

## Adapazarı zeminlerinin dinamik davranış özellikleri

Zülküf KAYA\*, Ayfer ERKEN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen  $M_w=7.4$  manyitüdümlü depremin sonucunda Kuzey Anadolu Fay zone üzerinde bulunan Adapazarı'nda çok sayıda sivilaşma ve taşıma gücü kaybı sonucu yapı-larda yana yatma, oturma ve yanal deplasmanlar gözlenmiş ve çok sayıda insanın ölümü ile büyük ekonomik kayıplar oluşmuştur. Bu nedenle Adapazarı'nda yer alan zeminlerin deprem yükleri altındaki davranışlarının bilinmesi önem kazanmıştır. Bu amaçla Adapazarı'nın sekiz farklı bölgesinde hasar görmüş yapıların etrafında yapılan arazi çalışmaları kapsamında açılmış on sondaj kuyusundan alınmış olan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerde efektif jeolojik yükün 100 kPa'a yakın olduğu numuneler kullanılmış ve bütün numunelere  $\sigma_c=100$  kPa konsolidasyon basıncı izotropik olarak uygulanmıştır. Konsolide olan zemin numuneleri üzerinde ilk önce maksimum elastisite modülleri belirlenmiş ve daha sonra göçme kriteri  $\varepsilon=\pm\% 2.5$  deformasyon seviyesi meydana gelinceye kadar farklı gerilme oranlarında ( $\sigma_d/2\sigma_c=0.205-0.515$ ) gerilme kontrollü drenajsız deneyler yapılmıştır. Boşluk suyu basıncı oluşumunu kontrol edebilmek için yükleme frekansı  $f=0.1$ Hz seçilmiştir. Bu çalışma sonucunda farklı zemin ve plastisite grupları için gerilme-şekil değiştirme-boşluk suyu basınç davranış biçimleri incelenmiş ve ayrıca dinamik mukavemet eğrisi elde edilmiştir. Zeminlerin dinamik davranışı incelendiğinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin  $M_w=7.4$  manyitüdüne karşılık  $N=20$  çevrim sayısında değişik plastisitede olan zeminlerin yumuşayarak büyük deformasyonlara uğradığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dinamik mukavemet, örselenmemiş zeminler, Adapazarı zeminleri.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Zülküf KAYA. zkaya@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 60 06.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Depremler sırasında zeminlerin davranışına bağlı olarak meydana gelen zemin deplasmanlarının belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 04.01.2008 tarihinde dergiye ulaşmış, 30.01.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.01.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Dynamic behaviour of Adapazari soils

### Extended abstract

The August 17, 1999 Kocaeli Earthquake had a moment magnitude of  $M_w = 7.4$  with a focal depth of 17 km. The earthquake has affected the city of Adapazari which is located on the North Anatolian Fault Line. Several liquefaction and bearing capacity loss cases involving tilting of buildings, excessive settlements and lateral spreading were encountered in the city. The earthquake caused several thousands of casualties and an enormous loss of assets. Consequently, it becomes important to determine the cyclic behavior of Adapazari soils under earthquake loads.

Accordingly, undisturbed soil samples were taken from 10 bore holes drilled next to the damaged structures in Adapazari City within the context of geotechnical studies.

The soil samples taken from the borings were determined to be as silty clay (CL), clay (CH), clayey silt (ML), silt (MH), silty sand (SM) and sand (SP). For the silty sands and very sandy silts, the fines content varies between  $FC=39-56\%$ . The high plasticity silts have natural moisture content values changing between  $w_n=41-40\%$  while fines content varies between  $FC=92-99\%$  and plasticity index values change between  $I_p=16-38\%$ . The natural moisture content values change between  $w_n=41-40\%$  and fines content varies between  $FC=87-99\%$  for non-plastic silts. The low-plasticity and high-plasticity clays have natural moisture content values varying between  $w_n=32-45\%$  and fines content values changing between  $FC=95-100\%$  while plasticity index values change between  $I_p=15-44\%$  and consistencies vary between  $w_n/w_L=0.55-0.90$ .

Slightly overconsolidated soils with  $OCR=2.75-3.85$  are lying on the surface of Adapazari. Silts and clays below 4.0 m depth are normally consolidated soils.

Cyclic triaxial tests were conducted on undisturbed normally consolidated soil samples having different fines content and plasticity index values. The soil samples with an effective geological overburden stress near to 100 kPa were used for the experimental studies and all samples were consolidated under a consolidation stress of  $\sigma_c=100$  kPa. All tests were performed by cyclic triaxial testing apparatus located at Soil Dynamics Laboratory of Civil Engineering Faculty of ITU. Undrained cyclic tests at

different cyclic stress ratio values were conducted on undisturbed soil samples and cyclic loadings had been applied regarding the failure criterion of the axial strains reaching  $\varepsilon = \pm 2.5\%$ . In order to control the pore pressure build-up, the cyclic loading frequency was chosen to be  $f=0.1$  Hz.

According to the strength curves obtained by using the results of the cyclic triaxial tests performed within this study obeying the failure criterion of reaching an axial strain of  $\varepsilon = \pm 2.5\%$ , the cyclic stress ratio values obtained for a number of cycles of  $N=20$  which represents an earthquake with magnitude  $M_w = 7.4$ , are determined to be as  $CSR=0.49$  for inorganic silts (MH) having plasticity index values change between  $I_p=27-31\%$ ,  $CSR=0.360$  for inorganic silts (MH) having plasticity index values change between  $I_p=15-22\%$ ,  $CSR=0.430$  for inorganic clays of high plasticity (CH),  $CSR=0.325$  for inorganic clays of low to medium plasticity (CL),  $CSR=0.240$  for inorganic silts and very fine sands (ML) and  $CSR=0.220$  for silty sands (SM).

It has been determined that sands having a high proportion of silts show the lowest resistance against liquefaction. For the whole range of silts with both low and high plasticity, non-plastic silts have the lowest resistance while the resistance increases as the plasticity increases. Clays are more resistant to liquefaction when compared with silty sands and non-plastic silts and they reach the failure ( $\varepsilon = \pm 2.5\%$ ) at higher number of cycles. Moreover, it has been observed that even high-plasticity soils present a softening behavior accompanied by a high amount of deformation for the number of cycle  $N=20$ . On the other hand, while the pore pressure build-up is lower for the non-plastic soils than the high-plasticity soils during initial loading stages, the rate of pore pressure build-up gets higher in non-plastic soils as the soil gets near to the failure point defined as  $\varepsilon = \pm 2.5\%$  or  $r_u=1.0$ .

In addition cyclic test, initial elasticity modulus has been measured by using gap sensors connected the upper plate of the triaxial chamber. The elasticity modulus of fine grained soils change from 55 MPa to 375 MPa.

**Keywords:** Dynamic strength, undisturbed soils, Adapazari soils.

## Giriş

17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden Türkiye'nin batı kesimleri oluşan yapısal hasarlar nedeni ile kuvvetli şekilde etkilenmiştir. Adapazarı şehri, depremin merkez üssüne yakın olması, yapı kalitesinin yetersiz ve yapılaşmaya uygun olmayan temel zeminlerinden dolayı büyük hasar görmüştür. Adapazarı şehrinin büyük bölümü 3-6 katlı betonarme yapı ile 1-2 katlı briket tarzı yığma yapılardan oluşmaktadır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sırasında bu yapıların büyük bir bölümünde zemin koşulları nedeniyle oturma, yana yatma, çökmeler meydana gelmiştir. Adapazarı şehri çoğunlukla kırılan Kuzey Anadolu Fayı yakınında kalın alüvyonlar üzerinde yer almaktadır (Yılmaz vd., 2004). Bu nedenle Adapazarı şehrinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli ( $M_w=7.4$ ) gibi büyük depremler sırasında sıvılaşma ve zemin yumuşamaları meydana gelmiştir. Bir çok araştırmacı tarafından Adapazarı kentinin yerel zemin koşulları, gözlenen hasarlara geoteknik faktörlerin etkileri, sıvılaşma, taşıma gücü kaybı ve zemin deformasyonları ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Erken vd., 2003; Kaya vd., 2002; Kiku vd., 2001; Erken, 2001; Erken vd., 2004a-b). Merkez mahallelerinde ağır hasarlı yapıların %22'yi aştığı yerlerde alüvyon zemin kalınlığı 1000 m'lere yaklaşmaktadır (Komazawa vd., 2002). Yılmaz vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada oturma, yana yatma ile yanıl hareketten dolayı yapısal hasarların merkezde daha fazla meydana geldiği belirtilmiştir. Bu çalışmada Adapazarı'nda depremden sonra yerinde yapılan kapsamlı geoteknik araştırmalar ve alınan numuneler üzerinde laboratuvarında yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak bölgede yer alan zeminlerin dinamik davranışı incelenmiştir.

## Bölgenin depremselliği

17 Ağustos 1999 tarihinde 03:01:37 yerel zamanında meydana gelen depremin yüzey dalga manyitüdü 7.8 (USGS), cisim dalga manyitüdü 6.3 (USGS), süre manyitüdü 6.7 (Kandilli), moment manyitüdü 7.4 (USGS, Kandilli), episenter koordinatları 40.702K, 29.987D (USGS) ve derinliği 17km (USGS)'dir. Manyitüdü  $M_w=7.4$  olan deprem Türkiye'nin batı kesiminde yer alan Gölcük kasabasına yakın meydana gelen deprem, Kuzey Anadolu Fay

(KAF) hattı üzerinde dört segment olarak oluşmuştur (<http://koeri.boun.edu.tr>).

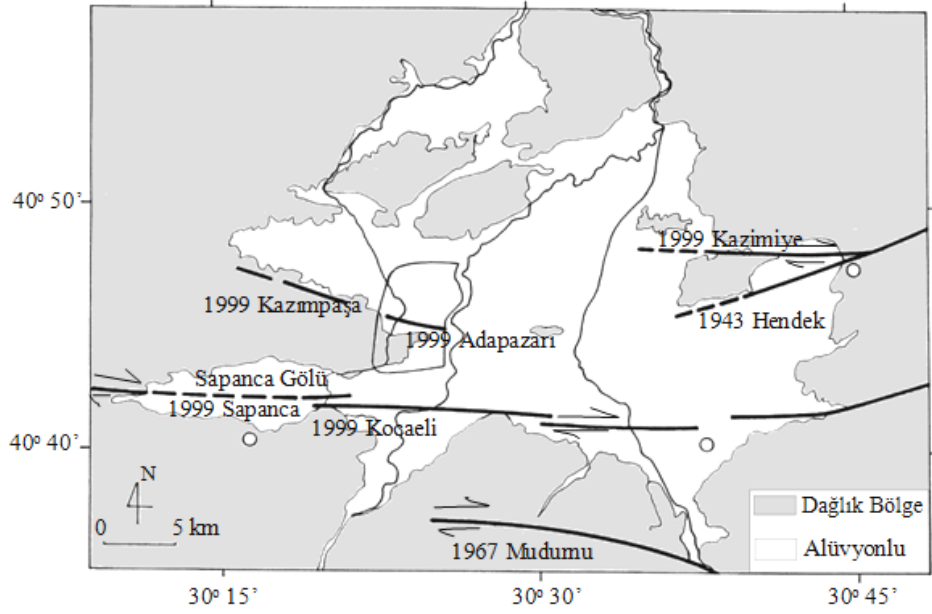
17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin ana kaydı Adapazarı şehrinin güney batısında yer alan Sakarya Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü deprem istasyonunda alınmış olup gözlenen yüzey kırılmasının sadece 3.3 km kuzeyindedir. Bu istasyonda faya hemen hemen paralel olan doğu-batı ve düşey yönde ivmeler kayıt edilmiştir. Doğu-batı yönündeki kaydın en büyük zemin ivmesi 0.415g, en büyük hız 81 cm/sn ve statik ötelenme 214 cm'dir (Anderson vd., 2000; Bray vd., 2001).

Sismik olarak çok aktif olan bu bölgede yaklaşık olarak 80 yıllık süreçte 1926 yılında meydana gelen Hendek depremi, 1943'te X şiddetinde meydana gelen Adapazarı-Hendek depremi, 1967 yılında manyitüdü 6.8 olan Sakarya depremi ve 1957 yılında Mudurnu depremi, 12 Kasım 1999 yılında 7.2 büyüklüğündeki Düzce depremi sırasında kırılan faylar ile bu depremler sırasında uzunluğu 150 m'den fazla genişliği 1 cm'den fazla olan kırıklar Şekil 1'de gösterilmiştir.

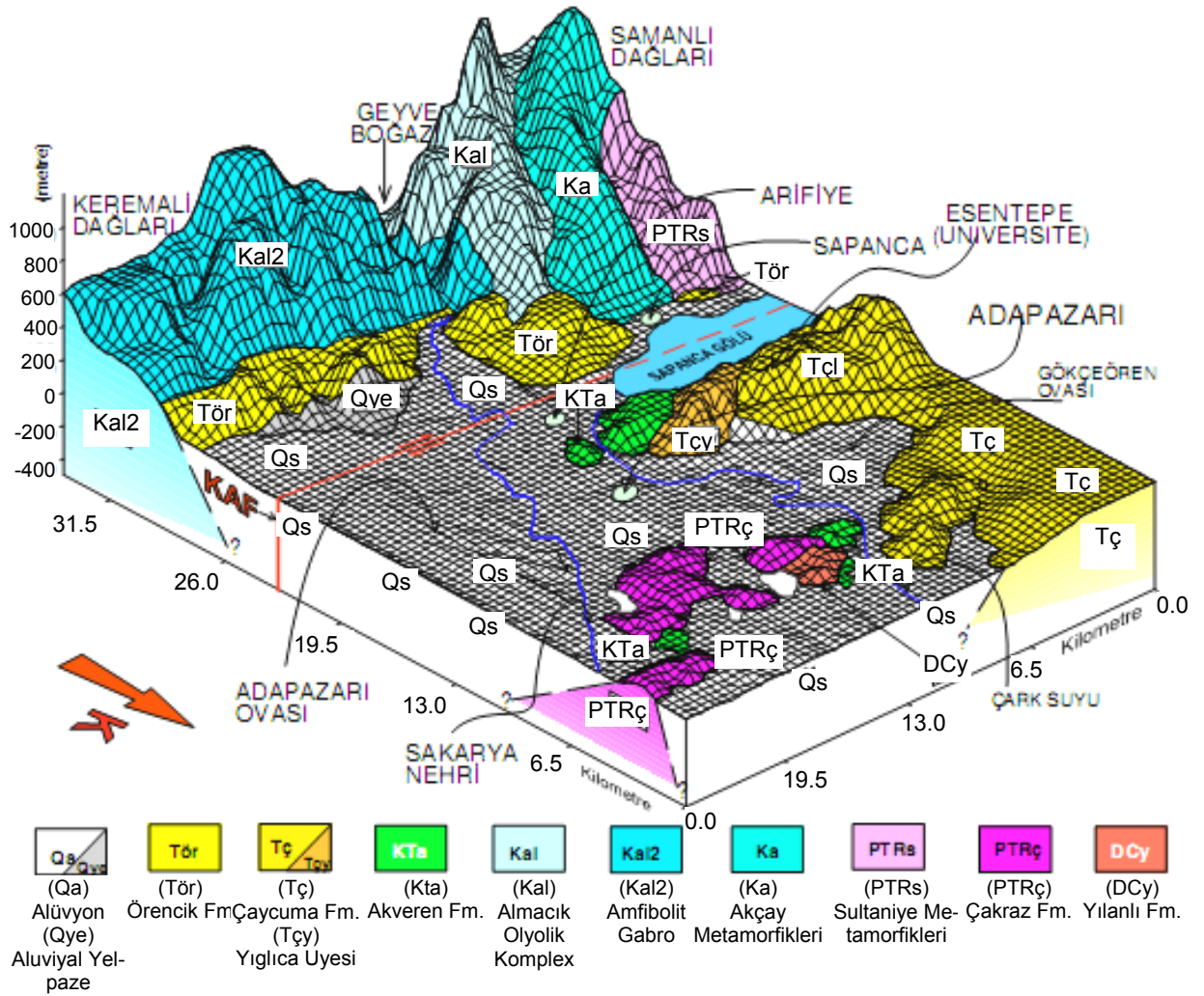
## Bölgenin jeolojisi

Önalp ve Bol (1998) tarafından yapılan çalışmaya göre Adapazarı şehri, uzun doğrultuda Sapanca Gölü-Hendek güneybatısı arasında 32 km, kısa doğrultuda kuzeyde Mağara Boğazı-güneyde Akyazı batısı arasında 27 km kadar uzanan yaklaşık bir paralelkenar biçimindeki Adapazarı Ovası'nın batısında yer almaktadır. Şehir genç alüvyonlu dolgu üzerinde ve yerleşimin daha çok kuzey-güney doğrultusunda olduğu tipik bir ova kentidir (Şekil 2). Adapazarı şehrinin kurulmuş olduğu arazi genelde düz bir görünüme sahip olup şehir merkezinin deniz seviyesine göre yüksekliği 31 m civarındadır. Bu yükseklik kuzeydoğu yönünde % 0.5, kuzeybatı yönünde % 2'lik bir eğimle azalma göstermektedir. Kentleşme sınırlarındaki bu düzlüğü batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkileri kısmen bozmaktadır.

Adapazarı ve çevresinin büyük bir kısmını Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin getirdiği çakıllı ve siltli kumlar içeren Kuvaterner alüvyon biri-



Şekil-1. Deprem bölgesinde kırılan fay hatları



Şekil 2. Adapazarı'nın jeomorfolojisi ve jeolojisi (Önalp ve Bol, 1998; Bol, 2003)

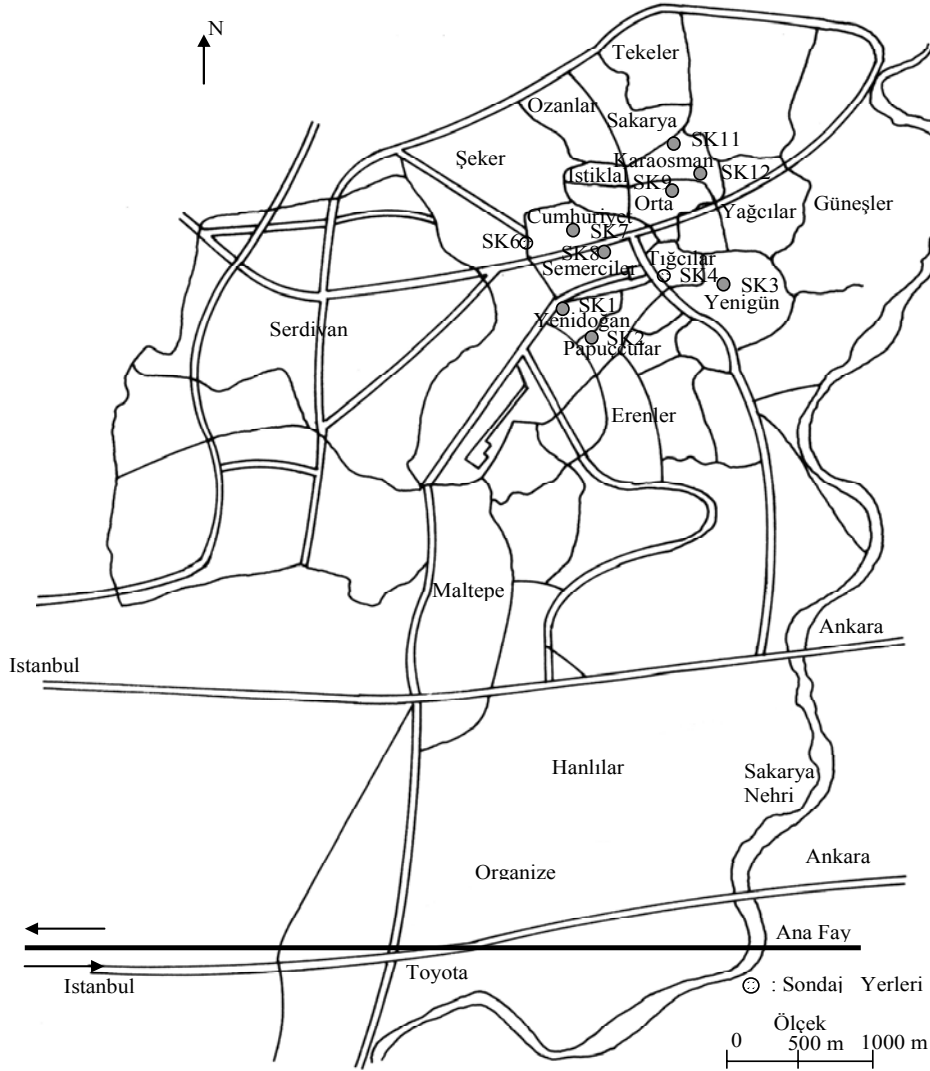
kintileri oluşturur. Genellikle çakıl-kum-silt serileri devamlı bir şekilde görülür. Bu birikintiler merceksi veya bant şeklinde düşük plastisiteli kil ve silt serileri içerirler. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belli seviyelerde bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde ardalanmalı olarak görülmektedir (Önalp vd., 2000). Anakaya derinliği şehrin merkezinde yaklaşık 1100 m'lerde bulunmaktadır (Komazawa vd., 2002; Hitoshi vd., 2002). Yeraltı su seviyesi genellikle zemin yüzeyinden 1-2 m aşağıda bulunmakta olup mevsimsel değişimler göstermektedir.

Sancio (2003) tarafından yapılan çalışmada 4 m derinlikten alınan bir karbon numunesi üzerinde

yaptırdıkları deneylere göre zeminin 1000 yaşında olduğunu tespit etmiştir. Bu sonuca göre yüzey zeminlerinin ise sadece birkaç yüz yıl veya daha az yaşında olduğunu ifade etmiştir.

### Yerel zemin koşulları

Bu çalışma kapsamında Adapazarı merkezinde sekiz ayrı noktada on sondaj çalışması Şekil 3'de görüldüğü gibi yapılmıştır. Bu sondaj noktaları zemin hareketleriyle hasar görmüş yapıların etrafında seçilmiştir. Standart penetrasyon deneyi (SPT) için açılan sondaj kuyularından alınan örselenmemiş tüp numuneleri ve örselenmiş zemin numuneleri üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılmış ve sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan sondajlara ait yerleşim planı

Tablo 1’de görüldüğü gibi deney numunelerinin su muhtevası  $w_n$ =% 22-50, ince dane oranı İDO=% 39-100, düzeltilmemiş SPT-N değeri  $N_{30}$ =5-23 aralığında değişmektedir. Ayrıca deney numunelerinin dane birim hacim ağırlığı  $\gamma_s$ =26.0-27.1 kN/m<sup>3</sup> aralığında değerler almaktadır. Yüzeiden alınan 2.5-4.5 m deney numunelerinden bazıları üzerinde yapılan ödometre deneyi sonucunda Aşırı Konsolidasyon Oranları (AKO) 2.75-3.85 arasında bulunmuş olup Adapazarı kent merkezinin yüzeeye yakın zeminlerinin hafif aşırı konsolide olduğu belirlenmiştir.

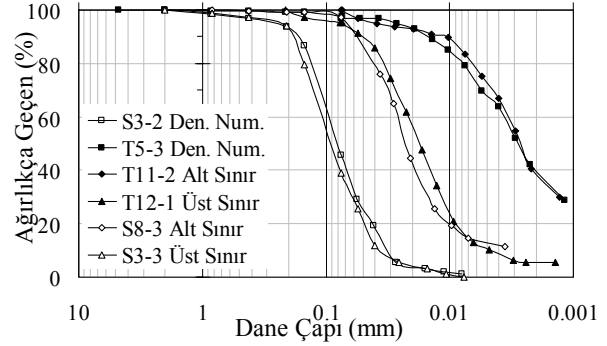
Tablo 1. Kullanılan zemin numunelerine ait endeks özellikler

Sondaj No	Deney No	Derinlik m	$w_n$ %	İDO %	$w_L$ %	$I_p$ %	$N_{30}$	Zemin Cinsi
SK3	S3-1	10.5-11.0	37	53.0	-	NP	23	ML
SK3	S3-2	10.5-11.0	29	46.0	-	NP	23	SM
SK3	S3-3	10.5-11.0	32	39.0	-	NP	23	SM
SK3	S3-4	3.0-3.5	46	92.0	62	22	5	MH
SK3	S3-5	3.0-3.5	50	94.0	55	16	5	MH
SK3	S3-6	3.0-3.5	46	94.0	59	20	5	MH
SK4	S4-1	3.0-3.5	22	55.5	-	-	12	ML
SK6	S6-2	3.0-3.5	42	98.8	59	28	7	MH
SK7	S7-3	3.0-3.5	43	99.3	66	31	4	MH
SK8	S8-3	3.0-3.5	44	97.3	-	NP	5	ML
SK1	T5-3	5.0-5.5	41	97.5	71	40	5	CH
SK2	T6-1	7.2-7.7	25	89.1	31	NP	14	ML
SK2	T6-4	7.2-7.7	33	99.4	45	20	14	CL
SK6	T7-2	7.5-8.0	27	86.3	26	NP	9	ML
SK8	T9-1	7.5-8.0	48	97.5	68	40	7	CH
SK1	T11-2	9.5-10.0	43	100.0	56	30	7	CH
SK11	T12-1	4.0-4.5	33	98.0	38	16	11	CL
SK12	T12-2	4.0-4.5	38	95.0	38	15	12	CL

$w_n$ =su muhtevası, İDO=ince dane oranı,  $w_L$ =likit limit,  $I_p$ =plastisite indisi,  $N_{30}$ =SPT-N değeri, NP=nonplastik

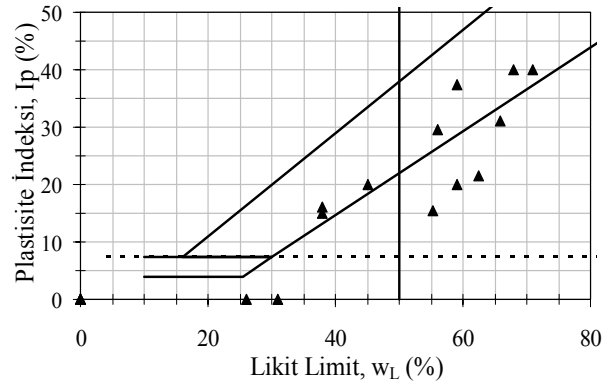
Tablo 1’de verilen ve üzerinde dinamik deney uygulanan numunelerin dane çapı dağılımı Şekil 4’te verilmiştir. Kil yüzdesi %10’dan küçük olan siltli kum-silt numunelerin (S8-3, S3-3)

ortalama dane çapı  $D_{50}$ =0.09-0.03 mm arasında değişirken, killi zemin numunelerin (T11-2, T12-1) ortalama dane çapı  $D_{50}$ =0.018-0.003 mm arasında değişmektedir.



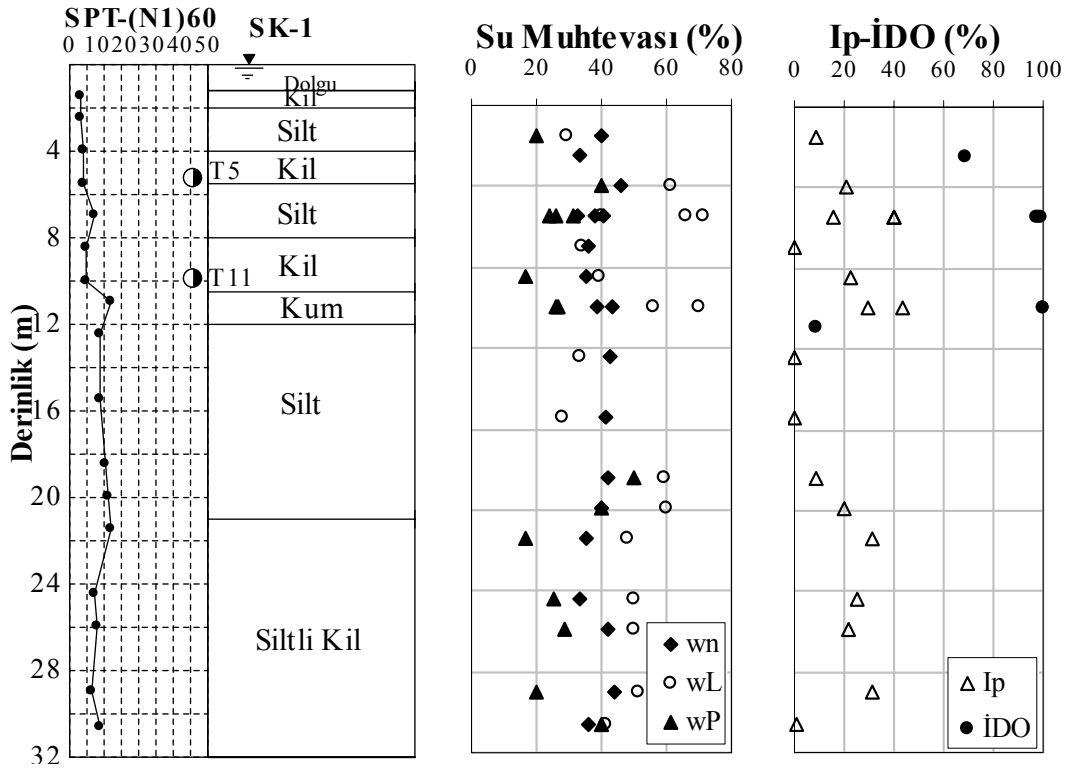
Şekil 4. Deneylerde kullanılan örselenmemiş kumlu-silt ile killi zemin numunelerinin dane dağılımı aralığı

Endeks deneyleri kapsamında yapılan kıvam limitleri deneylerine göre zemin numunelerinin plastisite kartındaki yerleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Bu grafikte verilen deney numuneleri plastisite olmayan zeminlerden plastisite indisi  $I_p$ =% 40’a kadar değişen zeminlerden oluşur.



Şekil 5. Deney numunelerinin Plastisite kartındaki yeri

Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarından sonra bütün sondajlar için zemin profilleri elde edilmiştir. Bu kapsamda T5 (5.0-5.5 m) ve T11 (9.5-10.0 m)’le başlayan deney numunelerinin yerinin de gösterildiği SK1 sondajına ait zemin profili kıvam limitleri ve ince dane oranıyla birlikte Şekil 6’da gösterilmektedir. Deprem sırasında bu noktalarda sıvılaşma gözlenmiştir.



Şekil 6. Yenidoğan Mahallesiinde (PTT yanı) yapılan SK1 sondajına ait zemin profili ve endeks özellikleri

SK1 sondajında 12 m derinliğe kadar silt ve kil ardalanması sonrasında sırasıyla herbiri 10'ar metre kalınlığında olan silt ve siltli kil tabakası yer almaktadır. Zemin profili verilen SK1 sondajının SPT-N değeri ilk 10 m içerisinde  $N_{30}=4-9$  arasında değişmektedir. 31 m'ye kadar devam ettirilmiş sondajın son 21 m'sinde SPT-N değeri  $N_{30}=8-15$  arasında değer almaktadır. SK1 sondajına ait zemin numunelerinin su muhtevası  $w_n=\%$  33-43, ince dane oranı ise  $\text{İDO}=\%$  8-100 aralığında bulunmaktadır (Şekil 6).

### Numune hazırlama ve deneyin yapılışı

Tekrarlı yükler altında zeminlerin dinamik davranışlarını belirlemek için dinamik üç eksenli deney sistemi kullanılmıştır. Deney aleti düşey statik yük yükleme kapasitesi 5000 N, hücrenin kapasitesi  $1000 \text{ kN/m}^2$  hidrolik basınca kadar dayanıklıdır. Deneylerde 50-60-75 mm çapında ve 100-120-150 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılabilir. Dinamik sinüzoidal düşey yük yükleme kapasitesi  $\pm 2000 \text{ N}$ 'dur. Dinamik deneyler gerilme kontrollü olarak yapılabilmektedir. Dinamik deneylerin fre-

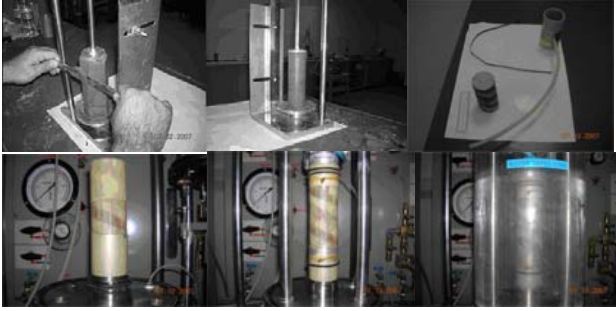
kansı 0.1 Hz ile 2 Hz arasında ayarlanabilmektedir. Dinamik üç eksenli deney sisteminde düşey yük, düşey deplasman, boşluk suyu basıncı ve hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Kullanılan numunelerin özellikleri önceki bölümde verilmiştir. Bu numuneler siltli kil (CL), kil (CH), killi silt (ML), silt (MH), siltli kum (SM), kum (SP) zeminlerden oluşmuştur.

İnce daneli numunelerdeki örselenmeyi en az düzeye indirmek için, yaklaşık olarak 7 cm çapında 80 cm yüksekliğindeki sondaj tüpleri, enine olacak şekilde yaklaşık 12-15 cm'lik parçalara ayrılmış ve daha sonra planya aletinde boyuna doğrultuda karşılıklı iki taraftan yarılarak numuneler çıkarılmıştır. Sondaj tüpünden çıkarıldığında dağılma ihtimali olan silt, kum, siltli kum ve kumlu silt zeminler dane çapına göre tüp içindeki su drene edildikten sonra sondaj tüpü ile beraber derin dondurucuya bırakılmıştır. Sondaj tüpünden çıkarılan numuneler boyu çapının en az iki katı olacak şekilde çapı 50 mm, yüksekliği 100 mm olarak Şekil 7'de



gösterilen numune traşlama aletinde hazırlanmıştır.



Şekil 7. Deney numunesinin hazırlanması ve üç eksenli deney sistemine yerleştirilmesi

Bu çalışma kapsamında zemin numunelerinin mukavemet davranışını incelenmek amacıyla yapılmış olan gerilme kontrollü üç eksenli deneylerde farklı dinamik yük seviyelerinde zeminlerde göçme kriteri olarak eksenel birim deformasyon  $\varepsilon = \pm\% 2.5$  veya boşluk suyu basıncı oranı  $\Delta u / \sigma'_c = 1.0$  oluncaya kadar tekrarlı yükleme yapılmıştır.

Deneylerde İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Zemin Dinamiği Laboratuvarında mevcut olan dinamik üç eksenli basınç deney aleti kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üç eksenli deney hücresine yerleştirildikten (Şekil 7) sonra  $30 \text{ kN/m}^2$ 'lik basınca eşit vakum üst drenaj kanalından uygulanmıştır. Kumlu ve düşük plastisiteli siltlerde, buzların erimesi için vakum uygulama süresi uzun tutulmuştur. Bu işlemten sonra çevre basıncı kademeli olarak  $30 \text{ kN/m}^2$  artırılırken vakumda aynı kademede azaltılarak sıfıra indirilmiştir. Siltli kum ve kumlu siltlerden  $30 \text{ kN/m}^2$ 'lik izotropik basınç altında su geçirilmiştir. Su geçirme işlemi tamamlandıktan sonra numunenin doygunluğunu sağlamak için ters basınç minimum  $200 \text{ kN/m}^2$ 'ye, çevre basıncı ise  $230 \text{ kN/m}^2$ 'ye getirilmiştir. Numune bu gerilme şartları altında uzun süre bekletilerek doygunluğu kontrol edilip  $\% 95$  üzerinde doygunluk sağlandıktan sonra ters basınç  $200 \text{ kN/m}^2$ , çevre basıncı  $300 \text{ kN/m}^2$  yapılarak  $100 \text{ kN/m}^2$ 'lik efektif izotropik çevre gerilmesi altında konsolide edilmiştir.

$\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$  konsolidasyon basıncı altında konsolide olan zemin numuneleri farklı gerilme

oranlarında ( $\sigma_d / 2\sigma'_c = 0.205-0.515$ ) ve  $f=0.1 \text{ Hz}$  frekansında tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmıştır. Drenajsız olarak dinamik yükleme yapılırken düşey yük, düşey deplasman ve boşluk suyu basıncı kaydedilmiştir.

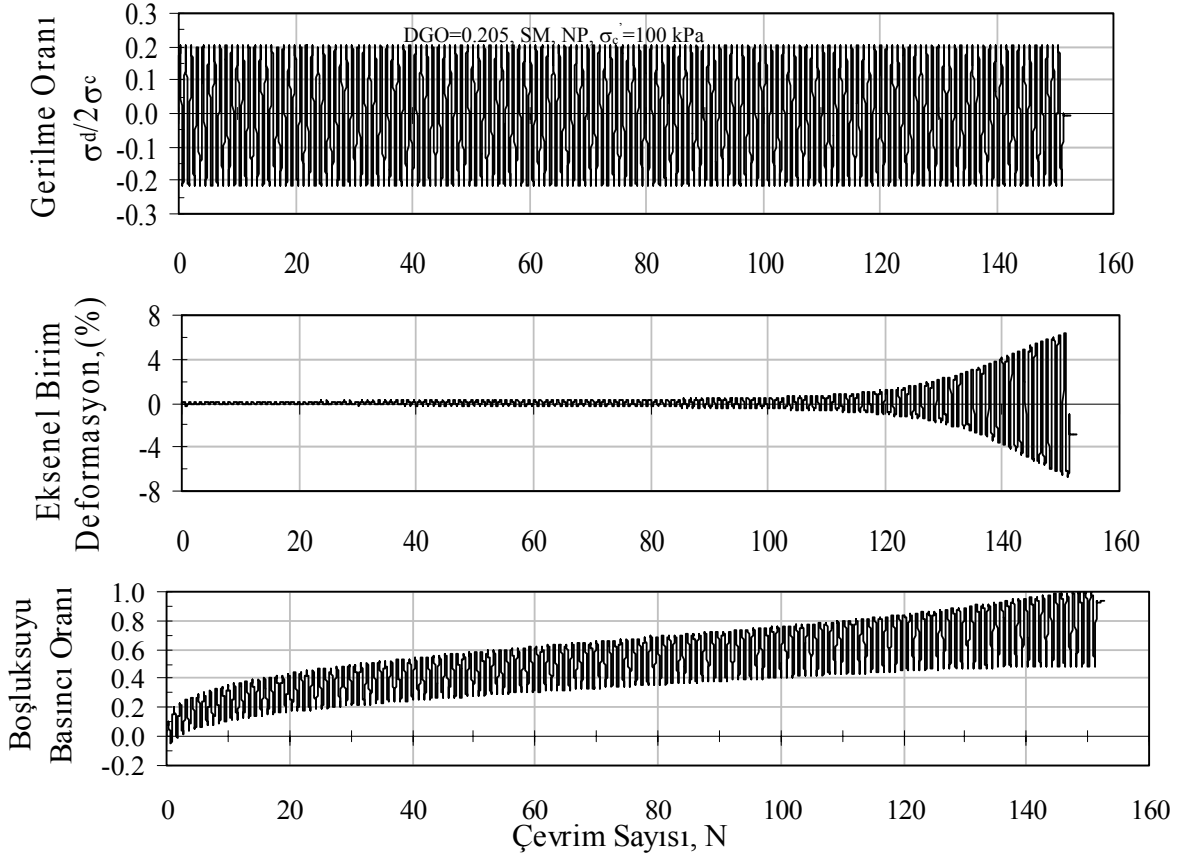
### Dinamik davranış

Dinamik yükler altındaki davranışını incelenen zeminlerden siltli kum (SM) ve yüksek plastisiteli kile (CH) ait tipik deney sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.

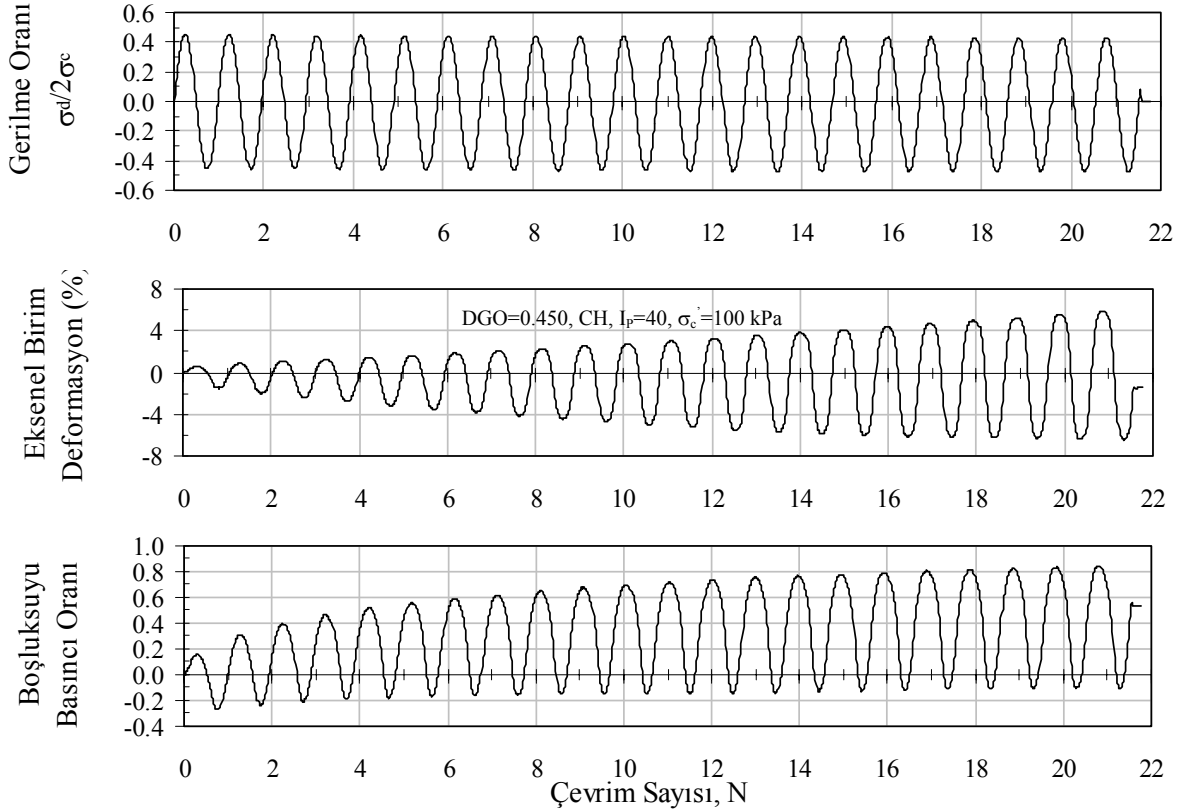
Şekil 8'de  $10.5-11.0 \text{ m}$  derinlikten alınan ince dane oranı  $\text{İDO} = \% 46$  olan zemin numunesinin dinamik üç eksenli basınç deney sonuçları Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'de verilen deney sonuçlarına göre deney numunesi  $\text{DGO} = 0.205$  gerilme oranında ilk 100 çevrime kadar eksenel birim deformasyon  $\pm\% 1$  boşluk suyu basıncı oranı ise  $0.75$  seviyelerinde iken bu çevrim sayısından itibaren boşluk suyu basıncı dereceli artmasına rağmen eksenel birim deformasyonda hızlı bir artış görülmektedir. Göçme kriteri olarak kabul edilen  $\pm\% 2.5$  değerine  $N=133$  çevrim sayısında ulaşılmışken boşluk suyu basıncı oranı  $r_u = 0.89$  olmuştur. Boşluk suyu basıncı oranı  $r_u = 1.0$  değerine ise  $N=150$  çevrim sonunda ulaşılabilmektedir. Deney sonunda eksenel birim deformasyon  $\varepsilon = \pm\% 6.5$  olmuştur.

Şekil 9'da ise plastisite indisi  $I_p = \% 40$  ve kıvam indisi  $I_c = 0.759$  olan CH grubu zemin numunesi üzerinde dinamik kayma gerilmesi oranı  $\text{DGO} = 0.450$  olan dinamik üç eksenli basınç deneyine ait grafikler verilmiştir. İnce dane oranı  $\% 97$  olan zemin numunesinde ilk çevrimden itibaren boşluk suyu basıncında artışlar olmuş ve  $N=5.5$  çevrimde eksenel birim deformasyon  $\varepsilon = \pm\% 2.5$  ile boşluk suyu basıncı oranı  $r_u = 0.55$  değerine ulaşmıştır. Bu nokta göçme kriterine karşılık gelen çevrim sayısıdır.  $N=20$  çevrimin sonunda ise boşluk suyu basıncı  $80 \text{ kPa}$  seviyelerinde kalmıştır. Ancak numune göçtüğü için eksenel birim deformasyonda pozitif yöne doğru bir kayma söz konusudur.  $N=20$  çevrimin sonunda zeminin uğradığı dinamik yükler altındaki deformasyon seviyesi  $\varepsilon_c = \pm\% 6.0$ 'dır (Şekil 9).





Şekil 8. S3-2 Denei numunesine ait dinamik üç eksenli denei sonuçları



Şekil 9. T5-3 denei numunesine ait dinamik üç eksenli denei sonuçları

## Dinamik mukavemet eğrisi

Dinamik mukavemet eğrisini elde edebilmek için Adapazarı'nın farklı bölgelerinden sondajlar ile alınan dan alınan örselenmemiş zemin numuneleri üzerinde dinamik deney öncesi küçük deformasyon ölçerler ile elastisite modülleri belirlenmiş ve daha sonra yapılan dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılmış olup sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Maksimum elastisite modülleri 55-375 MPa arasında değişmektedir.

Şekil 10'da  $\sigma_c = 100$  kPa konsolidasyon basıncı altında konsolide edilen CL, CH, ML, MH, SM grubu zeminlere ait numuneler üzerinde frekansı 0.1 Hz olan değişik gerilme oranlarında yapılan dinamik üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre eksenel deformasyon değeri  $\varepsilon = \pm 2.5$  (%) değerine karşılık gelen dinamik gerilme oranı ile çevrim sayısı arasındaki ilişki verilmiştir. Bu grafiklerde dinamik gerilme oranı arttıkça çevrim sayısı azalmaktadır. İnce dane oranı % 39-46 arasında değişen SM grubu zeminler çok düşük gerilme oranlarında  $\varepsilon = \pm 2.5$  eksenel birim deformasyonlara uğramışlardır. Plastisite indisi  $I_p = 27-31$  arasında değişen MH grubu zeminler sıvılaştırma direnci bakımından en dayanıklı zeminlerdir. Plastisite indisi  $I_p = 40$  olan CH grubu zeminlerde ise  $I_p = 27-31$  olan zeminlere göre daha düşük dinamik gerilme oranlarında  $\varepsilon = \pm 2.5$  eksenel birim deformasyonlara ulaşılmaktadır. Plastik olmayan ML grubu zeminler diğer zemin gruplarından sadece SM grubu (ince dane oranı % 39-46 olan) zeminlere göre biraz daha fazla sıvılaştırmaya dirençlidir.

Bu çalışma kapsamında yapılan dinamik deney sonuçlarına göre  $\varepsilon = \pm 2.5$  göçme kriterini sağlayan numunelere ait veriler kullanılarak Şekil 10'da farklı zemin grupları için elde edilen mukavemet eğrileri kullanılarak deprem manyitüdü  $M_w = 7.4$  olan bir depreme karşılık gelen  $N = 20$  çevrim sayısında göçmeye yol açan gerilme oranları plastisite indisi  $I_p = 27-31$  olan MH grubu zemin için  $DGO = 0.490$ , plastisite indisi  $I_p = 15-22$  olan MH grubu zemin için  $DGO = 0.360$ , CH grubu için  $DGO = 0.430$ , CL grubu için  $DGO = 0.325$ , ML grubu için  $0.240$  ve SM grubu zemin için  $DGO = 0.220$ 'dir. Ayrıca Tsukamoto ve diğerleri (2001) tarafından Tiğcılar Mahallesinden alınmış zemin numune-

leri üzerinde yapılan çalışmadan elde edilen veriler bu çalışmanın sonuçları ile uyumlu olup Şekil 10'da görülmektedir.

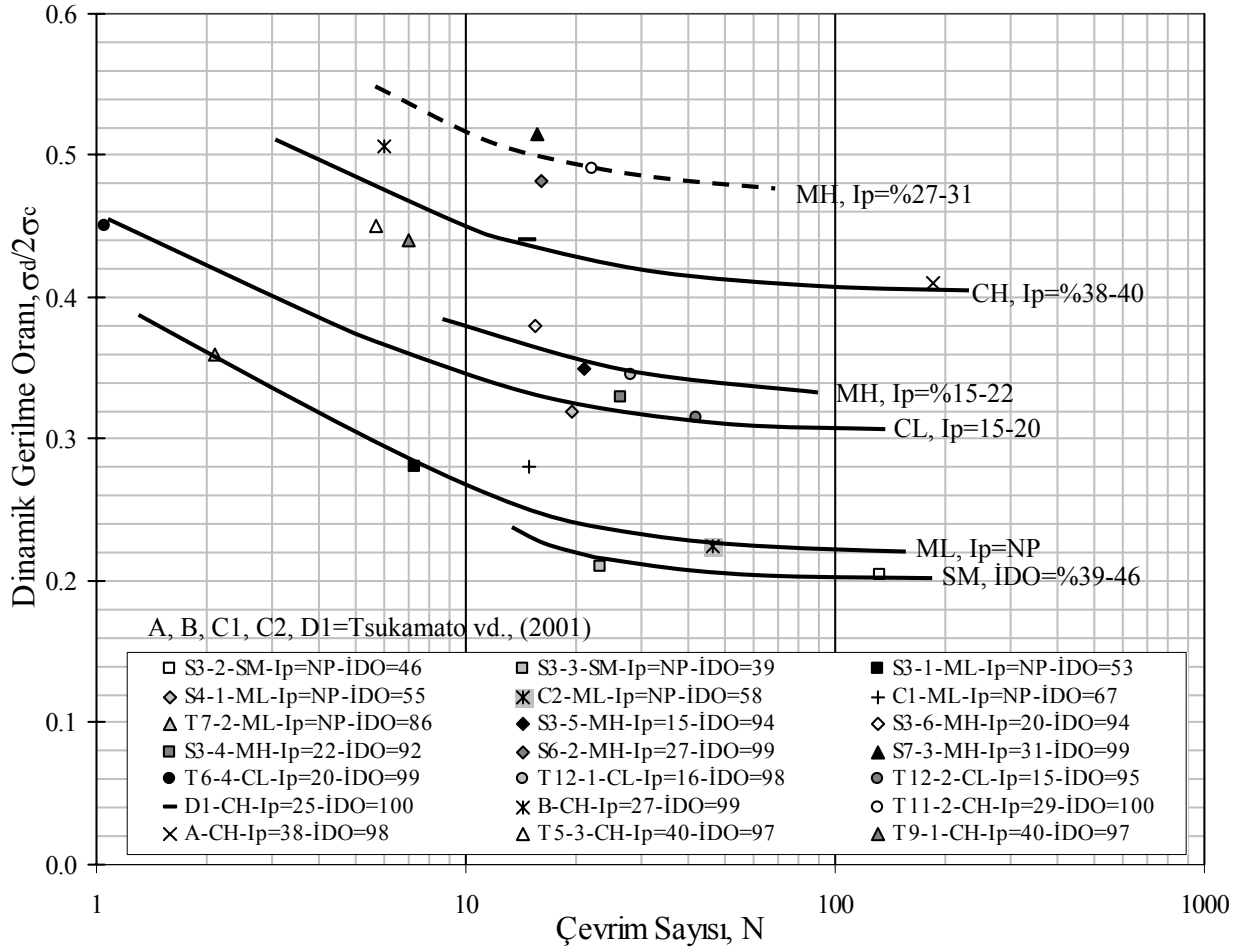
Tablo 2. Dinamik deney sonuçları

Sondaj No	Deney No	$\gamma_k^*$ kN/m <sup>3</sup>	$w_n$ %	İDO %	$E_{maks}$ MPa	$I_p$ %	DGO	N	Zemin Cinsi
SK3	S3-1	-	37	53	-	NP	0.265	7	ML
SK3	S3-2	-	29	46	-	NP	0.200	13 3	SM
SK3	S3-3	-	32	39	-	NP	0.219	23	SM
SK3	S3-4	-	46	92	-	22	0.331	27	MH
SK3	S3-5	-	50	94	-	16	0.350	21	MH
SK3	S3-6	-	46	94	-	20	0.377	15	MH
SK4	S4-1	17.00	22	56	-	-	0.320	19	ML
SK6	S6-2	12.80	42	99	-	28	0.482	18	MH
SK7	S7-3	12.90	43	99	-	31	0.515	15	MH
SK8	S8-3	13.50	44	97	-	NP	0.400	19	ML
SK1	T5-3	17.20	41	98	375	40	0.450	5	CH
SK2	T6-1	17.63	25	89	150	NP	0.415	20	ML
SK2	T6-4	17.76	33	99	55	20	0.450	1	CL
SK6	T7-2	17.15	27	86	126	NP	0.360	2	ML
SK8	T9-1	16.67	48	98	174	40	0.430	7	CH
SK1	T11-2	17.83	43	100	244	30	0.490	20	CH
SK11	T12-1	13.71	33	98	206	16	0.346	28	CL
SK12	T12-2	12.66	38	95	160	15	0.315	42	CL

$N$ =Eksenel birim deformasyonun  $\varepsilon = \pm 2.5$  olduğu değerdir.  $w_n$ =su muhtevası, İDO=ince dane oranı,  $w_L$ =likit limit,  $I_p$ =plastisite indisi,  $N_{30}$ =SPT-N değeri, NP=nonplastik, DGO=dinamik gerilme oranıdır

## Sonuçlar

Adapazarı kent merkezinde sekiz farklı noktada hasar görmüş yapıların etrafında örselenmemiş zemin numuneleri alınmış ve dinamik deneyler yapılmıştır.



Şekil 10. Dinamik mukavemet eğrisi

Deney sonuçlarına göre yüksek miktarda silt içeren kumlu zeminler sıvılaşmaya karşı en düşük direnci göstermiştir. Siltler genel olarak düşük ve yüksek plastisiteli olup en düşük mukavemet plastik olmayan siltlerde görülürken plastisitenin artmasıyla birlikte sıvılaşmaya karşı dirençte de artış gözlenmiştir. Killerin ise sıvılaşmaya karşı direnci siltli kum ve plastik olmayan siltlere göre daha yüksek elde edilmiştir.

### Teşekkür

Bu çalışma Fen Bilimleri Enstitüsü'nün "Depremler Sırasında Sıvılaşan Zeminlerde Meydana Gelen Yanal Yayımların Belirlenmesi" adlı 30654 nolu araştırma projesi ve Türkiye Deprem Vakfı'nın "17 Ağustos Kocaeli Depreminde Adapazarı'nda Oluşan Hasar Üzerinde Yerel Zemin Koşullarının Etkisi" adlı 00-AP113 nolu araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- Anderson, J.G., Sucuoğlu, H., Erberik, A., Yılmaz, T., Inan, E., Durukal, E., Erdik, M., Anooshehpour, R., Brune, J.N. ve Ni, S., (2000). Implications for seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, **16**, 113-137.
- Bol, E., (2003). Adapazarı zeminlerinin geoteknik özellikleri, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bray, J. D., Sancio, R.B., Durgunoglu, H.T., Onalp, A., Seed, R.B., Stewart, J.P., Youd, T.L., Baturay, M.B., Cetin, K.O., Christensen, C., Karadayilar, T. ve Emrem, C., (2001). Ground failure in Adapazarı, Turkey, in 15<sup>th</sup> ICSMGEg, TC4 Satellite Conference on Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes, 19-28, İstanbul, Türkiye.
- Erken, A., (2001). The role of geotechnical factors on observed damage in Adapazarı, *Proceedings of the XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*,

- Earthquake Geotechnical Engineering Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 29-32, İstanbul, Türkiye.
- Erken, A., Okan, R. ve Erdem, A., (2003). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda yer alan zeminlerin davranışı, V. Ulusal Deprem Konferansı, İstanbul.
- Erken, A., Kaya, Z. ve Erdem, A. (2004a). Ground deformations in Adapazarı during 1999 Kocaeli Earthquake, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 29-32, Canada.
- Erken, A., Kaya, Z. ve Ülker, M.B.C., (2004b). Liquefaction in Adapazarı during 1999 Kocaeli Earthquake, 6th International Congress on Advances in Civil Engineering, İstanbul, Türkiye.
- Hitoshi, M., Jumpei, A., Masao, K., Kajuro, N., Keiichi, N. ve Sumi, S., (2002). Bedrock structure in Adapazarı, Turkey, inferred from gravity anomaly and microseisms, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Japan Earthquake Engineering Symposium*, 301-306.
- Kaya, Z., Irisawa, T. ve Erken, A., (2002). Adapazarı zeminlerinin dinamik davranışı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi, Cilt 1, 220-227, Eskişehir.
- Kiku, H., Yoshida, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimuzu, Y., Ansal, A. ve Erken, A. (2001). In-situ penetrating test and soil profiling in Adapazarı-Turkey, XV ICSMGE Satellite Conference on "Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 259-265, İstanbul, Türkiye.
- Komazawa, M., Morikawa, H., Nakamura, K., Akamatsu, J., Nishimura, K., Sawada, S., Erken, A. ve Onalp, A., (2002). Bedrock structure in Adapazarı, Turkey-a possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 9, 829-836.
- Önalp, A., Sert, S. ve Bol, E., (2000). Adapazarı zeminlerinin deprem performansı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, 26-27 Ekim 2000, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 375-382.
- Önalp, A. ve Bol, E., (1998). *Adapazarı kent merkezi jeoloji ve jeomorfolojisi*, Rapor No:1, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı, Sakarya.
- Sancio, R.B., (2003). Ground failure and building performance in Adapazarı, Turkey, *PhD Thesis*, University of California, Berkeley, California, U.S.A..
- Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Yasuda, S. ve Horie, Y., (2001). Soil properties of the deposits in Adapazarı from laboratory tests, 15<sup>th</sup> ICSMGE, TC4 Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, İstanbul, Türkiye, August 2001, 275-280.
- Yılmaz, M.T., Pekcan, O. ve Bakır, B.S., (2004). Undrained cyclic shear and deformation behavior of silt-clay mixtures of Adapazarı, Turkey, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, 497-507.

---

<http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/Kocaelireport.pdf>