

Έλεγχος του κινδύνου ρευστοποίησης στην Θεσσαλονίκη Liquefaction risk in Thessaloniki

Κ. ΣΕΝΕΤΑΚΗΣ¹, Α. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ², Κ. ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η θεωρητική μελέτη σεισμικής απόκρισης κατά μήκος της παραλιακής περιοχής της Θεσσαλονίκης με κύριο στόχο τη χαρτογράφηση των επικίνδυνων σε ρευστοποίηση εδαφικών στρώσεων και τον προσδιορισμό του εύρους των αναμενόμενων μόνιμων μετακινήσεων για το σενάριο των 475 ετών. Αρχικά παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα της περιοχής μελέτης με στόχο τον καθορισμό της γεωμετρίας, των φυσικών-μηχανικών και δυναμικών ιδιοτήτων των κυριότερων εδαφικών σχηματισμών που παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό σε ρευστοποίηση. Η επεξεργασία αυτή οδήγησε στον προσδιορισμό 80 αντιπροσωπευτικών, εδαφοδυναμικών τομών κατά μήκος της παραλιακής περιοχής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα κύρια αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης και ρευστοποίησης που διενεργήθηκαν για σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επανάληψης 475 χρόνια. Τα αποτελέσματα των θεωρητικών αναλύσεων παρουσιάζονται υπό μορφή χαρτών. Σε συνδυασμό με αντίστοιχα αποτελέσματα εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης εφαρμόζοντας διαθέσιμες κανονιστικές διατάξεις (EC8, NCEER-2001) αποδεικνύεται ότι ορισμένες περιοχές της παραλιακής ζώνης της Θεσσαλονίκης παρουσιάζουν σχετικά υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης για το βασικό σεισμικό σενάριο των 475 ετών που προβλέπει ο ΕΑΚ2000.

ABSTRACT : The paper presents the results of the susceptibility and liquefaction risk assessment along the coast of Thessaloniki. The available geotechnical data are analyzed in order to evaluate the liquefaction potential and to determine representative soil profiles to perform a detailed liquefaction 1D analysis for the seismic scenario of 475 years. 80 representative soil profiles were analyzed using the code CYCLIC 1D. The results are compared with empirical results according to EC8 and NCEER-2001. The location, thickness, and depth of the liquefiable soils are presented in maps together with other useful ground motion parameters (PGA, PGV, PGD, shear stresses and strains etc). Based on these results it is concluded that the liquefaction risk in the coastal area of Thessaloniki is relatively high and the consequence may be quite important for certain above and underground structures as well as the port.

¹Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: ksenetak@civil.auth.gr

²Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: anas@civil.auth.gr

³Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, email: kpitilak@civil.auth.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωλογία της Θεσσαλονίκης χαρακτηρίζεται από τρεις μεγάλης κλίμακας γεωλογικούς σχηματισμούς (μεταμορφωμένο υπόβαθρο, αλλουβιακές αποθέσεις του Νεογενούς και πρόσφατες ολοκαινικές αποθέσεις). Η περιοχή είναι μέτριας έως υψηλής σεισμικότητας με εφελκυστικό πεδίο τάσεων (Parazachos et al., 1979). Στα επιφανειακά στρώματα της παραλιακής περιοχής της πόλης συναντώνται ολοκαινικοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από αποθέσεις ιλυωδών αργίλων – λεπτόκοκκων άμμων – ποτάμιων φερτών υλικών, οι οποίοι από γεωτεχνική σκοπιά χαρακτηρίζονται ως χαλαρές ιλυώδεις άμμοι έως αμμώδεις ιλύες, με μεταβαλλόμενο ποσοστό αργίλου, χαμηλής πλαστικότητας και ποικίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Παρόλο που στο σεισμό του 1978 δεν παρατηρήθηκαν συστηματικά φαινόμενα ρευστοποίησης, μελέτες εδαφικής απόκρισης βασισμένες σε απλοποιημένες εμπειρικές μεθόδους (Seed & Idriss, 1971, NCEER-2001) καταδεικνύουν υψηλό ποσοστό κινδύνου ρευστοποίησης των σχηματισμών αυτών (Pitilakis et al., 1982, Κακδέρη 2003).

Με βάση τα πληρέστερα διαθέσιμα δεδομένα που υπάρχουν σήμερα ως προς τα γεωλογικά, σεισμοτεκτονικά και γεωτεχνικά - δυναμικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής (Mountrakis et al., 1983, Hatzidimitriou et al., 1991, Αναστασιάδης Α., 1994, Ραπτάκης, Αναστασιάδης, Πιτιλάκης, 2001, Anastasiadis et al., 2001, Anastasiadis et al., 2002), κρίθηκε σκόπιμη η αναλυτικότερη μελέτη του κινδύνου ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη της Θεσσαλονίκης. Αρχικά παρουσιάζονται τα διαθέσιμα γεωτεχνικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής. Αξιολογούνται ως προς την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση και κατασκευάζονται τυπικές 1-Δ εδαφικές τομές, αντιπροσωπευτικές της στρωματογραφίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφών της παραλιακής περιοχής. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών ελέγχων του κινδύνου ρευστοποίησης στην παραλιακή περιοχή με βάση τις αναλυτικές - απλοποιημένες μεθόδους των NCEER (2001) και EC8-Part5 (2002). Εκτιμώνται επίσης οι αντίστοιχες καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης, με βάση την εμπειρική μέθοδο Ishihara & Yoshimine (1992).

Ακολούθως, παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων εδαφικής απόκρισης και μελέτης του κινδύνου ρευστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν με τον υπολογιστικό κώδικα CYCLIC 1D, στις περίπου 80 αντιπροσωπευτικές εδαφικές θέσεις στην παραλιακή ζώνη της Θεσσαλονίκης για το σεισμικό σενάριο των 475 ετών. Τα αποτελέσματα τόσο των απλοποιημένων όσο και των ανελαστικών αναλύσεων που παρουσιάζονται με μορφή χαρτών καταδεικνύουν το σχετικά υψηλό κίνδυνο εκδήλωσης ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη της Θεσσαλονίκης.

ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

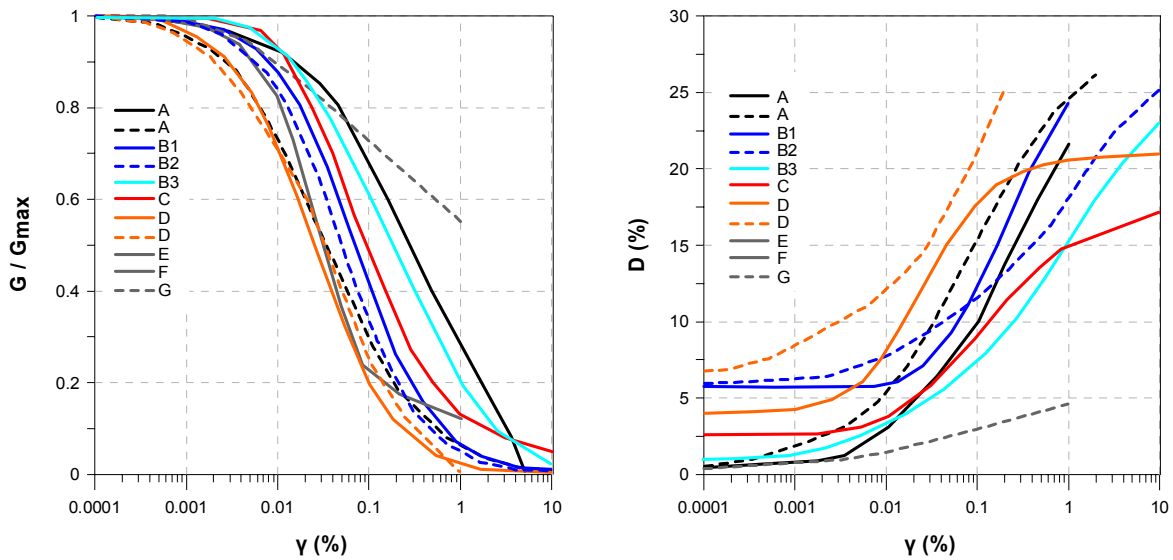
Τα γεωτεχνικά και δυναμικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους της Θεσσαλονίκης διερευνήθηκαν στα πλαίσια πλήθους ερευνητικών προγραμμάτων γεωφυσικών διασκοπήσεων, επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών εδαφοδυναμικής καθώς και θεωρητικών αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής Μηχανικής του Α.Π.Θ. τα τελευταία είκοσι χρόνια και βρίσκονται σε συνεχή εξέλιξη (Pitilakis et al., 1992, Αναστασιάδης, 1994, Raptakis et al.,

1994, Raptakis, 1995, Anastasiadis & Pitilakis, 1996, Anastasiadis & Pitilakis, 1997, Pitilakis & Anastasiadis, 1998, Pitilakis et al., 2003, 2004a, 2004b, 2006a, 2006b, 2007a, 2007b). Η επεξεργασία και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων αυτών οδήγησε στη σύνθεση ενός ολοκληρωμένου γεωτεχνικού χάρτη της πόλης της Θεσσαλονίκης και στο χωρισμό των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής σε 9 κατηγορίες (Anastasiadis et al., 2001, Anastasiadis et al., 2002, Ραπτάκης, Pitilakis et al., 2001).

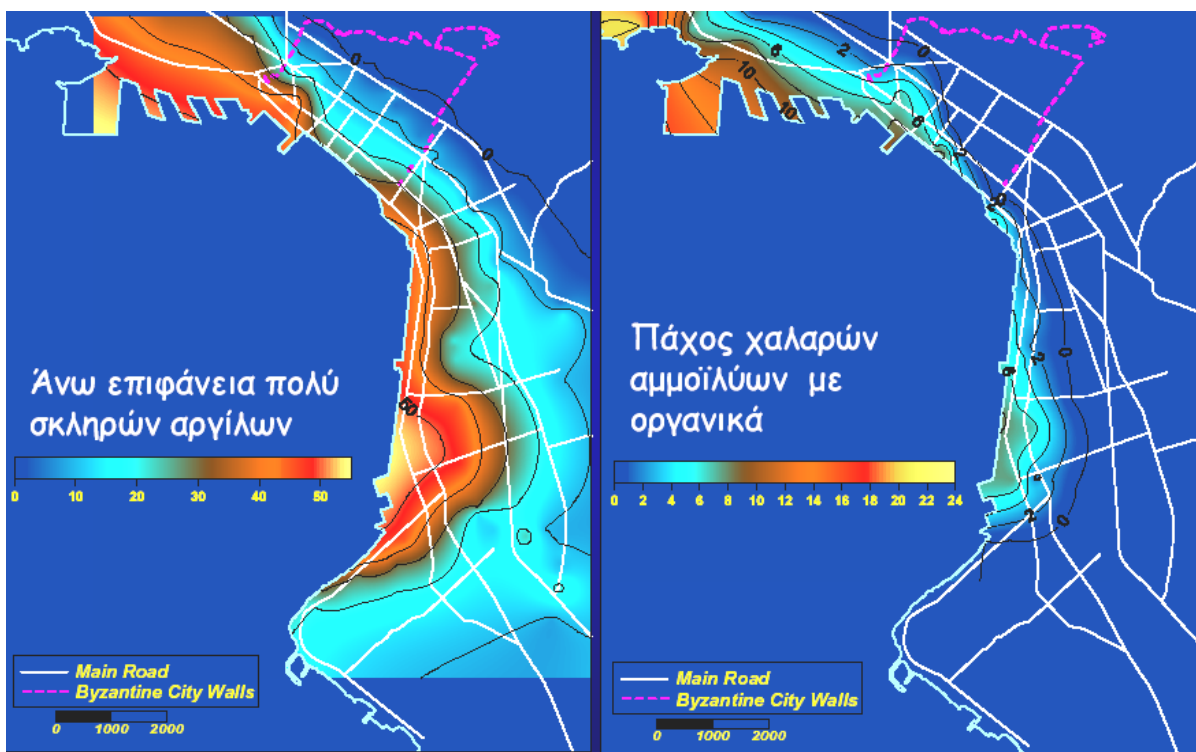
Τα κύρια γεωτεχνικά – εδαφοδυναμικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής συνοψίζονται στον Πίνακα 1 όπου δίνονται οι κύριοι εδαφικοί σχηματισμοί της πόλης, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές διάδοσης των διατμητικών και διαμήκων κυμάτων (V_S και V_P αντίστοιχα). Στο Σχήμα 1 δίνονται οι μέσες καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση των σχηματισμών αυτών ($G/G_0 - \log \gamma$ και $D - \log \gamma$, αντίστοιχα). Στο Σχήμα 2α δίνεται η χωρική κατανομή του βάθους της άνω επιφάνειας των σιφρών αργιλικών εδαφών που αποτελούν το βασικό σχηματισμό της Θεσσαλονίκης υπερκείμενο του βραχώδους υποβάθρου (έδαφος Β και κατά τόπους Ε). Αντίστοιχα, στο Σχήμα 2β δίδεται η χωρική κατανομή του πάχους των χαλαρών αμμοίλυωδών επιφανειακών αποθέσεων που κατά κύριο λόγο ενδιαφέρουν την παρούσα μελέτη.

Πίνακας 1. Δυναμικές ιδιότητες κύριων εδαφικών σχηματισμών περιοχής Θεσσαλονίκης (Anastasiadis et al., 2002).

Σχηματισμός	Περιγραφή	V_S (m/s)	V_P (m/s)
A	Τεχνητές επιχωματώσεις	200-350	400-1700
B1	Επιφανειακές παράκτιες και ποτάμιες αποθέσεις κυρίως σιφρής αμμώδους-ιλυώδους αργίλου έως αργιλώδους άμμου, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, πάχους 2-10m	300-400	1900
B2	Όπως B1, αλλά σε σχετικά χαλαρή κατάσταση με πάχος 3 έως 20m.	200-300	1800
B3	Όπως B1, αλλά με υψηλή πλαστικότητα και αντοχή, πάχους 2 έως 10m	300-400	1800
C	Πολύ χαλαρή αμμώδης ιλύς έως ιλυώδης άμμος με μεταβαλλόμενη περιεκτικότητα σε άργιλο και άμμο	120-220	1800
D	Αλλουβιακές αποθέσεις κυρίως αργιλικές με ενδιάμεσες στρώσεις άμμου και ιλύος, χαμηλής αντοχής και υψηλής συμπιεστότητας	150-250	1800
E	Πολύ σιφρή έως σκληρή άργιλος, χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, αμμώδης άργιλος με χαλίκια	350-700	2000
F	Πολύ σιφρή έως σκληρή ιλυώδης – αμμώδης έως χαλικιώδης προστερεοποιημένη μαργαϊκή άργιλος υπερκείμενη του βραχώδους υποβάθρου	700-850	3200
G	Πρασινοσχιστόλιθοι και γνεύσιοι που αποτελούν το βραχώδες υπόβαθρο	1750-2200	4500



Σχήμα 1. Μέσες καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης και αύξησης του λόγου απόσβεσης με τη διατμητική παραμόρφωση των κύριων εδαφικών σχηματισμών περιοχής Θεσσαλονίκης (Anastasiadis et al., 2002)



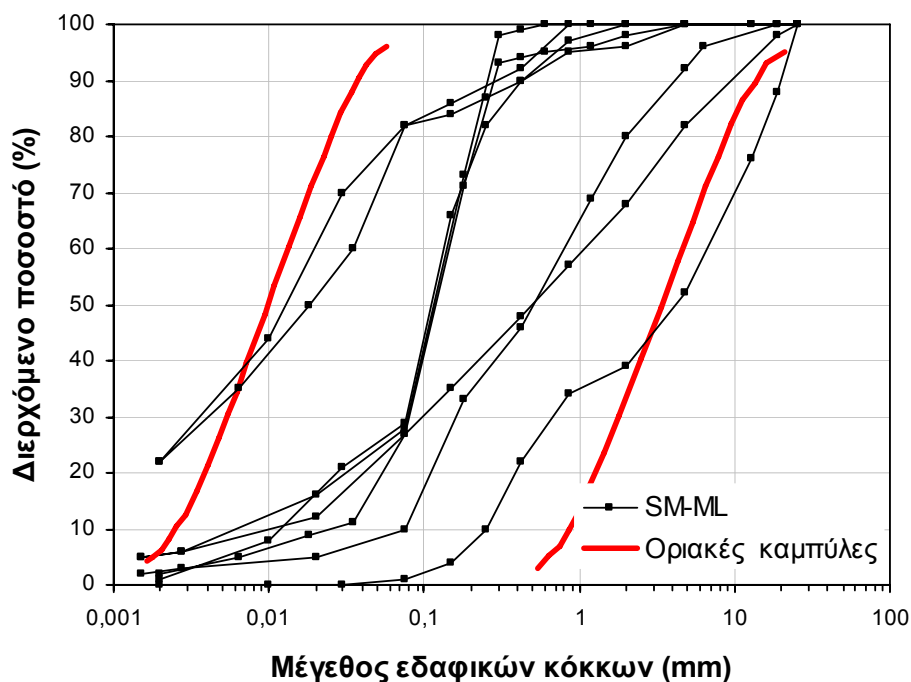
Σχήμα 2. Χωρική κατανομή (α) βάθους της άνω επιφάνειας των σιφρών αργιλικών σχηματισμών και (β) πάχους χαλαρών αμμοίλυδων επιφανειακών εδαφών περιοχής Θεσσαλονίκης

Οι σχηματισμοί A έως D συναντώνται στα επιφανειακά εδαφικά στρώματα. Τα εδάφη που κατατάσσονται στην κατηγορία C συνίστανται από χαλαρούς αμμοίλυδεις σχηματισμούς μικρής πλαστικότητας και μεταβαλλόμενου ποσοστού σε άργιλο, και συναντώνται κυρίως

στην παραλιακή περιοχή της πόλης. Αναφορικά με τους εδαφικούς σχηματισμούς της κατηγορίας C, πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν έντονα μη γραμμική συμπεριφορά και μη σημαντική εξάρτηση των καμπυλών $G/G_0 - \log \gamma$ από τη μέση περιβάλλουσα τάση, το δείκτη πλαστικότητας και το δείκτη πόρων (Pitilakis et al., 1992, Αναστασιάδης, 1994, Pitilakis & Anastasiadis, 1998). Στον Πίνακα 2 δίνονται οι μέσες τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών και των παραμέτρων αντοχής και συμπιεστότητας των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών (σχηματισμοί A έως D), ενώ στο Σχήμα 3 δίνονται τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες επιφανειακών, χαλαρών αμμοίλυδων εδαφών σύμφωνα με διαθέσιμα αποτελέσματα γεωτεχνικών ερευνών από την παραλιακή ζώνη.

Πίνακας 2. Μέσες τιμές φυσικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων αντοχής και συμπιεστότητας επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών περιοχής Θεσσαλονίκης (Anastasiadis et al., 2001).

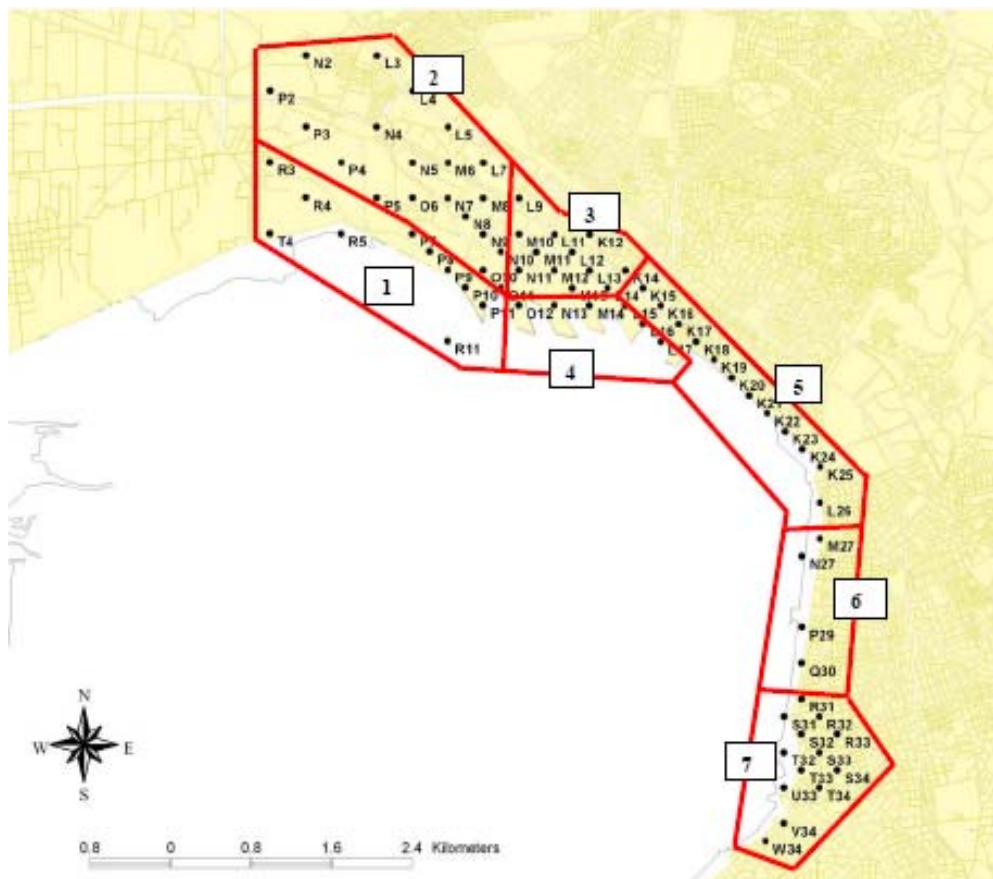
Σχηματισμός	WL (%)	WP (%)	IP (%)	e_0	W (%)	γ (kN/m ³)	N_{30}	q_u (kPa)	C_c
A	31 ± 5.5	19 ± 4.5	12 ± 5.8	-	23 ± 14.6	18.15 ± 1.08	16.2 ± 12.7	-	-
B1	30 ± 3.7	15 ± 1.3	15 ± 3.8	0.46 ± 0.07	16.5 ± 2.3	20.89 ± 0.9	32 ± 15	250 ± 100	<0.15
B2	30 ± 6	16 ± 3	12 ± 5	0.57 ± 0.08	20 ± 2	20.4 ± 1.7	11 ± 5	110 ± 45	0.18 ± 0.2
B3	55 ± 8	25 ± 5	30 ± 5	0.68 ± 0.1	25 ± 6	19.2 ± 0.8	>60	320 ± 80	0.11-0.26
C	32 ± 11	21 ± 7	11 ± 8	0.84 ± 0.12	27 ± 15.5	18.5 ± 1.2	6 ± 4	88 ± 22	0.2-0.3
D	60	30	30	0.58 ± 0.18	39 ± 8	17.26 ± 2.1	14 ± 6	-	0.25-0.3



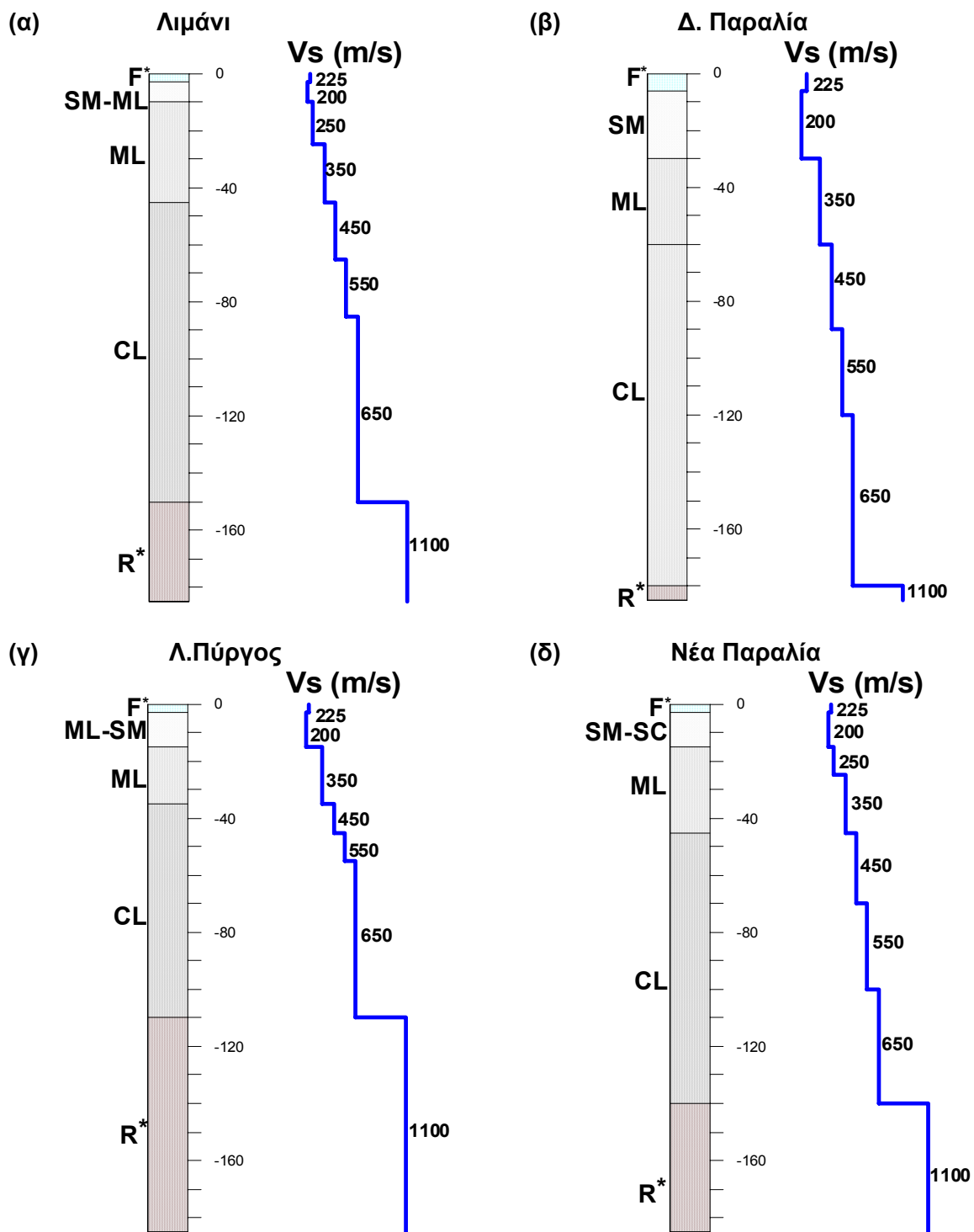
Σχήμα 3. Τυπικές κοκκομετρικές καμπύλες χαλαρών αμμοίλυδων εδαφών στην παραλιακή ζώνη της Θεσσαλονίκης και αντίστοιχες οριακές καμπύλες αμμοδών εδαφών με υψηλό συντελεστή ομοιομορφίας και μεγάλης ευαισθησίας σε ρευστοποίηση (Technical Standards for port & harbour facilities in Japan from Handbook and Liquefaction Recommendation of Reclaimed Land, Edited by Port & Harbour Res. Inst. Balkema, 1997)

Οι επιφανειακοί, χαλαροί αμμοϊλυώδεις σχηματισμοί ($N_{SPT} < 15$) έχουν πάχος από 2m έως 10m, και σε ορισμένες περιπτώσεις από 10m έως 30m (περιοχή λιμένα Θεσσαλονίκης και δυτική ζώνη παραλιακής προς το Καλοχώρι). Λαμβάνοντας υπόψη τα φυσικά χαρακτηριστικά και την κοκκομετρία των εδαφών αυτών (Πίνακας 2 και Σχήμα 3) και σύμφωνα με τα διεθνώς αποδεκτά κριτήρια αλλά και νεότερες έρευνες σχετικά με την επιδεκτικότητα των εδαφών σε ρευστοποίηση (Guo & Prakash, 1999, Polito, 1999, Yamamuro and Covert, 2001, NCEER, 2001, EC8-Part5, 2002, Boulanger & Idriss, 2006), προκύπτει ότι σε πολλές περιπτώσεις οι χαλαροί αμμοϊλυώδεις σχηματισμοί κατά μήκος της παραλιακής ζώνης της Θεσσαλονίκης παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό ρευστοποίησης.

Με βάση τα παραπάνω διαθέσιμα γεωτεχνικά – εδαφοδυναμικά δεδομένα και παλαιότερες μελέτες εδαφικής απόκρισης στην περιοχή της Θεσσαλονίκης (Anastasiadis et al., 2002, Pitilakis et al., 2003, 2004, 2006), σχεδιάστηκαν 80 περίπου μονοδιάστατες εδαφοδυναμικές τομές στην παραλιακή περιοχή της πόλης. Στον χάρτη του Σχήματος 4 παρουσιάζονται οι θέσεις αυτές, χωρισμένες σε 7 ζώνες κοινών στρωματογραφικών και δυναμικών χαρακτηριστικών, ενώ στο Σχήμα 5 δίδονται ορισμένες αντιπροσωπευτικές εδαφοδυναμικές τομές.



Σχήμα 4. Θέσεις μονοδιάστατων εδαφοδυναμικών τομών μελέτης και χωρισμός της παραλιακής Θεσσαλονίκης σε αντιπροσωπευτικές ζώνες κοινών στρωματογραφικών και δυναμικών χαρακτηριστικών



Σχήμα 5. Αντιπροσωπευτικές εδαφοδυναμικές τομές (α) περιοχή Λιμάνι Θεσσαλονίκης – Ζώνη 4, (β) Δυτική περιοχή προς Καλοχώρι – Ζώνη 2, (γ) περιοχή Λευκού Πύργου – Ζώνη 5, (δ) περιοχή Νέας Παραλίας – Ζώνη 6 (F^* = Τεχνητές Επιχωματώσεις, R^* = Σεισμικό Υπόβαθρο)

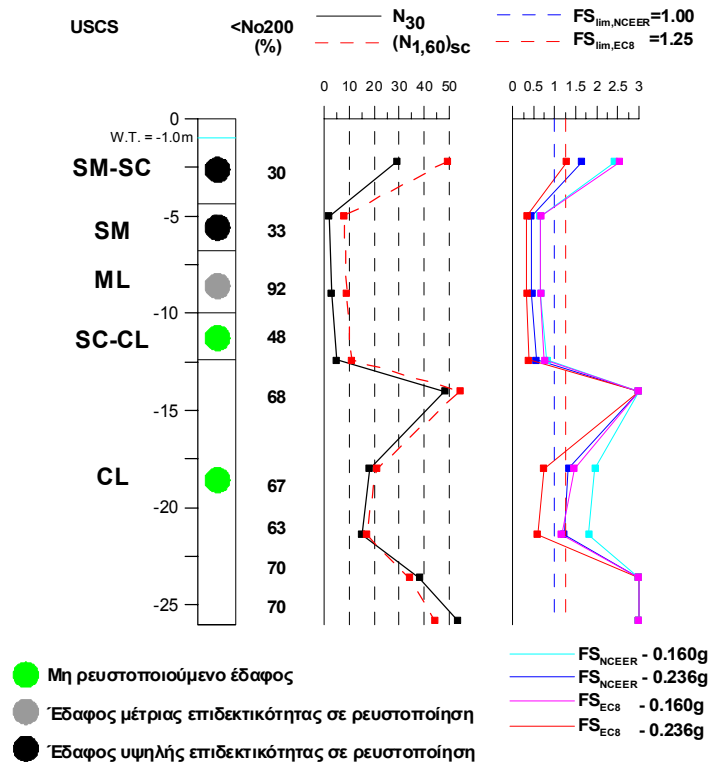
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Οι έλεγχοι του κινδύνου ρευστοποίησης σύμφωνα με τις συμβατικές μεθόδους των EC8-Part5 (2002) και NCEER (2001) πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικά και αντιπροσωπευτικά εδαφικά προφίλ της παραλιακής περιοχής όπου υπήρχαν διαθέσιμα αποτελέσματα δοκιμών SPT. Η εκτίμηση των αναπτυσσόμενων τάσεων σε κάθε εδαφικό προφίλ μελέτης πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικές τιμές κορυφαίας επιτάχυνσης στην ελεύθερη επιφάνεια. Στη πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε απλά η τιμή 0.16g που προτείνεται από τον ΕΑΚ2000 για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, ενώ στην δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα 1-Δ ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων στις υπόψη θέσεις (Pitilakis et al. 2004b) για το σεισμικό σενάριο των 475 χρόνων. Στη δεύτερη περίπτωση οι σεισμικές διεγέρσεις εισαγωγής στο σεισμικό υπόβαθρο είχαν κορυφαία τιμή 0.20g ή 0.24g σύμφωνα με συγκεκριμένο σενάριο σεισμικής επικινδυνότητας στην περιοχή μελέτης (Anastasiadis et al., 2002). Με την παραπάνω διαδικασία προκύπτουν 4 διαφορετικοί συντελεστές ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης με το βάθος, για κάθε μία από τις περίπου 10 θέσεις μελέτης. Είναι σαφές ότι η επιτάχυνση σχεδιασμού που προτείνεται από τον ΕΑΚ2000 δίνει τις υψηλότερες τιμές συντελεστών ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης, δεν μπορεί όμως να θεωρηθεί ως αντιπροσωπευτική για τις ανάγκες της συγκεκριμένης μελέτης, για λόγους που αναφέρονται και μέσα στον ΕΑΚ. Ουσιαστικά πρόκειται για εδάφη που μπορούν να καταταγούν στην κατηγορία Χ όπου επιβάλλονται ειδικά προσανατολισμένες μελέτες. Σε κάθε θέση μελέτης προκύπτει λοιπόν ένα μέγιστο πάχος εδάφους με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης. Στη συνέχεια, εκτιμώνται οι αναμενόμενες καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης με την χρήση της εμπειρικής μεθόδου των Ishihara & Yoshimine (1992).

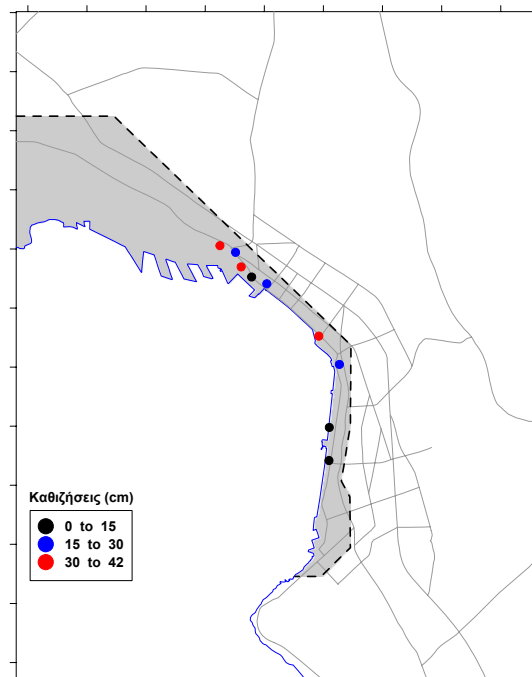
Στο Σχήμα 6 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα ελέγχου του κινδύνου ρευστοποίησης σε αντιπροσωπευτικό εδαφικό προφίλ της παραλιακής περιοχής. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ο έλεγχος των καθιζήσεων λόγω ρευστοποίησης πραγματοποιήθηκε στις εδαφικές στρώσεις που παρουσιάζουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (ποσοστό σε λεπτόκοκκο κλάσμα, πλαστικότητα, χαρακτηριστικά κοκκομετρίας κλπ), ενώ συγχρόνως ο συντελεστής ασφάλειας είναι μικρότερος του 1.00 ή 1.25 (κατά NCEER-97 ή EC8, αντίστοιχα). Στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης για το σύνολο των θέσεων μελέτης. Οι καθιζήσεις δεν είναι καθόλου αμελητέες και αναμένεται να επηρεάσουν τις πάσης φύσεως κατασκευές στην παραλιακή ζώνη.

Στις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκε έλεγχος του κινδύνου ρευστοποίησης με τις εμπειρικές μεθόδους των EC8-Part5 (2002) και NCEER (2001), πραγματοποιήθηκαν επίσης και ανελαστικές αναλύσεις με τον υπολογιστικό κώδικα CYCLIC 1D, με στόχο τον έλεγχο αξιοπιστίας των αναλύσεων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς τα υπολογιζόμενα πάχη ρευστοποίησης μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με πέντε σεισμικές διεγέρσεις (περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο) μετά από επικλιμάκια αναγωγή στις τιμές 0.20g και 0.24g (ανάλογα με την περιοχή μελέτης) που αντιστοιχούν στο σεισμικό σενάριο των 475 χρόνων. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται συγκριτικά τα εκτιμώμενα πάχη των ρευστοποιούμενων εδαφών όπως προέκυψαν με τις εμπειρικές μεθόδους και τις ανελαστικές αναλύσεις. Υψηλός κίνδυνος ρευστοποίησης παρατηρήθηκε

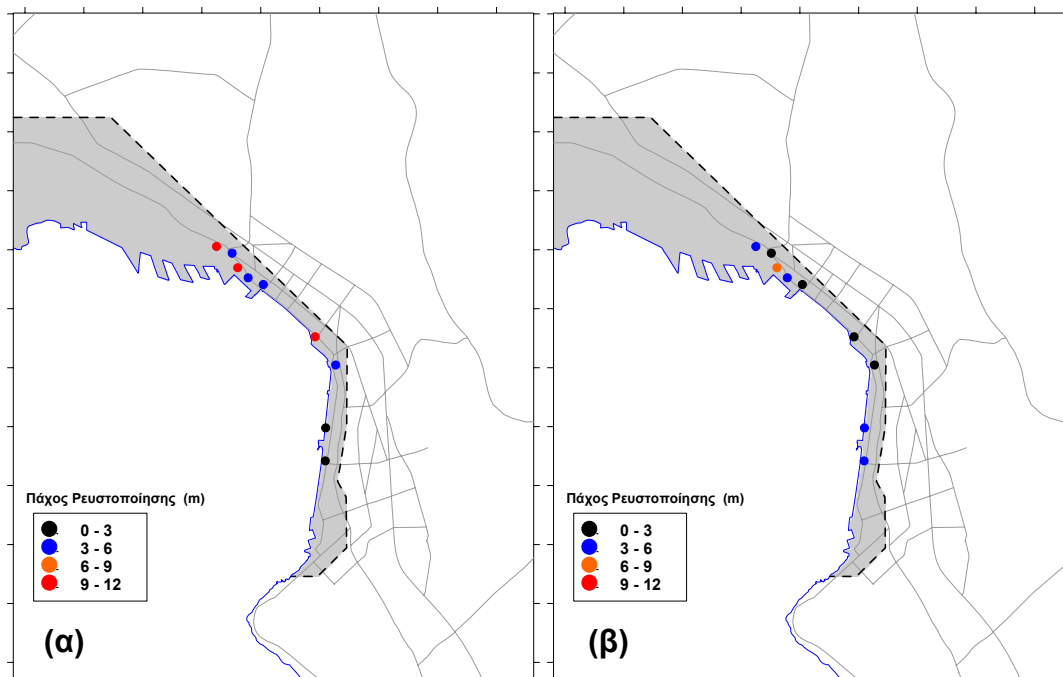
στις ίδιες θέσεις ενώ οι διαφορές στα πάχη όπου αναμένεται να εκδηλωθεί η ρευστοποίηση είναι μικρές.



Σχήμα 6. Τυπικό παράδειγμα ελέγχου του κινδύνου ρευστοποίησης σε υφιστάμενο εδαφικό προφίλ της παραλιακής Θεσσαλονίκης με βάση τις απλοποιημένες μεθόδους των EC8-Part5 (2002) και NCEER (2001) : Ρευστοποιούμενες θεωρούνται οι εδαφικές στρώσεις υψηλής επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση με ταυτόχρονη τιμή του συντελεστή ασφάλειας μικρότερη της οριακής τιμής FS_{lim}



Σχήμα 7. Εκτιμώμενες καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης στην παραλιακή Θεσσαλονίκης : Αποτελέσματα προκαταρκτικών ελέγχων με βάσει εμπειρικές μεθόδους των EC8-Part5 (2002) και NCEER (2001).



Σχήμα 8. Εκτιμώμενα πάχη ρευστοποίησης στην παραλιακή Θεσσαλονίκης : Αποτελέσματα (α) προκαταρκτικών ελέγχων με βάσει εμπειρικές μεθόδους (EC8-Part5, 2002, NCEER, 2001) και (β) ανελαστικών αναλύσεων με τον υπολογιστικό κώδικα CYCLIC 1D.

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών ελέγχων που συνοψίζονται στο Σχήμα 7, προκύπτει σε ορισμένες περιοχές σχετικά υψηλός κίνδυνος εκδήλωσης ρευστοποίησης για το σενάριο των 475 χρόνων, με αναμενόμενες καθιζήσεις τις τάξεως των 5.0 – 15.0cm και σε ορισμένες περιπτώσεις μεγαλύτερες από 30.0cm. Η εφαρμογή των εμπειρικών μεθοδολογιών οδηγεί στις περισσότερες περιπτώσεις σε μεγαλύτερα πάχη ρευστοποίησης (3.0m έως 12m) σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των θεωρητικών αναλύσεων (3.0m έως 9.0m), κυρίως λόγω των αυξημένων τιμών των εκτιμηθέντων αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

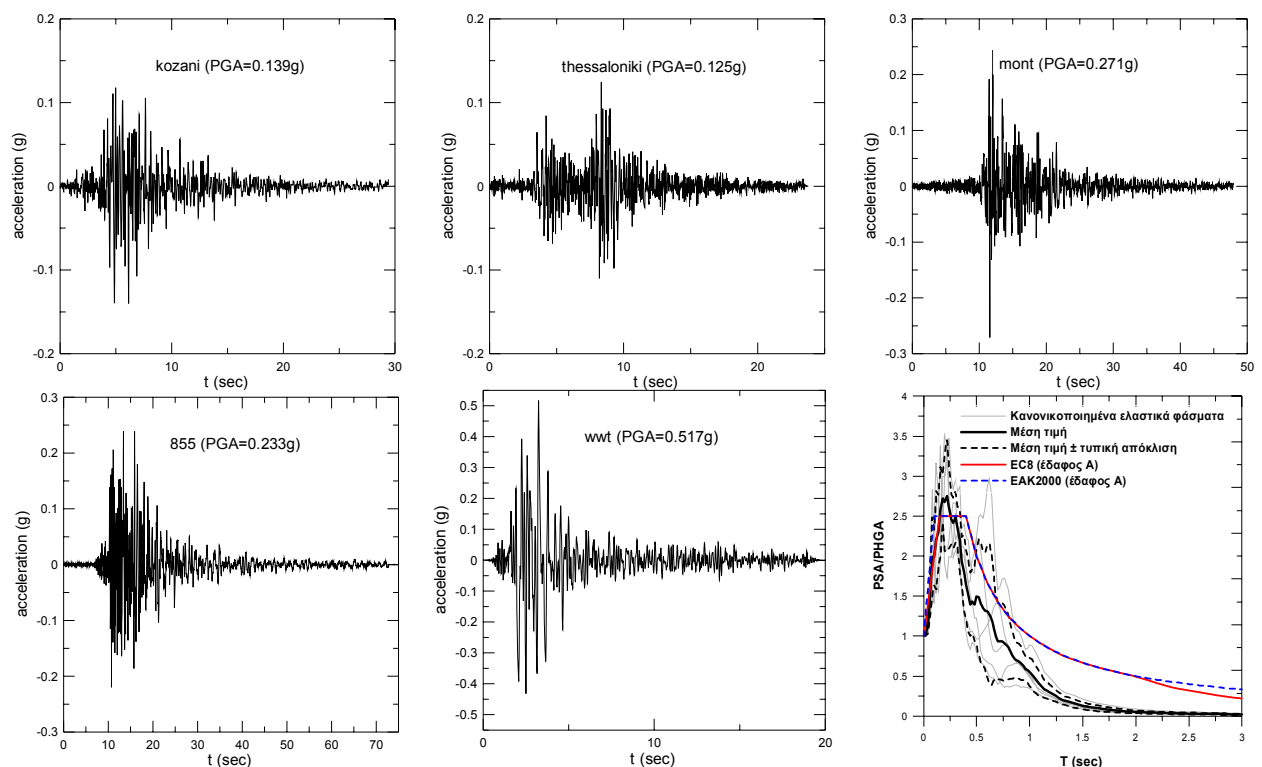
Οργάνωση ανελαστικών αναλύσεων

Οι θεωρητικές ανελαστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τον υπολογιστικό κώδικα CYCLIC 1D (Elgamal et al., 2003, Elgamal et al., 2006, Kramer & Elgamal, 2001, Yang & Elgamal, 2002, Yang et al., 2003). Στο συγκεκριμένο υπολογιστικό κώδικα τα εδάφη υπακούουν σε ελαστοπλαστικό νόμο συμπεριφοράς, ενώ υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης εδαφών επιδεκτικών σε ρευστοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τη διαστολική ή συστολική συμπεριφορά των εδαφών και τις αναπτυσσόμενες υδατικές υπερπιέσεις λόγω σεισμικής ταλάντωσης. Η αξιοπιστία του συγκεκριμένου κώδικα στην εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης τόσο στην ελαστική περιοχή συμπεριφοράς, όσο και στην περίπτωση ισχυρών σεισμικών κραδασμών και ανάπτυξης μη γραμμικών φαινομένων, έχει μελετηθεί συστηματικά

με αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων και σύγκριση με πραγματικές καταγραφές (Yang et al., 2003, Kramer & Elgamal, 2001, Trevelopoulos et al., 2007).

Οι σεισμικές διεγέρσεις εισαγωγής (πραγματικά και συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα) στο σεισμικό υπόβαθρο έχουν χαρακτηριστικά (συχνотικό περιεχόμενο, μέγεθος σεισμού και μηχανισμό διάρρηξης ρήγματος από το οποίο προήλθε η κάθε καταγραφή, κλπ) συμβατά με τα γεωλογικά, σεισμοτεκτονικά και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής. Στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται τα πέντε επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης στο σεισμικό υπόβαθρο (Anastasiadis et al., 2002) καθώς και τα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα. Συγκρίνονται επίσης με τα αντίστοιχα φάσματα που προτείνονται από αντισεισμικούς κανονισμούς (ΕΑΚ2000, EC8) για κατηγορία εδάφους Α που μπορεί να χαρακτηρίσει το οιονεί βραχώδες υπόβαθρο.

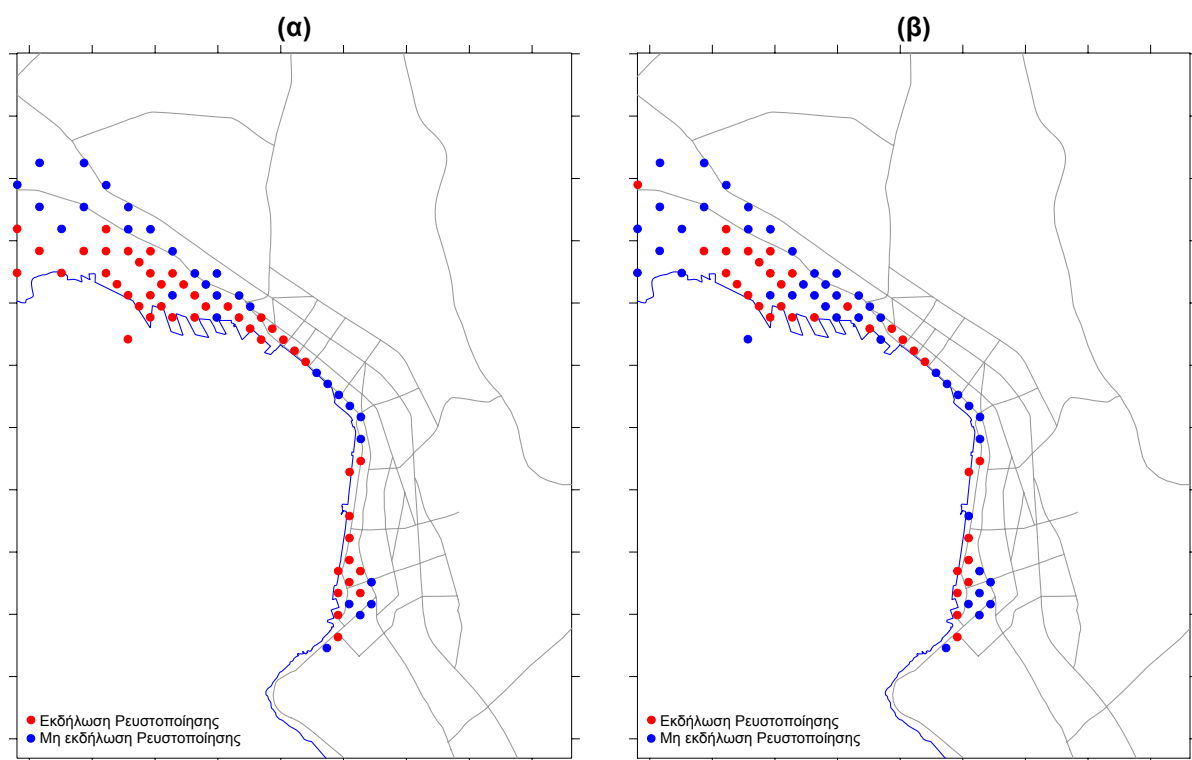
Οι σεισμικές διεγέρσεις εισάγονται στο λογισμικό CYCLIC 1D με κατάλληλη επικλιμάκια αναγωγή της κορυφαίας επιτάχυνσης ώστε να έχει τιμή 0.20g για τα εδαφικά προφίλ των ζωνών 1 έως 5 ή 0.24g για τα εδαφικά προφίλ των ζωνών 6 και 7 (Σχήμα 4), σύμφωνα πάντοτε με συγκεκριμένο σενάριο σεισμικής επικινδυνότητας με περίοδο επαναφοράς του σεισμού σχεδιασμού τα 475 έτη (Anastasiadis et al., 2002).



Σχήμα 9. Χρονοίσοτριες επιτάχυνσης σεισμικών διεγέρσεων εισαγωγής στο σεισμικό υπόβαθρο για την πραγματοποίηση μονοδιάστατων ανελαστικών αναλύσεων και αντίστοιχα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα απόκρισης της επιτάχυνσης

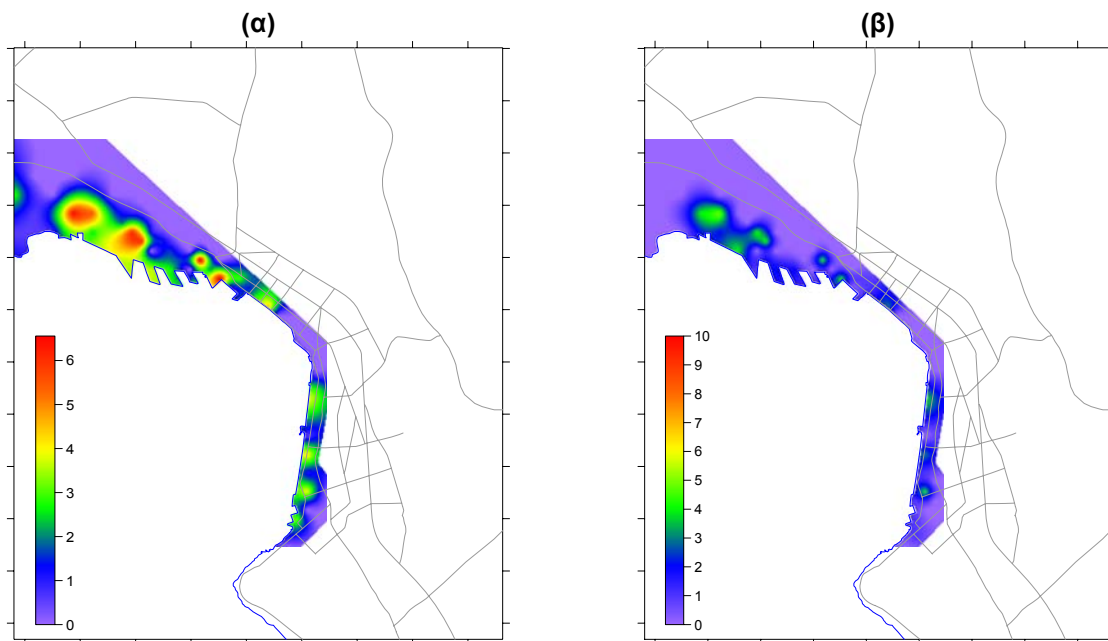
Αποτελέσματα

Για κάθε μία από τις 80 περίπου θέσεις μελέτης (Σχήμα 4) πραγματοποιήθηκαν πέντε ανελαστικές αναλύσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνουν την χωρική κατανομή των θέσεων εκδήλωσης ρευστοποίησης, το πάχος των ρευστοποιούμενων εδαφικών στρωμάτων, το βάθος εμφάνισης ρευστοποίησης, τις μόνιμες οριζόντιες μετακινήσεις, D_H , τη μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση, PGA, ταχύτητα, PGV, και μετακίνηση, PGD στην ελεύθερη επιφάνεια και σε βάθος 3.00m, και τέλος τη χωρική κατανομή των μέγιστων αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων σε βάθος 3.00m. Τα αποτελέσματα αφορούν όπως πάντα το σεισμικό σενάριο με μέση περίοδο επανάληψης 475 χρόνια. Στα Σχήματα 10 έως 16 παρουσιάζονται σε μορφή χαρτών ορισμένα αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από το σύνολο των αναλύσεων.

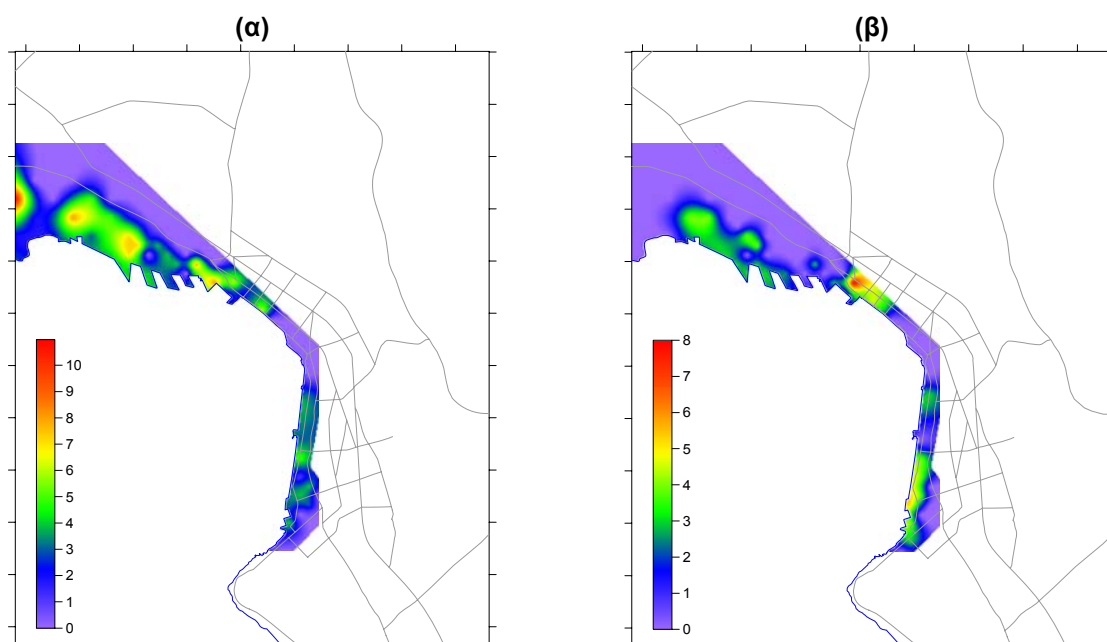


Σχήμα 10. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων στην παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Εδαφικές θέσεις όπου παρατηρείται εκδήλωση ρευστοποίησης για το σενάριο των 475 ετών (α) σεισμική διέγερση "855", (β) σεισμική διέγερση "Thessaloniki"

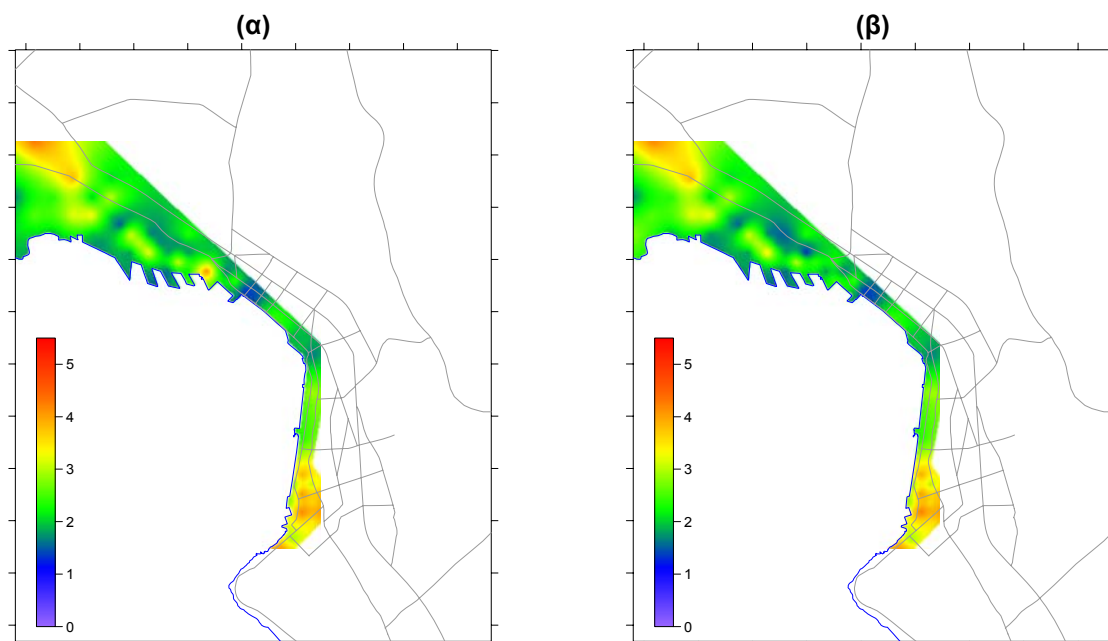
Γενικά παρατηρείται υψηλός κίνδυνος ρευστοποίησης σε ολόκληρη τη δυτική περιοχή που περιλαμβάνει και ολόκληρο το λιμάνι, ξεκινώντας από την παραλιακή ζώνη στην περιοχή της πλατείας Ελευθερίας. Μικρότερης έκτασης ζώνες με υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης παρατηρούνται στην περιοχή του Μεγάλου Μουσικής και του ξενοδοχείου Μακεδονία Παλάς. Το πάχος των ρευστοποιούμενων στρώσεων ποικίλει όπως και το βάθος τους (Σχήματα 11 και 12). Οι παραμένουσες οριζόντιες μετακινήσεις κυμαίνονται από 1 έως 5 cm (Σχήμα 13). Στο Σχήμα 16 δίδονται οι μέσες (+ 1 τυπική απόκλιση) τιμές των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων και διατμητικών τάσεων.



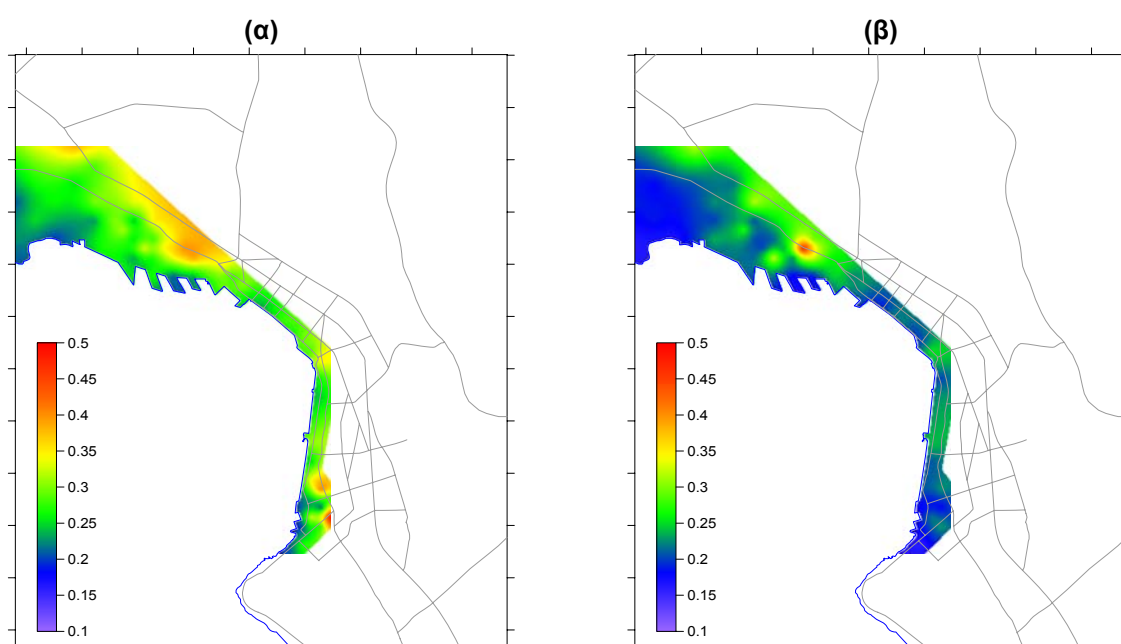
Σχήμα 11. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή (α) του μέγιστου παρατηρούμενου πάχους ρευστοποίησης και (β) του ελάχιστου παρατηρούμενου πάχους ρευστοποίησης στο σύνολο των 5 σεισμικών διεγέρσεων και για το σενάριο των 475 ετών (κλίμακα σε m)



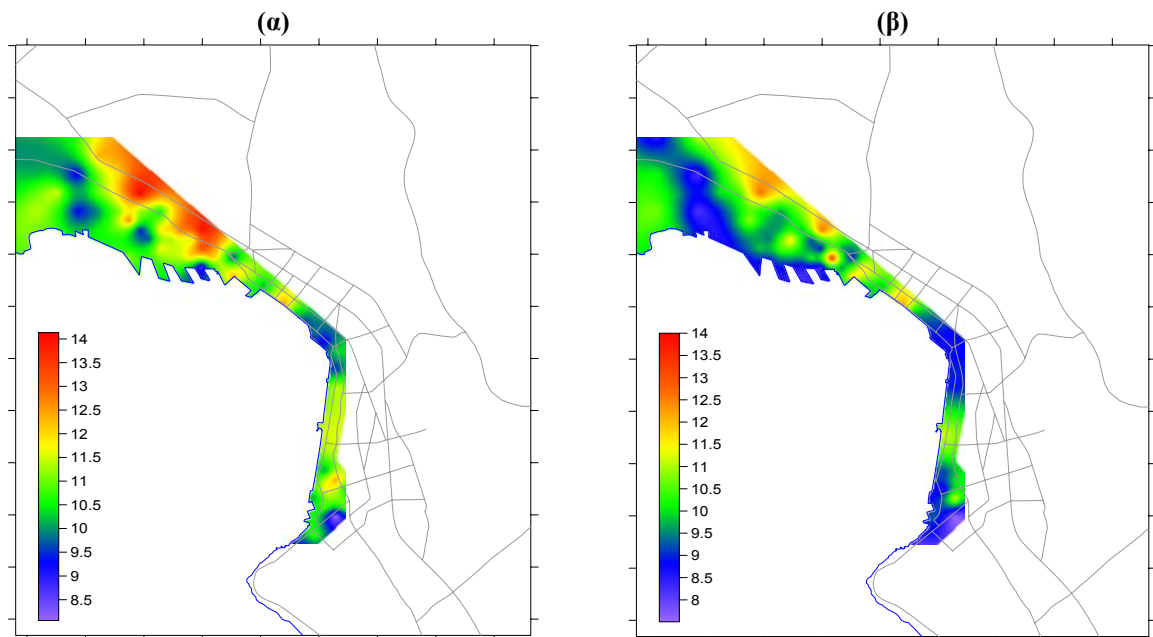
Σχήμα 12. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή (α) του μέσου παρατηρούμενου πάχους ρευστοποίησης και (β) του ελάχιστου αρχικού βάθους εμφάνισης ρευστοποίησης στο σύνολο των 5 σεισμικών διεγέρσεων και για το σενάριο των 475 ετών (κλίμακα σε m)



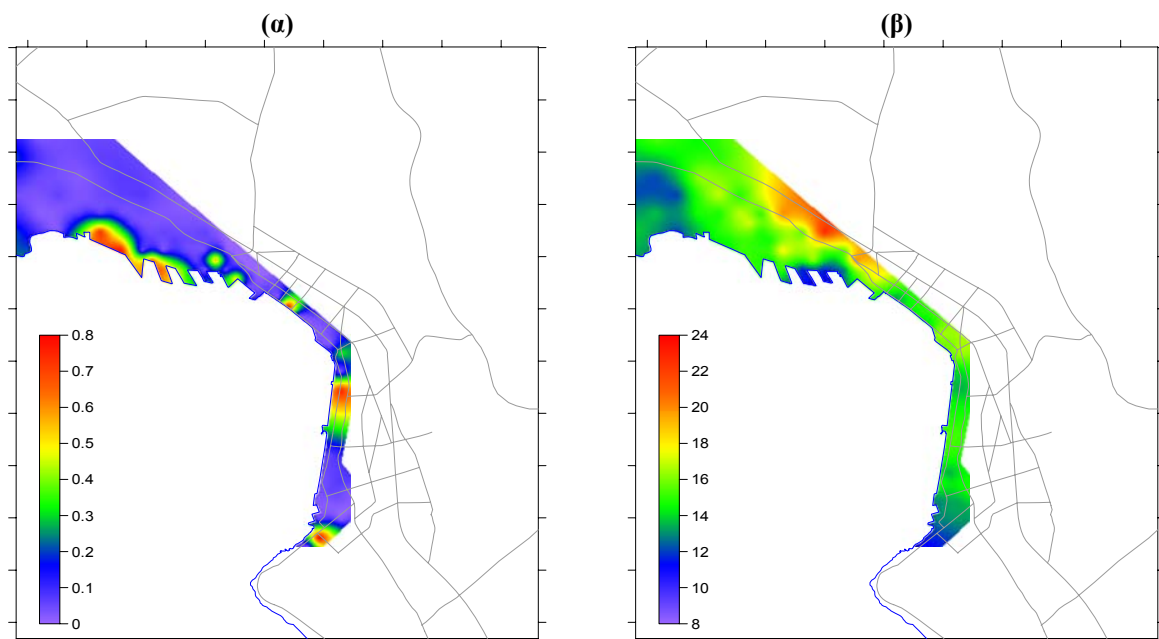
Σχήμα 13. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή της μέσης τιμής + μία τυπική απόκλιση των τελικών οριζόντιων μετακινήσεων, D_H , (α) στην ελεύθερη επιφάνεια και (β) σε βάθος 3.00m στο σύνολο των 5 σεισμικών διεγέρσεων και για το σενάριο των 475 ετών (κλίμακα σε cm)



Σχήμα 14. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή της μέσης τιμής + μία τυπική απόκλιση της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης, PGA, (α) στην ελεύθερη επιφάνεια και (β) σε βάθος 3.00m στο σύνολο των 5 σεισμικών διεγέρσεων και για το σενάριο των 475 ετών (κλίμακα σε g)



Σχήμα 15. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής ταχύτητας, PGV, (α) στην ελεύθερη επιφάνεια και (β) σε βάθος 3.00m για την σεισμική διέγερση "Kozani" και για το σενάριο των 475 ετών (κλίμακα σε cm/s)



Σχήμα 16. Παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης : Χωρική κατανομή της μέσης τιμής + μία τυπική απόκλιση, (α) των μέγιστων αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων (%) σε βάθος 3.00m και (β) των μέγιστων αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων (κλίμακα σε kPa) σε βάθος 3.00m στο σύνολο των 5 σεισμικών διεγέρσεων και για το σενάριο των 475 ετών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Με βάση τα αποτελέσματα των προκαταρκτικών ελέγχων του κινδύνου ρευστοποίησης με την εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων των NCEER-2001 και EC8 αλλά και τα αποτελέσματα των ανελαστικών αναλύσεων σεισμικής απόκρισης με τον υπολογιστικό κώδικα CYCLIC 1D, παρατηρείται σχετικά υψηλό κίνδυνος εκδήλωσης ρευστοποίησης στην παραλιακή περιοχή Θεσσαλονίκης για το βασικό σεισμικό σενάριο των 475 ετών. Το πρόβλημα αναμένεται περισσότερο έντονο στην περιοχή του λιμένα, στη δυτική ζώνη προς Καλοχώρι και σε ορισμένα τμήματα της ανατολικής Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με παλαιότερες μελέτες του κινδύνου ρευστοποίησης στην υπόψη περιοχή, που είχαν βασιστεί αποκλειστικά σε εμπειρικές μεθόδους.
- Το μέσο πάχος των εδαφικών στρώσεων που ρευστοποιούνται κυμαίνεται από 2.0m έως 4.0m, ενώ σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις (περιοχή λιμένα και δυτική ζώνη) φθάνει τα 10.0m έως 12.0m. Επίσης, η εκδήλωση του φαινομένου λαμβάνει χώρα σε επιφανειακά εδαφικά στρώματα, όπου η οροφή της ρευστοποιούμενης εδαφικής στρώσης βρίσκεται σε βάθη 2.0m έως 7.0m, ενώ σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις (κυρίως στη δυτική ζώνη) υπολογίστηκε σε βάθη 10.0m έως 12.0m.
- Οι παραμένουσες οριζόντιες μετακινήσεις (αποτελέσματα CYCLIC 1D) δεν αναμένονται ιδιαίτερα υψηλές, με μέση τιμή από 1.0cm έως 4.0cm, και εντοπίζονται στην περιοχή του λιμένα, τη δυτική ζώνη και σε ορισμένα τμήματα της ανατολικής Θεσσαλονίκης. Η διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και βάθους 3.00m είναι ασήμαντη. Οι αναμενόμενες καθιζήσεις λόγω ρευστοποίησης (αποτελέσματα εμπειρικών μεθόδων) είναι της τάξεως των 5.0 – 15.0 cm, και σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις έως και 30.0cm, κυρίως στην περιοχή του λιμένα και στη δυτική ζώνη. Οι τιμές αυτές έρχονται σε συμφωνία με παλαιότερες μελέτες του κινδύνου ρευστοποίησης στη συγκεκριμένη περιοχή.
- Η αναμενόμενη μέγιστη οριζόντια εδαφική επιτάχυνση στην ελεύθερη επιφάνεια (PGA) κυμαίνεται μεταξύ 0.25g – 0.35g στις μη ρευστοποιούμενες περιοχές και 0.15g – 0.25g στις περιοχές με εκδήλωση ρευστοποίησης. Σε βάθος 3.00m οι αναμενόμενες τιμές είναι ελαφρώς μικρότερες.
- Οι αναμενόμενες κορυφαίες τιμές της οριζόντιας εδαφικής ταχύτητας (PGV) και μετακίνησης (PGD) κυμαίνονται από 10.0 cm/sec έως 14.0cm/sec και από 3.0cm έως 6.0cm, αντίστοιχα, με μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ ελεύθερης επιφάνειας και βάθους 3.00m. Επίσης, οι αναπτυσσόμενες διατμητικές παραμορφώσεις και διατμητικές τάσεις σε βάθος 3.00m αναμένονται από $10^{-1}\%$ έως $0.5 \times 10^{-1}\%$ και 16.0kPa έως 22.0 kPa, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές έρχονται σε σχετική συμφωνία με παλαιότερες μελέτες σεισμικής απόκρισης βασισμένες σε υπολογιστικούς κώδικες ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αναστασιάδης Α., (1994). “Δυναμικά χαρακτηριστικά τυπικών Ελληνικών εδαφών”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.
- Anastasiadis A., Pitilakis K., (1996). “Shear modulus G_0 and damping of typical Greek soils at low strain amplitudes”, *Technika Chronika, Scientific Journal of Technical Chamber of Greece*, 16 (3), pp. 9-18.
- Anastasiadis A., Pitilakis K., (1997). “Variation of shear modulus G and damping of typical Greek soils with strain amplitude”, *Technika Chronika, Scientific Journal of Technical Chamber of Greece*, 17 (1-2), pp. 37-47.
- Anastasiadis A., Raptakis D., Pitilakis K., (2001). “Thessaloniki’s detailed microzoning: Subsurface structure as basis for site response analysis”, *Pure and Applied geophysics*, 158, pp. 2597-2633.
- Αναστασιάδης Α.Ι., Ραπτάκης Δ.Γ., Πιπιάκης Κ.Δ. (2001). “Η γνώση της Εδαφικής δομής ως αφετηρία στη μικροζωνική μελέτη Θεσσαλονίκης : Ι. Προσδιορισμός εδαφικών προσομοιωμάτων”, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, σελ. 75-82.
- Anastasiadis A., Apeessou M., Pitilakis K., (2002). “Earthquake hazard assessment in Thessaloniki, Greece: Level II – Site response analysis”, *International Conference: Earthquake Loss Estimation & Risk Reduction*, Bucharest, Romania, 24-26 October.
- Boulanger R.W., and Idriss I.M., (2006). “Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132 (11), November, pp. 1413-1426.
- EAK (2000). “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός”.
- Elgamal A., Yang Z., Parra E., (2003). “Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils”, *International Journal of Plasticity* 19, pp. 883-905.
- Elgamal A., Yang Z., and Lu J., (2006). “*Cyclic1D: A computer program for seismic ground response*”, Report No. SSRP-06/05, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA.
- EC-8, (2002). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects, Draft No5, Revised Final Project Team Draft (preStage 49), May 2002, Doc CEN/TC250/SC8/N318.
- Guo T., and Prakash S., (1999). “Liquefaction of silts and silty-clay mixtures”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 125 (8), August, pp. 706-710.
- Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, *Edited by Port and Harbor Research Institute*, Balkema, 1997, 312p.
- Hatzidimitriou P.M., Hatzfeld D., Scordilis E.M., Papadimitriou E.E., and Christodoulou A.A., (1991). “Seismotectonic Evidence of an Active Normal Fault Beneath Thessaloniki (Greece)”, *Terra Nova*, 3, pp. 648-654.
- Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*. Vol. 32(1): 173-188.
- Κακδέρη Κ., (2003). “Αποτίμηση σεισμικής διακινδύνευσης λιμένα Θεσσαλονίκης”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
- Kramer S.L., and Elgamal A.W., (2001). “*Modeling Soil Liquefaction Hazards for Performance-Based Earthquake Engineering*”, PEER Report 2001/13, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkley, February.

- Mountrakis D., Psilovikos A. And Papazachos B.C. (1983), “*The geotectonic region of the 1978 Thessaloniki earthquake. In the Thessaloniki Northern Greece Earthquake of June 20, 1978 and its Seismic Sequence*”, (eds. B.C. Papazachos and P.G. Carydis), pp. 11-27.
- NCEER, (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*, 127 (10), October, pp. 817-833.
- Papazachos B.C., Mountrakis D., Psilovikos A., and Leventakis G. (1979), “Surface Fault Traces and Fault Plane Solutions of the May-June 1978 Major Shocks in the Thessaloniki Area, Greece”, *Tectonophysics*, 53, pp. 171-183.
- Pitilakis K., Tsotsos St., Hatzigogos Th., (1982). “Study of Liquefaction Potential in the Area of Thessaloniki”, *VII Symp. on Earthquake Engineering, University of Roorkee*, Nav. 10-12, 1982, 1, pp. 375-380.
- Pitilakis K., Anastasiadis A., and Raptakis D., (1992). “Field and laboratory determination of dynamic properties of natural soil deposits, *Proceeding of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, 5, pp.1275-1280.
- Pitilakis K., and Anastasiadis A., (1998). “Soil and site characterization for seismic response analysis”, *Proceeding of the XI ECEE*, Paris, 6-11 September, Inv. Lectures, pp.65-90.
- Pitilakis, K. et al. (2003) Microzonation study of Thessaloniki, Final report.
- Pitilakis, K. D., Makra, K. A., and Raptakis, D. G. (2001) “2D vs. 1D site effects with potential applications to seismic norms: The cases of EUROSEISTEST and Thessaloniki”, Invited Lecture, Proc. XV ICSMGE Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, Istanbul, 123-133.
- Pitilakis, K., Kappos, A., Hatzigogos, Th., Anastasiadis, A., Anastasiadis, A., Alexoudi, M., Argyroudis, S., Penelis, G., Panagiotopoulos, Ch., Panagopoulos, G., Kakderi, K., Papadopoulos, I., Dikas, N., (2004a) “Synthesis of the application to Thessaloniki city”, RISK-UE Report, Thessaloniki.
- Pitilakis, K. et al., 2004b, RISK-UE “An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns” Research Project, European Commission, DG XII2001-2004, CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014, (2001-2004).
- Pitilakis, K. et al. 2006a SRMLIFE: “Development of a global methodology for the vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. Application to the metropolitan area of Thessaloniki” Research Project, General Secretariat for Research and Technology, 2003-2006, Greece.
- Pitilakis K., Alexoudi M., Argyroudis S., Anastasiadis A., 2006b, Seismic Risk Scenarios for an Efficient Risk Management: The Case of Thessaloniki (Greece), *Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction*, NATO Science Series, Ed. S.T. Wasti and G. Ozcebe, Springer Netherlands, 229-244.
- Pitilakis K., A. Anastasiadis, K. Kakderi, S.Argyroudis and M. Alexoudi (2007a) Seismic zonation, vulnerability assessment and loss scenarios in Thessaloniki, *Proceedings of the 2nd Japan-Greece Workshop on Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, April 3-4, Tokyo, Japan.
- Pitilakis K., Anastasiadis A., Kakderi K., Argyroudis S., Alexoudi M., 2007b, Vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. The case of Thessaloniki’ s Metropolitan area, *Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, 25-28 June.

- Polito C.P., (1999), "The effects of non-plastic fines on the liquefaction of sandy soils, Ph. D. Dissertation", Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Raptakis D.G., Anastasiadis A.J., Pitilakis K.D., and Lontzetidis K.S., (1994). "Shear wave velocities and damping of Greek natural soils", *Proceeding of the 10th Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria, 1, pp. 477-482.
- Ραππάκης Δ., (1995). "Συμβολή στον προσδιορισμό της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών και στη σεισμική απόκρισή τους", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ.
- Ραππάκης Δ.Γ., Αναστασιάδης Α.Ι., Πιπιλάκης Κ.Δ. (2001). "Η γνώση της Εδαφικής δομής ως αφετηρία στη μικροζωνική μελέτη Θεσσαλονίκης : ΙΙ. Συσχέτιση εδαφικών συνθηκών και βλαβών – εντάσεων", *4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής*, Αθήνα, σελ. 313-320.
- Seed, H.B., Idriss I.M., (1971). "Simplified Procedure for Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mech. and Found. Div.*, 97, pp. 1249-1273.
- Trevlopoulos K., Klimis N., and Anastasiadis A., (2007). "Evaluation of Site Characteristics in Liquefiable Soils", *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, June 25-27, Thessaloniki, Paper No.1651.
- Yamamuro J.A., and Covert K.M., (2001). "Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127 (4), April, pp. 314-323.
- Yang Z., and Elgamal A., (2002). "Influence of permeability on liquefaction-induced shear deformation", *Journal of Engineering Mechanics*, 128 (7), July 1, pp. 720-729.
- Yang Z., Elgamal A., and Parra E., (2003). "Computation model for cyclic mobility and associated shear deformation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129 (12), December, pp. 1119-1127.