

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10.

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικός στόχος της συγκεκριμένης ερευνητικής προσπάθειας ήταν τόσο η αποτύπωση της χωρικής κατανομής της ισχυρής κίνησης στην πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όσο και η κατανόηση των παραγόντων που συνετέλεσαν βασικότερο ρόλο στη διαμόρφωσή της:

- α) της διαδικασίας διάρρηξης του σεισμογόνου ρήγματος και
- β) των τοπικών εδαφολογικών συνθηκών

Η κατά το δυνατόν πληρέστερη εκτίμηση των χαρακτηριστικών του σεισμού της 7/9/99 στην πλειόσειστη περιοχή συμβάλλει ουσιαστικά τόσο στον ρεαλιστικότερο αντισεισμικό σχεδιασμό της ευρύτερης περιοχής της Αττικής, όσο και πιλοτικά για αντίστοιχες περιπτώσεις σεισμών κοντινού πεδίου άλλων πόλεων (π.χ. Πάτρα, Ηράκλειο, Λαμία, κ.α.).

Μια τέτοια μελέτη δεν θα μπορούσε παρά να ξεκινήσει από την λεπτομερή αποτύπωση της γεωλογίας και τεκτονικής της ευρύτερης πλειόσειστης περιοχής. Έγινε προσπάθεια συσχέτισής τους με τα σεισμολογικά στοιχεία που προέκυψαν τόσο από τη μελέτη του κύριου σεισμού, όσο και από τη μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας. Ως επικρατέστερο σενάριο εμφανίζεται εκείνο του τυφλού ρήγματος που θέλει την πρωτογενή διάρρηξη να μην φτάνει στην επιφάνεια και να περιορίζεται σε βάθος μερικών χιλιομέτρων (3 με 4), χωρίς να πρέπει να συνδεθεί απαραίτητα με κάποια επιφανειακή εμφάνιση αποτυπωμένου ρήγματος.

Η επεξεργασία των μετασεισμικών καταγραφών και οι σεισμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης επιβεβαίωσαν την σημαντικότητα επίδραση του εδάφους και των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη διαμόρφωση της τελικής σεισμικής κίνησης του κύριου σεισμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, μολονότι εν γένει δεν υπήρχαν γεωτεχνικά στοιχεία στις θέσεις καταγραφής του κύριου σεισμού (με εξαίρεση τους σταθμούς του Μετρό), διεξήχθησαν (κυρίως από το Κ.Ε.Δ.Ε.) γεωτεχνικές έρευνες σε θέσεις έντονης συγκέντρωσης βλαβών για τον προσδιορισμό των υπεδαφικών συνθηκών. Παραμένει βέβαια πάντα η έλλειψη δεδομένων γεωτρήσεων μεγάλου βάθους που να δίνουν δεδομένα έως το πραγματικό βραχώδες υπόβαθρο. Αυτός είναι προφανώς και ο λόγος που τα δεδομένα των αναλύσεων εδαφικού θορύβου δίνουν σε μερικές θέσεις (Χαλάνδρι, Μεταμόρφωση, Άνω Λιόσια, Καματερό) διαφορετικά αποτελέσματα από εκείνα των μονοδιάστατων ελαστικών

ισοδύναμων. Θεωρώντας ότι τα αποτελέσματα της ανάλυσης του εδαφικού θορύβου είναι πιο αντιπροσωπευτικά της ελαστικής τουλάχιστον συμπεριφοράς της επιφανειακής γεωλογίας και, όσον αφορά στις συχνοτικές ζώνες ενίσχυσης, σε σχέση με εκείνα των μονοδιάστατων ελαστικών ισοδύναμων, γιατί αναδεικνύουν την επίδραση όλης της εδαφικής στήλης από το πραγματικό βραχώδες υπόβαθρο και πάνω, πρέπει να επιστήσουμε την προσοχή για ακόμα μία φορά σε εκείνους που θέλουν να εκτιμήσουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους μόνο με χρήση ελαστικών μονοδιάστατων αναλύσεων σε δεδομένα γεωτρήσεων μερικών μόλις μέτρων βάθους.

Τα δε αποτελέσματα της μεθοδολογίας του εδαφικού θορύβου, δείχνουν για μία ακόμη φορά ότι:

- δρουν συμπληρωματικά με τη γεωτεχνική προσέγγιση, ιδιαίτερα όταν στις θέσεις ενδιαφέροντος δεν υπάρχουν δεδομένα γεωτρήσεων που να φτάνουν έως το βραχώδες υπόβαθρο
- μας δίνουν μία εικόνα των συχνοτικών ζωνών επίδρασης των επιφανειακών γεωλογικών συνθηκών στη σεισμική κίνηση η οποία προφανώς ισχύει για ελαστικές παραμορφώσεις.
- Τα πλάτη ενίσχυσης μπορούν να χαρακτηριστούν μόνο ως ενδεικτικά γιατί δεν είναι δυνατό να αποδώσουν κατά περίπτωση μη γραμμικές διαδικασίες σε περίπτωση ισχυρού σεισμού.
- Οι ενδείξεις πλατών ενίσχυσης υποδεικνύουν ότι στις θέσεις Μοναστηράκι, Αδάμες, Χαλάνδρι, Καματερό, ΚΕΔΕ, Σεπόλια, Μεταμόρφωση και Μενίδι, η επιφανειακή γεωλογική δομή επέδρασε αρκετά στη διαμόρφωση της τελικής σεισμικής κίνησης, ενώ στις θέσεις Άνω Λιόσια, Θρακομακεδόνες, Φυλή και Θριάσιο φαίνεται ότι η επίδραση ήταν μικρότερη ή και αμελητέα.

Οι εμπειρικές συσχετίσεις της ταχύτητας διάδοσης διατμητικού κύματος V_S και του αριθμού κρούσεων N_{SPT} πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή, καθώς συνήθως αναφέρονται σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών. Αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές της ταχύτητας V_S οδηγούν σε σημαντικά σφάλματα ως προς τις θεμελιώδεις ιδιοσυχνότητες του υποκείμενου σχηματισμού.

Σε μεγάλα επίπεδα επιταχύνσεων (και κατά συνέπεια διατμητικών παραμορφώσεων) η θεώρηση ιξωδο-ελαστικής συμπεριφοράς του εδάφους παύει να είναι ρεαλιστική. Για τον λόγο αυτόν οι ελαστικές καμπύλες φασματικής ενίσχυσης που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο

4 ισχύουν μόνον στην περίπτωση ασθενών μετασεισμικών δονήσεων, και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις φασματικές ενισχύσεις ισχυρών καταγραφών.

Η διερεύνηση της σεισμικής διάρρηξης, η εκτίμηση της κατανομής της σεισμικής κίνησης στην πλειόσειστο περιοχή κατά τη διάρκεια του κυρίου σεισμού, καθώς και η εκτίμηση των σεισμικών κινήσεων από πιθανά μελλοντικά σεισμικά σενάρια, προσεγγίστηκαν με σεισμικές προσομοιώσεις. Έγινε χρήση στοχαστικών, ημι-εμπειρικών και αναλυτικών/θεωρητικών προσεγγίσεων. Στις δύο πρώτες ακολουθήθηκε παρόμοιο σκεπτικό εργασίας. Στην αρχή χρησιμοποιώντας τις γνωστές παραμέτρους και τα δεδομένα επιταχυνσιογράφων, τεκμηριώθηκε το μοντέλο με βάση τη συσχέτιση παρατήρησης/εξομοίωσης. Έχοντας τεκμηριώσει τις παραμέτρους της στοχαστικής μεθόδου σε θέσεις ελεύθερου πεδίου, το επόμενο βήμα ήταν η προσομοίωση των ισχυρών σεισμικών κινήσεων στις υπόλοιπες θέσεις των επιταχυνσιογράφων που κατέγραψαν την ισχυρή σεισμική δόνηση της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Η αναλυτική/θεωρητική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε τόσο για την περαιτέρω διερεύνηση της κατευθυντικότητας της σεισμικής διάρρηξης, όσο και για την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης σε χαρακτηριστική θέση, που μπορεί να προκληθεί από μελλοντικούς σεισμούς επί σημαντικών ρηξιγενών ζωνών που βρίσκονται εκτός Αττικής.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της στοχαστικής προσέγγισης κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων θέσεων. Σε ότι αφορά τις ιστορίες της επιτάχυνσης, η συμφωνία μεταξύ συνθετικών και πραγματικών καταγραφών παρατηρείται τόσο στις μέγιστες τιμές, όσο και στις περιβάλλουσες συναρτήσεις (envelope functions) των κυματομορφών. Ρεαλιστική είναι και η προσομοίωση της διάρκειας των εγκάρσιων κυμάτων, ιδιαίτερα στους πιο κοντινούς ως προς το επίκεντρο σταθμούς. Στους πιο απομακρυσμένους σταθμούς (για παράδειγμα LAVR, COR, HAL1), παρατηρείται υποεκτίμηση της διάρκειας των εγκάρσιων κυμάτων, η οποία μπορεί να οφείλεται σε μεγαλύτερη επίδραση του παράγοντα απόσβεσης. Αντίστοιχα ικανοποιητικές είναι και οι συγκρίσεις των συνθετικών και παρατηρούμενων καταγραφών στο πεδίο των συχνοτήτων, τόσο στο φασματικό σχήμα όσο και στις απόλυτες τιμές της φασματικής επιτάχυνσης.

Μεταξύ των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι προσομοιώσεις στις θέσεις MNSA και SGMB. Στην πρώτη περίπτωση, η συνθετική καταγραφή παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την επιμήκη (longitudinal) καταγεγραμμένη συνιστώσα, ενώ διαφέρει κατά πολύ από την εγκάρσια (transversal). Το γεγονός αυτό ενισχύει τα

αποτελέσματα άλλων εργασιών (Gazetas, 2001; Gazetas et al., 2002), σχετικά με την αναξιοπιστία της καταγεγραμμένης εγκάρσιας κίνησης στο σταθμό MNSA και υποδεικνύει την καταγραφή της επιμήκους συνιστώσας ως αντιπροσωπευτική για τη συγκεκριμένη θέση. Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης στο σταθμό SGMB παρουσιάζει σημαντικές διαφορές και με τις δυο καταγεγραμμένες συνιστώσες και ιδιαίτερα με την εγκάρσια. Αξίζει να αναφερθεί ότι το βάθος εγκατάστασης του συγκεκριμένου σταθμού είναι το μεγαλύτερο του συνόλου των σταθμών που εξετάστηκαν (26 m), ενώ στην ίδια θέση και σε μικρότερο βάθος (7 m) ήταν εγκατεστημένος ο σταθμός SGMA. Συγκρίνοντας το βαθμό προσομοίωσης των παρατηρήσεων στους δυο τελευταίους σταθμούς, προκύπτει ότι αυτός είναι σημαντικά καλύτερος για το σταθμό SGMA. Η διαφορά αυτή πιθανόν να οφείλεται σε μεγαλύτερη επίδραση της περιβάλλουσας κατασκευής του σταθμού του Μετρώ στις καταγραφές του SGMB ή και το γεγονός ότι αυτές λήφθηκαν σε μεγαλύτερο βάθος. Επιπρόσθετα, η επίδραση αυτή πιθανόν να ήταν μεγαλύτερη κατά τη διεύθυνση παράλληλα στην εγκάρσια συνιστώσα του SGMB (N225°).

Μια συστηματική αστοχία που παρατηρείται στο σύνολο σχεδόν των προσομοιώσεων είναι τα μικρά φασματικά πλάτη των συνθετικών καταγραφών για συχνότητες μικρότερες από ~1.5 Hz. Όπως προαναφέρθηκε, η διαφορά αυτή αναμένεται θεωρητικά λόγω της χρησιμοποίησης μεγάλου αριθμού «υποπηγών» κατά τη μοντελοποίηση της σεισμογενούς επιφάνειας.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υποεκτίμησης των χαμηλών συχνοτήτων χωρίς περαιτέρω εξομάλυνση του μοντέλου κατανομής της ολίσθησης, αποφασίστηκε επανάληψη των υπολογισμών των συνθετικών κινήσεων συμπεριλαμβάνοντας κατάλληλη στατιστική διόρθωση.

Στη συνέχεια, το τεκμηριωμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή χαρτών με συνθετικές τιμές της επιτάχυνσης, επεκτείνοντας τις προσομοιώσεις και σε θέσεις για τις οποίες δεν υπάρχουν καταγραφές από το σεισμό της Αθήνας, με έμφαση στην πλειόσειστη περιοχή.

Οι συνθετικές τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης που υπολογίστηκαν με βάση τη στοχαστική προσέγγιση στο υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής ήταν μικρότερες από 0.35g. Οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται κατά μήκος του σεισμογόνου ρήγματος και εντός της προβολής του επιπέδου του στην επιφάνεια, ενώ αυξημένες τιμές παρατηρούνται και προς την πλευρά της πλειόσειστης περιοχής του 1999. Η αύξηση των τιμών προς την περιοχή αυτή φθάνει σε ορισμένες περιπτώσεις το 50% (για παράδειγμα κοντά στην περιοχή των

Θρακομακεδόνων) και σε συνδυασμό με τον παράγοντα των τοπικών εδαφικών συνθηκών μπορεί μερικώς να ερμηνεύσει την κατανομή των βλαβών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή συγκέντρωσης αυξημένων τιμών της επιτάχυνσης κοντά στο ανατολικό άκρο της προέκτασης του ρήγματος στην επιφάνεια, καθώς στην ίδια περιοχή παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερη συγκέντρωση επιφανειακών διαρρήξεων.

Εξετάζονται ως σενάρια πολύ μικρής πιθανότητας εκδήλωσης μελλοντικού ισχυρού σεισμού οι διαρρήξεις δυο νεοτεκτονικών ρηγμάτων που χαρτογραφήθηκαν εντός της περιοχής μελέτης: του ρήγματος του Θριάσειου πεδίου, παράλληλα στο σεισμογόνο ρήγμα της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 και του ρήγματος των Θρακομακεδόνων, το οποίο είναι προσανατολισμένο σχεδόν κάθετα στο σεισμογόνο ρήγμα του 1999. Ωστόσο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δυσμενέστερων σεναρίων προσομοίωσης.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της σεισμικής κίνησης χρησιμοποιώντας την ημι-εμπειρική προσέγγιση, μπορούν να βγουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η γεωμετρία και το αζιμούθιο του ρήγματος της Πάρνηθας, πιθανολογούσαν σημαντικά φαινόμενα κατευθυντικότητας σεισμικής διάρρηξης. Πράγματι, στο δυσμενέστερο σενάριο, η διάρρηξη ξεκινά από το δυτικό άκρο του ρήγματος σε βάθος γύρω στα 10 χλμ. και κατευθύνεται προς το ανατολικό άκρο και προς την επιφάνεια. Όλες οι προσομοιώσεις συγκλίνουν στην άποψη ότι το συγκεκριμένο δυσμενές σενάριο είναι και το επικρατέστερο σενάριο του σεισμού της 7/9/1999. Αποτελέσματα αυτής της κατευθυντικότητας είναι οι υψηλές τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης, ιδιαίτερα στην Α-Δ συνιστώσα, καθώς και σχετικά υψηλές τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης. Θετικό στοιχείο ήταν η σχετικά μικρή διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης (γύρω στα 5 δευτερόλεπτα) και συνδέεται άμεσα με τις διαστάσεις του ρήγματος και την ταχύτητα διάρρηξης (12χλμ / 2.7χλμ/δευτ.~4.5 δευτ.) καθώς και το γεγονός ότι η διάρρηξη δεν έφτασε μέχρι την επιφάνεια (πιθανώς σταμάτησε στα 4 χλμ βάθος, όπως προκύπτει από τη μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας).
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ημι-εμπειρική προσομοίωση για το ρήγμα της Πάρνηθας στη θέση Άνω Λιόσια (χαρακτηριστική θέση πολύ εγγύς πεδίου) η οποία αποκαλύπτει δύο φασματικές κορυφές επιτάχυνσης, γύρω στα 4-5 και 8-9 Hz και πλούσιο περιεχόμενο σε υψηλές συχνότητες (πάνω από 10Hz). Η εκτιμώμενη μέγιστη τιμή

επιτάχυνσης σε αυτή τη θέση είναι της τάξης του 0.6g στις οριζόντιες συνιστώσες και 0.4g στην κατακόρυφη. Η διάρκεια της ισχυρής κίνηση είναι 2 με 3 δευτερόλεπτα.

- Μερικές τιμές μέγιστης επιτάχυνσης των συνθετικών της ημι-εμπειρικής προσέγγισης σε διάφορα σενάρια είναι υψηλότερες των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της στοχαστικής προσέγγισης γιατί αντιπροσωπεύουν τα συγκεκριμένα πιο δυσμενή σενάρια και όχι στατιστικά μέγιστες τιμές.

Χρησιμοποιώντας τη θεωρητική/αναλυτική προσέγγιση έγινε κατ'αρχήν προσπάθεια προσομοίωσης της σεισμικής κίνησης του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Η προσομοίωση έγινε για τη θέση Άνω Λιόσια, με στόχο τη διερεύνηση του ρόλου της κατευθυντικότητας της διάρρηξης σε μια περιοχή που βρίσκεται στο ανατολικό άκρο του ρήγματος, καθώς και την προσπάθεια εκτίμησης των παραμέτρων της ισχυρής κίνησης στο εγγύς πεδίο. Για το σενάριο όπου η διάρρηξη κατευθύνεται προς ανατολάς η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης υπολογίζεται σε 0.6g, ενώ στην αντίθετη περίπτωση μονόδρομης διάρρηξης προς δυσμάς η μέγιστη επιτάχυνση υπολογίζεται σε 0.4g.

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η ίδια μεθοδολογία για να εκτιμηθούν και αξιολογηθούν οι παράμετροι της σεισμικής κίνησης στην ίδια περιοχή προερχόμενη από θεωρητικά πιθανά δυσμενέστερα για την Αττική μελλοντικά σεισμικά σενάρια. Γίνεται διερεύνηση της σεισμικής κίνησης που μπορεί να παρουσιαστεί ως αποτέλεσμα μελλοντικού σεισμού στις ρηξιγενείς ζώνες των Αλκυονίδων και της Αταλάντης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που προέρχονται από τις παρακάτω θεωρητικές προσομοιώσεις, αναπαράγουν το κυματικό πεδίο μέχρι μέγιστο 4-5 Hz. Η ρεαλιστική αναπαραγωγή αξιόπιστων συνθετικών για μεγαλύτερες συχνότητες, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι δυνατή μέσω θεωρητικών μεθόδων. Κατά συνέπεια τα παραγόμενα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα αντιπροσωπεύουν κινήσεις υποβάθρου, λόγω του γεγονότος ότι η πολύπλοκη επιφανειακή δομή της τάξης των μέτρων είναι σχεδόν διαφανής για τη συγκεκριμένη συχνοτική ζώνη.

Και για τις δύο προσομοιώσεις η μέγιστη επιτάχυνση δεν ξεπερνά τα 0.2g για οποιαδήποτε σενάριο διάρρηξης.

Και οι τρεις λοιπόν μεθοδολογίες προσομοίωσης συνηγορούν σε μία κατευθυντικότητα της σεισμικής διάρρηξης προς ανατολάς. Η έντονη εμφάνιση των αποτελεσμάτων της κατευθυντικότητας σε συγκεκριμένα διαστήματα περιόδων μπορεί να ερμηνευτεί θεωρητικά. Σύμφωνα με τη θεωρητική διατύπωση του φαινομένου της κατευθυντικότητας (Ben-Menahem, 1961, 1962) η μέγιστη ένταση των αποτελεσμάτων του προβλέπεται σε

περιπτώσεις που οι διαστάσεις της πηγής είναι της ίδιας τάξης με το μήκος του ακτινοβολούμενου κύματος και σε περιπτώσεις που η διάρκεια της διάρρηξης είναι της ίδιας τάξης με την περίοδο του ακτινοβολούμενου κύματος. Στην περίπτωση του σεισμού της Αθήνας, η περίοδος 0.2 sec, για την οποία τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας είναι ιδιαίτερα έντονα, αντιστοιχεί σε μήκος κύματος, λ , της τάξης των 16.5 km. Το συγκεκριμένο μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τις διαστάσεις της σεισμικής πηγής (12 με 16 km). Αντίστοιχα, η διάρκεια της διάρρηξης, που κυμάνθηκε από 3 έως 5 sec, είναι συμβατή με έντονη εκδήλωση του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις αντίστοιχες περιόδους.

Σε γενικές γραμμές, οι προτεινόμενες συνθετικές κινήσεις βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα αποτελέσματα των γεωτεχνικών μελετών που αφορούν στο επίπεδο της ισχυρής σεισμικής κίνησης εντός της πλειόσειστης περιοχής. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους Γκαζέτας και συνεργάτες (2001), οι επιταχύνσεις στην πλειόσειστη περιοχή κυμάνθηκαν μεταξύ των ακόλουθων τιμών:

- Μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης: $PGA \approx 0.3 - 0.7 \text{ g}$
- Μέση τιμή της φασματικής επιτάχυνσης: $S_A \approx 0.75 - 1.5 \text{ g}$ για $T \approx 0.15 - 0.30 \text{ sec}$
 $S_A \approx 0.15 - 0.3 \text{ g}$ για $T \approx 0.60 - 1.0 \text{ sec}$