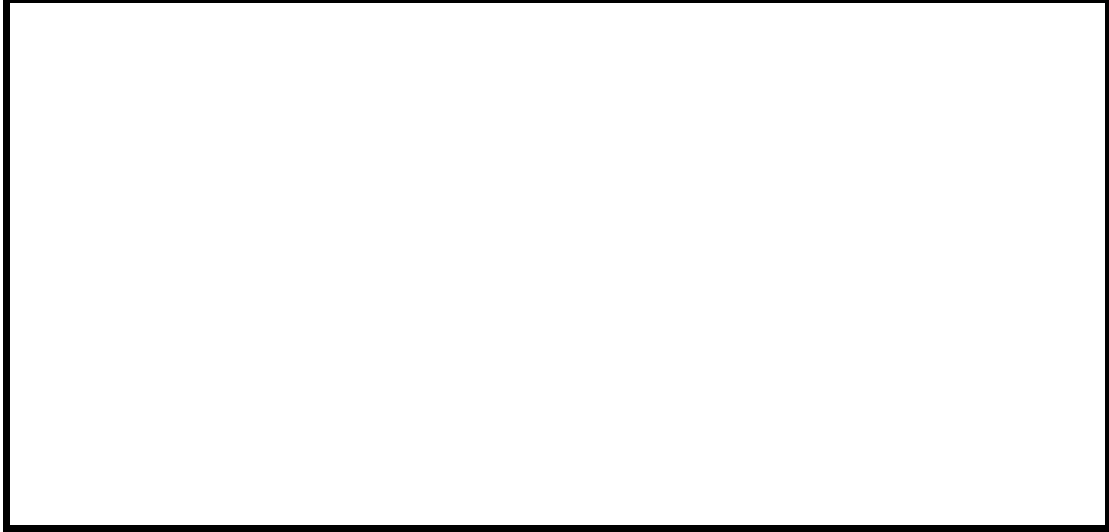




**TÜRKİYE BİLİMSEL VE  
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU**

**THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY**



**Mühendislik Araştırma Grubu**

Engineering Research Grant Group

**SIVILAŞMA TAHMİNİNDE YENİ TEKNOLOJİLER:  
KONİK VİBRASYON PENETRASYON TESTİ**

**PROJE NO: İÇTAG-1729**

YARD. DOÇ.DR. SELÇUK TOPRAK  
DR. MOTOHARU JİNGUUJİ

MAYIS 2006  
DENİZLİ

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi, Türkiye ve National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Japonya kuruluşlarından araştırmacıların ortak yürüttüğü uluslararası bir projedir. Çalışma İÇTAG-1729 olarak Türkiye Bilimsel Ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ve ayrıca National Institute of Advanced Science and Technology (AIST) tarafından desteklenmiştir. Bu proje kapsamında, vibrasyon penetrasyon testi (VPT) olarak isimlendirdiğimiz, sıvılaşma tahminlerinde kullanılmak üzere yeni bir arazi testi ve yöntem önerilmektedir. Bu araştırma projesi için verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a ve AIST'e teşekkür ederiz.

## İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	5
TABLO LİSTESİ .....	5
ÖZET .....	6
ABSTRACT .....	7
1. GİRİŞ.....	8
2. ZEMİN SIVILAŞMASI VE ETKİLERİ .....	8
3. GENEL ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ .....	14
4. SIVILAŞMA'DA YENİ BİR YAKLAŞIM: VİBRASYON PENETRASYON TESTİ (VPT)...	22
5. VPT ALETİ VE VPT ARAZİ DENEYLERİ .....	23
6. VPT DENEYLERİ SONUÇLARI VE ÖNERİLER .....	32
7. REFERANSLAR .....	36
8. EKLER: YAYINLARDAN ÖRNEKLER.....	38

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Sıvılaştan kumun yüzeye çıkışını gösteren kesit (Obermeier 1996, Ulusay 2000).....	9
Şekil 2. Adapazarı'nda Çark Caddesi civarında bir sokak boyunca zemin yüzeyine fıskırmış silt ve ince kum öbekleri (Sucuoğlu vd 2000).....	9
Şekil 3. 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde Adapazarı'nda eğilme formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış binalar (Sucuoğlu vd 2000).....	10
Şekil 4. 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda sıvılaştmanın bir sonucu olarak oturma formunda (yaklaşık 1m) aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış bir bina (Sucuoğlu vd 2000).....	11
Şekil 5. 1999 Kocaeli depreminde Sapanca Gölünün Adapazarı'na yaklaşık 5km mesafede yer alan doğu kıyısında sıvılaştmaya bağlı olduğu düşünülen oturmalar ve denize doğru yanal yayılımlar sonucunda sahil şeridi kısmen gölün suları altında kalmıştır (Sucuoğlu vd 2000).....	11
Şekil 6. Yanal yayılmanın gelişimi (Obermeier 1996, Çelik 2003).....	12
Şekil 7. Petkim rafinerisi iskelesi üzerinde yatay deplasman sonucu meydana gelen yanal hareket (yaklaşık 15cm) (Sucuoğlu vd 2000).....	12
Şekil 8. 1999 Marmara depremi sonrası Değirmendere sahilinin görünüşü. Kıyıya dolgu yapılarak kazanılmış olan alanlar 50m'ye yaklaşan yanal yayılımlar ile denize kaybedilmiştir (Sucuoğlu vd 2000).....	13
Şekil 9. 1995 Kobe Depreminde Port Island kuzey yakasında sıvılaştmanın neden olduğu yanal yayılma etkisiyle, su dağıtım sisteminde yer alan 700 mm çaplı çelik boruda meydana gelen hasar (Chung 1996).....	13
Şekil 10. Akma türü kayma (Ulusay 2000).....	14
Şekil 11. Gerilme azaltma faktörünün ( $r_d$ ) derinlik ( $z$ ) ile değişimi (Youd vd 2001).....	16
Şekil 12. Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş darbe sayısı ( $(N_1)_{60cs}$ ) arasındaki ilişki (Youd vd 2001).....	17
Şekil 13. Düzeltilmiş CPT uç direnci ile ( $q_{c1N}$ ) ile CRR/CSR arasındaki ilişki (Youd vd 2001).....	20
Şekil 14. Deprem büyüklüğü ve magnitüd düzeltme faktörü arasındaki ilişki (Youd vd 2001).....	21
Şekil 15. VPT testinin arazide uygulanan şematik olarak gösterimi.....	22
Şekil 16. Laboratuvarda Prototip VPT testinin gerçekleştirilmesi.....	24
Şekil 17. Sapanca gölü kenarında VPT deneyi için seçilen saha (arkada Sapanca gölü gözükmemektedir).....	25
Şekil 18. CPT ve SPT deney araçları.....	26
Şekil 19. Sapanca Gölü kıyısındaki test sahasında CPT and SPT test sonuçları.....	27
Şekil 20. (a) VPT aleti ve kablosu (b) VPT aletinin boyutları ile şematik olarak iç ve dış yapısı.....	28
Şekil 21. Sapanca Gölü kıyısındaki sahada 2004 yılında gerçekleştirilen VPT testi.....	29
Şekil 22. Deney sahasında SPT kamyonu ve proje yürütücüsünün elinde VPT aleti.....	30
Şekil 23. VPT aleti SPT hidrolik ünitesi ile zemine ittilirken.....	31
Şekil 24. VPT elektrik özdirenç ölçümleri ve CPT uç dirençleri ile kıyaslanması.....	33
Şekil 25. VPT deneyi esnasında ölçülen elektrik özdirenci ve ivme değişim kayıtları: (a) derinlikle değişim (b) kum zeminde-11.2 m ölçümler (c) silt zeminde-12.2 m ölçümler (Toprak ve Jinguuji, 2006).....	34

## TABLO LİSTESİ

Tablo 1. $T_{ij}$ , iç gömlek ve kuyu çapı düzeltme faktörleri (Skempton 1986).....	18
---	----

## ÖZET

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi, Türkiye ve National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Japonya kuruluşlarından araştırmacıların ortak yürüttüğü uluslararası bir projedir. Bu proje kapsamında sıvılaşma tahminlerinde kullanılmak üzere yeni bir arazi testi ve yöntem üzerinde çalışılmıştır. Konik vibrasyon penetrasyon testi (VPT) olarak isimlendirdiğimiz bu test esnasında konik VPT aleti istenilen derinliklere ittirilmekte ve vibrasyon uygulanmakta ve bu esnada ivme, boşluk suyu basıncı ve zemindeki elektrik özdirenci ölçülmektedir. Zeminin dinamik tepkisi doğrudan ölçüldüğünden dolayı bu deneyin kullanılan mevcut metodlara göre sıvılaşma tahminleri yönünden üstünlük göstermesi beklenmektedir. Aletin geliştirilmesi, kalibrasyonu ve arazide doğrulanma çalışmaları için bu aletin prototip modeli ile Japonya'da laboratuvar deneyleri, gerçek ölçütlerdeki alet ile de Sapanca Gölü, Adapazarı kıyısında arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sahasında, gerek zemin özelliklerinin tespitinde gerekse VPT deneyleri ile kıyaslamalar amacıyla CPT ve SPT deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sunulan VPT deneylerinin ölçümleri ve değerlendirmeleri bu yöntemin değişik zemin türlerinin dinamik davranışını ve özelliklerini yakaladığını ve sıvılaşma tespitinde kullanılabilir bir yöntem olarak umut verici olduğunu göstermektedir. Ancak yöntemdeki parametrelerin değişkenliğinin belirlenmesi amacıyla gerçek boyutta VPT aletiyle laboratuvar deneylerinin yapılması faydalı olacaktır.

## **ABSTRACT**

This study is a joint international project among the researchers from Pamukkale University, Turkey and National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Japan. A new field test and method which can be used for liquefaction prediction is proposed in this project. During the test that we name vibration probe penetration test (VPT), a conic VPT probe is penetrated into the ground and vibration applied by the probe. During the vibration, several parameters such as acceleration, excess pore water pressure along with the electrical resistivity change in the ground are measured by the sensors inside the probe. Because this test measures the dynamic response of soil layers directly, it is expected to give better liquefaction prediction results than the existing methods do. During the development and calibration of the vibration probe and verification of the method, several laboratory tests and field experiments were performed in Turkey and Japan. Laboratory tests were conducted by using prototype VPT cone whereas field tests were performed by using the real size VPT cone. Next to the VPT tests, we also performed CPT and SPT tests and got some soil samples at certain depths with the purpose of characterizing soil conditions and comparing with VPT results. The shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey was selected to carry out the VPT field tests. The VPT results presented in this study show that VPT was able to capture the properties and dynamic behavior of different type of soils at the sites and can be considered as one of the emerging and encouraging methods in liquefaction prediction. However, some additional laboratory experiments with real size VPT cone will be very useful to determine the effect of various parameters in VPT prediction in a controlled environment.

## 1. GİRİŞ

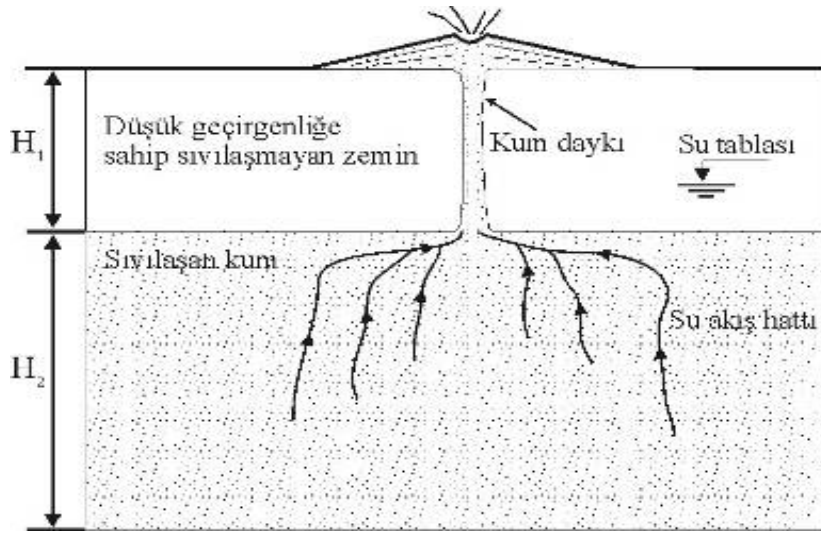
Sıvılaşma, deprem esnasındaki dinamik yükleme etkisiyle drenajsız yükleme şartları altında özellikle suya doygun kohesyonsuz zeminlerde meydana gelmektedir. Sıvılaşmanın en karakteristik özelliği, yükleme esnasında gelişen aşırı boşluk suyu basıncı ve bunun neticesinde zemindeki efektif gerilmenin azalmasıdır. Sıvılaşma sonucunda zeminde oturmalar ve yanal yayılmalar ya da zemin akmaları meydana gelebilir. Dolayısıyla depremlerin sebep olduğu zemin sıvılaşması zeminlerin içinde veya üstünde yer alan kentsel alt ve üst yapılarda önemli zararlara sebep olmaktadır. Ülkemizde ve dünyada gerçekleşen depremlerde oluşan sıvılaşma sonucunda kentsel yapılarda önemli zararlar oluşmuştur (Çelebi vd., 2000). Gelecek depremlerde zararların önlenmesi ve hasarların azaltılması açısından sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin önceden tespiti şehirleşmenin arttığı günümüzde özel önem kazanmıştır. Bu konuda dünya genelinde pekçok çalışmalar yapılmaktadır (örneğin, Toprak ve Holzer, 2003).

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde değişik arazi deneyleri kullanılmasına rağmen en yaygın olanlar standart penetrasyon testi (SPT) ve konik penetrasyon testidir (CPT). Herhangi bir zeminde bu deneylerden elde edilen sonuçlar, geçmiş depremlerden verileri kullanarak elde edilen bazı yarı-ampirik bağıntılarla karşılaştırılarak o zemin için sıvılaşma değerlendirilmesi yapılır (Youd vd., 2001). Bu değerlendirmelerde kullanılan arazi deney sonuçları ve bağıntılar zeminin dinamik etkisini doğrudan gözönüne almazlar. Ancak geçmiş deprem gözlemlerinden faydalanarak, ve bazı belirsizlikleri kabul ederek sonuca ulaşırlar. Bu çalışmada önerilen Vibrasyon Penetrasyon Testi (VPT) ile bu eksikliklerin giderilmesi ve zemin sıvılaşmasının dinamik olarak tespiti amaçlanmaktadır. Yöntemde zemin içine belirli derinliklere konik VPT aleti sokulmakta ve vibrasyon yaptırarak zeminin dinamik olarak sıvılaşması sağlanmakta ve bu esnada VPT aletiyle ivme, zemin boşluk suyu basıncı ve elektrik özdirenci değişimleri ölçümleri yapılmaktadır. Boşluk suyu basıncının yükselmesi sıvılaşma ile özdeşleşmiş bir olaydır. Zeminin elektrik özdirenci ile sıvılaşma arasındaki ilişkilerde daha önce gösterilmiştir (Jinguuji vd., 2007). Burada sunulan çalışmayla literatüre ve uygulamaya yeni ve etkili bir yöntem katılması ve böylece gelecekte sıvılaşma tahminlerinin çok daha başarılı olarak yapılmasının sağlanması beklenmektedir.

## 2. ZEMİN SIVILAŞMASI VE ETKİLERİ

Sıvılaşmanın arazi ve yapılar üzerindeki etkileri beş ana madde halinde sıralanabilir: 1. Zeminin taşıma gücünü yitirmesi; 2. Zeminin oturması; 3. Zemin salınımı; 4. Yanal yayılma; 5. Akma türü kayma. Sıvılaşmanın yüzeyde gözlenmesi ise kum fışırması (kum volkanları ve kum kraterleri), kum daykları ve siller, yanal yayılmalar ve kademeli yarıklar şeklinde olur (Şekil 1 ve Şekil 2).





**Şekil 1.** Sıvılaştıran kumun yüzeye çıkışını gösteren kesit (Obermeier 1996, Ulusay 2000)



**Şekil 2.** Adapazarı'nda Çark Caddesi civarında bir sokak boyunca zemin yüzeyine fıskırılmış silt ve ince kum öbekleri (Sucuoğlu vd 2000)

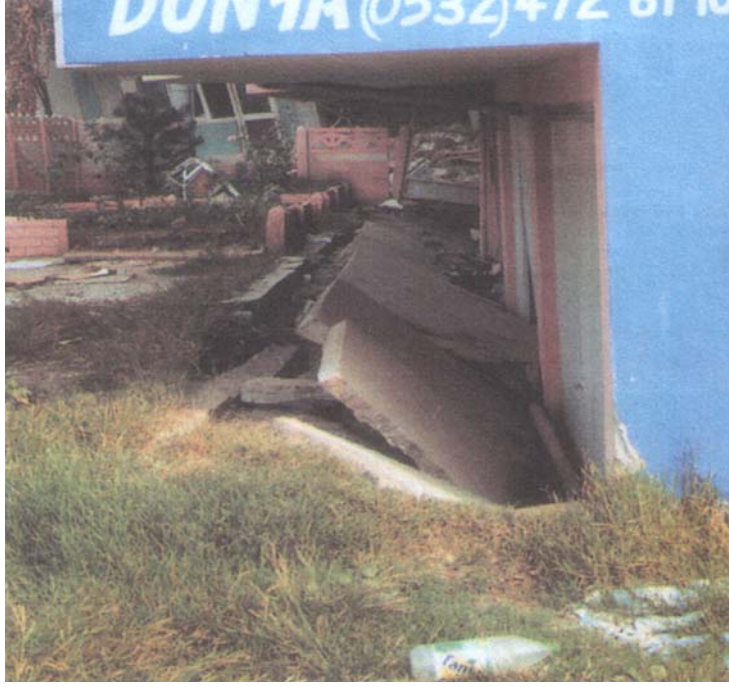
Zeminin taşıma gücünü yitirmesi, kısaca yapıları taşıyan zeminin sıvılaştığı zaman, yapının aktardığı yükü taşıyamaz hale gelmesi sonucu zemin üzerindeki yapıların değişik yönlerde yatması veya devrilmesidir (Şekil 3). Sıvılaşma nedeniyle zeminin taşıma gücünü yitirmesiyle binalarda gözlenen davranışın aksine sıvılaştıran zeminin içinde gömülü konumdaki tanklar ve borular ise, yüzeye doğru yükselme (kabarma) eğilimi gösterirler ve kırılmaya yada bükülmeye maruz kalırlar.



**Şekil 3.** 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde Adapazarı'nda eğilme formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış binalar (Sucuoğlu vd 2000)

Sıvılaşma sırasında ve sonrasında zemin tanelerinin gösterdikleri bir araya gelme eğilimi ve zeminin taşıma gücünü yitirmesi ile yüzeyde oturma şeklinde deformasyonlar (yerdeğiştirmeler) gözlenebilir. Bu koşullarda zeminde gelişen oturma yerdeğiştirmesi zeminin üzerindeki yapıya da yansyarak, yapı zeminin içine batar (Şekil 4 ve Şekil 5). Sıvılaşma yalnızca üst yapıları değil alt yapıları da olumsuz etkilemektedir. Örneğin 1995 Kobe depreminin yoğun tesirinde kalan Batı Japonya'nın endüstri ve kültür merkezi, toplam 15 milyon nüfuslu Hanshin bölgesinde, Kobe ve Osaka şehirlerinde su, atık su, gaz, elektrik ve telekomünikasyon sistemleri gibi candamarı sistemleri büyük zarar görmüştür. Bu zararlardan en az 3 milyon kişi ciddi şekilde etkilenmiştir. Özellikle sıvılaşma sonucu kalıcı yer deformasyonları gerçekleşen alanlarda çok yoğun zararlar gözlenmiştir. Eski borular ve birleşim noktaları daha duktıl ve esnek olan yeni borulara kıyasla daha çok zarar görmüştür (Toprak ve Yoshizaki 2003).

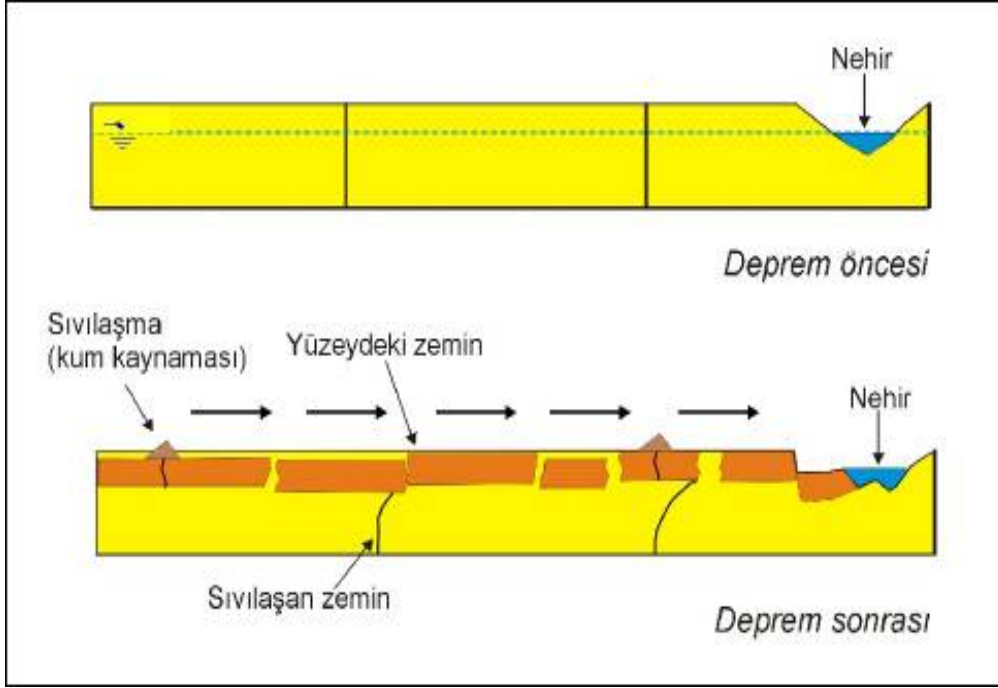
Sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılmalar yapılarda meydana gelen zararların ana sebeplerinden birisi olmaktadır. Yanal yayılma duraysızlığı sıvılaşan seviyenin üzerinde bulunan zeminin geniş bloklara ayrılması ve bu blokların yanal yönde hareket etmesidir. Bu hareket depremden kaynaklanan yer çekimi kuvvetleri ve içsel kuvvetlerin birlikte etkimesiyle meydana gelmektedir. Şekil 6'te yanal yayılmanın gelişimi görülmektedir. Yanal yayılma, genellikle eğimi son derece küçük (0,3-6 derece) olan yamaçlar boyunca ve nehir yatağı, göl veya deniz kıyısı gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeylere doğru gelişir. Yatay yöndeki hareket, birkaç metreden onlarca metreye kadar ulaşabilir. Hareket sırasında zemin ötelenir, bloklara ayrılır ve buna bağlı olarak zeminde çatlaklar, kırıklar küçük çöküntüler ve yükselmeler meydana gelir yapılar ve zemine gömülü diğer alt yapı elemanları (su dağıtım şebekesini oluşturan gömülü boru hatları, doğalgaz hatları) ciddi hasarlara maruz kalabilirler (Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9).



**Şekil 4.** 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda sıvılaşmanın bir sonucu olarak oturma formunda (yaklaşık 1m) aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış bir bina (Sucuoğlu vd 2000)



**Şekil 5.** 1999 Kocaeli depreminde Sapanca Gölünün Adapazarı'na yaklaşık 5km mesafede yer alan doğu kıyısında sıvılaşmaya bağlı olduğu düşünülen oturmalar ve denize doğru yanıl yayılımlar sonucunda sahil şeridi kısmen gölün suları altında kalmıştır (Sucuoğlu vd 2000)



**Şekil 6.** Yanal yayılmanın gelişimi (Obermeier 1996, Çelik 2003)



**Şekil 7.** Petkim rafinerisi iskelesi üzerinde yatay deplasman sonucu meydana gelen yanıl hareket (yaklaşık 15cm) (Sucuoğlu vd 2000)

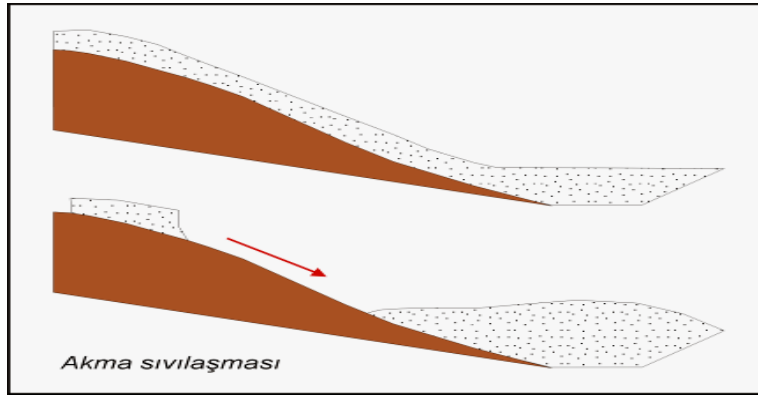


**Şekil 8.** 1999 Marmara depremi sonrası Değirmendere sahilinin görünüşü. Kıyıya dolgu yapılarak kazanılmış olan alanlar 50m'ye yaklaşan yanıl yayılımlar ile denize kaybedilmiştir (Sucuoğlu vd 2000)



**Şekil 9.** 1995 Kobe Depreminde Port Island kuzey yakasında sivilaşmanın neden olduğu yanıl yayılma etkisiyle, su dağıtım sisteminde yer alan 700 mm çaplı çelik boruda meydana gelen hasar (Chung 1996)

Sıvılaşmanın neden olduğu en etkili duraysızlıktan biri akma sıvılaşması olarak da anılan zemin hareketidir. Akma sırasında çok geniş zemin kütleleri, çok kısa bir sürede ve saatte onlarca kilometreye ulaşan bir hızla, eğimli yüzeyler boyunca kilometrelerce hareket edebilir (Şekil 10). Akma tamamen suya doymun zeminde gelişebildiği gibi, sıvılaşan zeminin üzerinde yer alan daha sert bir malzemeye ait blokların hareket etmesiyle de meydana gelebilir. Bu tür hareketler, eğimi  $6^0$ 'den daha büyük olan yamaçlar boyunca, gevşek ve suya doymun kumlar veya siltli kumlarda gelişmektedir. Ayrıca maden işletmelerindeki atık barajlarında toplanan, suya doymun ve çok ince cevher atıklarının da depremler sırasında akma davranışı gösterdikleri bilinmektedir.



**Şekil 10.** Akma türü kayma (Ulusay 2000)

### 3. GENEL ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ

Zeminlerin sıvılaşma duyarlılığının belirlenmesinde arazi ve laboratuvar deneylerine bağlı birçok analiz yöntemi bulunmaktadır. Laboratuvarda yapılan dinamik üç eksenli deneylerde, sıvılaşma olasılığı yüksek zeminlerin çoğundan örselenmemiş zemin örnekleri almak zor olduğundan arazi deneylerine dayalı değerlendirmeler uygulamada daha çok kullanım alanı bulmuştur. Bu arazi deneylerinden başlıca Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) en yaygın olarak kullanılan arazi deneyleri olup, Beker Penetrasyon Deneyi (BPT), Kayma Dalga Hızına ( $V_s$ ) bağlı analiz yöntemleri de sıvılaşma analizinde kullanılmaktadır. Tarihsel gelişim içinde önce SPT'ye dayalı yöntemler geliştirilmiş, diğerleri onu izlemişlerdir. Ama özellikle son 20 yıl içinde CPT deneylerinin yaygınlaşması ile birlikte CPT'ye dayalı yöntemlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Burada projeye alkali olduğu için yalnızca SPT ve CPT ile ilgili sıvılaşma analizleri hakkında kısa bilgiler verilecektir. Sıvılaşma analizleri üzerine ayrıntılı bilgilere değişik kaynaklardan ulaşılabilir (Örneğin Youd vd, 2001; Toprak vd., 1999, Toprak ve Holzer, 2003)

Kumlar ve siltler için Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilmiş olan basitleştirilmiş yöntem zamanla geliştirilmiştir. Amerikan Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezinde (National Center for Earthquake Engineering Research), zeminlerin sıvılaşma dirençlerinin belirlenmesi ve dünya çapında bu konuda bir standart yöntem

oluşturulması amacıyla sıvılaşma üzerine çalışan araştırmacılar T. Leslie ve I. M. Idriss başkanlığında bir araya getirilmiş ve bu çalışmalar "Youd vd (2001)" adlı makalede yayınlanmıştır.

Arazi deneylerini kullanılarak yapılan sıvılaşma analiziyle, sıvılaşma riskini belirlemede kullanılan sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) elde edilmektedir. Güvenlik katsayısı (FS), zeminin sıvılaşma direncinin (CRR) deprem anında meydana gelen devirsel gerilime (CSR) oranıdır. Yapılan sıvılaşma analizi sonucunda elde edilen güvenlik katsayısı (FS) 1'den küçük ise sıvılaşma vardır, güvenlik katsayısı (FS) 1'den büyük ise sıvılaşma yoktur. Sıvılaşma olasılığının belirlenmesi şu aşamalardan oluşur:

a) Devirsel gerilim oranı ( Cyclic Stress Ratio, CSR )

Devirsel gerilim oranı genel anlamda deprem anında meydana gelen makaslama gerilmesinin düşey efektif gerilmeye oranı olarak tanımlanabilir. Devirsel gerilim oranı, laboratuarda örselenmemiş zemin numunelerinin test edilmesi sonucu akla yatkın bir denklem olarak ortaya konulmuştur. Ancak doğal zemin gerilimi genel olarak laboratuarda belirlenmemektedir ve taneli zemin örnekleri tipik sondajlama ve örnekleme teknikleriyle zarar görmeden elde edilememiştir. Bu nedenlerden dolayı da bu denklem gerçeğe yakın sonuçlar vermemektedir. Örnekleme ve laboratuvar testlerinden kaynaklanan zorlukları gidermek amacıyla arazi deneyleri rutin sıvılaşma araştırmaları için kullanılan pratik yöntem haline gelmiştir. Devirsel gerilim oranını açıklamak için Seed ve Idriss (1971) aşağıdaki denklemi oluşturmuşlardır. Deprem sırasında meydana gelen tekrarlı gerilim oranı CSR, formül 3.1 ile hesaplanmaktadır.

$$CSR = (\tau_{av} / \sigma'_{vo}) = 0,65 (a_{max} / g) (\sigma_{vo} / \sigma'_{vo}) r_d \quad (3.1)$$

Burada,

$a_{max}$  : Zemin yüzeyinde deprem etkisiyle oluşan maksimum yatay yer ivmesi

$g$  : Yerçekim ivmesi

$\sigma_{vo}$  : Toplam örtü yükü gerilmesi

$\sigma'_{vo}$  : Efektif örtü yükü gerilmesi

$r_d$  : Gerilme indirgeme katsayısı

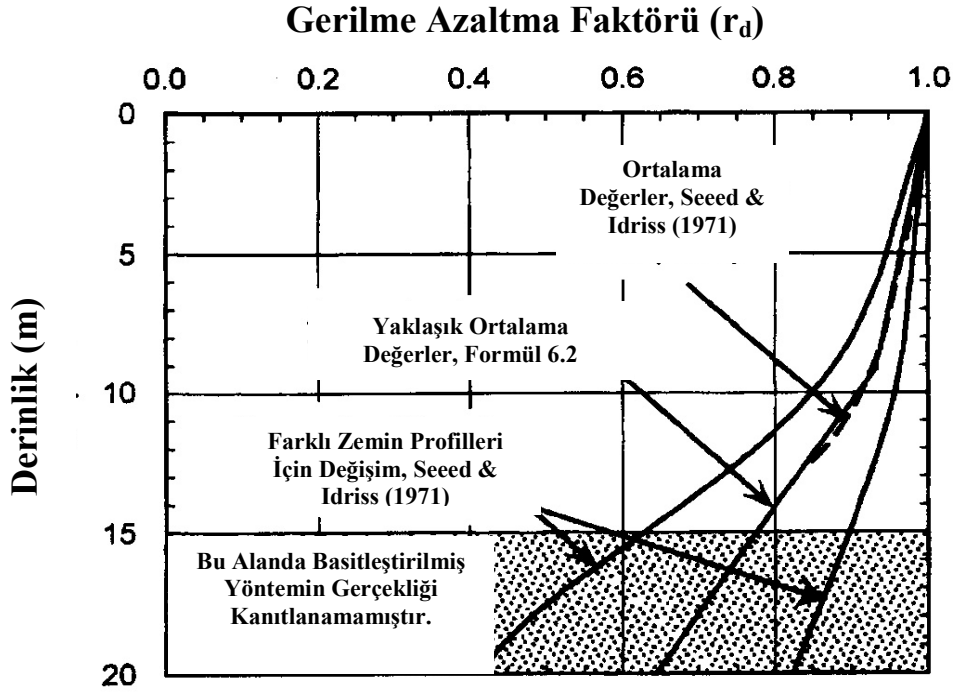
$\tau_{av}$  : Ortalama çevrimli kayma gerilmesi

Burada  $r_d$ , derinlikle ( $z$ ) değişen bir faktör olup 9.15 m derinliğe kadar formül 3.2, 9.15 m ile 23 m arasındaki derinliklerde ise formül 3.3 ile hesaplanmaktadır.

$$r_d = 1,0 - 0,00765 * z \quad z \leq 9,15 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 * z \quad 9,15 < z \leq 23 \text{ m} \quad (3.3)$$

Gerilme indirgeme katsayısının ( $r_d$ ) derinlikle olan değişimi Şekil 11'de verilmiştir. Yukarıdaki formüller (3.2 , 3.3) rutin mühendislik işlerinde (kritik olmayan projelerde) doğrudan kullanılabilir. Ancak bu iki esnek formülde önemli bir değişken bulunmaktadır. Bu da derinliktir.  $r_d$  nin derinlikle değişen geniş bir aralığı vardır (Şekil 11). Formül 3.2 ve 3.3'ün bilgisayar programlarında kullanımı için daha uygun hali formül 3.4'de verilmiştir.



**Şekil 11.** Gerilme azaltma faktörünün ( $r_d$ ) derinlik ( $z$ ) ile değişimi (Youd vd 2001)

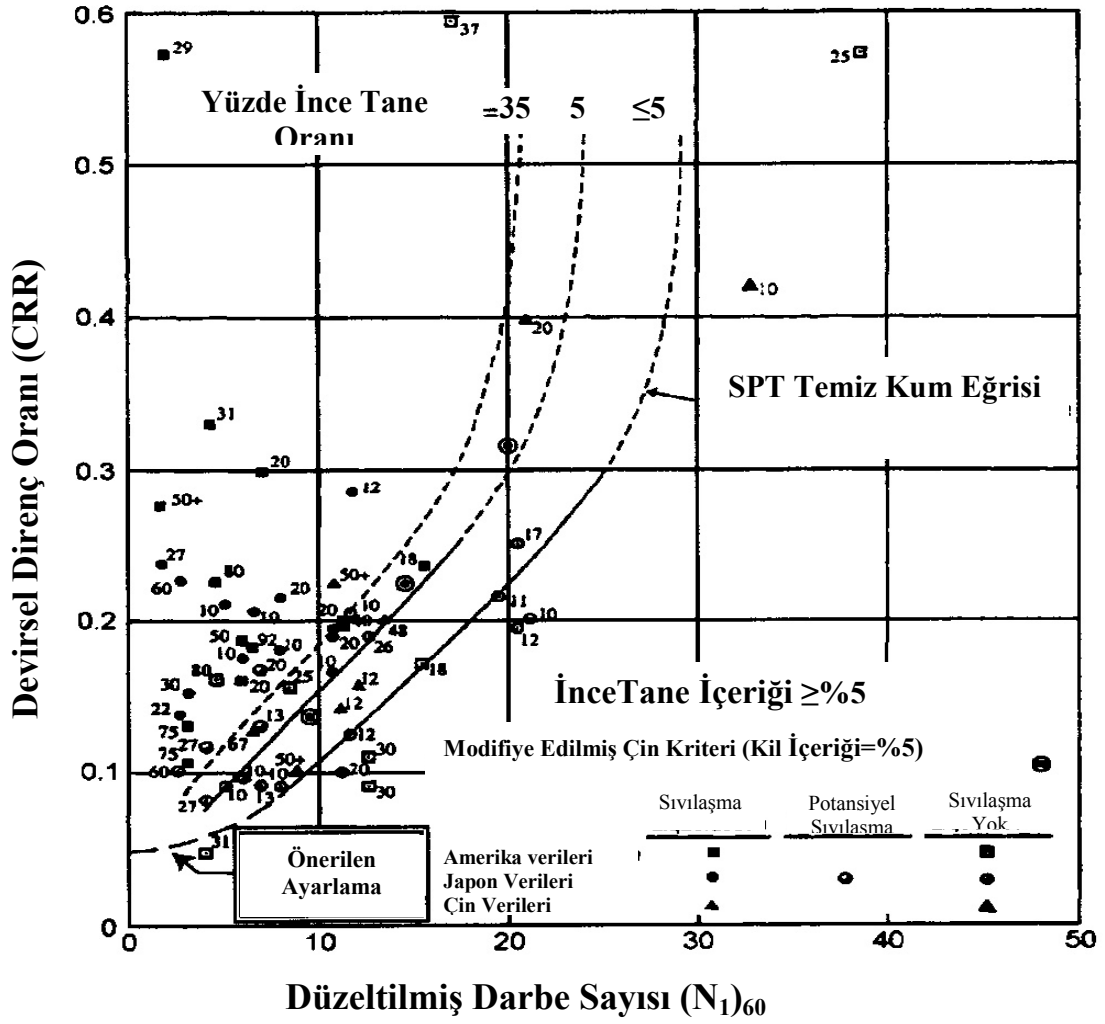
$$r_d = \frac{(1,00 - 0,4113 * z^{0,5} + 0,04052 * z + 0,001753 * z^{1,5})}{(1,00 - 0,4177 * z^{0,5} + 0,05729 * z - 0,006205 * z^{1,5} + 0,001210 * z^2)} \quad (3.4)$$

b) Devirsel direnç oranı ( Cyclic Resistance Ratio, CRR );

Sıvılaşma direncinin belirlenmesi için SPT ye bağlı kriterler yıllar boyu gelişime uğramıştır. Bu kriterler aşağıda verilmiştir. Zeminin sıvılaşmaya karşı olan tekrarlı direnç oranını (CRR) hesaplamada SPT darbe sayıları kullanılmıştır. SPT deneyinden elde edilen darbe sayıları ( $N$ ) bir dizi düzeltmeye tabi tutularak, düzeltilmiş SPT darbe sayısı ( $N_1$ )<sub>60</sub> belirlenmektedir. Bu düzeltmeler; örtü yükü düzeltmesi ( $C_N$ ), tij enerji oranı düzeltmesi ( $C_E$ ), kuyu çapı düzeltmesi ( $C_B$ ), deney sırasında kullanılan tij uzunluğu düzeltmesi ( $C_R$ ) ve iç gömlek (tüp) düzeltmesidir ( $C_S$ ).

Şekil 12 de geçmişte 7,5 büyüklüğünde olan depremlerde sıvılaşmanın görüldüğü bölgelerden yada sıvılaşma olayının gözlenmediği bölgelerden alınan düzeltilmiş ( $N_1$ )<sub>60</sub> ve CSR datalarından oluşturulmuş grafik verilmiştir. Grafikteki eğriler ince tane oranına göre geliştirilmiştir. Grafik ince tane oranı %5'e eşit yada küçük, ince tane oranı %15 ve ince tane oranı %35'e göre bölgelendirilmiştir. İnce tane (dane boyu < 0.075 mm olan kil+silt taneleri) oranı %5'ten küçük ve eşit ince tane oranı eğrisi sıvılaşma analizinde kullanılan basitleştirilmiş yöntem için temel kriterdir. Bu grafikten yararlanılarak CSR yada CRR hesaplanmaktadır. CRR formül 3.5 ile matematiksel olarak hesaplanabilir.





**Şekil 12.** Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş darbe sayısı  $(N_1)_{60cs}$  arasındaki ilişki (Youd vd 2001)

$$CRR_{7,5} = (1/(34-(N_1)_{60cs})) + ((N_1)_{60cs}/135) + (50/(10*(N_1)_{60cs}+45)^2) - (1/200) \quad (3.5)$$

Bu formül 7,5 büyüklüğündeki bir deprem için elde edilmiştir. Gerekli hesaplar yapıldıktan sonra magnitüd düzeltme faktörü ile düzeltilecektir.

$(N_1)_{60cs}$  : Çeşitli düzeltmeler sonucu elde edilmiş darbe sayısıdır. Bu düzeltmeler sırasıyla şunlardır ;

a) Enerji oranı düzeltmesi:

N : Standart penetrasyon deneyinden elde edilen darbe sayısı

ER : Tij enerji oranıdır. Türkiye’de genellikle donut tipi şahmerdan kullanılmaktadır. Enerji oranı Türkiye’de genellikle %45’tir.

$$N_{60} = N * ( ER /60 ) \quad (3.6)$$

b) SPT deki diğer düzeltmeler:

$$(N_1)_{60} = C_N * N_{60} * C_R * C_B * C_S \quad (3.7)$$

$C_N$  : Örtü gerilimi düzeltmesidir ve şöyle hesaplanabilir.

$$C_N = (2,2 / (1,2 + \sigma'_{vo}/P_a)) \quad (3.8)$$

$P_a$  ; Atmosfer basıncı ( $\sigma'_{vo}$  ile aynı birimde)

$C_R$  : Deney sırasında kullanılan tij uzunluğu düzeltmesi

$C_B$  : Kuyu çapı düzeltmesi

$C_S$  : İç gömlek düzeltmesi

SPT düzeltme katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Tij, iç gömlek ve kuyu çapı düzeltme faktörleri (Skempton 1986)

	Tij Düzeltilmesi,	Uzunluğu CR
Uzunluk <3 m	0.75	
Uzunluk 3-4 m	0.8	
Uzunluk 4-6 m	0.85	
Uzunluk 6-10 m	0.95	
Uzunluk 10-30 m	1	
	İç gömlek düzeltmesi,	CS
İç Gömlek Kullanılmadığında	1.1-1.3	
İç Gömlek Kullanıldığında	1	
	Kuyu Çapı Düzeltilmesi,	CB
Kuyu Çapı 65-115 mm	1	
Kuyu Çapı 150 mm	1,05	
Kuyu Çapı 200 mm	1,15	

c) SPT'deki ince tane oranı düzeltmesi;

Youd vd (2001), SPT'ye göre sivilaşma analizinde ince tane oranının (dane boyu < 0.075 mm olan kil+silt taneleri) artışı ile CRR 'nin arttığını belirtmiş ve düzeltilmiş SPT darbe değerlerinin  $(N_1)_{60}$ , zeminin içerdiği ince tane oranına (İTO) göre yeni bir düzeltme önermişlerdir  $(N_1)_{60cs}$ .

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (3.9)$$

$$\text{İTO (İnce tane oranı)} \leq \%5 \quad \rightarrow \quad \alpha = 0 \quad (3.10)$$

$$\%5 < \text{İTO} < \%35 \quad \rightarrow \quad \alpha = e^{(1,76 - (190 / \text{İTO}^2))} \quad (3.11)$$

$$\dot{I}TO \geq \%35 \quad \rightarrow \quad \alpha = 5 \quad (3.12)$$

$$\dot{I}TO \leq \%5 \quad \rightarrow \quad \beta = 1 \quad (3.13)$$

$$\%5 < \dot{I}TO < \%35 \quad \rightarrow \quad \beta = [0,99 + (\dot{I}TO^{1,5}/1.000)] \quad (3.14)$$

$$\dot{I}TO \geq \%35 \quad \rightarrow \quad \beta = 1,2 \quad (3.15)$$

Devirsel direnç oranının (CRR) ve deprem anında meydana gelen devirsel gerilimin (CSR) belirlenmesi için CPT'ye bağlı kriterler Şekil 13'ten geliştirilmiştir. Şekilde geçmişte 7,5 büyüklüğünde olan depremlerde sıvılaşmanın görüldüğü bölgelerden yada sıvılaşma olayının gözlenmediği bölgelerden alınan düzeltilmiş CPT uç direnci ( $q_{c1N}$ ) ve CRR, CSR verilerinden oluşturulmuş grafik verilmiştir. Grafik ince tane oranına göre geliştirilmiştir. İnce tane oranı %5 ten küçük temiz kum için, ince tane oranı eğrisi sıvılaşma analizinde kullanılan basitleştirilmiş yöntem için temel kriterdir.

$$(q_{c1N})_{cs} < 50 \text{ ise } CRR_{7,5} = 0,833 ((q_{c1N})_{cs}/1000)+0,05 \quad (3.16)$$

$$50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \text{ ise } CRR_{7,5} = 93((q_{c1N})_{cs}/1000)^3+0,08 \quad (3.17)$$

Yukarıdaki formül 7,5 büyüklüğündeki bir derem için tasarlanmıştır. Gerekli hesaplar yapıldıktan sonra magnitüd düzeltme faktörü ile düzeltilmelidir.

$(q_{c1N})_{cs}$  : Çeşitli düzeltmeler sonucu normalize edilmiş konik penetrasyon uç direnci (temiz kuma göre)

CPT düzeltmeleri şunlardır;

$C_Q$  ; Koni penetrasyon uç direnci düzeltme katsayısı

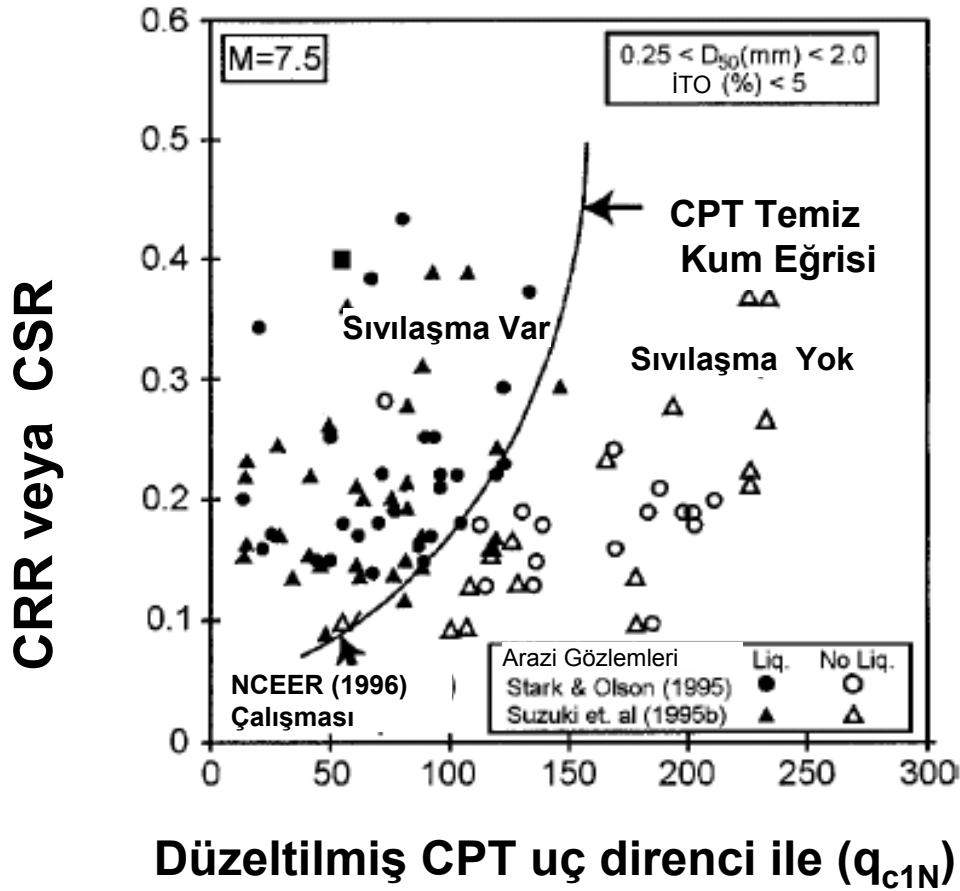
Siğ derinliklerde  $C_Q$  değeri düşük örtü yükü basıncından dolayı büyüktür. Bunula beraber 1,7 den büyük değerleri için  $C_Q$  değeri uygulanmaz. CPT sürtünme oranı genellikle ince tane oranının artışı ve zemin plastisitesinin artışı ile artar.

$n$  ; Zemin türüne bağlı değişken ( 0,5 -1,0 )

$$q_{c1N} = C_Q (q_c / Pa ) \quad (3.18)$$

$$C_Q = (Pa / \sigma'_{vo})^n \quad (3.19)$$

Düzeltilmiş CPT uç direnci ( $q_{c1N}$ ) ile CRR/CSR arasındaki ilişki Şekil 13'te verilmiştir. İnce dane oranının %5'ten büyük olduğu durumlarda uç direnci ile ilgili düzeltmelerin yapılması gerekmektedir (Youd vd, 2001).



**Şekil 13.** Düzeltilmiş CPT uç direnci ile ( $q_{c1N}$ ) ile CRR/CSR arasındaki ilişki (Youd vd 2001)

c) Sıvılaşmaya Karşı Güvenlik Katsayısı (FS);

7.5 büyüklüğündeki bir deprem için hesaplanan  $CRR_{7.5}$  değerlerinin incelenen bölgede öngörülen deprem büyüklüğüne göre düzeltilmesi gerekmektedir. Deprem büyüklüğü ve magnitüd düzeltme faktörü arasında çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan ilişkiler Şekil 14'te verilmiştir. Idriss (1985) yaptığı çalışmada, M5.5 ile M8.5 büyüklükleri arasında değişen depremler için magnitüd düzeltme faktörlerini tanımlamış ve bu değerleri Şekil 14'te görüldüğü üzere grafikte sunmuştur. Bu çalışma Youd vd (2001) tarafından revize edilmiş ve büyüklük ölçeklendirme (düzeltme) faktörü (MSF) formül 3.16'da ki gibi önerilmiştir.

$M_w$  : Deprem büyüklüğü (magnitüd)

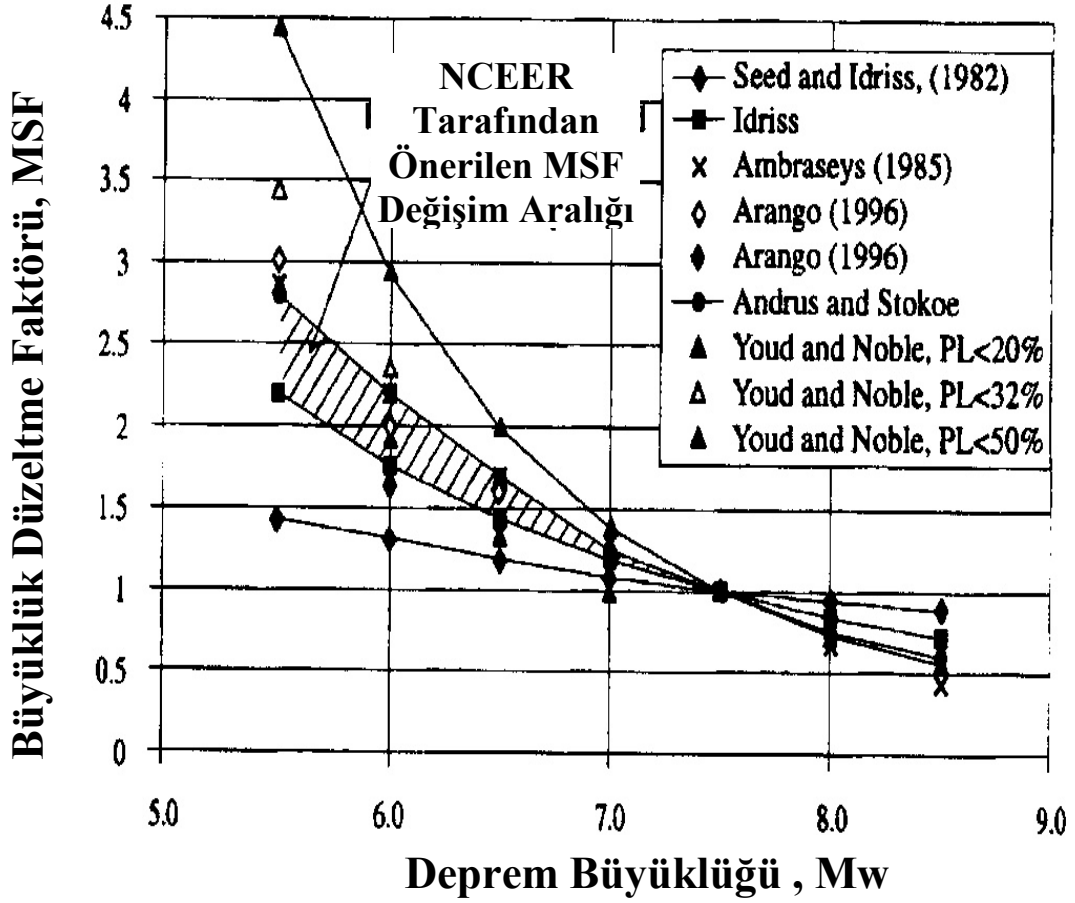
$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (3.16)$$

Sıvılaşmaya karşı FS şöyle hesaplanır.

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) * MSF \quad (3.17)$$

Arazi deneyi verileri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizi sonucu hesaplanan FS değerleri aşağıdaki aralıklara göre değerlendirilebilir.

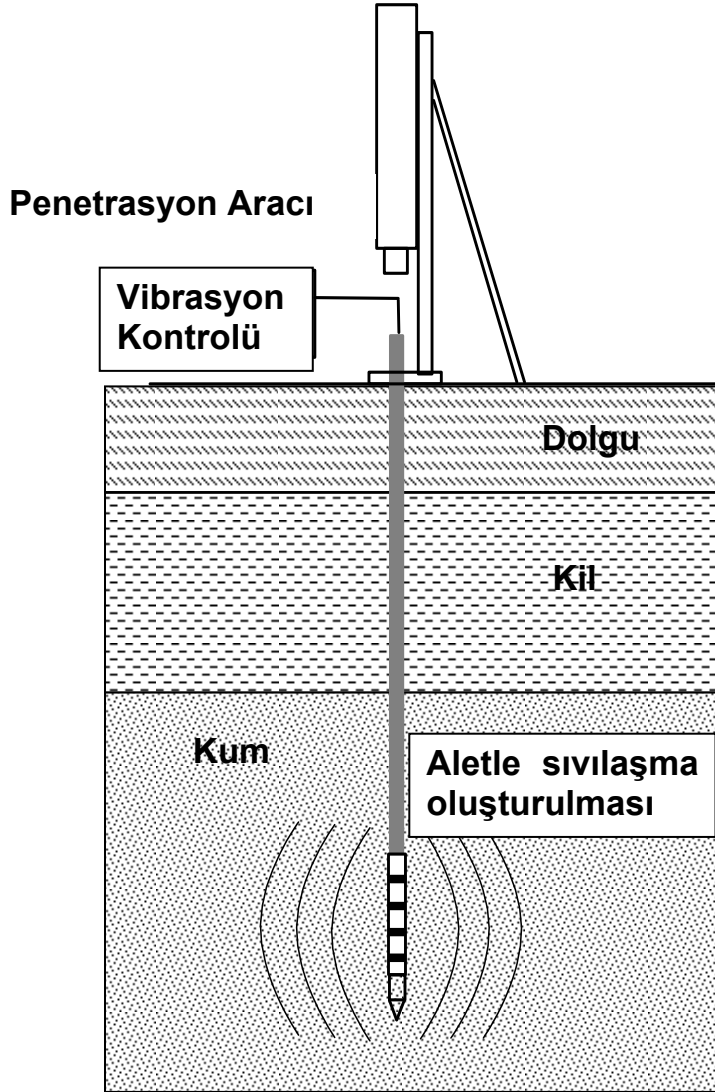
$FS \leq 1$	→	Sıvılaşma var
$1 < FS \leq 1.2$	→	Potansiyel sıvılaşma
$FS > 1.2$	→	Sıvılaşma yok



**Şekil 14.** Deprem büyüklüğü ve magnitud düzeltme faktörü arasındaki ilişki (Youd vd 2001)

#### 4. SIVILAŞMA'DA YENİ BİR YAKLAŞIM: VİBRASYON PENETRASYON TESTİ (VPT)

Şekil 15 VPT testinin arazide uygulanma şeklini şematik olarak göstermektedir. VPT testi VPT konik aletinin zemine ittirilmesi yönünden CPT ile benzerlik göstermektedir. VPT aleti zemine inceleme yapılacak derinliğe indirilince vibrasyon uygulanmakta ve aletin etrafındaki zemin içinde sıvılaşma gözlenmektedir. Vibrasyon esnasında VPT aleti içindeki sensörler yardımıyla zeminde boşluk suyu basıncı yükselmesi ve zeminin elektrik özdirenci değişimi ölçülmektedir. Ayrıca VPT aletinin ivmesi de aletin içinde bulunan bir ivme ölçer ile tespit edilmektedir. Elektrik özdirencinin zemin sıvılaşmasının incelenmesinde kullanılması daha önce laboratuvarında yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Jinguuji vd. 2001; 2007).



Şekil 15. VPT testinin arazide uygulanışının şematik olarak gösterimi

VPT ile ilgili ön çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen model deneyler cesaret verici sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu deneylerden kazanılan tecrübelerle tasarlanan prototip VPT aleti Japonya'da üretilerek laboratuvarda ilk deneyler gerçekleştirilmiştir (Jinguuji ve Toprak, 2003). Prototip VPT aletiyle yapılan deneylerde 30 cm genişliğinde, 60 cm uzunluğunda ve 30 cm yüksekliğinde fleksiglass'tan yapılmış dikdörtgen bir kap kullanılmıştır (**Şekil 16a**). Kabin içerisine yüksekliği 20 cm olacak şekilde kum numune hazırlanmıştır. Kullanılan kum, ortalama dane çapı,  $d_{50}$  0,125 mm olan Toyoura kumudur. Alttan uygulanan su basıncıyla kaynama ile oluşturulmuş gevşek numunenin rölatif sıklığı % 33 civarındadır. Prototip VPT aletinin üstüne yerleştirilen vibrasyon motoruna voltaj vererek vibrasyon oluşturulmuştur. Değişik seviyelerde voltaj uygulanarak kum numunedeki tepkiler gözlenmiştir. Voltaj 1V olduğunda motor çalışmış, fakat boşluk suyu basıncında ve zemin elektrik özdirencinde değişiklik olmamıştır. Voltaj 2V olarak uygulandığında ise bu değerlerde büyük değişiklikler gözlenmiştir. **Şekil 16b** deney esnasında ölçülen ivme, boşluk suyu basıncı ve elektrik özdirenci sonuçlarını göstermektedir. Vibrasyon, ölçümlerin başlamasından 5 saniye sonra başlamış ve 5 saniye sürmüştür. Zaman ölçümü elle yapıldığından **Şekil 16b**'de zaman grafiğinde çok az kayma olmuştur.

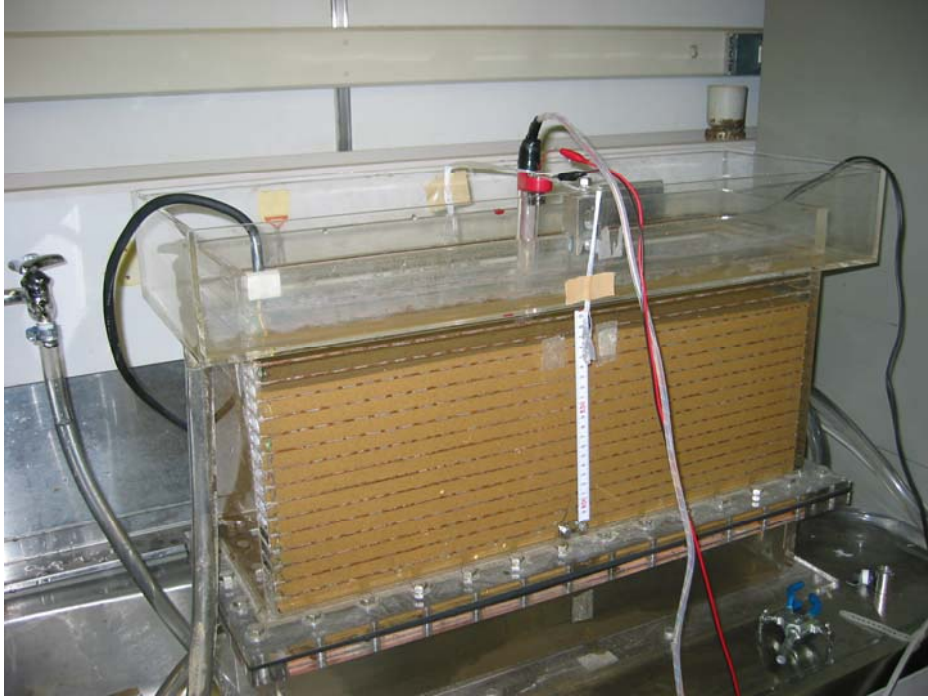
**Şekil 16b** vibrasyonun başlamasıyla birlikte boşluk suyu basıncının zemin örtü yükü seviyesine çıktığını ve sıvılaşmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Bu esnada yüzeyde su kaynaması ve aletin etrafında numunede oturmalar gözlenmiştir. Elektrik özdirencinde de zemin sıkılaşmasının bir işareti olarak yükselme kaydedilmiştir. Deney süresince sabit bir şekilde 2V voltaj uygulanmasına rağmen ivmenin çok değiştiği gözlenmiştir. Bu değişiklik kabin içindeki kumun rijitliğinin değişmesiyle açıklanabilmektedir.

## 5. VPT ALETİ VE VPT ARAZİ DENEYLERİ

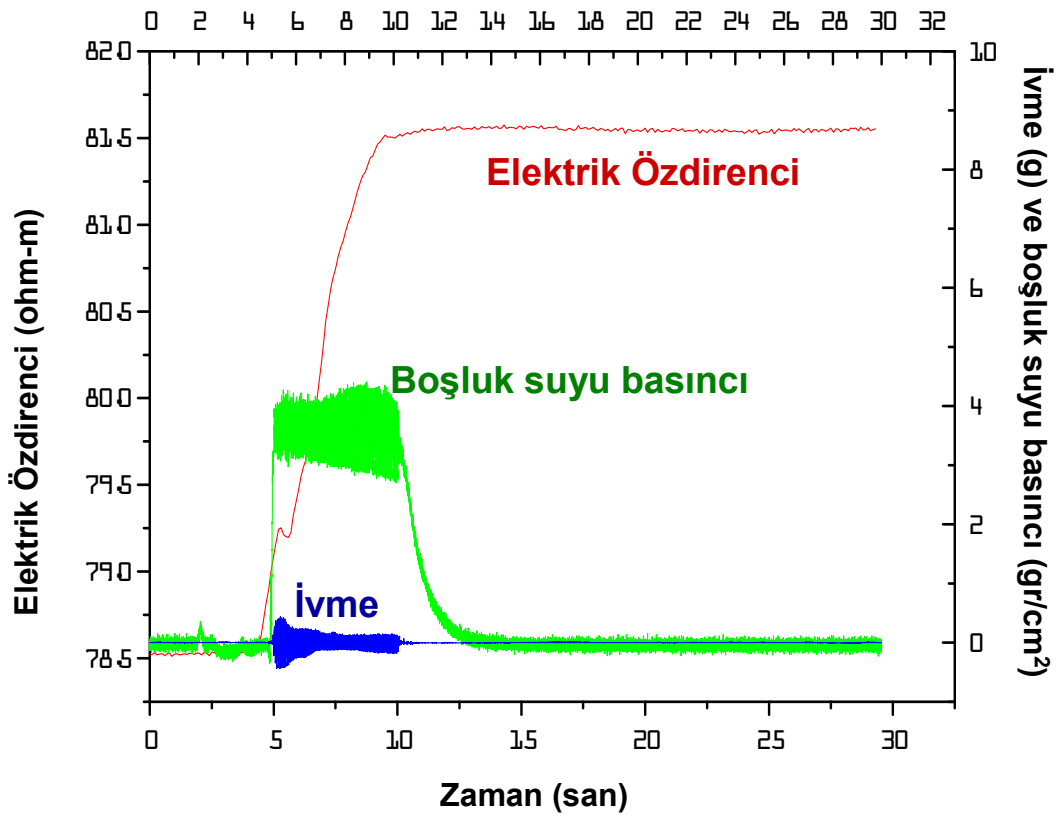
Prototip VPT aletiyle yapılan laboratuvar deneylerinin olumlu sonuçlar vermesi üzerine arazi deneyleri aşamasına geçilmiştir. Yapılan kapsamlı ve detaylı araştırmalar ve incelemelerden sonra 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde deprem şiddetinin yüksek olduğu ve sıvılaşma ile sıvılaşma sonucunda yanal yayılmaların yoğun gözlemlendiği bölgelerden olan Adapazarı yakınlarındaki Sapanca Gölü civarındaki alanlarda proje kapsamında VPT deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Adapazarı yakınlarındaki Sapanca gölü civarının VPT arazi deneyleri için uygun olacağı 1999 Kocaeli depreminden sonra değişik araştırmacılar tarafından bu yörelerde yapılmış Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) sonuçları ve değişik sondaj verileri gözönüne alınarak verilmiştir. İlk elemelerden sonra zeminin değişkenliği de gözönüne alınarak, deneylerin tam yerine karar kılmak için iki ayrı sahada ön CPT sondajları yapılmıştır. Veriler incelendikten sonra Sapanca gölü kenarında Sapanca Evlendirme Dairesinin yanındaki boş arazi VPT deneyleri için seçilmiştir (**Şekil 17**).

Sapanca gölü İzmit Körfezinin yaklaşık 20 km doğusunda tektonik oluşumlu bir göldür. Bu gölün güneydoğu kıyılarında 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde sıvılaşmalar



a) Prototip VPT aletiyle sıvılařma deneyi dűzeneđi



(b) Prototip VPT aletiyle sıvılaşma deneyi sonuçları

Şekil 16. Laboratuvarında Prototip VPT testinin gerçekleştirilmesi





**Şekil 17.** Sapanca gölü kenarında VPT deneyi için seçilen saha (arkada Sapanca gölü gözükmemektedir)

ve sivilaşma sonucunda yanal yayılmalar gözlenmiş ve birçok yapı (Örneğin Sapanca Hotel) ciddi hasar görmüştür (USGS, 2000; Çetin vd., 2002). Bu araştırma projesinde seçilen sahalarda Hotel Sapanca'ya yakındır. Bu alan, kalınlığı 60 m ye kadar çıkan kalın fluvyal holosen çökeltilerden oluşmuştur.

Arazi deneyleri gerçekleştirilirken VPT yapılan yerlerde karşılaştırma yapılabilmesi için mutlaka SPT ya da CPT deneylerinden biri de yapılmıştır (Şekil 18). Mümkün olan durumlarda üç deney birlikte gerçekleştirilmiştir. SPT ya da CPT deneyleri VPT deneylerinden önce gerçekleştirilerek zemin profilinin belirlenmesi sağlanmıştır. Proje kapsamında kaynaklar kısıtlı olduğundan yapılacak deneyler için arazi seçiminde itinalı davranılmış ve geçmişte yapılmış bilimsel ve/veya ticari zemin etüdüleri incelenerek uygun araziler belirlenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi CPT, zemin profilinin belirlenmesinde ve sivilaşma analizlerinde özellikle son yıllarda yaygın olarak kullanılan bir deneydir. Bununla birlikte SPT testinde gerek zemin profilinin belirlenmesinde gerekse sivilaşma analizlerinde tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. SPT sondajları aynı zamanda numune alma imkanı da vermiştir. Deney sonuçlarının birbiri ile kıyaslanabilmesi için SPT, CPT ve VPT testlerinin birbirine mümkün olduğu kadar yakın yapılmasına dikkat edilmiştir (1-3 m arası). Deneyler, uluslararası bilimsel ortaklık kapsamında gerçekleştirildiği için hazırlık ve planlama uzun zaman almış ve yıllara yayılarak yapılabilmektedir. Bu şekilde çalışma aynı zamanda ilk deneylerde kazanılan tecrübeler ışığında VPT aletinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesine ve yeni aletin sonraki yıldaki deneylerde kullanılabilmesine imkan vermiştir.



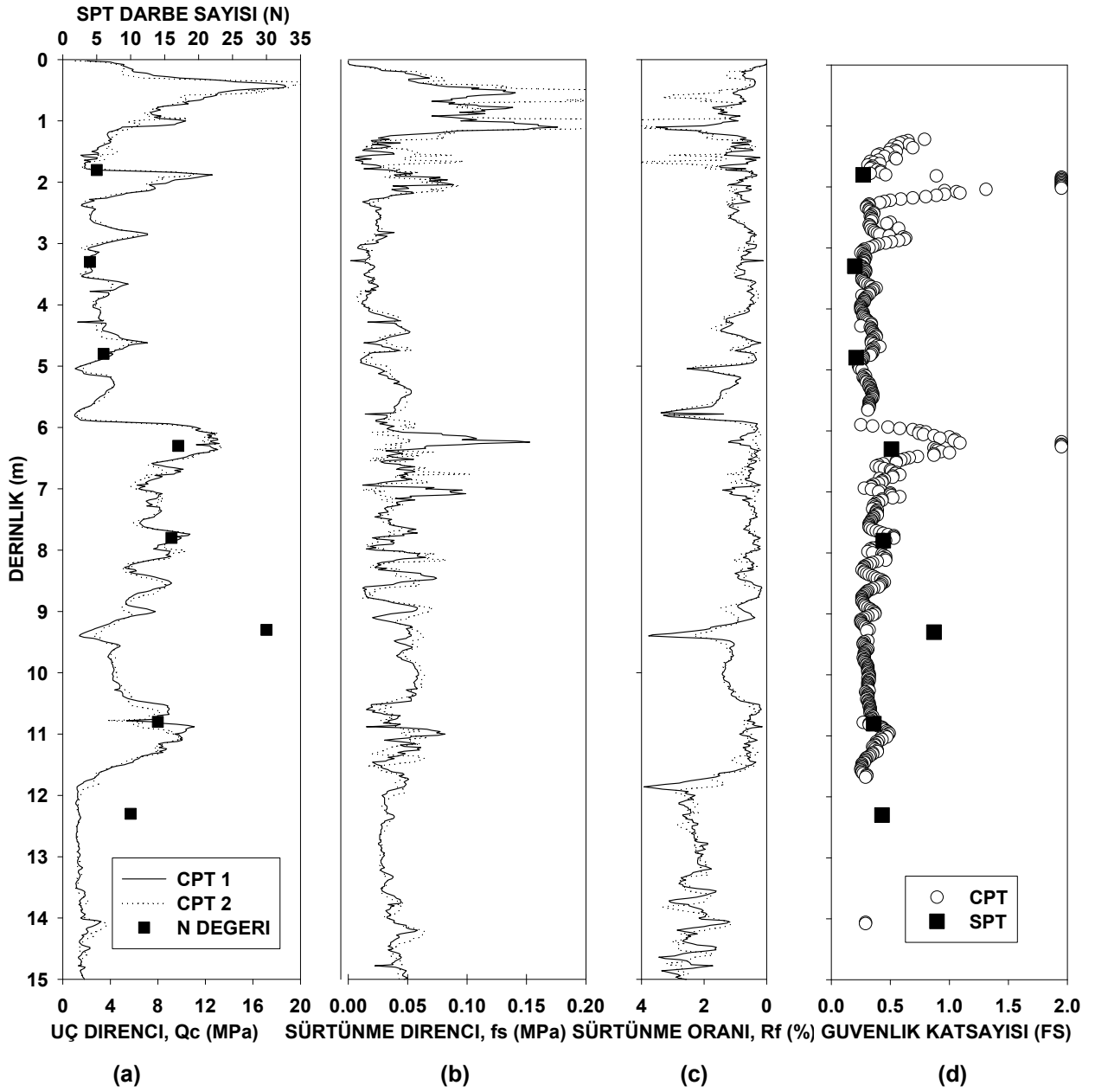
(a) Deney sahasında CPT kamyonu



(b) Deney sahasında SPT kamyonu

**Şekil 18.** CPT ve SPT deney araçları

Sapanca'daki saha'nın zemin özellikleri CPT ve SPT testleri ile belirlenmiştir. Sahada ölçülen CPT uç direnci, yüzey sürtünmesi direnci ve sürtünme oranı değerleri ile birlikte SPT darbe sayısı, N değerleri Şekil 19a, b ve c'de gösterilmiştir. CPT ekipmanında kesit alanı 10 cm<sup>2</sup>'ye karşılık gelen 60° açılılık konik uç kullanılmaktadır. Konik ucun üstünde yer alan sürtünme çeperi yüzeyi, 150 cm<sup>2</sup>'lik bir alana sahiptir. Kullanılan tijlerin uzunluğu 50 cm'dir ve her 2 cm derinlikte uç ve yüzey sürtünme dirençleri ölçülmüştür. SPT testleri ASTM D6066-98 ve D1586 standartlarını takip ederek gerçekleştirilmiştir. Alınan SPT numuneleri üzerinde laboratuvar indeks deneyleri yapılmış, ince dane oranı ve dane dağılımı belirlenmiştir. Kullanılan SPT şahmerdan sisteminin enerji oranı %60 seviyesindedir.

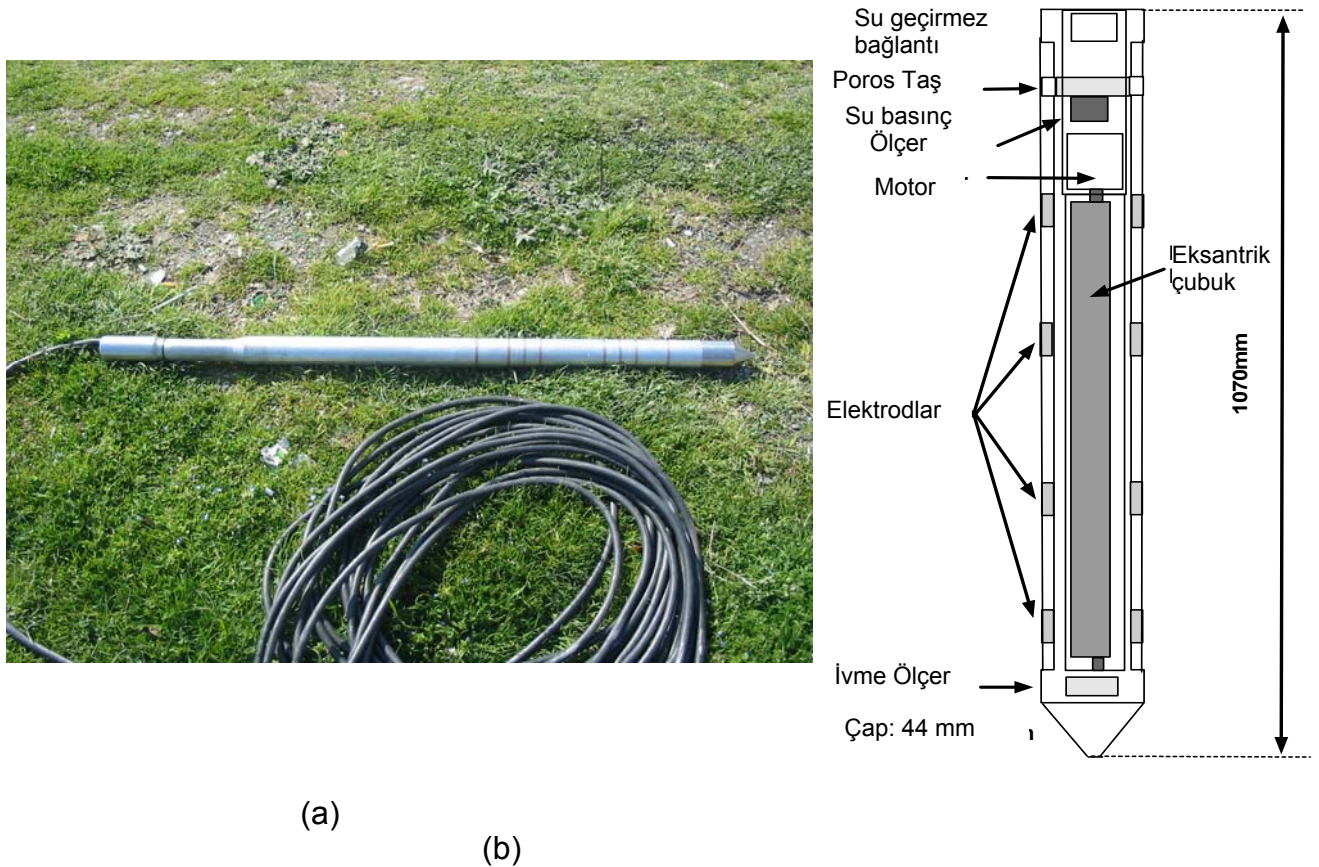


Şekil 19. Sapanca Gölü kıyısındaki test sahasında CPT and SPT test sonuçları

Saha'da su seviyesi 1.2 m seviyesindedir. Sahanın yüzeyi yaklaşık 1.1 m yüksekliğinde kumlu, çakıllı bir dolgu ile kaplıdır. Daha aşağı derinliklerde ise çakıllı, siltli ince kum, temiz kum, ve silt-kil tabakaları mevcuttur. CPT ve SPT analizleri bu sahanın sıvılaştırılabilir katmanlara sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 19d, 1999 Kocaeli (İzmit) depremi parametrelerini kullanarak hesaplanmış ( $M_w=7.4$  ve maksimum yer ivmesi= 0.4 g) sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayılarını göstermektedir. Sıvılaşma analizleri Youd, vd. (2001) tarafından anlatılan işlemleri takip ederek gerçekleştirilmiştir.

Bu projede tasarlanan ve üretilen VPT aleti, arazi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan CPT sistemi ile uyum içinde olacak şekildedir. Böylece geliştirilen bu alet için zemine itirme amacıyla yeni bir sistem kurulmasına gerek yoktur. Şekil 20 bu projede tasarlanan ve üretilen son VPT aletini boyutları ile birlikte göstermektedir. İlk deneylerden sonra vibrasyonun etkisini arttırmak için aletin çapı 36 mm'den 44 mm'ye çıkartılmış ve aletin üst kısımlarında olan ivme ölçer de aletin ucuna yakın bir pozisyona kaydırılmıştır. 36 mm çap, yaygın olarak kullanılan CPT aletiyle aynı boyutlardadır. 44 mm çap ise yine piyasada mevcut olan daha büyük çaplı CPT aletiyle aynıdır.

Şekil 21, 2004 yılında Sapanca Gölü kıyısındaki sahada gerçekleştirilen VPT deneyleri ile ilgili fotoğrafları göstermektedir. VPT deneyleri, kıyaslamalar yapabilmek



**Şekil 20.** (a) VPT aleti ve kablosu (b) VPT aletinin boyutları ile şematik olarak iç ve dış yapısı



(a) VPT aleti hidrolik itirme ünitesine yerleştirilirken



(b) VPT testi ölçüm ekipmanları



(c) Yerleştirilen VPT aletinin arkasına itirme çubukları takılırken



(d) VPT aleti zemine girerken

**Şekil 21.** Sapanca Gölü kıyısındaki sahada 2004 yılında gerçekleştirilen VPT testi

amacıyla daha önceden CPT deneyinin yapıldığı sondajların hemen yanında yapılmıştır. Şekil 21a bu projede üretilen gerçek boyuttaki ilk VPT aletini göstermektedir. VPT aleti CPT kamyonunun hidrolik itirme ünitesini kullanarak zemine sokulmuştur. Şekil 21c hidrolik itirme sistemine yerleştirilen VPT aletinin arkasına tijler eklenirken göstermektedir. Bu tijler CPT aletiyle kullanılanların aynıdır. VPT aleti tijlerle bağlantı noktası uyum içinde olacak şekilde yapılmıştır. Deneye başlamadan önce VPT aletinin kablosunun tijlerin içinden geçirilmesi gerekmektedir (Şekil 20a). Bu kablo VPT aletine hem gerekli enerjiyi aktarmakta hem de VPT aleti tarafından yapılan ölçümleri bilgisayara ve cihazlara aktarmaktadır. Kablo, içinden geçen hatların birbiriyle etkileşimini azaltmak üzere özel tasarlanmış bir kablodur. Ayrıca kablonun kalınlığı tijlerin iç çapına uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 21d VPT aletini zemine girerken göstermektedir. VPT ölçümleri su seviyesi altında her 50 cm derinlikte alınmıştır. VPT aleti içinde titreşimi gerçekleştiren motor, gücünü sahaya getirdiğimiz elektrik jeneratöründen almaktadır. Jeneratörün olmadığı durumlarda bir aküde yeterli olmaktadır. Aletle ölçülen ivme, boşluk suyu basıncı ile elektrodlardan tespit edilen akım ve potansiyel değerleri aletin üstünden çıkan kablolar ile ölçüm ve kayıt cihazlarına bağlanmaktadır (Şekil 21b).

Şekil 22 ve Şekil 23, 2005 yılında Sapanca Gölü kıyısındaki sahada gerçekleştirilen VPT ve SPT deneyleri ile ilgili fotoğrafları göstermektedir. Bu deneyler, kıyaslamalar



**Şekil 22.** Deney sahasında SPT kamyonu ve proje yürütücüsünün elinde VPT aleti



**Şekil 23.** VPT aleti SPT hidrolik ünitesi ile zemine ittirilirken

yapabilmek amacıyla daha önceden CPT deneyinin yapıldığı sondajların hemen yanında yapılmıştır. VPT aleti SPT kamyonunun hidrolik itirme ünitesini kullanarak zemine sokulmuştur. VPT aletinin tijlerle bağlantı noktası için bir adaptör yapılmıştır. SPT kamyonunun da VPT testi için kullanılabilceği bu deneylerde görülmüştür. Bu da dünya çapında CPT ye göre daha yaygın olan SPT testlerinin yapılabildiği her yerde VPT testlerinin yapılabileceğini göstermektedir. VPT ölçümleri su seviyesi altında her 50 cm derinlikte alınmıştır.

## 6. VPT DENEYLERİ SONUÇLARI VE ÖNERİLER

Her VPT deneyi esnasında VPT aletine 2 dakika süresince 20V voltaj uygulanmıştır. Ve her testte, ivme ve elektrik özdirenci kayıt süresi, 2 dakikası titreşim esnasında ve 3 dakikası da titreşim sonrası olmak üzere toplam 5 dakika olmuştur. VPT elektrik özdirenci ölçümleri CPT uç direnci ölçümleri ile uyum içinde çıkmıştır. Şekil 24a elektrik özdirenci ile CPT uç direnci ölçümlerini birlikte göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi iki değer birbirini uyum içinde takip etmektedir. Ancak VPT ölçümleri CPT ye göre daha az sıklıkla yapıldığından, tam bir kıyaslama olabilmesi amacıyla her VPT ölçüm noktası için CPT değerlerinin de ortalama değerler hesaplanarak kıyaslanması daha uygun olacaktır. Bu amaçla her VPT derinliğinde CPT uç direncinin 10 cm için ortalamaları alınmıştır. 10cm lik aralık, özdirenç ölçümüne karşılık geldiği için kullanılmıştır. Kıyaslama da arazide ölçülmüş CPT uç direnci ölçümleri doğrudan kullanılabilmesi gibi, sıvılaşma hesaplarında yoğun olarak kullanıldığı şekliyle düzeltilmiş ve normalize edilmiş uç dirençlerde kullanılabilir. Düzeltilmiş ve normalize edilmiş CPT uç dirençleri Youd vd. (2001) de açıklandığı üzere aşağıda verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$q_{c1N} = C_Q(q_c/P_a) \quad (1)$$

burada

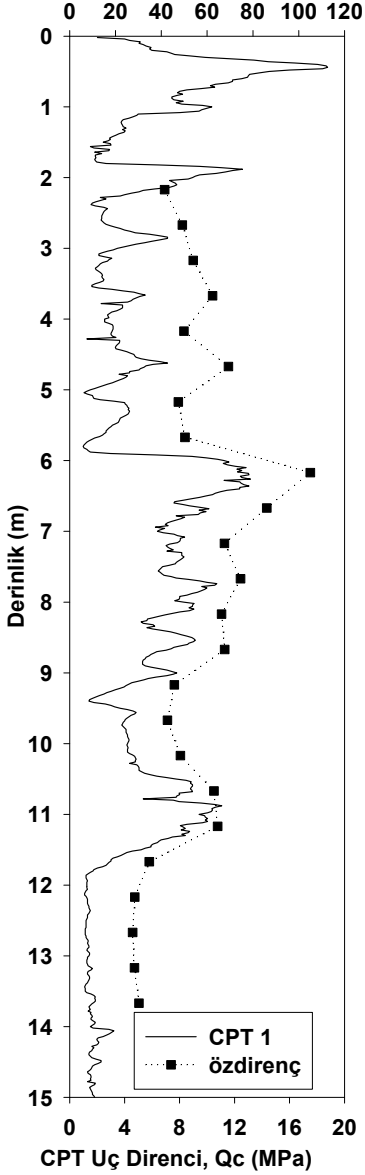
$$C_Q = (P_a/\sigma'_{vo})^n \quad (2)$$

ve burada  $C_Q$  = konik penetrasyon direncini normalize etmek için faktör;  $P_a = 1$  atm basınca karşılık gelen değerlerin efektif düşey gerilmeyle ( $\sigma'_{vo}$ ) aynı birimden değeri;  $n$  = zemin türüne göre değişen üst değeri; ve  $q_c$  = arazide ölçülen uç direnç değeri olmaktadır. Düşük derinliklerde  $C_Q$ , düşük efektif gerilmeden dolayı yüksek olabilmektedir, ama burada  $>1.7$  değerleri Youd vd. (2001) önerileri doğrultusunda kullanılmamıştır. Bu şekilde hesaplanan konik penetrasyon dirençleri ile elektrik özdirençleri ve aralarındaki ilişki Şekil 24b de gösterilmiştir. Ayrıca şekil üzerinde ilişkinin denklemi de verilmiştir. Hesaplarda  $n$  üst değeri 0.5 olarak kullanılmıştır. Denklem, yüksek  $r^2 = 0.96$  değeriyle iki parametre arasında çok yüksek bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Burada verilmediği halde arazide ölçülen uç direnç değeri de kullanılsa ilişkinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Şekil 24b'deki ilişkide 2.17 m derinlikte yapılan ölçüm kullanılmamıştır. Bu ölçüm diğer değerlerden çok büyük farklılık göstermiştir. Bu ölçümün zeminde 2m derinliğe kadar Auger ile açılan deliğin hemen altında olması ve VPT aletinin zemine tam girmediği gözönüne alınarak gerçek değeri yansıtmadığı düşünülmektedir.

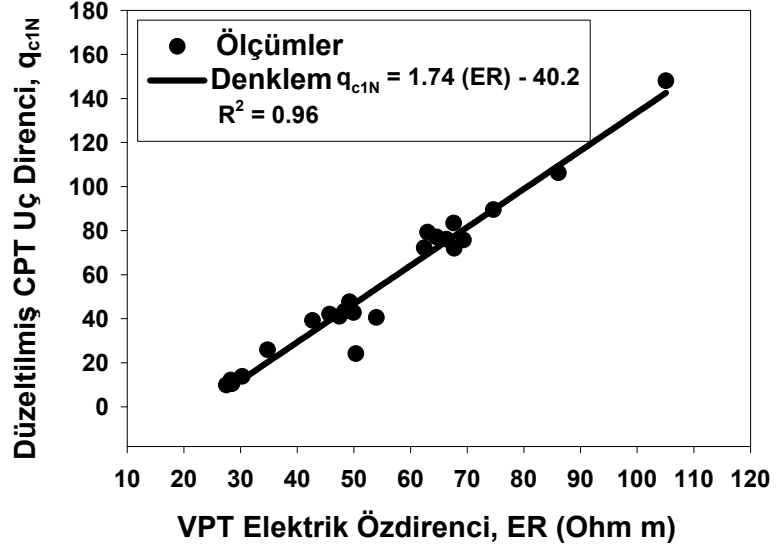
Daha güçlü titreşim uygulayabilmek için büyütülen VPT çapı (36 mm den 44 mm ye) zemindeki örselenmeyi arttırma açısından büyüyen çap için çap düzeltme faktörüne gerek olup olmadığı sorusunu ortaya çıkarmıştır. Fakat, 36 mm çaplı CPT uç direnci ölçümleri ile 44mm çaplı VPT aleti elektrik özdirenci ölçümleri arasındaki mevcut güçlü ilişki VPT için standart çap boyutunun 44 mm olması yönünde düşüncelerimizi güçlendirmiştir.



Baslangiç Elektrik Özdirenci (OHM.m)



(a) VPT ile ölçülen başlangıç elektrik özdirençleri

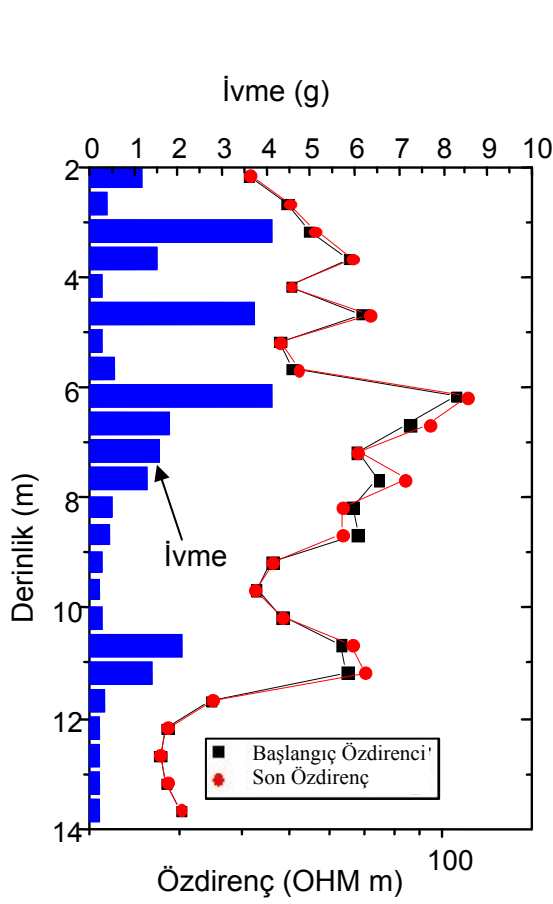


(b) Düzeltilmiş ve normalize edilmiş CPT uç direnci ile VPT elektrik özdirenci arasındaki ilişki

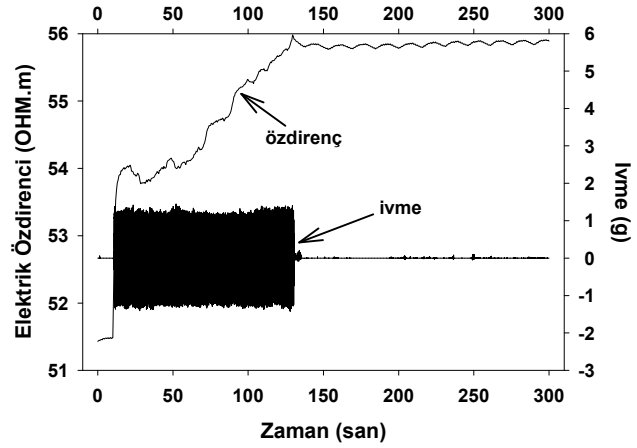
**Şekil 24.** VPT elektrik özdirenç ölçümleri ve CPT uç dirençleri ile kıyaslanması

Şekil 25a VPT ölçümlerinin derinlikle değişimini göstermektedir. Daha önce bahsedildiği gibi her deney esnasında elektrik özdirenci ve ivme zamana karşı kaydedilmektedir. Şekil 25b ve Şekil 25c, 11.2 ve 12.2 m derinlik için bu şekilde kaydedilmiş değerleri göstermektedir. Alınan SPT örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri, 11.2 m derinlikteki zemini Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi (USCS) içinde % 6 ince dane oranı ile SW-SM (iyi derecelenmiş kum-siltli kum)

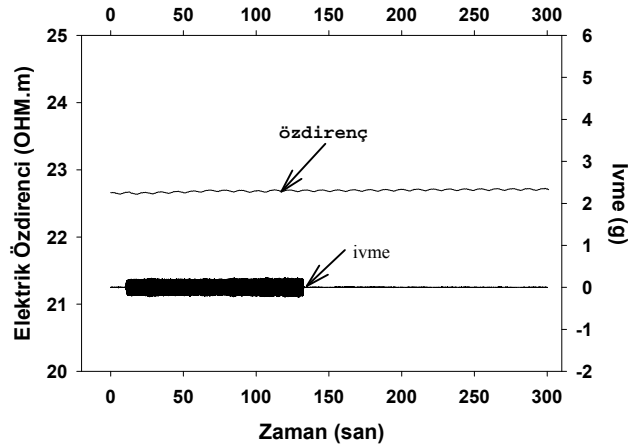
grubuna sokmaktadır. Bu zemin içerisinde VPT titreşimi esnasında kaydedilen ivme 1.4 g değerine ulaşmış ve elektrik özdirenci değişimi de %8.7 civarında



(a) ER-VPT ölçümlerinin derinlikle değişimi



(b) ER-VPT esnasında kum zeminde kaydedilen elektrik özdirenci ve ivme değişimi (11.2 m)



(c) ER-VPT esnasında silt zeminde kaydedilen elektrik özdirenci ve ivme değişimi (12.2 m)

**Şekil 25.** VPT deneyi esnasında ölçülen elektrik özdirenci ve ivme değişim kayıtları: (a) derinlikle değişim (b) kum zeminde-11.2 m ölçümler (c) silt zeminde-12.2 m ölçümler (Toprak ve Jinguuji, 2006)

gerçekleşmiştir. Gerçekleşen bu değişim şekli laboratuvarında kumlu zemin üzerinde elde edilen deney sonuçlarıyla uyushmaktadır. Alınan SPT örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri, 12.2 m derinlikteki zemini ise Birleşik Zemin Sınıflama Sistemi (USCS) içinde ML (silt) grubuna sokmaktadır. Elek analizi bu derinlikte kum oranını % 7 olarak belirlemiştir. Bu zemin içerisinde VPT titreşimi esnasında kaydedilen ivme 0.2 g değeriyle bir önceki zemin katmanına göre çok küçük kalmıştır. VPT esnasında elektrik özdirenci değişimi de gerçekleşmemiştir.

VPT sonuçlarının değişik zemin katmanlarında değişimi yakından incelendiğinde, ivme ve elektrik özdirenci değişimlerinin zemindeki ince dane oranından önemli bir şekilde etkilendiği gözlenmiştir. Bu VPT için cesaretlendirici bir gözlemdir, çünkü ince dane oranının zeminin sıvılaşma potansiyelini etkilediği bilinmektedir ve ER-VPT

bunu yansıtmaktadır. Bu aşamada sonuçları CPT ile kıyaslama açısından sürtünme oranı kullanılmıştır. CPT sürtünme oranı, yüzey sürtünme oranının CPT uç direncine oranı olarak tanımlanmakta ve genellikle ince tane oranına ve zemin plastisitesine bağlı olarak artmaktadır. Bu sebeple kabaca zemin türünü ve ince dane oranını tespit amacıyla kullanılabilir. Daha önce uç direnci kıyaslamasında kullanıldığı gibi, her VPT ölçüm derinliği için 10 cm aralığa karşılık gelecek şekilde ortalama sürtünme oranları hesaplanmıştır. VPT ve sürtünme oranları arasında doğrudan bire bir orantı kurulamasa bile, yaklaşık sürtünme oranının 0.9 değerinin, ivme ve özdirenç değişimleri eğilimi açısından farklılıkların belirginleştiği bir sınır olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerden düşük sürtünme oranı gösteren zeminler eğilim açısından Şekil 25b'dekine benzer davranış sergilerken, bu değer üstünde sürtünme oranı gösteren zeminler eğilim açısından Şekil 25c'dekine benzer davranış sergilemektedir. Kıyaslama açısından 11.2 ve 12.2 m'deki zeminlerde sürtünme oranı değerleri sırasıyla 0.6 ve 2.6'dır. Gösterildiği gibi elektrik özdirenci değişik zeminlerin dinamik davranışını yakalayabilmektedir.

Arazi deneylerinde aletin dış etkilere karşı fiziksel yönden güçlendirilmesi gerektiği sonucu da ortaya çıkmıştır. Bazı deneylerde elektrik özdirencini ölçmede kullanılan elektrodların VPT yüzeyinde sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Bazı deneylerde ise VPT'nin ittiriş yönünde sapmalardan dolayı aletin eğilme momentlerine maruz kalması sonucunda alet fonksiyonlarını kaybetmiştir.

Bu projede zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için adını Vibrasyon Penetrasyon Testi (VPT) olarak isimlendirdiğimiz yeni bir alet ve yöntem üretilmiştir. Aletin geliştirilmesi, kalibrasyonu ve arazide doğrulanma çalışmaları için bu aletin prototip modeli ile Japonya'da laboratuvar deneyleri, gerçek ölçütlerdeki alet ile de Sapanca Gölü, Adapazarı kıyısında arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sahasında, gerek zemin özelliklerinin tespitinde gerekse VPT deneyleri ile kıyaslamalar amacıyla CPT ve SPT deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sunulan VPT deneylerinin ölçümleri ve değerlendirmeleri bu yöntemin değişik zemin türlerinin dinamik davranışını ve özelliklerini yakaladığını ve sıvılaşma tespitinde kullanılabilecek bir yöntem olarak umut verici olduğunu göstermektedir. Ancak yöntemdeki parametrelerin değişkenliğinin belirlenmesi amacıyla gerçek boyutta VPT aletiyle laboratuvar deneylerinin yapılması faydalı olacaktır. Laboratuvar deneyleri arazide bulunan mevcut değişkenlerin bir kısmını ortadan kaldırarak yöntemdeki parametrelerin değişkenliğini doğrudan değerlendirme imkanı verecektir. Bu laboratuvar deneylerinin değişik alanlardaki teknolojilerden de faydalanarak tasarlanması planlanmaktadır. Örneğin tıp alanında kemiklerde, kaslarda, iç organlarda farklı rahatsızlıkları bulmakta kullanılan X-ışınları aletlerinden, CT tarayıcılardan faydalanarak VPT aletinin etrafında oluşan zemin hareketi ve sıvılaşma gözlemlenebilecektir. VPT aletinin küçük bir modeliyle Japonya'da yaptığımız çalışmalar (Jinguuji vd., 2006) olumlu sonuçlar vermiştir. Bu deneylerin gerçek VPT aletiyle yapılması durumunda arazi deneylerinde yapılan gözlem ve tespitlerin değerlendirilmesi güçlenecektir.

## 7. REFERANSLAR

Celebi, M., Toprak, S., Holzer, T. L. (2000), "Strong-Motion, Site-Effects, and Hazard Issues in Rebuilding Turkey: in Light of the 17 August, 1999 Earthquake and Its Aftershocks", *International Journal for Housing Science and Its Applications*, Special Issue: Kocaeli Earthquake, 1999, Volume 24, No 1, pp. 21-38.

Çelik, S. B. (2003) Denizli il merkezi zeminlerinin jeolojik, jeoteknik açıdan incelenmesi ve sivilaşma duyarlılığının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 112s.

Cetin, K. O., Youd, T. L., Seed, R. B., Bray, J. D., Sancio, R., Lettis, W., Yilmaz, M. T., Durgunoglu, H. T., 2002. "Liquefaction-induced ground deformations at Hotel Sapanca during Kocaeli (Izmit), Turkey earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1083-1092

Chung, R. (1996) The January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake , NIST Special Publication 901, *United States Department of Commerce Technology Administration (National Institute of Standards and Technology)*, Gaithersburg.

Idriss, I. M. (1985) Evaluating seismic risk in engineering practice, *Proc., 11<sup>th</sup> Int. Conference on Soil Mechanics and Found Engrg.*, s. 225-320.

Jinguuji, M., Kunimatsu, S., Izumi, H., Mochizuki, T. (2001), "Development of Visualization Technique of Relative Density of Sand During Liquefaction Using Resistivity and Consideration of The Results", *Japan Society of Civil Engineers*, 680(III-55), 201-209 (in Japanese).

Jinguuji, M., Toprak, S., and Kunimatsu, S., (2007) "Visualization Technique For Liquefaction Process In Chamber Experiments By Using Electrical Resistivity Monitoring", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier, 27 (2007) 191-199.

Jinguuji, M., Toprak, S. (2003), "A Fundamental Study of in-situ Dynamic Response Test for Liquefaction: Vibration Probe Penetration Test (VPT)", *Proceedings of the 108th SEGJ Conference*, May 2003, Tokyo, The Society of Exploration Geophysicists of Japan, p. 267-269.

Jinguuji, M., Toprak, S and Nakashima Y. (2006), "Development of Vibration Penetration Test (VPT) and Results of Laboratory and Field Experiments", Paper Number: 896, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13<sup>th</sup> ECEE & 30<sup>th</sup> General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.

Obermeier, S. F. (1996) Use of Liquefaction-induced features for paleoseismic analysis - An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes, *Engineering Geology*, Elsevier, 44: 1-76.

Seed, H. B. ve Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 97(9): 1249–1273.

Skempton, A. K. (1986) Standart penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging, and overconsolidation, *Geotechnique*, 36(3): 425-447.

Sucuoğlu, H., Gölkan, P., Yılmaz, Ç., Bakır, S., Özcebe, G., Ersoy, U., Tankut, T., Gür, T., Akkor, S., Erberik, A., Yılmaz, T. (2000) Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, *TMMM İnşaat Mühendisleri Odası*, ODTÜ, s. 53-78.

Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003), "Liquefaction Potential Index: A Field Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No.4, ASCE, USA.

Toprak, S. and Jinguuji, M. (2006), A New Test for Liquefaction Prediction: Electrical Resistivity Vibration Penetration Test", *Eighth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, April 18-22 2006.

Toprak, S., Holzer, T.L., Bennett, M.J., and Tinsley, J.C., III (1999), CPT- and SPT-based probabilistic assessments of liquefaction potential, *in* O'Rourke, T.D., Bardet, J-P., and Hamada, M., eds., U.S. - Japan workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures against liquefaction, 7th, Seattle, 1999, Proceedings, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Technical Report MCEER-99-0019, p. 69-86.

Toprak, S. ve Yoshizaki, K. (2003), "Boru Hatlarına Deprem Yüklerinin Etkisi", 5. *Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, CDROM Bildiri No: 25, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.

Ulusay, R. (2000) Zemin sıvılaşması, *Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi*, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını*, s. 34-45.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 2000. Implications for earthquake engineering risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, *USGS Circular 1193*.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., W. D. Liam Finn, Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., Stokoe, K. H. II. (2001), "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127 (10), 817-833

## 8. EKLER: YAYINLARDAN ÖRNEKLER

EK1: Jinguuji, M. and Toprak, S. (2005), "Development of Electrical Resistivity Vibration Penetration Test (ER-VPT)", Near Surface 2005, CD-ROM Paper No: P030, September 5-8, 2005, Palermo, Italy











EK2: **Toprak, S.** and Jinguuji, M., (2006) “A new test for Liquefaction Prediction: Electrical Resistivity Vibration Penetration Test”, Paper No: 406, Proceedings of the 8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, California, USA, April 18-22 2006





















### PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

<b>Proje Kodu:</b> İÇTAG I729 (1031042)
<b>Proje Başlığı:</b> Sıvılaşma Tahmininde Yeni Teknolojiler: Konik Vibrasyon Penetrasyon Testi
<b>Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar:</b> YARD. DOÇ. DR. SELÇUK TOPRAK DR. MOTOHARU JİNGUUJİ
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ, KINIKLI KAMPÜS, DENİZLİ 20070
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b> NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST), TSUKUBA, IBARAKİ 305-8569 JAPAN
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.04.2004 - 01.04.2006

**Öz**

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi, Türkiye ve National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Japonya kuruluşlarından araştırmacıların ortak yürüttüğü uluslararası bir projedir. Bu proje kapsamında sıvılaşma tahminlerinde kullanılmak üzere yeni bir arazi testi ve yöntem üzerinde çalışılmıştır. Konik vibrasyon penetrasyon testi (VPT) olarak isimlendirdiğimiz bu test esnasında konik VPT aleti arzu edilen derinliklere ittirilmekte ve vibrasyon uygulanmakta ve bu esnada ivme, boşluk suyu basıncı ve zemindeki elektrik özdirenci ölçülmektedir. Zeminin dinamik tepkisi doğrudan ölçüldüğünden dolayı bu deneyin kullanılan mevcut metodlara göre sıvılaşma tahminleri yönünden üstünlük göstermesi beklenmektedir. Aletin geliştirilmesi, kalibrasyonu ve arazide doğrulanma çalışmaları için bu aletin prototip modeli ile Japonya'da laboratuvar deneyleri, gerçek ölçütlerdeki alet ile de Sapanca Gölü, Adapazarı kıyısında arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sahasında, gerek zemin özelliklerinin tespitinde gerekse VPT deneyleri ile kıyaslamalar amacıyla CPT ve SPT deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sunulan VPT deneylerinin ölçümleri ve değerlendirmeleri bu yöntemin değişik zemin türlerinin dinamik davranışını ve özelliklerini yakaladığını ve sıvılaşma tespitinde kullanılabilecek bir yöntem olarak umut verici olduğunu göstermektedir. Ancak yöntemdeki parametrelerin değişkenliğinin belirlenmesi amacıyla gerçek boyutta VPT aletiyle laboratuvar deneylerinin yapılması faydalı olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** CPT, DEPREM, SIVILAŞMA, SPT, ZEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI, YENİ TEKNOLOJİLER, VPT

**Projeden Kaynaklanan Yayınlar:**

1. Toprak, S. and Jinguuji, M. (2006), "A new test for liquefaction prediction: Electrical Resistivity Vibration Probe Penetration Test (ER-VPT)", 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake, 100<sup>th</sup> Anniversary Earthquake Conference, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA
2. Jinguuji, M., Toprak, S and Nakashima Y. (2006), "Development of Vibration Penetration Test (VPT) and Results of Laboratory and Field Experiments", Paper Number: 896, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13<sup>th</sup> ECEE & 30<sup>th</sup> General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
3. Jinguuji, M. and Toprak, S. (2005), "Development of Electrical Resistivity Vibration Penetration Test (ER-VPT)", Near Surface 2005, CD-ROM Paper No: P030, September 5-8, 2005, Palermo, Italy
4. Jinguuji, M. and Toprak, S. (2004), "Dynamic response test for liquefiable soils using electrical resistivity vibration probe", The Society of Exploration Geophysicists of Japan, SEGJ 110th Annual Spring Meeting, May 25-27, 2004, Waseda University, Tokyo, Japan

**Bilim Dalı:** GEOTEKNİK DEPREM MÜHENDİSLİĞİ

**Doçentlik B. Dalı Kodu:** GEOTEKNİK



## **A NEW TEST FOR LIQUEFACTION PREDICTION: ELECTRICAL RESISTIVITY VIBRATION PENETRATION TEST (ER-VPT)**

S. Toprak<sup>1</sup> and M. Jinguuji<sup>2</sup>

### **ABSTRACT**

The estimation of liquefiable soils and potential mapping of liquefaction are very important for city planners, building owners, and engineers to determine liquefaction prone areas and hazard levels. In this research, we propose a new method which directly uses dynamic response of soils to evaluate its liquefaction potential. The method, electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT), utilizes a vibration probe, accelerometer, pore-pressure meter, and electrical resistivity measurement, to determine the liquefiable soils. In principle, the vibration probe is penetrated into soil and vibration is applied, and changes of soil properties such as its electrical resistivity in addition to pore water pressure are measured in situ. As part of this study, we carried out SPT, CPT, and ER-VPT field tests in the shore of Lake Sapanca, Adapazari, Turkey. The results of these tests are presented and ER-VPT test results are discussed herein.

### **Introduction**

Ordinary, methods which rely on field tests such as standard penetration test (SPT) or cone penetration test (CPT) are used for potential mapping of liquefaction (e.g., Toprak and Holzer, 2003). These methods developed over the years and are convenient and have many actual achievements in liquefaction prediction. SPT and CPT field tests primarily measure some parameters such as SPT blow counts,  $N$  or cone tip resistance,  $Q$  that are originally used to determine engineering properties of soil. Liquefaction prediction of soils is performed by using these parameters in relationships which were obtained from past earthquake observations and laboratory experiments. Several assumptions and corrections are applied during this process. In this research, we propose a new method which directly uses dynamic response of soils to evaluate its liquefaction potential.

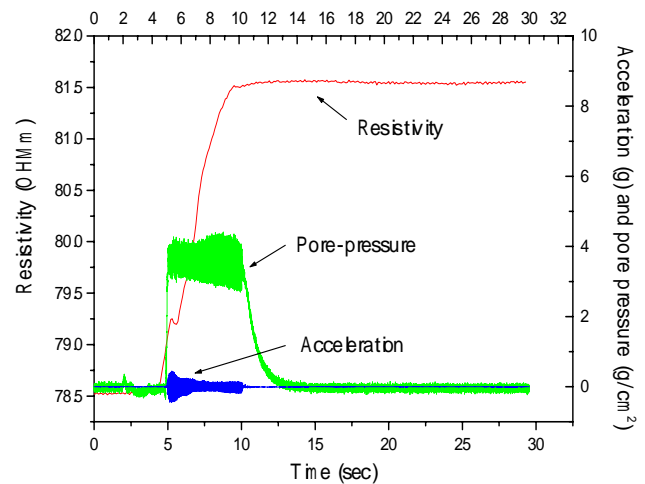
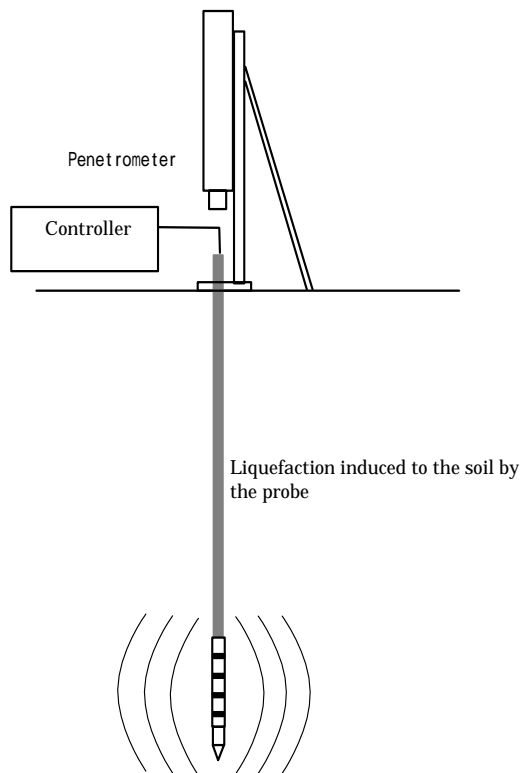
### **Electrical Resistivity Vibration Probe Penetration Test (ER-VPT)**

Fig.1a shows schematic view of ER-VPT test. ER-VPT is similar to CPT in the way that the probe is pushed into the ground. Once the probe is penetrated into the ground at the investigated depth, it is vibrated and liquefaction in the soil around the probe is observed. Liquefaction is monitored by measuring the electrical resistivity of the soil around the probe and

<sup>1</sup>Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Pamukkale University, Denizli, Turkey 20070

<sup>2</sup>National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan

pore water pressure. In addition, acceleration of the probe during the vibration is measured. The technique that uses electrical resistivity of soil was shown to be effective in liquefaction studies in laboratory (Jinguuji and others, 2001; 2003). Inside of the probe, a motor and eccentric rod are installed to make vibration. At the top and bottom of the probe, pore-pressure meters are installed to monitor change of pore-pressure during the test. Accelerometer is placed close to the tip of the probe.



a) Schematic view of ER-VPT Test

b) The result of model ER-VPT in laboratory test

Fig.1 The concept of electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT)

The first experiments of this research involved using a small chamber and small ER-VPT. As for the size of the vessel, the width is 30cm, length is 60cm and height is 30cm. The height of sand in the chamber was about 20cm. The sand used in the experiment was Toyoura sand which has a mean grain size,  $d_{50}$  of 0.125 mm. The sand sample was prepared by boiling and the resulting relative density was about 33%.

The vibration motor that was installed at the top of the probe works when voltage is induced. When 1V was induced at the beginning, the motor operated but value of pore-pressure and electrical resistivity didn't change. When 2V was induced to the motor, the resistivity and pore-pressure changed significantly. Fig.1b shows the acceleration, pore-water pressure and



electrical resistivity measured during the test. The vibration of motor started 5 seconds after the beginning of the measurement and continued 5 seconds. Because the timing of the beginning of each measurement was operated manually, the starting time of resistivity and acceleration shifted slightly in Fig. 1b.

Fig. 1b shows that when the vibration starts, the pore-pressure increases up to the overburden pressure indicating the soil is liquefied. The boiling of water at the surface and subsidence around the probe were observed. The electrical resistivity increased during liquefaction. Although the same 2V was induced to the motor all the time, the acceleration changed remarkably during the experiment. This is because of the change of stiffness of soil in the small chamber. This change of acceleration during vibration, however, was not generally observed in field tests.

### **Field experiments of ER-VPT in Turkey**

The shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey was selected to carry out the ER-VPT field tests. The lake is in a tectonic pull-apart basin and approximately 20 km east of Izmit Bay. This site was specifically selected because soils along the southeast shore of Lake Sapanca liquefied and some structures (e.g. Hotel Sapanca) were dramatically affected during the 1999 Izmit (Kocaeli) earthquake (e.g., USGS, 2000; Cetin et al., 2002). The test site is close to the Hotel Sapanca. The area is underlain by Holocene deposits consisting of relatively thick fluvial deposits up to about 60 m in depth. The soil properties at the site were characterized using SPT and CPT tests. The CPT tip resistance, sleeve friction and friction ratio values along with SPT blow counts,  $N$  are shown in Figs. 2a, 2b, and 2c. The CPT equipment consists of a  $60^\circ$  cone, with a cross-sectional area of  $10 \text{ cm}^2$ . The friction sleeve, located above the tip, has an area of  $150 \text{ cm}^2$ . The length of the rod increment used was 50 cm and the depth interval at which the tip resistance and sleeve friction were measured was 2 cm. The penetration speed was kept, in as much as possible, at 2 cm/s.

The SPT procedures follow the guidelines outlined in ASTM standards D6066-98 and D1586. Samples from the SPT's were used to determine fines content and grain size distribution of soil. The overall efficiency of a rope and cathead system with safety hammer used is about 60%. The rotary wash drilling technique using a tri-cone drill bit was used to reach the depth at which the SPT was to be performed. Casing (ID=10 cm) was used to support the walls of the boring.

The ground water table level at the test location is 1.2 m. The surface of the site consists of sandy gravel fill with a thickness of about 1.1 m. This fill layer is underlain by fine gravelly silty sand, clean sand, and silt-clay layers. The CPT and SPT test results indicated that this site has liquefiable soil layers. Fig. 2d shows the values of factor of safety against liquefaction calculated by using the 1999 Kocaeli (Izmit) earthquake parameters ( $M_w=7.4$  and  $PGA=0.4g$ ). Liquefaction analyses were performed following the procedures described in Youd, et al. (2001).

ER-VPT test research involved several field tests in the same location at various times. The first and second field tests were conducted in March 2004 and 2005, respectively at the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey. The first field tests included CPT and ER-VPT tests. The locations of the ER-VPT tests were within 1 m of the CPT tests shown in Fig. 2. The

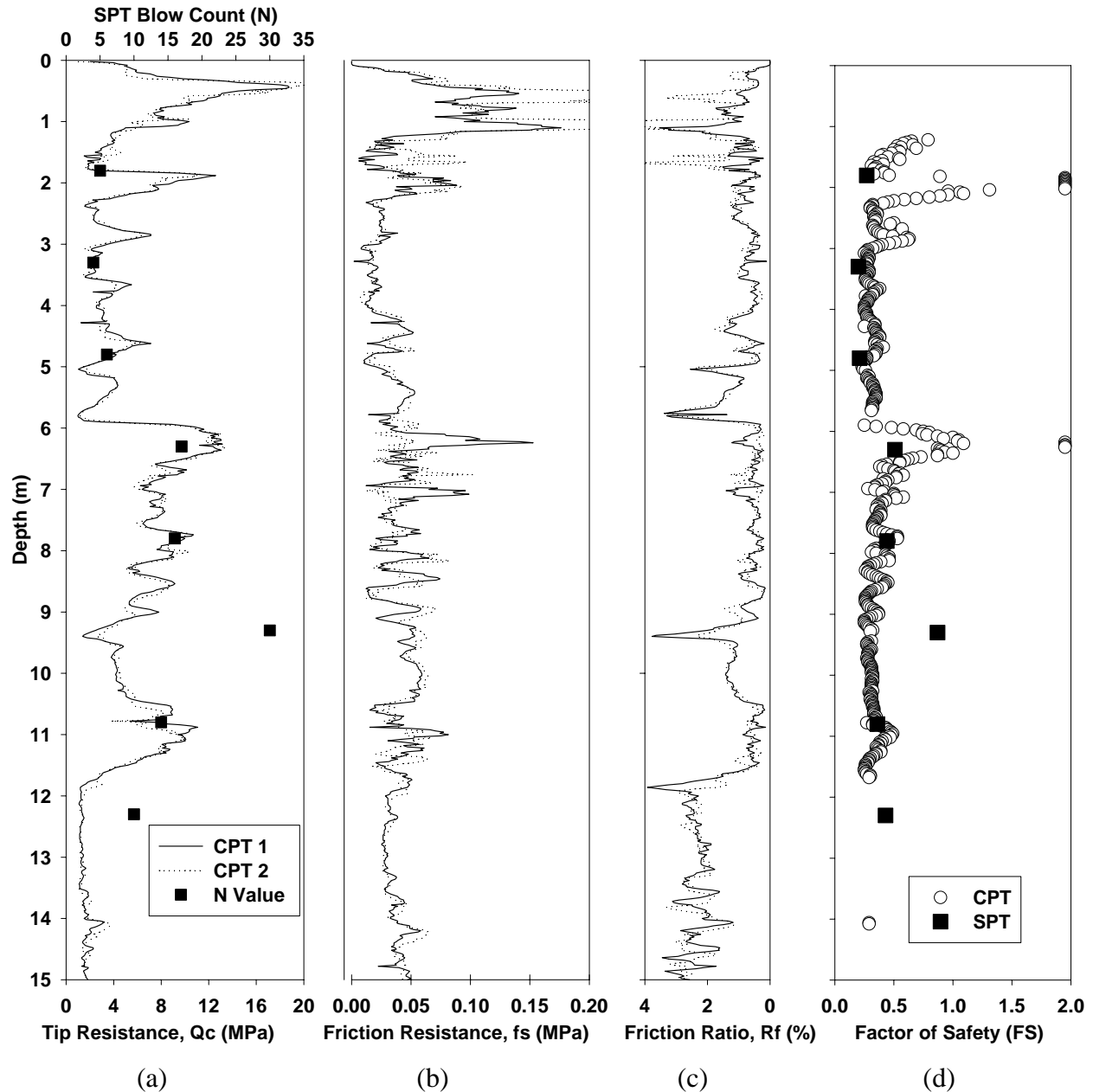
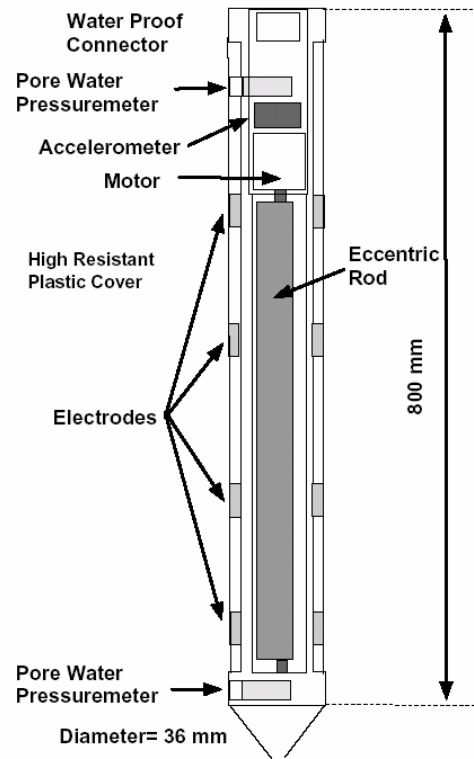


Figure 2. The CPT and SPT test results at the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

first real size ER-VPT equipment constructed in this research is shown in Fig. 3a. The schematic view and dimensions of the equipment can be seen in Fig. 3b. The diameter of the equipment, 36 mm is selected to be similar to CPT instrument. The CPT truck and hydraulic push unit were used to push ER-VPT equipment into the ground as shown in Fig 3. VPT measurements were taken every 50 cm below the ground water table level. These first field tests provided encouraging results which are discussed in Jinguuji and Toprak (2004). Some of the main results of these tests were: (1) different initial resistivity, resistivity change and acceleration values were obtained in different soil types; (2) more tests were required to correlate soil behavior with measured parameters; (3) some soil samples from different depths were required (4) stronger



a) Placing ER-VPT tool into hydraulic-push unit



b) Schematic view and dimensions



c) Connecting thrust rods to ER-VPT tool



d) ER-VPT instrument pushed into the ground

Figure 3. The ER-VPT field tests using CPT truck in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.



a) Modified ER-VPT instrument

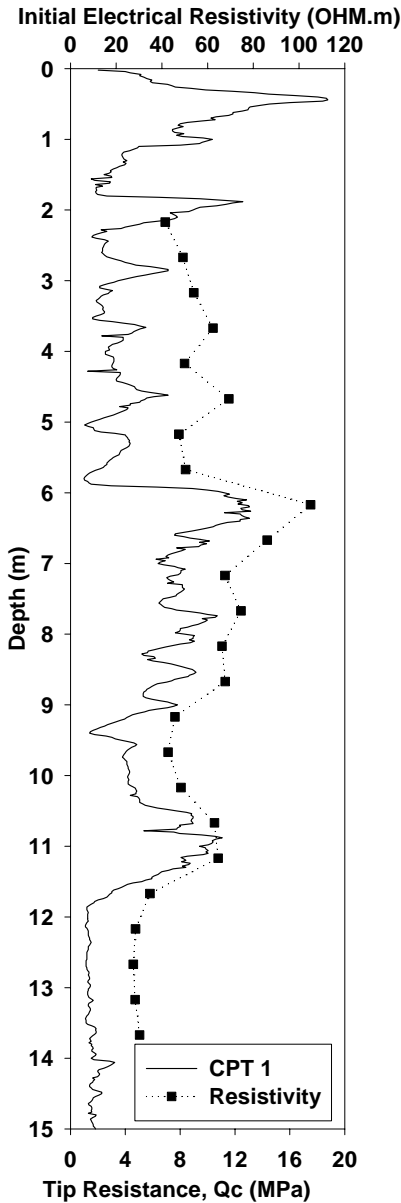
b) ER-VPT instrument pushed into the ground

Figure 4. The ER-VPT field tests using SPT truck in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

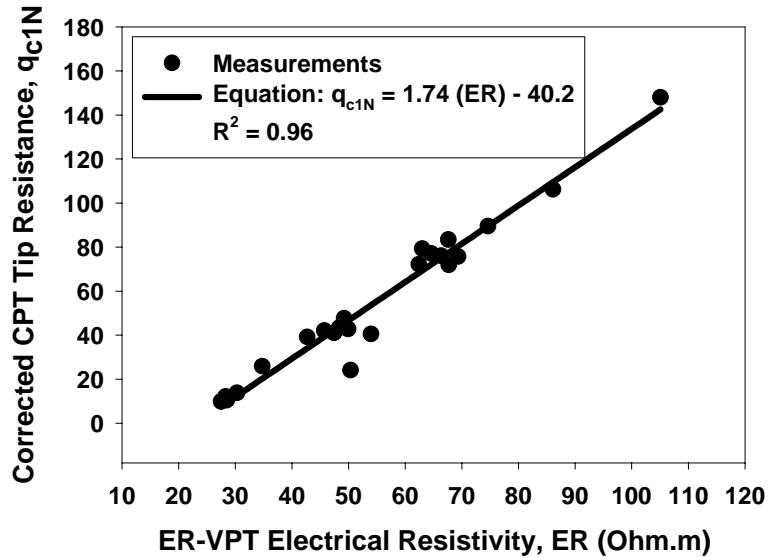
vibration would be better (5) some improvements were needed for the measuring system. In response to these observations, some modifications were made to ER-VPT equipment. One significant change was that the diameter of the VPT was increased from 36 mm to 44 mm in order to increase the vibration power in the soil. Also the accelerometer was moved from top to bottom part of VPT.

The second field tests included SPT and ER-VPT tests at the same location as the first field tests. SPT was selected this time to compare the results with ER-VPT and also to get some soil samples from the site. Samples from the SPT were used to determine fines content and grain size distribution of soil. Fig. 4a shows the modified ER-VPT instrument. The hydraulic unit of the SPT truck was used to push the instrument into the ground (Fig. 4b). VPT measurements were taken every 50 cm below the ground water table level (Jinguuji and Toprak, 2005). When necessary an auger was used to drill up to 2 m through the fill material and hard ground above the water table.

During the each ER-VPT test, 20V DC voltage was induced to ER-VPT probe. Applied vibration lasted 2 minutes. Electrical resistivity, pore water pressure, and acceleration values were recorded continuously for 5 minutes, during 2 minute-vibration and 3 minutes after the vibration. The black squares in Fig.5a show the initial electrical resistivity measured at each



(a) Initial electrical resistivity measured with ER-VPT



(b) Comparison of corrected and normalized CPT tip resistance with ER-VPT electrical resistivity

Figure 5. The ER-VPT initial electrical resistivity measurements in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

depth before vibrations. Also shown in the figure is the CPT tip resistance measured within 1-2 m of the ER-VPT location. The comparison of values in Fig. 5a shows that the trend in resistivity values at each depth follows the trend of the tip resistance of CPT. Fig. 5b illustrates the relationship between ER-VPT electrical resistivity and corrected and normalized CPT tip resistance. Tip resistance is the average of the values for 10 cm corresponding to each ER-VPT measurement. All data except the ER-VPT measurement at the depth of 2.17 m which was considered an outlier were used in the relationship. This particular measurement was made just below the bottom of the auger hole (2m) where ER-VPT didn't penetrate entirely, resulting in most probably erroneous electrical resistivity record. The dimensionless cone penetration resistance  $q_{c1N}$  is calculated by the following equation:

$$q_{c1N} = C_Q(q_c/P_a) \quad (1)$$

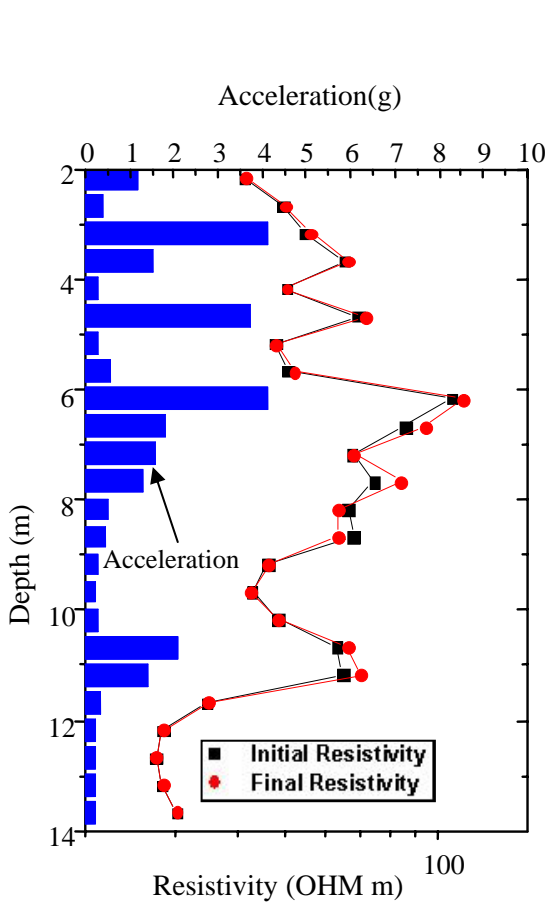
where

$$C_Q = (P_a/\sigma'_{vo})^n \quad (2)$$

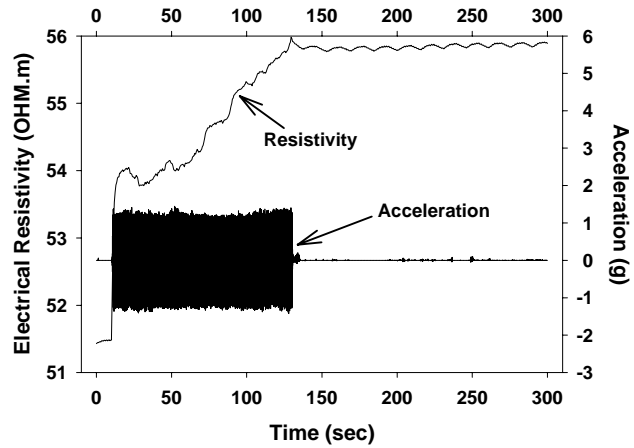
and where  $C_Q$  = normalizing factor for cone penetration resistance;  $P_a$  = 1 atm of pressure in the same units used for effective overburden pressure,  $\sigma'_{vo}$ ;  $n$  = exponent that varies with soil type; and  $q_c$  = field cone penetration resistance measured at the tip. At shallow depths  $C_Q$  becomes large because of low overburden pressure; however, values  $>1.7$  were not applied following recommendations of Youd, et al. (2001). Fig. 5b also shows the best fit line to the data ( $r^2 = 0.96$ ) and the corresponding equation. An exponent  $n$  of 0.5 used in the calculations.

Fig. 6a shows the ER-VPT test results relative to depth. As mentioned previously, the acceleration of the probe and electrical resistivity change were monitored during the test. ER-VPT was able to capture different behavior of various soil layers. For example, Figs. 6b and 6c show the resistivity and acceleration values recorded at depths of 11.2 m and 12.2 m, respectively. There is significant difference between the resistivity and acceleration values recorded at these depths. The acceleration amplitude of ER-VPT probe at 11.2 m reached up to 1.4 g and also resistivity of soil increased significantly during vibration (about 8.7 %). This resistivity change pattern is similar to that observed for liquefied sand in the laboratory (Fig.1b) and shows porosity and soil density change during vibration. This layer is classified as well graded sand layer with fines content of 6% (SW-SM according to Unified Soil Classification System-USCS) from the SPT samples. However, the acceleration of the probe at 12.2 m is about 0.2g, much smaller than that of the previous layer. Also no electrical resistivity change was observed during the ER-VPT test. This layer is classified as low plasticity silt (ML according to USCS) from the SPT samples. The sieve analyses of the sample showed that only 7% is sand at this depth. The results clearly reflect the difference in dynamic behavior of sand and silt soils.

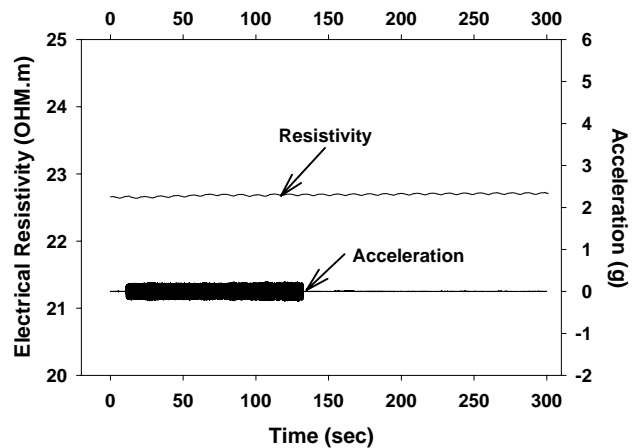
Comparison of ER-VPT results in different soil layers shows that both the acceleration and change of electrical resistivity are affected significantly by the fines content of the soil. To compare these results with CPT, friction ratio ( $R_f$ ) was used. The CPT friction ratio (sleeve resistance  $f_s$  divided by cone tip resistance  $q_c$ ) generally increases with increasing fines content and soil plasticity, allowing rough estimates of soil type and fines content. Friction ratio corresponding to each ER-VPT measurement was calculated as the average of the values for 10



(a) ER-VPT measurements with respect to depth



(b) The change of electrical resistivity and acceleration during ER-VPT in sand layer (11.2 m)



(c) The change of electrical resistivity and acceleration during ER-VPT in silt layer (12.2 m)

Figure 6. The ER-VPT field test results in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

cm at respective depth. Although the results didn't indicate a one to one correlation, friction ratio of about 0.9 marked a border line. The soils with smaller friction ratios showed patterns of the acceleration and change of electrical resistivity similar to Fig. 6b ( $R_f$  at this depth is 0.6) whereas others showed patterns of the acceleration and change of electrical resistivity similar to Fig. 6c ( $R_f$  at this depth is 2.6).

## Conclusions

A new method, electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT) is proposed in this paper to predict liquefiable soils. The method uses a vibration probe and electrical resistivity, pore water pressure, and acceleration measurements to determine the liquefiable soils. Laboratory experiments and field tests in the shore of Sapanca Lake, Adapazari, Turkey were conducted using ER-VPT instrument. The soil profile and properties at the site were determined by Cone Penetration Tests (CPT) and Standard Penetration Tests (SPT). ER-

VPT was able to capture the properties and dynamic behavior of different type of soils at the site. This ongoing research provided encouraging results but more experiments are required before the method can be established and used in geotechnical investigations. In this regard, we did some more recent tests in a different type of field in Japan, results of which however were not completed before the preparation of this paper.

### Acknowledgments

The work reported in this paper was sponsored by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK), under award number ICTAG-I729 (103I042) and grant of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan. We acknowledge the support given by ZETAS Corporation in the field tests. Laboratory tests were conducted by F. Taskin.

### References

- Cetin, K. O., Youd, T. L., Seed, R. B., Bray, J. D., Sancio, R., Lettis, W., Yilmaz, M. T., Durgunoglu, H. T., 2002. "Liquefaction-induced ground deformations at Hotel Sapanca during Kocaeli (Izmit), Turkey earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1083-1092.
- Jinguuji, M., Kunimatsu, S., Izumi, H., and T. Mochizuki, 2001. Development of visualization technique of relative density of sand during liquefaction using resistivity and consideration of the results, *Japan Society of Civil Engineers*, 680(III-55), 201-209 (in Japanese).
- Jinguuji, M., Kunimatsu, S., and Toprak, S., 2003. A monitoring and visualization technique for liquefaction using resistivity", in Hamada, M., Bardet, J-P., and O'Rourke, T.D., eds., U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Liquefaction, 8th, Tokyo, 2002, Proceedings, *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research Technical Report MCEER-03-0003*, p. 385-394.
- Jinguuji, M. and Toprak, S., 2004. "Dynamic response test for liquefiable soils using electrical resistivity vibration probe", The Society of Exploration Geophysicists of Japan, SEGJ 110th Annual Spring Meeting, May 25-27, 2004, Waseda University, Tokyo, Japan (In Japanese with English Abstract).
- Jinguuji, M. and Toprak, S., 2005. "Development of Electrical Resistivity Vibration Penetration Test (ER-VPT)", *Near Surface 2005*, CD-ROM Paper No. P030, September 5-8, 2005, Palermo, Italy.
- Toprak, S. and Holzer, T. L., 2003. "Liquefaction potential index: field assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129 (4), 315-322.
- United States Geological Survey (USGS), 2000. Implications for earthquake engineering risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999, *USGS Circular 1193*.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., W. D. Liam Finn, Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B., and Stokoe, K. H. II, 2001. "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127 (10), 817-833.



# P030 DEVELOPMENT OF ELECTRICAL RESISTIVITY VIBRATION PENETRATION TEST (ER-VPT)

M. JINGUUJI<sup>1</sup> AND S. TOPRAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Institute for Geo-Resources and Environments, PO BOX305-8569, AIST Tsukuba Central #7, Higashi 1-1, Tsukuba, Ibaraki, Japan*

<sup>2</sup>*Civil Engineering Department, Pamukkale University, Denizli, Turkey*

## Abstract

The estimation of liquefiable soils and potential mapping of liquefaction are very important for city planners, building owners, and engineers to see liquefaction prone areas and hazard levels. If the proposed structure is in a liquefaction hazard zone, additional measures against liquefaction can be taken. We propose a new method, electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT), which utilizes a vibration probe, accelerometer, pore-pressure meter and electrical resistivity measurement, to determine the liquefiable soils. We did experiments in laboratory and field using ER-VPT and got successful results. The ER-VPT is different from other tests commonly used in liquefaction prediction such as standard penetration test (SPT) and cone penetration test (CPT). This method uses dynamic response of soils for liquefaction prediction.

## 1. Introduction

The estimation of the depth and zoning of liquefiable soils are very important for geotechnical engineers and city planners. Ordinary, methods which rely on field tests such as standard penetration test (SPT) or cone penetration test (CPT) are used for potential mapping of liquefaction (Toprak and Holzer, 2003). These methods developed over the years and are convenient and have many actual achievements in liquefaction prediction. SPT and CPT field tests primarily measure some parameters such as SPT blow counts,  $N$  or cone tip resistance,  $Q$  that are originally used to determine engineering properties of soil. Liquefaction prediction of soils is performed by using these parameters in relationships which were obtained from past earthquake observations and laboratory experiments. Several assumptions and corrections are applied during this process. In this research, we propose a new method which directly uses dynamic response of soils to evaluate its liquefability. The method, electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT), utilizes a vibration probe, accelerometer, pore-pressure meter, and electrical resistivity measurement, to determine the liquefiable soils. In principle, the vibration probe is penetrated into soil and vibration is applied, and changes of soil property such as its electrical resistivity in addition to pore water pressure is measured in situ. Jinguuji and others (2001) discussed the use of electrical resistivity of soils in liquefaction evaluation. The method can also be used to evaluate ground improvements applied as a countermeasure against liquefaction by comparing ER-VPT results measured before and after the treatment. To confirm the effectiveness of this technique, we did several experiments in laboratory and field, the results of which are presented herein.

## 2. Electrical Resistivity Vibration Probe Penetration Test (ER-VPT)

Fig.1 shows schematic view of ER-VPT test. ER-VPT is similar to CPT in the way that the probe is pushed into the ground. Once the probe is penetrated into the ground at the investigated depth, it is vibrated and liquefaction in the soil around the probe is observed. Liquefaction is monitored by measuring the electrical resistivity of the soil around the probe and pore water pressure. In addition, acceleration of the probe during the vibration is measured. The technique that uses electrical resistivity of soil was shown to be effective in liquefaction studies in laboratory (Jinguuji and others, 2001). Vibration control can be chosen as feed-back control or steady voltage supply. Fig.2 shows the structure of the vibration probe

developed in this study. Inside of the probe, a motor and eccentric rod is installed to make vibration. At the top of the probe, pore-pressure meters are installed to monitor change of pore-pressure during the test. Accelerometer is placed close to the tip of the probe.

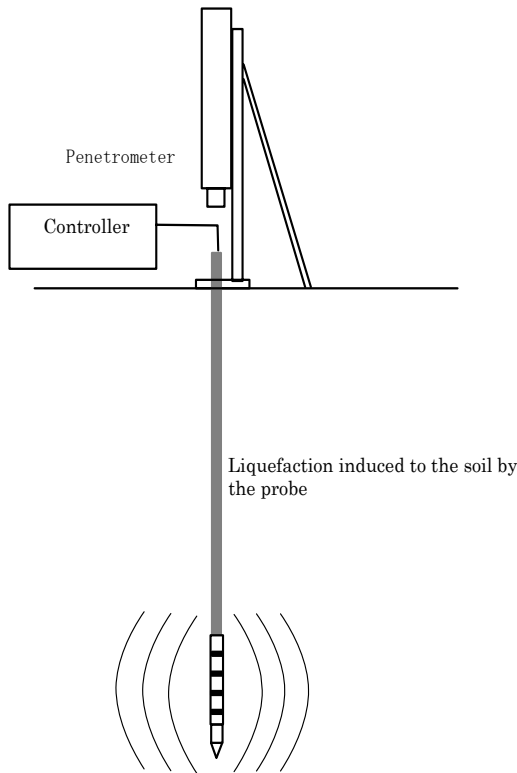


Fig.1 Schematic view of electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT)

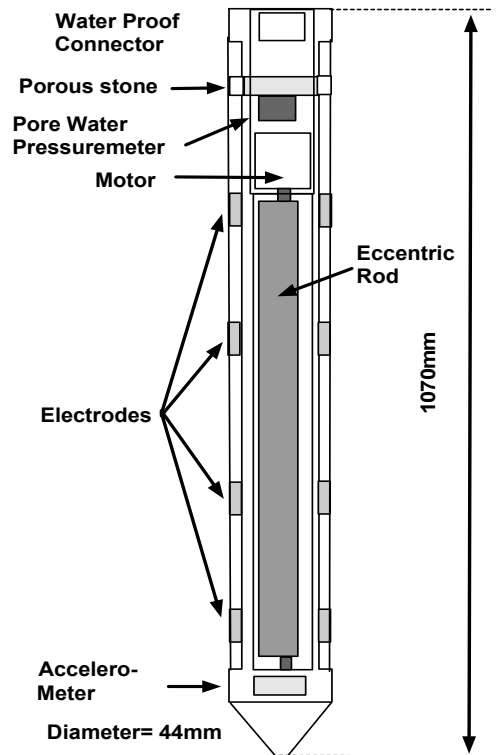


Fig.2 An example of the structure of vibration probe

### 3. A fundamental experiment in laboratory

First experiments of this research involved using a small chamber and small ER-VPT. As for the size of the vessel, the width is 30cm, length is 60cm and height is 30cm. The height of sand in the chamber was about 20cm. The sand used in the experiment was Toyoura sand. The sand sample was prepared by boiling and the resulting relative density was about 33%.

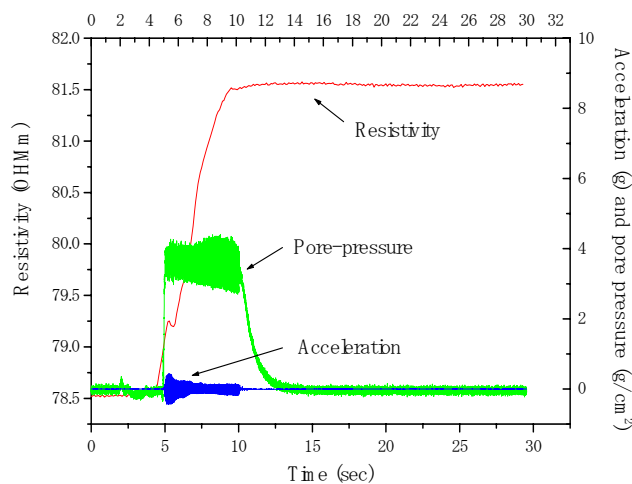


Fig.3 The result of VPT in laboratory test

The vibration motor that was installed at the top of the probe works when voltage to the motor is induced. When 1V was induced at the beginning, the motor operated but value of pore-pressure and electrical resistivity didn't change. When 2V was induced to the motor, the resistivity and pore-pressure changed significantly. Fig.3 shows the acceleration, pore-water pressure and electrical resistivity measured during the test. The vibration of motor started

5 seconds after the beginning of the measurement and continued 5 seconds. Because the

timing of the beginning of each measurement was operated manually, the starting time of resistivity and acceleration shifted slightly in the figure.

The figure shows that when the vibration starts, the pore-pressure increases up to the overburden pressure indicating the soil is liquefied. The boiling of water at the surface and subsidence around the probe were observed. The electrical resistivity increases during liquefaction. Although the same 2V was induced to the motor all the time, the acceleration changed remarkably during the experiment. This is because of the changes of stiffness of soil and confinement by soil. This result shows that the acceleration of probe represents the change of sand stiffness and states of liquefaction. Monitoring of acceleration may be effective to observe liquefaction states in soils.

#### 4. Field experiment of ER-VPT in Turkey

The ER-VPT probe shown in Fig.2 was used to carry out the field test in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey. This site was specifically selected because soils along the southeast shore of Lake Sapanca liquefied and some structures were dramatically affected during the 1999 Izmit (Kocaeli) earthquake (e.g., USGS, 2000). The soil properties at the site were characterized using CPT tests as shown in Fig. 4. Analysis of the CPT test results indicated that this site has some liquefiable soil layers. Fig.5 shows the result of ER-VPT test performed in Sapanca.

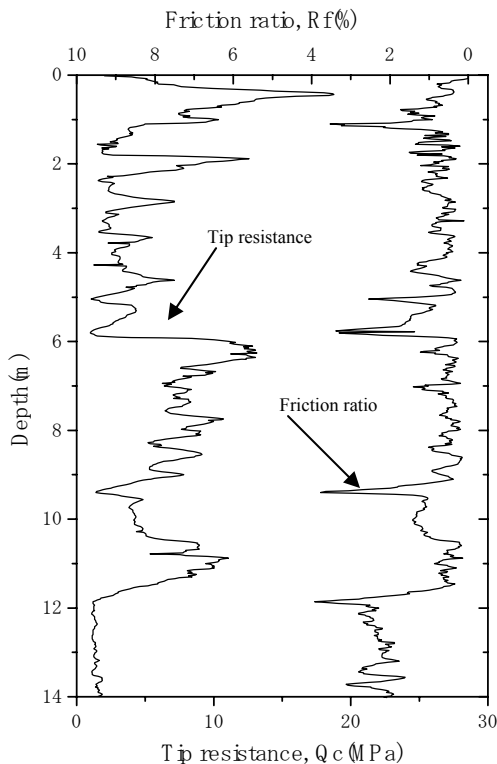


Fig.4 CPT test result at the shore of Lake Sapanca in Turkey

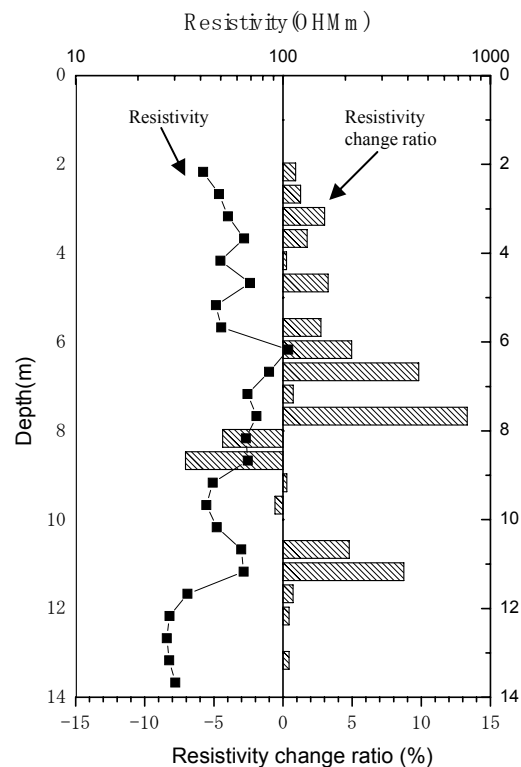


Fig.5 ER-VPT test result at the shore of Lake Sapanca in Turkey

During the test, 20V DC voltage was induced to ER-VPT probe. The black squares in Fig.5 show the electrical resistivity measured at each depth before each vibrations. The comparison of Figures 4 and 5 shows that the trend in resistivity values at each depth follows the trend of the tip resistance of CPT. The hatched bars in Fig.5 show the resistivity change ratio obtained by ER-VPT. This ratio is determined by calculating the resistivity difference before and after the vibration, and dividing it by the initial resistivity. The CPT shows that there exists primarily silty-sandy interbedded soil layers between the depth from 2 m to 6 m, sandy soil between the depth from 6 m to 12 m, with an interval of silty soil between the depth from 9 to

10.50m. Below 12 m, the soil is primarily clay. Figures 6 and 7 show the resistivity and acceleration values recorded in sand (11.8m) and clay (13.2m) layers, respectively. The values were recorded continuously for 5 minutes, during 2 minute-vibration and 3 minutes after the vibration. There is significant difference between the behavior of sand and clay layers. The acceleration amplitude of ER-VPT probe at 11.8m reached up to 1G and also resistivity of soil increased significantly during vibration. This resistivity change pattern is similar to that observed for liquefied sand in the laboratory (Fig.3) and this means porosity and soil density changed during vibration. The acceleration of the probe in clay layer at 13.2m is much smaller than that of sand layer. Also no electrical resistivity change was observed. The results clearly reflect the dynamic behavior of sandy and clayey soils.

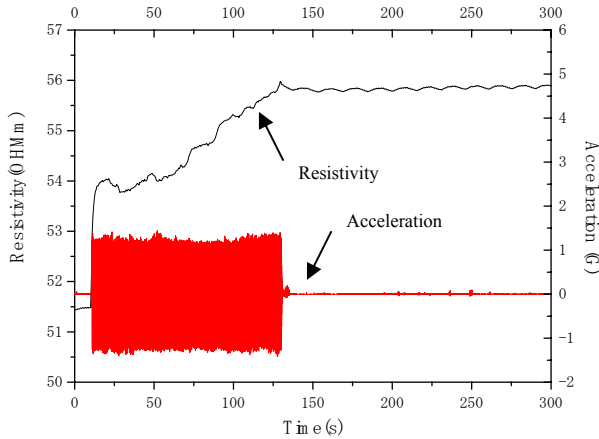


Fig.6 The change of the resistivity and acceleration during ER-VPT in sand layer (11.8m)

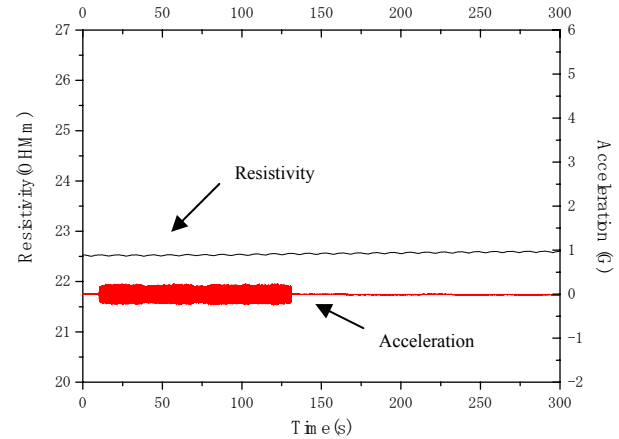


Fig.7 The change of the resistivity and acceleration during ER-VPT in clay layer (13.2m)

#### 4. Conclusion

We propose a new method, electrical resistivity vibration probe penetration test (ER-VPT) in this paper. The method uses a vibration probe and electrical resistivity measurement to determine the liquefiable soils. To confirm effectiveness of the method, we did experiments in laboratory using VPT and conducted field tests in the shore of Sapanca Lake, Adapazari, Turkey. The soil profile was determined by Cone Penetration Tests (CPT). Significant change of electrical resistivity during the ER-VPT was recorded at depths corresponding to the sand layer. The laboratory and field experiments using the new ER-VPT probe produced encouraging results.

#### Acknowledgements

The work reported in this paper was sponsored by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK), under award number ICTAG-I729 (103I042) and grant of National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. We acknowledge the support given by ZETAS Corporation in the field tests.

#### References

- Jinguuji, M., S. Kunitatsu, H. Izumi, and T. Mochizuki (2001): Development of visualization technique of relative density of sand during liquefaction using resistivity and consideration of the results, Japan Society of Civil Engineers, 680(III-55): 201-209 (in Japanese).
- Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003): Liquefaction Potential Index: Field Assessment, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 4, 315-322.
- United States Geological Survey (2000): Implications for Earthquake Engineering Risk Reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999, USGS Circular 1193.