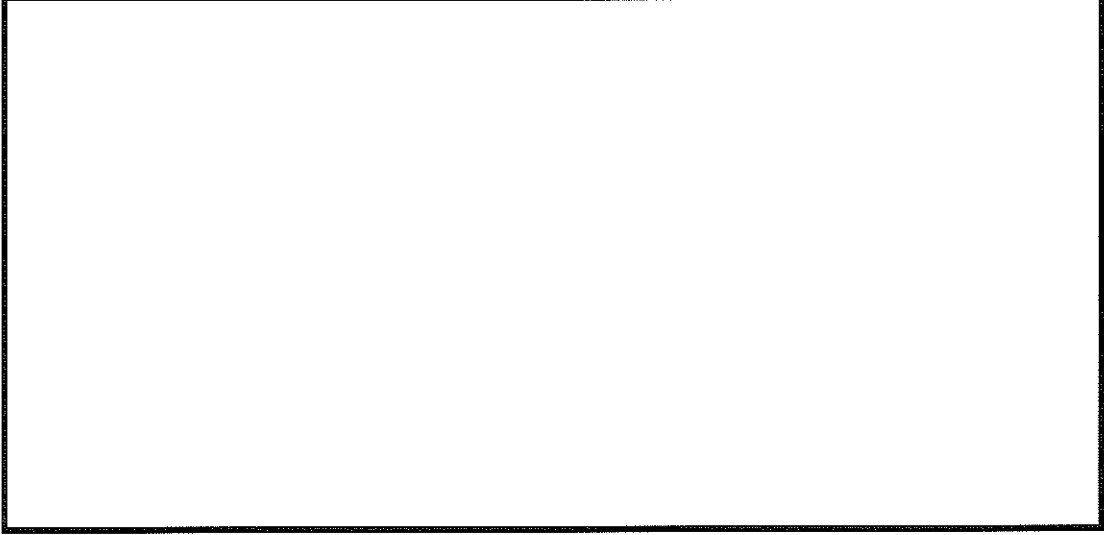




**TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU**

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



Mühendislik Araştırma Grubu

Engineering Research Grant Group

**SIVILAŞMA TAHMİNİNDE YENİ TEKNOLOJİ
VE YÖNTEMLER**

PROJE NO: 106M153

**YARD. DOÇ.DR. SELÇUK TOPRAK
DR. MOTOHARU JINGUUJİ**

**OCAK 2007
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 başlangıçta İÇTAG-1729 olarak Türkiye Bilimsel Ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından ve ayrıca National Institute of Advanced Science and Technology (AIST), Japonya tarafından, daha sonrasında da 106M153 olarak TÜBİTAK hızlı destek programı tarafından desteklenmiştir. Bu proje kapsamında, vibrasyon penetrasyon testi (VPT) olarak isimlendirdiğimiz, sıvılaşma tahminlerinde kullanılmak üzere yeni bir arazi testi ve yöntem üzerinde çalışılmıştır. Bu araştırma projesi için verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	5
TABLO LİSTESİ	6
ÖZET	7
ABSTRACT	8
1. GİRİŞ	9
2. ZEMİN SIVILAŞMASI VE ETKİLERİ	9
3. GENEL ZEMİN SIVILAŞMASI ANALİZLERİ	15
4. SIVILAŞMA'DA YENİ BİR YAKLAŞIM: VİBRASYON PENETRASYON TESTİ (VPT) ..	23
5. VPT ALETİ VE VPT ARAZİ DENEYLERİ	26
6. VPT DENEYLERİ SONUÇLARI VE ÖNERİLER	38
7. REFERANSLAR	46
8. EKLER: YAYINLARDAN ÖRNEKLER	48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Sivilaşan kumun yüzeye çıkışını gösteren kesit (Obermeier 1996, Ulusay 2000)	10
Şekil 2. Adapazarı'nda Çark Caddesi civarında bir sokak boyunca zemin yüzeyine fıskırmış silt ve ince kum öbekleri (Sucuoğlu vd 2000)	10
Şekil 3. 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde Adapazarı'nda eğilme formunda aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış binalar (Sucuoğlu vd 2000)	11
Şekil 4. 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda sivilaşmanın bir sonucu olarak.....	12
Şekil 5. 1999 Kocaeli depreminde Sapanca Gölünün Adapazarı'na yaklaşık 5km.....	12
Şekil 6. Yanal yayılmanın gelişimi (Obermeier 1996, Çelik 2003).....	13
Şekil 7. Petkim rafinerisi iskelesi üzerinde yatay deplasman sonucu meydana gelen yan al hareket (yaklaşık 15cm) (Sucuoğlu vd 2000)	13
Şekil 8. 1999 Marmara depremi sonrası Değirmendere sahilinin görünüşü. Kıyıya dolgu yapılarak kazanılmış olan alanlar 50m'ye yaklaşan yan al yayılımlar ile denize kaybedilmiştir (Sucuoğlu vd 2000).....	14
Şekil 9. 1995 Kobe Depreminde Port Island kuzey yakasında sivilaşmanın neden olduğu yan al yayılma etkisiyle, su dağıtım sisteminde yer alan 700 mm çaplı çelik boruda meydana gelen hasar (Chung 1996).....	14
Şekil 10. Akma türü kayma (Ulusay 2000)	15
Şekil 11. Gerilme azaltma faktörünün (r_d) derinlik (z) ile değişimi (Youd vd 2001).....	17
Şekil 12. Devirsel direnç oranı (CRR) ve düzeltilmiş darbe sayısı ($(N_1)_{60cs}$) arasındaki	18
Şekil 13. Düzeltilmiş CPT uç direnci ile (q_{c1N}) ile CRR/CSR arasındaki ilişki (Youd vd 2001)	21
Şekil 14. Deprem büyüklüğü ve magnitud düzeltme faktörü arasındaki ilişki (Youd vd 2001).....	22
Şekil 15. VPT testinin arazide uygulanışının şematik olarak gösterimi	24
Şekil 16. Laboratuvarda Prototip VPT testinin gerçekleştirilmesi.....	25
Şekil 17. Sapanca gölü kenarında VPT deneyi için seçilen saha (arkada Sapanca gölü gözükmemektedir)	27
Şekil 18. Antalya sahil kenarında VPT deneyi için seçilen saha (arkada bir hotel inşaatı gözükmemektedir)	27
Şekil 19. İzmit Körfezi civarı Yalova-Tavşanlı Bölgesinde VPT deneyi için seçilen saha (arkada İzmit Körfezi gözükmemektedir).....	28
Şekil 20. İzmit Körfezi civarı Yalova-Karamürsel Bölgesinde VPT deneyi için seçilen saha (arkada İpek Kağıt Fabrikası gözükmemektedir).....	28
Şekil 21. CPT ve SPT deney araçları	30
Şekil 22. Sapanca Gölü kıyısındaki test sahasında CPT and SPT test sonuçları	31
Şekil 23. (a) VPT aleti ve kablosu (b) VPT aletinin boyutları ile şematik olarak iç ve dış yapısı	32
Şekil 24. Sapanca Gölü kıyısındaki sahada 2004 yılında gerçekleştirilen VPT testi	33
Şekil 25. Deney sahasında SPT kamyonu ve proje yürütücüsünün elinde VPT aleti	34
Şekil 26. VPT aleti SPT hidrolik ünitesi ile zemine ittirilirken.....	34
Şekil 27. Antalya-Kundu bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları.....	35
Şekil 28. İzmit Körfezi civarı Yalova-Tavşanlı bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları ..	36
Şekil 29. İzmit Körfezi civarı Yalova-Karamürsel bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları	37
Şekil 30. VPT elektrik özdirenç ölçümleri ve CPT uç dirençleri ile kıyaslanması.....	39
Şekil 31. VPT deneyi esnasında ölçülen elektrik özdirenç 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)	40
Şekil 32. Antalya-Kundu bölgesindeki VPT deneylerinde elektrik özdirenç değişim oranları ve CPT ile karşılaştırılması (Jinguuji vd., 2006).....	42

Şekil 33. Relationship between pore pressure increase and acceleration at different depths (Jinguuji vd., 2006).....	43
Şekil 34. VPT deneyleri esnasında oluşan problemlere örnekler.....	44

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. Tij, iç gömlek ve kuyu çapı düzeltme faktörleri (Skempton 1986)	19
--	----

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 arzu edilen derinliklere ittirilmekte ve vibrasyon uygulanmakta ve bu esnada ivme, boşluk suyu basıncı ve zemindeki elektrik öz direnci 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, Antalya'da ve İzmit Körfezi civarında Yalova'da 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.

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, Antalya and in Yalova (around Izmit Bay) 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 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.

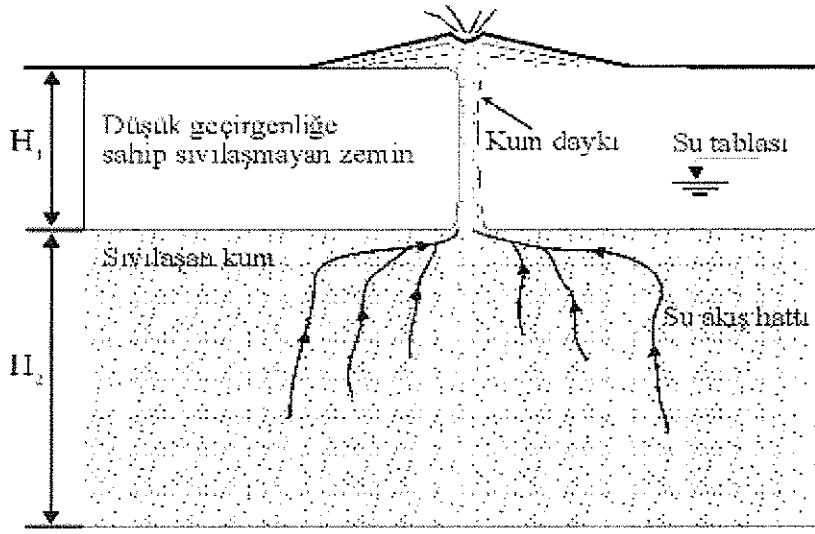
1. GİRİŞ

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 pek çok 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 fışkırması (kum volkanları ve kum kraterleri), kum daykları ve siller, yanal yayılmalar ve kademeli yarıklar şeklinde olur (Şekil 1 ve Şekil 2).

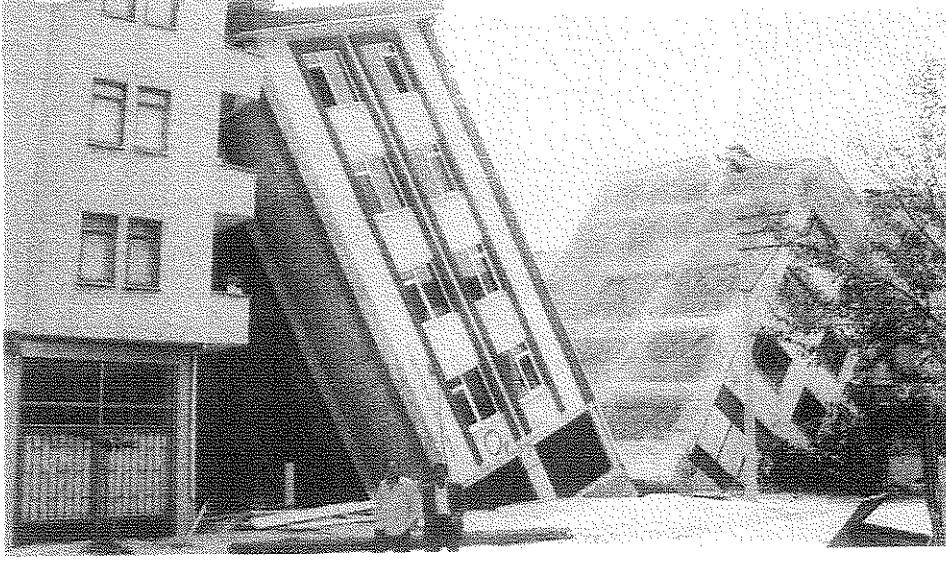


Şekil 1. Sivilaşan kumun yüzeye çıkışını gösteren kesit (Obermeier 1996, Ulusay 2000)



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

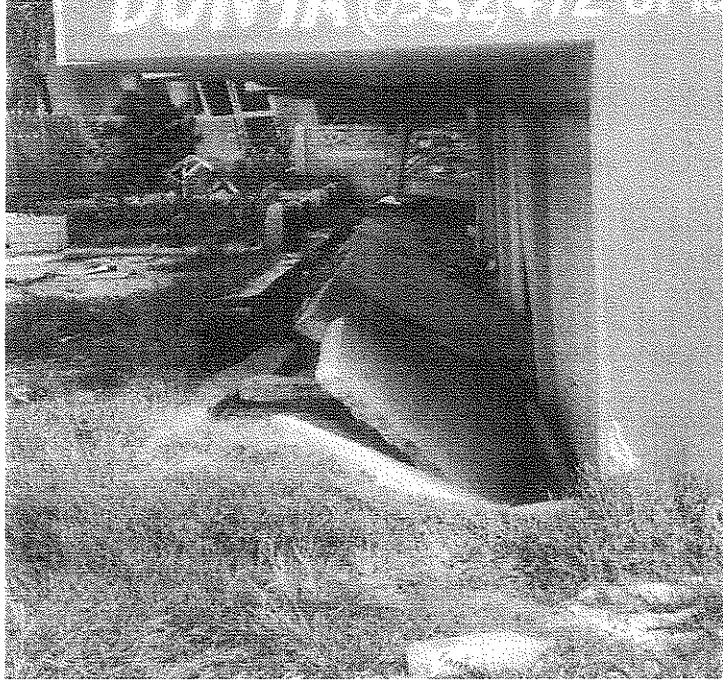
Zeminin taşıma gücünü yitirmesi, kısaca yapıları taşıyan zeminin sivilaştığı zaman, yapının aktardığı yükü taşıyamaz hale gelmesi sonucu zemin üzerindeki yapıların değişik yönlerde yatması veya devrilmesidir (Şekil 3). Sivilaşma nedeniyle zeminin taşıma gücünü yitirmesiyle binalarda gözlenen davranışın aksine sivilaşan 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 yansıyor, 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 düktil ve esnek olan yeni borulara kıyasla daha çok zarar görmüştür (Toprak ve Yoshizaki 2003).

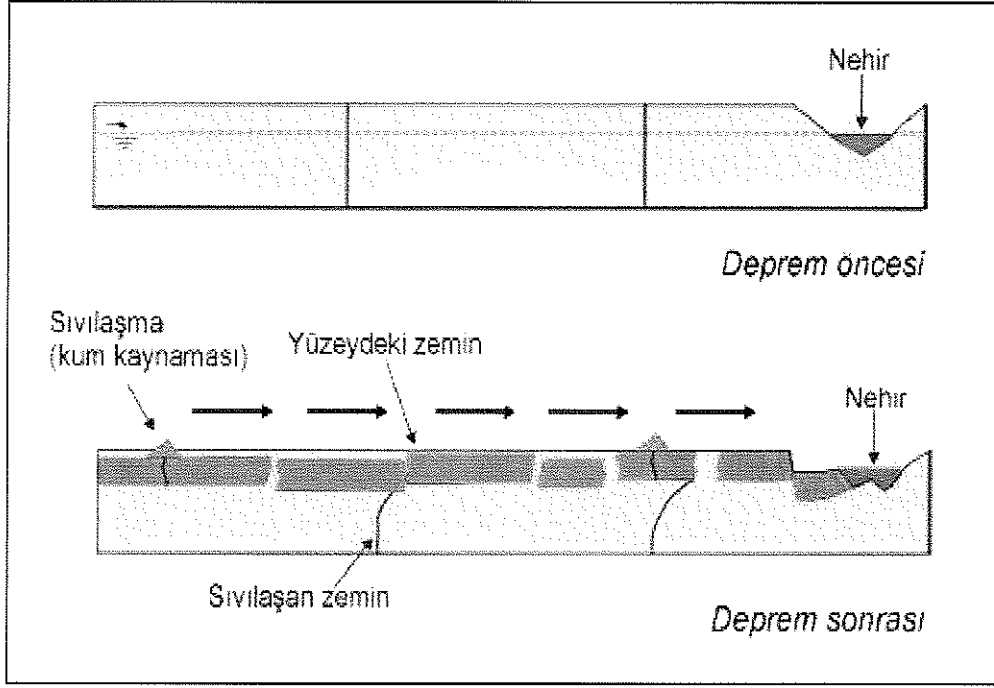
Sıvılaşmanın neden olduğu yanıl yayılmalar yapılarda meydana gelen zararların ana sebeplerinden birisi olmaktadır. Yanıl yayılma duraysızlığı sıvılaşan seviyenin üzerinde bulunan zeminin geniş bloklara ayrılması ve bu blokların yanıl yönde hareket etmesidir. Bu hareket depremden kaynaklanan yer çekimi kuvvetleri ve içsel kuvvetlerin birlikte etkimesiyle meydana gelmektedir. Şekil 6'te yanıl yayılmanın gelişimi görülmektedir. Yanıl 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).



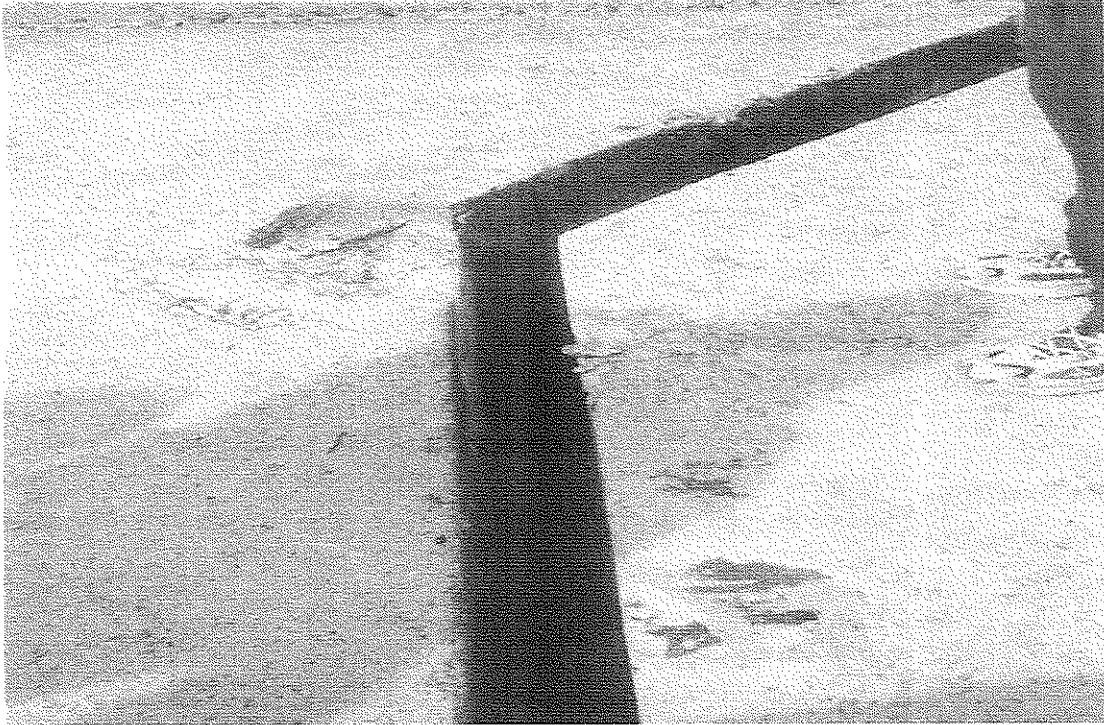
Şekil 4. 1999 Kocaeli depreminde Adapazarı'nda sivilaşmanın bir sonucu olarak oturma formunda (yaklaşık 1m) aşırı temel deformasyonuna maruz kalmış bir bina (Sucuoğlu vd 2000)



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



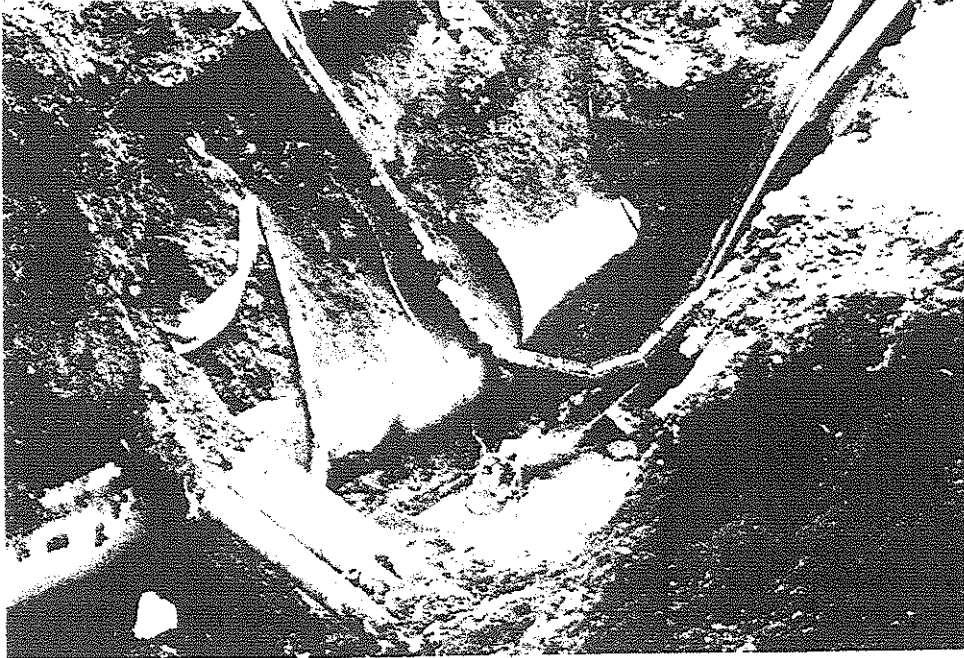
Şekil 6. Yanal yayılmanın gelişimi (Obermeier 1996, Çelik 2003)



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

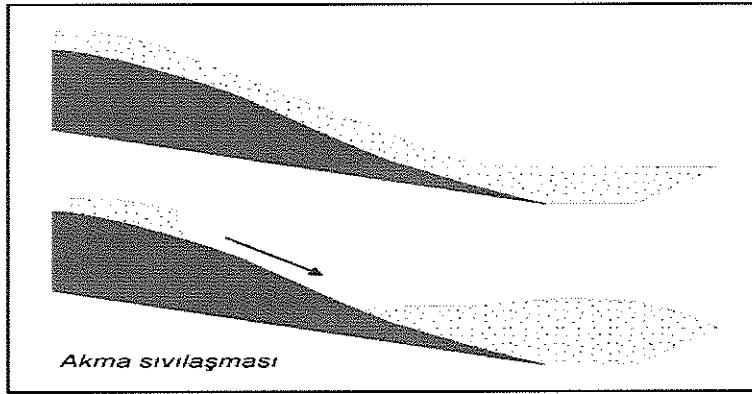


Şekil 8. 1999 Marmara depremi sonrası Değirmendere sahilinin görünüşü. Kıyıya dolgu yapılarak kazanılmış olan alanlar 50m'ye yaklaşan yanıl yayılımlar ile denize kaybedilmiştir (Sucuoğlu vd 2000)



Şekil 9. 1995 Kobe Depreminde Port Island kuzey yakasında sivilaşmanın neden olduğu yanıl yayılma etkisiyle, su dağıtım sisteminde yeralan 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 6⁰'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, Bekir Penetrasyon Deneyi (BPT), Kayma Dalga Hızına (Vs) 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

σ_{vo} : Toplam örtü yükü gerilmesi

σ'_{vo} : Efektif örtü yükü gerilmesi

r_d : Gerilme indirgeme katsayısı

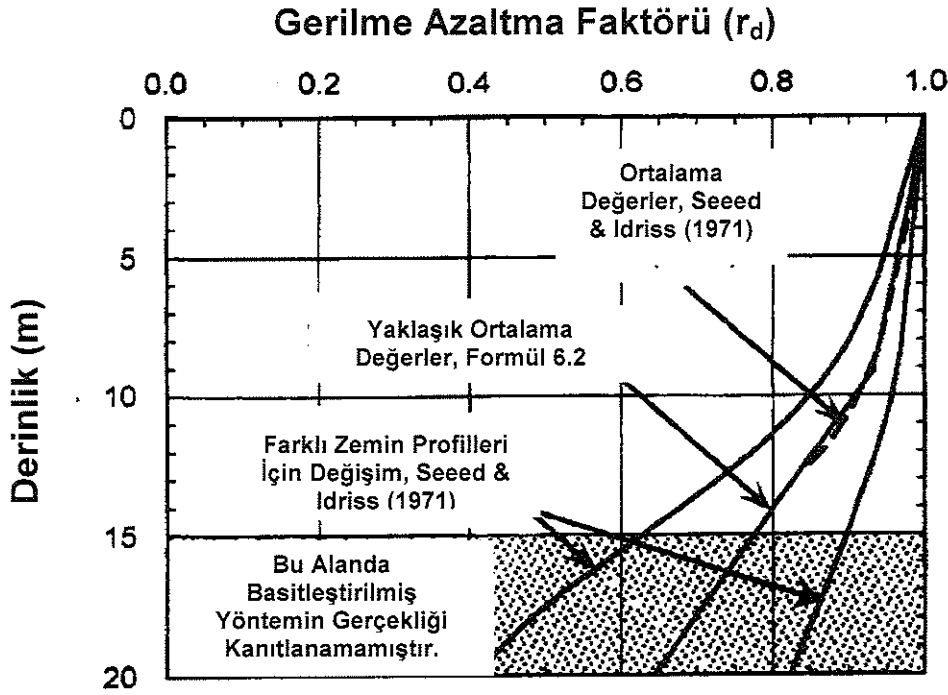
τ_{av} : Ortalama çevrimli kayma gerilmesi

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.



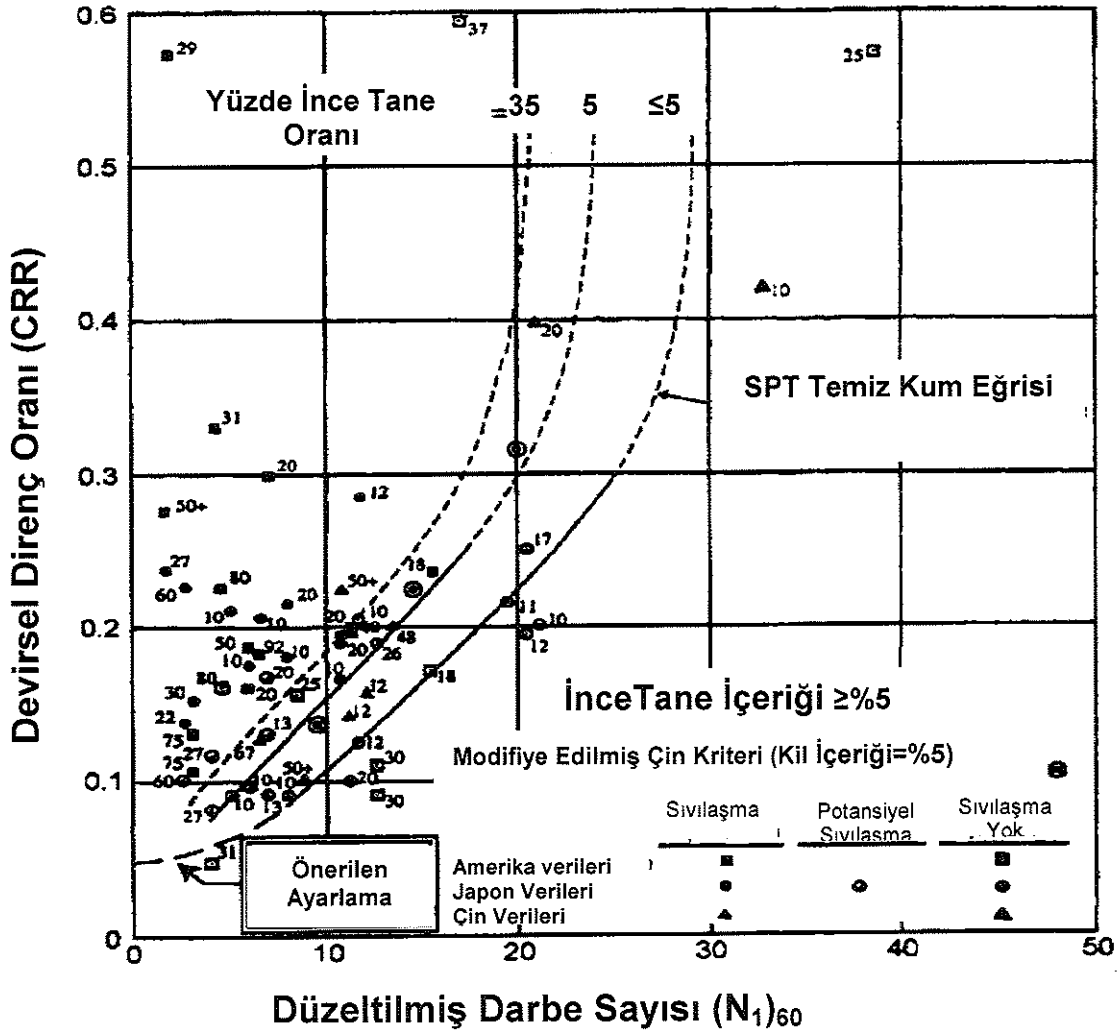
Şekil 11. Gerilme azaltma faktörünün (r_d) derinlik (z) ile değişimi (Youd vd 2001)

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

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 $(N_1)_{60}$ 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 $(N_1)_{60}$ 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 (σ'_{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 sıvılaşma 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 $(N_1)_{60cs}$.

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

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

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

$$ITO \geq \%35 \rightarrow \alpha = 5 \quad (3.12)$$

$$ITO \leq \%5 \rightarrow \beta = 1 \quad (3.13)$$

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

$$ITO \geq \%35 \rightarrow \beta = 1,2 \quad (3.15)$$

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

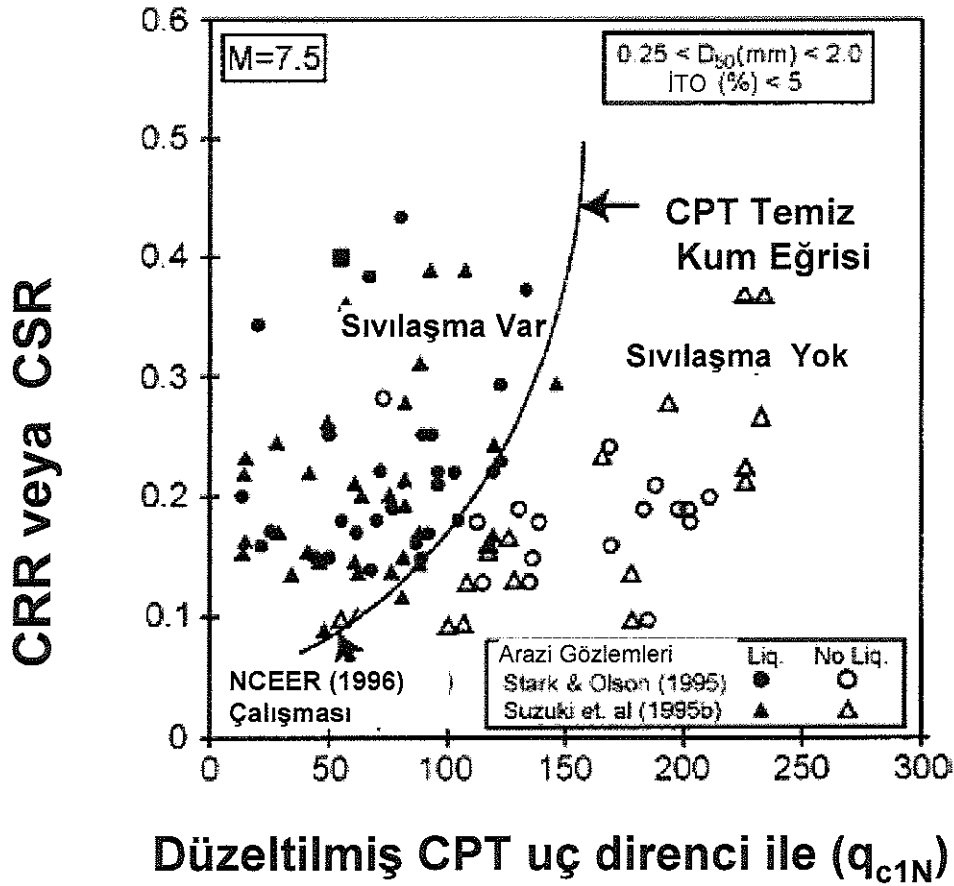
Sığ derinliklerde C_Q değeri düşük örtü yükü basıncından dolayı büyüktür. Bunula beraber 1,7 den büyük değerleri için C_Q değeri uygulanmaz. CPT sürtünme oranı genellikle ince tane oranının artışı ve zemin plastisitesinin artışı ile artar.

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)

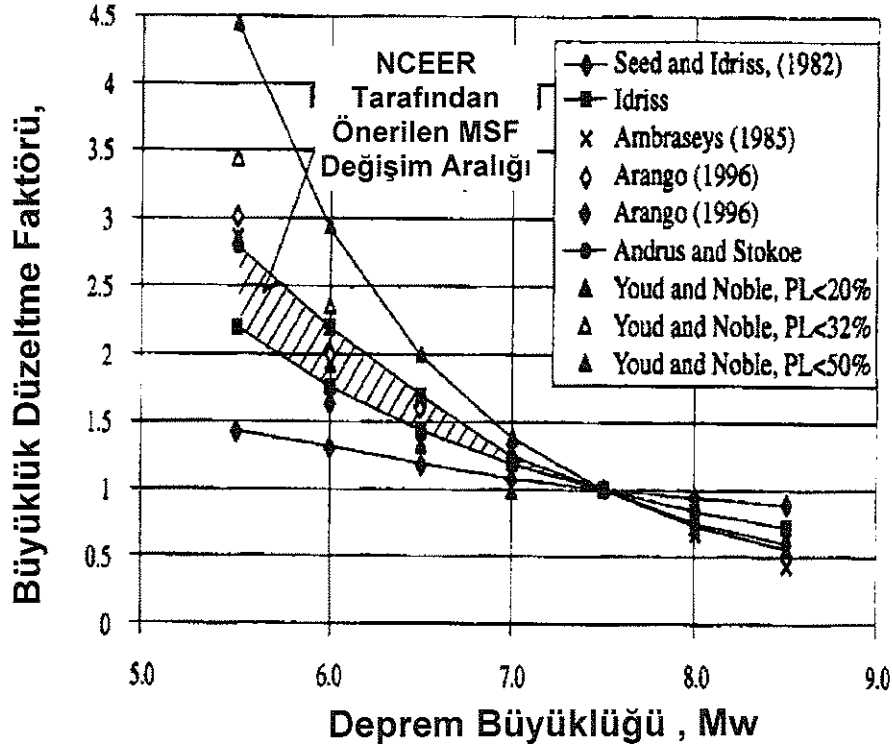
$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (3.16)$$

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 |

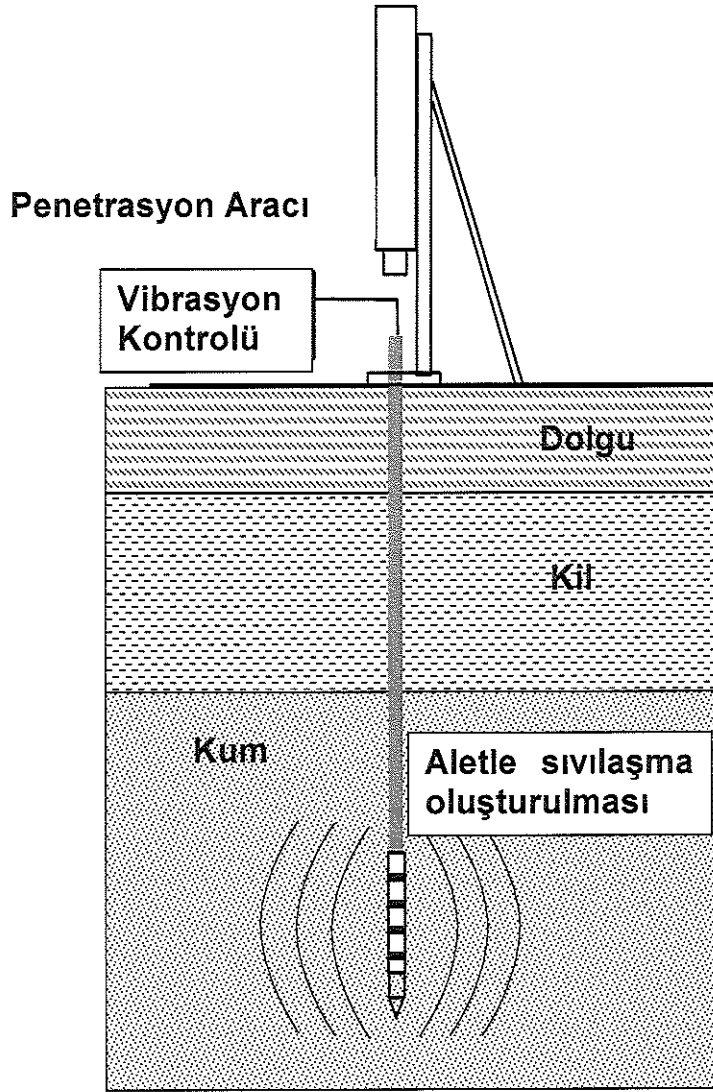


Şekil 14. Deprem büyüklüğü ve magnitüd düzeltme faktörü arasındaki ilişki (Youd vd 2001)

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

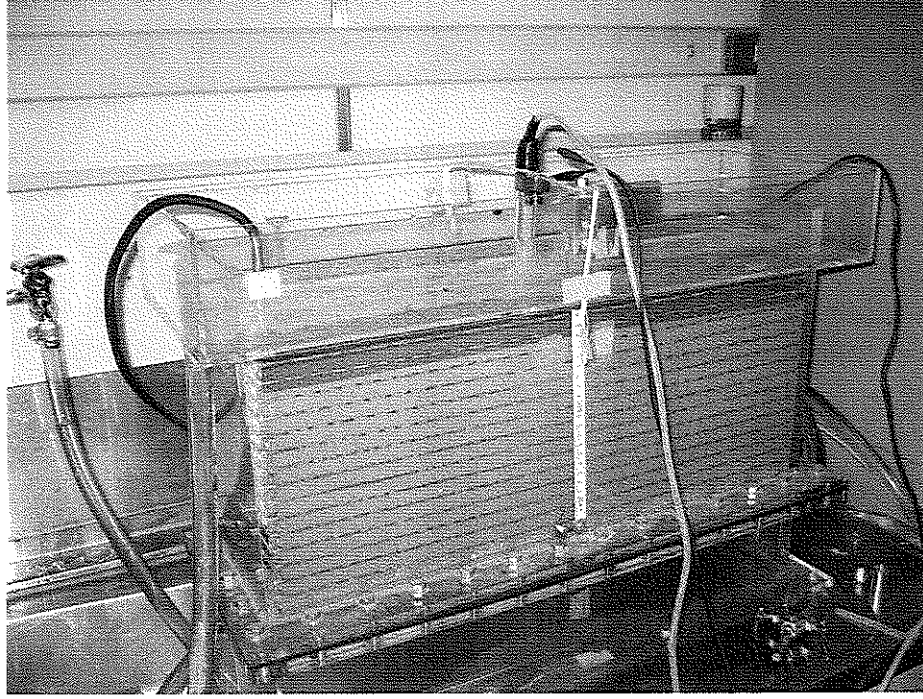
Şekil 15 VPT testinin arazide uygulanma şeklini şematik olarak göstermektedir. VPT testi VPT konik aletinin zemine ittirilmesi yönünden CPT ile benzerlik göstermektedir. VPT aleti zeminde inceleme yapılacak derinliğe indirilince vibrasyon uygulanmakta ve aletin etrafındaki zemin içinde sivilaşma gözlenmektedir. 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 sivilaşmasının incelenmesinde kullanılması daha önce laboratuvarında yapılan çalışmalarla gösterilmiştir (Jinguuji vd. 2001; 2007).

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 laboratuvarında 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). Kapın 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.

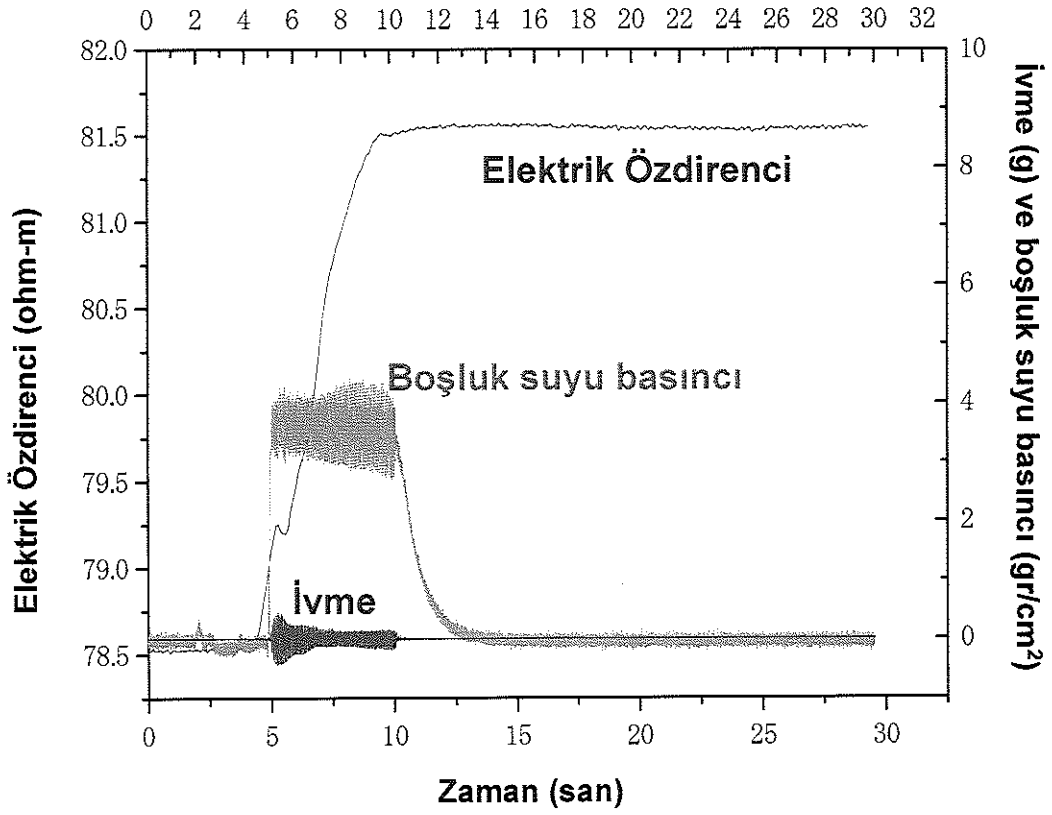


Şekil 15. VPT testinin arazide uygulanışının şematik olarak gösterimi

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 kabın içindeki kumun rijitliğinin değişmesiyle açıklanabilmektedir.



a) Prototip VPT aletiyle sıvılaşıma deneyi düzeneği



(b) Prototip VPT aletiyle sıvılaşıma deneyi sonuçları

Şekil 16. Laboratuvarda Prototip VPT testinin gerçekleştirilmesi

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 sivilaşma ile sivilaşma sonucunda yan al yayılmaların yoğun gözlemlendiği bölgeler dahil olmak üzere 4 alanda proje kapsamında VPT deneyleri gerçekleştirilmiştir. Alanlar şöyledir:

1. Adapazarı yakınlarındaki Sapanca Gölü civarı
2. Antalya-Kundu Bölgesi
3. İzmit Körfezi civarı Yalova-Tavşanlı Bölgesi
4. İzmit Körfezi civarı Yalova-Karamürsel Bölgesi

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).

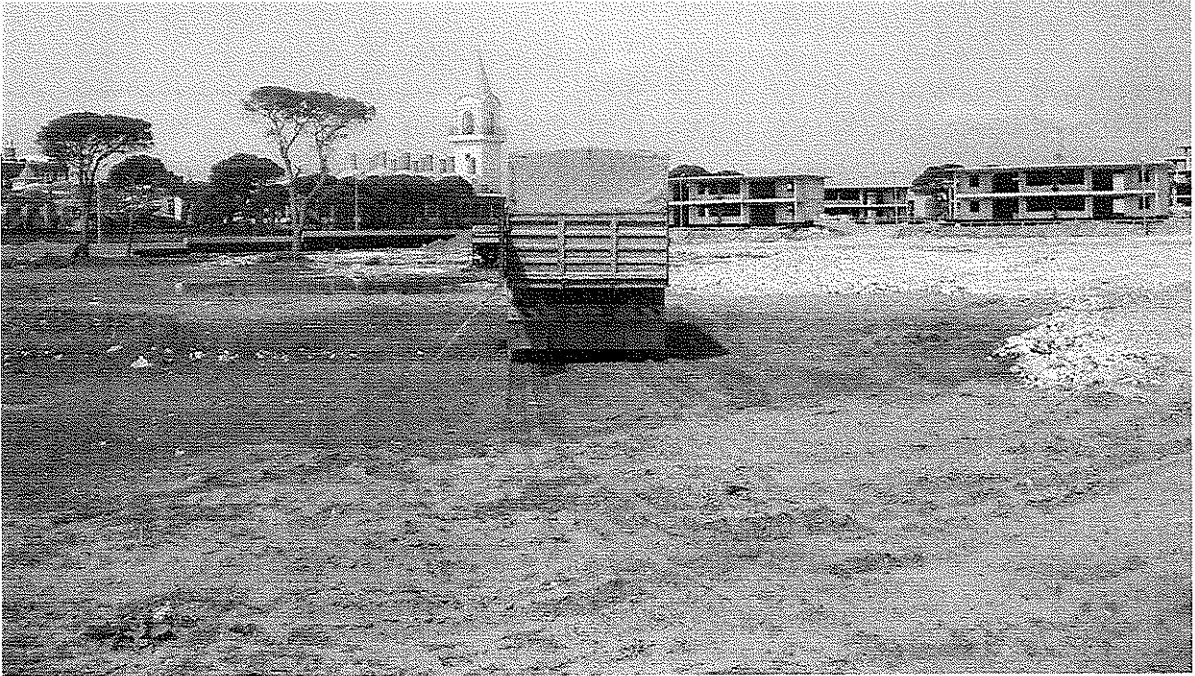
Sapanca gölü İzmit Körfezinin yaklaşık 20 km doğusunda tektonik oluşumlu bir göldür. Bu gölün güneydoğu kıyılarında 1999 Kocaeli (İzmit) depreminde sivilaşmalar ve sivilaşma sonucunda yan al yayılmalar gözlenmiş ve birçok yapı (Örneğin Sapanca Hoteli) ciddi hasar görmüştür (USGS, 2000; Çetin vd., 2002). Bu araştırma projesinde seçilen saha Hotel Sapanca'ya yakındır. Bu alan, kalınlığı 60 m ye kadar çıkan kalın fluvyal holosen çökeltilerden oluşmuştur.

Antalya-Kundu bölgesinde deney için seçilen alan Şekil 18' de gösterilmiştir. Bu arazi VPT aletinin özellikle temiz kum içerisinde davranışını gözlemlemek için seçilmiştir. Yalova civarında deney için seçilen yerler İzmit Körfezinin güney sahilllerine yakın alanlardır (Şekil 19 ve Şekil 20). Bu bölgeler 1999 Kocaeli depreminden sonra civarında inceleme yapılan alanlara yakındır (Mitchell vd, 2000).

Arazi deneyleri gerçekleştirilirken VPT yapılan yerlerde karşılaştırma yapılabilmesi için mutlaka SPT ya da CPT deneylerinden biri de yapılmıştır (Şekil 21). 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



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



Şekil 18. Antalya sahil kenarında VPT deneyi için seçilen saha (arkada bir hotel inşaatı gözükmektedir)



Şekil 19. İzmit Körfezi civarı Yalova-Tavşanlı Bölgesinde VPT deneyi için seçilen saha (arkada İzmit Körfezi gözükmektedir)



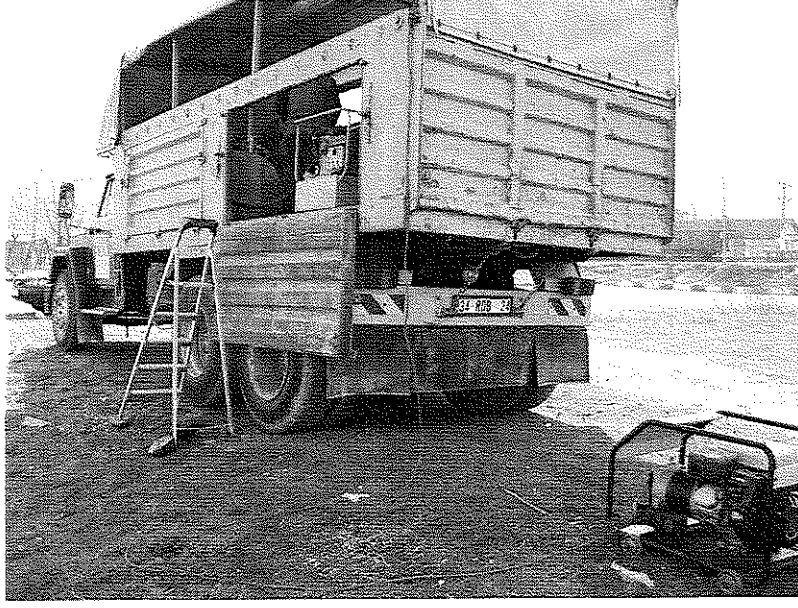
Şekil 20. İzmit Körfezi civarı Yalova-Karamürsel Bölgesinde VPT deneyi için seçilen saha (arkada İpek Kağıt Fabrikası gözükmektedir)

olarak kullanılan bir deneydir. Bununla birlikte SPT testinde gerek zemin profilinin belirlenmesinde gerekse sıvılaşma 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.

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 22a, b ve c'de gösterilmiştir. CPT ekipmanında kesit alanı 10 cm^2 'ye karşılık gelen 60° açılı konik uç kullanılmaktadır. Konik ucun üstünde yer alan sürtünme çeperi yüzeyi, 150 cm^2 '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.

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 sıvılaşabilir katmanlara sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 22d, 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 23 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.

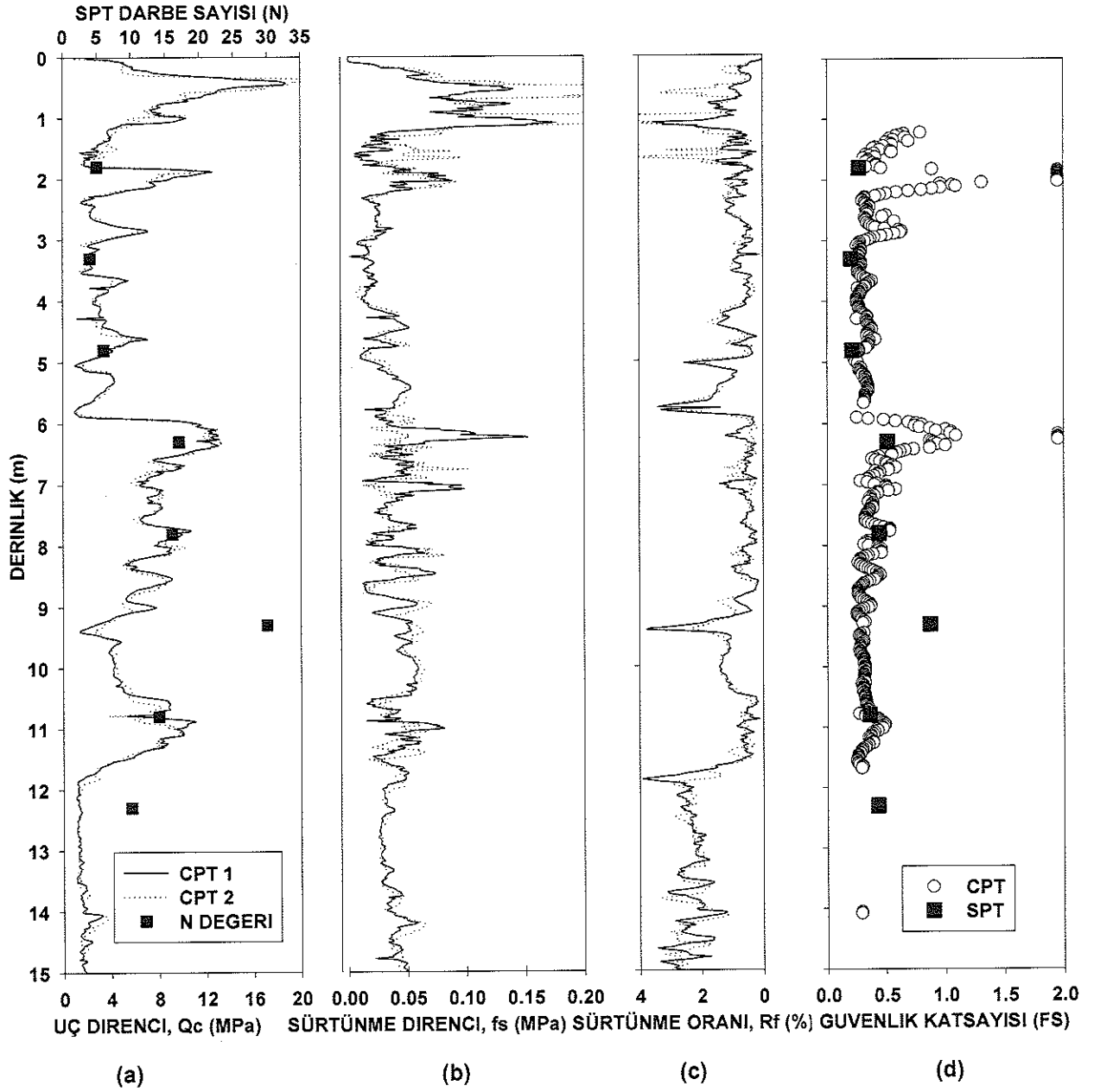


(a) Deney sahasında CPT kamyonu



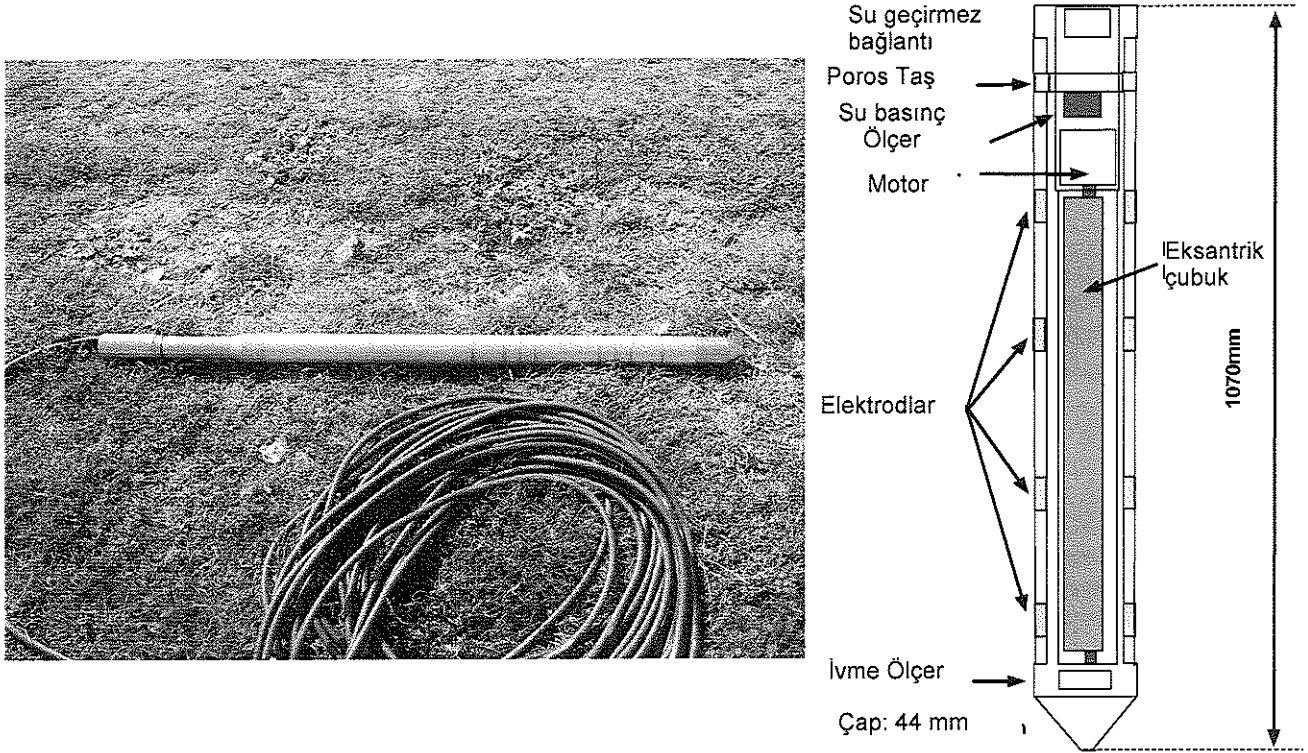
(b) Deney sahasında SPT kamyonu

Şekil 21. CPT ve SPT deney araçları



Şekil 22. Sapanca Gölü kıyısındaki test sahasında CPT and SPT test sonuçları

Şekil 24, 2004 yılında Sapanca Gölü kıyısındaki sahada gerçekleştirilen VPT deneyleri ile ilgili fotoğrafları göstermektedir. VPT deneyleri, kıyaslamalar yapabilmek amacıyla daha önceden CPT deneyinin yapıldığı sondajların hemen yanında yapılmıştır. Şekil 24a bu projede üretilen gerçek boyuttaki ilk VPT aletini göstermektedir. VPT aleti CPT kamyonunun hidrolik itirme ünitesini kullanarak zemine sokulmuştur. Şekil 24c 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 23a). 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



(a)

(b)

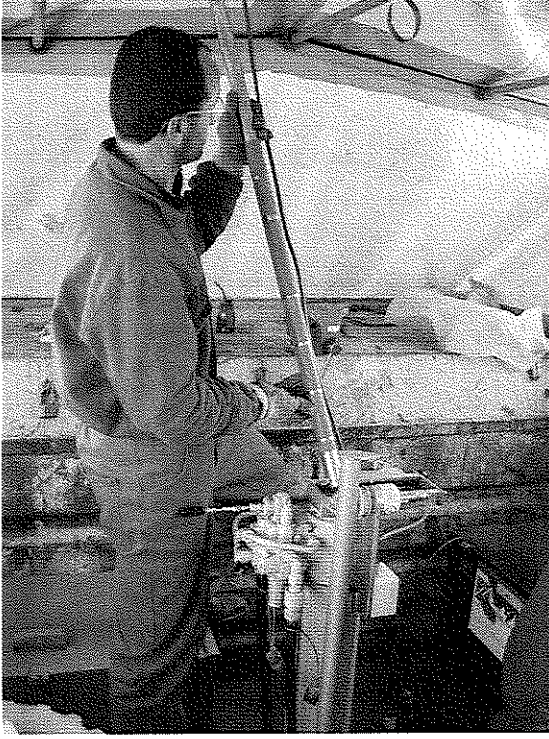
Şekil 23. (a) VPT aleti ve kablosu (b) VPT aletinin boyutları ile şematik olarak iç ve dış yapısı

üzere özel tasarlanmış bir kablodur. Ayrıca kablonun kalınlığı tijlerin iç çapına uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 24d 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 elektrodlerden tespit edilen akım ve potansiyel değerleri aletin üstünden çıkan kablolar ile ölçüm ve kayıt cihazlarına bağlanmaktadır (Şekil 24b).

Şekil 25 ve Şekil 26, 2005 yılında Sapanca Gölü kıyısındaki sahada gerçekleştirilen VPT ve SPT deneyleri ile ilgili fotoğrafları göstermektedir. Bu deneyler, kıyaslamalar 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 kullanılabileceği 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.

Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve sırasıyla Antalya-Kundu, Yalova-Tavşanlı ve Yalova-Karamürsel bölgelerinde gerçekleştirilen CPT deneyleri sonuçlarını

göstermektedir. CPT verilerinin sıvılaşma analizleri bu sahalarda sıvılaşma potansiyeli olan ve olmayan zemin katmanlarının olduğunu göstermiştir.



(a) VPT aleti hidrolik itirme ünitesine yerleştirilirken



(b) VPT testi ölçüm ekipmanları



(c) Yerleştirilen VPT aletinin arkasına itirme çubukları takılırken

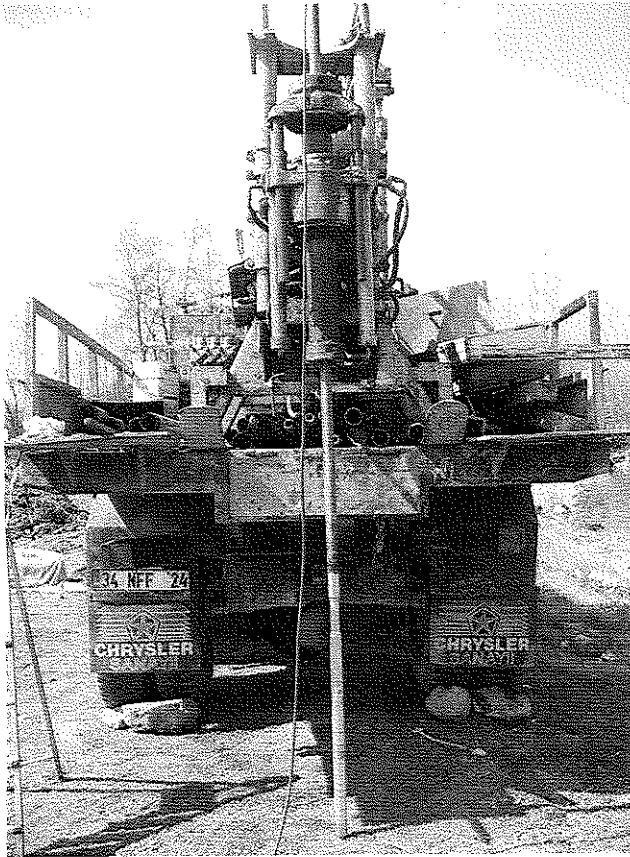


(d) VPT aleti zemine girerken

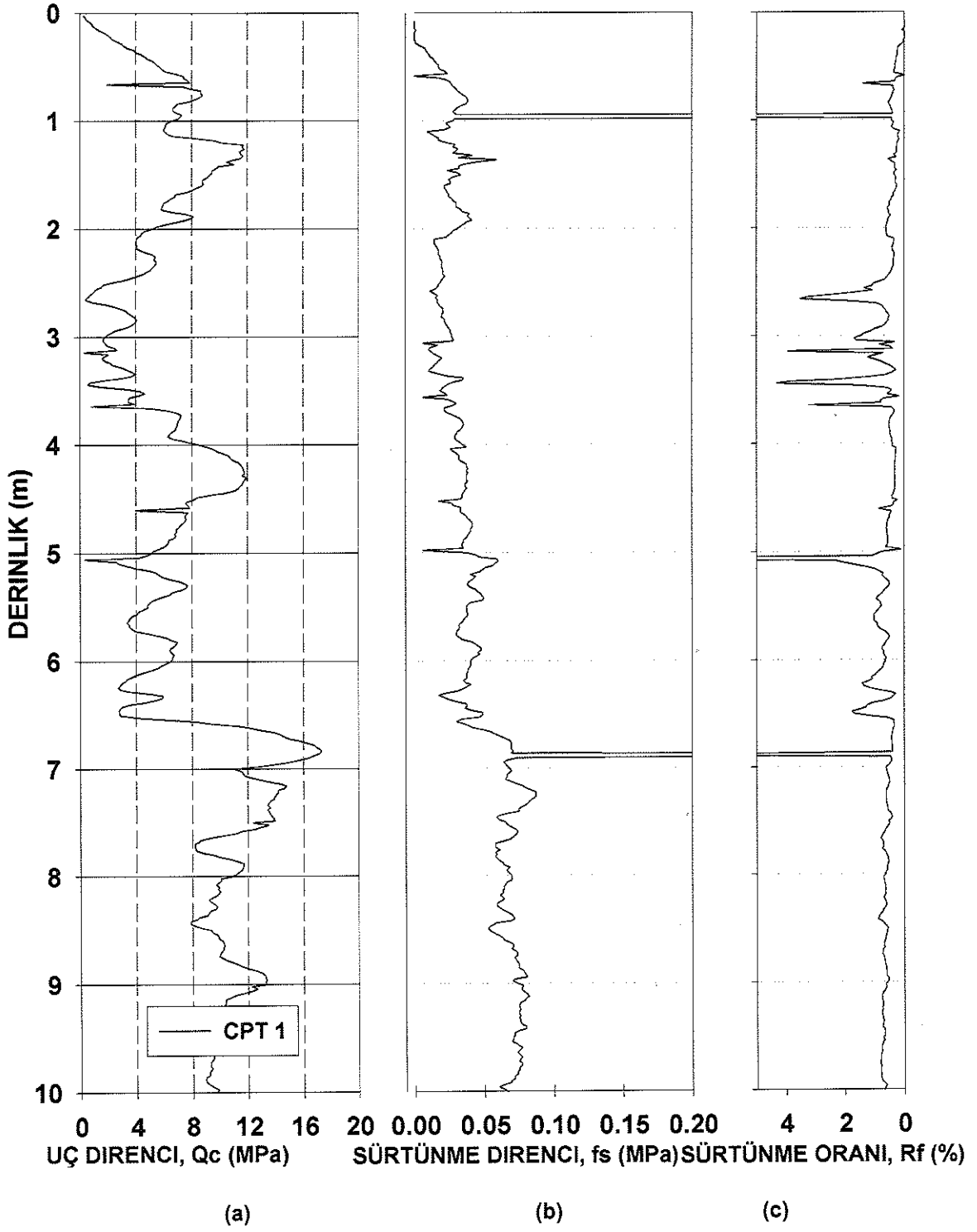
Şekil 24. Sapanca Gölü kıyısındaki sahada 2004 yılında gerçekleştirilen VPT testi



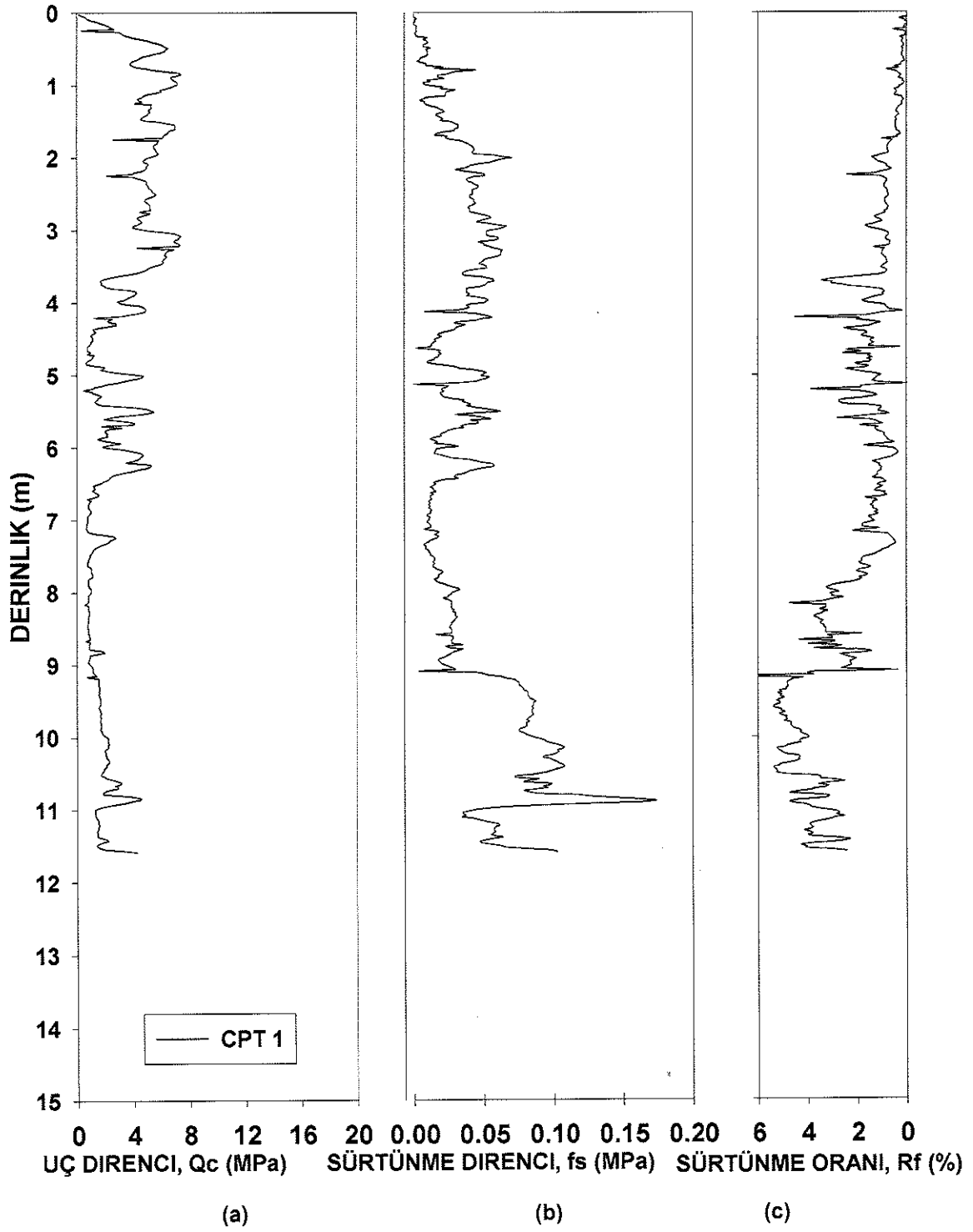
Şekil 25. Deney sahasında SPT kamyonu ve proje yürütücüsünün elinde VPT aleti



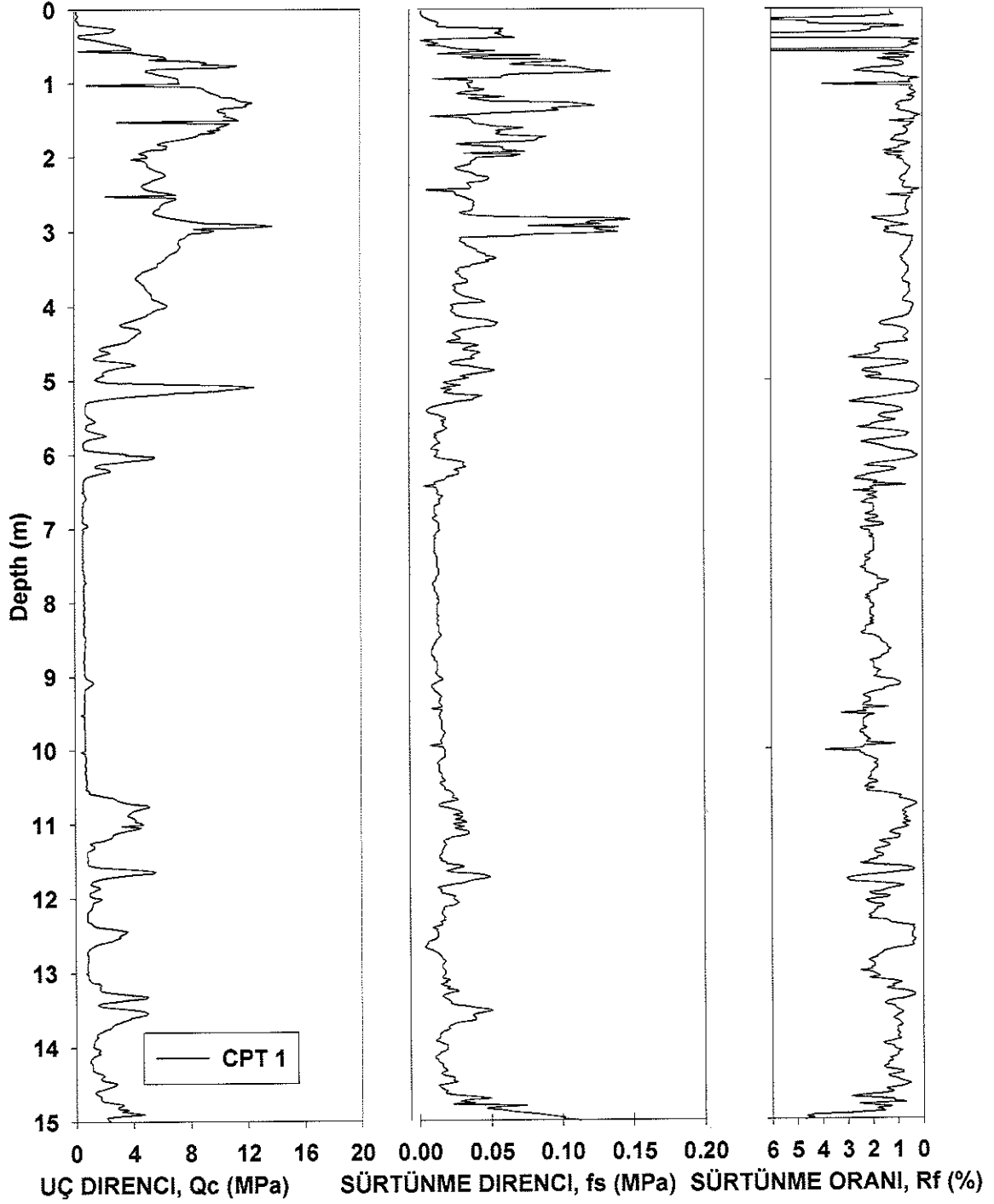
Şekil 26. VPT aleti SPT hidrolik ünitesi ile zemine ittirilirken



Şekil 27. Antalya-Kundu bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları



Şekil 28. İzmit Körfezi civarı Yalova-Tavşanlı bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları



(a)

(b)

(c)

Şekil 29. İzmit Körfezi civarı Yalova-Karamürsel bölgesindeki test sahasında CPT sonuçları

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 dakikasını titreşim esnasında ve 3 dakikasını da titreşim sonrası olmak üzere toplam 5 dakika olmuştur. VPT elektrik özdirenci ölçümleri CPT uç direnci ölçümleri ile uyum içinde çıkmıştır. Şekil 30a 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 kullanılabilir 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.

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

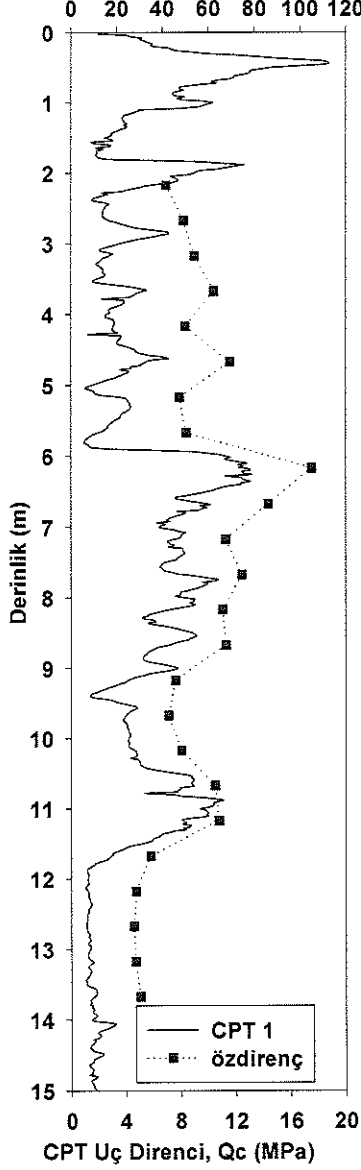
burada

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

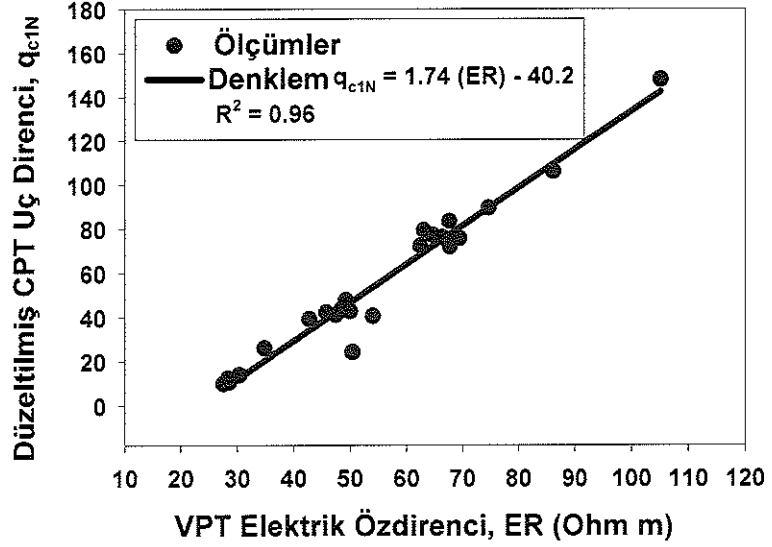
ve burada C_Q = konik penetrasyon direncini normalize etmek için faktör; $P_a = 1$ atm basınca karşılık gelen değer, efektif düşey gerilmeyle (σ'_{vo}) aynı birimden değeri; n = zemin türüne göre değişen üst değeri; ve q_c = arazide ölçülen uç direnç değeri olmaktadır. Düşük derinliklerde C_Q , düşük 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 3b 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 3b'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 artırma 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)



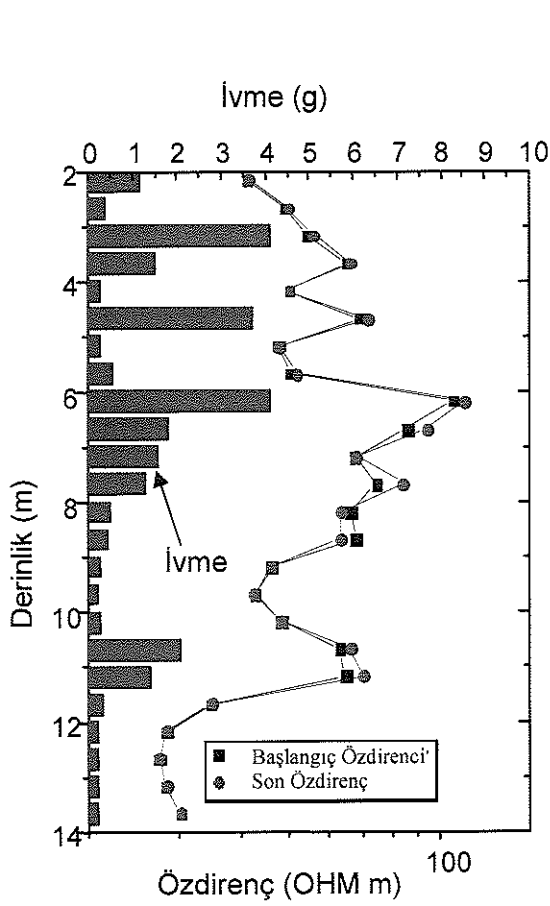
(a) VPT ile ölçülen başlangıç elektrik özdirençleri



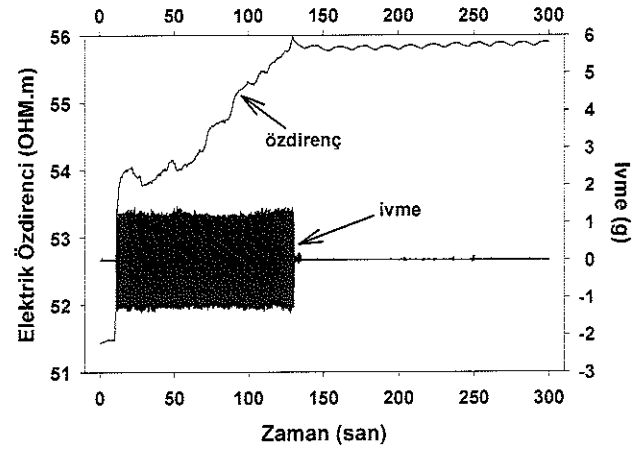
(b) Düzeltilmiş ve normalize edilmiş CPT uç direnci ile VPT elektrik özdirenci arasındaki ilişki

Şekil 30. VPT elektrik özdirenç ölçümleri ve CPT uç dirençleri ile kıyaslanması

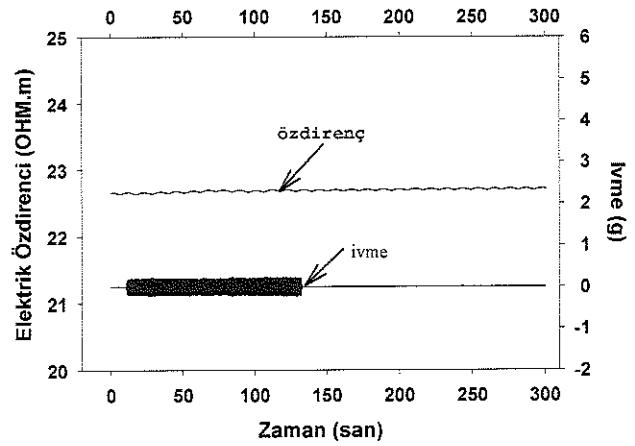
Şekil 31a VPT ölçümlerinin derinlikle değişimini göstermektedir. Daha önce bahsedildiği gibi her deney esnasında elektrik özdirenci ve ivme zamana karşı kaydedilmektedir. Şekil 31b ve Şekil 31c, 11.2 ve 12.2 m derinlik için bu şekilde kaydedilmiş değerleri göstermektedir. Alınan SPT örnekleri üzerinde 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 31. 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 Jinguuj, 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 değışimi de gerçekleşmemiştir.

VPT sonuçlarının değışik zemin katmanlarında değışimi yakından incelendiğinde, ivme ve elektrik özdirenci değışimlerinin 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

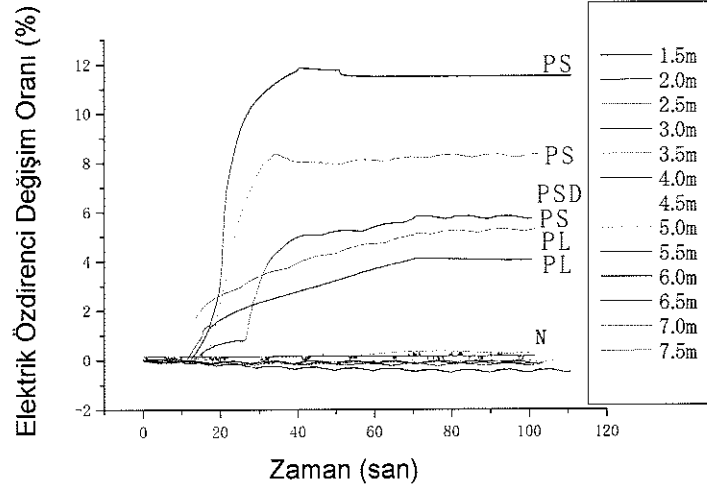
oranı olarak tanımlanmakta ve genellikle ince tane oranına ve zemin plastisitesine bağlı olarak artmaktadır. Bu sebeple kabaca zemin türünü ve ince dane oranını tespit amacıyla kullanılabilir. Daha önce uç direnci kıyaslamasında kullanıldığı gibi, her VPT ölçüm derinliği için 10 cm aralığa karşılık gelecek şekilde ortalama sürtünme oranları hesaplanmıştır. VPT ve sürtünme oranları arasında doğrudan bire bir orantı kurulmasa 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 31b'dekine benzer davranış sergilerken, bu değer üstünde sürtünme oranı gösteren zeminler eğilim açısından Şekil 31c'dekine benzer davranış sergilemektedir. Kıyaslama açısından 11.2 ve 12.2 m'deki zeminlerde sürtünme oranı değerleri sırasıyla 0.6 ve 2.6'dır.

Şekil 32 Antalya Kundu bölgesindeki VPT deney sonuçlarını göstermektedir. Şekil 32a'da farklı derinliklerde hesaplanan elektrik özdirenci değişim oranları verilmiştir. Bu oran VPT aleti ile aynı derinlikte ölçülen son ve ilk elektrik özdirenci farkının ilk elektrik özdirenci değerine bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Farklı derinliklerdeki oranlar zamana göre çizildiğinde grafiklerin değişik karakteristik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 32a detaylı olarak incelendiğinde genel olarak 4 farklı durum gözlemlenmiştir. Bunlar elektrik özdirenci değişim oranının kısa zamanda arttığı durum (PS), elektrik özdirenci değişim oranının uzun bir zamanda arttığı durum (PL), elektrik özdirenci değişim oranının hızla arttığı ama bu artışın deney başlangıcına göre bir süre geciktiği durum (PSD) ve elektrik özdirenci değişim oranının azaldığı durumdur. Değişik derinliklerde zeminlere karşılık gelen bu durumlar Şekil 32b'de CPT verileri ile birlikte gösterilmiştir.

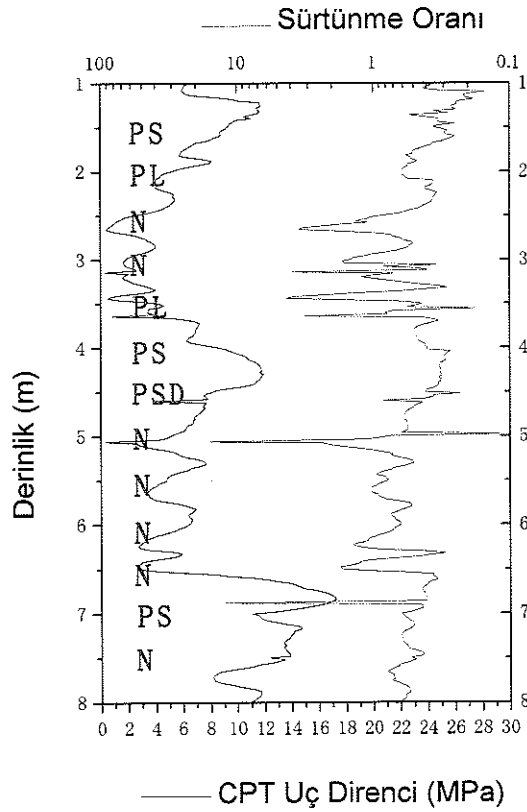
Gösterildiği gibi elektrik özdirenci değişik zeminlerin dinamik davranışını yakalayabilmektedir. Fakat VPT deneyinde elektrik özdirenci yanında diğer sensörler yardımı ile boşluk suyu basıncı ve ivme gibi değerler de ölçülmektedir. Şekil 33 a ve b, 3 ve 3.5 metre derinlikte ölçülen boşluk suyu basıncı artışını ve ivme'yi göstermektedir. İki derinlikte birbirinden çok farklı davranış gözlemlenmiştir. VPT aletiyle 3 ve 3.5 m'de ölçülen maksimum ivme değerleri sırasıyla 0.1 g ve 5g civarında gerçekleşmiştir. Bu derinliklerde boşluk suyu artışı da farklı gerçekleşmiştir.

VPT aletine uygulanan voltaj değerinin sınırlama ve ölçülen elektrik özdirenci sonuçlarını nasıl etkilediği de bu çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. 24 V uyguladığımızda sınırlama davranışının gözüktüğü farklı derinliklerin bazıları 20 V uyguladığımızda aynı sonucu vermemiştir. Mesela Antalya Kundu bölgesinde 20 V ile yaptığımız VPT deneylerinde yalnızca 1.5 ve 3.5 m derinlikte elektrik özdirenci değişimi gözlemlenmiştir. Bu gözlem bize ileride yapacağımız çalışmalarda, VPT aletine uygulayacağımız voltaj değerlerinin de sınırlama değerlendirilmesinde hızlı bir yaklaşım olarak kullanabilme imkanını göstermiştir.

Arazi deneylerinde aletin dış etkilere karşı fiziksel yönden güçlendirilmesi gerektiği sonucu da ortaya çıkmıştır. Bazı deneylerde elektrik özdirencini ölçmede kullanılan elektrodun VPT yüzeyinde sıyrıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 34a). Bazı deneylerde ise VPT'nin itirriş yönünde sapmalardan dolayı aletin eğilme momentlerine maruz kalması sonucunda alet fonksiyonlarını kaybetmiştir (Şekil 34b).

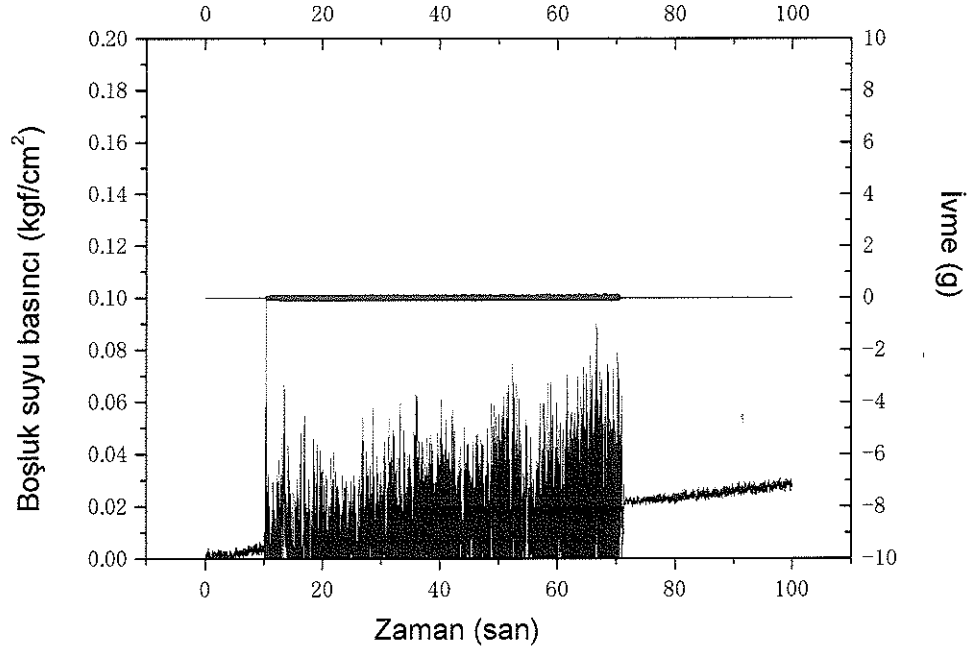


(a)

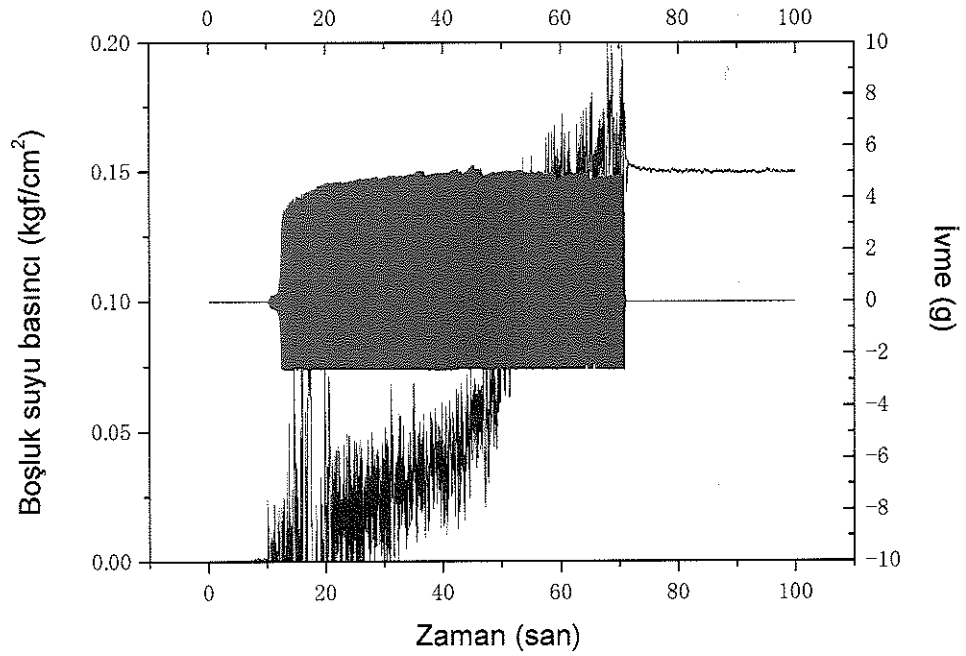


(b)

Şekil 32. Antalya-Kundu bölgesindeki VPT deneylerinde elektrik özdirenci değişim oranları ve CPT ile karşılaştırılması (Jinguuji vd., 2006)



(a) At 3.0m depth

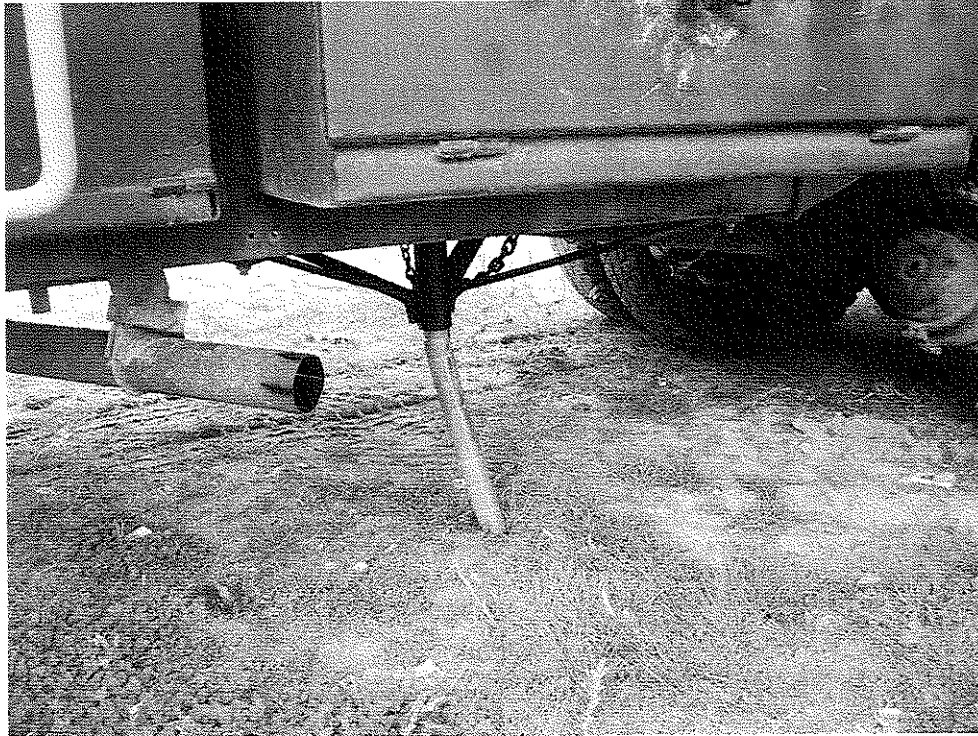


(b) At 3.5 m depth

Şekil 33. Relationship between pore pressure increase and acceleration at different depths (Jinguiji vd., 2006)



(a) Elektrod sıyılması



(b) VPT aletinin eğilerek kırılması

Şekil 34. VPT deneyleri esnasında oluşan problemlere örnekler

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, Antalya'da ve İzmit Körfezi civarında Yalova'da 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. 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-ışınli aletlerden, 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 sivilleşme 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., 11th 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 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.

Mitchell, J. K., Martin, J. R., Olgun, C. G., Emrem, C., Durgunoglu, H. T., Cetin, K. O., Karadayilar, T. (2000), Performance of Improved Ground and Earth Structures, Chapter 9, Kocaeli, Turkey, Earthquake of August 17, 1999 Reconnaissance Report, Earthquake Spectra, Supplement A to Volume 16, pp. 191-225.

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.

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



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

S. Toprak¹ and M. Jinguuji²

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.

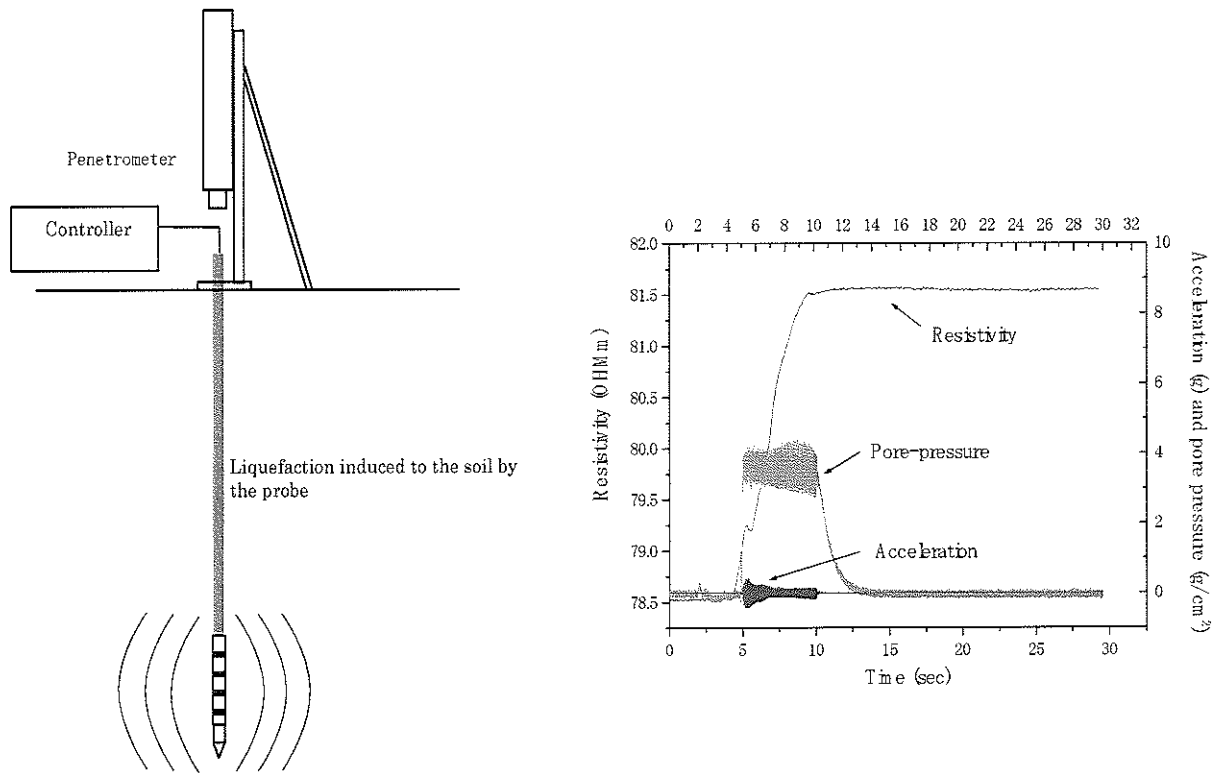
Electrical Resistivity Vibration Probe Penetration Test (ER-VPT)

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

¹Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Pamukkale University, Denizli, Turkey 20070

²National 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° cone, with a cross-sectional area of 10 cm^2 . The friction sleeve, located above the tip, has an area of 150 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

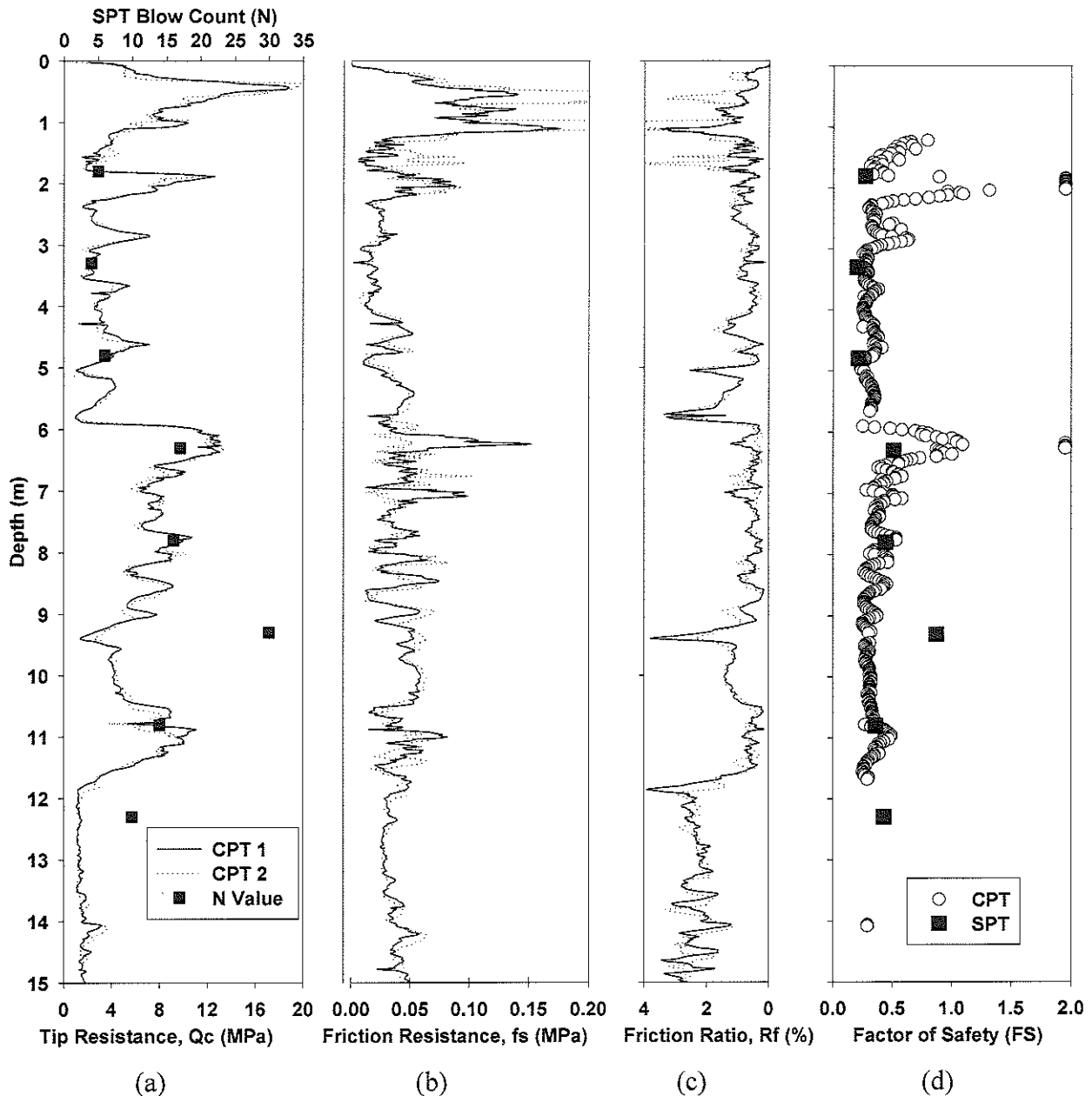
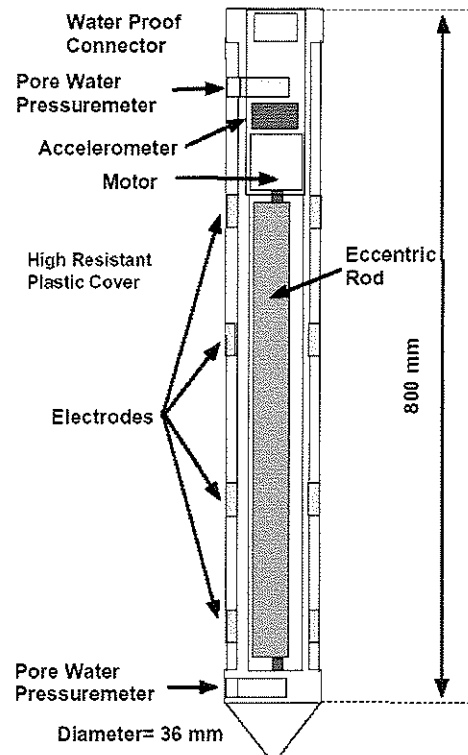


Figure 2. The CPT and SPT test results at the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

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



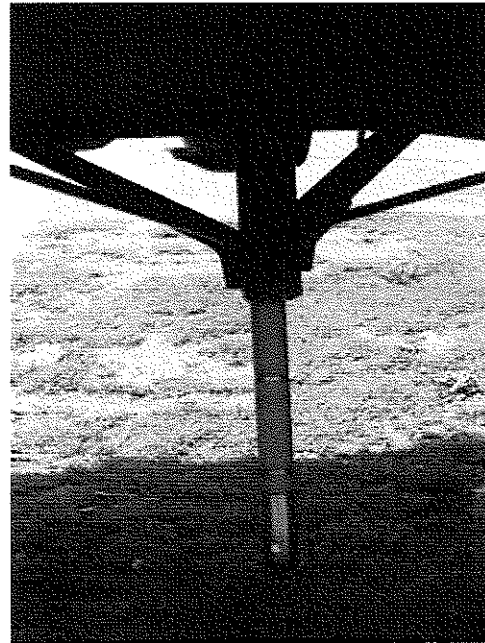
a) Placing ER-VPT tool into hydraulic-push unit



b) Schematic view and dimensions

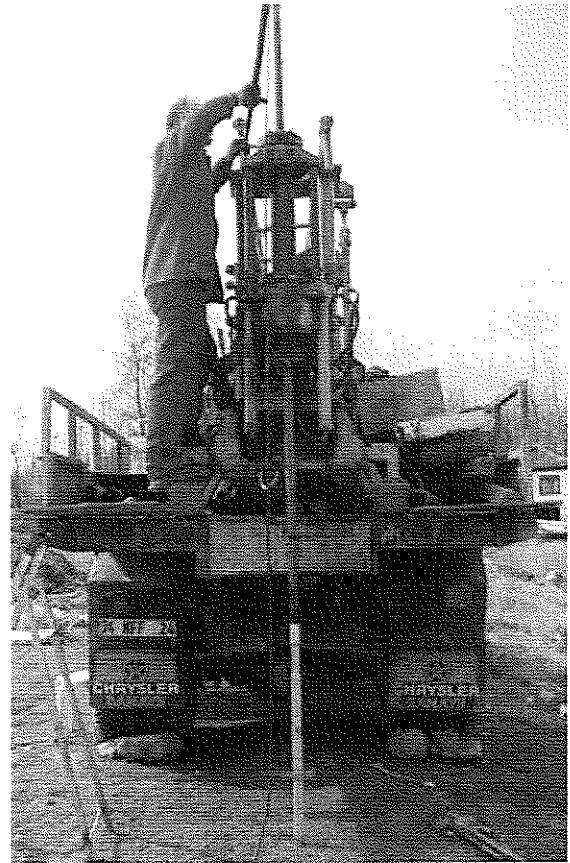
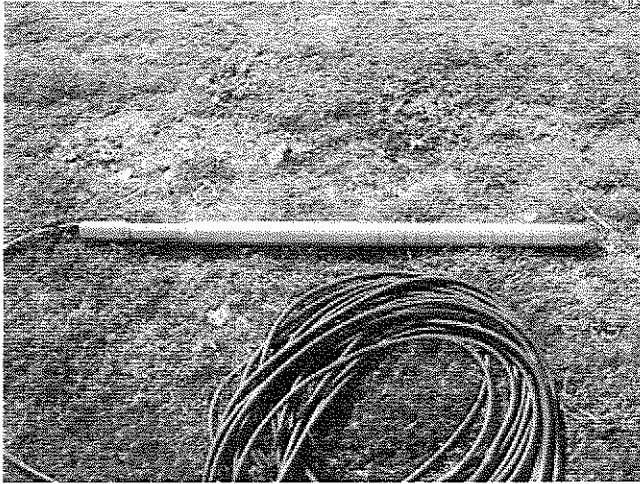


c) Connecting thrust rods to ER-VPT tool



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

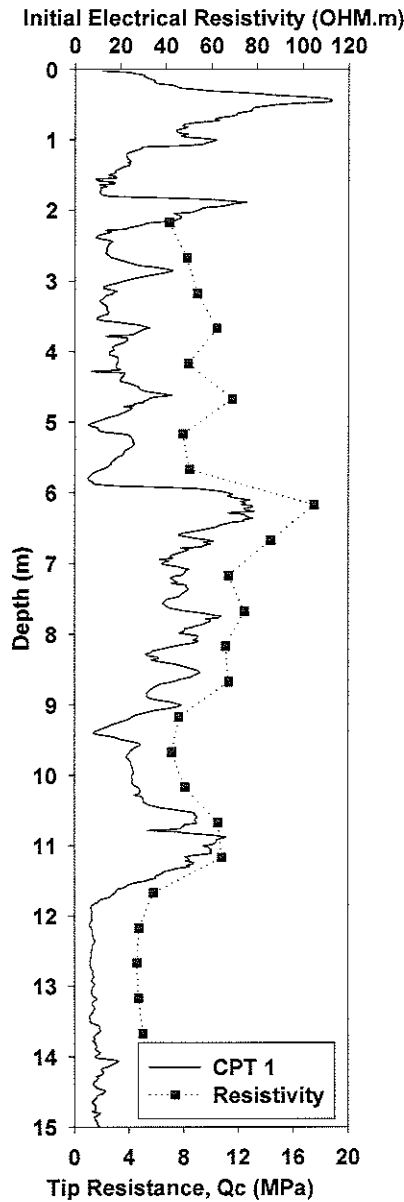
b) ER-VPT instrument pushed into the ground

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

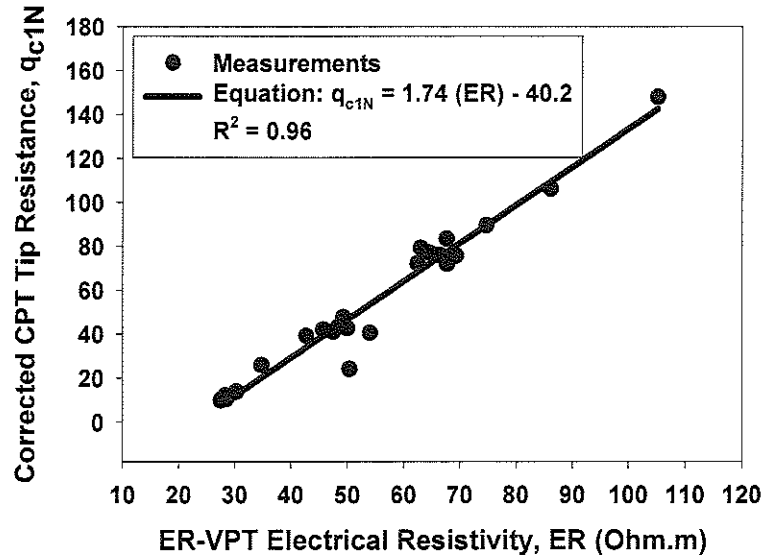
vibration would be better (5) some improvements were needed for the measuring system. In response to these observations, some modifications were made to ER-VPT equipment. One significant change was that the diameter of the VPT was increased from 36 mm to 44 mm in order to increase the vibration power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

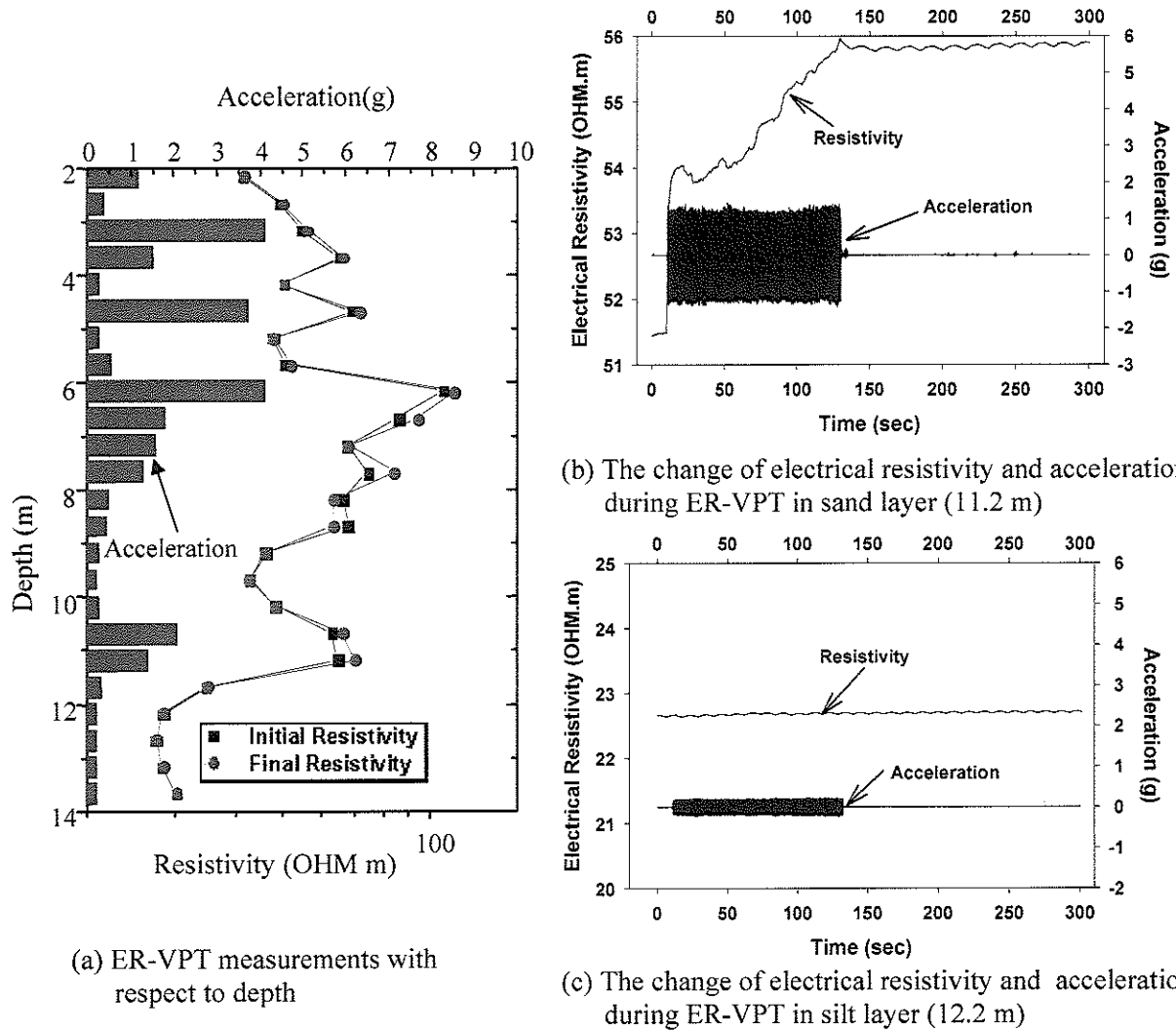


Figure 6. The ER-VPT field test results in the shore of Lake Sapanca, Adapazari in Turkey.

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.

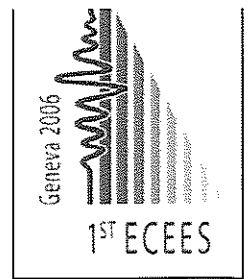
Acknowledgments

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.

EK2: 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 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006



DEVELOPMENT OF VIBRATION PENETRATION TEST (VPT) AND RESULTS OF LABORATORY AND FIELD EXPERIMENTS

Motoharu JINGUUI¹, Selcuk TOPRAK² and Yoshito NAKASHIMA¹

SUMMARY

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. We propose a new method, vibration probe penetration test (VPT), which utilizes a vibration probe, accelerometer, pore-pressure meter and electrical resistivity measurement, to determine the liquefiable soils. The 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 directly dynamic response of soils for liquefaction. We did laboratory experiments using small VPT and vessel. From the laboratory test, we confirmed remarkably electrical resistivity change and the pore-pressure increase during induced vibration. The pore-pressure increases up to the overburden pressure and it indicates the sand is liquefied during vibration. The accelerometer attached to the inside surface of the probe shows significant change during vibration and it may show the response of the change of stiffness and solidness of sand around the probe. To confirm the effectiveness of this method and to verify the results, we made real size VPT probes and did penetration tests in the field. 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 field experiments using the VPT probe produced encouraging results. Using the acceleration and electrical resistivity change in the soil, the VPT detected response of different type of soils. The results showed that VPT may have some additional merit in some kind of soils such as sands with high contents of silts. VPT can also be used to evaluate ground improvement against liquefaction by comparing the test results measured before and after the treatment.

1. INTRODUCTION

The estimation of liquefaction potential of soils is 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 were 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, vibration probe penetration test (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

¹ 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
Email : m.jinguuji@aist.go.jp

² Civil Engineering Department, Pamukkale University, Denizli, Turkey
Email: stoprak@pau.edu.tr

and vibration is applied at the investigated depth, and changes of soil property such as its electrical resistivity in addition to pore water pressure is measured in situ. Jinguuji et al. (2001, 2003) 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 VPT results measured before and after the treatment.

To confirm the effectiveness of this technique, several experiments in laboratory and field were performed. Jinguuji and Toprak (2004, 2005) and Toprak and Jinguuji (2006) presented the results from initial laboratory tests in Japan and field tests in Turkey. First VPT field tests were conducted around Sapanca Lake in Turkey and the VPT results were compared with SPT and CPT results (Toprak and Jinguuji, 2006). The VPT results were very encouraging. Subsequently, additional field tests were performed in Antalya, Turkey with the purpose of evaluating the VPT in different geological and geotechnical conditions. Also to determine the affected zone of VPT probe, X-ray image of the soil sample were taken using X-ray CT scanner using small VPT and chamber in the laboratory experiments. The results of these recent field and laboratory experiments are presented herein.

2. SUMMARY OF VIBRATION PENETRATION TEST (VPT)

Fig.1 shows schematic view of VPT test. 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 et. al, 2001; 2003). Vibration can be controlled by voltage supply. Fig.2 shows the structure of the vibration probe developed in this study. Inside of the probe, vibration apparatus that consist of a motor and eccentric rod is installed to make vibration. At the top or down of the probe, pore-pressure meters and accelerometer are installed to monitor change of pore-pressure and acceleration of probe during the test.

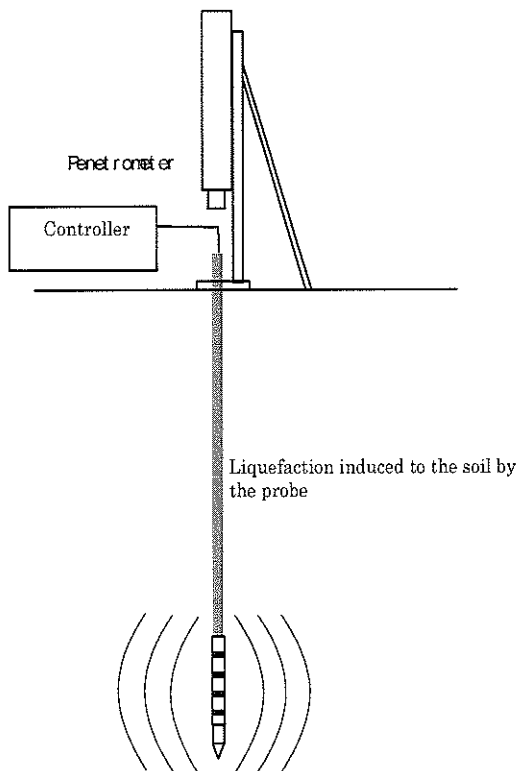


Figure 1: Schematic view of vibration probe penetration test (VPT)

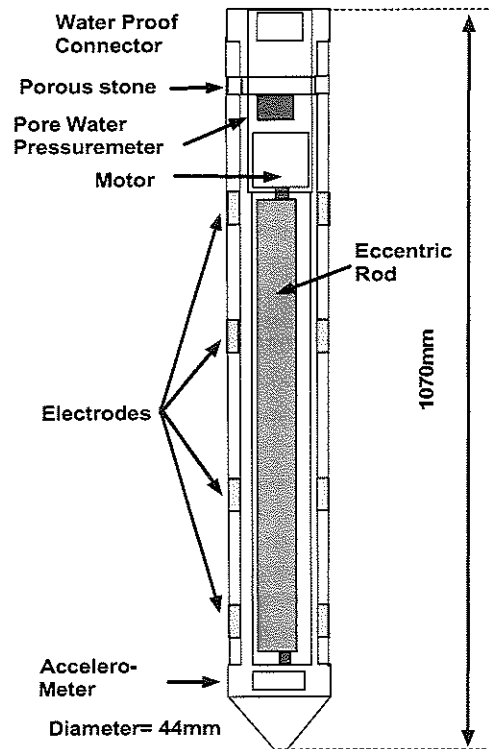


Figure 2: An example of the structure of vibration probe

and vibration is applied at the investigated depth, and changes of soil property such as its electrical resistivity in addition to pore water pressure is measured in situ. Jinguuji et al. (2001, 2003) 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 VPT results measured before and after the treatment.

To confirm the effectiveness of this technique, several experiments in laboratory and field were performed. Jinguuji and Toprak (2004, 2005) and Toprak and Jinguuji (2006) presented the results from initial laboratory tests in Japan and field tests in Turkey. First VPT field tests were conducted around Sapanca Lake in Turkey and the VPT results were compared with SPT and CPT results (Toprak and Jinguuji, 2006). The VPT results were very encouraging. Subsequently, additional field tests were performed in Antalya, Turkey with the purpose of evaluating the VPT in different geological and geotechnical conditions. Also to determine the affected zone of VPT probe, X-ray image of the soil sample were taken using X-ray CT scanner using small VPT and chamber in the laboratory experiments. The results of these recent field and laboratory experiments are presented herein.

2. SUMMARY OF VIBRATION PENETRATION TEST (VPT)

Fig.1 shows schematic view of VPT test. 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 et. al, 2001; 2003). Vibration can be controlled by voltage supply. Fig.2 shows the structure of the vibration probe developed in this study. Inside of the probe, vibration apparatus that consist of a motor and eccentric rod is installed to make vibration. At the top or down of the probe, pore-pressure meters and accelerometer are installed to monitor change of pore-pressure and acceleration of probe during the test.

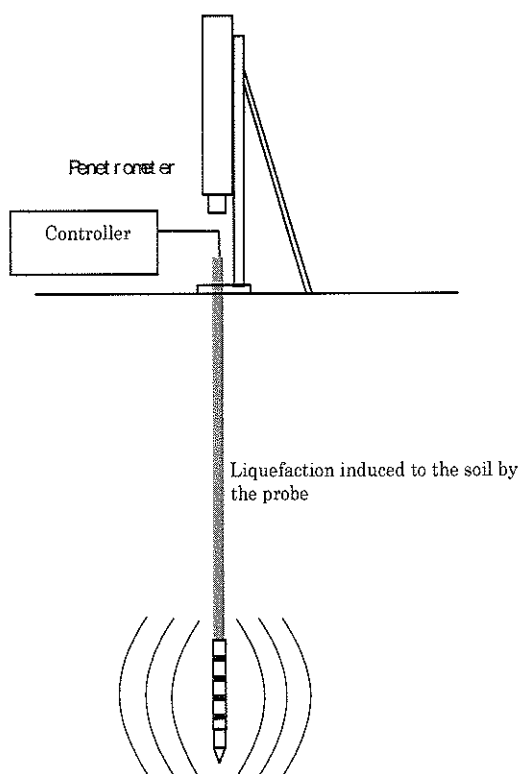


Figure 1: Schematic view of vibration probe penetration test (VPT)

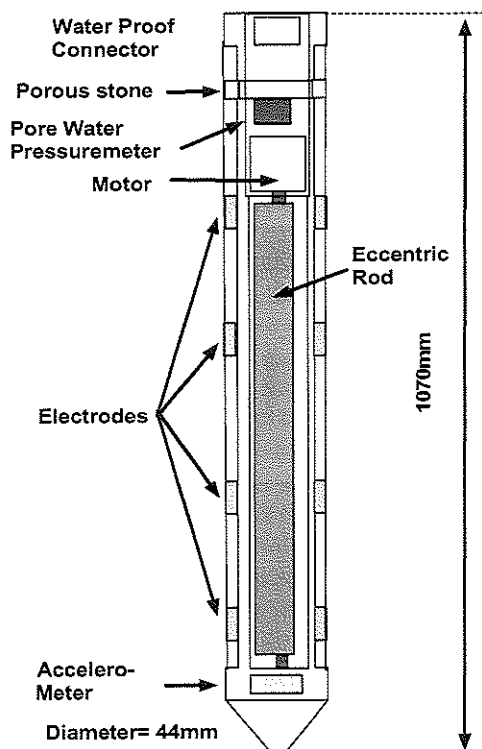


Figure 2: An example of the structure of vibration probe

3. FUNDAMENTAL LABORATORY EXPERIMENTS OF VPT

VPT probe equipped with sensors shows dynamic response of liquefiable soil during liquefaction. Laboratory experiments were performed to evaluate typical response of liquefiable soil. Laboratory experiments of this research involved using a small chamber and a small VPT. As for the size of the vessel, the width is 15cm, length is 60cm and height is 30cm. The height of sand in the chamber was about 20cm. The sand for the sample used in this experiment was Toyoura sand. 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 to the motor is induced. When voltage was induced to the motor, the electrical resistivity and pore-pressure in the soil 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 electrical resistivity and acceleration shifted slightly in the figure.

Fig. 3 shows that when the vibration starts, the pore-pressure increases up to the overburden pressure indicating the soil is liquefied. The boiling of water on the surface and subsidence around the probe were observed. The electrical resistivity around the probe increases during liquefaction. Although the same voltage 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 the first small experiment, we could confirm the remarkable change of the acceleration and electrical resistivity during liquefaction. Increase of electrical resistivity means soil density increase from Archie's law (Archie, 1942). Increase of electrical resistivity clearly shows soil density increase, however, the distribution of density increase in the affected soil volume with vibration is important to understand the responses of VPT sensors. To confirm and evaluate the affected soil volume with the vibration, we took X-ray image of the soil sample using X-ray CT scanner. X-ray CT scanner is commonly used in medical field to determine the conditions of human body and existing illness. As for the soil or sedimentary rock, the linear absorption coefficient of X-ray reflects the density of soil like the electrical resistivity do. If porosity or density of soil changes by liquefaction, the linear absorption coefficient of X-ray changes and the difference can be seen on the images taken before and after liquefaction.

The chamber used for the experiment in the X-ray CT scanner is the modified one of that used in the first experiment. Photo in Fig. 4 shows the X-ray CT machine and chamber used for the laboratory experiment. The sand sample was made by boiling process on the bed of CT machine. The voltage was controlled by DC supplier. The sand used for this experiment is Keisa No.4 and the estimated relative density of the soil sample is almost 30 %. Fig. 5 shows a X-ray differential image between before and after liquefaction. The vibration continued one minute and image is obtained by subtracting before value from after value. So, the image shows density difference between before and after liquefaction.

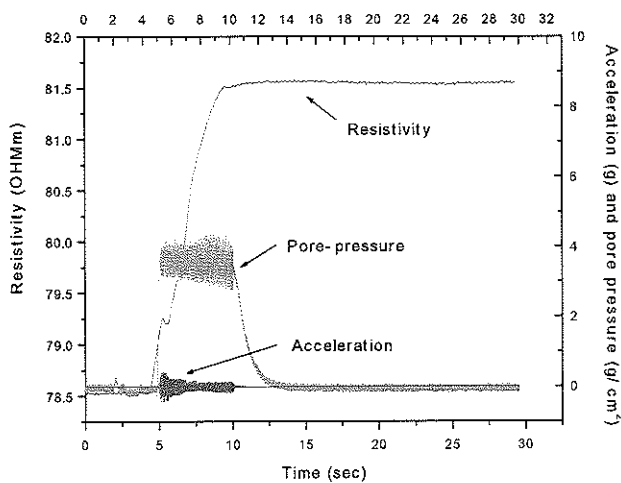


Figure 3: The result of VPT in laboratory test

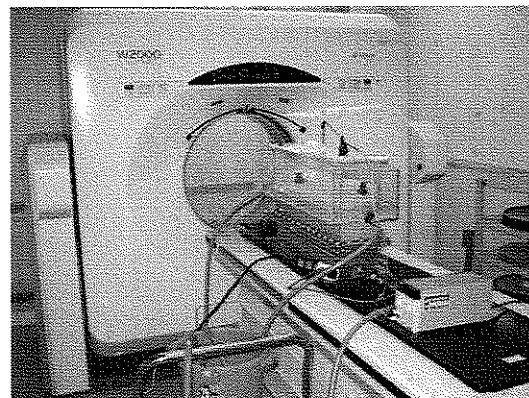


Figure 4: Photo of X-ray CT machine and chamber used for the experiment

The dark black zone shows subsidence of sand sample and bright orange shows increase of density. The pattern of the density increase zone is like an inverted triangle. One of the reasons of the observed pattern is that the vibrator is attached on the top of probe as opposed to inside of the probe like the real size VPT. This figure indicates that the increase of density is widespread around the probe.

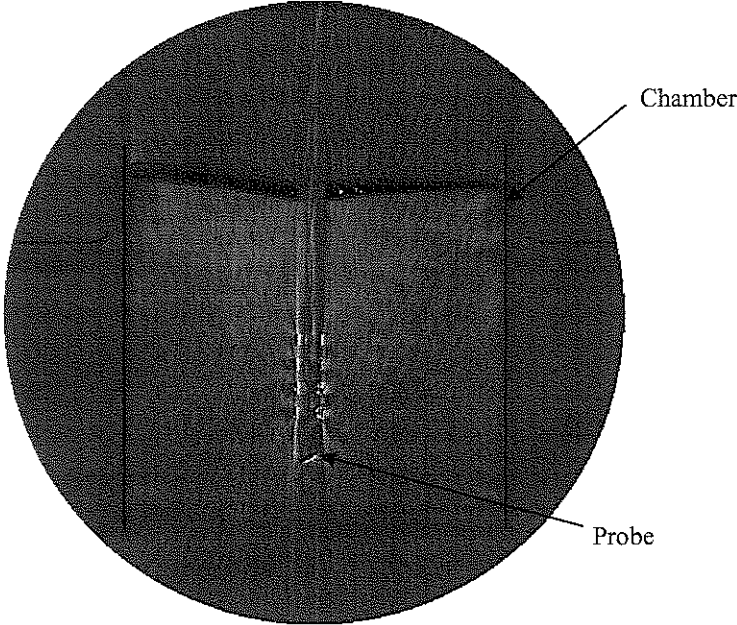


Figure 5: X-ray differential image between before and after liquefaction

The X-ray CT experiment shows significant change of density; however, the relationship between motor vibration and density increase rate is important to estimate and understand the liquefaction phenomena. So, we did an experiment to find relationship between the induced voltage and maximum acceleration during vibration, and also check the relationship between the maximum acceleration and electrical resistivity. Fig. 6 shows the relationship between induced voltage and maximum acceleration and Fig. 7 shows the relationship between maximum acceleration and electrical resistivity change rate.

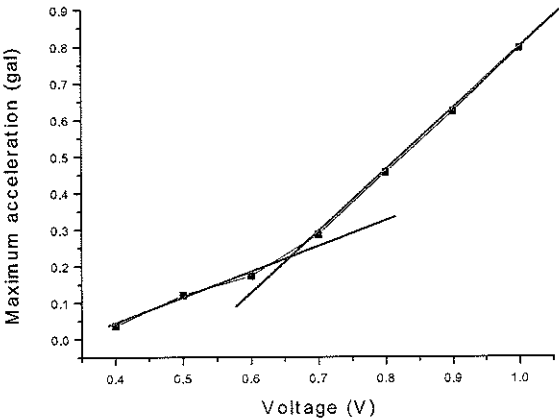


Figure 6: The relationship between induced voltage and maximum acceleration

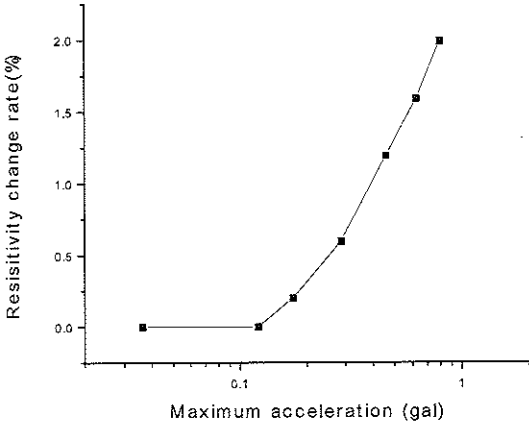


Figure 7: The relationship between maximum acceleration and resistivity change rate

Fig. 7 shows that about 0.15 gal (150 cm/sec²) is a break point for the increase of electrical resistivity change rate. And the induced voltage of 0.6V is the break point from Fig. 6. Also, the gradient of maximum acceleration to induced voltage changes about this point. This result suggests that the state of sand may change around this break point.

4. FIELD EXPERIMENTS IN ANTALYA, TURKEY

To confirm the effectiveness of the VPT method, we did field experiments in Antalya, Turkey. The experiment place is located near the sand beach of Mediterranean Sea. The soil properties at the site were characterized using CPT tests as shown in Fig. 8. Analysis of the CPT results according to Youd, et al. (2001) indicated that this site has some liquefiable soil layers. In the place, we carried out VPT that induce liquefaction using vibration by installed vibrator inside of the VPT probe. The voltage induced to the probe was 24 V and vibrations were applied at every 50cm, up to the depth of 7.5m. Fig. 9 shows the result of electrical resistivity change rate of VPT tests performed in Antalya. The electrical resistivity change rate at several depths shows characteristic patterns. In Fig. 9, we classified seven characteristic pattern as PS (Positive resistivity change in short time), PL (Positive resistivity change in long time), PSD (Positive resistivity change in short time but starting time is delayed) and N (Negative change of resistivity). These classifications are also shown in Fig. 8. Comparisons of the electrical resistivity pattern and friction ratio in Fig. 7 show good correlation. Especially, N (Negative change of resistivity) distributes around depths where friction ratio is over about 1. PSD (Positive resistivity change in short time but starting time is delayed) distributes around depths where tip resistance is relatively high. PL (Positive resistivity change in long time) distributes around depths where friction ratio is relatively high. These electrical resistivity change ratio pattern may reflects permeability of sand and liquefaction resistance of soil. As for the different power to VPT probe, when we induced 20V to VPT probe, we observed electrical resistivity change at the depths of 1.5m and 3.5m. This result shows a possibility of breakpoint analysis in future.

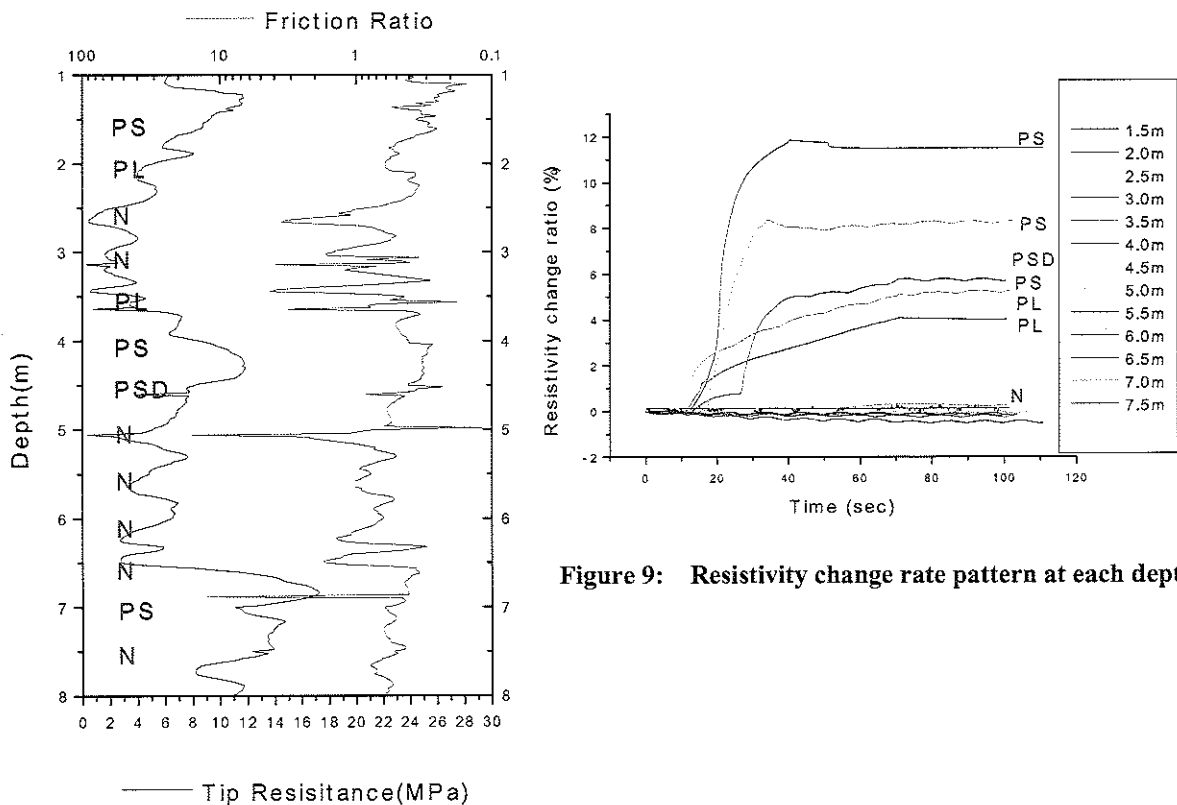


Figure 9: Resistivity change rate pattern at each depth

Figure 8: CPT analyses in seaside of Antalya, Turkey

We confirm the electrical resistivity change clearly at several depths from these VPT results. However, VPT has other sensors like pore water pressure meter and accelerometer. Fig.10 and Fig.11 show relationship between pore water pressure increase and acceleration at 3.0m and 3.5m, respectively.

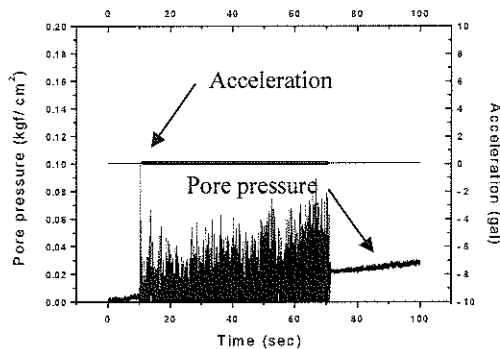


Figure 10: Relationship between pore pressure increase and acceleration at 3.0m depth

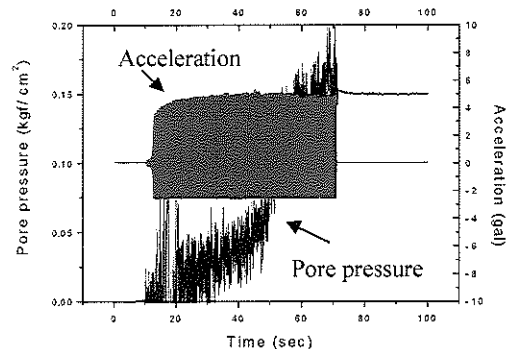


Figure 11: Relationship between pore pressure increase and acceleration at 3.5m depth.

The differences of response of the VPT sensors between the depth of 3.0m and 3.5m are very clear. The maximum of acceleration during VPT at 3.0m and 3.5m are 0.12 gal and 5.25 gal, respectively. The big difference of acceleration of VPT probe may reflect the confinement of the probe by soil. Also, pore pressure at 3.5m reaches almost 60% of over burden pressure (Water level is assumed at 1m depth).

5. CONCLUSION

We propose a new method, vibration probe penetration test (VPT) in this paper. The method uses a vibration probe with electrical resistivity, acceleration and pore water pressure sensors to determine the liquefiable soils. To confirm effectiveness of the method, we did experiments in laboratory using small VPT and conducted field tests in the seaside of Antalya, Turkey. As a result, we get significant electrical resistivity change and patterns that may reflect soil properties like permeability of sand and liquefaction resistance of soil. According to the acceleration and pore pressure measurement of the probe, we can confirm that liquefaction occurs and the acceleration and pore pressure increase like they did in the laboratory tests.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

The work reported in this paper was sponsored by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK) 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.

7. REFERENCES

- Archie, G. E. (1942), The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. A.I.M.E. Transactions 1942; 146: 54-62.
- Jinguuji, M., Kunimatsu, S., Izumi, H., and 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., 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 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. and Holzer, T. L. (2003), "Liquefaction Potential Index: Field Assessment", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129 (4), 315-322.
- 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.

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Kodu: 106M153
Proje Başlığı: SIVILAŞMA TAHMİNİNDE YENİ TEKNOLOJİ VE YÖNTEMLER
Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: YARD. DOÇ. DR. SELÇUK TOPRAK DR. MOTOHARU JINGUUJI
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ, KINIKLI KAMPÜS, DENİZLİ 20070
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED SCIENCE AND TECHNOLOGY (AIST), TSUKUBA, IBARAKI 305-8569 JAPAN
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.06.2006 01.12.2006
Öz <p>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 sivilaşma 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 sivilaşma 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, Antalya'da ve Izmit Körfezi civarında Yalova'da 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 sivilaşma tespitinde kullanılabilecek bir yöntem olarak umut verici olduğunu göstermektedir. Ancak yöntemdeki parametrelerin değişkenliğinin belirlenmesi amacıyla gerçek boyutta VPT aletiyle laboratuvar deneylerinin yapılması faydalı olacaktır.</p>
Anahtar Kelimeler: CPT, DEPREM, SIVILAŞMA, SPT, ZEMİN DİNAMİK DAVRANIŞI, YENİ TEKNOLOJİLER, VPT
Projeden Kaynaklanan Yayınlar: <ol style="list-style-type: none">1. 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 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC) Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.2. 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, 100th Anniversary Earthquake Conference, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA

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