

# ПРОЦЕНА ОПАСНОСТИ ОД ЛИКВЕФАКЦИЈЕ АНАЛИЗОМ IN SITU CPT ОПИТА И ИНДЕКСНИХ ПОКАЗАТЕЉА ТЛА

мр Душан Берисављевић, дипл.инж.геол.  
dusan.berisavljevic@institut ims.rs

др Ненад Шушић, дипл.грађ.инж.  
nenad.susic@institutims.rs

Институт за испитивање материјала, В. Мишића 43,  
Београд,

Стручни рад

**Резиме:** Процена сеизмичког понашања засићеног тла у условима земљотреса заснива се на геотехничким истраживањима и испитивањима и познавању сеизмичког режима изучаваног подручја. Ликвефакција се обично приписује растреситим, ситнозрним, једноличним песковима без садржаја пластичне фракције. Међутим, новија искуства указују да и финозрна и грубозрна тла могу претрпети значајне деформације настале као последица деловања циклчних напона индуктованих земљотресом. У раду је анализирана подложност тла на појаву ликвефакције на примеру резервоара (Р-27) за складиштење нафте у Смедереву.

**Кључне речи:** Ликвефакција, земљотрес, CPT, пластичност, влажност, гранулација

## ASSESSMENT OF LIQUEFACTION HAZARD BY IN SITU CPT TEST ANALYSIS AND INDEXING INDICATOR OF SOIL

Dušan Berisavljević, M.Sc. GE  
dusan.berisavljevic@institut ims.rs  
dr Nenad Šušić, Ph.D, CE  
nenad.susic@institutims.rs

Institute for Material Testing, V. Misica 43, Belgrade,

Professional Paper

**Abstract:** Assessment of seismic behavior of saturated soils during earthquake is based on geotechnical investigations and knowledge of the seismic regime of studied area. Liquefaction is usually related to loose fine-grained, uniform sands free of plastic fractions. However, recent experience suggests that the fine grain and coars grain soils can undergo significant strains as a consequence of the cyclic stresses induced by earthquake. The paper presents analysis of liquefaction susceptibility of soil on example of the reservoir (R-27) in Smederevo.

**Key words:** Liquefaction, earthquake, CPT, plasticity, moisture, granulation

## 1. УВОД

Ликвефакција је глобална појава која је од изузетног значаја за стабилност грађевинских објеката. У нашој земљи често се не узима у обзир при пројектовању, међутим недавна дешавања у Краљеву указују на реалну опасност од појаве ликвефакције у алувијалним седиментима плеистоценско-холоценске старости. За потребе санације резервоара Р-27 у Смедереву, који је оштећен у бомбардовању 1999. године један од задатака била је процена опасности од појаве ликвефакције при земљотресу. Конструкција резервоара је од челика (челични омотач темељен на аб тракастом темељу). Темељење дна резервоара урађено је преко тампонског слоја од ломљеног камена и цементно стабилизованог шљунка, дебљине 3.9 м. Геолошка грађа терена састоји се од следећих средина анализираних на ликвефакцију:

- (1) Песковито прашинасте глине дебљине 1.0 – 1.8 м.
- (2) Песковит шљунак дебљине 1.5 – 3.0 м
- (3) Шљунковит песак дебљине 3.3 – 4.8 м
- (4) Муљевите прашине дебљине 2.0 – 4.2 м

Наведене средине генетски су везане за алувијалне седименте реке Дунав. Квартарне су старости. У повлати ових средина налази се тампон дебљине 3.9 м. Круту недеформабилну подлогу чине миоценски шљункови знатне дебљине. Ова средина није узета у разматрање с обзиром да је просечна отпорност тла на продор конуса  $q_c > 25$  МПа.

## 2. О ФЕНОМЕНУ ЛИКВЕФАКЦИЈЕ

Феномен ликвефакције може се описати као смањење смичуће чврстоће тла услед пораста порних притисака у скелету тла при земљотресу. Смичућа чврстоћа грубозног тла ( $> 50\%$  честица крупнијих од 0.074 мм) зависи од угла унутрашњег трења и нормалног ефективног напона који делује између зрна скелета тла, а дата је изразом:

$$\tau = \sigma' \tan \varphi \quad (1)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2)$$

При чему је:

- $\tau$  - смичућа чврстоћа тла
- $\varphi$  - угао унутрашњег трења
- $\sigma'$  - ефективни нормални напон
- $\sigma$  - укупни нормални напон
- $u$  - порни притисак

Када је засићен и слабо збијен песак изложен дејству цикличног оптерећења изазваног земљотресом може доћи до знатног деформисања, односно слегања песка. Трајање цикличних напона је кратко у поређењу са временом потребним да се вода издренира, што изазива прогресиван пораст порних притисака. Када се величина порног притиска изједначи са величином укупног напона, ефективни напони постају једнаки нули, односно песак у потпуности губи смичућу чврстоћу и крутост. Ово изазива значајне деформације песка што може имати катастрофалне последице по објекте.

С друге стране циклично оптерећење финозрног тла може да изазове високе порне притиске који су обично мањи од 100% укупног напона. Лабораторијским испитивањима утврђено је да након достизања критичне вредности порног притиска долази до значајног губитка чврстоће, односно сваким наредним циклусом оптерећења нагло расту дилатације. Величина генерисаног порног притиска зависи од степена прекоконсолидације ОЦР, обично износи 80 - 90% за НЦ тла и око 75% за ОЦ тла. Boulanger и Idriss доводе у везу циклични смичући напон ( $\tau_{cyc}$ ) са недренираном кохезијом ( $c_u$ ) и наводе да њихов однос представља најбољи начин одређивања отпорности тла на појаву смичућих дилатација.

### 3. ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ПОЈАВУ ЛИКВЕФАКЦИЈЕ

#### 3.1 Гранулометријски састав и врста тла

Тип тла најподложнији ликвефакцији је онај код кога се отпорност на деформације мобилише трећем између зрна тла. Уколико су други фактори, као што су облик зрна, коефицијент униформности и релативна збијеност једнаки, фрикциона отпорност грубозрних тла опада са смањењем зрна тла. Tsuchida је (1970) анализирао гранулометријски састав разних алувијалних и делувијалних седимената за које се зна да су "доживели" ликвефакцију или нису током земљотреса. Он је предложио гранулометријске криве које раздвајају тла која су подложна ликвефакцији и она која нису (слика 1). Површина између две унутрашње криве представља пескове и прашинасте пескове, који имају најмању отпорност на ликвефакцију. Тла која спадају између унутрашњих и спољашњих кривих имају мању склоност ка појави ликвефакције. Тла са већим садржајем фракције шљунка мобилишу већу чврстоћу при смичању, а при том се и брже дренира вода из скелета тла него код песка. Међутим, историјски подаци указују да може доћи до појаве ликвефакције у растреситом шљунку

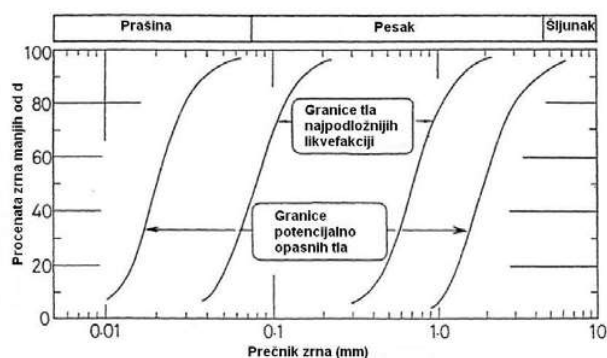
(Seed, 1968; Ishihara, 1985; Andrus, 1991) у случају јаких потреса или када су у подolini i повлати слоја шљунка непропусни слојеви. С друге стране повећање финозрне фракције смањује могућност прераспореде зрна песка у гушће стање при земљотресу. Ishihara (1985) наводи да финозрна тла са малим индексом пластичности могу да испоље исто понашање као песковита тла при земљотресу.

Ross (1969) наводи да су једнолично гранулисани материјали (генерално  $cu < 5$ ) подложнији ликвефакцији него добро гранулисани материјали, као и да су за униформно градуиране материјале ситнозрни пескови мање отпорни на појаву ликвефакције, него крупнозрни пескови, шљунковито тло, прашине или глине.

#### 3.2 Релативна збијеност

Представља један од кључних фактора који контролишу ликвефакцију. Ликвефакција обично настаје у засићеном чистом песку и прашинастом песку када је збијеност мања од 50%. Збијени пескови имају тенденцију ка појави дилатације током цикличног смичања, чиме генеришу негативне порне притиске и повећавају отпорност на дејство смичућих напона. Доња граница релативне збијености, испод које не би требало да дође до појаве ликвефакције је око 75%.

Овде је релативна збијеност коришћена за добијање фактора корекције за тежину надслоја ( $K_v$ ) и фактор нормализације за тежину надслоја код СРТ опита ( $C_n$ ).



Слика 1 Границе између тла подложних и неподложних ликвефакцији (Tsuchida, 1970)

### 3.3 Вертикални ефективни напон

Повећање вертикалног ефективног напона утиче на повећање смичуће чврстоће тла, а тиме се повећава циклично оптерећење потребно да се изазове ликвефакција, односно смањује се опасност од ликвефакције. Теренским опажањима утврдило се да се ликвефакција ретко дешава на дубини већој од 18 м. Ова дубина се слаже са запажањима Kashida (1969), који наводи да засићен песак неће доћи у стање ликвефакције уколико вертикални ефективни напон прелази 190 кРа.

Ова дубина одговара дубини до које је анализирана ликвефакција на локацији резервоара R-27.

### 3.4 Ниво подземне воде

Основни услов да дође до ликвефакције је да у тренутку земљотреса тло буде потпуно засићено. Ликвефакција се неће десити уколико је тло суво. Опасност од ликвефакције опада са смањењем степена засићења тла.

Све анализирани средине налазе су испод нивоа подземне воде.

### 3.5 Сеизмички режим

Могућност појаве ликвефакције условљено је и магнитудом и бројем циклуса оптерећења изазваних земљотресом.

У нашем случају магнитуда је срачуната за период активности од  $D=100$  година и ризик  $P=0.1$ , што значи да је допуштен ризик од 10% да у наредних 100 година срачуната магнитуда буде премашена.

$$M(D, R) = M_{\max} - (M_{\max} - U) \left[ -\frac{n_t}{D} \ln(1 - R) \right]^{\lambda} \quad (3)$$

Сеизмички параметри за централну Србију су одређени искуствено и износе:

$$M_{\max}=7.3; U=4.1; \lambda=0.238; i \quad n_t=2$$

$$M = 7.3 - (7.3 - 4.1) \left[ -\frac{2}{100} \ln(1 - 0.1) \right]^{0.238} = 6.56 \quad (4)$$

Очекивана максимална амплитуда износи  $M_{\max}=6.56$  за период активности од 100 год. и ризик  $P=0.1$ . Максимално убрзање тла на површини  $a_{\max}$  срачунато је према изразу:

$$\frac{a_{\max}}{g} = \frac{6.7 \left[ e^{\frac{1.05M + 1.65}{M}} \right]}{\left[ X + 35 + 0.17e^{0.65M} \right]^{2.56}} \quad (5)$$

Добијена вредност  $a_{\max}/g$  износи 0.069. Ова вредност је увећана за 50% и као рачунско убрзање је усвојено  $a_{\max}/g=0.106$ .

## 4. АНАЛИЗА ЛИКВЕФАКЦИЈЕ ГРУБОЗРНИХ СРЕДИНА

Комплекс грубозрних средина, на локацији резервоара R-27, представља алувијалне седименте реке Дунав формиране у условима честих промена енергије водотока. Овакви услови допринели су изразитој хетерогености комплекса по гранулометријском саставу. Карактеристично за комплекс су честа бочна и вертикална смењивања слојева и прослојака различитих по гранулатији. Повлату комплекса грубозрних средина чине високопластичне (CH) песковито прашинасте глине, а подину муљевите прашине средње пластичности (CI). Лабораторијским испитивањима изведеним за потребе изградње резервоара утврђен је коефицијент филтрације ових средина, који је реда величине  $10^{-6}$  до  $10^{-7}$  цм/с, те се могу сматрати практично водонепропусним. Оне онемогућавају брзу дисипацију порних притисака из грубозрних средина услед цикличног оптерећења од земљотреса (доприносе повећању опасности од ликвефакције). Код оваквог просторног односа слојева забележени су случајеви ликвефакције код шљунковитог тла.

Веома мало информација је доступно о понашању шљунковитог тла (шљунковити песак, песковити шљунак) при ликвефакцији, а као последица тога не постоји опште прихваћен критеријум за процену опасности од ликвефакције овог типа тла. Прелиминарне процене могу се спровести на основу карактеристичних нумеричких показатеља за грубозрне средине ( $d_{50}$ ,  $d_{20}$ , itd.). Утицај шљунковите фракције на понашање тла при цикличном оптерећењу услед земљотреса квантификује Исхихара (1985) уводећи корекциони фактор  $\alpha$ . Он зависи од процентуалног учешћа шљунка у тлу, а представља однос цикличне отпорности шљунковитог песка према цикличној отпорности песка са нула садржаја шљунковите фракције. Овај корекциони фактор повећава отпорност тла на ликвефакцију, повећањем CRR, међутим овде није примењен са чиме смо на страни сигурности.

Средине 2 и 3 третиране су као песковите, а преко доле наведене процедуре добијен је фактор сигурности  $F_s$ .

За процену опасности од ликвефакције грубозрних средина (средине 2 и 3) коришћена је полумпиријска “Упрошћена процедура” (Seed and Idriss 1971) са модификованим зависностима за: фактор редуције напона ( $r_d$ ), фактор размере магнитуде (MSF), фактор корекције за тежину надслоја ( $K_\sigma$ ) и фактор нормализације за тежину надслоја код СРТ ( $C_n$ ). Препоруке за одређивање ових параметара дали су I. M. Idriss и R. W. Boulanger (2004) у публикацији „Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes”, и овде неће бити приказане.

Процена опасности од ликвефакције заснива се на одређивању фактора сигурности у односу на ликвефакцију, који је дат изразом:

$$F_s = \frac{CRR}{CSR} \geq 1.0 \quad (6)$$

При чему је:

$F_s$  – фактор сигурности у односу на појаву ликвефакције

CRR – коефицијент цикличног оптерећења потребан да изазове ликвефакцију (ликвефакцијска отпорност)

CSR – коефицијент цикличног оптерећења индукван земљотресом

Уколико је  $F_s > 1$  неће доћи до ликвефакције. Уколико је  $F_s < 1$  постоји опасност од ликвефакције.

Коефицијент цикличног оптерећења (CSR) изазван земљотресом магнитуде 7.5 срачунат је преко следеће зависности:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{\max} \cdot \sigma_v \cdot r_d}{g \cdot \sigma_v' \cdot MSF} \quad (7)$$

При чему је:

$a_{\max}$  – максимално хоризонтално убрзање на површини

$g$  – убрзање услед гравитације ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$\sigma_v$  – укупни вертикални напон на дубини на којој је изведен СРТ опит

$\sigma_v'$  – ефективни вертикални напон на дубини на којој је изведен СРТ опит

$r_d$  – фактор редуције напона

$$MSF = \frac{CSR_M}{CSR_{M=7.5}} \text{ – фактор размере магнитуде}$$

MSF прилагођава CSR изазван земљотресом магнитуде  $M$  (у овом случају 6,56) еквивалентном CSR изазван земљотресом магнитуде  $M=7.5$ .

На основу вредности отпора тла на продор конуса  $q_c$  срачунат је коефицијент цикличне отпорности (CRR), преко следеће зависности:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{q_{c1n}}{540} + \left[ \frac{q_{c1n}}{67} \right]^2 - \left[ \frac{q_{c1n}}{80} \right]^3 + \left[ \frac{q_{c1n}}{114} \right]^4 - 3.0 \right\} \quad (8)$$

При чему је:

$q_{c1n}$  – нормализована вредност отпора конуса  $q_c$  за тежину надслоја

#### 4.1 Резултати анализе статичких пенетрација (СРТ)

На слици 2 приказана је промена фактора сигурности са дужином. Фактор сигурности је представљен тачкама које се налазе на дубини на којима је мерена пенетрациона отпорност ( $q_c$ ), у средини 2 и 3, а добијен је из једначине 6.

Са слике се види да је највећа концентрација тачака за фактор сигурности од 1.5 до 4.0, а да је од 7.8 до 8.0 м фактор сигурности мањи од 1.0. Међутим, на тим местима је вредност отпора конуса и трења по фрикционом рукавцу  $\Phi$  ниска. То указује на глиновите прослојке који су мање осетљиви на ликвефакцију. Такви прослојци су мале дебљине.

#### 5. АНАЛИЗА ЛИКВЕФАКЦИЈЕ ФИНОЗРНИХ СРЕДИНА

Протекле две деценије “Кинески критеријуми” често су се користили за процену опасности од појаве ликвефакције финозрних средина. Основе овог критеријума потичу од опажања ликвефакције финозрних средина, при снажним земљотресима у различитим деловима Кине, које је пријавио Wang (1979). Према Wang-у уколико тло задовољава сва три доле наведена услова:

1. Процентата финије фракције од 0.005 mm < 15%
2. Граница течења (LL) < 35%
3. Природна влажност ( $\omega$ ) > 0.9 x LL

и ако се налази изнад А линије на дијаграму пластичности може бити подложно ликвефакцији. У супротном тло се може сматрати сигурним у погледу ликвефакције.

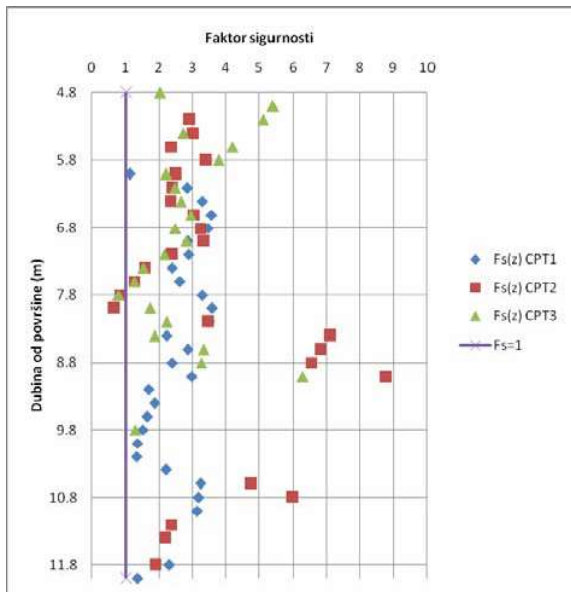
Andrews и Martin (2000) дају општи критеријум за процену опасности од ликвефакције финозрних средина, табела 1.

Табела 1: Критеријум за процену опасности од ликвефакције финозрних средина (Andrews и Martin).

	LL < 32	LL ≥ 32
фракције мање од 0.002 мм < 10 %	Подложно ликвефакцији	Потребна даља испитивања
фракције мање од 0.002 мм ≥ 10 %	Потребна даља испитивања	Није подложно ликвефакцији

Новија истраживања указују да је главни фактор који контролише ликвефакцију индекс пластичности (ИП). Тако Сеед (2003) предлаже да уколико засићено тло има ИП < 12%, ЛЛ < 37% и  $\omega/\text{ЛЛ} > 0.8$  може доћи до појаве ликвефакције. На свим испитаним узорцима добијен је индекс пластичности преко 15, што га према овом критеријуму сврстава у тла која су мање подложна ликвефакцији.

Испод објекта у конструкцији терена издвајају се две финозрне средине (1 и 4), анализиране на опасност од појаве ликвефакције.



Слика 2: Промена фактора сигурности са дужином, добијен из CPT опита за (средине 2 и 3)

### 5.1 Средина 1

Лабораторијским испитивањима добијени су следећи резултати интересантни са аспекта ликвефакције, табела 2:

Табела 2: Резултати лабораторијских испитивања коришћени при анализи подложности средине 1 ка ликвефакцији

узора к бр.	гранулација				% финијих честица од 0.005 мм	ЛЛ (%)	$\omega$ (%)	$\omega/\text{ЛЛ}$
	глин а (%)	пра шин а (%)	песа к (%)	шљу нак (%)				
Б- 1/5.5- 5.8	17	53	26	4	23 > 15	32. 0 < 35	29. 8	0.93 > 0.9
Б- 3/4.0- 4.2	21	54	21	4	29 > 15	39. 8 > 35	29. 6	0.74 < 0.9

Из табеле се може видети да, према Ванг-овом критеријуму, средина 1 није подложна ликвефакцији.

### 5.2 Средина 4

Лабораторијска испитивања спроведена су на три узорка, а добијени су следећи резултати интересантни са аспекта ликвефакције, табела број 3:

Табела 3: Резултати лабораторијских испитивања коришћени при анализи подложности средине 4 ка ликвефакцији

узорак бр.	гранулација				% финијих честица од 0.005 мм	ЛЛ (%)	$\omega$ (%)	$\omega/\text{ЛЛ}$
	гли на (%)	пра шина (%)	песа к (%)	шљу нак (%)				
Б- 1/12.0- 12.3	30	70	0	0	47 > 15	43.0 > 35	37. 0	0.86 < 0.9
Б- 1/15.0- 15.2	25	74	1	0	40 > 15	39.5 > 35	33. 7	0.85 < 0.9
Б- 2/14.5- 14.8	26	74	0	0	44 > 15	40.4 > 35	36. 7	0.9

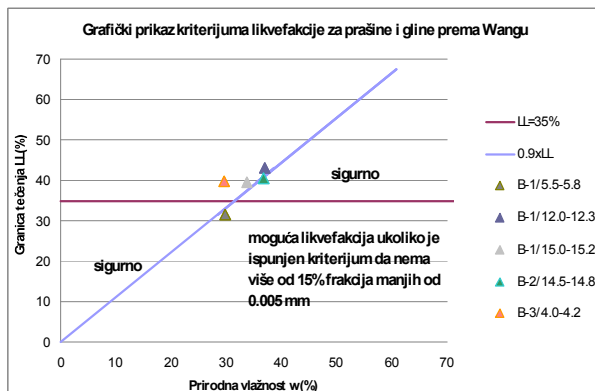
Из табеле се може видети да, према Ванг-овом критеријуму, средина 4 није подложна ликвефакцији.

Према критеријуму који препоручују Андрес и Мартин средине 1 и 4 нису подложне ликвефакцији, табела 4.

Табела 4: Оцена опасности на појаву ликвефакције (Андрес и Мартин) за финозрне средине.

	ЛЛ < 32	ЛЛ ≥ 32
фракције мање од 0.002 мм < 10 %	Подложно ликвефакцији	Потребна даља испитивања
фракције мање од 0.002 мм ≥ 10 %	Потребна даља испитивања	<b>Није подложно ликвефакцији</b>

На слици 3 дат је графички приказ критеријума ликвифакције за прашине и глине према Ванг-у за пет испитаних узорака из средине 1 и 4.



Слика 3: Графички приказ критеријума ликвифакције за прашине и глине по Ванг-у

## 6. ЗАКЉУЧАК

Различити су критеријуми за процену опасности од ликвифакције грубозрних и финозрних средина. За процену опасности од појаве ликвифакције за грубозрне средине могу се користити теренски СРТ и SPT опити, док за финозрне средине треба користити лабораторијска испитивања (пожељно је користити резултате триаксијалних циклених испитивања).

На основу анализе гранулометријског састава, пластичности, влажности и теренских СРТ испитивања, као и на основу сеизмичког режима истражног простора може се закључити да нема опасности од ликвифакције на локацији резервоара Р-27.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Boulanger R. W, Idriss I. M. (2005). **New criteria for distinguishing between silts and clays that are susceptible to liquefaction versus cyclic failure.** 25<sup>th</sup> Annual USSD Conference, Salt Lake City, Utah, 357-366.
- [2] Idriss I. M., Boulanger R. W. (2004). **Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes.** Proc. of the 11<sup>th</sup> ICSDEE and 3<sup>rd</sup> ICEGE, Barkley, California, pp 32-56.
- [3] Moss R. E. S., Seed R. B., Kayen R. E., Stewart J. P., Der Kiureghian A., Cetin. K. O. (2006). **CPT Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential.** Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- [4] New York State Department of Transportation. (2007). **Liquefaction Potential of Cohesionless Soil: Geotechnical Design Procedure.**
- [5] Prakash S., Puri K. V. (2010). **Recent advances in liquefaction of fine grained soils.** 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics and Symposium in Honor of Professor I. M. Idriss. San Diego, California, No. 4.17a, 1-6.
- [6] Robertson P. K., Wride (Fear) C. E. (1998). **Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test.** Canadian Geotechnical Journal 35, 442-459.
- [7] Seed R. B., Cetin. K. O., Moss R. E. S., Kammerer A. M., Wu J., Pestana J. M, Riemer M. F. (2001). **Recent advances in soil liquefaction engineering and seismic site response evaluation.** 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamic and Symposium in Honor of Professor W. D. Liam Finn, San Diego, California, No. SPL-2, 1-45.