

# Σύγκριτική εκτίμηση της αντοχής σε ρευστοποίηση από δοκιμές SPT και CPT

## Comparison of empirical evaluation of liquefaction resistance from SPT and CPT tests

ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Καθηγητής ΕΜΠ  
ΒΑΛΣΑΜΗΣ, Α. Πολιτικός Μηχανικός  
ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός  
ΝΙΚΟΛΑΙΔΗ, Μ. Πολιτικός Μηχανικός

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Εξετάζεται η συμβατότητα των σχέσεων εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης από επιτόπου δοκιμές SPT και CPT. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δεδομένα εκτενών γεωτεχνικών ερευνών σε πέντε (5) διαφορετικές θέσεις αλλουβιακών αποθέσεων. Αποδεικνύεται ότι η μεθοδολογία που βασίζεται στις δοκιμές (CPT) υπερεκτιμά συστηματικά την αντίσταση σε ρευστοποίηση και προτείνονται συγκεκριμένα μέτρα διόρθωσης της.

**ABSTRACT :** The compatibility between SPT-and CPT-based methods of liquefaction resistance evaluation is examined, based on data from extensive geotechnical investigations in five (5) alluvial sites in Greece. It is shown that CPT-based methods systematically over predict the liquefaction resistance. Certain corrections are proposed to eliminate this inconsistency.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καταστροφικές αστοχίες που προκλήθηκαν εξαιτίας της ρευστοποίησης του εδάφους σε πρόσφατους μεγάλους σεισμούς (Kobe 1995, Adapazari 1999, κλπ) υπενθυμίζουν ότι η ρευστοποίηση συνεχίζει να αποτελεί σημαντική απειλή για κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού.

Ως γνωστόν, δύο είναι οι επικρατέστερες επιτόπου δοκιμές για την εκτίμηση του κινδύνου έναντι ρευστοποίησης. Η Δοκιμή Πρότυπης Διείσδυσης ή SPT (Seed και Idriss 1971, Seed et al. 1985, Youd et al. 2001 και Idriss & Boulanger 2004) και η Δοκιμή Στατικής Πενετρομέτρησης CPT (Zhou 1980, Shibata & Teparaksa 1988, Stark & Olson 1995, Suzuki et al. 1995, Robertson & Wride 1998, Youd et al. 2001 και Idriss & Boulanger 2004). Σκοπός του παρόντος άρθρου είναι να συγκρίνει τις αντίστοιχες μεθοδολογίες εκτίμησης της αντοχής έναντι ρευστοποίησης. Και τούτο διότι οι εν λόγω μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα η μία από την άλλη, στηριζόμενες σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων, με

αποτέλεσμα η συμβατότητα τους να μην είναι δεδομένη.

Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στην περιγραφή-αναφοράς των δύο μεθοδολογιών υπό των Youd et al (2001) και στα πρόσθετα στοιχεία τα οποία παρέχονται υπό τους Idriss & Boulanger (2004).

### 2. ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ

#### 2.1 Μεθοδολογία Youd et al. (2001)

Σύμφωνα με τους Youd et al (2001) η αντίσταση του εδάφους σε ρευστοποίηση εκφράζεται μέσω του λόγου CRR (Cyclic Resistance Ratio) ο οποίος ορίζεται ως η απαιτούμενη ανακυκλική διατμητική τάση για να προκληθεί ρευστοποίηση προς την αρχική κατακόρυφο ενεργό τάση.

Οι Youd et al (2001) προτείνουν την Σχέση (1) για τον υπολογισμό της καμπύλης CRR από αποτελέσματα δοκιμής SPT:

$$CRR = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}^{cs}} + \frac{(N_1)_{60}^{cs}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60}^{cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (1)$$

Στην ανωτέρω σχέση,  $(N_1)_{60}^{cs}$  είναι ο διορθωμένος αριθμός κρούσεων SPT, ο οποίος ορίζεται ως:

$$(N_1)_{60}^{cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2)$$

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (3)$$

όπου  $N_m$  είναι ο αριθμός κρούσεων SPT,  $C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^{0.5}$ ,  $P_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση,  $\sigma'_{vo}$  είναι η κατακόρυφη ενεργός τάση και οι συντελεστές  $C_E$  (διόρθωση για το ποσοστό ενεργείας που απελευθέρωσε η σφύρα),  $C_B$  (διόρθωση για την διάμετρο της οπής της γεώτρησης),  $C_R$  (διόρθωση για το μήκος του στελέχους της γεώτρησης),  $C_S$  (διόρθωση για ειδικές συσκευές δοκιμών) δίνονται από τον Πίνακα 1. Τα  $\alpha$  και  $\beta$  στην Σχέση (2) εκφράζονται ως:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & FC \leq 5\% \\ \exp(1.76 - (190/FC^2)) & \text{για } 5\% < FC < 35\% \\ 5.0 & FC \geq 35\% \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & FC \leq 5\% \\ [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] & \text{για } 5\% < FC < 35\% \\ 1.2 & FC \geq 35\% \end{cases} \quad (5)$$

όπου  $FC(\%)$  είναι το ποσοστό των εμπιερχόμενων λεπτόκοκκων (ιλύος και αργίλου).

Πίνακας 1. Συντελεστές Σχέσης (2)  
Table 1. Factors of Equation (2)

Παράγοντας	Είδος εξοπλισμού	Σύμβολο	Διόρθωση
Διόρθωση ενεργείας	"Donut hammer"	$C_E$	0.5-1.0
	"Safety hammer"	$C_E$	0.7-1.2
	"Automatic trip Donut-type hammer"	$C_E$	0.8-1.3
Διάμετρος γεώτρησης	65-115 χιλ	$C_B$	1.00
	150 χιλ	$C_B$	1.05
	200 χιλ	$C_B$	1.15
Μήκος γεώτρησης	<3 μ	$C_R$	0.75
	3-4 μ	$C_R$	0.80
	4-6 μ	$C_R$	0.85
	6-10 μ	$C_R$	0.95
	10-30 μ	$C_R$	1.00
Μέθοδος δειγματοληψίας	"standard sampler"	$C_S$	1.00
	"sampler without liners"	$C_S$	1.1-1.3

Youd et al (2001)

Για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ρευστοποίηση από δεδομένα δοκιμής CPT οι

Youd et al (2001) προτείνουν αντίστοιχα την Σχέση (6):

$$CRR = 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.5, \quad (q_{c1N})_{cs} < 50 \quad (6)$$

$$CRR = 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08, \quad 50 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 160$$

όπου  $(q_{c1N})_{cs}$  είναι η διορθωμένη αντίσταση αιχμής του κώνου, η οποία υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$q_{c1N} = C_Q \left( \frac{q_c}{P_a} \right) \quad (7)$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N} \quad (8)$$

$$\text{όπου } C_Q = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

$$K_c = 1.0 \quad \text{για } I_c \leq 1.64$$

ενώ για  $I_c > 1.64$

$$K_c = -0.403I_c^4 + 5.581I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88$$

$$I_c = \left[ (3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / P_a] [(P_a / \sigma'_{vo})^n]$$

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] \times 100\%$$

Ο υπολογισμός του  $I_c$  γίνεται για αρχική τιμή  $n=1.0$ . Αν η τιμή του  $I_c$  που θα προκύψει είναι μεγαλύτερη από 2.6, το έδαφος θεωρείται πολύ πλάσιμο για να ρευστοποιηθεί. Αντίθετα, αν είναι μικρότερη από 2.6 επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί για  $n=0.5$ . Αν και πάλι είναι μικρότερη του 2.6 τότε αυτή θεωρείται η τελική τιμή του  $I_c$ . Αν όμως είναι μεγαλύτερη του 2.6 τότε επαναλαμβάνονται για τρίτη φορά οι υπολογισμοί με  $n=0.7$  και η τιμή που προκύπτει είναι η τελική. Με βάση την τιμή του  $I_c$  χωρίζονται τα εδάφη σε 9 κύριες κατηγορίες οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.

## 2.2 Τροποποιήσεις Idriss & Boulanger (2004)

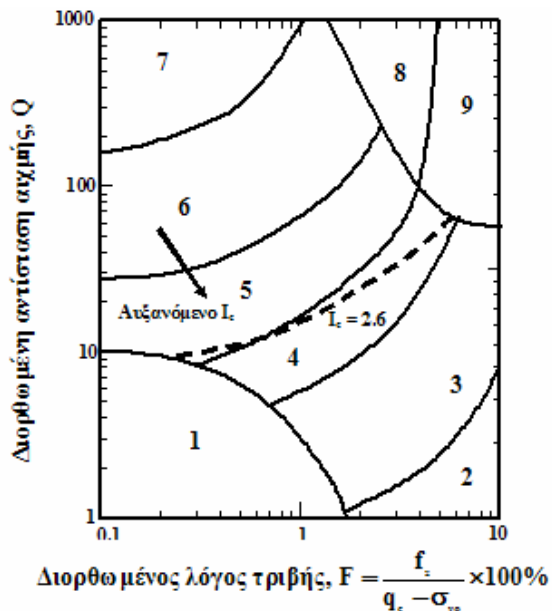
Πρόσφατα, οι Idriss & Boulanger (2004) τροποποίησαν τον υπολογισμό των συντελεστών  $C_N$  και  $C_Q$  που εκφράζουν την επιρροή της αρχικής ενεργού τάσης, στην αντοχή έναντι ρευστοποίησης ως ακολούθως:

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^\alpha \leq 1.7 \quad (10)$$

$$C_Q = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^\beta \leq 1.7 \quad (11)$$

$$\text{όπου } \alpha = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}}$$

$$\beta = 1.338 - 0.249(q_{c1N})^{0.264}$$



Σχήμα 1. Κατηγορίες εδάφους σύμφωνα με τους Youd et al (2001)  
Figure 1. Soil category according to Youd et al (2001)

Επισημαίνεται όμως, ότι η χρήση αυτών των σχέσεων, μπορεί να βελτιώνει κατάτι την ακρίβεια των υπολογισμών, αλλά αυξάνει δυσανάλογα την έκταση τους (απαιτεί επαναληπτική διαδικασία). Οι ίδιοι ερευνητές, προτείνουν τροποποιημένες σχέσεις για τον υπολογισμό της επιρροής του ποσοστού λεπτόκοκκων στην μεθοδολογία SPT (Εξ. 12) καθώς και για το υπολογισμό του λόγου CRR από αποτελέσματα δοκιμών SPT (Εξ. 13) και CPT (Εξ. 14):

$$(N_1)_{60-CS} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (12)$$

$$\text{όπου } \Delta(N_1)_{60} = \exp \left( 1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left( \frac{15.7}{FC} \right)^2 \right)$$

$$CRR = \exp \left[ \frac{(N_1)_{60-CS} + \left( \frac{(N_1)_{60-CS}}{126} \right)^2}{14.1} - \left( \frac{(N_1)_{60-CS}}{23.6} \right)^3 + \left( \frac{(N_1)_{60-CS}}{25.4} \right)^4 - 2.8 \right] \quad (13)$$

$$CRR = \exp \left[ \frac{q_{c1N} + \left( \frac{q_{c1N}}{67} \right)^2}{540} - \left( \frac{q_{c1N}}{80} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1N}}{114} \right)^4 - 3 \right] \quad (14)$$

Οι προτεινόμενες αλλαγές από τους Idriss & Boulanger (2004) δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την καμπύλη CRR-(N<sub>1</sub>)<sub>60-CS</sub>. Αντίθετα, υπάρχει αισθητή μετατόπιση της καμπύλης CRR-q<sub>c1N</sub> προς πιο συντηρητικές εκτιμήσεις του CRR.

### 2.3 «Κινέζικα» Κριτήρια

Όπως είναι γνωστό τα συνεκτικά-πλάσιμα υλικά (π.χ. άργιλοι) δεν ρευστοποιούνται λόγω σεισμού, όσο μικρές και να είναι οι τιμές N<sub>SPT</sub> ή q<sub>c</sub>. Στην μεθοδολογία CPT η επιρροή της πλασιμότητας του εδάφους λαμβάνεται υπόψη άμεσα, μέσω της τιμής του I<sub>c</sub>. Για την μεθοδολογία SPT όμως, δεν υπάρχει κάποιο αντίστοιχο μέγεθος. Η συνήθης πρακτική είναι η εκ των προτέρων διαλογή των εδαφικών στρώσεων και η εφαρμογή της μεθοδολογίας μόνο στις ρευστοποιήσιμες στρώσεις.

Στο παρόν άρθρο για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα γνωστά ως «Κινέζικα» κριτήρια (Youd et al. 2001). Σύμφωνα με αυτά για να είναι ρευστοποιήσιμο ένα έδαφος θα πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα οι παρακάτω συνθήκες:

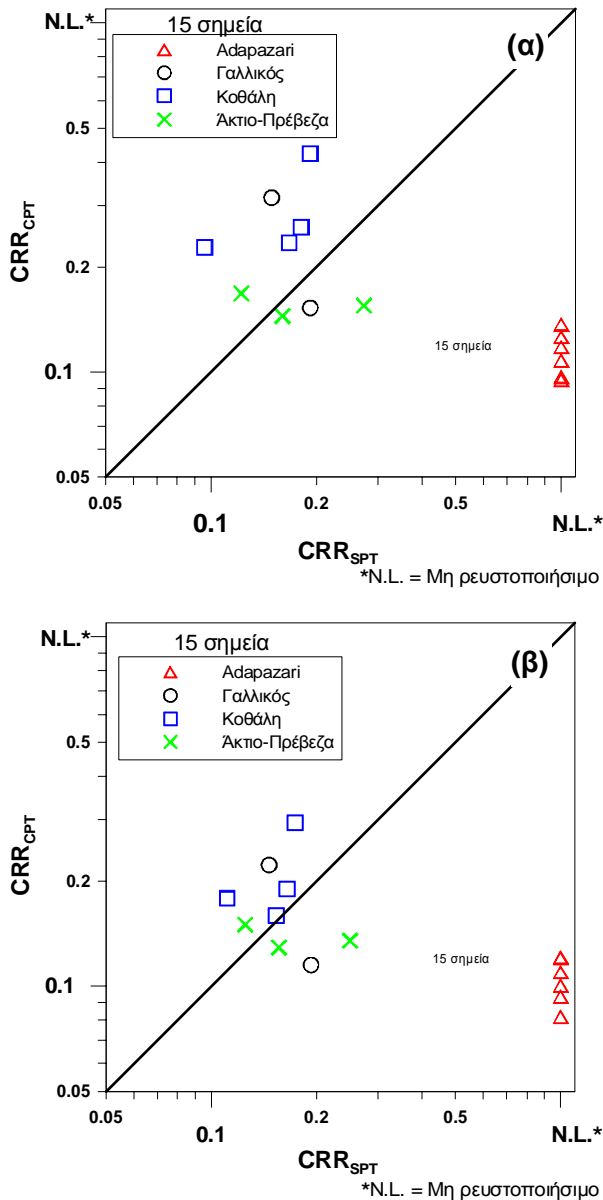
- Το ποσοστό αργίλου (Clay content – σωματίδια μικρότερα των 5 μ) να είναι μικρότερο του 15% κατά βάρος.
- Το όριο υδαρότητας (liquid limit) να είναι μικρότερο του 35%.
- Η φυσική υγρασία να είναι μεγαλύτερη του 90% του ορίου υδαρότητας.

### 3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ

Για να ελεγχθεί η συμβατότητα των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών, χρησιμοποιήθηκαν γεωτεχνικά στοιχεία από 5 τοποθεσίες (Γαλλικός ποταμός, Κοθάλη, στενά Ακτίου-Πρεβέζης, Μαλιακός κόλπος και Adapazari) στις οποίες είχαν γίνει σε μικρή απόσταση μεταξύ τους δοκιμές SPT και CPT. Αρχικά, η σύγκριση έγινε μεταξύ γειτονικών θέσεων στις

οποίες υπάρχουν δεδομένα δοκιμών SPT και CPT σε αντίστοιχο βάθος και εντός του ιδίου υλικού.

Η σύγκριση αυτή όμως (Σχήμα 2) δεν οδήγησε σε ασφαλή συμπεράσματα. Η διασπορά που παρατηρείται, αποδίδεται στο γεγονός ότι σε αλλουβιακές αποθέσεις διαταράσσεται η έννοια της «αντιστοιχίας βάθους» λόγω της έντονης στρωματογραφίας, με αποτέλεσμα η σύγκριση να γίνεται τελικώς για διαφορετικά υλικά.

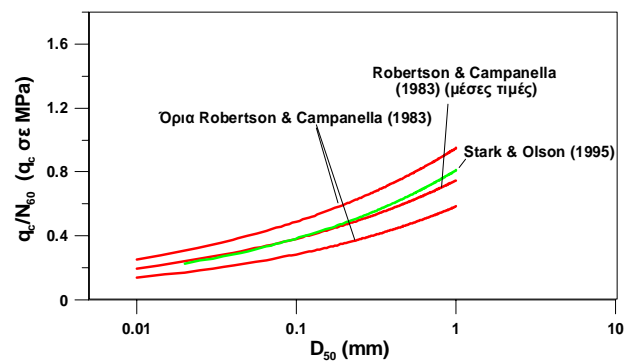


Σχήμα 2. Σύγκριση CRR από SPT και CPT.  
Figure 2. CRR comparison from SPT and CPT  
α. Youd et al (2001)  
β. Idriss & Boulanger (2004)

Το παραπάνω συμπέρασμα μας οδήγησε στην αναζήτηση εναλλακτικού τρόπου σύγκρισης των δύο μεθοδολογιών. Έτσι

λοιπόν, με βάση τον αριθμό κρούσεων SPT και τη μέση διάμετρο των κόκκων του εδάφους ( $D_{50}$ ) υπολογίστηκε για κάθε θέση σε κάθε γεώτρηση μία «αντίστοιχη» τιμή της αντίστασης αιχμής κώνου ( $q_c$ )<sub>eq</sub>. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το εμπειρικό διάγραμμα ( $q_c/N_{60} - D_{50}$ ) που πρότειναν οι Robertson & Campanella (1983) και η αντίστοιχη Εξίσωση (16) των Stark & Olson (1995) η οποία αποτελεί και την μέση τιμή του εύρους των Robertson & Campanella (1983) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.

$$N_{60} = \frac{1,23q_c}{D_{50}^{0,325}} \quad (15)$$



Σχήμα 3. Συσχετίσεις του  $q_{c1}$  με το  $(N_1)_{60}$   
Figure 3. Correlation of  $q_{c1}$  with  $(N_1)_{60}$

Στην συνέχεια υπολογίστηκε η «αντίστοιχη» πλευρική τριβή ( $f_s$ )<sub>eq</sub> του κώνου από την Εξίσωση 16 (Muromachi, 1981).

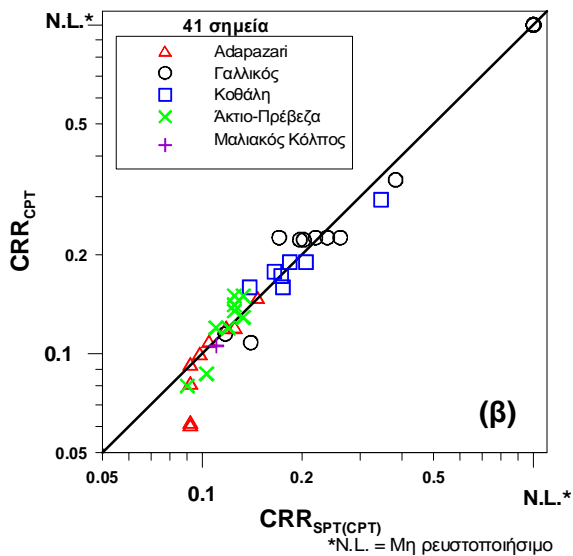
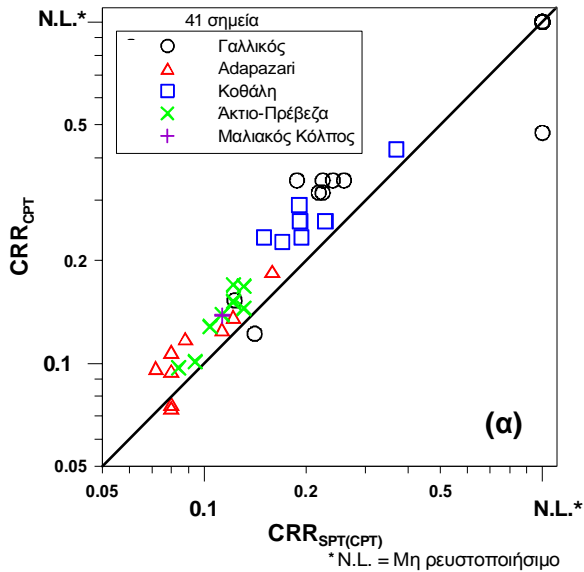
$$D_{50} = e^{\left( \frac{1,12235 \frac{f_s}{q_c} - 100}{0,77925} \right)} \quad (16)$$

Η αντίστροφη διαδικασία εφαρμόστηκε για την μετατροπή των δεδομένων  $q_c$  και  $f_s$  από δοκιμές CPT σε «αντίστοιχο» αριθμό χτύπων  $N_{eq}$ .

Στο Σχήμα 4 γίνεται σύγκριση της αντίστασης σε ρευστοποίηση που προέκυψε κατ' αυτό τον τρόπο από δεδομένα δοκιμών CPT. Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζονται οι τιμές του CRR που προκύπτουν χρησιμοποιώντας το έμμεσα υπολογισμένο  $N_{eq}$ , ενώ στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι τιμές του CRR που προέκυψαν άμεσα από τα αποτελέσματα των δοκιμών CPT. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5 συγκρίνονται οι τιμές της αντοχής σε ρευστοποίηση που προέκυψαν από δεδομένα SPT.

Από τα διαγράμματα αυτά εξάγονται δύο κύρια συμπεράσματα:

- Υπάρχει σαφής τάση υπερεκτίμησης της αντοχής έναντι ρευστοποίησης όταν χρησιμοποιούνται αποτελέσματα από δοκιμές CPT
- Υπάρχει καλή συσχέτιση μεταξύ των εδαφών που χαρακτηρίζονται ως μη ρευστοποιήσιμα αφενός από τα «Κινέζικα» Κριτήρια και αφετέρου από τον δείκτη  $I_c$ .



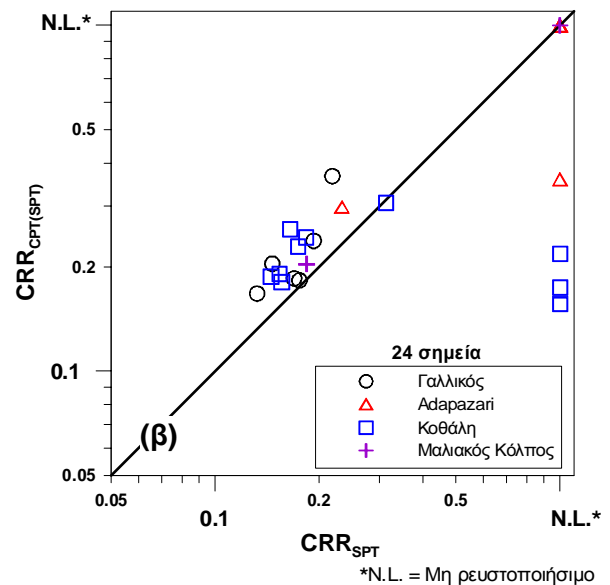
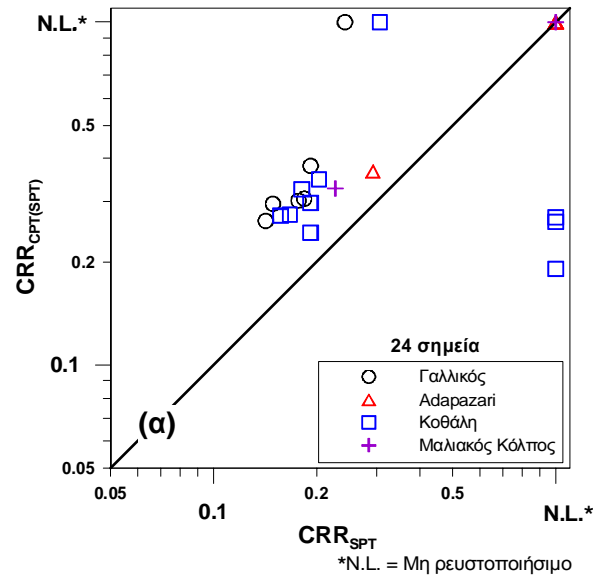
Σχήμα 4. Σύγκριση του CRR από το CPT και από το SPT (μετά την μετατροπή του  $q_{c1N}$  σε  $(N_1)_{60}$ )  
α. Μεθοδολογία Youd et al (2001)  
β. Μεθοδ. Idriss & Boulanger (2004)

Figure 4. Correlation of CRR from CPT and SPT (after transforming  $q_{c1N}$  to  $(N_1)_{60}$ )  
a. Methodology Youd et al (2001)  
b. Method. Idriss & Boulanger (2004)

#### 4. ΕΞΗΓΗΣΗ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Για περαιτέρω διερεύνηση του πρώτου από τα ανωτέρω συμπεράσματα, επιχειρήθηκε η απευθείας σύγκριση των καμπυλών  $CRR-(N_1)_{60-cs}$  και  $CRR-q_{c1N}$  που προέκυψαν πρωτογενώς, από επιτόπου παρατηρήσεις και αποτελούν τον πυρήνα ανάπτυξης των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών.

Η μετατροπή του αριθμού κύτπων SPT



Σχήμα 5. Σύγκριση του CRR από το SPT και από το CPT (μετά την μετατροπή του  $(N_1)_{60}$  σε  $q_{c1N}$ )  
α. Μεθοδολογία Youd et al (2001)  
β. Μεθοδ. Idriss & Boulanger (2004)

Figure 5. Correlation of CRR from SPT and CPT (after transforming  $(N_1)_{60}$  to  $q_{c1N}$ )  
a. Methodology Youd et al (2001)  
b. Method. Idriss & Boulanger (2004)

καθαρής άμμου  $(N_1)_{60-cs}$  σε ισοδύναμη τιμή αντίστασης αιχμής κώνου καθαρής άμμου  $(q_{c1N})_{cs}$  έγινε θεωρώντας ότι αναφερόμαστε σε σημείο του εδάφους με ενεργό γεωστατική τάση ίση με 100KPa, έτσι ώστε  $C_N=1$ . Επίσης, θεωρήθηκε ότι η δοκιμή γίνεται υπό πρότυπες συνθήκες έτσι ώστε οι διορθωτικοί συντελεστές  $C_E, C_B, C_S, C_R$  να είναι ίσοι με 1.0. Το ποσοστό λεπτόκοκκων θεωρήθηκε ως μικρότερο του 5% οπότε από τις Σχέσεις (2) και (3) έχουμε  $(N_1)_{60-cs} = (N_1)_{60} = N_m$ , ενώ θεωρήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές του  $D_{50}$  (0.01, 0.1 και 1mm).

Στο Σχήμα 6 συγκρίνονται οι καμπύλες  $CRR-q_{c1N}$  οι οποίες:

- προτείνονται από τους Youd et al. (2001)
- προτείνονται από τους Idriss & Boulanger (2004)
- προέκυψαν από τις καμπύλες των Youd et al. (2001) για δοκιμή SPT, μετά την μετατροπή του  $(N_1)_{60-cs}$  σε  $q_{c1N,cs}$

Αντίστοιχα στο Σχήμα 7 συγκρίνονται οι καμπύλες  $CRR-(N_1)_{60-cs}$  οι οποίες:

- προτείνονται από τους Youd et al. (2001)
- προτείνονται από τους Idriss & Boulanger (2004)
- προέκυψαν από τις καμπύλες των Youd et al. (2001) για δοκιμή CPT, μετά την μετατροπή του  $q_{c1N,cs}$  σε  $(N_1)_{60-cs}$

Και στα δύο Σχήματα, έχουν συμπεριληφθεί τα πρωτογενή δεδομένα από πραγματικά περιστατικά ρευστοποίησης όπως αναφέρονται από τους Youd et al. (2001)

Από τα δύο σχήματα προκύπτει ότι η καμπύλη υπολογισμού του CRR από δεδομένα CPT που πρότειναν οι Youd et al (2001) είναι μη συντηρητικά «τραβηγμένη», ενόψει κυρίως των δεδομένων από ιστορικά περιστατικά για δοκιμές SPT (Σχήμα 7). Αντίθετα, η καμπύλη που προτείνουν οι Idriss & Boulanger (2004) είναι περισσότερο ρεαλιστική.

Οι καμπύλες CRR όπως προκύπτουν από δεδομένα SPT όταν μεταφράζονται σε όρους κανονικοποιημένης αντίστασης κώνου είναι ακόμα πιο συντηρητικές από τις αντίστοιχες για δεδομένα CPT. Φυσικά, η ακριβής τους εκτίμηση επηρεάζεται έντονα από την σχέση που χρησιμοποιείται για την συσχέτιση  $N$  και  $D_{50}$  με το  $q_c$ .

Με βάση τα στοιχεία αυτά προτείνεται η παρακάτω Σχέση (17) για τον προσδιορισμό του CRR από την κανονικοποιημένη αντίσταση αιχμής κώνου η οποία εξασφαλίζει την

συμβατότητα των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών.

$$CRR = 0.4 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05, \quad (q_{c1N})_{cs} < 60 \quad (17)$$

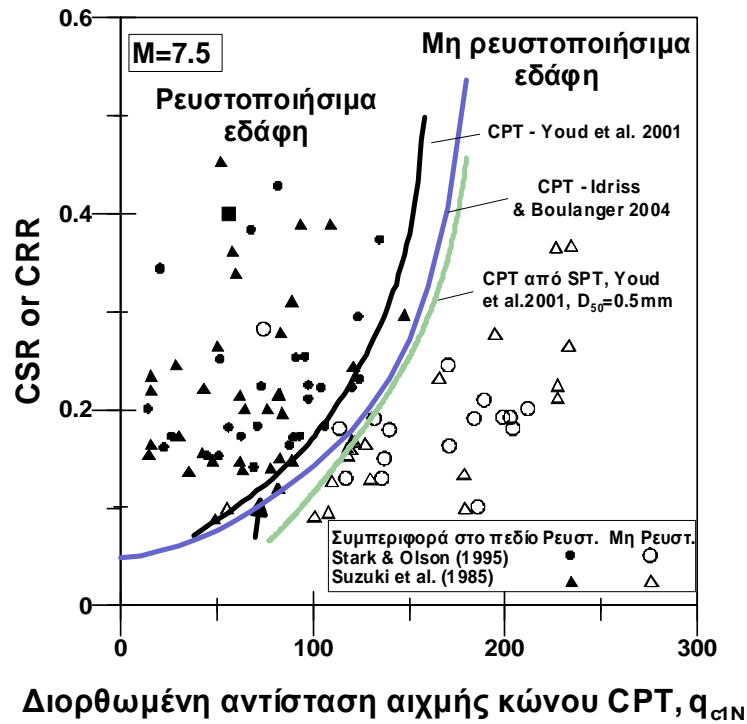
$$CRR = 50 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.065, \quad 60 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 185$$

## 5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ «ΚΙΝΕΖΙΚΩΝ» ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

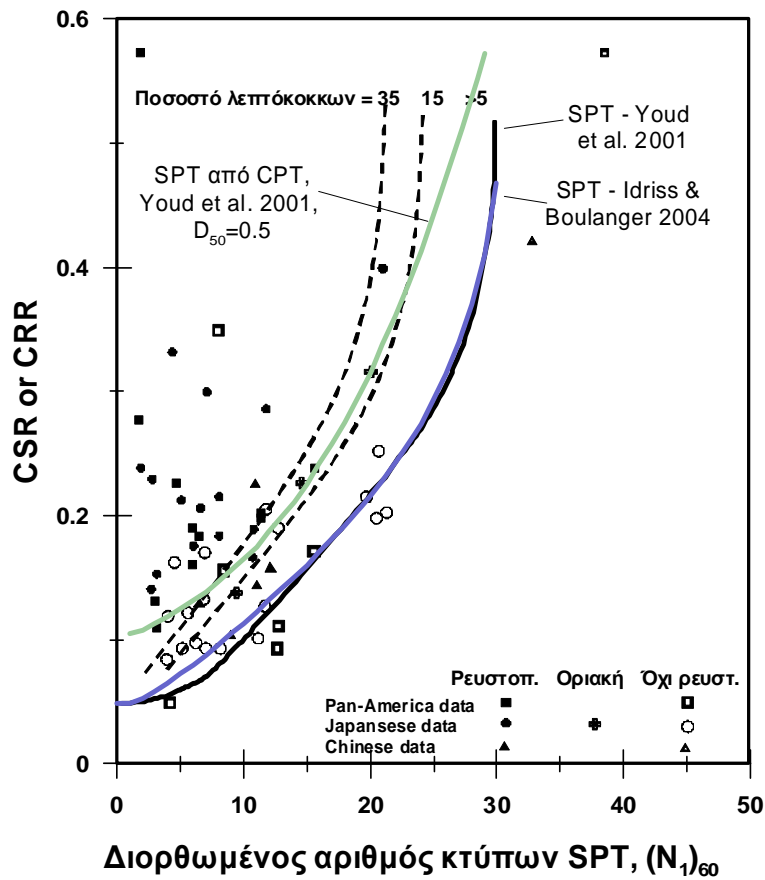
Η Χρήση των «Κινέζικων» Κριτηρίων ( $CC < 15\%$ ,  $LL < 35\%$  και  $w > 0.9LL$ ) για τον καταρχήν έλεγχο της πιθανότητας ρευστοποίησης λόγω πλαστικότητας του υλικού προτάθηκε αρχικά από τον Wang (1979), ενώ έχει πάρει την συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μορφή τους από τους Seed & Idriss (1982). Συχνά, τα Κινέζικα Κριτήρια αμφισβητήθηκαν, με πιο πρόσφατο παράδειγμα αυτό των Bray & Sancio (2004) και Sancio (2004) οι οποίοι, αναλύοντας θέσεις ρευστοποίησης από το Adapazari, θεωρούν ότι το πρώτο κριτήριο για το ποσοστό αργιλικών είναι πολύ «αυστηρό».

Από την διερεύνηση μας προκύπτει ότι, στις περιοχές που υπήρχαν αρκετά δεδομένα για να εφαρμοστούν τα Κινέζικα Κριτήρια, τα αποτελέσματα ήταν απόλυτα συμβατά με τον δείκτη εδάφους  $I_c$  που προκύπτει από μετρήσεις CPT. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η συμβατότητα αυτή διαταράσσεται αν αφαιρεθεί το πρώτο κριτήριο (ποσοστό αργιλικών), όπως προτείνουν οι Bray & Sancio (2004).

Βέβαια, είναι γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις στο Adapazari, αν και οι δοκιμές SPT και CPT πραγματοποιήθηκαν σε γειτονικές θέσεις, υπήρξε ασυμφωνία ως προς το αν το έδαφος είναι ρευστοποιήσιμο. Δεδομένου όμως ότι το Adapazari βρίσκεται σε αλλουβιακές αποθέσεις, το συγκεκριμένο γεγονός μπορεί να αποδοθεί στην έντονη στρωματογραφία της περιοχής, η οποία κάνει την σύγκριση ασύμβατη. Αυτή η παρατήρηση σε συνδυασμό με την εκτενή ρευστοποίηση που προβλέπει η μεθοδολογία CPT για το Adapazari μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αδυναμία του SPT να προβλέψει την εκτενή ρευστοποίηση που παρατηρήθηκε οφείλεται στο ότι οι ρευστοποιήσιμες στρώσεις διέφυγαν λόγω του σημειακού χαρακτήρα της δοκιμής SPT και του μικρού σχετικά πάχους τους.



Σχήμα 6. Σύγκριση καμπυλών CRR- $q_{c1N}$  και δεδομένων από ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης  
 Figure 6. Comparison of CRR- $q_{c1N}$  curves and case history data



Σχήμα 7. Σύγκριση καμπυλών CRR- $(N_1)_{60}$  και δεδομένων από ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης  
 Figure 7. Comparison of CRR- $(N_1)_{60}$  curves and case history data

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Υπάρχει ασυμβατότητα στην προτεινόμενη μεθοδολογία από τους Youd et al 2001 για τον υπολογισμό της αντοχής σε ρευστοποίηση μεταξύ της μεθόδου που βασίζεται σε δεδομένα από δοκιμές CPT και αυτής που βασίζεται σε δεδομένα από δοκιμές SPT. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη μεθοδολογία υπερεκτιμά την αντοχή σε ρευστοποίηση.
- Η διαφορά μεταξύ των μεθοδολογιών μειώνεται αισθητά με την χρήση των προτεινόμενων σχέσεων από τους Idriss & Boulanger 2004.
- Εναλλακτικά, για να επιτευχθεί ικανοποιητική συμβατότητα μεταξύ των δύο μεθοδολογιών προτείνεται μια νέα σχέση  $CRR-q_{c1N}$  (εξίσωση 17)
- Τα «Κινέζικα» κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αποκλεισμό μη-ρευστοποιήσιμων εδαφών λόγω πλασιμότητας όταν χρησιμοποιείται η δοκιμή SPT. Επισημαίνεται ότι εδαφικά δοκίμια που βρίσκονται στα όρια των κριτηρίων θα πρέπει να ελεγχθούν και εργαστηριακά.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bray, D. J. & Sancio, B. R. (2004), "Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari, Turkey", ASCE J. Geot. & Geoenv. Engng No 7, pp. 673-685
- Idriss, M. I. & Boulanger, W. R. (2004), "Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes", Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on recent Advances in Geot. Earthquake Engng & Soil Dyn, Vol. 1, pp 32-56
- Muromachi, T. (1981), "Cone penetration testing in Japan" Proc ACSE Nat. Convention: Penetration Testing and Experience, St. Louis, pp 49-75
- Robertson P.K. & Campanella R.G. (1983), Interpretation of Cone Penetration Tests, Part I: Sand, Part II:Clay, Canadian Geot. J., Vol 20, pp. 734-745
- Sancio, B. R. (2004), "Ground Failure and Building Performance in Adapazari, Turkey" PhD dissertation, Un. of California, Berkeley
- Seed, H. B. & Idriss, M. I.(1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", ASCE J. Soil mech. & foundation div., 97(9), pp 1249 – 1273
- Seed H.B. & Idriss I.M. (1982), "Ground motions and soil liquefaction during Earthquakes", EERI Monograph, Berkeley, California, 134 p.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. & Chung, R.M. (1985), "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", J. Geot. Engng. ASCE 111(12), 1425 – 1445
- Shibata, T. & Teparaksa W. (1988), "Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests", Soils & Foundations, Tokyo, Japan, 28(2), pp. 49-60
- Stark, T. D. & Olson, S. M. (1995), "Liquefaction Resistance using CPT and field cases Histories", J. Geot. Engng ASCE 121(12), pp 856 – 889
- Suzuki, Y., Tokimatsu, K., Koyamada, K., Taya, Y. & Kubota, Y.(1995), "Field correlation of soil liquefaction based on CPT data." Proc. Int. Symp. on Cone Penetration Testing, Vol. 2, pp 583–588
- Youd, L. T., Idriss, M. I., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Finn W.D.L., 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" ASCE J. Geot. & Geoenv. Engng, No 10, pp 817-833
- Wang, W. (1979), "Some findings in soil liquefaction", Proc. Int. Conf. on recent Advances in Geot. Earthquake Engng & Soil Dynamics Vol. 1, pp 179 – 185
- Zhou, S. (1980), "Evaluation of the liquefaction of sand by static cone penetration test", Proc.7<sup>th</sup> World Conf. Earthquake Engng, Istanbul, Turkey, Vol. 3