

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BABADAĞ (DENİZLİ) İLÇESİNDEKİ YAMAÇ DURAYSIZLIĞININ ÇOK
PARAMETRELİ İZLEME TEKNİKLERİ, FİZİKSEL MODEL DENEYLERİ
VE MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Sefer Beran ÇELİK**

Anabilim Dalı : Jeoloji Mühendisliği

Programı : Uygulamalı Jeoloji

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Halil KUMSAR

TEMMUZ 2012

DOKTORA TEZ ONAY FORMU

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 061640003 nolu öğrencisi Sefer Beran ÇELİK tarafından hazırlanan “**BABADAĞ (DENİZLİ) İLÇESİNDEKİ YAMAÇ DURAYSIZLIĞININ ÇOK PARAMETRELİ İZLEME TEKNİKLERİ, FİZİKSEL MODEL DENEYLERİ VE MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

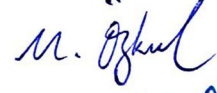
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Halil KUMSAR (PAÜ)
(Jüri Başkanı)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Reşat ULUSAY (HÜ)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL (PAÜ)




Jüri Üyesi : Doç. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK (SDÜ)



Jüri Üyesi : Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK (GÜ)



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
~~01.08.2012~~ tarih ve ~~19/20~~.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Nuri KOLSUZ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

İmza

: 

Öğrenci Adı Soyadı : Sefer Beran ÇELİK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, uzun yıllardan günümüze değin Denizli ili Babadağ ilçesinde görülen ve Gündoğdu Mahallesi'nde yaşayan halkı olumsuz yönde etkileyen Gündoğdu heyelanı incelenmiştir. Arazi izleme ve laboratuvar çalışmaları ile çeşitli analizleri içeren tezin gerçekleştirilmesinde her türlü destek ve katkıyı sağlayan danışman hocam Prof. Dr. Halil KUMSAR'a (Pamukkale Üniversitesi), tezin şekillenmesinde öneri ve görüşlerini her fırsatta belirten, tez izleme kurulu üyelerinden Prof. Dr. Reşat ULUSAY'a (Hacettepe Üniversitesi) ve Prof. Dr. Mehmet ÖZKUL'a (Pamukkale Üniversitesi), jüri üyeleri Doç. Dr. Mahmut MUTLUTÜRK'e (Süleyman Demirel Üniversitesi) ve Doç. Dr. Nihat Sinan IŞIK'a (Gazi Üniversitesi) sağladıkları katkıdan dolayı teşekkür ederim. Gündoğdu heyelanı ile ilgili yapılan çalışmalara başlangıcından itibaren bizzat destek sağlayan, laboratuvar deneylerinin gerçekleştirilmesinde, değerlendirilmesinde ayrıca sayısal analiz ve çözümlenmelerde katkı sağlayan, yardım ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Ömer Aydan'a (Tokai Üniversitesi-Japonya), 2000 yılından günümüze Japonya ve Türkiye'den katılımcıların yer aldığı bir proje kapsamında incelenen Gündoğdu heyelanını izleme ile ilgili çalışmaların bu tez çalışmasında da devam ettirilmesinde her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan, ayrıca bu izleme yöntemleri üzerinde çeşitli çalışma ve gözlemler yapmak üzere şahsımı 6 ay süreliğine Nihon Üniversitesi'ne davet eden Prof. Dr. Hisataka TANO'ya (Nihon Üniversitesi-Japonya) en içten teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvarda model deneylerinin gerçekleştirildiği sarsma masası ve ilgili deney düzeneği, Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiş 2009KRM001 no.lu bir altyapı projesi kapsamında yaptırılmıştır. Bu destek için ilgili birim ve yöneticilerine ayrıca teşekkür ederim. Tez konusu ile ilgili zaman zaman görüş, öneri ve desteklerini aldığım Pamukkale Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üye ve elemanlarından, Yrd. Doç. Dr. Mete HANÇER'e, Yrd. Doç. Dr. Suat TAŞDELEN'e, Yrd. Doç. Dr. İbrahim ÇOBANOĞLU'na, Yrd. Doç. Dr. Tamer KORALAY'a, Yrd. Doç. Dr. Ali KAYA'ya, Jeo. Yük. Müh. Mustafa KAYA'ya, Uz. M. Oruç BAYKARA'ya ve Araş. Gör. Dr. Savaş TOPAL'a ayrıca Yrd. Doç. Dr. H. Alim Baran'a teşekkürlerimi sunarım. Arazi çalışmalarının gerçekleştirilmesinde araç desteği sağlayan Denizli Valiliği İl Özel İdaresi'ne, İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü'ne ve Tarım İl Müdürlüğü'ne, arazi çalışmalarında sağladıkları destekten dolayı Babadağ İlçesi Kaymakamlığı'na, Belediye Başkanlığı'na, çalışanlarına ve ilçe halkına teşekkür ederim. Her zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim ve aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2012

Sefer Beran Çelik

Jeoloji Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı.....	1
1.2 Önceki Çalışmalar	8
1.2.1 Babadağ ilçesi ve yakın çevresini konu alan jeoloji çalışmaları.....	8
1.2.2 Babadağ ilçesi Gündoğdu heyelanını konu alan çalışmalar	10
2. İNCELEME ALANININ TANITIMI	15
2.1 Jeomorfoloji	15
2.2 İklim, Bitki Örtüsü ve Akarsular	16
2.3 Sosyo-Ekonomik Durum	18
3. İNCELEME ALANI VE YAKIN CİVARININ JEOLÖJİK ÖZELLİKLERİ	19
3.1 Stratigrafi	19
3.1.1 Babadağ Metamorfitleri.....	19
3.1.2 Sazak Formasyonu.....	19
3.1.3 Kolonkaya Formasyonu.....	22
3.1.3.1 Ahıllı Marn Üyesi.....	23
3.1.3.2 Babadağ Kumtaşı-Marn Üyesi	24
3.1.3.3 Manastır Çakıltası Üyesi	25
3.1.3.4 Mollaahmetler Çakıltası Üyesi.....	25
3.1.4 Asartepe Formasyonu	26
3.2 Süreksizlikler ve Kıvrımlar.....	28
4. İNCELEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN DEPREMSELLİĞİ VE İVME TAHMİNLERİ	33
4.1 Depremsellik	33
4.2 İnceleme Alanını Etkileyebilecek İvmelerin Tahmini	36
5. GÜNDOĞDU HEYELANI İÇİN ÇOK PARAMETRELİ İZLEME SİSTEMİ	46
5.1 Yağış ve Yeraltısuyu Seviye Değişimleri.....	46
5.2 Kuyu İçi Deformasyon Ölçümleri.....	48
5.3 Akustik Emisyon Aktivitesinin İzlenmesi	49
5.4 Çok Parametrelİ İzleme Verilerinin Değerlendirilmesi.....	53
5.5 Mesafe Değişimi Ölçümleri.....	57
6. JEOMEKANİK LABORATUVAR DENEYLERİ, FİZİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI VE MODEL DENEY DÜZENEGİ	67
6.1 Jeomekanik Laboratuvar Deneyleri.....	67
6.1.1 Fiziksel özelliklerin belirlenmesi	67
6.1.2 Kumtaşı araseviyesinin makaslama dayanımının belirlenmesi.....	68
6.2 Fiziksel Modelin Oluşturulması	73
6.3 Model Deney Düzeneginin Özellikleri.....	80

6.3.1 Sarsma masasının genel özellikleri	80
6.3.1.1 Sarsma masası ile üretilebilen ivmeler ve ölçümleri	82
6.3.1.2 Yatay mesafe değişimi 20 mm seçilerek üretilen ivmeler	85
6.3.1.3 Yatay mesafe değişimi 30 mm seçilerek üretilen ivmeler	89
6.3.1.4 Sarsma masasında oluşturulabilen farklı ivme şekilleri.....	93
6.3.1.5 Sarsma masasının hassasiyeti ile ilgili değerlendirmeler.....	95
6.3.2 Lazer mesafe ölçüm sistemi.....	97
6.3.3 Veri kayıt sistemi.....	98
6.3.4 İvme ölçer	99
6.3.5 Akustik emisyon veri kayıt sistemi	100
7. STATİK VE DİNAMİK MODEL DENEYLERİ	102
7.1 Eğitlendirme Deneyleri.....	102
7.2 Dinamik Sarsma Masası Deneyleri	111
7.3 Şok Deneyleri.....	116
7.4 Sayısal Analizler ve Deney Verileriyle Karşılaştırılmaları	121
8. GÜNDOĞDU HEYELANININ STATİK VE DİNAMİK DURAYLILIK ANALİZLERİ.....	126
8.1 Statik ve Psödostatik Şev Duraylılığı Analizleri.....	126
8.1.1 Analizlerde kullanılan parametrelerin seçimi	127
8.1.2 Gündoğdu heyelanının statik duraylılık analizi	128
8.1.3 Gündoğdu heyelanının psödostatik analizi	131
8.2 Dinamik Koşullar İçin Gerçekleştirilen Analizler	132
9. GÜNDOĞDU HEYELANININ ANALİTİK VE AYRIK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ANALİZİ	135
9.1 Su İçeriğine Bağlı Olarak Malzeme Özelliklerinin Değişiminin Belirlenmesi	137
9.2 Uzun Dönem YAS Seviye Değişimleri ve Yerdeğiştirme ile İlişkisi	140
9.3 Basitleştirilmiş Analitik Model ve Sonlu Elemanlar Modeli.....	142
9.3.1 Analitik model ve uygulaması	142
9.3.2 Yarı-sonsuz çoklu marn tabakalarının sonlu elemanlar modeli.....	143
9.4 Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemi (DFEM).....	145
9.4.1 Ayrık sonlu elemanlar yönteminin başlıca ilkeleri.....	145
9.5 Klasik DFEM Analizleri.....	146
9.6 Yumuşama-Sertleşme Modelini İçeren DFEM Analizleri	153
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	158
KAYNAKLAR.....	162
EKLER.....	171

KISALTMALAR

AE	: Akustik Emisyon
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DFEM	: Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemi
DFEM-CSH	: Devirsel Yumuşama Sertleşme Modelini İçeren DFEM Yöntemi
dv/dk	: Dakikadaki Devir Sayısı
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
kHz	: Kilohertz
ms	: Milisaniye
USGS	: United States Geological Survey
UTM	: Universal Transverse Mercator
YAS	: Yeraltısuyu Seviyesi

TABLO LİSTESİ

Tablolar

4.1 : Denizli ve yakın çevresinde meydana gelen tarihi depremler ve etkileri ...	33
4.2 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen ve büyüklüğü 5 ve daha yüksek olan depremler (KRDAE-UDİM verileri) ...	39
4.3 : İnceleme alanı için hesaplanan ivme değerleri.....	40
4.4 : İnceleme alanı için 6.3 büyüklüklü bir deprem olması durumunda hesaplanan ivme değerleri.....	40
6.1 : Belirlenen makaslama dayanımı parametreleri	71
6.2 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı hızlardaki makaslama dayanımı parametreleri	72
6.3 : Yapay kumtaşı seviyesinin oluşturulabilmesi için hazırlanan karışımlar ve ağırlıkça bileşenleri.....	75
6.4 : 20 mm yatay hareket için sarsma masasının hareket karakteristikleri.....	87
6.5 : 20 mm yatay hareket için belirlenen eşitlikler.....	88
6.6 : 30 mm yatay hareket için sarsma masasının hareket karakteristikleri.....	91
6.7 : 30 mm yatay hareket için belirlenen eşitlikler.....	93
7.1 : Kuru ve statik durumda fiziksel model üzerinde gerçekleştirilen eğimlendirme deneyleri sonuçları	103
7.2 : Eğimlendirme deneylerinden belirlenen statik ve hesaplanan dinamik kayma açıları.....	109
7.3 : Nemli koşullarda gerçekleştirilen eğimlendirme deney sonuçları.....	110
7.4 : Dinamik deneylerde yenilme anındaki hareket karakteristikleri.....	114
8.1 : AA' ve BB' kesitleri için hesaplanan güvenlik katsayıları	130
9.1 : Marnın artan su içeriğine bağlı olarak belirlenen makaslama dayanımı değerleri.....	139

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

1.1 : a) Babadağ ilçesinin genel görünümü (kuzeybatıya bakış), b) Gündoğdu Mahallesi ve heyelan alanının yaklaşık sınırı (kuzeybatıya bakış), c) eğimli tabakalar üzerinde kurulu Gündoğdu Mahallesi'nin görünümü (güneye bakış).....	2
1.2 : Afet Kanunu kapsamında yapılaşma ve iskana kapatılan alan.....	4
1.3 : Gündoğdu Mahallesi'nde, yapı ve yollarda yamaç hareketi nedeniyle gelişen olumsuzluklara örnekler	5
2.1 : İnceleme alanının yerbulduru haritası ve uydu görüntüsü	16
2.2 : İnceleme alanının yerleşim yerlerini, yolları, akarsuları, yükseltileri ve morfolojisini gösteren harita.....	17
3.1 : İnceleme alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti	20
3.2 : İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası ve enine kesiti	21
3.3 : Babadağ metamorfitlelerinin ilçe merkezindeki görünümü.....	22
3.4 : Hisar Kireçtaşı Üyesinin Hisarköy'ün doğusundaki görünümü.....	23
3.5 : Ahıllı Marn Üyesi'nin Ahıllı köyü yakınındaki bir yol yarmasındaki görünümü.....	24
3.6 : Babadağ Kumtaşı Marn Üyesinin ilçe merkezinin doğusunda bir yamaçtaki görünümü.....	25
3.7 : Manastır Çakıltası Üyesi'nin, Demirli kuzeyindeki bir yol yarmasındaki görünümü	26
3.8 : Kelleci Çakıltası Üyesinin Yeniköy'ün güneyindeki bir yamaçtaki görünümü.....	27
3.9 : İnceleme alanında, Gündoğdu Mahallesi civarındaki yol yarmalarında alınan tabaka ölçülerine göre hazırlanan kontur diyagramı	28
3.10 : Denizli Havzası ve yakın çevresinin jeoloji haritası.....	29
3.11 : Ahıllı Marn Üyesi ile Kelleci Çakıltası Üyesinin faylı dokanağının görünümü.....	30
3.12 : Babadağ fayının Yeniköy'ün doğusundaki görünümü	31
3.13 : Ahıllı fayının Ahıllı'nın kuzeybatısındaki görünümü.....	31
3.14 : Hisar fay düzleminin Hisarköy'ün doğusundaki görünümü	32
4.1 : 1973-2003 yılları arası Denizli ve çevresinde meydana gelen depremlere ilişkin "eklenik büyüklük-zaman" ilişkisi	34
4.2 : 1973-2003 yılları arası Denizli ve çevresinde meydana gelen depremlere ilişkin "büyüklük-sıklık" ilişkisi.....	35
4.3 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen depremler ve faylarla ilişkisi	35
4.4 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen 5 ve daha yüksek büyüklüklü depremler	38
4.5 : Deprem iç merkezi ile inceleme alanı arasındaki en yakın mesafenin hesaplanması.....	39

4.6	: 5 Şubat 2011'de Denizli-Akköy'de (a) ve 4 Nisan 2012 tarihinde Denizli-Baklan'da meydana gelen depremlerin Babadağ'da alınan ivme kayıtları.....	42
4.7	: 5 Şubat 2011 tarihinde Denizli-Akköy'de meydana gelen depremin Sarayköy ve Babadağ istasyonlarında alınan ivme kayıtlarının karşılaştırılması.....	43
4.8	: 5 Şubat 2011 tarihinde Denizli-Akköy'de meydana gelen depremin Denizli çevresindeki istasyonlarda alınan ivme değerleri ve ivme azalım ilişkileri ile karşılaştırılmaları.....	44
4.9	: Normal faylar için Büyüklük-kırık uzunluğu ilişkisi	45
4.10	: 6.8 büyüklüklü olası bir depremde Babadağ'da beklenecek en büyük ivme değeri	45
5.1	: Gündoğdu heyelanı çoklu izleme parametrelerinin ölçüm yerleri	46
5.2	: DMİ Babadağ istasyonu ve ilçeye kurulan istasyondan alınan aylık ortalama yağış miktarları.....	47
5.3	: SK-2 YAS seviyesi kayıt cihazı (a) ve SK-2 ve 3 kuyu yerleri (b).....	47
5.4	: Babadağ ilçesi için Eylül 2002 ile Mart 2011 arasındaki yıllık toplam yağış miktarları ve SK-2 kuyusundaki YAS seviyesi düşümü.....	48
5.5	: Kuyu içi deformasyon ölçüm sistemi.....	49
5.6	: Farklı eşik seviyelerine göre üretilen AE sayıları	51
5.7	: Arazi AE izleme sisteminin genel özellikleri.....	51
5.8	: AE-1, 2, 3 ve 4 istasyonlarının görünüşleri ve ayrıntılar.....	52
5.9	: 06.08.2005 ile 31.12.2006 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin YAS seviyesi, yağış ve AE aktivitesi ile ilişkisi	54
5.10	: 04.01.2007 ile 02.12.2007 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin AE aktivitesi ile ilişkisi.....	55
5.11	: 04.08.2008 ile 25.06.2009 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin, YAS seviyesi ve yağış ile ilişkisi	56
5.12	: Lazermete ile mesafe ölçümü	57
5.13	: Lazermetreyle alınan ölçümlerde kullanılan mesafe ölçüm noktaları	58
5.14	: 1, 2, 3, 4/1 ve 4/2 no.lu istasyonlardaki mesafe değişimleri ve bunların yağışla ilişkisi.....	59
5.15	: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 16 no.lu istasyonlardaki mesafe değişimleri ve yağışla ilişkisi	60
5.16	: AE-4 istasyonu mesafe ölçüm sistemi (telin gerilmesiyle dönen diske sabitlenmiş eğim algılayıcı (a), istasyonun görünümü (b)	61
5.17	: AE-4 istasyonunda ölçülen mesafe değişimi ve yağışla olan ilişkisi	62
5.18	: AE-4 istasyonunun alt ve üst kesimlerinde gözlenen deformasyonlar	63
5.19	: AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-1 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.....	64
5.20	: AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-2 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.....	65
5.21	: AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-3 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.....	65
5.22	: AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-4 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.....	66
6.1	: Birim hacim ağırlıkların belirlendiği kumtaşı ara yüzeyli prizmatik marn örnekleri.....	67
6.2	: Kumtaşı ara seviyelerinden örselenerek alınmış örneğin tane boyu dağılımı.....	68

6.3 : Marn ve kumtaşımdan hazırlanan ince kesitlerin görünümüleri	69
6.4 : Makaslama kutusu deney sistemi (veri alım ünitesi ve makaslama deney cihazı), hazırlanan prizmatik örnekler ve deney esnasındaki nemlendirme işleminden görünümeler	70
6.5 : 0.5 mm/dk hızındaki deneyde elde edilen makaslama gerilmesi-yerdeğiştirme grafikleri	71
6.6 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı makaslama hızlarındaki doruk makaslama yenilmesi zarfları	72
6.7 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı makaslama hızlarındaki artık makaslama yenilmesi zarfları	72
6.8 : Fiziksel model hazırlanış aşamaları	74
6.9 : Makaslama deneyleri için hazırlanan I, II ve III no.lu karışım örnekleri ...	75
6.10 : I no.lu (% 1) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri	76
6.11 : II no.lu (% 4) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri	76
6.12 : III no.lu (% 8) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri	76
6.13 : I nolu (% 1) karışım örneklerinin makaslama deneyi sonrası görünümüleri	77
6.14 : Hazırlanan kumtaşı örneklerinin farklı bağlayıcı oranlarındaki yenilme zarfları	77
6.15 : Fiziksel modelin deney düzeneğine aktarılması	78
6.16 : Laboratuvar koşullarında hazırlanan fiziksel modelin ölçekli görünümü	79
6.17: Tez çalışmasında kullanılan sarsma masası ve deney düzeneğinin detaylı görünümü	83
6.18 : Yerdeğiştirme verisinden hız ve ivmenin hesaplanması aşamaları	84
6.19 : 30 dv/dk motor hızında alınan yerdeğiştirme ve hesaplanan hız ve ivme değerleri	85
6.20 : Masanın 20 mm yatay hareketi için 10-190 dv/dk arası hesaplanan yerdeğiştirme, hız ve ivme grafikleri	86
6.21 : 20 mm yatay harekette hız ile dakikadaki devir sayısının ilişkisi	88
6.22 : 20 mm yatay harekette ivme ile dakikadaki devir sayısının ilişkisi	88
6.23 : 20 mm yatay harekette frekans ve periyotun dakikadaki devir sayısı ile ilişkisi	89
6.24 : Masanın 30 mm yatay hareketi için 10-190 dv/dk arası hesaplanan yerdeğiştirme, hız ve ivme grafikleri	90
6.25 : 30 mm masa hareketi için dakikadaki devir sayısı ile hesaplanan hız ilişkisi	91
6.26 : 30 mm masa hareketi için dakikadaki devir sayısı ile hesaplanan ivme ilişkisi	92
6.27 : 30 mm yatay harekette frekans ve periyodun dakikadaki devir sayısı ile ilişkisi	92
6.28 : 20 ve 30 mm'lik yatay hareket miktarları için hız ve ivme değerlerinin dakikadaki devir sayılarıyla değişimi	93
6.29 : 20 mm'lik yatay harekette 120-30 dv/dk arasında üretilen ve giderek azalan ivme değerleri grafiği	94
6.30 : 20 mm'lik yatay harekette 30-120 dv/dk arasında üretilen ve giderek artan ivme değerleri grafiği	94

6.31 : 20 mm'lik yatay harekette değişen devirlerde üretilen ivme değerleri grafiği	94
6.32 : 20 mm'lik hareket için ivme ölçerin kaydettiği ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	95
6.33 : 30 mm'lik hareket için ivme ölçerin kaydettiği ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması	96
6.34 : Lazer mesafe ölçüm sisteminin bileşenleri.....	96
6.35 : Graphtec 8 kanallı veri kayıt cihazı	98
6.36 : G-MEN DR02a portatif ivme ölçer	99
6.37 : AE veri alım sistemi (a) ve modele tutturulmuş AE algılayıcısı (b).....	100
6.38 : Deneylerde kullanılan AE veri alım sisteminin bileşenleri.....	100
7.1 : Eğilendirme deney düzeneği	103
7.2 : Kuru koşullarda gerçekleştirilen eğilendirme deneylerinde alınan verilerin grafik olarak sunumu.....	104
7.3 : Kayan bloğa etkiyen kuvvetler	105
7.4 : Eğilendirme deneylerinde kaydedilen zamana bağlı blok yerdeğiştirmeleri ve hareketleri en iyi temsil eden eğriler	108
7.5 : Nemli koşullardaki eğilendirme deneylerinde alınan verilerin grafikleri	110
7.6 : Dinamik model deney düzeneği ve ölçüm sistemlerinin görünümü.....	111
7.7 : 16, 18 ve 20°lik eğimlerde gerçekleştirilen dinamik deneylerde masa ivmesi, blok hareketi ve AE aktivitesi arasındaki ilişki	112
7.8 : 22 ve 24°lik eğimlerde gerçekleştirilen dinamik deneylerde masa ivmesi, blok hareketi ve AE aktivitesi arasındaki ilişki	113
7.9 : Dinamik model deneylerde elde edilen eğim miktarı, statik kayma açısı ve kritik ivme arasındaki ilişki	114
7.10 : 18°lik eğimde nemli koşullarda gerçekleştirilen dinamik deneylerde masanın ürettiği ivme ile blok hareketi arasındaki ilişki.....	116
7.11 : Şok deney düzeneğinden görünümler (a, b) ve nemlendirme işlemleri (c).....	117
7.12 : Kuru koşullarda, 16°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları..	118
7.13 : Nemli koşullarda, 16°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları	118
7.14 : Kuru koşullarda, 20°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları..	119
7.15 : Nemli koşullarda, 20°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları	119
7.16 : Kuru koşullarda, 24°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları..	120
7.17 : Nemli koşullarda, 24°lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları	120
7.18 : Eğimli kayma yüzeyi üzerindeki bloğa etkiyen kuvvetler	122
7.19 : 16, 18 ve 20°lik eğimlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirme miktarlarına ilişkin grafikler.....	124
7.20 : 22 ve 24°lik eğimlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirme miktarlarına ilişkin grafikler.....	125
8.1 : Duraylılık analizlerinde kullanılan AA' ve BB' kesit hatlarının konumları.....	127
8.2 : Analizlerin gerçekleştirildiği AA' ve BB' kesitleri ve tanımlanan kayma yüzeyi ile YAS profilleri.....	129
8.3 : AA' kesiti ve YAS seviyesinin Slopac yazılımına yüklenmiş halde görünümü.....	130

8.4 : AA' ve BB' kesitleri için hesaplanan güvenlik katsayısı ile psödo statik yer ivmesi değerlerinin değişimi.....	131
8.5 : Yamaca etkiyen kuvvetler	133
8.6 : Mw: 6.8'lik olası bir deprem için hesaplanan yerdeğiştirme miktarları ...	134
9.1 : Marn örnekleri üzerinde yapılan makaslama deneylerinde elde edilen makaslama gerilmesi-makaslama yerdeğiştirme grafikleri	137
9.2 : Marn örneklerinin kuru koşullar için belirlenen doruk ve artık makaslama yenilmesi zarfları	137
9.3 : Prizmatik örneğin suya doyurulma işlemi.....	138
9.4 : Marn örneğinin zamana bağlı olarak belirlenen su emme miktarları	138
9.5 : Farklı su içerikleri için makaslama gerilmesi-makaslama yerdeğiştirmesi grafikleri	139
9.6 : Marnın su içeriğine bağlı olarak makaslama dayanımındaki düşüş	140
9.7 : AE-4 istasyonunda ölçülen yerdeğiştirme verisi ile yağış ilişkisi	141
9.8 : YAS seviyesinde görülen yükselme ve ilgili yükselmeye neden olan toplam yağış miktarı ilişkisi	142
9.9 : Ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirmelerin karşılaştırılmaları	143
9.10 : Ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması	144
9.11 : SK-3 kuyusunda ölçülen zamana bağlı birim deformasyon davranışı....	144
9.12: Seçilen zamanlar için hesaplanan yerdeğiştirmeler	144
9.13 : DFEM analizi için FEM eleman ağı	146
9.14 : 1. Durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	147
9.15 : 1. durum için 12. adım sonundaki asal gerilme dağılımı	147
9.16 : 1. durum için 12. adım sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrileri.....	147
9.17 : 2. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen yerdeğiştirme miktarları	148
9.18 : 2. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.....	148
9.19 : 3. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	149
9.20 : 3. durum için 1. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.....	149
9.21 : 3. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.....	150
9.22 : 4. durum için 1. hesaplama adımında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	150
9.23 : 4. durum için 12. hesaplama adımında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	150
9.24 : 5. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.....	151
9.25 : 6. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	152
9.26 : 6 durum için yamaç topuğu için elde edilen yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.....	153
9.27 : 6 durum için topukta elde edilen yerdeğiştirme oranlarının karşılaştırılması.....	153
9.28 : Analizlerde 1. ve 215. gün sonlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları	155

9.29 : Hesaplamalarda 1. ve 215. günlerin sonu için elde edilen asal gerilme değerleri ve en büyük makaslama gerilmesi eşdeğer eğrileri.....	155
9.30 : Yamaç üzerinde seçilen 3 noktanın 215. gün için hesaplanan yerdeğiştirme miktarları	156
9.31 : Farklı zamanlar için belirlenen yerdeğiştirme miktarları	157

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kayma Yüzeyi Uzunluğu
a₂₀	: Sarma Masasının 20 mm Yatay Hareketi İçin Üretilen İvme
a₃₀	: Sarma Masasının 30 mm Yatay Hareketi İçin Üretilen İvme
a_c	: Kritik Taban İvmesi
a_h	: Yatay Yöndeki İvme Bileşeni
a_{maks}	: En Büyük Yer İvmesi
a_v	: Düşey Yöndeki İvme Bileşeni
c	: Kohezyon
E_h	: Yatay Yöndeki Deprem Yüğü
E_v	: Düşey Yöndeki Deprem Yüğü
F₂₀	: Sarma Masasının 20 mm Yatay Hareket Frekansı
F₃₀	: Sarma Masasının 30 mm Yatay Hareket Frekansı
g	: Yer çekimi ivmesi
G_d	: Kuru Durumdaki Kayma Modülü
G_p	: Plastik Deformasyon Modülü
G_s	: Doygun Durumdaki Kayma Modülü
h_{RF}	: Yağış Aktivitesine Bağlı Toplam Yağış Miktarı
M_L	: Yerel Büyüklük Cinsinden Deprem Büyüklüğü
M_s	: Yüzey Dalgası Cinsinden Deprem Büyüklüğü
M_w	: Depremin Moment Büyüklüğü
N	: Kayma Yüzeyine Dik Etkiyen Normal Kuvvet
p	: Basınç
r_u	: Gözenek Suyu Basınç Katsayısı
S	: Kaymaya Karşı Makaslama Kuvveti
T₂₀	: Sarma Masasının 20 mm Yatay Hareket Periyodu
T₃₀	: Sarma Masasının 30 mm Yatay Hareket Periyodu
V₂₀	: Sarma Masasının 20 mm Yatay Hareketi İçin Üretilen Hız
V₃₀	: Sarma Masasının 30 mm Yatay Hareketi İçin Üretilen Hız
W	: Kayan Bloğun Ağırlığı
Δh_w	: YAS seviye değişimi (yükselimi)
α	: Kayma Düzleminin (tabaka) Yatayla Yaptığı Açısı
φ	: İçsel Sürtünme Açısı
φ_{dinamik}	: Dinamik Kayma Açısı
φ_{statik}	: Statik Kayma Açısı
γ	: Birim Hacim Ağırlık
μs	: Mikro Gerinme
ρ	: Yoğunluk
σ	: Normal Gerilme
τ	: Makaslama Gerilmesi

ÖZET

BABADAĞ (DENİZLİ) İLÇESİNDEKİ YAMAÇ DURAYSIZLIĞININ ÇOK PARAMETRELİ İZLEME TEKNİKLERİ, FİZİKSEL MODEL DENEYLERİ VE MATEMATİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Bu tez çalışmasında, rapor edildiği ilk tarihten günümüze değin yaklaşık 70 yılı aşkın bir süredir Denizli ili Babadağ ilçe merkezinde görülen ve ilçe halkını olumsuz yönde etkileyen Gündoğdu heyelanı incelenmiştir. Güncel izleme verileri ışığında hareketin seyrinin araştırılması, statik ve dinamik model deneyleriyle kayma hareketinin laboratuvar koşullarında incelenmesi, limit denge ve sayısal analizlerle hareketin incelenmesi ve ayrıca yağışa bağlı yeraltısuyu seviye değişikliklerinin yamaç duraysızlığına etkilerinin dinamik koşulları da kapsayacak şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, Gündoğdu yamaç hareketinin ele alındığı çalışmalar ile inceleme alanı ve yakın çevresi için yapılmış jeoloji çalışmaları incelenmiştir. Yamaç hareketini kontrol eden jeolojik yapı saha çalışmaları ile incelenmiş ve inceleme alanı ve yakın çevresi için önceki çalışmalarda hazırlanan haritalardan yararlanılarak jeoloji haritası ve bir enine kesit hazırlanmıştır.

Bölgenin depremsellik açısından aktif bir bölgede yeralmasından dolayı, 1900 yılından günümüze değin yakın çevrede meydana gelmiş, 5 ve daha yüksek büyüklükteki depremler belirlenmiş ve inceleme alanı ile bu deprem odak ve merkez üstü uzaklıkları arası mesafeler belirlenerek yamacı etkilemiş olabilecek ivme değerleri Türkiye verileri kullanılarak geliştirilmiş azalım ilişkileri ile tahmin edilmiştir.

2000 yılından bu yana yerinde izlenen parametreler değerlendirilmiştir. Bu parametreler; Kuyu içi deformasyon ölçümü, akustik yayılma aktivitesi, yağış, yeraltısuyu seviye değişimi ve belirli noktalarda gerçekleştirilen mesafe ölçümü verileridir. Bu verilerin yamaç hareketi ile olan ilişkileri araştırılmıştır. İzleme verileri hareketin seyrinin değişen hızlarda sürdüğünü göstermiştir. Elde edilen izleme verileri, sayısal ve duraylılık analizlerinde kullanılmıştır.

Analizlerde kullanılmak üzere araziden alınan örselenmemiş örnekler üzerinde yamacı oluşturan birimlerin fiziksel ve mekanik özellikleri tayin edilmiştir. Ayrıca yamaç hareketinin laboratuvar koşullarında incelenmesi amacıyla kumtaşı ara seviyeli marn tabakalarından oluşan fiziksel bir model oluşturulmuştur. Model deneylerinin gerçekleştirileceği sarsma masası ve deneylerde kullanılan ölçüm ve veri kayıt sistemleri incelenerek deneylere hazır hale getirilmiştir.

İlçe merkezinde yamaç hareketinin etkilediği alanda iki adet kesit alınarak bu kesitler üzerinde statik ve psödostatik duraylılık analizleri yapılmıştır. Model; sarsma masası

kullanılarak statik konumda eğilendirme deneylerine, ardından 16-24° arası eğimlerde sabitlenerek dinamik ve şok deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler kuru koşullarda gerçekleştirilmiş olup, ayrıca nemli koşullarda da yapılmaya çalışılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sarsma masası ile üretilen ivmeler ile modelin üst bloğunun hareketi incelenmiş ve eğim miktarı ile kritik ivme arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Eğim miktarının artışına bağlı olarak kritik ivme miktarının azaldığı görülmüştür. Deneylerde ölçülen değerler sayısal olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Statik ve psödostatik limit denge analizleri yapılmış ve dinamik etki altında yamacın göstereceği davranış hesaplanmıştır. Ayrık sonlu elemanlar yaklaşımı kullanılarak arazi ölçeğinde analizler gerçekleştirilmiş ve uzun dönemde yamaçta görülebilecek yerdeğiştirme miktarları hesaplanmıştır. Son olarak kayma zonundaki malzemenin, yağışlara bağlı olarak yeraltısuyu seviyesinin değişimiyle su içeriğinin artışı ve deformabilite özelliklerinde görülebilecek değişiklikleri temel alan devirsel yumuşama ve sertleşme modeli ile yamaç hareketi açıklanmıştır. Hesaplanan yerdeğiştirme miktarları ilgili döneme ait ölçülen değerlerle karşılaştırılmış, değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Gündoğdu heyelanı (Babadağ), fiziksel model, sarsma masası, yamaç duraylılığı, çok parametrelili izleme.

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE SLOPE INSTABILITY IN BABADAĞ TOWN (DENİZLİ) USING MULTI PARAMETER MONITORING TECHNIQUES, PHYSICAL MODEL TESTS AND MATHEMATICAL METHODS

In this thesis, Gündoğdu landslide, which has been affecting the people in the center of Babadağ town of Denizli for more than 70 years, was investigated. For this aim, recent field monitoring data was analyzed, laboratory model tests were carried out, limit equilibrium and numerical analysis were performed and finally slope movement was explained by a model which is based on deformability of sliding zone material by groundwater level fluctuations.

In this context, studies have dealt with Gündoğdu slope movement and geological studies which were made for the study area and its surroundings were investigated. Geological structure that control the movement of the slope was investigated by field studies and geological map and cross section were prepared considering the previous studies.

Study area is located in seismically active region, the earthquakes near the study area with magnitude 5 and higher were selected and epicentral, hypocentral distances were determined. Ground accelerations by those earthquakes were predicted by attenuation relationships which were developed by some researchers using Turkish data.

Field monitoring parameters since 2000 were evaluated. These parameters are borehole strain data, acoustic emission data, rainfall, groundwater levels and distance measurement values. Relation between these parameters and long term slope movement were investigated. According to field monitoring data, unstable condition of the slope is ongoing in varying rates. Findings were used in stability and numerical analysis.

Physical and mechanical properties were determined on disturbed and undisturbed soil samples for the stability analysis. In addition, for investigation the slope movement in laboratory condition a physical model consisting marl and sandstone intercalations were prepared. A shaking table, data monitoring and acquisition devices investigated and prepared for the tests.

Two cross sections were taken for the static and pseudostatic stability analysis. Model tests performed using shaking table. Firstly tilting tests, after dynamic stability tests were performed in dry conditions. In addition, tests were tried to perform under wet condition and result were discussed. In dynamic tests, base accelerations, block movement and dip values were investigated and relation between base acceleration and dip values were determined. By increasing of the base

angle, decreasing of the critical acceleration was determined. Measured and calculated results were compared.

Static and pseudostatic analysis were performed. In order to calculate the earthquake induced displacements, dynamic stability analyses were also carried out. Numerical analysis in field scale were conducted using discrete finite element analysis to calculate long term slope displacements. Finally, creep type Gündoğdu slope movement was explained by cyclic softening and hardening model which is based on deformability properties of marl by saturation from groundwater level fluctuations. The calculated and measured displacement were compared and similar results were obtained.

Key Words: Gündoğdu landslide (Babadağ), physical model, shaking table, slope stability, multi parameter monitoring.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Kapsamı ve Amacı

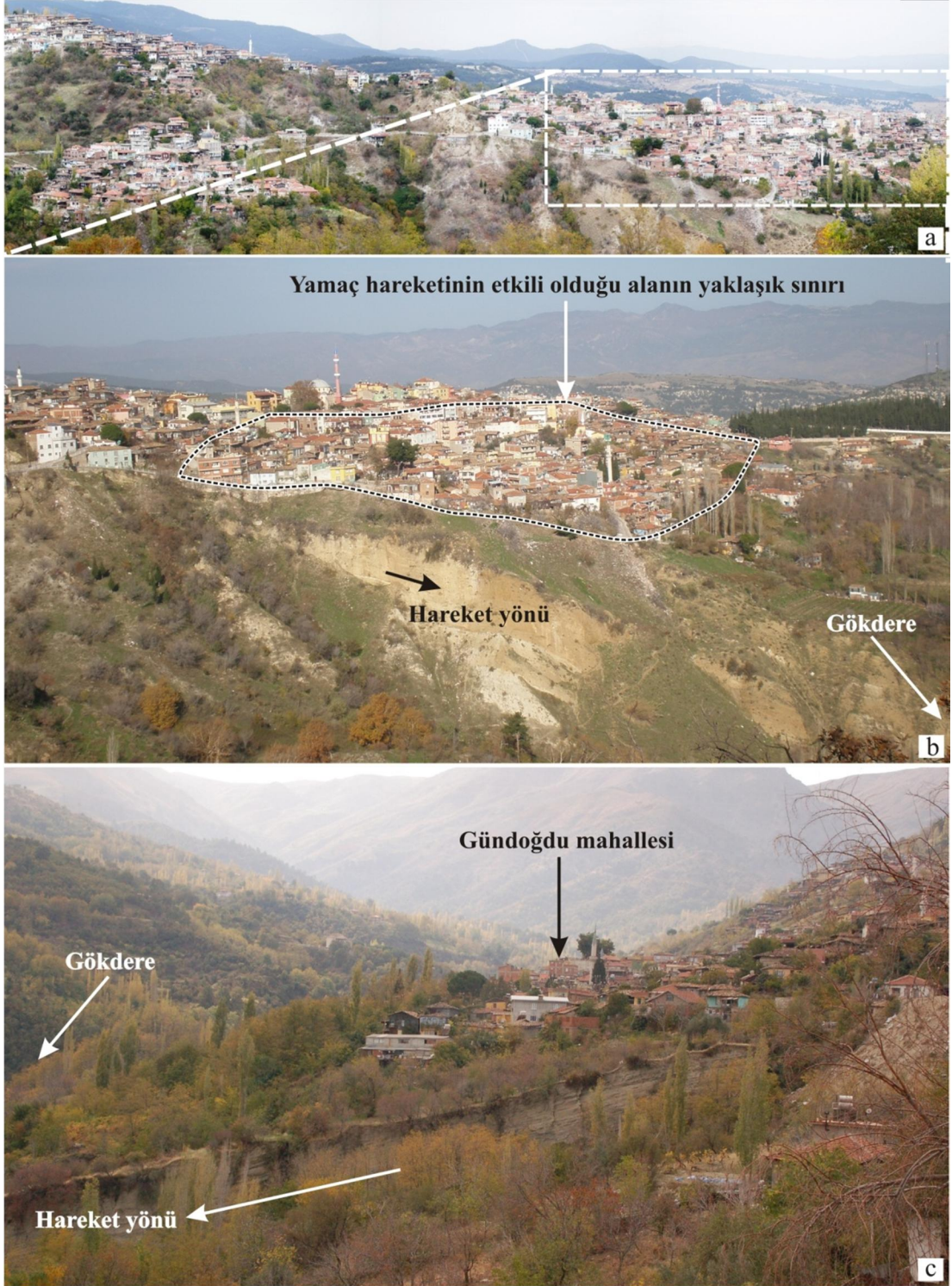
Heyelanlar, kaya, zemin veya moloz türü malzemenin yamaç eğimi yönünde aşağı hareket etmesi olarak tanımlanır (Cruden, 1991). Nüfus artışı ve kentleşme süreçlerine bağlı olarak yerleşim alanlarının duraysız yamaçlara doğru ilerlemesi, yol ve çeşitli inşaat kazıları, ormanlık alanların azalması vb. insan etkileri heyelanların meydana gelmesine veya tetiklenmesine neden olur.

Jeomorfolojik özellikler, düşük dayanımlı zemin veya kaya malzemesi özellikleri, şiddetli ve ani yağışların olumsuz etkileri, bitki örtüsü azlığı gibi faktörlerin etkisi altında, yerleşim yerlerinde görülen heyelanlar (yamaç duraysızlıkları) boyutlarıyla orantılı olarak can ve mal kayıplarına sebep olmasının yanı sıra, olumsuz sosyo-ekonomik sonuçlara neden olabilmektedir. Yağışlara bağlı olarak artan gözenek suyu basınçları ve depremlerin oluşturduğu dinamik tekrarlı yüklemeler heyelanların tetiklenmesine neden olan en yaygın etkenlerdendir.

Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Avusturya, Fransa, İtalya, İsviçre ve Hindistan'da heyelanlardan kaynaklanan yıllık ekonomik kayıpların 1 ile 5 milyar dolar arasında olduğu tahmin edilmektedir (Aleotti ve Chowdhury, 1999; Gökçeoğlu ve Ercanoğlu, 2001'den). Amerika Birleşik Devletlerinde heyelanların yılda 25-50 arası insanın yaşamını yitirmesine neden olduğu ve can ve ekonomik kayıpların depremlerden kaynaklanan kayıpları aştığı belirtilmiştir (Schuster and Fleming, 1986; Dai ve diğ., 2002'den). Li ve Wang (1992), Çin'de 1951 ile 1989 yılları arasında meydana gelen heyelanlarda toplam 5000 kişinin yaşamını yitirdiğini bir başka deyişle yıllık ortalama 125 can kaybı ve 500 milyon dolarlık ekonomik kaybın meydana geldiğini belirtmişlerdir (Dai ve diğ., 2002).

Babadağ (Denizli) ilçesi, Gündoğdu mahallesinin kurulu olduğu alanda, yetmiş yılı aşkın bir süredir düşük hızda seyreden ve Gündoğdu heyelanı olarak adlandırılan yamaç hareketi, hareketin gerçekleştiği alanda yaşayan halkı olumsuz yönde etkilemektedir. İlçe merkezinin büyük kısmının üzerinde kurulu olduğu Babadağ

kumtaşı-marn üyesi içinde görülen hareket, Gökdere vadisine doğru eğimli tabaka düzlemlerine paralel olarak seyretmektedir (Şekil 1.1).



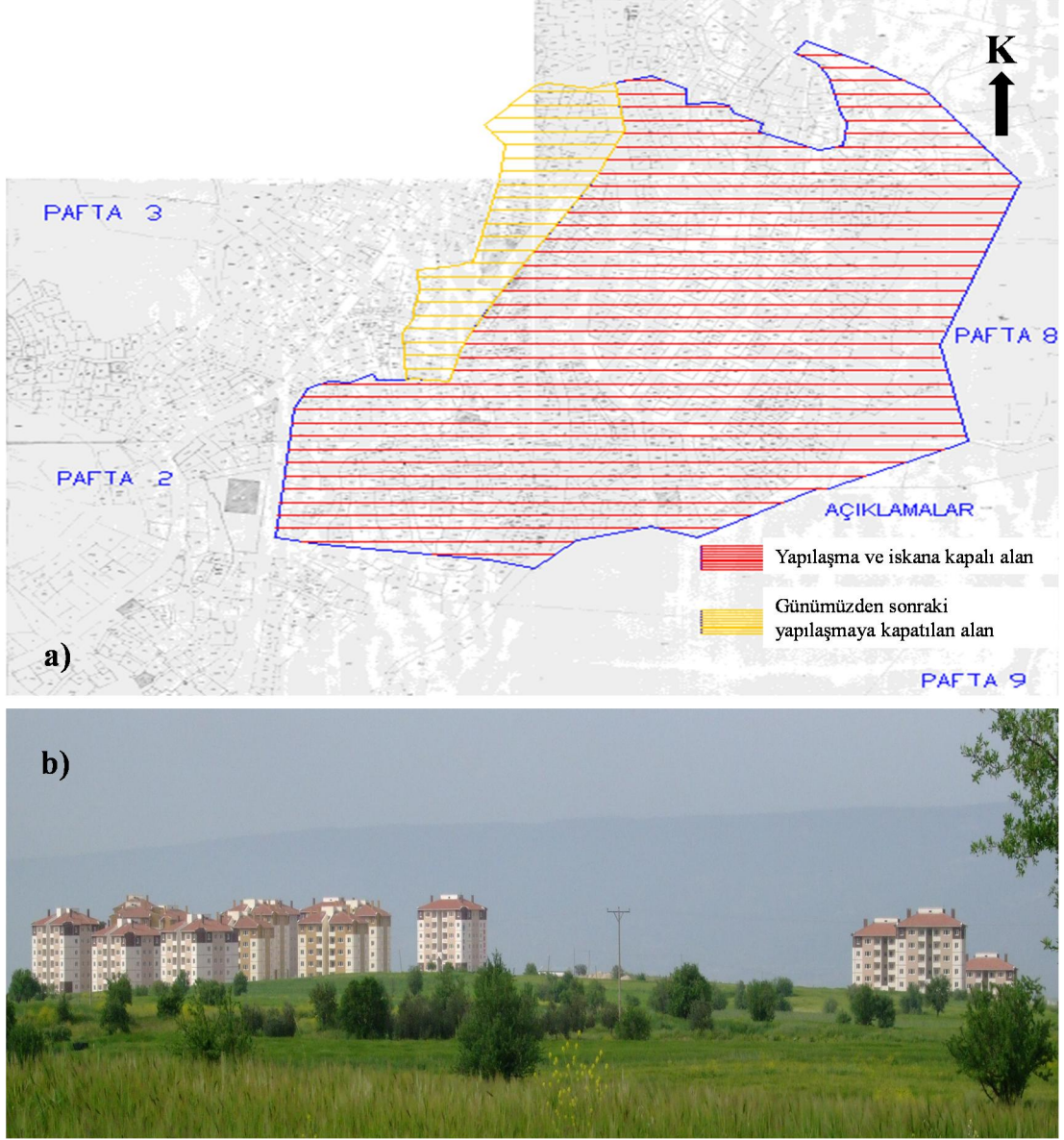
Şekil 1.1 : a) Babadağ ilçesinin genel görünümü (kuzeybatıya bakış), b) Gündoğdu Mahallesi ve heyelan alanının yaklaşık sınırı (kuzeybatıya bakış), c) eğimli tabakalar üzerinde kurulu Gündoğdu Mahallesi'nin görünümü (güneye bakış).

Günderoğdu heyelanı ilk kez Öney (1946) tarafından rapor edilmiştir. Daha sonraki yıllarda ilçe merkezi “afet bölgesi” kapsamına alınmıştır. 1948 yılında meydana gelen büyük yangın sonucunda ilçe merkezinin Denizli’ye daha yakın bir yerleşim yeri olan Göveçlik’e taşınması gündeme gelmiş, ancak halk taşınmaya razı olmamıştır (Özpınar ve diğ., 1999b). Ergün (1969) tarafından ilçe merkezinde yapılan etütlerde Fevzi Çakmak, Atatürk, Günderoğdu ve İsmet Paşa mahallelerinin potansiyel heyelan bölgesi oldukları ve bu mahallelerde yaşayan insanların daha güvenli alanlara taşınması gerektiği belirtilmiştir (Özpınar ve diğ., 1999b). Yamaç hareketi günümüze değin halkı olumsuz yönde etkilemeye devam etmiş ve artan nüfusla birlikte daha fazla sayıda insan, hareketin meydana getirdiği olumsuzluklarla yüz yüze kalmıştır.

2000 yılından itibaren sözkonusu yamaç hareketinin mekanizması ve harekete katkı sağlayabilecek nedenler uluslararası bilimsel bir proje kapsamında araştırılmaya başlanmıştır. Bu araştırmalar, arazi ve laboratuvar deneylerinin yanı sıra çeşitli arazi izleme tekniklerini kapsamaktadır. Bu teknikler; Belli noktalarda mesafe değişimi ölçümleri, yeraltısuyu seviyesi değişimlerinin otomatik ölçümü, kurulan meteoroloji istasyonu ile bölgeye düşen yağış miktarının ölçülmesi, akustik yayılma (AE) aktivitesi ölçümleri ve kuyu içi deformasyon ölçümleridir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, çeşitli analizler ve değerlendirmeler ulusal ve uluslararası yayınlarla kamuoyuna sunulmuştur (Aydan, 2003a; Çevik, 2003; Çevik ve Ulusay, 2005; Kumsar ve diğ., 2004; Tano ve diğ., 2006a, b, Tano ve diğ., 2008, Çelik ve diğ., 2011).

Günderoğdu heyelanı ile ilgili yapılan araştırmaların ve bulguların ışığında, ilçe merkezinin afet bölgesi ilan edilebilmesi için gereken süreç resmi kuruluşlarca yeniden başlatılmıştır. Afet İşleri Genel Müdürlüğü teknik elemanlarınca yerinde inceleme ve etütler yapılmıştır. Hazırlanan jeolojik etüt raporunda heyelanın önlenemeyeceği belirtilmiş ve afete maruz kalmış alanın sınırları belirlenmiştir. Afete maruz bölgede 452 konut, 145 işyeri ve 19 resmi yapının bulunduğu belirtilmiş, afetzede ailelerin nakledilmesinin gerektiği vurgulanmıştır (Altaylı ve diğ., 2006). Bunun üzerine 7269 sayılı Afet Kanununun 1. maddesine göre muhtemel heyelan afeti için Bayındırlık ve İskan Bakanlığınca, 24.11.2006 gün ve 52/20407 sayı ile “Genel hayata etkililik oluru” alınmıştır. Böylece Afet Kanunu kapsamında söz konusu alanda yaşayan halkın nakledilmesi kesinleşmiştir. Bakanlar Kurulunun

06.02.2007 tarih ve 11684 sayılı kararı ile Gündoğdu heyelanı “Afete maruz bölge” olarak ilan edilmiştir. Böylece 94.350 m²’lik bölgede yapılaşma ve iskân yasağı getirilmiştir (Şekil 1.2a). Yasal süreç devam etmiş ve riskli alanda yaşayan halk için ilçe merkezi dışında, Denizli il merkezine yakın bir yerde yeni bir yerleşim alanı belirlenmiştir. Konut ve işyerlerinin inşaatı tamamlanarak, halkın taşınması aşamasına gelinmiştir (Şekil 1.2b).



Şekil 1.2 : Afet Kanunu kapsamında yapılaşma ve iskana kapatılan alan, (a) (Altaylı ve diğ., 2006) ve yeni yerleşim yerinde inşa edilen yapılar (b).

Uzun süreli Gündoğdu heyelanının etkili olduğu alanda meydana getirdiği olumsuzluklar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir. Harekete bağlı olarak görülen söz konusu bu olumsuzluklara örnekler Şekil 1.3’de verilmiştir.



Şekil 1.3 : Gündoğdu Mahallesi'nde, yapı ve yollarda yamaç hareketi nedeniyle gelişen olumsuzluklara örnekler.

- a) Yapılarda belirgin olarak düşeyden sapmalar: Çoğu binanın yaşam koşullarını güçleştirecek derecede eğimlendiği ve bu nedenle bazı binaların terkedildiği görülmektedir (Şekil 1.3 a, b, c, d).
- b) Oturmalar: Özellikle eski binalarda oturmanın etkisi çok belirgin olarak gözlenebilmektedir. Bazı binaların kapı eşiklerinin yol seviyesinden birkaç basamak aşağıda olduğu ve bu seviyeye kadar binanın zemine oturduğu net olarak anlaşılmaktadır (Şekil 1.3 l, p, r).
- c) Sıva ve duvarlarda çatlama ve açılmalar: Çok tipik olarak gözlenen sıva ve duvar çatlakları hemen hemen hareketin etkin olduğu alandaki tüm binalarda belirgindir. Bu çatlakların zaman zaman onarıldığı bilinmekte ve bunun sürekli karşılaşılan bir durum olmasından dolayı yaşayan halk tarafından kanıksanmıştır. İleri derecede açılmaların görüldüğü eski binalarda dış duvar yüzeyleri teneke levhalar ile kaplama yoluyla onarılmaktadır (Şekil 1.3 e, f, g, h, n, o, s, t).
- d) Yollarda görülen hasarlar: Hareketin doğal bir sonucu olarak, yolların zamanla deforme olduğu ve belirli bir zamandan sonra yol üst kaplamalarında açılmalar meydana gelerek yolun kullanılmaz hale geldiği ve onarıldığı belediye görevlilerince belirtilmiştir (Şekil 1.3 k, m, r).
- e) Alt yapı elemanlarındaki hasarlar: Gömülü kanalizasyon ve su iletim hatlarında harekete bağlı olarak kırılma ve kaçakların olduğu, meydana gelen hasarların sürekli olarak izlendiği ve tekrar tekrar onarıldığı yine belediye görevlileri tarafından belirtilmiş ve tez çalışması süresinde de gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, Gündoğdu heyelanı üzerinde etkili olan jeolojik koşullar (tabakalanma), şevi oluşturan birimlerin fiziksel, mekanik özellikleri ile yağışların değişikliklerinin yamaç duraysızlığına etkilerinin dinamik koşulları da kapsayacak şekilde incelenmesi, ayrıca yamaç hareketinin seyrinin önerilen mekanik bir model ile açıklanması amaçlanmıştır.

Jeolojik yapının yamaç hareketine etkisinin araştırılması amacıyla önceki çalışmalardan da yararlanılarak, inceleme alanı ve yakın çevresinin jeolojik haritası derlenmiş ve bir enine kesit hazırlanmıştır. Bu aşamada, arazi gözlemleri ile yamaç hareketinin gözlemlendiği alandaki yapısal özellikler ve değişimleri incelenmiştir.

Babadağ ilçe merkezi depremsellik açısından aktif bir alanda kuruludur. Depremsellik, Denizli Havzası olarak da adlandırılan çöküntü alanını kuzey ve

güneyden sınırlayan normal fay sistemleri tarafından kontrol edilmektedir. Havza içinde meydana gelebilecek bir deprem etkisiyle büyük boyutlu bir hareketin olması sonucunda, önemli can ve mal kayıpları meydana gelebilecektir. Bu amaçla bölgenin deprem aktivitesi göz önünde bulundurularak çeşitli azalım ilişkileri ile inceleme alanında görülebilecek yer ivmesi değerleri tahmin edilmiştir.

Yerinde, lazerli el mesafe ölçeri kullanılarak ölçülen yerdeğişimi miktarları, yağış ve yeraltısuyu seviyesi değişimleri ve kuyu içi deformasyon ölçümü verileri ayrıca akustik yayılma (AE) aktivitesi verileri yamaç hareketinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Önceki çalışmalarda farklı jeomekanik laboratuvar ve arazi deneyleri yapılarak çalışmada gerekli olan malzeme ve süreksizlik özellikleri belirlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, fiziksel model oluşturulabilmesine yönelik amaçlarla, bu sahaya ait önceki çalışmalara ek olarak bazı fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir.

Fiziksel modelin oluşturulabilmesi ve tezin amacı doğrultusunda dinamik deneyler yapılması amacıyla araziden blok boyutunda örnekler derlenmiş ve kumtaşı araseviyesi içeren marn tabakalarından oluşan bir fiziksel model oluşturulmuştur. Tek yönde hareket edebilen, aynı zamanda üst yüzeyi hidrolik bir piston yardımıyla eğimlendirilebilen bir sarsma masası kullanılarak statik durumda eğimlendirme deneyleri yapılmış, ardından farklı eğim açılarında dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir. Dinamik deneylerde ivme yerdeğiştirme miktarları izlenmiş ve farklı eğim açılarında bloğu hareket ettirecek kritik ivme değerleri belirlenmiştir. Dinamik model deneyleriyle, düzlemsel kayma potansiyeline sahip kumtaşı ara seviyeli marn tabakalarının dinamik etki altındaki kayma davranışı ortaya konulmuştur.

Her bir dinamik deneyde ölçülen yerdeğiştirme miktarları, ilgili her deney için gerçekleştirilen sayısal analizlerden hesaplanan yerdeğiştirme miktarlarıyla karşılaştırılmıştır.

Yamaç hareketinin görüldüğü alanı temsil eden topoğrafik kesitler üzerinde, statik ve psödostatik koşullar için şev duraylılığı analizleri yapılmıştır. Arazide alınan tabaka eğimleri, ölçülen uzun dönemli yeraltısuyu seviyesi verisi ve yapılan fiziksel ve mekanik deney sonuçları analizlerde kullanılmıştır.

Gündoğdu heyelanında meydana gelebilecek deformasyonların kestirilebilmesi için ayırık elemanlar metodu yaklaşımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Ayrıca yağış ve yeraltısuyu seviyesi değişimlerine bağlı olarak, kayma zonundaki marnın su içeriğine bağlı olarak deforme olması ve kurumaya bağlı olarak defromasyonun durması temeline dayalı devirsel yumuşama-sertleşme modeli olarak adlandırılan bir modelle de yamaç hareketi açıklanmaya çalışılmıştır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda önceki çalışmalar, Babadağ ilçesi ve yakın çevresini konu alan jeoloji ve mühendislik jeolojisi çalışmaları olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir.

1.2.1 Babadağ ilçesi ve yakın çevresini konu alan jeoloji çalışmaları

Önay (1946), Babadağ ilçesi ve yakın çevresinde görülen yamaç hareketlerini ilk kez rapor eden araştırmacıdır. Önay (1946), bölgenin jeolojisine değinmiş bahsetmiş ve yamaç hareketlerinin nedenlerini; akarsuların etkisiyle topuk aşınması ve mika minerallerini içeren kumlu seviyelerde mikanın ayrışması ve kaygan bir özellik göstermesi olarak belirtmiştir. Gözlemlendiği bazı heyelanlardan bahseden araştırmacı bunların oluşum nedenlerini açıklamaya çalışmıştır.

Akarsu (1969), Babadağ ve çevresini kapsayan çalışmasında jeolojik birimleri, Paleozoyik, Neojen ve Kuvaterner yaşlı birimler olarak üçe ayırmıştır. Akarsu (1969) çalışmasında, Paleozoiyin, alt ve üst metamorfik şist serisinden oluştuğunu ve bölgedeki Neojen istifin kalın ve fosil içerikli olduğunu belirtmiştir.

Öngür (1971), Babadağ ve yakın çevresindeki birimlerin, Paleozoyik yaşlı metamorfitletler, Miyosen kireçtaşı, marn ve çakıltaşları, Alt Pliyosen kumtaşı, kıltaşı ve çakıltaşlarından oluştuğunu belirtmiştir. Neojen çökellerinin tümünün fosil içeriğine göre Alt Pliyosen yaşlı olduklarını belirtmiştir.

Taner (1975), Denizli bölgesi Neojeni'nin paleontolojik ve stratigrafik olarak incelenmiş, Paleozoyik yaşlı mermerler üzerine uyumsuz gelen Pliyosen çökellerinin Alt Pliyosen yaşlı olduğunu belirtmiştir.

Şimşek (1984), Denizli-Kızıldere-Tekkehamam-Tosunlar-Buldan-Yenice Alanının jeolojisini ve jeotermal enerji olanaklarını incelediği çalışmasında; Alt Pliyosen'de

Kızılburun, Sazak, Kolonkaya ve Pliyo-Kuvaterner'de Tosunlar formasyonlarını tanımlamış, Pliyo-Kuvaterner'de ise Taraça, Yamaç Molozu, Alüvyon ve Traverten birimlerini ayırmıştır.

Konak ve diğ. (1986), "Çal-Çivril-Karahallı Dolayının Jeolojisi" başlıklı raporlarında Oligosen öncesi temel kayaların Bekilli Grubu ve Çökelez Grubu olarak ikiye ayırmışlar, bunların üzerine uyumsuzlukla gelen karasal - sığ denizel Oligo-Miyosen çökellerini incelemişlerdir. Bayıralan formasyonu üzerine uyumsuz gelen ve aralarında uyumlu dokanak ilişkisi bulunan karasal Neojen çökellerini de alttan üste doğru Killik formasyonu, Sakızcılar formasyonu ve Ulubey formasyonu olarak ayırtlamışlardır. Kendisinden yaşlı tüm birimleri uyumsuzlukla örten Kuvaterner çökellerini de "Asartepe formasyonu" adıyla ayırtlamışlardır.

Sun (1990), Denizli yöresindeki Neojen çökellerini alttan üste doğru Kızılburun, Sazak, Sakızcılar ve Kolonkaya Formasyonları şeklinde ayırarak incelemiştir. Kuvaterner yaşlı çökeller ise, Asartepe Formasyonu, alüvyon ve travertenler olarak ayrılmıştır.

Taner (2001), "Denizli Bölgesi Neojeni'ne ait katların stratigrafik konumlarında yeni düzenleme" adlı çalışmasında daha önce Alt Pliyosen olarak yaşlandırdığı Neojen birimlerin yaşını, incelediği fosil içeriğine göre, Üst Miyosen olarak değiştirmiştir.

Koçyiğit (2005), Denizli havzasındaki graben dolgularını graben öncesi ve sonrası olarak iki gruba ayırmıştır. Araştırmacı, Denizli horst-graben sisteminde düşey kayma miktarının yıllık 0.14-0.15 mm ve ortalama genişlemenin ise %7 olduğunu belirtmiş, Denizli havzasının gelişimi için iki evreli genişleme modelini önererek bu evrelerin Orta Miyosen - Orta Pliyosen ile Geç Pliyosen - güncel genişleme evreleri olduğunu belirtmiştir.

Kaymakçı (2006), Geç Miyosen-Kuvaterner yaşlı çökellerin Denizli havzasıyla sınırlı olduğunu ve havzadaki genişlemenin Geç Miyosen'den günümüze değin devam ettiğini belirtmiştir.

Alçıçek ve diğ. (2007), Denizli havzasında, Alt - Orta Miyosen yaşlı Kızılburun formasyonunun en üst seviyelerini oluşturan bataklık sığ - gölsel çökeller üzerine geçişli ve uyumlu olarak Sazak formasyonunun depolandığını, Sazak formasyonu üzerine geçişli ve uyumlu olarak gelen Kolonkaya formasyonunun Üst Miyosen - Üst Pliyosen aralığında çökeldiğini ileri sürmüşlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca;

Kolonkaya formasyonunun alt ve orta seviyelerinde denizel ortamı yansıtan ve sığdan derin ortama geçen çökeller ile üst seviyelerde tatlı su ortamını karakterize eden kıyı önü ve alüvyon yelpazesi akarsu çökellerinin geldiğini belirtmişlerdir. Üst Pliyosen sonunda Neojen yaşlı havza dolgusunun BKB-DGD doğrultulu normal faylarla parçalanarak Pliyo-Kuvaterner'de hemen hemen güncel morfolojisini kazandığını belirtmişlerdir.

1.2.2 Babadağ ilçesi Gündoğdu heyelanını konu alan çalışmalar

Özpınar ve diğ. (1999a) tarafından yapılan çalışmada; Babadağ ve çevresi jeolojik, petrografik ve uygulamalı jeoloji açısından incelenmiş, Babadağ ve yakın çevresinde görülen kütle hareketlerinin genel sınıflandırmaları yapılmıştır. Bu araştırmacılar; bölgedeki kütle hareketlerini kayma yüzeyi litoloji sınırı ile uyumlu olanlar, kayma yüzeyi süreksizlik yüzeyleri ile uyumlu olanlar ve kayma yüzeyinin belirli bir litoloji içinde olduğu kütle hareketleri olarak sınıflandırarak hareketlerin oluşmasında etkili olan faktörleri belirtmişlerdir. Çalışmacılar ilçe merkezindeki Gündoğdu heyelanının oluşumundaki etkenleri; yağış, topoğrafik eğim, topuk oyulması, litolojik özellikler, dokuma tezgahlarının oluşturduğu titreşimler ve yeraltına süzülen suların oluşturduğu yeraltı erozyonu (süfüzyon) olarak belirtmişlerdir. Kanalizasyon ve su şebekesinden sızıntı olması durumunda hareketin devam ettiği ve buna bağlı olarak yapı hasarlarının gözlemlendiğini ve hasar gören altyapı elemanlarının yenilenmesi gerektiğini vurgulayarak, heyelandan etkilenen alanda yapılaşmaya izin verilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Özpınar ve diğ. (1999b) Babadağ ilçe merkezi Gündoğdu heyelanını inceledikleri çalışmalarında, yapım tarihi bilinen binaların inceleme zamanındaki konumlarına göre heyelanın hızının 20 mm/yıl olduğunu ve yamaç hareketinin binalarda düşeyden sapmalara (1-5°), yollarda çatlamalara vb. deformasyonlara neden olduğunu belirtmişlerdir.

Aydan (2003a), Babadağ-Gündoğdu heyelanının durumunun ve mekanizmasının belirlenebilmesi için limit denge eşitliği yaklaşımına dayanan matematiksel bir model önermiştir. Modeli farklı durumlar için inceleyen araştırmacı, heyelan için yağışlı bir dönemden sonra Babadağ merkezli 20 km çapında bir daire içinde meydana gelebilecek ve büyüklüğü 6'dan fazla olan bir depremin etkisiyle

Babadağ'ın Gökdere'ye bakan yamacında bir hareketin oluşabileceğini öne sürmüştür.

Atak ve diğ. (2003), Gündoğdu Mahallesi'nde görülen heyelanı, 1960 – 2001 yılları arasında, farklı zamanlarda çekilen 5 hava fotoğrafı üzerinde incelemiştir. Çalışmada belirlenen noktaların farklı yıllardaki yerdeğiştirme miktarları sonlu elemanlar yönteminin interpolasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Çalışılan zaman aralığı için ortalama yıllık yerdeğiştirme miktarı 40 – 160 mm olarak belirlenmiştir.

Aydan ve diğ. (2003), Babadağ heyelan bölgesindeki zayıf çimentolanmış kumtaşı ve marn üzerinde yapılan çeşitli laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre, marnın kuru durumda oldukça yüksek dayanıma sahip olduğu, ancak ıslak ve doymuş halde mekanik özelliklerinde azalma görüldüğü belirtilmiştir. Kumtaşı ve marnın sürtünme açısının 31° - 47° arasında değiştiği belirlenmiş, farklı suya doymuşluk durumlarında bu değerlerin değiştiği belirtilmiştir. Dokuma tezgahlarının yarattığı yer ivmeleri ölçülmüş ve yer ivmesi 50 gal'den daha az olarak belirlenmiştir. Ahşap dokuma tezgahlarının metalik olanlara nazaran daha fazla yer ivmesi oluşturdukları da belirlenmiştir. Bunun yanı sıra arazide on adet geçirgenlik deneyi yapılarak şevi oluşturan birimin hidrolik iletkenlik katsayıları hesaplanmıştır. Hidrolik iletkenliğin, 6.81×10^{-4} ile 1.25×10^{-3} cm/s arasında değiştiği belirtilmiş, ayrıca aynı çalışmada süzülme hızı 1.67 mm/s olarak verilmiştir.

Çevik (2003), Babadağ heyelanı üzerine yaptığı yüksek lisans tezi çalışmasında, Babadağ ilçesindeki kütle hareketinin nedenlerini ve mekanizmasını araştırmıştır. Araştırmacı farklı zamanlarda çekilmiş hava fotoğraflarının karşılaştırılmasıyla yerdeğiştirmenin 3.8 ile 15 cm arasında değiştiğini ve yoğun yağışlı dönemlerden sonra hareket miktarı ve hızında artış olduğunu belirtmiştir. Ayrıca binalarda alınan düşeyden sapma ölçümlerinde, eğimlenme miktarının 1° - 15° arasında değiştiğini belirlemiştir. Araştırmacı, yaptığı limit denge analizlerinde elde ettiği güvenlik katsayılarının, yeraltısuyu seviyesindeki değişime ve tabakalanma yüzeylerinin makaslama dayanımında meydana gelen azalmaya bağlı olarak düştüğünü, ayrıca yeraltısuyu seviyesinin derinliği ve tabakalanma düzlemlerinin ortalama artık makaslama dayanımı esas alınarak yapılan analizlerde, limit denge koşulunun (Güvenlik katsayısı, GK=1) sağlandığı ve bu durumun sayısal çözümleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla desteklendiğini vurgulamıştır. Yeraltısuyu

seviyesindeki değişime koşut olarak, yamaç duraylılığının da olumsuz yönde etkilendiğini, söz konusu yamaç hareketinin bugüne değin katastrofik bir yenilmeyle sonuçlanmamış olmasının nedenini, hareketin hızının zaman zaman artıp azalması ile açıklanabileceğini belirten bu araştırmacı, yamaç hareketini engelleme için ekonomik olarak mümkün görülmediğini, etkin bir drenaj sistemine ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır.

Tano ve diğ. (2003), Babadağ heyelanlarının nedenini araştırmak ve hareketin seyrini izlemek amacıyla geliştirdikleri ölçüm sistemlerini tanıtmışlardır. Bu sistemler; belirlenen noktalarda milimetre hassasiyetinde mesafe ölçümlerinin yapılabilmesi için el lazermetresi kullanılarak geliştirilen ölçüm sistemi, doğal ve yapay malzemelerin kırılması esnasında açığa çıkan ve ultrasonik elastik dalga olarak adlandırılabilen akustik yayılma (AE) aktivitesinin izlendiği AE istasyonlarıdır. Çalışmada mesafe ölçümleri ve AE aktivitelerinin zamana ve yağışa bağlı olarak değişimleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 6 aylık süre için en çok 38 mm'lik mesafe ölçümünün alındığı, yağış ve mesafe değişimleri arasında ilişkilerin gözlemlendiğini belirtmiş, yamaç hareketi üzerinde depremlerin de katkı yapabileceğini vurgulanmıştır.

Kumsar ve diğ. (2004), uzun süreli Babadağ heyelanını değerlendirdikleri çalışmalarında, yamaç hareketi mekanizmasının anlaşılması için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Yağışın harekete katkı sağlayan en önemli etken olduğunu belirten araştırmacılar, uzun süreli deformasyonun tahmini amacıyla alınan ölçümlere devam edilmesi gerektiğini ve önerilen modelin geometrik olarak daha karmaşık durumlara uyarlanmasına gereksinim olduğunu belirtmişlerdir.

Çevik ve Ulusay (2005), Babadağ ilçesini etkileyen Gündoğdu Mahallesi'ndeki uzun süreli kaya şevi duraysızlığını statik ve dinamik koşullar altında incelemişlerdir. Bu araştırmacılar yamaç duraysızlığını; su basınçları, depremlerden ve dokuma tezgahlarından kaynaklanan dinamik yükler gibi tetikleyici faktörler ile şevi oluşturan zayıf kaya birimlerinin hareket üzerindeki rolü açısından incelemişlerdir. Duraysızlığın Gökdere'ye doğru geliştiğini, ayrıca yeraltısuyu seviyesindeki değişimlerin hareketin hızını denetleyen başlıca faktör olduğunu belirten araştırmacılar, yaptıkları analizlerde dokuma tezgahlarından kaynaklanan titreşimlerin harekete katkı sağlayacak boyutta olmadığını, ancak yakın civarda meydana gelmiş depremlerin hareketin gelişimine muhtemelen katkı sağlamış olabileceğini ifade etmişlerdir.

Tano ve diğ. (2006a), Denizli-Babadağ ilçesinde görülen heyelanın izlenmesi için uygulanan çok parametrelili yaklaşım ile AE yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada; AE aktivitesinin özellikle yağış ve yüzeysel yerdeğiştirme verileri ile uyumlu olduğu belirtilmiş, yağışın azalmasına bağlı olarak AE etkinliğinin azaldığı ve yağıştan sonra ise yaklaşık bir hafta süreyle AE etkinliğinin devam ettiği vurgulanmıştır.

Tano ve diğ. (2006b) tarafından hazırlanan araştırma raporunda; Gündoğdu Mahallesi üzerinde kurulu olduğu marn-kumtaşı ardalınamasında düşük makaslama dayanımına sahip tabaka düzlemleri boyunca yılda 3.8-15 cm arasında değişen bir hızda Gökdere vadisine doğru bir hareketin olduğu belirtilmiştir. İzleme çalışmalarlarıyla ölçülen yerdeğiştirme miktarının yağışlardan sonra arttığı, benzer şekilde aylık AE aktivitesinin de yağış ile ilişkili olduğu ve yağışlardan bir hafta sonra arttığı, yağışsız dönemin bittiği Ağustos ayından sonra ise hareket ve AE aktivitesinin arttığı belirtilmiştir. Sahadaki kuyu tipi deformasyon ölçerden alınan verilere göre yüzeyden 23.6 m derinlikte belirgin bir deformasyon olduğu ve 6 ay süreyle doğrusal bir şekilde devam ettiği vurgulanmış, hareketin K27°D doğrultulu gerçekleştiği ve bununda mesafe ölçüm verisiyle uyumlu olduğu öne sürülmüştür. Harekete neden olan faktörler içinde yağışın ve süzülmenin de etkisinin olduğu belirtilmiş ve buna bağlı olarak, özellikle aşırı yağışlı dönemlerde gözenek suyu basınçlarında ani değişimlerin etkin gerilmeyi azalttığı, bunun da kaya malzemesinin dayanım ve deformabilite özelliklerini azalttığı belirtilmiştir. Bu durum, kaymaya karşı koyan kuvvetleri azaltmakta ve hareketi hızlandırıcı yönde etki etmektedir. Araştırmacılar ayrıca, yağışlara bağlı olarak yeraltı suyu seviyesindeki değişimlerin, hasar gören atık su borularından kaynaklanan sızıntıların ve Gökdere'nin topuğunda meydana getirdiği erozyonun da bu olumsuz gelişmede rolü olabileceğini ileri sürmüşlerdir. Tano ve diğ. (2006b) yaptıkları duraylılık analizlerinde, daha ayrıntılı veri ve çözümlemelere gerek duyulmakla birlikte, bölgede meydana gelmiş depremlerin de ilçedeki duraysızlıklara katkısının olmuş olabileceğine işaret etmişlerdir.

Kaya (2008), yüksek lisans projesi kapsamında, Gündoğdu heyelanını alınan topoğrafik kesitler üzerinde limit denge yöntemini kullanarak incelemiştir. Statik durumda heyelanın duraylı olduğunu belirten araştırmacı, daha önceden açılmış olan sondajlara ek olarak yaklaşık 50 m derinliğinde 3 adet sondaj kuyusu açıldığını ve sondaj profilleri boyunca marn ve kumtaşının gözlendiğini belirtmiştir.

Tano ve diğ. (2008), Babadağ ilçe merkezinde izlenen verinin hareket ile ilişkilerini değerlendirmişlerdir. Yerdeğişimi ölçümlerinin yağışlarla ilişkili olduğunu, benzer şekilde AE aktivitesindeki artışların yağışlara bağlı olduğunu, yağışın arttığı dönemlerde AE aktivitesinin arttığını, azaldığı dönemlerde azaldığını belirtmişlerdir. AE aktivitesinin yağışlardan sonra yaklaşık bir hafta süreyle devam ettiğini belirtmişlerdir. 2005 yılında yerleştirilen kuyu içi deformasyon ölçer verisine göre Ekim ayı içinde yüzeyden 23.6 ve 29.6 m derinliklerde belirgin deformasyon artışının görüldüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışma ve konu ile ilgili önceki çalışmalar ışığında, Gündoğdu Mahallesi yamaç hareketinin etkili olduğu alan Bayındırlık ve İskân Bakanlığı'nca "afete maruz bölge" olarak değerlendirilmiş ve yaşayan halkın daha güvenli bir yere taşınmasına karar verilmiştir. Bu uygulamanın doğal afet tehlikesi olan bir bölgede, afet olmadan önce önlem alınmasına ilişkin önemli bir örnek olduğu vurgulanmıştır.

Çelik ve diğ. (2011), aynı zamanda bu tezin de bir kısmını kapsayan çalışmada, Babadağ'daki Gündoğdu yamaç hareketini, fiziksel bir yamaç modeli oluşturularak dinamik koşullar altında laboratuvarında incelemişlerdir. Bu amaçla, araziden alınan örneklerle oluşturulan fiziksel yamaç modeli üzerinde eğimlendirme ve dinamik sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Arazideki tabaka eğimlerinin değişim aralığının temsil edilmesi amacıyla model farklı eğim açılarında eğimlendirilip sabitlenmiş ve dinamik deneylere tabi tutulmuştur. Hareketi başlatan ivme miktarları belirlenmiş ve düzlemsel kayma yüzeyi boyunca meydana gelen yerdeğiştirmeyle ilişkileri ortaya konmuştur. Deneylerden elde edilen ivme ve yerdeğiştirme ilişkisi sayısal çözümler de yapılarak karşılaştırılmıştır.

2. İNCELEME ALANININ TANITIMI

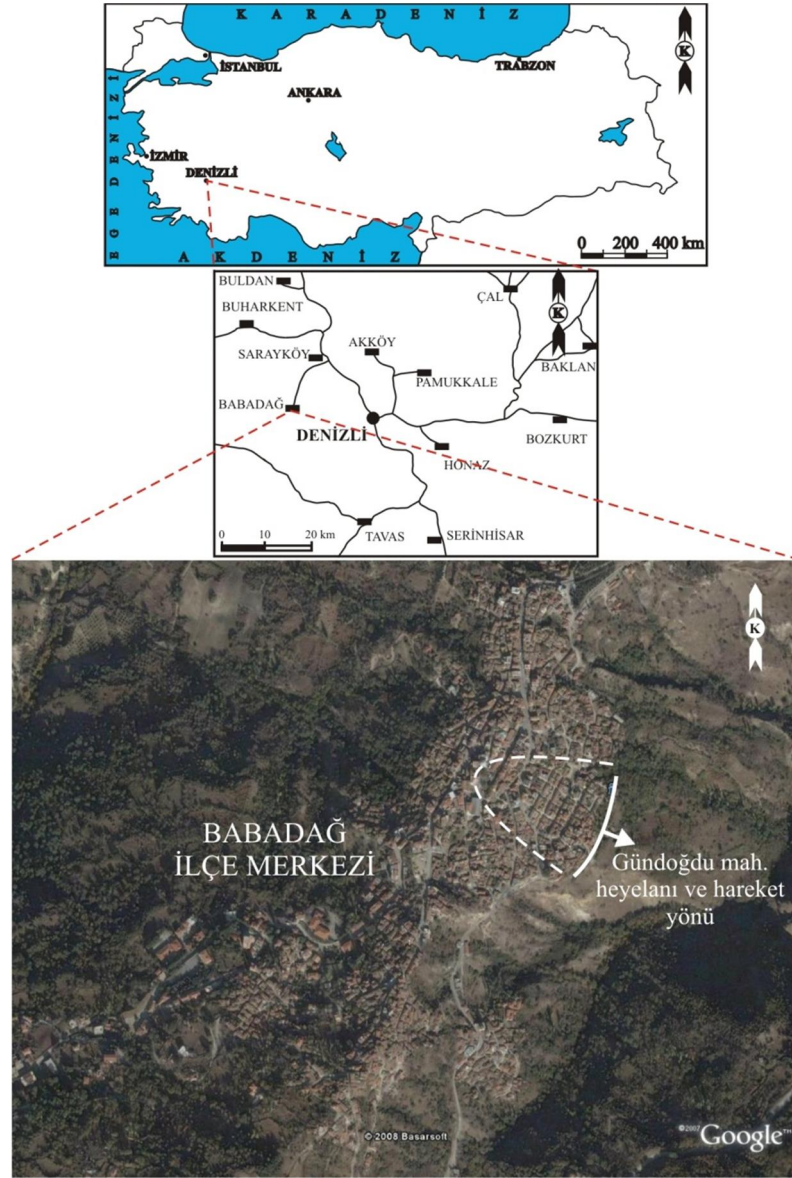
Babadağ ilçe merkezinde görülen Gündoğdu heyelanı ve ilçenin yakın çevresini kapsayan çalışma alanı; 1/25000 ölçekli Denizli M21b3 ve M21b4 topoğrafik paftaları içinde, K4184500-4189750 ile D659000-668000 UTM koordinatları ile sınırlanan alanda yer almaktadır (Şekil 2.1). Denizli ilinin yaklaşık 40 km batısında yer alan inceleme alanındaki yerleşim birimleri Ahıllı, Yeniköy, Kelleci, Oğuzlar, Kıranyer, İncirpınar ve Hisarköy'dür. İlçeye ulaşım Sarayköy ilçesi üzerinden asfalt yolla, batıdan İncirpınar, Kıranyer, Demirli'den ve doğudan Kelleci, Yeniköy'den geçen çoğunlukla asfalt kısmen stabilize yollarla sağlanmaktadır (Şekil 2.1).

2.1 Jeomorfoloji

İnceleme alanı ve yakın çevresi, Ege Bölgesi'nde yaygın olarak görülen tipik çöküntü ve yükselim topoğrafyasına uygunluk göstermektedir. Tektonizma ve jeolojik birimlerin litolojik özellikleri morfolojinin şekillenmesinde önemli rol oynamış, birbirine hemen hemen paralel olarak gelişmiş sentetik ve antitetik fayların varlığı da bölgeye basamaklı bir yapı kazandırmıştır. Paleozoyik yaşlı metamorfik birimler ile Neojen yaşlı çökellerin sınırını Babadağ fayı oluşturmaktadır. Güney kesimlerde ve üst kotlarda yer alan metamorfik birimler daha dik bir görünüm sunarken, kuzeye doğru gidildikçe daha genç ve gevşek çökel birimlerde birbirine paralel gelişmiş derelerin aşındırdığı dik ve derin vadiler görülmektedir. Jeomorfolojik özelliklerin etkisinde inceleme alanı ve çevresinde özellikle genç çökellerin yayılım gösterdiği eğimli alanlarda, irili ufaklı çok sayıda heyelan yer almaktadır. İnceleme alanı için hazırlanan ve bir sonraki bölümde verilen jeoloji haritasında bu heyelanlar gösterilmiştir.

İnceleme alanında yer alan başlıca dereler: Kükürt, Ahıllı, Gökdere ve Yeniköy dereleridir. Bu derelerin yaklaşık doğrultuları KD-GB olup, Babadağ ilçesi bu derelerden Ahıllı ve Gökdere ile sınırlanan sırta kurulmuştur (Şekil 2.2). Sürekli akan bu derelerin yanında çok sayıda mevsimsel dere de bulunmaktadır.

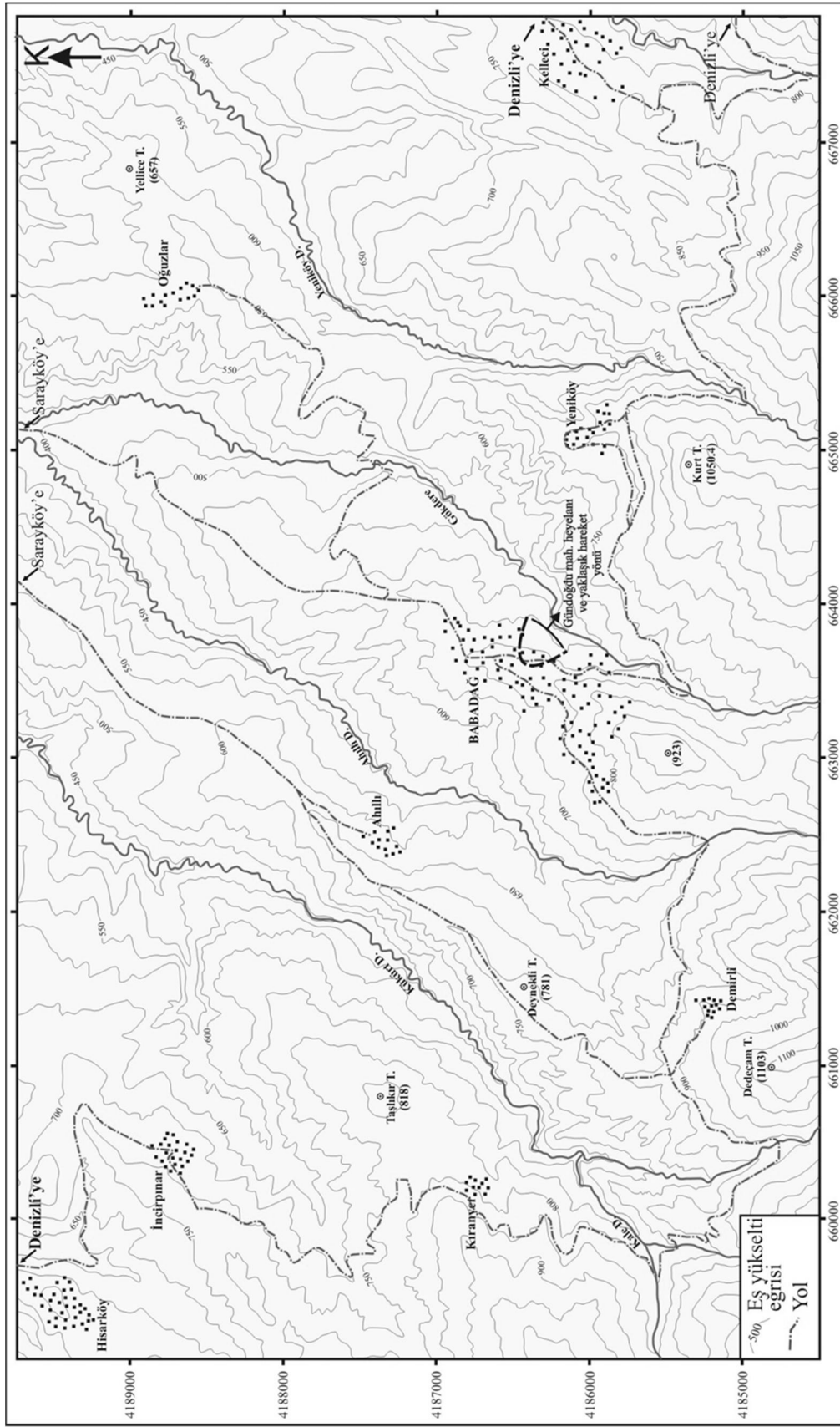
Belirgin olarak metamorfik birimlerde görülen yükseltiler, güneydoğuda Kurt Tepe (1050 m), güneybatıda Dedeçam Tepe (1103 m), batıda Deynekli Tepe (781 m), kuzeybatıda Taşlıkır Tepe (818 m)'dir (Şekil 2.2). Ayrıca ilçe güneyinde çeşitli yaylalar mevcuttur.



Şekil 2.1 : İnceleme alanının yerbulduru haritası ve uydu görüntüsü.

2.2 İklim ve Bitki Örtüsü

Kısmen Akdeniz, genellikle İç Ege ikliminin egemen olduğu inceleme alanında kışlar serin ve yağışlı, yazlar sıcak ve kurak geçmektedir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMI)'nden Babadağ ve Sarayköy'deki meteoroloji istasyonlarından 1974-2000 yılları arası için aylık ortalama yağış değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2.2 : İnceleme alanının yerleşim yerlerini, yolları, akarsularını, yükseltileri ve morfolojisini gösteren harita.

Babadağ meteoroloji istasyonunun 1991 yılında kapatılması nedeniyle 1991-2000 yılları arası için inceleme alanına en yakın olan Sarayköy istasyonunun verileri kullanılmıştır. 2000 yılında başlayıp 2008 yılında tamamlanan uluslararası bir proje kapsamında (Tano ve diğ., 2003), 2000 yılı Eylül ayında ilçe merkezindeki Tarım Müdürlüğü'nün bahçesine, saatlik yağış miktarı ve sıcaklık değerlerini otomatik olarak kaydeden bir istasyon kurulmuştur. DMİ ve kurulan istasyondan alınan veriler ve ilgili değerlendirmeler tezin 4. Bölümünde verilmiştir. Babadağ'ın yüzölçümü bakımından küçük olması ve eğimli arazilerin varlığı, ilçede tarım arazilerinin ve ormanlık alanların da azlığına neden olmuştur. İlçenin dağlık kesimlerinde yer yer ağaç toplulukları görülse de, ormanlar yok denecek kadar azdır.

2.3 Sosyo-Ekonomik Durum

Geçmişten günümüze değin dokumacılık, Babadağ'ın en önemli geçim kaynağını oluşturmaktadır. İlçede yaklaşık 700 yıllık geçmişi olan dokumacılık, 1965'e kadar el tezgahları ile yapılmış, daha sonra yarı otomatik tezgahlar ile devam etmiş, 1985'den sonra ise tam otomatik tezgahlarla sürdürülmüştür. İlçede günümüzde yaklaşık 3000 civarında yarı otomatik tezgah, 500-600 civarında ise tam otomatik tezgah mevcut olup, haftada yaklaşık 300 ton iplik üretilmektedir. İlçenin tarım ve hayvancılığa uygun arazilere sahip köyleri olmasına karşın, tarım ve hayvancılık oldukça sınırlıdır. İlçe yüzölçümü 14361 hektar olup, bu alanın % 23'ü olan 3314 hektarı tarım arazisi, % 39'luk kısmı olan 5646 hektarı orman, % 2'lik kısmı olan 300 hektarı mera ve % 36'luk 5100 hektarı ise tarım dışı arazidir (Url-1).

3. İNCELEME ALANI VE YAKIN CİVARININ JEOLJİK ÖZELLİKLERİ

3.1 Çalışma Alanı ve Yakın Çevresinin Stratigrafisi

Babadağ ve yakın çevresinde gözlenen jeolojik birimler, Paleozoyik yaşlı temel kayaları (Babadağ Metamorfileri) ve Senozoyik'e ait çökeller olmak üzere, iki gruba ayrılır (Şekil 3.1 ve 3.2). Temelde yeralan Babadağ metamorfileri üzerine uyumsuz olarak Senozoyik çökelleri gelmektedir. Senozoyik çökelleri; Üst Miyosen yaşlı Sazak formasyonuna ait Hisar kireçtaşı üyesi ve Kolonkaya formasyonuna ait Ahıllı marn üyesi, Babadağ kumtaşı-marn üyesi, Manastır çakıltaşı üyesi ve Mollaahmetler çakıltaşı üyesi ile temsil edilmektedir. İnceleme alanındaki en genç çökeller, Pliyo-Kuvaterner yaşlı Asartepe formasyonuna ait Kelleci çakıltaşı üyesidir (Şekil 3.2).

3.1.1 Babadağ Metamorfileri

İnceleme alanının güney kesiminde ve stratigrafik olarak temelde Ortaköy formasyonuna ait Paleozoyik yaşlı Babadağ metamorfileri yeralmaktadır (Konak ve diğ., 1986). Klorit, epidot, granat, biyotit, muskovit, kuvars, hornblend ve kalsit minerallerini içeren farklı türde grimsi ve yeşilimsi şistler ve siyah mermerlerin oluşturduğu metamorfiler, Babadağ ilçe merkezinin güneyinde ve kot olarak daha yüksek kesimlerde görülmektedir. İlçe merkezi ve yaylalık alanlara göre, güney kesimlere ve daha yüksek kotlara doğru gidildikçe metamorfilerde görülen alterasyon derecesi azalmaktadır (Özpınar ve diğ., 1999a). Babadağ metamorfileri (Şekil 3.3) ile kuzey kesimlerde yeralan Neojen yaşlı çökellerin sınırını Babadağ fayı oluşturmaktadır.

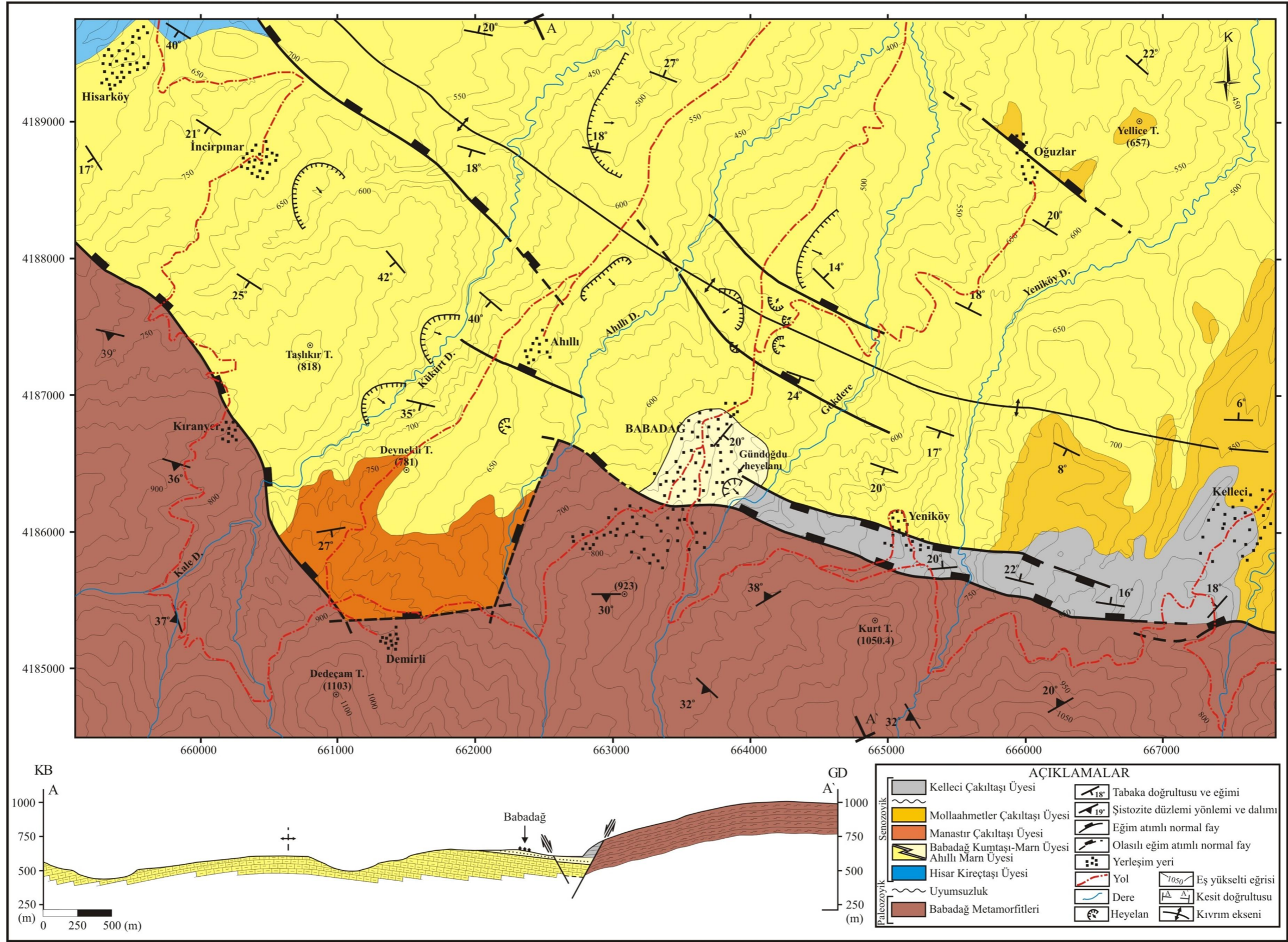
3.1.2 Sazak Formasyonu

İnceleme alanında Neojen yaşlı çökellerin en alt seviyesini oluşturan Sazak formasyonunu; altta kıltaşı, siltaşı, killi kireçtaşı, marn ve üstte ise masif kireçtaşları oluşturmaktadır. Adlaması ilk kez Şimşek (1984) tarafından yapılan formasyonun yaşı hakkında farklı görüşler olmakla birlikte, Taner (2001) tarafından, Kolonkaya formasyonuna Üst Miyosen yaşının verilmesi ile Sazak formasyonunun yaşı

stratigrafik konumu nedeniyle Topal (2003) tarafından Üst Miyosen'in orta seviyeleri olarak belirtilmiştir.

PALEOZOYİK	S E N E N O O Z J J E N										K	ÜST SİSTEM	SİMGE	LİTOLOJİ				
	ORTA-ÜST MİYOSEN					PLİYOSEN									KUVATERNER	SİSTEM		
ORTAKÖY Babadag Metamorfittleri	SAZAK					KOLONKAYA					ASARTEPE	FORMASYON	KALINLIK (m)					
	Hisar Kireçtaşı	Ahıllı Marnı	Babadag Kumtaşı-Marnı	Manastır Çakıltası	Mollaahmetler Çakıltası	Kelleci Çakıltası	SERİ, KAT	ÜYE										
500											15							
											150							
											100							
											100							
											350-500							
											300							
											500							

Şekil 3.1 : İnceleme alanı ve yakın çevresinin genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti (Sun, 1990, Özpınar ve diğ., 1999a, Topal, 2003 ve Alçiçek ve diğ., 2007'den yararlanılmıştır).



Şekil 3.2 : İnceleme alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası ve enine kesiti (Çevik (2003) ve Hançer ve Çemen (2005)'den yararlanılarak hazırlanmıştır).

Alçıçek ve diğ. (2007) tarafından Denizli havzası ile ilgili olarak yapılan fasiyes analizleri, sedimentolojik çalışmalar ve izotop analizlerine göre Sazak formasyonunun yaşı Üst-Orta Miyosen olarak verilmiştir. İnceleme alanı sınırları içerisinde ve sahanın kuzeybatısında Sazak formasyonuna ait Hisar Kireçtaşı Üyesi yer almaktadır.



Şekil 3.3 : Babadağ metamorfitlelerinin ilçe merkezindeki görünümü.

Paleozoyik yaşlı Babadağ metamorfitlelerini uyumsuzlukla üzerleyen Hisar kireçtaşı üyesinin adlanması ilk olarak Öngür (1971) tarafından yapılmış, bej, sert, bol çörtlü ve 20-100 cm tabaka kalınlığına sahip olarak tanımlanmıştır (Şekil 3.4). Birimin görünür kalınlığı, Öngür (1971) tarafından 450 m olarak belirtilmiştir. İnceleme alanının kuzeybatısında görülen üye üstte Kolonkaya formasyonuna ait Ahıllı Marn Üyesi ile uyumludur.

3.1.3 Kolonkaya Formasyonu

Sazak formasyonu üzerine geçişli ve uyumlu bir dokanakla gelen ve üstten Asartepe formasyonu ile uyumsuzlukla üzerlenen, kiltası, silttaşı, kireçtaşı ve marn ara seviyeleri içeren bu egemen kumtaşı istifini Şimşek (1984) tarafından Kolonkaya formasyonu olarak adlandırılmıştır. İstifin egemen litolojisini oluşturan kumtaşları

genellikle sarımsı, açık ve koyu pas renkli, gevşek tutturulmuş ve dağınık, parlak mika pullu, genellikle tane destekli, iyi boylanmalı, bazı seviyelerde çakıllı, genellikle paralel ve yersel çapraz tabakalıdır (Topal, 2003). Formasyonun çökme ortamı Sun (1990)'a göre düşük enerjili göl ortamı olarak belirtilmiştir. Kolonkaya formasyonuna; fosil içeriğine göre Kastelli (1971), Taner (1975) ve Şimşek (1984) tarafından Alt Pliyosen yaşı verilmiş, ancak Taner (2001) tarafından yapılan çalışmada yaşı Üst Miyosen olarak belirtilmiştir. Alçıçek ve diğ. (2007) tarafından ise, formasyonun yaşı Üst Miyosen-Pliyosen olarak verilmiştir. Üstte Kuvaterner yaşlı Asartepe formasyonu ile uyumsuz olarak örtülen Kolonkaya formasyonu inceleme alanında; Ahıllı Marn Üyesi, Babadağ Kumtaşı-Marn Üyesi, Manastır Çakıltası Üyesi ve Mollaahmetler Çakıltası Üyesi ile temsil edilmektedir.



Şekil 3.4 : Hisar Kireçtaşı Üyesinin Hisarköy'ün doğusundaki görünümü.

3.1.3.1 Ahıllı Marn Üyesi

Kolonkaya formasyonuna ait Ahıllı Marn Üyesi, inceleme alanında en geniş yayılımı gösteren litolojidir (Şekil 3.2). Hisar kireçtaşı üyesi üzerine uyumlu olarak gelen bu üye; Ahıllı yolunda tipik olarak gözlenen, tabaka kalınlıkları 1-2 cm'den 15-20 cm'ye kadar değişen (Şekil 3.5), krem renkli, yer yer demir oksit mercikleri içeren marn, kıltaşı ve killi marndan oluşmaktadır (Öngür, 1971). Ahıllı marnı örneklerinde yapılan X-ışınları kırınım analizleri sonucunda malzemenin çoğunlukla kil, az miktarda kalsit ve kuvars minerallerini içerdiği; yapısındaki kil fraksiyonunun ise % 53 oranında simektit, % 33 oranında illit ve % 14 oranında kaolinit minerallerinden oluştuğu belirtilmiştir (Çevik, 2003).



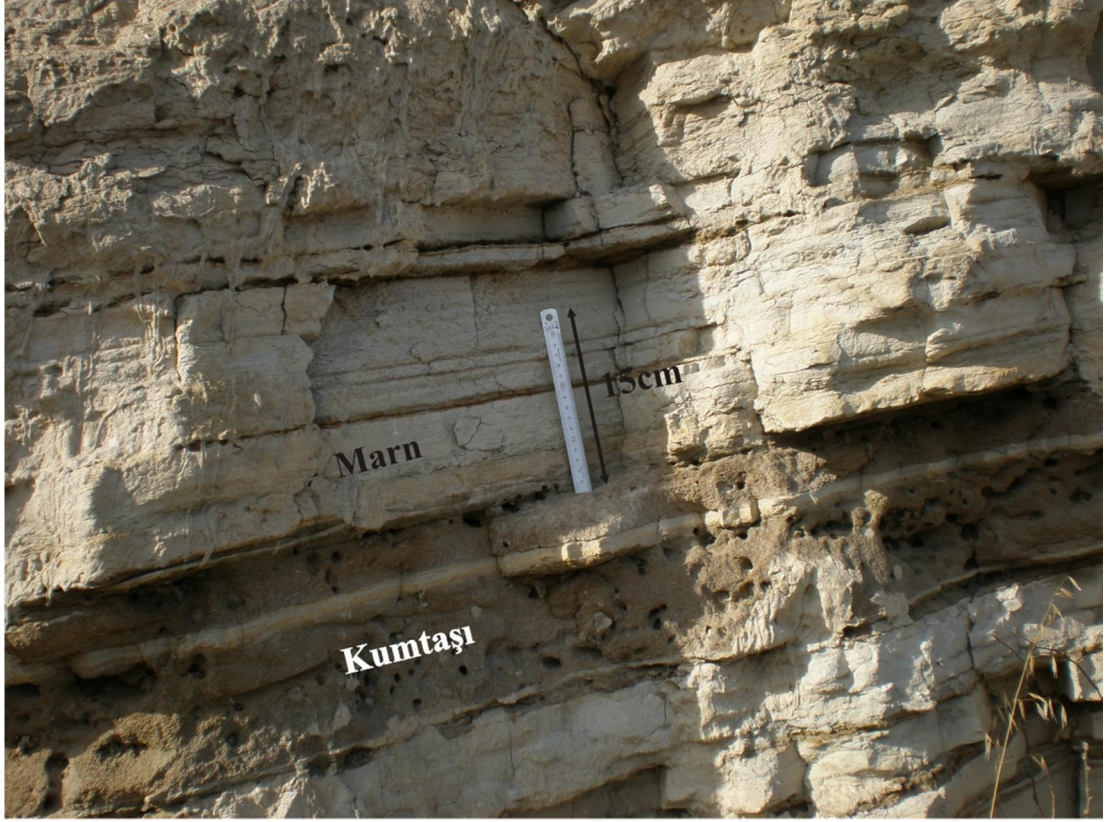
Şekil 3.5 : Ahıllı Marn Üyesi'nin Ahıllı köyü yakınındaki bir yol yarmasındaki görünümü.

3.1.3.2 Babadağ Kumtaşı-Marn Üyesi

Ahıllı marn üyesi üzerinde geçişli olarak yer alan Babadağ Kumtaşı-Marn Üyesi'nin görüldüğü alan, Babadağ ilçe merkezi ve çok yakın çevresi ile sınırlıdır (Özpınar ve diğ., 1999a). Açık sarımsı kumtaşı, marn ve marnlı kil araldanmasından oluşan üye ince ve orta katmanlıdır. Kumtaşları ve marnlar; pekişmemiş dağılğan bir özellik göstermekte, mika pulları içermekte ve 5-10 cm'lik seviyeler halinde gözlenmektedir (Şekil 3.2 ve Şekil 3.6). Üyenin kalınlığının Özpınar ve diğ. (1999a) tarafından 60 m'den fazla olduğu ileri sürülmüştür. 2000 yılından bu yana ilçe merkezinde gerek gözlem gerekse çeşitli izleme cihazlarının yerleştirilmesi amacıyla açılan ve en derini 52 m olan üç adet sondaj kuyusunda da bu üye kesilmiştir. Bu üyenin içerdiği kumtaşlarında yapılan X-ışınları kırınım analizine göre, % 64 mika, % 14 kuvars, % 8 kalsit, % 6 feldispat ve % 3 kil içerdiği belirtilmiştir (Çevik, 2003). İlçenin batı kesiminde bulunan ve tezin konusunu oluşturan yamaç hareketi bu üye üzerinde gelişmektedir.

3.1.3.3 Manastır Çakıltası Üyesi

Manastır çakıltası üyesi, adını almış olduğu Manastır Mahallesi ve Demirli kuzeyi dolaylarında yüzeylemektedir (Şekil 3.2).



Şekil 3.6 : Babadağ Kumtaşı Marn Üyesinin ilçe merkezinin doğusunda bir yamaçtaki görünümü.

Çalışma alanındaki diğer çakıltılardan sarımsı-kırmızımsı rengi ile ayrılan bu birim, çakıltası ve kumtaşı ardalanmalıdır (Şekil 3.7). Taban seviyelerinde kiltası, silttaşı ve kumtaşı ardalanmasının gözlemlendiği birim, üste doğru çakıltası, kumtaşı ardalanması olarak izlenmektedir. Çakıllar kuvarsit, kuvars şist, kuvars muskovit şist ve mermer bileşimli olup, kuvarsit ve mermer kökenli bileşenler daha fazladır (Özpinar ve diğ., 1999a). Üyenin Babadağ'ın doğusunda ölçülen kalınlığı Öngür (1971)'e göre 100 m'yi geçmektedir.

3.1.3.4 Mollaahmetler Çakıltası Üyesi

Mollaahmetler çakıltası üyesi, Babadağ'ın doğusunda Kelleci'nin doğusu ve inceleme alanı dışında yeralan Mollaahmetler civarında yüzeylemektedir. Kırmızımsı, kahverengimsi ve sarımsı renklerde gözlenen çakıltıların bileşenleri metamorfik kökenli olup, orta ve kalın katmanlıdır. İri bloklar ve kum ara

seviyelerini içermektedir. Çapraz tabakaların görüldüğü üyede, metamorfizmlerden uzaklaştıkça (kuzeye doğru) kalınlığın 150 m'den 50 m'ye düştüğü Öngür (1971) tarafından belirtilmiştir. Aynı araştırmacı, Mollaahmetler çakıltası üyesinin inceleme alanı dışında yeralan Bekirler'de marn ve killerin üzerinde uyumlu olarak görüldüğünü de belirtmiştir.



Şekil 3.7 : Manastır Çakıltası Üyesi'nin, Demirli kuzeyindeki bir yol yarmasındaki görünümü.

3.1.4 Asartepe Formasyonu

Asartepe formasyonu, inceleme alanının doğusunda Kelleci çakıltası üyesi ile temsil edilmekte ve alttaki Kolonkaya formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. Çakıltası, kumtaşı ve siltaşı seviyelerinden oluşan alüvyal kökenli çökeller Asartepe formasyonu olarak tanımlanmış ve adlanması ilk kez Ercan ve diğ. (1977) tarafından yapılmıştır. Asartepe formasyonunun içerdiği çökel topluluğu, temelin oluşturduğu topoğrafya üzerinde akan ve alüvyon yelpazesıyla başlayıp, örgülü ve menderesli akarsu çökelleriyle devam eden bir flüvyal ortamı yansıtmaktadır. Kötü boylanmalı ve köşeli elemanlar içeren konglomeralar alüvyon yelpazeleri ortamında, marn, kumtaşı ve siltaşları ise akarsuyun menderesli kanallarında oluşmuştur. Bu flüvyal

ortam hiçbir zaman bir göl ortamına ulaşmamıştır (Sun, 1990). Stratigrafik konumu nedeniyle formasyona, Ercan ve diğ. (1977) tarafından Pliyo-Kuvaterner yaşı verilmiştir. İnceleme alanında Asartepe formasyonuna ait Kelleci çakıltası üyesi bulunmaktadır. Kelleci çakıltası üyesi, Babadağ'ın doğusunda, Yeniköy ve Kelleci civarında yüzeylenmektedir (Şekil 3.2). Az pekleşmiş kırmızı kum, çakıl ve bloklardan oluşmaktadır (Şekil 3.8). Üye alttaki birimler üzerine uyumsuz olarak gelmekte, kuzey ve güneyde normal faylar ile sınırlanmaktadır. Özpınar ve diğ. (1999a) tarafından kalınlığının en fazla 10-15 m kadar olduğu belirtilen üyenin, bu çalışma kapsamında düzenlenen jeoloji haritasından alınan kesitteki kalınlığının yaklaşık 100 m olabileceği düşünülmektedir.



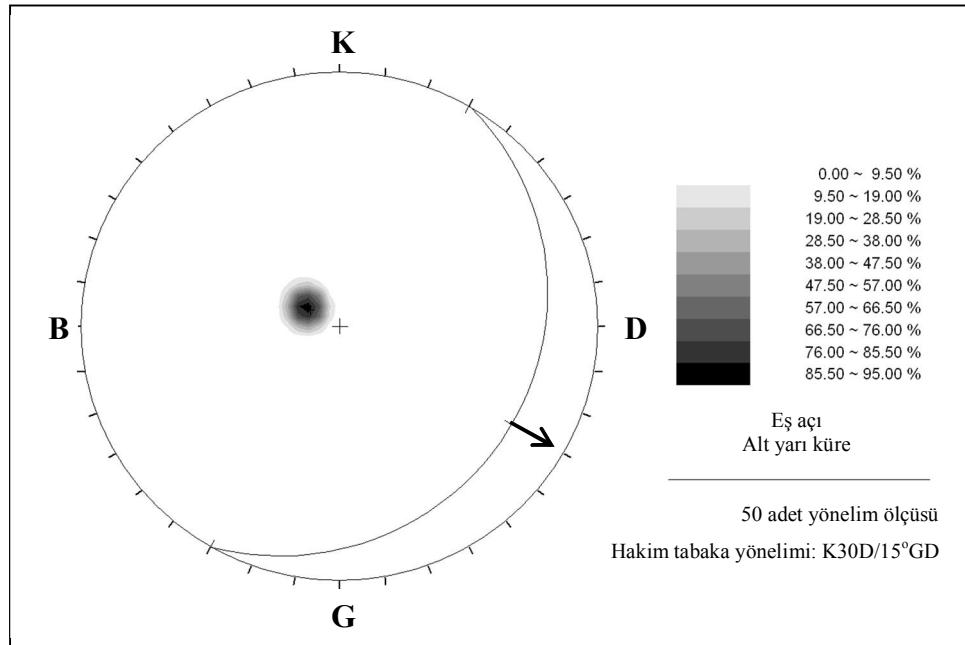
Şekil 3.8 : Kelleci Çakıltası Üyesinin Yeniköy'ün güneyindeki bir yamaçtaki görünümü.

3.2 Süreksizlikler ve Kıvrımlar

Çalışma alanının güney kesimlerinde geniş bir alan kaplayan metamorfitleerde, şistozite yüzeylerinin yönelimleri değişiklik göstermekle birlikte, ilçenin güney

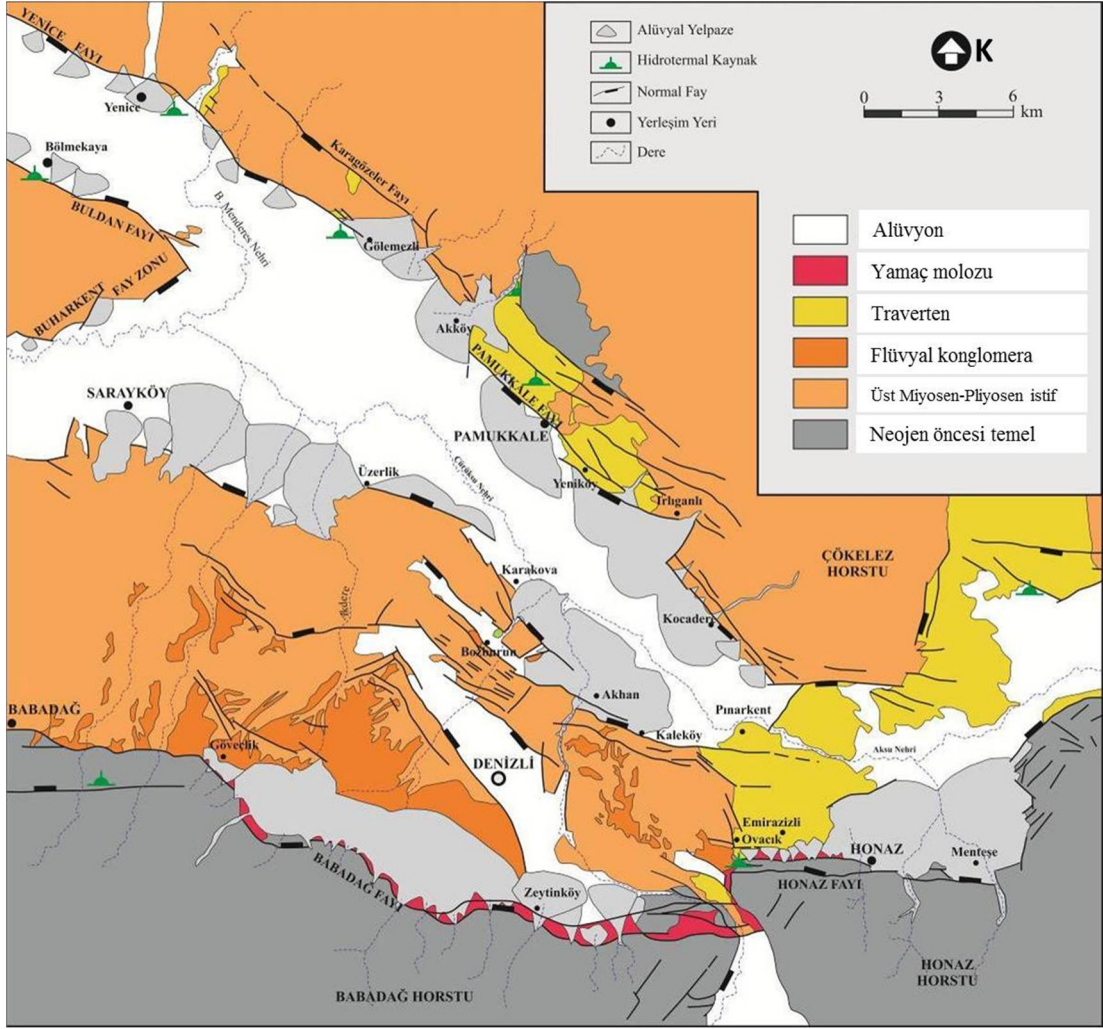
kesiminde (Şekil 3.2) şistozitenin güney-güneybatıya doğru eğimli oldukları görülmektedir. Çevik (2003) tarafından şistozite yüzeyleri için hazırlanan kontur diyagramında, K10°B/35°GB ve K69°B/30°GB yönelimli iki ana şistozite yüzeyi belirlenmiştir. Şistozite düzlemlerinin eğim yönlerinin güneybatıya doğru olması nedeniyle, ilçe merkezi civarındaki şistlerde özellikle yol yarmalarında herhangi bir duraysızlık sorunu görülmemektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, Babadağ ilçesi Gündoğdu Mahallesi, Kolonkaya formasyonuna ait Babadağ kumtaşı-marn üyesi üzerinde yer almaktadır (Şekil 3.2). Tabaka eğimleri doğudaki Gökdere vadisine doğru olup, yamaç duraysızlığı tabaka düzlemlerinin denetiminde gerçekleşmektedir. Çevik (2003) tarafından hazırlanan kontur diyagramlarında, hakim tabaka yönelimlerinin Gökdere'ye yakın alt kotlarda K33D/19°GD, daha üst kotlarda ise K35D/14°GD olduğu belirtilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, Gündoğdu Mahallesi'ne yakın üst kotlardaki yol yarmalarından alınan toplam 50 adet tabaka yönelimi ölçüsüne göre kontur diyagramı hazırlanmış ve hakim tabaka yönelimi K30D/15°GD olarak belirlenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : İnceleme alanında, Gündoğdu Mahallesi civarındaki yol yarmalarında alınan tabaka ölçülerine göre hazırlanan kontur diyagramı.

Denizli Havzası, Babadağ'ın doğusunda Büyük Menderes ve Gediz grabenlerinin kesiştiği alanın doğusunda, güneyde Babadağ, doğuda Honaz, kuzeyde ise Pamukkale faylarıyla sınırlı bir bölgede yer almaktadır (Şekil 3.10).

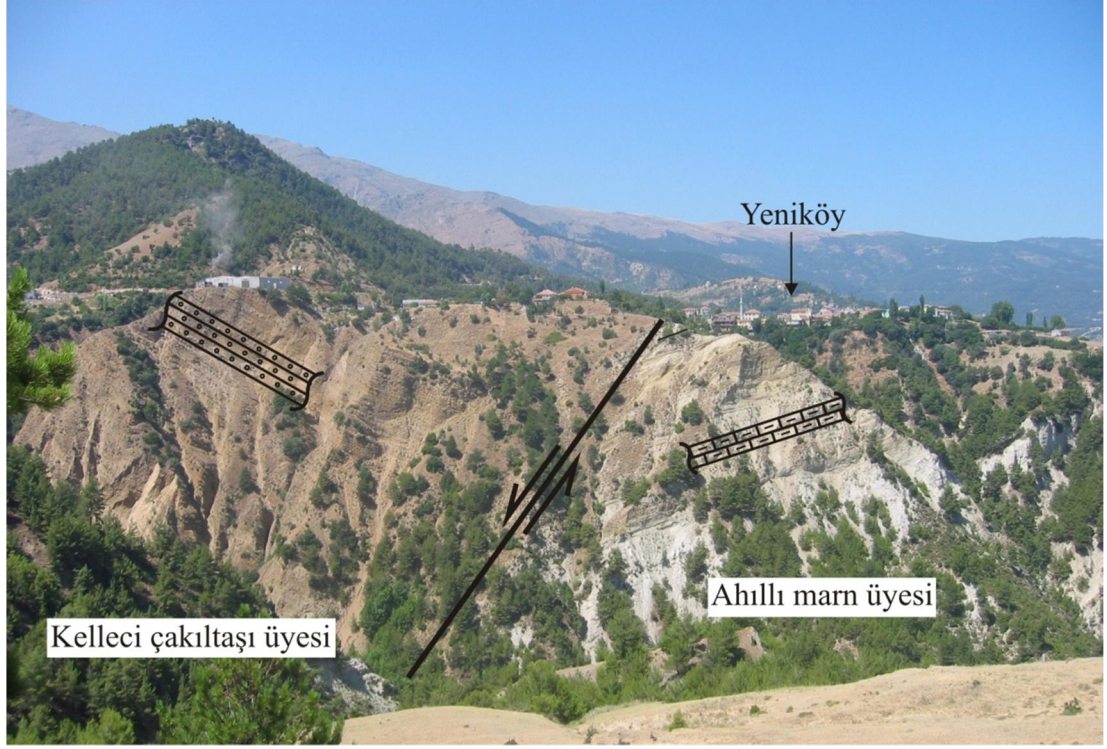


Şekil 3.10 : Denizli Havzası ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Koçyiğit, 2005 ve Topal, 2012).

Denizli Havzası içinde, havzanın güney ve kuzey sınırındaki ana faylara paralel olarak gelişmiş çok sayıda sentetik ve antitetik faylar bulunmaktadır. Babadağ ilçesi, Denizli Havzası'nın güney sınırını oluşturan Babadağ fayının üzerinde kurulmuştur. Bu fay aynı zamanda metamorfikler ile Neojen yaşlı birimler arasındaki sınırı oluşturmaktadır. İlçe merkezinin doğusunda KB-GD doğrultulu gözlenen fayın, Demirli kuzeyinde Manastır Çakıltaş Üyesi ile olan dokanağında fay düzlemi net olarak gözlenememiş, bu alanda olası fay olarak gösterilmiştir (Şekil 3.2). İlçe merkezinde yaklaşık D-B doğrultulu olan fay, batıda KB-GD doğrultusunda izlenmektedir.

İnceleme alanında, Babadağ fayının kuzeyinde ve hemen hemen paralel doğrultulu antitetik bir fay gözlenmiş olup, bu fayın Babadağ fayına antitetik bir fay olduğu tabaka yönelimlerinden anlaşılmıştır. Yeniköy'ün doğusuna kadar gözlenen bu fay, Ahıllı Marn Üyesi ile Kelleci Çakıltaş Üyesi'nin sınırını oluşturmaktadır. Yeniköy

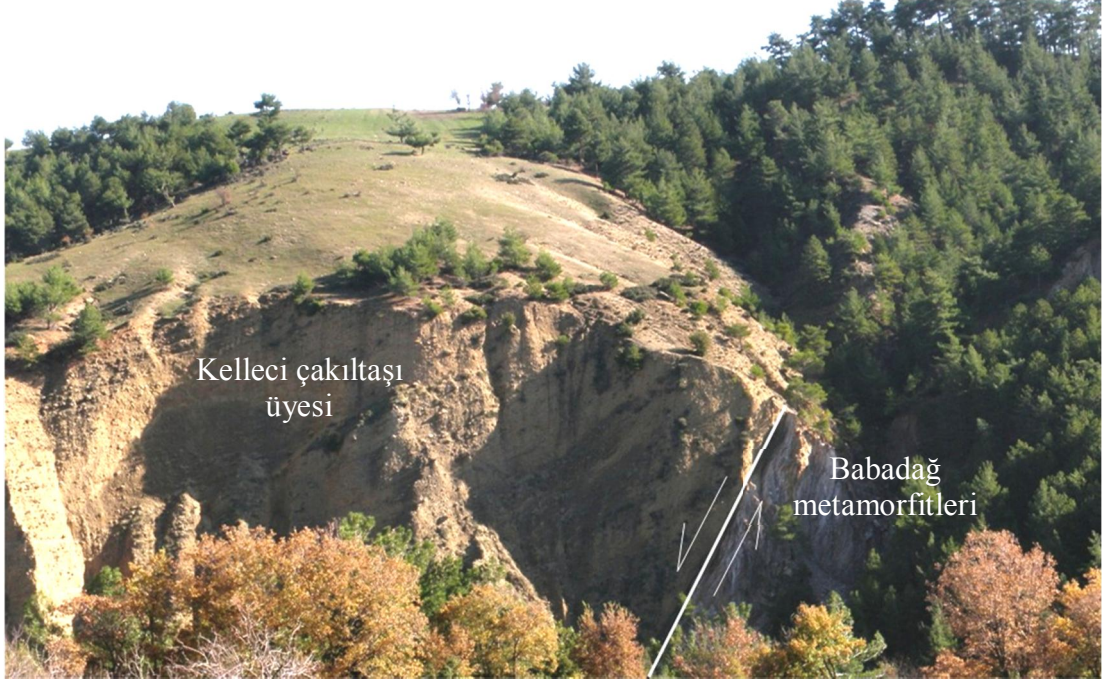
fayı ile Babadağ fayı arasında gözlenen Kelleci Çakıldaşı Üyesi'nin tabaka eğimleri yaklaşık kuzeye doğru iken, Yeniköy fayının kuzeyindeki Ahıllı marnının tabaka eğimlerinin ise güneye doğru olduğu gözlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 : Ahıllı Marn Üyesi ile Kelleci Çakıldaşı Üyesinin faylı dokanağının görünümü (Yeniköy'ün doğusu, batıya bakış).

Babadağ metamofitleri ile Kelleci çakıldaşlarının dokanağını oluşturan Babadağ fayının Yeniköy'ün doğusundaki bir yamaçtaki görünümü ise Şekil 3.12'de görülmektedir.

Çalışma alanındaki diğer bir fay da, Ahıllı köyünün güneyinden geçen Ahıllı fayıdır (Çevik, 2003). Ahıllı köyü, bu eğim atımlı normal fayın düşen bloğu üzerinde yer almaktadır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12 : Babadağ fayının Yeniköy'ün doğusundaki görünümü (doğuya bakış).



Şekil 3.13 : Ahıllı fayının Ahıllı'nın kuzeybatısındaki görünümü (kuzeybatıya bakış).

Çalışma alanındaki normal faylardan biri de Hisar fayıdır. Eğim atımlı normal bir fay olan Hisar fayı, çalışma alanının kuzeybatısındaki Hisar köyünün kuzeyinden geçerek Ahıllı'nın kuzeyine kadar uzanmaktadır. Hisarköy'ün doğusundaki bir yol yamacında fayın düzlemi net olarak gözlenmiş ve fayın yönelimi $K55B/60^{\circ}KD$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 : Hisar fay düzleminin Hisarköy'ün doğusundaki görünümü.

4. İNCELEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN DEPREMSELLİĞİ VE İVME TAHMİNİ

4.1 Depremsellik

İnceleme alanı, İmar ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi'nin hazırladığı Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası'na göre 1. derece deprem kuşağı içinde yer almaktadır. Genişleme tektoniğinin hakim olduğu Batı Anadolu'da yer alan inceleme alanı, Gediz ve Büyük Menderes grabenlerinin kesiştiği bölgenin batısında yer almaktadır. Depremlerin sıklıkla meydana geldiği alanda, arkeolojik verilerin ışığında aletsel dönem öncesinde can kaybına ve ağır hasara neden olmuş depremlerin meydana geldiği bilinmektedir. Hatta Denizli grabeninin kuzey kesimindeki antik Hierapolis, Tripolis, Laodikeia ve Colessea gibi yerleşim yerleri bu depremlerden etkilenmiş ve özellikle Pamukkale (Hierapolis)'de ağır hasarlar meydana gelmiştir (Tablo 4.1).

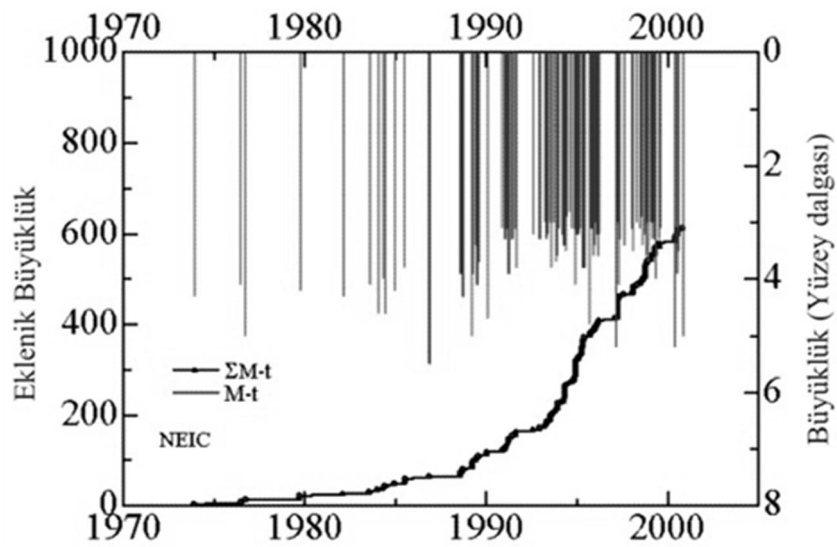
Tablo 4.1 : Denizli ve yakın çevresinde meydana gelen tarihi depremler ve etkileri (Kumsar ve diğ., 2008).

Tarih	Yarattığı hasar
MS.17	Deprem sonucu Hierapolis kenti yıkılmıştır.
MS.60	Pamukkale'deki yapılarda hasarlar meydana gelmiştir.
MS.700	Pamukkale antik tiyatrosunun sahne köşe duvarı kısmen yıkılmış, duvardaki blokların bazıları düşmüştür. Pamukkale'deki antik hamam tuğla ile onarılmıştır. Agora'da Latrin ve anıtsal çeşme duvarları yana yatıp devrilmiştir (Bizans dönemi verilerine göre)
1358	Bu depremde Pamukkale ağır hasar görmüş ve yerleşim yeri terk edilmiştir.
1717	Denizli-Sarayköy-Honaz arasındaki köylerde ağır hasar meydana gelmiş ve 6000 kişi ölmüştür (Altunel, 2000).
1878	Denizli ve Pamukkale'de önemli hasarlar meydana gelmiş ve Sultan II Abdülhamit deprem hasar tesbiti için teknik eleman görevlendirmiştir.
1899	Büyük Menderes grabeninde meydana gelen deprem sonucu 50 km uzunluğunda yüzey kırığı oluşmuş, Aydın ve Denizli illerinde ağır hasar meydana gelmiş ve 1117 kişi ölmüştür (Altunel, 2000).

Denizli ili ve yakın çevresinde 1900 yılından günümüze değin aletsel dönem verileri incelendiğinde, hasar yapıcı depremlerin meydana geldiği görülmektedir. 1963 yılında 5.5 büyüklüğünde meydana gelen deprem sonucu 14 kişi yaşamını yitirmiş ve

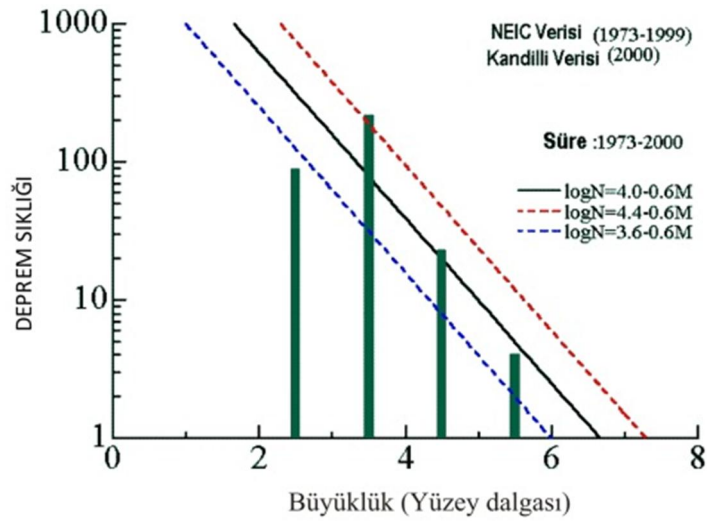
144 binada ağır hasar oluşmuştur. 1965 yılında büyüklüğü 5.7 olan Honaz odak merkezli depremde, Karateke köyü, Honaz ilçesi ve Kızılyer köyü arasındaki alanda KD-GB doğrultulu 15 km uzunluğunda bir yüzey kırığının oluştuğu yöre halkı tarafından ifade edilmiştir. 1976 yılında meydana gelen 4.9 büyüklüğündeki deprem sonucu 4 kişi ölmüş ve 887 binada hasar meydana gelmiştir. 1995 yılında Denizli-Kaklık merkezli deprem sonucunda ise can kaybı olmamış ancak 142 binada hasar meydana gelmiştir. 1 Nisan 2000 tarihinde 5.2 büyüklüğünde Denizli-Honaz merkezli deprem sonucu bölgede herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. 26.07.2003'de Buldan'da meydana gelen 5.6 büyüklüğündeki depremde ise, yığma yapılarda ağır hasar meydana gelmiştir (Kumsar ve diğ., 2008). Bu depremler, Denizli Havzasının sınırlarını oluşturan Pamukkale, Honaz ve Babadağ faylarıyla ilişkili olarak meydana gelmiştir. Deprem merkez üslerinin dağılımında bunu desteklemektedir.

Aydan ve diğ. (2001) inceleme alanını da içeren bölgenin sismik aktivitesinin değerlendirilmesi için 1973-2000 yılları arasında meydana gelen depremlere ilişkin NEIC (USGS-National Earthquake Information Center), Deprem Araştırma Enstitüsü ve Kandilli Rasathanesi verilerini kullanarak “eklenik büyüklük-zaman” ilişkisini (Şekil 4.1) ve “büyüklük-oluş sıklığı” ilişkisini (Şekil 4.2) belirlemiştir. Buna göre; 1990 ile 2000 yılları arasında, depremler daha sıklıkla görülmekte ve büyüklüğü 3 ile 4 arasındaki depremlerin sayısının daha fazla olduğu, ayrıca deprem büyüklüklerinin 6'yı geçmediği görülmektedir.

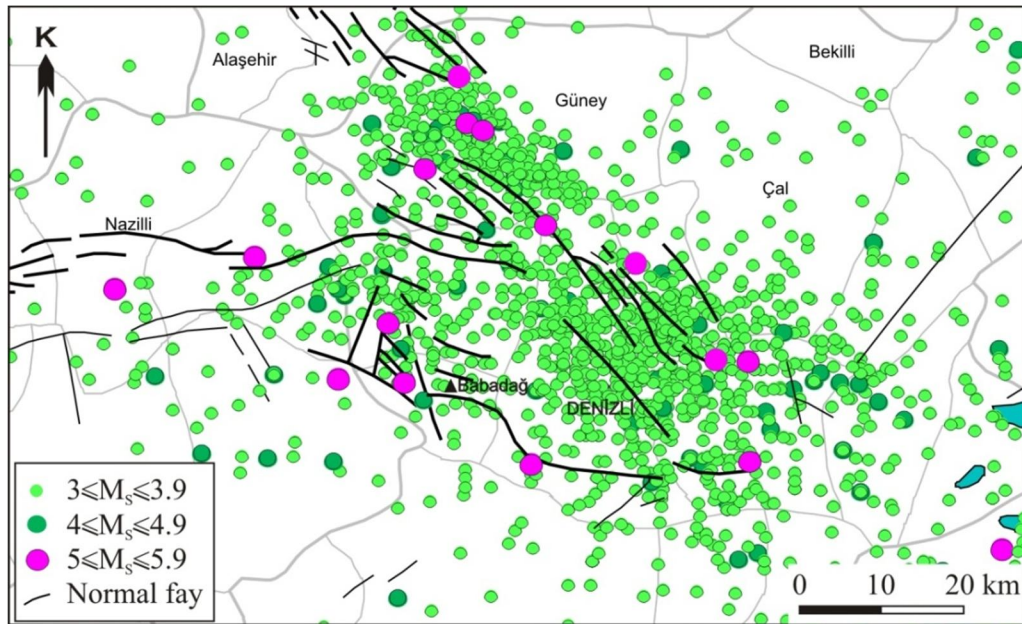


Şekil 4.1 : 1973-2003 yılları arası Denizli ve çevresinde meydana gelen depremlere ilişkin “eklenik büyüklük-zaman” ilişkisi (Aydan ve diğ., 2001).

Denizli ili ve yakın civarında meydana gelen depremler incelendiğinde (Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi verileri, KRDAE-UDİM), depremlerin havzayı kuzeyden ve güneyden sınırlayan fayların denetiminde meydana geldiği görülmektedir. Deprem odak merkezlerinin yeryüzeyindeki izdüşüm noktaları incelendiğinde ise, bu noktaların hemen hemen faylara paralel olarak dağıldığı görülmektedir. Deprem merkez üslerinin fay çizgisellikleri boyunca, deprem odak derinlikleri ve fay düzlemi eğimlerinin 40° - 60° arasında olmasının etkisiyle havza içlerine doğru dağılım gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 : 1973-2003 yılları arası Denizli ve çevresinde meydana gelen depremlere ilişkin "büyüklük-sıklık" ilişkisi (Aydan ve diğ., 2001).



Şekil 4.3 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen depremler ve faylarla ilişkisi (Url-2'den düzenlenmiştir, KRDAE-UDİM verileri).

4.2 İnceleme Alanını Etkileyebilecek İvmelerin Tahmini

Tez çalışmasının amacı doğrultusunda Babadağ ilçe merkezinde, meydana gelebilecek depremlerin etkisiyle oluşabilecek yer ivmelerinin tahmin edilebilmesi duraylılık analizleri ve ilgili değerlendirmeler açısından oldukça önemlidir. İnceleme alanında kuvvetli yer hareketi ölçüm istasyonu olmadığından, geçmişte olmuş herhangi bir depreme ait ivme kaydı bulunmamaktadır. Ancak çeşitli azalım ilişkileri kullanılarak, meydana gelmiş veya gelebilecek bir deprem etkisiyle hangi büyüklükte bir ivme oluşabileceği pratik olarak tahmin edilebilmektedir. Literatürde yeralan ve pratikte yaygın olarak kullanılan birçok azalım ilişkisi önerilmiştir. Özellikle 1999 depremlerinden sonra bu tür çalışmalara olan ilginin artışına bağlı olarak, Türkiye’de meydana gelmiş deprem verileri kullanılarak geliştirilmiş ivme azalım ilişkileri bulunmaktadır. İvme tahminlerinde Türkiye verisi esas alınarak, Aydan (2001) ve Ulusay ve diğ. (2004) tarafından önerilen azalım ilişkileri ivme tahminlerinde kullanılmıştır.

Aydan ve diğ. (1996) tarafından geliştirilen ivme azalım ilişkisinde, odağa olan uzaklık ve deprem büyüklüğü kullanılmakta ve bu parametrelerden en büyük yatay yer ivmesi hesaplanmaktadır. Aydan (2001), ilişkiyi kaya ve sıkı zemin ortamlara uygulanabilmesi için düzenlemiştir. Toprak zeminler için önerilen 2.8 katsayısının yanısıra, sıkı zemin ve kaya ortamlar için 0.56 katsayısını önermiştir.

$$a_{maks} = 0.56e^{-0.025R}(e^{0.9M_s} - 1) \quad (4.1)$$

Burada;

a_{maks} : en büyük yer ivmesi (cm/s^2),

M_s : yüzey dalgası büyüklüğü,

R: deprem odağına uzaklıktır (km).

Ulusay ve diğ. (2004), Türkiye’nin kuvvetli yer hareketi verilerini kullanarak yeni bir azalım ilişkisi önermiştir. Bu ilişkide zemin ve kaya ortamlar için farklı katsayılar önerilmiştir. Eşitliğin geliştirilmesinde, 1976 ve 2003 yılları arasında meydana gelmiş ve moment büyüklükleri 4.1 ile 7.5 arasında değişen 122 deprem verisine ait, 221 kayıt kullanmışlardır.

$$PGA = 2.18e^{0.0218*(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (4.2)$$

Burada;

PGA: en büyük yer ivmesi (cm/s^2),

M_w : moment büyüklüğü,

R_e : dışmerkeze uzaklık (km),

$S_A=0$ ve $S_B=0$ kaya zeminler için,

$S_A=1$ ve $S_B=0$ toprak zeminler için,

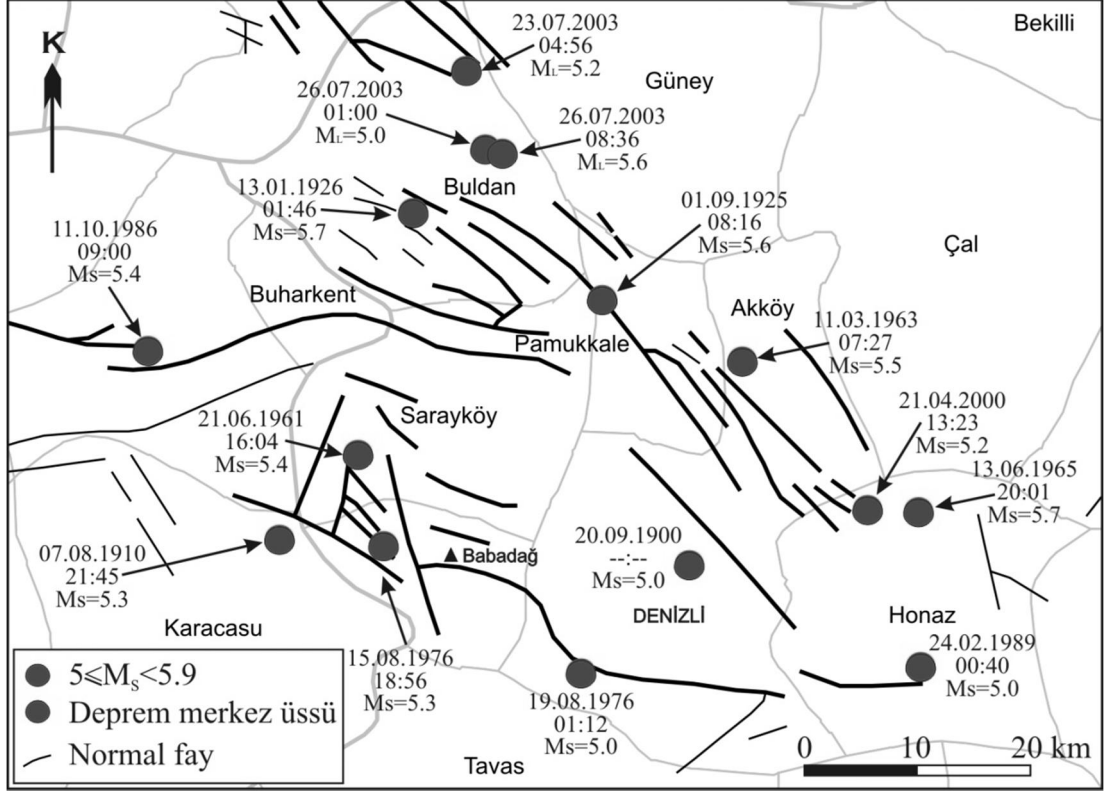
$S_A=0$ ve $S_B=1$ yumuşak zeminler için önerilen katsayılarıdır.

KRDAE-UDİM tarafından deprem büyüklükleri daha çok yüzey dalgası büyüklüğü (M_S) türünden bazı deprem büyüklükleri ise yerel büyüklük (M_L) türünden verilmiştir. Farklı büyüklük türleri için Ulusay ve diğ. (2004) tarafından önerilen büyüklükler arası dönüşüm ilişkileri kullanılarak hesaplamalarda bütünlük sağlanmıştır.

$$M_W = 0.6798M_S + 2.0402 \quad (4.3)$$

$$M_W = 0.7768 M_L + 1.5921 \quad (4.4)$$

Babadağ ilçe merkezini etkileyebilecek ivme değerlerini tahmin edebilmek için yakın çevrede meydana gelmiş ve büyüklüğü 5'den fazla olan depremler belirlenmiştir. 1900'den günümüze, oluş zamanına göre numaralandırılan depremlerin yeryüzeyindeki izdüşümlerinin dağılımları Şekil 4.4'de ve bu 15 depreme ait veriler Tablo 4.2'de verilmiştir. Depremlerin derinlikleri göz önüne alınarak inceleme alanı ve depremin odak merkezi arasındaki en kısa mesafeler, Şekil 4.5'de verilen şekilde hesaplanmıştır. Aydan (2001) tarafından önerilen azalım ilişkisinde bu mesafe kullanılırken, diğer iki ilişkide deprem merkez üssü ile inceleme alanındaki yatay mesafe hesaba katılmaktadır. Bu hesaplamalar ile azalım ilişkilerinde kullanılacak gerekli parametreler belirlenmiştir.



Şekil 4.4 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen 5 ve daha yüksek büyüklüklü depremler (Url-2'den düzenlenmiştir, KRDAE-UDİM verileri).

Aydan ve diğ. (2001), Denizli çevresindeki faylardan aldıkları, fay düzlemi ve fay çizikleri yönelimleri ile ana tektonik hatların uzunluklarını dikkate alarak en uzun fay izinin yaklaşık 35 km olduğunu ve bu fayın kırılması halinde üretebileceği depremin büyüklüğünün 6.3 ve odak derinliğinin ise 16.7 km olabileceğini belirtmişlerdir. Şekil 4.4'de verilen ve 1900 yılından sonra meydana gelmiş depremlerin konumları göz önüne alınarak, aynı noktalarda 6.3 büyüklüğündeki bu olası depremin olması durumunda inceleme alanını etkileyebilecek ivme değerleride benzer şekilde hesaplanmıştır.

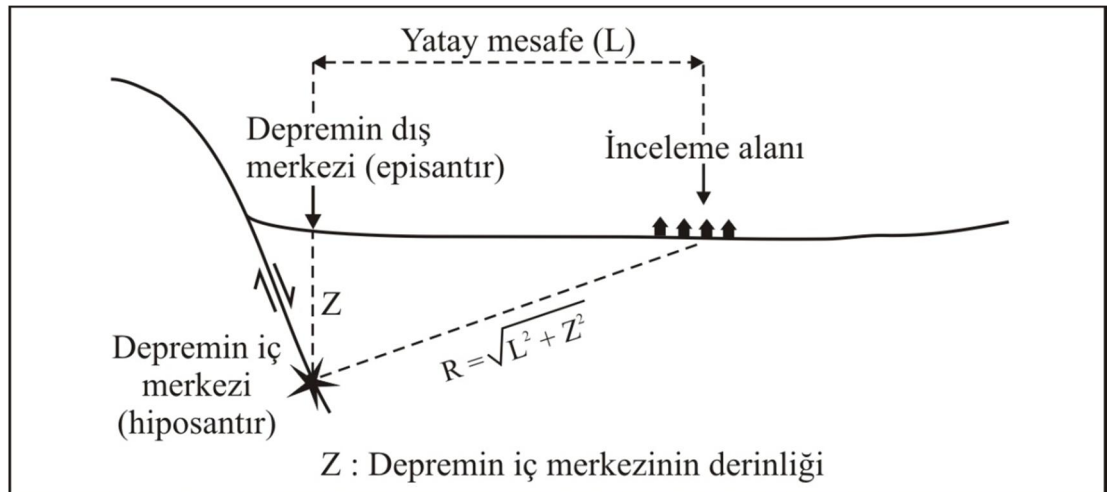
Yukarıda detayları verilen azalım ilişkileri ile inceleme alanını etkileyebilecek ivme değerleri, Şekil 4.6'da verilen ve 1900 yılından sonra meydana gelmiş büyüklüğü 5 ve daha fazla olan depremler için hesaplanmıştır. Azalım ilişkileri kullanılırken Aydan (2001) tarafından önerilen ilişki de, sıkılaştırılmış zemin ve kaya ortamlar için önerilen katsayı, Ulusay ve diğ. (2004) tarafından önerilen ilişki de benzer olarak kaya ortam için önerilen katsayılar seçilmiştir. Şekil 4.6'da verilen ve 1900 yılından sonra meydana gelmiş büyüklüğü 5 ve daha fazla olan depremler için hesaplan ivme

değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir. Ayrıca 6.3 büyüklüklü olası bir deprem için de benzer hesaplamalar gerçekleştirilmiş, hesaplama sonuçları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.2 : 1900 yılından günümüze Denizli ve çevresinde meydana gelen ve büyüklüğü 5 ve daha yüksek olan depremler (KRDAE-UDİM verileri).

Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M _s	Derinlik, Z (km)
20.09.1900	---	37.80	29.10	5.0	0
07.08.1910	21:45	37.80	28.70	5.3	30
01.09.1925	08:16	38.00	29.00	5.6	15
13.01.1926	01:46	38.06	28.81	5.7	10
21.06.1961	16:04	37.87	28.77	5.4	60
11.03.1963	07:27	37.96	29.14	5.5	40
13.06.1965	20:01	37.85	29.32	5.7	33
15.08.1976	18:56	37.80	28.80	5.3	11
19.08.1976	01:12	37.71	29.00	5.0	20
11.10.1986	09:00	37.94	28.56	5.4	5
24.02.1989	00:40	37.73	29.33	5.0	10
21.04.2000	13:23	37.85	29.27	5.2	15
23.07.2003	04:56	38.17	28.85	5.2*	5
26.07.2003	01:00	38.11	28.88	5.0*	5
26.07.2003	08:36	38.11	28.89	5.6*	4

* Deprem büyüklükleri M_L türündendir.



Şekil 4.5 : Deprem iç merkezi ile inceleme alanı arasındaki en yakın mesafenin hesaplanması.

Aydan (2001) ve Ulusay ve diğ. (2004)’ün önerdiği ilişkilerden hesaplanan ivme değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Tablo 4.3’de her bir deprem için iki farklı azalım ilişkisiyle belirlenen ivme değerlerinin 15-115 gal (0.015-0.15g) arasında değiştiği görülmüştür. 15.08.1976 tarihli 5.3 büyüklüklü deprem, inceleme

alanına en yakın deprem olması nedeniyle bu deprem için hesaplanan ivme değerlerinin en yüksek değerler olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3 : İnceleme alanı için hesaplanan ivme değerleri.

Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M _S	M _w	Z (km)	L (km)	R (km)	En büyük yer ivmesi, a _{maks} (gal, cm/s ²)	
									I	II
20.09.1900	---	37.80	29.10	5.0	5.4	0	21.10	21.10	29	71
07.08.1910	21:45	37.80	28.70	5.3	5.6	30	15.24	33.65	28	94
01.09.1925	08:16	38.00	29.00	5.6	5.8	15	26.41	30.37	40	85
13.01.1926	01:46	38.06	28.81	5.7	5.9	10	30.64	32.23	42	82
21.06.1961	16:04	37.87	28.77	5.4	5.7	60	12.22	61.23	15	106
11.03.1963	07:27	37.96	29.14	5.5	5.8	40	31.06	50.64	22	74
13.06.1965	20:01	37.85	29.32	5.7	5.9	33	41.57	53.08	25	65
15.08.1976	18:56	37.80	28.80	5.3	5.6	11	6.04	12.55	48	115
19.08.1976	01:12	37.71	29.00	5.0	5.4	20	15.45	25.27	26	81
11.10.1986	09:00	37.94	28.56	5.4	5.7	5	32.49	32.87	31	68
24.02.1989	00:40	37.73	29.33	5.0	5.4	10	42.69	43.85	16	45
21.04.2000	13:23	37.85	29.27	5.2	5.6	15	37.11	40.03	22	56
23.07.2003	04:56	38.17	28.85	5.3	5.6	5	43.07	43.36	21	51
26.07.2003	01:00	38.11	28.88	5.1	5.5	5	36.23	36.57	21	53
26.07.2003	08:36	38.11	28.89	5.7	5.9	4	35.92	36.14	39	74

M_S: Yüzeysel dalgası büyüklüğü, M_w: Moment büyüklüğü, Z: Depremin odak derinliği, L: Deprem ile inceleme alanı arası yatay uzaklık, R: Deprem ile inceleme alanı arası en kısa uzaklık, I: Aydan (2001), II: Ulusay ve diğ. (2004) yaklaşımlarına göre hesaplanan ivme değerleri.

Tablo 4.4 : İnceleme alanı için 6.3 büyüklüklü bir deprem olması durumunda hesaplanan ivme değerleri.

Tarih	Saat	Enlem	Boylam	M _S	Z (km)	L (km)	R (km)	En büyük yer ivmesi, a _{maks} (gal, cm/s ²)	
								I	II
20.09.1900	---	37.80	29.10	6.3	0	21.10	21.10	95	136
07.08.1910	21:45	37.80	28.70	6.3	30	15.24	33.65	70	154
01.09.1925	08:16	38.00	29.00	6.3	15	26.41	30.37	76	121
13.01.1926	01:46	38.06	28.81	6.3	10	30.64	32.23	72	110
21.06.1961	16:04	37.87	28.77	6.3	60	12.22	61.23	35	165
11.03.1963	07:27	37.96	29.14	6.3	40	31.06	50.64	45	109
13.06.1965	20:01	37.85	29.32	6.3	33	41.57	53.08	43	87
15.08.1976	18:56	37.80	28.80	6.3	11	6.04	12.55	118	188
19.08.1976	01:12	37.71	29.00	6.3	20	15.45	25.27	86	153
11.10.1986	09:00	37.94	28.56	6.3	5	32.49	32.87	71	106
24.02.1989	00:40	37.73	29.33	6.3	10	42.69	43.85	54	85
21.04.2000	13:23	37.85	29.27	6.3	15	37.11	40.03	59	96
23.07.2003	04:56	38.17	28.85	6.3	5	43.07	43.36	54	84
26.07.2003	01:00	38.11	28.88	6.3	5	36.23	36.57	65	97
26.07.2003	08:36	38.11	28.89	6.3	4	35.92	36.14	65	98

M_S: Yüzeysel dalgası büyüklüğü, Z: Depremin odak derinliği, L: Deprem ile inceleme alanı arası yatay uzaklık, R: Deprem ile inceleme alanı arası en kısa uzaklık, I: Aydan (2001), II: Ulusay ve diğ. (2004) yaklaşımlarına göre hesaplanan ivme değerleri.

Aydan ve diğ. (2001), tarafından belirtilen 6.3 büyüklüğündeki olası bir depremin olması durumunda inceleme alanını etkileyebilecek ivme değerleri de benzer şekilde hesaplanmıştır. Bu değerlerin de 35-188 cm/s² (0.035-0.18g) aralığında

değiştirdiği belirlenmiştir. Belirlenen bu ivme değerleri tezin sonraki bölümlerinde değerlendirilecektir.

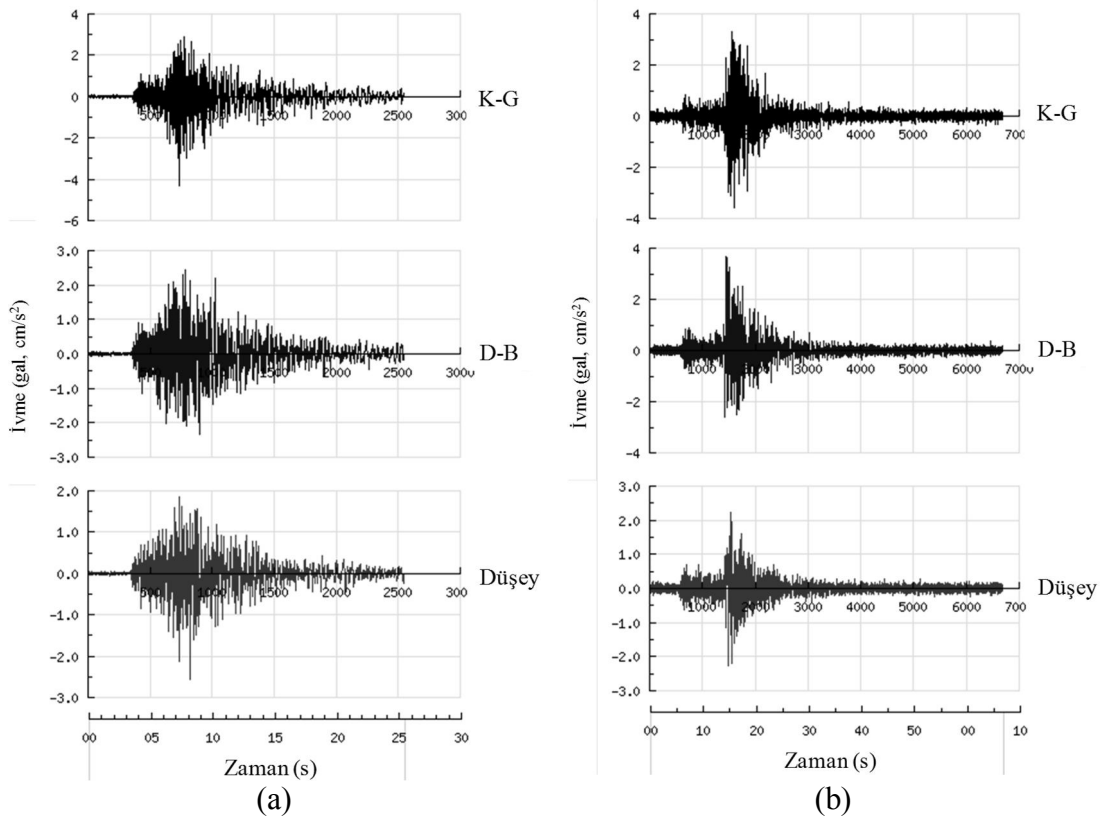
Babadağ ilçe merkezindeki İstanbul Camisi bahçesine, 09.04.2007'de ulusal deprem izleme ağı bünyesinde T. C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı tarafından bir kuvvetli yer hareketi ölçüm istasyonu kurulmuştur (Url-3). Bu istasyonda inceleme alanının yakınında, 5 Şubat 2011 tarihinde Denizli-Akköy merkez üslü 4 büyüklüğünde (M_L) ve 4 Nisan 2012 tarihinde Denizli-Baklan merkez üslü 4.3 büyüklüğünde (M_L) meydana gelmiş iki depreme ait ivme kayıtları alınmıştır (Şekil 4.6).

Şekil 4.7'de Denizli-Akköy'de meydana gelen 4 büyüklüğündeki depremin Sarayköy ve Babadağ istasyonlarında alınan ivme kayıtları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Söz konusu depremde Sarayköy'de kaydedilen en büyük ivme değeri ve sarsıntı süresi Babadağ'da kaydedilenin yaklaşık iki katıdır. Bu durum yerel zemin koşulları ile açıklanabilir. Sarayköy, gevşek çökeller üzerine kurulmuş iken, Babadağ kaya zemin üzerindedir.

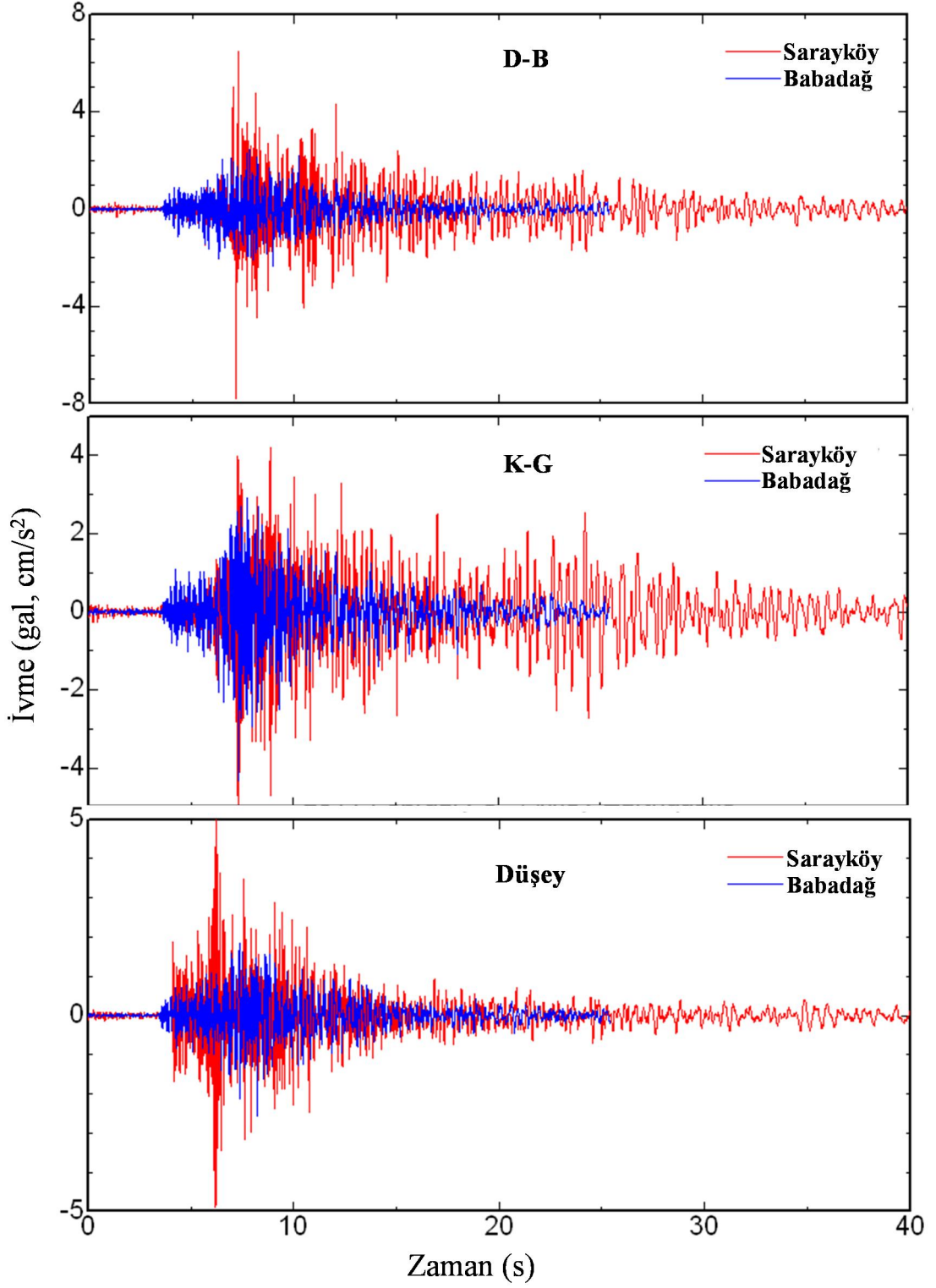
5 Şubat 2011'de Denizli-Akköy'de meydana gelen depremin oluşturduğu ivmeler ayrıca Denizli-Merkez, Aşağışamlı, Pamukkale Üniversitesi ve Sarayköy'de bulunan istasyonlarda da kaydedilmiştir. Depremin büyüklüğü göz önüne alındığında, Babadağ ilçe merkezi için en büyük yer ivmesi değerleri oldukça küçük ve 4 cm/s^2 'den azdır. Şekil 4.8'de Denizli çevresindeki istasyonlarda kaydedilen en büyük yer ivmesi değerleri ve bunların ivme azalım ilişkileri ile olan değişimi verilmiştir. Gevşek alüvyal çökeller üzerine kurulu istasyonlarda alınan ivmelerin yerel zemin koşullarına bağlı olarak yükseldiği görülmüştür.

Aydan (2007), sıvılaşma ve heyelan riski çalışmalarıyla ilgili birincil görgül yaklaşımlarda kullanılmak üzere sıvılaşabilir ve heyelana maruz kalabilir alanların deprem odağından uzaklığı ile deprem büyüklüğü arasında, aktif fayların geometrik boyutlarını, fay çiziği karakteristiklerini ve fay türlerini göz önüne alarak oluşturabileceği olası depremlerin sismik özelliklerinin belirlenebilmesi için, moment büyüklüğünü esas alan yeni bir azalım ilişkisi önermiş ve Türkiye ile diğer ülkelerde elde edilen verilerle bu ilişkiden belirlediği değerleri karşılaştırmıştır. Ayrıca bu çalışmada fay uzunluğu, alanı, net kayma miktarı ile moment büyüklüğü

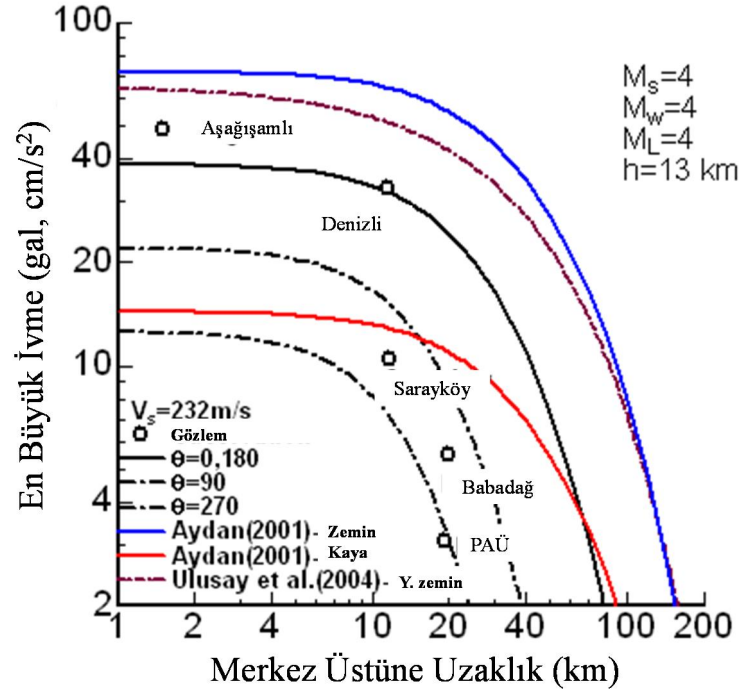
ilişkileri değerlendirilmiş ve normal faylar için yüzey kırığı ve büyüklük ilişkileri sunulmuştur.



Şekil 4.6 : 5 Şubat 2011'de Denizli-Akköy'de (a) ve 4 Nisan 2012 tarihinde Denizli-Baklan'da meydana gelen depremlerin Babadağ'da alınan ivme kayıtları (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı Verileri, Url-3).



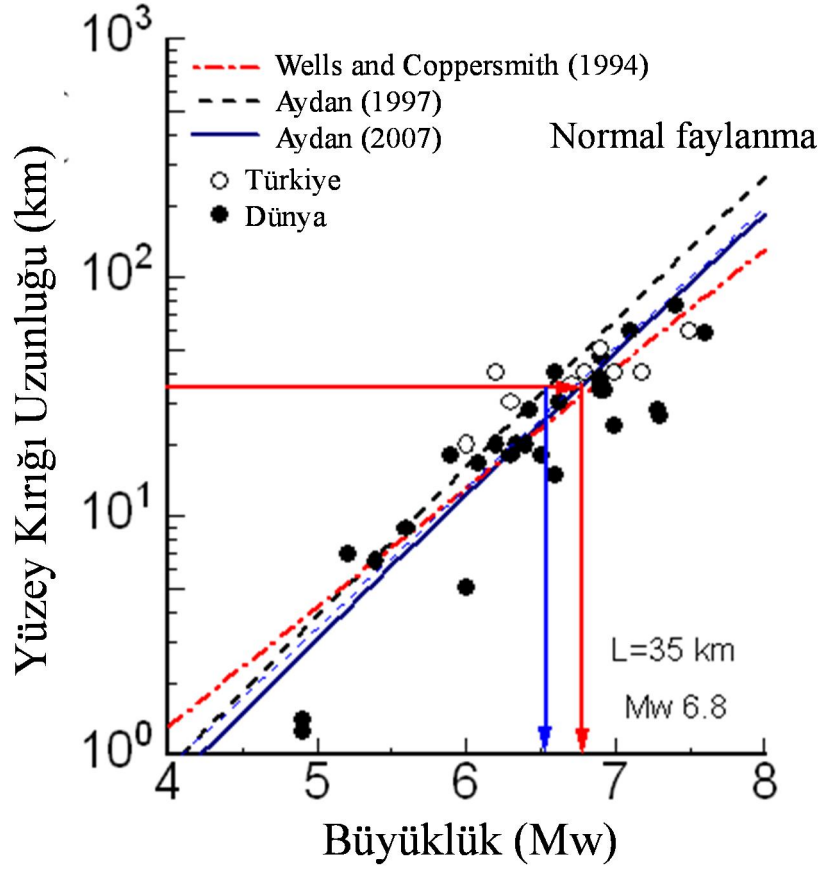
Şekil 4.7 : 5 Şubat 2011 tarihinde Denizli-Akköy’de meydana gelen depremin Sarayköy ve Babadağ istasyonlarında alınan ivme kayıtlarının karşılaştırılması (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı Verileri, Url-3).



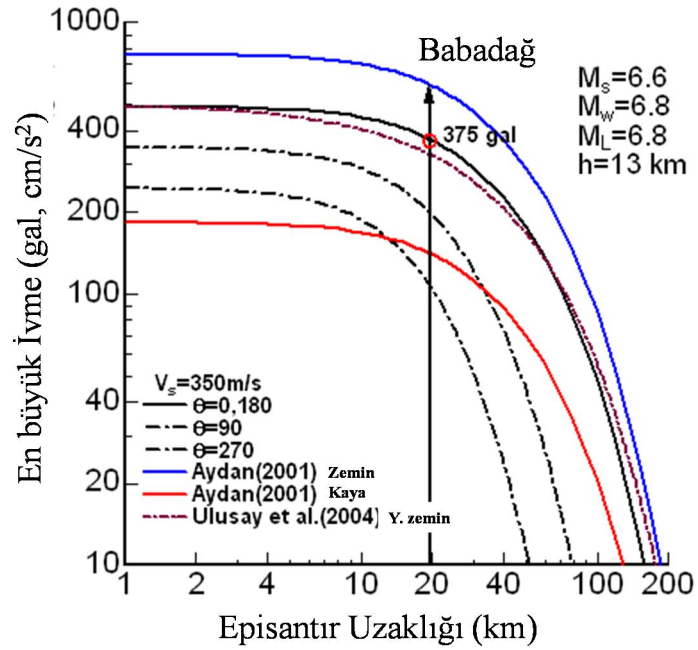
Şekil 4.8 : 5 Şubat 2011 tarihinde Denizli-Akköy'de meydana gelen depremin Denizli çevresindeki istasyonlarda alınan ivme değerleri ve ivme azalım ilişkileri ile karşılaştırılmaları.

Akköy depremi gibi Denizli havzasında meydana gelmiş depremlerin büyük çoğunluğu aktif Pamukkale fayı ile ilişkilidir. 35 km uzunluklu Pamukkale fayı, Aydan (2007)'de verilen normal faylar için fay kırık uzunluğu ve deprem büyüklüğü ilişkisine göre 6.8 moment büyüklüğündeki bir deprem üretme olasılığı söz konusudur (Şekil 4.9).

6.8 büyüklüğündeki olası bir depremin etkisiyle Babadağ ilçe merkezinde gelişebilecek en büyük ivme miktarları Aydan (2001, 2007) ve Ulusay ve diğ., (2004)'nin önerdikleri ivme azalım ilişkileri ile tahmin edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.10). Bu koşulda beklenen tahmini ivme $350-375$ cm/s² arasındadır. Bu değerler Akköy depreminde alınan en büyük ivme miktarının 86.8 katıdır. İlerki bölümlerde değinilecek olan sismik duraylılık analizlerinde olası deprem göz önüne alınarak, Akköy depreminde alınan ivme değerleri 86.8'le çarpılarak büyütülmüş ve analizlerde kullanılmıştır.



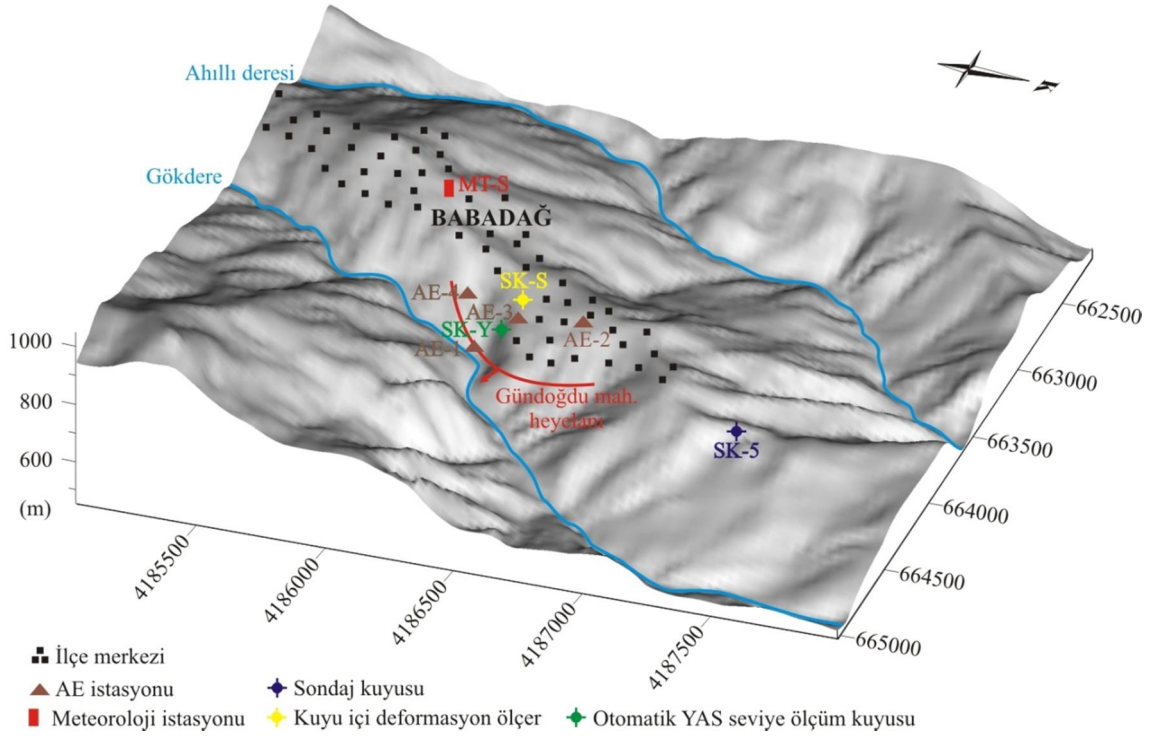
Şekil 4.9 : Normal faylar için Büyüklük-kırık uzunluğu ilişkisi (Aydan, 2007).



Şekil 4.10 : 6.8 büyüklüklü olası bir depremde Babadağ'da beklenecek en büyük ivme değeri.

5. GÜNDOĞDU HEYELANI İÇİN ÇOK PARAMETRELİ İZLEME SİSTEMİ

Babadağ ilçe merkezindeki yamaç hareketinin ve bu harekette rol oynayabileceği düşünülen jeolojik, hidrojeolojik ve meteorolojik koşulların izlenmesi amacıyla 2000 yılından bu yana yüzeyde ve açılan sondaj kuyularına yerleştirilen bazı cihazlarla izleme çalışmaları sürdürülmektedir (Tano ve diğ., 2003, 2006a, b, 2008). İzlenen bu parametreler; yağış, yeraltısuyu seviye değişimi, kuyu içi deformasyonu, mesafe ölçümleri ve akustik yayılmadır. İnceleme sahasındaki ölçüm ve izleme lokasyonları Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu bölümde söz konusu ölçülen parametreler karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

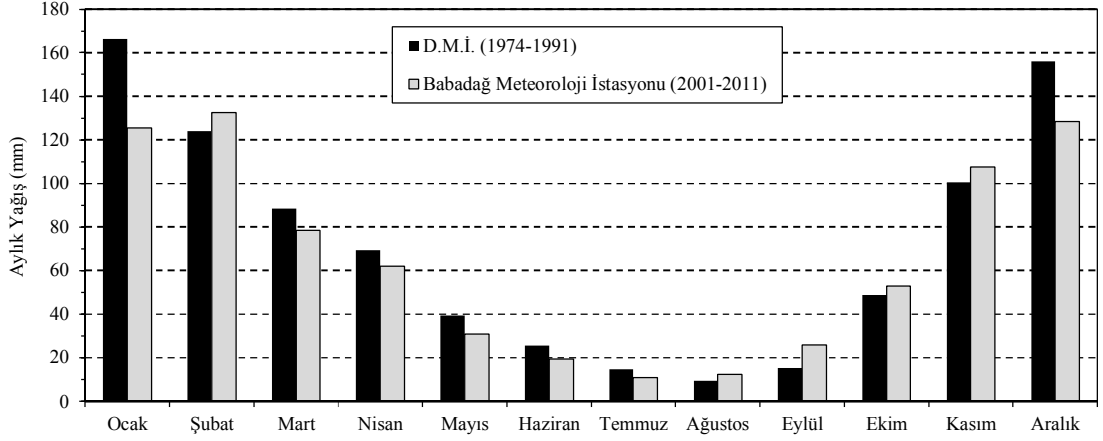


Şekil 5.1 : Gündoğdu heyelanı çoklu izleme parametrelerinin ölçüm yerleri.

5.1 Yağış ve Yeraltısuyu Seviye Değişimleri

Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) Genel Müdürlüğü Babadağ Meteoroloji İstasyonu'nun faal olduğu ve veri kaydettiği 1974-1991 yılları arası, ayrıca 2000 yılı sonunda uluslararası araştırma amaçlı bir proje kapsamında (Tano ve diğ., 2003) ilçeye kurulan ve saatlik veri kaydedebilen meteoroloji istasyonu verileri bu tez

çalışmasında da kullanılarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.1 ve 5.3). DMİ Babadağ istasyonunun 1991 yılına kadar alınan ve Babadağ Meteoroloji İstasyonu'nda 2001 yılından bu yana kaydedilen yıllık yağış verileri karşılaştırıldığında, değerlerin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 5.2).



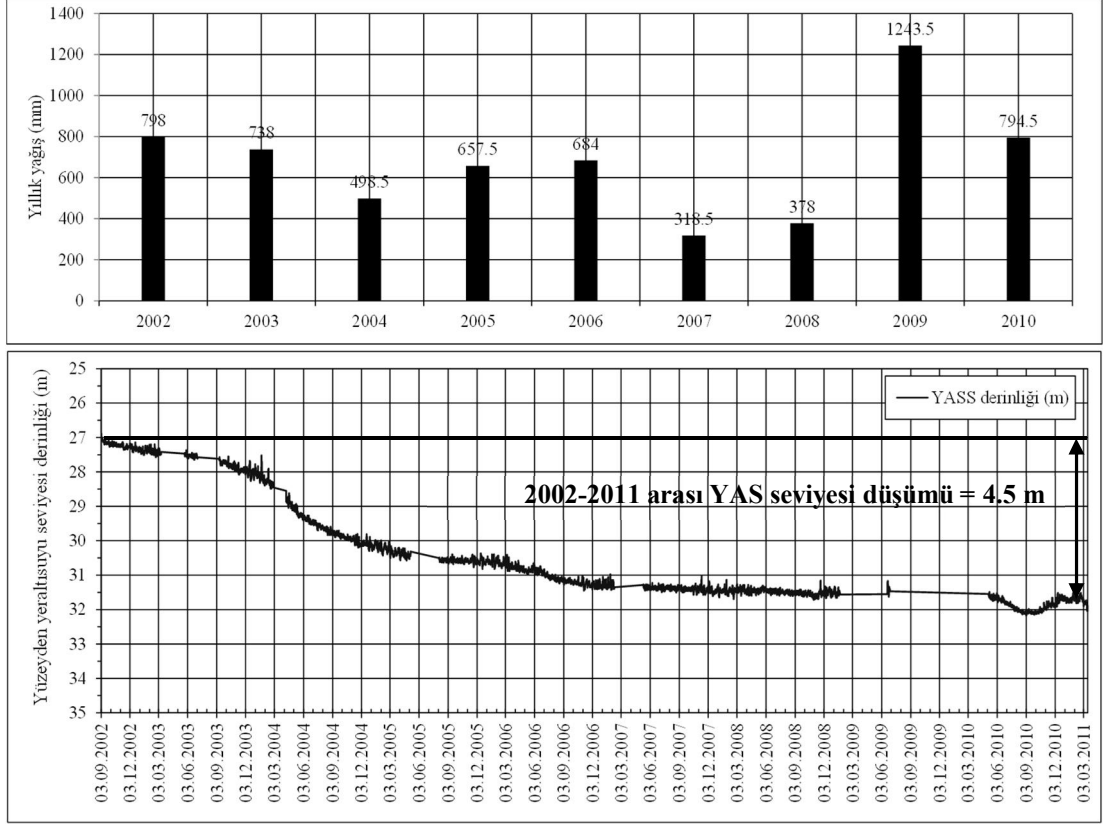
Şekil 5.2 : DMİ Babadağ istasyonu ve ilçeye kurulan istasyondan alınan aylık ortalama yağış miktarları.

Ortalama değerler olarak; en düşük yağış miktarı Temmuz ve Ağustos aylarında yaklaşık 15 mm, en yüksek yağış miktarı ise Aralık ve Ocak aylarında yaklaşık 165 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.3 : SK-2 YAS seviyesi kayıt cihazı (a) ve SK-2 ve 3 kuyu yerleri (b).

Ölçülen yeraltısuyu (YAS) seviyelerine göre 2002 ile 2011 yılları arasında, 2009 yılına kadar yıllık yağış miktarlarında belirgin düşüşün, daha sonra bu durumun tersine yıllık yağış miktarlarında belirgin bir artışın olduğu görülmüştür (Şekil 5.4). Cihazın yerleştirildiği 2002 yılının Eylül ayından itibaren günümüze değin, yaklaşık 4.5 m'lik bir düşümün olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : Babadağ ilçesi için Eylül 2002 ile Mart 2011 arasındaki yıllık toplam yağış miktarları ve SK-2 kuyusundaki YAS seviyesi düşümü (düz çizgilerin görüldüğü zaman aralıklarında teknik aksaklıklara bağlı olarak veri alınamamıştır).

5.2 Kuyu İçi Deformasyon Ölçümleri

Kuyu içi deformasyon ölçerler, ekstansometre gibi yamaç hareketi izleme tekniklerine göre daha ekonomik olmaları nedeniyle özellikle Japonya'da yaygın olarak kullanılmaktadır. İnceleme alanına, söz konusu uluslar arası ortak proje çerçevesinde (Tano ve diğ., 2006b) 2005 yılı Ağustos ayında kuyu yeri Şekil 5.1'de verilen bir kuyu içi deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. 50 m derinlikte açılan kuyuya yerleştirilen bu sistem ile deformasyon ölçümlerini mikro gerinme (μs) hassasiyetinde, cihazın dahili hafızasına 6 saatte bir kaydedilmektedir (Şekil 5.5). Yamaç hareketinin görüldüğü alanda olası kayma yüzeyi veya yüzeylerinin

derinliklerinin kestirilebilmesi amacıyla bu sistemle kaydedilen deformasyon verileri değerlendirilmiştir.



Şekil 5.5 : Kuyu içi deformasyon ölçüm sistemi.

5.3 Akustik Emisyon Aktivitesinin İzlenmesi

Katı maddelerin çoğu ve doğal malzemeler, gerilmeye veya şekil değişikliğine maruz kaldıklarında düşük seviyeli sismik sinyaller yayarlar (Hardy, 2003). Bu olgu akustik yayılma (akustik emisyon, AE) veya mikrosismik aktivite olarak adlandırılmaktadır. Akustik sinyaller mühendislik uygulamalarında özellikle, arazi gerilmelerinin yönelimlerinin ve büyüklüklerinin belirlenmesi ve çeşitli duraylılık izleme amaçlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Jeolojik malzemelerde yayılan akustik sinyallerin kökeni net olarak açıklanamamemle birlikte, sinyallerin gerilme ve deformasyon sürecine bağlı elastik gerinim enerjisinin ani boşalımı ile oluştuğu çoğu araştırmacı tarafından kabul edilmektedir. Malzemenin içerisinde herhangi bir nokta veya noktalarda başlayan akustik yayılma o noktadan başlayarak malzemenin veya kütlemin sınırlarına doğru hareket etmektedir.

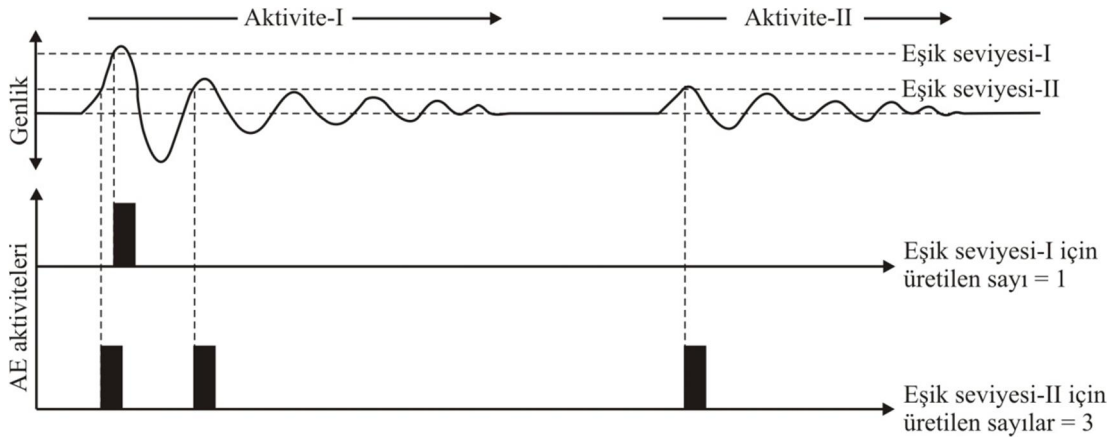
AE tekniğinden yararlanılarak laboratuvar koşullarında yönlü karot örneklerinden arazi gerilmelerinin büyüklük ve yönelimlerinin belirlendiği çalışmalar ve bu değerlerin yüksek maliyetli çeşitli arazi ölçüm teknikleri kullanılarak yerinde ölçülen değerlere karşılaştırıldığı çalışmalara rastlanılmaktadır; Hayashi ve diğ (1979), Yoshikawa ve Mogi (1981), Hardy ve diğ. (1989), Jupe ve diğ. (1992), Momayez ve

Hassani (1992), Seto ve diğ. (1992), Watanabe ve diğ (1999), Villaescusa ve diğ. (2002), Tuncay ve diğ. (2002), Daido ve diğ. (2003), Lavrov (2003), Hardy (2003), Ulusay ve diğ. (2003), Tuncay ve Ulusay (2008), Tuncay ve Obara (2012) bu çalışmalara örnek olarak gösterilebilir. Bunun yanında AE tekniğinin yamaç hareketlerinin uzun veya kısa süreli izlenmesi ile ilgili çalışmalara da literatürde rastlanılmaktadır (Koerner ve diğ., 1977; McCauley, 1977; Fujiwara ve diğ., 1999).

Tano ve diğ. (2003, 2006a, 2006b, 2008), Babadağ, Gündoğdu heyelanını konu alan çalışmalarında, düşük hızda seyreden Gündoğdu yamaç hareketinin AE aktiviteleri ile ilişkisini incelemiştir. Bu çalışmalar ile ilgili bilgiler tezin başlangıç kısımlarında verilmiştir.

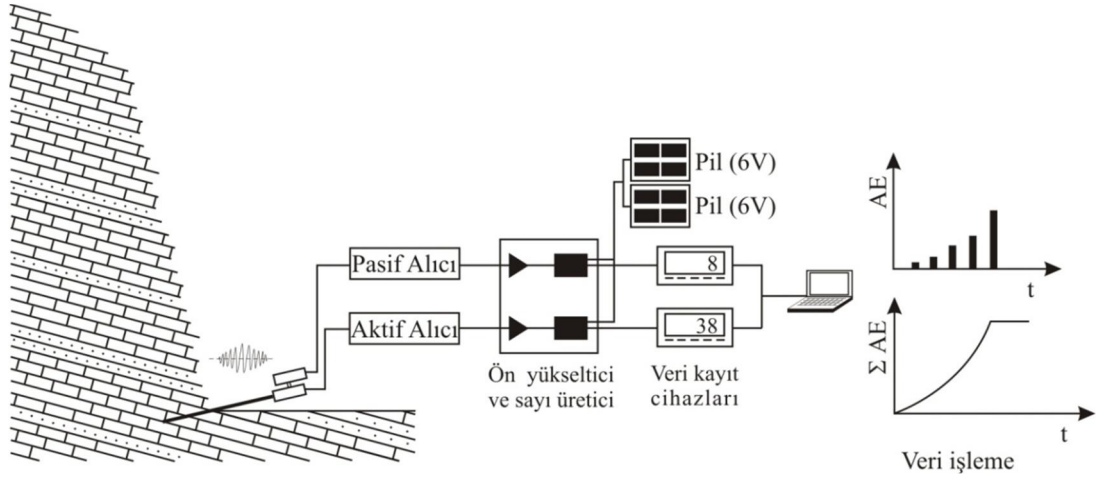
Gündoğdu yamaç hareketinin seyri AE verileri ve diğer izleme verileri ile karşılaştırılmıştır. AE sinyallerinin dalga formunda kaydı, depolanması ve sonradan analizi oldukça pahalı sistemlerle yapılabilmektedir. Dalga formunda analiz yerine, sinyallerden belirli bir eşik seviyesini geçenlerin sayı şeklinde parametrik olarak alımı, kaydı ve analizi oldukça pratik ve ekonomik sistemlerle gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 5.6). Bu kolaylığı nedeniyle literatürde çoğu araştırmacının gerek arazi gerekse laboratuvar çalışmalarında parametrik veri alımı ve analizini tercih ettiği görülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da arazide ve laboratuvar deneylerinde parametrik veri alımı yaklaşımı kullanılmıştır.

Parametrik AE veri alım sistemlerinde gerek laboratuvar gerekse arazi uygulamalarında algılayıcı ile alınan AE sinyalleri ön yükseltici ile yükseltir daha sonra eşik algılayıcısından geçirilerek eşiği geçen her bir sinyal için sayı üreticisi tarafından bir sayı üretilir ve ilgili zaman dilimi için kaydedilir (Şekil 5.7). AE aktivite sayılarının arazi koşullarında kaydı bilgisayarlar yerine, kompakt harici kayıt cihazları ile daha uygun ve pratik olmaktadır. Bu cihazlar tek kanalda 8000 veri kaydedebilmekte ve iki adet ince kalem pil ile çalışmaktadır. Uzun ömürlü alkalin piller ile en fazla bir yıla kadar veri kaydı yapabilen bu cihazlar ile saatlik toplam AE aktivite sayıları kaydedilmektedir. Bu cihazlardan her istasyonda aktif ve pasif algılayıcılar için toplam iki adet kullanılmaktadır.



Şekil 5.6 : Farklı eşik seviyelerine göre üretilen AE sayıları (Hardy, 2003).

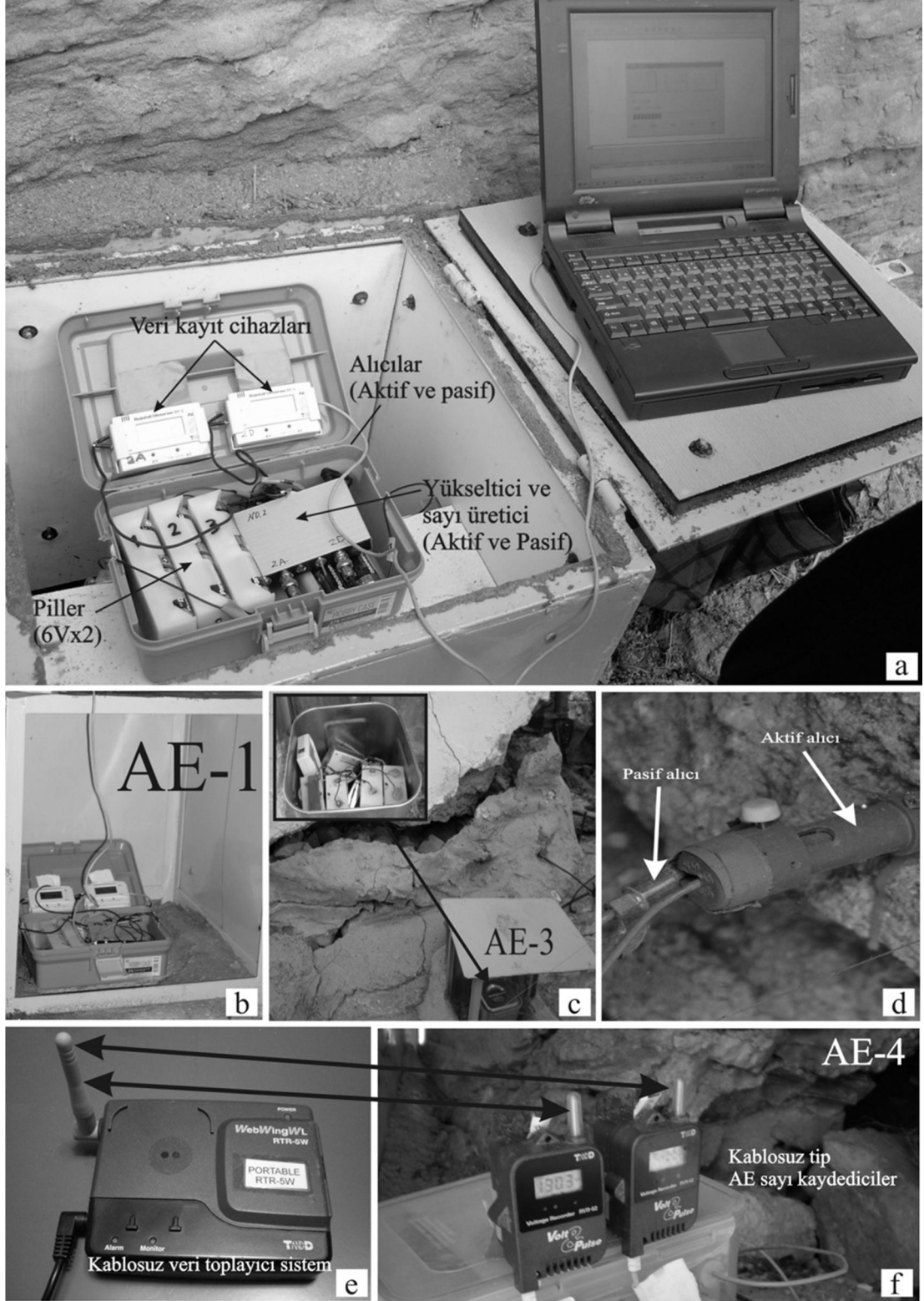
Bu çalışmada, Prof. Dr. Hisataka Tano (Nihon Üniversitesi, Japonya) tarafından geliştirilmiş ve araziye yerleştirilebilecek özellikteki AE veri alım sistemleri kullanılmıştır. Bu sistemlerin bileşenleri şematik olarak Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Arazi AE izleme sisteminin genel özellikleri (Tano ve diğ., 2006a'dan değiştirilmiştir).

Babadağ ilçesindeki hareketi izlemek amacıyla başlangıçta üç AE istasyonu kurulmuş olup, ayrıca 2008 yılında ise 1 no.lu mesafe ölçüm istasyonuna dördüncü AE istasyonu kurulmuştur. AE-1 istasyonu Gökdere vadisinde dere kotuna yakın bir seviyeye, diğer istasyonlar ise daha üst kotlarda hareketin görüldüğü alan içinde kurulmuştur (Şekil 5.8).

AE-3 istasyonu yamaç hareketi nedeniyle temelinde belirgin çatlama görülen ve oldukça fazla deformasyona maruz kalmış bir evin bahçesine yerleştirilmiştir (Şekil 5.8c). İstasyonlarda aktif ve dış etkenlere bağlı olarak oluşan sinyalleri almak ve sonradan filtrelemek için pasif alıcılar kullanılmaktadır.

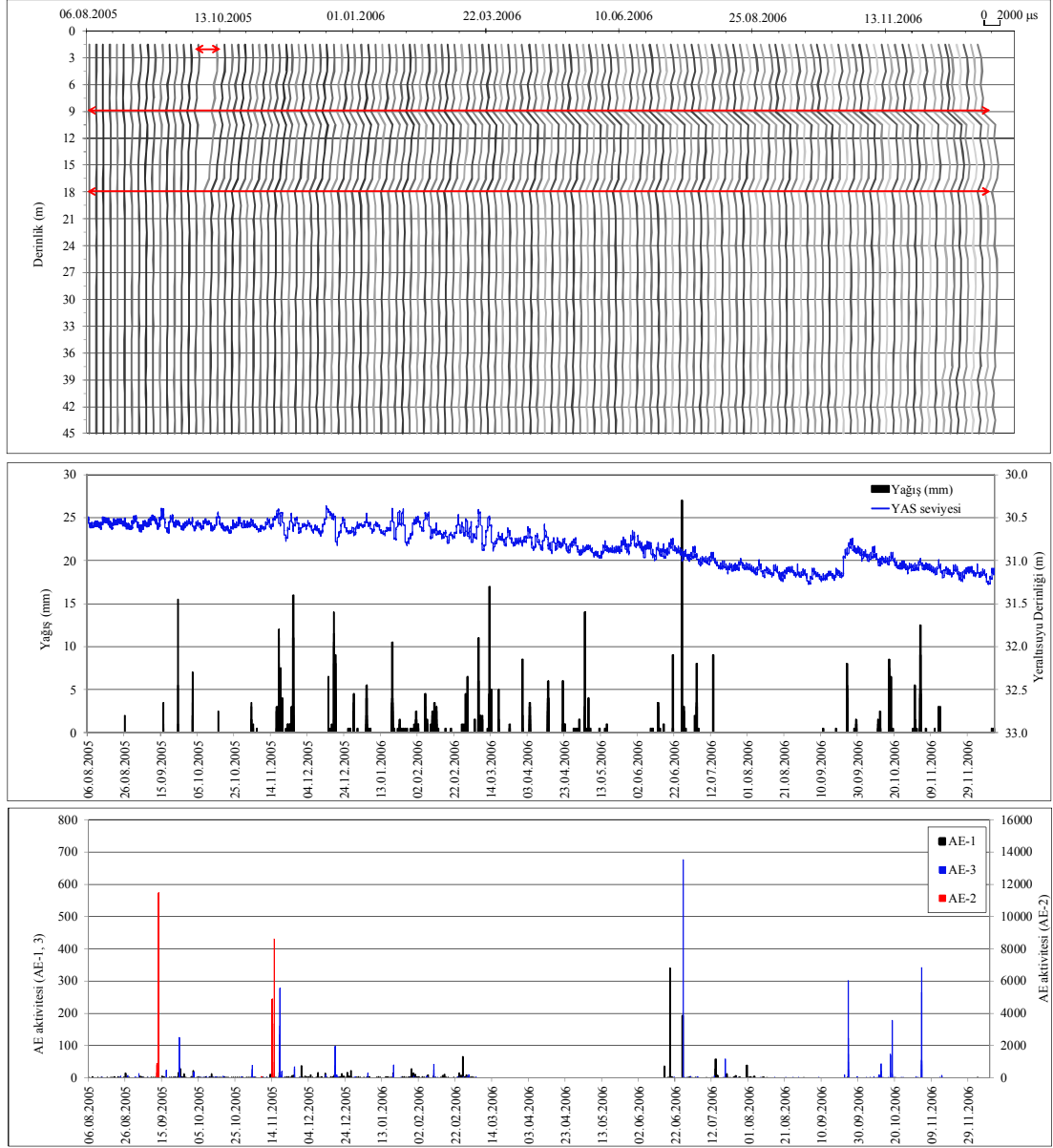


Şekil 5.8 : AE-1, 2, 3 ve 4 istasyonlarının görünümleri ve ayrıntılar (a: AE-2 istasyonunda kaydedilen verinin bilgisayara aktarılması, b: AE-1 istasyonunun görünümü, c: AE-3 istasyonunun görünümü, d: aktif ve pasif algılayıcılar, e-f: AE-4 istasyonunda verinin internet aracılığıyla aktarılmasına olanak sağlayan kablosuz veri toplayıcı ve aktif-pasif kanallar için veri kaydediciler).

5.4 Çok Parametrelİ İzleme Verilerinin Değerlendirilmesi

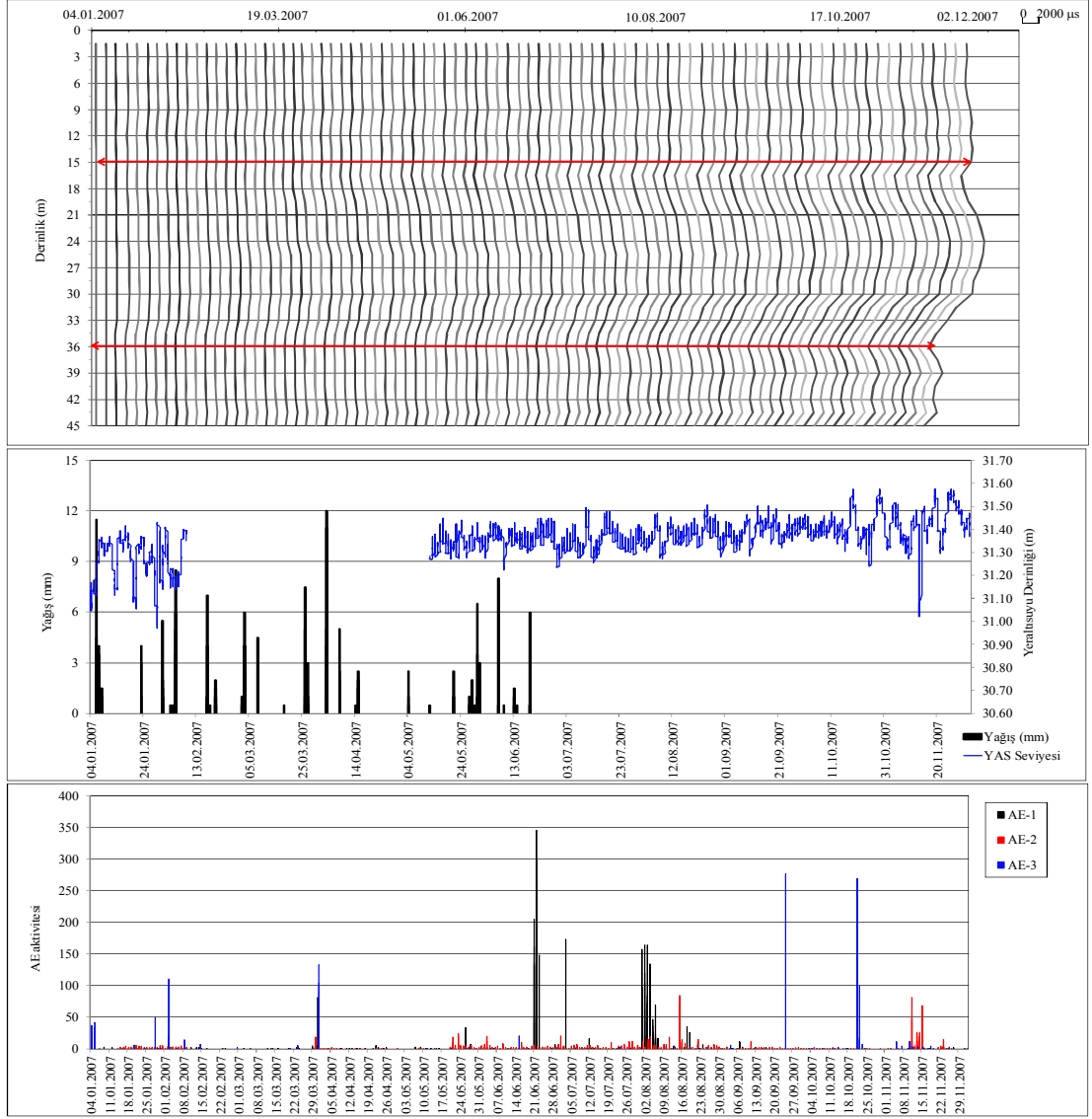
Bu alt bölümde; Babadağ ilçe merkezinde izlenen yağış, YAS seviye değişimleri, kuyu içi deformasyon ve AE aktivite verileri çizilen grafiklerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Arazi izleme sistemlerinde çeşitli arızalar, olumsuz dış etkenler, ağır hava koşulları, enerji kaynağı olarak kullanılan alkalin pillerin öngörülen zamandan önce bitmesi gibi bazı olumsuzluklara bağlı olarak veri kesintileriyle karşılaşılabilinmektedir.

Tez çalışması kapsamında, daha öncede belirtildiği gibi, 2001 yılından günümüze değin Gündoğdu heyelanını izlemek amacıyla elde edilen veriler (Aydan, 2003; Çevik ve Ulusay, 2005; Kumsar ve diğ., 2004; Tano ve diğ., 2003, 2006a, b; Tano ve diğ., 2008) incelenmiş, veri eksiklikleri olan aralıklar göz önünde bulundurularak deformasyon, yağış ve AE sayıları için üç döneme ait grafikler oluşturulmuştur. Birinci dönem cihazın yerleştirildiği 06.08.2005 ile 31.12.2006 tarihleri (Şekil 5.9), ikinci dönem 04.01.2007 ile 02.12.2007 (Şekil 5.10) ve son olarak üçüncü dönem ise 04.08.2008 ile 07.05.2009 arasını (Şekil 5.11) kapsamaktadır. 2009 yılı ortalarından itibaren günümüze değin alınan deformasyon verilerine göre sistemin deformasyon ölçebildiği aralığın aşıldığı görülmüştür. Deformasyon verisi incelendiğinde, farklı zamanlarda ve değişik seviyelerde deformasyonlar görülmektedir. Birinci dönemde, özellikle 09.10.2005 tarihinde başlayan ve 18 m derinliğe kadar etkiyen bir deformasyon söz konusudur. Bu tarihin öncesinde YAS ve yağış verisinde bir anomali görülememektedir. AE-2 istasyonundaki aktivite sonlandıktan yaklaşık 36 gün sonra deformasyon artışı görülmektedir. Bu tarihten sonra 9-18 m arasındaki derinliklerde deformasyon görülmektedir (Şekil 5.9). Aynı dönemde 26.06.2006 ile 24.09.2006 tarihleri arasındaki yağışsız sürede YAS seviyesinin yaklaşık 26 cm düştüğü ancak yağışın başlamasıyla ani olarak önceki seviyesine yükseldiği görülmektedir. Bu durumda yağışın ani olarak YAS seviyesini etkilediği görülmektedir. Yağışların başlamasıyla eş zamanlı olarak AE-3 istasyonunda aktivite artışı da gözlenmiştir. Bu durum, AE-3 istasyonunun yüzeyde yamaç hareketinin etkisinde sürekli deformasyona uğradığı bilinen tek katlı bir evin temeline kurulmuş olmasından dolayı yağışlarla eş zamanlı olarak meydana gelebilecek özellikle yerel ve yüzeysel bir hareketle açıklanabileceği düşünülmektedir.



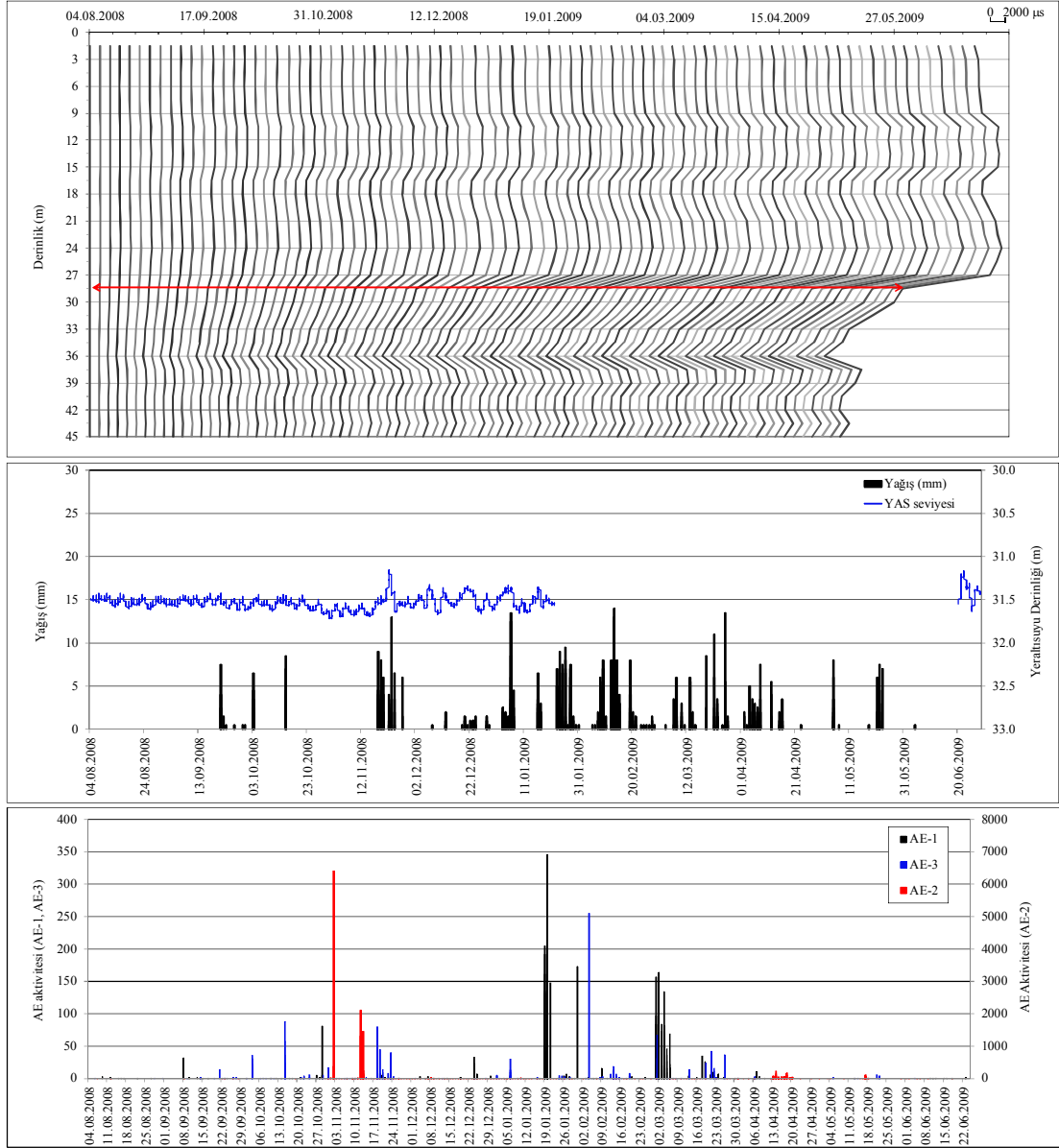
Şekli 5.9 : 06.08.2005 ile 31.12.2006 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin YAS seviyesi, yağış ve AE aktivitesi ile ilişkisi.

04.01.2007 ile 02.12.2007 tarihleri arasındaki ikinci dönemde 15 ile 36 m derinlikler arasında deformasyonlar dönem başından itibaren başlayarak dönemin sonuna dek görülmektedir. Dönem ortasından itibaren AE aktivitelerinde de artış kaydedilmiştir (Şekil 5.10). Bu dönemde 2007 yılının Şubat-Mayıs ayları arasında YAS seviyesi verileri, Temmuz-Aralık ayları arasındada yağış verileri, karşılaşılan sorunlar nedeniyle alınamamıştır.



Şekil 5.10 : 04.01.2007 ile 02.12.2007 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin AE aktivitesi ile ilişkisi.

04.08.2008 ile 25.06.2009 tarihleri arasındaki 3. dönemde Eylül ayı ortalarına kadar deformasyon, YAS seviyesi, yağış ve AE aktivitelerinde herhangi bir değişim olmamıştır. 21 Eylül 2008’de yağışların başlamasıyla deformasyon artışı ve ardından AE aktivite sayılarında artış gözlenmiştir. Kuyu profili boyunca 28.5 m derinlikte net deformasyon artışı görülmektedir. Yağışların başlamasıyla AE aktivitelerinde, özellikle AE-2 istasyonunda, yaklaşık 45 günlük süre sonrasında aktivite artışı gözlenmiştir. Bununla birlikte, yağışlı dönem devam ettikçe deformasyon ve AE aktivite sayılarında artış gözlenmiştir (Şekil 5.11). Bu dönemde, YAS seviye ölçüm cihazı 2009 Ocak ayı sonunda arızalanmış ve cihaz tamir edilmek üzere Japonya’ya üretici firmaya gönderilmiş olup, bu nedenle yaklaşık 6 aylık bir dönem için veri eksikliği söz konusu olmuştur.

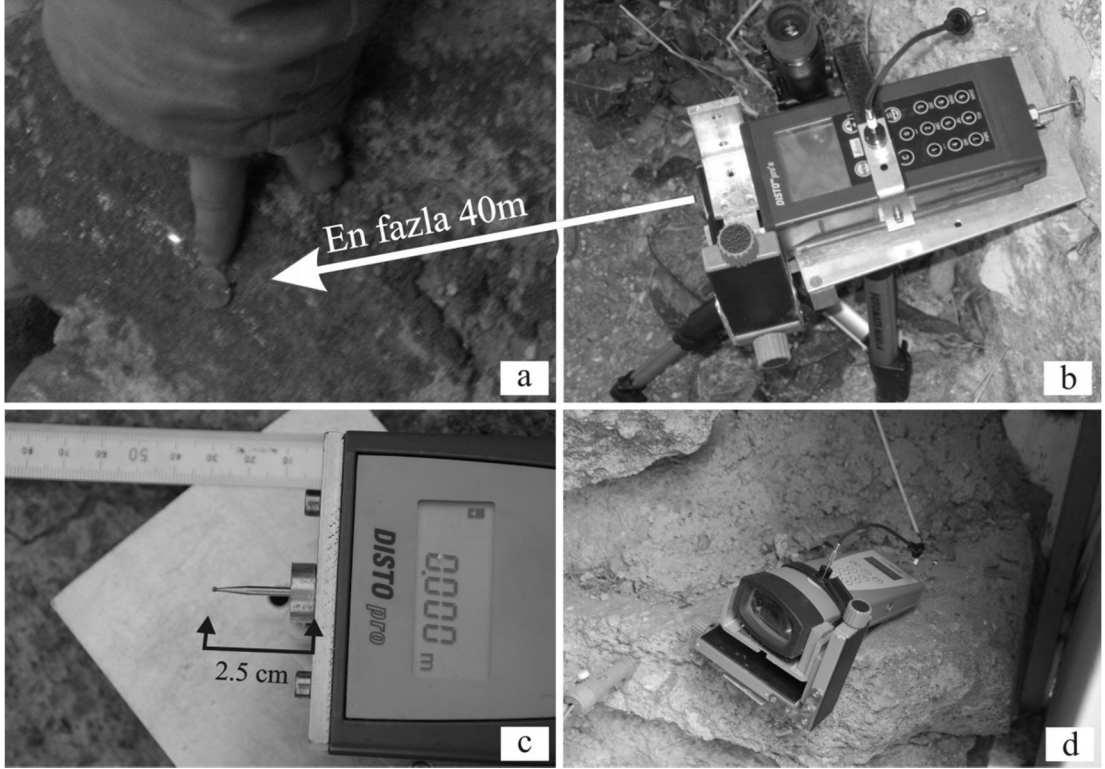


Şekil 5.11 : 04.08.2008 ile 25.06.2009 tarihleri arasında kuyu içi deformasyon verisinin, YAS seviyesi ve yağış ile ilişkisi.

Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11’de verilen grafiklerde AE aktivitesinin yağışlara bağlı olarak arttığı görülmektedir. Üç istasyon içinde yağışlardan sonra AE aktivitesindeki artışın başlama zamanlarının farklılık gösterdiği, bu durumun yağış sularının süzülme süresinden ve istasyonların farklı kotlarda kurulu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Önceki çalışmalarda arazide yapılan süzülme deneylerinde süzülme hızının 1.67 mm/s olduğu belirtilmiştir (Aydan ve diğ., 2003). İlçe merkezinde izlenen AE aktiviteleri, saatlik mesafe ölçümünün yapıldığı AE-4 istasyonundaki yerdeğiştirme verisi ile olan ilişkisi bir sonraki alt bölümde verilmiştir.

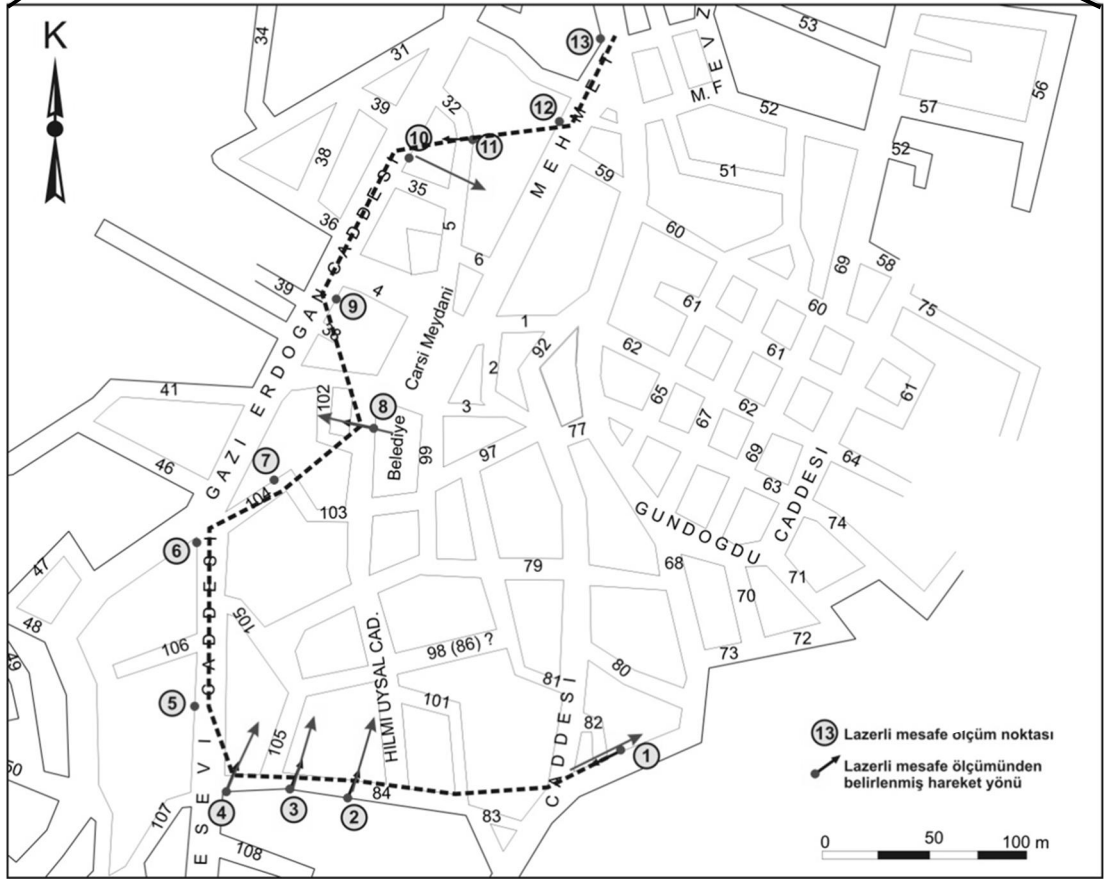
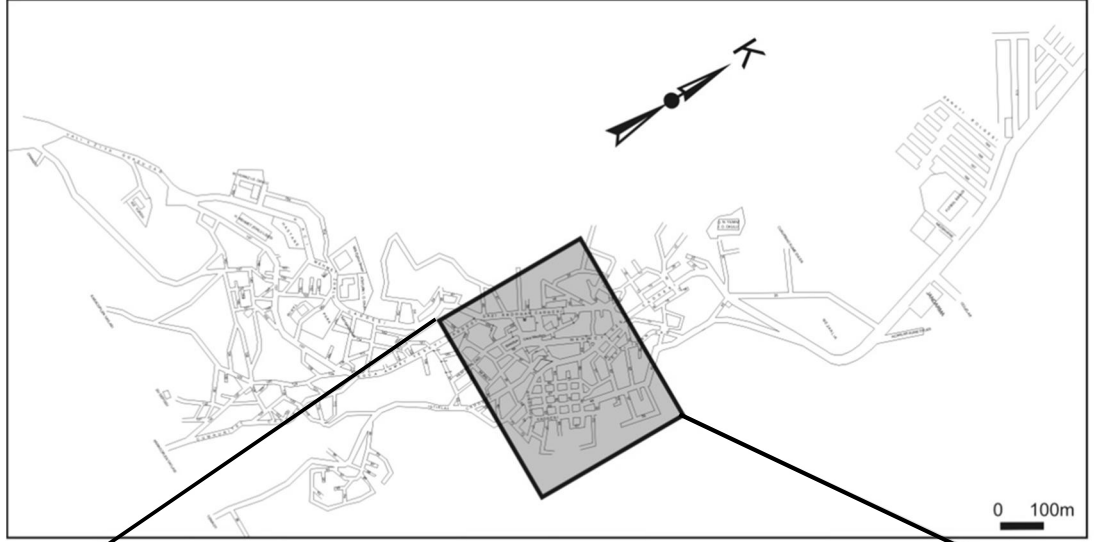
5.5 Mesafe Değişimi Ölçümleri

İlçede hareketli ve hareketsiz kesimler arasındaki sınır dikkate alınarak belirlenmiş noktalarda (Tano ve diğ., 2003) lazerli mesafe ölçüm yöntemiyle 13 istasyonda belirli aralıklarla mesafe değişimleri ölçülmüştür. Mesafe ölçümünde kullanılan lazermetrenin hassasiyeti 40 m'lik ölçüm uzaklığı için ± 1.5 mm'dir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12 : Lazermete ile mesafe ölçümü (a, b, d: lazermetrenin sabitlenmiş hedef noktasına ayarlanması, c: cihazın sabit bir noktaya temas ettirilmesinde kullanılan iğne).

İlçe merkezinde yol yüzeyleri değişik türde malzeme (asfalt, beton vb.) ile kaplı olup, zemini doğrudan gözleminin güçlüğü nedeniyle bu yöntemle ölçüm alınması tercih edilmiştir. Şekil 5.13'de mesafe ölçüm noktaları sokak krokisi üzerinde gösterilmiştir.

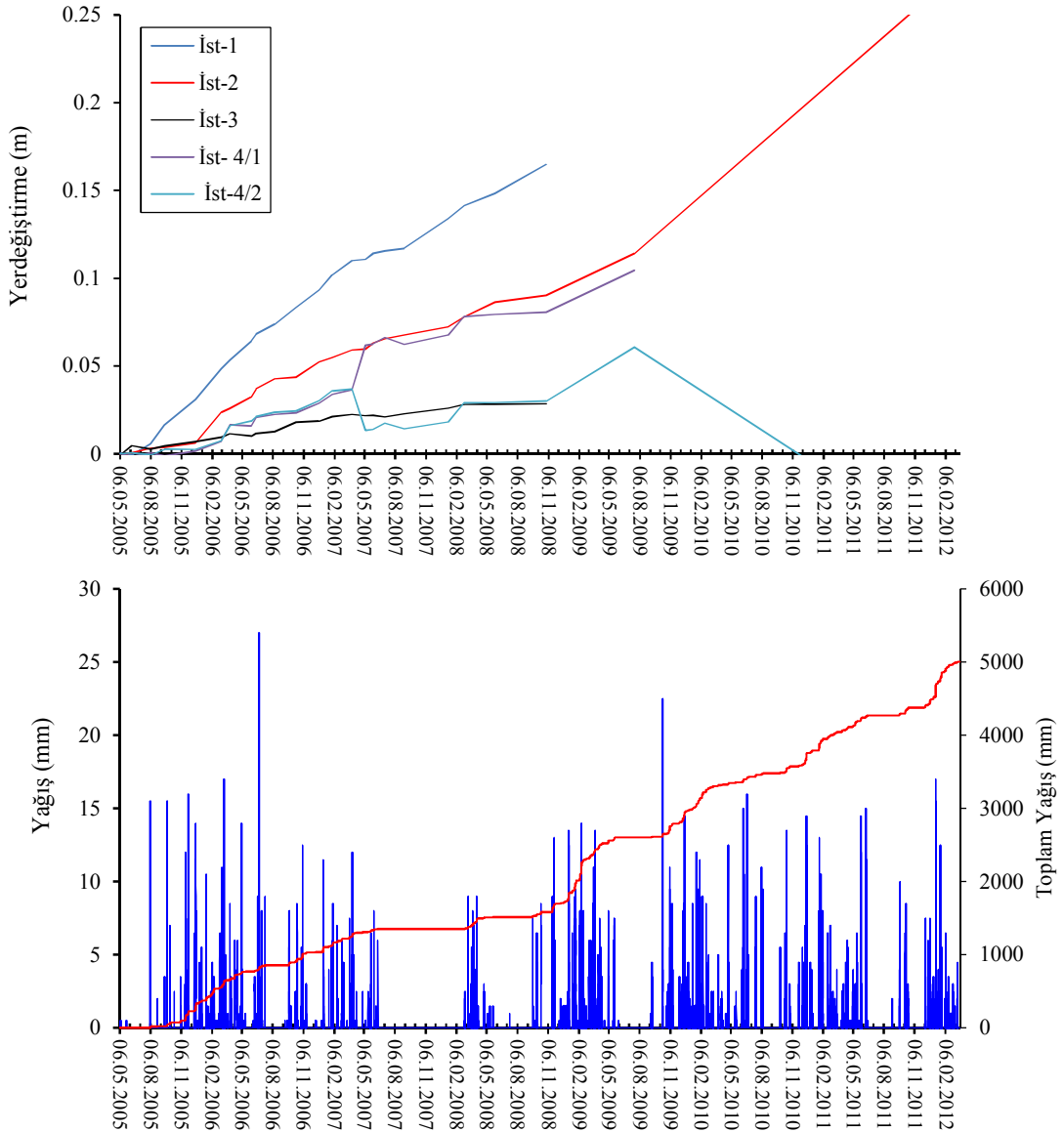


Şekil 5.13 : Lazermetreyle alınan ölçümlerde kullanılan mesafe ölçüm noktaları.

Mesafe ölçüm noktalarından bazılarının yerleri zaman içerisinde çeşitli sebeplerden dolayı kaybolmuştur. İstasyonlara ait uzun dönem mesafe değişimleri, ilgili ölçüm aralığındaki yağış miktarları ile birlikte Şekil 5.14 ve 5.15’de verilmiştir.

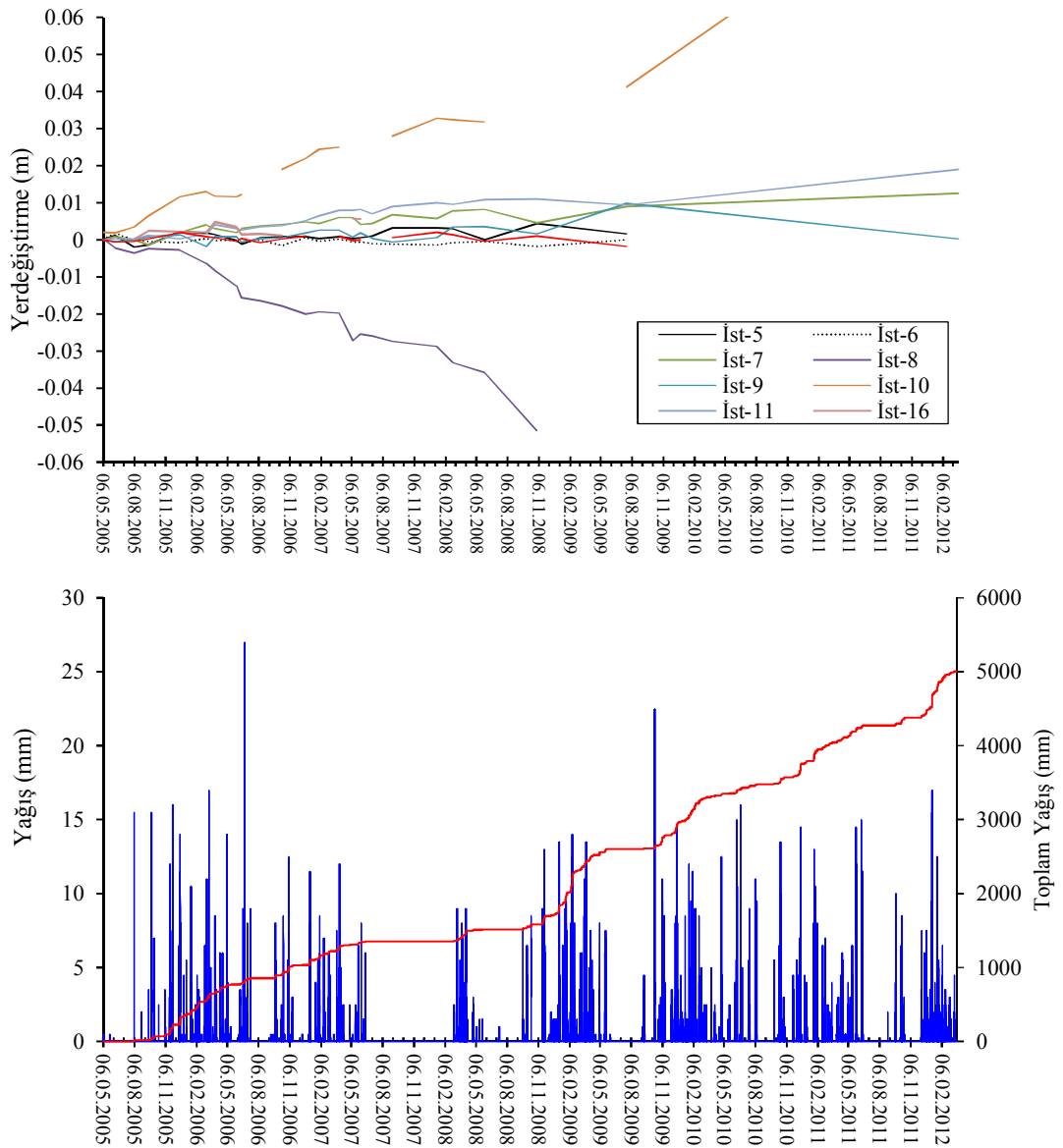
Lazerli mesafe ölçerle toplanan 2005-2012 arası veriye göre, en fazla 25 cm’lik mesafe değişimi söz konusudur. Bu değişim 2 nolu istasyonda görülmektedir (Şekil

5.14). Ayrıca 1 nolu istasyonda saatlik mesafe değişimi ölçümü alınmaktadır. Bu istasyonun kurulu olduğu yolda ve yakınında sürekli açılma ve buna bağlı deformasyonlar gözlenmektedir (Şekil 5.18). Ayrıca 8 nolu istasyonda mesafe azalışı, 10 nolu istasyonda ise artış gözlenmiştir. 5, 6, 7, 9, 11 ve 16 (Şekil 5.15) nolu istasyonlarda yerdeğiştirmenin 1 mm civarında olduğu görülmektedir. İstasyonlarda çeşitli nedenlere bağlı olarak ölçüm alınmayan zaman aralıklarında çizgiler kesikli olarak verilmiştir. Cihazın hassasiyetinin ± 1.5 mm olduğu göz önüne alındığında, bu istasyonlarda diğer istasyonlarda olduğu gibi, bir yerdeğiştirmenin olmadığı anlaşılmaktadır. Ölçüm verileri incelendiğinde, ilk 4 istasyonda giderek mesafe artışının meydana geldiği dikkati çekmektedir.



Şekil 5.14 : 1, 2, 3, 4/1 ve 4/2 no.lu istasyonlardaki mesafe değişimleri ve bunların yağışla ilişkisi.

İlgili grafiklerden, yağışlı dönemler ve bunların devamında hareketin arttığı, yağışsız dönemlerde ise göreceli olarak hareket miktarlarının azaldığı görülmektedir. Ölçüm verilerine göre 2005-2012 yılları arasında 2 no.lu istasyonda toplamda 25 cm'lik açılma, yıllık ortalama ise 3.2 cm'lik açılma belirlenmiştir. 10 no.lu istasyonda ise 2005-2010 yılları arasında toplam 6 cm, yıllık ortalama ise 1.2 cm'lik açılma belirlenmiştir. Bu iki istasyonda belirgin olarak gözlenen açılma 8 no.lu istasyonda tersine daralma veya mesafe kısalması olarak gözlenmektedir. Bu istasyonda ölçüm alınabilen 2005 ile 2008 yılı Kasım ayı arasında toplam 5.5 cm'lik, yıllık ortalama 1.5 cm'lik mesafe azalışı veya daralma gözlenmektedir.



Şekil 5.15 : 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 16 no.lu istasyonlardaki mesafe değişimleri ve yağışla ilişkisi.

El tipi lazermetre ile 2005 ile 2012 yılları arasında yukarıda verilen yerdeğişimi ölçümleri uluslararası projenin önceki çalışmalarında belirlenen (Atak ve diğ., 2003; Çevik, 2003; Tano ve diğ., 2003 ve Tano ve diğ., 2006b) mesafe değişimi değerleriyle uyumludur. Uzun dönemli yamaç hareketi, tez kapsamında incelenen mesafe değişimi verilerine göre seyrini sürdürmektedir.

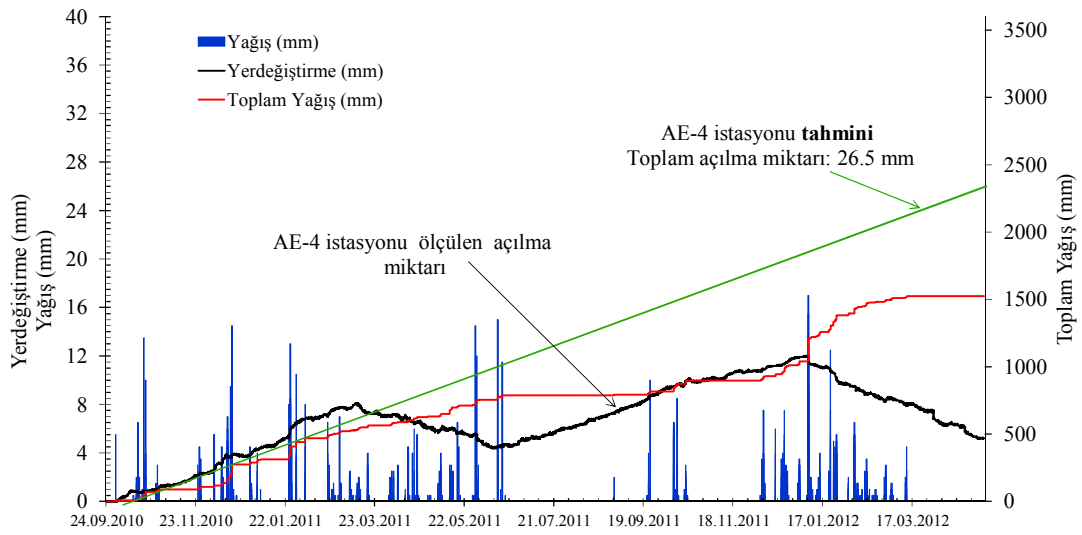
Gündoğdu heyelanının yaklaşık güney sınırı olarak belirlenen 1 no.lu mesafe ölçüm istasyonu (Şekil 5.15), AE-4 istasyonu olarak adlandırılmış ve saatlik mesafe değişimini ölçmek amacıyla tekrar düzenlenmiştir (Şekil 5.16). İstasyonun bulunduğu nokta önceki çalışmalarda yamaç hareketinin güney sınırı olarak değerlendirilmiş (Tano ve diğ., 2003) ve deformasyonların sürekli izlenebilmesi amacıyla Prof. Dr. Hisataka Tano tarafından geliştirilen AE izleme sistemi ve açılma miktarını kaydeden otomatik mesafe ölçüm cihazı bu istasyona yerleştirilmiştir (Şekil 5.16b, c).



Şekil 5.16 : AE-4 istasyonu mesafe ölçüm sistemi (telin gerilmesiyle dönen diske sabitlenmiş eğim algılayıcı (a), istasyonun görünümü (b)).

Mesafe değişimi, iki nokta arasındaki elik telin açılma veya daralmaya bağlı olarak bir diski döndürmesi yoluyla disk üzerine sabitlenmiş elektronik eğim ölçer verisinden hesaplanmaktadır.

AE-4 istasyonunun hemen üzerinden geçen yolda gerek yamaç hareketinin, gerekse yoldan geçen ağır araçların etkisiyle büyük deformasyonlar ve hasarlar sıklıkla görülmektedir. Bu hasarların etkisiyle ancak 24.09.2010 tarihinden günümüze değin yaklaşık 1.5 yıllık veri sağlıklı olarak alınabilmiş ve değerlendirilmiştir. AE-4 istasyonunda alınan yaklaşık 1.5 yıllık yerdeğiştirme miktarı ve bunun yağışla ile ilişkisi şekil 5.17’de verilmiştir.



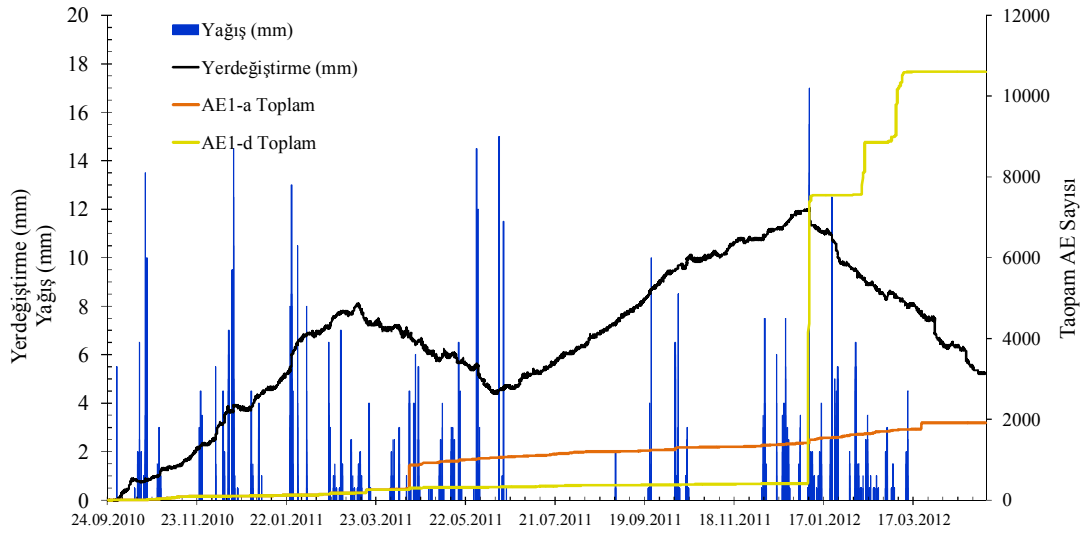
şekil 5.17 : AE-4 istasyonunda ölçülen mesafe değişimi ve yağışla olan ilişkisi.

Toplam 18 aylık mesafe değişimi verisi incelendiğinde, zamana bağlı olarak açılma ve ardından daralma şeklinde bir hareket gözlenmiştir. Bu açılma ve daralmanın istasyonun kurulu olduğu yerin alt ve st kesimlerindeki göreceli hareketlere bağlı olabileceği düşünülmektedir. şekil 5.18’de istasyon ve vresinde gözlenen bu açılmalar görülmektedir. Söz konusu mesafe daralmaları, kayan kütle bir bütün olarak düşünülüp mesafe artışı olarak değerlendirilmesi durumunda tahmini toplam açılma miktarı olarak verilmiştir (şekil 5.19). Bu durumda, AE-4 istasyonunda yıllık yaklaşık ortalama açılma miktarı 1 cm’dir. Daralma şeklinde görülen yerdeğiştirmelerin aslında açılmaya işaret ettiği kabul edildiğinde ise, tahmini yıllık ortalama açılma miktarı 1.75 cm olarak belirlenmiştir. şekil 5.17’de ayrıca, saatlik toplam yağış miktarları verilmiştir. Yağışın ve yerdeğiştirmenin zamana bağlı ve birbirine paralel olarak arttığı görülmektedir.



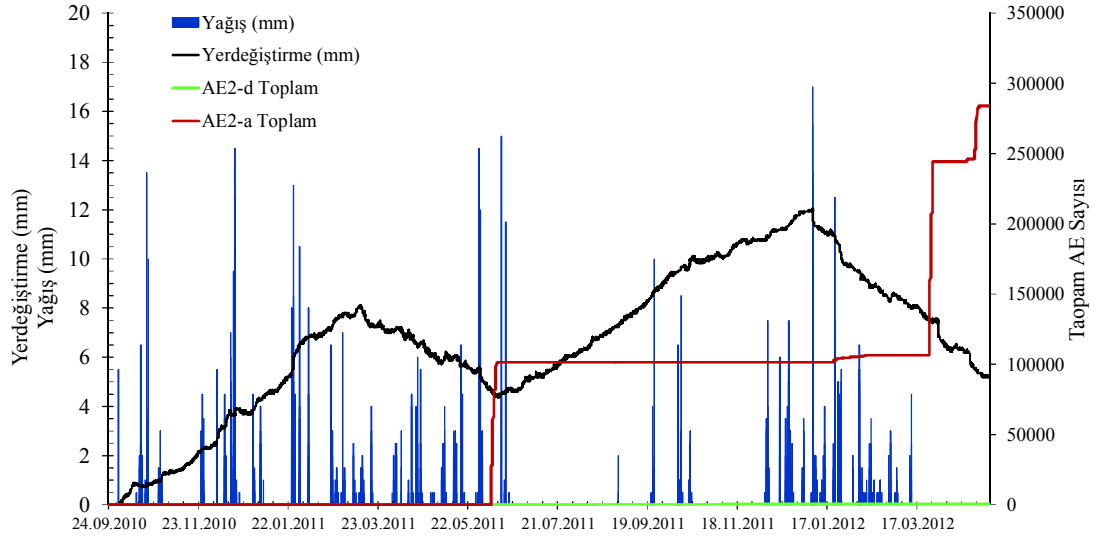
Şekil 5.18 : AE-4 istasyonunun alt ve üst kesimlerinde gözlenen deformasyonlar.

AE-4 istasyonunda saatlik yerdeğiştirme ölçümü yapıldığından, bu veri aynı zaman aralığında diğer üç AE istasyonunda kaydedilen AE aktiviteleriyle ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.19, 5.20, 5.21 ve 5.22’de sırasıyla AE-1, AE-2, AE-3 ve AE-4 istasyonlarında kaydedilen toplam AE aktiviteleri AE-4 no.lu istasyonda ölçülen yerdeğiştirme miktarları ile karşılaştırılmıştır. Her istasyon için aktif ve pasif AE aktivite sayıları verilmiş ancak AE-4 istasyonunda pasif kanal verisi teknik sorunlar nedeniyle alınmamıştır. AE-1, 2 ve 3 no.lu istasyonlarda ölçülen aktivite verileri ile AE-4 istasyonundaki yerdeğiştirme verisi arasında doğrudan bir ilişki görülememektedir. İstasyonlar arası mesafenin uzak olmasının bu durum üzerinde etkisi olabilir. Ayrıca yağış ve AE aktivite sayıları arasında net bir ilişki saptanamamıştır. Bununla birlikte, AE-1 istasyonu aktivite sayılarının yağışlara bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.

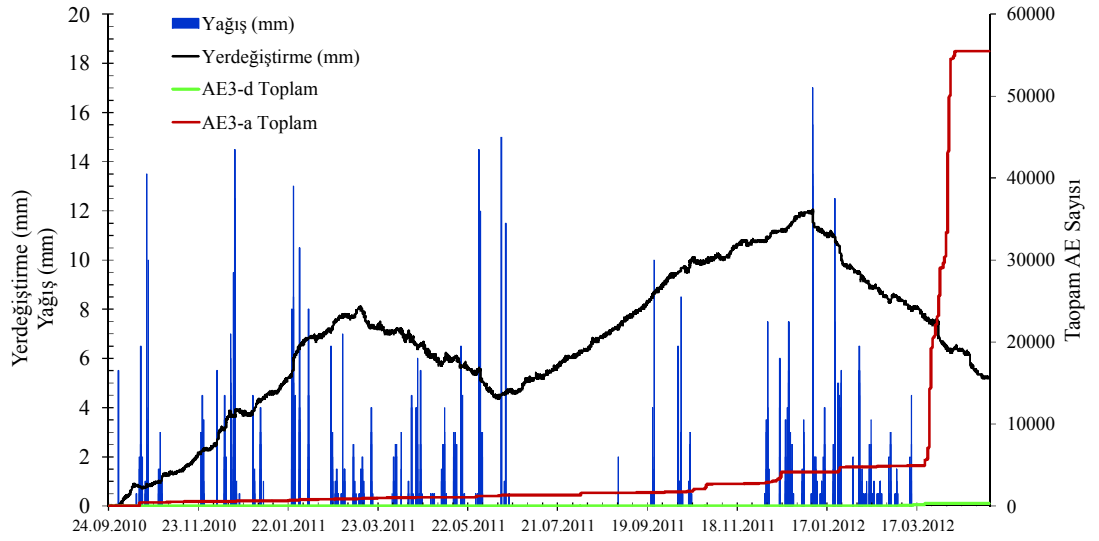


Şekil 5.19 : AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-1 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.

Şekil 5.24’de AE-4 istasyonunda ölçülen yerdeğiştirme ve AE aktivite verileri sunulmuştur. Bu istasyona, yoldan geçen ağır araçların birkaç kez hasar verdiği, belediye çalışanları ve yerel halktan öğrenilmiştir. Ayrıca AE algılayıcıları doğrudan zemine değil, asfalt altı temel veya geçmişte yola destek olması amacıyla inşa edilmiş duvara tutturulduğu için AE aktivitesi doğrudan yol ve altyapısında meydana gelen deformasyonlara işaret etmektedir. Bu istasyonda aktif AE sayılarında deformasyona paralel bir artış görülmektedir. AE aktivitelerinin meydana gelen deformasyonlarla eş zamanlı olarak kaydedildiği görülmektedir.

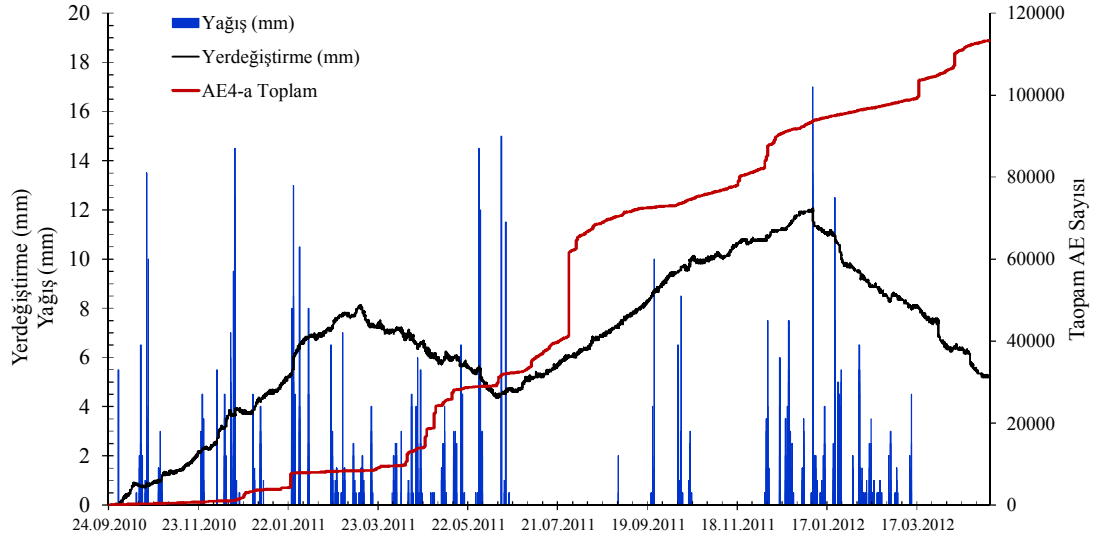


Şekil 5.20 : AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-2 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.



Şekil 5.21 : AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-3 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.

AE aktiviteleri, yapay gürültü, tektonik aktivite, vb. birçok etkiye bağlı olarak görülebilmektedir. Benzer olarak AE aktivitesi izlenen 4 istasyonda, istasyonların yakınındaki yapay ve doğal etkilere bağlı olarak aktiviteler gözlenmiştir.



Şekil 5.22 : AE-4 istasyonu yerdeğiştirme verisi ile AE-4 istasyonu aktivite sayılarının karşılaştırılması.

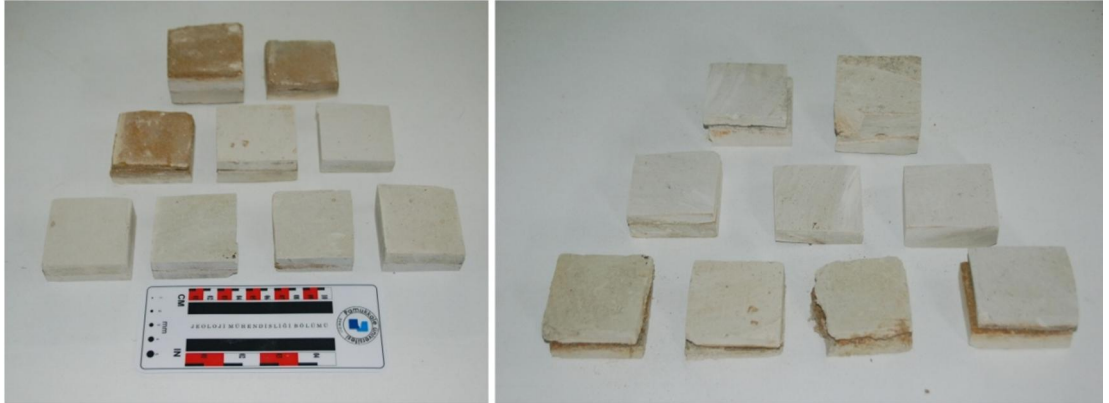
6. JEOMEKANİK LABORATUVAR DENEYLERİ FİZİKSEL MODELİN OLUŞTURULMASI VE MODEL DENEY DÜZENEGİ

6.1 Jeomekanik Laboratuvar Deneyleri

Yamaç duraylılık analizlerinde kullanılacak olan sevi oluşturan malzemenin ve süreksizliklerin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla jeomekanik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Fiziksel özellikler araziden alınan örselenmiş ve örselenmemiş örnekler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Ayrıca makaslama deneyleri için gerekli prizmatik örnekler araziden alınan kumtaşı araseviyeli marn bloklarından kesilerek hazırlanmıştır. Deneyler ISRM (2007)'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

6.1.1 Fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

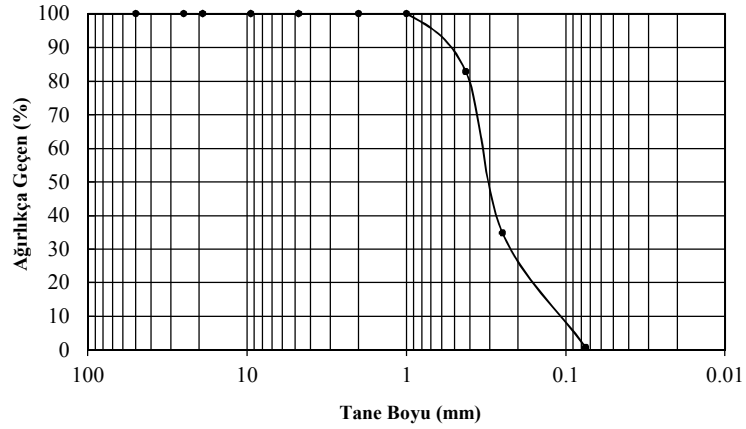
Babadağ kumtaşı-marn üyesinin doğal birim hacim ağırlığı, hazırlanan 6x6x2 cm boyutlu 9 adet makaslama kutusu deney örneklerinden hesaplanmıştır (Şekil 6.1). Doğal birim hacim ağırlık, 16.92-19.74 kN/m³ aralığında değişmekte olup, ortalama 18.58 kN/m³ olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.1 : Birim hacim ağırlıklarının belirlendiği kumtaşı ara yüzeyli prizmatik marn örnekleri.

Kumtaşı seviyelerinden alınan örselenmiş kum örneğinin tane boyu dağılımının belirlenebilmesi için örnek elek analizi deneyine tabi tutulmuş ve birleştirilmiş zemin

sınıfı kötü derecelenmiş kum (SP) olarak belirlenmiştir. Şekil 6.2’de kum örneğinin tane boyu dağılım eğrisi ve tane boyu dağılımı özellikleri verilmiştir.



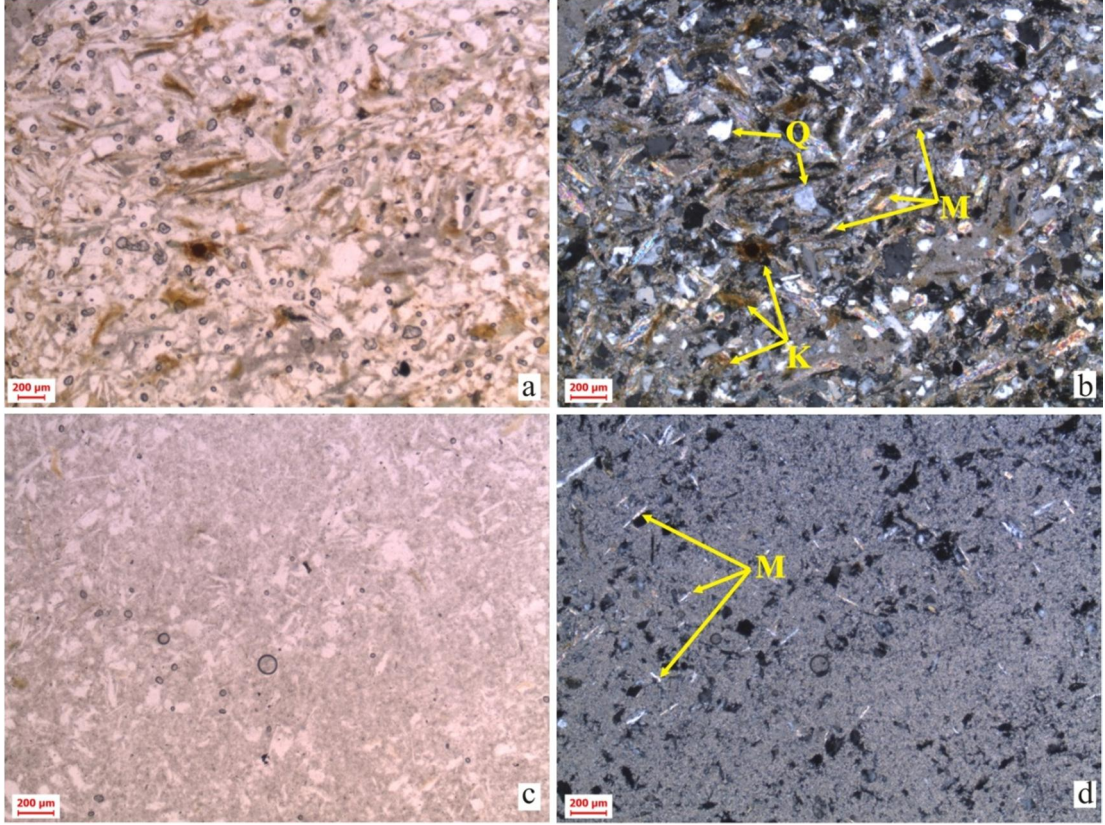
Çakıl (%): 0.0		Kum (%): 99.4		Kil-silt (%): 0.6	
Efektif Çap (D_{10})	0.12	%60’a karşılık gelen malzeme çapı, D_{60}	0.34	Üniformluk katsayısı (C_u)	2.78
%30’a karşılık gelen malzeme çapı, D_{30}	0.23	Eğrilik katsayısı (C_c)	1.21		
%50’ye karşılık gelen malzeme çapı, D_{50}	0.31				

Şekil 6.2 : Kumtaşı ara seviyelerinden örselenerek alınmış örneğin tane boyu dağılımı.

Kumtaşı ve marn örneklerinin mineral içeriklerinin belirlenmesi amacıyla ince kesitler hazırlanmıştır. Şekil 6.3a ve b’de kumtaşına ait tek ve çift nikol görünüşleri verilmiştir. Kumtaşında kuvars, muskovit, klorit ve opak minerallerin varlığı belirlenmiştir. Kumtaşı; taneler arası karbonat çimentolu olup, tanelerin köşeli olması taşınma mesafesinin kısa olduğunu göstermektedir. Şekil 6.3c ve d’de ise marnın tek ve çift nikol ince kesit görünüşleri verilmiştir. Marn’da ise, mika minerallerinin varlığı gözlemlenir ve karbonat çimentonun varlığı gözlenmektedir.

6.1.2 Kumtaşı ara seviyesinin makaslama dayanımının belirlenmesi

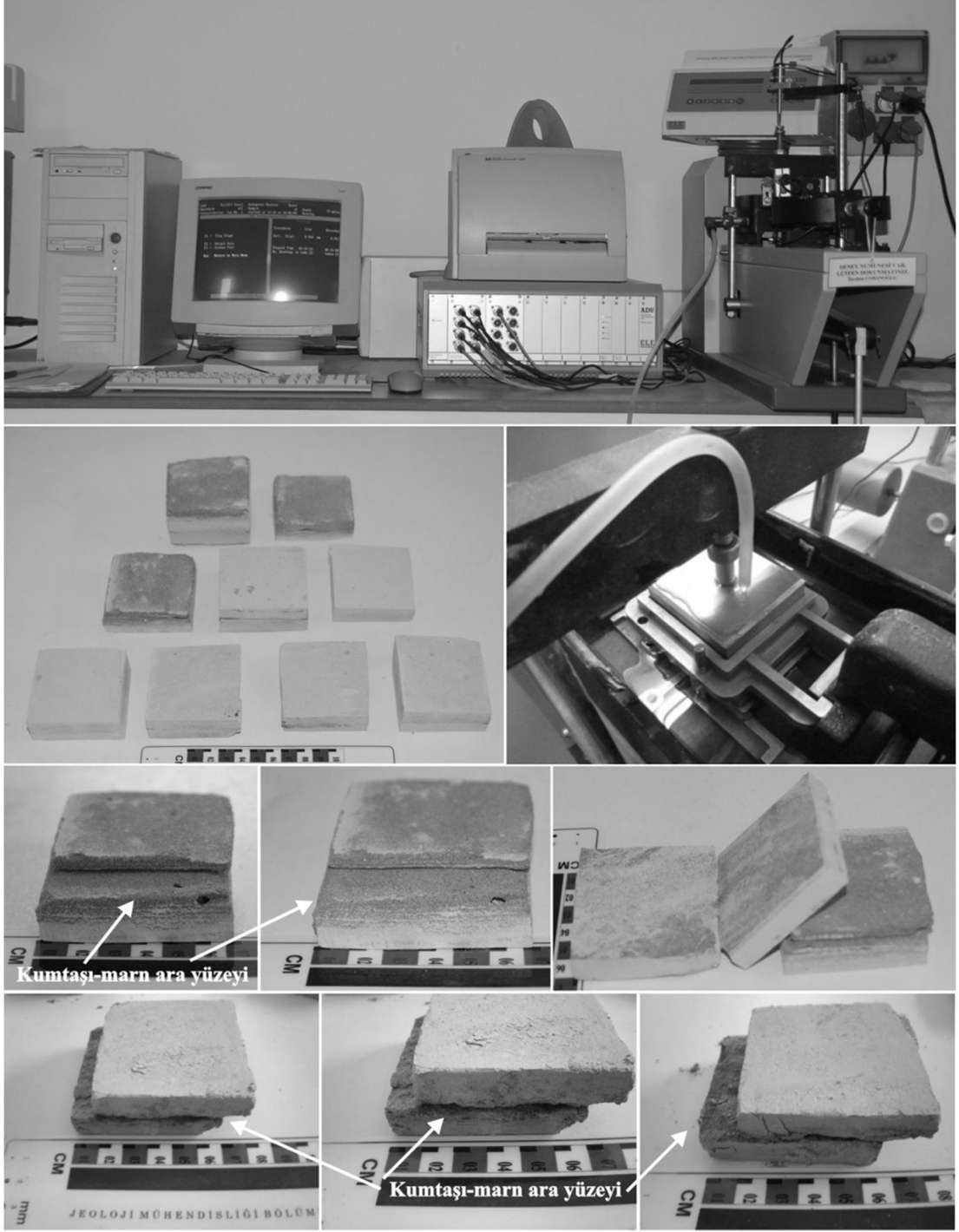
İlçeyi etkileyen yamaç hareketi, tabaka düzlemlerinin sahip olduğu makaslama dayanımı ile kontrol edilmekte, dolayısıyla tabaka düzlemlerinin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri hareketin seyrini etkileyen en önemli parametrelerdendir. Tabaka düzlemlerinin makaslama dayanımı parametrelerinin belirlenmesi amacıyla makaslama deneyleri yapılmıştır. Çalışma alanında Babadağ kumtaşı-marn ardalanmasının makaslama dayanımı parametreleri laboratuvar zemin makaslama deney cihazı kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 6.3 : Marn ve kumtaşından hazırlanan ince kesitlerin görünüşleri (a, b: kumtaşı, c, d: marn, Q: Kuvars, M: Muskovit, K: Klorit).

Prizmatik örnekler, araziden tabakalar halinde alınan kumtaşı ara seviyeli marn bloklarından 6x6x2 cm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Malzeme zayıf olduğu için, bu örnekler hazırlanırken çoğu dağılmıştır. Deneyler ASTM (1999)'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Standartta makaslama hızı, yenilme anındaki yerdeğiştirmenin, yenilme anına kadar geçen zamana oranı olarak önerilmiştir. Çevik (2003) Babadağ'daki, kumtaşı seviyeleri içeren marn örnekleri üzerinde yaptığı makaslama deneylerinde üç farklı makaslama hızını denemiş ve makaslama hızının düşüşüne bağlı olarak kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerlerinde azalma olduğunu belirlemiştir. Arazi gözlemlerine göre kumtaşı seviyelerinin Gökdere'ye yakın düşük kotlarda nemli olduğunu ve bu nedenle deneyler süresince örneklerin pipet ile nemlendirildiğini belirtmiştir.

Önceki çalışmalar göz önüne alınarak, hazırlanan prizmatik kumtaşı ara seviyeli marn örnekleri üzerinde makaslama deneyleri yapılmıştır. Makaslama deney sistemi, hazırlanan prizmatik örnekler ve deney sırasında yapılan nemlendirme işlemi Şekil 6.4'de verilmiştir.

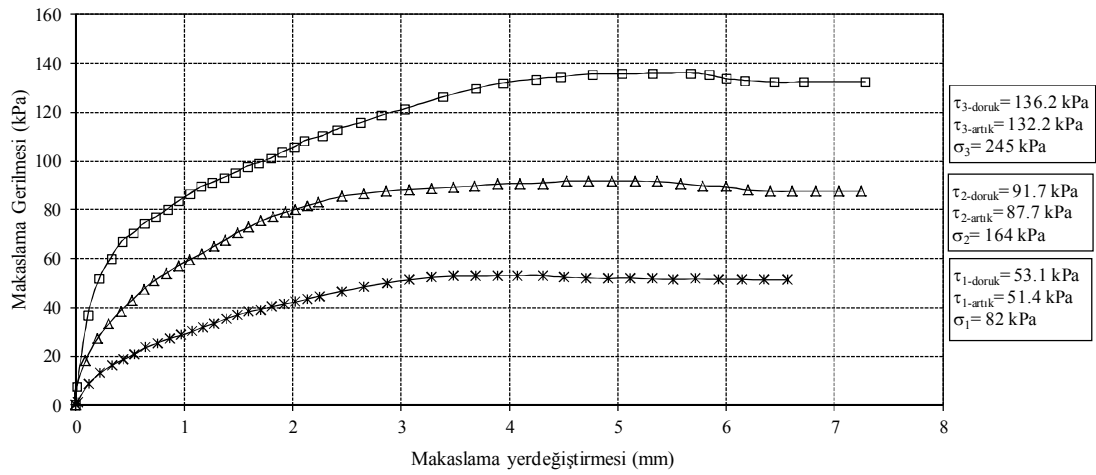


Şekil 6.4 : Makaslama kutusu deney sistemi (veri alım ünitesi ve makaslama deney cihazı), hazırlanan prizmatik örnekler ve deney esnasındaki nemlendirme işleminden görünüm.

Kumtaşı ara seviyelerinin makaslama dayanımı parametrelerinin daha farklı hızlardaki değişimlerinin gözlemlenmesi amacıyla, önceki çalışmalara ek olarak 0.5 mm/dk'lık nisbeten daha yüksek makaslama hızında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylere başlanmadan önce ara yüzey pipet kullanılarak nemlendirilmiştir.

Farklı makaslama hızlarında yapılan deneylere ait sonuçlar incelendiğinde, makaslama parametreleri arasındaki farkların çok yüksek olmadığı bununla birlikte, makaslama hızındaki artışla doğru orantılı bir biçimde bu parametrelerinin arttığı görülmektedir. 0.5 mm/dk makaslama hızı için makaslama gerilmesi ve makaslama yerdeğiştirmesi grafiği Şekil 6.5’de verilmiştir.

0.5 mm/dk makaslama hızlarında yapılan deneylere ait bilgiler Tablo 6.1’de verilmiştir. Farklı makaslama hızlarındaki deney sonuçları incelendiğinde, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri arasındaki farkların çok yüksek olmadığı, genel olarak makaslama hızı artışı ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir.

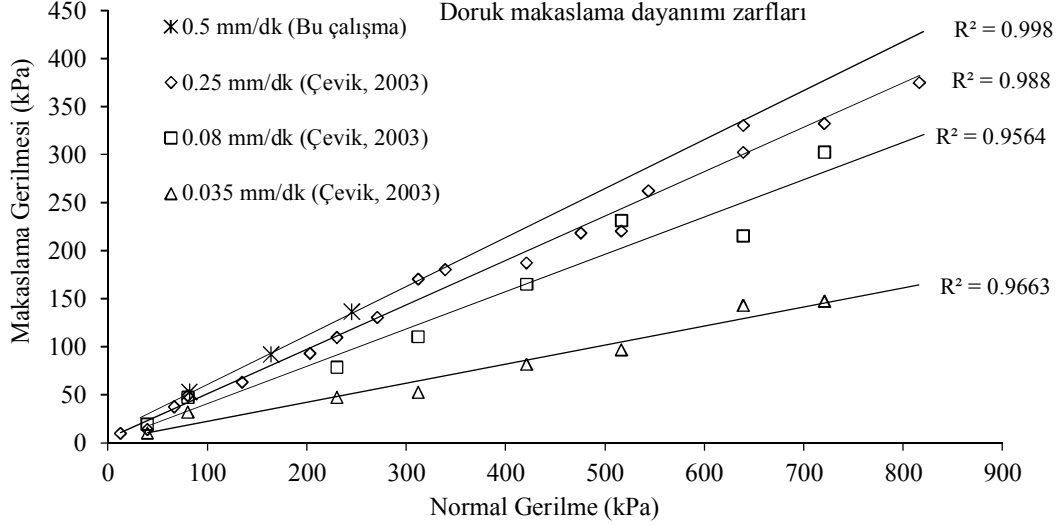


Şekil 6.5 : 0.5 mm/dk hızındaki deneyde elde edilen makaslama gerilmesi-yerdeğiştirme grafikleri.

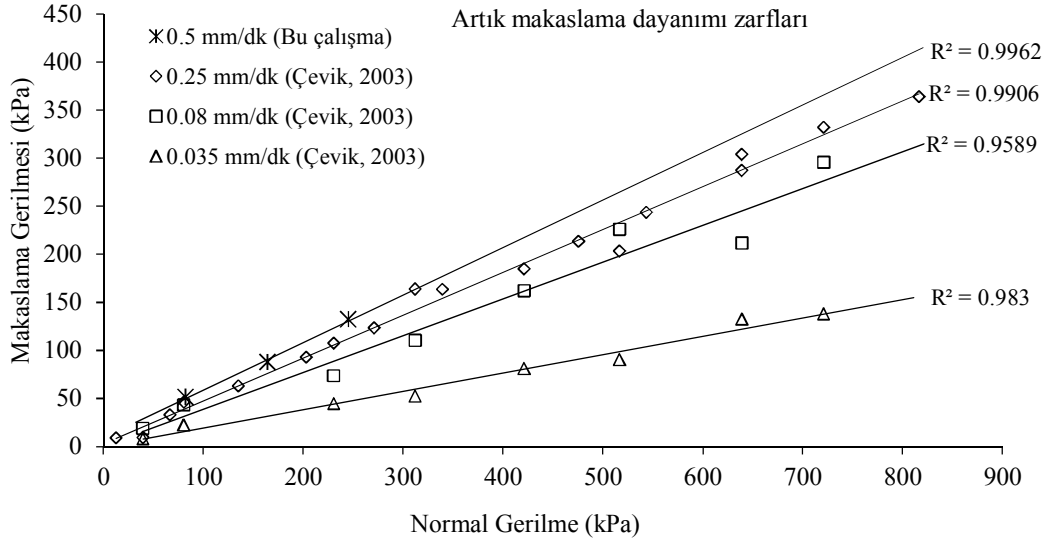
Tablo 6.1 : Belirlenen makaslama dayanımı parametreleri.

Makaslama hızı (mm/dk)	Normal gerilme, σ_n (kPa)	Makaslama gerilmesi doruk, τ_d (kPa)	Makaslama gerilmesi artık, τ_a (kPa)	Doruk Kohezyon, c_d (kPa)	Doruk içsel sürtünme açısı, ϕ_d (°)	Artık kohezyon, c_a (kPa)	Artık içsel sürtünme açısı, ϕ_a (°)
0.5	82	53.1	51.4	10.20	27.0	9.40	26.3
	164	91.7	87.7				
	245	136.2	132.1				

Bu çalışma kapsamında, 0.5 mm/dk hızında gerçekleştirilen makaslama deneylerinden elde edilen içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, Çevik (2003) tarafından belirlenen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çevik (2003) tarafından gerçekleştirilen deneyler ve bu tez çalışması kapsamında yapılan makaslama deneylerine ait farklı hızlardaki makaslama yenilmesi zarfları, doruk ve artık koşullar için sırasıyla Şekil 6.6 ve 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.6 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı makaslama hızlarındaki doruk makaslama yenilmesi zarfları.



Şekil 6.7 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı makaslama hızlarındaki artık makaslama yenilmesi zarfları.

Deneylelerden elde edilen ve yamaç duraylılığı analizlerinde kullanılacak makaslama dayanımı parametreleri önceki çalışmalarla birlikte topluca Tablo 6.2'de verilmiştir.

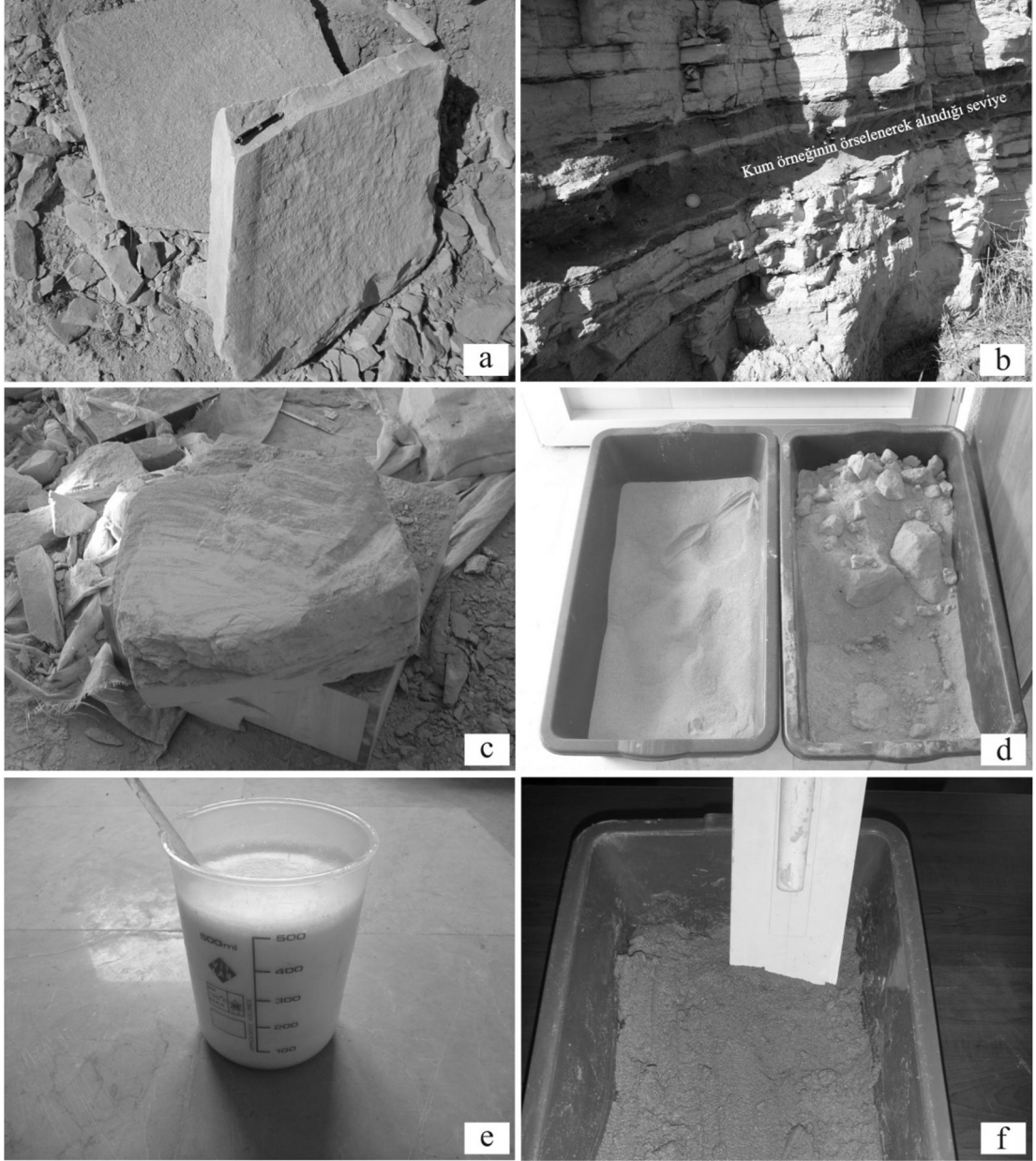
Tablo 6.2 : Kumtaşı ara seviyesi içeren marn örneklerinin farklı hızlardaki makaslama dayanımı parametreleri.

Makaslama hızı (mm/dk)	Doruk Kohezyon, c_d (kPa)	Doruk içsel sürtünme açısı, ϕ_d (°)	Artık kohezyon, c_a (kPa)	Artık içsel sürtünme açısı, ϕ_a (°)	Deneyle yapan
0.25 (Nemli)	6.8	24.2	3.54	23.8	Çevik, 2003
0.08 (Nemli)	2.6	21.2	1.01	20.9	Çevik, 2003
0.035 (Nemli)	2.9	11.2	0.59	10.8	Çevik, 2003
0.5 (Nemli)	10.2	27.0	9.40	26.3	Bu çalışma

Yamaç hareketinin devam ettiği göz önüne alınacak olursa duraylılık analizlerinde artık makaslama dayanımı parametrelerinin kullanılmasının daha gerçekçi olacağı düşünülmektedir. Ancak makaslama deneyleri topluca değerlendirildiğinde, artık ve doruk makaslama parametreleri arasında büyük farkın olmadığı görülmüştür.

6.2 Fiziksel Modelin Oluşturulması

Tezin amacı doğrultusunda dinamik deneylerin yapılabilmesi için fiziksel bir model oluşturulmuştur. Zayıf kumtaşının seviyelerinin oluşturduğu süreksizlik düzlemleri boyunca dinamik etki altında gelişebilecek kayma miktarlarının gözlenebilmesi amacıyla dinamik deneyler yapılmıştır. Model, doğal marn tabakaları ve araziden örselenerek alınan kum kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 6.8a, b). Marn örnekleri, Babadağ ilçe merkezi kuzeydoğusundaki Oğuzlar köyü girişindeki bir yamaçta bulunabilmiş ve laboratuvara taşınmıştır. Kolayca dağılabilen marn, hassas olarak el testereleri kullanılarak boyutlandırılmıştır (Şekil 6.8c). Kumtaşı seviyelerinin çok zayıf ve kolaylıkla dağılabilir özellikte olmasından dolayı araziden tabakalar halinde alınması mümkün olamamıştır. Bu malzeme, bunun yerine ilçe merkezinde bir yamaçtaki kumtaşı seviyelerinden örselenerek alınmıştır (Şekil 6.8b, d). Model oluşturulurken, örselenmiş kumun bir bağlayıcı ile karıştırılarak kumtaşı gibi kullanılmasının gerekliliği görülmüştür. Bu amaçla kullanılabilen malzeme araştırması yapılmıştır. İnşaat sektöründe özellikle dış cephe kaplamalarında yaygın olarak kullanılan bir kimyasal olan “stiren akriliğin” karışımında kullanılabileceği öngörülmüştür (Şekil 6.8e). Şekil 6.8f’de, hazırlanan su, stiren akrilik ve kum karışımı görülmektedir. Ön araştırma amacıyla ilk aşamada belirli oranlarda kum, stiren akrilik ve su içeren karışımlar hazırlanmış ve kurumaya bırakılmıştır. Ağırlıkça % 1, 4, 8 ve 12’lik stiren akrilik bağlayıcı ile oluşturulan karışımlar yaklaşık bir gün süreyle oda sıcaklığında kurutulduktan sonraki durumları incelenmiştir. Özellikle % 12’lik karışımın sonra son derece katı olduğu ve model oluşturulurken kullanımının uygun olmayacağı görülmüştür.



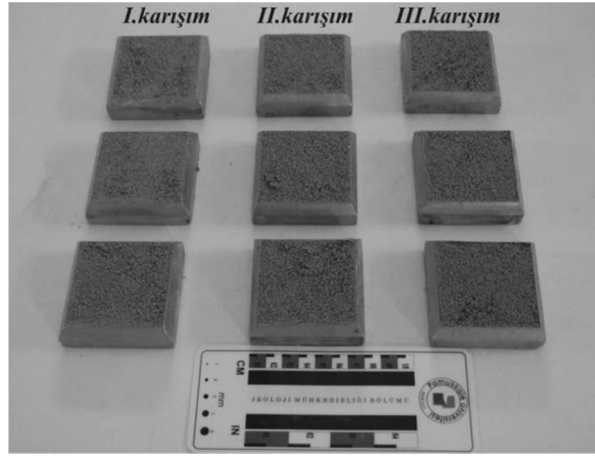
Şekil 6.8 : Fiziksel model hazırlanış aşamaları; a) araziden laboratuvara taşınan Ahıllı marnı tabaka örnekleri, b) kumun örselenerek alındığı seviye, c) marn tabakalarının kesilerek boyutlandırılması, d) yapay kumtaşı seviyelerinin oluşturulmasında kullanılan kum, e) kuma zayıf bağlayıcı özelliği kazandıracak su-stiren akrilik karışımı, f) hazırlanan kum karışımı.

En uygun karışım oranının belirlenebilmesi amacıyla tekrar belirli oranlarda karışımlar hazırlanıp, hazırlanan örnekler üzerinde makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Makaslama deney örnekleri % 1, 4 ve 8'lik karışımlar için hazırlanmış, % 12'lik karışımın çok sert ve yüksek dayanımlı olduğu görüldüğünden bu oran için makaslama örneği hazırlamaya gerek duyulmamıştır. Deneyler, ASTM (1999) standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan yapay kumtaşı

karışımlarının ağırlıkça bileşenleri Tablo 6.3’de, hazırlanan makaslama kutusu örnekleri ise Şekil 6.9’de verilmiştir.

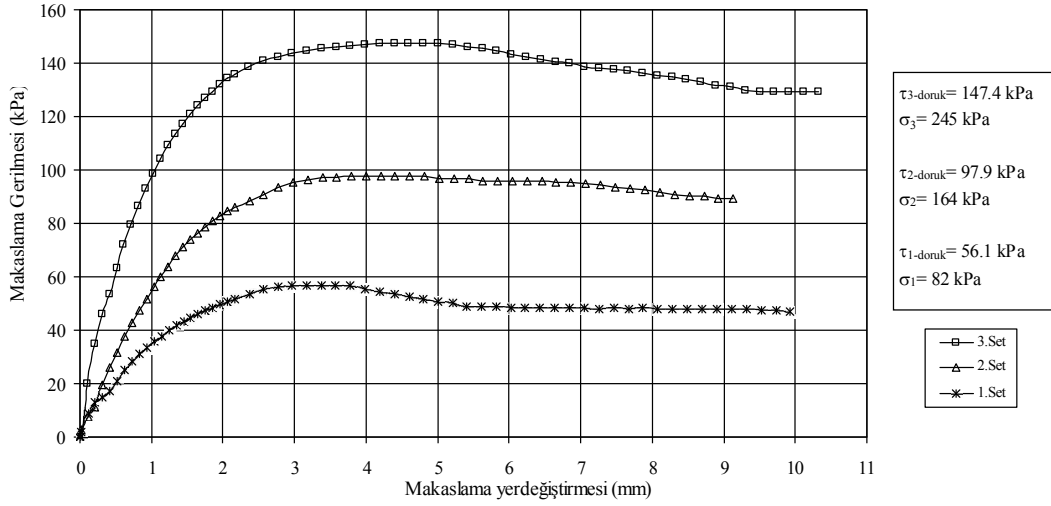
Tablo 6.3 : Yapay kumtaşı seviyesinin oluşturulabilmesi için hazırlanan karışımlar ve ağırlıkça bileşenleri.

Karışım no	Ağırlıkça bileşen (%)		
	Stiren akrilik	Kum	Su
I (% 1’lik karışım)	1	95	4
II (% 4’lük karışım)	4	90	6
III (% 8’lik karışım)	8	84	8

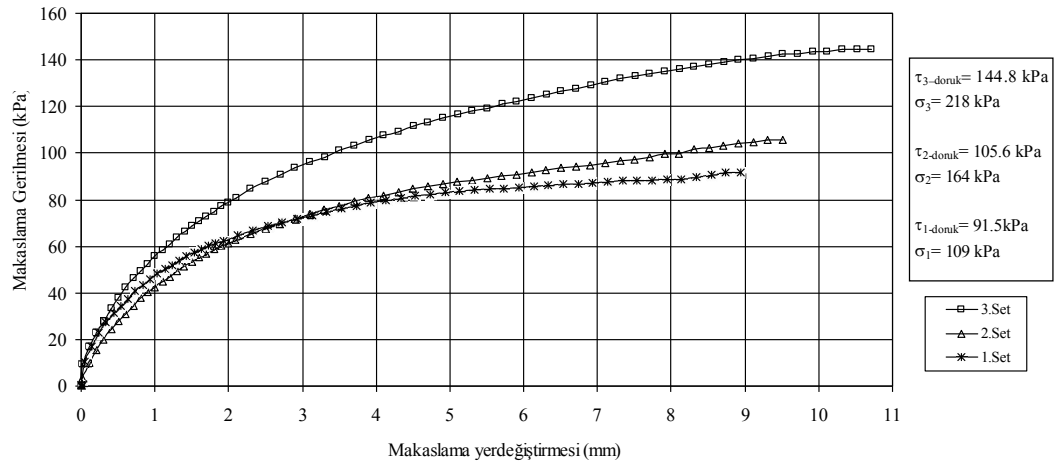


Şekil 6.9 : Makaslama deneyleri için hazırlanan I, II ve III no.lu karışım örnekleri.

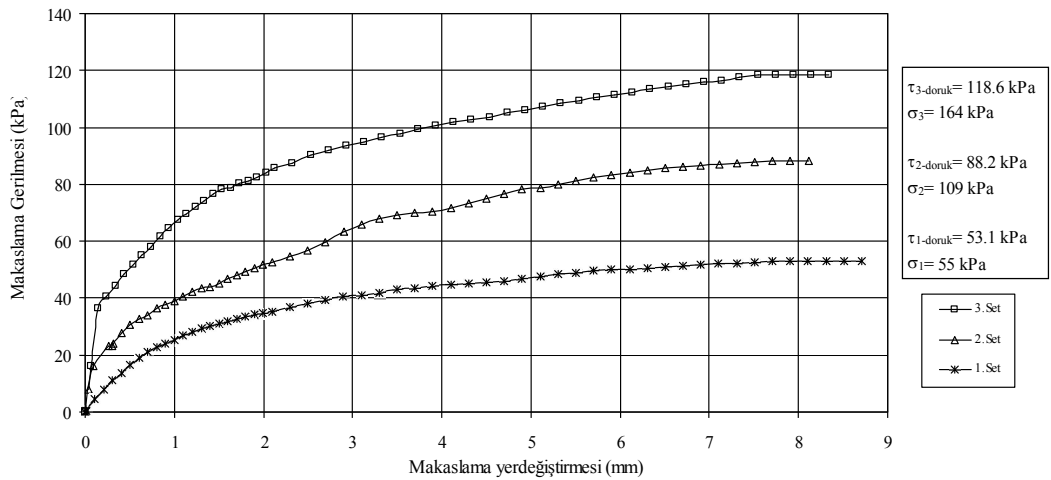
Örnekler, Tablo 6.3’de verilen yüzde ağırlıklara göre karıştırılmış ve her grup için yaklaşık 300 g kum örnek kullanılmıştır. Çok akıcı olmayan stiren akrilik belirtilen oranlardaki su ile seyreltilerek kum ile karıştırılmış ve mümkün olduğunca homojen karışımlar elde edilmeye çalışılmıştır. Hazırlanan karışımlar makaslama kutularına doldurularak, birbirine yakın derecede sıkıştırılmışlardır. Örneklerin alt ve üst yüzeyleri spatula ile düzeltilip bir gün oda sıcaklığında kurutulmuş ve daha sonra bu örnekler makaslama deneylerine tabi tutulmuştur. Makaslama dayanımı deneylerinde, % 4 ve 8’lik karışımlarla hazırlanan örnekler üzerinde artık dayanım parametreleri belirlenememiş, % 1’lik karışım deneylerinde ise doruk makaslama dayanımı değerlerine yakın parametreler elde edilmiştir. Deneylere ait makaslama gerilmesi-yerdeğiştirme grafikleri, % 1, 4 ve 8’lik karışımlar için sırası ile Şekil 6.10, 6.11 ve 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.10 : I no.lu (% 1) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri.

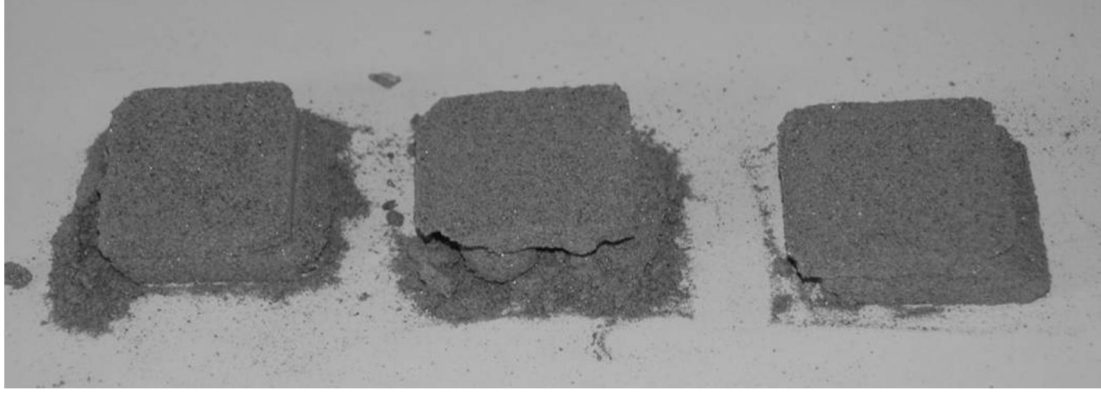


Şekil 6.11 : II no.lu (% 4) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri.

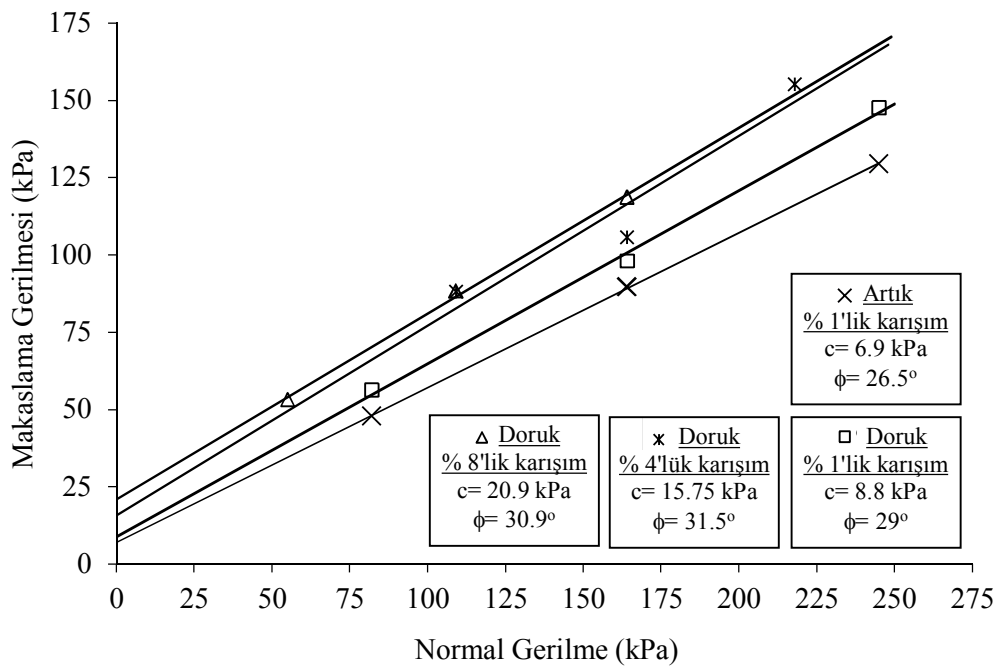


Şekil 6.12 : III no.lu (% 8) karışımın makaslama yerdeğiştirmesi-gerilmesi grafikleri.

I. Karışımın ait örneklerin deney sonu görünümleri ise Şekil 6.13’de verilmiştir. Makaslama yenilmesi zarfları ise toplu olarak Şekil 6.14’de verilmiştir.



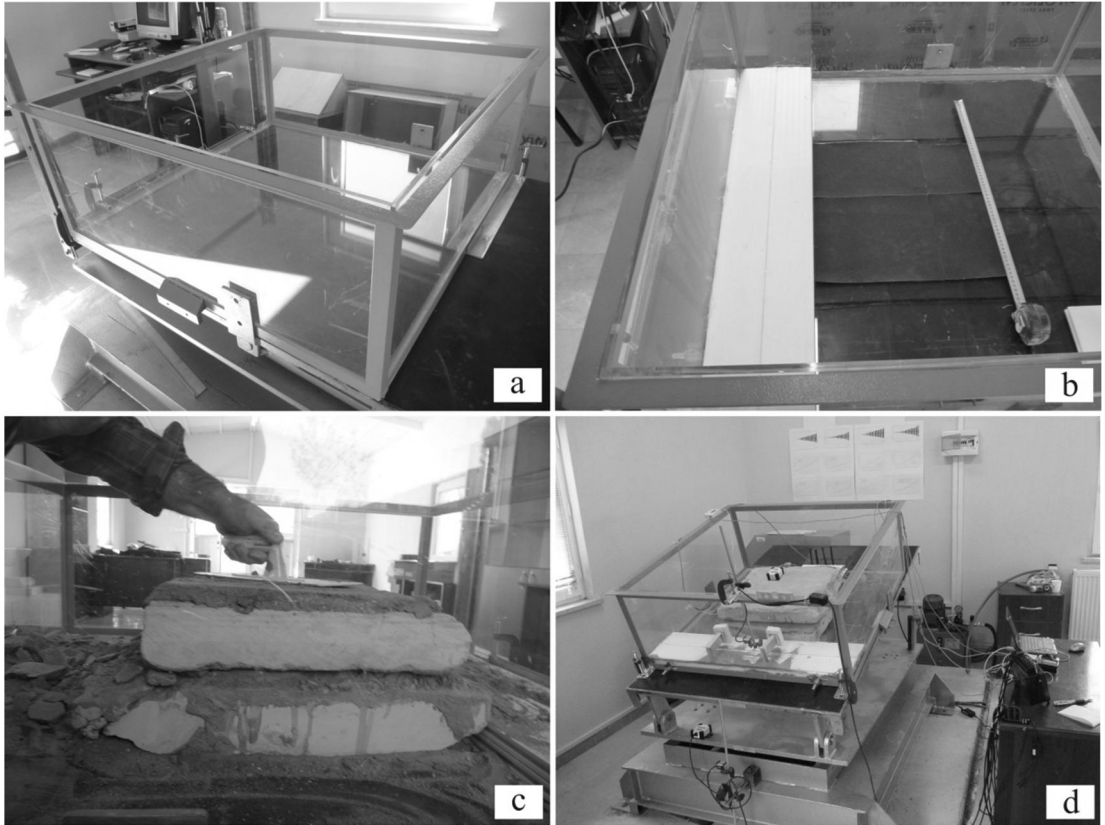
Şekil 6.13 : I nolu (% 1) karışım örneklerinin makaslama deneyi sonrası görünüşleri.



Şekil 6.14 : Hazırlanan kumtaşı örneklerinin farklı bağlayıcı oranlarındaki yenilme zarfları.

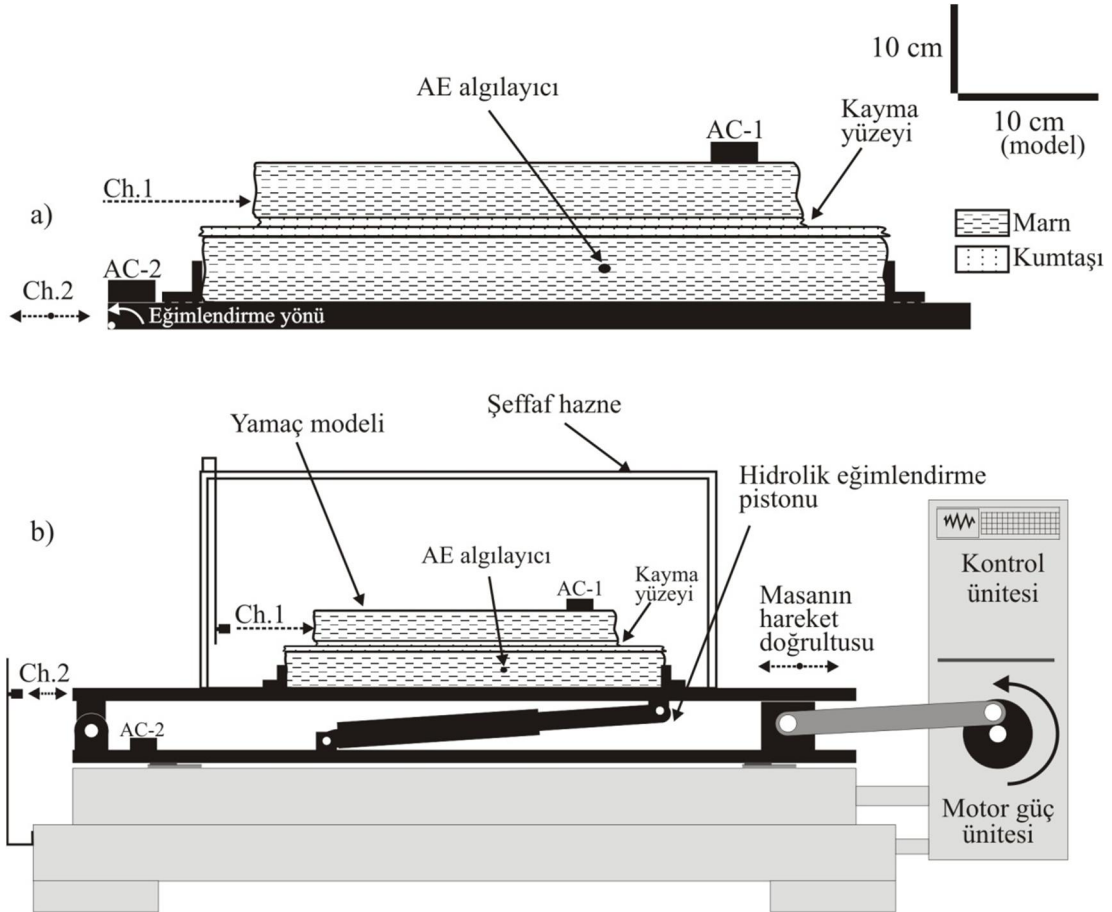
Araziden alınan doğal kumtaşı ara seviyeleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerde belirlenen makaslama parametreleri değerlerine en yakın değerler, %1 bağlayıcıyla hazırlanan yapay kumtaşı üzerinde yapılan deneylerde belirlenmiştir. Bu oranda hazırlanan karışım üzerinde yapılan makaslama deneylerinde, kohezyon 8.8 kPa ve içsel sürtünme açısı 29° olarak belirlenmiştir. Makaslama dayanımı deneyleri sonuçlarına göre fiziksel model için oluşturulacak kumtaşı seviyeleri için en uygun karışımın %1'lik bağlayıcılı karışımın olduğu görülmüş ve bu oran kullanılarak modelin kumtaşı ara seviyeleri oluşturulmuştur. Hazırlanan modelin sarsma masası üzerine sabitlenebilmesi ve deneye tabi tutulabilmesi için modelin içine konulacağı,

95x95x40 cm boyutlarında pleksi-glas bir hazne yaptırılmıştır (Şekil 6.15a). Hazne, sarsma masasına sabitlenerek yatay ve eğimli konumdaki duraylılığı sağlanmıştır. Daha sonra model hazne içine yerleştirilirken model tabanı ile hazne arasında sürtünme oluşturması amacıyla zımpara kağıdı yapıştırılmış ve üzerine model yerleştirilmiştir (Şekil 6.15b). Zımpara kağıdı üzerine yerleştirilen modelin alt bloğu, ön ve arkasından plastik tamponlarla hazne kenarlarına sabitlenmiş ve plastik tamponlar sıcak silikon ile yapıştırılarak sabitlenmiştir. Masanın ileri geri hareketi sırasında taban bloğunun duraylılığı sağlanmış, böylelikle masanın üreteceği ivmelerin doğrudan taban bloğuna iletilmesi sağlanmıştır. Modelin içine konulacağı hazne hazırlandıktan sonra kumtaşı arayüzeyi oluşturulması işlemine geçilmiştir. En alt bloğun üzerine hazırlanan kum karışımı kalınlığı yaklaşık 1 cm olacak şekilde serilmiştir. İşlem geniş yüzey alanlı bir mala kullanılarak yapılmış, serilen kum su terazisiyle tesviye edilerek (Şekil 6.15c) fiziksel model deneye hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.15d).



Şekil 6.15 : Fiziksel modelin deney düzeneğine aktarılması; a) sarsma masası üzerine monte edilmiş 95x95x40 cm boyutlarındaki pleksi-glas hazne, b) model tabanı ile hazne arasındaki zımpara kağıdı ve plastik tamponlar, c) marn tabakaları arasında hazırlanan kum karışımının serilmesi, d) modelin genel görünümü.

Hazırlanan modelin ve ilgili deney düzeneğinin ayrıntıları şematik olarak Şekil 6.16’da verilmiştir. Deney düzeneğinde iki adet lazer mesafe ölçer ve ivme ölçer kullanılmıştır. Bunun yanısıra kayma ile akustik yayılma aktivitesi arasındaki ilişkinin araştırılması amacıyla bir adet AE aktivite algılayıcısı da sisteme yerleştirilmiştir. Bir ivme ölçer sarsma masasının üzerine yatay olarak eğimlenmeyen yüzeye sabitlenmiştir. Bu ivme ölçerle deneyler sırasında sarsma masasıyla üretilen ivmeler kaydedilmiştir. İkinci ivme ölçer ise, kayan bloğun üzerine yerleştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla eğimlendirme deneylerinde masanın eğimlendirilme miktarları kaydedilmiştir. 1. kanal lazer mesafe ölçer bloğun kayma miktarının ölçülebilmesi için üst blokta belirlenen hedefi görecekte şekilde hazne kenarına sabitlenmiştir. 2. kanal ise, masa dışına yerleştirilerek zamana bağlı olarak masanın yerdeğişimi kaydedilmiştir.



Şekil 6.16 : Laboratuvar koşullarında hazırlanan fiziksel modelin ölçekli görünümü (a) ve deney düzeneği ayrıntıları (b), (Ch.1: blok yerdeğişimi ölçüm noktası, Ch.2: masa yerdeğişimi ölçüm noktası, AC-1: üst blok için ivmeölçer, AC-2: masa için ivmeölçer-yatay).

6.3 Model Deney Düzeneginin Özellikleri

Bu bölümde, Gündoğdu heyelanının mekanizmasının statik ve dinamik koşullardaki davranışına bir yaklaşımda bulunabilmek amacıyla, araziden alınan doğal malzemeler kullanılarak hazırlanmış, kumtaşı araseviyesi içeren fiziksel bir model statik ve dinamik koşullarda deneylere tabi tutulmuştur. Bu amaçla, PAÜ Jeoloji mühendisliği bölümü bünyesinde gerçekleştirilmiş bir kurumsal alt yapı projesi kapsamında tasarlanmış ve bir üretici firmaya yaptırılmış bir sarsma masası kullanılmıştır.

6.3.1 Sarsma Masasının Genel Özellikleri

Sarsma masaları, laboratuvar koşullarında farklı mühendislik amaçları doğrultusunda hazırlanmış modellerin, depremlerin oluşturduğu dinamik yüklere benzer yükler altındaki davranışlarının izlenmesi amacıyla dünya çapında yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerçek deprem kayıtlarının simüle edilebildiği ve büyük boyutlu, 3 yönde hareket edebilen sarsma masaları, çok yüksek güç kapasiteli ve hızlı hareket edebilen hidrolik sistemler ile çalıştırılabilmektedir. Çok karmaşık kontrol sistemleri ve veri alım ünitelerinin bulunduğu bu tip sistemlerin maliyetleri çok yüksek olup, dünyada sayılı araştırma merkezlerinde bulunmaktadır.

Sarsma masalarıyla ilgili literatür incelendiğinde, çalışmaların temel olarak iki gruba ayrıldığı görülmektedir. Birincisi; sarsma masalarının tasarımları, kapasiteleri, hassasiyetleri ve bunlarla ilgili değerlendirme ve önerilerin yapıldığı çalışmalar, ikinci grup çalışmalar ise sarsma masalarının çeşitli mühendislik yapılarının temsil edildiği modellerin deprem performanslarının incelendiği çalışmalardır. Bunun yanı sıra, sıvılaşma ve yamaç duraysızlıklarının dinamik koşullarda incelendiği çalışmalarda kısıtlı olmakla birlikte, rastlanılmaktadır.

Muhlenkamp (1997), ölçekli olarak hazırlanan modellerin dinamik etki altındaki davranışlarını belirlemek için sarsma masasını kullanmış, kullanılan hidrolik sistemin kapasitesini göz önünde bulundurarak masanın performans zarflarını geliştirmiştir. Meymand (1998), temel kazıkları ve temel zemini etkileşimini, dinamik koşullar altında sarsma masasında yaptığı model deneylerle ve sayısal çözümlerle incelemiştir. Burke (2004), zemin ile betonarme istinat duvarı arasındaki etkileşimi sarsma masası deneyleri ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiş, sonuçta 0.4 g üzerinde zemin büyütmesinin meydana geldiğini ve 0.8 g değerine ulaşıldığında ise

zemin büyütmesinin 1.35'e kadar yükseldiğini belirtmiştir. Pinzon (2005), Sarsma masalarının tasarımı ile ilgili çalışmasında, modelleri analitik olarak incelemiş ve bunları sarsma masasında deneye tabi tutmuştur. Araştırmacı, yerdeğiştirme kontrollü, servo-hidrolik sistemle çalışan bir sarsma masası tasarlamış ve sistemin performansını analitik yöntemlerle test etmiştir. Pinzon (2005)'in tasarladığı sarsma masası, 60 x 120 cm boyutlu ve 7.5 cm çaplı bir pistonla hareket etmektedir. Bu çalışma, daha çok sarsma masasının tasarımına ve duyarlılığının belirlenmesine yönelik bir çalışmadır. Lin ve Wang (2006), deprem etkisi altında yamaçların davranışlarını incelemişlerdir. Büyük ölçekli bir sarsma masasının kullanıldığı bu deneysel çalışmada, sarsma masası üstünde 0.5x1.3 m (GxY) boyutlu ve 30° yamaç eğimine sahip bir model yamaç oluşturulmuştur. Model yamaç oluşturulurken iyi boylanmış kum kullanılmış ve % 8 su içeriğinde, 16 kN/m³ birim hacim ağırlıkta sıkıştırılmıştır. Yapılan deneylerde modelin, 8.9 Hz frekansda, 0.4 g'lik ivme değerlerine kadar doğrusal davranış gösterdiği, 0.5 g'den büyük ivmelerde doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, doğrusal olmayan davranışın model zemini içinde dinamik etkiyi büyütücü yönde bir olumsuzluğa neden olduğunu da belirtmişlerdir. Modelin test edilmesiyle oluşan yenilme yüzeyinin oldukça sığ ve hemen hemen dairesel olduğu, ayrıca yamaç aynasında gözlemlendiği, bu durumuyla 1999 yılında meydana gelen 7.6 büyüklüğündeki Chi-chi depremi (Taiwan) etkisiyle meydana gelmiş yamaç duraysızlıklarıyla benzerlik gösterdiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan sarsma masası; üst tablası 1.5x1.0 m boyutlu, 400-500 kg'a kadar örneklerin deneye tabi tutulabileceği tek yönde hareket edebilen, hareketini bir elektrik motorundan alan ayrıca üst tablası hidrolik bir piston aracılığıyla 45°'ye kadar eğimlendirilebilir özelliklerde tasarlanmıştır. Sarsma masası, tek katlı laboratuvar yapısı içine yapı temelinden bağımsız olarak dökülen beton bir bloğa çelik bulonlarla sabitlenmiştir. Masaya hareket veren elektrik motorunun sürücü sistemi, 5 ayrı adım için motor devri ve süre seçenekleri girilerek programlanabilmektedir. Motoru 0-200 dv/dk arasında çalışabilen masa ile tek yönde, sabit, azalan ve artan şekilli, ayrıca sinüs hareketine benzer şekilli ivmeler üretilebilmektedir. Elektrik motorunun miline bağlı olarak dönen bir diskin merkez ekseninden dışa doğru değişik uzaklıklarda sabitlenebilen hareket kolu masaya hareket vermektedir. Kolun diskin üzerinde merkezden değişik uzaklıklarda açılmış

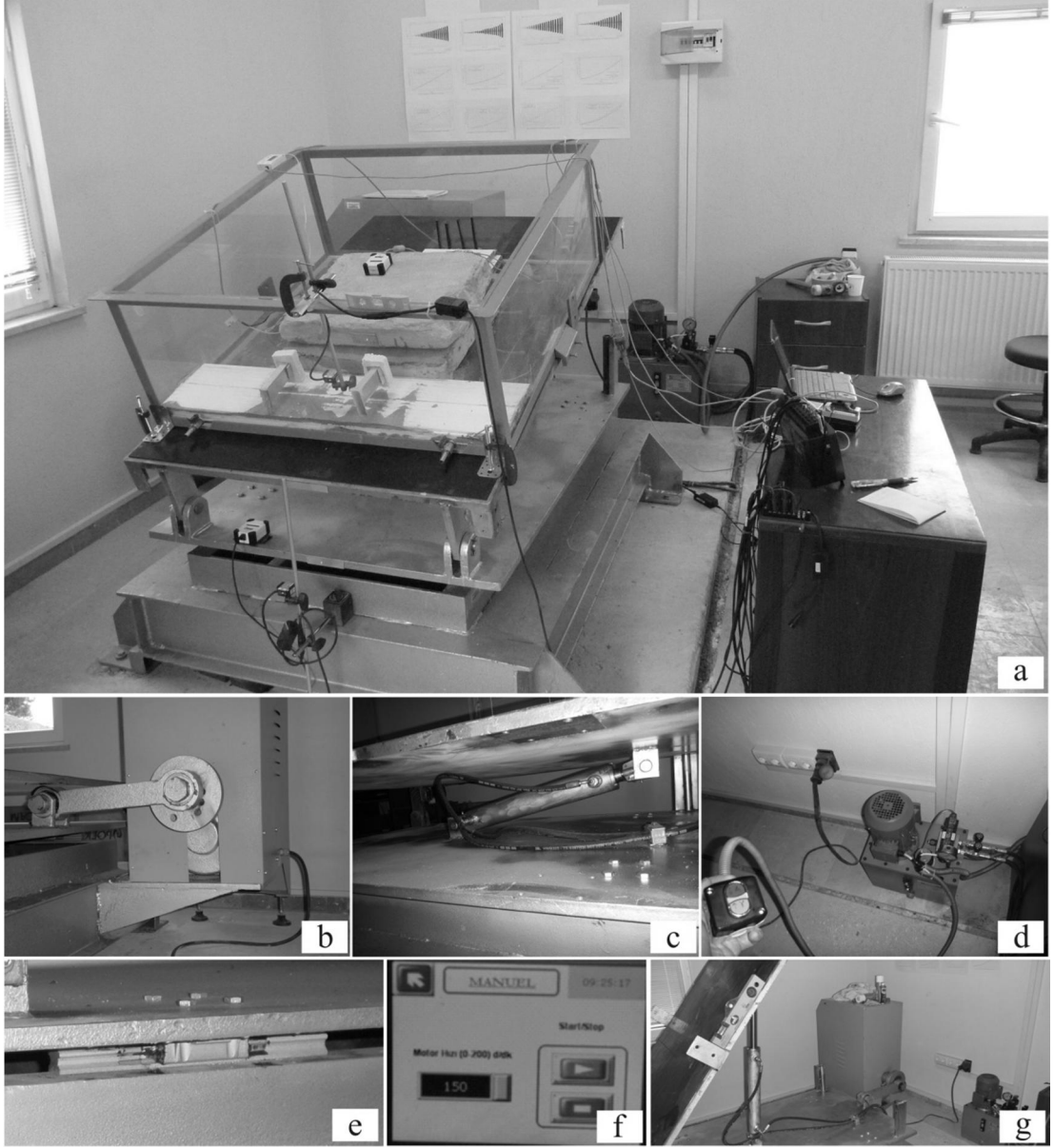
deliklere vidalandığı yerin değiştirilmesiyle masanın hareket mesafesi de değiştirilebilmektedir. Ancak bu değişimin deney sırasında yapılması olanaklı değildir. Farklı hareket mesafeleri için sarsma masası çalıştırılmış ve 20 ve 30 mm hareket miktarları için üretilen hız ve ivme değerlerinin deneysel çalışmalar için uygun olacağı görülmüştür. Hareket miktarının sabit olmasından dolayı artan ve azalan ivme değerleri motor devrinin artırılması ve azaltılmasıyla sağlanabilmektedir. Sarsma masası ve ayrıntıları Şekil 6.17’de görülmektedir.

6.3.1.1 Sarsma masası ile üretilebilen ivmeler ve ölçümleri

Sarsma masasının yatay hareket mesafesi 20 ve 30 mm olarak seçilmiş ve zamana bağlı olarak mesafe ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha uzun yatay mesafe değişimlerinde masa hareketinin çok hızlı olmasından dolayı motorun ve sistemin aşırı zorlandığı görülmüştür. 10 dv/dk’lık artışlarla 190 dv/dk’ya kadar masa hareketi 20 ms zaman aralığında (50 veri/s) kaydedilmiş, bu veriler daha sonra hız, ivme, frekans ve periyot hesaplamalarında kullanılmıştır. Dakikadaki devir sayısı ile hız, ivme, frekans ve periyot ilişkileri incelenmiş ve dağılımları temsil eden en uygun ilişkiler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, deneyin amacına uygun ivme ve hareket karakteristiklerini verecek devir sayılarının seçiminde bu ilişkilerin kullanımı son derece pratiklik sağlamıştır. Sarsma masasında üretilen ivme, lazer algılayıcılarla ölçülen yerdeğiştirmenin zamana göre iki kez türevi alınarak hesaplanmıştır. Yerdeğiştirmenin zamana göre birinci türevi hızı, ikinci türevi ise ivmeyi vermektedir. Bir eğrinin herhangi bir noktadaki türevi o noktadaki teğetin eğimini ifade ettiği bilgisinden hareket edilerek, yerdeğiştirme verisiyle oluşturulan eğrinin her bir zaman aralığını temsil eden doğru parçalarının eğimleri hesaplanarak hız, aynı şekilde hız verilerinin temsil ettiği eğrinin her bir zaman aralığındaki doğru parçalarının eğimleri belirlenerek de ivme değerleri hesaplanmıştır. Hesaplama aşamalarının ayrıntıları Şekil 6.18’de verilmiştir. Masanın yatay hareket mesafesi 30 mm seçilerek, 30 dv/dk’lık motor dönüş hızında lazer mesafe ölçer ile alınan yerdeğiştirme verisi ve bu veriden hesaplanan hız ve ivme değerleri örnek olarak Şekil 6.19’da verilmiştir.

Daha önceki ilgili bölümlerde belirtildiği gibi, modelle ilgili deneysel çalışmalara başlanılmadan önce deney düzeneğinin hazırlanma aşamasında, farklı yatay mesafe

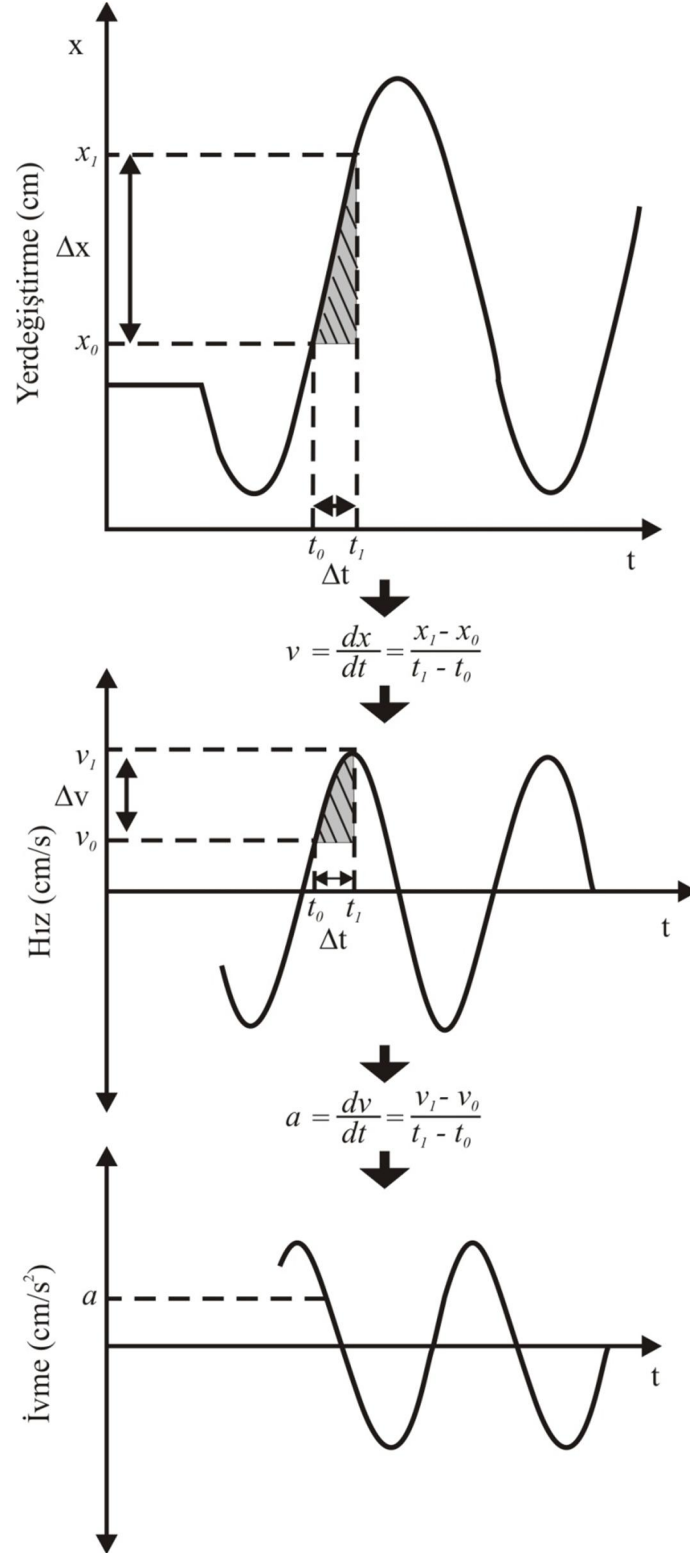
değişimi değerlerinde ve 0-190 dv/dk motor dönüş hızlarında çeşitli gözlemler yapılmıştır.



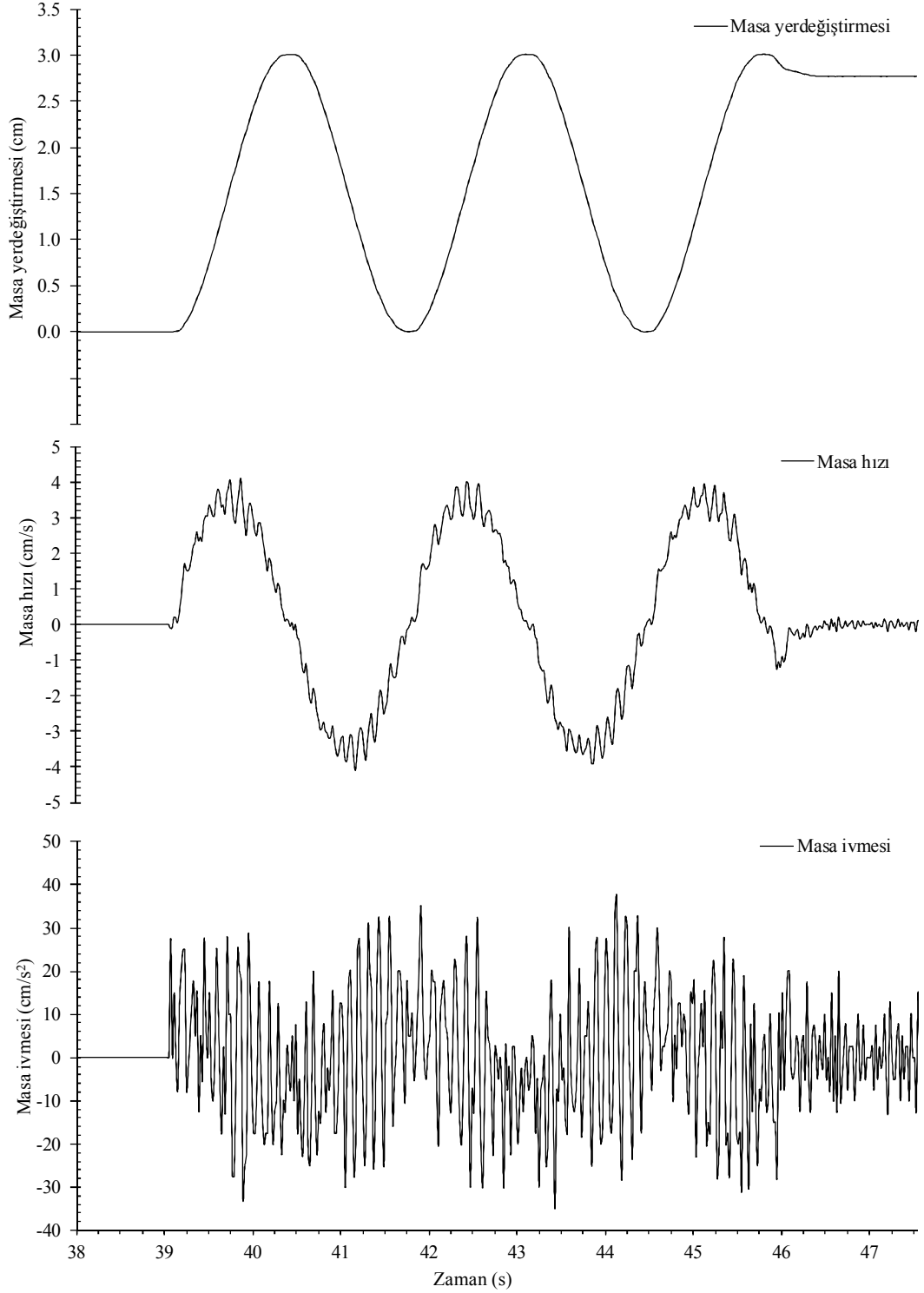
Şekil 6.17 : a) Tez çalışmasında kullanılan sarsma masası ve deney düzeneğinin detaylı görünümü, b) elektrik motoruna bağlı masaya hareketini veren kol, c-d) 45°'ye kadar eğilendirmede kullanılan hidrolik piston ve kontrol ünitesi, e) masa hareketinin düzgün ve hassas gerçekleşmesini sağlayan 4 özel ray sisteminden biri, f) motor sürücü sisteminin dokunmatik ekran üzerinden programlandığı arayüz, g) 45° eğilendirilmiş durumdaki sarsma masasının görünümü.

Sarsma masasının yapımı aşamasında lazer mesafe ölçerler kullanılarak üretilen masadan kaynaklanan ivmelerin, yerdeğişiminden hesaplanması öngörülmüş ve ivme değerleri bu şekilde hesaplanmıştır. Ancak sonradan portatif bir ivme ölçer temin edilebildiği için, deneysel çalışmalar sırasında ivme değerleri doğrudan ivme ölçer

kullanılarak kaydedilmiştir. Bu alt bölümde verilen ilişkiler kullanılarak, bir sonraki aşamadaki çalışmalarda ivme ölçer kullanılmadan da dinamik deneylerin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur.



Şekil 6.18 : Yerdeğiştirme verisinden hız ve ivmenin hesaplanması aşamaları.

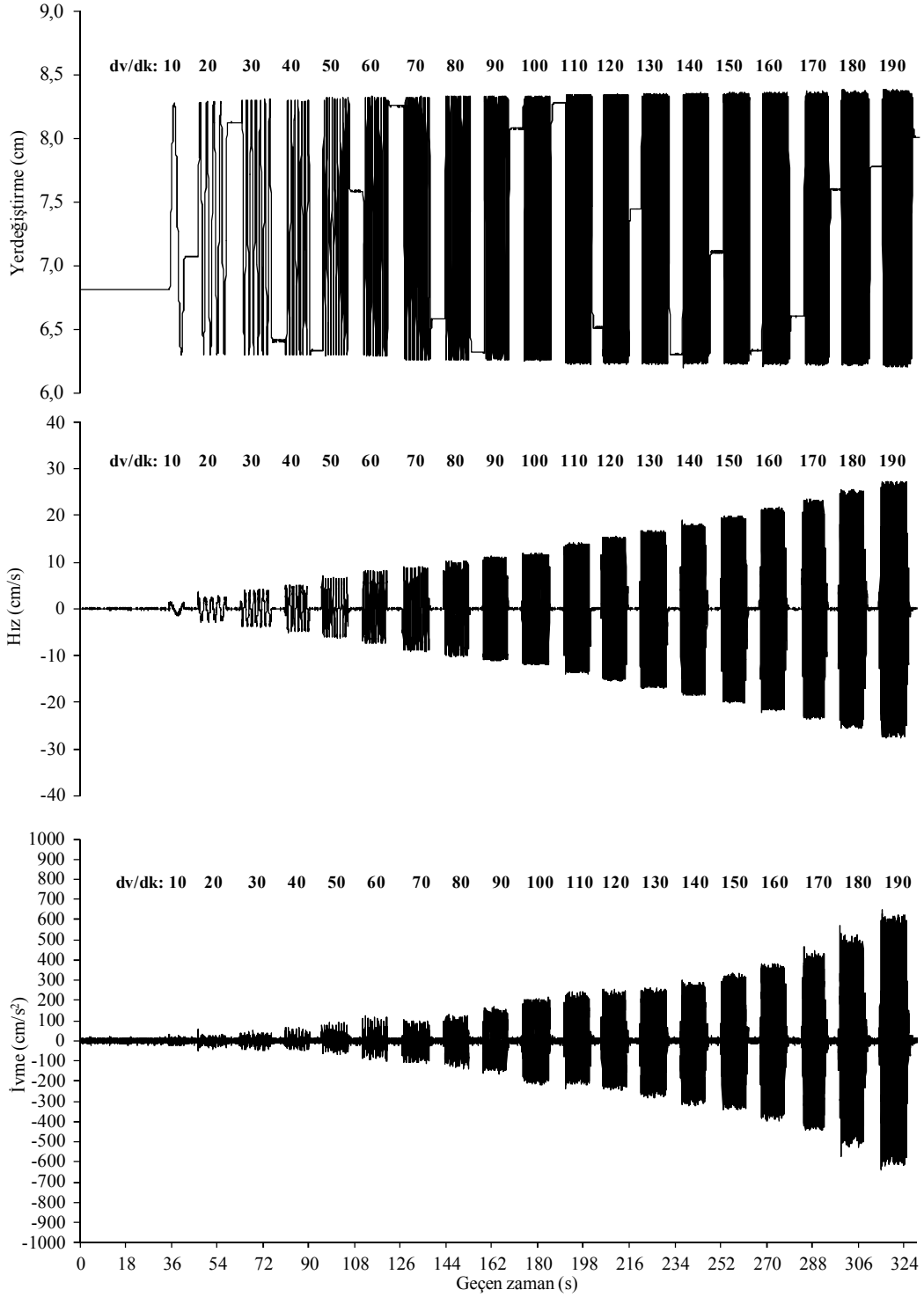


Şekil 6.19 : 30 dv/dk motor hızında alınan yerdeğiştirme ve hesaplanan hız ve ivme değerleri.

6.3.1.2 Yatay mesafe değişimi 20 mm seçilerek üretilen ivmeler

Yukarıda da bahsedildiği gibi sarsma masası 0-190 dv/dk arasında 10'ar devirlik artışlarla yaklaşık 10 s çalıştırılmış ve 5 s durdurulmuştur. Bu şekilde seçilen her devirdeki mesafe değişimi net olarak ölçülmüştür. Yatay mesafe değişimi 20 mm

seçilerek kaydedilen yerdeğiştirme verisi Şekil 6.20’de grafik olarak verilmiştir. Yerdeğiştirme verisinden sırayla hız ve ivme değerlerini hesaplayan bir çalışma sayfası programı hazırlanmıştır. Veriler incelenerek frekans ve periyot değerleri de ayrıca hesaplanmıştır. Hesaplanan “hız-zaman” ve “ivme-zaman” grafikleri Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20 : Masanın 20 mm yatay hareketi için 10-190 dv/dk arası hesaplanan yerdeğiştirme, hız ve ivme grafikleri.

Deneysel çalışmalarda masanın hangi devirde ne kadar büyüklükte hız, ivme, frekans ve periyot değerleri ürettiğinin önceden kestirilebilmesi için ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır. Bu ilişkiler Tablo 6.4'deki ölçülen ve hesaplanan parametreler kullanılarak belirlenmiştir. Verilerin dağılımı incelendiğinde, devir sayısı ile ivme ve hız değerlerinin en doğru biçimde parabolik eğrilerle temsil edilebileceği, frekansın devir sayısı ile doğrusal olarak arttığı, periyotun ise devir sayısı ile üstel bir fonksiyona bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir.

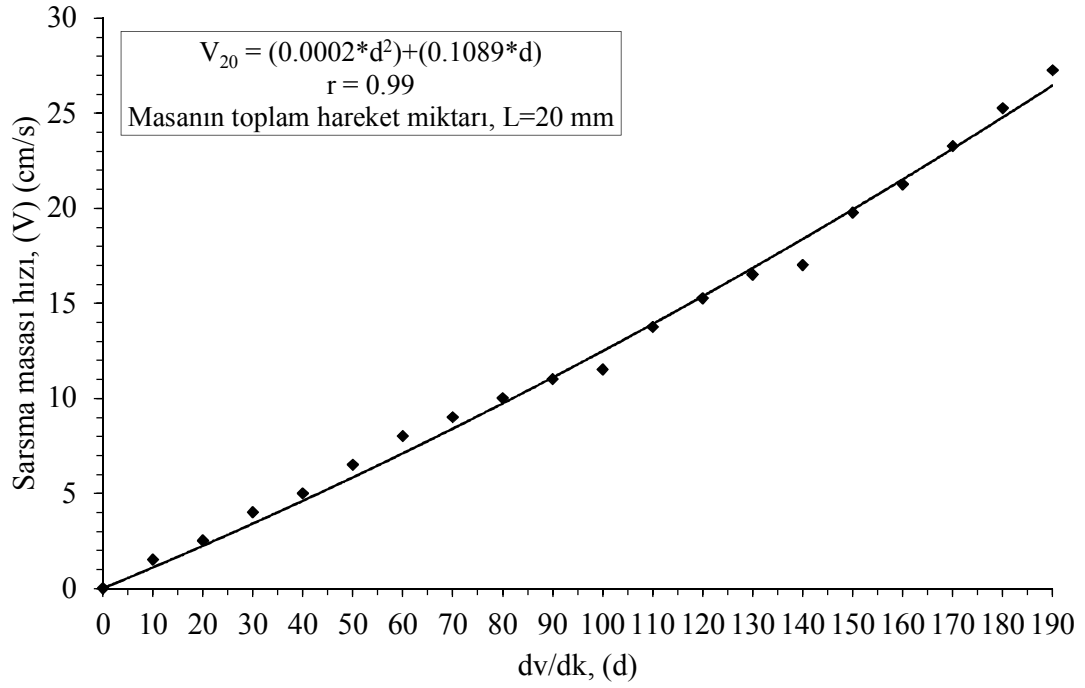
Tablo 6.4 : 20 mm yatay hareket için sarsma masasının hareket karakteristikleri.

Dakikadaki devir sayısı (dv/dk)	İvme, a_{20} (cm/s ²)	Hız, V_{20} (cm/s)	Frekans, F_{20} (Hz, s ⁻¹)	Periyot, T_{20} (s)
10	10	1.50	0.142	7.042
20	20	2.50	0.370	2.703
30	30	4.00	0.575	1.739
40	60	5.00	0.746	1.340
50	75	6.50	0.943	1.060
60	100	8.00	1.111	0.900
70	110	9.00	1.316	0.760
80	120	10.00	1.470	0.680
90	150	11.00	1.666	0.600
100	200	11.50	1.852	0.540
110	225	13.75	2.000	0.500
120	240	15.25	2.273	0.440
130	260	16.50	2.500	0.400
140	275	17.00	2.631	0.380
150	320	19.75	2.777	0.360
160	370	21.25	2.941	0.340
170	430	23.25	3.125	0.320
180	500	25.25	3.333	0.300
190	600	27.25	3.571	0.280

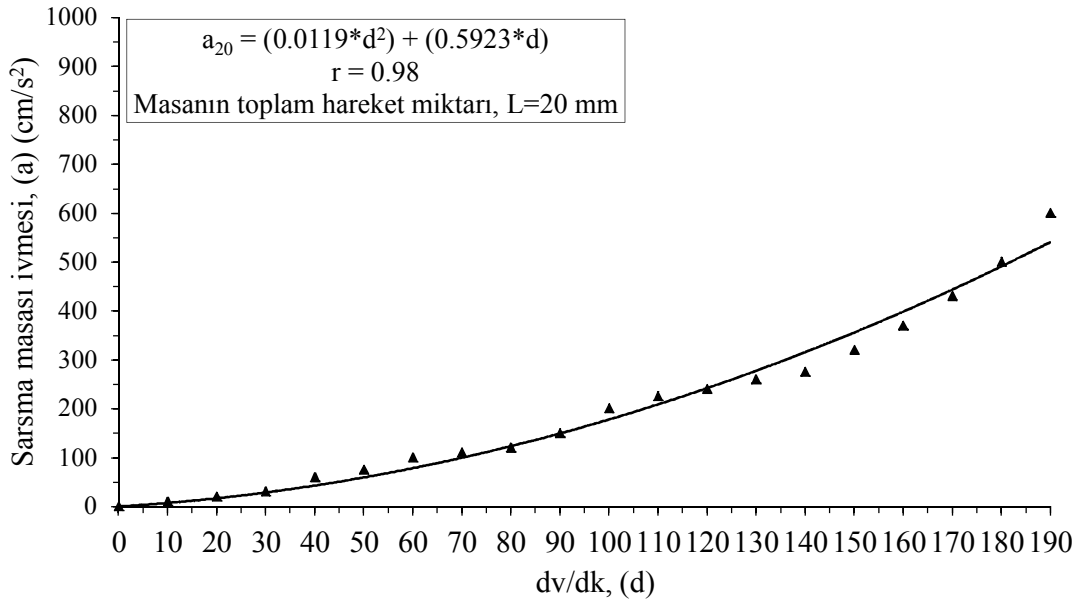
Dakikadaki devir sayısı ile hız, ivme, frekans ve periyot değerlerinin değişimleri sırasıyla Şekil 6.21, 6.22 ve 6.23'de, belirlenen eşitlikler ise ilgili korelasyon katsayıları ile birlikte Tablo 6.5'de verilmiştir. Korelasyon katsayıları tüm eşitlikler için oldukça yüksektir.

Tablo 6.5 : 20 mm yatay hareket için belirlenen eşitlikler.

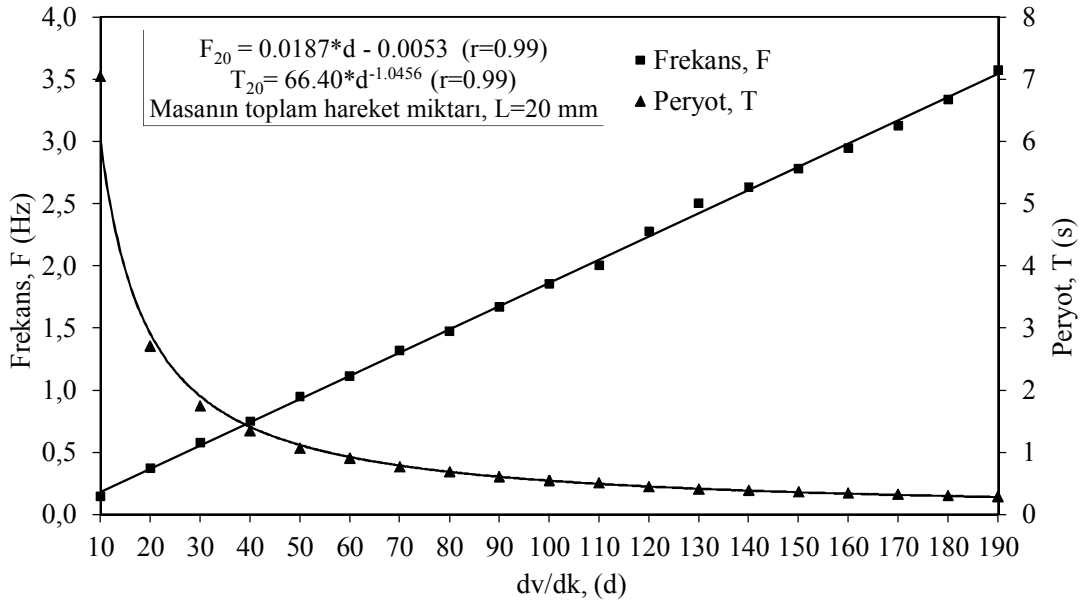
	Eşitlik	Korelasyon katsayısı, (r)
İvme	$a_{20} = (0.0119*d^2) + (0.5923*d)$	0.98
Hız	$V_{20} = (0.0002*d^2) + (0.1089*d)$	0.99
Frekans	$F_{20} = 0.0187*d - 0.0053$	0.99
Periyot	$T_{20} = 66.40*d^{-1.0456}$	0.99
d: dakikadaki devir sayısı (dv/dk)		



Şekil 6.21 : 20 mm yatay harekette hız ile dakikadaki devir sayısının ilişkisi.



Şekil 6.22 : 20 mm yatay harekette ivme ile dakikadaki devir sayısının ilişkisi.



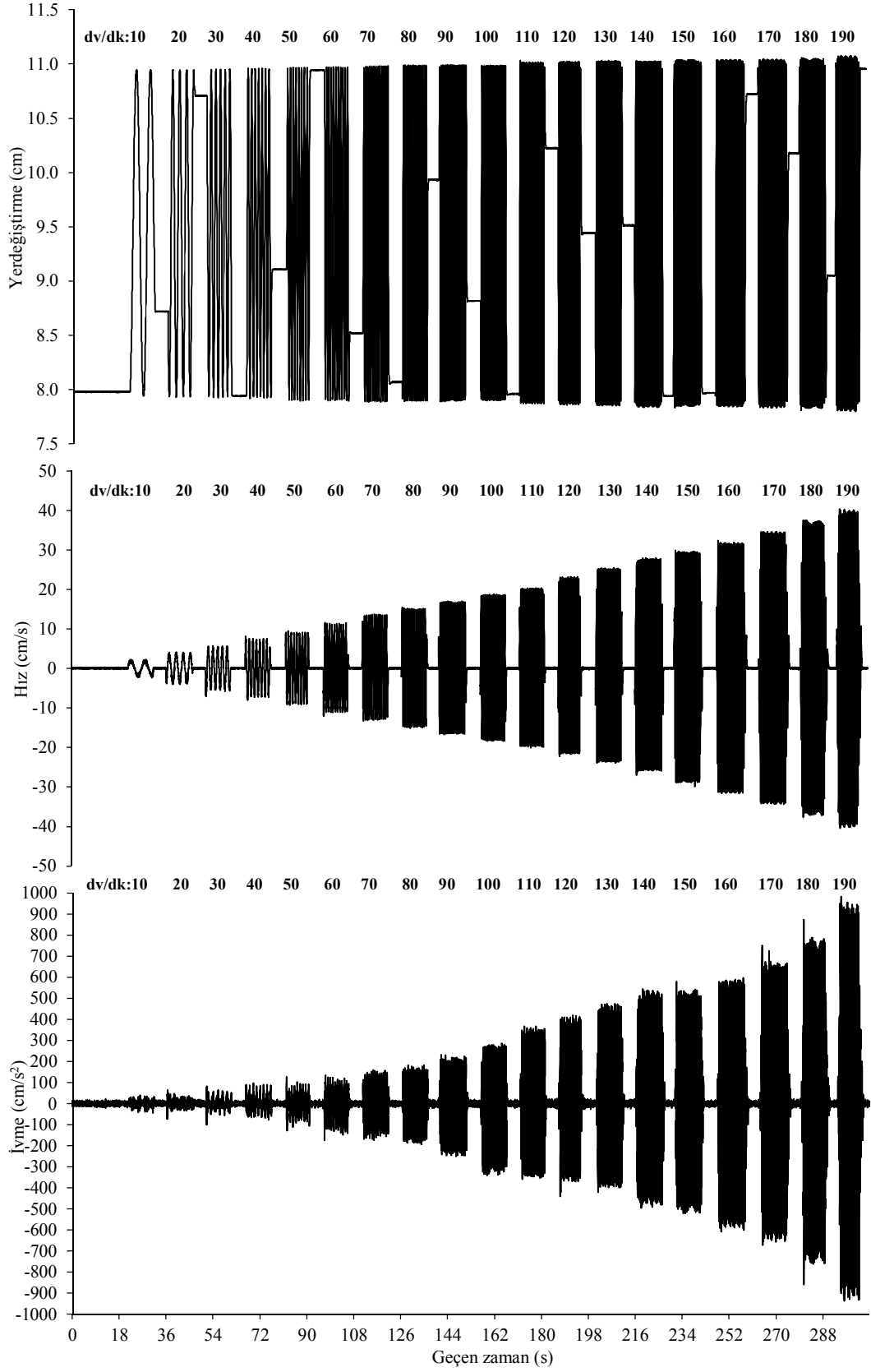
Şekil 6.23 : 20 mm yatay harekette frekans ve periyotun dakikadaki devir sayısı ile ilişkisi.

6.3.1.3 Yatay mesafe değişimi 30 mm seçilerek üretilen ivmeler

Yukarıda değinilen çalışmaların tamamı, yatay hareket miktarı 3 cm olacak şekilde ayarlanarak tekrarlanmıştır. Bu mesafe için de benzer ölçümler alınmış ve ilgili ilişkiler ortaya konulmuştur. Dakikadaki devir sayılarına bağlı olarak yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri grafik olarak Şekil 6.24’de verilmiştir. 30 mm hareket mesafesi için ilişkilerin geliştirilmesinde kullanılan, ölçülen ve hesaplanan değerler Tablo 6.6’da verilmiştir.

30 mm’lik yatay yerdeğiştirme için devir sayıları ile elde edilen hız ve ivme değerleri arasındaki dağılımlar incelenmiş, gerek hız gerekse ivme değerlerinin devir sayısı ile dağılımlarının 20 mm’lik mesafe değişimi için belirlenen ilişkilere benzer olarak, en uygun parabolik eğrilerle ifade edilebildiği belirlenmiştir (Şekil 6.25 ve 6.26). Frekansın devir sayısı ile doğrusal olarak arttığı, aksine periyotun doğal olarak devir sayısı ile üstel olarak azaldığı belirlenmiştir (Şekil 6.27).

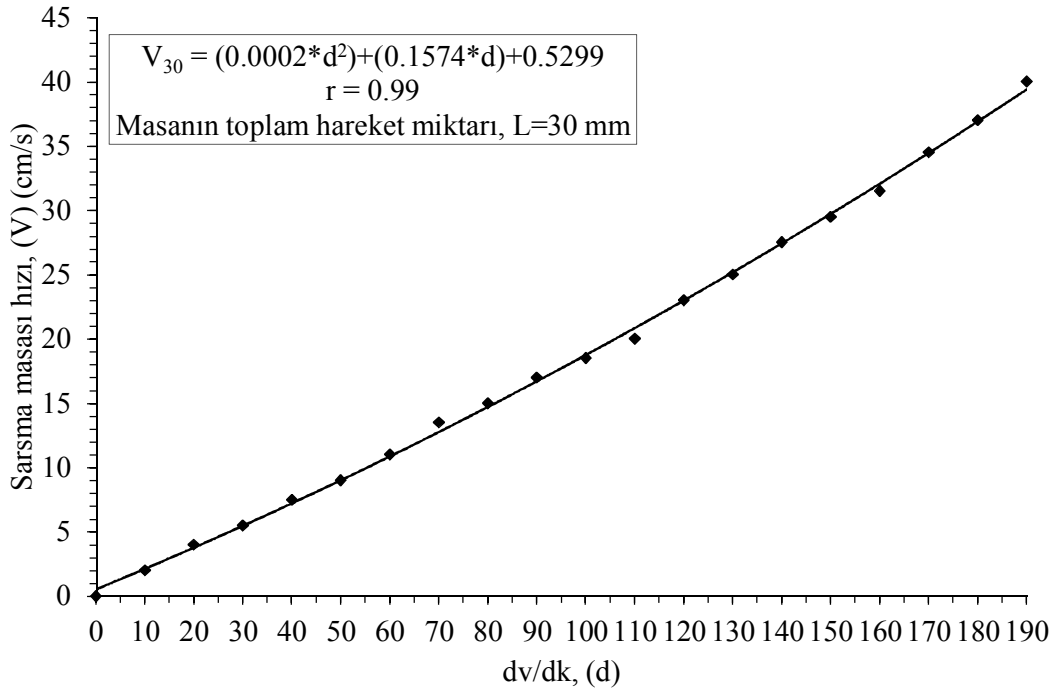
Elde edilen eşitlikler, Tablo 6.7’de ilgili korelasyon katsayıları ile birlikte verilmiştir. 20 mm için yapılan çalışmaya benzer olarak 30 mm için de korelasyon katsayılarının son derece yüksek olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar sonucunda, 20 ve 30 mm’lik yatay yerdeğiştirmeler için sarsma masası kalibre edilmiştir.



Şekil 6.24 : Masanın 30 mm yatay hareketi için 10-190 dv/dk arası hesaplanan yerdeğiştirme, hız ve ivme grafikleri.

Tablo 6.6 : 30 mm yatay hareket için sarsma masasının hareket karakteristikleri.

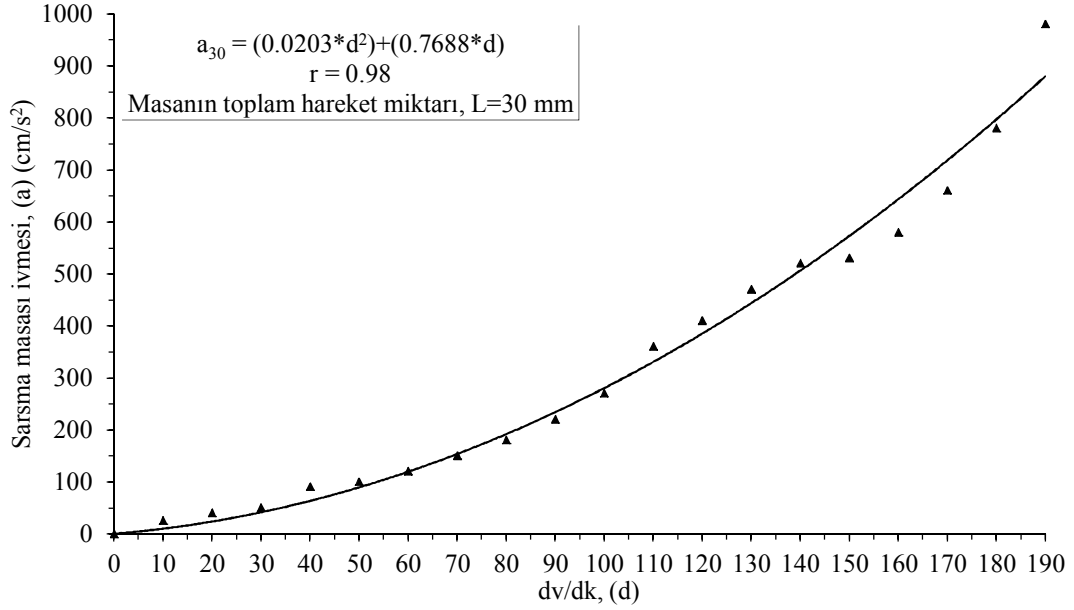
Dakikadaki devir sayısı (dv/dk)	İvme, A_{30} (cm/s ²)	Hız, V_{30} (cm/s)	Frekans, F_{30} (Hz, s ⁻¹)	Periyot, T_{30} (s)
10	25	2.0	0.184	5.435
20	40	4.0	0.359	2.786
30	50	5.5	0.588	1.701
40	90	7.5	0.750	1.333
50	100	9.0	0.943	1.060
60	120	11.0	1.163	0.860
70	150	13.5	1.310	0.763
80	180	15.0	1.515	0.660
90	220	17.0	1.666	0.600
100	270	18.5	1.852	0.540
110	360	20.0	2.000	0.500
120	410	23.0	2.272	0.440
130	470	25.0	2.381	0.420
140	520	27.5	2.631	0.380
150	530	29.5	2.777	0.360
160	580	31.5	2.941	0.340
170	660	34.5	3.125	0.320
180	780	37.0	3.333	0.300
190	980	40.0	3.571	0.280



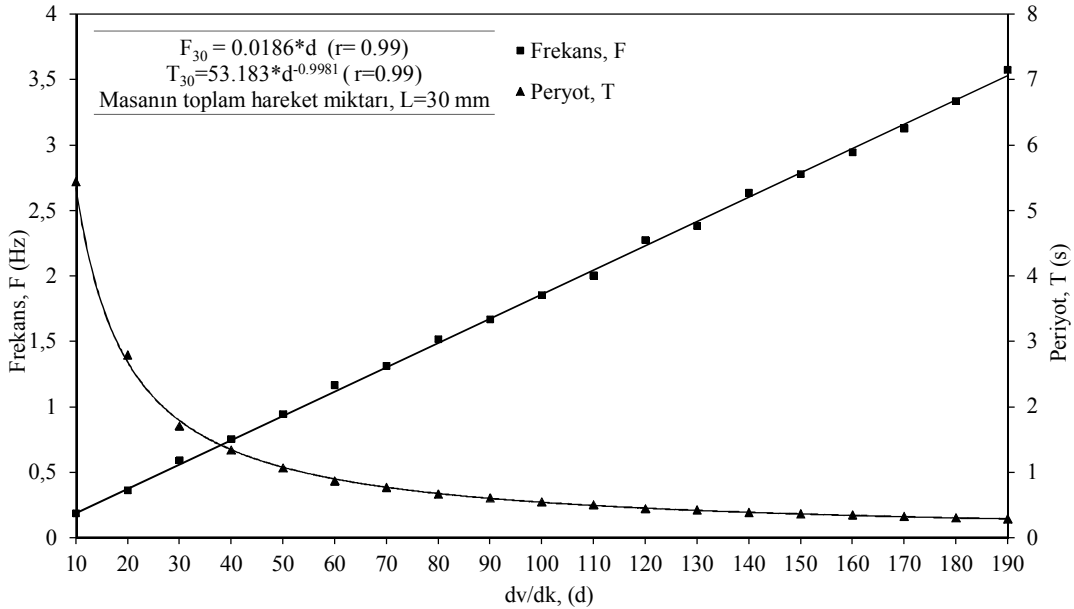
Şekil 6.25 : 30 mm masa hareketi için dakikadaki devir sayısı ile hesaplanan hız ilişkisi.

Daha yüksek yatay masa hareketleri için bazı gözlemler yapılmış ve 30 mm'den daha fazla mesafelerde masanın hareketi sırasında gözle görülür derecede titreştiği saptanmıştır. Bu durumun deneysel çalışmalarda istenmeyen ve denetlenemeyen

sonuçlara yol açabileceği düşüncesiyle, sarsma masasının 20 ve 30 mm'lik yatay harekette kullanılmasının sağlıklı olacağı düşünülmüştür. 30 mm hareket için doğal olarak birim zamanda alınan yolun artmasıyla daha yüksek parametreler elde edilmiştir.



Şekil 6.26 : 30 mm masa hareketi için dakikadaki devir sayısı ile hesaplanan ivme ilişkisi.



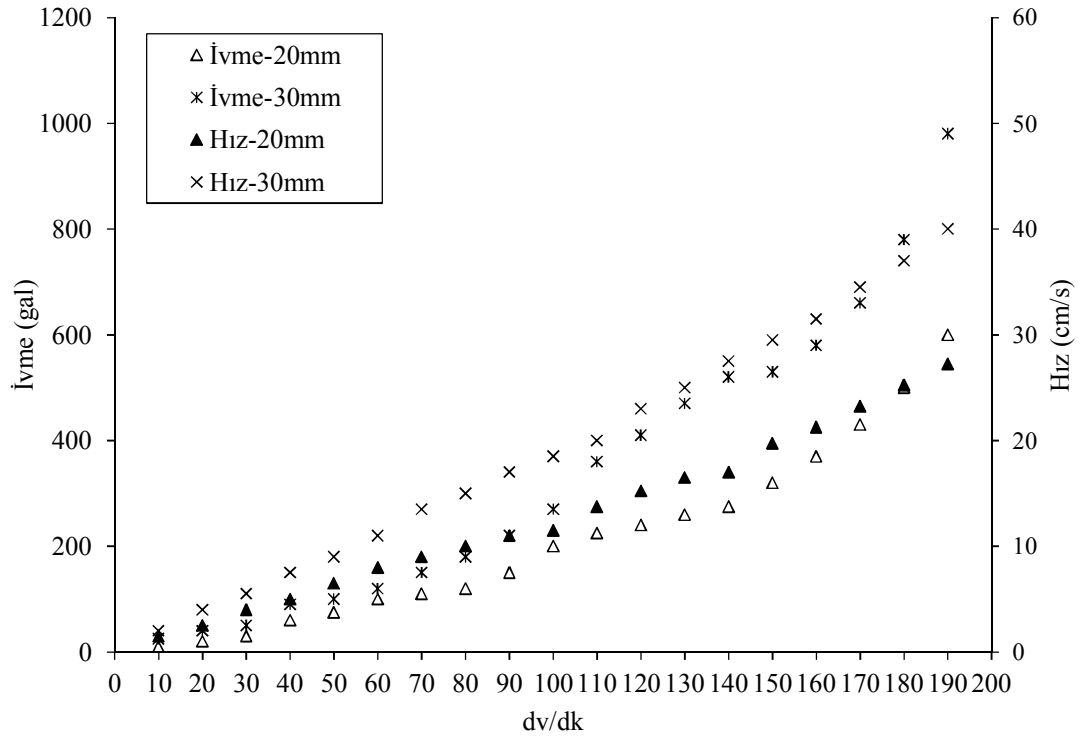
Şekil 6.27 : 30 mm yatay harekette frekans ve periyodun dakikadaki devir sayısı ile ilişkisi.

20 ve 30 mm yatay hareket için ivme ve hız değerlerinin değişimi Şekil 6.28'de verilmiştir. Aynı devir sayılarında 30 mm yatay hareket için hesaplanan ivme

değerleri, 20 mm'ye göre ortalama % 150, benzer şekilde hız değerlerinin de ortalama % 50 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6.7 : 30 mm yatay hareket için belirlenen eşitlikler.

	Eşitlik	Korelasyon katsayısı, r
İvme	$a_{30} = (0.0203*d^2)+(0.7688*d)$	0.98
Hız	$V_{30} = (0.0002*d^2)+(0.1574*d)+0.5299$	0.99
Frekans	$F_{30} = 0.0186*d$	0.99
Periyot	$T_{30}=53.183*d^{0.9981}$	0.99
d: dakikadaki devir sayısı		

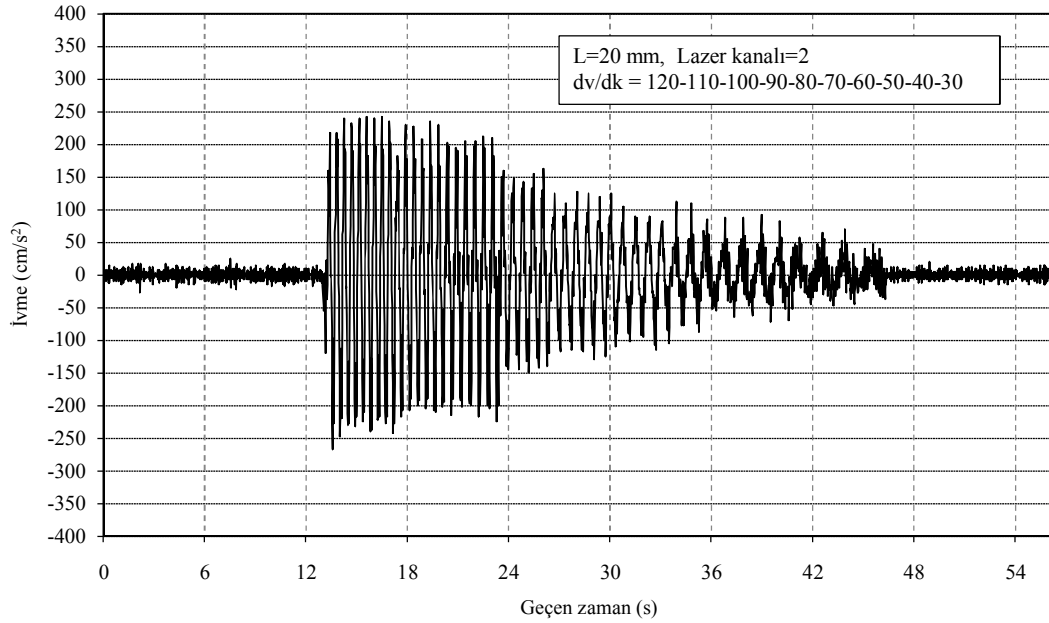


Şekil 6.28 : 20 ve 30 mm'lik yatay hareket miktarları için hız ve ivme değerlerinin dakikadaki devir sayılarıyla değişimi.

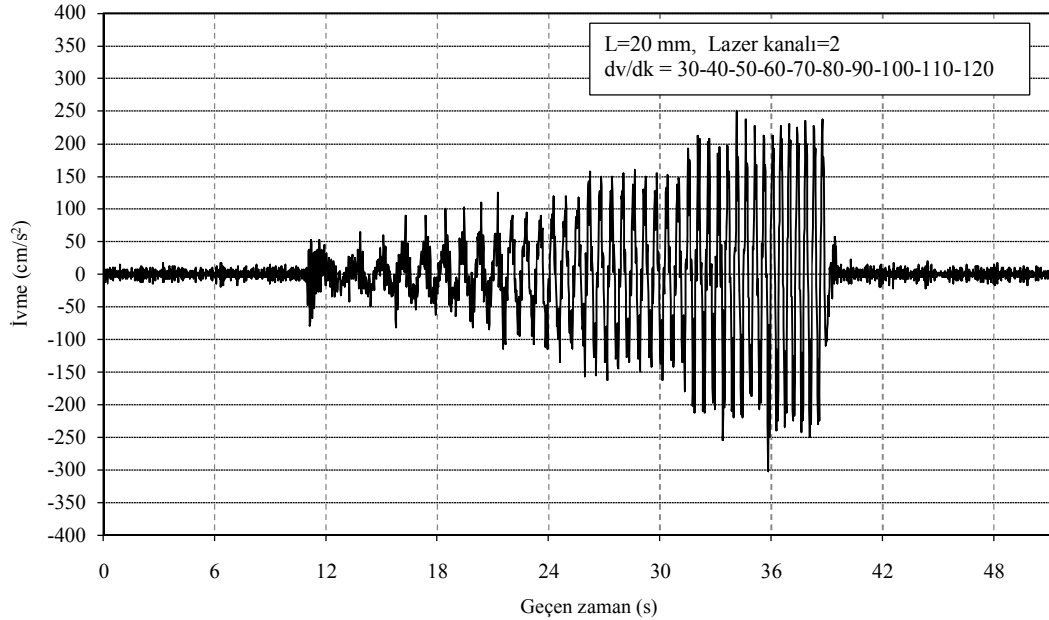
6.3.1.4 Sarsma masasında oluşturulabilen farklı ivme şekilleri

Deneysel çalışmalarda sarsma masasıyla üretilecek ivme miktarının zamana bağlı olarak sabit tutulması, artırılması veya azaltılmasıyla modelde meydana gelecek olan deformasyonların izlenmesi, ayrıca ivme ve deformasyon arasındaki ilişkilerin incelenmesi mümkün olabilmektedir. Bu amaçla sarsma masası sabit, giderek artan, giderek azalan ve değişen devirler için çalıştırılmış ve ürettiği ivmeler hesaplanmıştır. Masa yatay hareketi 20 mm olarak seçilmiş ve dakikadaki motor devirleri grafikler

üzerinde verilmiştir. Şekil 6.29'da azalan, 6.30'da artan ve 6.31'de ise değişen devirlerde üretilen ivme değerleri görülmektedir.



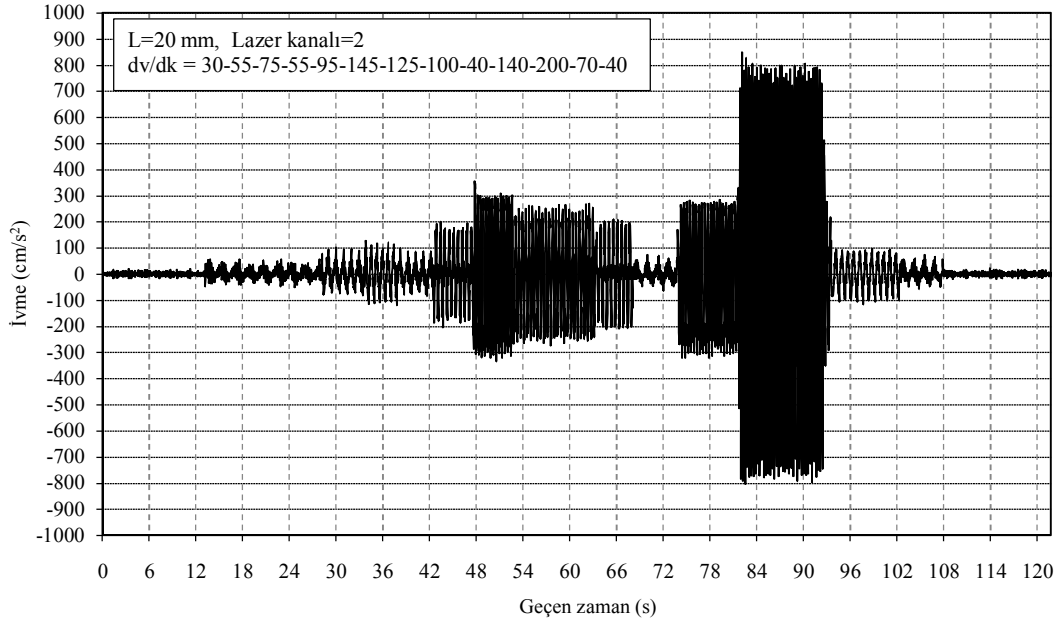
Şekil 6.29 : 20 mm'lik yatay harekette 120-30 dv/dk arasında üretilen ve giderek azalan ivme değerleri grafiği.



Şekil 6.30 : 20 mm'lik yatay harekette 30-120 dv/dk arasında üretilen ve giderek artan ivme değerleri grafiği.

Yapılan çalışmalarda, masaya hareket veren elektrik motorunun deney süresince durdurulmadan çalıştırılmasının daha uygun olacağı anlaşılmıştır. Aksi halde; motorun hareketinin durması ve harekete başlamasıyla anlık sarsıntıların oluştuğu

bunun da özellikle masanın çalıştırılması anında yüksek ivme değerlerinin alınmasına neden olduğu görülmüştür. Bu durum, mekanik sistemin önemli kısıtlamalarından biri olarak göze çarpmıştır.

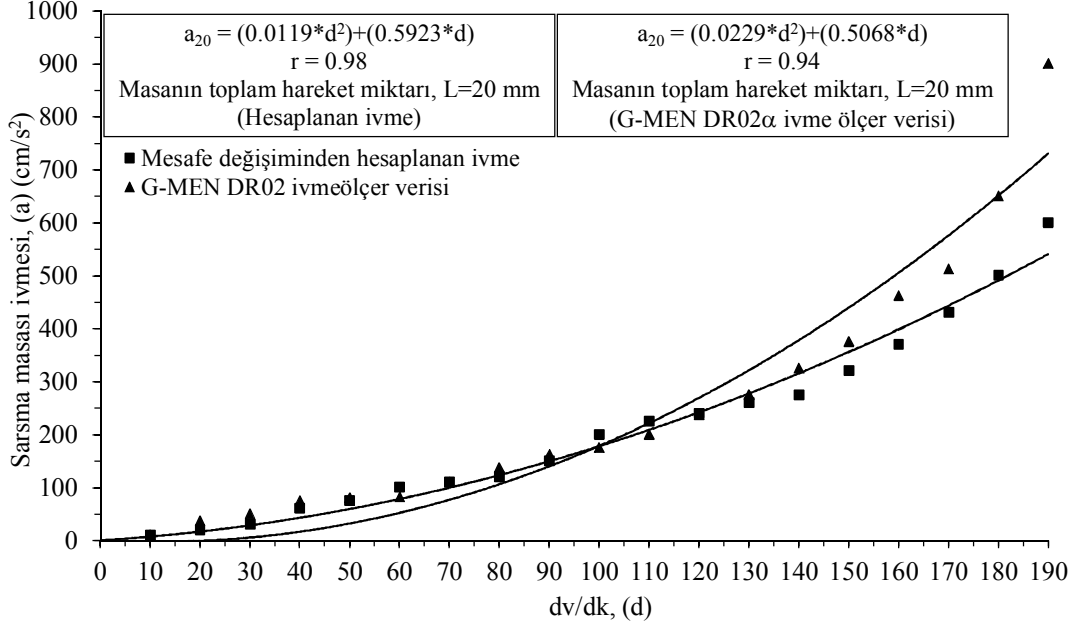


Şekil 6.31 : 20 mm'lik yatay harekette değişen devirlerde üretilen ivme değerleri grafiği.

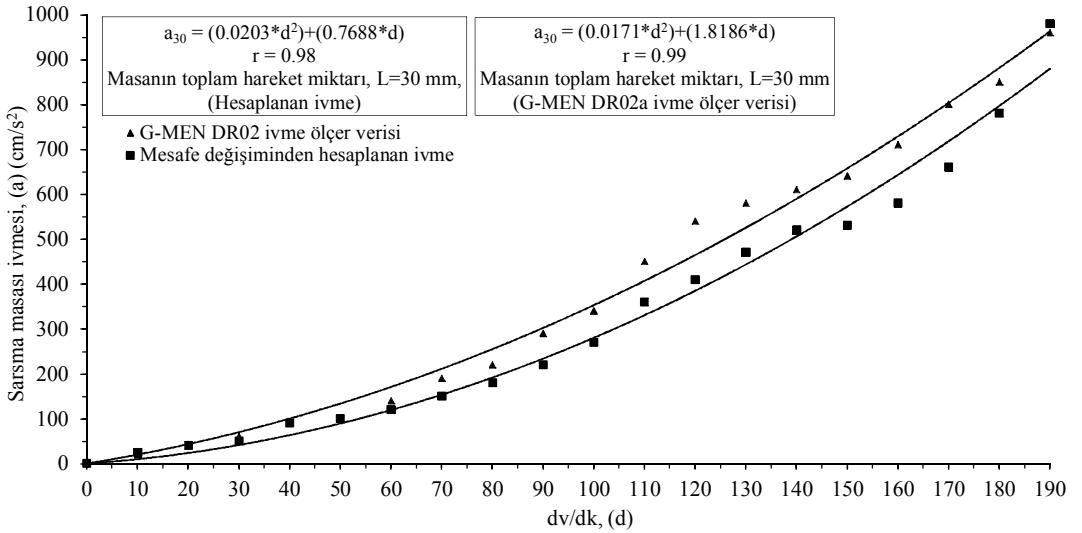
6.3.1.5 Sarsma masasının hassasiyeti ile ilgili değerlendirmeler

Mesafe ölçümünden hesaplanan masa hızı ve ivme değerlerinin bir bakıma doğrulanmasını sağlamak amacıyla yukarıda değinilen 20 ve 30 mm'lik yatay hareketler için mesafe ölçümleri alınırken, eş zamanlı olarak G-MEN DR02 model ivme ölçer kullanılarak ivme kayıtları da alınmıştır. İvme ölçerin kayıt aralığı 20 ms olarak ayarlanmıştır. İvme ölçer verisi ile mesafe değişiminden hesaplanan ivmeler karşılaştırılmış, Şekil 6.32'de 20 mm'lik, Şekil 6.33'de ise 30 mm'lik hareket için karşılaştırmalar verilmiştir. Ölçülen ivme değerleri ile hesaplanan ivme değerlerinin tutarlı olduğu görülmüştür. Bunun yanında değerler arasında yüksek olmamakla birlikte, belirli oranda farklılıkların olduğu da göze çarpmaktadır. İvme ölçerin ürettiği ivme değerlerinin genel olarak hesaplanan değerlerden yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun, sarsma masasının tek eksenli hareketi sırasında diğer eksenlerde meydana gelebilecek (düşey ve yanal) çok düşük miktarlı ve yüksek frekanslı hareketlerle (titreşimler) oluşabilecek ivmelerin masanın hareket eksenini doğrultusunda bileşen oluşturarak, ivme değerlerini arttırabileceği düşünülmektedir. Yüksek devirlere doğru sarsıntı ve titreşimlerin artması bu durumu desteklemektedir.

20 mm'lik hareket için 130 dv/dk'ya kadar (300 cm/s^2) ölçülen ve hesaplanan ivme değerlerinin hemen hemen aynı olduğu, yüksek devirlere doğru farklılıkların oluştuğu ve bunların giderek arttığı görülmüştür.



Şekil 6.32 : 20 mm'lik hareket için ivme ölçer kaydedtiği ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.



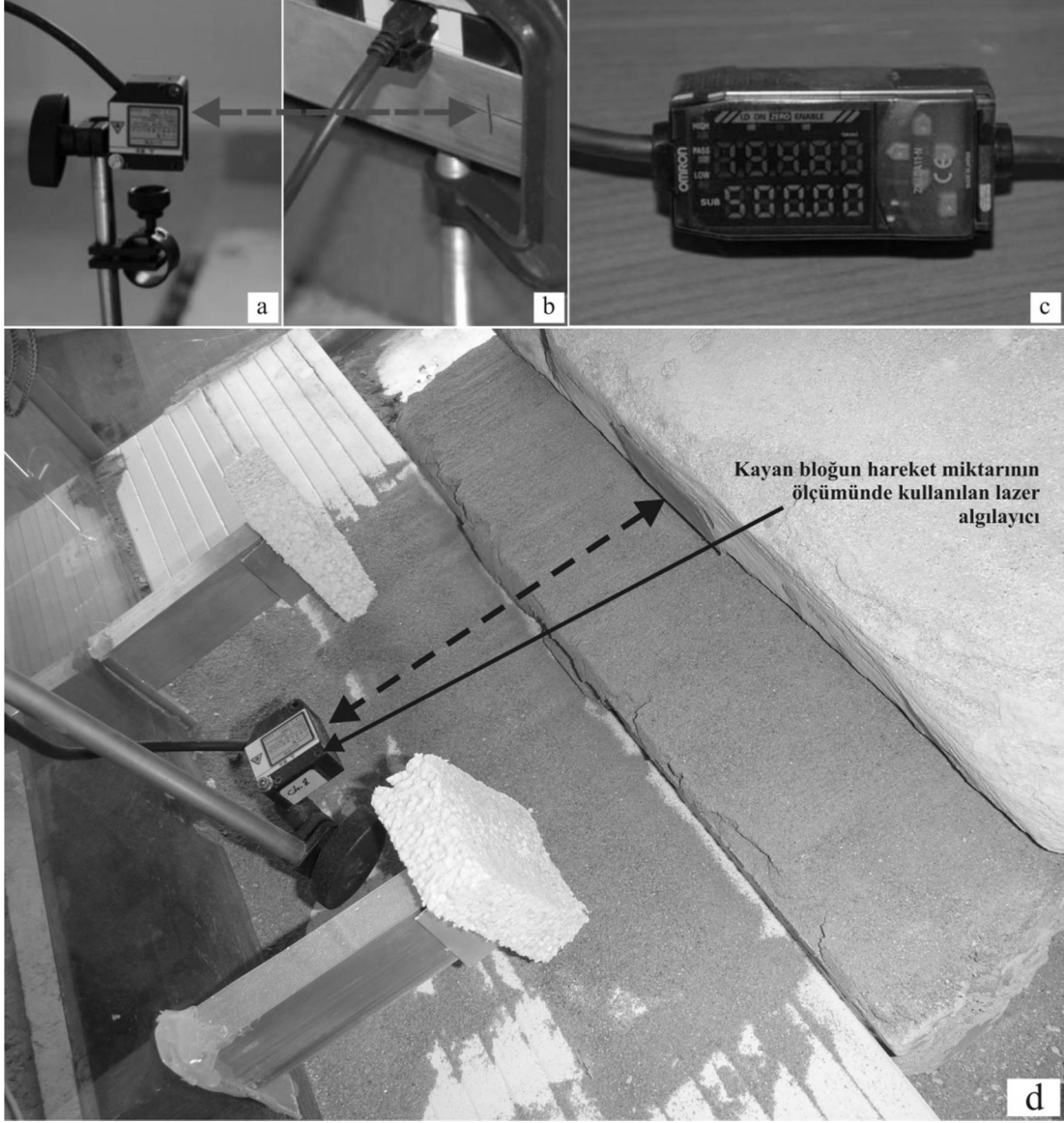
Şekil 6.33 : 30 mm'lik hareket için ivme ölçer kaydedtiği ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması.

Bu farklılıkların iki temel nedeninin olduğu düşünülmektedir. Bunlar, elektrik motorunun devrini düşüren dişli sistemindeki boşluklar ve masa üst yüzeyinin eğimlendirilebilir olmasından ötürü bağlantı noktalarındaki bazı boşluklardır. Bu iki durum, hareket esnasında ek titreşimlerin oluşmasına olanak sağlayabilir.

6.3.2 Lazer mesafe ölçüm sistemi

Bu tez çalışmasının deneysel kısımlarında, Omron firmasına ait yansıma esasıyla çalışan ZX-LD100 ve ZX-LD300 model lazer algılayıcılar kullanılmıştır. Bu sistemlerden biriyle masanın hareketi ve dolayısıyla hızı ve ivmesi, diğeriyle de modelde meydana gelen deformasyonların ölçümü mümkün olmuştur. Deneysel çalışmalarda başlangıçta lazer algılayıcılarla ölçülen yerdeğişimi miktarlarından deney süresince üretilen ivmelerin hesaplanması öngörülmüştür. Ancak daha sonra portatif ivme ölçer temin edilebildiğinden, deneysel çalışmalarda ivme ölçümlerinde bu portatif ivme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan lazer algılayıcılarından ZX-LD100 modeliyle 60-140 mm aralığında ve 0.01 mm hassasiyetli, ZX-LD300 modeliyle ise 100-500 mm aralığında ve 0.3 mm hassasiyetli ölçüm yapılabilmektedir. Algılayıcılar 2. sınıf ve 650 nm dalga boylu lazer kullanmaktadır (Omron, 2004).

Lazer algılayıcılar, ZX-LDA11 model yükseltici ünitelerle kullanılabilir. Algılayıcının yükselticiye gönderdiği sinyal yükselticide işlenerek voltaj veya miliamper olarak kayıt sistemine gönderilmektedir. Çıkış değerlerinin mesafeye dönüştürülmesinde kullanılan kalibrasyon katsayıları kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Lazer algılayıcılar endüstride çok farklı kullanım amaçlarıyla üretilmiş olup, yapılan denemeler sonucunda bu çalışmanın amacına yönelik kullanımının uygun olacağı görülmüştür. Benzer amaçlı laboratuvar çalışmalarında, LVDT (Linear Variable Differential Transformer) olarak adlandırılan deformasyon ölçerler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, fiziksel modelin dinamik koşullardaki hareketi izlenirken LVDT kullanımında algılayıcı ucunun modele sağlıklı bir şekilde tutturulmasının güçlüğü ve bu cihazların algılama mesafelerinin daha kısa olması gibi kısıtlamalar söz konusudur. Lazer algılayıcılar, LVDT türü algılayıcılara göre daha uzun menzillerde çalışabilmekte ve sadece lazer işaretleyicinin gösterdiği hedef noktası ile algılayıcı arasındaki mesafeyi ölçmesinden dolayı kullanımının son derece pratik olduğu görülmüştür. Şekil 6.34'de lazer mesafe ölçüm sisteminin bileşenleri görülmektedir.



Şekil 6.34 : Lazer mesafe ölçüm sisteminin bileşenleri (a: lazer algılayıcı, b: lazer algılayıcının hedef noktasındaki işaretleyicisi, c: yükseltici ünite, d: kayan bloğun hareket miktarının ölçümü).

6.3.3 Veri kayıt sistemi

Voltaj, akım, sayı (pulse) ayrıca uyumlu algılayıcılar ile sıcaklık ve nem değerlerinin kayıt edilmesi amacıyla geliştirilmiş olan Graphtec GL-900 veri kayıt sistemi deneylerde kullanılmıştır (Şekil 6.35). 8 kanallı veri kaydedebilen cihaz, 10 μ s'den başlayan zaman aralıklarında veri kaydedebilmekte ve bilgisayara çeşitli arayüzler ile bağlanabilmektedir (Graphtec, 2009). Deneyler süresince gerek masa hareketi gerekse blok yerdeğişimlerinin hesaplandığı voltaj verileri ve ayrıca AE aktivite sayıları bu cihaz kullanılarak kaydedilmiştir. Kullanım kolaylığı açısından deneyler süresince veriler, cihazın üzerine takılabilen USB belleğe kaydedilmiştir. Daha sonra

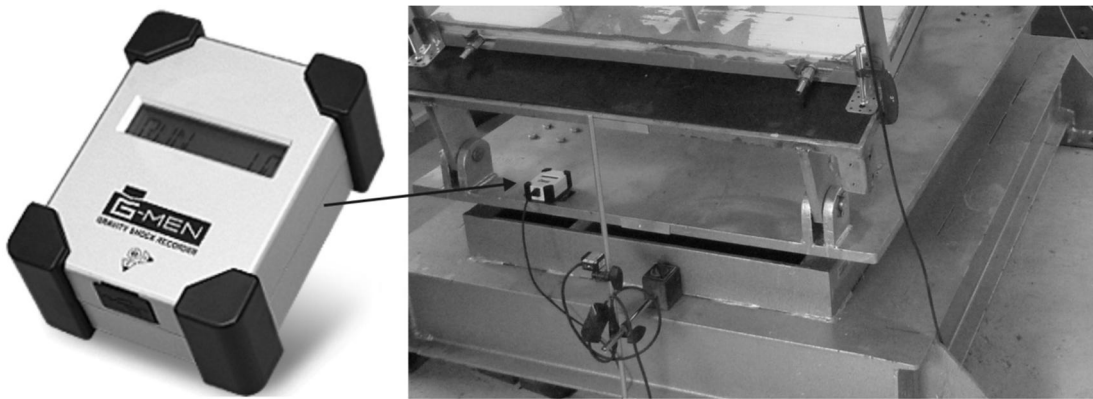
veri dosyası kişisel bilgisayara aktarılıp hesaplama ve analizler gerçekleştirilmiştir. Veri kayıt aralığı, bloğun kayma hareketinin net olarak izlenebilmesi için 10 ms olarak seçilmiştir.



Şekil 6.35 : Graphtec 8 kanallı veri kayıt cihazı (Graphtec, 2009).

6.3.4 İvme ölçer

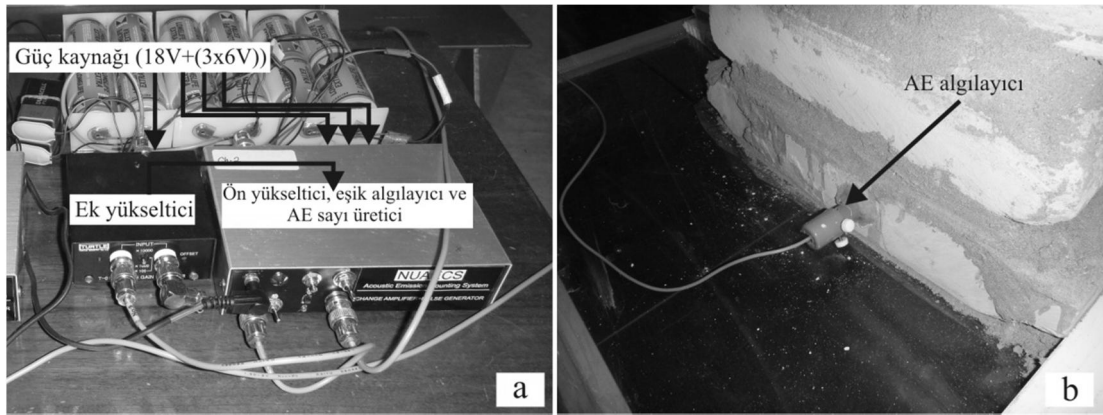
Deneyisel çalışmalarda, G-MEN DR02 α modeli (Şekil 6.36) ivme ölçer kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak 3-eksenli ivme kaydı alabilen cihaz, 3 adet ince kalem pille çalışmakta ve bilgisayar aracılığıyla ayarlanmaktadır. Deney süresince verileri kendi dahili hafızasına kaydetmekte ve deney sonunda verileri bilgisayara aktarmaktadır. Cihaz 0.02g hassasiyetli, 2g'ye kadar ivmeleri algılayabilmekte ve en küçük 10 ms zaman aralığında toplam 8000 veri kaydedebilmektedir (Url-4). Deneylerde sarsma masasına yatay olarak sabitlenen ivme ölçer ile 10 ms zaman aralıklarıyla ivmeler kaydedilmiştir.



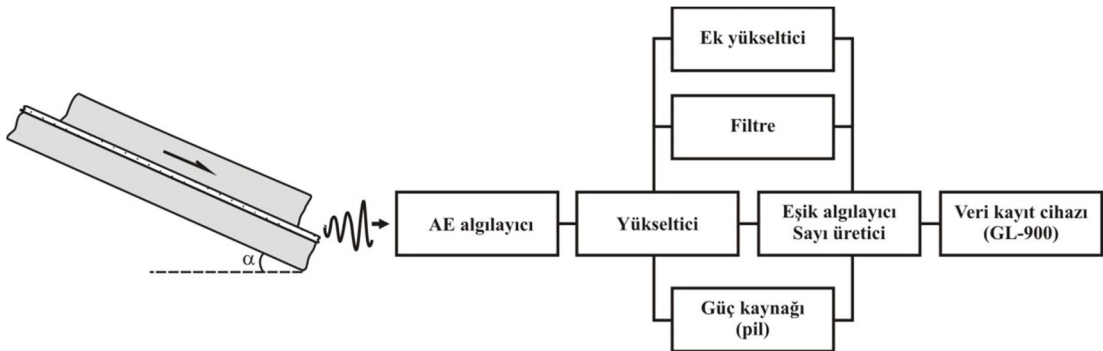
Şekil 6.36 : G-MEN DR02 α portatif ivme ölçer.

6.3.5 Akustik emisyon veri kayıt sistemi

Deneysel AE aktivitesinin kayma miktarı ile olan ilişkisinin araştırılması amacıyla laboratuvar koşullarındaki deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Prof. Dr. Hisataka Tano tarafından arazi uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış bir AE veri kayıt sistemi kullanılmıştır. Bu sistem, daha öncede belirtildiği gibi esas olarak arazide kullanılan AE veri kayıt sistemlerine benzerdir. Deneyler sırasında gerek hidrolik piston ve pompasından, gerekse sarsma masasının hareket motorundan kaynaklanan gürültülerin filtre edilebilmesi amacıyla eşik seviyesi ayarı, filtre ve ek yükseltici de sisteme ilave edilmiştir. Bu sistem, Abe ve diğ. (2007) tarafından granit, tuf ve alçıdan hazırlanmış karot örnekleri üzerinde ön yükleme gerilmelerinin belirlenmesine yönelik amaçlarla yapılan bir laboratuvar çalışmasında kullanılmış ve sistem NUA ECS (Nihon University Acoustic Emission Counting System) olarak adlandırılmıştır (Şekil 6.37). Bu AE veri alım sisteminin bileşenleri şematik olarak Şekil 6.38’de verilmiştir.



Şekil 6.37 : AE veri alım sistemi (a) ve modele tutturulmuş AE algılayıcısı (b).



Şekil 6.38 : Deneysel AE veri alım sisteminin bileşenleri (Abe ve diğ., 2007’den değiştirilmiştir).

Sistem, tek eksenli yükleme cihazı ve bu çalışmada kullanılan sarsma masası ve eğilendirme pistonu gibi çeşitli laboratuvar cihazlarından kaynaklanabilecek

gürültülerin filtre edilebilmesi amacıyla 120 kHz seviyeli yüksek geçiren bir filtre (high pass filter) içermektedir. Bu filtre, 120 kHz ve üzeri frekanslı sinyalleri geçirmektedir. Bu seviyeye kadar olan ve özellikle laboratuvar koşullarında meydana gelebilecek gürültüler bu sayede engellenmiş olmaktadır. Filtre kullanımından ötürü düşen sistem hassasiyetinin tekrar geri kazandırılması amacıyla bir ek yükseltici sisteme ilave edilmiştir (Abe ve diğ., 2007). Deneylere başlanmadan önce eğilendirme pistonu ve sarsma masası çalıştırılmış ve cihazlardan kaynaklanan gürültülerin deneyler sırasında kaydedilmemesi için sistemin eşik seviyesi ayarlanmıştır.

7. STATİK VE DİNAMİK MODEL DENEYLERİ

Hazırlanan fiziksel model üzerinde, statik koşullarda eğilendirme, ardından dinamik deneyler ve şok deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde farklı eğim miktarlarında, kumtaşı araseviyeli marn bloğunun uygulanan yatay ivme etkisindeki davranışı izlenmiştir. Öncelikle eğilendirme deneyleriyle kumtaşı araseviyesinin kayma açısı belirlenmiş, ardından gerçekleştirilen her bir deney için ilgili veriler kullanılarak dinamik kayma açıları verilen yöntemle hesaplanmıştır. Daha sonra farklı eğim miktarları ile kritik ivme arasındaki ilişki deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde nemli koşulların etkisi de incelenmeye çalışılmış ve bulgular değerlendirilmiştir. Ayrıca hazırlanan model üzerinde şok deneyleri yapılmaya çalışılmıştır. Sert kauçuk bir çekiçle sarsma masasına vurulmuş, ancak kayma oluşturabilecek bir şok şiddeti oluşturulamamıştır. Bunun yerine bu deneyler, küçük örnekler üzerinde kuru ve nemli koşullarda gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise elde edilen deneysel veriler sayısal çözümlerle karşılaştırılmıştır.

7.1 Eğilendirme Deneyleri

Malzemeler arasındaki sürtünmeye bağlı kayma açısı değişik mühendislik uygulamalarında, gerek tasarım gerekse uygulama aşamalarında çok büyük önem taşımaktadır. Süreksizlik yüzeylerinin kayma açılarının belirlenmesinde eğilendirme deneyleri sıklıkla kullanılmaktadır (Barton, 1973; Barton ve Choubey, 1977).

Arazi ve laboratuvar koşullarında yapılabilen bu deneylerde kayma hareketi, deneye tabi tutulmuş örnek boyutuna bağlı olarak, çok düşük normal gerilmeler altında gerçekleşmektedir. Bu durum göz önüne alındığında, düşük normal gerilmeler altında büyük kayma açıları belirlenebilmektedir. Eğilendirme deney koşullarında örneklerin üzerindeki normal gerilmelerin artırılması örnek boyutu göz önüne alındığında pratik olmamaktadır. Hazırlanan modelin içerdiği kumtaşı-marn ara yüzeyinin kayma açısının belirlenebilmesi amacıyla sarsma masası statik durumdayken, daha önce özellikleri belirtilen deney düzeneği kullanılarak

eğimlendirme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.1). Hidrolik bir piston yardımıyla eğimlendirilebilen masa, deneyler süresince mümkün olan en düşük ve sabit hızda eğimlendirilmiştir. Bu hız miktarı hidrolik pompanın ayarlanabildiği en düşük eğimlendirme hızı olarak belirlenen saniyede yaklaşık 3°'dir. Eğimlendirme deneyleri 8 kez yapılmış ve belirlenen kayma açıları Tablo 7.1'de sunulmuştur.

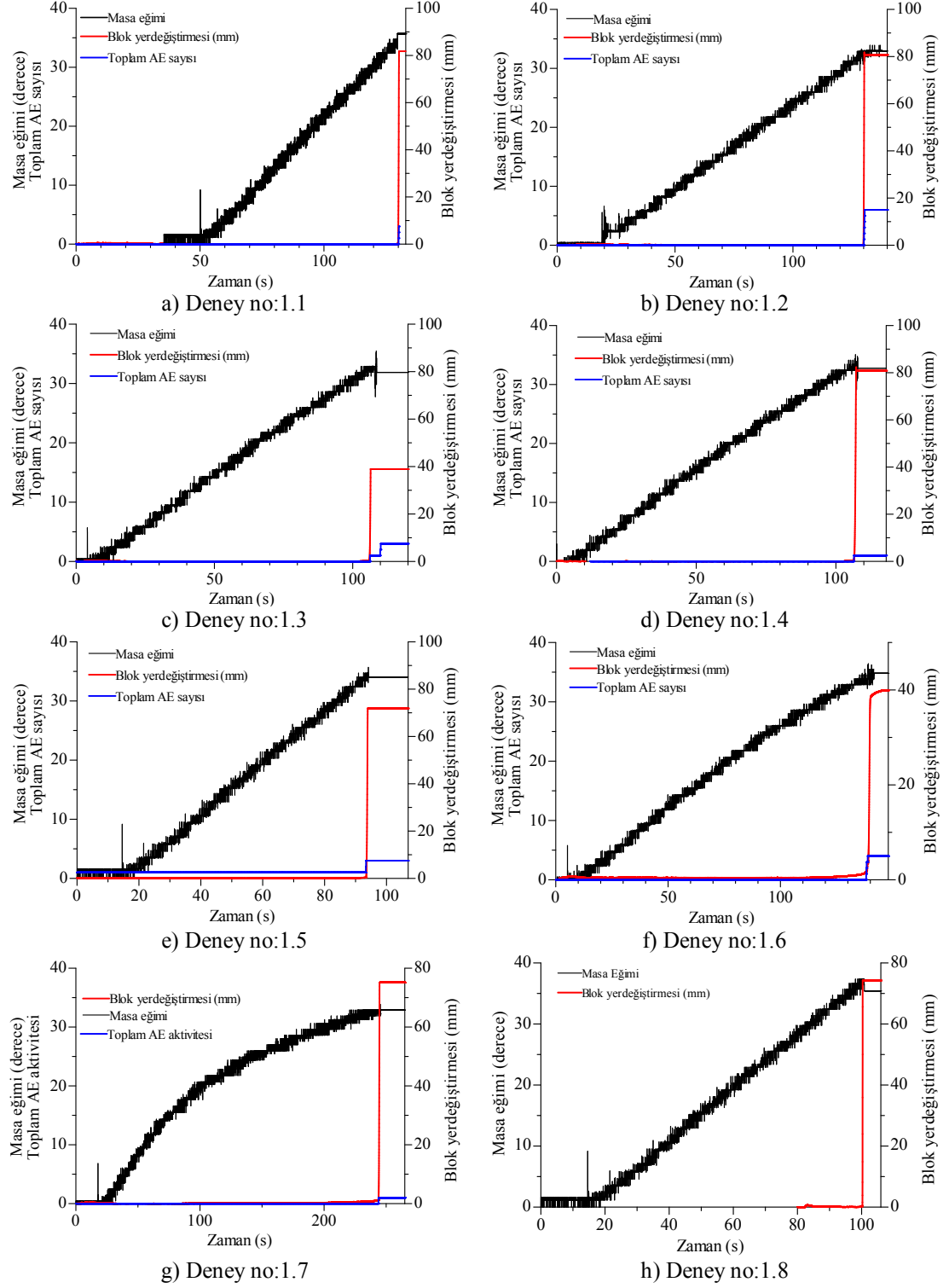


Şekil 7.1 : Eğimlendirme deney düzeneği (a: 45°'ye kadar eğimlendirilebilen masa, b: kayma öncesi fiziksel modelin görünümü, c: deney sonu görünüm).

Tablo 7.1 : Kuru ve statik durumda fiziksel model üzerinde gerçekleştirilen eğimlendirme deneylerinin sonuçları.

Deney no.	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Ölçülen Kayma açısı (°)	35.69	32.94	31.87	32.78	34.04	34.81	32.89	35.41
Aralık (°)	31.87-35.69							
Ortalama (°)	33.80							
Standart sapma (°)	1.39							

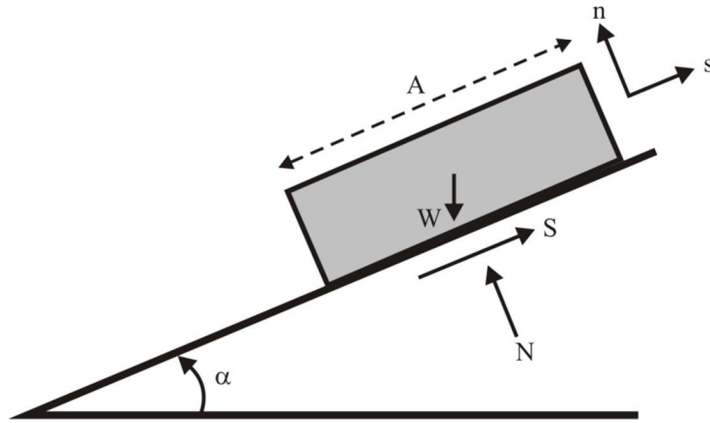
Gerçekleştirilen 8 adet deneye ait masa eğimi, blok yerdeğiştirmesi ve AE aktivitesi verileri grafik olarak Şekil 7.2’de sunulmuştur.



Şekil 7.2 : Kuru koşullarda gerçekleştirilen eğimlendirme deneylerinde alınan verilerin grafik olarak sunumu.

Çevik (2003) aynı bölge için yaptığı eğimlendirme deneylerinde kuru koşullarda ortalama 34° , ıslak koşulda ise 36° 'lık kayma açıları belirlemiştir. Sonuçlar bu tez kapsamında gerçekleştirilen model deney sonuçları ile uyumludur. Eğimlendirme deneyleri yapılırken masa eğimi, blok yerdeğiştirmesi ve akustik emisyon (AE) aktivitesi 10 ms (100 veri/s) zaman aralıklarıyla kaydedilmiştir. Bu sıklıkta veri alımıyla bloğun çok kısa zaman aralığında meydana gelen hareketi izlenebilmiştir. Kuru koşullarda gerçekleştirilen deneylerde bloğun harekete başlamasıyla hemen hemen eş zamanlı olarak AE aktivitesinin arttığı görülmektedir.

Eğimlendirme deneylerinde blok hareketi, hareket başlayana kadar statik kayma açısıyla hareket başladıktan sonra ise dinamik kayma açısıyla kontrol edilmektedir. Sayısal çözümlerde kullanılmak üzere, eğimlendirme deneylerinde zamana ve eğim miktarına bağılı olarak ölçülen blok hareketi değerleri kullanılarak her bir deney için aşağıda belirtilen yöntemle kayan bloğun dinamik kayma açısı belirlenmiştir. Şekil 7.3'de eğimli bir düzlem üzerindeki bloğa etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 7.3 : Kayan bloğa etkiyen kuvvetler.

Eğimli düzlem üzerindeki bir blok için dinamik kuvvet denge eşitlikleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Aydan ve Ulusay, 2002).

$$s \text{ yönü için; } W \sin \alpha - S = m \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (8.1)$$

$$n \text{ yönü için; } W \cos \alpha - N = m \frac{d^2 n}{dt^2} \quad (8.2)$$

Burada,

W: Blok ağırlığı,

α : Kayma düzleminin yatayla yaptığı açı,

A: Kayma yüzeyi uzunluğu,

S ve N: Kaymaya karşı makaslama kuvveti ve kayma yüzeyine dik yönde etkiyen normal kuvvetlerdir.

Arazi gözlemlerine göre incelenen tabakaların düz ve pürüzsüz olmaları dikkate alınarak hazırlanan fiziksel modelin içerdiği kumtaşı-marn ara seviyesinin de düz ve pürüzsüz olması nedeniyle kayma hareketi Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne göre (Eşitlik 7.3) incelenmiştir.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (7.3)$$

Burada,

τ : Makaslama gerilmesi,

c : Kohezyon,

σ : Normal gerilme,

ϕ : İçsel sürtünme açısıdır.

7.3 no.lu eşitlikte, alanı A olan yüzey boyunca ve tabaka yüzeyinin düz ve pürüzsüz olması nedeniyle kohezyon ihmal edilip gerekli sadeleştirmeler yapılarak eşitlik 7.5 elde edilmiş olur.

$$\tau.A = c.A + \sigma.A \tan \phi \quad (7.4)$$

$$S = N . \tan \phi \quad (7.5)$$

Bloğun dengesi statik ve dinamik koşullar için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{Kayma başlangıcında; } \frac{S}{N} = \tan \phi_{statik} \quad (7.6)$$

$$\text{Kayma süresince; } \frac{S}{N} = \tan \phi_{dinamik} \quad (7.7)$$

Kayan blok için, n yönündeki ivme ihmal edilerek bloğun denge koşulu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{W \sin \alpha - m \frac{d^2 s}{dt^2}}{W \cos \alpha} = \tan \phi_{statik} \quad (7.8)$$

Kayma başlangıcında; $\tan \alpha = \tan \phi_{statik}$ olacağı kabul edilip, 7.8 no.lu eşitlik sadeleştirilerek, kayma koşulu için 7.9 no.lu eşitlik elde edilir.

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = g(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi_{dinamik}) \quad (7.9)$$

Burada, $g(\sin\alpha - \cos\alpha \tan\phi_{dinamik})$ ifadesi A olarak tanımlanıp, 7.9 no.lu eşitliğin integrali iki kez alındığında aşağıdaki (7.10) eşitlik elde edilir.

$$s = A \frac{t^2}{2} + C_1 t + C_2 \quad (7.10)$$

Kayma başlangıcında; yerdeğiştirme (s) = 0, hız (v) = 0 ve $t = T_{statik}$ olacağı için, integral katsayıları C_1 ve C_2 aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\text{Hız } (v) = 0 \text{ için } \frac{ds}{dt} = At_s + C_1 \text{ ve } C_1 = -At_s \quad (7.11)$$

$$\text{Yerdeğiştirme } (s) = 0 \text{ için } s = A \frac{t_s^2}{2} + C_1 t_s + C_2, C_2 = -A \frac{t_s^2}{2} - C_1 t_s \text{ ve } C_2 = A \frac{t_s^2}{2} \quad (7.12)$$

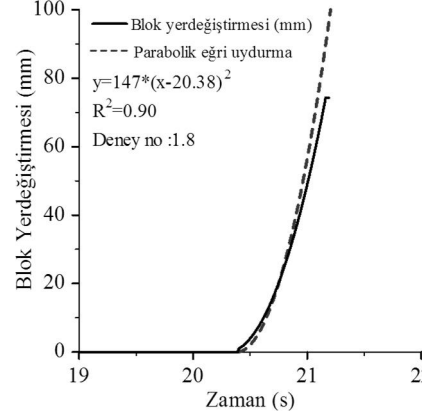
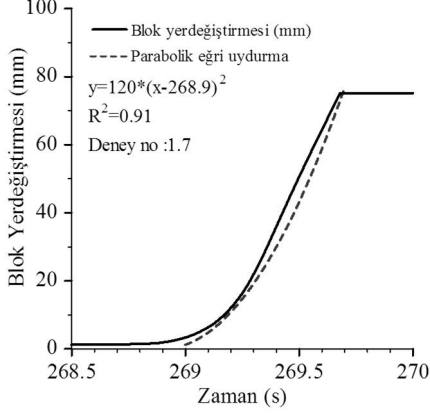
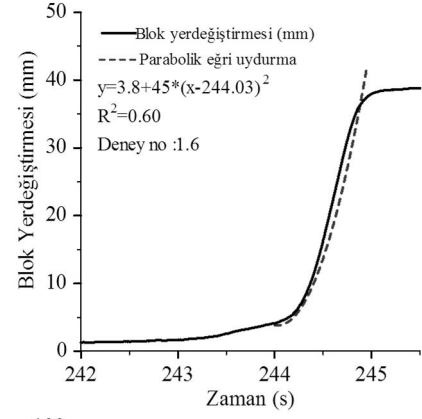
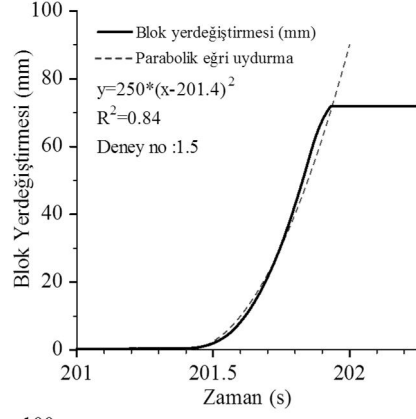
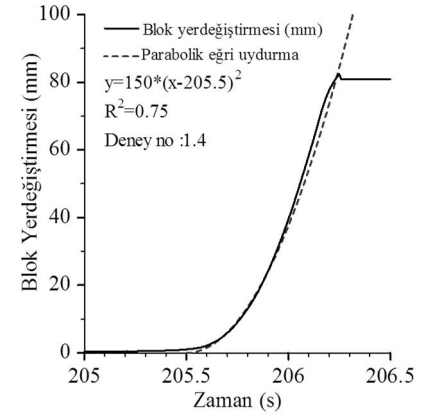
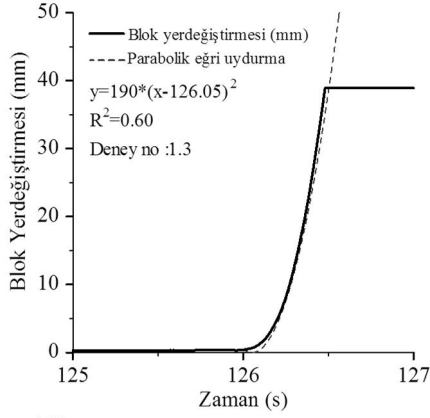
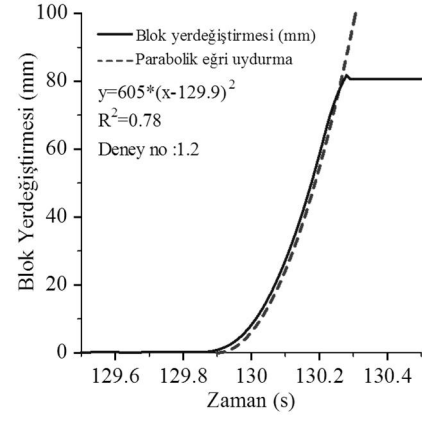
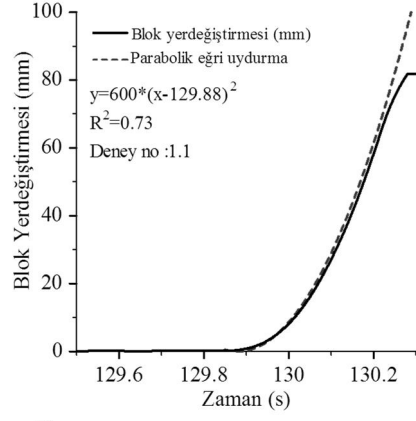
A katsayısı ve zamana bağlı olarak belirlenen C_1 ve C_2 integral sabitleri 7.10 no.lu eşitlikte yerlerine yazılırsa aşağıdaki eşitlik (7.13) elde edilmiş olur.

$$s = \frac{A}{2} (t - T_{statik})^2 \quad (7.13)$$

Yerdeğiştirme zaman eğrisi üzerinde en küçük kareler yöntemi ile ikinci dereceden eğri uydurma ile 7.13 no.lu eşitlikteki A katsayısı belirlenebilmektedir. Daha sonra dinamik kayma açısı, belirlenen A katsayısı kullanılarak aşağıdaki 7.14 no.lu eşitlik ile belirlenebilir.

$$\phi_{dinamik} = \tan^{-1} \left(\tan\alpha - \frac{1}{\cos\alpha} \frac{A}{g} \right) \quad (7.14)$$

Tekrarlanan her bir eğimlendirme deneyi için yukarıdaki yöntemle dinamik kayma açıları belirlenmiştir. Deneylerde kaydedilen zamana bağlı blok yerdeğiştirmesi verileri kullanılarak çizilen grafiklere en iyi uyan 2. dereceden eğri denklemleri belirlenmiştir. İlgili deney grafikleri, uydurulan eğriler ve denklemleri Şekil 7.4'de verilmiştir. Eğri denklemleri eşitlik 7.13'de verilen forma uygun şekilde elde edilmiş ve A katsayısı belirlenmiştir. Statik kayma açıları ve hesaplanan dinamik kayma açıları diğer belirlenen parametrelerle birlikte Tablo 7.2'de verilmiştir.



řekil 7.4 : Eđimlendirme deneýlerinde kaydedilen zamana bađlı blok yerdeğiřtirmeleri ve hareketleri en iyi temsil eden eđriler.

Kuru koşullarda belirlenen statik ve hesaplanan dinamik kayma aırlarının nemli koşullardaki değişiminin belirlenebilmesi amacıyla kum ara seviyesi sprey kullanılarak nemlendirilmiş ve eğimlendirme deneyleri tekrarlanmıştır. Özellikle marnın kil içeriğine bağlı suya olan hassasiyeti nemli koşullarda deney yapılabilmesini güçleştirmektedir.

Tablo 7.2 : Eğimlendirme deneylerinden belirlenen statik ve hesaplanan dinamik kayma aırları.

D deney No	Statik kayma açısı (°)	Belirlenen temsili eğri denklemi	R ²	A katsayısı	Dinamik kayma açısı (°)
1.1	35.69	$y=600*(x-129.88)^2$	0.73	1200	29.6
1.2	32.94	$y=605*(x-199.9)^2$	0.78	1210	26.6
1.3	31.87	$y=190*(x-126.05)^2$	0.60	380	29.9
1.4	32.78	$y=150*(x-205.5)^2$	0.75	300	31.3
1.5	34.04	$y=250*(x-201.4)^2$	0.84	500	31.5
1.6	34.81	$y=3.8+45*(x-244.03)^2$	0.60	90	34.4
1.7	32.89	$y=120*(x-268.9)^2$	0.91	240	31.7
1.8	35.41	$y=147*(x-20.38)^2$	0.90	294	33.9
Standart sapma (°)					2.5
Ortalama dinamik kayma açısı (°)					31.1

Marnın suyu emerek dağılmasından ötürü eğimlendirme ve bir sonraki başlıkta değinilen dinamik deneyler öncelikle kuru koşullarda gerçekleştirilmiş, ardından nemli koşullarda deneyler yapılmıştır. Nemli koşulların oluşturulması amacıyla, ilk olarak kum ara seviyesi modelin üst kısmından düşük miktarda su sızdırılarak nemlendirilmeye çalışılmış ancak, suyun belirli yollardan eğim aşağı aktığı görülmüş, kısa zaman sonra ise suyun akarken kum ara seviyesinde borulanma oluşturduğu gözlenmiştir. Nemli koşulların sağlanabilmesi için üst blok kaldırılıp ara seviye yüzeylerine su sıkılarak deneyden hemen önce nemlendirilmiştir.

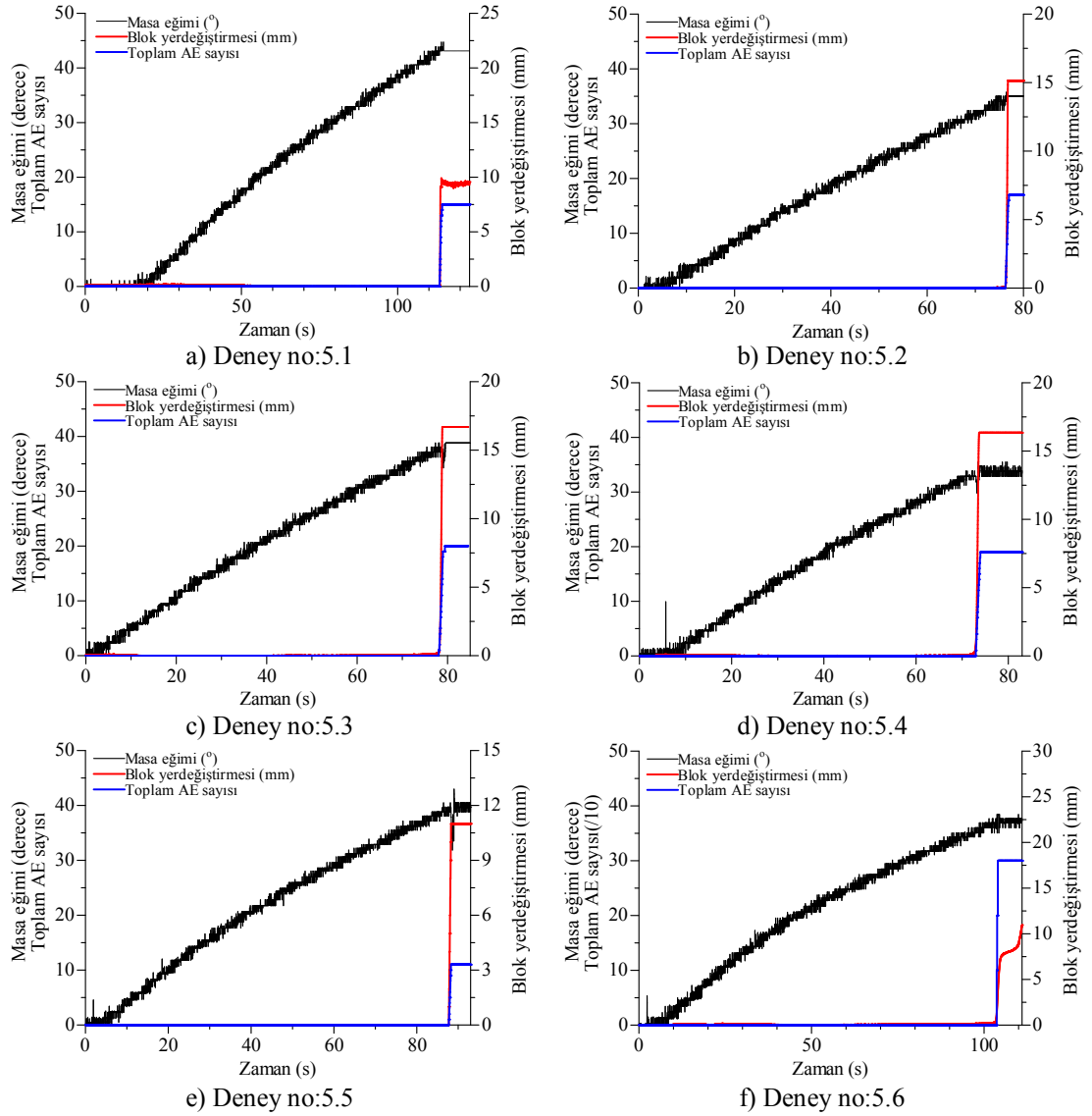
Nemli koşullarda gerçekleştirilen deneylerde bloğun harekete başladığı eğim miktarı 6 kez gerçekleştirilebilen deneylerde ortalama 37.7° olarak belirlenmiştir (Tablo 7.3). Kum ara seviyesindeki nemin sürtünmeyi azaltacak yönde rol oynayarak kuru koşullardakine göre daha düşük eğim açısında bloğun hareket etmesi beklenirken, bu durumun aksine nemli koşullarda kayma açısının ortalama 3.9° arttığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak marnın, kum arayüzeyindeki suyu emerek ara yüzeyde bir yapışmaya (adhezyona) neden olması ve bloğun daha yüksek açıda kaymasına yol aması olarak düşünölmüştür. Nemli koşullarda gerçekleştirilen deneylerde, dinamik kayma açılarında, kuru koşullarda gerçekleştirilen deneylere benzer olarak

düşümlerin görüleceğinden, nemli koşullarda gerçekleştirilen deneyler için dinamik kayma açısı ortalama 35° olarak alınmıştır.

Bununla birlikte, bloğun hareket miktarının kuru koşullara göre daha az olduğu gözlenmiştir. Nemli koşullar için dinamik kayma açısı hesaplanmamıştır. AE aktivite sayıları da, kuru koşullara benzer şekilde hemen hemen bloğun kaymaya başlamasıyla başlamıştır. 6 deneyin verisi grafik olarak Şekil 7.5’de verilmiştir.

Tablo 7.3 : Nemli koşullarda gerçekleştirilen eğimlendirme deneylerinin sonuçları.

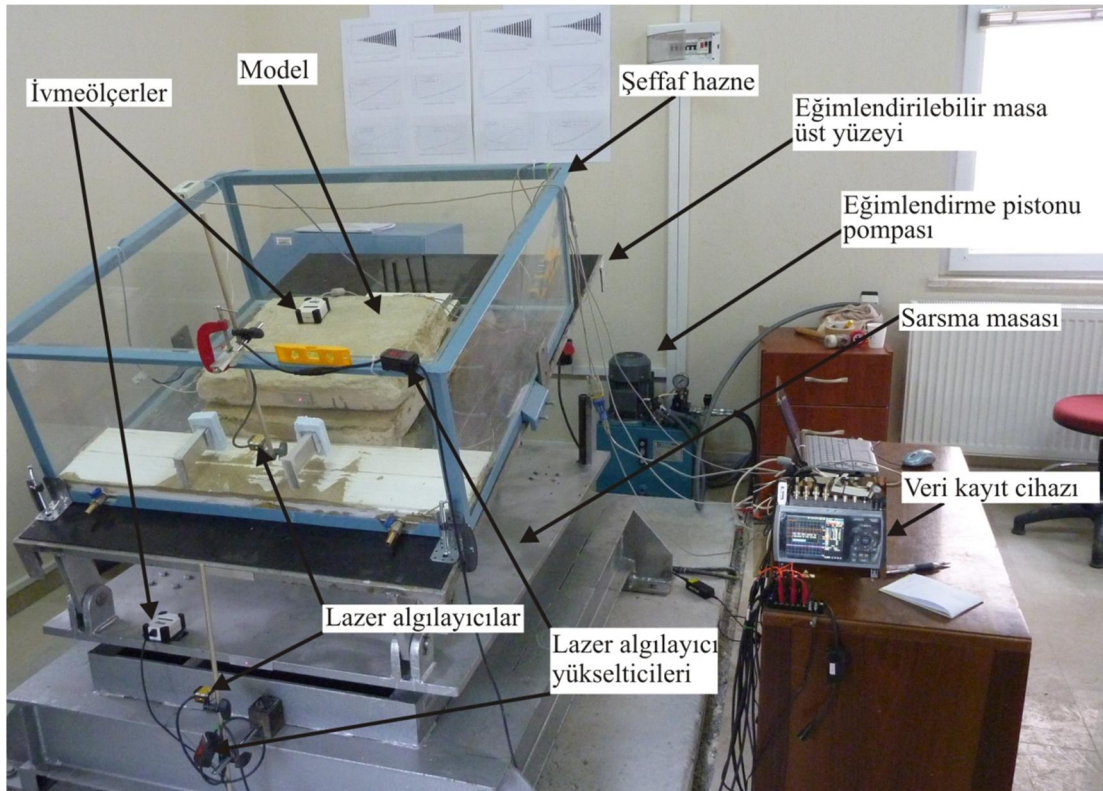
Deney no	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
Ölçülen kayma açısı ($^\circ$)	43.13	35.03	37.14	33.84	39.58	37.62
Aralık ($^\circ$)	33.84-43.13					
Ortalama ($^\circ$)	37.72					
Standart sapma ($^\circ$)	3.33					



Şekil 7.5 : Nemli koşullardaki eğimlendirme deneylerinde alınan verilerin grafikleri.

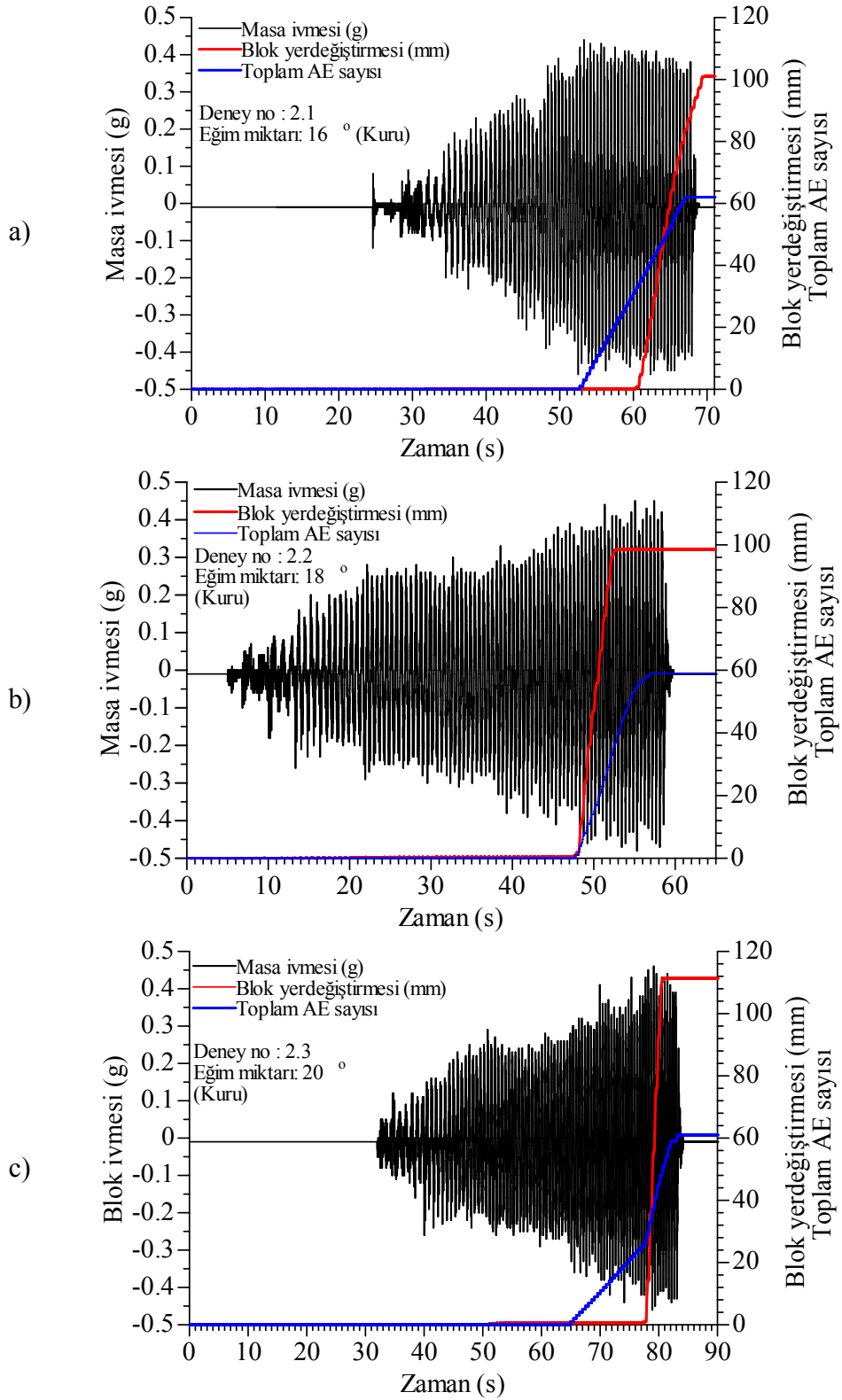
7.2 Dinamik Sarsma Masası Deneyleri

Hazırlanan fiziksel model, arazide tabaka eğimlerinin değişim aralığı dikkate alınarak, 16, 18, 20, 22 ve 24°'lik eğimlerde dinamik sarsma masası deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler süresince masaya hareket veren motorun devri kademeli şekilde arttırılarak, zamanla artan ivme değerleri fiziksel yamaç modeline uygulanmıştır. Deneylerde masanın yatay hareket mesafesi 30 mm olacak şekilde ayarlanmış ve tüm deneyler bu mesafede gerçekleştirilmiştir. Deneyler süresince veri kayıt aralığı hareketin hassas olarak algılanabilmesi için 10ms (100 veri/s) olarak seçilmiştir. Deney düzeneği ve ayrıntıları Şekil 7.6'da verilmiştir.



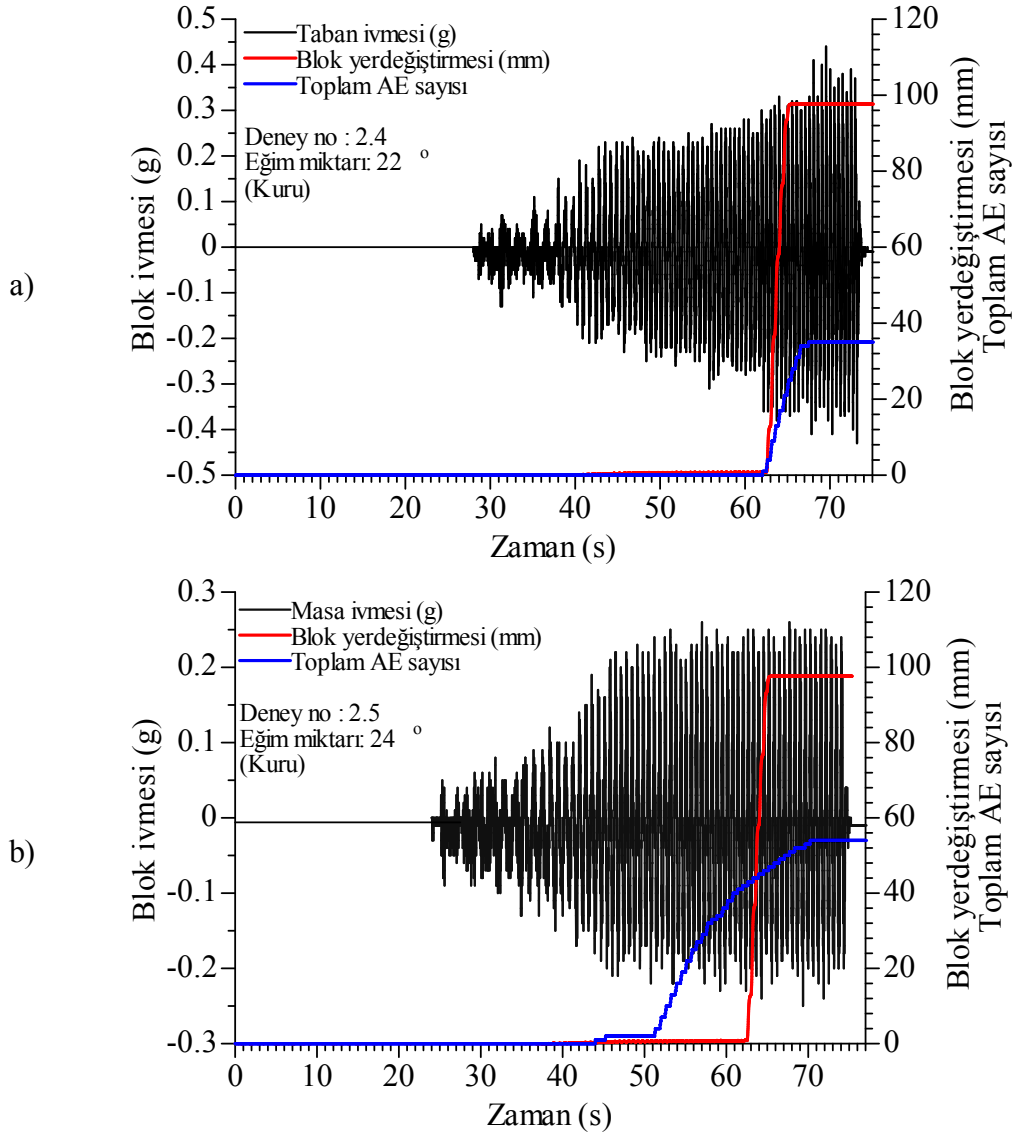
Şekil 7.6 : Dinamik model deney düzeneği ve ölçüm sistemlerinin görünümü.

Dinamik model deneyleri öncelikle kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Farklı eğim açılarında kritik ivme değerinin aşılmasıyla bloğun hareketi lazer mesafe ölçerlerle izlenmiştir. Deneyler süresince masada üretilen ivme ise, yatay olarak yerleştirilen bir ivme ölçerle kaydedilmiştir. Hareket sırasında meydana gelen AE aktivitesi de izlenmiş ve bloğun kayma miktarıyla AE arasındaki ilişki araştırılmıştır. Motor devri, dolayısıyla üretilen ivme değerleri, sıfırdan başlayarak yenilme gerçekleşene değin arttırılarak uygulanmıştır. Bu şekilde depremlerin oluşturduğu tekrarlı dinamik yüklere benzer ve zamana bağlı olarak artan ivmeler modele uygulanabilmiştir.



Şekil 7.7 : 16, 18 ve 20 °'lik eğimlerde gerçekleştirilen dinamik deneylerde masa ivmesi, blok hareketi ve AE aktivitesi arasındaki ilişki.

Kaymanın gözleendiği anda devir sabitlenmiş ve bloğun hareket edebileceği mesafe tamanlanana değin deneye devam edilmiştir. Şekil 7.7’de 16, 18 ve 20°lik, Şekil 7.8’de ise 22 ve 24° lik eğimlerde gerçekleştirilen deneylere ait yatay ivme değerleri ve yerdeğiştirme miktarları verilmiştir.



Şekil 7.8 : 22 ve 24°'lik eğimlerde gerçekleştirilen dinamik deneylerde masa ivmesi, blok hareketi ve AE aktivitesi arasındaki ilişki.

Dinamik kuru deneylerde beklendiği gibi, eğim açısı arttıkça bloğu duraysız hale getiren kritik ivme miktarlarının beklendiği gibi azaldığı görülmüş olup, 16° eğimde, yatay masa ivmesi 0.45 g'lik değere ulaştığında bloğun duraysız hale geldiği görülmüş eğimin 24°'ye doğru çıkarılmasıyla bloğu duraysız hale getiren ivme değerinin azaldığı, 24°'lik eğimde kritik ivme değerinin 0.22g'ye düştüğü gözlenmiştir (Tablo 7.5). Deneylerde, blok hareketi, eğim yönünde ve kritik ivmenin aşılması koşuluna bağlı olarak kademeli olarak gerçekleştirmiştir. Bloğun hazne

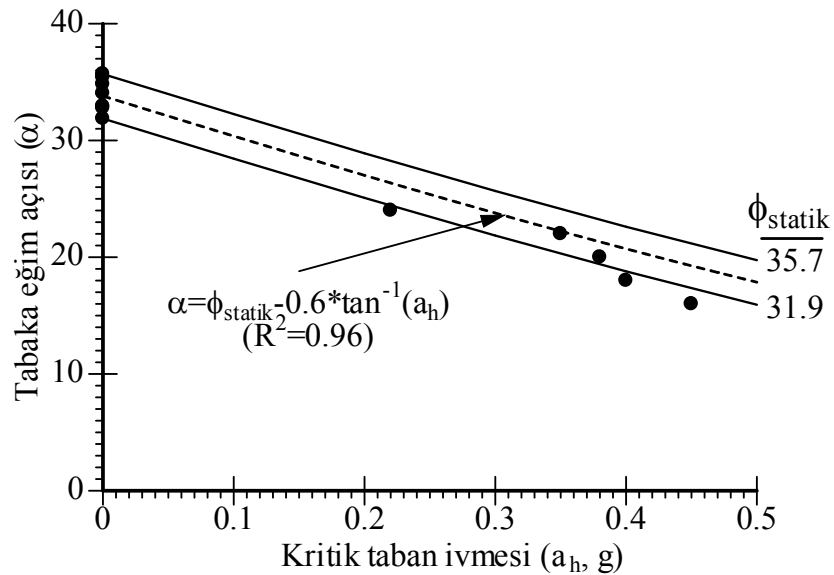
sınırına kadar hareket edebileceği mesafe, bloğun yerleştirildiği başlangıç konumuna bağlı olarak, en fazla 10-12 cm kadardır. Farklı eğim açılarında gerçekleştirilen dinamik deneylerde, blok hareketinin görüldüğü ivme değerlerindeki dakikadaki devir, hız, frekans ve periyot değerleri de Tablo 7.4’de birlikte verilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği gibi, deneyler süresince AE aktiviteleri de kaydedilmiştir. Masanın hareketi sırasında AE veri alım eşiği ayarlandığından, sadece blok kaymasına ilişkin AE aktivite sayıları sağlıklı olarak kaydedilebilmiştir.

Tablo 7.4 : Dinamik deneylerde yenilme anındaki hareket özellikleri.

Deney no	Eğim açısı (°)	Kritik ivme (g)	devir/dk	Hız V, (cm/s)	Frekans F, (Hz)	Periyot T, (s)
2.1	16	0.45	131	24.58	2.44	0.41
2.2	18	0.40	123	22.92	2.29	0.44
2.3	20	0.38	119	22.09	2.21	0.45
2.4	22	0.35	114	21.07	2.12	0.47
2.5	24	0.22	87	15.74	1.62	0.62

8 kez tekrarlanan statik eğimlendirme ve 5 farklı eğim için gerçekleştirilen dinamik sarsma masası deneylerinden elde edilen toplam 13 adet kritik kayma açısı değerleri Şekil 7.9’da sunulmuştur. Elde edilen taban eğimi, kritik ivme ve statik kayma açısı verileri arasında, eşitlik 7.15’de verilen ilişki belirlenmiştir. Ayrıca, eğimlendirme deneylerinden elde edilen en küçük ve en büyük tabaka eğim miktarı değerlerinin artan kritik ivme değerleriyle değişimi Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9 : Dinamik model deneylerde elde edilen eğim miktarı, statik kayma açısı ve kritik ivme arasındaki ilişki.

$$\alpha = \phi_{statik} - 0.6 * \tan^{-1}(a_h) \quad (8.15)$$

Burada;

α : Taban (tabaka) eğimi ($^{\circ}$),

ϕ_{statik} : Statik kayma açısı ($^{\circ}$),

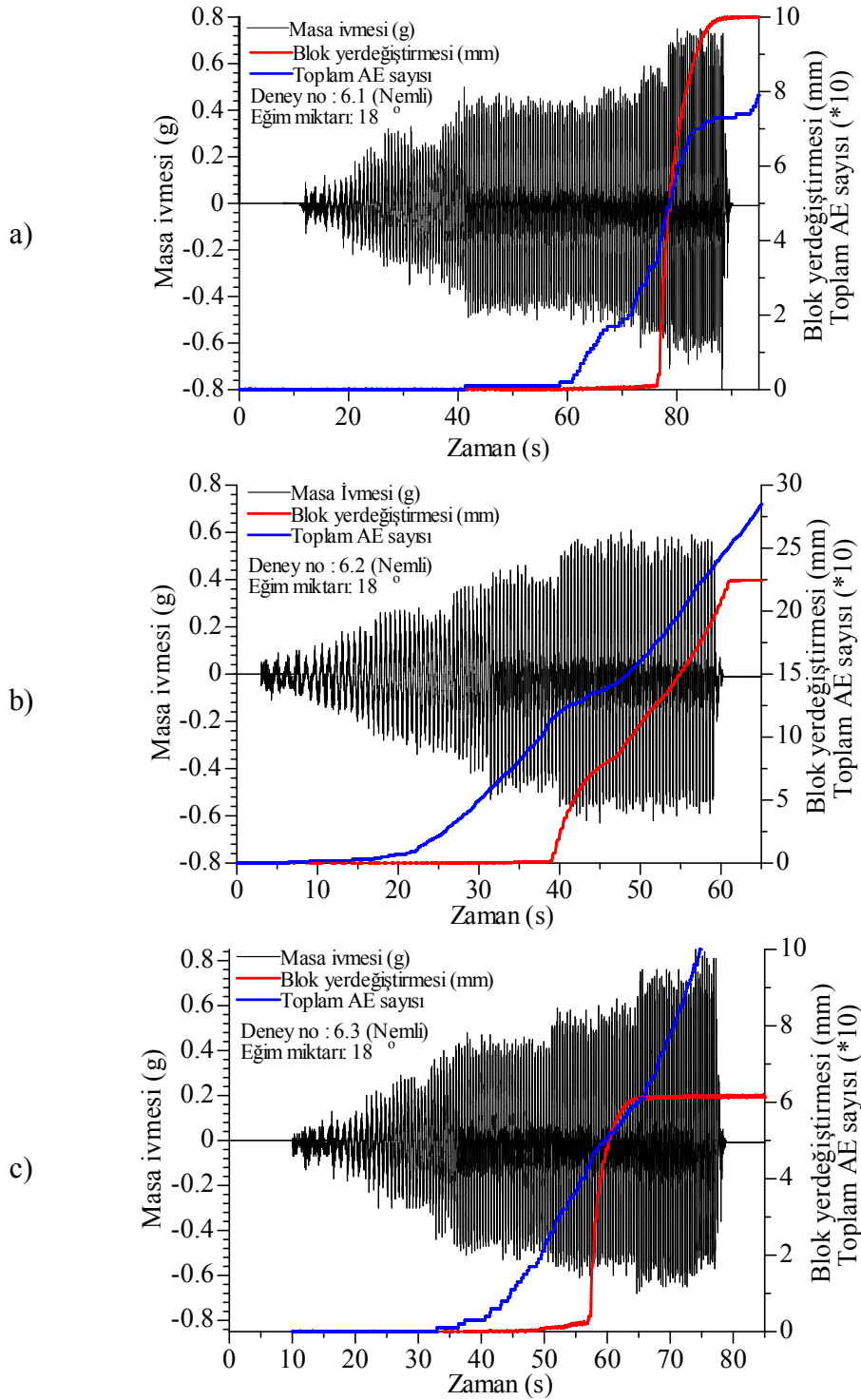
a_h : Kritik taban ivmesi (g),

Dinamik fiziksel model deneylerinde 17° eğimde, blok hareketinin yaklaşık 0.42 g'lik ivme değerinde başladığı görülmüştür.

Deneylerde AE aktivitelerinin bloğun harekete başlamasıyla eş zamanlı olarak başladığı görülmüştür. AE algılayıcısının kayan blokta ve blok tabanına yani kayma yüzeyine 3 cm gibi çok kısa bir mesafede konumlandırılmış olmasından dolayı, AE aktivitelerinin kayma ile eş zamanlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. 22° 'lik eğimde gerçekleştirilen deney dışında tüm deneylerde AE aktivite sayıları 60 civarında belirlenmiştir. Bu durum, kayma miktarının yaklaşık 100 mm olması ile tutarlıdır.

Kuru koşullarda gerçekleştirilen dinamik kayma deneylerinden sonra nemli koşullarda da deneyler gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, nemli koşulların sağlanabilmesi için üst blok kaldırılıp ara seviye deneyden hemen önce spreyle nemlendirilmiştir. Nemli koşullardaki dinamik deneyler, malzemenin suyu çok hızlı emerek kısa sürede dağılmaya başlamasından dolayı 18° 'lik eğimde ve üç kez tekrarlanarak yapılabilmektedir (Şekil 7.10). 18° 'de gerçekleştirilen dinamik nemli deneylerde, öngörülenin aksine, kuru koşullardaki deneylerde belirlenen 0.4g'lik kritik ivmeden daha yüksek ivmede, yaklaşık 0.6g'de bloğun harekete başladığı görülmüştür.

Kumtaşı ara seviyesindeki nemin sürtünmeyi azaltacak yönde rol oynayarak kuru koşullardakine göre daha düşük kritik ivme değerinde bloğun hareket etmesi beklenirken, bu durumun aksine kritik ivme değerinin nemli koşullarda % 150 oranında yükseldiği, blok hareketinin zorlaştığı ve marnın suyu emerek ara yüzeyde bir yapışma oluşturduğu görülmüştür.

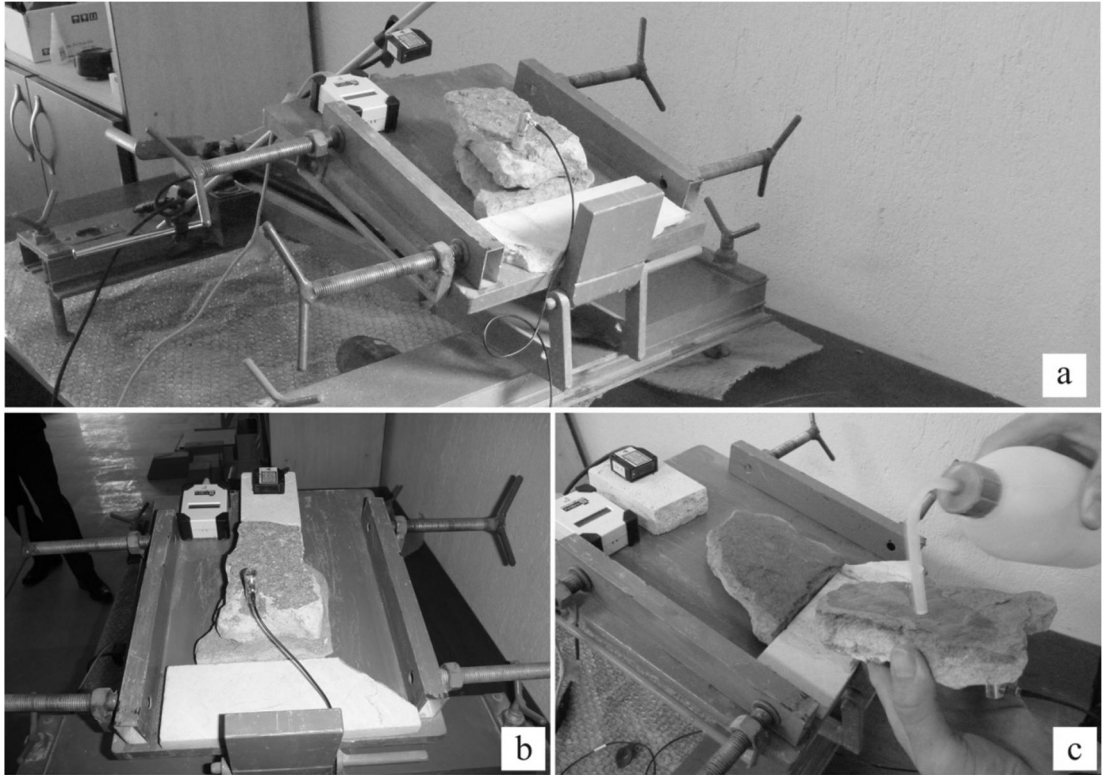


Şekil 7.10 : 18°'lik eğimde nemli koşullarda gerçekteştirilen dinamik deneylerde masanın ürettiği ivme ile blok hareketi arasındaki ilişki.

7.3 Şok Deneyleri

Hazırlanan fiziksel modelin içerdiği kumtaşı ara seviyesi boyunca tekrarlı yüklemeler koşullarında marn bloğunun hareketi gözlemlendikten sonra tekrarlı olmayan, diğer bir deyişle, tekdüze yüklemeler altındaki blok hareketinin izlenmesi amacıyla şok

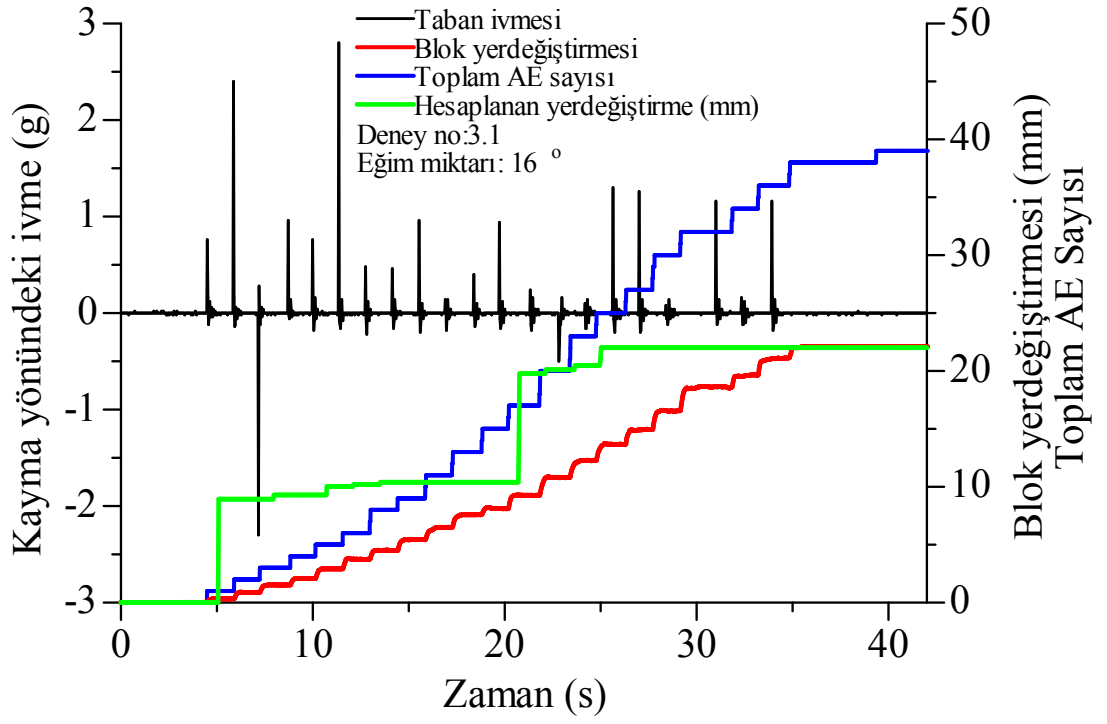
deneyleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, bazı deprem ivme kayıtlarında görülen tekrarlı olmayan doruk ivme değerleri şok deneyleriyle temsil edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca patlatma, kazı çalışmaları, ağır araç hareketleri ve çeşitli kütle hareketleri gibi yapay ve doğal etkenlere bağlı olarak meydana gelebilecek tekrarlı olmayan dinamik yükler de şok deneyleriyle temsil edilmeye çalışılmıştır. Laboratuvar koşullarında modeller üzerinde şok deneylerinin gerçekleştirilmesine yönelik herhangi bir standarda rastlanılamamıştır. Tezin bu aşamasında yapılan deneyler, yüzeyi lastik kaplı olan bir çekicinin model düzeneğinin belirli bir noktasına ard arda vurulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında ivme ve blok yerdeğiştirme miktarları kaydedilmiştir. Hazırlanan modelin büyük boyutlu olmasından dolayı, harekete neden olacak düzeyde şok etkisi oluşturulamamıştır. Bunun yerine yine laboratuvar koşullarında daha küçük boyutlu bir eğilendirme cihazı kullanılarak, araziden alınan doğal kumtaşı ara seviyesi içeren marn örnekleri üzerinde şok deneyleri yapılmıştır (Şekil 7.11).



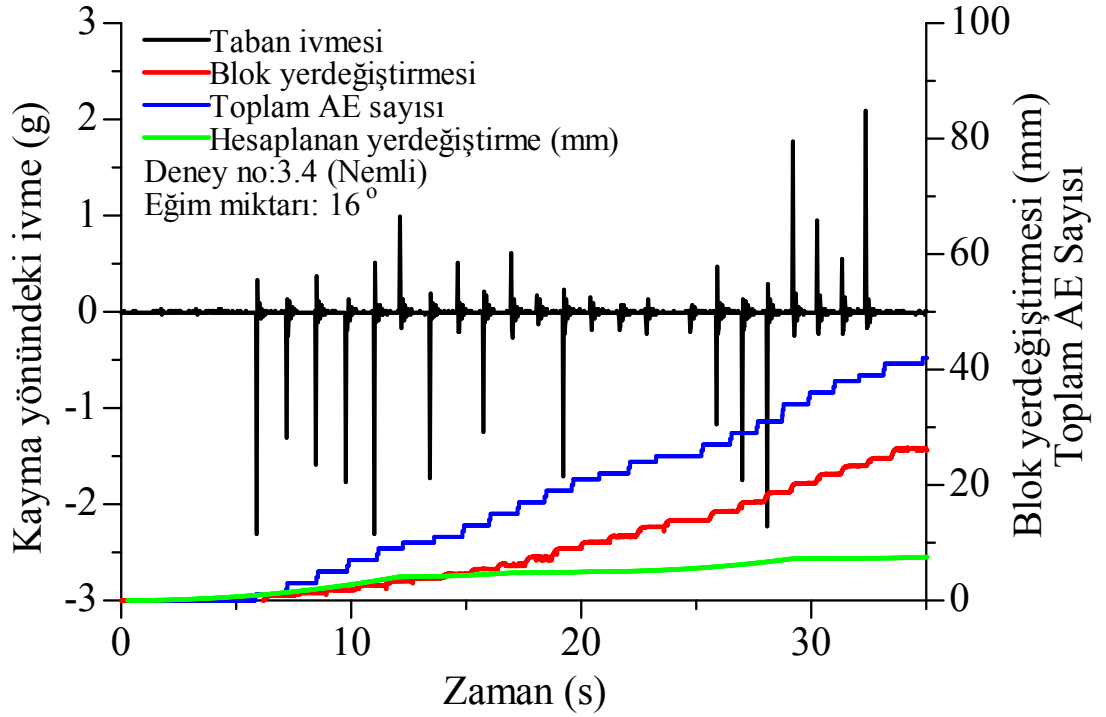
Şekil 7.11 : Şok deney düzeneğinden görünüm (a, b) ve nemlendirme işlemi (c).

Bu deneyler, kuru ve nemli koşullarda 16, 20 ve 24° eğim miktarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde şok etkisiyle oluşturulan kayma yönündeki ivme miktarları, blok yerdeğiştirmesi ve AE aktivitesi eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Kuru ve nemli koşullardaki deney sonuçları 16°'lik eğimde yapılan deneyler için

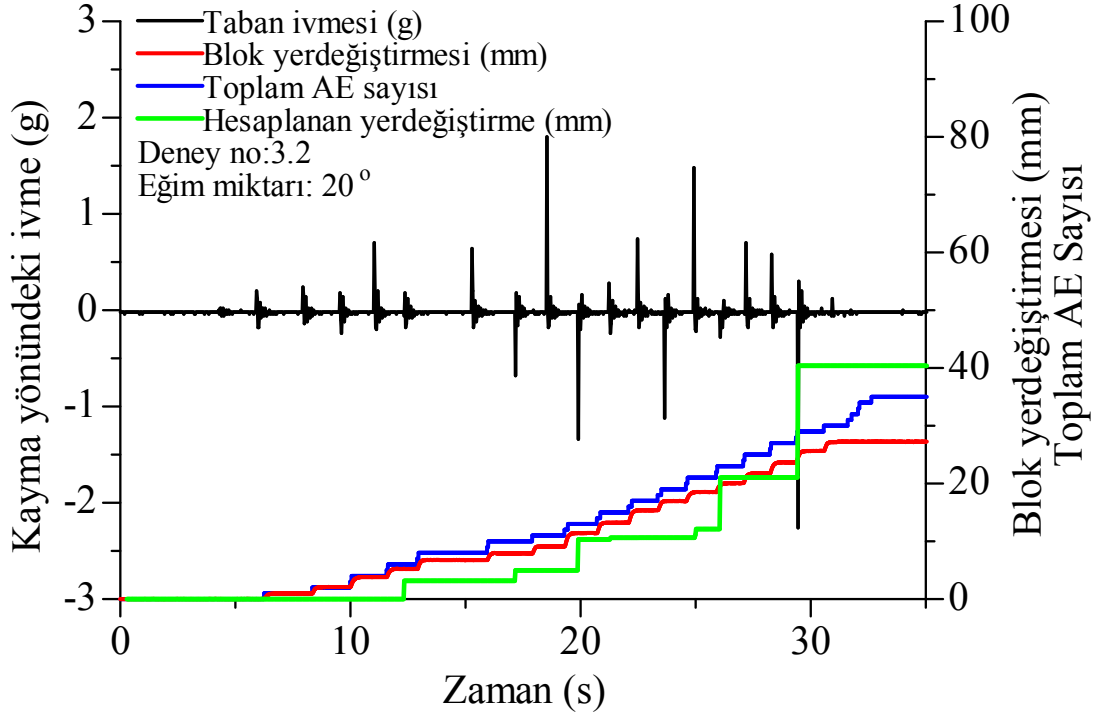
grafik olarak Şekil 7.12 ve 7.13’de, 20° ve 24° ’lik eğimde yapılan deney için ise sırasıyla Şekil 7.14, 7.15, 7.16 ve 7.17’de verilmiştir.



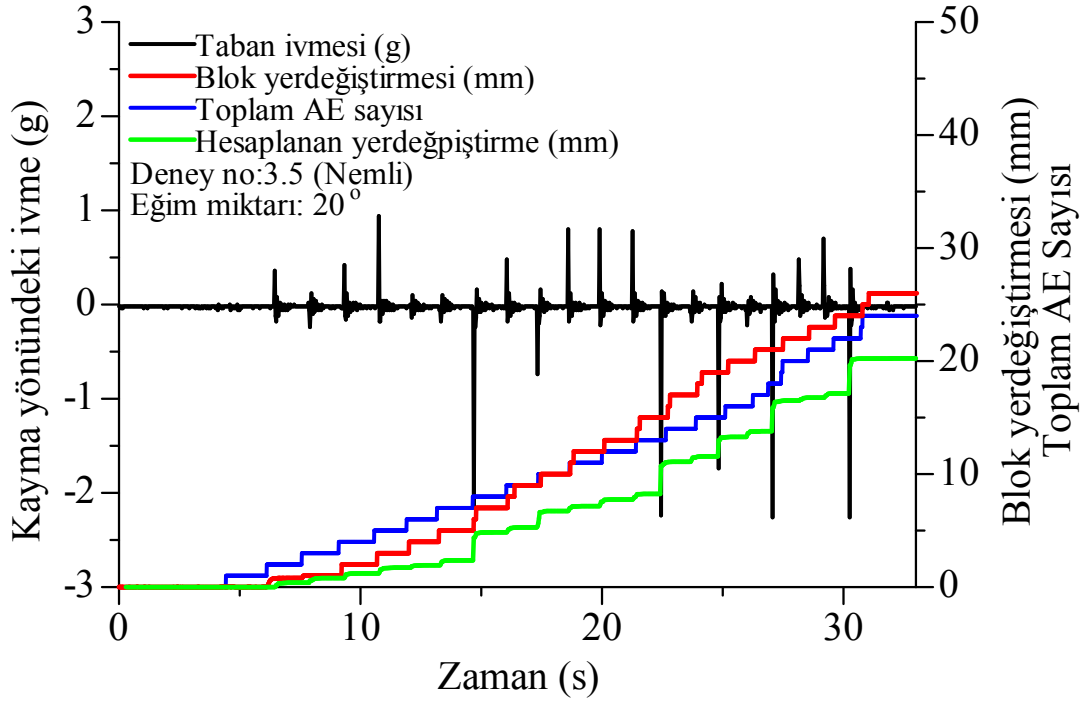
Şekil 7.12 : Kuru koşullarda, 16° ’lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları.



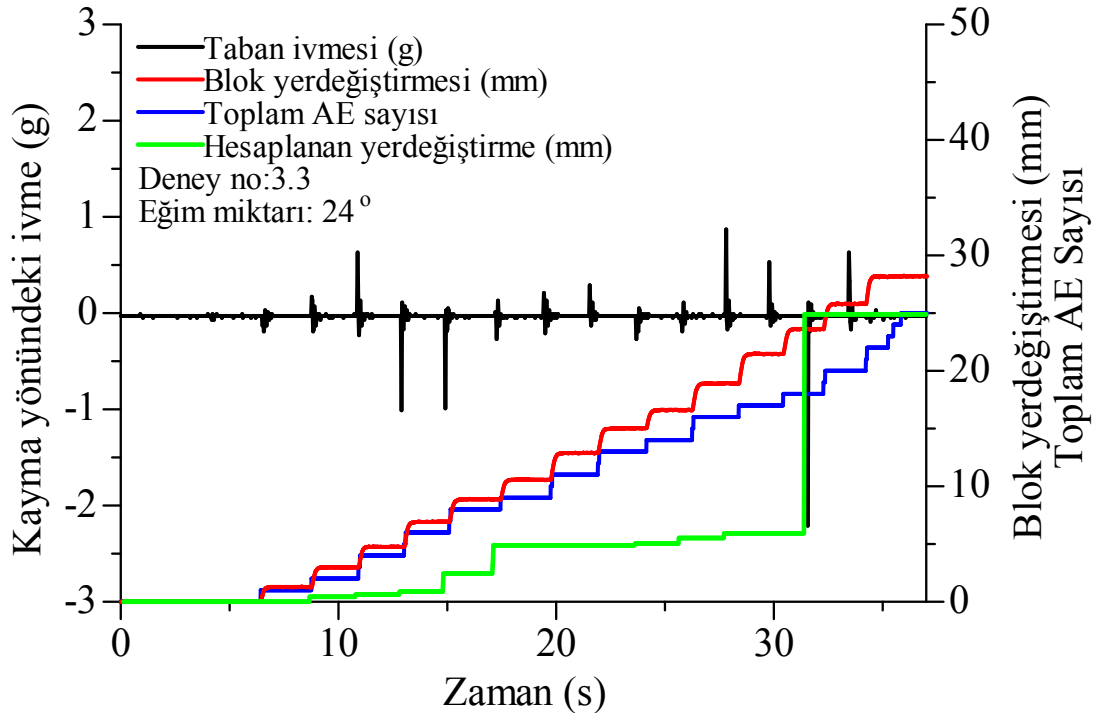
Şekil 7.13 : Nemli koşullarda, 16° ’lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları.



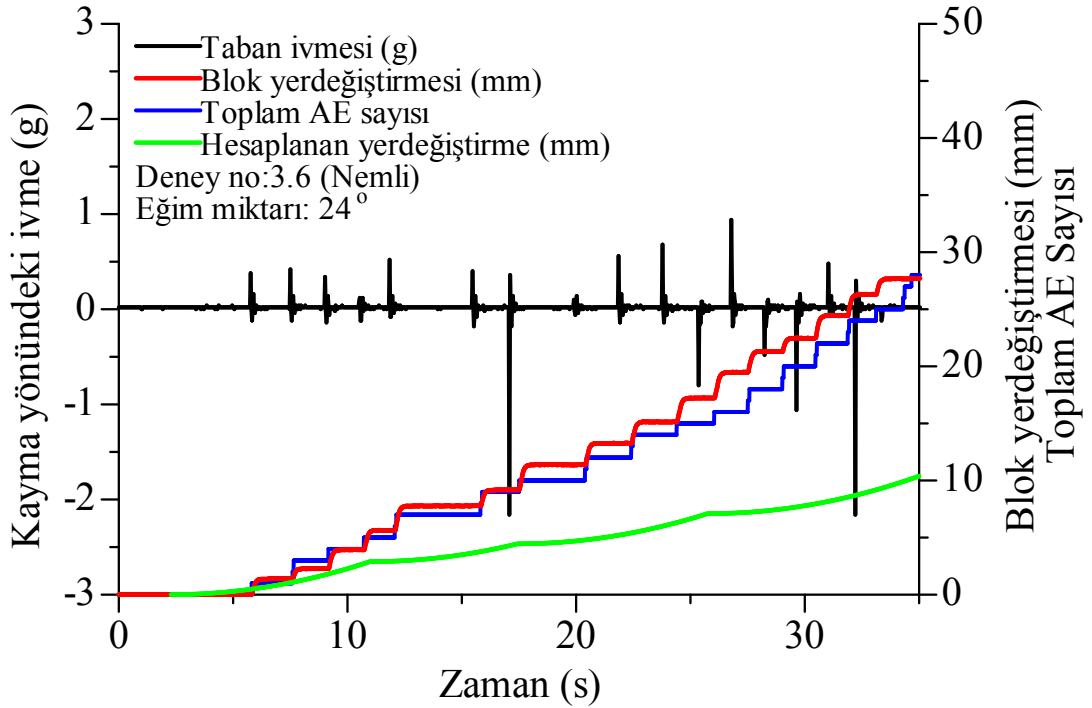
şekil 7.14 : Kuru koşullarda, 20°'lik eğimde geręekleřtirilen şok deneyi sonuçları.



şekil 7.15 : Nemli koşullarda, 20°'lik eğimde geręekleřtirilen şok deneyi sonuçları.



Şekil 7.16 : Kuru koşullarda, 24°'lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları.



Şekil 7.17 : Nemli koşullarda, 24°'lik eğimde gerçekleştirilen şok deneyi sonuçları.

Şok deneylerinde ölçülen ivme ve blok yerdeğiştirmesi değerleri bir sonraki alt bölümde ayrıntısı verilecek olan ve ivme etkisiyle kayan bloğun hareket miktarını hesaplayan bir yazılımla ayrıca hesaplanarak ölçülen yerdeğiştirme miktarları ile

ilgili grafiklerde sunulmuştur. Kuru koşullarda ölçülen ve hesaplanan miktarlar arasında bir uyum söz konusu iken, nemli koşullarda ise ölçülen ve hesaplanan miktarlar arasında farklılık göze çarpmaktadır. Eğimlendirme deneylerinde olduğu gibi, suya karşı hassas olan marnın nemlendikçe kayma olgusunun güçleştiği görülmüştür. Şok deneylerinde blok hareketine neden olan ivme değerlerinin değişkenlik göstermekle birlikte, 2-3 g'ye kadar yükseldiği göze çarpmaktadır. Bu durumda örneğin 16° eğimdeki dinamik model deneylerinde 0.45g'lik ivme değerinde hareket gözlenirken, 16° eğimdeki şok deneylerinde ise 1g ve üzerindeki ivme değerlerinde blok hareketi gözlenmiştir. Bu durumda harekete neden olabilecek tekrarlı olmayan dinamik yüklemelerden oluşan ivmenin, tekrarlı yüklemelerde oluşan ivmelerin yaklaşık iki katından fazla olduğu görülmektedir.

7.4 Sayısal Analizler ve Deney Verileriyle Karşılaştırılması

Bir şevin/yamacın gerek tasarımında gerekse tasarım sonrası uzun dönem performansı üzerinde herhangi bir dinamik etki altında meydana gelebilecek deformasyonların önemi çok büyüktür. Kalıcı şev yerdeğiştirmeleri çeşitli sayısal çözümleme teknikleri ile hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşımlardan ilk önerileni ve en yaygın olarak kullanılanı Newmark (1965)'a ait kayan blok analizidir. Bu yaklaşımda; eğimli bir kayma yüzeyi üzerindeki bloğa etkiyen statik ve dinamik kuvvetler blok ile taban arasındaki makaslama kuvvetini aştığı an bloğun hareket ettiği kabul edilmektedir. Newmark analizinde yapılan başlıca varsayımlar şunlardır; Kayan kütle rijit-plastik özelliktedir, kritik ivmeden düşük ivme değerlerinde yerdeğiştirme gerçekleşmez, kritik ivmenin aşılması koşulunda kayma yüzeyinde plastik deformasyon oluşur, kritik ivme gerinime bağlı değildir ve analiz boyunca sabit olarak kabul edilir ve dinamik koşullardaki gözenek suyu basıncı etkisi ihmal edilir (Newmark, 1965; Jibson, 1993'den).

Geleneksel Newmark analizi kullanılarak seçilen bir depreme ait ivme-zaman verisinin analiziyle sürtünmeli bloğun toplam hareketi belirlenebilmektedir. Toplam yerdeğiştirme miktarı, ivme kaydında kritik ivmeyi aşan değerlerin zamana bağlı olarak iki kez integralinin alınması yoluyla hesaplanmaktadır. Uygun deprem ivme kaydının seçimiyle ilgili karmaşanın ortadan kaldırılması ve hesaplama kolaylığı sağlaması bakımından, Newmark yerdeğiştirmesi tahmini için bir çok basitleştirilmiş yöntem önerilmiştir (Franklin ve Chang, 1977; Makdisi ve Seed, 1978; Jibson ve

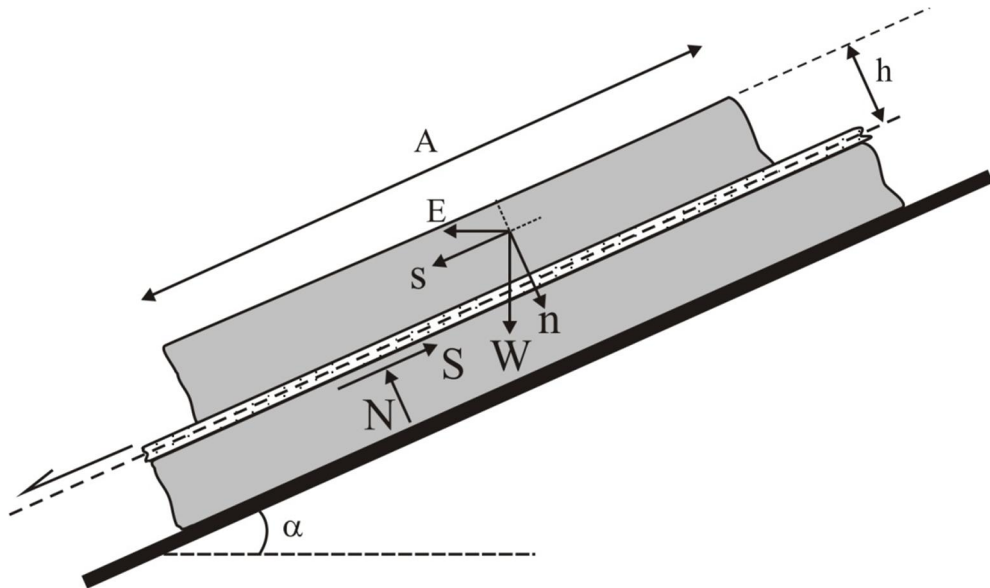
Keefe, 1988; Ambraseys ve Menu, 1988; Yegian ve diğ., 1991; Jibson, 1993; Jibson ve diğ., 1998; Miles ve Ho, 1999). Bu yaklaşımlar çoğunlukla, gerçek ivme kayıtlarının çift integraliyle elde edilen yerdeğiştirmelerin kullanıldığı regresyon analizleriyle geliştirilmiştir. Jibson ve diğ. (1998) tarafından geliştirilen yaklaşım en popöler olanlarından biridir. Bu yaklaşımda, depremin yıkıcı etkisinin göz önüne alınması amacıyla Arias şiddeti kullanılmıştır. Bu yaklaşım, coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak bölgesel heyelan duyarlılık haritalarının oluşturulmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Dinamik deneylerde ölçölen yerdeğiştirme miktarlarının sayısal çözümlerle karşılaştırılması amacıyla Newmark kayan blok analizi yaklaşımına benzer bir yaklaşım olan ve Aydan ve Ulusay (2002) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda yerdeğiştirmelerin hesaplanma aşamaları aşağıda verilmiştir.

Kayan bloğa etkiyen kuvvetlerin (şekil 7.18) etkisinde n ve s yönleri için denge koşulu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\sum F_s = S - W \sin \alpha - E \cos \alpha = m \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (7.16)$$

$$\sum F_n = N - W \cos \alpha + E \sin \alpha = m \frac{d^2 n}{dt^2} \quad (7.17)$$



şekil 7.18 : Eğimli kayma yüzeyi üzerindeki bloğa etkiyen kuvvetler (Aydan ve Ulusay, 2002'den değiştirilerek).

n yönündeki ivme ihmal edilip, önceki alt bölümde de belirtildiği gibi hareket düz ve pürüzsüz kayma yüzeyi boyunca Mohr-Coulomb yenilme ölçütüne uygun olarak gelişmektedir (Eşitlik 7.18).

$$\tau.A = c.A + \sigma .A \tan \phi \quad (7.18)$$

7.18 eşitliği sadeleştirilirse 7.19'da verilen şekle dönüşür.

$$\frac{S}{N} = \tan \phi \quad (7.19)$$

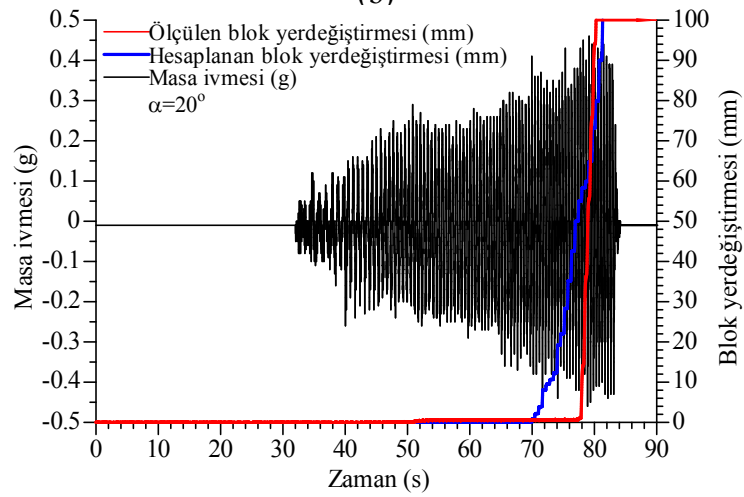
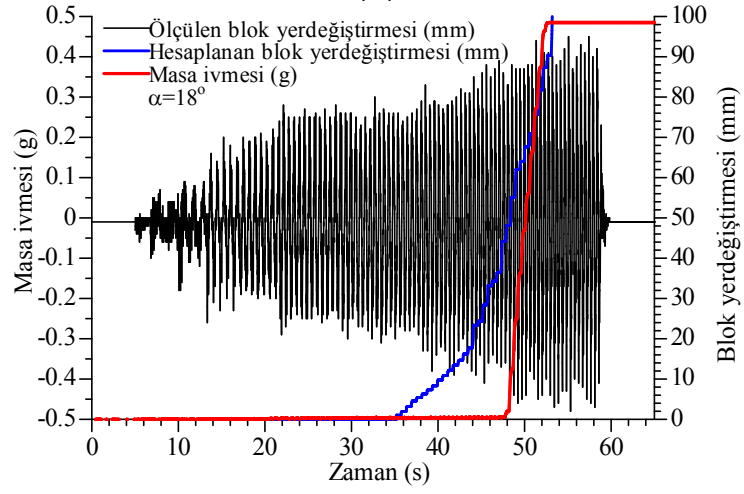
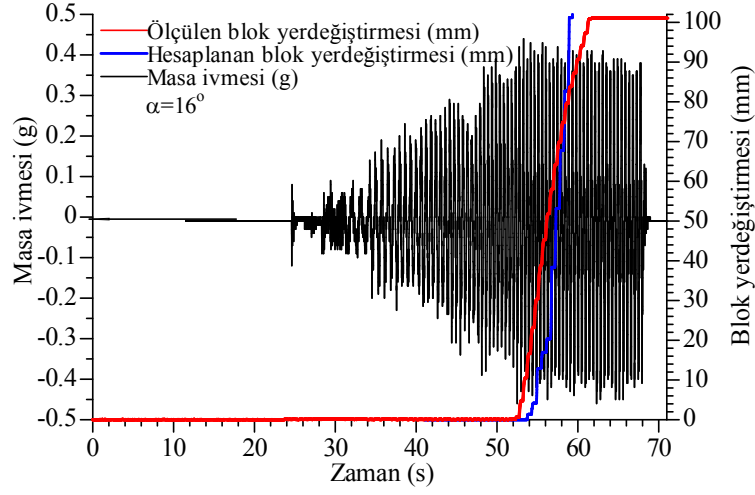
$$\frac{W \sin \alpha + E \cos \alpha - m \frac{d^2 s}{dt^2}}{W \cos \alpha - E \sin \alpha} = \tan \phi \quad (7.20)$$

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = gm(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) + a_h(t)m(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) \quad (7.21)$$

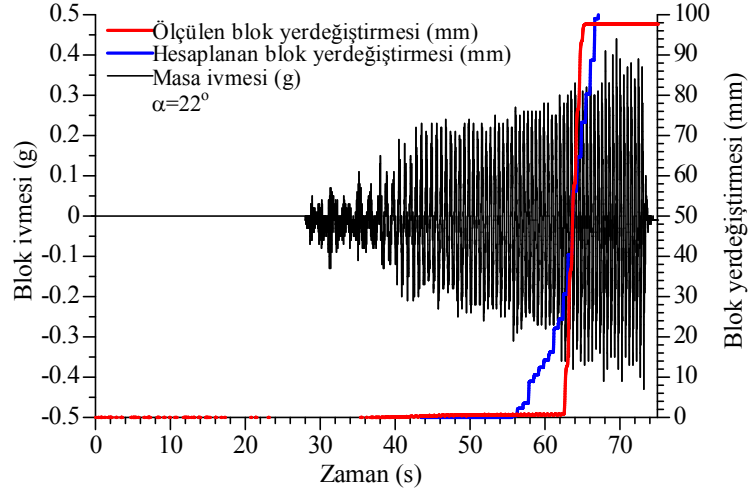
Yukarıdaki ifade sadeleştirilirse aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\frac{d^2 s}{dt^2} = g(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) + a_h(t)(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) \quad (7.22)$$

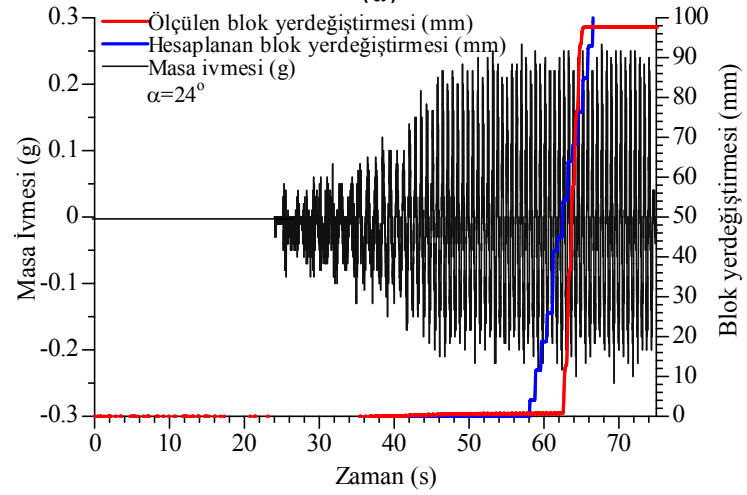
Doğrusal ivme yöntemine göre yukarıdaki eşitlik çözülerek kayan bloğun hız ve yerdeğiştirilmesi hesaplanmaktadır. Aşağıda hesaplanan yerdeğiştirme miktarları ölçülen miktarlarla karşılaştırılmıştır. 16, 18, 20, 22 ve 24° eğimlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen yer değiştirme miktarları ile hesaplanan yerdeğiştirmelerin benzer olduğu görülmektedir. Şekil 7.19'da, 16, 18 ve 20° eğimde, Şekil 7.20'de ise 22 ve 24°'de gerçekleştirilen deneyler için ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirme miktarları verilmiştir. Hesaplamalarda daha önce gerçekleştirilen deneyler ışığında kohezyon ihmal edilmiş ve eğimlendirme deneylerinden elde edilen statik ve dinamik sürtünme açıları kullanılmıştır.



Şekil 7.19 : 16, 18 ve 20°'lik eğimlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirme miktarlarına ilişkin grafikler.



(a)



(b)

Şekil 7.20 : 22 ve 24°'lik eğimlerde gerçekleştirilen deneylerde ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirme miktarlarına ilişkin grafikler.

8. GÜNDOĞDU HEYELANININ STATİK VE DİNAMİK DURAYLILIK ANALİZLERİ

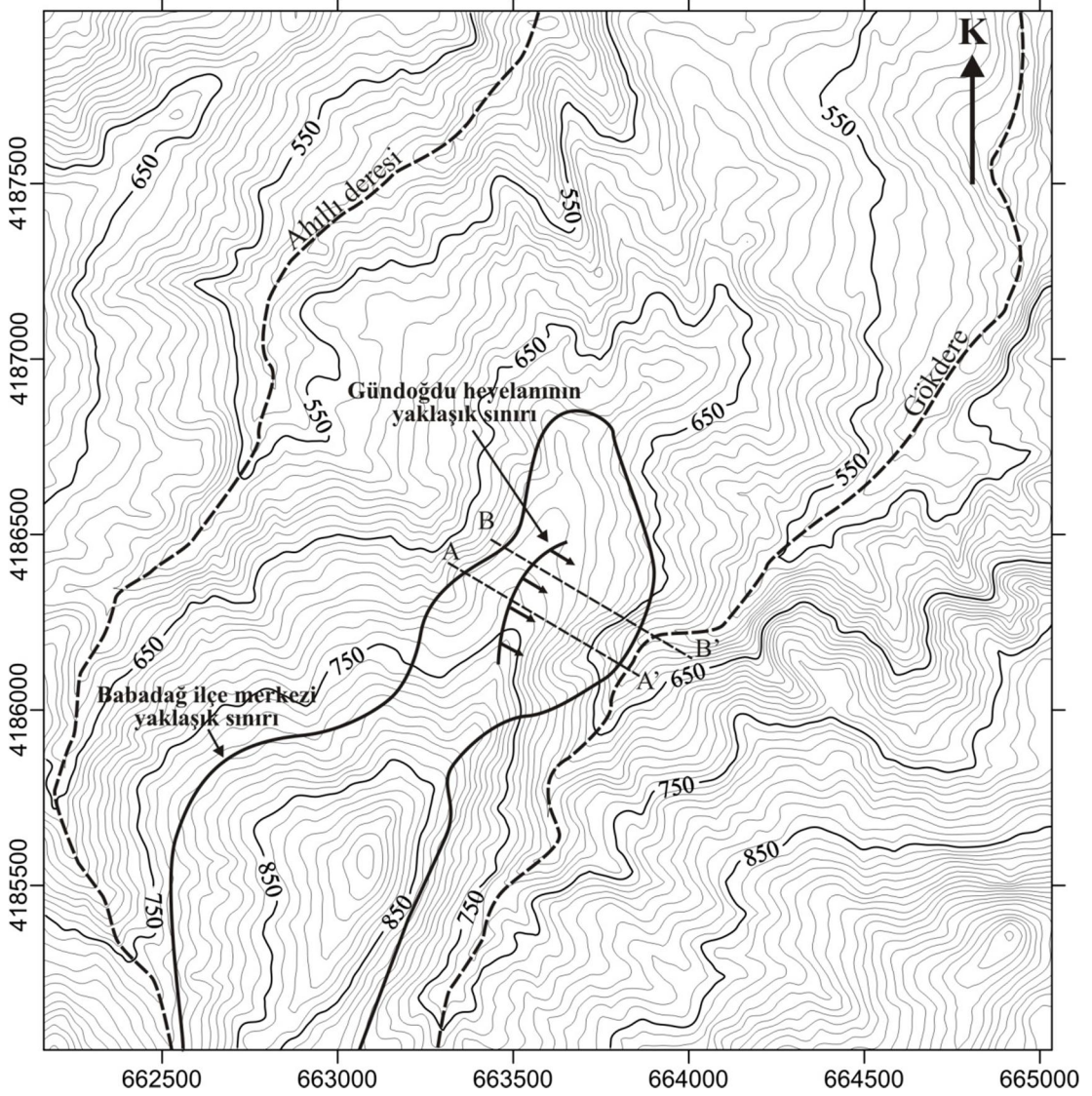
8.1 Statik ve Psödostatik Şev Duraylılığı Analizleri

Yamaç ve şevlerin statik duraylılığının incelenmesinde, limit denge analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu analizlerde, temel olarak potansiyel bir yenilme yüzeyi üzerindeki kütlelerin moment veya kuvvet dengesi esas alınarak, potansiyel yenilme yüzeyi üzerindeki kütlelerin rijit olduğu ve kaymanın sadece yenilme yüzeyi boyunca gerçekleştiği kabul edilir. Kayma yüzeyindeki her noktadaki dayanımın eşit olduğu kabul edildiğinden, güvenlik katsayısı yenilme yüzeyi boyunca sabittir (Kramer, 1996). Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bulgular ışığında güncel değerlendirmelerin yapılması amacıyla statik koşullarda duraylılık analizleri gerçekleştirilmiş, ayrıca söz konusu yamaç hareketinin depremsellik açısından aktif bir bölgede yer alması ve inceleme alanına yakın odak merkezli olası bir depremin meydana gelmesi olasılığı ile yamacı tetikleyebilecek ivme değerlerinin duraylılığa etkisini belirlemek amacıyla psödostatik duraylılık analizleri yapılmıştır.

Uzun süredir devam eden Gündoğdu yamaç hareketi, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, jeolojik yapının denetiminde ve tabaka düzlemlerine paralel olarak gelişmektedir. Çeşitli faktörlerin, özellikle aşırı yağışın etkisiyle değişen hızlarda süregelen hareket, neden olduğu yapısal hasarlar ve etkileriyle ilçe halkını olumsuz yönde etkilemektedir. Sürekli ve değişen hızlardaki bu hareket, ilginç bir yamaç duraysızlığı sorunu olarak göze çarpmakta ve günümüze değin belirgin ve ani bir yenilme ile sonuçlanmaması hareketin duraylı ve duraysız koşullar arasında değişen bir karakterde olduğunu göstermektedir (Çevik, 2003).

Duraylı ve duraysız koşullar arasında değişen yamaç hareketi, limit denge ve psödostatik limit denge duraylılık analizleri yapılarak incelenmiştir. Analizler Gündoğdu Mahallesi sınırları içinde, yeraltısuyu seviyesi ve kuyu içi deformasyon ölçümleri alınan iki ayrı kuyuya yakın yerlerden alınan iki enine kesit üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kesitler, önceki çalışmalarda belirtilen (Tano ve diğ., 2003, 2006

a, b; Aydan ve diğ., 2003) ve çeşitli hareket izleme çalışmaları sonucunda belirlenen hareket yönü vektörüne paralel olarak alınmıştır. Kesit hatları Şekil 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.1 : Duraylılık analizlerinde kullanılan AA' ve BB' kesit hatlarının konumları.

8.1.1 Analizlerde kullanılan parametrelerin seçimi

İnceleme alanında görülen kumtaşı-marn ardalanmasının tabaka eğimleri, ilçe merkezinin kurulu olduğu kotlardan güneydoğudaki Gökdere kotuna yakın alt seviyelere doğru artmaktadır. Duraylılık analizlerinde kullanılacak kayma düzleminin derinliğinin kestirilebilmesi için SK-3 kuyusunda ölçülen kuyu içi deformasyon verileri incelenmiştir. Tezin beşinci bölümünde de belirtildiği gibi, cihazın yerleştirildiği 06.08.2005 tarihinden itibaren zaman zaman farklı derinliklerde düşük miktarda deformasyonlar görülmüş, ancak 2009 yılı başından

Mayıs ayına kadar geçen yaklaşık 5 aylık dönemde 28.5 m derinde belirgin bir deformasyon artışı söz konusu olmuştur. Deformasyon artışının görüldüğü bu seviye kayma yüzeyi olarak yorumlanmıştır. Enine kesitlerde SK-3 kuyu yerinde, 28.5 m derinlikten dere kotuna doğru çizilen kayma yüzeyinin eğimi 17° olarak belirlenmiştir. Bu eğim miktarının ortalama tabaka eğimi ile uyumlu olduğu görülmüş ve analizlerde kayma düzlemi bu şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, Çevik (2003)'ün yaptığı çalışmada da belirttiği ve arazi çalışmalarında da opuğa yakın kotlarda kayma yüzeyi gözlenmiştir. Bu durum da analizler için tanımlanan kayma yüzeyini desteklemektedir.

Yeraltısuyu seviyesinin tanımlanabilmesi amacıyla SK-2 kuyusunda ölçülen su seviyesi derinliği verilerinden yararlanılmıştır. Bu kuyuda, yağışlardan sonra kuyu içine suyun sızmadığı ve ölçülen su seviyesi derinliği uzun dönemli yeraltısuyu seviyesini temsil ettiği görülmüştür. Diğer kuyularda ölçülen su seviyelerinin çok değişkenlik göstermesi ve yağışlardan hemen sonra yüzeyde biriken yağış sularının da kuyulara dolduğunun zaman zaman gözlenmesi nedeniyle bu kuyulara ait seviyeler analizlerde dikkate alınmamıştır. SK-2 kuyusunda, yeraltısuyu seviyesi ölçümlerine göre 2002 yılından günümüze değin yaklaşık 4.5 m'lik bir düşüm belirlenmiştir. SK-2 kuyusundaki yeraltısuyu seviyelerinin 2002 yılı ve günümüzdeki derinliği göz önünde bulundurularak kesitlere işlenmiş ve bu iki seviye için ayrı ayrı duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

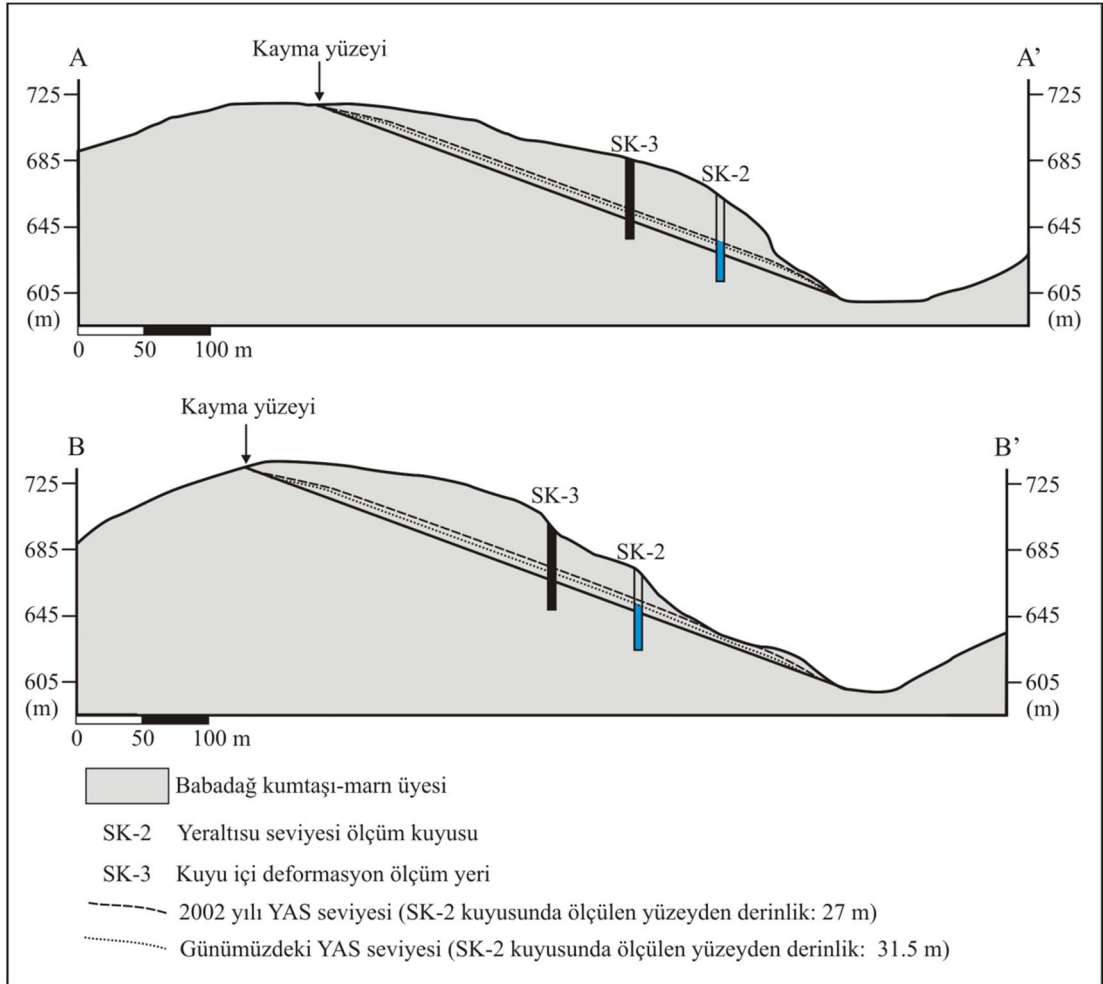
Analizlerde kullanılacak makaslama dayanımı parametrelerinin seçiminde, incelenen yamaç hareketinin devam ettiği göz önünde bulundurulduğunda, duraysızlığın doruk makaslama parametrelerinden daha çok artık parametrelerle kontrol edildiği kabul edilmelidir. Ancak, Çevik (2003)'ün yaptığı ve bu tez çalışmasında da ek deneyler yapılarak belirlenen makaslama dayanımı parametreleri incelendiğinde doruk ve artık değerler arasında büyük farkın olmadığı görülmüştür. Malzeme özelliklerinin belirlendiği alt bölümde makaslama deney verileri değerlendirilmiştir. Tüm makaslama parametreleri değerlendirildiğinde kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri sırasıyla 5 kPa ve 20° olarak belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır.

8.1.2 Gündoğdu heyelanının statik duraylılık analizi

Duraylılık analizleri, Kumsar (1993) tarafından geliştirilen Slopac adlı yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım, daha etkin kullanılabilmesi için seçilen

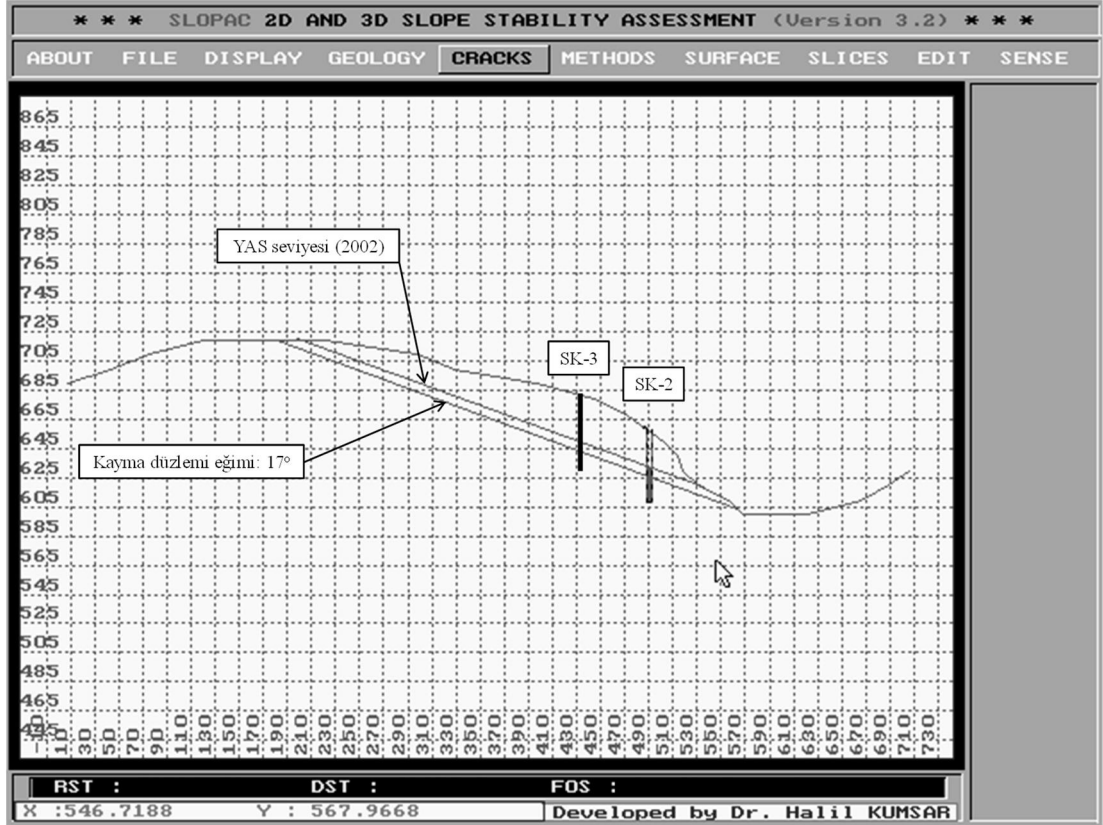
herhangi bir eğimde düzlemsel kayma yüzeyi ve yeraltısuyu profili tanımlanabilecek şekilde güncellenmiştir. Ayrıca, yamaç ve şevlerin duraylılığının incelenmesinde yaygın olarak kullanılan limit denge analizi yaklaşımlarından düzlemsel kayma duraysızlığı için Hoek ve Bray (1981) tarafından önerilen ve düzlemsel bir kayma yüzeyi boyunca kayan kütleyle etkiyen kuvvetlerin etkisi altında hesaplanan güvenlik katsayısına göre duraylılığın incelendiği yaklaşım yazılıma eklenmiş ve analizlerde kullanılmıştır.

İnceleme alanını kapsayan 1/25000 ölçekli topoğrafik harita sayısallaştırılmış ve yazılıma yüklenerek iki enine kesit alınmıştır. Kesitler üzerinde yukarıda belirtilen parametreler kullanılarak duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Yerleri Şekil 8.1’de verilmiş olan AA’ ve BB’ kesitleri, SK-2 ve SK-3 kuyu yerleri ve YAS seviyeleri ile birlikte Şekil 8.2’de verilmiştir. AA’ kesitinin Slopac yazılımına yüklenmiş haldeki görünümü ise Şekil 8.3’de verilmiştir.



Şekil 8.2 : Analizlerin gerçekleştirildiği AA’ ve BB’ kesitleri ve tanımlanan kayma yüzeyi ile YAS profilleri.

Analizler sonucunda hesaplanan güvenlik katsayıları Tablo 8.1’de verilmiştir. 2002 ve günümüzdeki ölçülen yeraltısuyu seviyelerine göre hesaplanan güvenlik katsayıları her iki kesit için de denge koşulu olan 1’in biraz üzerinde, 1.17 ile 1.28 arasında belirlenmiştir. Hareketin sürekli ve değişen hızlarda seyretmesi güvenlik katsayılarının denge koşulu olan 1’e yakın oluşuyla açıklanabilir. Çevik (2003) ve bu çalışma kapsamında belirlenen güvenlik katsayılarının benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 8.3 : AA’ kesiti ve YAS seviyesinin Slopac yazılımına yüklenmiş halde görünümü.

Tablo 8.1 : AA’ ve BB’ kesitleri için hesaplanan güvenlik katsayıları.

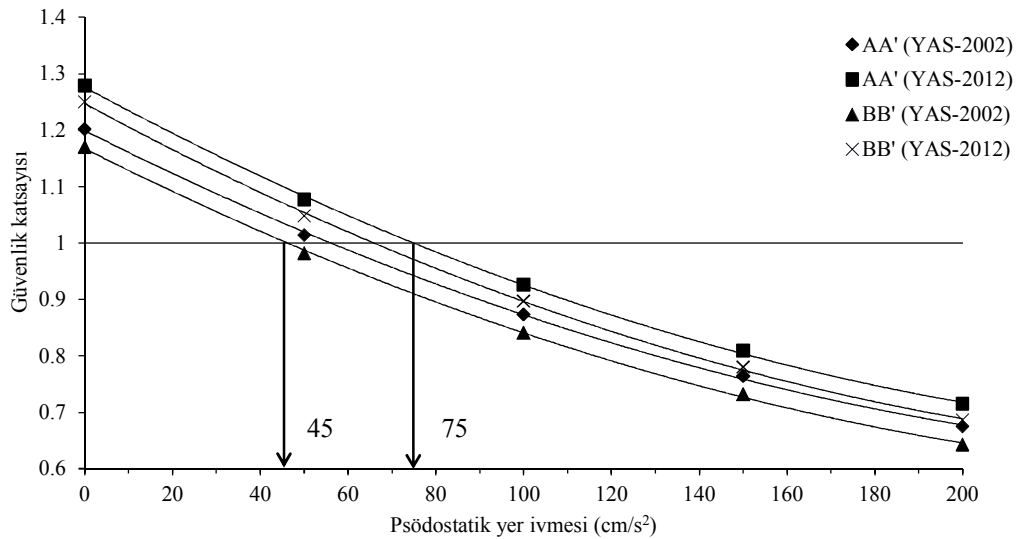
Kesit	YAS seviyesi (yüzeyden, m)	Yıl	Güvenlik katsayısı
AA’	27.0	2002	1.20
	31.5	2012	1.28
BB’	27.0	2002	1.17
	31.5	2012	1.25

Makaslama dayanımı değerlerinin özellikle yağışlı dönemlerde düşmesiyle güvenlik katsayılarının da düşeceği açıktır. deneylerinden elde edilen artık parametrelerin ortalamasının alınarak hesaplamaların yapıldığı göz önünde bulundurulduğunda daha düşük parametreler ile 1’den küçük, yüksek parametreler ile ise ortalama değerler için hesaplanan güvenlik katsayısından daha büyük değerlerin hesaplanacağı açıktır.

8.1.3 Gündoğdu heyelanının psödo statik analizi

Psödo statik analiz yaygın olarak kullanılmakta olup, bu yaklaşımda deprem yükleri statik kuvvetlermiş gibi göz önüne alınarak şevnin duraylılığı limit denge analizlerine benzer olarak araştırılmaktadır (Kramer, 1996). Ancak bu yaklaşımla depremlerin etkisiyle yamaçlarda meydana gelen kalıcı yer değiştirmelerin belirlenmesi olanaklı değildir.

İnceleme alanına yakın bir yerde meydana gelebilecek bir depremin yamaç hareketini tetikleyerek, ani ve büyük boyutlu bir hareketi meydana getirebilmesi riski söz konusudur. Bu kısımda yamacın, ne kadarlık ivme değerinde duraysız hale gelebileceğinin belirlenebilmesi amacıyla psödo statik analizler gerçekleştirilmiştir. Psödo statik analiz sonuçlarına göre iki kesit için de 2002 yılı ve günümüzdeki YAS seviyeleri göz önünde bulundurulmuş ve toplam 4 durum için, 45-75 cm/s² arasındaki ivme değerlerinde yamacın duraysız hale gelebileceği belirlenmiştir. Günümüzdeki YAS seviyesi durumu için AA' ve BB' kesitleri için yamacı duraysız hale getirebilecek ivme değerleri 70-75 cm/s² arasındadır. Hesaplanan psödo statik yer ivmesi değerlerinin 4 durum için statik güvenlik katsayıları ile değişimi Şekil 8.4'de sunulmuştur.



Şekil 8.4 : AA' ve BB' kesitleri için hesaplanan güvenlik katsayısı ile psödo statik yer ivmesi değerlerinin değişimi.

İlçe merkezinde kuvvetli yer hareketi ölçüm istasyonu 2007 yılında kurulduğundan, bölgede daha önce meydana gelmiş depremlerin ilçe merkezinde oluşturduğu ivme değerleri bilinmemektedir. Tezin 4. Bölümünde de belirtildiği gibi, 1900 yılından

günümüze değin Denizli ve çevresinde meydana gelmiş 5 ve daha yüksek büyüklükteki depremlerin Babadağ ilçe merkezinde meydana getirmiş olabileceği ivme değerleri iki farklı azalım ilişkisi kullanılarak tahmin edilmiş ve bunların ortalaması 51 cm/s^2 olarak belirlenmiştir. Bu değer, psödostatik analizle belirlenen ivme değerleri aralığında kalmakla birlikte, meydana gelmiş söz konusu depremlerin yamaç hareketine bir katkısının olup olmadığı konusunda herhangi bir bilgi yoktur. Yapılan analizlere göre olası deprem riski altında olan inceleme alanına yakın mesafede meydana gelecek bir depremde ani ve büyük boyutlu bir yamaç hareketi riski söz konusudur.

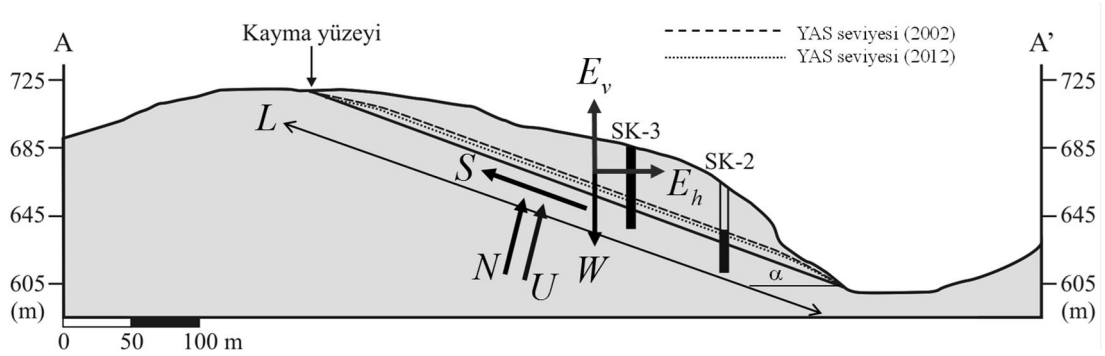
Laboratuvar koşullarında, fiziksel model üzerinde gerçekleştirilen dinamik deneyde ölçülen kritik ivme değeri ile arazi ölçeğinde yapılan psödostatik şev duraylılığı analizinin sonuçları arasında önemli bir farkın olduğu görülmektedir. Duraylılık analizlerinde kullanılan makaslama dayanımı parametreleri, örselenmemiş örnekler üzerinde arazi koşulları göz önünde bulundurularak nemli koşullarda gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir. Dinamik model deneyleri ise kuru koşullarda gerçekleştirilebilmiştir.

Bu bölümde değinilen duraylılık analizleri, hareketin olup olmayacağı konusunda birtakım ön bilgiler vermekle birlikte, özellikle dinamik etki altında meydana gelebilecek deformasyon miktarları hakkında bilgi sağlayamamaktadır.

8.2 Dinamik Koşullar İçin Gerçekleştirilen Analizler

Gündoğdu yamaç hareketi, deprensellik açısından aktif bir bölgede yer almakta ve dinamik koşullarda yamacın göstereceği davranış son derece önem kazanmaktadır. Yakın çevrede meydana gelebilecek bir depremin etkisiyle ortaya çıkabilecek sonuçların tahmini de bu anlamda dinamik koşullar için gerçekleştirilecek analiz ile mümkün olabilecektir. Tezin 4. Bölümünde, 6.8 büyüklüğündeki olası bir depremin etkisiyle Babadağ ilçe merkezinde gerçekleşebilecek en büyük ivme miktarları, Aydan (2001, 2007) ve Ulusay ve diğ., (2004) tarafından geliştirilen ivme azalım ilişkileri ile tahmin edilmeye çalışılmış, beklenen tahmini ivme değerinin $350\text{-}375 \text{ cm/s}^2$ arasında olabileceği belirlenmiştir. Bu değerler, Akköy depreminde alınan en büyük ivme miktarının 86.8 katıdır. Akköy depreminin Babadağ Gündoğdu Mahallesi'nde alınan ivme kaydının en yüksek ivmenin değeri $350\text{-}375 \text{ cm/s}^2$ olacak şekilde yükseltılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Dinamik sarsma masası

deneyleriyle ilgili bölümde verilen ve yerdeğiştirmenin tahmininde kullanılan sayısal çözümler yöntemiyle yamacın yerdeğiştirme miktarları belirlenmiştir. Şekil 8.5’de yamaca etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 8.5 : Yamaca etkiyen kuvvetler.

Eşitlik 8.1’de yamacın söz konusu ivmeye maruz kaldığında göstereceği davranışın gözlenmesinde kullanılan denklem (Aydan ve Ulusay, 2002) verilmiştir. Dinamik model deneylerinde kullanılan denklemden farklı olarak, arazi koşullarına yakın koşullarda gerçekteştirilen makaslama deneylerinde belirlenen kohezyon ve YAS seviyesine bağlı doygunluk göz önüne alınmıştır.

$$\frac{d^2s}{dt^2} = (g - a_v)(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi) + a_h(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) + g \cdot r_u \tan \phi - \frac{cL}{W} \quad (8.1)$$

Burada;

c: Kohezyon,

ϕ : İçsel sürtünme açısı,

α : Kayma düzleminin yatayla yaptığı açısı,

a_v : Düşey ivme bileşeni,

a_h : Yatay ivme bileşeni,

g: Yerçekimi ivmesi,

r_u : Gözenek suyu basınç katsayısı,

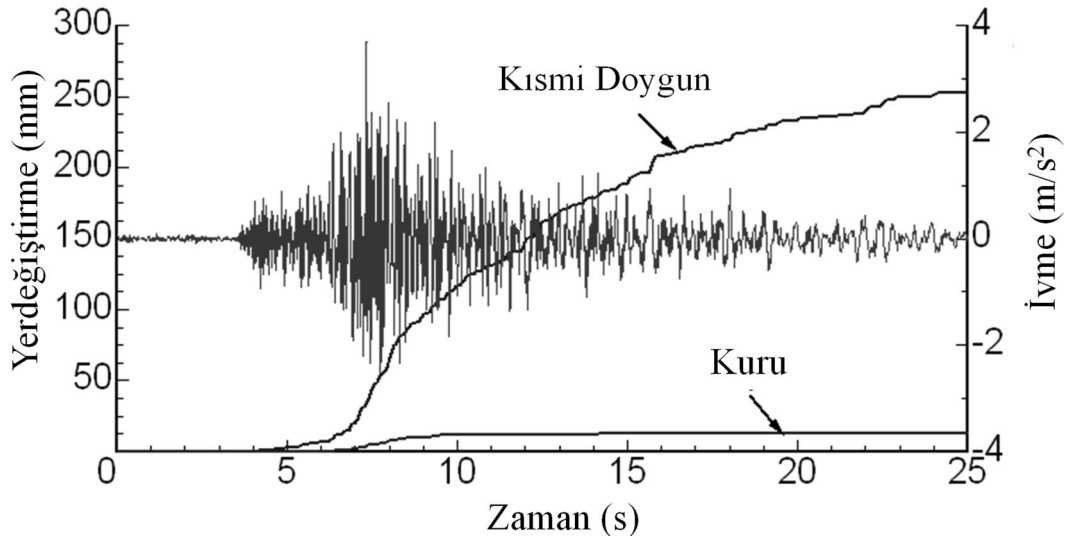
W: Kayan kütleinin ağırlığı,

L: Kayma yüzeyi uzunluğu,

E_v ve E_h : Düşey ve yatay yöndeki deprem yükleri,

S ve N: Kaymaya karşı makaslama kuvveti ve kayma yüzeyine dik etkiyen normal kuvvetlerdir.

Analizde birim hacim ağırlık, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri sırasıyla 18.6 kN/m^3 , 5 kPa ve 20° olarak alınmış, r_u : 0.2 (yarı doymuş) ve kuru koşulları için analizler gerçekleştirilmiştir. Söz konusu olası bir deprem etkisiyle yamaçta görülebilecek hareket miktarları Şekil 8.6'da gösterilmiştir.



Şekil 8.6 : M_w : 6.8'lik olası bir deprem için hesaplanan yerdeğiştirme miktarları.

En büyük $350\text{-}375 \text{ cm/s}^2$ 'lik yer ivmesi etkidiğinde; kuru koşullarda küçük miktarda hareket gözlenirken, yarı doymuş koşullar için toplam 25 cm 'lik yerdeğiştirmenin 25 saniyede gerçekleşebileceği hesaplanmıştır. Kısa sürede bu miktarda gerçekleşebilecek yerdeğiştirme etkisinde inceleme alanında büyük boyutlu yapısal hasarlar görülebilir.

9. GÜNDOĞDU HEYELANININ ANALİTİK VE AYRIK SONLU ELEMENLAR YÖNTEMLERİ KULLANILARAK ANALİZİ

Marn, çamurtaşı, silttaşı, şeyl, tuf ve ayrıışmış volkanik kayalar gibi kil içeren kayalar çeşitli mühendislik sorunlarına neden olabilmektedir (Aydan 2011; Aydan ve diğ., 1993, 1994, 2006). Kil minerallerinin büyük kısmı bünyelerine su aldıklarında veya kaybettiklerinde hacimlerinde değişiklik görülür. Bu tür jeolojik malzemelerin içerdikleri su miktarına bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerinde de değişimler gözlenir. Bunlar yamaç duraysızlığı sorunları gibi çeşitli yapısal ve çevresel jeomühendislik sorunlarına neden olabilmektedir.

Kayaların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bir indeks deneyi olarak suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyi Franklin ve Chandra (1972) tarafından önerilmiş ve ISRM tarafından kabul edilmiştir (ISRM, 2007). Bununla birlikte bu indeks, kil içeren kayaların temel kaya olması durumunda yapı ve yamaçların davranışının ve duraylılığının belirlenmesinde oldukça yetersiz ve mühendislik açısından anlamsızdır. Sulu ve bu tür malzemelerin bulunduğu ortamlarda karşılaşılan problemlerin çözümünde jeolojik malzemelerin su içeriğine bağlı olarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişiminin uygun bir model ile ortaya konulması gerekmektedir.

Aydan ve Ulusay (2003), Aydan (2003b), Aydan (2011), Aydan ve diğ., (1993, 1994 ve 2006) tarafından yapılan çalışmalarda kil içeren kayaların su içeriğine bağlı olarak hacimsel değişim miktarlarının belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Aydan (2003b), deneysel çalışmalar ışığında malzeme içindeki suyun yayılma özelliğini ortaya koymak amacıyla kuramsal bir yöntem önermiştir. Ayrıca Aydan ve diğ., (1993, 1994) yeraltısuyu seviyesi değişimlerine bağlı olarak, su içeriği artışı ve azalışıyla ilişkili hacimsel değişimlerin etkisiyle mühendislik yapılarının davranışının belirlenebilmesi amacıyla sayısal bir yöntem önermiştir.

Tezin bir önceki bölümünde yapılan analiz ve değerlendirmelerde, statik ve dinamik koşullarda Gündoğdu yamaç hareketi analiz edilmeye çalışılmıştır. Ancak yapılan analizler, zaman zaman düşük hızda seyreden, zaman zaman ise hareketsiz olan ve

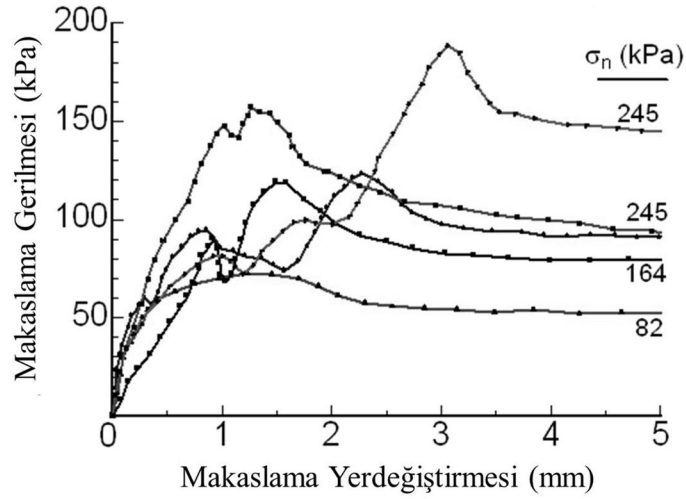
kribe benzeyen yamaç hareketi mekanizmasını açıklamada yetersizdir. Yamaç hareketinin hızı ve olumsuz etkileri özellikle yağışlarla ilişkili olarak görülmekte ve yağışlı dönemlerde ve akabinde artmaktadır. Saatlik yağış ve YAS seviye değişiminin inceleme alanında ölçülmesi, YAS seviyesi ve yağış arasındaki ilişkinin incelenmesi açısından oldukça önemli ve değerli veriler olup, literatürde buna benzer veri bulunması hemen hemen mümkün değildir.

YAS seviyesinde gözlenen değişimlere bağlı olarak suya hassas olan marn tabakalarının nemlenerek yumuşaması ve buna koşut olarak deformasyonların görülmesi, ardından kuruma olayına bağlı olarak da sertleşme ve deformasyonların azalması bu bölümde yamaç hareketini açıklamak için kullanılan modelin temelini oluşturmaktadır. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, SK-3 kuyusundaki kuyu içi birim deformasyon ölçer verisinde yüzeyden 28.5 m derinlikte belirgin deformasyon artışı belirlenmiştir. 28.5 m derinlikteki seviye ve SK-2 kuyusundaki su seviyesi enine kesitler üzerinde çizildiğinde, YAS seviyesinin büyük yerdeğiştirmelerin olduğu seviyenin hemen üstünde olduğu görülmüştür. Dolayısıyla büyük deformasyonu oluşturan seviyenin YAS seviyesi değişimlerinden etkilenmesi söz konusudur.

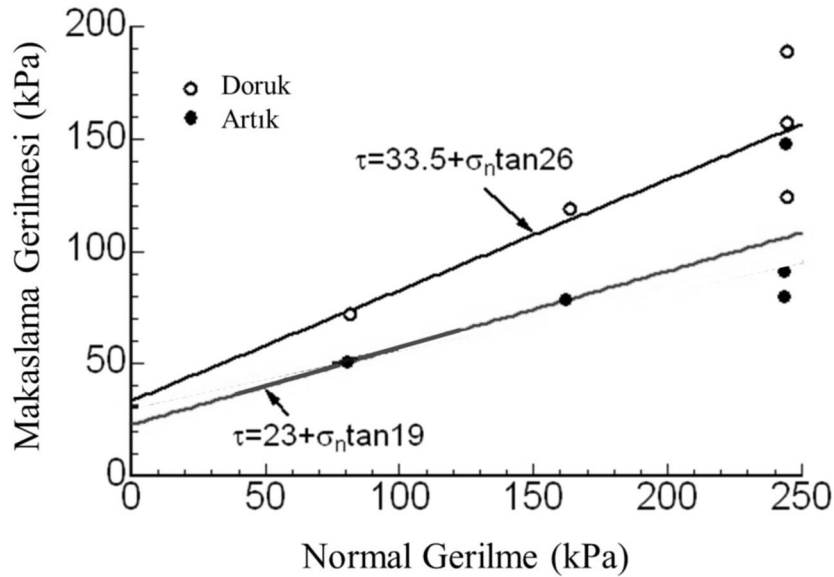
Marnın farklı su içeriklerine göre dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Babadağ ilçe merkezinden alınan doğal örnekler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. AE-4 istasyonunda ölçülen saatlik mesafe değişimi miktarları ile yeraltısuyu seviye değişimleri sunulmuş ve tüm bu veriler bir model kapsamında değerlendirilmiştir. Bu modelde, büyük yerdeğiştirmenin olduğu seviye kontak zonu olarak kabul edilmiş ve yağışlara bağlı olarak YAS seviyesi değişimiyle bu zonun su içeriğinin artışı sonucu suya hassas olan marnın deforme olduğu ilkesi temel alınmıştır. Daha sonra model, yerinde ölçülen uzaklık değişimi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Prof. Dr. Ömer Aydan tarafından geliştirilmiş bir bilgisayar yazılımı (Aydan ve diğ., 1996; Aydan ve Mamaghani, 1996; Mamaghani ve diğ., 1994), modeli içerecek şekilde güncellenmiş ve hesaplamalar yapılmıştır. Programla yapılan hesaplamalar, Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemini (DFEM) esas alarak ve düşünülen mekanik model içerilecek şekilde gerçekleştirilmektedir.

9.1 Su İçeriğine Bağlı Olarak Malzeme Özelliklerinin Değişiminin Belirlenmesi

İlgili hesaplama ve analizlerin gerçekleştirilmesi için önceki deneysel çalışmalara ek deneyler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 6x6x2 cm boyutlarında kesilerek hazırlanan marn kaya malzemesinin kuru koşullardaki kohezyon ve içsel sürtünme açılarının hesaplanması için makaslama deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde elde edilen makaslama gerilmesi-makaslama yerdeğiştirme grafikleri Şekil 9.1’de doruk ve artık makaslama yenilmesi zarfları ise Şekil 9.2’de verilmiştir. Marn örneğinin kuru koşullardaki doruk kohezyon ve içsel sürtünme açısı 33.5 kPa ve 26°, artık kohezyon ve içsel sürtünme açısı ise, 23 kPa ve 19° olarak belirlenmiştir.

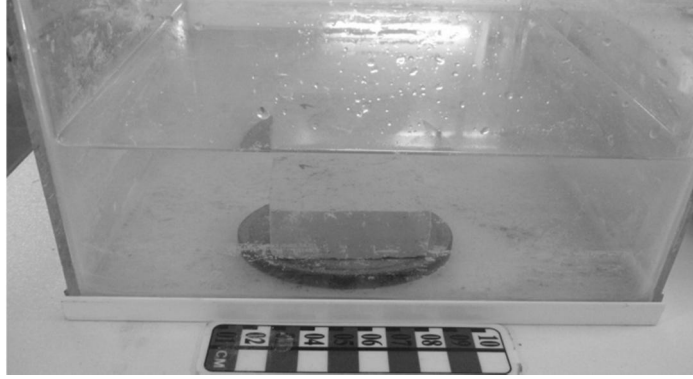


Şekil 9.1 : Marn örnekleri üzerinde yapılan makaslama deneylerinde elde edilen makaslama gerilmesi-makaslama yerdeğiştirme grafikleri.



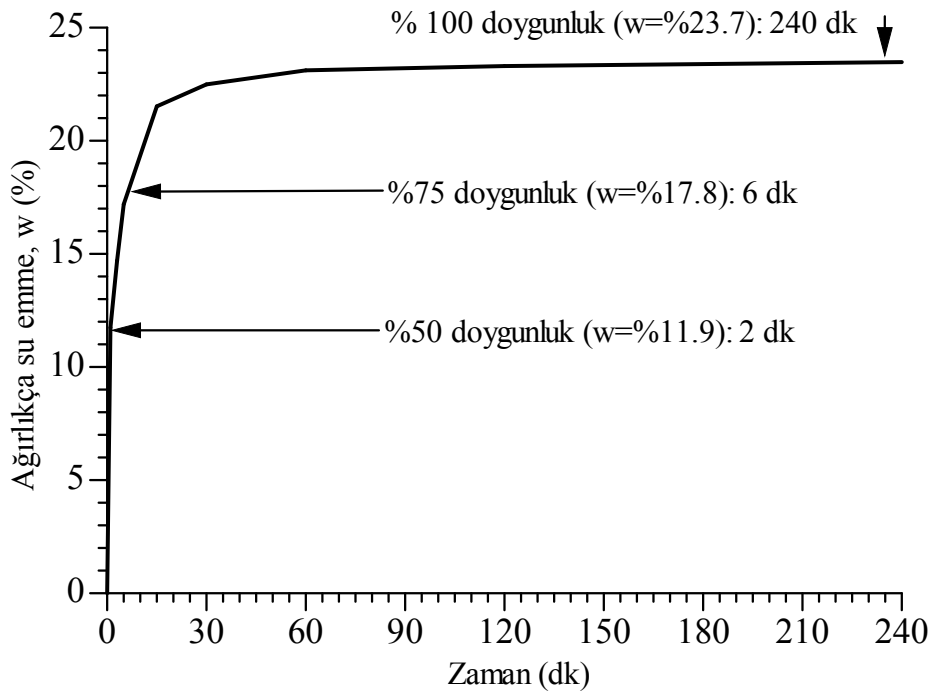
Şekil 9.2 : Marn örneklerinin kuru koşullar için belirlenen doruk ve artık makaslama yenilmesi zarfları.

Daha sonra suya duyarlı marnın farklı su içeriklerindeki dayanım özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla su emme ve makaslama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Prizmatik marn örnekleri kesilerek hazırlanmış, bir adet prizmatik örnek su içine konarak zamana bağlı olarak ağırlığı ölçülmüştür (Şekil 9.3).



Şekil 9.3 : Prizmatik örneğin suya doyurulma işlemi.

2, 6 ve 240 dk'lık sürelerde örneğin sırasıyla, % 11.9, 17.8 ve 23.7 su emdiği belirlenmiş olup, bu değerler sırasıyla %50, 75 ve 100 doygunluk derecelerine karşılık gelmektedir (Şekil 9.4).



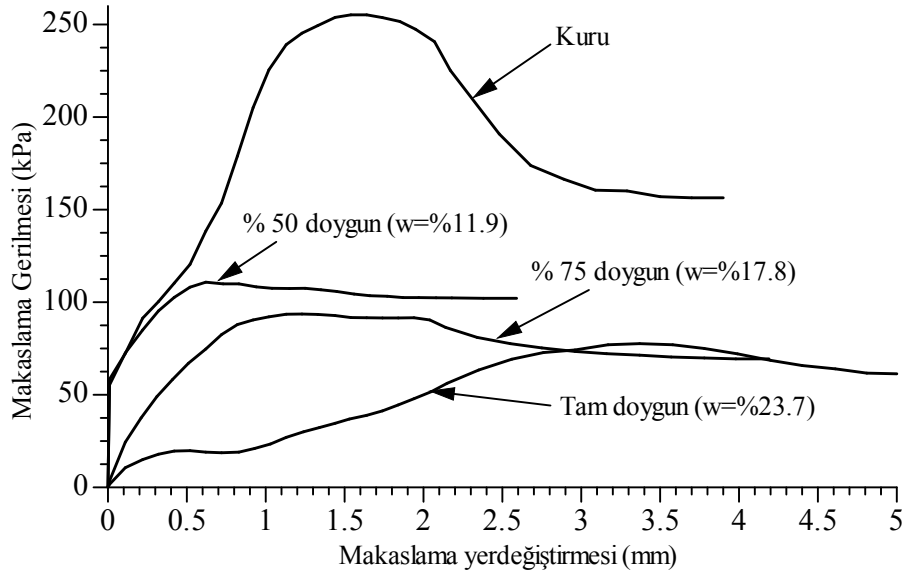
Şekil 9.4 : Marn örneğinin zamana bağlı olarak belirlenen su emme miktarları.

Hazırlanan prizmatik marn örnekleri farklı su içeriklerindeki makaslama dayanımlarının belirlenebilmesi için kuru, %50, %75 ve %100 doygunluk derecelerine kadar suya doyurularak makaslama deneyleri yapılmıştır. Bu

deneylerden artan su içeriğine bağlı olarak malzemenin makaslama dayanımındaki azalım belirlenmiştir. Deneyler, farklı örnekler üzerinde ve sabit 245 kPa'lık normal gerilme altında gerçekleştirilmiştir. Belirlenen makaslama gerilmesi değerleri Tablo 9.1'de, deneylere ait makaslama gerilmesi ve makaslama yerdeğiştirmesi grafikleri ise Şekil 9.5'de verilmiştir.

Tablo 9.1 : Marnın artan su içeriğine bağlı olarak belirlenen makaslama dayanımı değerleri.

Doygunluk derecesi (%)	Su içeriği (%)	Doruk makaslama Dayanımı, τ (kPa)	Artık makaslama dayanımı, τ (kPa)
0 (kuru)	0	255.5	156.4
50	11.9	110.8	102.1
75	17.8	93.6	69.4
100 (doygun)	23.7	77.6	61.3



Şekil 9.5 : Farklı su içerikleri için makaslama gerilmesi-makaslama yerdeğiştirmesi grafikleri.

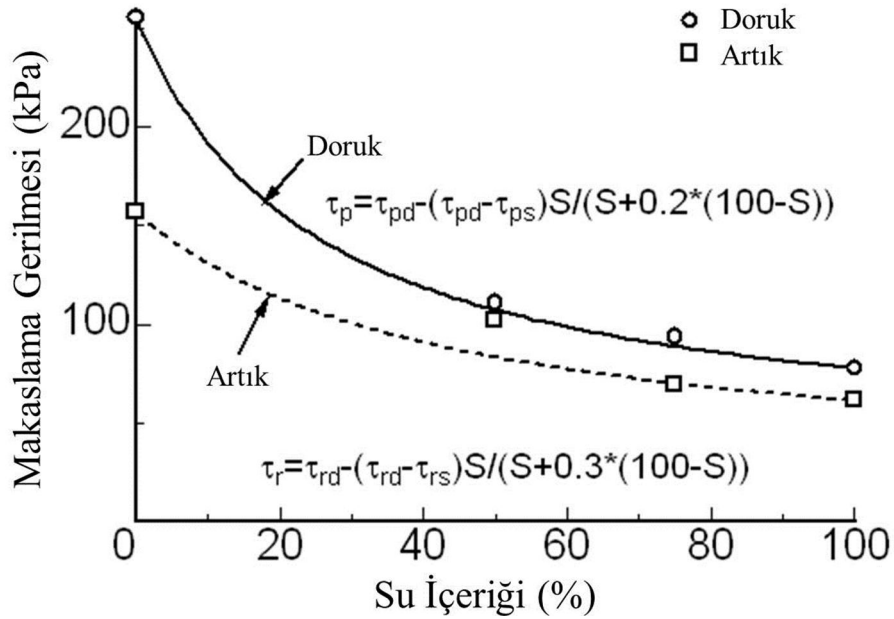
Su içeriği artışına bağlı olarak doruk ve artık makaslama gerilmesi değerlerinde düşüş görülmüştür (Şekil 9.6). Özellikle marnın suya olan hassasiyetinden dolayı örnek hazırlamanın zorluğundan, farklı su içeriklerindeki kohezyon ve içsel sürtünme açılarını belirlemenin yerine sadece birer örnek üzerinde makaslama gerilmesi değerleri belirlenebilmiştir.

Aydan (2003b), Aydan ve Ulusay (2003) değişen su içeriklerinde kaya örneğinin verilen bir özelliğinin oranlanmış hali için aşağıdaki gibi bir fonksiyonu önermişlerdir.

$$\frac{\varphi_w}{\varphi_d} = \eta_o - (\eta_o - \eta_{100}) \frac{S}{S + \theta(100 - S)} \text{ veya } \varphi_w = \left(\eta_o - (\eta_o - \eta_{100}) \frac{S}{S + \theta(100 - S)} \right) \varphi_d \quad (9.1)$$

Burada, φ_w , φ_d , η_o , η_{100} ve θ doygun ve kuru koşullarda seçilen mekanik özellikler ve oranlanmış değerleridir. θ görgül bir katsayı olup deneysel değerlerden belirlenmektedir.

Şekil 9.6'da su içeriğindeki değişime bağlı olarak görülen makaslama dayanımı değişimi EŞitlik 9.1'deki fonksiyona göre belirlenmiştir. Doruk ve artık makaslama için θ değeri sırasıyla 0.2 ve 0.3 olarak elde edilmiştir. Doruk ve artık makaslama için belirlenen fonksiyonlar, şekilden de görüldüğü gibi deneysel verilerle uyumludur.

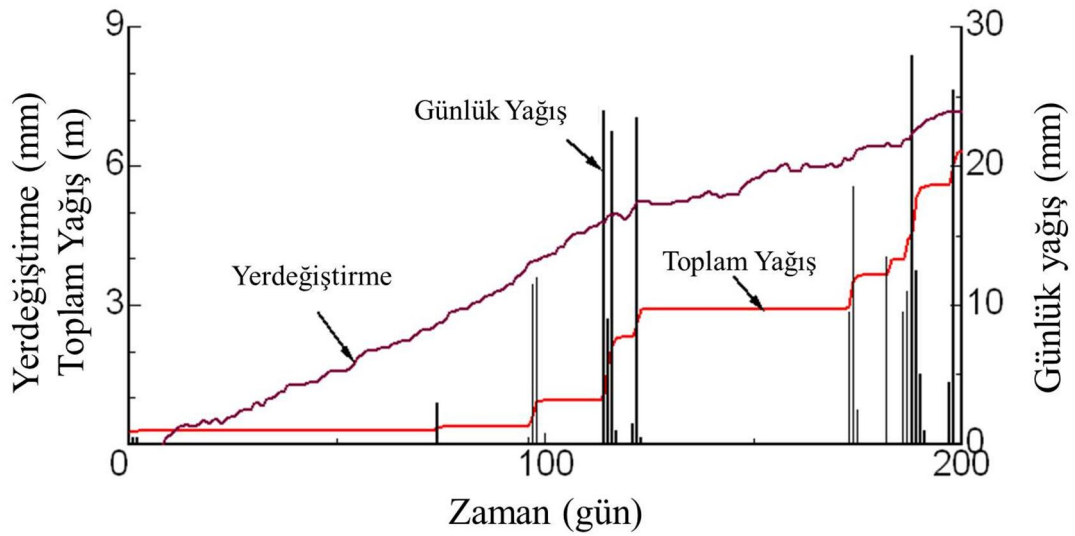


Şekil 9.6 : Marnın su içeriğine bağlı olarak makaslama dayanımındaki düşüş (τ_p : Doruk makaslama dayanımı, τ_{pd} : Kuru doruk makaslama dayanımı, τ_{ps} : Doygun doruk makaslama dayanımı, S: Su içeriği, τ_r : Artık makaslama dayanımı, τ_{rd} : Kuru artık makaslama dayanımı, τ_{rs} : Doygun artık makaslama dayanımı).

9.2 Uzun Dönem YAS Seviye Değişimleri ve Yerdeğiştirme ile İlişkisi

Tano ve diğ. (2003, 2006b ve 2008) tarafından ilçe merkezinde hareket izleme amacıyla yerleştirilen çok parametrelili izleme tekniklerine ait ayrıntılar 5. Bölüm'de verilmiştir. İzlenen parametrelerden saatlik alınan yağış miktarı ve YAS seviye değişimi verileri uzun dönem Gündoğdu yamaç hareketinin seyri üzerine büyük bir öneme sahip olup, izleme çalışmalarınde deformasyonların yağışlarla ilişkili

olduğunu göstermiştir. Şekil 9.7’de AE-4 istasyonunda ölçülen yerdeğiştirme miktarları ile yağış arasındaki ilişki verilmiştir. Bu ilişki yaklaşık 200 günlük veri için incelenmiştir. Ayrıca alınan saatlik yağış kayıtları ve SK-2 kuyusunda ölçülen su seviyesi değişimleri incelenmiş ve YAS seviyesi değişimlerinin yağışlardan hangi ölçüde etkilendiği ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Yağış ve YAS seviyesi değişimi arasında bir zaman aralığının olması olağan olmakla birlikte, bu aralığın değişken olduğu görülmüştür. Yerinde alınan veriler üzerinde bu ilişkinin belirlenebilmesi amacıyla değerlendirmeler yapılmıştır. Özellikle yağışların yoğun olduğu zamanlardaki yağış ve YAS seviyesi değişimleri incelenmiştir. Yağış miktarı ve YAS seviyesinde ne kadar zaman sonra değişimin görüldüğü ölçümlerden belirlenmiştir.



Şekil 9.7 : AE-4 istasyonunda ölçülen yerdeğiştirme verisi ile yağış ilişkisi.

Gündoğdu yamaç hareketi ile ilgili olarak alınan uzun süreli yağış ve YAS seviye değişimleri kayıtları ilk kez bu tez kapsamında incelenmiştir. Genel olarak YAS seviyesi ile yağış arasında net bir ilişkinin kurulması güç olmakla birlikte, çoğunlukla birkaç günden haftalara kadar değişen zaman aralıklarında yağışın YAS seviyesini etkilediği görülmüştür. Şekil 9.8’de YAS seviye değişimi ve ilgili yağış miktarı verilerinin dağılımı verilmiştir. Bu veriler ve ilgili grafikler EK-1’de verilmiştir. Yağış ve YAS seviye değişimi arasında Eşitlik 9.2’de verilen ilişki belirlenmiştir.

$$\Delta h_w = 2.18 * h_{RF} (R^2 = 0.58) \quad (9.2)$$

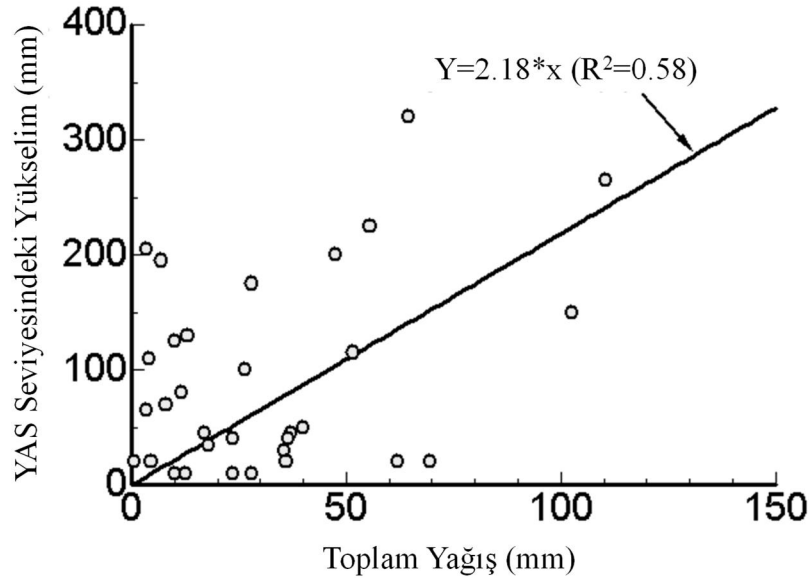
Burada,

Δh_w , YAS seviye değişimi (yükselimi),

h_{RF} , yağış aktivitesinin görüldüğü zaman aralığındaki toplam yağış miktarıdır.

Ayrıca yağış suyunun kayanın görünür gözeneklerinde (n) tutulacağı varsayımıyla ve basit kütle denkleği kavramıyla, YAS seviyesi değişimi Eşitlik 9.3'de verilen ilişkiyle de açıklanabilir.

$$\Delta h_w = \frac{1}{n} h_{RF} \quad (9.3)$$



şekil 9.8 : YAS seviyesinde görülen yükselim ve ilgili yükselime neden olan toplam yağış miktarı ilişkisi.

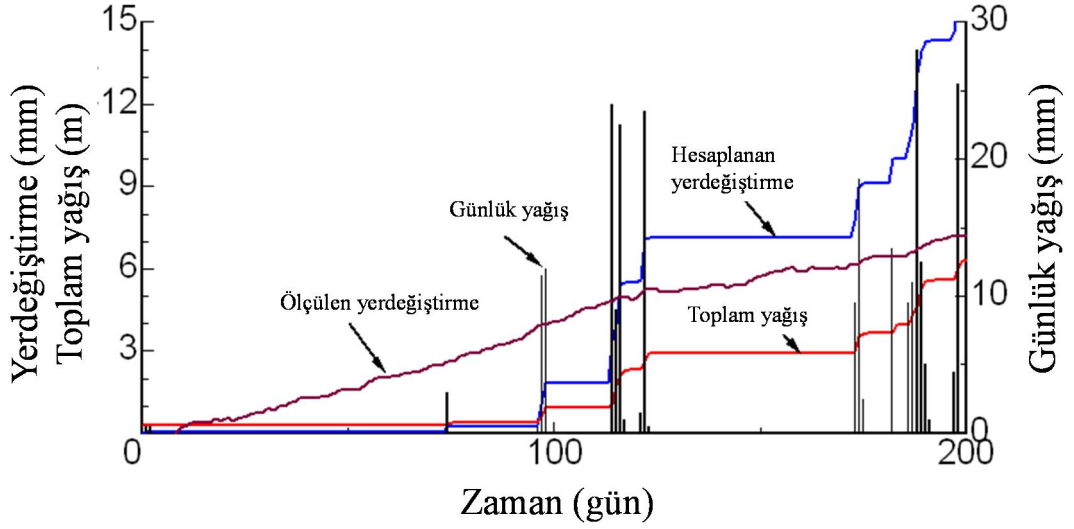
9.3 Basitleştirilmiş Analitik Model ve Sonlu Elemanlar Modeli

9.3.1 Analitik model ve uygulaması

Bu alt bölümde, bünyesine su alıp verdiğinde hacimsel değişim gösteren kaya ortamlar üzerinde veya içinde inşaa edilen yapıların davranışını incelemek amacıyla Aydan (1994, 1998) tarafından önerilen yaklaşım kullanılarak yerdeğiştirme miktarları hesaplanmıştır. Çözömlerle ilgili ayrıntılar ve eşitlikler EK.B'de verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda marn için doyma ve kuruma zamanları saatler düzeyinde olup, oldukça kısa zaman aralığı olarak belirlenmiştir. Bu bulgu ışığında analizler gün düzeyinde yapılmıştır. Ölçölen ve hesaplanan yerdeğiştirmeler şekil 9.9'da gösterilmiştir. Hesaplamalarda doymun kısmın kalınlığı göz önünde

bulundurulmuştur. Ölçülen ve hesaplanan değerler arasında biraz farklılıklar olmakla birlikte, model Gündoğdu yamaç hareketinin mekanizmasını tümüyle açıklayabilmektedir. Devirsel yumuşama-sertleşme modeli hesaplamalarında, gözlemler, laboratuvar deneyleri, ışığında kayma zonu derinliği (H) 30m, kuru makaslama modülü (G_d) 50 MPa, doymun kayma modülü (G_s) ise 5 MPa olarak alınmıştır.

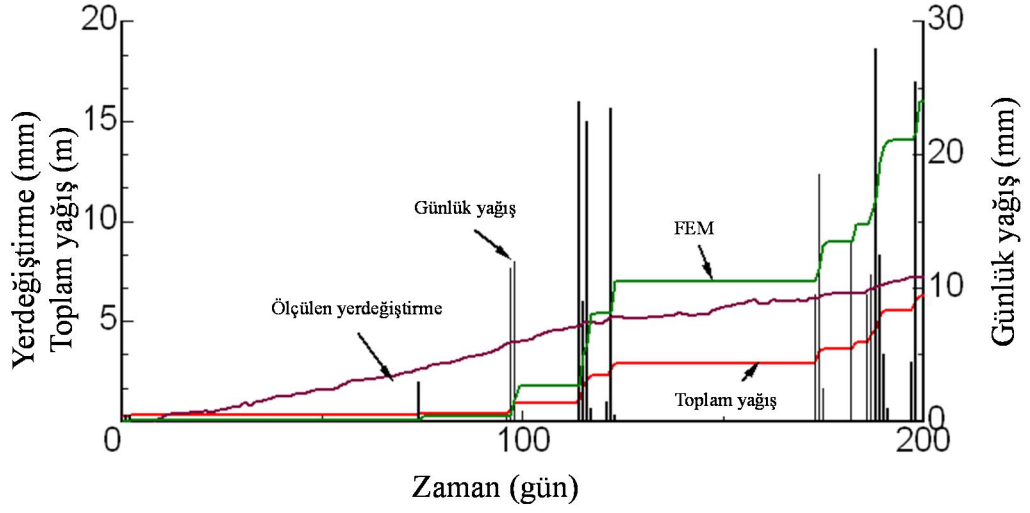


Şekil 9.9 : Ölçülen ve hesaplanan yerdeğıştirmelerin karşılaştırılmaları.

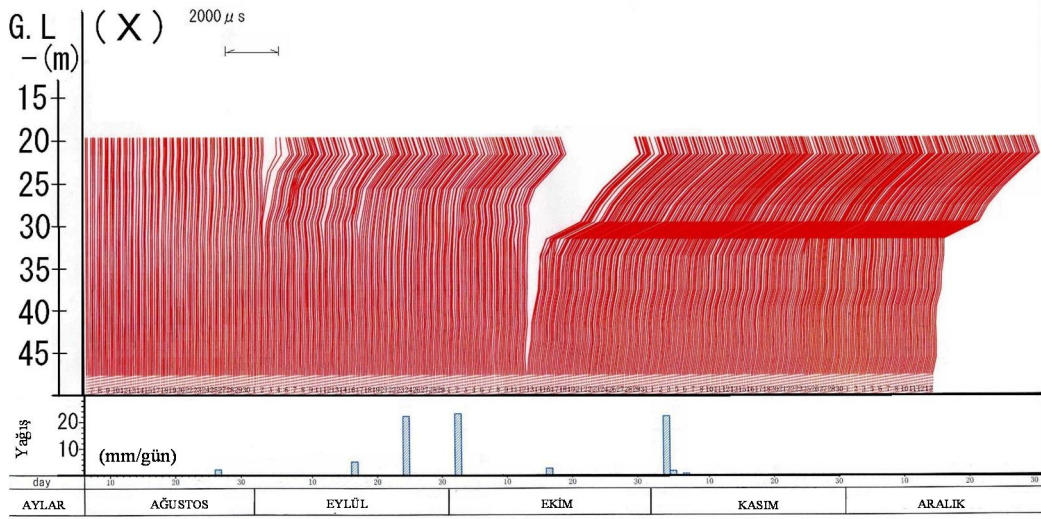
9.3.2 Yarı-Sonsuz çoklu marn tabakalarının Sonlu Elemanlar Modeli

Eğer doymun hale geçen kısmın kalınlığı bilinirse, bu amaçla kullanılacak analitik modelin sonlu elemanlar yaklaşımı Eşitlik EK-B.18’de verilmiştir. Eğer makaslama modülü $G(\theta)$ doymunluğa bağlı ise, doğrusal olmayan analiz gerekmektedir. Doymun tabakanın davranışı, verilen elastik-mükemmel plastik davranışa benzerdir. Zamana bağlı çözümlemede, yağışa bağlı olarak doymunlaşan tabaka kalınlığı değişmektedir. Şekil 9.10’da, Şekil 9.9’da verilen durum için hesaplanan sonuçlar verilmiştir. Analitik ve FEM sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Burada çok küçük miktarda bir farklılık görülmekte olup, bunda FEM’in sayısal yaklaşım hatasına bağlı olduğu söylenebilir.

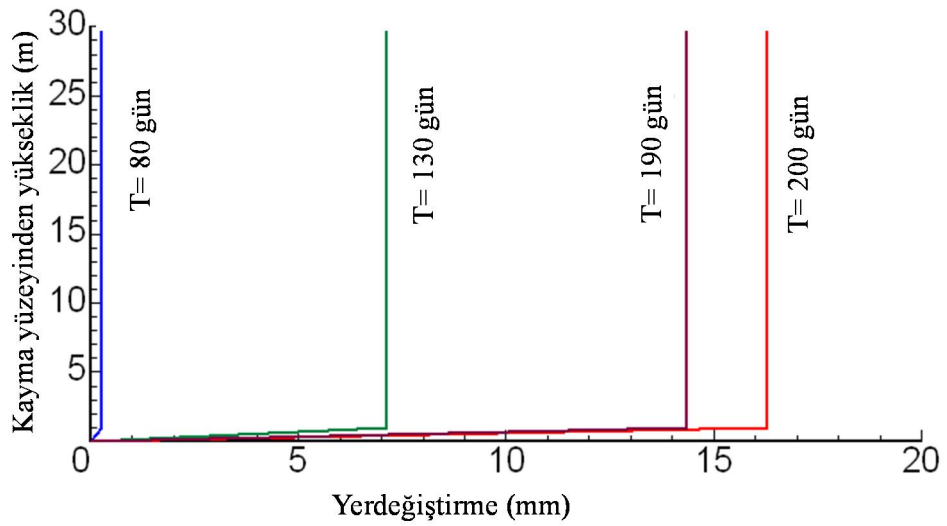
Şekil 9.11’de SK-3 kuyusunda ölçülen kuyu içi birim deformasyon davranışı gösterilmiştir. Şekilden, yaklaşık 4.5 aylık bir dönem için belirli derinliklerde büyük bir şekil değııştirmenin varlığı görülmektedir. Şekil 9.12’de ise, benzer şekilde, 30 m derinlik için hesaplanan yatay yerdeğıştirme miktarları verilmiştir. Gerçekleştirilen FEM analizleriyle Gündoğdu kripi benzeri yamaç hareketi modellenenmiştir. Klasik analizlerle bu türden yerdeğıştirmelerin belirlenmesi olanaklı değildir.



Şekil 9.10 : Ölçülen ve hesaplanan yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.



Şekil 9.11 : SK-3 kuyusunda ölçülen zamana bağlı birim deformasyon davranışı (Tano ve diğ., 2006a)



Şekil 9.12: Seçilen zamanlar için hesaplanan yerdeğiştirmeler.

9.4 Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemi

9.4.1 Ayrık sonlu elemanlar yönteminin başlıca ilkeleri

Tez çalışması kapsamında Gündoğdu heyelanı için alınan kesit üzerinde statik ve dinamik koşullarda, meydana gelebilecek deformasyonların tahim edilebilmesi için Aydan ve diğ., (1996); Aydan ve Mamaghani (1996), Mamaghani ve diğ., (1994) tarafından önerilen bir ayrık sonlu elemanlar (Discrete finite element method, DFEM) yaklaşımı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu yaklaşımda, süreksizlik içeren ortamlarda meydana gelebilecek büyük miktardaki deformasyonlar hesaplanabilmektedir. Yaklaşım, deforme olabilen bloklar (elemanlar) ve bloklar arası etkileşimin tanımlandığı kontakt modelinden oluşan mekanik modeli içermektedir. Farklı kenar sayılarındaki poligonlar elemanları temsil etmekte olup, komşu elemanlar birbirleriyle kontak halindedir. Kullanılan DFEM yaklaşımı, sürekli koordinat sistemi yenilenebilen Lagranj (güncellenmiş Lagranj) yöntemini kullanmakta ve böylelikle büyük deformasyonların belirlenebilmesi mümkün olmaktadır. Yöntemin ayrıntıları ve ilgili eşitlikleri EK.B’de verilmiş olup, daha ayrıntılı bilgilere ilgili bölümde değinilen kaynaklardan ulaşılabilir.

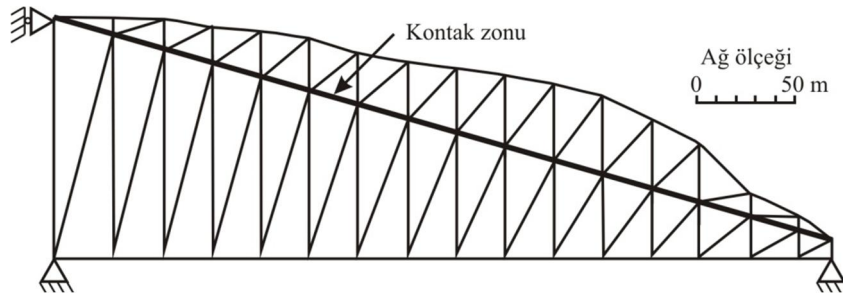
Sayısal analizlerde, doğrusal olmayan davranışların modellenmesinde üç temel yaklaşımdan biri kullanılmaktadır. Bunlar; ilksel, sekant veya teğetsel rijitlik yöntemleridir. DFEM analizlerinde ilksel rijitlik veya sekant yöntemi kullanılmaktadır. Sekant yöntemi gerçek davranışa daha yakın sonuçlar vermekle birlikte, sayısal duraysızlık sorunu erken aşamalarda oluşabilmektedir. Bunun yanısıra, ilksel rijitlik yöntemi sayısal olarak daha duraylıdır. Ayrıca DFEM’in, çözülen kısmi diferansiyel denklemin türüne bağlı olarak hiperbolik, parabolik ve yaklaşık eliptik sürümleri de vardır. Orijinal hali hiperbolik durum için programlanmış olmakla birlikte, yaklaşık-eliptik çözüm şekli daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu türde, özellikle elemanlar arası kantağın elasto-visko-plastik davranışı hakkında yeterli bilgiye sahip olunması oldukça güçtür. Öte yandan, benzer problemlerin çözümü için geliştirilmiş bazı ticari yazılımlar, süreksizliklerin kohezyon ve sürtünme açısı dışında, kendi yöntemlerine uygun deneysel olarak belirlenemeyen mekanik davranış modellerini kullanmaktadırlar (Shi, 1988; Kawamoto ve Aydan, 1999).

9.5 Klasik analizler

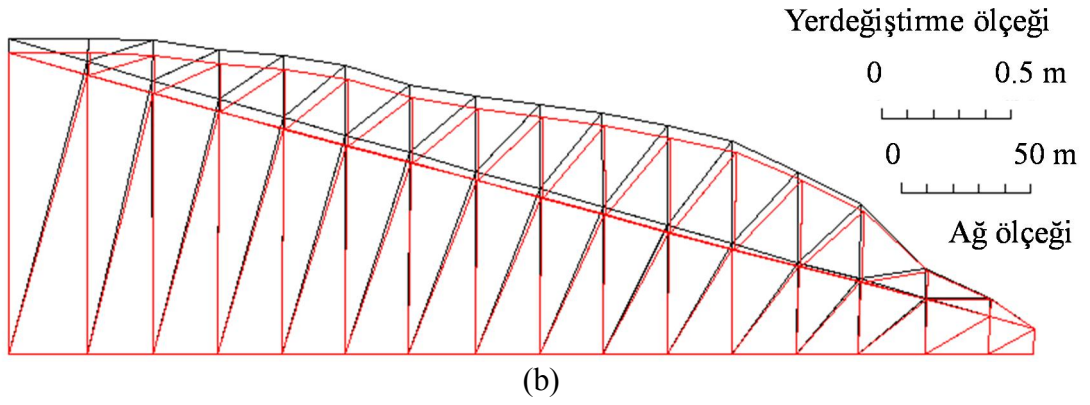
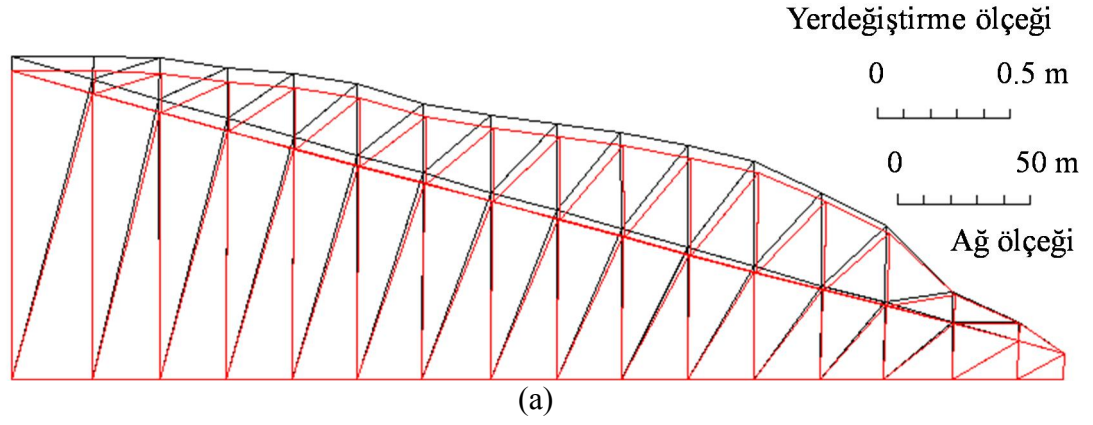
Bu bölümde, DFEM'in yaklaşık eliptik türü kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ayırık sonlu elemanlar metodunun akış şeması Şekil EK-B.5'de verilmiştir. Hesaplama adımları zaman benzeri adımlar olarak düşünülmelidir. Her adımda hesaplanan yerdeğiştirme artıyorsa, çözüm yapılan koşullarda kütlelin duraysız, aksi halde duraylı olduğu şeklinde yorumlanmalıdır. Bu bölümdeki analizler toplam 6 durum için gerçekleştirilmiştir. Kohezyon ve içsel sürtünme açıları, nemli ve kuru koşullar için belirlenen makaslama parametreleri göz önünde bulundurularak, 1. durumdan 6. duruma kadar sırasıyla 33 kPa-24°, 0 kPa-15°, 0 kPa-10°, 5 kPa-20°, 0 kPa-20° ve 5 kPa-20° olarak alınmıştır. Ayrıca 5. durumda 0.25 değerinde yatay sismik katsayı ve 6. durumda ise 0.131 değerindeki gözenek suyu basıncı katsayısı hesaplamalarda kullanılmıştır. Bu bölümde “kayma düzlemi” yerine açıklanan model doğrultusunda “kayma zonu” terimi kullanılmıştır.

1. Durum: Kohezyonlu ve sürtünmeli kontak zonu

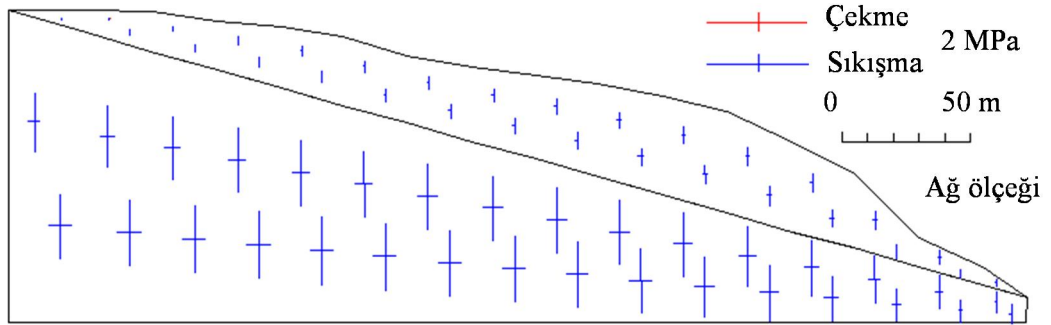
İlk durumda kumtaşı ara seviyeli marn örnekleri üzerinde kuru koşullarda elde edilen makaslama dayanımı verisi kullanılmıştır. Kohezyon ve içsel sürtünme açısı 33 kPa ve 24° olarak analizlerde kullanılmıştır. Analizler, yer çekimi etkisi altında 12 adıma kadar gerçekleştirilmiştir. Bu durumda deprem koşulu dikkate alınmamıştır. Şekil 9.13'de analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. Tüm analizlerde, modelin alt düğüm noktaları hem düşey, hemde yatay yönde sabittir. Modelin sol tarafı ise yatay hareket için sabit düşey yönde serbesttir. 16° eğimli kontak zonu boyunca 1. durum için kütlelin duraylı olduğu görülmektedir. 1. ve 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen deforme olmuş ağ ve yerdeğiştirme miktarları Şekil 9.14a ve 9.14b'de, asal gerilme dağılımı Şekil 9.15'de, en büyük makaslama gerilmesi eş değer eğrileri olarak Şekil 9.16'de gösterilmiştir.



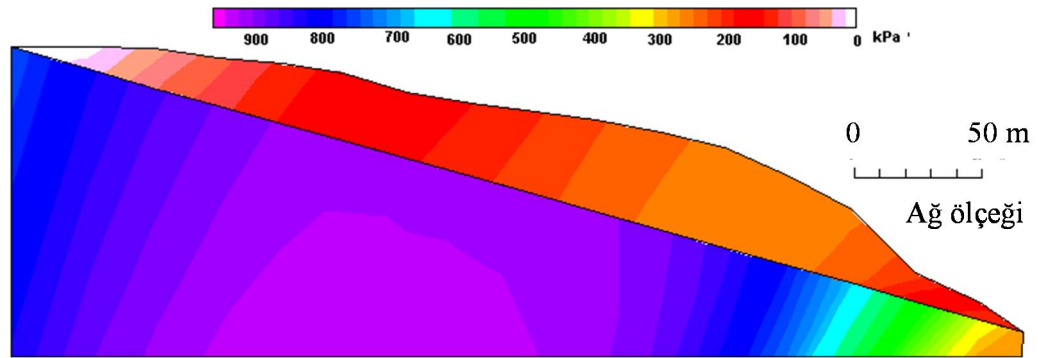
Şekil 9.13 : DFEM analizi için FEM eleman ağı.



Şekil 9.14 : 1. Durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.



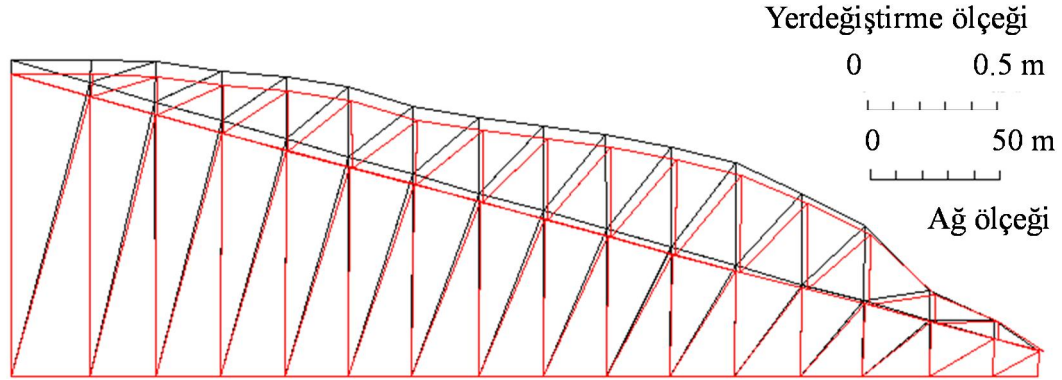
Şekil 9.15 : 1. durum için 12. adım sonundaki asal gerilme dağılımı.



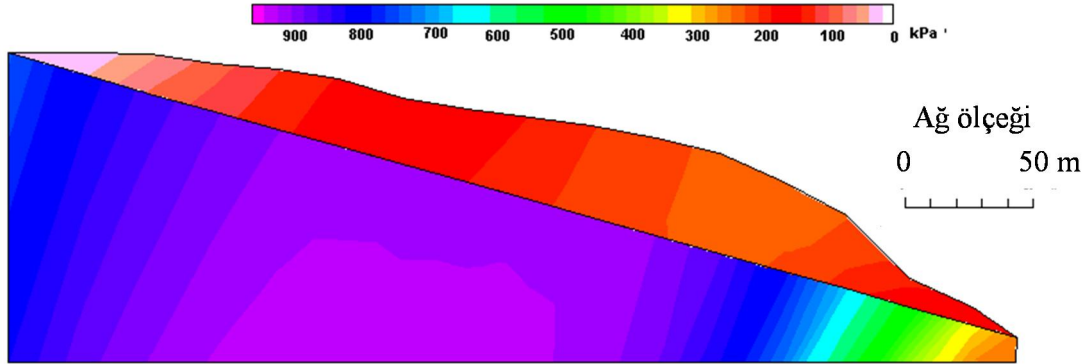
Şekil 9.16 : 1. durum için 12. adım sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrileri.

2. Durum: Kohezyonsuz, sürtünmeli kontak zonu

Bu durumda, kontak zonunun kohezyonsuz ve 15° içsel sürtünme açısına sahip olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda deprem koşulu dikkate alınmamıştır. Benzer şekilde yer çekimi etkisi altında 12 adımda analizler gerçekleştirilmiştir. 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen yerdeğiştirmeler Şekil 9.17’de en büyük makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı ise Şekil 9.18’de verilmiştir.



Şekil 9.17 : 2. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen yerdeğiştirme miktarları.



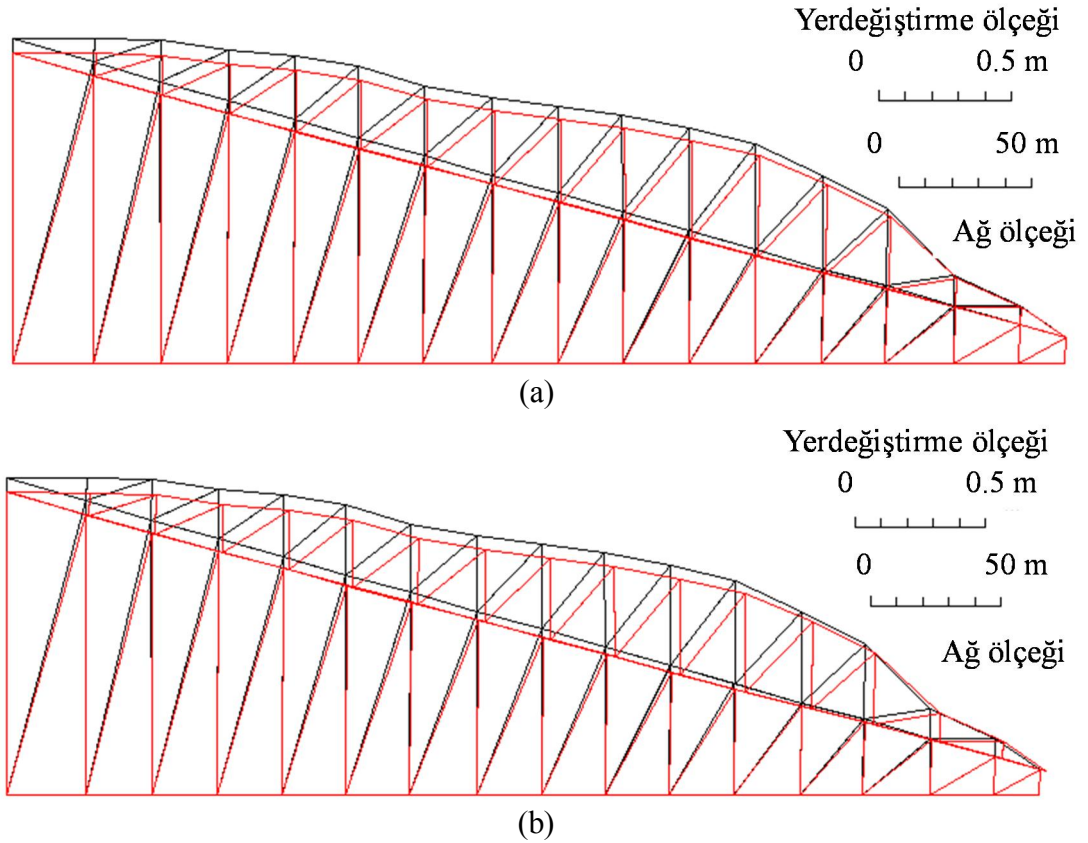
Şekil 9.18 : 2. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.

Daha düşük makaslama parametreleri ile yapılan analizde kontak zonu boyunca göreceli bir yerdeğiştirme oluşmakta ve kütlelin duraysız olduğu görülmektedir. Kayan bloğun yerdeğiştirmesi hesaplama adımlarında artarak devam etmiştir. 16° eğimli sürtünmeli kontak zonu için hesaplanan güvenlik katsayısı 0.934 olarak belirlenmiştir.

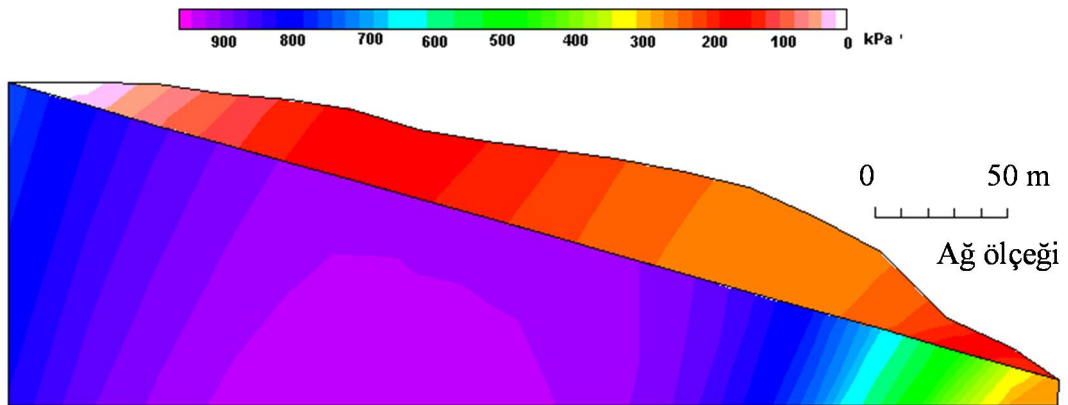
3. Durum: Daha düşük sürtünme açısına sahip kontak zonu

Bu durumda kontak zonunun sürtünmesi daha düşük olup, kohezyon ve içsel sürtünme açısı 0 kPa ve 10° olarak alınmıştır. Deprem koşulu dikkate alınmayarak ve Yer çekimi uygulanarak hesaplama 12 adımda gerçekleştirilmiştir. Şekil 9.19’da 1.

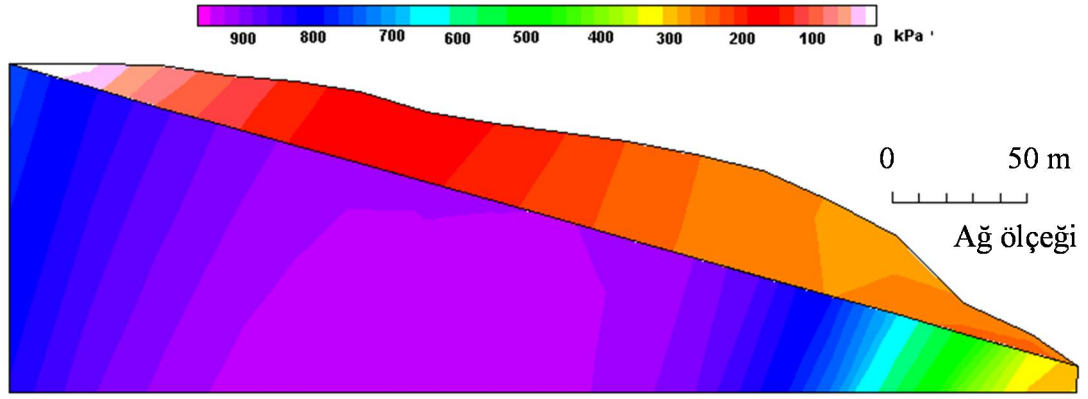
ve 12. adım sonundaki deforme olmuş yamaç, Şekil 9.20 ve 9.21’de ise 1. ve 12. hesaplama adımları sonundaki makaslama gerilmesi değerlerinin değişimleri verilmiştir. 12. adım sonunda topukta kontak zonunun defromasyonuna bağlı olarak belirgin bir yerdeğiştirme gözlenmektedir. 2. duruma göre, daha düşük içsel sürtünme açısına bağlı olarak yerdeğiştirme miktarları artmaktadır. Bu durum için belirlenen güvenlik katsayısı oldukça düşük olup 0.615 olarak belirlenmiştir.



Şekil 9.19 : 3. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.



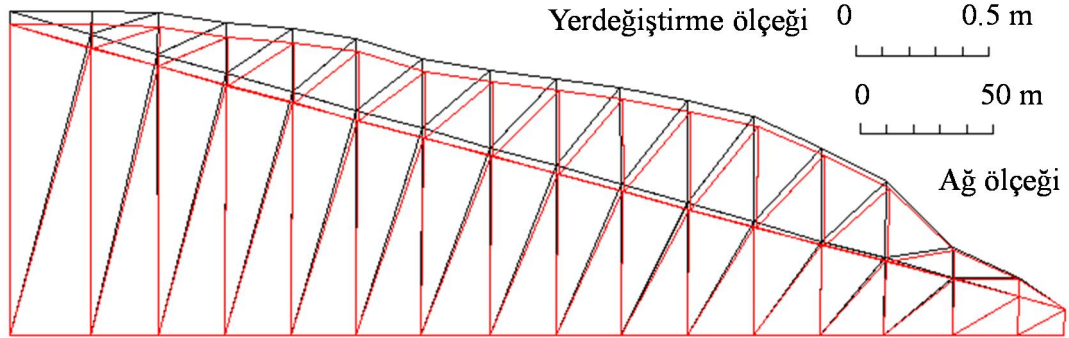
Şekil 9.20 : 3. durum için 1. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.



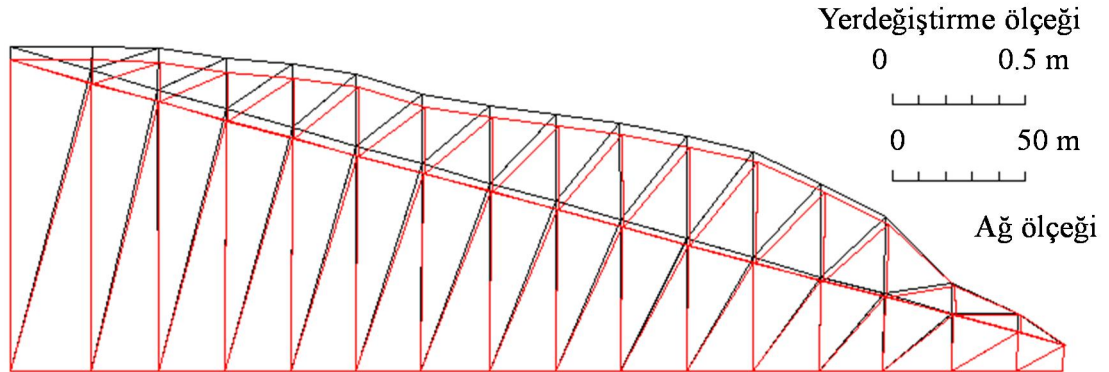
Şekil 9.21 : 3. durum için 12. hesaplama adımı sonunda elde edilen makaslama gerilmesi eşdeğer eğrilerinin dağılımı.

4. Durum: 5 kPa kohezyon ve 20° içsel sürtünme açısına sahip kontak zonu

Bu durumda, nemli koşullarda elde edilen, kohezyon ve içsel sürtünme açısı 5 kPa ve 20° olarak alınmıştır. Ancak şev kuru ve deprem etkisi dikkate alınmadan analiz edilmiştir. Benzer şekilde gerçekleştirilen analizlerde 1. ve 12. hesaplama adımları sonunda elde edilen yerdeğiştirmeler Şekil 9.22 ve 9.23’de verilmiştir. En son adımda kütlelin duraylı olduğu anlaşılmaktadır.



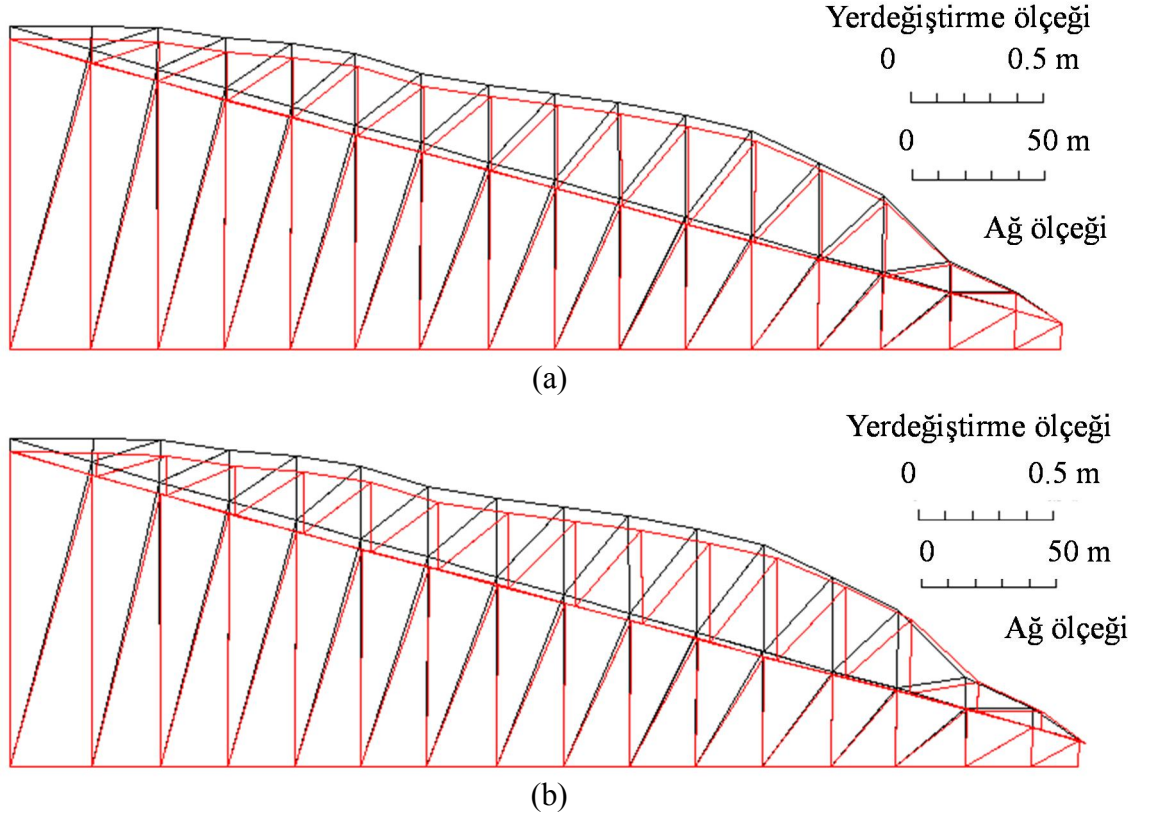
Şekil 9.22 : 4. durum için 1. hesaplama adımında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.



Şekil 9.23 : 4. durum için 12. hesaplama adımında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.

5. Durum: 0.25 değerinde yatay sismik katsayı etkisinde, 5 kPa kohezyon ve 20° içsel sürtünme açısına sahip kontak zonu

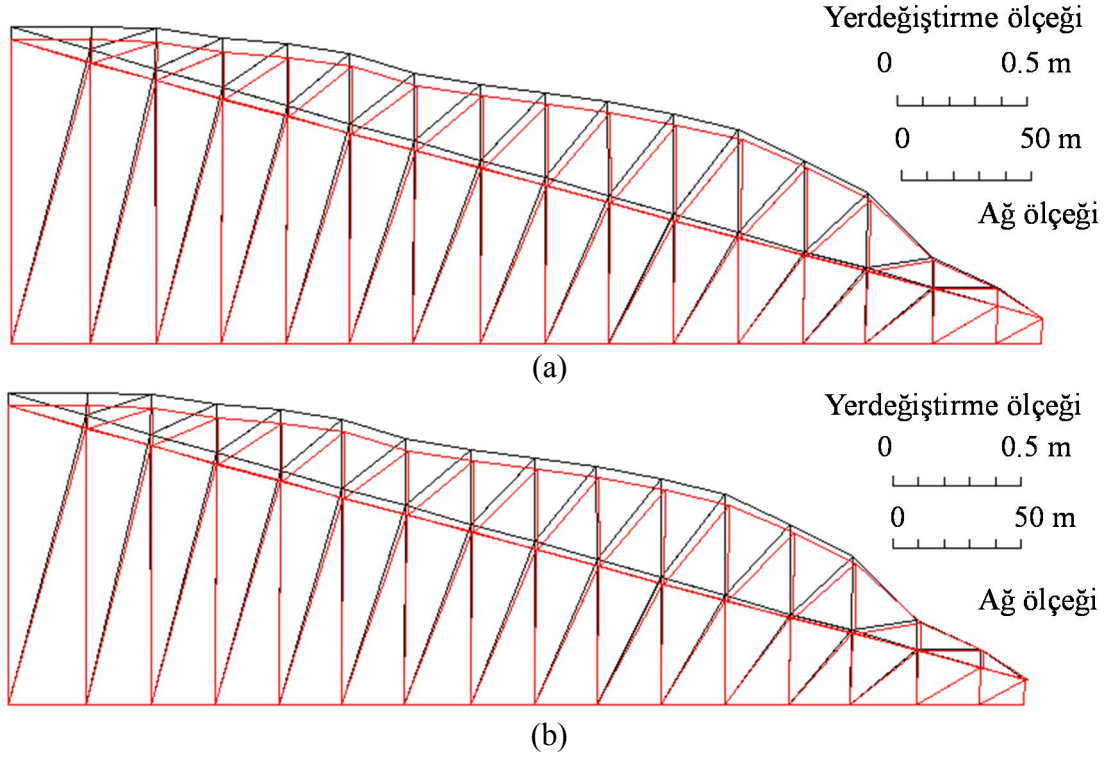
Önceki durumlardaki gibi Şekil 9.24’de, 1. ve 12. hesaplama adımları için elde edilen yerdeğiştirmeler görülmektedir. Tüm kütle ve yamaç topuğunda yerdeğiştirmeler belirgin olup, esas olarak bu koşullar altında kütle duraysızdır ve her hesaplama adımında yerdeğiştirme miktarları giderek artmaktadır.



Şekil 9.24 : 5. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.

6. Durum: 0.131 değerinde gözenek suyu basıncı katsayısı (r_u) etkisinde 5 kPa kohezyon ve 20° içsel sürtünme açısına sahip kontak zonu

Şekil 9.25’de, $r_u = 0.131$ değeri etkisi altında 1. ve 12. hesaplama adımları sonunda elde edilen yerdeğiştirmeler verilmektedir. Tüm kütle ve yamaç topuğunda belirgin yerdeğiştirmeler görülmektedir. Bu durumda alınan r_u değeri, yamaçtaki YAS seviyesinin günümüzdeki konumuna göre hesaplanmıştır.

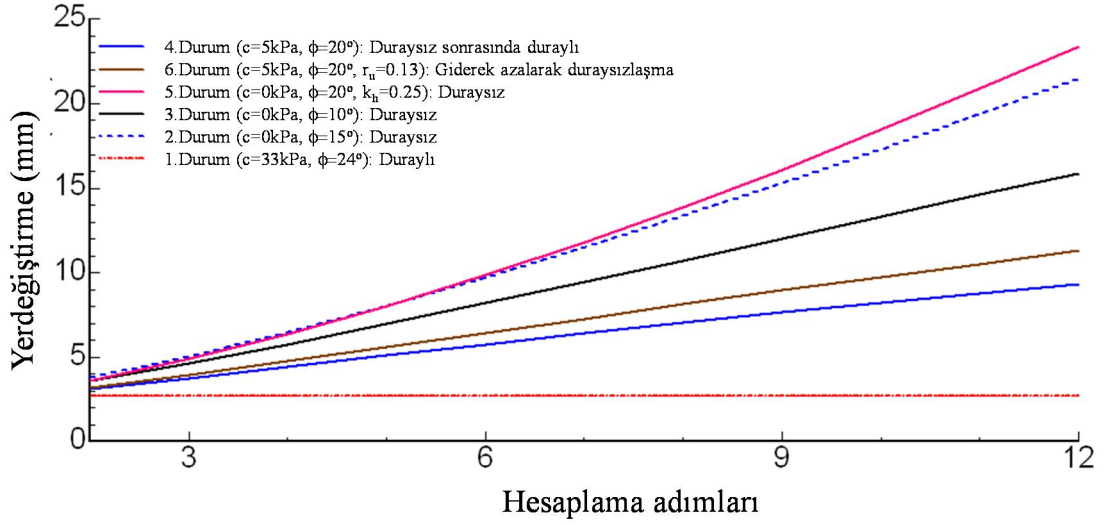


Şekil 9.25 : 6. durum için 1. (a) ve 12. (b) hesaplama adımlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.

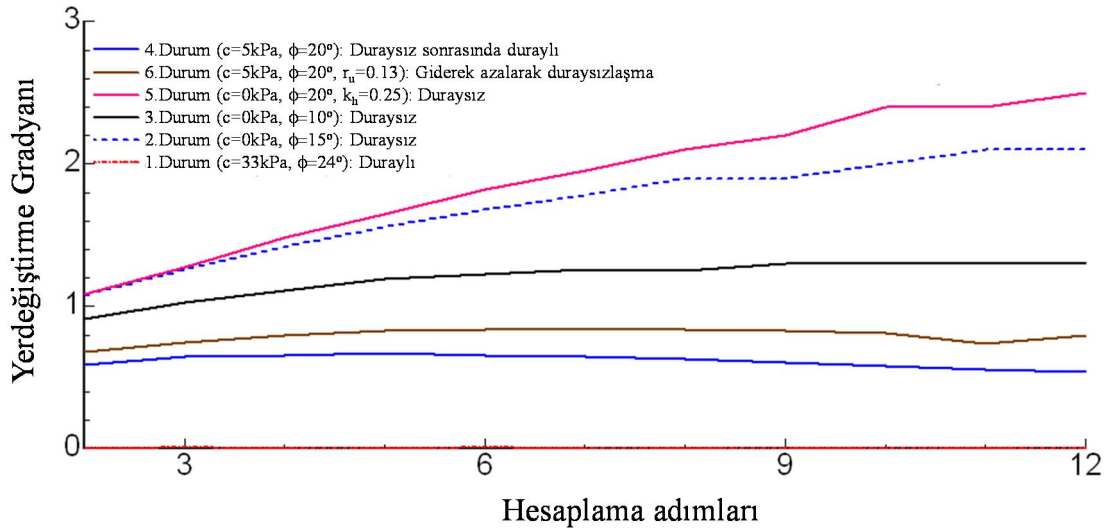
Şekil 9.26 ve 9.27’de, 6 durum için yamacın yatay yerdeğiştirme miktarları birlikte verilmiştir. 1. durumda yerdeğiştirme görülmemektedir ve bu durumlarda kütle duraylı olarak değerlendirilmiştir. 2., 3., 4., 5. ve 6. durumlarda ise artan hesaplama adımlarına bağlı olarak hesaplanan yerdeğiştirme miktarları da artmaktadır. Azalan mekanik parametreler, sismik yükleme ve YAS seviyesi etkilerine bağlı olarak yamaç duraysızlaşmaktadır. Deneysel olarak belirlenen dayanım parametreleri kullanıldığında, deprem yükü ve YAS değişimi olmaması halinde yamacın duraylı olduğu görülmektedir. Ayrıca, eğer yamaç kaymaya başlarsa yamaç geometrisi ve mekanik özelliklerde değişmezse kaymanın durması veya duraysız durumdan tekrar duraylı duruma geçişi olanaklı gözükmemektedir. Şekil 9.27’de yerdeğiştirme miktarları gradyanı olarak verilmiştir. Her hesaplama adımındaki yerdeğiştirmeler oransal olarak verilmiştir. Bu şekilden, 1. durum yanında 4. ve 6. durumlarda artan hesaplama adımlarına doğru hesaplanan yerdeğiştirmeler azalmaktadır.

Yapılan limit denge analizleri ve klasik DFEM analizleriyle Gündoğdu heyelanının, krip benzeri yavaş basamak türü yamaç hareketinin gerçek davranışının modellenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, kayan kütlelerin modellenmesi için farklı bir mekanik modele ihtiyaç duyulmuş ve DFEM yaklaşımı ile daha önce

gerçekleştirilen deneylerle belirlenmeye çalışılan doygunluğa bağlı değişen malzeme özelliklerinin kullanıldığı birleştirilmiş bir mekanik davranış modeli önerilmiştir. Bu model, bunu izleyen alt bölümde tartışılmıştır.



Şekil 9.26 : 6 durum için yamaç topuğu için elde edilen yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.



Şekil 9.27 : 6 durum için topukta elde edilen yerdeğiştirme oranlarının karşılaştırılması.

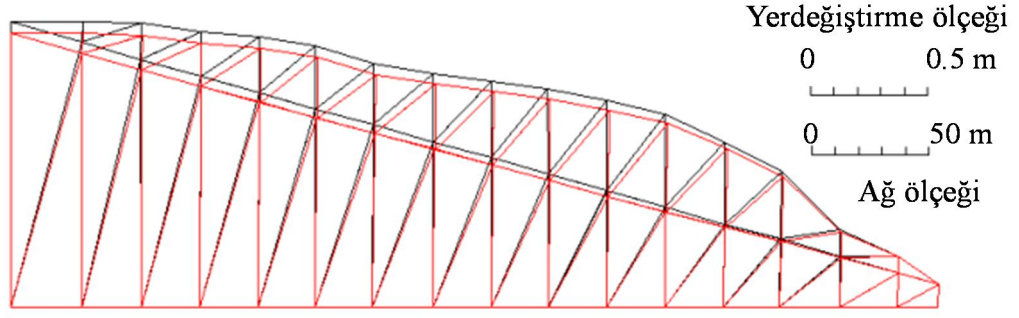
9.6 Yumuşama-Sertleşme Modelini İçeren DFEM Analizleri

Bir önceki alt bölümde de belirtildiği gibi, gözlenen kriplere benzeri Gündoğdu yamaç hareketini klasik analizlerle modellemek mümkün değildir. Klasik analizlerde yenilmenin olup olmayacağı, yenilmenin olması halinde belki çok kısa zaman aralığında gerçekleşebileceği belirlenebilmektedir. Ancak Gündoğdu yamaç

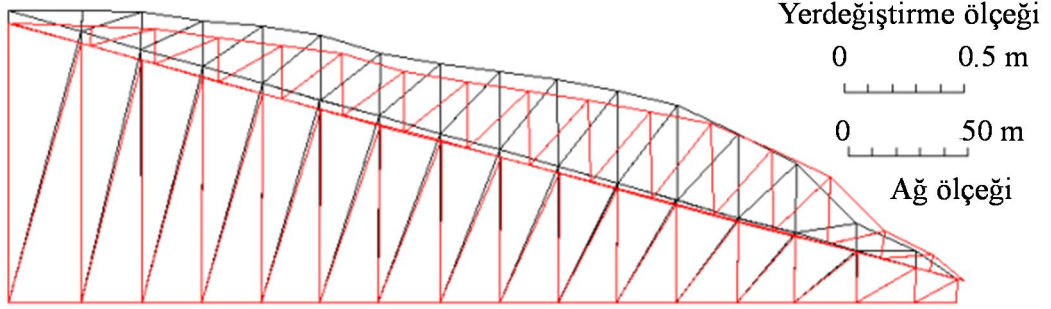
hareketinin, ilk kez rapor edildiği 1940'lı yıllardan (Önay, 1946) günümüze değin düşük hızlarda hareket ettiği bilinmektedir. Temel kavramı önceki alt bölümlerde açıklanan yumuşama-sertleşme olgusu, bu alt bölümde DFEM analizine eklenmiştir. Bu sayede kontak zonu için devirsel yumuşama ve sertleşme olgusunu da içeren yeni bir model oluşturulmuş ve bu model DFEM-CSH olarak adlandırılmıştır. Hazırlanan yazılımın hesaplama mantığı ve akış şeması Şekil EK-B.6'da gösterilmiştir.

Arazide ölçülen yerdeğiştirme verisinin sağlıklı olarak alınabildiği zaman aralıkları için hesaplamalar yapılmıştır. Böylelikle, ölçülen ve hesaplanan değerlerin karşılaştırılması mümkün olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, saatlik yerdeğişimi ölçümünün yapıldığı AE-4 istasyonu, bulunduğu noktanın yol altında olmasından dolayı sıklıkla hasara uğramış ve kurulduğu 2009 yılından bu yana sağlıklı veri alınabilmesi mümkün olamamıştır. Bu bölümde 2011 Mayıs ayından itibaren kaydedilen yağış verisi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. 215 günlük bir zaman aralığı için hesaplamalar yapılmış ve Şekil 9.28'de 1. ve 215. gün sonundaki yerdeğiştirme miktarları verilmiştir. Şekil 9.29'da ise, aynı zaman aralığı için asal gerilmelerin değişimi ve elde edilen en büyük makaslama gerilmeleri görülmektedir. Yağışlara bağlı olarak en büyük yerdeğiştirmenin meydana geldiği kayma zonunda, kuruma-sertleşme çevrimlerine bağlı olarak meydana gelen belirgin kalıcı yerdeğiştirme miktarları belirlenmiştir. Bu durumda önerilen yöntemle arazide gözlenen yamaç davranışının temsil edilebildiği, hesaplanan ve ölçülen değerlerin uyumlu olduğu söylenebilir.

Yerdeğiştirme miktarlarının daha net olarak görülebilmesi amacıyla Şekil 9.30'da görülen ve yamacın üst, orta ve topuk kesimlerinden seçilen üç noktanın 215. gün sonunda elde edilen yerdeğiştirme miktarları grafiksel olarak verilmiştir. Seçilen noktalardaki deformasyonlar farklılık göstermektedir.

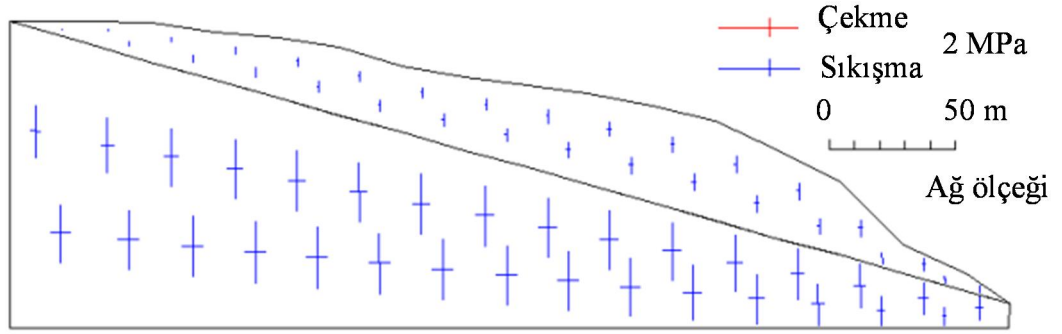


Adım: 1. gün



Adım: 215. gün

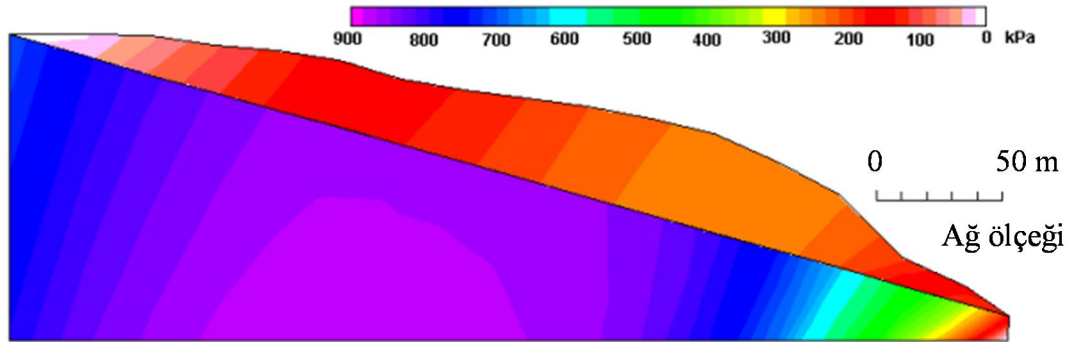
Şekil 9.28 : Analizlerde 1. ve 215. gün sonlarında elde edilen yerdeğiştirme miktarları.



Asal gerilme

Adım: 215 gün

Makaslama Gerilmesi Ölçeği

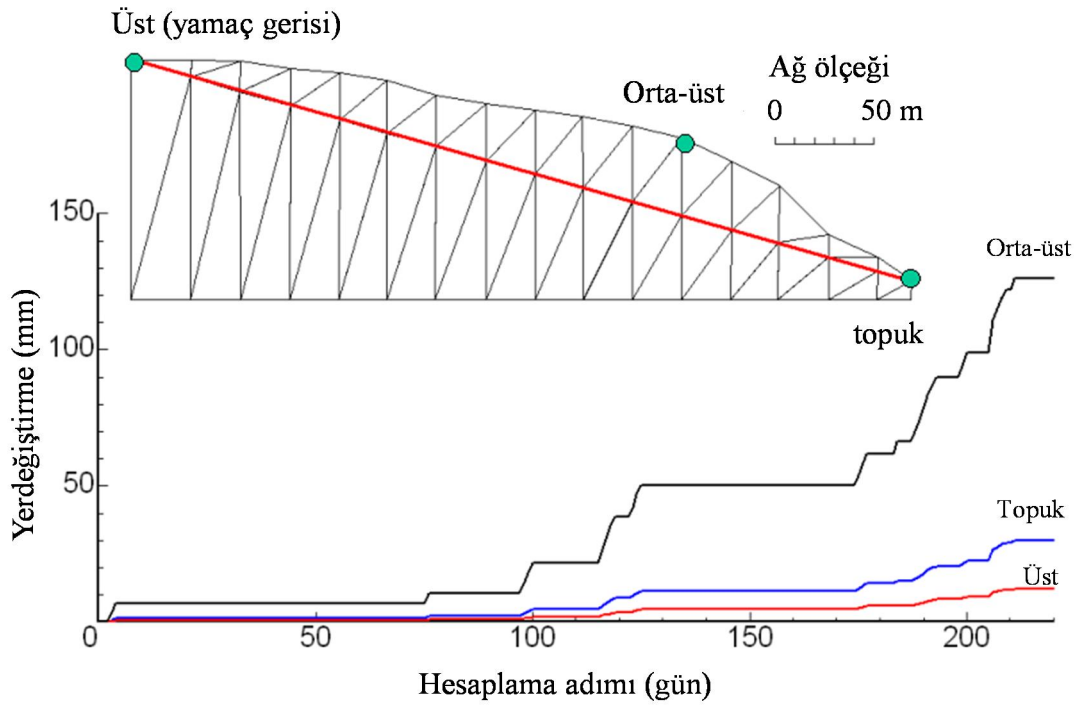


Adım: 215 gün

Şekil 9.29 : Hesaplamalarda 1. ve 215. günlerin sonu için elde edilen asal gerilme değerleri ve en büyük makaslama gerilmesi eşdeğer eğrileri.

En büyük yerdeğiştirme miktarı yaklaşık 150 mm olarak ve yamaçın orta üst kesimlerinde seçilen nokta için hesaplanmıştır. Aynı zaman aralığı için topuk ve üst kesimlerde belirlenen yaklaşık yerdeğiştirme miktarları sırasıyla 30 ve 15 mm olarak hesaplanmıştır. Üst ve orta kesimler, aynı zamanda yerleşim yeri olan ve çeşitli yapısal olumsuzlukların görüldüğü kesimlerdir. Hesaplanan yerdeğiştirme miktarları, yamaç hareketiyle meydana gelen olumsuzlukları da açıklayabilmektedir.

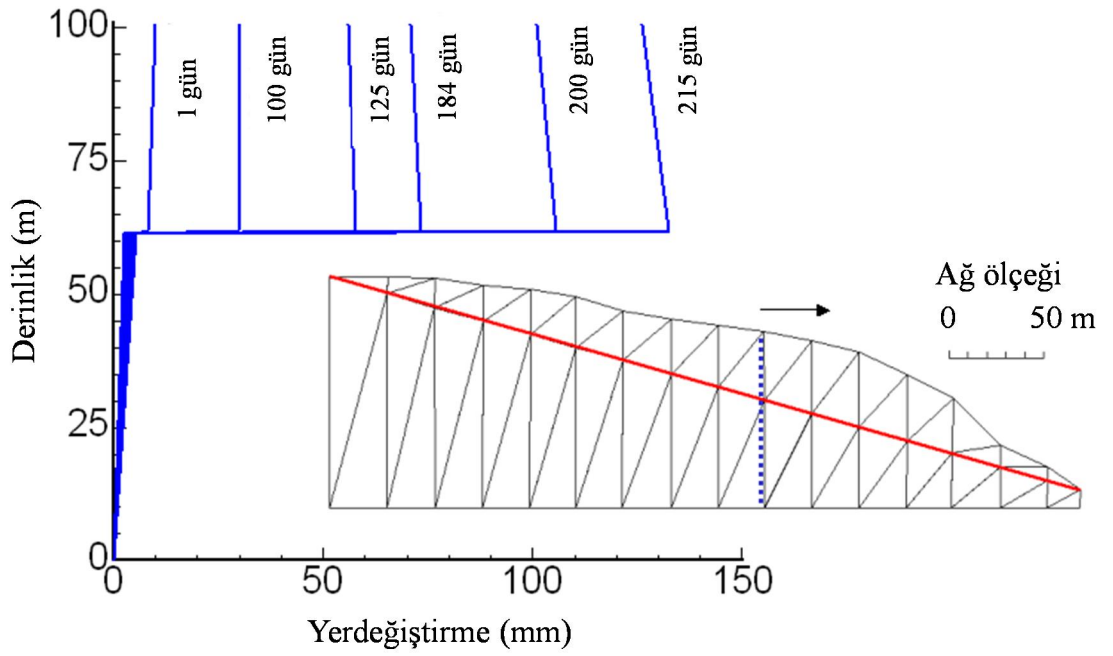
2005-2012 yılları arasında lazer mesafe ölçer cihazıyla en çok hareket miktarı 2 no.lu istasyonda yıllık ortalama 3.2 cm olarak belirlenmiştir. Bu değer, saatlik yerdeğiştirmeyi ölçülen AE-4 istasyonunda ise 1.75 cm'dir. Yapılan hesaplamalarda ise, yıllık yerdeğiştirme miktarı yamaçın üst kesimleri için 2.5 cm olarak hesaplanmıştır. Arazide ölçülen yerdeğiştirme miktarları ile hesaplanan miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 9.30 : Yamaç üzerinde seçilen 3 noktanın 215. gün için hesaplanan yerdeğiştirme miktarları.

Benzer olarak, Şekil 9.31'de yamaç üzerinde seçilen düşey bir kesitte belirli zaman aralıkları için hesaplanan yerdeğiştirme miktarları görülmektedir. Sonuçlar, özellikle son dönem kuyu içi birim deformasyon ölçümü verileri ile uyumluluk göstermektedir.

Kuyu içi birim deformasyon verisinin son doneminde yuzeyden yaklaşık 30 m derinde belirlenen belirgin deformasyon artışı, hesaplama sonuılarında da gozlenmektedir. Seçilen noktanın yaklaşık yatay yerdeğiştirme miktarı 150 mm'ye yakındır. Babadağ ilçesi Gundoğdu Mahallesi'nde gorulen yamaç hareketi, izleme teknikleriyle elde edilen hareket mekanizmasına en yakın şekilde modellenebilmiş ve meydana gelen deformasyonlar açıklanabilmiştir. Bu model ile boylesi ilginç bir muhendislik sorununun açıklanmasına katkı sağlanması mumkun olmuştur.



şekil 9.32 : Farklı zamanlar için belirlenen yerdeğiştirme miktarları.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, Babadağ ilçe merkezindeki Gündoğdu Mahallesi'nde görülen ve yol açtığı çeşitli olumsuzluklarla yaşayan halkı etkileyen Gündoğdu heyelanı çeşitli arazi izleme teknikleri, laboratuvar ölçeğinde gerçekleştirilen model deneyleri, duraylılık analizleri ve sayısal çözümleme teknikleriyle incelenmiştir.

İnceleme alanının depremsellik açısından aktif bir bölgede olduğu ve yakın çevredeki aktif fayların varlığı göz önünde bulundurularak günümüze değin yakın çevrede meydana gelmiş 5 ve üzeri büyüklüklü depremler belirlenmiş ivme azalım ilişkileri ile inceleme alanında gelişebilecek ivmeler 15-115 gal arasında olabileceği tahmin edilmiştir. Ayrıca Pamukkale fayına bağlı olarak 6.8 büyüklüklü bir deprem olması koşulunda da inceleme alanında 350-375 gal'lik ivmelerin gelişebileceği belirlenmiştir.

Çok parametrelili arazi izleme verisine göre, yıllık ortalama 1.75 ile 3.2 cm arasında açılmanın devam ettiği gözlenmiştir. Ayrıca kuyu içi birim deformasyon ölçümü kaydedilen kuyuda yüzeyden 28.5 m derinlikte belirgin bir deformasyon artışı görülmüştür. İzleme verileri ışığında söz konusu yamaç hareketinin duraysızlığının devam ettiği sonucuna varılmıştır.

Laboratuvar koşullarında düzlemsel kayma yüzeyi içeren bir fiziksel model hazırlanmış ve eğimlendirme, dinamik ve şok deneylerine tabi tutulmuştur. Yapılan statik eğimlendirme deneylerinde ortalama 33.8°'lik kayma açısı belirlenmiş, ayrıca dinamik kayma açıları da deney verileri kullanılarak, ortalama 31.13° olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, blok hareketinin izlendiği dinamik sarsma masası deneylerinin sayısal çözümlerinde kullanılmıştır.

İnceleme alanında tabaka eğimlerinin 16 ile 24° arasında değiştiği, ilçe merkezinin kurulu olduğu üst seviyelerden dere seviyelerine inildikçe bu değerlerin 16°'den, 24°'ye doğru değiştiği bilinmektedir. 16, 18, 20, 22 ve 24°'de yapılan dinamik deneyler sonucunda blok hareketine sebep olabilecek kritik ivme 16° için 220 ve 24° için 450 cm/s² olarak ölçülmüştür. Yapılan model deneyleri de, yakın çevrede

meydana gelebilecek bir deprem etkisiyle söz konusu heyelanın tetiklenme riski altında olduğunu göstermiştir. Eğimli düzlem boyunca kritik ivmenin aşılmasıyla görülen blok hareketi dinamik yüklemeye bağlı olarak basamak şeklinde gözlenmiştir. Sayısal çözümlerle ölçülen blok hareketi karşılaştırılmış sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan şok deneylerinde de dinamik deneylerde olduğu gibi kademe kademe blok hareketi gözlenmiş, ancak bu deneylerde hareket oluşturacak ivme değerlerinin 1-2 g gibi yüksek değerlerde olduğu görülmüştür. Benzer şekilde sonuçlar sayısal analizlerle karşılaştırılmıştır.

Blok hareketi ile eş zamanlı olarak kaydedilen akustik yayılma aktivitesinin hemen hemen hareketle eş zamanlı olarak arttığı gözlenmiştir. Bu durum algılayıcı ile kayma yüzeyi arasındaki mesafenin çok kısa olmasıyla açıklanabilir.

2002 yılı ve günümüzdeki yeraltısuyu seviyesi göz önünde bulundurularak limit denge analizleri gerçekleştirilmiştir. Statik ve psödo statik analizler kayma yönüne paralel olarak alınmış iki adet kesit üzerinde gerçekleştirilmiş ve güvenlik katsayısı 1.17 ile 1.28 arasında hesaplanmıştır. Psödo statik analiz ile yamacı duraysız hale getirecek kritik ivme değeri ise yaklaşık 45-75 gal civarında hesaplanmıştır.

Gündoğdu yamaç hareketinin meydana gelebilecek bir depremde göstereceği davranışın veya meydana gelebilecek yerdeğiştirme miktarlarının belirlenebilmesi için dinamik stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizde Pamukkale fayına bağlı meydana gelebilecek 6.8 büyüklüklü olası bir depremde inceleme alanını etkileyecek, 350 gal civarında tahmin edilen ivme değeri eşik olarak alınmış ve yakın geçmişte Akköy'de meydana gelen 4 büyüklüğündeki depremin Babadağ'da alınan kaydı en büyük değeri 350 gal olacak şekilde büyütülmüştür. Bu kayıt kullanılarak dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Yarı doygun koşullar için 25 s'lik sürede toplam 25 cm'lik bir hareketin meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Bu da göstermektedir ki, Gündoğdu heyelanı böyle bir olası deprem etkisiyle ani olarak harekete geçebilecek ve mevcut durumdaki uzun süreli heyelan etkisinde gelişen küçük yerdeğiştirmelerden dolayı hasar görmüş olan yapılarda toptan göçmeler gibi daha ağır hasarlar ve can kayıpları meydana gelebilecektir.

Yapılan analizlerin, Gündoğdu yamaç hareketinin gerçek davranışını ortaya koymada yetersiz kaldığı görülmüştür. Özellikle yağışlı dönemlerden sonra artış gösteren

hareketin yağışsız dönemlerde azalması, marnın su içeriğine bağlı olarak değişen deformabilite özelliklerinin harekete katkı yapabileceği düşünülerek bir mekanik model ile açıklanmıştır.

Alınan kesit üzerinde sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş ve en büyük yerdeğiştirmenin meydana geldiği zon, YAS seviye değişimine bağlı olarak suya doymun hale gelen kontak zonu olarak tanımlanmıştır. Ayrık sonlu elemanlar yaklaşımı ile 6 durum için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu durumlarda, farklı mekanik parametreler, YAS durumu ve yatay sismik katsayı etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Hesaplanan yerdeğiştirme miktarları 3. ve 5. durum için en yüksektir. 3. durumda, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri 0 kPa ve 10° olarak seçilmiş ve bu en düşük parametrelerle, beklenildiği gibi yüksek yerdeğiştirme miktarları belirlenmiştir. Benzer şekilde yüksek yerdeğiştirme miktarlarının belirlendiği 5. durumda ise, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri 5 kPa ve 20° olarak seçilmiş, ayrıca 0.25 değerinde yatay sismik katsayı kütleyle etkidiği varsayılmıştır.

En son kısımda ise YAS seviye değişimlerine bağlı olarak doymunlaşp yumuşayan ve kuruyarak sertleşen zonun analitik modeli DFEM analizine eklenmiş (DFEM-CSH) ve ölçülen yağış verisi ve su içeriğine bağlı olarak değişen malzeme özelliklerinin göz önünde bulundurulduğu analizler gerçekleştirilmiştir. 2011 Mayıs ayından itibaren 215 günlük yağış verisi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. En büyük yerdeğiştirme miktarı yaklaşık 150 mm olarak yamaçın orta üst kesimlerinde seçilen bir nokta için hesaplanmıştır. Aynı zaman aralığı için topuk ve üst kesimlerde belirlenen yaklaşık yerdeğiştirme miktarları daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan hesaplamalarda yıllık yerdeğiştirme miktarı yamaç üst kesimleri için yıllık 2.5 cm olarak hesaplanmıştır. Arazide ölçülen yerdeğiştirme miktarları ile hesaplanan miktarların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Babadağ ilçesi Gündoğdu mahallesinde görülen yamaç hareketi, izleme teknikleriyle elde edilen hareket mekanizmasına en yakın şekilde modellenenmiş böylelikle meydana gelen deformasyonlar açıklanabilmiş ve bu ilginç mühendislik sorununun açıklanmasına yönelik yeni bir yaklaşım getirilmiştir.

İlçe merkezine T.C. Başbakanlık, AFAD, Deprem Dairesi tarafından yerleştirilen kuvvetli yer hareketi ölçüm istasyonu sayesinde bundan sonra yakın çevrede

olabilecek depremlerin meydana getireceği gerçek ivme değerleri alınarak daha gerçekçi ivme verileri ile analizlerin gerçekleştirilmesi mümkün olabilecektir.

Gündoğdu mahallesinde meydana gelen sürekli yamaç hareketinin iskana ve yapılaşmaya kapatıldıktan sonra, bu bölgenin hem Babadağ'ın sosyo-ekonomik durumuna katkı koymasđ hemde insanlığa aktif bir heyelan bölgesi eğitim ve oğretim amacıyla Heyelan JEO-PARK'đ haline dönüştürülmesi Dünyada ilk ve güzel bir örnek bir çalışma olacaktır. JEO-PARK haline dönüştürülmesi halinde ana yol güzergahının korunması örnek olacak şekilde řu anda büyük deformasyona uğramış yapıların yıkılmadan bırakılması ve mahalle içinde yeni yapılmış bazı binaların aynen bırakılması, kurulmuş olan ölçüm sistemlerinin korunması ve güçlendirilmesi gerekmektedir. Bununla beraber park giriş ve çıkışlarındaki sorumluluk olgusunada yasal bir çözüm getirilmelidir. Bu olgu Türkiyede řu anda Kapadokya bölgesindeki eski yeraltđ yapılarının durumuna oldukça benzerdir. Yine benzer şekilde Japonya'da Gifu vilayetindeki Mitake kasabasında terkedilmiş eski yeraltđ linyit ocaklarını ziyaret eden kişilere herhangi bir olumsuzluk durumda sorumluluğun kendilerine ait olduğuna dair bir belge imzalatılarak bu soruna çözüm getirilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abe, T., Çelik, S.B., and Tano, H.,** 2007. Experimental Study on Kaiser Effect of Rock-like Materials by Using a Handy AE Counting System. *Nihon University Journal of College of Engineering*. **49(1)**, 19-31.
- Akarsu, İ.,** 1969. Ege Bölgesinin (Babadağ ve Civarı) Jeolojisi, *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Cilt **XII**, 1-2, 1-9.
- Alçıçek, H., Varol, B., and Özkul, M.,** 2007. Sedimentary Facies, Depositional Environments and Palaeogeographic Evolution of the Neogene Denizli Basin of SW Anatolia, Turkey. *Sedimentary Geology*, **202**, 596-637.
- Aleotti, P., and Chowdhury, R.N.,** 1999. Landslide Hazard Assessments: Summary Review and New Perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **58**, 21-44.
- Altaylı, K., Şeren, İ., İleri, N., ve Yılmaz, S.,** 2006. Babadağ İlçesi Gündoğdu Mahallesi Jeolojik Etüt Raporu. *Afet İşleri Genel Müd., Ankara*.
- Altunel, E.,** 2000. (Lattivita Sismica a Hierapolis e Nelle Zone Limitrofe) Hierapolis ve Yakın Çevresinde Tarihsel Deprem Aktivitesi. *Ricerche Archeologiche Turche Nella Valle Del Lykos (Lykos Vadisi Türk Arkeoloji Araştırmaları)* 229-325.
- Ambraseys, N.N., and Menu, J.M.,** 1988. Earthquake-Induced Ground Displacements. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **16 (7)**, 985-1006.
- ASTM,** 1999. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *No: D 3080 – 98*.
- Atak, O., Aksu O., Aydan, Ö., and Çevik, Y.,** 2003. The Evaluation of Long-Term Ground Deformation of The Landslide Area of Babadağ Through Aerial Photogrammetry Technique. *Proceedings of the International Colloquium on the Instrumentation of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey, H.Tano, H. Watanabe and Ö. Aydan(eds.), November 8, 2003, Nihon Univ., Koriyama, Japan*,133-142.
- Aydan, Ö.,** 1994. The Dynamic Shear Response Of An Infinitely Long Visco-Elastic Layer Under Gravitational Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13**, 181-186.
- Aydan, Ö.,** 1998. A Simplified Finite Element Approach for Modeling the Lateral Spreading of Liquefied Ground. *Proceedings of the Second Japan-Turkey Workshop on Earthquake Disaster Prevention Research in Turkey, JICA-ITU, Vol.2*, 1-10.

- Aydan, Ö.**, 2001. İstanbul Boğazı Denizaltı Geçışı İçin Tüp Tünel ile Kalkan Tünelin Uygunluğunun Karşılaştırılması. *Jeoloji Mühendisliği*, **25(1)**, 1-17.
- Aydan, Ö.**, 2003a. The Mechanism of the Creep-Type Landslide at Babadağ. *Proceedings of the International Colloquium on the Instrumentation of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey*, H.Tano, H. Watanabe and Ö. Aydan(eds.), November 8, 2003, Nihon Univ., Koriyama, Japan, 39-50.
- Aydan, Ö.**, 2003b. The Moisture Migration Characteristics of Clay-Bearing Geomaterials and the Variations of Their Physical and Mechanical Properties with Water Content. *2nd Asian Conference on Saturated Soils (UNSAT-ASIA 2003)*.
- Aydan, Ö.**, 2007. Aktif Faylardan Olası Depremlerin Sismik Özellikleri ile Sıvılaşma ve Heyelan Riskinin Tahmini. *6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, 563-574.
- Aydan, Ö.**, 2011. Some Issues in Tunnelling Through Rock Mass and Their Possible Solutions. *First Asian Tunnelling Conference*, ATS11, 33-44.
- Aydan, Ö., Akagi, T., and Kawamoto, T.**, 1993. Theoretical and Numerical Modeling of Swelling Phenomenon of Rocks in Tunnel Excavations. *The 2nd Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics*, Sydney, 331-336.
- Aydan, Ö., Ito, T., Akagi, T., and Kawamoto, T.**, 1994. Theoretical and Numerical Modeling of Swelling Phenomenon of Rocks in Rock Excavations. *In Proceedings of Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, IACMAG, Morgantown, 3, 2215-2220.
- Aydan, Ö., Sezaki, M., and Yarar, R.**, 1996. The Seismic Characteristics of Turkish Earthquakes. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, June 23-28, Acapulco, Mexico.
- Aydan, Ö., ve Mamaghani, I.H.P.**, 1996. Ayrık Sonlu Elemanlar Yönteminin Kaya Mühendisliği Yapılarına Uygunluğu. *3. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ankara, 283-290.
- Aydan, Ö., Mamaghani, I.H.P., and Kawamoto, T.**, 1996. Application of Discrete Finite Element Method (DFEM) to Rock Engineering Structures, NARMS'96, 2039-2046.
- Aydan, Ö., Kumsar, H., and Ulusay, R.**, 2001. How to Infer the Possible Mechanism and Characteristics of Earthquakes from the Striations and Ground Surface Traces of Existing Faults, *Seismic Fault Induced Failures*, 153-162.
- Aydan, Ö., and Ulusay, R.**, 2002. Back-Analysis of a Seismically Induced Highway Embankment Failure During the 1999 Düzce Earthquake. *Environmental Geology*, **42**, 621-631.
- Aydan, Ö., and Ulusay, R.**, 2003. Geotechnical and Geoenvironmental Characteristics of Man-made Underground Structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, **69**, 245-272.

- Aydan, Ö., Ulusay, R., Kumsar, H., and Çevik, S.Y.,** 2003. Laboratory and In-Situ Tests on Rock and Bedding Planes and Machinery Induced Vibrations of Babadağ Landslide Area. *Proceedings of the International Colloquium on the Instrumentation of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey*, H.Tano, H. Watanabe and Ö. Aydan(eds.), November 8, 2003, Nihon Univ., Koriyama, Japan, 91-100.
- Aydan, Ö., Daido, M., Tano, H., Nakama, S., and Matsui, H.,** 2006. The Failure Mechanism of Around Horizontal Boreholes Excavated in Sedimentary Rock. *50th US Rock Mech. Symp.*, Paper No. 06-130.
- Barton, N., and Choubey, V.,** 1977. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics*, **10**, 1-54.
- Barton, N.,** 1973. Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints. *Engineering Geology*, **7**, 287-332.
- Burke, C.B.,** 2004. Full-Scale Shaking Table Tests and Finite Element Analysis of Reinforced Soil Retaining Walls, *PhD Thesis*, Columbia University, NY, 195p.
- Cruden, D.M.,** 1991. A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **43**, 27-29.
- Çelik, S.B., Kumsar, H., ve Aydan, Ö.,** 2011. Babadağ Gündoğdu Heyelanının Mekanizmasının Statik ve Dinamik Model Deneyleri ile İncelenmesi. *X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 8-9 Aralık 2011, ODTÜ, Ankara*, 161-170.
- Çevik, S.Y.,** 2003. Babadağ (Denizli) İlçesindeki Kütle Hareketinin Nedenleri, Mekanizması ve Modellemesi Üzerine Bir Araştırma. *Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara*, 162s (yayınlanmamış).
- Çevik, S.Y., and Ulusay, R.,** 2005. Engineering Geological Assessments of the Repeated Plane Shear Slope Instability Threatening Babadağ (Turkey) and Its Environmental Impacts. *Environmental Geology*, **47(5)**, 685-701.
- Dai, F.C., Lee, C.F., and Ngai, Y.Y.,** 2002. Landslide Risk Assessment and Management: An Overview. *Engineering Geology*, **64**, 65–87.
- Daido, M., Aydan, Ö., Kuwae, H., and Sakoda, S.,** 2003. An Experimental Study on the Validity of Kaiser Effect for In-Situ Stress Measurements by Acoustic Emission Method (AEM) in Rocks Subjected to Cyclic Loads. *Journal of The School of Marine Science and Technology*, **1(1)**, 17-22.
- Ercan, T., Dinçel, A.S., Günay, E., ve Türkecan, A.,** 1977. Uşak Yöresinin Jeolojisi ve Volkanitlerinin Petrolojisi, *MTA Rapor no: 6354*, Ankara.
- Ergün, M.,** 1969. Babadağ Bucağı Jeolojik Etüd Raporu. *Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara*, 3s.
- Franklin, J.A., and Chandra, R.,** 1972. The Slake Durability Test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **9**, 325–341.

- Franklin A.G., and Chang F.K.,** 1977. Permanent Displacements of Earth Embankments by Newmark Sliding Block Analysis, Earthquake Resistance of Earth and Rock-Fill Dams. Report 5, *US Army Engineer Waterways Experiment Station, Misc paper no: S-71-17.*
- Fujiwara, T., Ishibashi, A., and Monma, K.,** 1999. Application of Acoustic Emission Method to Shirasu Slope Monitoring. *Slope Stability Engineering, Yagi, Yamagami & Jiang ed.* 147-150.
- Gökçeoğlu, C. ve Ercanoğlu, M.,** 2001. Heyelan Duyarlılık Haritalarının Hazırlanmasında Kullanılan Parametrelere İlişkin Belirsizlikler. *Yerbilimleri*, **23**, 189-206.
- Graphtec,** 2009. GL900 Midi Logger User's Manual 1st Edition. Graphtec Corporation, *Manual no: GL900-4/8-UM-151*, 105p.
- Hançer, M., and Çemen İ.,** 2005. Geometry and Structural Evolution of Extensional Faults and Folds in the Denizli Basin, Southwestern Turkey. *Geological Society of America Annual meeting, Salt Lake City, Abstracts with Programs*, **37(7)**, p.212.
- Hardy, H.R.Jr.,** 2003. Acoustic Emission / Microseismic Activity. Vol. 1 Principles, Techniques and Geotechnical Applications. *A.A. Balkema Publishers.* 281p.
- Hardy, H.R.Jr., Zhang, D., and Zelanko, J.C.,** 1989. Recent Studies of the Kaiser Effect in Geologic Materials. *Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), State College, PA, Trans. Tech.Publications*, 27-55.
- Hayashi, M., Kanagawa, T., Hibino, S., Motojima, M., and Kitahara, Y.,** 1979. Detection of Anisotropic Geo-Stresses Trying by Acoustic Emission, and Non-Linear Rock Mechanics on Large Excavating Caverns. *Proceedings of the 4th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreux*, **2**, 211-218.
- Hoek, E., and Bray, J.W.,** 1981. Rock Slope Engineering. *IMM Publication*, London, UK.
- ISRM,** 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J. A. (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods. ISRM, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Kozanofset, Ankara, Turkey, 628p.
- Jibson, R.W.,** 1993. Predicting Earthquake-Induced Landslide Displacements Using Newmark's Sliding Block Analysis. *Transport. Res. Rec.* **1411**, 9–17.
- Jibson, R.W., and Keefer, D.K.,** 1988. Landslides Triggered by Earthquakes in the Central Mississippi Valley, Tennessee and Kentucky. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **Vol. 1336-C**, 24p.
- Jibson, R.W., Harp, E.L., and Michael, J.A.,** 1998. A Method for Producing Digital Probabilistic Seismic Landslide Hazard Maps: An Example from the Los Angeles, California Area. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 98-113.

- Jupe, A.J., Barr, S.P., and Pine, R.J.**, 1992. In Situ Stress Measurements Obtained Using Overcoring and the Kaiser Effect of Acoustic Emission within the Carnmenellis Granite, UK. *Progress in Acoustic Emission VI*. 197-174.
- Kastelli, M.**, 1971. Denizli-Sarayköy, ubukdağ-Karacasu Alanı Jeoloji İncelemesi. *MTA Rapor no:4573*, Ankara.
- Kawamoto, T., and Aydan, .**, 1999. A Review of Numerical Analysis of Tunnels in Discontinuous Rock Masses. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **Vol. 23**, 1377-1391
- Kaya, H.E.**, 2008. Babadağ İlçesi (Denizli) Ktle Hareketlerinin Mühendislik Jeolojisi Açısından İncelenmesi ve Ktle Hareketi Risk Alanlarının Belirlenmesi, *Yüksek lisans projesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli*, 67s (yayınlanmamış).
- Kaymakı, N.**, 2006. Kinematic Development and Paleostress Analysis of the Denizli Basin (Western Turkey): Implications of Spatial Variation of Relative Paleostress Magnitudes and Orientations. *Journal of Asian Earth Sciences*, **27**, 207-222.
- Koyiğit, A.**, 2005. The Denizli Graben-Horst System and the Eastern Limit of Western Anatolian Continental Extension: Basin-Fill, Structure, Deformational Mode, Throw Amount and Episodic Evolutionary History, SW Turkey. *Geodinamica Acta*, **18(3/4)**, 167-208.
- Koerner R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M.**, 1977. Acoustic emission studies of soil masses in the laboratory and field. *Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H. R.Hardy, Jr. and F. W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications*, 243-256.
- Konak, N., Akdeniz, N., ve akır, M.H.**, 1986. al-ivril-Karahallı Dolayının Jeolojisi. *MTA Rapor no: 8945*, 122s.
- Kramer, S.L.**, 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 643p.
- Kumsar, H.**, 1993. Computerised Mine Slope Stability Assessment by Using Inter-Slice Force Transmission Theory. *PhD Thesis*, Nottingham University, UK, 255p.
- Kumsar, H., Aydan, ., Tano, H., ve Atak, O.**, 2004. Uzun Sreli Babadağ (Denizli) Heyelanının Kaya Mekaniği Açısından İncelenmesi, 7. *Kaya Mekaniği Sempozyumu, Ekim 2004, Sivas*.
- Kumsar, H., Aydan. ., Tano, H., ve elik, S.B.**, 2008. 23-26 Temmuz 2003 Buldan (Denizli) Depremlerinin Mühendislik İncelemesi, Ekin Yayınevi, Bursa, 118s.
- Lavrov, A.**, 2003. The Kaiser Effect in Rocks: Principles and Stress Estimation Techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **40**, 151-171.
- Li, T., and Wang, S.**, 1992. Landslide Hazards and Their Mitigation in China. *Science Press, Beijing*, 84p.

- Lin, M-L., and Wang, K-L.,** 2006. Seismic Slope Behavior in a Large-Scale Shaking Table Model Test. *Engineering Geology*, **86**, 118-133.
- Makdisi, F.I., and Seed, H.B.,** 1978. Simplified Procedure for Estimating Dam and Embankment Earthquake-Induced Deformations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. **104**, 299-321.
- Mamaghani, I.H.P., Baba, S., Aydan, Ö., and Shimizu, S.,** 1994. Discrete Finite Element Method for Blocky Systems. *Proc. Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Morgantown, 1, 843-850.
- Mamaghani, I.H.P., Aydan, Ö., and Kajikawa, Y.,** 1999. Analysis of Masonry Structures Under Static and Dynamic Loading by Discrete Finite Element Method. *JSCE Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.**16(2)**, 75-86.
- McCauley, M.L.,** 1977. Monitoring Slope Stability with Acoustic Emission. *Proceedings of the 1st Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H. R.Hardy, Jr. and F. W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications*, 257-269.
- Meymand, P.J.,** 1998. Shaking Table Scale Model Tests of Nonlinear Soil-Pile-Superstructure Interaction In Soft Clay, *PhD Thesis*, University of California-Berkeley, 462p.
- Miles, S.B., and Ho, C.L.,** 1999. Rigorous Landslide Hazard Zonation Using Newmark's Method and Stochastic Ground Motion Simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **18(4)**, 305-323.
- Momayez, M., Hassani, F.P., and Hardy, H.R.Jr.,** 1992. Maximum Curvature Method: A Technique to Estimate Kaiser-Effect Load from Acoustic Emission Data. *Journal of Acoustic Emission*, **10(3/4)**, 61-65.
- Muhlenkamp, M.J.,** 1997. Analysis, Design, and Construction of a Shaking Table Facility, *MSc Thesis*, Rice University, TX, 178p.
- Newmark, N.M.,** 1965. Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Geotechnique* **15**, 139-160.
- Omron,** 2004. ZX-L-N Series Laser Type Smart Sensors User's Manual. Omron Corporation, 168p.
- Önay, T.S.,** 1946. Babadağ Civarı Göçüntüleri, *MTA dergisi*, **36**, 300-304.
- Öngür, T.,** 1971. Denizli-Babadağ Çevresine İlişkin Jeolojik Etüt ve Jeotermal Olanakları, *MTA Rapor no: 4689*.
- Özpınar, Y., Koralay T., Çobanoğlu İ., Köseoğlu M., ve Sabaz. Ü.,** 1999a. Babadağ ve Yakın Çevresinin Jeolojik-Petrografik ve Uygulamalı Jeoloji Açısından İncelenmesi, *1. Babadağ Sempozyumu, Pamukkale Üniv., Denizli*, 1-23.
- Özpınar, Y., Köseoğlu M., Çobanoğlu İ., ve Ok, R.,** 1999b. Babadağ (Denizli) İlçe Merkezi Gündoğdu Heyelanı. *1. Babadağ Sempozyumu, Pamukkale Üniv., Denizli*, 39-50.

- Pinzon, A.F.S.**, 2005. Development, Modeling, Identification and Simulation of a Small Shaking Table System. *PhD Thesis*, University of California Los Angeles, 235p.
- Schuster, R.L., and Fleming, R.W.**, 1986. Economic Losses and Fatalities Due to Landslides. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, **23(1)**, 11-28.
- Seto, M., Utagawa, M., and Katsuyama, K.**, 1992. The Estimation of Pre-Stress from AE in Cyclic Loading of Pre-stressed Rock. *Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI*, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 159-166.
- Shi, G.H.**, 1988. Discontinous Deformation Analysis: A New Numerical Model For The Statics And Dynamics Of Block Systems. *PhD Thesis*, University of California Berkeley, 378p.
- Şimşek, S.**, 1984. Denizli-Sarayköy-Buldan Alanının Jeolojisi ve Jeotermal Enerji Kaynakları, *İ. Ü. Yer Bilimleri Dergisi*, **3**, 145-162.
- Sun, S.**, 1990. Denizli-Uşak Arasının Jeolojisi ve Linyit Olanakları, *MTA Rapor no: 9985*, 92s.
- Taner, G.**, 1975. Denizli Bölgesi Neojeni'nin Paleontolojik ve Stratigrafik Etüdü. *MTA Dergisi*, **85**, 45-66.
- Taner, G.**, 2001. Denizli Bölgesi Neojen'ine Ait Katların Stratigrafik Konumlarında Yeni Düzenleme. *54. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara*, s.21.
- Tano, H., Kumsar, H., Aydan, Ö., and Ulusay, R.**, 2003. The Assessment of the Babadağ Landslide Behaviour by a Simple Field Measurement System. *Proceedings of the International Colloquium on the Instrumentation of Landslides and Earthquakes in Japan and Turkey*, H.Tano, H. Watanabe and Ö. Aydan(eds.), November 8, 2003, Nihon Univ., Koriyama, Japan, 1-9.
- Tano, H., Abe, T., Aydan, Ö., Kumsar, H., Kaya, M., Çelik, S.B., ve Ulusay R.**, 2006a. AE ve Zemin Deformasyonu Davranışınıda İçeren Birleşik İzleme Sistemi Yardımı ile Babadağ Heyelanının Uzun Süre İzlenmesi, *Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, Denizli, 25-27 Mayıs*, 131-141.
- Tano, H., Aydan, Ö., Ulusay, R., ve Kumsar, H.**, 2006b. Şev Hareketleri Üzerinde Etkili Olan Jeo-Çevresel Faktörlerle İlgili Ortak Araştırma: Babadağ (Türkiye)'deki Krip Türü Şev Duraylılığının İncelenmesi. *Japon Eğitim, Kültür, Spor, Bilim ve Teknoloji Tarafından Desteklenen Çok Disiplinli Ortak Araştırma Projesi Ara Raporu*. 72s.
- Tano, H., Aydan, Ö., Kumsar, H., Kaya, M., Çelik, S.B., Ulusay, R., and Abe, T.**, 2008. Investigation of Babadağ Landslide and Its Implications for Hazard Mitigation Before Natural Disaster. *Türk-Japon İnşaat Mühendisleri Birinci Ortak Çalışma Sempozyumu*, 5 Haziran 2008, İstanbul, 65-73.

- Topal, S.**, 2003. Denizli Neojen İstifinin Stratigrafisi ve Tektonik Özellikleri, *Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli*, 76s (yayınlanmamış).
- Topal, S.**, 2012. Denizli Havzasındaki Fayların Tektonik Jeomorfolojisi. *Doktora tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli*, 145s (yayınlanmamış).
- Tuncay, E., and Obara, Y.**, 2012. Comparison of Stresses Obtained from Acoustic Emission and Compact Conical-Ended Borehole Overcoring Techniques and An Evaluation of the Kaiser Effect Level. *Bull Eng Geol Environ*, **71(2)**, 367-377.
- Tuncay, E., and Ulusay, R.**, 2008. Relation Between Kaiser Effect Levels and Pre-Stresses Applied in the Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **45(4)**, 524-537.
- Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö., ve Yüzer, E.**, 2002. Akustik Emisyon (AE) Tekniği: 2 AE Tekniğiyle Türkiye’de Arazi Gerilmelerinin Belirlenmesi Konusunda bir Ön İnceleme. *Yerbilimleri*, **25**, 83-98.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Tano, H., Watanabe, H., and Aydan, Ö.**, 2003. The Measurement of the Stress State of Turkey by Acoustic Emission (AE) Method. *Proceedings of the Third International Symposium on Rock Stress, Kumamoto, Japan. Sugawara, Obara & Seto eds.*, 255-260.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., and Gökceoğlu, C.**, 2004. An Attenuation Relationship Based on Turkish Strong Motion Data and Iso-Acceleration Map of Turkey. *Engineering Geology*, **74**, 265–291.
- Url-1** <<http://www.babadag.gov.tr/ekonomi.html>>, alındığı tarih 06.08.2011.
- Url-2** <<http://www.sayisalgrafik.com.tr/deprem>>, alındığı tarih 09.01.2012.
- Url-3** <<http://www.deprem.gov.tr>>, alındığı tarih 06.02.2012.
- Url-4** <<http://www.g-men.jp>>, alındığı tarih 10.05.2010.
- Villaescusa, E., Seto, M., and Baird, G.**, 2002. Stress Measurement From Oriented Rock Core. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. **39**, 603-615.
- Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö.**, 1999. Initial Stress State in Cappadocia. *Japan-Korea Rock Engineering Symposium, K. Matsui and H. Shimada (eds.)*, Fukuoka, Japan, 113-124.
- Yegian, M.K., Marciano, E., and Ghahraman, V.G.**, 1991. Earthquake-Induced Permanent Deformations: Probabilistic Approach. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **1360**, 317-494.
- Yoshikawa, S., and Mogi, K.**, 1981. A New Method for Estimation of the Crustal Stress from Cored Rock Samples: Laboratory Study in the Case of Uniaxial Compression. *Tectonophysics*, **74**, 323-339.

EKLER

EK A : Yağış ve YAS Seviye Değişimi Arasında Belirlenen İlişkiler ve İlgili Şekiller.

EK B. Analizlerde Kullanılan Analitik, Sonlu Elemanlar (FEM) ve Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemlerinin (DFEM) Temel İlkeleri.

EK A : Yağış ve YAS Seviyesi Değişimi Arasında Belirlenen İlişkiler ve İlgili Şekiller

Tablo A.1 : 2005 ile 2009 yılları arasında yağış ve YAS seviyelerinde belirlenen değişimler.

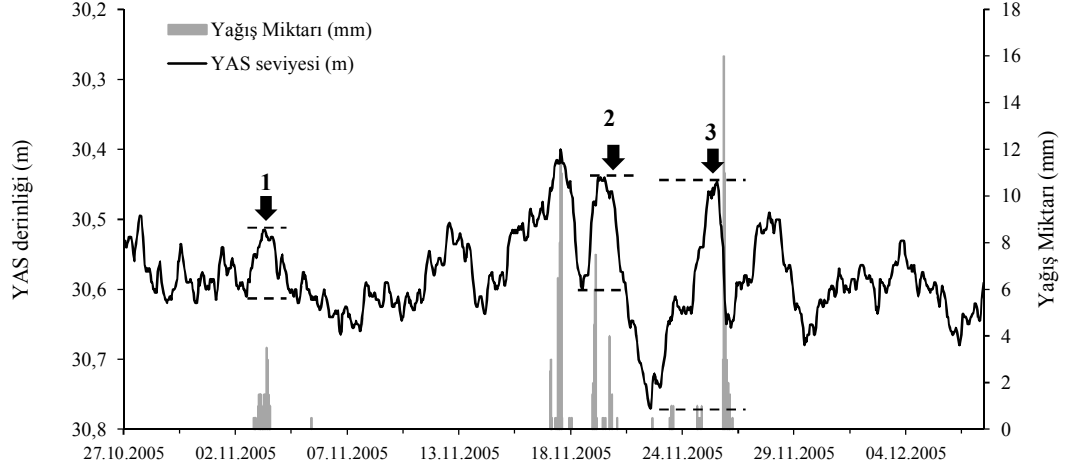
Gözlem nokta no	Yağış aktivitesi başlangıç tarihi	Yağış aktivitesi bitiş tarihi	h_{RF} (mm)	Δh_w (m)	t (saat)
1	01.11.2005	05.11.2005	23.5	0.01	240
2	18.11.2005	19.11.2005	62	0.02	48
3	22.11.2005	28.11.2005	51.5	0.115	121
4	14.12.2005	19.12.2005	110.5	0.265	144
5	26.12.2005	29.12.2005	17	0.045	96
6	03.01.2006	05.01.2006	18	0.035	72
7	22.01.2006	02.02.2006	37	0.045	288
8	05.02.2006	07.02.2006	28	0.175	72
9	08.02.2006	12.02.2006	55.5	0.225	120
10	25.02.2006	01.03.2006	13	0.13	120
11	13.04.2006	14.04.2006	47.5	0.2	48
12	20.04.2006	23.04.2006	12.5	0.01	96
13	03.05.2006	07.05.2006	28	0.01	120
14	26.06.2006	02.07.2006	36.5	0.04	168
15	03.07.2006	13.07.2006	26.5	0.1	264
16	18.09.2006	19.09.2006	0.5	0.02	48
17	24.09.2006	27.09.2006	35.5	0.03	96
18	28.09.2006	30.09.2006	4.5	0.02	72
19	11.10.2006	13.10.2006	10	0.01	72
20	16.10.2006	19.10.2006	36	0.02	96
21	06.01.2007	13.01.2007	69.5	0.02	191
22	23.01.2007	25.01.2007	8	0.07	72
23	30.01.2007	31.01.2007	11.5	0.08	47
24	03.02.2007	06.02.2007	40	0.05	96
25	21.05.2007	25.05.2007	3.5	0.065	120
26	26.05.2007	01.06.2007	23.5	0.04	168
27	13.06.2007	14.06.2007	3.5	0.205	48
28	19.06.2007	20.06.2007	7	0.195	48
29	18.11.2008	22.11.2008	64.5	0.32	120
30	19.12.2008	20.12.2008	4	0.11	48
31	27.12.2008	28.12.2008	10	0.125	48
32	01.01.2009	06.01.2009	102.5	0.15	144

Açıklama:

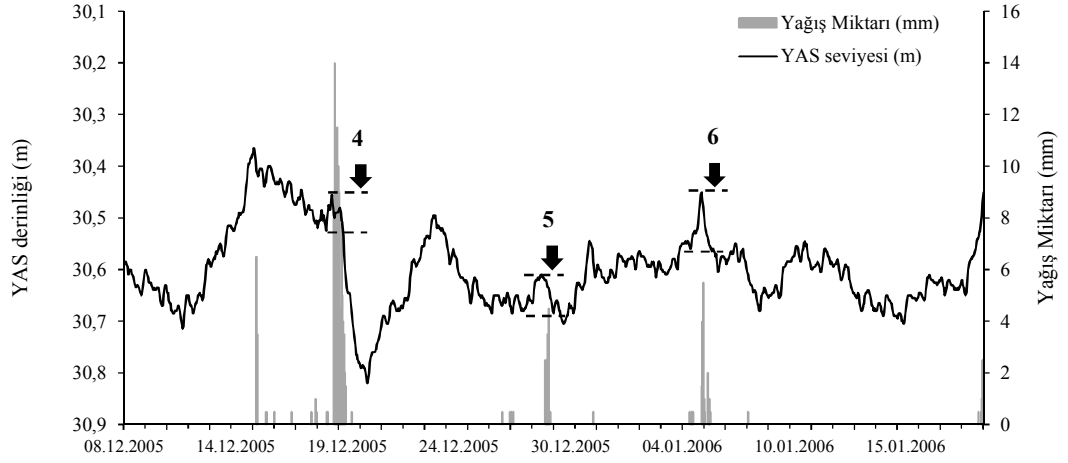
Δh_w : YAS seviye değişimi (yükselimi),

h_{RF} : Yağış aktivitesinin görüldüğü zaman aralığındaki toplam yağış miktarı,

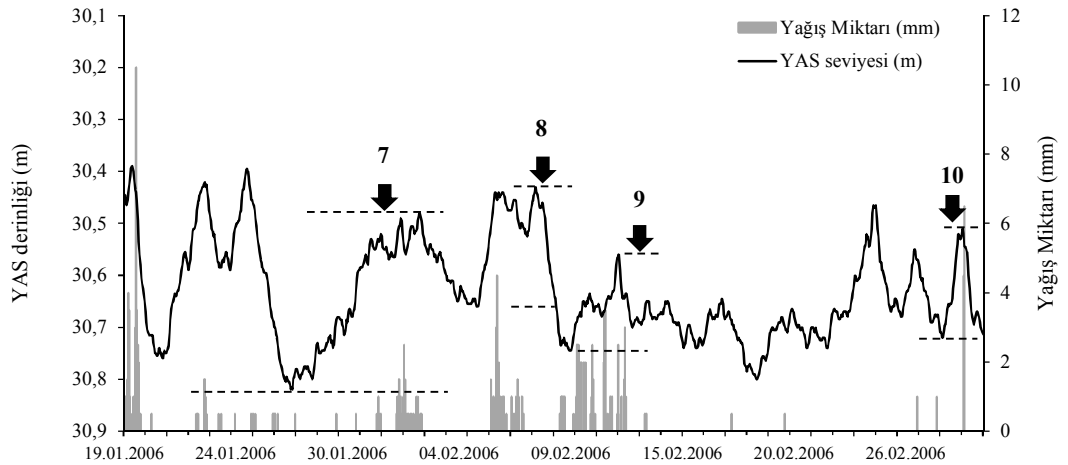
t : Yağış başlangıcı ile YAS seviyesinin en yüksek seviyeye ulaşana dek geçen zamandır.



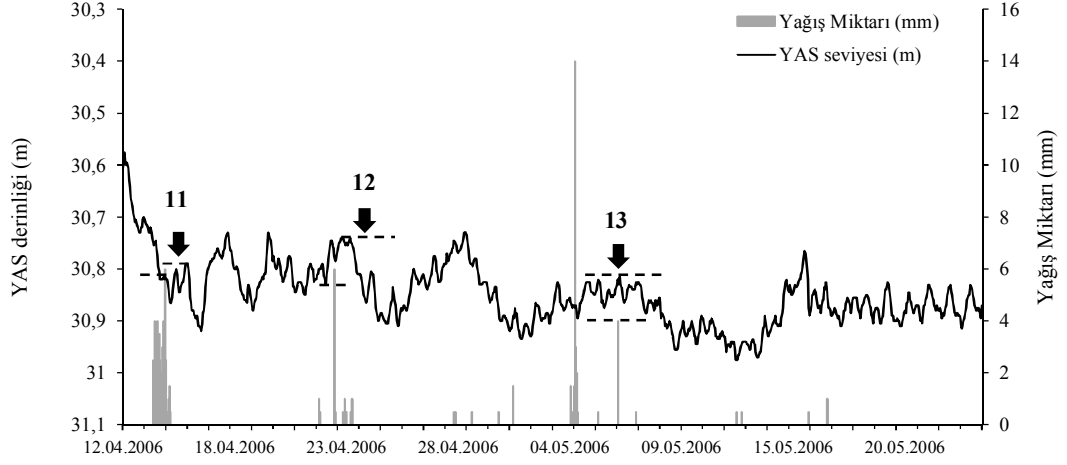
Şekil A.1 : 1., 2., ve 3. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



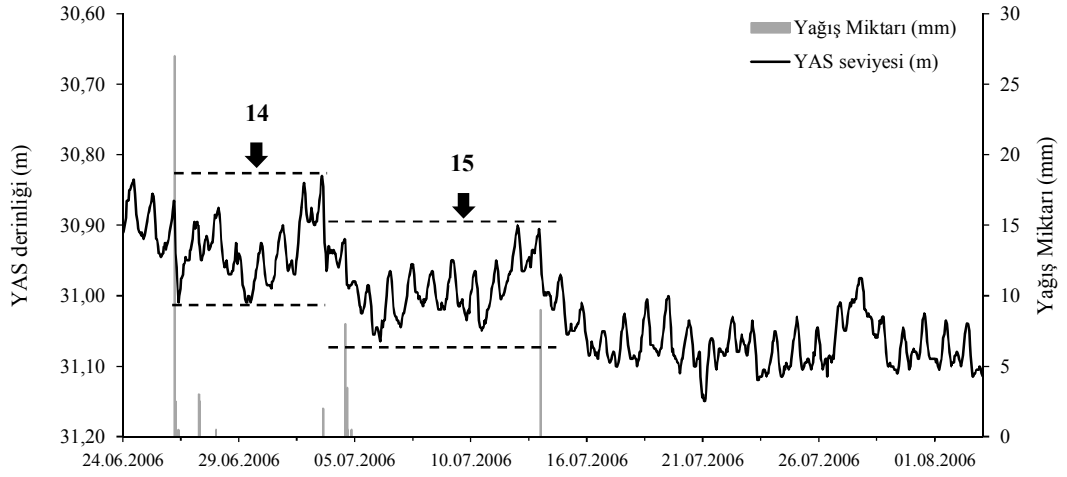
Şekil A.2 : 4., 5., ve 6. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



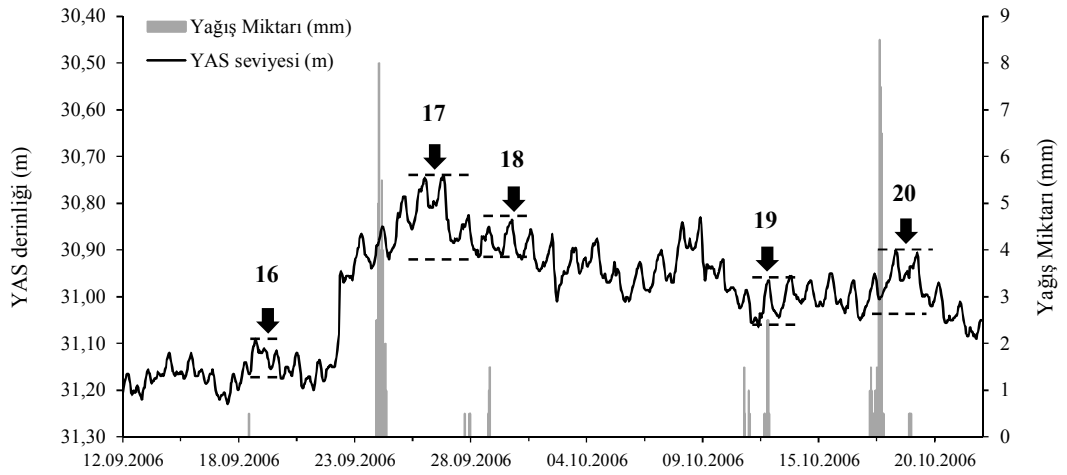
Şekil A.3 : 7., 8., 9. ve 10. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



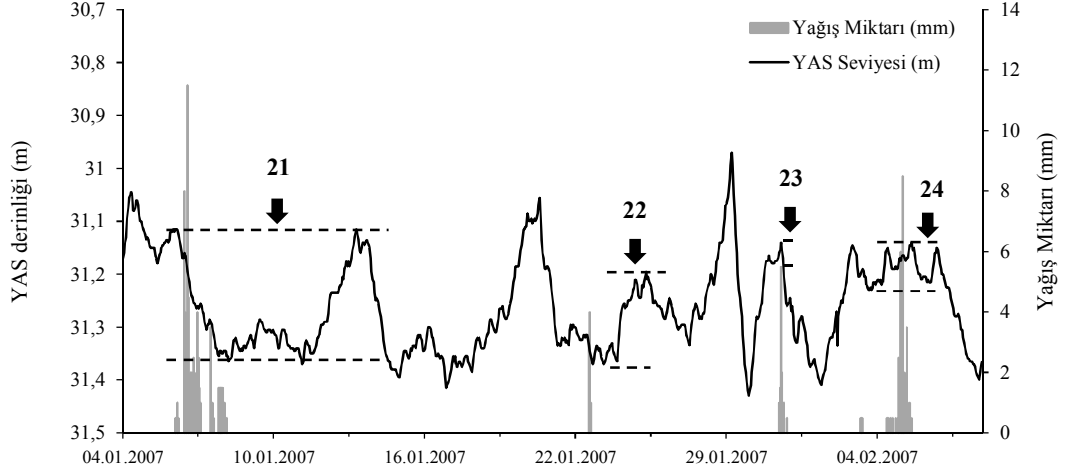
Şekil A.4 : 11., 12., ve 13. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



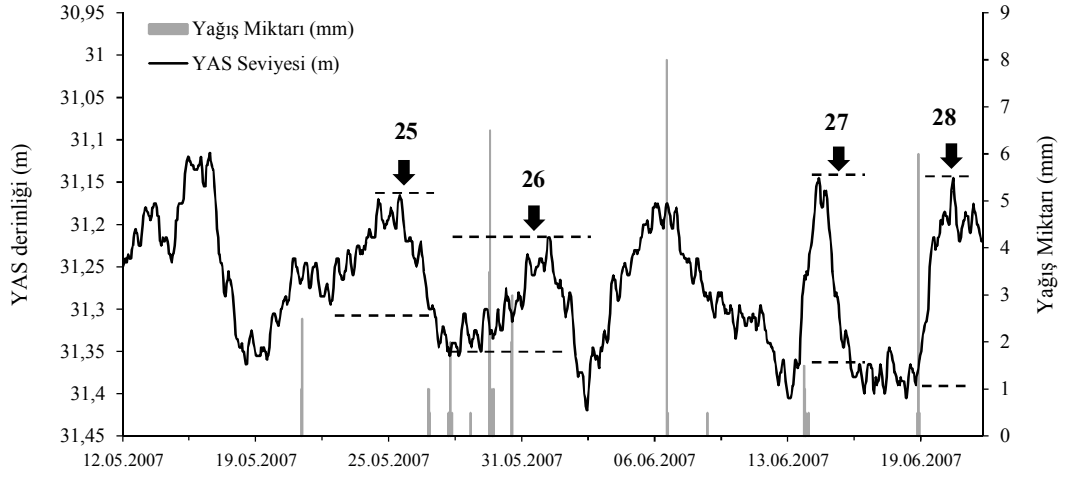
Şekil A.5 : 14. ve 15. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



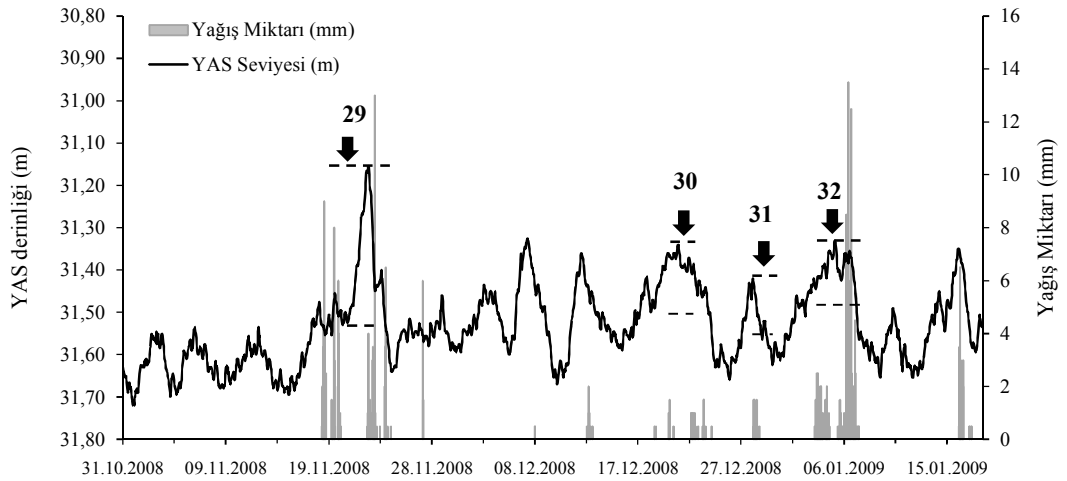
Şekil A.6 : 16., 17., 18., 19. ve 20. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



Şekil A.7 : 21., 22., 23. ve 24. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



Şekil A.8 : 25., 26., 27. ve 28. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.



Şekil A.9 : 29., 30., 31. ve 32. yağış-YAS seviyesi veri noktaları.

EK B. Analizlerde Kullanılan Analitik, Sonlu Elemanlar (FEM) ve Ayrık Sonlu Elemanlar Yöntemlerinin (DFEM) Temel İlkeleri

Bu kısımda analizlerde kullanılan analitik, sonlu elemanlar ve ayrık sonlu elemanlar yöntemlerinin temel ilkeleri özetlenmiştir. Yaklaşım, yeraltısuyunun etkilediği ve bünyesine su alıp verdiğinde hacimsel değişim ve deformabilite özellikleri değişim gösteren kaya ortamlar üzerine veya içine inşa edilen yapıların davranışını incelemek amacıyla Aydan ve diğ., (1994, 2006) tarafından önerilmiştir. Kaya içerisindeki su içeriğinin değişimi yayılma (difüzyon) problemi olarak aşağıda eşitlikleri verilen şekilde modellenmiştir.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\nabla \cdot \mathbf{q} + Q \quad (\text{B.1})$$

Burada, θ , \mathbf{q} , Q ve t sırasıyla su içeriği, su yayılım hız vektörü, su içeriği kaynağı ve zamandır. Eğer suyun yayılımı Fick yasasına uyduğu varsayılırsa, su yayılım hız vektörü ile su içeriği arasındaki ilişki Eşitlik B.2'deki gibi verilebilir.

$$\mathbf{q} = -k \nabla \theta \quad (\text{B.2})$$

Burada, k su yayılma katsayısıdır. Eğer su içeriğinin bir kısmı YAS hareketi tarafından veya açıklıklardaki hava akımından etkilenerek hareket ederse, Eşitlik B.3'deki ifade kullanılabilir. Bu koşulda, serbest su veya hava akış hızı bilinmelidir. Eğer gerilme değişimi çok küçük oranlarda ise, hareket denklemi Eşitlik B.4'deki gibi verilebilir.

$$\nabla \cdot \dot{\boldsymbol{\sigma}} = 0 \quad (\text{B.3})$$

Kayalar için, su içeriğine bağlı özelliklerdne gerilme ve gerinme arasındaki en basit mekanik davranış ilişkisi doğrusal olup aşağıdaki gibi verilebilir (Aydan ve Ulusay, 2003; Aydan ve diğ., 2006).

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}(\theta)\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_e \quad (\text{B.4})$$

Eşitlik B.4 kullanılarak gerçekleştirilecek çözümlerde doğrusal olmayan davranış için elasto-plastik analizlere benzer bir yaklaşım gerekir. Su emme veya kaybetmeye bağlı hacimsel değişimler aşağıdaki ilişkiyle ifade edilebilir.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_e = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_s \quad (\text{B.5})$$

B.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Eşitlik B.1 ve B.2’de verilen eşitlikler bir takım matematiksel işlemnden sonra sonlu elemanlar şekli aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$[M] \{\dot{\theta}\} + [H] \{\theta\} = \{Q\} \quad (B.6)$$

Burada,

$$[M] = \int [N]^T [N] dV,$$

$$[H] = k \int [B]^T [B] dV,$$

$$\{Q\} = \int [\bar{N}]^T \{q_n\} d\Gamma$$

Benzer şekilde Eşitlik B.3’de verilen hareket korunum denge denkleminin sonlu elemanlar şekli bir zaman basamağı için aşağıdaki gibi ifade edilir.

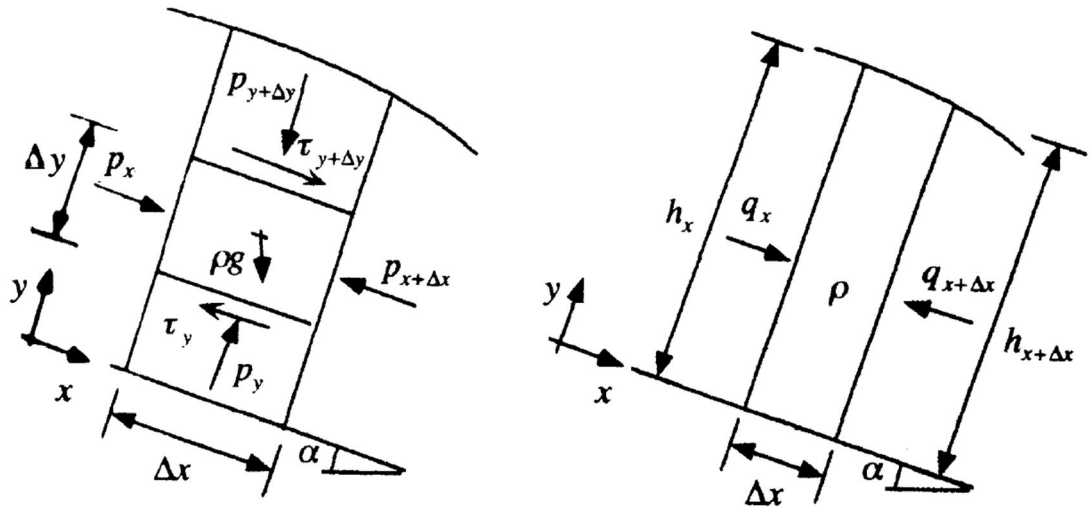
$$[K] \{\dot{U}\} = \{\dot{F}\} \quad (B.7)$$

Burada,

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV ; \{\dot{F}\} = \int_V [B]^T [D] \{\dot{e}_s\} dV + \int_S [\bar{N}]^T \{\dot{i}\} dS \quad (B.8)$$

B.2 Basitleştirilmiş Analitik Model ve Sonlu Elemanlar Modelleri

Bu kısımda verilen basitleştirilmiş analitik (kuramsal) model Aydan (1994, 1998) tarafından geliştirilen kuramsal modele dayanmaktadır. Yatayla α eğim miktarındaki kütlelinin sonsuz küçük bir elemanı için moment korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir (Şekil B.1).



Şekil B.1 : Makaslama gerilmesine maruz tabaka modeli (Aydan 1994, 1998).

x-yönü için;

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \sin \alpha \quad (\text{B.9})$$

y-yönü için;

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \sin \alpha \quad (\text{B.10})$$

Burada, τ , p , ρ , g sırasıyla makaslama gerilmesi, basınç, yoğunluk ve yerçekimi ivmesidir. Basıncın x yönündeki değişimi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \cos \alpha \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{B.11})$$

Makaslama gerinimi (birim deformasyon) ile makaslama gerilimi arasında ilişki doğrusal olarak aşağıdaki gibi verilebilir (Eşitlik B.12).

$$\tau = G\gamma; \gamma = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (\text{B.12})$$

B.12 B.10'da kullanılır ve elde edilen adi diferansiyel denklem çözülürse aşağıdaki gibi bir ilişki sınır koşulları ile birlikte elde edilir.

$$\tau = \rho g \cos \alpha \left(\tan \alpha - \frac{\partial h}{\partial x} \right) (h - y) \quad (\text{B.13})$$

Eğer düşünülen kütlemin yüksekliği x 'e göre değişmiyorsa yüksekliğin türevi ihmal edilebilir. Dolayısıyla makaslama gerilmesi ve yerdeğiştirme ilişkileri aşağıdaki hali alır.

$$\tau = \rho g \sin \alpha (h - y); u = \frac{\rho g \sin \alpha}{G} y \left(h - \frac{y}{2} \right) \quad (\text{B.14})$$

Deneysel sonuçlara göre, deformasyon modülü doygunluğa bağlı olarak azalmakta ve kurumaya bağlı olarak kuru durumundaki değerine dönmektedir. Doygunlaşma süresince deformasyon modülü plastik deformasyon (G_p) modülü olarak kabul edilebilir (Şekil B.2) ve doygun hale geliş süresince meydana gelen yerdeğiştirmeler plastik deformasyon olarak nitelendirilebilir.

$$u_s = \frac{\rho g \sin \alpha}{G_s} y \left(h - \left(t - \frac{y}{2} \right) \right) \quad (\text{B.15})$$

Burada,

t : Verilen doyma-kuruma çevrimlerinde doyunlaşan tabaka kalınlığıdır.

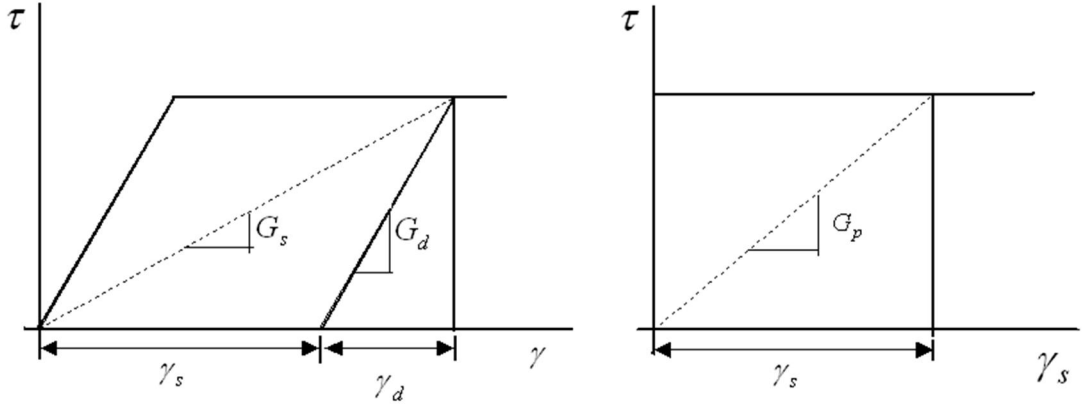
Plastik deformasyon doygun ve kuru durumlardaki yerdeğiştirmelerin farkı olarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$u_p = \rho g \sin \alpha y \left(\frac{1}{G_s} - \frac{1}{G_d} \right) \cdot \left(h - \left(t - \frac{y}{2} \right) \right) \quad (\text{B.16})$$

Burada,

G_d ve G_s , sırasıyla kuru ve doygun durumlardaki makaslama modülüdür. Bu alışmada B.16'daki eşdeğer makaslama modülü aşağıdaki gibi yazılmış ve plastik deformasyon modülü olarak tanımlanmıştır.

$$G_p = \frac{G_s G_d}{G_d - G_s} \quad (\text{B.17})$$



şekil B.2 : Marn tabakasının devirsel yumuşama-sertleşme modeli.

Yarı-sonsuz çoklu marn tabakalarının sonlu elemanlar modeli ve uygulaması Eğer doygunluğa uğrayan kısmın kalınlığı bilinirse (Tablo A.1), Eşitlik B.9'da verilen analitik modelin sonlu elemanlar yaklaşımı aşağıda Eşitlik B.18'deki gibi verilebilir.

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (\text{B.18})$$

Burada,

$$[K] = \int_{y_i}^{y_j} [B]^T G(\theta) [B] dy \quad (\text{B.19})$$

$$\{F\} = -\rho g \sin \alpha \int_{y_i}^{y_j} [N]^T dy \quad (\text{B.20})$$

B.2 Ayrık Sonlu Elemanlar Modeli

Aydan ve diğ., (1996); Aydan ve Mamaghani (1996), Mamaghani ve diğ., (1994) tarafından önerilen ayrık sonlu elemanlar (Discrete finite element method, DFEM) yöntemi kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yöntemin detayları verilen referanslarda bulunabilir.

$$M\ddot{U} + CU + KU = F \quad (B.21)$$

Burada,

$$M = \int_{\Omega_e} \rho N^T N d\Omega, C = \int_{\Omega_e} B^T D_v B d\Omega, K = \int_{\Omega_e} B^T D_v B d\Omega, F = \int_{\Omega_e} N^T b d\Omega + \int_{\Gamma_e} N^T t d\Gamma \quad (B.22)$$

Yukarıdaki denklem sistemi zaman uzayında sayısal analiz teknikleri kullanılarak çözülebilmektedir. Eğer verilen zaman aralıkları için eşitlik ifade edilirse, Eşitlik B.23'deki hali alır.

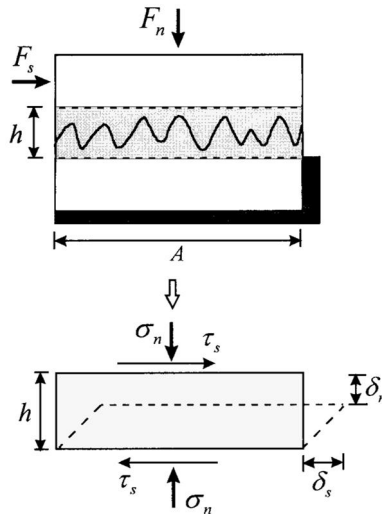
$$[\bar{K}] \{U\}_{n+1} = \{F\}_{n+1} \quad (B.23)$$

Merkezi farklar çözümleme yöntemi uygulanarak, aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$[\bar{K}] = \frac{1}{2\Delta t} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \quad (B.24)$$

$$\{F\}_{n+1} = \left(\frac{2}{\Delta t^2} [M] - [K] \right) \{U\}_n - \left(\frac{2}{\Delta t^2} [M] - \frac{2}{2\Delta t} [K] \right) \{U\}_{n-1} + \{F\}_n \quad (B.25)$$

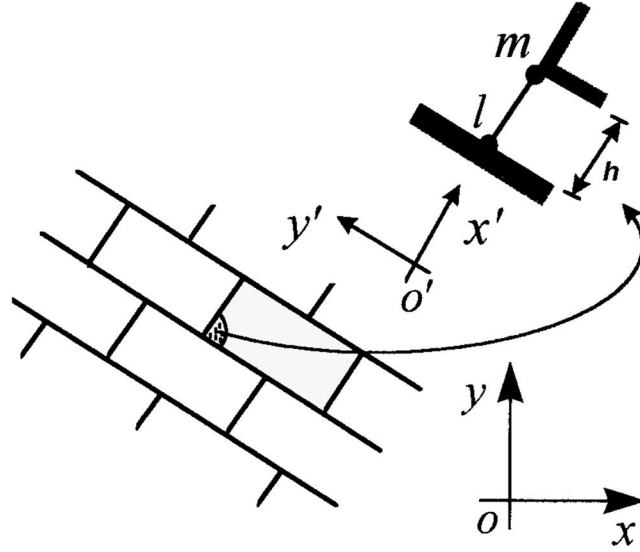
İki komşu kaya bloğu arasındaki kontak zonu pürüzlülüğe bağlı olarak belli kalınlığa sahip olduğu düşünülerek Şekil B.3'deki gibi modellenmiştir. Gerinme ve gerilmeler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Şekil B.3 : Elemanlar arası kontakın mekanik modeli (Aydan ve diğ., 1996).

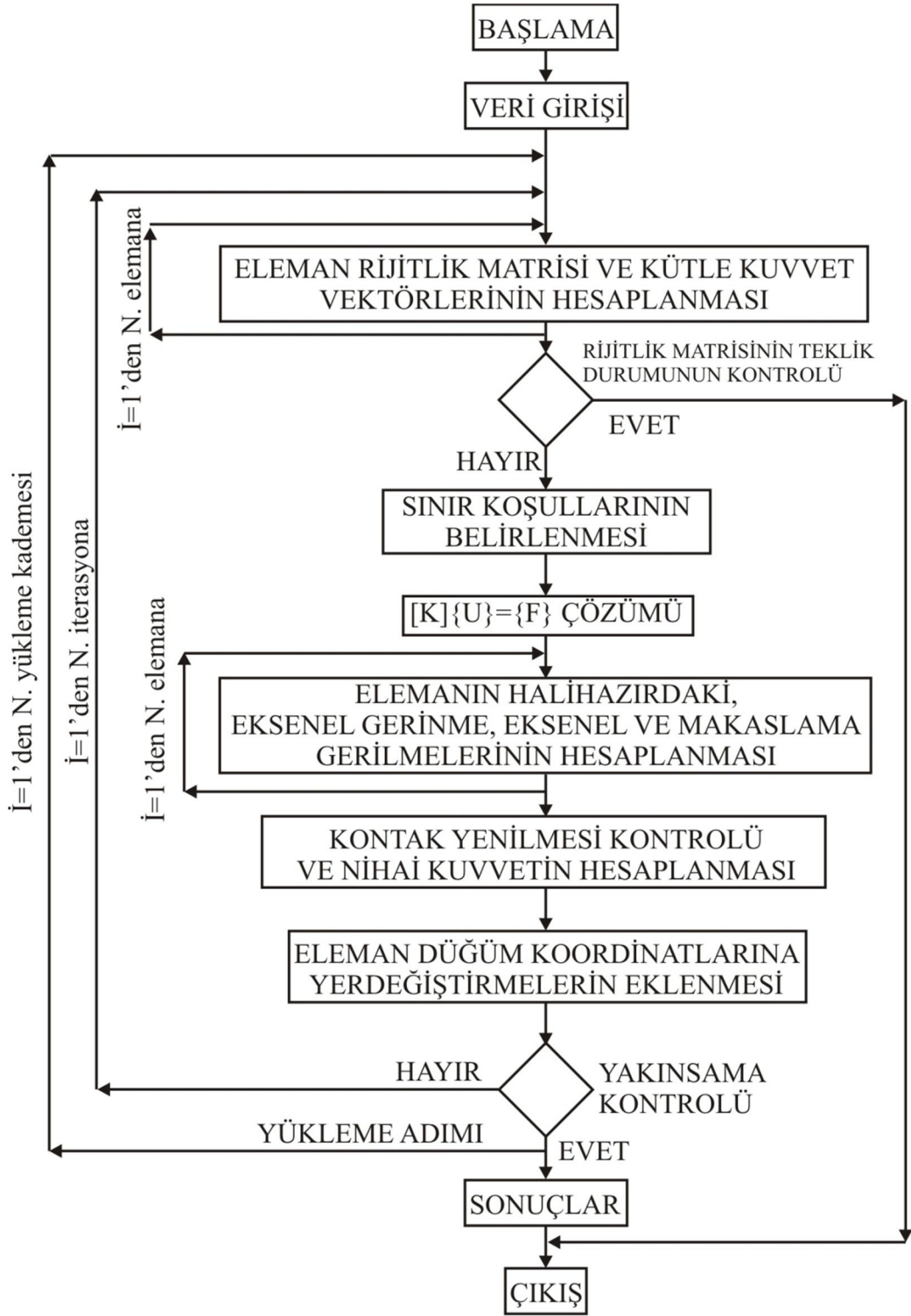
$$\sigma_n = \frac{F_n}{A}, \quad \varepsilon_n = \frac{\delta_n}{h}, \quad \dot{\varepsilon}_n = \frac{\dot{\delta}_n}{h}, \quad \tau_s = \frac{F_s}{A}, \quad \gamma_s = \frac{\delta_s}{h}, \quad \dot{\gamma}_s = \frac{\dot{\delta}_s}{h} \quad (\text{B.26})$$

Elemanların sonlu elemanlar yöntemindeki gösterilişi ise Şekil B.4’de verilmiştir.



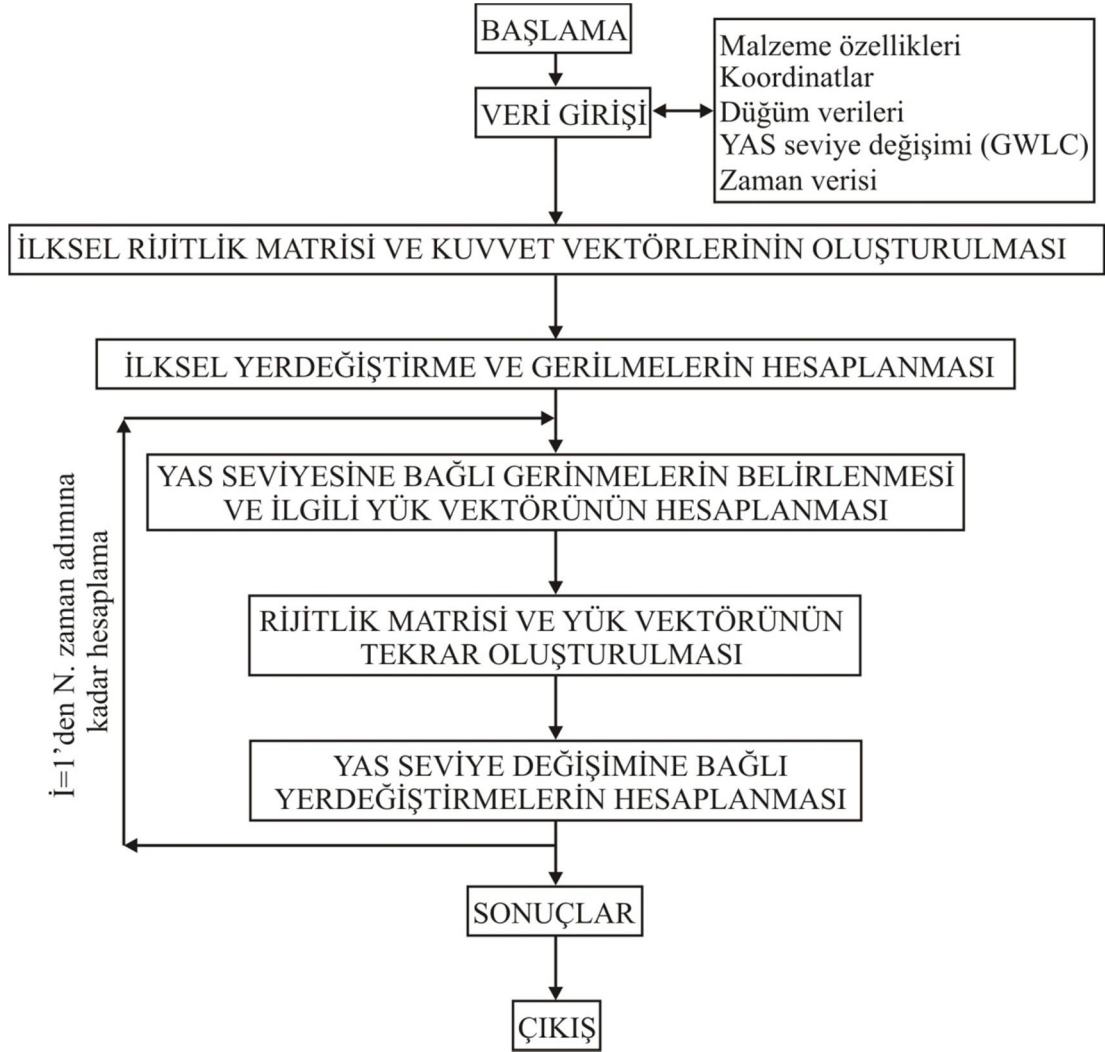
Şekil B.4 : Ayrık sonlu elemanlar yönteminde kontak elemanın gösterilişi (Aydan ve diğ., 1996).

Şekil B.5’de analizlerde kullanılan DFEM yaklaşımının akış şeması verilmektedir.



Şekil B.5 : Analizlerde kullanılan DFEM (yarı eliptik versiyonu) analizi akış şeması (Mamaghani ve diğ., 1999).

Tez kapsamında önerilen YAS seviye değişimlerine bağlı olarak marnın yumuşaması ve sertleşmesine bağlı olarak geręekleřen deformasyonların belirlendiği ve ayrık sonlu farklar-devirsel yumuşama sertleşme modeli olarak adlandırılan (DFEM-CSH) analizinin hesaplama akış şeması ise şekil B.6'da verilmiştir.



şekil B.6 : Yumuşama sertleşme modelini içeren DFEM (DFEM-CSH) analizi çözümlene akış şeması.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Sefer Beran ÇELİK

Doğum Yeri ve Tarihi: Sinop 25.05.1975

Adres: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü
20017 Kınıklı Denizli

Lisans Üniversite: Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü (1994-1998)

Yayın Listesi (Seçilmiş):

- Çelik, S. B.**, ve Kumsar, H., 2006, Denizli İl Merkezi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 25-27 Mayıs 2006, Denizli*, 23-33.
- Abe, T., **Çelik, S. B.**, and Tano, H., 2007, Experimental study on Kaiser effect of rock-like materials by using a handy AE counting system. *J. Coll. Eng. Nihon University*, **49 (1)**, 19-31.
- Çobanoğlu, İ., and **Çelik, S. B.**, 2008, Estimation of uniaxial compressive strength from point load strength, Schmidt hardness and P-wave velocity. *Bull Eng Geol Environ* **67**, 491–498.
- Çobanoğlu, İ., **Çelik, S. B.**, Dinçer, İ., and Alkaya, D., 2009, Core size and time effects on water absorption values of rock and cement mortar samples. *Bull Eng Geol Environ* **68**, 483–489.
- Çelik, S. B.**, Kumsar, H., and Aydan, Ö., 2011. Babadağ Gündoğdu Heyelanının mekanizmasının statik ve dinamik model deneyleri ile incelenmesi. *X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 8-9 Aralık 2011, ODTÜ, Ankara*, 161-170.
- Koralay, T., Özkul, M., Kumsar, H., **Çelik, S. B.**, and Pektaş, K., 2011, The effect of welding degree on geotechnical properties of an ignimbrite flow unit: the Bitlis castle case (Eastern Turkey). *Environ Earth Sci* **64**, 869–881.
- Çobanoğlu, İ., and **Çelik, S. B.** 2012. Determination of strength parameters and quality assessment of Denizli travertines (SW Turkey). *Engineering Geology* **129-130**, 38–47.