

# Εδαφική Ρευστοποίηση στην Παραλιακή Ζώνη της Κάτω Αχαΐας κατά το Σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας της 8<sup>ης</sup> Ιουνίου 2008

## Soil Liquefaction at the Coastal Zone of Kato Achaia in the Achaia-Illia, Greece, Earthquake of June 8, 2008

ΜΠΑΤΙΛΑΣ, Α. Β.	Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτ. Φοιτ., Παν. Πατρών.
ΑΘΑΝΑΣΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. Α.	Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Παν. Πατρών.
ΠΕΛΕΚΗΣ, Π. Κ.	Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, ΑΣΠΑΙΤΕ.
ΒΛΑΧΑΚΗΣ, Β. Σ.	Πολιτικός Μηχανικός, Μ.Δ.Ε., Μεταπτ. Φοιτητής, Παν. Πατρών.
ΚΛΗΜΗΣ, Ν.	Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, Δημοκρ. Παν. Θράκης
ΜΥΛΩΝΑΚΗΣ, Γ. Ε.	Πολιτικός Μηχανικός, Αναπλ. Καθηγητής, Παν. Πατρών.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Παρουσιάζεται η περίπτωση εκδήλωσης εδαφικής ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης στην παραλιακή ζώνη της Κάτω Αχαΐας κατά το σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας της 8-6-2008 ( $M_w=6.5$ ). Παρουσιάζονται αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης στην εξεταζόμενη θέση και εκτιμάται η ένταση της επιφανειακής κίνησης με βάση σύγχρονες σχέσεις εξασθένησης και τις διαθέσιμες καταγραφές του κύριου σεισμού. Η παρατηρηθείσα συμπεριφορά συγκρίνεται με εκτιμήσεις βασισμένες στην εφαρμογή των σύγχρονων κριτηρίων ρευστοποιησιμότητας και των ημιεμπειρικών συσχετίσεων του κινδύνου ρευστοποίησης με βάση επι-τόπου δοκιμές όπως SPT, CPT, και  $V_{SO}$ .

**ABSTRACT :** A case history of soil liquefaction and lateral spreading, which occurred at the coastal zone of Kato Achaia during the Achaia-Illia, Greece earthquake of June 8, 2008 ( $M_w=6.5$ ), is reported. The results of a subsurface exploration conducted in the liquefied zone are presented whereas the intensity of surface motion in the area is evaluated based on attenuation relations and strong motion recordings of the main sock. The observed behavior is compared to estimates based on current liquefaction susceptibility criteria and on semi empirical correlations between liquefaction triggering and the results of in-situ tests (SPT, CPT,  $V_{SO}$ ).

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας (8-6-2008,  $M_w=6.5$ ) εκτός από τις σοβαρές βλάβες που προκάλεσε σε οικοδομικά έργα της πλειόσειστης περιοχής έγινε αφορμή για την εκδήλωση αρκετών φαινομένων εδαφικής αστοχίας σε ακτίνα 15km, περίπου, από το κατακόρυφο, δεξιόστροφο σεισμογόνο ρήγμα διεύθυνσης που προκάλεσε το σεισμό (Margaris et al. 2008, 2010). Τα φαινόμενα αυτά περιλαμβάνουν περιπτώσεις εδαφικής ρευστοποίησης/ πλευρικής εξάπλωσης, καθίζησης παραλιακών ζωνών ή επιχωμάτων και κατολισθήσεων (κυρίως βραχοπτώσεων), Σχήμα 1.

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η παρουσίαση στοιχείων που αφορούν στην εκδήλωση εδαφικής

ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης στην παραλιακή ζώνη της Κάτω Αχαΐας, σε απόσταση 6.0km, περίπου, από το σεισμογόνο ρήγμα. Τα στοιχεία περιλαμβάνουν παρατηρήσεις πεδίου, γεωτεχνικά δεδομένα για τις εδαφικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης και συγκρίσεις της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς με τις προβλέψεις σύγχρονων μεθοδολογιών ελέγχου ρευστοποιησιμότητας και κινδύνου ρευστοποίησης.

### 2. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

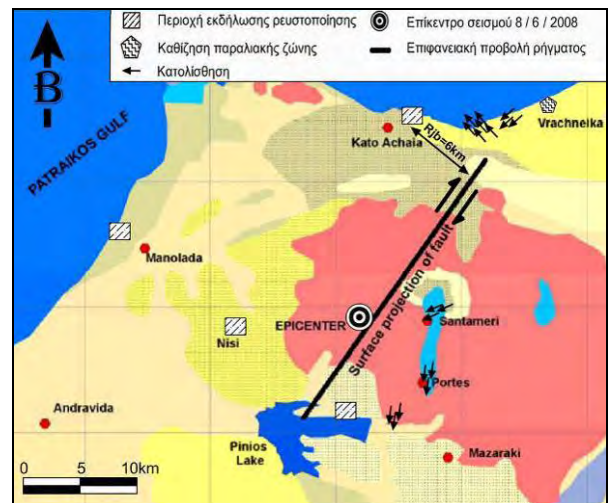
Οι παρατηρήσεις πεδίου στη παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας διεξήχθησαν στις 10 και 11 Ιουνίου 2008 (48 ώρες, περίπου, μετά την εκδήλωση του κύριου σεισμού) και περιέλαβαν την καταγραφή της συμπεριφοράς των

επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών και την τοπογραφική αποτύπωση των θέσεων ρευστοποίησης (ΘΕΣΗ-I και ΘΕΣΗ-II).

Η ΘΕΣΗ-I ( $N38^{\circ} 09.106'$ ,  $E21^{\circ} 33.807'$ ) βρίσκεται στην παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας, σε απόσταση 590m Β-ΒΑ από τον Σιδηροδρομικό Σταθμό, και χαρακτηρίζεται από επίπεδη μορφολογία, με ήπια κλίση ( $\approx 0.4\%$ ) προς τη θάλασσα, Σχήμα 2. Αντίστοιχα, η ΘΕΣΗ-II ( $N38^{\circ} 09.147'$ ,  $E21^{\circ} 33.571'$ ) βρίσκεται σε απόσταση 350m δυτικά της ΘΕΣΗΣ-I και παρουσιάζει παρόμοια μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Κατά τις αναγνωριστικές επισκέψεις στη ΘΕΣΗ-I παρατηρήθηκαν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της εκδήλωσης ρευστοποίησης οριζοντίου εδάφους. Συγκεκριμένα, εντοπίστηκαν πολλοί κρατήρες άμμου με απόθεση αμμο-ιλυωδών υλικών τειφρού ή πολύ ανοιχτού καφέ χρώματος. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται φωτογραφική άποψη δύο κρατήρων άμμου με διαφορετικά χρώματα αναδυθέντος εδαφικού υλικού: τειφρό χρώμα στο Σχήμα 3α και πολύ ανοιχτό καφέ (μπεζ) χρώμα στο Σχήμα 3β.

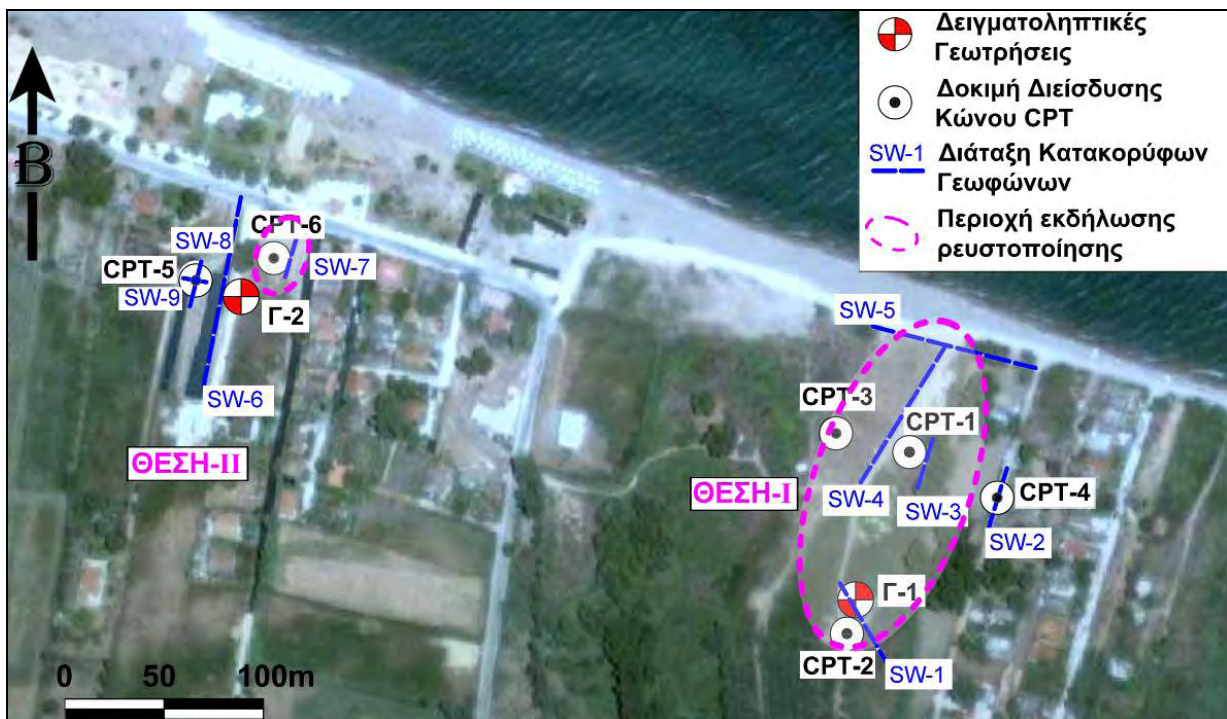
Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού των κρατήρων παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 4: το εδαφικό υλικό τειφρού



Σχήμα 1. Επίκεντρο, σεισμικό ρήγμα και θέσεις εκδήλωσης φαινομένων εδαφικής αστοχίας κατά το σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας (8-6-2008).

Figure 1. The epicenter, fault trace and locations of ground failure in the Achaia-Elia (8-6-2008) earthquake.

χρώματος χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος (SM) με  $C_u=12.4$  και  $C_c=1.38$ , ενώ το εδαφικό υλικό πολύ ανοιχτού καφέ χρώματος χαρακτηρίζεται ως λεπτή άμμος (SP) με  $C_u=2.91$  και  $C_c=1.26$ .



Σχήμα 2. Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) της παραλιακής ζώνης με τις θέσεις δοκιμών πεδίου και των περιοχών ρευστοποίησης.

Figure 2. Satellite photograph (Google Earth) of the coastal zone with the position of in situ tests and liquefied areas.



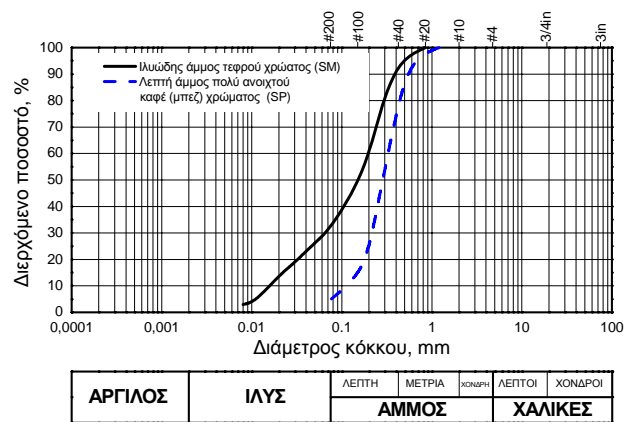
Σχήμα 3. Κρατήρες άμμου στη παραλιακή ζώνη της Κ. Αχαΐας μετά το σεισμό της 8-6-2008.

Figure 3. Sand craters in the coastal zone of K. Achaia following the 8-6-2008 earthquake.

Στη ΘΕΣΗ-I παρατηρήθηκαν επίσης τα γνωρίσματα της πλευρικής εξάπλωσης, δηλαδή η ανάπτυξη επιφανειακών εδαφικών ρηγματώσεων (μέχρι απόσταση 200m περίπου από την ακτογραμμή) με πλάτος ανοίγματος κυμαινόμενο από 1cm έως 12cm. Στο οριζοντιογραφικό διάγραμμα της ΘΕΣΗ-I, που φαίνεται στο Σχήμα 5, σημειώνονται οι θέσεις των περιοχών απόθεσης εδαφικού υλικού καθώς και των εδαφικών ρηγματώσεων με τα διανύσματα μετακίνησης για μεταβαλλόμενες αποστάσεις από την ακτογραμμή. Η συνολική πλευρική μετακίνηση του επιφανειακού εδάφους στη ΘΕΣΗ-I προέκυψε ίση με 30cm, κατόπιν άθροισης των πλατών του ανοίγματος των ρηγματώσεων κατά μήκος του άξονα A-A'. Σημειώνεται ότι στη ΘΕΣΗ-II εκδηλώθηκε εδαφική ρευστοποίηση περιορισμένης έκτασης (όχι όμως και πλευρική εξάπλωση).

Σύμφωνα με μαρτυρία του ιδιοκτήτη της έκτασης στην οποία εκδηλώθηκε η ρευστοποίηση, τα εδαφικά υλικά που

συναντώνται μέχρι το βάθος των 5m, απομακρύνθηκαν προ δεκαετίας, περίπου, (για να χρησιμοποιηθούν σε θέση κατασκευής έργου) και αντικαταστάθηκαν με μη-επιλεγμένα χαλαρά υλικά επίχωσης. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στη θέση με την ένδειξη “ανατροπή βαρελιού” στο Σχήμα 5, κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού παρατηρήθηκε ανατροπή και πτώση προς δυσμάς πλαστικού βαρελιού, ύψους 0.77m και διαμέτρου 0.40m, γεμάτου με νερό και εδραζόμενου στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, σύμφωνα με τη μαρτυρία του αναφερθέντος ιδιοκτήτη, ήταν αδύνατη η παραμονή ανθρώπου σε όρθια (αλλά ακόμα και καθήμενη) στάση κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης.



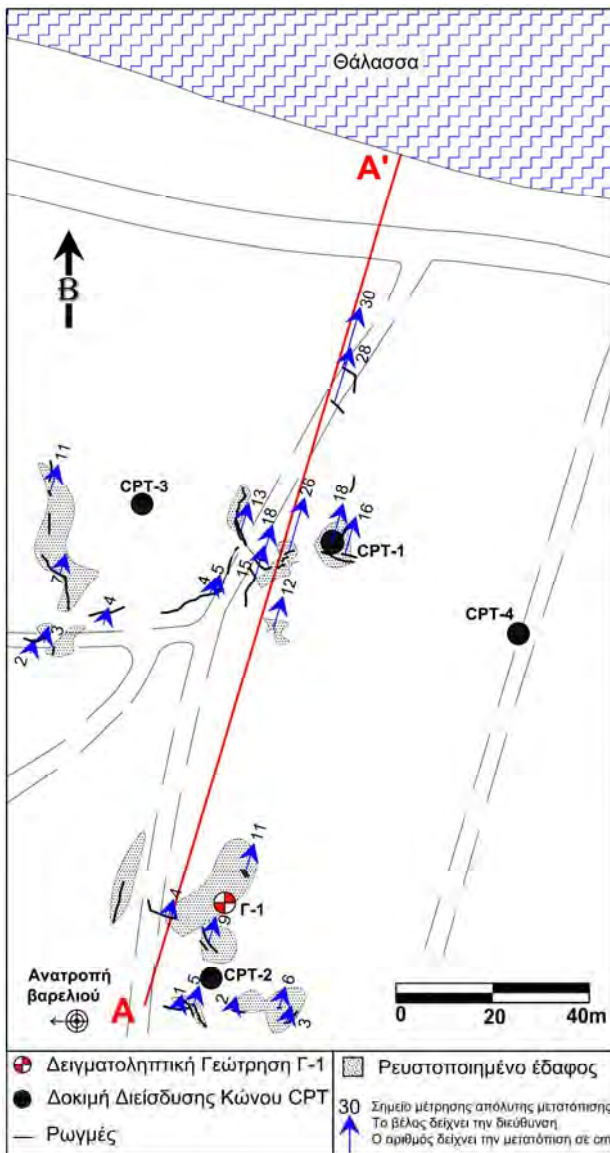
Σχήμα 4. Κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού των κρατήρων άμμου.

Figure 4. Grain size curves of the material ejected from sand craters.

### 3. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η διερεύνηση του υπεδάφους στην περιοχή ρευστοποίησης της παραλιακής ζώνης της Κ.Αχαΐας βασίστηκε στη διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων με μετρήσεις του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης (SPT), δοκιμών διείσδυσης κώνου (CPT) και επι-τόπου μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων μικρού πλάτους,  $V_{S0}$ , ως συνάρτηση του βάθους με τη μέθοδο των επιφανειακών κυμάτων (SW), Σχήμα 2. Διεξήχθησαν επίσης εργαστηριακές δοκιμές κατάταξης και δοκιμές αντοχής στα συνεκτικά εδαφικά δείγματα.

Τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης συνοψίζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 6 και 7. Παρατηρείται ότι η



Σχήμα 5. Παρατηρηθείσα εδαφική συμπεριφορά στη παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας.  
Figure 5. Observed soil behavior in the coastal zone of K.Achaia.

εδαφική τομή στις δύο θέσεις (ΘΕΣΗ-I και ΘΕΣΗ-II) παρουσιάζει ορισμένες γενικές ομοιότητες αλλά και χαρακτηριστικές διαφοροποιήσεις. Και στις δύο θέσεις η εδαφική στρωματογραφία περιλαμβάνει επιφανειακή στρώση χονδρόκοκκων υλικών (αμμοχαλίκων) με πολύ μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών, ακολουθούμενη από στρώση συνεκτικού εδάφους, μέσης πλαστικότητας και μικρής αντοχής. Το πάχος της επιφανειακής στρώσης είναι ίσο με 3m, στη ΘΕΣΗ-I και 4m στη ΘΕΣΗ-II. Στη συνέχεια η στρωματογραφία των δύο θέσεων διαφοροποιείται: στη ΘΕΣΗ-II μετά το βάθος των 4m συναντώνται λεπτόκοκκοι συνεκτικοί σχηματισμοί μικρής αντοχής με υψηλότατο ποσοστό λεπτών

συστατικών (μέχρι 90%) και δείκτη πλαστικότητας κυμαινόμενο από 7 έως 18. Αντίστοιχα, στη ΘΕΣΗ-I μετά την επιφανειακή στρώση συναντώνται μη-πλαστικές αμμόδεις/ιλυώδεις στρώσεις με χαμηλό ποσοστό λεπτών μέχρι βάθος 12m. Οι στρώσεις αυτές ακολουθούνται από συνεκτικά εδαφικά υλικά μικρής αντοχής με πολύ υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών, παρόμοια με αυτά της ΘΕΣΗΣ-II.

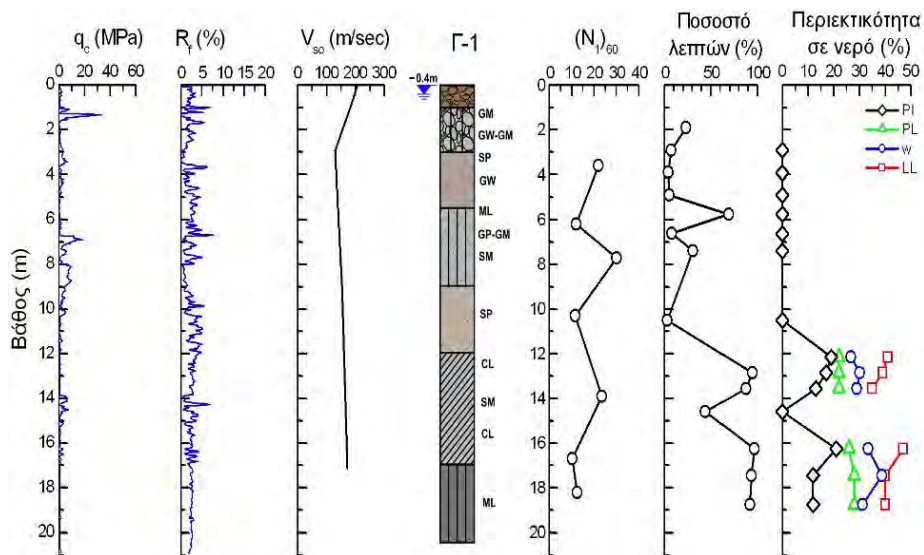
Τα αποτελέσματα των επι-τόπου δοκιμών SPT και CPT υποδεικνύουν ότι η αντοχή των βαθύτερων συνεκτικών σχηματισμών στη ΘΕΣΗ-I είναι μεγαλύτερη, συγκριτικά με αυτή της ΘΕΣΗΣ-II [ $(N_1)_{60} \approx 20$  έναντι 9 και  $q_c \approx 0.9\text{MPa}$  έναντι  $0.6\text{MPa}$ ], αντίστοιχα. Αντίθετα, η κατανομή των τιμών της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων μικρού πλάτους,  $V_{S0}$ , με το βάθος, δεν παρουσιάζει ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ της ΘΕΣΗΣ-I και ΘΕΣΗΣ-II και χαρακτηρίζεται από μια μέση τιμή ίση προς 150m/s.

Η στάθμη του φρεάτιου οριζοντα στην περιοχή κατά την περίοδο διεξαγωγής των γεωτρήσεων (Φεβρουάριος 2009) εντοπίστηκε σε βάθος 0.4m από την επιφάνεια του εδάφους.

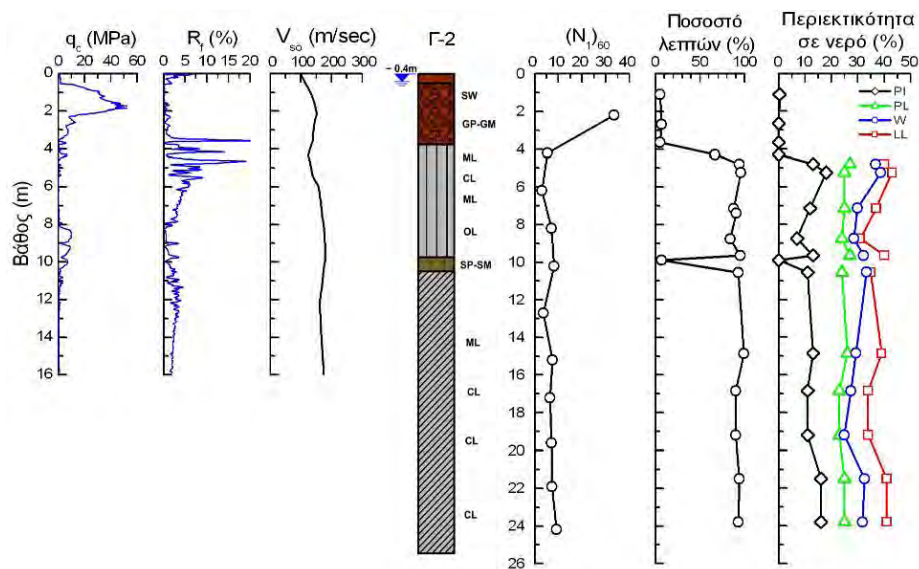
#### 4. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ

Στην εξεταζόμενη περιοχή της Κ.Αχαΐας δεν είναι διαθέσιμη καταγραφή του κύριου σεισμού από επιταχυνσιογράφο ισχυρής εδαφικής κίνησης και γι' αυτό η τιμή της αναπτυχθείσας επιτάχυνσης εκτιμήθηκε με βάση τη σχέση εξασθένησης των Boore and Atkinson (2008). Η ανωτέρω, πρόσφατα αναπτυχθείσα σχέση εξασθένησης ανήκει στην ομάδα σχέσεων της "επόμενης γενιάς" (NGA) και διαπιστώθηκε ότι περιγράφει ικανοποιητικά τις καταγραφείσες τιμές της εδαφικής κίνησης κατά το σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας (Margaris et al. 2008, 2010), Σχήμα 8.

Από το διάγραμμα του Σχήματος 8, προκύπτει ότι για την τιμή της απόστασης της εξεταζόμενης περιοχής ρευστοποίησης από το σεισμογόνο ρήγμα ( $R_{jb} \approx 6\text{km}$ ), η μέση τιμή της κορυφαίας οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης (γεωμετρικός μέσος δύο οριζόντιων συνιστωσών) είναι  $a_{\max} = g/3$ , ενώ η περιοχή που αντιστοιχεί στο εύρος  $\pm\sigma$  είναι: 0.2g έως 0.6g. Το ανωτέρω εύρος τιμών βρίσκεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις πεδίου που προαναφέρθηκαν, συμπεριλαμβανομένης της



Σχήμα 6. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης στη ΘΕΣΗ-I.  
Figure 6. Results of subsurface exploration at SITE-I.



Σχήμα 7. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης στη ΘΕΣΗ-II.  
Figure 7. Results of subsurface exploration at SITE-II.

ανατροπής βαρελιού και της απώλειας της ισορροπίας όρθιων (αλλά ακόμα και καθήμενων) ανθρώπων κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού της 8-6-2008.

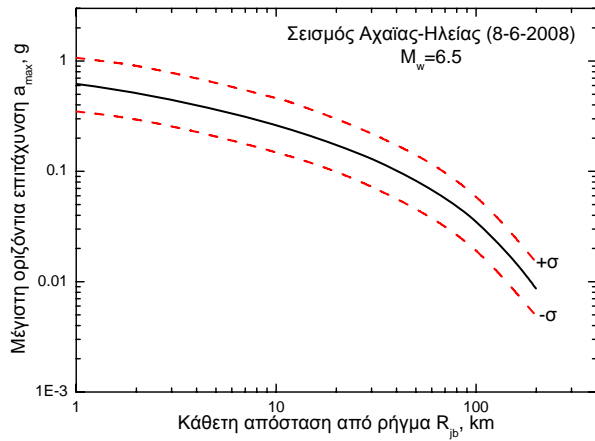
## 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΕΙΣΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Η αναμενόμενη συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών στην εξεταζόμενη περιοχή μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις σύγχρονες διαθέσιμες μεθόδολογίες που αφορούν (α) την ρευστοποιησιμότητα, (β) τον κίνδυνο ρευστοποίησης και (γ) τις οριζόντιες μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

### 5.1 Ρευστοποιησιμότητα

Στην περίπτωση των χονδρόκοκκων εδαφών υιοθετείται το κριτήριο του Tsuchida, 1970 (από Ishihara et al., 1980) το οποίο βασίζεται στην κοκκομετρική καμπύλη του υλικού. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες που προέκυψαν για τα εξετασθέντα εδαφικά δείγματα των γεωτρήσεων Γ-1 και Γ-2 και οι οριακές καμπύλες ρευστοποιήσιμων κατά Tsuchida, 1970 (από Ishihara et al., 1980).

εδαφών

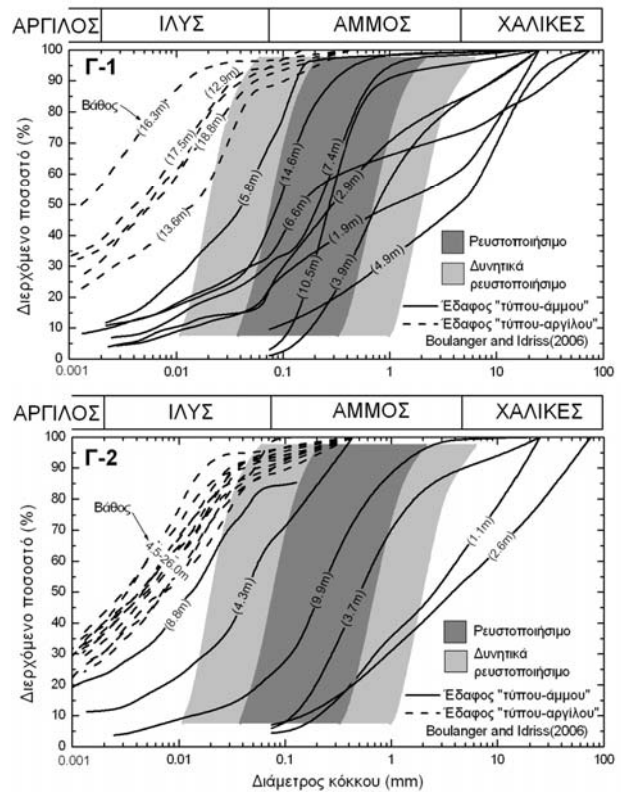


Σχήμα 8. Σχέση εξασθένισης της μέγιστης επιφανειακής οριζόντιας επιτάχυνσης με βάση τις καταγραφές του σεισμού της Αχαΐας-Ηλείας.

Figure 8. Attenuation of maximum horizontal surface acceleration with distance for the Achaia -Elia earthquake.

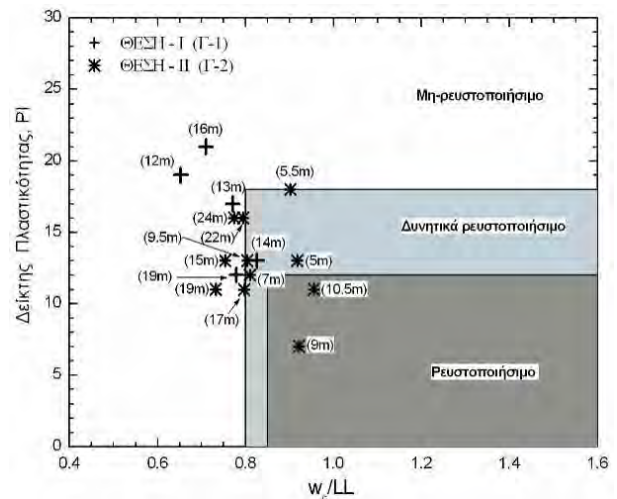
Επισημαίνεται ότι οι κοκκομετρικές καμπύλες έχουν διαχωριστεί σε καμπύλες εδαφικών υλικών “τύπου άμμου” και “τύπου αργίλου”, με βάση το κριτήριο των Boulanger and Idriss (2006). Διαπιστώνεται ότι και στις δύο θέσεις τα διαγράμματα του Σχήματος 9 υποδεικνύουν την ρευστοποιησιμότητα των αδρόκοκκων επιφανειακών σχηματισμών (βάθη μέχρι 10m από την επιφάνεια) οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως εδάφη “τύπου άμμου”. Οι βαθύτεροι λεπτόκοκκοι συνεκτικοί εδαφικοί σχηματισμοί (οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως εδάφη “τύπου αργίλου”) βρίσκονται εκτός της ζώνης ρευστοποιησιμότητας του διαγράμματος και για τον έλεγχο της ρευστοποιησιμότητάς τους χρησιμοποιείται το κριτήριο του των Bray and Sancio (2006) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 10 μαζί με τα σημεία που αντιστοιχούν στα εξετασθέντα εδαφικά δείγματα. Παρατηρείται ότι ορισμένα από τα συνεκτικά εδαφικά στρώματα που συναντώνται μέχρι το βάθος των 14m ταξινομούνται ως δυνητικά ρευστοποιήσιμα ή ρευστοποιήσιμα.

Με βάση τις ενδείξεις των ανωτέρω κριτηρίων ρευστοποιησιμότητας και τις συγκρίσεις του χρώματος των εδαφικών υλικών των κρατήρων με το χρώμα των εδαφικών στρώσεων στις θέσεις των γεωτρήσεων, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το βάθος πρόελευσης των εδαφικών υλικών που εμφανίστηκαν στην επιφάνεια. Για την περίπτωση του υλικού τεφρού χρώματος εκτιμάται ότι στην περιοχή της γεώτρησης Γ-1



Σχήμα 9. Κοκκομετρικές καμπύλες των εξετασθέντων δειγμάτων και οριακές καμπύλες ρευστοποιήσιμων εδαφών.

Figure 9. Grain size distribution of tested soil samples and gradation curves of liquefiable soils.



Σχήμα 10. Αποτελέσματα δοκιμών κατάταξης (LL, PI,  $w_c$ ) των επιφανειακών εδαφών της παραλιακής ζώνης και τα κριτήρια ρευστοποιησιμότητας των Bray and Sancio (2006).

Figure 10. Results of index testing (LL, PI,  $w_c$ ) on surficial soils of coastal zone and liquefaction susceptibility criteria by Bray and Sancio (2006).

προήλθε από την εδαφική στρώση που συναντάται σε βάθος 1-3m (χωρίς να αποκλείεται και η στρώση από 5.5-9m). Στην περιοχή της γεώτρησης Γ-2 το αντίστοιχο βάθος 4-10m. Αντίστοιχα, η λεπτόκοκκη άμμος ανοιχτού καφέ χρώματος στην περιοχή της γεώτρησης Γ-1 εκτιμάται ότι προήλθε από βάθος 3-5.5m (χωρίς να αποκλείεται και η στρώση από 9-12m).

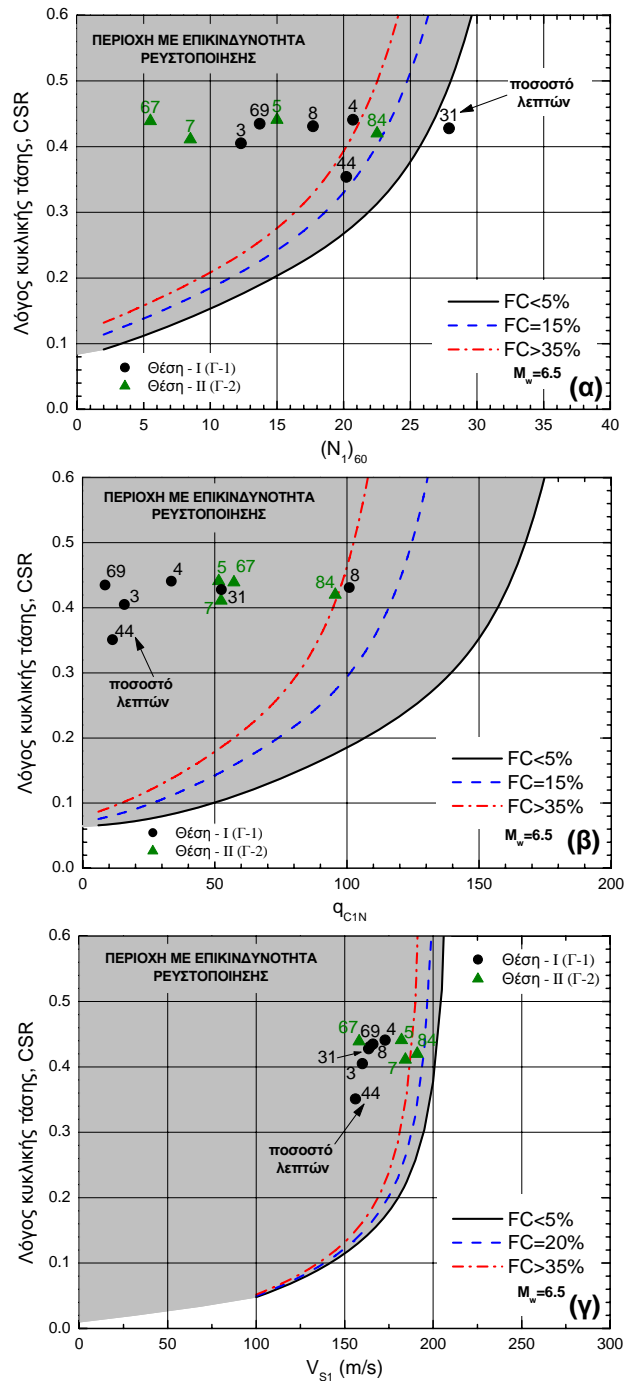
### 5.2 Κίνδυνος Ρευστοποίησης

Ο κίνδυνος ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με βάση ημιεμπειρικές συσχετίσεις με τα αποτελέσματα των επι-τόπου δοκιμών SPT και CPT καθώς και με την τιμή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων μικρού πλάτους,  $V_{s0}$  (Idriss and Boulanger, 2008). Η σύγκριση της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς με τις προβλέψεις των τριών μεθοδολογιών εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης παρουσιάζεται στα διαγράμματα του Σχήματος 11.

Στα διαγράμματα αυτά έχουν εισαχθεί τα σημεία που αντιστοιχούν στις μετρηθείσες τιμές των παραμέτρων  $(N_1)_{60}$ ,  $q_{c1N}$  και  $V_{s1}$  στις δύο θέσεις (ΘΕΣΗ-I και ΘΕΣΗ-II) και στις αντίστοιχες υπολογισθείσες τιμές του λόγου κυκλικής διαμητρικής τάσης, CSR. Παρατηρείται ότι, με την εξαίρεση ενός μόνο σημείου (Σχήμα 11α), υπάρχει πλήρης συμφωνία μεταξύ της παρατηρηθείσας εκδήλωσης ρευστοποίησης στις δύο θέσεις και στις προβλέψεις των τριών διαγραμμάτων.

### 5.3 Πλευρική Εξάπλωση

Για την εκτίμηση της πλευρικής μετακίνησης του επιφανειακού εδάφους, που εκδηλώνεται ως αποτέλεσμα της εδαφικής ρευστοποίησης, χρησιμοποιούνται εμπειρικές, ημιεμπειρικές και αναλυτικές μεθοδολογίες, οι οποίες προς το παρόν οδηγούν σε τιμές χαρακτηριζόμενες από σχετικά μεγάλες αβεβαιότητες (Idriss and Boulanger, 2008). Στο παρόν άρθρο, για λόγους ενδεικτικής σύγκρισης μεταξύ παρατηρηθείσας και υπολογισθείσας συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται η μέθοδος Youd et al. (2002), με τις εξής παραδοχές: 1) περίπτωση πρηνούς ήπιας κλίσης χωρίς ύπαρξη ελεύθερου μετώπου, 2) κλίση πρηνούς  $S=0.4\%$ , 3) απόσταση από ρήγμα  $R_{jb}=6\text{km}$ , 4) μέγεθος σεισμού  $M_w=6.5$ , 5) αθροιστικό πάχος ρευστοποιήσιμων στρώσεων (στρώσεις για τις οποίες ισχύει  $(N_1)_{60}<15$ )  $T_{15}=2.3\text{m}$ , 6) ποσοστό



Σχήμα 11. Διαγράμματα επικινδυνότητας ρευστοποίησης, με βάση α) τον αριθμό κτύπων  $(N_1)_{60}$ , β) την αντοχή αιχμής κώνου  $q_{c1N}$  και γ) την ταχύτητα διάδοσης  $V_{s1}$ , με τα δεδομένα της περίπτωσης ρευστοποίησης της Κ. Αχαΐας.

Figure 11. Liquefaction triggering charts based on a) SPT blow count  $(N_1)_{60}$ , b) CPT tip resistance  $q_{c1N}$  and c) shear wave velocity  $V_{s1}$ , with the data points corresponding to the case history of K. Achaia.

λεπτών (που αντιστοιχεί στο πάχος  $T_{15}$ ),  $F_{15}=27\%$  και 7) μέση διάμετρος κόκκων στο πάχος

$T_{15}$ ,  $D_{50_{15}}=0.154\text{mm}$ .

Με βάση τις ανωτέρω τιμές η εξίσωση των Youd et al. (2002) προβλέπει ότι κατά τη διεύθυνση του άξονα A-A', που σημειώνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5, η αναμενόμενη οριζόντια μετακίνηση της επιφανειακής εδαφικής στρώσης προς την κατεύθυνση της ακτογραμμής είναι  $D_H=22\text{cm}$ . Η τιμή αυτή βρίσκεται σε σχετικά καλή συμφωνία με την παρατηρηθείσα τιμή των 30cm.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τις αναγνωριστικές επισκέψεις στην παραλιακή ζώνη της Κ. Αχαΐας μετά το σεισμό της 8-6-2008, εντοπίστηκαν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα (α)εκτεταμένης εδαφικής ρευστοποίησης υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου και (β)πλευρικής εξάπλωσης προς την κατεύθυνση της ακτογραμμής.

Τις ανωτέρω παρατηρήσεις ακολούθησε γεωτεχνική έρευνα του υπεδάφους τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή συγκρίσεων παρατηρηθείσας και αναμενόμενης συμπεριφοράς με βάση σύγχρονα κριτήρια και μεθοδολογίες.

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από την μελέτη και ανάλυση της συγκεκριμένης περίπτωσης ρευστοποίησης επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των συγχρόνων μεθοδολογιών ελέγχου ρευστοποιησιμότητας, κινδύνου ρευστοποίησης και υπολογισμού πλευρικών μετακινήσεων και αποτελούν χρήσιμη προσθήκη στην υφιστάμενη βάση δεδομένων.

## 7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες προς το Καθηγητή του UCLA, J. P. Stewart, ο οποίος συντόνισε τις αναγνωριστικές επισκέψεις στην Κ. Αχαΐα, την κα. Β. Ευθυμιάδου που συμμετείχε στις ανωτέρω επισκέψεις, καθώς και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Παν. Πατρών, Π. Ψιμούλη και Σ. Λυκουργιώτη για την διεξαγωγή της τοπογραφικής αποτύπωσης της περιοχής στη ΘΕΣΗΣ-Ι της Κ. Αχαΐας, όπου εκδηλώθηκε ρευστοποίηση.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Boore, D.M., and Atkinson, G.M., (2008), "Ground Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at Spectral

Periods Between 0.01 and 10.0s", *Earthquake Spectra*, Vol. 24, pp 99-138.

Bray, J. and Sancio, R.B. (2006), "Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 132(9), pp 1165-1777.

Efthymiadou, V., (2008), "The Achaia-Ilia Earthquake Of June 8, 2008 Site Investigation & Preliminary Results", Thesis for Master Degree, MEEES, Dec 2008.

Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2008), "Soil Liquefaction During Earthquakes", *Earthquake Engineering Research Institute MNO-12*.

Ishihara, K., Troncoso, J., Kawase, Y., Takahashi, Y. (1980), "Cyclic strength characteristics of tailings materials", *Soils & Foundations*, Vol. 20(4), pp 127-142.

Margaris, B. and 18 other authors (2008), "Preliminary Report on the Principal Seismological and Engineering Aspects of the  $M_w=6.5$  Achaia-Ilia (Greece) Earthquake on 8 June 2008". GEER Association Report No. GEER-013, June 2008, [http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/Post\\_EQ\\_Reports.html](http://research.eerc.berkeley.edu/projects/GEER/Post_EQ_Reports.html).

Margaris, B., Athanasopoulos, G., Mylonakis, G., Papaioannou, C., Klimis, N., Theodoulidis, N., Savvaidis, A., Efthymiadou, V. and Stewart, P.J. (2010), " $M_w=6.5$  Achaia-Ilia (Greece) Earthquake on 8 June 2008: Source Characteristics, Ground Motions, and Ground Failure", *Earthquake Spectra*, Vol. 26, (in press).

Tran, K.T. and Hiltunen, D.R., (2008), "A Comparison of Shear Wave Velocity Profiles from SASW, MASW, and ReMi Techniques", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamics IV*, Sacramento, CA, USA, 18-22 May, 2008, ASCE, GSP 181.

Youd, T.L. & 20 other authors (2001), "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 127(10), pp 817-833.

Youd, T.L., Corbett, M.H., and Bartlett, S.F. (2002), "Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displayment", *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 128(12), pp 1007-1017.