

139222

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**HEYELANLAR İÇİN BİR DİNAMİK DEFORMASYON VE BİR DİNAMİK
HAREKET YÜZEYİ MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

Harita Yük. Müh. Temel BAYRAK

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24.01.2003

Tezin Savunma Tarihi : 15.05.2003

138222

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Mualla YALÇINKAYA

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Aslan DİLAVER

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fikri BULUT

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tefvik AYAN

Jüri Üyesi : Prof. Dr. Celalettin KARAALI

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

TRABZON 2003

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Doktora tezi danışmanlığımı üstlenerek gerek konu seçimi, gerekse çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam sayın Y. Doç. Dr. Mualla YALÇINKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim. Doktora tez çalışmasının izlenmesi sırasında bilimsel desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım sayın Prof. Dr. Aslan DİLİVER ve Prof. Dr. Fikri BULUT'a çok teşekkür ederim.

Dinamik deformasyon modelinin fonksiyonel yapısının oluşturulmasındaki değerli katkılarından dolayı sayın Prof. Dr. Mahir RESULOV, Prof. Dr. Hızır ÖNSOY, Doç. Dr. Temel KAYIKÇIOĞLU ve Doç. Dr. Atilla BİLGİN'e teşekkürü bir borç bilirim. GPS konusunda teknik destek sağlayan sayın Doç. Dr. Ertan GÖKALP'e çok teşekkür ederim. Arazide jeolojik ve jeofizik çalışmaların yapılmasında yardımcı olan Arş. Gör. Ali YALÇIN, Y. Doç. Dr. Hakan KARSLI ve Arş. Gör. Sedat YILMAZ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca jeolojik çalışmalarda yol gösteren sayın Prof. Dr. Remzi DİLEK ve Y. Doç. Dr. Fatma GÜLTEKİN'e de teşekkür ederim.

Arazide yapılan jeodezik çalışmalarda yardımcı olan sayın Arş. Gör. Oğuz GÜNGÖR, Arş. Gör. Levent TAŞÇI, Arş. Gör. Mustafa ATASOY, Arş. Gör. Dr. Osman DEMİR, Arş. Gör. Fevzi KARSLI, Arş. Gör. Selçuk REİS, Arş. Gör. Kemal YURT, Arş. Gör. Mehmet ALKAN, Arş. Gör. Faruk YILDIRIM, Arş. Gör. Emine TANIR, Arş. Gör. Kamil TEKE ve Arş. Gör. Mehmet ÇETE'ye çok teşekkür ederim.

Çalışmanın resmi işlemlerinin sorunsuz yürütmesinde katkıları olan K.T.Ü. Fen Bilimleri ve Öğrenci İşleri çalışanlarına, teze maddi kaynak sağlayan K.T.Ü. Araştırma Fonuna ve çalışanlarına çok teşekkür ederim. Ayrıca tez aşaması boyunca bana sonsuz sabır gösteren ve desteğini esirgemeyen sevgili eşime ve güzel kızlarıma şükranlarımı sunarım.

Temel BAYRAK

Trabzon 2003

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Heyelan.....	5
1.2.1. Heyelanların Nedenleri.....	5
1.2.2. Heyelan Tipleri ve Heyelanlar Sonucu Oluşan Hareketler.....	8
1.2.3. Heyelanların Sosyo-Ekonomik Etkileri.....	13
1.2.4. Heyelanların İzlenmesi İçin Yöntemler ve Teknikler.....	14
1.3. Global Konum Belirleme (GPS).....	16
1.3.1. GPS Birimleri.....	17
1.3.2. GPS Ölçüleri.....	17
1.3.3. GPS Gözlemleri İçin Referans Koordinat Sistemi (WGS-84).....	18
1.3.4. GPS Ölçü Yöntemleri ve Hata Kaynakları.....	19
1.4. GPS Ağlarının Dengelenmesi.....	20
1.4.1. GPS Ağlarının Serbest Dengelenmesi.....	20
1.5. İstatistik Testler.....	26
1.5.1. Model Hipotezinin Testi.....	26
1.5.2. Uyuşumsuz Ölçüler Testi.....	28
1.5.3. Genişletilmiş Fonksiyonel Modelin Testi.....	29
1.6. Deformasyon Modelleri.....	30
1.6.1. Statik Deformasyon Modeli.....	34
1.6.2. Kinematik Deformasyon Modelleri.....	39

1.6.2.1.	Kinematik Tek Nokta Modeli.....	39
1.6.2.1.1.	Kalman-Filtreleme Tekniği.....	41
1.6.2.1.2.	Kalman-Filtreleme Tekniğinin Global Testi.....	47
1.6.2.1.3.	Hareket Parametrelerinin Anlamlılık Testi.....	48
1.6.2.1.4.	Kalman-Filtreleme Tekniğinde Başlangıç Periyodunda Yapılacak İşlemeler.....	49
1.6.2.2.	Kinematik Yüzey Modeli.....	52
1.6.3.	Dinamik Deformasyon Modeli.....	54
1.6.3.1.	Yeraltı Suyu Seviye Değişimlerini Belirleme Yöntemleri.....	56
1.6.3.1.1.	Yeraltı Su Seviyelerinin Jeolojik Yöntemle Belirlenmesi.....	56
1.6.3.1.2.	Yeraltı Su Seviyelerinin Jeofizik Düşey Elektrik Sondajı (DES) Yöntemi İle Belirlenmesi.....	57
1.6.3.1.3.	Multiquadric Enterpolasyon.....	59
1.6.3.2.	Heyelan İçin Dinamik Tek Nokta Modelinin Oluşturulması.....	60
1.6.3.3.	Heyelan İçin Dinamik Yüzey Modelinin Oluşturulması.....	64
2.	YAPILAN ALIşMALAR.....	66
2.1.	Ön alışmalar.....	66
2.1.1.	Araştırma Alanının Genel Tanıtımı.....	66
2.1.2.	Bölgedeki Heyelanın Tanımı ve Sınıflaması.....	67
2.1.3.	Bölgedeki Heyelana Neden Olan Etkenler.....	68
2.1.4.	Meteorolojik alışmalar.....	69
2.2.	Jeodezik alışmalar.....	70
2.2.1.	Jeodezik Deformasyon Ağının Tasarımı ve Tesisi.....	71
2.2.2.	GPS Ölçülerin Yapılması ve Değerlendirilmesi.....	72
2.3.	Jeolojik alışmalar.....	74
2.4.	Jeofizik alışmalar.....	77
2.5.	Jeodezik Ağ Noktalarının Yer Altı Su Seviyelerinin Hesaplanması.....	78
3.	BULGULAR.....	80
3.1.	Deformasyon Analizi.....	80
3.1.1.	Statik Deformasyon Modeli (θ^2 -Ölçütü) İle Deformasyon Analizi	81
3.1.2.	Kinematik Deformasyon Modelleri İle Deformasyon Analizi.....	91
3.1.2.1.	Kinematik Tek Nokta Modeli İle Deformasyon Analizi.....	91
3.1.2.2.	Kinematik Yüzey Modeli İle Deformasyon Analizi.....	117

3.1.3.	Dinamik Deformasyon Modelleri İle Deformasyon Analizi.....	121
3.1.3.1.	Dinamik Tek Nokta Modeli İle Deformasyon Analizi.....	121
3.1.3.2.	Dinamik Yüzey Modeli İle Deformasyon Analizi.....	144
4.	İRDELEME.....	149
5.	SONUÇLAR.....	163
6.	ÖNERİLER.....	168
7.	KAYNAKLAR.....	171
	ÖZGEÇMİŞ.....	181



ÖZET

Günümüzde artık, deformasyon belirleme uygulamalarında, araştırmaya konu olan objelerin davranışlarının analiz edilmesi önem kazanmıştır. Bu tür istekler, deformasyon araştırmalarında hareketin nedenlerini içeren dinamik deformasyon analizlerinin, basit geometrik (statik) ve zamansal (kinematik) deformasyon analiz yöntemlerinin yerini almaya başlamasına neden olmuştur. Bu gelişmelere paralel olarak bu çalışmada, heyelan davranışlarının analizi için bir dinamik deformasyon ve bir dinamik yüzey modeli oluşturulması amaçlanmıştır.

Çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ili, Çağlayan ilçesi, Kutlugün köyü uygulama alanı olarak seçilmiştir. Dinamik deformasyon modelini oluşturmak amacıyla öncelikle bölgede, jeolojik ve jeofizik çalışmalar yapılarak oluşan heyelanın tipi, güncel sınırları ve nedenleri belirlenmiştir. Bölgede heyelanın en önemli nedeni olan yer altı 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 GPS gözlemleri yapılmıştır. Aynı periyotlarda, jeolojik ve jeofizik gözlemlerle yer altı suyu seviyeleri de ölçülmüştür. Dinamik modelin oluşturulmasında ön bilgi edinmek için daha basit modeller olan statik deformasyon modeli (θ^2 -ölçütü) ve kinematik deformasyon (kinematik tek nokta, kinematik yüzey) modelleri ile deformasyon analizi yapılmıştır. Bu model sonuçları ve yer altı suyu seviye değişimleri dikkate alınarak heyelan için dinamik deformasyon modelleri (dinamik tek nokta, dinamik yüzey) oluşturulmuştur. Heyelan oluşumunda yeraltı suyunun değişim etkisinin çok önemli olduğu dinamik model sonuçlarından görülmüştür. Böylece hareketler fiziksel gerçeklere göre daha uygun yorumlanabilmektedir. Dinamik modelle hareket belirlemenin üstünlüklerinin yanında dezavantajlarının olduğu da görülmüştür. Bu nedenle deformasyon araştırması yapılan probleme göre deformasyon modelinin seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan, Yeraltı Suyu Değişimi, Dinamik Model, Statik Model, Kinematik Model, Kalman-Filtreleme, Kinematik Yüzey Modeli, Dinamik Yüzey Modeli

SUMMARY

Developing A Dynamic Deformation Model and A Dynamic Movement Surface Model for Landslides

Nowadays, analysis of object behaviors has been a common practice in deformation determining applications. These type requests have caused that dynamic deformation analysis methods regarding causative forces have started taking the place of simple geometrical (static) and temporal (kinematic) deformation analysis methods. As parallel these developments, in this study, it was aimed to develop a dynamic deformation and a dynamic surface model for analysis of temporal behaviors of landslides.

In the study, Kutlugün Village in Maçka County in the province of Trabzon in the Eastern Black Sea Region of Turkey was selected as application area. To form dynamic deformation model, firstly, type, current border and causes of landslides were determined by geological and geophysical investigations. Underground water level changes being the most important cause of landslides in study area were regarded as causative force in the course of developing dynamic model. A geodetic deformation network was constructed for deformation investigations according to current borders of landslides. Measurement times were determined by meteorological data and a six-period GPS measurement was made at these times. At the same time, underground water levels were also measured by geological and geophysical measurements. To obtain preliminary information for dynamic models, deformation analyses were made by static (θ^2 -criteration) and kinematic (kinematic single point, kinematic surface) models. Then, dynamic models (dynamic single point, dynamic surface) were developed regarding these model results and under ground water level changes. It was seen from results of dynamic models that effect of underground water level changes was more effective in occurrence of landslides. In this manner, movements could be interpreted more appropriate to physical realities. It was also seen that dynamic models have some disadvantage. For this reason, it was concluded that selection of deformation model has to be made according to importance of phenomenon.

Key Words: Landslides, Underground Water Level Changes, Dynamic Model, Static Model, Kinematic Model, Kalman-Filter, Kinematic Surface Model, Dynamic Surface Model

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Kayaçlarda düzlemsel kayma.....	9
Şekil 2. Farklı litolojideki kayaçlarda yayılma türü kitle hareketi.....	9
Şekil 3. Değişik türde düzlemsel kaymalar.....	10
Şekil 4. Doğada görülen eğri yüzeyli kayma türleri.....	11
Şekil 5. Tipik bir heyelan (eğrisel yüzeyli kayma) blok diyagramı ve çeşitli kısımlara verilen isimler.....	11
Şekil 6. Heyelanlarda hareket mekanizmaları.....	12
Şekil 7. Heyelanlarda hareket eden kısımda dönme hareketi.....	13
Şekil 8. WGS-84 koordinat sistemi.....	18
Şekil 9. Öncül kestirim (prediksiyon), filtre, yumuşatma aşamaları ve aralarındaki ilişki.....	42
Şekil 10. Kalman-Filtreleme tekniğinin iş akış şeması.....	46
Şekil 11. Sondaj kuyularından yer altı su seviyesi ölçüsü.....	56
Şekil 12. DES yönteminde kullanılan ekipmanlar ve ölçü düzeneği.....	58
Şekil 13. Schlumberger elektrot dizilimi.....	58
Şekil 14. Konum-yer altı suyu değişim ilişkisi.....	61
Şekil 15. Uygulama arazisinin yeri.....	66
Şekil 16. Yavaş akma (Creep) heyelan tipi	68
Şekil 17. Heyelanın; istinat duvarı, içme suyu boru hattı ve karayolu üzerindeki etkileri.....	69
Şekil 18. Bölgenin ölçü periyot aralığındaki yağış ve sıcaklık değişimi.....	70
Şekil 19. Jeodezik deformasyon ağı.....	71
Şekil 20. Uydu görünüşü.....	73
Şekil 21. DOP değerlerinin dağılımı.....	73
Şekil 22. Uygulama arazisinin jeolojik ve jeomorfolojik haritası.....	75
Şekil 23. Yüzeysel hareketler ve onların noktalar üzerindeki olası etkileri.....	76
Şekil 24. Kasım 2000 Verilerinden JFZ1 noktasında görünür öz direnç ve elektrot aralığına göre çizilen Schlumberger eğrisinin otomatik yorumu.....	77
Şekil 25. Ölçü periyotlarına göre ağ noktalarındaki yer altı suyu değişimleri.....	79

Şekil 26.	Kas.2000–Şub.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	83
Şekil 27.	Kas.2000–May.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	83
Şekil 28.	Kas.2000–Ağu.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	84
Şekil 29.	Kas.2000–Kas.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	84
Şekil 30.	Kas.2000–Şub.2002 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	85
Şekil 31.	Tüm noktaların statik modelle hesaplanmış x yönündeki hareket-yağış ilişkileri.....	86
Şekil 32.	Tüm noktaların statik modelle hesaplanmış y yönündeki hareket-yağış ilişkileri.....	86
Şekil 33.	Tüm noktaların statik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket-yağış ilişkileri.....	87
Şekil 34.	1 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	87
Şekil 35.	3 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	88
Şekil 36.	4 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	88
Şekil 37.	5 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	88
Şekil 38.	6 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	89
Şekil 39.	7 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	89
Şekil 40.	9 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi..	89
Şekil 41.	11 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi	90
Şekil 42.	12 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi	90
Şekil 43.	14 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi	90
Şekil 44.	Kas.00–Şub.01–May.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	98
Şekil 45.	Kas.00–Şub.01–May.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	98
Şekil 46.	Kas.00–May.01–Ağu.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	99
Şekil 47.	Kas.00–May.01–Ağu.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	99
Şekil 48.	Kas.00–Ağu.01–Kas.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	100

Şekil 49.	Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	100
Şekil 50.	Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	101
Şekil 51.	Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	101
Şekil 52.	Tüm noktaların Kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi.....	102
Şekil 53.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi.....	102
Şekil 54.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi.....	103
Şekil 55.	Tüm noktaların Kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi.....	103
Şekil 56.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi.....	104
Şekil 57.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi.....	104
Şekil 58.	Tüm noktaların Kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi.....	105
Şekil 59.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi.....	105
Şekil 60.	Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi.....	106
Şekil 61.	1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	107
Şekil 62.	1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	107
Şekil 63.	1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	107
Şekil 64.	3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	108
Şekil 65.	3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	108
Şekil 66.	3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	108
Şekil 67.	4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	109
Şekil 68.	4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	109
Şekil 69.	4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	109
Şekil 70.	5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	110

Şekil 71.	5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	110
Şekil 72.	5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	110
Şekil 73.	6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	111
Şekil 74.	6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	111
Şekil 75.	6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	111
Şekil 76.	7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	112
Şekil 77.	7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	112
Şekil 78.	7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	112
Şekil 79.	9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	113
Şekil 80.	9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	113
Şekil 81.	9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	113
Şekil 82.	11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	114
Şekil 83.	11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	114
Şekil 84.	11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	114
Şekil 85.	12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	115
Şekil 86.	12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	115
Şekil 87.	12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	115
Şekil 88.	14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi.....	116
Şekil 89.	14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi.....	116
Şekil 90.	14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi.....	116
Şekil 91.	Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi.....	118
Şekil 92.	Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi.....	119
Şekil 93.	Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi.....	120
Şekil 94.	Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi.....	121
Şekil 95.	Kas.00–Şub.01–May.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	130

Şekil 96.	Kas.00-Şub.01-May.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	130
Şekil 97.	Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	131
Şekil 98.	Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	131
Şekil 99.	Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	132
Şekil 100.	Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	132
Şekil 101.	Kas.00-Kas.01-Şub.02 noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri.....	133
Şekil 102.	Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları.....	133
Şekil 103.	1 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	134
Şekil 104.	3 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	135
Şekil 105.	4 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	136
Şekil 106.	5 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	137
Şekil 107.	6 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	138
Şekil 108.	7 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	139
Şekil 109.	9 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	140
Şekil 110.	11 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	141
Şekil 111.	12 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	142

Şekil 112.	14 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi.....	143
Şekil 113.	Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi.....	145
Şekil 114.	Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi.....	146
Şekil 115.	Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi.....	147
Şekil 116.	Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi.....	148



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Heyelan hareketlerinin ölçülmesinde kullanılan temel yöntemler ve doğrulukları.....	14
Tablo 2. Deformasyon modellerinin sınıflandırılması.....	33
Tablo 3. Yer altı suyunun değişiminin zamana göre davranışı.....	60
Tablo 4. GPS ağ ölçme düzeni.....	74
Tablo 5. Her periyottaki ölçülerin serbest dengeleme sonuçları.....	81
Tablo 6. Tüm ölçü periyot gruplarındaki statik deformasyon analizi sonuçları.....	82
Tablo 7. Kinematik modelin (konum+hız+ivme) Kalman-filtreleme yöntemi ile çözümünün istatistik test sonuçları	92
Tablo 8. Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları.....	93
Tablo 9. Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları.....	94
Tablo 10. Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları.....	95
Tablo 11. Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları.....	96
Tablo 12. Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	117
Tablo 13. Şubat 2001-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	118
Tablo 14. Mayıs 2001-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	119
Tablo 15. Ağustos 2001-Kasım 2001-Şubat 2002 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	120
Tablo 16. Dinamik tek nokta modelinin (konum+hız+ivme+yere altı suyu) istatistik test sonuçları.....	122
Tablo 17. Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları.....	124

Tablo 18.	Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları.....	125
Tablo 19.	Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları.....	126
Tablo 20.	Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları.....	128
Tablo 21.	Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	145
Tablo 22.	Şubat 2001-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	146
Tablo 23.	Mayıs 2001-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	147
Tablo 24.	Ağustos 2001-Kasım 2001 – Şubat 2002 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları.....	148

SEMBOLLER DİZİNİ

a	: İvme parametresi
A_{Δ}	: GPS ağı katsayılar matrisi
b	: Yer altı suyu parametresi
d	: Datum parametre sayısı
f	: Serbestlik derecesi
$F(x, y, z)$	: Kapalı hız fonksiyonu
G	: Dönüşüm parametre katsayılar matrisi
I	: Birim matris
K	: Kalman kazanç (gain) matrisi
K_{xx}	: Dengeli koordinatların varyans-kovaryans matrisi
K_{Δ}	: Koordinat fark ölçülerinin varyans-kovaryans matrisi
$-\ell_{\Delta}$	: Ötelenmiş gözlemler vektörü
$\overline{m_g}$	: Birim ölçünün ortalama hatasının genişletilmiş modelden hesaplanan değeri
m_0	: Birim ölçünün ortalama hatasının soncul değeri
m_x, m_y, m_z	: Dengeli koordinatların duyarlılığı
$m_{\Delta x}, m_{\Delta y}, m_{\Delta z}$	: Dengeli koordinat farklarının duyarlılığı
p	: Nokta sayısı
P_{Δ}	: Koordinat fark ölçülerinin ağırlık matrisi
q	: Yüzey polinom katsayıları
ρ_a	: Görünür öz direnç
Q_d	: Fark vektörüne ait kofaktörler matrisi
Q_{ss}	: Noktaların konumlarının bozucu bileşenleri için kovaryans matrisi
Q_{vv}	: düzeltmelerin ters ağırlık matrisi
Q_{ww}	: Bozucu etki ivmesinin kovaryans matrisi
Q_{xx}	: Dengeli koordinatların ters ağırlıkları matrisi

$Q_{\overline{Y}\overline{Y}}$	: Kalman-Filtreleme’de prediksyon denkleminin kovaryans matrisi
Q_{Δ}	: Dengeli ölçülerin ters ağırlıkları matrisi
s_0	: Birim ölçünün ortalama hatasının öncül değeri
T	: Prediksyon (yeni durumu elde etme) matrisi
u	: Koordinat bilinmeyenlerinin sayısı
v	: Hız parametresi
v_{Δ}	: Düzeltmeler
$(X,Y,Z)_{WGS-84}$	: GPS’den elde edilen mutlak koordinatlar
$(\Delta X,\Delta Y,\Delta Z)_{WGS-84}$	: GPS’den elde edilen bağıl koordinatlar
$\overline{Y}$	: Kalman-Filtreleme’de prediksyon (öncül kestirim) durum (konum, hız, ivme) vektörü
$\hat{Y}$	: Kalman-Filtreleme’de durum (konum, hız, ivme) vektörü
δX	: Dengeleme bilinmeyenleri vektörü
Δt	: Zaman farkı
ΔS	: Yer altı suyu değişimi
ΔV	: Potansiyel farkı
$\overline{\Delta X}$	: Dengeli koordinat farkları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde, özellikle Karadeniz Bölgesinin hemen hemen tamamı ile Marmara, Doğu Anadolu ve Akdeniz Bölgelerinin geniş alanlarında sıklıkla gözlenen heyelanlar, neden oldukları can ve mal kaybı yönüyle depremlerden sonra ikinci önemli doğal afetlerdir. K.T.Ü. heyelan araştırma merkezinin verilerine göre Türkiye’de 1959-1994 yılları arasında doğal afetlerden zarar gören konutların sayısı 423.000’dir ve bunların %53’ü (211.500 konut) depremlerden, %27’si (114.210 konut) heyelanlardan dolayı kullanılamaz hale gelmiştir. Ülkemizin değişik yörelerinde, değişik zamanlarda meydana gelen heyelanlar binaların yıkılmasına, alt yapıların, tarım ve orman alanlarının kullanılamaz hale gelmesine, çok daha önemlisi insanların hayatlarını yitirmesine neden olmaktadır.

Ülkemizde, oluşma sıklığı ve verdiği zararlar açısından heyelandan en fazla etkilenen bölgeler Marmara ve Karadeniz’dir. Marmara bölgesi tektonik özellikleri nedeniyle zemin hareketlerine uygun bir ortama sahiptir. Bu bölgede yamaç hareketleri en fazla Büyük Çekmece Gölü kıyıları, İstanbul Boğazı ve Yalova çevresinde görülmektedir. Bölgede, İ.T.Ü. Jeodezi Bölümü tarafından, 1999-2001 yılları arasında İstanbul’un Ambarlı limanı çevresi ile 1990-1991 yılları arasında Büyük Çekmece Gölü kıyılarında yürütülen çalışmalar jeodezik yöntemlerle yapılan en güncel heyelan izleme projeleridir.

Karadeniz kıyısında, İnebolu-Hopa arasındaki yamaç hareketleri önde gelen jeomorfolojik olaylar olarak tanımlanabilir. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi’ndeki zeminler dik topoğrafya nedeniyle bir süre sonra hareket etmekte ve bu hareketler yol, temel kazısı gibi mühendislik çalışmaları ve yağış sonucu hızlanmaktadır. Doğu Karadeniz bölgesindeki heyelanlar %42’si su, %26’sı ayrışma, %26’sı kazı, %4’ü bitki değişikliği ve %2’si diğer nedenlerden dolayı oluşmaktadır. Yıllık yağış ortalamaları 809 ile 2338 mm arasında değişen bu bölge, Türkiye’nin en fazla yağış alan bölgesidir. Bölgede heyelan sayısı fazla, ancak hareket eden zemin ve kayaç hacmi düşüktür (Tarhan, 1991; Önalp, 1991).

Doğu Karadeniz Bölgesi’nde geçmişte görülen en önemli heyelanlar, 1929 Sürmene ve Of, 1950 Trabzon Sera, 1979 Rize Kanlıdere ve 1988 Trabzon Maçka Çatak heyelanlarıdır. Güncel heyelanlara örnek olarak; 1998 Köprübaşı heyelanı (100 bina

yıkıldı, 50 ölü), 1993 Trabzon Beşirli Mahallesi heyelanı (1 bina çöktü), 1998 Trabzon heyelanı (43 ölü), 2001 Hopa heyelanı (1 ölü), 3 Kasım 2001 Rize heyelanı (4 ölü, 100 köy yolu kapandı, 3 ev yıkıldı, 2 trilyonluk maddi zarar meydana geldi), 2001 Rize Güneysu heyelanı (8 ev yıkıldı), 2002 Ordu Ulubey heyelanı (23 bina hasar gördü, 12 köye bağlanan yol çöktü), 2002 Gümüşhane Özkürtün heyelanı (9 ev ve 1 okul yıkıldı), 2002 Rize heyelanı (23 ölü) verilebilir. Sıkça görülen heyelanlara ve olumsuzluklarına rağmen, bölgedeki heyelanlar ve onların verdiği zararlar konusunda sağlıklı istatistik bilgileri yoktur.

Doğu Karadeniz Bölgesi'ndeki topoğrafik yapının dağlık olması ve dağların hemen kıyından başlaması nedeniyle bölgede yerleşim alanları sınırlıdır. Ekonomik büyüme ve nüfus artışı, dağ eteklerinin yerleşime açılmasını gerektirmiştir. Bu yerleşim alanları, genelde doğal ya da insan kaynaklı oluşmuş heyelan riski yüksek yamaçlardır. Bölgede, bu tür yamaçlarda oluşan heyelanların jeodezik yöntemlerle izlenmesi ile ilgili şimdiye kadar yapılmış çalışma yoktur. Yani Doğu Karadeniz Bölgesi'nde en büyük doğal afet olan heyelanların izlenmesi çalışmalarında jeodezik verilerin katkısı göz ardı edilmiştir.

Heyelan çalışmaları konum-zaman ilişkisi, sosyo-ekonomik kayıplar, çevresel etkiler, zararların azaltılmasıyla ilgili alanları kapsayan disiplinler arası çalışmayı gerektiren bir konudur. Heyelanların belirlenmesinde jeologlar, jeofizikçiler ve zemin mekanikçiler genelde kütlelerin kayıp kaymayacakları konusuyla ilgilenmişler ve kayma olasılığına karşı koruyucu önlemler almışlardır. Halbuki heyelanları önleme ve zararlarını azaltma çalışmalarında kütlelerin ne kadar hareket edeceği, hangi yönde hareket edeceği, hatta hareketin hızının ve ivmesinin hareket nedeni dikkate alınarak belirlenmesi gerekir. Diğer bir deyişle üç boyutlu, zamana ve konuma bağlı karmaşık bir problem olan heyelanların belirlenmesinde farklı bilim dallarının beraber çalışması ve sonuçların birlikte yorumlanması gerekir.

Bu çalışmanın amacı, heyelanlar için hareketin nedeninin de dikkate alındığı bir dinamik deformasyon modeli oluşturmak ve hareket parametrelerini bu modelle belirlemektir. Ayrıca bu modelin bulgularıyla diğer disiplinlerin bulgularının birlikte irdelenmesi ile heyelan sonucu oluşan hareketlerin daha gerçekçi yorumlanabileceğinin gösterilmesi ve heyelan izleme çalışmalarında jeodezik yöntemlerin kullanılmasının gerekliliğinin vurgulanması amaçlanmıştır.

Jeodezik deformasyon analizinde kullanılacak deformasyon modelinin seçimi önemlidir. Uygun bir deformasyon modeli deformasyon olayını doğru bir şekilde

tanımlarken yetersiz bir model deformasyon analizinin yanlış yapılmasına neden olabilir. Deformasyon irdelemesi yapılan probleme göre, bazen basit deformasyon modelleri araştırılan objenin deformasyonunu tanımlamak için yetersiz kalabilir. Bu durumlarda kompleks deformasyon modelleri tercih edilmelidir. Heyelanın da kompleks bir olay olması nedeniyle bu çalışmada hareketlerin belirlenmesi için en genel model olan dinamik deformasyon modeli kullanılmıştır. Dinamik deformasyon modelinde, hareketi oluşturan dış etkenler de hareket modelinin içine katılarak hareket, hem zamana, hem konuma, hem de harekete neden olan dış etkenlere bağlı olarak belirlenir. Dinamik modelin oluşturulması için farklı bilim dallarının beraber çalışması gerekmektedir. Farklı bilim dallarının bir araya gelmesindeki zorluk ve modelin kompleks olması nedeniyle dinamik model ile hareket belirlenmesi konusunda günümüze kadar az çalışma yapılmıştır.

Çalışmada, Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ili, Çağlayan ilçesi Kutlugün köyü heyelan araştırmaları uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bu araştırmada, jeodezi, jeoloji ve jeofizik bilim dalları birlikte çalışarak heyelan hareketlerinin belirlenmesi ve yorumlaması yapılmıştır.

Dinamik modeli oluşturmak için öncelikle hareketi belirlenecek objeye etki eden hareket nedenlerinin belirlenmesi gerekir. Bu nedenle araştırmada, öncelikle bölgede Jeolojik ve Jeofizik çalışmalar yapılarak oluşan heyelanın en önemli nedeninin yer altı suyu seviye değişimleri olduğu saptanmıştır. Yer altı suyu, harekete etkiyen kuvvet olarak ele alınmış ve dinamik olarak modellenmiştir.

Bölgede jeolojik incelemeler yapılarak, heyelanın güncel durumunu gösteren jeomorfolojik harita çizilmiştir. Bu haritaya göre heyelan bölgesi ve çevresini kapsayan bir jeodezik deformasyon ağı tesis edilmiştir. Deformasyonları belirlemek için ağda yapılacak periyodik ölçülere gereksinim vardır. Periyodik ölçülerin ne zaman yapılması gerektiği önemlidir. Bölgenin çok yağış alması ve yağışında yer altı suyu değişimini etkilemesi nedeniyle ölçü periyot zamanları, meteorolojik veriler yardımıyla Kasım, Şubat, Mayıs ve Ağustos ayları olarak saptanmıştır. Jeodezik ağda, belirlenen bu aylarda 2000-2002 arasında 6 periyotta GPS (Global Positioning System) ölçüleri yapılmıştır. Bu ölçüler değerlendirilerek ağ noktalarının koordinatları (x, y, z) ile varyans-kovaryans matrisleri elde edilmiştir.

Dinamik deformasyon modelini oluşturabilmek için her ölçü periyodunda noktaların yeraltı suyu seviyelerinin de belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, arazinin uygun yerlerinde açılmış olan sondaj kuyularında ve seçilmiş olan jeofizik noktalarında yapılan

ölçülerle yeraltı su seviyeleri belirlenmiştir. Bu ölçüler yardımıyla jeodezik ağı her noktasının yeraltı su seviyeleri hesaplanmıştır.

Dinamik deformasyon modeliyle hareketlerin belirlenmesinden önce deformasyonun seyri ve şiddeti konusunda bir ön bilgi elde edebilmek için daha basit modeller olan statik ve kinematik modellerle de deformasyonlar belirlenmiştir. Uygulamada, statik modellerden ayırma gücü yüksek olan θ^2 -ölçütü ile zamana ve diğer dış etkenlere bağlı olmadan noktaların yalnızca konum hareketleri belirlenmiştir. Zamana ve konuma bağlı bir fonksiyon olan Kinematik tek nokta modeliyle ise noktaların hareketleri, hareketlerin hızları ve ivmeleri belirlenmiştir. Bu modelin çözümünde az ölçü periyoduyla hesaplama yapılabilen Kalman-filtreleme tekniği kullanılmıştır. Uygulamada ayrıca zamana bağlı bir yüzey fonksiyonuyla bölgenin kinematik hareket yüzeyi de belirlenmiştir.

Uygulamada, dinamik deformasyon modeli bölgedeki heyelan oluşumunda önemli bir dinamik etken olan yer altı suyu seviye değişimleri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Ayrıca statik ve kinematik modellerden elde edilen sonuçlar da modelin oluşturulmasında ön bilgi olarak kullanılmıştır. Böylece konuma, zamana ve dış etkenlere bağlı olarak oluşturulan bir dinamik tek nokta modeliyle nokta hareket parametreleri, bir dinamik yüzey modeliyle de dinamik hareket yüzeyleri belirlenmiştir.

Dinamik tek nokta modelindeki bilinmeyenlerin aynı anda belirlendiği durumlarda model geçersiz olabilir. Bu nedenle uygulamada, en uygun hareket modelinin belirlenmesi için hesaplamalar genişletilmiş model testine göre adım adım yapılmıştır. Dinamik tek nokta modeliyle hesaplanan hareket parametreleri, statik ve kinematik tek nokta modeli sonuçlarıyla karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Dinamik tek nokta modelinden belirlenen fiziksel etki parametresinin, hareketlerin yorumlanmasında katkı sağlaması ve böylece daha uygun kararlar verilebilmesi bu modelin diğer modellerden olan üstünlüğünü göstermiştir.

Bu çalışmada, dinamik yüzey modeli, hareket yüzeylerinin etkiyen kuvvet altındaki periyodik değişimlerini belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Böylece bütün bir kütle içerisindeki ölçülmemiş noktaların hareketleri de izlenebilmiştir. Dinamik ve kinematik yüzey modelleri karşılaştırıldığında, dinamik hareket yüzeylerinden hesaplanan yüzey katsayılarının sayısının, kinematik hareket yüzey katsayılarının sayısından fazla olduğu görülmüştür. Böylece dinamik yüzey modelinde heyelanın nedeni olan yer altı suyu değişimi dikkate alındığından bölgede oluşan hareket yüzeyleri ve ölçülmemiş noktaların hareketleri de daha gerçekçi saptanabilmektedir.

Dinamik tek nokta modeliyle belirlenen nokta hareketlerini daha iyi yorumlayabilmek için jeolojik çalışmalar yapılarak bölgedeki oluşan yüzeysel hareketler belirlenmiştir. Bu yüzeysel hareketler dikkate alınarak nokta hareketleri daha gerçekçi yorumlanabilmiştir.

Araştırma sonuçları, dinamik modelde dikkate alınan fiziksel parametrenin büyüklük ve işaretinin, hareketin nedeninin nokta hareketine olan etkisinin anlaşılmasını sağladığını göstermiştir. Hareket davranışlarının, dinamik etki altındaki zamansal seyrinin yorumlanması bu parametrelere dayanılarak yapılabilmektedir. Sonuç olarak, hareketin nedeninin de dikkate alındığı dinamik modellerle, hareketlerin yorumlanmasının daha gerçekçi yapılabileceği söylenebilir. Ayrıca bu çalışmada, doğal bir afet olan heyelanın belirlenmesinde ve gerekli tedbirlerin zamanında alınabilmesinde farklı disiplinlerin birlikte çalışmasının çok yararlı olacağı görülmüştür. Dinamik modelin bu üstünlüklerinin yanı sıra modelin oluşturulmasında, farklı disiplinlerin birlikte çalışmasındaki güçlükler, matematik modelin karmaşıklığı ve ekonomik olmaması karşılaşılan olumsuzluklardır.

1.2 Heyelan

Heyelanlar, ülke ekonomilerine direkt yada dolaylı olarak büyük zararlar veren doğal olaylardan biridir. Çok çatlaklı kaya kütleleri, yamaç molozu yada zemin kütlelerinin belirli bir yüzey boyunca yamaç aşağı doğru hareketi olarak tanımlanan heyelanlara, yoğun yağış, deprem dalgaları, su seviyesindeki ani değişiklikler ya da hızlı dere yatağı erozyonları gibi doğal faktörler neden olmaktadır. Bunlara ek olarak, gerekli mühendislik çalışmaları yapılmadan yerleşime açılan yamaç ve engebeli arazilerde yapı inşaatı, bitki örtüsünün tahrip edilmesi, değişik amaçlı kazılar vb. heyelanların oluşumunu tetikleyen önemli faktörlerdir (Zezere vd., 1999/2; Asch vd., 1999; URL-1, 2002; Önalp, 1991; Veder, 1981).

1.2.1. Heyelanların Nedenleri

Yamaçları oluşturan toprak malzemesi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri olan karmaşık bir sistemdir. Toprak malzemesi, organik madde, değişken miktarda su, hava ve kaya karışımından oluşmaktadır. Suyun ve organik malzemenin miktarı ve

toprağın özellikleri bir takım nedenlerden dolayı değişime uğrayabilir. Toprak malzemenin bileşimini değiştiren ve mukavemetini azaltan faktörler arasındaki karmaşık etkileşim yamacın şeklinin değişmesine ve kaymasına neden olmaktadır (Burfel vd., 1982).

İstatistik değerlendirmeler kohezyon (tanelerin birbirini çekme özelliği), içsel sürtünme açısı (tanelerin temas yüzeyindeki sürtünmeden kaynaklanan dayanım), eğim, rölatif hız, akarsuların ve insanların topoğrafyada oluşturduğu karakteristik şekiller, bitki örtüsü, yer altı suyu ve fay hattına olan yakınlık gibi parametrelerin heyelanların oluşmasına neden olan yaygın özellikler olduğunu göstermiştir (Gökçeoğlu ve Aksoy, 1996; Ocakoğlu vd., 2002).

Heyelanlar, iklim koşulları (yağmur, sıcak-soğuk, rüzgar vs. etkenler tarafından yeryüzündeki kayaların ayrışması) gibi yavaş bir süreç sonucu olduğu gibi dış mekanizmalar tarafından da aktif hale getirilir. Doğal (depremler) ya da yapay (büyük yer altı patlamaları, makine titreşimleri) nedenlerle meydana gelen titreşimler kütlelerde gerilmeler oluşturarak yamaç dengesini bozabilirler ve zemini akıcı duruma getirebilirler (Tarhan, 1996; URL-1, 2002).

Heyelanları oluşturan ya da diğer bir deyişle şev bozulmalarına neden olan faktörler, “Gerilme ve Deformasyonları Artıran” ve “Zeminin Direncini Azaltan” olarak iki grupta toplanabilir. Kütle hareketlerini doğuran nedenler genellikle gerilme, deformasyon, yağış ve zaman parametrelerinin karşılıklı ve çoğunlukla eş zamanlı etkileşimi sonucunda ortaya çıkmaktadır (Zhou vd., 2002; Tarhan, 1996; Bulut, 1995; Önalp 1983, 1991; Yüzer, 1987).

I. Gerilme ve Deformasyonları Artıran Faktörler

a) Yüksek Eğimler

Yükseltinin fazla olduğu yüksek eğimli arazilerde zeminin yapısına bağlı olarak toprak eğim yönünde akarak heyelan oluşur. Heyelanla topoğrafik yapı arasında bir korelasyon vardır. Heyelan olma olasılığı eğimi 20 üzerindeki arazilerde çok yüksektir. Bunun yanı sıra heyelan görülen arazilerin büyük bir kısmının eğimleri 10 -15 arasındadır (Zezere vd., 1999/1).

b) Yağış ve Yeraltı suyu

Heyelanları tetikleyen en önemli faktör yağmur ve buna bağlı olarak oluşan yer altı suyudur (Ocakoglu vd., 2002; Deangeli ve Giani, 2001; Flageollet vd., 1999; Zezere vd., 1999/1, 1999/2; Asch vd., 1999; URL-1, 2002). Yağmur ve buna bağlı olarak oluşan yer altı suyu heyelan için dinamik bir değişkendir (Zhou vd., 2002; Yüzer, 1987). Hidrolojik özellikler ve potansiyel kayma bölgesinin içinde ve dışındaki hidrolojik sistemler heyelanın frekansını (oluşma aralığını) belirlerler ve farklı tipte ve boyuttaki heyelanların oluşmasında önemli rol oynarlar (Asch vd., 1999). Toprak malzeme içindeki su, kütlelerin dengesini, eritme, aşındırma, ek yük, boşluk suyu basıncı oluşturma, su içeriğini değiştirme şeklinde etkilemektedir ve dolayısıyla zeminin akıcı hale gelmesine neden olmaktadır. Genel olarak söylemek gerekirse heyelanın aktifleşmesi ile yağmur arasında doğrudan bir ilişki vardır. Yağışlardan sonra oluşan heyelan sayısı diğer nedenlerden kaynaklanana oranla çok daha yüksektir. Literatürde, kütle hareketleri ile yağış ve yer altı suyu rejimleri arasında kesin bir bağıntı bulunduğunu gösteren örnekler çoktur (Flageollet vd., 1999; Önalp, 1991, 1983).

Yüzeysel heyelanlardaki kayma koşulları, toprağın kohezyonu ve eğim açısıyla tanımlanan kritik bir derinlikte toprak içindeki su miktarının toprağın direncini azaltacak kadar fazlalaşması ile oluşabilir. Daha derin heyelanlar çoğunlukla yer altı su seviyesinin yükselip alçalmasıyla tetiklenirler. Yer altı suyu hareketi, süreksizliklerdeki ve boşluklardaki dolgu maddelerini ya da zeminlerdeki ince kum, silt gibi ufak malzemeleri yıkayarak ya da eriyebilir maddeleri (jips, tuz vb.) eriterek, kütlelerin dengesini etkilemekte ve heyelanlara neden olmaktadır (Asch vd., 1999; Zezere, 1999/2; Tarhan, 1996).

c) Topuktan Malzeme Kaybı

Heyelanlar doğrudan ya da dolaylı olarak tetikleyici bir faktör olan insan aktiviteleri sonucu oluşabilir. Yamaç kayması topukta yük kaybına neden olacak veya aşırı yükleme şeklinde gerilimi arttıracak ya da yüzey veya yeraltı suyu akış yönünü değiştirebilecek inşaat aktivitelerinden ortaya çıkabilir. Şevlerde durağanlığı bozan etkenlerden en önemlisi topukta beliren gerilme yığılmalarıdır. Özellikle yol yarmaları etkisi ile arazide genelde

kısa süreler sonunda giderek kırılma ve kaymalar oluşabilmektedir (Zezere vd., 1999/2; Flageollet vd., 1999; Tarhan, 1991).

II. Zeminin Direncini Azaltan Faktörler

a) Ayırışma

Fiziksel ve kimyasal ayırışma kayaçların büyük ölçüde değişikliğe uğramasına, taneler arasındaki bağın zayıflamasına ve tamamen yok olmasına neden olmaktadır. Yağış rejimi, nem oranı ve yıllık sıcaklık ortalamaları nedeniyle yaşlı kayaçlarda, hızlı gelişen ayırışmalar ve yıpranmalar oluşur. (Tarhan, 1996; Bulut, 1995; Önalp, 1991).

Zayıf zeminlerin dış etkenlere dayanıklı olmaması nedeni ile böyle arazilerde heyelan olma olasılığı yüksek olur. Yağan yağmur ve karların erimesi ile yükselen su içeriği sonucu yarı katı hale gelen zeminler, oluşan boşluk suyu basıncı etkisiyle kolayca kayabilecek duruma gelmekte ve diğer faktörlerin de etkisiyle heyelanlar meydana gelebilmektedir (Tarhan, 1991; Önalp, 1991).

b) Bitki örtüsü

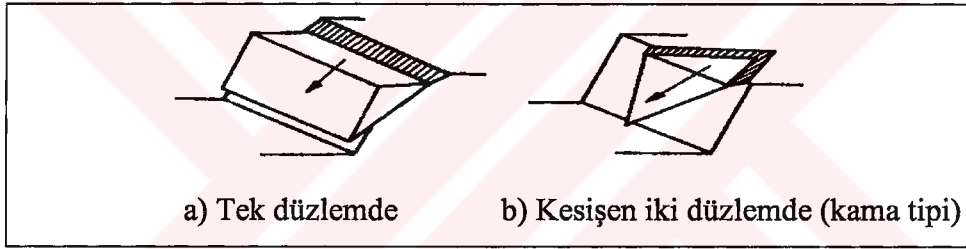
Genellikle zayıf kaya ve ana materyalden oluşan eğimli ve dış görünüş itibariyle stabil yamaçlar bitki örtüsünün yok edilmesine karşı fazlasıyla duyarlıdır. Doğal bitki örtüsü ve ormanların yok edilmesi yüzey suyunun etkili olma oranını dolayısı ile heyelan riskini artırır (Zezere vd., 1999/1; Görçelioğlu, 1991; Erdaş, 1991).

1.2.2. Heyelan Tipleri ve Heyelanlar Sonucu Oluşan Hareketler

Kaymalar, kayma yüzeyinin şekline göre, düzlemsel kayma ve eğrisel kaymalar olmak üzere iki ana grupta toplanabilirler (Varnes, 1978; Varnes ve Savage, 1996; Turner ve Schuster, 1996; Tarhan, 1996; Yüzer, 1987; Önalp, 1983; Veder, 1981).

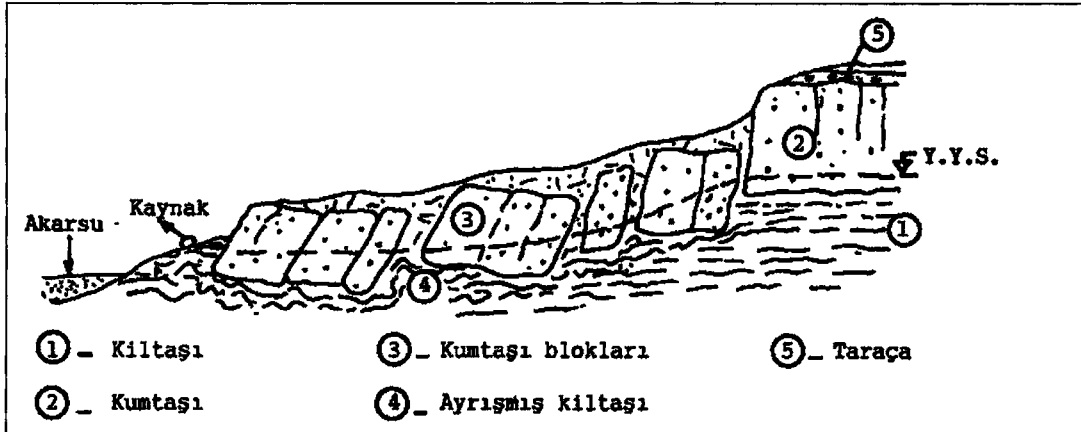
• Düzlemsel Kayma

Doğadaki kayaçların fay, çatlak, şistozite, tabaka vb. gibi süreksizlik yüzeyleri boyunca, sınırlı bir şekilde aşağıya doğru hareket etmesine düzlemsel kayma denir. Düzlemsel kaymanın başlıca nedeni yamaç topuklarında yapılan kazılar ve aşınmalar, yamaçlara fazla ek yük konması, yüzey ve yer altı suları, ayrışma, hidratasyon olayı, farklı litolojide kayaç ardalanması ve yerçekimidir. Tüm bu faktörler zayıflık düzlemindeki direnç (kohezyon, içsel sürtünme açısı) ve gerilme özelliklerinin değişmesine neden olur. Sonuçta kaydırıcı kuvvetlerin tutucu kuvvetlerden fazla olması halinde zayıflık düzlemi boyunca kayma meydana gelir (Şekil 1.a). Kesişen düzlemlerin ara kesiti boyunca da kama tipi kaymalar meydana gelir (Şekil 1.b).



Şekil 1. Kayaçlarda düzlemsel kayma (Tarhan, 1996)

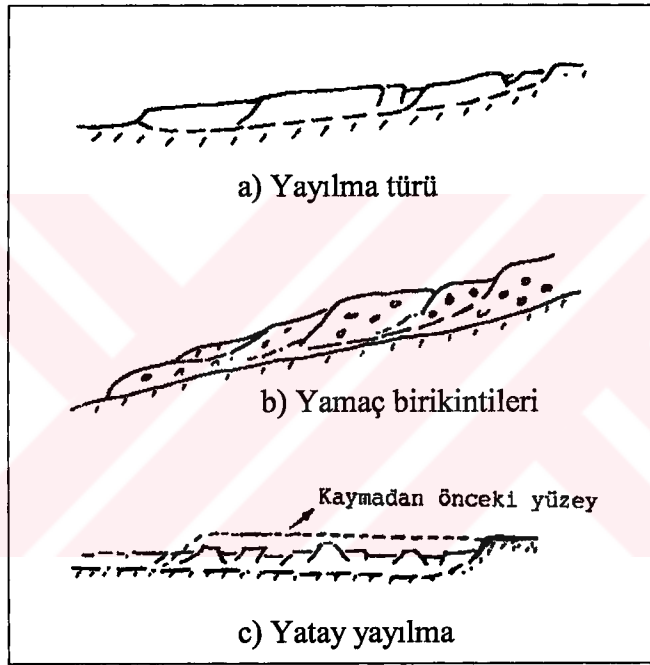
Düzlemsel kayma daha çok yayılma (translational) şeklinde olur (Şekil 2).



Şekil 2. Farklı litolojideki kayaçlarda yayılma türü kütle hareketi (Tarhan, 1996)

Bu tür hareketlerde en çok litolojik özellikler rol oynar. Suyu karşı hassas kayaç seviyeleri üzerindeki tabakalar, eğim boyunca aşağıya ya da yanal hareket ederler.

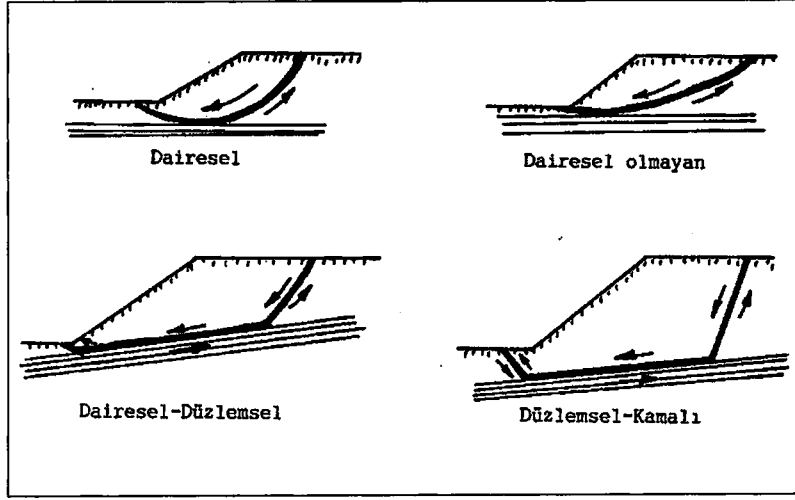
Düzlemsel kayma farklı litolojideki zeminlerden başka, kayaçların üzerinde birikmiş moloz, toprak gibi ayırık malzemelerin alttaki sağlam kayaç üzerinde ya da kendi içindeki bir yüzey boyunca kaymasıyla da meydana gelebilir (Şekil 3). Kayan malzeme türüne bağlı olarak moloz kayması toprak kayması gibi isimler verilen bu tip hareketlere çoğu zaman heyelan da denir (Tarhan, 1996; Koca ve Türk, 1991; Önalp, 1983).



Şekil 3. Değişik türde düzlemsel kaymalar (Tarhan, 1996)

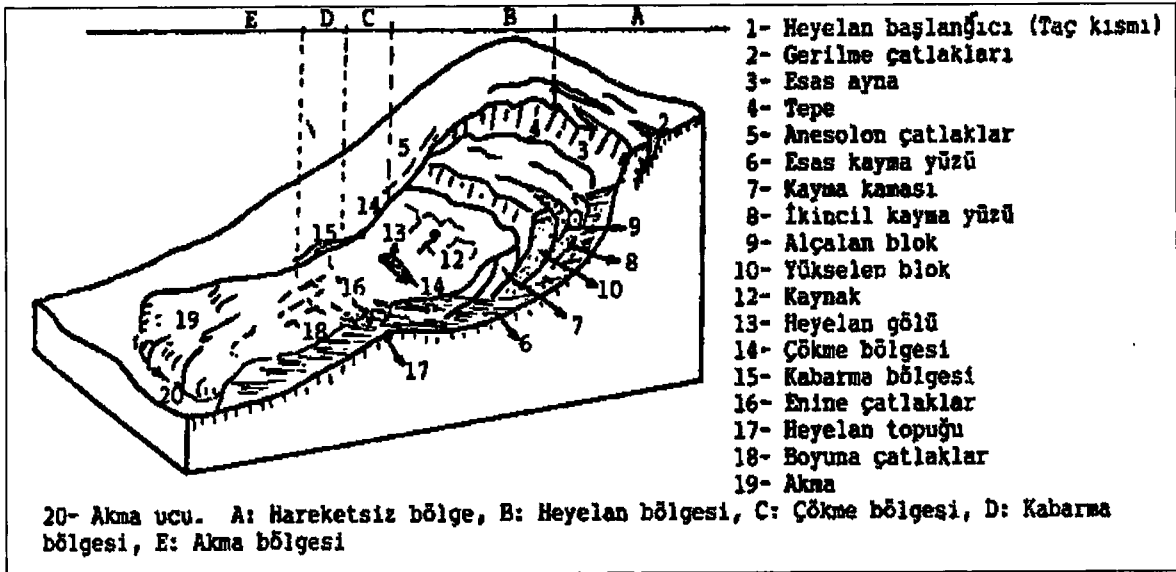
- **Eğri Yüzeyli Kayma**

Eğri yüzeyli kayma, daha çok ayırık ve zayıf çimentolu ya da çok sık çatlaklı (bloklu, parçalı) kayaçlarda oluşur. Şekil 4'de görüldüğü gibi kayma yüzeyi dairesel, dairesel-düzlemsel, dairesel olmayan (hiperbol, silindir, spiral) düzlemsel-kamalı şekillerde olmaktadır. Genelde bu tür kütle hareketlerine heyelan denmektedir. Eğri yüzeyli kütle hareketlerinde hareket eden malzemede dönme olayları da görülmektedir. Hareket etmiş kayaçlar derinlere kadar inebilir. Bu tür kayma hareketlerinde çoğu birbirine paralel birden fazla kayma yüzeyi görülebilir.



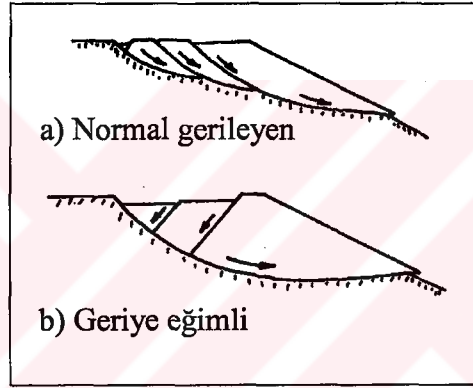
Şekil 4. Doğada görülen eğri yüzeyli kayma türleri (Tarhan, 1996)

Zeminlerde meydana gelen yamaç ya da şev kaymaları incelendiğinde, genellikle kaymaların eğri bir yüzey boyunca meydana geldiği ve eğri yüzeyin çoğunlukla da dairesel biçimde olduğu görülmüştür. Ayrıca incelemeler eğrisel kayma yüzeylerinin ayrık zeminlerde oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle çok sık çatlaklı kayalar da (bloklu ve parçalı) zemin gibi hareket ederler ve eğrisel yüzeyli kaymalar gösterirler. Genelde heyelan adı altında toplanan bu tür kütle hareketlerinde, zemin ya da kayalar bir düzlem üzerinde yamaç aşağı hissedilir bir şekilde hareket ederler.



Şekil 5. Tipik bir heyelan (eğrisel yüzeyli kayma) blok diyagramı ve çeşitli kısımlara verilen isimler (Tarhan, 1996)

Eğrisel yüzeyli kütle hareketlerinde üst kısımlar aşağı doğru kayarken aşağı kısımlarda çökme, kabarma ve akma bölgeleri görülür (Şekil 5). Şekil 5'de görüldüğü gibi heyelanlarda değişik kısımlara değişik isimler verilir. Gerilme çatlaklarının şekil ve derinliğinden yararlanarak esas kayma yüzeyinin şekli ve derinliği saptanmaya çalışılır. Heyelanın esas aynası genellikle düşey ya da düşeye yakındır. Hareket eden malzeme çok ilerleyecek olursa, desteksiz kalan taç kısmında gerilme çatlakları ve bunlara bağlı olarak da öncekine benzer pek çok heyelan meydana gelebilir. Bu şekilde normal geriye doğru ilerleyen heyelanlar (Şekil 6.a), hareket eden kütlenin esas aynaya bakan kısmında ise esas aynaya doğru kaymalar (Şekil 6.b) meydana gelebilir.

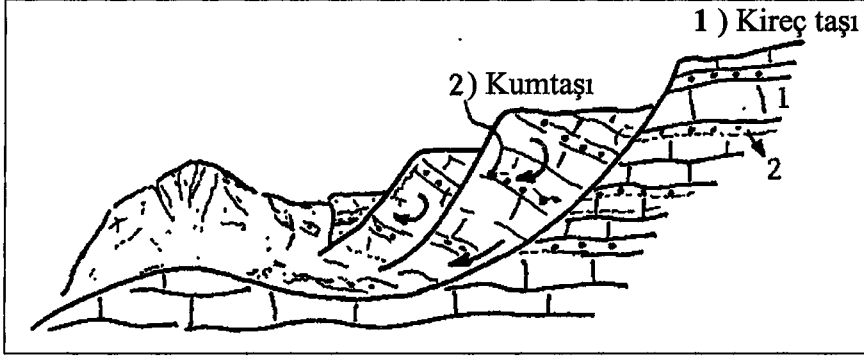


Şekil 6. Heyelanlarda hareket mekanizmaları (Tarhan, 1996)

Bazı heyelanlarda hareket eden kütlede ikincil kayma yüzeyleri oluşur ve bu kayma yüzeylerinin arasında kalan kayma kamaları yukarıya doğru hareket edebilir. Bu tür hareket eden yerlerde, yağış ve kaynak suları birikerek heyelan içi gölleri oluştururlar. Göller heyelanın orta kısmında oluşan çökme bölgelerinde de meydana gelebilir. Heyelanların topuk kısmında kabarmalar görülür. Kabarma kısmında meydana gelen enine çatlaklar yaklaşık topuk noktasında kesişir. Kayan malzemede çoğu zaman dönme hareketi de görülür (Şekil 7).

Heyelanlar doğal kayaç ve zeminlerde meydana geldiği gibi insanlar tarafından oluşturulan dolma zeminlerde de (topak, toprak-kaya dolgu barajlar, yol dolguları) meydana gelebilir. Bundan dolayı kazı ve inşaat yapılmadan önce gerek sahada ve gerekse laboratuvarında jeolojik ve zemin mekaniği araştırmalarının yapılması zorunludur. Sert, sağlam ve homojen kütlelerin dik yamaçları ya da kazı şevleri uzun zaman duraylı

kaldıkları halde yumuşak ve ayrık kayalarda değişik türde kütle hareketleri çokça görülmektedir (Tarhan, 1996; Erguvanlı, 1982; Veder, 1981).



Şekil 7. Heyelanlarda hareket eden kısımda dönme hareketi (Tarhan, 1996)

1.2.3. Heyelanların Sosyo-Ekonomik Etkileri

Heyelanların en büyük sosyoekonomik etkisi insan hayatı kayıplarıdır. Heyelanlar yaralanma ve ölümlerin yanı sıra yapıların zarar görmesine ve bir kısım kaynakların etkilenmesine de neden olurlar. Su kaynakları, atık su ve içme suyu sistemleri, tarım alanları, doğal gaz ve petrol boru hatları, barajlar, karayolları, metrolar ve demiryolları bir kayma olayının ardından olumsuz etkilenebilirler. Heyelanlar, yapıların onarım maliyetinin artması, mülk değerlerinin azalması, taşımacılığın aksaması, yaralanma olaylarının getirdiği tıbbi maliyetin ortaya çıkması gibi olumsuz ekonomik etkilere neden olurlar. Ani yada yavaş oluşan heyelanlar, sınırların değişmesi nedeniyle toprak kullanımı ve mülkiyet hakları konusunda problemlere neden olabilmektedirler (White, 1999; Mikkelsen 1996; Altan vd., 1994; Ayan vd., 1993; URL-1, 2002).

1.2.4. Heyelanların İzlenmesi İçin Yöntemler ve Teknikler

Heyelan davranışlarının yorumlanması ve gerekli önlemlerin önceden alınması heyelanı izlemekle mümkündür. Yüzeye ait yer değiştirmelerin ölçülmesi, etkiyen kuvvetler sonucu oluşan hareketi analiz etmek ve heyelanın gelişimini gözlemenin en basit yoludur (Dercourt, 2000; Gili vd., 2000; Moss vd., 1999).

Durağan olmayan yamaçların hareketlerinin izlenmesi için çok çeşitli ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Tape ve Wire Device'ler, noktalar ya da çatlaklar arasındaki uzunlukların değişimlerini ölçmek için kullanılırlar. Fissurometer ya da Sort-Base Extonsometer'ler, uzunluk değişimlerini kaydetmek için kullanılırlar. Nivolar, Teodolitler, Elektronik Mesafe Ölçerler, Total Station ve GPS ölçüleri hem nokta koordinatlarının ve hem de konum değişimlerinin elde edilebilmesini sağlarlar. Hava ya da Yersel Fotogrametri yardımıyla nokta koordinatları, eş yükseklik haritaları ve sayısal yükseklik modelleri elde edilebilmektedir. Heyelan hareketlerinin ölçülebilmesi için kullanılan yöntemlerin doğruluğuna ait geniş açıklamalar Krauter (1988) ve Mikkelsen (1996)'dan elde edilebilir. Temel yöntemler ve onlara ait hassasiyetlere ilişkin geniş bir özet Tablo 1'de verilmiştir. Bu yöntemler tek başlarına olduğu gibi birbirlerini tamamlayıcı olarak ta kullanılabilirler (Malet vd., 2002; Gili vd., 2000).

Son yıllarda, GPS her türlü deformasyon ölçmeleri (güncel yer kabuğu hareketleri, depremlerin önceden kestirimi, heyelanlar, mühendislik yapılarının denetimi v.b.) konularında diğer jeodezik ölçü yöntemlerin yerini almaya başlamıştır. GPS, donanımı sağlam, hafif, ucuz, güvenilir ve kullanması kolaydır. GPS'in ölçme yöntemleri ve yazılımları, arazi verilerinin daha kolay değerlendirilmesine olanak vermektedirler (Gili vd., 2000; Chang, 2000; Gökalp, 1995).

Tablo 1. Heyelan hareketlerinin ölçülmesinde kullanılan temel yöntemler ve doğrulukları

Yöntem	Kullanım	Sonuçlar	Mesafe	Doğruluk
Fissurometer	Birimlerin diferansiyel hareketi	dD	<20 mm	± 0.1 mm
Levelling vernier pole	Küçük çatlakların açılımı	dD	<200 mm	± 0.5 mm
Short-base extensometer	Çatlakların açılımı	dD	25-450 mm	± 0.1 mm
Invar distance-meter	Yer değiştirme	dD	40 m' ye kadar	± 0.1 mm
Wire extensometer	Yer değiştirme	dD	100 m' ye kadar	± 0.5 mm
EDM	Yer değiştirme	dD	1-10 km	1-5 mm+1-5 ppm
Geometrik nivelman	Yükseklik değişimi	dZ	değişken	2-5 mm/km
Hassas nivelman	Yükseklik değişimi	dZ	değişken	0.2-1 mm/km
Total station	Yer değiştirmeler	dX, dY, dZ	1-10 km	3 mm+1-5 ppm
Yer fotogrametrisi	Yer değiştirmeler	dX, dY, dZ	<200 m	40 mm
Hava fotogrametrisi	Yer değiştirmeler Sayısal Yükseklik Modeli	dX, dY, dZ	$H_{uçuş} < 500$ m	100 mm
Radar interferometry INSAR	Yer değiştirmeler Sayısal Yükseklik Modeli	dX, dY, dZ	Değişken	3-5 mm
GPS	Yer değiştirmeler	dX, dY, dZ	Değişken Genellikle Baz <20 km	1-2 mm

Heyelan hareketinin detaylı analizi, konumların üç boyutta birlikte belirlenmesini gerektirir (Malet vd., 2002; Dercourt, 2000; Ayan vd., 1993). GPS sistemi, faz ölçüleri kullanmak suretiyle “mm” duyarlıkta nokta konumlarını üç boyutlu olarak aynı anda belirlemektedir. Bu doğruluğa sahip olan GPS küçük ve yavaş yer değişimi gösteren heyelanların izlenmesi için de rahatlıkla kullanılabilir (Malet vd., 2002; Dercourt, 2000; Gili vd., 2000; Brunner, 1997; Karaali ve Gökalp, 1994; McLellan vd., 1989; Wells, 1987; Gökalp, 1994, 1995).

Çalışma alanının büyüklüğüne göre ekonomiklik, üretkenlik, hareket kabiliyeti, hız ve doğruluk göz önüne alındığında GPS teknikleri, diğer jeodezik ölçme tekniklerinden daha kullanışlıdır. Heyelan çalışmalarında, heyelanlardan kaynaklanan morfolojik şekil bozukluklarından dolayı noktaların karşılıklı görüşü ve buna bağlı olarak ağ geometrisinin sağlanması oldukça zordur. GPS kullanmanın en büyük avantajlarından birisi de noktaların yerlerinin seçiminde ağ geometrisinin fazla önemli olmamasıdır. GPS ölçmeleri hava durumundan bağımsızdır ve herhangi bir zamanda Dünya üzerinde herhangi bir yerde yapılabilir. Tüm bu üstünlüklerine rağmen GPS’in kullanımı, gökyüzünün görünüşünü kapatan ve yansıma oluşturan dağlık ve bitki örtüsü gibi heyelanın çevresel özellikleri tarafından sınırlandırılabilir. Zayıf uydu geometrisi, multipath ve anten faz merkezi kayıklık hataları gibi sistematik hatalar ulaşılabilecek nokta konum doğruluğunu etkileyebilir (Malet vd., 2002; Fukuoka vd., 2001; Dercourt, 2000; Gili vd., 2000; Brunner, 1997; Gökalp, 1994; Hofmann vd., 1992; McLellan vd., 1989).

Şu anda GPS 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.

Periyodik ölçme yaklaşımında, izlenecek yamacın uygun yerlerine heyelan hareketini belirleyebilecek özelliklere sahip bir jeodezik deformasyon ağı tesis edilir. Ağ noktalarına ait kenarlar GPS ile ölçülür. GPS verileri değerlendirilerek her noktanın koordinatları belirlenir. Periyodik farklar her hangi bir deformasyon analizi yardımıyla irdelenir. Bu yöntemle istatistik olarak noktaların hareket edip etmediği belirlenebilir ve ilave olarak hareket miktarı, hareketin hızı ve yönü belirlenebilir. Bu yöntem donanım ve bakım açısından ekonomiktir. Heyelanların periyodik GPS ölçüleri ile izlenmesine örnek olarak Gili vd. (2000) ve Moss vd. (1999) tarafından yapılmış çalışmalar verilebilir.

Sürekli izleme yönteminde, izlenecek deformasyon noktalarının her birinin üzerine bir GPS alıcısı yerleştirilmesi gereklidir. Her bir GPS alıcısının topladığı veriler anlık

olarak bir merkezi veri işleme biriminde toplanır. Bu birimde veriler uygun bir yazılımla değerlendirilerek anlık konum değişimleri belirlenir. Yöntemin izlenecek nokta sayısı kadar GPS alıcısı gerektirmesi maliyetin artmasına neden olur. Heyelanların GPS ile anlık izlenmesiyle ilgili bazı çalışmalar olan Malet vd. (2002) ve Brunner (1997) örnek olarak verilebilir.

Bu yaklaşıma bir alternatif olarak çok anten sistemli GPS alıcıları geliştirilmiştir. Bir GPS alıcısı bir çok antenin topladığı verileri depolayabilmekte ve merkezi depolama birimine transfer edebilmektedir. Geliştirilen bir mikro-işlemci yardımıyla bir GPS alıcısı birkaç GPS alıcısı gibi çalışabilmektedir. Coaxial kabloların kullanılması sinyal gücünü azaltması nedeniyle antenlerin alıcıyla olan mesafelerinin kısa tutulmasına neden olmaktadır. Buna karşılık Fiber optik kablolar bu sınırlamayı ortadan kaldırmıştır (Ding vd., 2000). Bir alıcıya bağlı antenlere ait datalar bir tek dosyada toplanmaktadır. Heyelanların çok anten sistemli GPS ile izlenmesine örnek çalışmalar olarak Santerre, Beutler (1993) ve Ding vd. (2000) verilebilir.

1.3. Global Konum Belirleme (GPS)

GPS, navigasyon, çevresel çalışmalar, doğal kaynakların yönetimi, coğrafi bilgi sistemi için veri toplama, deformasyon ölçmeleri, yerel ve global jeodezik ölçmeler gibi geniş bir kullanım alanı olan hassas üç boyutlu konum belirlemeyi sağlayan uydu bazlı bir sistemdir. GPS sistemi, sürekli konum ve hız belirlemeyi sağlayabilmek için en az dört uydunun her an uzay içerisinde elektronik olarak görünebildiği, dünya yüzeyini tam tarayacak şekilde yörüngelendirilmiş, yaklaşık dairesel, yörüngeyi tamamlama süresi 12 yıldız saati olan ve yörüngeleri gök ekvator düzlemi ile 55° eğim açısı yapan 21 esas 3 yedek olmak üzere 24 adet uydudan oluşmuştur. Sistem GPS uydularının sürekli olarak dünyaya gönderdiği elektromanyetik dalgaları izleyerek alıcının konumunu rölatif $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{WGS-84}$ veya mutlak $(X, Y, Z)_{WGS-84}$ olarak elde edebilmektedir (Gili vd., 2000; Wolf ve Ghilani, 1997; Kurt, 1996; Eren ve Uzel, 1995; Gökalp, 1994; Hofmann vd., 1992).

1.3.1. GPS Birimleri

GPS, uzay, kontrol ve kullanıcı birimi olmak üzere üç bölümden oluşur. Uzay birimi ekvator düzlemi ile 55° açı yapan altı dairesel yörünge düzlemindeki 24 uydudan oluşmaktadır. Uyduların yörünge yüksekliği yaklaşık 20200 kilometredir, periyotları 12 saattir ve uydu konfigürasyonları evrensel zamana göre her gün 4 dakika daha erken olmak üzere tekrarlanır. Her uydu, Ana Kontrol Merkezince hesaplanan ve yer antenleri aracılığı ile gönderilen kendi yörüngesine ait bilgileri alır ve düzeltilmiş zaman bilgileri ile L bandındaki iki taşıyıcı frekanstan sinyaller gönderir. Bunlar navigasyon sinyalleri (kodlar), navigasyon ve sistem verileridir.

Kontrol birimi uydu yörüngesini belirlemek için beş izleme istasyonundan oluşmaktadır. Kontrol bölümünün görevleri, uydu sistemini sürekli izlemek ve kontrol altında tutmak, uydu efemerislerini ve uydu saatlerini önceden kestirmek ve her uydu için navigasyon mesajlarını periyodik olarak güncellemektir.

Kullanıcı birimi, uydu sinyallerini almak için tasarlanmış değişik tipte ve özellikteki GPS alıcılarından oluşmaktadır. Alıcılar, navigasyon amaçlı işler veya jeodezik konumlandırma için GPS sinyallerini uydulardan toplamaktadırlar (Brunner, 1997; Gökalp, 1994; Hofmann vd., 1992).

1.3.2. GPS Ölçüleri

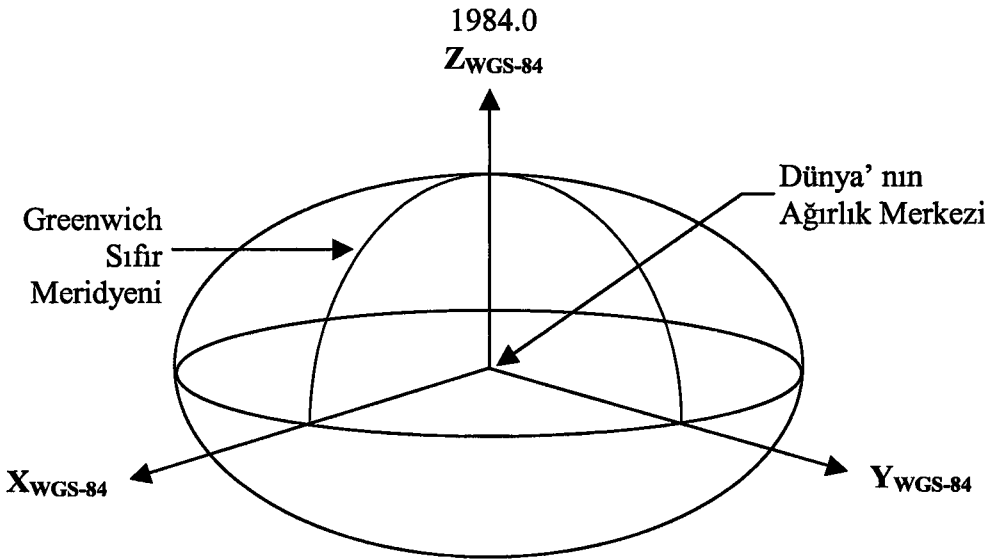
GPS, konumları bilinmeyen yer istasyonlarındaki alıcılarla koordinatları hassas olarak bilinen GPS uyduları arasındaki mesafeleri ölçme prensibine göre çalışır. GPS gözlemleri, uydudan yayımlanan sinyalin geçtiği yol boyunca geçirdiği sürenin ölçülmesiyle ya da alınan sinyal ile alıcıda üretilen aynı özellikli sinyalin karşılaştırılması ile oluşturulan faz farklarının ölçülmesi ile elde edilirler. GPS’de kod ölçüleri ve taşıyıcı faz ölçüleri yardımıyla konum belirleme olmak üzere iki farklı gözlem işlemi kullanılır (Teunissen ve Kleusberg, 1998; McElroy, 1998; Wolf ve Ghilani, 1997; Karaali ve Gökalp, 1994; Hofmann vd., 1992).

Kod ölçüleri yöntemi, sinyalin uydudan çıkıp alıcıya ulaşması sırasında geçen zamanı hassas bir şekilde ölçerek uydularla alıcılar arasındaki mesafeleri belirlemeyi içerir. Taşıyıcı faz işleminde gözlenmiş nicelikler, uydulardan çıkıp alıcılara ulaşan taşıyıcı dalgada oluşan faz değişimleridir. Bu işlemde, uyduların hareket etmelerinden dolayı bir

zamanlama problemi ortaya çıkmaktadır. Sistemdeki zamanlama problemini çözmek ve diğer hataları elimine etmek için, fark alma teknikleri kullanılır. Fark alma teknikleri ile direkt olarak nokta konumları hesaplanamaz, bunun yerine bazlar hassas olarak belirlenir. Bu konum belirleme yönteminde sistematik hatalar büyük ölçüde elimine edilebilmektedir (Gili vd., 2000; Teunissen ve Kleusberg, 1998; Wolf ve Ghilani, 1997; French, 1996; Gökalp, 1995, 1994; Niemeier, 1992; Wells, 1987).

1.3.3. GPS Gözlemleri İçin Referans Koordinat Sistemi (WGS-84)

1987 tarihinden itibaren GPS, World Geodetic System 1984 (WGS-84) sistemini referans sistemi olarak kullanmaktadır. GPS uydularından alınan tüm konum bilgileri WGS-84 referans elipsoidinde hesaplanmaktadır. WGS-84 yersel üç boyutlu bir koordinat sistemidir ve Uluslararası Yersel Koordinat Sistemi olarak kabul edilir. WGS-84 sistemi Yersel Ortalama Dünya Elipsoidini, Dünya Gravitasyonel Modelini ve diğer jeodezik datumlara ait dönüşüm parametrelerini içeren bir sistemdir. Sistemin başlangıç noktası yerin ağırlık merkezidir. Z eksenini 1984.0 anı için belirlenen ortalama yerin dönme eksenine paraleldir. X eksenini sıfır meridyen düzlemi ile ekvator düzleminin ara kesitidir. Y eksenini sağ el sistemi oluşturacak şekilde başlangıç noktasında X ve Z eksenlerine dik olan eksenidir (Şekil 8).



Şekil 8. WGS-84 koordinat sistemi

WGS-84 koordinat sistemi, 25 adet global dağılmış doppler istasyonlarından sürekli iletilen veriler ile oluşturulmuştur. Buna göre bu koordinat sistemi, kontrol birimini oluşturan beş yer izleme istasyonunun üç boyutlu WGS-84 koordinatları yardımıyla tanımlanmıştır. GPS kullanıcıları, WGS-84 koordinat sisteminden ancak kontrol birimince doğruluğu yükseltilmiş yörünge bilgilerini kullanarak yararlanabilirler (Hooijberg, 1997; Wolf ve Ghilani, 1997; Eren ve Uzel, 1995; Gökalp, 1994).

1.3.4. GPS Ölçü Yöntemleri ve Hata Kaynakları

GPS ile rölatif ölçü belirlemede genel olarak statik (statik, hızlı statik, tekrarlı) ve kinematik (dur-git, kinematik, real time kinematik) ölçü yöntemleri kullanılmaktadır (McElroy, 1998; French, 1996; Eren ve Uzel, 1995; Hofmann vd., 1992). Tektonik hareketlerin ve heyelanların izlenmesinde, baraj ve diğer mühendislik yapılarının deformasyonlarının incelenmesinde çoğunlukla statik yöntem kullanılır. Bu yöntemle, istasyon noktalarının bağıl konumları belirlenir. Bağıl konum belirlemenin amacı iki nokta arasındaki baz vektörünü hesaplamaktır. Bağıl koordinat belirleme işleminde taşıyıcı faz ölçüleri fark alma yöntemleriyle değerlendirilirler. Burada bağıl konum belirleme için ölçü sonrası değerlendirme işleminde tekli fark, ikili fark ve üçlü fark ölçü kombinasyonları kullanılır. Statik ölçü yönteminin duyarlılığı 5mm+1ppm'dir. Ölçü duyarlılığı, uydu sayısı, uyduların konfigürasyonu ve ölçü süresine bağlı olarak değişir. Statik ölçü yönteminde veri toplama işlemi 30 dakika ve üzeridir. Genellikle veri kaydetme aralığı 20 saniyedir (Chang, 2000; Ding vd., 2000; McElroy, 1998; Brunner, 1997; Eren ve Uzel, 1995; Gökalp, 1994; Hofmann vd., 1992).

Tüm ölçme uygulamalarında olduğu gibi, GPS ölçüleri de bazı sistematik veya sistematik olmayan hatalar içermektedirler. Sistematik hataların en önemlileri uydu yörüngelerindeki hatalar, uydu saat hatası, alıcı saat hatası, atmosferik koşullardan dolayı sinyal yayımındaki hatalar, iyonosferik gecikme hataları troposferik gecikme hatası, başlangıç faz belirsizliği hatası gibi hatalardır. Sistematik olmayan hatalar faz kayması, multipath, anten faz merkezi kayıklığı gibi hatalardır. Bu ve diğer hataları hesaba katmak ve nokta konum belirleme duyarlılığını arttırmak için, GPS gözlemleri, çok dikkatli bir şekilde kurallarına göre ve gereğinden fazla yapılır. Gereğinden fazla ölçü yapıldığı için dengeleme yapılması kaçınılmazdır. Gözlemler içerisinde hataların analizi yapılarak

elimine edilmesi gerekir (Gili vd., 2000; McElroy, 1998; Brunner, 1997; French, 1996; Gökarp, 1995; Eren ve Uzel, 1995).

1.4. GPS Ağlarının Dengelemesi

GPS verileri genellikle en küçük kareler prensibine dayandırılmış algoritmalarla analiz edilir. Gözlemlerin taşıyıcı fazlar kullanılarak yapıldığı GPS ölçme işleminde, en küçük kareler dengelemesinin uygulandığı iki aşama vardır. Birinci aşama, fazla sayıdaki taşıyıcı fazlardan elde edilmiş baz bileşenlerinin kendi içinde dengelenerek dengeli baz bileşenleri ve bu bileşenlere karşılık gelen kovaryans matrislerinin elde edildiği aşamadır. İkinci aşama, dengeli baz bileşenlerinin hepsinin birlikte dengelenmesi sonucu ağ noktalarının X, Y ve Z koordinatlarının ve varyans-kovaryans matrislerinin elde edildiği aşamadır (Wolf ve Ghilani, 1997; French, 1996; Eren ve Uzel, 1995).

Kullanım amaçlarına göre oluşturulan ve bu amaçlara göre en uygun hale getirilmesi istenen jeodezik ağların, önceden belirlenen doğruluk, duyarlık ve güvenilirlik isteklerini karşılamaları istenir. Bu anlamda gerçekçi bir irdeleme yapabilmek için ele alınan jeodezik ağlarının ölçüleri serbest ağ yöntemiyle dengelenir. Serbest ağ dengelemesiyle, gözlemlerin kendi aralarındaki tutarlılıkları ve noktaların duyarlılıkları daha gerçekçi belirlenebilir (Wolf ve Ghilani, 1997; Gökarp, 1995; Konak, 1994; Niemeier, 1992; McLellan vd., 1989; Ayan, 1982; Mierlo, 1978; Pelzer, 1971).

1.4.1. GPS Ağlarının Serbest Dengelemesi

GPS ile elde edilen bağıl konum koordinatları $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{WGS-84}$ GPS deformasyon ağının ölçülerini; $\overline{\Delta X}$, $\overline{\Delta Y}$ ve $\overline{\Delta Z}$ dengeli ölçüleri; $\overline{X}$, $\overline{Y}$ ve $\overline{Z}$ dengeli nokta koordinatlarını gösterirse, tüm noktaların koordinatlarının bilinmeyen olarak seçildiği serbest ağ dengelemesinde fonksiyonel model,

$$\begin{aligned}
\Delta X_{[1,2]} + v_{\Delta X[1,2]} &= \overline{\Delta X}_{[1,2]} = \overline{X}_2 - \overline{X}_1 \\
\Delta Y_{[1,2]} + v_{\Delta Y[1,2]} &= \overline{\Delta Y}_{[1,2]} = \overline{Y}_2 - \overline{Y}_1 \\
\Delta Z_{[1,2]} + v_{\Delta Z[1,2]} &= \overline{\Delta Z}_{[1,2]} = \overline{Z}_2 - \overline{Z}_1 \\
&\dots\dots\dots \\
\Delta X_{[1,3]} + v_{\Delta X[1,3]} &= \overline{\Delta X}_{[1,3]} = \overline{X}_3 - \overline{X}_1 \\
\Delta Y_{[1,3]} + v_{\Delta Y[1,3]} &= \overline{\Delta Y}_{[1,3]} = \overline{Y}_3 - \overline{Y}_1 \\
\Delta Z_{[1,3]} + v_{\Delta Z[1,3]} &= \overline{\Delta Z}_{[1,3]} = \overline{Z}_3 - \overline{Z}_1 \\
&\dots\dots\dots \\
\Delta X_{[2,3]} + v_{\Delta X[2,3]} &= \overline{\Delta X}_{[2,3]} = \overline{X}_3 - \overline{X}_2 \\
\Delta Y_{[2,3]} + v_{\Delta Y[2,3]} &= \overline{\Delta Y}_{[2,3]} = \overline{Y}_3 - \overline{Y}_2 \\
\Delta Z_{[2,3]} + v_{\Delta Z[2,3]} &= \overline{\Delta Z}_{[2,3]} = \overline{Z}_3 - \overline{Z}_2
\end{aligned} \tag{1}$$

.....

biçiminde oluşturulur. Küçük sayısal değerlerle çalışabilmek için yaklaşık koordinatlar ve dengeleme bilinmeyenlerinden noktaların kesin değerleri

$$\begin{aligned}
\overline{X}_1 &= X_1^0 + \delta X_1 & ; & & \overline{X}_2 &= X_2^0 + \delta X_2 & ; & & \overline{X}_3 &= X_3^0 + \delta X_3 \\
\overline{Y}_1 &= Y_1^0 + \delta Y_1 & ; & & \overline{Y}_2 &= Y_2^0 + \delta Y_2 & ; & & \overline{Y}_3 &= Y_3^0 + \delta Y_3 \\
\overline{Z}_1 &= Z_1^0 + \delta Z_1 & ; & & \overline{Z}_2 &= Z_2^0 + \delta Z_2 & ; & & \overline{Z}_3 &= Z_3^0 + \delta Z_3 \\
&\dots\dots\dots & & & \dots\dots\dots & & & & \dots\dots\dots
\end{aligned} \tag{2}$$

ve ötelenmiş gözlemler

$$\begin{aligned}
-\ell_{\Delta X[1,2]} &= [\Delta X_{[1,2]} - (X_2^0 - X_1^0)] \\
-\ell_{\Delta Y[1,2]} &= [\Delta Y_{[1,2]} - (Y_2^0 - Y_1^0)] \\
-\ell_{\Delta Z[1,2]} &= [\Delta Z_{[1,2]} - (Z_2^0 - Z_1^0)] \\
&\dots\dots\dots \\
-\ell_{\Delta X[1,3]} &= [\Delta X_{[1,3]} - (X_3^0 - X_1^0)] \\
-\ell_{\Delta Y[1,3]} &= [\Delta Y_{[1,3]} - (Y_3^0 - Y_1^0)] \\
-\ell_{\Delta Z[1,3]} &= [\Delta Z_{[1,3]} - (Z_3^0 - Z_1^0)] \\
&\dots\dots\dots \\
-\ell_{\Delta X[2,3]} &= [\Delta X_{[2,3]} - (X_3^0 - X_2^0)] \\
-\ell_{\Delta Y[2,3]} &= [\Delta Y_{[2,3]} - (Y_3^0 - Y_2^0)] \\
-\ell_{\Delta Z[2,3]} &= [\Delta Z_{[2,3]} - (Z_3^0 - Z_2^0)] \\
&\dots\dots\dots
\end{aligned} \tag{3}$$

olmak üzere fonksiyonel model matris gösterimiyle

$$v_{\Delta} = A_{\Delta} \delta X_{\Delta} - \ell_{\Delta} \tag{4}$$

biçiminde olur. Buradaki katsayılar matrisi A_{Δ} ,

$$A_{\Delta} = \begin{bmatrix}
-1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots
\end{bmatrix} \tag{5}$$

dengeleme bilinmeyenleri (δX), düzeltmeler (v_{Δ}) ve ötelenmiş gözlemler ($-\ell_{\Delta}$) vektörleri

$$\delta X = \begin{bmatrix} \delta X_1 \\ \delta Y_1 \\ \delta Z_1 \\ \delta X_2 \\ \delta Y_2 \\ \delta Z_2 \\ \delta X_3 \\ \delta Y_3 \\ \delta Z_3 \\ \dots \end{bmatrix}, \quad v_{\Delta} = \begin{bmatrix} v_{\Delta X[1,2]} \\ v_{\Delta Y[1,2]} \\ v_{\Delta Z[1,2]} \\ v_{\Delta X[1,3]} \\ v_{\Delta Y[1,3]} \\ v_{\Delta Z[1,3]} \\ v_{\Delta X[2,3]} \\ v_{\Delta Y[2,3]} \\ v_{\Delta Z[2,3]} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad -\ell_{\Delta} = \begin{bmatrix} \ell_{\Delta X[1,2]} \\ \ell_{\Delta Y[1,2]} \\ \ell_{\Delta Z[1,2]} \\ \ell_{\Delta X[1,3]} \\ \ell_{\Delta Y[1,3]} \\ \ell_{\Delta Z[1,3]} \\ \ell_{\Delta X[2,3]} \\ \ell_{\Delta Y[2,3]} \\ \ell_{\Delta Z[2,3]} \\ \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

şeklindedir (Güllü, 1998; Ersoy, 1997; Wolf ve Ghilani, 1997; Kurt, 1996; Eren ve Uzel, 1995; Hofmann vd., 1992).

GPS ağlarında ölçülerin stokastik yapısını oluşturan ağırlık matrisi, GPS ölçülerinin varyans-kovaryans matrisinden hesaplanır (Tiberius, 1999). Rölatif konum belirlemede 2 veya daha fazla sayıdaki alıcı uydulardan eş zamanlı olarak faz ölçüleri toplamaktadırlar. Uydu geometrisindeki değişikliklerden yararlanılarak tamsayı taşıyıcı faz belirsizliği ve baz bileşenleri çözülür. Bir uydudan gönderilen ve yer istasyonlarında ölçülen fazlar aynı uyduya ait oldukları için fiziksel olarak korelasyonludurlar. Ancak GPS uygulamalarında fiziksel korelasyonlar genellikle ihmal edilirler (Eren ve Uzel, 1995; Hofmann vd., 1992).

GPS relatif konum belirlemede, bir kenara ait ölçülmüş üç baz bileşeni birbirleriyle fark alma tekniklerinden dolayı matematik korelasyonludur. Bu nedenle 3*3 boyutlu bir varyans-kovaryans matrisi taşıyıcı faz ölçülerinin en küçük kareler dengelemesinin bir ürünü olarak her baz için elde edilir. Bu varyans-kovaryans matrisi ağ dengelemesinde gözlemlerin ağırlıkları olarak kullanılır. Her hangi bir GPS ağı için ağırlık matrisi 3*3' lük bloklar halinde köşegen tiptedir. Matrisin diğer tüm elemanları sıfır değerini alır. Koordinat fark ölçülerinin varyans-kovaryans matrisi aşağıdaki gibi kurulur.

$$K_{\Delta} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{\Delta X}^2 & m_{\Delta XY}^2 & m_{\Delta XZ}^2 \\ m_{\Delta YX}^2 & m_{\Delta Y}^2 & m_{\Delta YZ}^2 \\ m_{\Delta ZX}^2 & m_{\Delta ZY}^2 & m_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix}_{[1,2]} & \underline{0} & \dots \\ \underline{0} & \begin{bmatrix} m_{\Delta X}^2 & m_{\Delta XY}^2 & m_{\Delta XZ}^2 \\ m_{\Delta YX}^2 & m_{\Delta Y}^2 & m_{\Delta YZ}^2 \\ m_{\Delta ZX}^2 & m_{\Delta ZY}^2 & m_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix}_{[1,3]} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (7)$$

P_{Δ} koordinat fark ölçülerinin ağırlık matrisi, koordinat fark ölçülerinin varyans-kovaryans matrisi yardımıyla

$$P_{\Delta} = (K_{\Delta})^{-1} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. Böylece GPS ağının fonksiyonel ve stokastik modeli,

$$v_{\Delta} = A_{\Delta} \delta X_{\Delta} - \ell_{\Delta} \quad ; \quad P_{\Delta} \quad (9)$$

biçiminde elde edilmiş olur. (9) eşitliğinde verilen matematik modelin En Küçük Karelerle dengelenmesi sonucu dengeleme bilinmeyenleri,

$$\delta X_{\Delta} = (A_{\Delta}^T P_{\Delta} A_{\Delta})^+ (A_{\Delta}^T P_{\Delta} \ell_{\Delta}), \quad (10)$$

noktaların dengeli koordinatları,

$$X_i = X_i^0 + \delta X_{\Delta}, \quad (11)$$

düzeltilmeler,

$$v_{\Delta} = A_{\Delta} \delta X_{\Delta} - \ell_{\Delta} \quad (12)$$

dengeli koordinatların ters ağırlıkları,

$$Q_{xx} = (A_{\Delta}^T P_{\Delta} A_{\Delta})^+ \quad (13)$$

hesaplanır. p , nokta sayısı; n , koordinat farkı ölçü sayısı; $u = 3p$, koordinat bilinmeyenlerinin sayısı ve d , datum parametrelerinin sayısından hesaplanan serbestlik derecesinden ($f = n - u + d$) yararlanarak, birim ölçünün karesel ortalama hatası,

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{v_{\Delta}^T P_{\Delta} v_{\Delta}}{f}}, \quad (14)$$

dengeli koordinatların duyarlılığı,

$$\begin{aligned} m_x &= \pm m_0 \sqrt{q_{xx}} \\ m_y &= \pm m_0 \sqrt{q_{yy}} \\ m_z &= \pm m_0 \sqrt{q_{zz}} \end{aligned} \quad (15)$$

dengeli koordinatların varyans-kovaryans matrisi,

$$K_{xx} = m_0^2 Q_{xx}, \quad (16)$$

dengeli ölçüler,

$$\overline{\Delta X} = \Delta X + v_{\Delta}, \quad (17)$$

dengeli ölçülerin ters ağırlıkları,

$$Q_{\Delta} = A_{\Delta} Q_{xx} A_{\Delta}^T, \quad (18)$$

dengeli koordinat farklarının duyarlılığı,

$$\begin{aligned} m_{\Delta x} &= \pm m_0 \sqrt{q_{\Delta x}} \\ m_{\Delta y} &= \pm m_0 \sqrt{q_{\Delta y}}, \\ m_{\Delta z} &= \pm m_0 \sqrt{q_{\Delta z}} \end{aligned} \quad (19)$$

dengeli ölçülerin varyans-kovaryans matrisi,

$$K_{\Delta} = m_0^2 Q_{\Delta} , \quad (20)$$

düzeltilmeleri ters ağırlık matrisi,

$$Q_{vv} = P_{\Delta}^{-1} - Q_{\Delta} , \quad (21)$$

biçiminde hesaplanır (Güllü, 1998; Wolf ve Ghilani, Kurt, 1996; Kuang, 1996; Yaşayan, 1994).

1.5. İstatistik Testler

1.5.1. Model Hipotezinin Testi

Dengeleme hesabının matematik modelinin ölçülerle bilinmeyenler arasındaki geometrik ve fiziksel ilişkilere uygun olup olmadığı, ölçülerin duyarlılıklarını ve aralarındaki korelasyonları yeterince yansıtıp yansıtmadığı model hipotezinin testi yoluyla denetlenir. Deformasyon analizine geçmeden önce model hipotezinin testi yapılmalıdır (Öztürk, Şerbetçi, 1992).

Aynı koşullarda yapılan benzer türden ölçülerin değerlendirilmesi sonucunda, dengelemeden önce elde edilen ve gözlemlerin ağırlıklarının belirlenmesinde yararlanılan birim ölçünün ortalama hatasının öncül (a priori) değeri s_0 ile dengeleme hesabı sonucunda bulunan soncul (a posteriori) değeri m_0 büyüklüğü aynı bir karesel ortalama hata σ_0^2 'nin uygulamada elde edilen değeridir. Bu değerler kullanılarak model hipotezinin testi için sıfır hipotezi,

$$H_0 : E \{ m_0^2 \} = E \{ s_0^2 \} = \sigma_0^2 \quad (22)$$

biçiminde kurulur. Seçenek hipotezleri, tek yönlü testlerde

$$H_{S_1} : E \{ m_0^2 \} < E \{ s_0^2 \} \quad (23)$$

$$H_{S_1} : E \{ m_0^2 \} > E \{ s_0^2 \}$$

olarak, çift yönlü testlerde ise

$$H_{S_2} = E \{ m_0^2 \} \neq E \{ s_0^2 \} \quad (24)$$

olarak kurulur. Birim ölçünün öncül ve soncul değerleri yardımıyla hesaplanan test büyüklüğü,

$$T = \frac{m_0^2}{s_0^2} \quad ; \quad m_0 > s_0 \quad (25)$$

F-dağılım tablolarından yanılma olasılığı (α), payın serbestlik derecesi (f) ve paydanın serbestlik derecesine (f_f) göre alınan F-dağılımı tablo değerleri,

$$q_1 = F_{f,f_f,1-\alpha} \quad \text{ya da} \quad q_2 = F_{f,f_f,1-\frac{\alpha}{2}} \quad (26)$$

ile karşılaştırılır. Test büyüklüğü, seçenек hipotezi H_{S_1} ise q_1 ile seçenек hipotezi H_{S_2} ise q_2 ile karşılaştırılır. Eğer test büyüklüğü tablo değerinden küçük ise ($T < q$), dengeleme modeli geçerlidir. Başka bir deyişle kurulan fonksiyonel model, gözlemler arasındaki geometrik ve fiziksel ilişkilere uygundur. Stokastik model, gözlemlerin duyarlıklarını ve aralarındaki korelasyonları yeterince yansıtmaktadır. Eğer test büyüklüğü tablo değerinden büyük ise ($T > q$), dengeleme modeli geçersizdir. Bu durum, ölçülerde kaba hata olması ya da fonksiyonel ve stokastik modellerin yanlış kurulması gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Sıfır hipotezinin reddedilmesine bunlardan hangisinin neden olduğu bilinemez ve yukarıda verilen test ise bu konuda bilgi vermez. Bu durumda uyumsuz ölçüler testi ile uyumsuz ölçülerin ayıklanması gerekmektedir. Test sonucunda uyumsuz ölçülerden arınmış ölçülerle yeni bir dengeleme işlemi yapılır ve model hipotezi testi yenilenir (Konak, 1994; Şimşek, 1992; Tanır, 2000; Kara, 1998). Eğer yine model geçersiz olursa, seçtiğimiz öncül değer s_0 ağıda beklenen kaliteye uymamaktadır. Bu durumda dengeleme sonucunda bulduğumuz soncul değer m_0 ile ağırlıklar yeniden

belirlenir. Model hipotezi testi tekrarlanır. Hala seçenек hipotezi geçersiz çıkıyorsa fonksiyonel modelin test edilmesi gerekir (Kara, 1998; Konak, 1994).

1.5.2. Uyuşumsuz Ölçüler Testi

Deformasyonların izlenmesine yönelik tesis edilen jeodezik ağ noktalarında ortaya çıkması beklenen yer değıştirmelerin saptanması için yapılan ölçmeler son derece özenle yapılmasına rağmen yine de bazı hataların sonuçları olumsuz yönde etkilemeleri önlenemez ve bu hatalar “deformasyon var” şeklinde yanlış karar verilmesine neden olur. Model hataları çoğunlukla ölçülerdeki kaba hatalardan kaynaklanır. Kaba hatalar düzeltme denklemlerinin kurulması aşamasında sabit terimlerde kendilerini gösterirler ve kolayca giderilebilirler. Buna karşın rasgele ölçü hatalarına çok yakın büyüklükte olan kaba ve sistematik hatalar kolaylıkla fark edilemezler ve dengeleme hesabı sonucunda bulunan büyüklükleri olumsuz yönde etkilerler. Uyuşumsuz ölçüler dengelemenin matematik modelinin geçersizliğine neden olabilir. Bunlar ancak uyuşumsuz ölçüler testi ile belirlenebilirler. Model hipotezini geçersiz kılabilen uyuşumsuz ölçüler data-snooping, tau ve t-testlerinden herhangi biriyle ortaya çıkarılabilir. Sıfır hipotezi, “uyuşumsuz ölçü yoktur” biçiminde öngörölür (Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Şimşek, 1992).

Herhangi bir l_i ölçüsüne ilişkin düzeltme v_i , düzeltmelerin kofaktör matrisi (Q_{vv})’nin i ’nci köşegen elemanı q_{vivi} , öncül ve soncul standart sapmalar sırasıyla s_0 ve m_0 ile gösterilirse Baarda (data-snooping) testi için

$$T_i = \frac{|v_i|}{s_0 \sqrt{q_{vivi}}} \sim N(0,1) \quad (\text{standartlaştırılmış normal dağılım}) \quad (27)$$

ve tau-testi için

$$T_i = \frac{|v_i|}{m_0 \sqrt{q_{vivi}}} \sim \tau_f \quad (\text{Tau-dağılımı}) \quad (28)$$

test büyüklükleri geçerlidir (Şimşek ve Demirel, 1997; Ayan, 1992; Demirel, 1987; Aksoy, 1984). Test edilecek i . ölçü dışında kalan diğer ölçülerle bulunacak soncul standart sapma $\bar{m}_0$ olmak üzere

$$\bar{m}_0^2 = \frac{[p.v.v] - \frac{v_i^2}{q_{v_i v_i}}}{f-1} \quad (29)$$

t-testi için

$$T_i = \frac{|v_i|}{\bar{m}_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} \sim t_{f-1} \quad (\text{t-dağılımı}) \quad (30)$$

test büyüklüğü t-dağılımlıdır. (27), (28) ya da (30) test büyüklüğünden hesaplanan değerlerin en büyüğü öngörülen yanılma olasılığı ve serbestlik derecesine bağlı olarak ilgili dağılımın sınır değerinden büyük çıkarsa söz konusu ölçünün uyumsuz olduğu yargısına varılır. Bu ölçüler çıkarılır ya da yinelenir ve işleme uyumsuz ölçü kalmayıncaya kadar devam edilir (Güllü, 1998; Dilaver, 1996; Kuang, 1996; Yalçınkaya (Ünver), 1994; Konak, 1994; Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Şimşek, 1992).

1.5.3. Genişletilmiş Fonksiyonel Modelin Testi

Dengeleme hesabında, oluşturulan fonksiyonel model kaba ve sistematik hatalardan arındırıldığı sürece gerçeği yansıtır. Genişletilmiş fonksiyonel modelin testi, Y ek bilinmeyenlerinin göz ardı edilmesinden kaynaklanan sistematik hataların oluşup oluşmadığı, başka bir deyişle Y ek bilinmeyenlerinin anlamlılık testiyle belirlenir. Genişletilmiş fonksiyonel model matris gösterimiyle,

$$\begin{aligned} 1 + v &= A_x X + A_y Y \\ 1 + v &= \begin{bmatrix} A_x & A_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

biçimindedir. Burada X, normal fonksiyonel model bilinmeyenleri; Y, genişletilmiş fonksiyonel modelin ek bilinmeyenleri; A_x ve A_y sırasıyla X ve Y bilinmeyenlerine karşılık gelen katsayılar matrisleridir. Ek bilinmeyenler rasgele değişkenler olarak kabul edildiğinden $E\{Y\} = 0$ dır. Birim ölçünün ortalama hatası ve birim ağırlıklı varyansın ek bilinmeyenlerle hesaplanan değeri;

$$m_g^2 = \frac{v^T p v}{n - u + d} \quad (32)$$

$$\overline{m}_g^2 = \frac{Y^T Q_{yy}^{-1} Y}{u_g}$$

dır. Bu değerlerden test büyüklüğü,

$$T_g = \frac{\overline{m}_g^2}{m_g^2} \quad (33)$$

eşitliğinden hesaplanır. Yukarıdaki bağıntılarda Q_{yy} , Y bilinmeyenlerine ilişkin ters ağırlık matrisini, u ; bilinmeyenlerin sayısını; u_g , Y ek bilinmeyenlerinin sayısını ve d , rank bozukluğunu göstermektedir. Test değerine karşılık gelen sınır değer F -dağılımı tablo değeriyle karşılaştırılarak genişletilmiş fonksiyonel modelin anlamlı olup olmadığına karar verilir. $T > F$ -tablo ise modelin genişletilmesi anlamlıdır. Buna karşılık $T < F$ -tablo ise hesaplanan Y ek bilinmeyenlerinin anlamlı olmadıklarına dolayısıyla fonksiyonel modelin genişletilmesinin anlamsız olduğu sonucuna varılır (Koch, 1999; Yalçınkaya (Ünver), 1994; Yaşayan 1994; Yanıçoğlu, 1986).

1.6. Deformasyon Modelleri

Herhangi bir etkiden dolayı objenin şeklinde, boyutunda ve konumunda meydana gelen değişimler deformasyon olarak adlandırılır. Değişimlerin belirlenmesi ve yorumlanması deformasyon modellerinin ana amacıdır. Deformasyon ölçmeleri mühendislik ölçmelerindeki en önemli aktivitelerden biridir. Deformasyon ölçme sonuçları direkt olarak insan hayatı ve mühendislik yapılarının güvenliği ile ilgilidir (Kuang, 1996).

Deformasyon ölçüsü yapmanın iki temel amacı vardır. Bunlar, deforme olan objenin geometrik durumu (konum ve şekil değişimi vs.) ve fiziksel durumu (etkiyen kuvvet ile deformasyon ilişkisi) hakkında bilgi edinmektir. Bu iki problem deformasyon analizlerinin ilgi alanına girmektedir. Günümüzde zamana, konuma ve etkiyen kuvvete bağlı olarak bir objenin hareketlerini ve yer değiştirmelerini araştırmak deformasyon analizlerinin temel görevi olmuştur. Kontrol ölçmelerinin ve deformasyon analizinin amacı hareketlerin ya da konumların yüksek doğrulukta elde edilmesidir. Deformasyon izlemede önemli olan rölatif büyüklükler olduğu için seçilen koordinat sisteminin önemi yoktur (McLellan vd., 1989; Gökalp, 1995; Gökalp ve Karaali, 1994).

Deformasyon belirleme süreci, deformasyon oluşumunun ölçümü, analizi ve yorumlanması şeklindedir. Deformasyon analizinde kullanılacak deformasyon modelinin seçimi önemlidir. Uygun bir deformasyon modeli deformasyon olayını doğru bir şekilde tanımlarken yetersiz bir model deformasyon analizinde başarısızlıklara neden olabilir. Kompleks deformasyon modelleri modelin doğruluk, güvenilirlik ve hassasiyetini azaltmaz buna karşılık deformasyon analizinin başarısızlığına sebep olabilir. Diğer yandan basit deformasyon modelleri araştırılan objenin deformasyonunu tanımlamak için yetersiz kalabilir. Deformasyon seyri ve şiddeti konusunda bir ön bilgi mevcut olmadığı zaman basit modellerle başlangıç yapılabilir. Eğer basit modeller istatistik testler sonucunda yetersiz görülürse daha kompleks modellerle çalışılabilir (Ding vd., 2000; Ren ve Ding, 1996; Yalçinkaya (Ünver), 1994; Wuhan, 1978).

Deformasyonlar, problemin şekline, kapsamına ve uygulanan ölçme yöntemlerinin türüne göre değişik modeller içinde incelenir.

Bu modeller;

- zamana bağlı olmayan statik modeller,
- zamana ve konuma bağlı olan kinematik modeller ve
- hareketin nedeninin de dikkate alındığı zamana ve konuma bağlı dinamik modellerdir.

Statik modelin konusu, deformasyon irdemesi yapılan objenin karakteristik noktalarına ait deformasyon vektörlerinin, zamandan ve etkiyen dış kuvvetlerden bağımsız olarak belirlemektir. Bu modelle deformasyonun belirlenmesi için öncelikle obje çeşitli periyotlarda ölçülmeli ve her periyottaki ölçüler ayrı ayrı dengelenmelidir. Ölçme

periyotları arasındaki koordinat farkları hem araştırılan objedeki deformasyonu hem de gözlemlerdeki hataları yansıtır. Bu nedenle periyotlar arasındaki koordinat farkları, istatistik yöntemlerle test edilerek deformasyon irdelemesi yapılır. Objeye etki eden yükler ve geometrik reaksiyonlar arasındaki davranışların incelenmesi statik modelin konusu dışındadır. Bu modelde tüm sistemin bir kez ölçülmesi sırasında noktaların sabit kaldığı varsayılır. Bu tanımıyla statik model jeodezik olarak en çok uygulanan bir deformasyon analizi yöntemidir (Atasoy, 2001; Atasoy, 1988; Yalçinkaya (Ünver) ve Tanır, 2000; Heunecke ve Pelzer, 1998; Ayan, 1982).

Statik deformasyon modelinde araştırılan objenin bir kez ölçülmesi sırasında hareket etmediği ve sadece iki periyot arasında konum değiştirdiği kabul edilmektedir. Aslında araştırılan obje bir kez ölçülmesi sırasında genellikle az ya da çok sürekli bir hareket içindedir. Bu durumlarda, zamana bağlı olarak hareket parametrelerinin (konum, hız, ivme) belirlendiği kinematik deformasyon modelleri uygulanmalıdır. Kinematik modelin amacı, deformasyona neden olan dış güçleri dikkate almaksızın zamana bağlı fonksiyonlar yardımıyla nokta hareketlerinin uygun bir tanımını bulmaktır (Gülal, 1999/1, 1999/2; Ayan, 1982; Yalçinkaya (Ünver), 1988).

Gelişen ölçme teknikleri, deformasyon analizinde de yeni değerlendirme modellerinin kullanılmasını zorunlu kılmıştır. Günümüzde artık mühendislik ölçmelerinin amacı, köprüler, barajlar, kuleler ile heyelanlara ve depremlere maruz kalan kütleler gibi objelerin davranışlarını analiz etmek olmuştur. Başka bir deyişle hareket davranışlarının, harekete neden olan güçler belirlenerek analiz modelinin içine katıldığı dinamik modelle belirlenmesi yeni uğraş alanı olmuştur. Son yıllarda dinamik deformasyon modelleri klasik deformasyon modellerinin (statik ve kinematik) yerini almaya başlamıştır (Heunecke, 1995).

Dinamik deformasyon modeli, statik ve kinematik deformasyon modellerini kapsayan en genel modeldir. Dinamik deformasyon modeli, deformasyon ile deformasyona neden olan kuvvetler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi ifade eder. Bu modelde yalnız geometrik değişimler değil, deformasyona neden olan kuvvetlerin zamana ve dış etkenlere bağlı olarak değişimi ve birbirleriyle ilişkileri yanında, bu kuvvetlerin deformasyon sonucunu doğuran dönüşüm fonksiyonu da araştırılır. Dinamik deformasyon modelinde amaç, bu dönüşüm fonksiyonunun saptanması ve nedenler ile deformasyonların yer ve zaman ilişkilerinin ortaya konmasıdır (Gülal, 1999/2; Yalçinkaya (Ünver), 1988; Ayan, 1982).

Dinamik deformasyon modelinde, objeye etki eden yüklerin etkisi altındaki objenin durumuna ait bilgilerin önceden araştırılması önemlidir. Dinamik deformasyon modelinin oluşturulması aşamasında, etki eden kuvvetler ile bunların olası büyüklükleri ve zamana göre değişimleri hakkında ön bilgiler elde edilmelidir. Obje deformasyonlarının büyüklüğü, deformasyonların zaman sürecindeki değişimi gibi ön bilgiler, geliştirilecek model tasarımı için gereklidir. Bu tasarım bilgileri başlangıç aşamasında genelde yeterlidir. Böylece kullanılacak ölçü yöntemleri için önemli kriterler üretilebilir. Bunlar ulaşılabilecek ölçü doğruluğu, gözlem periyotlarının zamana göre dağılımı ve sayısı ile bir gözlem için harcanacak süre gibi önemli kriterlerdir. Deformasyonun zamansal değişiminin izlenebilmesi için gözlem periyotlarının zamana göre dağılımı ve ölçü süreleri belirlenmelidir. Ölçme periyotları, etkiyen kuvvetin aktif-pasif olma durumuna bağlıdır. Ölçü süresi ise deformasyon hızına ve ölçü inceliğine bağlıdır (Pelzer, 1993). Yukarıda verilen bilgiler ışığında deformasyon modelleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler (Welsch, 1996; Heunecke ve Pelzer, 1988).

Tablo 2. Deformasyon modellerinin sınıflandırılması

Parametre	Statik Model	Kinematik Model	Dinamik Model
Zaman	Modelleme yok	Hareketler zamanın fonksiyonu olarak düşünülür	Hareketler zamanın ve yüklerin fonksiyonu olarak düşünülür
Etkiyen Güçler	Hareketler yüklerin fonksiyonu olarak düşünülür	Modelleme yok	Hareketler zamanın ve yüklerin fonksiyonu olarak düşünülür
Objenin Durumu	Yükler altındaki dengede yeterlilik	Harekette devamlılık	Harekette devamlılık

Tablo 2’de görüldüğü gibi dinamik deformasyon modeli, deformasyon analizi için kullanılan en genel modeldir. Fiziksel parametreler dikkate alınmazsa dinamik model bir geometrik deformasyon modeline dönüşür. Geometrik model, zamanı dikkate alan konum, hız ve ivme bileşenlerinden oluşan kinematik model ile hız ve ivme bileşenlerinin dikkate alınmadığı statik modeli içerir.

1.6.1. Statik Deformasyon Modeli

Basit olarak iki koordinat değerinin karşılaştırılması yerine, ölçülerin tamamının değerlendirildiği istatistik testlere dayalı çeşitli statik deformasyon modelleri geliştirilmiştir. Statik model bir objede hareket oluşup oluşmadığını, o obje ve çevresini kapsayan deformasyon ağının çeşitli periyotlarda belirlenen nokta koordinat farklarını istatistik olarak eşdeğerlik testi ile saptayan en temel yöntemdir. Bu modellerden bazıları, Pelzer tarafından geliştirilmiş θ^2 -Ölçütü, Heck, Kuntz, Mier-Hirmer tarafından geliştirilen ve noktaların analitik yoldan irdelenmesini sağlayan Analitik Yöntemler, Mierlo tarafından geliştirilen Mierlo Yöntemi, Caspary-Schwintzer tarafından geliştirilen Cholesky Carpanlarına Ayırma Yöntemleri olarak isimlendirilir. Bu çalışmada statik modellerden uygulamada en çok kullanılan θ^2 -Ölçütü yöntemi uygulanmıştır.

Deformasyon ağlarının ölçme planı ve uygulanan ölçme yöntemleri, araştırma süresi boyunca aynı kalırsa yöntemden kaynaklanan sistematik etkiler, karşılaştırılan periyotların tümünde benzer ve aynı büyüklükte ortaya çıkmış olur. Eşdeğerlik testleri sırasında koordinat vektörlerinin farkları ile işlem yapıldığından belirlenen deformasyonlar, sistematik hatalardan arındırılmış olur. İki ölçme periyodu arasında geçen sürede hiçbir noktada deformasyon olmasa bile kaçınılmaz ölçü hataları nedeniyle, bu ölçülerden elde edilen nokta kümeleri arasında kesin bir eşdeğerlik beklenemez. İki ölçü periyodunda elde edilen nokta kümelerinin birbiri üzerine dönüştürülmesi sonucunda bazı noktalar az çok farklılıklar gösterecektir. Bu farklılığın rasgele hatalardan mı kaynaklandığı, yoksa karşılaştırılan bu iki konum bilgileri kümesi arasında bir değişim mi bulunduğu sorusuna θ^2 -Ölçütü ile çözüm aranmaktadır.

θ^2 -Ölçütü yönteminde, önce tüm periyotlardaki ölçüler ayrı ayrı serbest dengelenerek, dengeli koordinatlar vektörü x , düzeltmelerin kareleri toplamı v^Tpv , bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi Q_{xx} hesaplanır. İki periyot arasında anlamlı nokta hareketi olup olmadığını belirlemek için, periyotlardan elde edilen dengeli koordinatların fark vektörü (d) hesaplanır. İki ölçü periyodunda hesaplanan dengelenmiş koordinatlar Helmert dönüşümü ile birbiri üzerine çakıştırıldığında ortak noktalardaki fark doğrudan doğruya d vektörünün elemanını verir (Yalçınkaya (Ünver) ve Tanır, 2000; Kuhlman ve Pelzer, 1997; Pelzer, 1985; Atasoy, 1984; Öztürk, 1987).

İki ölçü periyodunda hesaplanan nokta koordinatları (x_1, x_2) ile fark vektörü,

$$d = x_2 - x_1 \quad (34)$$

olarak hesaplanır. Ağın herhangi bir noktasında deformasyon oluşup oluşmadığını araştırmak için, sıfır hipotezi hiçbir noktada deformasyon yoktur şeklinde

$$H_0 : x_2 - x_1 = 0 \quad (35)$$

(35)'e göre kurulur (Öztürk, 1987). d fark vektörüne ait kofaktörler matrisi Q_d , iki grup ölçülerin birbirinden bağımsız olduğu varsayımı ile hata yayılma kuralı uygulandığında,

$$Q_d = Q_{xx_1} + Q_{xx_2} = (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \quad (36)$$

olarak elde edilir. Hipotezin düzeltmelerin ağırlıklı kareleri toplamına etkisi olan θ^2 -ölçütü,

$$\theta^2 = (x_2 - x_1)^T \{ (A_1^T P_1 A_1)^+ + (A_2^T P_2 A_2)^+ \}^+ (x_2 - x_1) \quad (37)$$

biçiminde elde edilir. Q_d 'nin rangı, ağın geometrik şeklinin ve datum parametrelerinin her iki ölçme periyodunda da aynı kaldığı durumlarda

$$h = \text{rang} (Q_{xx_1}) = \text{rang} (Q_{xx_2}) = u_k - d_{\text{datum}} \quad (38)$$

biçiminde hesaplanır. Burada, u_k ; ağdaki koordinat bilinmeyen sayısı, d_{datum} ; datum parametreleri sayısıdır. Ölçülerin; aynı aletler, aynı meteorolojik koşullarda, aynı ölçme ekibince yapıldıkları varsayılırsa her iki ölçü dizisinin kuramsal varyansları eşit olur. Her iki ölçü kümesinin ortak standart sapması

$$s_0^2 = \frac{v_1^T P_1 v_1 + v_2^T P_2 v_2}{f_1 + f_2} \quad (39)$$

$$f_i = n_i - u_i + d_{\text{datum}} ; \quad i = 1, 2$$

eşitliğinden hesaplanır. Eşdeğerlik testinin test büyüklüğü,

$$T = \frac{\theta^2}{s_0^2 h} \quad (40)$$

olarak hesaplanır. Test değeri T , F -tablo değeri ile karşılaştırılır. $f = f_1 + f_2$ olmak üzere, $T < F_{h,f,1-\alpha}$ ise H_0 hipotezi geçerlidir. Yani iki periyot arasında geçen sürede $s = 1 - \alpha$ kadar bir istatistik güvenle ağ noktalarında deformasyon gözlenmemiştir denilebilir. $T > F_{h,f,1-\alpha}$ ise H_0 hipotezi geçerli değildir. Yani iki periyot arasında geçen sürede $s = 1 - \alpha$ kadar bir istatistik güvenle ağ noktalarından birinde ya da birkaçında deformasyon olduğuna karar verilir. Deformasyon olduğuna karar verildikten sonra, ağda hareket eden noktalar tek tek belirlenir. Bunun için ağ noktaları içinde her seferinde bir nokta hareketli, diğerleri sabit olduğu varsayımı ile nokta sayısı kadar θ^2 -Ölçütü değeri hesaplanır. d fark vektörü ve Q_d kofaktörler matrisi aşağıdaki gibi alt matrislere ayrılır.

$$d = \begin{bmatrix} d_F \\ d_B \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$Q_d = \begin{bmatrix} Q_{FF} & Q_{FB} \\ Q_{BF} & Q_{BB} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Burada B , hareketli noktaları ve F , sabit noktaları göstermektedir. Q_d matrisinin tersi alınarak ağırlık matrisi aşağıdaki biçimde

$$Q_d^+ = P_d = \begin{bmatrix} P_{FF} & P_{FB} \\ P_{BF} & P_{BB} \end{bmatrix} \quad (43)$$

elde edilmiş olur. Her nokta deformasyon kuşkusu bulunan B noktası olarak ele alınır. Böylelikle her yeni adımda başka bir noktanın koordinatları, alt vektör d_B olarak yazılır. Bu durumda ağın nokta sayısı p kadar aykırılık etkisi hesaplanır. Alt matrisler Gauss yöntemi ile indirgenerek,

$$\bar{d}_B = d_B - P_{BB}^{-1} P_{BF} d_F \quad (44)$$

$$\bar{P}_{FF} = P_{FF} - P_{FB} P_{BB}^{-1} P_{BF} \quad (45)$$

değerleri hesaplanır. Bu değerler yardımıyla θ^2 değeri

$$\theta^2 = d^T Q_d^+ d = d_F^T \bar{P}_{FF} d_F + \bar{d}_B^T P_{BB} \bar{d}_B \quad (46)$$

olarak bağımsız iki bileşene ayrılır. $d_F^T \bar{P}_{FF} d_F$ sabit olduğu varsayılan noktaya ait aykırılık, $\bar{d}_B^T P_{BB} \bar{d}_B$ hareketli olduğu varsayılan her noktaya ait aykırılıktır.

$$(\theta^2)_i = (\bar{d}_B^T P_{BB} \bar{d}_B)_i \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (47)$$

Toplam aykırılıktaki payı en büyük olan $(\theta^2)_{\max} = \text{Max}((\theta^2)_i)$ olan noktada, $s = 1 - \alpha$ kadar istatistik güvenle deformasyon olduğuna karar verilir. Ağda hareket eden başka nokta bulunup bulunmadığını araştırmak için d ve Q_d 'ye bir S-dönüşümü yapılarak geriye kalan $(p-1)$ noktadan yararlanarak yeni bir datum verilir. d ve Q_d 'de deformasyon noktasına ait elemanlar, en son satır ve sütunlara atılır. GPS ağları için ortogonal özellikli dönüşüm parametre katsayılar matrisi (G), p sayıda nokta için aşağıdaki biçimde oluşturulur.

$$\underline{G}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} & \dots & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{p}} \end{bmatrix} \quad (48)$$

G matrisinden yararlanarak S dönüşüm matrisi aşağıdaki biçimde elde edilir (Yalçınkaya (Ünver), 1996/2; Kurt, 1996; Öztürk ve Şerbetçi, 1992; Mierlo, 1978).

$$S_i = I - G G^T \quad (49)$$

Dönüşüm matrisi yardımıyla d ve Q_d matrisi

$$d_i = S_i d \quad (50)$$

$$Q_{di} = S_i Q_d S_i^T \quad (51)$$

biçiminde dönüştürülür. i.dönüşümden sonra fark vektörü ve bunun ters ağırlık matrisi

$$d_i = \begin{bmatrix} d_D \\ d_N \end{bmatrix} = S_i \begin{bmatrix} d_F \\ d_B \end{bmatrix} = S_i d \quad (52)$$

$$Q_{di} = \begin{bmatrix} Q_{DD} & Q_{DN} \\ Q_{ND} & Q_{NN} \end{bmatrix} \quad (53)$$

biçiminde alt matrislere ayrılır. Burada, D, datum noktalarını; N, datum dönüşümüne katılmayan noktaları göstermektedir. d_N , toplam aykırılıktaki payları en büyük olan θ^2_{max} noktalarına ait d_B değerinin dönüşümden sonraki değeridir. i. belirleme adımından sonra kalan aykırılık,

$$\theta^2_{kalan} = d_D^T Q_{DD}^+ d_D \quad (54)$$

olarak hesaplanır. m, deformasyon olduğu belirlenen noktaya ilişkin koordinatların sayısı olmak üzere serbestlik dereceleri $h_D = h - m$, $f_D = f - 3$ biçiminde hesaplanır. Test büyüklüğü,

$$T_D = \frac{\theta^2_{kalan}}{s_0^2 \cdot h_D} > F_{h_D, f_D, 1-\alpha} \quad (55)$$

ise ağda hareketli nokta vardır. Yeni hareketli nokta, yukarıda açıklanan işlemler tekrar edilerek belirlenir. Bu işlemlere test büyüklüğü, tablo değerinde küçük oluncaya kadar devam edilir. Son bir S dönüşümü ile ağda sabit kalan noktalar P_D , deformasyon olduğu kanıtlanan noktalar P_N ve deformasyon büyüklükleri d_N elde edilir (Atasoy, 1988; Gründig vd., 1985; Dupraz vd., 1979; Pelzer, 1971).

1.6.2. Kinematik Deformasyon Modelleri

Kinematik modellerin genel amacı, etkiyen kuvvetleri dikkate almaksızın zamana ve konuma bağlı olarak deformasyon noktalarının hareketlerini veya deformasyon bölgesinin hareket yüzeyini saptamaktır. Kinematik modellerde zamana bağlı hesaplanan değişimler ağ noktalarının hız ve ivmeleri yardımıyla tanımlanabilir. Böylece modeldeki bilinmeyen temel parametreler konum, hız ve ivmelerdir (Liu, 1998; Neyman, 1994; Yalçinkaya (Ünver), 1996/1, 1994; Heunecke, 1995; Grewal ve Andrews, 1993; Pelzer, 1985).

Bu çalışmada uygulanan kinematik deformasyon modelleri;

- kinematik tek nokta ve
- kinematik yüzey modelidir.

1.6.2.1. Kinematik Tek Nokta Modeli

Kinematik tek nokta modelinde, jeodezik ağda zamanla hareket eden noktalar, hareketin büyüklüğü, nokta hareketlerinin hızları ve ivmeleri zaman bağlı (56) eşitliğinde verilen bir fonksiyonla saptanır.

$$\mathbf{x}_j^{(k)} = \mathbf{x}_j^{(k-1)} + \mathbf{v}_j(t_k - t_{k-1}) + \frac{1}{2} \mathbf{a}_j(t_k - t_{k-1})^2 + \dots \quad (56)$$

Burada $\mathbf{v}$, nokta hareketinin hızını; $\mathbf{a}$, nokta hareketinin ivmesini; t_k , k. periyodun ölçü zamanını; t_{k-1} , (k-1). periyodun ölçü zamanını; j, nokta koordinatlarının sayısını ($j=1, 2, \dots, 3n$; n: nokta sayısı) göstermektedir. Kinematik tek nokta modelinin hareket parametreleri (konum, hız, ivme), literatürde Hannover yaklaşımı olarak adlandırılan yöntemle adım adım hesaplanabilir. Böylece ara sonuçlar adım adım test edilir ve hesap yolu denetlenmiş olur. Hannover yaklaşımının işlem adımları aşağıda açıklandığı gibidir.

1. Adım : Her periyot ölçüleri serbest ağ yöntemi ile dengelenerek ölçülerde bulunan kaba hatalar belirlenir. Hatalı ölçüler serbestlik ölçülerine bakılarak ayıklanır veya yinelenir. GPS ağı uyumlu bulunan ölçülerle dengelenip her ölçme periyodu için noktaların dengeli koordinatları ($\mathbf{x}$), dengeli koordinatların ters ağırlık matrisi ($\mathbf{Q}_{xx}$) ve birim ölçünün varyansı (s_0^2) hesaplanır. Bu değerler, ikinci adımda veri olarak kullanılır.

2. Adım : Bu adımda statik model ile hareketler saptanır. Statik model,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} \quad (57)$$

şeklinde oluşturulur. Bu modelin sıfır hipotezi “ $H_0^{(s)} : \text{zamanlar arasında geçen sürede hareket oluşmamıştır}$ ” şeklindedir. İstatistik test sonucunda bu hipotez reddedilirse, tüm bölgede hareket olup olmadığına bakılır. Hareket varsa diğer adıma geçilir.

3. Adım : (57) bağıntısındaki statik model hız parametreleriyle genişletilerek doğrusal model,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + v_j(t_k - t_{k-1}) \quad (58)$$

şeklinde oluşturulur. Doğrusal modelin sıfır hipotezi “ $H_0^{(d)} : \text{tüm noktalarda doğrusal hareket vardır}$ ” biçiminde kurulur. Eğer test sonucunda bu hipotez reddedilirse ve bir hareket nedeni varsa; yüksek dereceli bir hareket modeli denir. Böylece karesel hareketi belirleyen diğer adıma geçilir.

4. Adım : (58) modeli ivme parametresi ile genişletilerek karesel model,

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + v_j(t_k - t_{k-1}) + \frac{1}{2} a_j(t_k - t_{k-1})^2 \quad (59)$$

oluşturulur. Bu modelin sıfır hipotezi “ $H_0^{(a)} : \text{tüm noktalarda ivmesel hareket vardır}$ ” biçiminde kurulur. Bir deformasyon modelinin yorumlanması için özellikle ivmenin işareti çok anlamlıdır. Çünkü deformasyonun seyrinin nasıl olacağı ivmenin büyüklüğüne göre anlaşılır. İvme > 0 ise deformasyon hızı büyür. Bu durum araştırma objesinin kararsızlığını gösterir. İvme < 0 ise deformasyon hızı azalır. Çoğu kez ivmenin işaretini deformasyon modelinin fiziksel çevre koşulları etkiler (Pelzer, 1993).

Kinematik tek nokta modelinden (59) her noktanın hareket parametrelerinin, aynı anda dengeli olarak hesaplanabilmesi için çok sayıda ölçme periyodunda yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Bu nedenle, hareket parametrelerini az sayıda ölçü periyodu ile belirleyebilen Kalman-filtreleme yöntemiyle hesaplamanın yapılması gerekir (Rossikopoulos vd., 1998; Yalçınkaya (Ünver), 1994; Pelzer, 1993).

1.6.2.1.1. Kalman-Filtreleme Tekniği

Kalman-filtreleme tekniği bütün dinamik sistemlerin durum değişkenlerinin kestiriminde kullanılabilir. Örneğin radyo dalgalarının ve radar sinyallerinin kestiriminde, sismik verilerin analizinde, görüntü işlemede, hava raporlarının tahmininde, tarım ürünlerinin en uygun toplanma zamanlarının önceden tahmin edilmesi gibi bir çok mühendislik uygulamalarında kullanılabilen bir kestirim yöntemidir. Kalman-filtresi, lineer dinamik bir sistemin durum vektörlerinin kestiriminde kullanılan lineer karesel bir kestirim operatörü olarak tanımlanabilir (İnce, 1999; Grewal ve Andrews, 1993). Kalman-filtreleme tekniği en küçük kareler yönteminin etkili hesaplama yeteneğini kullanarak matematiksel eşitliklerin çözülebilmesi için geliştirilmiştir. Kalman-filtreleme metodu ile önceki, şimdiki ve hatta gelecekteki durumların kestirimleri yapılabilmektedir (Welch ve Bishop, 2002).

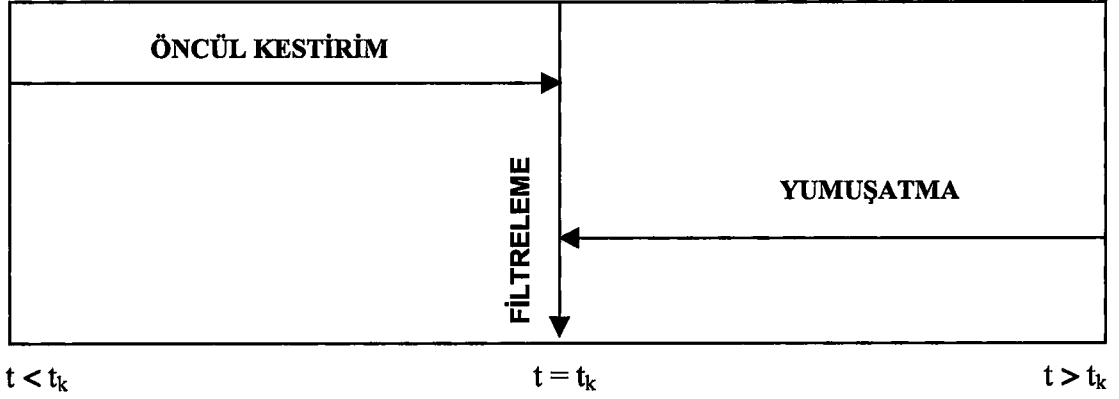
Deformasyonun hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü, deformasyon olayını kestirmek için hesaplanır. Bu nedenle deforme olan objenin durum vektörünün kestirimi için Kalman-filtreleme yönteminin kullanılması çok uygundur. Kalman-filtreleme’de durum vektörünün bileşenleri sistemlerin bilinmeyenleridir. Kalman-filtreleme’nin bu özelliği deformasyon davranışını anlamada ve özellikle deprem ve heyelan gibi afetlerin araştırılması için çok önemlidir (İnce, şahin, 2000). Kalman-filtreleme yönteminde statik ve kinematik hareketler araştırılır. Bu yöntemin farkı ve olumlu yanı düzgün ve düzgün olmayan hareketleri az sayıdaki periyot ölçüleriyle belirleyebilmesidir. Kalman-filtreleme yönteminde amaç, önceki periyotta bilinen hareket parametrelerinden ekstrapolasyon yoluyla sonraki periyottaki hareket parametrelerinin hesaplanmasıdır (Yalçinkaya (Ünver), 1994; Grewal ve Andrews, 1993).

Kalman-filtresi üç temel aşamadan oluşur.

a) Öncül Kestirim (prediksiyon, ekstrapolasyon) : $t < t_k$ koşuluyla t_k anındaki durum değişkenlerinin, sistemin önceki özelliklerinden faydalananarak hesaplanması aşaması,

b) Filtreleme : Herhangi bir t anında sistemin t_k anındaki durum parametreleri $t = t_k$ koşulu ile t anındaki ölçüler de kullanılarak hesaplanması aşaması,

c) Yumuşatma : Herhangi bir t anında, t_k anındaki durum değişkenleri $t > t_k$ koşuluyla, t_k anına kadar ki tüm ölçülerle birlikte hesaplanması aşamasıdır.



Şekil 9. Öncül kestirim (prediksiyon), filtre, yumuşatma aşamaları ve aralarındaki ilişki (İnce, 1999).

Kalman-filtreleme Tekniği, t_{k-1} periyodunda bilinen hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü bilgileri ve t_k periyodunda yapılmış ölçüler yardımıyla güncel durum vektörünün tahmininde kullanılır. Bu yöntemde prediksiyonla çözüm yapıldığı için ölçülerin belirli oranda ölçü hatalarıyla yüklü oluşu ve bir önceki zamandaki durum vektöründeki elemanların da hatasız olmaması nedeniyle sınırsız biçimde extrapolyasyonla genişletilmemelidir.

Hareket parametrelerinden oluşan durum vektörü, konum ve konumun zamana göre birinci türevi hız, ikinci türevi ivmeden oluşan değişkenlerdir. Bu parametreler azaltılır veya artırılabilir. Artırıldığı zaman hareketin yorumlanması zorlaşabilir. Üç boyutlu ağlara göre konum, hız ve ivmeden oluşan hareket modeli aşağıdaki (60) eşitliğine göre oluşturulur (Rossikopoulos vd., 1998; Pelzer, 1985, 1986; Holdahl ve Hardh, 1979).

$$\begin{aligned}
 x_k &= x_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{x}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{x}_{k-1} \\
 y_k &= y_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{y}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{y}_{k-1} \\
 z_k &= z_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{z}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{z}_{k-1}
 \end{aligned} \tag{60}$$

Burada, (x_k, y_k, z_k) ve $(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$, noktanın sırasıyla t_k ve t_{k-1} periyodundaki koordinatlarını,

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{k-1} &= \frac{\partial x_{k-1}}{\partial t}, x_{k-1} \text{ koordinatının } t_{k-1} \text{ anındaki hızını,} \\
\dot{y}_{k-1} &= \frac{\partial y_{k-1}}{\partial t}, y_{k-1} \text{ koordinatı için } t_{k-1} \text{ anındaki hızını,} \\
\dot{z}_{k-1} &= \frac{\partial z_{k-1}}{\partial t}, z_{k-1} \text{ koordinatının } t_{k-1} \text{ anındaki hızını,} \\
\ddot{x}_{k-1} &= \frac{\partial^2 x_{k-1}}{\partial t^2}, x_{k-1} \text{ koordinatının } t_{k-1} \text{ anındaki ivmesini,} \\
\ddot{y}_{k-1} &= \frac{\partial^2 y_{k-1}}{\partial t^2}, y_{k-1} \text{ koordinatının } t_{k-1} \text{ anındaki ivmesini,} \\
\ddot{z}_{k-1} &= \frac{\partial^2 z_{k-1}}{\partial t^2}, z_{k-1} \text{ koordinatının } t_{k-1} \text{ anındaki ivmesini}
\end{aligned}$$

göstermektedir. (60) eşitliğinde görüldüğü gibi t_k zamanındaki nokta konumları, t_{k-1} zamanındaki nokta hareket parametrelerinden yararlanarak hesaplanmaktadır. (60) eşitliğindeki her nokta için konum, hız, ivme bilinmeyenlerinin hesabı için çok sayıda ölçü periyoduna gereksinim vardır. t_k zamanındaki nokta hareket parametrelerini Kalman-filtreleme yöntemiyle hesaplayabilmek için (60) eşitliğindeki denklemlerin zamana göre birinci türevleri alınarak hız denklemleri, ikinci türevleri alınarak ivme denklemleri (61) eşitliğinde görüldüğü gibi oluşturulur. Böylece Kalman-filtrelemede durum vektörü bilinmeyenleri daha az ölçü periyodu verileri ile hesaplanabilir (Yalçınkaya (Ünver), 1996/1; Heunecke, 1995; Huep, 1986).

$$\begin{aligned}
x_k &= x_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{x}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{x}_{k-1} \\
y_k &= y_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{y}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{y}_{k-1} \\
z_k &= z_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \dot{z}_{k-1} + \frac{1}{2} (t_k - t_{k-1})^2 \ddot{z}_{k-1} \\
\dot{x}_k &= \dot{x}_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \ddot{x}_{k-1} \\
\dot{y}_k &= \dot{y}_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \ddot{y}_{k-1} \\
\dot{z}_k &= \dot{z}_{k-1} + (t_k - t_{k-1}) \ddot{z}_{k-1} \\
\ddot{x}_k &= \ddot{x}_{k-1} \\
\ddot{y}_k &= \ddot{y}_{k-1} \\
\ddot{z}_k &= \ddot{z}_{k-1}
\end{aligned} \tag{61}$$

(61) eşitliği matris olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} I & I(t_k - t_{k-1}) & I \frac{(t_k - t_{k-1})^2}{2} \\ 0 & I & I(t_k - t_{k-1}) \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \\ \vdots \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{k-1} \quad (62)$$

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = \mathbf{T}_{k,k-1} \hat{\mathbf{Y}}_{k-1} \quad (63)$$

$\bar{\mathbf{Y}}_k$, t_k anı için prediksyon (öncül kestirim) durum (konum, hız, ivme) vektörü,

$\hat{\mathbf{Y}}_{k-1}$, t_{k-1} anındaki durum (konum, hız, ivme) vektörü,

$\mathbf{T}_{k,k-1}$, prediksyon (yeni durumu elde etme) matrisi,

$\mathbf{I}$, birim matristir.

(63) eşitliği Kalman-filtrelemenin temel denklemi olan prediksyon (ön kestirim) denklemidir. t_k ve t_{k-1} periyotları arasındaki sabit bozucu ivme w olmak üzere, prediksyon denkleminde bulunan sistem gürültüleri (modelin rasgele hataları), (63) denkleminde $\mathbf{T}$ matrisinin son sütunundaki terimlerden oluşan $\mathbf{S}$ gürültü vektörü (66) olarak düşünülür. Böylece prediksyon denklemi ve kovaryans matrisi aşağıdaki gibi olur (Gülal, 1999/1; Pelzer, 1988).

$$\bar{\mathbf{Y}}_k = \mathbf{T}_{k,k-1} \hat{\mathbf{Y}}_{k-1} + \mathbf{S}_{k,k-1} \mathbf{w}_{k-1} \quad (64)$$

$$\mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{Y}}\bar{\mathbf{Y}},k} = \mathbf{T}_{k,k-1} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{Y}}\hat{\mathbf{Y}},k-1} \mathbf{T}_{k,k-1}^T + \mathbf{S}_{k,k-1} \mathbf{Q}_{ww,k-1} \mathbf{S}_{k,k-1}^T \quad (65)$$

$$\mathbf{S}_{k,k-1}^T = \begin{bmatrix} I \frac{(t_k - t_{k-1})^2}{2} & I(t_k - t_{k-1}) & I \end{bmatrix} \quad (66)$$

Bozucu etkilerin ivme vektörü w belirsizdir ve kural olarak ölçülemez. Bu nedenle w için psoydo gözlem vektörü $w = 0$ alınabilir. Bozucu etkilerin konuma etkisi daha önceki deneylerden yararlanarak belirlenebilir. Buna karşın hız ve ivmedeki etkileri zor tahmin edilir. Bozucu etki ivmesinin kovaryansı bozucu matris S yardımıyla aşağıdaki bağıntıdan türetilir (Heunecke, 1994; Pelzer, 1987).

$$Q_{ww,k-1} = 4(t_k - t_{k-1})^{-4} Q_{SS,k-1} \quad (67)$$

Burada Q_{ss} , noktaların $(k-1)$ periyodundaki konumlarının bozucu bileşenleri için kovaryans matrisidir. k periyodunda yapılmış olan ölçülerin düzeltme denklemi,

$$l_k + v_{l,k} = A_k \hat{Y}_k = \begin{bmatrix} A_{konum,k} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix}_k \quad (68)$$

ile k periyodunun prediksyon denklemi (64) ile birleştirilerek filtre aşamasının fonksiyonel ve stokastik modeli aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_k \\ l_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ A_k \end{bmatrix} \hat{Y}_k - \begin{bmatrix} v_{\bar{Y},k} \\ v_{l,k} \end{bmatrix}, \quad Q_k = \begin{bmatrix} Q_{\bar{Y}\bar{Y},k} & 0 \\ 0 & Q_{ll,k} \end{bmatrix} \quad (69)$$

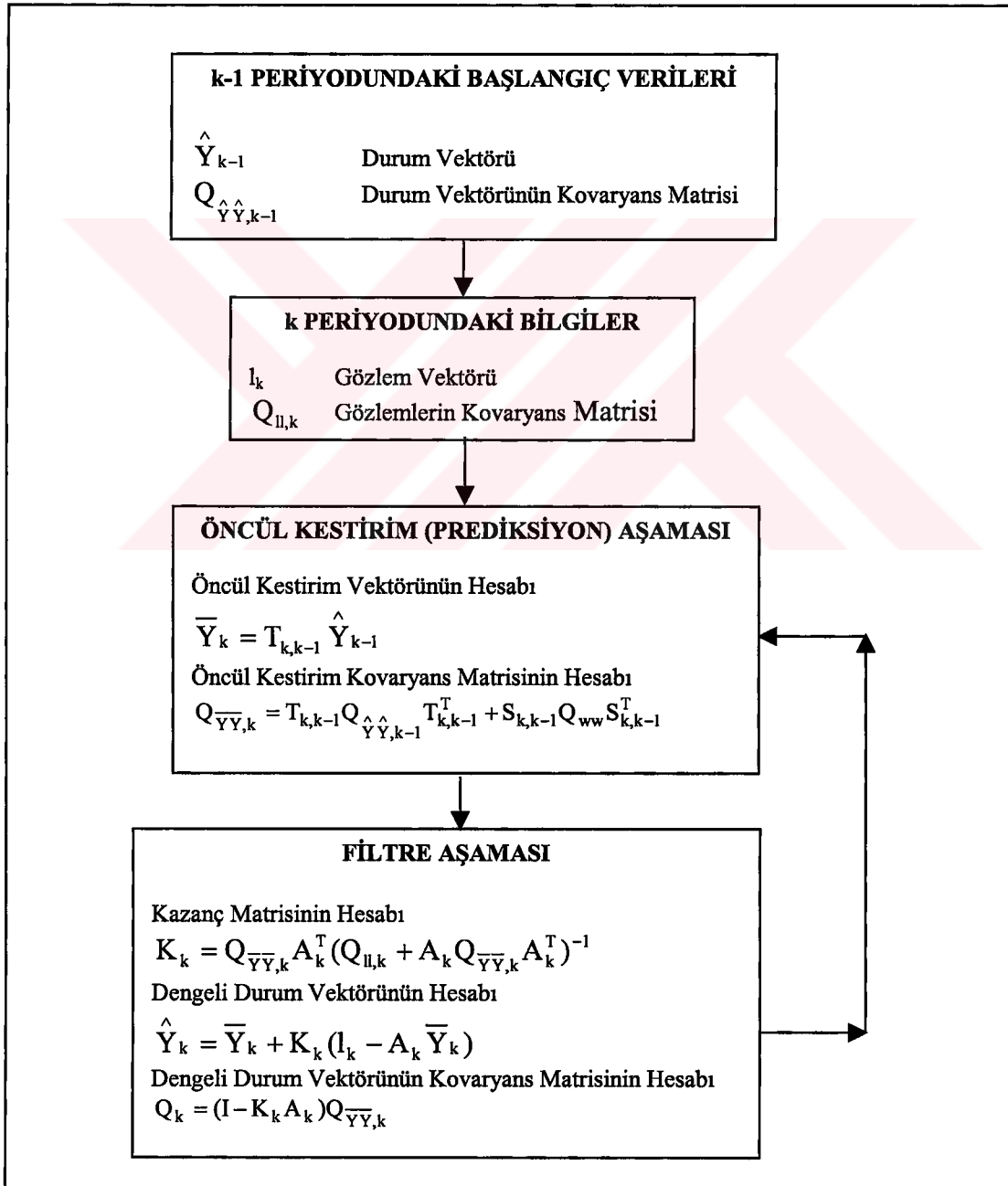
Kalman kazanç (gain) matrisi olarak adlandırılan matris K_k aşağıdaki gibi olmak üzere,

$$K_k = Q_{\bar{Y}\bar{Y},k} A_k^T (Q_{ll,k} + A_k Q_{\bar{Y}\bar{Y},k} A_k^T)^{-1} = Q_{\bar{Y}\bar{Y},k} A_k^T D_k^{-1} \quad (70)$$

yeğnime (yenilik) vektörü d_k , t_k anındaki filtre edilmiş (dengelenmiş) durum vektörü $\hat{Y}_k$, prediksyon edilmiş durum vektörünün düzeltilmesi $v_{\bar{Y},k}$ ve t_k anındaki ölçülerin düzeltilmesi $v_{l,k}$ aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} d_k \\ \hat{Y}_k \\ v_{\bar{Y},k} \\ v_{l,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_k & I \\ I - K_k A_k & K_k \\ -K_k A_k & K_k \\ Q_{ll,k} D_k^{-1} A_k & -Q_{ll,k} D_k^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Y}_k \\ l_k \end{bmatrix} \quad (71)$$

Filtre aşaması gerçekte klasik en küçük kareler yöntemiyle dengelemedir. Klasik dengelemeden en önemli farkı, klasik dengelemede ölçü sayısı n bilinmeyen sayısı u 'dan daha büyük olmak zorundadır, Kalman-filtresinde ise ölçme sayısı bilinmeyenlerin sayısından az olabilir. Filtre, ölçme verileri ve öncül kestirim bilgilerinin ağırlıklı kombinasyonu ile durum bilinmeyenlerinin filtre edilmiş (dengelemiş) değerlerini hesaplar (Gülal, 1999/1; Unterberg, 1991).



Şekil 10. Kalman-filtreleme tekniğinin iş akış şeması

Kalman-filtresi her yeni periyotta tekrar başa dönerek çalışmasına devam eder. Bu tekrarlı yapı Kalman-filtresinin en önemli özelliklerinden biridir. Bunun yanı sıra filtre tekrarlı yapısı içerisinde her öncül kestirimini, o ana kadar yapılmış tüm ölçüleri kullanarak hesaplar (Chui ve Chen, 1987; Pelzer, 1986). Kalman-filtreleme tekniğinin iş akış şeması Şekil 10'da gösterilmiştir.

1.6.2.1.2. Kalman-Filtreleme Tekniğinin Global Testi

Ön kestirimle hesaplanan durum vektörü ile dengelemeyle (filtrelemeyle) bulunan durum vektörü arasındaki fark test edilir.

$$\hat{Y}_k - \bar{Y}_k = K_k d_k \quad (72)$$

Sıfır hipotezi aşağıdaki biçimde kurulur.

$$H_0: E(d_k) = E(l_k) - A_k E(\bar{Y}_k) = 0 \quad (73)$$

Test büyüklüğü, filtreleme tekniğinin birim ölçünün varyansı $s_{0,k}^2$ ile önceki prediksyondan kestirilen varyans s_0^2 yardımıyla, $n_{l,k}$, k periyodundaki ölçü sayısı olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$T_G = \frac{s_{0,k}^2}{s_0^2} = \frac{d_k^T D^{-1} d_k}{n_{l,k} s_0^2} \quad (74)$$

$T_G > F_{n_{l,k}, f, 1-\alpha}$ ise sıfır hipotezi geçerli sayılamaz. Uyuşumsuzluk gözlem vektörü l_k ya da prediksyonla kazanılan $\bar{Y}_k$ dan kaynaklanabilir. Ölçülerdeki kaba hatalar uyumsuz ölçüler testi ile belirlenir ve ayıklanır. Global test hala anlamlı çıkmıyorsa uyumsuzluğun nedeni predikte edilen durum vektöründe olduğu varsayılır.

Bir P_j noktasına ait 9 hareket parametresinden oluşan düzeltme vektöründen (75) yararlanarak test büyüklüğü, (76) eşitliğinden hesaplanarak tablo değeriyle karşılaştırılır.

$$V_j^T = \begin{bmatrix} \hat{v}_{x_j} & \hat{v}_{y_j} & \hat{v}_{z_j} & \hat{v}_{\dot{x}_j} & \hat{v}_{\dot{y}_j} & \hat{v}_{\dot{z}_j} & \hat{v}_{\ddot{x}_j} & \hat{v}_{\ddot{y}_j} & \hat{v}_{\ddot{z}_j} \end{bmatrix} \quad (75)$$

$$\frac{v_j Q_{jj}^{-1} v_j}{9 s_0^2} \geq F_{9,f,1-\alpha} \quad (76)$$

(76) eşitliği geçerli ise P_j noktasında bir model hatası vardır. Bu model hatası, P_j noktasındaki bozucu etkilerin büyütülmesiyle giderilebilir. Bu durumda model hatası oluşan noktadaki bozucu ivmenin varyansı büyütülmelidir. Bu işleme anlamlı model hatası kalmayıncaya kadar devam edilmelidir (Yalçinkaya (Ünver), 1994; Pelzer, 1987).

1.6.2.1.3. Hareket Parametrelerinin Anlamlılık Testi

Kalman-filtreleme tekniği ile hesaplanan konum, hız, ivme parametrelerinin anlamlı olup olmadıkları test edilmelidir. Her noktanın koordinatlarının, konum, hız, ivme bilinmeyenlerinin testi için test büyüklükleri aşağıdaki gibi hesaplanır (Öztürk, 1992).

$$\begin{aligned} T_{x_i} &= \frac{|x_i|}{m_{x_i}} & T_{y_i} &= \frac{|y_i|}{m_{y_i}} & T_{z_i} &= \frac{|z_i|}{m_{z_i}} \\ T_{\dot{x}_i} &= \frac{|\dot{x}_i|}{m_{\dot{x}_i}} & T_{\dot{y}_i} &= \frac{|\dot{y}_i|}{m_{\dot{y}_i}} & T_{\dot{z}_i} &= \frac{|\dot{z}_i|}{m_{\dot{z}_i}} \\ T_{\ddot{x}_i} &= \frac{|\ddot{x}_i|}{m_{\ddot{x}_i}} & T_{\ddot{y}_i} &= \frac{|\ddot{y}_i|}{m_{\ddot{y}_i}} & T_{\ddot{z}_i} &= \frac{|\ddot{z}_i|}{m_{\ddot{z}_i}} \end{aligned} \quad (77)$$

Test büyüklükleri ayrı ayrı t-Tablo değeri ile karşılaştırılır.

$T_{x_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{y_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{z_i} \geq t - \text{Tablo}$ ise KONUM bilinmeyi ANLAMLIdır.

$T_{\dot{x}_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{\dot{y}_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{\dot{z}_i} \geq t - \text{Tablo}$ ise HIZ bilinmeyi ANLAMLIdır.

$T_{\ddot{x}_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{\ddot{y}_i} \geq t - \text{Tablo}$, $T_{\ddot{z}_i} \geq t - \text{Tablo}$ ise İVME bilinmeyi ANLAMLIdır.

1.6.2.1.4. Kalman-Filtreleme Tekniğinde Başlangıç Periyodunda Yapılacak İşlemler

Kalman-filtreleme analizinin yapılabilmesi için t_{k-1} periyodundaki hareket parametrelerinin ve bunların kovaryans matrislerinin bilinmesi gerekmektedir. Fakat başlangıç periyodunda bunlar bilinmemektedir. Bu bilgiler, ancak t_0 , t_1 ve t_2 periyotlarının değerlendirilmesinden sonra elde edilirler. Kalman-filtreleme modeliyle yapılacak çözümde başlangıç periyodunda yapılacak işlemler aşağıda açıklanmıştır.

- Sıfırıncı Periyodun (t_0) Değerlendirilmesi

Sıfır periyodunun değerlendirilmesinde ölçülerin türüne göre kurulan matematik modelin dengelenmesi sonucunda ağ noktalarının konum bilinmeyenleri ve bunların ters ağırlık matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Y_0^T = [x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad \dots \quad x_n \quad y_n \quad z_n], \quad Q_{YY,0} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & Q_{xz} \\ Q_{yx} & Q_{yy} & Q_{yz} \\ Q_{zx} & Q_{zy} & Q_{zz} \end{bmatrix} \quad (78)$$

- Birinci Periyodun (t_1) Değerlendirilmesi

Birinci periyotta hız bilinmeyenleri hesaplanabilir. Bunun için sıfır periyodundaki durum vektörü, hesaplanacak hız kadar sıfırla genişletilir.

$$\hat{Y}_0^T = [x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad \dots \quad x_n \quad y_n \quad z_n \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (79)$$

(78) eşitliğindeki kovaryans matrisi, hız parametresi için yapılan tahminlerle aşağıdaki gibi türetilerek genişletilir.

$$Q_{\hat{Y}\hat{Y},0} = \begin{bmatrix} Q_{YY,0} & Q_{Y\dot{Y},0} \\ Q_{\dot{Y}Y,0} & Q_{\dot{Y}\dot{Y},0} \end{bmatrix} \quad (80)$$

$Q_{YY,0}$, sıfır periyodundaki kovaryans matrisidir. Hız ile konum arasında korelasyon olmadığı varsayımı yapıldığından, ilgili matrisler sıfır alınır.

$$Q_{\dot{Y}Y} = Q_{Y\dot{Y}} = 0 \quad (81)$$

Hızların varyans-kovaryans matrisi henüz bilinmediğinden yaklaşık olarak tahmin edilir. Deformasyon ağının hareketli noktalarında düşünülebilen maksimum hızlar yardımıyla maksimum hata

$$H_{\max} = \dot{Y}_0 - \dot{Y}_{\max} \quad (82)$$

biçiminde türetilir. Ağda başlangıçta herhangi bir şekilde bilinen ya da statik bir yöntemle belirlenen hareketli noktalardaki varyans aşağıdaki eşitlikten kestirilir.

$$\sigma_{\dot{Y},H}^2 = \frac{H_{\max}^2}{10} \quad (83)$$

Bu değer hareketli noktaların tümünde aynı kaldığı, hareketsiz noktalar için sıfır olduğu varsayılır.

$$\sigma_{\dot{Y},S}^2 = 0 \quad (84)$$

Tahmin edilen hızlar arasında korelasyon olmadığı varsayılarak hızlar için kovaryans matrisi aşağıdaki biçimde köşegen matris olarak elde edilir.

$$Q_{\dot{Y}\dot{Y},0} = \frac{1}{\sigma_0^2} \begin{bmatrix} . & & & & \\ & . & & & 0 \\ & & \sigma_{\dot{Y},H}^2 & & \\ & & & . & \\ 0 & & & & \sigma_{\dot{Y},S}^2 \\ & & & & & . \end{bmatrix} \quad (85)$$

Böylece birinci periyodun durum vektörünü hesaplamak için gerekli olan sıfır periyodu durum vektörü ve kovaryans matrisi belirlenmiş olur. Kalman-filtreleme tekniğinde gerekli olan matrisler ve eşitlikler birinci periyot için aşağıdaki biçimde oluşturulur. Prediksiyon matrisi T ve gürültü matrisi S,

$$T = \begin{bmatrix} I & I(t_1 - t_0) \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} I(t_1 - t_0) \\ I \end{bmatrix} \quad (86)$$

ölçülerin düzeltme denklemi,

$$l_1 + v_{l,1} = A_1 \hat{Y}_1 = [A_{\text{konum}} \quad 0] \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{bmatrix}_1 \quad (87)$$

şeklindedir. Burada, A_1 ve A_{konum} ; birinci periyottaki konum (x,y,z) bilgileri için katsayılar matrisi, l_1 ve $v_{l,1}$; birinci periyotun ölçüleri ve düzeltmeleridir. Oluşturulan matrislerle Şekil 10'daki akış şeması aşamaları izlenerek birinci periyodun durum vektörü ve kovaryans matrisi hesaplanmış olur.

$$\hat{Y}_1 = \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{bmatrix}_1, \quad Q_{\hat{Y}\hat{Y},1} = \begin{bmatrix} Q_{YY} & Q_{Y\dot{Y}} \\ Q_{\dot{Y}Y} & Q_{\dot{Y}\dot{Y}} \end{bmatrix}_1 \quad (88)$$

• İkinci Periyodun (t_2) Değerlendirilmesi

Artık ikinci periyotta ivme bilinmeyenleri hesaplanabilir. Bunun için sıfır periyodundaki durum vektörü, hesaplanacak ivme kadar sıfırla genişletilir.

$$\hat{Y}_1^T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & . & . & x_n & y_n & z_n & \dot{x}_1 & \dot{y}_1 & \dot{z}_1 & . & . & \dot{x}_n & \dot{y}_n & \dot{z}_n & 0 & . & . & 0 \end{bmatrix}_1 \quad (89)$$

Birinci periyottaki kovaryans matrisi ivme için genişletilir. İvmenin varyans-kovaryans matrisi henüz bilinmediğinden birinci periyottaki gibi yaklaşık olarak tahmin edilir. Birinci periyotta hesaplanan hız ve konum ile ivme arasında korelasyon olmadığı varsayımı yapıldığından, ilgili terimler sıfır alınarak kovaryans matrisi,

$$Q_{\hat{Y}\hat{Y},1} = \begin{bmatrix} Q_{YY} & Q_{Y\ddot{Y}} & & & & \\ Q_{\dot{Y}Y} & Q_{\dot{Y}\ddot{Y}} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \frac{\sigma_{\ddot{Y},H}^2}{\sigma_0^2} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \frac{\sigma_{\ddot{Y},H}^2}{\sigma_0^2} \\ & & 0 & & & \end{bmatrix} \quad (90)$$

biçiminde oluşturulur. Kalman-filtrelemenin işlem adımlarına göre hesaplama yapılarak durum vektörü ve kovaryans matrisi

$$\hat{Y}_2 = \begin{bmatrix} Y \\ \dot{Y} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix}_2, \quad Q_{\hat{Y}\hat{Y},2} = \begin{bmatrix} Q_{YY} & Q_{Y\dot{Y}} & Q_{Y\ddot{Y}} \\ Q_{\dot{Y}Y} & Q_{\dot{Y}\dot{Y}} & Q_{\dot{Y}\ddot{Y}} \\ Q_{\ddot{Y}Y} & Q_{\ddot{Y}\dot{Y}} & Q_{\ddot{Y}\ddot{Y}} \end{bmatrix}_2 \quad (91)$$

eşitliğinden hesaplanabilir (Yalçinkaya (Ünver), 2001, 1994; Heunecke, 1994; Pelzer, 1988; Huep, 1986).

1.6.2.2. Kinematik Yüzey Modeli

Kinematik yüzey modellerinde hareket yüzeyleri, konuma ve zamana bağlı fonksiyonlarla belirlenir. Ağ noktalarına ait jeodezik ölçüler yardımıyla bulunan konum bilgilerinden yararlanarak üç boyutlu kinematik yüzey modeli bir polinom olarak (92) eşitliğindeki gibi oluşturulur (Zippelt, 1998; Liu, 1998; Yalçinkaya (Ünver), 1994; Pelzer, 1987; Chrzanowski vd., 1986; Gürkan, 1984; Vanicek vd., 1979).

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l \end{aligned} \quad (92)$$

Burada $(x_j^{(i)}, y_j^{(i)}, z_j^{(i)})$ ve $(x_j^{(i-1)}, y_j^{(i-1)}, z_j^{(i-1)})$, sırasıyla (i). ve (i-1). periyottaki j noktasının koordinatlarını; $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, i. ve (i-1). periyotlar arasındaki zaman farkını; q_{kl} , polinomun katsayılarını; m, polinomun derecesini göstermektedir. Burada, $i = 1, 2, \dots, r$; $j = 1, 2, \dots, n$; r, ölçü periyodu sayısını; n nokta sayısını göstermektedir. (92) eşitliği zamana ve konuma bağlı bir kinematik yüzey modelidir. Polinomun katsayıları (q_{kl}) en küçük kareler yöntemiyle hesaplanır. Polinom katsayıları sırasıyla (1.5.3) bölümünde açıklandığı gibi genişletilmiş fonksiyonel modelin testi ile test edilir. Genişletilmiş fonksiyonel modelin testi sonucunda bölgenin hareket yüzeyi belirlenmiş olur. Bir $P_j(x_j, y_j, z_j)$ noktası için (92) kapalı hız fonksiyonu açık olarak aşağıdaki biçimde yazılabilir (Liu, 1998; Holdahl ve Hardh, 1979; Yalçinkaya (Ünver), 1994).

$$F(x_j, y_j, z_j) = q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + q_{11}x_jy_j + q_{02}y_j^2 + q_{30}x_j^3 + \dots \quad (93)$$

(93) eşitliği, (92) eşitliğinde yerine konulursa aşağıdaki (94) eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1})(t_i - t_{i-1}) \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1})(t_i - t_{i-1}) \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1})(t_i - t_{i-1}) \end{aligned} \quad (94)$$

(94) eşitliği açık yazılırsa üç boyutlu ağlar için kinematik yüzey modeli (95) eşitliğindeki gibi olur.

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + q_{11}x_jy_j + q_{02}y_j^2 + \dots) \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + q_{11}x_jy_j + q_{02}y_j^2 + \dots) \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + q_{11}x_jy_j + q_{02}y_j^2 + \dots) \end{aligned} \quad (95)$$

Her nokta için yazılabilen (95) bağıntısından koordinat bilinmeyenleri ve hareket yüzeyinin katsayıları hesaplanabilir (Liu ve Parm, 1996; Liu, 1990; Holdahl, 1978; Niemeier, 1976). Burada, i, ölçü periyot numarası; j, nokta numarasıdır. Bu verilere göre (95) modelinin düzeltme denklemleri; $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$, düzeltmeler; $dx_j^{i-1}, dy_j^{i-1}, dz_j^{i-1}$, başlangıç

zamanındaki koordinat bilinmeyenleri olmak üzere tüm noktalar için aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}_{x_j}^i &= dx_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l - (x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)}) \\
 \mathcal{G}_{y_j}^i &= dy_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l - (y_j^{(i)} - y_j^{(i-1)}) \\
 \mathcal{G}_{z_j}^i &= dz_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l - (z_j^{(i)} - z_j^{(i-1)})
 \end{aligned} \tag{96}$$

Bilinmeyenler $(dx_j^{i-1}, dy_j^{i-1}, dz_j^{i-1}$ ve q) en küçük kareler yöntemine göre hesaplanır. Her katsayı için adım adım genişletilmiş fonksiyonel model testi yapılarak polinomun derecesi dolayısı ile hareket yüzeyi belirlenmiş olur. Böylece, tüm alanı temsil eden kinematik hareket yüzeyi (F) belirlenmiş olur.

1.6.3. Dinamik Deformasyon Modeli

Dinamik deformasyon modeli, statik ve kinematik modeli kapsayan en genel deformasyon modelidir. Dinamik deformasyon modeliyle hareketler, zamana ve etkiyen dış kuvvetlere bağlı olarak belirlenir. Statik ve kinematik deformasyon modelleri ile deformasyonların belirlenmesi için belirli periyotlarda yapılmış jeodezik ölçüler yeterlidir. Buna karşılık dinamik model hem geometrik hem de fiziksel parametreleri içerdiğinden yalnız jeodezik veriler bu model için yeterli değildir. Dinamik modelle deformasyonları belirleyebilmek için önce araştırılan objeye etki eden dış kuvvetlerin belirlenmesi gerekir. Dış etkenlerin belirlenmesi, hareketin modellendirilmesi ve yorumlanması aşamalarında farklı disiplinlerin beraber çalışmasını gerektirir. Bu nedenle genelde hareketlerin belirlenmesi çalışmalarında dinamik deformasyon modelinin uygulanmasından kaçınılarak statik ve kinematik deformasyon modelleri kullanılmıştır (Yalçınkaya (Ünver) ve Bayrak, 2001/2; Ren ve Ding, 1996; Heunecke vd., 1993; Papo ve Prelmutter, 1991).

Bu çalışmada heyelanlar için bir dinamik deformasyon modeli oluşturulmuş ve hareketler bu modelle belirlenmiştir. Heyelanların belirlenmesi ve olası zararların azaltılması için potansiyel tehlikeli yamaçların neden olduğu deformasyonların izlemesi gerekir. Yamaçların izlenmesinde, genellikle basit geometrik yaklaşımlar kullanılır. Bu

çeşit yaklaşımlar, izlenmiş yamaçların genel davranışının derecesini belirlemeyi sağlarlar. Fakat, yamacın kayma mekanizmasını anlamak ve heyelanın güvenilir bir kestirimini yapmak için bu çeşit yaklaşımları tek başlarına kullanmak yeterli olmayabilir. Ayrıca basit geometrik yaklaşımlar veri içindeki bilgiden tam olarak faydalanma konusunda yetersizdirler ve izlenmiş yamacın stabilite durumu hakkında da ayrıntılı bilgi vermeleri zordur. Yamacın mekanik özellikleri ve heyelan mekanizmalarını hesaba katmadan sadece izleme verileriyle çalışmak yanlış kararlar vermeye neden olabilir (Ding vd., 2001; Ren ve Ding, 1996).

Heyelan kestirim çalışmalarında kullanılan istatistiksel (statik ve kinematik) modeller tektonik (deprem, yapay titreşimler, vs.), iklimsel (yağmur, yer altı suyu değişimi, sıcaklık, vs.) ve insan kaynaklı etkileri ihmal ederler. Bu tür istatistik modellerle heyelan sisteminin oluşumundaki karmaşık durumun nedeni açık bir şekilde yansıtılamaz ve bu yöntemleri kullanarak geleceğe yönelik heyelan kestirimi yapılamaz. Heyelan üç boyutlu ve zamansal bir problemdir ve heyelanlar zamana ve konuma bağlı olarak oluşan karmaşık dinamik sistemlerdir. Heyelanlar ve heyelanlara neden olan faktörler arasındaki ilişkinin analizi sadece heyelan mekanizmasını anlamamızı sağlamaz aynı zamanda gelecekte oluşabilecek heyelanların tahmini ve heyelanın verebileceği zararların azaltılması yönünde temel bir dayanak sunar. Dinamik modelin uygulanmasıyla heyelan sonucu deforme olan objenin zamansal davranışı gerçeğe çok yakın bir biçimde tanımlanabilir. Heyelanlar ve etkiyen kuvvetler arasındaki ilişki zamana ve çalışılan alanın çevresel özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Dinamik modelin oluşturulması aşamasında objenin mekanik özellikleri dikkate alınmalıdır ve modele katılacak parametrelerin seçimi aşamasında matematik modelin karmaşıklığı da göz önüne alınmalıdır (Qin vd., 2002; Zhou vd., 2002; Eichhorn ve Möhlenbrink, 2001; Yalçinkaya (Ünver) ve Bayrak, 2001/2; Brunsden, 1999; Welsch, 1996; Chrazanowski vd., 1986).

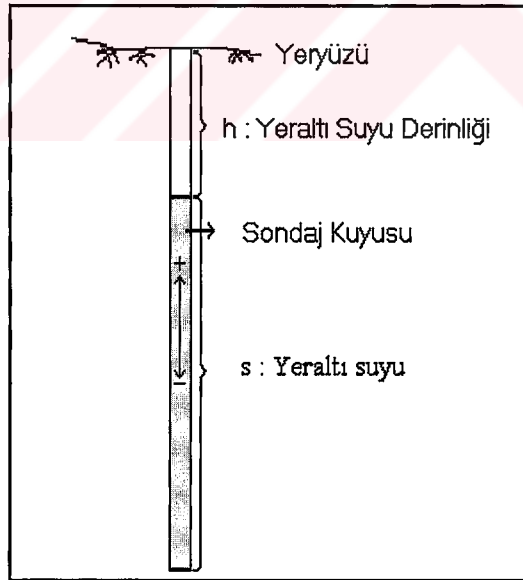
Dinamik deformasyon modeli ile heyelan hareketinin nedenini belirleyebilmek için Jeoloji, Jeofizik, Jeodezi ve jeomekanik gibi bilim dallarının beraber çalışması gerekir. Bu işbirliği deformasyon ağı noktalarının yerinin seçimi, harekete neden olan dış etkenlerin doğru olarak belirlenebilmesi ve deformasyon sonuçlarının yorumlanabilmesi için gereklidir. Sonuç olarak heyelanlar, yalnızca jeofizik, jeolojik ya da jeodezik bir problem olarak görülmemelidir. Bu bilim dalları, heyelanların belirlenmesi ve zararlarının önlenmesi konusunda ortak çalışmalar yapmalıdırlar (Yalçinkaya (Ünver) ve Bayrak, 2001/1; Kalkan vd., 2001; Gülal, 1999/2; Altan vd., 1994; Dilaver vd., 1991).

1.6.3.1. Yer altı Suyu Seviye Değişimlerini Belirleme Yöntemleri

Bu uygulamada yapılan jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu araştırma bölgesinde oluşan heyelanın en önemli nedeninin yer altı suyu değişimi olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle oluşturulacak dinamik deformasyon modellerinde, yer altı suyu seviye değişimleri dış kuvvet olarak dikkate alınmıştır. Dinamik deformasyon modelinin oluşturulabilmesi için her ölçü periyodunda jeodezik ağ noktalarının yer altı suyu seviyelerinin belirlenmesine gerek vardır. Yer altı su seviyeleri jeolojik ve jeofizik yöntemlerle belirlenebilir.

1.6.3.1.1. Yer Altı Su Seviyelerinin Jeolojik Yöntemle Belirlenmesi

Yer altı su seviyelerini jeolojik olarak belirleyebilmek için arazinin uygun yerlerinde sondaj kuyuları açılır ve arazide yer altı suyunun olup olmadığı araştırılır.



Şekil 11. Sondaj kuyularından yer altı su seviyesi ölçüsü

Yer altı suyu seviyesini belirleyebilmek için Şekil 11’de görüldüğü gibi yüzeyden sondaj kuyusu içindeki su seviyesine kadar olan derinlik (h) ölçülür. Bu değer, sondaj

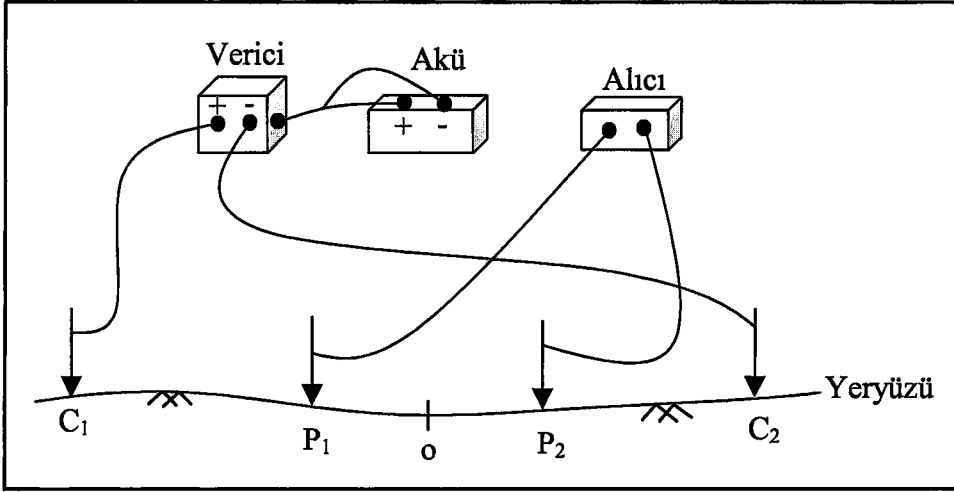
kuyusunun bulunduğu noktanın yükseklik kotundan çıkarılarak o noktadaki yer altı su seviyesi değeri (s) elde edilmiş olur.

1.6.3.1.2. Yer Altı Su Seviyelerinin Jeofizik Düşey Elektrik Sondajı (DES) Yöntemi ile Belirlenmesi

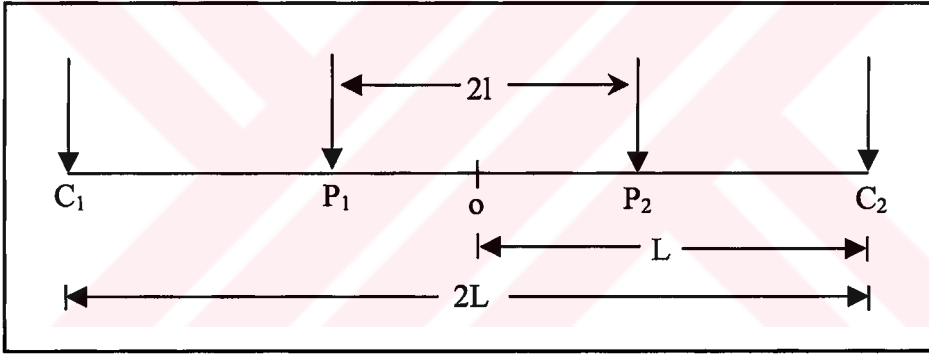
Heyelan sahalarında uygulanan jeofizik yöntemlerle bir heyelanın; yeryüzünde gözlenemeyen sınırları, kayma yüzeyinin derinliği, heyelan bölgesindeki değişik malzemelerin dağılım düzeni, yeraltı suyunun durumu, filtrasyon akışının yönü ve hızı, temel kayanın derinliği, yapı ve bileşimi gibi özellikler saptanabilmektedir (Muiuane, Pedersen, 1999; Loke ve Barker, 1995; Gelişli ve Çınar, 1991).

Elektrik öz direnç sondajı uygulamasıyla öz direncin derinlikle değişimi belirlenerek kayan kütlenin kalınlığı, kayma düzleminin konumu ve yeraltı suyu derinliği ortaya çıkarılabilir. En çok kullanılan elektrik öz direnç yöntemi, düşey elektrik sondajı (DES) yöntemidir. DES yöntemi, yer altının derinlere doğru değişimini incelemek için kullanılır. İncelenecek alanda seçilecek bir noktada, önce elektrotlar arasındaki aralıklar küçük alınır ve yavaş yavaş bu aralıklar artırılarak her defasında görünür öz direnç hesaplanır. Elektrotlar arasındaki uzaklık arttıkça akımın nüfuz edeceği derinlik artacağından, bu yöntem ile sığ derinliklerden başlayarak belirli bir derinliğe kadar olan tabakaların öz dirençlerinin etkileri ölçülmüş olur. Elde edilen görünür öz direnç, elektrot aralığının fonksiyonu olarak çizilecek olursa görünür öz direncin değişiminden, düşey yöndeki her bir tabakaya ait tabaka kalınlıkları ve öz dirençler hesaplanır (Muiuane ve Pedersen, 1999; Loke ve Barker, 1995; Telford vd., 1986).

DES yönteminin arazide uygulanmasında en çok schlumberger elektrot dizilimi kullanılır. DES yöntemindeki ekipmanlar ve ölçü düzeneği Şekil 12’de; Schlumberger elektrot dizilimi de Şekil 13’de gösterilmiştir. Şekil 12’de görüldüğü gibi ölçü noktası (o)’dan eşit uzaklıkta alınan P_1 , P_2 ve C_1 , C_2 noktalarına elektrotlar (demir-nikel karışımı) çakılır. C_1 , C_2 noktalarına elektrik akımı verilir ve P_1 , P_2 noktalarındaki potansiyeller (ΔV) ölçülür.



Şekil 12. DES yönteminde kullanılan ekipmanlar ve ölçü düzeneği



Şekil 13. Schlumberger elektrot dizilimi

Görünür öz direnç değerleri aşağıdaki bağıntıdan hesaplanabilir.

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad (97)$$

Burada, C_1 ve C_2 sembolleri, akım elektrotlarını; P_1 ve P_2 sembolleri, potansiyel elektrotlarını; ΔV (mVolt), P_1 ve P_2 arasındaki potansiyel farkı; I (mAmpere), vericiden verilen akım miktarını; l , potansiyel elektrotların ölçü noktasından (o) olan uzaklıklarını; L , akım elektrotlarının ölçü noktasından (o) olan uzaklıklarını ve ρ_a (ohm-m) ise hesaplanan görünür öz direnci temsil etmektedir.

DES'ten elde edilen görünür özdirençlerin yorumlanması için Zohdy (1989) tarafından geliştirilen ve iteratif bir algoritmaya göre çalışan bir yazılım kullanılmıştır. Yazılım elektrot aralığı ve düzeltilmiş görünür özdirençlerden derinlik ve gerçek özdirençleri hesaplamaktadır. Hesaplama sonucunda her bir tabakaya ait tabaka kalınlıklarına karşılık gerçek özdirenç değerleri çizilir. Görünür özdirençin en düşük olduğu tabaka su tabakasıdır ve bu tabakaya karşılık gelen derinlik DES yapılan noktada yüzeyden itibaren yer altı su seviyesine kadar olan derinlik değeri olarak yorumlanır. Jeolojik yöntemde olduğu gibi derinlik değeri, noktanın yükseklik kotundan çıkarılarak o noktadaki yer altı su seviyesi elde edilmiş olur.

1.6.3.1.3. Multiquadric Enterpolasyon

Amacımız jeodezik ağ noktalarının her ölçü periyodunda yer altı su seviyelerini belirlemektir. Ağ noktalarının yer altı suyu seviyeleri, arazideki sondaj kuyusu noktaları ve jeofizik noktalarında ölçülen yer altı suyu seviyelerinden multiquadric enterpolasyonla belirlenir. Multiquadric üç boyutlu yüzey genel olarak,

$$\sum_{j=1}^n c_j \left[(y_j - y)^2 + (x_j - x)^2 + (z_j - z)^2 \right]^{1/2} = ds_j \quad (98)$$

biçiminde serilerle gösterilir. Burada, x_j , y_j , z_j , örnekleme noktalarının koordinatlarını; x , y , z , enterpole edilecek noktanın koordinatlarını; n , örnekleme noktalarının sayısını göstermektedir. Burada ds_j , x , y ve z 'nin fonksiyonları olan tek bir cins üçüncü dereceden yüzeylerin toplamıdır. Her bir üçüncü dereceden yüzeyin düşey simetri eksenini örnekleme noktalarının yatay konumlarında yer almıştır. c_j katsayıları üçüncü dereceden terimlerin işaretini ve eğimini belirler. c_j katsayılarının sayısı örnekleme noktaları kadardır. Yukarıdaki denklem her nokta için yazılırsa, n sayıda denklemden oluşan bilinmeyenleri n tane c_j katsayısı olan bir doğrusal denklem sistemi elde edilir. Bu sistemin herhangi bir yöntemle çözümü aranan c_j katsayılarını verecektir. Yöntemde hassasiyeti arttırmak için önce örnekleme noktalarına göre düşük dereceden bir trend yüzeyi $t(x,y,z)$ geçirildikten sonra kalan trend değerleri ile multiquadric yüzeyin katsayıları belirlenir. Trend yüzeyi için genelde sıfırıncı dereceden yüzey kullanılır. Sıfırıncı dereceden trend yüzeyi;

$$t(x, y, z) = s_0 = \frac{1}{n} \sum s_i \quad (99)$$

şeklinde hesaplanır. Herhangi bir P noktasının yer altı su seviyesi (s_p) değeri,

$$s_p = t(x, y, z) + ds_p \quad (100)$$

şeklinde hesaplanır (Bektaş, 1998; Bayrak, 1996; Holdahl ve Hardy, 1979; Hardy, 1978).

1.6.3.2. Heyelan için Dinamik Tek Nokta Modelinin Oluşturulması

Yağış ve yüzey sularından oluşan yer altı suyu, heyelanın en önemli nedenlerinden biridir (Ding vd., 2001; Zezere vd., 1999/2; Ren ve Ding, 1996; Krauter, 1992; Gut, 1992; Önalp, 1991). Yer altı su seviyesinin zamana göre davranışı Pelzer (1993)'e göre Tablo 3'de görüldüğü gibi lineerdir.

Tablo 3. Yer altı suyunun değişiminin zamana göre davranışı (Pelzer, 1993)

Deformasyon Nedeni	Tarz	Tipik değişimler	Grafik gösterim	Davranış tipi
Yer altı su seviyesinin alçalması ve yükselmesi	Yer altı su seviyesi yüksekliği	Lineer alçalma ve yükselme		Lineer değişim

Etkiyen tüm kuvvetler altında düzenli olarak ivmelenen bir nokta için konum değişim fonksiyonu, kinematik deformasyon modeli gibi sadece zamanı dikkate alarak (101) eşitliği biçiminde yazılabilir.

$$x = f(t) \quad (101)$$

Dinamik deformasyon modeli, kinematik modele hareketin nedeni eklenerek oluşturulabilir. Heyelanlı bir arazi için (101) eşitliğindeki fonksiyona, konuma etki eden

kuvvetlerden biri olan yer altı suyu değişim parametresi (s) eklenerek (102) eşitliğindeki gibi dinamik modelin fonksiyonu oluşturulur (Ding vd., 2001; Yalçinkaya (Ünver) ve Bayrak, 2001/2; Ren ve Ding, 1996; Pelzer, 1985; Huep, 1985).

$$x = f(t, s) \quad (102)$$

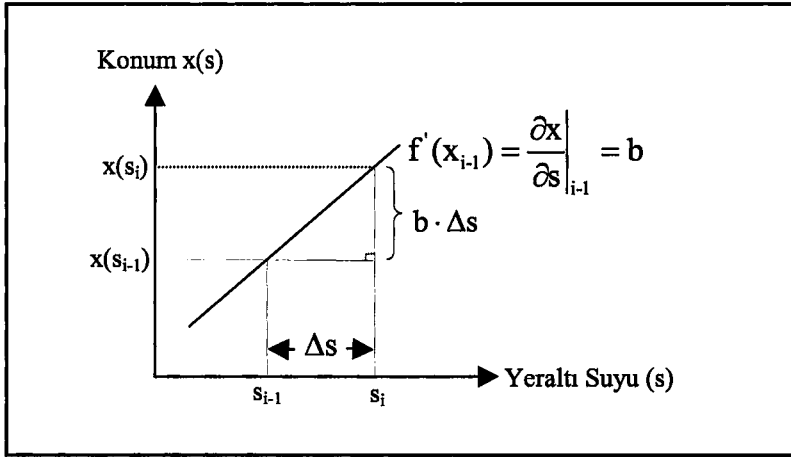
(102) eşitliği Taylor serisine açılıp ikinci derecede sonlandırıldığında (103) eşitliği elde edilir.

$$x_{(t_i, s_i)} = x_{(t_{i-1}, s_{i-1})} + \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta t + \left. \frac{\partial x}{\partial s} \right|_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta s + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right|_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta t^2 \quad (103)$$

(103) eşitliği düzenlenerek (104) eşitliğindeki gibi konum bileşeni elde edilir.

$$x_{(t_i, s_i)} = x_{(t_{i-1}, s_{i-1})} + v_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta t + \frac{1}{2} a_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta t^2 + b_{(t_{i-1}, s_{i-1})} \Delta s \quad (104)$$

Konum bileşeni ile yer altı suyu değişiminin geometrik ilişkisi Şekil 14'den görülebilir.



Şekil 14. Konum-yer altı suyu değişim ilişkisi

Burada, Δs ve Δt sırasıyla iki periyot arasındaki yer altı suyu seviyesi ve zaman farkıdır. b yer altı suyu değişiminin etki parametresidir. Üç boyutlu ağlar için Dinamik Tek Nokta

Modeli yer altı suyu seviye değişiminin kinematik modele eklenmesiyle aşağıda gösterildiği biçimde elde edilir (Yalçinkaya (Ünver) ve Bayrak, 2001/1; Güla, 1999/2; Liu ve Parm, 1997; Pelzer, 1993, 1988; Welsch, 1985; Vanicek vd., 1979).

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{xj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{xj}^{(i-1)} + (s_j^{(i)} - s_j^{(i-1)}) b_{xj}^{(i-1)} \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{yj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{yj}^{(i-1)} + (s_j^{(i)} - s_j^{(i-1)}) b_{yj}^{(i-1)} \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{zj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{zj}^{(i-1)} + (s_j^{(i)} - s_j^{(i-1)}) b_{zj}^{(i-1)} \end{aligned} \quad (105)$$

Burada, $x_j^{(i)}, y_j^{(i)}, z_j^{(i)}$, j noktasının (i). periyottaki koordinatlarını; $x_j^{(i-1)}, y_j^{(i-1)}, z_j^{(i-1)}$, j noktasının (i-1). periyottaki koordinatlarını; v_{xj}, v_{yj}, v_{zj} , j noktasının x, y ve z koordinatlarının hızlarını; a_{xj}, a_{yj}, a_{zj} , j noktasının x, y, z koordinatlarının ivmesini; t_i , (i). ölçü periyodundaki zamanı ve t_{i-1} , (i-1). ölçü periyodu zamanını temsil etmektedir. $s_j^{(i)}$ ve $s_j^{(i-1)}$ (i). ve (i-1). periyotta j noktasının yer altı su seviyeleridir. b_{xj}, b_{yj}, b_{zj} , (i-1). periyottaki yer altı suyu seviye değişiminin j noktasının koordinatlarına (x,y,z) etkime katsayısıdır. Bu katsayılar istatistik olarak test edilerek yer altı suyu değişiminin koordinatlara olan etkisinin anlamlı olup olmadığı belirlenir. Burada, $i = 1, 2, \dots, k$ (k:ölçü periyodu sayısı) ve $j = 1, 2, \dots, n$ (n: nokta sayısı)'dir.

(105) eşitliğinde verilen dinamik tek nokta modelinin hareket parametrelerini direkt hesaplayabilmek için çok sayıda ölçü periyoduna gereksinim vardır. Az sayıda ölçü periyoduyla hareket parametrelerini belirleyebilmek için Kalman-filtreleme tekniğine göre hesaplama yapılabilir. Bu bağlamda, üç boyutlu ağlar için konum, konumun birinci türevi hız, konumun ikinci türevi ivme ve yer altı suyu parametrelerinden oluşacak biçimde fonksiyonel model aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}
x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{xj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{xj}^{(i-1)} + (s_i - s_{i-1}) b_{xj}^{(i-1)} \\
y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{yj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{yj}^{(i-1)} + (s_i - s_{i-1}) b_{yj}^{(i-1)} \\
z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) v_{zj}^{(i-1)} + \frac{1}{2} (t_i - t_{i-1})^2 a_{zj}^{(i-1)} + (s_i - s_{i-1}) b_{zj}^{(i-1)} \\
v_{xj}^{(i)} &= v_{xj}^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) a_{xj}^{(i-1)} \\
v_{yj}^{(i)} &= v_{yj}^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) a_{yj}^{(i-1)} \\
v_{zj}^{(i)} &= v_{zj}^{(i-1)} + (t_i - t_{i-1}) a_{zj}^{(i-1)} \\
a_{xj}^{(i)} &= a_{xj}^{(i-1)} \\
a_{yj}^{(i)} &= a_{yj}^{(i-1)} \\
a_{zj}^{(i)} &= a_{zj}^{(i-1)}
\end{aligned} \tag{106}$$

Hareket parametrelerini hesaplayabilmek için en az üç periyotta yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Fonksiyonel model matris gösterimiyle aşağıdaki biçimde oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} x_j^{(i)} \\ y_j^{(i)} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{yj}^{(i)} \\ a_{zj}^{(i)} \\ x_j^{(i+1)} \\ y_j^{(i+1)} \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{yj}^{(i+1)} \\ a_{zj}^{(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & I(t_i - t_{i-1}) & I \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} & I(s_i - s_{i-1}) \\ 0 & I & I(t_i - t_{i-1}) & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ I & I(t_{i+1} - t_{i-1}) & I \frac{(t_{i+1} - t_{i-1})^2}{2} & I(s_{i+1} - s_{i-1}) \\ 0 & I & I(t_{i+1} - t_{i-1}) & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j^{(i-1)} \\ y_j^{(i-1)} \\ z_j^{(i-1)} \\ v_{xj}^{(i-1)} \\ v_{yj}^{(i-1)} \\ v_{zj}^{(i-1)} \\ a_{xj}^{(i-1)} \\ a_{yj}^{(i-1)} \\ a_{zj}^{(i-1)} \\ b_{xj}^{(i-1)} \\ b_{yj}^{(i-1)} \\ b_{zj}^{(i-1)} \end{bmatrix} \tag{107}$$

Dinamik tek nokta modeli genişletilmiş modelin testine göre hesaplanır. Böylece kinematik tek nokta modelini oluşturan bölümün çözümünden hesaplanan hareket parametrelerinin ters ağırlık matrisi yardımıyla dinamik tek nokta modelinin stokastik yapısı oluşturulur. Fonksiyonel ve stokastik modeller en küçük kareler yöntemiyle çözümlenerek konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametreleri elde edilir (Koch, 1999; Yalçinkaya (Ünver), 1994; Yanıçoğlu, 1986).

1.6.3.3. Heyelan için Dinamik Yüzey Modelinin Oluşturulması

Kinematik yüzey modeli (92), yer altı suyu değişimlerinin etkisini veren fonksiyonla genişletilerek dinamik yüzey modeli (108) eşitliğinde görüldüğü gibi oluşturulabilir.

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l \end{aligned} \quad (108)$$

Burada, $(x_j^{(i)}, y_j^{(i)}, z_j^{(i)})$ ve $(x_j^{(i-1)}, y_j^{(i-1)}, z_j^{(i-1)})$, (i). ve (i-1). periyottaki j noktasının koordinatlarını; $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, (i). ve (i-1). periyotlar arasındaki zaman farkını; q_{kl} , polinomun katsayılarını; m, polinomun derecesini; Δs_j , j noktasının (i). ve (i-1). zamanlarındaki yeraltı su seviyesi değerleri farkını; d yer altı suyu etkisinin katsayılarını; n_s , polinomun derecesini göstermektedir. Ayrıca, $i = 1, 2, \dots, r$ (r : ölçü periyodu sayısı); $j = 1, 2, \dots, n$ (n : nokta sayısı)'dır.

(108) eşitliği zamana, konuma ve etkiyen kuvvet olan yer altı suyu değişimine bağlı bir dinamik yüzey modelidir. Polinomun katsayıları (q_{kl} ve d_i) en küçük kareler yöntemiyle hesaplanır (Zippelt, 1998). Hareket yüzeyinin derecesi genişletilmiş fonksiyonel modelin testi ile belirlenir. Böylece en uygun dinamik hareket yüzeyi belirlenmiş olur (Koch, 1999). Bir $P_j(x_j, y_j, z_j)$ noktası için (108) kapalı hız fonksiyonu açık olarak aşağıdaki biçimde yazılır (Yalçinkaya (Ünver), 1994; Chrzanowski vd., 1986; Pelzer; 1988; Welsch, 1985; Holdahl ve Hardh, 1979; Vanicek vd., 1979; Niemeier 1976).

$$F(x_j, y_j, z_j) = q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + q_{11}x_jy_j + \dots \quad (109)$$

(109) bağıntısı yardımıyla (108) eşitliği düzenlenirse (110) eşitliği,

$$\begin{aligned} x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1}) \Delta t_i + (d_0 + d_1 \Delta s) \Delta t_i \\ y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1}) \Delta t_i + (d_0 + d_1 \Delta s) \Delta t_i \\ z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + F(x_j^{i-1}, y_j^{i-1}, z_j^{i-1}) \Delta t_i + (d_0 + d_1 \Delta s) \Delta t_i \end{aligned} \quad (110)$$

biçiminde elde edilir. (110) eşitliği açık yazılırsa,

$$\begin{aligned}
 x_j^{(i)} &= x_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + \dots) + \Delta t_i (d_0 + d_1\Delta s) \\
 y_j^{(i)} &= y_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + \dots) + \Delta t_i (d_0 + d_1\Delta s) \\
 z_j^{(i)} &= z_j^{(i-1)} + \Delta t_i (q_{00} + q_{10}x_j + q_{01}y_j + q_{20}x_j^2 + \dots) + \Delta t_i (d_0 + d_1\Delta s)
 \end{aligned} \tag{111}$$

oluşur. Bu verilere göre düzeltme denklemleri, $\mathcal{G}_{xj}, \mathcal{G}_{yj}, \mathcal{G}_{zj}$, düzeltmeler; $dx_j^{i-1}, dy_j^{i-1}, dz_j^{i-1}$, (i-1). zamandaki koordinat bilinmeyenleri ve Δt zaman farkı olmak üzere tüm noktalar için aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{G}_{xj}^i &= dx_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l - (x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)}) \\
 \mathcal{G}_{yj}^i &= dy_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l - (y_j^{(i)} - y_j^{(i-1)}) \\
 \mathcal{G}_{zj}^i &= dz_j^{i-1} + \Delta t_i \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^{m-k} q_{kl} x^k y^l + \Delta t_i \sum_{l=0}^{n_s} d_l \Delta s_j^l - (z_j^{(i)} - z_j^{(i-1)})
 \end{aligned} \tag{112}$$

Bilinmeyenler en küçük kareler yöntemine göre hesaplanır. Genişletilmiş fonksiyonel model testi ile polinomun derecesi adım adım belirlenir. Böylece, tüm alanı temsil eden dinamik hareket yüzeyi (F) belirlenmiş olur.

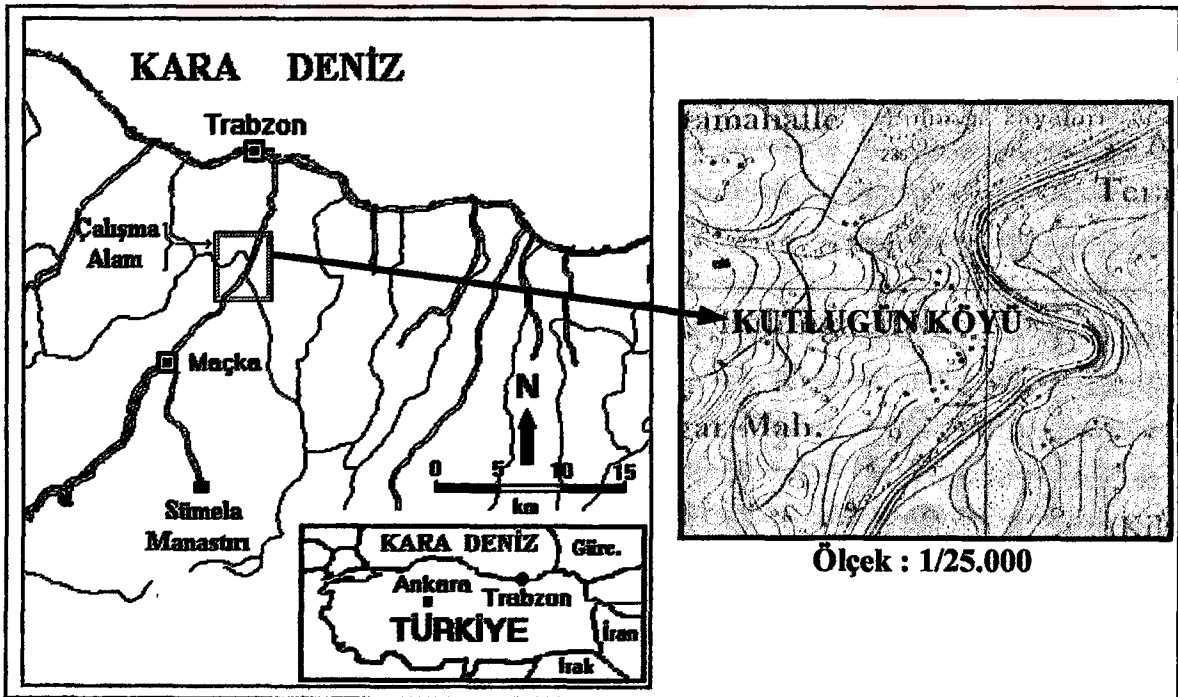
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu araştırmanın amacı, jeodezik, jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu, heyelanlar için hareketin nedeninin de dikkate alındığı bir dinamik deformasyon modelini oluşturmak ve dinamik modelden elde edilen bulgularla diğer disiplinlerin bulgularını birlikte irdeleyip heyelan sonucu oluşan hareketlerin daha gerçekçi yorumlamasını yapabilmektir.

2.1. Ön Çalışmalar

2.1.1. Araştırma Alanının Genel Tanıtımı

Uygulama alanı olarak, Doğu Karadeniz Bölgesi, Trabzon ili, Çaylıyan ilçesinde heyelanlı bir bölge olan Kutlugün Köyü seçilmiştir. İncelenen alan, TRABZON-G43-a2 1/25.000 ölçekli pafta içinde yer almaktadır. Araştırma alanı, Trabzon ilinin doğusundaki Değirmendere nehrinin Karadeniz'e döküldüğü yerden yaklaşık 10 km içeride ve Değirmendere vadisinin batı yamacında bulunmaktadır (Şekil 15).



Şekil 15. Uygulama arazisinin yeri

Araştırma yapılan yamacın alt kısmından, Değirmendere nehri, Trabzon-Maçka karayolu ve Trabzon ilinin içme suyu ihtiyacını karşılayan ana su boru hattı geçmektedir. Karayolu önceleri Değirmendere nehrini takip ederken, daha sonra güzergahı değiştirilerek Şekil 22’de görüldüğü biçimde yamacın alt (topuk) kısmından geçirilmiştir.

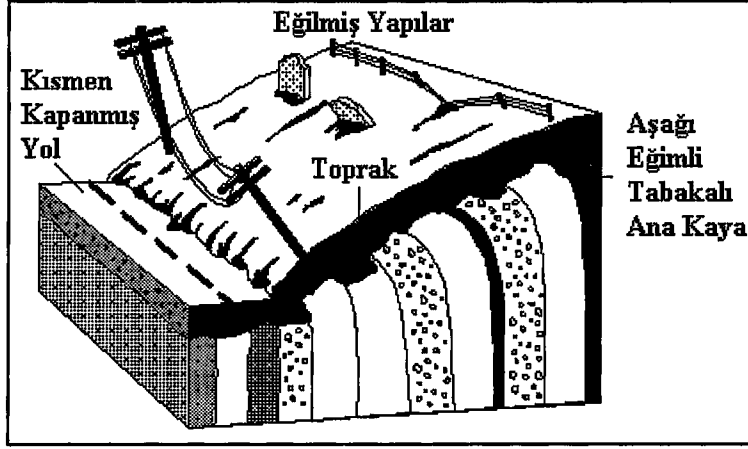
Uygulama alanında, heyelanın göçme, çökme, kabarma şekillerine bağlı olarak gelişmiş yayvan tepelikler, küçük düzlükler ve çukurlarla eğimleri yer yer değişen engebeli arazi şekilleri bulunmaktadır. Bölge, heyelana bağlı olarak homojen eğime sahip değildir. Çalışma alanındaki yükseklikler ortalama 60-200 metre arasında değişmektedir. Uygulama arazisi, genelde seyrek yerleşim alanları ile fındık ve tarım alanlarından oluşmaktadır. Bölge, bahar ve kış mevsimlerinde uzun süreli yağışlar almaktadır. Yıllık ortalama yağış miktarı 1000 mm, ortalama sıcaklık ise 14.5 °C’dir.

2.1.2. Bölgedeki Heyelanın Tanımı ve Sınıflaması

Çalışma alanının alt kısmından geçen Trabzon kenti içme suyu borusunda yer kayması olayına bağlı olarak zaman zaman kırılmaların oluşması ve şehrin içme suyu gereksiniminin karşılanamaması nedeniyle 1995 yılında su boru hattının uygun geçiş tip proje alternatiflerini üretmek amacıyla İller Bankası tarafından İNSİTU (Jeoloji Jeoteknik Sondajcılık Ltd. Şti.) adlı bir şirkete bölgenin jeolojik ve jeoteknik incelemeleri yaptırılmıştır (İller Bankası Raporlar Kitabı, 1995). Ayrıca dinamik modeli oluşturmada gerekli olan bilgileri elde edebilmek amacıyla, K.T.Ü. Jeoloji ve Jeofizik bölümleri öğretim üyeleri tarafından arazi çalışmalarının başlangıcı olan 1999 yılında, bölgenin jeolojik yapısı yeniden incelemiş ve heyelanın nedenleri saptanmıştır.

Yapılan araştırmalar sonucu, heyelanın meydana geldiği alanlarda, kumtaşı, marn, şeyl, killi kireç taşı ve tüft gibi jeolojik malzemenin olduğu belirlenmiştir. Bu malzemenin yer yer ayrışması sonucu, inceleme alanında killi seviyelerin olduğu gözlenmiştir. Bölgedeki kayma hareketinin, tüffit arakatlı marnın parçalanarak ayrışması sonucunda suya doymuş siltli killere dönüşmüş ve kütle içindeki olistostrom malzemenin yamaç aşağı 180 ve 170 kotlarındaki akmalar (SS1 ve SS2) ile başladığı belirlenmiştir (Şekil 23). Yüzeylerde meydana gelen kayma düzlemi Şekil 5’teki gibi kaşık biçimlidir. Bu rotasyonel hareket kayma düzlemine teğettir. Çalışma alanında, bu tip heyelanın oluşturduğu yay ve at nalı biçimindeki şevler, çökme bölgelerinde oluşan çukur ve düzlükler, kabarma bölgelerini karakterize eden küçük tepeler gibi topoğrafik şekiller görülmektedir.

Araştırma alanında oluşan heyelan tipi, Şekil 16’da ki gibi malzemede oluşan yavaş akma (creep) biçimindedir. Bölgede, kütlenin bütünüyle aktif olarak hareket ettiği saptanmıştır.



Şekil 16. Yavaş akma (Creep) heyelan tipi (URL-1, 2002)

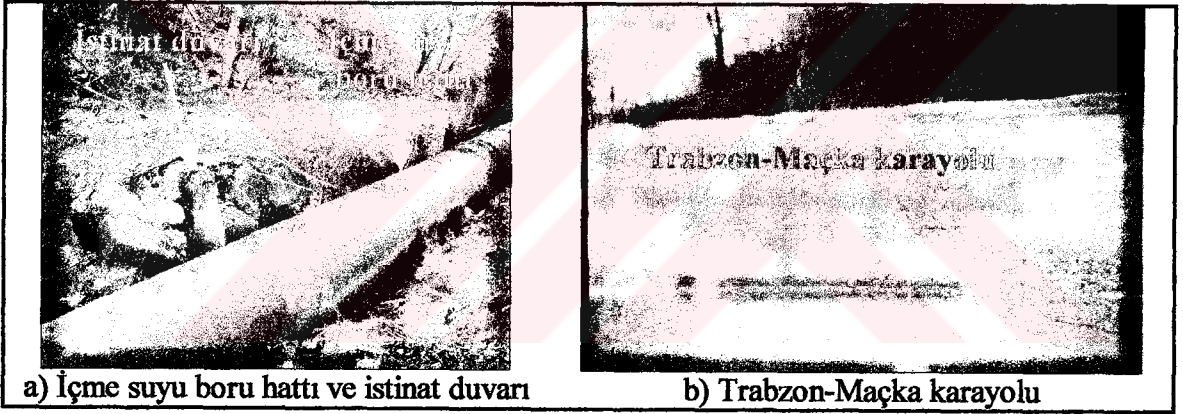
Heyelanlı alan; yamacın üst kısmı ile alt kısmı arasında 750 m uzunlukta, çökme bölgesinde 380 m ve topukta 200 m enindedir. Esas aynadan başlayan kayma düzleminin derinliği yapılan sondajlara göre dirençli temel kayaya teğet olarak çökme bölgesinde 50-60 m, kabarma bölgesinde 60-70 m ve topukta 15-20 m olarak belirlenmiştir.

2.1.3. Bölgedeki Heyelana Neden Olan Etkenler

Bölgede, yamacın önceki eğiminin yaklaşık olarak 11-16 derece arası değişmesi heyelanın oluşumunda eğiminin fazla etkili olmadığını göstermektedir. Bölgedeki heyelan oluşumunun nedenlerinden biri, malzemenin jeolojik ve jeoteknik özellikleridir. Bölgede bulunan düşük direnç özelliğine sahip kaya katmanının (marn), su ve hava teması ile kolayca dağılması ve mekanik olarak parçalanmasından dolayı bölgede ayrışma oranı yüksek bir heyelan malzemesi oluşmuştur. Aşırı ayrışma sonucu gevşeyen malzemede oluşan gözeneklilik ve geçirimlilik, yağışlı bir iklime sahip bölgede toprağın yüksek oranda su depolamasına neden olmuştur. Yapılan araştırma sonucu kütlenin büyük bir kısmının su taşıdığı, daha az geçirimli kesimlerinin de suya doygun olduğu belirlenmiştir. İNSİTU şirketinin bölgede açtığı sondaj kuyularında yaptığı ölçümler sonucunda da, çalışma alanında yer altı suyunun varlığı ve su seviyesinin yağışlara bağlı olarak değiştiği

saptanmıştır (İller Bankası Raporlar Kitabı, 1995). Ayrıca bölgeden geçen yüzey sularının çeşitli nedenlerle yerin altına kaymaları ve tarım alanlarının sulanması için çevredeki kaynaklardan getirilen suların yeraltına sızması, yer altı suyu tablasının yükselmesinin diğer bir nedeni olarak belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu yer altı su seviyesi değişimlerinin, bölgedeki heyelanın en önemli nedenlerinden biri olduğu saptanmıştır.

Yamacın alt kısmından geçen Trabzon-Maçka karayolunun iyileştirilmesi için yapılan kazılardan dolayı çalışma alanının topuk kısmında yük kaybı meydana gelmiştir. Yük kaybını azaltmak için burada istinat duvarı inşa edilmiştir. Bu istinat duvarı ve karayoluna paralel olarak geçen Trabzon şehri içme suyu boru hattı heyelan nedeniyle sık sık kırılmaktadır (Şekil 17-a). Karayolunda da heyelan nedeniyle çatlama ve çökmeler oluşmaktadır (Şekil 17-b).

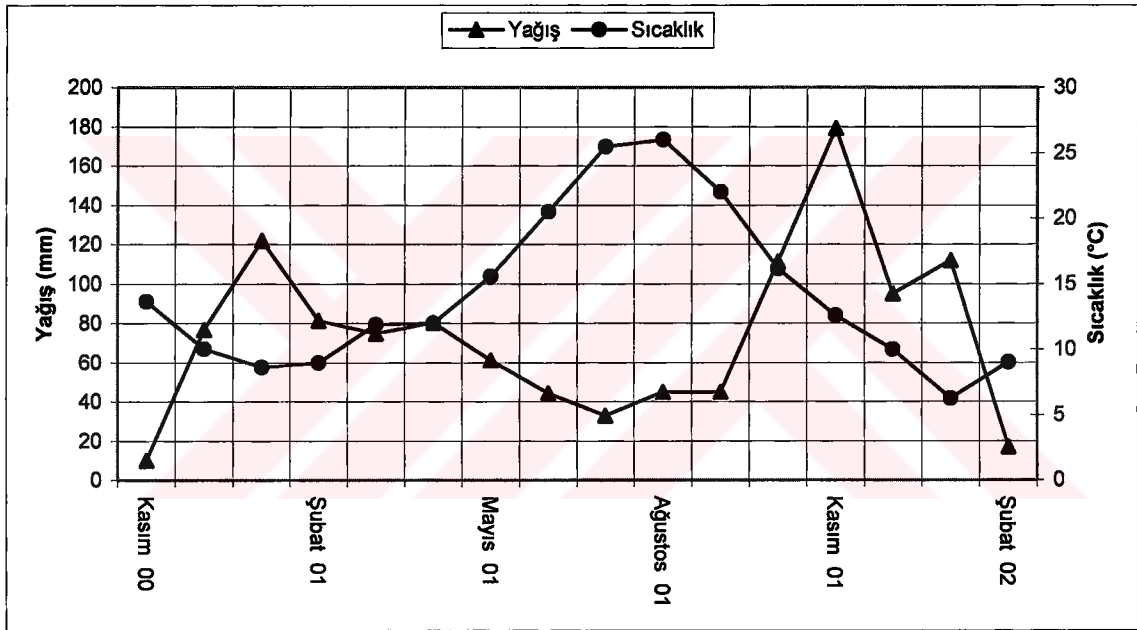


Şekil 17. Heyelanın; istinat duvarı, içme suyu boru hattı ve karayolu üzerindeki etkileri

2.1.4. Meteorolojik Çalışmalar

Deformasyonun zamansal seyrinin kontrol altında tutulabilmesi için gözlem periyotlarının zamana göre dağılımı yani en uygun ölçme periyotları belirlenmelidir. Ölçme periyotlarının aralığı, etkiyen kuvvetin aktif-pasif olma durumuna bağlı olarak seçilebilir. Çalışma arazisinde, yağmur ve buna bağlı olarak oluşan yer altı suyu, heyelan için dinamik bir değişkendir ve heyelanın tetiklenmesinde en önemli faktörlerden biridir. Bu nedenle arazinin en fazla ve en az yağış aldığı zamanlarda ölçülerin yapılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

Periyodik ölçülerin hangi zamanlarda yapılacağını belirlemek için Trabzon Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden bölgenin 10 yıllık hava durumu bilgileri alınmış ve sıcaklık ve yağış grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler incelenerek, 2, 5, 8 ve 11. aylarda olmak üzere yılda 4 kez jeodezik, jeolojik ve jeofizik ölçüler yapılmasına karar verilmiştir. Ölçü periyotları için verilen kararın uygunluğunu test etmek amacıyla periyodik ölçülerin başlangıcı olan Kasım 2000 den itibaren aylık yağış ve sıcaklık verileri de meteorolojiden alınarak ilgili grafik çizilmiştir (Şekil 18). Bu grafik ölçü periyotları için verilen kararların uygun olduğunu göstermektedir.



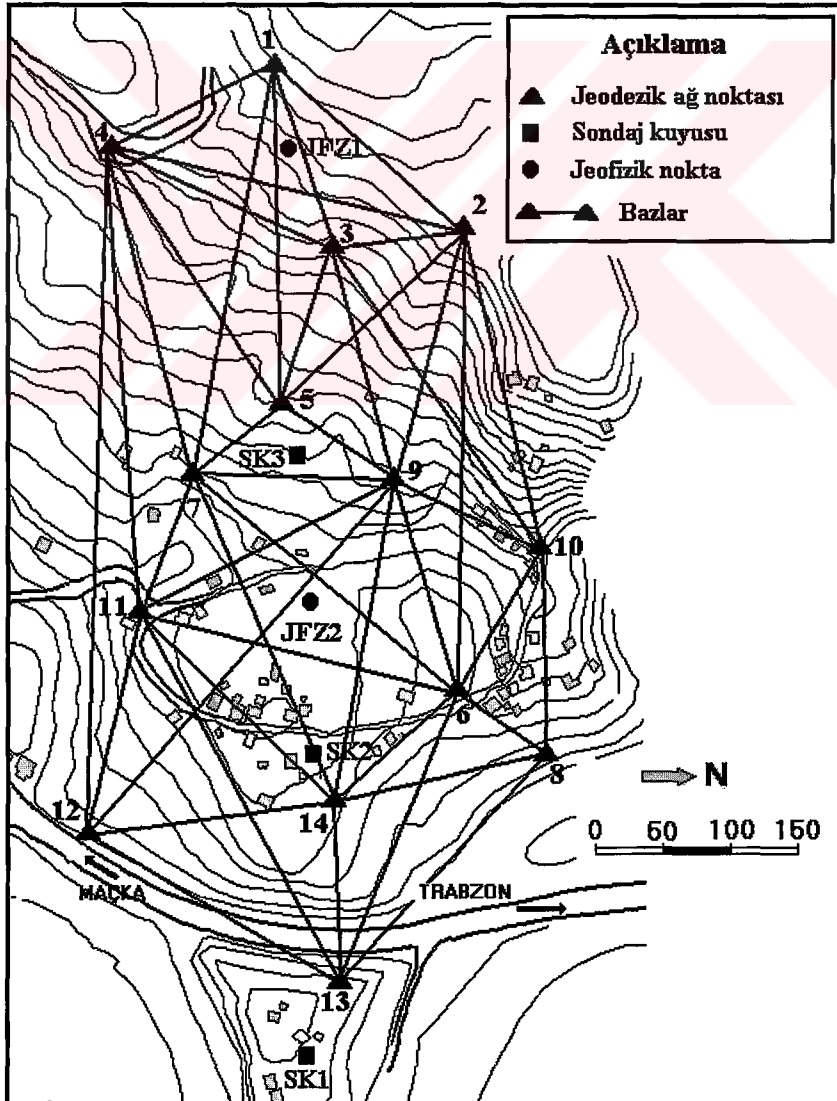
Şekil 18. Bölgenin ölçü periyot aralığındaki yağış ve sıcaklık değişimi

2.2. Jeodezik Çalışmalar

Heyelanlar, üç boyutlu zamana ve konuma bağlı karmaşık hareketler olduklarından hareketlerin aynı anda üç boyutlu olarak belirlenmesi için bölgede amaca uygun bir jeodezik deformasyon ağına kurulması ve ağda GPS ile belirlenen periyotlarda ölçülerin yapılması planlanmıştır.

2.2.1. Jeodezik Deformasyon Ağı'nın Tasarımı ve Tesisi

Jeodezik deformasyon ağı tasarımının ilk aşamasında, bölgenin 1:25.000 ve 1:1.000 ölçekli topoğrafik haritaları üzerinde ağı noktalarının yerleri belirlenmiştir. Nokta yerlerinin seçiminde, uydu görüşünün açık olması, kolay ulaşılabilir olması, noktaların bölgeyi temsil edebilecek özellikte olması ve bölgede yapılan jeolojik incelemeler dikkate alınmıştır. Tüm bu koşulları sağlayan ve jeolojik olarak hareket beklentisi olmayan yerlerde seçilen 4 sabit nokta (2, 8, 10, 13) ile hareket beklentisi olan yerlerde seçilen 10 obje noktasından (1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14) oluşan 14 noktalı bir jeodezik deformasyon ağı tasarlanmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Jeodezik deformasyon ağı

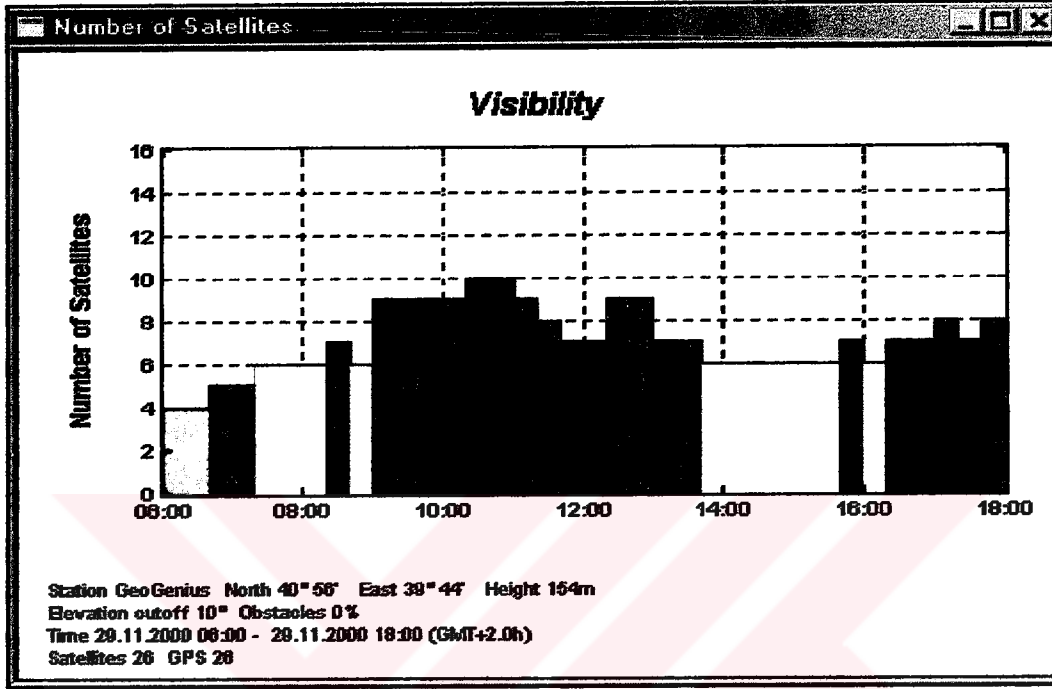
Jeodezik deformasyon ağıının en uygun geometrik şeklinin oluşturulması amacıyla duyarlık ve güvenilirlik kriterleri ile ağıın optimizasyonu yapılmıştır. Ağıın duyarlık ve güvenilirlik yönünden yeterli olduğu ve ölçülerin birbirini iyi denetlediğine karar verildikten sonra noktalar tesis edilmiştir. Noktalar pilye olarak tesis edilmişler ve merkezleştirme hatalarından kaçınacak şekilde alet bağlama vida düzeneğiyle donatılmışlardır.

2.2.2. GPS Ölçülerinin Yapılması ve Değerlendirilmesi

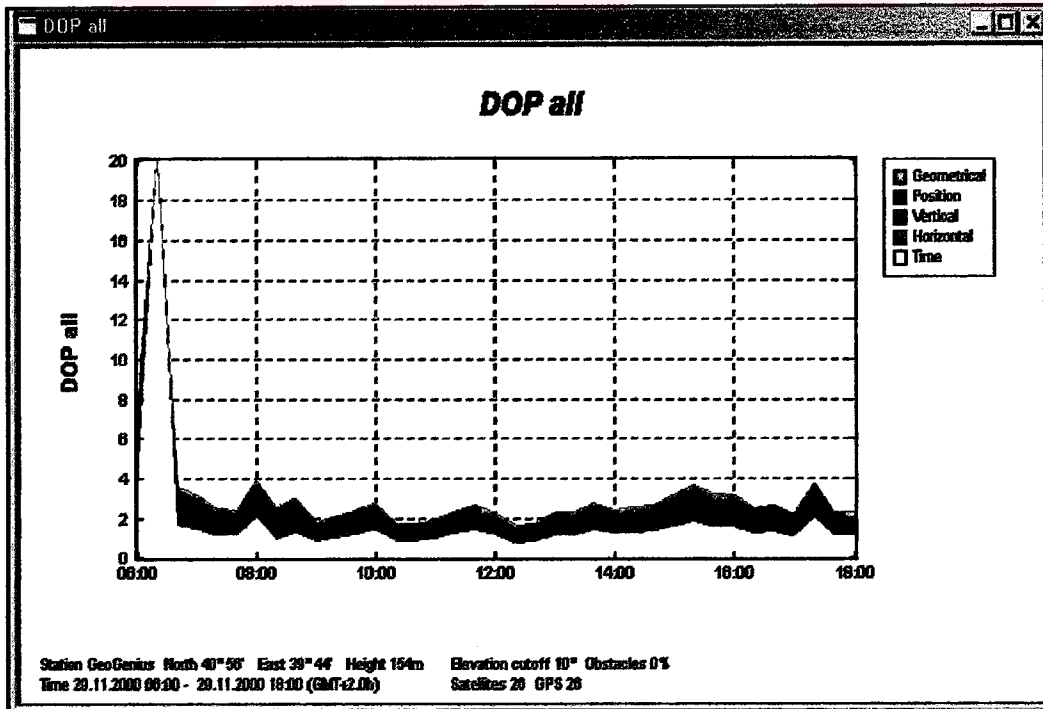
GPS'in yüksek duyarlığa sahip oluşu, üç boyutlu koordinatları aynı anda elde edebilmesi ve noktaların birbirini görme zorunluluğunun olmamasından dolayı bu çalışmada jeodezik ölçülerin yapılmasında GPS kullanılmıştır. Deformasyon ölçüleri Ashtech marka 3 adet GPS alıcıları ile 3 ayda bir periyodik olarak yapılmıştır. GPS gözlemlerinin yapılmasında statik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Statik yöntemin kullanılmasının gerekçesi yüksek duyarlık gerektiren jeodinamik hareketlerin (heyelanlar) izlenmesinde milimetre mertebesinde doğruluk sağlamasıdır. Ölçü süresi, ölçme zamanındaki uyduların durumuna göre yaklaşık 40 dakika olarak belirlenmiştir. Bir günlük ölçme süresince bir noktadaki alıcının konumu hiç değişmeyecek şekilde ölçü planı yapılmıştır. Tüm komşu noktaların bu noktaya bağlı olarak ölçülmesine dikkat edilmiştir. Bu işlem kaba hataların kolayca belirlenmesi ve ölçmelerin güvenilirliğinin artırılması için gerçekleştirilmiştir. Ağda ölçülen kenar sayısı 44'dür. Ölçü planı her periyot için aynı tutulmuştur. Ölçüler aynı ekip ve aletlerle tekrarlanmıştır.

Ölçme planının yapılmasından önce, Geogenius-2000 yazılımının Planning modülü yardımıyla gün içerisinde uyduların görüldüğü en uygun ölçü saatleri belirlenmiştir. Kasım 2000 ölçü periyoduna ait uydu sayısı Şekil 20'de ve duyarlık dağılımı (DOP) Şekil 21'de örnek olarak verilmiştir. Şekil 20'de görüldüğü gibi bölgede 07.00 ile 18.00 saatleri arasında uydu sayısı ölçü yapmaya elverişlidir. Ancak çalışma alanını çevreleyen dağların uydu görünüşünü engellemesi nedeniyle arazide ölçü saatleri içerisinde olması gereken uydu sayısından daha azı görülebilmektedir. Bu dikkate alındığında en fazla uydunun gözlemlendiği 08.00 ile 14.00 saatleri ölçü yapmak için uygundur. Şekil 21 incelendiğinde, duyarlık dağılımının en iyi olduğu saatlerin de yine 08.00 ile 14.00 saatleri olduğu görülmektedir. Böylece Kasım periyodunda çalışma arazisi için en uygun ölçme saatlerinin 08.00 ile 14.00 arası olduğuna karar verilmiştir. Bu nedenle 44 kenarlı deformasyon ağıının ölçülebilmesi için üç günlük bir süreye gereksinim olduğu ortaya çıkmıştır. Üç GPS

alıcısına bağlı olarak birinci gün 8, ikinci gün 7 ve üçüncü gün 6 oturum olacak şekilde bir ölçü planı yapılmıştır (Tablo 4).



Şekil 20. Uydu görünüşü



Şekil 21. DOP değerlerinin dağılımı

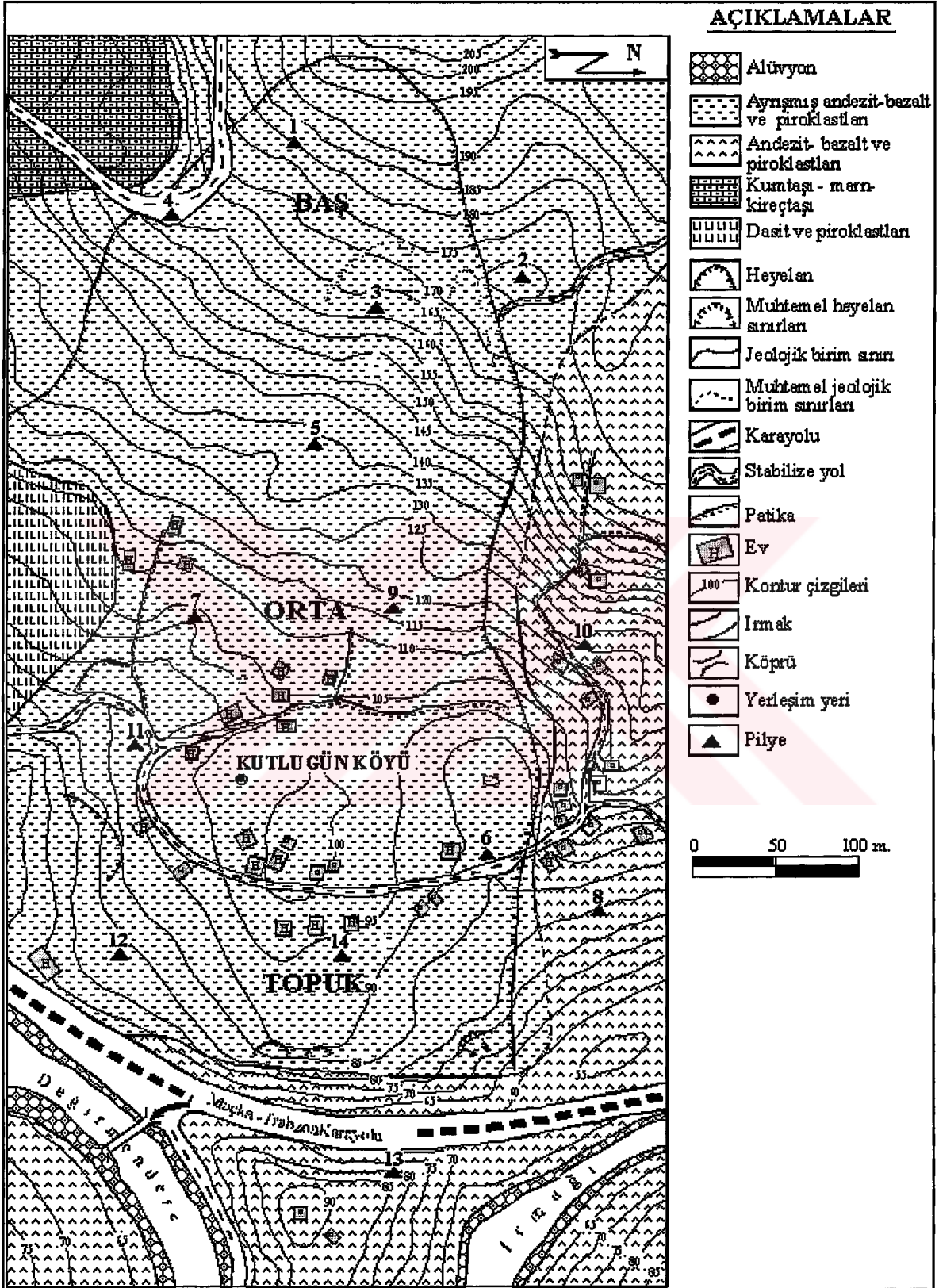
Ölçme planı düzenlemesi aşamasında ölçülerin yüksek kottan aşağı kota doğru yapılması göz önüne alınmıştır. Bu durum arazide ulaşımın yaya olarak yapılması zorunluluğundan kaynaklanmıştır. Ayrıca ölçme tasarımı yapılırken ağın duyarlılığı ve güvenilirliği açısından, her sonraki oturumun daha önce gözlem yapılan bir veya iki noktayı içermesine dikkat edilmiştir. Toplanan veriler Geogenius-2000 yazılımında değerlendirilmiştir. Bu veriler yardımıyla ağın serbest dengelemesi yapılmış ve korelasyonlar dikkate alınarak uyşumsuz ölçüler belirlenmiştir. Uyşumsuz ölçüler yinelenerek tekrar serbest dengeleme yapıp ağ noktalarının koordinatları hesaplanmıştır. Yapılan bilgisayar programlarında Fortran Visual Workbench v 1.0 derleyicisi kullanılmıştır. Dengeleme programı, uygulaması yapılacak olan statik, kinematik ve dinamik deformasyon analiz programlarına veri hazırlayacak şekilde tasarlanmıştır. Program jeodezik ağın yinelenmiş ölçülerle hesaplanan nokta koordinatlarını ve varyans-kovaryans matrislerini deformasyon analizleri için ürün olarak sunabilmektedir.

Tablo 4. GPS ağ ölçme düzeni

Gün	Oturum	İstasyonlar	Gün	Oturum	İstasyonlar	Gün	Oturum	İstasyonlar
1	1	1-2-3	2	1	9-3-10	3	1	6-2-10
	2	1-2-4		2	9-3-5		2	6-8-10
	3	1-3-4		3	9-2-5		3	6-8-14
	4	1-5-4		4	9-7-5		4	6-7-14
	5	1-7-4		5	9-6-11		5	6-13-14
	6	11-7-4		6	9-14-11		6	8-13-14
	7	11-12-4		7	9-14-12			
	8	11-12-13						

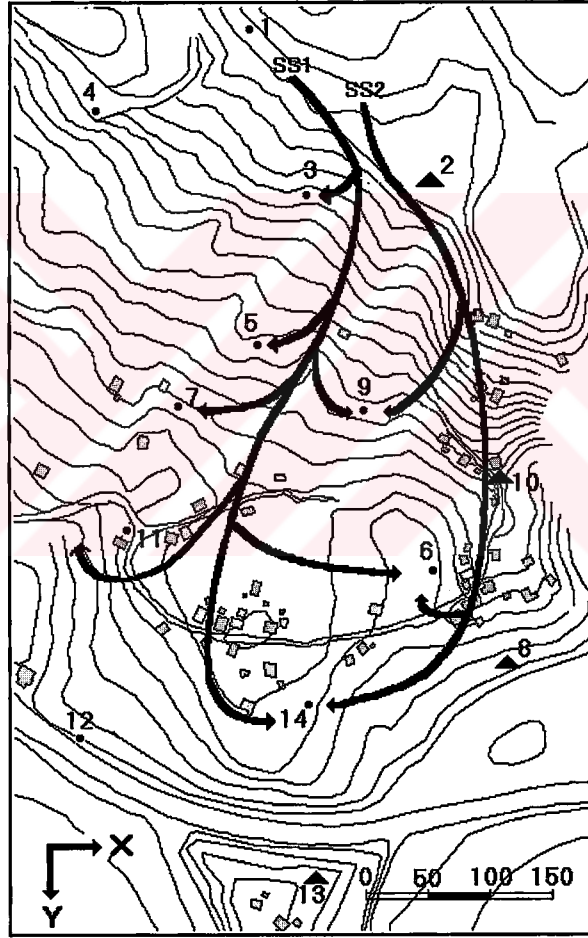
2.3. Jeolojik Çalışmalar

Uygulama alanındaki jeolojik çalışmalar, arazinin zemin yapısı hakkında bilgi edinmek, bölgede oluşan heyelan mekanizmasını anlamak ve heyelanın nedenlerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Önce, arazinin jeolojik yapısı incelenerek bölgedeki jeolojik malzeme ve heyelan sınırlarının güncel durumu belirlenmiş ve bölgenin jeomorfolojik haritası üretilmiştir (Şekil 22). Jeodezik ağın sabit ve hareketli noktalarının yerlerinin seçimi bu haritaya göre yapılmıştır.



Şekil 22. Uygulama arazisinin jeolojik ve jeomorfolojik haritası

Jeolojik çalışmalar sonucunda çalışma alanında SS1 ve SS2 olarak adlandırılmış iki yüzeysel hareket belirlenmiştir (Şekil 23). Yüzeylerinden akan toprak kütlelerinin nokta hareketlerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Şekil 23, Yüzeysel hareketlerin, noktaların hareketleri üzerindeki olası etkilerini göstermektedir. Şekil 23’de görüldüğü gibi 3, 5, 7 ve 11 numaralı noktalar sadece SS1’den, 6, 9 ve 14 numaralı noktalar hem SS1’in hem de SS2’den etkilenmiştir. 1, 4 ve 12 numaralı noktalar üzerinde yüzeysel hareketlerin etkisi olmadığı gözlenmiştir.



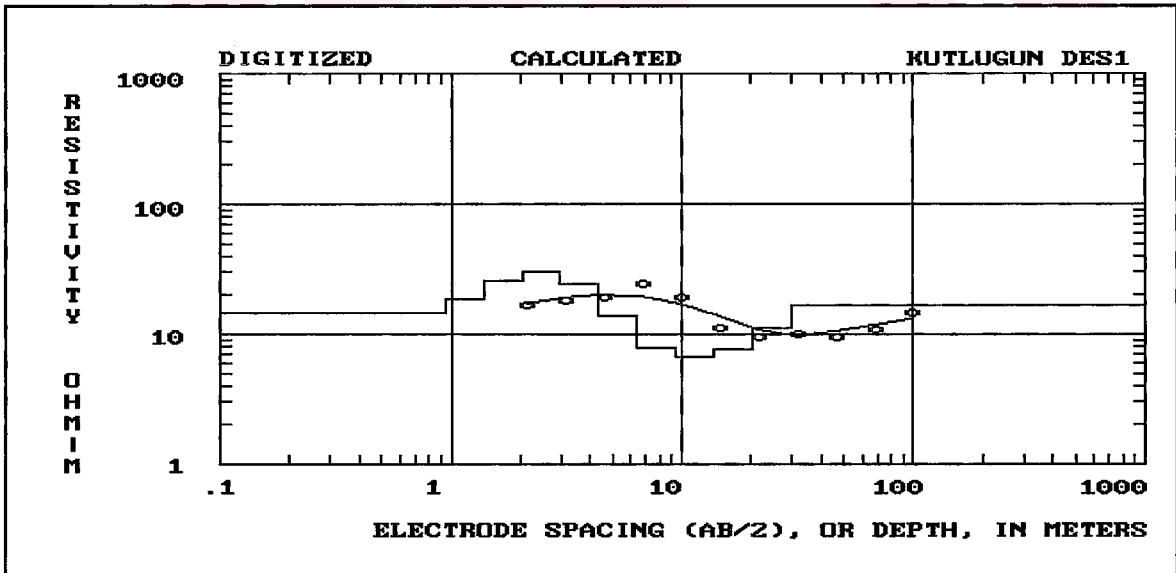
Şekil 23. Yüzeysel hareketler ve onların noktalar üzerindeki olası etkileri

Ayrıca, ağ noktalarının yer altı suyu seviyelerini her periyotta belirlemek amacıyla bölgede İNSİTU şirketinin daha önce açtığı sondaj kuyularında (SK1, SK2 ve SK3) yer altı su seviyesi ölçüleri yapılmıştır (Şekil 19).

2.4. Jeofizik Çalışmalar

Arazide bulunan sondaj kuyuları, ağ noktalarının yer altı suyu seviyelerini belirlemede yeterli olmamıştır. Yeni sondaj kuyuları açmak, çalışma arazisinin topoğrafik koşullarından dolayı zor ve masraflıdır. Ayrıca arazinin bazı noktalarında özellikle heyelanın aktif olduğu üst kısımlarda sondaj kuyularının zaman sürecinde ve heyelan etkisi altında korunabilmesi de oldukça güçtür. Bu nedenle sondaj kuyularına tamamlayıcı olarak arazide gerekli görülen yerlerde Jeofizik noktalar (JFZ1 ve JFZ2) belirlenmiştir (Şekil 19).

Bu noktalarda, jeofizik yöntemlerden biri olan ve öz direncin derinlikle değişimi prensibine göre çalışan düşey elektrik öz direnç sondajı (DES) uygulanarak yeraltı suyu derinliği belirlenmiştir. DES' ten elde edilen görünür öz dirençlerin yorumlanması için Zohdy tarafından yazılan ve iteratif bir algoritmaya göre çalışan bir yazılım kullanılarak yüzeyden itibaren su tabakasının derinlikleri hesaplanmıştır. Jeofizik ölçülerin yorumlanmasında kullanılan yazılım ile öz direnç verilerinden tabakaların derinlikleri hesaplanabilmektedir. Yazılımın grafik çıktısına bir örnek olarak Kasım 2000 periyodunda JFZ1 noktasında yapılan jeofizik ölçümlere göre yorumlanmış Schlumberger eğrisi Şekil 24'de verilmiştir.



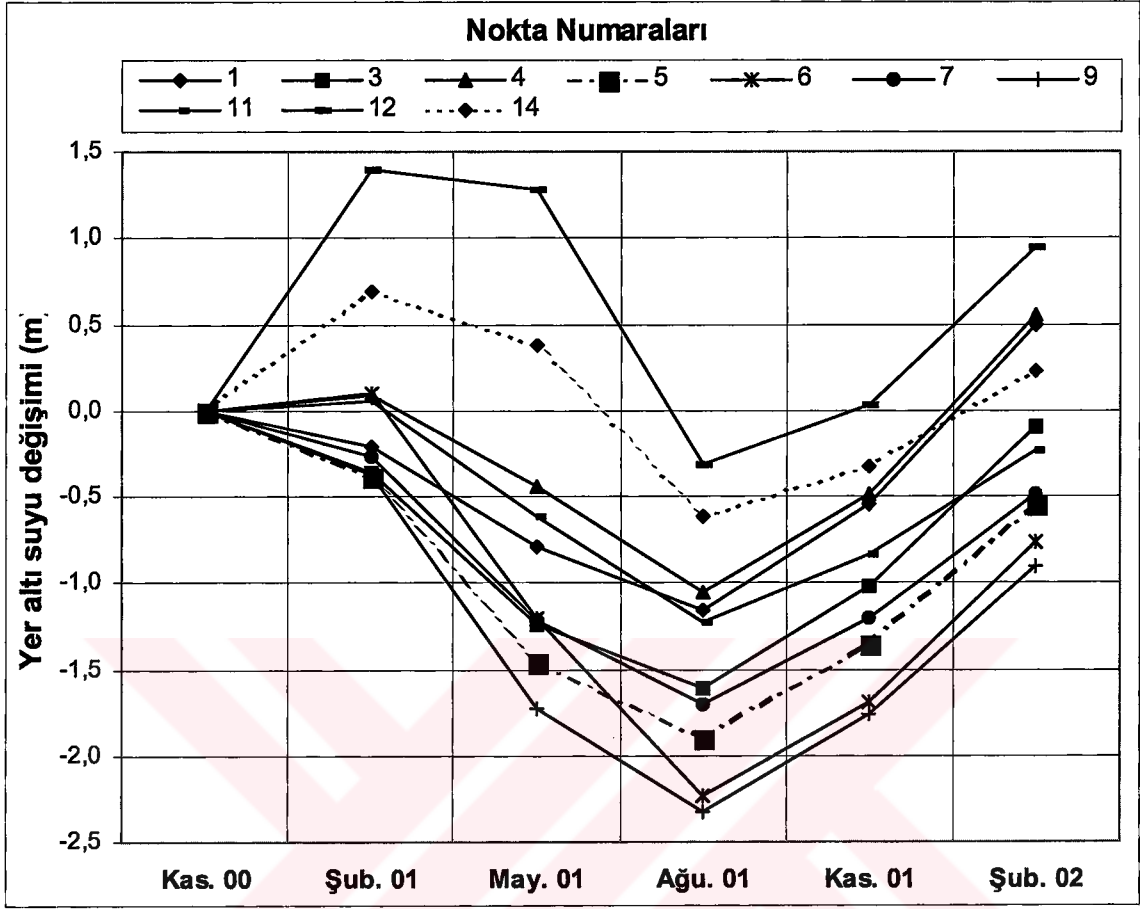
Şekil 24. Kasım 2000 verilerinden JFZ1 noktasında görünür öz direnç ve elektrot aralığına göre çizilen Schlumberger eğrisinin yorumu

Şekildeki trend eğrisinin en küçük değeri, görünür öz direnci en düşük olan tabakayı temsil etmektedir. Görünür öz direncin en alçak olan tabakası su tabakası olduğundan, yeryüzünden itibaren yer altı suyunun derinliği belirlenmiş olur. Şekilde görüldüğü gibi Kasım 2000 ölçü periyodunda JFZ1 noktasının yüzeyden olan yer altı suyu derinliği $h = 9.42$ m olarak bulunmuştur. Jeofizik noktalardaki yer altı suyu derinlikleri, her ölçü periyodunda aynı şekilde belirlenmiştir.

2.5. Jeodezik Ağ Noktalarının Yer Altı Su Seviyelerinin Hesaplanması

Yukarıda belirtildiği üzere üçü jeolojik (SK1, SK2, SK3) ve ikisi jeofizik (JFZ1, JFZ2) nokta olmak üzere beş noktada yer altı suyu belirleme çalışmaları her ölçü periyodunda yapılmıştır. Bu ölçülerden elde edilen yer altı suyu derinlikleri kullanılarak Multiquadric Enterpolasyon yardımıyla tüm ağ noktalarındaki yer altı suyu derinlikleri hesaplanmış ve Kasım 2000 başlangıç olmak üzere ağ noktalarındaki yer altı suyu değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 25).

Bu değerler yer altı suyu değişimini dikkate alan heyelan için oluşturulmuş dinamik deformasyon modelinde veri olarak kullanılmışlardır. Şekil 25'den kış aylarına doğru çalışma alanındaki yer altı su seviyesinin yükseldiği, yaz aylarına doğru ise yer altı su seviyesinin azaldığı görülmektedir. Şekil 18'deki yağış ve sıcaklık grafiğinin de bunu doğruladığı açık bir biçimde görülmektedir. Başka bir deyişle bu arazide yer altı suyunun değişiminde yağışın etkili olduğu söylenebilir. Periyodik ölçüler süresince tüm noktalarda ortalama 2 metre civarında yer altı suyu değişimi gözlenmiştir. Bu durum yer altı suyu değişiminin heyelan oluşumundaki etkisini açık bir biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 25. Ölçü periyotlarına göre ağ noktalarındaki yer altı suyu değişimleri

3. BULGULAR

3.1. Deformasyon Analizi

Deformasyon belirlemek amacıyla tesis edilmiş Şekil 19'daki jeodezik ağda, Kasım 2000, Şubat 2001, Mayıs 2001, Ağustos 2001, Kasım 2001 ve Şubat 2002 olmak üzere 6 periyotluk GPS ölçüsü yapılmıştır. 2000 yılı Kasım ayı referans zamanı (t_0 zamanı) olarak alınmıştır. Bu periyottaki ölçüler serbest ağ yöntemiyle dengelenmiş ve uyuşumsuz ölçüler, korelasyonları dikkate alan Data-Snooping yöntemine göre saptanarak yinelenmiştir. Kasım 2000 periyodunda hesaplanan dengeli koordinatlar diğer periyotlarda yaklaşık koordinatlar olarak kullanılmıştır. Tüm periyotlarda uyuşumsuz ölçüler irdelemesi yapıp ağ, uyumlu ölçülerle her periyot için ayrı ayrı serbest ağ yöntemiyle dengelenmiştir. Ölçü periyotlarına ait serbest ağ dengelemesi sonuçları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Her periyottaki ölçülerin serbest dengeleme sonuçları

Dengeleme Girdi ve Çıktıları	Ölçü Periyotları ve İstatistiksel Bilgiler					
Deformasyon Ağı Bilgileri	Kasım 2000	Şubat 2001	Mayıs 2001	Ağustos 2001	Kasım 2001	Şubat 2002
-Nokta sayısı (p)	14	14	14	14	14	14
GPS Vektörleri						
-Vektör sayısı (m)	44	44	44	44	44	44
-Vektör bileşenleri sayısı ($n=3m$)	132	132	132	132	132	132
Dengeleme Bilgileri						
-Ölçü sayısı (n)	132	132	132	132	132	132
-Bilinmeyen sayısı ($u=3p$)	42	42	42	42	42	42
-Datum defekt ($d=3$)	3	3	3	3	3	3
-Serbestlik derecesi ($f = n-u+d$)	93	93	93	93	93	93
-Düzeltilmelerin kareleri toplamı	51.079	84.088	134.919	137.968	141.111	164.636
- m_0 (soncul standart sapma)	0.741	0.951	1.204	1.218	1.231	1.331
- s_0 (öncül standart sapma)	0.732	0.919	1.191	1.175	1.133	1.268
-T (test büyüklüğü)	1.025	1.071	1.023	1.074	1.180	1.101
-q (F-tablo değeri)	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502	1.502
Konum Hataları	Max	Max	Max	Max	Max	Max
- m_x (cm)	0.13	0.20	0.31	0.29	0.22	0.33
- m_y (cm)	0.13	0.17	0.28	0.31	0.19	0.35
- m_z (cm)	0.15	0.19	0.26	0.37	0.28	0.35
Ağın Ort. Nokta Konum Hatası (m_p)	0.15	0.24	0.32	0.42	0.32	0.37

Bu dengeleme sonuçları, (dengeli koordinatlar, koordinatların ters ağırlık matrisleri ve birim ölçünün ortalama hataları) statik, kinematik ve dinamik deformasyon modellerinde veri olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada, deformasyon irdelemeleri aşağıda sıralanan modeller ve yöntemlerle yapılmıştır.

- ◆ Statik deformasyon modeli
 - θ^2 -Ölçütü
- ◆ Kinematik deformasyon modelleri
 - Kinematik tek nokta modeli
 - Kinematik yüzey modeli
- ◆ Dinamik deformasyon modelleri
 - Dinamik tek nokta modeli
 - Dinamik yüzey modeli

3.1.1. Statik Deformasyon Modeli (θ^2 -Ölçütü) İle Deformasyon Analizi

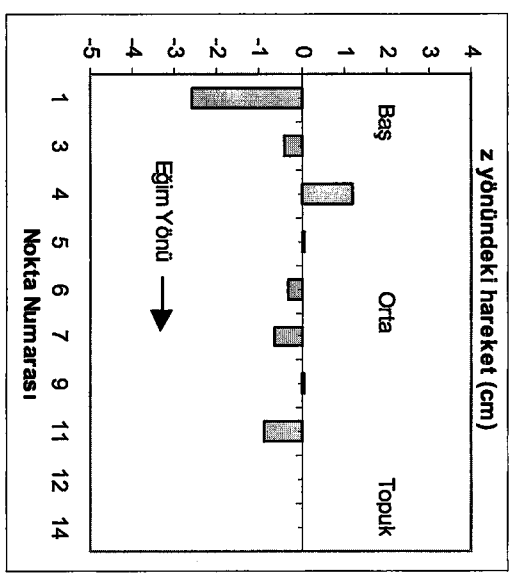
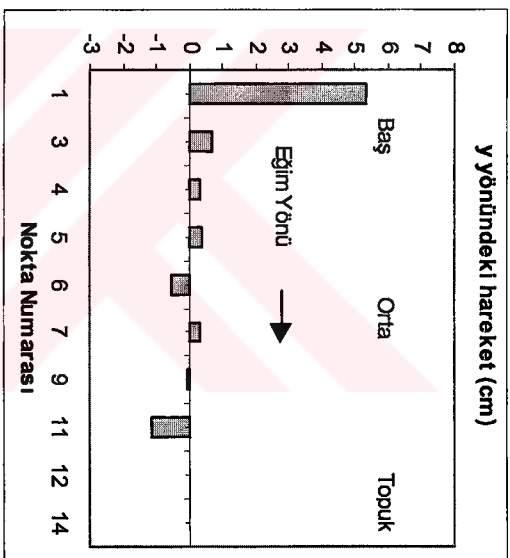
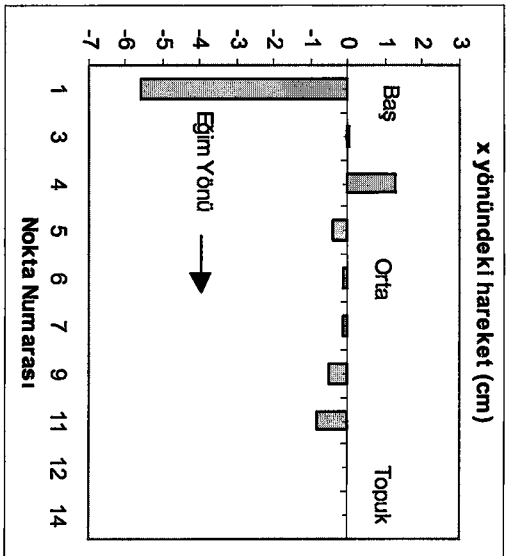
1.6.1. bölümünde açıklanan θ^2 -Ölçütü yöntemine göre, Kasım 2000-Şubat 2001, Kasım 2000-Mayıs 2001, Kasım 2000-Ağustos 2001, Kasım 2000-Kasım 2001, Kasım 2000-Şubat 2002 periyotları arasında geçen süre içinde hareket eden noktalar belirlenmiş ve onlara ait hareket büyüklükleri (dx, dy, dz) hesaplanmıştır. (40) eşitliğine göre test büyüklüğü (T) ve onlara karşılık gelen F-tablo değerleri (q) saptanarak Tablo 6'da gösterilmiştir. Test değerleri tablo değerlerinden büyük olan noktalarda deformasyon olduğuna karar verilmiştir. Tablolardaki karar satırında deformasyon olan noktalarda “E”, deformasyon belirlenmeyen noktalarda “H” ifadesi kullanılmıştır.

Tablo 6'da görüldüğü gibi tüm ölçü periyotları arasında sabit zeminlere tesis edilmiş olan 2, 8, 10 ve 13 numaralı noktalarda deformasyon saptanmamıştır. Hareketli zeminlere tesis edilen 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda deformasyon belirlenmiştir. Arazinin eğim yönündeki nokta hareketlerinin davranışlarını görsel olarak izlemek için Şekil 22'de gösterilmiş olan heyelanın baş, orta ve topuğuna göre statik deformasyon analiz sonuçları, x, y ve z yönlerinde grafik olarak verilmiştir (Şekil 26-30). Tüm noktaların x, y, z eksenleri yönündeki hareketlerinin yağışla olan ilişkilerini görebilmek

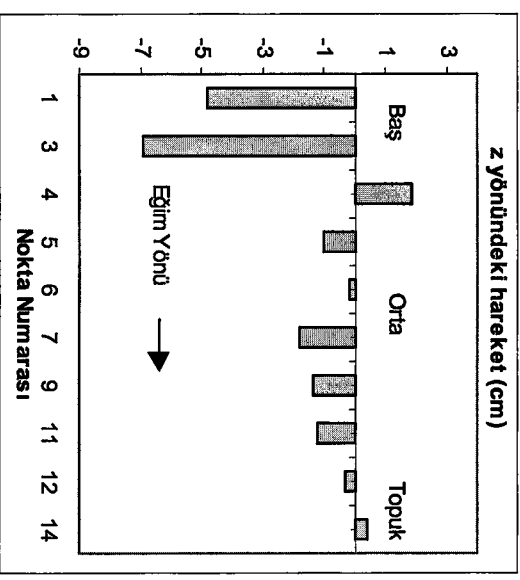
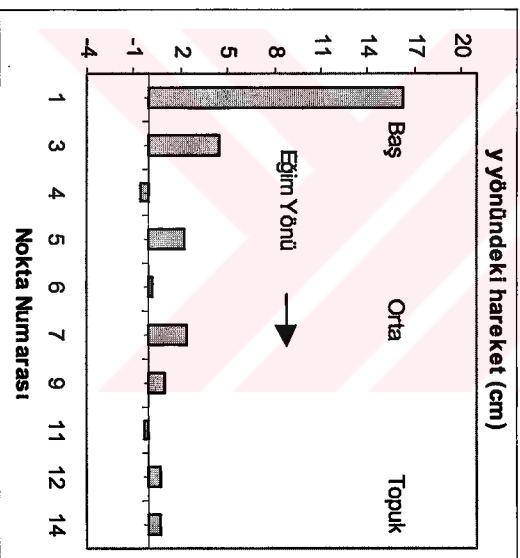
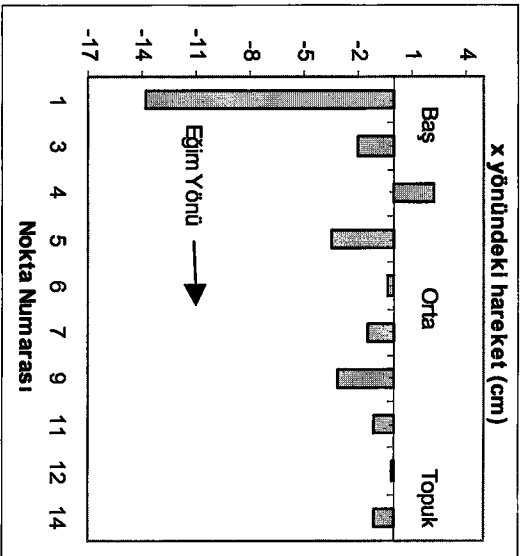
için grafikleri çizilmiştir (Şekil 31-33). Aynı ayrı her noktanın yağış ve x, y, z eksenini yönündeki hareket ilişkileri de Şekil 34-43'de verilmiştir.

Tablo 6. Tüm ölçü periyot gruplarındaki statik deformasyon analizi sonuçları

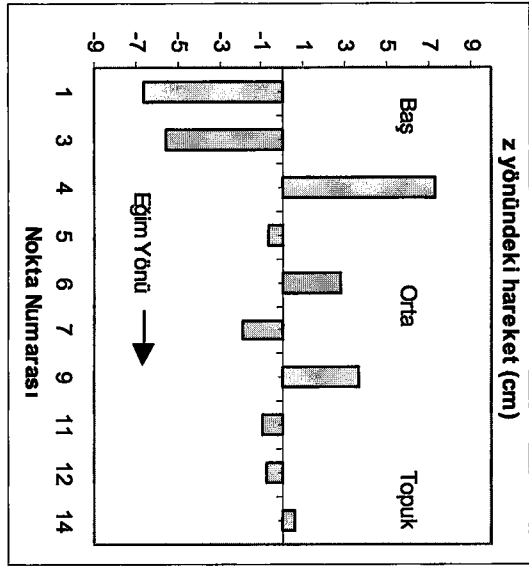
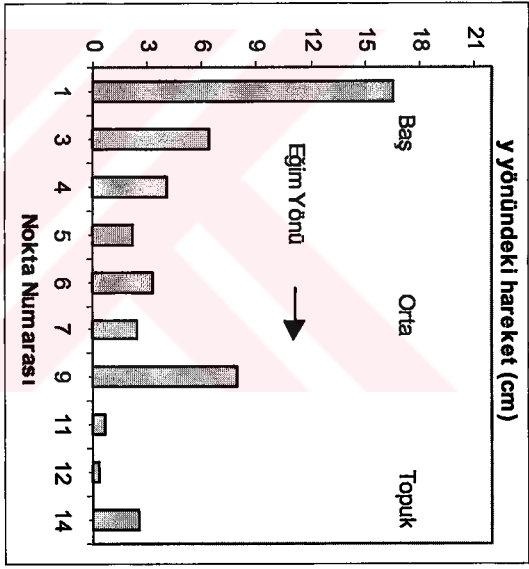
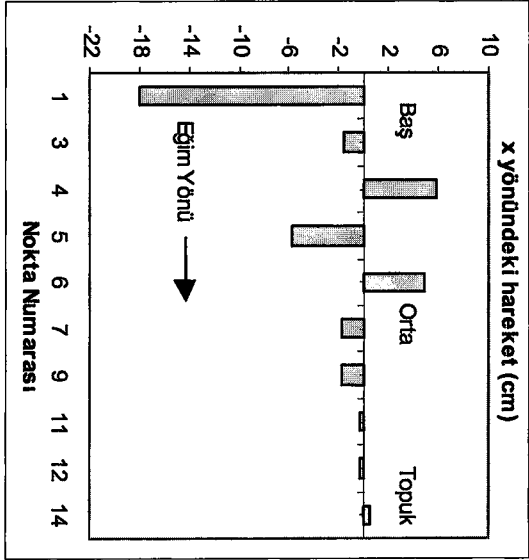
Periyot : Kasım 2000 – Şubat 2001														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-5.61		0.04	1.27	-0.40	-0.16	-0.14		-0.54		-0.86			
dy (cm)	5.34		0.69	0.35	0.38	-0.55	0.34		-0.03		-1.13			
dz (cm)	-2.60		-0.42	1.22	0.07	-0.33	-0.62		0.05		-0.90			
T	439		6.67	15.86	8.30	3.34	5.24		8.15		8.26			
q	1.48		1.60	1.49	1.51	1.69	1.64		1.54		1.56			
Karar	E	H	E	E	E	E	E	H	E	H	E	H	H	H
Periyot : Kasım 2000 – Mayıs 2001														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-13.82		-1.97	2.26	-3.44	-0.33	-1.47		-3.12		-1.06	-0.08		-1.10
dy (cm)	16.23		4.41	-0.54	2.24	0.18	2.41		1.03		-0.22	0.74		0.73
dz (cm)	-4.84		-6.94	1.82	-1.01	-0.16	-1.83		-1.36		-1.22	-0.34		0.39
T	2227		277	101	287	5.80	59.0		118		10.7	6.06		18.8
q	1.48		1.51	1.56	1.49	1.85	1.60		1.54		1.69	1.76		1.64
Karar	E	H	E	E	E	E	E	H	E	H	E	E	H	E
Periyot : Kasım 2000 – Ağustos 2001														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-18.05		-1.52	5.78	-5.76	4.81	-1.66		-1.80		-0.30	-0.25		0.49
dy (cm)	16.54		6.46	4.04	2.19	3.28	2.43		7.99		0.67	0.29		2.51
dz (cm)	-6.63		-5.57	7.29	-0.68	2.77	-1.92		3.68		-0.93	-0.78		0.63
T	9335		1217	584	1422	165	268		1579		17.6	8.43		69.9
q	1.48		1.54	1.56	1.51	1.64	1.60		1.49		1.76	1.85		1.69
Karar	E	H	E	E	E	E	E	H	E	H	E	E	H	E
Periyot : Kasım 2000 – Kasım 2001														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-17.84		-2.11	5.84	-6.03	3.64	-2.89		-3.84		-0.10	1.43		1.89
dy (cm)	17.64		6.57	5.18	2.62	2.26	2.48		9.42		-0.03	0.03		3.90
dz (cm)	-6.80		-7.39	7.60	-1.88	1.38	-3.63		1.59		-1.41	0.67		3.13
T	11183		1349	532	1532	278	761		2184		16.3	39.8		176
q	1.48		1.54	1.60	1.51	1.64	1.56		1.49		1.85	1.76		1.69
Karar	E	H	E	E	E	E	E	H	E	H	E	E	H	E
Periyot : Kasım 2000 – Şubat 2002														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-23.15		-2.74	6.15	-6.77	0.50	-2.95		-10.01		-0.86	0.27		-1.93
dy (cm)	28.61		6.83	6.83	2.68	0.30	3.47		10.18		0.59	1.96		4.55
dz (cm)	-7.45		-10.77	7.64	-1.55	-1.26	-3.73		-4.66		-1.11	-0.77		4.52
T	5548		462	177	563	16.7	149		733		27.4	28.9		75.6
q	1.48		1.54	1.56	1.51	1.85	1.60		1.49		1.76	1.68		1.64
Karar	E	H	E	E	E	E	E	H	E	H	E	E	H	E



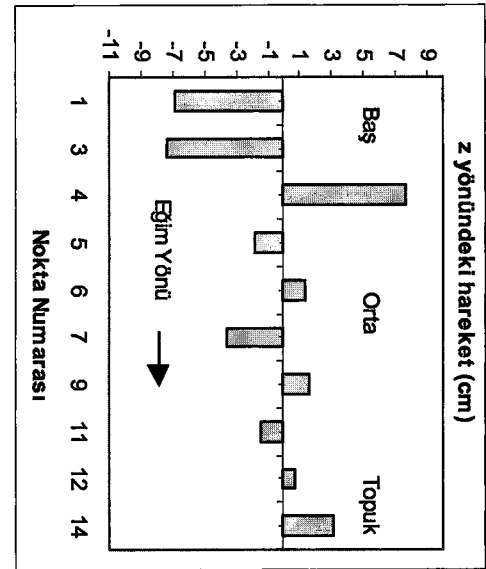
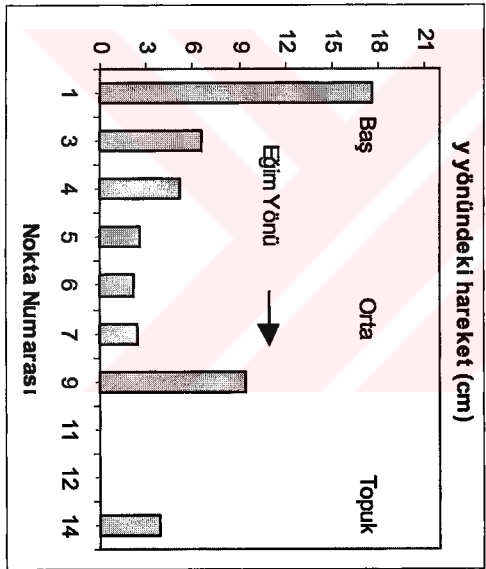
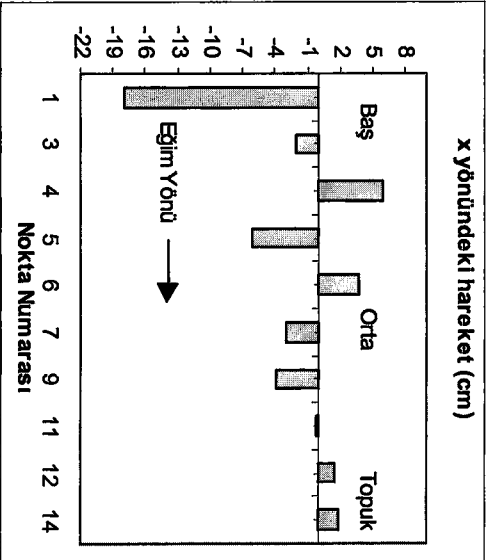
Şekil 26. Kas.2000–Şub.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



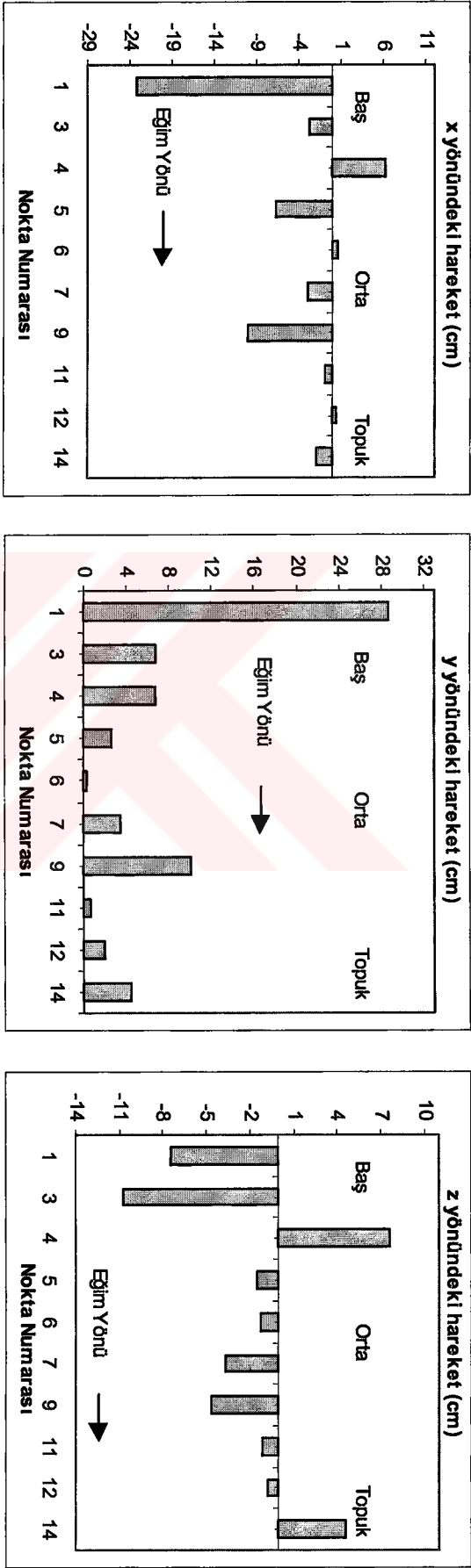
Şekil 27. Kas.2000–May.2001 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



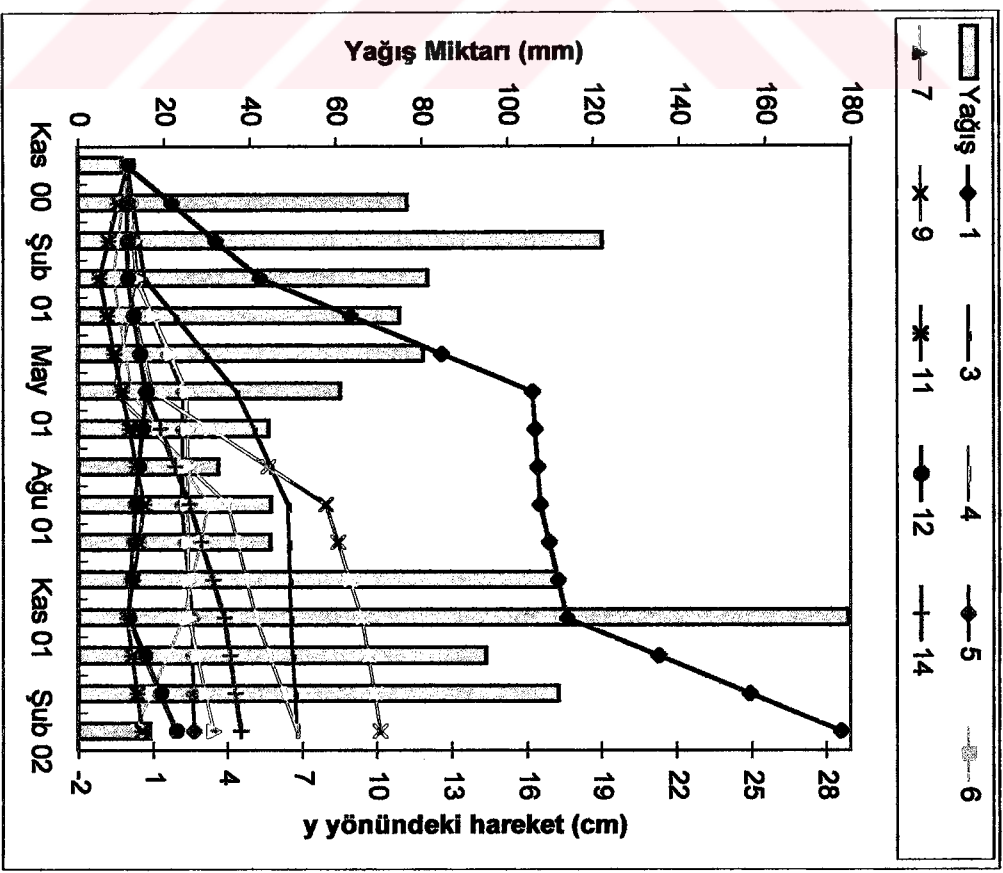
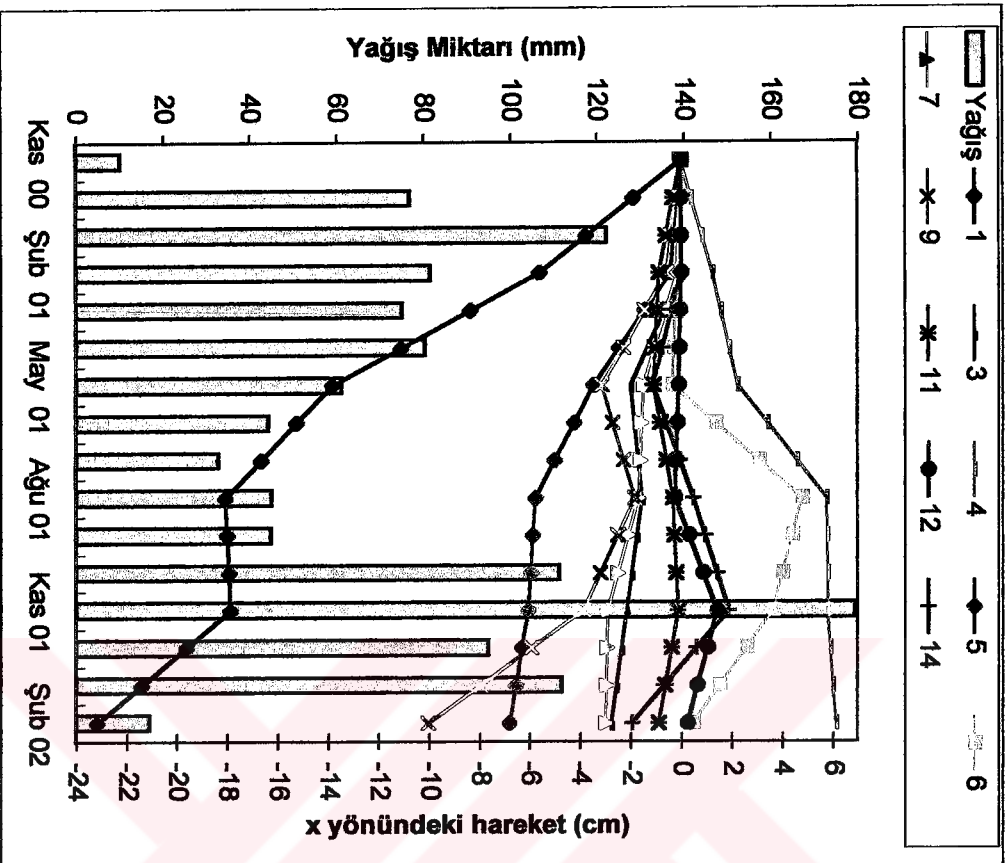
Şekil 28. Kas.2000–Ağu.2001 periyodunda noktaların statik modellerle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri

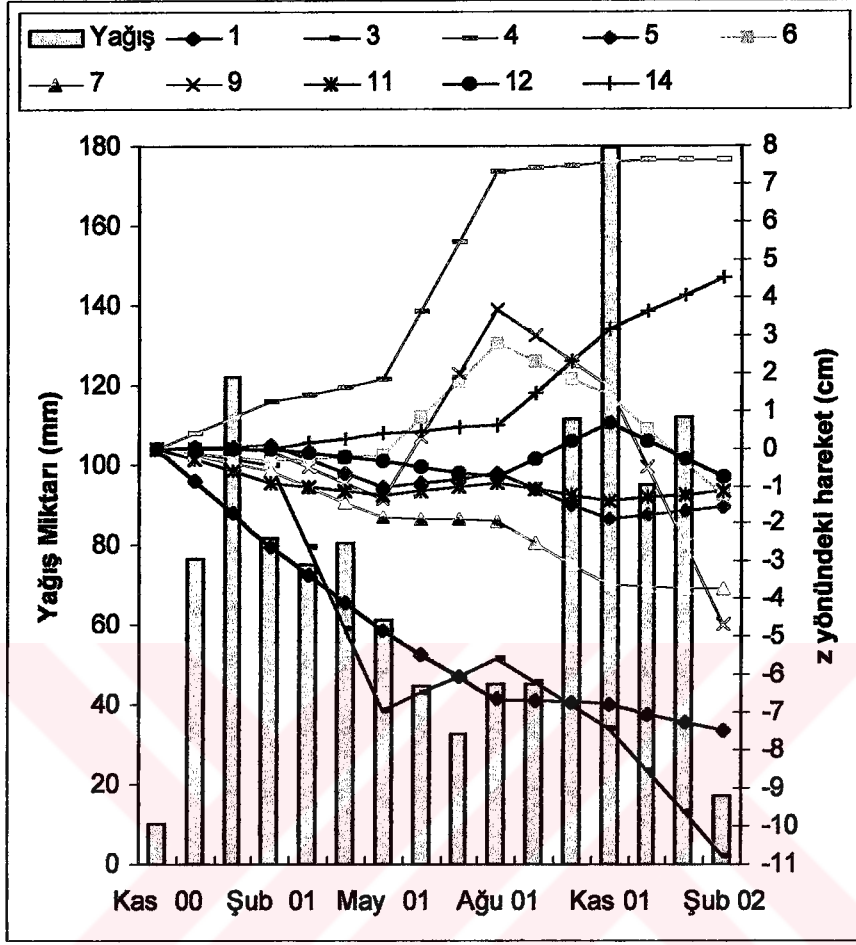


Şekil 29. Kas.2000–Kas.2001 periyodunda noktaların statik modellerle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri

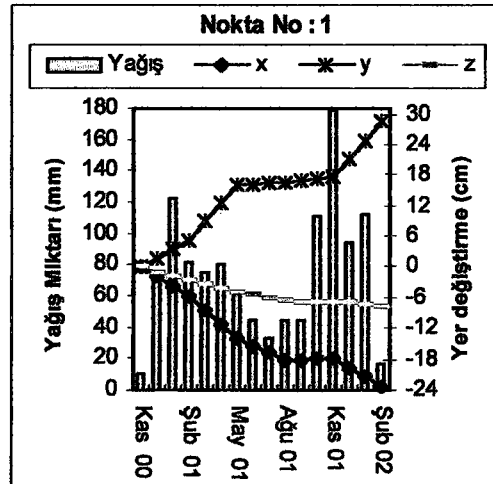


Şekil 30. Kas.2000-Şub.2002 periyodunda noktaların statik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri

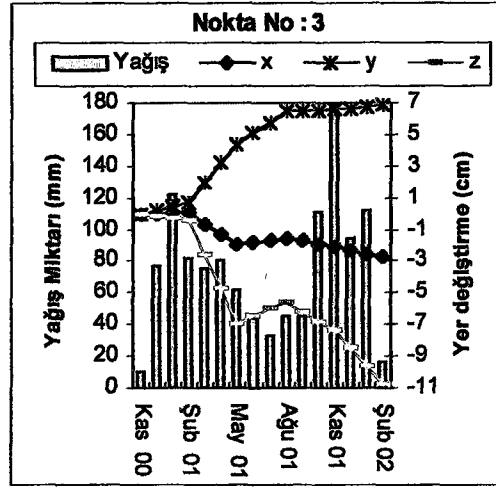




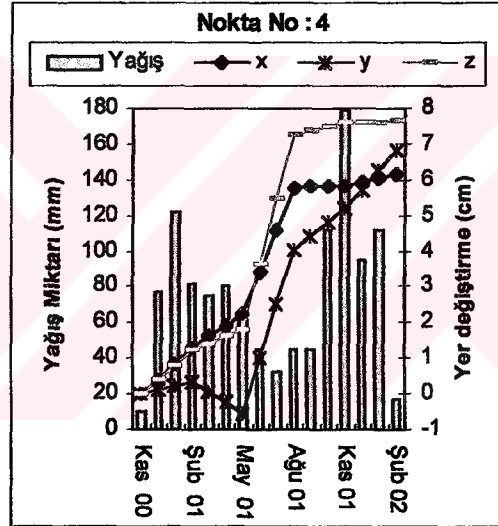
Şekil 33. Tüm noktaların statik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket yağış ilişkileri



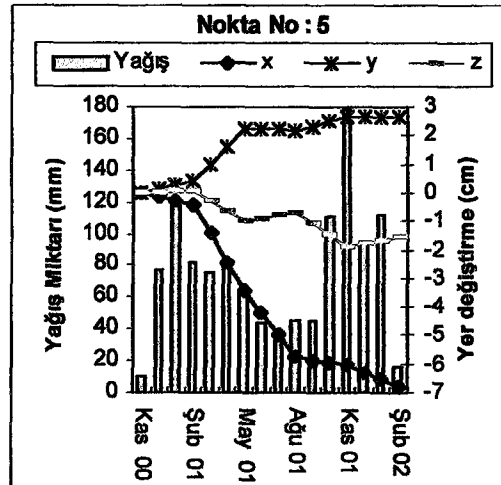
Şekil 34. 1 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



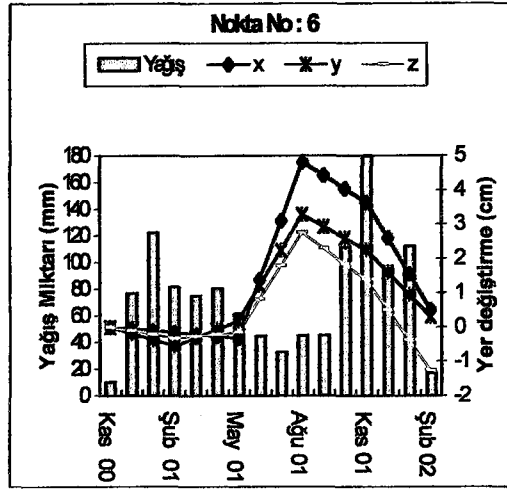
Şekil 35. 3 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değişirme-yağış ilişkisi



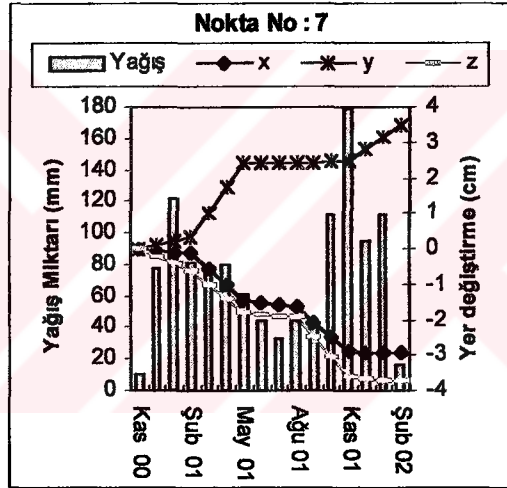
Şekil 36. 4 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değişirme-yağış ilişkisi



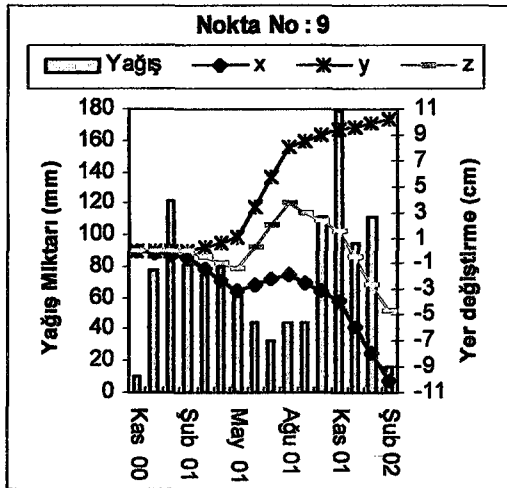
Şekil 37. 5 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değişirme-yağış ilişkisi



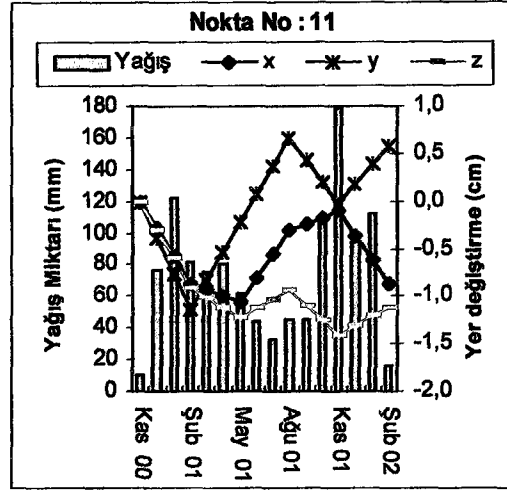
Şekil 38. 6 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



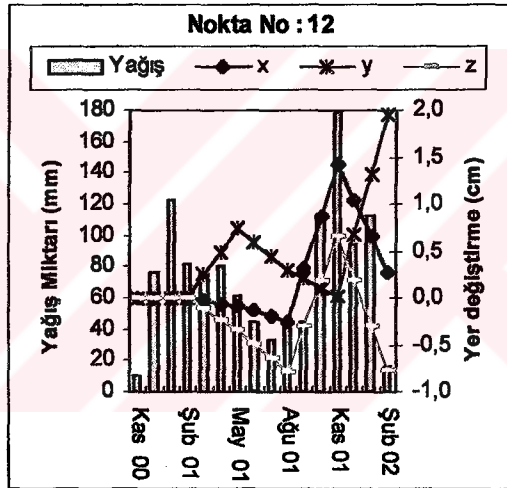
Şekil 39. 7 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



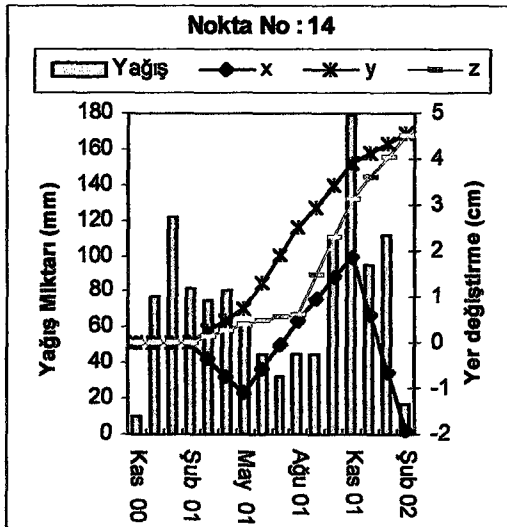
Şekil 40. 9 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



Şekil 41. 11 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



Şekil 42. 12 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



Şekil 43. 14 nolu noktanın statik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi

3.1.2. Kinematik Deformasyon Modelleri İle Deformasyon Analizi

3.1.2.1. Kinematik Tek Nokta Modeli İle Deformasyon Analizi

Kinematik tek nokta modeli (56) eşitliğindeki gibi dengeli koordinatlarla oluşturulmuş ve hesaplamalar Kalman-filtreleme yöntemine göre yapılmıştır. Hareket parametreleri (konum, hız ve ivme),

- Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001
- Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001
- Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001
- Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002

periyotlarında hesaplanmıştır. Her ölçü grubunun çözümü 1.6.2.1. bölümünde anlatıldığı biçimde adım adım yapılmıştır. Ölçü periyot gruplarının stokastik yapıları, birbirinden bağımsız olarak Kalman-filtreleme tekniğinin başlangıç periyodunda yapılacak işlemlerin açıklandığı 1.6.2.1.4. bölümünde ki gibi iterasyonla oluşturulmuştur. Bilindiği gibi başlangıç ölçü grubundan kestirilen stokastik yapının extrapolasyonla sınırsız olarak genişletilmesiyle yeni ölçü gruplarının hareket parametrelerinin hesaplanması uygun değildir. Bu durum yapılan uygulamada da görülmüştür.

Her ölçü periyot gruplarının global testleri 1.6.2.1.2. bölümünde, genişletilmiş modelin testi de 1.5.3. bölümünde açıklandığı biçimde yapılmış ve istatistik sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Bu tabloda gösterilen s_0 , öncül karesel ortalama hatayı; m_0 , soncul karesel ortalama hatayı; T , öncül ve soncul karesel ortalama hatalardan hesaplanmış test büyüklüğünü ve q_f ise F-tablo sınır değerini göstermektedir. Önce, test değerleri (T), F-tablo sınır değeri (q_f) ile karşılaştırılarak modelin geçerli olup olmadığına karar verilmiştir. Sonra, genişletilmiş parametrelerden hesaplanan ortalama hata (m_g) ve s_0 yardımıyla belirlenen test büyüklüğü (T_g), F-tablo değeri (q_g) ile karşılaştırılarak modelin genişletilip genişletilmeyeceğine karar verilmiş ve Tablo 7’nin karar sütununda da gösterilmiştir. Bu sütunda görüldüğü gibi her ölçü periyot grupları için en uygun deformasyon modelinin “konum+hız+ivme” modeli olduğuna karar verilmiştir.

Tablo 7. Kinematik modelin (konum+hız+ivme) Kalman-filtreleme yöntemi ile çözümünün istatistik test sonuçları

Periyot	Lineer Model (Konum + Hız)		Periyot	Karesel Model (Konum + Hız + İvme)		KARAR (En Uygun Model)
	Global Test	Geniş. Mod. Testi		Global Test	Geniş. Mod. Testi	
	s_0 m_0 T q_f	s_0 m_g T_g q_g		s_0 m_0 T q_f	s_0 m_g T_g q_g	
Kasım 2000 Şubat 2001	0.741 0.765 1.066 1.516	0.765 17.222 560.750 1.669	Kasım 2000 Şubat 2001 Mayıs 2001	0.765 0.839 1.204 1.484	0.839 4.637 30.528 1.613	KONUM + HIZ + İVME
Kasım 2000 Mayıs 2001	0.951 1.030 1.173 1.516	1.030 19.070 342.78 1.669	Kasım 2000 Mayıs 2001 Ağustos 2001	1.030 1.131 1.205 1.484	1.131 8.805 60.608 1.613	KONUM + HIZ + İVME
Kasım 2000 Ağustos 2001	1.204 0.996 1.462 1.520	0.996 14.037 198.623 1.669	Kasım 2000 Ağustos 2001 Kasım 2001	0.996 1.011 1.030 1.484	1.011 9.846 94.846 1.613	KONUM + HIZ + İVME
Kasım 2000 Kasım 2001	1.218 1.311 1.158 1.516	1.311 16.512 158.633 1.669	Kasım 2000 Kasım 2001 Şubat 2002	1.311 1.322 1.017 1.484	1.322 7.977 36.409 1.613	KONUM + HIZ + İVME

Karar verilen modele göre hesaplanan hareket parametrelerinin (d_x , d_y , d_z , v_x , v_y , v_z , a_x , a_y , a_z) anlamlılık testleri 1.6.2.1.3. bölümünde açıklandığı biçimde yapılmıştır. Hareket parametreleri ve anlamlılık test sonuçları Tablo 8, 9, 10, 11’de verilmiştir. Bu tablolarda, her parametreye ait olan T değeri, test büyüklüğünü ve q_t ise t-tablo değerini göstermektedir. Test büyüklüklerinin t-tablo sınır değerinden büyük olduğu durumlarda ilgili parametrenin anlamlı olduğuna karar verilmiş ve karar satırlarında (+) işareti kullanılmıştır. Tersisi durumda ilgili parametrenin anlamlı olmadığına karar verilmiş ve karar satırlarında (-) işareti kullanılmıştır.

Tablo 8. Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları

Periyot : Kasım 2000 – Şubat 2001 – Mayıs 2001														Kinematik model : Konum + Hız + İvme													
														$q_t = 1.979$ $T > q_t$ ise (+) $T < q_t$ ise (-)													
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14													
dx (cm)	-16.09	0.07	-2.90	1.80	-4.69	-0.23	-2.17	0.09	-3.94	0.25	-1.41	-0.10	-0.74	-1.58													
T_{dx}	36.64	0.33	11.82	7.62	19.54	1.99	8.88	0.37	15.75	1.08	5.70	0.40	1.79	6.40													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)													
dy (cm)	18.47	-0.02	5.23	-0.27	3.207	-0.03	2.71	-0.52	1.32	-0.38	-0.32	0.49	0.57	0.75													
T_{dy}	26.71	0.08	21.64	2.14	12.78	2.12	10.97	1.02	5.12	1.62	1.32	1.89	1.35	3.01													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)													
dz (cm)	-6.40	-0.53	-7.93	1.54	-2.12	-0.26	-2.24	-0.21	-1.82	0.52	-1.52	-0.70	0.88	0.17													
T_{dz}	16.64	1.39	22.97	6.47	8.64	2.08	9.02	0.84	6.98	1.20	6.02	2.60	1.42	0.67													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)													
v_x (cm/ay)	-1.32	0.02	-0.96	-0.21	-1.71	0.06	-0.64	0.02	-0.79	0.01	0.09	-0.21	-0.09	-0.61													
T_{v_x}	12.49	0.35	8.16	2.07	9.67	2.48	5.35	0.37	6.32	1.14	0.73	1.43	1.48	5.24													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)													
v_y (cm/ay)	2.26	0.00	1.29	-0.39	0.81	0.38	0.64	-0.04	0.55	-0.13	0.53	-0.13	0.13	0.01													
T_{v_y}	12.33	0.01	11.19	3.96	6.75	3.59	5.81	0.73	4.39	1.41	4.80	0.91	1.31	2.08													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)													
v_z (cm/ay)	-0.17	-0.07	-2.26	-0.27	-0.61	0.17	-0.39	-0.02	-0.46	0.04	0.04	-0.40	0.14	-0.34													
T_{v_z}	2.50	1.45	19.66	2.50	4.63	2.49	3.13	0.26	3.39	0.68	0.30	2.617	1.30	2.98													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)													
a_x (cm/ay ²)	0.12	0.002	-0.158	-0.104	-0.162	0.021	-0.098	0.001	-0.089	-0.001	0.060	-0.049	-0.005	-0.107													
T_{a_x}	4.62	0.21	5.15	4.12	5.44	2.75	3.50	0.12	2.88	0.11	2.04	2.32	0.46	3.81													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)													
a_y (cm/ay ²)	0.05	0.000	0.178	-0.09	0.113	0.097	0.084	-0.001	0.101	-0.012	0.141	-0.047	0.010	-0.020													
T_{a_y}	2.07	0.06	6.26	3.72	3.87	3.74	3.12	0.13	3.29	1.29	5.05	2.27	1.05	2.74													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)													
a_z (cm/ay ²)	0.14	-0.003	-0.346	-0.110	-0.093	0.050	-0.036	-0.001	-0.064	-0.002	0.051	-0.079	0.010	-0.091													
T_{a_z}	5.06	0.39	12.21	4.18	2.87	2.81	2.17	0.05	2.92	0.16	1.68	2.06	0.91	3.24													
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)													

Tablo 9. Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları

Periyot Kasım 2000 – Mayıs 2001 – Ağustos 2001														Kinematik model : Konum + Hız + İvme														
q _e = 1,979														T > q _e ise (+) T < q _e ise (-)														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-19.34	-0.14	-1.25	6.66	-5.77	4.87	-1.62	-0.69	-2.00	-0.60	-0.48	-0.26	-0.79	-0.05	-19.34	-0.14	-1.25	6.66	-5.77	4.87	-1.62	-0.69	-2.00	-0.60	-0.48	-0.26	-0.79	-0.05
T _{dx}	31.31	0.27	2.96	10.80	9.05	7.23	2.44	1.14	3.01	1.04	2.68	0.29	1.67	0.08	31.31	0.27	2.96	10.80	9.05	7.23	2.44	1.14	3.01	1.04	2.68	0.29	1.67	0.08
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
dy (cm)	21.51	0.64	8.66	6.29	4.92	4.20	3.86	-0.79	11.11	-1.51	1.42	0.59	0.76	2.96	21.51	0.64	8.66	6.29	4.92	4.20	3.86	-0.79	11.11	-1.51	1.42	0.59	0.76	2.96
T _{dy}	39.49	1.36	15.61	11.47	7.96	7.43	6.49	1.44	18.08	1.06	2.36	0.72	1.23	4.67	39.49	1.36	15.61	11.47	7.96	7.43	6.49	1.44	18.08	1.06	2.36	0.72	1.23	4.67
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)
dz (cm)	-7.89	-1.36	-6.85	7.36	-1.67	2.72	-2.42	0.80	3.43	-0.80	-1.36	-0.41	0.87	0.61	-7.89	-1.36	-6.85	7.36	-1.67	2.72	-2.42	0.80	3.43	-0.80	-1.36	-0.41	0.87	0.61
T _{dz}	12.83	1.60	10.72	11.97	2.46	4.02	3.47	1.27	5.02	1.36	2.09	0.57	1.41	0.90	12.83	1.60	10.72	11.97	2.46	4.02	3.47	1.27	5.02	1.36	2.09	0.57	1.41	0.90
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
v _x (cm/ay)	6.46	0.04	1.71	0.76	1.57	2.08	1.18	-0.02	2.42	-0.02	1.18	0.01	-0.14	1.12	6.46	0.04	1.71	0.76	1.57	2.08	1.18	-0.02	2.42	-0.02	1.18	0.01	-0.14	1.12
T _{v_x}	21.20	0.49	5.21	2.59	4.94	6.23	3.31	0.24	6.74	0.27	3.38	0.02	1.16	3.27	21.20	0.49	5.21	2.59	4.94	6.23	3.31	0.24	6.74	0.27	3.38	0.02	1.16	3.27
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)
v _y (cm/ay)	-7.22	0.03	-0.89	2.02	-0.73	1.56	-0.75	-0.15	2.78	-0.20	0.91	-0.36	0.11	0.25	-7.22	0.03	-0.89	2.02	-0.73	1.56	-0.75	-0.15	2.78	-0.20	0.91	-0.36	0.11	0.25
T _{v_y}	26.24	0.38	3.09	7.32	2.17	5.53	2.39	1.48	7.79	1.16	3.15	0.91	1.18	0.79	26.24	0.38	3.09	7.32	2.17	5.53	2.39	1.48	7.79	1.16	3.15	0.91	1.18	0.79
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
v _z (cm/ay)	2.71	-0.10	3.39	1.18	0.99	1.38	1.03	0.16	2.65	-0.07	1.09	0.52	0.08	0.12	2.71	-0.10	3.39	1.18	0.99	1.38	1.03	0.16	2.65	-0.07	1.09	0.52	0.08	0.12
T _{v_z}	9.06	1.13	10.99	4.00	2.89	4.25	2.88	1.38	6.75	0.73	3.27	1.27	0.75	0.37	9.06	1.13	10.99	4.00	2.89	4.25	2.88	1.38	6.75	0.73	3.27	1.27	0.75	0.37
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
a _x (cm/ay ²)	2.311	0.002	0.450	-0.400	0.557	0.337	0.315	-0.002	0.670	-0.001	0.317	-0.013	-0.004	0.264	2.311	0.002	0.450	-0.400	0.557	0.337	0.315	-0.002	0.670	-0.001	0.317	-0.013	-0.004	0.264
T _{a_x}	6.72	0.13	5.46	2.54	6.94	4.60	3.80	0.09	7.46	0.06	3.74	0.13	0.23	3.15	6.72	0.13	5.46	2.54	6.94	4.60	3.80	0.09	7.46	0.06	3.74	0.13	0.23	3.15
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)
a _y (cm/ay ²)	-2.555	0.001	-0.475	0.331	-0.320	0.300	-0.294	-0.005	0.405	-0.007	0.233	-0.100	0.003	-0.009	-2.555	0.001	-0.475	0.331	-0.320	0.300	-0.294	-0.005	0.405	-0.007	0.233	-0.100	0.003	-0.009
T _{a_y}	7.48	0.12	6.42	4.88	3.78	4.29	3.76	0.31	4.53	0.54	3.23	1.05	0.25	0.11	7.48	0.12	6.42	4.88	3.78	4.29	3.76	0.31	4.53	0.54	3.23	1.05	0.25	0.11
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)
a _z (cm/ay ²)	0.969	-0.002	1.042	0.490	0.285	0.272	0.332	0.008	0.565	-0.005	0.333	0.133	0.000	-0.001	0.969	-0.002	1.042	0.490	0.285	0.272	0.332	0.008	0.565	-0.005	0.333	0.133	0.000	-0.001
T _{a_z}	2.96	0.14	13.58	2.67	3.29	3.42	3.75	0.43	5.73	0.31	4.06	1.29	0.02	0.01	2.96	0.14	13.58	2.67	3.29	3.42	3.75	0.43	5.73	0.31	4.06	1.29	0.02	0.01
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)

Tablo 10. Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları

Periyot Kasım 2000 – Ağustos 2001 – Kasım 2001														Kinematik model : Konum + Hiz + İvme														
q _t = 1.979														T > q _t ise (+) T < q _t ise (-)														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14														
dx (cm)	-19.87	0.08	-1.51	5.31	-6.03	4.23	-2.54	0.26	-4.09	-0.23	-0.30	1.57	0.17	2.07														
T _{dx}	33.36	0.32	18.61	12.78	21.75	11.29	7.88	0.30	10.88	0.58	2.53	4.08	0.61	3.36														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
dy (cm)	22.35	-0.10	6.81	6.52	4.42	2.41	2.82	-0.14	10.56	0.32	0.10	0.05	-0.10	4.06														
T _{dy}	41.85	1.80	19.87	10.10	22.67	14.88	11.60	0.89	32.23	0.72	3.52	2.25	0.23	2.55														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
dz (cm)	-7.99	0.05	-7.30	8.36	-2.08	2.37	-3.42	0.17	1.66	0.01	-1.49	0.54	0.05	3.25														
T _{dz}	39.96	1.05	14.20	22.83	11.08	8.60	12.59	0.39	13.71	0.02	3.21	6.15	0.56	2.22														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
v _x (cm/ay)	-8.80	0.02	-1.73	2.21	-3.64	1.69	-1.34	0.02	-1.59	0.02	-0.89	-0.18	-0.03	-0.42														
T _{v_x}	15.66	0.60	7.31	6.35	8.27	12.18	6.96	0.47	8.01	0.28	2.87	3.71	0.56	3.81														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
v _y (cm/ay)	7.32	0.03	4.07	1.35	2.52	1.16	2.71	0.01	4.42	-0.01	0.16	-0.16	0.00	1.07														
T _{v_y}	8.89	0.89	12.88	8.64	6.07	10.97	4.42	0.37	13.99	1.13	2.58	3.21	0.40	5.03														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
v _z (cm/ay)	-2.13	0.05	-4.14	3.20	-0.81	0.62	-1.09	0.01	0.91	0.01	-1.08	-0.68	0.02	0.24														
T _{v_z}	6.89	0.51	11.69	10.58	4.65	10.31	7.11	0.42	2.13	0.28	5.75	5.78	0.59	2.61														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
a _x (cm/ay ²)	2.133	0.001	0.945	-0.240	0.695	0.470	0.929	-0.003	0.857	-0.009	0.774	-0.113	-0.001	0.218														
T _{a_x}	6.17	0.302	2.04	3.28	4.88	7.71	3.19	0.24	4.84	0.12	2.71	3.26	0.28	3.60														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
a _y (cm/ay ²)	-2.652	0.001	-1.009	0.199	-0.518	0.792	-0.160	-0.002	0.626	-0.003	0.401	-0.101	0.008	-0.014														
T _{a_y}	7.69	0.379	3.56	4.54	3.58	4.76	2.25	0.10	6.46	0.10	2.45	2.41	0.20	2.53														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														
a _z (cm/ay ²)	1.102	-0.001	0.768	0.543	0.457	0.179	0.751	0.004	0.267	-0.002	0.393	0.193	-0.002	-0.071														
T _{a_z}	2.55	0.300	2.96	5.63	2.49	4.71	3.91	0.25	2.44	0.13	2.06	4.16	0.30	3.93														
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)														

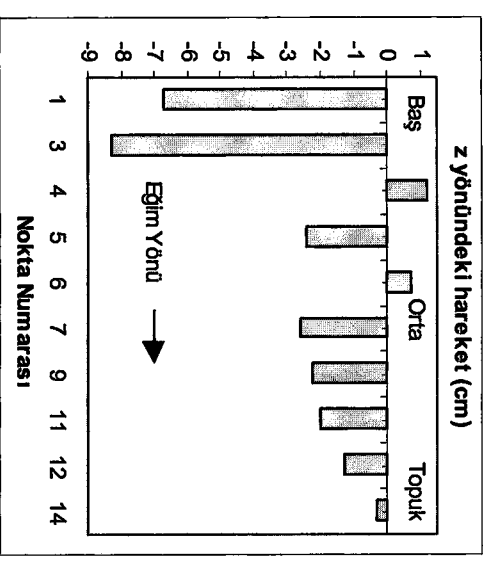
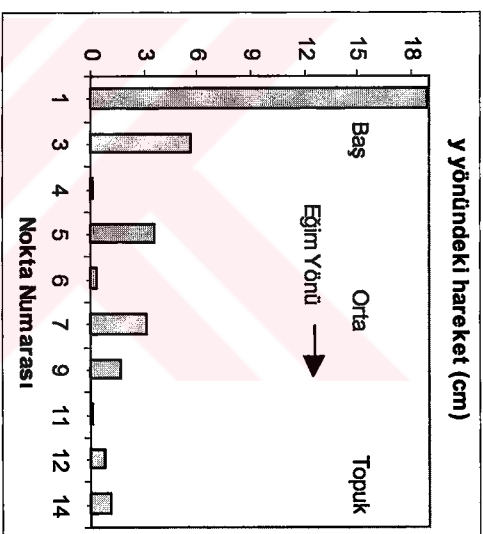
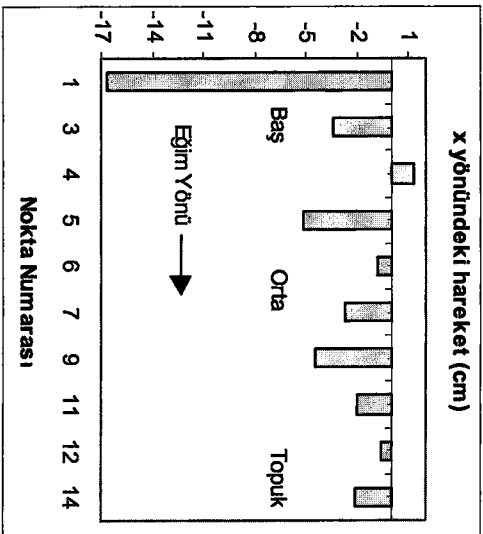
Tablo 11. Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002 periyodunda kinematik deformasyon analiz sonuçları

Periyot Kasım 2000- Kasım 2001 - Şubat 2002														Kinematik model : Konum + Hız + İvme														
q _t = 1.979														T > q _t ise (+) T < q _t ise (-)														
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
dx (cm)	-29.84	0.13	-5.01	7.95	-10.82	-1.42	-5.36	-0.55	-12.32	-0.36	-2.81	-1.51	-0.02	-3.35	-29.84	0.13	-5.01	7.95	-10.82	-1.42	-5.36	-0.55	-12.32	-0.36	-2.81	-1.51	-0.02	-3.35
T _{dx}	27.73	0.36	15.15	12.64	20.85	11.33	4.63	0.12	10.88	0.35	2.37	2.47	0.61	3.36	27.73	0.36	15.15	12.64	20.85	11.33	4.63	0.12	10.88	0.35	2.37	2.47	0.61	3.36
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)
dy (cm)	37.93	-0.38	7.54	7.54	4.05	2.77	4.58	0.09	10.34	0.08	1.14	4.74	0.09	5.52	37.93	-0.38	7.54	7.54	4.05	2.77	4.58	0.09	10.34	0.08	1.14	4.74	0.09	5.52
T _{dy}	38.22	0.35	17.51	11.62	9.08	13.05	7.86	0.89	32.23	0.43	3.11	4.09	0.23	2.55	38.22	0.35	17.51	11.62	9.08	13.05	7.86	0.89	32.23	0.43	3.11	4.09	0.23	2.55
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
dz (cm)	-11.46	0.20	-13.42	8.91	-4.47	-3.50	-4.77	0.25	-6.66	-0.26	-3.23	-3.03	0.04	5.40	-11.46	0.20	-13.42	8.91	-4.47	-3.50	-4.77	0.25	-6.66	-0.26	-3.23	-3.03	0.04	5.40
T _{dz}	19.45	.30	24.30	20.76	8.92	9.22	3.59	0.39	13.71	0.23	2.81	3.69	0.56	2.22	19.45	.30	24.30	20.76	8.92	9.22	3.59	0.39	13.71	0.23	2.81	3.69	0.56	2.22
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
V _x (cm/ay)	-4.71	0.05	-1.73	3.29	-4.49	1.55	-1.59	0.03	-1.49	-0.01	-0.72	-0.32	-0.04	-0.38	-4.71	0.05	-1.73	3.29	-4.49	1.55	-1.59	0.03	-1.49	-0.01	-0.72	-0.32	-0.04	-0.38
T _{V_x}	8.25	0.99	6.06	5.86	6.85	10.94	3.12	0.60	8.36	0.55	2.83	3.68	0.27	3.11	8.25	0.99	6.06	5.86	6.85	10.94	3.12	0.60	8.36	0.55	2.83	3.68	0.27	3.11
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
V _y (cm/ay)	4.83	-0.03	3.42	1.22	2.49	1.87	2.76	-0.02	3.06	-0.01	0.52	-0.26	0.03	1.46	4.83	-0.03	3.42	1.22	2.49	1.87	2.76	-0.02	3.06	-0.01	0.52	-0.26	0.03	1.46
T _{V_y}	8.72	0.66	10.52	2.17	6.43	6.43	4.29	0.53	9.51	1.53	2.14	2.47	0.22	3.86	8.72	0.66	10.52	2.17	6.43	6.43	4.29	0.53	9.51	1.53	2.14	2.47	0.22	3.86
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
V _z (cm/ay)	-4.64	0.02	-2.99	3.71	-1.98	-0.61	-2.06	-0.04	1.87	0.02	-1.34	-0.33	0.01	0.42	-4.64	0.02	-2.99	3.71	-1.98	-0.61	-2.06	-0.04	1.87	0.02	-1.34	-0.33	0.01	0.42
T _{V_z}	8.42	0.62	8.64	7.55	4.61	8.52	3.92	0.22	3.39	0.13	2.05	3.22	0.61	2.07	8.42	0.62	8.64	7.55	4.61	8.52	3.92	0.22	3.39	0.13	2.05	3.22	0.61	2.07
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
a _x (cm/ay ²)	2.104	0.000	0.738	-0.968	0.740	0.972	0.805	-0.001	0.968	-0.001	0.844	-0.158	-0.001	0.267	2.104	0.000	0.738	-0.968	0.740	0.972	0.805	-0.001	0.968	-0.001	0.844	-0.158	-0.001	0.267
T _{a_x}	7.07	0.04	2.98	4.62	4.37	6.81	4.01	0.03	5.69	0.02	2.78	3.79	0.10	3.29	7.07	0.04	2.98	4.62	4.37	6.81	4.01	0.03	5.69	0.02	2.78	3.79	0.10	3.29
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
a _y (cm/ay ²)	-2.254	0.000	-0.699	0.271	-0.813	0.752	-0.286	-0.001	0.640	-0.001	0.637	-0.139	0.001	-0.184	-2.254	0.000	-0.699	0.271	-0.813	0.752	-0.286	-0.001	0.640	-0.001	0.637	-0.139	0.001	-0.184
T _{a_y}	7.28	0.04	3.94	3.41	4.85	3.66	2.93	0.01	4.11	0.03	2.88	2.43	0.09	3.13	7.28	0.04	3.94	3.41	4.85	3.66	2.93	0.01	4.11	0.03	2.88	2.43	0.09	3.13
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)
a _z (cm/ay ²)	0.708	-0.000	0.721	0.868	0.641	0.247	0.835	0.001	0.443	-0.001	0.257	0.223	-0.001	-0.171	0.708	-0.000	0.721	0.868	0.641	0.247	0.835	0.001	0.443	-0.001	0.257	0.223	-0.001	-0.171
T _{a_z}	2.51	0.03	2.57	5.12	3.76	5.67	2.87	0.02	3.73	0.05	2.08	4.18	0.12	4.03	2.51	0.03	2.57	5.12	3.76	5.67	2.87	0.02	3.73	0.05	2.08	4.18	0.12	4.03
Karar	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)

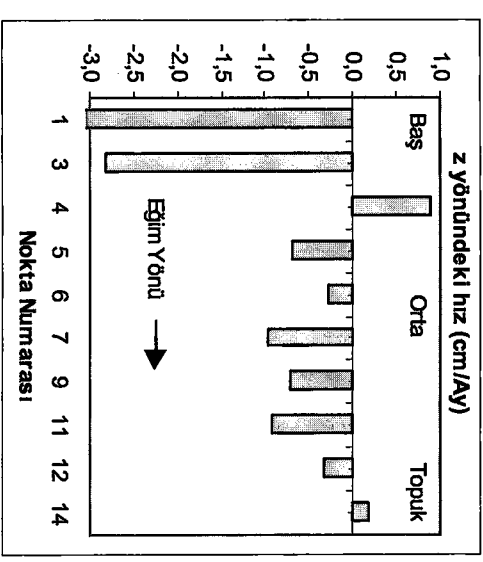
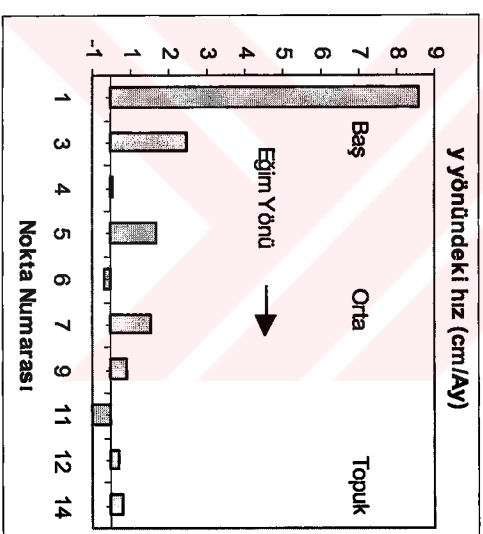
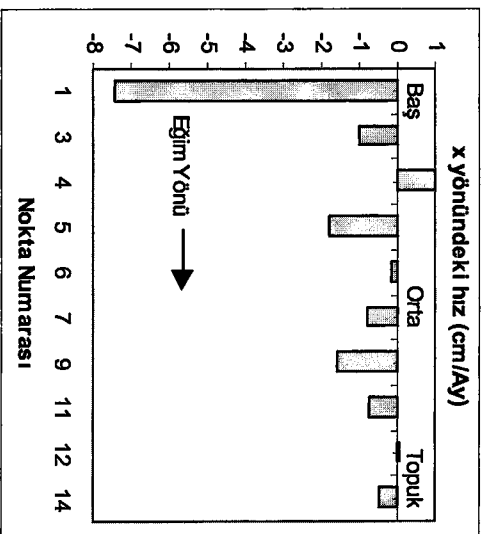
Çalışma alanını oluşturan yamaçta (Şekil 22), heyelanın baş, orta ve topuk kısımlarındaki nokta hareketlerinin eğim yönündeki davranışlarını görebilmek için kinematik tek nokta modelinden hesaplanan hareket parametrelerinden konum ve hız değişiminin x, y ve z yönündeki grafikleri örnek olarak çizilmiştir (Şekil 44- 51).

Her ölçü periyot grubundan hesaplanan tüm noktalara ait hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönündeki değişimlerinin yağışla olan ilişkisini görmek ve hareketi yorumlayabilmek için tüm noktaların hareket parametrelerinin değişimleri aynı grafiklerde çizilmiştir (Şekil 52-60). x, y, ve z eksenleri yönündeki noktaların hareketleri Şekil 52, 55 ve 58’de, noktaların hareket hızları Şekil 53, 56 ve 59’da, noktaların hareket ivmeleri Şekil 54, 57 ve 60’da ayrı ayrı verilmiştir.

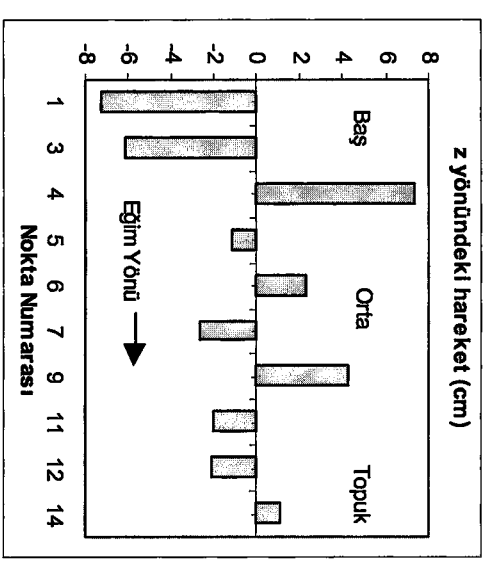
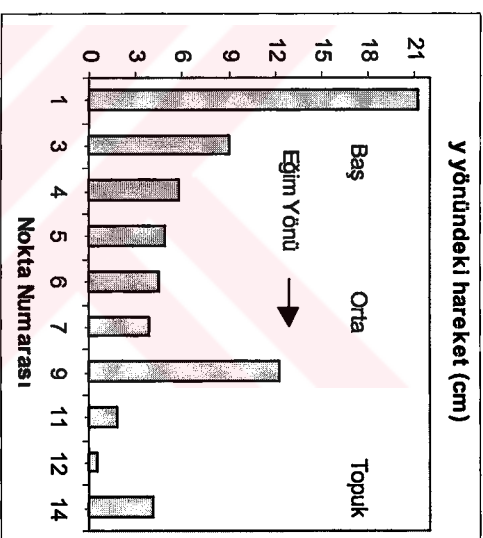
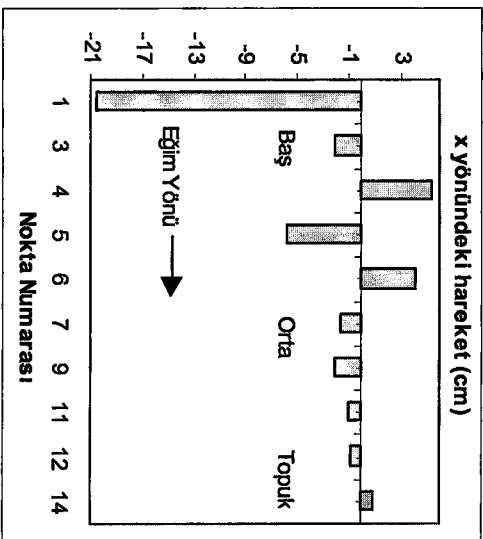
Tek tek her noktanın hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönlerindeki değişimlerini yorumlayabilmek ve hareketin yağışla olan ilişkisini tüm ölçü periyotlarında görebilmek için de grafikler çizilmiştir (Şekil 61-90).



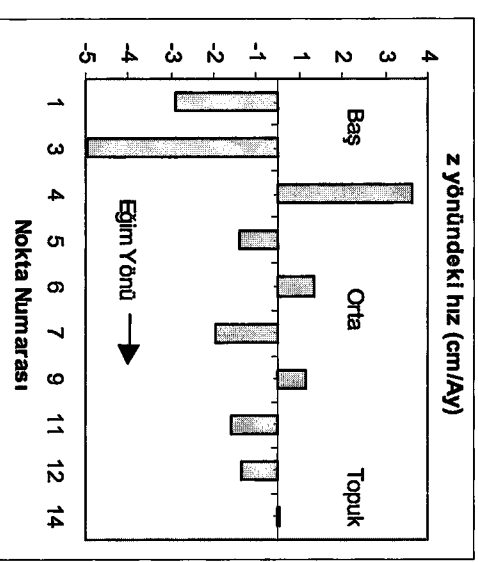
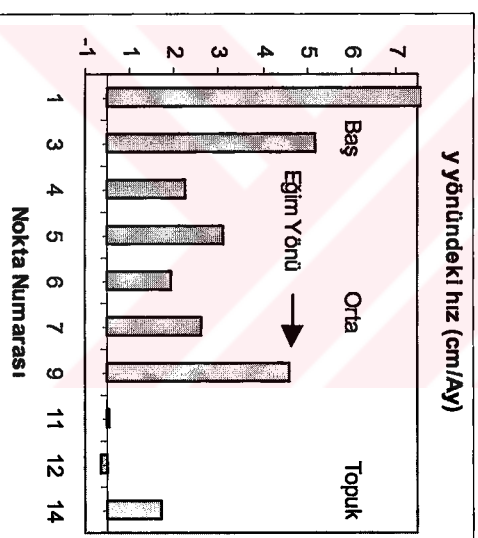
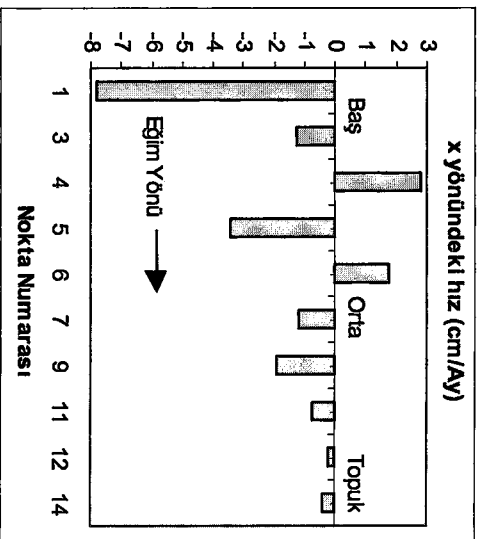
Şekil 44. Kas.00-Şub.01-May.01 periyodunda noktaların kinematik modellerle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



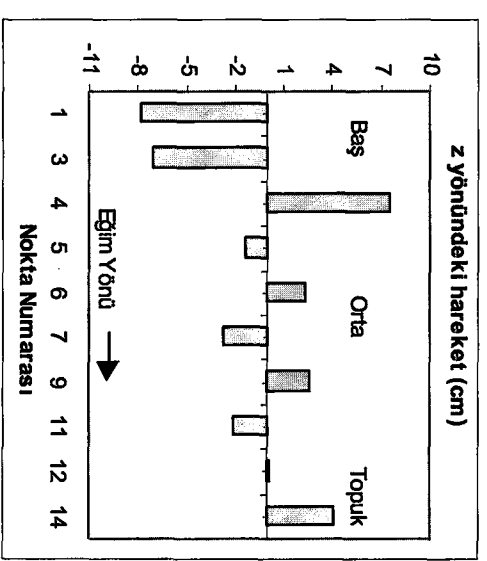
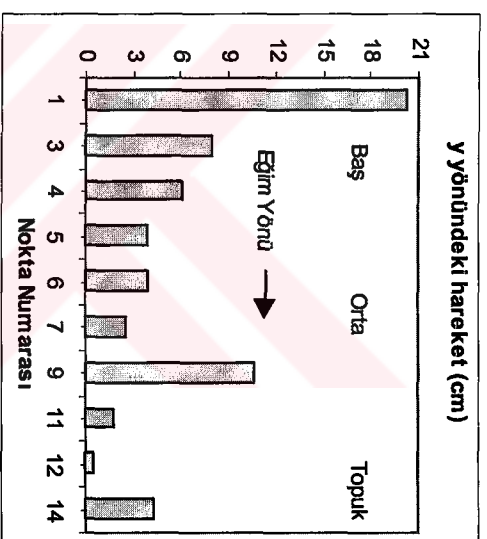
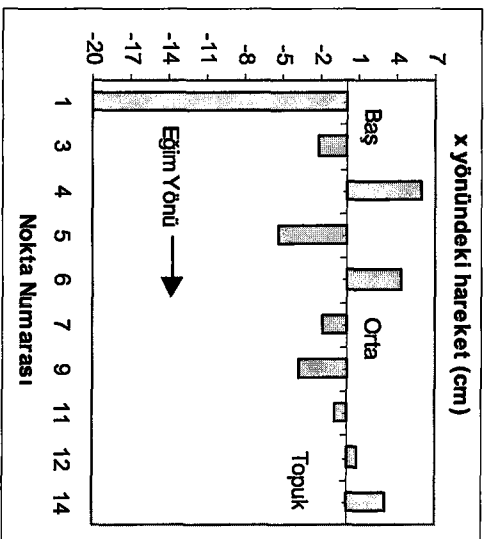
Şekil 45. Kas.00-Şub.01-May.01 periyodunda noktaların kinematik modellerle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları



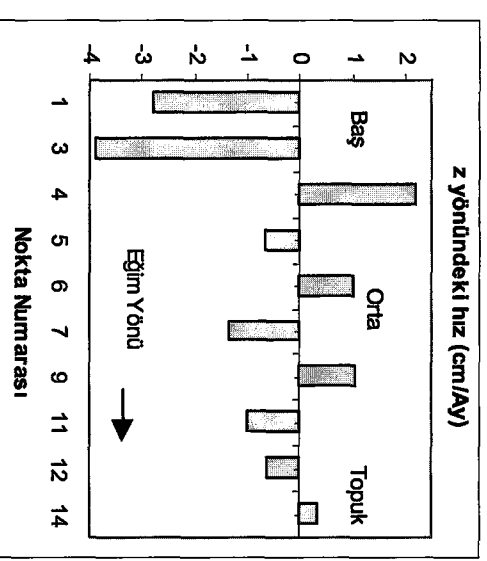
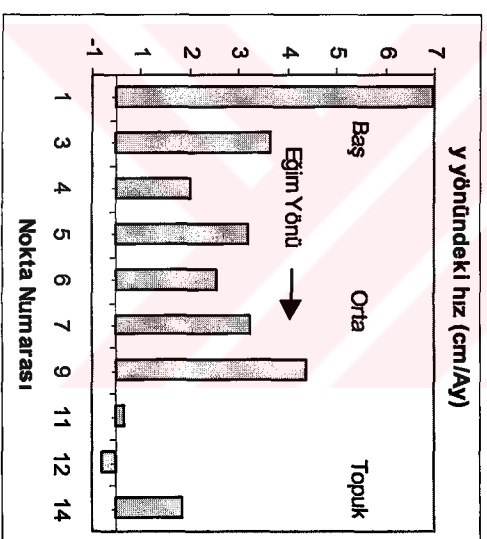
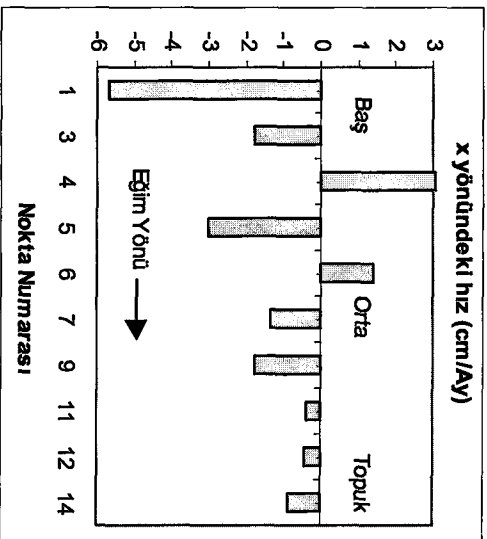
Şekil 46. Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



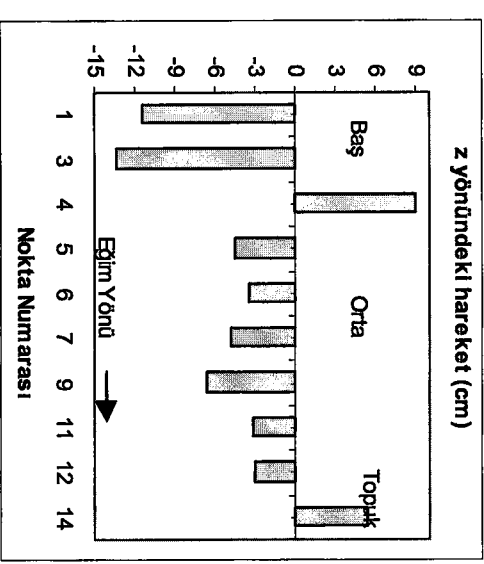
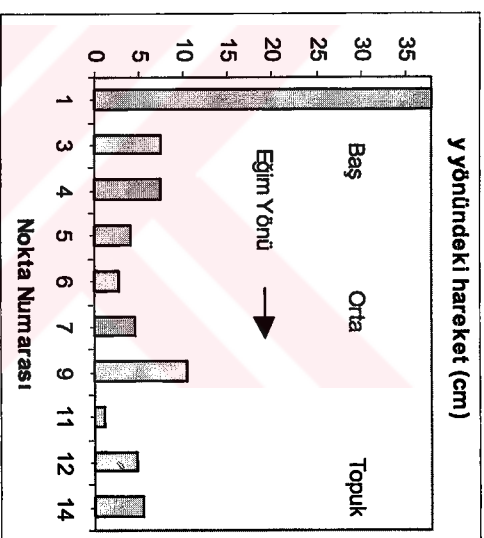
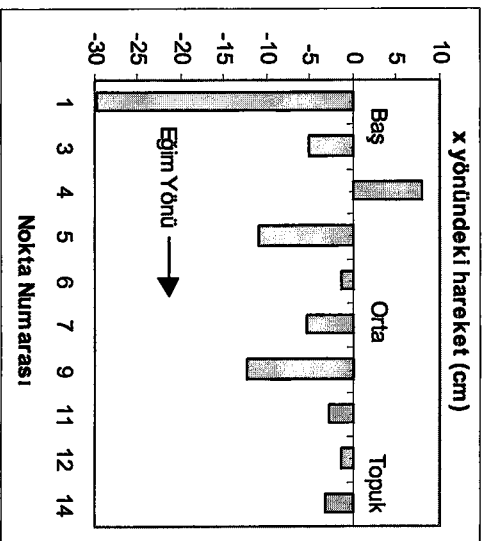
Şekil 47. Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları



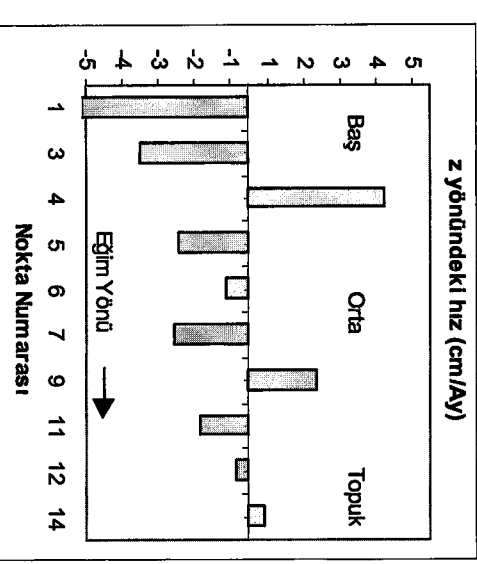
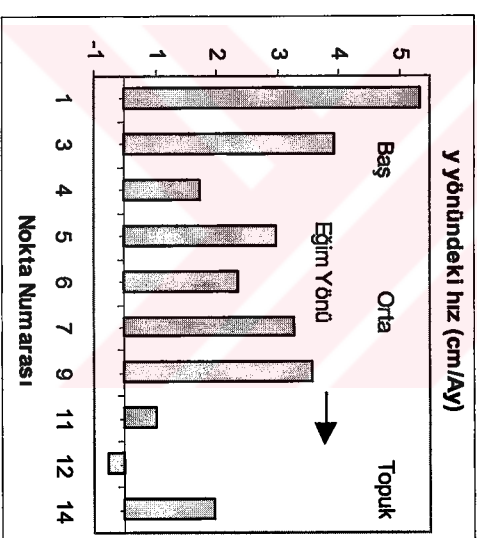
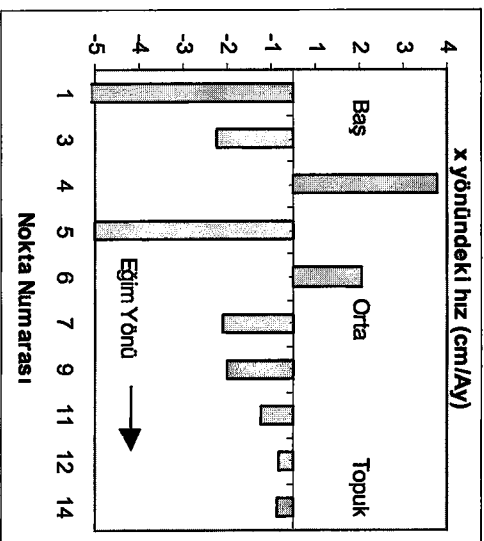
Şekil 48. Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



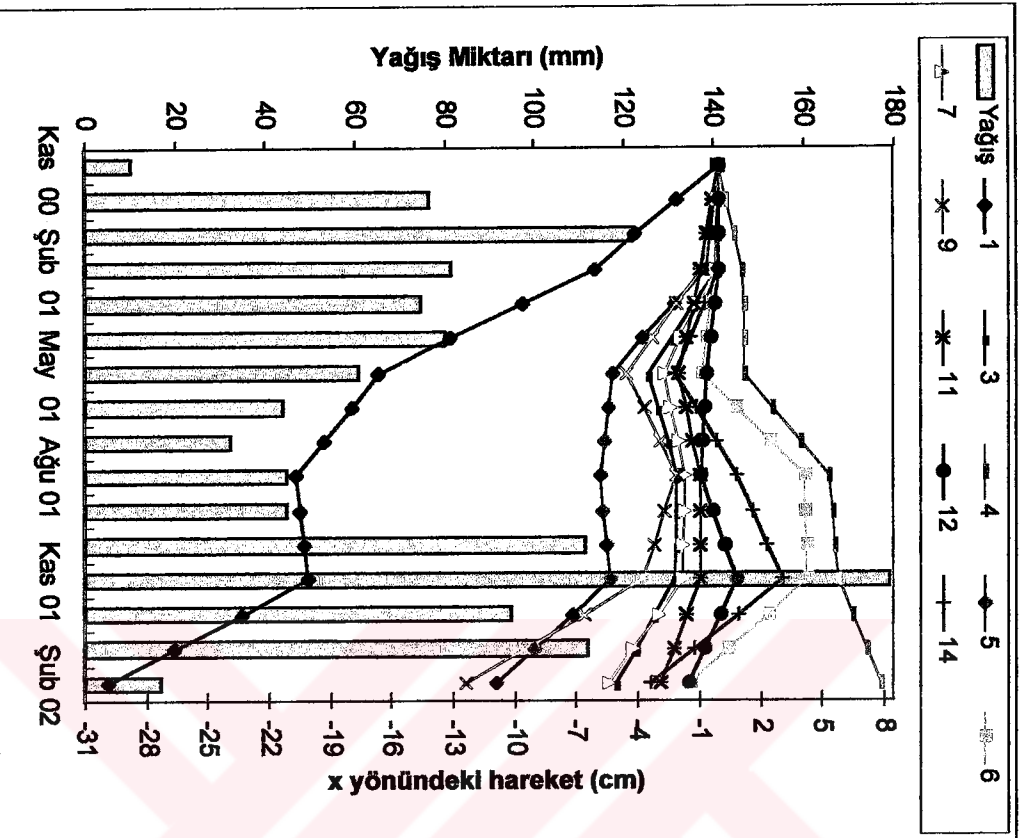
Şekil 49. Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları



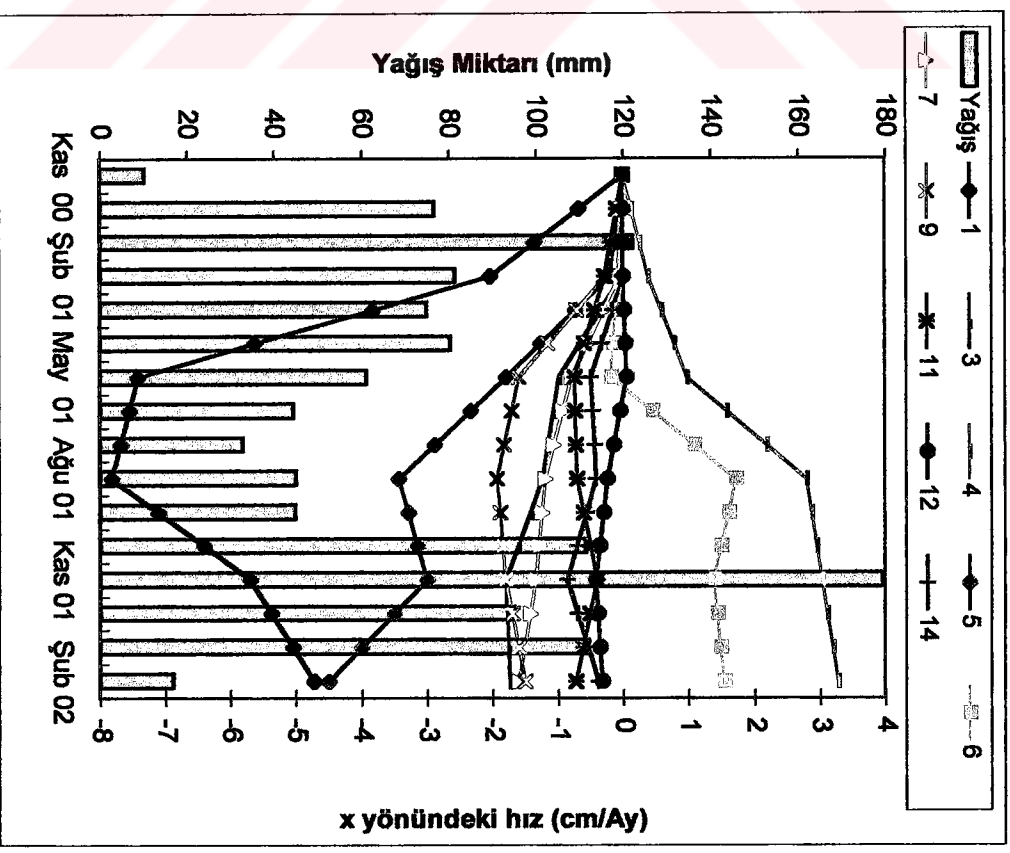
Şekil 50. Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareketleri



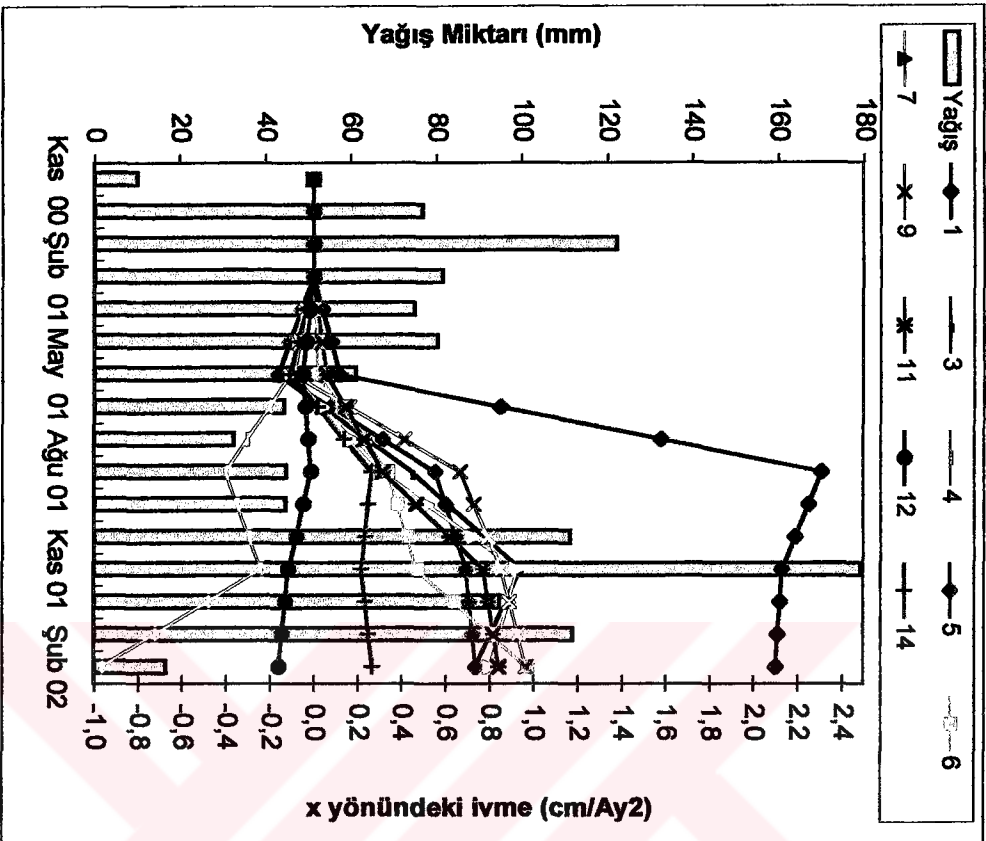
Şekil 51. Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların kinematik modelle belirlenmiş x, y ve z yönündeki hareket hızları



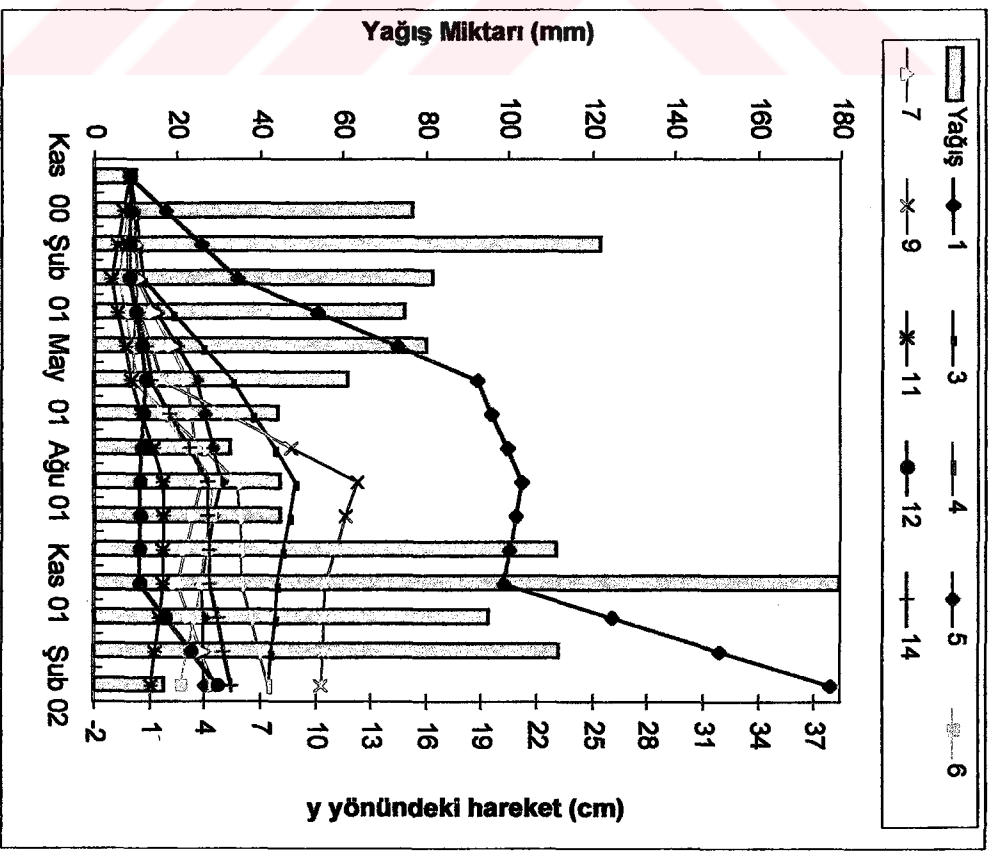
Şekil 52. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi



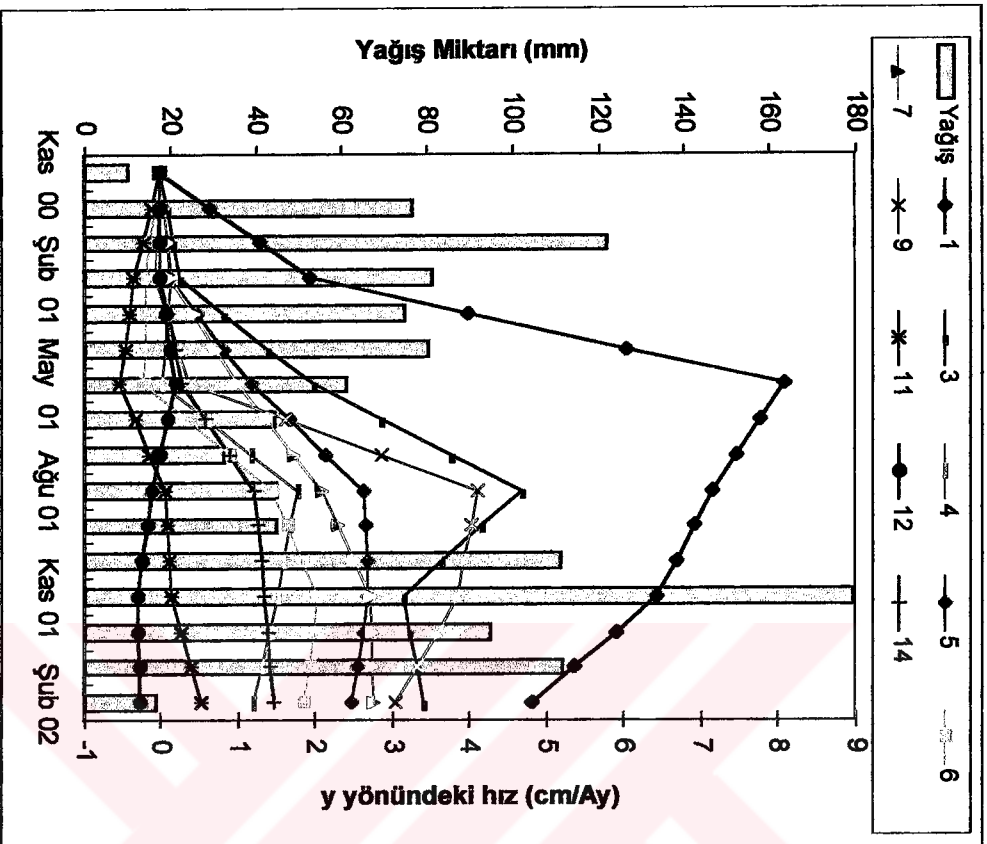
Şekil 53. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi



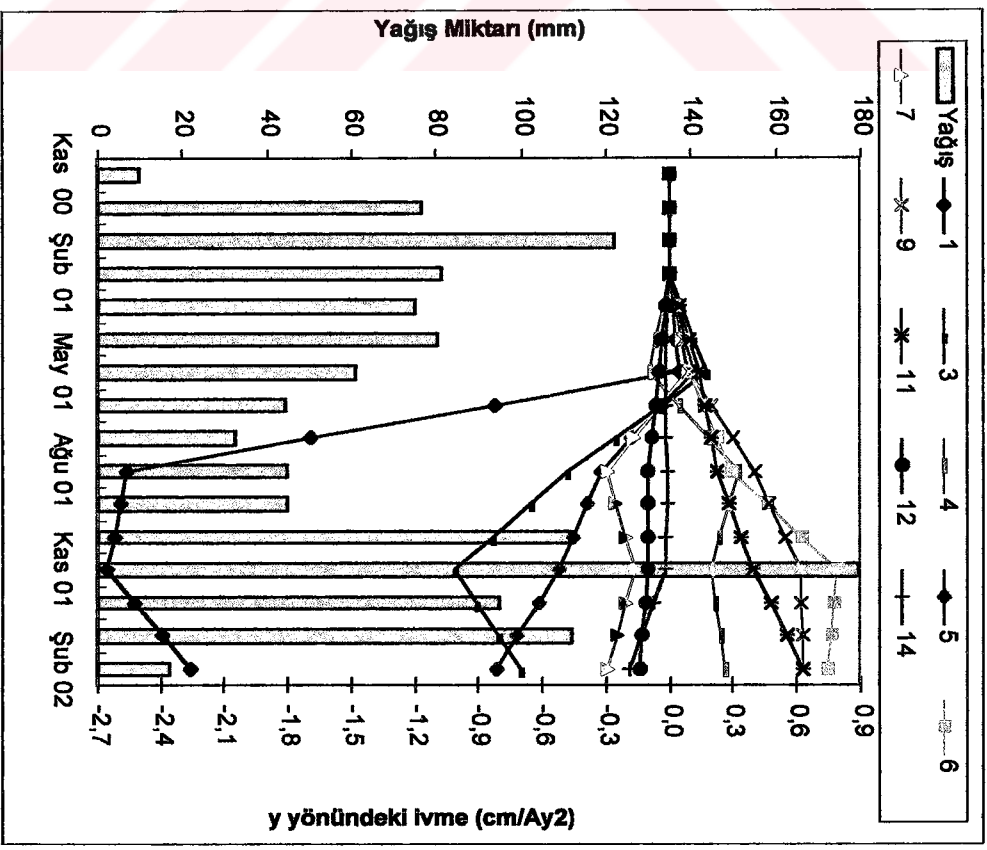
Şekil 54. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış x yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi



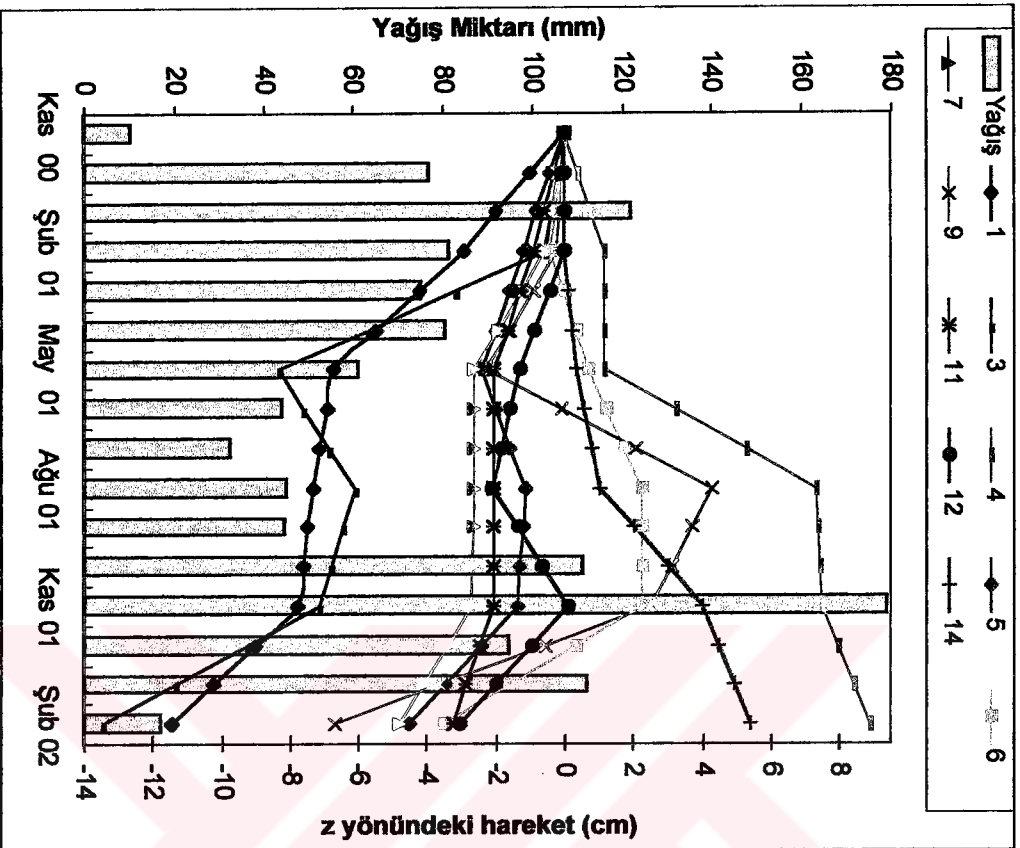
Şekil 55. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi



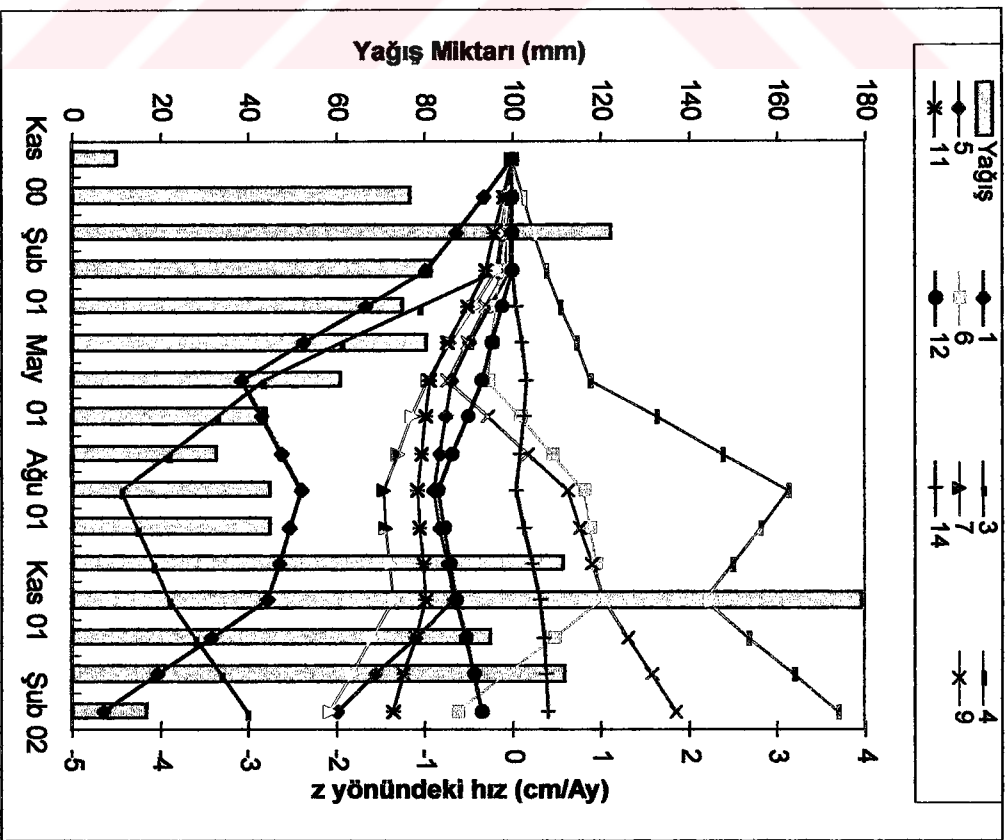
Şekil 56. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi



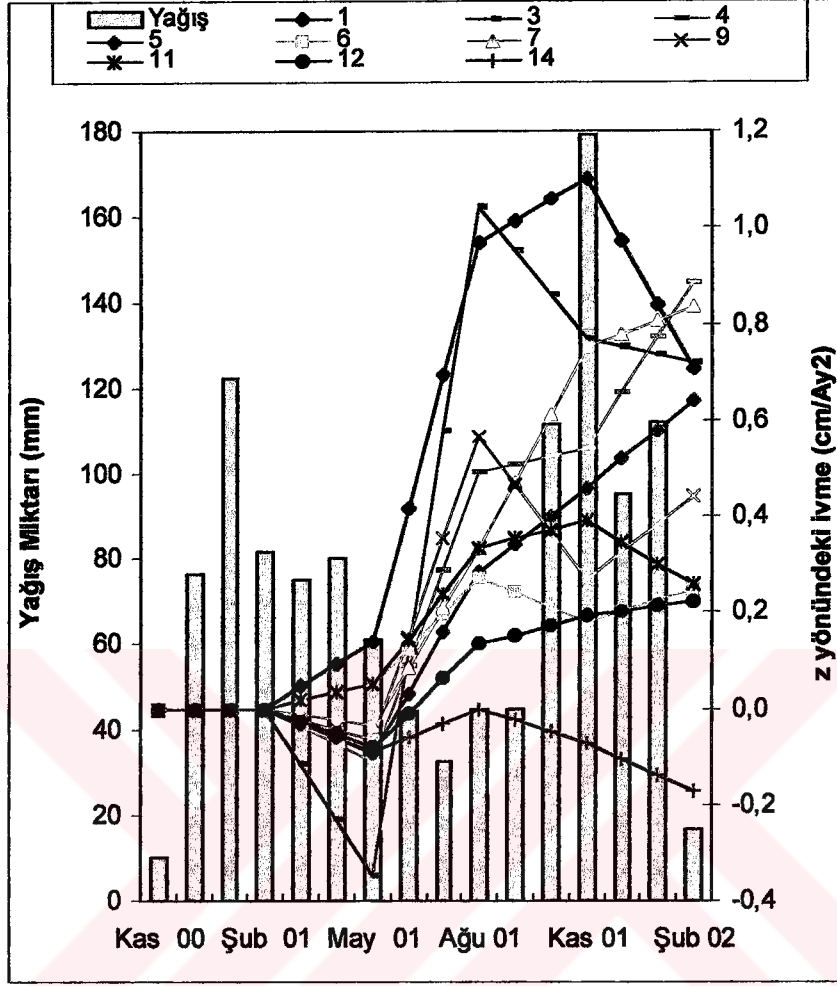
Şekil 57. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış y yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi



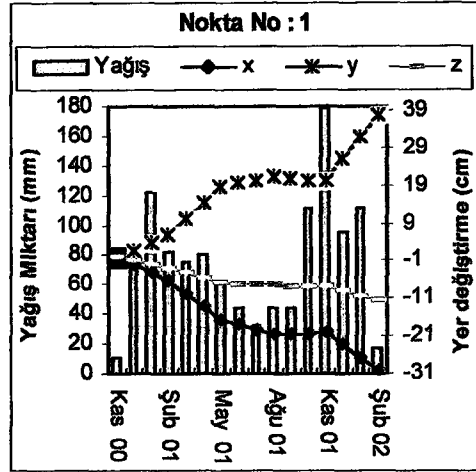
Şekil 58. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareketlerin yağışla ilişkisi



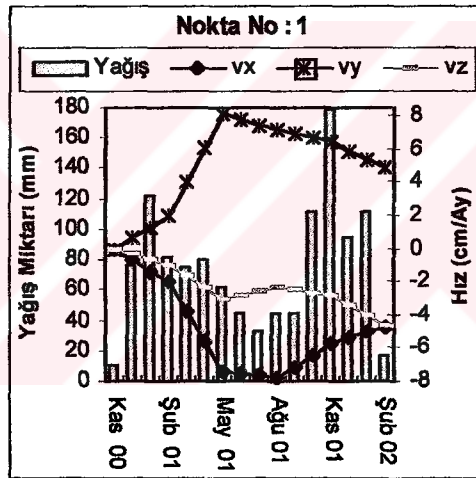
Şekil 59. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket hızlarının yağışla ilişkisi



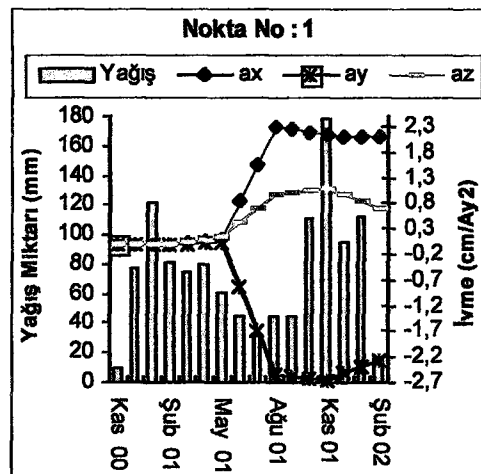
Şekil 60. Tüm noktaların kinematik modelle hesaplanmış z yönündeki hareket ivmelerinin yağışla ilişkisi



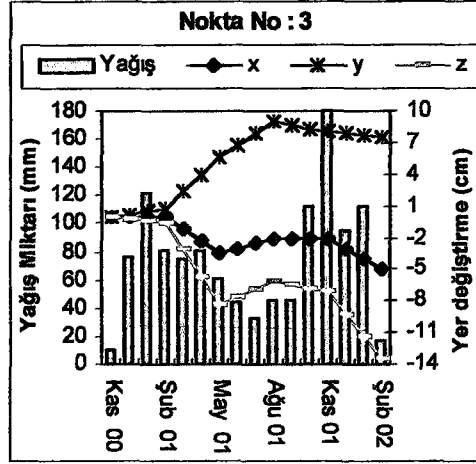
Şekil 61. 1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



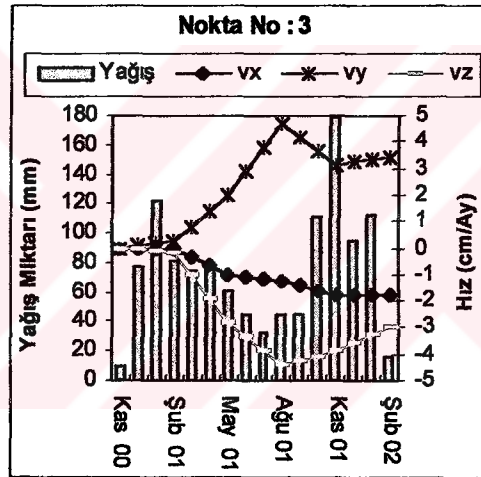
Şekil 62. 1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



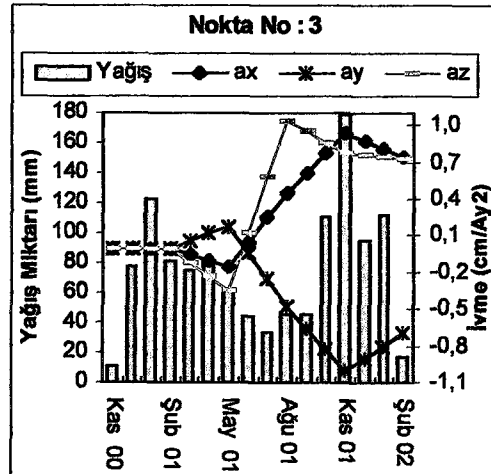
Şekil 63. 1 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



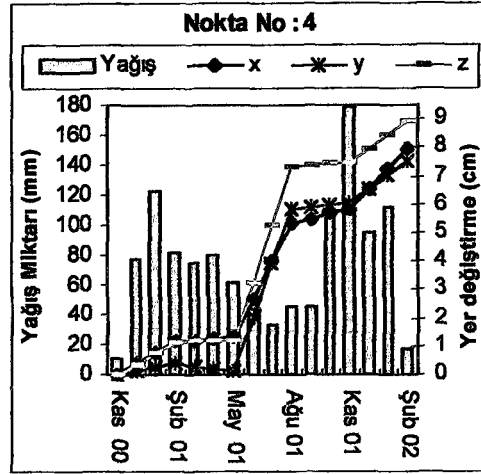
Şekil 64. 3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



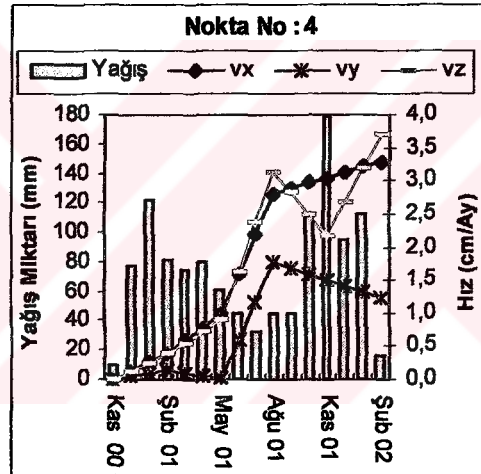
Şekil 65. 3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



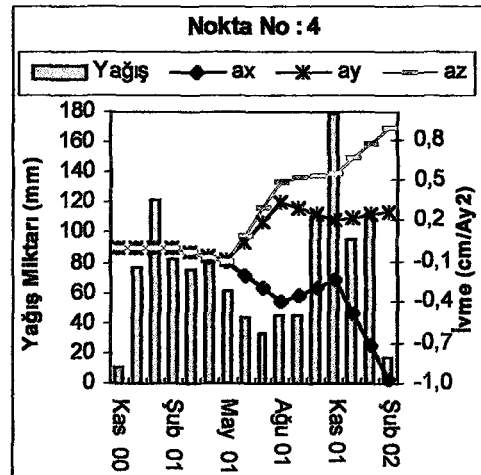
Şekil 66. 3 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



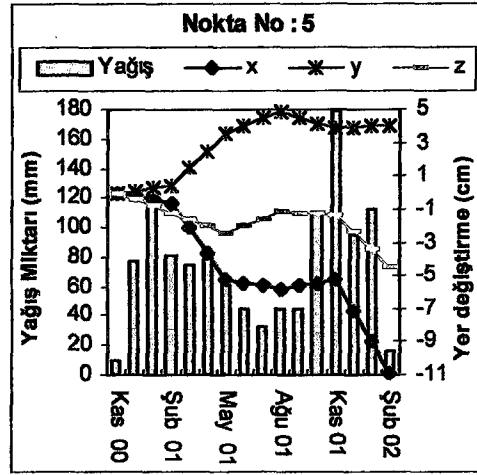
Şekil 67. 4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



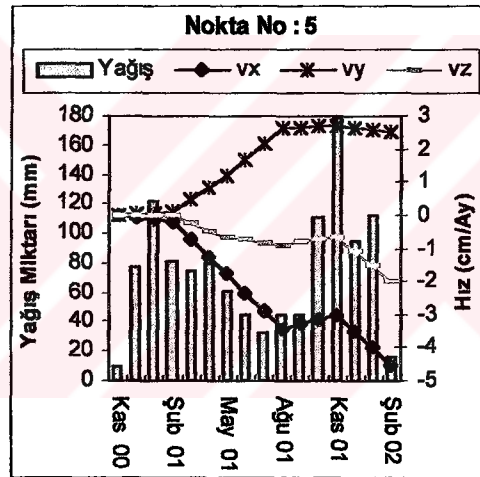
Şekil 68. 4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



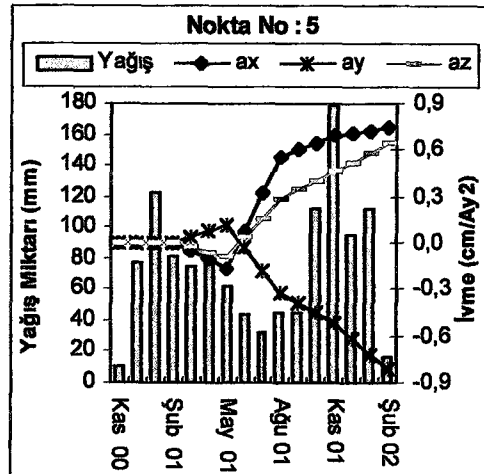
Şekil 69. 4 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



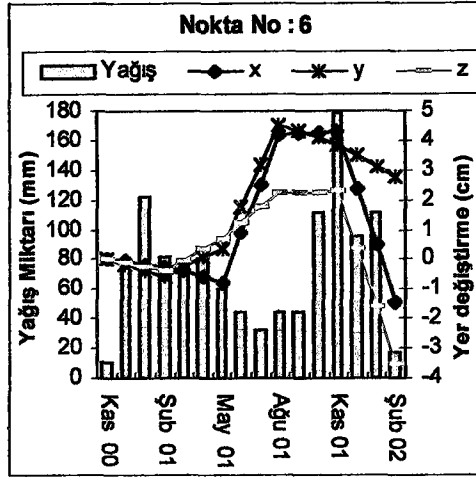
Şekil 70. 5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



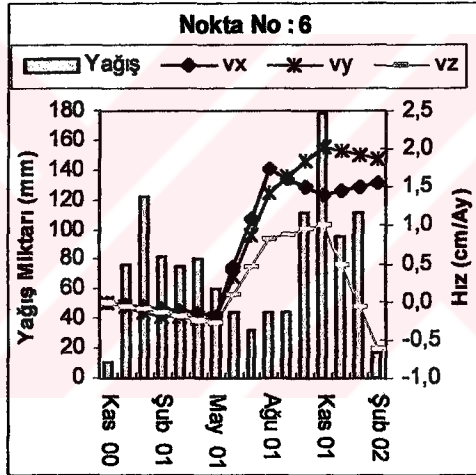
Şekil 71. 5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



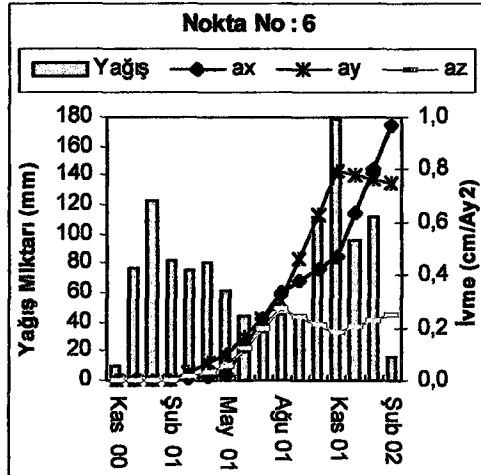
Şekil 72. 5 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



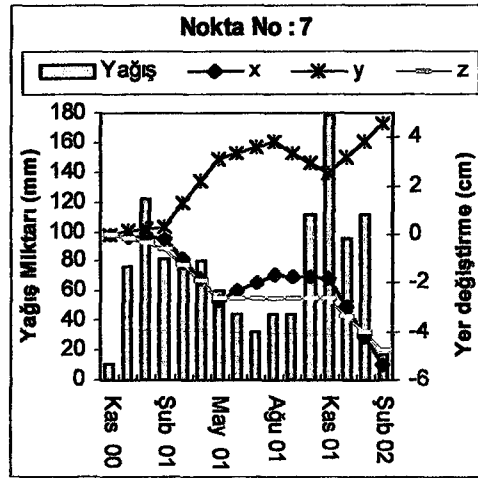
Şekil 73. 6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



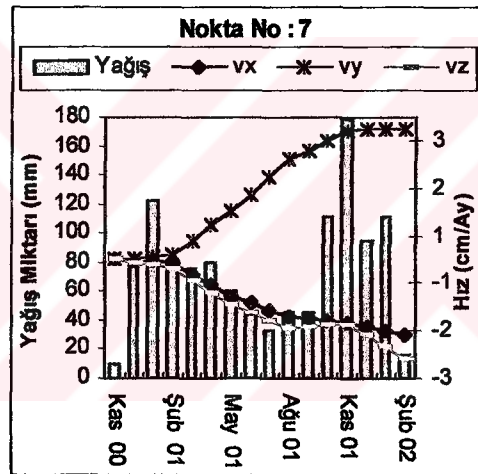
Şekil 74. 6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



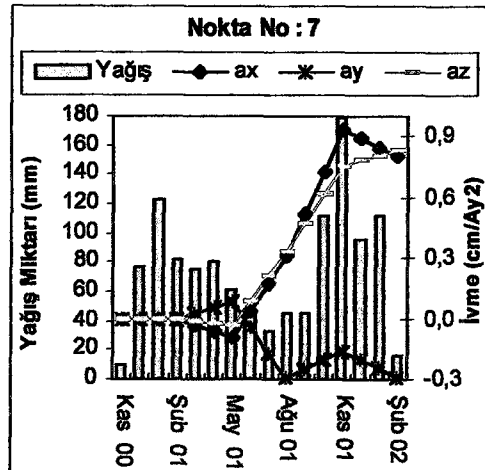
Şekil 75. 6 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



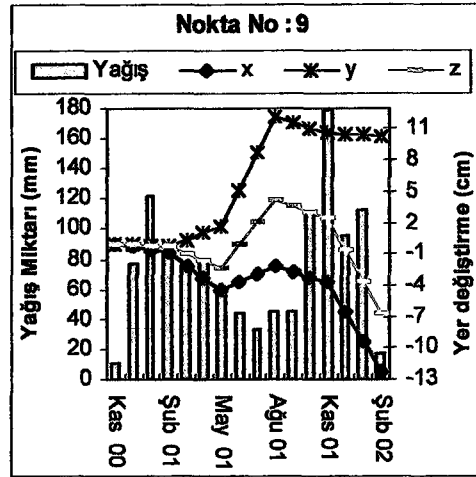
Şekil 76. 7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



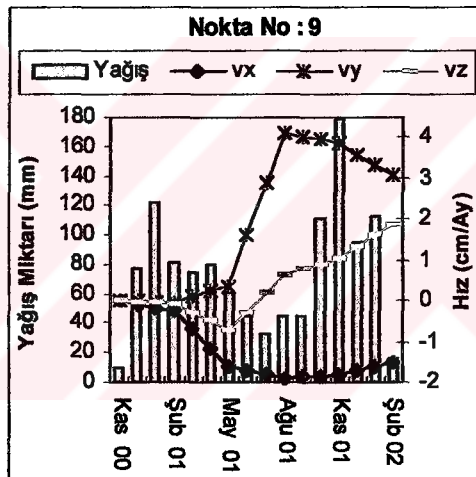
Şekil 77. 7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



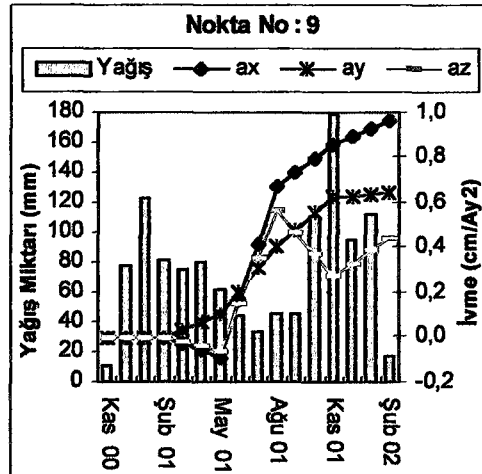
Şekil 78. 7 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



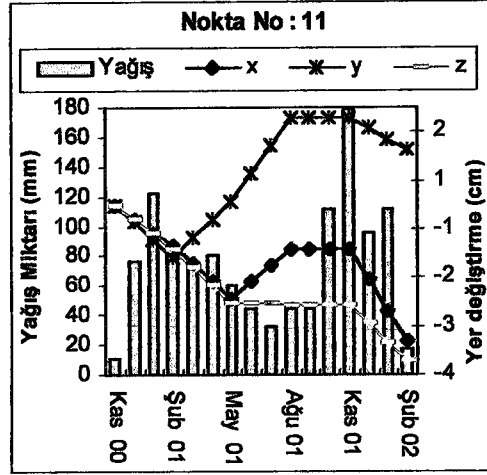
Şekil 79. 9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



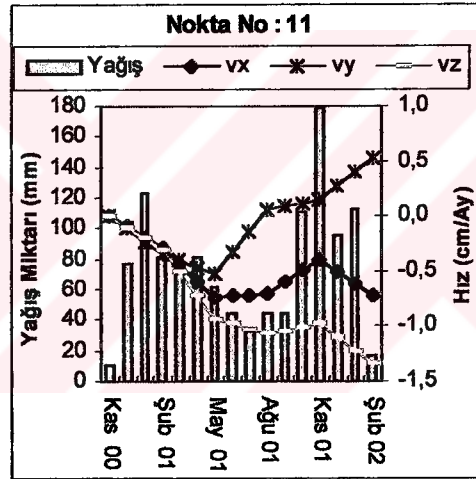
Şekil 80. 9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



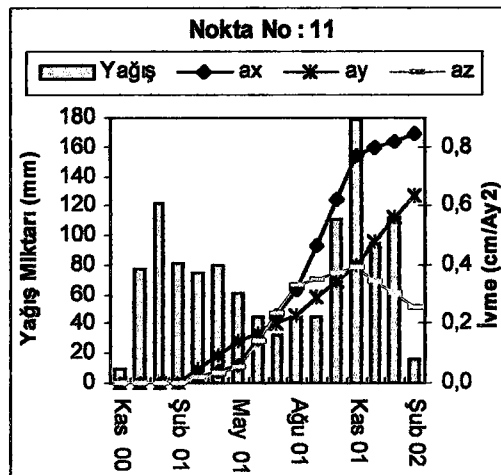
Şekil 81. 9 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



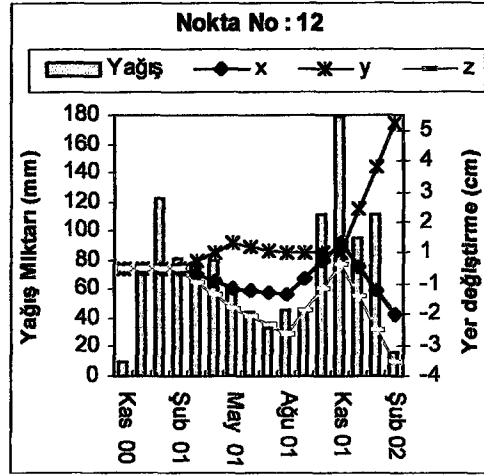
Şekil 82. 11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



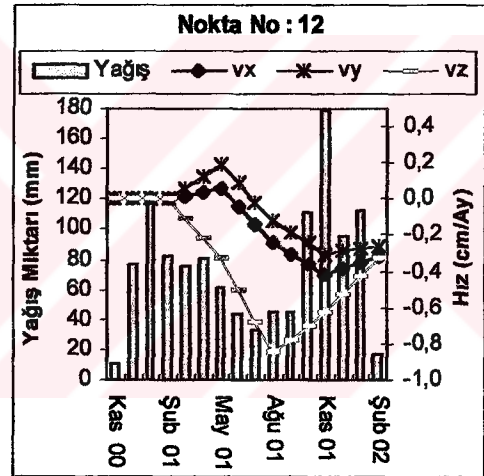
Şekil 83. 11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



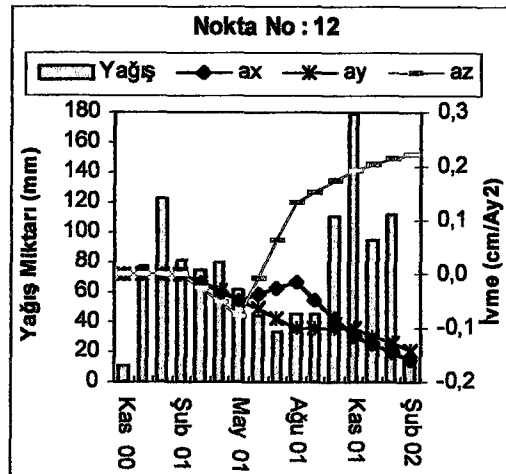
Şekil 84. 11 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



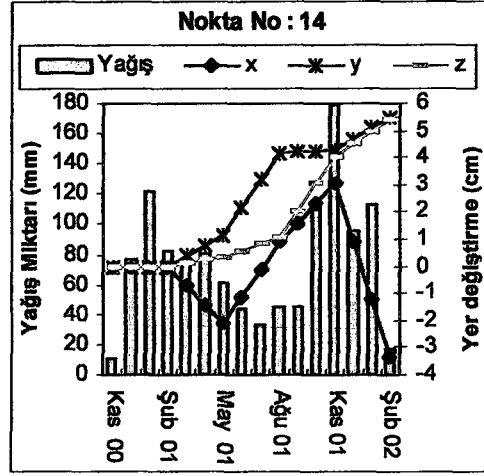
şekil 85. 12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



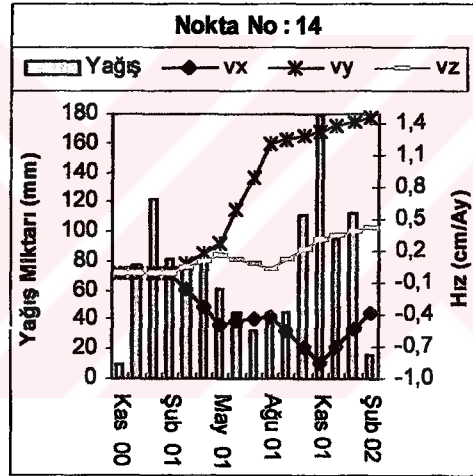
şekil 86. 12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



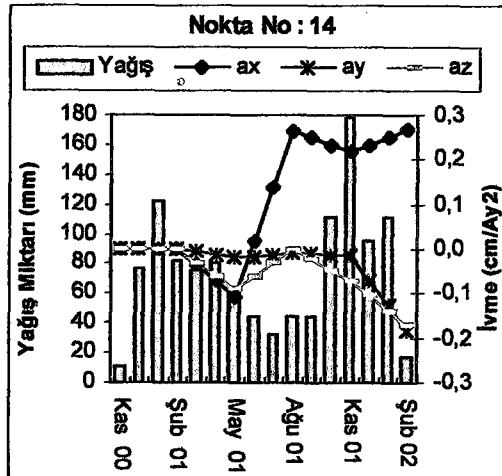
şekil 87. 12 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi



Şekil 88. 14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış yer değiştirme-yağış ilişkisi



Şekil 89. 14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış hız-yağış ilişkisi



Şekil 90. 14 nolu noktanın kinematik modelle hesaplanmış ivme-yağış ilişkisi

3.1.2.2. Kinematik Yüzey Modeli İle Deformasyon Analizi

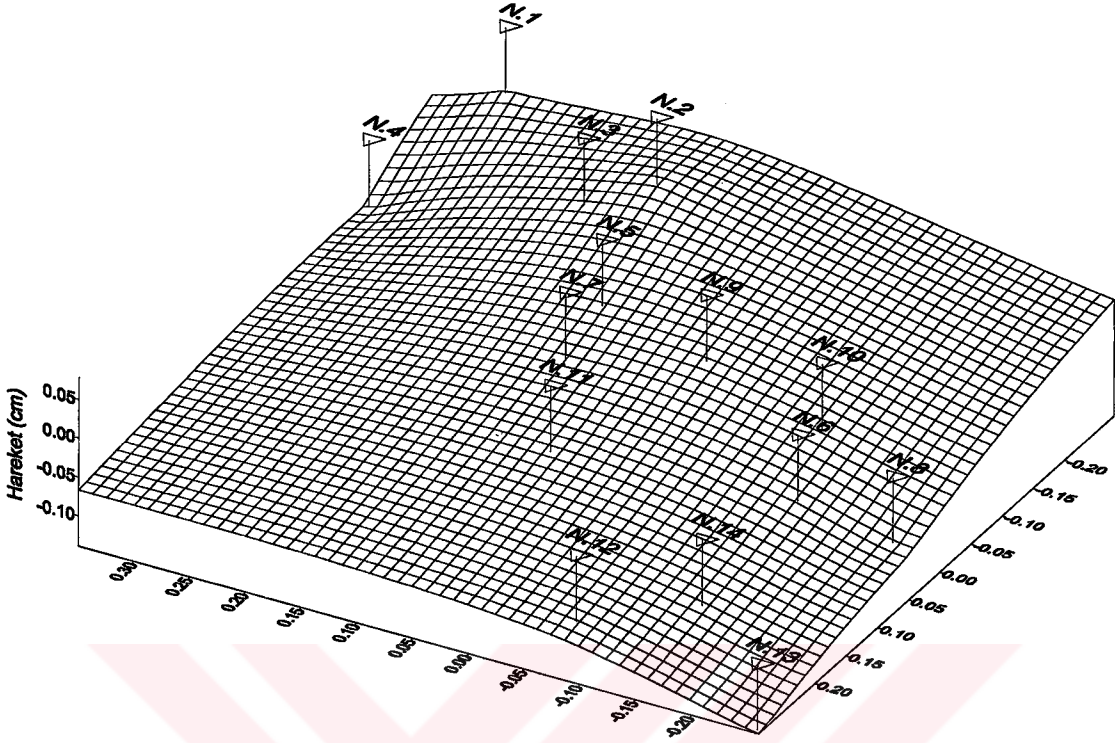
Bu çalışmada, (1.6.2.2.) bölümünde anlatılan kinematik yüzey modeli kullanılarak,

- Kasım 2000 – Şubat 2001 – Mayıs 2001
- Şubat 2001 – Mayıs 2001 – Ağustos 2001
- Mayıs 2001 – Ağustos 2001 – Kasım 2001
- Ağustos 2001 – Kasım 2001 – Şubat 2002

periyotlarında bölgenin hareket yüzeyleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hareket yüzeyi (92) eşitliğinde verilen kinematik yüzey polinomu ile belirlenmiştir. (92) bağıntısında verilen modelde dengeli koordinatlar ölçü, koordinat bilinmeyenleri ve polinom katsayıları da bilinmeyenlerdir. Bu modelde polinom katsayıları (q), genişletilmiş fonksiyonel modelin testine göre adım adım hesaplanmıştır. Bölgenin hareket yüzeyi katsayıları, model hipotezi ve genişletilmiş modelin testi sonuçları ile katsayıların anlamlılığına ait kararlar tüm periyotlar için Tablo 12-15’de verilmiştir. Bu tablolarda görüldüğü gibi tüm periyotlarda 4. derece yüzey anlamlı bulunmuştur. Anlamlı bulunan katsayılarla çizilen hareket yüzeyleri Şekil 91-94’de verilmiştir.

Tablo 12. Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

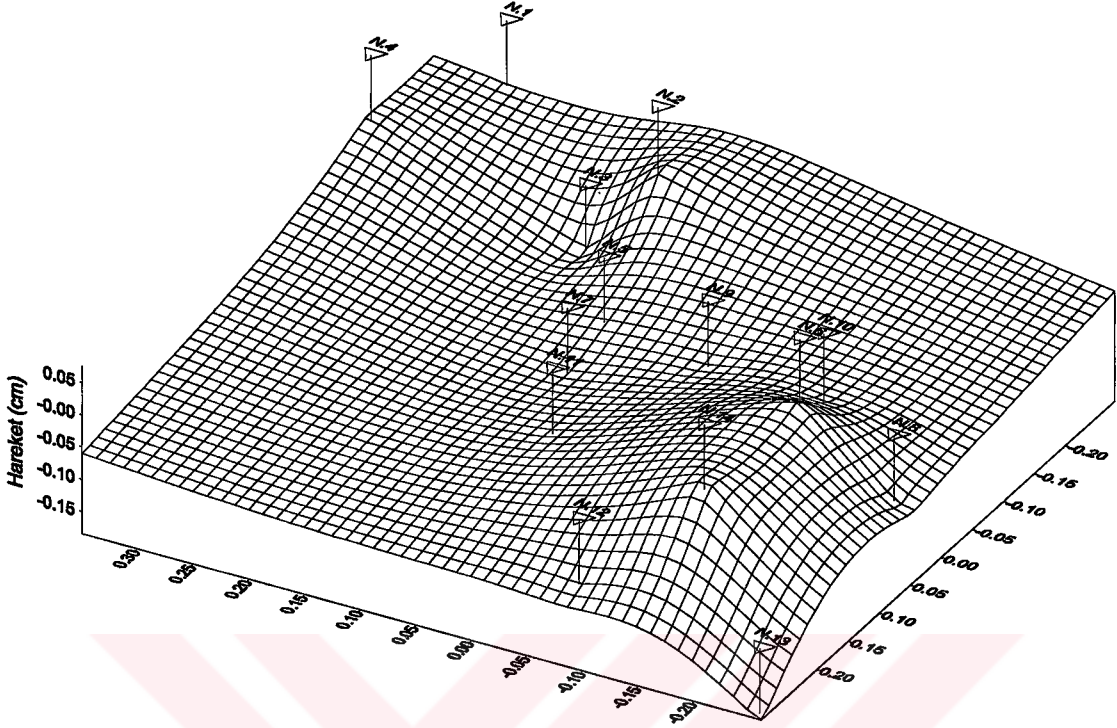
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	Tg	q _{tt}	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	0.00003	1.001	1.810	Geçerli	55.48	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	0.05934	1.001	1.810	Geçerli	25.91	11.98	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	- 0.33705	1.001	1.810	Geçerli	25.71	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	- 0.89385	1.001	1.810	Geçerli	22.65	5.37	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	- 0.06684	1.001	1.810	Geçerli	13.52	4.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	0.31235	1.001	1.810	Geçerli	15.36	3.90	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	- 0.33905	1.001	1.810	Geçerli	12.38	3.53	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.07208	1.001	1.810	Geçerli	6.74	3.27	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	0.08539	1.001	1.810	Geçerli	7.48	3.07	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	- 0.16699	1.001	1.810	Geçerli	8.23	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	- 0.13022	1.001	1.810	Geçerli	9.11	2.81	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.02094	1.001	1.810	Geçerli	9.28	2.71	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.02792	1.001	1.810	Geçerli	8.01	2.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	- 0.04712	1.001	1.810	Geçerli	4.51	2.56	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.04444	1.001	1.810	Geçerli	3.25	2.51	Model Genişletilebilir	Anlamlı
16	q ₅₀	-0.05304	1.001	1.810	Geçerli	2.33	2.47	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 91. Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi

Tablo 13. Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

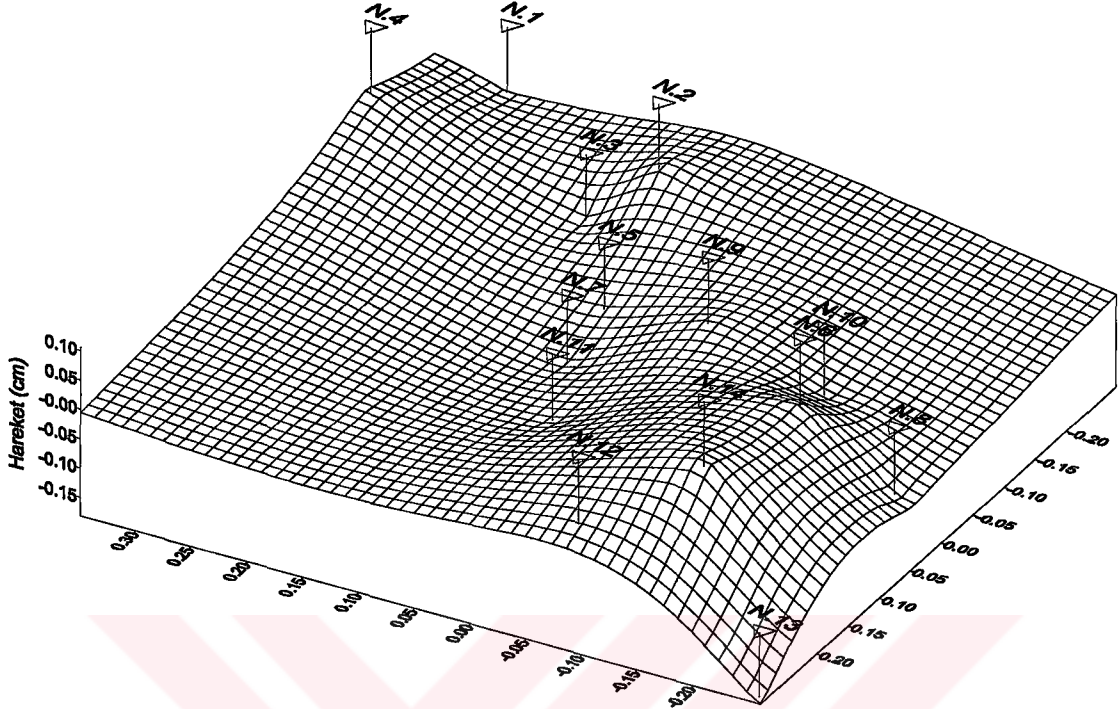
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	T _g	q _g	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	-0.00003	1.001	1.810	Geçerli	57.47	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	-0.68358	1.023	1.810	Geçerli	11.33	4.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.34606	1.022	1.810	Geçerli	24.88	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-1.54808	1.047	1.810	Geçerli	8.14	3.43	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	0.05830	1.048	1.810	Geçerli	7.99	3.15	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	1.24562	1.063	1.810	Geçerli	6.83	2.95	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	-0.65810	1.066	1.810	Geçerli	5.09	2.81	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.14679	1.066	1.810	Geçerli	4.42	2.70	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	0.03784	1.066	1.810	Geçerli	3.23	2.61	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	-0.02383	1.067	1.810	Geçerli	3.13	2.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	-0.24790	1.067	1.810	Geçerli	3.10	2.49	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.08540	1.067	1.810	Geçerli	2.90	2.45	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.00356	1.067	1.810	Geçerli	2.35	2.41	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	0.03254	1.067	1.810	Geçerli	1.95	2.39	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 92. Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi

Tablo 14. Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

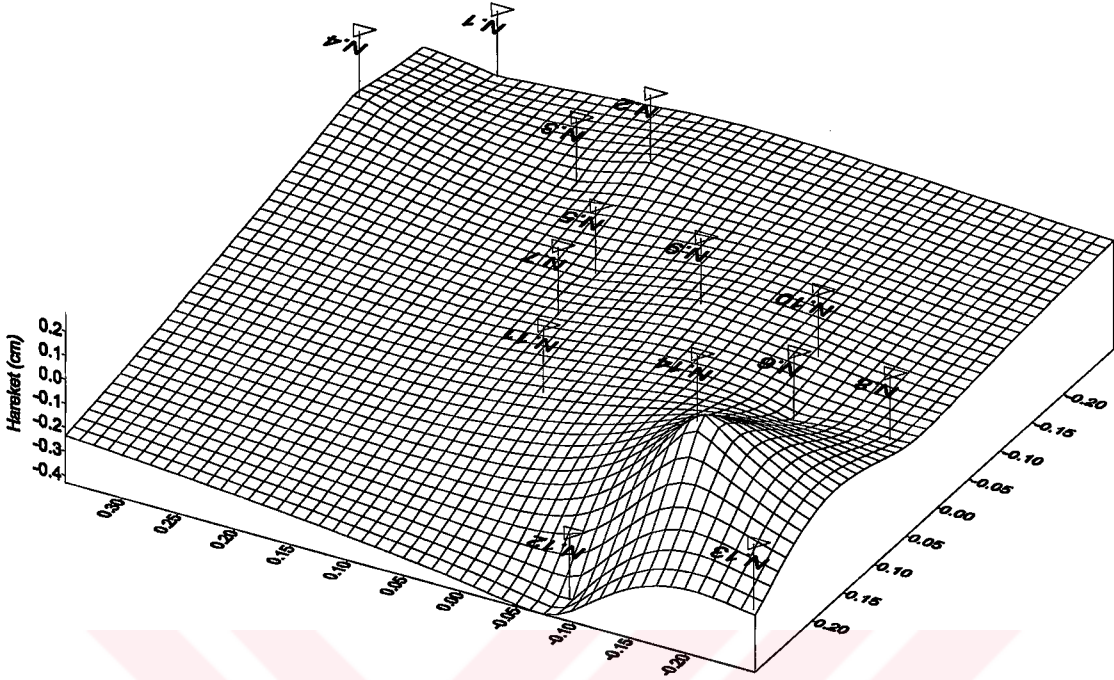
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	Tg	q _g	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	0.00001	1.001	1.816	Geçerli	29.53	6.23	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	-0.63125	1.027	1.816	Geçerli	28.74	4.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.35405	1.026	1.816	Geçerli	27.84	3.87	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-1.58023	1.021	1.816	Geçerli	26.68	3.43	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	-0.29249	1.033	1.816	Geçerli	26.24	3.15	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	2.27783	1.089	1.816	Geçerli	25.82	2.95	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	-1.13021	1.088	1.816	Geçerli	25.31	2.81	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.23737	1.087	1.816	Geçerli	23.51	2.70	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	0.12303	1.087	1.816	Geçerli	15.05	2.61	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	-0.18754	1.089	1.816	Geçerli	14.01	2.54	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	-0.29956	1.089	1.816	Geçerli	4.18	2.49	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.06061	1.089	1.816	Geçerli	3.52	2.45	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.07666	1.089	1.816	Geçerli	3.21	2.41	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	-0.15715	1.089	1.816	Geçerli	2.89	2.39	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.00458	1.089	1.816	Geçerli	1.39	2.27	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 93. Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi

Tablo 15. Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda kinematik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	T _g	q _g	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	0.00003	1.001	1.810	Geçerli	21.11	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	0.12987	1.002	1.810	Geçerli	16.88	11.98	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.79693	1.002	1.810	Geçerli	16.29	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	0.34338	1.002	1.810	Geçerli	9.99	5.37	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	0.93323	1.002	1.810	Geçerli	8.70	4.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	-2.72007	1.002	1.810	Geçerli	7.63	3.90	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	0.38459	1.002	1.810	Geçerli	6.27	3.53	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.05755	1.002	1.810	Geçerli	5.49	3.27	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	-0.19966	1.011	1.810	Geçerli	4.50	3.07	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	0.15694	1.011	1.810	Geçerli	3.83	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	0.12577	1.011	1.810	Geçerli	3.64	2.80	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	-0.00366	1.011	1.810	Geçerli	3.62	2.71	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	-0.07295	1.011	1.810	Geçerli	2.89	2.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	0.12750	1.011	1.810	Geçerli	2.77	2.56	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.02402	1.011	1.810	Geçerli	1.73	2.51	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 94. Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda bölgenin kinematik hareket yüzeyi

3.1.3. Dinamik Deformasyon Modelleri İle Deformasyon Analizi

3.1.3.1. Dinamik Tek Nokta Modeli İle Deformasyon Analizi

Uygulama alanındaki heyelanın nedeni olan yer altı suyu değişiminin etkisi dikkate alınarak dinamik deformasyon modelinin fonksiyonel yapısı (105) eşitliğindeki gibi oluşturulmuştur. Kinematik tek nokta modelinin Kalman-filtreleme yöntemine göre çözümü sonucu hesaplanan bilinmeyenlerin ters ağırlık matrisi dinamik modelin stokastik yapısı olarak alınmıştır. Fonksiyonel ve stokastik modeller En Küçük Kareler yöntemine göre çözülerek hareket parametreleri (konum, hız, ivme ve yer altı suyu) hesaplanmıştır. Dinamik modelle;

- Kasım 2000–Şubat 2001-Mayıs 2001
- Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001
- Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001
- Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002

periyotlarında deformasyonlar belirlenmiştir. Global testle dengeleme modelinin geçerliliği ve genişletilmiş modelin testiyle de hareketin nedenini oluşturan yer altı suyu parametrelerinin anlamlılığı test edilmiş ve istatistik sonuçları Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16’da gösterilen s_0 , öncül karesel ortalama hatayı; m_0 , soncul karesel ortalama hatayı; T , öncül ve soncul karesel ortalama hatalardan hesaplanmış test büyüklüğünü ve q_r ise F-tablo sınır değerini göstermektedir. Önce, T test değerleri, q_r sınır değeri ile karşılaştırılarak modelin geçerli olup olmadığı belirlenmiştir. Sonra, genişletilmiş parametrelerden hesaplanan ortalama hata m_g ve s_0 yardımıyla belirlenen T_g test büyüklüğü, F-tablo değeri q_g ile karşılaştırılarak modelin genişletilip genişletilmeyeceğine karar verilmiş ve Tablo 16’nın karar sütununda gösterilmiştir. Bu sütunda, tüm ölçü periyot gruplarında yer altı suyu parametreleri ile modelin genişletilmesinin anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 16. Dinamik tek nokta modelinin (konum+hız+ivme+yer altı suyu) istatistik test sonuçları

DİNAMİK MODEL Konum + Hız + İvme + Yeraltı Suyu			
Periyot	Global Test s_0 m_0 T q_r	Yer altı suyu parametreleri için Genişletilmiş Modelin Testi s_0 m_g T_g q_t	KARAR
Kasım 2000 Şubat 2001 Mayıs 2001	0.839 0.962 1.317 1.484	0.962 1.534 2.542 1.468	KONUM + HIZ + İVME + YERALTI SUYU
Kasım 2000 Mayıs 2001 Ağustos 2001	1.131 1.214 1.153 1.484	1.214 2.312 3.627 1.468	KONUM + HIZ + İVME + YERALTI SUYU
Kasım 2000 Ağustos 2001 Kasım 2001	1.011 1.076 1.132 1.484	1.076 2.211 4.222 1.468	KONUM + HIZ + İVME + YERALTI SUYU
Kasım 2000 Kasım 2001 Şubat 2002	1.311 1.421 1.177 1.484	1.421 2.031 2.043 1.468	KONUM + HIZ + İVME + YERALTI SUYU

Karar verilen modele göre hesaplanan hareket parametrelerinin ($d_x, d_y, d_z, v_x, v_y, v_z, a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z$) anlamlılık testleri 1.6.2.1.3. bölümünde açıklandığı biçimde yapılmıştır. Hareket parametreleri ve anlamlılık test sonuçları Tablo 17-20'de verilmiştir. Bu tablolardaki gösterimler, kinematik tek nokta modelinden hesaplanan parametrelerin anlamlılık testleri ile aynıdır.

Heyelanın baş, orta ve topuk kısımlarındaki nokta hareketlerinin eğim yönündeki davranışlarını görebilmek için dinamik modelden hesaplanan hareket parametrelerinden konum ve hız grafikleri örnek olarak verilmiştir (Şekil 95-102). Tek tek her noktanın hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönlerindeki değişimlerini yorumlayabilmek ve hareketin yer altı suyu seviyesi değişimleriyle olan ilişkisini tüm ölçü periyotlarında görebilmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 103-142).



Tablo 17. Kasım 2000-Şubat 2001-Mayıs 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları

Periyot : Kasım 2000 – Şubat 2001 – Mayıs 2001														Dinamik Model : Konum + Hız + İvme + Yer altı Suyu													
g _t = 1.975														T > g _t ise (+) T < g _t ise (-)													
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14													
dx (cm)	-23.15	0.16	-9.90	0.86	-12.73	-0.07	-6.60	0.19	-9.09	0.24	-1.00	-0.89	2.09	-0.83													
T _{dx}	126.08	0.35	63.41	4.05	80.52	0.49	40.36	0.43	63.04	0.64	6.80	14.14	1.38	3.65													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
dy (cm)	32.34	0.01	14.32	-2.39	8.81	-2.11	7.04	-0.85	5.04	-1.18	-2.68	0.95	0.01	1.42													
T _{dy}	166.76	0.01	90.93	10.28	56.68	13.21	40.39	1.94	36.52	1.06	17.80	15.27	0.01	5.87													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
dz (cm)	-6.52	-0.99	-24.02	0.29	-6.41	-0.70	-4.73	-0.24	-4.88	0.87	-1.36	-1.36	-3.21	1.92													
T _{dz}	46.43	1.67	209.33	1.86	62.46	5.66	42.55	0.75	50.24	1.77	10.61	25.97	1.29	10.04													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
v _x (cm/ay)	-0.691	0.016	-0.908	-0.626	-0.991	0.129	-0.538	0.006	-0.559	0.021	0.374	-0.294	-0.115	-0.699													
T _{v_x}	8.36	0.07	12.92	7.02	13.97	2.08	7.42	0.04	8.70	0.12	5.98	6.27	0.88	11.45													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
v _y (cm/ay)	0.323	-0.009	1.047	-0.516	0.678	0.579	0.482	0.013	0.624	-0.051	0.838	-0.290	0.007	-0.061													
T _{v_y}	3.72	0.04	14.81	5.26	9.75	8.49	6.18	0.08	10.11	0.29	13.08	5.93	0.04	1.99													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
v _z (cm/ay)	-0.836	-0.001	-0.088	-0.678	-0.534	0.301	-0.226	-0.226	-0.384	-0.074	0.307	-0.464	0.190	-0.566													
T _{v_z}	13.49	0.01	41.07	10.28	11.91	5.72	4.26	0.10	8.82	0.53	5.63	11.49	1.59	11.13													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)													
a _x (cm/ay ²)	0.116	0.000	-0.098	0.081	0.114	-0.011	-0.019	0.001	0.034	-0.007	-0.002	0.049	0.006	0.012													
T _{a_x}	6.23	0.01	5.57	3.07	8.27	2.58	6.93	0.23	7.28	0.19	2.41	0.25	0.21	6.11													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)													
a _y (cm/ay ²)	0.042	0.003	0.145	-0.004	0.091	0.019	0.015	-0.002	-0.067	-0.003	0.001	0.022	0.008	-0.011													
T _{a_y}	4.08	0.06	8.33	2.22	6.03	1.03	1.31	0.58	8.29	0.93	0.69	0.18	0.24	3.91													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)													
a _z (cm/ay ²)	0.113	-0.005	0.113	0.084	-0.054	0.013	0.013	0.000	0.037	0.013	0.000	-0.053	-0.013	0.072													
T _{a_z}	9.21	0.15	20.26	1.26	9.49	3.31	1.30	0.12	5.09	0.46	0.26	0.32	0.53	5.13													
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)													

Tablo 17'nin devamı

Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
b_x	0.037	0.001	-0.032	-0.035	-0.027	0.003	-0.019	0.000	-0.012	0.000	0.016	-0.073	-0.012	-0.062
Tb_x	26.12	0.27	40.53	20.04	41.27	6.01	23.49	0.17	25.21	0.17	16.63	17.28	1.31	30.01
Karar	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$
b_y	0.016	0.000	0.037	-0.030	0.019	0.013	0.016	0.000	0.013	-0.002	0.038	-0.070	0.005	-0.011
Tb_y	10.93	0.05	45.05	16.74	29.13	25.22	19.82	0.10	30.46	1.23	37.54	16.86	0.86	5.04
Karar	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$
b_z	0.043	-0.001	-0.071	-0.037	-0.016	0.007	-0.007	0.000	-0.009	0.000	0.014	-0.119	0.017	-0.054
Tb_z	36.85	0.48	115.15	27.29	32.71	16.37	12.03	0.36	26.37	0.28	16.06	34.17	1.62	31.01
Karar	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$	$T>q(+)$	$T<q(-)$	$T>q(+)$

Tablo 18. Kasım 2000-Mayıs 2001-Ağustos 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları

Periyot : Kasım 2000 – Mayıs 2001 – Ağustos 2001														Dinamik Model : Konum + Hiz + İvme + Yer altı Suyu													
q _e = 1.975														T > q _e ise (+) T < q _e ise (-)													
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14													
dx (cm)	-25.36	0.00	-10.87	6.59	-15.62	5.33	-7.46	-0.26	-10.84	0.04	-0.56	-0.50	-0.29	0.23													
T _{dx}	42.13	0.01	2.897	14.34	12.20	11.53	3.167	0.57	3.99	0.11	2.20	2.06	0.62	2.51													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
dy (cm)	33.15	0.11	15.84	5.76	9.80	4.39	7.73	0.07	6.16	0.06	0.88	0.28	0.25	3.06													
T _{dy}	45.16	0.24	18.86	12.30	10.18	9.34	7.93	0.15	23.67	0.14	2.87	2.59	0.53	6.47													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
dz (cm)	-7.16	-0.21	-25.84	7.61	-7.97	2.74	-4.27	-0.09	3.70	-0.06	-1.53	-1.32	-0.09	2.15													
T _{dz}	15.43	0.46	12.56	16.39	2.07	5.86	4.84	0.21	7.91	0.13	3.28	2.80	0.19	0.32													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
v _x (cm/ay)	-1.068	0.002	-1.905	0.262	-1.654	0.598	-0.740	-0.043	0.788	-0.028	-0.879	-0.176	0.080	0.984													
T _{v_x}	8.16	0.03	10.02	2.76	10.58	4.30	5.61	0.73	4.52	0.47	2.12	2.23	1.30	3.97													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
v _y (cm/ay)	1.045	-0.011	1.390	0.668	1.978	0.887	0.225	0.076	0.859	0.064	-0.508	-0.082	-0.068	0.157													
T _{v_y}	19.00	0.18	23.43	19.65	11.07	2.56	8.78	1.24	2.35	1.08	3.69	0.57	1.12	2.63													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(-)	T<q(-)	T>q(+)													
v _z (cm/ay)	-1.478	0.075	-0.648	1.675	-0.931	0.533	-0.098	0.048	0.644	-0.077	-0.495	0.004	-0.014	0.168													
T _{v_z}	3.71	1.30	24.46	4.58	2.54	1.981	2.180	0.79	3.77	1.31	2.15	0.02	1.38	2.66													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T<q(-)	T>q(+)													

Tablo 18'in devamı

Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
a_x (cm/ay ²)	0.369	0.000	0.354	-0.780	0.660	0.510	0.160	-0.004	0.730	-0.003	0.289	-0.115	0.009	0.769
T_{a_x}	7.68	0.02	9.31	2.69	10.58	2.83	5.26	0.51	3.76	0.29	2.66	2.76	1.80	2.70
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)
a_y (cm/ay ²)	-0.838	0.000	-0.890	0.810	-1.247	0.875	-0.690	0.008	0.740	0.001	0.480	-0.084	-0.001	-0.193
T_{a_y}	18.08	0.05	24.28	17.24	11.43	2.81	8.98	0.92	1.99	1.05	4.27	2.55	0.15	2.68
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)
a_z (cm/ay ²)	0.997	0.009	0.246	0.940	0.753	0.264	0.026	0.004	0.985	-0.009	0.339	0.027	-0.001	0.178
T_{a_z}	4.27	1.24	23.40	2.20	2.05	2.73	2.41	0.51	2.40	0.86	2.47	0.17	0.62	2.61
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)
b_x	0.247	0.000	0.365	-0.130	0.601	0.496	0.190	0.000	0.689	0.000	0.134	-0.109	0.000	0.737
T_{b_x}	7.31	0.01	9.21	2.79	10.51	2.72	5.20	0.01	3.65	0.01	2.72	2.71	0.01	2.55
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)
b_y	-0.730	0.000	-0.470	0.718	-0.323	-0.589	-0.114	0.000	-0.560	0.001	-0.094	0.103	0.000	-0.115
T_{b_y}	17.59	0.05	24.23	17.04	11.41	2.89	8.94	0.06	2.14	0.07	4.31	2.67	0.04	2.75
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)
b_z	0.980	0.000	0.304	0.289	0.517	-0.329	-0.298	0.000	0.191	0.000	-0.177	0.020	0.000	0.158
T_{b_z}	4.43	0.03	23.19	2.06	2.99	2.79	0.460	0.02	2.28	0.01	2.52	0.12	0.01	2.60
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T<q (-)	T>q (+)

Tablo 19. Kasım 2000-Ağustos 2001-Kasım 2001 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları

Periyot : Kasım 2000 – Ağustos 2001 – Kasım 2001													
Dinamik Model : Konum + Hız + İvme + Yer altı Suyu													
Nokta	$q_t = 1.975$												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
dx (cm)	-28.99	-0.01	-11.02	6.14	-16.51	5.78	-8.62	-0.12	-13.71	0.13	-0.13	1.54	0.16
T_{dx}	13.48	0.01	2.72	4.33	3.91	3.39	2.15	0.09	2.93	0.09	2.06	2.12	0.11
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)
dy (cm)	36.34	-0.07	16.97	5.88	10.16	4.47	8.01	-0.24	11.64	-0.50	0.80	0.85	-0.59
T_{dy}	14.84	0.54	4.83	4.03	2.16	2.01	2.36	0.52	3.58	0.35	2.24	2.06	0.41
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)
dz (cm)	-8.81	-0.06	-28.75	8.32	-8.43	3.46	-5.20	-0.52	1.10	-0.19	-3.28	1.27	-0.30
T_{dz}	6.21	1.16	6.16	4.46	2.41	2.32	2.95	1.07	2.04	0.83	2.20	2.39	0.91
Karar	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T<q (-)	T>q (+)	T>q (+)	T<q (-)

Tablo 19'un devamı

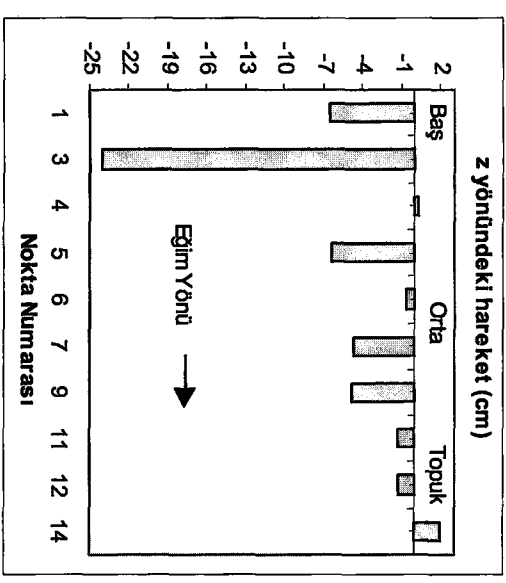
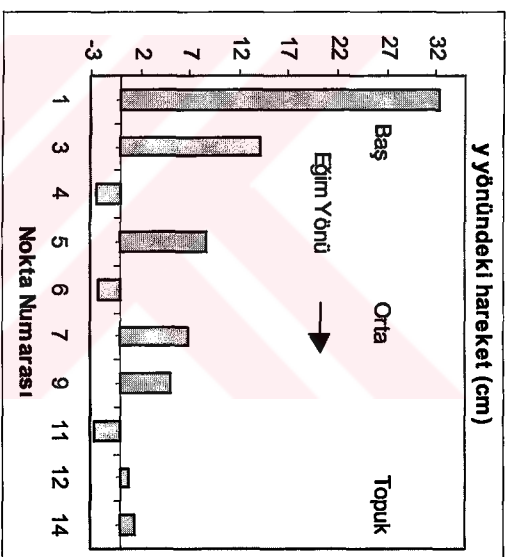
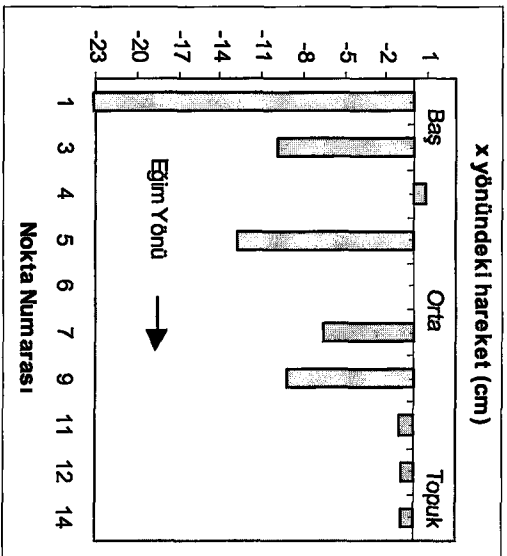
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
v_x (cm/ay) Tv_x Karar	-0.290 2.25 T>q (+)	-0.011 0.09 T<q (-)	-0.202 2.72 T>q (+)	0.589 4.94 T>q (+)	-0.660 2.57 T>q (+)	0.555 4.85 T>q (+)	-0.137 2.19 T>q (+)	0.027 0.23 T<q (-)	-0.461 2.15 T>q (+)	0.022 0.19 T<q (-)	-0.096 1.35 T<q (-)	0.370 3.27 T>q (+)	0.017 0.71 T<q (-)	0.161 2.32 T>q (+)
v_y (cm/ay) Tv_y Karar	0.257 2.17 T>q (+)	-0.012 1.08 T<q (-)	0.554 4.66 T>q (+)	0.697 5.64 T>q (+)	0.416 3.40 T>q (+)	0.804 6.83 T>q (+)	0.342 2.69 T>q (+)	-0.013 1.16 T<q (-)	0.752 2.08 T>q (+)	-0.019 0.94 T<q (-)	0.435 2.98 T>q (+)	0.030 1.02 T<q (-)	-0.015 1.40 T<q (-)	0.164 2.81 T>q (+)
v_z (cm/ay) Tv_z Karar	-0.335 2.86 T>q (+)	-0.018 1.63 T<q (-)	-0.705 6.03 T>q (+)	0.879 7.57 T>q (+)	-0.473 4.07 T>q (+)	0.614 5.33 T>q (+)	-0.335 2.88 T>q (+)	-0.22 1.89 T<q (-)	0.971 3.65 T>q (+)	-0.016 1.38 T<q (-)	-0.360 2.61 T>q (+)	0.047 1.47 T<q (-)	-0.019 1.76 T<q (-)	0.227 2.94 T>q (+)
a_x (cm/ay ²) Ta_x Karar	0.077 15.71 T>q (+)	-0.06 1.16 T<q (-)	-0.051 7.99 T>q (+)	-0.033 6.51 T>q (+)	-0.067 8.00 T>q (+)	0.235 20.83 T>q (+)	0.048 6.56 T>q (+)	-0.002 0.256 T<q (-)	-0.220 12.41 T>q (+)	0.000 0.02 T<q (-)	-0.021 3.25 T>q (+)	0.035 4.66 T>q (+)	0.004 0.92 T<q (-)	0.089 2.05 T>q (+)
a_y (cm/ay ²) Ta_y Karar	-0.089 18.00 T>q (+)	0.003 0.58 T<q (-)	0.028 4.34 T>q (+)	-0.029 5.83 T>q (+)	0.030 2.38 T>q (+)	0.196 17.86 T>q (+)	-0.051 2.47 T>q (+)	0.009 1.33 T<q (-)	0.361 11.61 T>q (+)	0.001 1.88 T<q (-)	0.010 2.31 T>q (+)	0.011 1.99 T>q (+)	-0.001 0.31 T<q (-)	0.092 1.99 T>q (+)
a_z (cm/ay ²) Ta_z Karar	0.020 4.02 T>q (+)	0.001 0.09 T<q (-)	-0.139 22.28 T>q (+)	-0.043 8.72 T>q (+)	-0.093 10.76 T>q (+)	0.158 13.85 T>q (+)	0.052 6.81 T>q (+)	0.000 0.01 T<q (-)	0.334 15.78 T>q (+)	0.007 0.75 T<q (-)	-0.20 3.60 T>q (+)	-0.007 1.98 T>q (+)	-0.001 0.42 T<q (-)	0.110 2.05 T>q (+)
b_x Tb_x Karar	-0.104 21.90 T>q (+)	-0.005 0.71 T<q (-)	0.098 10.53 T>q (+)	0.070 16.40 T>q (+)	0.069 5.64 T>q (+)	0.378 24.15 T>q (+)	0.082 7.44 T>q (+)	-0.006 0.64 T<q (-)	0.319 9.52 T>q (+)	-0.004 0.26 T<q (-)	0.049 2.64 T>q (+)	0.001 3.18 T>q (+)	0.000 0.24 T<q (-)	0.024 4.91 T>q (+)
b_y Tb_y Karar	0.155 32.86 T>q (+)	0.001 1.67 T<q (-)	0.042 4.59 T>q (+)	0.103 23.64 T>q (+)	0.048 3.55 T>q (+)	0.339 22.48 T>q (+)	0.024 2.00 T>q (+)	0.002 0.70 T<q (-)	0.580 8.67 T>q (+)	0.003 0.49 T<q (-)	0.068 2.16 T>q (+)	0.001 2.84 T>q (+)	0.000 0.86 T<q (-)	0.021 3.93 T>q (+)
b_z Tb_z Karar	-0.065 14.08 T>q (+)	0.002 1.43 T<q (-)	0.259 28.23 T>q (+)	0.102 25.52 T>q (+)	0.165 13.06 T>q (+)	0.270 17.42 T>q (+)	0.095 8.61 T>q (+)	0.002 0.44 T<q (-)	0.527 12.44 T>q (+)	0.002 1.45 T<q (-)	0.065 7.26 T>q (+)	-0.001 2.35 T>q (+)	0.000 0.48 T<q (-)	-0.300 2.05 T>q (+)

Tablo 20. Kasım 2000-Kasım 2001-Şubat 2002 periyodunda dinamik deformasyon analiz sonuçları

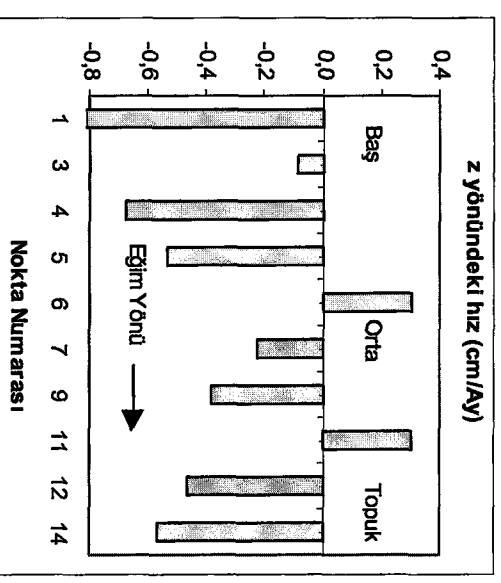
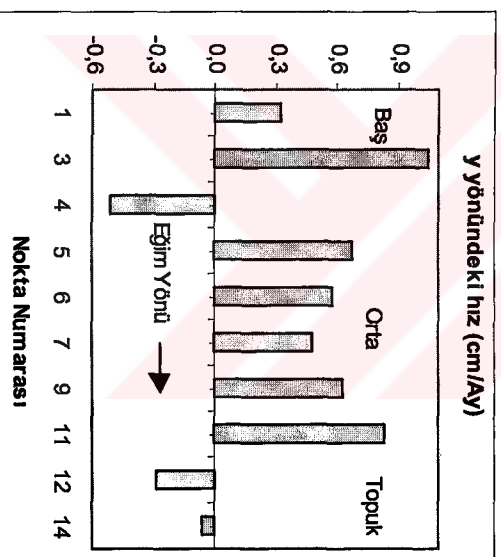
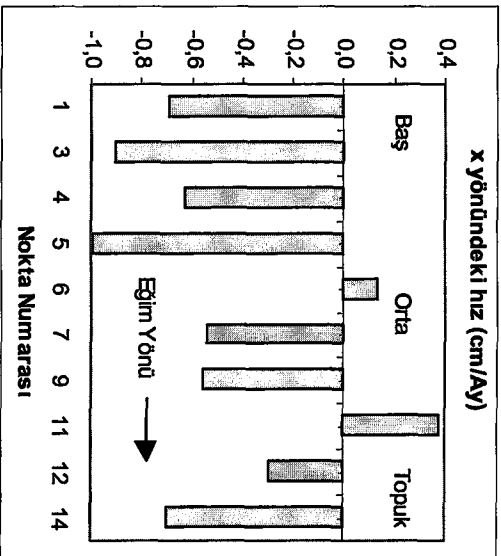
Periyot : Kasım 2000 – Kasım 2001 – Şubat 2002														Dinamik Model : Konum + Hız + İvme + Yer altı Suyu													
q _e = 1.975														T > q _e ise (+) T < q _e ise (-)													
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14													
dx (cm)	-31.09	0.17	-12.51	8.81	-17.10	-1.13	-9.13	-0.18	-16.18	0.07	-3.63	-1.95	0.23	-2.98													
T _{dx}	26.45	1.68	2.52	2.90	7.21	2.22	2.27	1.32	10.07	1.03	2.06	2.15	0.25	2.09													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
dy (cm)	38.88	-0.11	17.45	8.99	12.31	5.60	9.54	-0.16	11.33	-0.13	1.49	4.24	-0.18	5.75													
T _{dy}	30.45	1.65	5.38	2.97	2.28	2.60	2.56	1.43	5.26	1.55	2.50	2.44	0.47	2.57													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
dz (cm)	-12.91	0.19	-29.91	9.52	-9.91	-4.33	-5.86	-0.14	-9.42	-0.12	-4.06	-4.18	-0.13	6.32													
T _{dz}	12.99	2.97	15.21	2.54	5.97	4.57	6.11	1.82	9.45	1.37	4.22	4.38	1.39	2.94													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
v _x (cm/ay)	-1.210	0.171	-0.518	1.149	-0.203	1.131	-0.263	-0.056	-1.505	0.023	-0.149	-0.358	0.063	-0.385													
T _{v_x}	17.61	1.27	7.41	18.29	3.06	34.19	5.35	1.03	23.09	0.60	2.01	8.09	0.99	19.19													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
v _y (cm/ay)	1.812	-0.138	0.731	1.908	0.506	1.359	0.236	-0.078	1.923	0.048	0.511	0.155	-0.013	0.552													
T _{v_y}	25.75	1.26	10.40	28.24	7.35	24.91	3.88	1.55	28.81	0.24	8.23	2.86	1.91	11.59													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
v _z (cm/ay)	-0.969	-0.170	-1.704	1.055	-0.855	-1.240	-0.554	-0.087	-1.382	-0.028	-0.450	-0.404	-0.019	0.278													
T _{v_z}	13.67	0.99	25.50	30.63	12.62	27.92	9.71	1.92	35.60	0.84	7.68	7.17	0.83	7.25													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
a _x (cm/ay ²)	-0.252	0.010	-0.079	0.181	-0.040	0.052	-0.017	-0.012	-0.019	0.005	-0.060	-0.017	0.006	-0.040													
T _{a_x}	50.09	1.55	19.42	52.28	2.67	18.59	18.13	1.18	8.52	1.02	3.49	16.85	0.34	6.34													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
a _y (cm/ay ²)	0.370	-0.018	0.074	0.284	0.039	0.028	0.019	-0.009	0.048	-0.007	0.027	0.033	-0.002	0.022													
T _{a_y}	68.42	1.76	19.00	70.01	15.28	10.19	9.31	0.27	20.44	0.81	13.68	2.48	0.70	5.16													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													
a _z (cm/ay ²)	-0.166	-0.031	-0.212	0.293	-0.054	-0.026	-0.027	-0.015	-0.047	-0.003	-0.019	-0.029	-0.001	0.090													
T _{a_z}	32.61	1.69	56.47	68.82	20.18	9.12	17.80	1.49	19.63	0.18	10.59	3.98	0.81	5.73													
Karar	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)	T>q(+)	T<q(-)	T>q(+)													

Tablo 20'nin devamı

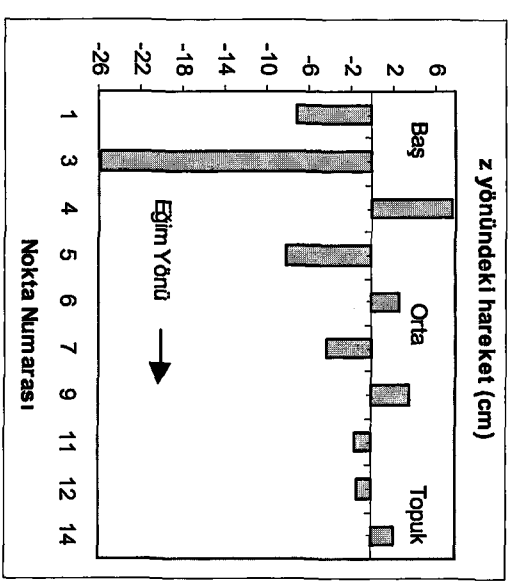
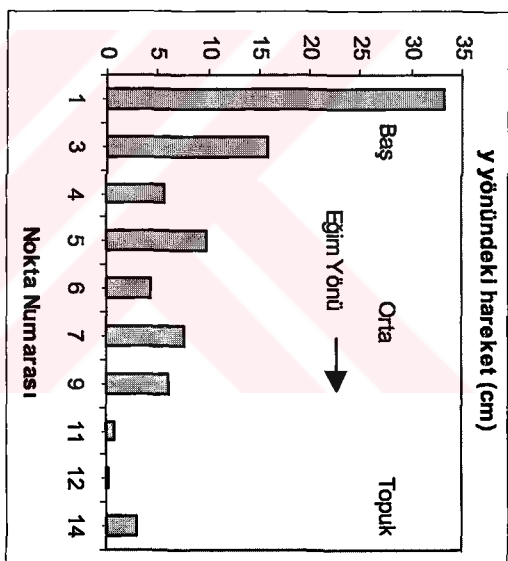
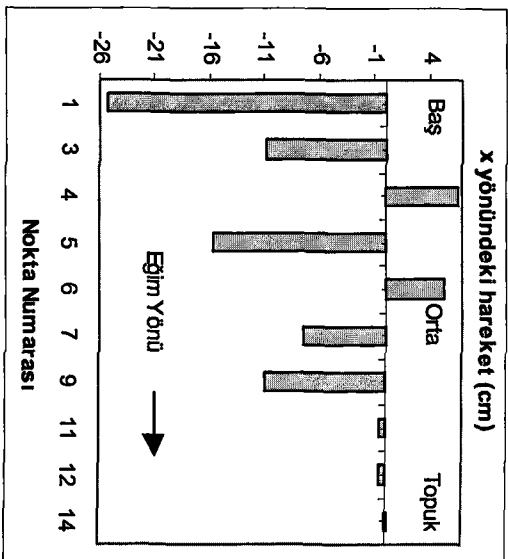
Nokta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
b_x	-0.172	0.003	-0.027	0.071	-0.011	0.091	0.014	0.006	-0.011	-0.001	-0.013	-0.011	0.004	-0.040
Tb_x	67.00	0.12	25.02	46.36	17.91	46.96	28.61	1.77	24.16	0.71	11.99	6.04	1.69	8.25
Karar	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$
b_y	0.244	-0.004	0.090	0.113	0.015	0.068	0.010	0.004	0.017	0.002	0.021	0.015	0.007	0.035
Tb_y	84.41	0.08	8.57	66.60	7.13	53.78	2.17	0.25	12.15	1.08	13.50	10.00	0.65	2.02
Karar	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$
b_z	-0.099	-0.006	-0.072	0.114	-0.019	0.047	0.017	0.003	-0.017	0.001	-0.021	-0.021	0.000	0.012
Tb_z	41.87	0.52	69.91	65.39	28.07	37.43	21.36	1.93	11.06	0.76	12.30	15.92	0.23	2.85
Karar	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$	$T > q (+)$	$T < q (-)$	$T > q (+)$



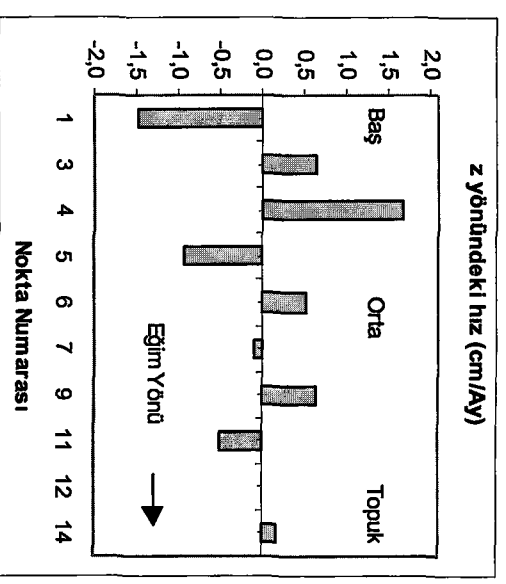
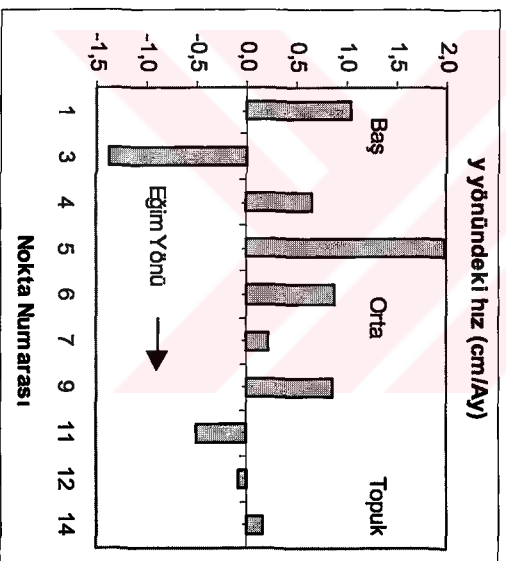
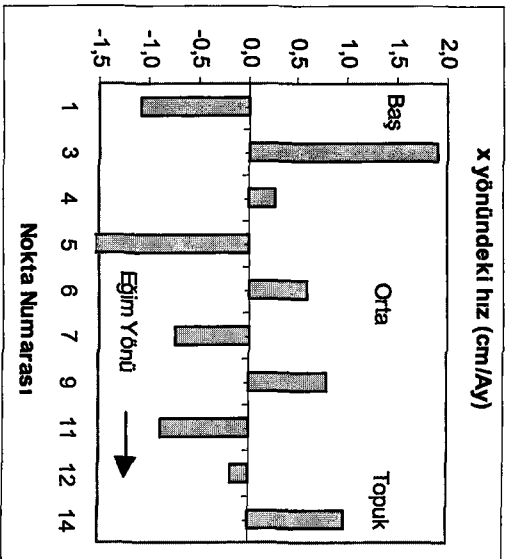
Şekil 95. Kas.00-Şub.01-May.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareketleri



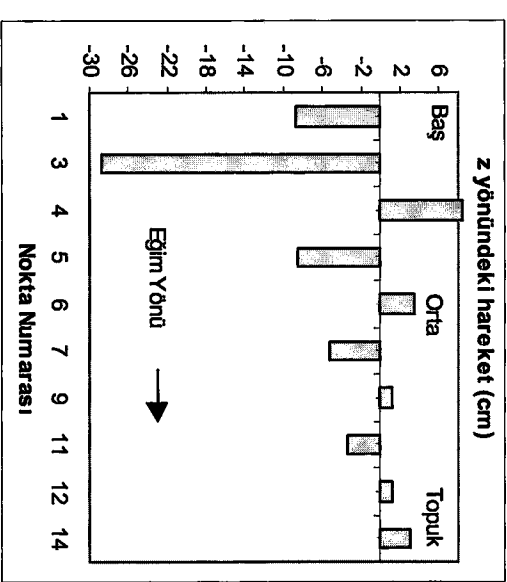
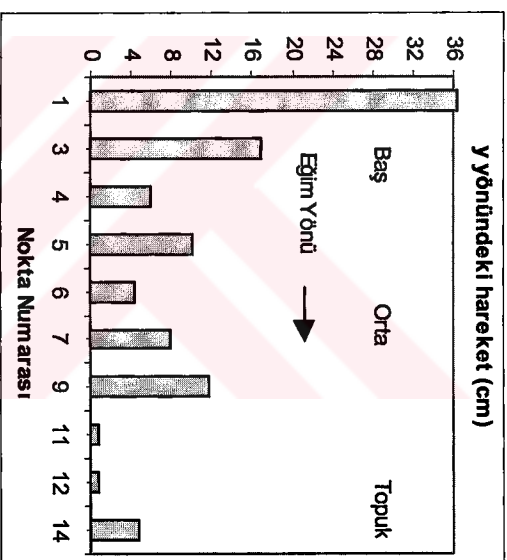
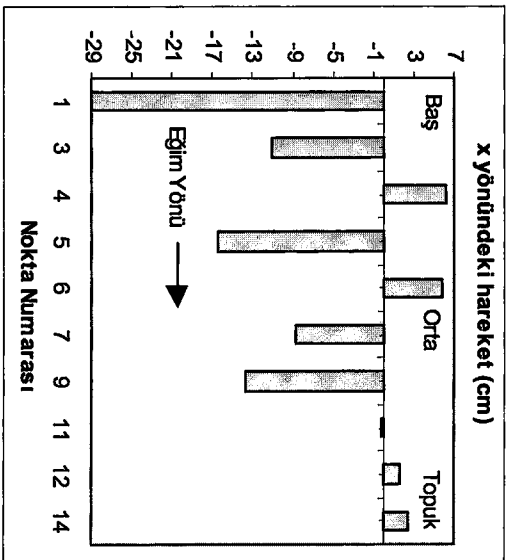
Şekil 96. Kas.00-Şub.01-May.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareket hızları



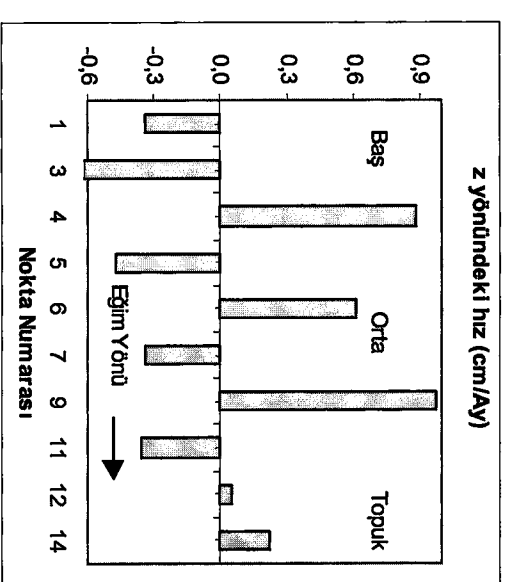
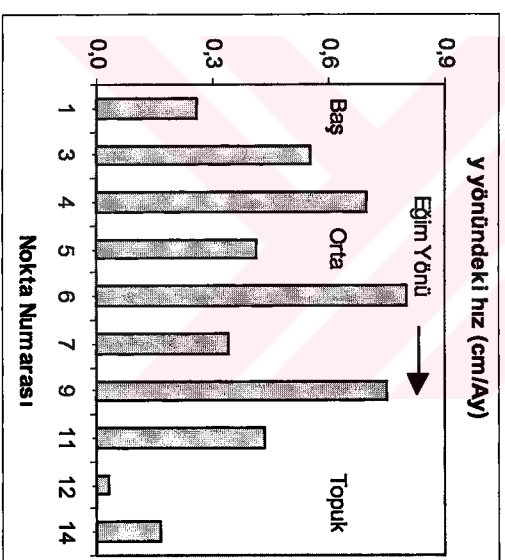
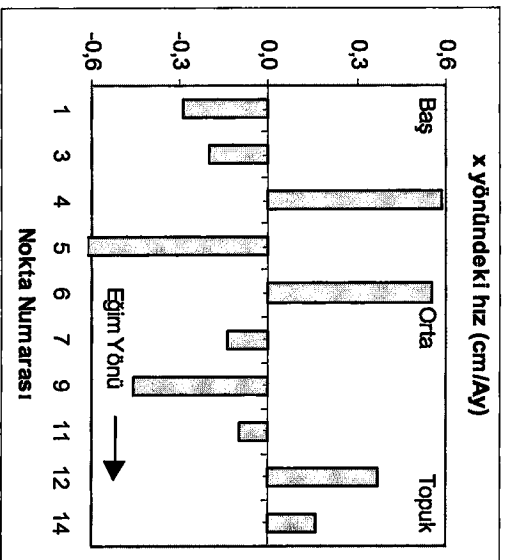
Şekil 97. Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareketleri



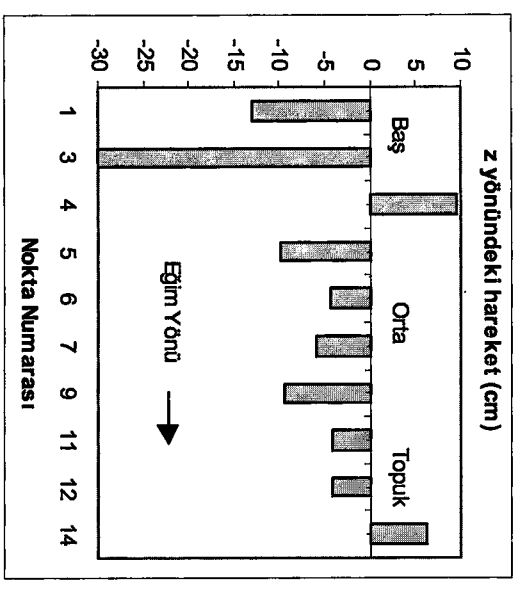
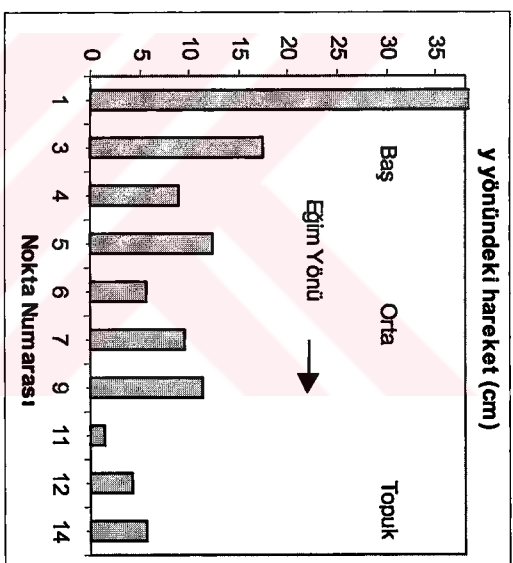
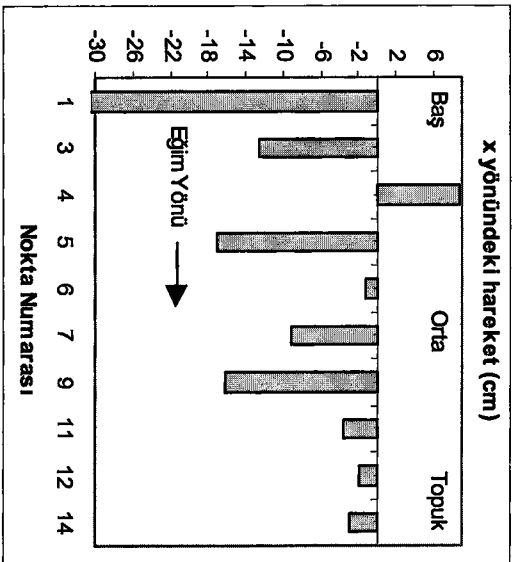
Şekil 98. Kas.00-May.01-Ağu.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareket hızları



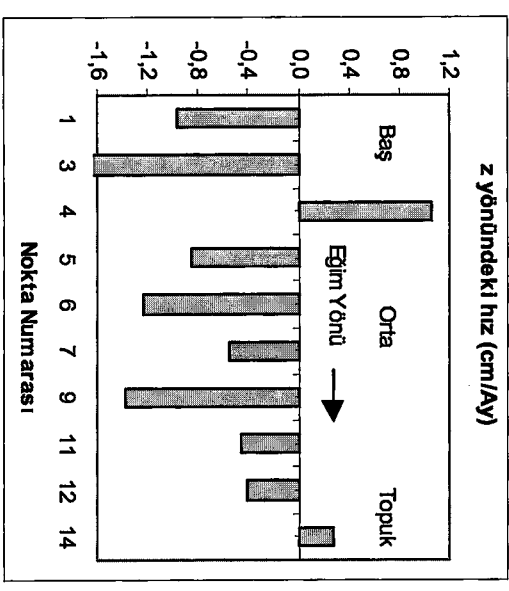
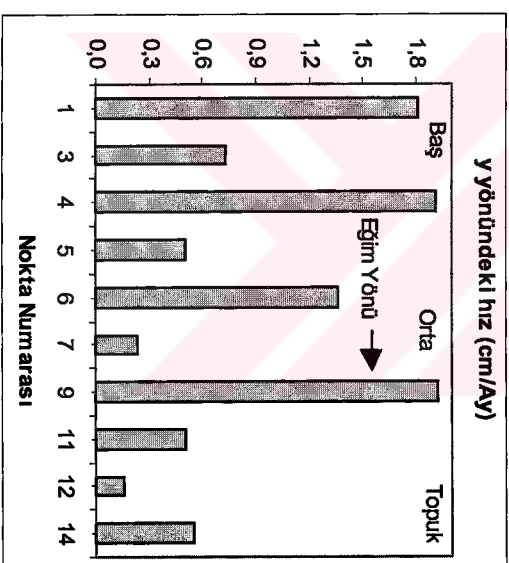
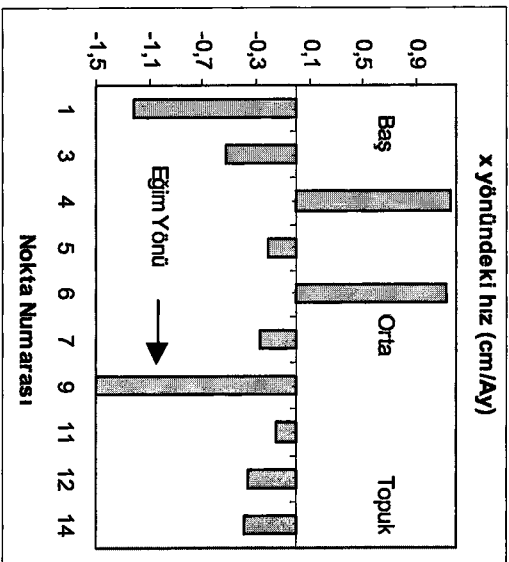
Şekil 99. Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareketleri



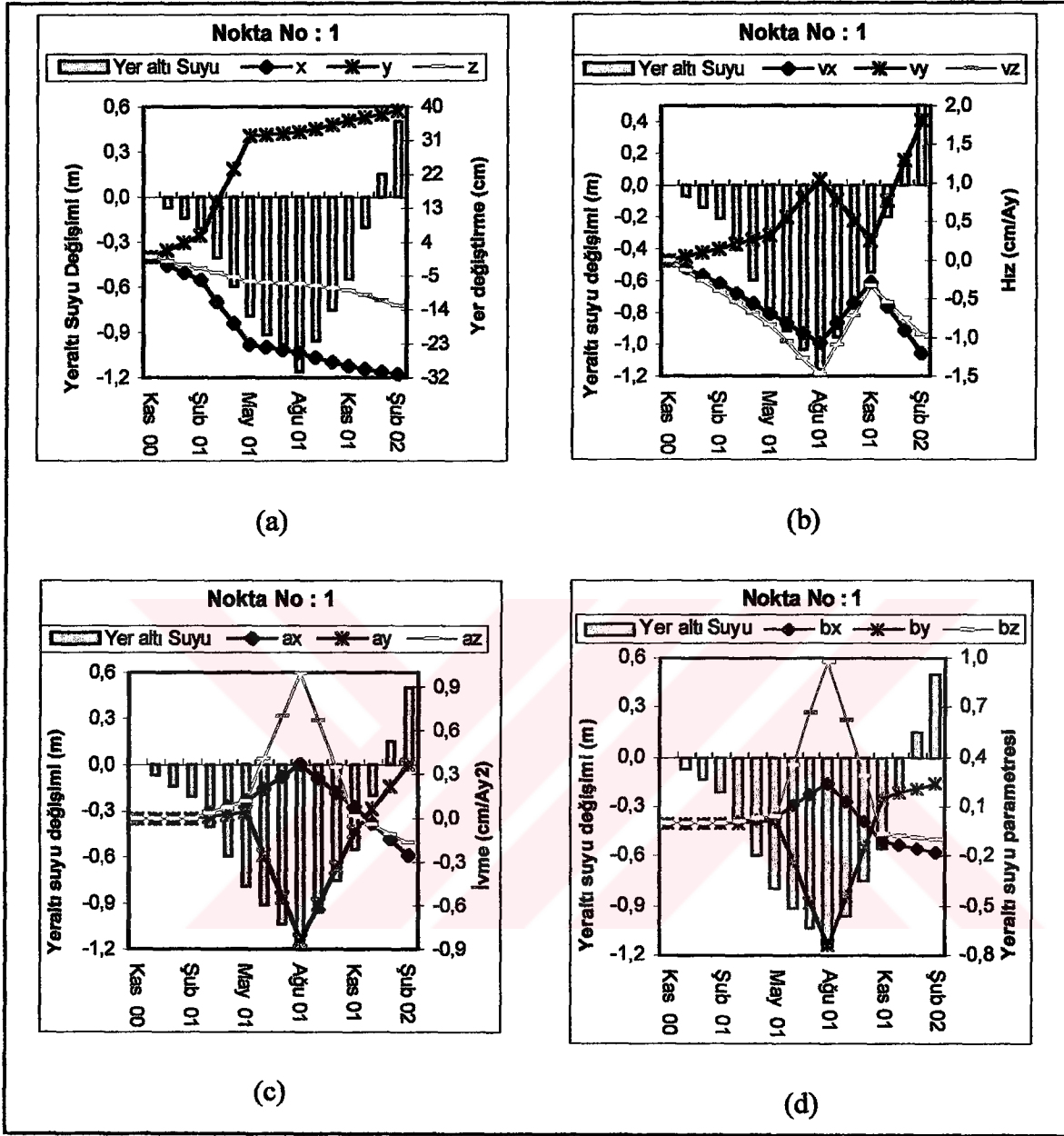
Şekil 100. Kas.00-Ağu.01-Kas.01 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareket hızları



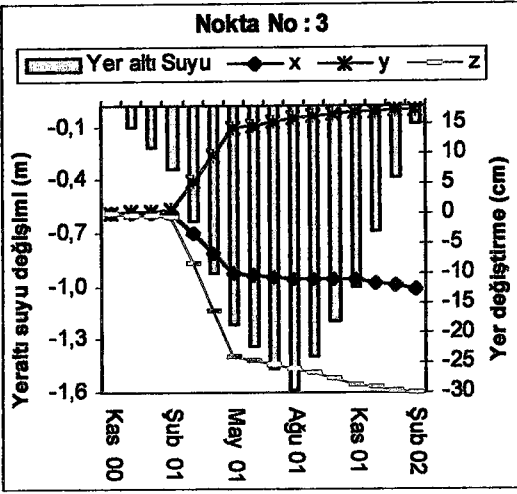
Şekil 101. Kas.00-Kas.01-Şub.02 noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareketleri



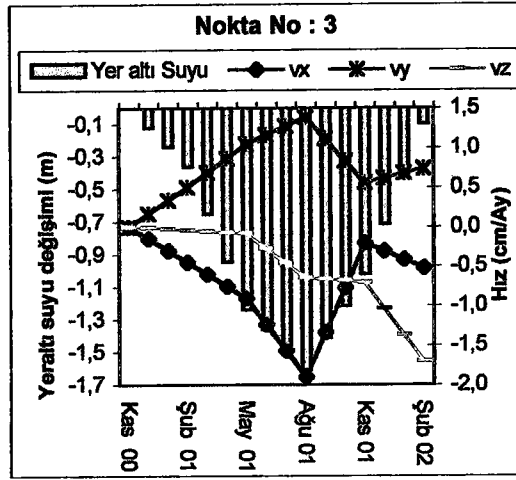
Şekil 102. Kas.00-Kas.01-Şub.02 periyodunda noktaların dinamik modelle belirlenmiş sırasıyla x, y ve z yönündeki hareket hızları



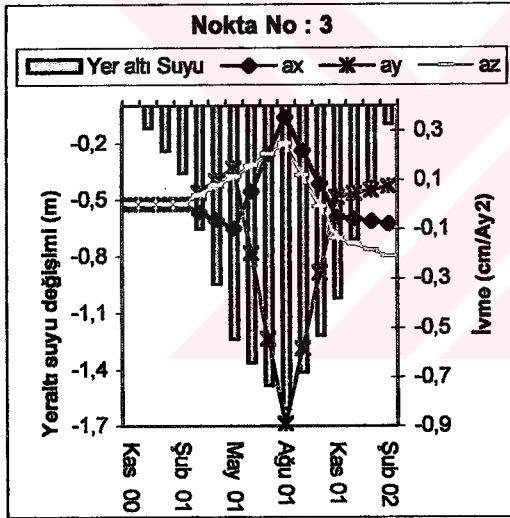
Şekil 103. 1 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



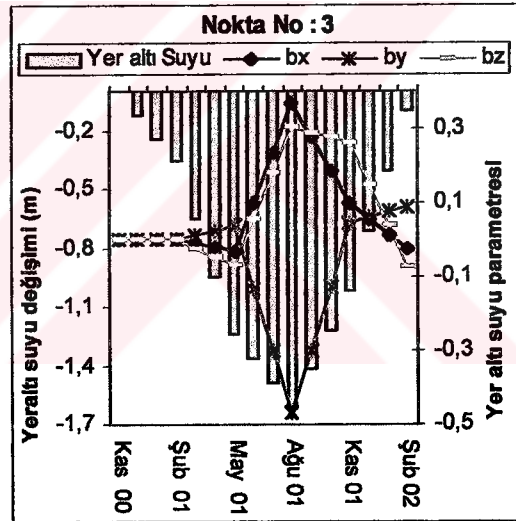
(a)



(b)

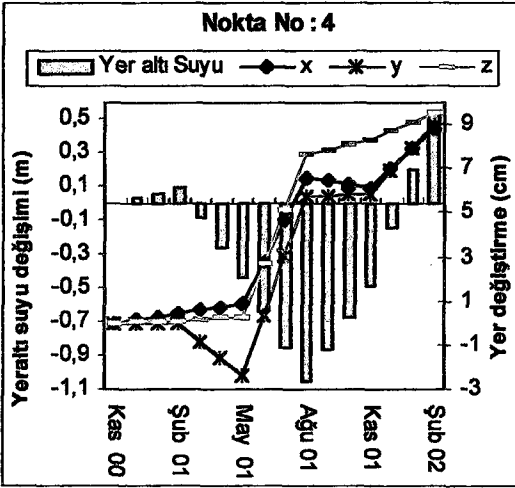


(c)

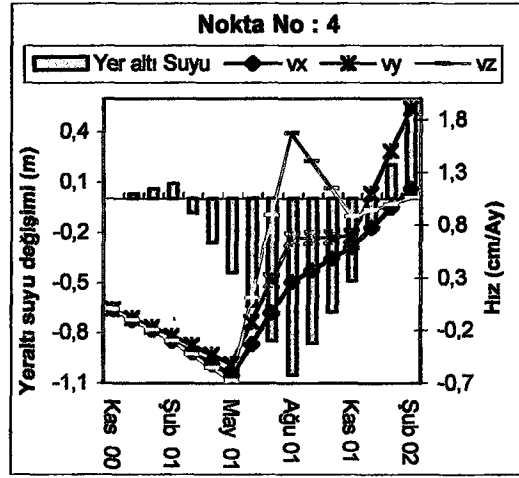


(d)

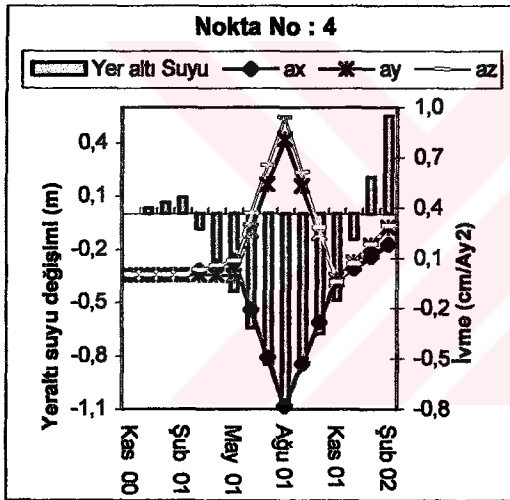
Şekil 104. 3 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



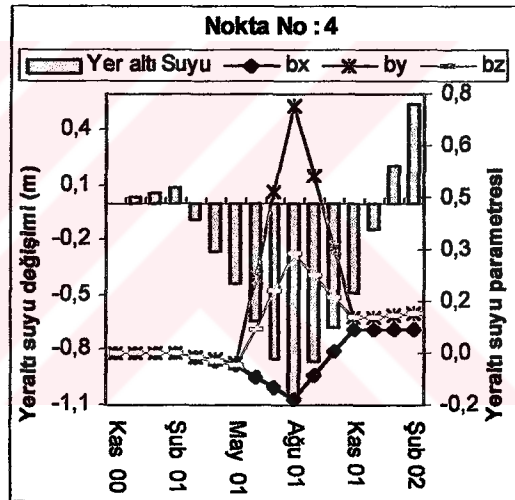
(a)



(b)

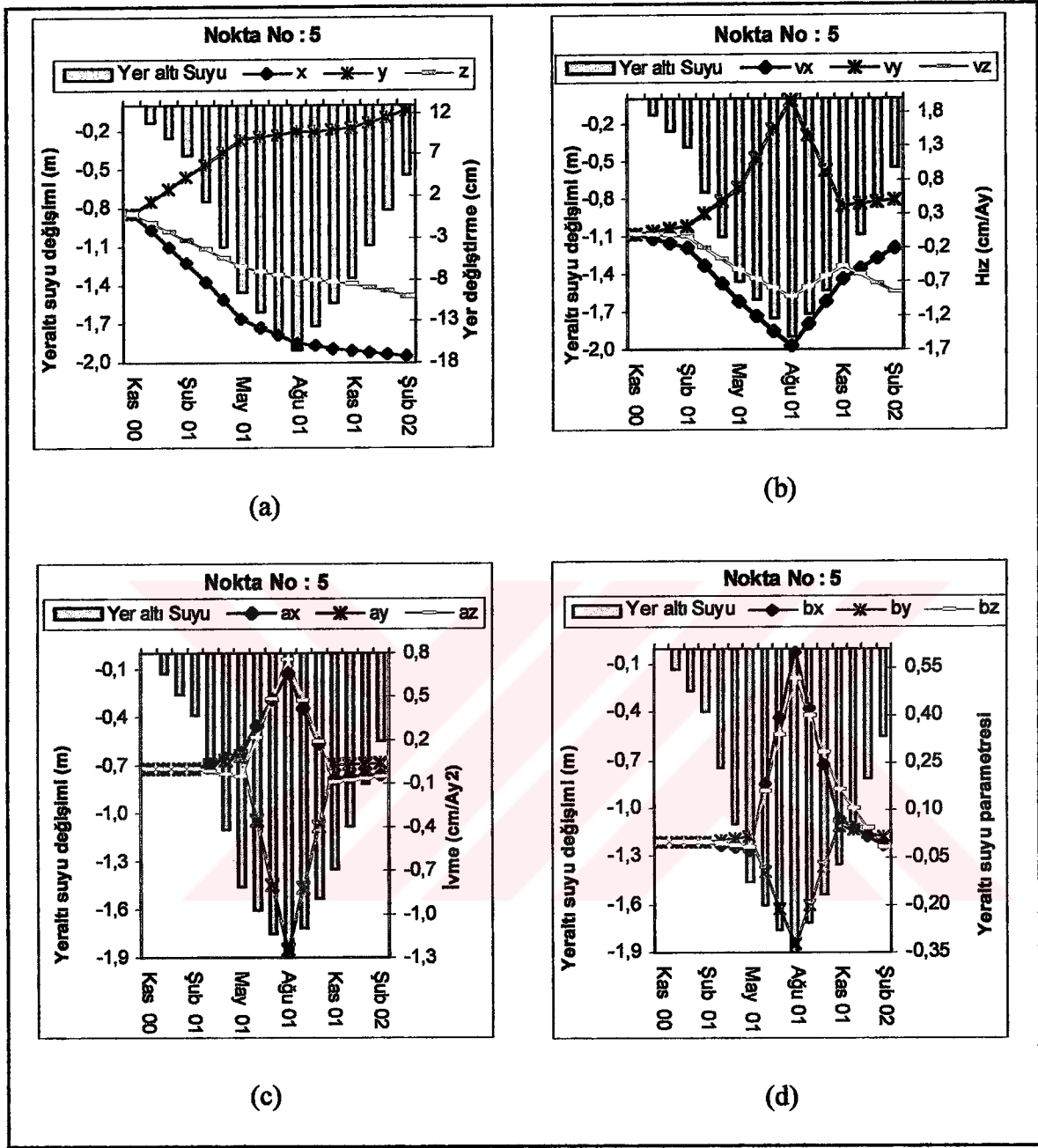


(c)

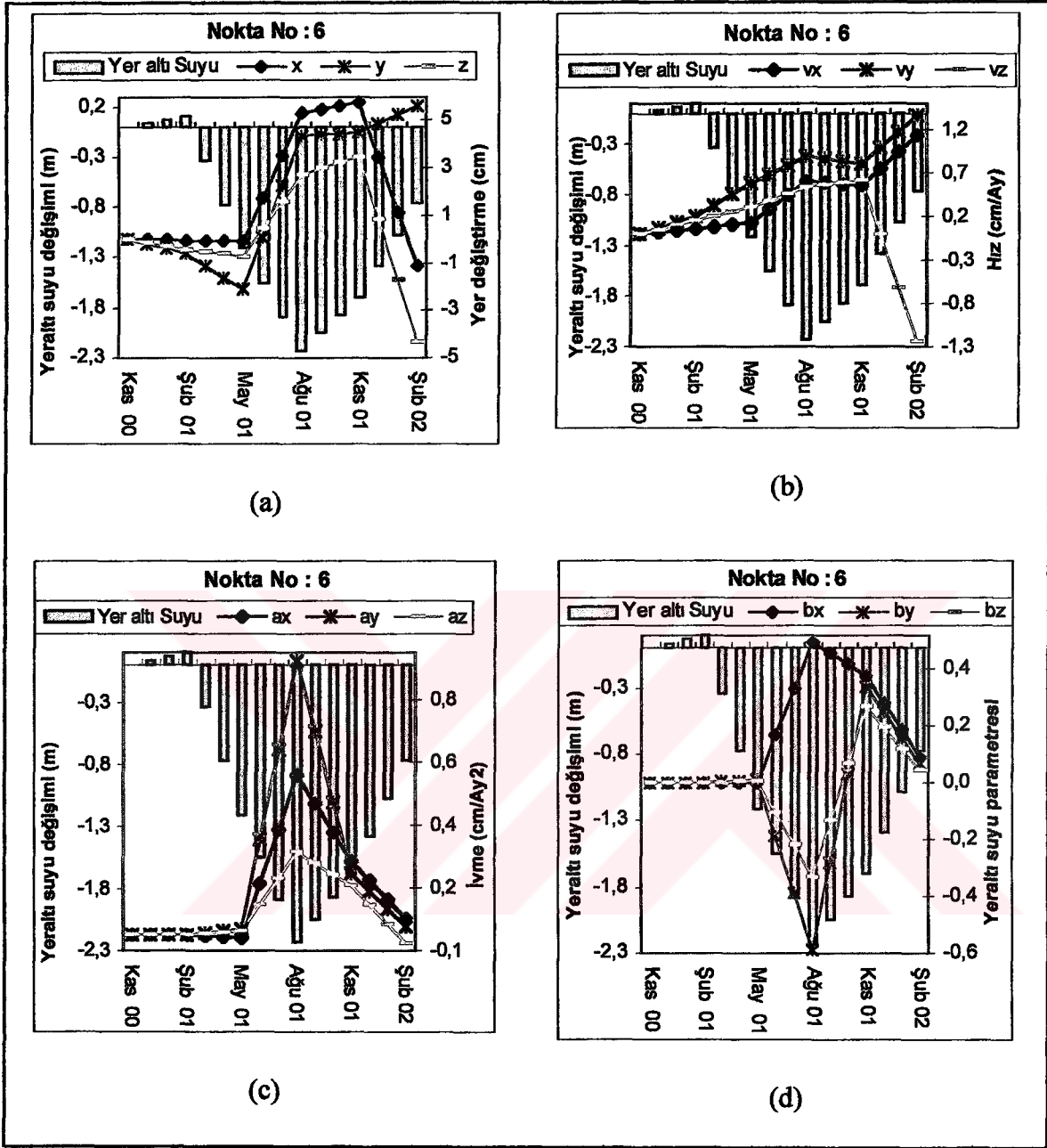


(d)

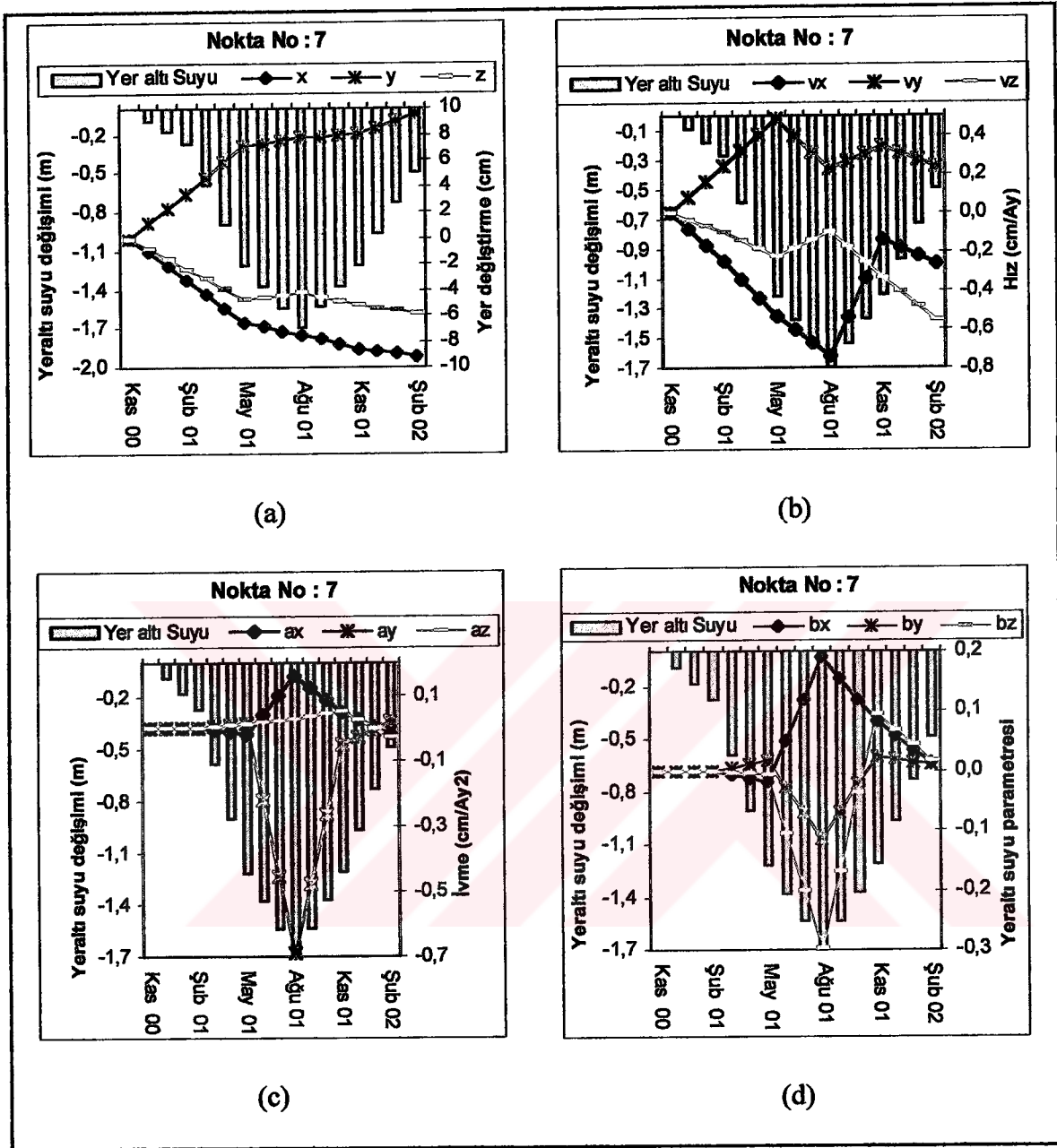
Şekil 105. 4 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



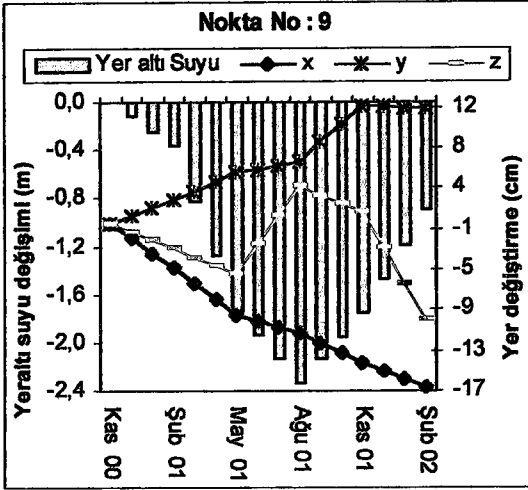
Şekil 106. 5 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



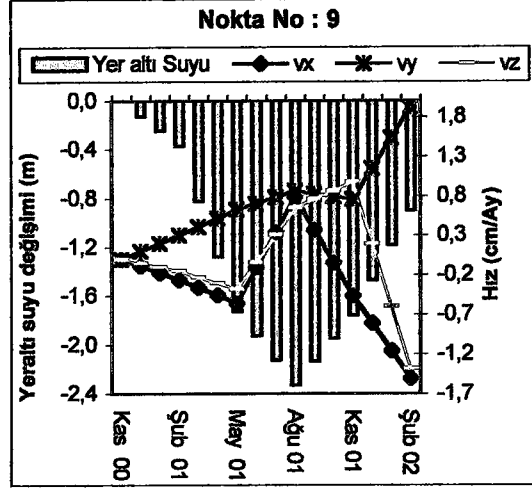
Şekil 107. 6 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



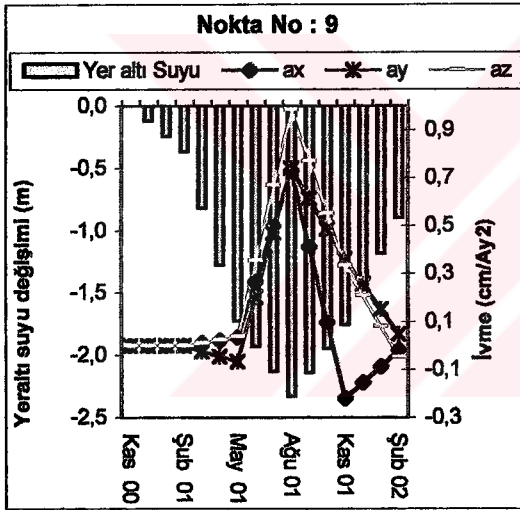
Şekil 108. 7 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



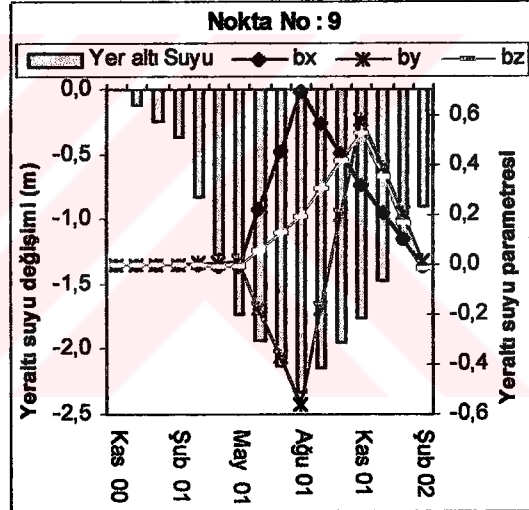
(a)



(b)

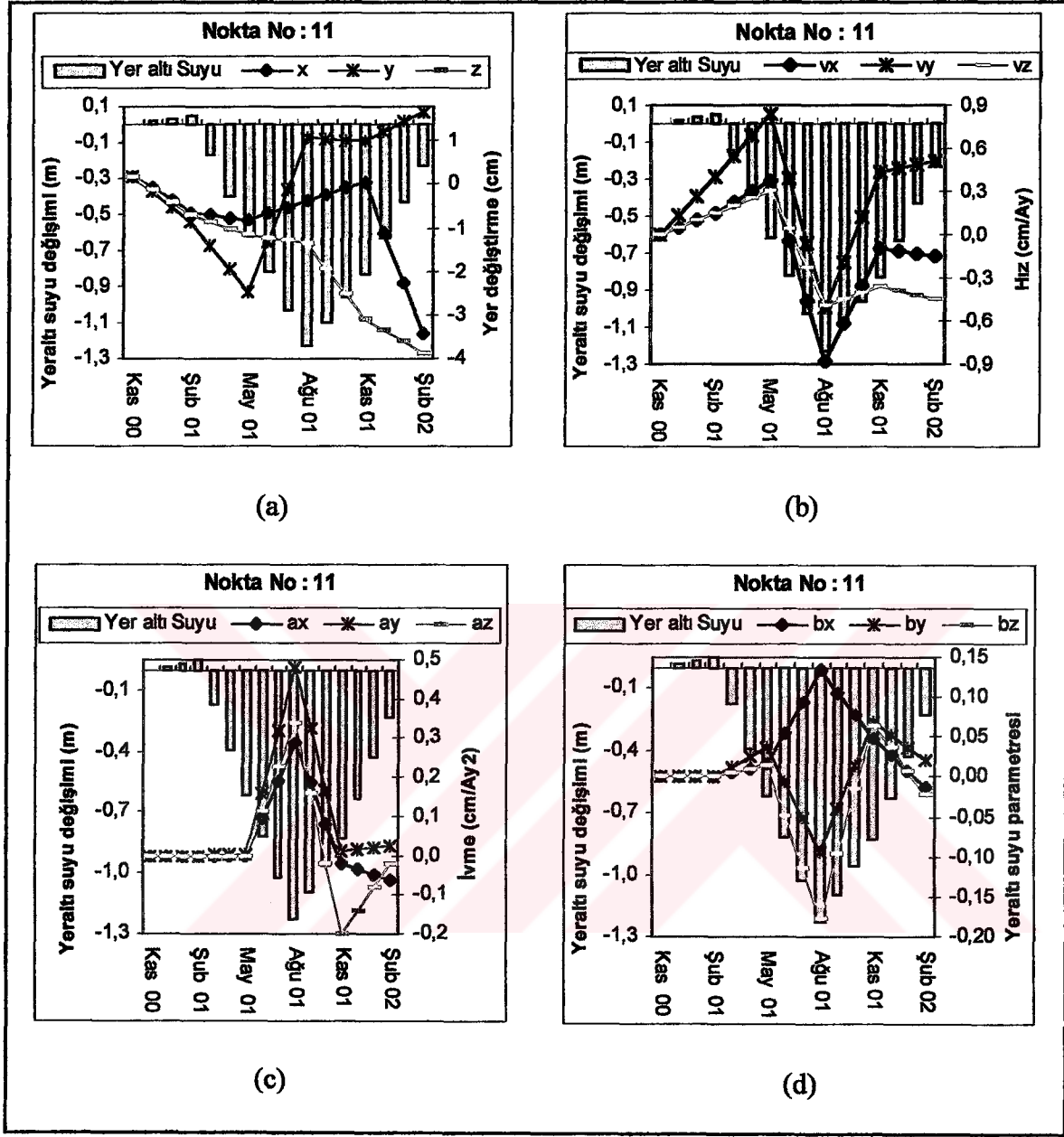


(c)

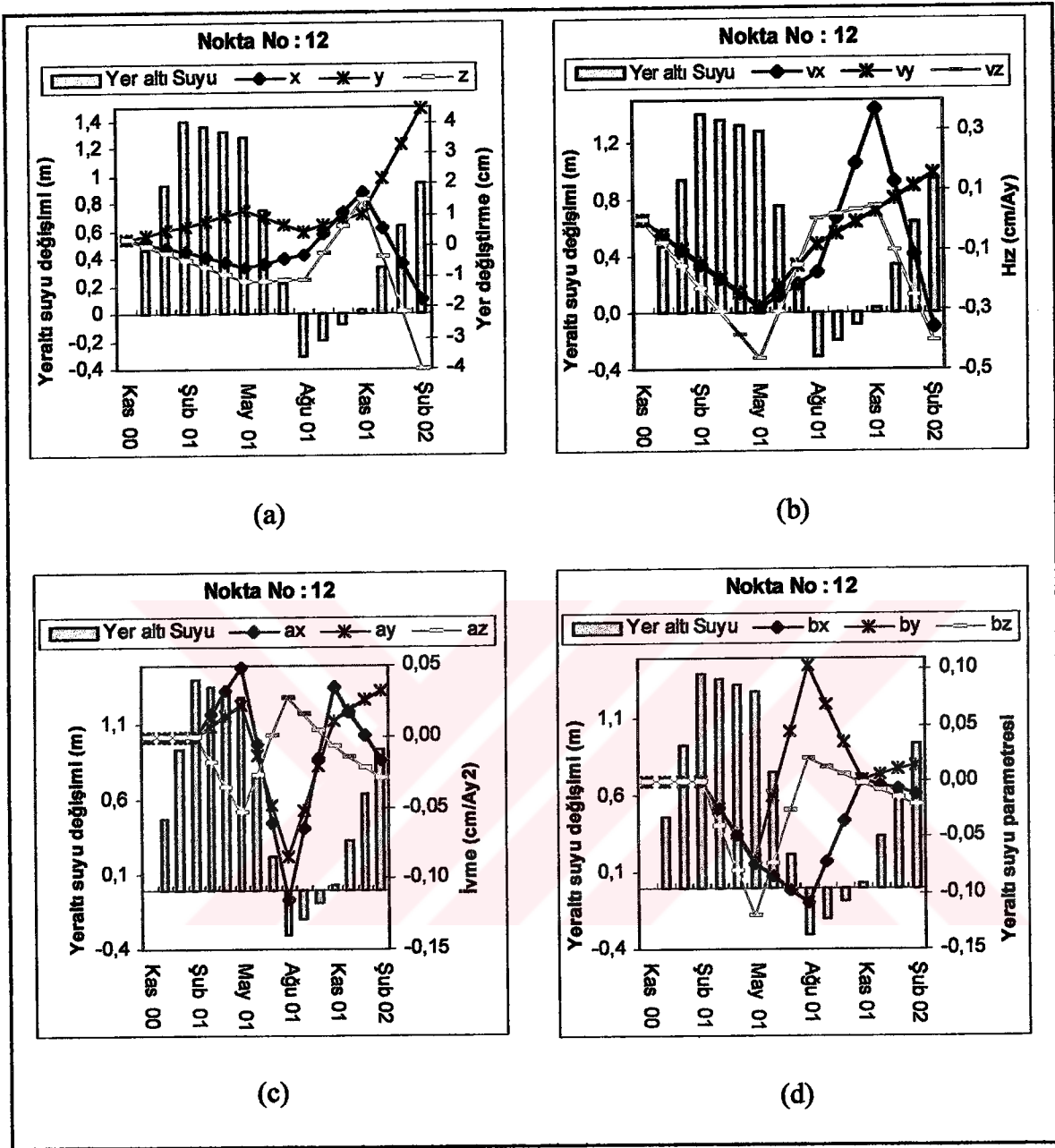


(d)

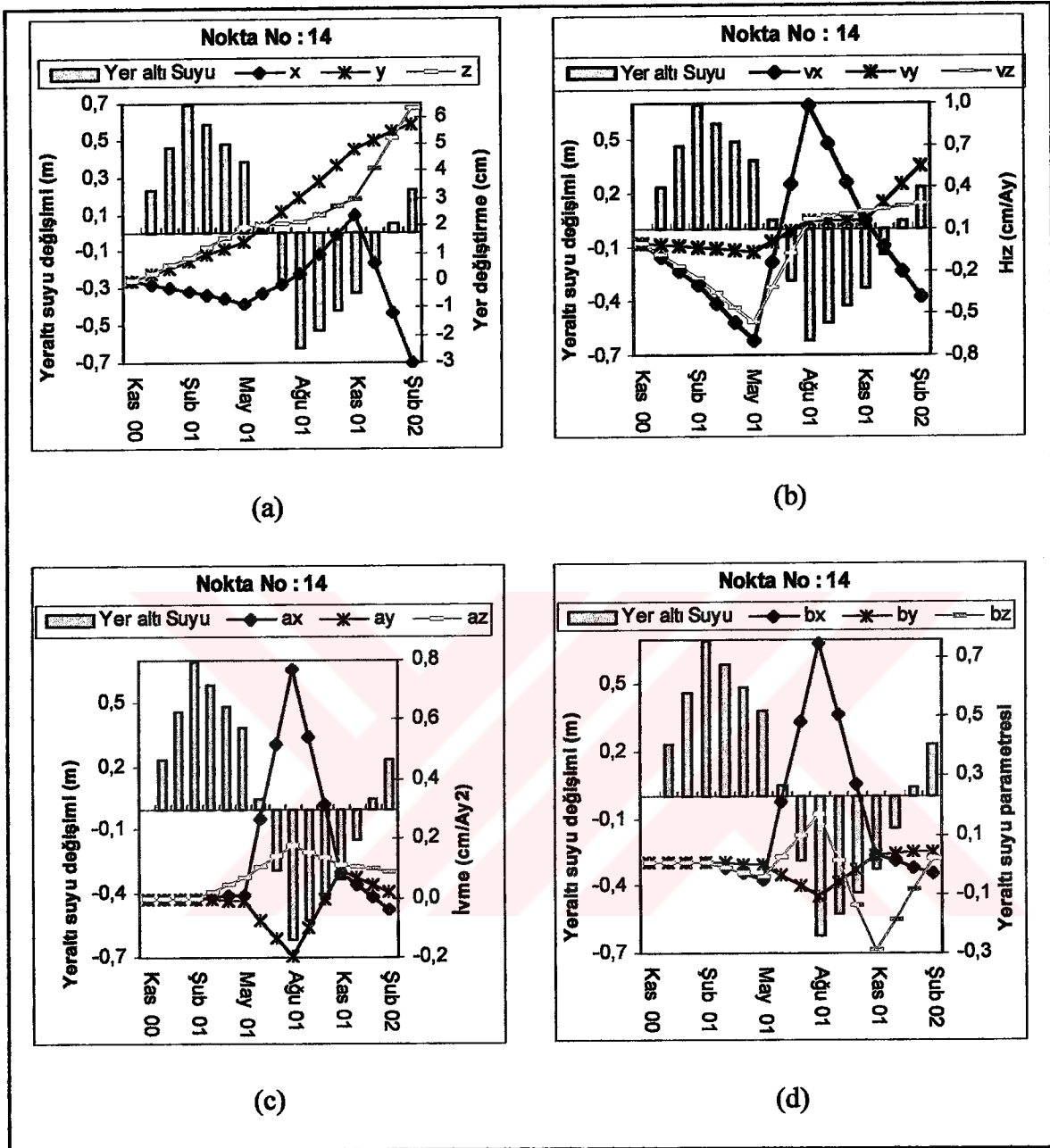
Şekil 109. 9 nolu noktanın dinamik modelde hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



Şekil 110. 11 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



Şekil 111. 12 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi



Şekil 112. 14 nolu noktanın dinamik modelle hesaplanmış a) ivme-yer altı suyu ilişkisi, b) hız-yer altı suyu ilişkisi, c) ivme-yer altı suyu ilişkisi, d) yer altı suyu parametresi-yer altı suyu ilişkisi

3.1.3.2. Dinamik Yüzey Modeli İle Deformasyon Analizi

Bu çalışmada, (1.6.3.3.) bölümünde anlatıldığı biçimde oluşturulan dinamik yüzey modeliyle,

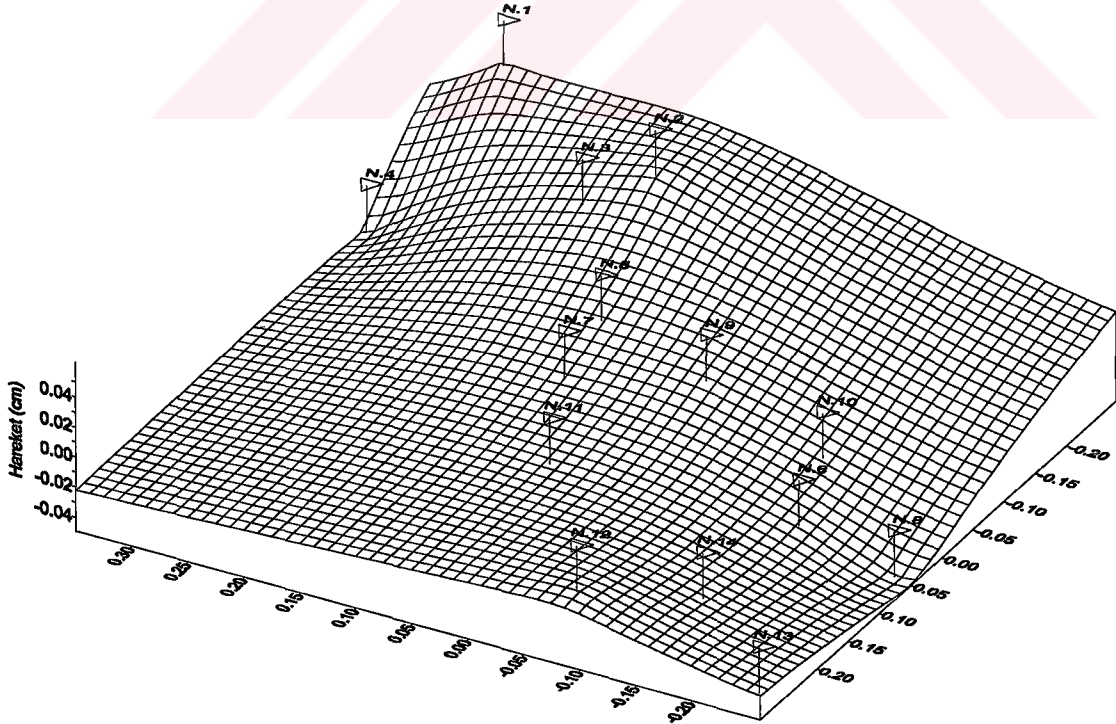
- Kasım 2000 – Şubat 2001 – Mayıs 2001
- Şubat 2001 – Mayıs 2001 – Ağustos 2001
- Mayıs 2001 – Ağustos 2001 – Kasım 2001
- Ağustos 2001 – Kasım 2001 – Şubat 2002

periyotlarında bölgenin hareket yüzeyleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Bölgenin hareket yüzeyi, (110) eşitliğinde verilen dinamik yüzey polinomu ile belirlenmiştir. (110) bağıntısında verilen modelde dengeli koordinatlar ölçü, koordinat bilinmeyenleri ve polinom katsayıları da bilinmeyenlerdir. Bu modelde polinom katsayıları (q), genişletilmiş fonksiyonel modelin testine göre adım adım hesaplanmıştır.

Bölgenin hareket yüzeyi katsayıları, model hipotezi ve genişletilmiş modelin testi sonuçları ile katsayıların anlamlılığına ait kararlar tüm periyotlar için Tablo 21-24'de verilmiştir. Hesaplanan tüm periyotlarda yapılan testler sonucunda Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 ve Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyotları için 4. derece yüzey, Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 ve Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyotları için 5. derece yüzey anlamlı bulunmuş ve bu hareket yüzeyleri Şekil 143-146'da verilmiştir.

Tablo 21. Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

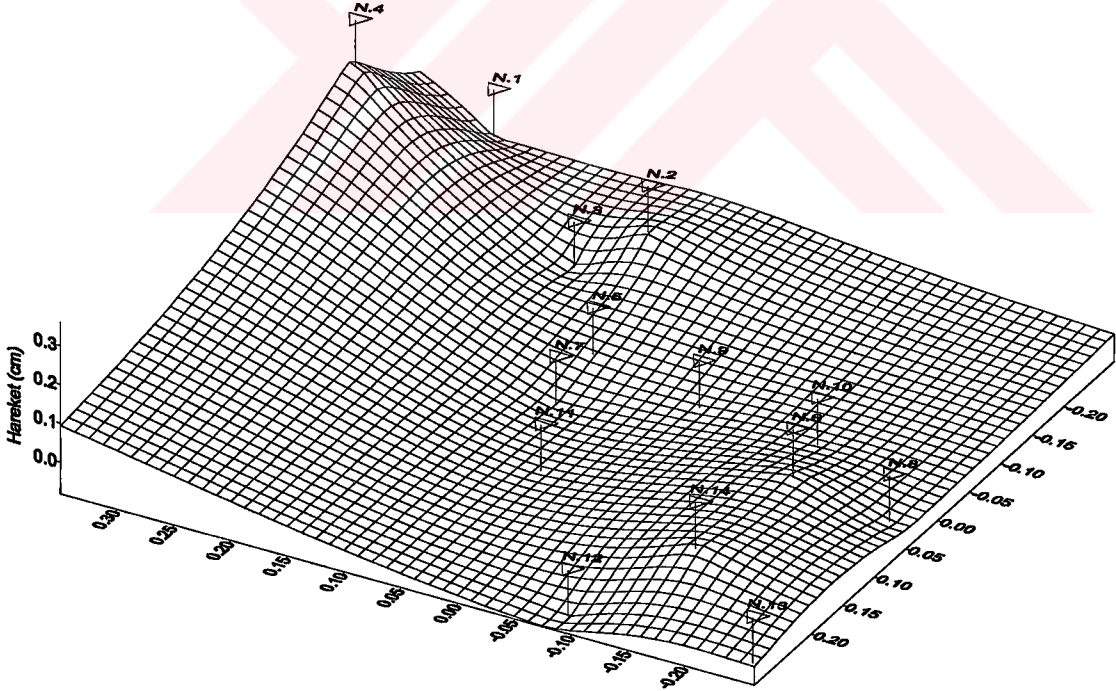
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	T _g	q _g	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	0.00003	1.001	1.810	Geçerli	186.18	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	0.04552	1.001	1.810	Geçerli	44.16	11.98	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.16382	1.001	1.810	Geçerli	58.46	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-0.68661	1.001	1.810	Geçerli	19.84	5.37	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	-0.28467	1.001	1.810	Geçerli	15.11	4.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	0.56056	1.001	1.810	Geçerli	17.20	3.90	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	-0.34762	1.001	1.810	Geçerli	6.862	3.53	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.09018	1.001	1.810	Geçerli	7.511	3.27	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	0.05923	1.001	1.810	Geçerli	8.399	3.07	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	-0.13241	1.001	1.810	Geçerli	9.301	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	-0.11153	1.001	1.810	Geçerli	8.215	2.81	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.00547	1.001	1.810	Geçerli	7.226	2.71	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.04299	1.001	1.810	Geçerli	6.555	2.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	-0.06344	1.001	1.810	Geçerli	5.736	2.56	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.06382	1.001	1.810	Geçerli	5.327	2.51	Model Genişletilebilir	Anlamlı
16	q ₅₀	-0.05296	1.001	1.810	Geçerli	4.662	2.47	Model Genişletilebilir	Anlamlı
17	q ₄₁	0.01858	1.001	1.810	Geçerli	3.900	2.30	Model Genişletilebilir	Anlamlı
18	q ₃₂	-0.00187	1.001	1.810	Geçerli	2.997	2.26	Model Genişletilebilir	Anlamlı
19	q ₂₃	-0.00586	1.001	1.810	Geçerli	2.664	2.22	Model Genişletilebilir	Anlamlı
20	q ₁₄	0.00958	1.001	1.810	Geçerli	1.997	2.08	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 113. Kasım 2000–Şubat 2001–Mayıs 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi

Tablo 22. Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

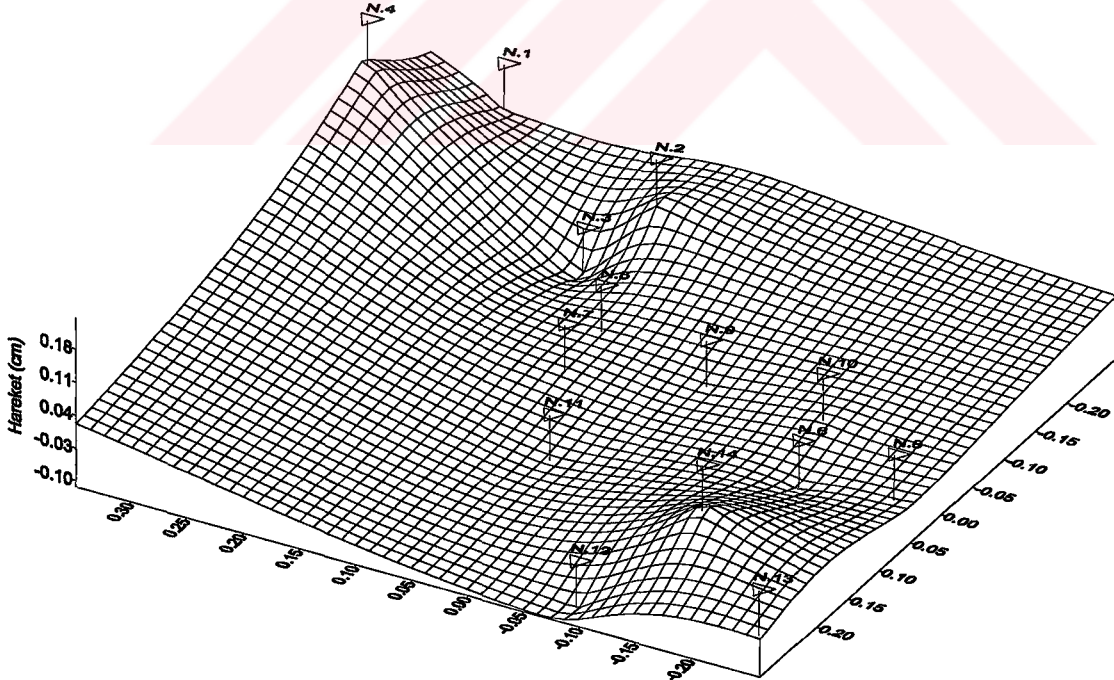
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	Tg	q _e	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	-0.00002	1.001	1.810	Geçerli	51.66	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	-1.23647	1.014	1.810	Geçerli	11.44	4.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.62174	1.015	1.810	Geçerli	10.24	3.86	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-1.35126	1.026	1.810	Geçerli	9.06	3.41	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	0.05744	1.026	1.810	Geçerli	8.99	3.12	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	1.04428	1.042	1.810	Geçerli	8.82	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	-0.68216	1.044	1.810	Geçerli	7.06	2.76	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.22628	1.044	1.810	Geçerli	6.26	2.64	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	-0.06592	1.044	1.810	Geçerli	6.09	2.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	0.07001	1.044	1.810	Geçerli	5.29	2.47	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	-0.21811	1.044	1.810	Geçerli	4.22	2.40	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.06485	1.045	1.810	Geçerli	4.19	2.34	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.01876	1.045	1.810	Geçerli	3.31	2.30	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	-0.06652	1.045	1.810	Geçerli	2.43	2.25	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.11335	1.044	1.810	Geçerli	2.31	2.22	Model Genişletilebilir	Anlamlı
16	q ₅₀	0.11335	1.044	1.810	Geçerli	2.10	2.18	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 114. Şubat 2001–Mayıs 2001–Ağustos 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi

Tablo 23. Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

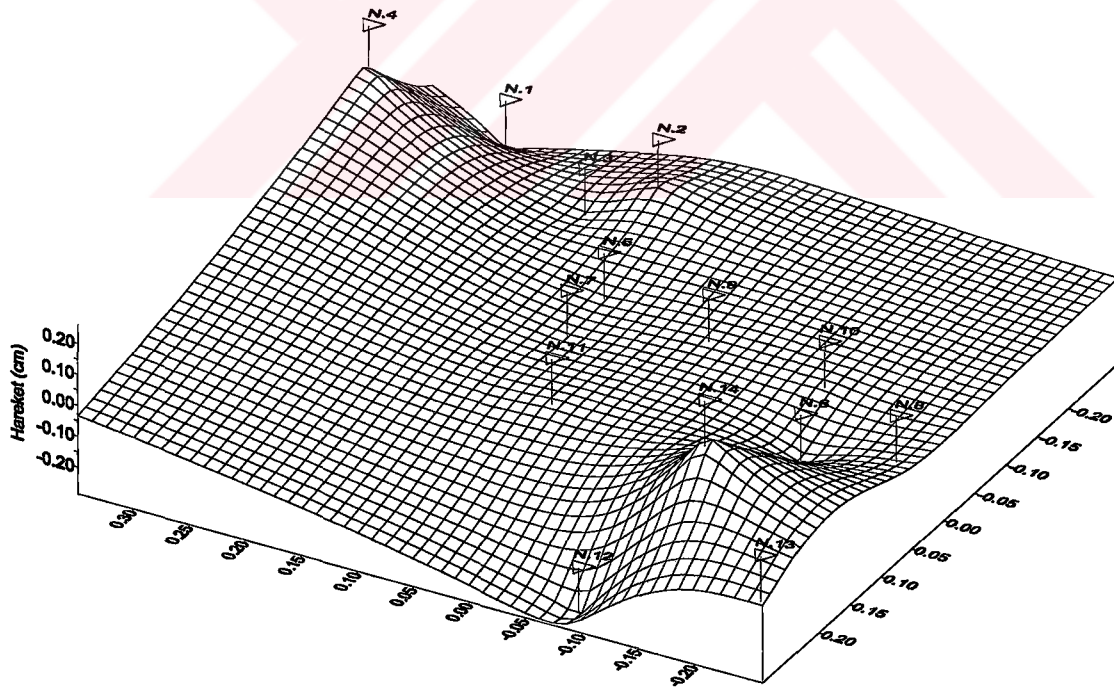
Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	Tg	q _g	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	-0.00001	1.001	1.816	Geçerli	51.43	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	-0.25192	1.008	1.816	Geçerli	27.20	11.98	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.83129	1.003	1.816	Geçerli	21.62	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-2.33160	1.008	1.816	Geçerli	17.19	3.41	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	0.36047	1.014	1.816	Geçerli	15.13	3.12	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	1.64248	1.035	1.816	Geçerli	14.37	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	-1.09792	1.035	1.816	Geçerli	13.02	2.76	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.14913	1.037	1.816	Geçerli	10.65	2.64	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	0.24940	1.042	1.816	Geçerli	9.34	2.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	-0.33812	1.035	1.816	Geçerli	8.76	2.47	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	-0.37423	1.035	1.816	Geçerli	7.25	2.40	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.11790	1.035	1.816	Geçerli	6.74	2.34	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	0.02445	1.036	1.816	Geçerli	5.08	2.30	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	-0.10381	1.036	1.816	Geçerli	4.33	2.25	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	0.17940	1.039	1.816	Geçerli	3.99	2.22	Model Genişletilebilir	Anlamlı
16	q ₅₀	-0.15612	1.038	1.816	Geçerli	3.22	2.18	Model Genişletilebilir	Anlamlı
17	q ₄₁	0.04841	1.035	1.816	Geçerli	2.31	2.15	Model Genişletilebilir	Anlamlı
18	q ₃₂	-0.21814	1.040	1.816	Geçerli	1.85	2.13	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 115. Mayıs 2001–Ağustos 2001–Kasım 2001 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi

Tablo 24. Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda dinamik yüzey modeli ile hesaplanan hareket yüzeyi katsayıları ve istatistik test sonuçları

Polinom Katsayıları			Model Hipotezi			Genişletilmiş Modelin Testi			Katsayılar İçin Karar
			T	q	Karar	Tg	qg	Model İçin Karar	
1	q ₀₀	0.00003	1.001	1.810	Geçerli	48.72	43.88	Model Genişletilebilir	Anlamlı
2	q ₁₀	0.46109	1.002	1.810	Geçerli	16.44	11.98	Model Genişletilebilir	Anlamlı
3	q ₀₁	-0.14301	1.001	1.810	Geçerli	14.66	7.16	Model Genişletilebilir	Anlamlı
4	q ₂₀	-0.03493	1.001	1.810	Geçerli	10.25	5.37	Model Genişletilebilir	Anlamlı
5	q ₁₁	1.02942	1.003	1.810	Geçerli	9.33	4.55	Model Genişletilebilir	Anlamlı
6	q ₀₂	-2.78429	1.011	1.810	Geçerli	8.63	3.90	Model Genişletilebilir	Anlamlı
7	q ₃₀	0.30804	1.011	1.810	Geçerli	7.62	3.53	Model Genişletilebilir	Anlamlı
8	q ₂₁	0.12776	1.011	1.810	Geçerli	6.85	3.27	Model Genişletilebilir	Anlamlı
9	q ₁₂	-0.24350	1.011	1.810	Geçerli	6.03	3.07	Model Genişletilebilir	Anlamlı
10	q ₀₃	0.16437	1.011	1.810	Geçerli	5.70	2.92	Model Genişletilebilir	Anlamlı
11	q ₄₀	0.08637	1.012	1.810	Geçerli	4.77	2.81	Model Genişletilebilir	Anlamlı
12	q ₃₁	0.00813	1.011	1.810	Geçerli	4.55	2.71	Model Genişletilebilir	Anlamlı
13	q ₂₂	-0.07434	1.011	1.810	Geçerli	3.59	2.63	Model Genişletilebilir	Anlamlı
14	q ₁₃	0.12681	1.011	1.810	Geçerli	2.97	2.56	Model Genişletilebilir	Anlamlı
15	q ₀₄	-0.21263	1.011	1.810	Geçerli	2.76	2.51	Model Genişletilebilir	Anlamlı
16	q ₅₀	0.65214	1.012	1.810	Geçerli	1.94	2.47	Model Genişletilemez	Anlamsız



Şekil 116. Ağustos 2001–Kasım 2001–Şubat 2002 periyodunda bölgenin dinamik hareket yüzeyi

4. İRDELEME

Heyelan için bir dinamik tek nokta ve bir dinamik hareket yüzeyi modellerinin oluşturulmasında;

- arazinin zemin yapısını, hareketin nedeninin belirlemek ve ölçmek için jeolojik ve jeofizik çalışmalar,
- ölçü periyot zaman aralıklarının belirlenmesi için meteorolojik çalışmalar,
- hareketin büyüklüğünü, yönünü, hızını, ivmesini ve hareketin nedeninin harekete olan etkisini belirleyebilmek için jeodezik çalışmalar

yapılmıştır.

Jeolojik çalışmalar, arazinin zemin yapısını tanımak, oluşan heyelanın tipini ve nedenlerini saptayarak heyelan mekanizmasını ortaya koyabilmek için yapılmıştır. Jeolojik çalışmalar sonucu, bölgedeki heyelanın tipinin Şekil 16'da görüldüğü gibi yavaş akma (creep) şeklinde olduğu, heyelanın en önemli nedeninin de yer altı suyu değişimleri olduğu belirlenmiştir. Bölgedeki heyelan tipi dikkate alınarak hareketlerin, jeodezik ağ yöntemiyle belirlenmesine karar verilmiştir. Jeodezik deformasyon ağının tasarlanabilmesi için bölgedeki heyelan sınırlarının güncel durumlarının saptanmasına gerek duyulmuştur. Bu nedenle jeolojik çalışmalar sonucu bölgenin jeomorfolojik haritası oluşturulmuştur. Bu haritanın gösterdiği sağlam ve hareketli zemin yapısı dikkate alınarak, heyelan bölgesi ve çevresini kapsayacak biçimde bir jeodezik deformasyon ağı tesis edilmiştir. Jeodezik deformasyon ağında bulunan hareketli noktaların, heyelan hareketlerinin karakteristiklerini, yönlerini ve büyüklüklerini ortaya çıkarılabilecek ve araziye iyi temsil edebilecek yerlerde tesis edilmelerine dikkat edilmiştir. Böylece yamaç boyunca oluşan heyelanın baş, orta ve topuk kısımlarında tesis edilmiş olan jeodezik ağ noktalarıyla daha uygun hareket yorumlaması yapılabilmektedir. Bunların yanı sıra, bölgedeki yüzeysel hareketlerin belirlenmesi amacıyla da jeolojik çalışmalar yapılmış ve bölgede iki farklı yüzeysel hareket (SS1 ve SS2) belirlenmiştir (Şekil 23). Bu yüzeysel hareketlerin, etki alanları içinde olan noktaların hareketlerini yükselme, alçalma ve dönme şeklinde etkiledikleri saptanmıştır. Bu nedenle nokta hareketlerinin yorumlanması aşamasında, yüzeysel hareketlerin noktalara olan etkilerinin dikkate alınmasının gerekli olduğu, böylece hareketler konusunda daha gerçekçi kararlar verilebileceği görülmüştür.

Dinamik deformasyon modellerinin oluşturulmasında gerekli olan yer altı suyu değişimlerinin belirlenebilmesi için de bölgede jeolojik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu açılmış olan üç sondaj kuyusunda (SK1, SK2, SK3) periyodik olarak yer altı suyu seviyelerinin ölçümleri yapılmıştır. Bu kuyularda yapılan ölçüler sonucu, yer altı suyu seviyelerinin, yağışların az olduğu yaz aylarında alçaldığı, yağışların fazla olduğu bahar ve kış aylarında yükseldiği görülmüştür. Sondaj kuyusu açılarak yer altı suyu seviyelerinin ölçülmesi yöntemi ekonomik değildir. Ayrıca bu kuyuların zaman içinde heyelan etkisi altında bozulmadan korunmaları da oldukça zordur.

Arazide bulunan mevcut sondaj kuyularının, jeodezik ağ noktalarının yer altı suyu seviyelerini belirlemek için yeterli sayıda olmadıkları görülmüştür. Arazide yeni sondaj kuyusu açmanın pahalı ve kuyuların korunmalarının da güç olmasından dolayı, yer altı suyu seviyelerinin belirlenmesinde uygulanması daha kolay olan jeofizik yöntemlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla arazinin uygun görülen yerlerinde yer altı suyu seviyelerini ölçmek için jeofizik noktalar (JFZ1, JFZ2) seçilmiştir. Bu noktalarda, bölgedeki heyelan malzemesinin derinliğinin saptanabilmesi ve istenilen her hangi bir noktada yer altı suyu derinliğinin belirlenebilmesi için jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmada, jeofizik yöntemle yer altı suyu seviyesi belirleme işleminin, hızlı, pratik, sondaj kuyusu açma yöntemine göre daha ekonomik ve heyelan nedeniyle oluşan kayma olayından da etkilenmediği görülmüştür.

Bölgede oluşan heyelanın, en fazla yer altı suyu değişiminden etkilemesi ve yer altı suyu seviyesi değişiminin de yağışla ilişkili olmasından dolayı meteorolojik çalışmalarla bölgenin yağış rejiminin belirlenmesine karar verilmiştir. Bu bağlamda bölgeye ait 10 yıllık meteorolojik bilgiler (yağış ve sıcaklık) incelenmiş ve grafikleri çizilerek bölgenin fazla ve az yağış aldığı aylar belirlenmiştir. Bu grafikler yorumlanarak, ölçüler yağış öncesi ve yağış sonrası aylarda yapılacak şekilde ölçü periyotlarının zamana göre dağılımına ve ölçü periyot aralığına karar verilmiştir. Ayrıca ölçü periyot zamanlarının uygunluğu, ölçü yapılan yıllardaki meteorolojik bilgilerle denetlenmiştir.

Heyelanı izlemek için tesis edilmiş olan jeodezik deformasyon ağında, belirlenen ölçü zamanlarında 2000-20002 yılları arasında altı periyotluk GPS ölçüleri yapılmıştır. Ölçü yapılacak günlerdeki uygun ölçü saatleri Geogenius-2000 yazılımının Planning modülü yardımıyla belirlenmiştir. Tüm ölçü periyotlarında uydu sayısı ve DOP dağılımında çok büyük değişiklikler gözlenmemiştir. Bu nedenle ölçü yapılan tüm periyotlarda Tablo 4'de verilen GPS ağ ölçü planı uygulanmıştır. Her periyotta yapılan

GPS ölçüleri değerlendirilerek bağıl koordinatlar ile varyans-kovaryans matrisleri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak ağ serbest dengelenmiş ve uyuşumsuz ölçüler belirlenmiştir. Her periyottaki ölçülere ve dengelemeye ait istatistik bilgiler Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda verilen test büyüklüğü (T) ve F-tablo (q) değerleri karşılaştırıldığında tüm periyotlar için model hipotezinin geçerli olduğu yani diğer bir deyişle dengeleme sonucunda hesaplanan nokta koordinatları ile varyans-kovaryans matrislerinin deformasyon analizlerinde veri olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Çalışmada oluşturulacak olan dinamik deformasyon modelleri için gerekli olan öncül bilgileri sağlamak ve dinamik model sonuçlarının karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla statik ve kinematik modellerle de hareketler belirlenmiştir. Statik modelle deformasyon analizi için sadece jeodezik ölçülerden elde edilen veriler yeterlidir. Bu çalışmada, statik modelle yapılan deformasyon analizinde ayırma gücü yüksek olan ve hareketli nokta ile hareket büyüklüklerinin kolayca saptandığı θ^2 -Ölçütü yöntemi kullanılmıştır. İlk ölçü periyodu olan Kasım 2000 başlangıcına göre yapılan deformasyon analiz sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Tablo genel olarak irdelendiğinde, sabit zeminlere tesis edilen 2, 8, 10 ve 13 numaralı noktalarda deformasyon saptanmadığı, hareketli zeminlere tesis edilen 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda anlamlı hareketler gözlemlendiği görülebilmektedir. Bu yöntemle, 1, 3, 4, 5, ve 7 numaralı noktalarda x, y ve z yönlerinde sürekli artan bir hareket olduğu saptanmıştır. Yalnız 4 numaralı noktanın x ve z koordinatlarındaki hareketlerin diğer noktaların ters yönünde olduğu gözlenmiştir. Bu noktanın heyelan oluşan bölgenin dışında olduğu ve başka etkilerden dolayı bu şekilde hareket ettiği sonucuna varılmıştır. 6, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda heyelan morfolojisi ve yüzeysel hareketlerin bir takım etkilerinden dolayı yükselme, alçalma ve dönme şeklinde hareketler görülmüştür.

Yamaç üzerinde bulunan noktaların tüm periyotlarda saptanan hareketlerinin eğim yönündeki davranışları izleyebilmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 26-30). Bu şekillere bakıldığında, tüm yönlerde hareketin heyelanın baş kısmından topuk kısmına doğru azalan biçimde ortaya çıktığı gözlenmiştir. Topuk kısmındaki hareketin azlığının, Trabzon-Maçka karayolunun ve Trabzon'un su ihtiyacını karşılayan su boru hattının korunması amacıyla tesis edilmiş istinat duvarının hareketi engelleyici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak yamaç eğiminin y yönünde olması nedeniyle bu yönde etkiyen kuvvetlerin istinat duvarını zorladığı da görülmektedir (Şekil 17).

Çalışma alanındaki yıllık yağış miktarının ortalama 1000 mm olması nedeniyle tüm ölçü periyotlarında yağış ile tüm noktaların x, y ve z eksenleri yönündeki hareketleri arasındaki ilişkiyi birlikte görebilmek için Şekil 31-33'deki grafikler çizilmiştir. Noktalardaki yağış-yer değiştirme ilişkileri incelendiğinde tüm periyotlardaki nokta hareketlerinin kış ve bahar aylarında yağışla birlikte arttığı ve yaz aylarında ise duraklama gösterdiği şekillerden açık bir biçimde gözlenmektedir. Buradan yağışın heyelan oluşumunda önemli bir etken olduğu sonucu çıkmaktadır.

Aynı ayrı her noktanın x, y ve z eksenleri yönündeki hareketleri ile yağış arasındaki ilişkileri Şekil 34-43'de verilmiştir. Şekiller ayrıntılı olarak irdelendiğinde heyelan kitlesi üzerinde bulunan hareketli noktaların her birinin etkiyen yüklere karşı farklı geometrik reaksiyonlar verdiği gözlenmektedir.

1 numaralı nokta, tüm periyotlarda ve tüm yönlerde en fazla hareket gözlenen noktadır. Hareketler sürekli artan biçimde ve $-x$, $+y$, $-z$ yönündedir. Şekil 23'de görüldüğü gibi nokta her iki yüzeysel hareketlerin etki alanı dışındadır. Bu nokta yüzeysel hareketlerin başladığı yerin hemen üstünde bulunmaktadır.

3 numaralı nokta Şekil 23'de görüldüğü gibi sadece yüzeysel hareket SS1'in etkisi altındadır. Noktada ki hareketler $-x$, $+y$, $-z$ yönünde ve genelde sürekli artan biçimdedir. Şekil 35'de görüldüğü gibi noktada Mayıs01-Ağustos01 aralığında az da olsa bir yükselme gözlenmiştir. Sonuç olarak SS1'in bu noktanın hareketi üzerindeki etkisinin fazla olduğu açıkça görülmektedir.

4 numaralı nokta her iki yüzeysel hareketin (SS1, SS2) etki alanı dışındadır. Hareketler tüm periyotlarda sürekli artan bir miktarda $+x$, $+y$, $+z$ yönlerinde gerçekleşmiştir. Tablo 6'daki değerlerden ve Şekil 26-30'daki grafiklerden görüldüğü gibi bu nokta heyelan kitlesinin dışında olmasından dolayı, başka dış güçlerden kaynaklanan etkiler nedeniyle beklenenden farklı hareketler yansıtmıştır.

5 numaralı nokta bir toprak kabartısı üzerindedir. Nokta sadece SS1'in etkisi altındadır ve noktadaki hareketler genelde $-x$, $+y$, $-z$ yönündedir. Nokta Kasım00-Mayıs01 periyodu hariç $+y$ yönünde fazla hareket etmemiştir. Ayrıca 3 numaralı noktada olduğu gibi bu noktada da Mayıs01-Ağustos01 aralığında az da olsa bir yükselme gözlenmiştir.

6 numaralı nokta, Şekil 23'de görüldüğü gibi SS1 ve SS2'den zıt yönlerde öteleme ve dönme biçiminde etkilenmiştir. Bundan dolayı heyelan kitlesi üzerinde bulunan noktada beklenenin aksine az hareket belirlenmiştir (Şekil 38).

7 numaralı nokta sadece SS1'in etkisi altında ve eğimli bir yamacın üzerindedir. Nuktada beklenildiği gibi tüm periyotlarda $-x$, $+y$, $-z$ yönlerinde hareket saptanmıştır.

9 numaralı nokta 6 numaralı nokta gibi SS1 ve SS2'den zıt yönlerde öteleme ve dönme biçiminde etkilenmiştir. Hareketler genelde $-x$, $+y$, $-z$ yönündedir. Ancak Şekil 40'da görüldüğü gibi Mayıs01-Ağustos01 aralığında $+x$ ve $+z$ yönünde hareketler gözlenmiştir.

11 numaralı nokta, Şekil 23'de görüldüğü gibi yalnız SS1'den dönme şeklinde etkilenmiştir. Bu nedenle Şekil 41'de de görüldüğü gibi bu noktada beklenenin aksine fazla hareket belirlenmemiştir.

12 Numaralı nokta Trabzon-Maça karayolu kenarında, yolun ve şehrin içme suyu boru hattının zarar görmemesi için inşa edilmiş istinat duvarının üstündedir. Heyelanın istinat duvarına olan etkisini gözleyebilmek için nokta istinat duvarına yakın bir yere tesis edilmiştir. İstinat duvarı, noktanın x , y , z yönünde yapması beklenen hareketlerin ortaya çıkmasını engellemiştir. İstinat duvarının heyelanı kısmen de olsa engellediği Şekil 26-30'daki grafiklerden de açıkça görülebilmektedir. İstinat duvarının, Kasım01-Şubat02 aralığındaki aşırı yağışla birlikte $+y$ yönünde oluşan ani hareketten etkilendiği gözlenmiştir.

14 numaralı nokta Şekil 22'de görüldüğü gibi heyelanın topuk kısmındadır. Nokta SS1 ve SS2'den zıt yönlerde öteleme ve dönme biçiminde etkilenmiştir. Bu nedenle noktada beklenenin aksine daha az hareket saptanmıştır. Şekil 43'de görüldüğü gibi nokta, periyot aralıklarında bazen $-x$, bazen de $+x$ yönünde hareket etmiştir. y ekseni yönünde de beklenildiği gibi artan bir hareket gözlenmiştir. Nokta yükselme eğilimi gösteren bir yere tesis edilmiş olduğundan noktada $+z$ yönünde hareket saptanmıştır.

Çalışmada, statik model uygulamasından sonra, kinematik deformasyon modellerinden olan kinematik tek nokta ve kinematik yüzey modelleriyle de hareketler ve hareket yüzeyleri belirlenmiştir.

Araştırmada, kinematik tek nokta modelinin hareket parametreleri, genişletilmiş modelin testine göre istatistik olarak adım adım test edilerek hesaplanmıştır. Böylece en uygun hareket modeli saptanabilmiş ve ara sonuçlar da elde edilebilmiştir. Her periyoda ait istatistik test sonuçları ve karar verilen en uygun modeller Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü gibi tüm periyotlar için karesel model yani diğer bir deyişle konum+hız+ivme modeli geçerli bulunmuştur. Karar verilen en uygun kinematik tek nokta modellerinden hesaplanan hareket parametrelerinin anlamlılık testleri yapılmış ve hareket

parametreleri ile anlamlılık test sonuçları Tablo 8-11’de verilmiştir. Bu tablolar genel olarak irdelendiğinde, sabit zeminlere tesis edilen 2, 8, 10 ve 13 numaralı noktalarda deformasyon saptanmadığı, hareketli zeminlere tesis edilen 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda anlamlı hareketler gözlemlendiği görülebilmektedir. Statik modelde olduğu gibi bu modelle de 1, 3, 4, 5, 7 numaralı noktalarda x, y ve z yönlerinde sürekli artan ve 6, 9, 11, 12, 14 numaralı noktalarda ise yükselme, alçalma ve dönme şeklinde hareketlerin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 4 numaralı noktada statik modelle belirlenen sıra dışı hareketler bu modelle de saptanmıştır.

Araştırma yapılan yamaç üzerinde bulunan noktaların tüm periyotlarda saptanan kinematik hareketlerinin eğim yönündeki davranışlarını izleyebilmek için grafikler çizilmiştir (Şekil 44-51). Bu şekillerden, noktaların hareket parametre değerlerinin yamacın baş kısmından topuk kısmına doğru azaldıkları görülebilmektedir.

Tüm noktaların bütün periyotlarda belirlenen hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönündeki değişimlerinin yağışla olan ilişkilerini bir arada görebilmek için Şekil 52-60’daki grafikler çizilmiştir. Hız grafikleri periyotlar arasındaki yer değiştirmelerin zamansal davranışının anlaşılabilmesini ve ivme grafikleri ise hareketin artan yada azalan türde olup olmadığının irdelenmesini sağlamışlardır. Bütün hareketli noktaların yağış-hareket parametrelerinin aynı grafikte gösterilmesiyle yağış-deformasyon ilişkisi daha rahat gözlenebilmiştir.

Ayrı ayrı tüm hareketli noktaların hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönündeki değerleri yağışla ilişkilendirilerek aynı grafikte çizilmiş (Şekil 61-90) ve nokta hareket parametreleri aşağıdaki biçimde irdelenmiştir.

1 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 61-63 incelendiğinde, tüm yönlerde geçen zaman içerisinde en fazla hareketin, hızın ve ivmenin bu noktada olduğu gözlenmiştir. Yağışın azalmaya başladığı Mayıs 2001’den sonraki zamanda hareket miktarlarında görülen azalma ile yağışın artmaya başladığı Kasım 2001’den sonraki zamanda görülen artış, hız ve ivme grafiklerinde de gözlenmiştir.

SS1’in etkisi altında bulunan 3 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 64-66 incelendiğinde, her yönde sürekli artan ancak yaz aylarında az da olsa yavaşlayan anlamlı değişimlerin olduğu görülür. Yer değiştirme ve hızların x, y ve z eksenleri yönündeki değişimlerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 64’de görüldüğü gibi noktada, z yönünde alçalma eğiliminde

bir hareket olmasına rağmen Ağustos 2001’de gözlenen yükselmenin yukarıdan akan toprak kitlesinin oluşturduğu kabarma etkisinden ileri geldiği söylenebilir.

4 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 67-69 incelendiğinde, hareketlerin sürekli artış eğiliminde olduğu ve nokta hareket yönlerinin ise statik modeldeki gibi kitle üzerindeki diğer noktalardan farklı olduğu gözlenmiştir. Bu durum, noktanın heyelanın olduğu yüzeysel hareketlerin dışında olması nedeniyle heyelandan çok başka dış güçlerden etkilendiğini göstermektedir.

SS1’in etkisi altında bulunan 5 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 70-72 incelendiğinde, hareketlerde sürekli artış olmasına rağmen Mayıs 2001 ve Kasım 2001 ayları arasında hareket hızlarında bir azalmanın olduğu görülmektedir. Noktanın ivme grafiğinden de ivme değerinin Mayıs 2001 ve Şubat 2002 aralığında x ve z yönlerinde büyüdüğü, y yönünde ise küçüldüğü görülebilmektedir.

SS1 ve SS2’nin etkisi altında bulunan 6 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 73-75 incelendiğinde, noktanın yüzeysel hareketlerin ters yöndeki etkileri altında olduğu görülebilmektedir. yüzeysel hareketlerin ters etkileri nedeniyle noktanın kendi etrafında dönme, alçalma ve yükselme şeklinde hareketler yaptığı grafiklerden izlenebilmektedir.

SS1’in etkisi altında bulunan 7 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 76-78 incelendiğinde, noktada tüm yönlerde hareketlerin arttığı gözlenebilir. Noktanın SS1’den etkileneşinden dolayı y yönündeki hareket parametrelerinde periyodik olarak artış ve azalma gözlenmiştir.

SS1 ve SS2’nin etkisi altında bulunan 9 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 79-81 incelendiğinde, devamlı artış şeklinde beklenen hareketin aksine artan ve azalan şekillerde hareket olduğu gözlenebilir. Bunun nedeni noktanın 6 numaralı nokta gibi yüzeysel hareketlerin ters yönde etkileneşmiş olmasıdır.

SS1’in etkisi altında bulunan 11 numaralı noktaya ait x , y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 82-84 incelendiğinde, bu noktada tüm yönlerde en az hareket belirlendiği görülebilir. Bunun nedeni SS1’in noktayı döndürme şeklinde etkilemiş olmasıdır.

İstinat duvarı üstünde bulunan 12 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 85-87 incelendiğinde, noktada beklenilenden az hareket saptandığı görülebilir. Bunun nedeni istinat duvarının hareketi engellemesidir. Hız ve ivme grafiklerinde ki kararsızlıklar da istinat duvarının heyelana karşı gösterdiği tepkiden kaynaklanmaktadır.

SS1 ve SS2'nin etkisi altında bulunan 14 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız ve ivme değişimlerinin grafiklerini gösteren Şekil 88-90 incelendiğinde, noktanın hareket parametrelerinin y ve z yönünde artan, x yönünde ise artan ve azalan biçimde hareket ettiği gözlenmektedir. Bunun nedeni yüzeysel hareketlerin noktayı ters yönlerde etkilemiş olmasıdır.

Kinematik tek nokta modeliyle elde edilen sonuçlar statik model sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Böylece bu modelle, noktaların hareketlerinin yanı sıra hareketin hız ve ivmeleri zamana bağlı olarak hesaplanabilmiştir. Çalışmada, hareket parametrelerinin hesaplanmasında Kalman-filtreleme tekniği uygulanmıştır. Böylece düzgün ve düzgün olmayan hareketler az sayıda ölçü periyodu kullanılarak belirlenebilmiştir. Bu yöntem, deformasyon davranışını extrapolasyonla genişletip, yeni ölçü bilgileriyle birleştirerek hesap yaptığı için kinematik davranışların sınırsız biçimde extrapolasyonla genişletilmemesi gerekir. Aksi taktirde yanlış sonuçlara varılabilir. Kalman-filtreleme yönteminin kullanıldığı uygulamada hareket parametreleri adım adım hesaplanmıştır. Böylece ara sonuçlar elde edilebilmiş ve bu sonuçlar istatistik testlerle denetlenebilmiştir. Ara sonuçlar yardımıyla noktalardaki hareketin seyrinin izlenebilmesi ve yorumlanabilmesi de sağlanmıştır.

Bölgede oluşan hareket yüzeyini belirlemek amacıyla, kinematik hareket yüzey modeli kullanılmıştır ve bu modelle çeşitli ölçü periyot gruplarında hareket yüzey katsayıları hesaplanmıştır (Tablo 12-15). Bu tablolarda görüldüğü gibi katsayılar, genişletilmiş modelin testine göre adım adım test edilerek hareket yüzeyinin anlamlı katsayıları ve derecesi belirlenmiştir. Tablolarda görüldüğü gibi tüm ölçü periyot grupları için 4. derece yüzey anlamlı bulunmuş ve hareket yüzeyleri çizilmiştir (Şekil 91-94). Şekiller incelendiğinde, 4 ile 14 numaralı noktalarda yükselmelerin, 1, 3, 5, 7, 11 numaralı noktalarda çökmelerin olduğu görülebilir. Bu sonuçlar, statik ve kinematik tek nokta model bulgularıyla uyuşmaktadır.

Hareket yüzey modelleriyle, heyelan sonucu oluşan hareket yüzeyinin zamansal davranışları görsel olarak izlenebilmiştir. Ayrıca ölçülmemiş noktaların hareketlerini

extrapolasyonla belirleme algoritmasını içeren bu modelle bölgede ölçülmemiş her noktanın hareketi de belirlenebilmiştir. Sonuç olarak, heyelan sonucu oluşan hareket yüzeyinin zamansal değişimini görsel olarak izleyebilmek ve hareketleri yorumlayabilmek için kinematik hareket yüzey modeli ile hareket yüzeylerinin belirlenmesi gerekir.

Daha öncede belirtildiği gibi bu araştırmanın temel amacı, heyelana etkiyen dış kuvvetleri de dikkate alan dinamik deformasyon modelini oluşturmaktır. Bu bağlamda hareketler ve hareket yüzeyleri, oluşturulan bir dinamik tek nokta ve bir dinamik yüzey modeliyle belirlenmiştir. Bu modellerin oluşturulmasında statik ve kinematik deformasyon modellerinden elde edilen sonuçlar ön bilgi olarak kullanılmıştır. Hareketi zamana ve etkiyen dış kuvvetlere göre belirleyen dinamik modellerle deformasyon analizi yapabilmek için farklı bilim dallarının beraber çalışması gerekmiştir. Bölgede heyelan hareketinin nedenlerinin neler olduğu jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu saptanmıştır. Yer altı suyu değişimleri bölgede heyelanın en önemli nedeni olarak belirlenmiş ve heyelan için oluşturulan dinamik deformasyon modellerinde fiziksel parametre olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 7’de görüldüğü gibi kinematik tek nokta modelinde her ölçü periyot grubu için en uygun hareket modelinin “konum+hız+ivme” olduğu ve bu modelin de genişletilebileceği saptanmıştı. Başka bir deyişle modelin, heyelana neden olan kuvvetlerden biri ya da birkaçına ait fiziksel parametrelerle genişletilebileceği görülmüştür. Bu durum, çalışma bölgesinde oluşan heyelanın belirlenmesi için kullanılması gereken en uygun modelin, hareketin nedenini de dikkate alan dinamik deformasyon modeli olacağını göstermiştir.

Heyelan için dinamik tek nokta modeli, kinematik tek nokta modelinin etkiyen kuvveti temsil eden yer altı suyu seviye değişim parametresiyle genişletilmesi sonucu oluşturulmuştur. Her ölçü periyot grubu için dinamik tek nokta modeliyle hareket parametreleri hesaplanmıştır. İstatistik testler sonucunda en uygun modelin “konum+hız+ivme+yeraltı suyu” olduğuna karar verilmiştir (Tablo 16). Tablo 16’daki genişletilmiş modelin test sonuçlarından, modelin başka bir fiziksel parametreyle de genişletilebileceği görülebilmektedir. Diğer bir deyişle model, heyelana neden olan yer altı suyu değişimlerine ek olarak heyelana etki eden başka bir fiziksel parametreyle de genişletilebilir. Fakat modelin fazla sayıda parametre ile genişletilmesinde yorumlama hatasının yapılabileceği de unutulmamalıdır.

Dinamik tek nokta modelinden hesaplanan hareket parametrelerinin anlamlılık testleri yapılmış ve hareket parametreleri ile anlamlılık test sonuçları Tablo 17-20'de verilmiştir. Tablolar genel olarak irdelendiğinde bu modelle de sabit zeminlere tesis edilen 2, 8, 10 ve 13 numaralı noktalarda deformasyon saptanmadığı, hareketli zeminlere tesis edilen 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda ise anlamlı hareketler gözlemlendiği görülebilmektedir. Tablolardaki sayısal değerlerden statik ve kinematik model sonuçlarındaki gibi 1, 3, 4, 5, ve 7 numaralı noktalarda x, y ve z yönlerinde sürekli artan bir hareket gözlenmiştir. Statik ve kinematik tek nokta modelinde saptanan 4 numaralı noktadaki sıra dışı hareket bu model sonuçlarında da gözlenmiştir. 6, 9, 11, 12 ve 14 numaralı noktalarda periyotlar arasında yükselme, alçalma ve dönme şeklindeki hareketler bu model sonuçlarından da fark edilebilmektedir.

Araştırma yapılan yamacın baş, orta ve topuk kısmında bulunan noktaların dinamik tek nokta modeli ile hesaplanan hareket parametrelerinden nokta hareketleri ve hızlarına ait grafikler Şekil 95-102'deki gibi çizilerek heyelanın eğim yönündeki davranışları izlenebilmiştir. Bu şekillerden, nokta hareketleri ve hızlarının diğer modellerde olduğu gibi yamacın baş kısmından topuk kısmına doğru azaldığı gözlenmektedir.

Hareketli olan her noktanın ayrı ayrı bütün periyotlarda belirlenen hareket parametrelerinin x, y ve z eksenleri yönündeki değişimlerinin yer altı suyu değişimiyle olan ilişkilerini bir arada görebilmek için Şekil 103-142'deki grafikler çizilmiştir. Bu grafikler, heyelan bölgesinin yükler altında gösterdiği dinamik reaksiyonlarının noktalardaki etkisinin daha detaylı analiz edilebilmesini sağlamışlardır. Hız grafikleri periyotlar arasındaki yer değiştirmelerin zamansal davranışının anlaşılabilmesini, ivme grafikleri hareketin artan yada azalan türde olup olmadığının anlaşılabilmesini, yer altı suyu parametresi grafikleri ise yer altı suyu seviyesi değişimlerinin hareketler üzerindeki etkisinin arttırıcı yada azaltıcı türde olup olmadığının irdelenmesini sağlamışlardır. Grafiklerde görüldüğü gibi noktaların x, y ve z eksen yönündeki hareket, hız ve ivmelerin yönleri kinematik tek nokta modelinden hesaplanan parametrelerle aynı işaretli bulunmuştur. Noktaların belirlenen hareket değerleri, kinematik tek nokta modeline göre daha büyük hesaplanmıştır. Buna karşın noktaların hız ve ivme parametreleri kinematik tek nokta modelinden hesaplanan değerlere göre daha küçük bulunmuştur. Bu değerlerin küçük çıkmasının, dinamik tek nokta modelinin stokastik yapısının kinematik tek nokta modelinden üretilmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Arazinin yer altı suyu depolama özelliğine sahip olması nedeniyle noktalardaki yer altı suyu değişimlerinin hareket parametreleriyle olan ilişkilerini görebilmek için tüm grafiklerde her noktanın yer altı suyu değişimleri ayrı ayrı gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi x, y ve z eksen yönündeki hareket parametreleri, yer altı suyu değişimiyle doğru orantılı olarak artmakta ya da azalmaktadır. Araştırma yapılan ölçü periyotları aralığında hareket parametre değerleri, yer altı suyu değişiminin az olduğu yaz aylarında küçük, değişiminin fazla olduğu bahar ve kış aylarında ise daha büyük belirlenmiştir. Böylece araştırma alanındaki yer altı suyu değişiminin heyelanların oluşumu üzerindeki zamansal etkisi gözlemlenmiştir.

Dinamik tek nokta modelinden hesaplanan hareket parametreleri ile yer altı suyu seviye değişiminin birlikte gösterildiği grafikler incelendiğinde, yer altı suyu seviye değişimi-ivme grafiği ile yer altı suyu seviye değişimi-yer altı suyu parametresi grafiklerinin hemen hemen aynı özellikte oldukları görülmektedir. İvme yükler altındaki objenin deformasyon hızına ait bilgileri içerdiği gibi yer altı suyu parametresi de yer altı suyu değişimlerinin deformasyon hızına olan etkilerine ait bilgileri içermektedir. Yer altı suyu parametresinin işaretini, deformasyon modelinin fiziksel parametresi olan yer altı suyu seviyelerinin zamansal değişimleri belirlemektedir. Yer altı suyu seviye değişimlerinin nokta hareketlerine olan etkisinin yorumlanmasında yer altı suyu parametresinin işareti çok anlamlıdır. Çünkü yer altı suyu değişimlerinin deformasyon seyrini nasıl etkileyeceği, yer altı suyu parametresinin büyüklüğüne ve işaretine bağlı olarak anlaşılabilir. “Yer altı suyu parametresi > 0 ” ise yer altı suyu seviye değişimlerinin noktalardaki deformasyon hızını arttırdığı, “Yer altı suyu parametresi < 0 ” ise yer altı suyu seviye değişimlerinin noktalardaki deformasyon hızı üzerindeki etkisinin azaldığı anlaşılır.

Dinamik tek nokta modelinden hesaplanan her noktanın hareket parametrelerinin ayrı ayrı çizildiği şekiller ayrıntılı olarak irdelendiğinde, heyelan kitlesi içerisinde bulunan hareketli noktaların her birinin etkiyen yüklere ve yer altı suyu seviye değişimlerine karşı farklı geometrik reaksiyonlar verdiği gözlenmektedir.

1 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 103-106 incelendiğinde, statik ve kinematik modellerde olduğu gibi dinamik modelde de tüm yönlerde en fazla hareketler bu noktada belirlenmiştir. Noktada, Kasım 2000’den yer altı suyu seviye değişiminin en fazla olduğu Mayıs 2001’e kadar olan zaman aralığında artan bir hareketin varlığı ivme grafiğinden de görülebilmektedir. Kasım 2000-Mayıs 2001 zaman aralığında, yer altı suyu

seviye değişiminin deformasyonu hızlandırıcı etkisi, yer altı suyu parametresi grafiğinden açıkça gözlenebilmektedir.

3 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 107-110 incelendiğinde, y ve z yönlerinde sürekli artan ancak yaz aylarında az da olsa yavaşlayan anlamlı değişimler gözlenmiştir. Mayıs 2001-Kasım 2001 ayları arasındaki yer altı suyu seviye değişiminin az olması bu yavaşlamanın nedeni olarak verilebilir. Bu durum yer altı suyu parametresi grafiğinden de açıkça görülebilmektedir.

4 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 111-114 incelendiğinde, noktadaki sıra dışı hareketlerin dinamik modelle de saptandığı görülmektedir. Noktadaki hareketlerin Kasım 2000-Şubat 2002 aralığında genelde devamlı artan biçimde olduğu görülebilmektedir. Noktaya ait yer altı suyu parametresi grafiği, yer altı suyu seviye değişiminin hareketi hızlandırıcı etkisini çok iyi yansıtmaktadır.

5 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 115-118 incelendiğinde, noktanın Kasım 2000-Mayıs 2001 ayları arasında hareketinin sürekli arttığı, Mayıs 2001-Kasım 2001 ayları arasında ise yavaşladığı görülmektedir. Bu aralıkta hareketin yavaşlama nedeninin, aynı aralıkta yer altı suyu seviye değişiminin az olmasından kaynaklandığı yer altı suyu parametresi grafiğinden de görülebilmektedir.

6 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 119-122 incelendiğinde, diğer modellerdeki gibi bölgedeki yer altı suyu seviye değişimlerinin tetiklediği yüzeysel hareketlerin ters yönlerdeki etkilerinden dolayı noktada beklenenden daha az hareket belirlenmiş olduğu görülebilir.

7 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 123-126 incelendiğinde, noktada yaz aylarında yavaş, diğer mevsimlerde ise genelde artan bir hareket gözlenmiştir. Yer altı suyunun yaz ayları hariç deformasyonu hızlandırıcı etkisi yer altı suyu parametresi grafiğinden de açıkça görülebilmektedir.

9 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 127-130 incelendiğinde, bölgedeki yer altı suyu seviye değişimlerinin tetiklediği yüzeysel hareketlerin ters

yönlerdeki etkilerinden dolayı 6 numaralı noktada olduğu gibi bu noktada da beklenenden daha az hareket belirlenmiş olduğu görülebilir.

11 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 131-134 incelendiğinde, noktanın az hareket ettiği görülebilir. Nokta hareketi üzerinde yer altı suyu seviye değişiminin etkisinin fazla olmadığı, yer altı suyu parametresi grafiğindeki değerlerin küçüklüğünden de fark edilebilmektedir.

12 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 138-138 incelendiğinde, 11 numaralı nokta olduğu gibi bu noktada da fazla hareket olmadığı görülebilir. Noktanın istinat duvarına yakın olmasından dolayı nokta x ve z yönünde beklenenden az hareket etmiştir. Yer altı suyu parametresi grafiğinde görüldüğü gibi yer altı suyu seviye değişimi noktanın y yönündeki hareketine hızlandırıcı etki yapmıştır. Bu nedenle istinat duvarında zaman zaman kırılmaların olduğu gözlenmiştir.

14 numaralı noktaya ait x, y ve z eksenleri yönündeki konum, hız, ivme ve yer altı suyu parametrelerinin değişim grafiklerini gösteren Şekil 139-142 incelendiğinde, bu noktanın yer altı suyu seviye değişiminden fazla etkilenmiş olduğu görülebilir.

Tüm noktalara ait grafikler incelendiğinde, nokta hareketlerinin ve hareket hızlarının, yer altı suyu seviye değişiminin azaldığı yaz aylarında yavaşladığı, yer altı suyu seviye değişiminin arttığı kış ve bahar aylarında da arttığı görülmektedir. Bu durum bölgedeki heyelanın oluşumunda yer altı suyu etkisinin ne kadar fazla olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda bölgede oluşan heyelanın, yer altı suyu parametresi dikkate alınarak oluşturulan dinamik deformasyon modeliyle belirlenmesinin gerekli olduğu kanısına varılmıştır.

Bu çalışmada, yer altı suyu seviye değişimi dikkate alınarak heyelan için bir dinamik yüzey modeli oluşturulmuştur. Kinematik modelde olduğu gibi bölgede ölçülmemiş her hangi bir noktanın dinamik hareketini extrapolasyonla belirleme algoritmasını içeren bu modelle de bölgede oluşan hareketler görsel olarak izlenmiştir. Bu amaçla, yer altı suyu parametresi dikkate alınarak oluşturulan dinamik yüzey modelinin katsayıları çeşitli ölçü periyot grupları için hesaplanmıştır (Tablo 21-24). Bu tablolarda görüldüğü gibi katsayılar, genişletilmiş modelin testine göre adım adım test edilerek hareket yüzeyinin anlamlı katsayıları ve derecesi belirlenmiştir. Tablolarda görüldüğü gibi Şubat 2001-Mayıs 2001-Ağustos 2001 ile Ağustos 2001-Kasım 2001-Şubat 2002 ölçü periyot gruplarında 4. derece yüzey anlamlı bulunmuştur. Kasım 200-Şubat 2001-Mayıs 2001 ile Mayıs 2001-Ağustos

2001-Kasım 2001 ölçü periyot grubunda 4. derece polinomdan sonra 5. derece polinomun sırasıyla ilk dört ve iki katsayıları anlamlı bulunmuştur. Anlamlı bulunan polinom katsayılarıyla yüzeyler çizilmiştir (Şekil 143-146). Şekiller incelendiğinde, bu modelle de 4 ile 14 numaralı noktalarda yükselme, 1, 3, 5, 7, 11 numaralı noktalarda çökmelerin olduğu görülmüştür.

Her ölçü periyot grubunda hesaplanan dinamik yüzey polinom katsayılarının işareti, kinematik yüzey polinom katsayılarının işaretleriyle aynı, sayısal değerleri de genelde birbirine yakın bulunmuştur. Fakat her ölçü periyot grubu için dinamik yüzeyden istatistik olarak belirlenen anlamlı katsayılarının sayısı, kinematik yüzeyinkinden daha fazla bulunmuştur. Dolayısıyla bölgenin dinamik hareket yüzeyleri, kinematik hareket yüzeylerinden farklı olmuştur. Dinamik yüzey modelinden hesaplanan yer altı suyu seviye değişim katsayıları da istatistik olarak test edilmiş ve anlamlı bulunmuşlardır. Bu durum, yüzey katsayılarının hesaplanmasında yer altı suyu seviye değişimlerinin dikkate alınmasının gerekli olduğunu göstermektedir. Böylece oluşturulan dinamik yüzey modeliyle bölgede oluşan hareket yüzeyleri ve ölçülmemiş noktaların hareketleri de daha gerçekçi saptanabilmektedir.

Araştırma sonuçları, dinamik modelde dikkate alınan fiziksel parametrenin büyüklük ve işaretinin, hareketin nedeninin nokta hareketine olan etkisinin anlaşılmasını sağladığını göstermiştir. Hareket davranışlarının dinamik etki altındaki zamansal seyrinin yorumlanması bu parametrelere dayanılarak yapılabilmektedir. Sonuç olarak, hareketin nedeninin de dikkate alındığı dinamik modellerle, hareketlerin yorumlanmasının daha gerçekçi yapılabileceği söylenebilir.

5. SONUÇLAR

Ülkemizde özellikle Doğu Karadeniz Bölgesinde çok sık görülen en önemli doğal afetlerden biri olan heyelanlar konusunda farklı bilim dalları genelde ayrı ayrı çalışmalar yapmakta ve kendilerine özgü veriler toplamaktadırlar. Ülkemizdeki heyelan çalışmalarının çoğu da jeodezik verilerden yoksundur. Jeodezik yöntemler, jeodinamik (deprem, heyelan vs.) olayların modellendirilebilmesi ve yorumlanmasında sağlayabileceği katkılar açısından büyük önem taşımaktadırlar. Jeodezik yöntemlerle arazi yüzeyindeki yer değiştirmeler, yer değiştirme hızları, yer değiştirme ivmeleri ve hatta deformasyona neden olan etkenlerin deformasyon oluşumu üzerindeki etkileri de belirlenebilmektedir. Jeodezik yöntemlerle elde edilen veriler, jeolojik ve jeofizik verilerle birlikte yorumlanabilir ve heyelan hakkında daha somut ve gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.

Jeodezik yöntemlerle deformasyon analizinde kullanılacak deformasyon modelinin seçimi önemlidir. Uygun bir deformasyon modeli deformasyon olayını doğru bir şekilde tanımlarken yetersiz bir model deformasyon analizinde başarısızlıklara neden olabilir. Basit deformasyon modelleri araştırılan objenin deformasyonunu tanımlamak için yetersiz kalabilir. Deformasyon seyri ve şiddeti konusunda bir ön bilgi mevcut olmadığı zaman basit modellerle başlangıç yapılabilir. Eğer basit modeller istatistik testler sonucunda yetersiz görülürse daha kompleks modellerle çalışılmalıdır.

Heyelanlar üç boyutlu, zamana ve konuma bağlı olarak oluşan kompleks dinamik sistemlerdir. Heyelanlar ve etkiyen kuvvetler arasındaki ilişki zamana ve çalışılan alanın çevresel özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Bu nedenle araştırmada, önce deformasyonun seyri ve şiddetini anlayabilmek için basit (statik ve kinematik) modellerle başlangıç yapılmış ve bu modellerden elde edilen öncül bilgiler kullanılarak kompleks (dinamik) modellere geçilmiştir. Kompleks modellerle hareketlerin belirlenebilmesinde farklı disiplinlerin birlikte çalışması gerekmektedir. Bu bağlamda araştırmada, jeodezik, jeolojik, jeofizik ve meteorolojik çalışmalar yapılarak, heyelan için hareketin nedenini de içeren bir dinamik deformasyon modeli ile bir dinamik yüzey modeli oluşturulmuş ve hareketler bu modellerle belirlenmiştir. Yapılan araştırmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Heyelan araştırması yapılacak bölgede, mutlaka jeolojik çalışmalar yapılarak deformasyona neden olan heyelanın tipinin, heyelanı tetikleyen dış kuvvetlerin ve

heyelan sınırlarının güncel durumlarının belirlenmesinin gerekli olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların, deformasyon araştırması için tesis edilecek ve heyelan hareketlerinin karakteristiklerini, yönlerini ve büyüklüklerini ortaya koyabilecek deformasyon ağ noktalarının yerlerinin saptanmasında da çok önemli olduğu görülmüştür.

- Bölgede oluşan heyelanın en önemli nedeninin yer altı suyu seviyesi değişimleri olduğu jeolojik ve jeofizik çalışmalarla belirlenmiştir.
- Jeolojik çalışmalar sonucu, bölgede oluşan yüzeysel hareketler saptanmış ve bu yüzeysel hareketlerin nokta hareketleri üzerine olan etkileri incelenerek nokta hareketlerinin daha gerçekçi yorumları yapılabilmektedir.
- Dinamik deformasyon modelinde dikkate alınması gereken yer altı suyu seviye ölçümleri jeolojik ve jeofizik yöntemlerle yapılabilir.
- Yer altı suyu seviyeleri, jeolojik olarak bölgenin uygun yerlerinde açılmış sondaj kuyularından ölçülmüştür. Sondaj kuyusu açmak pahalı ve arazi koşullarından dolayı da zordur. Ayrıca bu kuyuların heyelanlardan kaynaklanan deformasyonlar ve diğer nedenler sonucu tahrip olmalarından dolayı zamanla korunmaları güçtür. Bu nedenlerden dolayı sondaj kuyularının sürekli ölçü yapılması gereken deformasyon izleme çalışmalarında kullanılması çok uygun değildir.
- Yer altı suyu seviyeleri, deformasyonlardan etkilenmeyen ve sondaj kuyusu açma yönteminden daha ekonomik ve pratik olan jeofizik yöntemlerle de ölçülebilir. Jeofizik elektrik öz direnç yöntemiyle, yer altı suyu seviyelerinin yanı sıra heyelan malzemesinin derinliği de belirlenebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı yöntemin deformasyon izleme çalışmalarında kullanılmasının daha uygun olduğu söylenebilir.
- Heyelanın belirlenebilmesi için periyodik zaman aralıklarında yapılacak ölçülere gereksinim vardır. Ölçüler, yer altı suyu değişimlerinin en fazla ve en az olduğu zamanlarda yapılmalıdır. Bölgedeki heyelanları tetikleyen ve yer altı suyu değişimlerini en fazla etkileyen yağış rejiminin belirlenebilmesi için meteorolojik çalışmalar yapılmıştır. Ölçü periyotlarına, meteorolojik verilere göre yağış öncesi ve yağış sonrası zamanlar olacak biçimde karar verilmiştir.
- Meteorolojik veriler, ölçü periyot zamanlarını belirlemenin yanı sıra bu zamanların uygun olup olmadığının denetlenmesini de sağlamışlardır.
- Jeodezik yöntemlerle jeodinamik döngü içerisindeki heyelandan kaynaklanan deformasyonlar ölçülmek istendiğinde heyelanın tipi göz önüne alınmalıdır. Yavaş

akma (creep) şeklinde oluşan heyelanlardan kaynaklanan deformasyonların belirlenmesi için jeodezik ağ yönteminin kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

- Jeodezik deformasyon ağları, bölgenin jeomorfolojik haritasına göre heyelan bölgesi ve çevresini kapsayacak biçimde tasarlanmalı, nokta dağılımı ve ölçme değerlendirme yöntemi uygun seçilmelidir. Bu çalışma sonucunda, heyelanlar için en uygun yöntemin hareketin nedeni de dikkate alan dinamik deformasyon analiz yöntemi olduğu görülmüştür.
- Dinamik deformasyon modeli, statik ve kinematik deformasyon modellerin sonuçlarından yararlanarak türetilmektedir. Bu nedenle dinamik modeli oluşturabilmek ve sonuçları karşılaştırmak amacıyla heyelanlar, statik ve kinematik deformasyon modelleriyle de belirlenmelidir.
- Statik ve kinematik deformasyon modelleriyle heyelanların belirlenmesi için sadece jeodezik verilerin yeterli olduğu, dinamik deformasyon modelinde ise hem geometrik hem de fiziksel parametreler dikkate alınması gerekli olduğundan sadece jeodezik ölçülerin yeterli olmadığı görülmüştür.
- Dinamik deformasyon modelinin oluşturulmasında, etkiyen kuvvetin belirlenmesi ve ölçülmesi, bu kuvvete bağlı olarak hareketin modellendirilmesi ve sonuçların yorumlanması aşamasında farklı disiplinlerin katkılarına gereksinim duyulmuştur.
- Bu çalışmada hareketler, yer altı suyu parametresiyle oluşturulmuş olan bir dinamik tek nokta modeli ile hareket yüzeyleri ise yer altı suyu parametresi dikkate alınarak oluşturulmuş olan bir dinamik yüzey modeliyle belirlenmiştir.
- Dinamik tek nokta modeliyle, jeodezik ağ noktalarındaki yer değiştirmeler, yer değiştirme hızları, yer değiştirme ivmeleri ve yer altı suyu parametreleri belirlenebilmiştir. Hızlar yer değiştirmelerin zamansal davranışının anlaşılabilmesini, ivmeler hareketin artan yada azalan türde olup olmadığını, yer altı suyu parametreleri ise yer altı suyu değişimlerinin hareketler üzerindeki etkisinin arttırıcı yada azaltıcı türde olup olmadığının irdelenmesini sağlamışlardır.
- Dinamik tek nokta modelinde her nokta için ayrı ayrı hareket parametrelerinden oluşan bilinmeyenlerin hesabı için fazla periyotta yapılmış ölçülere gereksinim vardır. Az sayıda ölçme periyoduyla hareket parametreleri Kalman-filtreleme yöntemiyle çözülebilir. Böylece zaman periyotları arasındaki sabit bozucu ivme ve sistem gürültüleri dikkate alınarak çözüm yapılabilmiş olunur. Buna karşın prediksyonla çözüm yapıldığı için ölçülerin belirli oranda ölçü hatalarıyla yüklü oluşu ve bir önceki

zamandaki durum vektöründeki elemanların da hatasız olmaması nedeniyle sınırsız bir biçimde extrapolasyonla genişletilme yapılmaması gerektiği görülmüştür.

- Dinamik tek nokta modelindeki bilinmeyenlerin aynı anda belirlendiği durumlarda model geçersiz olabilir. Bu nedenle en uygun hareket modelinin belirlenmesi için genişletilmiş model testine göre hesaplamaların adım adım yapılmasının gerekli olduğu görülmüştür.
- Dinamik tek nokta modeliyle hesaplanan hareket parametreleri, statik ve kinematik tek nokta modeli sonuçlarıyla karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Dinamik tek nokta modelinden belirlenen fiziksel etki parametresinin, hareketlerin yorumlanmasında katkı sağlaması ve böylece daha uygun kararlar verilebilmesi bu modelin diğer modellerden olan üstünlüğüdür.
- Bu çalışmada, nokta hareket parametrelerinin daha gerçekçi yorumlanabilmesi için yüzeysel hareketlerin dikkate alınmasının gerekli olduğu da görülmüştür.
- Bu çalışmada, dinamik yüzey modeli, hareket yüzeylerinin etkiyen kuvvet altındaki periyodik değişimlerini belirlemek amacıyla oluşturulmuştur. Böylece bütün bir kütle içerisindeki ölçülmemiş noktaların hareketleri de izlenebilmiştir.
- Dinamik ve kinematik yüzey modelleri karşılaştırıldığında, dinamik hareket yüzeylerinden hesaplanan yüzey katsayılarının sayısının, kinematik hareket yüzey katsayılarının sayısından fazla, aynı katsayıların işaretlerinin aynı, büyüklüklerinin de birbirlerine yakın değerlerde oldukları görülmüştür. Dolayısıyla oluşan yüzeyler birbirlerinden farklı olmuşlardır. Böylece dinamik yüzey modelinde heyelanın nedeni olan yer altı suyu değişimi dikkate alındığından bölgede oluşan hareket yüzeyleri ve ölçülmemiş noktaların hareketleri de daha gerçekçi saptanabilmiştir.
- Dinamik modelin bu üstünlüklerinin yanı sıra modelin oluşturulmasında, farklı disiplinlerin birlikte çalışmasındaki güçlükler, matematik modelin karmaşıklığı ve ekonomik olmaması modelin olumsuz yanlarıdır.
- Bu bölgedeki heyelanların oluşumunda suyun etkisinin çok fazla olduğu görülmüştür. Hareketler, aşırı sulaşma ile ilgili problemlerden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle bölgedeki heyelanların kontrol altında tutulması için yüzey ve yer altı suyunun ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir.
- Bu çalışmada, doğal bir afet olan heyelanın belirlenmesinde ve gerekli tedbirlerin zamanında alınabilmesinde farklı disiplinlerin birlikte çalışmasının çok yararlı olduğu sonucu da ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, dinamik deformasyon modeliyle heyelanların belirlenmesinde aşağıdaki adımların uygulanması önerilebilir:

- Can ve mal kaybına neden olan ve sonuçları hayati önem taşıyan heyelanların belirlenmesi çalışmalarında hareketler, dinamik deformasyon modeliyle belirlenmelidir.
- Arazide jeolojik ve jeofizik araştırmalar yapılarak oluşan heyelanın tipi, güncel durumu ve nedenleri belirlenmelidir.
- Heyelanın tipi ve en önemli nedenlerine göre ölçme yöntemleri belirlenmelidir.
- Bölgenin meteorolojik verilerine göre ölçme periyot zamanları saptanmalıdır.
- Hareketin nedeni olan değişkene göre dinamik modelin matematik yapısı uygun biçimde oluşturulmalıdır.
- Belirlenen nokta hareketlerinin daha gerçekçi yorumlanabilmesi için bölgenin yüzeysel hareketlerin de mutlaka dikkate alınmalıdır.

6. ÖNERİLER

Hareketlerin belirlenmesi ve yorumlanmasında en uygun model, hareketin nedeninin de dikkate alındığı dinamik deformasyon modelidir. Hareketin nedeninin belirlenmesi ve modelin oluşturulması aşamalarında farklı bilim dallarının birlikte çalışması gerekir. Farklı bilim dallarının birlikte çalışmasının getireceği zorluk ve modelin oluşturulmasındaki karmaşık yapı nedeniyle dinamik modellerle hareketlerin belirlenmesi konusunda günümüze kadar az çalışma yapılmıştır.

Bu araştırmada, heyelanlar için dinamik deformasyon modelinin oluşturulması ve hareketlerin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Heyelanlar için dinamik deformasyon modelinin oluşturulmasında aşağıdaki işlemlerin yapılması önerilir:

- Jeolojik çalışmalar sonucu bölgenin heyelan tipi belirlenmelidir.
- Bölgenin jeomorfolojik haritası yapılmalı ve heyelanın güncel durumu saptanmalıdır.
- Jeomorfolojik harita ve heyelan tipi dikkate alınarak, heyelanlı bölge ve çevresini kapsayacak biçimde bir jeodezik deformasyon ağı tesis edilmelidir.
- Ağda yapılacak periyodik ölçüler için en uygun ölçme yönteminin saptanması gerekir.
- Dinamik deformasyon modeliyle heyelanları belirleyebilmek için bölgede yapılacak jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu heyelanın nedenlerinin belirlenmesi gerekir.
- Dinamik modelde dikkate alınması gereken en önemli heyelan nedeninin hangisi olduğu saptanmalıdır.
- Heyelanın en önemli nedenine göre ölçü periyot zamanlarının belirlenmesi gerekir.
- Belirlenen ölçü periyotlarında, jeodezik ölçüler ile heyelanın nedenine ait fiziksel ölçüler aynı zamanda yapılmalıdır.
- Jeodezik ve fiziksel ölçülere uygun fonksiyonel yapı türetilerek dinamik deformasyon modeli oluşturulmalıdır.
- Dinamik hareketleri belirlemek için öncelikle Jeodezik ve fiziksel ölçüler kullanılarak, bölgede oluşan nokta hareketlerinin genel davranışı statik deformasyon modeliyle belirlenmelidir.

- Sonra, dinamik deformasyon modelinin stokastik yapısının oluşturulmasında kullanmak ve karşılaştırma yapabilmek amacıyla kinematik tek nokta modeliyle nokta hareketlerinin belirlenmesi gerekir.
- Kinematik tek nokta modelinin hesaplamaları, adım adım genişletilmiş modelin testine göre yapılarak en uygun hareket modelinin belirlenebilmesi gerekir.
- Kinematik tek nokta modeliyle parametrelerin aynı anda hesaplanabilmesi için fazla sayıda ölçü periyoduna gereksinim vardır. Bundan dolayı daha az ölçü periyoduna gereksinim duyan Kalman-filtreleme tekniği ile parametreler hesaplanmalıdır.
- Kinematik tek nokta modelinde yapılan genişletilmiş modelin testine göre dinamik modele geçişin uygun olup olmadığına karar verilmelidir.
- Dinamik tek nokta modeli çözülerek nokta hareketleri, hareketin hızı, ivmesi ve fiziksel etki parametresi hesaplanmalıdır.
- Fiziksel etki parametreleri de dikkate alınarak nokta hareketleri yorumlanmalıdır.
- Bölgede ölçülmemiş noktaların dinamik hareketlerinin belirlenmesi için de hareketin nedeninin dikkate alındığı dinamik yüzey modeli ile hareket yüzeyinin belirlenmesi gerekir.

Araştırmalar sonucu, ülkemizde depremlerden sonra ikinci, Doğu Karadeniz Bölgesinde ise birinci büyük doğal afet olmasına rağmen heyelanlar konusunda yeterli kurumsal çalışmaların yapılmadığı saptanmıştır. Ülkemizdeki heyelanların önlenmesi ve zararlarının azaltılmasına yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Dünyanın gelişmiş ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de ulusal bir heyelan izleme merkezi kurulmalıdır.
- Üniversitelerdeki heyelan araştırma merkezleri işlevsel hale getirilmelidir.
- Tüm ülke genelinde heyelan risk haritaları oluşturulmalı ve heyelan bilgi sistemi kurulmalıdır.
- Heyelanların bölgelere göre tarihsel gelişimleri araştırılmalı, geleceğe yönelik olası heyelan kestirimleri yapılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.
- Heyelan tehlikesi olan alanlardaki yerleşimler önlenmeli ve yerleşimciler bu konuda bilinçlendirilmelidir.

- Ülkemizde heyelanların sosyal ve ekonomik etkileri (insan hayatı kayıpları, mülkiyet hakları, yer altı ve yerüstü boru hatlarının hasar görmesi, barajların yıkılması, ulaşımın aksaması gibi) üzerine araştırmalar yapılmalı ve bu konulardaki problemler (özellikle mülkiyet) çözüme kavuşturulmalıdır.
- Heyelanların belirlenmesi ve zararlarının önlenmesi konusunda heyelan araştırmaları artık Jeodezi, Jeoloji, Jeofizik ve Jeomekanik bilim dallarının ortaklaşa çalışmaları ile yürütülmelidir.
- Heyelanların farklı disiplinler tarafından birlikte araştırılması konusunda üniversitelerde yapılan çalışmalar desteklenmeli ve araştırmacılar teşvik edilmelidir.
- Son yıllarda meydana gelen felaketler dikkate alınarak ülkemizde en çok yağmur alan ve buna bağlı olarak en çok heyelanın gözlemlendiği ve bunun doğal sonucu olarak can ve mal kaybının en çok görüldüğü Karadeniz Bölgesi'ndeki heyelanlar için acil çalışmalara başlanmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- Alkan, M., 1995. Heyelan Ağaç İlişkisi Tartışmasında Geline Aşama, Türkiye İkinci Ulusal Heyelan Sempozyumu, Adapazarı, Bildiriler Kitabı, 35-44.
- Altan, O., Ayan, T., Deniz, R., Tekin, E. ve Özür, B., 1994. Determination of Soil Movements at A Land-Slide Area, 1st International Symposium on Deformations, İstanbul, Proceedings, 692-699.
- Aksoy, A., 1984. Uyuşumsuz Ölçüler Testi, Harita Dergisi, 93, 15-24.
- Asch, W.J, Buma, J. and Van Beek, L.P.H., 1999. A View on Some Hydrological Triggering Systems in Landslides, Geomorphology, 30, 25-35.
- Atasoy, V., 1984. Jeodezik Deformasyon Ölçülerinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Atasoy, V., 1988. Üç Boyutlu Jeodezik Ağlarda Yer Kabuğu Hareketlerinin İrdelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Atasoy, V., Konak, H. ve Öztürk, E., 2001. Maden Sahalarında Kurulan Deformasyon Ağlarının İzlenmesi, 8. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Bildiriler Kitabı, 44-54.
- Ayan, T., 1982. Jeodezik Ağlarda Deformasyon Analizine Genel Bakış, İ.T.Ü. Dergisi, 40, 21-25.
- Ayan, T., 1992. Uyuşumsuz Ölçüler Testi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 72, 38-46.
- Ayan, T., Tekin, E. ve Deniz, R., 1993. Heyelan Hareketlerinin İzlenmesi İçin Bir Jeodezik Uygulama, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 75, 55-68.
- Bektaş, S., 1998. Mühendisler İçin Sayısal Çözümleme: Basic Program Örnekleriyle, Samsun.
- Bayrak, T., 1996. Sayısal Yükseklik Modellerinde İnterpolasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Brunner, F. K., 1997. Continuous Monitoring of Deformation Using The Global Positioning System, AvH Magazine, 69, 29-38.
- Brunsdan, D., 1999. Some Geomorphological Considerations for The Future Develepment of Landslide Model, Geomorphology, 30, 23-24.
- Bulut, F., 1995. Fındıklı İlçesi (Rize) Doğu Yöresindeki Heyelanların Nedenleri, Türkiye İkinci Ulusal Heyelan Sempozyumu, Adapazarı, Bildiriler Kitabı, 143-152.

- Burchfiel, B. C., Foster, R. J. and Keller E. A., 1982. Physical Geology, 43216, A Bell and Hovell Company, Colombus, Ohio,
- Chang, C.C., 2000. Estimation of Local Subsidence Using GPS and Leveling Data, Surveying and Land Information Systems, 60, 85-94.
- Chrzanowski, A., Chen, Y., Romero, P. and Secord, J. M., 1986. Integration of geodetic and geotechnical deformation measurements in the geosciences, Tectonophysics 130, 369-383.
- Chui, C. K. and Chen, G., 1987. Kalman Fiktering with Real-Time Applications, Springer Verlag, Germany.
- Deangeli, C. and Giani, G. P, 2001. Analysis of Debris Flows Triggered by Rainfalls in Northern Italy, ISSMGE TC-11 (Landslides) Proceedings of Conference on Transition from Slide to Flow – Mechanisms and Remedial Measures, Trabzon, CD, 15-16.
- Demirel, H., 1987. Nirengi Ağlarının Dengelenmesi ve Sonuçlarının Test Edilmesi, Harita Dergisi, Sayı 98, 22-33.
- Dercourt, J., 2000. Apport du GPS 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.
- Dilaver, A., Karaali, C. and Şen, K., 1991. Heyelanların Yersel Jeodezik Yöntemlerle Önceden Belirlenmesi, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 155-157.
- Dilaver, A., 1996. Jeodezik Ağlarda Kaba Hatalı Ölçülerin Ayıklanması ve Güven Ölçütleri, K.T.Ü. M.M.F. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Araştırma Raporları, Fakülte Yayın No: 2.
- Ding, X., Chen, Y., Huang, D., Zhu, J., Tsakiri, M. and Sreewart, M., 2000. Slope Monitoring Using GPS: A Multi-antenna Approach, GPS World, 75, 52-55.
- Ding, X., Chen, Y. Q. and Zhu, J. J., 2001. Modeling of Landslides Based on Monitoring Data and the Dynamic of Slopes, FIG Symposium, USA.
- Dupraz, H., Niemeier, W. and Pelzer, H., 1979 Analyse von Deformationsmessungen durch Klaffungszerlegung, Deformationsanalysen, Heft 4, Hannover.
- Eichhorn, A. and Möhlenbrink, W., 2001. Identification of Physical Parametrers by Means of Differential Equations in The Adaptive Dynamic Fitter Model, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, Proceedings, 326-335,
- Erdaş, O., 1991. Bitki Örtüsü ve Özellikle Bitki Kökleri İle Zemin Arasındaki İlişkilerin Heyelanların Önlenmesi ve Mühendislik Biyolojisi Açısından İncelenmesi, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 108-117.

- Eren, K. ve Uzel, T., 1995. GPS Ölçmeleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, Yayın No: 301, İstanbul.
- Erguvanlı, K., 1982. Mühendislik Jeolojisi, İTÜ Basımevi, İstanbul.
- Ersoy, N., 1997. GPS Sistemi İle Şehir Nirengi Ağlarının Analizi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 83, 6-27.
- Flageollet, J. C., Maquaire, O., Martin, B. and Weber, D., 1999. Landslides and Climatic Conditions in The Barcelonnette and Vars Basins (Southern French Alps, France), Geomorphology, 30, 65-78.
- French, G. T., 1996. An Introduction to the Global Positioning System, GeoResearch, Inc., ISBN: 0-9655723-0-7.
- Fukuoka, H., Tamari, Y., Furuya, G. and Fujikawa, H., 2001. Application of Real Time GPS to Landslide Monitoring, ISSMGE ATC-9 Proceedings of Field Workshop on Landslides and Natural/Cultural Heritages in Turkey, Trabzon, Turkey.
- Gelişli, K. ve Çınar, H., 1991. Heyelan Araştırmalarında Jeofizik Yöntemlerin Kullanımı, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 356-365.
- Gili, J. A., Corominas, J. and Rius, J., 2000. Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring, Engineering Geology, 55, 167-192.
- Gökalp, E., 1994. GPS İle Deformasyon İzleme Amaçlı Yöntem Geliştirme, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Gökalp, E. and Karaali, C., 1994. An Overview of the Physical Interpretation of Deformation Measurements, 1st International Symposium on Deformations, Istanbul, Proc, 234-241.
- Gökalp, E., 1995. GPS Ölçü Süresini Kısaltma Amaçlı Yöntem Geliştirme, Türkiye Ulusal Jeodezi-Jeofizik Birliği Bilimsel Kongreleri, Ankara, Bildiriler Kitabı, Cilt II, 403-415.
- Gökceoğlu, C. ve Aksoy, H., 1996. Landslide Susceptibility Mapping of The Slopes in The Residual Soils of Mengen Region (TURKEY) by Deterministic Stability Analyses and Image Processing Techniques, Engineering Geology, 44, 147-161.
- Görçelioğlu, E., 1991. Bitki Örtüsünün Yamaç ve Şev Stabilitesine Etkileri, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 5-19.
- Grewal, M. S. and Andrews, A. P., 1993. Kalman Filtering Theory and Practice, Printice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Gründig, L. V., Nevreither, M. and Bahndorf, J., 1985. Deformationanalyse und S-Transformation, ZFV, Heft 4, 151-160.

- Gut, M., 1992. Fernüberwachung von Felsbewegungen durch Langen - und Neigungsmessungen, XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.
- Gülal, E., 1999/1. Kalman Filtreleme Tekniğinin Deformasyon Analizinde Uygulanması, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 1, 11-25 .
- Gülal, E., 1999/2. Deformasyon Ölçülerinin Analizinde Dinamik Modelleme, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 2, 9-22.
- Güllü, M., 1998. GPS ve Yersel Gözlemlerin Birlikte Dengelenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Gürkan, O., 1984, Fiziksel Jeodezi, Heiskanen, W., Morits, H., Çeviri, K.T.Ü. Basımevi, Genel Yayın No. 19, Fakülte Yayın No. 8., Trabzon.
- Hardy, R. L., 1978. The Application of Multiquadric Equations and Point Mass Anomaly Models to Crustal Movements Studies, NOAA Technical Report N0. 76, NGS 11, U.S.A.
- Heunecke, O., Pelzer, H., Pfeuter, A. and Willgalis, S., 1993. Comparative Investigations of Dynamic Deformation Models, 7st International Symposium on Deformation Measurements, Banff.
- Heunecke, O., 1994. Deformationsanalyse mittels KALMAN-Filter, Möglichkeiten und perspektiven, in: FIG XX. International Congress, Melbourne, 602.3/1.
- Heunecke, O., 1995. Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver KALMAN-Filterung, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr.208.
- Heunecke, O. and Pelzer, H., 1998. A New Terminology for Deformation Analysis Models Based on System Theory, IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering in Eisenstadt, 20-22.
- Hofmann, W. B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1992. Global Positioning System: Theory and Practice, Springer-Verlag Wien New York, ISBN 3-211-82364-6.
- Holdahl, S. H. and Hardy, L. R., 1979. Solvability and Multiquadric Analysis as Applied to Investigations of Vertical Crustal Movements, Australia, Proceedings of the IUGG Interdisciplinary Symposium, Recent Crustal Movements.
- Holdahl, S. H., 1978. Models for Extracting Vertical Crustal Movements from Leveling Data, Proceedings of the 9th GEOP Conference, An International Symposium on The Application of Geodesy to Geodynamics, Department of Geodetic Science Report No. 280, The Ohio State University.
- Hooijberg, M., 1997. Practical Geodesy Using Computer, Springer-Verlag, ISBN 3-540-61826-0.

- Huep, W., 1985. Positionsbestimmung im Küstenbereich, Vortrage des Kontaktstudiums, Geodatische Netze in Landes Und Ingenieurvermessung, Hannover, 693-724.
- Huep, W., 1986, Zur Positionsschatzung im gestörten KALMAN-Filter am Beispiel eines manövrierenden WWAFFV der Universitat Hannover, Nr.143.
- İller Bankası, 1995, İller Bankası Genel Müdürlüğü Trabzon Kenti İçme Suyu İletim Hattı Heyelanlı Bölüm Etüd, Proje, ve Mühendislik Hizmetleri Raporlar Kitabı, Ankara.
- İnce, C. D., 1999. Dinamik Sistemlerin GPS ve Kalman Filtresi ile Anlık Olarak İzlenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İnce, C. D. ve Şahin, M., 2000. Real-Time Deformation Monitoring with GPS and Kalman Filter, *Earth Planets Space*, 52, 837-840.
- Kalkan, Y., Alkan, M. R. and Yanalak, M., 2001. Landslide Monitoring Project by Using Different Techniques, Fourth International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days", Berlin, Proceedins, 663-670.
- Kara, H. H., 1998. İteratif Uyuşumsuz Ölçü Belirleme Yöntemleri ve Kararlı Yapıdaki Jeodezik Ağlarda Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karaali, C. ve Gökalp, E., 1994, GPS Gözlemleri, K.T.Ü. M.M.F. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Araştırma Raporları, Fakülte Yayın No: 2.
- Koca, Y. ve Türk, N., 1991. Kaya Şev Stabilite Analizlerinde Süreksizlik Şev Düzlemi Kesişme Zarfının Kullanımı, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 237-255.
- Koch, K.-R., 1999. Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer-Verlag Berlin.
- Konak, H., 1994. Yüzey Ağlarının Optimizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Krauter, E., 1988. Applicability and Usefulness of Field Measurements on Unstable Slopes, 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Proc., Vol. 1, 367-373.
- Krauter, E., 1992. Hangrutschungen–ein Umweltproblem, XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.
- Kuang, S., 1996. Geodetic Network Analysis and Optimal Design, Ann Arbor Press, Inc., ISBN 1-57504-044-1.
- Kuhllman, H. and Pelzer, H., 1997. Models of Deformation Analysis, Second International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days", Berlin, Proceedings, 21-30.

- Kurt, O., 1996. GPS Ölçülerinin Değerlendirildiği Üç Boyutlu Jeodezik Ağlarda Duyarlık ve Güven Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Liu, Q., 1990. Studies on The Model of Vertical Crustal Movements, Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 14, 3, 322-24.
- Liu, Q. and Parm, T., 1996. On The Vertical Deformation Models, Proceedings of The 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong,
- Liu, Q. and Parm, T., 1997. A New Approach to The Time Dependent Models of Vertical Crustal Deformation, Bolletino di Geodesia E Scienze Afini, 55, 3, 305-319.
- Liu, Q., 1998. Time-Dependent Models of Vertical Crustal Deformation from GPS-Leveling Data, Surveying and Land Information Systems, 58, 1, 5-12.
- Loke, M. H. and Barker, R. D., 1995. Improvements to The Zohdy Method for The Inversion of Resistivity Sounding and Pseudosection Data, Computers & Geosciences, 21, 2, 321-332.
- Malet, J. P., Maquaire, O. and 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.
- McElroy, S., 1998. Getting Started with GPS Surveying, The Global Positioning System Consortium (GPSCO).
- McLellan, J. F., Porte, T. R. and Price, P. St.J., 1989. Pipeline Deformation Monitoring Using GPS Survey Techniques, Journal of Surveying Engineering, 115, 1, 115-121.
- Mierlo, J., 1978. A Testing Procedure for Analysing Geodetic Deformation Measurements, Proceedings, Second International Symposium on Deformation Measurements by Geodetic Methods, Bonn, Proceedings, 321-353.
- Mikkelsen, P.E., 1996. Field Instrumentation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides Investigation and Mitigation, TRB Special Report 247. National Academy Press, pp.278-316, Chapter 11, Washington, DC.
- Moss, J. L., McGuire, W. J. and Page, D., 1999. Ground Deformation of a Potential Landslide at La Palma, Canary Islands, Journal of Volconology and Geothermal Research, 94, 251-256.
- Muiuane, E. A. and Pedersen, L. B., 1999. Automatic 1D Interpretation of DC Resistivity Sounding data, Journal of Applied Geophysics, 42, 35-45.
- Neyman, Y., 1994. The Main Concepts of Kalman Filtering, Lecture Notes, Institut of Theoretical Geodesy, Department of Mathematical Geodesy and Geoinformatics, Graz University of Technology, Graz.

- Niemeier, W., 1976. Ansätze zur Interpretation der Ergebnisse Geodatischer Deformationsmessungen, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 76, 36-63.
- Niemeier, W., 1992. Potential of the Global Positioning System (GPS) for Local Deformation Studies, 6th FIG Symposium on Deformation Measurements, Hannover, Germany.
- Ocakoğlu, F., Gökceoğlu, C. and Ercanoğlu, M., 2002. Dynamics of a Complex Mass Movements Triggered by Heavy Rainfall: A Case Study from NW Turkey, Geomorphology, 42, 329-341.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi, K.T.Ü. Basımevi, Cilt 2, Trabzon.
- Önalp, A., 1991. Doğu Karadeniz Bölgesi Heyelanları – Nedenleri, Analizi ve Kontrolü, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 85-95.
- Öztürk, E., 1978. Jeodezik Deformasyon Ölçülerinin İrdelenmesi θ^2 -Ölçütü, Harita Dergisi, 85, 44-52.
- Öztürk, E., 1987. Jeodezik ağlarda duyarlık ve Güven Ölçütleri, Türkiye I. Harita ve Teknik Kurultayı, Ankara, Bildiriler Kitabı, 641-699.
- Öztürk, E. ve Şerbetçi, M., 1992. Dengeleme Hesabı, K.T.Ü. Basımevi, Cilt III, Trabzon.
- Papo, H. B. and Prelmutter, A., 1991. Dynamical Modelling in Deformation Analysis, Manuscripta Geodetica, 16, 5, 33-41 .
- Pelzer, H., 1971. Zur Analyse Geodetischer Deformationsmessungen, DGK, R.C., Nr.164, München.
- Pelzer, H., 1985. Statische, Kinematische und Dynamische Punktfelder, in: Geodatische Netze in Landes-und Ingenieurvermessung II, PELZER, H., Stuttgart.
- Pelzer, H., 1986. Application of Kalman- and Wiener-Filtering on the Determination of Vertical Movements, The Symposium on Height Determination on Recent Vertical Crustal Movements in Western Europa, Determination of Heights and Height Changes, Hannover, Proc., 539-555.
- Pelzer, H., 1987. Deformationsuntersuchungen auf der Basis Kinematischer Bewegungsmodelle, AVN, 94, 2, 49-62.
- Pelzer, H., 1988. Ingenieurvermessung, Deformationsmessungen Massenberechnung, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Pelzer, H., 1993. Kinematische und Dynamische Fragestellungen der Ingenieurgeodasie, VR 8.

- Qin, S., Jiao, J.J. and Wang, S., 2002. A Nonlinear Dynamical Model of Landslide Evolution, Geomorphology, 43, 77-85.
- Ren, D. and Ding, X., 1996. Dynamic Deformation Analysis of Open Pit Slopes, Proceedings of FIG 8th International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, Proceedings.
- Rossikopoulos, D., Fotiou, A., Livieratos, E. and Bald, P., 1998. A Rigorous Analysis of GPS data to detect Crustal Deformations in The Area of The Ionian Sea, Tectonophysics 294, 271-280.
- Santerre, R. and Beutler, G., 1993. A proposed GPS Method with Multi-Antenna and Sinle Receiver, Bulletin Geodesique, 67, 210-223.
- Şimşek, M., 1992. Jeodezik Ağlarda Uyuşumsuz Ölçülerin Belirlenmesi, Harita Dergisi, 108, 18-33.
- Şimşek, M. ve Demirel, H., 1997. Ağ Sıklaştırmada Modern Teknikler, 6. Harita Kurultayı, Ankara, Bildiriler Kitabı, 239-255.
- Tanır, E., 2000. Deformasyon Analizinde Statik Değerlendirme Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Tarhan, F., 1991. Doğu Karadeniz Bölgesi Heyelanlarına Genel Bir Bakış, Türkiye 1. Ulusal Heyelan Sempozyumu, Trabzon, Bildiriler Kitabı, 38-63.
- Tarhan, F., 1996. Mühendislik Jeolojisi Prensipleri, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A., 1986. Applied Geophysics, Cambridge University Press.
- Teunissen, P. J. G. and Kleusberg, A., 1998. GPS for Geodesy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-63661-7.
- Tiberius, C. C. J. M., 1999. The GPS Data Weight Matrix: What are The Issues?, National Technical Meeting and 19th Biennial Guidance Test Symposium, Canada, ION, 219-227.
- Turner, A. K. ve Schuster, R. L., 1996. Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247, US National Research Council Transportation Research Board.
- Unterberg, V., 1991. Das KALMAN-FİLTHER als Ansatz für die Auswertung weitraumiger Kinematischer Höhennetze, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 170.
- URL-1, <http://www.em.gov.bc.ca/mining/geolsurv/surficial/landslid/default.htm>, Landslides in British Columbia, 17 Kasım 2002.

- Vanicek, P., Elliott, R. and Castle, O. R., 1979. Four-dimensional Modelling of Recent Vertical Movements in the Area of the Southern California Uplift, Proceedings of Sixth Internatioanl Symposium on Recent Crustal Movements, California.
- Varnes D. J., 1978. Slope Movement Types and Processes, in Schuster, R. L. and R. J. Krizek (eds.), Landslides-Analysis and Control, Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, D.C., p. 12-33.
- Varnes, D. J. and Savage, W. Z., 1996. The Slumgullion Earth Flow: A Large Scale Natural Laborotory, U.S. Geological Survey Bulletin, 2130.
- Veder, C., 1981. Landslides and Their Stabilization, Erika Jahn, Springer-Verlag New YorkWien, ISBN 3-211-81627-5.
- Welch, G., Bishop, G., 2002, An Introduction to the Kalman Filter, http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/kalman_filter/kalman.html, 15 Mart 2002.
- Wells, D., 1987. Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Association, ISBN 0-920-114-73-3.
- Welsch, W., 1985. Kinematische Netzbetrachtung, Vortrage des Kontaktstudiums, Geodatische Netze in Landes Und Ingenieurvermessung, Hannover, 751-779.
- Welsch, W., 1996. Geodetic Analysis of Dynamic Processes: Classification and Terminology, The 8th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Hong Kong, 147-156.
- White, C.A., 1999. Landslides and Earthquake Displacement of Land Survey Monuments and Land Lines, Surveying and Land Information Systems, 59, 2, 132-138.
- Wolf, P. R. and Ghilani, C. D., 1997. Ghilani: Adjustment Computation : Statistics and Least Squares in Surveying and GIS, John Wiley and Sons, Inc., ISBN 0-471-16833-5.
- Wuhan, V. L., G., 1978. On the Separability of Deformation Models, ZFV, 11, 555-563.
- Yalçinkaya (Ünver), M., 1988. Düşey Yöndeki Yer Kabuğu Hareketlerinin Duyarlıklı Nivelman Ölçüleri İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yalçinkaya (Ünver), M., 1994. Düşey Yöndeki Yerkabuğu Deformasyonlarının Kinematik Model İle Belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yalçinkaya (Ünver), M., 1996/1. Kalman-Filtreleme Yöntemi ile Kinematik Düşey Hareketlerin Belirlenmesi, Harita Dergisi, 116, 14-31.
- Yalçinkaya (Ünver), M., 1996/2. Nivelman Ağlarında Duyarlık ve Güven Ölçütleri, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi, 80, 73-84.

- Yalçinkaya (Ünver), M. ve Tanır, E., 2000. Determination of Movements on Mining Areas by Static Deformation Models, 11th International Congress of the International Society for Mine Surveying”, Cracow Poland, Proceedings, 331-344,.
- Yalçinkaya (Ünver), M. ve Bayrak, T., 2001/1. Heyelanların Dinamik Deformasyon Modeli İle Belirlenmesi, 8. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, Bildiriler Kitabı, 55-63.
- Yalçinkaya (Ünver), M. ve Bayrak, T., 2001/2. Developing a Dynamic Deformation Model For Landslides, Fourth International Symposium “Turkish-German Joint Geodetic Days”, Berlin, Proceedings, 583-590.
- Yalçinkaya (Ünver), M., 2001. Üç Boyutlu Ağlarda Kalman-Filtreleme Tekniğinin Uygulanması: Matlab ve Fortran Programlama Dilleriyle Çözümü, K.T.Ü. M.M.F. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Araştırma Raporları, Fakülte Yayın No: 2001/1.
- Yanıçoğlu, O., 1986. Kalibrasyon Bazı Dengelemesinde Fonksiyonel Model Testi, Harita Dergisi, 97, 31-47.
- Yaşayan, R. Y., 1994. Bütünleşik Ağların Dengelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yüzer, E., 1987. Kaya Şevlerinde Denetim-Gözetim ve Uyarı Sistemleri, Yamaç ve Şevlerin Stabilitesi Dayanma Yapıları Semineri, Samsun, Cilt II, 1-26.
- Zezere, J. L., Ferreira, A. B. and Rodrigues, M. L., 1999/1. Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and Triggering Factors, Phys. Cem. Earth (A), Vol 24, No. 10, 925-934.
- Zezere, J. L., Ferreira, A. B. and Rodrigues, M. L., 1999/2. The Role of Conditioning and Triggering Factors in the Occurrence of Landslides: A Case Study in the Area North of Lisbon (Portugal), Geomorphology, 30, 133-146.
- Zhou, C. H., Lee, C. F., Li, J. and Xu, Z. W., 2002. On The Spatial relationship Between Landslides and Causatives Factors on Lantau Island, Hong Kong, Geomorphology, 43, 197-207.
- Zippelt, K., 1998. Modelbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von Vertikalbewegungen unter Verwendung von Prazisionsnivelements, DGK Reihe C, 343, 3-153.
- Zohdy, A. R, 1989. A New Method for The Automatic Interpretation of Schlumberger and Wenner Sounding Curves, Geophysics, 54, 2, 245-253.

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise Trabzon'da tamamladı. 1988 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümüne girdi. 1992 yılında bölümü başarı ile bitirdi. Aynı yıl adı geçen bölümde Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve bir yıl süreyle Sürmene Yabancı Dil Hazırlık Okulunda İngilizce eğitimi aldı. 1993 yılı Kasım ayında Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 1995 yılında Evlendi. 1996 Yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümünde Doktora öğrenimine başladı. 1997'de Zeynep ve 1998'de Sena adlı iki kız çocuğu oldu. 1998 yılında Y.Ö.K. tarafından Doktora öğrenimine devam etmek üzere Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümüne 35. madde uyarınca görevlendirildi. Halen adı geçen bölümde Doktora öğrencisi ve misafir Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir.