

Κριτήρια Επιδεκτικότητας και Δυναμικό Ρευστοποίησης με Βάση Νέες Καταγραφές από την Ελλάδα και το Εξωτερικό Susceptibility criteria and liquefaction potential assessment based on new in-situ data from Greece, Taiwan and Turkey

Γιώργος ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ¹, Σπύρος ΠΑΥΛΙΔΗΣ², Βασίλης ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ³, Κυριαζής
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ⁴

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εξέταση της επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού και της επικινδυνότητας μιας θέσης γίνεται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και πραγματοποιείται πριν την τελική εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης του συγκεκριμένου σχηματισμού. Έπειτα, υπολογίζεται ο δείκτης δυναμικού ρευστοποίησης LPI, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ως μέσο εκτίμησης του δυναμικού ρευστοποίησης μιας θέσης και με βάση την υπάρχουσα βαθμονόμηση του συγκεκριμένου δείκτη με το δυναμικό και τη δριμύτητα των φαινομένων ρευστοποίησης (Iwasaki et al., 1982) έχουν συνταχθεί χάρτες επιδεκτικότητας και εν δυνάμει ρευστοποιήσιμων περιοχών. Όμως, η παραπάνω βαθμονόμηση στηρίχθηκε στα γνωστά ως «Κινέζικα κριτήρια» επιδεκτικότητας για ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, τα οποία σήμερα χαρακτηρίζονται ως συντηρητικά, ενώ νέα τροποποιημένα κριτήρια (Seed et al., 2003) δημοσιεύτηκαν πρόσφατα. Στην παρούσα εργασία, η υπάρχουσα βαθμονόμηση των Iwasaki et al. (1982) συγκρίνεται με την βαθμονόμηση η οποία έχει προκύψει από την επεξεργασία γεωτεχνικών τομών επί τόπου δοκιμών SPT όπου η επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού εξετάστηκε με βάση τα νέα κριτήρια των Seed et al. (2003).

ABSTRACT: In order to evaluate the liquefaction potential of a soil element, the examination of its liquefaction susceptibility should be performed in advance. Afterwards, the liquefaction potential index of the entire soil column can be computed and used for the compilation of liquefaction hazard maps based on existing classification. However, the correlation of the index with the liquefaction potential was based on the “chinese criteria” of susceptibility that are now considered as conservative, while modified ones were proposed. The main goal of this study was to investigate the influence of these modified susceptibility criteria to the existing classification and to propose a new one if it is needed. In addition, a model for evaluating the probability of liquefaction-surface evidence was examined based on the value of liquefaction potential index of the soil column. The data set that was statistically analyzed was compiled by post-earthquake in-situ SPT borings performed in Greece, Taiwan and Turkey.

¹ Γεωλόγος, MSc, PhD, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: gpapatha@auth.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, email: pavliides@geo.auth.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ, email: christar@geo.auth.gr

⁴ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, email: kpitilak@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χαρακτηρισμός μιας θέσης και ενός σχηματισμού ως εν δυνάμει ρευστοποιήσιμου γίνεται έπειτα από την εφαρμογή συγκεκριμένων κριτηρίων αναφορικά με την απόσταση της θέσης από το επίκεντρο μελλοντικής σεισμικής δόνησης και με βάση την εξέταση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους. Η επικινδυνότητα μιας θέσης μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις εμπειρικές σχέσεις συσχέτισης μεγέθους σεισμού με την επικεντρική απόσταση της θέσης εμφάνισης ρευστοποίησης (Ambraseys, 1988; Parathanassiou et al. 2005), ενώ η επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών ορίζεται με βάση συγκεκριμένα κριτήρια.

Οι προϋποθέσεις τις οποίες θα πρέπει να ικανοποιεί ένα έδαφος ώστε να χαρακτηριστεί ως επιδεκτικό προς ρευστοποίηση, και που ήταν σε ισχύ μέχρι και τις αρχές τις δεκαετίας, είναι ευρέως γνωστές ως «Κινέζικα κριτήρια» (Wang, 1979) και αφορούσαν το ποσοστό των λεπτόκοκκων στο έδαφος και την τιμή του ορίου υδαρότητας. Οι Andrews και Martin (2000) επανεξέτασαν τα προηγούμενα δεδομένα και προσθέτοντας ταυτόχρονα νέα στοιχεία από μεταγενέστερους σεισμούς τροποποίησαν τα «Κινέζικα κριτήρια» με βάση τις προδιαγραφές που χρησιμοποιούνται στις Η.Π.Α, αναφορικά με τη μέγιστη διάμετρο των αργιλικών υλικών.

Στη συνέχεια και αφού έχει εκτιμηθεί η επιδεκτικότητα των σχηματισμών, υπολογίζεται ο δείκτης δυναμικού ρευστοποίησης LPI, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί ως μέσο εκτίμησης του δυναμικού ρευστοποίησης μιας θέσης.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία προτάθηκε από τους Iwasaki et al. (1978) ως μέτρο εκτίμησης της δριμύτητας των φαινομένων ρευστοποίησης και βαθμονομήθηκε με το δυναμικό ρευστοποίησης μιας θέσης (πίνακας 1) από τους Iwasaki et al. (1982). Στη συνέχεια οι Torrak και Holzer (2003) επιβεβαίωσαν την υπάρχουσα βαθμονόμηση και πρότειναν μια συσχέτιση των μορφών των αστοχιών λόγω ρευστοποίησης με το δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης LPI. Έπειτα, οι Sonmez (2003) και Lee et al. (2003) τροποποίησαν τόσο τη μεθοδολογία όσο και την προτεινόμενη βαθμονόμηση δημοσιεύοντας ταξινομήσεις κατά τις οποίες είτε προστέθηκε μία υποκατηγορία δυναμικού ρευστοποίησης στις υπάρχουσες (Sonmez, 2003) είτε αυξήθηκαν οι τιμές του LPI που συνιστούν τα όρια μεταξύ των κατηγοριών (Lee et al., 2003).

Πίνακας 1. Πίνακας συσχέτισης δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης μιας εδαφικής στήλης με το δυναμικό αυτής (Iwasaki et al., 1982)

Δείκτης δυναμικού ρευστοποίησης	Δυναμικό ρευστοποίησης
LPI=0	Πολύ χαμηλό
0<LPI<5	Χαμηλό
5<LPI<15	Υψηλό
LPI>15	Πολύ Υψηλό

Η τιμή του LPI μπορεί να ενσωματωθεί σε προγράμματα γεωγραφικών συστημάτων πληροφόρησης (GIS), παρέχοντας χωρικά δεδομένα για την αναπαραγωγή χαρτών εν

δυνάμει ρευστοποιήσιμων περιοχών με βάση την υπάρχουσα βαθμονόμηση του συγκεκριμένου δείκτη με το δυναμικό και τη δριμύτητα των φαινομένων ρευστοποίησης (Iwasaki et al., 1982). Τέτοιες εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί σε αρκετές περιοχές ανά τον κόσμο ενώ για την Ελλάδα παρόμοια εφαρμογή έχει δημοσιευτεί από τους Parathanassiou et al. (2005b) για την πόλη της Λευκάδας, στην οποία συγκρίνονται το δυναμικό ρευστοποίησης του υπεδάφους της πόλης με την κατανομή των αστοχιών που προκλήθηκαν από τη σεισμική δόνηση της 14^{ης} Αυγούστου 2003.

Όμως, η παραπάνω βαθμονόμηση στηρίχθηκε στα γνωστά ως «Κινέζικα κριτήρια» επιδεκτικότητας για ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, τα οποία σήμερα χαρακτηρίζονται ως συντηρητικά σύμφωνα με τους Seed et al. (2003) καθώς η επιδεκτικότητα ενός σχηματισμού προς ρευστοποίηση εξαρτάται από το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών και όχι από το ποσοστό των κόκκων μεγέθους αργίλου που εμφανίζεται στα «Κινέζικα κριτήρια». Συνεπώς τα προηγούμενα κριτήρια θα πρέπει να θεωρούνται ανενεργά καθώς εδάφη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση ταξινομούσαν ως μη επιδεκτικά με αποτέλεσμα τη λανθασμένη εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης.

Στην παρούσα εργασία, η υπάρχουσα βαθμονόμηση των Iwasaki et al. (1982) συγκρίνεται με την βαθμονόμηση η οποία έχει προκύψει από την επεξεργασία γεωτεχνικών τομών επί τόπου δοκιμών SPT όπου η επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού εξετάστηκε με βάση τα νέα κριτήρια των Seed et al. (2003).

Αρχικά, δημιουργήθηκε μια βάση γεωτεχνικών τομών επί τόπου δοκιμών SPT που πραγματοποιήθηκαν σε θέσεις εκδήλωσης ή μη επιφανειακών φαινομένων ρευστοποίησης στην Ελλάδα και στο εξωτερικό. Για τη δημιουργία αυτής της βάσης πραγματοποιήθηκε αναζήτηση σε δημοσιευμένες εργασίες και σε δικτυακούς τόπους όπου υπήρχε πλήρης περιγραφή τόσο της διαδικασίας εκτέλεσης των δοκιμών όσο και της περιγραφής των αστοχιών. Στη συνέχεια τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε κατηγορίες ανάλογα με την περιγραφή των φαινομένων ρευστοποίησης, η οποία συνόδευε κάθε γεωτεχνική τομή.

Έπειτα, υπολογίστηκε ο συντελεστής ασφάλειας σε ρευστοποίηση κάθε εδαφικού στρώματος και εξετάστηκε η επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών με βάση τα νέα κριτήρια των Seed et al. (2003). Στον υπολογισμό της τιμής του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης (LPI), ο οποίος έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Iwasaki et al. (1982), συμμετείχαν μόνο εκείνα τα εδάφη τα οποία ικανοποιούσαν τα κριτήρια επιδεκτικότητας των Seed et al. (2003). Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης των τροποποιημένων κριτηρίων επιδεκτικότητας στην τελική βαθμονόμηση με καταληκτικό στόχο την βελτίωση της υπάρχουσας βαθμονόμησης του δυναμικού ρευστοποίησης

ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ ΑΠΟ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ

Για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων επί τόπου δοκιμών SPT πραγματοποιήθηκε αναζήτηση σε δημοσιευμένες εργασίες και σε δικτυακούς τόπους. Ο συνολικός αριθμός των καταχωρημένων γεωτεχνικών τομών στη βάση δεδομένων ανέρχεται σε 79, με την

πλειοψηφία αυτών να αναφέρεται σε επί τόπου δοκιμές SPT σε θέσεις όπου παρατηρήθηκαν επιφανειακές εκδηλώσεις ρευστοποίησης.

Το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων τα οποία έχουν καταχωρηθεί στη βάση, προέρχεται από τις δύο σεισμικές δονήσεις του 1999, στην Ταϊβαν και στην Τουρκία. Δεδομένα από 12 γεωτεχνικές τομές επί τόπου δοκιμών σε θέσεις εμφάνισης ρευστοποίησης αναφέρονται στο σεισμό του Kocaeli (Τουρκία) το 1999 ενώ 58 περιπτώσεις, (45 ρευστοποίησης και 13 μη ρευστοποίησης) προέρχονται από γεωτρήσεις σε θέσεις όπου εκτελέστηκαν δοκιμές SPT στην Ταϊβαν μετά τη σεισμική δόνηση της Chi-chi το 1999. Η συλλογή αυτών των τομών πραγματοποιήθηκε από συγκεκριμένους δικτυακούς τόπους (web site) στους οποίους υπάρχει πλήρης περιγραφή τόσο της διαδικασίας εκτέλεσης των δοκιμών όσο και της περιγραφής των αστοχιών. Αυτοί οι δικτυακοί τόποι εντοπίζονται στις ακόλουθες διευθύνσεις: http://peer.berkeley.edu/lifelines/research_projects/3A02/, <http://www.ces.clemson.edu/chichi/TW-LIQ/Homepage.htm> για το σεισμό της Chi-Chi (Taiwan) και <http://peer.berkeley.edu/turkey/adapazari/> για τη σεισμική δόνηση του Kocaeli (Τουρκία). Τη βάση δεδομένων συμπληρώνουν 9 γεωτρήσεις σε επιλεγμένες θέσεις εμφάνισης ρευστοποίησης στο νησί της Λευκάδας μετά το σεισμό του 2003. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί εμφανίζονται τα καταχωρημένα στοιχεία στη βάση δεδομένων ανά σεισμό και αριθμό δοκιμών σε θέσεις εμφάνισης ή μη ρευστοποίησης για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Πίνακας 2. Πίνακας επί τόπου δοκιμών SPT

Σεισμός	SPT δοκιμές σε θέσεις εμφάνισης ρευστοποίησης	SPT δοκιμές σε θέσεις μη εμφάνισης ρευστοποίησης
Kocaeli	12	-
Chi-Chi	45	13
Λευκάδα	9	-

Στη συνέχεια, τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την δριμύτητα των μορφών των φαινομένων ρευστοποίησης, *υψηλή, μέση και καμία αστοχία*. Στην πρώτη κατηγορία τοποθετήθηκαν οι τομές οι οποίες προέκυψαν από δοκιμές σε θέσεις όπου σύμφωνα με την περιγραφή υπήρξε αστοχία λόγω πλευρικής μετατόπισης (lateral spreading) ενώ η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από δεδομένα σε θέσεις όπου υπήρξε είτε εμφάνιση κώνων άμμου (sand boils) είτε περιγραφή καθίζησης εδάφους ή/και κατασκευής.

Στα καταχωρημένα στοιχεία στη βάση δεδομένων εφαρμόστηκαν στατιστικές μέθοδοι με στόχο την δημιουργία μιας καταρχήν συσχέτισης, η ολοκλήρωση της οποίας θα επιτευχθεί μετά από τον εμπλουτισμό της με περισσότερες περιπτώσεις και δεδομένα επί τόπου δοκιμών.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Έπειτα από την ταξινόμηση των δεδομένων σε κατηγορίες, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης. Αρχικά υπολογίστηκε ο συντελεστής

ασφαλείας σε ρευστοποίηση κάθε εδαφικού στρώματος με βάση την απλοποιημένη διαδικασία των Seed και Idriss (1971) και τις τροποποιήσεις αυτής, όπως διατυπώθηκαν από την επιτροπή NCEER (Youd et al., 2001).

Έτσι λοιπόν, η αντίσταση στην ρευστοποίηση των εδαφικών στρωμάτων, CRR, υπολογίστηκε με βάση τη σχέση:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - N_{1(60)cs}} + \frac{N_{1(60)cs}}{135} + \frac{50}{[10 \times N_{1(60)cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (1)$$

Όπου $(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60}$ και

$\alpha=0$ για $FC < 5\%$,

$\alpha = \exp [1.76 - (190 / FC^2)]$ για $5\% < FC < 35\%$

$\alpha = 5$ για $FC > 35\%$

$\beta = 1.0$ για $FC < 5\%$

$\beta = [0.99 + FC \cdot 1.5 / 1000]$ για $5\% < FC < 35\%$

$\beta = 1.2$ για $FC > 35\%$

ενώ η κανονικοποιημένη τιμή $(N_1)_{60}$ των κρούσεων N, υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης :

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S$$

όπου N = ο αριθμός κρούσεων κατά την εκτέλεση της δοκιμής, C_N = διορθωτικός συντελεστής για να ληφθεί υπόψη η επιρροή της πίεσης σ'_{vo} του υπερκείμενου εδάφους, C_E = συντελεστής του λόγου ενέργειας (ER), C_B = συντελεστής αναφερόμενος στη διάμετρο της γεώτρησης, C_R = διορθωτικός συντελεστής του μήκους των στελεχών κάτω από τον άκμονα, C_S = διόρθωση για δείγματα με ή χωρίς φραγμούς.

Όσον αφορά το λόγο των αναπτυσσόμενων ανακυκλικών τάσεων (CSR), αυτός υπολογίστηκε με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$CSR = 0.65 \times \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \times \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \times r_d \quad (2)$$

όπου a_{max} = η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), g = η επιτάχυνση της βαρύτητας, σ_{vo} = ολική κατακόρυφη τάση, σ'_{vo} = ενεργή τάση, r_d = συντελεστής μείωσης της τάσης με το βάθος z.

Ο παράγοντας r_d , ο οποίος εκφράζει την ευκαμψία του εδαφικού προφίλ υπολογίστηκε με βάση τους δημοσιευμένους τύπους από τους Liao και Whitman (1986):

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad \text{για } z < 9.15\text{m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{για } 9.15 \text{ m} < z < 23\text{m}$$

όπου z = βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε μέτρα.

Οι τιμές του $CSR_{7.5}$, οι οποίες υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των παραπάνω εξισώσεων στη συνέχεια διαιρέθηκαν με το συντελεστή αναγωγής MSF για την αντίστοιχη σεισμική δόνηση. Ο συντελεστής MSF για κάθε σεισμό υπολογίστηκε με βάση τη μαθηματική σχέση:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (3)$$

Έπειτα, στα εδάφη με $fs < 1$ εφαρμόστηκαν τα κριτήρια των Seed et al. (2003), για να διερευνηθεί η επιδεκτικότητα τους προς ρευστοποίηση, έτσι ώστε στον τελικό υπολογισμό του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης των εδαφικών στηλών να συμπεριληφθούν μονάχα εκείνα που πληρούσαν τις προδιαγραφές των κριτηρίων των Seed et al. (2003).

Ο δείκτης δυναμικού ρευστοποίησης υπολογίστηκε με βάση την προτεινόμενη από τους Iwasaki et al. (1982) σχέση:

$$LPI = \int_0^z F(z)W(z)dz \quad (4)$$

όπου $F(z) = 1 - fs$ για $fs < 1$

$F(z) = 0$ για $fs > 1$

και $W(z) = 10^{-0.5z}$, $z =$ βάθος σε μέτρα από την επιφάνεια

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Αρχικά, εφαρμόστηκε στα δεδομένα η μέθοδος των θηκογραμμάτων και το αποτέλεσμα αυτής της στατιστικής επεξεργασίας συγκρίθηκε με τις προτεινόμενες ταξινομήσεις από τους Iwasaki et al. (1982) και Toprak and Holzer (2003). Στη συνέχεια, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης με στόχο την ανάπτυξη ενός μοντέλου συσχέτισης του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης με την πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης.

Μέθοδος θηκογραμμάτων

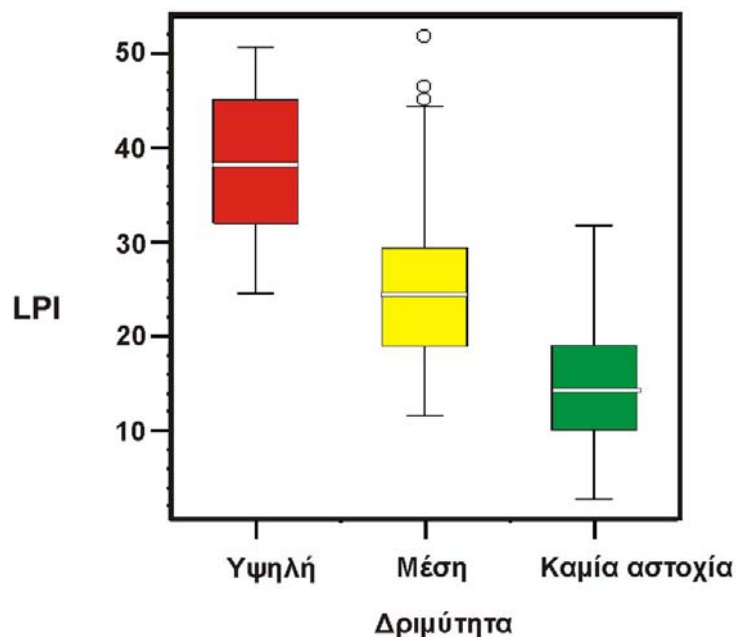
Για τη δημιουργία της νέας ταξινόμησης μεταξύ της δριμύτητας των φαινομένων ρευστοποίησης και του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης (LPI) εδαφικής στήλης, χρησιμοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν με βάση τη μέθοδο των θηκογραμμάτων (box-plots) οι τιμές του LPI των επί τόπου δοκιμών SPT (Parathanassiou, 2008).

Το θηκόγραμμα (box-plot) είναι ένας νέος τρόπος γραφικής παρουσίασης των πέντε (5) μέτρων μιας κατανομής: της ελάχιστης τιμής, της μέγιστης τιμής και των τεταρτημορίων Q1, Q2, Q3. Η συγκεκριμένη μέθοδος επεξεργασίας επιλέχθηκε διότι με αυτήν προβάλλεται ξεκάθαρα ως ορθογώνιο το τμήμα εκείνο του πληθυσμού το οποίο απεικονίζει τη μέση τάση στη διακύμανση των τιμών, αποκλείοντας την ελάχιστη και μέγιστη τιμή, οι οποίες ορισμένες φορές αποτελούν ακραία παραδείγματα.

Ως πρώτο τεταρτημόριο (quartile) Q_1 ορίζεται η τιμή αριστερά της οποίας βρίσκεται το πολύ το 25% των παρατηρήσεων και όμοια για το Q_3 , η τιμή αριστερά της οποίας βρίσκεται το πολύ το 75% των παρατηρήσεων. Η τιμή Q_2 συμπίπτει με τη **διάμεσο** (median), την τιμή δηλ. για την οποία το πολύ 50% των παρατηρήσεων είναι μικρότερες και το πολύ 50% των παρατηρήσεων είναι μεγαλύτερες από την τιμή αυτή.

Για κάθε μία από τις 2 κατηγορίες δριμύτητας και για την κατηγορία «καμία αστοχία», αντιστοιχεί ένα θηκόγραμμα στο οποίο η ελάχιστη τιμή ταυτίζεται με την κάτω παράλληλη γραμμή στον άξονα x , ενώ η μέγιστη τιμή ταυτίζεται με την επάνω παράλληλη γραμμή στον άξονα x . Στο ορθογώνιο που ορίζεται από το ενδοτεταρτημοριακό εύρος σημειώνεται με έντονη γραμμή η διάμεσος που συμπίπτει με τη θέση του δεύτερου τεταρτημορίου Q_2 . Τέλος, η κάτω πλευρά του ορθογωνίου ταυτίζεται με το Q_1 (τιμή η οποία εκφράζει το 25% των παρατηρήσεων) και η επάνω πλευρά του ορθογωνίου ταυτίζεται με το Q_3 (75% των παρατηρήσεων).

Το αποτέλεσμα αυτής της στατιστικής επεξεργασίας εμφανίζεται στο σχήμα 1, όπου διακρίνονται οι τρεις κατηγορίες δριμύτητας των μορφών των φαινομένων ρευστοποίησης (θηκογράμματα) σε σχέση με τις τιμές του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης.



Σχήμα 1. Θηκόγραμμα διακύμανσης δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης με την δριμύτητα των μορφών των φαινομένων ρευστοποίησης

Αναλυτικά οι τιμές του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης που χαρακτηρίζουν κάθε μία από τις 3 κατηγορίες είναι:

Για την κατηγορία «υψηλός βαθμός δριμύτητας», η οποία συσχετίζεται με την εμφάνιση πλευρική μετατόπισης (lateral spreading), το ορθογώνιο του θηκογράμματος ορίζεται από τις τιμές 32 (Q_1) και 45 (Q_3) με διάμεσο ίση με 38. Για την κατηγορία «μέσης δριμύτητας»,

εμφάνιση κώνων άμμου (Sand boils), Καθίζηση κτιρίου (Building Settlement), το ορθογώνιο του θηκογράμματος ορίζεται από τις τιμές 19 (Q_1) και 29 (Q_3) με διάμεσο ίση με 24. Τέλος, για την κατηγορία «καμία αστοχία (No failures)», το ορθογώνιο του θηκογράμματος ορίζεται από τις τιμές 10 (Q_1) και 19 (Q_3) με διάμεσο ίση με 14.

Συνοψίζοντας, η προτεινόμενη καταρχήν ταξινόμηση της δριμύτητας των φαινομένων ρευστοποίησης με βάση την τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης της εδαφικής στήλης ορίζει ότι:

- για τιμές του LPI μεγαλύτερες από 32 αναμένονται μεγάλης δριμύτητας φαινόμενα ρευστοποίησης (πλευρικές μετατοπίσεις)
- για τιμές του $LPI < 19$, δεν αναμένονται επιφανειακές εκδηλώσεις φαινομένων ρευστοποίησης χωρίς αυτό να απορρίπτει το σενάριο ρευστοποίησης ενός υποκείμενου εδαφικού στρώματος και
- για $19 < LPI < 29$, είναι πιθανό να εκδηλωθούν μέσης δριμύτητας φαινόμενα ρευστοποίησης όπως δημιουργία κώνων άμμου και καθιζήσεις.

Η προτεινόμενη ταξινόμηση διαφέρει αισθητά από τις υπάρχουσες των Iwasaki et al (1982) και Toprak and Holzer (2003), όπου οι τιμές του LPI που συνιστούν τα όρια μεταξύ των κατηγοριών είναι 5 και 15 για θέσεις με χαμηλό και υψηλό δυναμικό ρευστοποίησης, αντίστοιχα. Μια αιτία για αυτήν την διαφοροποίηση είναι η εφαρμογή διαφορετικών κριτηρίων επιδεκτικότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς (Parathanassiou, 2008) καθώς οι Iwasaki et al (1982) και Toprak and Holzer (2003), χρησιμοποίησαν τα «Κινέζικα κριτήρια» και τα κριτήρια των Andrews and Martin (2000) ενώ σε αυτήν την εργασία εφαρμόστηκαν τα τροποποιημένα από τους Seed et al. (2003) κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια αυξάνουν το συνολικό πάχος των επιδεκτικών προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών καθώς εδάφη με ποσοστό αργίλου μεγαλύτερο από 15%, μη ρευστοποιήσιμα κατά τους Andrews και Martin (2000), θεωρούνται πλέον εν δυνάμει ρευστοποιήσιμα εφόσον το όριο υδαρότητας τους LL είναι μικρότερο του 37% και ο δείκτης πλαστικότητας μικρότερος του 12%. Συνεπώς, αυτή η αύξηση στις τιμές του LPI είναι αναμενόμενη αφού ο δείκτης δυναμικού ρευστοποίησης εξαρτάται από το πάχος των ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Μέθοδος λογιστικής παλινδρόμησης

Στη συνέχεια, αναζητήθηκε η συνάρτηση η οποία θα παρείχε τη δυνατότητα υπολογισμού της πιθανότητας επιφανειακής εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποίησης. Αυτή η διερεύνηση, της σχέσης του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης μιας εδαφικής στήλης με την πιθανότητα εμφάνισης ρευστοποίησης στο περιβάλλον αυτής, πραγματοποιήθηκε με βάση τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης.

Η μέθοδος της λογιστικής παλινδρόμησης (logistic regression), προτιμήθηκε διότι αναφέρεται σε εκείνες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η εξαρτημένη μεταβλητή είναι διμερής (binary) ή όπως ονομάζεται διαφορετικά διχοτομημένη (dichotomous), κάτι το οποίο συμβαίνει στην προκειμένη περίπτωση, *ναι* ή *όχι* εμφάνιση ρευστοποίησης.

Το ζητούμενο κατά την ανάλυση των δεδομένων ήταν η εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης έχοντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή μονάχα την τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης. Το υπόδειγμα της λογιστικής παλινδρόμησης με μια μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή είναι:

$$\text{Πιθανότητα (ρευστοποίησης)} = 1 / [1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 X)}]$$

Όπου β_0 και β_1 είναι οι συντελεστές της λογιστικής παλινδρόμησης και e είναι η βάση των φυσικών (νεπέριων) λογάριθμων, με τιμή ίση με 2.718.

Η σχέση μεταξύ της ανεξάρτητης μεταβλητής και της πιθανότητας είναι μη γραμμική και οι εκτιμητές πιθανότητας κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1, ανεξάρτητα της τιμής του Z.

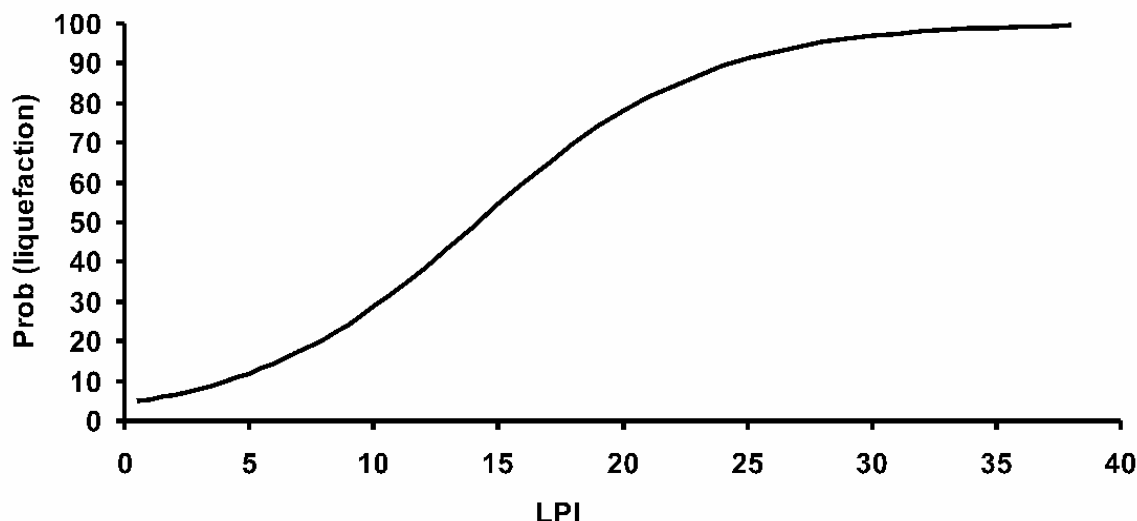
Αρχικά, τα δεδομένα των γεωτεχνικών τομών τα οποία αναφέρονται σε εμφάνιση ρευστοποίησης καταχωρήθηκαν με τον κωδικό 1, ενώ με τον κωδικό 0 χαρακτηρίστηκαν αυτά στα οποία δεν περιγράφεται εκδήλωση ρευστοποίησης. Η στήλη στην οποία περιέχονται οι παραπάνω κωδικοί ονομάστηκε “ yes/no “ και αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή (dependent variable) ενώ η στήλη με τις τιμές του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης, εμφανίζεται ως LPI και αντιστοιχεί στην ανεξάρτητη μεταβλητή.

Οι συντελεστές του υποδείγματος, β_0 και β_1 οι οποίοι υπολογίστηκαν με την τεχνική της ταυτόχρονης εισόδου στην εξίσωση παλινδρόμησης βρέθηκαν ίσοι με -3,092 και 0,218 αντίστοιχα, συνεπώς η προτεινόμενη εξίσωση παλινδρόμησης είναι :

$$\text{Pr ob}(liquefaction) = \left(\frac{1}{1 + e^{-(-3.092 + 0.218 \times LPI)}} \right) \quad (4)$$

Στη συνέχεια ελέγχθηκε η καλή προσαρμογή του υποδείγματος της ανάλυσης με συγκεκριμένους δείκτες ερμηνείας. Κατά την μέθοδο Hosmer και Lemeshow κατανομονται οι παρατηρήσεις σε δέκατα με βάση της προβλεπόμενες πιθανότητες και στη συνέχεια υπολογίζεται το υπόδειγμα χ^2 (chi – square) από τις παρατηρούμενες και αναμενόμενες κατανομές. Η τιμή του στατιστικού της σημαντικότητας, Sig.= 0.592>0.05 καθώς επίσης και η σχετικά υψηλή τιμή του δείκτη Nagelkerke R^2 , ίση με 0.458, επιβεβαιώνουν την καλή προσαρμογή του υποδείγματος (Norusis, 2003).

Επίσης, θέτοντας την τιμή Prob(liquefaction)=0.5 ως το όριο μεταξύ των δύο καταστάσεων, εμφάνιση ή όχι φαινομένων ρευστοποίησης στην επιφάνεια, προκύπτει ότι το ποσοστό των επιτυχημένων προβλέψεων είναι ίσο με 84.8% (Parathanassiou, 2008), ενώ η τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης που αντιστοιχεί στην πιθανότητα Prob=0.5 είναι ίση με 14 (σχήμα 2). Συνεπώς, με βάση την ανάλυση λογιστικής παλινδρόμησης, οι θέσεις όπου $LPI > 14$ θεωρούνται ως πιθανά σημεία εκδήλωσης επιφανειακών φαινομένων ρευστοποίησης ενώ αυτές όπου $LPI < 14$ ως μη ρευστοποιήσιμες.



Σχήμα 2. Καμπύλη πιθανότητας εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης με βάση την τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης LPI

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των τροποποιημένων κριτηρίων επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ενός εδάφους, στην υπάρχουσα βαθμονόμηση του δυναμικού ρευστοποίησης με τον δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης LPI.

Για την επίτευξη των στόχων της έρευνας δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων γεωτεχνικών τομών από επί-τόπου δοκιμές σε θέσεις εμφάνισης ή μη εμφάνισης ρευστοποίησης έπειτα από σεισμικές δονήσεις στην Τουρκία, στην Taiwan και στην Ελλάδα. Για κάθε τομή εκτιμήθηκε η επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, με βάση την εφαρμογή των προτεινόμενων από τους Seed et al. (2003) κριτηρίων, και υπολογίσθηκε η τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης. Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης και τη μέθοδο των θηκογραμμάτων και είχε ως στόχο τον συσχετισμό του δείκτη με την επιφανειακή εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης.

Η βαθμονόμηση που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου των θηκογραμμάτων αναφέρει ότι σε θέσεις όπου:

- $LPI > 32$ αναμένονται μεγάλης δριμύτητας φαινόμενα ρευστοποίησης (πλευρικές μετατοπίσεις)
- $LPI < 19$ δεν αναμένονται επιφανειακές εκδηλώσεις φαινομένων ρευστοποίησης
- $19 < LPI < 29$, είναι πιθανό να εκδηλωθούν μέσης δριμύτητας φαινόμενα ρευστοποίησης όπως δημιουργία κώνων άμμου και καθιζήσεις.

Αυτά τα προτεινόμενα όρια αφορούν την εμφάνιση μεγάλων μόνιμων παραμορφώσεων στο έδαφος σε μια συγκεκριμένη θέση και όχι την συμπεριφορά των υποκείμενων εδαφών. Συνεπώς, οι επιπτώσεις της ρευστοποίησης ενός υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού στην θεμελίωση μιας κατασκευής θα πρέπει να εκτιμηθεί σύμφωνα με τις υπάρχουσες δημοσιευμένες μεθόδους.

Η προτεινόμενη καταρχήν βαθμονόμηση, από αυτήν την εργασία, διαφέρει αισθητά από την υπάρχουσα. Μία αιτία αυτής της διαφοροποίησης είναι η εφαρμογή των νέων κριτηρίων επιδεκτικότητας στους εδαφικούς σχηματισμούς αντί των «κινεζικών κριτηρίων».

Επιπλέον, αναπτύχθηκε ένα πιθανολογικό μοντέλο πρόγνωσης εκδήλωσης επιφανειακών φαινομένων ρευστοποίησης με βάση την μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης. Η προτεινόμενη εξίσωση με την οποία υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης στην επιφάνεια, P (ρευστοποίησης) είναι:

$$Pr ob(liquefaction) = \left(\frac{1}{1 + e^{-(-3.092 + 0.218 \times LPI)}} \right)$$

Η οριστική βαθμονόμηση του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης με τη δριμύτητα των μορφών των φαινομένων ρευστοποίησης πρόκειται να ολοκληρωθεί μετά από τον εμπλουτισμό της βάσης δεδομένων με νέα στοιχεία και περιπτώσεις από επί τόπου δοκιμές σε θέσεις εμφάνισης ή μη φαινομένων ρευστοποίησης

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ambraseys, N.N., (1988). Engineering seismology, *Int. J. Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 17, pp. 1-105
- Andrews, D.C., Martin, G.R., (2000), Criteria for liquefaction of silty sands, Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., Yasyda, S., (1978). A practical method for assessing the soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation, San Francisco, Vol 2, pp. 885-896
- Iwasaki, T. Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H., (1982), Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, Proceedings of the 3rd International Conference on microzonation, Seattle, 3, pp. 1310-1330.
- Lee, D.H., Ku, C.S., Yuan, H., (2003), A study of the liquefaction risk potential at Yanlin. Taiwan, *Engineering Geology* 71, 97-117
- Liao, S., Whitman, R.V., (1986), Overburden correction factor for SPT in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 112 (3), 373-377.
- Norusis, J., M., (2003), SPSS 12.0 *Statistical Procedures Companion*, Prentice Hall, N. Jersey
- Papathanassiou, G., (2008), LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence, *Engineering Geology*, 96, pp. 94-104
- Papathanassiou, G., Pavlides, Sp., Christaras, B., Pitilakis, K., (2005), Liquefaction case histories and empirical relations of earthquake magnitude versus distance from the broader Aegean region, *J. Geodyn.*, 40, pp. 257-278

- Papathanassiou, G., Pavlides, S., Ganas, A., (2005b), The 2003 Lefkada earthquake: field observation and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkada, *Engineering Geology*, 82, 12-31
- Seed, H.B., Idriss, I.M., (1971), Simplified Procedure for evaluation Soil liquefaction potential, *Journal Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, 97 SM9, 1249-1273.
- Seed, R.B., Cetin, K.O., Moss, R.E.S., Kammerer, A.M., Wu, J., Pestana, J.M., Riemer, M.F., Sancio, R.B., Bray, J.D., Kayen, R.E., Faris, A., (2003), Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework, 26th annual ASCE L.A. Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, California, 71 pp.
- Sonmez, H., (2003), Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey), *Environmental Geology*, 44, 862-871
- Toprak, S., 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., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcurson, III WF, Marti, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II K.H., (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
- Wang, W., (1979), Some findings in soil liquefaction, Research report water conservancy and hydroelectric power scientific research institute, Beijing, China, pp. 1-17.