştir (Hastaoğlu, 2009). Bu noktadaki hareketin başka bir heyelandan mı yoksa başka bir dış kuvvetten mi, ya da tamamen noktanın jeolojik özelliklerinden mi kaynaklandığı jeolojik, jeofizik ve jeodezik çalışmalar sonucunda belirlenmelidir (Hastaoğlu, 2009). Bunun yanı sıra bu noktadaki kayma alansal olarak da belirlenip etrafındaki yapılar (Emniyet binası, Askerlik Şubesi, Devlet Hastanesi, İtfaiye Binası ve Jandarma binası) üzerindeki etkisinin bir an önce belirlenmesi gerekmektedir. Jeodezik olarak alansal bir kaymayı belirleye bilmek için nokta yapısı daha sık olan bir ağ tasarlanmalı ve böylelikle kayma sadece noktasal değil aynı zamanda alansal olarak da belirlenmelidir. Gerek personel ve donanım gerekse maddi olanaklardan dolayı tez çalışması kapsamında böyle bir çalışma gerçekleştirilememiştir. (Hastaoğlu, 2009).

Hastaoğlu K.O., Sanlı D. U., (2011b)' de belirtmiş olduğu gibi, bölgede hala bir kayma devam etmektedir. Ancak bu kaymanın ne sebebi nede mekanizması hakkında bir bilgi bulunmamaktadır. Bu yüzden ivedilikle bölgede alansal deformasyonu ve bu deformasyonun sebeplerini belirleyecek bir çalışma yapılması gerekmektedir. Yukarıda anlatılan yöntemler göz önünde bulundurulduğunda evrensel ölçekte de heyelanların alansal olarak izlenmesi için en yaygın ve en uygun yöntemin GNSS, PS- InSAR birlikte kullanılması olduğu anlaşılmaktadır. Halen günümüzde bilim insanları bu iki yöntemin en uygun hali ile nasıl kullanılacağı üzerine çalışmalar yapmaktadır. Bu projede, bu iki yöntemin birlikte kullanılmasıyla elde edilecek sonuçlar ile güncel bir tartışmaya katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu iki yöntem ile elde edilen deformasyonlar dış kuvvetler (yağış miktarı, sıcaklık, yer altı su seviyesi) ile ilişkilendirilmesi planlanmıştır. Bu plan doğrultusunda çalışma sahası olan Sivas ili Koyulhisar ilçesi Heyelan sahasını kapsayacak şekilde 53 adet GNSS noktası tesis edilmiş ve bu noktalarda 10 periyot üçer gün tekrarlı birer saatlik hızlı statik GNSS ölçümü gerçekleştirmiş ve her periyot için 53 adet GNSS noktasında ait koordinat değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Kalman Filtreleme yöntemine göre değerlendirilerek noktalara ait yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Daha sonra sıra heyelan sahasına için Envisat ve Terrasar-x radar uydularına ait SAR görüntüleri Alman ve Avrupa Uzay Ajanslarına önerilen projeler çerçevesinde temin edilmiş ve STAMPS yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Böylelikle heyelan sahasına ait uydu bakış doğrultusundaki kayma yüzeyleri PS-InSAR yöntemi ile elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak heyalan sahasına ait kayma yüzeyleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun yanı sıra yeraltı su seviyesindeki değişimler incelenerek kayma miktarları ile yeraltı su seviyesi arasındaki ilişki Kalman Filtreleme tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Sonuç ürünler için ise Koyulhisar Heyelan sahasına ilişkin jeodezik ve jeodezik olmayan tüm verileri içeren bir Afet Bilgi Sisteminin oluşturulmuştur. Bu sistem sayesinde riskli bölgeler belirlenmeye çalışılmıştır.

2. ÇALIŞMA SAHASI

Koyulhisar ilçesi, Sivas'a 180 km uzaklıkta olup, batıda Tokat'ın Resadiye kuzeyde Ordu ilinin Mesudiye, doğuda Susehri ve güneyde Zara ve Hafik ilçeleri ile çevrilidir. Çalışma alanının tektonik olarak aktif bir fay olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'nda (KAFZ) yer alması nedeni ile bölgedeki kayalar genellikle kırıklı, ezilmiş ve süreksizlikler içermektedir. Bölgedeki yüksek eğimli topografyaya da bağımlı olarak bölge içerisinde eski ve yeni birçok heyelan bulunmaktadır. Bu heyelanların hareket yönleri ise, genelde yerleşim alanlarını tehdit eder konumdadır (Sendir ve Yılmaz 2001).



Şekil 2.1. Çalışma Sahası

Koyulhisar ilçesi dağlık bir bölgede yer almaktadır. Çalışma alanının en önemli ve en büyük akarsuyu olan Kelkit ırmağı, yaklaşık doğu-batı yönünde ve KAFZ'na yaklaşık paralel olarak uzanmaktadır. En yüksek tepe ve dağlar; Boztepe, Saytepe ve Iğdır dağı olup sırasıyla 1361 m, 1240 m ve 1850 m sev açıları ise 20 derece ile 75 derece arasında değişmektedir (Sendir ve Yılmaz, 2001).

Koyulhisar; KAFZ üzerinde yer alan, yüksek dağların ve sık ormanların bulunduğu bir bölgedir. Bu bölgenin sık sık heyelanlara maruz kaldığı bilinmektedir. Kaymalar genellikle ağır geçen kış mevsiminden sonra Koyulhisar'ın daha çok kuzeyinde moloz akmaları şeklinde gözlenmektedir. Yine, bu her iki heyelan da, son yılların en ağır geçen kış ve bahar mevsimlerinden sonra gelmiştir (Sendir ve Yılmaz, 2001).

Daha önceki yapılan çalışmalarda (Sendir H. ve Yılmaz I. , 2001) çalışma alanı içerisindeki potansiyel yamaç duraysızlıklarının, genellikle güneye doğru (G, GB- GD) hakim olduğu görülmüştür. Bu da Koyulhisar ilçesi ve civarındaki hakim yamaç yönleridir. Çalışma alanı içerisinde belirlenmiş eski ve yeni tüm heyelanlar, güneydeki Şıhlar fayı ile kuzeydeki Dumanlıca fayı arasında gözlenmiş olması, bu heyelanların tümünün kuzeyden güneye doğru, Dumanlıca fayından Şıhlar fayına kadar uzanan ve birçok heyelanın birleşmesi ile oluşan karmaşık bir heyelan sistemi ile açıklanmıştır.

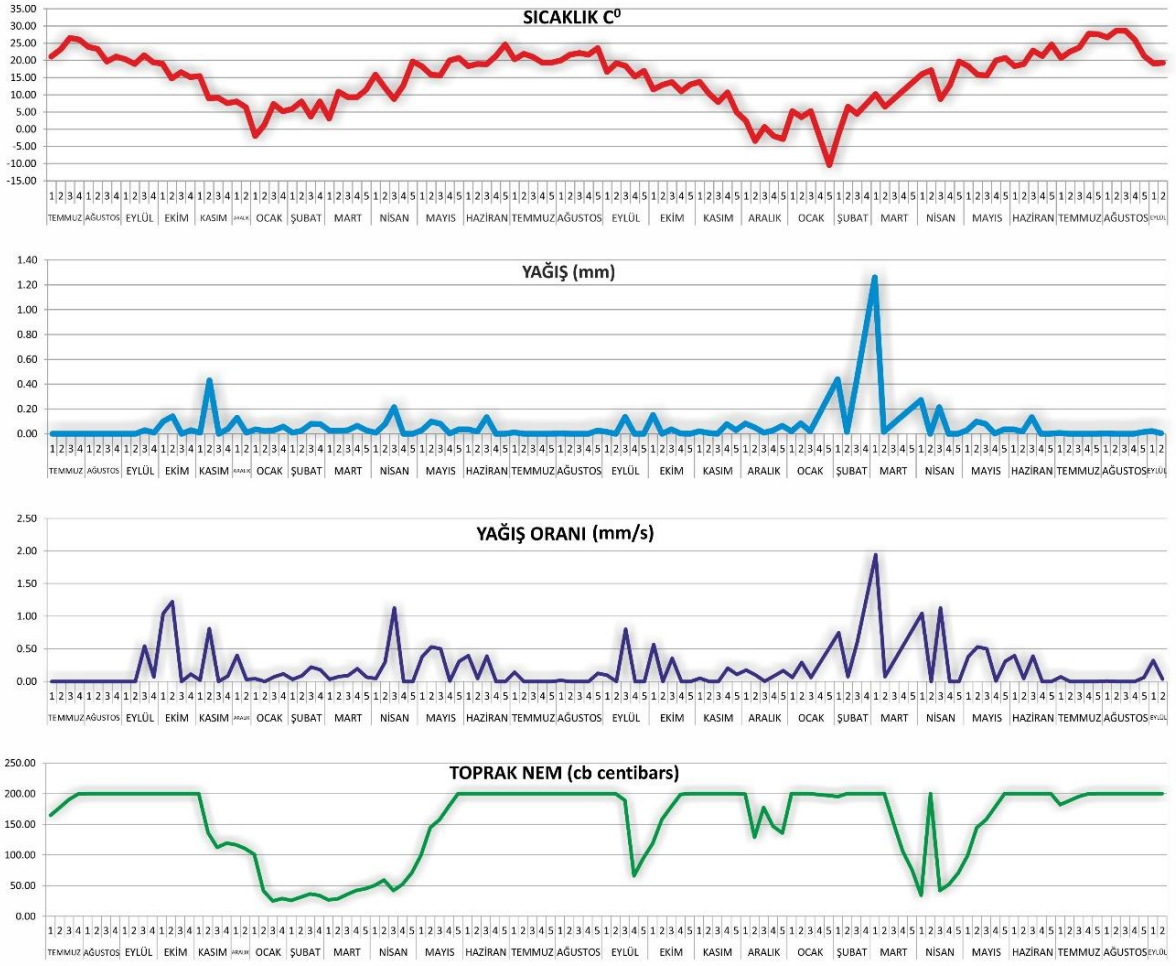
2.1 Meteorolojik Özellikler

Çalışma alanında, suyun temel kaynağı yağmur suları olup, bu sular hidrolojik çevrimin en önemli bileşenidir. Yağışlar her mevsime dağılmakla beraber, en fazla yağış Mayıs ayında olup 64 mm'dir. En düşük yıllık ortalama yağış değeri 1962 yılında 265.9 mm ve en yüksek değer olan 575.1 mm ise 1983 yılında kaydedilmiş olup. Koyulhisar ve Susehri Meteoroloji istasyonlarından alınan 37 yıllık ortalama yağış 394.6 mm'dir. (Sendir ve Yılmaz, 2001).

Bölgede daha önce gerçekleşen iki heyelanda ağır geçen kış aylarından sonra gerçekleşmiştir. Bölgede heyelanları tetikleyen en önemli sebeplerden birisi kış aylarından sonra eriyen kar sularının yeraltı su seviyesinde oluşturduğu artış olarak gösterilmektedir. Bu yüzden bölgedeki sıcaklık ve yağış miktarları ile yeraltı su seviyesi değişimi arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek amacı ile çalışma sahasına bir adet meteoroloji istasyonu tesisisi gerçekleştirilmiştir. Bu istasyon sayesinde sıcaklık, yağış miktarları ile toprak nem oranı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Meteoroloji istasyonu Emniyet Müdürlüğü Bahçesine yerleştirilmiş olup, Şekil 2.2' de bu istasyona ait fotoğraf bulunmaktadır. Bu istasyondan elde edilen sıcaklık, yağış miktarı ve toprak nemlilik değerleri Şekil 2.3 de verilmektedir.



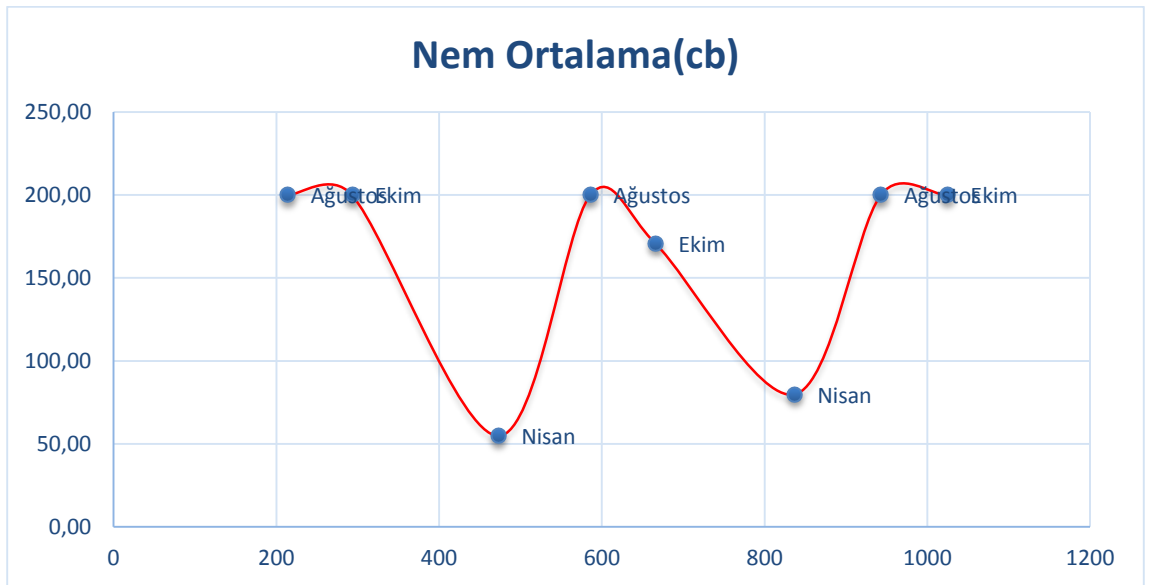
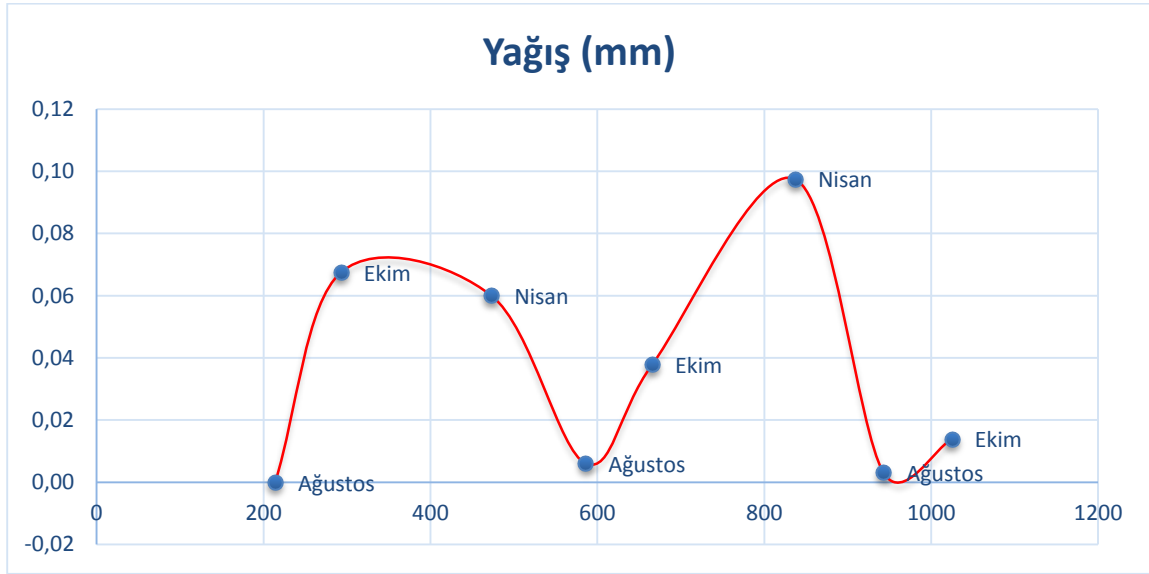
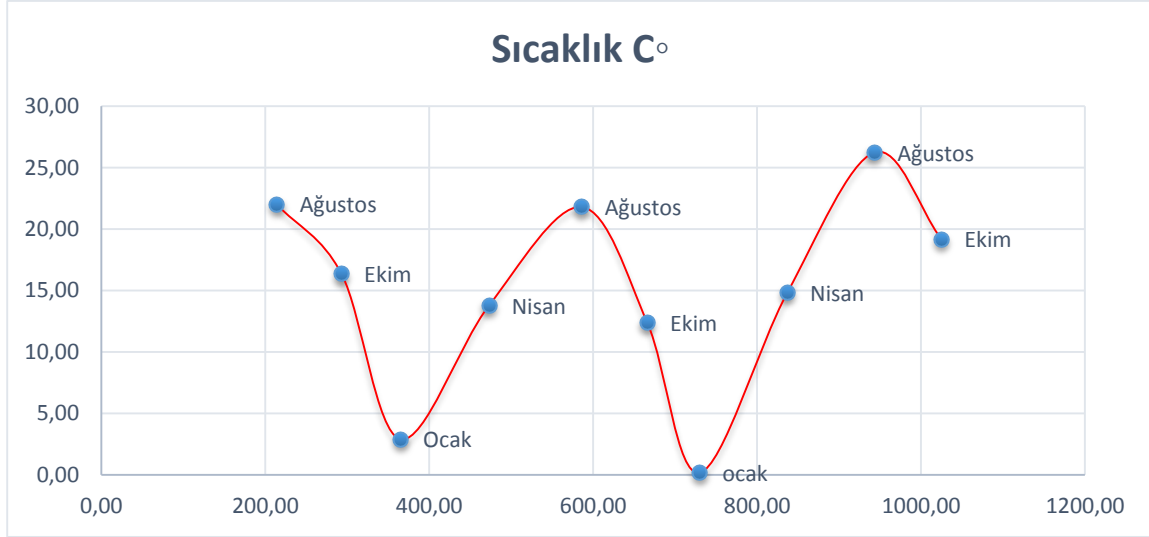
Şekil 2.2. Çalışma sahasına tesis edilen meteoroloji istasyonu (06.06.2012 E: 40.302123, B: 37.823654)



Şekil 2.3. Meteoroloji istasyonundan toplanan günlük veriler

Şekil 2.4' de meteoroloji istasyonunun dan elde edilen günlük verilerden ortalamalarından hesaplanan GNSS ölçü periyotlarına ait meteoroloji bilgileri sunulmaktadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4' deki meteorolojik veriler incelendiğinde sıcaklıkların Nisan-Mayıs aylarında artışa geçtiğini ağustos'ta maksimum değere ulaştığını ve yine Ekim-Kasım ayında inişe geçtiği gözlenmektedir. Yağış miktarlarının ise Nisan-Mayıs ayları arasında maksimum ağustos'ta minimum ve Ekim-Kasım ayları arasında tekrar artışı görülmektedir. Toprak nemlilik değerlerinde ise Nisan aylarında toprak nemlilik değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Yaz aylarında ise toprak nemlilik değerinin neredeyse hiç yok denecek seviyede olduğu gözlenmektedir. Ekim aylarında ise yağışın artmasıyla bu değerin bir nebze de olsa artışı gözlenmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere toprak nemlilik seviyesini yağıştan ziyade eriyen kar sularının artırdığı açıkça gözlenmektedir.

Çalışma alanında meydana gelen heyelanların incelenmesi sonucunda yağışlar ve bitki örtüsünün de büyük ölçüde rol oynadığı görülmüştür. Özellikle 1998 ve 2000 yılı heyelanlarından önce gerçekleşmiş olan bol yağışlı kış ve ilkbahar mevsimlerinin etkisi ile kırık ve çatlakların su ile dolması sonucunda, hem buralarda yaygın kil dolgunun dayanımını düşürmüştür, hem de buralarda kayma düzlemelerinde hareketin oluşmasına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, kayaların üzerinde bulunan kalın toprak örtüsünün birim hacim ağırlığının artmasına da katkıda bulunarak şevlerde ek yükleri arttırmıştır. Çalışma alanındaki şevler üzerinde bulunan sık ormanlık özelliği, yağışlı sezonda ve karların erimesi sırasında suyun şev aşağı akışını yavaşlatmış ve suyun toprak malzemenin içerisine doğru sızmasını kolaylaştırmıştır. Böylece yamaçta kaymayı oluşturan kuvvetler artmıştır (Sendir H. ve Yılmaz I. , 2002).

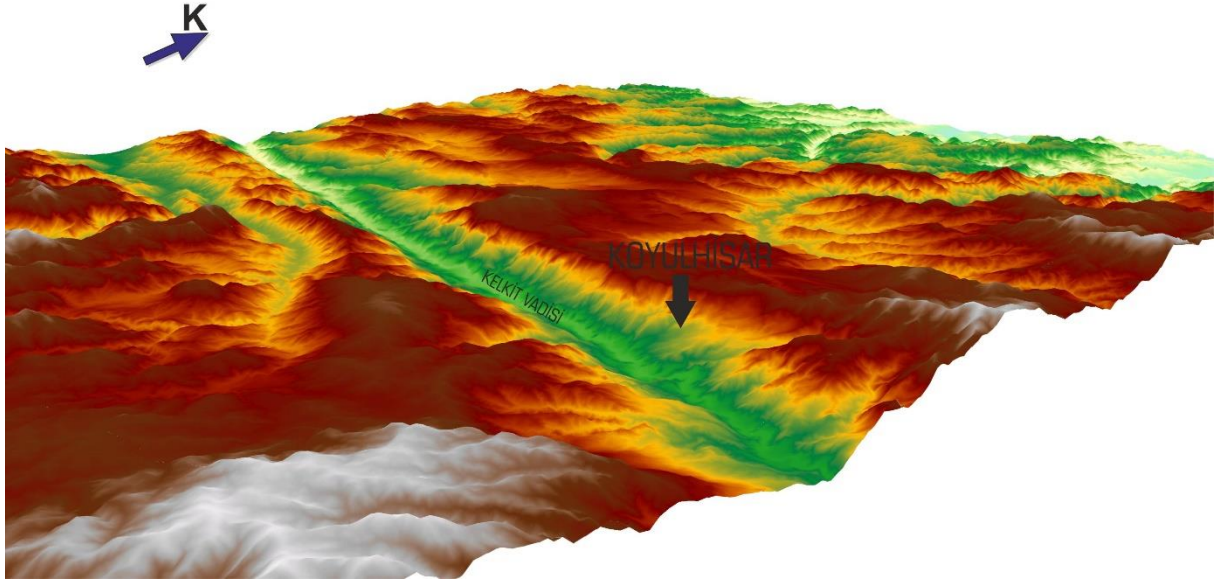


Şekil 2.4. GNSS ölçü günlerinde ortalama, sıcaklık, yağış miktarı ve toprak nemlilik değerleri

2.2 Jeomorfolojik Özellikler

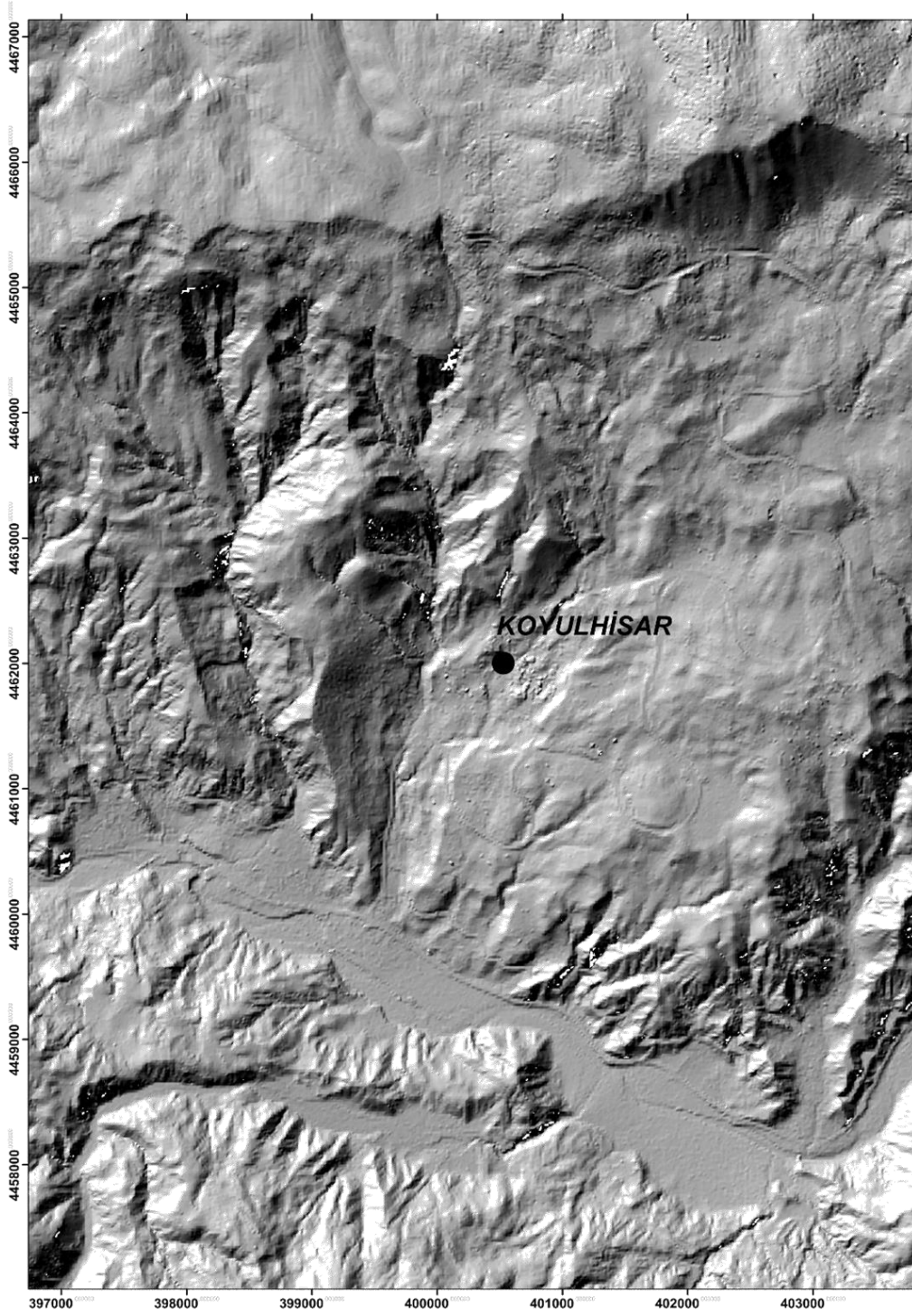
Koyulhisar ilçe merkezi, ülkemizin en önemli sismik kuşaklarından birisi olan Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer almaktadır. Bölgede yer alan kayaların gerek litolojik özelliklerinden ve gerekse yoğun aktif faylanmaya bağlı olarak şekillenen morfolojiden dolayı heyelanlar da büyük risk oluşturmaktadır. Bu amaçla bölgede değişik zamanlarda çeşitli bilimsel ve teknik amaçlı çalışma ve gözlemler yapılmıştır.

Çalışma bölgesi genel olarak incelendiğinde yaklaşık doğu-batı doğrultulu Kelkit vadisi içerisinde eğimin çok fazla olduğu gözlemlenmektedir.

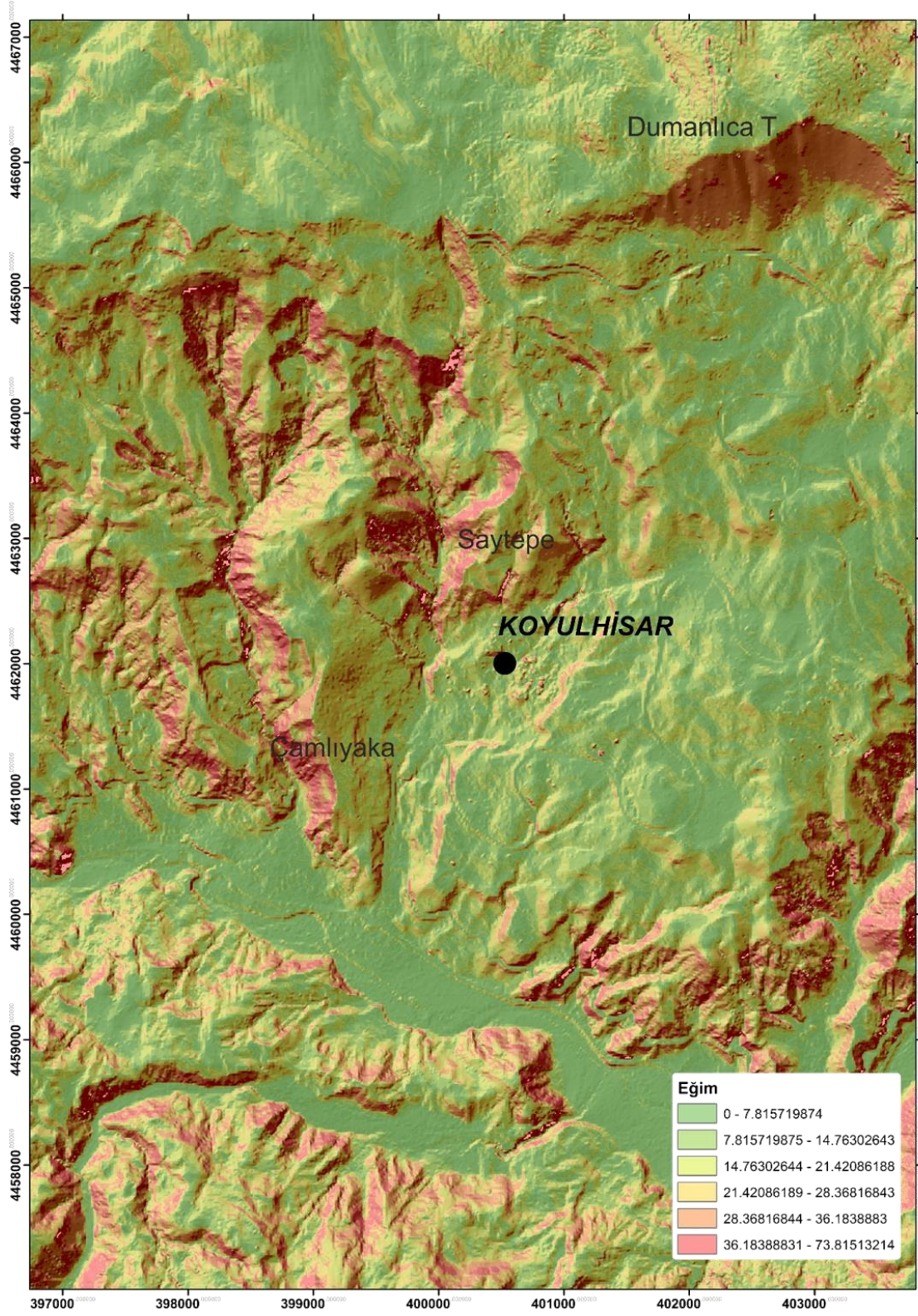


Şekil 2.5. Çalışma bölgesinin Sayısal Yükseklik Modeli (SYM) üzerinde gösterimi

Çalışma alanı içinde gelişen birçok heyelan bilinmektedir. Bu heyelanların oluşmasında ki birinci etken bilindiği üzere eğimdir. Çalışma bölgesinin hemen güneyinde Kelkit vadisi içinde gelişen Kelkit çayı civarında ortalama yükseklik 600 m, ilçe merkezinin kuzeyinde bulunan dumanlıca tepesinde 1800 m civarındadır. Yaklaşık 5 kmlik hat boyunca yükseklik farkının 1200 m olduğu görülmektedir. Bu yükseklik farkından dolayı eğim yer yer 70° ye çıkmaktadır. Eğimin fazla olması heyelan riskini arttırmaktadır.



Şekil 2.6. Çalışma alanına ait SYM verisiyle üretilen kabartma haritası



Şekil 2.7. Çalışma alanına ait eğim haritası

2.3 Stratigrafik Özellikler

Çalışma bölgesinde yüzeyleyen kaya birimleri yaşlıdan gence doğru, Orta-Üst Maestrihtiyen yaşlı Aşağıkale, Üst Maestrihtiyen yaşlı İğdir, Daniyen yaşlı Şıhlar, Orta-Üst Paleosen yaşlı Düdenyaylası, Pliyosen yaşlı Dumanlıca (Erdembaba) ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı Koyulhisar Formasyonlarından oluşmaktadır. Aşağıkale, İğdir, Şıhlar ve Düdenyaylası formasyonları geç Kretase-Paleosen sırasında, volkanik yay tipi bir ortamda çökelmiş, üste doğru tane boyu artan kalın bir istif oluşturur. Dumanlıca ve Koyulhisar formasyonları ise neotektonik dönemin ürünüdür (Toprak 1988).

Aşağıkale Formasyonu :

Orta-Üst Maestrihtiyen yaşlı Aşağıkale Formasyonu Toprak (1988) tarafından tanımlanmıştır. Birim alt seviyelerinde aglomera, bazaltik lav akıntılarının ardalanması ile başlar ve aglomera, tuf ardalanması ile devam eder, üst kesimlerinde ise aglomera kumtaşı ardalanması ve bazaltik lav akıntılarından oluşur. Aşağıkale formasyonu, İğdir formasyonu tarafından üzerlenmektedir. Aşağıkale Formasyonu, Koyulhisar ilçe merkezinin güneydoğusunda Yukarıkale köyü civarında ve ilçe merkezi güneybatısında yer alan Aşağıkale köyü civarında gözlemlenmektedir.



Şekil 2.8. Yukarıkale Köyü civarında yüzeyleyen Aşağıkale formasyonuna ait görünüm (08.07.2013 E: 40.297200, B: 37.863759)

İğdir Formasyonu :

Üst Maestrihtiyen yaşlı İğdir Formasyonu ilk kez Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından tanımlanmıştır. Birim kırmızı şeyl ve marnlarla başlar, üste doğru silt ve şeyl arakatkılı kumlu ve fosilli kireçtaşlarıyla devam eder ve üst kesimlerinde ise beyaz-sarı renkli orta tabakalı kumlu ve fosilli kireçtaşları ile tamamlanır. Birim Şıhlar Formasyonu tarafından üzerlenir. İğdir Formasyonu, Koyulhisar ilçe merkezi kuzeybatısında yer alan Subaşı mahallesi , Eğriçimen yaylası civarında ve ayrıca ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan İkizyaka köyü civarında gözlemlenmektedir.



Şekil 2.9. Eğriçimen yaylası civarı yüzeyleyen İğdir Formasyonundan görünüm (03.07.2013 E: 40.341046, B: 37.807076)

Şıhlar Formasyonu :

Daniyen yaşlı Şıhlar Formasyonu Toprak (1988) tarafından tanımlanmıştır. Birim marn, çamurtaşı arakatkılı, orta tabakalı jips ve kumlu kireçtaşı ardalanması ile başlar. Jips arakatkılı kumtaşı-silttaşı ve polijenik konglomeralarla devam eder ve kumtaşı-konglomera ardalanması ile tamamlanır. Düdenyaylası formasyonu Şıhlar formasyonunu üzerlemektedir. Şıhlar Formasyonu, Koyulhisar ilçe merkezi güneybatısında yer alan şıhlar mahallesi kuzeyinde küçük yüzlekler şeklinde gözlemlenmektedir.



Şekil 2.10. Şihlar Mahallesi kuzeyinde yüzeyleyen Şihlar Formasyonuna ait görünüm (04.07.2013 E: 40.288780, B: 37.812436)

Düdenyaylası Formasyonu :

Orta-üst Paleosen yaşlı Düdenyaylası Formasyonu Toprak (1988) tarafından tanımlanmıştır. Birim altta sarı renkli orta tabakalı kumlu kireçtaşı ile başlar ve gri renkli marn, siltli-kireçtaşı, silttaşı şeklinde ardalanmalı olarak devam eder (Toprak 1988). Düdenyaylası Formasyonu, Koyulhisar ilçe merkezinin kuzeyinden başlayıp güneyine kadar devam eden tepe ve sırtlar şeklinde gözlemlenmektedir.



Şekil 2.11. a) Çamlıyaka mahallesi ve b) Saytepe civarında yüzeyleyen Düdenyaylası Formasyonundan görünüm (Foto a : 03.07.2013 E: 40.287993, B: 37.818257, Foto b : 23.04.2014 E: 40.317103, B: 37.830662)

Dumanlıca (Erdembaba) Formasyonu :

Pliyosen yaşlı Dumanlıca (Erdembaba) Formasyonu ilk kez Terlemez ve Yılmaz (1980) tarafından adlandırılmıştır. Birim andezitik-bazaltik karakterli volkaniklerden oluşmaktadır. Bu volkanik kayaların jeokimyasında, kıtasal kabuğun anateksisi sonucunda meydana gelen kalkalkalin karakterli asidik bir magmanın ürünü olduğu görülmektedir (Terzioğlu 1986). Dumanlıca Formasyonu, Koyulhisar ilçe merkezinin kuzeyinde bulunan Dumanlıca tepesi ve civarında gözlemlenmektedir.



Şekil 2.12. Dumanlıca Tepesi üzerinde yüzeyleyen Dumanlıca Formasyonundan görünüm (22.04.2014 E: 40.342094, B: 37.856984)

Koyulhisar Formasyonu :

Pliyo-Kuvaterner yaşlı Koyulhisar Formasyonu bölgedeki en genç birimi oluşturmaktadır. Birim oldukça gevşek dokulu aglomera-tüf ve gri-yeşil renkli, breşik görünümlü andezitik lav akıntıları ve konglomeralardan oluşmaktadır. Koyulhisar Formasyonu olarak tanımlanan bu birim, Koyulhisar ilçe merkezini ve çevresini kapsamaktadır.



Şekil 2.13. Koyulhisar- Mesudiye karayolu civarı yol yarmasında yüzeyleyen Koyulhisar Formasyonuna ait görünüm (24.04.2014 E: 40.293842, B: 37.824685)



Şekil 2.14. Koyulhisar Formasyonuna ait genel görünüm (24.04.2014 E: 40.325784, B: 37.832827)

Alüvyon :

Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Kelkit Çayı boyunca fay denetimli taraça çakılları, Kuvaterner yaşlı alüvyon yelpaze çökelleri ve alüvyon dolguları şeklinde gelişen birim, çakıl, kum ve siltlerden oluşmaktadır (Uysal ve diğ. 1995).



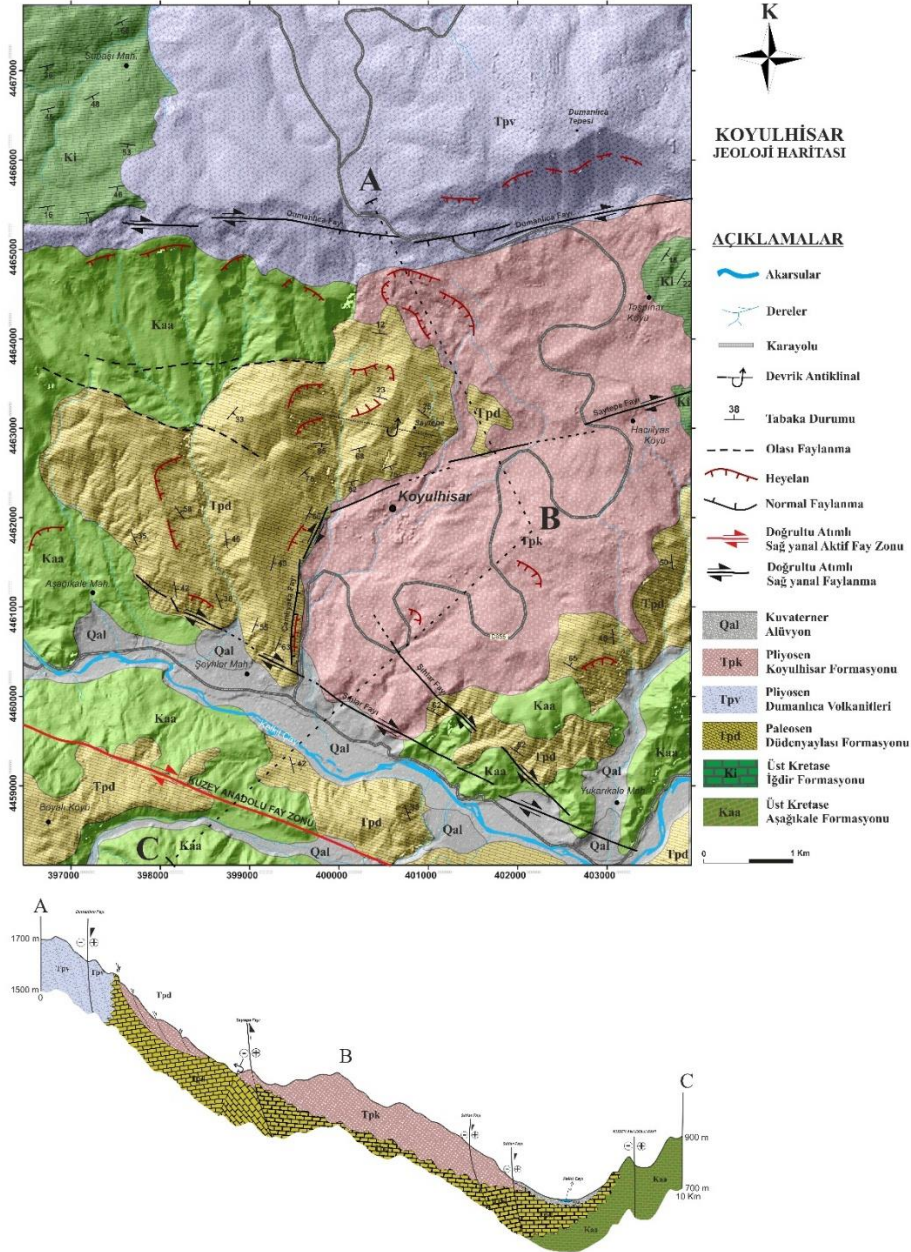
Şekil 2.15. Alıvyon Formasyona ait genel görünüm (05.07.2013 E: 40.286484, B: 37.796060)

2.4 Litolojik Özellikler

Çalışma alanı ve yakın çevresinde bulunan jeolojik birimler, saha çalışmaları sonucu detaylı olarak haritalandırılmıştır ve Şekil2.16' da sunulmuştur. İnceleme alanı içerisinde Koyulhisar

formasyonu olarak tanımlanan Pliyo-Kuvaterner yaşlı, gevşek dokulu aglomera-tüf ve gri-yeşil renkli, breşik görünümlü andezitik lav akıntıları ve konglomeralar bulunmaktadır.

GNSS ölçümleri için tesis edilen 52 adet poligon noktasından “OH04, OH20, OH24, OH27 ve OH29” Düdenyaylası Formasyonu olarak adlandırılan birim üzerindedir. Diğer poligon noktaları ise Koyulhisar Formasyonu üzerindedir. Jeolojik harita ve seçilen kesit alanına ait litoloji jeolojik kesit üzerinde Şekil 2.16’ da görülmektedir.



Şekil 2.16. Çalışma alanına ait Jeoloji haritası ve kesiti

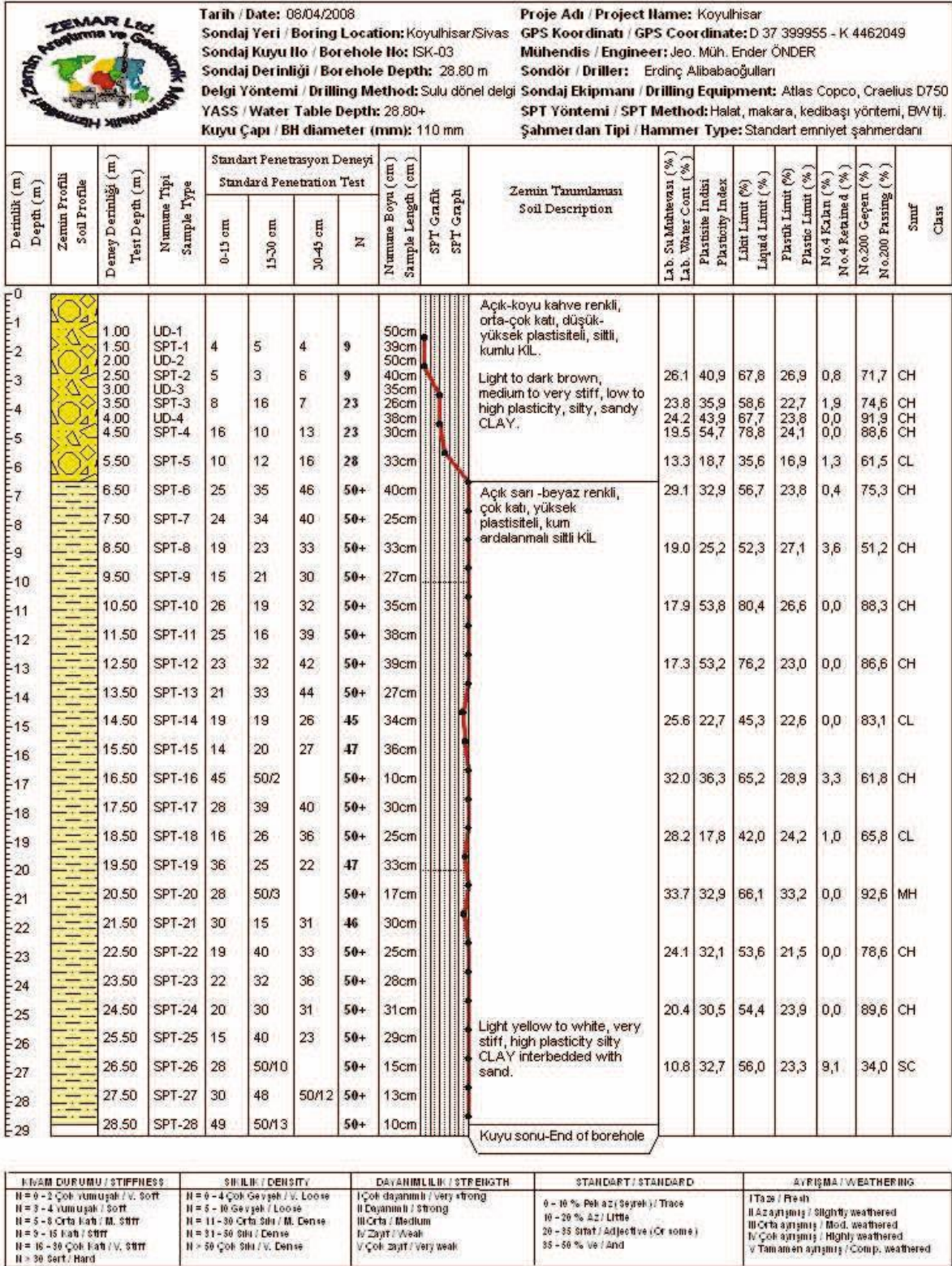
Çalışma alanı içerisinde daha önce yapılan çalışmalarda açılan 22 adet sondaj noktası bulunmaktadır. Bu noktalarda açılan sondajlar sonucu elde edilen sondaj logları Koyulhisar ilçe merkezine ait zeminin litolojik özellikleri hakkında detaylı bilgiler vermektedir.

Tablo 2.1. İlçe merkezinde açılan sondajların konum bilgileri ve kesilen birimlerin derinlikleri

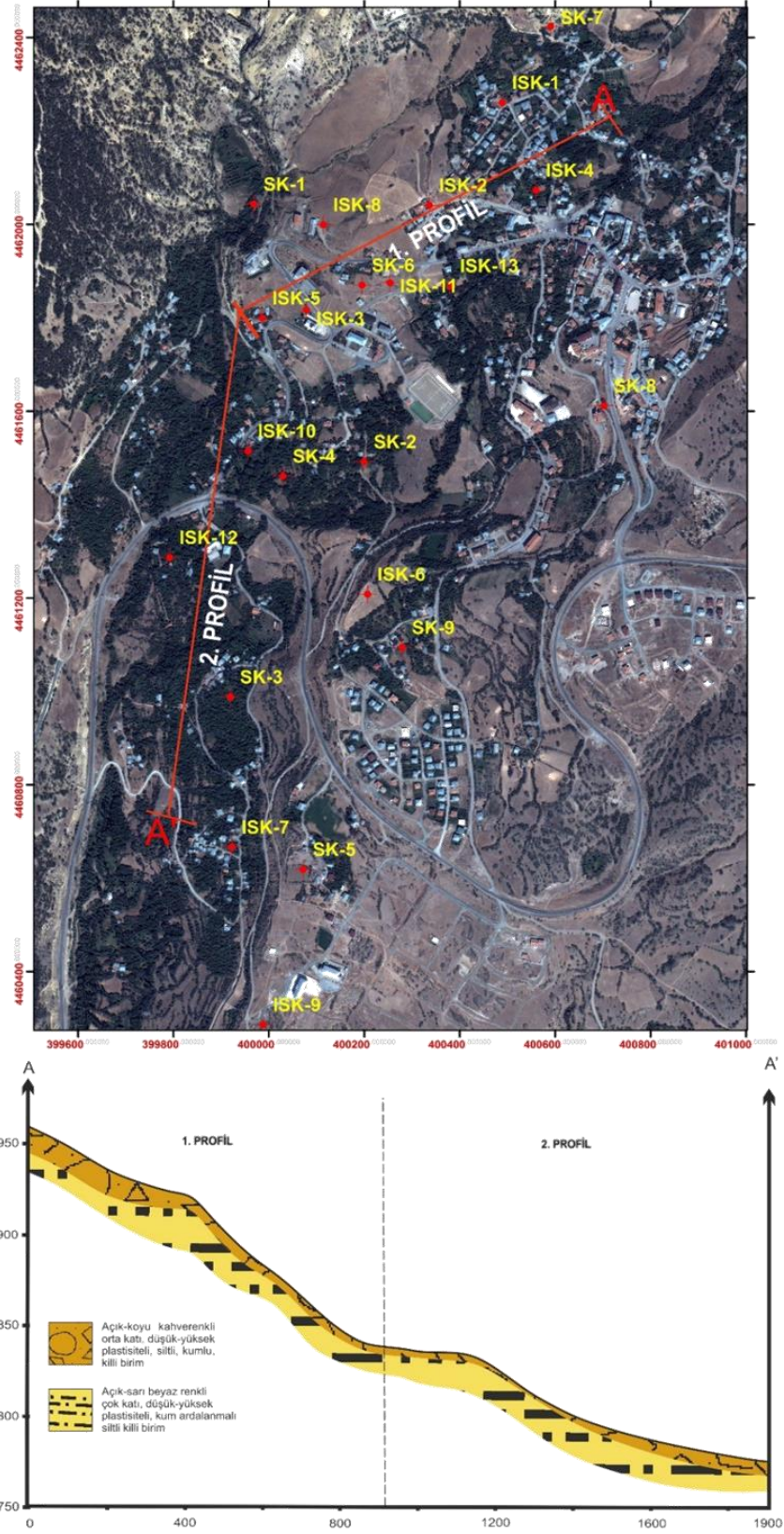
Sondaj Noktası	Enlem	Boylam	Yükseklik	1. birim (m)	2. birim (m)
SK-1	40.30291	37.82291	840	4.5	13.5
SK-2	40.29797	37.82571	832.35	0	15
SK-3	40.29341	37.8225	790.025	10.6	13.45
SK-4	40.29767	37.82372	816.265	0	18
SK-5	40.29009	37.82435	817.501	0	15
SK-6	40.30138	37.82561	869.509	0	12.05
SK-7	40.30641	37.83017	983.867	12	10.5
SK-8	40.29911	37.83161	915.531	9	11.4
SK-9	40.2944	37.82672	860.135	0	10.1
ISK-1	40.30493	37.82901	950.002	14.5	6
ISK-2	40.30294	37.82724	924.031	7.5	22.7
ISK-3	40.30089	37.82425	855.905	6.5	22.3
ISK-4	40.30325	37.82987	927.332	14	13.5
ISK-5	40.30072	37.82316	843.573	4.5	9.5
ISK-6	40.29542	37.82585	855.8	3.5	6.1
ISK-7	40.29051	37.82259	777.016	3.7	5.9
ISK-8	40.30253	37.82464	888.918	9.6	9.2
ISK-9	40.28709	37.82342	790.002	5.5	4
ISK-10	40.29815	37.82285	840.823	3.5	17.5
ISK-11	40.30143	37.8263	875.451	9.5	21
ISK-12	40.29608	37.82096	789.844	3	20
ISK-13	40.30139	37.82778	882.813	7.6	33.9

Sondaj logları incelendiğinde ilçe merkezinde iki farklı birim gözlenmektedir. Tablo 2.1’ de sondaj noktaları ve birimlerin kaçınıcı metrede kesildiği görülmektedir. Gözlemlenen birinci birim açık-koyu kahverenkli, orta-katı düşük-yüksek plastisiteli , siltli, kumlu ve killi birimden oluşmaktadır. İkinci birim ise açık-sarı beyaz renkli, düşük yüksek plastisiteli, kum ar dalanmalı siltli killi birim olduğu görülmüştür.

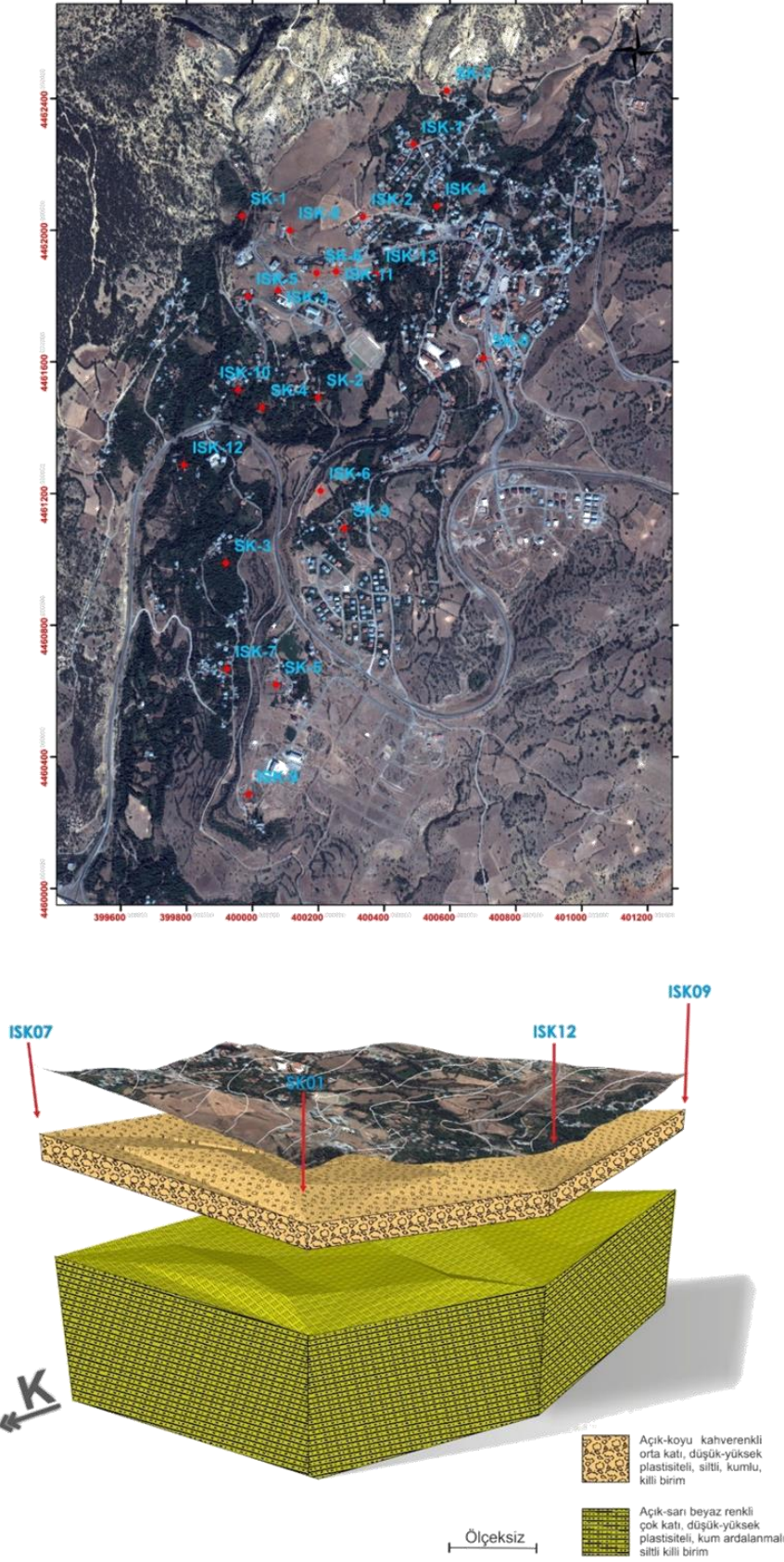
22 noktaya ait sondaj verileri değerlendirildiğinde ArcGIS yazılımı yardımı ile kriging enterpolasyon yöntemi kullanılarak noktalara ait yüzey oluşturulmuştur. Her sondaj noktasına ait yükseklik ve sondaj derinlikleri verisi kullanılarak iki adet ayrı kota sahip yüzey oluşturulmuştur. Enterpolasyon sonucu sondaj noktası olmayan yerlerdeki yaklaşık birimlerin kalınlıkları elde edilmiş ve bir kesit boyunca Şekil2.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Kullanılan sondaj loguna ait örnek görünüm (Hatiboğlu O., 2009).



Şekil 2.18. Sondaj noktalarının uydu görüntüsü üzerinde gösterimi ve birimlerin kesit görünümü



Şekil 2.19. Sondaj verileri yardımıyla elde edilen yüzeylerin gösterildiği üçboyutlu model

2.5 Yapısal Jeoloji

Çalışma alanı Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer almaktadır. Kuzey Anadolu Fay Zonu bölgede 6-8 km. genişliğinde ve 32 km. uzunluğunda doğrultu atımlı sağ yanal bir fay kuşağıyla temsil edilir. Bölgedeki bu kuşak Toprak (1988) tarafından Kuzey Anadolu Ana Fayı, Koyulhisar fay takımı, Kelkit fay takımı, Şihlar fay takımı, ve Kuruçay fay takımı olmak üzere beş fay takımına ayrılmıştır. Ancak güncel saha incelemeleri sonucu Koyulhisar ilçe merkezi ve çevresinde bulunan Şihlar fay takımı, Çamlıyaka fayı, Saytepe fayı ve bölgenin kuzeyinde Dumanlıca fayları bulunmaktadır.

Gerek morfotektonik yapılar ve gerekse sismik etkinlik, Kuzey Anadolu Fay Zonunun Koyulhisar kesiminin halen aktif ve sağ-yanal doğrultu atımlı bir fay zonu olduğunu kuvvetle belirtmektedir. Kuzey Anadolu Fay Zonunun bu segmenti üzerinde, Kuvaterner dönemde gelişmiş 3.6 km'lik sağ-yanal bir ötelenme ölçülmüştür (Toprak 1988).

Bölgenin aktif bir fay zonu üzerinde olması jeolojik birimler üzerindeki süreksizliklerin kaynağını net bir şekilde açıklamaktadır.

2.5.1 Çalışma bölgesinde yeralan süreksizlik yapıları (Eklem, Kırık ve Çatlaklar)

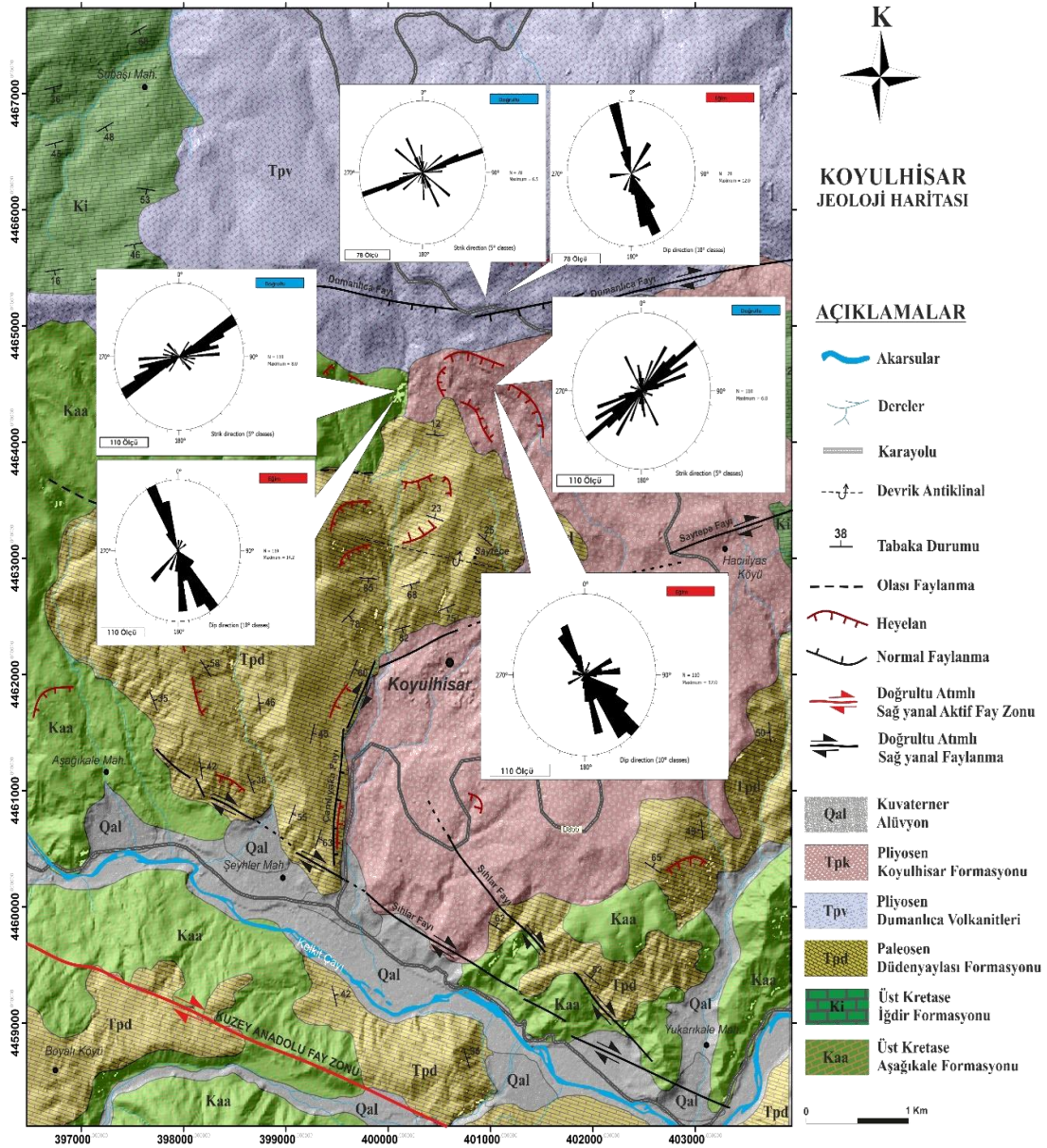
Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun değişik kesimlerinde zonun aktif tektoniği, jeomorfolojik ve sismik özellikleri konusunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Aynı şekilde Kelkit vadisini de içerisine alan KAFZ'nun doğu kesiminde yapılan birçok jeolojik amaçlı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar değişik lisansüstü çalışma ya da bireysel projeler şeklinde yapılmıştır. Heyelanlı bölgelerde, birimler içerisinde gelişmiş kırık ve çatlakların durumu ve özellikleri önemli bir unsurdur.

Yüzey sularının sızmasına olanak sağlayan bu kırık ve çatlaklar arazide ölçülmüş, değerlendirilmiş ve kırık-çatlak analizi yapılmıştır. Mühendislik uygulamalarında süreksizlik yönelimi eğim miktarı ve eğim yönleri ile ifade edilir. Süreksizliklerin durumları kaya kütlelerini parçalara ayıran blokları belirleyecektir. Ayrıca süreksizliğin devamlılığı, bir düzlem içerisindeki süreksizliğin boyutunun veya alansal yayılımının kabaca ölçüsüdür. Süreksizliğin devamlılığı makaslama dayanımını, kayaların parçalanma özelliklerini, göçebilirlik ve geçirgenlik özelliklerini etkiler. Süreksizliğin açıklığı şev stabilite sorunları açısından büyük önem taşımaktadır. Eklemlerin açıklığı yeraltı suyunun dolaşımı ve dolgu malzemesi açısından önemlidir.

KAFZ içerisinde yeralan birincil faylar genelde $K60^{\circ}$ - 70° B, Koyulhisar civarında ise yaklaşık D-B gidişlidir. Sintetik faylar ana fay ile 20° - 40° arasında değişen açılar yapmakta, antitetik faylar

ise KKD-GGB doğrultusunda gelişmektedir. Buna göre fayların oluşumuna yol açan en büyük sıkışma gerilmesi K20°B-G20°D doğrultusundadır (Toprak 1988).

Çalışma alanında toplam 380 adet kırık ve çatlak ölçümü yapılmıştır. Eklem ölçümlerinin analizi sonucunda egemen eklem takımları Dumanlıca Formasyonu'nda K60°D 65°GD, K25°B 85°KD, K40°B 82°GB Koyulhisar Formasyonu'nda K50°D 80°GD, K60°B 85°GB, K10°D 72°GD Aşağıkale Formasyonu'nda K65°D,70°GD, K23°B 75°KD şeklinde belirlenmiştir. (Şekil 2.20)



Şekil 2.20. Heyelan bölgesi yakın çevresinde yapılan eklem ölçümlerinin gül diyagramı şeklinde gösterimi

Birimler içerisinde gelişmiş olan eklemlerin genel dağılımlarını görmek ve sıkışma yönüne göre yorum yapabilmek için tüm ölçümler esas alınarak jenetik ve kökensel sınıflamalar yapılmıştır. Bu sınıflamalar sonucunda Dumanlıca Formasyonu'nda iki yönde gelişmiş makaslama ve tansiyon eklemleri, Aşağıkale Formasyonu'nda tansiyon ve genişleme eklemleri, Koyulhisar Formasyonu'nda ise iki yönde gelişmiş makaslama ve genişleme eklemleri belirlenmiştir (Tablo 2.2). Bu eklemlerin doğrultuları ve eğim yönleri dikkate alındığında eklemler, heyelanın hareketini sağlayan yüzey sularının birimler içerisinde hareketini kolaylaştıracak şekildedir.

Tablo 2.2. Çalışma alanındaki birimlere ait eklemlerin jenetik ve kökensel sınıflamaları (Sendir, H. 2001.'den düzenlenmiştir).

Birim Adı	Egemen Eklem Durumları	Jenetik ve Kökensel Sınıflama
Dumanlıca Formasyonu	K60°D 65°GD	Makaslama
	K25°B 85°KD	Tansiyon
	K40°B 82°GB	Makaslama
Aşağıkale Formasyonu	K65°D, 70°GD	Tansiyon
	K23°B 75°KD	Genişleme
Koyulhisar Formasyonu	K50°D 80°GD	Genişleme
	K60°B 85°GB	Makaslama
	K10°D 72°GD	Makaslama

Bölgedeki eklemlerin mühendislik jeolojisi açısından süreksizlik özellikleri çalışılmıştır. Aralık, eklem sıklığı, açıklık, pürüzlülük, dalgalılık, dolgu malzemesi ve devamlılık özellikleri Tablo 2.3' de verilmiştir.

Tablo 2.3. Bölgedeki eklemlerin mühendislik jeolojisi açısından süreksizlik özelliklerinin sınıflamaları (Sendir, H. 2001.'den düzenlenmiştir).

Süreksizlik Özellik Formasyon Adı	Aralık (ISRM 1978)	Eklem Sıklığı (ISRM 1978)	Açıklık (Anon 1977)	Pürüzlülük (ISRM 1978)	Dalgallılık (ISRM 1978)	Dolgu Malzemesi	Devamlılık (ISRM 1978)
Dumanlıca Formasyonu	<i>Yakın Aralıklı</i> (60-200mm)	<i>Kırıklı</i> (3-10)	<i>Orta geniş</i> (60-200mm)	<i>Pürüzlü</i> (3)	<i>Az dalgallı</i> (2)	<i>Kum</i> <i>Silt</i> <i>Kalsit</i>	<i>Düşük Devamlılık</i> (1-3)
Koyulhisar Formasyonu	<i>Geniş Aralıklı</i> (600-2000mm)	<i>Az Çatlaklı-Kırıklı</i> (1-3)	<i>Orta-Geniş</i> (60-200mm) <i>Orta-Dar</i> (20-60mm)	<i>Pürüzlü</i> (3)	<i>Az dalgallı</i> (2)	<i>Kum</i> <i>Silt</i> <i>Kalsit</i>	<i>Orta Devamlılık</i> (3-10)
Aşağıkale Formasyonu	<i>Çok Yakın Aralıklı</i> (20-60mm)	<i>Çok Çatlaklı-Kırıklı</i> (10-50)	<i>Orta-Geniş</i> (60-200mm)	<i>Pürüzlü</i> (3)	<i>Az dalgallı</i> (2)	<i>Kum</i> <i>Silt</i> <i>Kalsit</i>	<i>Çok Düşük Devamlılık</i> (<1)

2.5.2 Çalışma Bölgesinde Yer Alan Fay Toplulukları Ve Kinematik Analizi

Çalışma alanı saha incelemeleri sonucu Koyulhisar ilçe merkezi ve çevresinde bulunan Şıhlar fay takımı, Çamlıyaka fayı, Saytepe fayı ve bölgenin kuzeyinde Dumanlıca fayları bulunmaktadır. Bu fay takımları içerisinde değerlendirilen ve Koyulhisar ilçe merkezini yakından ilgilendiren faylar şunlardır.

Kuzey Anadolu Fayı Ana kolu: Bölgede Aşağıkale köyünün yaklaşık 1 km. güneyinden Kelkit Irmağının güney yatağını takip ederek, yaklaşık 110-115 derece doğrultusunda Ağilyazı köyünün hemen güneyinden doğuya doğru devam etmektedir

Şıhlar Fay Takımı: Şıhlar fayı doğuda Ağilyazı köyünün yaklaşık 1-1.5 km. batısında ana fayın kolu olarak ayrılmıştır. Batıya doğru ana faya paralel olarak hareket etmiş ve Yukarıkale ve Aşağıkale köyleri arasında kollara ayrılmıştır. Şıhlar fayı alüvyal fanları, basamaklı fay skarplarını ve fay kontrollü ırmak çökellerini ötelemiştir. Bu öteleme olayları Şıhlar fayının aktif olduğunu göstermektedir.

Saytepe Fayı: Koyulhisar ilçe merkezinin hemen kuzeyinde bulunan Saytepenin yaklaşık 1-1.5 km. batısından başlayarak D-B doğrultuda doğuya doğru devam eden fay, Kayaören köyünün kuzeybatısında iki kola ayrılmaktadır. Fay Şıhlar, Düdenyaylası, Koyulhisar ve İğdir formasyonlarını kesmektedir.

Çamlıyaka Fayı: Çamlıyaka köyünün doğusunda yer alan fay Koyulhisar çöküntüsünün batı kenarını oluşturmaktadır. Çamlıyaka fayı yaklaşık 4 km. uzunluğunda, kuzeydoğu-güneybatı doğrultulu sağ-yanal ve normal bileşene sahip bölgedeki diğer faylara antitetik olarak gelişmiştir.

Dumanlıca Fayı: Koyulhisar ilçe merkezinin kuzeyinde ve yaklaşık 3 km uzaklıkta olup, Dumanlıca tepesi güneyinde yer alan bu fay, yaklaşık D-B yönlüdür ve doğrultu atımlı sağ-yanal bileşene sahiptir. Fayın bazı bölgelerinde normal bileşenlere rastlanmıştır.

Bölgedeki bu faylar, bölgenin litolojisi göz önüne alındığında meydana gelen heyelanları tetikler niteliktedir. Özellikle Koyulhisar formasyonu içerisinde yer alan talus ve fay terası çökelleri bu aktif faylar sayesinde hareketlilik kazanmakta ve suya doyan zeminde hareketlenerek heyelanları oluşturmaktadır (Tatar v.d 2000).

2.5.2.1 Fay Topluluklarının Kinematik Analizi

Tektonik deformasyonun geliştiği birçok bölgede, bu deformasyonun ürünü olan kırık sistemleri de iyi gelişmiş olarak gözlenebilmektedir. Bununla birlikte kaya türü ve mostra koşulları uygun olduğu takdirde hareketin özelliklerini yansıtan veriler fay düzlemi üzerinde korunabilmektedir. Bu tür verilerin saha içerisinde bir çok farklı lokasyonda ölçülmesiyle, hem fay sistemlerinin geometrisi ortaya konmakta, hem de geniş bir alanda deformasyonun ana karakterleri belirlenebilmektedir. Bu veriler, üst kırılğan kabukta tektonik fazlar sırasındaki gerilme durumuyla yapısal deformasyon ilişkisini de ortaya koyabilmektedir (Carey-Guailhardis ve Mercier, 1987).

Farklı tektonik fazların ayırt edilmesinde kırıkların geometrik ilişkileri (ara kesitler) ile aynı fay düzlemi üzerinde gelişen ve birbirini üzerleyen kayma çizgilerinin kullanılması olanaklıdır (Vergely ve diğ., 1987; Carey-Guailhardis ve Mercier, 1987).

Bir faya ait mostranın gözleendiği yerde, fayın doğrultu ve eğimi, kayma vektörü (pitch: yatım değeri), fayın hareket yönü ile fayın türü belirlenebilir. Özellikle fayın hareket yönünün belirlenebilmesi kinematik analiz açısından büyük önem taşımaktadır. Bunlar, kırıkların

oluşturdukları fay takımlarının geometrik ve kinematik karakterlerinin belirlenmesi için ilk verileri oluşturacaktır.

Arazi çalışmaları sırasında bir bölgedeki tektonik rejim ve deformasyon hakkında uygun sonuçlara ulaşabilmek için çok sayıda verinin elde edilmesi gerekir. Bununla birlikte verilerin yerleştirilmesi, analizi ve sınıflandırılması da ayrı bir önem taşımaktadır.

Fayların geometrisi de diğer düzlemsel ve çizgisel veriler gibi klasik stereografik izdüşüm ile gösterilir. Tektonik analizlerde Wulf ve Schmidt'in eş alanlı alt yarım küre projeksiyonu kullanılmaktadır. Bu diyagramlarda fay düzlemleri ve üzerinde yer alan kayma çizgileri yardımıyla hareket yönlerinin gösterilmesi olasıdır. Hareketin yönleri düzleme ait doğrultu çizgisi ve eğim yayı üzerinde çizilen oklarla (pitch) gösterilir. Bu küçük okların içe doğru olanları ters, dışa doğru olanları normal hareketleri ve/veya bunların bileşenlerini ifade etmektedir (Angelier ve Mechler, 1977).

Üzerinde hareket yönünü gösteren fay toplulukları bir çok farklı yöntemle değerlendirilebilir. Bu tür fay toplulukları, grafik yöntemlerden Arthaud (1969) yöntemi, deprem odak çözümlemelerinde kullanılan ve sismik faylara Pegoraro (1972), Angelier ve Mechler (1977) tarafından uygulanan standart diedron yöntemi (dièdres droit) ve Carey (1979) ile aynı temel kuralları içeren Angelier (1984), Armijo ve Cifernas (1979) tarafından uygulanan sayısal analiz yöntemi gibi farklı yöntemlerle değerlendirilebilmektedir.

Wallace (1958), Bott (1959) ve Price (1966)'ın mekanik yaklaşımlarının kullanılmasıyla bir çok araştırmacı tarafından (Carey ve Brunier, 1974; Carey, 1979) kırılmış kaya kütlelerindeki fayların kinematığının yorumlanması için bilgisayar destekli kantitatif yöntemler hazırlanmıştır. Bu yöntemler için bazı temel ön koşullar şöyle sıralanabilir.

1) Kaya kütlesi içerisindeki bir tektonik faz, tek bir homojen stres tensörü ile karakterize edilmektedir.

2) Bu tektonik faz için malzemenin izotropik ve homojen olduğunu, her bir fay düzlemi üzerinde gelişen atımın, (kayma (si) çizgisi) bu fay düzlemi üzerinde etkin çözümlenmiş makaslama gerilmesinin (τ_i) doğrultusunda ve yönünde olduğu kabul edilir.

3) Faylarla ayrılmış bloklar arasında sürekli deformasyonun ve deformasyon sırasında fay düzlemi rotasyonlarının olmadığı, kayma çizikleri üzerindeki atımın bağımsız ve fay genişliğinden küçük olduğu kabul edilmektedir. Böylece kaya kütlelerinin deformasyonu, faylar boyunca rijid blokların göreceli yer değiştirmesiyle meydana gelmektedir. Makaslama tensöründeki fark, blokların hareketine neden olan çözümlenmiş gerilme tensöründen sorumludur (Temiz, 1994; Över, 1996; Özden ve Över, 1998).

Yukarıdaki koşullar sağlandığında bir tektonik faz ile ilişkili gerilme tensörü, bu fazın sonucunda ortaya çıkan bağımsız kayma çizgilerinden elde edilebilir (Angelier ve Mechler, 1977).

Her bir ölçülmüş kayma çizgisi (I) için, bir fay düzlemine uygulanan gerilme (σ_i), $\sigma_i = \sigma_{ni} + \tau_i$ olarak belirlenir (Şekil 4.1). Yukarıda belirtilen hipotez, ön görülen atım vektörü (τ_i) ile gözlenen atım vektörü (s_i) arasındaki açının 0'a yaklaştığını gösterir. (τ_i) bileşenleri dört parametrenin fonksiyonudur. Bunlar bir coğrafik referans noktasına göre üç ana gerilme doğrultusunu veren üç Euler açısı ve ana gerilmeleri arasındaki R oranıdır (Carey, 1976; Carey-Gailhardis ve Mercier, 1987).

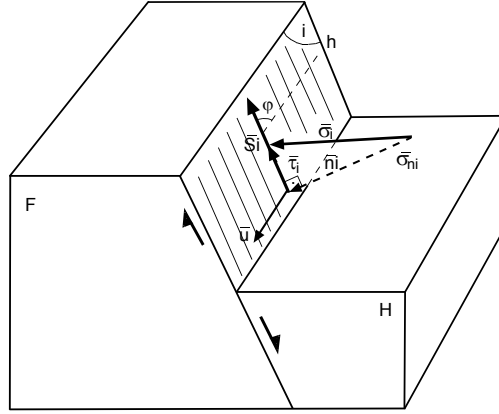
$$[R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)] \quad (2.1)$$

R değeri 1 ($\sigma_2 = \sigma_3$) ile 0 ($\sigma_1 = \sigma_2$) arasında değişir. Dört değer (τ_i, s_i) $\rightarrow 0$ ile uyumlu olmalıdır. Aşağıdaki fonksiyonda (τ, s) arasındaki açı minimize edilerek gerilme tensörü elde edilir:

$$[F = -\sum k_i \cos 2 (\tau_i, s_i)] \quad (2.2)$$

Eğer; (τ_i, s_i) < 90 ise $k_i = 1$, (τ_i, s_i) ≥ 90 ise $k_i = -1$ dir. Pratikte, indirgeme matematiksel olarak, (τ_i, s_i) açısı 20° 'den küçük olduğunda iyi sonuç vermektedir (Carey, 1979). Çünkü histogram üzerindeki dağılım daha yakın bir aralıkta ve benzer faylar için bu sonucu verebilir. Pratikte, (τ_i, s_i) açılarının % 80'i 20° 'den küçük olması durumunda da sonuç güvenilir olarak kabul edilir. Açı arttıkça, çözümün doğruluğu ve ikinci minimum daha da uzaklaşmaktadır. Birden fazla tektonik faza karşılık gelen verilerin ayrılmasında daha karmaşık hesaplamalar kullanılır (Carey, 1979; Etchecopar, 1981; Armijo ve diğ., 1982). Bu yöntem, seçilmiş sismik fay düzlemlerinin odak mekanizması çözümlemelerine de uygulanabilir

Metodu uygulamak konusunda ve verilerin derlenmesi açısından bazı düşünce farklılıkları araştırmacıları zorlamaktadır. Bu anlamda bir çok farklı yazım şekli göze çarpmaktadır. Burada gerek bu yöntemi bilgisayarda veya el çizim yöntemiyle uygulamak açısından, gerekse literatürdeki birliktelik açısından Carey (1979) tarafından geliştirilen sayısal (nümerik) analiz yöntemi uygulanmıştır. Çok büyük farklar olmamakla birlikte, bir fay düzlemine ait veriler Carey (1979) sayısal analiz yönteminde şu şekilde derlenmektedir.



Şekil 2.21. Metin içerisindeki kullanılan simgelerin bir normal fay üzerindeki gösterimleri.

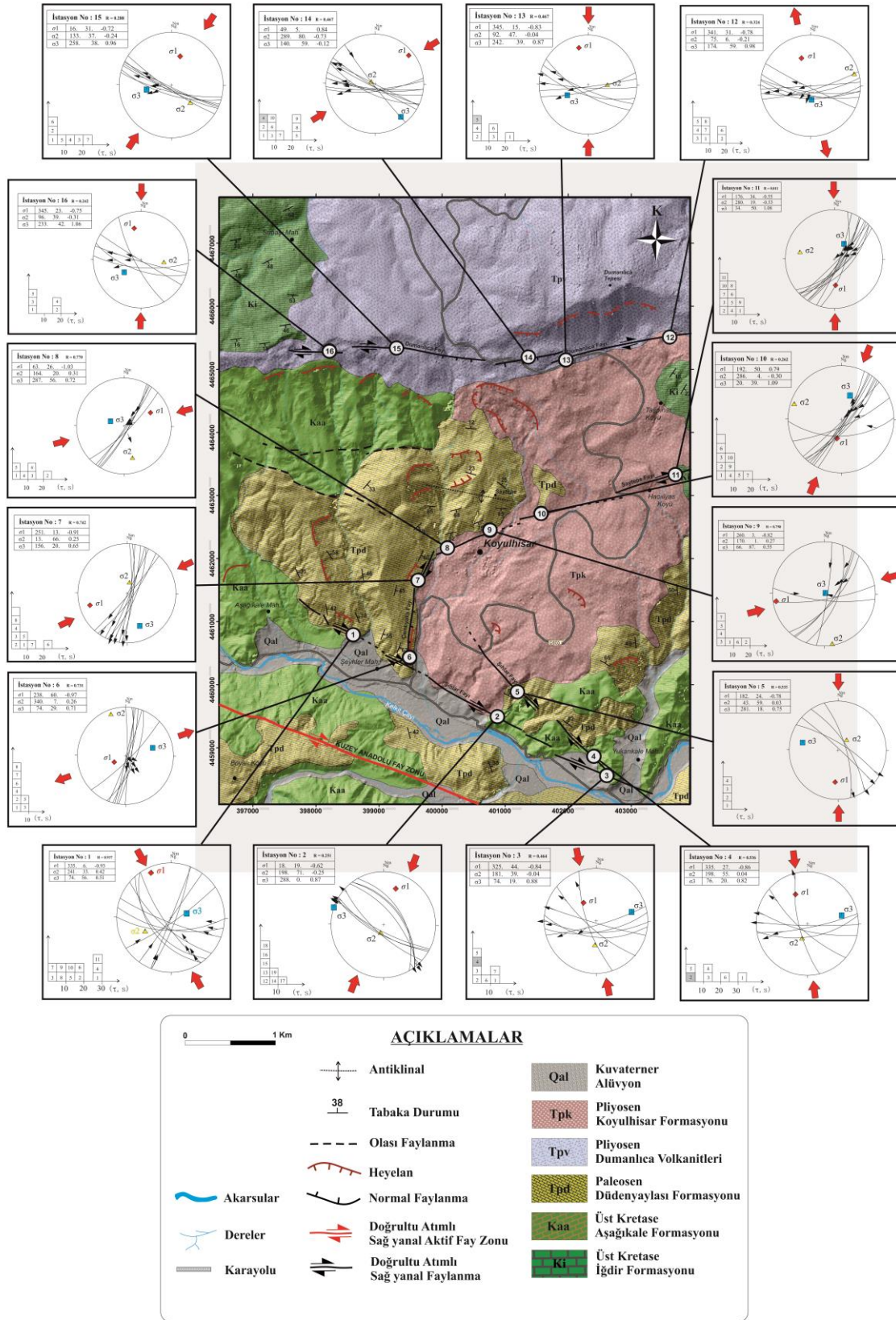
Burada I: Fay düzlemi, H: Tavan blok, s_i : Tavan bloğa göre taban bloğun hareket yönüne paralel atım vektörü, aynı zamanda ölçülmüş kayma çizgisi, n_i : Fay düzlemine normal vektör; σ_1 : Fay düzlemine uygulanan (İ) gerilme, σ_n : σ_1 'in fay düzlemine dik (normal) bileşeni, τ_i : Çözümlemiş makaslama gerilmesi, σ_1 'nin fay düzlemi üzerindeki ortogonal izdüşümü, θ : Fayın doğrultusuyla (h) atım vektörü (s) arasındaki yatım (pitch); u : (s_i , n_i) düzlemine dik vektördür. (Carey ve Mercier, 1987).

Fayın doğrultusu, saat ibresi yönünde (kuzeyden doğuya doğru) 0-180° arasında bir sayısal değer ile gösterilirken, bu düzleme ait eğim yönü ve eğim miktarıyla birlikte ifade edilmektedir. Eğer bu düzlem üzerinde hareket ile ilişkili çizgisellikler (kaymayı gösterir belirteçler olarak kayma çizikleri) gelişmiş ise, fay düzlemi üzerindeki kayma vektörünün (pitch, rake) dalım miktarı ve yönü belirlenmektedir. Son olarak ise, fay bloğu üzerindeki hareketin türü (normal, ters, sağ yanal veya sol yanal atımlı fay olarak) ifade edilmektedir.

Bu çalışmada, Koyulhisar ilçe merkezi çevresinde yüzeyleyen birimler yaşlıdan gence doğru, Orta-Üst Maestrihtiyen yaşlı Aşağıkale, Üst Maestrihtiyen yaşlı İğdir, Daniyen yaşlı Şıhlar, Orta-Üst Paleosen yaşlı Düdenyaylası, Pliyosen yaşlı Dumanlıca (Erdembaba) ve Pliyo-Kuvaterner yaşlı Koyulhisar Formasyonlarında gelişen faylanmaların yapısal olarak incelenmesi ve bölgenin deformasyon özelliklerini ortaya koymak için fay düzlemlerinden veriler elde edilmiştir. Toplanan bu veriler, Carey (1976 ve 1979)'in bilgisayar destekli sayısal analiz yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. İnceleme alanının farklı bölgelerinde yer alan 16 değişik istasyondan toplam 123 adet fay düzlemi ve kayma vektörü belirlenmiştir. Belirlenen istasyonların özellikleri Tablo 2.4.' de verilmiştir. Ölçüm yapılan istasyonların jeoloji haritası üzerinde dağılımı ve kinematik analiz sonuçları Şekil 2.22' de gösterilmektedir.

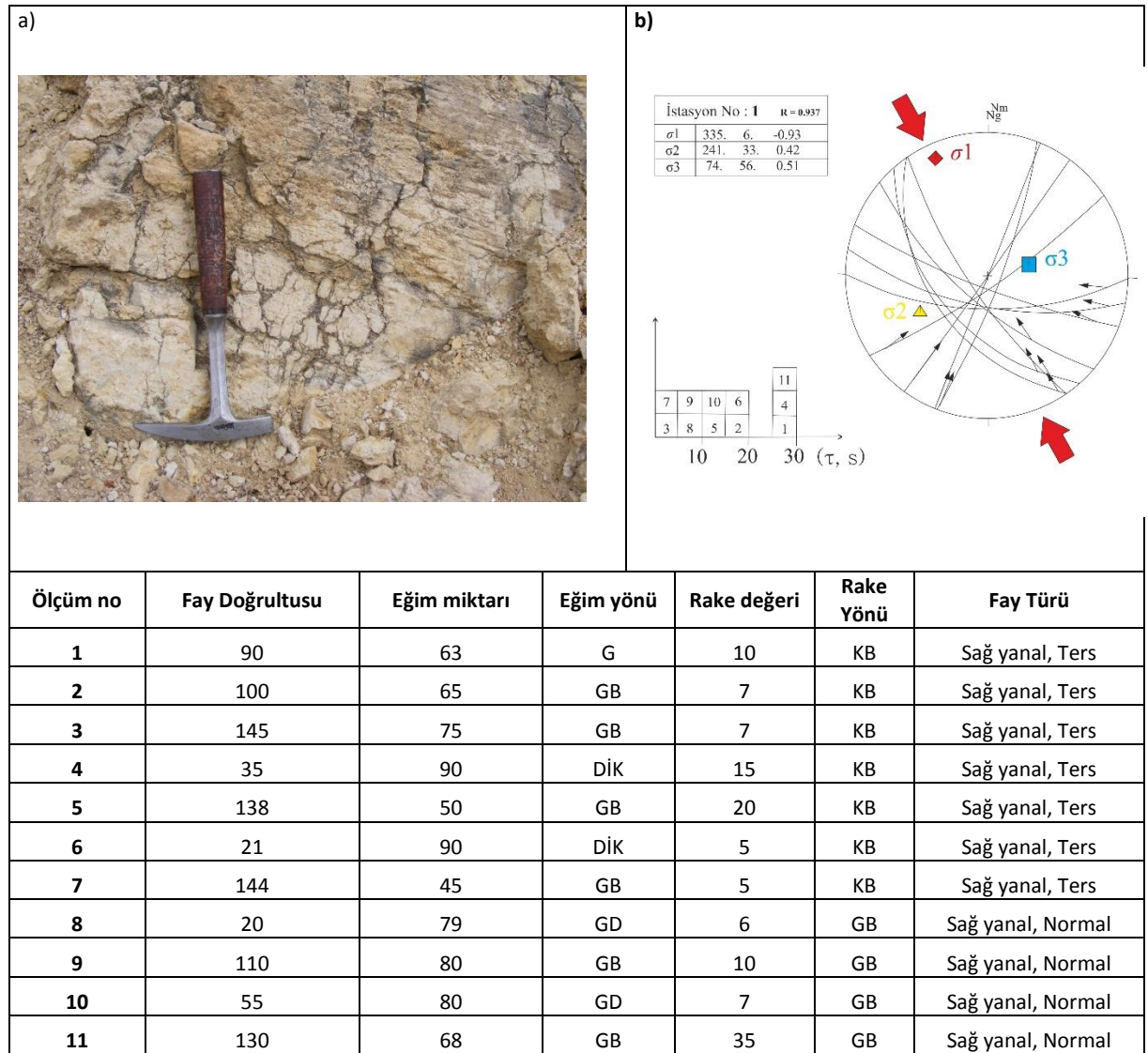
Tablo 2.4. Çalışma alanı fay düzlemlerine ait verilerin ölçüldüğü istasyonların noktasal yerleri.

İstasyonlar	Enlem (K)	Boylam (D)	Ölçü Sayısı	Formasyon Adı	Formasyon Yaşı
1	40.293600°	37.801700°	11	Düdenyaylası Formasyonu	Orta-Üst Paleosen
2	40.284400°	37.823200°	8	Aşağıkale Formasyonu	Orta-Üst Maestrihtiyen
3	40.275567°	37.844317°	7	Aşağıkale Formasyonu	Orta-Üst Maestrihtiyen
4	40.281342°	37.842525°	6	Aşağıkale Formasyonu	Orta-Üst Maestrihtiyen
5	40.289705°	37.831069°	4	Düdenyaylası Formasyonu	Orta-Üst Paleosen
6	40.288850°	37.818267°	8	Düdenyaylası Formasyonu	Orta-Üst Paleosen
7	40.302150°	37.820950°	9	Düdenyaylası Formasyonu	Orta-Üst Paleosen
8	40.303533°	37.823550°	6	Koyulhisar Formasyonu	Pliyo-Kuvaterner
9	40.306667°	37.831667°	7	Koyulhisar Formasyonu	Pliyo-Kuvaterner
10	40.309033°	37.842250°	10	Düdenyaylası Formasyonu	Orta-Üst Paleosen
11	40.316983°	37.872483°	11	İğdir Formasyonu	Üst Maestrihtiyen
12	40.334767°	37.878900°	8	Koyulhisar Formasyonu	Pliyo-Kuvaterner
13	40.333750°	37.854250°	6	Dumanlıca Formasyonu	Pliyosen
14	40.331200°	37.835283°	10	Dumanlıca Formasyonu	Pliyosen
15	40.331475°	37.823707°	7	Dumanlıca Formasyonu	Pliyosen
16	40.331171°	37.808489°	5	Dumanlıca Formasyonu	Pliyosen



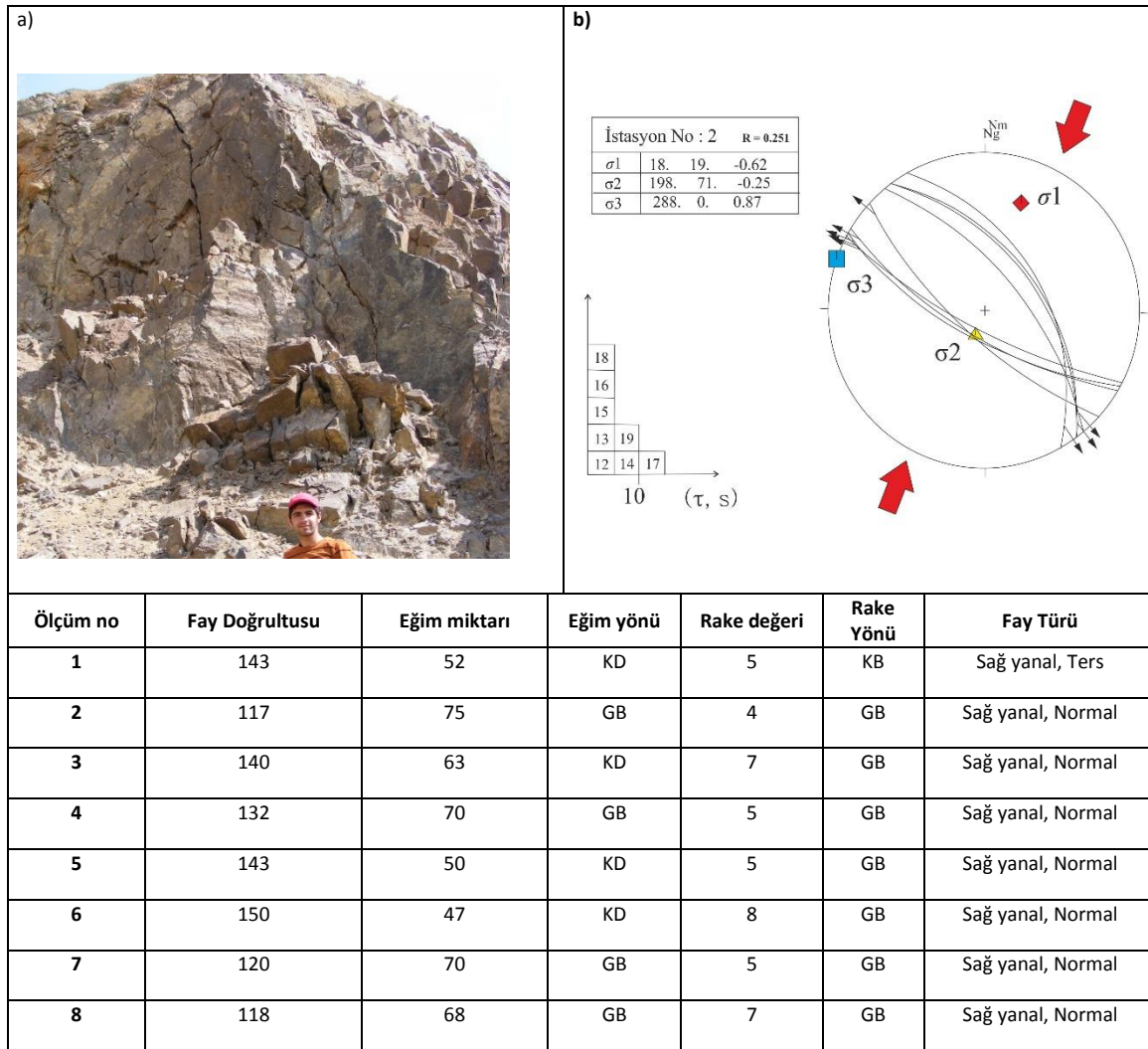
Şekil 2.22. Ölçüm yapılan istasyonların jeoloji haritası üzerinde dağılımı ve kinematik analiz sonuçları

İstasyon 1: Bu istasyonu oluşturan veriler inceleme alanının güneybatısında yer alan Şıhlar mahallesinin yaklaşık 400 m kuzeyinde bulunan su kanalı için açılan yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Düdenyaylası formasyonu olarak adlandırılan ve sarı renkli orta tabakalı kumlu kireçtaşı üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çizikleri ve kireçtaşı üzerindeki kalsitleşmeden yararlanılmıştır. Kireçtaşları üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atım bileşeni olan sağ yanal ters ve normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.23' de verilmiştir. İstasyon 1'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KKB-GGD doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.23.b' de görülmektedir.



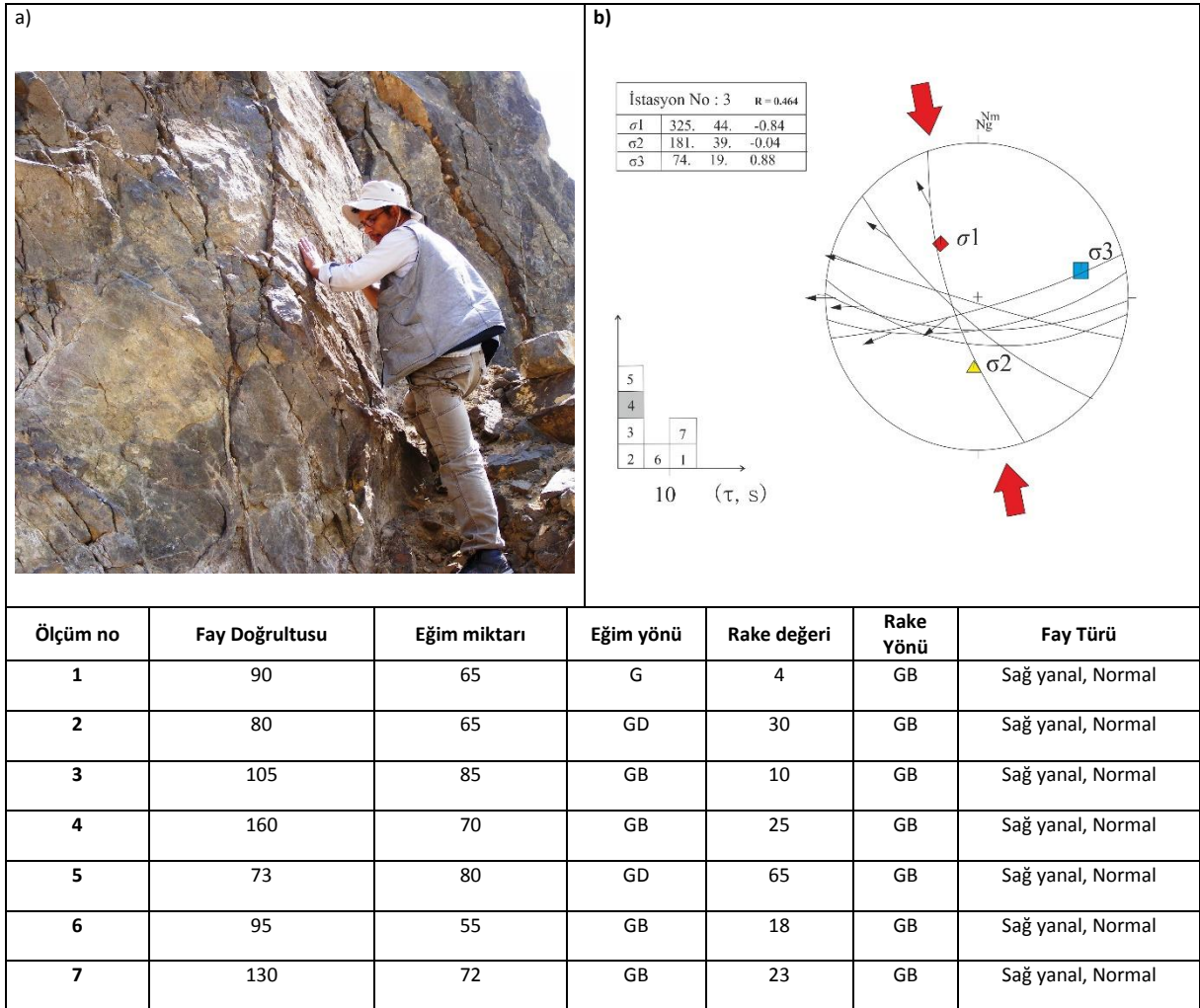
Şekil 2.23. İstasyon 1'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 2: Bu istasyonu oluşturan veriler inceleme alanının güneyinde ilçe merkezine yaklaşık 2 km uzaklıkta bulunan su kanalı için açılan yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Aşağıkale formasyonu olarak adlandırılan ve aglomera kumtaşı ardalanması ve bazaltik lav akıntılarından oluşan kayaçlar üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Bu volkanik kayaçların üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atım bileşeni olan sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.24' de verilmiştir. İstasyon 2'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KKD-GGB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.24.b' de görülmektedir.



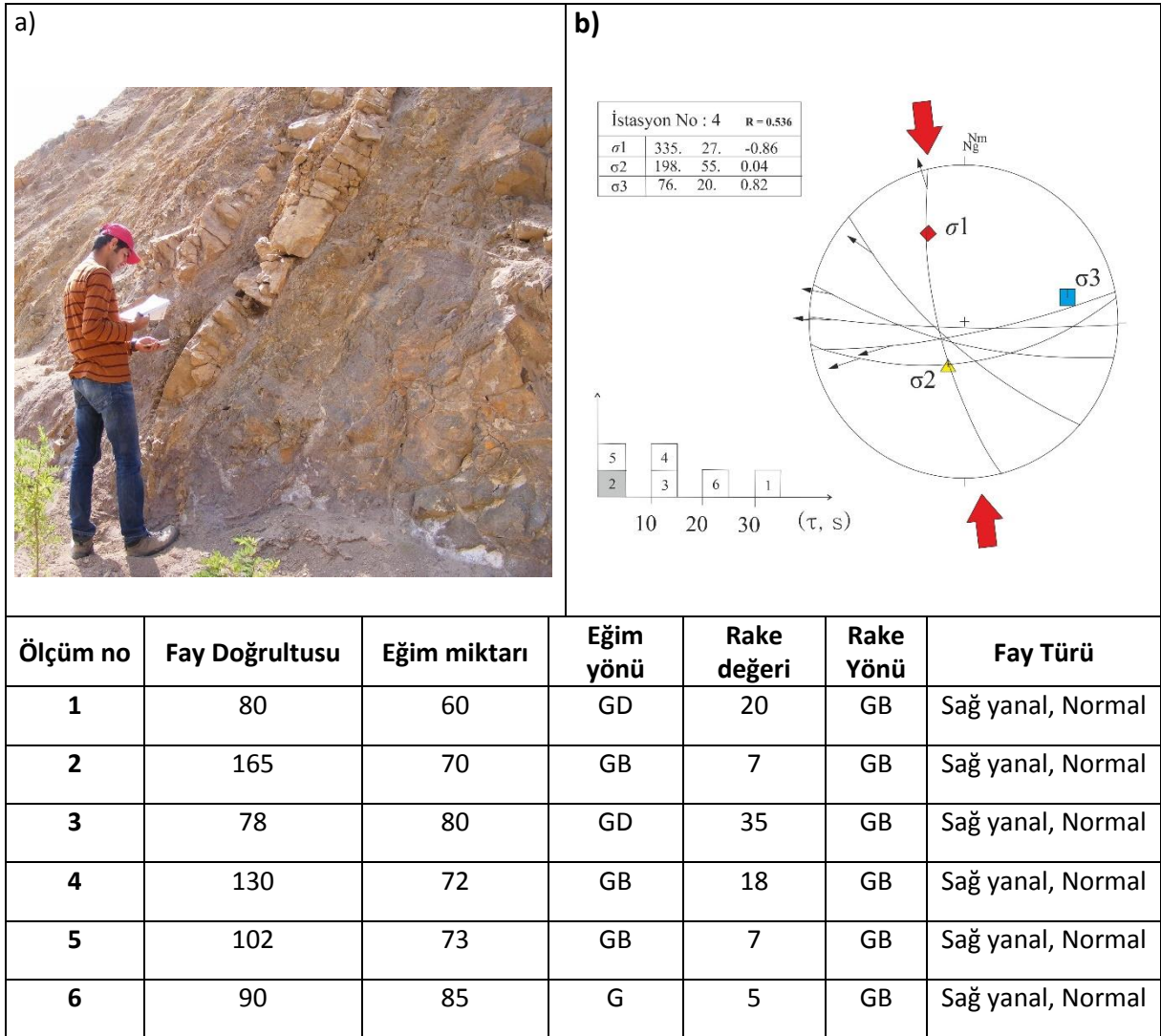
Şekil 2.24. İstasyon 2'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 3: Bu istasyonu oluşturan veriler inceleme alanının güneydoğusunda Yukarıkale mahallesi güneybatısında yaklaşık 300 m uzaklıkta bulunan su kanalı için açılan yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Aşağıkale formasyonu olarak adlandırılan ve aglomera kumtaşı ardalanması ve bazaltik lav akıntılarından oluşan kayalar üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Bu volkanik kayaların üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atım bileşeni olan sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf şekil * de verilmiştir. İstasyon 3'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KKB-GGD doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.25.b' de görülmektedir.



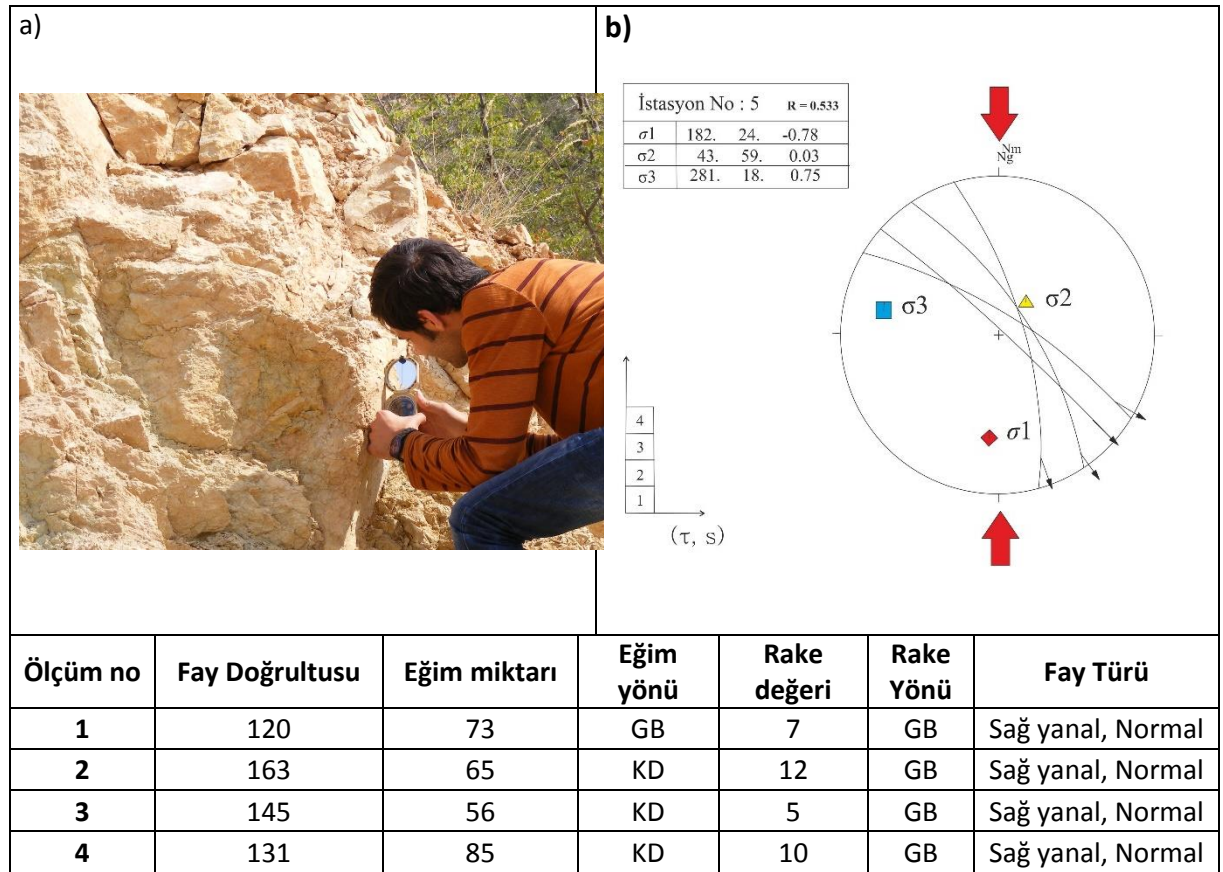
Şekil 2.25. İstasyon 3'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 4: Bu istasyonu oluşturan veriler inceleme alanının güneydoğusunda Yukarıkale mahallesi batısında yaklaşık 500 m uzaklıkta bulunan su kanalı için açılan yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Aşağıkale formasyonu olarak adlandırılan ve aglomera kumtaşı ardalanması ve bazaltik lav akıntılarından oluşan kayalar üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Bu volkanik kayaların üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atım bileşeni olan sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.26' de verilmiştir. İstasyon 4'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KKB-GGD doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.26.b' de görülmektedir.



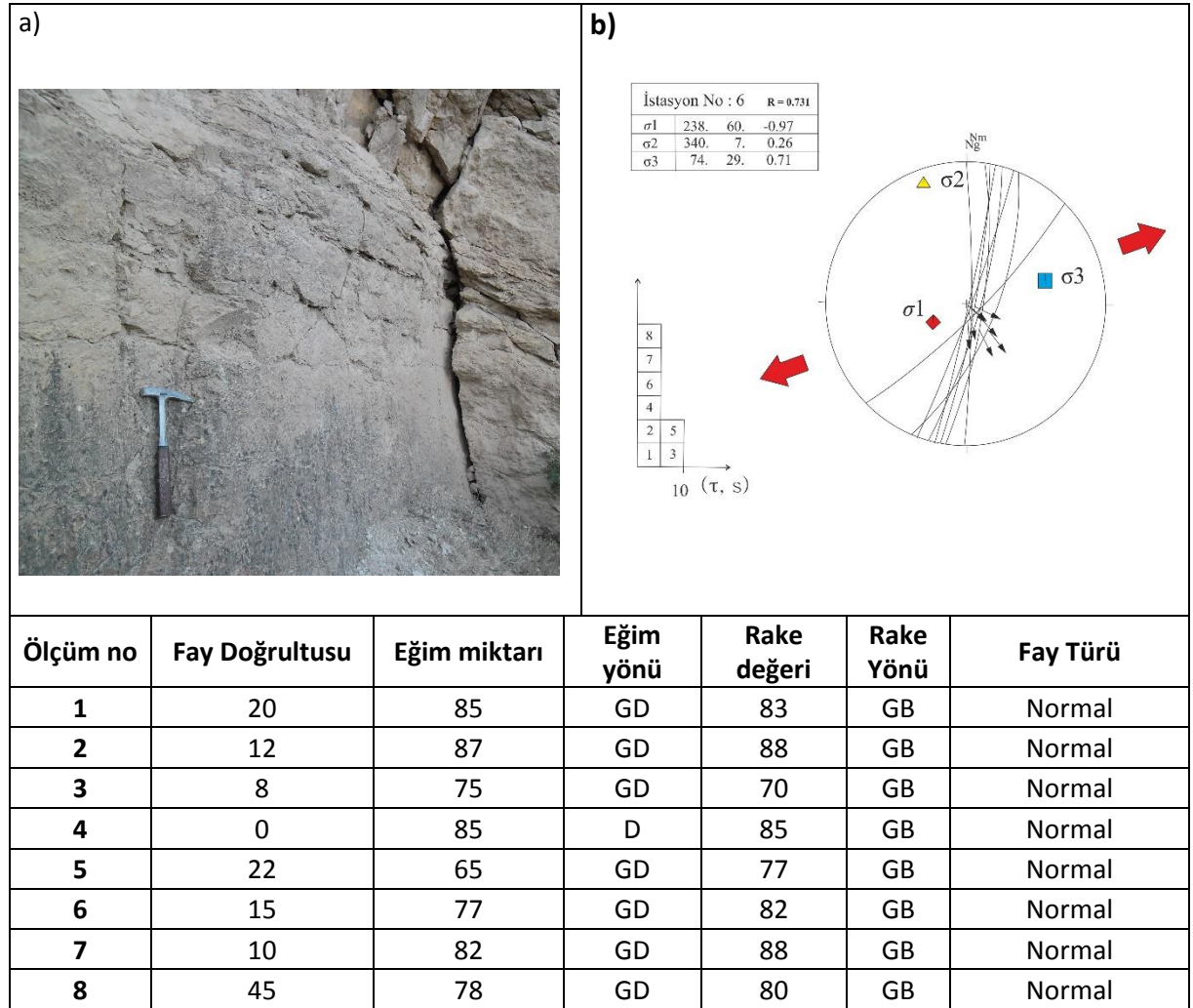
Şekil 2.26. İstasyon 4'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 5: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin güneydoğusunda yer alan akarsu teraslarında yer alan yarmalarda gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Düdenyaylası formasyonu olarak adlandırılan ve sarı renkli orta tabakalı kumlu kireçtaşı üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çizikleri ve kireçtaşı üzerindeki kalsitleşmeden yararlanılmıştır. Kireçtaşları üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atım bileşeni olan sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekill 2.27’ de verilmiştir. İstasyon 5’den elde edilen verilerin Carey (1979)’in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak K-G doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.27.b’ de görülmektedir.



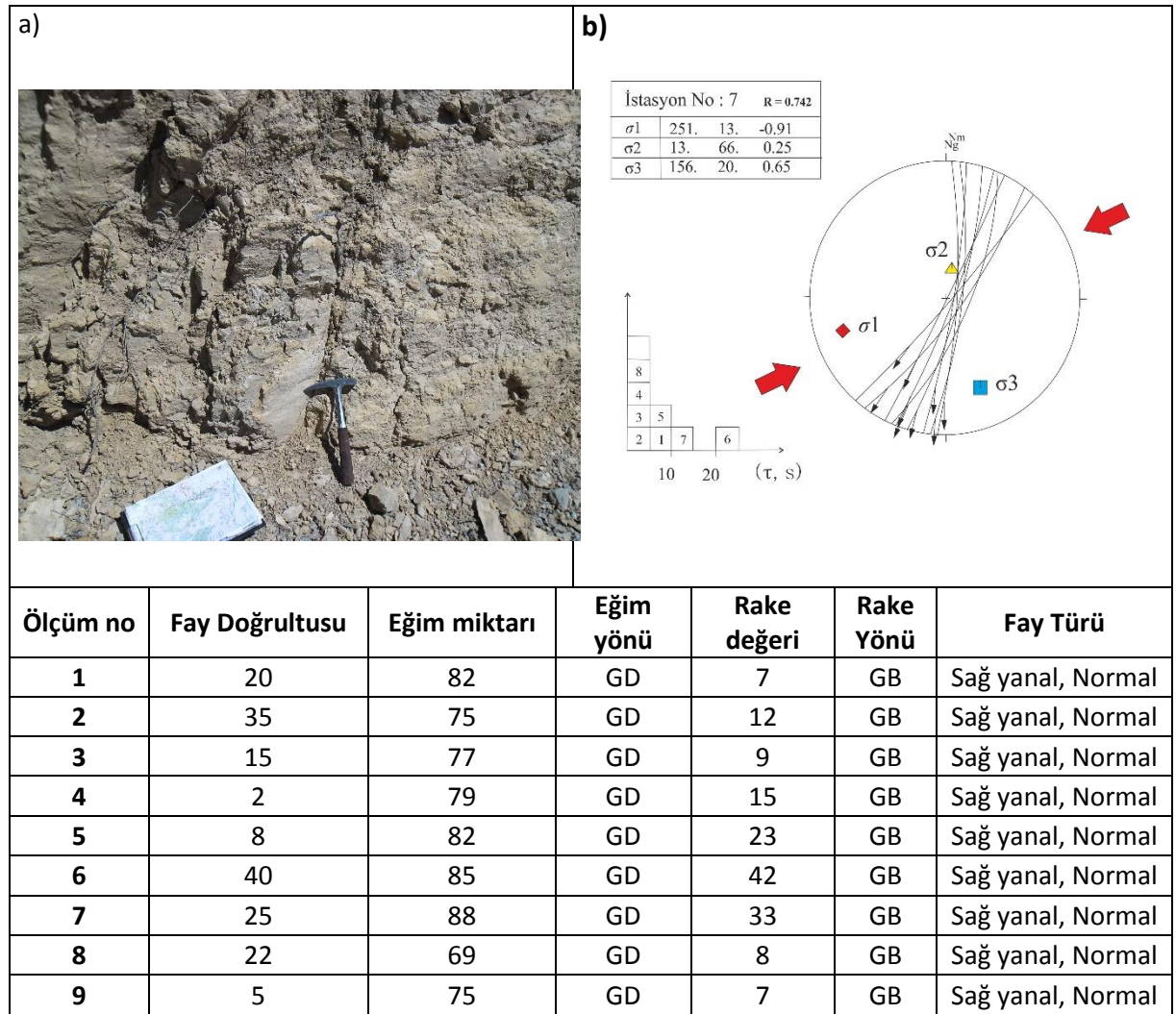
Şekil 2.27. İstasyon 5’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 6: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin güneybatısında yer alan yol kenarında doğal yarmalarda gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Düdenyaylası formasyonu olarak adlandırılan ve sarı renkli orta tabakalı kumlu kireçtaşı üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çizikleri ve kireçtaşı üzerindeki kalsitleşmeden yararlanılmıştır. Kireçtaşları üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.28' de verilmiştir. İstasyon 6'dan elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak DKD-BGB doğrultulu genişleme rejimi sonucu olduğu Şekil 2.28.b' de görülmektedir.



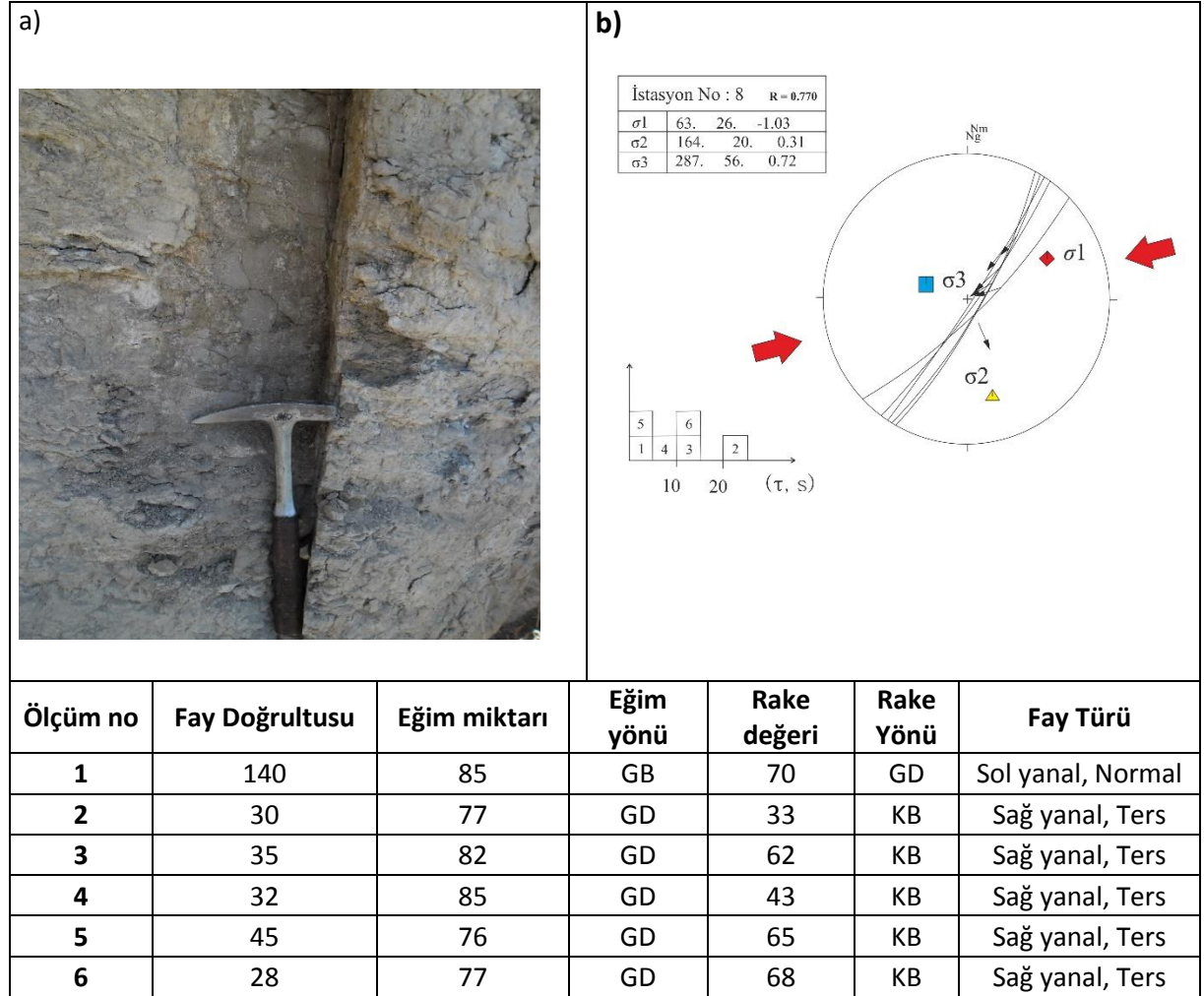
Şekil 2.28. İstasyon 6'da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 7: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin güneybatısında yer alan Çamlıyaka mahallesinin yaklaşık 200 m kuzeyinde doğal yarmalarda gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Düdenyaylası formasyonu olarak adlandırılan ve sarı renkli orta tabakalı kumlu kireçtaşı üzerinde gelişmiş fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında fay düzlemlerinde gözlenen kayma çizikleri ve kireçtaşı üzerindeki kalsitleşmeden yararlanılmıştır. Kireçtaşları üzerinde çok net olarak görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.29' da verilmiştir. İstasyon 7'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.29.b' de görülmektedir.



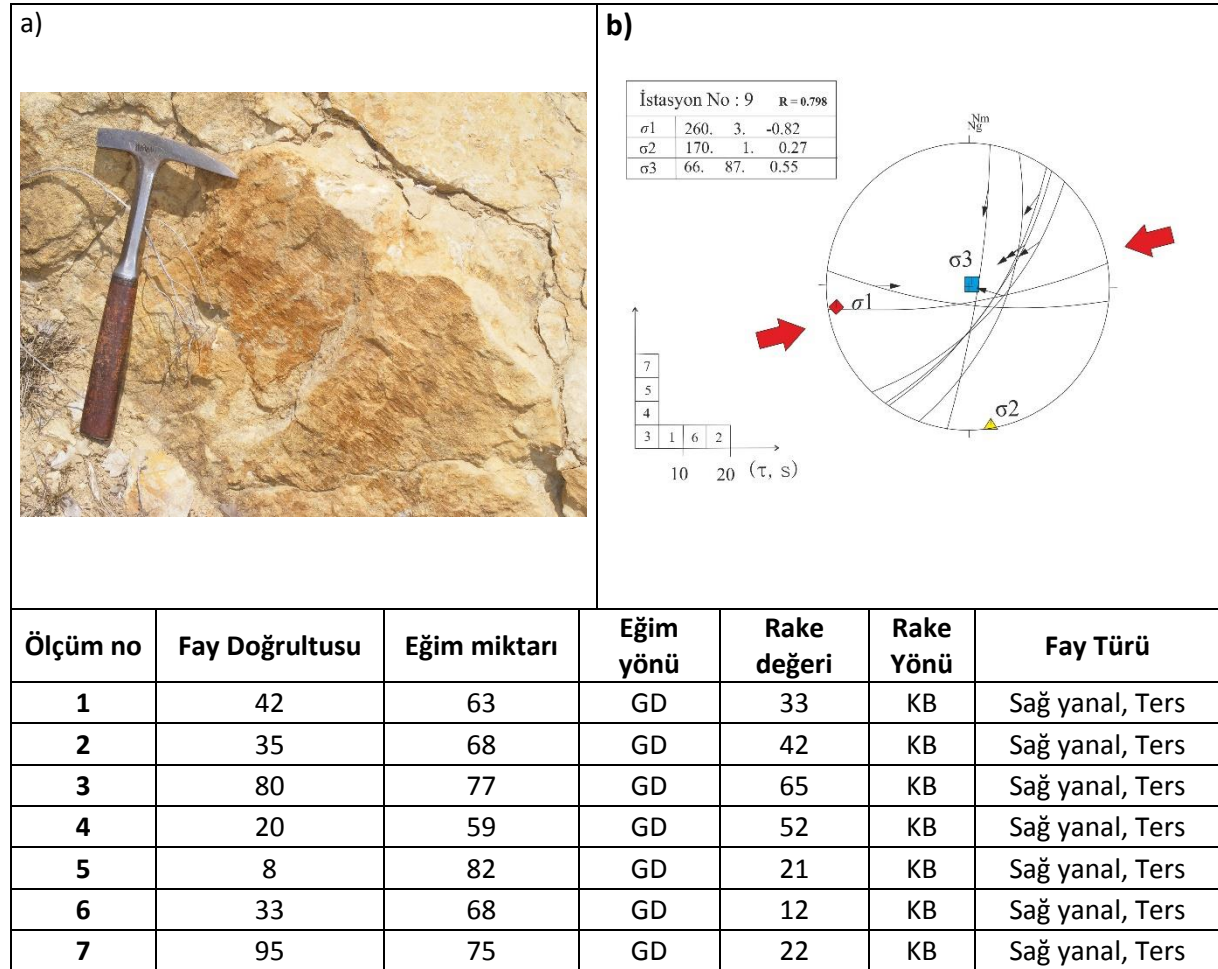
Şekil 2.29. İstasyon 7'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 8: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeyinde yer alan yaklaşık 400 m kuzeybatısında akarsu teraslarında yer alan yarmalarda gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Koyulhisar formasyonu olarak adlandırılan ve gevşek dokulu aglomera-tüf ve gri-yeşil renkli, breşik görünümlü andezitik lav akıntıları ve konglomeraların oluşturduğu fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümlerin yapılmasında gevşek dokulu malzeme üzerinde kayma çizikleri görülemediğinden tabanda biriken marnlı seviyede fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Bu killi seviyede çok net görünmesede, detaylı incelendiğinde görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal ters faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.30' da verilmiştir. İstasyon 8'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu olduğu Şekil 2.30.b' de görülmektedir.



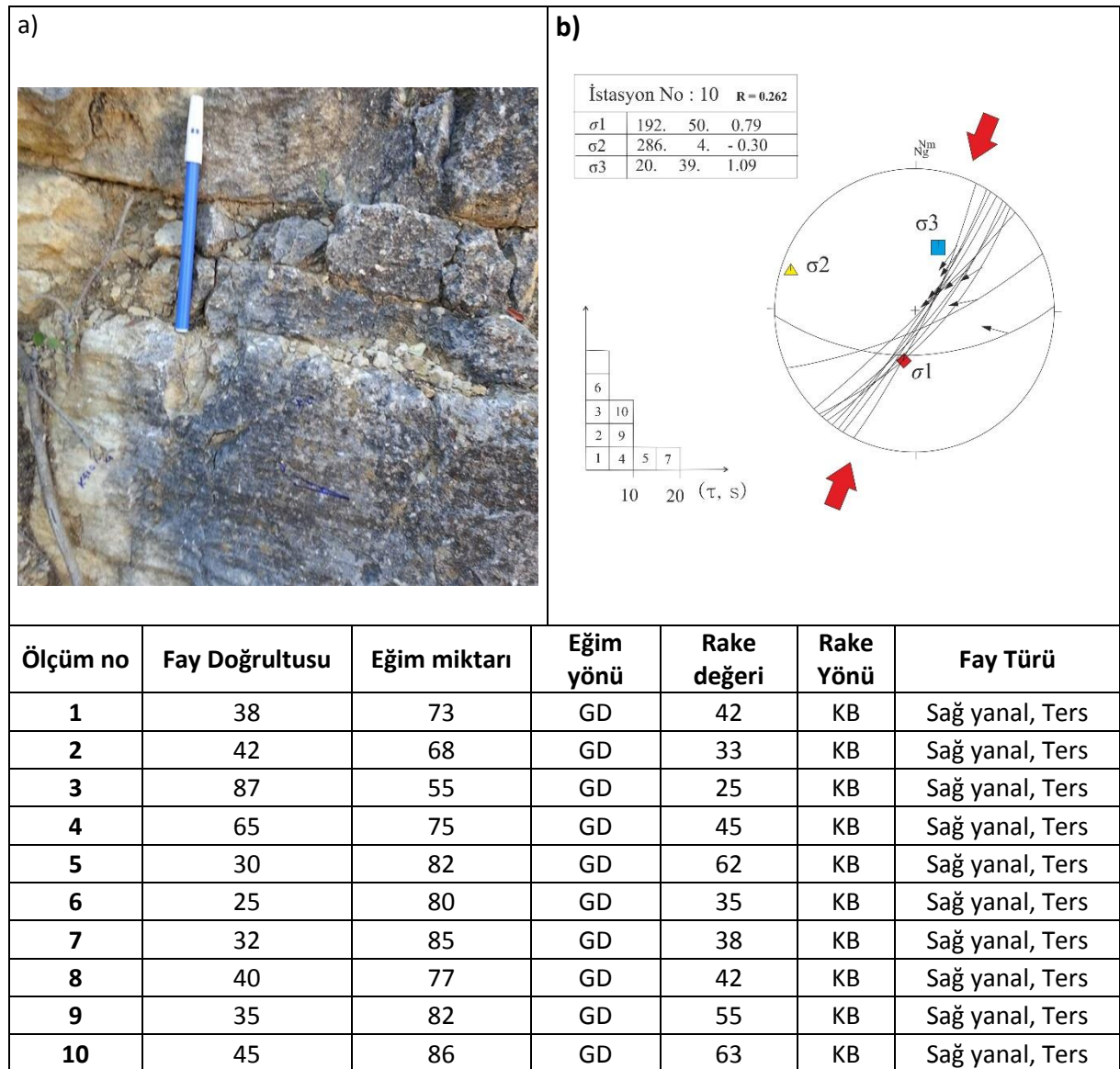
Şekil 2.30. İstasyon 8'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 9: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeyinde yer alan yaklaşık 200 m kuzeyinde akarsu teraslarında yer alan yarmalarda gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Koyulhisar formasyonu olarak adlandırılan ve gevşek dokulu aglomera-tüf ve gri-yeşil renkli, breşik görünümlü andezitik lav akıntıları ve konglomeraların oluşturduğu fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümler Düdenyaylası Formasyonu olarak adlandırılan kumlu siltli kireçtaşları üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Kireçtaşı üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal ters faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.31' de verilmiştir. İstasyon 9'dan elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak DKD-BGB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.31.b' de görülmektedir.



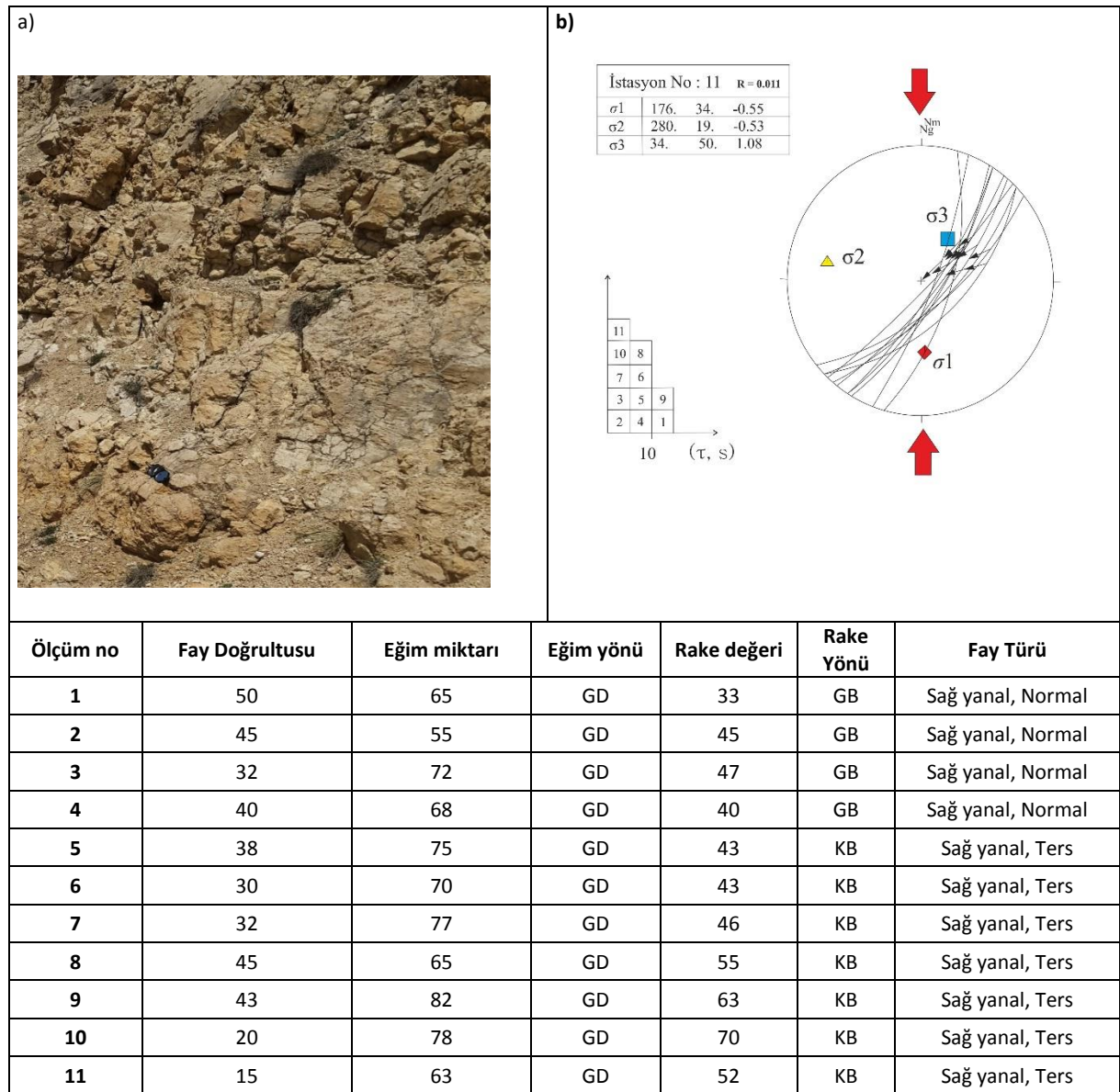
Şekil 2.31. İstasyon 9'da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 10: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan yaklaşık 800 m uzaklıkta yol yarmasında gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Düdenyaylası Formasyonu olarak adlandırılan kumlu siltli kireçtaşları üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Kireçtaşı üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.32' de verilmiştir. İstasyon 10'dan elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.32.b' de görülmektedir.



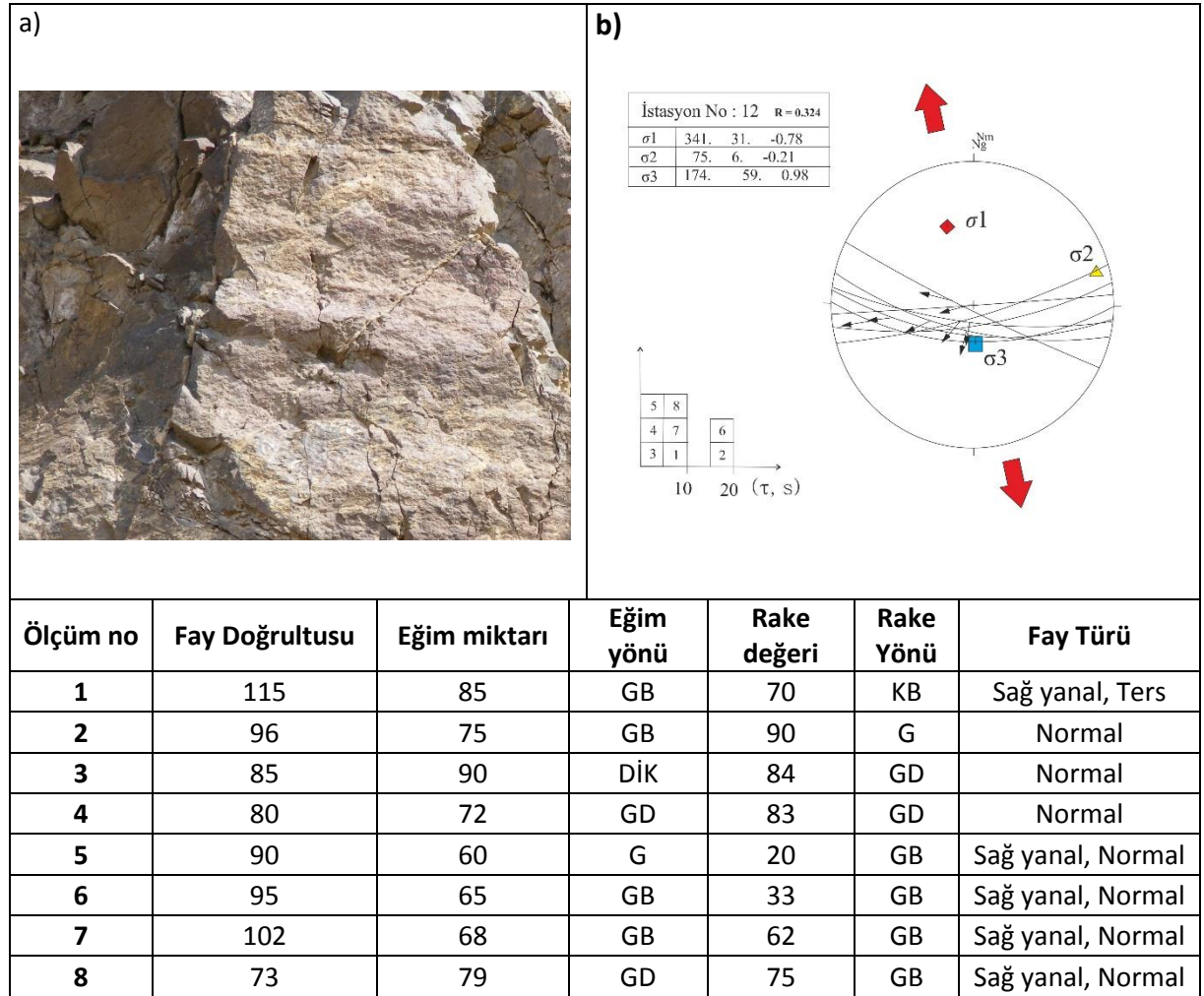
Şekil 2.32. İstasyon 10'da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 11: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan yaklaşık 3.5 km uzaklıktaki İkizyaka köyü yol yarmasında gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler İğdir Formasyonu olarak adlandırılan kireçtaşları üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Kireçtaşı üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal ters faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.33' de verilmiştir. İstasyon 11'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak K-G doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.33.b' de görülmektedir.



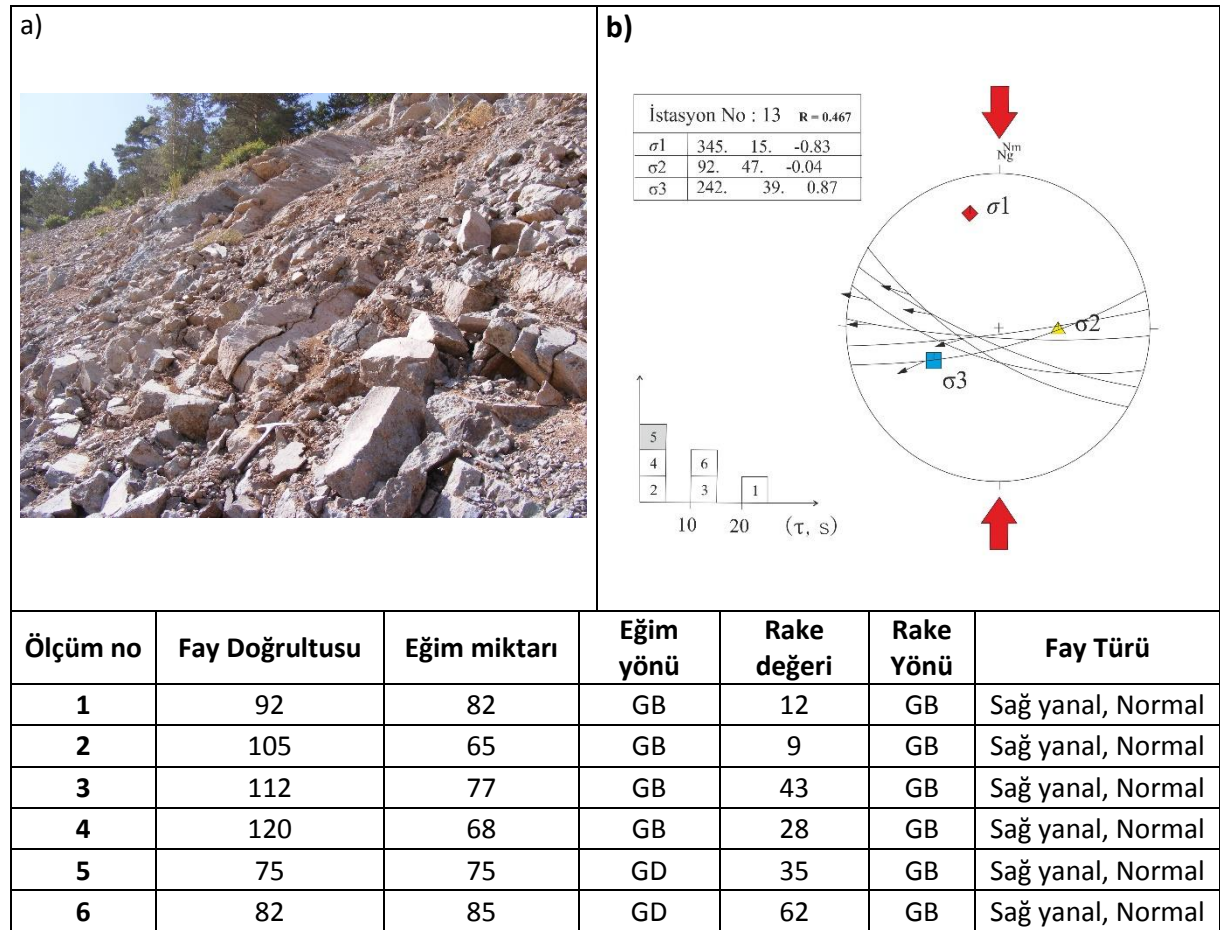
Şekil 2.33. İstasyon 11'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 12: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan yaklaşık 5 km uzaklıktaki Taşpınar köyü kuzeyinde yol yarmasında gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Bu veriler Koyulhisar formasyonu olarak adlandırılan ve gevşek dokulu aglomera-tüf ve gri-yeşil renkli, breşik görünümlü andezitik lav akıntıları ve konglomeraların oluşturduğu fay düzlemlerinden oluşmaktadır. Ölçümler Dumanlıca Formasyonu olarak adlandırılan andezitik-bazaltik karekterli volkaniklerden oluşan kayalar üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Volkanik kayalar üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.34' de verilmiştir. İstasyon 12'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KKB-GGD doğrultulu genişleme rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.34.b' de görülmektedir.



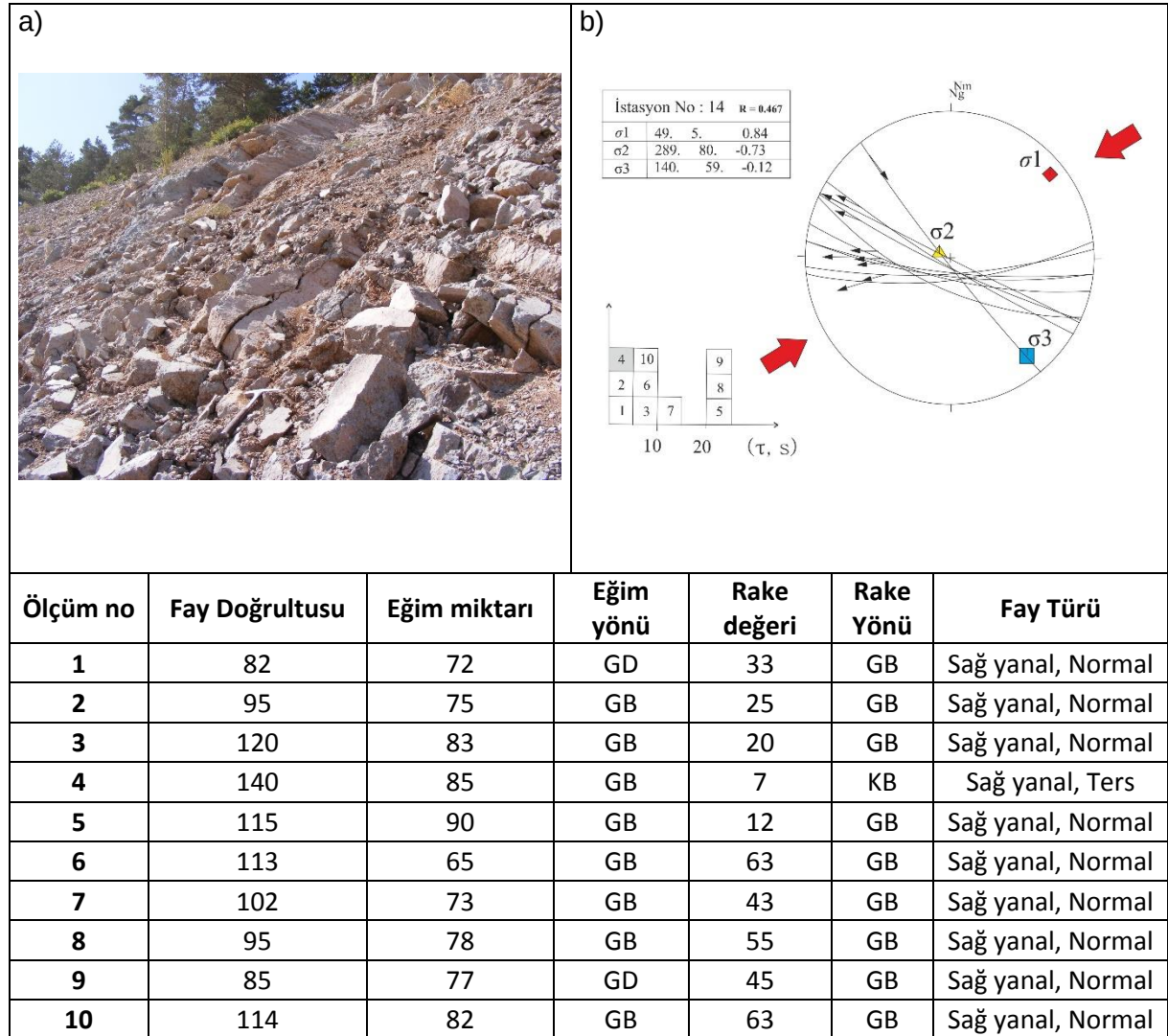
Şekil 2.34. İstasyon 12'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 13: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan yaklaşık 5 km uzaklıktaki Taşpınar köyü kuzeybatısında yol yarmasında gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Ölçümler Dumanlıca Formasyonu olarak adlandırılan andezitik-bazaltik karakterli volkaniklerden oluşan kayalar üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Volkanik kayalar üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.35' de verilmiştir. İstasyon 13'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak K-G doğrultulu sıkışma rejimi sonucu olduğu Şekil 2.35.b' de görülmektedir.



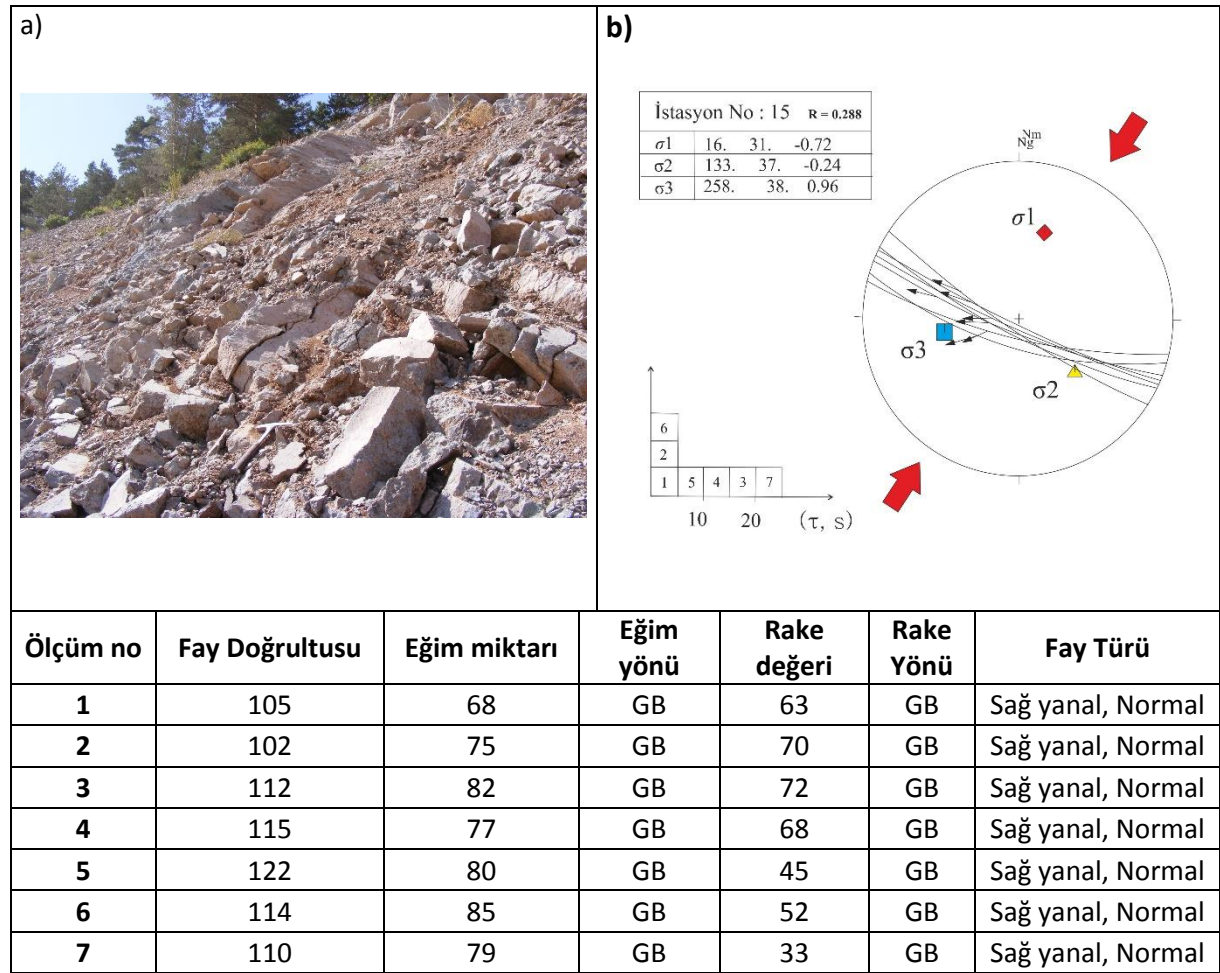
Şekil 2.35. İstasyon 13'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 14: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeydoğusunda yer alan yaklaşık 5 km uzaklıktaki Mesudiye karayolu yol yarmasında gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Ölçümler Dumanlıca Formasyonu olarak adlandırılan andezitik-bazaltik karakterli volkaniklerden oluşan kayalar üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Volkanik kayalar üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.36' da verilmiştir. İstasyon 14'den elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.36.b' de görülmektedir.



Şekil 2.36. İstasyon 14'de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

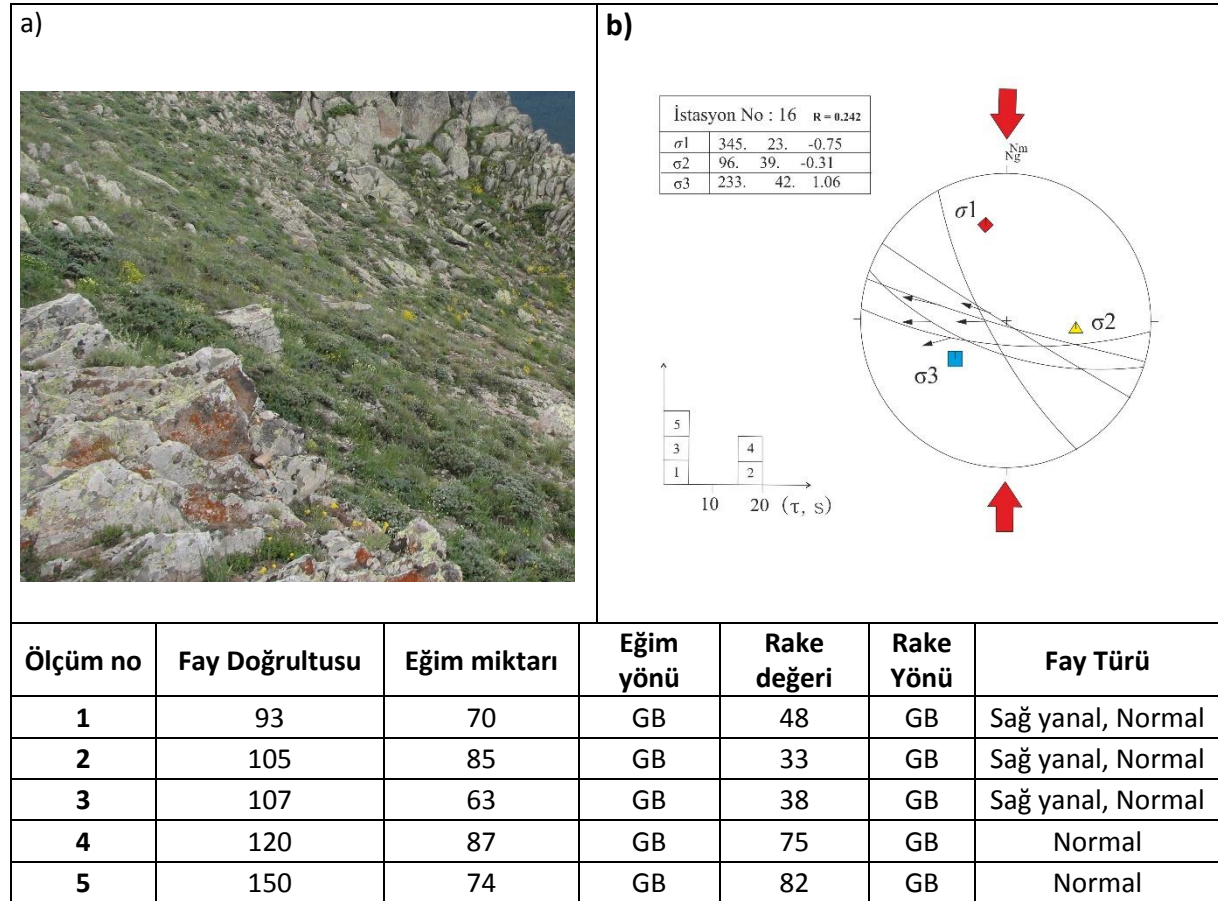
İstasyon 15: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeybatısında yer alan yaklaşık 7 km uzaklıktaki Çakılçiftlik kuzeyinde yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Ölçümler Dumanlıca Formasyonu olarak adlandırılan andezitik-bazaltik karakterli volkaniklerden oluşan kayalar üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Volkanik kayalar üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.37’ de verilmiştir. İstasyon 15’den elde edilen verilerin Carey (1979)’in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak KD-GB doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.37.b’ de görülmektedir.



Şekil 2.37. İstasyon 15’de ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

İstasyon 16: Bu istasyonu oluşturan veriler ilçe merkezinin kuzeybatısında yer alan yaklaşık 7 km uzaklıktaki Çakılçiftlik batısında yer alan yarmada gözlemlenen kayma çizikleri ölçülerek derlenmiştir. Ölçümler Dumanlıca Formasyonu olarak adlandırılan andezitik-bazaltik karakterli volkaniklerden oluşan kayalar üzerinde kayma çizikleri ve fay düzlemleri görülmüş, gözlenen kayma çiziklerinden yararlanılmıştır. Volkanik kayalar üzerinde çok net görülen kayma çizikleri hareketin türü hakkında bilgi vermektedir. Bu fayların doğrultu atımlı sağ yanal normal faylar olduğu belirlenmiştir. Elde edilen verilerin analizi ve istasyona ait fotoğraf Şekil 2.38' de verilmiştir.

İstasyon 16'dan elde edilen verilerin Carey (1979)'in sayısal analiz yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda, bu fayların yaklaşık olarak K-G doğrultulu sıkışma rejimi sonucu oluştuğu Şekil 2.38.b' de görülmektedir.



Şekil 2.38. İstasyon 16'da ölçülen fay düzlemlerine ait fotoğraf (a) ve Carey yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda elde edilen sonuçların Wulff ağı üzerinde (alt yarı küre) gösterimi (b).

2.6 Hidrojeolojik Özellikler ve Yer Altı Su Seviyesi Ölçümleri

Heyelan, doğal kaya, zemin, yapay dolgu veya bunların bir ya da birkaçının bileşiminden oluşan şev malzemesinin, yerçekimi, jeolojik ve su içeriği gibi doğal faktörler ile bilinçsizce yapılan yamaç-şev kazısı, yapay patlatmalar, yamaçlar üzerindeki bitki örtüsünün yok edilmesi, çeşitli amaçlar için arazinin yanlış kullanılması gibi doğal olmayan çeşitli faktörlerin etkisi altında yamaç eğimi yönünde çoğunlukla dairesel ya da düzlemsel hareketle sonuçlanan bir olaydır. Hareketin hızı ve büyüklüğü, yamaç eğimi ve içerdiği su miktarı ile doğru orantılıdır.

Koyulhisar ve heyelan bölgesi, en önemli aktif deprem kuşaklarından birisi olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'na (KAFZ) yakın bir bölgede yer almaktadır. Aktif deprem kuşaklarının en önemli özelliklerinden birisi de kendine özgü yeryüzü şekilleri geliştirmesidir. Derin çizgisel vadi oluşumları, sıcak-soğuk su kaynaklarının ve uzamış tepelerin dizilimi, dere yataklarında yön değiştirme gibi yeryüzü şekillerinin gelişiminin yanı sıra, heyelan, kaya düşmesi, toprak akması gibi yüzey şekillerinin değişimi ile sonuçlanan kitle hareketleri de bu tip aktif kuşaklar üzerinde çok sık meydana gelen doğa olaylarıdır.

Jeolojik ve GNSS verileri ile yılda yaklaşık 2.5 cm hareket ettiğini bildiğimiz 1.100 km uzunluğundaki KAFZ boyunca kayalar, çok yoğun bir deformasyonla karşı karşıyadır. Bu deformasyon sonucu özellikle kireçtaşı, kumtaşı gibi kayalarda ezik ve parçalanmış zonlar meydana gelmekte ve heyelan için potansiyel tehlike oluşturmaktadır (Şekil 2.39). KAFZ üzerinde Kelkit Çayı vadisi içerisinde bulunan Suşehri, Koyulhisar, Reşadiye ve Niksar gibi yerleşim yerlerinin uzun yıllardan bu yana önemli bir heyelan bölgesi olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.39. Deformasyon sonucu özellikle kireçtaşı, kumtaşı gibi kayalarda ezik ve parçalanmış zonların görünümü

Kuzey Anadolu ve Doğu Anadolu gibi büyük doğrultu atımlı fay zonları aynı zamanda çok sarp ve belirgin yüzey şekillerinin de oluşumunu sağlamaktadır. Faylanmanın doğrultusuna paralel

uzanan yüksek dağlar ve önlerinde yer yer yine bu fay zonlarının geometrisi sonucu oluşan ovalar bulunmaktadır. Bu tür fay zonları üzerindeki yerleşim yerlerinin çoğunlukla bu ovaların üzerinde, yamaçlarında yada bu fay zonlarına dik yönde gelişmiş vadi içlerinde olduğu gözlenmektedir. Koyulhisar da bu fay zonuna dik yönde gelişmiş derin bir vadi içerisinde bulunmaktadır.

Koyulhisar ilçesi ve yakın çevresinde Eosen yaşlı kaya birimlerindeki killi seviyeler, Alt Miyosen yaşlı killi-jipsli seviyeler ile Pliyo-Kuvaterner yaşlı teras çökellerinin bulunduğu alanlarda çok büyük eski heyelan kütleleri bulunmaktadır. Özellikle bölgede morfolojik olarak zirvelerde yeralan Pliyosen yaşlı Erdambaba Bazaltları üzerinde kar yağışı sonucu oluşan su kütleleri kırık ve çatlaklardan sızarak, daha alt kotlarda Koyulhisar Formasyonu ile bu bazaltların dokanağından kaynaklar olarak yüzeye çıkmaktadır. Yüzeye çıkan bu sular, Koyulhisar Formasyonu'na ait ayrılmış marn ve killi kayaları (Şekil 2.40), boşalan su kaynaklarının (Şekil 2.41) da etkisiyle suya aşırı doygun hale getirmiş ve kaymanın gerçekleşmesini sağlamıştır.



Şekil 2.40. Eosen yaşlı Koyulhisar Formasyonuna ait killi ve marnlı seviyelerin görünümü



Şekil 2.41. Heyelanın kaynak bölgesinde görülen su kaynaklarından görünüm

Bölgede 1998-2000 yıllarında meydana gelen heyelanlardan sonra biriken malzeme, ilçenin kuzeyinde bulunan Aklan mahallesinin doğusunda Gönenli deresi içerisinde yer almaktadır. Bu akan kütlenin genişliği 2 km'ye kadar ulaşmaktadır. Bölgede yer altı su seviyesi oldukça yüksek olup, heyelanlı kütle içerisinde küçük gölcükler oluşmuştur (Şekil 2.42). Koyulhisar'ın üzerinde bulunduğu eski heyelan küttlesinin önü açık olup, yağışlı bir mevsimde malzemenin tekrar su ile temasının artması ve suya doygun hale gelmesi sonucu heyelanlı küttlenin tekrar hareket etme olasılığı yüksektir.

Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde bulunan bölge, heyelan ve toprak akması gibi kitle hareketlerini oluşturmaya uygun jeolojik, jeomorfolojik ve iklimsel özelliklere sahiptir. Kitle hareketinin ana kaynak alanının, Kavacık Çiftliği doğusunda yer alan vadi içerisinde 1500 ile 1600 metre kotları arasındaki güneye akan doğal su kaynakları ve bu kaynakları besleyen göller bölgesinde geliştiği gözlenmiştir (Şekil 2.43, Şekil 2.44).

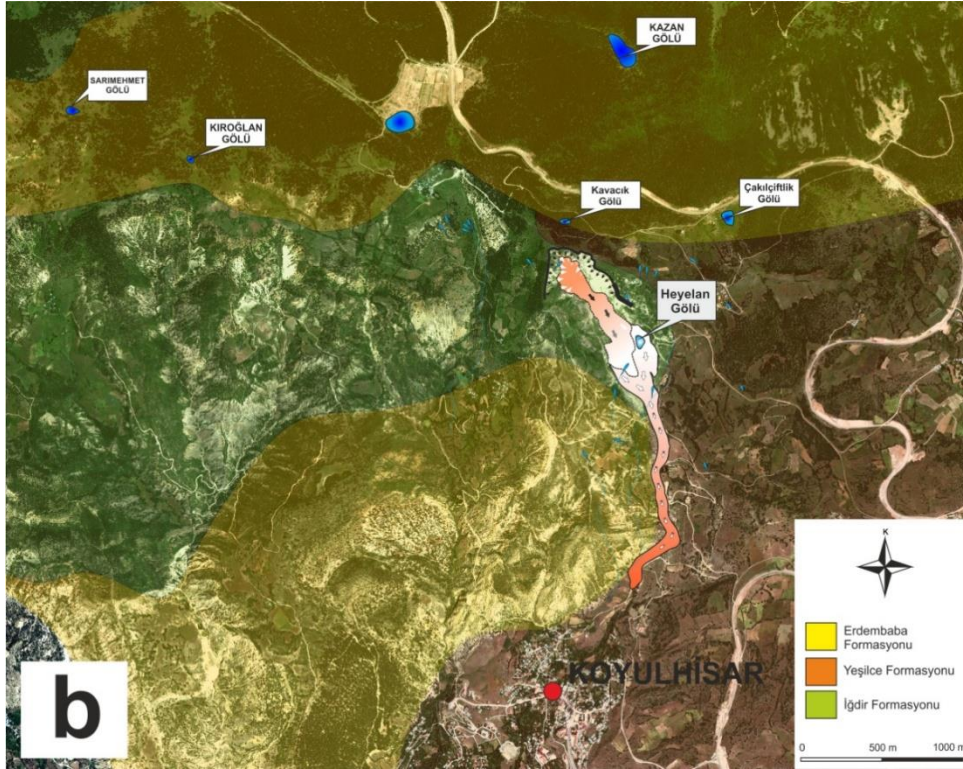


Şekil 2.42. Heyelanlı kütle içerisinde yer alan küçük gölcüklerin görünümü



Şekil 2.43. Kitle hareketinin ana kaynak alanında yer alan göllerden görünüm.

Kitle hareketinin meydana geldiği vadi yaklaşık 3 km uzunluğundadır ve bu vadiyi besleyen 17 adet su kaynağı bulunmaktadır (Şekil 2.44). Ancak heyelan sonrasında akmanın gerçekleştiği vadi içerisinde de yeni su kaynakları oluşmuştur. Kitle hareketi, mevsimsel ısı değişimine bağlı ani kar erimeleri sonucunda yüzey ve yeraltı sularının bölgedeki ayrılmış kaya birimleri ile etkileşimi sonucunda başlamış, daha alt kotlarda ise ayrılmış killi kayalar boşalan su kaynaklarının da etkisiyle suya aşırı doygun hale gelmiştir.



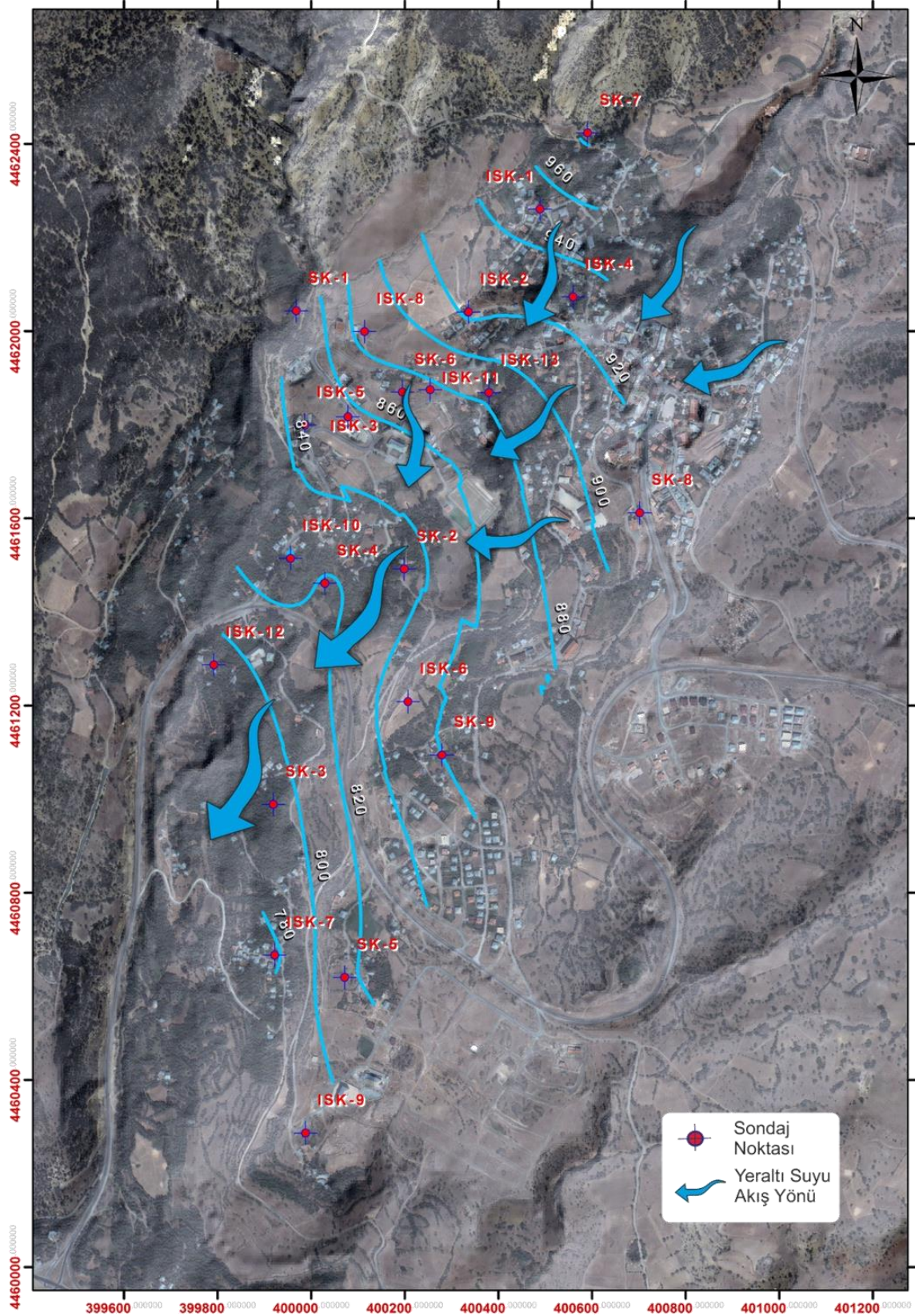
Şekil 2.44. Koyulhisar heyelan bölgesi, kitle hareketinin ana kaynak alanındaki su kaynakları ve göllerin uydu görüntüsündeki konumu

Çalışma Sahasına ait yer altı su seviyesi belirlenmesi için DPT-120220K nolu proje kapsamında inklinometre ölçüsü gerçekleştirebilmek için daha önce açılmış olan sondaj kuyuları kullanılmıştır. İlk olarak bu kuyuların yerleri belirlenmiştir. Şekil 2.45' de DPT-120220K nolu proje kapsamında açılan tüm sondaj kuyuları ve bu kuyulara ait loglardan elde edilen yer altı su seviyelerinden enterpole edilen yer altı su seviyeleri ve su akış yönleri gösterilmektedir. Bu kuyulardan ISK isimli olanlar inklinometre kuyusu olup mevcutta da bulunmaktadır. Fakat SK kodlu olan kuyular kapatılmıştır. Proje çalışmalarında ISK kodlu inclinometre kuyularından dahrip olmamış 6 adet kuyu belirlenmiştir. Bu kuyulara ait uydu görüntüsü Şekil 2.47' de verilmektedir. Şekil 2.46 'da yeraltı su ölçümlerinin ilişkin fotoğraflar bulunmaktadır. Yer altı su seviyelerini ölçmek için bir adet kuyumetre aleti satın alınmıştır. Bu alet yardımı ile periyodik olarak altı sondaj kuyusunda yer altı su seviyeleri belirlenmiştir. Bu kuyulardan ISK05 isimli kuyunun derinliği 5 m olduğu için 5. Periyotdan sonra bu kuyudan ölçü alınamamıştır.

ISK13 nolu kuyuda ise kuyu suyunun tarımsal amaçlı olarak tarla sulama işlerinde kullanıldığı belirlenmiş ve tutarlı sonuçlar elde edilemeyeceği kanısına varılmıştır. Şekil 2.45' den de açıkça görüleceği üzere ISK09 nolu kuyu ise heyelan sahası olarak nitelendiren vadinin içerisinde bulunmamaktadır. Bu kuyunun bulunduğu noktanın topoğrafik özelliklerinden dolayı bu kuyuyu besleyen kaynaklar heyelan sahası içerisindeki kuyulardan farklıdır. Bu yüzden bu kuyuya ait veriler heyelan sahasındaki yeraltı su seviyesi değişimi yorumlarında göz önünde bulundurulmamıştır.

Heyelan sahası içerisindeki ISK2, ISK11 ve ISK10 nolu kuyular aynı vadi içerisinde ve aynı topoğrafik özelliklere sahip kuyulardır. Bu yüzden heyelan sahasına ait yeraltı su seviyesi değişim yorumlarında sadece ISK2, ISK11 ve ISK 10 nolu noktalara ait veriler kullanılmıştır. Şekil 2.48' de yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı yorumlarda kullanılmayan ISK9, ISK5, ISK13 nolu kuyulara ait yeraltı su seviyesi değerleri verilmektedir. Şekil 2.49' da ise yorumlarda kullanılan ve heyelan sahasındaki yer altı su seviyesi değişimini gösteren kuyulara ait değerler sunulmaktadır.

Şekil 2.49 incelendiğinde Yeraltı su seviyesinin Nisan aylarında arttığı Ağustos ve Ekim aylarında ise azaldığı açıkça gözlenmektedir. Burdan da açıkça anlaşılacağı üzere bölgedeki yeraltı su seviyesi yağışlardan daha çok Nisan ayıyla birlikte eriyen kar suları nedeni ile artış göstermektedir.



Şekil 2.45. DPT-120220K nolu proje kapsamında açılan ve yer altı su seviyeleri ölçülen kuyular

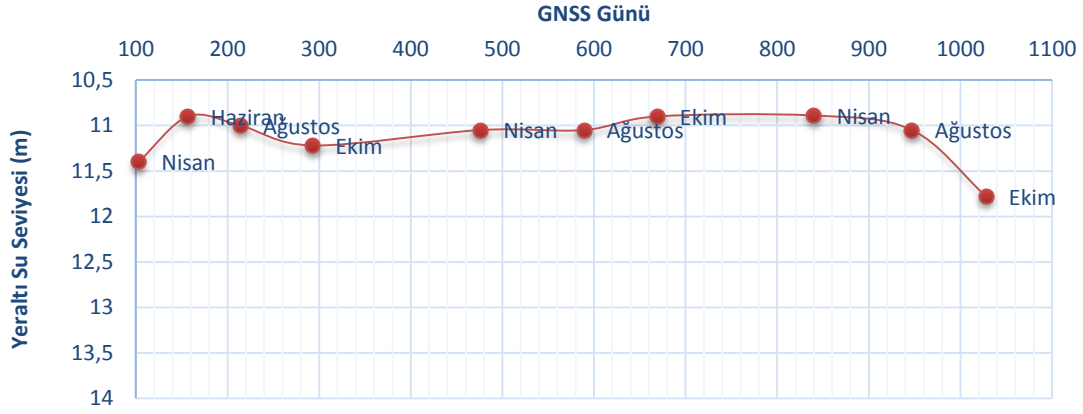


Şekil 2.46. Yeraltı su seviyesi ölçümleri

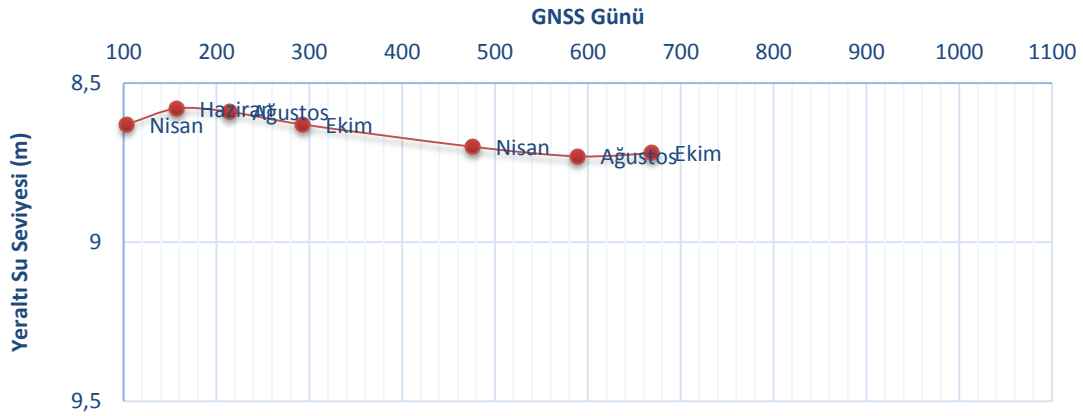


Şekil 2.47. Yer altı su seviyesi ölçüm sondaj kuyularına ait lokasyonlar

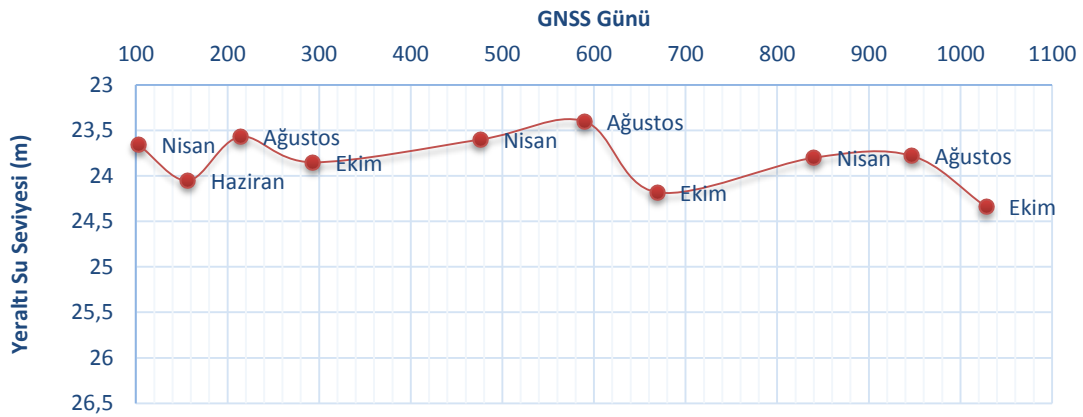
ISK9 (Heyelan Sahası Dışındaki Nokta)



ISK05 (Yeterli Derinlikte Olmayan Nokta)

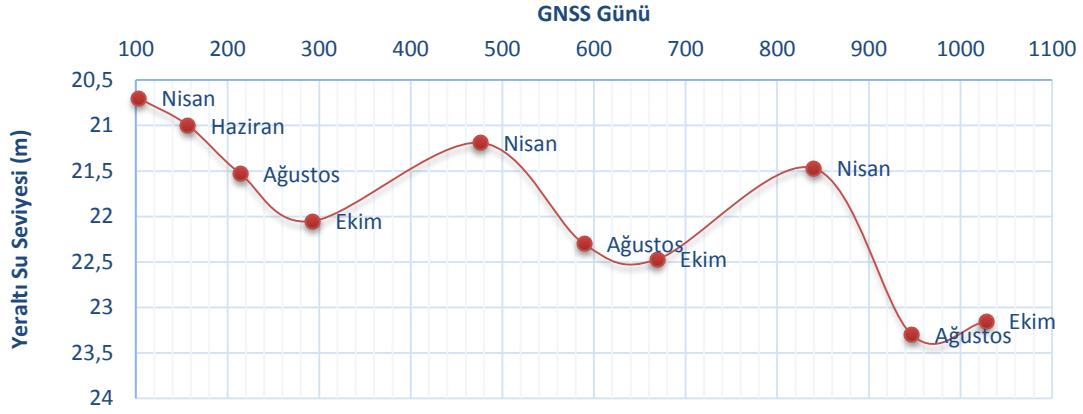


ISK13(Tarımsal Sulama Amaçlı Kullanılan Nokta)

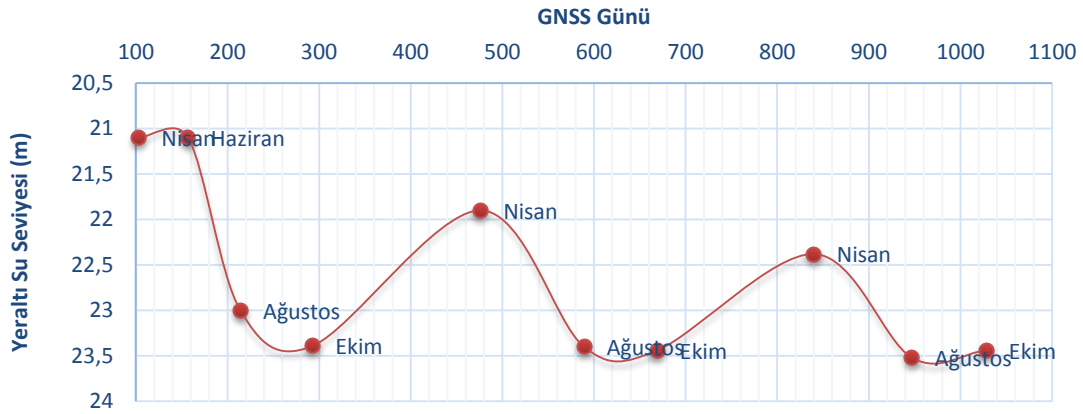


Şekil 2.48. Yourmlarda kullanılmayan ISK9, ISK5, ISK13 nolu kuyulara ait yeraltı su seviyesi değerleri.

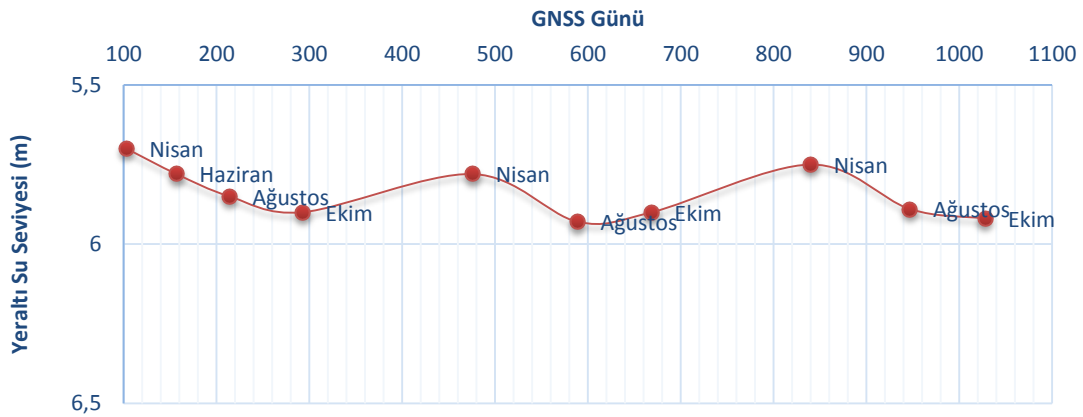
ISK02



ISK11



ISK10

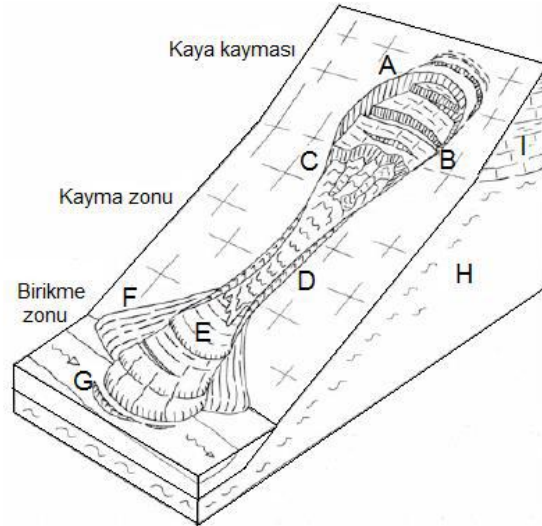


Şekil 2.49. Yorumlarda kullanılan ve heyelan sahasındaki yer altı su seviyesi değişimini gösteren kuyulara ait yeraltı su seviyesi değişimi değerleri.

2.7 Heyelanlar

Heyelan, doğal kaya, zemin, yapay dolgu veya bunların bir ya da birkaçının bileşiminden oluşan şev malzemesinin, yerçekimi, jeolojik ve su içeriği gibi doğal faktörler ile bilinçsizce yapılan yamaç-şev kazısı, yapay patlatmalar, yamaçlar üzerindeki bitki örtüsünün yok edilmesi, çeşitli amaçlar için arazinin yanlış kullanılması gibi doğal olmayan çeşitli faktörlerin etkisi altında yamaç eğimi yönünde çoğunlukla dairesel ya da düzlemsel hareketle sonuçlanan bir olaydır. Hareketin hızı ve büyüklüğü, yamaç eğimi ve içerdiği su miktarı ile doğru orantılıdır.

Koyulhisar ilçe merkezi ve yakın çevresinde Eosen yaşlı killi seviyeler, Alt Miyosen yaşlı killi ve jipsli seviyeler ile Pliyo-Kuvaterner yaşlı teras çökellerinin gözlemlendiği alanlarda çok büyük eski heyelan kütleleri görülmektedir. Bu heyelanların çoğu genel olarak dairesel-dönme şeklinde bir mekanizmaya sahiptir. Koyulhisar ilçe merkezi dairesel-dönme şeklinde meydana gelmiş eski bir heyelan üzerinde bulunmaktadır. Koyulhisar'ın üzerinde bulunduğu eski heyelan kütlelerinin önü açık olup, geçen zaman içerisinde sürekli aktivitesini sürdürmüştür. Ancak bu aktivite kütsel olmayıp, genellikle ana kütle üzerinde meydana gelen lokal heyelanlar şeklindedir (Tatar v.d 2000).



Şekil 2.50. Basitleştirilmiş olarak heyelanın bölümlerinin görünümü.

Şekil 2.50' de A ana yamaç, B gerilme çatlakları ve çukurlar, C küçük yamaç, D yanal set, E radyal çatlaklar ve çapraz sırtlar, F pasif kalmış eski topuk kısmı, G topuk, H kayma yüzeyi, I ana kaya (Bertollini vd., (2013)'den düzenlenerek alınmıştır).

Heyelanı oluşturan yapısal elemanları ve özellikleri ise kısaca aşağıda anlatılmaktadır.

Taç: Heyelanın en üst kısmı ve aynanın gözlemlendiği bölümde karakteristik olarak gerilme çatlakları gözlenir, hareketsiz kalmış kısım olarak tanımlanır.

Ana (Esas) Ayna: Kayan zemin kütlelerinin dik veya dike yakın yüzey bölgesidir.

Tepe: Hareket eden kütle ile ana aynanın kesiştiği yerin en üst noktasıdır.

Ana Kütle: Kayma yüzeyi boyunca hareket eden malzemenin tümünü içerir.

Çapraz (Enine) Çatlaklar: Heyelanın topuğunun üst kısmında meydana gelen çatlaklardır. Genellikle kabarma bölgesinde meydana gelir. Kabarma bölgesine karşılık çökme bölgelerinin karakteristikleri ise heyelan gölcükleridir.

Topuk: Hareket eden kütlelerin en son kısmıdır. Heyelan sınıflandırmalarında malzemenin toplandığı yer olarak tanımlansa da topuk genellikle dairesel kaymalarda kullanılan bir terimdir. Heyelanların orta kısımlarında genellikle çökmeler meydana gelirken alt kısımlarında kabarmalar meydana gelir.

Tablo 2.5. Heyelanların hareket ve malzeme türüne göre sınıflandırılması (Varnes'den (1978) düzenlenerek alınmıştır).

HAREKET TÜRÜ		Malzemenin Türü	
		KAYAÇLAR	ZEMİNLER
			İri Daneli İnce Daneli
Düşme		Kaya düşmesi	Moloz düşmesi Zemin düşmesi
Devrilme		Kaya devrilmesi	Molozda devrilme Zeminde devrilme
Akma	Yavaş	Kaya kripi	Moloz kripi Zemin kripi
	Hızlı	Çok parçalı kayaç akması	Moloz akması Zemin akması
Kayma	Ötelemeli	Kayada blok türü ötelenme	Zeminde/molozda blok türü ötelenme
	Dönel	Sıkı çatlaklı kayada dönel kayma	Zeminde molozda dönel kayma
Yanal Yayılma		Kaya yayılması	Zemin/moloz yayılması
Karmaşık		Hem hareket türü hem de malzeme karışık	

Genellikle kayma şeklinde olan heyelanlar, düşme, kayma ve akma hareketleriyle ya da bunlardan birkaçının birleşmesiyle de olabilmektedir. Buna göre sınıflandırma için kullanılan ve Tablo 2.5' de sunulan hareket türüne göre heyelan tipleri aşağıda ayrı olarak kısaca anlatılmaktadır.

Düşmeler: Ana kütleden ve yerden gevşeme veya parçalanma yoluyla ayrılan bölümlerin ani hareketi düşme olarak tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle düşme kaya parçalarıyla, yeri oluşturan gereçlerin eğim doğrultusunda hareketi şeklinde görülen bir heyelan türüdür. Düşme hareketi, doğal ve yapay nedenlere dayanmaktadır. Düşme hareketi kayma hareketinden farklı olarak serbest düşme şeklindedir.

Kaymalar: Kayma direncinin bir ya da birkaç yüzey boyunca azalmasıyla oluşan heyelanlar, kaymalar olarak adlandırılır. Kayma sırasında, hareket eden gereçler birbirleriyle etkileşim halindedirler. Bu kütleler, belirli ölçüde temel özelliklerine bağlı kalarak bozulmakta, parçalanmakta ve son aşamada akmalara dönüşmektedir. Kaymalar da kendi içinde ikiye ayrılabilir.

Düzlemsel kaymalar: Bu tip kaymalar, kayan kütlenin jeolojik oluşumuyla ilgilidir. Kayan malzemenin kalınlığı birkaç metre olmasına rağmen, etkiledikleri alan oldukça geniştir. Bu tip heyelanlar hem kaya, hem de kohezyonlu (bozuşmuş) ve kohezyonsuz (bozuşmamış) zeminlerde görülmektedir. Toprak kaymaları, bu tip heyelanlara bir örnektir. Bunlar su ile dolgunlaşan ve kayganlaşan yüzeylerin veya toprakların, kopma sonucu bulunduğu yamaçlardan aşağıya ve yana doğru yer değiştirmesiyle oluşurlar ve bunlar yüzeyseldirler. Bu kaymalar, ana kaymalar ile yüzey gereçlerinin kayması şeklinde olmaktadır.

Dönel Kaymalar: Kayan gerecin özelliğinin çok az değiştiği ya da hiç değişmediği heyelanlardır. Bunlar en sık görülen heyelan tipidir. Kopma yüzeylerinin şekli kaşığa benzemekte ve genellikle yamaç (şev) göçmesi şeklindedir. Kayma sonucunda, hareket eden kütlenin üst kısımları çökerken, alt kısımları yığılma nedeniyle kabarır. Yamaçların alt kısımlarının akarsular, dağlar veya yapay etkinlikler sonucu oyulması, göçme şeklindeki bu heyelanların esas nedenidir. Bu tür heyelanların oluşumu daha çok dolgu yamaçlarında gerçekleşir.

Akmalar: Daha çok yamaç döküntüsü, ayrıışmış malzemeler, kumlar ve sıkışmamış yüzey formasyonları gibi, gevşek gerecin ıslak ya da kuru zemin üzerindeki yer değiştirmesi akma hareketi olarak tanımlanmaktadır. Bu tür hareketin temel nedeni, boşluk suyu basıncının oluşmasına neden olan ve kayma direncini azaltan sudur. Akmalar genellikle kuvvetli sağanaklar sırasında veya sonrasında ortaya çıkmaktadır. Kaynak suları, donmuş zeminlerin ani çözülmesi gibi, diğer bazı etkenler de bu tip heyelanlara neden olabilmektedir.

Zemin Akmaları: İçinde belli miktarda su bulunduran, kaba ve ince yüzey malzemeleri az eğimli yamaçlarda kayma, çok eğimli yamaçlarda ise akma hareketi göstermektedir.

Yukarıda anlatıldığı gibi heyelan tipleri çok çeşitlidir. Bu nedenle bir bölgede heyelan araştırması yapılıyorsa, heyelan tipinin doğru belirlenmesi için araştırma veya incelemede kullanılan yöntem çok dikkatli seçilmeli ve buna bağlı olarak heyelanın iyi analiz edilmelidir.

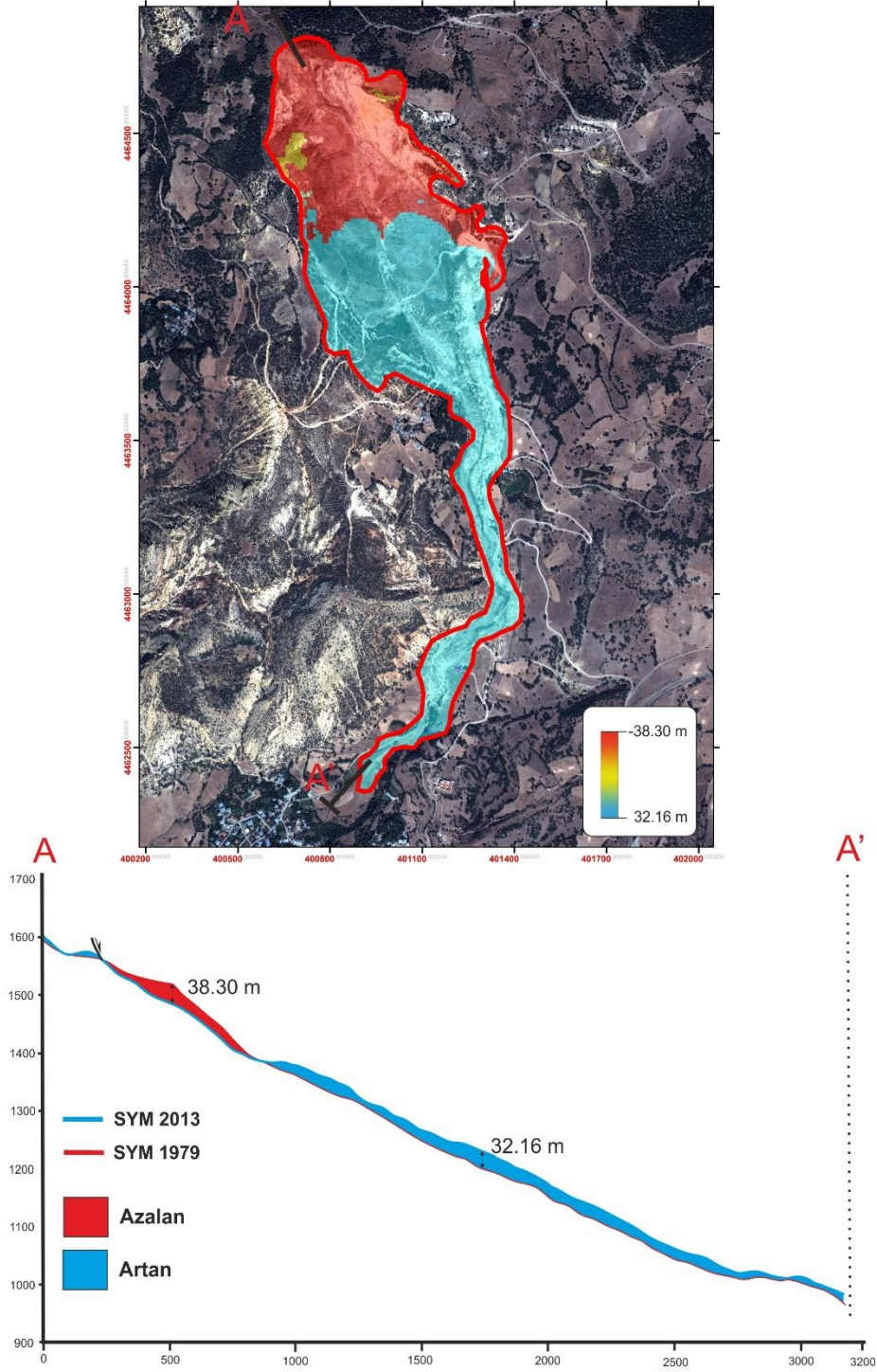
Çalışma alanında meydana gelen heyelanların incelenmesi sonucunda yağışlar ve bitki örtüsünün de büyük ölçüde rol oynadığı görülmüştür. Özellikle 1998 ve 2000 yılı heyelanlarından önce gerçekleşmiş olan bol yağışlı kış ve ilkbahar mevsimlerinin etkisi ile kırık ve çatlakların su ile dolması sonucunda, hem buralarda yaygın kil dolgunun dayanımını düşürmüş, hem de buralarda kayma düzlemlerinde hareketin oluşmasına katkıda bulunmuştur. Bununla birlikte, kayaların üzerinde bulunan kalın toprak örtüsünün birim hacim ağırlığının artmasına da katkıda bulunarak şevlerde ek yükleri arttırmıştır.



Şekil 2.51. Koyulhisar heyelanı Taç kısmından görünüm (Nisan 2014)

Çalışma alanındaki şevler üzerinde bulunan sık ormanlık özelliği, yağışlı sezonda ve karların erimesi sırasında suyun şev aşağı akışını yavaşlatmış ve suyun toprak malzemenin içerisine doğru sızmasını kolaylaştırmıştır. Böylece yamaçta kaymayı oluşturan kuvvetler artmıştır (Sendir H. ve Yılmaz I. , 2001). Şekil 2.52’ de bölgede 1998 ve 2000 yılında gerçekleşen heyelanlar sonucunda oluşan topoğrafyadaki kütle değişimi gösterilmektedir. 1979 ve 2013 yıllarına ait sayısal yükseklik verilerinin karşılaştırılması sonucunda Şekil 2.52’ deki sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre 1998 ve 2000 yıllarında gerçekleşen heyelan sonucu yaklaşık 251300 m² lik alan içerisinde 2927750 m³ malzeme yamaç aşağı hareket etmiştir. Hareket eden bu

malzemenin 422000 m² lik alan içerisinde 4912193 m³ lük malzeme olarak yayıldığı görülmektedir.



Şekil 2.52. 1979 ve 2013 yıllarına ait sayısal yükseklik verilerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilen malzeme hareketi.

Heyelan içerisinde yapılan detaylı incelemelerde güncel olarak devam eden gerilme çatlakları, kayma yüzeyleri (şekil *) ve basamak şeklinde düşmeler görülmektedir (Şekil 2.53).



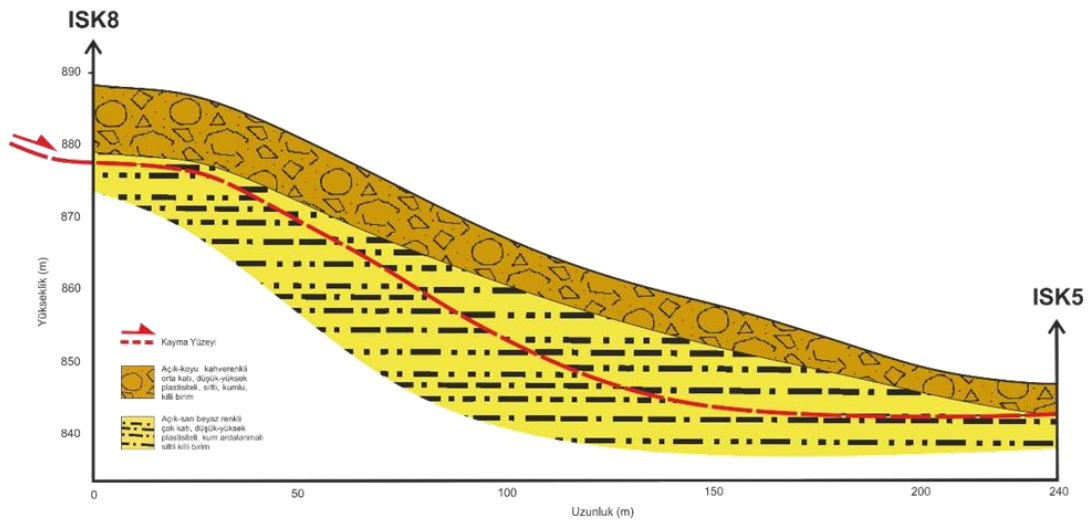
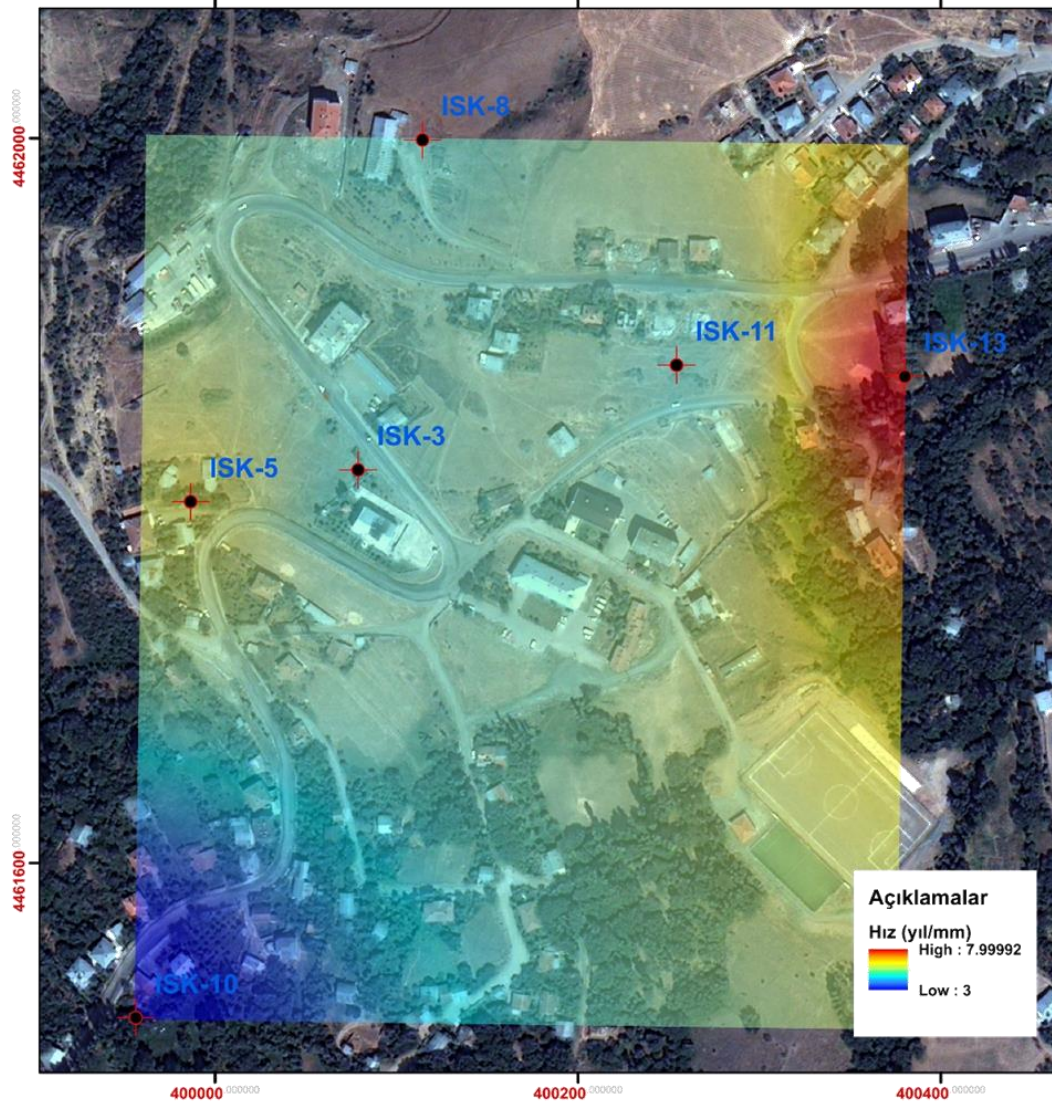
Şekil 2.53. Heyelan içerisinde meydana gelen a ve c gerilme çatlakları b kayma yüzeyinden görünüm (Nisan 2014)



Şekil 2.54. Heyelan içerisinde gözlemlenen basamaklar (Nisan 2013)

Daha önceki yapılan çalışmalarda (Sendir H. ve Yılmaz I. , 2001) çalışma alanı içerisindeki potansiyel yamaç duransızlıklarının, genellikle güneye doğru (G, GB- GD) hakim olduğu görülmüştür. Bu da Koyulhisar ilçesi ve civarındaki hakim yamaç yönleridir. Çalışma alanı içerisinde belirlenmiş eski ve yeni tüm heyelanlar, güneydeki Şihlar fayı ile kuzeydeki Dumanlıca fayı arasında gözlenmiş olması, bu heyelanların tümünün kuzeyden güneye doğru, Dumanlıca fayından Şihlar fayına kadar uzanan ve birçok heyelanın birleşmesi ile oluşan karmaşık bir heyelan sistemi ile açıklanmıştır.

Ayrıca Hatiboğlu O., 2009 un Koyulhisar ilçe merkezinde yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, inklonometre ölçümleri yaparak bölgeye ait kayma yüzeylerini belirlemiştir. Elde edilen bu veriler kullanılarak ilçe merkezine ait inklonometre ölçüm noktaları derlenmiş ve enterpole edilerek noktaların dışında kalan, ölçüm noktasının olmadığı alanların yaklaşık değerlerine ulaşılmıştır. Bu işlem sonucunda yeni kesit hattı belirlenerek kayma yüzeyleri ortaya çıkarılmıştır. Şekil 2.55' de kayma yüzeyi ve sondaj verileri yardımıyla elde edilen jeolojik birimlerin kesiti gösterilmektedir.



Şekil 2.55. Kayma yüzeyi ve sondaj verileri yardımıyla elde edilen jeolojik birimlerin kesit gösterimi

Şekil 2.55 incelendiğinde özellikle şehir merkezinde kayma yüzeyinin, 5 ila 20 m derinlikte değişen ve kum ardalımalı sitli killi birimlerde olduğu gözlenmiştir. Çalışma alanı içerisinde daha önce oluşmuş Koyulhisar heyelanı dışında bölgedeki su kaynaklarına ve yamaç eğimine bağlı olarak gelişen farklı küçük ölçekli heyelanlar ve kaya düşmeleri gözlenmektedir.

Koyulhisar ilçe merkezine yaklaşık 2 km uzaklıkta yol kenarında meydana gelen heyelan Çamlıyaka Fayı doğrultusunda ve düdenyaylası formasyonu üzerinde yer alan birimlerin tabaka eğim yönünde yenilmeye uğrayarak küçük ölçekli kütle hareketine sebep olmuştur. Bölgedeki diğer heyelanlara ilişkin fotoğraflar Şekil 2.56 ve 2.57’ de verilmiştir.



Şekil 2.56. Koyulhisar ilçe merkezi karayolu kenarında gelişen heyelan (Nisan 2014)



Şekil 2.57. Bölgedeki diğer heyelanlar ve kaya düşmesi (Nisan 2014)

2.8 Depremsellik

Çalışma alanı Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde yer alan sismik aktivitelerin yoğun olduğu bir kuşak üzerinde yer almaktadır. Bölge, oluşabilecek orta-büyük ölçekteki deprem sarsıntılarıyla yenilmeye uğrayıp heyelan oluşturabilecek potansiyele sahiptir. Bölgenin topoğrafik özellikleri ve aktif fay zonu üzerinde olması nedeniyle oluşan küçük ölçekte gelişen fayların yanı sıra yoğun süreksizliklerin olması Kelkit Vadisi boyunca bölgeye büyük bir handikap sağlamaktadır.



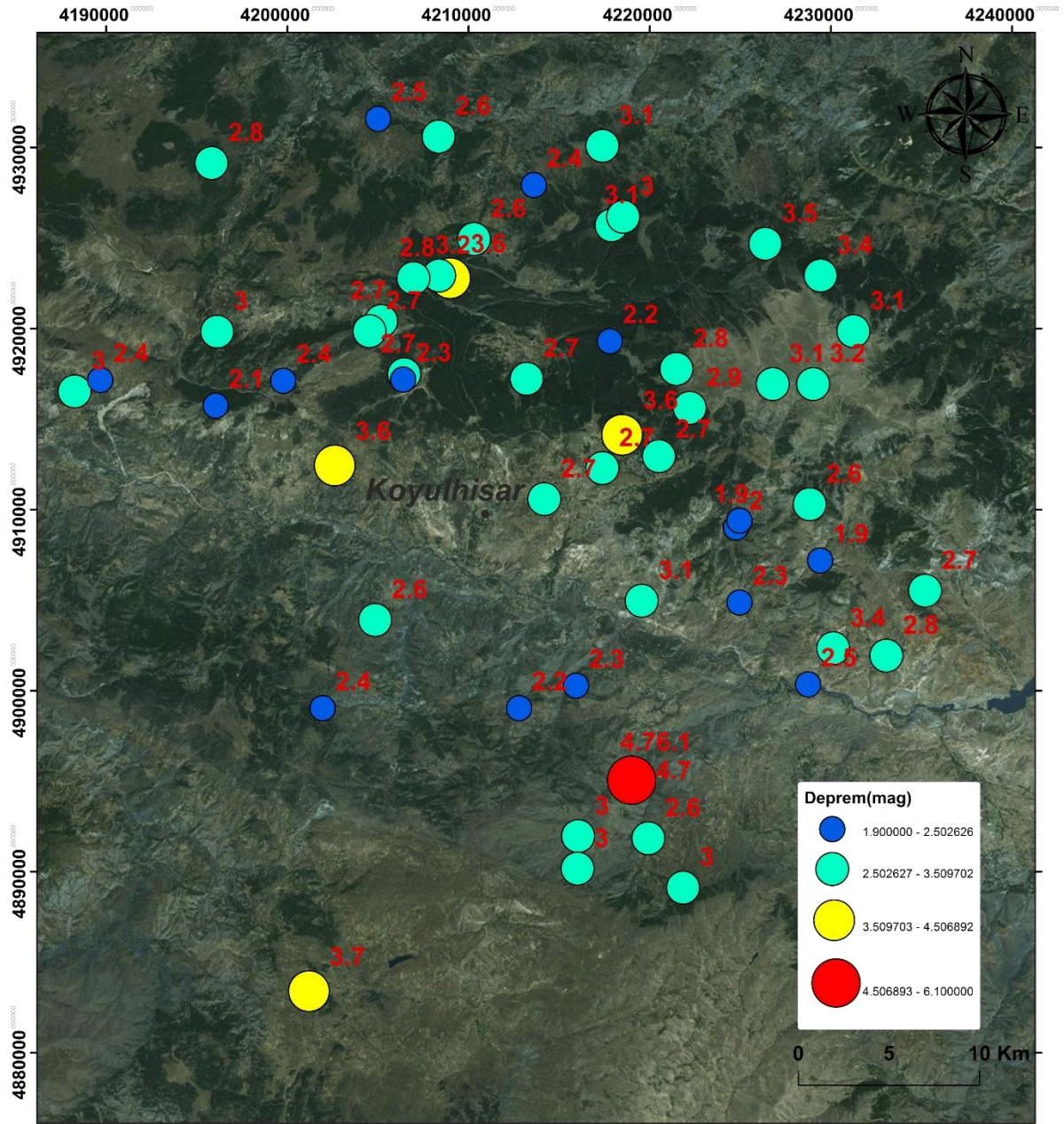
Şekil 2.58. MTA tarafından 2012 yılında güncellenen Türkiye diri fay haritası ve çalışma alanı Google earth üzerinde gösterimi

Çalışma alanına ait Kandilli rasathanesi verileri derlenip bölgedeki tarihsel ve aletsel depremler Tablo 2.6' da sunulmaktadır.

Tablo 2.6. Bölgede meydana gelen depremler

Oluş zamanı	Enlem	Boylam	Mag	Yer
2014.12.21	40.2832	37.9935	1.9	YAGCILAR-KOYULHISAR
2014.10.10	40.3662	37.8892	2.2	ARPAALAN-MESUDIYE
2014.09.02	40.2358	37.8725	2.3	GOLCUK-KOYULHISAR
2014.08.16	40.2273	37.8442	2.2	GOLCUK-KOYULHISAR
2014.08.16	40.1788	37.8735	3	GUNISIK-KOYULHISAR
2014.08.02	40.3537	37.7872	2.7	YENIASLAN-KOYULHISAR
2014.07.11	40.2957	37.9518	2	CUKUROBA-KOYULHISAR
2013.07.24	40.341	37.9288	2.9	IKIZYAKA-KOYULHISAR

2013.06.19	40.3418	37.6938	2.1	SUGOZU-KOYULHISAR
2013.05.17	40.3738	37.7758	2.7	YENIASLAN-KOYULHISAR
2013.01.14	40.2363	37.9875	2.5	KILICPINARI-KOYULHISAR
2012.11.13	40.4252	37.8515	2.4	MUSALI-MESUDIYE
2012.09.22	40.2983	37.9535	1.9	CUKUROBA-KOYULHISAR
2012.09.01	40.39	37.7918	2.8	GUNEYCE-MESUDIYE
2012.06.14	40.4335	37.6917	2.8	ESATLI-MESUDIYE
2012.01.30	40.2673	37.9535	2.3	YALNIZTEPE-KOYULHISAR
2012.01.06	40.3065	37.8567	2.7	HACIILYAS-KOYULHISAR
2012.01.05	40.3517	37.7867	2.3	YENIASLAN-KOYULHISAR
2011.12.31	40.3512	37.7272	2.4	YUVALI-MESUDIYE
2011.10.20	40.37	37.77	2.7	YENIASLAN-KOYULHISAR
2011.09.13	40.3182	37.8855	2.7	IKIZYAKA-KOYULHISAR
2011.08.23	40.4132	37.8958	3	GUVENLI-MESUDIYE
2011.05.11	40.2607	37.7728	2.6	BOYALI-KOYULHISAR
2011.04.06	40.178	37.9083	2.6	YOLUSTU-KOYULHISAR
2011.03.31	40.4435	37.8043	2.6	YARDERE-MESUDIYE
2011.03.22	40.4502	37.7743	2.5	MESUDIYE
2011.01.21	40.2273	37.7468	2.4	KARACAM-KOYULHISAR
2011.01.17	40.4048	37.8218	2.6	YESILCIT-MESUDIYE
2010.11.14	40.3045	37.9883	2.6	SUTLUCE-KOYULHISAR
2010.10.06	40.3698	37.6945	3	CAVDAR-MESUDIYE
2010.06.14	40.3515	37.6365	2.4	SUGOZU-KOYULHISAR
2010.05.24	40.3227	37.9135	2.7	IKIZYAKA-KOYULHISAR
2010.03.25	40.3472	37.6238	3	GOKDERE-KOYULHISAR
2009.11.12	40.3557	37.9222	2.8	IKIZYAKA-KOYULHISAR
2009.10.12	40.2718	38.0455	2.7	HODUCEK-SUSEHRI
2009.10.12	40.2472	38.0263	2.8	KESIKKAS-SUSEHRI
2009.09.05	40.268	37.905	3.1	KAYAOREN-KOYULHISAR
2009.04.19	40.44	37.8855	3.1	GUVENLI-MESUDIYE
2009.03.17	40.403	37.9663	3.5	ORTAKOY-KOYULHISAR
2009.03.17	40.391	37.9937	3.4	ORTAKOY-KOYULHISAR
2007.06.16	40.3308	37.8953	3.6	IKIZYAKA-KOYULHISAR
2007.05.11	40.352	37.848	2.7	ARPAALAN-MESUDIYE
2007.03.03	40.3192	37.7528	3.6	CAYLI-KOYULHISAR
2007.02.16	40.391	37.8045	3.2	GUNEYCE-MESUDIYE
2007.01.16	40.1593	37.9255	3	EKINOZU-KOYULHISAR
2006.02.15	40.1665	37.8732	3	EKINOZU-KOYULHISAR
2004.11.02	40.39	37.81	3.6	GUNEYCE-MESUDIYE
2004.09.20	40.35	37.97	3.1	CUKUROBA-KOYULHISAR
2004.09.18	40.37	38.01	3.1	ORTAKOY-KOYULHISAR
2004.09.18	40.35	37.99	3.2	CUKUROBA-KOYULHISAR
2003.05.15	40.41	37.89	3.1	GUVENLI-MESUDIYE
1997.09.26	40.25	38	3.4	KILICPINARI-KOYULHISAR
1997.04.09	40.12	37.74	3.7	DEREKOY-ZARA
1929.06.28	40.2	37.9	4.7	GUNISIK-KOYULHISAR
1929.05.19	40.2	37.9	4.7	GUNISIK-KOYULHISAR
1929.05.18	40.2	37.9	6.1	GUNISIK-KOYULHISAR

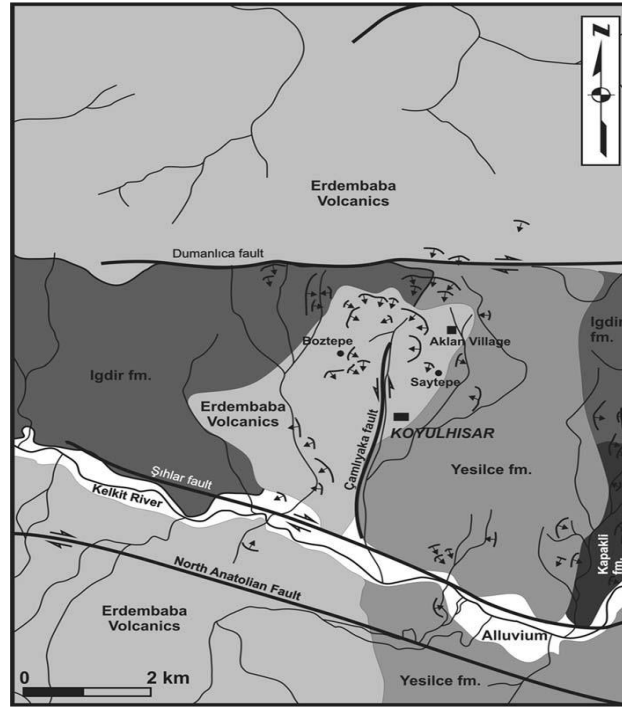


Şekil 2.59. Bölgedeki depremlerin uydu görüntüsü üzerindeki dağılımları

3. GNSS ÖLÇÜ VE DEĞERLENDİRME

3.1 GNSS İstikşaf Çalışması ve Nokta Tesisi

İstikşaf çalışmalarında altlık olarak Google Earth uydu görüntüleri ve Yılmaz (2009)' da belirtilen bölgeye ait jeolojik harita (Şekil 1) kullanılmıştır. Tesis edilecek GNSS noktası lokasyonları belirlenirken bölgede daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalardan faydalanılmıştır. Hastaoğlu (2009); özellikle şehir merkezinde Emniyet binasının bulunduğu bölgede ortalama yıllık 8 cm olmak üzere, mevcut heyelan kütlesi üzerinde ise ortalama yıllık 1.5 cm hareket belirlemiştir. Bunun yanı sıra gerek yöre halkı gerekse yerel yönetim tarafından özellikle Emniyet binası ve civarında gözle görülebilir deformasyonların olduğu beyan edilmiş olup, bu beyanlar Hastaoğlu (2009) tarafından verilen bilgileri doğrulamaktadır. Şekil 3.1' de bu deformasyonlara ait fotoğraflar bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Koyulhisar ilçesi Jeolojik Haritası (Yılmaz 2009)

Özellikle Yılmaz (2009)' ın da belirttiği üzere, bölgedeki yer altı su seviyesindeki mevsimsel değişimler heyelanların oluşumunu tetikleyen önemli nedenlerden birisidir. Emniyet binasının temelinde açılan su kuyusunda özellikle karların eridiği nisan ayında su seviyesinin yüzeyden itibaren 20 cm' ye kadar çıktığı gözlenmiş olup, bu seviyenin yaz aylarında azaldığı gözlenmiştir (Şekil 3.3). Emniyet Müdürlüğü civarındaki yer altı su seviyesinin çok yüksek

olması bu bölgede oluşan büyük deformasyonların ana sebebini oluşturduğu düşünülmektedir. Gerek literatür gerekse yöre halkından edinilen bilgiler ışığında Emniyet binası ve civarında nokta sıklığının artırılması kararı alınmıştır. Böylelikle bu farklı deformasyonun alansal olarak da belirlenmesi planlanmıştır.



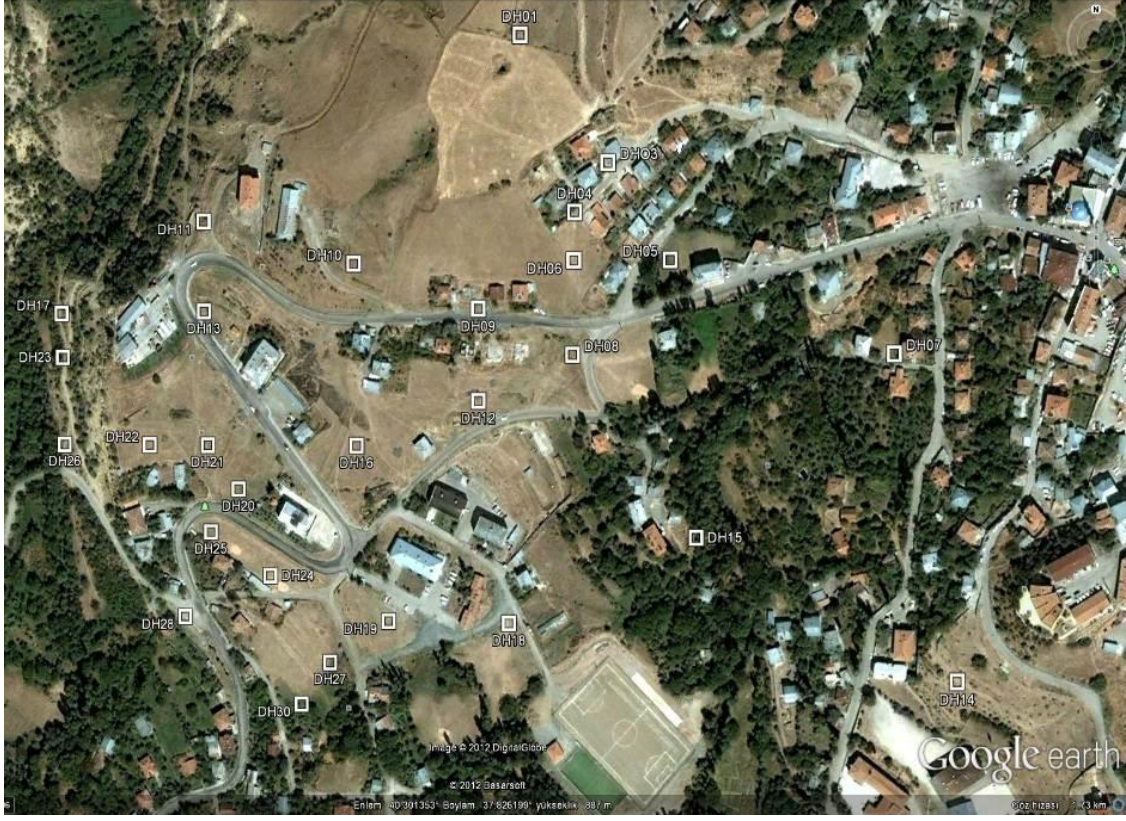
Şekil 3.2. Emniyet Binası ve civarındaki deformasyonlar (Hastaoglu vd., 2011).



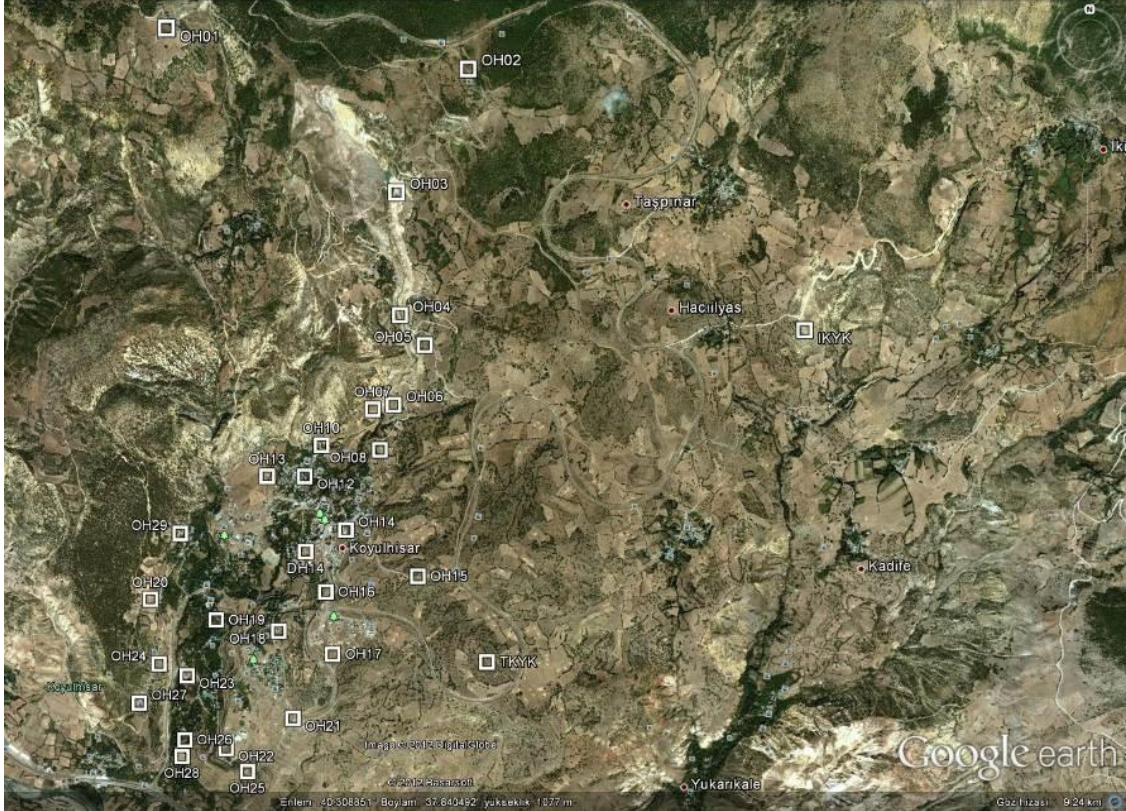
Şekil 3.3. Emniyet binasının temelinde açılan su kuyusu (Haziran 2012).



Şekil 3.4. Heyelan sahasına tesis edilen bütün GNSS noktaları (60 adet).



Şekil 3.5. Sadece Emniyet binası civarındaki 50 m aralıklarla tesis edilen GNSS noktaları.



Şekil 3.6. Emniyet binası civarındaki noktalar dışında kalan yaklaşık 100-200 m aralılarla tesis edilen diğer noktalar

Bu doğrultuda çalışma alanında iki farklı GNSS nokta ağı planlanmıştır. Bunlardan ilki Şehir merkezindeki Emniyet Müdürlüğü binası ve çevresinde yaklaşık 30 noktadan oluşan ve noktalar arası mesafenin 50-70 m arasında olduğu birinci ağ ve diğeri ise tüm şehir merkezini kapsayan noktalar arası mesafelerin 100-200 m arasında değiştiği ve yaklaşık 24 noktadan oluşan ikinci ağdır. Bu GNSS ağlarının yanı sıra eski heyelan kütlesi üzerine 4 ve taç kısmına 2 adet GNSS noktası tesis edilmesi planlanmıştır. İki adet nokta ise heyelan sahası dışında sabit nokta olarak belirlenmiştir. Bu sabit noktalar belirlenirken gerekli jeolojik ve jeodezik kısıtlamalara dikkat edilmiştir. Bu sabit noktalardan birincisi İKYK isimdeki ve çalışma sahasına yaklaşık 13 km uzaklıktaki TUTGA noktası olarak planlanmıştır. İkinci sabit nokta ise İlçede yeni yapılan TOKİ konutları civarında bulunan TKYK isimdeki nokta olarak planlanmıştır. Tüm bu noktalara ait Google Earth görüntüsü Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6' da verilmektedir. Şekil 3.4' de tüm noktalar, Şekil 3.5' de sadece Emniyet binası civarındaki 50 m aralıklarla tesis edilen GNSS noktaları, Şekil 3.6' da ise Emniyet binası civarındaki noktalar dışında kalan yaklaşık 100-200 m aralıklarla tesis edilen diğer noktalar görülmektedir.

Tüm bu planlamalar doğrultusunda gerek GNSS nokta yerlerinin belirlenmesi ve gerekse nokta tesislerinin gerçekleştirilmesi için 28 Mart 2012 ile 01 Nisan 2012 tarihleri arasında 5 gün süre ile proje ekibinden 1 yürütücü, 2 araştırmacı, 3 bursiyer ve 1 teknisyen ile arazi çalışması gerçekleştirilmiştir. Nokta tesisleri için bu tarihlerin seçilmesindeki en büyük sebep bölgedeki iklim koşullarıdır. Bölgede kar yağışı mart ayının ortalarına kadar sürdüğü için istikşaf ve tesis çalışmaları ancak Mart ayının sonunda gerçekleştirilebilmiştir. Gerçekleştirilen İstikşaf çalışmaları neticesinde nokta yerleri belirlenmiş ve bu noktalara 50 cm uzunluğunda poligon taşları tesis edilmiştir. Şekil 3.7' de bazı noktalara ilişkin tesis fotoğrafları bulunmaktadır. Özellikle nokta yerleri belirlenirken GNSS noktaları için jeolojik (zemin yapısı, topografya vb.) ve jeodezik kısıtlamalar (çok yolluluk etkisi, uydu görüş açısı vb.) göz önünde bulundurulmuştur. Toplamda 57 noktada GNSS nokta tesisi gerçekleştirilmiştir. Proje süresince Tesis edilen bu GNSS noktalarından 4 tanesi tahrip edilmiş olup 10 periyot boyunca ölçülememiştir. Bu yüzden toplam 53 adet GNSS noktasında 10 periyot ölçü gerçekleştirilebilmiştir.



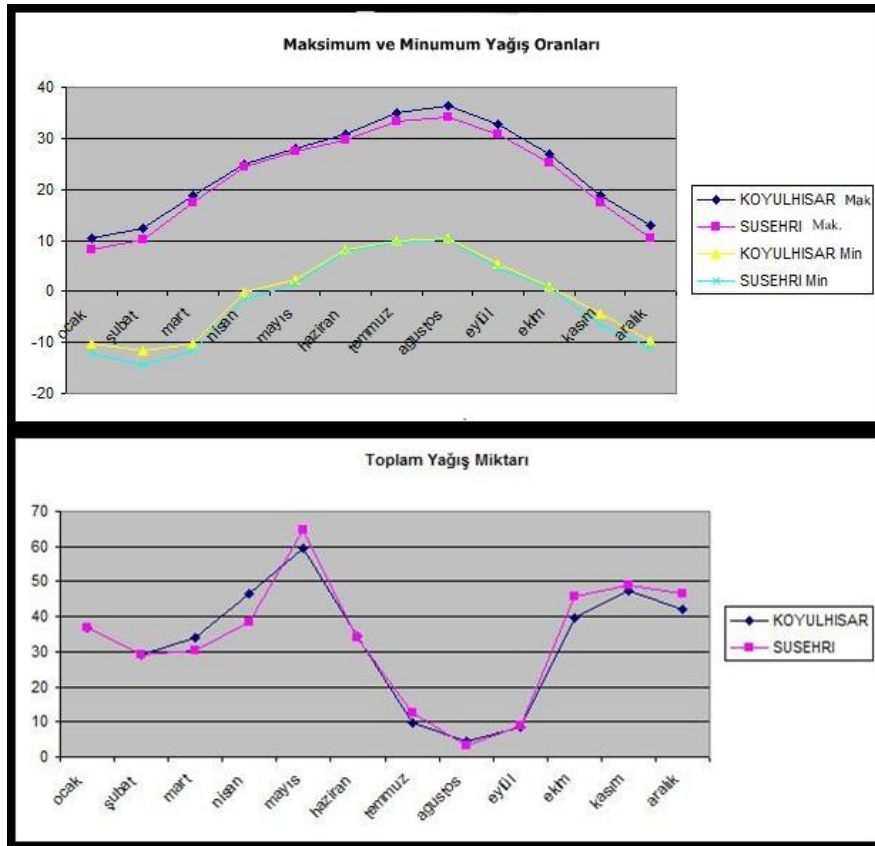
Şekil 3.7. Bazı GNSS noktalarına ilişkin tesis fotoğrafları (Mart 2012)

3.2 GNSS Ölçümleri

GNSS ölçümlerine geçilmeden önce ölçü periyotlarının tarihleri belirlenmiştir. GNSS ölçüleriyle deformasyon miktarlarının tam olarak belirlenebilmesi için, çalışılacak bölgedeki deformasyonların ana nedenlerinin bilinmesi gerekmektedir. Deformasyonu tetikleyen etkiler doğrultusunda deformasyon miktarları farklı hareketler gösterebilirler. Örneğin bir mevsimsel etkide deformasyon miktarı periyodik bir salınım gösteriyorsa bu bölgede periyodik etkinin pik yaptığı aylarda ölçüm yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde elde edilecek deformasyon miktarları yorumlanırken hata yapılabilir. Bu doğrultuda ilk olarak, literatür araştırması ile proje sahasında oluşan heyelanların ana nedenleri incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, bölgede daha önce gerçekleşen 1998 ve 2000 yıllarındaki her iki heyelanın da yoğun kar yağışı ile geçen kış mevsiminin ardından yaz aylarında gerçekleştiği görülmüştür. Hem 1998 hem de 2000 yılında meydana gelen heyelanlarda gerilme çatlaklarının su ile dolu olduğu ve kayan her kütleinin topuğunda göllerin olduğu gözlenmiştir. Yine, bu her iki heyelan da, son yılların en ağır geçen kış ve bahar mevsimlerinden sonra gelmiştir (Sendir ve Yılmaz, 2001). Çalışma alanında, suyun temel kaynağı eriyen kar ve yağmur suları olup, bu sular hidrolojik çevrimin en önemli bileşenidir. Özetle bölgedeki deformasyonların ana nedeninin

yeraltı su seviyesindeki değişimler olduğu tespit edilmiş olup GNSS ölçüm tarihleri de bu değişimler göz önüne alınarak planlanmıştır. GNSS ölçüm tarihleri belirlenirken Meteoroloji Genel Müdürlüğü' ünden alınan veriler referans kabul edilmiştir.

Koyulhisar bölgesinde meteoroloji genel müdürlüğüne ait ölçüm istasyonları ile, 1984- 1994 yılları arasında kesintili olarak hava sıcaklığı ve yağış oranları belirlenmiştir. 1994 yılında maddi gerekçeler yüzünden Koyulhisar ilindeki bu istasyon kapatılmıştır. GNSS ölçü periyotları belirlenirken meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmuştur. Koyulhisar ilçesinde aktif bir meteoroloji istasyonu bulunmadığı için, bu ihtiyacın Koyulhisar ilçesine yaklaşık 40 km uzaklıkta Suşehri ilçesindeki meteoroloji istasyonunda toplanan veriler ile giderilip giderilemeyeceği araştırılmıştır. Bu araştırmada Koyulhisar ilçesine ait 1984- 1994 yılları arasındaki yaklaşık 6 yıllık verilerden, aylara göre ortalama maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve toplam yağış miktarları hesaplanmıştır. Yine aynı tarihler arasında Suşehri ilçesindeki istasyon verileri içinde, aylara göre ortalama maksimum sıcaklık, minimum sıcaklık ve toplam yağış miktarları hesaplanmıştır. Daha sonra bu iki veri kümesi arasındaki korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Çıkan sonuca göre, maksimum ve minimum sıcaklık değerleri için korelasyon katsayısı 0,99, toplam yağış içinse 0,98 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.8' de Koyulhisar ilçesine ait aylara göre sıcaklık ve toplam yağış miktarları verilmektedir.



Şekil 3.8. Koyulhisar ilçesine ait aylara göre sıcaklık ve toplam yağış miktarları. (Sıcaklıklar derece yağış miktarları m^2 başına düşen ortalama m^3 biriminde verilmiştir.)

Şekil 3.8 incelendiğinde sıcaklıkların Nisan-Mayıs aylarında artışa geçtiğini, Ağustos’ da maksimum değere ulaştığını ve yine Ekim-Kasım ayında inişe geçtiğini görebiliyoruz. Yağış miktarlarının ise Nisan- Mayıs’ da maksimum, Ağustos’ da minimum Ekim-Kasım’da tekrar arttığını görüyoruz. Hem sıcaklıktaki hem de yağıştaki bu periyodik değişimler göz önüne alınarak ölçüm dönemleri olarak, Nisan, Ağustos, Kasım ayları tercih edilmiştir. Kasım ayından Nisan ayına kadar bölgede kar yağışı olduğu için noktalara ulaşım bu aylarda imkansız bir hal almaktadır, bu yüzden Kasım-Nisan ayları arasında bir ölçüm planlanamamıştır. Tüm bunların yanı sıra Nisan 2012’ deki 1. Periyot GNSS ölçüsünün hemen ardından Haziran 2012’ de ek bir ölçü daha yapılması planlanmıştır. Bunun nedeni özellikle kar sularının nisan ayında erimesi ve bu bir aylık sürede herhangi bir deformasyon oluşup oluşmadığının anlaşılmasıdır. Özetle Nisan-Ağustos arasındaki olası bir deformasyonun salınımını öğrenmek amacı ile Haziran ayında da bir ölçü planlanmıştır.

Hazırlanan ölçü planı dahilinde, toplam 10. Periyot GNSS ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Ölçü tarihleri 18-23 Nisan 2012, 03-07 Haziran 2012, 1-5 Ağustos 2012, 18-22 Ekim 2012, 18-23 Nisan 2013, 16-18 Ağustos 2013, 27-29 Ekim 2013, 18-23 Nisan 2014, 1-5 Ağustos 2014, 22-27 Ekim 2014 tarihleridir. Arazi çalışmalarında Cumhuriyet Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümüne ait 6 adet Trimble 5700 marka GNSS seti, 3 adet Leica GS15 marka GNSS seti olmak üzere toplamda 9 adet GNSS aleti kullanılmıştır. TKYK ve IKYK noktaları sabit noktalar olduğu için gün boyu yaklaşık 12 saat bu noktalarda gözlem gerçekleştirilmiştir. Diğer noktalarda ise birer saat ölçü GNSS ölçüsü gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler üç gün tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9’ da GNSS nokta ölçümlerine ait resimler bulunmaktadır. Üç günlük ölçüler yardımı ile olası kaba hatalar elimine edilerek noktalara ait güvenilir koordinat değerlerinin hesaplanması planlanmıştır. Hastaoglu ve Sanli 2011a’ da belirtildiği gibi oluşturulan lokal GNSS ağının da en uzun bazın 15 km’ yi geçmemesi nedeni ile bir saatlik GNSS verisi kullanılarak mm doğruluğunda koordinat bilgisi elde edilebileceği için birer saatlik GNSS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Hastaoglu ve Sanli (2011a), Hızlı Statik GNSS ölçü doğruluğunun araştırılması amacı ile gerçekleştirdikleri çalışmada, GNSS ölçü noktaları arası baz uzunluğunun 15 km ve noktalar arası yükseklik farkının 500m geçmemesi durumunda 30 dakikalık veriler ile 12 saatlik verilerin aynı sonuçları verdiğini göstermiştir. Bu çalışmada ilk olarak IGS noktalarından bir ağ oluşturulmuş ve GNSS ölçü doğruluğunu ölçü zamanı, baz uzunluğu ve yükseklik farkına bağlı olarak ifade eden bir fonksiyon belirlenmiştir. Daha sonra bu fonksiyondan elde edilen değerlerin doğruluğu Koyulhisar heyelan sahasında test edilerek fonksiyonun bu çalışma sahası için doğruluğu kanıtlanmıştır. Netice itibari ile bu proje kapsamında da GNSS ölçü noktaları belirlenirken yukarıda belirtilen kıstaslar göz önünde bulundurularak GNSS noktaları tesis edilmiş ve ölçü süreleri belirlenmiştir.



Şekil 3.9. GNSS ölçümlerine ilişkin fotoğraflar

3.3 GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi

GNSS Ölçülerinin değerlendirilmesi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak heyelan sahası dışında sabit nokta olarak tesis edilen IKYK ve TKYK noktalarının IGS noktaları ile birlikte değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda ise IKYK ve TKYK noktaları sabit tutularak Heyelan sahasındaki 51 noktaya ait GNSS Hızlı Statik verileri değerlendirilmiştir.

3.3.1 IKYK ve TKYK Noktalarına ait GNSS Verilerinin Değerlendirilmesi

Verilerin değerlendirilmesi esnasında, jeolojik özellikleri göz önünde bulundurularak heyelan sahası dışında bulunan TKYK ve IKYK noktalarının koordinat değerlerinin değişmediği varsayılmıştır. Değerlendirme işleminde ilk olarak sabit kabul edilecek noktalar olan IKYK ve TKYK noktalarının güvenilir koordinatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden heyelan verilerinin değerlendirilme işlemine geçmeden önce IKYK ve TKYK noktalarının, global ölçekte IGS (International GNSS Service) ağına ait noktaların referans alındığı bir ağda değerlendirilme işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla IGS noktalarından BUCU, POLV, NICO, TUBI ve ZECK noktalarının sabit referans noktaları olduğu IKYK, TKYK noktalarının ise koordinat değerleri kestirilecek noktalar olarak seçildiği bir ağ oluşturulmuştur. Bu ağda sabit noktalar seçilirken mümkün olduğunca iyi bir ağ yapısı oluşturulmaya çalışılmıştır. Fakat gerek ölçüm yapılan günlerde her noktaya ait gözlem dosyalarının yayınlanmamış olması gerekse baz uzunluğunun Bernese 5.2 BPE' de 2000 km yi geçmemesi gerektiği için ancak yukarıda bahsi geçen dört nokta referans noktası olarak seçilmiştir. Sonuç olarak 10 periyot için BUCU, POLV, , NICO, TUBI, ZECK, IKYK, CMYK noktalarından oluşan ağda değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda IKYK, CMYK noktalarına ait 10 periyot koordinat değerleri belirlenmiştir.

Verilerin değerlendirilmesi aşamasında lisansı Cumhuriyet Üniversitesi Geomatik Mühendisliği Bölümüne ait olan BERNESE 5.2 Akademik GNSS değerlendirme yazılımı kullanılmıştır. Yazılıma ait akış şeması Tablo 3.1'de verilmiştir. BERNESE V5.2 yazılımı ile değerlendirme için öncelikle heyelan noktalarına ait GNSS gözlemleri RINEX (Receiver Independent Exchange Format) formata dönüştürülmüş, bu aşamada anten yükseklikleri anten faz merkezinden (ARP; Antenna Reference Point) itibaren hesaplanmıştır. BERNESE V5.2 yazılımı ile hesaplamalarda IGS duyarlı yörünge bilgisi (SP3; Standard Product 3) ve yer dönüklük parametreleri (ERP; Earth Rotation Parameters) kullanılmış olup yörünge iyileştirme yapılmamış, uydu yörüngeleri, ERP değerleri ve uydu saat katsayıları bilinen olarak alınmıştır. Değerlendirmede kullanılan global noktalara ait ham veriler ve epok koordinatları, ABD'de bulunan SIO (Scripps Institute of Oceanography)'ya bağlı SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) arşivinden alınmıştır. Tablo 3.2'de Bernese programı değerlendirme stratejisi hakkında bilgi verilmektedir.

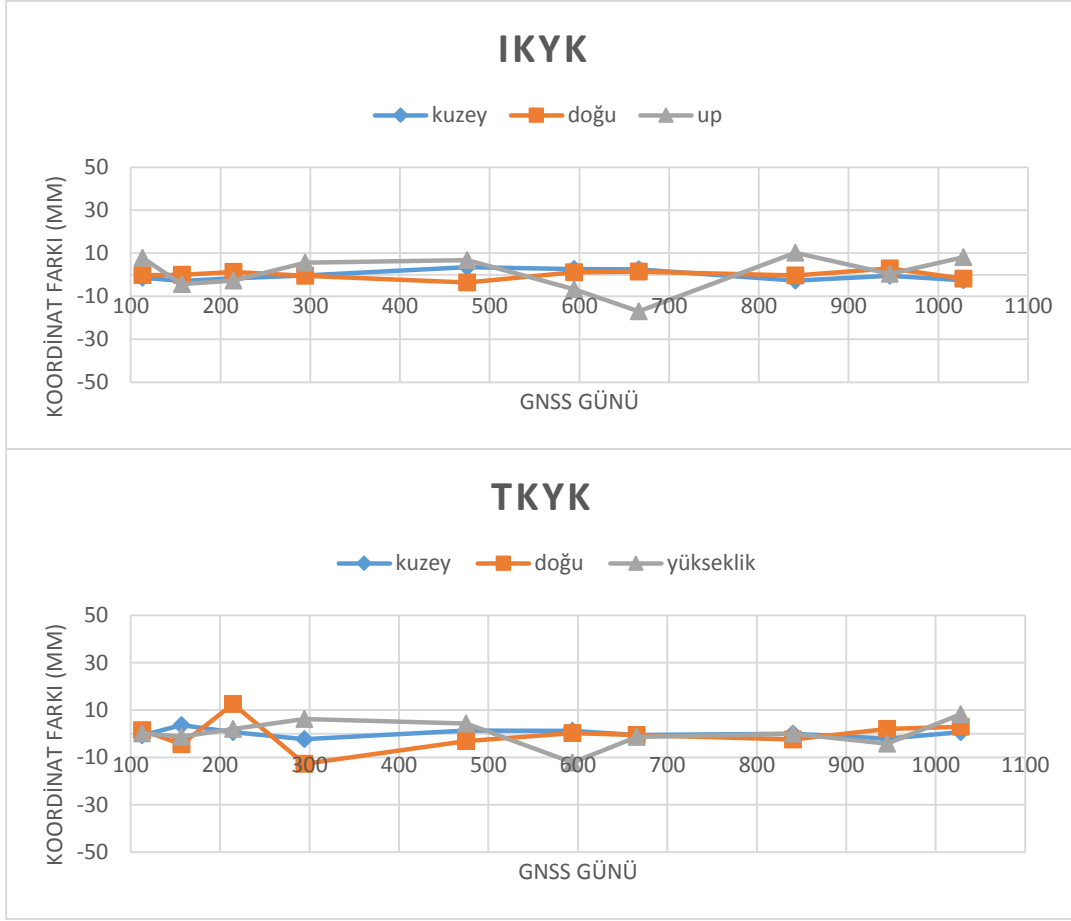
Verilerin değerlendirilmesi sonucunda IKYK ve TKYK noktalarına ait 10 periyot koordinat değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin tekrarlılıkları Şekil 10 de verilmektedir. Tablo 3.3' de ise bu koordinat değerlerinden elde edilen yıllık hız değerleri verilmektedir.

Tablo 3.2. Değerlendirmede Kullanılan Modeller

MODELLER	DEĞERLENDİRME DEĞERLERİ
YÖRÜNGE	IGS FINAL Birleştirilmiş Yörünge
YER DÖNÜKLÜK PARAMETRELERİ	IGS FINAL Yer Dönme Parametreleri
UYDU SAATLERİ	IGS FINAL Uydu saatleri
TROPOSFER	NIELL MODELİ 4-SAATLİK ZENİT GECİKME PARAMETRELERİ ÖNSEL AĞIRLIKLAR: 5.00 m (Mutlak); 1.00 m (Görelî)
İYONOSFER	GLOBAL TEK KATMANLI MODEL
ALICI SAATLERİ	HER EPOK İÇİN KOD VERİSİ ÇÖZÜMÜ
ANTEN FAZ MERKEZLERİ	IGS FAZ MERKEZİ TANIMLAMALARI
FAZ TAMSAYI BİLİNMEYENLERİ ÇÖZÜMÜ	QIF ALGORİTMASI
AĞIRLIKLANDIRMA STRATEJİSİ	İKİLİ FARK GÖZLEMLERİ :1-2 cm YÜKSEKLİK AÇISINDAN BAĞIMSIZ AĞIRLIKLANDIRMA STRATEJİSİ

Tablo 3.3. Noktalara ait yıllık hız değerleri

YEREL JEODEZİK DATUM: ITRF2008			
NUM	İSTASYON İSMİ	VX (M/Y)	VY (M/Y)
			VZ (M/Y)
1	BUCU 11401M001	-0.01650	0.01880
2	IKYK	-0.01872	0.00907
3	NICO 14302M001	-0.01778	0.01109
4	POLV 12336M001	-0.02250	0.01207
5	TKYK	-0.01933	0.00428
6	TUBI 20806M001	-0.01861	0.01394
7	ZECK 12351M001	-0.02021	0.01600



Şekil 3.10. IKYK ve TKYK noktalarına ait koordinat tekrarlılıkları

Şekil 3.10 incelendiğinde IKYK ve TKYK noktalarına ait koordinat değerlerinin periyotlar arasında en fazla yaklaşık ± 1 cm değişim gösterdiği izlenmektedir. Elde edilen bu koordinat değerleri yardımı ile Bernese 5.2 yazılımının hız kestirim modülü kullanılarak bu noktalara ait yıllık hız değerleri kestirilmiştir. Elde edilen yıllık hız değerleri Tablo 3.3' de verilmektedir.

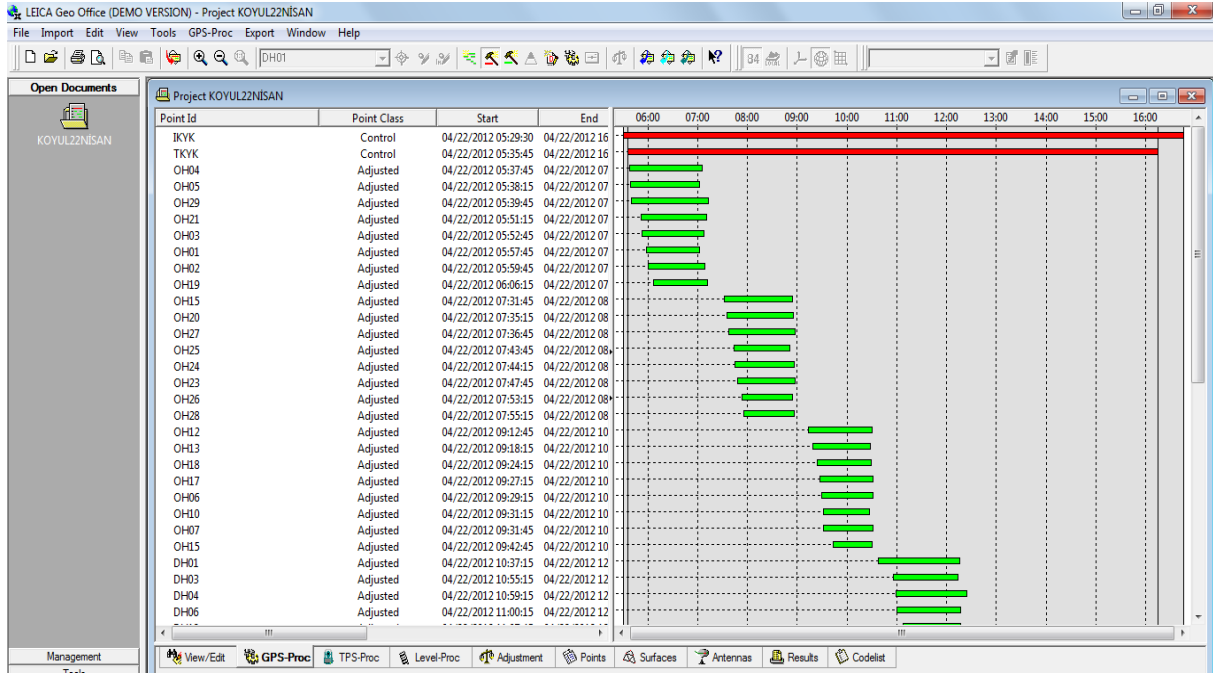
Tablo 3.3' de görüldüğü üzere IKYK ve TKYK noktalarında yıllık beklenen tektonik hareketten kaynaklanan hız değerleri elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak IKYK ve TKYK noktalarından heyelandan kaynaklanan bir hareket olmadığı rahatlıkla söylenebilir.

3.3.2 Heyelan Sahası İçerisinde Bulunan 51 Noktaya ait GNSS Hızlı Statik Verilerinin Değerlendirilmesi:

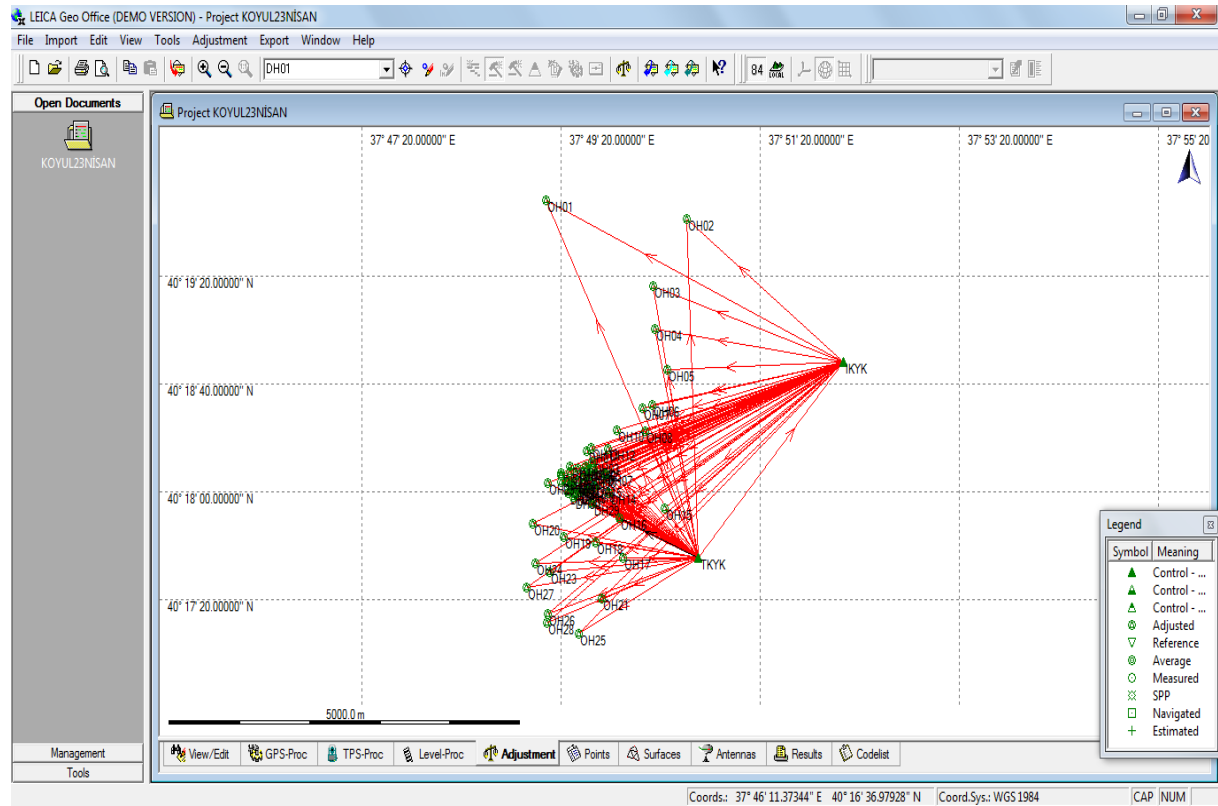
Değerlendirme işleminin ikinci kısmında TKYK ve IKYK noktaları sabit tutularak heyelan sahasındaki 51 noktaya ait GNSS Hızlı Statik verileri değerlendirilmiştir. Verilerin en az 1 saat olması ve baz uzunluklarının en fazla 3 km olması nedeni ile Hastaoglu ve Şanlı 2011' de belirtildiği gibi ticari yazılımdan mm düzeyinde konum doğruluğu elde edileceği gerçeğinden yola çıkarak bu işlem için LEICA Geo Office (LGO) programı kullanılmıştır. Şekil 3.11 de LGO programı GNSS gözlem süreleri , Şekil 3.12' de ise değerlendirilen bazlar gösterilmektedir. LEICA Geo Office yazılımı kullanılarak 10 periyota ilişkin değerlendirme sonucunda 51 GNSS noktasına ait edilen koordinat değerleri kestirilmiştir. Şekil 3.13' de bu değerlendirmeden elde edilen koordinat değerlerinin tekrarlılıkları gösterilmektedir.

Bölgede kütleli homojen bir hareket den ziyade lokal ve heterojen hareketler beklenmektedir. Fakat bölgenin genel topoğrafik yapısı göz önünde bulundurulduğunda hareketlerin genel olarak topoğrafik eğimin yönü olan kuzey-güney doğrultusunda olması beklenmektedir. Şekil 3.13 incelendiğinde genel olarak heterojen bir hareket izlenirken yatay yöndeki hareketler kuzey güney yönlü olmaktadır. Bunun yanı sıra bölgede bazı noktalarda çökmeler gözlenirken bazı noktalarda yükselmelerin gözlenmesinin ana sebebi de heyelan mekanizmasının bazı noktalarda topluklaması sonucunda bu noktalarda yükselmelerin oluşmasıdır.

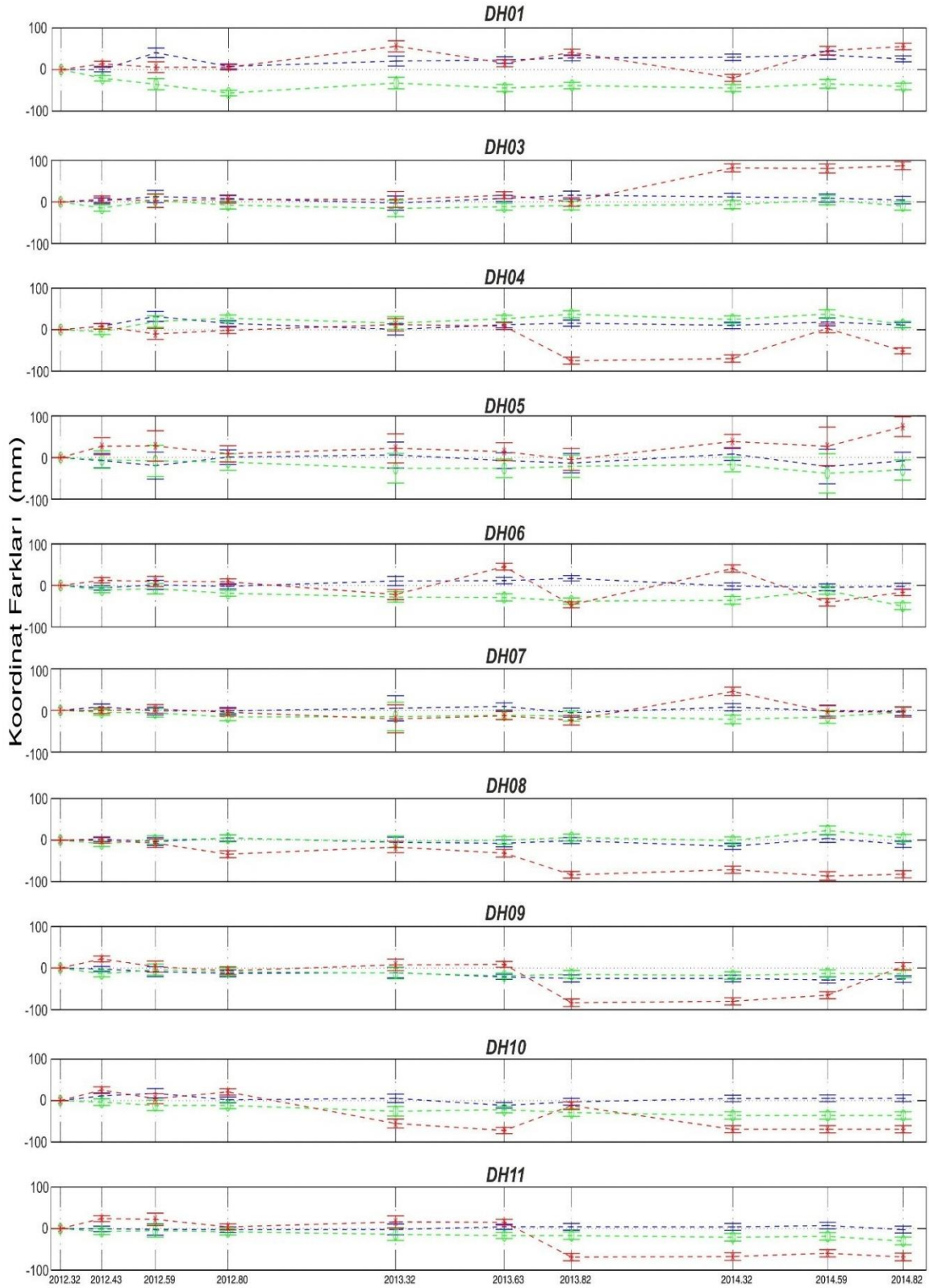
GNSS noktalarına ilişkin tekrarlılıklar ve hız değerleri incelendiğinde özellikle DH20 ve DH 21 nolu noktaların bulunduğu Emniyet Binası civarında ki hareketler ve yönleri bölgede daha önce gerçekleştirilen çalışmaları doğrular niteliktedir. Bölgede daha önce gerçekleştirilen iki ayrı çalışmada (Tatar vd. 2001, Hastaoglu ve Şanlı 2011) Heyelan sahası içerisinde en hareketli bölge olarak DH20 ve DH 21 nolu noktaların bulunduğu Emniyet Binası civarı olduğu belirtilmiştir. Bunun ana sebebi olarak ta bu bölgedeki yer altı su seviyesinin mevsimsel olarak artış göstermesi olduğu belirtilmiştir. Bölgenin yaklaşık 150 m uzağındaki ISK11 no lu sondaj noktasından ölçülen yer altı su seviyeleri de açıkça bölgedeki mevsimsel olarak su seviyesindeki değişimleri göstermektedir. Bunun yanı sıra Şekil 3.3' de görüldüğü üzere DH20 ve DH 21 nolu noktalara yaklaşık 50 m uzaklıktaki Emniyet müdürlüğü binasının içerisinde bulunan sondaj kuyusundan da sürekli su çekilerek binanın temelindeki su seviyesindeki artış engellenmeye çalışılmaktadır. Bunun yanı sıra DH01 ve OH13 nolu noktaların bulunduğu bölgede topoğrafyaya bağlı zıt yönlü anlamlı hareketler gözlenmektedir. Birde OH16 nolu noktada topoğrafyanın eğimi doğrultusunda özellikle doğu bileşeninde anlamlı hareketlenme göze çarpmaktadır.



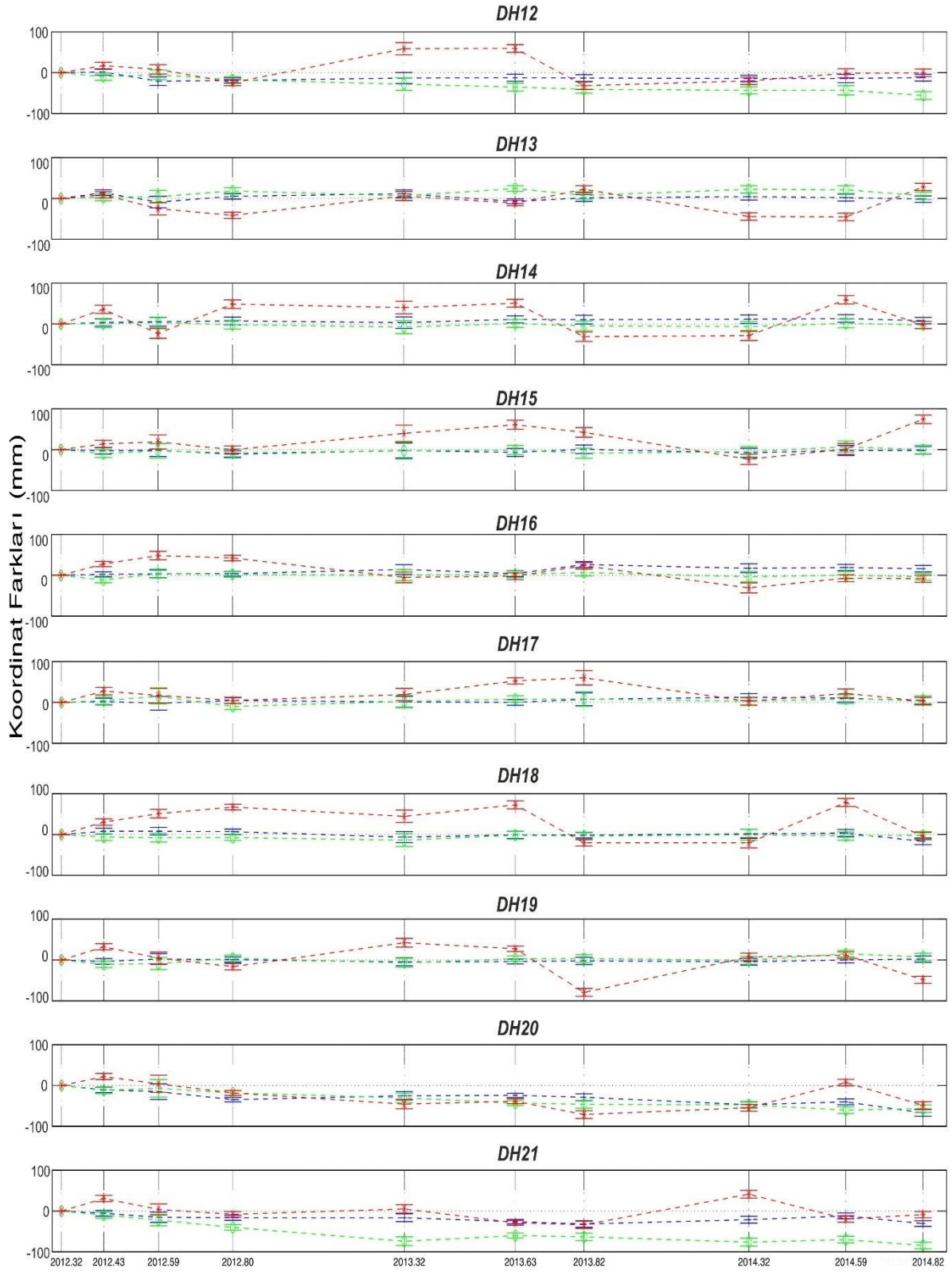
Şekil 3.11. GNSS gözlem süreleri



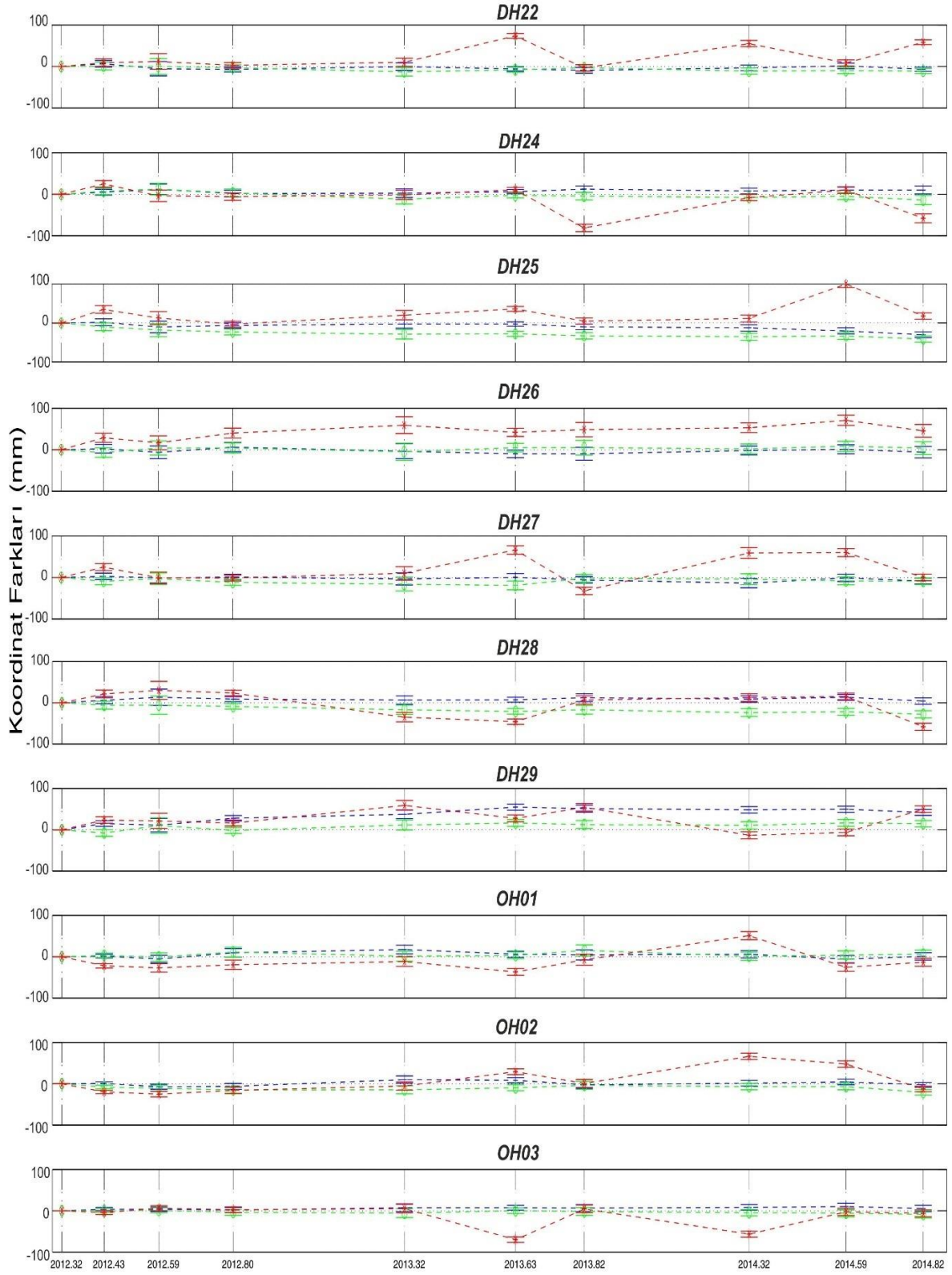
Şekil 3.12. LGO yazılımı ile değerlendirilen bazlar



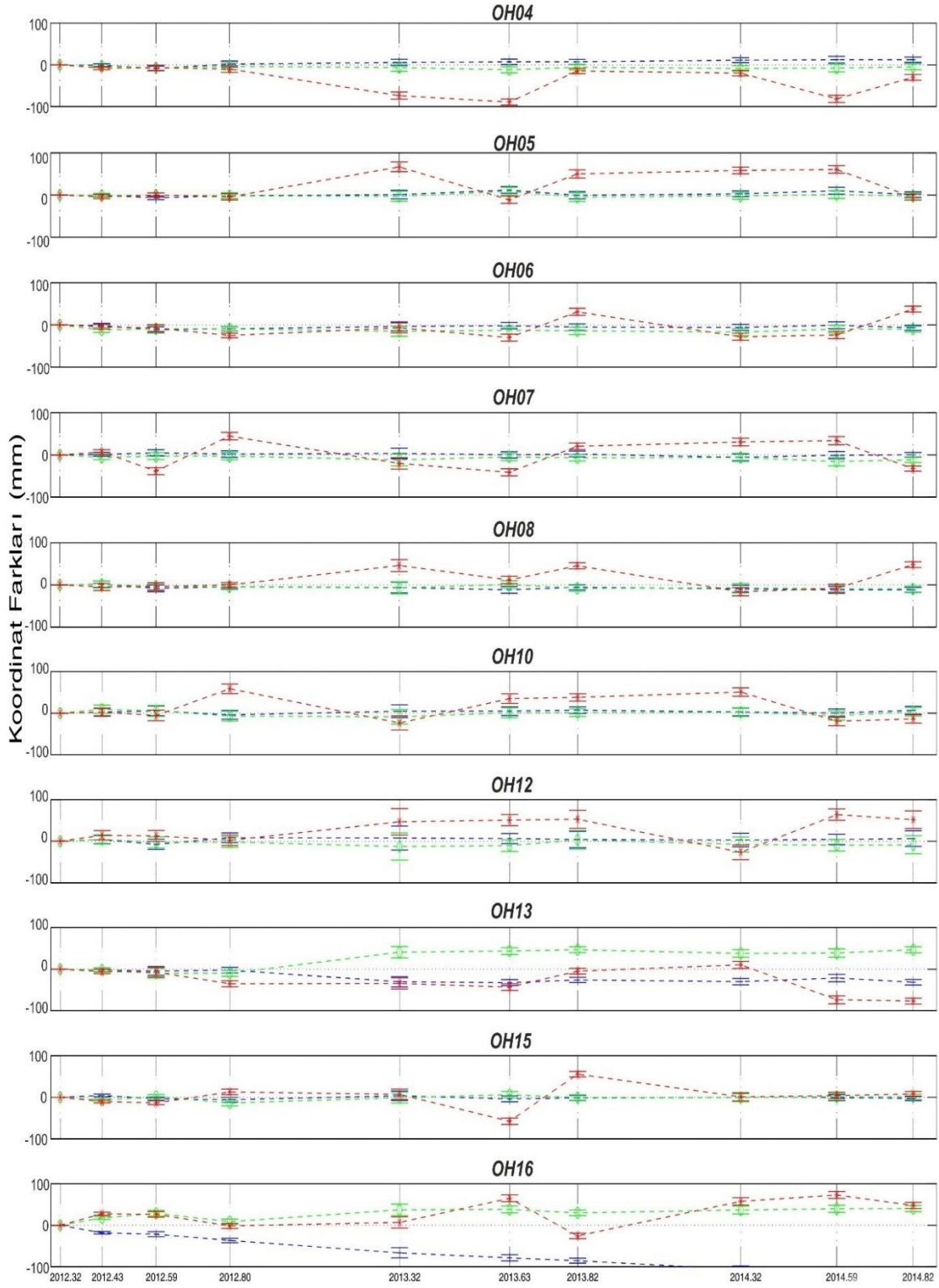
GPS günü (Ondalık Yıl)



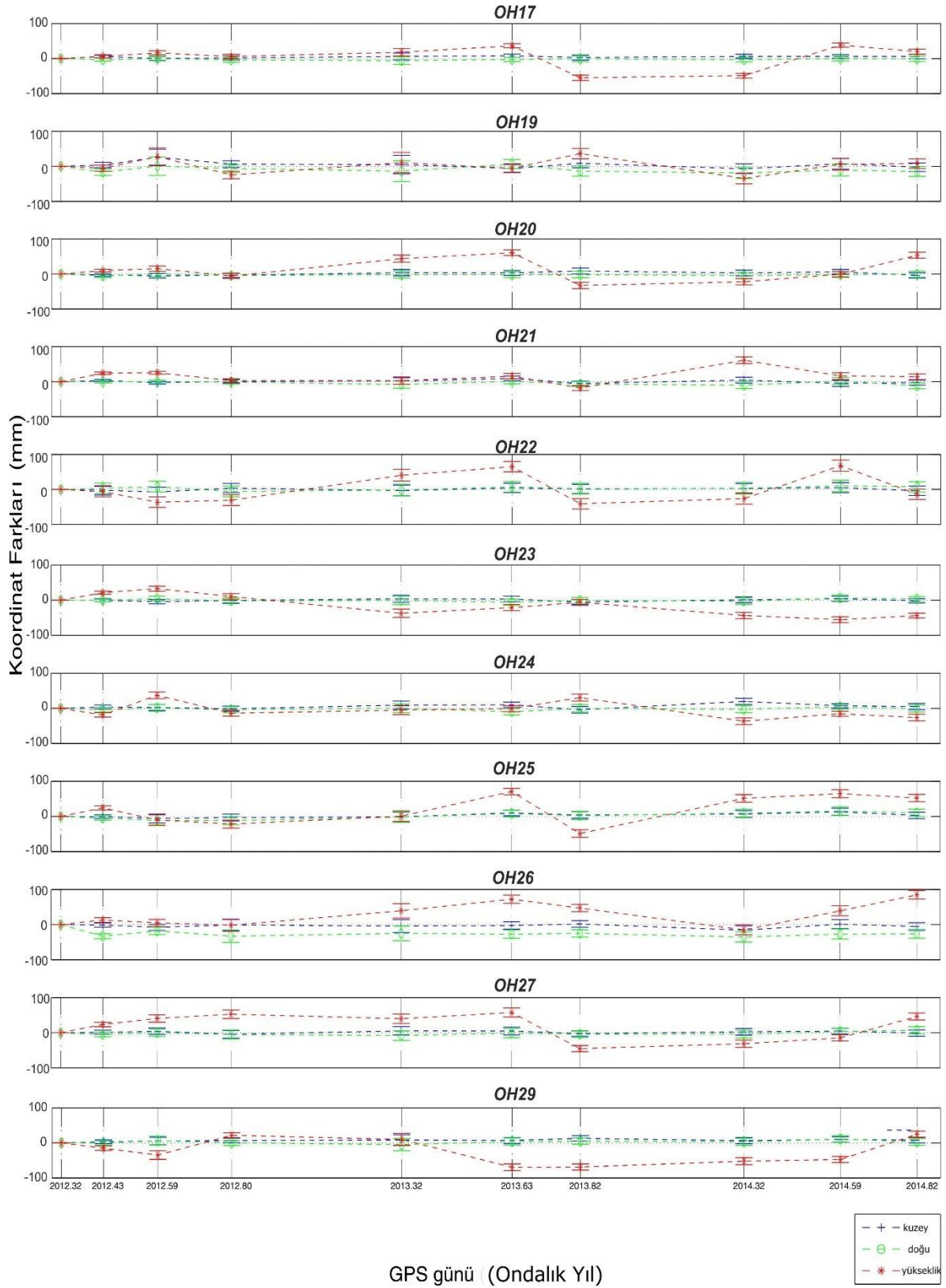
GPS günü (Ondalık Yıl)



GPS günü (Ondalık Yıl)



GPS günü (Ondalık Yıl)



Şekil 3.13. Heyelan Sahasındaki 51 GNSS noktasına ait on periyotluk GNSS değerlendirilmesinden elde edilen koordinat farkları

3.4 GNSS Verilerinden Hız Kestirimi

3.4.1 Kinematik Deformasyon Modeline Göre Kalman Filtresi

Kalman Filtreleme yönteminde statik, kinematik ve dinamik hareketler araştırılır. Bu yöntemin farkı ve olumlu yanı düzgün ve düzgün olmayan hareketleri az sayıdaki periyot ölçü ile belirleyebilmesidir. Kalman Filtreleme yönteminde amaç önceki periyotta bilinen hareket parametrelerinden ekstrapolasyon yoluyla sonraki periyottaki hareket parametrelerinin hesaplanmasıdır (Bayrak 2003). Kalman filtre tekniği, rastgele hatalar içeren dinamik bir sisteme uygulanan en uygun parametre kestirim işlemidir (Doğan 2002).

Kalman Filtreleme Yöntemi. t_{i-1} periyodun da bilinen hareket parametrelerinde oluşan durum vektörü bilgileri ve t_i periyodun da yapılmış ölçüler yardımıyla güncel durum vektörünün tahmininde kullanılır. 3 boyutlu ağlar için konum, hız ve ivmeden oluşan hareket modeli Eşitlik 3.1 de verilmiştir.

$$\begin{aligned} X_j^{(k+1)} &= X_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) v_{xj} + \frac{1}{2} (t_{k+1} - t_k)^2 a_{xj} \\ Y_j^{(k+1)} &= Y_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) v_{yj} + \frac{1}{2} (t_{k+1} - t_k)^2 a_{yj} \\ Z_j^{(k+1)} &= Z_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) v_{zj} + \frac{1}{2} (t_{k+1} - t_k)^2 a_{zj} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$X_j^{(k+1)}, Y_j^{(k+1)}, Z_j^{(k+1)}$: j noktasının (t_{k+1}) . Periyot koordinat değeri,

$X_j^{(k)}, Y_j^{(k)}, Z_j^{(k)}$: j noktasının (t_k) . Periyot koordinat değeri,

v_{xj}, v_{yj}, v_{zj} : j noktasının X,Y,Z koordinat hız değerleri, a_{xj}, a_{yj}, a_{zj} : j noktasının X,Y,Z koordinat ivme değerleri, $k = 1, 2, \dots, i$ (i: ölçülen periyot sayısı), $j = 1, 2, \dots, n$ (n: ölçülen nokta sayısı).

Kalman Filtreleme Yöntemi prediksyon (prediction), süzme (filtering) ve yumuşatma (smoothing) olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. (Cross 1990). Nokta hareket parametrelerini Kalman filtreleme yöntemiyle hesaplayabilmek için Eşitlik 1'deki denklemlerin zaman göre birinci türevi alınarak hız denklemleri ikinci türevleri alınarak ivme denklemleri oluşturulur. Eşitlik 3.2 ve 3.3' de bu denklemlere ait matris formu verilmektedir.

$$\bar{Y}_{k+1} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} I & I(t_{k+1}-t_k) & I \frac{(t_{k+1}-t_k)^2}{2} \\ 0 & I & I(t_{k+1}-t_k) \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}_{k+1,k} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v_x \\ v_y \\ v_z \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_k \quad (3.2)$$

$$\bar{Y}_{k+1} = T_{k+1,k} \hat{Y}_k \quad (3.3)$$

$\bar{Y}_{k+1}$: (tk+1) anındaki durum vektörü, $\hat{Y}_k$: (tk) anındaki durum vektörü $T_{k+1,k}$: predikasyon matrisi ve I : Birim matrisidir. Eşitlik 3.3 temel Kalman Filtreleme eşitliğidir. (tk+1) ve (tk) periyotları arasındaki sabit bozucu ivme w olmak üzere predikasyon denkleminde bulunan sistem gürültüleri Eşitlik 3.3'deki $T_{k+1,k}$ matrisinin son sütunundaki terimlerden oluşan S gürültü vektörü olarak düşünülür. Bunun sonucunda predikasyon matrisi ve kovaryans matrisi aşağıdaki gibi olur (Gülal. 1999. Bayrak 2009. Acar vd. 2008).

$$\bar{Y}_{k+1} = T_{k+1,k} \hat{Y}_k + S_{k+1,k} w_k \quad (3.4)$$

$$Q_{\bar{Y}\bar{Y},k+1} = T_{k+1,k} Q_{\hat{Y}\hat{Y},k} T_{k+1,k}^T + S_{k+1,k} Q_{ww,k} S_{k+1,k}^T \quad (3.5)$$

$$S_{k+1,k}^T = \begin{bmatrix} I \frac{(t_{k+1}-t_k)^2}{2} & I(t_{k+1}-t_k) & I \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$Q_{ww,k-1} = 4(t_k - t_{k-1})^{-4} Q_{SS,k-1} \quad (3.7)$$

$S_{k+1,k}^T$: (tk+1) ve (tk) periyotları arasındaki gürültü vektörü,

$Q_{\hat{Y}\hat{Y},k}$: (tk) anında durum vektörüne ait kovaryans matrisi,

$Q_{ww,k}$: (tk) anında bozucu etki ivmesinin kovaryans matrisi.

Bozucu etkilerin ivme vektörü w belirsizdir ve kural olarak ölçülemez. Bu nedenle pseudo gözlem vektörü $w=0$ olarak alınabilir (Bayrak 2009). k+1 periyodunda yapılmış olan ölçülere ait düzeltme denklemi Eşitlik 3.8'de verilmektedir.

$$l_{k+1} + v_{l,k+1} = A_{k+1} \hat{Y}_{k+1} \quad (3.8)$$

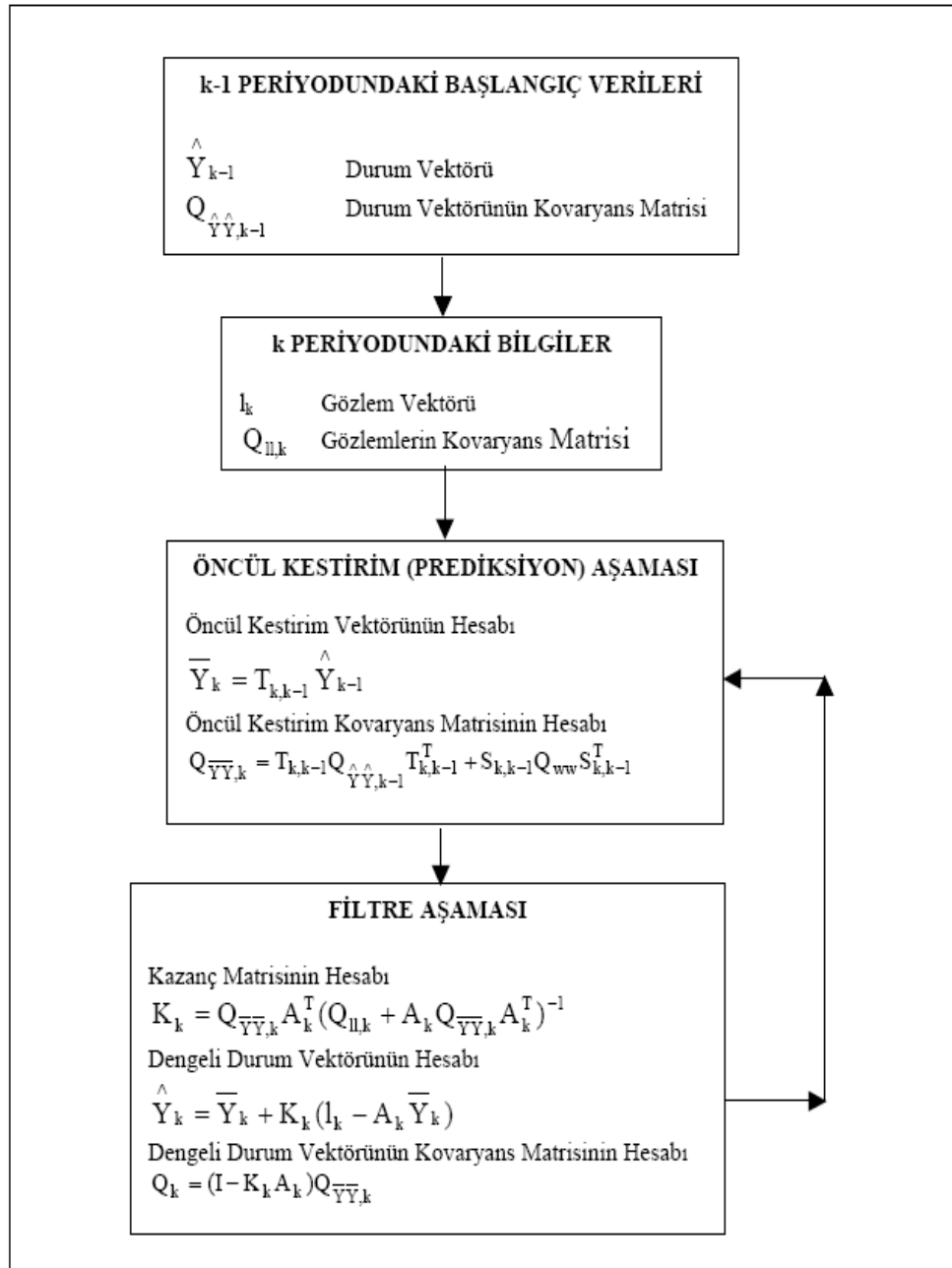
Burada l_{k+1} : (tk+1) anındaki ölçüler. $v_{l,k+1}$: düzeltme değerleri, A_{k+1} : Katsayılar matrisi ve $\hat{Y}_{k+1}$: (tk+1) anındaki durum vektörüdür. Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.8 birleştirilerek filtre aşamasının

fonksiyonel ve stokastik modeli aşağıdaki gibi oluşturulur. (Acar vd. 2008. Bayrak 2009. Yalcinkaya ve Bayrak 2005).

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{k+1} \\ l_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ A_{k+1} \end{bmatrix} \hat{Y}_{k+1} - \begin{bmatrix} v_{Y,k+1} \\ v_{l,k+1} \end{bmatrix} ; \quad Q_i = \begin{bmatrix} Q_{\bar{Y}\bar{Y},k+1} & 0 \\ 0 & Q_{ll,k+1} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Model çözülerek hareket parametreleri ve onlara ait kovaryans matrisleri hesaplanır. Tablo 3.4' de Kalman Filtresi iş akış şeması verilmektedir.

Tablo 3.4. Kalman Filtresi iş akış diyagramı (Bayrak 2003.)



3.4.2 Heyelan Sahası İçerisindeki 51 noktaya ait Hız Değerlerinin Kalman Filtresi kullanılarak Belirlenmesi

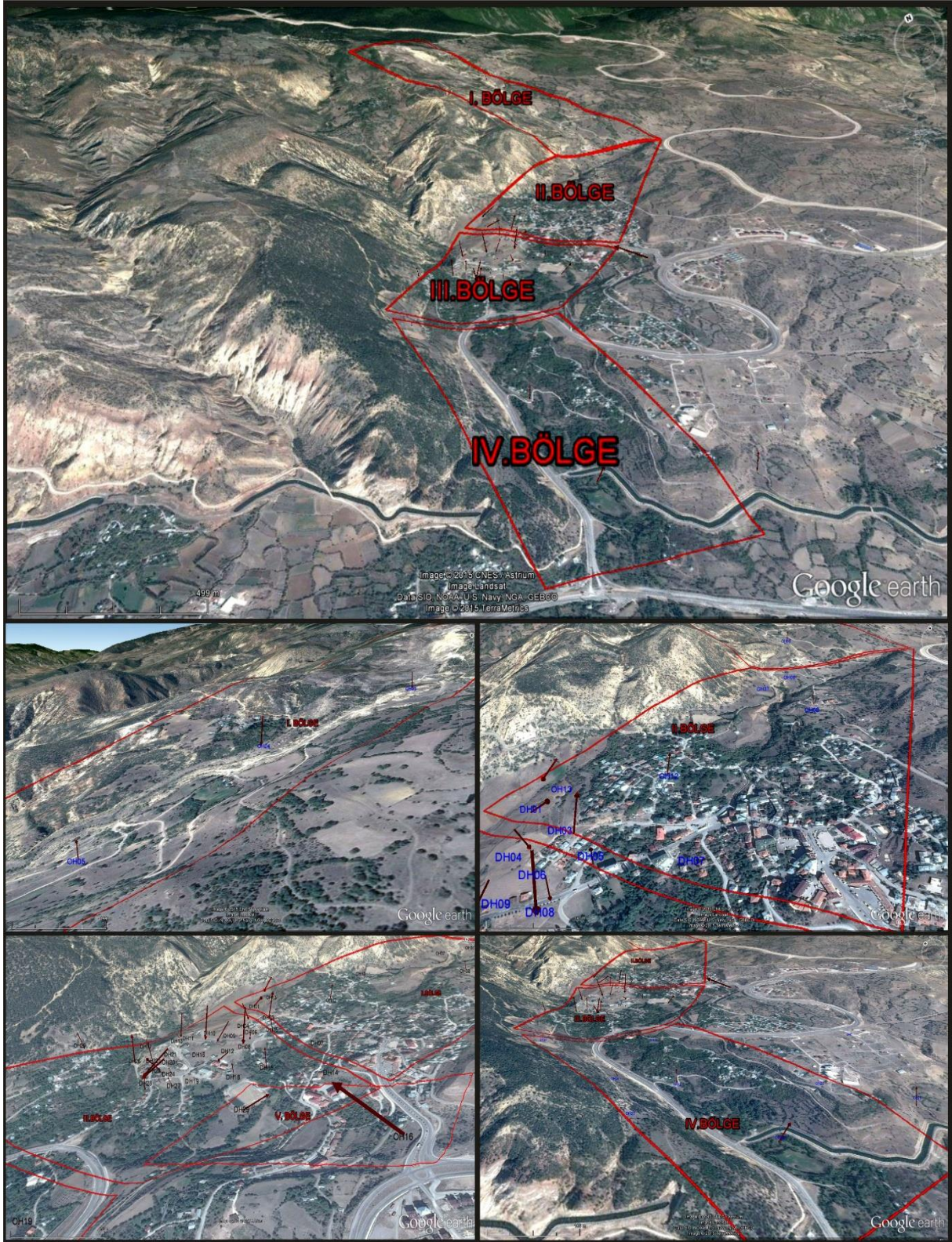
Bu çalışmada heyelan sahasında bulunan 51 adet GNSS noktası için 10 periyot GNSS ölçüsü LEICA Geo Office yazılımı kullanarak değerlendirilmiş ve koordinat değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu koordinat değerleri kullanılarak Eşitlik 3.1’de verilen 3 Boyutlu Kinematik Kalman Filtreleme Modeli yardımı ile GNSS noktalarına ait hız ve ivme değerleri kestirilmiştir. Noktalara ait anlamlı ivme değerleri bulunmadığı için model daraltılarak noktalara ilişkin sadece hız değerleri kestirilmiştir. Kestirilen bu hız değerleri Tablo 3.5’de sunulmaktadır.

Tablo 3.5’ de yıllık hız değerleri anlamlı çıkan noktalar ve değerleri kırmızı ile işaretlenmiştir. Tablo 3.5’ de elde edilen hız değerlerine ilişkin hız değerleri ne ait bileşke vektör hesaplanmış ve uydu görüntüsü üzerinde çizdirilmiştir. Bu çizim genel anlamıyla Şekil 3.14 ‘de gösterilmektedir. Şekil 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 ve 3.19 da ise daha lokal ölçekte hız vektörleri ve bu vektörlere ait kesitler sunulmaktadır. Tablo 3.5 ve Şekil 3.14 birlikte değerlendirildiğinde heyelan sahasındaki yüzey kayma hareketi açıkça gözlenmektedir.

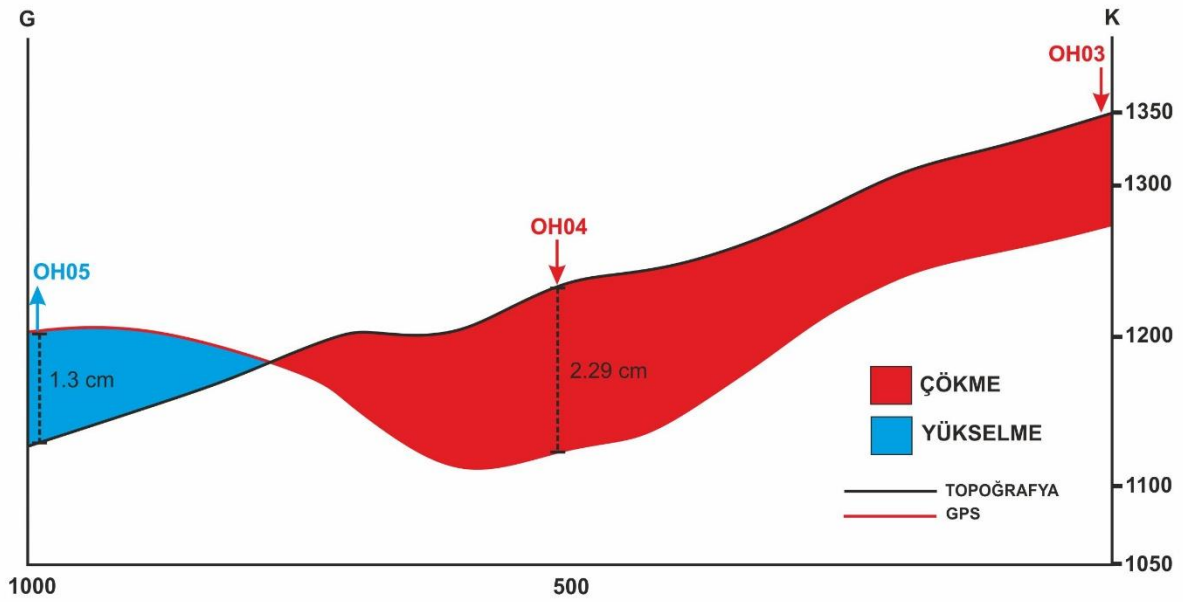
Heyelan sahası kuzeyden güneye yani taç bölgesinden topuk bölgesine doğru daha ayrıntılı bölgelere bölünerek incelenecek olursa; Heyelanın taç kısmının kuzeyinde kalan ve OH01 ve OH02 nolu noktalarında içinde bulunduğu bölgede anlamlı bir hareket gözlenmemektedir. Bunun yanı sıra Şekil 3.15’ de de görüleceği üzere I. Bölge olarak da isimlendirilen ve eski heyelan kütlesi üzerinde bulunan OH03 ve OH04 nolu noktalarda ortalama yıllık -2 cm ‘ ye yakın bir çökme gözlenirken bu hareket Saytepe civarında sönümlenmekte ve OH05 nolu nokta civarında topuklayarak yaklaşık yıllık 1.3 cm lik bir yükselmeye dönüşmektedir. Bu yükselme hareketi Şekil 3.16’ da da görüldüğü üzere II. Bölge olarak nitelendirilen ve OH12 ve DH03 nolu noktalarında içerisine alan bölgede artarak yaklaşık yıllık 2 cm olarak devam etmekte ve sonlanmaktadır. Bunun yanı sıra DH01 ve OH13 nolu noktalarda da tamamen birbirleri ile zıt yönlü ve hemen hemen aynı büyüklükte yaklaşık 3 cm lik bir topoğrafik eğim doğrultusunda bir harekette gözlenmektedir.

Tablo 3.5. GNSS noktalarına ait yıllık hız değerleri

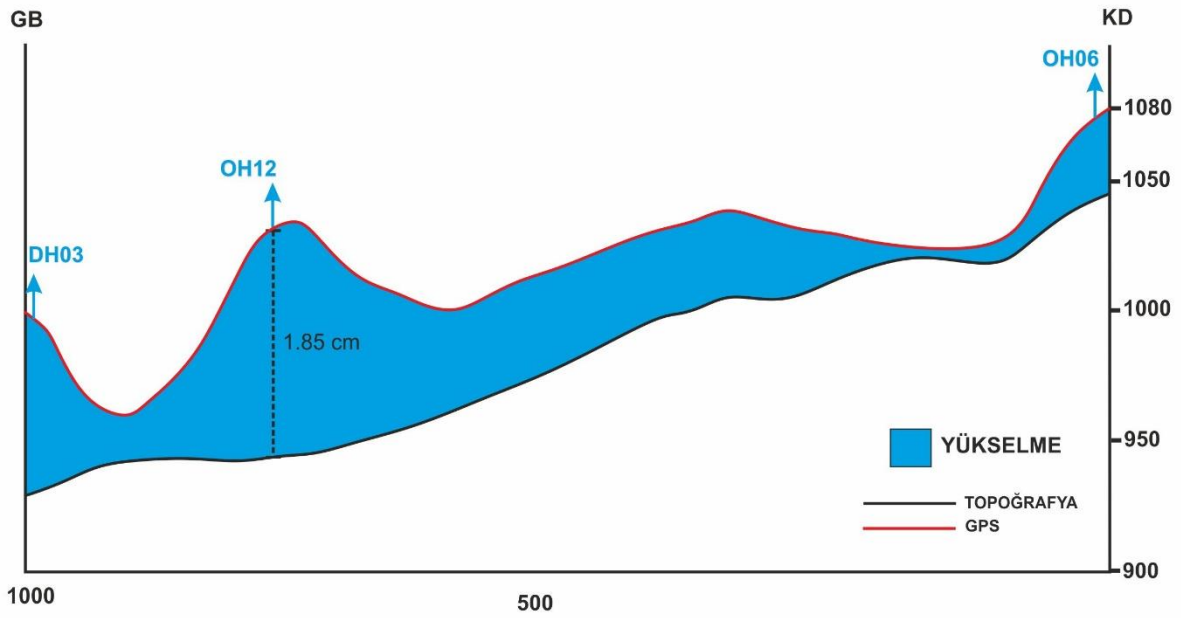
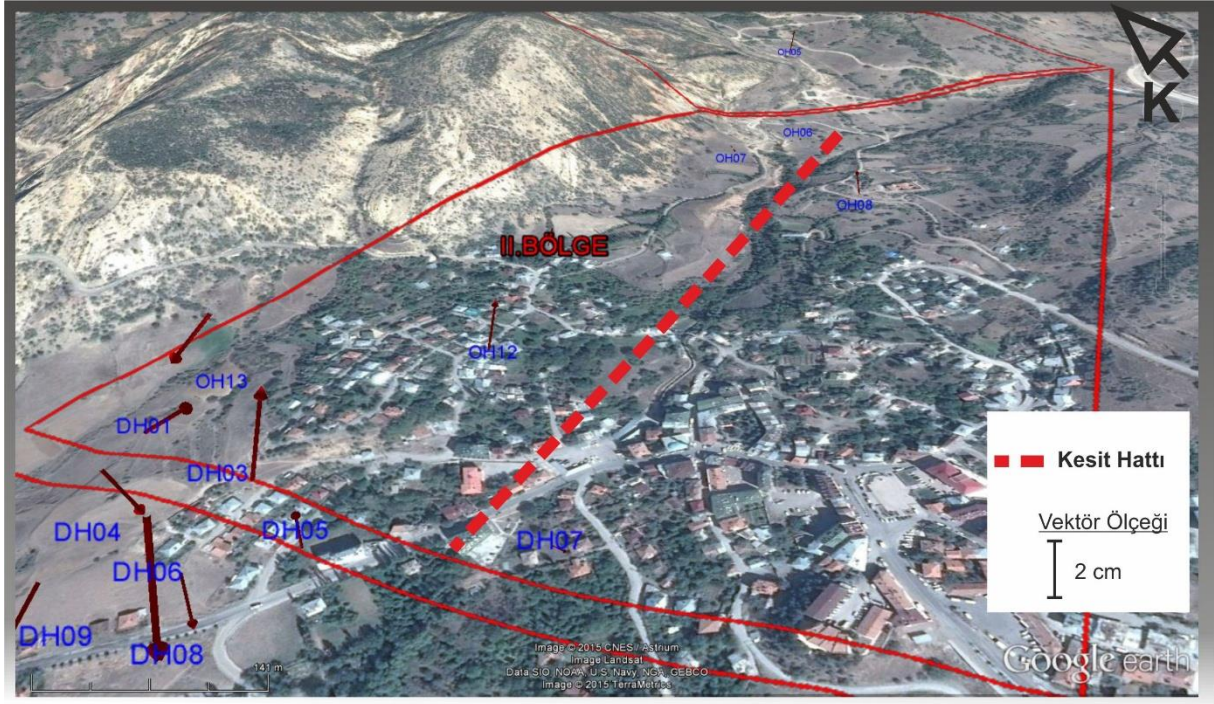
NN	Hız Değeri (cm/ yıl)			Hız Değeri Std. Sapma (cm/yıl)			Hız Değeri Test Değeri (t=1.65)		
	vn	ve	vup	sn	se	sup	Tn	Te	Tup
DH01	-2.2	1.4	1.5	0.6	0.5	0.6	3.8	2.7	2.7
DH03	-0.4	0.5	2.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.8	4.2
DH04	1.2	0.6	-1.9	0.6	0.5	0.6	2.1	1.3	3.4
DH05	-1.0	-0.1	1.5	1.4	1.3	1.4	0.7	0.1	1.1
DH06	-1.7	0.2	-0.4	0.6	0.5	0.5	3.1	0.3	0.8
DH07	-0.7	0.1	0.2	0.8	0.7	0.8	0.9	0.2	0.3
DH08	0.3	-0.3	-3.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6	6.0
DH09	-0.8	-1.3	-1.8	0.6	0.5	0.6	1.4	2.5	3.2
DH10	-1.6	0.1	-2.9	0.6	0.5	0.6	2.8	0.2	5.2
DH11	-1.1	0.1	-2.2	0.6	0.5	0.6	1.8	0.3	3.8
DH12	-2.2	-0.7	-0.1	0.6	0.6	0.6	3.4	1.3	0.1
DH13	0.8	0.0	-0.6	0.6	0.5	0.6	1.4	0.0	1.0
DH14	-0.1	0.5	0.7	0.7	0.6	0.7	0.2	0.8	1.1
DH15	-0.1	-0.2	1.7	0.8	0.7	0.8	0.1	0.3	2.2
DH16	0.0	0.8	0.1	0.6	0.5	0.6	0.0	1.6	0.1
DH17	0.3	0.3	1.0	0.7	0.6	0.6	0.4	0.5	1.6
DH18	-0.2	-0.2	1.3	0.6	0.6	0.6	0.3	0.3	2.1
DH19	0.3	-0.1	-0.4	0.6	0.5	0.6	0.5	0.2	0.7
DH20	-2.6	-2.2	-1.9	0.5	0.5	0.5	4.7	4.6	3.6
DH21	-3.7	-1.2	-0.6	0.5	0.5	0.5	6.9	2.6	1.1
DH22	-0.5	-0.2	2.0	0.5	0.4	0.4	1.0	0.6	4.6
DH24	-0.3	0.4	-0.8	0.6	0.5	0.5	0.6	0.9	1.4
DH25	-1.8	-0.8	1.7	0.6	0.5	0.5	3.2	1.6	3.2
DH26	0.2	-0.2	2.7	0.8	0.8	0.8	0.3	0.3	3.2
DH27	-0.4	-0.3	1.0	0.6	0.6	0.6	0.7	0.5	1.7
DH28	-1.1	0.5	-0.8	0.6	0.5	0.6	2.0	0.9	1.4
DH29	0.7	2.4	1.2	0.6	0.5	0.5	1.2	4.7	2.1
OH01	0.2	0.1	-0.4	0.7	0.6	0.6	0.4	0.2	0.7
OH02	-0.6	0.1	0.9	0.5	0.4	0.5	1.3	0.1	1.9
OH03	-0.2	0.4	-1.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.8	2.5
OH04	-0.4	0.5	-2.2	0.5	0.4	0.5	0.8	1.1	4.5
OH05	0.0	0.2	1.3	0.5	0.5	0.5	0.1	0.3	2.5
OH06	-0.6	-0.3	0.0	0.5	0.5	0.5	1.2	0.6	0.0
OH07	-0.5	0.0	-0.2	0.5	0.5	0.5	0.9	0.0	0.5
OH08	-0.4	-0.5	1.1	0.5	0.5	0.5	0.7	1.1	2.2
OH10	0.0	0.2	0.7	0.7	0.6	0.7	0.0	0.3	1.1
OH12	-0.4	0.2	1.8	1.1	1.0	1.1	0.3	0.2	1.8
OH13	2.0	-1.4	-2.1	0.5	0.5	0.5	3.7	2.9	3.9
OH15	0.0	-0.1	0.3	0.5	0.4	0.5	0.0	0.3	0.6
OH16	1.9	-5.4	2.0	0.5	0.5	0.5	3.6	11.5	3.9
OH17	-0.1	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.2	0.8	0.7
OH19	-0.5	0.0	0.0	1.0	0.8	0.9	0.6	0.0	0.0
OH20	-0.1	0.1	0.8	0.6	0.5	0.5	0.2	0.2	1.4
OH21	-0.3	0.0	0.9	0.6	0.5	0.5	0.5	0.1	1.7
OH22	0.2	0.0	0.4	1.0	0.9	1.0	0.3	0.0	0.4
OH23	0.0	0.0	-1.7	0.5	0.5	0.5	0.1	0.0	3.2
OH24	0.0	0.4	-0.7	0.6	0.5	0.6	0.1	0.7	1.2
OH25	0.4	0.3	2.0	0.7	0.6	0.7	0.5	0.5	2.8
OH26	-1.4	-0.2	2.4	0.8	0.7	0.8	1.7	0.3	2.9
OH27	0.0	0.1	0.2	0.7	0.6	0.6	0.0	0.2	0.3
OH29	0.3	0.5	-1.6	0.6	0.5	0.6	0.4	0.8	2.6



Şekil 3.14. Bölgelere ayrılmış çalışma sahası ve GNSS noktalarına ait hız vektörleri



Şekil 3.15. I. Bölge (Eski heyelan Kütlesi üzeri) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit

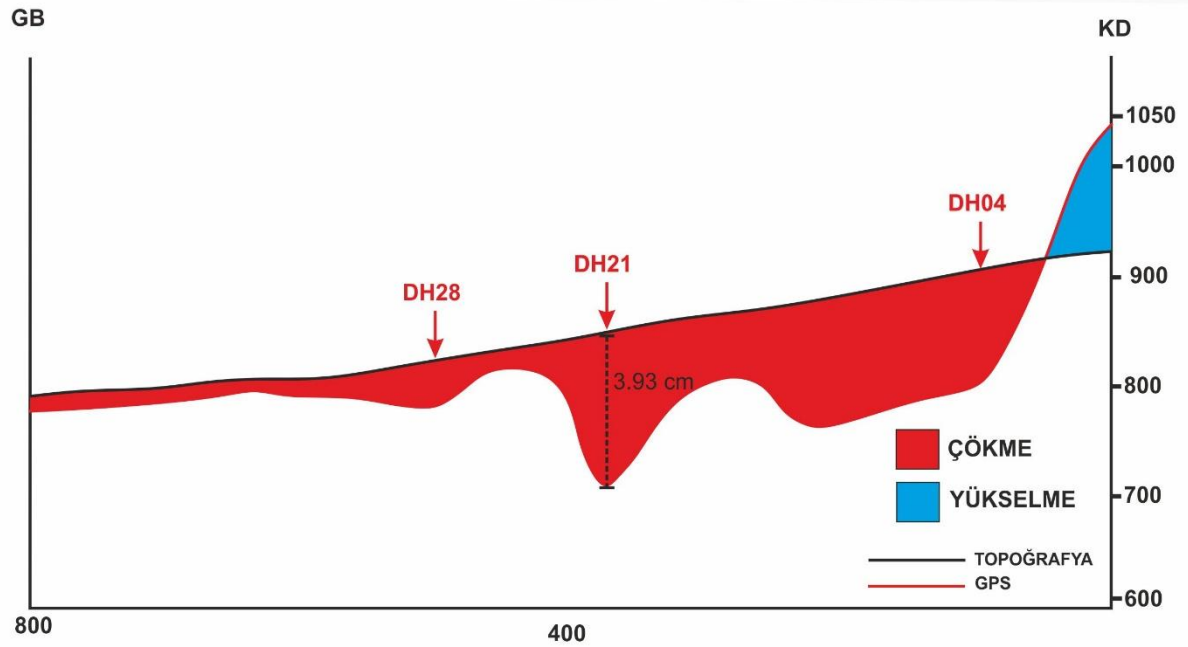


Şekil 3.16. II. Bölge (Şehir Merkezi Kuzey Bölümü) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit

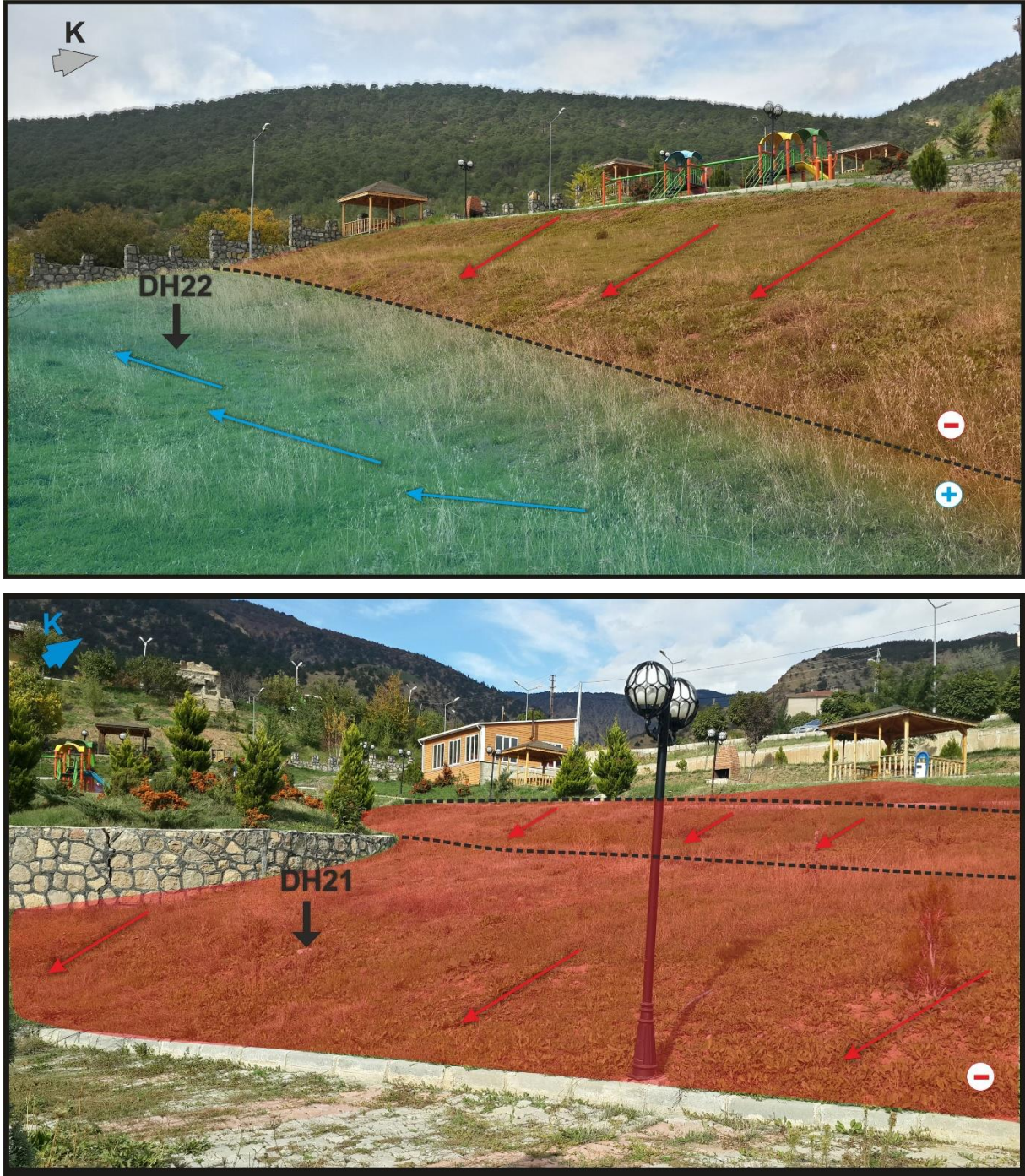
Şekil 3.18' de III. Bölge olarak isimlendirilen bölge heyelan sahasının en hareketli bölgesi olup DH04 nolu nokta civarında III. bölgenin kuzeyindeki yükselme hareketi sönümlenmektedir. III. Bölgede batı- doğu yönünde uzanan DH11, DH10, DH09 ve DH08 noktalarından oluşan bölgede yaklaşık 3 cm/yıl lik bir kuzey-güney ve çökme hareketinin bileşkesinde bir hareket gözlenmektedir. Bu noktaların hemen önünde bulunan DH20 ve DH21 nolu noktalarda ise yine kuzey-güney ve çökme hareketinin bileşkesi yönünde yaklaşık 4 cm/yıl hareket gözlenmektedir. Bu hareketin karşılığı olarak DH17, DH22, DH26 nolu noktaların bulunduğu bölgede bir yükselme yani topuk alanı oluşmaktadır. Özetle bu bölgenin büyük heyelan kütesi üzerinde daha küçük bir kayma düzlemi oluşturduğu gözlenmektedir. Şekil 3.19' da DH21 ve DH22 nolu etrafındaki kayma düzlemleri ve basmaklar gösterilmektedir. Şekil 3.19 incelendiğinde morfoloji ile noktalara ait hız vektörlerinin yönlerinin oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 3.17 'de de bu bölgede bulunan binalardaki oluşan deformasyonlar gözlenmektedir. Şekil 3.17 incelendiğinde Emniyet müdürlüğü ve civarında oluşan lokal kaymalar neticesinde binalardaki deformasyonlar açıkça izlenebilmektedir.



Şekil 3.17. DH20 ve DH21 nolu noktalar civarındaki binalarda oluşan deformasyonlar.



Şekil 3.18. III. Bölge (Şehir Merkezi Emniyet Binası Civarı) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boykesit

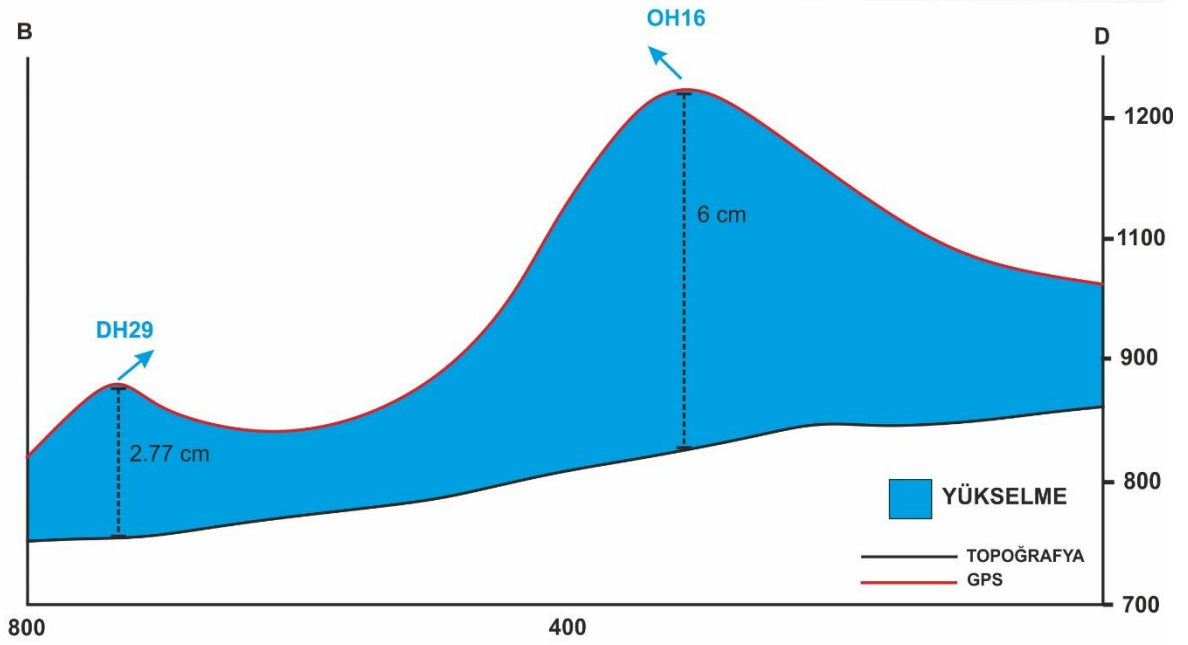
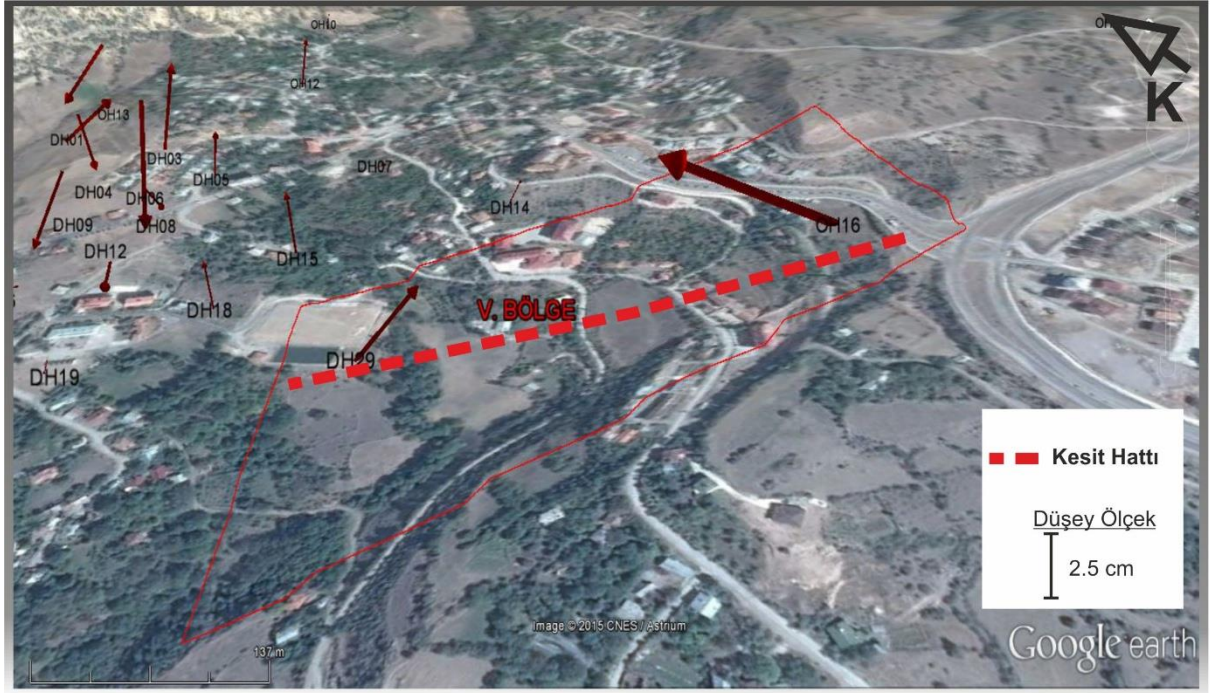


Şekil 3.19. DH21 ve DH22 nolu noktalardaki kayma yüzleri ve oluşan basamaklar.

Şekil 3.21' de ise V bölge olarak nitelendirilen ve III. Bölgenin batısında kalan alan gözlenmektedir. Burada da OH16 nolu civarında doğu- batı yönlü yaklaşık 6 cm/yıl lokal bir hareket gözlenmektedir bunun karşılığında da DH29 nolu noktada da OH16'nın zıt doğrultusu olan batı-doğu yönlü yaklaşık 3 cm/yıl büyüklüğünde bir hareket gözlenmektedir. Bu bölgede de lokal bir kayma düzlemi olduğu açıkça gözlenmektedir. Şekil 3.20' de OH16 nolu nokta ve buradaki kayma düzlemi gösterilmektedir. Bu bölge de lokal hareket sonucunda oluşan kaymanın etkisi Şekil 3.20' de gösterilen kulübede açıkça izlenebilmektedir. Sonuç olarak bu bölgede de ana heyelan kütlelerinden bağımsız lokal bir kayma düzlemi oluşumu izlenmektedir.



Şekil 3.20. OH16 nolu nokta ve civarındaki kayma düzlemi ve yönü (17.02.2015, E: 40.297240, B: 37.832188)

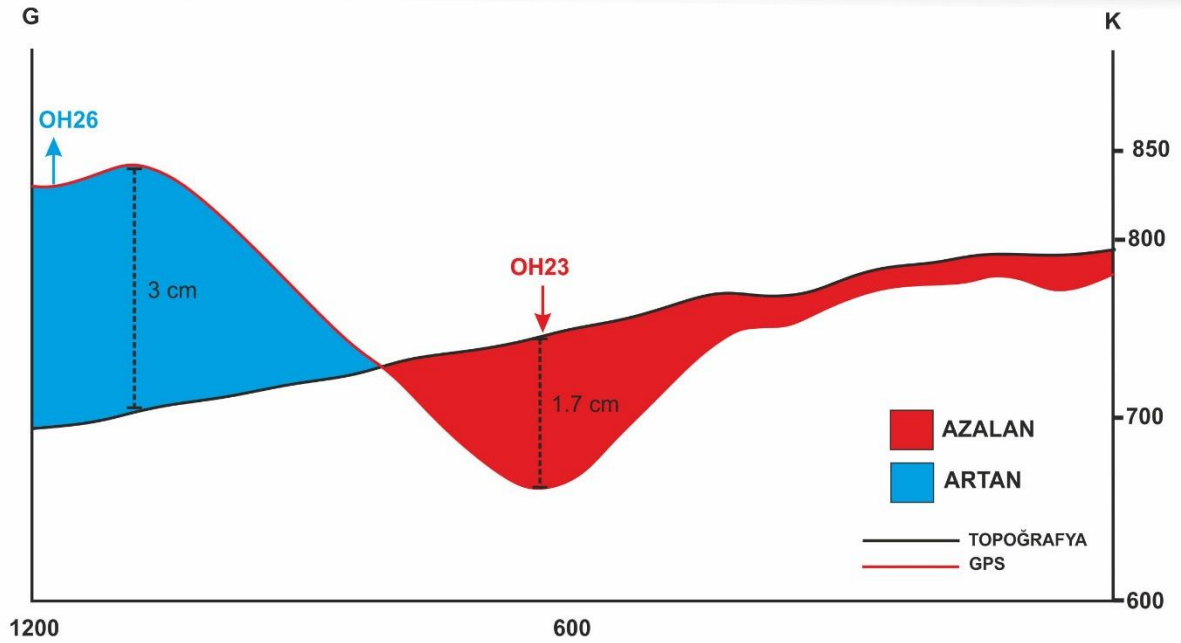
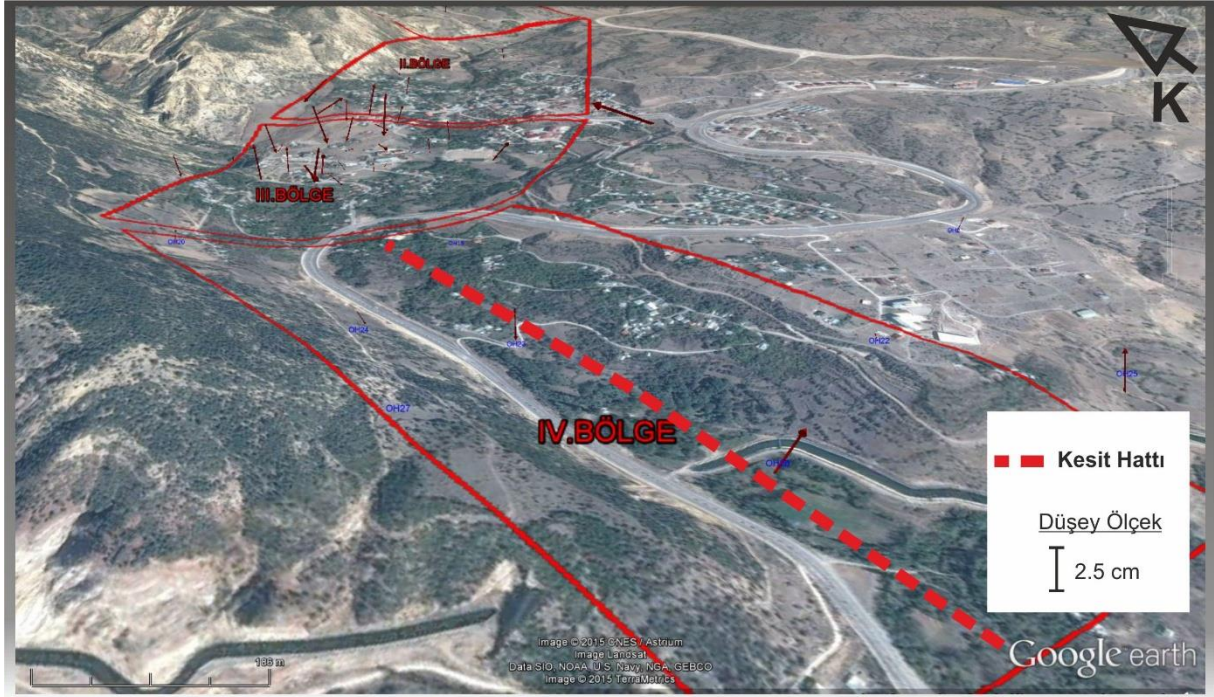


Şekil 3.21. V. Bölge (Şehir Merkezi Batı kesimi) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boykesit

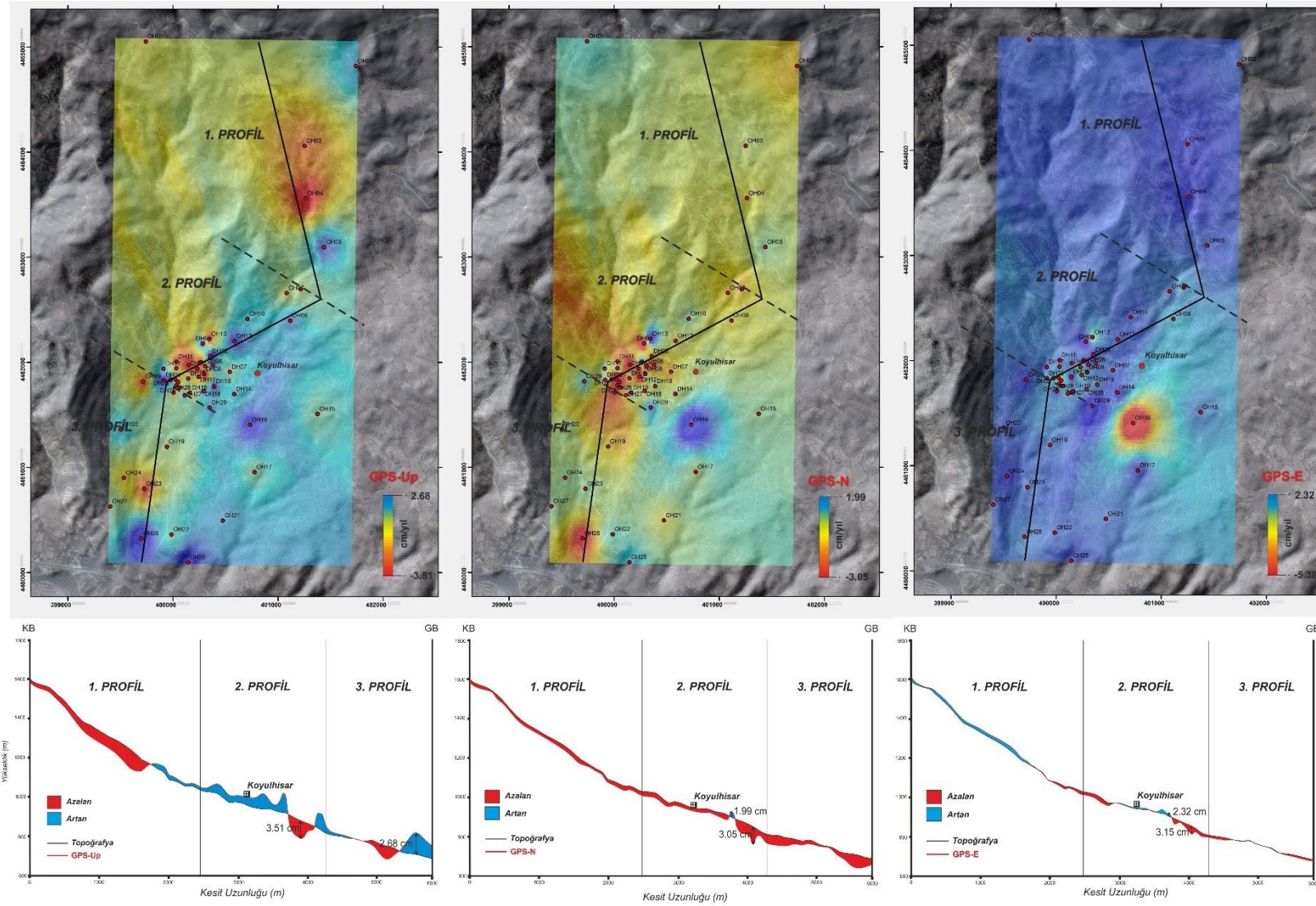
Şekil 3.22' de görüleceği üzere III. Bölgedeki çökme hareketi IV. Bölge'nin kuzey kesimlerinde azalarak devam etmekte ve IV. Bölgenin güneyinde topuklayarak yükselme hareketine dönüşmektedir.

Şekil 3.23' de ise yükseklik, kuzey ve doğu bileşenleri için ayrı ayrı elde edilen enterpole haritaları ve kesitler sunulmaktadır. Şekil 3.23 incelendiğinde Eski Heyelan sahasında çökme daha sonra Saytepe civarında yükselme, Eminiyet binasının arkasında yeniden bir çökme ve daha sonrasında yükselme gözlenirken bu hareket heyelan sahasının güneyinde tekrarlamaktadır. Bunun yanı sıra tüm heyelan sahasında kuzeyden güneye doğru bir hareket gözlenirken OH16 nolu noktada bu hareket güney kuzey yönlüdür. Doğu bileşeninde genellikle doğuya doğru bir hareket varken bu hareket OH16 nolu nokta ve Emniyet müdürlüğü civarında batıya doğru olmaktadır.

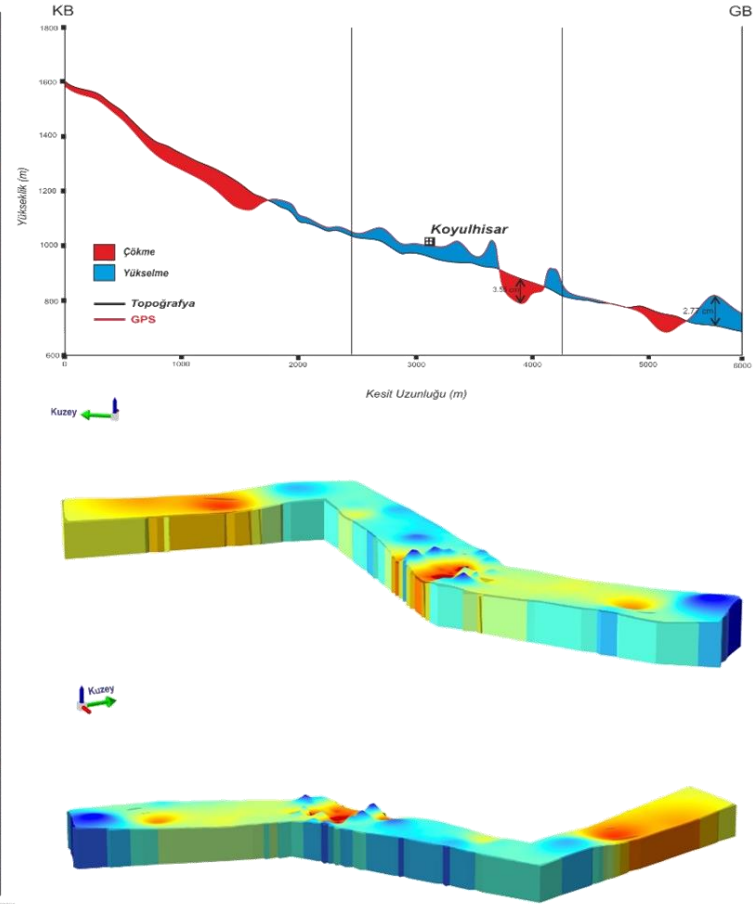
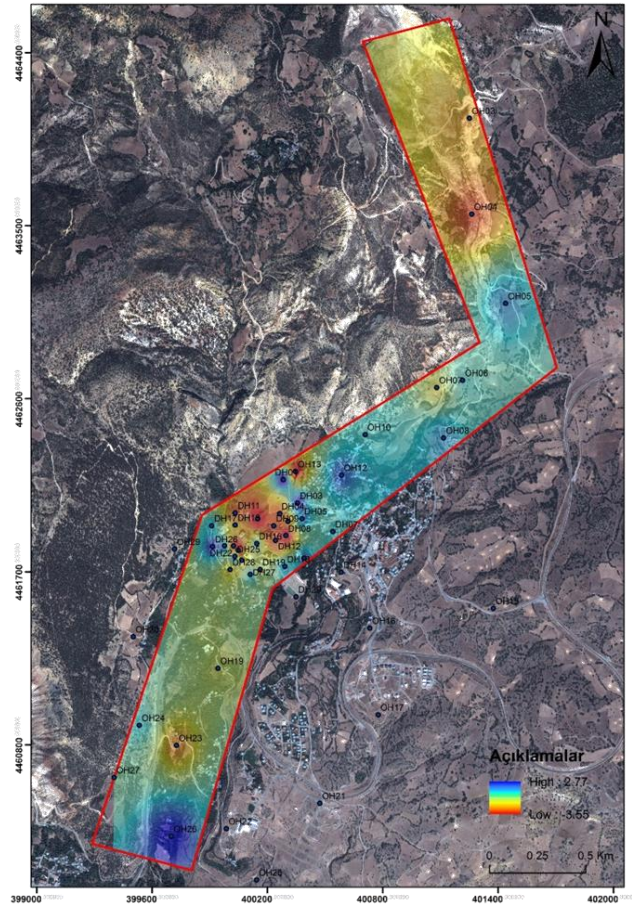
Şekil 3.24' de ise GNSS noktalarından elde edilen bileşke hız vektörleri çökme yükselme olarak nitelendirilmiş ve enterpolasyon haritası üretilmiştir. Daha sonra bu harita üzerinden Kuzey-Güney doğrultusunda Heyelan sahasının tac kısmından topuk kısmına kadar bir boy kesit alınmış ve topoğrafyanın üzerine bu değerleri işlenmiştir. Bu değerleri son olarak kabartılarak heyelan sahası boyunca GNSS noktalarından elde edilen çökme yükselme alanları 3 boyutlu olarak sunulmuştur. Şekil incelendiğinde Eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme daha sonra Saytepe civarında başlayıp şehir merkezine kadar uzanan bir yükselme alanı gözlenmektedir. Bunun yanı sıra Emniyet müdürlüğü civarında lokal bir çökme ve karşılığında yükselme alanı da gözlenmektedir. Şehir merkezinin Güneyinde yine bir çökme ve karşılığında yükselme alanı izlenmektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere Ana heyelan kütlesi üzerinde birden fazla kayma düzlemleri gözlenmektedir.



Şekil 3.22. IV. Bölge (Şehir Merkezi Güneyi Heyelan Sahası Topuk Kısmı) GNSS noktalarına ait bileşke hız vektörleri ve bileşke hız vektörlerinden enterpole edilmiş değerlerden üretilen boy kesit



Şekil 3.23. Heyelan Sahası GNSS noktalarından enterpole edilen hız değerleri ve heyelan sahası boyunca kuzey-güney doğrultuda alınan kesit üzerindeki hız değerleri a. Yükseklik bileşeni b. Kuzey bileşen c. Doğu bileşeni



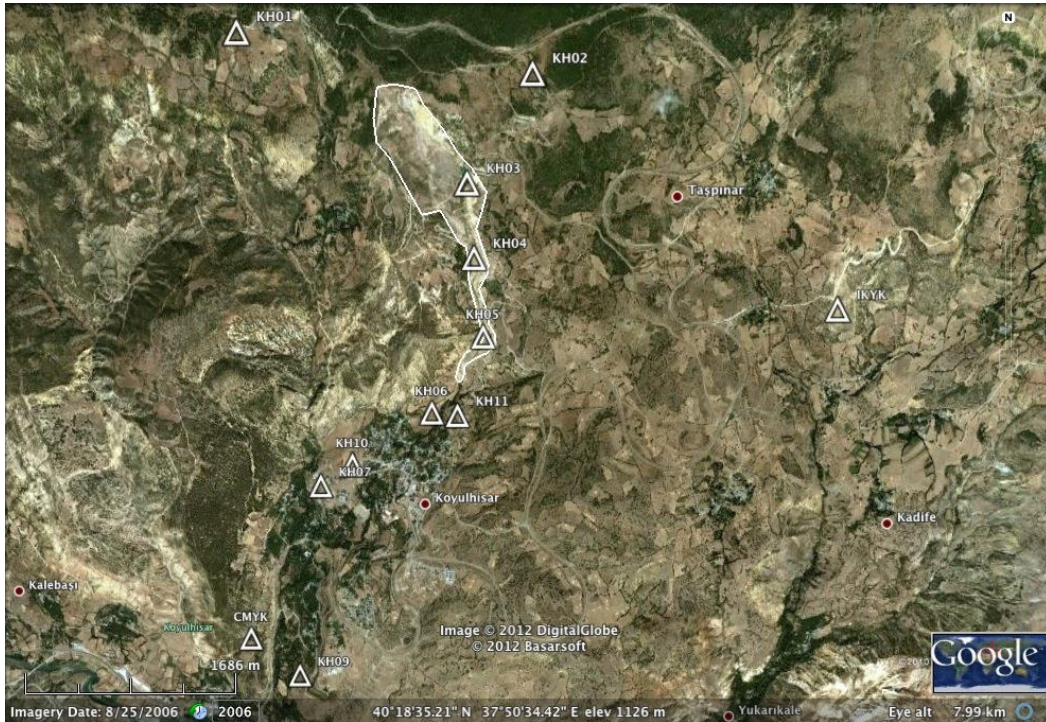
Şekil 3.24. Heyelan Sahası GNSS noktaları bileşke hız vektörlerinden elde edilen çökme yükselme yönündeki Enterpolasyon haritası ve Kuzey Güney Yönünde boy kesit ile bu değerlere ait kabartma harita.

3.4.3 Dinamik Deformasyon Modeli Kullanılarak GNSS Noktalarına Kalman Filtresi Uygulanması

Bu çalışmada dinamik deformasyon modeli kalman filtreleme yöntemi kullanılarak deformasyon miktarı, sıcaklık ve yer altı su değişimi değişimine bağlı bir fonksiyon olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ilk olarak proje GNSS ölçüleri devam ederken, bölgede daha önce Hastaoğlu 2009 tarafından gerçekleştirilmiş GNSS ölçülerinden elde edilen hız değerleri ile bölgeye ait meteorolojik veriler arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra proje GNSS ölçüleri bittikten sonra bu model proje GNSS noktaları içinde test edilmesi planlanmıştır.

3.4.3.1 Bölgede Daha Önce Gerçekleştirilmiş GNSS Çalışmalarından Elde Edilen Hız Değerleri ile Meteorolojik Veriler Arasındaki İlişkinin Kalman Filtresi Yöntemiyle Araştırılması

Bölgede Hastaoğlu 2009 tarafından 2007-2008 yılları arasında 10 adet noktada GNSS ölçüleri yapılmış ve bu noktalara ilişkin yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada özellikle Emniyet Müdürlüğü civarında bulunan KH07 nolu noktada yatay bileşende anlamlı ve büyük kayma miktarları elde edilmiştir. Proje aşamasında da yine Koyulhisar ilçe merkezinde bu noktaya yakın DH20 ve DH21 nolu noktalarımızda benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 3.25. Hastaoglu 2009' da yaptığı çalışmada kullanılan GNSS noktalarının lokasyonları

İlk olarak KH07 nolu noktada Bölüm 3.4.1’ de anlatılan Kinematik deformasyon modeline göre kalman filtresi kullanılarak 10 adet GNSS noktası için hız değerleri tekrar kestirilmiştir. Bu noktalardan KH07 nolu noktada özellikle yatay bileşende anlamlı ve büyük değerler elde edilmiştir. Bu değerlerin Hastaoglu 2009’da bulunan hız değerleri aynı olduğu görülmüştür. Daha sonra yatay bileşendeki bu anlamlı hareket ile dış kuvvetler olan sıcaklık değişimi ve yer altı su seviyesi arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Fakat bölgede 2007-2008 yılları arasında yer altı su seviyesi ölçümü gerçekleştirilmediği için direkt olarak bu ilişki irdelenmemiştir. Burada deformasyonlara neden olan kuvvet olarak sıcaklık değişimi alınmıştır. Bölgede sıcaklık değişimine bağlı olarak karlar erimekte ve buda yer altı su seviyesini yükseltmektedir. Çalışma bölgesinde meydana gelen 1998 ve 2000 yılına ait iki heyelanda karların erimeye başladığı dönemlerde meydana gelmiştir. Sonuç olarak KHO7 isimli nokta dinamik kalman filtreleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiş ve kayma miktarı ile sıcaklık değişimi arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Şekil 2.26 incelendiğinde kuzey ve doğu bileşeni için yaklaşık 7cm/yıl civarında bir hareket gözlenmektedir. Kuzey ve doğu bileşeni için hareketin yaz aylarında yavaşladığı açıkça gözlenmektedir. Hareketin Ekim-Nisan ve Nisan-Temmuz aylarında oldukça hızlandığı da yine Şekil 2.26’ da görülmektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere KH07 noktasındaki harekette mevsimsel bir etki gözlenmektedir.



Şekil 3.26. Sıcaklık değişimi ile yer değiştirmesi arasındaki ilişki

Sıcaklık ile yer değiştirmesi arasındaki bu ilişkiyi ortaya koyabilmek için KH07 noktasına kuzey ve doğu bileşenlerine ait veriler kullanılarak bir dinamik model oluşturulmuştur. $x = f(t, \Delta S)$ dinamik modelinde ΔS periyotlar arası sıcaklık farkını ifade etmektedir (Hastaoglu 2013). Dinamik Modelin kullanıldığı Kalman Filtreleme Yöntemine göre KH07 noktası için kuzey ve

doğu bileşenlerini içeren iki boyutlu konum ve dış kuvvetten (sıcaklık) oluşan hareket modeli Eşitlik 3.10' da verilmiştir.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} - e^{(S_{k+1}-S_k)/10} s_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} - e^{(S_{k+1}-S_k)/10} s_{ej} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Burada $n_j(k+1)$, $e_j(k+1)$: $(tk+1)$. Periyot için j noktasının kuzey ve doğu koordinat değerleri, $n_j(k)$, $e_j(k)$: (tk) . Periyot için j noktasının kuzey ve doğu koordinat değerleri. s_{nj} , s_{ej} : j. noktanın n ve e koordinat değerleri için sıcaklık değişimi katsayıları, S_{k+1} : $(tk+1)$. periyot için sıcaklık değeri, S_k : (tk) . periyot için sıcaklık değeridir.

KH07 nolu noktanın Dinamik Deformasyon modeline göre Kalman Filtresi kullanılarak hareket parametrelerinin hesabı için kullanılan modelin matris formu Eşitlik 3.11' de verilmektedir.

$$\bar{Y}_{k+1} = \begin{bmatrix} n \\ e \\ s_x \\ s_y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} I & I(-e^{(s_{k+1}-s_k)/10}) \\ 0 & I \end{bmatrix}_{k+1,k} \begin{bmatrix} n \\ e \\ s_x \\ s_y \end{bmatrix}_k \quad (3.11)$$

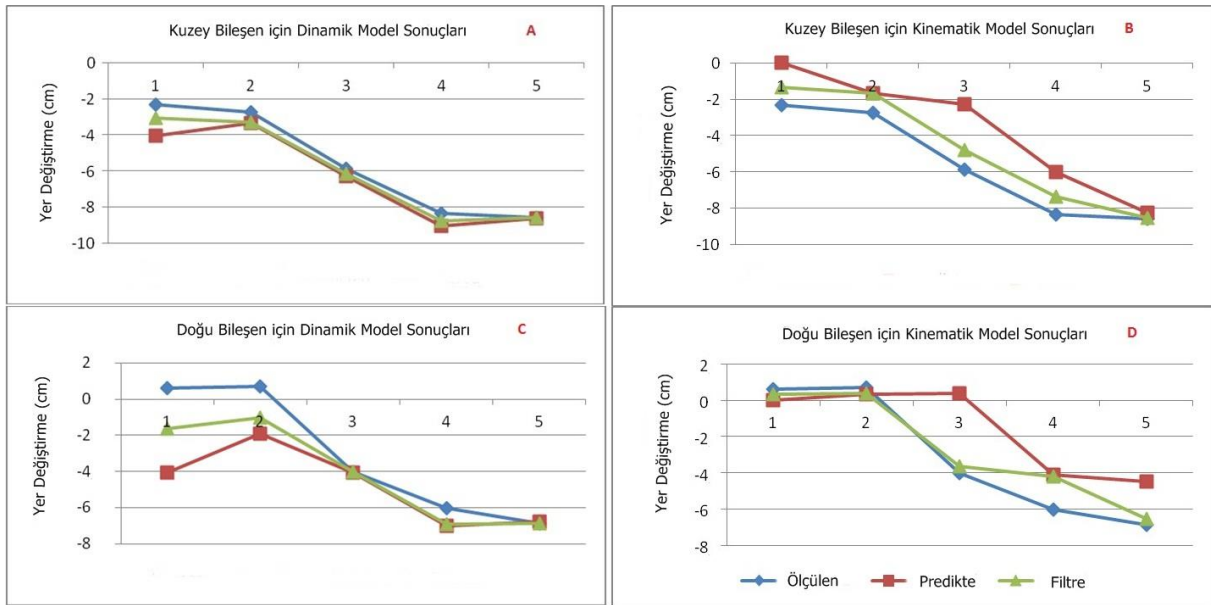
Eşitlik (3.11) prediksyon eşitliğidir. Model 2D Kalman Filtre Değerlendirmesine göre hesaplanarak sıcaklık katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar Tablo 3.6' da sunulmaktadır.

Tablo 3.6. Dinamik model kullanılarak Kalman Filtresinden kestirilen sıcaklık katsayı değerleri

Ölçü Periyotları	Sıcaklık Katsayısı (cm)		Anlamlılık Düzeyi	
	s_n	s_e	ds_n	ds_e
Tem. 07- Nis.07	1.412	1.445	14.68(v)	14.17(v)
Kas.07- Nis.07	1.408	1.421	14.15(v)	13.57(v)
Nis.08- Nis.07	1.384	1.420	14.97(v)	14.11(v)
Agu.07- Nis.07	-0.283	-0.298	16.47(v)	13.78(v)
Kas.08- Nis.07	-0.282	-0.299	9.91(v)	9.60(v)

Şekil 2.27' de KH07 nolu noktaya ait Dinamik ve Kinematik modelden elde edilen sonuçlar verilmektedir. Şekil 2.27.a ve 2.27.b'de KH07 noktasının kuzey bileşeni için Dinamik ve Kinematik modelden elde edilen ölçüm, prediksyon ve filtreleme sonuçları verilmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere Kuzey bileşeni için Dinamik modelle elde edilen prediksyon ve filtreleme sonuçları kendi içerisinde daha tutarlı ve ölçüm değerlerine daha yakın değerlerdir. Sonuçta Kuzey bileşeni için sıcaklık etkisini göz önünde bulunduran dinamik model kinematik modele göre daha tutarlı sonuçlar üretmiştir.

Şekil 2.27.c ve 2.27.d'de ise KH07 noktasının doğu bileşeni için Dinamik ve Kinematik modelden elde edilen ölçüm, prediksyon ve filtreleme sonuçları verilmektedir. Burada özellikle 3. Periyotdan sonra Dinamik modelden elde edilen prediksyon ve filtreleme sonuçların ölçü değerlerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Özellikle dinamik modelde prediksyon değerlerinin gerçek ölçü değerleri daha uyumlu olduğu gözlenmekte buda ileriye yönelik kestirimlerde dinamik modelin daha uygun sonuçlar verebileceğini bizlere göstermektedir.



Şekil 3.27. Dinamik ve Kinematik Deformasyon modelleri Kullanılarak Kalman Filtresinde KH07 nolu nokta için Ölçülen (measured), Predikte (predicted) ve Filtre (filtered) değerler.

Tablo 3.7' de ise ölçülen değerler ile dinamik ve kinematik modelden elde edilen prediksyon ve filtreleme değerleri arasındaki R^2 ve korelasyon değerleri verilmektedir. Tablo 3.7 incelendiğinde dinamik model için R^2 ve korelasyon değerlerinin kinematik modele göre daha uygun olduğu gözlenmektedir.

Tablo 3.7. KH07 nolu nokta ölçü, predikte ve filtre değerlerinden elde edilen yer değiştirme miktarları arasındaki korelasyon ve R^2 değerleri

	Kuzey Bileşen				Doğu Bileşeni			
	Dinamik		Kinematik		Dinamik		Kinematik	
	Filtre	Predikte	Filtre	Predikte	Filtre	Predikte	Filtre	Predikte
Korelasyon	0.998	0.983	0.993	0.928	0.981	0.875	0.980	0.827
(R^2)	0.996	0.967	0.987	0.862	0.963	0.766	0.961	0.684

KH07 nolu noktaya ilişkin Kinematik ve Dinamik Kalman Filtreleme sonucunda elde edilen her periyoda ilişkin predikte ve filtrelenmiş yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma neticesinde özellikle dinamik modelden predikte edilen yer değiştirmelerin gerçek değerler ile daha uyumu olduğu gözlenmiştir. Dinamik modelleme sonucunda KH07 nolu noktanın hareketi yorumlanırken mevsimsel sıcaklık değişimlerinin göz ardı edilmemesi gerektiği anlaşılmıştır. Özellikle dinamik modelde predikasyon değerlerinin gerçek ölçü değerleri daha uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu ileriye yönelik kestirimlerde Koyulhisar Heyelanı için dinamik modelin daha uygun sonuçlar verebileceğini bizlere göstermektedir. Ayrıca bu bölümde gerçekleştirilen çalışma Turkish Journal of Earth Sciences (ISI) dergisinde "Investigation of the groundwater effect on slow-motion landslides by using dynamic Kalman filtering method with GNSS: Koyulhisar town center", 1033-1046 pp., 2013 , DOI: 10.3906/yer-1210-10. İsmiyle yayınlanmıştır.

3.4.3.2 Heyelan Sahası İçerisindeki 51 nokta için Dinamik Deformasyon Modeli Kullanılarak Kalman Filtresi Uygulaması

Bu işlem için ilk olarak Bölüm 3.4.3.1. de uygulanan sıcaklık değişimi ve yer altı su seviyesi değişimi ile yer değiştirme arasındaki ilişkileri irdelemek amacı ile Eşitlik 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16' da belirtilen modeller kullanılmıştır. Şekil 3.13 detaylı olarak incelendiğinde sıcaklık değişimi ve yer altı su seviyesindeki değişimler ile yer değiştirmeler arasında anlamlı bir ilişki göze çarpmamaktadır. Fakat buna rağmen tüm noktalar için bu ilişkiler farklı modeller kullanılarak incelenmiştir. Eşitlik 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16' da sırası ile;

$n_j^{(k+1)}$, $e_j^{(k+1)}$ ve $up_j^{(k+1)}$: (t_{k+1}) . periot için j noktasının sırası ile kuzey, doğu ve yükseklik koordinat değerlerini,

$n_j^{(k)}$, $e_j^{(k)}$ ve $up_j^{(k)}$: (t_k) . periot için j noktasının sırası ile kuzey, doğu ve yükseklik koordinat değerlerini,

V_{nj} , V_{ej} , V_{upj} : j. noktanın sırası ile kuzey, doğu ve yükseklik koordinat değerleri için hız katsayı değerlerini,

W_{nj} , W_{ej} , W_{upj} : j. noktanın sırası ile kuzey, doğu ve yükseklik koordinat değerleri için yeraltı su değişimi katsayı değerlerini,

S_{nj} , S_{ej} , S_{upj} : j. noktanın sırası ile kuzey, doğu ve yükseklik koordinat değerleri için sıcaklık değişimi katsayı değerlerini,

w_{k+1} ve w_k : sırası ile (t_{k+1}) . ve (t_k) . periyotlar için yeraltı su seviyesi değerlerini,

s_{k+1} ve s_k : sırası ile (t_{k+1}) . ve (t_k) . periyotlar için sıcaklık değerlerini,

e : Euler değerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{ej} \\ up_j^{(k+1)} &= up_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{upj} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12'de kalman filtresinde yer değiştirmeler kinematik modele göre yani sadece zaman değişimine bağlı olarak modellenmiş ve V hız katsayı değerleri hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{nj} + (w_{k+1} - w_k) W_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{ej} + (w_{k+1} - w_k) W_{ej} \\ up_j^{(k+1)} &= up_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{upj} + (w_{k+1} - w_k) W_{upj} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13'de kalman filtresinde yer değiştirmeler, zaman değişimi ve yer altı su seviyesi değişimine bağlı doğrusal bir deformasyon modeline göre modellenmiş ve V hız katsayı değerleri ve W yeraltı su seviyesi değişim katsayı değerleri hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{nj} + e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{ej} + e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{ej} \\ up_j^{(k+1)} &= up_j^{(k)} + (t_{k+1} - t_k) V_{upj} + e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{upj} \end{aligned} \quad (3.14)$$

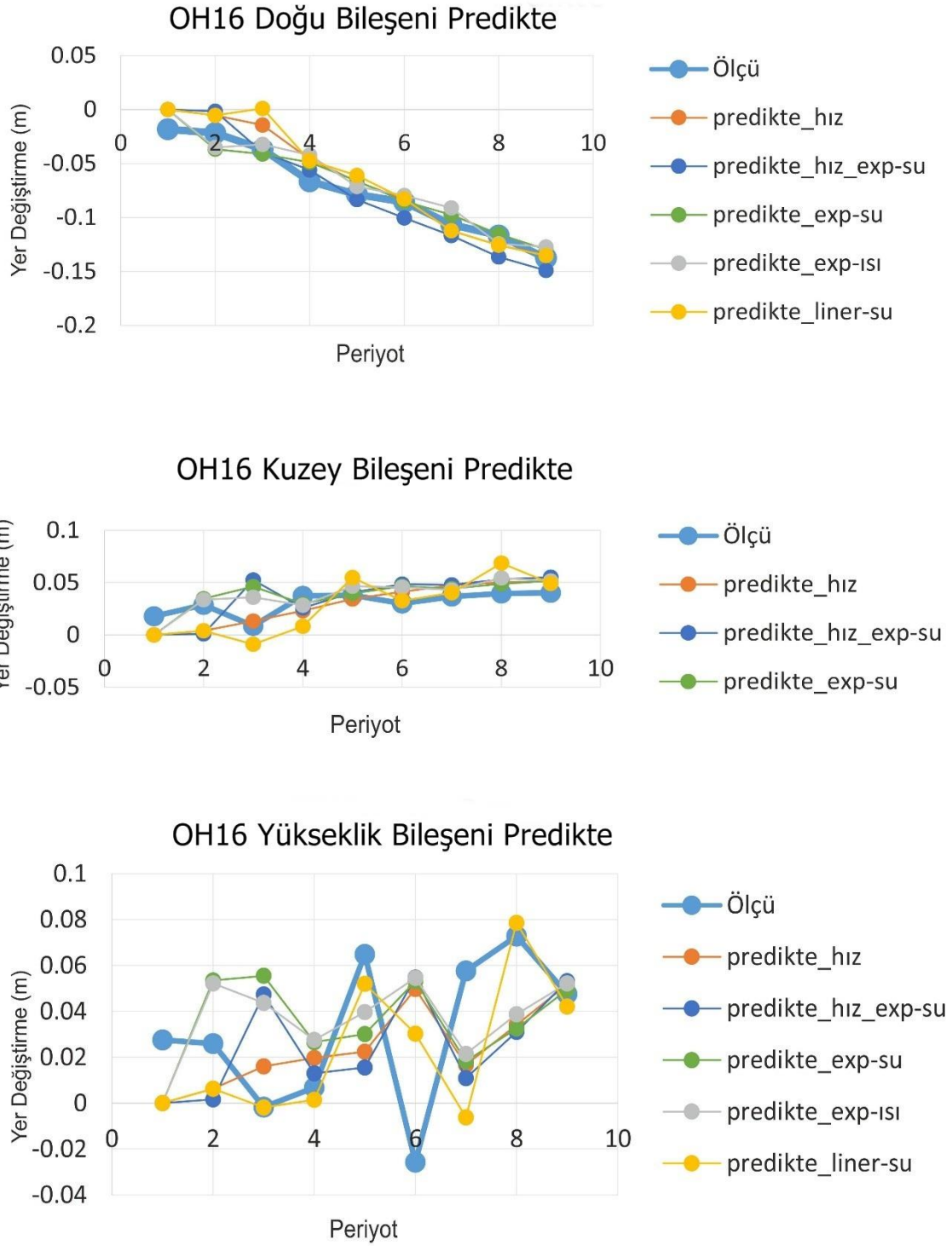
Eşitlik 3.14’de kalman filtresinde yer değiştirmeler zaman değişimini doğrusal ve yer altı su seviyesi değişimini extrapolansiyel bir deformasyon modeline göre modellenmiş ve V hız katsayı değerleri ve W yeraltı su seviyesi değişim katsayı değerleri hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} - e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} - e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{ej} \\ up_j^{(k+1)} &= up_j^{(k)} - e^{(w_{k+1}-w_k)/10} W_{ej} \end{aligned} \quad (3.15)$$

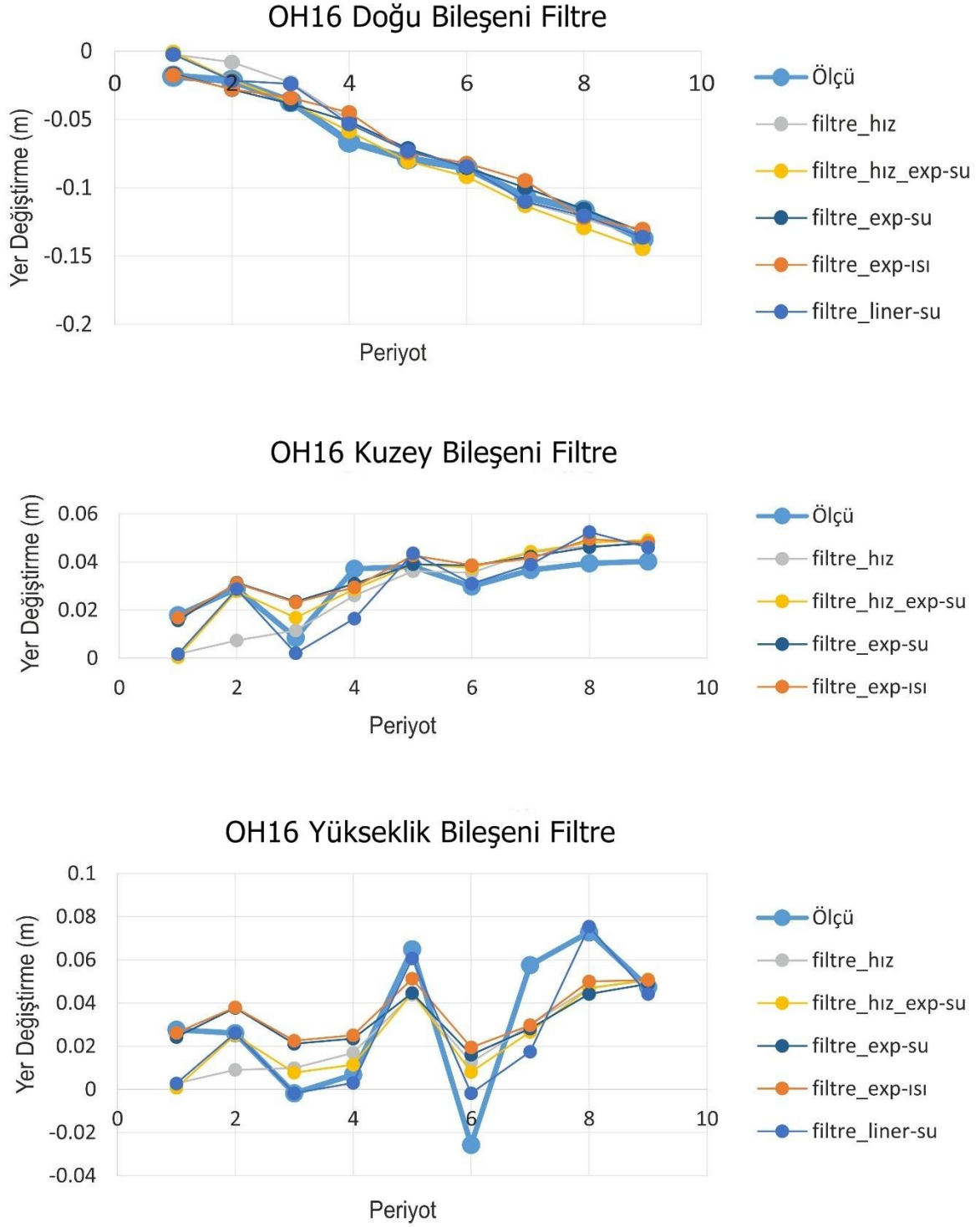
Eşitlik 3.15’de kalman filtresinde yer değiştirmeler, yer altı su seviyesi değişimini extrapolansiyel bir deformasyon modeline göre modellenmiş ve W yeraltı su seviyesi değişim katsayı değerleri hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} n_j^{(k+1)} &= n_j^{(k)} - e^{(S_{k+1}-S_k)/10} S_{nj} \\ e_j^{(k+1)} &= e_j^{(k)} - e^{(S_{k+1}-S_k)/10} S_{ej} \\ up_j^{(k+1)} &= up_j^{(k)} - e^{(S_{k+1}-S_k)/10} S_{ej} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16’ da kalman filtresinde yer değiştirmeler, sıcaklık değişimini extrapolansiyel bir deformasyon modeline göre modellenmiş ve S sıcaklık değişim katsayı değerleri hesaplanmıştır. Tüm modellerden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacı ile bölgede en büyük hız değerlerine sahip olan OH16 DH20 ve DH21 nolu noktalara ilişkin elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlar gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalar Şekil 3.28 ile Şekil3.33 arasındaki şekillerde sunulmaktadır.



Şekil 3.28. OH16 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri

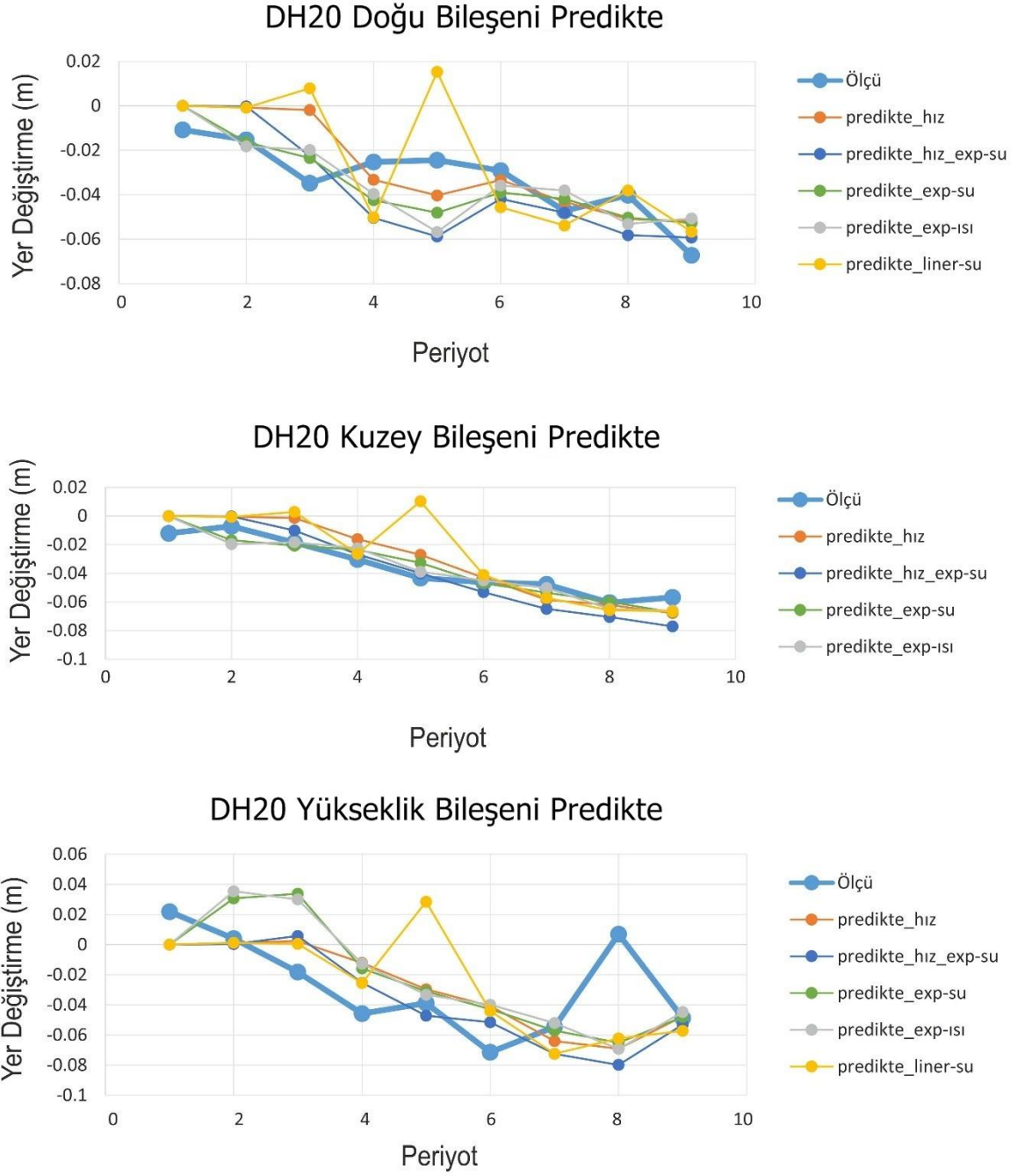


Şekil 3.29. OH16 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri

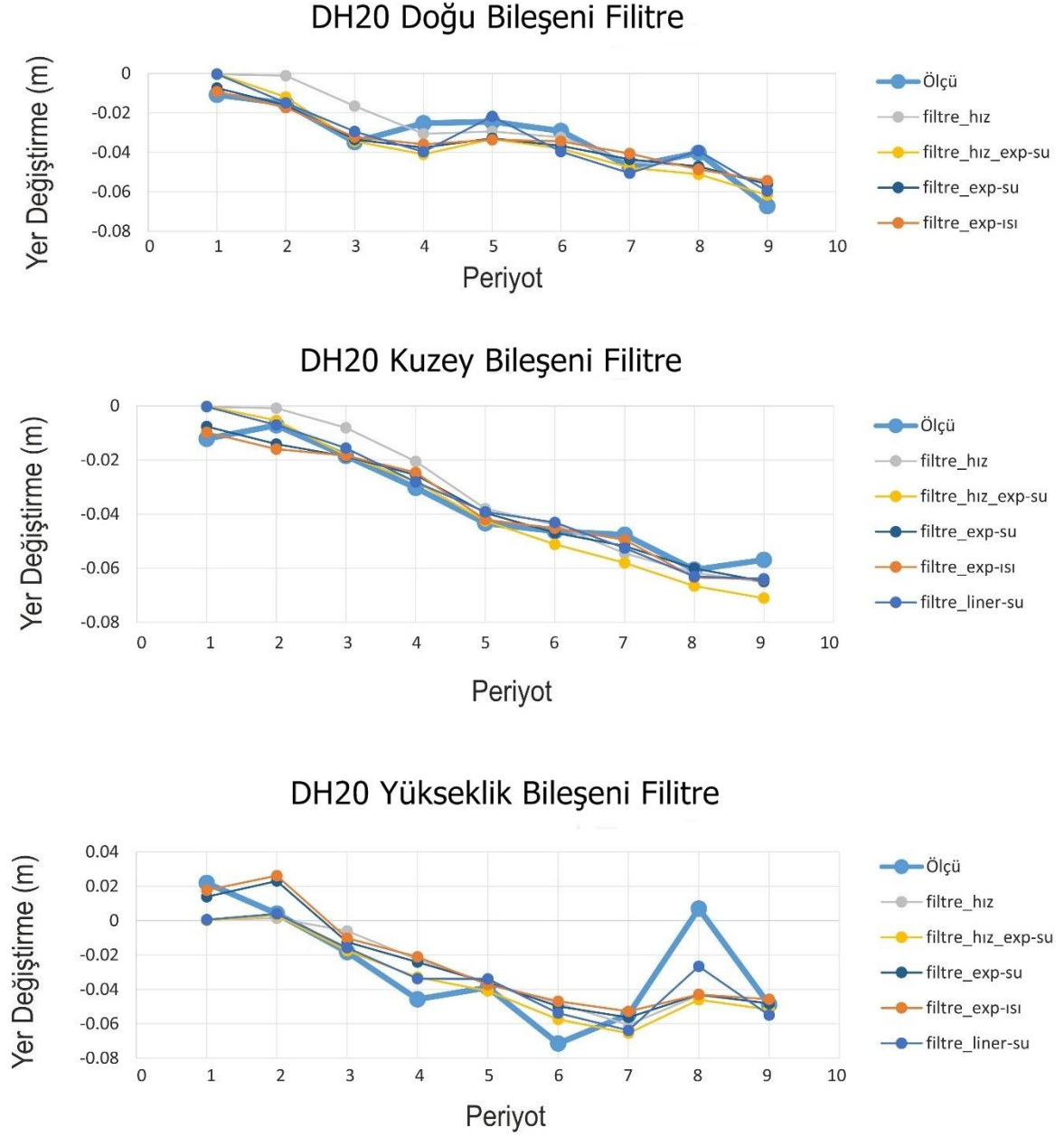
Şekil 3.28 ve 3.29’ da OH16 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte ve filtre değerleri sunulmaktadır. Şekil 3.28 ve 3.29 incelendiğinde ölçü değerlerine en yakın sonuçları kuzey ve doğu bileşenleri için Eşitlik 3.15’ de verilen yer altı su seviyesi değişimini extrapolansiyel bir deformasyon modeline göre modelleyen Kalman Filtre modelinin verdiği gözlenmektedir. Yükseklik bileşeni için Eşitlik 3.13’ de verilen zaman değişimi ve yer altı su seviyesi değişimini doğrusal bir deformasyon modeline göre ifade eden Kalman Filtre modeli vermektedir. Tablo 3.8 ‘de bütün modellerden elde edilen predikte ve filtre sonuçların ölçü değerlerinden farkları yardımı ile hesaplanmış standart sapma değerleri sunulmaktadır. Tablo 3.8’ de de yukarıda bahsi geçen modellerin daha küçük standart sapma değerleri verdiği gözlenmektedir.

Şekil 3.30, 3.31, 3.32 ve 3.33’ de ise DH20 ve DH21 nolu noktalar için beş farklı modelden elde edilen değerler gözlenmektedir. Bu şekillerde ve Tablo 3.8’ de de görüldüğü üzere yatay bileşen için yer altı su seviyesi değişimini extrapolansiyel bir deformasyon modeline göre modelleyen Kalman Filtre modelinin az da olsa sonuçları iyileştirmektedir. Bunu yanı sıra yükseklik bileşenin de DH20 için doğrusal hız değerinin yanında extrapolansiyel yer altı su seviyesi değişiminin birlikte değerlendirildiği modelin daha uygun sonuçlar verdiği, DH21 içinse doğrusal hız değerinin yanında doğrusal yer altı su seviyesi değişiminin birlikte değerlendirildiği modelin daha uygun sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

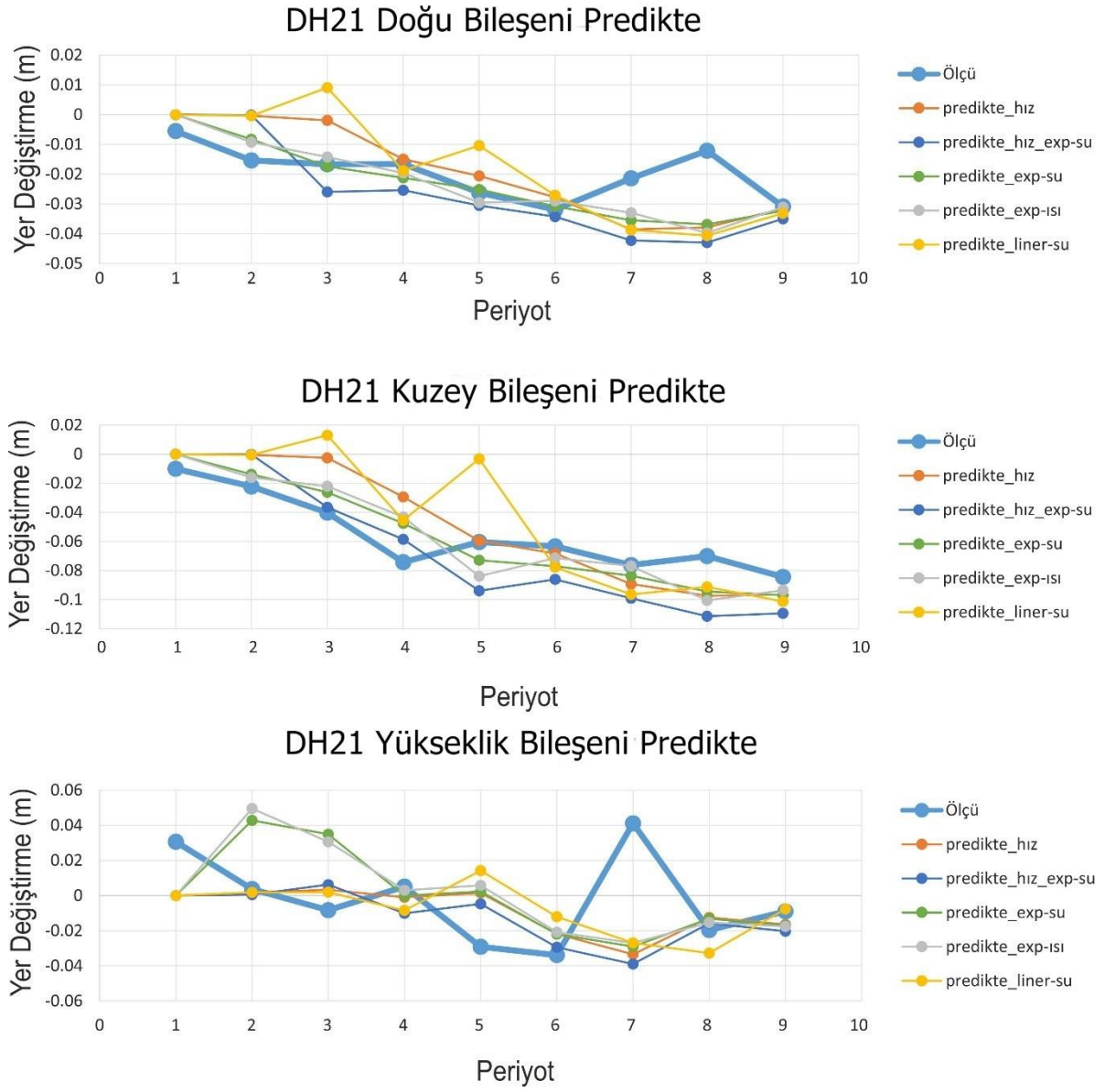
Özetle deformasyon miktarlarının en büyük olduğu OH16, DH20 ve DH21 nolu noktalarda sadece zamana bağlı model yerine yukarıda bahsi geçen modeller kullanıldığında predikte ve filtre değerlerinde çok fazla bir değişim olmakla birlikte 1 cm ye yakın iyileşme olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçtan anlaşılabacağı üzere gerek sıcaklık değişimi gerekse yer altı su seviyesi değişimini ile yer değiştirme değerleri arasında sonuçları anlamlı düzeyde iyileştirecek sistematik ilişkiler belirlenememiştir. Fakat ileriye yönelik çalışmalarda yukarıda bahsi geçen modeller gibi dış kuvvetleri de hesaba katan farklı modellerin kullanılmasının daha doğru sonuçlar üretebileceği en azından bu gibi dinamik modellerden elde edilen sonuçların gerçek değerlere daha yakın sonuçlar üreteceği gözlenmiştir.



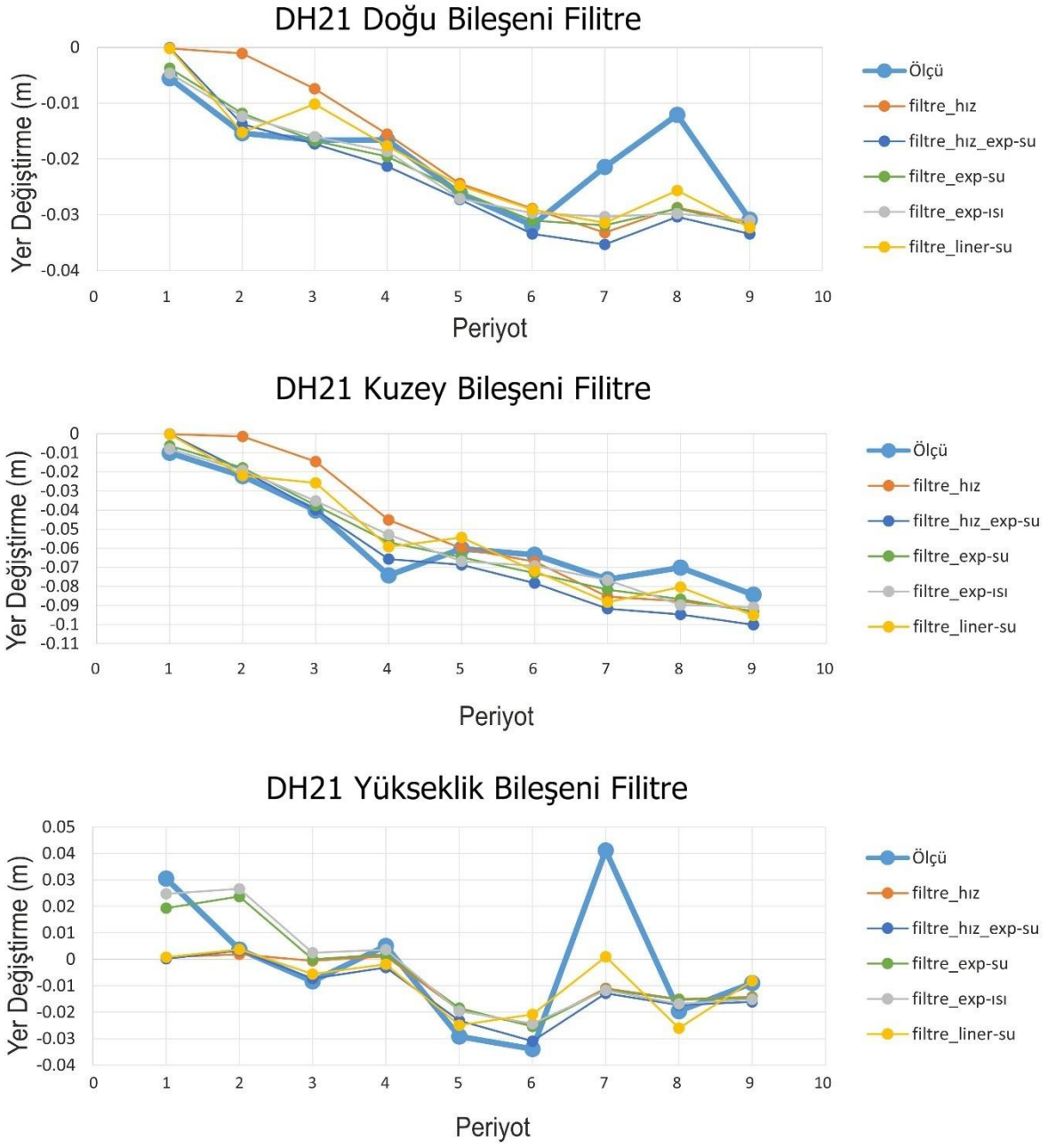
Şekil 3.30. DH20 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri



Şekil 3.31. DH20 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri



Şekil 3.32. DH21 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen predikte değerleri



Şekil 3.33. DH21 nolu noktaya ait kuzey doğu ve yükseklik bileşenleri için beş farklı modelden elde edilen filtre değerleri

Tablo 3.8. Beş farklı modelden elde edilen predikte ve filtre sonuçların ölçü değerlerinden farkları yardımı ile hesaplanmış standart sapma değerleri

Nokta No		Standart Sapma Değerleri (mm)									
		Predikte					Filtre				
		Hız	Hız+ Exp-Su	Exp-Su	Exp-İsı	Hız+ Lineer-Su	Hız	Hız+ Exp-Su	Exp-Su	Exp-İsı	Hız+ Lineer-Su
OH16	e	12	15	11	12	15	9	9	6	9	10
	n	14	22	15	13	20	11	9	6	7	12
	up	39	45	44	41	32	23	22	24	24	16
DH20	e	16	18	14	16	23	10	9	7	8	18
	n	11	12	8	8	20	7	8	5	5	17
	up	33	34	36	38	38	23	20	22	23	26
DH21	e	14	14	10	11	17	10	8	7	7	11
	n	24	23	17	20	31	17	12	10	11	22
	up	31	31	36	36	32	21	20	21	21	18

3.5 GNSS Sonuçları Yardımıyla Gerilim Analizi

3.5.1 Gerilim Analizi

Gerilim analizi Malzeme, Mukavemet, Mekanik, Zemin Mekaniği gibi birçok disiplinler tarafından sıklıkla kullanılmaktadır. Gerilme normal, kayma veya burma türlerine göre deformasyonlar oluşturur. Gerilme doğrudan ölçülmez ama oluşan deformasyon ölçümleri ile hesaplanabilir (Poyraz, 2009).

Gerilim analizi yerbilimlerindeki disiplinler tarafından (Jeoloji, Jeodezi vb. gibi) deformasyonları daha iyi anlayabilmek ve yorumlayabilmek için kullandıkları bir tekniktir. Jeodezik verilerden gerilimlerin belirlenmesine ait ilk rapor 1929 yılında Japon bilim adamları tarafından yayımlanmıştır (Schneider, 1991). Günümüzde ise GNSS teknolojilerinin getirdiği kolaylıklar sayesinde gerilim parametrelerin tamamı hesaplanabilmektedir.

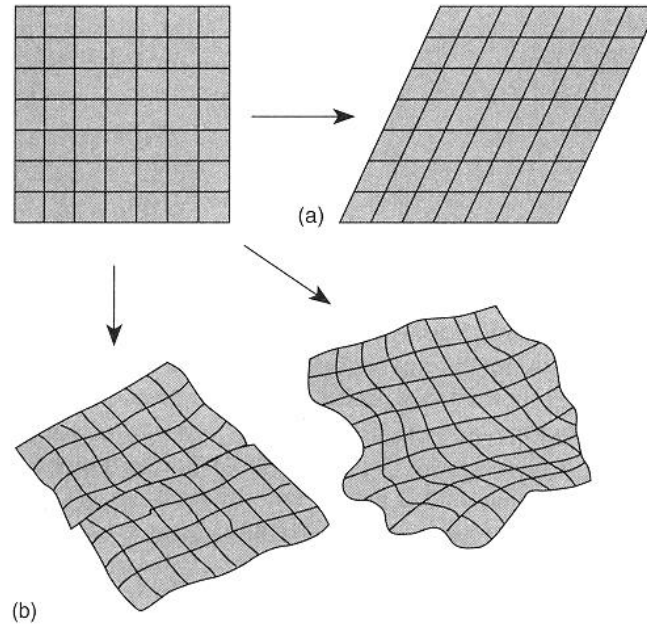
Yerkabuğunun irili ufaklı birçok plakadan oluştuğu ve bu plakaların birbirlerine göre hareket ettikleri bilinmektedir. Bu plakaların hareket özelliklerinin belirlenmesi güncel jeodinamik araştırma konuları arasındadır. Plakaların birbirlerine göre hareket miktarları, plakaların dönme miktarları, plaka sınırlarında ve plaka içindeki gerilimlerin belirlenmesi çalışılmaktadır (Deniz, 1997). Yerkabuğunda oluşan gerilimler, sismik veya jeolojik verilerden ve jeodezik verilerden olmak üzere iki farklı yöntemle belirlenebilmektedir. Bu iki farklı yöntem ile yapılan sonuçların birbirlerine uyuşması beklenir (Denli, 1998).

Gerilim analizi, bir objenin deformasyonun belirlenmesi ve gösterilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerilim birikiminin belirlenmesi ve izlenmesinde aşağıdaki jeodezik yöntemler kullanılmaktadır.

- Ölçü ya da dengeli ölçü (uzunluk, açı, azimut)
- Koordinat farkları
- Gerilim parametrelerinin dengeleme modeli içerisinde belirlenmesi (Birlikte indirgeme yöntemi) (Demir, 1999)

Uygulanan bu yöntemlerde, açı ölçüleri ile kayma bileşenleri ve maksimum kayma yönü, azimut ölçüsü ile açı ölçüsüne ek olarak dönme parametresi, uzunluk ölçü ile alan bozulması, kayma bileşenleri, asal gerilimler ve asal gerilimin yönü tayin edilebilir. Günümüzde uydu teknolojilerinin hızla gelişmesiyle ortaya çıkan GNSS tekniği yöntemi ile yukarıda bahsedilen bütün gerilim parametreleri belirlenebilmektedir. GNSS ile elde edilen baz vektör bileşenleri ölçek ve dönüklük bilgilerini içerdiğinden gerilim parametrelerin tamamı belirlenebilmektedir.

Ayrıca kullanılan yöntemlerde gerilim parametrelerinin tespitinde uygulama bölgesinin homojen veya heterojen varsayımına bağlı olarak değişik matematiksel modeller söz konusudur. Homojen deformasyon, deformasyon miktarının kütlenin her tarafında aynı olma halidir. Bir kütle içinde deformasyonun homojen karakterde gelişmiş olduğunu o kütle içinde ele alacağımız bir takım düşünsel çizgilerin paralelliklerini korumuş olduğu düşünülür. Homojen olmayan deformasyonda ise bu paralelliklerin bozulduğu durumlardır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. (a) Homojen deformasyon, (b) Homojen olmayan deformasyon

Gerilme tensör elemanlarından yararlanılarak gerilim parametrelerinin hesaplanması, hem yaygın kullanımı, hem de sadelik ve kolay anlaşır olması bakımından iki boyut için açıklanacaktır. Üç boyutlu ilişkiler iki boyutludan kolayca türetilmektedir.

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{xx} & \mathbf{e}_{xy} \\ \mathbf{e}_{yx} & \mathbf{e}_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{u}_y}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{u}_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial \mathbf{u}_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

(3.17) eşitliğindeki u_x ve u_y iki boyutlu yer değiştirme vektörünün elemanlarıdır. Gerilim tensörü $\mathbf{e}$, köşegen elemanları (e_{xx} , e_{yy}) koordinat eksenleri boyunca birim uzunlukta oluşan genişlemeyi, köşegeni dışındaki elemanları (e_{xy} , e_{yx}) ise koordinat eksenlerine göre deformasyon sonucu ortaya çıkan küçük açısız bozulmaları tanımlar.

X (kuzey) ve Y (doğu) eksenleri ile tanımlı iki boyutlu koordinat sisteminde;

Pi ve Pj noktalarını birleştiren ve X eksenine α_{ij} açısı yapan bir doğrultuda t ve t' periyotlarındaki uzunluklar sırasıyla S_{ij} ve S'_{ij} olmak üzere birim uzunluktaki ε_i değişimi,

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta S_{ij}}{S_{ij} \Delta t} = e_{xx} \cos^2 \alpha_{ij} + e_{xy} \sin 2\alpha_{ij} + e_{yy} \sin^2 \alpha_{ij} \quad (3.18)$$

eşitliğinden elde edilir (Chen, 1991; Denli, 1998; Deniz, 1997; Kakkuri, 1997). Burada,

$$\Delta S_{ij} = S'_{ij} - S_{ij} \quad (3.19)$$

$$\Delta t = t' - t \quad (3.20)$$

dir. (3.18) eşitliğini matris olarak gösterilmesi durumunda aşağıdaki (3.21) eşitliği elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{12} \\ \vdots \\ \varepsilon_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_{12} & \sin 2\alpha_{12} & \sin^2 \alpha_{12} \\ \cos^2 \alpha_{13} & \sin 2\alpha_{13} & \sin^2 \alpha_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos^2 \alpha_{ij} & \sin 2\alpha_{ij} & \sin^2 \alpha_{ij} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{yy} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Genel olarak (3.18) eşitliğinden gerilim tensör elemanları olan e_{xx} , e_{xy} ve e_{yy} elde edilir.

Gerilim analizindeki detaylı matematiksel modeller hakkındaki detaylı bilgiler Poyraz, 2014 ve

Hackl vd.2009 yayınlarında anlatılmıştır. Gerilme tensörü elemanlarından aşağıdaki gerilme parametreleri hesaplanabilir (Chen 1991; Kakkuri, 1992; Denli, 1998; Deniz, 1997; Poyraz, 2009; Hackl vd., 2009; Poyraz,2014).

$$\Delta = e_{xx} + e_{yy} \text{ (Dilatasyon)} \quad (3.22)$$

$$\gamma_1 = e_{xx} - e_{yy} \text{ (Saf Kesme gerilmesi)} \quad (3.23)$$

$$\gamma_2 = 2e_{xy} \text{ (Mühendislik kesme gerilmesi)} \quad (3.24)$$

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \text{ (Toplam kesme Gerilmesi)} \quad (3.25)$$

Asal Gerilmeler;

$$E_1 = \frac{1}{2}(\Delta + \gamma) \text{ (Maksimum gerilme)} \quad (3.26)$$

$$E_2 = \frac{1}{2}(\Delta - \gamma) \text{ (Minumum gerilme)} \quad (3.27)$$

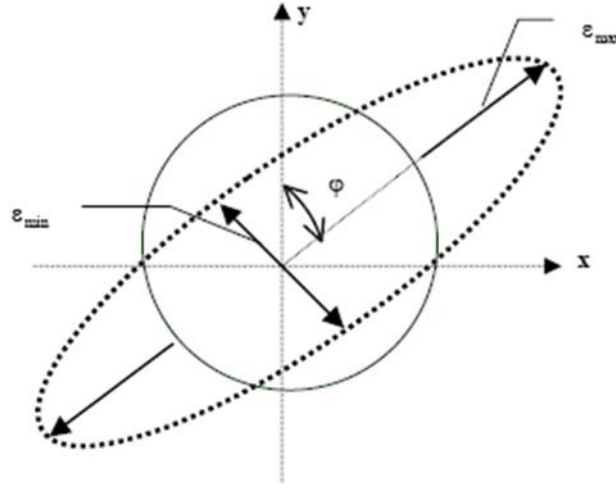
$$\beta = \arctan\left(\frac{e_{xy}}{E_1 - e_{xy}}\right) \text{ (Maksimum gerilme doğrultusunun azimutu)} \quad (3.28)$$

$$E_{SHEAR} = \frac{1}{2}(E_1 - E_2) \text{ (Maksimum kesme gerilme)} \quad (3.29)$$

$$E_{INTER} = \frac{1}{2}(E_1 + E_2) \text{ (Maksimum normal gerilme)} \quad (3.30)$$

Gerilmeler jeodezik ağın her noktası için hesaplanan asal gerilme değerleri ile ifade edileceği gibi grafik olarak da gösterilebilir. Söz konusu noktada maksimum gerilme doğrultusu çizilir. Bu doğrultuda maksimum gerilme ve buna dik doğrultuda minumum gerilme çizilerek gerilme elipsinin eksenleri oluşturulur.

Pozitif asal gerinim parametresi genişlemeyi, negatif asal gerinim parametresi ise sıkışmayı belirtir. Deformasyon, asal gerinim parametrelerinin her ikisi pozitif ise gerinim elipsi, biri pozitif diğeri negatif ise iki bölümlü hiperbol, ikisi de negatif ise sanal elips biçimindedir. Grafik gösterimde genişleme yönü noktadan dışarıya doğru, sıkışma yönü ise bunun tersi oklarla gösterilir (Vanicek vd., 1981).



Şekil 3.35. Gerilme elipsi maksimum ve minimum asal gerilim parametreleri (Doğan, 2002)

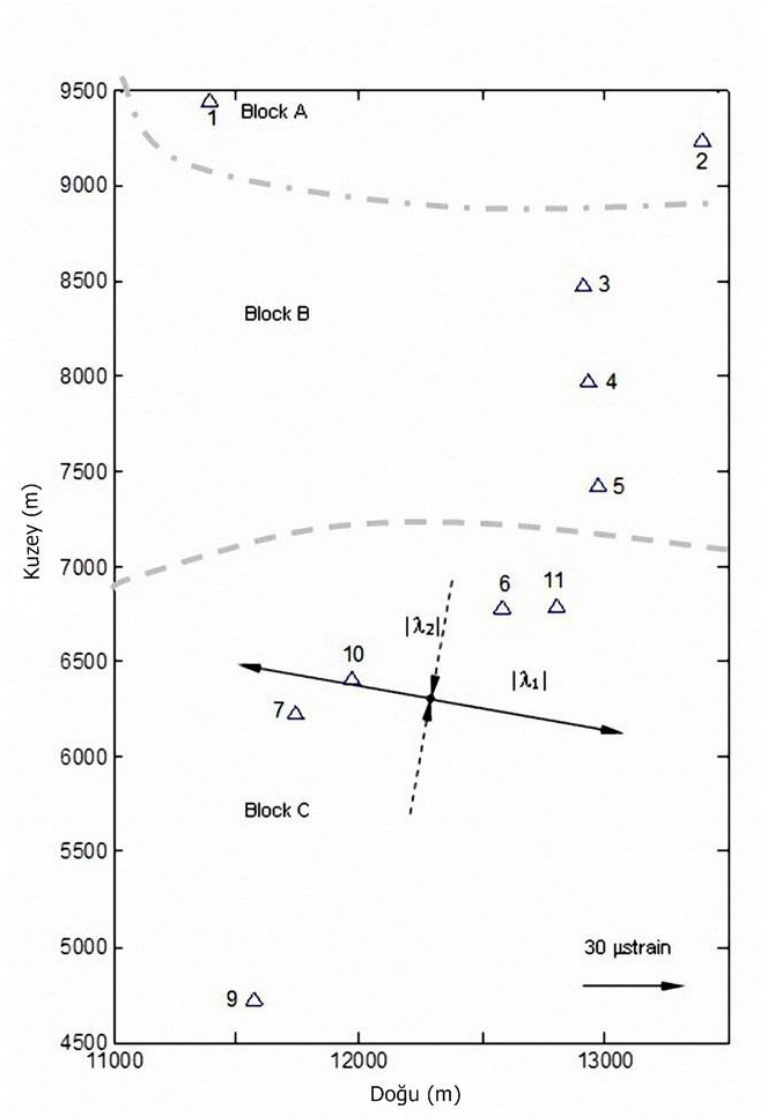
3.5.2 Bölgede Daha Önce Gerçekleştirilen GNSS çalışmalarından Hesaplanan Gerilim Değerleri

17 Mart 2005 tarihinde meydana gelen ve can kaybına neden olan Kuzulu (Koyulhisar) heyelanı da Türkiye'nin önemli aktif fay zonlarından Kuzey Anadolu Fay Zonuna (KAFZ) yakın bir alanda gerçekleşmiştir. Bu doğal afetin oluşumunda kuskusuz topoğrafik, iklimsel ve litolojik faktörlerin yanı sıra, aktif bir fay zone içerisinde gelişen yapıların varlığının da etkisi olmuştur (Poyraz, 2015).

Hastaoğlu 2009'da bölgede 2007-2008 yılları arasında mevsimsel etkileri de gözlemlenebileceği GNSS ölçüleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada GNSS sonuçlarından yaklaşık 4'er aylık periyotlarda yer değiştirmeler elde edilmiştir. Elde edilen en fazla değer şehir merkezinde yaklaşık 9 cm ile hesaplanmıştır. Ayrıca bu noktaların yer değiştirmelerinin yanında yer değiştirmelere sebep olan kuvvetle de incelenmesi gereken önemli konulardan biridir. Bu kuvvetlerin belirlenmesi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de gerilim parametrelerinin belirlenmesidir.

Proje kapsamında bölüm 3.5.1 ve Poyraz, 2015'de anlatılan temel matematiksel modellere göre şehir merkezindeki gerilim değerleri iki farklı GNSS veri setinden elde edilen değerlere göre incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak bu bölgede 2007-2008 yılları arasında 12 noktalık bir GNSS ağından elde edilen yer değiştirmeler yardımıyla bölgedeki gerilim parametrelerinin elde edilmesidir. Bunun için heyelanın karakteristik yapısını yansıtabilecek şekilde bloklara bölünmüştür. A blok heyelanın taç kısmını oluşturan ve hareketlerin çok fazla beklenmediği

bölgelerdir. B ve C bloklarında ise nispeten A bloka göre daha fazla hareketin beklendiği bölgedir. Yapılan gerilim analizinde C bölgede anlamlı bir gerilim hareketi elde edilmiştir. Gerilimin asal eksenleri incelendiğinde Kuzey-Güney yönünde sıkışma, Doğu-Batı yönünde ise bir genişleme hareketi gözlenmektedir (Şekil 3.36). Ayrıca C blok Kuzey Anadolu Fay Zonuna yakın olmasından dolayı sağ yanal atılımlı bir faydan beklenen (Poyraz,2015; Fiegl 1990) asal eksen hareketlerini yansıtmaktadır. Bu kapsamda bölgede genel mevsimsel etkilerinin yanı sıra bölgenin aktif bir fay zonuna yakınlığından kaynaklanan bir hareketin olduğu düşünülmektedir (Poyraz, 2015).



Şekil 3.36. Koyulhisar bölgesinin üç bölgeye ayrılarak elde edilen gerilim asal eksenleri (Poyraz, 2015)

3.5.3 Proje Kapsamında elde edilen GNSS sonuçlarından Hesaplanan Gerilim Değerleri

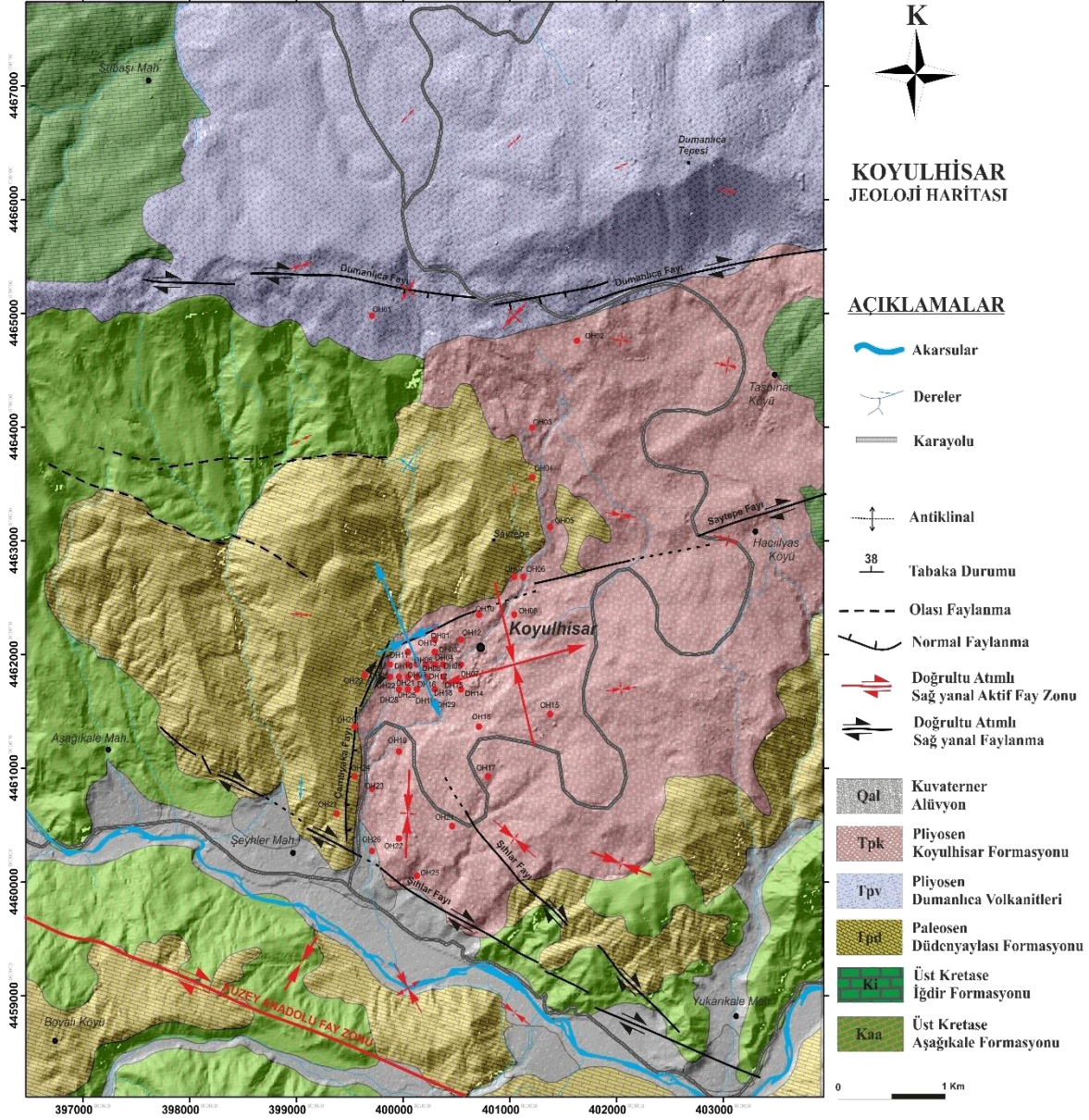
Proje kapsamında yapılan ikinci gerilim analizi Hackl vd. 2009'yılında yapmış olduğu çalışmada önerilen iki boyutlu gerilim analizi yöntemi seçilmiştir. Bu çalışma için bölgenin alansal gerilim değerlerini elde edebilmek için grid aralığı 0.003 derece seçilmiştir. Buna göre bölge için hesaplanan gerilim yönleri Şekil 3.37 gösterilmiştir. Şekil 3.37 incelendiğinde özellikle Koyulhisar şehir merkezinde gerilim birikiminin daha fazla olduğu ortaya konmaktadır. Heyelan bölgesinin taç ve topuk bölgesi için hesaplanan gerilim vektörlerinin büyüklüğü şehir merkezine göre daha az ve küçüktür. Fakat bölge için elde edilen gerilim vektörlerinin sıkışma ve genişleme yönleri bölgede bulunan fayların karakteristik özelliklerini taşımaktadır. Her iki çalışma içinde elde edilen gerilimin asal eksen yönleri bölge için Jeolog ekibinin gerçekleştirdiği fay kinematiklerinden elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

Şekil 3.38. incelendiğinde Dumanlıca Fayı ve yakın bölgesinde elde edilen sıkışma ve çekme yönleri şehir merkezine göre daha az gerilim birikimine sahip olduğunu göstermektedir. Dumanlıca Fayı bölgesinde elde edilen sıkışma KD-GB yönlü olarak elde edilmiştir. Bu bölgede elde edilen fay kinematik analizlerinde ise örneğin İstasyon No:14 ve No:15 elde edilen sıkışma yönleride benzerlik göstermektedir. Bu fay bölgesinin genelinde sıkışma rejimin hakim olduğunu fayın doğusunda ise K-G yönlü olduğu anlaşılmaktadır.

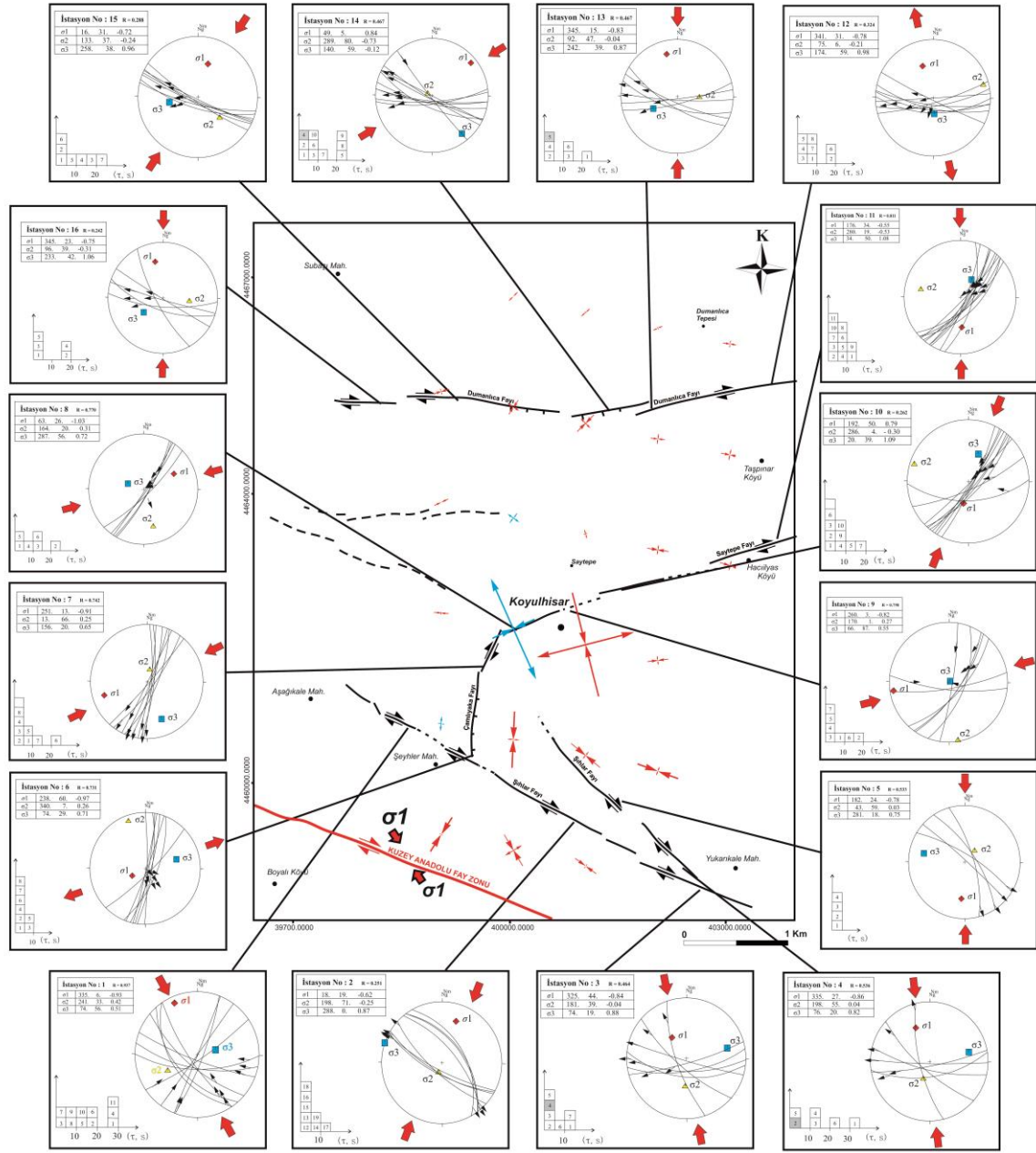
Şehir merkezinde elde edilen sıkışma ve çekme yönleri ise bölgede bir çok fayın etkisi altında kaldığı ama genelde fay kinematiklerinden elde edilen sıkışma ve çekme yönlerine benzerlikleri görülmektedir. Fakat fayların kesiştiği bölgelerde farklılıklar göstermesine rağmen genel karakteristik özelliklerini korumaktadırlar. Örneğin Saytepe fayının olduğu bölgede D-B sıkışma olmasına karşın Çamlıyaka ve Şihlar Fayının bulunduğu bölgelerde K-G ve KB-GD yönlü sıkışma değerleri bu faylar için fay kinematiklerinden elde edilen sıkışma yönleri ile benzerlikler göstermektedir. Ayrıca şehir merkezine oldukça yakın olan KAFZ (Kuzey Anadolu Fay Zonu)'nun etkisinde bölgede edilen Kuzey-Güney yönünde sıkışma, Doğu-Batı yönünde ise bir genişleme olarak ortaya çıkmaktadır. Bu ise 2007-2008 yılları arasındaki GNSS verilerinden elde edilen blok hareketine benzerlik göstermektedir. Bu ise bölgede halen aktif olarak aynlı yönlü deformasyonun meydana geldiğini ve tehlike boyutunun devam ettiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu bölge için elde edilen gerilim asal eksenleri, faydan uzaklaştıkça gerilmelerin azalması, rijit kıtasal hareketlerde, deformasyon ve gerilimlerin fay sınırı boyunca gerçekleşmesi özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Gerek jeolojik gözlemlere dayalı kinematik analizlerin gerekse GNSS sonuçlarından üretilen gerilim analizinin, heyelanlar nedeniyle morfolojik durumun bozunmuş olduğu lokasyonlarda

(Emniyet Müdürlüğü ve OH16 nolu nokta civarı) doğru-güvenilir sonuçlar vermediği doğal olarak gözlenmiştir. Bunun göstergesi olarak Şehir merkezinde genel tektonik yapıdan bağımsız gerilim değerleri elde edilmiştir. Bu da bölgede lokal anlamda heyelanların varlığını sunmaktadır.



Şekil 3.37. Güncel GNSS sonuçlarından elde edilen sıkışma ve çekme yönleri



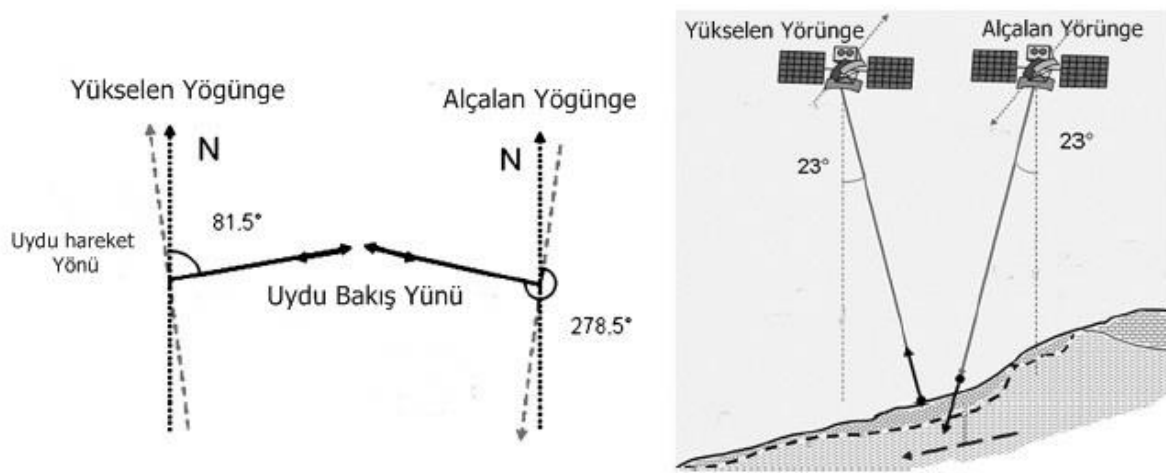
ACIKLAMALAR



Şekil 3.38. Güncel GNSS sonuçlarından elde edilen sıkışma ve çekme yönleri ve bölge içerisinde bulunan faylar için yapılan fay kinematik analizi

4. PSInSAR ÇALIŞMALARI

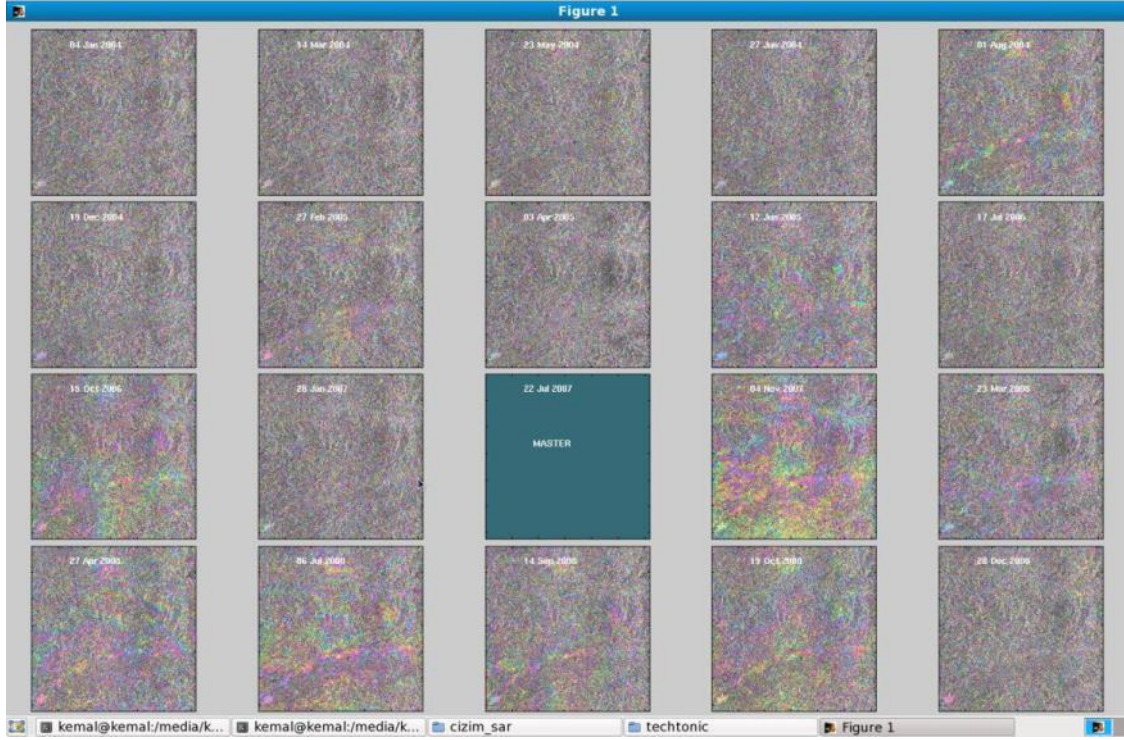
Bu proje kapsamında Koyulhisar Heyelan Sahasındaki kayma miktarlarının SAR görüntüleri değerlendirilerek belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak bölgeye ait güncel ve arşiv SAR görüntülerinin temin edilmesi gerekmektedir. Bölgeye ait 2001-2010 yılları arasındaki arşiv görüntüleri ENVISAT ASAR görüntülerinden temin edilirken, 2011 yılından itibaren bu görüntüler Terrasar-X uydularından temin edilebilmektedir. Bahsi geçen bu görüntüleri temin edebilmek için sırası ile Avrupa Uzay Ajansı ve Alman Uzay Ajansı'na proje önerilerinde bulunulmuş ve görüntüler temin edilmiştir.



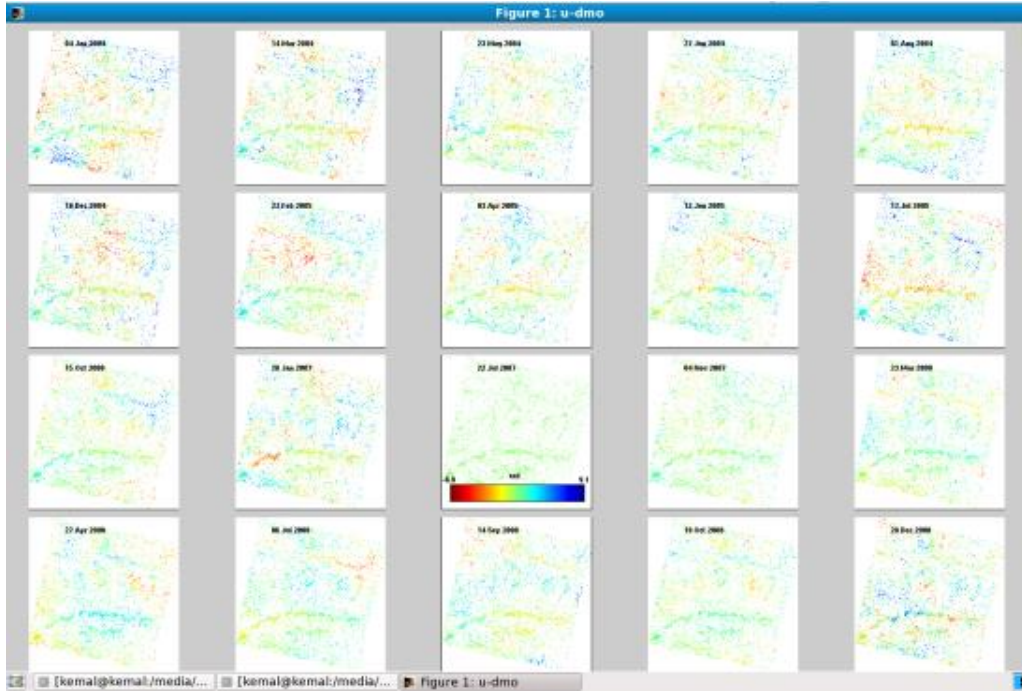
Şekil 4.1. PS-InSAR ölçme prensibi

Şekil 4.1' de PSInSAR ölçü prensibi gösterilmektedir. Görüntülerin değerlendirilmesi aşamasında ilk olarak ham veri olarak temin edilen SAR görüntüleri ROI_PAC yazılımı kullanılarak SLC görüntü formatına dönüştürülmüştür. İnterferogramların elde edilmesi için ise Delft duyarlı yörünge bilgileri ve Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software (DORIS) yazılımı kullanılmıştır. Son olarak ise PS noktalarına ait hız değerlerini elde etmek için Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) yazılımı kullanılmıştır.

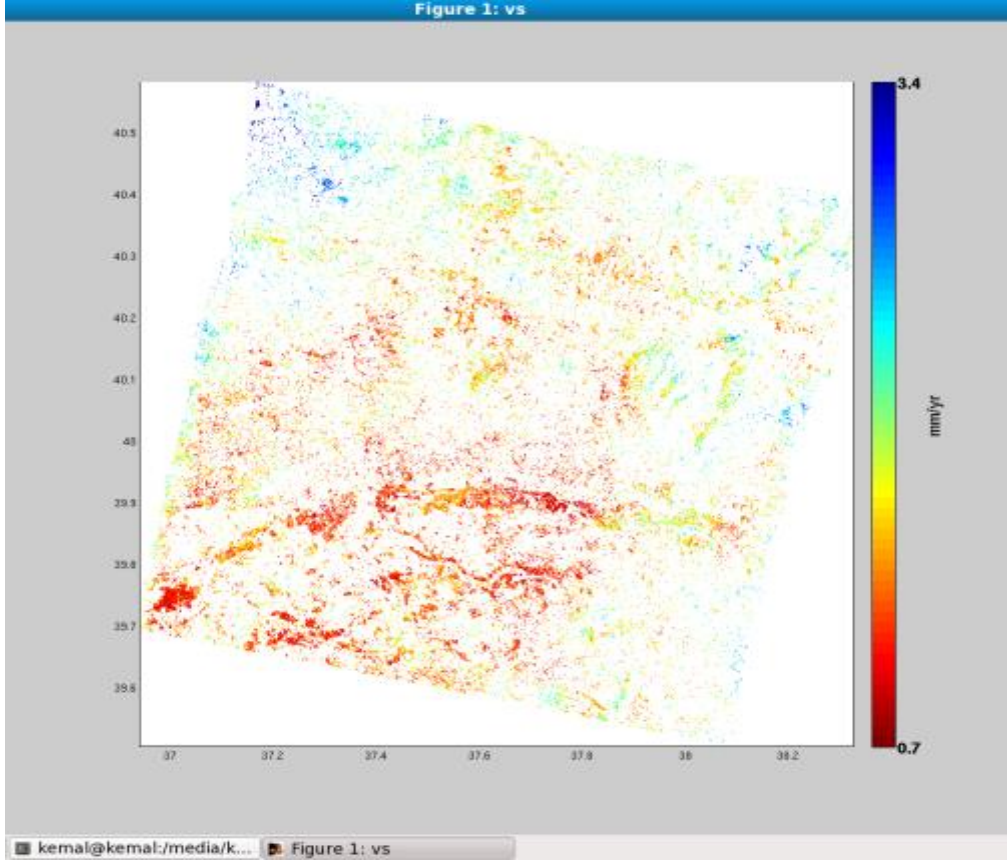
Değerlendirme aşamalarının görselleştirilmesi amacı ile sırası ile Şekil 4.2, 4.3, 4.4 verilmiştir. Şekil 4.2' de 2004-2009 yılları arasında 78 iz numaralı tüm çerçeve SAR görüntüsünden elde edilen interferogramlar bulunmaktadır. Interferogramlar elde edilirken master görüntü olarak 22 Temmuz 2007'ye ait görüntü seçilmiş ve bütün ölçüler bu master görüntü ile karşılaştırılarak interferogramlar elde edilmiştir. Şekil 4.3' de ise değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktalarına ait genel görüntü verilmektedir. Şekil 4.4'da ise değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktalarına ait hız bilgileri verilmektedir.



Şekil 4.2. DORIS programı kullanılarak elde edilen interferogramlar.



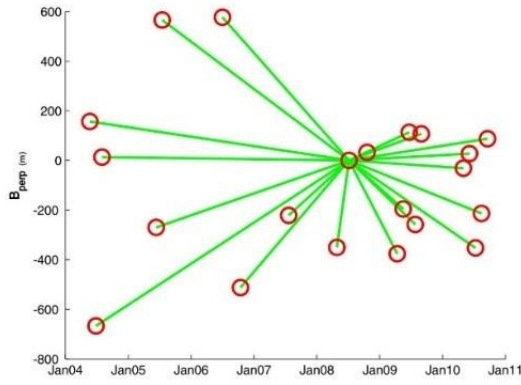
Şekil 4.3 STAMPS programı ile değerlendirme sonucunda hatalardan (yörünge hatası, atmosfer hatası) arındırılmış PS noktalarına ait genel görüntü (radyan birimli)



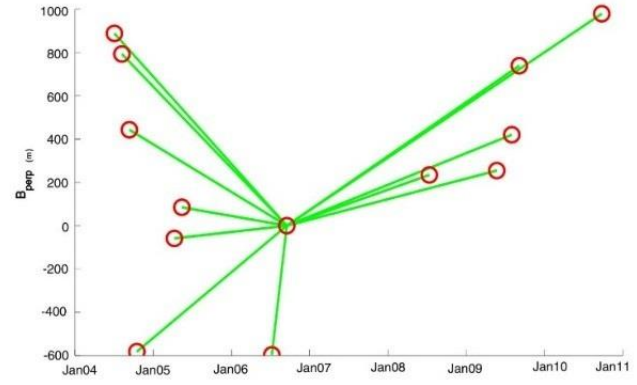
Şekil 4.4. STAMPS programı ile değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktalarına ait hız bilgileri(mm/yıl).

4.1. ENVISAT Görüntülerinin Temini ve Değerlendirilmesi

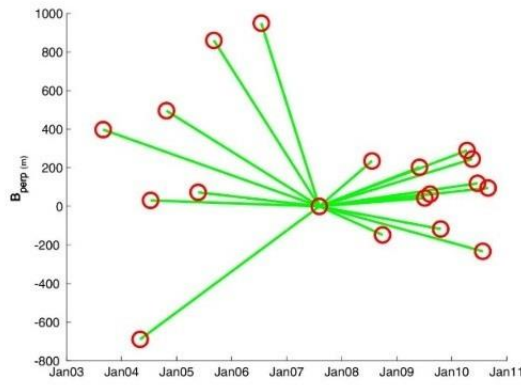
ENVISAT arşiv görüntülerin ücretsiz temini için Avrupa Uzay Ajansı olan ESA' ya "Monitoring of Koyulhisar Landslides using PSInSAR method" isimli ve TR10956 kodlu proje başvurusunda bulunulmuştur. Proje kabul edilmiş ve böylelikle ENVISAT arşiv görüntülerinin ücretsiz temini gerçekleştirilmiştir. Arşiv verileri tarandığın da bölgeye ait iki alçalan iki adet de yükselen uydu ait görüntü olduğu tespit edilmiştir. Bu uydulara ait görüntü iz numaraları 78, 307 alçalan uydular ve 443 ve 171 yükselen uydulardır. Daha sonra bu uydulara ait Şekil 4.5' de gösterilen tarihlerdeki veriler değerlendirilmiştir.



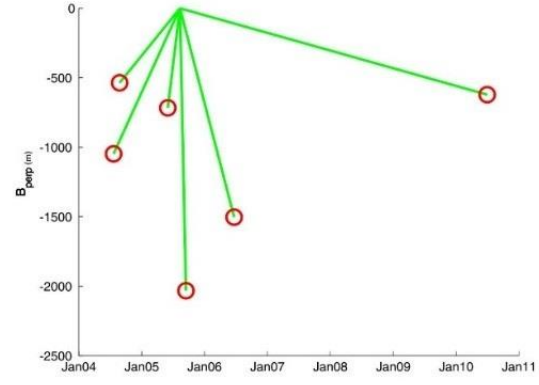
ENVISAT-ASAR 78 Çerçeve



ENVISAT-ASAR 171 Çerçeve



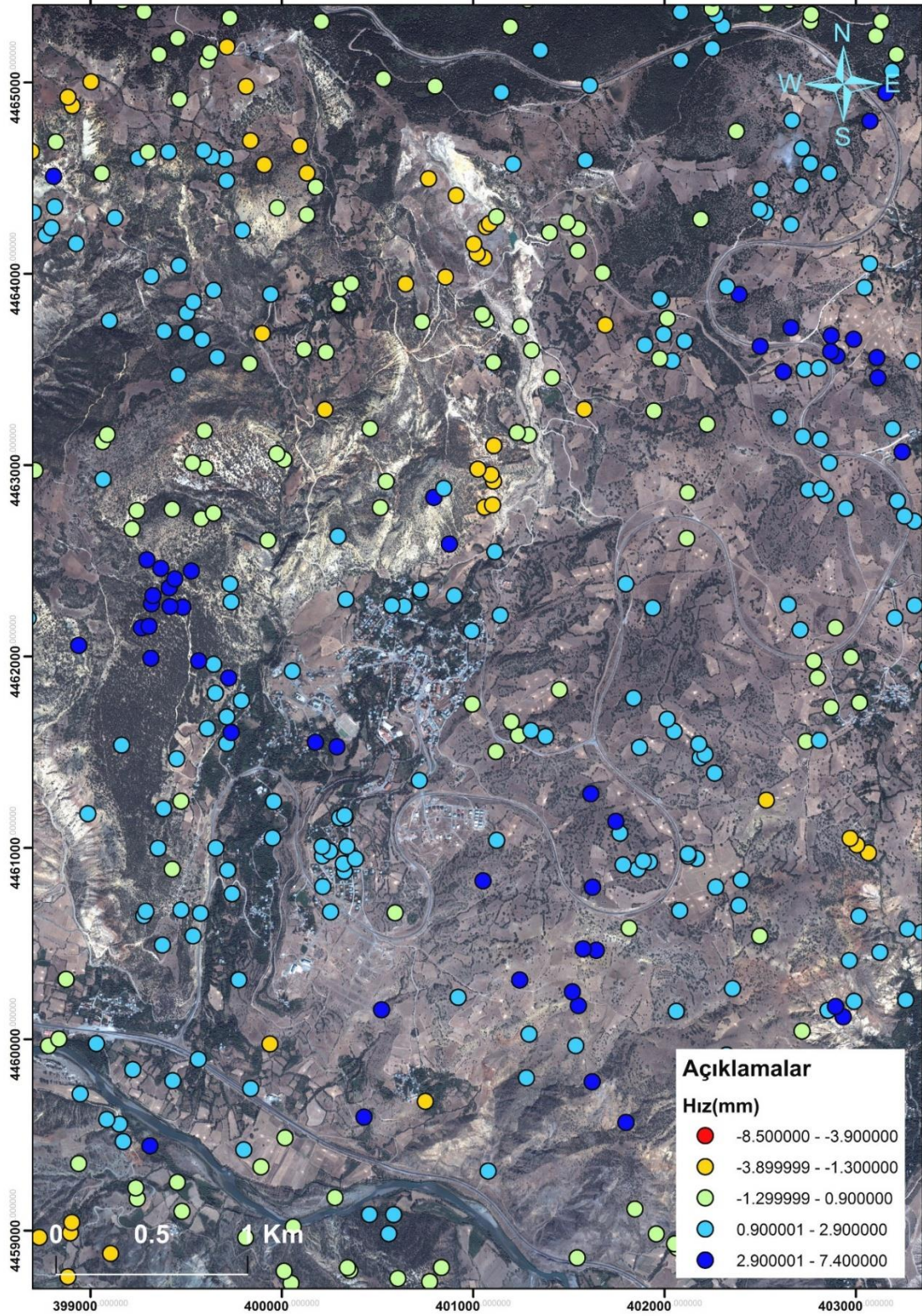
ENVISAT-ASAR 307 Çerçeve



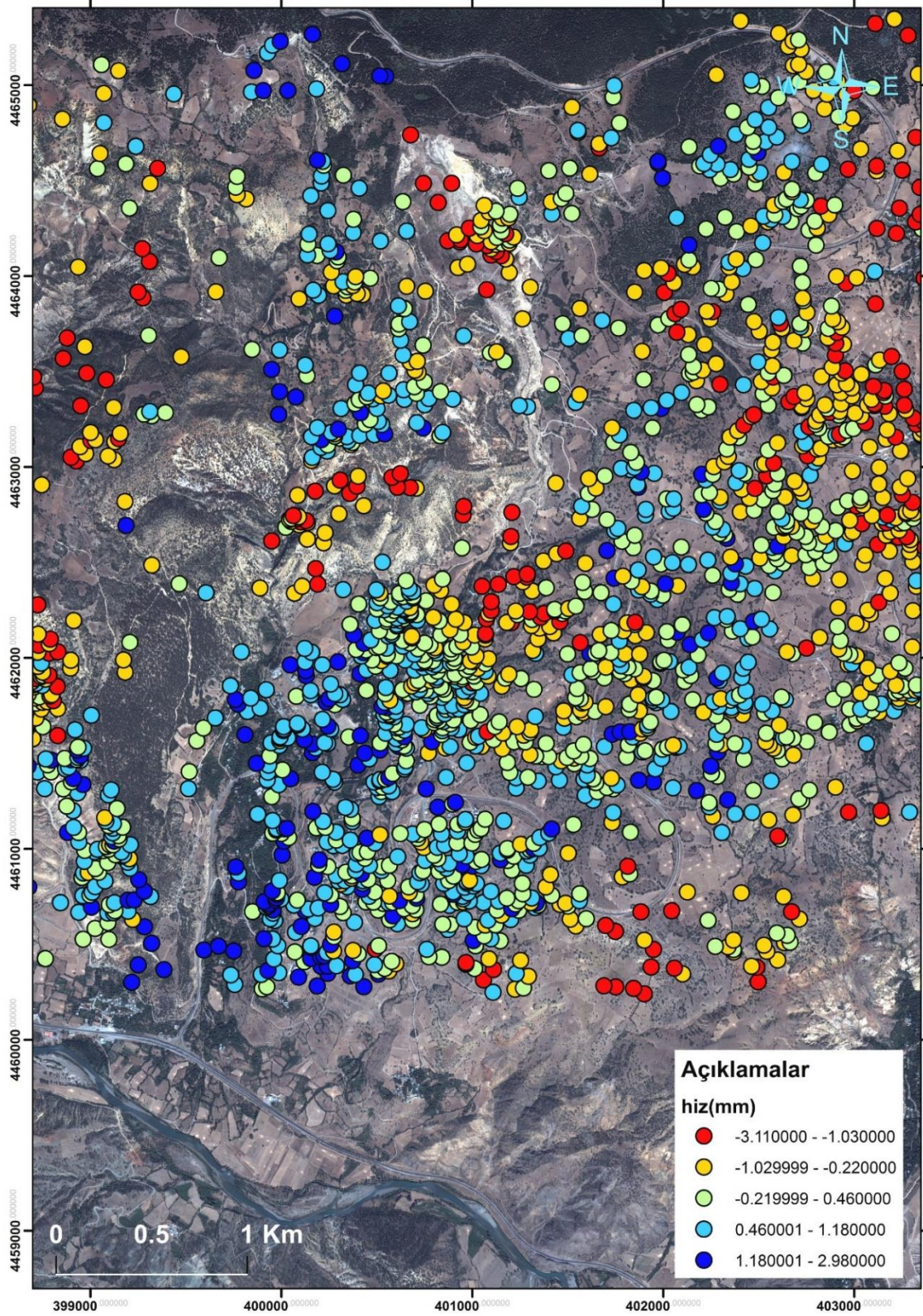
ENVISAT-ASAR 443 Çerçeve

Şekil 4.5. StaMPS yazılımı kullanılarak değerlendirilen ENVISAT ASAR görüntüleri ve seçilen master görüntüden tarih ve baz mesafesi farkları.

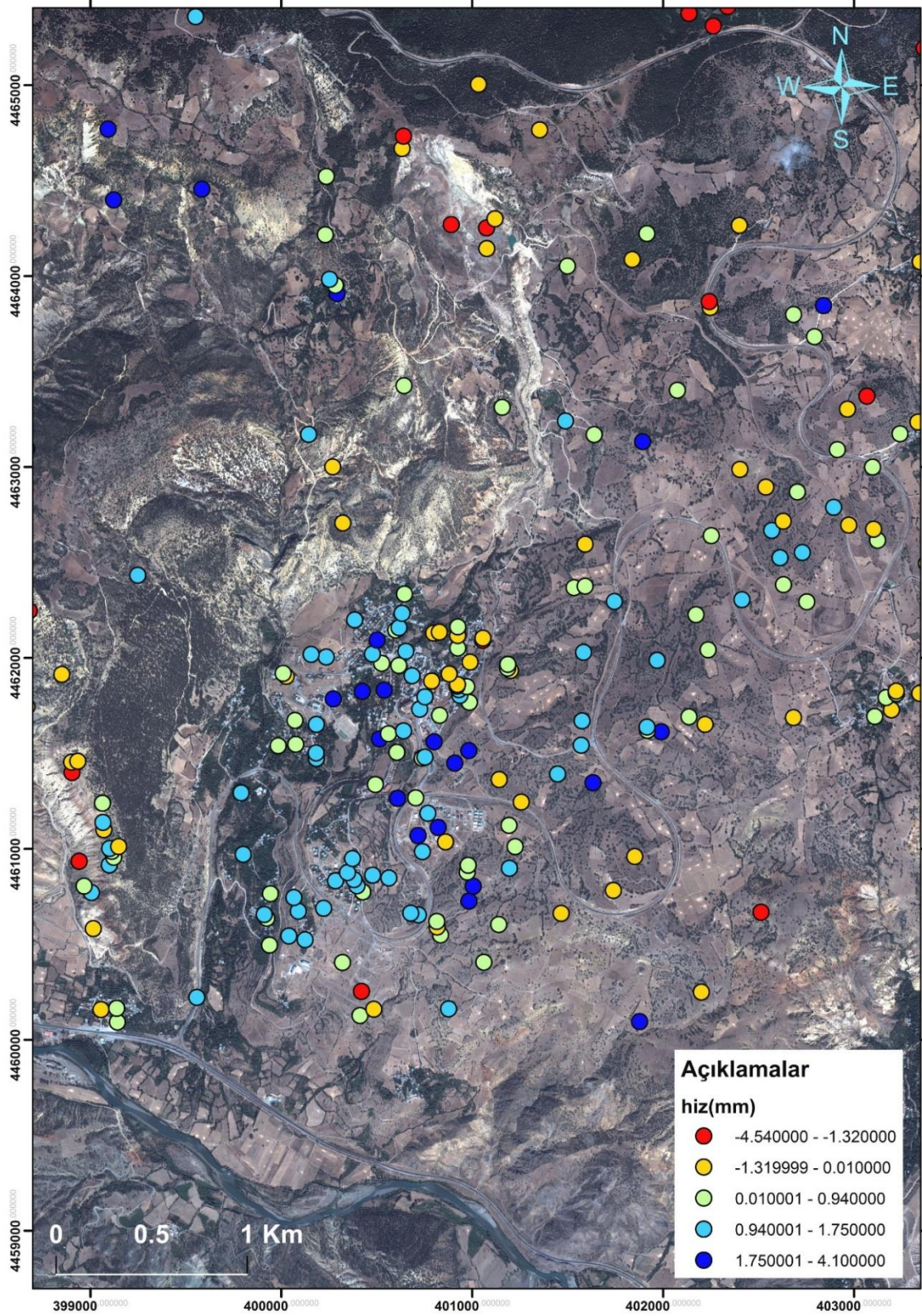
Sırası ile 78, 307, 443 ve 171 iz numaralı uydular için STAMPS programı kullanılarak değerlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme işleminde Koyulhisar bölgesine ait alan tüm çerçeveden heyelan sahasını da içinde barındıran bir bölge kesilerek bu bölgeye ilişkin değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9' da değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri uydu görüntüsü üzerine çakıştırılmış hali görülmektedir.



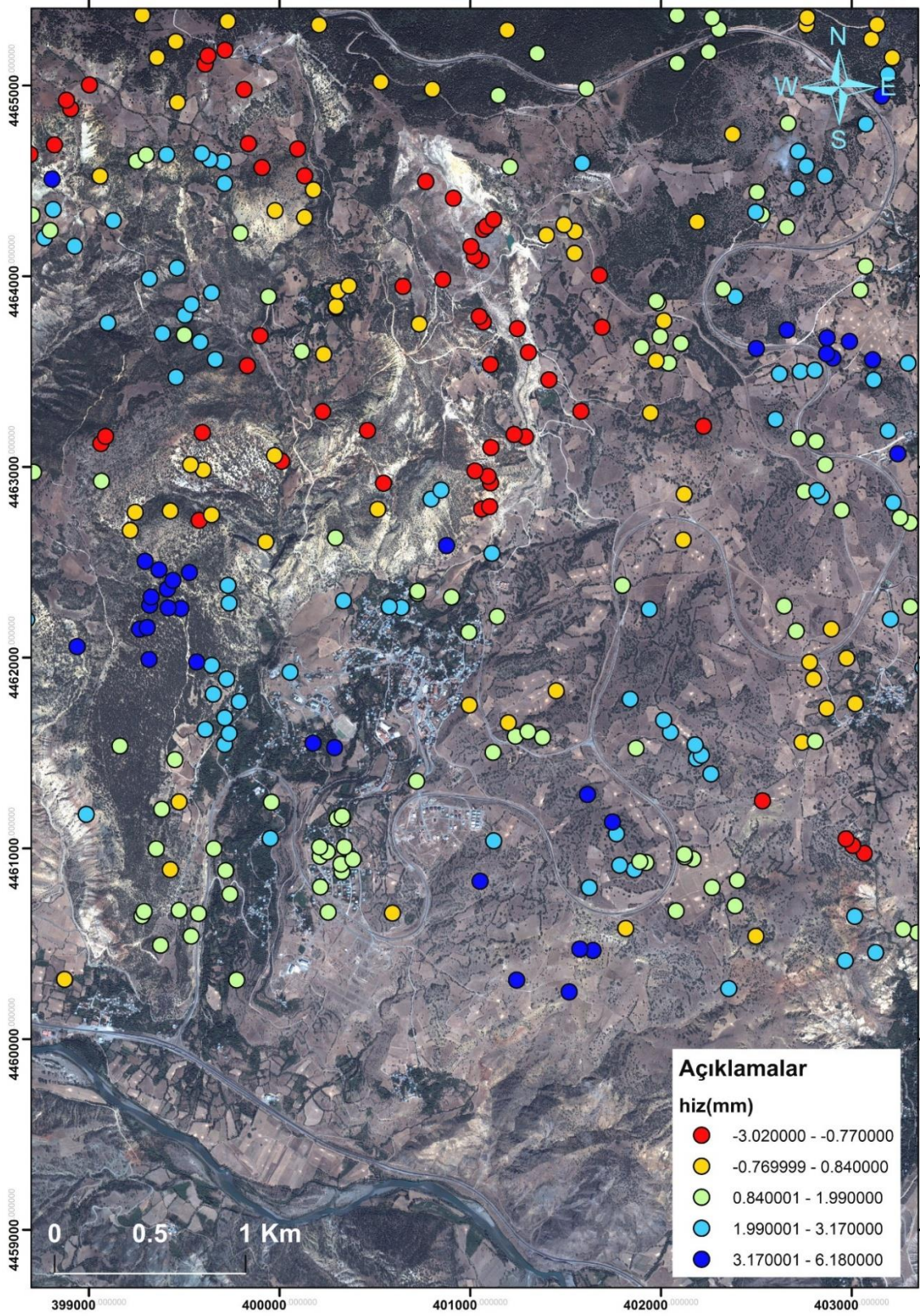
Şekil 4.6. ENVISAT-ASAR 78 iz numaralı alçalan uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.



Şekil 4.7. ENVISAT-ASAR 307 iz numaralı alçalan uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.



Şekil 4.8. ENVISAT-ASAR 171 iz numaralı yükselen uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.



Şekil 4.9. ENVISAT-ASAR 443 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.

Şekil 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9 incelendiğinde genel olarak Heyelan sahasının kuzeyinde bir çökme hareketi varken heyelan sahasının ortalarında bu hareket sönümlenerek yerini yükselme hareketine bıraktığı gözlemlenmektedir.

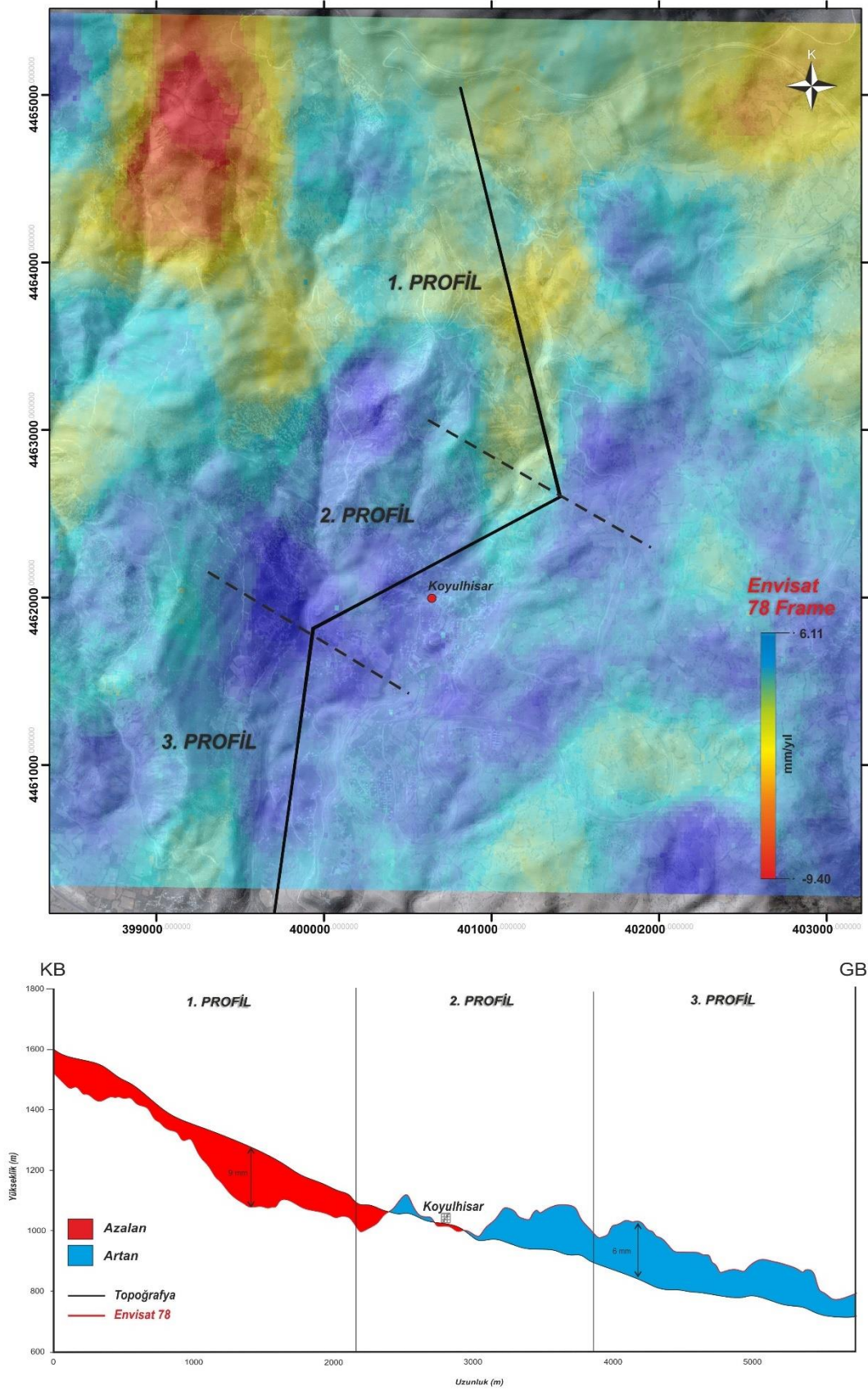
Bu hareketin heyelan sahası boyunca daha iyi görebilmek amacı ile Heyelan sahasındaki PS noktaları kullanılarak her bir uydu görüntüsü için enterpole haritaları oluşturulmuştur. Daha sonra bu haritalar üzerinde bir kesit alanı belirlenmiş bu kesit üzerine düşen değerler yardımı ile heyelan sahasındaki hareket değerlerine ilişkin boy kesitler çizdirilmiştir. Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ve 4.13’ de PS noktalarından enterpole edilmiş değerler ve bu değerlerin heyelan sahası boyunca kuzey güney doğrultusunda dağılımını gösteren boy kesit değerleri sunulmaktadır.

Şekil 4.10’ de 78 iz numaralı alçalan uyduya ait değerler sunulmaktadır. Şekil 4.10 incelendiğinde birinci kesit alanı ve ikinci kesit alanının ilk yarısını içeren Eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme gözlenirken, bu hareket ikinci kesit alanının ortaları olan Saytepe mevkinde sönümlenmekte ve ikinci kesitin ikinci yarısı ve üçüncü kesiti içerisinde bulunduran heyelan sahasının güneyinde yükselme olarak karşımıza çıkmaktadır. Özetle heyelan sahası çökme ve yükselme alanları olarak ikiye ayrılmakta kuzey kesimde çökme gözlenirken güney kesimde yükselme hareketi gözlenmektedir.

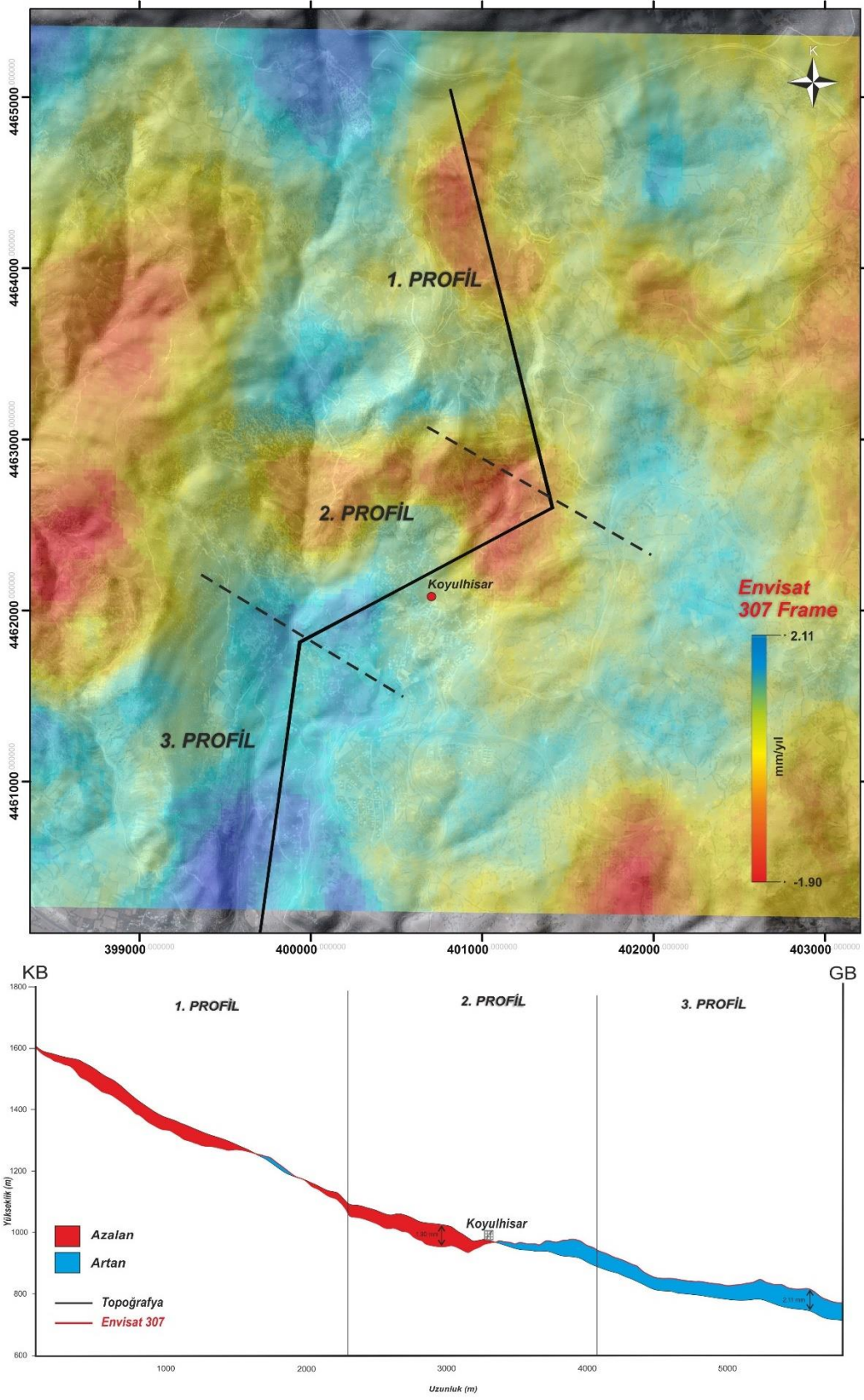
Şekil 4.11’ de 307 iz numaralı alçalan uyduya ait değerler sunulmaktadır. Şekil 4.11 incelendiğinde 78 iz numaralı alçalan uyduya ait değerler ile uyumlu olduğu ve eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme gözlenirken bu hareket Saytepe mevkinde sönümlenmekte ve heyelan sahasının güneyinde yükselme olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 4.12’ de 171 iz numaralı alçalan uyduya ait değerler sunulmaktadır. Şekil 4.12 incelendiğinde diğer uydu sonuçlarının aksine Saytepenin kuzeyi yani I. Kesitin sonu ile II. Kesitin başı arasında bir yükselme gözlenmektedir. Şekil 4.12’ de de açıkça görüleceği üzere bu bölgede enterpolasyon yapabilecek yeteri sayıda PS noktası bulunmamaktadır bu bölgeye ait enterpolasyon bilgileri bölgeye daha uzak noktalardan üretilmiştir buda sonuçlarda hataya neden olmuştur. Aslında 171 iz numaralı uydu için bu bölgede bir sonuç üretmek doğru olmamakla birlikte tüm alan enterpole edilirken bu bölgede enterpole edilmiştir. Özetle bu bölgedeki değerlerin diğer üç uydu sonuçlarından farklı çıkmasının ana sebebi 171 iz numaralı uydu için bu bölgede yeterli PS noktasının bulunmamasıdır. Bu bölge dışında 171 iz numaralı uydu 78 ve 307 iz numaralı uydularla uyumlu sonuçlar üretmiştir. Yani heyelan sahası kuzeyinde çökme gözlenirken güneyinde yükselme gözlenmektedir.

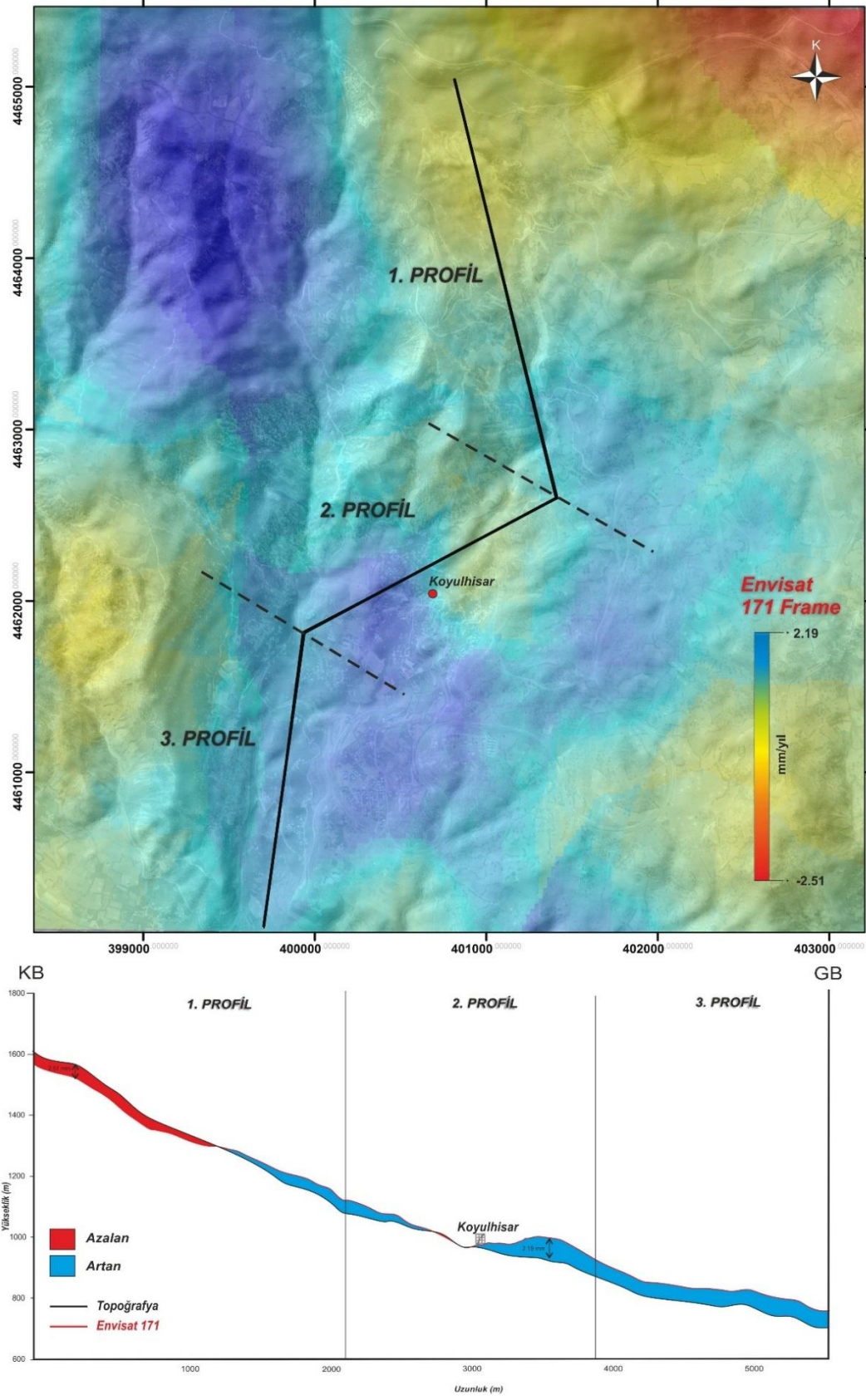
Şekil 4.13’ de 443 iz numaralı yükselen uyduya ait değerler sunulmaktadır. Şekil 4.13 incelendiğinde 78 iz numaralı alçalan uyduya ait değerler ile oldukça yüksek korelasyonlu sonuçlar elde edildiği gözlenmektedir özetle eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme gözlenirken bu hareket Saytepe mevkinde sönümlenmekte ve heyelan sahasının güneyinde yükselme olarak karşımıza çıkmaktadır.



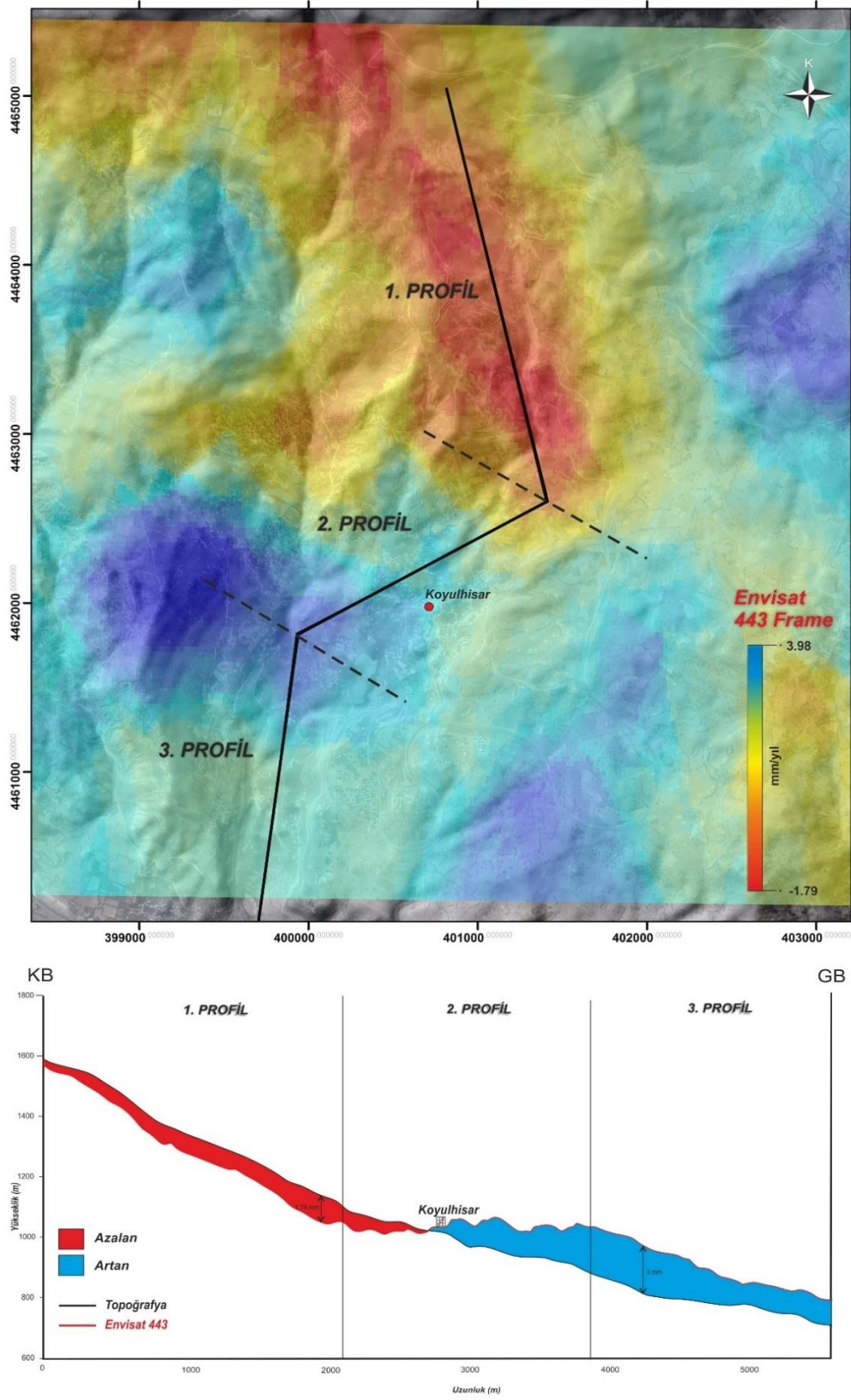
Şekil 4.10. ENVISAT-ASAR 78 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.



Şekil 4.11. ENVISAT-ASAR 307 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.



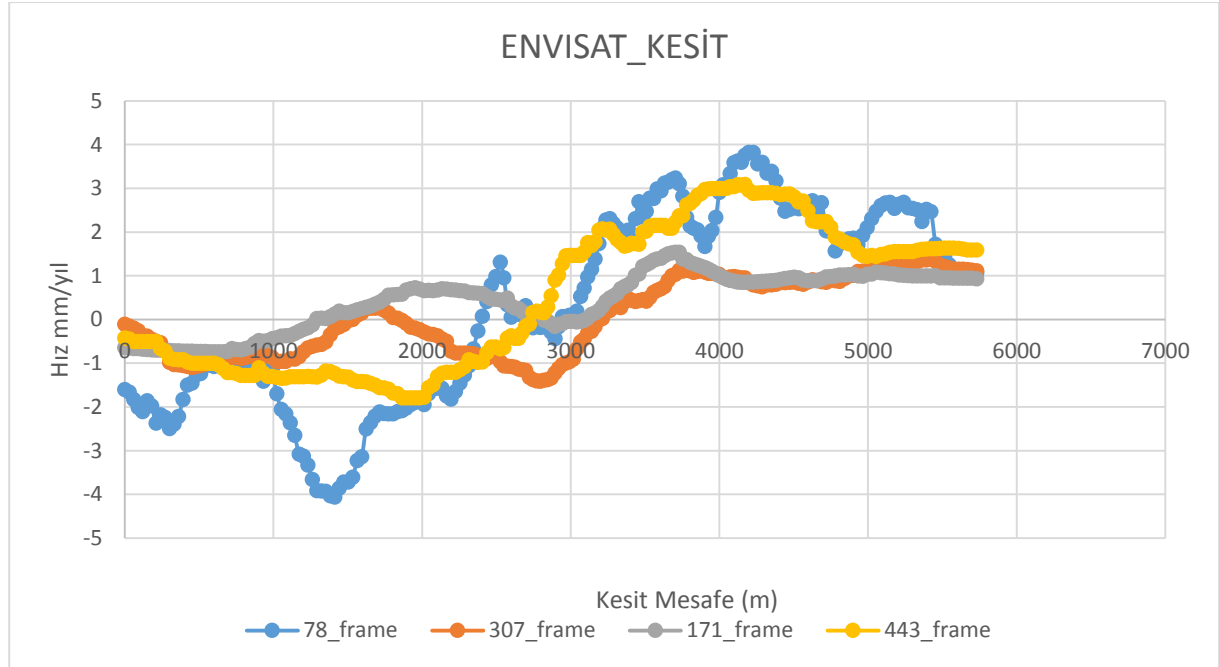
Şekil 4.12. ENVISAT-ASAR 171 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.



Şekil 4.13. ENVISAT-ASAR 443 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.

Tablo 4.1. ENVISAT ASAR uydu verilerinden kesit boyunca elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değerleri

Korelasyon Değeri				
Uydu No	78	307	171	443
78	-----	0.69	0.71	0.92
307	0.69	-----	0.80	0.73
171	0.71	0.80	-----	0.67
443	0.92	0.73	0.67	-----



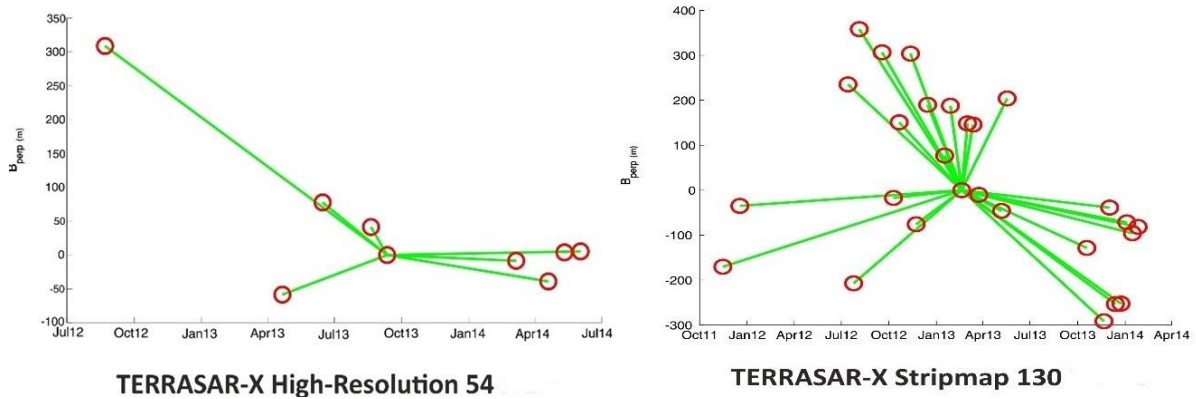
Şekil 4.14. ENVISAT ASAR görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi

Tablo 4.1’ de seçilen kesit boyunca bütün görüntülerden elde edilen yıllık hız değerlerinin birbirleri ile korelasyon değerleri sunulmaktadır. Tablo 4.1 incelendiğinde %67 ile %92 arasında değişen yüksek korelasyon değerleri görülmektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere tüm görüntüler birbirleri ile yüksek korelasyondur. Şekil 4.14’ de ise bütün ENVISAT

görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi sunulmaktadır. Özellikle kesitin 3000. metresi ve civarında çökme hareketi yerini yükselme hareketine bırakmaktadır. Kesit üzerinde 3000 m Saytepe mevkiini işaret etmektedir. Bütün görüntülerden elde edilen hareketlerin eğilimi aynı yönde olup Heyelanın taç bölgesinden Saytepe mevkiine kadar çökme daha sonra ise yükselme olarak kendisini göstermektedir.

4.2. TerraSAR-X Görüntülerinin Temini ve Değerlendirilmesi

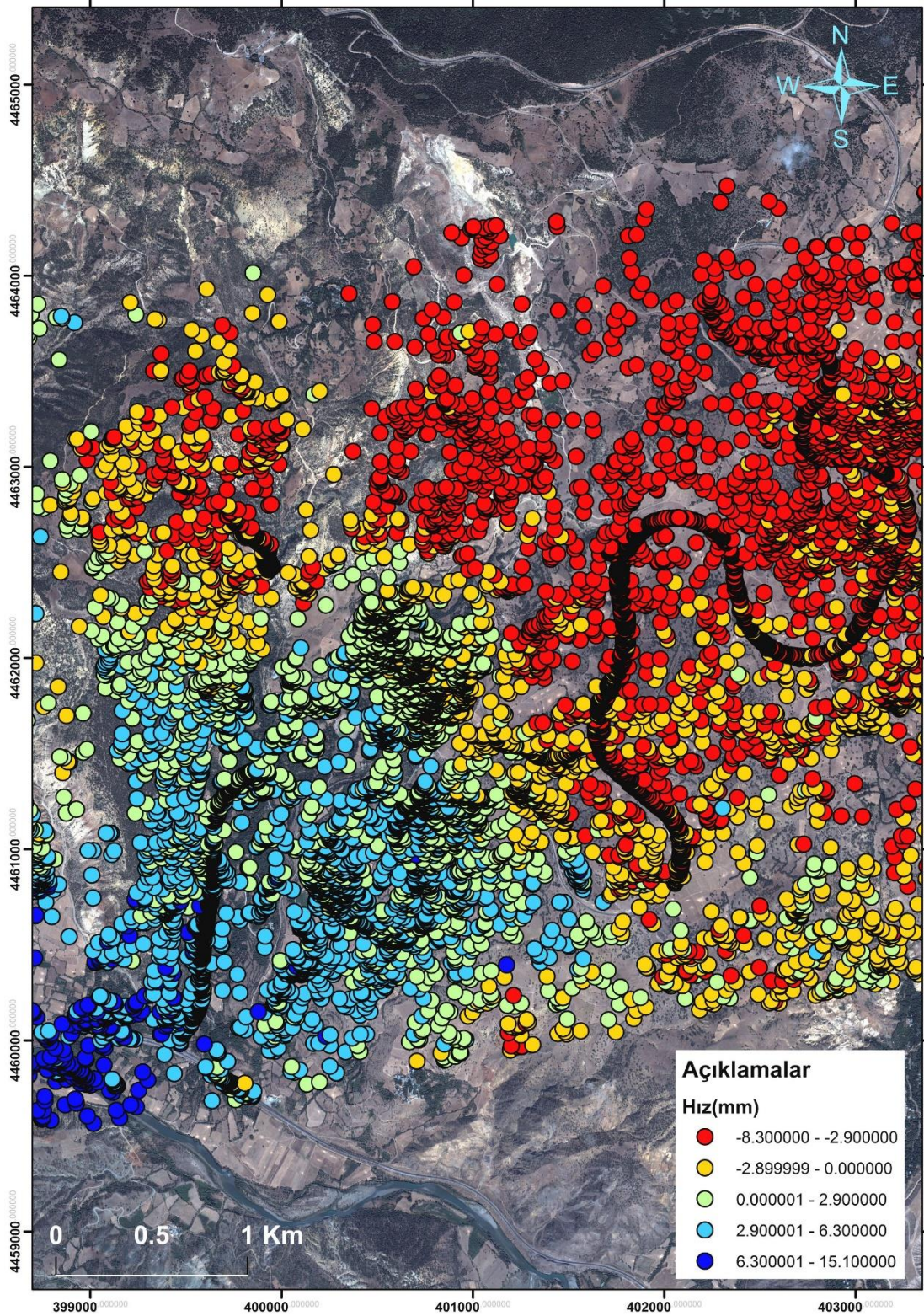
Güncel uzay radar görüntülerinin temini için Alman Uzay Ajansı tarafından temin edilen yüksek çözünürlüklü TerraSAR-X görüntüleri tercih edilmiştir. Görüntülerin temini için Alman Uzay Ajansı olan DLR' ye "Monitoring of Landslides on east part of North Antolia Fault Zone(Kelkit Valley) using PSInSAR method with TerraSAR-X data" isimli ve GEO1232 kodlu proje başvurusunda bulunulmuştur. Proje kabul edilmiş ve böylelikle TerraSAR-X güncel görüntülerinin temini gerçekleştirilmiştir. Bölgeye ait görüntüler farklı çözünürlükteki iki adet alçalan uydudan temin edilmiştir. Bunlar high resolution 54 iz numaralı ve stripmap 130 iz numaralı görüntüleridir. Daha sonra bu uydulara ait Şekil 4.15' de gösterilen tarihlerdeki veriler değerlendirilmiştir.



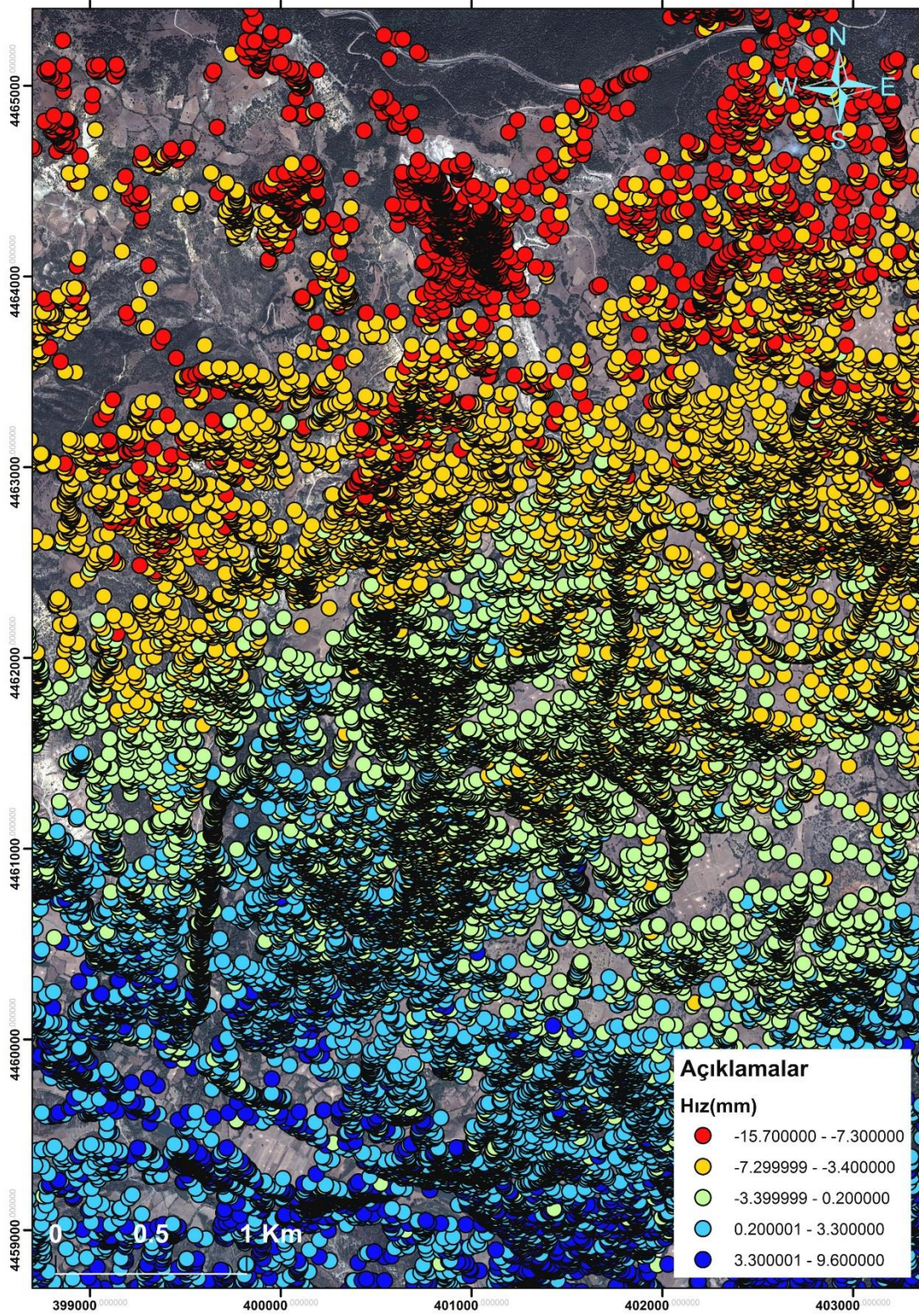
Şekil 4.15. StaMPS yazılımı kullanılarak değerlendirilen TerraSAR görüntüleri ve seçilen master görüntüden tarih ve baz mesafesi farkları.

Sırası ile 54 ve 130 iz numaralı uydular için STAMPS programı kullanılarak değerlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme işleminde Koyulhisar bölgesine ait alan tüm çerçeveden heyelan sahasını da içinde barındıran bir bölge kesilerek bu bölgeye ilişkin değerlendirme gerçekleştirilmiştir. High resolution 54 iz numaralı uydu görüntüsü ne yazık ki Heyelan sahasının taç kısmını kapsamamaktadır. Bu yüzden high resolution 54 iz numaralı uydudan bu bölgeye ait PS noktaları üretilmemiştir. Şekil 4.16 ve 4.17' de değerlendirme

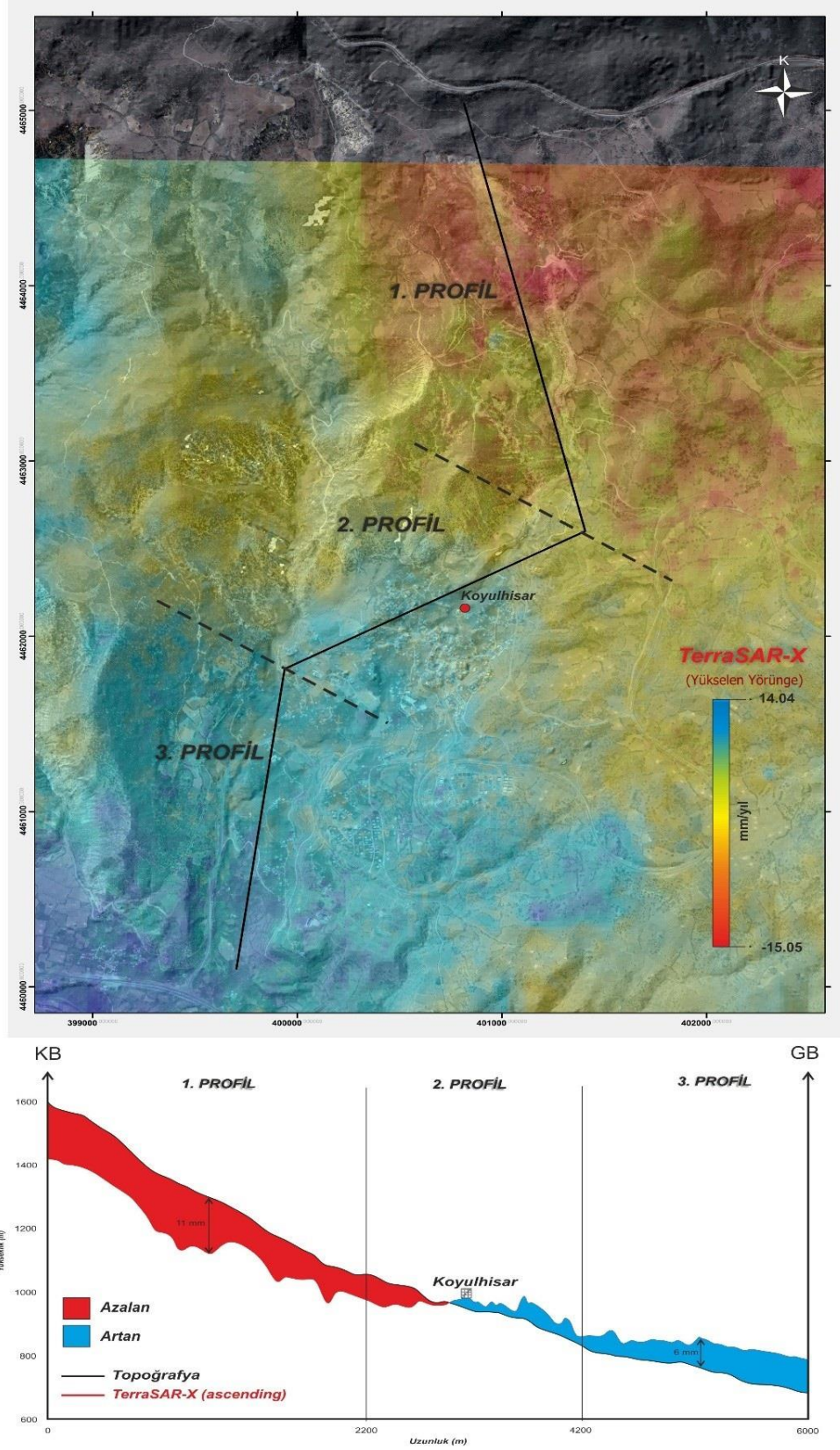
sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri uydu görüntüsü üzerine çakıştırılmış hali görülmektedir. Her iki şekilde de heyelan sahasının kuzeyinde çökme güneyinde ise yükselme gözlenmektedir. Bu sonuçlar genel anlamda ENVISAT sonuçları ile uyuşumdur. Şekil 4.18 ve 4.19' da PS noktalarından enterpole edilmiş değerler ve bu değerlerin heyelan sahası boyunca kuzey güney doğrultusunda dağılımını gösteren boy kesit değerleri sunulmaktadır



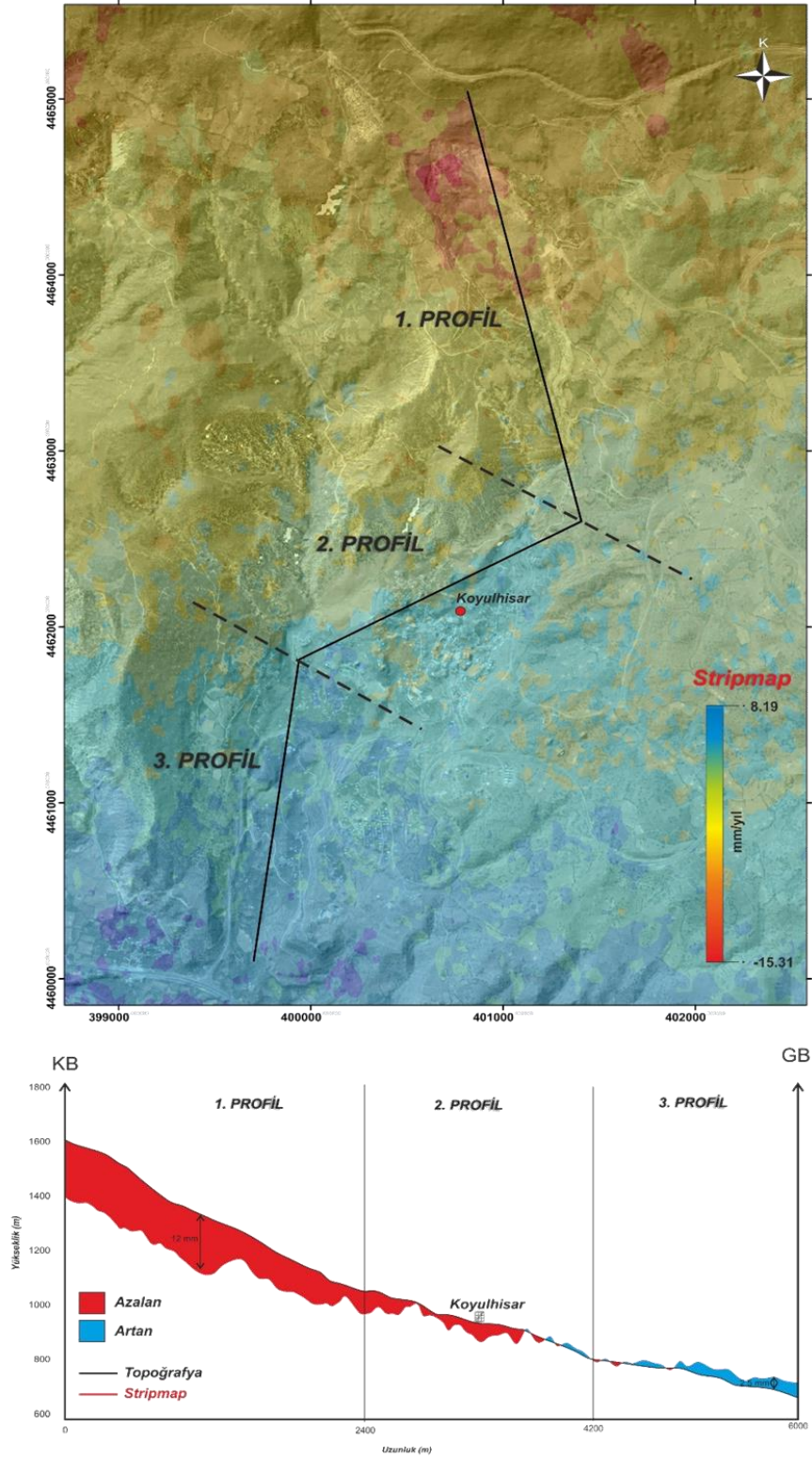
Şekil 4.16. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.



Şekil 4.17. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uyduya ait değerlendirme sonucunda elde edilen PS noktaları ve bu noktalara ait hız değerleri.



Şekil 4.18. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.

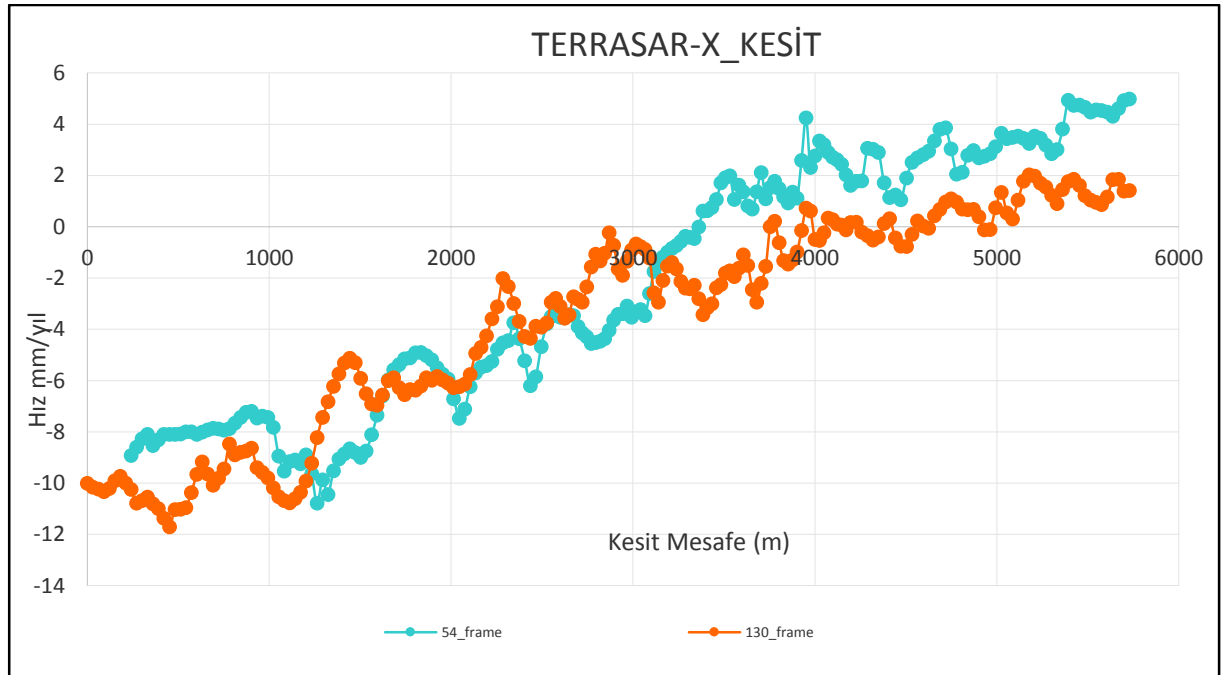


Şekil 4.19. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uyduya ait PS noktalarından elde edilen enterpole hız haritası ve boy kesit.

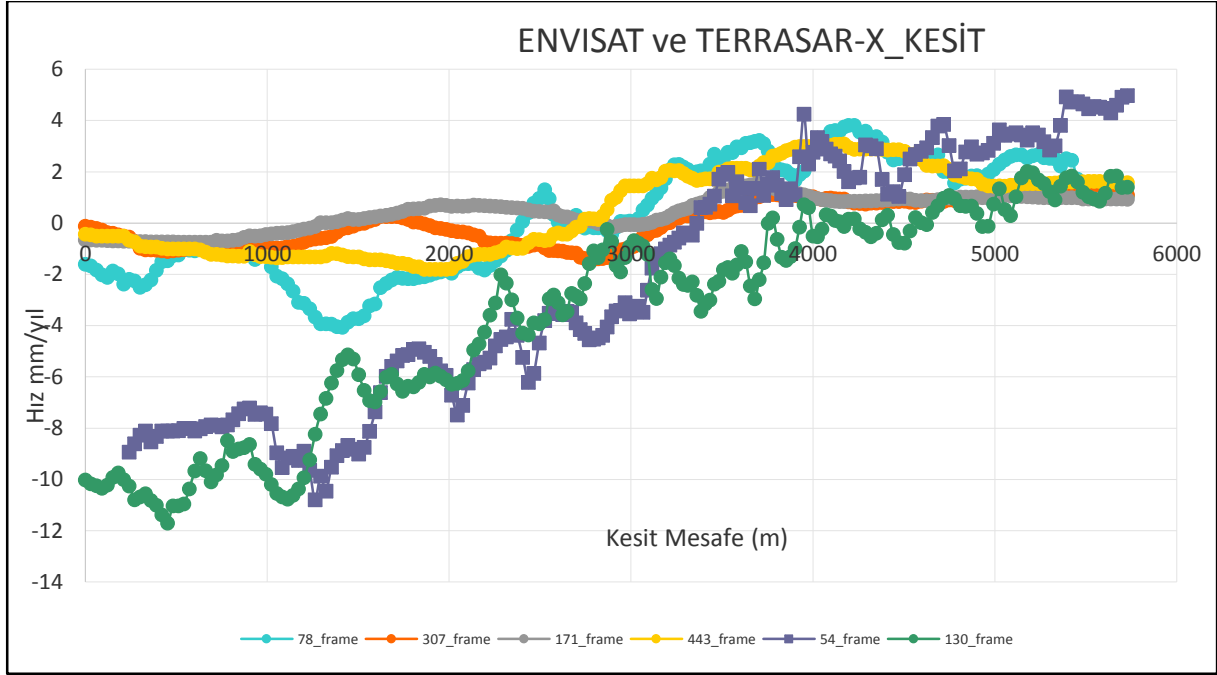
Şekil 4.18 ve 4.19 incelendiğinde ENVISAT sonuçlarına benzer sonuçlar gözlenmektedir. Terrasar-X sonuçlarında da Saytepenin kuzeyinde kalan eski heyelan kütleleri üzerinde çökme alanı gözlenirken, Saytepenin güney yamaçlarında yani şehir merkezinde yükselme gözlenmektedir. Tablo 4.2’ de ENVISAT ve TerraSAR-X sonuçlarının birbirleriyle korelasyon değerleri verilmektedir. Tablo 4.2’ de 130 ve 54 iz numaralı uydulara ait veriler TerraSAR-X sonuçlarını göstermektedir. Stripmap ve High Resolution sonuçları %90 korelasyonlu sonuçlar üretmektedir. ENVISAT sonuçları ile TerraSAR-X sonuçlarının ortalama olarak %80 korelasyonu olduğu Tablo 4.2’ de açıkça gözlenmektedir. Şekil 4.20’ de TerraSAR-X sonuçlarına ait kesit boyunca elde edilen hız değerleri görülmektedir. Şekil 4.21’ de ise ENVISAT arşiv sonuçları ve TerraSAR-X güncel görüntülerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Tablo 4.2. TerraSAR-X ve ENVISAT uydu verilerinden kesit boyunca elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değerleri

Korelasyon Değeri						
Uydu No	78	307	171	443	54	130
78	-----	0.69	0.71	0.92	0.90	0.79
307	0.69	-----	0.80	0.73	0.85	0.69
171	0.71	0.80	-----	0.67	0.82	0.82
443	0.92	0.73	0.67	-----	0.90	0.80
54	0.90	0.85	0.82	0.90	-----	0.90
130	0.79	0.69	0.82	0.80	0.90	-----



Şekil 4.20. TerraSAR-X görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi



Şekil 4.21. ENVISAT ve TerraSAR-X görüntülerinden elde edilen hız değerlerinin kesit boyunca değişimi

Şekil 4.21 detaylı olarak incelendiğinde gerek ENVISAT gerek se TerraSAR-X görüntülerin aynı eğilimi gösterdiği ve Saytepenin kuzey kesimin de çökme varken Saytepenin güneyinde bu yükselme olarak gözlenmektedir. Şekil 4.21’ de açıkça görüldüğü üzere özellikle Saytepenin Kuzeyindeki çökme hareketi 2012 yılından sonra elde edilen sonuçlarda artışı gözlenmektedir. Bu da heyelan sahasındaki çökme hareketinin son iki yılda daha hızlı geliştiğini ve riskin giderek arttığını bizlere göstermektedir.

PS sonuçlarında hız değerlerin küçük olmasında ki ana sebep PSInSAR değerlendirilmesinde değerlendirmenin bölgeye bağlı olarak yapılmasıdır. Yani sonuçlar bağıl olarak üretilmektedir. Bölgenin tamamındaki ortalama bir hareket belirlenmekte ve bu değer referans değer olarak seçilmektedir. Daha sonra PS noktalarına ait hareket miktarları bu referans değerden farkı alınarak yıllık hız değerleri kestirilmektedir. Heyelan sahası değerlendirilirken küçük alanlarda çalışılmakta ve bu alanın tamamında hareket gözlenmektedir. Yıllık hız değerleri bu ortalama hareketten farkı bize vermektedir. Özetle PSInSAR yöntemi ile heyelan belirleme çalışmalarında hareketin büyüklüğünden ziyade eğilimi ve yönü bize daha fazla ve doğru bilgi üretmektedir.

SAR değerlendirmeleri sonuncunda genel anlamıyla heyelan mekanizması hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 4.21’ de de görüldüğü üzere Eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme

hareketi varken bu hareket Saytepe sayesinde topuklamakta ve bu çökme hareketinin basıncı sonucunda ise Şehir merkezinde bir yükselme oluşmaktadır.

5. PSINSAR SONUÇLARI İLE GNSS SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Proje çalışmaları kapsamında 53 noktada 10 periyot GNSS ölçüsü gerçekleştirmiş ve bu noktalara ait yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu hız değerleri yardımı ile Bölüm 3’ de ayrıntılı olarak açıklandığı şekliyle Heyelan sahasına ilişkin kayma yüzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunu yanı sıra bölgeye ait arşiv ve güncel SAR görüntüleri temin edilmiş ve bu görüntüler PSInSAR yöntemine göre değerlendirilerek heyelan sahasındaki PS noktalarına ilişkin yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Bölüm 4’ de bu çalışmalar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu bölümde Bölüm 3 ve Bölüm 4’ den elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Heyelanların bu iki yöntemle izlenebilirliği irdelenmiştir.

Bölüm 5 iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki ENVISAT arşiv görüntülerinden elde edilen sonuçlar daha önce elde bölgede gerçekleştirilmiş GNSS çalışma sonuçlarının karşılaştırılmasını içermektedir. İkinci kısım ise güncel TerraSAR-X sonuçları ile proje kapsamında gerçekleştirilen GNSS çalışması sonuçlarının karşılaştırılmasıdır.

5.1 ENVISAT Arşiv Görüntü Sonuçları ile Aynı Tarihlerle Gerçekleştirilmiş GNSS Çalışması Sonuçlarının Karşılaştırılması

Koyulhisar Heyelan sahasında Hastaoğlu ve Sanli 2011’de yaptıkları çalışmada 2007-2008 yılları arasında 10 adet GNSS noktasında 6 periyot GNSS gözlemi gerçekleştirmiş ve bu noktalar için üç boyutlu yıllık hız değerlerini elde etmiştir. Bu çalışmada da aynı bölgeye ait yine 2006-2008 yılları arası 10 adet ENVISAT 78 iz numaralı uyduya ait uydu görüntüsü Permanent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR) tekniği kullanılarak değerlendirilmiş ve heyelan sahasına ait PS noktalarında line of sight (LOS) yönünde yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Daha sonra PSInSAR sonuçlarından elde edilen hız değerleri ile Hastaoğlu ve Sanli 2013’deki GNSS hız değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki ilişki incelenmiştir. Görüntü sayısının 10 ile sınırlı olmasında ki ana sebep GNSS gözlemlerinin gerçekleştirildiği 2007-2208 yılları arasında çalışma bölgesine ait ESA arşivinde sadece 78 iz numaralı uyduya ait 10 adet görüntünün bulunmasıdır. ESA arşivinde diğer uydular için en fazla 5 adet görüntü mevcut bulunmaktadır. Bu yüzden değerlendirme işlemlerinde 78 iz numaralı uydu görüntüleri kullanılmıştır.

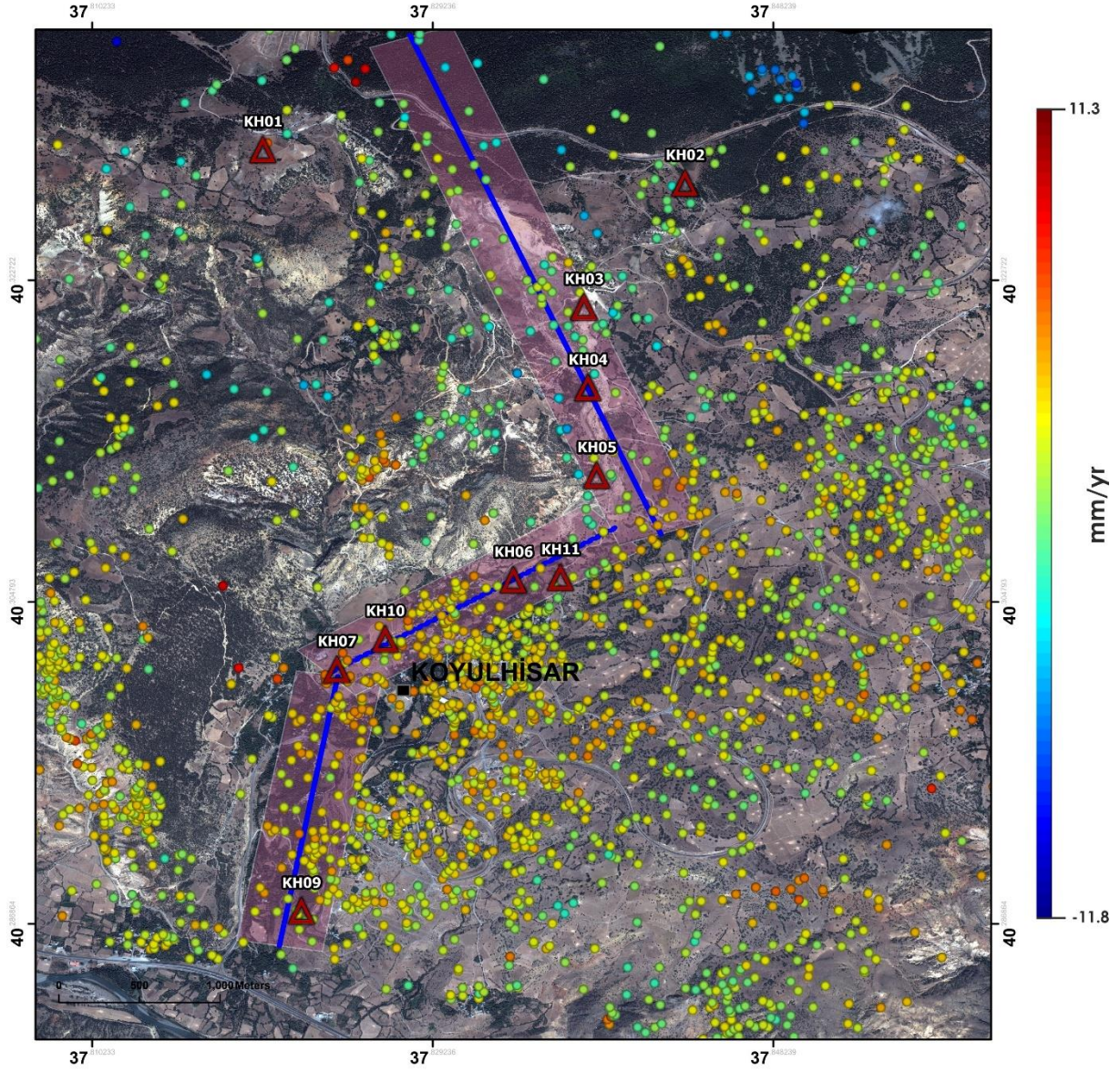
GNSS ve PSInSAR sonuçlarından heyelan sahasına ilişkin iki ayrı hareket modeli fit edilmiştir. Heyelan sahasına ilişkin bu hareket modellerinden kestirilen hız değerleri karşılaştırılmış ve her iki model arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Sonuç olarak Şehir merkezindeki bir GNSS noktası haricindeki 9 adet GNSS noktası ve PSInSAR noktalarından kestirilen modeller arasında $r=0.84$ gibi yüksek bir korelasyon belirlenmiştir.

Bölgede daha önce Hastaoglu 2013 tarafından GNSS çalışması gerçekleştirilmiş olup bu çalışma sonucunda bölgede bulunan 10 adet GNSS noktasına ait üç boyutlu yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 5.1’ de verilmektedir. GNSS hızlarını belirlemek için 3 gün tekrarlı 6 periyot GNSS gözlemi gerçekleştirilmiş ve verileri Bernese yazılımı kullanarak değerlendirmiştir. Şekil 5.1’de GNSS noktalarının konumları gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Hastaoglu 2013 tarafından belirlenen GNSS noktalarına ait hız değerleri

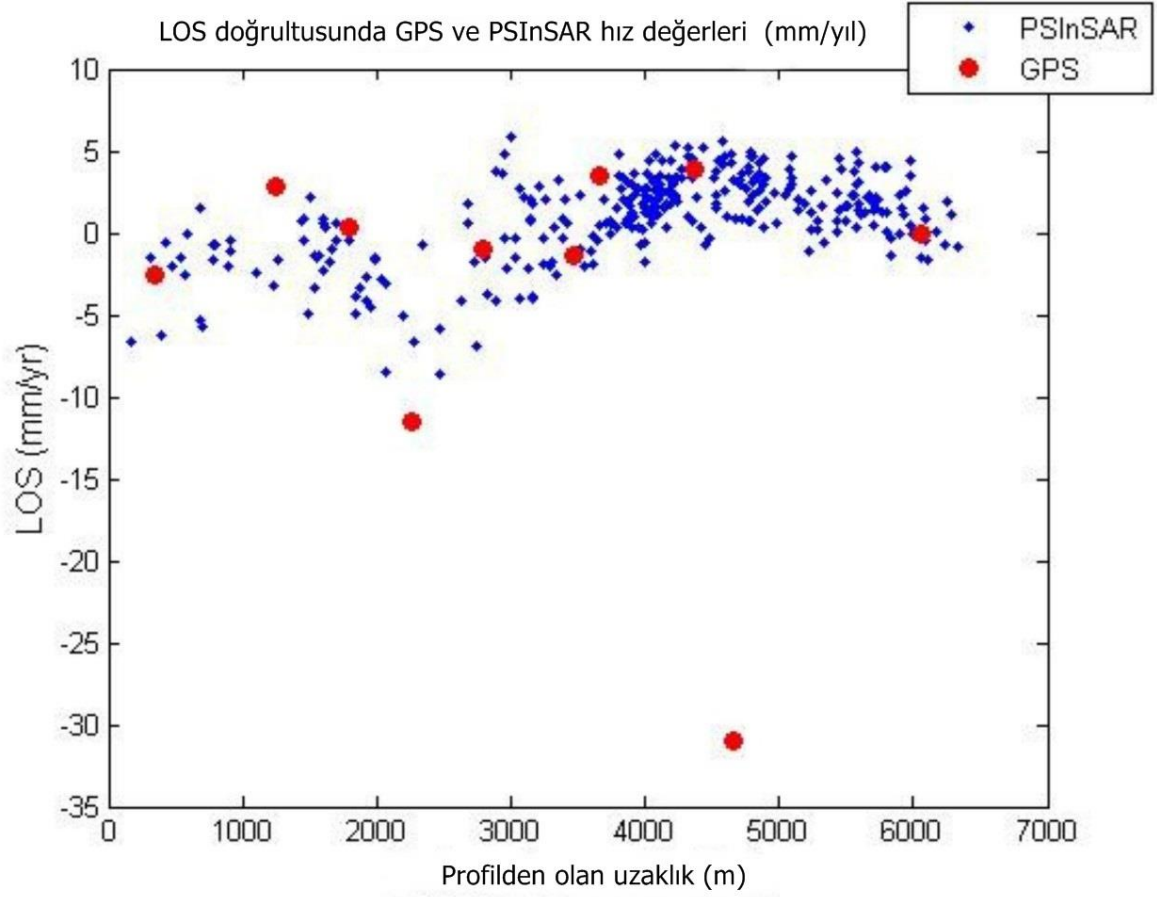
N.No	Hız Değeri			Anlamlılık Seviyesi		
	v_n	v_e	v_{ud}	Tv_n	Tv_e	Tv_{ud}
KH01	2.3	-3.6	-3.4	0.2(-)	0.5(-)	0.3(-)
KH02	9.9	-3.8	-0.7	1.2(-)	0.7(-)	0.1(-)
KH03	11.8	-3.4	-4.2	2.6(√)	0.5(-)	0.9(-)
KH04	-3.1	-1.5	-11.1	0.5(-)	0.3(-)	1.0(-)
KH05	0.4	-14.6	0.0	0.1(-)	2.8(√)	0.1(-)
KH06	-15.7	1.5	10.1	1.9(√)	0.2(-)	1.1(-)
KH07	-64.4	-47.8	-2.5	9.7(√)	5.0(√)	0.2(-)
KH09	-3.5	-14.5	2.9	0.4(-)	1.7(√)	0.3(-)
KH10	3.6	-3.5	3.1	0.5(-)	0.4(-)	0.5(-)
KH11	1.4	-14.9	-0.6	0.4(-)	1.6(-)	0.7(-)

PS değerlendirme sonucunda Şekil 5.1’ de verilen PS noktaları için LOS yönündeki yıllık hız değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde genel olarak Eski heyelan kütlesi üzerinde bir çökme gözlenirken daha güneyde bulunan şehir merkezinde bir yükselme gözlenmektedir. PS noktalarındaki deformasyonların daha ayrıntılı olarak gözlenmesi için heyelan sahası boyunca bir kesit alanı belirlenmiş (Şekil 5.1) ve bu kesit üzerindeki PS noktalarına ait hız değerleri incelenmiştir.



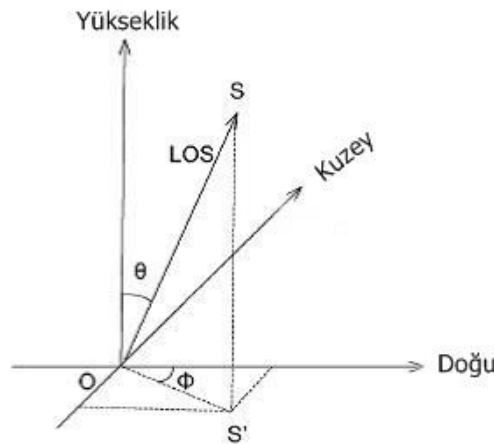
Şekil 5.1. 10 adet ENVISAT 78 iz numaralı uyduya ait görüntüden elde edilen PS noktaları için LOS yönündeki yıllık hız değerleri, kesit ve GNSS noktaları.

Elde edilen GNSS ve PSInSAR sonuçlarını karşılaştırmak için ilk önce heyelan sahasını taç bölgesinden topuk bölgesine kadar kuzey-güney yönlü üç bölümden oluşan bir kesit hattı belirlendi (Şekil 5.1). Daha sonra bu kesit hattı boyunca GNSS ve PS noktalarına ilişkin LOS yönündeki hız değerleri belirlendi. Heyelan sahası içerisine düşen PS noktalarını belirleyebilmek için seçilen kesit hattının 200 m sağına ve soluna düşmeyen PS noktaları veri kümesinden çıkarıldı. Heyelan sahası kesit alanına düşen PS noktalarına ilişkin hız değerlerine ait kesit grafiği Şekil 5.2' de verilmektedir.



Şekil 5.2. Seçilen kesit boyunca GNSS ve PS noktalarına ait hız değerleri.

GNSS hız değerleri üç boyutlu olarak elde edilmektedir. Bu sonuçların PSInSAR sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için Eşitlik 5.1 ve 5.2' deki formüller kullanılarak üç boyutlu GNSS hız değerleri tek boyutlu LOS yönündeki hız değerlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra heyelan sahası üzerinde kuzey-güney yönünde belirlenen kesit hattı boyunca Şekil 5.3' de verilen GNSS noktalarına ait LOS değerleri de hesaplanmıştır.



Şekil 5.3. Sarı yan-bakış geometrisi ve açısal parametreler

GNSS noktalarına ait LOS değerleri de hesaplanırken Eşitlik 5.1’ deki formüller kullanılmıştır. Şekil 5.3’ de alçalan bir uydu için yan bakış geometrisi ve açısal parametreler verilmektedir. Burada S uydu konumunu ve O hedef noktasını sunmaktadır. Uydu ile hedef arasındaki hat LOS (Line of Sight direction) görüş mesafesi yönünü vermektedir. θ (heading) gelme açısıdır. ve S’O kesikli çizgi SO doğrultusunun yatay düzleme izdüşümüdür. Φ (incidence) açısı ise S’O doğrultusu ile doğu yönü arasındaki açıdır. Kuzey-Güney(North), Doğu-Batı(East) ve Düşey yöndeki (Up) hız değerlerinden LOS yönündeki hızlar hesaplanırken Eşitlik 5.1 ve 5.2 deki formüller kullanılır.

Yüzey deformasyonları doğu, kuzey ve yükseklik yönlerinde üç boyutlu olarak şu şekilde ifade edilebilir $D = (d_e, d_n, d_{up})^T$. Daha sonra Deformasyon vektörü D LOS(line of sight) yönüne aşağıdaki eşitlik kullanılarak dönüştürülebilir.

$$d_{LOS} = s^T \cdot D \quad (5.1)$$

$$s = (-\cos\alpha_h \sin\theta \quad \sin\alpha_h \sin\theta \quad \cos\theta)^T \quad (5.2)$$

Burada d_{LOS} , s ve D sırası ile uydu bakış doğrultusundaki yer değiştirmeleri, uydu birim vektörünü, üç boyutlu yüzey deformasyonlarını ifade etmektedir. Eşitlik 5.2’ de uydu birim vektörünü ayrıntılı olarak tanımlanmaktadır. Burada Envisat I2 alçalan geçiş için , α_h heading açısı ve θ incidence açısıdır (Arıkan et. al., 2009). Bu eşitlikler kullanılarak GNSS üç boyutlu hız vektörleri LOS yönünde tek boyutlu olarak elde edilir. Şekil 5.2’ de bu eşitlikler kullanılarak hesaplanan LOS yönündeki GNSS hız değerleri gösterilmektedir.

Şekil 5.3’ de alınan kesit boyunca GNSS ve PS noktalarına ait hız değerleri verilmektedir. Bu şekil incelendiğinde kesitin yaklaşık 4700 m sinde bir GNSS noktasına ait hız değerinin diğer tüm değerlerden oldukça farklı olduğu gözlenmektedir. Farklılık gösteren bu nokta KH07 nolu GNSS noktasıdır. KH07 nolu noktaya ait GNSS hız değerleri incelendiğinde bu noktada diğer heyelan sahasındaki noktalardan farklı bir yatay yönde hareket gözlenmektedir. Hastaoglu and Sanli 2013’ deki yayınlarında bu hareketin bölgedeki heyelan hareketinden bağımsız lokal bir hareket olabileceğini belirtmiştir. Hastaoglu and Sanli 2013’ de Emniyet müdürlüğü içerisinde bulunan kuyudaki yeraltı su seviyesindeki ani değişimleri işaret etmiş ve KH07 nolu noktadaki hız değerlerinin ana heyelan kütlelerinden farklı lokal bir hareket olduğu vurgulamıştır.

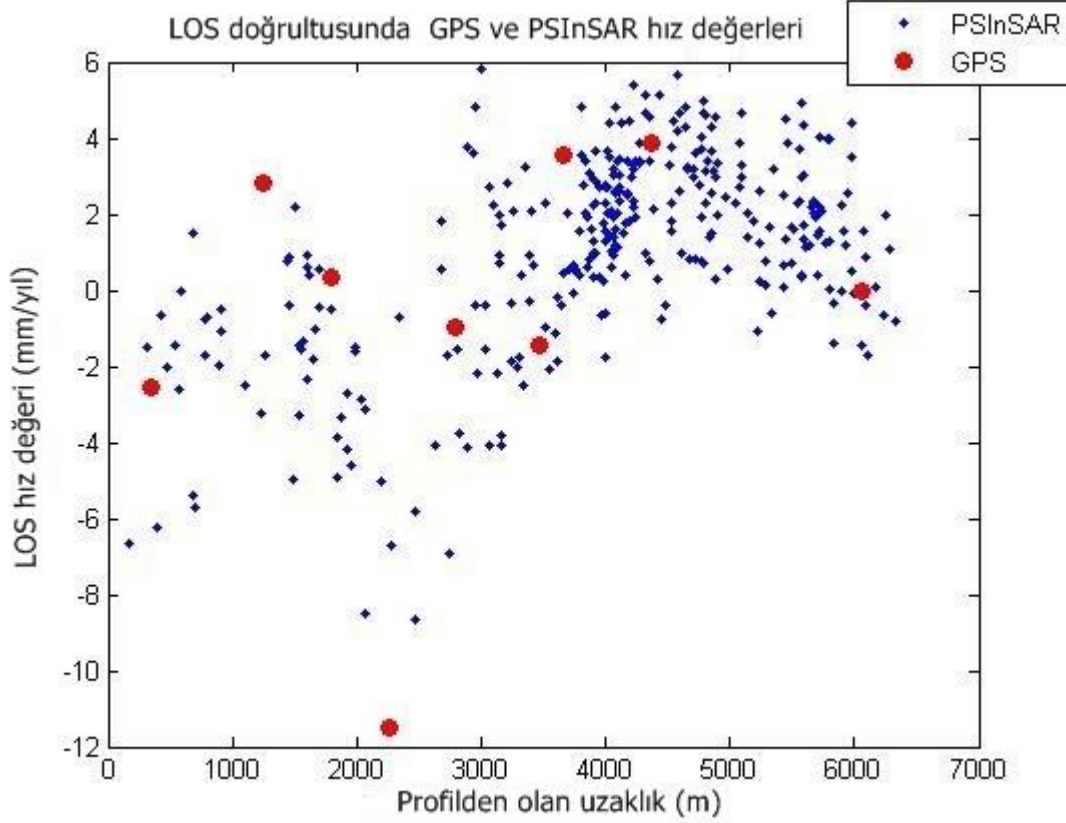
Şekil 5.2’ deki kesit incelendiğinde KH07 nolu noktadaki GNSS sonuçları için PSInSAR sonuçlarının uyum göstermediği gözlenmektedir. Daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda KH07 nolu noktadaki hareketin lokal bir hareket olabileceği söylenmiştir nitekim KH07 nin

yaklaşık 250 m uzağındaki KH10 da hareket miktarlarının çok küçük olması da bunun bir kanıtıdır.



Şekil 5.4. KH07 nolu nokta ve civarındaki PS noktaları.

KH07 nolu noktadaki hareketin PSInSAR yöntemi ile belirlenememiş olmasındaki ana sebebin ,Şekil 5.4 de yeşil alanla gösterilen yaklaşık 50 m yarıçaplı bir daire şeklinde alanda KH07 nolu nokta etrafında herhangi bir PS noktasına rastlanamamış olunmasıdır. Özetle KH07 civarındaki hareketin küçük bir alanda lokal bir hareket olması ve bu alana PS noktası rastlamamasından dolayı PS sonuçlarının bu noktadaki lokal hareketi yansıtamadığı düşünülmektedir. Bu düşünceden yola çıkarak heyelan sahasındaki GNSS sonuçları için PSInSAR sonuçları karşılaştırılırken bu nokta elimine edilmiş ve Şekil 5.5 daki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.5. Seçilen kesit boyunca KH07 nolu nokta hariç GNSS ve PS noktalarına ait hız değerleri

Bunu yanı sıra Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2’de ENVISAT 78 frame için , α_h heading açısı -165.88° ve θ incidence açısı 22.7° değerleri yerine yazılacak olursa Eşitlik 5.3’deki değerler elde edilecektir.

$$disp_{LOS} = 0.37 * E - 0.09 * N + 0.92 * V \quad (5.3)$$

Bu formülden de açıkça anlaşılacağı üç boyutlu GNSS hız değerleri tek boyutlu LOS hız değerlerine çevrilirken doğu bileşenindeki bir hareketin ancak %37’ si, kuzey yönlü bir hareketin % 9 gibi küçük bir kısmı ve yükseklik bileşeninin %92 gibi neredeyse tamamı yansıtılmaktadır. Yani Kuzey-Güney bileşenli bir hareketin ancak onda biri hesaba karılmaktadır yani 5 cm lik bir hız değeri 5mm gibi küçük bir değer olarak LOS yönüne çevrile bilmektedir. KH07 nolu noktada da hareketin ana bileşeni kuzey-güney bileşendir. Bu noktaya PS noktası rastlasa bile bu yönlü bir hareketin PS yöntemi ile belirlenmesi oldukça güçtür.

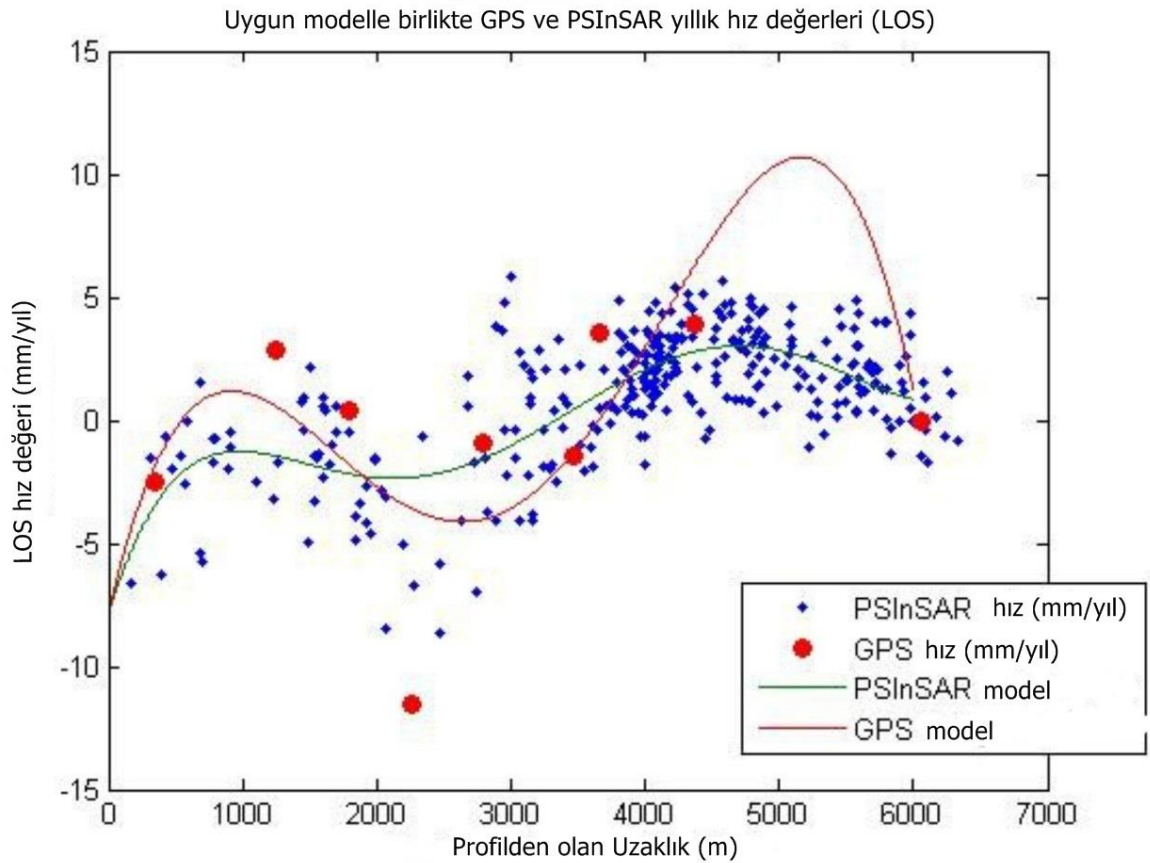
Şekil 5.5 incelendiğinde GNSS noktaları ile PS sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu gözle görülmektedir. Hem bu uyumu matematiksel olarak araştıra bilmek hemde kesit boyunca iki yöntemden de hareket modelini elde edebilmek için her iki yöntemle elde edilen hız değerlerine ait hareket eğrileri fit edilmiştir. Bu işlemde Kesit boyunca elde edilen GNSS ve PS noktalarına

ait LOS hız değerlerinden, sırası ile Eşitlik 5.4 ve Eşitlik 5.5 deki modeller kullanılarak ayrı ayrı GNSS ve PS sonuçları için gerçekleştirilmiştir. Kestirilen bu modeller Şekil 5.6 de verilmektedir.

$$V_{PS} = 5.9 * 10^{-17} x^5 - 1.0 * 10^{-12} x^4 + 6.4 * 10^{-9} x^3 - 1.7 * 10^{-5} x^2 + 0.0179 x - 7.8905 \quad (5.4)$$

$$V_{GPS} = -4.6 * 10^{-13} x^4 + 5.4 * 10^{-9} x^3 - 1.9 * 10^{-5} x^2 + 0.0234 x - 7.8638 \quad (5.5)$$

Burada V_{PS} , V_{GPS} ve x , GNSS hızlarını (LOS yönündeki), yıllık PS hızlarını (LOS yönündeki), ve kesit uzunluğunu göstermektedir. Kestirilen hareket modellerinin güvenilirliğini anlamak için her iki modele ait R-squared değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 5.6. GNSS ve PS noktaları için fit edilen eğriler.

GNSS ve PSInSAR için elde edilen iki farklı hareket modeli Şekil 5.6' da gösterilmektedir. Her iki modelde dikkatlice izlendiğinde Kesitin ilk 1km lik (heyelan tac bölgesi) kısmında bir yükselme daha sonraki 2km lik kısmında (eski heyelan kütlesi) ise çökme, 2km ile 5km arasında (şehir merkezi) ise tekrar yükselme ve son 1km lik kısımda (heyelan topuk bölgesi) çökme hareketi gözlenmektedir. Sonuç olarak her iki modelde de hareket eğilimleri birbirini ile

uyuşumdur. Bu iki modelin birbirleri arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için her iki modelde de, kesit boyunca 50m ara ile hız değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra her iki modelden hesaplanan hız değerleri için korelasyon değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değer 0.84 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere her iki modelden elde edilen hız değerleri birbirini doğrulamaktadır.

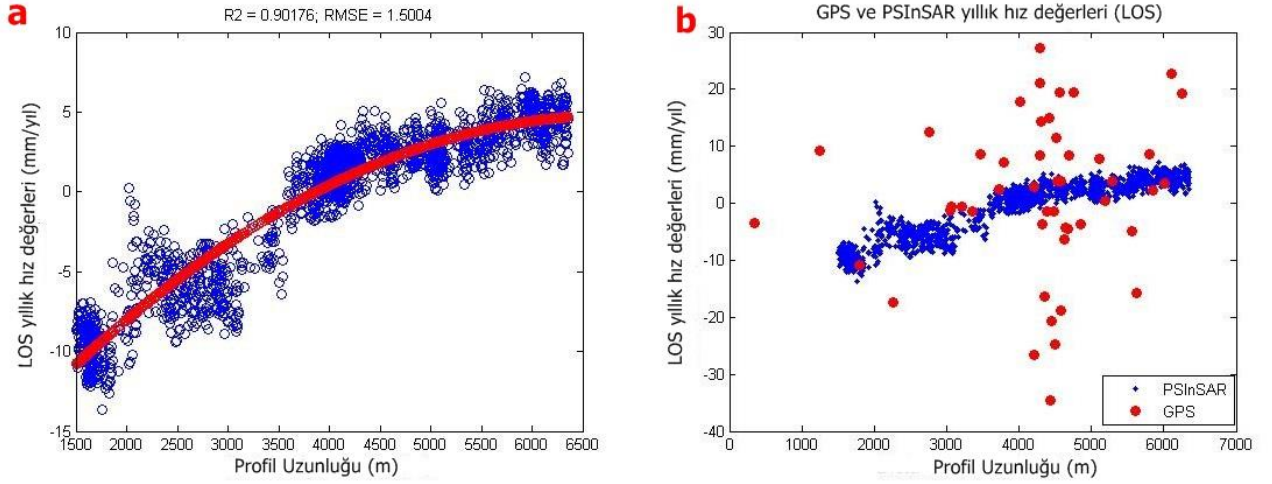
Özetle Koyulhisar heyelan sahasında gerçekleştirilen GNSS ve PSInSAR sonuçları birbirini doğrulamakta ve genel heyelan kütlelerinin hareketi hakkında bilgi sunmaktadır. Özellikle KH07 nolu noktadaki deformasyonun noktasal ve yatay yönde olmasından dolayı PS tekniği ile belirlenememiş olması bu çalışma için PS tekniğinin zayıf yönü olarak söylene bilinir. KH07 nolu noktadaki GNSS ile sadece noktasal olarak belirlenip bu hareketin alansal olarak bir anlamı olup olmadığının sadece GNSS ölçüleri kullanılarak belirlenememiş olması da GNSS yönteminin zayıflığı olarak özetlene bilinir. Ayrıca Bölüm 5.1’ de anlatılan bu çalışma ,”Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion Landslides, Koyulhisar,Turkey”, isimli bir çalışma olarak Geomatics, Natural Hazards and Risk (ISI), dergisinde, DOI : 10.1080/19475705.2014.978822. numarası ile Ekim 2014 tarihinde online olarak basılmıştır.

5.2 TerraSAR-X Güncel Görüntülerinden Elde Edilen PS Sonuçları İle Proje Kapsamında Ölçülen GNSS Sonuçlarının Karşılaştırılması

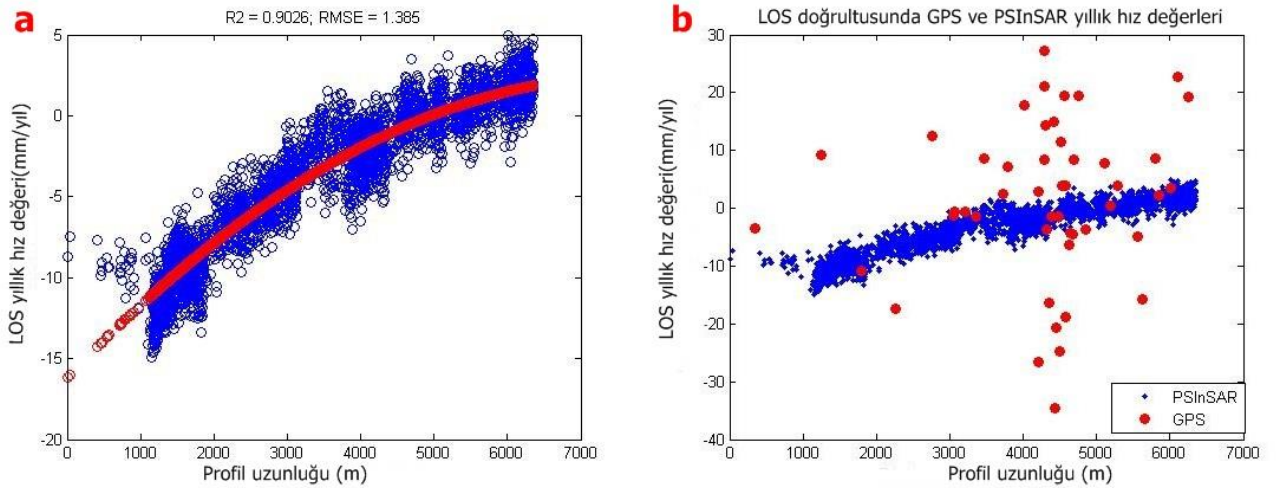
Bölüm 5.1 ‘de ki çalışmada açıkça görüleceği üzere KH07 nolu nokta civarında lokal bir hareket belirlenmiştir. Bu hareketin alansal olarak çıkarılması için Proje kapsamında GNSS nokta tesisinde bu bölgede yaklaşık 50 şer metre ara ile 30 adet nokta tesis edilmiş ve GNSS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar Bölüm 3’ de ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Hastaoglu 2009’ da gerçekleştirilen 9 GNSS noktasındaki çalışma sonuçları ile mevcut projenin bu 9 noktaya yakın yerlerdeki GNSS sonuçları karşılaştırıldığında aslında uyumlu sonuçlar edilmekle beraber Hastaoglu 2009’ daki 9 adet GNSS noktasının heyelan mekanizmasını tanımlamakta yetersiz kaldığı açıkça görülmektedir. Özetle GNSS sonuçları noktasal bazda sonuçlar ürettiği için heyelan sahaları gibi karmaşık yapıların GNSS yöntemi izlenmesinde olabildiğince fazla GNSS noktasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bunu yanı sıra bölgeye ait değişik çözünürlükte güncel uzay radar görüntüleri temin edilmiş ve değerlendirmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda Bölüm 4.2’ de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde ise Bölüm 3’ de elde edilen GNSS sonuçları ile Bölüm 4.2’ de elde edilen PSInSAR sonuçlarının birlikte yorumlanması planlanmaktadır.

Karşılaştırma işlemi için ilk olarak Bölüm 5.1’ deki yöntem izlenmiştir. Yani Heyelan sahasındaki kesit üzerine düşen GNSS ve PS noktalarına ait LOS yönündeki yıllık hız değerleri hesaplanmış ve bu değerler Şekil 5.7 ve 5.8 de verilmiştir. Şekil 5.7’ de TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri ve GNSS LOS yönündeki hız değerleri birlikte verilmektedir. Şekil 5.8’ de ise TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri ve GNSS LOS yönündeki hız değerleri birlikte verilmektedir.



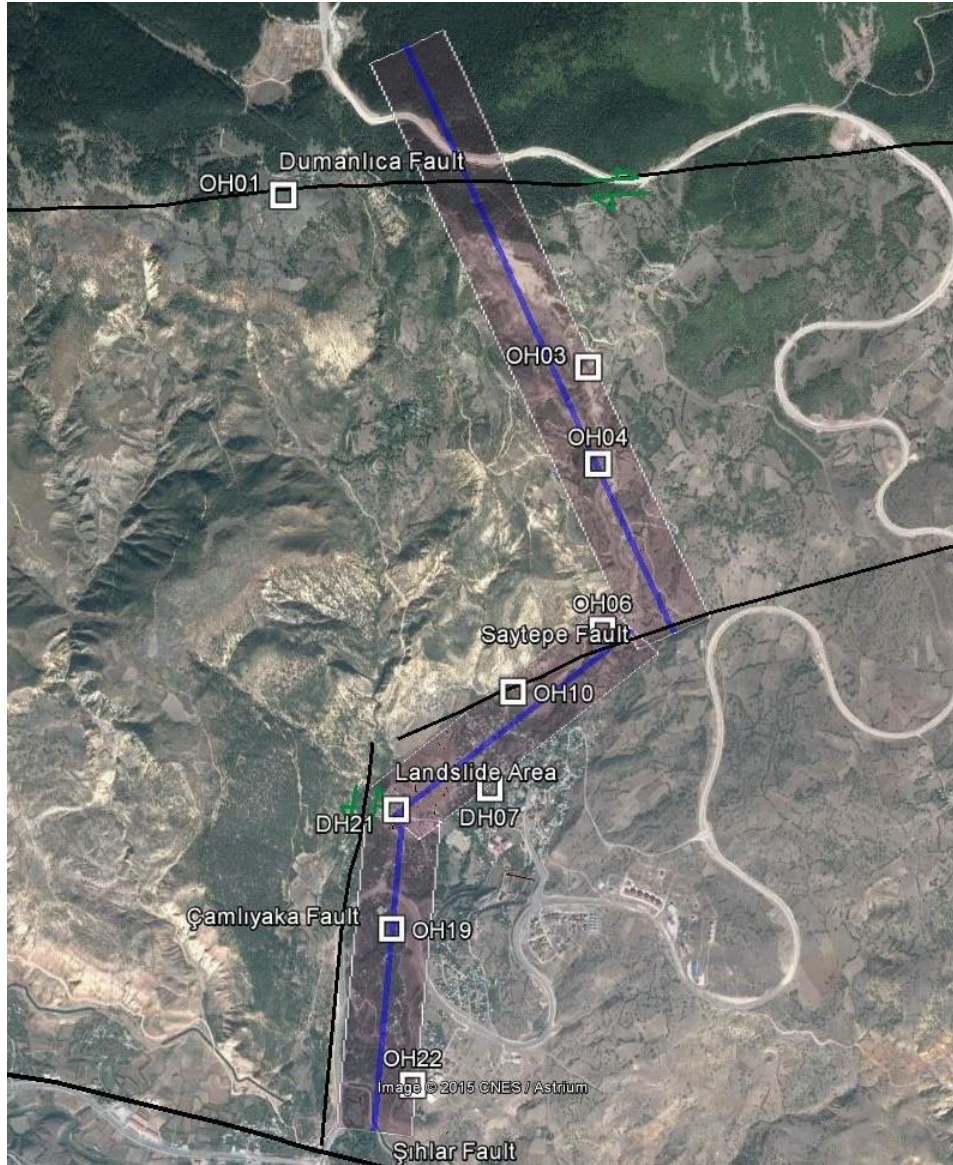
Şekil 5.7. a) Seçilen kesit boyunca TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri, b) Seçilen kesit boyunca PS noktaları ve GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri.



Şekil 5.8. a) Seçilen kesit boyunca TerraSAR-X Stripmap130 iz numaralı uyduya ait PS nokta hız değerleri, b) Seçilen kesit boyunca PS noktaları ve GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri.

Şekil 5.7 ve 5.8 incelendiğinde GNSS hız değerleri ile PS hız değerleri arasında bir korelasyon gözlenememektedir. Halbuki Bölüm 5.1’ de 9 adet GNSS sonucu ile ENVISAT PS sonuçlarının yüksek korelasyonlu olduğu izlenmiştir. Proje kapsamında GNSS sonuçları ile PS sonuçlarının uyumlu çıkmamasının ana nedeni özellikle şehir merkezinde çok sayıda GNSS noktası

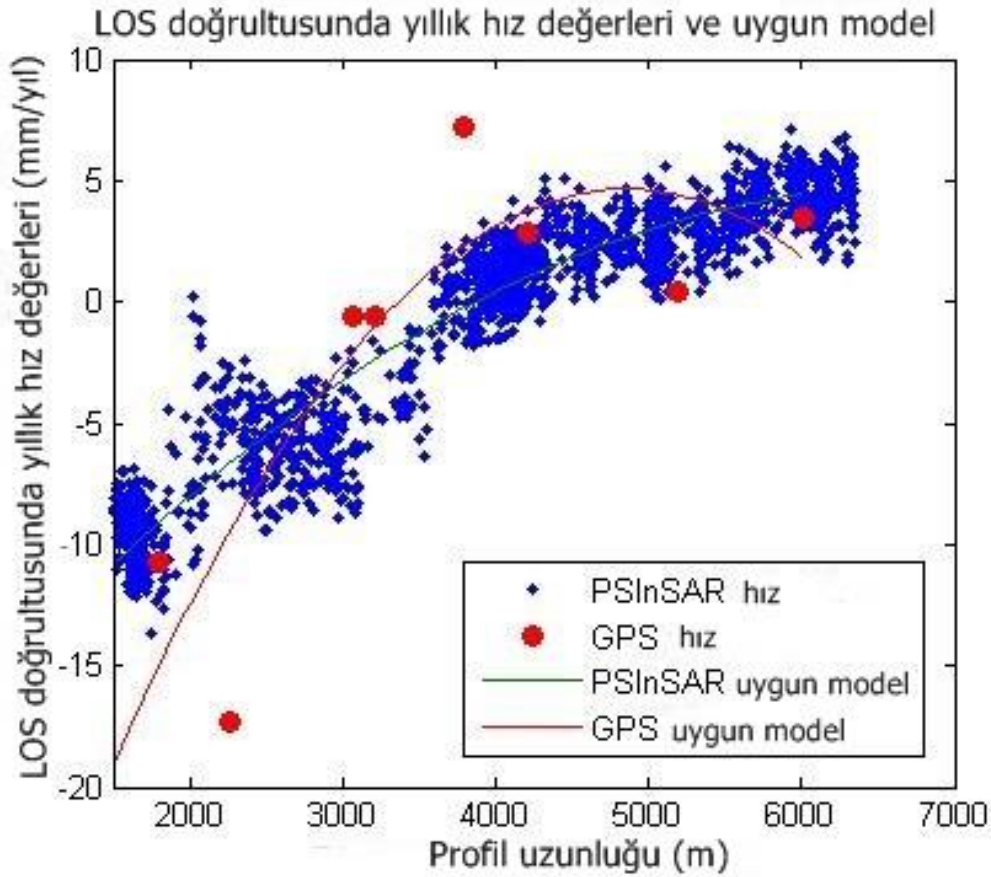
bulunması ve bu noktalarda ana heyelan kütesinden bağımsız lokal hareketlerin varlığıdır. Bölüm 5.1’ de de belirtildiği üzere PS yöntemi ile kuzey ve doğu bileşendeki hareketler yüksek doğrulukla belirlenememekte ve lokal alanlarda yeterli PS noktası yok ise lokal hareketler belirlenememektedir. Fakat Bölüm 5.1’ de de belirtildiği üzere PS sonuçları ana heyelan kütesinin hareket özelliklerini yansıtmaktadır. Bu doğrultuda Heyelan sahasının genel hareketinin yansıtacak kuzey güney yönde kesit boyunca GNSS noktaları seçilmiş ve bu noktalar ile PS sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9’ da Heyelan sahasının kesit boyunca hareketini yansıtacak seçilen noktalar gösterilmektedir.



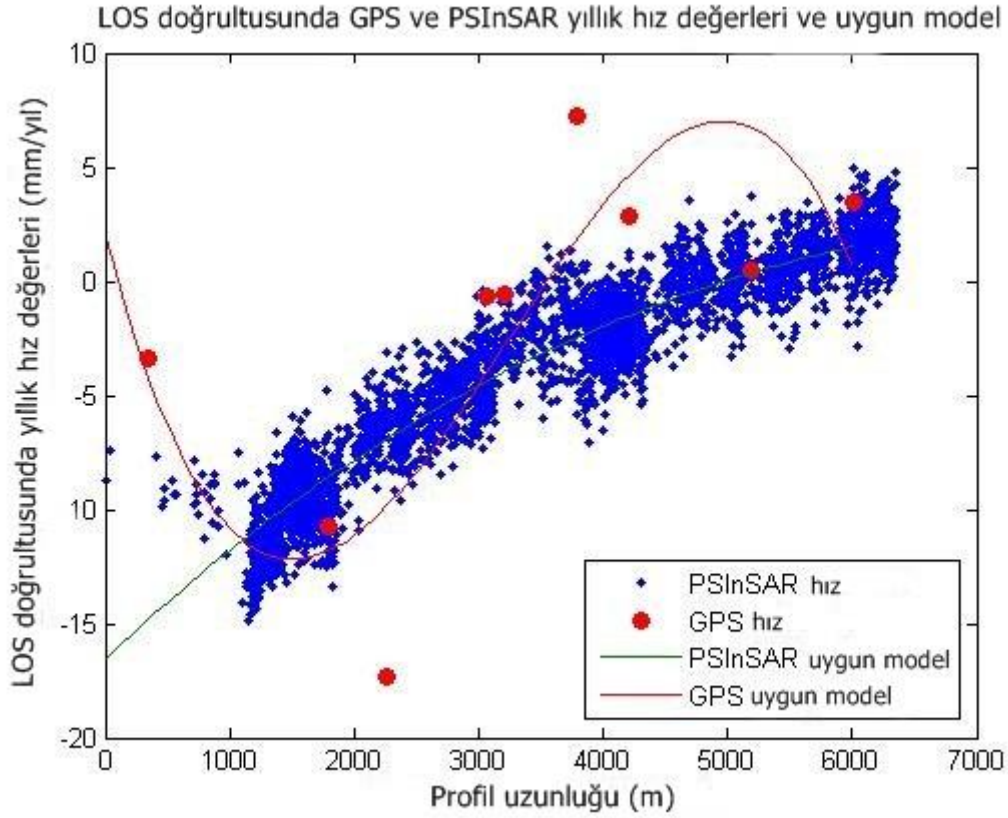
Şekil 5.9. Heyelan sahası genel karakterini göstermek amaçlı seçilen GNSS noktaları.

Şekil 5.9’ daki GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri ve bunların PS noktalarının hız değerleri ile karşılaştırılması Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’ de verilmektedir.

Şekil 5.10' da Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri ile TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için ikinci dereceden fit edilen eğriler gösterilmektedir. Şekil 5.10 incelendiğinde her iki eğrinin de aynı karakteristik özellikte olduğu gözlenmekte ve Saytepe fayının kuzeyinde bir çökme gözlenirken güneyinde yükselme gözlenmektedir. Bunu yanı kesit boyunca sıra iki eğri modelinden elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değeri de 0.98 olarak hesaplanmıştır. Buradan da anlaşılabacağı üzere iki yöntemde genel heyelan kütlesi için aynı hareket modelini sunmaktadır. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı çerçeve heyelan sahasının kuzeyini kapsamadığı için değerlendirmelerde OH01 nolu GNSS noktası hesaba katılmamıştır.



Şekil 5.10. Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri, TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için ikinci dereceden fit edilen eğriler.



Şekil 5.11. Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri, TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için ikinci dereceden fit edilen eğriler.

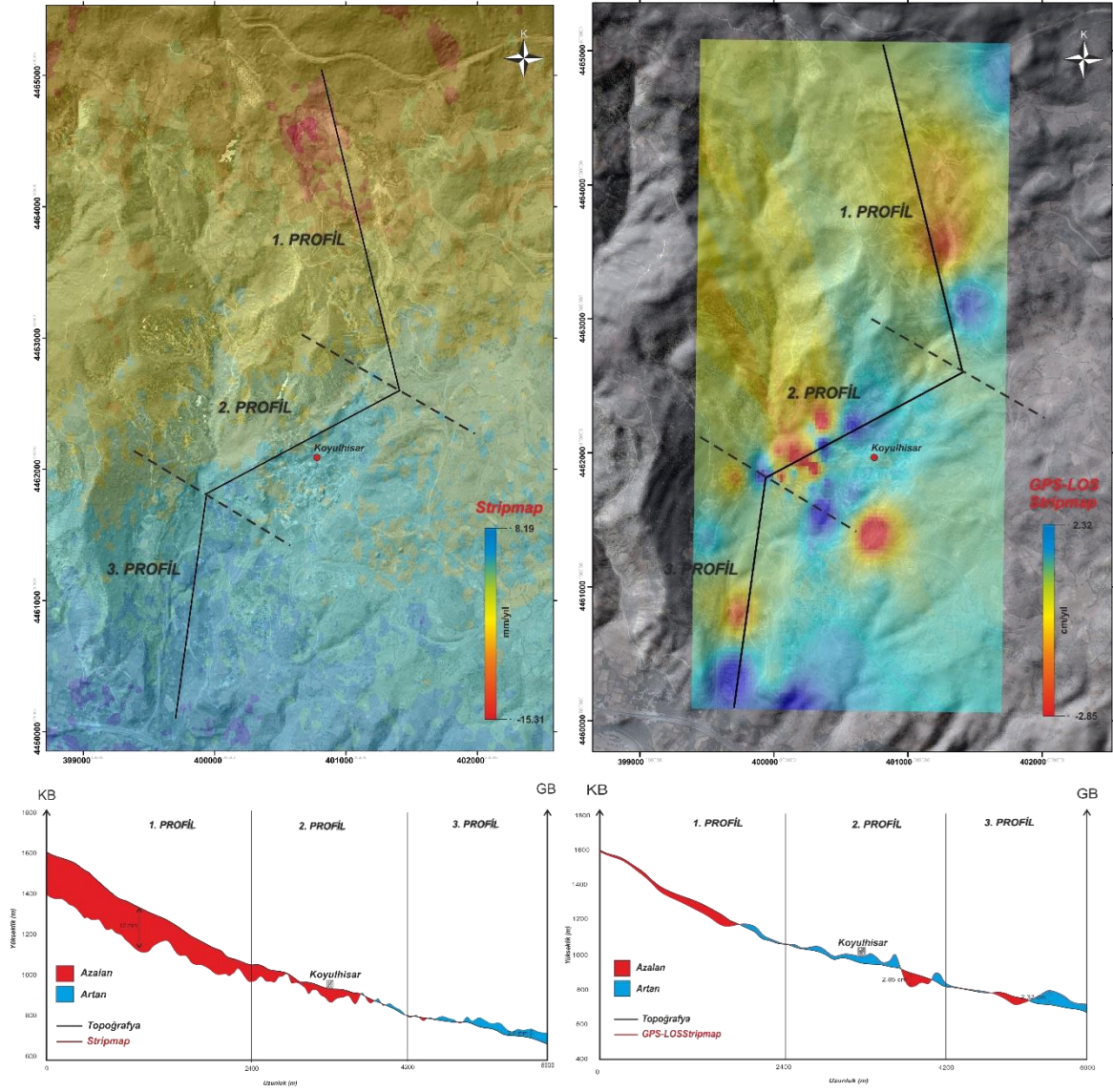
Şekil 5.11' de Heyelan sahasının genel karakteristiğini göstermek amacı ile seçilen GNSS noktalarına ait LOS yönündeki hız değerleri ile TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uydu PS noktaları hız değerleri ve bu hız değerleri için üçüncü dereceden fit edilen eğriler gösterilmektedir.

Şekil 5.11 incelendiğinde 54 iz numaralı uydu sonuçlarında olduğu gibi her iki eğrinin de aynı karakteristik özellikte olduğu gözlenmekte ve Saytepe fayının kuzeyinde bir çökme gözlenirken güneyinde yükselme gözlenmektedir. Bunu yanı kesit boyunca sıra iki eğri modelinden elde edilen hız değerleri arasındaki korelasyon değeri de 0.95 olarak hesaplanmıştır. Buradan da anlaşılabacağı üzere iki yöntemde genel heyelan kütlesi için aynı hareket modelini sunmaktadır.

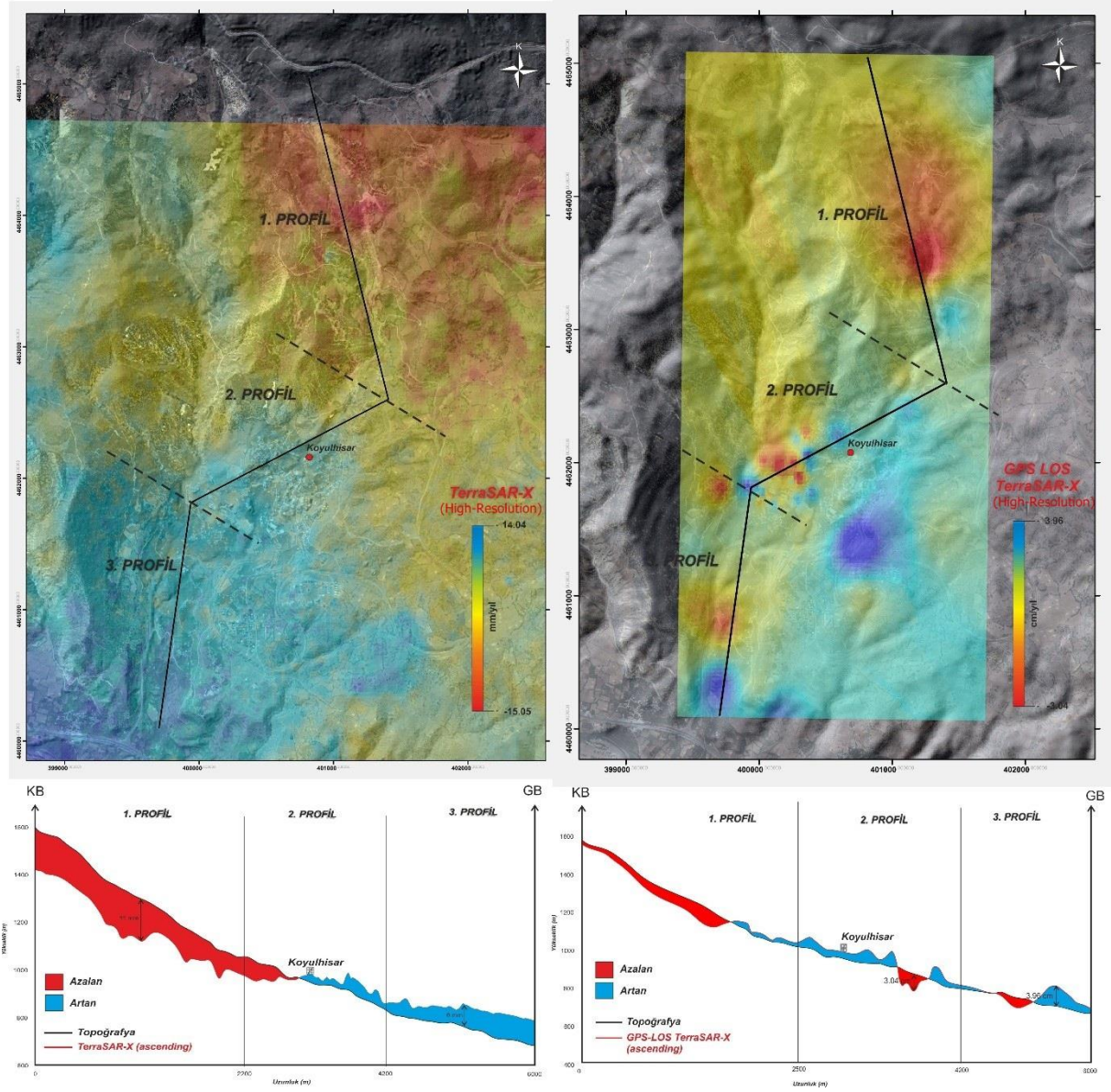
Sonuç olarak heyelan sahası üzerinde bir kesit seçilerek bu kesit üzerindeki tüm (51 adet) GNSS noktaları ile PS sonuçlarının karşılaştırılmasından uyumu sonuçlar elde edilememiştir. Bunun nedeni Koyulhisar heyelan sahasının kendi içerisinde ana kütleden bağımsız lokal şev hareketleri içermesidir. 51 adet GNSS noktasına ait GNSS hız değerleri tüm heyelan sahasındaki hareketleri ayrıntılı olarak yansıtırken PS sonuçları lokal hareketleri yansıtmada başarılı olamamakla birlikte genel heyelan hareketinin yansıtmaktadır.

Proje kapsamında heyelan sahasının genel karakteristiğini gösteren enterpole haritalarını oluşturacak sayıda GNSS ve PS noktası bulunduğu için enterpole haritalarının oluşturularak bu haritalardan elde edilecek kesit değerlerinin karşılaştırılması da mümkün olmuştur. Böyle bir karşılaştırmanın ana sebebi Heyelan sahası içerisinde GNSS sonuçlarından birden fazla lokal hareket bölgesinin belirlenmiş olması ve bu hareketlerin enterpole haritaları yardımı ile daha iyi yansıtılacağı düşüncesidir. İlk olarak çalışma bölgesinde elde edilen GNSS üç boyutlu hız değerleri Eşitlik 5.1 ve 5.2’ de verilen formüller kullanılarak tek boyutlu uydu bakış doğrultusuna (LOS) çevrilmiştir. Daha sonra 51 adet GNSS noktasından elde edilen LOS yönündeki hız değerlerinden Heyelan sahası için enterpolasyon haritası üretilmiştir. Bunun yanı sıra PS noktalarından elde edilen hız değerleri yardımı ile enterpole haritaları da elde edilmiştir. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı ve High resolution 54 iz numaralı uydular için elde edilen enterpole hız değerleri Şekil 5.12 ve 5.13’ de sunulmaktadır.

Şekil 5.12 ve 5.13’ deki her iki hartada da incelendiğinde PS sonuçların genel heyelan mekanizmasını yansıttığı fakat GNSS sonuçlarında belirlenen lokal hareketleri yansıtmadığı açıkça gözlenmektedir.



Şekil 5.12. TerraSAR-X Stripmap 130 iz numaralı uydu için GNSS ve PS noktalarından üretilen enterpole LOS yönündeki hız değerleri ve kesit boyunca bu hız değerlerinin değişimi



Şekil 5.13. TerraSAR-X High resolution 54 iz numaralı uydu için GNSS ve PS noktalarından üretilen enterpole LOS yönündeki hız değerleri ve kesit boyunca bu hız değerlerinin değişimi

Sonuç olarak heyelanların izlenmesinde lokal hareketlerin ve genel heyelan hareketinin izlenmesi GNSS yöntemi ile oldukça başarılı olarak belirlenirken bu yöntemin başarı ile kullanılması için çok sayıda GNSS noktasına ihtiyaç vardır. Bu da gerek maliyet gerekse emek yönünden yöntemin kullanılmasını zayıflatmaktadır. Bunu yanı sıra PS yöntemi ile araziye gitmeden az maliyet ve az emek harcayarak heyelanın genel hareket mekanizması belirlenebilmekte fakat lokal hareketler başarı ile belirlenememektedir. Özetle Heyelan çalışmalarında bu iki yöntemin birlikte kullanılması daha uygundur. Şöyle ki genel heyelan hareketi PS yöntemi ile belirlenirken lokalde özellikle şev duyarsızlıklarının fazla olduğu, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu veya yüzey çatlaklarının belirgin olduğu vb. alanlarda ek GNSS

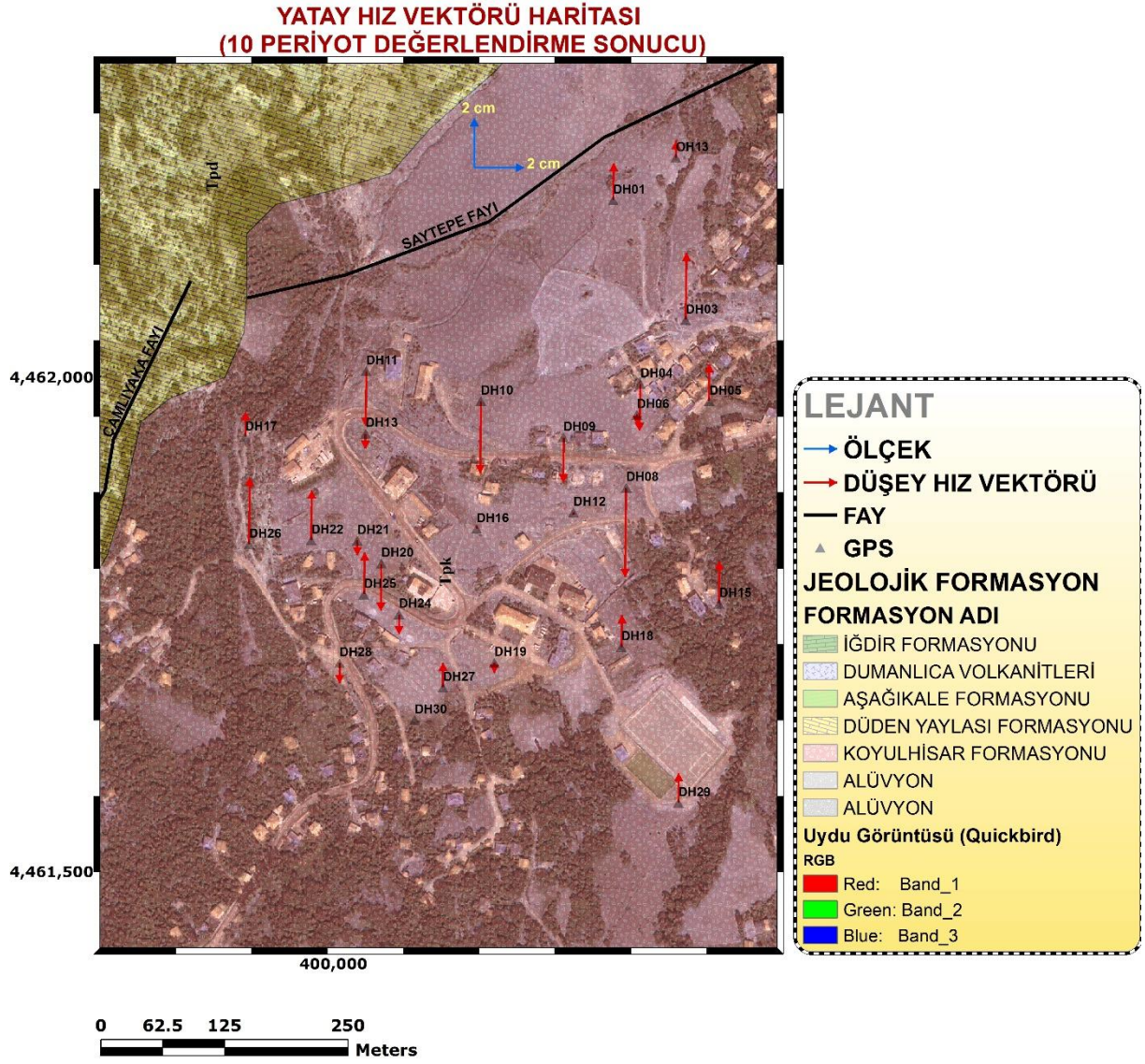
noktaları tesis edilerek bu alanlardaki lokal hareketlerin belirlenmesi ile az sayıda GNSS noktası ve PS sonuçları birlikte değerlendirilerek daha uygun sonuçlar elde edilebilir.

6. AFET BİLGİ SİSTEMİ (ABS) ALTYAPISININ OLUŞTURULMASI

Proje önerisinde belirtildiği üzere çalışma kapsamında, PS-INSAR, GNSS, yeraltı su seviyesi, uydu görüntüleri, fay, jeolojik formasyon gibi verilerin CBS ortamında bütünleştirilmesi ve bu verilerin analizi sonucunda çalışma bölgesindeki riskli alanların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

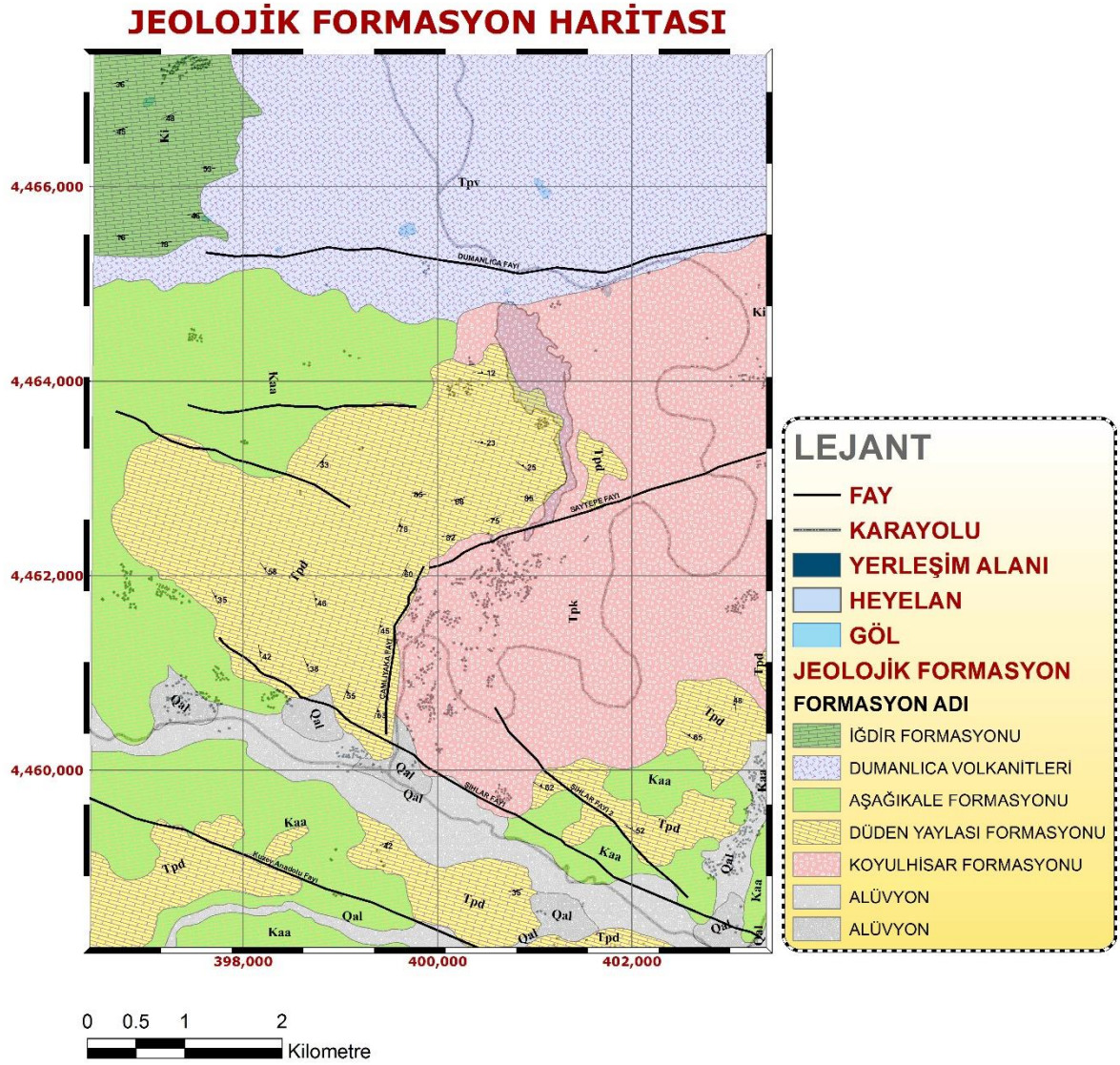
Proje sürecinde bu amaç doğrultusunda belirtilen tüm veriler CBS yazılımı ortamında bütünleştirilerek ABS altyapısı oluşturulmuş ve aşağıda belirtilen haritalar ve bilgiler üretilmiştir.

- 10 periyotluk arazi çalışmalarıyla elde edilen GNSS verilerinin değerlendirilmesi sonucunda dönemsel yer değiştirme haritaları, yatay ve düşey hız haritaları
- Arazi çalışmaları sonucunda bölgenin faylarını ve formasyon bilgilerini içeren büyük ölçekli güncel jeoloji haritası
- Dönemlere göre bir kesit boyunca meydana gelen yer değiştirme ve hız verilerinin analizi
- Dönemsel PS-INSAR verilerinden elde edilen değerlerin dönemsel GNSS verileriyle karşılaştırılarak analiz edilmesi
- Çalışma alanının eğim haritası
- Çalışma alanının bakı haritası
- Çalışma alanının kabartma haritası
- Yeraltı su seviyesi haritası



Şekil 6.1. GNSS sonuçlarından üretilen düşey hız vektörleri ve jeolojik bilgiler.

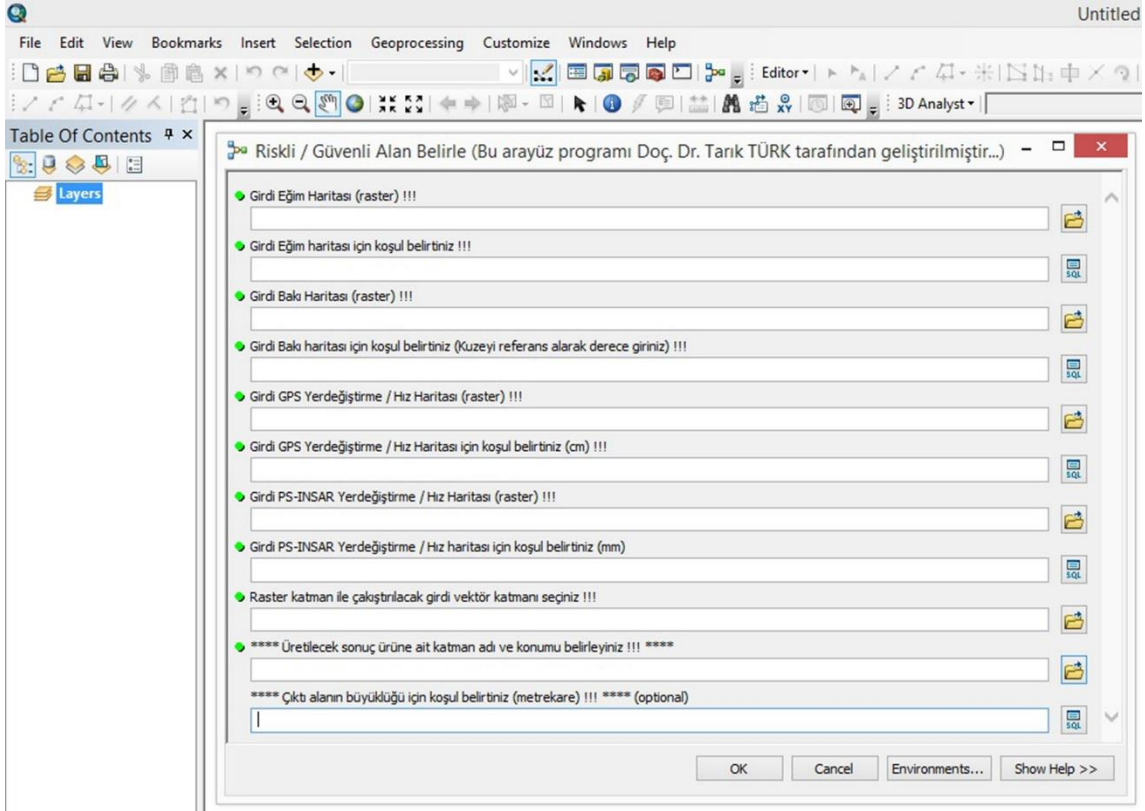
Şekil 6.1' de ABS kapsamında depolanan bilgilere örnek olarak jeoloji haritası üzerinde GNSS düşey hız değerleri gösterilmektedir.



Şekil 6.2. ABS ortamında çalışma bölgesi jeoloji haritası

Diğer taraftan, mevcut veriler dikkate alınarak heyelan bakımından riskli alanların tam otomatik olarak belirlenebilmesi amacıyla CBS yazılımı ortamında çalışan kullanıcı ara yüz programı geliştirilmiştir. Şekil 6.3' de geliştirilen ara yüze ilişkin ekran görüntüsü bulunmaktadır.

Bu program; eğim, baki, GNSS hız veya yer değiştirme ve PS-INSAR hız veya yer değiştirme ölçütlerinin belirlenmesi koşuluyla heyelan bakımından riskli alanları tam otomatik olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen kullanıcı ara yüz programının çalıştırılması sonucunda elde edilen riskli alanlara ait haritalar aşağıda görülmektedir.

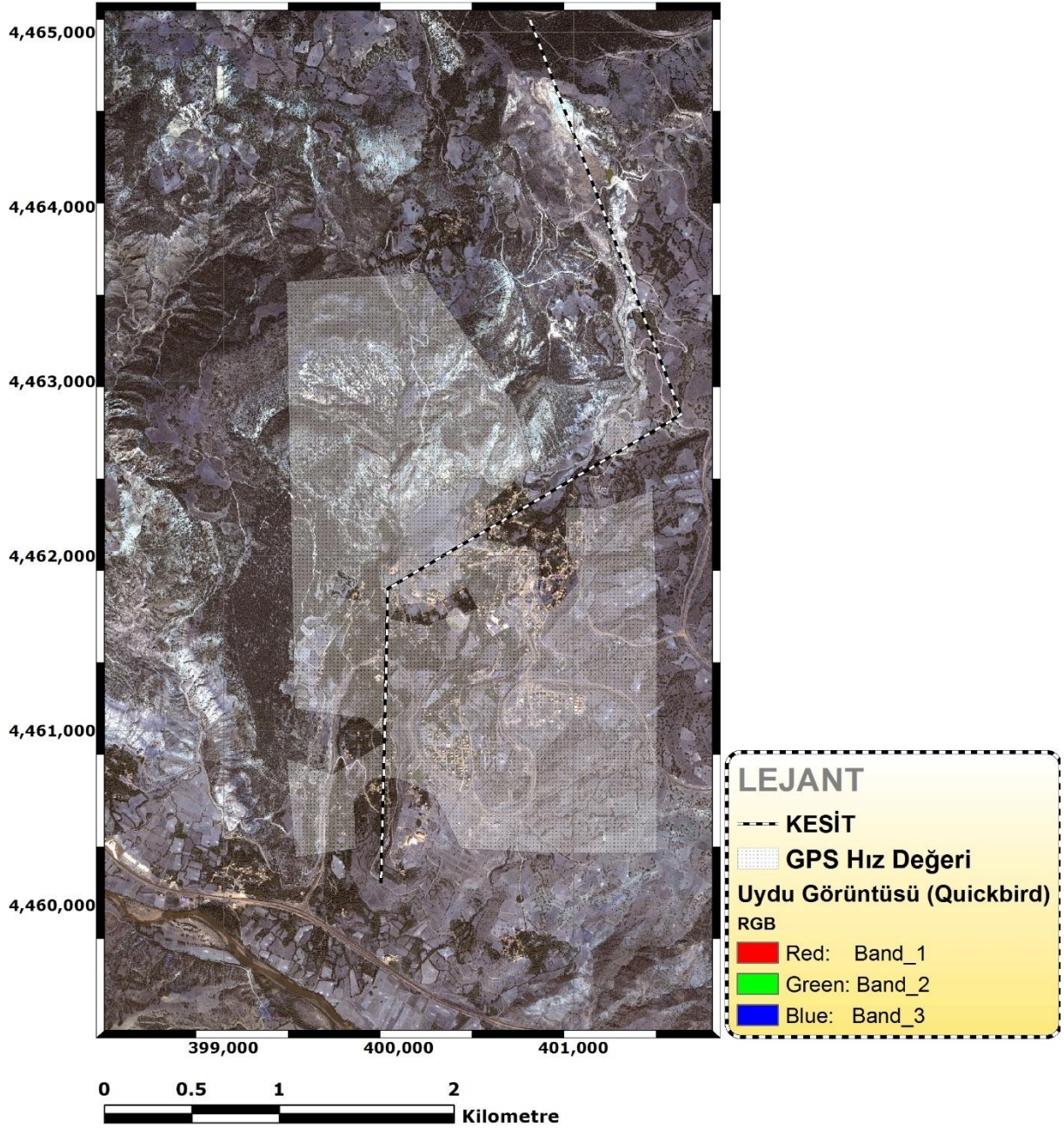


Şekil 6.3. CBS yazılımı ortamında çalışan kullanıcı arayüz programı

Şekil 6.3' de gösterilen ara yüz kullanılarak istenilen sorgulamalar gerçekleştirilebilir. Örnek olarak Şekil 6.4' de sadece bileşke GNSS hız değerleri 2.5 cm üzerinde olan bölgeler belirlenmiş, Şekil 6.5' de PS hız değerleri 2mm' den büyük alanlar belirlenmiş, Şekil 6.6' da ise GNSS hız değeri 2.5 cm' den büyük alanlar, PS hız değeri 2mm büyük alanlar ve Eğimi %8' den büyük alanların bileşkesinin oluşturduğu risk haritası oluşturulmuştur. Genel olarak GNSS ,PS ve Eğim kriterleri göz önünde bulundurulduğunda özellikle emniyet müdürlüğü ve OH 16 nolu nokta ve civarı riskli bölge olmakta birlikte özellikle Saytepe Fayının kuzey kesimindeki eski heyelan kütlesi de bölge için risk oluşturmaktadır. Nerdeyse tüm heyelan sahası aynı formasyonda bulunduğu için jeolojik formasyon bir kriter olarak hesaba katılmamıştır.

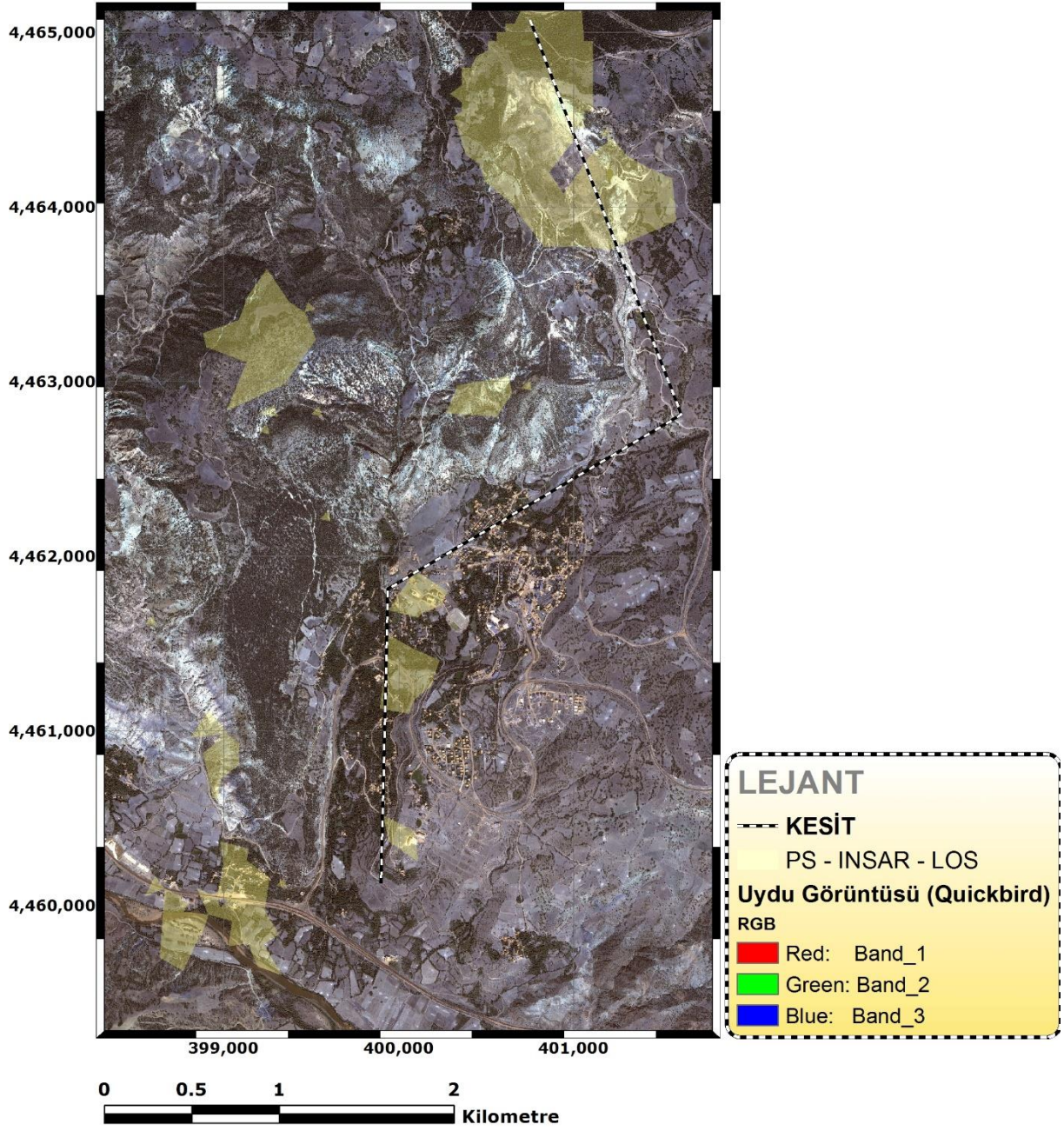
Proje kapsamında oluşturulan ara yüz sayesinde sorgulamalar daha da genişletilerek değişik parametreler de (bakı, jeolojik formasyon, yer altı su seviyesi vb.) hesaba katılarak değişik risk analizleri gerçekleştirilebilir. Proje sonucunda üretilen bu bilgi sistemi yerel yönetimler ile paylaşarak amaçlar doğrultusunda gerekli risk analizleri ve sorgulamalar gerçekleştirilecektir. Proje boyunca üretilen tüm haritalar bu sistem kullanılarak üretilmiştir.

GPS HIZ HARİTASI (Hız Değeri ≥ 2.5 cm Alanlar)

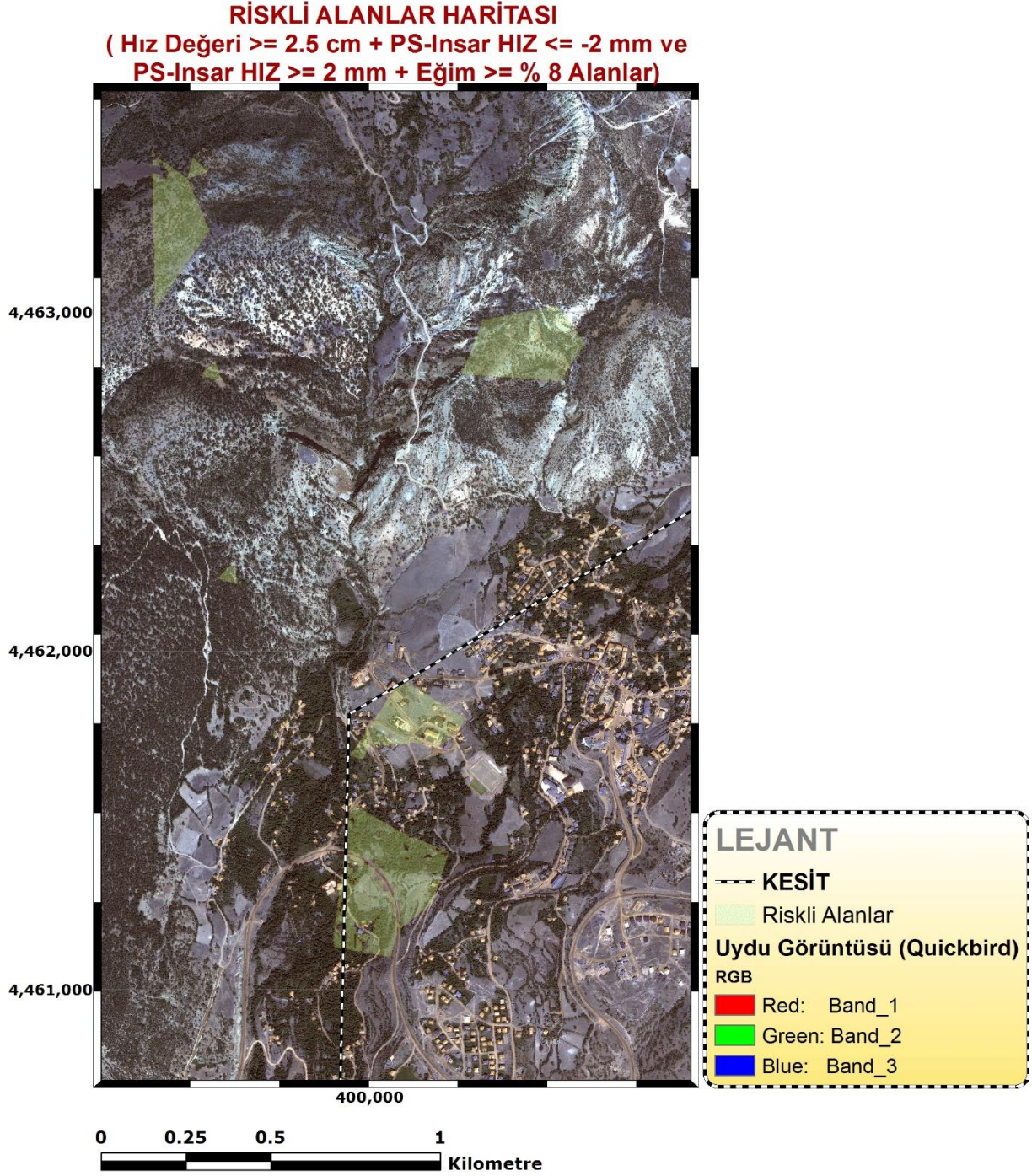


Şekil 6.4. GNSS hız değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası

PS - INSAR LOS HIZ HARİTASI (Hız ≤ -2 mm ve Hız ≥ 2 mm)



Şekil 6.5. PS-INSAR hız değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası



Şekil 6.6. GNSS, PS-INSAR ve eğim değerlerinin sorgulanıp analiz edilmesi sonucunda elde edilen risk haritası

Sonuç olarak, proje süresi boyunca mevcut ve elde edilen tüm veriler CBS ortamında depolanmış, sorgulanmış, analiz edilmiş, belgelendirilmiş ve Afet Bilgi Sistemi (ABS) altyapısı oluşturulmuştur.

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çalışma sahası Kuzey Anadolu Fay Zonu üzerinde olup, 1. derece deprem tehlikesi altındadır. Bu özelliğinden dolayı bölgede aynı zamanda yoğun heyelanlarda oluşmaktadır. Özellikle Eosen yaşlı kaya birimleri içerisindeki killi seviyeler ve Alt Miyosen yaşlı kaya birimleri içerisindeki killi ve jipsli seviyeler heyelanların oluşumuna en uygun kayalardır. Bu kayaların yoğun şekilde izlendiği Koyulhisar ilçe merkezinde de çok büyük eski heyelan kütleleri izlenmektedir. Bu heyelanların büyük çoğunluğu dairesel dönme hareketi şeklinde gelişmektedir.

Bölgede 1998-2000 yıllarında meydana gelen heyelanlardan sonra biriken malzeme, ilçenin kuzeyinde bulunan Aklan mahallesinin doğusunda Gönenli deresi içerisinde yer almaktadır. Bu akan kütlenin genişliği 2 km'ye kadar ulaşmaktadır. Bölgede yer altı su seviyesi oldukça yüksek olup, heyelanlı kütle içerisinde küçük gölcükler oluşmuştur. Koyulhisar'ın üzerinde bulunduğu eski heyelan kütlelerinin önü açık olup, yağışlı bir mevsimde malzemenin tekrar su ile temasının artması ve suya doygun hale gelmesi sonucu heyelanlı kütlenin tekrar hareket etme olasılığı yüksektir.

Gerçekleştirilen gözlemler sonucunda, çalışma alanı içerisindeki potansiyel yamaç duyarlılıklarının, genellikle güneye doğru (GB,GD) hakim olduğu görülmüştür. Çalışma alanı içerisinde belirlenmiş olan eski ve yeni tüm heyelanlar, güneydeki Şıhlar fayı ile kuzeydeki Dumanlıca fayı arasında gözlenmektedir. Buda heyelanların kuzeyden güneye doğru Dumanlıca fayından Şıhlar fayına kadar uzanan ve birçok heyelanın birleşmesi ile oluşabilecek karmaşık bir heyelan sistemi ile açıklana bilinir.

İlçenin üzerinde kurulu olduğu heyelan kütleleri ilçenin kuzeyinde Subaşı ve Aklan mahalleleri D-KD'sunda başlamış ve Saytepe'nin batı ve özellikle doğu kenarı boyunca güneye ilçe merkezinde doğru akmıştır. Bu akan kütle oldukça büyük boyutta olup genişliği 2 km'ye kadar ulaşmaktadır. Bununla beraber kütlenin akış güzergâhı üzerinde bulunan Saytepe olası büyük tehlikeyi azaltır nitelikte doğal bir bariyer görevi yapmaktadır Bu ana kütle üzerinde de ayrıca ilçe merkezinde zaman zaman yersel heyelanlar gelişmiştir. Koyulhisar İlçe Emniyet Amirliği binasının yakın civarında da birtakım deformasyonlar izlenmiştir. Ancak bu deformasyonlar yukarıda da belirtildiği gibi ana kütle içerisinde gelişen yersel heyelanlardır. Buna bağlı olarak Emniyet Amirliği Binasının daha kuzeyinde bulunan yerleşim yerlerinde heyelana bağlı olarak ciddi deformasyonlar gelişmiştir.

Gerek jeolojik veriler gerekse saha gözlemlerinin değerlendirilmesi sonucunda bölgedeki heyelanların oluşumunda, özellikle Sendir ve Yılmaz (2001)' de de belirtildiği gibi beş faktörün etkili olduğu düşünülmektedir. Bu faktörler sırası ile önceden meydana gelmiş yenilmeler, kaya kütlelerinin içerdiği kırık çatlak gibi süreksizlikler, yağışlar ve bitki örtüsü, topoğrafya(eğimler 20 ile 70 derece arasında değişmektedir.) tektonik aktivite (çalışma alanı KAFZ üzerinde bulunmaktadır.) ve bozunma ve ayrışmalardır ki çalışma alanındaki birimlerde özellikle egemen süreksizliklerin eğim yönlerinin çakıştığı bölgelerde yoğun bozunma ve ayrışma zonları gelişmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen gözlem ve ölçümler sonrasında genel olarak yaklaşık K-G yönünde küçük ve/veya büyük hareketler gözlenmiştir. Proje sahasının genel değerlendirmesi içerisinde alçalma ve/veya yükselme değerleri dikkate alınarak değerlendirme yapıldığında, başta Sendir ve Yılmaz (2001) olmak üzere araştırmacıların öngördüğü genel heyelan mekanizmasıyla uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu genel değerlendirme proje sahasının kuzeyinde genel bir çökmeyi, güneyinde ise yükselme gelişimini içermekle birlikte alçalmanın gerçekleştiği bölge Saytepe'nin gerisinde (kuzeyinde) kalan bölgelerde açık bir şekilde gözlenmektedir. Yükselme şeklindeki hareket ise özellikle Koyulhisar yerleşim alanının güneybatı ucunda olmak üzere belirlenmiştir.

GNSS sonuçlarından daha lokal ölçeklere inildiğinde yapılan değerlendirmeler sırasında bu lokal bölgeler içerisinde sadece alçalma veya yükselme olmayıp yatay hareketlerinde gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu farklı hareketler SAR sonuçlarından elde edilen bölgesel ölçekteki değerlendirmenin yanlış olduğu anlamına gelmeyip, genel heyelan topoğrafisinde yer alan bu büyük bölgenin kabarmayla birlikte kendi içerisinde meydana gelen lokal şev hareketlerini ifade etmektedir. Bu lokal şev hareketlerinin küçük değerleri ve bir heyelana dönüşmemiş olmasının nedeni ilgili şevlerin topuklarının bir mühendislik yapısı (Bina, yol, vb.), bitki örtüsü (özellikle ağaçlık alanlar) veya şevin hemen önünde yer alan topoğrafik yükseltiler ile desteklenmesi şeklinde açıklanabilir.

Bu proje kapsamında elde edilen GNSS ve PSInSAR hız değerleri yorumlandığında özellikle bölgesel deformasyonun belirlenmesinde PSInSAR yöntemi başarılı olduğu gözlenmiştir. Bu başarının ana sebebi olarak PS noktalarının tüm çalışma sahasının alansal anlamda temsil ediyor olmasıdır. Özellikle Eşitlik 5.3' de vurgulandığı üzere SAR yöntemi, çökme ve yükselme hareketlerini %90 oranında yansıtırken yatay bileşimindeki hareketleri yansıtmakta başarılı olmamıştır. Bunun neticesinde lokal anlamda daha küçük alanlardaki yatay hareketlerin belirlenmesinde SAR yöntemi yerine GNSS yönteminin benimsenmesinin daha faydalı olacağı düşünülmektedir.

SAR yönteminin aksine, GNSS yöntemiyle hareket miktarları tek boyutlu olmayıp üç boyutlu elde edilmektedir. Bunun yansıra istenen her noktada GNSS ile gözlem yapmak mümkündür. GNSS yönteminin bu başarısına rağmen, büyük alanlardaki deformasyonların izlenmesinde çok fazla GNSS noktası tesisine ve ölçümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Ve ne yazık ki her noktaya ulaşılammaktadır. Bu anlamda gerek işgücü ve gerekse maliyet fazlalığı ile her noktaya ulaşım zorlukları nedeniyle GNSS yöntemiyle bölgesel deformasyonların izlenmesi pek olanaklı olmamaktadır. Sonuç olarak sahanın topoğrafya ve morfolojisindeki değişikliklere bağlı olarak ortaya çıkan heterojen yapının izlenmesinde PSInSAR ve GNSS yöntemlerinin birlikte kullanılması önerilir.

Kaynaklar

- Acar, M., Ozludemir, T., Erol, S., Celik, R.N., Ayan, T. 2008. "Kinematic landslide monitoring with Kalman filtering". Natural Hazards and Earth System Sciences 8, 213–221.
- Angelier, J. ve Mechler, P., 1977, "Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalment utilisable en tectonique et en seismologie : la method diedres droits", Bull. Soc. Geol. France, 19, 1309-1318
- Angelier, J. 1984," Tectonic analysis of fault slip data sets". Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 89(B7), 5835-5848.
- Arikan M, Hooper A, Hanssen R. 2009. "Radar time series analysis over West Anatolia". Fringe 2009 Workshop; Frascati. 30 November-4 December (ESA SP-677, March 2010).
- Armijo, R., ve Cisternas, A., 1978. Un problème inverse en microtectonique cassante. C. R. Acad. Sci. Ser. 2, 287:595-598.
- Armijo, A., Carey, E. ve Cisternas, A., 1982. "The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases". Tectonophysics, 82, 145-160.
- Arthaud, F., 1969. "Methode de determination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermediaire d'une population de failles". Bull. Geol. Soc. France, 11, 729-737.
- Bamler, R., Hartl, P. 1998. "Synthetic Aperture Radar Interferometry", Inverse Problems 14, R1-R54.
- Bamler, R., Kampes, B., Adam, N., ve Suchandt, S. 2005. "Assessment of Slow Deformations and Rapid Motions by Radar Interferometry", Photogrammetric Week 05, 111-122 Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bayrak T. 2003. "Heyelanlar İçin Bir Dinamik Deformasyon ve Bir Dinamik Hareket Yüzeyi Modelinin Oluşturulması", Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bayrak, T. 2009. "Determining the influence of rainfall on the activity of Kulugun landslide." Fresenius Environmental Bulletin, 18, 7b.

Bertolini G., Fioroni C. 2013. "Large Reactivated Earth Flows in the Northern Apennines (Italy): An Overview". Landslide Science and Practice Volume 4: Global Environmental Change, 51-58

Bott, M. H. P., 1959. "The mechanism of oblique slip faulting. Geol. Mag", 96, 109-117.

Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, J., Wasowski, J. 2006. "Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas", Engineering Geology 88, 218-239.

Browitt, C., Aktar, M. 2006. "Italy Vulnerability Mapping Istanbul, GMES TerraFirma Workshop 3", 18-19 MAY 2006, ESRIN, Frascati.

Brunner, F.K. ve Welsch, W.M. 1994. "Effects of the Troposphere on GNSS Measurements", GNSS World, 4:42-51.

Brunner, F. K. 1997. "Continuous Monitoring of Deformation Using The Global Positioning System", AvH Magazine, 69, 29-38.

Burgmann, R., Fielding, E., Sukhatme, J. 1998. "Slip along the Hayward fault, California, estimated from space-based synthetic aperture radar interferometry", Geology 26 559–562.

Burgmann, R., Hilley, G., Ferretti, A., Novali, F. 2006. "Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay area from permanent scatterer InSAR and GNSS analysis", Geological Society of America Vol.34, No.3, 221-224.

Cakir, Z., A. M. Akoglu, S. Belabbes, Ergintav, S. ve Meghraoui, M. 2005. "Creeping along the Ismetpasa section of the North Anatolian Fault (Western Turkey): Rate and extent from InSAR", Earth and Plan. Sci. Lett. 238, 225-234.

Carey, E. ve Brunier, B., 1974. "Analyse theorique et numerique d'une modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population des faillles". Cr. Acad. Sci., Paris, 2790, 891-894.

Carey, E., 1979. "Recherche des directions principales de contraintes associees au jeu d'une population de failles", Rev. Geol. Dynam. Geog. Phys., 21, 57-66

Carey-Guillardis, E. and Mercier, J.L., 1987. "A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations. Earth Planet. Sci. Lett. 82, 165-179.

- Cascini L., Gianfranco F., Dari P. 2009. "Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide-affected areas SPRS", *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 598–611.
- Chen, R., 1991. "On horizontal crustal deformation in Finland". Rep. Finn. Geod. Inst. 91:1. Helsinki.
- Coe J.A., Ellis W.L., Godt J.W. , Savage W.Z., Savage J.E., Michael J.A., Kibler J.D., Powers P.S., Lidke D.J., Debray S. 2003. "Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation" ,July 1998–March 2002, *Engineering Geology* 68 (2003) 67–101.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. 2001a. "Comparing GNSS, Optical Leveling and Permanent Scatterers", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '01, IEEE 2001 International*, Vol.6, On page(s): 2622-2624.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. 2001b. "Seismic faults analysis in California by means of the permanent scatterers technique", *Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, 11-14 September, 2001 in Sheffield, UK., p. 125 – 131.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., ve Rocca F. 2003a. "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique", *Engineering Geology* 68 (2003) 3 –14.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Locatelli, R., Savio, G. 2003b "Multi-platform permanent scatterers analysis: first results", *Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Publication Date: 22-23 May 2003 On page(s): 52- 56.
- Colesanti, C., Wasowski, J. 2006. "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry", *Engineering Geology* 88, 173-199.
- Cross, P.A. 1990. *Advanced Least Squares Applied to Position Fixing. Working Papers*. North East London Polytechnic, Department of Surveying.
- Deguchi, T., Kato, M., Akcin H., Kutoglu H. S. 2007. "Monitoring of mining induced land subsidence using L- and C- band SAR interferometry", *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007. *IGARSS 2007. IEEE International* 23-28 July 2007, 2122-2125.

Delacourt, C., Allemand, P., Squarzoni, C., Picard, F., Raucoules, D., Carnec, C. 2003. "Potential and Limitations of ERS-Differential SAR Interferometry for landslide studies in the French Alps and Pyrenes", Proceedings of FRINGE 2003 Workshop, Frascati, Italy.

Demir, C., 1999. "The western part of the North Anatolian Fault Zone Horizontal Movement and Strain Accumulation Investigation of Earth Crust". YTÜ, Institute of Science, PhD Thesis, İstanbul.

Denli, HH. 1998. "Determination of Crustal Movements Analysis in the Marmara Sea Region Using GNSS". PhD dissertation, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, (in Turkish).

Deniz, R. 1997. "Jeodezik verilerden strain analizi" Jeodezi Anabilim Dalı Seminerleri, İstanbul (Basılmamış).

Dercourt, J. 2000. "Apport du GNSS au Suivi en Continu des Mouvements de Terrain: Application au Glissement-Coulee de Super- Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France), Earth and Planetary Sciences, 331, 175-182.

Doğan, U. 2002. "Research on Kinematic Models of deformation from 17 August 1999 Izmit earthquake", YTÜ, Institute of Science, PhD Thesis, İstanbul.

Etchecopar, A., 1981. "An inverse problem in microtectonics for determination of stress tensors from fault striation analysis". J. Struc. Geol., 3, 51-65.

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F., Moretti, S. 2006. "Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM Project", Engineering Geology 88, 200-217.

Featherstone, W.E., Dentith, M.C. ve Kirby, J.F. 1998. "Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights From GNSS", Survey Review, 34.267:278-296.

Feigle, K. L., King, R. W., Jordan And T. H. 1990. "Geodetic measurements of tectonic deformation in the Santa Maria Fold and Thrust Belt", California. Journal of Geophysical Research, 95(B3), pp.2679–99.

Ferretti A., Prati C., ve Rocca F. 2001. "Permanent Scatterers in SAR Interferometry," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, no. 1, pp. 8-20.

Fruneau, B., Achache, J. and Delacourt, C. 1996. "Observations and modelling of the Saint-Etienne-Tinée landslide using SAR interferometry", Tectonophysics, 265, 181–190.

Fruneau, B., Delacourt, C. and Achache, J. 1996. "Observation and Modelling of the Saint-Etienne-Tinée Landslide Using SAR Interferometry", Proceedings of FRINGE '96, Zurich, Switzerland.

Gao, L., ve Zeng, Q. 2007. "Terrain Deformation monitoring in Three Gorges Area using Permanent Scatterers SAR Interferometry", ScanGIS'2007 – Proceedings of the 11th ScanGIS'2007 – Proceedings of the 11th Geographical Information Sciences 5th - 7th September.

Gens, R. ve Vangenderen, J.L. 1996. "SAR interferometry - issues, techniques, applications", International Journal of Remote Sensing, 17, 1803-1835.

Gens, R. 1998. "Quality assessment of SAR interferometric data", PhD Thesis, Universtiy of Hannover, Hannover, Germany.

Gili, J. A., Corominas, J., Rius, J. 2000. "Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring", Engineering Geology, 55, 167-192.

Gülal, E. 1999. "Kalman filtreleme tekniğinin deformasyon ölçülerinin analizinde uygulanması." Journal of Yıldız Technical University 1, 10–19 (in Turkish).

Hackl M., Malservisi R., and Wdowinski S. 2009. "Strain rate patterns from dense GNSS networks". Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9, 1177–1187

Hanssen, F. R. 2005. "Satellite Radar Interferometry for Deformation Monitoring: a Priori Assessment of Feasibility and Accuracy", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 6, pages 253-260.

Hastaoğlu K.O. 2009. "GNSS Hızlı Statik Yöntem İle Heyelanların İzlenebilirliğinin Araştırılması: Sivas Koyulhisar Heyelanı Örneği", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hastaoğlu K.O., Sanlı D. U. 2011a, "Accuracy Of Gps Rapid Static Positioning: Application To Koyulhisar Landslide, Central Turkey", Survey Review (ISI), 226-240 pp., 2011 , DOI: 10.1179/003962611X12894696205145.

Hastaoğlu K.O., Sanlı D. U. 2011b. "Monitoring Koyulhisar landslide using rapid static GNSS : a strategy to remove biases from vertical velocities", Natural Hazards, DOI 10.1007/s11069-011-9728-5.

Hastaoğlu K.O, 2013, "Investigation of the groundwater effect on slow-motion landslides by using dynamic Kalman filtering method with GNSS: Koyulhisar town center", Turkish Journal of Earth Sciences (ISI) , DOI: 10.3906/yer-1210-10

Hastaoğlu K.O, 2014, "Comparing the results of PSInSAR and GNSS on slow motion Landslides, Koyulhisar,Turkey", Natural Hazards and Risk (ISI), DOI : 10.1080/19475705.2014.978822

Hatiboğlu O., 2009. "Investigation Of Koyulhisar (Sivas) Settlement Area In Terms Of Slope Instability", A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University Ankara.

Heleno S.I.N., Oliveira L.G.S. , Henriques M. J., Falcão A. P., Lima J. N.P., Cooksley G., Ferretti A., Fonseca A. M., Ferreira J. P.L, Fonseca J. F.B.D. 2011. "Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon", Remote Sensing of Environment 115 (2011) 2152–2167.

Hofmann-Wellenhof, B.,Lichtenegger, H. Ve Collins, J. 2001. "Global Positioning System Theory and Practice", Fifth Revise Edition, Springer, New York.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., ve Kampes, B.,2004. "A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers", Geophysical Research Letters, Vol.31.

Hooper, A., Segall, P., ve Zebker, H. 2007. "Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo", Galapagos, 2007. Journal of Geophysical Research pp.

Jung, H., C. ve Min, K., D. 2005. "Observing coal mining subsidence from JERS-1 permanent scatterer analysis", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS, Proceedings. 2005 IEEE International Volume 7, 25-29 July 2005 Page(s): 4578 – 4581.

Jung, H., J., Kim, S., W., Jung, H., S., Min, K., D., Won, J., S. 2007. "Satellite observtion of coal mining subsidence by persistent Scatterer analysis", Engineering Geology 92, 1-13.

Kakkuri, J. 1992. "The Stress Phenomenon in the Fennoscandian Shield, Lektire Notes", NKG Autumn Scholl in Helsinki, Helsinki.

- Kim, J., S., Kim, D., J., Kim, S., W., Won, J., S., ve Moon, W., M. 2007. "Monitoring of urban land surface subsidence using PS InSAR", *Geosciences Journal* Vol. 11, No. 1, p. 59 – 73, March.
- Kimura, H. and Yamaguchi, Y. 2000. "Detection of landslide areas using Radar Interferometry", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(3), 337–344.
- Madsen, S. N., Zebker, H. A. ve Martin, J. 1993. "Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing Techniques", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.31, pages 246-256.
- Massonnet, D.ve Feigl, K. L. 1998. "Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth Surface", *Reviews of Geophysics* Vol. 36, Number 4, November 1998, pages 441-500.
- Malet, J. P., Maquaire, O., Calais, E. 2002. The Use of Global Positioning System Techniques for The Continuous Monitoring of Landslides: Application to Yhe Super-Sauze Earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Geomorphology*, 43, 33-54.
- Matsushima, T., Takagi, A., 2000. "GNSS and EDM monitoring of Unzen volcano ground deformation". *Earth Planets Space* 52: 1015– 1018.
- Meisina, C., Zucca, F., Fosatti, D., Ceriani, M., ve Allievi, J. 2006. "Ground deformation monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)", *Engineering Geology* 88(2006) 240–25.
- Mora P., Baldi P., Casula G., Fabris M., Ghirotti M., Mazini E., Pesci A. 2003. "Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy)", *Engineering Geology* 68 (2003) 103–121.
- Moss, J. L., McGuire, W. J., Page, D. 1999. "Ground Deformation of a Potential Landslide at La Palma, Canary Islands", *Journal of Volconology and Geothermal Research*, 94, 251-256,
- Ng., A., H. ve Ge., L. 2007. "Application of persistent scatterer InSAR and GIS for urban subsidence monitoring, *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2007. IGARSS 2007. IEEE International Publication Date: 23- 28 July 2007 On page(s): 1091-1094.
- Över, S., 1996. "Analyse tectonique et etats de contrainte cenozo'iques dans la zone centrale de la Faile Kurd Anatolienne", *These Univ. Paris-Sud, Örsay*, 260 p.

Özden, S. ve Över, S., 1998. “Sivas havzası kuzey kenarında (Sakardağ) Tersiyer yaşlı gerilme durumlarının saptanmasına fay topluluklarının kinematik analiziyle bir yaklaşım”. C.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri A-Yer Bilimleri, Cilt:15, sayfa: 21-32.

Pegoraro, O. 1972. “Application de la microtectonique à un étude de neotectonique”. Le golfe Maliaque (Grèce centrale). Thèse Illème cycle, USTL Montpellier.

Perissin, D., Prati, C. and Rocca, F. 2007. “Asar parallel-track PS analysis in urban sites, Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007, IEEE International 23-28 July 2007, 1167-1170.

Peyret M., Djamour Y., Rizza M., Ritz J.-F., Hurtrez J.-E., Goudarzi M.A., Nankali H., Chéry J., Le Dortz K., Uri F. 2008. “Monitoring of the large slow Kahrod landslide in Alborz mountain range (Iran) by GNSS and SAR interferometry”, Engineering Geology 100 (2008) 131–141.

Prati, C., Rocca, F. ve Ferretti, A. 2004. “Requirement for a space mission for DInSAR and PS analysis based on past and present missions”, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS apos; 04. Proceedings. 2004 IEEE International Volume 3, 20–24 Sept. 2004 Page(s):1695 – 1698.

Price, N. J., 1966. “Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rock”, Pergamon, New York, 176 s

Perski Z., Hanssen R., Wojcik A., Wojciechowski T., 2009. “InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine”, Poland, Engineering Geology 106, 58–67

Poyraz, F. 2009. “Investigation of horizontal crustal deformation and strain accumulation for east side of North Anatolian fault zone”. PhD. Yıldız Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul, Turkey (in Turkish).

Poyraz, F. 2014. “Determining the strain upon the eastern section of the North Anatolian fault zone (NAFZ)”. Doi: 10.1007/s12517-014-1301-6, Arabian Journal of Geosciences (in press)

Poyraz, F. 2015. “Determination and testing of strain parameters in the landslide region of Koyulhisar, Turkey”, doi: 10.1179/1752270614Y.0000000152, Survey Review (in press)

Rizos, C. 1999. “Satellite Navigation and Positioning Group (SNAP): Principles and Practice of GNSS surveying, http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/GNSS/GNSS_survey/principles_GNSS.htm,

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. Ve Goldstein, R. M. 2000. "Synthetic aperture radar interferometry", Proceedings of IEEE, Vol. 88, pages 333–382.

Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A. and Grasemann, B. 1999. "Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria", Geophysical Research Letters, 26, 1629–1632.

Rott, H., Mayer, C. and Siegel, A. 2000. "On the operational potential of SAR interferometry for monitoring mass movements in Alpine areas", Proceedings of the 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2000), Munich, 23–25 May 2000, 43–46.

Schneider, D., Vanicek, P., 1991. "A New Look At The U.S Geological Survey 1970-1980 Horizontal Crustal Deformation Data Around Hollister", California, Journal Of Geophysical Research, Vol.96, No.B13, Pages 21641-21657.

Seleem T.A., Parcharidis I., Foumelis M., Kourkouli P. 2011. "Detection of ground deformation over Sharm El-Sheikh–Ras Nasrani coastal zone, South Sinai (Egypt), by using time series SAR interferometry", Journal of African Earth Sciences 59.

Sendir, H. ve Yılmaz, I., 2001." Koyulhisar (Sivas) heyelanlarına yapısal ve jeomorfolojik açıdan bakış". Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri A-Yerbilimleri, c.18, no.1, s. 47-54.

Sendir, H. and Yılmaz, I., 2002. "Structural, geomorphological and geomechanical aspects of the Koyulhisar landslides in the North Anatolian Fault Zone (Sivas-Turkey)". Environmental Geology, 42 (1), 52-60.

Singhroy, V., Mattar, K.E. and Gray, A.L. 1998. "Landslide characteristics in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images", Advanced Space Research, 3, 465–476.

Sousa J.J., Ruiz A.M., Hanssen R.F., Bastos L, Gil A.J. 2010. "Galindo-Zaldívar J., Sanz de Galdeano C., PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain)", Journal of Geodynamics 49 (2010) 181–189.

Squarzoni C., Delacourt C., Allemand P. 2005. "Differential single-frequency GNSS monitoring of the La Valette landslide (French Alps), Engineering Geology 79 (2005) 215–229.

Strozzi, T., Wegmuller, U., Werner, C.,L., Wiesmann, A. ve Spreckles, V. 2003. "JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring", IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing, vol.41, no.7.

Stewart,M. and Rizos, C. 2002. "GNSS Projects: Some planning issues". Manual of Geospatial Science and Technology, J. D. Bossler et al., ed., Taylor&Francis, London and Newyork, pp 162-182.

Tatar O., Aykanat D., Koçbulut F., Yılmaz I., Sendir H.,Kürçer A., Sağlam B. 2000. "Koyulhisar İlçe Merkezi ve İlçe Emniyet Amirliği Hizmet Binası Heyelan Etüd ve Değerlendirme Raporu", Sivas.

Tatar v.d 2009, "Aktif Fay Zonları ve Doğal Afetler: Kuzey Anadolu Fay Zonu Üzerinde Kelkit Vadisi Boyunca Yer Alan Yerleşim Alanlarının Doğal Afet Risk Analizi ve Afet Bilgi Sisteminin Oluşturulması", Devlet Planlama Teşkilatı 2006K-120220 Nolu Proje.

Temiz, H,. 1994. "Sivas Tersiyer havzasının Kemah (Erzincan) ve Hafik (Sivas) yörelerindeki tektonostratigrafisi ve tektonik deformasyon biçimi". C.O. Fen Bil. Enst. Doktora Tezi, 239 Sayfa (Yayımlanmamış).

Terlemez, I. and Yılmaz, A., 1980. "Ünye-Ordu-Resadiye-Koyulhisar- Karaçayır-Hafik arasında kalan bölgesinin jeolojisi", M.T.A. Rp. No: 6671.

Terzioğlu, N., 1986. "Reşadiye-Gölköy ve Koyulhisar arasındaki Tersiyer-Kuvaterner yaşlı volkanitlerinin genel stratigrafik özellikleri", Cumhuriyet Univ., Müh, Fak, Dergisi, Yerbilimleri, 3/1, 3- 13.

Toprak, G. 1988. "Tectonic and stratigraphic characterstics of the Koyulhisar segment of the North Anatolian Fault Zone (Sivas-Turkey)". A Ph. D. Thesis,

Toprak, V. 1988. "Neotectonic characteristics of the North Anatolian Fault Zone between Koyulhisar and Suşehri (NE Turkey)", METU Jr. Pure and Applied Sciences, 21, 1-3, 155-168.

Uysal, S., 1995. "Koyulhisar (Sivas) yöresinin jeolojisi", M.T.A. Rp No: 9838.

Vachon, P. W., Geudtner, D., Gray, A. L., & Touzi, R. 1995. "ERS-1 synthetic aperture radar repeat-pass interferometry studies—implications for Radarsat", Canadian Journal of Remote Sensing, 21(4), 441-454.

- Vanicek, P., Thapa, K. Ve Schneider, D., 1981. "The Use of Strain to Identify Incompatible Observations and Constraints in Horizontal Geodetic Networks", *Manuscripta Geodaetica*, 6, 257-281.
- Varnes, D. J. 1978. "Slope movement types and processes". "In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control" (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.).
- Vergely, P., Sassi, W. ve Carey-Gailhardis, E., 1987. "Analyse graphique des failles a l'aide de focalisations de stries". *Bull..Soc. Geol.*, 2, 395-402
- Vilardo, G., Ventura, G., Terranova, C., Matano, F. Ve Nardò, S. 2009. "Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry", *Remote Sensing of Environment*, vol 113, pages 197-212.
- Vietmeier, J., Wagner, W. and Dikau, R. 1999. "Monitoring moderate slope movements (landslides) in the southern French Alps using differential SAR interferometry", *Proceedings of Fringe '99 Workshop: Advancing ERS SAR Interferometry from Applications towards Operations*, Liège, Belgium.
- Wallace, R. E., 1958. "Geometry of shearing stress and relation to faulting". *J. Geol.* 59, 118.
- Wasowski, J. and Gostelow, P. 1999. "Engineering geology landslide investigations and SAR interferometry", *Proceedings of FRINGE '99*, Liège, Belgium.
- Walter, D., Hoffmann, J., Kampes, B., ve Sroka, A. 2004. "Radar Interferometric Analysis of Mining Induced Surface Subsidence using Permanent Scatterers" 2004 Envisat & ERS Symposium 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.
- Yalçinkaya M., Bayrak T. 2005. "Comparison of Static, Kinematic and Dynamic Geodetic Deformation Models for Kutlugun Landslide in Northeastern Turkey", *Natural Hazards*, 34: 91–110.
- Yilmaz, I. 2009. "A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68, 297– 306.

Zebker, H.A., Werner, C.L., Rosen, P.A., Hensley S. 1994. "Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 12 No.4.

Zebker, H.A. ve Goldstein, R. M. 1986. "Topographic mapping from interferometer SAR observations", Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No. B5, 4993–5000.