

Γεωτεχνικός Χάρτης και Μικροζωνική Μελέτη Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου-Ν.Ιωνίας

Geotechnical Map and Microzonation Study of Volos – N. Ionia urban area

ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ.Δ. Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
ΡΑΠΤΑΚΗΣ, Δ.Γ. Επίκ. Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
ΜΑΚΡΑ, Κ.Α. Εντεταλμένη Ερευνήτρια ΙΤΣΑΚ
ΒΕΛΔΕΜΙΡΗ, Φ. Πολιτικός Μηχανικός, ΙΔΑΧ ΑΠΘ
ΤΙΚΑ, Θ. Καθηγήτρια, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Α. Λέκτορας, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
ΧΑΤΖΗΝΙΚΟΛΑΟΥ, Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Δρ ΑΠΘ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο παρόν παρουσιάζονται συνοπτικά βασικές επισημάνσεις από την πλήρη Μικροζωνική Μελέτη του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Βόλου-Ν.Ιωνίας σε ό,τι αφορά τη γεωλογία και νεοτεκτονική της περιοχής, τη μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας για τον σεισμό σχεδιασμού, την εκτεταμένη γεωτεχνική-γεωφυσική έρευνα στο ΠΣ σε συνδυασμό με την εδαφική ζωνοποίηση, και κυρίως τα βασικά στοιχεία της μελέτης σεισμικής απόκρισης με τα προτεινόμενα φάσματα σχεδιασμού (σύμφωνα με τις απαιτήσεις του αντισεισμικού κανονισμού) καθώς και τη μελέτη του κινδύνου ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών στο ΠΣ.

ABSTRACT : In the present paper, we briefly present basic remarks from the complete Microzonation study of Volos – N. Ionia urban area regarding the geological and neotectonic settings of the area, the hazard assessment study for the design earthquake, the extended geotechnical-geophysical study in combination with the sedimentary zonation, and mainly the main results of the seismic response study together with the proposed design spectra (according to the seismic code demands), as well as the study of the liquefaction risk of the soil formations within the urban area.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωτεχνική χαρτογράφηση των δυναμικών ιδιοτήτων και ιδίως η μελέτη της σεισμικής απόκρισης του υπεδάφους του ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας αποτέλεσε αντικείμενο της μικροζωνικής μελέτης που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Θεμελιώσεων και Γεωτεχνικής Σεισμικής του ΑΠΘ (Τεχνική έκθεση, 2000) με χρηματοδότηση της Νομαρχία Μαγνησίας και τη συμμετοχή επιστημόνων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ειδικοτήτων από άλλα πανεπιστημιακά εργαστήρια και ερευνητικά κέντρα.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα γεωλογικά και σεισμολογικά δεδομένα της περιοχής καθώς και τα αποτελέσματα εκτεταμένου προγράμματος γεωφυσικών διασκοπήσεων και γεωερευνητικών εργασιών με στόχο την κατασκευή ενός αντιπροσωπευτικού γεωτεχνικού χάρτη της περιοχής περιλαμβανομένης της γεωμετρίας και των δυναμικών ιδιο-

τήτων των κυριότερων εδαφών. Η επεξεργασία και η σύνθεση των αποτελεσμάτων αυτών με υπάρχουσες πληροφορίες οδήγησε σε αντιπροσωπευτικές εδαφοδυναμικές τομές καθώς και σε τρισδιάστατους θεματικούς χάρτες, για τις διαφορετικές ζώνες του συγκροτήματος και για κάθε διαφορετική κατηγορία εδάφους της περιοχής. Η μελέτη της σεισμικής απόκρισης πραγματοποιήθηκε σε αντιπροσωπευτικές θέσεις, για το βασικό σεισμικό σενάριο σχεδιασμού (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια), με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε επιφανειακό βράχο 0.27g και με την χρήση εννέα πραγματικών και συνθετικών χρονοϊστοριών σεισμικών διεγέρσεων. Τα αποτελέσματα δίδονται υπό μορφή χαρτών και πινάκων και περιλαμβάνουν την χωρική μεταβολή στην επιφάνεια των κορυφαίων τιμών επιτάχυνσης και ελαστικών φασμάτων σχεδιασμού, άλλων βασικών παραμέτρων απόκρισης όπως είναι το δυναμικό ενίσχυσης/απομείωσης της σεισμικής κίνησης και η δεσπόζουσα ιδιοπε-

ρίοδος του εδάφους. Τέλος εξετάζεται η επικινδυνότητα των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων της παραλιακής περιοχής έναντι ρευστοποίησης. Τα αποτελέσματα, που σε τελική μορφή χωρίζουν την περιοχή σε ζώνες παρόμοιας σεισμικής απόκρισης, επιβεβαιώνουν την πολυπλοκότητα της επιφανειακής γεωλογίας και τον πρωταρχικό ρόλο των χαρακτηριστικών του υπεδάφους της περιοχής του Βόλου στη συμπεριφορά του σε αναμενόμενες ισχυρές σεισμικές φορτίσεις.

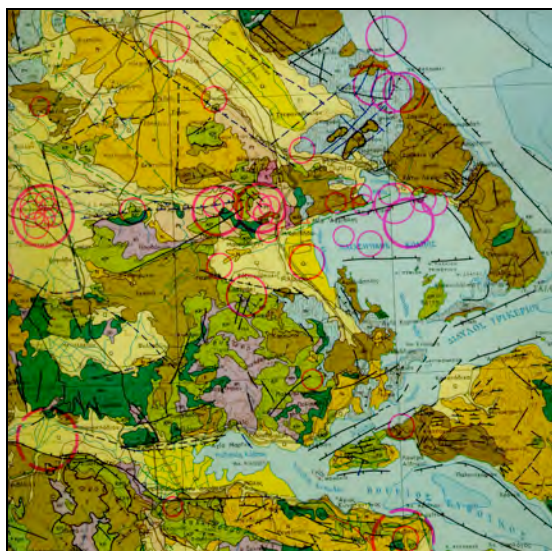
2. ΓΕΩΛΟΓΙΑ – ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η ευρύτερη περιοχή του ΠΣ, τοποθετείται γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη. Οι κυριότεροι εδαφικοί (μετααλπικοί) σχηματισμοί που συναντώνται είναι οι: α) ιλυώδης άργιλος μέσου πάχους 6m, που είναι ο υπερκείμενος σχηματισμός πάνω στον οποίο είναι θεμελιωμένη η πόλη του Βόλου, β) κολλούβια και αλλούβια υλικά που συνίστανται από κροκάλες, λατύπες και άμμο, που φτάνουν στο βάθος μέχρι το βραχώδες υπόβαθρο και είναι ο κυριότερος εδαφικός σχηματισμός του Βόλου και γ) παραλιακές αποθέσεις που είναι αμμώδεις σχηματισμοί μικρού πάχους και έκτασης. Το πάχος των εδαφικών αυτών σχηματισμών έως το βραχώδες υπόβαθρο κυμαίνεται από 30 έως 40m στα Βόρεια, Βόρειο-Ανατολικά και Βόρειο-Δυτικά της πόλης, αυξάνεται προς τα Νότια, 50 έως 70m στο κέντρο της πόλης, ξεπερνώντας τα 100m παραλιακά αυτής. Το βραχώδες υπόβαθρο (προαλπικοί και αλπικοί σχηματισμοί) αποτελείται από α) γνεύσιους και σχιστόλιθους ηλικίας Κατώτερου Τριαδικού – Ανώτερου Παλαιozoϊκού, β) μάρμαρα Μέσο – Άνω Τριαδικού – Άνω Ιουρασικού και γ) κρητιδικούς, τεκτονικά τοποθετημένους σχιστόλιθους, σχιστογνεύσιους και γνεύσιους

Η ευρύτερη περιοχή του Βόλου είναι έντονα τεκτονισμένη, με πλούσια νεοτεκτονική δράση, παρόμοια με εκείνη που επικρατεί στο νότιο Αιγαίο και χαρακτηρίζεται από κανονικά, εφελκυστικά ρήγματα με μικρή οριζόντια συνιστώσα. Κοντά στην περιοχή του Βόλου οι κύριες νεοτεκτονικές δομές, είναι τα ρήγματα της Νέας Αγχιάλου, των Φαρσάλων και του Πηλίου (Σχ. 1). Η σεισμική πηγή που έδωσε στο πρόσφατο παρελθόν (Ιούλιο 1980) σεισμό μεγέθους 6.5, είναι το ρήγμα της Νέας Αγχιάλου.

3. ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ

Ο Ν. Μαγνησίας και η ευρύτερη περιοχή χαρα-



Σχήμα 1. Σεισμοτεκτονικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του Βόλου (Ι.Γ.Μ.Ε., 1989).

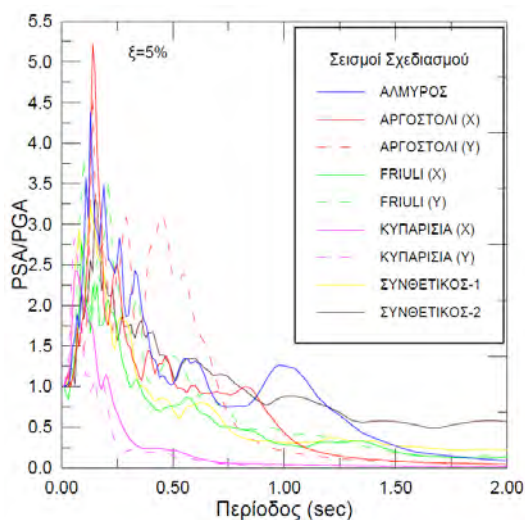
Figure 1. Seismotectonic map of the broader area of the city of Volos (I.G.M.E., 1989)

κτηρίζονται από υψηλή σεισμικότητα. Τον τελευταίο αιώνα, η πόλη του Βόλου έχει πληγεί επανειλημμένα από ισχυρούς σεισμούς οι οποίοι προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές (σεισμός Λεχωνίων 19.04.1955, Βελεστίου 08.03.1957). Ο Βόλος εντάσσεται στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II (ΕΑΚ2003) με επιτάχυνση σχεδιασμού 0.24g σε αρμονία με την υψηλή σεισμικότητα της περιοχής.

Στο πλαίσιο της ΜΜ έλαβε χώρα μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας για την πρόταση του σεισμού σχεδιασμού με πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 χρόνια (σύμφωνα με όλους τους αντισεισμικούς κανονισμούς για τα κοινά οικοδομικά έργα), καθώς επίσης και της προσομοίωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο για τη μελέτη της εδαφικής απόκρισης. Η εκτίμηση του σεισμού σχεδιασμού πραγματοποιήθηκε για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των προαναφερόμενων ρηγμάτων καθώς και της ζώνης 10 σεισμικών πηγών στην οποία ανήκει η περιοχή μελέτης. Με βάση την υψηλή σεισμικότητα της περιοχής και τη μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας εκτιμήθηκε ότι ο σεισμός σχεδιασμού για το πολεοδομικό συγκρότημα Βόλου – Ν. Ιωνίας έχει μέγεθος 6.5 και μέγιστη αναμενόμενη επιτάχυνση σε επιφανειακό βράχο 0.27g.

Για τις ανάγκες της μελέτης της σεισμικής απόκρισης, μετά από ενδελεχή έλεγχο των αποτελεσμάτων, προτάθηκαν 9 χρονοϊστορίες επιτάχυνσης (7 καταγραφές και 2 συνθετικές) οι οποίες μετά την αποσυνέλιξή τους στη βάση του εδαφικού προσομοιώματος παρουσιάζαν μέγιστες επιταχύνσεις 0.14-0.17g ανάλογα με

το συχνотικό περιεχόμενο του σεισμού στην επιφάνεια. Τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού του Αλμυρού, του Αργοστολίου (2 συνιστώσες) και του Friuli (2 συνιστώσες) προέρχονται από σεισμούς σε παρόμοια σεισμοτεκτονικά περιβάλλοντα και με αντίστοιχα μεγέθη. Οι συνθετικοί σεισμοί βασίζονται σε σεισμοτεκτονικά μοντέλα κατάλληλα για τη ζώνη 10 όπου ανήκει η ευρύτερη περιοχή. Οι σεισμοί της Κυπριασίας χρησιμοποιήθηκαν ως χαρακτηριστικές σεισμικές κινήσεις μικρής διάρκειας με φτωχό συχνотικό περιεχόμενο. Τα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα απόκρισης των σεισμών αυτών (στη βάση των εδαφικών προσομοιωμάτων) δίδονται στο σχήμα 2.



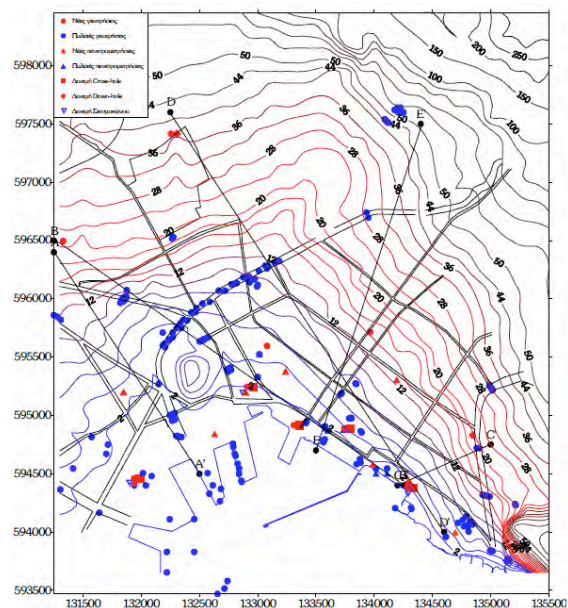
Σχήμα 2. Κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού.

Figure 2. Normalized elastic response spectra

4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στο πλαίσιο της ΜΜ εκτελέστηκε πρόγραμμα γεωτρήσεων, γεωτεχνικών ερευνών και δοκιμών. Το πρόγραμμα των ερευνών και οι θέσεις των γεωτρήσεων καθορίστηκαν, αφού προηγήθηκε επεξεργασία όλων των υπαρχουσών γεωτεχνικών πληροφοριών. Πρόκειται για περίπου 170 γεωτρήσεις, οι οποίες προσέφεραν μία πολύτιμη βάση αναφοράς για την εκτέλεση ενός προγράμματος γεωτρήσεων (Τεχνική έκθεση ΚΕΔΕ, 1997) και επιτόπου δοκιμών προσανατολισμένων στη γνώση των γεωτεχνικών συνθηκών. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις και δοκιμές SPT σε 10 θέσεις – στατικές πεντρομετρήσεις σε 9 θέσεις – δοκιμές crosshole σε 6 θέσεις – δοκιμές downhole σε 2 θέσεις και δοκιμές σεισμοκώνου σε 3 θέσεις (βλ. λεπτομέρειες στο Ραπτάκης και συν., 2010). Όλες οι θέσεις των παλαιών και νέων γεωτεχνικών δοκιμών και ερευνών δίνονται στο

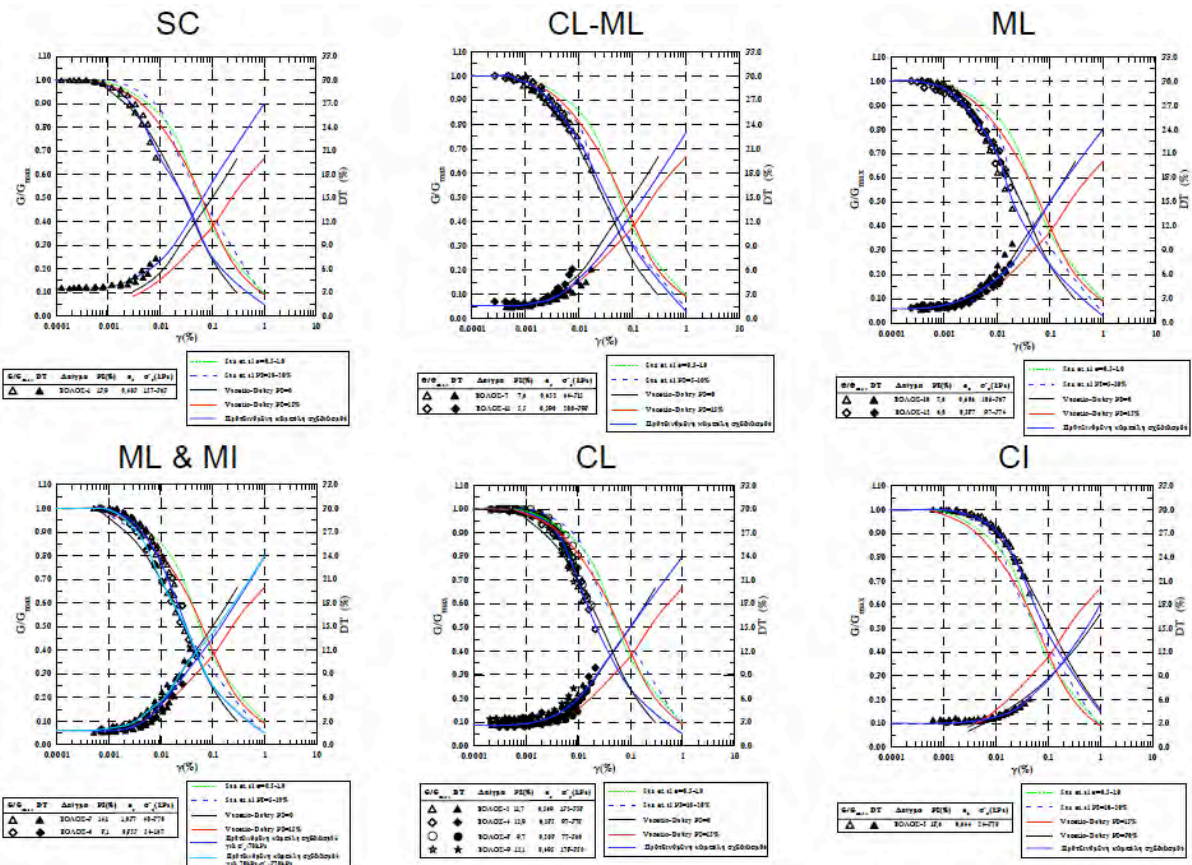
σχήμα 3. Τέλος, χρήσιμες πληροφορίες προσέφεραν και 24 υδρογεωτρήσεις που συλλέχθηκαν ειδικά στη βόρεια περιοχή της πόλης.



Σχήμα 3. Θέσεις νέων και παλαιών γεωτεχνικών δοκιμών και ερευνών και χαρακτηριστικών γεωτεχνικών μηκοτομών.

Figure 3. Location of new and old geotechnical tests and studies and characteristic geotechnical cross-sections.

Επίσης παράλληλα με τις επιτόπου γεωτεχνικές δοκιμές και τις γεωφυσικές διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές στήλης συντονισμού για τον προσδιορισμό της μεταβολής του μέτρου διάτμησης, G , και του ποσοστού απόσβεσης, $DT\%$, με τη διατμητική παραμόρφωση, γ , σε 12 αδιατάρακτα εδαφικά δοκίμια για τα παρακάτω εδάφη που συναντώνται στην περιοχή (Σχ. 4) α) ανοιχτή καστανή αργιλώδης άμμος (SC): $PI=13.9\%$ $e=0.403$ β) μαλακή, καστανή ιλύς έως ιλυώδης άργιλος με άμμο (CL-ML): $PI=5.5-7.6\%$ $e=0.590-0.652$ γ) μαλακή, καστανή αμμώδης ιλύς με περιοχές διάσπαρτων χαλικιών (ML): $PI=6.0-7.6\%$ $e=0.587-0.606$ δ) μαλακή, τεφρή ιλύς με οργανικά (ML & MI): $PI=8.1-14.1\%$ $e=0.853-1.037$ ε) μαλακή, κίτρινη έως καστανή αμμώδης άργιλος με περιοχές διάσπαρτων χαλικιών (CL): $PI=9.7-12.9\%$ $e=0.495-0.585$ και στ) σκληρή καστανοκόκκινη άργιλος (CI): $PI=18.6\%$ $e=0.644$. Για το βράχο, τα αμμοχάλικα, τις ιλυώδεις άμμους (SM), και τις ιλεις και αργίλους υψηλής πλαστικότητας (MH, CH) που συναντώνται στην περιοχή μελέτης και για τα οποία δεν υπήρχαν διαθέσιμα δείγματα, προτάθηκαν καμπύλες από το αρχείο του ΕΕΘΣΓΜ και από τη διεθνή βιβλιογραφία.



Σχήμα 4. Μεταβολή του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης, G/G_{max} και λόγου διατμητικής απόσβεσης, DT (%) με τη διατμητική παραμόρφωση, γ (%) για τους 6 διαφορετικούς τύπους εδαφών που συναντώνται στην περιοχή μελέτης
 Figure 4. G/G_{max} - γ (%)- DT (%) curves for the 6 different soil types met in the area under study.

5. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΓΕΩΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Όλες οι παλαιές και νέες γεωτεχνικές πληροφορίες αρχειοθετήθηκαν σε ειδικό αρχείο γεωτεχνικών πληροφοριών το οποίο παρείχε τη δυνατότητα πολλαπλής και ευέλικτης στατιστικής επεξεργασίας των στοιχείων. Η επεξεργασία των γεωτεχνικών πληροφοριών έγινε με δύο βασικούς άξονες: α) την εκτίμηση της στρωματογραφίας των εδαφικών σχηματισμών ως το υπόβαθρο και (β) την εκτίμηση των μέσων τιμών των γεωτεχνικών και εδαφοδυναμικών παραμέτρων για κάθε σχηματισμό (Πίν. 1 και ο Πιν. 4 από Ραπτάκης και συν., 2010) και οδήγησε στη γεωτεχνική χαρτογράφηση των εδαφικών σχηματισμών σε όλο το ΠΣ.

Με βάση την οριοθέτηση των βασικών εδαφικών σχηματισμών από το σύνολο των γεωτεχνικών πληροφοριών και χωροταξικά κριτήρια (πυκνότητα πολεοδομικού ιστού, σπουδαιότητα περιοχών, ανάπτυξη και επέκταση πολεοδομικού συγκροτήματος) σχεδιάσθηκαν 5 διδιάστατες τομές (AA', BB', CC', DD', EE') συ-

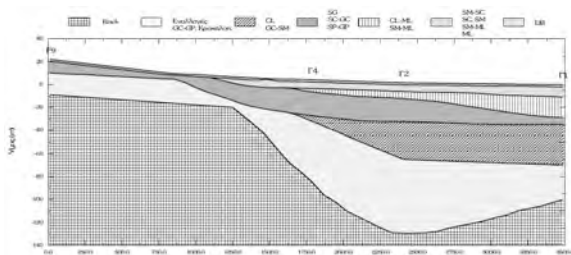
νολικού μήκους 15km με τη στρωματογραφία και τη μέση ταχύτητα V_s (Σχ. 3 & 5). Το σύνολο των μηκοτομών δείχνει την ποικιλομορφία των εδαφικών σχηματισμών, καθώς και την έντονη διαφοροποίηση της γεωμετρίας τους (πάχη, κλίσεις, εμφανίσεις κ.α.).

Επίσης, το βάθος του υπόβαθρου (ή οιονεί βράχου), για τις περιπτώσεις που οι γεωτρήσεις δεν έφθασαν έως το σεισμικό υπόβαθρο ($V_s > 750\text{m/s}$), εκτιμήθηκε με βάση το σύνολο των γεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων και κυμαίνεται από 25m έως 130m. Οι τιμές της ταχύτητας V_s σε βάθη όπου δεν υπήρχαν άλλα στοιχεία, εκτιμήθηκαν με βάση τα γεωλογικά δεδομένα και τη διεθνή πρακτική, που συνίσταται στην προοδευτική αύξηση της δυσκαμψίας του σχηματισμού με το βάθος, έως μία τιμή $V_s > 750\text{m/s}$.

Τέλος από την επεξεργασία όλων των διαθέσιμων δεδομένων προτάθηκε ο χωρισμός της περιοχής σε ζώνες και υποζώνες με όμοια γεωτεχνικά και γεωφυσικά χαρακτηριστικά, κατάλληλος για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης. Η περιοχή λοιπόν χωρίστηκε σε 4

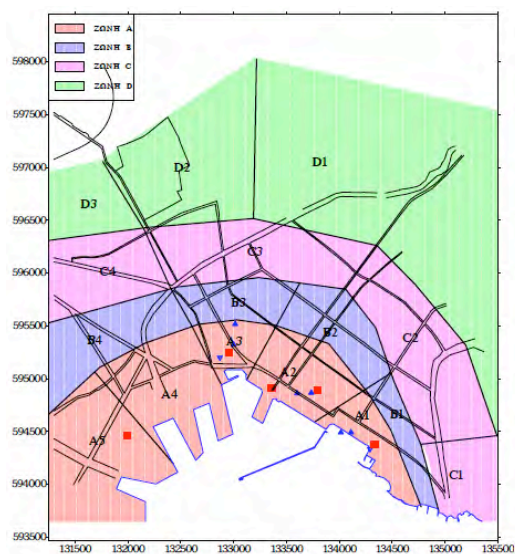
Πίνακας 1. Στατιστική επεξεργασία των εδαφικών ιδιοτήτων των 8 κατηγοριών εδαφών
Table 1. Statistical information of geotechnical properties for 8 soil types

Είδος Εδαφούς	Στατιστική Τιμή	Κόσιννο No200 (%)	Κόσιννο No4 (%)	WP (%)	W (%)	ML (%)	IP (%)	SR (%)	φ ₀	GS (V/m ³)	G _D (V/m ³)	G _M (V/m ³)	N ₂₀	CC	CU (kgf/cm ²)	EPSU (%)	C shear (CD)	F shear (CD)	
GW, GP	μέση τιμή	27,00	25,03										48,51						
	αριθμός δειγμάτων	30	30										19						
	μέγιστη τιμή	4,00	39,00										93,00						
	ελάχιστη τιμή	0,30	2,00										6,00						
	τυπικό σφάλμα	1,38	12,55										13,57						
GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC	μέση τιμή	9,21	37,46	16,23	10,51	23,62	7,39						47,19						
	αριθμός δειγμάτων	84	84	22	17	22	25						64						
	μέγιστη τιμή	12,00	49,00	22,00	39,00	39,00	21,00						139,00						
	ελάχιστη τιμή	5,00	17,00	13,00	3,80	17,70	3,00						4,00						
	τυπικό σφάλμα	2,92	8,75	2,58	2,83	2,70	4,76						17,51						
GM, GC, GM-GC	μέση τιμή	17,19	42,85	16,66	13,34	23,46	6,81			2,74		2,28	38,19						
	αριθμός δειγμάτων	78	78	34	19	34	34			1		1	47						
	μέγιστη τιμή	50,00	49,00	20,00	44,10	26,60	12,30			2,74		2,28	135,00						
	ελάχιστη τιμή	13,00	28,00	12,00	4,30	18,10	4,00			2,74		2,28	7,00						
	τυπικό σφάλμα	3,93	5,08	2,08	9,10	2,64	1,63						27,63						
SW, SP, SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC	μέση τιμή	6,84	66,66	10,65	19,37	25,39	7,76			0,03		1,04	44,22	0,10	0,11	14,36	0,06	6,0	
	αριθμός δειγμάτων	62	62	17	15	17	16			8		6	45	5	5	1	1	1,0	
	μέγιστη τιμή	12,00	100,00	27,00	38,00	35,00	11,00			1,01		1,94	130,00	0,27	0,70	15,10	0,08	6,0	
	ελάχιστη τιμή	1,00	50,00	12,00	2,90	18,90	4,00			0,32		1,27	4,00	0,07	0,05	12,80	0,08	6,0	
	τυπικό σφάλμα	2,89	17,21	3,94	10,88	5,05	2,01			0,27		0,27	30,50	0,08	0,26	1,00			
SM, SC, SM-SC	μέση τιμή	30,70	74,04	17,33	15,78	25,85	8,51	97,00	0,59	2,71		1,82	2,08	30,55	0,17	0,72	11,62	0,15	23,7
	αριθμός δειγμάτων	641	641	366	246	366	366	2	21	44		52	19	468	13	22	12	9	9,0
	μέγιστη τιμή	49,00	100,00	36,00	39,60	53,00	37,00	100,00	1,16	2,77		2,15	2,27	132,00	0,35	1,62	20,80	0,35	36,0
	ελάχιστη τιμή	13,00	50,00	4,00	4,00	17,00	2,00	94,00	0,35	2,55		1,21	1,73	2,00	0,10	0,12	1,66	0,05	14,0
	τυπικό σφάλμα	9,89	14,31	2,57	6,72	5,30	4,86	4,24	0,23	0,05		0,19	0,15	23,61	0,08	0,49	6,57	0,12	6,4
CL	μέση τιμή	72,66	97,30	18,69	25,61	36,31	11,62	94,80	0,77	2,67		1,61	2,00	13,74	0,19	0,62	14,72	0,36	13,3
	αριθμός δειγμάτων	343	343	343	184	343	343	5	48	23		28	84	244	23	57	48	9	8,0
	μέγιστη τιμή	99,00	100,00	27,00	60,00	49,70	26,00	100,00	1,62	2,77		1,89	2,24	62,00	0,53	2,46	20,00	1,91	20,0
	ελάχιστη τιμή	50,00	64,00	7,00	6,30	21,90	7,10	92,00	0,16	2,47		1,23	1,61	1,00	0,10	0,13	6,67	0,05	12,0
	τυπικό σφάλμα	13,50	5,31	2,99	6,15	5,98	4,39	3,27	0,31	0,09		0,20	0,14	13,62	0,11	0,53	3,30	0,59	2,4
CL-ML, ML	μέση τιμή	75,47	97,40	22,43	30,76	30,96	6,55	100,00	0,85	2,69		1,68	1,93	9,47	0,25	0,49	15,08	0,40	30,0
	αριθμός δειγμάτων	157	157	157	98	157	157	1	26	6		14	44	108	8	33	26	1	1,0
	μέγιστη τιμή	99,00	100,00	39,00	65,40	48,50	19,50	100,00	1,25	2,70		1,96	2,26	66,00	0,37	1,22	16,60	0,45	30,0
	ελάχιστη τιμή	50,00	67,00	2,00	10,10	7,00	1,00	100,00	0,41	2,67		1,42	1,62	2,00	0,10	0,06	6,43	0,45	30,0
	τυπικό σφάλμα	15,17	5,36	5,47	11,00	7,92	3,24	0,02	0,24	0,02		0,17	0,15	10,12	0,10	0,30	3,28		
CH, MH	μέση τιμή	67,35	98,65	30,65	40,36	54,94	24,29			0,06		Δ,00	1,85	6,64	0,21	0,85	14,04		
	αριθμός δειγμάτων	17	17	17	8	17	17			5		1	7	11	5	4	4		
	μέγιστη τιμή	97,00	100,00	55,00	72,30	64,00	36,00			1,23		2,09	20,00	0,37	1,21	16,20			
	ελάχιστη τιμή	56,00	82,00	18,00	23,00	50,00	4,00			0,54		2,70	1,50	3,00	0,13	0,39	5,33		
	τυπικό σφάλμα	13,00	4,37	9,96	15,82	4,54	8,09			0,30			0,19	5,41	0,13	0,35	5,88		



Σχήμα 5. Γεωλογική - Γεωτεχνική τομή Β-Β'
Figure 5. Geological-geotechnical section B-B'

ζώνες (A, B, C, D) (Σχ. 6). Την παραλιακή (A), δύο μεταβατικές – ενδιάμεσες ζώνες (B και C) και περιμετρικώς και βορείως προς το όρος Πήλιο τη ζώνη D, η οποία προοδευτικά φθάνει ως τον επιφανειακό βράχο. Η καθεμία από αυτές χωρίσθηκε σε άλλες, μικρότερης έκτασης με μικρές διαφοροποιήσεις, σε σχέση με τα γενικά χαρακτηριστικά της κεντρικής ζώνης. Για παράδειγμα η υποζώνη A3 διαφοροποιείται από την A5, λόγω του ότι το σεισμικό υπόβαθρο βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος και ταυτόχρονα κοντά στην επιφάνεια συναντώνται ορισμένοι αμμοχαλικώδεις οριζόντες (προφανώς παλαιά κοίτη χειμάρρων) που δεν συναντώνται στην A5. Με την έννοια αυτή, η σεισμική απόκριση της υποζώνης A3 δεν αναμένεται να έχει σημαντικές διαφορές από την απόκριση της υποζώνης A5. Ανάλογα κριτήρια ίσχυσαν και για το χωρισμό των υπολοίπων ζωνών σε υποζώνες. Συνολικά το ΠΣ χωρίσθηκε σε 16 μικρότερες ζώνες, που ανήκουν



Σχήμα 6. Χωρισμός ΠΣ σε ζώνες παρόμοιων γεωτεχνικών και γεωφυσικών χαρακτηριστικών
Figure 6. Zonation of the area on the basis of similar geotechnical and geophysical characteristics

σε 4 γενικές ζώνες.

Επίσης θα πρέπει να τονισθεί ότι η ζωνοποίηση θεωρείται αξιόπιστη για τη μελέτη της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών. Η χρησιμοποίησή της για άλλους σκοπούς, όπως για παράδειγμα τη μελέτη βαθειών ή επιφανειακών θεμελιώσεων, θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή και μόνο σε επίπεδο προκαταρκτικής μελέτης.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

Η μελέτη της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών υλοποιήθηκε σε 2 στάδια. με τη χρήση του κώδικα SHAKE 1D προσομοίωσης με κατακόρυφη διάδοση SH κυμάτων από το υπόβαθρο στην επιφάνεια.

Στο πρώτο στάδιο, η ανάλυση έγινε αποκλειστικά για τις 10 εδαφικές τομές, όπου έγιναν γεωτρήσεις (G01 έως G10), στις οποίες οι δυναμικές ιδιότητες των εδαφών (V_s , $G/Go-\gamma-DT$ %) είναι με ακρίβεια γνωστές από επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές. Με βάση τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου και το γεωσεισμικό χάρτη (σχ. 6), για κάθε μία από τις 16 ζώνες προτάθηκαν ένα ή περισσότερα εδαφικά ομοιώματα. Συνολικά προτάθηκαν 30 1D προσομοιώματα σχεδιασμού. Τα χαρακτηριστικά τους προέκυψαν μετά από μία εργώδη στατιστική επεξεργασία των τιμών των γεωτεχνικών πληροφοριών. Όπου υπήρχαν στοιχεία μόνο από N-SPT μετρήσεις, ο υπολογισμός της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων V_s εκτιμήθηκε με εμπειρικές σχέσεις, που έχουν προταθεί από το ΕΕΘΓΣΜ-ΑΠΘ, άλλως ακολουθήθηκε η πρακτική της προοδευτικής αύξησης της δυσκαμψίας του σχηματισμού με το βάθος, έως μία τιμή $V_s > 750$ m/s.

Για τη μελέτη της εδαφικής απόκρισης πραγματοποιήθηκαν κατά το πρώτο στάδιο (I), 90 επιλύσεις στις 10 επαρκώς γνωστές θέσεις, και κατά το δεύτερο (II), 270 επιλύσεις σε 30 αντιπροσωπευτικά προσομοιώματα. Για κάθε μία από τις επιλύσεις, υπολογίστηκαν η μεταβολή της μέγιστης επιτάχυνσης και της μέγιστης παραμόρφωσης με το βάθος, το επιταχυνσιογράφημα, το φάσμα Fourier και το ελαστικό φάσμα απόκρισης (για 2%, 5% και 10% απόσβεση) στο οιονεί βραχώδες υπόβαθρο και στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς και η συνάρτηση μεταφοράς των αποθέσεων.

Η μερική σύνθεση των αποτελεσμάτων οδήγησε στο συμπέρασμα ότι: (α) σε ό,τι αφορά τις τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης PGA, οι ζώνες A1, A2, A3, A4, A5 και B2 έχουν παραπλήσιες τιμές (0.15 έως 0.21g) και (β) το ίδιο ισχύει και για τις ζώνες B1, B3 και B4 (0.36-0.42g), τις ζώνες C1α, C2, C3 και C4 (0.30-0.38g) και τη ζώνη D (0.34-0.46g). Στην αντιπροσωπευτική εδαφική τομή C1b, λόγω της έντονης αντίθεσης της ταχύτητας V_s αποθέσεων και υποβάθρου και του μικρού πάχους των αποθέσεων παρουσιάζεται σημαντική ενίσχυση της εδαφικής επιτάχυνσης σε σχέση με την υπόλοιπη ζώνη (0,52g έναντι 0,33g κατά μέσο όρο).

Από τη στατιστική επεξεργασία του συνό-

λου των αποτελεσμάτων της σεισμικής απόκρισης προέκυψε ότι α) στην παραλιακή ζώνη (A) η μέση εδαφική επιτάχυνση είναι της τάξης του 0.20g, στη ζώνη B περίπου 0.40g, στη ζώνη C 0.33g και στη ζώνη D 0.39g, β) η θεμελιώδης περίοδος T_0 στην παραλιακή ζώνη (A) είναι περίπου 1.10sec, στη ζώνη B 0.43sec, στη ζώνη C 0.41sec και στη ζώνη D 0.35sec, γ) μέγιστες διατμητικές παραμορφώσεις γ , στα επιφανειακά στρώματα (0-7m) έχουν τις ακόλουθες τιμές: Ζώνη A $2 \cdot 10^{-3}$, Ζώνη B $2.8 \cdot 10^{-3}$, Ζώνη C $7 \cdot 10^{-4}$, Ζώνη D $2.6 \cdot 10^{-3}$.

Οι τιμές της PGA που υπολογίστηκαν είναι οι μέγιστες τιμές, ενώ αυτές που χρησιμοποιούνται στον αντισεισμικό σχεδιασμό είναι οι «ενεργές» ή «δρώσες» τιμές της επιτάχυνσης οι οποίες προέκυψαν ως η μέση τιμή των φασματικών επιταχύνσεων μεταξύ 0,1sec και 0,5sec διαιρούμενη διά 2,5. Η μέθοδος αυτή εφαρμοζόμενη στα μέσα ελαστικά φάσματα απόκρισης σε όλες τις ζώνες οδήγησε σε μία μέση τιμή ενεργούς επιτάχυνσης ίσης με 70% της μέγιστης. Σημειωτέον ότι η ζώνη B2 έχει ενταχθεί στη ζώνη A, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Ειδικά στη ζώνη A (+ B2), επειδή τα φάσματα απόκρισης λόγω του μαλακού εδάφους παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές σε μεγάλες περιόδους (>0.5sec), ως «ενεργός» τιμή εδαφικής επιτάχυνσης έχει ληφθεί η μέγιστη τιμή των μέσων τιμών από τις αναλύσεις. Η μέση τιμή εδαφικής επιτάχυνσης ανά ζώνη διαμορφώθηκε στις τιμές του πίνακα 2.

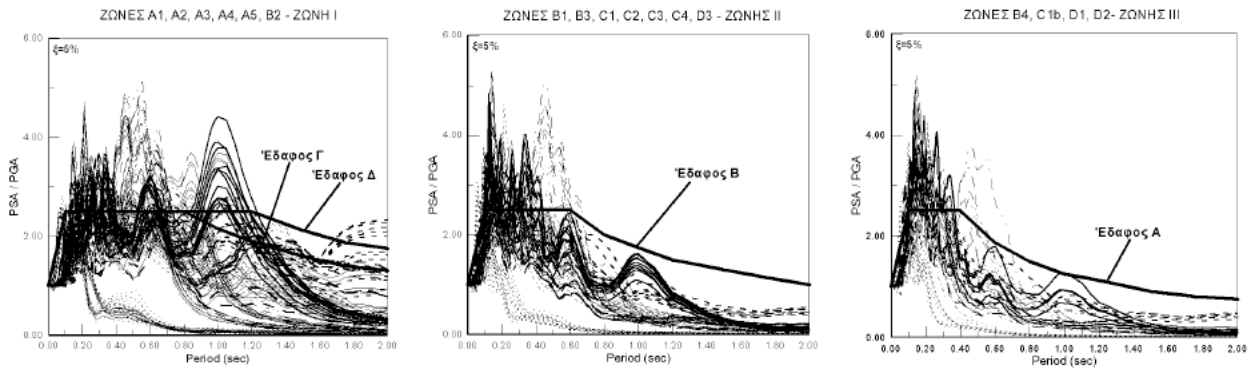
Πίνακας 2. Μέσες εδαφικές επιταχύνσεις

Table 2. Mean ground accelerations per zone

Ζώνη	A (+B2)	B (-B2)	C	A(+B2)
PGA _{eff}	0,18g	0,28g	0,24g	0,27g

Με βάση τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων ζωνών, τις μέσες ιδιοπεριόδους των αποθέσεων και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών φασμάτων απόκρισης, οι 16 ζώνες του σχήματος 6 ομαδοποιήθηκαν σε 3 ζώνες: Ζώνη I: το σύνολο των ζωνών της παραλιακής ζώνης A καθώς και η ζώνη B2, Ζώνη II: Ενδιάμεσες ζώνες (B1, B3, C1, C2, C3, C4) και Ζώνη III: περιμετρικές βόρειες και ανατολικές περιοχές (B4, D1, D2)

Στο σχήμα 7 παρουσιάζονται όλα τα κανονικοποιημένα φάσματα ανά ζώνη και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του ΕΑΚ για τις εδαφικές κατηγορίες A, B, Γ, Δ. Παρόλο που η σύγκριση είναι σχετικά ικανοποιητική, διαπιστώνεται ότι σε γενικές γραμμές η ενιαία φασματική τιμή 2.5 του οριζόντιου κλάδου που εισηγείται ο ΕΑΚ δεν παρέχει ικανοποιητική εξασφάλιση.



Σχήμα 7. Σύγκριση κανονικοποιημένων φασμάτων απόκρισης ανά ζώνη με τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού του ΕΑΚ

Figure 7. Comparison between the normalized response spectra for each zone and the design response spectra of Greek Seismic Code

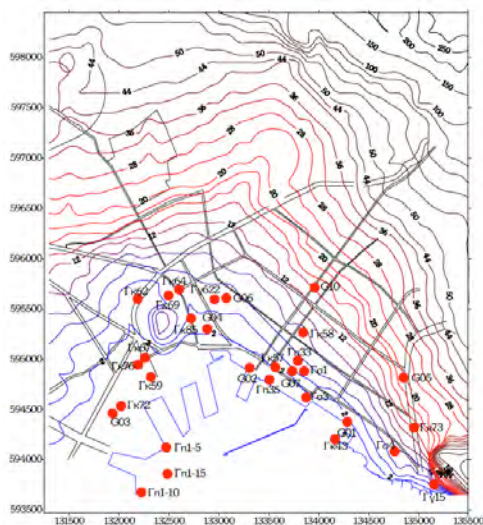
7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ο έλεγχος του κινδύνου ρευστοποίησης έγινε σύμφωνα και με τις διεθνείς προδιαγραφές σε δύο στάδια. Καταρχάς εξετάζεται το δυναμικό ρευστοποίησης ή αλλιώς η επιδεκτικότητα των εδαφών σε ρευστοποίηση, βάση κοκκομετρίας και παραμέτρων αντοχής. Εφόσον η πρώτη αυτή προϋπόθεση πληρούντο, ακολούθησε η εκτίμηση του κινδύνου ρευστοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη και τα χαρακτηριστικά του σεισμού σε ό,τι αφορά τις αναπτυσσόμενες εδαφικές επιταχύνσεις και διατμητικές τάσεις.

Το γενικό συμπέρασμα, το οποίο προέκυψε από τους προκαταρκτικούς ελέγχους, είναι ότι τα εδάφη της παραλιακής ζώνης του Βόλου ανήκουν στην κατηγορία εδαφών που παρουσιάζουν κάποιο, μικρό ή μεγάλο, δυναμικό ρευστοποίησης (σχ. 8 & 9). Στη συνέχεια ακολου-

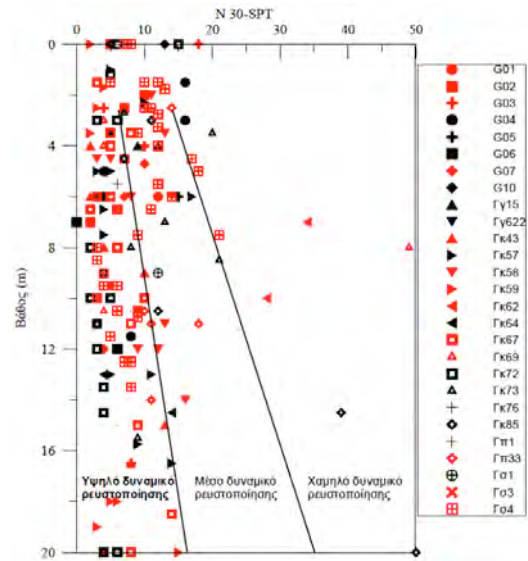
θησε λεπτομερής αναλυτικός έλεγχος του κινδύνου ρευστοποίησης σε 13 τυπικές αντιπροσωπευτικές εδαφικές τομές από τις 28 με υψηλό δυναμικό ρευστοποίησης.

Τα αποτελέσματα του αναλυτικού ελέγχου έδειξαν ότι ο κίνδυνος ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη του Βόλου είναι υπαρκτός για ένα ισχυρό σεισμό ανάλογης έντασης με τους σεισμούς σχεδιασμού, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη με συντελεστές ασφαλείας F έναντι ρευστοποίησης, μικρότεροι ή γύρω στη μονάδα. Τα φαινόμενα αναμένεται να εκδηλωθούν με μεγαλύτερη ένταση στο δυτικό τμήμα της παραλιακής ζώνης, όπου οι χαλαροί κορεσμένοι σχηματισμοί της αμμοίλυος έχουν σημαντικό πάχος και δεν διακόπτονται από αργιλικούς ή αμμοχαλικώδεις σχηματισμούς.



Σχήμα 8. Θέσεις γεωτρήσεων με υψηλό δυναμικό ρευστοποίησης

Figure 8. Location of boreholes with high liquefaction susceptibility index



Σχήμα 9. Δυναμικό ρευστοποίησης με βάση το N_{30-SPT}

Figure 9. Liquefaction susceptibility based on N_{30-SPT} values

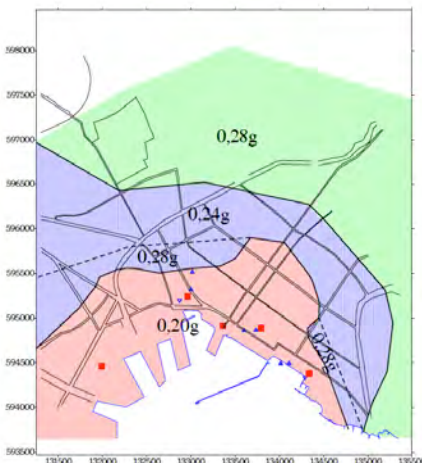
8. ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, σε ό,τι αφορά τις τιμές σχεδιασμού της δρώσας εδαφικής επιτάχυνσης και των αντίστοιχων φασμάτων ελαστικής απόκρισης, η υπό μελέτη περιοχή χωρίσθηκε σε 3 ζώνες (I-παραλιακή, II-ενδιάμεση και III-περιμετρική), ισοδύναμης σεισμικής απόκρισης (σχ. 10 ,11). Για τις υπόλοιπες παραμέτρους της ισχυρής εδαφικής κίνησης, προτείνονται μέσες τιμές, για κάθε ζώνη και υποζώνη. Η δεσπόζουσα περίοδος, T_0 , των εδαφικών σχηματισμών κυμαίνεται από 1,4sec σε ορισμένες περιοχές στην παραλιακή ζώνη μέχρι 0,30sec στην περιμετρική βόρεια ζώνη III. Οι μέσες τιμές των συντελεστών ενίσχυσης, A_{max} , της σεισμικής κίνησης, με εξαίρεση μία

στενή περιοχή περί του ορίου της επιφανειακής εμφάνισης του βράχου στην ανατολική περιοχή της πόλης, κυμαίνονται από 4,0 έως 7,0.

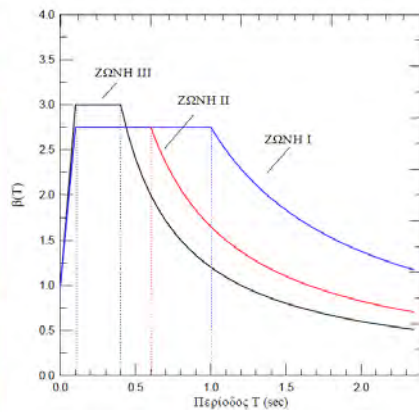
Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η περιοχή, που παρουσιάζει υψηλό κίνδυνο ρευστοποίησης για τα σεισμικά σενάρια που μελετήθηκαν. Στη ζώνη αυτή κρίνεται απαραίτητος ο έλεγχος του κινδύνου ρευστοποίησης σε κάθε νέα κατασκευή και η λήψη των κατάλληλων μέτρων για την αντιμετώπιση του αυξημένου κινδύνου.

Η ζωνοποίηση του ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας που προτάθηκε, ομογενοποιεί και συνθέτει όλα τα αποτελέσματα της μικροζωνικής μελέτης, ακολουθώντας το πνεύμα του κανονισμού και έχοντας ως γνώμονα την όσο το δυνατόν πιο εύχρηστη εφαρμογή των πορισμάτων της μελέτης.



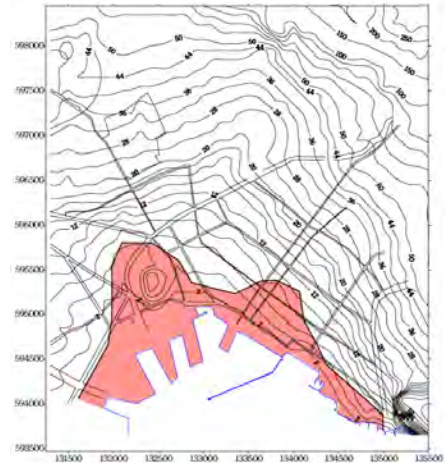
Σχήμα 10. Προτεινόμενες ενεργές εδαφικές επιταχύνσεις ανά ζώνη

Figure 10. Proposed effective acceleration for each zone



Σχήμα 11. Προτεινόμενα κανονικοποιημένα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού ανά ζώνη

Figure 11. Proposed normalized elastic response spectra for each zone



Σχήμα 12. Ζώνη υψηλού κινδύνου ρευστοποίησης

Figure 12. Area of high liquefaction risk

10. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες οφείλονται καταρχήν στη Νομαρχία Βόλου για τη χρηματοδότηση του έργου 8870/ΕΕ/ΑΠΘ, σε όλους τους συντελεστές που βοήθησαν να έρθει σε πέρας η Μικροζωνική Μελέτη του ΠΣ Βόλου - Ν. Ιωνίας, και στους φορείς που διέθεσαν πληροφορίες για την εκπόνηση της Μικροζωνικής Μελέτης.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ι.Γ.Μ.Ε. (1989). Γεωλογικός χάρτης (φ. Βόλου 1:50000).
Ραπτάκης Δ., Κ. Μάκρα, Κ. Πιπιάκης (2010). "Προσομοιώματα Ταχύτητας Εγκαρσίων Κυμάτων και Εκτίμηση της Σεισμικής Από-

κρισης στο ΠΣ Βόλου-Ν.Ιωνίας", 6^ο Παν. Συν. Γεωτ. και Γεωπερ. Μηχ., Βόλος, 2010.

Τεχνική έκθεση (2000). "Μικροζωνική Μελέτη του ΠΣ Βόλου – Ν. Ιωνίας" Εργ. Εδαφ. και Θεμελ. Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ (επιστ. υπ. Κ. Πιπιάκης, κωδ. εργ. 8870 ΕΕ) ΑΠΘ

Τεχνική Έκθεση (1997). "Γεωτρήσεις και εργαστηριακές – γεωτεχνικές έρευνες" (Υπ. Γ. Τσιαμπάος, Ν. Σαμπατακάκης, Χ. Γιάνναρος, Χ. Κωνσταντινίδης και Ι. Βασιλείου. ΚΕΔΕ – ΥΠΕΧΩΔΕ.