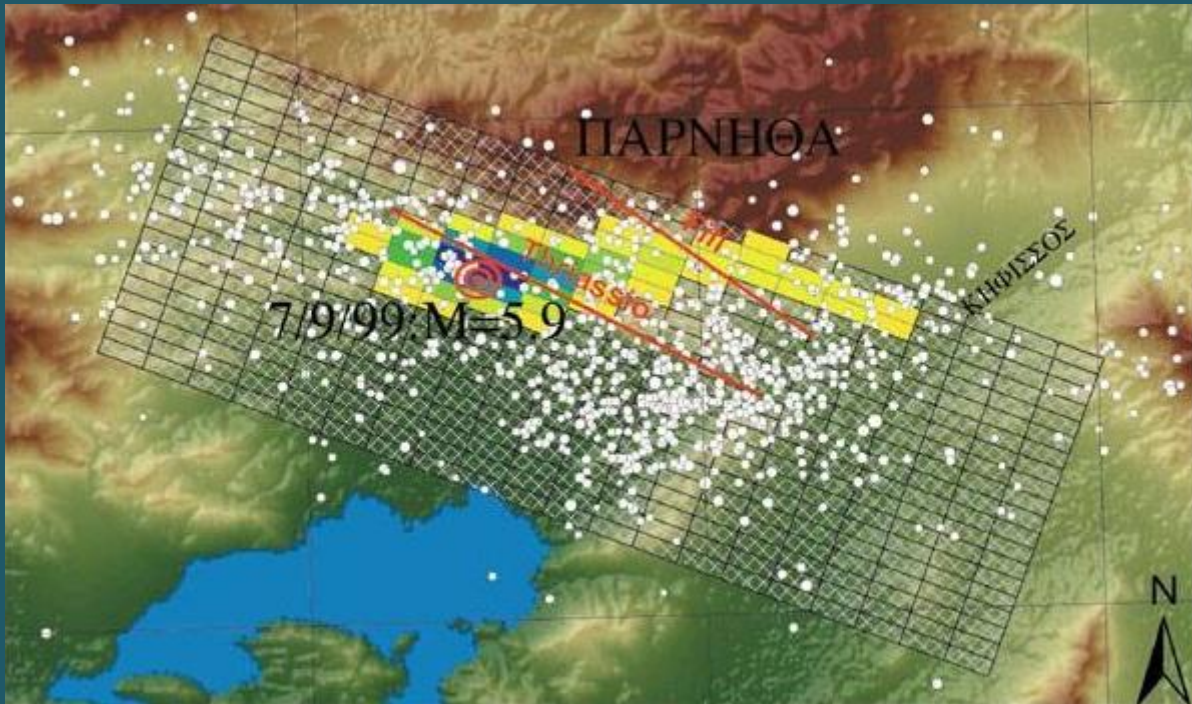




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΣΤΙΣ 7/9/1999

ΣΚΙΑΔΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

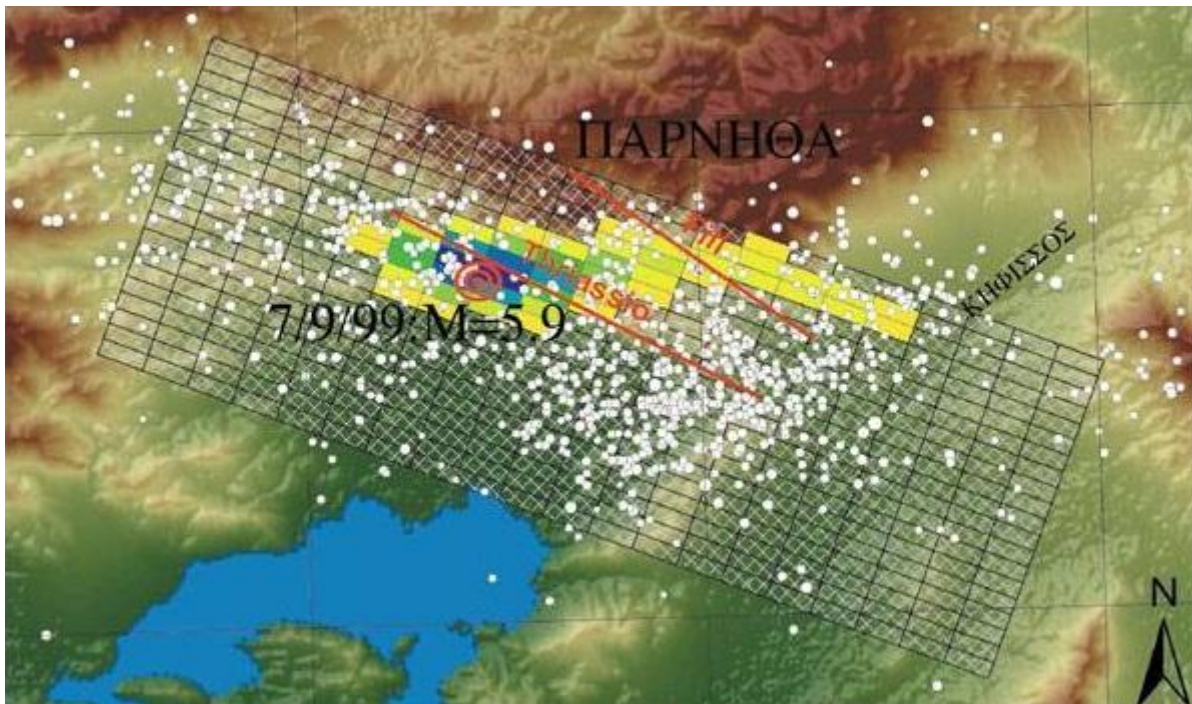
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΠΥΡΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Dr Ι. ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ, πολιτικός μηχανικός

ΑΘΗΝΑ 2010-2011



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΣΕΙΣΜΟΙ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΑΙΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΣΤΙΣ 7/9/1999

ΣΚΙΑΔΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΠΥΡΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, καθηγητής Ε.Μ.Π.  
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Dr I. ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ, πολιτικός μηχανικός

ΑΘΗΝΑ 2010-2011

*«Ελπίζω στους σεισμούς  
που μέλλονται να έρθουν...»*

από το ποίημα  
«Για το φτωχό Bertolt Brecht»  
του ομώνυμου ποιητή

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ πολύ τον καθηγητή κ. Σπυράκο Κωνσταντίνο για την προσφορά του στο θέμα της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον πολιτικό μηχανικό κ. Ταφλαμπά Ιωάννη για την πολύτιμη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της μεταπτυχιακής εργασίας καθώς επίσης και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μίμογλου Πέτρο για τη βοήθειά του στο χειρισμό των υπολογιστικών προγραμμάτων.



---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Στην προκειμένη έρευνα εξετάζεται η ύπαρξη φαινομένων κατευθυντικότητας για σεισμικά γεγονότα μεγέθους  $M \approx 6$ . Στη μελέτη των Bommer, Georgallides και Tromans (2001) έχει αποδειχτεί η ύπαρξη των εν λόγω φαινομένων στο σεισμό του San Salvador στις 10 Οκτωβρίου 1986, μεγέθους  $M=5.4$ , ενώ ανάλογα φαινόμενα και παρατηρήσεις προέκυψαν εξετάζοντας το σεισμό μεγέθους  $M=6.3$  της L' Aquila στις 6 Απριλίου 2009. Συνεπώς, διερευνάται η ενδεχόμενη επίδραση των συγκεκριμένων φαινομένων στο σεισμό της Αθήνας μεγέθους  $M=5.9$  στις 7 Σεπτεμβρίου 1999.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φαινόμενα που εμφανίζονται στο κοντινό πεδίο και διαφοροποιούν σημαντικά την εδαφική κίνηση, δηλαδή κυρίως η κατευθυντικότητα της διάρρηξης και η παραμένουσα μετακίνηση, και ερευνάται η επίδρασή τους στην εδαφική κίνηση. Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι νέες σχέσεις εκτίμησης της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου και η νέα βάση δεδομένων NGA όπως διαμορφώθηκε από ένα πρόγραμμα στο οποίο συνεργάστηκαν πέντε βασικές ομάδες ερευνητών. Ακόμα, γίνεται αναφορά στη σχέση εξασθένησης της εδαφικής κίνησης των Boore – Atkinson (2008), οι οποίοι λαμβάνουν τα σεισμικά δεδομένα από τη νέα βάση καταγραφών NGA. Στην εν λόγω σχέση, η εδαφική επιτάχυνση εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος, την απόσταση από το ρήγμα, τις εδαφικές συνθήκες και τον τύπο του ρήγματος. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές αναφέρονται στην ανελαστική συμπεριφορά της εδαφικής απόθεσης χρησιμοποιώντας δυο συνιστώσες της εδαφικής συμπεριφοράς, μια γραμμική και μια μη γραμμική, με κατάλληλους συντελεστές. Οι τιμές επιταχύνσεων που προκύπτουν αρχικά αυξάνονται μέχρι τιμή της περιόδου ίση περίπου με την περίοδο εμφάνισης παλμού της εκάστοτε καταγραφής ( $T \approx T_p$ ) και ακολούθως μειώνονται. Έτσι,

προκύπτουν τα φάσματα επιταχύνσεων Boore – Atkinson (2008), τα οποία δε λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του κοντινού πεδίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις έρευνες του Rowshandel (2006) και των Shahi- Baker (2011). Στο μοντέλο του ο Rowshandel (2006) λαμβάνει υπόψη του οποιαδήποτε μορφή διάρρηξης σε οποιαδήποτε γεωμετρία ρήγματος οπότε διευκολύνεται η εκτίμηση της κατευθυντικότητας στη διεύθυνση της διάρρηξης. Επίσης, το συγκεκριμένο μοντέλο δεν εξαρτά την εδαφική κίνηση από τη βύθιση του ρήγματος αλλά λαμβάνει υπόψη και την κατανομή των διαρρήξεων. Οι Shahi- Baker (2011) θέλοντας να προσεγγίσουν τα φαινόμενα του κοντινού πεδίου, εισάγουν μια κωδωνοειδή μορφή επαύξησης του φάσματος γύρω από την περίοδο του παλμού  $T_p$ , λαμβάνοντας υπόψη την κατευθυντικότητα μέσω του πολλαπλασιασμού με το συντελεστή  $\mu_{lnAf}$ . Οι τελευταίοι σε αντίθεση με τον Rowshandel (2006) αναφέρονται σε εμφάνιση φαινομένων κατευθυντικότητας σε οποιαδήποτε θέση γύρω από το ρήγμα.

Στο κεφάλαιο τέσσερα, γίνεται αναφορά στις βασικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ιδιοπεριόδων των κατασκευών σύμφωνα με τον ευρωκώδικα 8 και στη μέθοδο εξαγωγής των ανελαστικών φασμάτων μετακίνησης σύμφωνα με τις σχέσεις του Fajfar που συσχετίζουν το δείκτη συμπεριφοράς με την πλαστιμότητα σε συνάρτηση με το λόγο  $T/T_p$ . Η συγκεκριμένη σχέση χρησιμοποιήθηκε λόγω του ότι τα αποτελέσματά της προσεγγίζουν ικανοποιητικά αυτά των Chioccarelli – Iervolino (2010) για το σεισμό της L'Aquila.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καμπύλες τρωτότητας Rossetto - Elnashai (2002) και η έρευνα των Kappos et al (2007) για τις παρατηρούμενες βλάβες στο σεισμό της Αθήνας. Οι Rossetto - Elnashai (2002) εξήγαγαν γενικές καμπύλες τρωτότητας για όλους τους τύπους κατασκευών και βάσει της μελέτης τους και των προτεινόμενων σχέσεων μπορούν να εξαχθούν οι πιθανότητες υπέρβασης των τριών επιπέδων βλαβών αν πρόκειται για ανελαστικές καμπύλες ή των πέντε επιπέδων αν πρόκειται για ελαστικές.

Ο πρόσφατος σεισμός της L'Aquila (6/4/2009, Italy,  $M=6.3$ ) εξετάζεται στο κεφάλαιο έξι και παρουσιάζονται οι διαπιστώσεις των Chioccarelli – Iervolino (2010) για τις ελαστικές και ανελαστικές μετακινήσεις και την επίδραση του κοντινού πεδίου, βασιζόμενοι στις καταγραφές του σεισμού. Ακόμα, εκτιμάται η επίδραση του συχνοτικού περιεχομένου της δόνησης στις παρατηρούμενες βλάβες των κατασκευών της περιοχής του σεισμού. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αποδεικνύεται ότι η περίοδος των καταγραφών βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένο εύρος περιόδων, στο οποίο ευνοείται η εμφάνιση φαινομένων κοντινού πεδίου. Ακόμα, διαπιστώνεται η μικρή διάρκεια των καταγραφών και επιβεβαιώνεται η εμφάνιση των φαινομένων κοντινού πεδίου στο σταθμό καταγραφής AQK.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία του σεισμού της Αθήνας και εντοπίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των επιταχυνσιογραφημάτων και των φασμάτων που ενδεχομένως σχετίζονται με την παρουσία φαινομένων κοντινού πεδίου. Ακόμα, ακολουθείται μια διαδικασία, χρησιμοποιώντας τις προαναφερόμενες σχέσεις, ώστε τελικά να πιστοποιηθεί η εμφάνιση των

φαινομένων κατευθυντικότητας. Συμπερασματικά, μετά από εφαρμογή των σχέσεων για 16 σημεία περιμετρικά της περιοχής με τις μέγιστες παρατηρηθείσες βλάβες και την εξαγωγή φασμάτων επιτάχυνσης, παρατηρείται ότι υπάρχουν αρκετά στοιχεία που ενδεχομένως πιστοποιούν την ύπαρξη κατευθυντικότητας. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα φάσματα των πραγματικών σεισμών στο Coyote Lake (6/8/1979, California,  $M=5.7$ ), το San Salvador (10/10/1986, El Salvador,  $M=5.4$ ) και τη L'Aquila (6/4/2009, Italy,  $M=6.3$ ), προκύπτει ότι οι ομοιότητες είναι καταφανείς. Άρα εφόσον τέτοια φαινόμενα παρουσιάστηκαν στους προαναφερθέντες σεισμούς υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανίστηκαν και στο σεισμό της Αθήνας. Συγκεκριμένα, η κατευθυντικότητα παρουσιάζεται εντονότερα στις θέσεις με τις μέγιστες βλάβες, με τη μικρότερη διάρκεια καταγραφής και με την περίοδο της καταγραφής σε συγκεκριμένο εύρος περιόδων. Ακόμα, από τη σύγκριση των φασμάτων επιτάχυνσης με αυτά του ευρωκώδικα 8, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για το αν ο κανονισμός επαρκεί για τη μελέτη των κατασκευών δεδομένης της δράσης των φαινομένων κοντινού πεδίου. Επιπρόσθετα, εξάγονται τα ελαστικά φάσματα μετακινήσεων και τα ανελαστικά για τρεις περιπτώσεις συντελεστών  $q=2, 3$  και  $4$ , χρησιμοποιώντας τη σχέση του Fajfar. Επίσης, παράγονται οι καμπύλες τρωτότητας Rossetto - Elnashai (2002), οι οποίες είναι γενικές για όλους τους τύπους κατασκευών. Συγκεκριμένα, για το σεισμό της Αθήνας παρουσιάζονται οι ελαστικές καμπύλες τρωτότητας με τις αντίστοιχες ελαστικές μετακινήσεις, οι ανελαστικές καμπύλες με τις ανελαστικές μετακινήσεις και οι ελαστικές καμπύλες για τις ελαστικές μετακινήσεις με τυπική απόκλιση. Από τις εν λόγω καμπύλες εκτιμώνται οι πιθανότητες υπέρβασης των διαφόρων σταθμών επιτελεστικότητας για τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις κτηρίων (μονώροφα, διώροφα, τριώροφα και τετραώροφα).

Συμπερασματικά, επιβεβαιώνεται ότι η επίδραση των σεισμών μεσαίου μεγέθους είναι σημαντική καθώς η επίδραση της κατευθυντικότητας είναι έκδηλη σε μεγάλα οικιστικά συγκροτήματα παγκοσμίως. Ο πρόσφατος σεισμός στις ανατολικές ακτές της Αμερικής μεγέθους  $M \approx 5.9$  τονίζεται ότι θα είχε σοβαρές συνέπειες αν συνέβαινε κοντά σε κατοικημένη περιοχή.



---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

1.1	Εισαγωγή.....	σελ.1
	α) Οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου.....	σελ.1
	β) Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.....	σελ.5
1.2	Διαθέσιμα μοντέλα πρόβλεψης σεισμών κοντινού πεδίου - επιδράσεις κατευθυντικότητας της διάρρηξης.....	σελ.12
	α) Φασματική επιτάχυνση.....	σελ.12
	β) Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων.....	σελ.12
	γ) Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV).....	σελ.13
	δ) Περίοδος παλμού.....	σελ.15
	ε) Αριθμός σημαντικών παλμών.....	σελ.17
1.3	Επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step) στο κοντινό πεδίο του ρήγματος.....	σελ.18
1.4	Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού.....	σελ.19
2.1	Εισαγωγή.....	σελ.27
2.2	Βασικά τεχνικά ζητήματα που αφορούν τα νέα μοντέλα της εδαφικής κίνησης.....	σελ.28
2.3	Δημιουργία της βάσης δεδομένων των νέων σχέσεων.....	σελ.30
2.4	Επιπρόσθετη έρευνα στις σεισμικές επιδράσεις.....	σελ.32
	2.4.1. Προσομοίωση της κίνησης βραχώδους υποβάθρου.....	σελ.32
	2.4.2 Προσομοίωση της απόκρισης της θέσης.....	σελ.32
	2.4.3. Τρισδιάστατη προσομοίωση βάσης.....	σελ.33



2.4.4. Προσδιορισμός της κατευθυντικότητας χρησιμοποιώντας ισόχρονη θεωρία.....σελ.35	σελ.35
2.5 Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις.....σελ.35	σελ.35
2.6 Παρουσίαση της μελέτης των Boore και Atkinson.....σελ.36	σελ.36
2.6.1. Εισαγωγή.....σελ.36	σελ.36
2.6.2. Δεδομένα.....σελ.37	σελ.37
2.6.3. Εξισώσεις.....σελ.42	σελ.42
2.6.4. Καθορισμός συντελεστών.....σελ.45	σελ.45
2.6.5. Αποτελέσματα έρευνας.....σελ.54	σελ.54
2.7 Σύγκριση των εδαφικών κινήσεων που προέκυψαν με ή χωρίς τη χρήση του σεισμού του Chi-Chi (Ταϊβάν 1999).....σελ.64	σελ.64
3.1 Εισαγωγή.....σελ.67	σελ.67
3.2 Περιγραφή της έρευνας του Rowshandel για την ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών της διάρρηξης στα μοντέλα εδαφικής κίνησης.....σελ.70	σελ.70
3.2.1 Τα υπάρχοντα μοντέλα που ενσωματώνουν την κατευθυντικότητα.....σελ.70	σελ.70
3.2.2 Το προτεινόμενο μοντέλο.....σελ.71	σελ.71
3.2.3 Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα.....σελ.74	σελ.74
3.2.4 Έλεγχος του προτεινόμενου μοντέλου για ομογενή διάρρηξη.....σελ.75	σελ.75
3.2.5 Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας βασιζόμενα στα δεδομένα της νέας βάσης (NGA).....σελ.75	σελ.75
3.2.6 Ανάλυση αβεβαιότητας.....σελ.77	σελ.77
3.2.7 Επιταχύνσεις στην παράλληλη και στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα.....σελ.83	σελ.83
3.2.8 Εδαφικές κινήσεις.....σελ.86	σελ.86
3.3 Διαμόρφωση της σχέσης των Shahi – Baker για το κοντινό πεδίο.....σελ.89	σελ.89
3.3.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης.....σελ.89	σελ.89
3.3.2 Δημιουργία μοντέλων εύρεσης της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης.....σελ.91	σελ.91
3.3.3 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού.....σελ.97	σελ.97
3.3.4 Ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω της ύπαρξης του παλμού.....σελ.98	σελ.98
4.1 Εισαγωγή.....σελ.101	σελ.101
4.2 Περίοδος της δόνησης στους αντισεισμικούς κανονισμούς...σελ.103	σελ.103
4.2.1 Σχέσεις περιόδου – ύψους κατασκευής στους αντισεισμικούς κανονισμούς για καμπτικά πλαίσια.....σελ.103	σελ.103

4.2.2	Σχέσεις περιόδου – ύψους κατασκευής σε αντισεισμικούς κανονισμούς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ή από τοιχοποιία.....σελ.105
4.2.3	Περίοδοι ταλάντωσης χαρακτηριστικών περιπτώσεων κτηρίων.....σελ.108
4.3	Περίοδοι που χρησιμοποιούνται στη γραμμική στατική και δυναμική ανάλυση του ευρωκώδικα 8.....σελ.111
4.4	Συστάσεις για μελλοντική εφαρμογή στον ευρωκώδικα 8.....σελ.113
4.5	Μέθοδος Fajfar για τον προσδιορισμό του δείκτη συμπεριφοράς.....σελ.114
4.5.1	Ορισμοί.....σελ.114
4.5.2	Αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.....σελ.115
4.5.3	Διγραμμικό μοντέλο του δείκτη συμπεριφοράς.....σελ.116
4.5.4	Συνιστώμενοι συντελεστές συμπεριφοράς.....σελ.117
5.1	Εισαγωγή.....σελ.119
5.2	Παρουσίαση της έρευνας των Rossetto και Elnashai (2003).....σελ.121
5.2.1	Αξιολόγηση των υπάρχουσών καμπυλών τρωτότητας.....σελ.121
5.2.2	Πηγή δεδομένων βλαβών.....σελ.121
5.2.3	Κατασκευαστική μονάδα και μέτρο βλάβης.....σελ.125
5.2.4	Χαρακτηρισμός της εδαφικής κίνησης.....σελ.126
5.2.5	Επαλήθευση χρησιμοποιώντας δεδομένα παρατηρήσεων πεδίου.....σελ.126
5.2.6	Περιγραφή της βάσης δεδομένων των βλαβών.....σελ.128
5.2.7	Μια νέα κλίμακα βλαβών για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος.....σελ.130
5.2.8	Παραγωγή των νέων καμπυλών τρωτότητας για την Ευρώπη.....σελ.132
5.2.9	Συμπερασματικές παρατηρήσεις αναφορικά με την εφαρμογή και τη μελλοντική χρήση των καμπυλών.....σελ.141
5.3	Παρουσίαση της μελέτης των Karros et al.....σελ.143
5.3.1	Σύνοψη της έρευνας.....σελ.143
5.3.2	Κατηγοριοποίηση των κατασκευών και εκτίμηση του στατιστικού κόστους.....σελ.144
5.3.3	Πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης στην εξεταζόμενη περιοχή.....σελ.147
5.3.4	Προσομοίωση της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου.....σελ.147
5.3.5	Διατύπωση για μονοδιάστατα εδαφικά μοντέλα και ανάλυση απόκρισης.....σελ.150
5.3.6	Ανάλυση τρωτότητας και εκτίμηση απωλειών.....σελ.153

5.3.7 Σύγκριση των προβλεπόμενων και των στατιστικών απωλειών.....σελ.155	σελ.155
6.1 Εισαγωγή.....σελ.159	σελ.159
6.2 Τα φαινόμενα κοντινού πεδίου σύμφωνα με τους Chioccarelli και Iervolino.....σελ.160	σελ.160
6.2.1 Η κατευθυντικότητα της διάρρηξης.....σελ.160	σελ.160
6.2.2 Παλμική σεισμική δράση.....σελ.162	σελ.162
6.3 Ο σεισμός της L' Aquila.....σελ.168	σελ.168
6.4 Παρουσίαση της μελέτης των Chioccarelli και Iervolino (2010) για το σεισμό της 6 <sup>ης</sup> Απριλίου 2009 στη L' Aquila της Ιταλίας.....σελ.171	σελ.171
6.4.1 Γενικές παρατηρήσεις.....σελ.171	σελ.171
6.4.2 Εντοπίζοντας τις παλμικές καταγραφές.....σελ.171	σελ.171
6.4.3 Σεισμικές δράσεις.....σελ.175	σελ.175
6.4.4 Μη στραμμένες καταγραφές.....σελ.180	σελ.180
6.4.5 Κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατακόρυφη συνιστώσα.....σελ.181	σελ.181
6.4.6 Συμπεράσματα.....σελ.182	σελ.182
6.5 Παρουσίαση της έρευνας των Celebi et al για τις κτηριακές βλάβες του σεισμού της L' Aquila.....σελ.183	σελ.183
6.5.1 Είδος κατασκευών και βλάβες.....σελ.183	σελ.183
6.5.2 Κύριοι καταγραφικοί σταθμοί και δεδομένα της έρευνας.....σελ.186	σελ.186
6.5.3 Σημαντικές εδαφικές κινήσεις και φάσματα.....σελ.190	σελ.190
6.5.4 Ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης.....σελ.195	σελ.195
6.5.5 Διάρκεια ισχυρής εδαφικής κίνησης.....σελ.197	σελ.197
6.5.6 Μόνιμες μετακινήσεις των καταγραφών.....σελ.197	σελ.197
6.5.7 Εξισώσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης.....σελ.198	σελ.198
6.5.8 Η εδαφική κίνηση σε συνάρτηση με τις κτηριακές βλάβες.....σελ.200	σελ.200
6.5.9 Συμπεράσματα για τις Ηνωμένες Πολιτείες και τις χώρες της μεσογείου.....σελ.202	σελ.202
7.1 Το χρονικό του σεισμού της Αθήνας.....σελ.203	σελ.203
7.2 Ιστορικοί σεισμοί – Παλαιότερη σεισμικότητα.....σελ.208	σελ.208
7.3 Γεωλογία της περιοχής.....σελ.210	σελ.210
7.4 Τα ενεργά ρήγματα της Πάρνηθας.....σελ.212	σελ.212
7.4.1 Το ρήγμα της Φυλής.....σελ.212	σελ.212
7.4.2 Το ρήγμα της Αυλώνας.....σελ.215	σελ.215
7.4.3 Το ρήγμα της Μαλίζας.....σελ.216	σελ.216
7.4.4 Το ρήγμα των Θρακομακεδόνων.....σελ.217	σελ.217

7.5	Μελέτες που έχουν διεξαχθεί την περιοχή της Αττικής με αφορμή το σεισμό της 7 <sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα.....σελ.221
7.6	Καταγραφές σεισμού 7 <sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα.....σελ.242
7.7	Η επίδραση του κοντινού πεδίου στο σεισμό της Αθήνας.....σελ.243
7.7.1	Εισαγωγή.....σελ.243
7.7.2	Διαδικασία της μελέτης.....σελ.244
7.7.3	Προκύπτοντα φάσματα Boore – Atkinson.....σελ.245
7.7.4	Προκύπτοντα φάσματα Shahi – Baker.....σελ.246
7.7.5	Σύγκριση των φασμάτων επιτάχυνσης με αυτά του κανονισμού.....σελ.253
7.7.6	Παραγωγή ανελαστικών φασμάτων μετακινήσεων.....σελ.262
7.7.7	Σύγκριση με τους πραγματικούς σεισμούς.....σελ.276
7.7.8	Καμπύλες τρωτότητας σύμφωνα με τους Rossetto και Elnashai.....σελ.278
8.	Συμπεράσματα.....σελ.305





# 1

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

### 1.1 Εισαγωγή

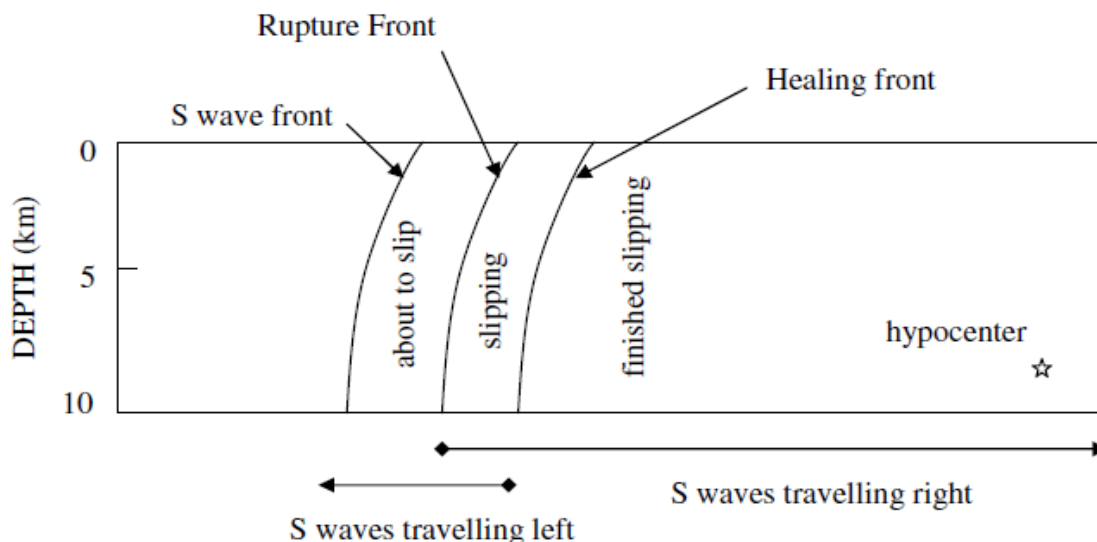
#### α) Οι επιδράσεις του κοντινού πεδίου

Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σ' ένα ρήγμα μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικές από εκείνες που βρίσκονται μακριά από τη σεισμική πηγή. Θεωρητικά η ζώνη κοντινού πεδίου ρηγμάτων ορίζεται σε απόσταση περίπου 20 – 60km από ένα ρήγμα. Μέσα σε αυτή τη ζώνη οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την περιοχή και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος. Οι εν λόγω παράγοντες οδηγούν στα αποτελέσματα που καλούνται ως «κετευθυντικότητα της διάρρηξης» (rupture directivity) και «παραμένουσα μετακίνηση» (fling step).

Η εμπρόσθια κετευθυντικότητα (forward directivity) λαμβάνει χώρα όταν η διάδοση της διάρρηξης και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα γίνονται προς την ίδια περιοχή. Αυτό εμφανίζεται επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι κοντά (γενικά λίγο μικρότερη) στην ταχύτητα διατμητικών κυμάτων του βράχου κοντά στην πηγή. Για ένα μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης (**εικόνα 1.1**) όπου το μέτωπο της διάρρηξης διαδίδεται μακριά από το υπόκεντρο και προς μια περιοχή, η ενέργεια συσσωρεύεται κοντά στο μέτωπο διάρρηξης από κάθε διαδοχική ζώνη της ολίσθησης κατά μήκος του ρήγματος. Το μέτωπο των κυμάτων φθάνει ως ένας μεγάλος παλμός της κίνησης που χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος ανάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια.

Εάν μια περιοχή βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από αυτήν, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο

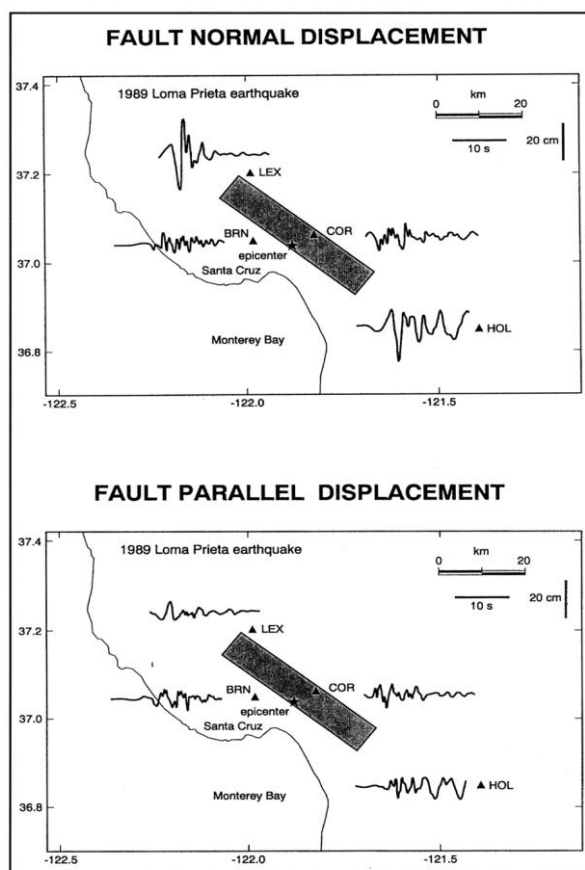
τέλος του προηγούμενου του. Αυτός ο όρος, καλούμενος ως «οπίσθια κατευθυντικότητα» (backward directivity), χαρακτηρίζεται από κινήσεις με σχετικά μεγάλη διάρκεια και μικρό εύρος. Η «ουδέτερη κατευθυντικότητα» (neutral directivity) εμφανίζεται όταν η ρήξη δεν είναι ούτε προς ούτε μακριά από την περιοχή.



**Εικόνα 1.1:** σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με ταχύτητα περίπου ίση με το 80% της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου της ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).

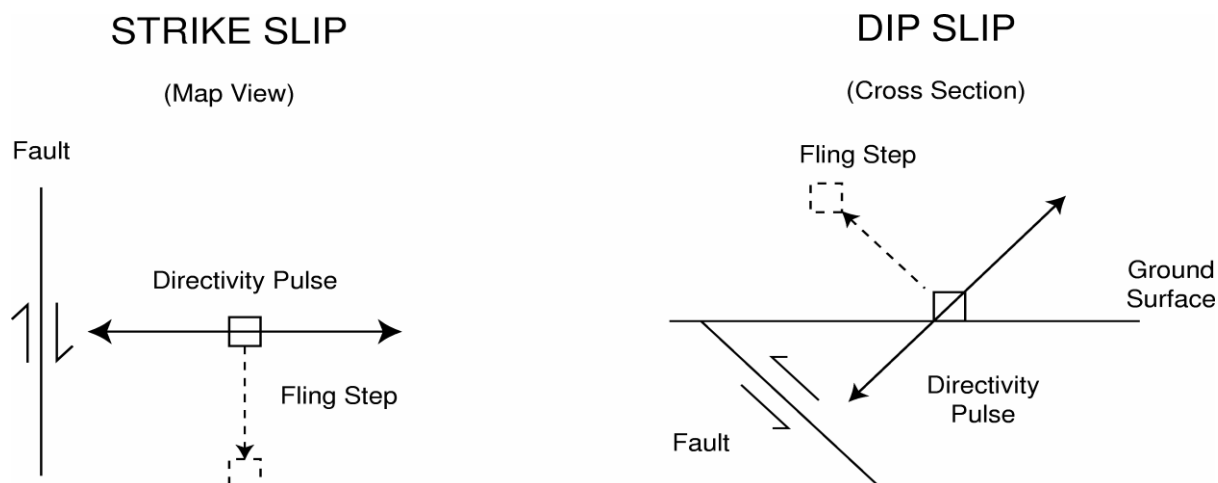
Οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις εδαφικές μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Loma Prieta του 1989 παρουσιάζονται στο **εικόνα 1.2**. Το επίκεντρο του σεισμού είναι κοντά στο Corralitos και Branciforte Drive, όπου οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες και στις κάθετες και στις παράλληλες με το ρήγμα συνιστώσες κάτι που αποδίδεται στην οπίσθια κατευθυντικότητα. Στα άκρα του ρήγματος παρ' όλα αυτά, στο Lexington Dam και το Hollister, η εμπρόσθια κατευθυντικότητα αναγκάζει τις οριζόντιες εδαφικές κινήσεις στην κάθετη διεύθυνση του ρήγματος να είναι παλμικές και πολύ μεγαλύτερες από τις κινήσεις των παραλλήλων συνιστωσών του ρήγματος, οι οποίες είναι παρόμοιες με εκείνες κοντά στο επίκεντρο. Οι μεγάλες παλμικές κινήσεις εμφανίζονται μόνο στην κάθετη με το ρήγμα συνιστώσα (fault normal) και μόνο μακριά από το επίκεντρο.

Τα φαινόμενα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης μπορούν να παρουσιαστούν τόσο σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, όσο και σε κατακόρυφης βύθισης. Στις περιπτώσεις ρήγματος κατακόρυφης βύθισης, οι συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας εμφανίζονται για περιοχές κοντά στην προβολή του επάνω τεμάχους του ρήγματος. Σε μηχανισμούς οριζόντιας ολίσθησης, ο τρόπος εκπομπής ενέργειας λόγω διάτμησης σε ένα ανάστροφο ρήγμα αναγκάζει τον παλμό της κίνησης να είναι προσανατολισμένος κάθετα στα οριζόντια ρήγματα (Somerville et al 1997a).

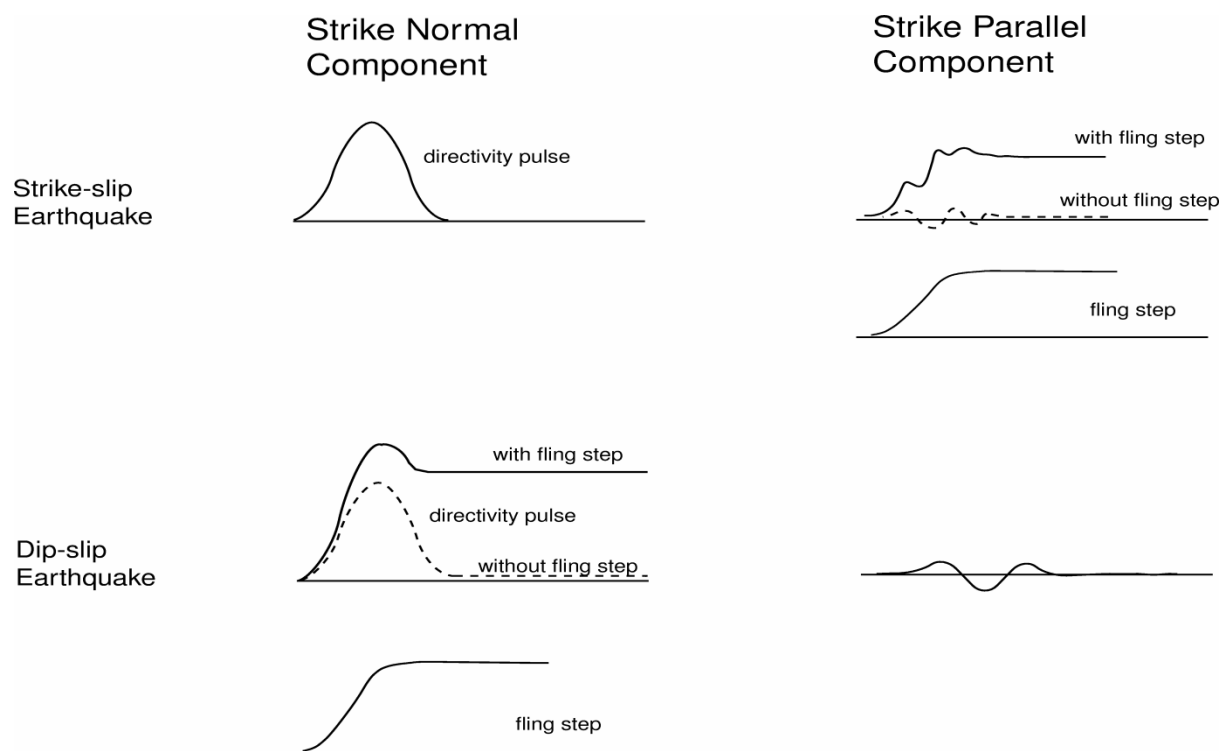


**Εικόνα 1.2:** Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989 για τις κάθετες (άνω) και τις παράλληλες (κάτω) στο ρήγμα συνιστώσες. Πηγή: EERI, 1995.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Οι εν λόγω στατικές μετατοπίσεις που καλούνται «παραμένουσες μετακινήσεις» (fling step) εμφανίζονται μετά από ένα χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων καθώς η ολίσθηση του ρήγματος προχωρά. Οι μετακινήσεις αυτές εμφανίζονται παράλληλα στη διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος άρα δε συνδέονται άμεσα με τις προαναφερθείσες δυναμικές μετακινήσεις που καλούνται «παλμός κατευθυντικότητας της διάρρηξης». Στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζεται στην κάθετη συνιστώσα ενώ η παραμένουσα μετακίνηση στην παράλληλη συνιστώσα. Στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης τόσο η παραμένουσα μετακίνηση όσο και ο παλμός κατευθυντικότητας εμφανίζονται στην κάθετη συνιστώσα. Οι προσανατολισμοί της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης απεικονίζονται στο **εικόνα 1.3**, ενώ οι χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές εμφανίζονται μαζί και χωριστά παρουσιάζονται στο **εικόνα 1.4**.



**Εικόνα 1.3:** Σχηματικό διάγραμμα των προσανατολισμών της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης.



**Εικόνα 1.4:** Σχηματικό διάγραμμα των χρονοιστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας παρουσιάζονται μαζί και χωριστά.

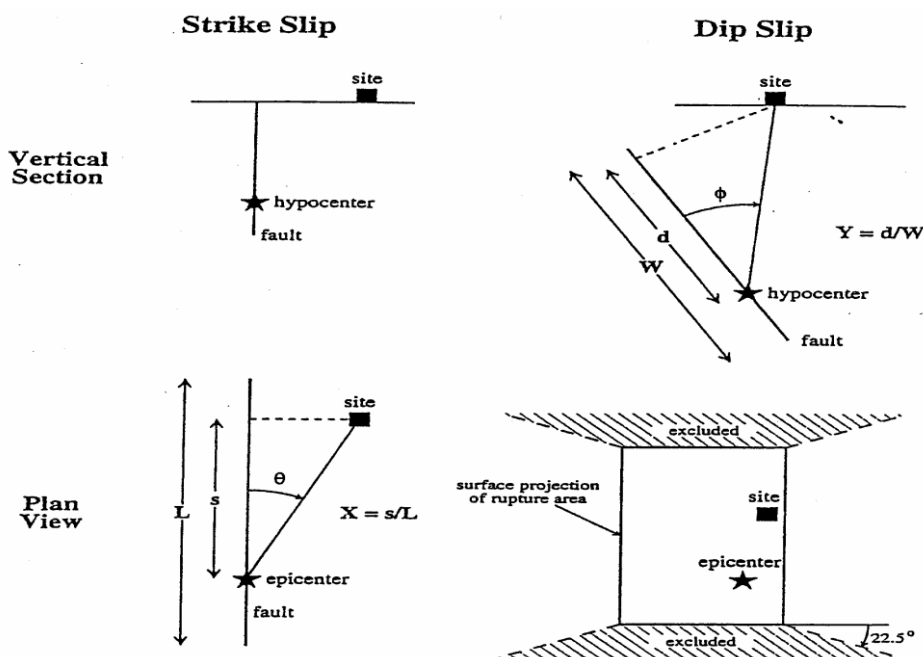
Τα διαθέσιμα στοιχεία κινήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της επίδρασης του κοντινού πεδίου είναι περιορισμένα. Ωστόσο, οι πρόσφατοι σεισμοί στην Τουρκία και την Ταϊβάν έχουν συμπληρώσει σημαντικά τη βάση δεδομένων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης με έμφαση στην εμπρόσθια κατευθυντικότητα. Ακολούθως, γίνεται μικρή αναφορά στις επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης στο κοντινό πεδίο του ρήγματος.

### β) Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου

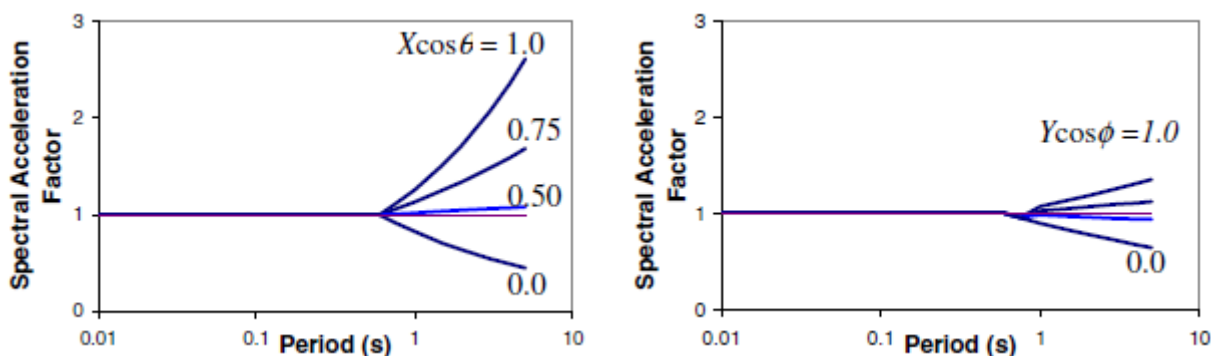
Οι Somerville et al (1997a) παραμετροποίησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε εμπρόσθια και οπίσθια κατευθυντικότητα. Όπως φαίνεται στο **εικόνα 1.5**, η διαφοροποίηση στο χώρο των επιδράσεων της κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης της διάρρηξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $\varphi$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης), και από το μέρος της επιφάνειας διάρρηξης του ρήγματος που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της εξεταζόμενης περιοχής ( $X$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $Y$  για τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα εμπρόσθιας κατευθυντικότητας προκύπτουν από τις μικρότερες γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του ρήγματος και για τα μεγαλύτερα μέρη του διερρηγμένου ρήγματος μεταξύ της θέσης και του υποκέντρου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και όταν ικανοποιούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμπρόσθια κατευθυντικότητα, τα αποτελέσματά της μπορεί να μην εμφανιστούν. Αυτό θα συνέβαινε εάν ένας σταθμός βρίσκεται στο τέλος ενός ρήγματος και η διάρρηξη εμφανίζεται προς το σταθμό αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται προς το τέλος του ρήγματος που βρίσκεται ο σταθμός.

Για να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο **εικόνα 1.5** και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο **εικόνα 1.6**. Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που τροποποιούνται είναι τα μέσα οριζόντια φάσματα απόκρισης και ο λόγος των φασμάτων απόκρισης για την κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι παράγοντες κοντινής πηγής καθορίζονται για αποστάσεις μικρότερες από  $15\text{km}$  και για τρεις διαφορετικούς τύπους σεισμικών πηγών (**πίνακας 1.1**). Οι παράγοντες κοντινής πηγής από τον κανονισμό UBC (1997) είναι συμβατοί με το μέσο όρο των καθέτων και των παραλλήλων στο ρήγμα συνιστωσών στο μοντέλο Somerville et al (1997a) και ως εκ τούτου οι διατάξεις του κανονισμού δεν ξεετάζουν τη μεγαλύτερη κάθετη συνιστώσα της κίνησης Somerville (1998).

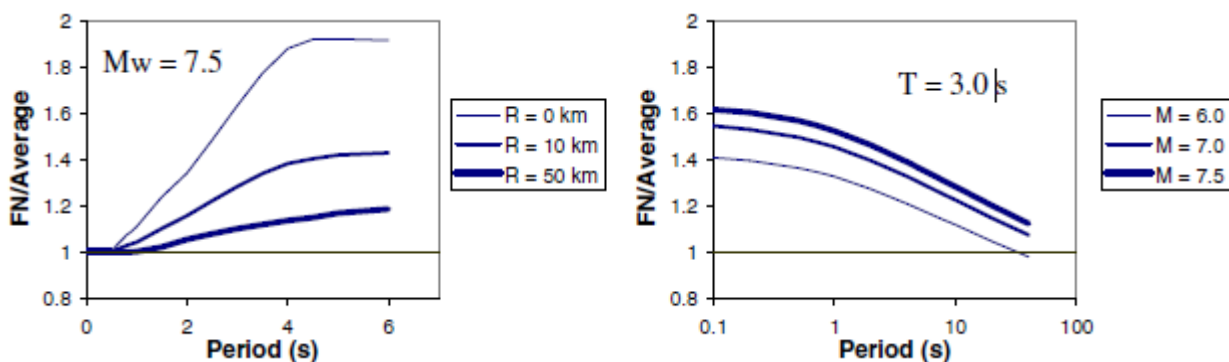




Εικόνα 1.5: Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες της κατευθυντικότητας της διάρρηξης (από Somerville et al 1997a).



α) Μέση αναλογία φασματικής απόκρισης με εξάρτηση στις παραμέτρους της περιόδου και της διεύθυνσης.



β) Αναλογία οριζόντιας φασματικής απόκρισης κάθετης στη ρήξη προς τη μέση οριζόντια για συνθήκες εμπρόσθιας κατευθυντικότητας ( $X\cos\theta=1$ ).

Εικόνα 1.6: Προβλέψεις από τη σχέση των Somerville et al (1997a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας.

Η έρευνα για την απόκριση των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχει οδηγήσει στην εύρεση μιας αντιπροσωπευτικής χρονοϊστορίας των κινήσεων που είναι προτιμητέα για μια αντιπροσώπευση ενός φάσματος απόκρισης (π.χ. Somerville, 1998 Alavi και Kranwinkler, 2000 Sasani και Bertero, 2000 Rodriguez-Marek, 2000). Μια παρουσίαση χρονοϊστορίας είναι προτιμητέα επειδή ο χαρακτηρισμός στο πεδίο συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης (δηλαδή μέσω ενός φάσματος απόκρισης) υπονοεί μια πιθανοτική διαδικασία που έχει μια σχετικά ομοιόμορφη διανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της κίνησης.

α) Παράγοντας μικρής περιόδου ( $N_a$ )

Seismic Source Type	Closest Distance to Known Seismic Source <sup>1</sup>		
	≤ 2 km	5 km	≥ 10 km
A	1.5	1.2	1.0
B	1.3	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0

β) Παράγοντας ενδιάμεσης περιόδου ( $N_v$ )

Seismic Source Type	Closest Distance to Known Seismic Source <sup>1</sup>			
	≤ 2 km	5 km	10 km	≥ 15 km
A	2.0	1.6	1.2	1.0
B	1.6	1.2	1.0	1.0
C	1.0	1.0	1.0	1.0

γ) Περιγραφή των τύπων σεισμικής πηγής

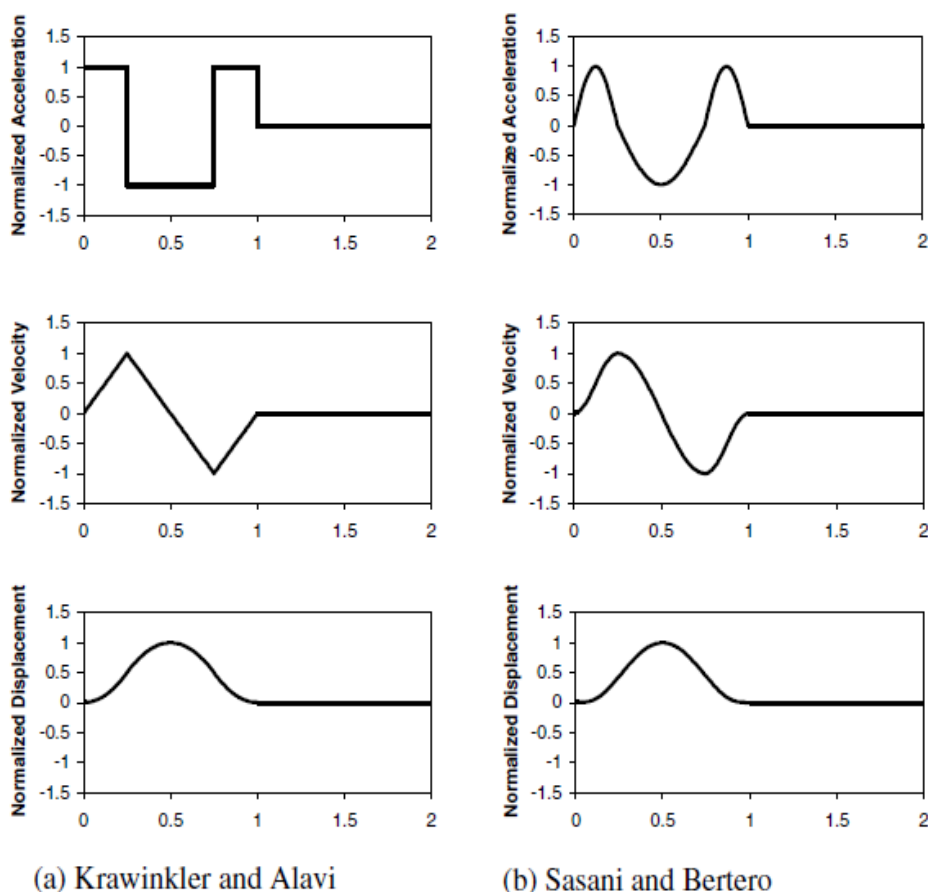
Seismic Source Type	Description	Seismic Source Definition	
		Maximum Moment Magnitude, $m$	Slip Rate, $s$ (mm/year)
A	Faults that are capable of producing large magnitude events and that have a high rate of seismic activity	$m \geq 7.0$	$s \geq 5$
B	All faults other than Types A and C	$m \geq 7.0$ $m < 7.0$ $m \geq 6.5$	$s > 5$ $s > 2$ $s < 2$
C	Faults that are not capable of producing large magnitude earthquakes and that have a relatively low rate of seismic activity	$m < 6.5$	$s \leq 2$

<sup>1</sup>: Η πλησιέστερη απόσταση στη σεισμική πηγή θα πρέπει να λαμβάνεται ως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της εξεταζόμενης θέσης και της προβολής του επιπέδου του ρήγματος στην επιφάνεια ( $R_{J-B}$ ). Η επιφανειακή προβολή δεν χρειάζεται να περιλαμβάνει μέρη της πηγής σε βάθη των 10km ή μεγαλύτερα.

**Πίνακας 1.1:** Παράγοντες κοντινής πηγής από UBC (1997).

Οι μελέτες Krawinkler και Alavi (1998) και Sasani και Bertero (2000) έχουν δείξει ότι οι απλουστευμένες θεωρήσεις του παλμού ταχύτητας μπορούν να «συλλάβουν» τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα απόκρισης των κατασκευών που υποβάλλονται στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί απλουστευμένοι παλμοί παρουσιάζονται στο **εικόνα 1.7**.

Για την αναπαράσταση μιας δόνησης δυο διευθύνσεων απαιτείται μια αναπαράσταση ημιτονικού παλμού της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας μαζί με τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της έναρξης της κάθετης και της παράλληλης με το ρήγμα συνιστώσας. Ο **πίνακας 1.2** παρέχει τους ορισμούς συνηθισμένων παραμέτρων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίες διευκρινίζονται στο **εικόνα 1.8**. Ένας απλός χαρακτηρισμός είναι δυνατός με τη χρήση της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας ( $PHV$ ), της κατά προσέγγιση περιόδου δεσπόζοντος παλμού ( $T_v$ ) και του αριθμού σημαντικών ημιπαλμών της κίνησης στη μεγαλύτερη κάθετη διεύθυνση στο ρήγμα.



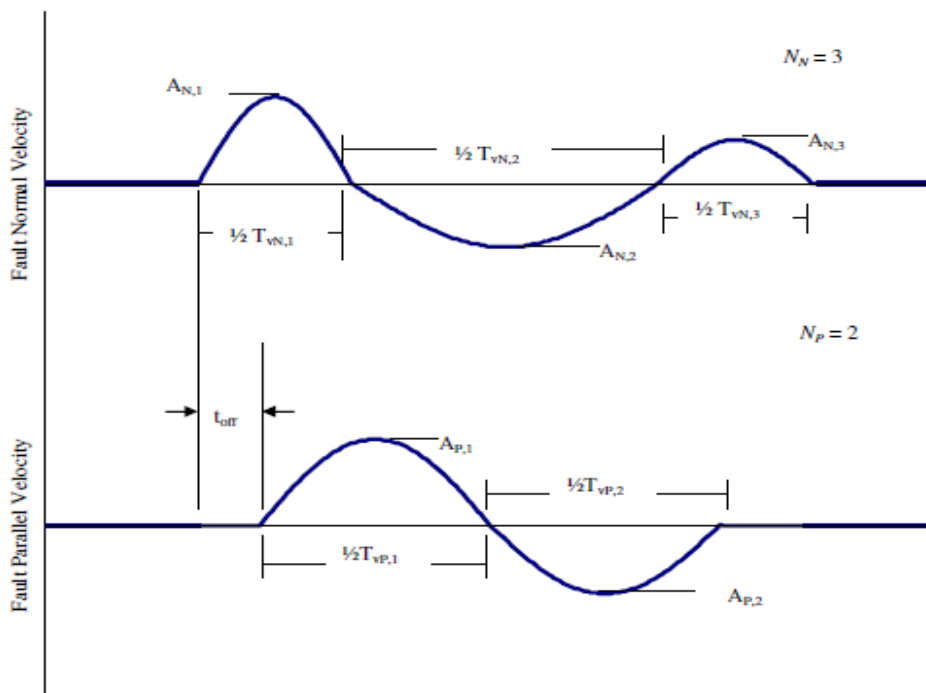
**Εικόνα 1.7:** Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές.

Ο προσδιορισμός της περιόδου του παλμού χρησιμοποιεί είτε το χρόνο διάβασης των τιμών από το μηδενικό άξονα (zero crossing time) είτε το χρόνο στον οποίο η ταχύτητα ισούται με το 10% της μέγιστης ταχύτητας για αυτό τον παλμό. Αυτό είναι απαραίτητο για τους παλμούς στους οποίους έχει προηγηθεί απόκλιση

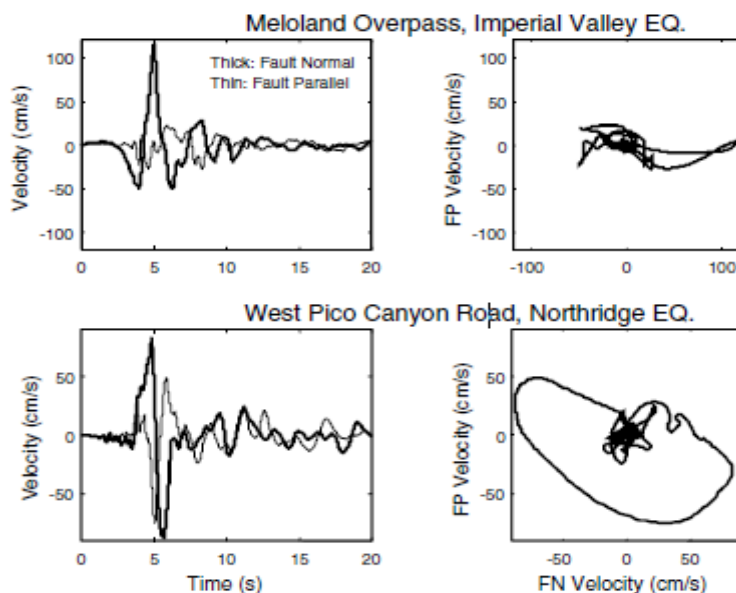
από το μηδενικό άξονα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Ένας βαθμός αβεβαιότητας υφίσταται σε εκτιμήσεις της  $T_v$ . Εντούτοις, η αβεβαιότητα που συνδέεται με την πρόβλεψη της  $T_v$  από τις σεισμολογικές μεταβλητές είναι πολύ μεγαλύτερη από τα λάθη στον υπολογισμό της από τα σημεία μηδενισμού. Οι Kranwinkel και Alavi (1998) προσδιορίζουν τον παλμό ταχύτητας από μια σαφή και σφαιρική κορυφή αιχμής στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Ως εκ τούτου, αυτή η εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι σχετικά σαφής. Για τις μονοπαλμικές κινήσεις αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού παρέχουν κατά προσέγγιση ισοδύναμα αποτελέσματα. Συνολικά, ο λόγος μεταξύ της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  είναι 0.84 με μια τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez-Marek 2000). Η σύμπτωση της  $T_v$  για μια εδαφική κίνηση σεισμού δείχνει ότι ο παλμός ταχύτητας περιέχει την ενέργεια σε μια συγκεκριμένη ζώνη περιόδων.

Parameter	Abbreviation	Methodology to obtain parameter
Number of significant pulses.	$N$	Number of half-cycle pulses in the velocity-time history with amplitudes at least 50% of the peak ground velocity of the record.
Pulse period.	$T_{v,i}$	For each half sine pulse, $T_{v,i} = 2(t_2 - t_1)$ , where $t_1$ and $t_2$ are either the zero-crossing time, or the time at which velocity is equal to 10% of the peak velocity for the pulse if this time is significantly different than the zero crossing time. $T_v$ corresponding to the pulse with maximum amplitude is the overall representative velocity pulse period.
Predominant period from pseudo-velocity response spectra.	$T_{p-v}$	Period corresponding to a clear and global peak in the pseudo-velocity response spectra at 5% damping.
Pulse amplitude.	$A_i$	For each half sine pulse, the peak ground velocity in the time interval $[t_1, t_2]$ .
Peak ground velocity	PHV	Maximum velocity, defined by the maximum value of $A_i$ . Note, however, that in very few exceptions, the maximum value of $A_i$ in the fault parallel direction does not occur concurrently with the fault normal pulse.
Ratio of fault parallel to fault normal amplitude	$PHV_{P/N}$	Defined by the ratio of maximum $A_P$ divided by maximum $A_N$ , where the subscripts $P$ and $N$ denote fault-parallel and fault-normal motions respectively.
Time delay between fault normal and fault parallel pulse	$t_{off}$	Time of initiation of fault parallel pulse minus the time of initiation of fault normal pulse.

**Πίνακας 1.2:** Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημιτονικού παλμού (από Rodriguez – Marek 2000).

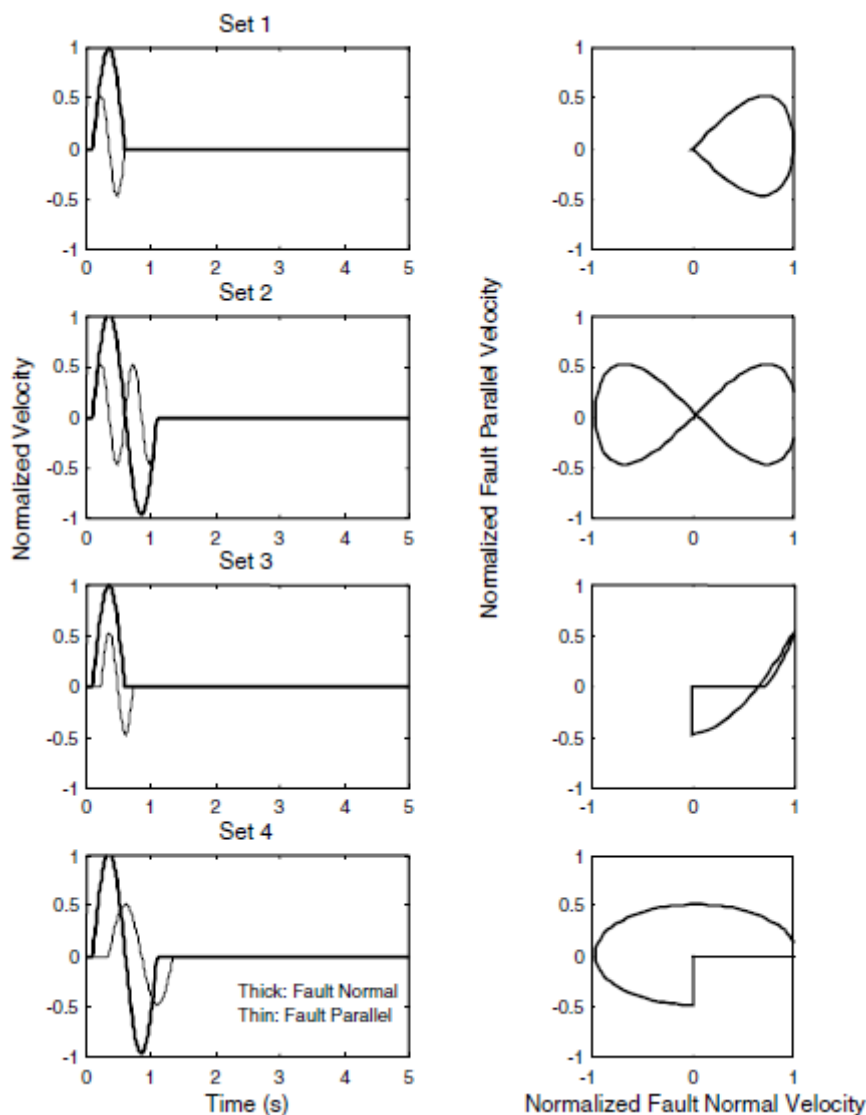


**Εικόνα 1.8:** Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος αντίστοιχα (Rodriguez – Marek 2000).



**Εικόνα 1.9:** Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δυο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δυο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες.





**Εικόνα 1.10:** Απλοποιημένη αναπαράσταση ημιτονικού παλμού για εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η  $PHV$  (μέγιστη οριζόντια ταχύτητα) για παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αντιστοιχεί στο 50% της  $PHV$  κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (Rodriguez-Marek 2000).

Οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν εστιάσει στα αποτελέσματα της μεγαλύτερης κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alani και Kranwinkler 2000). Εντούτοις, υπάρχουν εφαρμογές για τις οποίες η παράλληλη συνιστώσα στο ρήγμα μπορεί να είναι επίσης σημαντική. Μη γραμμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης από τον Rodriguez – Marek (2000) δείχνουν ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στις τιμές της  $PHV$  και της  $T_v$  και στις δυο διευθύνσεις. Δυο κινήσεις κοντινού πεδίου με τις σημαντικά διαφορετικές κινήσεις της παράλληλης συνιστώσας στο ρήγμα παρουσιάζονται στο **εικόνα 1.9**. Επιπρόσθετη έρευνα επιτρέπει να διακριθούν τα αποτελέσματα της δόνησης δυο διευθύνσεων στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στη ζώνη κοντινού ρήγματος όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Από μια εξέταση καταγεγραμμένων κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν την εμπρόσθια κατευθυντικότητα από τον

Rodriguez – Marek (2000), διαπιστώθηκε ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στο **εικόνα 1.10** θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνηθεί η σημασία της δόνησης δυο διευθύνσεων στις μελλοντικές μελέτες. Εάν είναι σημαντικές στη συμπεριφορά των κατασκευών, οι κατακόρυφες κινήσεις στη ζώνη κοντινού πεδίου μπορεί να πρέπει να υπολογιστούν επίσης.

## 1.2 Διαθέσιμα μοντέλα πρόβλεψης σεισμών κοντινού πεδίου - επιδράσεις κατευθυντικότητας της διάρρηξης

### α) Φασματική επιτάχυνση

Οι Somerville et al (1997a) και ο Abrahamson (2000) παρουσίασαν μοντέλα για την τροποποίηση των φασμάτων απόκρισης με απόσβεση  $\zeta=5\%$  μέσω της σχέσης απόσβεσης Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (**εικόνα 1.5**). Τα μοντέλα παρουσιάζονται για την τροποποίηση του γεωμετρικού μέσου των δυο οριζόντιων συνιστωσών και του λόγου της κάθετης προς τη μέση οριζόντια φασματική συνιστώσα. Οι λεπτομέρειες των μοντέλων φαίνονται στις δυο κορυφαίες σειρές του **πίνακα 1.3**.

### β) Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων

Οι Somerville et al (1997a) παρουσίασαν ένα μοντέλο για την τροποποίηση του 5 – 75% της σημαντικής διάρκειας από τη σχέση απόσβεσης Abrahamson και Silva (1996). Το μοντέλο αναπτύχθηκε με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης στις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (**εικόνα 1.5**). Το μοντέλο ισχύει για τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου και των δυο οριζόντιων συνιστωσών. Ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε από το Liu (2001) για τον ισοδύναμο αριθμό ομοειδών κύκλων ( $N$ ). Οι λεπτομέρειες των μοντέλων διάρκειας και αριθμού ( $N$ ) φαίνονται στις δυο κατώτατες σειρές του **πίνακα 1.3**.

Ground Motion Parameter (Reference)	Description	Equation	Range of Applicability
Spectral Acceleration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a; Abrahamson, 2000)	y=Bias in average horizontal response spectral acceleration (ln units) with respect to Abrahamson and Silva (1997)	Strike-Slip faults: $y = c_1 + 1.88c_2 X \cos \theta$ ( $X \cos \theta \leq 0.4$ ) $y = c_1 + 0.75c_2$ ( $X \cos \theta > 0.4$ )  Dip-Slip faults: $y = c_1 + c_2 Y \cos \phi$	$m > 6.5$ For $m < 6.5$ , replace $y$ with $T_m \cdot y$ Where $T_m = 0$ for $m \leq 6$ and $T_m = 1 + (m - 6.5) / 0.5$ for $6.5 > m > 6$  $r < 30$ km For $r > 30$ , replace $y$ with $T_d \cdot y$ Where $T_d = 0$ for $r > 60$ and $T_d = 1 - (r - 30) / 30$ for $60 > r > 30$ km
Spectral Acceleration: Ratio of Strike Normal/Average Amplitude (Somerville et al., 1997a)	Natural logarithm of the ratio of strike normal to average horizontal spectral acceleration	$y = \cos 2\xi [C_1 + C_2 \ln(r + 1) + C_3(m - 6)]$	$6.0 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 50$ km $\xi = \theta$ for strike-slip, $\phi$ for dip-slip. $0 < \xi < 90^\circ$ $C_1, C_2, C_3$ function of period. Given separately for cases in which dependence on $\xi$ is included, and cases in which dependence on $\xi$ is ignored.
5-75% sig. duration: Ratio of data/model (Somerville et al., 1997a)	Bias in duration of acceleration with respect to Abrahamson and Silva (1996)	Strike-Slip faults: $y = C_1 + C_2 X \cos \theta$  Dip-Slip faults: $y = C_1 + C_2 Y \cos \phi$	$6.5 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 20$ km
Number of Cycles (N): Ratio of data/model (Liu et al., 2001)	Bias in N with respect to Liu et al. (2001)	Strike-Slip faults: $y = C_1 + C_2 X \cos \theta$  Dip-Slip faults: $y = C_1 + C_2 Y \cos \phi$	$6.5 \leq m \leq 7.5$ $0 \leq r \leq 20$ km

**Πίνακας 1.3:** Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση επιδράσεων κατευθυντικότητας. Οι παράμετροι  $X$ ,  $Y$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  ορίστηκαν στο σχήμα 5. Οι τροποποιήσεις φαίνονται στο σχήμα 6.

### γ) Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

Η  $PHV$  επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από το ρήγμα και τις εδαφικές συνθήκες της εξεταζόμενης περιοχής. Ο Somerville (1998) πρότεινε τη χρήση μιας διγραμμικής σχέσης μεταξύ του λογαρίθμου  $PHV$ , του μεγέθους και του λογαρίθμου της απόστασης. Ο Somerville (1998) εκτέλεσε μια ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από 15 καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες που αυξήθηκαν από 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη  $m=6.2-7.5$  και απόσταση  $r=0-10$  km. Προς αποφυγή των μη ρεαλιστικών προβλέψεων της  $PHV$  στις μικρές αποστάσεις, ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε μια ελάχιστη απόσταση των 3 km. Η σχέση του Somerville (1998) για την  $PHV$  κοντά στο ρήγμα είναι:

$$\ln(PHV) = -2.31 + 1.15m - 0.5 \ln(r) \quad [1]$$

όπου το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα αλλά περιορίζεται τουλάχιστον στα 3 km.

Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την  $PHV$ , το μέγεθος και την απόσταση παρουσιάστηκε από τους Alavi και Kranwinkler (2000) βασισμένη στο ίδιο σύνολο στοιχείων που χρησιμοποίησε ο Somerville (1998). Η σχέση της  $PHV$  των Alavi και Kranwinkler (2000) είναι:

$$\ln(PHV) = -5.11 + 1.59m - 0.58 \ln(r) \quad [2]$$

Ο Rodriguez-Marek (2000) εκτέλεσε τις αναλύσεις παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα στοιχεία ήταν για περιοχές με αποστάσεις  $r < 20\text{km}$  και  $m = 6.1-7.4$ . Χωριστές αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις κινήσεις που καταγράφηκαν επί βράχου και εδάφους. Βάσει της ανάλυσης των καταγραφών αυτών προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την  $PHV$ :

$$\ln(PHV) = a + b m + c \ln(r^2 + d^2) + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad [3]$$

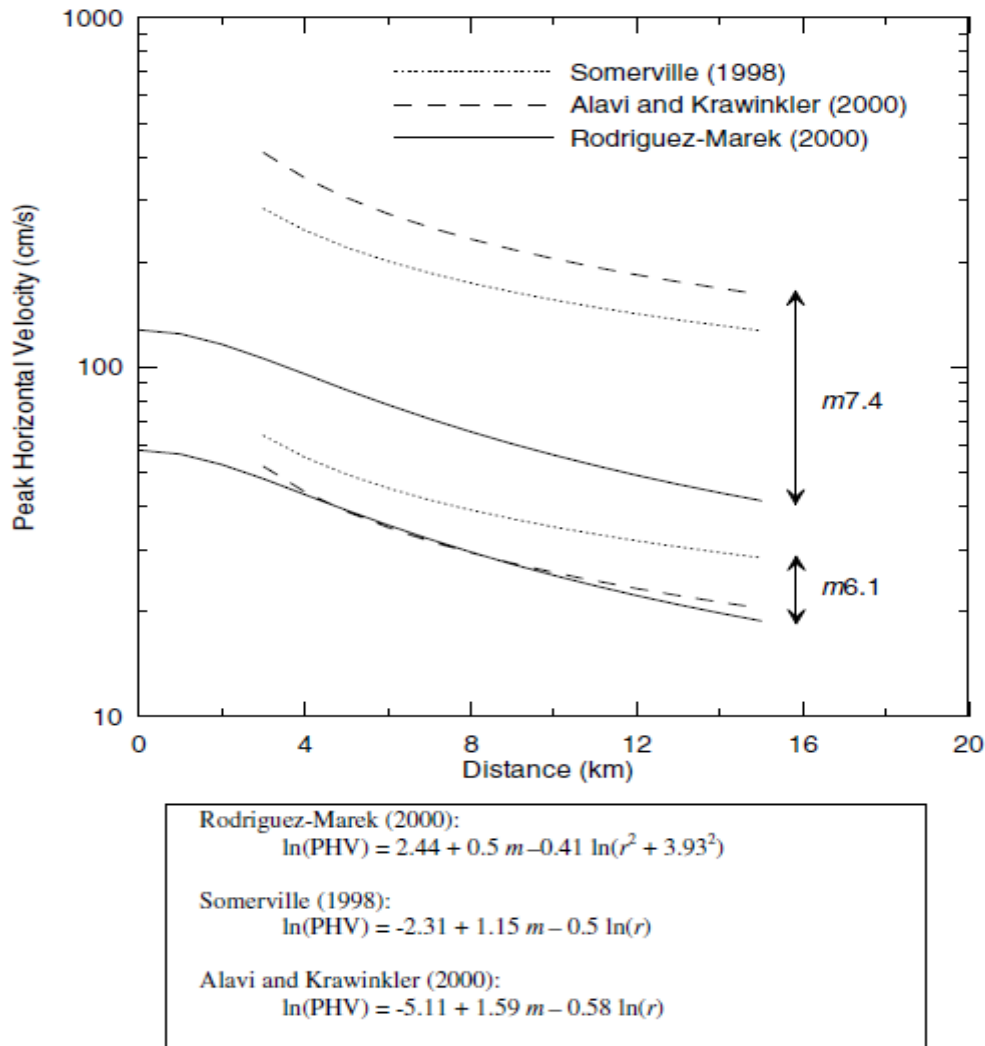
όπου η  $PHV$  είναι σε μονάδες  $\text{cm/s}$ , τα  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  είναι οι παράμετροι, το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το  $m$  είναι το μέγεθος και τα  $\eta_i$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι οι όροι σφάλματος.

Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Rodriguez – Marek (2000) παρουσιάζονται στον **πίνακα 1.4**.

Data Set	$a$	$b$	$c$	$d$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	2.44	0.50	-0.41	3.93	0.47	0.41	0.62
Rock	1.46	0.61	-0.38	3.93	0.53	0.25	0.59
Soil	3.86	0.30	-0.42	3.93	0.43	0.41	0.59

**Πίνακας 1.4:** Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez – Marek (2000) για την  $PHV$

Η **εικόνα 1.11** συγκρίνει τη σχέση που προτάθηκε από τον Rodriguez – Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Kranwinkler (2000). Οι σχέσεις διαφέρουν κυρίως στην επίδραση του μεγέθους  $m$ . Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στο μεγαλύτερο ποσό στοιχείων που περιλαμβάνεται στην πρόσφατη μελέτη.



**Εικόνα 1.11:** Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση της PHV με σχέσεις προτεινόμενες από διάφορους ερευνητές με στοιχεία από βάσεις δεδομένων σεισμών κοντινού πεδίου και με το φαινόμενο της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας (Rodriguez – Marek 2000).

### δ) Περίοδος παλμού

Η σχέση του Somerville (1998) για την περίοδο παλμού είναι:

$$\log_{10} T_v = -2.5 + 0.425m \quad [4]$$

όπου η  $T_v$  είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και το  $m$  είναι το μέγεθος. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης που χρησιμοποιούν τα μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς οι Somerville et al (1999) παρέχουν την εξίσωση:

$$\log_{10} T_v = -3.0 + 0.5m \quad [5]$$

Η περίοδος του παλμού της ταχύτητας συνδέεται με τη χρονική διάρκεια της ολίσθησης στο ρήγμα  $t_R$ , η οποία μετρά τη διάρκεια της ολίσθησης σε συγκεκριμένο σημείο στο ρήγμα. Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  είναι (Somerville 1998):

$$T_v = 2.2 t_R \quad [6]$$

Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  μπορούν επίσης να προκύψουν από τη φυσική του φαινομένου των διαρρήξεων. Εάν ένα ρήγμα διαμορφώνεται ως σημείο (σημειακή πηγή) και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας αγνοούνται, η διάρκεια της κίνησης θα είναι ίση με τη χρονική

διάρκεια  $t_R$  (Somerville 1998). Οι πεπερασμένες διαστάσεις του ρήγματος και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας συμβάλλουν στη διεύρυνση του παλμού. Η χρονική διάρκεια της ολίσθησης στο ρήγμα  $t_R$  είναι τότε ένα κάτω όριο του παλμού.

Οι Alavi και Kranwinkler (2000) καθόρισαν την περίοδο παλμού ως δεσπόμενη περίοδο σε φάσμα απόκρισης ταχύτητας ( $T_{v-p}$ ). Η σχέση τους που χρησιμοποιεί αυτό τον ορισμό για την περίοδο παλμού είναι:

$$\log_{10} T_{v-p} = -1.76 + 0.31m \quad [7]$$

Ο Rodriguez-Marek (2000) ανέπτυξε την ακόλουθη σχέση για την περίοδο παλμού:

$$\ln(T_v)_{ij} = a + b m + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad [8]$$

όπου  $(T_v)_{ij}$  είναι η περίοδος του παλμού της καταγραφής  $j$  από το γεγονός  $i$ ,  $a$  και  $b$  είναι οι παράμετροι του μοντέλου,  $\eta_i$  και  $\varepsilon_{ij}$  είναι οι όροι σφάλματος.

Εκτιμήσεις παρέχονται για την περίοδο του παλμού,  $T_v$ , και τη δεσπόμενη περίοδο του φάσματος ταχύτητας  $T_{v-p}$ . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον **πίνακα 1.5**. Η σχέση ισχύει για  $m=6.1-7.4$  και για  $r < 20 \text{ km}$ .

Το **εικόνα 1.12** συγκρίνει τη σχέση που πρόσφατα προτάθηκε από τον Rodriguez – Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville(1998) και τους Alavi και Kranwinkler(2000). Οι σχέσεις του Rodriguez – Marek (2000) για τις  $T_v$  και  $T_{v-p}$  δίνουν μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville(1998) για το  $T_v$  και από τους Alavi και Kranwinkler(2000) για το  $T_{v-p}$ . Οι διαφορές δεν είναι τόσο μεγάλες για μεγάλα μεγέθη σεισμού  $m > 7$ , όπου υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού.

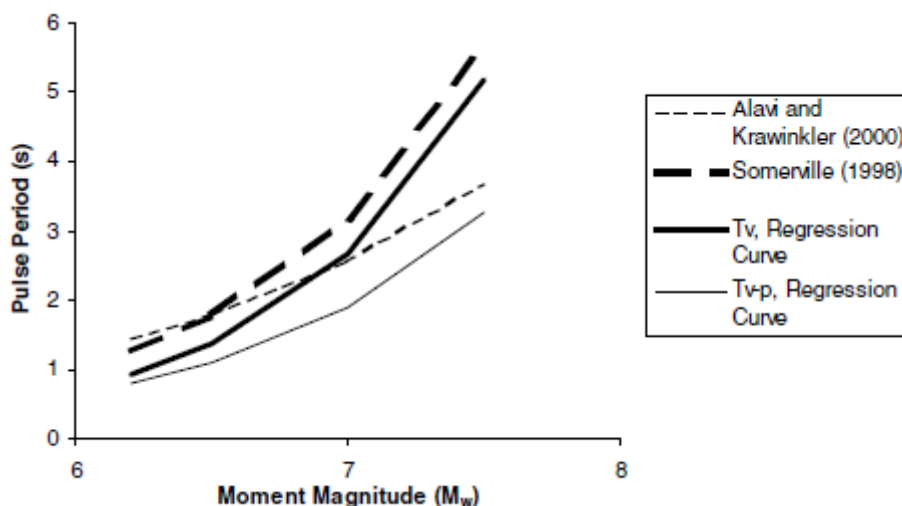
α)  $T_v$

Data Set	$a$	$b$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	-8.33	1.33	0.36	0.40	0.54
Rock	-11.10	1.70	0.31	0.41	0.51
Soil	-5.81	0.97	0.32	0.40	0.51

β)  $T_{v-p}$

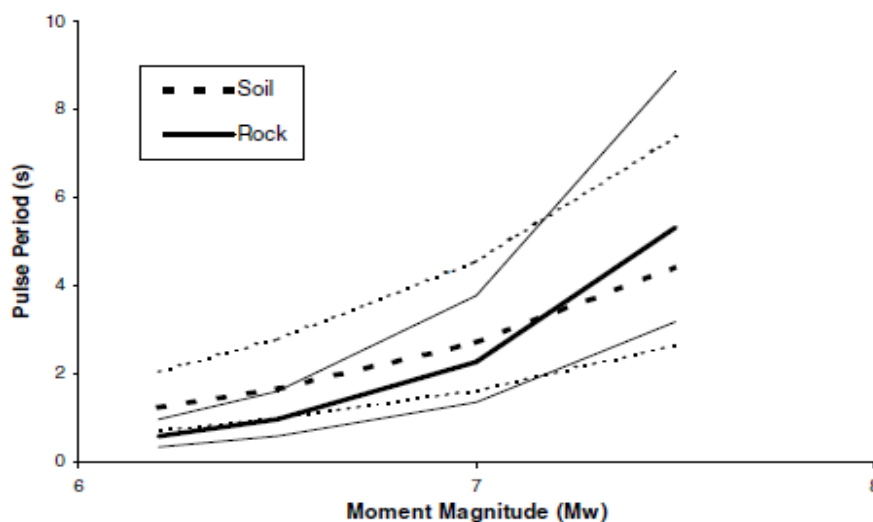
Data Set	$a$	$b$	$\sigma$	$\tau$	$\sigma_{total}$
All Motions	-6.92	1.08	0.48	0.45	0.66
Rock	-9.53	1.42	0.37	0.61	0.71
Soil	-5.66	0.91	0.41	0.45	0.61

**Πίνακας 1.5:** Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) για την περίοδο του παλμού.



**Εικόνα 1.12:** Σύγκριση μοντέλου Rodriguez-Marek (2000) με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για την  $T_v$  και από Alavi και Krawinkler (2000) για την  $T_{v-p}$  (Rodriguez-Marek 2000)

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων Rodriguez – Marek (2000) για περίοδο του παλμού για το βράχο και το έδαφος (**εικόνα 1.13**). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για τα μεγάλα μεγέθη γεγονότα ( $m > 7$ ), αλλά η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη επί εδαφών απ' ό,τι για περιοχές βράχου για τα γεγονότα με χαμηλότερα μεγέθη. Η εξέταση των ταξινομημένων κατά ζεύγη σταθμών βράχου και εδάφους και τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτή την παρατήρηση (Rodriguez-Marek 2000).



**Εικόνα 1.13:** Μοντέλο Rodriguez-Marek για εκτίμηση της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος. Οι έντονες καμπύλες αναπαριστούν τη μέση τιμή και οι λεπτές τις τυπικές αποκλίσεις (Rodriguez-Marek 2000).

#### ε) Αριθμός σημαντικών παλμών

Ο αριθμός των παλμών της κίνησης (καλούμενος ως αριθμός σημαντικών παλμών  $N_v$ ) ορίζεται ως ο αριθμός ημικύκλων ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 50% της μέγιστης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης (**πίνακας 1.3**). Για



τον υπολογισμό του αριθμού σημαντικών παλμών ταχύτητας μόνο η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κίνησης εξετάζεται. Ο αριθμός σημαντικών παλμών στην κάθετη συνιστώσα 48 καταγραφών παρουσιάζεται στον **πίνακα 1.6**. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δυο σημαντικούς παλμούς (π.χ. ένας πλήρης κύκλος της εδαφικής κίνησης). Ο Somerville (1998) προτείνει ο αριθμός παλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας να συνδέεται με τον αριθμό ετερογενών διαρρήξεων (asperities) σ' ένα ρήγμα, ο οποίος στη συνέχεια να συνδέεται με τη διανομή ολίσθησης ρήγματος. Δεν υπάρχει κανένα μοντέλο διαθέσιμο για την πρόβλεψη του αριθμού σημαντικών παλμών στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις ο  $N_v$  θα ποικίλλει μεταξύ 1 και 3 με  $N_v=2$  να είναι μια καλή τιμή που χρησιμοποιείται για σεισμούς.

Earthquake	Year	Number of Records	Number of Records with given number of half-cycle pulses ( $N_v$ )			
			1 pulse	2 pulses	3 pulses	> 3 pulses
Parkfield	66	2	0 (0)	1 (1)	0 (0)	1 (1)
San Fernando	71	1	1 (0)	0 (0)	0 (1)	0 (0)
Imperial Valley	79	13	1 (0)	10 (1)	1 (7)	1 (5)
Morgan Hill	84	2	0 (0)	0 (0)	1 (0)	1 (2)
Superstition Hills(B)	87	2	1 (0)	1 (1)	0 (0)	0 (1)
Loma Prieta	89	8	0 (0)	4 (0)	1 (1)	3 (7)
Erzincan, Turkey	92	1	0 (0)	0 (0)	1 (1)	0 (0)
Landers	92	1	1 (0)	0 (1)	0 (0)	0 (0)
Northridge	94	10	3 (0)	4 (4)	3 (2)	0 (4)
Kobe	95	4	0 (0)	1 (0)	0 (1)	3 (3)
Kocaeli, Turkey	99	4	0 (0)	3 (2)	0 (0)	1 (2)
<b>Totals</b>		<b>48</b>	<b>7 (0)</b>	<b>24 (10)</b>	<b>7 (13)</b>	<b>10 (25)</b>

**Πίνακας 1.6:** Αριθμός παλμών ( $N_v$ ) για 48 κινήσεις κοντινού πεδίου (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημικύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV. (Rodriguez-Marek 2000).

### 1.3 Επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step) στο κοντινό πεδίο του ρήγματος

Η επίδραση της παραμένουσας μετακίνησης (fling step) της εδαφικής κίνησης στην απόκριση των κατασκευών θεωρείτο ότι είχε μικρότερη σημασία από την επίδραση της κατευθυντικότητας. Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Τουρκία (Νικομήδεια 1999) και στην Ταϊβάν (Chi- Chi 1999), τόνισαν τη σημασία της παραμένουσας παραμόρφωσης που συνδέεται με τη ρήξη επιφάνειας στην απόκριση των κτηρίων. Οι ευδιάκριτες εδαφικές μεταθέσεις, οι διαφορικές καθιζήσεις και η παραμόρφωση του εδάφους αποτελούν μερικές εκφάνσεις αυτού του φαινομένου.

Η παραμένουσα μετακίνηση, ως αποτέλεσμα στατικής μετατόπισης του εδάφους, χαρακτηρίζεται από έναν παλμό ταχύτητας μονής κατεύθυνσης και ένα μονοτονικό βήμα στη χρονοϊστορία των μετατοπίσεων. Το βήμα στη χρονοϊστορία των μετατοπίσεων εμφανίζεται παράλληλα στη διεύθυνση της ολίσθησης ρήγματος (δηλαδή κατά μήκος της διάρρηξης).



Για όλους τους τύπους ρηγμάτων η μέγιστη μετατόπιση ( $MD$ ) ρήγματος σε  $m$  μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος σεισμού ( $m$ ) του γεγονότος μέσω της εξίσωσης:

$$\log_{10}(MD) = -5.46 + 0.82m \quad [9]$$

η οποία ισχύει για εύρος μεγέθους σεισμού  $m=5.2-8.1$  και για εύρος  $MD$  από  $0.01m$  σε  $14.6m$ .

Η μέση μετατόπιση ( $AD$ ) ρήγματος για όλους τους τύπους ρηγμάτων είναι:

$$\log_{10}(AD) = -4.80 + 0.69m \quad [10]$$

η οποία ισχύει για εύρος μεγέθους σεισμού  $m=5.6-8.1$ .

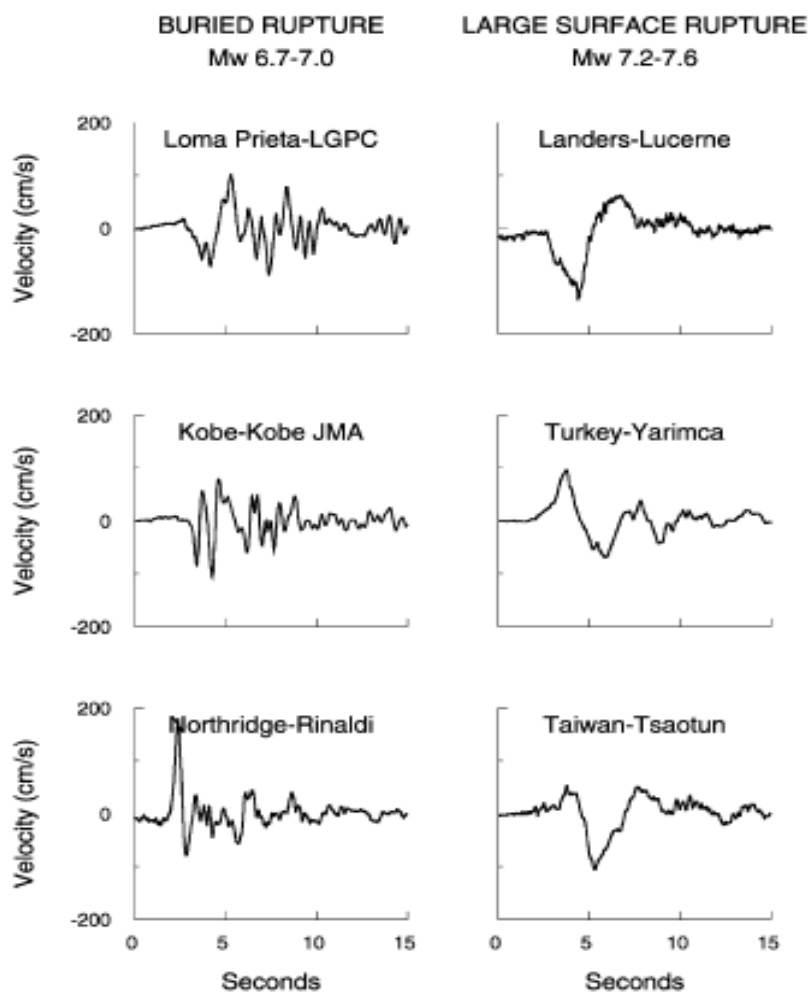
Η παραμένουσα μετακίνηση επιφάνειας ως αποτέλεσμα της διάρρηξης ρηγμάτων μπορεί να ποικίλλει σημαντικά με την απόσταση από το ίχνος του ρήγματος. Η τεκτονική μετατόπιση μακριά από το ρήγμα μπορεί να εντοπιστεί σε ίχνη δευτεροβαθμίων ρηγμάτων και σε άλλες ασυνέχειες.

#### 1.4 Μεταβολή των ιδιοτήτων του παλμού της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου συναρτήσει του μεγέθους του σεισμού

Όλα τα υπάρχοντα μοντέλα κίνησης του εδάφους υποθέτουν μονοτονική ενίσχυση των φασματικών τιμών σε όλες τις περιόδους με την αύξηση του μεγέθους. Παρ' όλα αυτά, καταγραφές κοντινού πεδίου πρόσφατων σεισμών (Τουρκία και Ταϊβάν) επιβεβαιώνουν ότι ο παλμός κατευθυντικότητας που εμφανίζεται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα καταλαμβάνει μια στενή ζώνη συχνοτήτων και η περίοδος του αυξάνεται με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους. Η εν λόγω εξάρτηση του μεγέθους από την περίοδο του παλμού είναι εύλογη θεωρητικά καθώς η περίοδος του παλμού σχετίζεται με παραμέτρους της πηγής όπως ο χρόνος άφιξης (διάρκεια της ολίσθησης ενός σημείου του ρήγματος) και οι διαστάσεις του ρήγματος, οι οποίες γενικά αυξάνονται με την αύξηση του μεγέθους του σεισμού. Αυτή η εξάρτηση του μεγέθους από την περίοδο του παλμού προκαλεί μια αιχμή στο φάσμα απόκρισης της οποίας η περίοδος αυξάνεται με το μέγεθος ώστε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου προερχόμενες από μικρούς σεισμούς δύνανται να υπερβούν αυτές των ισχυρότερων σεισμών σε ενδιάμεσες περιόδους (περίπου  $1sec$ ). Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις Somerville (2003) που σχετίζουν την περίοδο της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας του παλμού ταχύτητας με πρόσω κατευθυντικότητα με το μέγεθος του εκάστοτε σεισμού και ένα μοντέλο φάσματος επιταχύνσεων που περιλαμβάνει τη μεταβολή του σεισμικού μεγέθους ως εξάρτηση από την περίοδο της αιχμής του φάσματος.

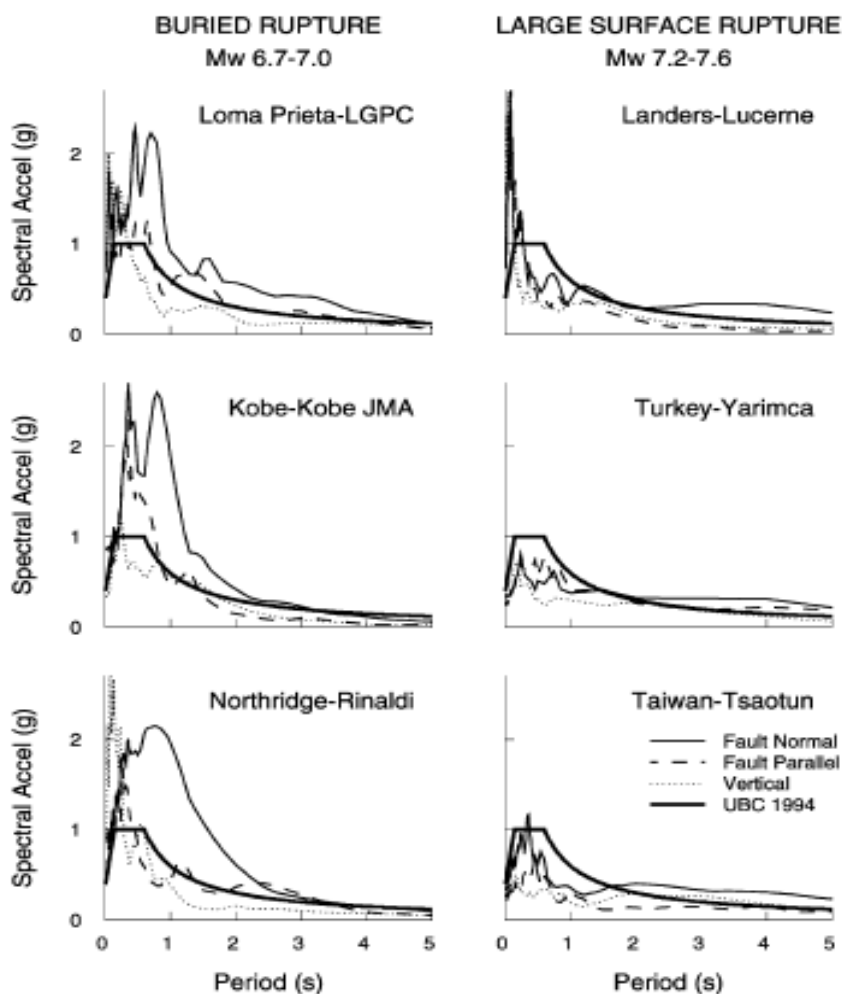
Οι ισχυροί σεισμοί της Τουρκίας και της Ταϊβάν που αποδεικνύουν την εξάρτηση της περιόδου του παλμού κοντινού πεδίου από το σεισμικό μέγεθος, χαρακτηρίζονται από ασθενείς καταγραφές στις μικρές και ενδιάμεσες περιόδους ( $0,1-3sec$ ), ασθενέστερες από τις καταγραφές σεισμών μικρότερου μεγέθους ( $M_w=6.7-7$ ), κάτι που οδήγησε σε επανεκτίμηση των σχέσεων του Somerville 1999.

Στην **εικόνα 1.14 α** παρουσιάζονται στα αριστερά καταγραφές σεισμών μεγέθους  $M_w=6.7-7$  και δεξιά καταγραφές ισχυρότερων σεισμών  $M_w=7.2-7.6$  και στην **1.14 β** τα αντίστοιχα φάσματά τους.



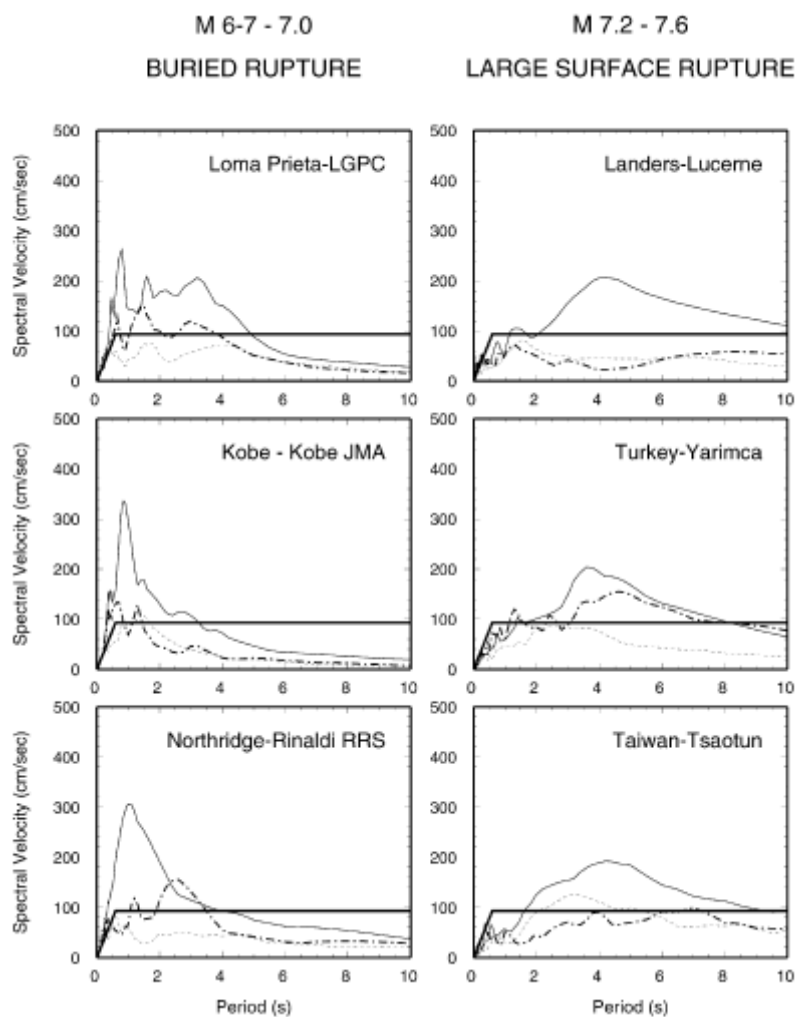
**Εικόνα 1.14a:** Καταγραφές παλμών ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα τριών σεισμών μέτριου μεγέθους (αριστερή στήλη) και τριών σεισμών μεγάλου μεγέθους (δεξιά στήλη) σχεδιασμένοι σε ίδια κλίμακα.

Η φύση στενών περιόδων αυτών των φασμάτων προκαλεί μικρές αιχμές στο φάσμα απόκρισης. Τονίζεται ότι η παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα αναμένεται μικρότερη από την κάθετη λόγω απουσίας της κατευθυντικότητας, κάτι που φαίνεται στα φάσματα. Το φάσμα του κανονισμού UBC 1994 χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης και παρατηρείται ότι το φάσμα των ισχυρών σεισμών (δεξιά στήλη) είναι συμβατό με το φάσμα του κανονισμού στις ενδιάμεσες περιόδους των 0.5 έως 2sec ενώ από τα 4sec και άνω οι τιμές του ξεπερνούν αυτές του κανονισμού. Όσον αφορά τους σεισμούς μικρότερου μεγέθους (αριστερή στήλη) η συμπεριφορά τους είναι πολύ διαφορετική αφού το φάσμα είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του κανονισμού στις ενδιάμεσες περιόδους των 0.5-2.5sec και όμοιο με το φάσμα του κανονισμού στις μεγαλύτερες περιόδους.



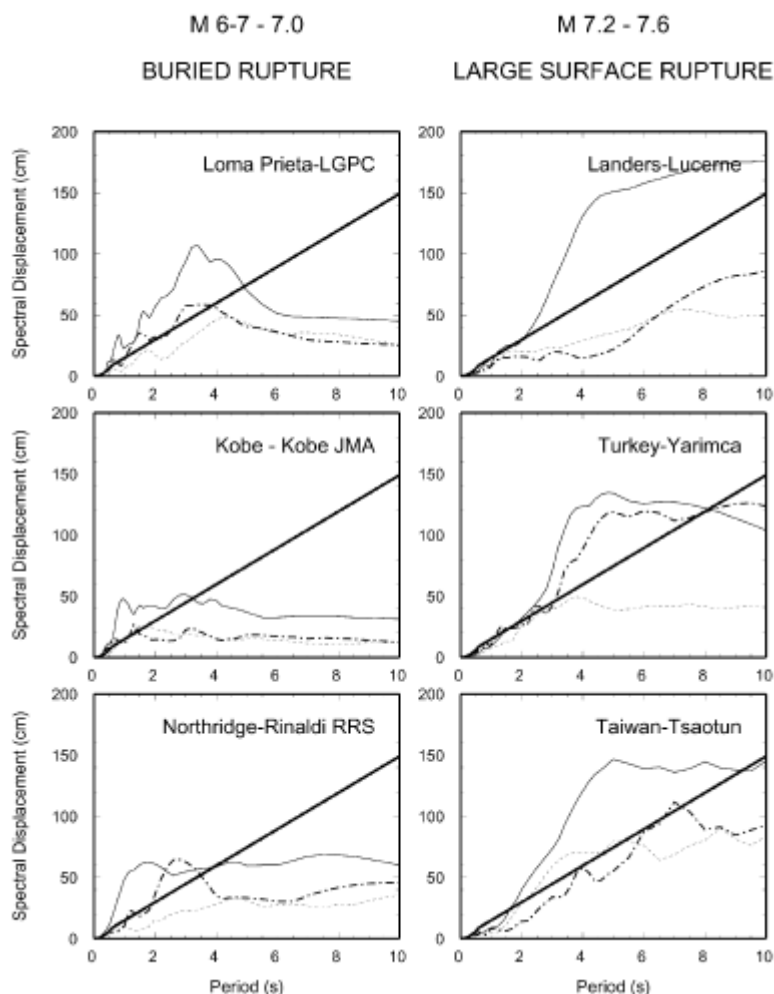
**Εικόνα 1.14 β:** Αντίστοιχα φάσματα των χρονοϊστοριών του **σχήματος 14 α** συγκρινόμενα με τον κανονισμό UBC 1994.

Τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης παρουσιάζονται καλύτερα στις **εικόνες 1.15 και 1.16** που απεικονίζουν τα φάσματα ταχυτήτων και μετακινήσεων αντίστοιχα των παλμών της **εικόνας 1.14 α** και αποδεικνύουν ότι η μεταβολή του σεισμικού μεγέθους είναι εμφανής, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψη στα μέχρι στιγμής υπάρχοντα μοντέλα συμπεριλαμβανομένου και αυτού των Somerville et al (1997), τα οποία υποθέτουν ότι οι φασματικές ενισχύσεις αυξάνονται μονοτονικά σε όλες τις περιόδους.



**Εικόνα 1.15:** Φασματικές ταχύτητες παλμών κάθετα στο ρήγμα ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρότερων (δεξιά) σεισμών

Παρ' όλα αυτά, αυτά τα χαρακτηριστικά είναι φυσική επίπτωση του περιορισμού του παλμού πρόσω κατευθυντικότητας σε στενή ζώνη περιόδων. Η περίοδος του παλμού κοντινού πεδίου σχετίζεται με τις παραμέτρους της σεισμικής πηγής όπως η διάρκεια ολίσθησης ενός σημείου στο ρήγμα και οι διαστάσεις της πηγής που αυξάνονται με το μέγεθος του σεισμού. Οι κινήσεις κοντινού πεδίου δε μπορούν να περιγραφούν επακριβώς από ένα ομοιόμορφα αυξανόμενο φάσμα σταθερού σχήματος επειδή το σχήμα των ενδιάμεσων και μεγάλων περιόδων αλλάζει καθώς αυξάνεται το επίπεδο του φάσματος με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους.



**Εικόνα 1.16:** Φασματικές μετακινήσεις παλμών στην κάθετη συνιστώσα του ρήγματος ενδιάμεσων (αριστερά) και ισχυρών (δεξιά) σεισμών

Οι Somerville (1998), Somerville et al (2000) και Alavi & Krawinkler (2000) παρήγαγαν εξισώσεις συσχετισμού της περιόδου με την ενίσχυση του παλμού κατευθυντικότητας της ταχύτητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των εξισώσεων αυτών απείχαν έως και  $10\text{km}$  από το ρήγμα και η περίοδος προέκυψε ανεξάρτητη από την απόσταση από το ρήγμα. Οι εν λόγω εξισώσεις τροποποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις πρόσφατες καταγραφές των σεισμών του Chi – Chi (1999), της Ταϊβάν και του Kocaeli στην Τουρκία και προέκυψαν ξεχωριστές σχέσεις καταγραφών κοντινού πεδίου για βράχο και εδαφικό σχηματισμό. Αυτές οι συσχετίσεις χρησιμοποιούν την περίοδο  $T_{dir}$  του μεγαλύτερου κύκλου της κυματομορφής της ταχύτητας που καταγράφηκε σε σταθμούς κοντά στο ρήγμα λαμβάνοντας υπόψη την πρόσω κατευθυντικότητα. Τα δεδομένα σε βράχο συμβαδίζουν με την παραδοχή της περιόδου του παλμού  $T_{dir}$  αυξανόμενης αναλογικά με το μήκος του ρήγματος και τις σχέσεις των Somerville et al (1999) και δίνουν περίοδο παλμού:

$$\log_{10} T_{dir} = -3.17 + 0.5M_w$$

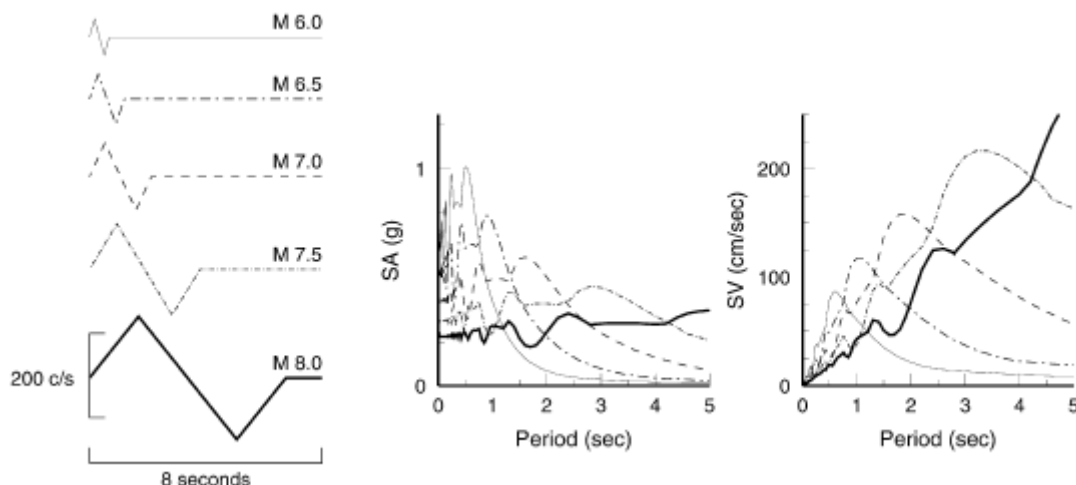
Η επίδραση του εδαφικού στρώματος γενικότερα αυξάνει τη μέγιστη τιμή ταχύτητας και την περίοδο της κίνησης εισαγωγής (input motion). Το ποσοστό της

αύξησης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κίνησης εισαγωγής, το πάχος και τις φυσικές ιδιότητες του εδαφικού στρώματος. Η εξίσωση της περιόδου παλμού για έδαφος είναι:

$$\log_{10} T_{dir} = -2.02 + 0.346M_w.$$

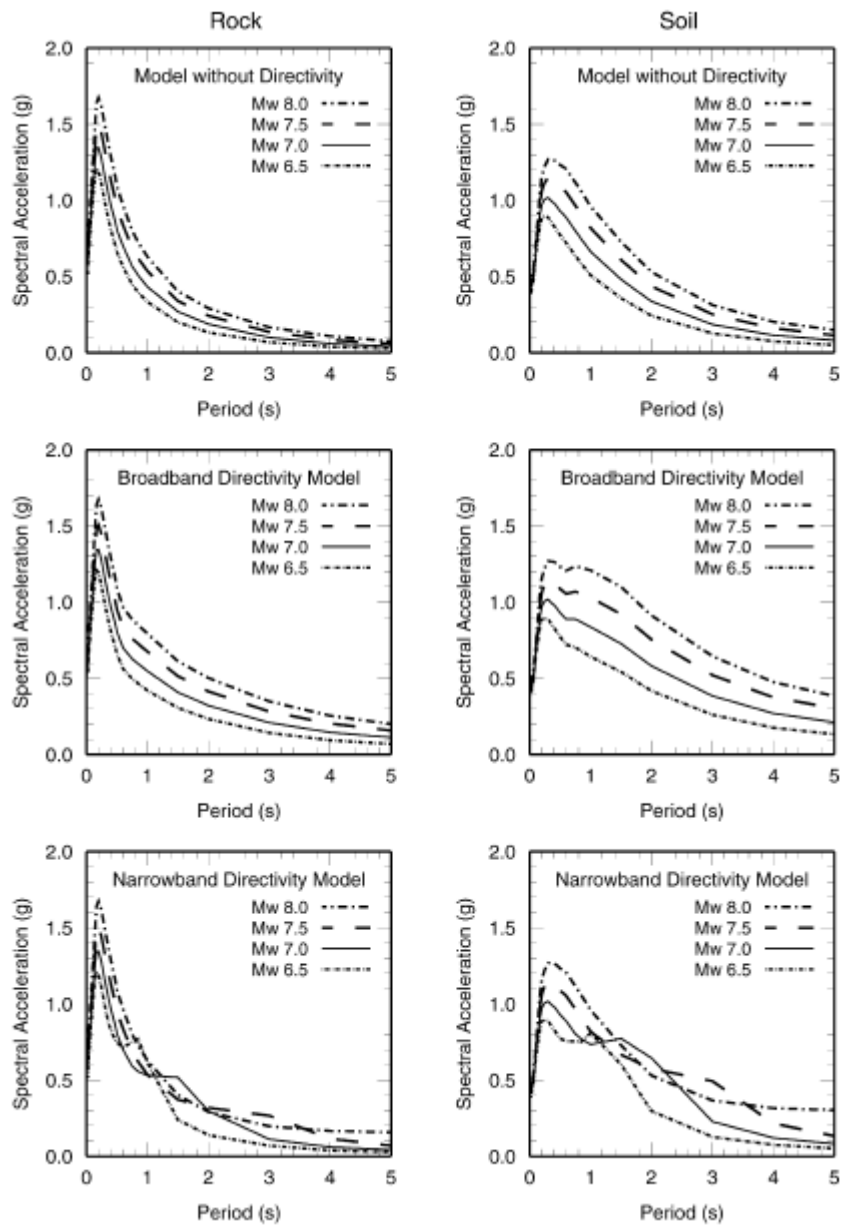
Οι εν λόγω γραμμικές σχέσεις για βράχο και έδαφος εξισώνονται για  $M_w=7.4$  και αναμένεται ότι η σχέση για έδαφος είναι στην πραγματικότητα κεκαμμένη και συναληθεύει με την εξίσωση για βράχο σε μεγέθη άνω των  $M_w=7.4$  ενώ έχει μικρότερες τιμές περιόδου παλμού σε μεγέθη 7.4 και άνω.

Στην **εικόνα 1.17** παρουσιάζεται ένας τριγωνικός παλμός ταχύτητας και το αντίστοιχο φάσμα επιταχύνσεων και ταχυτήτων για διάφορα μεγέθη και προκύπτει ότι το ελαστικό φάσμα απόκρισης παρουσιάζει αιχμές που σχετίζονται με την περίοδο του παλμού. Εξαιτίας αυτών των αιχμών το φάσμα δεν αυξάνεται μονοτονικά με το μέγεθος σε όλες τις περιόδους, όπως συμβαίνει στα συμβατικά μοντέλα εδαφικής κίνησης. Αντίθετα, το φάσμα ασθενέστερων σεισμών είναι ισχυρότερο από το φάσμα μεγαλύτερων σεισμών σε μια περιοχή περιόδων.



**Εικόνα 1.17:** Διαβάθμιση με το μέγεθος απλών παλμών ταχύτητας που αντιπροσωπεύουν κινήσεις κοντινού πεδίου (αριστερά) και τα αντίστοιχα φάσματα επιταχύνσεων (κέντρο) και ταχυτήτων (δεξιά).

Τέλος, στην **εικόνα 1.18** γίνεται σύγκριση του φάσματος απόκρισης σε βράχο και έδαφος του παρόντος μοντέλου του Somerville (2003) με προηγούμενα μοντέλα των Abrahamson & Silva (1997) που δεν περιλαμβάνει την επίδραση της κατευθυντικότητας και των Somerville et al (1997) που το φαινόμενο της κατευθυντικότητας βασίζεται στη μονοτονική αύξηση των χαρακτηριστικών της εδαφικής κίνησης με την αύξηση του μεγέθους σε όλες τις φασματικές περιόδους. Το νέο μοντέλο του Somerville (2003) παράγει μεγαλύτερο φάσμα απόκρισης στην περιοχή περιόδων μεταξύ 0.5-2sec για σεισμούς μεγέθους μικρότερου των  $M_w=7.5$  και μικρότερο φάσμα απόκρισης σε όλες τις περιόδους για σεισμούς μεγαλύτερους του  $M_w=7.5$ , συγκρινόμενο με το μοντέλο των Somerville et al (1997).



**Εικόνα 1.18:** Μοντέλο φασματικής απόκρισης κοντινού πεδίου σε απόσταση 5km για βράχο (αριστερά) και εδαφικό σχηματισμό (δεξιά). Πάνω: μοντέλο χωρίς κατευθυντικότητα των Abrahamson & Silva (1997), μέση: μοντέλο διευρυμένης συχνότητας κατευθυντικότητας των Somerville et al (1997) και κάτω: μοντέλο κατευθυντικότητας σε στενή ζώνη συχνοτήτων του Somerville (2003).





# 2

## ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ NGA

---

### 2.1 Εισαγωγή

Η νέα γενιά μοντέλων απομείωσης της εδαφικής κίνησης (NGA) αποτελεί ένα ερευνητικό πρόγραμμα που οργανώθηκε από το ερευνητικό κέντρο αντισεισμικής τεχνολογίας του Ειρηνικού σε συνεργασία με το γεωλογικό ερευνητικό κέντρο των Ηνωμένων Πολιτειών και το αντισεισμικό κέντρο της νότιας Καλιφόρνια. Στόχος του προγράμματος είναι να αναπτυχθούν νέες σχέσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης για επιφανειακούς σεισμούς των δυτικών Ηνωμένων πολιτειών και όμοιων ενεργών σεισμικά περιοχών. Δημιουργήθηκαν πέντε ανεξάρτητα εργαζόμενες ερευνητικές ομάδες, με συνεχή όμως επικοινωνία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης, για την παραγωγή διαφορετικών μοντέλων εδαφικής κίνησης. Η εργασία των ομάδων αφορούσε:

- την ανάπτυξη ενός ξεχωριστού μοντέλου εδαφικής κίνησης από κάθε ομάδα ερευνητών
- τη δημιουργία μιας ανανεωμένης και εκτεταμένης βάσης δεδομένων των καταγεγραμμένων σεισμικών κινήσεων, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών για τη διαδικασία της καταγραφής της κίνησης, τις υπάρχουσες σεισμικές πηγές, τη διαδρομή της κίνησης και τα εδαφικά χαρακτηριστικά των σταθμών καταγραφής που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές για τη δημιουργία των μοντέλων τους
- τη διενέργεια και άλλων ερευνητικών προγραμμάτων ώστε να λειτουργήσουν επικουρικά στα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης

- τη δημιουργία ενός προγράμματος αλληλεπίδρασης των ομάδων διαμέσου της έρευνας, ώστε να παρέχονται επιστημονικά δεδομένα και αναθεωρήσεις ερευνών στην επιστημονική κοινότητα και τις κοινότητες μηχανικών

Οι ερευνητές που παρουσιάζονται είχαν δημιουργήσει πέντε προϋπάρχοντα και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης τα οποία παρουσιάζονται στις παρενθέσεις.

- Norman Abrahamson and Water Silva (Abrahamson and Silva 1997)
- David Boore and Gail Atkinson (Boore et al. 1997)
- Kenneth Campbell and Yousef Bozorgnia (Campbell 1997, Campbell and Bozorgnia 2003)
- Brian Chiou and Robert Youngs, επαναπροσαρμογή του μοντέλου των Sadigh et al. (1993,1997)
- I.M. Idriss (Idriss 1991)

Για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες της αντισεισμικής κοινότητας τα πέντε μοντέλα αρχικά έπρεπε να είναι εφαρμόσιμα στις ακόλουθες συνθήκες:

- Παράμετροι μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, μέγιστης εδαφικής ταχύτητας και ελαστικής ψευδο-επιτάχυνσης με 5% απόσβεση σε εύρος περιόδων 0 με 10 δευτερόλεπτα.
- Μέση οριζόντια συνιστώσα εδαφικής κίνησης με συνιστώσες στην κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση.
- Σεισμικά δεδομένα από ρηχούς σεισμούς (οριζόντιας ολίσθησης ή κανονικής ή ανάστροφης κατακόρυφης βύθισης) των δυτικών Ηνωμένων Πολιτειών.
- Εύρος σεισμικού μεγέθους από 5 έως 8.5 (ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης) και 5 μέχρι 8 (ρήγματα κανονικής ή ανάστροφης κατακόρυφης βύθισης).
- Απόσταση από το ρήγμα μεταξύ 0 και 200km.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις αργότερα τροποποιήθηκαν με κατάργηση της κατηγοριοποίησης των συνιστωσών σε παράλληλη και κάθετη στο ρήγμα, με σκοπό να εστιάσουμε στην πολυπλοκότητα των μοντέλων για τη μέση οριζόντια συνιστώσα. Προσαύξηση των απαιτήσεων οδήγησε σε μοντέλα εδαφικής κίνησης που είναι εφαρμόσιμα σε ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών από αυτό των προϋπάρχοντων μοντέλων. Για τις παλαιότερες σχέσεις δημιουργήθηκαν φασματικές τιμές για μεγαλύτερες περιόδους κυμαινόμενες από 2 έως 5 δευτερόλεπτα, δεν αναφέρθηκαν τιμές της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας, τα μεγαλύτερα μεγέθη εφαρμογής κυμαίνονταν μεταξύ 7.5 και 8 και οι αποστάσεις εφαρμογής είναι από 60 έως 100km.

## 2.2 Βασικά τεχνικά ζητήματα που αφορούν τα νέα μοντέλα της εδαφικής κίνησης

Τα βασικά τεχνικά ζητήματα που απευθύνονται στη δημιουργία των νέων σχέσεων και στην περαιτέρω έρευνα στο θέμα είναι η εξέταση των διαφόρων επιδράσεων στις σεισμικές δονήσεις και η στατιστική ανάλυση των δεδομένων.

Αναφορικά με τις επιδράσεις στις σεισμικές δονήσεις, λήφθηκε υπόψη αυτή του κοντινού πεδίου σε σεισμικά γεγονότα μεσαίου προς μεγάλου μεγέθους, της απόστασης από το ρήγμα τόσο για κοντινές όσο και για μακρινές αποστάσεις, της

κατευθυντικότητας της διάρρηξης, της κίνησης κατάντη και ανάντη του ρήγματος για ρήγματα κατακόρυφης βύθισης, του είδους του ρήγματος (κατακόρυφης βύθισης / οριζόντιας ολίσθησης), του βάθους του ρήγματος (βαθύ ή επιφανειακό) και της εδαφικής ενίσχυσης αναφορικά με συνθήκες βραχώδους υποβάθρου ή τρισδιάστατου εδαφικού σχηματισμού.

Βασιζόμενοι στην ανάλυση και την κρίση τους, οι δημιουργοί των μοντέλων έκριναν τη σημαντικότητα ή μη της επίδρασης των προαναφερθέντων παραμέτρων και τη μοντελοποίηση τους. Εκτός από την εξάρτηση από το μέγεθος, την απόσταση από το ρήγμα, το είδος του ρήγματος και την επίδραση των εδαφικών συνθηκών που όλες οι ομάδες συμπεριέλαβαν στα μοντέλα τους, οι περισσότεροι ερευνητές έλαβαν υπόψη την επίδραση ανάντη και κατάντη του ρήγματος και την εξάρτηση από το βάθος του ρήγματος και από το εδαφικό υπόβαθρο. Οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας δεν ενσωματώθηκαν στα νέα μοντέλα, παρ' όλα αυτά η επίδραση στη μέση οριζόντια συνιστώσα της εδαφικής κίνησης εξετάστηκε από τους Spudlich και Chiu (2008) και τα αποτελέσματά τους μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση των προβλέψεων της εδαφικής κίνησης.

Μια κοινή απόφαση των πέντε ερευνητικών ομάδων ήταν η χρήση της μέσης διατμητικής εδαφικής ταχύτητας στα πρώτα 30m της εδαφικής στρώσης ( $V_{s,30}$ ) ως παραμέτρου που χαρακτηρίζει την εδαφική δυσκαμψία και απόκριση στο σεισμικό κραδασμό. Η χρήση της συγκεκριμένης παραμέτρου θεωρείται περισσότερο κατατοπιστική όσον αφορά την εδαφική κατηγοριοποίηση παρά οι ασαφείς και ευρείες κατηγορίες που προτείνονται από τις παλαιότερες σχέσεις (εξαιρέση αποτελούν οι σχέσεις των Boore et al.(1997) που χρησιμοποιούν τη  $V_{s,30}$ ). Στα τέσσερα μοντέλα η ενίσχυση, λόγω της θέσης της καταγραφής σε βραχώδες υπόβαθρο, είναι συνεχής συνάρτηση της ταχύτητας διατμητικού κύματος  $V_{s,30}$ . Τα συγκεκριμένα μοντέλα ενσωματώνουν την επίδραση της εδαφικής μη γραμμικής συμπεριφοράς ενώ το μοντέλο του Idriss εκτιμά τις ταχύτητες διατμητικού κύματος για δυο κατηγορίες εδαφών με υψηλές ταχύτητες ( $450m/s \leq V_{s,30} \leq 900m/s$  και  $V_{s,30} > 900m/s$ ).

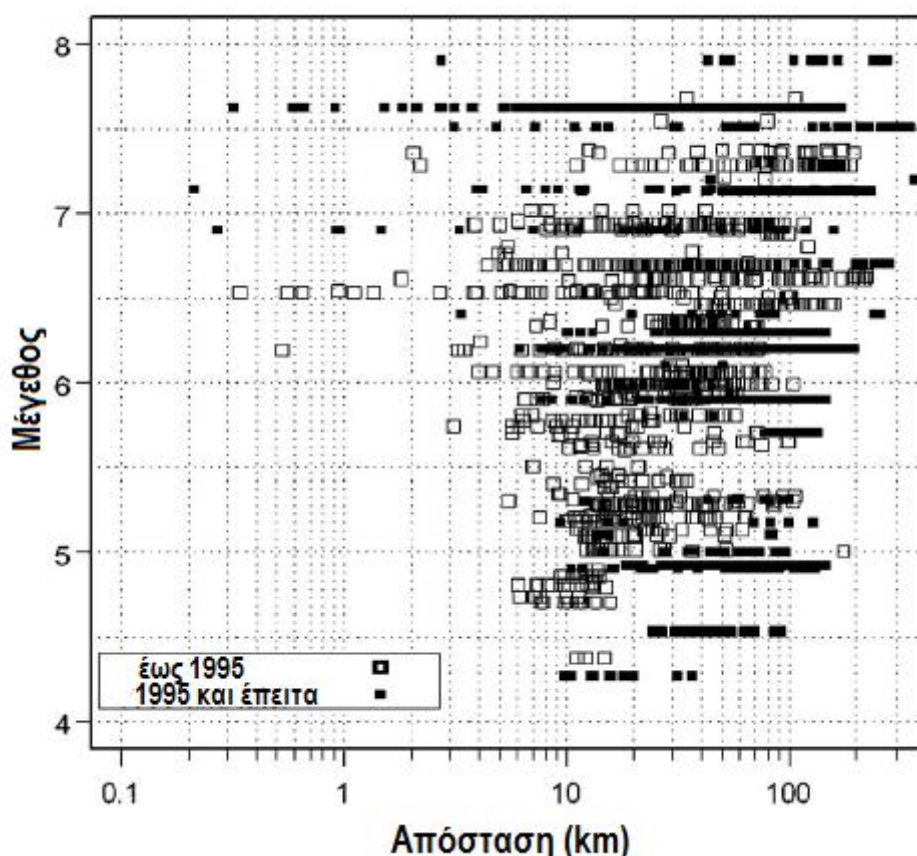
Οι δημιουργοί των σχέσεων χρησιμοποίησαν τη βασική σεισμολογική θεωρία, τα απλά σεισμικά μοντέλα καθώς και πρόσθετες αναλύσεις για τη δημιουργία των νέων σχέσεων απομείωσης της εδαφικής κίνησης. Η συγκεκριμένη προσπάθεια είναι σημαντική καθώς εκτιμήθηκε η επίδραση του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης από το ρήγμα στην εδαφική κίνηση και έγινε η επέκταση του φάσματος μέχρι τα 10 δευτερόλεπτα. Ο αριθμός των καταγραφών με πληροφορίες στις μεγάλες περιόδους ήταν σημαντικά μικρότερος από τις καταγραφές με περιόδους περίπου 1 δευτερόλεπτο. Μερικοί ερευνητές ανέλυσαν επιπρόσθετα δεδομένα ευρυζωνικών καταγραφών τα οποία δεν διατίθενται στις βάσεις δεδομένων ισχυρής εδαφικής κίνησης ώστε να δημιουργήσουν σχέσεις απόσβεσης για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50km.

Αναφορικά με τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων, λήφθηκαν υπόψη αβεβαιότητες στις προβλεπόμενες μεταβλητές όπως το μέγεθος του σεισμού και την ταχύτητα  $V_{s,30}$  και η εξάρτηση του σεισμικού μεγέθους, της απόστασης, του είδους του εδάφους και του επιπέδου της δόνησης από συστηματικά σφάλματα. Ως

αποτέλεσμα αυτών των εκτιμήσεων, οι ερευνητές συνέστησαν μικρότερες τυπικές αποκλίσεις στις θέσεις όπου η  $V_{s,30}$  προέκυψε από πραγματικές μετρήσεις και όχι από συσχετίσεις μεγεθών. Επίσης, συστάθηκε μέθοδος μείωσης της τυπικής απόκλισης για περιοχές με βραχώδες υπόβαθρο λόγω της μη γραμμικής εδαφικής συμπεριφοράς και τυπικές αποκλίσεις είτε μειούμενες με την αύξηση του σεισμικού μεγέθους (για μεγέθη μεταξύ 5 και 7-7.5) είτε ανεξάρτητες του σεισμικού μεγέθους.

### 2.3 Δημιουργία της βάσης δεδομένων των νέων σχέσεων

Οι ερευνητές επεξέτειναν τη βάση δεδομένων του αντισεισμικού ερευνητικού κέντρου του ειρηνικού και τα πρόσθετα δεδομένα που χρησιμοποίησαν παρουσιάζονται στην **εικόνα 2.1** μαζί με τα ήδη υπάρχοντα. Οι νέοι καταγραφέντες σεισμικοί κραδασμοί στο Hector Mine της Καλοφόρνιας (1999), στο Kocaeli και το Duzce της Τουρκίας (1999), στο Chi-Chi της Ταιβάν (1999) καθώς και οι πέντε ισχυροί μετασεισμοί από τις δονήσεις στο βουνό Nenana της Καλιφόρνια (2003) και Denali στην Αλάσκα περιλαμβάνονται στις νέες καταγραφές. Η επεκταθείσα βάση δεδομένων περιλαμβάνει 173 σεισμούς, 1456 καταγραφικούς σταθμούς και 3551 καταγραφές με πολλαπλές συνιστώσες.



**Εικόνα 2.1:** Κατανομή καταγραφών εδαφικής κίνησης της νέας βάσης δεδομένων ανάλογα με το μέγεθος και την απόσταση από το ρήγμα

Κάθε μελετητική ομάδα αποφασίστηκε να χρησιμοποιήσει ένα υποσύνολο δεδομένων κατά τη δική της κρίση. Οι παράγοντες που ελήφθησαν υπόψη από τις εκάστοτε ομάδες ώστε να οριστικοποιήσουν τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα ήταν:

- πιθανές καταγραφές από διαφορετικό τεκτονικό περιβάλλον
- σεισμοί μη καλά προσδιορισμένοι ως προς το μέγεθος, την απόσταση από το ρήγμα κλπ
- καταγραφές με προβλήματα ή ερωτήματα σχετικά με την ποιότητά τους
- καταγραφές μη αντιπροσωπευτικές συνθηκών ελευθέρου πεδίου (πχ καταγραφές σε βάσεις άκαμπτων ψηλών κτηρίων, άκαμπτων θεμελιώσεων ή ακροβάθρων)
- καταγραφές μετασεισμών

Η πιο σημαντική απόφαση για την κάθε ερευνητική ομάδα ήταν το αν θα συμπεριλάβει τις καταγραφές από την κύρια σεισμική δόνηση στο Chi-Chi, μεγέθους  $M7.6$  (421 καταγραφές) και των αντίστοιχων μετασεισμών (1392 καταγραφές). Τελικά, όλες οι ομάδες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα της κύριας δόνησης και τρεις από τις πέντε να χρησιμοποιήσουν επιπρόσθετα τα μετασεισμικά δεδομένα.

Όπως περιγράφεται και από τους Chiu et al (2008), ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία εκτίμησης των τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία των καταγραφών, σεβόμενοι τις φασματικές τιμές των δεδομένων. Αξιολογήθηκε η μικρότερη χρησιμοποιούμενη συχνότητα κάθε καταγραφής και συστάθηκαν χρησιμοποιούμενες τιμές στη βάση δεδομένων. Οι περισσότερες καταγραφές στράφηκαν ώστε να δημιουργηθούν οι κάθετες και παράλληλες στο ρήγμα συνιστώσες και η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε και για τις καταγραφές που καθόριζαν εξ ολοκλήρου τη μέση οριζόντια συνιστώσα, ανεξαρτήτως των δυο καταγεγραμμένων οριζοντίων συνιστωσών (Boore et al. 2006). Άλλες μετρήσεις της οριζόντιας σεισμικής κίνησης συμπεριλαμβανομένης και της μέτρησης του σεισμικού μεγέθους της μέγιστης οριζόντιας συνιστώσας σε συνδυασμό με τη μέση οριζόντια συνιστώσα αξιολογήθηκαν και από τους ερευνητές των νέων μοντέλων αλλά και από άλλους, συμπεριλαμβανομένων των Beyer και Bommer (2006), Campbell και Bozorgnia (2007;2008), Watson-Lamprey και Boore (2007) και Huang et al. (2008).

Κατά τη συλλογή, εκτίμηση και επέκταση των σεισμικών δεδομένων λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα:

- χαρακτηρισμός της κατάστασης του πεδίου χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους και συστήματα κατάταξης όπως αυτό της διατμητικής εδαφικής ταχύτητας  $V_{s,30}$ , την κατάταξη NEHRP, την κατάταξη επιφανειακής γεωλογίας και αυτή του γεωμητώου.
- εκτίμηση της  $V_{s,30}$  χρησιμοποιώντας συσχετίσεις σε σταθμούς όπου δεν είχαν καταγραφεί τιμές της διατμητικής εδαφικής ταχύτητας (μόνο στο 30% των σταθμών καταγραφής υπήρχαν μετρήσεις)
- συστηματική και σχετική αξιολόγηση των σεισμικών μεγεθών, του τύπου του ρήγματος, της γεωμετρίας της διάρρηξης, της κατηγοριοποίησης των σταθμών καταγραφής ως ανάντη και κατόντη, των παραμέτρων της κατευθυντικότητας σύμφωνα με τις παραμέτρους των Somerville et al. (1997)

και Spudlich και Chiou (2008) και των αποστάσεων πηγής - θέσης καταγραφής

- εκτίμηση του βάθους της σεισμικής διάρρηξης
- συλλογή βαθών μέχρι το βράχο με κατηγοριοποίηση ως προς τη διατμητική ταχύτητα σε ομάδες  $V_s=1, 1.5$  και  $2.5$  km/sec στις θέσεις καταγραφής
- συλλογή των χαρακτηριστικών της λεκάνης αν η καταγραφή βρίσκεται εντός της

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος ήταν η εκτίμηση της  $V_{s,30}$  στις θέσεις καταγραφών, βασιζόμενη σε συσχετίσεις με την καταμετρημένη διατμητική ταχύτητα σε άλλες θέσεις και σε εξαρτήσεις από τη γεωλογία της περιοχής και από τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Οι μελέτες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εν λόγω παραμέτρου συμπεριλαμβάνουν δεδομένα από τους σεισμούς του Northridge στην Καλιφόρνια (1994) και δεδομένα καταγεγραμμένων ταχυτήτων στην ευρύτερη περιοχή από το γεωλογικό ιστιπούτο της περιοχής. Παρόμοιες συσχετίσεις έγιναν για την εκτίμηση των εδαφικών ταχυτήτων συμπεριλαμβάνοντας δεδομένα από το σεισμό και τους μετασεισμούς του Chi-Chi στην Ταιβάν (1999).

## 2.4 Επιπρόσθετη έρευνα στις σεισμικές επιδράσεις

Η συγκεκριμένη έρευνα περιλαμβάνει προσομοίωση της κίνησης βραχώδους υποβάθρου και της εδαφικής ενίσχυσης, τρισδιάστατη προσομοίωση της εδαφικής κίνησης της βάσης και ανάπτυξη φόρμουλας παρακολούθησης του φαινομένου της κατευθυντικότητας της εδαφικής κίνησης χρησιμοποιώντας της ισόχρονες καμπύλες.

### 2.4.1. Προσομοίωση της κίνησης βραχώδους υποβάθρου

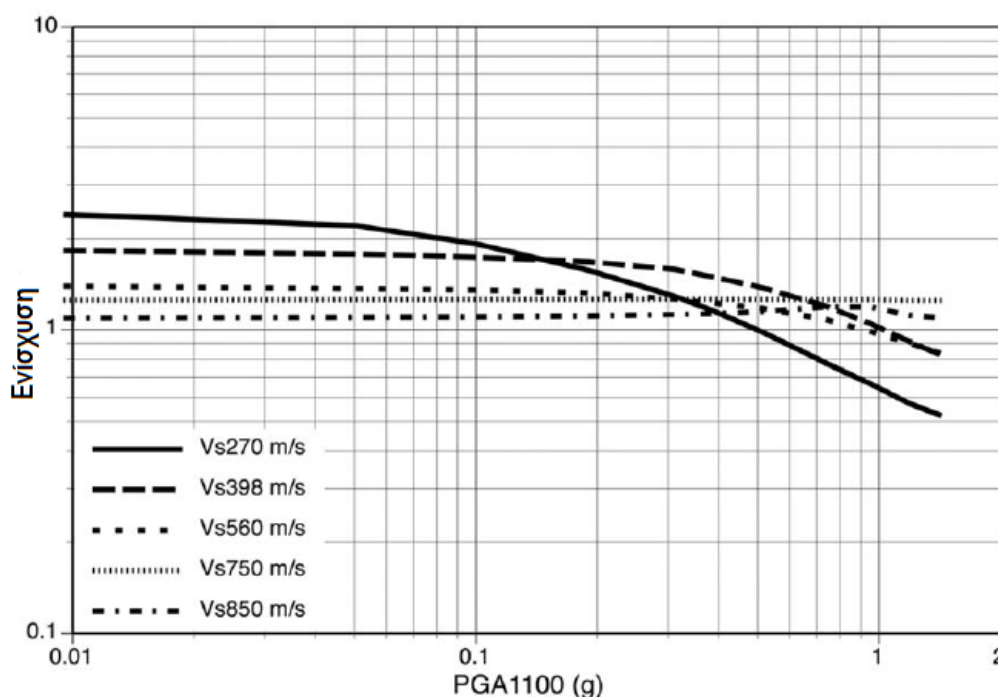
Η εν λόγω προσομοίωση διεξήχθη από τρεις ομάδες με σκοπό τη διεξαγωγή θεωρητικών εκτιμήσεων για την τροποποίηση των φασματικών τιμών σε συνάρτηση με το μέγεθος του κραδασμού, την απόσταση από το ρήγμα, την περιοχή της διάρρηξης και τις επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης, τις επιδράσεις της ανάντη και κατάντη περιοχής και του βαθέως ή επιβανειακού ρήγματος. Η διαδικασία και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της εταιρείας URS, των μηχανικών του Ειρηνικού (PEA) και του πανεπιστημίου Reno της Νεβάδα (UNR) περιγράφονται από τους Graves και Pitarka (2004), Silva et al. (2002), Zeng et al. (1994) και Zeng (2002). Τα τρία σετ δεδομένων συγκρίνονται από τους Somerville et al. (2006) και αναθεωρούνται από τους Collins et al. (2006). Οι προσομοιώσεις περιέχουν ορισμένους περιορισμούς αναφορικά με την τροποποίηση της εδαφικής κίνησης με διαφορετικές παραμέτρους της πηγής, όμως σημαντικές διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων υπήρξαν μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις (Collins et al. 2006).

### 2.4.2 Προσομοίωση της απόκρισης της θέσης

Όπως προκύπτει από τους Walling et al. (2008), οι προσομοιώσεις αναφορικά με τη θέση των καταγραφών διεξήχθησαν από τον Silva (2008) για εδαφικά προφίλ αντιπροσωπευτικά της εκάστοτε διατμητικής ταχύτητας, της κατηγοριοποίησης εδαφών κατά NEHRP και της γεωλογίας της περιοχής. Η ισοδύναμη γραμμική

ανάλυση για τέσσερα εδαφικά μοντέλα παρουσιάζεται στην **εικόνα 2.2** ως ένα παράδειγμα της ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης στην περίοδο των 0.2 δευτερολέπτων σχετιζόμενη με την αναφορική επιτάχυνση βράχου για  $V_{s,30}=1100\text{m/sec}$ . Οι τιμές ταχύτητας διατμητικού κύματος ( $V_{s,30}=1100\text{m/sec}, 560\text{m/sec}$  και  $270\text{m/sec}$ ) αντιστοιχούν στις εδαφικές κατηγορίες B, C και D κατά NEHRP, ενώ η τιμή  $V_{s,30}=270\text{m/sec}$  αντιστοιχεί στο σύνορο εδάφους B/C. Το εν λόγω εδαφικό μοντέλο ονομάζεται «Peninsular range model» και διαφέρει από το «EPRI model» το οποίο παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση της ενίσχυσης με την αύξηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε βραχώδες υπόβαθρο (η διαφορά οφείλεται σε μεγαλύτερη μη γραμμικότητα του εδάφους).

Οι Walling et al. (2008) χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της εδαφικής προσομοίωσης, ανέπτυξαν δυο παραμετρικά μοντέλα μη γραμμικής εδαφικής ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης (ένα για κάθε εδαφικό τύπο που αναφέρεται παραπάνω) για διαφορετικές περιόδους δόνησης ως συνάρτηση της  $V_{s,30}$  και της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης σε βραχώδες υπόβαθρο. Δυο από τις ερευνητικές ομάδες χρησιμοποίησαν τα μοντέλα των Walling et al. (2008) ώστε να περιορίσουν τη μη γραμμική εδαφική συμπεριφορά.



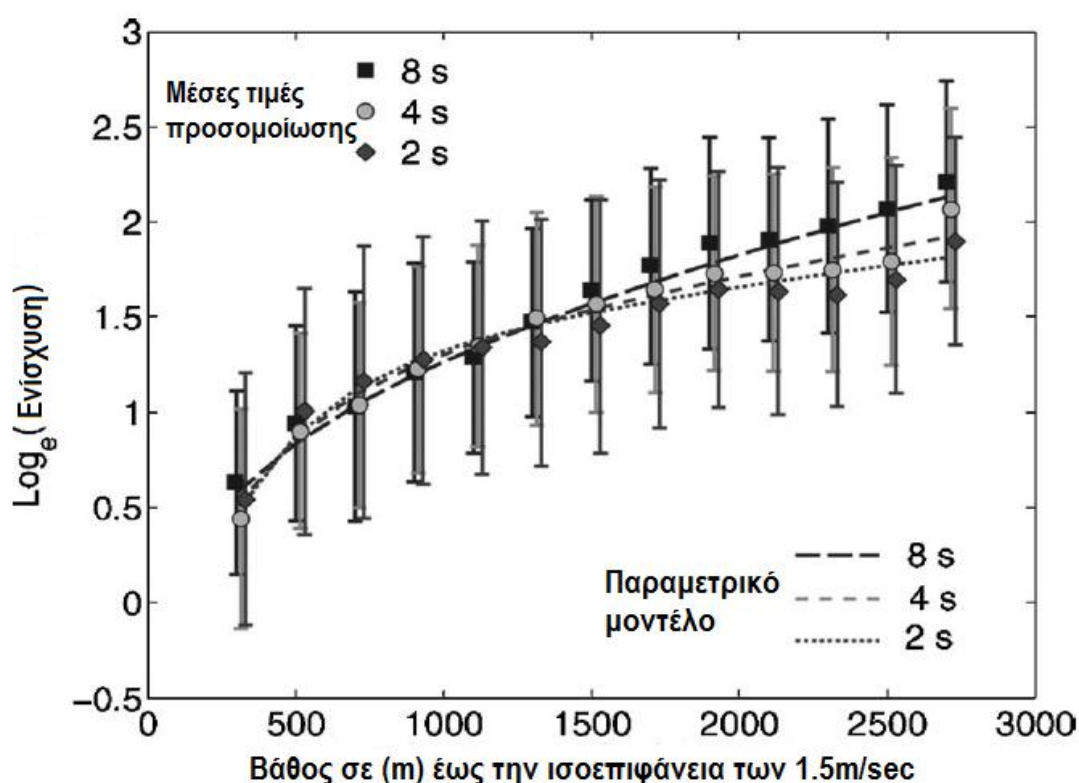
**Εικόνα 2.2:** Παράδειγμα ενίσχυσης της φασματικής επιτάχυνσης για περίοδο 0.2sec με προσομοίωση απόκρισης πεδίου χρησιμοποιώντας το εδαφικό μοντέλο «Peninsular range» (Walling et al. 2008).

#### 2.4.3. Τρισδιάστατη προσομοίωση βάσης

Οι Day et al. (2005; 2006; 2008) και ο Day (2005) διεξήγαγαν αντιπροσωπευτικές σειρές τρισδιάστατων εδαφικών προσομοιώσεων βάσης για βαθιές αποθέσεις λεκανών της νότιας Καλιφόρνια. Η γεωμετρία του ρήγματος βασίστηκε στο προσομοίωμα ρηγμάτων της κοινότητας SCEC και το τρισδιάστατο



μοντέλο ταχυτήτων βασίστηκε στο προσομοίωμα ταχυτήτων της κοινότητας SCEC (Magistrale et al. 2000). Οι φασματικές επιταχύνσεις από τις προσομοιώσεις κανονικοποιήθηκαν ως προς αυτές από τις προσομοιώσεις μοντέλων σκληρού βραχώδους υποβάθρου. Η **εικόνα 2.3** απεικονίζει μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις των μέσων ενισχύσεων βάσης στην πηγή, υπολογισμένων βάσει των προσομοιώσεων για τρεις διαφορετικές περιόδους ως συνάρτηση του βάθους για εδαφικό σκελετό με ταχύτητα διατμητικού κύματος ίση με 1.5km/sec. Οι ενισχύσεις ομοίως υπολογίστηκαν για 26 περιόδους από 2 μέχρι 10 δευτερόλεπτα και για ταχύτητες σχηματισμών 1km/sec, 1.5km/sec και 2.5km/sec. Οι Day et al. (2005; 2006; 2008) και ο Day (2005) ανέπτυξαν ένα παραμετρικό μοντέλο χαρακτηρισμού αυτών των ενισχύσεων, το οποίο παρουσιάζεται με διακεκομμένες καμπύλες στην **εικόνα 2.3**.



**Εικόνα 2.3:** Απεικόνιση της ενίσχυσης λεκάνης ως συνάρτηση του βάθους για 1.5m/sec ισοεπιφάνεια όπως προέκυψε από τρισδιάστατες προσομοιώσεις απόκρισης λεκάνης. Τα ολόκληρα σύμβολα υποδεικνύουν συντελεστές μέσης επιτάχυνσης ενώ οι μπάρες δίνουν τις τυπικές αποκλίσεις για τρεις διαφορετικές περιόδους. Οι διακεκομμένες καμπύλες είναι οι συντελεστές λεκάνης που υπολογίζονται από το παραμετρικό μοντέλο (Day et al. 2008).

Για την ενσωμάτωση της επιρροής βάσης στις σχέσεις εδαφικής κίνησης είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί το κατά πόσον το μέσο εδαφικό βραχώδες υπόβαθρο διαφέρει από το ιδανικό μοντέλο αναφοράς και το κατά πόσον το βάθος της λεκάνης μπορεί να συσχετίζεται με άλλες μεταβλητές που επηρεάζουν την εδαφική ενίσχυση, όπως η ταχύτητα διατμητικού κύματος. Μερικοί ερευνητές χρησιμοποίησαν αυτά τα αποτελέσματα για τη δημιουργία μοντέλων επίδρασης του



βάθους λεκάνης και του βάθους του βραχώδους υποβάθρου στην ενίσχυση της εδαφικής κίνησης.

#### 2.4.4. Προσδιορισμός της κατευθυντικότητας χρησιμοποιώντας ισόχρονη θεωρία

Βασιζόμενοι στην ισόχρονη διατύπωση της εδαφικής σεισμικής κίνησης (Spudlich και Frazer 1984), οι Spudlich και Chίου (2008) δημιούργησαν ένα μοντέλο πρόβλεψης ύπαρξης κατευθυντικότητας (IDP) βασισμένο στους νόμους της φυσικής ως εναλλακτική σε ένα μοντέλο που είχε προταθεί παλαιότερα από τους Somerville et al. (1997). Το πλεονέκτημα του νέου μοντέλου είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε θέση κοντινού πεδίου και σε οποιοδήποτε μηχανισμό διάρρηξης. Επίσης, οι Spudlich και Chίου (2008) ερεύνησαν την προτιμώμενη φόρμουλα επίδρασης του φαινομένου της κατευθυντικότητας στη βάση δεδομένων των νέων μοντέλων. Χρησιμοποιώντας δεδομένα μεγέθους μεγαλύτερου του 5.6 και για αποστάσεις μικρότερες των 70km κατέληξαν στο ότι το φαινόμενο της κατευθυντικότητας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως γραμμική συνάρτηση του IDP. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο και τα ολικά υπόλοιπα από τέσσερα νέα μοντέλα, δημιουργήθηκαν εμπειρικά μοντέλα για 10 φασματικές περιόδους στο εύρος των 0.5 με 10 δευτερολέπτων για κάθε μια από τις τέσσερις νέες σχέσεις απομείωσης. Τα τελικά μοντέλα ισοχρονικής κατευθυντικότητας προβλέπουν αδρά τις μισές επιδράσεις ρηγμάτων κανονικής διάρρηξης που προέβλεπε το μοντέλο των Somerville et al. (1997). Τα χωρικά προσομοιώματα των προβλεπόμενων επιδράσεων διαφέρουν σε πολλαπλά σημεία. Αυτά τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν ως διορθωτικοί συντελεστές στις αντίστοιχες σχέσεις απομείωσης ως μέσο ενσωμάτωσης του φαινομένου της κατευθυντικότητας στις προβλέψεις μέσης τιμής για τη μέση οριζόντια συνιστώσα των σχέσεων απομείωσης. Το μοντέλο ισοχρονικής κατευθυντικότητας μπορεί να επεκταθεί ώστε να χαρακτηρίζει την πόλωση της εδαφικής κίνησης η οποία μπορεί να εφαρμοστεί ως μέθοδος μετατροπής της προβλεπόμενης μέσης οριζόντιας κίνησης σε συγκεκριμένη κατεύθυνση, όπως για παράδειγμα στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

## 2.5 Αλληλεπιδράσεις του προγράμματος και αναθεωρήσεις

Η συνολική διάρκεια του προγράμματος ήταν πέντε χρόνια, ξεκινώντας από μια συνάντηση όλων των επιστημόνων τον Οκτώβριο του 2002. Δημιουργήθηκαν συνολικά 81-82 μονοήμερες συναντήσεις στην καθεμιά από τις οποίες συμμετείχαν περίπου 40-80 επιστήμονες και μηχανικοί κατά τη χρονική περίοδο 2003-2005. Οι αρχικές συναντήσεις εστίαζαν κυρίως στη συνολική διάρθρωση του προγράμματος και στη δημιουργία μιας ενιαίας βάσης δεδομένων, ενώ οι επόμενες στα δημιουργούμενα μοντέλα απομείωσης της εδαφικής κίνησης. Υπήρξαν πέντε ομάδες εργασίας, καθεμιά από τις οποίες αποτελούνταν από περίπου 4-13 επιστήμονες και μηχανικούς. Οι ομάδες συναντιόνταν αρκετά συχνά με σκοπό την επιθεώρηση των αποτελεσμάτων και τη συζήτηση των κυρίων ζητημάτων και καθεμιά έπαιρνε ανεξάρτητα αποφάσεις σχετικά με το μοντέλο της εδαφικής κίνησης και τις μεθόδους

και παραδοχές προσομοίωσης. Όμως, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ομάδων τα τελικά μοντέλα της εδαφικής κίνησης έχουν πάρα πολλές ομοιότητες.

Το γεωλογικό ινστιτούτο Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) διεξήγαγε έλεγχο των προτεινόμενων νέων μοντέλων απομείωσης. Η έρευνα εστίασε στην πιθανή ένταξη των νέων μοντέλων στους εθνικούς χάρτες εκτίμησης σεισμικού κινδύνου και κατάληξε στην υιοθέτηση μερικών από αυτά. Πολλές παρελθοντικές εκτιμήσεις του σεισμικού κινδύνου παρουσιάζουν αβεβαιότητες στην προσομοίωση της εδαφικής κίνησης καθώς χρησιμοποιούν συνδυασμό δημοσιευμένων ερευνών – σχέσεων. Η ασαφής (ή μερικές φορές σαφής) υπόθεση αυτής της μεθόδου είναι ότι σχέσεις διαφορετικών ερευνητών εκπροσωπούν διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης της πηγής του σεισμικού κραδασμού, της κατεύθυνσης διάδοσης και των επιδράσεων του πεδίου. Λόγω της αλληλεπίδρασης των ομάδων έρευνας των νέων μοντέλων απομείωσης της εδαφικής κίνησης, το γεωλογικό ινστιτούτο συνέστησε ότι η χρήση των μέσων μοντέλων δεν μπορεί να υποτεθεί ότι εξαλείφει την επιστημονική αβεβαιότητα, η οποία πρέπει να ληφθεί ξεχωριστά υπόψη. Επιπρόσθετα, το ινστιτούτο ανέπτυξε μια ενισχυμένη διαδικασία ενσωμάτωσης της επιστημονικής αβεβαιότητας στα νέα μοντέλα απομείωσης εδαφικής κίνησης των εθνικών χαρτών.

## 2.6 Παρουσίαση της μελέτης των Boore και Atkinson

### 2.6.1. Εισαγωγή

Οι εξισώσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που δίνουν την εδαφική κίνηση ή τα φασματικά μεγέθη ως συνάρτηση του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης από το ρήγμα, είναι σημαντικά εργαλεία στην ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας. Οι εν λόγω εξισώσεις δημιουργούνται εμπειρικά μέσω της μείωσης των καταγεγραμμένων δεδομένων ισχυρής εδαφικής κίνησης σε συνάρτηση με το μέγεθος, την απόσταση και άλλες πιθανές μεταβλητές.

Οι συγκεκριμένοι ερευνητές πρότειναν εξισώσεις εδαφικής κίνησης για τη μέση οριζόντια συνιστώσα ως συνάρτηση του μεγέθους του σεισμού, της απόστασης από την πηγή, της τοπικής ταχύτητας του διατμητικού κύματος και του τύπου του ρήγματος και αφορούν τη μέση οριζόντια συνιστώσα εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και φασματικής επιτάχυνσης με απόσβεση 5% για περιόδους μεταξύ 0.01sec και 10sec. Οι εξισώσεις παράχθηκαν από εμπειρική απομείωση δεδομένων της νέας εκτεταμένης βάσης του αντισεισμικού ερευνητικού κέντρου του Ειρηνικού που αφορά επιφανειακούς σεισμούς σε ενεργές τεκτονικά περιοχές ανά την υφήλιο και αντιπροσωπεύουν μια σημαντική αναβάθμιση των εξισώσεων που είχαν προτείνει οι Boore et al. (1997), οι οποίες βασίζονταν σε περιορισμένο αριθμό καταγραφών σε σύγκριση με τις καταγραφές της συγκεκριμένης μελέτης. Η αύξηση των δεδομένων (περίπου 14 φορές περισσότερα) είναι εξαιρετικά σημαντική για τις προκύπτουσες επιταχύνσεις καθώς η ποσότητά τους επιδρά στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, ειδικότερα ως προς τη συσχέτιση με το μέγεθος και την απόσταση από το ρήγμα και στην εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας.

Για περιόδους μικρότερες του 1sec στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν 1574 καταγραφές από 58 κύρια σεισμικά γεγονότα σε εύρος αποστάσεων από 0km έως

400km (ο αριθμός των διαθέσιμων δεδομένων μειωνόταν όσο η περίοδος αυξανόταν). Οι κυρίαρχες μεταβλητές πρόβλεψης είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής ( $M$ ), η κοντινότερη οριζόντια απόσταση στην επιφανειακή εμφάνιση του ρήγματος ( $R_{JB}$  – απόσταση Joyner-Boore) και η μέση ταχύτητα διατμητικού κύματος από την εδαφική επιφάνεια μέχρι το βάθος των 30m ( $V_{s,30}$ ). Οι εξισώσεις είναι εφαρμόσιμες για εύρος τιμών μεγέθους  $M=5-8$ , απόστασης  $R_{JB}<200km$  και ταχύτητας  $V_{s,30}=180-1300m/s$ .

### 2.6.2. Δεδομένα

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι όλη η βάση δεδομένων των Chiou et al. (2008) η οποία ονομάζεται «NGA flatfile». Επίσης, έγινε χρήση των συγκεντρωμένων δεδομένων των J. Boatwright και L. Seekins για τρία μικρά σε μέγεθος γεγονότα, των καταγραφών από το Parkfield της Καλιφόρνια (2004) για τον κύριο κραδασμό του σεισμού από το ψηφιακό σύστημα καταγραφών του Berkeley κοντά στο Parkfield καθώς επίσης και των καταγραφών ισχυρής εδαφικής κίνησης του γεωλογικού ινστιτούτου των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτά τα πρόσθετα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση της συνάρτησης της απομείωσης συναρτήσει της απόστασης από το ρήγμα όπου περιορίζονταν οι απομειωτικοί συντελεστές αλλά δεν λήφθηκαν υπόψη στην τελική απομείωση.

Οι παράμετροι εδαφικής κίνησης που αποτελούν εξαρτημένες μεταβλητές είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ( $pga$ ), η μέγιστη εδαφική ταχύτητα ( $pgv$ ) και η φασματική απόκριση για 5% απόσβεση ( $psa$ ), όλες για την οριζόντια συνιστώσα. Στη συγκεκριμένη έρευνα οι μεταβλητές δεν είναι ο απλός γεωμετρικός μέσος των δυο οριζόντιων συνιστωσών αλλά η παράμετρος του γεωμετρικού μέσου που δεν εξαρτάται από τη διεύθυνση των καταγραφικών οργάνων της οριζόντιας κίνησης. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε συστήθηκε πρώτα από τους Boore et al. (2006) και αρχικά καθορίστηκε ένας αριθμός παραμέτρων ανεξάρτητων από τη διεύθυνση και χρησιμοποιήθηκε η επονομαζόμενη παράμετρος  $GMRotI$  ως ο γεωμετρικός μέσος καθοριζόμενος από το 50% των τιμών των γεωμετρικών μέσων που υπολογίστηκαν για όλες τις μη περιπτές γωνίες περιστροφής και όλες τις περιόδους που είναι μικρότερες από τη μέγιστη χρησιμοποιούμενη περίοδο. Το πλεονέκτημα της χρήσης μιας ανεξάρτητης από τη διεύθυνση παραμέτρου της οριζόντιας σεισμικής συνιστώσας μπορεί να εκτιμηθεί θεωρώντας την περίπτωση όπου η κίνηση είναι εντελώς πολωμένη κατά τη μια διεύθυνση. Στην εν λόγω περίπτωση, ο γεωμετρικός μέσος μπορεί να πάρει μηδενική τιμή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, παρ' όλα αυτά, οι διαφορές μεταξύ του γεωμετρικού μέσου και της παραμέτρου  $GMRotI$  δεν είναι μεγάλες, άρα ως μεταβλητή απόκρισης μπορεί να θεωρηθεί μια μέση οριζόντια συνιστώσα.

Η συγκεκριμένη μελέτη δεν περιλαμβάνει εξισώσεις για την πρόβλεψη των απομειωμένων τιμών της μέγιστης εδαφικής μετακίνησης ( $pgd$ ). Η εν λόγω παράμετρος είναι έντονα ευαίσθητη στο φιλτράρισμα στις μικρές συχνότητες (low-cut) που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία των δεδομένων, οπότε δε μπορεί να θεωρηθεί μια σταθερή παράμετρος της εδαφικής απόκρισης. Επιπρόσθετα, υπάρχει μια προκατάληψη όσον αφορά τις τιμές της μετακίνησης που προκύπτουν από τη

νέα βάση δεδομένων του προγράμματος αναφορικά με τις καταγραφές με φιλτράρισμα των μικρών συχνοτήτων και οι ερευνητές συστήνουν εναλλακτικά τη χρήση του φάσματος απόκρισης στις μεγάλες περιόδους αντί των τιμών της εδαφικής μετακίνησης.

Η συγκεκριμένη ανάλυση, βασιζόμενη σε ένα πλήθος κριτηρίων, απέκλεισε ορισμένες καταγραφές με ποιο σημαντική αυτή της μη λήψης των καταγραφών των μετασεισμών. Οι μετασεισμοί δεν χρησιμοποιήθηκαν λόγω της διαφοράς της απομείωσης σε σχέση με τις καταγραφές του κυρίου σεισμού, όπως υποστηρίζουν οι Boore και Atkinson (1989) και ο Atkinson (1993). Αυτός ο περιορισμός μείωσε τη βάση δεδομένων περίπου στο μισό λόγω των πολλών καταγραφών μετασεισμών του σεισμού του Chi-Chi στην Ταιβάν (1999). Επίσης, μεταβλητές απόκρισης αποκλείστηκαν για περιόδους ταλάντωσης μεγαλύτερες της  $T_{max}$ . Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον **πίνακα 2.1**.

Μια πιθανή αντίδραση σε σχέση με τα αποτελέσματα της απομείωσης μπορεί να προκύψει από το ότι δεν συμπεριλήφθηκαν δεδομένα με μικρό πλάτος ταλάντωσης για εύρος αποστάσεων στο οποίο δεδομένα μεγαλύτερων πλατών του ίδιου σεισμικού γεγονότος χρησιμοποιήθηκαν. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για το συγκεκριμένο αποκλεισμό δεδομένων. Αρχικά, μπορεί να έχουν τιμή μικρότερη από την τιμή ταλάντωσης των οργάνων καταγραφής, άρα η καταγραφή θα ξεκινήσει σε κάποιο χρονικό σημείο κατά τη διάρκεια της άφιξης του κύματος S. Ακόμα, μπορεί οι τιμές τους να είναι πολύ μικρές για να διακριτοποιηθούν ή να είναι μικρότερες από την τιμή θορύβου που χρησιμοποιείται ώστε να εφαρμοστεί το φιλτράρισμα των μικρών συχνοτήτων (low-cut filter). Οποιαδήποτε συλλογή καταγραφών σε μικρό εύρος αποστάσεων από την πηγή μπορεί να διαθέτει μεγάλο εύρος τιμών λόγω της φυσικής μεταβλητότητας της εδαφικής κίνησης. Κάποιες τιμές που βρίσκονται κάτω από το αποκοπτόμενο μέγεθος αποκλείονται αναγκαστικά. Συμπεριλαμβάνοντας μόνο τις μεγαλύτερες εδαφικές κινήσεις (πάνω από το αποκοπτόμενο μέγεθος) θα υπάρχει πρόβλημα στις προκύπτουσες σχέσεις των εδαφικών μετακινήσεων καθώς θα υπάρχει τάση για πιο γρήγορη μείωση της μετακίνησης με την απόσταση, κάτι που δε συμβαδίζει με τις πραγματικές καταγραφές. Στη συγκεκριμένη έρευνα το πρόβλημα αυτό παρακάμφθηκε αποκλείοντας τις καταγραφές σταθμών που δεν είχαν συντονιστεί και βρίσκονταν πιο κοντά στο ρήγμα από την ελάχιστη καθορισμένη κοντινότερη απόσταση. Τέλος, αντιδράσεις μπορεί να υπάρξουν όσον αφορά τις ψηφιακές καταγραφές λόγω της παρουσίας θορύβου στις μεγάλες περιόδους, ο οποίος είναι ανεξάρτητος της απόστασης της πηγής από το σταθμό. Κατά συνέπεια, η προκύπτουσα εξάρτηση από την απόσταση για μικρούς σεισμούς και μεγάλες περιόδους μπορεί να υπόκειται σε βραδύτερη μείωση από ότι θα υπήρχε στην πραγματικότητα.

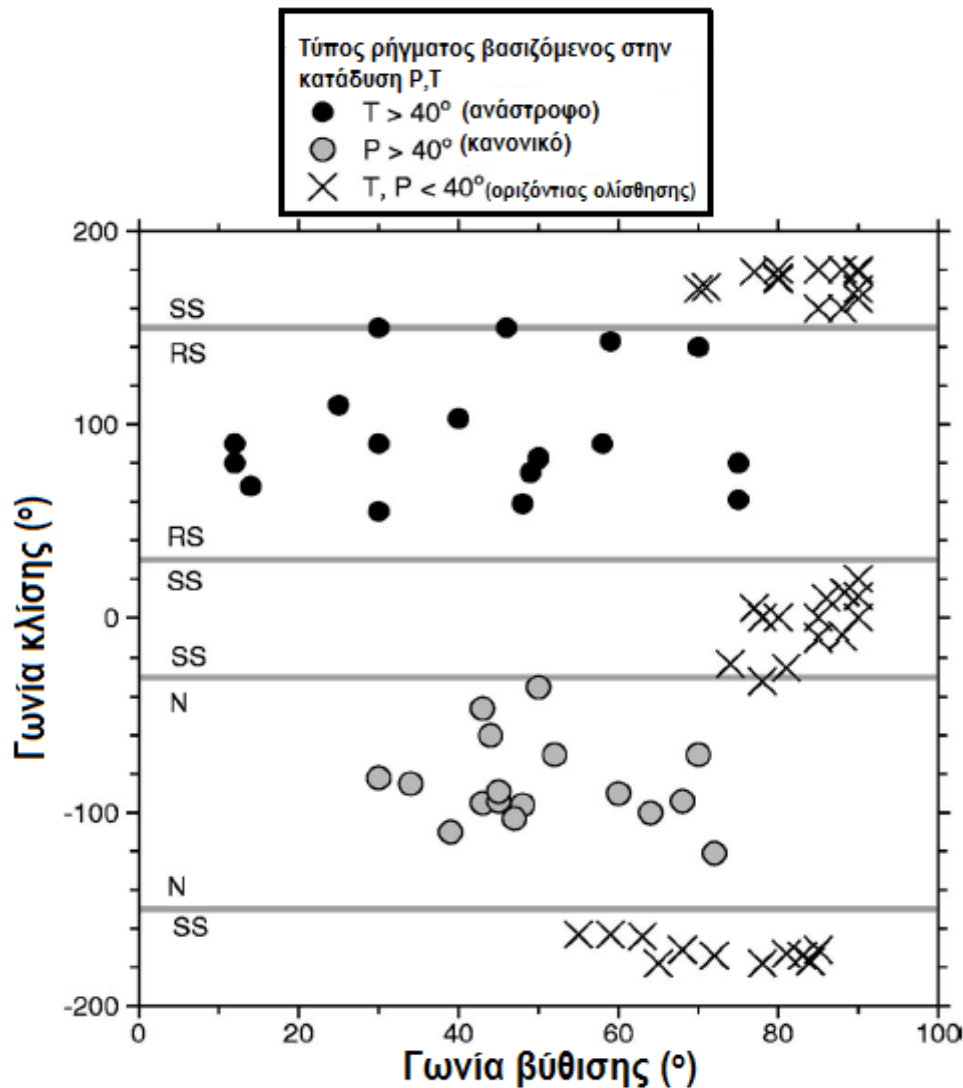
NAME	YEAR	MODY	M	DEPTH		TYPE	NOBS	RJB	EQID
				DIP	(km)			RANGE	
Parkfield	1966	0628	6.19	90	10	S	4	10–18	25
Borrego Mtn	1968	0409	6.63	78	8	S	2	129–222	28
San Fernando	1971	0209	6.61	50	13	R	31	14–218	30
Hollister-03	1974	1128	5.14	90	6	S	2	9–10	34
Friuli, Italy-01	1976	0506	6.50	12	5	R	5	15–102	40
Tabas, Iran	1978	0916	7.35	25	6	R	7	0–194	46
St Elias, Alaska	1979	0228	7.54	12	16	R	2	26–80	142
Coyote Lake	1979	0806	5.74	80	10	S	7	0–34	48
Norcia, Italy	1979	0919	5.90	64	6	N	3	2–31	49
Imperial Valley-06	1979	1015	6.53	80	10	S	33	0–49	50
Livermore-01	1980	0124	5.80	85	12	S	5	15–53	53
Anza (Horse Canyon)-01	1980	0225	5.19	70	14	S	5	6–39	55
Mammoth Lakes-01	1980	0525	6.06	50	9	N	2	1–5	56
Victoria, Mexico	1980	0609	6.33	90	11	S	4	6–39	64
Irpinia, Italy-01	1980	1123	6.90	60	10	N	12	7–60	68
Westmorland	1981	0426	5.90	90	2	S	6	6–19	73
Coalinga-01	1983	0502	6.36	30	5	R	44	24–55	76
Borah Peak, ID-01	1983	1028	6.88	52	16	N	2	83–85	87
Morgan Hill	1984	0424	6.19	90	9	S	24	3–71	90
Lazio-Abruzzo, Italy	1984	0507	5.80	48	14	N	5	13–49	91
Hollister-04	1986	0126	5.45	90	9	S	3	11–13	98
N Palm Springs	1986	0708	6.06	46	11	R	30	0–78	101
Chalfant Valley-01	1986	0720	5.77	90	7	S	5	6–24	102
Chalfant Valley-02	1986	0721	6.19	55	10	S	10	6–51	103
San Salvador	1986	1010	5.80	85	11	S	2	2–4	108
Whittier Narrows-01	1987	1001	5.99	30	15	R	106	0–82	113
Superstition Hills-02	1987	1124	6.54	90	9	S	11	1–27	116
Loma Prieta	1989	1018	6.93	70	18	R	73	0–117	118
Upland	1990	0228	5.63	77	5	S	3	7–72	143
Manjil, Iran	1990	0620	7.37	88	19	S	7	13–175	144
Sierra Madre	1991	0628	5.61	50	12	R	8	3–46	145
Roermond, Netherlands	1992	0413	5.30	68	15	N	3	55–101	122
Cape Mendocino	1992	0425	7.01	14	10	R	6	0–40	123
Landers	1992	0628	7.28	90	7	S	68	2–190	125
Big Bear-01	1992	0628	6.46	85	13	S	39	7–147	126
Little Skull Mtn, NV	1992	0629	5.65	70	12	N	8	14–99	152
Northridge-01	1994	0117	6.69	40	18	R	154	0–148	127
Kobe, Japan	1995	0116	6.90	85	18	S	12	0–158	129
Kozani, Greece-01	1995	0513	6.40	43	13	N	3	14–79	130
Dinar, Turkey	1995	1001	6.40	45	5	N	4	0–255	134

**Πίνακας 2.1:** Γεγονότα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση για περίοδο 0.2sec. Δίνεται ο τύπος του σεισμού (S: ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, N: ρήγμα κατακόρυφης βύθισης, R: ανάστροφο ρήγμα), ο αριθμός των παρατηρήσεων (NOBS), το εύρος των αποστάσεων  $R_{JB}$  σε km και ο αριθμός καταγραφής της βάσης δεδομένων.

NAME	YEAR	MODY	M	DEPTH		TYPE	NOBS	RJB	
				DIP	(km)			RANGE	EQID
Northwest China-01	1997	0405	5.90	68	23	S	2	12–49	153
Northwest China-02	1997	0406	5.93	30	31	N	2	20–37	154
Northwest China-04	1997	0415	5.80	43	22	N	2	21–35	156
Kocaeli, Turkey	1999	0817	7.51	88	15	S	26	1–316	136
Chi-Chi, Taiwan	1999	0920	7.62	30	7	R	380	0–169	137
Hector Mine	1999	1016	7.13	77	5	S	82	10–233	158
Düzce, Turkey	1999	1112	7.14	65	10	S	22	0–188	138
Yountville	2000	0903	5.00	90	10	S	24	8–94	160
Big Bear-02	2001	0210	4.53	90	9	S	41	22–92	161
Mohawk Val, Portola	2001	0810	5.17	81	4	S	6	67–126	162
Anza-02	2001	1031	4.92	78	15	S	72	10–133	163
Gulf of California	2001	1208	5.70	59	10	S	11	72–130	164
CA/Baja Border Area	2002	0222	5.31	74	7	S	9	40–97	165
Gilroy	2002	0514	4.90	84	10	S	34	2–130	166
Yorba Linda	2002	0903	4.27	88	7	S	12	6–36	167
Nenana Mountain, Alaska	2002	1023	6.70	90	4	S	33	105–280	168
Denali, Alaska	2002	1103	7.90	71	5	S	23	0–276	169
Big Bear City	2003	0222	4.92	72	6	S	33	24–146	170

Πίνακας 2.1: Συνέχεια

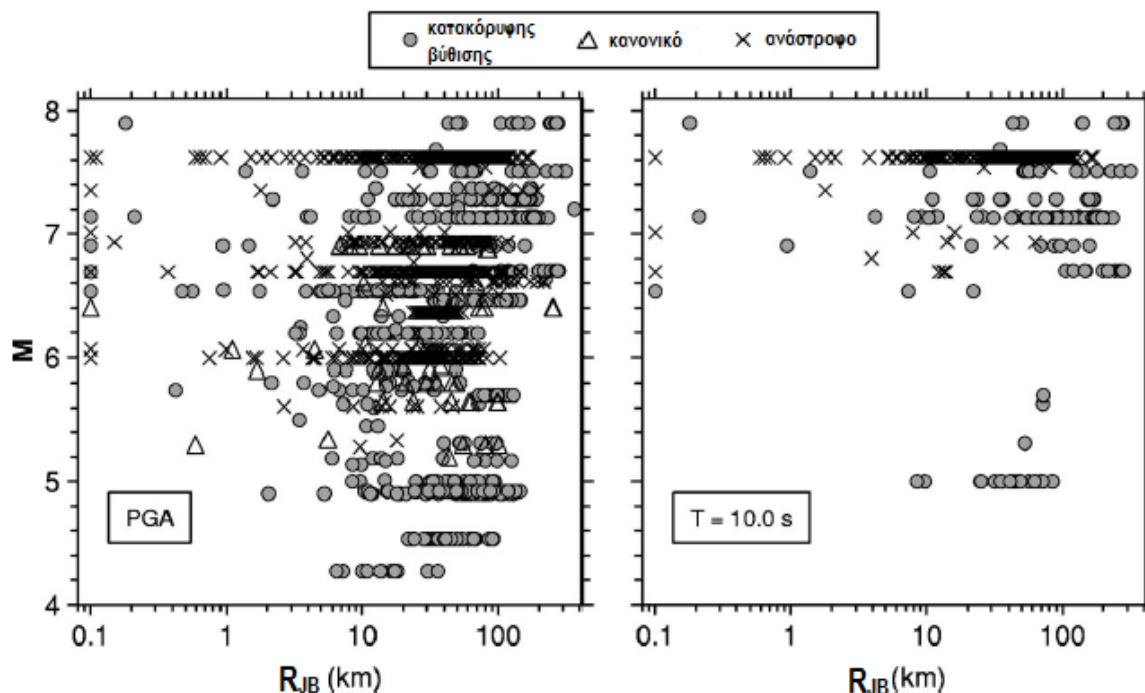
Οι κυριότερες μεταβλητές πρόβλεψης για το χαρακτηρισμό μιας περιοχής (ανεξάρτητες μεταβλητές της μειωτικής ανάλυσης) είναι το μέγεθος του σεισμικού κραδασμού ( $M$ ), η απόσταση Joyner – Boore ( $R_{JB}$  – κοντινότερη απόσταση στην επιφανειακή εμφάνιση του ρήγματος) και η ταχύτητα διατμητικού κύματος  $V_{s,30}$  (μέση ταχύτητα της εδαφικής στήλης ύψους 30m υπολογισμένη ως αντίστροφη της διατμητικής βραδύτητας για την ίδια εδαφική στήλη). Θεωρήθηκε επίσης η επίδραση του τύπου του ρήγματος όπως αυτή καθορίζεται από τη βύθιση των αξόνων  $P$  και  $T$  της **εικόνας 2.4**. Ενώ υπάρχουν ορισμένα πλεονεκτήματα κατά τη χρήση των  $P$  και  $T$  αξόνων, η συγκεκριμένη εικόνα δείχνει ότι η απλή κατηγοριοποίηση με γωνίες κλίσης έως  $30^\circ$  από την κατακόρυφο (ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης), γωνίες από  $30^\circ$  μέχρι  $150^\circ$  (ανάστροφα ρήγματα) και γωνίες από  $-30^\circ$  μέχρι  $-150^\circ$  (κανονικά ρήγματα) δίνει ουσιαστικά τα ίδια αποτελέσματα με την κατηγοριοποίηση κατά τους άξονες  $P$  και  $T$ .



**Εικόνα 2.4:** Κατανομή των καταγραφών βάσει των γωνιών κλίσης και βύθισης. Οι οριζόντιες γκρι γραμμές υποδηλώνουν τα όρια μεταξύ των διαφορετικών τύπων ρηγμάτων και τα σύμβολα υποδεικνύουν την κατηγοριοποίηση κατά άξονες P και T.

Αντιπροσωπευτικές κατανομές μεγέθους και απόστασης από το ρήγμα που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη φαίνονται στην **εικόνα 2.5**, όπου τα εκάστοτε σύμβολα αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς τύπους ρηγμάτων. Ο συνολικός αριθμός καταγραφών είναι 1574 για περιόδους μέχρι 1sec με μια μικρή αύξηση μέχρι τα 2sec και μια ταχεία μείωση στον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων για περιόδους άνω των 2sec. Η κατανομή των δεδομένων ανάλογα με την εκάστοτε μεταβλητή επηρεάζει τις προκύπτουσες εξισώσεις. Τονίζεται ότι υπάρχει έλλειψη δεδομένων στο κοντινό πεδίο μικρών σε μέγεθος σεισμών με αποτέλεσμα οι εδαφικές κινήσεις κοντά στην πηγή για μικρά γεγονότα να μην δεσμεύονται από τις μετρήσεις. Για μεγάλες περιόδους ταλάντωσης υπάρχουν λιγοστά δεδομένα για μικρού μεγέθους σεισμούς σε όλες τις αποστάσεις άρα η τροποποίηση με το μέγεθος στις μεγάλες περιόδους είναι κακώς προσδιορισμένη για μικρά μεγέθη.





**Εικόνα 2.5:** Κατανομή των καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των εξισώσεων των PGA και PSA για περίοδο 10sec, διαφορισμένες βάσει του τύπου του ρήγματος (σημεία με  $R_{JB}$  μικρότερη των 0.1km σχεδιάστηκαν στα 0.1km). Οι γενικές κατανομές για περιόδους μικρότερες των 4sec είναι όμοιες με εκείνες της PGA αν και υπάρχουν λιγότερες καταγραφές (ο αριθμός των καταγραφών μειώνεται σημαντικά για περιόδους μεγαλύτερες από 2sec).

Το μεγαλύτερο εύρος μεγεθών παρουσιάζεται για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (4.3-7.9) και το στενότερο εύρος για κατακόρυφης βύθισης (5.3-6.9). Αυτό υποδηλώνει ότι η τροποποίηση με το μέγεθος είναι καλύτερα προσδιορισμένη για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης παρά για κατακόρυφης βύθισης, ένα πρόβλημα που μπορεί να παρακαμφθεί χρησιμοποιώντας μια κοινή τροποποίηση βάσει του σεισμικού μεγέθους για όλους τους τύπους των ρηγμάτων.

Ο μεγαλύτερος όγκος δεδομένων προέρχεται από περιοχές δεδομένων με έδαφος C και D, τα οποία κυμαίνονται από μαλακό βράχο μέχρι σφιγρά εδάφη ενώ πολύ λίγα δεδομένα προέρχονται από περιοχές με έδαφος A (σκληρό βράχο).

### 2.6.3. Εξισώσεις

Ακολουθώντας τη φιλοσοφία των Boore et al. (1993; 1994; 1997) πρέπει να προκύψουν εύκολα εφαρμόσιμες εξισώσεις με τον ελάχιστο αριθμό μεταβλητών. Η συγκεκριμένη έρευνα ξεκίνησε από τις απλούστερες υπάρχουσες εξισώσεις, οι οποίες έγιναν πολυπλοκότερες όπως απαιτούνταν από συγκρίσεις της προβλεπόμενης εδαφικής κίνησης με την παρατηρηθείσα στο πεδίο καταγραφών. Η επιλογή της συναρτησιακής σχέσης καθοδηγήθηκε από υποκειμενικό έλεγχο των παραμέτρων των δεδομένων. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις συσχέτισης της απομείωσης της ενίσχυσης συναρτήσεως της απόστασης στο μακρινό πεδίο αποτελούν απλές συναρτήσεις, ανεξάρτητες του μεγέθους και χωρίς να παρουσιάζουν καμπυλότητα σε μεγάλες αποστάσεις. Η συγκεκριμένη μορφή των



εξισώσεων θεωρήθηκε επαρκής για εύρος αποστάσεων μεγαλύτερων των 80km. Τα δεδομένα, ωστόσο, αποδεικνύουν ότι η καμπυλότητα των εξισώσεων είναι απαραίτητη για την προσομοίωση της επίδρασης της ανελαστικής απομείωσης σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 80km. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα δείχνουν ότι ο γεωμετρικός παράγοντας εξάπλωσης εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος. Για να ενσωματωθούν αυτές οι τάσεις στις εξισώσεις προστέθηκε μια ανελαστική συνιστώσα στην οποία ο λογάριθμος του  $y$  ( $\ln y$ ) είναι ανάλογος της απόστασης  $R$  καθώς και μια μεταβλητή εξαρτώμενη από το μέγεθος στην οποία το  $\ln y$  είναι ανάλογο του  $\ln R$  και ο συντελεστής αναλογίας είναι συνάρτηση του σεισμικού μεγέθους. Αυτά τα πρόσθετα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στις εξισώσεις να προβλέψουν την ενίσχυση μέχρι και σε απόσταση 400km. Οι προκύπτουσες εξισώσεις δεν περιλαμβάνουν συντελεστές σχετικούς με τη διάρρηξη, το αν βρισκόμαστε ανάντη ή κατόντη και το βάθος λεκάνης, λόγω του ότι η ανάλυση υπολοίπων δεν αποδεικνύει ότι η προσθήκη αυτών των παραμέτρων θα βελτίωνε σημαντικά τα αποτελέσματα. Η προτεινόμενη εξίσωση είναι η:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S,30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \cdot \sigma_T \quad [1]$$

Στη συγκεκριμένη εξίσωση τα  $F_M$ ,  $F_D$  και  $F_S$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη μεταβολή με το σεισμικό μέγεθος, τη συνάρτηση με την απόσταση από το ρήγμα και την τοπική ενίσχυση. Το  $M$  υποδεικνύει το σεισμικό μέγεθος, το  $R_{JB}$  είναι η απόσταση Joyner-Boore, δηλαδή η κοντινότερη απόσταση στην επιφανειακή προβολή του ρήγματος (ισούται με την επικεντρική απόσταση για γεγονότα με μέγεθος  $M < 6$ ) και η ταχύτητα  $V_{S,30}$  αποτελεί το αντίστροφο της μέσης διατμητικής βραδύτητας εδαφικής στήλης βάθους 30m. Η μεταβλητή  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής της τυπικής απόκλισης η οποία προσδιορίζεται ως συνάρτηση της αβεβαιότητας  $\sigma$  των δεδομένων και της αβεβαιότητας  $\tau$  της διαδικασίας:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad [2]$$

Η συνάρτηση της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$F_D(R_{JB}, M) = [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \cdot \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + c_3 \cdot (R - R_{ref}) \quad [3]$$

όπου 
$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2} \quad [4]$$

και  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $M_{ref}$ ,  $R_{ref}$  και  $h$  είναι συντελεστές που καθορίζονται στην ανάλυση.

Η μεταβολή με το σεισμικό μέγεθος δίνεται από:

α)  $M \leq M_h$

$$F_M(M) = e_1 \cdot U + e_2 \cdot SS + e_3 \cdot NS + e_4 \cdot RS + e_5 \cdot (M - M_h) + e_6 \cdot (M - M_h)^2 \quad [5a]$$

β)  $M > M_h$

$$F_M(M) = e_1 \cdot U + e_2 \cdot SS + e_3 \cdot NS + e_4 \cdot RS + e_7 \cdot (M - M_h) \quad [5b]$$

όπου  $U$ ,  $SS$ ,  $NS$  και  $RS$  είναι τεχνητές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν τους διαφορετικούς τύπους ρηγμάτων ως μη καθορισμένα ( $U$ ), οριζόντιας ολίσθησης ( $SS$ ), κανονικά ( $NS$ ) και ανάστροφα ( $RS$ ) (βλέπε **πίνακα 2.2**) και  $M_h$  είναι το καθοριστικό μέγεθος για το σχήμα της κλιμάκωσης μεγέθους, το οποίο προσδιορίζεται κατά την ανάλυση.

Fault Type	U	SS	NS	RS
Unspecified	1	0	0	0
Strike-slip	0	1	0	0
Normal	0	0	1	0
Thrust/reverse	0	0	0	1

**Πίνακας 2.2:** Τιμές των παραμέτρων των τύπων των ρηγμάτων

Η συνάρτηση της ενίσχυσης πεδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$F_S = F_{LIN} + F_{NL} \quad [6]$$

όπου τα  $F_{LIN}$  και  $F_{NL}$  είναι η γραμμική και μη γραμμική συνιστώσα αντίστοιχα.

Η γραμμική συνιστώσα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$F_{LIN} = b_{lin} \cdot \ln \left( \frac{V_{s,30}}{V_{ref}} \right) \quad [7]$$

όπου το  $b_{lin}$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την περίοδο και  $V_{ref}$  είναι η διατμητική ταχύτητα αναφοράς ( $=760m/sec$ ) για την οριακή τιμή των εδαφών B και C. Οι εν λόγω συντελεστές καθορίστηκαν βάσει της έρευνας των Choi και Stewart (2005) και βασίζονται σε εμπειρικές συσχετίσεις.

Η μη γραμμική συνιστώσα προσδιορίζεται από τη σχέση:

α)  $pga_{4nl} \leq \alpha_1$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \cdot \ln \left( pga_{low} / 0.1 \right) \quad [8a]$$

β)  $\alpha_1 < pga_{4nl} \leq \alpha_2$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \cdot \ln \left( pga_{low} / 0.1 \right) + c \cdot \left[ \ln \left( pga_{4nl} / \alpha_1 \right) \right]^2 + d \cdot \left[ \ln \left( pga_{4nl} / \alpha_1 \right) \right]^3 \quad [8b]$$

γ)  $\alpha_2 < pga_{4nl}$ :

$$F_{NL} = b_{nl} \cdot \ln \left( pga_{4nl} / 0.1 \right) \quad [8c]$$

όπου τα  $\alpha_1 (=0.03g)$  και  $\alpha_2 (=0.09g)$  αποτελούν κατώτατα επίπεδα για τη γραμμική και τη μη γραμμική ενίσχυση αντίστοιχα, η  $pga_{low}$  ( $=0.06g$ ) είναι μεταβλητή μετάβασης από τη γραμμική στη μη γραμμική περιοχή και η  $pga_{4nl}$  είναι η προβλεπόμενη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση σε  $g$  για ταχύτητα διατμητικού κύματος αναφοράς  $V_{ref}=760m/sec$  όπως προκύπτει από την **εξίσωση [1]** για  $F_S=0$  και  $\varepsilon=0$ . Προέκυψαν τρεις εξισώσεις μη γραμμικής συνιστώσας της απόκρισης (**εξισώσεις 8a, 8b και 8c**) για δυο λόγους. Πρώτον, για να αποτραπεί άπειρη αύξηση της μη γραμμικής ενίσχυσης με τη μείωση της  $pga_{4nl}$  και δεύτερον για να ομαλοποιηθεί η μετάβαση από τη γραμμική στη μη γραμμική συμπεριφορά. Οι συντελεστές  $c$  και  $d$  της **εξίσωσης 8b** προσδιορίζονται από:

$$c = (3 \cdot \Delta y - b_{nl} \cdot \Delta x) / \Delta x^2 \quad [9]$$

και 
$$d = -(2 \cdot \Delta y - b_{nl} \cdot \Delta x) / \Delta x^3 \quad [10]$$

$$\text{όπου } \Delta x = \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) \quad [11] \quad \text{και} \quad \Delta y = b_{nl} \cdot \ln\left(\frac{a_2}{p_{ga\_low}}\right) \quad [12]$$

Η μη γραμμική κλίση  $b_{nl}$  είναι συνάρτηση της περιόδου και της  $V_{s,30}$  και δίνεται από:

$$\alpha) V_{s,30} \leq V_1: \quad b_{nl} = b_1 \quad [13a]$$

$$\beta) V_1 < V_{s,30} \leq V_2: \quad b_{nl} = (b_1 - b_2) \cdot \frac{\ln(V_{s,30}/V_2)}{\ln(V_1/V_2)} + b_2 \quad [13b]$$

$$\gamma) V_2 < V_{s,30} < V_{ref}: \quad b_{nl} = b_2 \cdot \frac{\ln(V_{s,30}/V_{ref})}{\ln(V_2/V_{ref})} \quad [13c]$$

$$\delta) V_{ref} \leq V_{s,30}: \quad b_{nl} = 0.0 \quad [13d]$$

όπου  $V_1=180m/sec$ ,  $V_2=300m/sec$  και  $b_1$  και  $b_2$  είναι συντελεστές εξαρτώμενοι της περιόδου.

#### 2.6.4. Καθορισμός συντελεστών

Οι επιλεγμένες μεταβλητές απόκρισης των νέων εξισώσεων αρχικά διορθώθηκαν ώστε να εξασφαλίσουν τιμές ισοδύναμες των παρατηρήσεων πεδίου για διατμητική ταχύτητα αναφοράς  $V_{ref}=760m/sec$  και χρήση των **εξισώσεων 6, 7, 8a-8c, 9-12, και 13a-13d** και μια εξίσωση για την  $pga_{nl}$  και χρήση μόνο των δεδομένων που πληρούν τις συνθήκες  $R_{JB} \leq 80KM$  και  $V_{s,30} > 360m/sec$ . Έπειτα, οι διορθωμένες παρατηρήσεις πεδίου απομειώθηκαν σύμφωνα με την **εξίσωση [1]** ώστε να καθοριστούν τα  $F_D$  και  $F_M$ . Λόγω του ότι όλες οι παρατηρήσεις είχαν διορθωθεί βάσει της συνθήκης αναφοράς, απλοποιώντας την παλινδρόμηση θέτουμε  $F_S=0$ . Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας δυο στάδια παλινδρόμησης σύμφωνα με τους Joyner και Boore (1993, 1994). Το πρώτο στάδιο καθορίζει την εξάρτηση από την απόσταση από το ρήγμα και το δεύτερο την εξάρτηση από το σεισμικό μέγεθος. Όλες οι παλινδρομήσεις έγιναν περίοδο-περίοδο και δεν υπήρξε ομαλοποίηση των συντελεστών που καθορίστηκαν από την ανάλυση παλινδρόμησης (αν και ορισμένοι συντελεστές περιορισμού ομαλοποιήθηκαν).

Λόγω του ότι οι διορθώσεις που αφορούν την ενίσχυση που υφίσταται λόγω της θέσης της καταγραφής έγιναν πριν τις παλινδρομήσεις σε πρώτο και δεύτερο στάδιο, ο καθορισμός των συντελεστών της ενίσχυσης λόγω θέσης έγινε πριν από όλα. Οι συντελεστές βρίσκονται στους **πίνακες 2.3 και 2.4** και σημειώνεται ότι για την ταχύτητα αναφοράς  $V_{ref}=760m/sec$  θεωρείται  $F_{LIN}=F_{NL}=F_S=0$ .

Γι' αυτό το λόγο η εδαφική ενίσχυση καθορίζεται για κίνηση που αφορά το όριο των εδαφικών κατηγοριών Β και C. Η λογική του προκαθορισμού της ενίσχυσης λόγω θέσης είναι ότι η νέα βάση δεδομένων μπορεί να μην είναι ικανή να καθορίσει ταυτόχρονα όλους τους συντελεστές για τις μη γραμμικές εξισώσεις και την

κλιμάκωση μεγέθους – απόστασης λόγω παραμέτρων που ανταλλάσσονται, ειδικότερα όταν υπάρχει μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

Period	$b_{lin}$	$b_1$	$b_2$
PGV	-0.600	-0.500	-0.06
PGA	-0.360	-0.640	-0.14
0.010	-0.360	-0.640	-0.14
0.020	-0.340	-0.630	-0.12
0.030	-0.330	-0.620	-0.11
0.050	-0.290	-0.640	-0.11
0.075	-0.230	-0.640	-0.11
0.100	-0.250	-0.600	-0.13
0.150	-0.280	-0.530	-0.18
0.200	-0.310	-0.520	-0.19
0.250	-0.390	-0.520	-0.16
0.300	-0.440	-0.520	-0.14
0.400	-0.500	-0.510	-0.10
0.500	-0.600	-0.500	-0.06
0.750	-0.690	-0.470	0.00
1.000	-0.700	-0.440	0.00
1.500	-0.720	-0.400	0.00
2.000	-0.730	-0.380	0.00
3.000	-0.740	-0.340	0.00
4.000	-0.750	-0.310	0.00
5.000	-0.750	-0.291	0.00
7.500	-0.692	-0.247	0.00
10.000	-0.650	-0.215	0.00

**Πίνακας 2.3:** Συντελεστές ενίσχυσης ανάλογα με τη θέση εξαρτώμενοι από την περίοδο

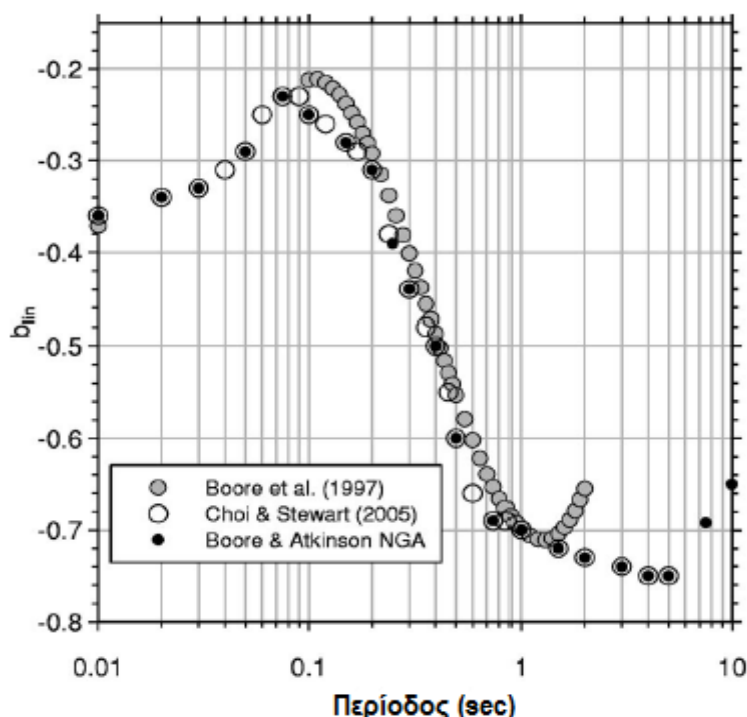
Coefficient	Value
$a_1$	0.03 g
$pga_{low}$	0.06 g
$a_2$	0.09 g
$V_1$	180 m/s
$V_2$	300 m/s
$V_{ref}$	760 m/s

**Πίνακας 2.4:** Συντελεστές ενίσχυσης ανάλογα με τη θέση εξαρτώμενοι από την περίοδο

Γι' αυτό ήταν προτιμότερο να ενισχυθεί η εδαφική συμπεριφορά βασιζόμενοι στην καλύτερη διαθέσιμη εμπειρική ανάλυση της βιβλιογραφίας και επιτρέποντας στην παλινδρόμηση να καθορίσει τους εναπομείναντες συντελεστές μεγέθους και απόστασης. Αναγνωρίζεται ότι υπάρχουν αναμφισβήτητες ανταλλαγές παραμέτρων και ότι μια αλλαγή στην εδαφική συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη αλλαγή της κλιμάκωσης με το μέγεθος και την απόσταση. Να σημειωθεί ωστόσο, ότι οι προκαθορισμένοι όροι της εδαφικής συμπεριφοράς είναι όμοιοι με αυτούς που υιοθετήθηκαν από τους κατασκευαστές της νέας βάσης δεδομένων, οι οποίοι

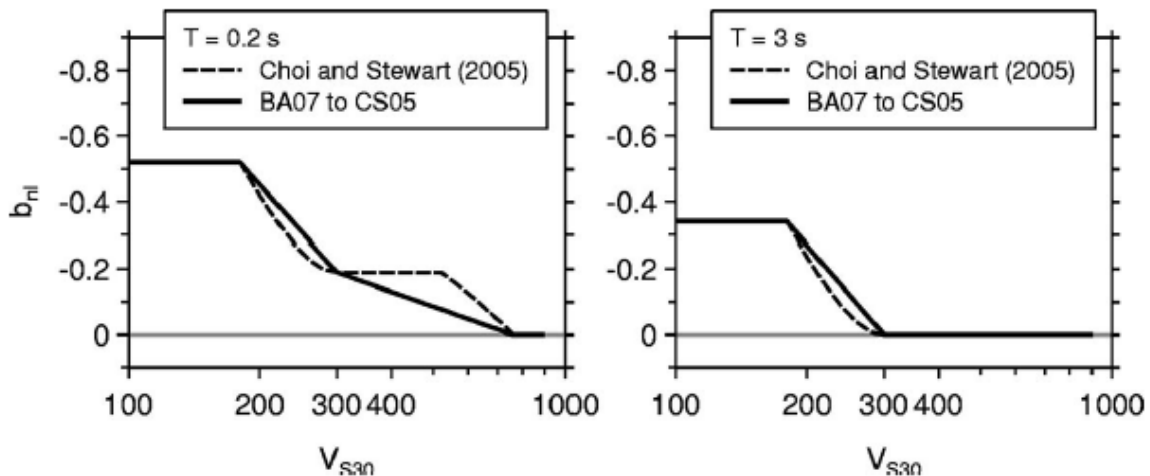
χρησιμοποίησαν διαφορετικές προσεγγίσεις, άρα φαίνεται να υπάρχει ομοφωνία ως προς τους συντελεστές εδαφικής συμπεριφοράς.

Λεπτομερώς, οι συντελεστές εδαφικής συμπεριφοράς που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις καθορίστηκαν ως ακολούθως. Ο συντελεστής γραμμικής ενίσχυσης  $b_{lin}$  υιοθετήθηκε από το CS05, όπου δεν υπάρχουν τιμές για  $T > 5sec$ . Σε μεγαλύτερες περιόδους ο συντελεστής εξάγεται από την **εικόνα 2.6**. Όσο οι περίοδοι αυξάνονται θα περιμέναμε την ενίσχυση να μειώνεται (και μια τέτοια τάση προέκυψε από άλλους ερευνητές των νέων εξισώσεων). Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε υποκειμενικά να υπάρχει μια γραμμική τάση σε όρους λογαριθμικής κλίμακας των περιόδων ως η βάση απόκτησης τιμών του συντελεστή σε μεγάλες περιόδους.



**Εικόνα 2.6:** Συντελεστής γραμμικής ενίσχυσης σε συνάρτηση με την περίοδο. Με μαύρες κουκκίδες σημειώνονται οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Ο συντελεστής μη γραμμικής κλίσης  $b_{nl}$  εξαρτάται από τη  $V_{s,30}$  και οι προκύπτουσες εξισώσεις είναι απλούστερες από αυτές του CS05 όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.7**. Οι τιμές του  $b_{nl}$  στα σημεία  $V_{s,30}=V_1$  και  $V_{s,30}=V_2$  δίνονται από τους συντελεστές  $b_1$  και  $b_2$  αντίστοιχα, ενώ αποτελούν συναρτήσεις της περιόδου. Για να επεκταθεί η τιμή του  $b_1$  σε μεγαλύτερες των  $5sec$  περιόδους προσαρμόζουμε δυο τετραγωνικές καμπύλες στις τιμές του CS05, μια για όλες τις τιμές και μια για τις τιμές που αντιστοιχούν σε περιόδους μεγαλύτερες των  $0.2sec$ . Τα αποτελέσματα είναι όμοια όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.7**. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιήθηκε και για την τιμή των  $5sec$  αλλά ουσιαστικά δεν παρατηρήθηκε διαφορά των μεταβλητών των δυο μεθόδων (CS05 και της παρουσιαζόμενης μεθόδου).

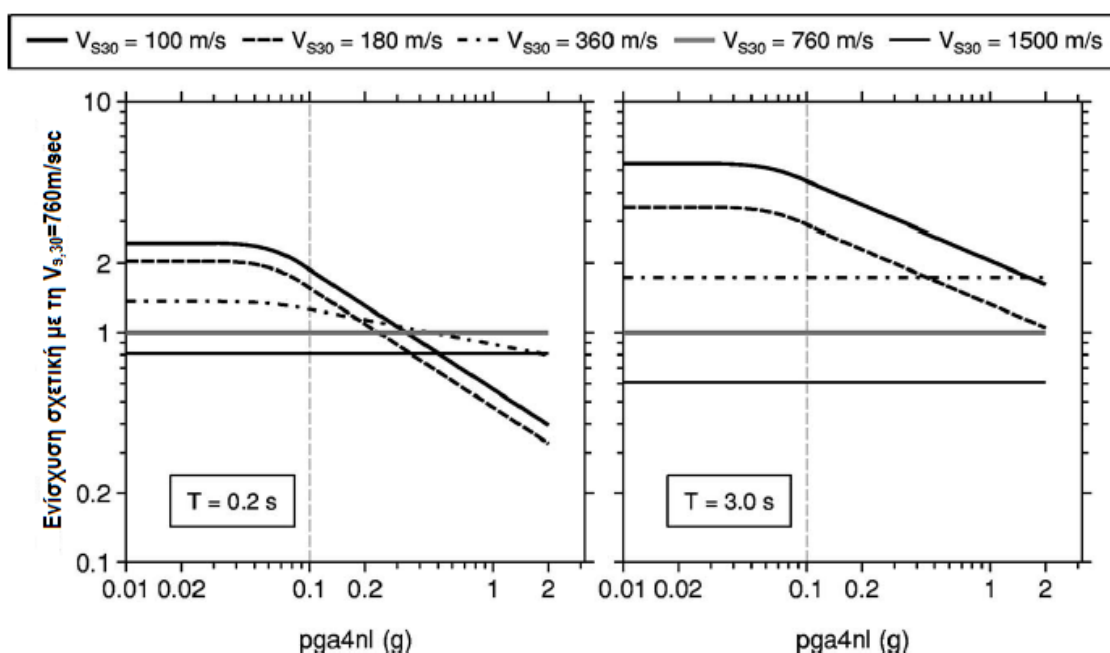


**Εικόνα 2.7:** Σύγκριση της κλίσης που ελέγχει τη μη γραμμική συνάρτηση ενίσχυσης

Πρέπει στο σημείο αυτό να τονιστεί κάτι σχετικό με την ορολογία. Στην **εξίσωση [8c]** η παράμετρος  $F_{NL}$  είναι μηδενική όταν  $\rho ga4nl=0.1g$ . Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι δεν υπάρχει μη γραμμική ενίσχυση γι' αυτό το επίπεδο της εδαφικής κίνησης. Η ενίσχυση γι' αυτή την τιμή δίδεται εξ ολοκλήρου από το  $F_{LIN}$  επειδή οι κινήσεις που χρησιμοποιήθηκαν από το CS05 ώστε να προκύψει η γραμμική συνιστώσα είχαν ένα μέσο  $\log PGA \approx 0.1g$  σε όλες τις εδαφικές κατηγορίες. Άρα το  $F_{NL}$  δεν είναι μηδενικό για τιμές της  $\rho ga4nl$  μεγαλύτερες και μικρότερες από το  $0.1g$ . Το CS05 χρησιμοποιεί μόνο την **εξίσωση [8c]** για να περιγράψει τη μη γραμμική ενίσχυση και δεν περιορίζει τη μη γραμμική απόκριση σε  $\rho ga4nl > 0.1g$ . Είναι ξεκάθαρο ότι το CS05 θεωρεί την **εξίσωση [8c]** έγκυρη για  $\rho ga4nl$  μεταξύ  $0.02$  με  $0.8g$ . Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ενίσχυση  $F_S$  μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη γραμμική συνιστώσα  $F_{LIN}$  για μικρότερες τιμές της  $\rho ga4nl$  και η μη γραμμική ενίσχυση συνεχίζει να αυξάνεται χωρίς όριο καθώς η  $\rho ga4nl$  μειώνεται. Στην παρούσα έρευνα, έγινε τροποποίηση του CS05 ώστε να αποτραπεί η επέκταση της ενίσχυσης σε μικρότερες τιμές του  $\rho ga4nl$ , θέτοντας ως όριο τιμών την  $\rho ga4nl=0.03g$ . Απλά τερματίζοντας τη μη γραμμική ενίσχυση σε μια τιμή της  $\rho ga4nl$  εμφανίζεται ένα τσίγκωμα στις γραφικές απεικονίσεις της εδαφικής κίνησης με την απόσταση. Για το λόγο αυτό ενσωματώθηκε η **εξίσωση μετάβασης [8b]**.

Η συνολική ενίσχυση για ένα κοντό ( $0.2sec$ ) και ένα ψηλό ( $3sec$ ) ταλαντωτή παρουσιάζεται στην **εικόνα 2.8**, ως συνάρτηση της  $\rho ga4nl$  για ένα εύρος τιμών της  $V_{s,30}$ . Στις μικρές περιόδους η μη γραμμική συνιστώσα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κίνησης σε θέσεις που χαρακτηρίζονται από χαμηλές ταχύτητες ενώ σε μεγάλες περιόδους η εδαφική μη γραμμικότητα είναι σημαντική αλλά η εδαφική δικτυωτή απόκριση αποτελεί τύπο ενίσχυσης ακόμα και για μεγάλες τιμές της  $\rho ga4nl$ . Για περιόδους μεγαλύτερες των  $0.75sec$  δεν υπάρχει μη γραμμική συνεισφορά στην ενίσχυση για τιμές  $V_{s,30} > 300m/sec$ . Πρέπει να τονιστεί ότι οι εμπειρικές μελέτες πάνω στις οποίες βασίστηκαν οι εδαφικές εξισώσεις συμπεριλάμβαναν πολύ λίγα δεδομένα σιφρών εδαφών με  $V_{s,30} > 1000m/sec$ . Οι

εξισώσεις ενίσχυσης είναι πιθανώς λογικές για τιμές της  $V_{s,30}$  έως  $1300\text{m/sec}$  αλλά δεν θα πρέπει να εφαρμόζονται για πολύ σκληρά εδαφικά προφίλ ( $V_{s,30} \geq 1500\text{m/sec}$ ).



**Εικόνα 2.8:** Συνδυασμένη ενίσχυση για περιόδους  $T=0.2\text{sec}$  και  $T=3\text{sec}$  ως συνάρτηση της  $\text{pga}_{4\text{nl}}$  για διάφορες τιμές  $V_{s,30}$ . Παρατηρούμε από το αριστερό γράφημα ότι για μικρές περιόδους η γραμμική ενίσχυση δεν εμφανίζεται σε μαλακά εδάφη μέχρι  $\text{pga}_{4\text{nl}} < 0.03\text{g}$ .

Η συνάρτηση της εδαφικής κίνησης από την απόσταση καθορίζεται στην πρώτη παλινδρόμηση όπου οι μεταβλητές απόκρισης είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, η μέγιστη εδαφική ταχύτητα ή η φασματική επιτάχυνση σε κάποια επιλεγμένη περίοδο, κάθε φορά διορθωμένη με την διατμητική ταχύτητα αναφοράς  $V_{ref}=760\text{m/sec}$  αφαιρώντας το  $F_s$  από το  $\ln Y_{observed}$ . Οι διορθωμένες μεταβλητές απόκρισης για το υποσύνολο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη για αποστάσεις μέχρι το πολύ  $400\text{m}$  μειώνονται με την απόσταση χρησιμοποιώντας την **εξίσωση [14]**, η οποία είναι ίδια με την **εξίσωση [3]** αλλά με αντικατάσταση των τεχνητών μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν τον όρο συμβάν για κάθε σεισμό.

$$F_D(R_{JB}, M) = c_o(event) + [c_1 + c_2(M - M_{ref})] \cdot \ln\left(\frac{R}{R_{ref}}\right) + c_3 \cdot (R - R_{ref}) \quad [14]$$

Στη συγκεκριμένη εξίσωση το  $c_o(event)$  είναι μια συντόμευση του αθροίσματος

$$(c_o)_1 \cdot \delta_1 + (c_o)_2 \cdot \delta_2 + \dots + (c_o)_{NE} \cdot \delta_{NE} \quad [15]$$

όπου  $(c_o)_j$  είναι ο όρος για το γεγονός  $j$ , το  $\delta_j$  ισούται με 1 για το γεγονός  $j$  διαφορετικά ισούται με μηδέν και  $NE$  είναι ο αριθμός των σεισμών.

Υπάρχουν πολλά σημαντικά ζητήματα κατά την εκτέλεση της παλινδρόμησης. Πρώτον, θεωρούνται υπαρκτές λογικές διαφορές στην εξασθένηση (Boore 1989, Benz et al.1997), ακόμα και σε σχετικά μικρές σε έκταση περιοχές. Εδώ αγνοείται αυτό το πιθανό σφάλμα και υποτίθεται ότι το τμήμα των νέων εξισώσεων που αφορά την απόσταση εφαρμόζεται για επιφανειακούς σεισμούς σε όλες τις ενεργές

τεκτονικά περιοχές. Αυτή θεωρείται λογική αρχική παραδοχή καθώς η σημαντικότητα των τοπικών επιδράσεων μπορεί να εξεταστεί αργότερα μέσω της εξέτασης της τάσης των υπολοίπων για υποσύνολα δεδομένων ανά περιοχή. Η δεύτερη δυσκολία είναι περισσότερο προβληματική καθώς η νέα βάση δεδομένων περιέχει αραιές καταγραφές για αποστάσεις πάνω από 80-100km από το ρήγμα, ειδικότερα για σεισμούς μεσαίου μεγέθους. Αυτό κάνει πολύ δύσκολη, αν όχι αδύνατη, τη λήψη ενός ισχυρού ταυτόχρονου καθορισμού των  $c_1$  και  $c_3$  συντελεστών που αφορούν την κλίση και την καμπυλότητα αντίστοιχα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα της βάσης δεδομένων χρησιμοποιούνται επιπρόσθετες καταγραφές εδαφικών κινήσεων από την Καλιφόρνια ώστε να προσδιοριστεί πρωτίστως ο μη γραμμικός όρος  $c_3$  ως συνάρτηση της περιόδου. Έπειτα, χρησιμοποιείται η γνωστή τιμή του συντελεστή  $c_3$  και μέσω της παλινδρόμησης προσδιορίζονται και οι υπόλοιποι συντελεστές.

Καθορισμός το συντελεστή  $c_3$ : Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του, περιλαμβάνουν αυτά της νέας βάσης δεδομένων για τρία μικρούς σεισμούς της Καλιφόρνια, συν πολλά περισσότερα δεδομένα για τα ίδια σεισμικά γεγονότα καταγεγραμμένα όμως από επιταχυνσιογράφους σε μια πιο ευρεία ζώνη στην Καλιφόρνια. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μεταβλητές απόκρισης που είχαν υπολογιστεί από 74 καταγραφές δυο συνιστωσών της κύριας δόνησης του σεισμού στο Parkfield (2004 /M=6) για τον καθορισμό του συντελεστή  $c_3$ . Τα συγκεκριμένα δεδομένα καταγράφηκαν μετά τη δημιουργία της νέας βάσης δεδομένων. Ο κωδικός αριθμός των καταγραφικών σταθμών που προμήθευσαν με δεδομένα την παρούσα μελέτη δίνεται στον **πίνακα 2.5**. Για τα επιπρόσθετα δεδομένα από τους τρεις μικρούς σεισμούς της Καλιφόρνια χρησιμοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση πεδίου που είχαν προτείνει οι Boatwright και Seekins για να διορθώσουν το φάσμα ώστε να αφορά την τιμή της ταχύτητας  $V_{s,30}=760m/sec$ . Για τα δεδομένα από το Parkfield δεν έγινε διόρθωση των τιμών της διατμητικής ταχύτητας καθώς υπήρχε μόνο ενδιαφέρον για τον καθορισμό της συνάρτησης της απόστασης και επειδή οι καταμετρημένες τιμές ταχύτητας ήταν γνωστές μόνο σε ορισμένες θέσεις. Για τις καταγραφές των τεσσάρων γεγονότων χρησιμοποιήθηκαν φάσματα των δυο οριζοντίων συνιστωσών αντιμετωπιζόμενες ως διαφορετικές καταγραφές (δεν έγινε δηλαδή συνδυασμός τους).

Earthquake	# of Stations in NGA	# of Stations Used by BA
2001 Anza (M 4.92)	73	197
2002 Yorba Linda (M 4.27)	12	207
2003 Big Bear City (M 4.92)	37	262
2004 Parkfield (M 6.0)	0	74

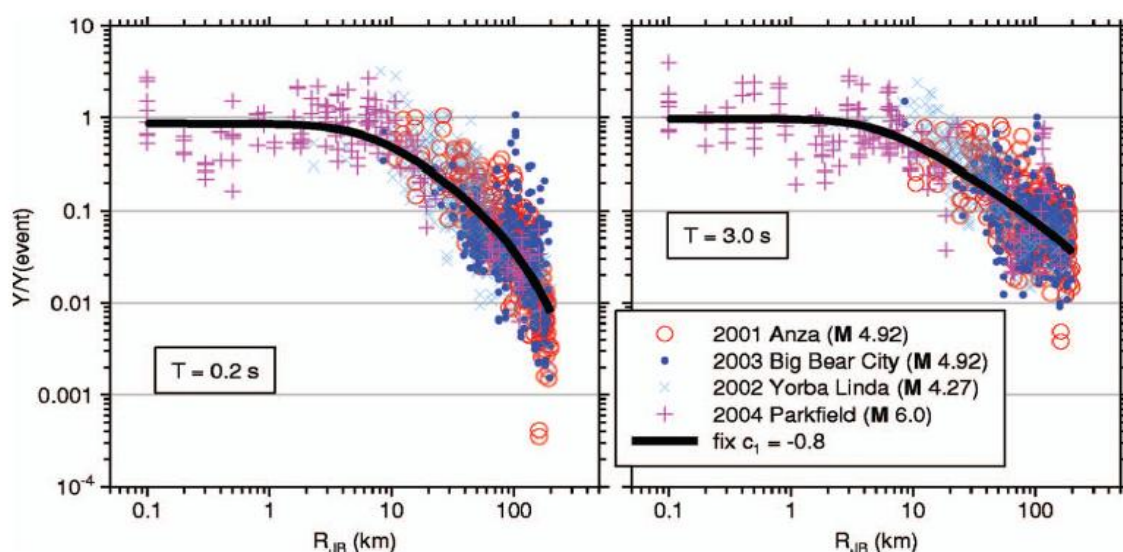
**Πίνακας 2.5:** Σύγκριση των αριθμών των σταθμών καταγραφής της νέας βάσης δεδομένων και της ευρύτερης βάσης που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ανελαστικών συντελεστών.

Έγιναν ακολούθως οι παλινδρομήσεις με το συντελεστή  $c_1$  σταθεροποιημένο στις τιμές -0.5, -0.8 και -1. Τοποθετήθηκε έπειτα  $c_2=0$  και έγινε η επίλυση για τους συντελεστές  $c_3$  και  $h$ . Με άλλα λόγια, σταθεροποιήθηκε η κλίση της γραφικής



παράστασης και έπειτα προσδιορίστηκε η απαιτούμενη καμπυλότητά της ώστε να ταιριάζει στην πιο απότομη μείωση των πιο απομακρυσμένων δεδομένων (ο συντελεστής  $c_3$  πρέπει να είναι μικρότερος του μηδενός).

Επίσης, επιλύθηκε ο απαιτούμενος συντελεστής βάθους  $h$  για το κοντινό πεδίο ώστε να ταιριάζει στη λιγότερο απότομη αύξηση των δεδομένων με τη μείωση της απόστασης σε κοντινές αποστάσεις. Ακόμα, καθορίστηκε για καθέναν από τους τέσσερις σεισμούς ένας όρος που αφορούσε το σχετικό επίπεδο πλάτους ( $c_0$ ). Η **εικόνα 2.9** συγκρίνει την παλινδρόμηση σε σχέση με τις παρατηρήσεις πεδίου, όπου οι τελευταίες έχουν κανονικοποιηθεί σε ένα σύνθητες πλάτος, αφαιρώντας τους όρους γεγονότων  $c_0$ .



**Εικόνα 2.9:** Κανονικοποιημένες εδαφικές κινήσεις τεσσάρων γεγονότων χρησιμοποιώντας την ευρύτερη βάση δεδομένων. Η μαύρη καμπύλη είναι η παλινδρόμηση που προέκυψε με τιμές συντελεστών  $c_1=-0.8$  και  $c_2=0.0$

Επιλέχθηκε οι παράμετροι  $c_3$  να καθοριστούν για την περίπτωση  $c_1=-0,8$  ως μια τυπική τιμή εμπειρικών συσχετίσεων για τον προσδιορισμό της παραμέτρου της γεωμετρικής κλίσης σε ενδιάμεσες περιόδους. Για έναν ευρύτερο έλεγχο, καθορίστηκαν οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων  $c_3$  και  $h$  ώστε να ικανοποιούν τις εξισώσεις απόστασης που προκύπτουν στη νότια Καλιφόρνια από μια πιο ευρεία βάση δεδομένων των Raoof et al. (1999). Οι ισοδύναμες τιμές των  $c_3$  και  $h$  των Raoof et al. (1999) είναι όμοιες της παρούσας ανάλυσης. Για να εφαρμοστούν οι τιμές της  $c_3$  στο συνολικό εύρος περιόδων που απαιτείτο για τη νέα βάση δεδομένων, έγινε ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων στις εν λόγω τιμές. Η τιμή της  $c_3$  στις μικρές περιόδους δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, άρα τοποθετείται ένα άνω όριο ως  $|c_3|=0.01151$ . Ομοίως, οι τιμές για τις μεγάλες περιόδους καθορίστηκαν στην περίοδο  $T=3sec$  άρα τέθηκε ένα κάτω όριο  $|c_3|=0.00191$ . Επίσης, οι τιμές της  $c_3$  περιορίστηκαν από τις παλινδρομήσεις της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας ώστε να είναι αυτές που προκύπτουν από την παλινδρόμησης για περίοδο  $T=1sec$ . Αυτή η επιλογή αποτελεί ένα συμβιβασμό

μεταξύ της ομοιότητας που παρατηρήθηκε μεταξύ των  $PGV$  και  $PGA$  στα  $2sec$  σε κλιμάκωση μεγαλύτερου σεισμικού μεγέθους.

Καθορισμός του συντελεστή  $h$ : Ο περιορισμός του ψευδο – βάθους  $h$  στην παλινδρόμηση είναι επιθυμητός ώστε να αποφευχθεί σύμπτωση των γραφικών παραστάσεων για μεγάλα σεισμικά γεγονότα σε πολύ κοντινές αποστάσεις. Αυτός ο περιορισμός επετεύχθη εφαρμόζοντας αρχικές παλινδρομήσεις θεωρώντας το συντελεστή  $h$  ως ελεύθερη παράμετρο και τροποποιώντας τις προκύπτουσες μεταβλητές όσο χρειαζόταν για να αποφευχθεί η σύμπτωση των φασμάτων στις κοντινές αποστάσεις. Στη συγκεκριμένη παλινδρόμηση ο συντελεστής  $c_1$  ήταν η ελεύθερη μεταβλητή και ο  $c_3$  περιορίστηκε σε ένα σύνολο αρχικά καθορισμένων τιμών. Οι μεταβλητές που προέκυψαν θεωρώντας το  $h$  ως ελεύθερη παράμετρο προσεγγίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων αλλά παρατηρήθηκε ότι η τιμή του  $h$  στα  $0.05sec$  ήταν πολύ μικρή, πολύ πιο κάτω από την τιμή της παλινδρόμησης της  $PGA$ . Η τιμή του συντελεστή αυξήθηκε σε  $0.05$  ώστε να προσεγγίσει την τιμή της παλινδρόμησης της  $PGA$  για θεώρηση μη περιορισμένου συντελεστή  $h$  και εφαρμόστηκε ξανά η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Η τροποποιημένη καμπύλη ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιήθηκε ως η βάση καθορισμού του συντελεστή  $h$  σε όλες τις περιόδους. Η τιμή στις μικρές περιόδους καθορίστηκε από την ισότητα  $PSA$  και  $PGA$  σε περιόδους κάτω των  $0.1sec$ . Για την  $PSA$  υιοθετήθηκαν οι τιμές της τροποποιημένης καμπύλης ελαχίστων τετραγώνων για ταλαντωτή με περίοδο  $T=0.05sec$ . Έπειτα, καθορίστηκαν οι τιμές για περιόδους μεταξύ  $0.01$  και  $0.05sec$  ώστε να είναι ίδιες με αυτές για τα  $0.05sec$ . Όμοια με τις παραδοχές που έγιναν για το συντελεστή  $c_3$ , χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $h$  στο  $1sec$  για την  $PGV$ .

Καθορισμός των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_0$ : Έχοντας περιορίσει τους συντελεστές  $h$  και  $c_3$ , μειώθηκαν οι μεταβλητές απόκρισης της νέας βάσης δεδομένων ώστε να γίνει η επίλυση ως προς τους συντελεστές  $c_1$  και  $c_2$  (**εξίσωση [3]**), μαζί με τους συντελεστές  $c_0$  για κάθε σεισμικό γεγονός, χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα για αποστάσεις μικρότερες των  $400km$ . Ο συντελεστής  $c_1$  είναι ο ενεργός γεωμετρικός ρυθμός αύξησης (κλίση) ενός γεγονότος μεγέθους  $M=M_{ref}$  ενώ ο  $c_2$  παρέχει ένα μέσο περιγραφής της απομείωσης με το μέγεθος και την απόσταση (αλλάζει την κλίση για γεγονότα μεγαλύτερα ή μικρότερα από το  $M_{ref}$ ). Το σφάλμα των δεδομένων ( $\sigma$ ) δίνεται από την τυπική απόκλιση των υπολοίπων από την παλινδρόμηση του πρώτου σταδίου. Η παλινδρόμηση χρησιμοποιεί μεταβλητές που αφορούν τη  $R_{ref}$  και το  $M_{ref}$ . Οι τιμές των μεταβλητών που αναφέρονται σε αυτές τις παραμέτρους είναι τυχαίες. Τοποθετήθηκε  $M_{ref}=4.5$  καθώς αυτό είναι περίπου το μέγεθος των περισσότερων γεγονότων που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του συντελεστή  $c_3$ . Αυτή η επιλογή συνεπάγεται ότι η εξάρτηση της κλίσης με το μέγεθος θα αναφέρεται κυρίως σε αυτή που παρατηρείται σε μικρά σεισμικά μεγέθη. Επίσης, τοποθετήθηκε  $R_{ref}=1km$ , μια βολική παράμετρος καθώς οι καμπύλες που περιγράφουν την εξάρτηση με την απόσταση έχουν σημείο καμπής κοντά στο  $R=R_{ref}$ . Οι καμπύλες σε μεγαλύτερα σεισμικά μεγέθη είναι πιο επίπεδες απ' ό,τι αυτές των μικρότερων μεγεθών σε αποστάσεις μικρότερες από την απόσταση που σημειώνεται στο σημείο καμπής. Αυτό το γεγονός αποφεύχθηκε επιλέγοντας την

προαναφερθείσα τιμή του  $R_{ref}$  αν και κάθε τιμή που ικανοποιεί την  $R_{ref} < \min(h)$ , με το μέγιστο να αφορά όλες τις περιόδους, θα απέτρεπε μη επιθυμητή σύμπτωση των προβλεπόμενων καμπυλών κοντά στην πηγή (θέλουμε να εξασφαλίσουμε ότι θα ισχύει η  $R > R_{ref}$  στην απόσταση που παρατηρείται το σημείο καμπής, ακόμα και όταν  $R_{JB}=0$ ).

Οι διάφοροι συντελεστές της **εξίσωσης [14]** που προέκυψαν από την παλινδρόμηση του πρώτου σταδίου, χρησιμοποιήθηκαν σε ένα δεύτερο στάδιο ώστε να καθοριστεί η παλινδρόμηση σύμφωνα με το σεισμικό μέγεθος των μεταβλητών απόκρισης. Όπως προτείνουν οι Joyner και Boore (1993) η παλινδρόμηση στο στάδιο δυο είναι επαναληπτική διαδικασία ώστε να γίνουν επιλύσεις και ως προς τη διακύμανση  $\tau$ . Ενώ επιλέχθηκε τετραγωνικός βασικός τύπος για την κλιμάκωση του σεισμικού μεγέθους, παρ' όλα αυτά, τοποθετήθηκε ο περιορισμός ώστε το μέγεθος  $M$  να είναι μικρότερο από 8.5 ώστε να περιοριστεί ο υπερκορεσμός (η πρόβλεψη μείωσης των πλατών με αύξηση του μεγέθους). Για την υλοποίηση της περιορισμένης εξάρτησης από το τετραγωνικό σεισμικό μέγεθος χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος αλγόριθμος:

1. Προσδιορισμός των παραμέτρων  $c_0$  των γεγονότων για μια συγκεκριμένη περίοδο με μια πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Αν το  $M$  για το οποίο η συνάρτηση αρχίζει να μειώνεται πληροί τη συνθήκη  $M_{max} > 8.5$ , υιοθετείται αυτός ο τύπος παλινδρόμησης για την εξάρτηση από το μέγεθος στη συγκεκριμένη περίοδο.
2. Αν  $M_{max} < 8.5$  για μια συγκεκριμένη περίοδο, διενεργείται παλινδρόμηση δυο σταδίων με όριο το  $M_h$  με μια τετραγωνική καμπύλη για  $M \leq M_h$  και μια γραμμική για  $M > M_h$ . Αν η κλίση της γραμμικής συνάρτησης είναι θετική, χρησιμοποιείται αυτή η παλινδρόμηση δυο σταδίων για τη συγκεκριμένη περίοδο.
3. Αν η κλίση της γραμμικής συνάρτησης είναι αρνητική επαναδιενεργείται η παλινδρόμηση δυο σταδίων περιορίζοντας την κλίση της γραμμής πάνω από το  $M_h$  ώστε να είναι μηδέν. Να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις για όλες σχεδόν τις περιόδους που είναι μικρότερες ή ίσες του 1sec απαιτούν τον περιορισμό της μηδενικής κλίσης άρα για μικρές περιόδους τα δεδομένα υποδεικνύουν υπερκορεσμό. Στη συγκεκριμένη έρευνα λόγω έλλειψης δεδομένων και γνώσεων, ο υπερκορεσμός θεωρήθηκε πολύ μεγάλος στο στάδιο της ανάπτυξης των εξισώσεων.

Επιλογή του  $M_h$ : Η παράμετρος  $M_h$  είναι το οριακό μέγεθος όπου η περιορισμένη κλιμάκωση μεγέθους στην παλινδρόμηση δυο σταδίων αλλάζει από την τετραγωνική στη γραμμική μορφή. Υποκειμενική εξέταση των μη παραμετρικών γραφικών απεικονίσεων των δεδομένων ξεκάθαρα αποδεικνύουν ότι οι εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου δεν γίνονται σημαντικά μεγαλύτερες με την αύξηση του μεγέθους πέρα από ένα εύρος μεγεθών μεταξύ 6.5 και 7, άρα το  $M_h$  λαμβάνει τιμές μέσα σε αυτό το εύρος.

Εξάρτηση από τον τύπο του ρήγματος: Οι γραφικές παραστάσεις των διαφόρων όρων συναρτήσεων του σεισμικού μεγέθους αποδεικνύουν ότι σεισμοί κανονικού τύπου ρήγματος έχουν πλάτη συστηματικά χαμηλότερα από τους

σεισμούς σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ή ανάστροφα σε όλες τις περιόδους. Αυτή η παρατήρηση χρησιμοποιήθηκε για την κατηγοριοποίηση των εδαφών. Αρχικά, τα δεδομένα όλων των εδαφικών τύπων τοποθετήθηκαν μαζί και προσδιορίστηκαν οι συντελεστές  $e_1, e_5, e_6, e_7$  και  $e_8$  με τοποθέτηση  $e_2=e_3=e_4=0$ . Η παλινδρόμηση επαναλήφθηκε διορθώνοντας τους συντελεστές  $e_5, e_6, e_7$  και  $e_8$  ώστε να αποκτήσουν τιμές από όλα τα δεδομένα συσσωρευμένα και οι εξισώσεις επιλύθηκαν ώστε να προκύψουν οι συντελεστές  $e_2, e_3$  και  $e_4$  των τεχνητών μεταβλητών των τύπων ρηγμάτωσης *SS, NS* και *RS*. Έτσι, περιορίστηκε η σχετική κλιμάκωση των πλατών με το μέγεθος ώστε να είναι ίδια σε όλους τους τύπους γεγονότων αλλά ταυτόχρονα επιτράπη μια παράλληλη μετατόπιση του μέσου πλάτους σύμφωνα με το μηχανισμό ρηγμάτωσης. Η αβεβαιότητα  $\tau$  ήταν ελαφρώς διαφοροποιημένη για τις δυο αυτές περιπτώσεις άρα χρησιμοποιήθηκε η σήμανση με  $U$  και  $M$  ώστε να ξεχωρίζει ο καθορισμένος και μη καθορισμένος τύπος ρήγματος.

### 2.6.5. Αποτελέσματα έρευνας

Οι διάφοροι συντελεστές παρουσιάζονται στους επισυναπτόμενους πίνακες όπου οι μονάδες μέτρησης της *PSA* είναι  $g$ , της *PGV* είναι  $cm/sec$ , της απόστασης είναι  $km$  και της ταχύτητας είναι  $m/sec$ . Στη βάση δεδομένων δεν υπάρχουν καταγραφές από ρήγμα κανονικής διάρρηξης για περίοδο ταλάντωσης  $10sec$  άρα επισήμως δεν θα μπορούσε να προκύψει ο συντελεστής  $e_3$  για τη συγκεκριμένη περίοδο. Η τιμή που εμφανίζεται στον **πίνακα 2.7** προέκυψε υπό τη θεώρηση ότι ο λόγος των κινήσεων για κανονικά και μη κατηγοριοποιημένα ρήγματα είναι ίδιος για περιόδους  $7.5sec$  και  $10sec$ . Με αυτή την παραδοχή,

$$e_3(10\ sec) = e_1(10\ sec) + [e_3(7.5\ sec) - e_1(7.5\ sec)]$$

Μια πιο ακριβής μέθοδος σύγκρισης των διαφορών μεταξύ των εξαγόμενων εξισώσεων και των πραγματικών παρατηρήσεων είναι η γραφική απεικόνιση των υπολοίπων της ανάλυσης του πρώτου σταδίου που ορίζονται από το λόγο της παρατηρούμενης προς την προβλεπόμενη εδαφική κίνηση. Η **εικόνα 2.10** απεικονίζει τα υπόλοιπα σε συνάρτηση με την απόσταση για *PGA* και *PSA* στα  $10sec$ . Για πιο σαφή εικόνα, τα υπόλοιπα διαχωρίστηκαν σε διαφορετικά εύρη μεγεθών και για δυο συγκεκριμένα σεισμικά γεγονότα. Ενώ παρουσιάζονται μικρές αποκλίσεις από μηδενικές τιμές υπολοίπων, δεν υπάρχει σημαντική τάση απόκλισης στο μέγεθος, την απόσταση ή τη διατμητική ταχύτητα. Άρα η παραδοχές που έγιναν για τον προσδιορισμό των εξισώσεων θεωρούνται λογικές.

Η **εικόνα 2.11** είναι μια γραφική απεικόνιση του αντίστροφου λογάριθμου των συντελεστών  $c_0$  της παλινδρόμησης πρώτου σταδίου συναρτήσει του σεισμικού μεγέθους, με την παλινδρόμηση δευτέρου σταδίου να παρουσιάζεται επίσης. Ορίζεται ακόμα ο τύπος ρήγματος κάθε γεγονότος με διαφορετικό χρωματισμό. Η μορφή της συνάρτησης προσδίδει μια λογική προσαρμογή στα δεδομένα πλάτη των σεισμών κοντινού πεδίου. Να σημειωθεί ότι η κλιμάκωση με το μέγεθος για περίοδο  $10sec$  για μεγέθη  $M < 6.5$  μπορεί να θεωρηθεί μη αξιόπιστη καθώς ελέγχεται ισχυρά από τα δεδομένα ενός μικρού σεισμικού γεγονότος στο Yountville (2000) με μέγεθος  $M=5$ .

Period	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$h$
PGV	-0.87370	0.10060	-0.00334	2.54
PGA	-0.66050	0.11970	-0.01151	1.35
0.010	-0.66220	0.12000	-0.01151	1.35
0.020	-0.66600	0.12280	-0.01151	1.35
0.030	-0.69010	0.12830	-0.01151	1.35
0.050	-0.71700	0.13170	-0.01151	1.35
0.075	-0.72050	0.12370	-0.01151	1.55
0.100	-0.70810	0.11170	-0.01151	1.68
0.150	-0.69610	0.09884	-0.01113	1.86
0.200	-0.58300	0.04273	-0.00952	1.98
0.250	-0.57260	0.02977	-0.00837	2.07
0.300	-0.55430	0.01955	-0.00750	2.14
0.400	-0.64430	0.04394	-0.00626	2.24
0.500	-0.69140	0.06080	-0.00540	2.32
0.750	-0.74080	0.07518	-0.00409	2.46
1.000	-0.81830	0.10270	-0.00334	2.54
1.500	-0.83030	0.09793	-0.00255	2.66
2.000	-0.82850	0.09432	-0.00217	2.73
3.000	-0.78440	0.07282	-0.00191	2.83
4.000	-0.68540	0.03758	-0.00191	2.89
5.000	-0.50960	-0.02391	-0.00191	2.93
7.500	-0.37240	-0.06568	-0.00191	3.00
10.000	-0.09824	-0.13800	-0.00191	3.04

**Πίνακας 2.7:** Συντελεστές απόστασης με  $M_{ref}=4.5$ ,  $R_{ref}=1km$  για όλες τις περιόδους εκτός  $R_{ref}=5km$  για  $pga4nl$

Τα γραφήματα της  $PSA$  που προκύπτουν από τις εξισώσεις παρουσιάζονται στην **εικόνα 2.12**. Οι καμπύλες για τα ισχυρότερα σεισμικά γεγονότα τείνουν να συμπιεστούν μαζί στις περιόδους κοντά στα  $0.2-0.3sec$  πιθανώς λόγω του κοινού γεωμετρικού παράγοντα αυτών των περιόδων. Κατά τα άλλα, η φασματική επιτάχυνση είναι μια ομαλή καμπύλη ειδικά αν αναλογιστούμε ότι πολλοί συντελεστές προσδιορίστηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους σε κάθε περίοδο. Γραφική παράσταση της φασματικής επιτάχυνσης συναρτήσει της απόστασης παρουσιάζεται στην **εικόνα 2.13** για δυο αντιπροσωπευτικές περιόδους και για  $V_{s,30}=760m/sec$ . Η επίδραση της  $V_{s,30}$  στο πλάτος της εδαφικής κίνησης παρουσιάζεται στην **εικόνα 2.14**. Η μη γραμμική εδαφική ενίσχυση οδηγεί τις καμπύλες στο να τέμνονται άρα σε κοντινές αποστάσεις μικρότερες τιμές της  $V_{s,30}$  (πιο μαλακά εδάφη) θα έχουν μικρότερα προβλεπόμενα πλάτη απ' ότι τα πιο σφιχρά εδάφη λόγω της μη γραμμικής

απόσβεσης. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο σε μικρότερες παρά σε μεγαλύτερες περιόδους.

Period	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$M_h$
PGV	5.00121	5.04727	4.63188	5.08210	0.18322	-0.12736	0.00000	8.50
PGA	-0.53804	-0.50350	-0.75472	-0.50970	0.28805	-0.10164	0.00000	6.75
0.010	-0.52883	-0.49429	-0.74551	-0.49966	0.28897	-0.10019	0.00000	6.75
0.020	-0.52192	-0.48508	-0.73906	-0.48895	0.25144	-0.11006	0.00000	6.75
0.030	-0.45285	-0.41831	-0.66722	-0.42229	0.17976	-0.12858	0.00000	6.75
0.050	-0.28476	-0.25022	-0.48462	-0.26092	0.06369	-0.15752	0.00000	6.75
0.075	0.00767	0.04912	-0.20578	0.02706	0.01170	-0.17051	0.00000	6.75
0.100	0.20109	0.23102	0.03058	0.22193	0.04697	-0.15948	0.00000	6.75
0.150	0.46128	0.48661	0.30185	0.49328	0.17990	-0.14539	0.00000	6.75
0.200	0.57180	0.59253	0.40860	0.61472	0.52729	-0.12964	0.00102	6.75
0.250	0.51884	0.53496	0.33880	0.57747	0.60880	-0.13843	0.08607	6.75
0.300	0.43825	0.44516	0.25356	0.51990	0.64472	-0.15694	0.10601	6.75
0.400	0.39220	0.40602	0.21398	0.46080	0.78610	-0.07843	0.02262	6.75
0.500	0.18957	0.19878	0.00967	0.26337	0.76837	-0.09054	0.00000	6.75
0.750	-0.21338	-0.19496	-0.49176	-0.10813	0.75179	-0.14053	0.10302	6.75
1.000	-0.46896	-0.43443	-0.78465	-0.39330	0.67880	-0.18257	0.05393	6.75
1.500	-0.86271	-0.79593	-1.20902	-0.88085	0.70689	-0.25950	0.19082	6.75
2.000	-1.22652	-1.15514	-1.57697	-1.27669	0.77989	-0.29657	0.29888	6.75
3.000	-1.82979	-1.74690	-2.22584	-1.91814	0.77966	-0.45384	0.67466	6.75
4.000	-2.24656	-2.15906	-2.58228	-2.38168	1.24961	-0.35874	0.79508	6.75
5.000	-1.28408	-1.21270	-1.50904	-1.41093	0.14271	-0.39006	0.00000	8.50
7.500	-1.43145	-1.31632	-1.81022	-1.59217	0.52407	-0.37578	0.00000	8.50
10.000	-2.15446	-2.16137	-2.53323	-2.14635	0.40387	-0.48492	0.00000	8.50

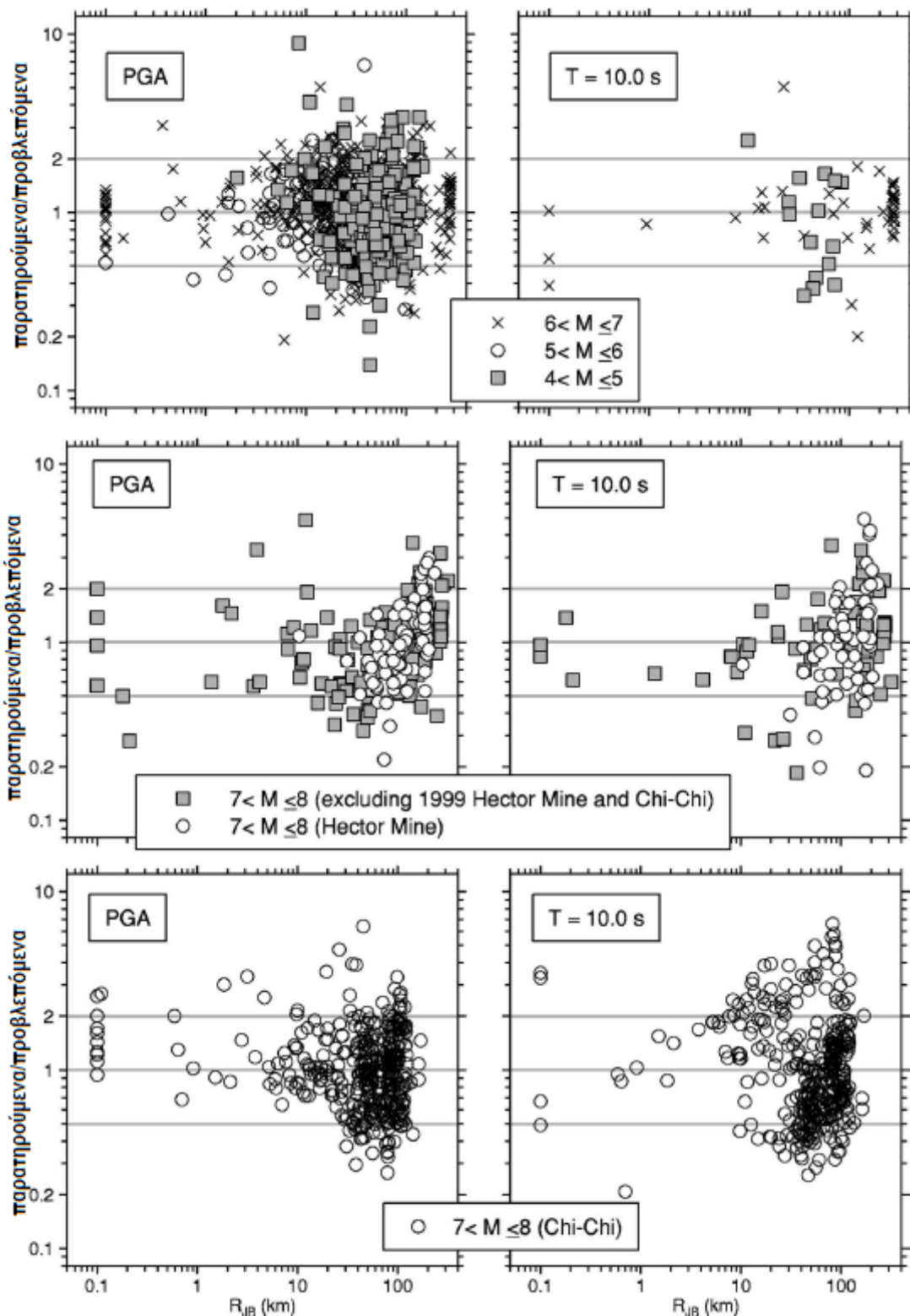
**Πίνακας 2.8:** Συντελεστές μεγέθους

Πολλοί ερευνητές πρότειναν ότι οι υψίσυχνες εδαφικές κινήσεις από σεισμούς με επιφανειακή εμφάνιση των ρηγμάτων είναι ασθενέστερες από αυτές των ρηγμάτων που παραμένουν θαμμένα. Στην **εικόνα 2.15** γίνεται διερεύνηση αυτής της πρότασης, στην οποία παρουσιάζονται τα υπόλοιπα των σεισμικών γεγονότων από την πρώτη φάση παλινδρόμησης, σχεδιασμένα συναρτήσεως του μεγέθους για δυο κατηγορίες σεισμών.



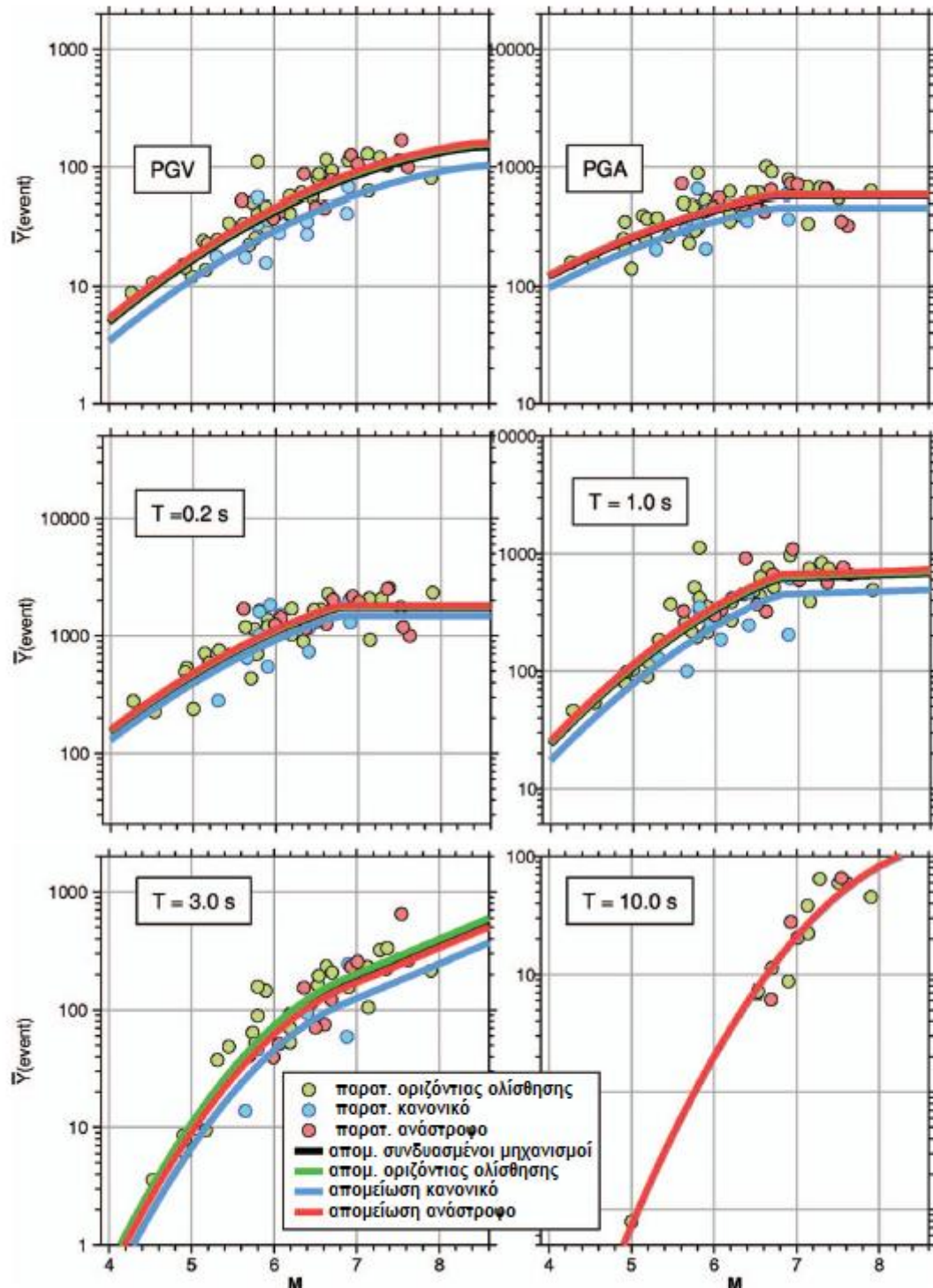
Period	$\sigma$	$\tau_U$	$\sigma_{TU}$	$\tau_M$	$\sigma_{TM}$
PGV	0.500	0.286	0.576	0.256	0.560
PGA	0.502	0.265	0.566	0.260	0.564
0.010	0.502	0.267	0.569	0.262	0.566
0.020	0.502	0.267	0.569	0.262	0.566
0.030	0.507	0.276	0.578	0.274	0.576
0.050	0.516	0.286	0.589	0.286	0.589
0.075	0.513	0.322	0.606	0.320	0.606
0.100	0.520	0.313	0.608	0.318	0.608
0.150	0.518	0.288	0.592	0.290	0.594
0.200	0.523	0.283	0.596	0.288	0.596
0.250	0.527	0.267	0.592	0.267	0.592
0.300	0.546	0.272	0.608	0.269	0.608
0.400	0.541	0.267	0.603	0.267	0.603
0.500	0.555	0.265	0.615	0.265	0.615
0.750	0.571	0.311	0.649	0.299	0.645
1.000	0.573	0.318	0.654	0.302	0.647
1.500	0.566	0.382	0.684	0.373	0.679
2.000	0.580	0.398	0.702	0.389	0.700
3.000	0.566	0.410	0.700	0.401	0.695
4.000	0.583	0.394	0.702	0.385	0.698
5.000	0.601	0.414	0.730	0.437	0.744
7.500	0.626	0.465	0.781	0.477	0.787
10.000	0.645	0.355	0.735	0.477	0.801

**Πίνακας 2.9:** Αβεβαιότητες μεταξύ των δεδομένων ( $\sigma$ ), εντός των δεδομένων ( $\tau$ ) και συνδυαστικές ( $\sigma_\tau$ ). Τα γράμματα  $U$  και  $M$  υποδηλώνουν μη κατηγοριοποιημένο και κατηγοριοποιημένο ρήγμα αντίστοιχα.

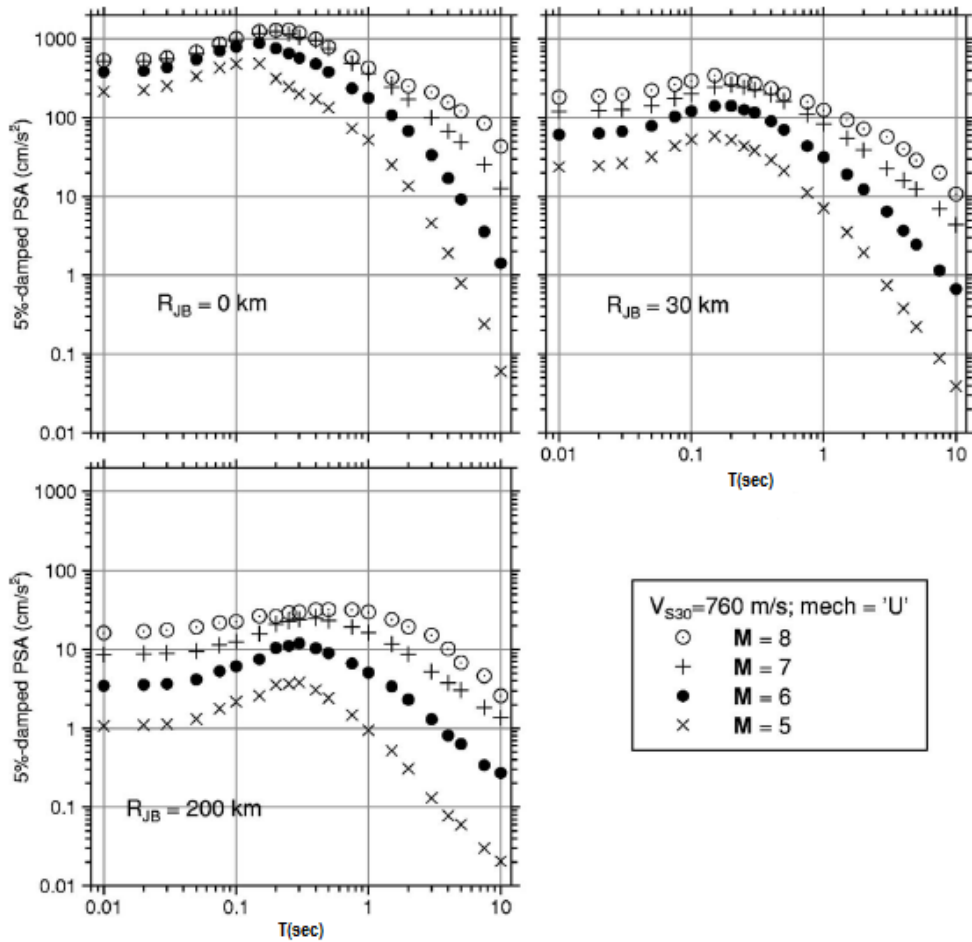


**Εικόνα 2.10:** Υπόλοιπα 1<sup>ης</sup> φάσης παλινδρόμησης χωρισμένα ανάλογα με το μέγεθος για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και φασματική επιτάχυνση για  $T=10$ sec. Τα υπόλοιπα για το σεισμό Chi-Chi παρουσιάζονται ξεχωριστά στο κάτω μέρος των γραφημάτων.

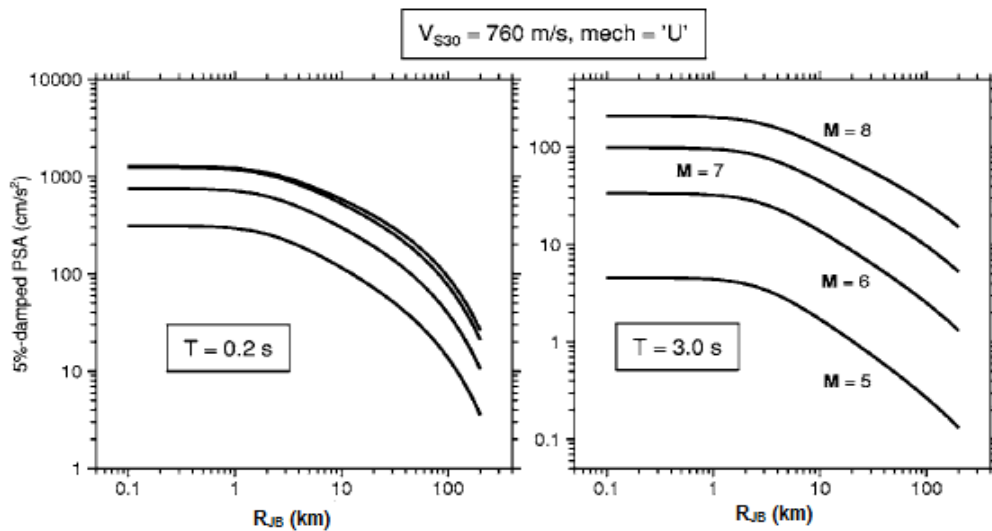




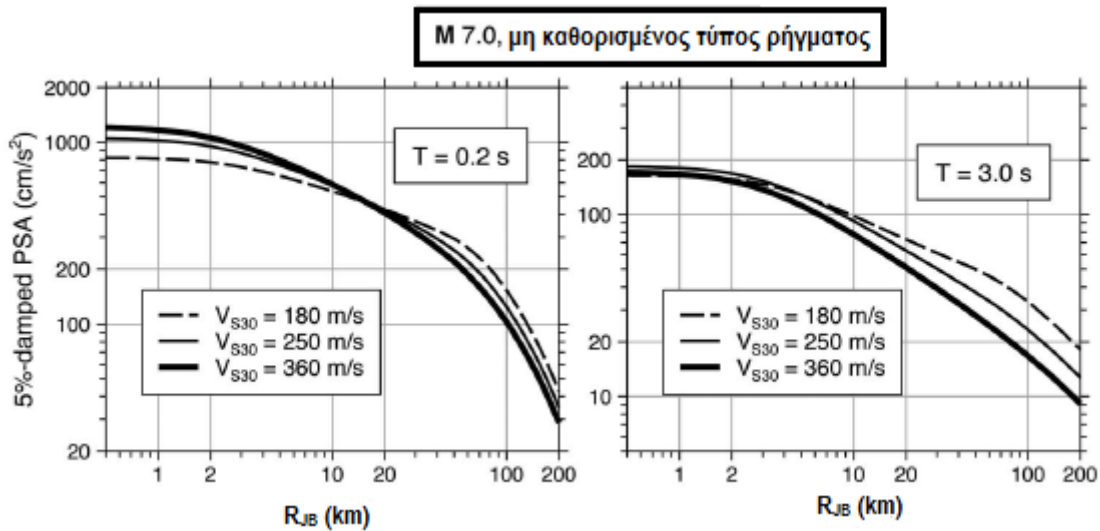
**Εικόνα 2.11:** Ο αντιλογαρίθμος του μέσου λογαρίθμου των καταγραφών κάθε γεγονότος προσαρμοσμένος στην απόσταση αναφοράς του 1km και στην ταχύτητα αναφοράς των 760m/sec σύμφωνα με τις εξισώσεις [14] και [15]. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια κλίμακα στον κατακόρυφο άξονα ώστε να γίνεται εύκολα η σύγκριση από περίοδο σε περίοδο.



**Εικόνα 2.12:** Μέγιστη φασματική επιτάχυνση ως συνάρτηση της περιόδου. Τα φάσματα παρουσιάζονται για τρεις αποστάσεις και τέσσερα σεισμικά μεγέθη, για μη καθορισμένο τύπο ρήγματος και  $V_{s,30}=760\text{m/sec}$ .

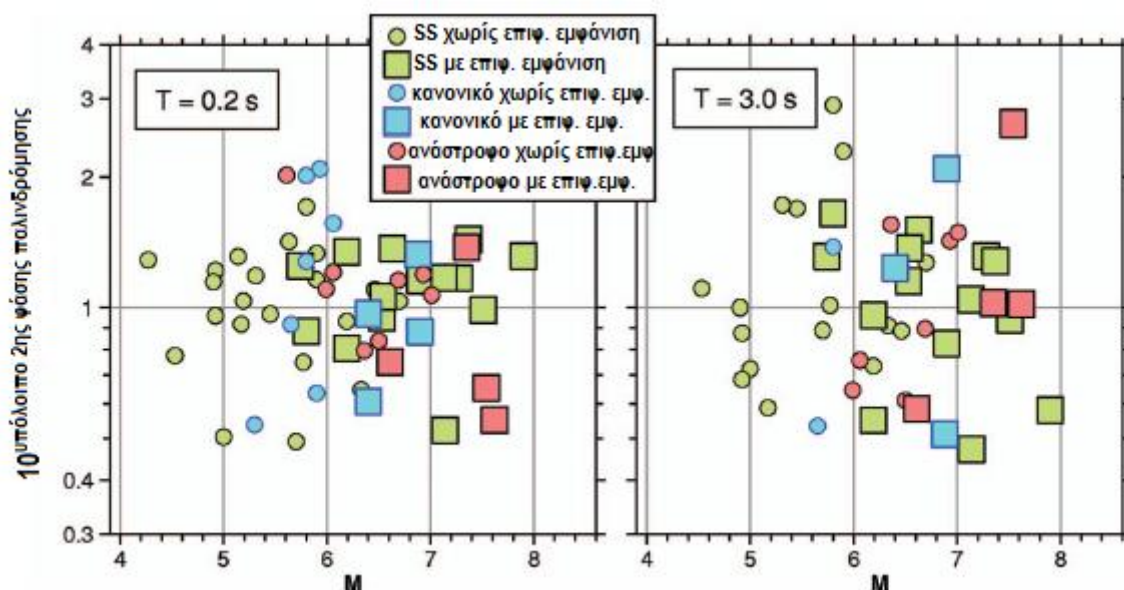


**Εικόνα 2.13:** Μέγιστη φασματική επιτάχυνση ως συνάρτηση της απόστασης. Τα φάσματα παρουσιάζονται για σεισμικά μεγέθη 5, 6, 7 και 8, για μη καθορισμένο τύπο ρήγματος και  $V_{s,30}=760\text{m/sec}$ . Χρησιμοποιήθηκε η ίδια κατακόρυφη κλίμακα ώστε να γίνεται η σύγκριση της κλίμακας του μεγέθους για όλες τις περιόδους.



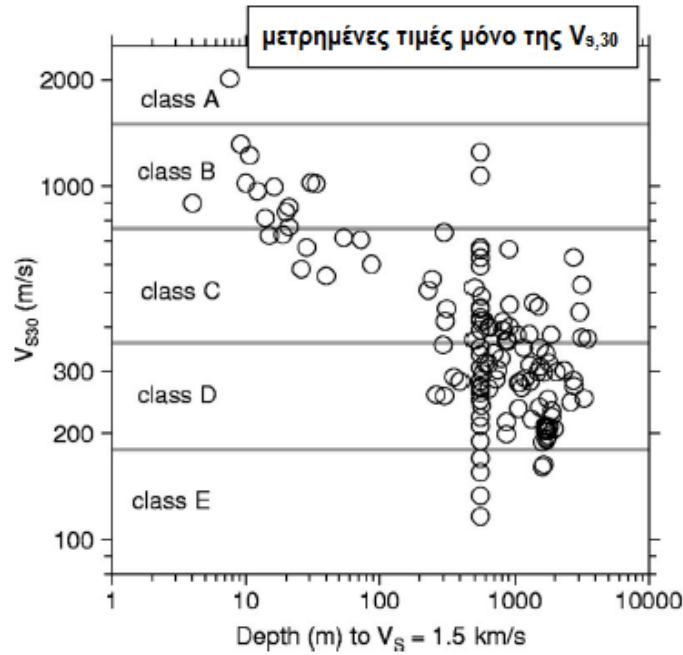
**Εικόνα 2.14:** Μέγιστη φασματική επιτάχυνση ως συνάρτηση της απόστασης για σεισμικό μέγεθος 7, για μη καθορισμένο τύπο ρήγματος και τρεις τιμές της  $V_{s,30}$ . Χρησιμοποιήθηκε η ίδια κατακόρυφη κλίμακα ώστε να γίνεται η σύγκριση της κλίμακας του μεγέθους για τις δυο περιόδους.

Η πρώτη παρατήρηση αφορά το ότι οι περισσότεροι σεισμοί με επιφανειακή εμφάνιση έχουν και μεγαλύτερο μέγεθος, με σχεδόν εξ ολοκλήρου επιφανειακή εμφάνιση για μεγέθη μεγαλύτερα από 7. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε μείωση στις κινήσεις αυτών των σεισμών θα οδηγήσει σε μειωμένη κλιμάκωση με το μέγεθος στη δεύτερη φάση της παλινδρόμησης. Για την παραγωγή της κλιμάκωσης με το μέγεθος για τα γεγονότα με επιφανειακή ή μη εμφάνιση, χρειάζονται δεδομένα και των δυο τύπων ρηγμάτων στο ίδιο εύρος μεγεθών. Όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.15**, μόνο για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης υπάρχει πάνω από μια κατηγορία σεισμών σε ένα σύνθετες εύρος μεγεθών. Επίσης, δεν υπάρχει ένδειξη ότι τα υπόλοιπα που θα προκύψουν θα είναι συστηματικά διαφορετικά για τις δυο κατηγορίες δεδομένων. Για το λόγο αυτό δεν υφίσταται ανάγκη ενσωμάτωσης των τεχνητών μεταβλητών των επιφανειακών ή μη ρηγμάτων στις παραγόμενες εξισώσεις. Καθώς αυξάνεται η εμπιστοσύνη των παραμέτρων που προκύπτουν από προσομοιώσεις με δυναμικά μοντέλα της διάδοσης της διάρρηξης ή καθώς πρόσθετα σεισμικά δεδομένα μπορεί να προκύψουν με το πέρασμα των ετών, ενδέχεται να χρειαστεί στις εξισώσεις και ένας όρος που να λαμβάνει υπόψη το αν το ρήγμα εμφανίζεται στην επιφάνεια ή όχι. Λαμβάνοντάς αυτό το γεγονός υπόψη, πρόκειται να υπάρξει ένας κορεσμός στην κλιμάκωση με το μέγεθος αν τα δεδομένα δεν είναι κατηγοριοποιημένα ανάλογα με την επιφανειακή εμφάνιση ή όχι, τα αποτελέσματα όμως δεν θα είναι δραματικά διαφορετικά.



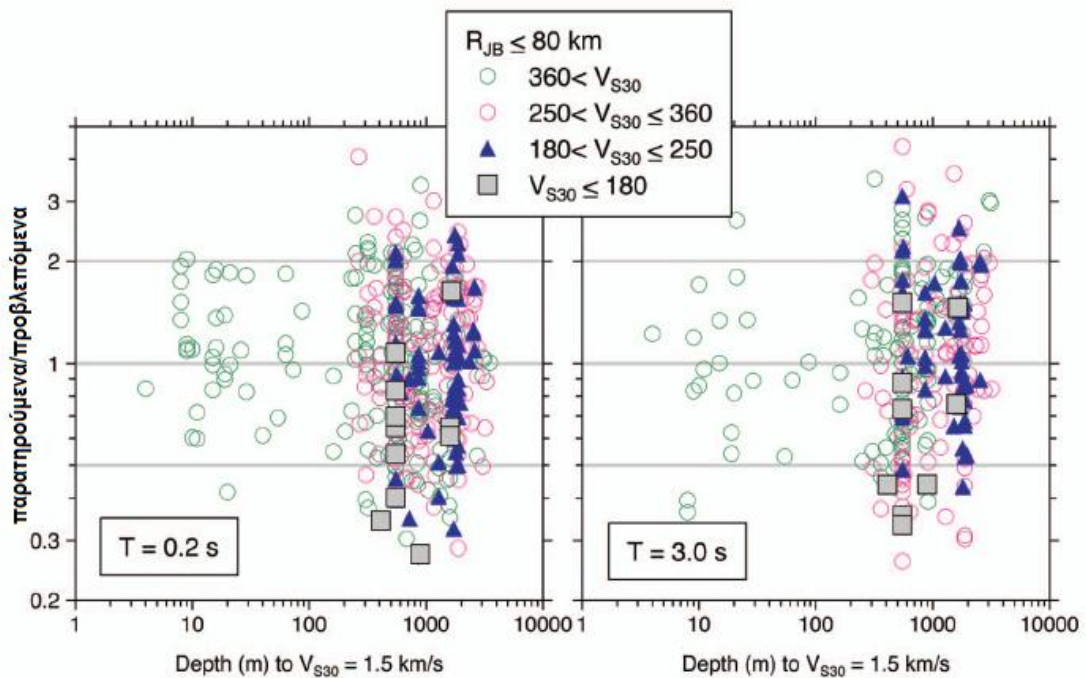
**Εικόνα 2.15:** Αντιλογάριθμος των υπολοίπων της δεύτερης φάσης της παλινδρόμησης συναρτήσει του σεισμικού μεγέθους και των διαφορετικών τύπων ρηγμάτων για τα οποία τα ρήγματα είτε εμφανίζονται είτε όχι στην επιφάνεια.

Άλλος ένας παράγοντας που επιδρά στην εδαφική κίνηση είναι το βάθος της εδαφικής στρώσης, όπου εξετάζεται η επιρροή του στα υπόλοιπα της παλινδρόμησης της πρώτης φάσης. Ένας από τους λόγους για τους οποίους δεν υπάρχει όρος που να αφορά το βάθος στρώσης στις εξισώσεις παρουσιάζεται στην **εικόνα 2.16**, η οποία δείχνει την κατανομή της  $V_{s,30}$  συναρτήσει του βάθους. Η γραφική παράσταση περιέχει όλα τα δεδομένα της νέας βάσης δεδομένων για τα οποία υπάρχουν μετρήσεις της  $V_{s,30}$  και του βάθους της εδαφικής στρώσης. Είναι φανερό ότι σε πιο μαλακές εδαφικές στρώσεις το βάθος και η  $V_{s,30}$  είναι μεγέθη έντονα συσχετισμένα. Για το λόγο αυτό, οποιαδήποτε επιρροή του βάθους τείνει να προσδιοριστεί μέσω της εμπειρικής προσομοίωσης της ενίσχυσης βάσει της θέσης. Προσπαθώντας να διαχωρίσουμε την επιρροή του βάθους του εδαφικού σχηματισμού από την ενίσχυση λόγω θέσης της καταγραφής, απαιτήθηκε χρήση πρόσθετων πληροφοριών και υποθέσεων. Εξετάζοντας τα υπόλοιπα της πρώτης φάσης της παλινδρόμησης έγινε προσπάθεια εντοπισμού κάποιας επίδρασης του βάθους του εδαφικού σχηματισμού που δεν είχε παρατηρηθεί νωρίτερα. Παρατηρήθηκε ότι τα υπόλοιπα δεν συσχετίζονται με το βάθος του σχηματισμού εκτός από μια τάση για θετικές τιμές υπολοίπων (υποεκτίμηση με συντελεστή περίπου 1.6) σε μεγάλες περιόδους για αποστάσεις άνω των 80km για θέσεις με βάθος μέχρι 700m.



**Εικόνα 2.16:** Η  $V_{s,30}$  συναρτήσει του βάθους του εδαφικού σχηματισμού. Παρουσιάζονται όλες οι καταγραφές της νέας βάσης δεδομένων για τις οποίες υπάρχουν μετρήσεις ταχύτητας και βάθους.

Η **εικόνα 2.17** περιέχει υπόλοιπα της πρώτης φάσης παλινδρόμησης συναρτήσει του βάθους μέχρι ταχύτητα  $1.5\text{km/sec}$ , όπου παρουσιάζονται μόνο υπόλοιπα για  $R_{JB} \leq 80\text{km}$ , με σκοπό να μη γίνει κακό ταίριασμα των υπολοίπων όταν υπάρχει πιο μακρινή εξασθένηση.



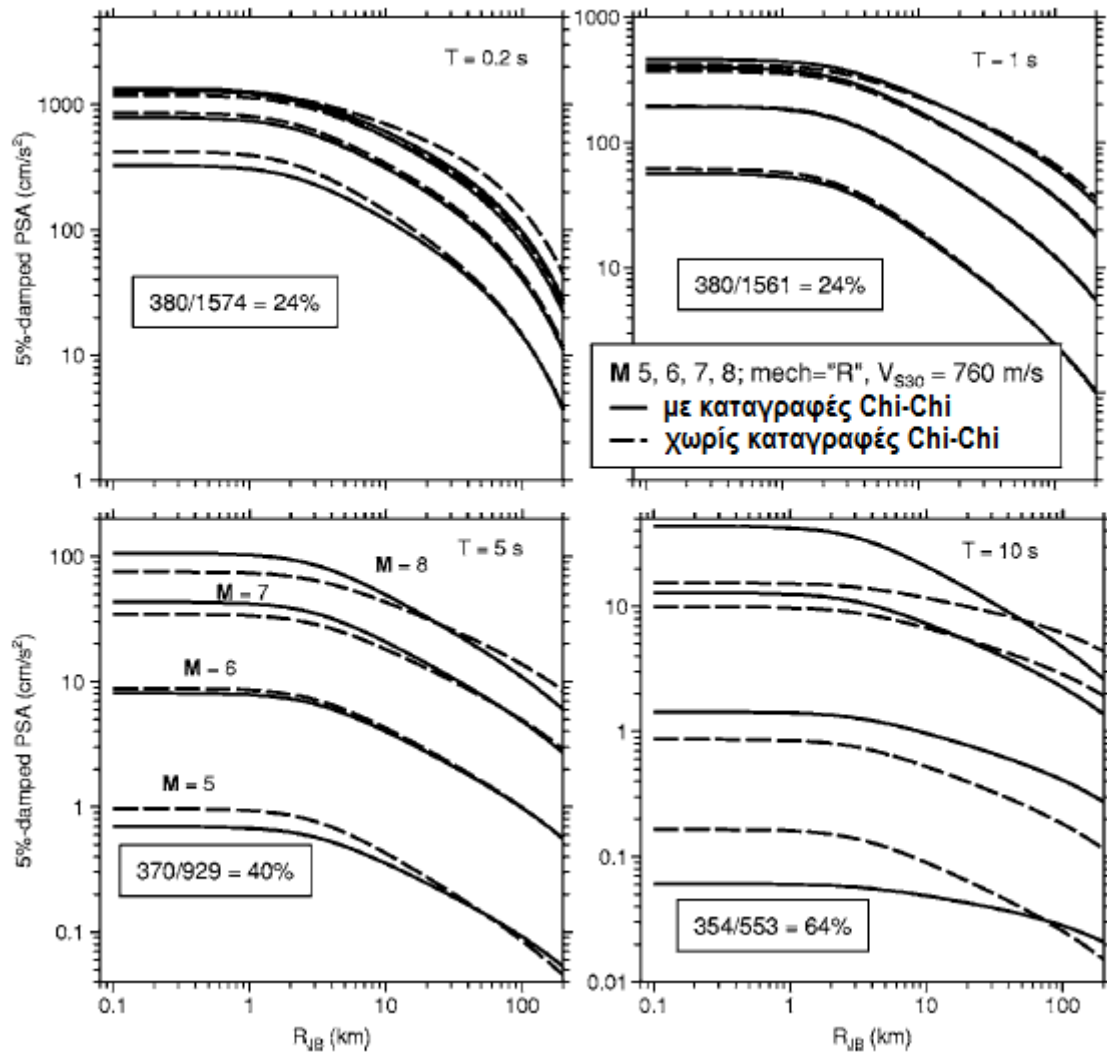
**Εικόνα 2.17:** Τα υπόλοιπα της πρώτης φάσης της παλινδρόμησης συναρτήσει του βάθους μέχρι  $V_s=1.5\text{km/sec}$ , διαφορισμένα με τη  $V_{s,30}$  για  $R_{JB} \leq 80\text{km}$ .



Υποθέτοντας ότι οι θετικές τιμές υπολοίπων οφείλονται αποκλειστικά στην επίδραση του βάθους του σχηματισμού, οι τάσεις των γραφικών παραστάσεων υποδεικνύουν υποεκτίμηση της κίνησης σε θέσεις με βαθύ εδαφικό σχηματισμό σε μεγάλες περιόδους από τις παραγόμενες εξισώσεις. Για πιο ρηχό σχηματισμό και κοντινότερες αποστάσεις δεν υφίσταται επίδραση του βάθους του σχηματισμού. Ένας άλλος λόγος για μικρή επίδραση του βάθους του σχηματισμού βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο ο σχηματισμός αποκρίνεται στα επερχόμενα σεισμικά κύματα και στο πως αυτά εισέρχονται, ανακλώνται και εξέρχονται από το σχηματισμό.

## 2.7 Σύγκριση των εδαφικών κινήσεων που προέκυψαν με ή χωρίς τη χρήση του σεισμού του Chi-Chi (Ταϊβάν 1999)

Λόγω του ότι οι καταγραφές του σεισμού του Chi-Chi αποτελούν ένα μεγάλο κλάσμα των συνολικών καταγραφών θα ήταν χρήσιμο να παρατηρηθεί η αλλαγή των εξισώσεων σε περίπτωση μη χρησιμοποίησης των δεδομένων του συγκεκριμένου σεισμού στην παλινδρόμηση πρώτης και δεύτερης φάσης. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία επαναλήφθηκε η ανάλυση χωρίς να ληφθούν υπόψη οι καταγραφές του συγκεκριμένου σεισμού. Η **εικόνα 2.18** παρουσιάζει συγκριτικά τις εξισώσεις που προέκυψαν με και χωρίς τα δεδομένα του σεισμού με ταυτόχρονη παρουσίαση του ποσοστού των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από το σεισμό του Chi-Chi στην ανάλυση παλινδρόμησης (ο αριθμός των καταγραφών του Chi-Chi είναι ο αριθμητής του κλάσματος). Είναι φανερό ότι ο αριθμός των δεδομένων του Chi-Chi αυξάνεται με την περίοδο, φτάνοντας το 64% των συνολικών δεδομένων για περίοδο 10sec. Για το λόγο αυτό δεν αποτελεί έκπληξη ότι η προκύπτουσα φασματική επιτάχυνση για περίοδο 10sec προκύπτει πολύ διαφορετική λαμβάνοντας ή όχι υπόψη τα δεδομένα του σεισμού του Chi-Chi. Στις ενδιάμεσες μικρές περιόδους, βέβαια, οι διαφορές δεν είναι δραματικές. Παρουσιάζει ακόμα μεγάλο ενδιαφέρον το ότι μπορεί να εμφανιστούν διαφορές ακόμα και για μικρά σεισμικά μεγέθη παρά το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται μόνο οι καταγραφές της κύριας δόνησης του σεισμού του Chi-Chi και όχι οι μετασεισμοί. Η εξήγηση αυτού του παράδοξου συμπεράσματος οφείλεται στο ότι ο σεισμός του Chi-Chi είναι πολύ καλά καταγεγραμμένος και για το λόγο αυτό τα δεδομένα του κυριαρχούν στην πρώτη φάση της παλινδρόμησης στην οποία οι καταγραφές είναι ισοβαρείς στον καθορισμό των όρων των εξισώσεων που εξαρτώνται από την απόσταση. Αυτοί οι όροι έπειτα επηρεάζουν τους όρους των σεισμικών γεγονότων και αυτό με τη σειρά του επηρεάζει την κλιμάκωση του μεγέθους. Εν κατακλείδι, παρά το ότι ο σεισμός του Chi-Chi αν ληφθεί υπόψη επηρεάζει τις εξισώσεις, είναι μόνο ένας σημαντικός παράγοντας που ελέγχει τις προβλεπόμενες φασματικές τιμές επιταχύνσεων σε περιόδους μεγαλύτερες των 5sec.



**Εικόνα 2.18:** Σύγκριση των φασματικών επιταχύνσεων για τέσσερις διαφορετικές περιόδους των εξισώσεων που προέκυψαν στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιώντας ή όχι τις καταγραφές της κύριας δόνησης του σεισμού του Chi-Chi. Οι λόγοι είναι ο αριθμός των καταγραφών του σεισμού του Chi-Chi που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των τελικών εξισώσεων, διαιρεμένοι με τον ολικό αριθμό των καταγραφών.





# 3

## ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΣΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

---

### 3.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται δυο μοντέλα πρόβλεψης εδαφικής κίνησης, αυτό του Rowshandel (2006) και αυτό των Shahi – Baker (2011). Το πρώτο ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά της διάρρηξης στην εδαφική κίνηση, ενώ το δεύτερο λαμβάνει υπόψη την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας και είναι αυτό που θα λάβουμε υπόψη και ακολούθως στη μελέτη για να προκύψουν τα ενισχυμένα φάσματα επιτάχυνσης λόγω αυτού του φαινομένου.

Τα χαρακτηριστικά της διάρρηξης έχουν σημαντική επίδραση στο επίπεδο και τη διανομή των εδαφικών σεισμικών κινήσεων του κοντινού πεδίου. Η υπάρχουσα κατάσταση γνώσεων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των χαρακτηριστικών της πηγής στις εδαφικές κινήσεις, καθιστά ικανή τη διεξαγωγή μιας ποσοτικής ανάλυσης της επίδρασης της διάρρηξης στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Τα χαρακτηριστικά της σεισμικής πηγής κατηγοριοποιούνται σε δυο κατηγορίες ώστε να ληφθούν υπόψη απλοποιητικά στα μοντέλα ανάλυσης του σεισμικού κινδύνου. Έτσι, δημιουργούνται οι δυο κατηγορίες, αυτή της κατευθυντικότητας της διάρρηξης και αυτή της ετερογένειας της διάρρηξης. Η κατευθυντικότητα της διάρρηξης αντανακλά την επίδραση της διεύθυνσης της διάρρηξης στο ρήγμα, όπως αυτό φαίνεται από τη θέση μελέτης. Το εν λόγω χαρακτηριστικό κρίνεται σημαντικό ακόμα και στην περίπτωση της ομοιογένειας της διάρρηξης, η οποία οδηγεί σε ομοιόμορφη απελευθέρωση ενέργειας στο επίπεδο της διάρρηξης. Για να γίνει κατανοητή η επίδραση της κατευθυντικότητας της διάρρηξης, και πιο συγκεκριμένα αυτής που παράχθηκε κατά τα σύγχρονα σεισμικά γεγονότα, πρέπει να γίνει ενσωμάτωση της

επίδρασης της ομογενούς διάρρηξης του ρήγματος στις μεθοδολογίες ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Ωστόσο, η διάρρηξη κυρίως μεγάλων σεισμικών μεγεθών είναι κάθε άλλο παρά ομογενής, γεγονός που οφείλεται σε ανωμαλίες γεωμετρίας του ρήγματος, ανομοιομορφίες των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και στην ποικιλία των περιφερειακών και τοπικών τάσεων. Ένας σημαντικός παράγοντας της ετερογένειας της διάρρηξης είναι η ύπαρξη επιφανειών με τραχύτητα (*asperity*), δηλαδή ζωνών με χαρακτηριστικά αντοχής και τάσεων σημαντικά διαφορετικά από αυτά των υπολοίπων περιοχών του ρήγματος. Η παρουσία των συγκεκριμένων περιοχών οδηγεί σε πιο ετερογενείς διαρρήξεις που χαρακτηρίζονται από ανομοιομορφίες στην ολίσθηση, στο ρυθμό ολίσθησης, στη διαβάθμιση των τάσεων, στην ταχύτητα της διάρρηξης, στην παραμένουσα μετασεισμική τάση και στη μετασεισμική δραστηριότητα του ρήγματος. Προς το παρόν, οι ετερογένειες της σεισμικής πηγής δε συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου για σχεδιασμό κατασκευών και λήψη αποφάσεων, καθώς δεν έχουν μελετηθεί και κατανοηθεί πλήρως. Παρ' όλα αυτά, πληροφορίες που αφορούν τη φύση των περιοχών με διαφορετική τραχύτητα, τη διανομή της ολίσθησης και άλλα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τις μελέτες των πιο πρόσφατων σεισμικών γεγονότων, μπορούν να ελεγχθούν ώστε να καθοριστεί η επίδρασή τους στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου. Μια μέθοδος ώστε να ληφθούν τα εν λόγω (ομογενή ή ετερογενή) χαρακτηριστικά υπόψη στα μοντέλα προσδιορισμού του σεισμικού κινδύνου είναι η ενσωμάτωσή τους στα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης ή στις σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης καθώς απομακρυνόμαστε από τη σεισμική πηγή. Οι παρούσες σχέσεις εξασθένησης δεν λαμβάνουν υπόψη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της διάρρηξης της πηγής. Φυσικά, η παράμετρος αβεβαιότητας  $\sigma$  των υπαρχουσών προσομοιώσεων λαμβάνει εν μέρει υπόψη αυτά τα χαρακτηριστικά. Η επόμενη γενιά σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής κίνησης είναι πολύ πιθανό να συμπεριλάβει την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Οι υπάρχουσες σχέσεις μπορούν να ελεγχθούν με τη χρήση καταγραφών πρόσφατων σεισμικών γεγονότων και να τροποποιηθούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας.

Στην έρευνα του Rowshandel (2006), λήφθηκε υπόψη ένα μοντέλο ικανό να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διάρρηξης της πηγής στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου και ελέγχθηκε για μια ποικιλία γεωμετρίας και τύπου διάρρηξης. Τα προκύπτοντα αποτελέσματα εφαρμόστηκαν σε σχέσεις απομείωσης και προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Η νέα βάση δεδομένων (*NGA*) καθώς επίσης και τέσσερις ευρέως χρησιμοποιούμενες σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης (Sadigh et al. 1997, Abrahamson και Silva 1997, Campbell και Bozorgnia 2003 και Boore, Joyner και Fumal 1997) χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία και τον έλεγχο του μοντέλου. Για να προσδιοριστεί η επίδραση του τύπου της διάρρηξης στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου, το μοντέλο σε συνδυασμό με τις τέσσερις σχέσεις προσδιορισμού της εδαφικής κίνησης, εισάχθηκε σε ένα λογισμικό πρόβλεψης σεισμικού κινδύνου (Rowshandel 2004) και προέκυψαν κατανομές εδαφικής κίνησης για μεγάλο αριθμό ρηγμάτων και διάφορους μηχανισμούς διάρρηξης. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη μελέτη του βαθμού

συσχέτισης της παράλληλης (*FP*) και της κάθετης (*FM*) συνιστώσας του ρήγματος με τη διεύθυνση της διάρρηξης. Για το λόγο αυτό, στη μελέτη χρησιμοποιείται ο μέσος όρος (*AVE*) της οριζόντιας σεισμικής κίνησης και προκύπτει η συσχέτιση της κάθετης και της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας με την κατευθυντικότητα για το σεισμό του Northridge (17 Ιανουαρίου 1994).

Οι επιδράσεις της πρόσω κατευθυντικότητας είναι γνωστό ότι προκαλούν εδαφικές κινήσεις με μορφή παλμού στις περιοχές κοντά στο ρήγμα. Οι Shahi και Baker (2011) προτείνουν μια μέθοδο ενσωμάτωσης των φαινομένων κοντινού πεδίου στις εξισώσεις πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Επίσης, προτείνεται μια νέα μέθοδος κατηγοριοποίησης της εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη, περιστρέφοντας τις εδαφικές καταγραφές και εντοπίζοντας τον παλμό σε όλες τις διευθύνσεις. Η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την αποκωδικοποίηση 179 καταγραφών της νέας βάσης σεισμικών δεδομένων (*NGA*), όπου μια παλμική κίνηση παρατηρείται το λιγότερο σε μια διεύθυνση. Οι προκύπτουσες πληροφορίες από τη συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εκτιμηθεί η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε κάποια περιοχή, η διεύθυνση εμφάνισης του παλμού σε σχέση με τη διεύθυνση του ρήγματος, η περίοδος της παλμικής κίνησης και η ενίσχυση του φάσματος απόκρισης λόγω της παρουσίας του παλμού στην εδαφική κίνηση. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αναπτύσσεται κλιμακωτά ώστε να καταστεί δυνατή τυχόν τροποποίηση κάποιας εκ των σχέσεων αν μελλοντικά αναπτυχθεί περαιτέρω γνώση επί του θέματος. Τέλος, η σχέσεις που προκύπτουν συγκρίνονται με ήδη υπάρχουσες, προκειμένου να εκτιμηθούν οι παρόμοιες επιδράσεις στον προσδιορισμό της φασματικής επιτάχυνσης.

Οι εδαφικές κινήσεις με παρουσία παλμού στην αρχή της χρονοϊστορίας της ταχύτητας ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία εδαφικών κινήσεων που προκαλούν πολλές καταστροφές στις κατασκευές. Αυτό το είδος εδαφικής κίνησης, το οποίο στην έρευνα των Shahi και Baker (2011) αναφέρεται ως παλμική κίνηση, παρατηρείται συνήθως σε περιοχές πλησίον ενός ρήγματος και πιστεύεται ότι προκαλείται πρωτίστως λόγω της παρουσίας των φαινομένων πρόσω κατευθυντικότητας (Somerville et al. 1997, Somerville 2003 και 2005, Spudlich και Chiu 2008). Οι παλμικές εδαφικές κινήσεις αυξάνουν τις σεισμικές απαιτήσεις των κατασκευών και προκαλούν εκτεταμένες καταστροφές, όπως παρατηρήθηκε σε διάφορους σεισμούς. Τα συμβατικά μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούνται στην πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δε λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη παλμικής κίνησης και γι' αυτό ίσως να υποεκτιμούν τον σεισμικό κίνδυνο σε περιοχές κοντινού πεδίου όπου αναμένεται να εμφανιστεί ο παλμός. Είναι πολύ σημαντικό να μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις της εν λόγω κίνησης ώστε να εκτιμηθεί σωστά ο σεισμικός κίνδυνος και να ενσωματωθούν τα φαινόμενα κατευθυντικότητας στους υπολογισμούς του τελευταίου. Η μόνιμη παραμένουσα μετακίνηση του εδάφους που αποτελεί ακόμα ένα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Στο παρελθόν έγιναν πολλές προσπάθειες ενσωμάτωσης της επίδρασης του παλμού του κοντινού πεδίου στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Εκεί δόθηκε έμφαση στη μοντελοποίηση της ενίσχυσης του φάσματος απόκρισης λόγω της

παλμικής κίνησης είτε αυξάνοντας ή μειώνοντας μονοτονικά τις φασματικές συντεταγμένες σε ένα εύρος περιόδων (Somerville et al. 1997, Abrahamson 2000) είτε ενισχύοντας το φάσμα απόκρισης σε ένα στενό εύρος περιόδων κοντά στην περίοδο του παλμού ( $T_p$ ) (Somerville 2005, Tothong et al. 2007). Τα πρώτα μοντέλα αναφέρονται συνήθως ως αυτά με την ευρεία ζώνη ενώ τα τελευταία ως αυτά με τη στενή ζώνη. Η πορεία μελέτης αυτής της εργασίας επεκτείνει την πορεία των Tothong et al (2007) και χρησιμοποιεί επιπρόσθετα μοντέλα περιοριζόμενων καταγραφών, αντί για τα παλαιότερα χρησιμοποιούμενα υποθετικά μοντέλα. Η συγκεκριμένη μελέτη δίνει επίσης τη δυνατότητα υπολογισμού της φασματικής επιτάχυνσης σε οποιαδήποτε τυχαία διεύθυνση περιμετρικά του ρήγματος, ενώ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μοντέλο στενής ζώνης καθώς η φασματική επιτάχυνση ενισχύεται σε ένα εύρος περιόδων κεντραρισμένων γύρω από την περίοδο του παλμού. Παρ' όλα αυτά, δε μπορούν να γίνουν υποθέσεις εκ των προτέρων όσον αφορά τον αριθμό των περιόδων που ενισχύονται γύρω από την περίοδο του παλμού και το μέγεθος της ενίσχυσης. Το μοντέλο προέκυψε εντελώς εμπειρικά ενώ ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος περιστρέφει την εδαφική κίνηση και εντοπίζει τον παλμό όχι μόνο στην κάθετη στο ρήγμα αλλά σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτή η τροποποίηση επιτρέπει την αναγνώριση των παλμών της ταχύτητας σε τυχαίες διευθύνσεις, οι οποίες αργότερα χρησιμοποιούνται στη βαθμονόμηση των μοντέλων πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης.

Η συνολική έρευνα περιλαμβάνει μοντέλα πρόβλεψης της πιθανότητας εμφάνισης παλμού για μια δεδομένη γεωμετρία πηγής και θέσης καταγραφής, την πιθανότητα παρατήρησης παλμού σε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση δεδομένου ότι έχει παρατηρηθεί ο παλμός σε κάποια θέση καταγραφής και την απόσβεση του φάσματος απόκρισης λόγω της απουσίας παλμού στην εδαφική κίνησης κοντινού πεδίου.

### 3.2 Περιγραφή της έρευνας του Rowshandel για την ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών της διάρρηξης στα μοντέλα εδαφικής κίνησης

#### 3.2.1 Τα υπάρχοντα μοντέλα που ενσωματώνουν την κατευθυντικότητα

Το μοναδικό μοντέλο που υφίσταται στη βιβλιογραφία και λαμβάνει υπόψη την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου είναι αυτό των Somerville et al. 1997. Στο συγκεκριμένο μοντέλο αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός της διάρρηξης σε δυο κατηγορίες: οριζόντια ολίσθηση ή κατακόρυφη βύθιση. Η έρευνα υποθέτει ότι οποιεσδήποτε μεταβολές του μεγέθους της εδαφικής κίνησης λόγω κατευθυντικότητας εξαρτώνται από δυο γεωμετρικές παραμέτρους: (1) τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της διάρρηξης και της διεύθυνσης διάδοσης των σεισμικών κυμάτων από την πηγή στη θέση μελέτης (συμβολίζεται με  $\theta$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και με  $\varphi$  για ρήγματα κατακόρυφης βύθισης) και (2) το λόγο του μήκους διάρρηξης  $s$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ή του πλάτους διάρρηξης  $d$  για ρήγματα κατακόρυφης βύθισης που σχηματίζεται μεταξύ του υποκέντρου και της θέσης καταγραφής. Οι παράμετροι

κατευθυντικότητας για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης συμβολίζονται ως  $X$  και  $Y$  αντίστοιχα και προκύπτουν από:

$$X = \frac{s}{L} \cdot \cos\theta \quad \text{και} \quad Y = \frac{d}{w} \cdot \cos\varphi \quad [1]$$

Οι Somerville et al. (1997) συσχέτισαν τις παραμέτρους κατευθυντικότητας με τα υπόλοιπα της εδαφικής κίνησης ( $y$ ) που ορίζονται ως η διαφορά μεταξύ του λογαρίθμου της καταγεγραμμένης φασματικής επιτάχυνσης από το λογάριθμο της αντίστοιχης υπολογιζόμενης από τις σχέσεις:

$$y = \begin{cases} C_1 + C_2 \cdot X & \text{για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης} \\ C_1 + C_2 \cdot Y & \text{για ρήγματα κατακόρυφης βύθισης} \end{cases} \quad [2]$$

όπου τα  $C_1$  και  $C_2$  είναι συντελεστές κατευθυντικότητας εξαρτώμενοι από την περίοδο. Οι Somerville et al. (1997) χρησιμοποίησαν τη βάση δεδομένων και τη σχέση εξασθένησης της εδαφικής κίνησης των Abrahamson και Silva 1997 για τον προσδιορισμό τους.

Μια σημαντική απλοποιητική παραδοχή της σχέσης των Somerville et al. 1997 αποτελεί ο αρχικός διαχωρισμός των ρηγμάτων σε απολύτως οριζόντιας ολίσθησης ή κατακόρυφης βύθισης. Αυτός ο διαχωρισμός οδηγεί σε υπόθεση μιας μόνο διάρρηξης, δηλαδή στην περίπτωση των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης η διάρρηξη θεωρείται ότι εξαρτάται από το βάθος και ότι είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ολίσθησης ενώ στην περίπτωση των ρηγμάτων κατακόρυφης βύθισης η διάρρηξη θεωρείται ότι εξαρτάται από την κατεύθυνση της ολίσθησης και κινείται μόνο στη διεύθυνση της βύθισης του ρήγματος. Ως αποτέλεσμα, υποτίθεται μονοδιάστατη διάρρηξη και αγνοούνται τυχόν τροποποιήσεις κατά μήκος του πλάτους στην περίπτωση των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης και κατά μήκος του μήκους στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης. Το μοντέλο είναι περισσότερο εφαρμόσιμο σε περιπτώσεις μακρών και στενών ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης και κοντών και πλατιών ρηγμάτων κατακόρυφης βύθισης. Ένας δεύτερος περιορισμός της συγκεκριμένης μελέτης είναι ο τρόπος που λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της κατευθυντικότητας στις περιοχές μακριά από τα δυο άκρα του ρήγματος στη διεύθυνση της διάρρηξης. Οι ερευνητές γραμμικοποίησαν την περιοχή σχηματίζοντας δυο ευθείες διερχόμενες από τα άκρα του ρήγματος και με διεύθυνση  $67.5^\circ$  σε σχέση με την κατεύθυνση της διάρρηξης. Ο συγκεκριμένος τυχαίος τρόπος γραμμικοποίησης της ζώνης κοντά στη σεισμική πηγή για τα φαινόμενα της κατευθυντικότητας θα μπορούσε να έχει αρνητικές συνέπειες στο επίπεδο και την κατανομή του σεισμικού κινδύνου σε περιοχές που περικλείουν τα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης. Βασιζόμενος σε παρατηρηθείσες εδαφικές κινήσεις ο Abrahamson (2000) τροποποίησε το μοντέλο των Somerville et al. (1997) δίνοντας μια μέγιστη τιμή για την τιμή της κατευθυντικότητας για μικρές γωνίες, περιορίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις παραμέτρους κατευθυντικότητας  $X$  και  $Y$  μέχρι το 0.4.

### 3.2.2 Το προτεινόμενο μοντέλο

Το προτεινόμενο μοντέλο αποτελεί γενίκευση αυτού των Somerville et al (1997) και αποτελείται από μια παράμετρο κατευθυντικότητας  $\xi$  και δυο σταθερές  $C_1$  και  $C_2$ . Το φαινόμενο της κατευθυντικότητας λαμβάνεται υπόψη και στη λογαριθμική του

μορφή ως  $C_2 \cdot \xi$ . Επίσης, η προτεινόμενη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω για τη δημιουργία νέων σχέσεων εξασθένισης της εδαφικής κίνησης ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με σχέσεις που δε λαμβάνουν υπόψη την κατευθυντικότητα. Όταν χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη νέων σχέσεων εξασθένισης ο συντελεστής  $C_1$  μπορεί να απορροφηθεί από τον ελεύθερα επιλεγόμενο συντελεστή της σχέσης εξασθένισης και η μόνη σταθερά που προκύπτει από την ανάλυση είναι ο συντελεστής  $C_2$ . Με άλλα λόγια, ο πρώτος συντελεστής αφορά στην επίδραση του συστηματικού σφάλματος της βάσης δεδομένων (λόγω της διαφορετικότητας των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη της σχέσης εξασθένισης και του μοντέλου) και μόνο ο δεύτερος συντελεστής εκπροσωπεί την ευαισθησία της εδαφικής κίνησης σε σχέση με τη διεύθυνση της διάρρηξης.

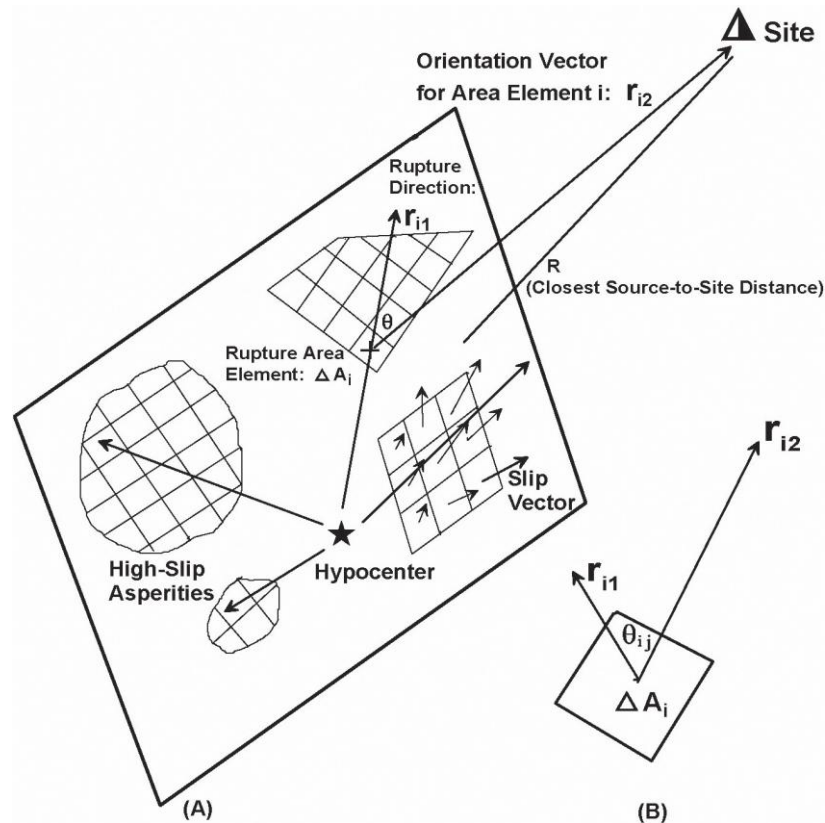
Το μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ότι η επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας είναι ανάλογη με το κλάσμα της επιφάνειας του ρήγματος που διαρρηγνύεται προς τη θέση μελέτης. Αναλόγως, η συνεισφορά της εδαφικής κίνησης σε κάποια θέση λόγω της κατευθυντικότητας της πηγής λαμβάνεται ανάλογη προς το ενεργό κλάσμα της επιφάνειας του ρήγματος που ολισθαίνει προς τη θέση μελέτης. Με αυτό τον ορισμό, η ενεργός παράμετρος κατευθυντικότητας σε κάποια θέση  $j$  λόγω της ύπαρξης ενός ρήγματος με εμβαδόν  $A$  μπορεί να προκύψει από τη σχέση:

$$\xi_j = \frac{\sum_{i=1}^N \zeta_i \Delta A_i \vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{\sum_{i=1}^N \Delta A_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \zeta_i \Delta A_i \cos \theta_{ij}}{A} \quad [3]$$

όπου το  $\Delta A_i$  αποτελεί προσαύξηση της περιοχής του ρήγματος που ολισθαίνει στη διεύθυνση που αναπαριστάται από το μοναδιαίο διάνυσμα  $\vec{r}_1$ ,  $\vec{r}_2$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που ορίζει τη διεύθυνση από την προσαύξηση  $\Delta A_i$  της περιοχής της διάρρηξης μέχρι τη θέση  $j$ ,  $\theta_{ij}$  είναι η γωνία από την πηγή μέχρι τη θέση καταγραφής ( $\cos \theta_{ij} = \vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2$ ) και η παράμετρος  $\zeta_i$  περιλαμβάνεται στη σχέση ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση της προσαύξησης της κινούμενης επιφάνειας του ρήγματος στην εδαφική κίνηση στη θέση  $j$  (**εικόνα 3.1**). Η παράμετρος  $\zeta$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών ανομοιομορφίας της διάρρηξης. Λαμβάνεται ως μηδενική όταν η επαύξηση της επιφάνειας  $\Delta A_i$  απελευθερώνει σχεδόν μηδενική ποσότητα ενέργειας άρα δεν διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην προκύπτουσα εδαφική κίνηση. Χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες ως προς την ανομοιομορφία της διάρρηξης του ρήγματος, όπως οι περιοχές διαφοροποιημένης τραχύτητας και η διανομή των ολισθήσεων, προκύπτουν κατάλληλες τιμές για την παράμετρο  $\zeta$ . Όταν ο στόχος της μελέτης είναι η προσομοίωση μόνο της κατευθυντικότητας της διάρρηξης και η επίδραση της ανομοιομορφίας μπορεί να αγνοηθεί, τότε  $\zeta=1$  για όλες τις περιοχές της επιφάνειας ολίσθησης. Αυτή η περίπτωση αναφέρεται και ως ομογενής διάρρηξη και η προκύπτουσα παράμετρος  $\xi$  αναφέρεται και ως η παράμετρος κατευθυντικότητας της ομογενούς διάρρηξης ή απλούστερα ως παράμετρος κατευθυντικότητας.

Ο στόχος της δημιουργίας του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν η επίλυση των δυο προβλημάτων του μοντέλου των Somerville et al (1997) που προαναφέρθηκαν.

Με την παρούσα σχέση δε χρειάζεται η κατηγοριοποίηση των ρηγμάτων σύμφωνα με τον τύπο διάρρηξης και η επίδραση της πάνω και κάτω διάρρηξης στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και της κατά μήκος διάρρηξης στα ρήγματα κατακόρυφης βύθισης μπορούν να ληφθούν άμεσα υπόψη. Επιπρόσθετα, δεν υφίσταται ανάγκη γραμμικοποίησης στα άκρα του ρήγματος καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την επίδραση οποιασδήποτε μορφής διάρρηξης σε ρήγματα οποιασδήποτε γεωμετρίας και δύναται να συμπεριλάβει τις επιδράσεις της ετερογένειας της διάρρηξης.



**Εικόνα 3.1:** (A) Σχηματικό διάγραμμα της γεωμετρίας του ρήγματος, του προσανατολισμού σε σχέση με τη θέση καταγραφής και κάποιων χαρακτηριστικών της διάρρηξης και (B) διεύθυνση της διάρρηξης (ολίσθηση) και προσανατολισμός βάσει της θέσης  $j$  κάποιου στοιχείου  $i$  του ρήγματος.

Η παράμετρος κατευθυντικότητας  $\xi$  είναι εντελώς γεωμετρική καθώς εξαρτάται από την τοποθεσία της θέσης καταγραφής, τη γεωμετρία του ρήγματος και τη θέση του υποκέντρου. Μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-1$  και  $+1$ , με τις αρνητικές και τις θετικές τιμές να υποδεικνύουν θέσεις πίσω και μπροστά από τη διεύθυνση της διάρρηξης αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $\xi$  γίνεται πρώτα η υποδιαίρεση της επιφάνειας του ρήγματος σε  $N$  μικρότερες επιφάνειες (συνήθως τετραγωνικού σχήματος, διαστάσεων  $1\text{km} \cdot 1\text{km}$ ), όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 3.1**. Εναλλακτικά, η επίδραση της κατευθυντικότητας της διάρρηξης μπορεί να καθοριστεί από τη διεύθυνση της ολίσθησης πάνω στο ρήγμα όπου το μοναδιαίο διάνυσμα  $\vec{r}_1$  αντιπροσωπεύει τη διεύθυνση της ολίσθησης σε ένα τμήμα  $i$  του ρήγματος.

Οι δυο σταθερές  $C_1$  και  $C_2$  εξαρτώνται από το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης εδαφικής κίνησης και από την εδαφική κατηγορία. Ειδικότερα, η παράμετρος  $C_1$

εξαρτάται από τη βάση δεδομένων και απορροφάται από την ελεύθερη παράμετρο της σχέσης εξασθένησης άρα μόνο η παράμετρος  $C_2$  αφορά το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Όσον αφορά το μέγεθος της εδαφικής κίνησης, φασματικές επιταχύνσεις σε μεγαλύτερες περιόδους παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξάρτηση από την κατευθυντικότητα της διάρρηξης. Οι Somerville et al (1997) παρατήρησαν ασήμαντη επίδραση στις τιμές των φασματικών επιταχύνσεων για περιόδους κάτω από 0.6sec. Η παρούσα μελέτη εξετάζει την εξάρτηση της κατευθυντικότητας από την περίοδο της εδαφικής κίνησης. Οι Somerville et al (1997) επίσης παρατήρησαν μεγαλύτερη επίδραση της κατευθυντικότητας σε επιταχύνσεις στην κάθετη διεύθυνση των ρηγμάτων παρά σε τιμές επιταχύνσεων της παράλληλης διεύθυνσης. Η περαιτέρω εξάρτηση των διευθύνσεων από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας εξετάζεται επίσης.

### 3.2.3 Τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα

Τα δεδομένα της εν λόγω μελέτης λήφθηκαν από τη νέα βάση δεδομένων (NGA) του ερευνητικού αντισεισμικού κέντρου του ειρηνικού και από τη βάση σεισμικών δεδομένων και ρηγμάτων του γεωλογικού ινστιτούτου της Καλιφόρνια (CGS). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο του μοντέλου και τον υπολογισμό της παραμέτρου κατευθυντικότητας  $\xi$  σε συγκεκριμένες θέσεις για διαφορετικού τύπου γεωμετρικές ρηγμάτων και διάρρηξης. Τα δεδομένα της νέας βάσης (NGA) χρησιμοποιήθηκαν επίσης για τη συσχέτιση του μεγέθους  $\xi$  με τις καταγεγραμμένες τιμές επιταχύνσεων σε διάφορες θέσεις. Η νέα βάση δεδομένων (NGA) αποτελείται από 175 σεισμικά γεγονότα με 3551 καταγραφές. Από αυτά σχεδόν τα μισά αποτελούν καταγραφές του σεισμού στο Chi-Chi (1999) και των μετασεισμών του. Η βάση δεδομένων παρέχει μέσες οριζόντιες φασματικές επιταχύνσεις με απόσβεση 5% σε παράλληλη και κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση για περιόδους έως και 10sec. Επίσης, η εδαφική κατηγοριοποίηση σε συνάρτηση με το εθνικό πρόγραμμα μείωσης σεισμικού κινδύνου (NEHRP) συμπεριλαμβάνεται στη νέα βάση δεδομένων και χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη. Κάποιες πληροφορίες για τη δυναμική διάρρηξη του ρήγματος όπως η ταχύτητα της διάρρηξης και ο βαθμός ανόδου, περιλαμβάνονται επίσης στη νέα βάση δεδομένων, αλλά δεν περιλαμβάνονται δεδομένα για την ετερογένεια των διαρρήξεων όπως ο αριθμός, το μέγεθος και η κατανομή των περιοχών με διαφορετική τραχύτητα ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικό του ρήγματος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης της ετερογενούς διάρρηξης στην εδαφική κίνηση. Η αποτίμηση της επίδρασης της ετερογένειας της διάρρηξης απαιτεί πληροφορίες σχετικά με χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος και η κατανομή των περιοχών διαφορετικής τραχύτητας, η ολίσθηση, ο ρυθμός ολίσθησης και η πτώση τάσης. Λόγω της απώλειας αυτών των δεδομένων στη νέα βάση δεδομένων (NGA), η συγκεκριμένη έρευνα περιορίζεται μόνο στη μελέτη ομογενούς διάρρηξης. Για τον υπολογισμό υπολοίπων εδαφικής κίνησης για τον καθορισμό των συντελεστών κατευθυντικότητας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις εξισώσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης (Sadigh et al. 1997, Abrahamson και Silva 1997, Campbell και Bozorgnia 2003 και Boore, Joyner και Fumal 1997) για ρηχούς σεισμούς με σύστημα μη



επέκτασης στις οποίες βασίστηκε η δημιουργία των πιθανοτικών χαρτών εκτίμησης σεισμικού κινδύνου το 2002 (Cao et al. 2003).

### 3.2.4 Έλεγχος του προτεινόμενου μοντέλου για ομογενή διάρρηξη

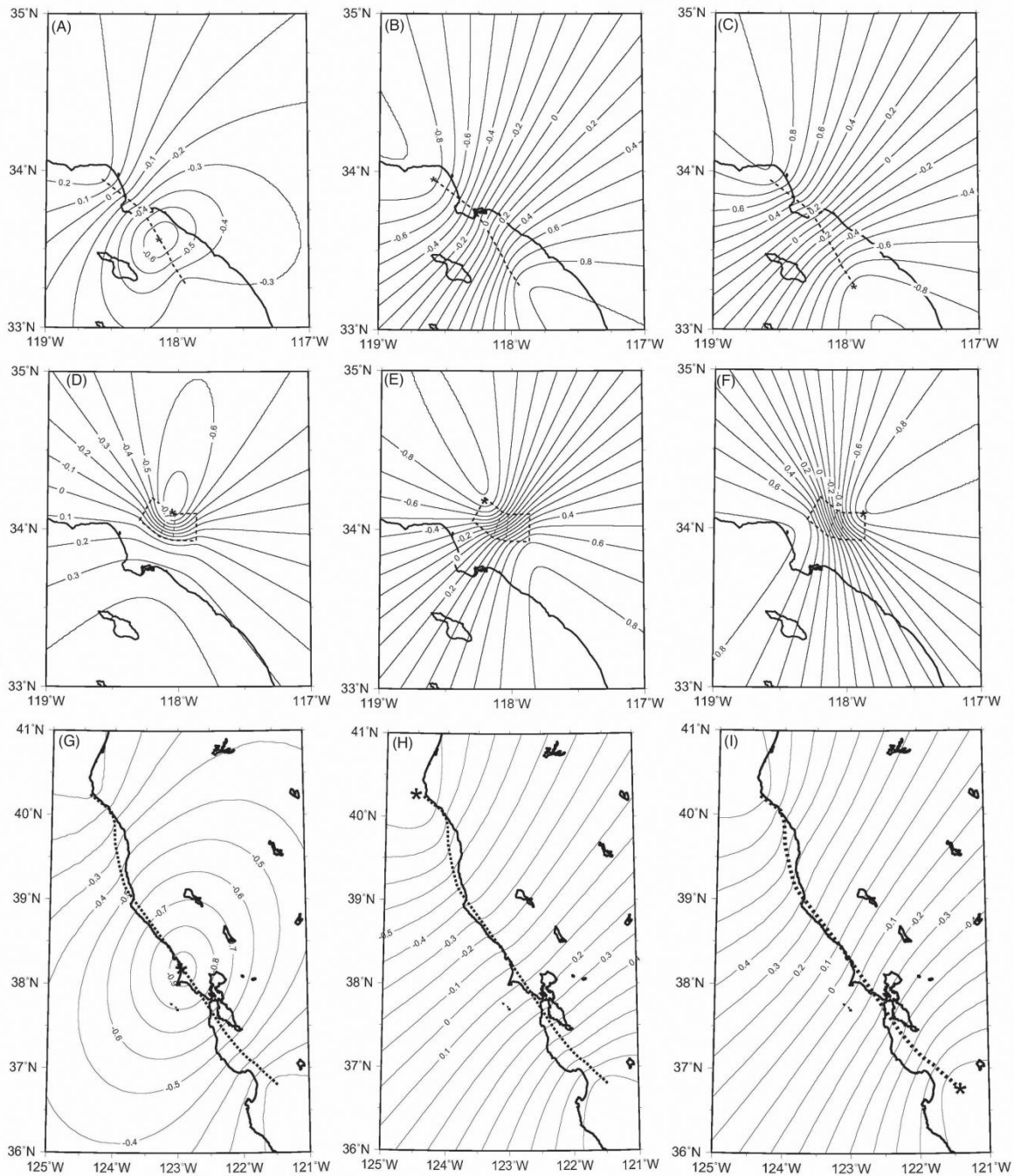
Για τον έλεγχο του μοντέλου για ομογενή διάρρηξη τοποθετήθηκε  $\zeta=1$  στην **εξίσωση [3]** και υπολογίστηκε η παράμετρος κατευθυντικότητας  $\xi$  για διάφορες περιοχές γύρω από ρήγματα διαφορετικής γεωμετρίας και τύπου διάρρηξης. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε η τοπική κατανομή της παραμέτρου κατευθυντικότητας γύρω από διάφορα ρήγματα του Los Angeles και του San Fransisco. Αναφορικά με τη γεωμετρία του ρήγματος, χρησιμοποιήθηκε μονομηματικό και πολυμηματικό ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και αντίστοιχα για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης. Για τον τύπο της διάρρηξης επιλέχθηκαν διάφορα σενάρια τα οποία περιλαμβάνουν: (α) αμφίπλευρες διαρρήξεις με το υπόκεντρο περίπου στο μέσο μήκος του ρήγματος και σε διάφορα βάθη, (β) μονόπλευρες διαρρήξεις με το υπόκεντρο στο κάθε άκρο του ρήγματος και σε διαφορετικά βάθη και (γ) διαφορετικοί τύποι τυχαίας διάρρηξης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το προτεινόμενο μοντέλο προσομοιώνει τη ρεαλιστική περίπτωση της διάρρηξης πολλών διευθύνσεων γι' αυτό οι ορολογίες «αμφίπλευρη» και «μονόπλευρη» που χρησιμοποιούνται είναι απλοποιητικές και χρησιμεύουν μόνο σε διαρρήξεις με μεγάλο λόγο δυο διαστάσεων. Μεμονωμένα αποτελέσματα από πολυμηματικά ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης για αμφίπλευρη και μονόπλευρη διάρρηξη παρουσιάζονται στην **εικόνα 3.2**. Ειδικότερα, στην **εικόνα 3.2 (A-C)** παρουσιάζονται οι κατανομές της παραμέτρου κατευθυντικότητας  $\xi$  για αμφίπλευρη και μονόπλευρη ομογενή διάρρηξη του κατακόρυφου ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης Palos Verdes, το οποίο μοντελοποιείται με πέντε τμήματα στη βάση δεδομένων των ρηγμάτων της Καλιφόρνια. Οι **εικόνες 3.2 (D-F)** παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για τα ίδια σενάρια διάρρηξης για το τυφλό ρήγμα κατακόρυφης βύθισης του Puente Hills, το οποίο προσομοιάζεται με τρία τμήματα. Οι **εικόνες 3.2 (G-I)** παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα το οποίο αποτελείται από 26 γραμμικά τμήματα στη βάση δεδομένων της Καλιφόρνια.

### 3.2.5 Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας βασισμένα στα δεδομένα της νέας βάσης (NGA)

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της διάρρηξης των πεπερασμένων τμημάτων των ρηγμάτων της νέας βάσης δεδομένων (NGA), υπολογίστηκε η παράμετρος κατευθυντικότητας  $\xi$  στις θέσεις καταγραφής της σεισμικής κίνησης. Οι συντελεστές κατευθυντικότητας  $C_1$  και  $C_2$  λαμβάνονται συσχετίζοντας τα υπόλοιπα της εδαφικής κίνησης με την παράμετρο  $\xi$ . Τα εν λόγω υπόλοιπα είναι η διαφορές μεταξύ του φυσικού λογαρίθμου των μετρούμενων τιμών της εδαφικής κίνησης της νέας βάσης δεδομένων και των υπολογιζόμενων τιμών από τις εξισώσεις, άρα:

$$\delta = \ln(\text{υπολογιζόμενες τιμές}) - \ln(\text{μετρούμενες τιμές}) \quad [4]$$

Οι υπολογιζόμενες τιμές εδαφικής κίνησης προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις τέσσερις εξισώσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης.



**Εικόνα 3.2:** Τοπικές κατανομές της παραμέτρου κατευθυντικότητας  $\xi$  για τρεις τύπους διάρρηξης του ρήγματος Palos Verdes (A-C), του τυφλού ρήγματος Puente Hills (D-F) και του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα για το σεισμικό γεγονός του 1906 (G-I). Ρήγμα Palos Verdes: (A) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην τομή του μεσαίου και νοτίου κομματιού, (B) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΒΔ γωνία, (C) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΝΑ γωνία, (D) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στο μέσο μήκος, (E) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΒΔ γωνία, (F) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΝΑ γωνία, (G) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην τομή του μεσαίου και του νότιου κομματιού, (H) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΒΔ γωνία, (I) υπόκεντρο που βρίσκεται σε βάθος στην ΝΑ γωνία.

Για την προσέγγιση των εδαφικών κατηγοριών *C* για βράχο και *D* για έδαφος σύμφωνα με τη *NEHRP* χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις των Sadigh et al. (1997) και των Abrahamson και Silva (1997) αντίστοιχα, γενικότερα για βράχο και έδαφος οι σχέσεις των Campbell και Bozorgnia (2003) και για  $V_{s,30}=520m/sec$  και  $V_{s,30}=250m/sec$  αυτές των Boore, Joyner και Fumal (1997). Έπειτα, υπολογίστηκαν οι μέσες φασματικές τιμές επιταχύνσεων με περιόδους κυμαινόμενες από 0.1sec έως τη μέγιστη περίοδο του εκάστοτε μοντέλου. Εκτελώντας ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης και συσχετίζοντας τα υπόλοιπα της εδαφικής κίνησης της **εξίσωσης [4]** με την παράμετρο κατευθυντικότητας της **εξίσωσης [3]**, υπολογίστηκαν τελικά οι συντελεστές κατευθυντικότητας  $C_1$  και  $C_2$ .

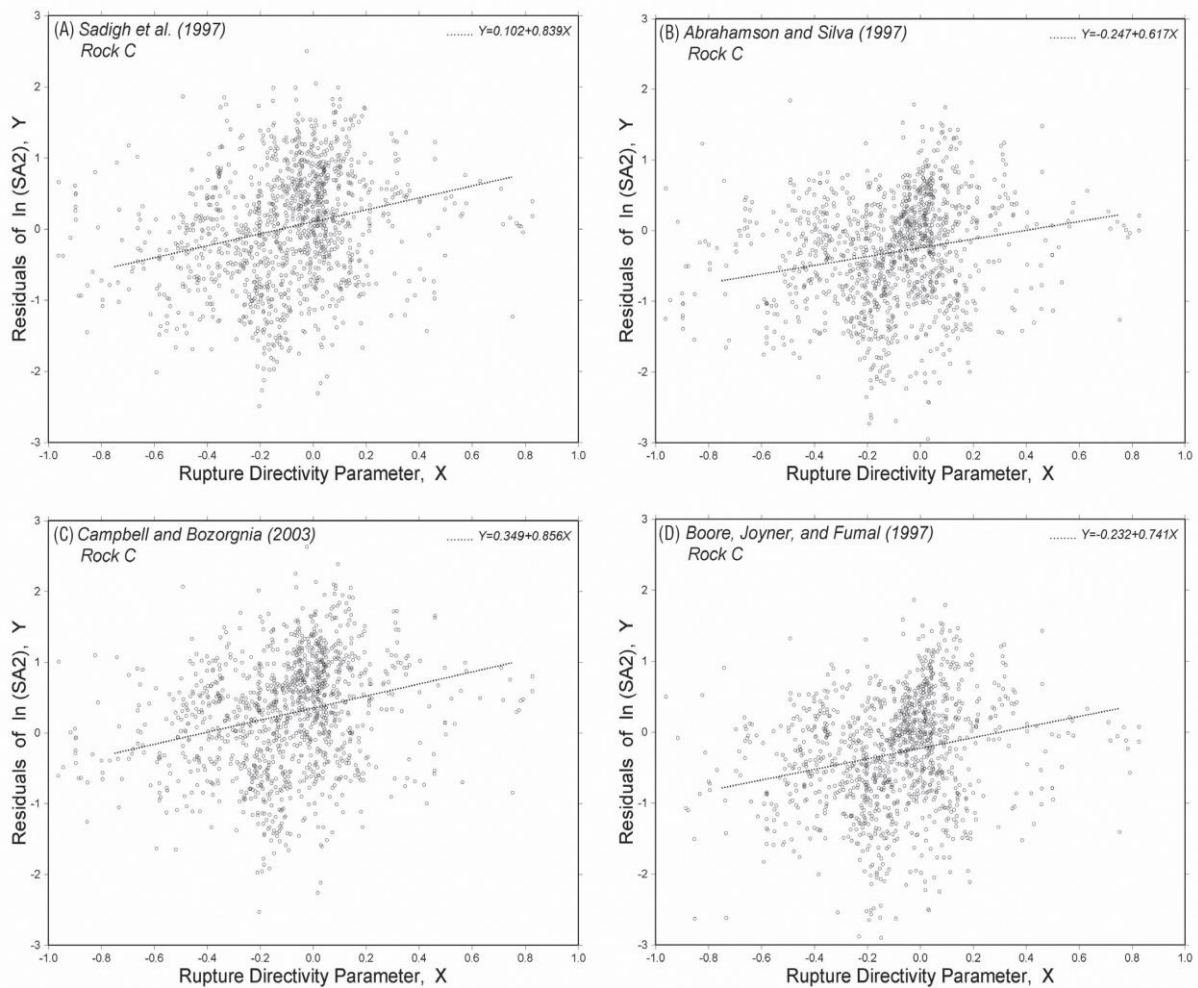
$$\delta = C_1 + C_2 \cdot \xi_j \quad [5]$$

Για τον προσδιορισμό της επίδρασης του τύπου του εδάφους όταν υπήρχαν επαρκή δεδομένα καταγραφών, διεξάχθηκε επιπρόσθετη γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης. Συσχετίσεις με την παράμετρο  $\xi$  των υπολοίπων  $\delta(SA2)$  για περίοδο  $T=2sec$  και έδαφος κατηγορίας *C* απεικονίζονται στην **εικόνα 3.3**. Οι συντελεστές κατευθυντικότητας για βράχο και άλλο εδαφικό σχηματισμό παρουσιάζονται αντίστοιχα στους **πίνακες 3.1 και 3.2** καθώς επίσης και στην **εικόνα 3.4**. Παρατηρούμε τα αραιά δεδομένα για πολύ μικρές και αντίστοιχα πολύ μεγάλες τιμές της παραμέτρου  $\xi$  (όπως πχ για  $\xi < -0.75$  και  $\xi > 0.75$ ) και τα αποτελέσματα που βασίζονται στα δεδομένα που ανήκουν στην κατηγορία  $-0.75 < \xi < 0.75$ .

Αναφορικά με τους συντελεστές κατευθυντικότητας, η παράμετρος  $C_1$  αφορά τις διαφοροποιήσεις στα δεδομένα στις οποίες βασίζονται οι εξισώσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης και οι χρησιμοποιούμενες βάσεις δεδομένων για τον υπολογισμό των παραμέτρων και των συντελεστών κατευθυντικότητας. Η παράμετρος  $C_2$  αντίθετα, αναφέρεται στην ένταση του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Από τους **πίνακες 3.1 και 3.2** και την **εικόνα 3.4** είναι καταφανές ότι η κατευθυντικότητα αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου της εδαφικής κίνησης. Αυτή η εξάρτηση είναι πιο έκδηλη στις **εικόνες 3.4 (A-D)**. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα συνάδουν στο ότι η κατευθυντικότητα αυξάνεται από τις μικρές περιόδους (0.3sec) μέχρι τουλάχιστον τα 3sec και πιθανώς και περισσότερο. Οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων ομάδων των αποτελεσμάτων οφείλονται στις διαφορές των τεσσάρων βάσεων δεδομένων, στο τι θεωρείται τελικά ως «έδαφος» και «βράχος» και στην επιλογή των παραμέτρων κάθε συσχέτισης (πχ απόσταση, σεισμικό μέγεθος, είδος ρήγματος κλπ).

### 3.2.6 Ανάλυση αβεβαιότητας

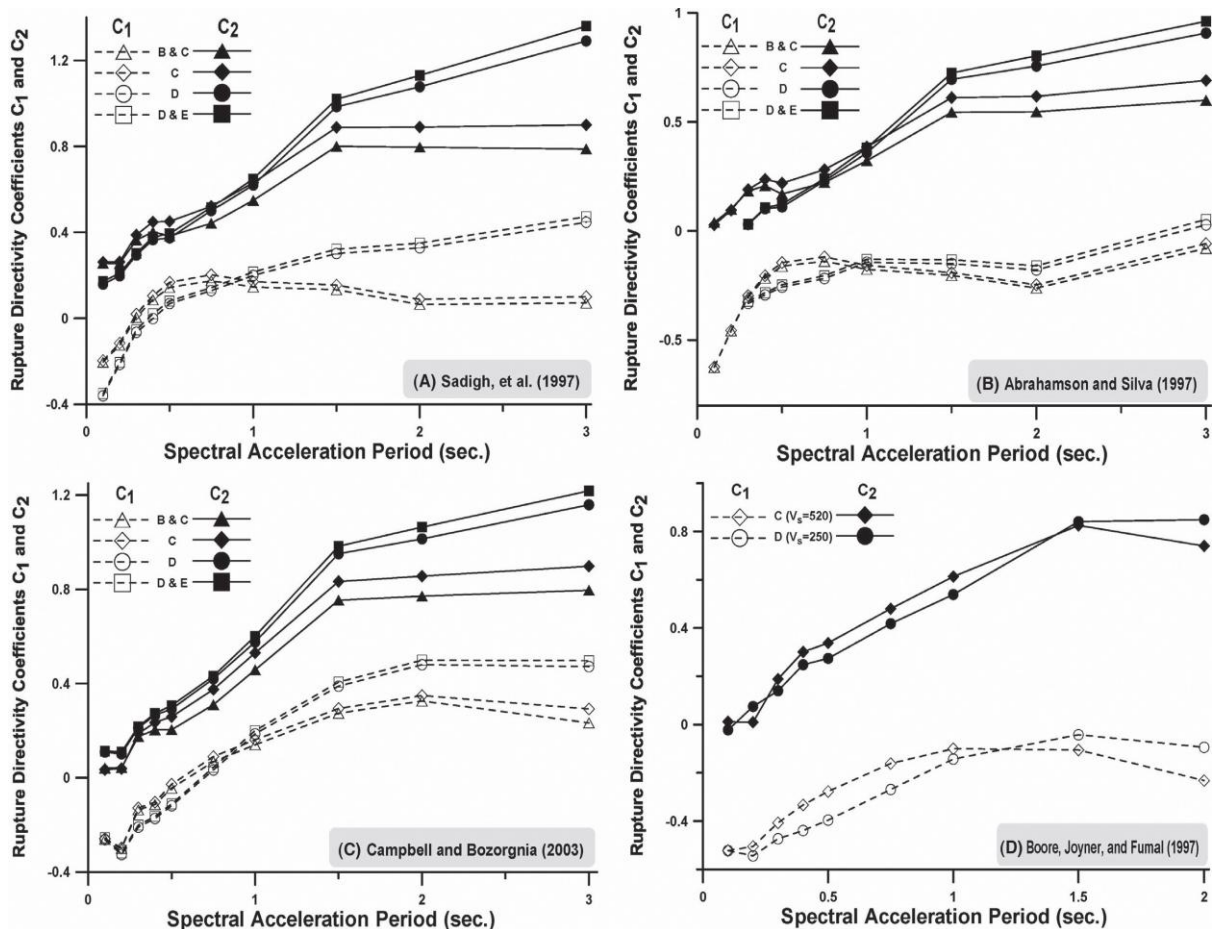
Για τη μελέτη της επίδρασης της κατευθυντικότητας στα μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης, διεξήχθη ένας έλεγχος της διασποράς των υπολοίπων της εδαφικής κίνησης πριν και μετά τις τροποποιήσεις κατευθυντικότητας. Ως μέτρο της διασποράς θεωρήθηκε η τυπική απόκλιση των υπολογισμένων εδαφικών κινήσεων από τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Χρησιμοποιήθηκε ειδικότερα η ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων των υπολοίπων:



**Εικόνα 3.3:** Συσχετίσεις των υπολοίπων των τετραγώνων των φασματικών επιταχύνσεων για τη παράμετρο κατευθυντικότητας βράχου των τεσσάρων σχέσεων εξασθένησης και για δεδομένα μεταξύ  $-0.75 < X \leq 0.75$ .

Period, Second	Sadigh et al. (1997)		Abrahamson and Silva (1997)		Campbell and Bozorgnia (2003)		Boore, Joyner, and Fumal (1997)	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
0.1	-0.188	0.235	-0.624	0.028	-0.259	0.035	-0.522	0.012
0.2	-0.110	0.228	-0.456	0.095	-0.298	0.039	-0.505	0.010
0.3	0.024	0.353	-0.296	0.190	-0.128	0.187	-0.407	0.189
0.4	0.112	0.421	-0.205	0.237	-0.104	0.235	-0.333	0.301
0.5	0.175	0.424	-0.145	0.219	-0.028	0.259	-0.277	0.338
0.75	0.208	0.506	-0.119	0.281	0.090	0.375	-0.161	0.480
1	0.179	0.585	-0.159	0.385	0.161	0.530	-0.100	0.613
1.5	0.167	0.847	-0.191	0.611	0.294	0.833	-0.105	0.825
2	0.102	0.839	-0.247	0.617	0.349	0.856	-0.232	0.741
3	0.117	0.855	-0.058	0.690	0.292	0.898	—	—

**Πίνακας 3.1:** Συντελεστές κατευθυντικότητας  $C_1$  και  $C_2$  για διαφορετικές περιόδους εδαφικής κίνησης βράχου ( $NEHRP$ ,  $V_{s,30}=520m/sec$ ) βασιζόμενοι στις τέσσερις εξισώσεις εξασθένησης για  $-0.75 < X \leq 0.75$ .



**Εικόνα 3.4:** Συντελεστές κατευθυντικότητας  $C_1$  και  $C_2$  ως συναρτήσεις της περιόδου φασματικής επιτάχυνσης και του τύπου του εδάφους για τις τέσσερις εξισώσεις εξασθένισης.

Period, Second	Sadigh <i>et al.</i> (1997)		Abrahamson and Silva (1997)		Campbell and Bozorgnia (2003)		Boore, Joyner, and Fumal (1997)	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
0.1	-0.360	0.159	-0.530	-0.127	-0.263	0.109	-0.522	-0.022
0.2	-0.214	0.198	-0.427	-0.059	-0.326	0.101	-0.544	0.075
0.3	-0.065	0.294	-0.332	0.030	-0.210	0.212	-0.473	0.140
0.4	0.098	0.366	-0.293	0.102	-0.173	0.266	-0.439	0.248
0.5	0.069	0.374	-0.257	0.110	-0.119	0.292	-0.396	0.274
0.75	0.129	0.501	-0.218	0.229	0.033	0.420	-0.269	0.418
1	0.200	0.620	-0.144	0.358	0.186	0.576	-0.143	0.539
1.5	0.302	0.984	-0.150	0.695	0.389	0.951	-0.042	0.841
2	0.328	1.077	-0.179	0.756	0.480	1.014	-0.094	0.849
3	0.447	1.290	0.028	0.907	0.472	1.159	—	—

**Πίνακας 3.2:** Συντελεστές κατευθυντικότητας  $C_1$  και  $C_2$  για διαφορετικές περιόδους εδαφικής κίνησης εδάφους (NEHRP,  $V_{s,30}=250\text{m/sec}$ ) βασιζόμενοι στις τέσσερις εξισώσεις εξασθένισης για  $-0.75 < \xi < 0.75$ .



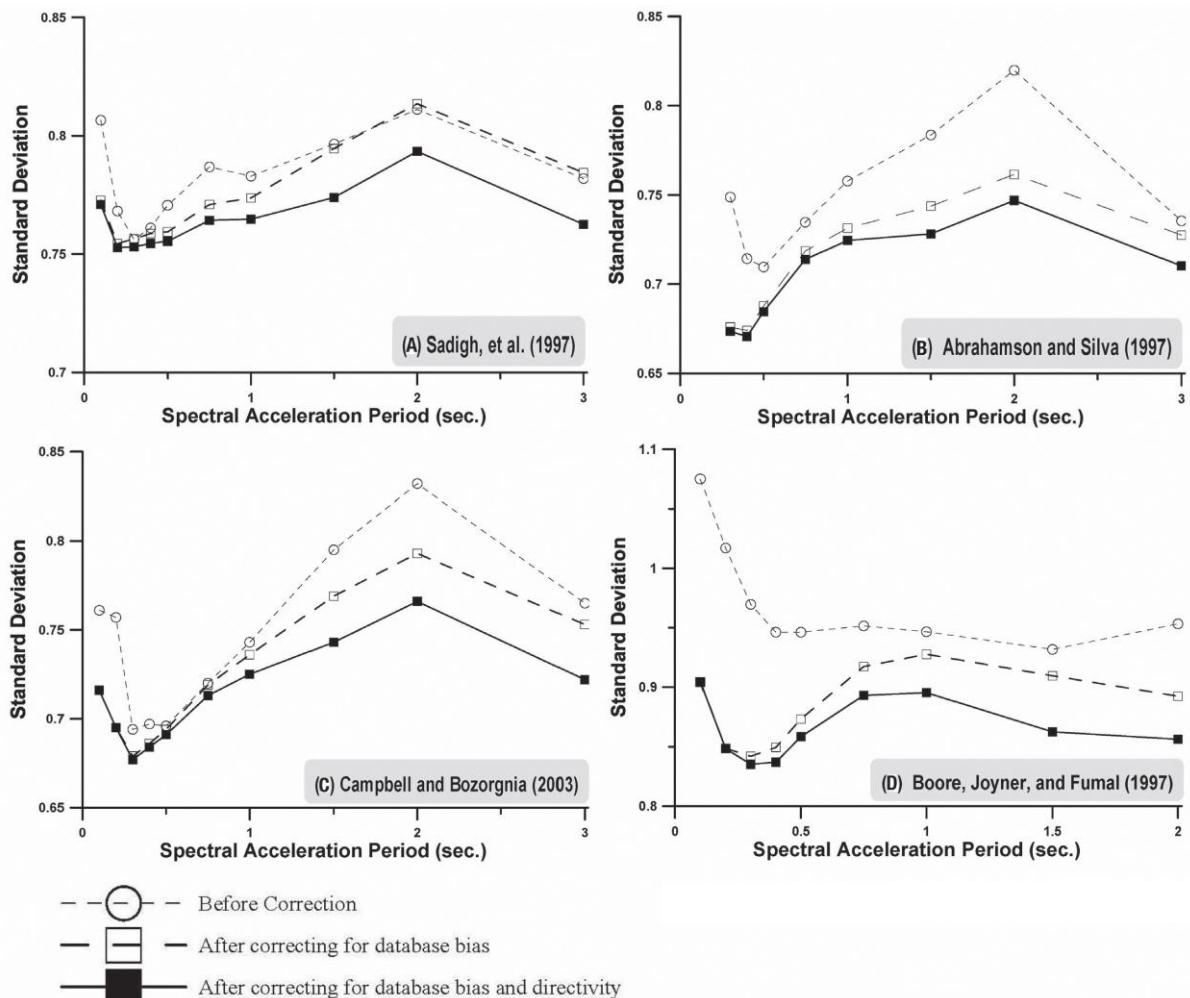
$$\sigma = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \right]^{1/2} \quad [6]$$

όπου  $\delta_i$  είναι το υπόλοιπο της  $i$  καταγραφής πριν και μετά τις διορθώσεις και  $n$  είναι ο αριθμός των σημείων των καταγραφών που αφορούν τη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση. Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση υπολογίστηκαν οι τιμές της τυπικής απόκλισης πριν και μετά τη διόρθωση λόγω ύπαρξης κατευθυντικότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο απλός ορισμός της διακύμανσης δεν διαχωρίζει τη συνεισφορά της αβεβαιότητας των καταγραφών με αυτή της αβεβαιότητας του συνδυασμού των καταγραφών. Είναι πολύ σημαντικός ο διαχωρισμός των δυο αβεβαιότητων, ειδικά στην περίπτωση του μεγάλου εύρους καταγραφών και της αναμενόμενης διακύμανσης μεταξύ διαφορετικών καταγραφών του ίδιου σεισμικού γεγονότος. Παρ' όλα αυτά, ο σκοπός αυτού του ελέγχου ήταν η δημιουργία μια γενικής και ποιοτικής υπόθεσης αναφορικά με την επίδραση της διόρθωσης των καταγραφών λόγω της κατευθυντικότητας στη διακύμανση των προβλεπόμενων τιμών.

Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές κατευθυντικότητας που αντιστοιχούν σε καθεμιά από τις τέσσερις σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης, υπολογίστηκαν τρεις ομάδες τιμών της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις **εικόνες 3.5 και 3.6** για βράχο και εδαφικό σχηματισμό αντίστοιχα. Η πρώτη ομάδα καμπυλών αφορά στα υπόλοιπα πριν τη διόρθωση, η δεύτερη ομάδα τυπικών αποκλίσεων  $\sigma$  προέκυψε χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τις σχέσεις εξασθένισης διορθωμένα λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα αποτελέσματα των καταγραφών, άρα από αντικατάσταση των  $\delta_i$  της **εξίσωσης [6]** με  $\delta_i \cdot C_1$ . Τέλος, η τρίτη ομάδα προέκυψε από τα υπόλοιπα διορθωμένα τόσο για τις τιμές των καταγραφών όσο και λόγω της ύπαρξης της κατευθυντικότητας, δηλαδή με αντικατάσταση των  $\delta_i$  της **εξίσωσης [6]** με  $\delta_i \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \xi$ .

Αναφερόμενοι στις **εικόνες 3.5 και 3.6**, οι διαφορές μεταξύ των μικρά διακεκομμένων καμπυλών με τις μεγάλα διακεκομμένες οφείλονται στις διαφορές των βάσεων δεδομένων των σχέσεων εξασθένισης και της νέας βάσης δεδομένων (NGA). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στις εικόνες, η συγκεκριμένη διαφορά ποικίλλει ανάμεσα στις τέσσερις χρησιμοποιούμενες εξισώσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης. Η επίδραση του άνω ορίου τιμών που τίθεται από τη χρήση των καταγραφών είναι γενικότερα μεγαλύτερη σε πολύ μικρές περιόδους (μικρότερες των 0.3sec). Η μείωση της τιμής της αβεβαιότητας καθώς κινούμαστε από τις καμπύλες με μεγάλη διακεκομμένη γραμμή προς τις ακέραιες καμπύλες, οφείλονται σε διορθώσεις λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της κατευθυντικότητας που είναι μικρότερες σε μικρές περιόδους και μεγαλύτερες σε μεγάλες περιόδους. Το μέσο μέγεθος της συγκεκριμένης μείωσης αντιστοιχεί σε 5-10%, περίπου το ίδιο σε όλες τις σχέσεις εξασθένισης.

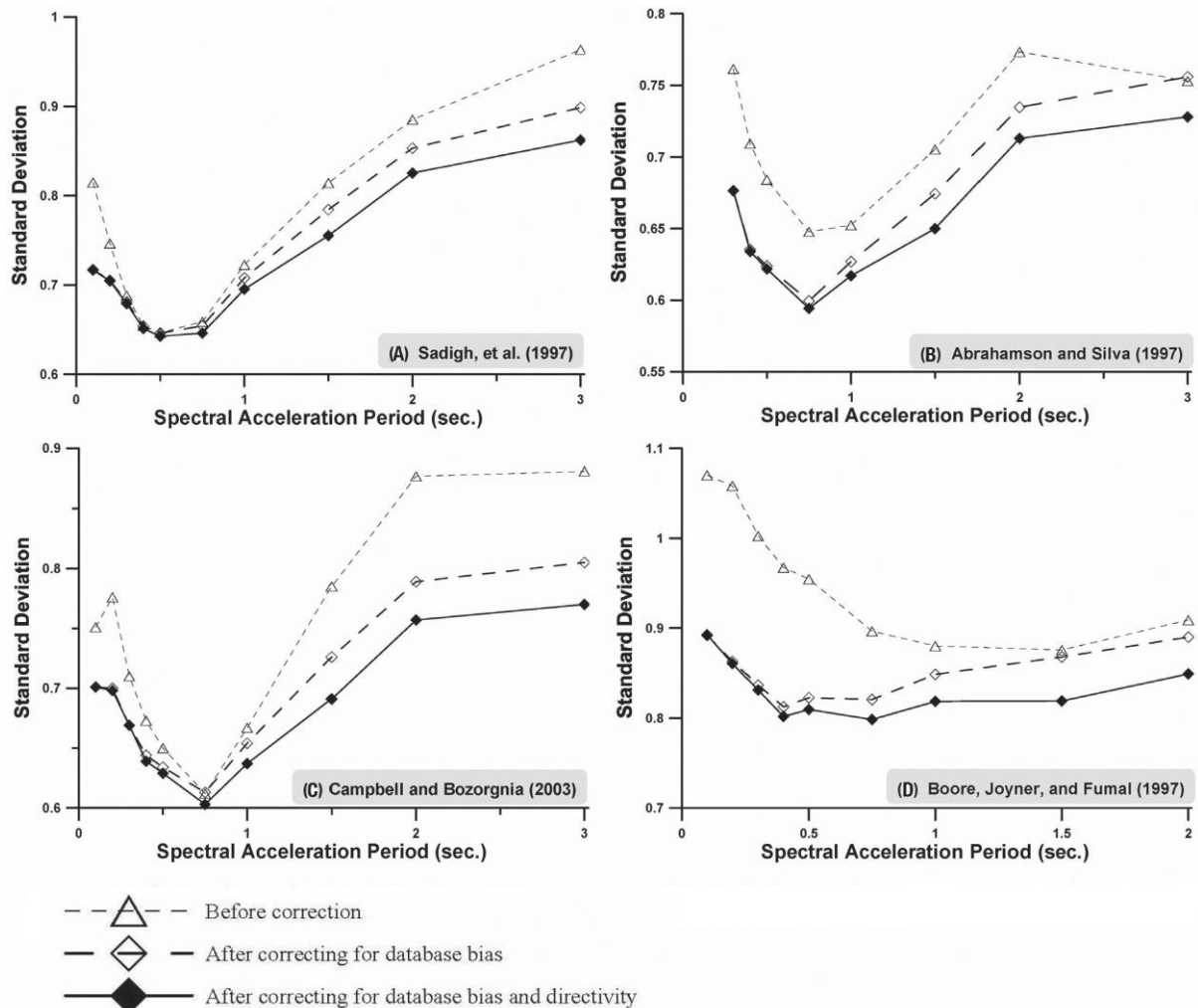
Η τυπική απόκλιση  $\sigma$  λαμβάνει τη μικρότερη τιμή της σε περιόδους περίπου στα 0.3sec για βράχο και στα 0.75sec για έδαφος και για τις τέσσερις σχέσεις εξασθένισης. Η διακύμανση σε πολύ μικρές περιόδους είναι μεγάλη τόσο πριν όσο και μετά τη διόρθωση, κάτι που μπορεί μερικώς να οφείλεται στο μικρό βαθμό δειγματοληψίας των παλαιότερων καταγραφών στις βάσεις δεδομένων.



**Εικόνα 3.5:** Αλλαγές στην τυπική απόκλιση βράχου λόγω αφαίρεσης της τάσης της βάσης δεδομένων και διόρθωσης της κατευθυντικότητας, βασισμένες στις τέσσερις εξισώσεις εξασθένισης. Η αλλαγή στην  $\sigma$  από τις μικρά διακεκομμένες στις μεγάλα διακεκομμένες γραμμές οφείλεται στη διόρθωση της βάσης δεδομένων μέσω του συντελεστή  $C_1$  και η πτώση της  $\sigma$  από τις μεγάλα διακεκομμένες γραμμές στις πλήρεις γραμμές οφείλεται στο ότι λάβαμε υπόψη το φαινόμενο κατευθυντικότητας με τη χρήση του όρου  $C_2 \cdot \xi$ .

Γενικότερα, οι βάσεις δεδομένων περιέχουν κυρίως εδαφικές κινήσεις μεγαλύτερου μεγέθους. Οι τελευταίες εδαφικές κινήσεις έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να βρίσκονται πάνω από το όριο θορύβου, ενώ οι ασθενέστερες κινήσεις σε πολύ μικρές και αντίστοιχα πολύ μεγάλες περιόδους επηρεάζονται περισσότερο από το επίπεδο θορύβου. Η μεγάλη αβεβαιότητα που υφίσταται στις μεγάλες συχνότητες και περιόδους μπορεί ακόμα να οφείλεται σε πιθανούς περιορισμούς των τιμών των δεδομένων λόγω της επιλογής διαφορετικών εύρων συχνοτήτων στα εφαρμοζόμενα φίλτρα των διαφόρων εδαφικών κινήσεων. Μια ακόμη παρατήρηση που προκύπτει από τις **εικόνες 3.5 και 3.6** είναι το σχετικά μεγάλο μέγεθος της τυπικής απόκλισης και για τις τέσσερις σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης, συγκρινόμενη με τις τιμές των πραγματικών καταγραφών (κυρίως στο εύρος  $0.5\text{sec}$  με  $0.7\text{sec}$ ). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και υπάρχουν πολλοί λόγοι για αυτή

τη διαφοροποίηση. Αρχικά, το μέτρο μεταβλητότητας,  $\sigma$ , που ορίζεται από την **εξίσωση [6]** δεν είναι ακριβώς το ίδιο με τον όρο τυπικού σφάλματος που ορίζεται σε καθεμιά από τις τέσσερις σχέσεις εξασθένισης. Στην πραγματικότητα, κατά τον υπολογισμό του  $\sigma$  στην προκειμένη μελέτη, όλα τα σημεία δεδομένων θεωρήθηκαν ανεξάρτητα, χωρίς να ληφθεί υπόψη της διαφοροποίησης της αβεβαιότητας των γεγονότων και της αβεβαιότητας μεταξύ των γεγονότων.



**Εικόνα 3.6:** Αλλαγές στην τυπική απόκλιση εδάφους λόγω αφαίρεσης της τάσης της βάσης δεδομένων και διόρθωσης της κατευθυντικότητας, βασισμένες στις τέσσερις εξισώσεις εξασθένισης. Η αλλαγή στην  $\sigma$  από τις μικρά διακεκομμένες στις μεγάλα διακεκομμένες γραμμές οφείλεται στη διόρθωση της βάσης δεδομένων μέσω του συντελεστή  $C_1$  και η πτώση της  $\sigma$  από τις μεγάλα διακεκομμένες γραμμές στις πλήρεις γραμμές οφείλεται στο ότι λάβαμε υπόψη το φαινόμενο κατευθυντικότητας με τη χρήση του όρου  $C_2 \xi$ .

Επίσης, παρά την αφθονία των νέων πληροφοριών της νέας βάσης δεδομένων (NGA), αναμενόταν μια μεγαλύτερη μεταβλητότητα της νέας βάσης παρά των βάσεων δεδομένων των τεσσάρων σχέσεων εξασθένισης. Συγκρινόμενη με τη νέα βάση δεδομένων, καθεμιά από τις τέσσερις σχέσεις εξασθένισης διαθέτει μικρότερα εύρη μεγεθών και αποστάσεων. Στην προκειμένη έρευνα δεν τέθηκαν περιορισμοί στα εύρη των παραμέτρων διακινδύνευσης όπως το μέγεθος και η απόσταση. Κατά



την ανάλυση των υπολοίπων παρατηρήθηκαν επίσης πολλά σημεία καταγραφών μακριά από τα υπόλοιπα, τα οποία επαληθεύουν το βαθμό της αβεβαιότητας και την αύξηση του  $\sigma$  και εντοπίζουν την ανάγκη για καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων. Οι εν λόγω καταγραφές λήφθηκαν κανονικά υπόψη. Η διακύμανση μεταξύ των καταγραφών διαδραματίζει σημαντικότερο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής του  $\sigma$  από ότι η διακύμανση μεταξύ διαφορετικών σεισμικών γεγονότων. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τις αβεβαιότητες είναι τα σφάλματα από τις υποθέσεις που σχετίζονται με τους εδαφικούς σχηματισμούς βάσει του *NEHRP*, δηλαδή της χρήσης των εξισώσεων Sadigh et al. (1997) και των Abrahamson και Silva (1997) αντίστοιχα για την προσέγγιση των εδαφικών κατηγοριών *C* για βράχο και *D* για έδαφος, τις σχέσεις των Campbell και Bozorgnia (2003) γενικότερα για βράχο και έδαφος και τις σχέσεις των Boore, Joyner και Fumal (1997) για  $V_{s,30}=520m/sec$  και  $V_{s,30}=250m/sec$ .

### 3.2.7 Επιταχύνσεις στην παράλληλη και στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα

Για τους πρόσφατους σεισμούς εντοπίστηκαν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ της παράλληλης και της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας επιταχύνσεων, κυρίως στην περιοχή των μεγάλων περιόδων. Για παράδειγμα, οι Somerville et al (1997) προβλέπουν αντίστοιχα αποτελέσματα για τις καταγραφές στη Lucerne του σεισμού του Landers το 1992.

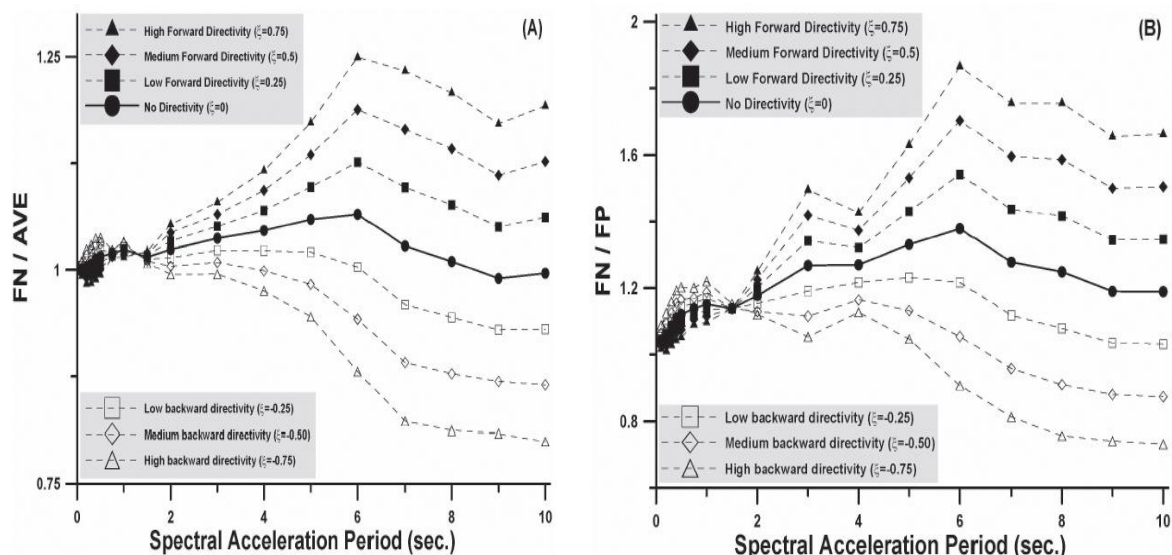
Ο Richards (1976), χρησιμοποιώντας τη λύση του δυναμικού πεδίου μιας ελλειπτικής διατμητικής ρωγμής σε ελαστικό μέσο, εξήγαγε επιταχύνσεις στην παράλληλη και την κάθετη συνιστώσα της διεύθυνσης της διάρρηξης. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο για τη μελέτη των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, εξάγει αποτελέσματα για τις παράλληλες και κάθετες στο ρήγμα συνιστώσες της εδαφικής επιτάχυνσης λόγω ύπαρξης ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της διεύθυνσης της διάρρηξης.

Από την ελαστική, ελλειπτική διατμητική ρωγή του Richards μέχρι τους σεισμούς που προκύπτουν από ρήγματα με ποικίλα μηχανικά χαρακτηριστικά, υπάρχουν παράγοντες που δύνανται να επηρεάσουν το σχετικό μέγεθος της εδαφικής κίνησης παράλληλα και κάθετα στο ρήγμα. Οι Somerville et al. (1997) αναφέρουν τιμές κυμαινόμενες περίπου στο εύρος 1-1.15 για περιόδους 1sec, 1-1.25 για 2sec και 1-1.4 για 3sec, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν στις κοντινότερες αποστάσεις, στα μεγαλύτερα σεισμικά μεγέθη και σε μεγαλύτερες τιμές κατευθυντικότητας.

Χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων (*NGA*) μπορεί να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων και να δημιουργηθούν μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης στην παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Στην παρούσα έρευνα εξετάστηκε μόνο η εξάρτηση της παράλληλης και της κάθετης συνιστώσας από την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Διεξάγοντας μια ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης της διακύμανσης των δυο λόγων *FN/FP* και *FN/AVE* συναρτήσει της παραμέτρου κατευθυντικότητας  $\xi$ , υπολογίστηκε η συσχέτιση των συντελεστών για περιόδους μέχρι 10sec. Χρησιμοποιώντας τους εν λόγω συντελεστές εκτιμήθηκαν οι τιμές των δυο λόγων για διάφορα επίπεδα

κατευθυντικότητας, κυμαινόμενα από μεγάλη όπισθεν κατευθυντικότητα ( $\xi=-0.75$ ) έως μεγάλη έμπροσθεν κατευθυντικότητα ( $\xi=0.75$ ).

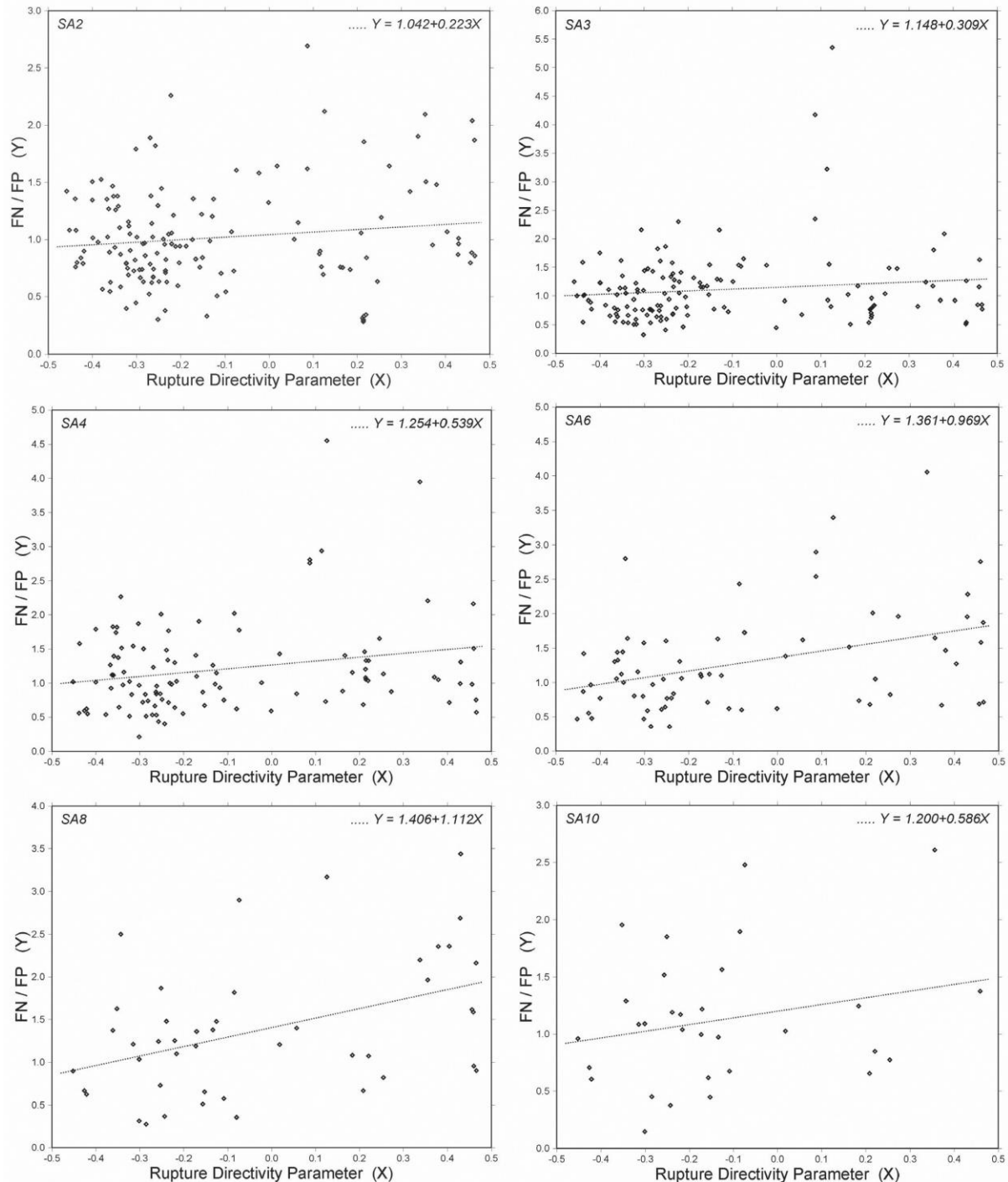
Η **εικόνα 3.7** παρουσιάζει την επίδραση της κατευθυντικότητας για απόσταση της διάρρηξης  $0-200\text{km}$ , συνδυαζόμενων όλων των υπολοίπων παραμέτρων, δηλαδή τα δεδομένα δεν κατηγοριοποιήθηκαν βάσει της απόστασης, του σεισμικού μεγέθους, του τύπου του ρήγματος, της εδαφικής κατηγορίας κλπ. Σε περιόδους μικρότερες του  $1.5\text{sec}$  η επίδραση είναι μικρή και με μεγάλη μεταβλητότητα αλλά μεγαλώνει σταδιακά για περιόδους άνω του  $1.5\text{sec}$ . Συγκρίνοντας το λόγο  $FN/AVE \approx 1.25$  για μεγάλη πρόσω κατευθυντικότητα ( $\xi=0.75$ ) με τον αντίστοιχο λόγο  $FN/AVE \approx 0.85$  για μεγάλη όπισθεν κατευθυντικότητα ( $\xi=-0.75$ ) στα  $6\text{sec}$ , μπορεί κανείς να αντιληφθεί τη μεγάλη επίδραση του φαινομένου κυρίως στις μεγάλες περιόδους. Η πτώση των καμπυλών σε περιόδους άνω των  $6\text{sec}$  οφείλεται στη σημαντική πτώση του αριθμού των δεδομένων στις μεγάλες περιόδους.



**Εικόνα 3.7:** Εξάρτηση της παραμέτρου κατευθυντικότητας  $\xi$  από (A) το λόγο της κάθετης προς τη μέση φασματική επιτάχυνση και (B) το λόγο της κάθετης προς την παράλληλη φασματική επιτάχυνση σε διαφορετικές περιόδους.

Για περαιτέρω μελέτη της εξάρτησης των δυο λόγων από την παράμετρο  $\xi$ , χρησιμοποιήθηκαν οι καταγραφές της νέας βάσης δεδομένων για το σεισμό του Northridge στις 17 Ιανουαρίου 1994. Υπάρχουν 160 καταγραφές του κύριου σεισμικού γεγονότος με κυμαινόμενες αποστάσεις από το ρήγμα από  $5$  έως  $150\text{km}$ . Από τις 160 καταγραφές οι 40 βρίσκονται μακρύτερα από  $50\text{km}$  και οι 8 μακρύτερα από  $100\text{km}$ . Η ταξινόμηση των καταγραφών σύμφωνα με την εδαφική κατηγορία και το NEHRP είναι: 2-A, 12-B, 73-C, 72-D και 1-E. Η παράμετρος κατευθυντικότητας  $\xi$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-0.5$  για μέτρια όπισθεν κατευθυντικότητα και  $0.5$  για μέτρια έμπροσθεν κατευθυντικότητα. Οι θέσεις καταγραφής με τη μεγαλύτερη πρόσω κατευθυντικότητα σε αποστάσεις μικρότερες των  $25\text{km}$  από το ρήγμα για τις οποίες υπάρχουν καταγραφές στη νέα βάση δεδομένων είναι: σταθμός Rinaldi Receiving ( $\xi \approx 0.02$ ), Pacoima Dam ( $\xi \approx 0.09$ ), Jensen Filter Plant Generator ( $\xi \approx 0.12$ ), Sylmar Olive View Hospital ( $\xi \approx 0.13$ ), Moorpark Fire Station ( $\xi \approx 0.21$ ), Canyon

Country West Lost Canyon ( $\xi \approx 0.26$ ), Newhall Fire Station ( $\xi \approx 0.34$ ), Newhall Pico Canyon Road ( $\xi \approx 0.36$ ), Lake Hudges #12A ( $\xi \approx 0.46$ ), Lake Hudges #9 ( $\xi \approx 0.46$ ) και Castaic Old Ridge Route ( $\xi \approx 0.46$ ). Η **εικόνα 3.8** παρουσιάζει τη συσχέτιση του λόγου  $FN/FP$  ως προς την παράμετρο  $\xi$  για περιόδους από 2 έως 10sec.



**Εικόνα 3.8:** Συσχετίσεις των λόγων της κάθετης και παράλληλης φασματικής επιτάχυνσης σε διαφορετικές περιόδους με την παράμετρο κατευθυντικότητας της δάρρηξης για το σεισμό του Northridge (1994).

Υποθέτοντας γραμμική συσχέτιση των καταγραφών, στην **εικόνα 3.8** παρουσιάζεται μια γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης που οδηγεί στον προσδιορισμό των συντελεστών συσχέτισης. Για τις περισσότερες περιόδους υπάρχει ένας αριθμός σημείων που βρίσκονται εκτός της μάζας των δεδομένων. Τα πιο απομακρυσμένα είναι αυτά του Pacoima Dam και του Rinaldi στις μικρότερες περιόδους των 1-3sec, των Sylmar Olive View Hospital και Newhall Fire Station στις ενδιάμεσες περιόδους των 3-6sec και των Tarzana Cedar Hill, Canoga Park Toranga και Newhall at Pico Canyon για τις μεγαλύτερες περιόδους των 7-10sec. Στη συνέχεια, διεξήχθη ένας ενδεδειγμένος έλεγχος αυτών των απομακρυσμένων καταγραφών ώστε να εντοπιστεί η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της τοπογραφίας και των γεωλογικών χαρακτηριστικών που θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη συσχέτιση των δυο λόγων με την κατευθυντικότητα της διάρρηξης. Ο αριθμός των καταγραφών για το συγκεκριμένο γεγονός δεν κρίνεται επαρκής για πιο ενδεδειγμένη έρευνα που θα οδηγούσε στην επίδραση του εδαφικού τύπου, το εύρος των αποστάσεων κλπ.

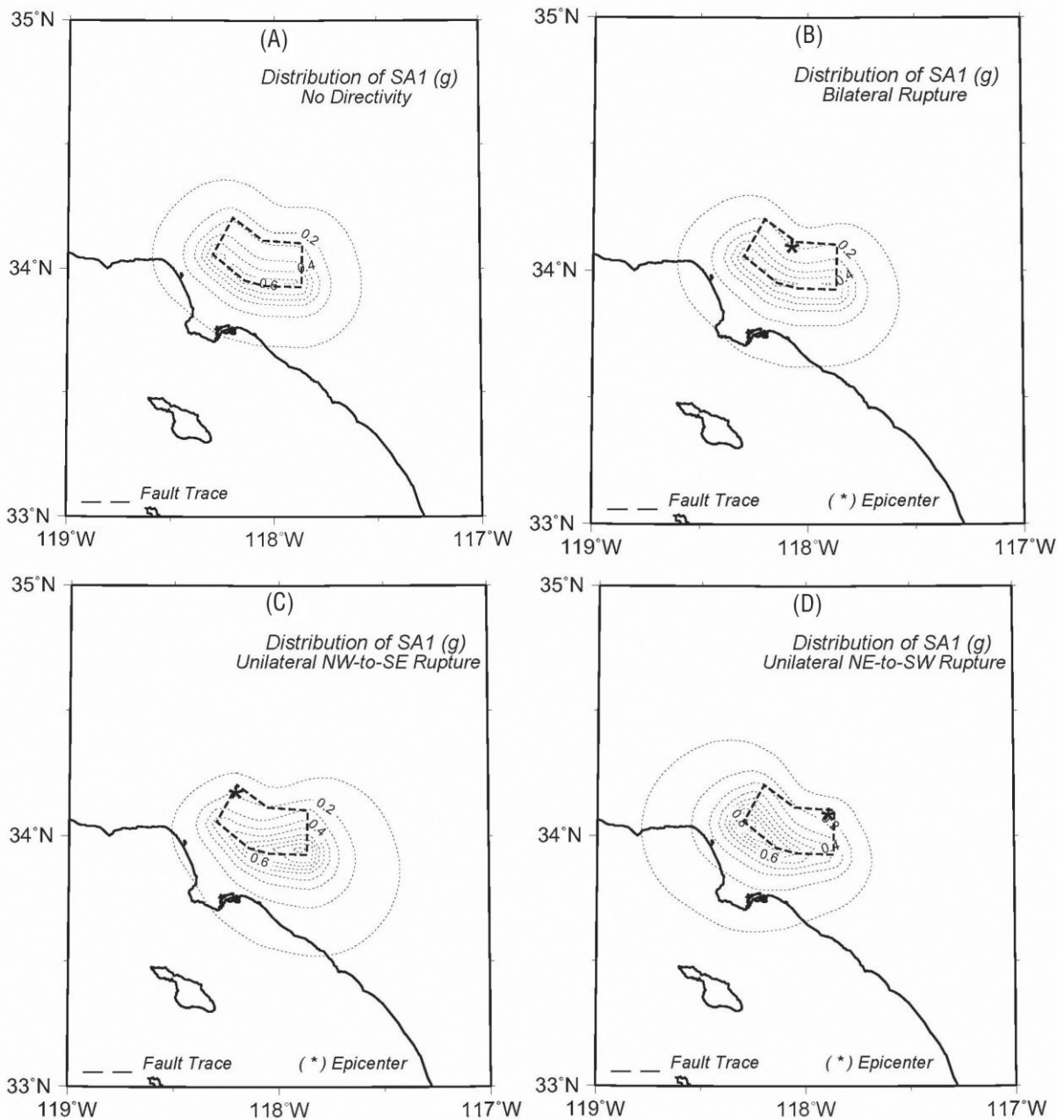
### 3.2.8 Εδαφικές κινήσεις

Ενσωματώνοντας τις τροποποιημένες βάσει κατευθυντικότητας σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης σε ένα λογισμικό πακέτο πρόβλεψης σεισμικού κινδύνου (Rowshandel 2004), ερευνώνται οι επιδράσεις του τύπου της διάρρηξης στην εδαφική κίνηση για διαφορετικές περιόδους. Για τη μέτρηση της εδαφικής κίνησης χρησιμοποιήθηκε η οριζόντια φασματική επιτάχυνση με απόσβεση 5% για περιόδους από 1 έως 3sec. Χρησιμοποιήθηκαν διακυμάνσεις των εδαφικών κινήσεων λόγω σεισμικής δόνησης σε ρήγματα διαφορετικής γεωμετρίας και μορφής διάρρηξης και προέκυψαν αποτελέσματα για τα ρήγματα Puente Hills και του Αγίου Ανδρέα, τα οποία παρουσιάζονται στις **εικόνες 3.9 και 3.10** αντίστοιχα.

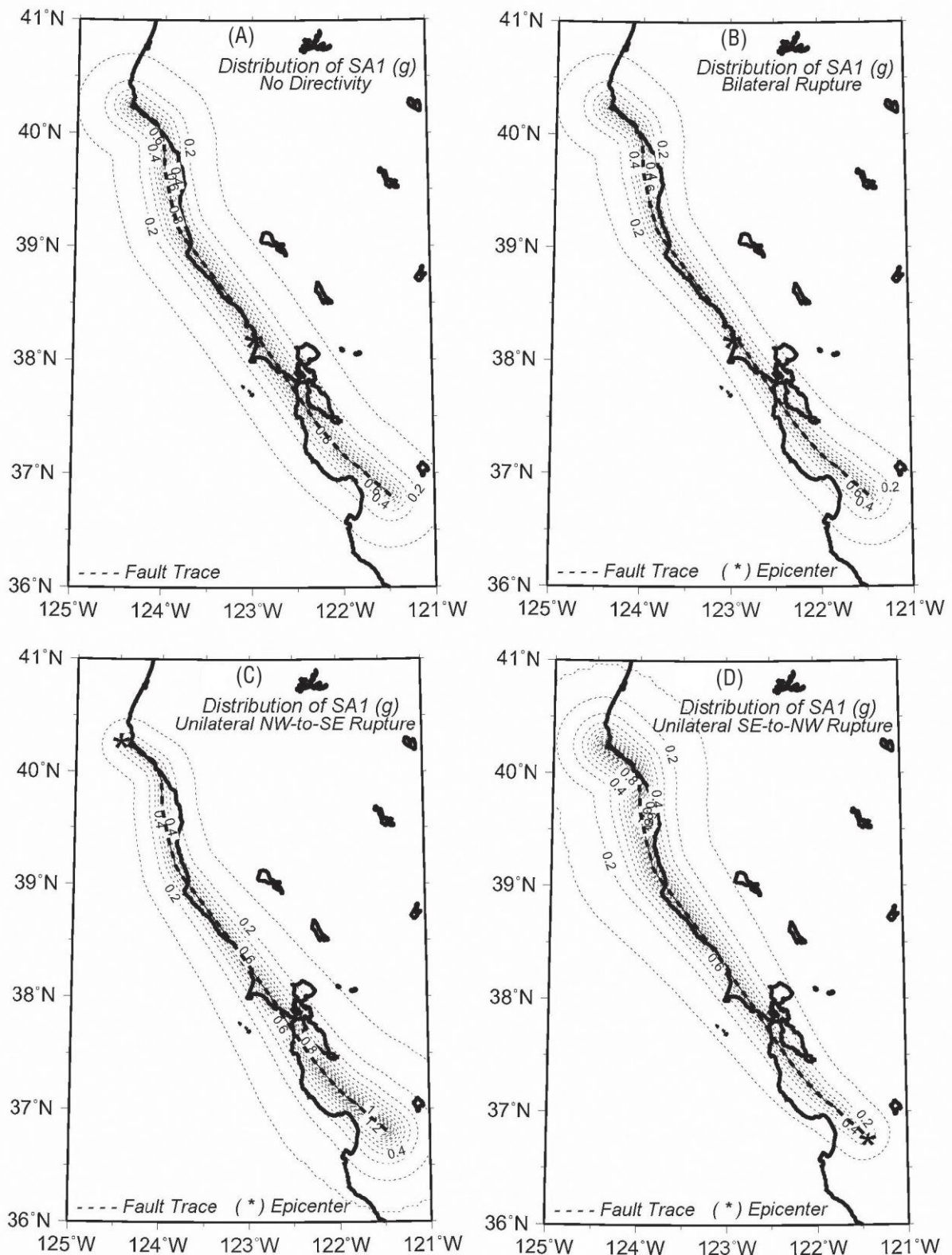
Η **εικόνα 3.9 (A-D)** παρουσιάζει τις διακυμάνσεις για φασματικές επιταχύνσεις στο 1sec ενός χαρακτηριστικού σεισμού μεγέθους  $M7.1$  του τυφλού ρήγματος Puente Hills, βασιζόμενοι σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια διάρρηξης: (A) τη συνηθισμένη περίπτωση με μη κατευθυντικότητα της διάρρηξης, (B) τη διάρρηξη να ξεκινά από το υπόκεντρο και να βρίσκεται στο μέσο μήκος και στον πυθμένα του ρήγματος, (C) τη διάρρηξη να ξεκινά από το βορειοδυτικό άκρο και τον πυθμένα του ρήγματος και να διαδίδεται προς τα ανατολικά, νοτιοανατολικά και νότια και (D) τη διάρρηξη να ξεκινά από το νοτιοανατολικό άκρο και τον πυθμένα του ρήγματος και να διαδίδεται προς τα δυτικά, νοτιοδυτικά και νότια. Η **εικόνα 3.10** παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα για το σεισμικό γεγονός μεγέθους  $M7.9$  που προέκυψε από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα, μια επανάληψη του σεισμού του San Fransisco του 1906.

Για τη δημιουργία των **εικόνων 3.9 και 3.10** λήφθηκαν υπόψη οι τέσσερις εξισώσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης με ισοδύναμη βαρύτητα. Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών περιπτώσεων διάρρηξης αποδεικνύει ξεκάθαρα τη σημαντική επίδραση που έχει ο τύπος της διάρρηξης στο σεισμικό μέγεθος και την κατανομή των φασματικών επιταχύνσεων στην περίοδο του 1sec.

Λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή  $C_2$  στο μοντέλο, ο οποίος σημαίνει μεγαλύτερη κατευθυντικότητα, η επίδραση μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη για φασματικές επιταχύνσεις μεγαλύτερων περιόδων.



**Εικόνα 3.9:** Κατανομές της φασματικής επιτάχυνσης (γεωμετρικός μέσος των τεσσάρων σχέσεων εξασθένισης) για πλήρη διάρρηξη ενός σεισμού μεγέθους  $M=7.1$  του τυφλού ρήγματος Puente Hills, για τέσσερα διαφορετικά σενάρια διάρρηξης.



**Εικόνα 3.10:** Κατανομές της φασματικής επιτάχυνσης (γεωμετρικός μέσος των τεσσάρων σχέσεων εξασθένισης) το σεισμό του San Francisco (1906), μεγέθους  $M=7.9$  για τέσσερα διαφορετικά σενάρια διάρρηξης.

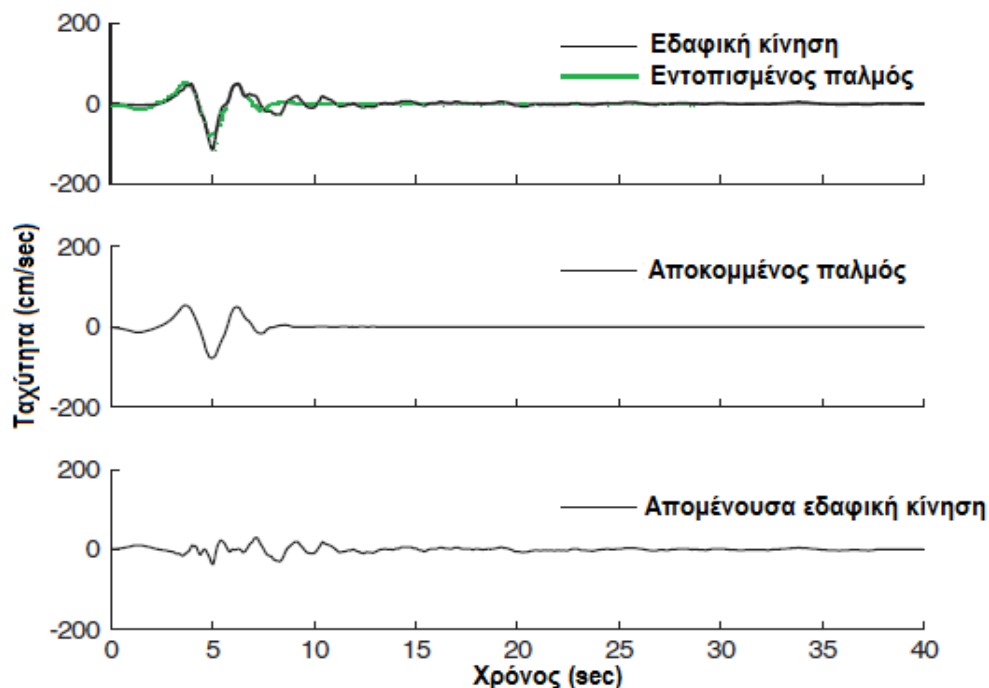


### 3.3 Διαμόρφωση της σχέσης των Shahi – Baker για το κοντινό πεδίο

#### 3.3.1 Αναγνώριση της ύπαρξης παλμικής κίνησης

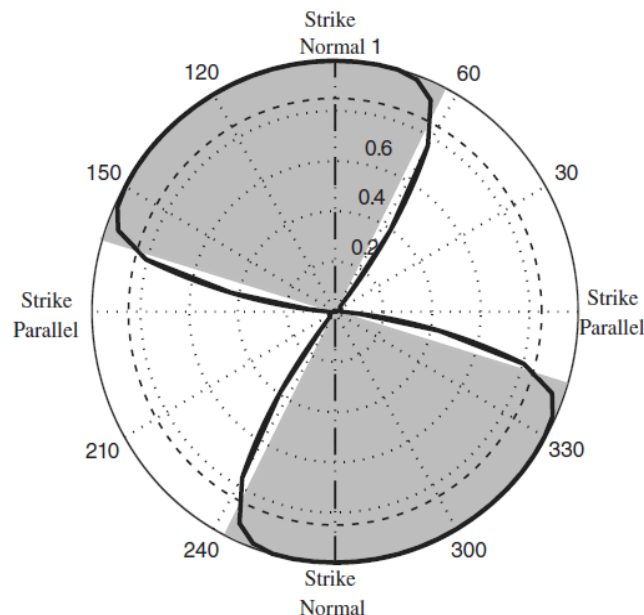
Προκειμένου να συμπληρωθεί μια πιθανοτική μελέτη παλμικών εδαφικών κινήσεων χρειάζεται μια βιβλιοθήκη καταγραφών με κατηγοριοποίηση της εκάστοτε εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Στο παρελθόν πολλοί ερευνητές κατηγοριοποίησαν τις καταγραφές χρησιμοποιώντας οπτικές ή ποσοτικές τεχνικές (Mavroeidis και Parageorgiou 2003, Somerville 2003, Fu και Menun 2004, Akkar et al 2005). Αυτές οι προσπάθειες όμως δεν περιέχουν μη παλμικές εδαφικές κινήσεις γι' αυτό αποτρέπουν την ανάλυση από τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού.

Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εντοπισμού παλμού του Baker (2007) επειδή είναι εντελώς ποσοτική και επιτρέπει την κατηγοριοποίηση πολλών δεδομένων όπως αυτά της νέας βάσης δεδομένων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί κυματική ανάλυση ώστε να αποκόψει το παλμικό κομμάτι από τη χρονοϊστορία της ταχύτητας της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας της εδαφικής κίνησης. Έπειτα, το αποκοπτόμενο τμήμα αναλύεται και χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση της εδαφικής κίνησης ως παλμικής ή μη. Αν και η κατηγοριοποίηση ορισμένων καταγραφών είναι δύσκολη λόγω της δυαδικότητας της μεθόδου, ο εν λόγω αλγόριθμος είναι γενικά αποτελεσματικός στο να δώσει βάσιμα αποτελέσματα. Η **εικόνα 3.11** απεικονίζει γραφικά τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.



**Εικόνα 3.11:** Απεικόνιση της διαδικασίας που χρησιμοποιεί ο Baker (2007) για την αποκοπή του μεγαλύτερου παλμού από τη χρονοϊστορία ταχυτήτων (εδώ παρουσιάζεται η χρονοϊστορία του σεισμού στο Imperial Valley, El Centro 1979). Στην περίπτωση αυτή ο παλμός είναι μεγάλος και η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική.

Αν και οι παλμοί ταχύτητας που προέρχονται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας αναμένεται να εμφανιστούν στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της εδαφικής κίνησης (Somerville 1997), σε πολλές διαρρήξεις λόγω της ανώμαλης γεωμετρίας καθίσταται δύσκολος ο προσδιορισμός της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας και οι παλμικές κινήσεις παρατηρούνται σε ένα ευρύ φάσμα διευθύνσεων γύρω από το ρήγμα (Howard et al 2005). Η **εικόνα 3.12** δείχνει τον συντελεστή εμφάνισης παλμού όπως αυτός προσδιορίστηκε από τον Baker (2007) σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από μια περιοχή (στις παλμικές εδαφικές κινήσεις εμφανίζονται μεγάλες τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού και σε διάφορες διευθύνσεις γύρω από τη θέση καταγραφής). Η παρουσιαζόμενη περίπτωση αποτελεί την απλή περίπτωση εμφάνισης παλμού γύρω από περιοχή ρήγματος κανονικής διάρρηξης ενώ πιο περίπλοκες περιπτώσεις υφίστανται όταν η διεύθυνση του ρήγματος κανονικής διάρρηξης δεν κείται στο εύρος διευθύνσεων όπου παρατηρούνται οι παλμοί (οι εν λόγω περιπτώσεις είναι μικρές σε αριθμό).



**Εικόνα 3.12:** Τιμές συντελεστή εμφάνισης παλμού ως συνάρτηση της διεύθυνσης για το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή υποδεικνύει τις διευθύνσεις στις οποίες η παλμική κίνηση είναι εμφανής.

Προκειμένου να μελετηθούν οι διευθύνσεις εμφάνισης της παλμικής κίνησης, οι εδαφικές καταγεγραμμένες κινήσεις περιστράφηκαν σε όλες τις διευθύνσεις και για καθεμιά διεύθυνση κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές ή μη. Μια θέση, λοιπόν, θεωρείται ότι μπορεί να εμφανίσει παλμική κίνηση αν έστω και μια εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε διεύθυνση στη θέση αυτή είναι παλμική. Αυτό το μοντέλο περιστροφής και κατηγοριοποίησης εδαφικών κινήσεων σε κάθε διεύθυνση οδήγησε στην κατηγοριοποίηση 179 καταγραφών της νέας βάσης δεδομένων, οι οποίες χαρακτηρίστηκαν ως παλμικές. Η συγκεκριμένη μέθοδος κατηγοριοποίησης προσδιορίζει παλμούς μόνο στην οριζόντια διεύθυνση και ίσως να μη μπορεί να



κατηγοριοποιήσει την κίνηση ως παλμική αν ο παλμός δε βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο. Η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση μπορεί να μη βρίσκεται στο οριζόντιο επίπεδο για ορισμένα ρήγματα μη κανονικής ολίσθησης, γι' αυτό τα μοντέλα για τα όλα τα ρήγματα μη κανονικής διάρρηξης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα μελέτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο όταν υπάρχουν μικρής σημασίας παλμοί εκτός του οριζοντίου επιπέδου.

Η προηγούμενη έρευνα του Baker (2007) η οποία περιείχε μόνο εδαφικές κινήσεις που προέκυπταν από ρήγματα κανονικής διάρρηξης, προσδιόρισε 91 παλμικές κινήσεις της νέας βάσης δεδομένων. Οι περισσότερες από τις πρόσθετες εδαφικές κινήσεις της παρούσας μελέτης είχαν ένα διακριτό παλμικό χαρακτηριστικό στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Οι συγκεκριμένες καταγραφές δεν κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικές στην έρευνα του Baker (2007) επειδή το παλμικό χαρακτηριστικό βρισκόταν ελάχιστα εκτός των κατώτατων ορίων κατηγοριοποίησης της παρούσας έρευνας. Η παρουσία διακριτού παλμού στη χρονοϊστορία ταχυτήτων της κάθετης συνιστώσας των περισσότερων παλμικών καταγραφών υποδηλώνει ότι η επίδραση της κατευθυντικότητας μπορεί να είναι η κύρια αιτία της παλμικής κίνησης στη διεύθυνση αυτή.

### 3.3.2 Δημιουργία μοντέλων εύρεσης της οριζόντιας φασματικής επιτάχυνσης

Η συμβατική εξίσωση προσδιορισμού της φασματικής επιτάχυνσης είναι η:

$$v_{S_a}(x) = \sum_{i=1}^{\#faults} v_i \iint P(S_a > x|m, r) \cdot dm \cdot dr \quad [7]$$

η οποία χρησιμοποιείται για την εύρεση του ετήσιου ρυθμού με τον οποίο η φασματική επιτάχυνση  $S_a$  σε μια θέση υπερβαίνει την τιμή  $x$ . Ο όρος  $P(S_a > x|m, r)$  δίνει την πιθανότητα η  $S_a$  σε μια συγκεκριμένη θέση να υπερβεί την τιμή  $x$  με την ταυτόχρονη εμφάνιση σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί με οποιοδήποτε εδαφικό μοντέλο. Η συγκεκριμένη πιθανότητα αν πολλαπλασιαστεί με την πυκνότητα πιθανότητας εμφάνισης ενός σεισμού μεγέθους  $m$  σε απόσταση  $r$ ,  $f_i(m, r)$  σε ένα συγκεκριμένο ρήγμα  $i$  και αν ολοκληρωθεί για όλες τις πιθανές τιμές των  $m$  και  $r$ , δίνει την πιθανότητα υπέρβασης ενός σεισμού. Ο συνολικός ρυθμός υπέρβασης μιας θέσης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας αυτή την πιθανότητα με το ρυθμό εμφάνισης των σεισμών στο ρήγμα  $v_i$  και αθροίζοντας για κάθε ρήγμα στην περιοχή της θέσης. Η πιθανότητα  $P(S_a > x|m, r)$  προέκυψε χρησιμοποιώντας ένα εδαφικό μοντέλο το οποίο γενικότερα αποτελεί συνάρτηση των παραμέτρων του μηχανισμού διάρρηξης, των χαρακτηριστικών της θέσης καταγραφής και άλλων παραμέτρων πέραν του σεισμικού μεγέθους και της απόστασης.

Οι επιδράσεις της παλμικής κίνησης μπορούν να συμπεριληφθούν στην ανάλυση σεισμικού κινδύνου χρησιμοποιώντας ένα τροποποιημένο μοντέλο εδαφικής κίνησης, το οποίο ερμηνεύει την επίδραση της ενίσχυσης των παλμών κατευθυντικότητας στις τιμές της φασματικής επιτάχυνσης. Επειδή οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της πηγής και της θέσης καταγραφής, το εδαφικό μοντέλο ερμηνείας των παλμών πρέπει να είναι συνάρτηση της γεωμετρίας εκτός από συνάρτηση του μεγέθους και της απόστασης. Άρα μπορεί

να χρησιμοποιηθεί ένα τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο ερμηνείας της παλμικής εδαφικής κίνησης για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης  $P^*(S_a > x|m, r, z)$ , όπου το  $z$  αναπαριστά τις πληροφορίες για τη γεωμετρία της περιοχής. Αυτή η νέα πιθανότητα υπέρβασης όταν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της εξίσωσης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να δώσει το βαθμό υπέρβασης της  $S_a$  σε κάποια θέση, συναρτήσει του υπολογισμού της επίδρασης των παλμικών κινήσεων.

Η κατευθυντικότητα μπορεί να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης μέσω της εξίσωσης:

$$v_{S_a}(x) = \sum_{i=1}^{\#faults} v_i \iiint P^*(S_a > x|m, r, z) \cdot f_i(m, r, z) \cdot dm \cdot dr \cdot dz \quad [8]$$

Η παρουσία ενός παλμικού χαρακτηριστικού της εδαφικής κίνησης ενισχύει ένα εύρος περιόδων του φάσματος απόκρισης, όπως φαίνεται στην **εικόνα 3.13**. Αυτή η ενίσχυση της απόκρισης αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα υπέρβασης μιας συγκεκριμένης τιμής φασματικής επιτάχυνσης όταν η παλμική εδαφική κίνηση εμφανίζεται σε κάποια περιοχή. Για το λόγο αυτό, η προτεινόμενη **εξίσωση [8]** μπορεί να προκύψει διαχωρίζοντας την πιθανότητα  $P^*(S_a > x|m, r, z)$  σε δυο περιπτώσεις εξαρτώμενες από το αν εμφανίζεται ή όχι παλμική κίνηση. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορούν αργότερα να συνδυαστούν ώστε να υπολογιστεί ο συνολικός βαθμός υπέρβασης.

Τα συγκεκριμένα εδαφικά μοντέλα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης προσαρμόζονται εμπειρικά χρησιμοποιώντας παλμικές και μη κινήσεις από μια βάση δεδομένων εδαφικής κίνησης. Στην περιοχή κοντινού πεδίου, όπου παρουσιάζονται κυριότερα οι παλμοί, τα εδαφικά μοντέλα μπορεί να υποεκτιμούν την παλμική εδαφική κίνηση και να υπερεκτιμούν τη μη παλμική. Όταν παρατηρείται κάποιος παλμός μια πρόβλεψη της υπέρβασης της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να δοθεί από την εξίσωση:

$$P(S_a > x|m, r, z, pulse) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln S_a, pulse}}{\sigma_{\ln S_a, pulse}}\right) \quad [9]$$

όπου οι παλμικές εδαφικές κινήσεις έχουν μέση τιμή  $\mu_{\ln S_a, pulse}$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln S_a, pulse}$ . Να σημειωθεί ότι τα  $\mu_{\ln S_a, pulse}$  και  $\sigma_{\ln S_a, pulse}$  είναι συναρτήσεις των  $m$ ,  $r$ ,  $T_p$  και άλλων παραγόντων αλλά η εξάρτησή τους έχει παραληφθεί με σκοπό να τονιστεί η επίδραση των νέων παραμέτρων της συγκεκριμένης έρευνας.

Όταν δεν παρατηρείται παλμός για τον υπολογισμό της φασματικής επιτάχυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί το τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο της επόμενης εξίσωσης, αφού πρωτίστως γίνει η διόρθωσή του για την υπερεκτίμηση της κίνησης:

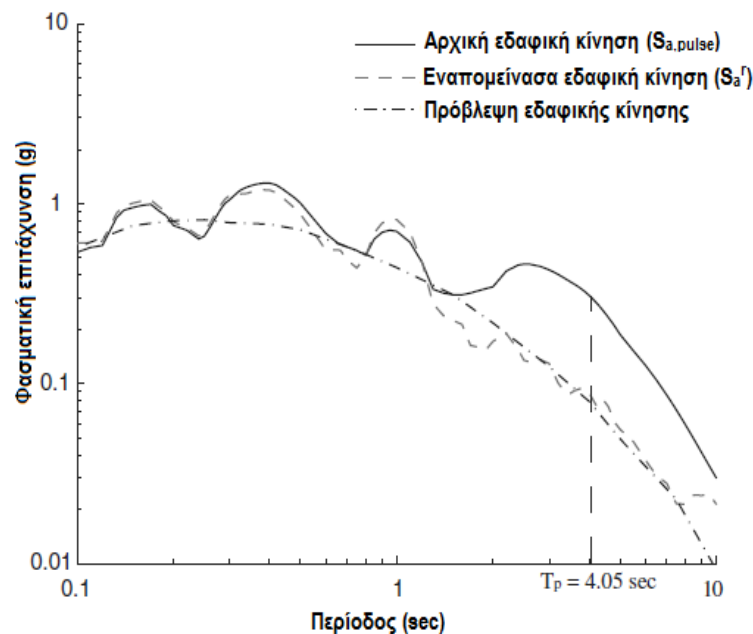
$$P(S_a > x|m, r, no pulse) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln S_a, no pulse}}{\sigma_{\ln S_a, no pulse}}\right) \quad [10]$$

όπου η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο τροποποιημένης εδαφικής κίνησης για μη παλμικές κινήσεις. Στις **εξισώσεις [9]** και **[10]** το  $\Phi()$  αντιπροσωπεύει την τυπική κανονική αθροιστική συνάρτηση κατανομής. Υποτέθηκε κανονική κατανομή υπολοίπων ενώ τα ιστογράμματα υπολοίπων που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα είναι συμβατά με αυτή την υπόθεση.

Οι δυο αυτές υποπεριπτώσεις μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας το θεώρημα ολικής πιθανότητας (Benjamin και Cornell, 1970) ώστε να προκύψει η ολική πιθανότητα υπέρβασης  $S_a$  την τιμή  $x$  σε κάποια θέση ως:

$$P^*(S_a > x|m, r, z) = P(\text{pulse}|m, r, z) \cdot P(S_a > x|m, r, z, \text{pulse}) + (1 - P(\text{pulse}|m, r, z)) \cdot P(S_a > x|m, r, \text{no pulse}) \quad [11]$$

Όπως παρατηρείται στην **εξίσωση [11]** η πιθανότητα ύπαρξης παλμικής κίνησης σε μια περιοχή είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της φασματικής επιτάχυνσης. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο λογιστικής παλινδρόμησης για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης παλμού δεδομένης της γεωμετρίας της πηγής και της θέσης καταγραφής, κατά το οποίο χρησιμοποιείται ένα γενικευμένο γραμμικό μοντέλο για την προσαρμογή των δεδομένων διωνυμικής κατανομής (Kutner et al. 2004).



**Εικόνα 3.13:** Φάσμα απόκρισης από το σεισμό Imperial Valley, El Centro 1979 σε κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Η μέση πρόβλεψη των Boore και Atkinson (2007) και η φασματική απόκριση για την απομένουσα εδαφική κίνηση παρουσιάζονται επίσης.

Είναι ευρέως αποδεδειγμένο ότι το φαινόμενο πρόσω κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία της περιοχής καταγραφής. Οι Iervolino και Cornell (2008) απέδειξαν ότι οι παράμετροι  $r$ ,  $s$  και  $\theta$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και  $r$ ,  $d$  και  $\varphi$  για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων έχουν μεγαλύτερη ισχύ κατά τη λογιστική παλινδρόμηση για τον προσδιορισμό της εμφάνισης παλμού απ' ό,τι άλλες παράμετροι. Η **εικόνα 3.14** παρουσιάζει γραφικά αυτές τις παραμέτρους. Στην προκειμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι με αυτές των Iervolino και Cornell (2008) και διεξήχθη η λογιστική παλινδρόμηση χρησιμοποιώντας πληροφορίες από όλες τις θέσεις καταγραφής της νέας βάσης δεδομένων. Χρειάστηκε επαναπροσαρμογή των δεδομένων επειδή το μοντέλο των Iervolino και Cornell (2008) δίνει μόνο την πιθανότητα εμφάνισης παλμού στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα ενώ η συγκεκριμένη έρευνα χρειάζεται την πιθανότητα εμφάνισης σε

οποιαδήποτε συνιστώσα. Βρέθηκε ότι μόνο οι παράμετροι  $r$  και  $s$  είναι στατιστικά σημαντικές στην περίπτωση ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης ενώ οι παράμετροι  $r$ ,  $d$  και  $\varphi$  είναι σημαντικές για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων. Τα αποτελέσματα της στατιστικής παλινδρόμησης συνοψίζονται στις **εξισώσεις [12]** και **[13]**:

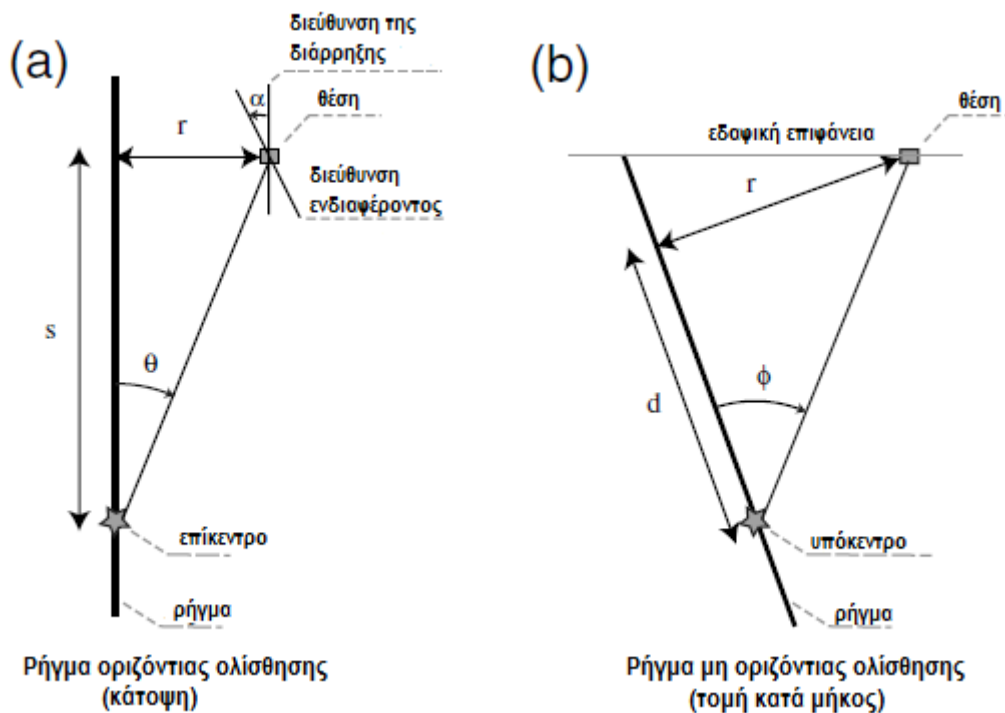
- για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης

$$P(\text{pulse}|r, s) = \frac{1}{1 + e^{(0.642 + 0.167 \cdot r - 0.075 \cdot s)}} \quad [12]$$

- για όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων

$$P(\text{pulse}|r, d, \varphi) = \frac{1}{1 + e^{(0.128 + 0.055 \cdot r - 0.061 \cdot d + 0.036 \cdot \varphi)}} \quad [13]$$

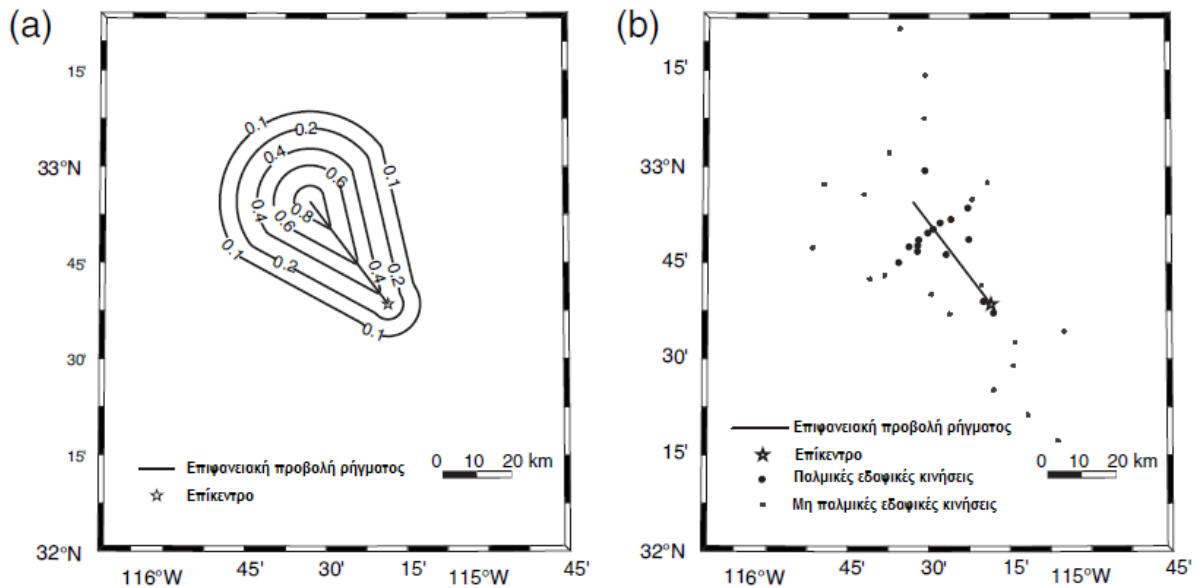
Οι μονάδες των  $r$ ,  $d$  και  $s$  είναι  $km$  ενώ του  $\varphi$  είναι **μοίρες**. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε περιείχε τιμές του  $r$  που κυμαίνονταν από  $0.3km$  έως  $255km$  στην περίπτωση ρηγμάτων μη οριζόντιας ολίσθησης και  $0.07km$  έως  $472km$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Οι τιμές του  $d$  κυμαίνονταν από  $0$  έως  $70km$ , του  $\varphi$  από  $0$  έως  $90$  μοίρες και του  $s$  από  $0.3km$  έως  $143km$ .



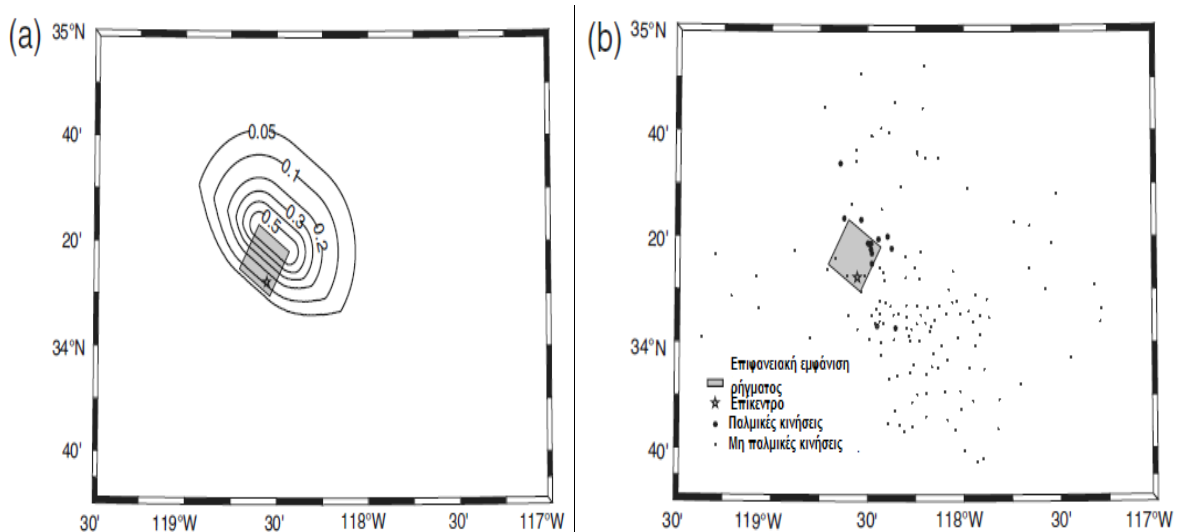
**Εικόνα 3.14:** Σχήμα που επεξηγεί τις απαιτούμενες παραμέτρους για τη λογιστική παλινδρόμηση για (α) ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και (β) ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης. Παρουσιάζεται επίσης η γωνία  $\alpha$  μεταξύ της διεύθυνσης ενδιαφέροντος και της διεύθυνσης του ρήματος.

Ένας χάρτης με τις προκύπτουσες πιθανότητες για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης παρουσιάζεται στην **εικόνα 3.15a** και για ένα ρήγμα μη οριζόντιας ολίσθησης στην **εικόνα 3.16a**. Οι ισούψεις των χαρτών συμβολίζουν την πιθανότητα εμφάνισης παλμού γύρω από τη διάρρηξη κατά το σεισμό του Imperial Valley και του Northridge. Οι συγκεκριμένοι χάρτες μπορούν να συγκριθούν με τους πραγματικούς για περιοχές όπου παρατηρήθηκε η παλμική εδαφική κίνηση, όπως φαίνεται στις αντίστοιχες **εικόνες 3.15b** και **3.16b**. Το συγκεκριμένο μοντέλο προβλέπει αυξημένη

πιθανότητα εμφάνισης παλμού σε περιοχές όπου εμφανίζονται φαινόμενα κατευθυντικότητας, ενώ το σχήμα των ισοϋψών φαίνεται να είναι όμοιο με αυτό των πραγματικών παρατηρήσεων.



**Εικόνα 3.15:** Χάρτης του σεισμού του Imperial Valley που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση.



**Εικόνα 3.16:** Χάρτης του σεισμού του Northridge που απεικονίζει (α) ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμού για δεδομένη διάρρηξη και (β) περιοχές όπου παρατηρήθηκε παλμική εδαφική κίνηση.

Η περιστροφή και η κατηγοριοποίηση των εδαφικών κινήσεων οδήγησε στην εύρεση των παλμικών κινήσεων σε ένα εύρος διευθύνσεων. Για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου μιας θέσης κοντά σε ρήγμα για διάφορες διευθύνσεις πρέπει να είναι γνωστή η πιθανότητα παρατήρησης παλμικής κίνησης σε κάποια τυχαία διεύθυνση. Τα δεδομένα από τις περιστρεμμένες κατηγοριοποιήσεις παλμών χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της πιθανότητας εύρεσης παλμού σε κάποια

διεύθυνση ( $\alpha$ ) δεδομένου ότι ο παλμός εμφανίζεται σε κάποια θέση, άρα  $P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse})$ . Η γωνία  $\alpha$  είναι η μικρότερη γωνία που μπορεί να μετρηθεί σε σχέση με τη γωνία βύθισης του ρήγματος που λήφθηκε από τα δεδομένα της νέας βάσης δεδομένων. Η **εικόνα 3.14a** απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η γωνία  $\alpha$ . Βρέθηκε ότι η πιθανότητα  $P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse})$  είναι διαφορετική για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και διαφορετική για κάθε άλλο τύπο ρήγματος. Η **εικόνα 3.17** δείχνει το κλάσμα των παλμικών κινήσεων με παλμό στη γωνία  $\alpha$  για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη οριζόντιας ολίσθησης. Στην εικόνα επίσης παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μείωση των τετραγωνικών σφαλμάτων μεταξύ των δεδομένων που προέκυψαν από παρατηρήσεις και αυτών που προέκυψαν από τις εξισώσεις. Το μοντέλο περιγράφεται από τις **εξισώσεις [14]** και **[15]** για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και όλους τους υπόλοιπους τύπους ρηγμάτων αντίστοιχα:

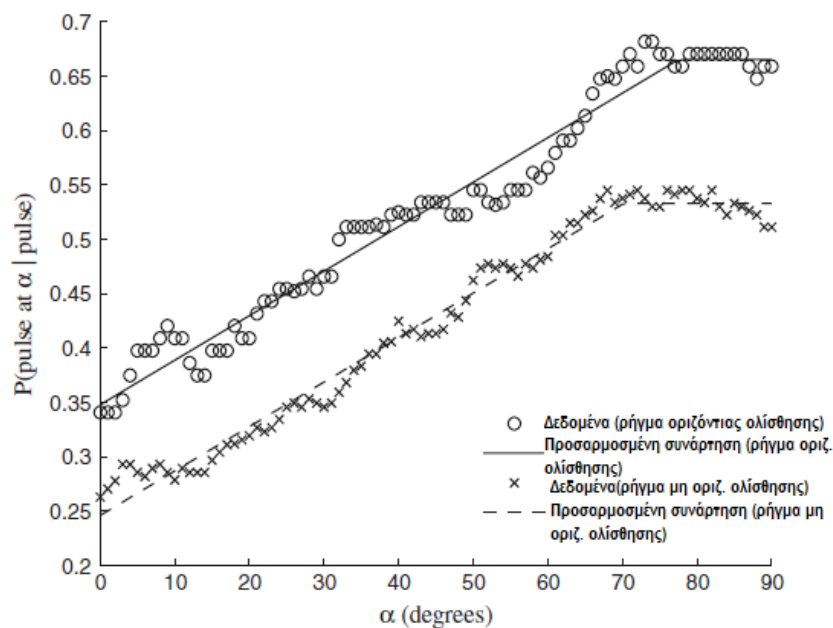
$$P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse}) = \min [0.67, 0.67 - 0.0041 \cdot (77.5 - \alpha)] \quad [14]$$

$$P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse}) = \min [0.53, 0.53 - 0.0041 \cdot (70.2 - \alpha)] \quad [15]$$

Λόγω του εντονότερου φαινομένου κατευθυντικότητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και του ότι η κάθετη συνιστώσα βρίσκεται πιο κοντά στην προβολή του ρήγματος στο οριζόντιο επίπεδο, αναμένεται να υπάρχουν μεγαλύτερες τιμές πιθανότητας παρατήρησης παλμού στη διεύθυνση αυτή. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα της ανάλυσης επιβεβαίωσαν ότι η πιο πιθανή διεύθυνση για εμφάνιση παλμικής κίνησης είναι η κάθετη στη διάρρηξη ( $\alpha=90^\circ$ ) ενώ η λιγότερο πιθανή είναι η παράλληλη στη διάρρηξη ( $\alpha=0^\circ$ ) για όλες τις κατηγορίες ρηγμάτων (οριζόντιας ολίσθησης και μη). Η πιθανότητα εμφάνισης παλμικής κίνησης σε κάποια θέση με διεύθυνση  $\alpha$  από τη γωνία βύθισης του ρήγματος δίνεται από την εξίσωση:

$$P(\text{pulse at } \alpha) = P(\text{pulse at } \alpha | \text{pulse}) \cdot P(\text{pulse}) \quad [16]$$

όπου οι όροι στο αριστερό μέλος καθορίζονται από τις **εξισώσεις [12] έως [15]**.



**Εικόνα 3.17:** Απεικόνιση της πιθανότητας εμφάνισης παλμού σε γωνία  $\alpha$  δεδομένου του παλμού σε κάποια θέση για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και μη.

### 3.3.3 Προσδιορισμός της περιόδου του παλμού

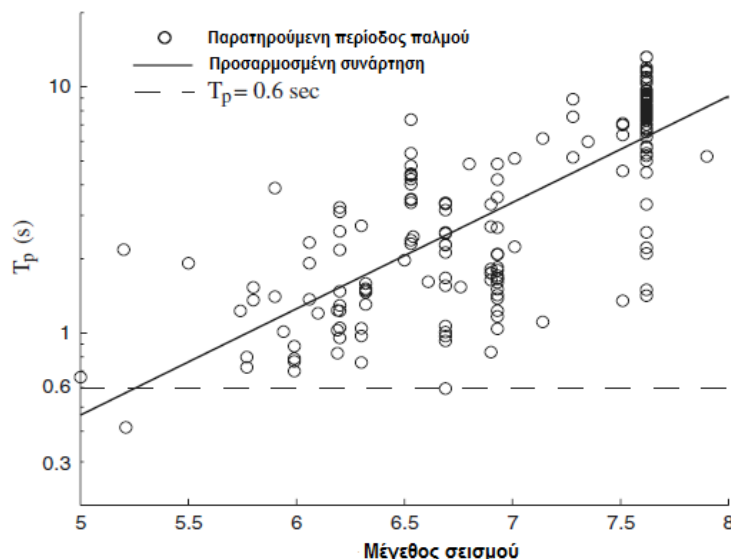
Η ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης  $S_a$  λόγω της παρουσίας ενός παλμικού χαρακτηριστικού στην εδαφική κίνηση αποτελεί συνάρτηση της περιόδου του παλμού. Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν ανακάλυψαν ότι η περίοδος του παλμού εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος, συνεπώς συμπεριέλαβαν αυτή τη σχέση στις εξισώσεις τους (Μανροειδής και Παπαγεωργίου 2003, Somerville 2003, Bray και Rodriguez-Marek 2004 και Baker 2007). Χρησιμοποιώντας τον τροποποιημένο αλγόριθμο κατηγοριοποίησης εντοπίστηκαν πολλές παλμικές εδαφικές κινήσεις οι οποίες δεν είχαν χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερες έρευνες και κατασκευάστηκε μια εξίσωση συσχέτισης της περιόδου του παλμού και του σεισμικού μεγέθους χρησιμοποιώντας όλες τις παλμικές κινήσεις της παρούσας έρευνας.

Για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της περιόδου του παλμού και του μεγέθους του σεισμικού γεγονότος, υπολογίστηκαν οι περίοδοι όλων των εντοπισμένων παλμών. Η περίοδος που σχετίζεται με το μέγιστο πλάτος της ανάλυσης Fourier του παλμού χρησιμοποιήθηκε ως μέσο μέτρησης της περιόδου του παλμού κατά τη μέθοδο του Baker (2007). Οι **εξισώσεις [17]** και **[18]** προέκυψαν από γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ του  $\ln T_p$  και του σεισμικού μεγέθους.

$$\mu_{\ln T_p} = -5.73 + 0.99 \cdot M \quad [17]$$

$$\sigma_{\ln T_p} = 0.56 \quad [18]$$

Η **εικόνα 3.18** απεικονίζει τη σχέση της παρατηρούμενης περιόδου του παλμού  $T_p$  σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος  $M$  της **εξίσωσης [17]**.



**Εικόνα 3.18:** Περίοδος του παλμού σχετιζόμενη με το σεισμικό μέγεθος για εδαφικές κινήσεις χαρακτηριζόμενες ως παλμικές.

Τα υπόλοιπα του μοντέλου ακολουθούν κανονική κατανομή άρα η  $\ln T_p$  μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή (ή ότι η  $T_p$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή) σε σχέση με τη μέση τιμή  $\mu_{\ln T_p}$  που δίνεται από την **εξίσωση [17]** και την τυπική απόκλιση  $\sigma_{\ln T_p}$  που δίνεται από την **εξίσωση [18]**. Από



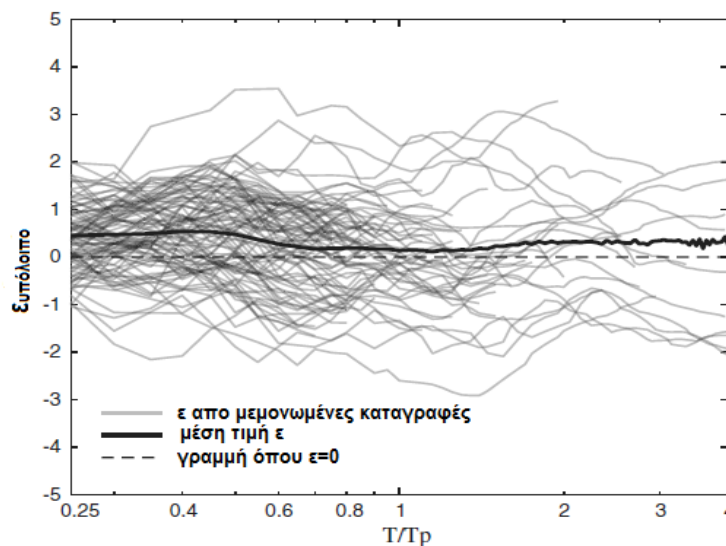
την εικόνα επίσης φαίνεται ότι ο αριθμός των παλμικών κινήσεων με μικρή περίοδο παλμού είναι μικρός. Τιμές  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  είναι σπάνιες και παλμοί κατευθυντικότητας με χαμηλές περιόδους δεν αναμένεται να επιδρούν σημαντικά στη σεισμική επικινδυνότητα. Για το λόγο αυτό, οι παρατηρήσεις με  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  αγνοήθηκαν στα εν λόγω μοντέλα και στους μετέπειτα υπολογισμούς.

### 3.3.4 Ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης λόγω της ύπαρξης του παλμού

Η προτεινόμενη μελέτη χρειάζεται ένα προσομοίωμα εδαφικής κίνησης συμβατό με παλμικά χαρακτηριστικά. Το εδαφικό μοντέλο όταν εμφανίζεται ο παλμός είναι απαραίτητο να προβλέπει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της  $\ln S_{a,pulse}$  σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Για απλοποίηση του μοντέλου η συγκεκριμένη παράμετρος μπορεί να διαχωριστεί σε δυο μέρη:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln \left( \frac{S_{a,pulse}}{S_a^r} \cdot S_a^r \right) = \ln(Af \cdot S_a^r) = \ln Af + \ln S_a^r \quad [19]$$

Ο όρος  $S_a^r$  είναι η φασματική επιτάχυνση της απομένουσας εδαφικής κίνησης, δηλαδή της κίνησης που απομένει μετά την αφαίρεση του παλμού και ο όρος  $Af$  είναι ο συντελεστής ενίσχυσης λόγω της παρουσίας του παλμού. Αυτή η προσομοίωση της εδαφικής κίνησης δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης της ενίσχυσης λόγω των παλμικών χαρακτηριστικών και της απομένουσας εδαφικής κίνησης σε κάποια θέση ξεχωριστά. Στην **εικόνα 3.19** παρουσιάζονται τα υπόλοιπα  $\varepsilon$  της εδαφικής κίνησης σύμφωνα με το μοντέλο των Boore και Atkinson (2008), όπου τα  $\varepsilon$  συμβολίζουν τα τυποποιημένα υπόλοιπα του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).



**Εικόνα 3.19:** Παρατηρούμενες τιμές  $\varepsilon$  της απομένουσας εδαφικής κίνησης.

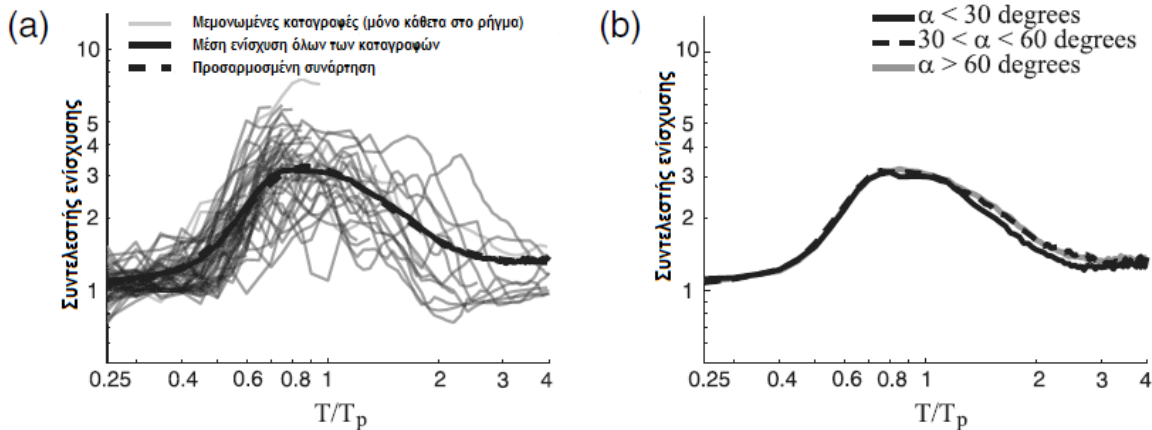
Στην εικόνα φαίνεται ότι τιμές των  $\varepsilon$  κοντά στο 0 υποδηλώνουν ότι το εδαφικό μοντέλο μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά την  $S_a^r$  κατά μέσο όρο και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απομένουσας εδαφικής κίνησης. Οι Chioccarelli και Iervolino (2010) απέδειξαν ότι η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα εδαφικής κίνησης είναι πολλές φορές ισχυρότερη από την παράλληλη, ακόμα και μετά την αφαίρεση του παλμού, άρα το αποτέλεσμα της **εικόνας 3.19**



είναι συμβατό με αυτό το εύρημα καθώς τα  $\epsilon$  από την απομένουσα εδαφική κίνηση είναι θετικά (η εδαφική κίνηση είναι δηλαδή ισχυρότερη από την πρόβλεψη για τη μέση τιμή). Όμως, τα  $\epsilon$  είναι αρκετά κοντά στο 0 άρα συμπεραίνουμε ότι τα παραδοσιακά μοντέλα εδαφικής κίνησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της απομένουσας εδαφικής κίνησης. Άρα η **εξίσωση [19]** μπορεί να ξαναγραφεί αντικαθιστώντας το  $\ln S_a^r$  με την τιμή που προβλέπεται από τα παραδοσιακά προσομοιώματα εδαφικής κίνησης:

$$\ln S_{a,pulse} = \ln Af + \ln S_{a,gmm} \quad [20]$$

Ακόμη, στην παρούσα μελέτη υπολογίστηκαν μορφές εδαφικής ενίσχυσης καθώς επίσης και ο λόγος της φασματικής επιτάχυνσης της εδαφικής κίνησης προς την αντίστοιχη της απομένουσας εδαφικής κίνησης μετά την αφαίρεση του παλμού. Η **εικόνα 3.20** δείχνει τους συντελεστές ενίσχυσης σε συνάρτηση με το λόγο της περιόδου που μας ενδιαφέρει ( $T$ ) προς την περίοδο του παλμού ( $T_p$ ). Οι μέσες τιμές των λόγων σχηματίζουν καμπύλη κωδωνοειδούς μορφής ομοιόμορφα τοποθετημένη σε σχέση με το λόγο  $T/T_p=1$ .



**Εικόνα 3.20:** Συντελεστής ενίσχυσης των φασματικών επιταχύνσεων λόγω της παρουσίας των παλμικών χαρακτηριστικών στις εδαφικές κινήσεις. (α) γραφική παράσταση των παραγόμενων εξισώσεων μαζί με τις παρατηρήσεις πεδίου και (b) μέση ενίσχυση λόγω της καταγραφής παλμών σε διάφορες διευθύνσεις.

Μετά από την εφαρμογή διαφόρων σχέσεων, χρησιμοποιώντας απομείωση των τετραγώνων των σφαλμάτων και εφαρμογή στα σεισμικά δεδομένα, επιλέχθηκε η εξής:

$$\mu_{\ln Af} = \begin{cases} 1.131 \cdot \exp\left(-3.11 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.058 & \text{αν } T \leq 0.88 \cdot T_p \\ 0.896 \cdot \exp\left(-2.11 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.255 & \text{αν } T > 0.88 \cdot T_p \end{cases} \quad [21]$$

Στην **εικόνα 3.20a** παρουσιάζεται η προσομοίωση σε συνάρτηση με τις παρατηρούμενες ενισχύσεις. Ενισχύσεις που υπολογίστηκαν για παλμικές κινήσεις σε διαφορετικές διευθύνσεις παρουσιάζονται στην **εικόνα 3.20b** από την οποία συμπεραίνεται ότι το μοντέλο είναι σταθερό ανεξάρτητα από την αλλαγή της διεύθυνσης. Παρόμοιοι έλεγχοι απέδειξαν ότι η ενίσχυση λόγω της παρουσίας του

παλμού παραμένει σταθερή με την αλλαγή των σεισμικών μεγεθών και του τύπου του ρήγματος. Μπορούμε επίσης να πούμε ότι:

$$\mu_{\ln S_{a,pulse}} = \mu_{\ln A_f} + \mu_{\ln S_{a,gmm}} \quad [22]$$

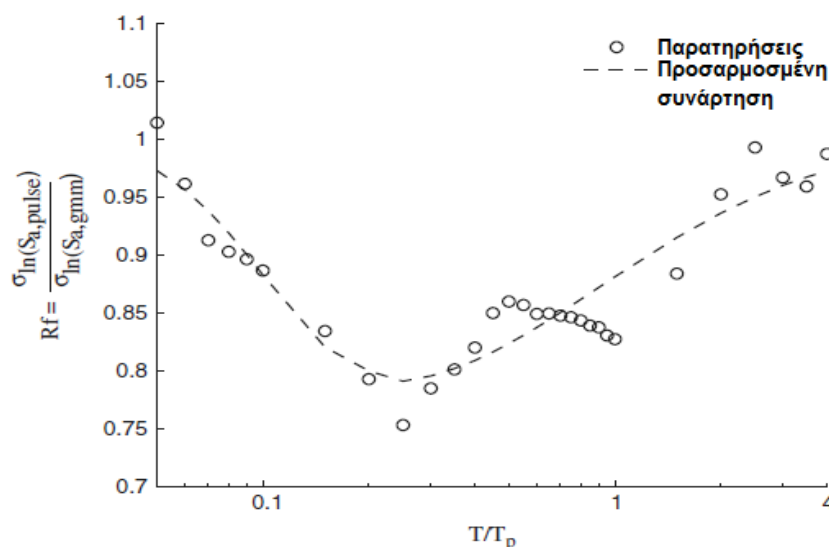
Επειδή το τροποποιημένο εδαφικό μοντέλο της παρούσας μελέτης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε παλμικές κινήσεις, αναμένεται ότι η τυπική απόκλιση του υποσυνόλου καταγραφών θα είναι μικρότερη από αυτή της συνολικής βάσης δεδομένων. Επίσης, επειδή το συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόζεται για εδαφική ενίσχυση προερχόμενη από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας, η ομαλοποίηση που γίνεται οδηγεί σε μείωση των τιμών των τυπικών αποκλίσεων των υπολοίπων. Η παρατηρούμενη μείωση των τυπικών αποκλίσεων εξαρτάται από το λόγο  $T/T_p$  και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\ln S_{a,pulse}} = Rf \cdot \sigma_{\ln S_{a,gmm}} \quad [23]$$

όπου ο απομειωτικός συντελεστής  $Rf$  υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Rf = \begin{cases} 1 - 0.2 \cdot \exp\left(-0.96 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 1.56\right)^2\right) & \text{αν } T \leq 0.21 \cdot T_p \\ 1 - 0.21 \cdot \exp\left(-0.24 \cdot \left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 1.56\right)^2\right) & \text{αν } T > 0.21 \cdot T_p \end{cases} \quad [24]$$

Στην **εικόνα 3.21** παρουσιάζεται ο λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων του τροποποιημένου μοντέλου προς αυτές του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008). Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη μελέτη είναι στατιστικά προσαρμοσμένα στα σεισμικά δεδομένα και εξαρτώμενα από την περίοδο του παλμού ( $T_p$ ). Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα με περίοδο  $T_p < 0.6 \text{ sec}$  είναι σπάνια και η προσομοίωση του μοντέλου για τις συγκεκριμένες τιμές μπορεί να οδηγήσει σε ενίσχυση των μικρών περιόδων, άρα συνιστάται η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου για τυπικές εδαφικές κινήσεις περιόδων  $T_p > 0.6 \text{ sec}$ . Ας σημειωθεί ότι αυτό το όριο περιορίζει την ενίσχυση της φασματικής επιτάχυνσης στις μικρές περιόδους, το οποίο είναι συμβατό με τα όρια που χρησιμοποιούνται σε άλλα μοντέλα προσομοίωσης.



**Εικόνα 3.21:** Λόγος της τυπικής απόκλισης των υπολοίπων από προβλέψεις του παλμικού φάσματος ( $\sigma_{\ln S_{a,pulse}}$ ) προς την τυπική απόκλιση ( $\sigma_{\ln S_{a,gmm}}$ ) του μοντέλου των Boore και Atkinson (2008).

# 4

## ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 ΚΑΙ ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο υπολογισμός χαρακτηριστικών στοιχείων των κατασκευών όπως της ιδιοπεριόδου και του δείκτη συμπεριφοράς τους. Όσον αφορά την πρώτη, ακολουθείται η μεθοδολογία του EC8 όπως αυτή εφαρμόζεται στη γραμμική ανάλυση, ενώ για τη δεύτερη χρησιμοποιείται η μεθοδολογία του Fajfar (2003).

Διατάξεις για τη γραμμική στατική και τη δυναμική ανάλυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος περιλαμβάνονται σχεδόν σε όλους τους αντισεισμικούς κανονισμούς παγκοσμίως. Αν και η επωνυμία αυτών των διαδικασιών ποικίλλει από κανονισμό σε κανονισμό, οι βασικές αρχές παραμένουν οι ίδιες. Η γραμμική στατική μέθοδος επιτρέπει στους μηχανικούς την πρόβλεψη της δεσπόζουσας περιόδου της δόνησης με έναν απλοποιητικό τρόπο και τον υπολογισμό της τέμνουσας βάσης σχεδιασμού από το φάσμα απόκρισης. Η εν λόγω τέμνουσα βάσης κατανέμεται ανάλογα με το ύψος της κατασκευής με γραμμικό τρόπο. Γενικότερα χρησιμοποιούμενες είναι οι σχέσεις ιδιοπεριόδου – ύψους οι οποίες προκύπτουν για διαφορετικούς τύπους κτηρίων από τις μετρημένες περιόδους της δόνησης κατά τη διάρκεια σεισμών μέσω της ανάλυσης Rayleigh. Η γραμμική δυναμική μέθοδος απαιτεί τη δημιουργία ενός απλού αναλυτικού μοντέλου της κατασκευής και τον υπολογισμό των περιόδων της δόνησης και των σχημάτων ενός σημαντικού αριθμού ιδιομορφών. Οι δυνάμεις που προκύπτουν από κάθε ιδιομορφή, εφαρμόζονται στην κατασκευή χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ιδιομορφικό σχήμα, ενώ οι

προκύπτουσες σεισμικές δυνάμεις συνδυάζονται χρησιμοποιώντας καθορισμένους κανόνες.

Η περίοδος δόνησης αποτελεί μια κυρίαρχη παράμετρο στο σχεδιασμό βάσει των δυνάμεων καθώς καθορίζει τη φασματική επιτάχυνση άρα και την τέμνουσα βάσης σχεδιασμού της κατασκευής. Για ένα τυπικό εύρος ιδιοπεριόδων κατασκευών, υψηλότερες ιδιοπερίοδοι οδηγούν σε μικρότερες δυνάμεις σχεδιασμού. Η συγκεκριμένη έρευνα αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι αντισεισμικοί κανονισμοί επιτρέπουν στο σχεδιαστή την εκτίμηση της ιδιοπεριόδου τόσο στη γραμμική στατική όσο και στη δυναμική ανάλυση. Συγκεκριμένα, εξετάζεται εκτενώς η επίδραση της ιδιοπεριόδου της δόνησης στο σχεδιασμό καθώς και κάποιες αρχικές προτάσεις για την αναβάθμιση των ιδιοπεριόδων δόνησης στη γραμμική ανάλυση του Ευρωκώδικα 8.

Όσον αφορά την έρευνα του Fajfar (2003) για τον προσδιορισμό του δείκτη συμπεριφοράς, αναφέρεται ότι πολλές έρευνες έχουν διεξαχθεί από το 1960, οι οποίες ορίζουν συντελεστές απομείωσης αντοχής για μείωση της μέγιστης πλαστικής συμπεριφοράς μονοβάθμιων ταλαντωτών (SDOF). Γενικότερα, οι εν λόγω έρευνες χρησιμοποιούν τις εξής προσεγγίσεις: (1) εκτιμούν τους συντελεστές  $q$  βασιζόμενες στην απόκριση ενός μεγάλου αριθμού μονοβάθμιων ταλαντωτών που υπόκεινται σε πολλές και διαφορετικές εδαφικές κινήσεις ή (2) χρησιμοποιούν παλμικές κυματομορφές για την παραγωγή σχέσεων για το συντελεστή  $q$  ώστε να εφαρμόζονται σε ελαστικά φάσματα υπολογισμένα για καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις. Οι εν λόγω έρευνες θεωρούν διγραμμική και μειούμενης ακαμψίας μονοβάθμια συστήματα με παρόμοιες τιμές παραμέτρων (ακαμψίας μετά τη διαρροή και απόσβεσης) υποβαλλόμενες σε ένα ευρύ φάσμα εδαφικών κινήσεων και γενικώς προσδιορίζοντας παρόμοιους συντελεστές  $q$ . Η μελέτη των Vidic et al (1994) προτείνει σχέσεις  $q$ - $\mu$ - $T$  εφαρμόσιμες σε εδαφικές κινήσεις που καταγράφηκαν σε ποικίλες εδαφικές κατηγορίες και εξαρτώνται από την περίοδο  $T_1$ , η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Επόμενες έρευνες απέδειξαν ότι η προαναφερθείσα ήταν όσο ακριβής είναι αυτή με τους παλμικούς παράγοντες  $q$  και οι δυο με τη σειρά τους είναι τόσο έγκυρες όσο τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα σύγχρονα μοντέλα. Αξίζει να τονιστεί πως μόνο το μοντέλο των Vidic et al (1994) προσαρμόζεται στο συχνοτικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης. Η έρευνα του Fajfar (2003) τροποποιεί τη σχέση των Vidic et al (1994)  $q$ - $\mu$ - $T/T_a$  και τη μετατρέπει σε συνάρτηση της χαρακτηριστικής περιόδου. Η συγκεκριμένη πρόταση είναι περισσότερο εύχρηστη από ότι ο παλμικός παράγοντας  $q$  και παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα. Η τροποποίηση με την περίοδο του παλμού  $T_p$  είναι περισσότερο εύχρηστη από την  $T_a$ .

## 4.2 Περίοδος της δόνησης στους αντισεισμικούς κανονισμούς

### 4.2.1 Σχέσεις περιόδου – ύψους κατασκευής στους αντισεισμικούς κανονισμούς για καμπτικά πλαίσια

Η δεσπόζουσα περίοδος δόνησης που λαμβάνεται υπόψη στον απλοποιητικό σχεδιασμό κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, υπολογίζεται εδώ και πολλά χρόνια χρησιμοποιώντας μια σχέση της περιόδου με το ύψος της κατασκευής. Μια από τις πρώτες προταθείσες σχέσεις υπολογισμού στον ATC3-06 (1978) ήταν η:

$$T = C_t \cdot H^{3/4} \quad [1]$$

όπου το  $C_t$  ήταν ένας απομειωτικός συντελεστής και το  $H$  το ύψος του κτηρίου σε πόδια. Όπως αναφέρουν οι Goel και Chopra (1997), η **εξίσωση [1]** παράχθηκε υποθέτοντας ότι οι ισοδύναμες στατικές πλευρικές δυνάμεις κατανέμονται γραμμικά καθ' ύψος του κτηρίου και η κατανομή της δυσκαμψίας με το ύψος παράγει μια μοναδιαία σχετική μετακίνηση ορόφων υπό τις γραμμικά κατανεμημένες δυνάμεις. Επιπρόσθετα, η τέμνουσα βάσης υποτίθετο ότι είναι ανάλογη του  $T^{2/3}$  και τελικά οι δυο αυτές υποθέσεις οδηγούν στη δημιουργία της **εξίσωσης [1]**. Η περίοδος δόνησης ( $T$ ) ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή μάζας  $m$  και δυσκαμψίας  $k$  δίνεται από τον τύπο:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [2]$$

Η δυσκαμψία του ταλαντωτή προσδιορίζεται διαιρώντας την τέμνουσα βάσης  $V$  με την πλευρική μετακίνηση  $\Delta$ . από το φάσμα απόκρισης των πρώιμων κανονισμών, η τέμνουσα βάσης για το σύννηθες χρησιμοποιούμενο εύρος περιόδων κατασκευών λαμβάνονταν αντιστρόφως ανάλογη της  $T^{2/3}$ , με συντελεστή αναλογίας  $C_1$ . Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν υποθεθεί ότι η κατανομή της δυσκαμψίας καθ' ύψος παράγει μια μοναδιαία σχετική μετακίνηση υπό τη γραμμική κατανομή των πλευρικών δυνάμεων, τότε η πλευρική μετατόπιση  $\Delta$  δίνεται από τη σχετική μετακίνηση των ορόφων  $\theta$ , πολλαπλασιασμένη με το ύψος  $H$  του κτηρίου:

$$k = \frac{V}{\Delta} = \frac{C_1}{T^{2/3} \cdot \Delta} = \frac{C_1}{T^{2/3} \cdot \theta \cdot H} \quad [3]$$

Αντικαθιστώντας την **εξίσωση [3]** στη **[2]** θα προκύψει η **εξίσωση [1]** μεταξύ της περιόδου και του ύψους του κτηρίου όπως παρουσιάζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m \cdot T^{2/3} \cdot H \cdot \theta}{C_1}} \quad [4]$$

$$T^2 = (2\pi)^2 \cdot \frac{m \cdot T^{2/3} \cdot H \cdot \theta}{C_1} \quad [5]$$

$$T^{4/3} = C_t \cdot H \quad [6]$$

Στον ATC3-06 ο συντελεστής  $C_t$  της **εξίσωσης [1]** δίνεται ίσος με 0.025 για καμπτικά πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος. Ο συντελεστής προσδιορίζεται από τη μελέτη των Gates και Foth (1978), η οποία βασίζεται στις μετρημένες περιόδους δόνησης πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος κατά τη διάρκεια του σεισμού στο San Fernando το 1971. Μια ακόλουθη επανεκτίμηση από το SEAOC (1988) έδειξε πως η τιμή  $C_t=0.03$  ήταν καταλληλότερη για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος. Ο

συντελεστής  $C_i$  βαθμονομήθηκε ώστε η παραγόμενη δεσπόζουσα περίοδος να υποεκτιμά την ιδιοπερίοδο κατά 10-20% στην πρώτη διαρροή ώστε να προκύψει μια συντηρητική εκτίμηση της τέμνουσας βάσης (Goel και Chopra, 1997).

Οι Bertero et al (1988) μελέτησαν σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια τα δεκατέσσερα κτήρια που είχαν λάβει υπ' όψιν τους οι Gates και Foth (1978) και ανακάλυψαν ότι τέσσερα κτήρια και το πέμπτο στη διαμήκη διεύθυνση δε μπορούσαν να θεωρηθούν ως κατασκευές με καμπτικά πλαίσια (MRF), άρα τα απέκλεισαν από τη βάση δεδομένων τους. Επίσης, προσδιόρισαν δυο κτήρια με καταστροφές του φέροντα οργανισμού και άλλα δυο χωρίς καταστροφές και επεξήγησαν την επίδραση των βλαβών στη μείωση της δυσκαμψίας και την αύξηση της περιόδου ταλάντωσης. Οι Gates και Foth (1978) δεν συσχέτισαν τις κτηριακές βλάβες με την περίοδο ταλάντωσης και για το λόγο αυτό οι Bertero et al (1988) επανεκτίμησαν τη χρονοϊστορία της κτηριακής απόκρισης για κατασκευές καμπτικών πλαισίων και προσδιόρισαν τις χρονικές στιγμές όπου συνέβαινε μια απότομη αύξηση της περιόδου της ταλάντωσης, η οποία σχετίζεται με την εκκίνηση των κατασκευαστικών βλαβών. Η περίοδος της ταλάντωσης στη δεύτερη αυτή αύξηση της περιόδου θεωρούνταν ότι είναι το στάδιο κατά το οποίο μια μη κατασκευαστική συνιστώσα σταματά τη σημαντική της επίδραση στη δυσκαμψία και ερμηνεύεται ως η περίοδος στην οποία αρχικά δονούνται η κατασκευή, αποτελούμενη μόνο από το φέροντα οργανισμό της. Προσθέτοντας άλλες τέσσερις κατασκευές στη βάση δεδομένων τους, εκτίμησαν την περίοδο δόνησης του φέροντος οργανισμού για όλα τα κτήρια κατά τη δεύτερη αύξηση της περιόδου, με τον ομοιόμορφο τρόπο που προαναφέρθηκε. Συμπέραναν, λοιπόν, ότι η **εξίσωση [1]** με συντελεστή  $C_i=0.03$  δεν αποτελεί αξιόπιστη εκτίμηση της ταλάντωσης των καμπτικών πλαισίων, ενώ προέκυψε μια καλύτερη προσέγγιση με  $C_i=0.04$  (0.097 αν το  $H$  μετράται σε  $m$  και όχι σε πόδια). Για ένα χαμηλότερο όριο εκτίμησης της περιόδου οι Bertero et al. (1988) προτείνουν επίσης την τιμή  $C_i=0.035$  (0.085 για  $H$  σε  $m$ ). Τα κτήρια της εν λόγω έρευνας δεν περιελάμβαναν μόνο τον φέροντα οργανισμό αλλά και διαφόρων τύπων τοιχοπληρώσεις, οι οποίες όπως απέδειξαν οι Bendimerad et al (1991), ελάχιστα συνέβαλλαν στην αλλαγή της τιμής της δυσκαμψίας τους. Συμπερασματικά, λοιπόν, η χρήση της προτεινόμενης εξίσωσής τους για την ιδιοπερίοδο βρίσκεται υπό αμφισβήτηση.

Ο συντελεστής της **εξίσωσης [1]** σύμφωνα με το SEAOC-88 συστήνεται ως 0.03 και έχει υιοθετηθεί σε πολλούς αντισεισμικούς κανονισμούς από το 1978. Στον ευρωκώδικα 8 ο συντελεστής  $C_i$  τροποποιήθηκε καταλήγοντας στην τιμή  $C_i=0.075$ , θεωρώντας ότι το ύψος των κτηρίων μετράται σε μέτρα. Έτσι, οι περισσότεροι κανονισμοί ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν την **εξίσωση [1]** με την τιμή  $C_i=0.075$ .

Οι Goel και Chopra (1997) χρησιμοποίησαν τη δεσπόζουσα περίοδο της δόνησης που καταγράφηκε κατά τη διάρκεια οκτώ σεισμικών γεγονότων στην Καλιφόρνια από το 1971 έως το 1994, ώστε να επαναπροσδιορίσουν ακριβέστερα τη σχέση περιόδου – ύψους κατασκευής. Η καλύτερη προσέγγιση κατωτάτου ορίου που προτείνουν είναι η:

$$T = 0.0466 \cdot H^{0.9} \quad (H \text{ σε μέτρα}) \quad [7]$$

Αυτή η εξίσωση συμπεριλήφθηκε πρόσφατα στον κανονισμό ASCE 7-05 και όπως φαίνεται οι Goel και Chopra (1997) επέλεξαν να ξεφύγουν από την εκθετική μείωση κατά 0.75 αλλά εφάρμοσαν τη σχέση με εκθέτη το 0.9. Οι απλοποιημένες εξισώσεις περιόδου – ύψους κατασκευής μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στον ευρωκώδικα 8 για κτήρια ύψους έως 40m και γι' αυτό το λόγο η περίοδος ταλάντωσης που προκύπτει από αυτές τις εξισώσεις κυμαίνεται γενικότερα μεταξύ της διατμητικής και της καμπτικής περιόδου. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς των **εξισώσεων [2] έως [6]** με την τέμνουσα βάσης αντιστρόφως ανάλογη της περιόδου ( $V=C_t/T$ ), η εξίσωση περιόδου – ύψους κατασκευής γραμμικοποιείται:

$$T = C_t \cdot H \quad [8]$$

Ο λόγος για τον οποίο οι Goel και Chopra (1997) δεν κατάληξαν σε γραμμική σχέση αποδίδεται στο ότι δεν εστίασαν σε κατασκευές με τέμνουσα βάσης αντιστρόφως ανάλογη της περιόδου, αλλά συμπεριέλαβαν ψηλότερες κατασκευές στο εύρος της μη αναλογικότητας. Βασιζόμενοι στο γεγονός ότι μια αναθεωρημένη σχέση περιόδου – ύψους για πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος έχει προταθεί, όσο και στο ότι η πιθανότητα της γραμμικής εξίσωσης να είναι πιο ισχυρή για πλαίσια σχεδιαζόμενα σύμφωνα με τον ευρωκώδικα 8, εγκαθιδρύεται μια εξέταση των περιόδων ταλάντωσης του φέροντος οργανισμού των νέων σχεδιαζόμενων κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς τοιχοπληρώσεις.

#### 4.2.2 Σχέσεις περιόδου – ύψους κατασκευής σε αντισεισμικούς κανονισμούς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος ή από τοιχοποιία

Η πρώτη εξίσωση περιόδου – ύψους κατασκευής κτηρίων με τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος είχε τη μορφή της **εξίσωσης [9]** και δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας τις καταγραφές του σεισμού του San Fernando το 1971:

$$T = \frac{C_t \cdot H}{\sqrt{D}} \quad [9]$$

όπου  $D$  είναι η διάσταση της βάσης του κτηρίου στην κατεύθυνση μελέτης. Με το ύψος και τη διάσταση  $D$  του κτηρίου μετρούμενες σε πόδια  $C_t=0.05$  ενώ θα ήταν 0.09 αν μετρούνταν σε μέτρα. Αυτή η εξίσωση προκύπτει από την εξίσωση της συχνότητας ταλάντωσης μιας αμφιπροέχουσας δοκού (θεωρώντας μόνο διατμητικές παραμορφώσεις), με το πάχος της να είναι περίπου ομοιόμορφο άρα μόνο ο λόγος πλάτος/μήκος του κτηρίου επιδρά στην περίοδο, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$T = 4 \sqrt{\frac{m}{\kappa G} \frac{H}{\sqrt{A}}} = \frac{\alpha H}{\sqrt{A}} = \frac{\alpha H}{\sqrt{D t_w}} = \frac{\alpha_1 H}{\sqrt{D}} \quad [10]$$

όπου  $m$  είναι η μάζα ανά μονάδα μήκους,  $G$  είναι το μέτρο διάτμησης,  $\kappa$  είναι ο συντελεστής σχήματος που λαμβάνεται υπόψη για τη μη γραμμική κατανομή των διατμητικών δυνάμεων,  $D$  είναι το μήκος της δοκού και  $t_w$  είναι το πάχος της. Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται σε πολλούς αντισεισμικούς κανονισμούς παγκοσμίως αλλά ο τύπος κατασκευών εφαρμογής της ποικίλλει από κανονισμό σε κανονισμό, όπως παρουσιάζεται στον **πίνακα 4.1**. Μερικοί κανονισμοί χρησιμοποιούν αυτή τη σχέση ειδικά για κτήρια τόσο με πλαίσια όσο και με διατμητικά τοιχία, μερικοί για κτήρια

MRF οπλισμένου σκυροδέματος με παρεμβολές τοιχοποιίας και άλλοι για οποιαδήποτε κτήρια εκτός αυτών με καμπτικά χωρικά πλαίσια.

Country, Year	Type of Structure to which Eq. (9) is applied
Albania, 1989	RC framed structures with brick masonry infill walls participating in seismic force resistance
Algeria, 1988	Steel or RC moment resisting frames with infilled masonry and partial or total RC shear walls, braced frames, and masonry walls
Canada, 1995	Other structures (i.e. not moment resisting frames)
Colombia 1984	Other structures (i.e. all except framed structures where the frame is not braced by rigid elements that tend to impede the free deflection)
Cuba, 1995	RC buildings with frames and shear walls
Egypt, 1988	All buildings except moment resisting space frames
El Salvador, 1989	All buildings except frames
Ethiopia, 1983	All buildings except those with moment resisting space frames capable of resisting 100% of the required lateral forced and not enclosed by or adjoined by more rigid elements
India, 1984	Other structures (not moment resisting frames without bracing or shear walls for resisting lateral loads)
Iran, 1988	All buildings except moment resisting frames, if other elements do not create an obstacle to the movement of the building frame
Israel, 1975	Multi-storey structures in which horizontal forces are carried by RC frames
Italy, 1986 & 1996	For framed structures (N.B. $C_t$ from Eq. (9) is taken as equal to 0.1)
Peru, 1977	For buildings whose structural elements are exclusively open frames and shear walls of the elevator, without other elements for providing rigidity to the structure
Venezuela, 1982	Structures consisting of frames and structural walls of reinforced concrete or braced frames

**Πίνακας 4.1:** Κτήρια στα οποία εφαρμόζεται η εξίσωση [9] για διαφορετικούς αντισεισμικούς κανονισμούς ανά τον κόσμο

Ο κανονισμός UBC-97 δε χρησιμοποιεί την **εξίσωση [9]** για κτήρια με διατμητικά τοιχία αλλά εμπειρικές εξισώσεις της μορφής της **εξίσωσης [1]**, όπου το  $C_t=0.02$  με το ύψος να μετράται σε **πόδια** και  $0.05$  αν μετράται σε **μέτρα**. Αυτή η μέθοδος είναι η αντίστοιχη του ευρωκώδικα 8 για «άλλες κατασκευές» και υφίσταται επίσης στον κανονισμό της Αλγερίας (1988) ως μια άλλη πιθανή μέθοδος για μεταλλικά κτήρια ή κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος με παρεμβαλλόμενη τοιχοποιία ή μερικώς ή ολικώς παρεμβαλλόμενα διατμητικά τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος, πλαίσια δυσκαμψίας και τοιχοποιία. Ο κανονισμός της Αλγερίας είναι περισσότερο σαφής αναφορικά με τον χρησιμοποιούμενο συντελεστή της **εξίσωσης [1]** για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς παρεμβαλλόμενα τοιχία. Πιστεύεται ότι πολλοί μελετητές ακολουθώντας τον ευρωκώδικα 8 θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την **εξίσωση [1]** με  $C_t=0.075$  για όλες τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ανεξαρτήτως της μορφής και του υλικού των τοιχοπληρώσεων. Για το λόγο αυτό, θεωρώντας ότι πολλές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη κατασκευάζονται με πολύ δύσκαμπτες τοιχοποιίες οι οποίες συχνά λειτουργούν ανεξάρτητα από τον υπόλοιπο φέροντα οργανισμό, η περίοδος ταλάντωσης υπερεκτιμάται και η τέμνουσα βάσης υποεκτιμάται. Μια ακόμα χρησιμοποιούμενη τιμή του  $C_t$  της **εξίσωσης [1]** χρησιμοποιείται στους κανονισμούς UBC-97 και SEAOC-96:

$$C_t = \frac{0.1}{\sqrt{A_c}} \quad [11]$$



όπου το  $A_c$  αποτελεί την ενεργό περιοχή (σε τετραγωνικά πόδια) των διατμητικών τοιχίων και προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$A_c = \sum_{i=1}^{NW} A_i \left[ 0.2 + \left( \frac{D_i}{H} \right)^2 \right] \text{ με } D_i/H \leq 0.9 \quad [12]$$

στην οποία το  $A_i$  είναι η περιοχή στην οριζόντια τομή (σε τετραγωνικά πόδια), το  $D_i$  είναι η διάσταση στη διεύθυνση ενδιαφέροντος (σε πόδια) του  $i^{\text{ου}}$  διατμητικού τοιχίου του πρώτου ορόφου της κατασκευής και  $NW$  είναι ο συνολικός αριθμός των διατμητικών τοιχίων. Η τιμή της **εξίσωσης [11]** γίνεται 0.075 όταν οι διαστάσεις της κατασκευής μετρώνται σε μέτρα. Η εν λόγω εξίσωση παρουσιάζεται επίσης στον ευρωκώδικα 8 ως χρησιμοποιούμενη σε κατασκευές με διατμητικά τοιχία από οπλισμένο σκυρόδεμα ή τοιχοποιία. Παρ' όλα αυτά, ο υπολογισμός του  $A_c$  από την **εξίσωση [13]** φαίνεται να είναι ελάχιστα διαφορετικός από αυτόν της εξίσωσης [12], κάτι το οποίο αποδίδεται σε συντακτικό λάθος.

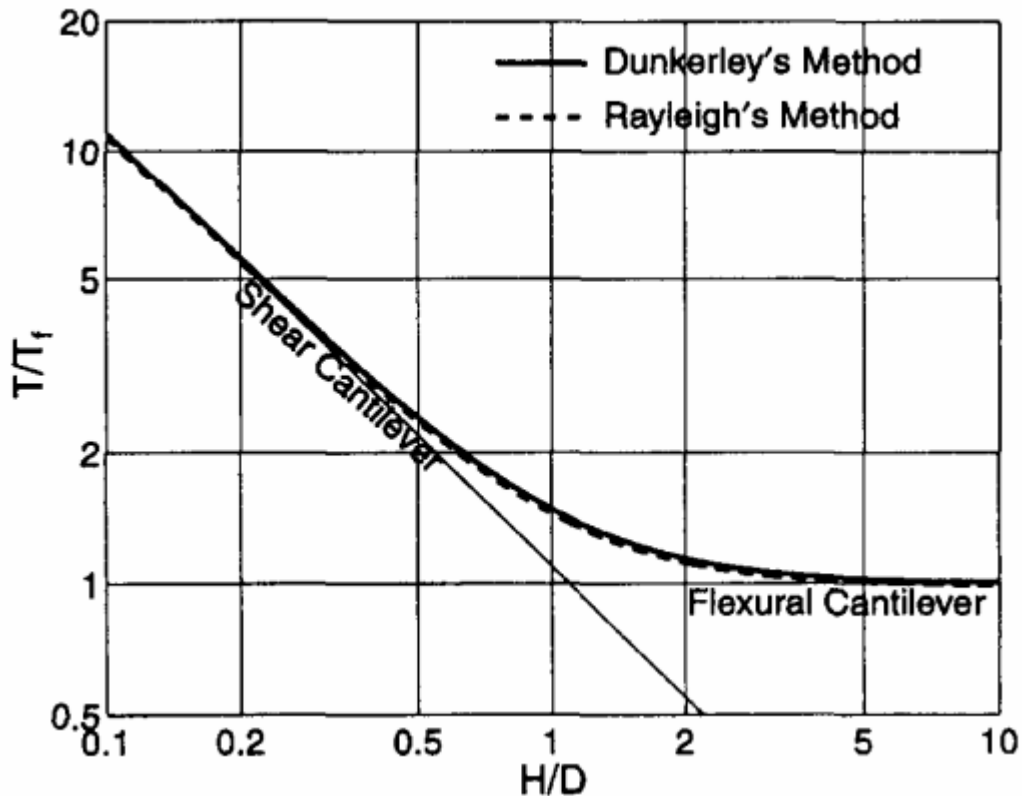
$$A_c = \sum_{i=1}^{NW} A_i \left[ 0.2 + \left( \frac{D_i}{H} \right)^2 \right]^2 \quad [13]$$

Τόσο οι Goel και Chopra (1998) όσο και οι Lee et al (2000) αποδεικνύουν ότι οι **εξισώσεις [9]** και **[11]** είναι πολύ συντηρητικές για κτήρια με διατμητικά τοιχία, συγκρινόμενες με τις μετρηθείσες περιόδους ταλάντωσης κατασκευών κατά τη διάρκεια σεισμών. Οι Goel και Chopra (1998) αναφέρουν ότι υφίσταται μικρή συσχέτιση μεταξύ της τιμής  $H/\sqrt{D}$  της **εξίσωσης [9]** και της περιόδου της ταλάντωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι τα διατμητικά τοιχία δεν επεκτείνονται σε όλη τη διάσταση  $D$  του κτηρίου αλλά μόνο σε ένα μικρό ποσοστό της. Αντίθετα, η **εξίσωση [11]** που περιλαμβάνει επακριβώς τις διαστάσεις των τοιχίων, φαίνεται να συσχετίζεται καλύτερα με την περίοδο της ταλάντωσης αλλά προέκυψε πολύ συντηρητική. Τόσο οι Goel και Chopra (1998) όσο και οι Lee et al (2000) βαθμονόμησαν την εξίσωση για περίοδο ταλάντωσης των κατασκευών με διατμητικά τοιχία θεωρώντας τη δεσπόζουσα περίοδο μιας ομοιόμορφης αμφιπροέχουσας δοκού με καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις. Η **εικόνα 4.1** απεικονίζει την περίοδο ταλάντωσης μιας αμφιπροέχουσας δοκού με καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις διαιρεμένη με την περίοδο ταλάντωσης μιας καθαρά καμπτικής αμφιπροέχουσας δοκού ως συνάρτηση του λόγου ύψους προς βάθος ( $H/D$ ). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η περίοδος πλησιάζει την περίοδο μιας καθαρά διατμητικής αμφιπροέχουσας καθώς ο λόγος ύψους προς βάθος μειώνεται και την περίοδο μιας καθαρά καμπτικής αμφιπροέχουσας καθώς ο λόγος αυξάνει. Για διατμητικά τοιχία με λόγους  $H/D$  μεταξύ 0.2 και 5 πρέπει να συνυπολογιστεί η συνεισφορά τόσο της κάμψης όσο και της διάτμησης στην περίοδο.

Οι Goel και Chopra (1998) χρησιμοποίησαν καταμετρημένες περιόδους δόνησης κατασκευών με διατμητικά τοιχία και πρότειναν την **εξίσωση [14]** για τον υπολογισμό της περιόδου:

$$T = \frac{0.0019}{\sqrt{C_w}} H \quad [14]$$

$$\text{όπου } C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^{NW} \frac{A_i}{\left[ 1 + 0.83 \left( \frac{h_i}{D_i} \right)^2 \right]}$$



**Εικόνα 4.1:** Δεσπόζουσα περίοδος αμφιπροεχουσών δοκών ως συνάρτηση του λόγου ύψους προς βάθος (Goel και Chopra 2008).

#### 4.2.3 Περίοδοι ταλάντωσης χαρακτηριστικών περιπτώσεων κτηρίων

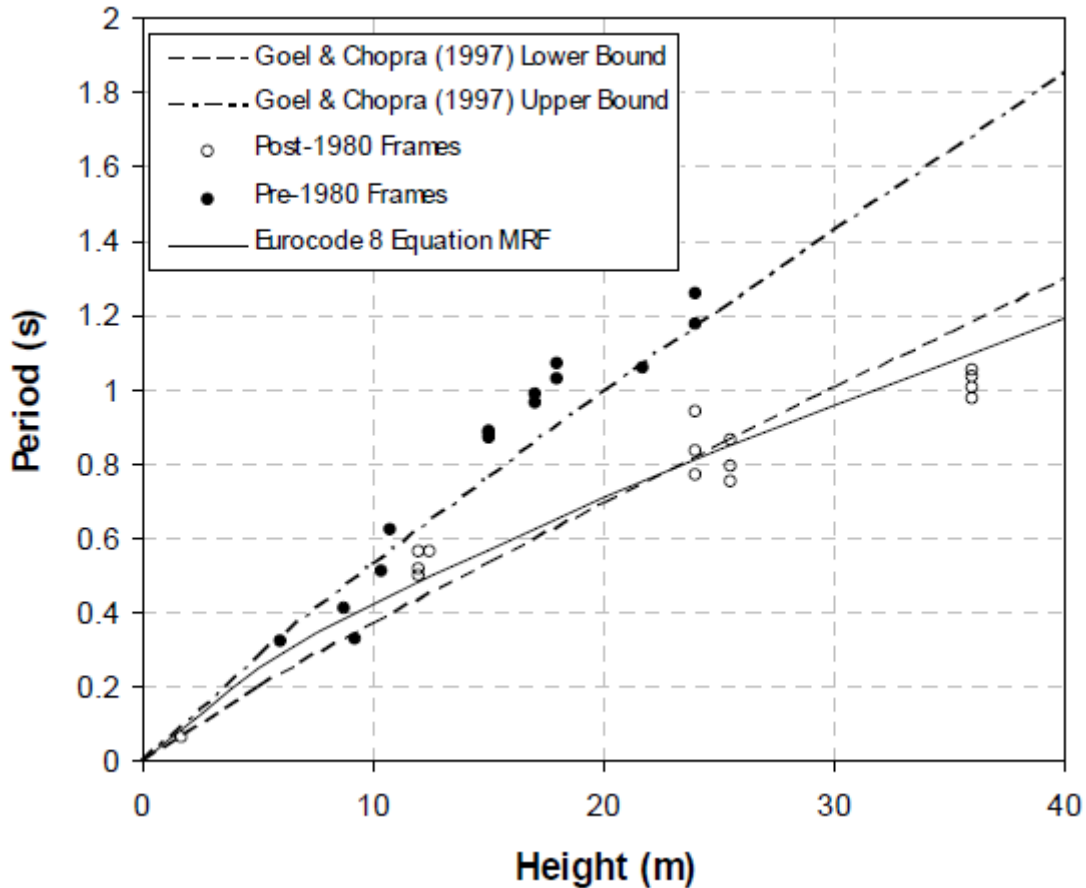
Οι σχέσεις περιόδου – ύψους κτηρίου που έχουν παραχθεί στο παρελθόν και περιγράφηκαν ανωτέρω, προέκυψαν από την καταμετρημένη περίοδο ταλάντωσης κτηρίων που χτίστηκαν σε μεγάλη χρονική απόσταση και υπόκεινται σε διαφορετικούς κανονισμούς. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος της διασποράς των αποτελεσμάτων. Τα κτήρια που σχεδιάστηκαν βάσει των πιο πρόσφατων αντισεισμικών κανονισμών, με μεγαλύτερες απαιτήσεις πλευρικών δυνάμεων και αρχές αντοχών σχεδιασμού είναι πιο πιθανό να έχουν μεγαλύτερα σε διαστάσεις υποστυλώματα άρα εμφανίζουν και μεγαλύτερη ακαμψία. Ένας αριθμός ευρωπαϊκών καμπτικών πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μοντελοποιήθηκε από τον Crowley (2003) χρησιμοποιώντας το seismostruct, ένα λογισμικό ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, και διεξάγοντας μοναδιαία ανάλυση για τον υπολογισμό των δεσποζουσών περιόδων της ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρχε μεγάλη διαφορά στη δυσκαμψία των κατασκευών που σχεδιάστηκαν πριν και μετά το 1980 (**εικόνα 4.1**), κυρίως λόγω των αλλαγών των αρχών σχεδιασμού. Η εξίσωση του ευρωκώδικα 8 που προέκυψε μετατρέποντας την **εξίσωση [1]** από πόδια σε μέτρα, φαίνεται να ταιριάζει καλά στην περίοδο της ταλάντωσης αυτών των νέων ευρωπαϊκών κτηρίων, αν και όπως προαναφέρθηκε υπάρχουν αντιδράσεις για τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων και οδηγούμαστε σε μια συντηρητική σχέση. Παρ' όλα αυτά, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα νεότερα ευρωπαϊκά κτήρια είναι περισσότερο δύσκαμπτα από αυτά που κτίστηκαν πριν το 1980, η εξίσωση μπορεί

να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη. Οι πιο πρόσφατες εξισώσεις των Goel και Chopra (1997) με τα άνω και κάτω όρια, οι οποίες προέκυψαν από κτήρια που υποβλήθηκαν σε σεισμούς της Καλιφόρνια από το 1971 έως το 1994, παρουσιάζονται επίσης στην **εικόνα 4.1**. Τα χαρακτηριστικά των κτηρίων της Καλιφόρνια δεν άλλαξαν δραστικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων 40 ετών όπως έγινε στην Ευρώπη άρα η διασπορά των δεδομένων των Goel και Chopra (1997) μπορεί να μην οφείλεται στο χρόνο, αλλά θα ήταν ενδιαφέρον να παρατηρηθεί η σχέση αυτών των δύο παραμέτρων.

Στην Ευρώπη αποτελεί συνήθη πρακτική η χρήση άκαμπτων τοιχοπληρώσεων σε καμπτικά πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος, τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά. Αυτά τα μη φέροντα στοιχεία δύνανται να επιδράσουν τόσο στην πλευρική δυσκαμψία όσο και στην αντοχή των κατασκευών. Ο ευρωκώδικας 8 επιτρέπει στο σχεδιαστή να αγνοήσει την επίδραση των τοιχοπληρώσεων στην αντοχή του κτηρίου (θεωρώντας τις ως μη φέροντα στοιχεία) και πολλοί μελετητές αγνοούν την επίδρασή τους ακόμα και στην ακαμψία. Ο ευρωκώδικας 8 ωστόσο αναφέρει ότι αν επιδρούν σημαντικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αλλά δεν αναφέρει τη μέθοδο προσομοίωσής τους. Αν χρησιμοποιείται η γραμμική στατική ανάλυση τότε μπορεί λανθασμένα να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση περιόδου που αναφέρεται σε καμπτικά χωρικά πλαίσια ή η μέθοδος Rayleigh, όπου το παραμορφωμένο σχήμα λαμβάνεται από ένα αριθμητικό μοντέλο στο οποίο δε συμπεριλαμβάνονται οι τοιχοπληρώσεις. Αναφορικά με τη γραμμική δυναμική μέθοδο, όπου απαιτείται μοναδιαία ανάλυση για τον υπολογισμό της περιόδου ενός αριθμού ιδιομορφών της δόνησης, και πάλι είναι πιθανό τα άκαμπτα αυτά στοιχεία να μη συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο.

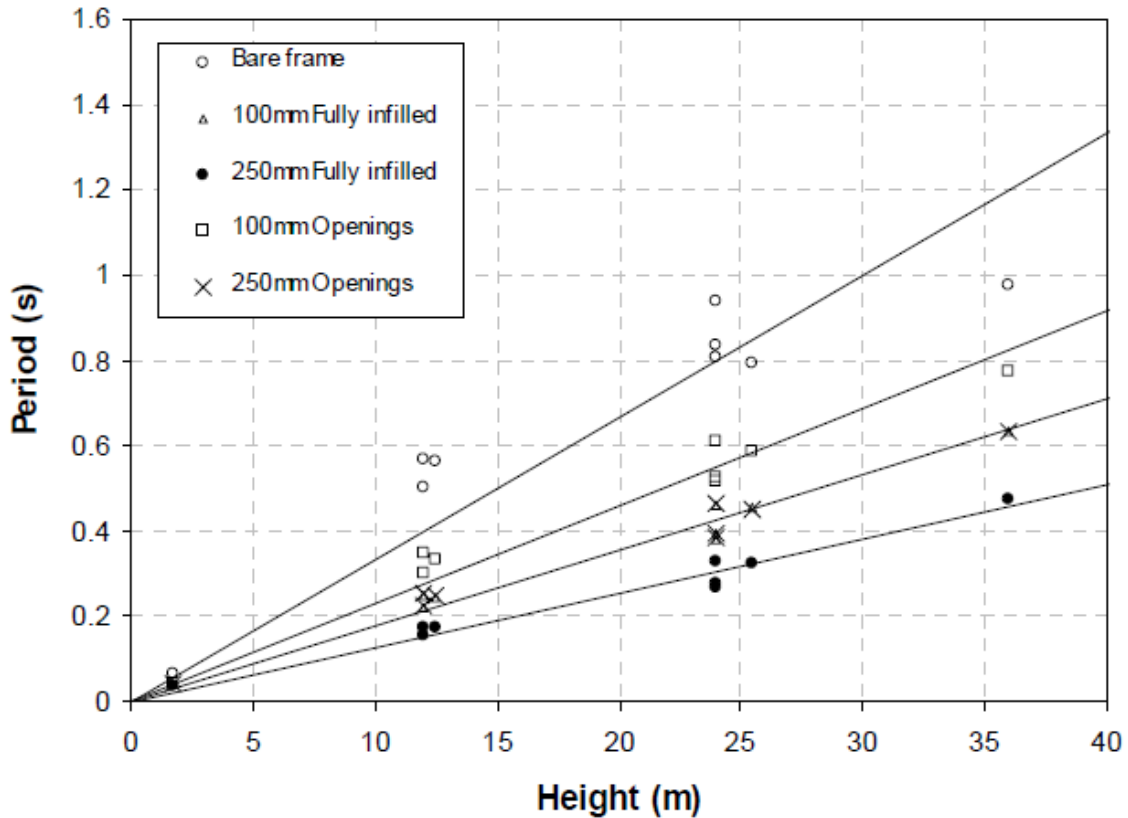
Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση αυτών των άκαμπτων τοιχοπληρώσεων στην περίοδο ταλάντωσης καμπτικών πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος, ο Angel (2007) προσέθεσε ισοδύναμα δομικά άκαμπτα μέλη στα ευρωπαϊκά μοντέλα μετά το 1980, για δυο τιμές πάχους τοιχίων (100mm και 250mm) και για πλήρως καλυμμένο με τοιχοποιία φέροντα οργανισμό ή χωρίς καθόλου πλήρωση. Οι περίοδοι ταλάντωσης αυτών των τεσσάρων τύπων πλαισίων παρουσιάζονται στην **εικόνα 4.2**, μαζί με την περίοδο ταλάντωσης των κενών πλαισίων.

Η διανομή σε κάθε κτήριο ποικίλλει με ορισμένα μέλη με πλήρη τοιχοπλήρωση, ορισμένα με κενά στην τοιχοπλήρωση και ορισμένα με πλήρη απουσία τοιχοπλήρωσης. Οι Bal et al (2008) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά τουρκικών κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος και κατέληξαν στο ότι η αναλογία κενών πλαισίων, πλήρων τοιχοπληρωμένων και μερικώς τοιχοπληρωμένων σε ένα δείγμα τουρκικών κτηρίων ήταν αντίστοιχα 34%, 28% και 38%. Αυτοί οι λόγοι χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό ενός σταθμικού μέσου περιόδου ταλάντωσης κάθε πλαισίου που παρουσιάζεται στην **εικόνα 4.2**, θεωρώντας 50% τοιχοπληρώσεις πάχους 100mm και 50% τοιχοπληρώσεις πάχους 250mm. Η περίοδος ταλάντωσης των αντίστοιχων πλαισίων υπολογίστηκε επίσης με χρήση της **εξίσωσης [9]** και βάσει των διατάξεων «άλλων κατασκευών» του ευρωκώδικα 8 (**εξίσωση [1]** με  $C_i=0.05$ ). Μια σύγκριση αυτών των εξισώσεων των κανονισμών με τις αναλυτικά υπολογισμένες περιόδους παρουσιάζεται στην **εικόνα 4.3**.



**Εικόνα 4.2:** Άνω και κάτω όριο σχέσης περιόδου – ύψους των Goel και Chopra (1997) και του EC8 για κενά πλαίσια MRF συγκρινόμενη με τις περιόδους που προκύπτουν για μεγάλες ακαμψίες για τον ευρωπαϊκό σχεδιασμό κενών πλαισίων MRF πριν και μετά το 1980.

Τα αποτελέσματα της **εικόνας 4.3** επιβεβαιώνουν ότι οι περίοδοι ταλάντωσης από αριθμητική ανάλυση για τα τοιχοπληρωμένα πλαίσια μετά το 1980 στην Ευρώπη προσαρμόζονται πολύ καλά στα αποτελέσματα των **εξισώσεων [9]** και **[1]** (με το συντελεστή  $C_i$  όπως ορίζεται από τον ευρωκώδικα για «άλλες κατασκευές»). Ο λόγος για τον οποίο τα τοιχοπληρωμένα κτήρια συμφωνούν με τις εξισώσεις, ενώ άλλοι ερευνητές κατέληξαν στο ότι είναι πολύ συντηρητικά για κατασκευές με διατμητικά τοιχεία, είναι ότι οι λόγοι ύψους προς πλάτος είναι υψηλοί κάτι το οποίο οφείλεται στο ότι υπάρχουν τοιχοπληρώσεις σε όλα τα τμήματα της κατασκευής. Ένας χαμηλός λόγος ύψους προς πλάτος υποδεικνύει μια μεγαλύτερη διατμητική παραμόρφωση σε σχέση με την περίοδο της ταλάντωσης και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η **εξίσωση [9]** δίνει αποδεκτά αποτελέσματα.



**Εικόνα 4.3:** Περίοδοι ταλάντωσης καμπτικών πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος μετά το 1980 για διάφορα είδη τοιχοποιίας.

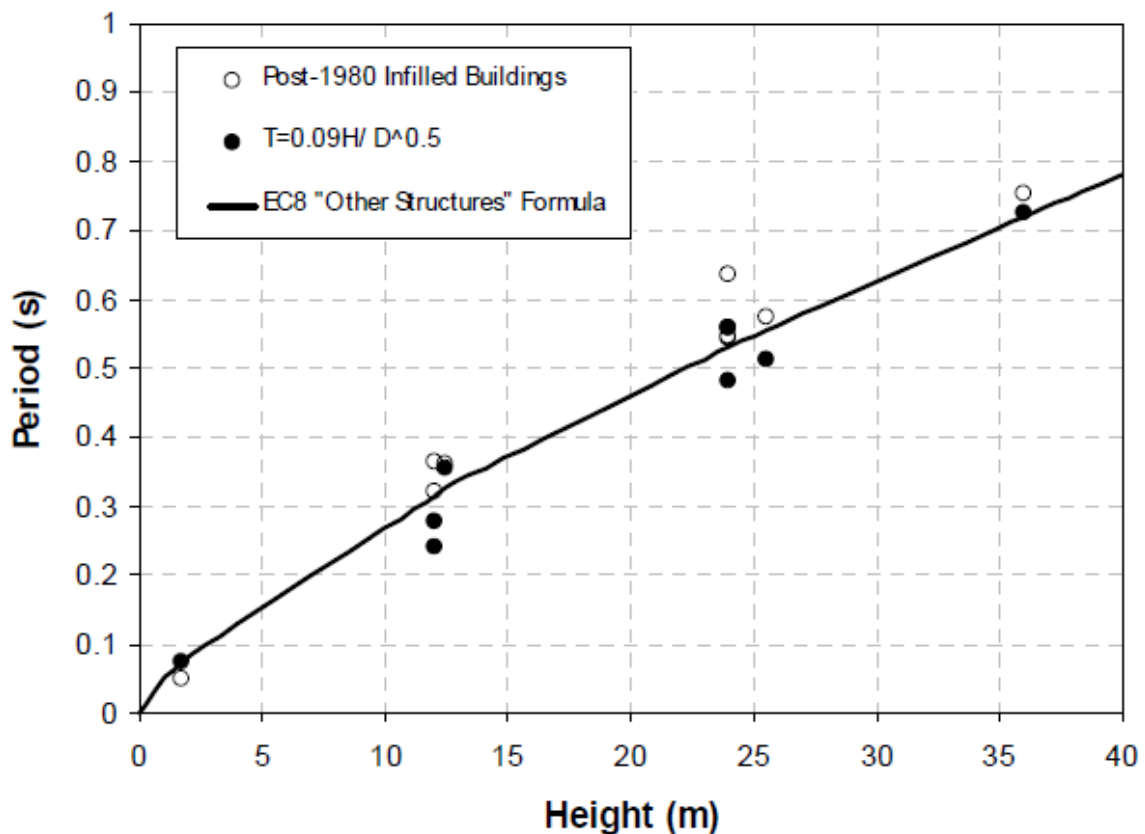
#### 4.3 Περίοδοι που χρησιμοποιούνται στη γραμμική στατική και δυναμική ανάλυση του ευρωκώδικα 8

Ο ευρωκώδικας 8 επιτρέπει τη γραμμική ανάλυση για το σχεδιασμό νέων κατασκευών, η οποία περιλαμβάνει τη στατική μέθοδο δυνάμεων και την ιδιομορφική φασματική ανάλυση (δυναμική). Και οι δυο τύποι ανάλυσης χρησιμοποιούν ομαλοποιημένα φάσματα απόκρισης που καθορίζονται στον κανονισμό με σκοπό να χαρακτηρίσουν τις σεισμικές δυνάμεις. Η ιδιομορφική φασματική ανάλυση είναι εφαρμόσιμη σε όλους τους τύπους κατασκευών ενώ η στατική έχει πολλούς περιορισμούς στη χρήση της λόγω του ότι μπορεί τα αποτελέσματά της να είναι μη συντηρητικά σε ορισμένες περιπτώσεις. Παρά τα μειονεκτήματα όμως η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευκολίας εφαρμογής της.

Στην ουσία, η στατική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί σε κατασκευές των οποίων η απόκριση δεν επηρεάζεται εκτενώς από την επιρροή μεγαλύτερων ιδιομορφών της ταλάντωσης. Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα 8, οι συγκεκριμένες κατασκευές ακολουθούν δυο περιπτώσεις: πρώτον, η δεσπόμενη περίοδος της ελεύθερης ταλάντωσης στις κύριες διευθύνσεις είναι μικρότερη είτε από το τετραπλάσιο της περιόδου  $T_c$  (όπου η  $T_c$  κυμαίνεται μεταξύ των 0.25sec και 0.8sec) είτε από δυο δευτερόλεπτα και δεύτερον το κτήριο είναι ομαλό καθ' ύψος. Η στατική μέθοδος επιτρέπει τη χρήση απλοποιημένων σχέσεων για την εκτίμηση της περιόδου της ταλάντωσης του κτηρίου σχεδιασμού. Για τα συγκεκριμένα κτήρια στα

οποία η στατική μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί, σε πολλές περιπτώσεις είναι πιθανό να εφαρμοστεί η ιδιομορφική φασματική ανάλυση. Για τον υπολογισμό των περιόδων ενός αριθμού ιδιομορφών της ταλάντωσης ο μελετητής μπορεί να παράξει γενικά το κτηριακό μοντέλο και να εφαρμόσει μοναδιαία ανάλυση.

Πρόσφατες έρευνες έδειξαν μέσω ενός αριθμού εφαρμογών πως η εφαρμογή των δυο μεθόδων σε δεδομένο κτήριο μπορεί να δώσει διαφορετικές τέμνουσες βάσης σχεδιασμού και διαφορετικά διατμητικά προφίλ για το κτήριο. Παραδείγματα των δυο μεθόδων για δυο κατασκευές στην Ευρώπη μετά το 1980 παρουσιάζονται στην **εικόνα 4.4**.

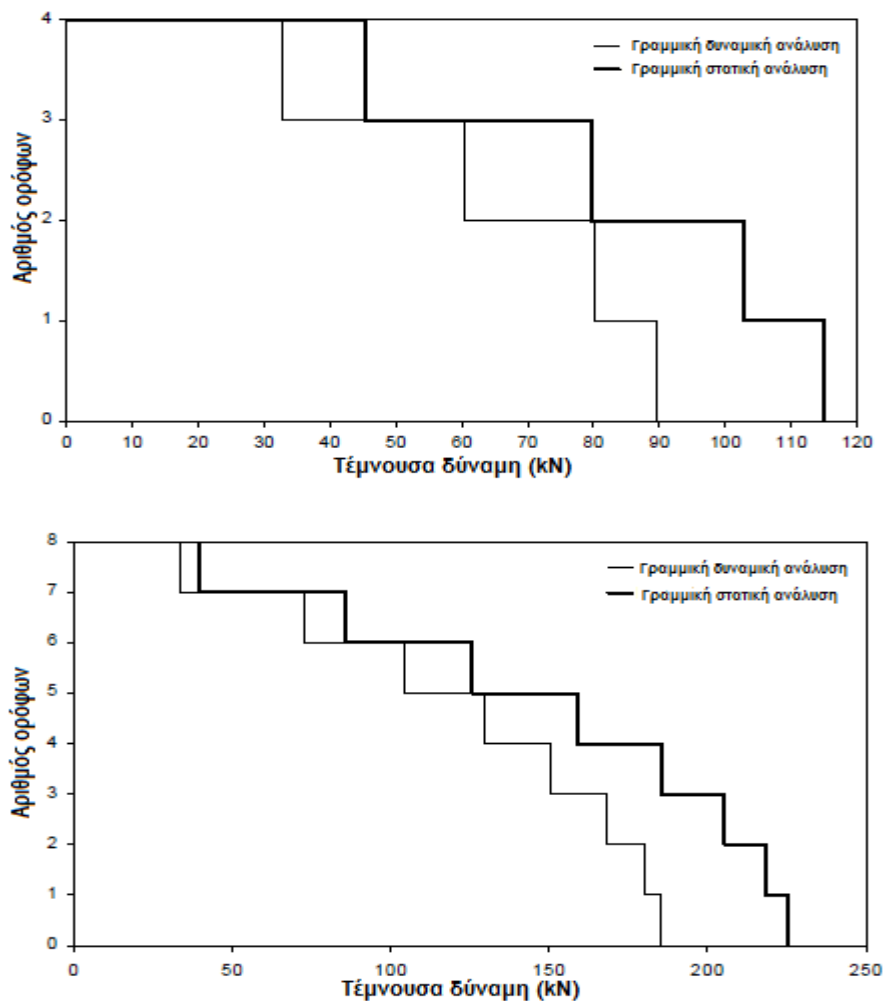


**Εικόνα 4.4:** Περίοδοι ταλάντωσης κτηρίων μετά το 1980 με τοιχοποιία βασισμένες σε ένα σταθμικό μέσο αποτελεσμάτων της **εικόνας 4.1**, συγκρινόμενες με τις περιόδους της **εξίσωσης [9]** και τη σχέση **[1]** με  $C_i=0.05$ .

Η κύρια αιτία διαφορετικότητας ως προς τις τέμνουσες βάσης είναι η διαφορά μεταξύ της δεσπόζουσας περιόδου της ταλάντωσης από την εξίσωση περιόδου – ύψους κτηρίου και της περιόδου από τη μοναδιαία (ή Rayleigh) ανάλυση ενός μοντέλου κενού πλαισίου, όπου οι δυσκαμψίες των διατομών μπορεί να είναι μειωμένες ακόμα και κατά 50%. Πολλοί κανονισμοί αναγνωρίζουν ότι η περίοδος κραδασμού που προκύπτει από την απλοποιημένη σχέση περιόδου – ύψους είναι πιο ρεαλιστική, έχοντας υπολογιστεί άμεσα από τις καταμετρημένες περιόδους κτηρίων που υπέστησαν σεισμικές δονήσεις. Όμως, όταν οι υψηλότερες ιδιομορφές είναι σημαντικές (σε ψηλές ή ανομοιόμορφες καθ' ύψος κατασκευές) η μέθοδος φασματικής ιδιομορφικής ανάλυσης δίνει ένα πιο ρεαλιστικό προφίλ των πλευρικών

δυνάμεων. Για το λόγο αυτό, οι συγκεκριμένοι κανονισμοί απαιτούν από το μελετητή να ελέγχει αν η ιδιομορφική τέμνουσα σχεδιασμού είναι μικρότερη του 85% της τέμνουσας βάσης για την ισοδύναμη στατική ανάλυση. Αν αυτό συμβαίνει, τότε οι δυνάμεις και όχι οι σχετικές μετατοπίσεις των ορόφων, πρέπει να πολλαπλασιαστούν με  $0.85V/V_t$ , όπου  $V$  είναι η τέμνουσα βάσης της στατικής μεθόδου και  $V_t$  η τέμνουσα βάσης για τον απαιτούμενο ιδιομορφικό σχεδιασμό.

Ακόμα και όταν οι μεγαλύτερες ιδιομορφές δεν είναι σημαντικές και οι μελετητές χρησιμοποιούν τη στατική μέθοδο αλλά υπολογίζουν την περίοδο ταλάντωσης από τη μέθοδο Rayleigh, πολλοί κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη το άνω όριο της περιόδου ταλάντωσης από τη μέθοδο Rayleigh. Αυτή είναι μια εναλλακτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να περιορίσει μη ρεαλιστικές υψηλές τιμές περιόδων και αντίστοιχα χαμηλές τιμές τεμνουσών βάσης.



**Εικόνα 4.5:** Προφίλ διατμητικής δύναμης για δυο κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος σχεδιασμένα βάσει του EC8, τα οποία προέκυψαν από τη γραμμική δυναμική και τη στατική ανάλυση.

#### 4.4 Συστάσεις για μελλοντική εφαρμογή στον ευρωκώδικα 8

Ο ευρωκώδικας 8 θα πρέπει μελλοντικά να λάβει υπόψη του τα κατωτέρω σχετιζόμενα με τις περιόδους ταλάντωσης και τις επακόλουθες δυνάμεις της γραμμικής ανάλυσης:

- Κατά την εφαρμογή των εξισώσεων περιόδου – ύψους για καμπτικά πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος (MRF) θα πρέπει να υπάρχουν δυο μέθοδοι οι οποίες εξαρτώνται από το αν οι τοιχοπληρώσεις πρόκειται να είναι (α) απομονωμένες από τα πλαίσια ή (β) άκαμπτα συνδεδεμένες μεταξύ τους.
- Η παρούσα σχέση περιόδου – ύψους του ευρωκώδικα 8 για κενά πλαίσια MRF φαίνεται να είναι ρεαλιστική και δεν θα πρέπει απαραίτητα να αναβαθμιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Goel και Chopra (1997), ειδικότερα αναλογιζόμενοι ότι βασίζεται σε κτήρια που κατασκευάστηκαν κατά τη διάρκεια πολλών ετών και υπόκεινται σε διαφορετικούς αντισεισμικούς κανονισμούς.
- Η εξίσωση περιόδου – ύψους για τις αναφερόμενες ως «άλλες κατασκευές» των προκειμένων διατάξεων του ευρωκώδικα 8 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περίοδο ταλάντωσης των MRF με άκαμπτη τοιχοπλήρωση, όπως ακριβώς και στην **εξίσωση [9]** με  $C_r=0.09$ .
- Το λάθος το οποίο εντοπίστηκε στην εξίσωση της περιόδου ταλάντωσης για κτήρια με διατμητικά τοιχία θα πρέπει να επιδιορθωθεί και η συγκεκριμένη εξίσωση θα πρέπει να αναμορφωθεί λαμβάνοντας υπόψη και αυτή των Goel και Chopra (1998). Ωστόσο, θα ήταν ενδιαφέρουσα μια σύγκριση της εξίσωσης με τις αναλυτικά υπολογιζόμενες περιόδους ταλάντωσης νέων κατασκευών με διατμητικά τοιχία.
- Η περίοδος ταλάντωσης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Rayleigh (στη γραμμική στατική ανάλυση) θα έπρεπε να περιοριστεί βασιζόμενη στην περίοδο ταλάντωσης που προκύπτει από τις εξισώσεις περιόδου – ύψους.
- Η τέμνουσα βάσης που προέρχεται από τη μέθοδο φασματικής ιδιομορφικής ανάλυσης θα μπορούσε να μεγεθυνθεί χρησιμοποιώντας την τέμνουσα βάσης από τη στατική ανάλυση. Αυτό θα απαλλάξει το σχεδιασμό από χαμηλές τιμές δυνάμεων που προκύπτουν από τη χρήση των αναλυτικών μοντέλων με μη ρεαλιστικές τιμές περιόδων ταλάντωσης.

## 4.5 Μέθοδος Fajfar για τον προσδιορισμό του δείκτη συμπεριφοράς

### 4.5.1 Ορισμοί

Για να υπάρχει μια κοινή βάση σύγκρισης των αποτελεσμάτων διαφορετικών ερευνών, προτείνονται οι παρακάτω ορισμοί:

Η αδιάστατη παράμετρος αντοχής  $\eta_y$  ενός μονοβάθμιου συστήματος μάζας  $m$ , περιόδου  $T$  και δείκτη πλαστιμότητας  $\mu$ , το οποίο υποβάλλεται σε εδαφική κίνηση με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $a_{g,max}$ , ορίζεται από το λόγο:

$$\eta_y(\mu, T) = \frac{V_y(\mu, T)}{m \cdot a_{g,max}} \quad [15]$$

όπου  $V_y$  είναι η αντοχή διαρροής του συστήματος. Η παράμετρος αντοχής επίσης συνδέεται με το συντελεστή διαρροής  $C_y$ :

$$C_y = \frac{V_y}{W} = \eta_y \cdot \frac{a_{g,max}}{g} \quad [16]$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $W=mg$  το βάρος του συστήματος.



Ο αδιάστατος συντελεστής μείωσης αντοχής  $q$  του μονοβάθμιου συστήματος ορίζεται ως ο λόγος της αντοχής που απαιτείται για ελαστική συμπεριφορά  $\eta_y(\mu=1, T)$  προς την αντοχή που σχετίζεται με τη μέγιστη απαίτηση πλαστιμότητας  $\eta_y(\mu, T)$ :

$$q(\mu, T) = \frac{\eta_y(\mu=1, T)}{\eta_y(\mu, T)} \quad [17]$$

Πρέπει να τονιστεί ότι ο συντελεστής μείωσης της **εξίσωσης [17]** λαμβάνει υπόψη μόνο την πλαστιμότητα του συστήματος. Δεν είναι ισοδύναμος με τους σταθερούς συντελεστές μείωσης που χρησιμοποιούνται στους κανονισμούς. Οι συντελεστές μείωσης των κανονισμών λαμβάνουν υπόψη τόσο την απώλεια ενέργειας όσο και την υπεραντοχή της κατασκευής.

#### 4.5.2 Αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών

Στον **πίνακα 4.2** παρουσιάζονται επτά από τα χρησιμοποιούμενα σύγχρονα μοντέλα υπολογισμού του παράγοντα  $q$  σε χρονολογική σειρά. Για καθένα από αυτά, δίνεται το έτος δημιουργίας καθώς και ο αριθμός των καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων ή των χρησιμοποιούμενων παλμών, οι τύποι συστημάτων που μελετήθηκαν και οι βασικές παράμετροι στις οποίες βασίστηκε η παραγωγή των συντελεστών  $q$ . Τα μοντέλα των Newmark και Hall, Riddell et al και Ordaz και Perez-Rocha καθορίστηκαν για ελαστοπλαστικά συστήματα, ενώ των Nassar και Kranwinkler και των Vidic et al προέκυψαν τόσο για διγραμμικά όσο και για συστήματα μειούμενης ακαμψίας. Οι Cuesta και Aschheim παρήγαγαν ένα μοντέλο από απλούς παλμούς που μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά παραμορφούμενα συστήματα.

MODEL	YEAR	NUMBER OF RECORDS (PULSES)	SYSTEMS			R-FACTOR DEPENDENCE
			$\alpha$ , %	$\beta$ , %	$\mu$	
Newmark and Hall	1973	(3)	0 (b)	$\leq 20$	$\leq 10$	$T, \mu,$ $\beta, T_a(a_{g,max}, v_{g,max}, d_{g,max}, \phi_{ea}, \phi_{ev}, \phi_{ed})$
Riddell, Hidalgo, and Cruz	1989	4 sets	0 (b)	5	$\leq 10$	$T, \mu$
Nassar and Krawinkler	1991	15	0, 2, 10 (b, sd)	5	$\leq 8$	$T, \mu,$ $\alpha$
Miranda	1993	124	3 (b)	5	$\leq 6$	$T, \mu,$ soil, $T_G$
Vidic, Fajfar, and Fischinger	1994	40	10 (b, sd)	5	$\leq 10$	$T, \mu,$ $T_a(a_{g,max}, v_{g,max}, \phi_{ea}, \phi_{ev})$
Ordaz and Pérez Rocha	1998	445	0 (b)	5	$\leq 8$	$T, \mu,$ $d_{g,max}, D(T)$
Cuesta and Aschheim	2000	15 (24)	0, 2, 10 (b, sd)	2, 5, 10	$\leq 8$	$T, \mu,$ $T_g$

<sup>1</sup> b=bilinear; sd=stiffness degrading.

**Πίνακας 4.2:** Οι σχέσεις προσδιορισμού του  $q$ .

Σε όλα τα μοντέλα εμφανίζονται δυο παράμετροι, η αρχική περίοδος του συστήματος  $T$  και η πλαστιμότητά του  $\mu$ . μερικά μοντέλα είναι συνάρτηση και άλλων παραμέτρων όπως ο λόγος ακαμψίας μετά τη διαρροή ( $\alpha$ ), η απόσβεση ( $\beta$ ) ή η

ελαστική μετακίνηση απόκρισης  $D(T)$ . Στα παλαιότερα μοντέλα λαμβάνονταν υπόψη και οι εδαφικές παράμετροι όπως η μέγιστη εδαφική μετακίνηση  $d_{g,max}$ , η μέγιστη εδαφική ταχύτητα  $v_{g,max}$ , η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση  $a_{g,max}$  ή η δεσπόζουσα περίοδος της εδαφικής κίνησης ( $T_p$ ).

Οι Veletsos και Newmark (1960), Veletsos et al (1965) και αργότερα οι Newmark και Hall (1973) εγκαθίδρυσαν ότι: (1) οι συντελεστές  $q$  ελαστοπλαστικών συστημάτων που υπόκεινται σε εδαφική κίνηση περιορίζονται στην τιμή  $q=1$  για πολύ μικροπερίοδα συστήματα, (2) ο συντελεστής  $q$  μπορεί να προκύψει από τον «κανόνα ίσων ενεργειών» για μικροπερίοδα συστήματα και (3) ισχύει ότι  $q=\mu$  για συστήματα μεσαίας ή μεγάλης περιόδου, σχέση γνωστή ως «κανόνας ίσων μετακινήσεων».

Οι Riddell, Hidalgo και Cruz (1989) πρότειναν μια διγραμμική έκφραση της σχέσης  $q-\mu-T$  στην οποία για συστήματα με μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας ( $\mu>5$ ) και περιόδους  $T\geq 4sec$ , οι συντελεστές  $q$  είναι μικρότεροι από τις τιμές πλαστιμότητας, προκύπτοντας από τον «κανόνα των ίσων μετακινήσεων».

Ο Miranda (1993) πρότεινε διαφορετικές σχέσεις  $q$  για διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες. Για μαλακά εδάφη ο συντελεστής  $q$  αποτελεί συνάρτηση της παραμέτρου  $T_G$  που ορίζει τη δεσπόζουσα περίοδο της εδαφικής κίνησης. Σύμφωνα με τον Miranda (1993) αυτή είναι η περίοδος στην οποία η μέγιστη σχετική ταχύτητα έχει φτάσει στο ελαστικό φάσμα απόσβεσης 5%.

#### 4.5.3 Διγραμμικό μοντέλο του δείκτη συμπεριφοράς

Ο Vidic (1993) ανέπτυξε ένα μοντέλο προσδιορισμού του  $q$  για διγραμμικά και μειούμενης δυσκαμψίας συστήματα που αποκρίνονται στις σεισμικές κινήσεις της Καλιφόρνια, της Χιλής, της Ιταλίας, του Μεξικού, του Μαυροβουνίου και της πρώην γιουκοσλαβικής δημοκρατίας. Στην έρευνα, η δυσκαμψία μετά τη διαρροή ήταν 10% της αρχικής,  $\mu\leq 10$ ,  $T\leq 2.5sec$  και η απόσβεση ήταν είτε ανάλογη της μάζας είτε η ίδια η δυσκαμψία. Η προτεινόμενη εξίσωση  $q-\mu-T/T_p$ , εξαρτάται από την περίοδο  $T_p$  που με τη σειρά της εξαρτάται από την απαιτούμενη πλαστιμότητα  $\mu$  και την περίοδο  $T_1$  που εκπροσωπεί την περίοδο στην τομή του κλάδου σταθερής επιτάχυνσης με τον κλάδο σταθερής ταχύτητας του φάσματος. Η εν λόγω περίοδος υπολογίζεται βασιζόμενη στη μέγιστη εδαφική ταχύτητα, τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και τους παράγοντες ενίσχυσής τους. Η προτεινόμενη εξίσωση για τα συστήματα μειούμενης πλαστιμότητας ικανοποιεί τον «κανόνα των ίσων μετακινήσεων» για μακροπερίοδα συστήματα, κάτι που δεν κάνει η σχέση για διγραμμικά συστήματα.

Οι σχέσεις που παράγονται για διγραμμικά συστήματα παραμορφούμενα με το φορτίο έχουν απόσβεση ανάλογη της μάζας ίση με 5% της κρίσιμης απόσβεσης που δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$q = \begin{cases} C_1(\mu-1)^{c_r} \frac{T}{T_a} + 1 & \alpha v \frac{T}{T_a} \leq 1 \\ C_1(\mu-1)^{c_r} + 1 & \alpha v \frac{T}{T_a} > 1 \end{cases} \quad [18]$$

όπου  $c_1=1.35$ ,  $c_r=0.95$ .

$$T_a = 0.75\mu^{0.2}T_1 \quad [19]$$

$$T_1 = 2\pi \frac{\varphi_{ev} \cdot v_{g,max}}{\varphi_{ea} \cdot a_{g,max}} \quad [20]$$

και  $a_{g,max}$  και  $v_{g,max}$  είναι η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση και ταχύτητα αντίστοιχα. Στην προκειμένη, ο συντελεστής ενίσχυσης της επιτάχυνσης  $\varphi_{ea} = 2.5$  και της ταχύτητας  $\varphi_{ev} = 2, 1.8, 2.6$  και  $2.8$  για τυπικές καταγραφές, καταγραφές Ηνωμένων Πολιτειών, Χιλής, και μαλακού εδάφους στο Μεξικό αντίστοιχα.

Για την **εξίσωση [18]** Προτάθηκαν διαφορετικοί συντελεστές για συστήματα μειούμενης δυσκαμψίας και για απόσβεση ανάλογη της άμεσης ακαμψίας. Επίσης, προτάθηκαν διαφορετικοί συντελεστές για την **εξίσωση [19]** για συστήματα μειούμενης δυσκαμψίας.

Οι προηγούμενες σχέσεις χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μετακίνησης οροφής (target) της μη γραμμικής μεθόδου για σεισμική απόκριση γνωστή ως «μέθοδος N2» (Fajfar 2000). Στην πιο πρόσφατη απλοποιημένη εκδοχή της μεθόδου, το ανελαστικό φάσμα απόκρισης εκτιμάται χρησιμοποιώντας  $c_1=1$ ,  $c_r=1$  και  $T_p=T_1$ .

#### 4.5.4 Συνιστώμενοι συντελεστές συμπεριφοράς

Οι Vidic et al απέδειξαν ότι υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των συντελεστών  $q$  διγραμμικών συστημάτων και των συστημάτων μειούμενης ακαμψίας. Για απόσβεση ανάλογη της μάζας, τα συστήματα μειούμενης ακαμψίας χρειάζονται  $c_1=1$ . Η ανάλυση αποδεικνύει ότι η εξίσωση των Vidic et al μπορεί να απλοποιηθεί στην:

$$q = \begin{cases} c_1(\mu-1)\frac{T}{T_p}+1 & \text{αν } \frac{T}{T_p} \leq 1 \\ c_1(\mu-1)+1 & \text{αν } \frac{T}{T_p} > 1 \end{cases} \quad [21]$$

όπου η  $T_p$  δίνεται από τις εξισώσεις  $T_p = 2\pi \frac{S_{v,max}}{S_{a,max}}$  ή  $T_p = \frac{[T \cdot \eta(\mu=1, T)]_{max}}{[\eta(\mu=1, T)]_{max}}$  και  $c_1=1.3$  για μια ακριβή εκτίμηση του  $q$  για συστήματα με περιορισμένη μείωση της δυσκαμψίας ή  $c_1=1.0$  για συστήματα με σημαντική μείωση της δυσκαμψίας ή για μια πιο συντηρητική εκτίμηση για συστήματα με περιορισμένη μείωση δυσκαμψίας. Αυτές οι συστάσεις βασίζονται στην απόκριση μονοβαθμίων συστημάτων με  $\mu \leq 8$ ,  $2 \leq \beta \leq 10\%$ ,  $0 \leq \alpha \leq 10\%$  και  $T \leq 3 \text{ sec}$  για κινήσεις που έχουν ένα εύρος χαρακτηριστικών περιόδων και διάρκειας. Οι κινήσεις περιλαμβάνουν τόσο κινήσεις μακρινού πεδίου και έναν περιορισμένο αριθμό κινήσεων κοντινού πεδίου, καταγεγραμμένες σε διάφορους προσανατολισμούς σχετικά με τη διάρρηξη. Η παρατήρηση ότι ένας παράγοντας  $q$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινήσεις μακρινού πεδίου μπορεί να είναι πιο δελεαστική από την πρόταση χρήσης του στο κοντινό πεδίο. Παρ' όλα αυτά, πρόσθετες μελέτες που περιλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, εντοπίζουν συστηματικές διαφορές των παραγόντων  $q$  ανάμεσα σε κινήσεις κοντινού και μακρινού πεδίου οι οποίες δεν εντοπίστηκαν στην παρούσα μελέτη. Η **εξίσωση [21]** δε συστήνεται για χρήση σε μαλακά εδάφη που μπορεί να προκαλέσουν σχεδόν αρμονικές ταλαντώσεις, όπως παρατηρήθηκε στο Μεξικό το 1985.



# 5

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΕΥΠΑΘΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΒΑΣΕΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά οι καμπύλες τρωτότητας σύμφωνα με την έρευνα των Rossetto και Elnashai (2003), οι οποίες βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και αφορούν κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη. Έπειτα, παρουσιάζεται η αναλυτική εκτίμηση του κόστους βλαβών των κτηρίων της Αθήνας κατά το σεισμό που συνέβη στις 7 Σεπτεμβρίου 1999, όπως προέκυψαν από την έρευνα των Karros et al (2007).

Στην έρευνα των Rossetto και Elnashai (2003) διεξάχθηκαν εκτιμήσεις σεισμικού κινδύνου σε πληθώρα κτηρίων για τον εντοπισμό των αστικών περιοχών που είναι πιθανότερο να υποστούν σημαντικές κτηριακές καταστροφές και απώλειες ζωής κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης είναι σημαντικά για τη μείωση των απωλειών σε μελλοντικά σεισμικά γεγονότα, καθώς επιτρέπουν την παρέμβαση με κτηριακή ενίσχυση και τη διαχείριση του σεισμικού κινδύνου. Στην Ευρώπη, η πλειοψηφία των υπάρχοντων κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος δεν έχουν σχεδιαστεί ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις των νέων αντισεισμικών κανονισμών. Παρ' όλα αυτά, τα περισσότερα διαθέτουν πλευρική αντίσταση λόγω των συντελεστών υπεραντοχής των αντισεισμικών κανονισμών, οι οποίοι μπορεί να είναι επαρκείς ώστε να ανθίστανται σε σεισμούς μετρίου μεγέθους που χαρακτηρίζουν τη σεισμικότητα της Ευρώπης, υποκείμενα σε έναν αποδεκτό βαθμό βλάβης. Ο ορισμός της αποδεκτής βλάβης ποικίλει ανάλογα με τη σημαντικότητα της κατασκευής, τη χρήση της και τη σφοδρότητα της σεισμικής

κίνησης. Πρέπει να ικανοποιηθούν τυπικά κριτήρια πολλαπλής συμπεριφοράς, γι' αυτό απαιτούνται εργαλεία πρόβλεψης όπως οι καμπύλες τρωτότητας ώστε να προσδιοριστεί η σεισμική επικινδυνότητα πολλαπλών τύπων κατασκευών μέσω της απόκρισης ή συμπερασμάτων από την απόκριση τυπικών κατασκευών.

Οι καμπύλες τρωτότητας σχετίζουν την πιθανότητα υπέρβασης πολλαπλών σταθμών βλαβών με μια παράμετρο της εδαφικής κίνησης και έτσι δύνανται να θεωρηθούν ως μια γραφική απεικόνιση του σεισμικού κινδύνου. Στην περίπτωση των πολλαπλών κτηρίων, η χρήση τους αποδίδει μια πρόβλεψη του ποσοστού του εκτιθέμενου δομήματος σε κάθε στάθμη βλάβης μετά από κάποιο σεισμικό γεγονός που προκάλεσε ισχυρή εδαφική κίνηση και στις τρεις χωρικές διευθύνσεις. Στο πρώτο μέρος της παρούσας έρευνας εξετάζονται οι υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας για διαφορετικές κατηγορίες κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα και γίνεται μια ανασκόπηση βάσει της εφαρμογής τους στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην Ευρώπη. Συμπερασματικά, ερευνάται η χρήση, εφαρμογή και εξάρτηση μόνο των οπτικών παρατηρήσεων ως πηγή δημιουργίας καμπυλών τρωτότητας για τυπικές ευρωπαϊκές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος. Τα δεδομένα λήφθηκαν από παγκόσμια γεγονότα και εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία για την παραγωγή ενός νέου βαθμού βλάβης (ομογενοποιημένη κλίμακα οπλισμένου σκυροδέματος – HRC) αναφορικά με πειραματικές μετρήσεις για την ομαδοποίηση των δεδομένων βλαβών. Χρησιμοποιώντας τη νέα κλίμακα βλαβών, εισάγεται η ιδέα των ομογενοποιημένων σχέσεων ευπάθειας, η οποία εφαρμόζεται σε διαφορετικά συστήματα κτηριακής αντίστασης. Τέλος, διεξάγονται αναλύσεις ευαισθησίας και παλινδρομήσεις ώστε να εξεταστεί η εφικτή ή μη χρήση της γενικής αυτής εξίσωσης.

Σκοπός της έρευνας των Karros et al (2007) είναι η παρουσίαση αναλυτικών τεχνικών για τη δημιουργία σεναρίων βλάβης τυπικών κατασκευών παρόμοιων με αυτές της νότιας Ευρώπης, ο έλεγχος της εγκυρότητάς τους μέσω της εφαρμογής τους σε κτήρια που βρίσκονται στην περιοχή που υπέστη τις περισσότερες βλάβες κατά το σεισμό της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 και η σύγκριση των αναλυτικά προβλεπόμενων απωλειών με στατιστικά δεδομένα κόστους επιδιόρθωσης που συλλέχθηκαν μετά το σεισμικό γεγονός.

Η εκτίμηση των απωλειών ενός σεισμικού γεγονότος μπορεί να διεξαχθεί χρησιμοποιώντας μητρώα πιθανοτήτων βλάβης βασιζόμενα στα στατιστικά στοιχεία των καταστροφών παλαιότερων σεισμικών γεγονότων ή σε κρίση ειδημόνων ή σε καμπύλες τρωτότητας παραγόμενες από ανάλυση κατάλληλων μηχανικά μοντέλων. Στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιείται ευρέως το HAZUS, ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών που εκτιμά τις απώλειες λόγω σεισμικού κινδύνου. Η εκτίμηση τρωτότητας στο συγκεκριμένο σύστημα επιτυγχάνεται μέσω μιας αναλυτικής διαδικασίας συνδυασμού της προσέγγισης του φάσματος αντοχής με τις καμπύλες τρωτότητας συναρτήσει φασματικών τιμών. Το συνηθέστερο πρόβλημα από την εφαρμογή ενός εντελώς εμπειρικού μοντέλου είναι η μη διαθεσιμότητα καταγραφών για διάφορες τιμές εντάσεων, η οποία οδηγεί σε μια σχετική αφθονία στατιστικών δεδομένων στο εύρος εντάσεων 6-8 και σε απουσία τιμών στις άλλες εντάσεις, κάνοντας δύσκολη την επιλογή της κατάλληλης αθροιστικής κατανομής. Από την άλλη, εντελώς αναλυτικές ή βασιζόμενες σε εμπειρογνώμονες τεχνικές θα

πρέπει να αποφεύγονται καθώς ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά από την πραγματικότητα και συχνά υπερεκτιμούν το κόστος των καταστροφών.

Για την αποφυγή των προαναφερθέντων οι Karros et al (1998b, 2002, 2004) ανέπτυξαν μια υβριδική προσέγγιση που ξεκινώντας από τις στατιστικές βλαβών, γίνονται εκτιμήσεις της πιθανής βλάβης σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν δεδομένα μέσω μη γραμμικής ανάλυσης κατασκευών. Επίσης παράγονται καμπύλες τρωτότητας σε όρους PGA ή φασματικών μετακινήσεων συνδυάζοντας τη μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας για αντιπροσωπευτικά μοντέλα κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος με στατιστικές βλαβών από το σεισμό της Θεσσαλονίκης (Ελλάδα, 1978). Πρέπει να σημειωθεί ότι καθορίζεται καλύτερα το κόστος παρέμβασης και όχι τόσο ο βαθμός πραγματοποιούμενων βλαβών. Στην πραγματικότητα, ο τελευταίος λαμβάνεται υπόψη σε ικανοποιητικό βαθμό (ειδικά για τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα) από τους ερευνητές που επιθυμούν εφαρμογή ενισχύσεων σε κατεστραμμένες από το σεισμό κατασκευές. Μια ελαφρώς διαφορετική προσέγγιση βασιζόμενη επίσης στην υβριδική τεχνική αλλά συμπεριλαμβάνοντας και μη γραμμική στατική ανάλυση (αντί για δυναμική), συγκρίνεται με τα στατιστικά δεδομένα του κόστους παρέμβασης που χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό των καμπυλών τρωτότητας μη οπλισμένων κτηρίων από τοιχοποιία (URM).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιεί η δεύτερη θεώρηση είναι λιγοστά αφού στην περίπτωση των κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν μόνο καταγραφές του σεισμού της Θεσσαλονίκης (1978) και στην περίπτωση κτηρίων από τοιχοποιία χρησιμοποιήθηκαν τρία συνολικά σεισμικά γεγονότα. Ο σεισμός της Αθήνας το 1999 παρουσιάζει μια μοναδική ευκαιρία ελέγχου της αξιοπιστίας των βασικών αναλυτικών μοντέλων σε σχέση με τα νέα στατιστικά δεδομένα που συλλέχθηκαν στη μεσοσεισμική ζώνη. Στόχος της μελέτης είναι η σύγκριση των βλαβών και της εκτίμησης απωλειών βασιζόμενη αποκλειστικά σε αναλυτικές προσεγγίσεις στατιστικών δεδομένων του σεισμού της Αθήνας.

## 5.2 Παρουσίαση της έρευνας των Rossetto και Elnashai (2003)

### 5.2.1 Αξιολόγηση των υπάρχουσών καμπυλών τρωτότητας

Ενώ έχουν δημιουργηθεί λιγοστές σχέσεις ευπάθειας για τις ευρωπαϊκές χώρες, πολλαπλές έχουν προταθεί από κυβερνήσεις και ερευνητικά ινστιτούτα για διάφορους τύπους κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Παρακάτω εξετάζονται οι επιδράσεις της επιλεγόμενης βάσης δεδομένων, των χαρακτηριστικών τύπων κτηρίων, του τρόπου μέτρησης των καταστροφών και των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης στην παραγωγή της εξίσωσης πρόβλεψης των κτηριακών βλαβών. Οι παράμετροι αυτοί εξετάζονται τόσο σε γενικότερο πλαίσιο όσο και με στόχο την εφαρμογή τους στις σχέσεις εκτίμησης σεισμικού κινδύνου στην Ευρώπη.

### 5.2.2 Πηγή δεδομένων βλαβών

Οι υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας μπορεί να είναι εμπειρικές, κριτικές, αναλυτικές ή υβριδικές, ανάλογα με το αν τα δεδομένα βλαβών που

χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή τους προέρχονται από παρατηρούμενες βλάβες παλαιότερων σεισμικών γεγονότων, γνώμη ειδικών, αναλυτικές προσομοιώσεις ή συνδυασμό των προαναφερθέντων αντίστοιχα.

Οι εμπειρικές καμπύλες χρησιμοποιούν τις κτηριακές βλάβες που εξάγονται από μετασεισμικές παρατηρήσεις και τη στατιστική τους ανάλυση. Η πηγή παρατήρησης είναι η πιο ρεαλιστική καθώς λαμβάνονται υπόψη όλες οι πρακτικές λεπτομέρειες των κατασκευών μελέτης μαζί με την αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής, την τοπογραφία, τη θέση, τη διαδρομή και τα χαρακτηριστικά της πηγής. Παρ' όλα αυτά, οι ίδιοι παράγοντες που καθιστούν τις παρατηρήσεις πεδίου την περισσότερο ρεαλιστική μέθοδο ευθύνονται και για τη μη συχνή εφαρμογή της. Οι εμπειρικές σχέσεις βλαβών – εδαφικής κίνησης που αναπτύχθηκαν για ευρωπαϊκές χώρες βασίζονται σε λιγοστές έρευνες βλαβών που διεξήχθησαν για μεμονωμένες τοποθεσίες σεισμικών γεγονότων. Γενικότερα, δεν γίνεται κατηγοριοποίηση αναφορικά με τον τύπο των κτηρίων, τη διαφορετικότητα των υλικών, τα ύψη ή τις προβλέψεις αντισεισμικού σχεδιασμού. Συμπερασματικά, οι καμπύλες είναι πολύ συγκεκριμένες αναφορικά με το σεισμο-τεκτονικό, γεωτεχνικό και κτηριακό περιβάλλον. Είναι πιθανή μια ευρύτερη εφαρμογή τους αν ληφθεί υπόψη η σεισμική συμπεριφορά διαφορετικών κατασκευαστικά κτηρίων και αν χρησιμοποιηθεί μια μεγαλύτερη ποσότητα εμπειρικών δεδομένων. Πρακτικά, αυτό θα ήταν εφικτό μέσω του συνδυασμού δεδομένων διαφορετικών σεισμικών γεγονότων και περιοχών. Παρ' όλα αυτά, λόγω της σπανιότητας σεισμών μεγάλου μεγέθους κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, οι παρατηρήσεις πεδίου που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των εξισώσεων τείνουν να είναι σπάνιες και πολύ στοχευμένες στο μικρό βαθμό βλαβών, και στο μικρό εύρος ισχυρής εδαφικής κίνησης. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγάλες αβεβαιότητες που σχετίζονται με την εφαρμογή των εξισώσεων σε περίπτωση σεισμικών γεγονότων μεγάλου μεγέθους. Για τον σαφή προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης και κατανομή των σεισμικών βλαβών αντιπροσωπευτική της κατανομής της σεισμικής αντίστασης των κατασκευών, οι εν λόγω καμπύλες θα πρέπει να χρησιμοποιούν μετασεισμικές παρατηρήσεις που διεξάγονται για μεγάλο αριθμό κτηρίων παρόμοιας κατασκευής και σε περιοχές με ομοιόμορφες εδαφικές παραμέτρους κοντά στους σταθμούς καταγραφών. Λόγω της τυπικής και απότομης εκτέλεσης των μετασεισμικών παρατηρήσεων, της κυμαινόμενης εμπειρίας των εμπειρογνομόνων και της χρήσης κακώς ορισμένων κλιμάκων βλάβης, εισάγονται λάθη στην κατηγοριοποίηση της κτηριακής βλάβης (ειδικότερα για τις μικρότερες στάθμες βλαβών) στη στατιστική ανάλυση. Επιπρόσθετα, η βλάβη λόγω πολλαπλών σεισμικών γεγονότων θα πρέπει να συνυπολογιστεί και να αποδοθεί σε ένα γεγονός ή κτήρια που υπέστησαν βλάβες λόγω δράσης άλλων παραγόντων (π.χ. εδαφική καθίζηση, κατολίσθηση, πλημμύρα, φωτιά) θα πρέπει να συμπεριληφθούν στα δεδομένα. Τα προαναφερθέντα λάθη δε μπορούν να εξαλειφθούν μέσω στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων ακόμα και στις περιπτώσεις όπου θεωρείται ένα μοναδικό σεισμικό γεγονός και διεξάγεται περιορισμένη παρακολούθηση πεδίου. Το χαμηλό επίπεδο τελειοποίησης σε όρους κατασκευής και κατηγοριοποίησης βλαβών που χαρακτηρίζει τη μετασεισμική



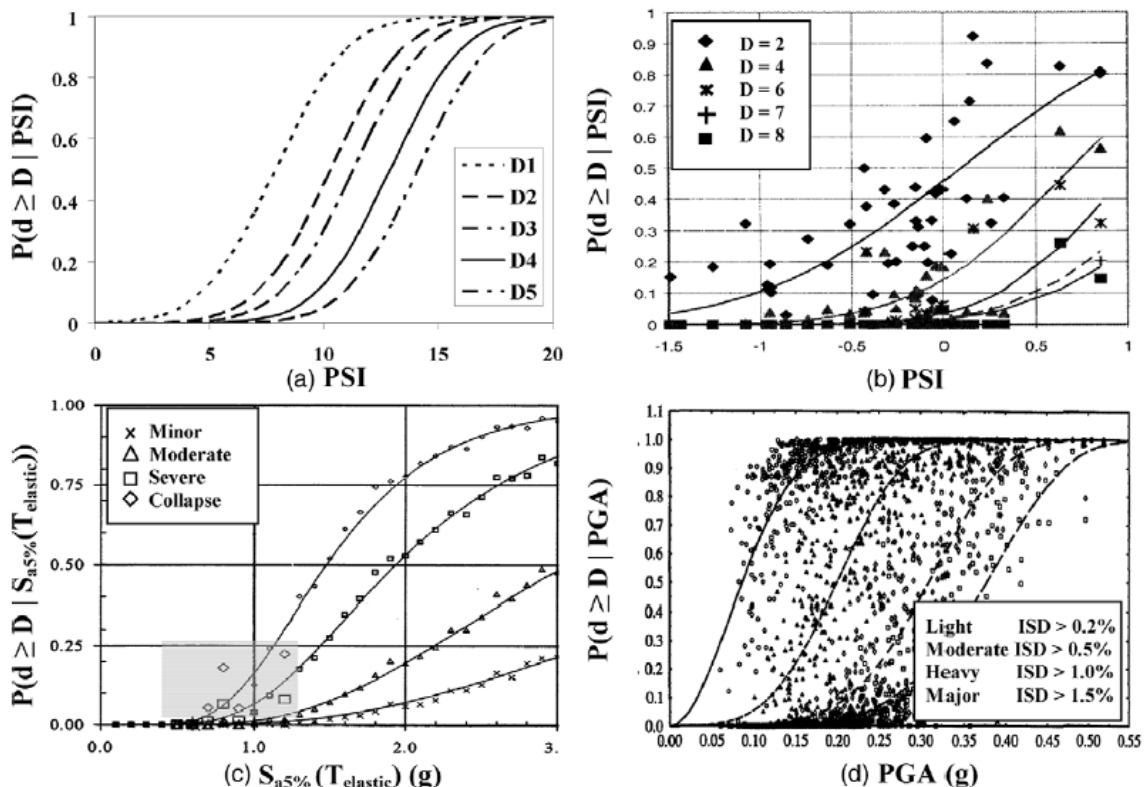
παρακολούθηση, θέτει ένα φυσικό εμπόδιο στο συνδυασμό των δεδομένων βλάβης για διαφορετικούς τύπους κτηρίων.

Οι εξισώσεις που βασίζονται στην κρίση εμπειρογνομώνων, δε σχετίζονται με παρόμοια προβλήματα αναφορικά με την ποσότητα και την ποιότητα των στατιστικών δεδομένων κτηριακής βλάβης που χαρακτηρίζουν τις εμπειρικές σχέσεις. Πολιτικοί μηχανικοί με εμπειρία στο πεδίο επιστρατεύονται για τη δημιουργία υποθέσεων της πιθανής κατανομής βλάβης σε πληθυσμό κτηρίων υποβαλλόμενων σε σεισμικό γεγονός διαφορετικής κάθε φορά έντασης. Οι εξισώσεις κατανομής της πιθανότητας προσαρμόζονται στις προβλέψεις των ειδικών ώστε να αντιπροσωπεύουν ένα εύρος εκτίμησης βλαβών για κάθε επίπεδο έντασης. Η πιθανότητα ενός συγκεκριμένου βαθμού βλάβης παράγεται από τις προκύπτουσες κατανομές και σχεδιάζεται σε παραλληλισμό με το αντίστοιχο επίπεδο εδαφικής κίνησης, ώστε να προκύψει μια ομάδα καμπυλών τρωτότητας και αντίστοιχα όρια αβεβαιότητας. Καθώς μπορεί να ζητηθεί από τους ειδικούς η πρόβλεψη για οποιοδήποτε αριθμό κτηριακού τύπου, οι καμπύλες μπορούν εύκολα να συμπεριλάβουν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση διαφόρων κατασκευών. Συμπερασματικά, η γνώμη των ειδικών είναι η βασική πηγή που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους ισχύοντες κανονισμούς αποκατάστασης βλαβών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής για τη δημιουργία μητρώων πιθανότητας εμφάνισης βλαβών και καμπυλών τρωτότητας. Η αξιοπιστία των κριτικών καμπυλών είναι αμφίβολη λόγω της εξάρτησής τους από την προσωπική εμπειρία των συμβούλων ειδικών. Είναι πρακτικά αδύνατο να εκτιμηθεί ο βαθμός συντηρητικότητας που σχετίζεται με τη βάση δεδομένων των συγκεκριμένων καμπυλών γι' αυτό αν η χώρα παραγωγής των καμπυλών τρωτότητας χαρακτηρίζεται από κατασκευαστικές πρακτικές που διαφέρουν σημαντικά από τις χρησιμοποιούμενες στην Ευρώπη, η εφαρμογή τους στην τελευταία θα πρέπει να απαγορεύεται.

Οι αναλυτικές καμπύλες τρωτότητας λαμβάνουν υπόψη ως στατιστική βάση τη διανομή βλαβών που προσομοιώνεται από την ανάλυση μοντέλων κατασκευών υπό αυξανόμενα σεισμικά φορτία. Η ανάλυση μπορεί να καταλήξει σε μικρότερη στατιστική απόκλιση και μεγαλύτερη αξιοπιστία της εκτίμησης τρωτότητας διαφορετικών κατασκευών, συγκρινόμενη με τη γνώμη των ειδικών. Εκτός αυτού, στο παρελθόν παράχθηκαν λιγιστές καμπύλες τρωτότητας για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος λόγω του απαιτούμενου υπολογιστικού φόρτου και των περιορισμών στις δυνατότητες μοντελοποίησης. Οι αρχιτεκτονικές παρεμβάσεις δε μπορούν να ληφθούν υπόψη, η λεπτομερής προσομοίωση των τοιχοπληρώσεων είναι υπό αμφισβήτηση, δε μπορούν να ληφθούν υπόψη περίτεχνα εδαφικά μοντέλα παράλληλα με περίτεχνα κτηριακά και ο λικνισμός και η ανύψωση των κατασκευών θέτει μια αυξημένη δυσκολία στους αριθμητικούς υπολογισμούς. Πολλά υπολογιστικά περιβάλλοντα έχουν επίσης δυσκολία σύγκλισης όταν οι κατασκευές υπόκεινται σε αυξημένες απαιτήσεις και η αριθμητική δυσκολία μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητική αστοχία της κατασκευής. Παρ' όλα αυτά, πρόσφατη ανάπτυξη οδήγησε στο συνυπολογισμό ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων απόκρισης στις αναλυτικές μεθόδους, όπως η αλληλεπίδραση διατμητικής και αξονικής ευκαμψίας,

εδάφους – κατασκευής και ο διαδραστικός περιορισμός λυγισμού μελών σκυροδέματος και οπλισμένων δοκών. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκαν νέες τεχνικές ανάλυσης και διαδικασίες επίλυσης που επιτρέπουν τη δημιουργία αρχείου βλαβών για μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Έτσι, η αναλυτική προσέγγιση των καμπυλών τρωτότητας έχει γίνει περισσότερο ελκυστική λόγω της ευκολίας και της αποδοτικότητας με την οποία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα, όμως δεν έχει ακόμη εκμεταλλευτεί τα όρια των δυνατοτήτων της.

Οι περισσότερες υπάρχουσες αναλυτικές καμπύλες δημιουργήθηκαν για κατασκευές στην Αμερική ακολουθώντας μια ποικιλία τεχνικών ανάλυσης, κυμαινόμενη από ελαστική ανάλυση του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος σε μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας τρισδιάστατων μοντέλων οπλισμένου σκυροδέματος. Οι επιλογές που χρειάστηκε να γίνουν για τη μέθοδο της ανάλυσης, την κτηριακή εξιδανίκευση, το σεισμικό κίνδυνο και τα μοντέλα βλαβών, επηρεάζουν καθοριστικά τις παραγόμενες καμπύλες και δημιουργούν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου που γίνεται από διαφορετικές αρχές για ίδια τοποθεσία, ίδιο τύπο κατασκευής και ίδια σεισμικότητα. Η εφαρμογή τους στην Ευρώπη μπορεί, λοιπόν, να μην είναι δικαιολογημένη εκτός αν θεωρηθεί κατάλληλος συντελεστής αβεβαιότητας στα κατασκευαστικά μοντέλα και την εδαφική κίνηση.



**Εικόνα 5.1:** Υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας (a) καμπύλες Spence et al. για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος μη χρήση της κλίμακας βλαβών MSK, (b) καμπύλες Orsini για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος μη χρήση της κλίμακας βλαβών MSK, (c) καμπύλες Singhal και Kiremidjian για χαμηλά κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος με χρήση του δείκτη βλαβών Park και Ang και (d) καμπύλες Mosalam et al. για χαμηλά κτήρια με τη σχετική μετακίνηση ορόφων να καθορίζει το βαθμό βλάβης.

Οι υβριδικές καμπύλες τρωτότητας προσπαθούν να αντισταθμίσουν τη σπανιότητα παρατηρήσεων πεδίου, την υποκειμενικότητα των κριτικών δεδομένων και τις ελλείψεις μοντελοποίησης των αναλυτικών διαδικασιών, συνδυάζοντας δεδομένα από διαφορετικές πηγές. Τα υπάρχοντα παραδείγματα από υβριδικές καμπύλες περιλαμβάνουν την τροποποίηση των αναλυτικών ή κριτικών σχέσεων με δεδομένα παρατηρήσεων πεδίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις τα προκύπτοντα δεδομένα από τις πρόσθετες πηγές είναι πολύ περιορισμένα σε ποσότητα και αντικείμενο. Σε κάποιες περιπτώσεις, τα δεδομένα που περιλαμβάνονται είναι επιπροσθέτως ενισχυμένα με πειραματικά αποτελέσματα. Η τελευταία πηγή δεδομένων έγινε αρκετά σημαντική τα τελευταία χρόνια καθώς η εξέταση μεγάλων και περισσότερο ρεαλιστικών κατασκευών έγινε συχνότερη. Παρ' όλα αυτά, λόγω του αυξημένου κόστους και του απαιτούμενου χρόνου ελέγχου πλήρους κλίμακας, αφού ο έλεγχος μικρής κλίμακας δεν είναι καθοριστικός για παρόμοια εδάφη, μπορεί να εξεταστεί μόνο ένας μικρός αριθμός παραμέτρων χωρίς να είναι δυνατή η ποικιλία παραμέτρων. Τα πειραματικά αποτελέσματα για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται περισσότερο για λόγους επαλήθευσης παρά ως μια πρόσθετη πηγή στατιστικών δεδομένων κτηριακών βλαβών. Συμπερασματικά, η θεώρηση πολλαπλών πηγών δεδομένων για τον πιο σωστό καθορισμό της αξιοπιστίας των καμπυλών τρωτότητας κρίνεται ως αναγκαία.

### 5.2.3 Κατασκευαστική μονάδα και μέτρο βλάβης

Η παρουσία και οι συνέπειες μιας κατασκευαστικής βλάβης μπορεί να θεωρηθεί η σημαντικότερη αιτία απώλειας ανθρώπινης ζωής καθώς και οικονομικής ζημίας στην πλειοψηφία των σεισμικών γεγονότων. Η χρήση σταθμών λειτουργικότητας καθοριζόμενων από οικονομικά κριτήρια στις καμπύλες απόκρισης δύναται να αποκλείσει την εφαρμογή τους σε περιοχές πέραν αυτών που θεωρήθηκαν ώστε να κατασκευαστούν και μπορεί να εισάγει μια εξάρτηση από το χρόνο αν οι οριακές τιμές σχετίζονται με την οικονομική κατάσταση της περιοχής τη στιγμή του σεισμικού γεγονότος. Δεν υπάρχει απλή εξίσωση συσχέτισης της κατασκευαστικής βλάβης με την οικονομική διακινδύνευση και οι καμπύλες των Miyakoshi et al. που βασίζονται στην απώλεια ιδιοκτησίας φαίνεται να υποεκτιμούν την παρατηρούμενη βλάβη σε κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος μετά το σεισμό του Kobe στην Ιαπωνία (1995). Η χρήση των διαμερισμάτων ως κατασκευαστικής μονάδας από τον Orsini δεν αποδεικνύεται φυσικά, λαμβάνοντας υπόψη την ανάπτυξη μηχανισμού ορόφου και δεδομένης της πιθανής φύσης των υπαρχόντων δεδομένων, οδηγούμαστε σε περιορισμένη πρακτική εφαρμογή. Τα κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος και οι παγκόσμιες κτηριακές καταστροφές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ως κατασκευαστική μονάδα και παράμετρος αποτίμησης απώλειας αντίστοιχα. Ακόμα, για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, τα κτήρια θα πρέπει να έχουν τον ίδιο σχεδιασμό με αυτά της Ευρώπης.

Για τη χρήση των καμπυλών τρωτότητας σε ένα πλαίσιο κτηριακής απόκρισης είναι επιθυμητό η επιλεγθείσα κλίμακα βλαβών να καθορίζεται από τουλάχιστον τρία επίπεδα βλάβης, που αντιστοιχούν στην άμεση χρήση, την προστασία ζωής και την

αποφυγή κατάρρευσης. Ακόμα, τα όρια βλάβης θα πρέπει να έχουν σαφή διαχωρισμό αναφορικά με τις αναμενόμενες βλάβες στα φέροντα και μη τμήματα κτηρίων με διαφορετική πλευρική αντίσταση. Για την αναλυτική παραγωγή των καμπυλών θα πρέπει να βαθμονομηθεί η κλίμακα βλάβης μέσω μιας παραμέτρου μέτρησης της κτηριακής απόκρισης. Η επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου είναι πολύ σημαντική καθώς οι τιμές της καθορίζουν την αξιοπιστία των σχέσεων τρωτότητας. Η χρήση της κτηριακής πλαστιμότητας ως παραμέτρου θεωρείται ακατάλληλη λόγω της αδυναμίας εντοπισμού σφαλμάτων που προκύπτουν από συσσωρευμένες βλάβες στο επίπεδο των ορόφων. Η μέγιστη σχετική μετακίνηση μεταξύ των ορόφων δύναται να εντοπίσει ανάλογες μορφές αστοχίας αλλά χρειάζεται η κρίση του μηχανικού για την τοποθέτηση τιμών στις παραμέτρους των σταθμών επιτελεστικότητας, οι οποίες αποδείχτηκε ότι είναι αρκετά μικρές άρα δημιουργούνται καμπύλες που αδυνατούν να περιγράψουν επίπεδα υψηλών βλαβών παρότι ονομάζονται «ισχυρές» και «κυρίαρχες».

#### 5.2.4 Χαρακτηρισμός της εδαφικής κίνησης

Στις σχέσεις τρωτότητας ο οριζόντιος άξονας αναφέρεται στη σεισμική απαίτηση. Το επιλεγόμενο μέτρο πρέπει να είναι ικανό να εκφράσει την επίδραση της πηγής, της διαδρομής και της θέσης στην ισχυρή εδαφική κίνηση και να εκτιμηθεί ανεξάρτητα από τη σεισμική ευπάθεια του κτηρίου στο οποίο υποβάλλεται η κίνηση. Ωστόσο, πολλές υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας υιοθετούν εντάσεις για το χαρακτηρισμό της εδαφικής κίνησης, οι οποίες προκύπτουν από παρατηρήσεις των σεισμικών επιδράσεων και γι' αυτό ενσωματώνουν στοιχεία της κατασκευαστικής τρωτότητας. Η ένταση έχει το πρόσθετο μειονέκτημα ότι αποτελεί υποκειμενική και δυσδιάκριτη κλίμακα, μη σχετιζόμενη με αξιόπιστες σχέσεις εξασθένισης. Οι Yamazaki και Murao υιοθέτησαν τιμές της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV) για το χαρακτηρισμό της σεισμικής απαίτησης. Ωστόσο, χρησιμοποιούν μια επαναληπτική μεθοδολογία παραγωγής στην οποία οι τιμές ταχύτητας επαναπροσδιορίζονται και η σχετιζόμενες πιθανότητες υπέρβασης βλαβών τροποποιούνται ώστε οι άξονες των παραγόμενων καμπυλών τρωτότητας να είναι σημαντικά εξαρτώμενοι, άρα ο άξονας της εδαφικής κίνησης δεν είναι πλέον αντιπροσωπευτικός αυτού που αρχικά παρατηρήθηκε. Η χρήση μιας εδαφικής παραμέτρου σχετιζόμενης με τις κατασκευαστικές βλάβες οδηγεί τελικά σε μειωμένη διασπορά των αποτελεσμάτων και παραπλανητική αίσθηση εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου.

#### 5.2.5 Επαλήθευση χρησιμοποιώντας δεδομένα παρατηρήσεων πεδίου

Η εγκυρότητα των καμπυλών τρωτότητας καθορίζεται μέσω σύγκρισης με πραγματικές παρατηρήσεις μετασεισμικών καταστροφών. Προκαλεί έκπληξη τι ότι οι υπάρχουσες καμπύλες σπανίως έχουν επαληθευτεί με παρατηρήσεις πεδίου πέραν αυτών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία τους. Οι παραγόμενες καμπύλες τρωτότητας για μη ευρωπαϊκές χώρες μπορεί να είναι εξαρτώμενες από τη θέση ή από διάφορες υποθέσεις αναφορικά με τη σύνθεση του πληθυσμού των κτηρίων.

Ωστόσο, είναι πιθανό αν οι εξισώσεις τρωτότητας διαφέρουν μεταξύ της σεισμικής αντίστασης των κατασκευών με διακριτά συστήματα πλευρικής αντίστασης, υψόμετρα και αντισεισμικούς κανονισμούς σχεδίασης, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αποτίμηση των ευρωπαϊκών κτηρίων με παρόμοια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Αυτή η παραδοχή υποδηλώνει ότι ένας επαρκής βαθμός κατασκευαστικών αβεβαιοτήτων περιλαμβάνεται στην παραγωγή των καμπυλών ώστε να περιοριστούν οποιεσδήποτε διαφοροποιήσεις αφορούν τις κατασκευαστικές μεθόδους και λεπτομέρειες που μπορεί να διαφέρουν σε διάφορες τοποθεσίες. Για τον προσδιορισμό της εγκυρότητας της προκειμένης υπόθεσης, διεξάγεται μια σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων κινδύνου από τις υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας και των παρατηρήσεων πεδίου που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία για ευρωπαϊκές κατασκευές. Οι καμπύλες τρωτότητας που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση επιλέχθηκαν από κάθε κατηγορία γενικής χρήσεως ως οι πιο σχετικές με τα ευρωπαϊκά κτήρια. Τα δεδομένα από τις παρατηρήσεις πεδίου προέκυψαν από εμπειρική βάση που μετατρέπεται σε κλίμακα βλάβης σχετιζόμενη με τις αναλυτικές καμπύλες που χρησιμοποιούνται στον **πίνακα 5.5**. Για τη διεξαγωγή της σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν δυο ομάδες παρατηρήσεων πεδίου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **πίνακα 5.1**.

Source	Structure type	Comparison with observations for European structures of the same lateral-load resisting system				Comparison with observations for structures of the same type, country and earthquake			
		No. of Datasets	No. of Bldgs	$\mu(\epsilon)^a$	$R^2$ <sup>b</sup>	No. of Datasets	No. of Bldgs	$\mu(\epsilon)$	$R^2$
Spence et al. [1]	Non-seismic Bare MRF	28	3306	0.39	0.55	–	–	–	–
Orsini [3]	Bare MRF	26	293636	0.64	0.50	16	2208	0.77	0.50
ATC-13 [7]	Non-ductile low-rise MRF	30	3682	0.44	0.52	4	1476	1.82	0.49
ATC-13 [7]	Non-ductile mid-rise MRF	8	290832	0.31	0.42	–	–	–	–
Singhal et al. [9]	Low-rise bare MRF	12	1842	0.10	0.38	4	1476	0.15	0.44
Singhal et al. [9]	Mid-rise bare MRF	8	290832	0.26	0.52	–	–	–	–
Mosalam et al. [11]	Low-rise bare MRF	14	291847	0.41	0.44	4	1476	1.54	0.49
Mosalam et al. [11]	Infilled Frame	8	1544	0.78	0.39	–	–	–	–

<sup>a</sup>  $\mu(\epsilon)$  = mean error in prediction.

<sup>b</sup>  $R^2$  = coefficient of correlation of the data to the fitted curves.

**Πίνακας 5.1:** Σύγκριση των υπάρχουσών καμπυλών τρωτότητας με στατιστικά στοιχεία από τις παρατηρήσεις πεδίου.

Στην πρώτη περίπτωση, τα δεδομένα αφορούν πληθυσμούς ευρωπαϊκών κατασκευών με το ίδιο σύστημα πλευρικής αντίστασης, όπως υποτίθεται από τις υπάρχουσες καμπύλες που χρησιμοποιούνται. Στη δεύτερη περίπτωση, η σύγκριση διεξάγεται χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις που έλαβαν χώρα μόνο για κατασκευές, χώρες και σεισμούς που καθορίζονται από τις υπάρχουσες καμπύλες τρωτότητας, όντας εντός των ορίων εφαρμογής τους. Και στις δυο περιπτώσεις παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογιζόμενων καμπυλών τρωτότητας, με τα μέσα σφάλματα στη δεύτερη περίπτωση να είναι σημαντικά μεγαλύτερα από αυτά της πρώτης. Αν και βασίζεται σε πολύ λίγες περιπτώσεις, αυτό το γεγονός προϋποθέτει ότι η αβεβαιότητα πρόβλεψης που σχετίζεται με την εφαρμογή των καμπυλών σε συγκεκριμένους τύπους κατασκευών

ανάλογα με τη χώρα κατασκευής είναι συγκρίσιμη με αυτή που προκύπτει από την εφαρμογή σε ευρωπαϊκά κτήρια με παρόμοιο κατασκευαστικό σχήμα. Αυτή η παρατήρηση υπαινίσσεται ότι η χρήση των μη ευρωπαϊκών καμπυλών τρωτότητας στην εκτίμηση σεισμικού κινδύνου στην Ευρώπη είναι πιθανή, δεδομένου της κατάλληλης θεώρησης της κτηριακής ομοιότητας. Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός των παρατηρήσεων πεδίου για παρόμοιες κατασκευές που προκύπτει από διαφορετικές χώρες και σεισμούς φαίνεται ότι ταιριάζει απόλυτα με την παραγωγή των νέων εμπειρικών συσχετίσεων.

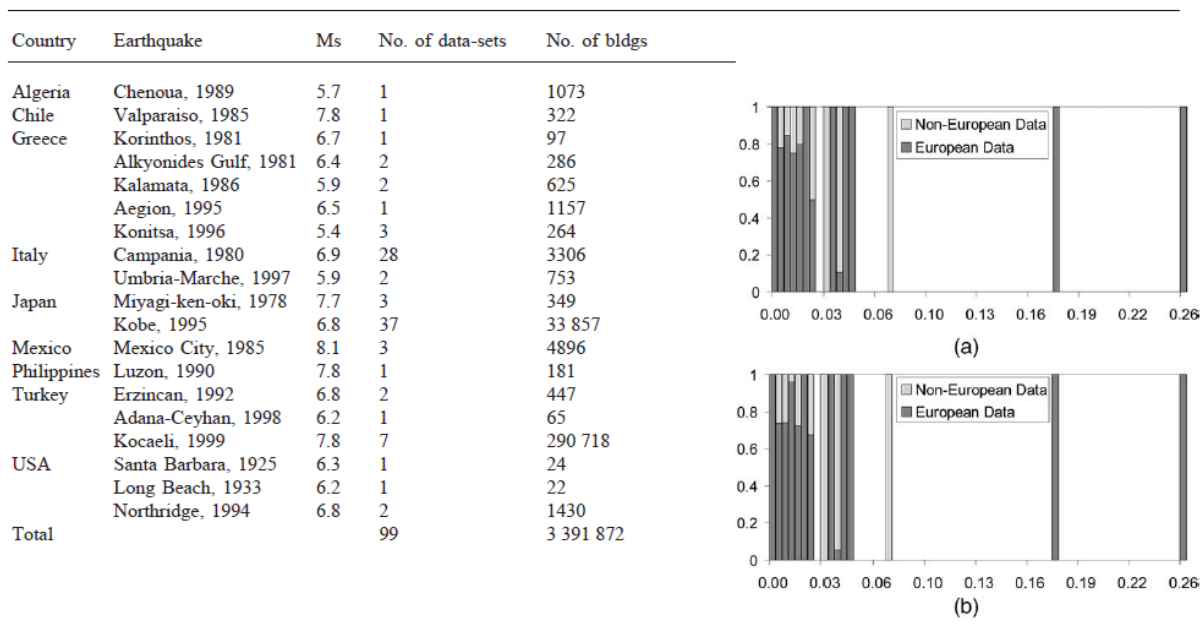
Παρά τα θετικά συμπεράσματα, η χρήση των επιθεωρημένων καμπυλών δε συνίσταται για εφαρμογή σε κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη. Η μικρή ποσότητα και το εύρος εδαφικής κίνησης των χρησιμοποιούμενων δεδομένων για την εξακρίβωση των αποτελεσμάτων μπορεί να περιέχουν παραπλανητικούς συντελεστές μεγάλων συσχετίσεων αλλά προκύπτουν σημαντικά λάθη πρόβλεψης σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό προέρχεται από το συνδυασμό των σφαλμάτων των εμπειρικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση και από τις υποθέσεις που έγιναν αναφορικά με την πηγή των δεδομένων βλάβης, την κατασκευαστική μονάδα και το χαρακτηρισμό της βλάβης και της εδαφικής κίνησης. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι προς το παρόν δεν υφίστανται καμπύλες τρωτότητας που να περιέχουν όλα τα απαραίτητα κριτήρια ώστε να αποτελέσουν ένα αξιόπιστο εργαλείο εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου στην Ευρώπη.

#### 5.2.6 Περιγραφή της βάσης δεδομένων των βλαβών

Στη συγκεκριμένη μελέτη παράγονται νέες εμπειρικές σχέσεις από μια βάση δεδομένων που αποτελείται από μετασεισμικές παρατηρήσεις βλαβών, οι οποίες συλλέχθηκαν από 29 δημοσιοποιημένες έρευνες πεδίου διεξαγόμενες από ερευνητικά κέντρα και κυβερνητικές ομάδες. Τη στατιστική βάση σχηματισμού των εξισώσεων απαρτίζουν 99 καταγραφές, καθεμιά από τις οποίες αποτελείται από διανομή βλαβών παρατηρούμενων σε ένα πληθυσμό κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος, ελεγμένου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία μετά τη δράση ενός σεισμικού γεγονότος. Για όλα τα δεδομένα περιλαμβάνονται καταγραφές πεδίου της εδαφικής κίνησης και πληροφορίες αναφορικά με το σεισμό και τη γεωλογία της περιοχής, ώστε να είναι επιτρεπτός ο ορισμός της παραμέτρου της σχετιζόμενης εδαφικής κίνησης. Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει συνολικά 340000 κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος και καταγραφές από 19 σεισμικά γεγονότα. Για να προκύψουν επαρκή δεδομένα για την παλινδρόμηση των καμπυλών τρωτότητας και για να καλυφθεί ένα μεγάλο εύρος εδαφικών κινήσεων, περιλήφθηκαν στη βάση δεδομένων στατιστικά δεδομένων βλαβών από μη ευρωπαϊκά σεισμικά γεγονότα. Παρ' όλα αυτά, δεν καθορίζει αποκλειστικά ο αριθμός των γεγονότων της βάσης δεδομένων το σχήμα της καμπύλης, αλλά η κατανομή τους σχετικά με τη σημαντικότητα της εδαφικής κίνησης. Ο **πίνακας 5.2** δείχνει ότι κατά μήκος του μεγαλύτερου τμήματος του εύρους της εδαφικής κίνησης, τα δεδομένα των ευρωπαϊκών σεισμών κυριαρχούν τόσο σε όρους βάσης δεδομένων όσο και αριθμού κατασκευών. Θεωρήθηκε μη ομοιόμορφη κατανομή του αριθμού των κατασκευών

μεταξύ διαφορετικών χωρών, σεισμικών γεγονότων και κτηριακών συστημάτων (πίνακες 5.2 και 5.3) και ως προς την επιλογή της κλίμακας βλάβης αλλά και ως προς τη μέθοδο παραγωγής της εμπειρικής καμπύλης.

Ακόμα, λήφθηκαν υπόψη μόνο στατιστικές παρατηρήσεων που αφορούν κατασκευές με παρόμοια πλευρική αντίσταση με αυτές που κατασκευάζονται στην Ευρώπη. Τα προκύπτοντα σφάλματα λόγω διαφοροποιήσεων στην κατασκευαστική πρακτική αποδείχτηκε ότι ήταν σχετικά μεγάλα σε κλίμακα εθνικού μεμονωμένου γεγονότος και διεθνούς πολλαπλού. Για το λόγο αυτό, δεδομένου ότι η παράμετρος εδαφικής κίνησης που επιλέχθηκε ρεαλιστικά εκπροσωπεί την επιβαλλόμενη σεισμική απαίτηση, η συσχέτιση των παρατηρούμενων δεδομένων για παρόμοιες κατασκευές που προκύπτουν σε διαφορετικές τοποθεσίες και για διαφορετικά σεισμικά γεγονότα είναι αμφίβολη. Η βάση δεδομένων περιέχει καταγραφές τόσο από επιλεκτικές έρευνες όσο και από πιο λεπτομερείς δευτερογενείς ερευνητικές διαδικασίες, με κάθε σύνολο παρατηρήσεων χαρακτηριζόμενο από τη χρήση διαφορετικών κλιμάκων βλάβης. Αυτή η ετερογένεια θέτει το μεγαλύτερο εμπόδιο στη συσχέτιση με τα εμπειρικά δεδομένα.



**Πίνακας 5.2:** Η σύνθεση της βάσης δεδομένων που προέκυψε από τις παρατηρήσεις πεδίου και η κατανομή της σχετιζόμενης αναλογίας ευρωπαϊκών και μη (α) καταγραφών και (β) κατασκευών με το  $S_{d5\%}$ .

Structural type		Bare MRF	Infilled MRF	Shear walls	Undefined system	Total
Total no. of datasets		43	8	1	47	99
Total no. of buildings		296 513	2720	322	40 317	339 872
Datasets discretised by height	Low-rise (< 3 floor)	36	8	0	10	54
	Med-rise (4-7 floor)	13	2	1	43	59
	High-rise (>8 floor)	6	2	0	8	16
Datasets deiscretised by seismic code	Pre-code	33	4	0	28	65
	Old-code	10	3	1	21	35
	New-code	0	1	0	2	3

**Πίνακας 5.3:** Η κατασκευαστική της εμπειρικής βάσης δεδομένων.

### 5.2.7 Μια νέα κλίμακα βλαβών για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος

Για τον προσδιορισμό εκτίμησης σεισμικού κινδύνου για πληθυσμό κτηρίων ποικίλης σύνθεσης, είναι απαραίτητη είτε η ανάπτυξη συνόλων καμπυλών τρωτότητας για διάφορους κτηριακούς τύπους όπου τα κριτήρια απόκρισης καθορίζονται σύμφωνα με τα κτηριακά χαρακτηριστικά, είτε η χρήση στατιστικών βλαβών από παρατηρήσεις πεδίου που παρέχουν μια συνολική σύνθεση στην καθορισμένη ομάδα κτηρίων. Πρακτικά, είναι αδύνατη η εύρεση της ποσότητας και του εύρους βλαβών που απαιτούνται για καθεμιά από αυτές τις προσεγγίσεις ώστε να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη των αποτελεσμάτων.

Για το λόγο αυτό προτείνεται μια νέα προσέγγιση όπου μπορούν να συνδυαστούν δεδομένα διαφορετικών κτηριακών συστημάτων για την παραγωγή μιας ομογενοποιημένης και γενικής ομάδας καμπυλών, εφαρμόσιμης σε όλες τις κατασκευές μέσω της χρήσης μιας κλίμακας βλαβών που λαμβάνει υπόψη τις διαφορές των βαθμών βλάβης μεταξύ των διαφορετικών τύπων κατασκευών. Η συγκεκριμένη κλίμακα βλάβης απαιτείται για την υιοθέτηση ορίων βλάβης σε όρους αναμενόμενης βλάβης σε διαφορετικά συστήματα κατασκευής και παραμέτρου απόκρισης κατασκευών ενδεικτική της παγκόσμιας στάθμης βλαβών. Ερευνήθηκαν οι υπάρχουσες κλίμακες βλαβών αλλά δεν κρίθηκαν κατάλληλες για χρήση στη γενική καμπύλη απόκρισης. Πολλές από αυτές χρησιμοποιούν αμφίβολες περιγραφές για τον καθορισμό του ορίου βλάβης και δε λαμβάνουν σαφώς υπόψη τις διαφορές στην πλευρική αντίσταση των κτηρίων διαφορετικών τύπων ή τις καταστροφές σε μη φέροντα μέλη. Ο ορισμός των ορίων βλάβης σε όρους παραμέτρων κτηριακής απόκρισης είναι σπάνιος και διεξάγεται χρησιμοποιώντας είτε πολύ συντηρητικές τιμές βασιζόμενες στην εμπειρία του μηχανικού, είτε πειραματικές βαθμονομήσεις βασιζόμενες σε ένα μικρό ποσοστό δεδομένων που δε σχετίζονται με το σύνολο των κατασκευών το οποίο καλύπτει η κλίμακα βλαβών. Στην περίπτωση κωδίκων αναμόρφωσης οι οποίοι υιοθετούν δυναμικές μεθόδους κτηριακής απόκρισης, οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων μπορεί να μην είναι αξιόπιστες ακόμα και αν βαθμονομήθηκαν εμπειρικά, καθώς μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικές των καθορισμένων μειώσεων αντοχής αντί για διαφορετικές στάθμες βλάβης.

Προτείνεται, λοιπόν, μια νέα κλίμακα βλαβών γνωστή ως η ομογενοποιημένη κλίμακα οπλισμένου σκυροδέματος (HRC), η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή των καμπυλών τρωτότητας. Η κλίμακα υποδιαιρείται σε επτά καταστάσεις βλαβών, καθεμιά από τις οποίες προσδιορίζεται στον **πίνακα 5.4** σε όρους τυπικής κτηριακής και μη κτηριακής αναμενόμενης βλάβης για τους τέσσερις βασικούς τύπους κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος που εντοπίζονται στην Ευρώπη. Τα όρια βλάβης περιγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από το δείκτη βλάβης HRC ( $DI_{HRC}$ ) ο οποίος παρέχει μια αριθμητική αναφορά για την πειραματική βαθμονόμηση με την κατασκευαστική παράμετρο απόκρισης του λόγου της μέγιστης σχετικής μετακίνησης των ορόφων ( $ISD_{max\%}$ ). Η βαθμονόμηση διεξάχθηκε χρησιμοποιώντας δημοσιοποιημένες καταγραφές 25 δυναμικών δοκιμών για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς και με τοιχοπλήρωση καθώς και με διατμητικά τοιχία, όπου



καταγράφηκαν η διάδοση της σεισμικής βλάβης και η σχετική μετακίνηση μεταξύ των ορόφων. Μέσω επεξήγησης της καταγραφείσας παγκόσμιας βλάβης, οι τιμές του συντελεστή βλάβης HRC εφαρμόστηκαν στα πειραματικά δείγματα, καταλήγοντας σε συνολικά 105 ζεύγη τιμών  $ISD_{max\%} - DI_{HRC}$ . Ακολούθως, διετάχθησαν μη γραμμικές παλινδρομήσεις και παράχθηκαν εξισώσεις για καθεμιά από τις κτηριακές κατηγορίες του **πίνακα 5.4** ξεχωριστά, καθώς και για γενικές κατασκευές άγνωστου συστήματος με το οποίο ανθίστανται στα σεισμικά φορτία. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις τροποποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα ψευδοδυναμικών δοκιμών από δυο πλαίσια πλήρους κλίμακας (ενός χωρίς και ενός με τοιχοπλήρωση) και δυο κατασκευών με διατμητικά τοιχία.

$DI_{HRC}$	DAMAGE STATE	DUCTILE MRF	NON-DUCTILE MRF	INFILLED MRF	SHEAR-WALL
0	None	No damage	No damage	No damage	No damage
10	Slight	Fine cracks in plaster partitions/infills	Fine cracks in plaster partitions/infills	Fine cracks in plaster partitions/infills	Fine cracks in plaster partitions/infills
20	Light	Start of structural damage	Start of structural damage	Cracking at wall-frame interfaces	Start of structural damage
30		Hairline cracking in beams and columns near joints (<1mm)	Hairline cracking in beams and columns near joints (<1mm)	Cracking initiates from corners of openings	Hairline cracking on shear-wall surfaces & coupling beams
40				Diagonal cracking of walls. Limited crushing of bricks at b/c connections	Onset of concrete spalling at a few locations
50	Moderate	Cracking in most beams & columns	Flexural & shear cracking in most beams & columns	Increased brick crushing at b/c connections	Most shear walls exhibit cracks
60		Some yielding in a limited number	Some yielding in a limited number	Start of structural damage	Some walls reach yield capacity
70		Larger flexural cracks & start of concrete spalling	Shear cracking & spalling is limited	Some diagonal shear cracking in members especially for exterior frames	Increased diagonal cracking & spalling at wall corners
80	Extensive	Ultimate capacity reached in some elements – large flexural cracking, concrete spalling & re-bar buckling	Loss of bond at lap-splices, bar pull-out, broken ties	Extensive cracking of infills, falling bricks, out-of-plane bulging	Most shear walls have exceeded yield, some reach ultimate capacity, boundary element distress seen.
90		Short column failure	Main re-bar may buckle or elements fail in shear	Partial failure of many infills, heavier damage in frame members, some fail in shear	Re-bar buckling, extensive cracking & through-wall cracks. Shear failure of some frame members
100	Partial Collapse	Collapse of a few columns, a building wing or single upper floor	Shear failure of many columns or impending soft-storey failure	Beams &/or columns fail in shear causing partial collapse. Near total infill failure	Coupling beams shattered and some shear walls fail
	Collapse	Complete or impending building collapse	Complete or soft-storey failure at ground floor	Complete or impending building collapse	Complete or impending building collapse

**Πίνακας 5.4:** Η κλίμακα HRC: τυπικές αναμενόμενες βλάβες σε πλάσιμα, μη πλάσιμα και τοιχοπληρούμενα καμπτικά πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος και κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος με διατμητικά τοιχία.

Οι τελικές εξισώσεις και οι συντελεστές συσχέτισης που προκύπτουν από την εφαρμογή των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζονται στις εξισώσεις [1-4], όπου το  $ISD_{max\%}$  εκφράζεται σε όρους ποσοστού.

- $R^2 = 0.991$  για μη πλάστιμα MRF  

$$DI_{HRC} = 34.89Ln(ISD_{max\%}) + 39.39 \quad [1]$$

- $R^2 = 0.822$  για πλαίσια με τοιχοπλήρωση  

$$DI_{HRC} = 22.49Ln(ISD_{max\%}) + 66.88 \quad [2]$$

- $R^2 = 0.985$  για συστήματα με διατμητικά τοιχία  

$$DI_{HRC} = 39.31Ln(ISD_{max\%}) + 52.98 \quad [3]$$

- $R^2 = 0.760$  για γενικές κατασκευές  

$$DI_{HRC} = 27.89Ln(ISD_{max\%}) + 56.36 \quad [4]$$

Οι συγκεκριμένες εξισώσεις χρησιμοποιούνται για τον ορισμό των ακραίων τιμών των ορίων βλαβών για την κλίμακα HRC που παρουσιάζεται στον **πίνακα 5.6** και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των πιθανοτήτων υπέρβασης κατά τη δημιουργία των καμπυλών τρωτότητας.

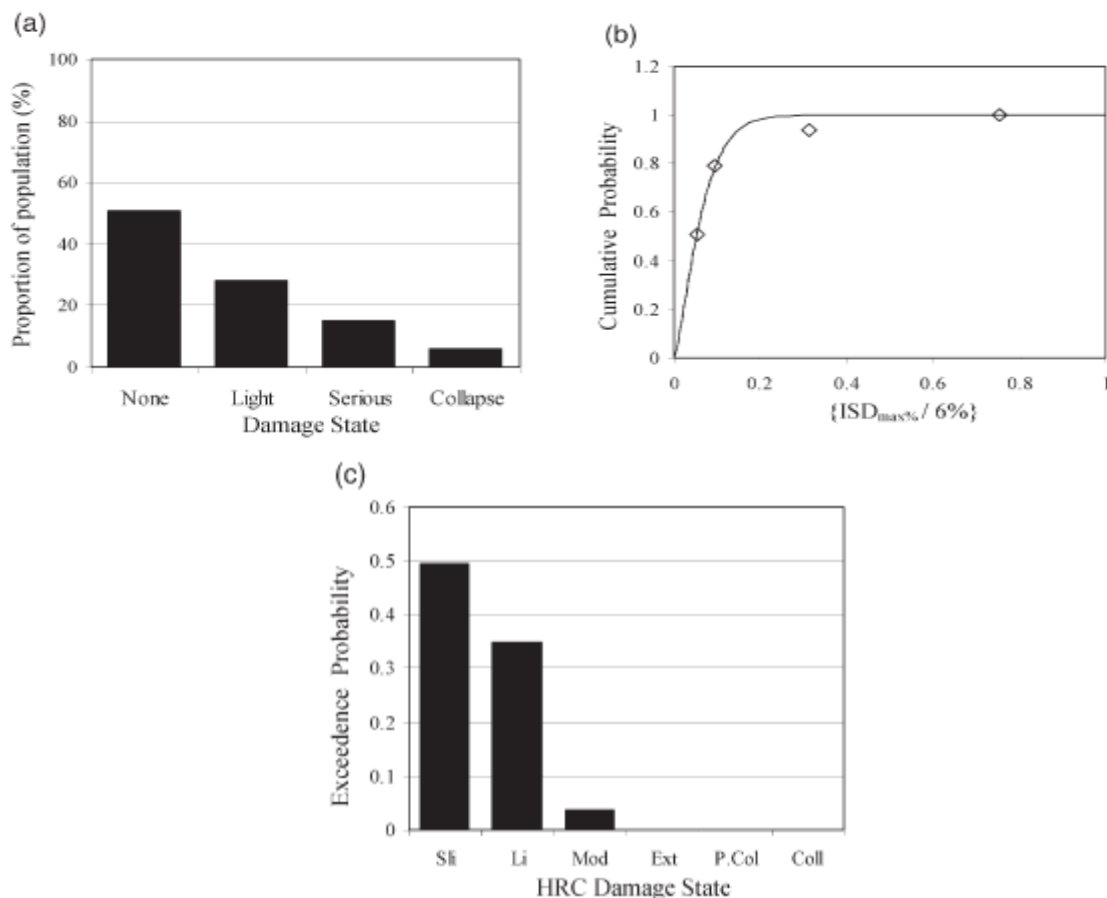
$DI_{HRC}$	HRC	HAZUS 1999 [17]	VISION 2000 [18]	FEMA 273 [19]	EMS98 [20]	MSK [2]	AIJ [5]	ATC-13 [7]	ATC-21 [21]	EPPO [22]
0	None	No damage limit state								
10	Slight	Slight damage	Fully operational	Immediate occupancy	Grade 1	D1	Light	Slight	Green Tag	Green Tag
20	Light		Operational	Damage control	Grade 2	D2	Minor	Light		
30								Moderate		
40	Moderate	Moderate damage	Life safe	Life safe	Grade 3	D3	Moderate	Moderate	Yellow Tag	Yellow Tag
50								Heavy		
60								Major		
70	Extensive	Extensive damage	Near collapse	Limited safety	Grade 4	D4	Major	Major	Red Tag	Red Tag
80				Major						
90	Partial Collapse	Collapse	Collapse	Collapse prevention	Grade 4	D4	Major	Major	Red Tag	Red Tag
100				Partial collapse						
	Collapse	Collapse limit state								

**Πίνακας 5.5:** Η ισοδυναμία μεταξύ των υπαρχουσών κλιμάκων βλάβης και της κλίμακας HRC για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος.

### 5.2.8 Παραγωγή των νέων καμπυλών τρωτότητας για την Ευρώπη

Οι εμπειρικές σχέσεις τρωτότητας για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη παράχθηκαν χρησιμοποιώντας τις 99 μετασεισμικές καταγραφές βλαβών που περιγράφονται στον **πίνακα 5.2**. Κάθε ομάδα δεδομένων μπορεί να οπτικοποιηθεί ως μια μπάρα διαγράμματος, όπου η αναλογία των εξεταζόμενων κτηρίων που βρίσκονται στην κάθε στάθμη βλάβης σχεδιάζεται δίπλα – δίπλα έτσι

ώστε να αυξηθεί η σημαντικότητα βλάβης. Καθώς η κάθε ομάδα δεδομένων είναι προσδιορισμένη σε όρους διαφορετικής κλίμακας βλαβών, τα διαγράμματα με μπάρες που προκύπτουν δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα. Επιπρόσθετα, η υπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής των βαθμών βλάβης κατά μήκος του οριζόντιου άξονα είναι φυσικά μη ρεαλιστική λόγω της μη γραμμικής φύσης της εξέλιξης της βλάβης στις κατασκευές. Έτσι, όλα τα δεδομένα τροποποιήθηκαν στην κλίμακα HRC ώστε να επιτραπεί η σύγκριση των διαφορετικών επιπέδων βλάβης που περιγράφονταν από ανόμοιες βάσεις δεδομένων και η περιγραφή των βλαβών με ένα ομοιόμορφο κριτήριο. Κατά συνέπεια, προσδιορίστηκαν τέσσερις πίνακες συσχέτισης (καθένας για κάθε σύστημα κατασκευής του **πίνακα 5.4**), μεταξύ της κλίμακας HRC και άλλων υπάρχοντων κλιμάκων κατά την προσωπική εκτίμηση των συγγραφέων των ορίων των σχετικών περιγραφών βλάβης των σταθμών επιτελεστικότητας. Στον **πίνακα 5.5** παρουσιάζεται μερικά δεδομένα συσχέτισης γενικών κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος που χρησιμοποιείται όταν οι τιμές  $DI_{HRC}$  δεν είναι άμεσα προσδιορίσιμες από τις μετασεισμικές παρατηρήσεις. Έπειτα, χρησιμοποιούνται οι **εξισώσεις [1-4]** για τη μετατροπή των δεικτών βλάβης στις ισοδύναμες τιμές  $ISD_{max\%}$ . Τα 99 δεδομένα ξανασχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας το λόγο της μέγιστης σχετικής μετακίνησης ορόφων (ομαλοποιημένο στο 6%) στον οριζόντιο άξονα (**εικόνα 5.2b**) και τις συνεχείς συναρτήσεις πιθανότητας διασποράς προσαρμοσμένες στον καθένα (**εικόνα 5.2c**).



**Εικόνα 5.2:** Μετατροπή των παρατηρούμενων στατιστικά βλαβών κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος στις Πλαταίες μετά το σεισμό της Κορίνθου (Ελλάδα, 1981) στην κλίμακα HRC.

Παρατηρήθηκε μια έκδηλη τάση στην απεικόνιση της συχνότητας βλαβών προς την κατεύθυνση των χαμηλών ή υψηλών επιπέδων βλάβης στην περίπτωση των ασθενών ή πολύ ισχυρών εδαφικών κινήσεων αντίστοιχα, κάτι το οποίο προσομοιώθηκε καλύτερα μέσω των συναρτήσεων διασποράς πιθανότητας  $\beta$  (beta).

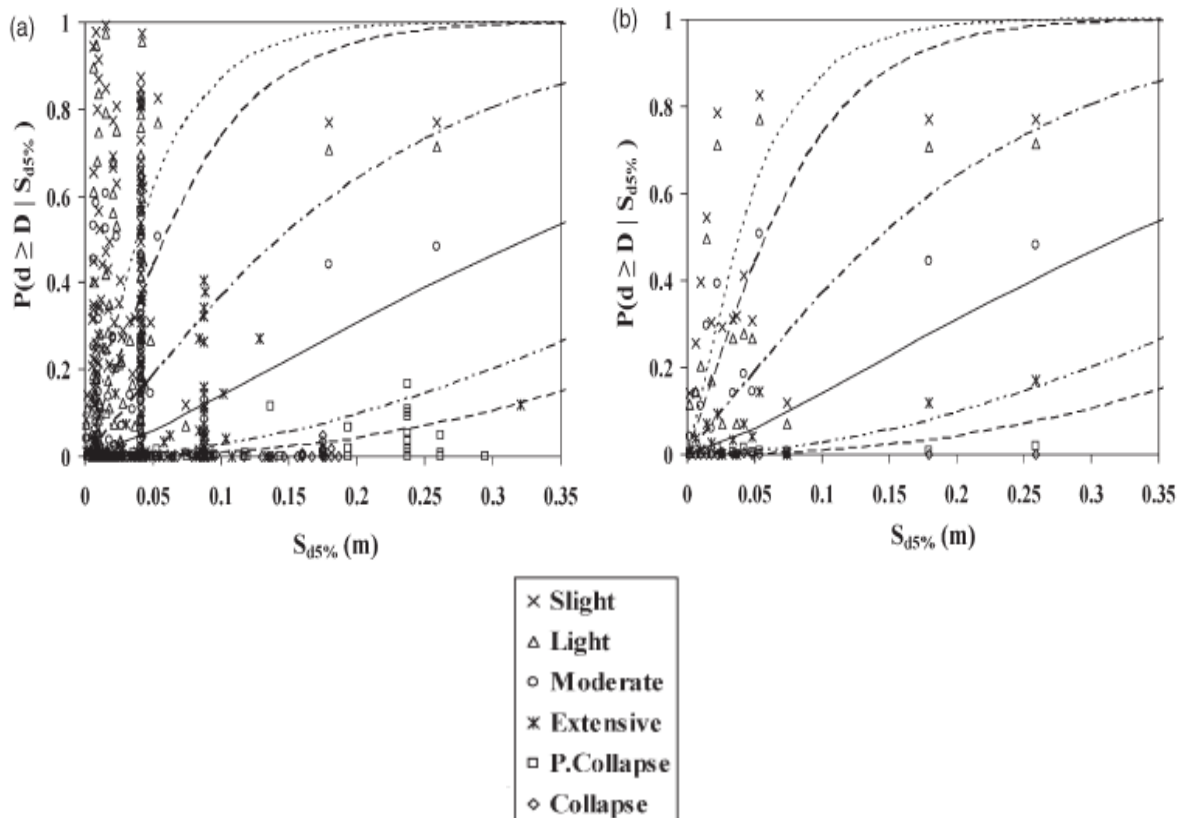
Οι συσσωρευτικές κατανομές  $\beta$  ακολούθως προσαρμόστηκαν σε καθεμιά εκ των 99 δεδομένων βλαβών, χρησιμοποιώντας ένα μη γραμμικό μοντέλο εξασθένισης που υπολογίζει τις τιμές των παραμέτρων σχήματος μέσω ελαχιστοποίησης των τετραγώνων των υπολοίπων. Οι πιθανότητες υπέρβασης της στάθμης βλαβών HRC προσδιορίστηκαν από τις προσαρμοσμένες αθροιστικές κατανομές, χρησιμοποιώντας τις τιμές των  $ISD_{max\%}$  όπως προσδιορίστηκαν στον **πίνακα 5.6** για το κάθε σύστημα κατασκευής. Έτσι, λοιπόν, προκύπτουν 99 τιμές πιθανότητας υπέρβασης της κάθε στάθμης επιτελεστικότητας της κλίμακας HRC, οι οποίες σχεδιάζονται σε συνάρτηση με την αντίστοιχη παράμετρο της εδαφικής κίνησης και σχηματίζουν μια καμπύλη τρωτότητας.

ISD <sub>max</sub> (%) limits for HRC-scale					HRC and FEMA- 273 [19] ISD <sub>max</sub> (%) limits					
HRC damage state	All	N-D MRF	Infilled MRF	Shear-walls	FEMA-273 damage state	N-D MRF		Shear-walls		
						HRC	F273	HRC	F273	
None	0.00	0.00	0.00	0.00	Immediate occupancy	0.00	0.00	0.00	0.00	
Slight	0.13	0.32	0.05	0.26		Life safety	1.36	1.00	0.93	0.50
Light	0.19	0.43	0.08	0.34	Collapse prevention		3.20	4.00	1.99	2.00
Moderate	0.56	1.02	0.30	0.72						
Extensive	1.63	2.41	1.15	1.54						
Part. Coll.	3.34	4.27	2.80	2.56						
Collapse	>4.78	>5.68	>4.36	>3.31						

**Πίνακας 5.6:** Οριακές τιμές του  $ISD_{max\%}$  που καθορίζει τα όρια βλάβης της κλίμακας HRC για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (All), για μη πλάσιμα κτήρια MRF, για κτήρια με τοιχοπληρώσεις και με διατμητικά τοιχεία.

Συχνά υιοθετείται ισοβαρής ανάλυση των σημείων πιθανότητας υπέρβασης λόγω των μικρών ποσοτήτων των θεωρούμενων παρατηρήσεων πεδίου. Στην παρούσα μελέτη απαιτείται ισοβαρής διαδικασία ώστε να διαχειριστούμε το σημαντικό ποσοστό των διαθέσιμων μη επεξεργασμένων αποτελεσμάτων και τη μεγάλη σχετιζόμενη διασπορά (**εικόνα 5.3a**). οι πιθανότητες υπέρβασης των βαθμών βλάβης για όμοιες εδαφικές κινήσεις προέκυψαν από κάθε ομάδα καταγραφών και έπειτα συνδυάστηκαν σύμφωνα με σχετικές παραμέτρους από τις παρατηρούμενες βλάβες στα κτήρια. Οι ισοβαρείς στατιστικές σχεδιάστηκαν ως προς τη μέση τιμή και τις μη γραμμικές εξασθενίσεις που διεξάχθηκαν ώστε να παραχθούν οι καμπύλες τρωτότητας (**εικόνα 5.3b**). Η ισοβαρής ανάλυση, εκτός του ότι διευκολύνει τον εντοπισμό χαρακτηριστικών τάσεων στις καταγραφές, μειώνει επίσης την επίδραση των μεμονωμένων σεισμικών γεγονότων και των μη ευρωπαϊκών γεγονότων στο σχήμα της καμπύλης. Η υψηλή συχνότητα των σεισμικών παρατηρήσεων μικρού μεγέθους σε χαμηλές εδαφικές κινήσεις, μειώνει την επίδραση οποιουδήποτε μεμονωμένου γεγονότος καθώς και οποιασδήποτε

παρατήρησης μεγάλου μεγέθους στην περιοχή αυτή. Καθώς συνδυάζονται πιθανότητες υπέρβασης επιπέδων βλαβών αντί για βλαμμένα μέλη κατασκευών για τον προσδιορισμό των καμπυλών τρωτότητας, η επίδραση των δεδομένων με μεγάλο αριθμό δείγματος μειώνεται και δεν παρατηρείται να επηρεάζει υπερβολικά το σχήμα της καμπύλης σε χαμηλά επίπεδα εδαφικής κίνησης. Το γεγονός αυτό πραγματοποιείται ακόμα και στην περίπτωση του σεισμού του Kocaeli (Τουρκία, 1999) για τον οποίο υπάρχουν ομάδες καταγραφών μεγάλες σε μέγεθος δεδομένων. Ο σεισμός αυτός παρέχει μια πληθώρα πηγή δεδομένων για βλάβες για μια ποικιλία κτηριακών τύπων και αποτελεί μια μοναδική πηγή ευρωπαϊκών παρατηρήσεων στο εύρος ισχυρών εδαφικών κινήσεων. Η επίδρασή του στο σχήμα των καμπυλών τρωτότητας στο εν λόγω εύρος φαίνεται να είναι σημαντική αλλά εξαρτάται από την υψηλή εξάρτηση από τα δεδομένα και το πόσο αυτά σχετίζονται με τα σενάρια εκτίμησης του ευρωπαϊκού σεισμικού κινδύνου.



**Εικόνα 5.3:** Οι τελικές ομογενοποιημένες καμπύλες τρωτότητας για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος συγκρινόμενες με (a) τις μη σταθμισμένες και (b) τις σταθμισμένες παρατηρήσεις πεδίου.

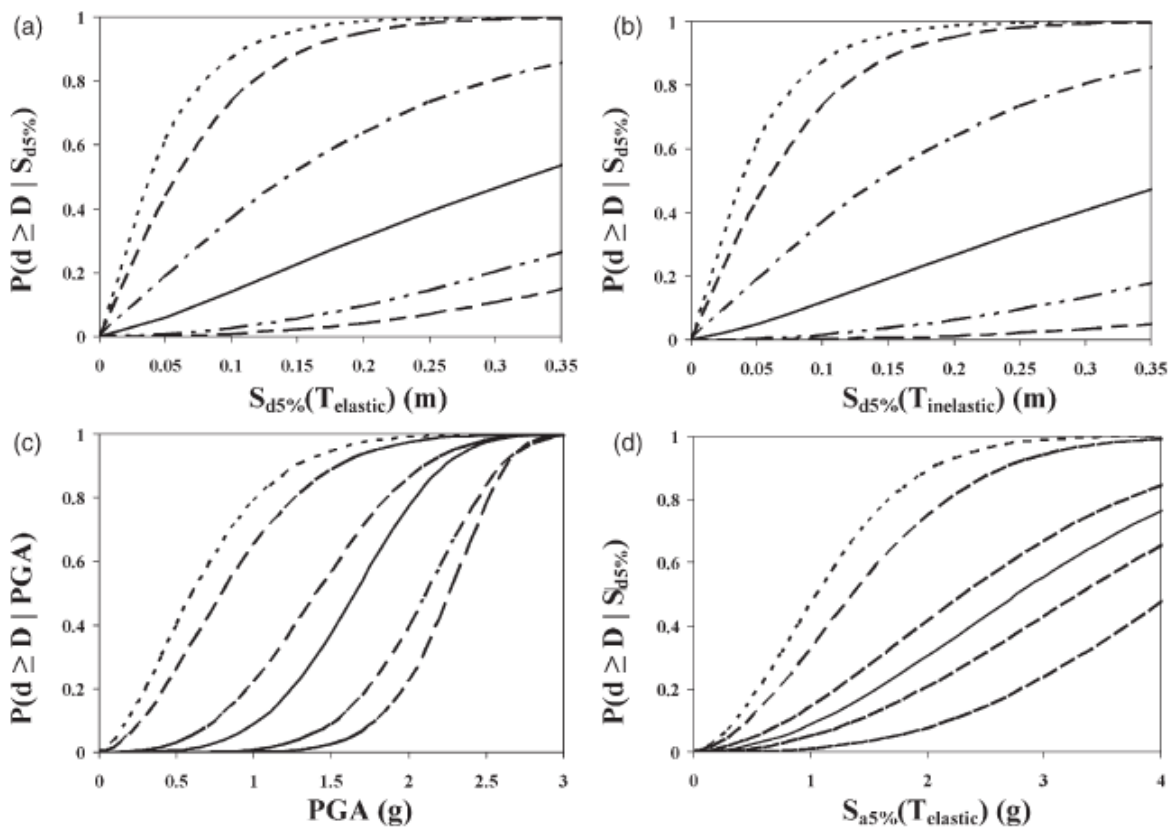
Η έλλειψη πολλών παρατηρήσεων για το εύρος μεγάλων συχνοτήτων παραδόξως δεν οδηγεί σε μεγάλα όρια εμπιστοσύνης που σχετίζονται με την αβεβαιότητα του σχήματος των καμπυλών. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης πολλαπλές αθροιστικές σχέσεις διακύμανσης ώστε να μοντελοποιηθούν τα σχήματα καμπυλών τρωτότητας και διεξήχθη σύγκριση των μοντέλων θεωρώντας φασματικές παραμέτρους εξαρτώμενες τόσο από τα μέγιστα επιταχύνσεων όσο και



μετακινήσεων. Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες σχέσεις στις υπάρχουσες καμπύλες είναι αθροιστικές κανονικές και λογαριθμικές κατανομές, ωστόσο, μετά από πολλές δοκιμές βρέθηκε ότι η σχέση που παρουσιάζεται στην **εξίσωση [5]** αποφέρει την καλύτερη προσαρμογή σε όλες τις θεωρούμενες παραμέτρους της εδαφικής κίνησης ( $GM$ ). Η εν λόγω σχέση χρησιμοποιείται για την παραγωγή εμπειρικών καμπυλών τρωτότητας, με τις παραμέτρους  $\alpha$  και  $\beta$  να καθορίζονται από γραμμική παλινδρόμηση των διαγραμμάτων των παρατηρήσεων πεδίου.

$$P(d \geq DI_{HRC} | GM) = 1 - \exp(-a \cdot GM^\beta) \quad [5]$$

Έτσι, δημιουργούνται καμπύλες τρωτότητας χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης ( $PGA$ ), τιμές επιταχύνσεων και μετακινήσεων για 5% απόσβεση ( $S_{a5\%}(T_{elastic})$  και  $S_{d5\%}(T_{elastic})$ ) και τιμές ανελαστικών φασματικών μετακινήσεων εξαρτώμενες από διάφορες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας ( $S_{d\mu\%}(T_{inelastic})$ ) (**εικόνα 5.4**). Στις περιοχές με διαθεσιμότητα καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων, αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων των καμπυλών τρωτότητας ειδάλλως οι σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης επιλέχθηκαν βασιζόμενες στην τοποθεσία της περιοχής και στον αντίστοιχο μηχανισμό του ρήγματος.



**Εικόνα 5.4:** Εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για διαφορετικές εδαφικές παραμέτρους.

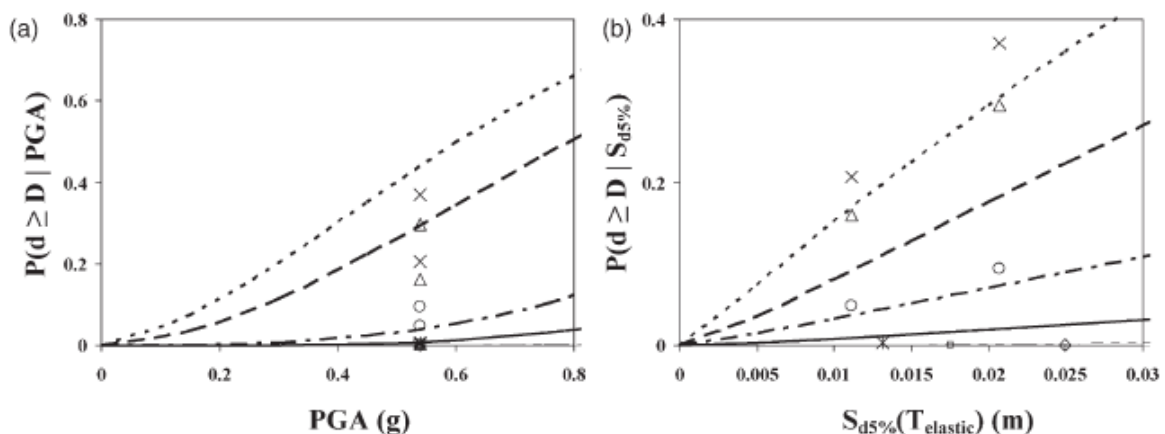
Στην περίπτωση της θεώρησης των  $PGA$  και  $S_{a5\%}(T_{elastic})$  χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των Ambraseys et al. για βάσεις δεδομένων που αφορούν περιοχές της Ευρώπης και της Μέσης Ανατολής, των Joyner – Boore για τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και των Youngs και Chiou για την Ιαπωνία, τη Χιλή και το Μεξικό. Για τις

φασματικές μετακινήσεις χρησιμοποιήθηκε η σχέση των Borzi et al. για όλες τις περιοχές. Αν δεν παρατηρούνταν συγκεκριμένη εκτίμηση της τυπικής περιόδου κατασκευής, αυτή εκτιμούνταν από το κυρίαρχο ύψος των κατασκευών χρησιμοποιώντας τις σχέσεις του ευρωκώδικα 8. Η παράμετρος  $S_{d\mu\%}(T_{inelastic})$  χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της επίδρασης των βλαβών, της επιμήκυνσης της περιόδου και της αύξησης απορρόφησης ενέργειας της σεισμικής απαίτησης. Οι τιμές πλαστιμότητας που σχετίζονται με τις καμπύλες διαφορετικών επιπέδων βλάβης υπολογίστηκαν θεωρώντας μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφων ίδιας τιμής για όλους τους ορόφους του κτηρίου (**πίνακας 5.6**) και ότι η μέση στάθμη βλαβών αντιστοιχεί στη διαρροή της κατασκευής (δηλαδή για τυπικές κατασκευές είναι  $\mu= 2, 4.15$  και  $6$  για «εκτεταμένη», «μερική κατάρρευση» και «κατάρρευση» αντίστοιχα). Οι προκύπτουσες πλαστιμότητες χρησιμοποιήθηκαν ακολούθως για τον υπολογισμό της απόσβεσης, της ανελαστικής περιόδου και της αντίστοιχης ανελαστικής φασματικής μετακίνησης για όλα τα επίπεδα βλαβών. Οι εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας που προκύπτουν τελικά, παρουσιάζονται στον **πίνακα 5.7**. Μια αύξηση της πιθανότητας βλάβης οδηγεί σε αύξηση της σεισμικής απαίτησης γι' αυτό καθώς χρησιμοποιούνται οι ίδιες πηγές δεδομένων στις σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης, η συσχέτιση των καμπυλών με τις παρατηρήσεις πεδίου υποδηλώνει ότι οι παράμετροι των εξισώσεων αποτελούν καλούς δείκτες μέτρησης του σεισμικού κινδύνου.

HRC damage state	Curve parameters						Bldgs	Non-weighted data				Weighted data			
	Mean		U90%		L90%			Data sets	$\mu(\epsilon)$	cov ( $\epsilon$ )	R <sup>2</sup>	Data sets	$\mu(\epsilon)$	cov ( $\epsilon$ )	R <sup>2</sup>
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$									
<b>PGA</b>															
Slight	1.556	1.60	3.950	1.60	0.830	1.60	339872	99	0.27	0.80	0.37	9	0.37	0.77	0.33
Light	1.055	1.80	2.732	1.80	0.620	1.80	339187	90	0.24	1.04	0.29	8	0.37	0.76	0.35
Moderate	0.250	3.00	0.903	3.00	0.102	3.00	331702	69	0.21	0.96	0.34	8	0.26	0.74	0.36
Extensive	0.093	4.00	0.538	4.00	0.010	4.00	329152	49	0.08	1.32	0.27	7	0.08	0.92	0.36
P.Collapse	0.009	5.80	0.162	5.80	0.001	5.80	292839	35	0.03	1.41	0.26	7	0.01	0.78	0.39
Collapse	0.001	8.00	0.005	8.00	0.001	8.00	77876	24	0.01	1.42	0.26	4	0.00	1.51	0.28
<b><math>S_{a5\%}(T_{elastic})</math></b>															
Slight	0.633	1.80	1.865	1.80	0.192	1.80	339872	99	0.25	0.84	0.39	15	0.30	1.04	0.39
Light	0.396	1.80	1.356	1.80	0.116	1.80	339187	90	0.22	1.05	0.30	15	0.29	1.05	0.37
Moderate	0.153	1.80	0.524	1.80	0.041	1.80	331702	69	0.17	1.07	0.28	14	0.19	0.99	0.39
Extensive	0.090	2.00	0.447	2.00	0.036	2.00	329152	49	0.08	1.13	0.26	14	0.08	1.00	0.52
P.Collapse	0.050	2.20	0.265	2.20	0.031	2.20	292839	35	0.04	1.40	0.40	13	0.05	1.68	0.49
Collapse	0.010	3.00	0.056	3.00	0.006	3.00	77876	24	0.01	2.29	0.44	8	0.03	2.27	0.49
<b><math>S_{d5\%}(T_{elastic})</math></b>															
Slight	25.82	1.10	76.45	1.10	13.72	1.10	339872	99	0.23	0.83	0.37	15	0.23	1.25	0.58
Light	21.08	1.20	73.88	1.20	8.350	1.20	339187	90	0.23	0.93	0.30	15	0.22	1.27	0.59
Moderate	6.500	1.15	29.57	1.15	2.342	1.15	331702	69	0.17	1.02	0.30	14	0.14	1.37	0.50
Extensive	3.000	1.30	17.52	1.30	1.323	1.30	329152	49	0.07	1.32	0.28	13	0.06	0.97	0.49
P.Collapse	2.500	2.00	13.45	2.00	1.200	2.00	292839	35	0.03	1.37	0.28	12	0.02	0.72	0.47
Collapse	2.000	2.40	9.37	2.40	1.119	2.40	77876	24	0.01	1.62	0.36	6	0.02	1.07	0.29
<b><math>S_{d\mu\%}(T_{inelastic})</math></b>															
Extensive	2.500	1.30	10.18	1.30	0.926	1.30	329152	49	0.08	1.27	0.28	19	0.07	1.56	0.57
P.Collapse	1.600	2.00	7.497	2.00	0.740	2.00	292839	35	0.03	1.40	0.27	16	0.06	1.60	0.48
Collapse	0.600	2.40	1.076	2.40	0.125	2.40	77876	24	0.01	1.42	0.27	5	0.003	0.76	0.45

**Πίνακας 5.7:** Σύνοψη των εμπειρικών καμπυλών τρωτότητας για διαφορετικές παραμέτρους εδαφικών κινήσεων και προσαρμογή τους στις παρατηρήσεις πεδίου.

Η συσχέτιση είναι γενικότερα ασθενής και υφίσταται σημαντικό μέσο σφάλμα σε όλες τις περιπτώσεις. Ακόμα, η PGA δεν αποτελεί τόσο καλό μέτρο προσέγγισης όσο οι φασματικές παράμετροι, καθώς δε μπορεί να λάβει υπόψη τη σεισμική διάρκεια, τους καταγραφόμενους κύκλους φόρτισης, το συχνοτικό περιεχόμενο και τις μέγιστες τιμές του ή την επίδραση των δυναμικών παραμέτρων των κτηρίων και της γεωλογίας της περιοχής στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου (**εικόνα 5.5**). Οι καμπύλες τρωτότητας που προέκυψαν από τη χρήση των φασματικών μετακινήσεων παρουσιάζουν καλύτερη συσχέτιση με τις εμπειρικές παρατηρήσεις απ' ό,τι αυτές που προέκυψαν από τις φασματικές επιταχύνσεις και έτσι αποδεικνύεται η υπεροχή των μετακινήσεων στην αναπαράσταση της πιθανότητας εμφάνισης βλαβών. Στην περίπτωση του  $S_{d\mu\%}(T_{inelastic})$  η συσχέτιση για υψηλότερα επίπεδα βλαβών βελτιώνεται συγκρινόμενη με την  $S_{d5\%}(T_{elastic})$  και τότε το εύρος των ορίων εμπιστοσύνης μειώνεται σημαντικά. Η συγκεκριμένη παράμετρος είναι πολλά υποσχόμενη αλλά λόγω της ανεπάρκειας δεδομένων για υψηλές στάθμες βλαβών, απαιτείται πρόσθετη έρευνα. Οι τελικώς προτεινόμενες καμπύλες τρωτότητας υιοθετούν την  $S_{d5\%}(T_{elastic})$  και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα σχεδιασμό βασιζόμενο στις μετακινήσεις.



**Εικόνα 5.5:** Παράδειγμα της διαφοροποίησης της κατανομής των σημείων τρωτότητας για διαφορετικές παραμέτρους εδαφικής κίνησης χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις κτηριακών βλαβών χαμηλού και μεσαίου ύψους (μικρά και μεγάλα σύμβολα αντίστοιχα) στο Αίγιο μετά το σεισμό του Αιγίου (Ελλάδα, 1995).

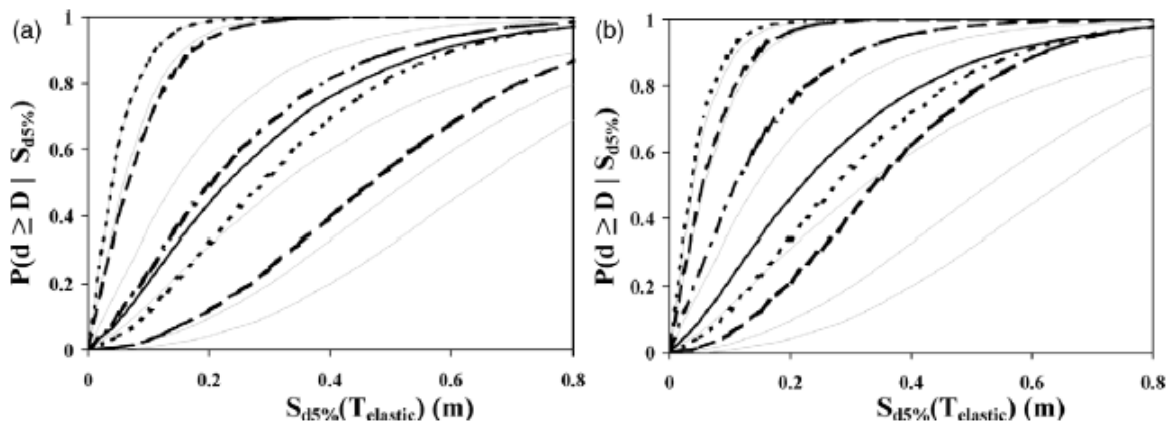
Οι καμπύλες τρωτότητας του **πίνακα 5.7** είναι ομοιογενείς καθώς συνδυάζουν όλα τα διατιθέμενα δεδομένα παρατηρήσεων πεδίου ανεξαρτήτως του τύπου της κατασκευής. Αυτό προϋποθέτει ότι η χρήση της κλίμακας βλαβών HRC, που διαφέρει για κτήρια με διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά, είναι επαρκής για την εξάλειψη της εξάρτησης από της καμπύλης το σχήμα, ανάλογα με τον τύπο κατασκευής. Για τον έλεγχο αυτής της υπόθεσης, έγινε επαναπροσδιορισμός των καμπυλών τρωτότητας, λαμβάνοντας υπόψη υποσύνολα των παρατηρούμενων δεδομένων που ανήκουν σε διαφορετικά συστήματα κτηριακής αντίστασης, διαφορετικούς αντισεισμικούς κανονισμούς και ομάδες ύψους κτηρίων του **πίνακα**



**5.3.** Με τη νέα διαδικασία, τα ανεπαρκή εμπειρικά δεδομένα είναι ικανά να παράξουν καμπύλες τρωτότητας με αποτελέσματα άμεσα συγκρίσιμα με τις γενικές καμπύλες ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η επίδραση διαφόρων παραγόντων.

Στην περίπτωση των κτηρίων στα οποία τα πλαίσια περιέχουν τοιχοπληρώσεις, η τρωτότητα ελαφρών υποεκτιμάται από τις γενικές καμπύλες στο εύρος χαμηλών βλαβών, ενώ δεν παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση στα υψηλά επίπεδα βλαβών και μόνο μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των σχημάτων γενικών και των κενών πλαισίων MRF των καμπυλών παρουσιάζονται στην περίπτωση ενδιάμεσου βαθμού βλαβών. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται παρόμοιες τιμές συσχέτισης και προβλεπόμενα σφάλματα και στην περίπτωση πρόβλεψης βαθμού βλαβών κτηρίων με ή χωρίς τοιχοπληρώσεις, με καμπύλες εξαρτώμενες από συγκεκριμένο τύπο κατασκευής. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η επίδραση του μη φέροντος τοίχου πλήρωσης στην κτηριακή απόκριση δεν επηρεάζει καθοριστικά το σχήμα της καμπύλης και γι' αυτό οι ομογενοποιημένες καμπύλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό εμπιστοσύνης για την πρόβλεψη βλαβών σε αυτού του είδους τις κατασκευές. Ακόμα, υπάρχουν ανεπαρκή δεδομένα για την εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος αναφορικά με κατασκευές που διαθέτουν διατμητικά τοιχία, συνεπώς συνίσταται να μη γίνεται χρήση των ομογενοποιημένων καμπυλών ή του κατώτατου ορίου εμπιστοσύνης 90% των γενικών καμπυλών σε αυτή την περίπτωση. Λόγω απώλειας πειραματικών δεδομένων για τη βαθμονόμηση, δε λαμβάνονται υπόψη στις καμπύλες HRC τα διαφορετικά επίπεδα του κατασκευαστικού σεισμικού σχεδιασμού ή της ποιότητας των κατασκευών και γι' αυτό η επίδραση αυτών των παραγόντων δεν έχει αφαιρεθεί επιτυχώς από τις γενικές καμπύλες. Αυτό φαίνεται εντονότερα από τη σημαντική επίδραση του ύψους της κατασκευής και του διαφορετικού σεισμικού κανονισμού σχεδιασμού στα όρια βλαβών των καμπυλών «λιγοστών βλαβών» και «εκτεταμένων βλαβών». Οι γενικές καμπύλες τείνουν να υπερεκτιμούν τις παρατηρούμενες βλάβες σε χαμηλά κτήρια με καμπυλικά πλαίσια στο εύρος των χαμηλών ορίων βλαβών και να τις υποεκτιμούν για υψηλότερες στάθμες βλαβών (*εικόνα 5.6α*), ενώ το αντίθετο παρατηρείται στην περίπτωση κτισμάτων ενδιάμεσου υψομέτρου. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των ομοιογενών και των εξαρτώμενων από το υψόμετρο καμπυλών αποδίδονται στους τυπικά διαφορετικούς κτηριακούς κανονισμούς που χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό των κτηρίων διαφορετικών κατηγοριών υψομέτρων.

Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται και από τις παρατηρούμενες βλάβες σε υψηλά κτήρια χωρίς τοιχοπλήρωση, οι οποίες υπερεκτιμώνται από τις ομοιογενείς καμπύλες σε ισχυρές εδαφικές κινήσεις λόγω της περίσσειας πλευρικής αντίστασης που διαθέτουν σε σχέση με τις κατασκευές χαμηλότερων υψομέτρων. Όταν οι παραγόμενες σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό καμπύλες συγκρίνονται με τις γενικές, οι τελευταίες παρουσιάζουν σημαντική υπό και υπερεκτίμηση της τρωτότητας των κτηρίων που δεν υπόκεινται σε αντισεισμικό κανονισμό και αυτών που σχεδιάστηκαν με παλαιότερους κανονισμούς αντίστοιχα. Λόγω της έλλειψης παρατηρήσεων, δε μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με τις κατασκευές που είναι σχεδιασμένες σύμφωνα με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς.



**Εικόνα 5.6:** Σύγκριση των ομοιογενοποιημένων καμπυλών (γκρι γραμμές) με τις καμπύλες τρωτότητας που παράγονται για ειδικές κατηγορίες κτηρίων (διακεκομμένες μαύρες γραμμές): (α) πλαίσια χαμηλού ύψους και (β) πλαίσια που κατασκευάστηκαν πριν τη δημιουργία κανονισμών.

Η διαφορές στα σχήματα των καμπυλών οφείλονται κυρίως στην απουσία σχεδιασμού αντοχών, όπου προκαλεί καταστροφές στις κατασκευές με κυρίαρχη μορφή βλάβης το σχηματισμό μαλακών ορόφων. Αυτός ο τρόπος αστοχίας σχετίζεται με μια ταχεία μετάβαση από τα χαμηλά όρια βλάβης στο όριο κατάρρευσης, κάτι που αντικατοπτρίζεται στις καμπύλες τρωτότητας που υπήρχαν πριν τη δημιουργία αντισεισμικών κανονισμών, με μια πλησιέστερη προσέγγιση των καμπυλών και μια ταχύτερη αύξηση των τιμών τους με την αύξηση της εδαφικής κίνησης. Η συνεισφορά της κακής ποιότητας κατασκευής και της ανομοιομορφίας στις παρατηρούμενες αστοχίες είναι ο βασικότερος παράγοντας της μεγάλης υποεκτίμησης βλάβης σε κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος από τις ομογενοποιημένες καμπύλες.

Ο κτηριακός τύπος, το ύψος της κατασκευής και οι σχέσεις τρωτότητας των κανονισμών σχετίζονται με υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης και χαμηλότερα προβλεπόμενα σφάλματα από ότι οι ομογενοποιημένες καμπύλες, ωστόσο το μέγεθος της διασποράς παραμένει μεγάλο. Τόσο οι ομογενοποιημένες καμπύλες όσο και οι εξαρτώμενες από διάφορες κατηγορίες υποθέτουν ότι δεδομένα βλαβών διαφορετικών χωρών και σεισμικών γεγονότων μπορούν να συνδυαστούν αν πρόκειται για ίδια κτηριακή απόκριση αναφορικά με την πλευρική αντίσταση στα σεισμικά φορτία. Οι προτεινόμενες σχέσεις προσεγγίζουν καλύτερα τα δεδομένα βλαβών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τους απ' ότι τα δεδομένα άλλων εμπειρικών καμπυλών, παρά τον σημαντικά αυξημένο αριθμό καταγραφών και θεωρούμενων κτηριακών τύπων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των επιπέδων βλαβών, οι πιθανότητες υπέρβασης και η επιλογή των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης ομογενοποιούν σημαντικά τη βάση δεδομένων που αποτελείται από παρατηρηθείσες βλάβες. Η διαφορά σχήματος μεταξύ των κατηγοριών καμπυλών τρωτότητας μπορεί μεμονωμένα να αποδοθεί στην επίδραση των κυρίαρχων κατηγοριών κατασκευής (μεσαίου ύψους κατασκευές παλαιών κανονισμών και μεγάλου ύψους κατασκευές

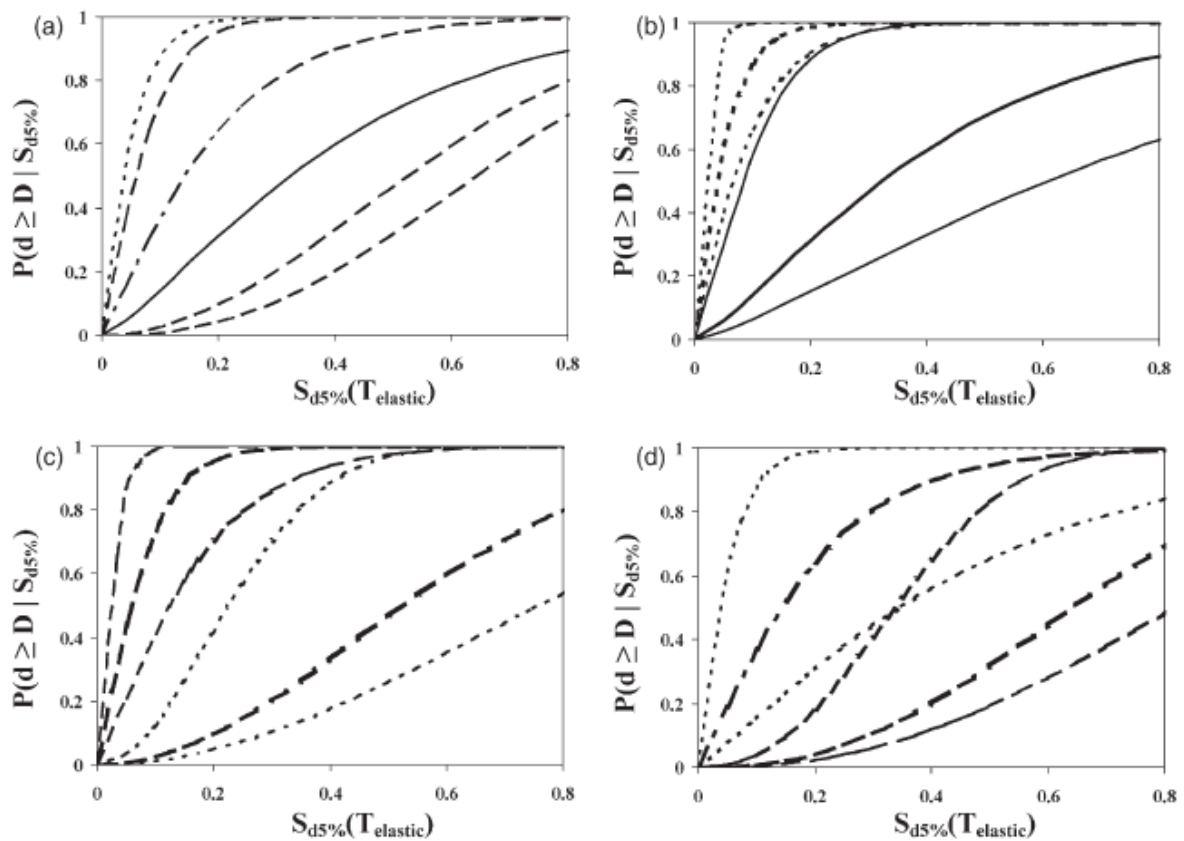
χωρίς κανονισμό). Παρόμοια διασπορά για μεμονωμένα και πολλαπλά γεγονότα τείνει να επιβεβαιώσει τη συνθήκη ότι η αβεβαιότητα οφείλεται σε λανθασμένη κατηγοριοποίηση των βλαβών των παρατηρήσεων πεδίου.

Για τη δημιουργία συντηρητικών εκτιμήσεων σεισμικού κινδύνου ορίστηκαν αυστηρά όρια εμπιστοσύνης των ομογενοποιημένων καμπυλών. Δε μπορεί να θεωρηθεί σταθερή τυπική απόκλιση από τη μέση πρόβλεψη για όλες τις καμπύλες και τα όρια βλαβών καθώς οι σχέσεις είναι μη γραμμικές, η κατανομή της διασποράς γύρω από τις καμπύλες δεν είναι σταθερή και υφίσταται πόλωση στην ποσότητα των δεδομένων για χαμηλά όρια βλαβών και εδαφικές κινήσεις. Γι' αυτό, η σχετιζόμενη εμπιστοσύνη με κάθε κατηγορία βλάβης καθορίστηκε κατά μήκος της καμπύλης τρωτότητας διαχωρίζοντας τον άξονα της εδαφικής κίνησης σε περαιτέρω τμήματα. Καθένα από τα τμήματα αυτά εξετάστηκε ξεχωριστά και υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση για κάθε επίπεδο βλάβης, εφαρμόστηκαν οι σχέσεις κατανομής του *Student – T*, προσδιορίστηκε το επίπεδο βλάβης για κάθε τμήμα και τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95% και 5%. Για να προκύψουν σχέσης της μορφής της **εξίσωσης [5]**, διεξάχθηκαν μη γραμμικές παλινδρομήσεις για το άνω και κάτω όριο εμπιστοσύνης 90% κάθε επιπέδου βλάβης. Στην **εικόνα 5.7** παρουσιάζονται διαστήματα εμπιστοσύνης μεγαλύτερου εύρους για όλα τα επίπεδα βλαβών, τα οποία είναι παρόμοια στο σχήμα με αυτά των Singhal και Kiremidjian των αναλυτικών καταγραφών. Σε χαμηλά επίπεδα βλάβης, προκύπτουν ευρεία όρια εμπιστοσύνης λόγω διασποράς που σχετίζεται με εσωτερικά σφάλματα των στατιστικών δεδομένων των παρατηρήσεων πεδίου, ενώ η απουσία μεγάλου αριθμού δεδομένων οδηγεί επίσης σε ευρύτερα όρια εμπιστοσύνης όταν εφαρμόζεται η κατανομή *Student – T* σε υψηλά επίπεδα βλαβών.

#### 5.2.9 Συμπερασματικές παρατηρήσεις αναφορικά με την εφαρμογή και τη μελλοντική χρήση των καμπυλών

Συνοψίζοντας, στην παρούσα μελέτη παράχθηκαν καμπύλες τρωτότητας για τον προσδιορισμό του σεισμικού κινδύνου κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος και δημιουργήθηκε και μια νέα κλίμακα βλαβών HRC η οποία βαθμονομείται πειραματικά μέσω του λόγου της σχετικής μετακίνησης ορόφων κτηρίων με διαφορετικό σύστημα αντίστασης στο σεισμό. Η εν λόγω κλίμακα σχετίζεται με τα υπάρχοντα όρια βλαβών και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία εμπειρικών καμπυλών με σκοπό τον προσδιορισμό μιας μόνο ομοιογενούς και καθολικής καμπύλης τρωτότητας για όλους τους τύπους κατασκευών. Οι εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας σχετίζουν την πιθανότητα υπέρβασης των ορίων βλάβης HRC που βασίζονται στις μετακινήσεις, με την παράμετρο σεισμικής απαίτησης των φασματικών μετακινήσεων που προέκυψε για ελαστική περίοδο ταλάντωσης με 5% απόσβεση και είναι επαρκής για χρήση σε ανάλυση βασιζόμενη στις μετακινήσεις. Οι προτεινόμενες σχέσεις χαρακτηρίζονται από καλύτερη συσχέτιση με τις παρατηρούμενες βλάβες απ' ότι οι ήδη υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις, παρά του ότι περιλαμβάνουν μεγαλύτερο αριθμό κατηγοριών κατασκευών. Στην περίπτωση των καμπυλών που σχετίζονται με τον τύπο κατασκευής, η συσχέτιση

είναι εντονότερη και για το λόγο αυτό επετεύχθη βελτίωση των καμπυλών εντός των ορίων ποιότητας και ποσότητας των διαθέσιμων δεδομένων, μέσω της χρήσης της προτεινόμενης διαδικασίας παραγωγής των καμπυλών τρωτότητας, της επιλογής κατάλληλων βαθμών βλάβης και παραμέτρων εδαφικής κίνησης. Η ευαισθησία των ομογενοποιημένων καμπυλών σε διαφορετικά κτηριακά χαρακτηριστικά ερευνήθηκε επίσης και αφαιρέθηκε η επίδραση του τρόπου πλευρικής αντίστασης της εκάστοτε κατασκευής στο σχήμα των καμπυλών τρωτότητας μέσω της χρήσης της κλίμακας βλαβών HRC. Ωστόσο, άλλα κτηριακά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την αντίσταση των κατασκευών φαίνεται να παρεμποδίζουν τη χρήση των καμπυλών για τον προσδιορισμό τρωτότητας υψηλών κατασκευών και κτηρίων που δεν σχεδιάστηκαν σύμφωνα με κάποιο αντισεισμικό κανονισμό. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι αν δεν εντοπιστούν περισσότερες ποσοτικά και ποιοτικά καταγραφές για τη βαθμονόμηση της κλίμακας HRC, τα αποτελέσματα στην ποιότητα κατασκευής και στους αντισεισμικούς κανονισμούς θα μπορούν να ληφθούν υπόψη μόνο μέσω της χρήσης ξεχωριστών καμπυλών τρωτότητας για κτήρια διαφορετικών υψών και κανονισμών. Καθώς είναι αδύνατη η αφαίρεση της διασποράς που οφείλεται στην εσωτερική ετερογένεια του δείγματος κατασκευών και σε εμπειρικές εκτιμήσεις του βαθμού παρατηρούμενων βλαβών, συνίσταται οι καμπύλες να εφαρμόζονται λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη τις εκάστοτε αβεβαιότητες.



**Εικόνα 5.7:** Οι προτεινόμενες εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας (σκούρες γραμμές) και τα όρια εμπιστοσύνης 90% (ανοιχτές γραμμές): (a) μέσες καμπύλες, (b) όρια λιγοστών και εκτεταμένων βλαβών, (c) όρια ελαφρών βλαβών και στάθμης μερικής κατάρρευσης και (d) όρια μετρίων βλαβών και κατάρρευσης.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, είναι σαφές ότι η παραγωγή καμπυλών τρωτότητας μόνο από εμπειρικά δεδομένα δεν είναι επαρκής για τη ρεαλιστική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου που μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη βεβαιότητα σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη. Για να δημιουργηθεί ένα τέτοιο μοντέλο είναι απαραίτητη η εμπειρική παρακολούθηση η οποία θα ενισχυθεί από αναλυτικά προσομοιωμένες στατιστικές βλαβών.

### 5.3 Παρουσίαση της μελέτης των Karros et al

#### 5.3.1 Σύνοψη της έρευνας

Στο πρώτο μέρος της έρευνας, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν καταγραφές του κύριου σεισμικού γεγονότος στη μεσοσεισμική περιοχή, χρησιμοποιείται μια πιλοτική μέθοδος για την εκτίμησή τους για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Χρησιμοποιώντας τόσο ντετερμινιστική όσο και στοχαστική προσέγγιση, καθώς και πραγματικές καταγραφές αναφερόμενες στη κίνηση βράχου στην εδαφική επιφάνεια, και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του σεισμικού γεγονότος της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999, επιτυγχάνεται η προσομοίωση της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου χρησιμοποιώντας γεωτεχνικά και γεωφυσικά δεδομένα. Παράγονται έτσι επτά κατηγορίες εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθοδολογίες και συγκεκριμένα την εμπειρική συνάρτηση Green (EGF), το μοντέλο σημειακής πηγής (PSM), το μοντέλο πεπερασμένης πηγής (FSM), το μοντέλο πεπερασμένης πηγής που βασίζεται στην κατανομή μετακινήσεων (FSM – SDM), δύο πραγματικές καταγραφές (SGMA, SPLA) και άλλη μια καταγραφή που προέκυψε από γεωτεχνικά δεδομένα (KEDE). Βασιζόμενοι σε σεισμολογικές και γεωφυσικές παρατηρήσεις αντιπροσωπευτικές της μεσοσεισμικής περιοχής, προκύπτει η ισχυρή εδαφική κίνηση σε βραχώδεις σχηματισμούς των περιοχών μελέτης. Έπειτα, πραγματοποιείται συνδυασμός με τις δυναμικές ιδιότητες των εδαφικών προφίλ στις θέσεις γεωτρήσεων και δημιουργούνται μονοδιάστατα εδαφικά μοντέλα. Ακόμα, διεξάγονται αναλυτικές έρευνες με στόχο την εκτίμηση της διασποράς της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Οι δημιουργημένες ομάδες εδαφικής κίνησης χρησιμοποιούνται έπειτα για τον προσδιορισμό της απόκρισης κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιία. Χρησιμοποιώντας μια πιο ακριβή μέθοδο (Karros et al 1998, 2004) καθίσταται εφικτή η συσχέτιση του δείκτη κατασκευαστικών βλαβών με το κόστος επισκευών, προσδιορίζονται ποικίλες ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας και τα αποτελέσματά τους χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της οικονομικής ζημίας της περισσότερο ευπαθούς περιοχής.

Το στατιστικό κόστος επισκευών παράχθηκε από δεδομένα του δήμου Άνω Λιοσίων στη μεσοσεισμική περιοχή του σεισμού της Αθήνας. Διεξήχθη λεπτομερής έρευνα αντιπροσωπευτικών δειγμάτων 150 κατασκευών και εκτιμήθηκε το συνολικό στατιστικό κόστος, όπως και το μεμονωμένο για κάθε κατηγορία βλάβης. Για να είναι συγκρίσιμα με την προκύπτουσα οικονομική απώλεια τα δεδομένα διαχωρίστηκαν σε

κατάλληλες κατηγορίες. Ακολούθως, συγκρίθηκαν τα προβλεπόμενα και στατιστικά κόστη για όλη την περιοχή μελέτης όπως και ξεχωριστά για κάθε γεωλογική και γεωφυσική ζώνη και τελικά η αναλυτική εκτίμηση οικονομικών απωλειών φαίνεται να συμφωνεί σε ικανοποιητικό βαθμό με το στατιστικό κόστος επισκευής για κάποια από τα σενάρια σεισμικού κινδύνου.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι εύκολα εφαρμόσιμη και σε άλλες αστικές περιοχές και μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του σεισμικού κινδύνου όπως και στις τακτικές ενίσχυσης των κατασκευών σε σεισμικά ενεργές περιοχές.

### 5.3.2 Κατηγοριοποίηση των κατασκευών και εκτίμηση του στατιστικού κόστους

Το στατιστικό κόστος επισκευής προέκυψε από δεδομένα που συγκεντρώθηκαν στο πεδίο του δήμου Άνω Λιοσίων, στην περισσότερο πληγείσα περιοχή από το σεισμό της Αθήνας. Η βάση δεδομένων αποτελείται από 150 κτήρια περιλαμβάνοντας ένα πλήρες σύνολο δεδομένων που αφορούν τον αριθμό των οικοδομικών τετραγώνων, τον αριθμό κάθε κτηρίου στο τετράγωνο, τη διεύθυνση, το έτος κατασκευής, την οικοδομική άδεια, τη χρήση του κτηρίου, το συνολικό εμβαδόν κάθε ορόφου, τον αριθμό ορόφων, το συνολικό ύψος και το συνολικό όγκο. Επίσης, περιλαμβάνονται δεδομένα που αφορούντα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κτηρίων όπως την ύπαρξη ή μη υπογείου, την ύπαρξη μαλακού ορόφου και τον τύπο κατασκευής. Τέλος, περιλαμβάνονται πληροφορίες αναφορικά με την κατηγοριοποίηση των κτηρίων ανάλογα με τις παρατηρηθείσες βλάβες μετά το σεισμό. Η κατηγοριοποίηση βλαβών ακολουθεί το σύστημα πράσινο / κίτρινο / κόκκινο, δηλαδή:

- Πράσινο: η ολική σεισμική αντοχή δεν έχει μειωθεί, το κτήριο μπορεί να κατοικηθεί άμεσα και η πρόσβαση σε αυτό δεν απαγορεύεται.
- Κίτρινο: κτήριο με μειωμένη αντοχή που πρέπει να επισκευαστεί. Η χρήση του απαγορεύεται.
- Κόκκινο: το κτήριο είναι μη ασφαλές και απαγορεύεται η είσοδος στους ενοίκους. Μετά από περισσότερο λεπτομερή έλεγχο αποφασίζεται η κατεδάφισή του ή όχι.

Χρησιμοποιώντας το μέσο κόστος επισκευής ανά τετραγωνικό μέτρο για κάθε κατηγορία βλάβης εκτιμήθηκε το συνολικό κόστος επισκευής για το δήμο Άνω Λιοσίων. Η ακρίβεια αυτών των μέσων τιμών κόστους επισκευής εξετάστηκε βάσει αντίστοιχων τιμών που προτείνονται από τμήματα σεισμικής αποκατάστασης για άλλες περιοχές της Αθήνας. Στον **πίνακα 5.8** παρουσιάζονται τα στατιστικά κόστη για κάθε κατηγορία βλάβης, όπως και το συνολικό κόστος. Οι γεωλογικές και γεωφυσικές ζώνες των Άνω Λιοσίων παρουσιάζονται στην **εικόνα 5.8** μαζί με το σύνολο των κτηρίων, την κατηγοριοποίηση της σεισμικής βλάβης και την κατανομή του σεισμικού κόστους.

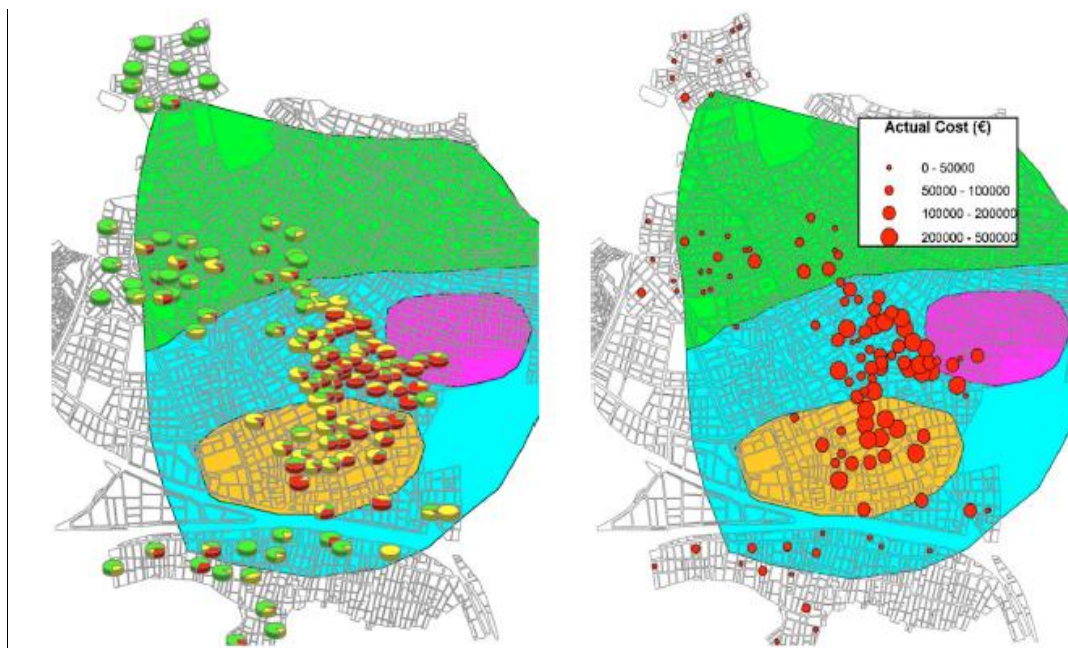
Για την αναλυτική εκτίμηση του κόστους επέμβασης τα κτήρια διαχωρίστηκαν σε ομάδες, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με αυτά των αναλυτικών μοντέλων. Αρχικά, τα κτήρια διαχωρίστηκαν ανάλογα με το έτος κατασκευής τους σε

δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά αυτά που σχεδιάστηκαν και χτίστηκαν πριν το 1996 σύμφωνα με τους παλιούς αντισεισμικούς κανονισμούς (1959 και 1984) και η δεύτερη όσα σχεδιάστηκαν και χτίστηκαν σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς (1995 και 2000). Όλες οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος της πρώτης κατηγορίας υποτέθηκε ότι είχαν στατικό σύστημα χωρικού πλαισίου χωρίς διατμητικά τοιχεία ενώ αυτές της δεύτερης κατηγορίας είχαν το ίδιο σύστημα με διατμητικά τοιχεία, κάτι που αποδεικνύεται και από τις παρατηρήσεις πεδίου.

Damage category	Building number	Area (m <sup>2</sup> )	Repair cost	Total cost (€)
Green	403	59 547	€35.5/m <sup>2</sup>	2 113 919
Yellow	350	61 871	€92.4/m <sup>2</sup>	5 716 880
Red	230	25 974	€361.1/m <sup>2</sup>	9 379 211
<b>TOTAL</b>	<b>983</b>	<b>147 392</b>	—	<b>17 210 010</b>

Note: €1 ≈ \$1.3 US (2006 rate)

**Πίνακας 5.8:** Εκτίμηση του στατιστικού κόστους



**Εικόνα 5.8:** Γεωλογικές ζώνες του δήμου Άνω Λιοσίων με κατηγοριοποίηση των κτηριακών βλαβών (αριστερά) και κατανομή του στατιστικού κόστους (δεξιά).

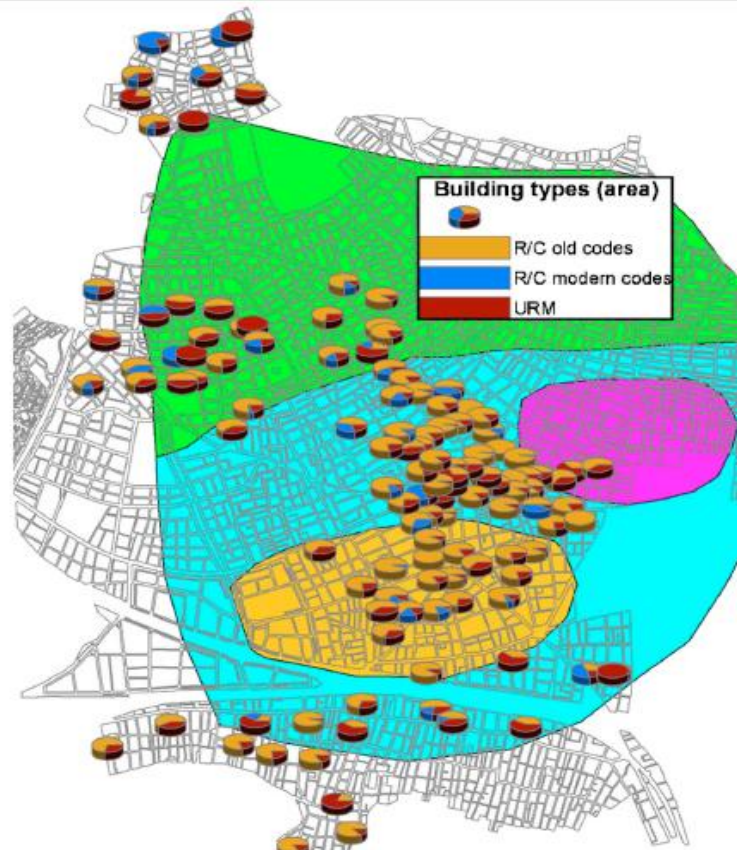
Η περαιτέρω κατηγοριοποίηση οδήγησε στον ακόλουθο διαχωρισμό:

Κατασκευές σχεδιασμένες και χτισμένες πριν το 1996

- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος ενός και δυο ορόφων με τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, χωρίς pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι 83904m<sup>2</sup>.
- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος ενός και δυο ορόφων με τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, με pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι 6933m<sup>2</sup>.



- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος τριών και τεσσάρων ορόφων με τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, χωρίς pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $16861m^2$ .
- Κτήρια ενός και δυο ορόφων με φέρουσα τοιχοποιία από πλινθοδομή (URM). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $27121m^2$ .
- Κτήρια ενός ορόφου με φέρουσα τοιχοποιία από λίθους. Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $345m^2$ .



**Εικόνα 5.9:** Εμβαδόν ( $m^2$ )/ τύπος κατασκευής

#### Κατασκευές σχεδιασμένες και χτισμένες μετά το 1996

- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος ενός και δυο ορόφων με διπλό κατασκευαστικό σύστημα και τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, χωρίς pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $4733m^2$ .
- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος ενός και δυο ορόφων με διπλό κατασκευαστικό σύστημα και τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, με pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $2541m^2$ .
- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος τριών και τεσσάρων ορόφων με διπλό κατασκευαστικό σύστημα και τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, χωρίς pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $4381m^2$ .



- Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος τριών και τεσσάρων ορόφων με διπλό κατασκευαστικό σύστημα και τοιχοπλήρωση από πλινθοδομή, με pilotis (μαλακός όροφος στο ισόγειο). Το συνολικό εμβαδόν των κτηρίων αυτής της ομάδας είναι  $573m^2$ .

Η κατηγοριοποίηση των κτηρίων της εξεταζόμενης περιοχής σε δυο βασικές κατηγορίες οπλισμένου σκυροδέματος (παλιοί και νέοι κανονισμοί) και κτήρια από τοιχοποιία (URM) παρουσιάζονται στην **εικόνα 5.9** μαζί με το εμβαδόν της κάθε κατηγορίας. Φαίνεται ότι η κατανομή των κτηρίων ποικίλει στις διάφορες περιοχές της Αθήνας.

### 5.3.3 Πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης στην εξεταζόμενη περιοχή

Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν καταγραφές του κύριου σεισμικού γεγονότος στη μεσοσεισμική περιοχή, διεξάγεται μια αναλυτική πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης σε διαφορετικές ζώνες της περιοχής μελέτης, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές.

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται τρεις πραγματικές καταγραφές, τροποποιημένες ώστε να ληφθούν υπόψη τα εδαφικά χαρακτηριστικά, οι οποίες είναι οι SGMA, SPLA και A399. Οι συγκεκριμένες καταγραφές τροποποιούνται ώστε να εξαλειφθούν τα φαινόμενα επιφανειακών κυμάτων και χρησιμοποιούνται ως κίνηση εισαγωγής στη μεσοσεισμική περιοχή. Λαμβάνοντας υπόψη τα γεωτεχνικά και γεωφυσικά χαρακτηριστικά σε επιλεγμένες θέσεις του δήμου Άνω Λιοσίων και τις αντίστοιχες εξισώσεις μεταφοράς κίνησης, προκύπτουν χρονοϊστορίες επιταχύνσεων αντιπροσωπευτικές των καταγραφών κοντινού πεδίου και ομαλοποιημένες ως προς τα εδαφικά χαρακτηριστικά.

### 5.3.4 Προσομοίωση της εδαφικής κίνησης κοντινού πεδίου

#### Εμπειρική μέθοδος Green (EGF)

η συγκεκριμένη μέθοδος (Irikura 1983, 1986) εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης λόγω του κύριου σεισμικού γεγονότος της Αθήνας ( $M_w=5.9$ ), χρησιμοποιώντας μια καταγραφή ως εμπειρική σχέση του Green. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα συνδυασμό της τεχνικής EGF (Hartzell 1978) με τον κανόνα ομοιότητας σε σεισμό. Σύμφωνα με του Irikura και Kamae (1994), όταν δυο γεγονότα συμβαίνουν από την ίδια σεισμική πηγή, ο κανόνας ομοιότητας των σεισμών περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{L}{L_e} = \frac{W}{W_e} = \frac{D}{CD_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \frac{M_o}{CM_{Oe}}^{1/3} = N \quad [6]$$

Οι παράμετροι χωρίς δείκτη αντιστοιχούν στο μεγαλύτερο σε μέγεθος γεγονός ενώ αυτές με το δείκτη στο μικρότερο. Τα  $L$  και  $W$  είναι το μήκος και το πλάτος του ρήγματος αντίστοιχα,  $D$  είναι η τελική μετατόπιση,  $\tau$  είναι ο χρόνος άφιξης και  $M_o$  είναι η βαθμωτή σεισμική ροπή. Ακόμα, το  $C$  αφορά το λόγο πτώσης τάσης  $\sigma$  μεταξύ των δυο γεγονότων και  $N$  είναι μια παράμετρος διακριτοποίησης του ρήγματος που ορίζεται ως ο κοντινότερος ακέραιος αριθμός στην τιμή που προκύπτει από την εξίσωση. Οι παράμετροι  $C$  και  $N$  είναι ιδιαίτερης σημασίας για τις προσομοιώσεις αφού η πρώτη ελέγχει το επίπεδο προσομοίωσης του φάσματος και η δεύτερη

καθορίζει τον αριθμό των στοιχείων ( $N*N$ ) στα οποία διαχωρίζεται τελικά το ρήγμα. Η προσομοιούμενη ισχυρή κίνηση στη μεσοσεισμική περιοχή (δήμος Άνω Λιοσίων) με τη χρήση της μεθόδου EGF παρουσιάζεται στην **εικόνα 5.10b**.

#### Στοχαστική μέθοδος σημειακής πηγής (PSM)

Το μοντέλο σημειακής πηγής βασίζεται στην αρχή ότι ένα φασματικό σχήμα  $\omega^2$  με την απόσταση  $R$  από το υπόκεντρο μπορεί να προσδιοριστεί ως συνάρτηση της σεισμικής ροπής  $M_0$ , της απόστασης  $R$ , της γωνιακής συχνότητας  $f_0$  και της παραμέτρου τάσης  $\Delta\sigma$ . Σκοπός της ανάλυσης είναι ο ορισμός των παραμέτρων που εμπλέκονται στον προσδιορισμό της εδαφικής κίνησης με συχνοτικό περιεχόμενο  $0.5\text{Hz}-10\text{Hz}$ . Τα δεδομένα ισχυρής εδαφικής κίνησης μπορούν να προβλεφθούν με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας το απλοποιημένο θεωρητικό μοντέλο και λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του γεγονότος.

#### Στοχαστική μέθοδος πεπερασμένης πηγής (FSM)

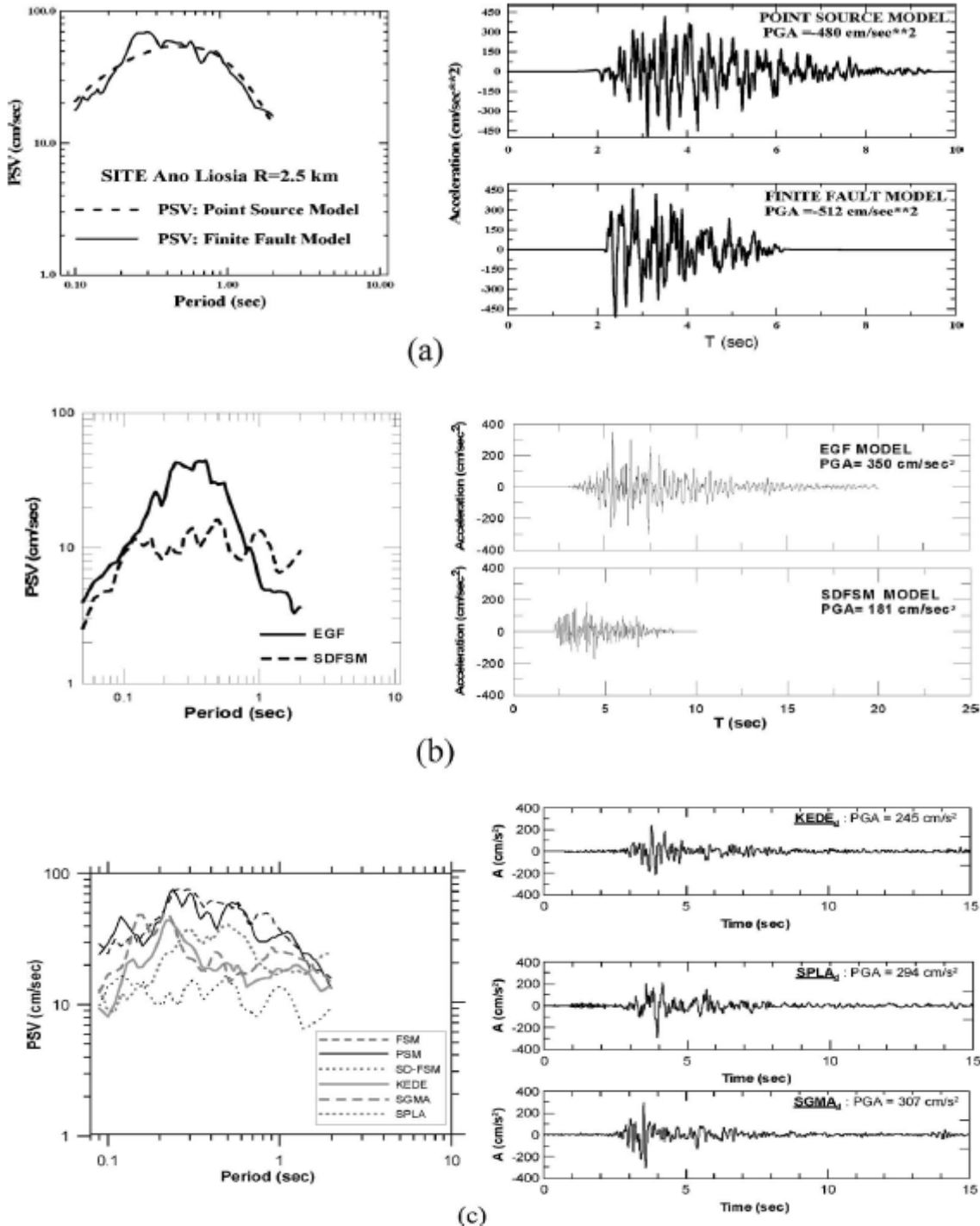
Στο συγκεκριμένο μοντέλο η επιφάνεια του ρήγματος διακριτοποιείται σε μικρά στοιχεία, καθένα από τα οποία χρησιμοποιείται σαν σημειακή πηγή. Το μοντέλο όλων των σημειακών πηγών ενισχύεται με μια κατάλληλη χρονική καθυστέρηση. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση σεισμικών γεγονότων μεγέθους  $M>5.4$ . Οι παράμετροι του ρήγματος στη συγκεκριμένη περίπτωση λήφθηκαν από την έρευνα των Harvard και Papazachos et al (2001) και οι εισαγόμενες παράμετροι των στοχαστικών (σημειακών και πεπερασμένων) μοντέλων πηγής παράχθηκαν από τους Margaris και Boore (1998) και Margaris (2000). Επιπρόσθετα, τόσο για τα μοντέλα πηγής όσο και για τις θέσεις καταγραφών, η ενίσχυση προέκυψε χρησιμοποιώντας συντελεστές κανονικοποίησης σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά δεδομένα. Η προσομοιούμενη σεισμική κίνηση για τα μοντέλα πεπερασμένης πηγής (FSM) και σημειακής πηγής (PSM) παρουσιάζεται στην **εικόνα 5.10a**.

#### Στοχαστική μέθοδος κατανομής ολισθήσεων (SD – FSM)

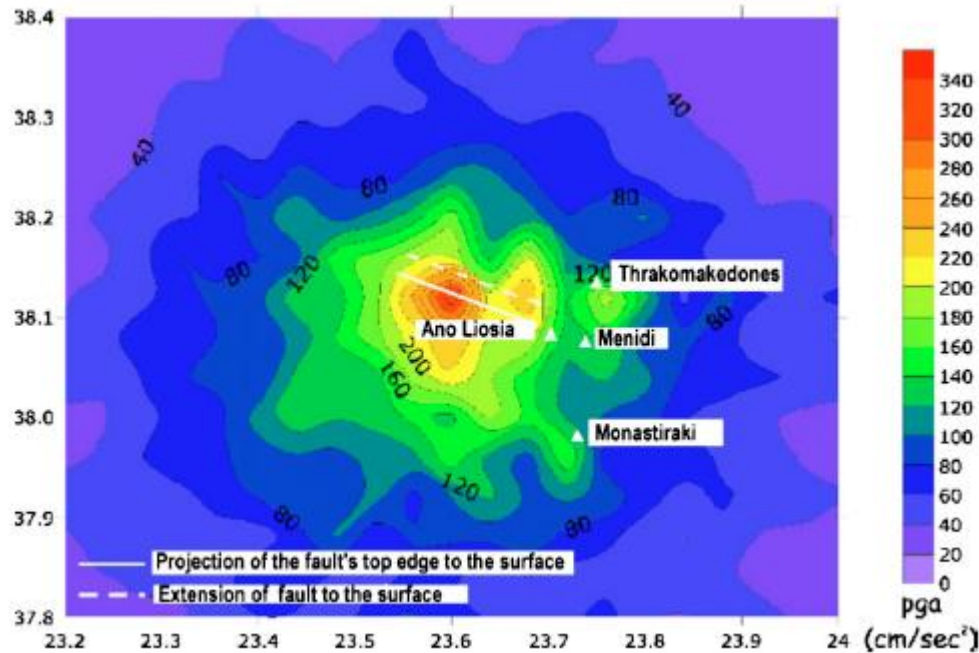
Στη συγκεκριμένη προσέγγιση εφαρμόζεται και η τεχνική της πεπερασμένης πηγής (FSM) αλλά χρησιμοποιώντας μη ομοιογενή κατανομή μετακινήσεων στο ρήγμα. Η κατανομή των μετακινήσεων του σεισμού της Αθήνας λήφθηκε από αντιστροφή των χρονικών συναρτήσεων της πηγής χρησιμοποιώντας ταχύτητα διάρρηξης  $2.7\text{km/sec}$  και χρόνο άφιξης  $0.4\text{sec}$ . Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται για το σχηματισμό χαρτών με συνθετικές τιμές επιταχύνσεων, επεκτείνοντας την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης σε θέσεις όπου δεν υπάρχουν καταγεγραμμένα σήματα, ειδικότερα στη μεσοσεισμική περιοχή.

Συνολικά, τοποθετήθηκαν 1200 συνθετικά επιταχυνσεογραφήματα σε επιλεγμένες θέσεις πάνω στον κάρναβο. Οι προκύπτουσες μέγιστες τιμές επιταχύνσεων παρουσιάζονται στο χάρτη της **εικόνας 5.11** μαζί με την προβολή του ρήγματος όπως επίσης και την επέκτασή του ως την επιφάνεια. Η μεσοσεισμική περιοχή (Μενίδι, Άνω Λιόσια και Θρακομακεδόνες) εντοπίζεται δίπλα στο ρήγμα, αναδεικνύοντας το ρόλο της σεισμικής πηγής στη διασπορά των βλαβών. Τα

συγκεκριμένα επιταχυνσεογραφήματα αναφέρονται σε κατάσταση βραχύδου υποβάθρου, ενώ η επίδραση των τοπικών δυναμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών προφίλ δε λαμβάνονται υπόψη. Η τεχνική παρουσιάζεται και γραφικά στην **εικόνα 5.10b**.



**Εικόνα 5.10:** Προσομοιωμένη εδαφική κίνηση στην περιοχή των Άνω Λιοσίων χρησιμοποιώντας: (α) τεχνικές FSM και PSM, (β) την εμπειρική σχέση του Green (EGF) και τη στοχαστική κατανομή ολισθήσεων με την τεχνική FSM, (γ) πραγματικές καταγραφές (KEDE, SPLA και SGMA), όλα συσχετισμένα και υπολογισμένα για τιμές PSV.



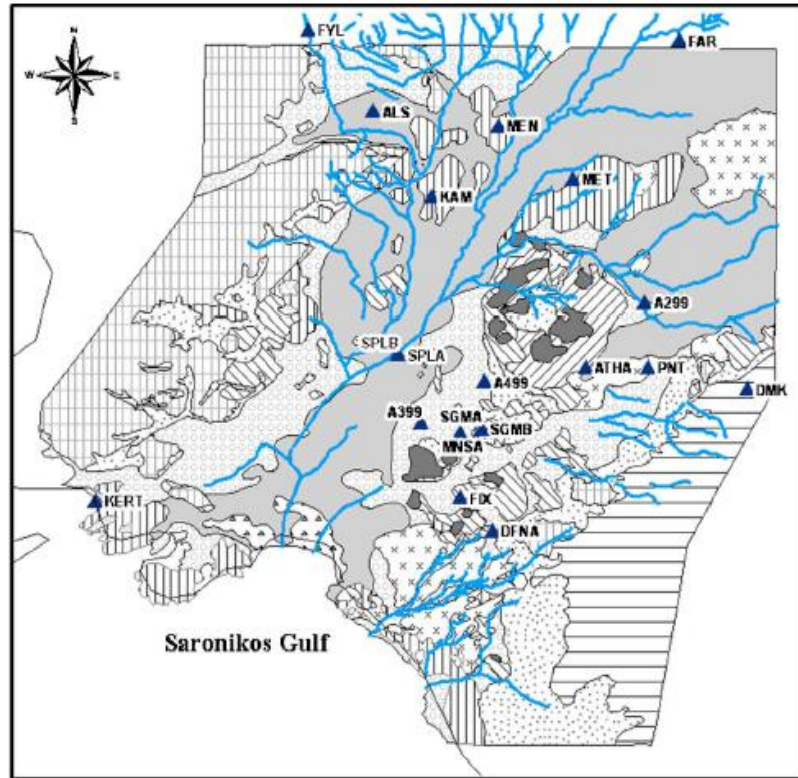
**Εικόνα 5.11:** Μέγιστες επιταχύνσεις των 1200 συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων για υποκείμενο βραχώδες έδαφος.

### 5.3.5 Διατύπωση για μονοδιάστατα εδαφικά μοντέλα και ανάλυση απόκρισης

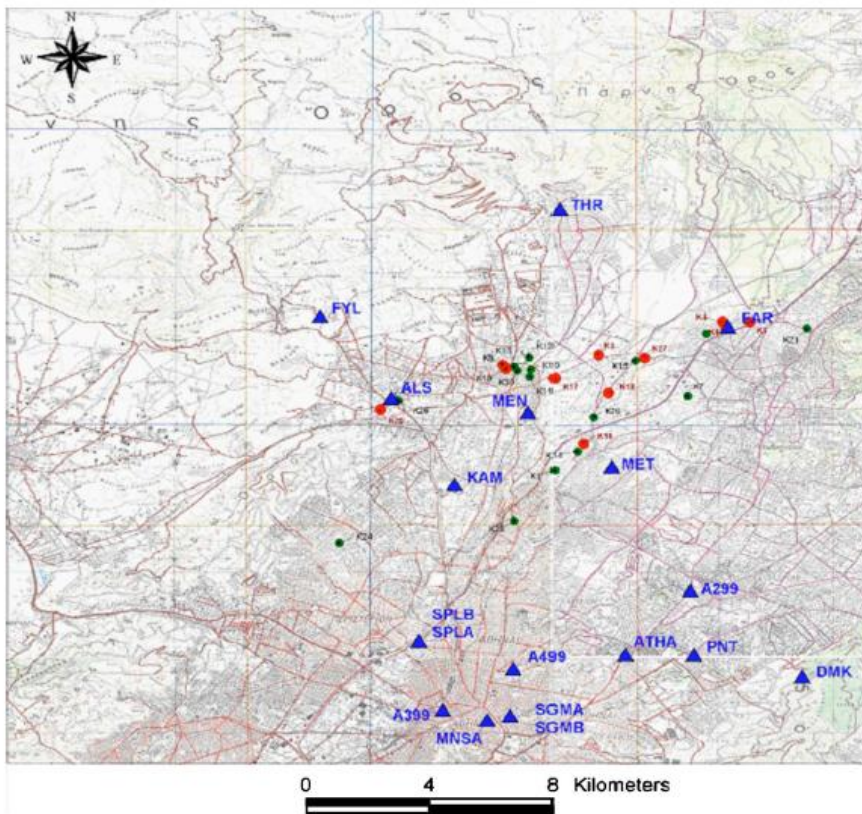
Όλα τα διατιθέμενα δεδομένα που σχετίζονται με τη γεωλογία, τις γεωτεχνικές παραμέτρους και τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά συγκεντρώθηκαν και μετατράπηκαν στην κλίμακα GIS. Αντιπροσωπευτικοί χάρτες της μεσοσεισμικής περιοχής παρουσιάζονται σε συνάρτηση με τις γεωλογικές/γεωτεχνικές ζώνες στην **εικόνα 5.12**, τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων και τα διαθέσιμα γεωτεχνικά/γεωφυσικά δεδομένα (**εικόνα 5.13**). Σε συγκεκριμένες θέσεις της μεσοσεισμικής περιοχής όπου υπήρχαν καταγραφές μετασεισμών, εφαρμόστηκε η τεχνική του φασματικού λόγου της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα, η οποία εξάγει χρήσιμες πληροφορίες για τη δεσπόζουσα συχνότητα των εξεταζόμενων θέσεων. Μέσες τιμές του λόγου καθώς και δεσπόζουσες περίοδοι μπορούν να προκύψουν επιπροσθέτως για το χαρακτηρισμό της εδαφικής απόκρισης σε διάφορες θέσεις. Σε συνάρτηση με τις δυναμικές παραμέτρους των εδαφικών προφίλ στις θέσεις καταγραφής, προέκυψαν και θεωρητικές συναρτήσεις μεταφοράς. Από τη σύγκριση των αναλυτικών και των εμπειρικών σχέσεων μεταφοράς προκύπτει ο σχηματισμός των μονοδιάστατων εδαφικών μοντέλων.

Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων μέσω του εδάφους βασίζεται σε μονοδιάστατη σεισμική απόκριση που διεξάγεται μέσω του λογισμικού CYBERQUAKE. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα του εδάφους και η υστερητική απόσβεση, χρησιμοποιώντας ένα πολύπλοκο μέτρο ελαστικότητας. Ακόμα και αν η ισοδύναμη γραμμική ανάλυση υπερεκτιμά τις υπολογιζόμενες διατμητικές τάσεις και υποεκτιμά τις ενισχύσεις στο εύρος υψηλών συχνοτήτων, είναι αποδεκτή σε μεσαία επίπεδα τάσεων.

**Geological / Geotechnical zones**  
(after Koukis & Sabatakakis 2000)



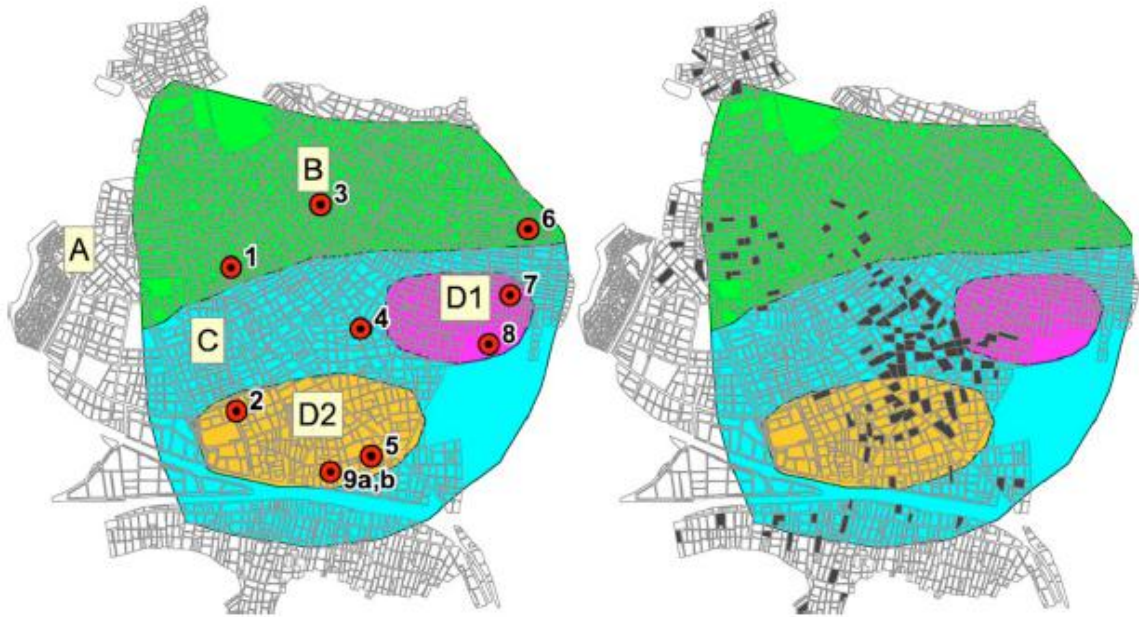
**Εικόνα 5.12:** Γεωλογικές ζώνες της μεσοσεισμικής περιοχής.



**Εικόνα 5.13:** Θέσεις επιταχυνσιογράφων και θέσεις με γεωλογικά / γεωφυσικά δεδομένα.



Για τις ανάγκες της σεισμικής ανάλυσης αποκρίσεων, θεωρήθηκαν επτά επιταχυνσεογραφήματα. Η πρώτη ομάδα δεδομένων περιλαμβάνει τις καταγραφές των σταθμών Σύνταγμα-SGMA (0.24g), Σεπόλια-SPLA (0.27g) και ΚΕΔΕ-A399 (0.19g) και η δεύτερη τις στοχαστικές προσομοιώσεις στα Άνω Λιόσια (ALS-FSM: 0.52g, ALS-PSM: 0.48g) και το Μενίδι (MND-FSM: 0.49g, MND-PSM: 0.39g) θεωρώντας βραχώδες υπόβαθρο (κατηγορία εδάφους Β). Για την εξέταση της διακύμανσης των χαρακτηριστικών απόκρισης (πλάτος διατμητικής παραμόρφωσης, ενίσχυση, επίπεδο επιτάχυνσης κλπ) και για την ενσωμάτωση ορίων στην έντονα μη γραμμική εδαφική συμπεριφορά, η ανάλυση διεξήχθη χρησιμοποιώντας τις συνολικές τάσεις σε δέκα τοποθεσίες με γνωστό εδαφικό προφίλ στην περιοχή μελέτης (**εικόνα 5.14**) και για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις. Τα αποτελέσματα μαζί με τις γεωλογικές, γεωφυσικές και γεωτεχνικές πληροφορίες παρουσιάζονται στην **εικόνα 5.14** για πέντε διαφορετικές εδαφικές ζώνες που εκπροσωπούν το σχετικό σεισμικό κίνδυνο σε συνάρτηση με τα συνολικά εξεταζόμενα δεδομένα.



**Εικόνα 5.14:** Ορισμός των ζωνών και εξεταζόμενα κτήρια.

Στον **πίνακα 5.9** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης απόκρισης σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του δήμου Άνω Λιοσίων με τις τιμές επιταχύνσεων στην επιφάνεια του εδάφους (στήλες 3, 5, 7, 9, 11 και 13) έξι σεισμικών κινήσεων (PSM, FSM, SD-FSM, ΚΕΔΕ<sub>d</sub>, SPLA<sub>d</sub> και SGMA<sub>d</sub>), τις τιμές επιταχύνσεων στη βάση του εδαφικού σχηματισμού έξι σεισμικών σεναρίων (στήλες 2, 4, 6, 8, 10 και 12). Παρατηρείται ότι ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, οι επιταχύνσεις ποικίλουν από 0.2g έως 0.5g, ενώ οι επιταχύνσεις στην επιφάνεια φτάνουν μέχρι τα 0.7g σε ορισμένες θέσεις.

Στην **εικόνα 5.10c** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ειδικής ανάλυσης απόκρισης κάποιας θέσης (*P4*) στα Άνω Λιόσια, χρησιμοποιώντας διαφορετικές καταγεγραμμένες εδαφικές κινήσεις ( $KEDE_d$ ,  $SPLA_d$  και  $SGMA_d$ ), μαζί με το φάσμα ψευδο-ταχύτητας και τρεις στοχαστικές σεισμικές κινήσεις (PSM, FSM και SD-FSM).

Excitation Site	PSM		FSM		$KEDE_d$		$SPLA_d$		$SGMA_d$		SD-FSM	
	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>	(PGA) <sub>r</sub>	(PGA) <sub>s</sub>
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
P-3	0.47	0.56	0.51	0.55	0.19	0.21	0.27	0.28	0.24	0.27	0.19	0.22
P-4		0.60		0.61		0.25		0.30		0.31		0.24
P-7		0.66		0.69		0.32		0.36		0.36		0.24
P-9		0.40		0.45		0.25		0.29		0.26		0.20

**Πίνακας 5.9:** Θεωρητική ανάλυση απόκρισης πεδίου και αποτελέσματα σε αντιπροσωπευτικές θέσεις των Άνω Λιοσίων με PGA (g) στην εδαφική επιφάνεια (στηλές 3, 5, 7, 9, 11 και 13) για έξι σεισμικές κινήσεις (PSM, FSM, SD-FSM,  $KEDE_d$ ,  $SPLA_d$  και  $SGMA_d$ ).

### 5.3.6 Ανάλυση τρωτότητας και εκτίμηση απωλειών

#### Κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος

Οι προαναφερθείσες επτά θέσεις επιταχυνσιογράφων χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της απόκρισης κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος βασιζόμενοι στην υβριδική μέθοδο των Karros et al (1998b, 2004) που συσχετίζει το δείκτη κατασκευαστικής βλάβης με το κόστος επισκευής και χρησιμοποιεί μια πιο ακριβή ομάδα κριτηρίων κατάρρευσης ώστε να προσδιορίσει τις ανελαστικές χρονοϊστορίες τυπικών κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εκτίμηση των οικονομικών απωλειών στην περιοχή μελέτης.

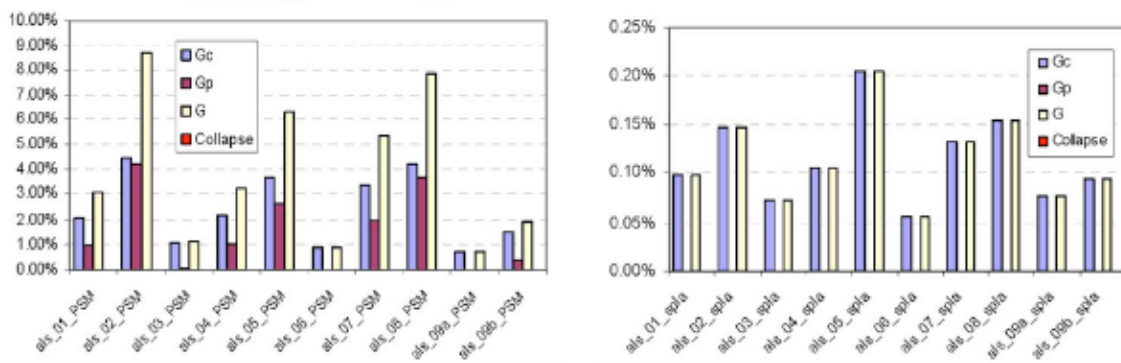
Αναφερόμενοι στο ύψος των κατασκευών, αναλύθηκαν περιπτώσεις διωρόφων, τετραωρόφων και εννιαωρόφων κτηρίων, ομαδοποιημένες ως χαμηλά (1-3 όροφοι), μεσαίου ύψους (4-7 όροφοι) και ψηλά (8 όροφοι ή και ψηλότερα). Επίσης, έγινε κατηγοριοποίηση ανάλογα με το σύστημα κατασκευής ως κτήρια με πλαίσια και διπλό σύστημα δόμησης (πλαίσια και διατμητικά τοιχία). Καθένα από τα προαναφερθέντα κτήρια μπορεί να διαθέτει ή όχι τοιχοπλήρωση ή pilotis και να είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με τους παλαιότερους ή τους πιο πρόσφατους αντισεισμικούς κανονισμούς. Έτσι, προέκυψαν συνολικά 36 διαφορετικοί κτηριακοί τύποι και αναλύθηκαν δισδιάστατα ώστε να μειωθεί το κόστος της ανάλυσης.

Υπό την απουσία ενός περισσότερο ακριβούς μοντέλου, οι περιπτώσεις στις οποίες χρειάζεται επέμβαση στο κτήριο και επιδιόρθωση των βλαβών καθορίζονται χρησιμοποιώντας τα παρακάτω κριτήρια αστοχίας:

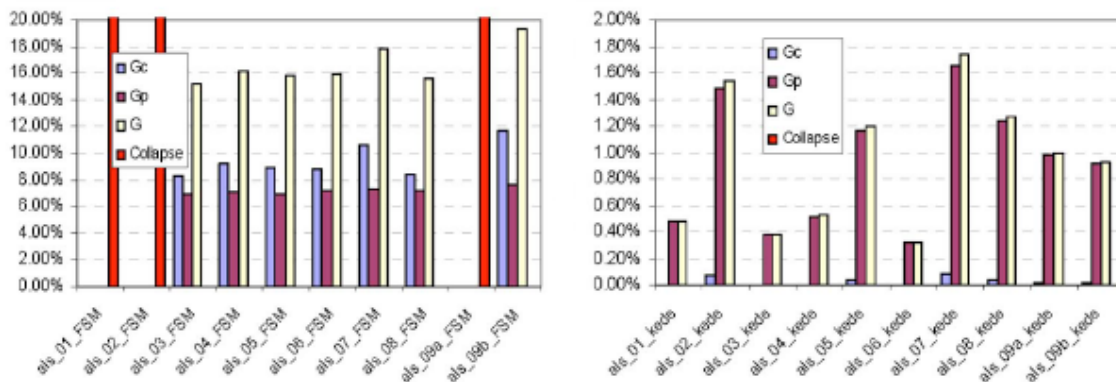
- Σε πλαίσιακές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος η αστοχία θεωρείται ότι συμβαίνει όταν είτε το 50% ή περισσότερο των υποστυλωμάτων ενός ορόφου έχει αστοχήσει, είτε η σχετική μετακίνηση των ορόφων ξεπερνά την τιμή του 4% σε οποιονδήποτε όροφο.
- Σε κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος με διπλό σύστημα (πλαίσια και διατμητικά τοιχία) η αστοχία θεωρείται ότι συμβαίνει όταν είτε το 50% ή περισσότερο των υποστυλωμάτων ενός ορόφου έχει αστοχήσει, είτε τα τοιχία

(που αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό διατμητικού φορτίου) ενός ορόφου αστοχήσουν, είτε η σχετική μετακίνηση των ορόφων ξεπερνά την τιμή του 2% σε οποιοδήποτε όροφο.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στις **εικόνες 5.15 και 5.16**, όπου οι κόκκινες μπάρες συμβολίζουν την κατάρρευση. Είναι ξεκάθαρο ότι τα στοχαστικά αποτελέσματα είναι μεγαλύτερα από τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα για τα οποία δεν προβλέφθηκε κατάρρευση για κανένα κτηριακό τύπο. Το αποτέλεσμα του σεισμικού σχεδιασμού είναι πολύ σημαντικό ειδικότερα για τις περισσότερες έντονες κινήσεις (όλες οι καταρρεύσεις εντοπίζονται σε κτηριακούς τύπους παλαιών αντισεισμικών κανονισμών).



**Εικόνα 5.15:** Διώροφο κτήριο οπλισμένου σκυροδέματος, διπλού τύπου των νέων κανονισμών για την καταγραφή PSM (αριστερά) και SPLA (δεξιά).



**Εικόνα 5.16:** Τετραώροφο κτήριο οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπλήρωση των παλιών κανονισμών για την καταγραφή FSM (αριστερά) και KEDE (δεξιά).

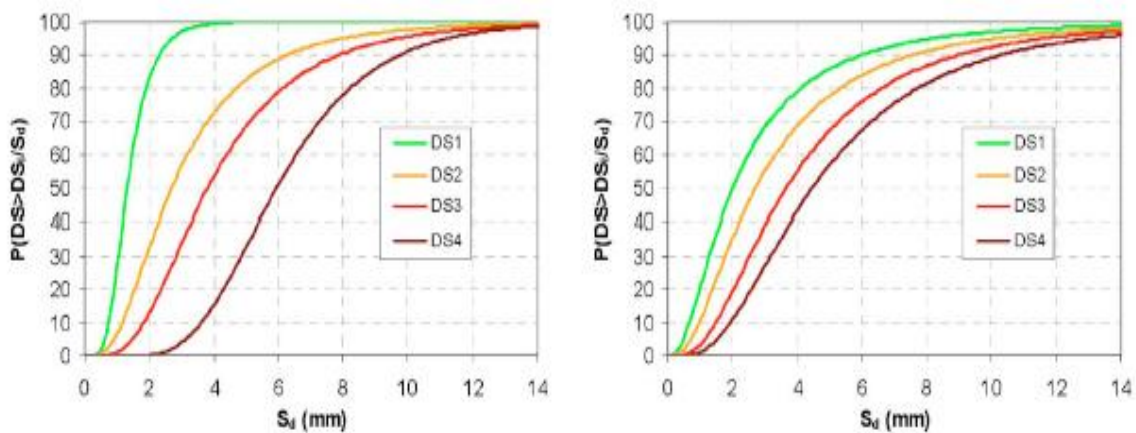
**Κτήρια URM**

Κατάλληλες καμπύλες τρωτότητας για τυπικά κτήρια URM στην Ελλάδα προτείνονται από τους Penelis et al. (2003) χρησιμοποιώντας την υβριδική μέθοδο η οποία συσχετίζει τα αναλυτικά αποτελέσματα (στην προκειμένη περίπτωση της ανάλυσης pushover) με στατιστικές βλάβες παρατηρούμενες σε προηγούμενα σεισμικά γεγονότα. Οι καμπύλες τρωτότητας (**εικόνα 5.17**) βασίστηκαν σε δεδομένα



διαφόρων σεισμών που συνέβησαν στην Ελλάδα τα τελευταία τριάντα χρόνια και θεωρήθηκαν κατάλληλα για χρήση στην παρούσα μελέτη. Σε συμφωνία με πολλές άλλες έρευνες με καμπύλες τρωτότητας, θεωρήθηκαν τέσσερις καταστάσεις βλαβών: ελαφριές βλάβες (DS1), ενδιάμεσες βλάβες (DS2), εκτεταμένες βλάβες (DS3) και πολύ σοβαρές βλάβες και κατάρρευση (DS4). Κάθε επίπεδο βλαβών σχετίζεται με ένα συντελεστή απωλειών για παράδειγμα η στάθμη DS2 αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 5% και 20% του κόστους αποκατάστασης.

Η διαδικασία εκτίμησης των οικονομικών απωλειών χρησιμοποιεί αρχικά το φάσμα ψευδο-επιτάχυνσης κάθε κίνησης εισαγωγής από το οποίο προκύπτει το μέσο φάσμα ψευδο-επιτάχυνσης για την περίπτωση ενδιαφέροντος. Έπειτα, βασιζόμενοι στο μέσο φάσμα, εκτιμάται η φασματική μετακίνηση για κάθε κατηγορία κτηρίων, χρησιμοποιώντας την καμπύλη τρωτότητας της καθεμιάς. Τέλος, χρησιμοποιώντας τις τιμές μετακινήσεων και τις καμπύλες τρωτότητας εκτιμάται ο μέσος συντελεστής βλάβης για κάθε κτηριακή κατηγορία και πολλαπλασιάζεται το αντίστοιχο εμβαδόν με το κόστος επισκευής ώστε να προκύψει η τελική εκτίμησης του συνολικού κόστους.



**Εικόνα 5.17:** Καμπύλες τρωτότητας για κτήρια με τοιχοποιία από λίθους (αριστερά) και πλινθοδομή (δεξιά).

### 5.3.7 Σύγκριση των προβλεπόμενων και των στατιστικών απωλειών

Το στατιστικό κόστος που προέκυψε με την προαναφερθείσα διαδικασία συγκρίνεται με το κόστος βλάβης της αναλυτικής μεθόδου υπολογισμού. Πρέπει να τονιστεί ότι το στατιστικό κόστος βρίσκεται πολύ μακριά από το πραγματικό κόστος επισκευών, το οποίο εξαρτάται από τον πραγματικό βαθμό βλάβης κάθε κτηρίου. Η εμπειρία από παρεμβάσεις για επισκευές σε προηγούμενους σεισμούς στην Ελλάδα έχει αποδείξει ότι για τον ίδιο βαθμό βλάβης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι ενίσχυσης και το γεγονός ότι το 50% με 100% του κόστους επισκευής παρέχεται από το κράτος, οδηγεί σε ισχυρότερες ενισχύσεις. Ωστόσο, πολλά κτήρια που έχουν υποστεί σοβαρότατες καταστροφές δεν επισκευάζονται ποτέ. Τέλος, οι παρατηρήσεις πεδίου από τους μηχανικούς δεν είναι οι ιδανικές καθώς δεν αποδίδεται μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη εικόνα της κατανομής των βλαβών στην

πληγείσα περιοχή. Οι επιθεωρήσεις διεξάγονται συνήθως υπό την παραίνεση των ιδιοκτητών άρα πολλά κτήρια δεν εξετάζονται ποτέ.

Οι καμπύλες κόστους που παρουσιάζονται στον **πίνακα 5.10** αναφέρονται σε κατασκευές των τεσσάρων από τις πέντε ζώνες της **εικόνας 5.14** καθώς δεν υπήρχαν δεδομένα για το εδαφικό προφίλ της ζώνης Α. η πρόβλεψη για το συνολικό κόστος φαίνεται να είναι ικανοποιητική όταν χρησιμοποιείται η στοχαστική θεώρηση αλλά τα αποτελέσματα των πραγματικών καταγραφών υποεκτιμούν σημαντικά το κόστος. Μια εκτενέστερη εξέταση αποκαλύπτει ότι η ακρίβεια της στοχαστικής κίνησης μειώνεται όταν η κάθε ζώνη εξετάζεται ξεχωριστά, παρ' όλα αυτά, τα αποτελέσματα εξακολουθούν να είναι ικανοποιητικά λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

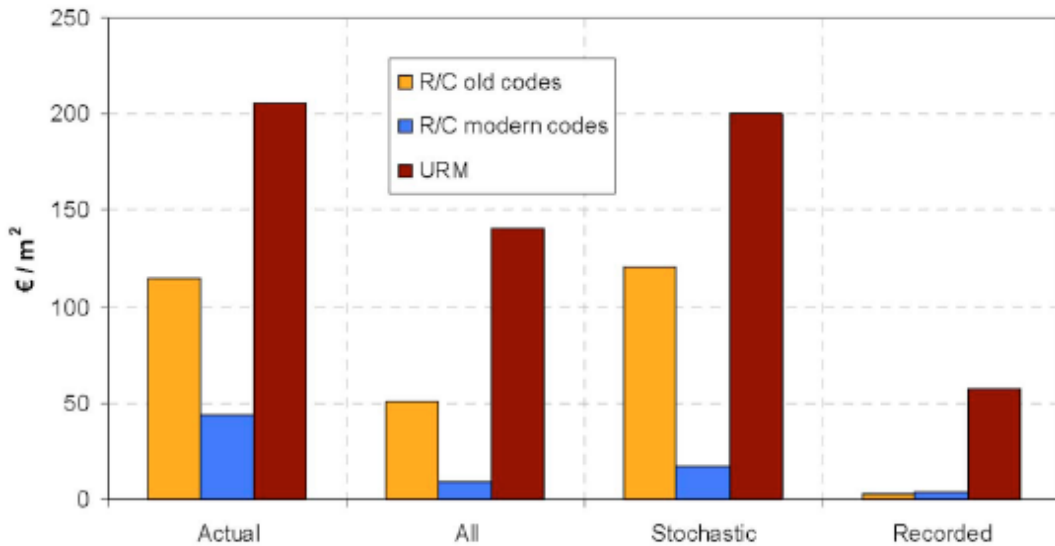
Zones	“Statistical”	PSM series	FSM series	FSM-DSM series	E.G.F.	Mean value of stochastic motion set	Mean value of recorded motion set	Mean value, all sets
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(2)+(3)	(6)	(2)+(3)+(6)
B	1,189	1,829	2,592	169	—	2,211	299	1,332
C	9,839	6,643	5,139	786	—	5,891	836	3,067
D1	428	680	647	39	—	664	77	327
D2	4,851	6,470	9,277	422	683	7,873	428	3,468
ALL	16,307	15,622	17,656	1,416	—	16,639	1,639	8,195

**Πίνακας 5.10:** Πρόβλεψη κόστους για κάθε ζώνη (σε 1000€). Οι καταγραφές EGF και FSM-DSM δε συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό των μέσων τιμών.

Όπως αναμενόταν, η ηλικία (άρα το επίπεδο αντισεισμικού σχεδιασμού) και το είδος της κατασκευής επηρεάζουν σημαντικά την τρωτότητα της κατασκευής (**εικόνες 5.18 και 5.19**). Τα κτήρια URM είναι τα πιο ευπαθή (με στατιστικό κόστος  $208€/m^2$ ) ενώ για τα κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος η ηλικία αποτελεί μια πιο καθοριστική παράμετρο (κτήρια σχεδιασμένα με τον πιο μοντέρνο αντισεισμικό κανονισμό παρουσιάζουν ελάχιστες καταστροφές). Οι στοχαστικές κινήσεις εισαγωγής δίνουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις για όλες τις κτηριακές κατηγορίες, ενώ οι καταγεγραμμένες κινήσεις υποεκτιμούν σημαντικά τις οικονομικές απώλειες και είναι σημαντικό το ότι οι τελευταίες είναι πιο σημαντικές για κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος παρά για κτήρια URM.



**Εικόνα 5.18:** Στατιστική και εκτιμώμενη οικονομική ζημία στην περιοχή μελέτης. Οι καταγραφές EGF και FSM-DSM δε συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό.



**Εικόνα 5.19:** Κόστος/m<sup>2</sup> για διαφορετικές κατηγορίες κτηρίων και επίπεδα σεισμικού σχεδιασμού. Οι καταγραφές EGF και FSM-DSM δε συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό.



# 6

## Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ L' AQUILA

### 6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται ο σεισμός της L' Aquila ως ένας σεισμός μεσαίου μεγέθους που συνέβη κοντά σε αστική περιοχή, όπως δηλαδή ο σεισμός της Αθήνας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μελέτες των Chioccarelli και Iervolino (2010) και των Celebi et al (2010) που αναφέρονται στη σεισμική απαίτηση στο κοντινό πεδίο και τις παλμικές κινήσεις του συγκεκριμένου σεισμικού γεγονότος και στις καταγραφές του σεισμού και παρατηρήσεις των κτηριακών καταστροφών αντίστοιχα. Συνεπώς, από τα συμπεράσματα των ερευνών μπορούν να προκύψουν αντίστοιχα συμπεράσματα για το σεισμό της Αθήνας.

Στην έρευνα των Chioccarelli και Iervolino (2010) εξετάζεται η επίδραση των φαινομένων κοντινού πεδίου στο σεισμό της L' Aquila μεγέθους  $M_w=6.3$  και πιο συγκεκριμένα ερευνώνται πληροφορίες αναφορικά με την πηγή της διάρρηξης και τις θέσεις καταγραφών με αποστάσεις μέχρι  $30km$ . Επίσης, οι οριζόντιες καταγραφές κοντινού πεδίου περιστρέφονται ώστε να προκύψουν καταγραφές στην κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση και η σεισμική ροπή αναλύεται λαμβάνοντας υπόψη τα σήματα στα οποία εντοπίστηκαν παλμοί ταχύτητας, αυτά που χαρακτηρίζονται ως μη παλμικά και αυτά των αποτελεσμάτων της νέας βάσης δεδομένων NGA. Τέλος, παρουσιάζεται μια ανάλυση που αφορά την κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης.

Ο σεισμός προκάλεσε σημαντικές απώλειες ζωής, πολλές καταστροφές ιστορικών κτισμάτων πολιτισμικής αξίας καθώς και νέων οικοδομημάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αν και οι κτηριακές βλάβες ήταν σημαντικές και διασκορπισμένες σε μεγάλη περιοχή, η μελέτη των χαρακτηριστικών της ισχυρής εδαφικής κίνησης από την πλειόσειστη περιοχή υποδεικνύει ότι η μικρή διάρκεια του

κραδασμού απέτρεψε την κατάρρευση πολλών κατασκευών. Αναγνωρίζεται ότι λόγω αυτής της μικρής διάρκειας, οι τοιχοπληρώσεις μπορεί να έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην αποτροπή μεγάλων βλαβών ή κατάρρευσης των κατασκευών. Συμπεραίνεται ότι καλύτερες νέες πρακτικές ενίσχυσης οι οποίες περιλαμβάνουν διατμητικά τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να αποδειχτούν βοηθητικές στη μείωση του σεισμικού κινδύνου σε αντίστοιχες περιοχές της Ιταλίας, της Μεσογείου και ακόμα και των Ηνωμένων Πολιτειών, όπου υπάρχουν ποικίλες ελαττωματικές κατασκευές. Σκοπός της έρευνας των Celebi et al (2010) είναι η μελέτη διαφόρων κτηριακών χαρακτηριστικών της περιοχής και η συσχέτιση των παρατηρούμενων βλαβών με τα δεδομένα της σεισμικής κίνησης. Τονίζεται ότι δε λήφθηκαν υπόψη οι μετασεισμοί.

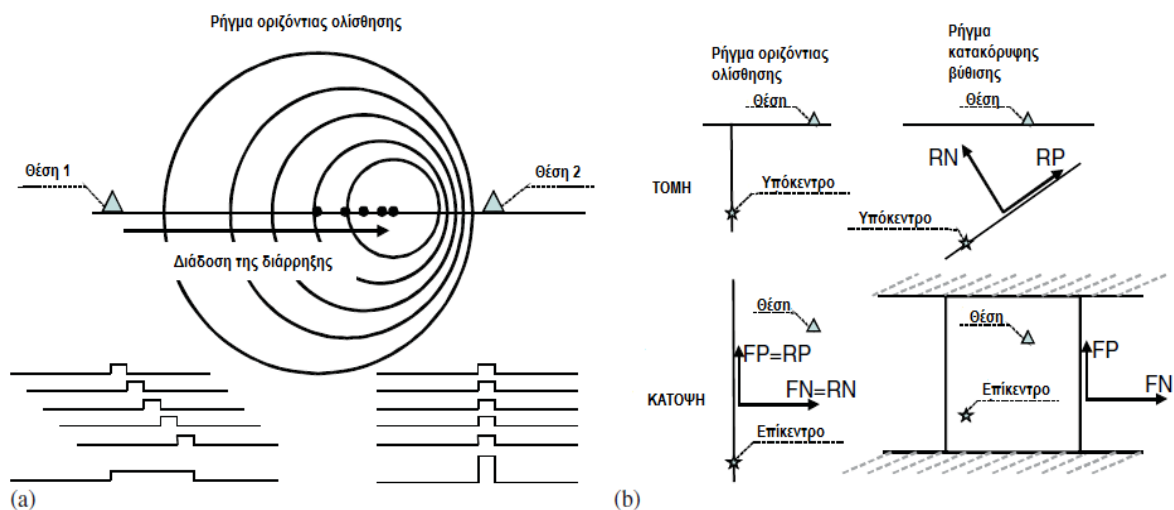
## 6.2 Τα φαινόμενα κοντινού πεδίου σύμφωνα με τους Chioccarelli και Iervolino

### 6.2.1 Η κατευθυντικότητα της διάρρηξης

Τα φαινόμενα κατευθυντικότητας της διάρρηξης είναι γνωστά εδώ και πολλά χρόνια, τόσο στους σεισμολόγους όσο και στους μηχανικούς. Για παράδειγμα, σε περιοχές που βρίσκονται σε συγκεκριμένο γεωγραφικό σχηματισμό ως προς τη διάρρηξη, η ταχύτητα των καθέτων στο ρήγμα σημάτων μπορεί να περιέχει ένα σημαντικό παλμό στην αρχή της καταγραφής, ο οποίος περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας. Τα αποτελέσματα της κυματομορφής διαφέρουν από αυτά της συνηθισμένης εδαφικής κίνησης του μακρινού πεδίου σε γεωμετρικές συνθήκες μη συμβατές με φαινόμενα κατευθυντικότητας. Οι υπάρχουσες εξισώσεις εδαφικής απόκρισης δεν είναι ικανές να συμπεριλάβουν αποτελεσματικά τα εν λόγω φαινόμενα και η πιθανοτική ανάλυση σεισμικού κινδύνου δεν είναι ικανή να προβλέψει το χαρακτηριστικό φασματικό σχήμα. Επιπρόσθετα, πιστεύεται ότι κατασκευές με δυναμική συμπεριφορά σε ένα εύρος περιόδων σχετιζόμενο με την περίοδο του παλμού μπορεί να υποβληθούν σε υποεκτιμημένη σεισμική απαίτηση. Στην έρευνα των Chioccarelli και Iervolino (2010) εξετάζεται αυτό το φαινόμενο και ποσοτικοποιούνται ελαστικά και ανελαστικά σεισμικά μεγέθη χρησιμοποιώντας τη νέα βάση δεδομένων (NGA) στην οποία ένα κλάσμα περιλαμβάνει παλμούς ταχυτήτων σχετιζόμενους με άλλες έρευνες. Η συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιεί σύγχρονα εργαλεία και μεθόδους για να προσδιορίσει την επίδραση της κατευθυντικότητας και να ποσοτικοποιήσει το σχετιζόμενο με αυτή σεισμικό κίνδυνο σε όρους σεισμικών ροπών των κατασκευών. Ως επακόλουθο, τα ίδια εργαλεία χρησιμοποιούνται σε μια πρώτη προσπάθεια εντοπισμού φαινομένων κατευθυντικότητας στις καταγραφές ενός σεισμού κανονικής διάρρηξης στην περιοχή Abruzzo της κεντρικής Ιταλίας. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι οι παλμικές επιδράσεις είναι πιθανό να συνέβησαν στο συγκεκριμένο γεγονός καθώς παρατηρήσεις παλμικών καταγραφών σε κάποιους σταθμούς κοντινού πεδίου βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η αύξηση της σεισμικής απαίτησης της παλμικής συνιστώσας συμφωνεί με τα αποτελέσματα των καταγραφών της NGA και η σεισμική απαίτηση μη παλμικών κινήσεων είναι γενικότερα όμοια με την αναμενόμενη των συνηθισμένων καταγραφών.



Οι καταγραφόμενες εδαφικές κινήσεις στο κοντινό πεδίο ενός σεισμού μπορεί να περιέχουν φαινόμενα κατευθυντικότητας τα οποία εντοπίζονται από παλμούς ταχυτήτων χαμηλής συχνότητας στην αρχή της καταγραφής. Η παρουσία αυτών των φαινομένων εξαρτάται από τη φύση της διάρρηξης και τη γεωμετρία της περιοχής. Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Somerville et al. η σεισμική ενέργεια που εκπέμπεται από την πηγή φτάνει στη θέση καταγραφής ως μια μεγάλη παλμική κίνηση αν η κατεύθυνση της διάρρηξης και η διάδοση του κύματος γίνονται προς την θέση καταγραφής, οπότε και η ταχύτητα διάδοσης της διάρρηξης είναι τόσο μεγάλη όσο η ταχύτητα διάδοσης διατμητικού κύματος. Στην **εικόνα 6.1α** παρουσιάζεται το φαινόμενο κατευθυντικότητας στην απλή περίπτωση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Καθώς η διάρρηξη που μπορεί να θεωρηθεί ως σημειακή πηγή κινούμενη κατά μήκος του ρήγματος απομακρύνεται από το επίκεντρο, εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή σεισμικών κυμάτων που δημιουργούνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Τα κύματα τείνουν να φτάσουν την ίδια χρονική στιγμή στη **θέση 2** και η ενέργεια συγκεντρώνεται σε μια παλμική κίνηση μικρής διάρκειας και υψηλού πλάτους. Αντίστροφα, στη **θέση 1** η διάρρηξη κινείται αντίθετα άρα τα αφιχθέντα κύματα τείνουν να φτάσουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές γι' αυτό η ενέργεια διασκορπίζεται σε μεγαλύτερο χρονικό εύρος και το σήμα έχει μικρότερο πλάτος.



**Εικόνα 6.1:** (α) Κατευθυντικότητα της σεισμικής ενέργειας: στιγμιότυπο των κυμάτων και (β) διευθύνσεις των επιδράσεων για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και κατακόρυφης βύθισης.

Λόγω του τρόπου διάδοσης της ακτινοβολίας, στην περίπτωση των ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης οι παλμοί κατευθυντικότητας εντοπίζονται στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, ενώ στην παράλληλη αναμένεται μικρή, αν όχι ανύπαρκτη, επίδραση του φαινομένου. Σε ρήγματα κατακόρυφης βύθισης, ο παλμός κατευθυντικότητας αναμένεται στην κάθετη διεύθυνση της βύθισης του ρήγματος, η οποία σε οριζόντια προβολή αντιστοιχεί στην κάθετη διεύθυνση της διάρρηξης.

Λόγω του ότι η διάρρηξη και η διάδοση των κυμάτων σε πραγματικά σεισμικά γεγονότα είναι πιο περίπλοκη από τα προαναφερθέντα, υπάρχουν άλλοι παράγοντες που επιδρούν και δημιουργούν προβλήματα στον εντοπισμό των παλμών ταχυτήτων



που μπορεί να μη βρίσκονται στο κοντινό πεδίο. Αντιθέτως, οι παλμικές καταγραφές είναι υψίστης σημασίας όσον αφορά τις κατασκευές, λόγω της σεισμικής απαίτησης που είναι σημαντικά διαφορετική από εκείνη των μη παλμικών κινήσεων. Η ελαστική απαίτηση των παλμικών σημάτων είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή των συνήθων καταγραφών. Ειδικότερα στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, το σχήμα του φάσματος δεν είναι σταθερό, παρουσιάζοντας μια αύξηση των φασματικών τιμών στην περιοχή γύρω από την περίοδο του παλμού και λόγω του ότι η τελευταία εντοπίζεται σε χαμηλές συχνότητες, η ανελαστική απαίτηση μπορεί να προκύψει εξαιρετικά μεγάλη και να αναπτυχθεί σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Ακολουθως, παρουσιάζεται η ενίσχυση της ελαστικής και ανελαστικής απαίτησης των παλμικών καταγραφών στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και το χαρακτηριστικό φασματικό σχήμα για παλμικές και μη κινήσεις. Η βάση δεδομένων αποτελεί υποσύνολο των κάθετων και παράλληλων στο ρήγμα περιστρεμμένων καταγραφών της NGA. Τα αποτελέσματα θα βοηθήσουν στην προσαρμογή της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου στις παλμικές καταγραφές και στην ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κατευθυντικότητας στις κατασκευές. Στην προκειμένη μελέτη εξετάζεται ο σεισμός της 6<sup>ης</sup> Απριλίου 2009 στη L' Aquila ως παράδειγμα διερεύνησης των φαινομένων κατευθυντικότητας. Εν προκειμένω, αναλύθηκαν καταγραφές κοντινού πεδίου του κύριου κραδασμού περιστρεμμένες στην κάθετη και την παράλληλη διεύθυνση του ρήγματος ώστε να προκύψουν παλμοί με την ίδια διαδικασία που προέκυψαν στο πρόγραμμα NGA. Όσοι περιείχαν παλμό ταχύτητας συγκρίθηκαν με όσους είχαν κατηγοριοποιηθεί ως παλμικοί, με τις μη περιστρεμμένες συνιστώσες και με τα μοντέλα πρόβλεψης παρουσίας παλμών κατευθυντικότητας. Τα αποτελέσματα του σεισμού της L' Aquila συγκρίθηκαν επίσης με αυτά της νέας βάσης δεδομένων ώστε να προκύψει αν είναι σε συμφωνία με τα αναμενόμενα αποτελέσματα παλμικών και μη καταγραφών κοντινού πεδίου.

### 6.2.2 Παλμική σεισμική δράση

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών των παλμικών κινήσεων σε όρους σεισμικών ροπών που καταπονούν τις κατασκευές, λήφθηκαν υπόψη καταγραφές της νέας βάσης δεδομένων NGA. Η βάση περιλαμβάνει παλμικές καταγραφές καθώς και σήματα στα οποία δεν εντοπίστηκαν παλμοί. Τα δεδομένα κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικά και μη παλμικά από τον Baker μέσω ενός αλγορίθμου βασισμένου σε κυματομορφές ο οποίος χρησιμοποιώντας ένα συντελεστή δείκτη από το 0 έως το 1, κατηγοριοποιεί τις εδαφικές κινήσεις και την περίοδο του παλμού ( $T_p$ ). Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τόσο πιθανότερη είναι η ύπαρξη παλμού στην καταγραφή. Μόνο οι κάθετες στο ρήγμα συνιστώσες της σεισμικής κίνησης που παρουσίασαν συντελεστή πάνω από 0.85 λήφθηκαν υπόψη αυθαίρετα ως παλμικές. Οι παλμοί είναι πιθανό να εντοπιστούν και στις παράλληλες στο ρήγμα συνιστώσες αλλά αυτές οι περιπτώσεις δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα έρευνα αν και η συμπεριφορά τους ερευνάται. Συγκεκριμένα, οι παλμικές κινήσεις που λήφθηκαν υπόψη διαφέρουν λίγο από αυτές που χρησιμοποίησε ο Baker αλλά βασίζονται στην ανάλυση της ίδιας βάσης δεδομένων που αποτελείται από 73 καταγραφές 23

σεισμικών γεγονότων, 12 από τα οποία προέρχονται από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης.

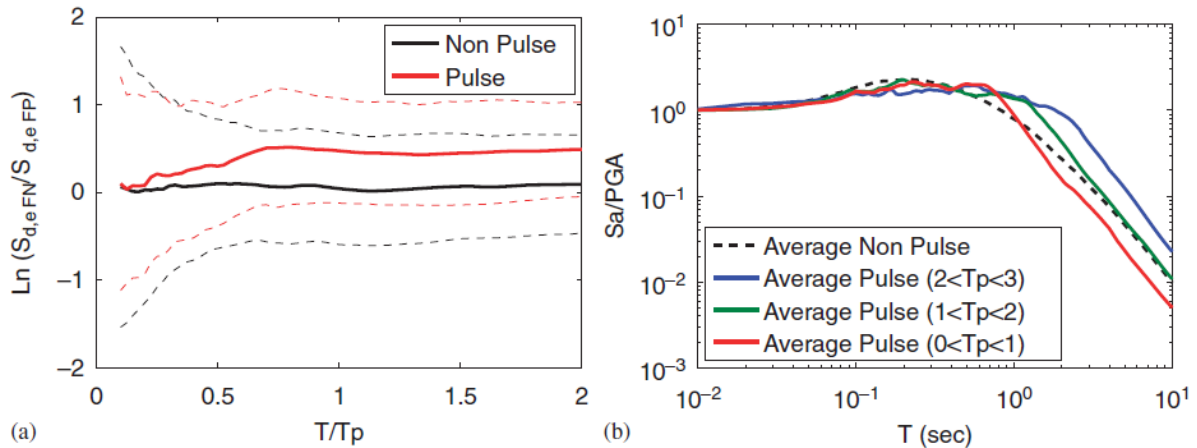
Type	Events	Records	Pulse-like records
Strike-slip	12	133	34
Non-strike-slip	11	229	39
Total	23	362	73

**Πίνακας 6.1:** Καταγραφές νέας βάσης δεδομένων NGA

Τα σεισμικά μεγέθη των γεγονότων λαμβάνουν τιμές μεταξύ  $M_w=5.2-7.5$ , ο αριθμός των καταγραφών από ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης είναι 133 και αυτές που θεωρήθηκαν παλμικές είναι 34. Οι καταγραφές που προέρχονται από άλλους τύπους ρηγμάτων είναι 229, 39 από τις οποίες θεωρήθηκαν παλμικές.

Το πρώτο χαρακτηριστικό των παλμικών κινήσεων σχετίζεται με την ελαστική σεισμική απαίτηση. Για να ερευνηθεί η επίδρασή του, χρησιμοποιήθηκε ο λόγος της ελαστικής φασματικής μετακίνησης της κάθετης συνιστώσας σε διάφορες περιόδους ( $S_{d,eFN}(T)$ ) προς την αντίστοιχη της παράλληλης συνιστώσας ( $S_{d,eFP}(T)$ ). Αναμένεται ότι λόγω του ότι παλμός εντοπίζεται κυρίως στην κάθετη συνιστώσα, ο λόγος της κάθετης προς την παράλληλη συνιστώσα είναι μεγαλύτερος για εδαφικές κινήσεις όπου η κάθετη συνιστώσα είναι παλμική σε σχέση με τις καταγραφές που η κάθετη συνιστώσα είναι μη παλμική. Ο λόγος δίνεται σε όρους μέσου φυσικού λογαρίθμου ως συνάρτηση του λόγου  $T/T_p$  (**εικόνα 6.2α**). Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι μέσες τιμές  $\pm$  τυπική απόκλιση. Αν και η διασπορά είναι σημαντικά αυξημένη, όπως συνήθως συμβαίνει για τα πλάτη εδαφικών κινήσεων, καθίσταται σαφές ότι αν υπάρχει παλμική κίνηση η ελαστική κάθετη στο ρήγμα απαίτηση είναι περίπου 50% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη παράλληλη στο ρήγμα απαίτηση. Αντίθετα, αν η κίνηση δεν είναι παλμική στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα, οι σεισμικές απαιτήσεις στην κάθετη και την παράλληλη συνιστώσα είναι συγκρίσιμες. Το δεύτερο και σημαντικότερο χαρακτηριστικό που εξετάζεται είναι το χαρακτηριστικό σχήμα του φάσματος των παλμικών κινήσεων. Στην πραγματικότητα, το φάσμα αυτών των καταγραφών παρουσιάζει ένα μέγιστο των τιμών επιταχύνσεων (μια απότομη αύξηση) στο εύρος περιόδων γύρω από την περίοδο του παλμού. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς οι παρούσες σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης δεν είναι ικανές να το περιγράψουν και για το λόγο αυτό ο σεισμικός κίνδυνος και η ανάλυση απαίτησης των κατασκευών μπορεί να είναι μη συντηρητική. Στον **πίνακα 6.2** οι παλμικές περίοδοι της βάσης δεδομένων χωρίζονται σε κατηγορίες και για καθεμιά παρουσιάζεται ο αριθμός των παλμικών κινήσεων. Στην **εικόνα 6.2b** δίνονται οι μέσες λογαριθμικές τιμές του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης των παλμικών κινήσεων μερικών κατηγοριών, το πιο σημαντικό στοιχείο δηλαδή της δυναμικής συμπεριφοράς των συνήθων κατασκευών. Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των διαφορετικών εδαφικών κινήσεων όλα τα φάσματα ομαλοποιήθηκαν

δηλαδή όλες οι συνιστώσες διαιρέθηκαν με την  $rga$ . Παρατηρείται, τέλος, το μη σταθερό σχήμα φάσματος των παλμικών κινήσεων.



**Εικόνα 6.2:** (a) λόγοι κάθετης προς παράλληλη μετακίνηση και (b) φάσμα μέσης ελαστικής επιτάχυνσης

Παρ’ όλα αυτά, η κανονικοποίηση με την  $rga$  που χρησιμοποιείται στην **εικόνα 6.2b**, λειτουργεί μόνο στο εύρος των υψηλών συχνοτήτων. Για αυτό το λόγο, η ελαστική απαίτηση θα έπρεπε να αναλυθεί καλύτερα, λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίσεις του μέτρου έντασης της θεωρούμενης εδαφικής κίνησης ( $IM$ ) μέσω μιας κατάλληλης σχέσης πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης:

$$\varepsilon = [\log(IM) - \overline{\log(IM)}] / \sigma_{\log(IM)} \quad [1]$$

Στην **εξίσωση [1]** το  $IM$  είναι η καταγεγραμμένη παράμετρος εδαφικής κίνησης, το  $\overline{\log(IM)}$  είναι η μέση τιμή των λογαρίθμων των  $IM$  που προέκυψαν από τη σχέση εξασθένησης και το  $\sigma_{\log(IM)}$  είναι η τυπική απόκλιση των λογαρίθμων των  $IM$ . Η σχέση εξασθένησης της εδαφικής κίνησης είναι αυτή των Boore – Atkinson και στην **εικόνα 6.3** παρουσιάζονται οι τιμές του  $\varepsilon$  για την παράλληλη και την κάθετη συνιστώσα στην περίπτωση της παλμικής (α) και της μη παλμικής (β) εδαφικής κίνησης. Τα αποτελέσματα του  $\varepsilon$  για τις παλμικές κινήσεις προτού περιστραφούν παρουσιάζουν ένα μέγιστο γύρω από την τιμή της  $T=T_p$ , το οποίο ποτέ δεν ξεπερνά τη μονάδα. Οι περιστρεμμένες καταγραφές της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας έχουν το ίδιο σχήμα αλλά παρουσιάζουν μέγιστο στο 2. Στην περίπτωση των εδαφικών κινήσεων όπου η κάθετη συνιστώσα δεν είναι παλμική, το  $\varepsilon$  δεν έχει μια σαφή συμπεριφορά (**εικόνα 6.3b**). Επιπρόσθετα, η περιστροφή δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. από τη σύγκριση των παλμικών και μη κινήσεων φαίνεται ότι οι τιμές του  $\varepsilon$  στις πρώτες είναι συστηματικά μεγαλύτερες από αυτές της δεύτερης περίπτωσης, επιβεβαιώνοντας ότι οι παλμικές κινήσεις είναι ισχυρότερες από τις μη παλμικές.

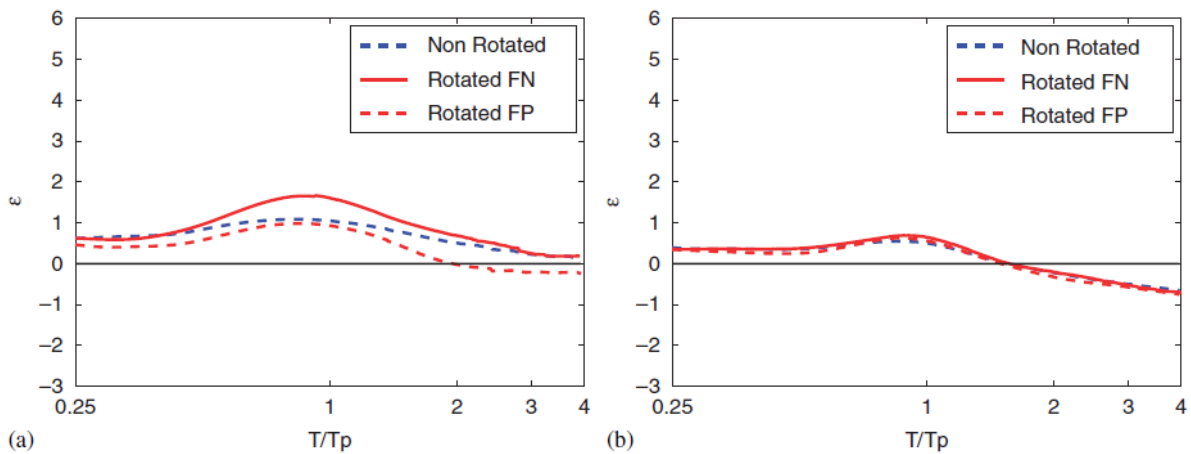
$T_p$	[0 s, 1 s]	[1 s, 2 s]	[2 s, 3 s]	[3 s, 4 s]	[4 s, 5 s]	[5 s, 6 s]	[6 s, 12 s]
Number of records	18	18	8	10	9	5	5

**Πίνακας 6.2:** Αριθμός καταγραφών για διάφορες κατηγορίες  $T_p$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ποσοτικοποιώντας το  $\varepsilon$  για τις παλμικές κινήσεις επιτρέπεται ο υπολογισμός του χαρακτηριστικού φασματικού σχήματος, τροποποιώντας τις εξισώσεις εξασθένισης χωρίς τη χρήση κάποιας συγκεκριμένης εξ αυτών. Στην κατεύθυνση αυτή, ο Baker πρότεινε ένα συντελεστή τροποποίησης για μια υπάρχουσα εξίσωση εξασθένισης:

$$\overline{\ln(S_{a,e}(T))} = \overline{\ln(S_{a,e}(T))} + e^{-(\ln(\frac{T}{T_p}))^2} \quad [2]$$

όπου  $\overline{\ln(S_{a,e}(T))}$  είναι η προβλεπόμενη φασματική επιτάχυνση τροποποιημένη για παλμικά χαρακτηριστικά και ο τελευταίος όρος του δεξιού μέλους μοντελοποιεί το απότομο μέγιστο των φασματικών τιμών, έχοντας μέγιστο για  $T=T_p$ . Αυτή η εξίσωση γενικότερα χρησιμοποιείται στην παρούσα έρευνα για την προσαρμογή της ανάλυσης σεισμικού κινδύνου ώστε να συμπεριλαμβάνει και τα φαινόμενα κοντινού πεδίου.



**Εικόνα 6.3:** Μέσες τιμές  $\varepsilon$  για εδαφικές κινήσεις όπου η κάθετη συνιστώσα είναι παλμική (a) και μη παλμική (b).

Υπολογίστηκαν επίσης δυο ολοκληρωτικές παράμετροι  $IM$  της βάσης δεδομένων NGA ώστε να εξακριβωθεί εάν υπάρχει σημαντική επίδραση των φαινομένων κοντινού πεδίου στη διάρκεια των σημάτων. Οι παράμετροι αυτοί είναι η ένταση Arias ( $A_I$ ) και η σημαντική διάρκεια ( $S_D$ ). Ο **πίνακας 6.3** απεικονίζει τους στατιστικούς μέσους και τις διαφορές μεταξύ των ποσοστών 25% και 75% των εμπειρικών διασπορών. Και οι δυο παράμετροι αποτελούν ισχυρές στατιστικές εκτιμήσεις.

Το  $A_I$  αποτελεί μέτρο της ενέργειας, δηλαδή συνάρτηση του σεισμικού μεγέθους, της απόστασης της θέσης μελέτης από την πηγή και των εδαφικών χαρακτηριστικών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τη σύγκριση αντίστοιχων σημάτων, διαφορετικά όμως περιστρεμμένων. Αναμένεται ότι για τις παλμικές καταγραφές ο λόγος  $A_I$  της κάθετης προς την παράλληλη συνιστώσα είναι σημαντικά μεγαλύτερος της μονάδας καθώς η κάθετη συνιστώσα είναι πιο ενεργητική. Στην πραγματικότητα, οι μέσες τιμές των λόγων ισούνται με 1.23 (με τυπική απόκλιση ίση

με 0.63) και 1.07 (με τυπική απόκλιση 0.57) για τις παλμικές και μη παλμικές κινήσεις αντίστοιχα.

Το  $S_D$  είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία η εδαφική κίνηση απελευθερώνει το 90% της συνολικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση σημάτων από διαφορετικές θέσεις και σεισμικά γεγονότα. Αναμένεται ότι τα παλμικά σήματα έχουν σημαντική διάρκεια χαμηλότερη από τα μη παλμικά. Οι τιμές του **πίνακα 6.3** φαίνεται να επιβεβαιώνουν ποσοτικά αυτό το γεγονός, με μέσες τιμές ίσες με 8.42 και 10.93 για τις κάθετες στο ρήγμα συνιστώσες των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών αντίστοιχα. Η **εικόνα 6.4** δείχνει τα ιστογράμματα των  $A_I$  και  $S_D$  και τις μέσες τιμές τους (κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές).

Type	Sample size	$A_I$ (m/s)		$S_D$ (s)		
		Median	Range	Median	Range	
Pulse-like	FN	73	0.87	1.49	8.42	5.82
	FP	73	0.73	1.34	9.10	5.12
Non-pulse-like	FN	289	0.42	0.86	10.93	6.58
	FP	289	0.40	0.85	11.10	6.69

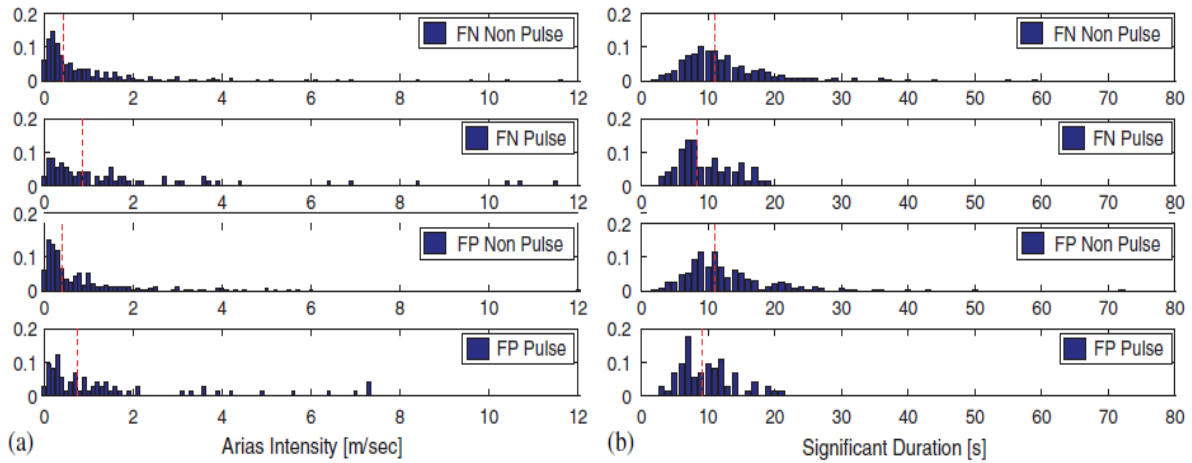
**Πίνακας 6.3:** Συγκεντρωτικές τιμές IM

Για τη μελέτη της επίδρασης των παλμικών χαρακτηριστικών σε μη γραμμικές κατασκευές, εφαρμόστηκε διγραμμική ανάλυση μονοβάθμιου συστήματος (SDOF) με κράτυνση 3%, απόσβεση 5% και διαφορετικές τιμές συντελεστή απομείωσης αντοχής ( $R_s$ ), σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$R_s = S_{a,e}(T) \cdot m/F_y \quad [3]$$

όπου το  $T$  είναι η περίοδος ταλάντωσης του SDOF,  $m$  η μάζα του και  $F_y$  είναι η αντοχή διαρροής.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι στη μη γραμμική περίπτωση ο λόγος της κάθετης προς την παράλληλη συνιστώσα είναι συγκριτικά μεγαλύτερος για τις καταγραφές στις οποίες η κάθετη συνιστώσα είναι παλμική (**εικόνες 6.5a-6.5c**). Οι λόγοι κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 1.39-1.67 και 1.40-1.72 για την κάθετη και την παράλληλη διεύθυνση αντίστοιχα, για τιμές του  $R_s$  ίσες με 2, 4 και 6. Επιπρόσθετα, μη προβλεπόμενη απαίτηση μετακινήσεων μπορεί να προκύψει για κατασκευές που λειτουργούν ως μη γραμμικοί ταλαντωτές σε εύρος περιόδων γύρω από αυτή του παλμού. Ένας τρόπος οπτικοποίησης αυτής της παρατήρησης επιτυγχάνεται μέσω της γραφικής απεικόνισης του λογαρίθμου του πηλίκου της ανελαστικής ( $S_{d,i}$ ) προς την ελαστική ( $S_{d,e}$ ) μετακίνηση του διγραμμικού συστήματος SDOF. Στις **εικόνες 6.5d-6.5f** παρουσιάζονται για τρεις τιμές του  $R_s$  οι μέσες συνιστώσες της κάθετης και παράλληλης στο ρήγμα εδαφικής κίνησης όπου η κάθετη είναι παλμική και της μη παλμικής κάθετης συνιστώσας. Οι τελευταία περίπτωση θεωρείται συνήθης οπότε χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς μετρήσεων. Οι παράλληλες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης όπου η κάθετη συνιστώσα δεν είναι παλμική δεν σχεδιάστηκαν καθώς η καμπύλη συμπίπτει με εκείνη των κάθετων συνιστωσών.



Εικόνα 6.4: Ιστογράμματα (a) έντασης Arias και (b) σημαντικής διάρκειας για των καταγραφών NGA

Οι καμπύλες των κάθετων παλμικών καταγραφών μεγιστοποιούν την τιμή  $S_{d,i}/S_{d,e}$  για  $T/T_p \approx 0.3-0.5$ , υποδηλώνοντας μια συγκριτικά μεγαλύτερη ανελαστική απαίτηση για τις κινήσεις κοντινού πεδίου λόγω του ότι η επιμηκυμένη περίοδος κατασκευής αυξάνει την τιμή της όσο πλησιάζει προς την περίοδο του παλμού  $T_p$ .

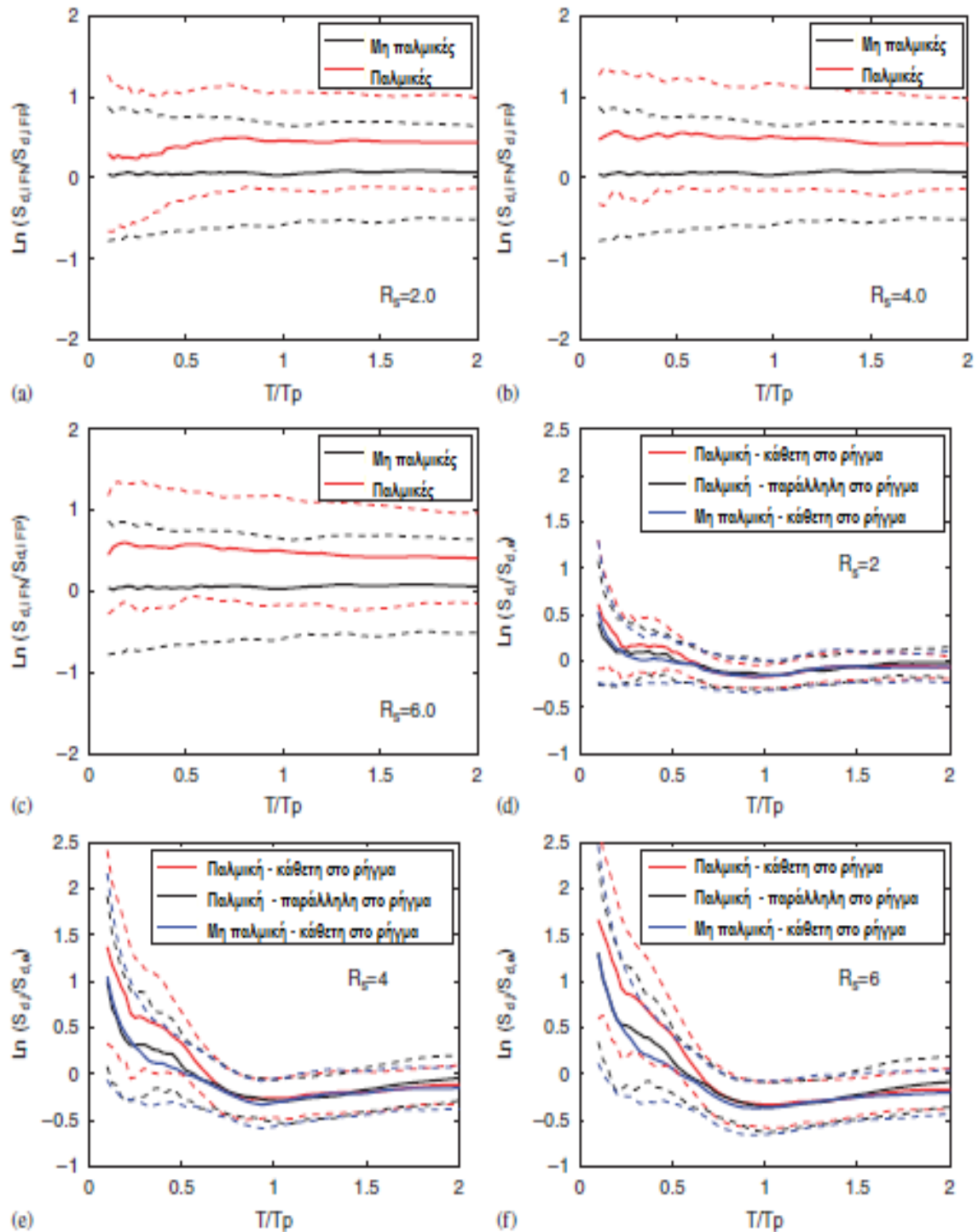
Οι παράλληλες στο ρήγμα συνιστώσες όταν η κάθετες είναι παλμικές, παρουσιάζουν μικρότερη αύξηση σε σχέση με τις κάθετες, παρ' ότι δεν συμπίπτουν επακριβώς με τις συνήθεις καταγραφές. Αυτό είναι αναμενόμενο μέχρι κάποιο βαθμό καθώς στην παράλληλη διεύθυνση η επίδραση της κατευθυντικότητας είναι ασθενέστερη από αυτή στην κάθετη διεύθυνση, αλλά δεν είναι μηδενική.

Στον **πίνακα 6.4** παρουσιάζονται οι μέσοι λόγοι  $S_{d,i}/S_{d,e}$  για παλμικές κινήσεις στην κάθετη συνιστώσα, τις προκύπτουσες παράλληλες κινήσεις για την προηγούμενη περίπτωση και τις μη παλμικές κινήσεις της κάθετης συνιστώσας, όλες υπολογισμένες για τιμές  $T/T_p$  για τις οποίες οι διαφορές μεταξύ παλμικών κάθετων και μη παλμικών κάθετων συνιστωσών είναι μεγαλύτερες. Στην κάθετη διεύθυνση η αύξηση των παλμικών κινήσεων σχετικά με τις μη παλμικές ισούνται με 18, 53 και 71% για τιμές  $R_s$  ίσες με 2, 4 και 6 αντίστοιχα. Η αύξηση των ίδιων λόγων για τις παράλληλες συνιστώσες όταν η κάθετη είναι μη παλμική σε σχέση με τις μη παλμικές κάθετες ισούνται με 9, 15 και 21%. Ως αποτέλεσμα, ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική απόκριση δεν είναι ίδιος με αυτόν των τυπικών καταγραφών δηλαδή μπορεί να παραβιάσει τον κανόνα των ίσων μετακινήσεων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί κατάλληλα στο σεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών.

	$T/T_p$	Pulse-FN	Pulse-FP	Non-pulse-FN
$R_s=2$	0.325	1.196	1.104	1.015
$R_s=4$	0.350	1.738	1.304	1.133
$R_s=6$	0.325	2.182	1.543	1.278

Πίνακας 6.4: Τιμές λόγων  $S_{d,i}/S_{d,e}$  σχετιζόμενες με τη μέγιστη τιμή της κάθετης παλμικής κίνησης και της κάθετης μη παλμικής





**Εικόνα 6.5:** Λόγοι κάθετης προς παράλληλη ανελαστική μετακίνηση (a, b και c) και ανελαστικής προς ελαστική απαίτηση μετακίνησης (d, e και f).

### 6.3 Ο σεισμός της L' Aquila

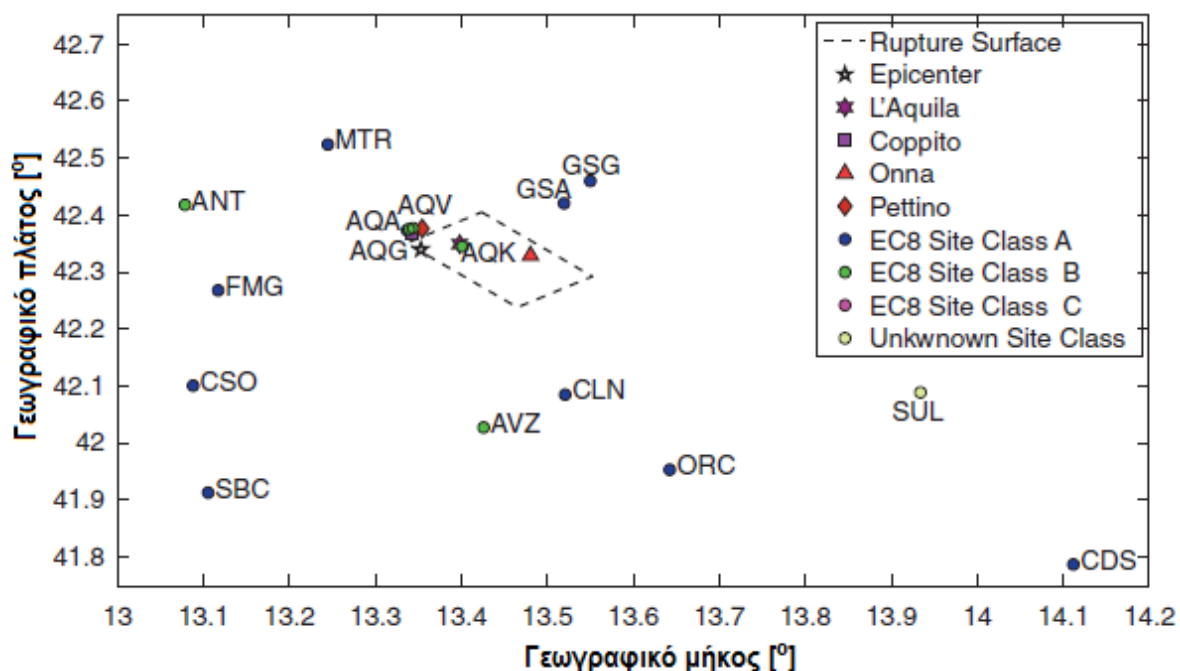
Ένας σημαντικός σεισμός ρήγματος κανονικής διάρρηξης με επίπεδο διάρρηξης περίπου ορθογωνικό, διαστάσεων  $17 \cdot 14 \text{ km}^2$ , συνέβη στην περιοχή Abruzzo της κεντρικής Ιταλίας στις 6 Απριλίου 2009 στις  $1:32:39 \text{ UTC}$  (εικόνα 6.6). Σύμφωνα με το εθνικό ιταλικό ινστιτούτο γεωφυσικής και ηφαιστιολογίας, το μέγεθος του σεισμού ήταν  $M_w=6.3$  ( $M_s=6.3$ ,  $M_f=5.8$ ). Οι συντεταγμένες του επικέντρου ήταν



42.348N και 13.380E και το υποκεντρικό βάθος κυμαίνεται μεταξύ 12 και 0.6km από την επιφάνεια. Οι μετασεισμοί προσδιορίζουν μια αξιοσημείωτα απλή και επίπεδη επιφάνεια διάρρηξης που βυθίζεται 55° προς το βορρά και περνά ακριβώς κάτω από την πόλη L' Aquila σε βάθος περίπου 6km. Το επίπεδο διάρρηξης χαρακτηρίζεται από διεύθυνση 142° και γωνία ολίσθησης 90°. Οι συντεταγμένες των κορυφών του επιπέδου διάρρηξης και του υποκέντρου παρουσιάζονται στον **πίνακα 6.5**. Η κύρια δόνηση καταγράφηκε από τους σταθμούς του εθνικού δικτύου επιταχύνσεων (RAN) της ιταλικής αστικής προστασίας. Στην **εικόνα 6.6** παρουσιάζεται η προβολή του επιπέδου της διάρρηξης με την επικεντρική περιοχή, οι καταγραφικοί σταθμοί, οι κατηγορίες του ευρωκώδικα 8 και κάποιες από τις πιο ευπαθείς περιοχές. Ο σεισμός πιθανότατα προήλθε από μια διάρρηξη του κανονικού ρήγματος Paganica. Οι γεωλόγοι εντόπισαν μια επιφανειακή διάρρηξη μήκους περίπου 2.5 – 3km κοντά στα ρήγματα Paganica και Bazzano. Μια αρχική μοντελοποίηση των μετασεισμικών επιφανειακών μετακινήσεων μέσω απομακρυσμένων αισθητήρων αποδεικνύει ότι η διάρρηξη διαδόθηκε κυρίως 15km προς τα πάνω και 20km κατά μήκος του ρήγματος και προς τα βορειοανατολικά του υποκέντρου.

	Fault plane vertices				Hypocenter
Longitude	13.424°	13.552°	13.465°	13.336°	13.353°
Latitude	42.405°	42.293°	42.238°	42.351°	42.340°
Depth (km)	0.600	0.600	11.800	11.800	11.800

**Πίνακας 6.5:** Συντεταγμένες υποκέντρου και επιπέδου της διάρρηξης



**Εικόνα 6.6:** Χάρτης της επιφάνειας διάρρηξης και των σταθμών καταγραφής έως αποστάσεις 60km από την επιφανειακή προβολή του ρήγματος.

Στο συγκεκριμένο γεγονός σημειώθηκαν 305 νεκροί και 1500 τραυματίες. Ένα σημαντικό ποσοστό απωλειών ανθρώπινης ζωής (περίπου 134) συνέβη σε κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος (στο περίπου 1% των συνολικών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος). Η L' Aquila, η μεγαλύτερη πόλη της περιοχής, με πληθυσμό 66813 ατόμων αποδεκατίστηκε καθώς το κύριο σεισμικό γεγονός άφησε 64812 ανθρώπους άστεγους. Το κέντρο της πόλης χαρακτηρίστηκε από ένταση 8.5 βαθμών της κλίμακας MCS. Στη L' Aquila όπως και σε άλλες γειτονικές περιοχές κανείς δεν επιτρεπόταν να μένει στο σπίτι του λόγω του φόβου κατάρρευσης των ήδη κατεστραμμένων κατασκευών. Στο μικρό χωριό Onna, συνολικού πληθυσμού 700 ατόμων, σημειώθηκαν 40 νεκροί, η κλίμακα εντάσεως άγγιξε το 9.5 και η διάρρηξη βρισκόταν μόλις 3km κάτω από το έδαφος. Ανεπίσημα, 60000 κατασκευές υπέστησαν βλάβες και εκτιμάται ότι το 10% αυτών είχαν μελέτη μηχανικού. Επίσης, περίπου 53000 κατασκευές που βρίσκονταν εκτός των περισσότερο πληγέντων περιοχών, εξετάστηκαν από ομάδα μηχανικών οι οποίοι έκριναν 54% αυτών κατάλληλες και 29% ακατάλληλες για κατοικία. Η **εικόνα 6.7** απεικονίζει τη γενικότερη περιοχή του σεισμού και το επίκεντρο σε συνάρτηση με τις εδαφικές καθιζήσεις και άλλα ενδιαφέροντα σημεία της έρευνας των Celebi et al (2010).



**Εικόνα 6.7:** (a) γενικός χάρτης της Ιταλίας που απεικονίζει την περιοχή του σεισμού. (b) χάρτης της περιοχής του σεισμού

Το σεισμό κατέγραψαν 58 επιταχυνσιογράφοι, εγκατεστημένοι σε διάφορες θέσεις και προέκυψαν 113 καταγραφές σε επικεντρικές αποστάσεις έως 700km, από τις οποίες απομονώθηκαν οι καταγραφές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), της μέγιστης εδαφικής ταχύτητας (PGV) και των αντίστοιχων φασματικών μεγεθών. Τέλος, ο καταγραφικός σταθμός AQU που βρισκόταν πλησιέστερα στο κέντρο της L' Aquila, κατέγραψε τον κύριο σεισμικό κραδασμό. Έως τα τέλη Ιουνίου 2009 είχαν καταγραφεί 22 μετασεισμοί μεγέθους  $M > 4$ , καθένας από τους οποίους καταγράφηκε από περίπου 40 καταγραφικούς σταθμούς. Ο μεγαλύτερος σημειώθηκε νότια του κυρίως γεγονότος στις 7 Απριλίου 2009 και είχε μέγεθος  $M_w = 5.6$  και οι αμέσως μικρότεροι στις 9 Απριλίου 2009 βόρεια της L' Aquila με μεγέθη 5.4 και 5.3 αντίστοιχα. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν καταγραφές από το ιστορικό κέντρο της πόλης.

Οι ισχυροί σεισμοί δεν είναι ασυνήθιστοι στην περιοχή Abruzzo. Κατά τα παρελθόντα 700 χρόνια συνέβησαν στην περιοχή τουλάχιστον 5 σεισμικά γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων και των δυο μεγαλύτερων σεισμών στην περιοχή το 1461 και 2009, με παρόμοια μακροσεισμικά χαρακτηριστικά. Ο μεγαλύτερος πρόσφατος σεισμός πριν το 2009 είχε μέγεθος  $M_w=7$ , επίκεντρο κοντά στο Avezzano και συνέβη το 1915 στη λεκάνη Fucino προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές στη L' Aquila σε ακτίνα 35km από το κέντρο της.

Η L' Aquila βρίσκεται 110km έξω από τη Ρώμη και τόσο αυτή όσο και τα γειτονικά χωριά δέχτηκαν επιταχύνσεις μεγαλύτερες των 0.3g κατά τη διάρκεια του σεισμού. Με εξαίρεση το Monticchio το οποίο βρίσκεται στην ενδιάμεση επικεντρική περιοχή και πολύ κοντά στην Onna (1.5km απόσταση), πολλές άλλες πόλεις και χωριά υπέστησαν σοβαρότατες καταστροφές και εγκαταλείφθηκαν οριστικά για πολλούς μήνες μετά το σεισμό.

## 6.4 Παρουσίαση της μελέτης των Chioccarelli και Iervolino (2010) για το σεισμό της 6<sup>ης</sup> Απριλίου 2009 στη L' Aquila της Ιταλίας

### 6.4.1 Γενικές παρατηρήσεις

Στην προκειμένη έρευνα, οι κυματομορφές επιτάχυνσης διορθώθηκαν βάσει γραμμικής διόρθωσης βάσης και του φίλτρου Butterworth ( $low-cut=0.1Hz$ ,  $high-cut=25Hz$ ,  $order=4$ ), το οποίο θεωρείται συντηρητικό από κάποιους μελετητές. Οι οριζόντιες συνιστώσες κάθε καταγραφής περιστράφηκαν από τις πραγματικές διευθύνσεις των επιταχυνσιογράφων (διεύθυνση βορρά-νότου και ανατολής-δύσης) σε διευθύνσεις παράλληλες και κάθετες στο ρήγμα. Στην παρούσα μελέτη, λήφθηκαν υπόψη μόνο καταγραφές με απόσταση από το ρήγμα έως 30km (13 σε συνολικό αριθμό) και η απόσταση αυτή θεωρήθηκε το όριο επέκτασης του κοντινού πεδίου. Ο **πίνακας 6.6** περιλαμβάνει κάποιες μέγιστες και συνολικές τιμές των  $IM$  της καταγραφείσας κίνησης στο κοντινό πεδίο, δηλαδή τιμές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης, τιμές  $A_i$ , τιμές του συντελεστή Cosenza και Manfredi ( $I_D$ ), τιμές του  $S_D$  και τιμές διάρκειας για 5% $rga$  ( $B_D$ ).

### 6.4.2 Εντοπίζοντας τις παλμικές καταγραφές

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Baker, υπολογίζεται ένας παλμικός δείκτης για κάθε καταγραφή ο οποίος αν λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 0.85 και κάτω του 0.15 η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική και μη παλμική αντίστοιχα, ενώ καταγραφές με δείκτη ενδιάμεσης τιμής χαρακτηρίζονται ως αμφίβολες. Για το διαχωρισμό των παλμικών σημάτων χρησιμοποιούνται και δυο άλλα χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά την εμφάνιση παλμού στην αρχή της καταγραφής όπου αν συμβαίνει τότε η κίνηση χαρακτηρίζεται ως παλμική. Το δεύτερο αναφέρεται στη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV), η οποία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 30cm/sec ώστε να θεωρηθεί ότι υφίσταται παλμική κίνηση. Στην παρούσα έρευνα το δεύτερο αυτό χαρακτηριστικό αγνοείται.

Στον **πίνακα 6.7** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του παλμικού διαχωρισμού για τις καταγραφές του **πίνακα 6.6**, όπου οι παλμικές κινήσεις παρουσιάζονται με

έντονη γραφή. Αναλύθηκαν συνολικά 13 σταθμοί, 7 από τους οποίους περιείχαν οριζόντια συνιστώσα που χαρακτηρίστηκε παλμική, 6 στην κάθετη συνιστώσα και μόνο ένας στην παράλληλη (AQV). Ο τελευταίος σταθμός έχει κάθετη συνιστώσα που θεωρήθηκε ως αμφίβολη, ενώ τα ελαστικά φάσματα μετακινήσεων είναι παρόμοια και στις δυο διευθύνσεις. Στην **εικόνα 6.8** παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του εξαγόμενου αλγορίθμου της παλμικής καταγραφής του σταθμού AQK με καταγεγραμμένη ταχύτητα, εξαγόμενους παλμούς, εναπομένοντα σήματα και χρονοϊστορία μετακινήσεων. Οι κάθετες και παράλληλες συνιστώσες παρουσιάζονται στο αριστερά και δεξιά πλαίσιο αντίστοιχα. Το πρώτο είναι παλμικό με τιμή 1 και το δεύτερο μη παλμικό με τιμή 0. Ο AQK αποτελεί το σταθμό με το ισχυρότερο παλμικό σήμα στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση.

	Record	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PGD* (cm)	A <sub>I</sub> (cm/s)	I <sub>D</sub> (-)	S <sub>D</sub> (s)	B <sub>D</sub> (s)
1	AQV_FN	725.37	37.63	5.53	228.76	5.24	7.69	25.14
	AQV_FP	474.42	31.41	7.07	253.90	10.64	7.61	66.41
2	AQG_FN	357.16	34.08	8.19	114.47	5.88	8.16	18.23
	AQG_FP	391.79	26.60	5.45	144.91	8.68	8.45	25.17
3	AQA_FN	425.86	28.67	7.11	132.60	6.79	6.91	14.78
	AQA_FP	404.55	19.91	3.32	198.89	15.50	7.72	67.33
4	AQK_FN	413.57	45.01	13.22	138.10	4.63	10.55	66.06
	AQK_FP	261.99	16.66	5.32	81.96	11.73	15.37	66.51
5	GSA_FN	153.52	10.91	3.35	37.13	13.86	9.38	25.53
	GSA_FP	197.58	6.02	1.37	46.50	24.48	8.02	24.10
6	CLN_FN	99.54	5.48	1.76	3.87	4.43	8.00	20.05
	CLN_FP	63.29	5.82	2.26	3.75	6.37	6.53	19.13
7	AVZ_FN	61.91	13.06	3.40	8.43	6.51	21.56	51.28
	AVZ_FP	63.41	9.89	3.54	9.14	9.10	18.25	49.76
8	MTR_FN	51.04	4.08	0.93	4.02	12.04	14.84	45.93
	MTR_FP	57.19	3.04	0.88	5.17	18.59	11.39	34.84
9	GSG_FN	20.31	3.66	2.14	0.81	6.81	10.65	33.28
	GSG_FP	25.52	2.31	0.71	0.69	7.33	10.97	25.59
10	FMG_FN	21.87	2.12	0.98	1.34	18.12	22.76	60.38
	FMG_FP	24.43	1.90	0.92	0.88	11.87	20.58	41.78
11	ANT_FN	26.66	2.25	0.47	1.67	17.33	21.68	54.48
	ANT_FP	19.19	1.99	0.43	0.96	15.74	22.87	64.52
12	CSO_FN	18.91	2.24	1.00	0.89	13.11	21.38	58.06
	CSO_FP	13.74	1.48	0.43	0.48	14.74	27.23	65.69
13	ORC_FN	72.64	6.88	1.11	4.77	5.97	10.24	30.10
	ORC_FP	31.85	2.86	0.99	1.83	12.60	14.00	50.95

**Πίνακας 6.6:** Μέγιστες και ολικές τιμές των IM των καταγραφών κοντινού πεδίου του σεισμού της L' Aquila

Μελετώντας αμφίβολες περιπτώσεις, αποφασίστηκε η κατηγοριοποίηση ως παλμικών των κάθετων σημάτων της GSA. Τα ελαστικά φάσματα μετακινήσεων φαίνεται να επιβεβαιώνουν αυτή την απόφαση ενώ όλες οι υπόλοιπες αμφίβολες περιπτώσεις θεωρήθηκαν μη παλμικές.

Εν συνεχεία, εφαρμόστηκε ένα μοντέλο πρόβλεψης της εμφάνισης παλμού, βασιζόμενο στις παραμέτρους των Somerville et al. Οι παράμετροι στην περίπτωση των ρηγμάτων κατακόρυφης βύθισης είναι η κοντινότερη απόσταση στη διάρρηξη ( $C/Std$  ή  $R$ ), το κλάσμα της επιφάνειας διάρρηξης που βρίσκεται μεταξύ του υποκέντρου και της θέσης καταγραφής ( $d$ ) και η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης της διάρρηξης και της διεύθυνσης που συνδέει το υπόκεντρο με τη θέση καταγραφής ( $\varphi$ ). Το θεωρούμενο μοντέλο της **εξίσωσης [4]** προέκυψε μέσω λογιστικής μείωσης και είναι εφαρμόσιμο για εύρη 5-30km, 0-20km και 0-90° των  $R$ ,  $d$  και  $\varphi$  αντίστοιχα.

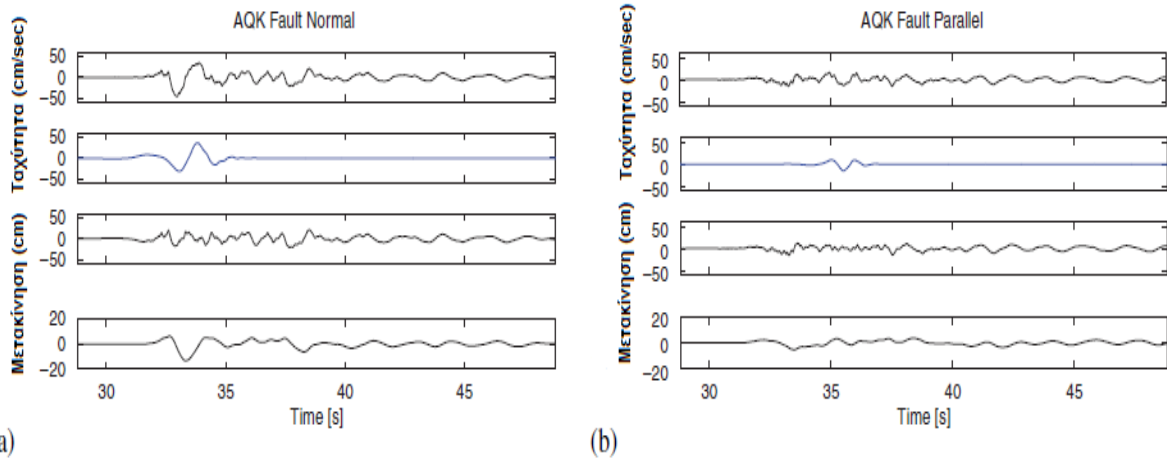
$$P[pulse|R, d, \varphi] = \frac{e^{0.553-0.055R-0.0267d-0.027\varphi}}{1+e^{0.553-0.055R-0.0267d-0.027\varphi}} \quad [4]$$

Στην **εικόνα 6.9** παρουσιάζονται οι γεωμετρικές προβλέψεις τριών διαφορετικών περιπτώσεων σχετικής θέσης διάρρηξης – θέσης καταγραφής του σεισμού στη L' Aquila. Ο ορισμός με τις ζώνες αναφέρεται σε αυτό που αποτυπώνεται στην **εικόνα 6.10**: στην περίπτωση 0 το  $\varphi$  είναι μεγαλύτερο από 90° ενώ οι περιπτώσεις 1 και 2 διαφέρουν λόγω της γεωμετρικής συσχέτισης μεταξύ των τριών παραμέτρων της πιθανότητας πρόβλεψης.

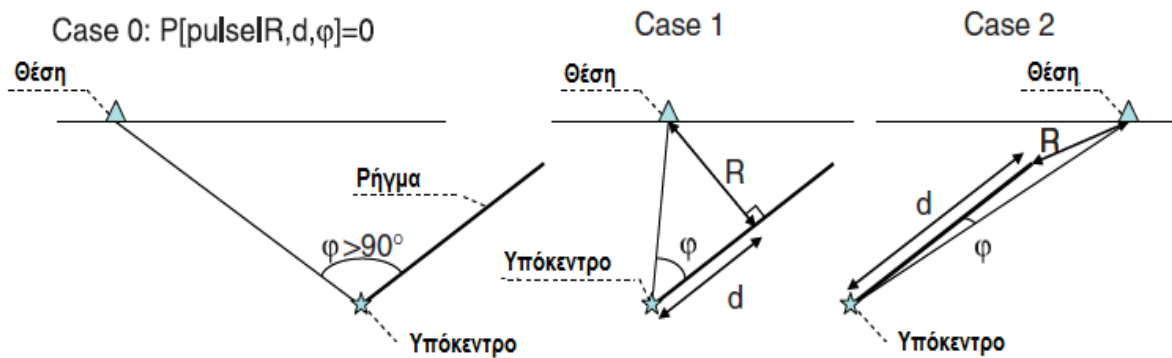
Component	Pulse indicator	Late pulse indicator	PGV (cm/s)	Classified as pulse	$T_p$ (s)
AQV_FN	0.70	0.00	37.63	No	0.53
AQV_FP	<b>0.85</b>	<b>0.00</b>	<b>31.41</b>	Yes	<b>1.06</b>
AQG_FN	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>34.08</b>	Yes	<b>1.02</b>
AQG_FP	0.71	0.00	26.60	No	1.11
AQA_FN	<b>0.93</b>	<b>0.00</b>	<b>28.67</b>	Yes	<b>0.74</b>
AQA_FP	0.00	0.00	19.91	No	0.62
AQK_FN	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>45.01</b>	Yes	<b>1.99</b>
AQK_FP	0.00	1.00	16.66	No	1.26
GSA_FN	<b>0.72</b>	<b>0.00</b>	<b>10.91</b>	Yes	<b>3.13</b>
GSA_FP	0.00	0.00	6.02	No	1.97
CLN_FN	0.05	1.00	5.48	No	5.17
CLN_FP	0.01	1.00	5.82	No	4.81
AVZ_FN	0.97	1.00	13.06	No	1.88
AVZ_FP	0.00	1.00	9.89	No	1.61
MTR_FN	0.01	1.00	4.08	No	2.60
MTR_FP	0.00	1.00	3.04	No	2.16
GSG_FN	<b>0.95</b>	<b>0.00</b>	<b>3.66</b>	Yes	<b>4.03</b>
GSG_FP	0.08	1.00	2.31	No	5.17
FMG_FN	0.00	1.00	2.12	No	4.03
FMG_FP	0.01	0.00	1.90	No	4.76
ANT_FN	0.00	0.00	2.25	No	0.95
ANT_FP	0.00	0.00	1.99	No	2.76
CSO_FN	0.00	1.00	2.24	No	4.82
CSO_FP	0.00	1.00	1.48	No	2.22
ORC_FN	<b>0.92</b>	<b>0.00</b>	<b>6.88</b>	Yes	<b>0.83</b>
ORC_FP	0.00	1.00	2.86	No	4.47

**Πίνακας 6.7:** Αποτελέσματα του εντοπισμού παλμού στις οριζόντιες συνιστώσες





**Εικόνα 6.8:** Από πάνω προς τα κάτω: χρονιοιστορία ταχυτήτων, αποσπώμενοι παλμοί, απομένουσα ταχύτητα και σήμα μετακίνησης για την κάθετη (αριστερά) και την παράλληλη (δεξιά) συνιστώσα του καταγραφικού σταθμού AQK.



**Εικόνα 6.9:** Γεωμετρικές προβλέψεις για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις της σχετικής θέσης της διάρρηξης με τη θέση μελέτης.

Στον **πίνακα 8** περιλαμβάνονται οι τιμές των γεωμετρικών προβλέψεων και η πιθανότητες εμφάνισης παλμού για σταθμούς στο κοντινό πεδίο.

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	R (km)	d (km)	φ (°)	P [pulse]
AQV	13.34	42.38	6.07	10.16	29.60	0.30
AQG	13.34	42.37	6.60	9.70	33.05	0.28
AQA	13.34	42.38	6.41	9.85	31.71	0.28
AQK	13.40	42.34	4.80	10.94	23.69	0.34
GSA	13.52	42.42	7.14	14.21	14.79	0.35
CLN	13.52	42.09	20.77	3.78	74.13	0.06
AVZ	13.43	42.03	26.48	0.00	0.00	0.00
MTR	13.24	42.52	19.73	12.97	10.67	0.24
GSG	13.55	42.46	11.89	14.21	21.31	0.26
FMG	13.12	42.27	23.47	0.00	0.00	0.00
ANT	13.08	42.42	25.37	1.29	85.47	0.04
CSO	13.09	42.10	35.62	0.00	0.00	0.00
ORC	13.64	41.95	36.66	2.69	79.80	0.02

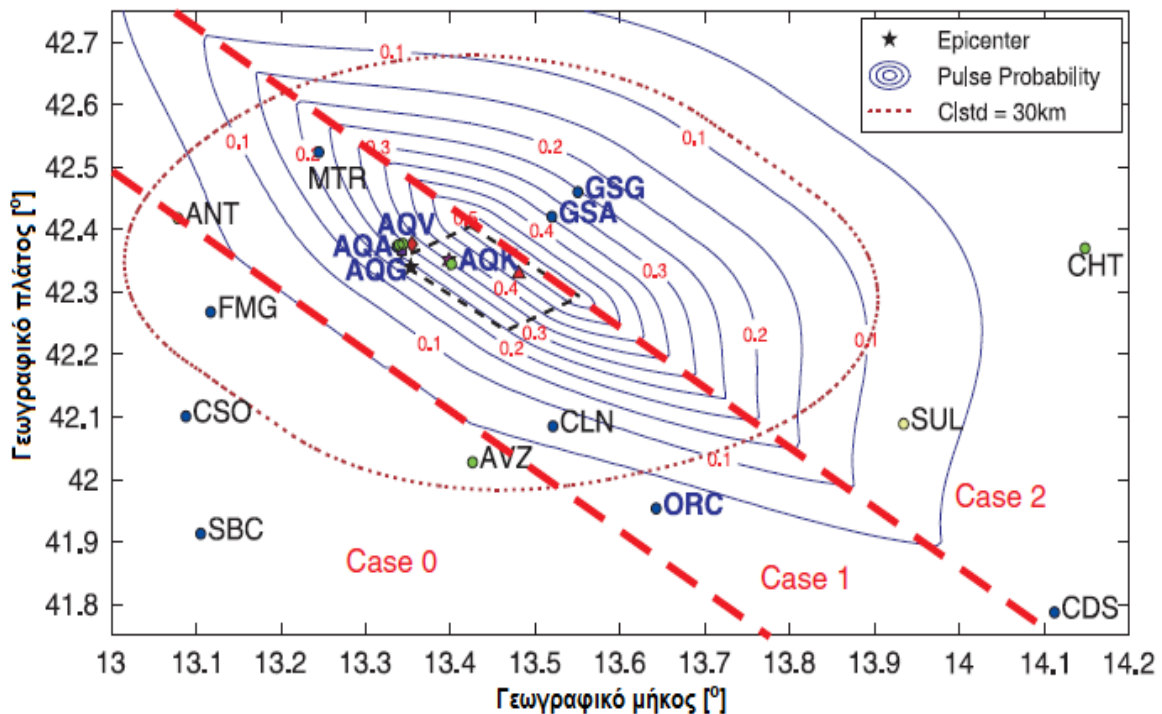
**Πίνακας 6.8:** Γεωμετρικές προβλέψεις και πιθανότητα εμφάνισης παλμού για κάθε καταγραφικό σταθμό.

Η πιθανότητα εμφάνισης δεν είναι ποτέ μεγαλύτερη από το 0.5 και αυτό γιατί το μοντέλο δημιουργήθηκε για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης τα οποία συχνά είναι περίπλοκα και δεν καθίσταται εύκολος ο εντοπισμός των επιδράσεων της κατευθυντικότητας της διάρρηξης. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό θέσεων που επηρεάζονται ισχυρά από τους παλμούς ταχυτήτων, δεδομένης της γεωμετρίας της πηγής. Από την άποψη αυτή, τα αποτελέσματα της πιθανότητας εμφάνισης παλμών βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά του αλγορίθμου παλμικής κατηγοριοποίησης.

### 6.4.3 Σεισμικές δράσεις

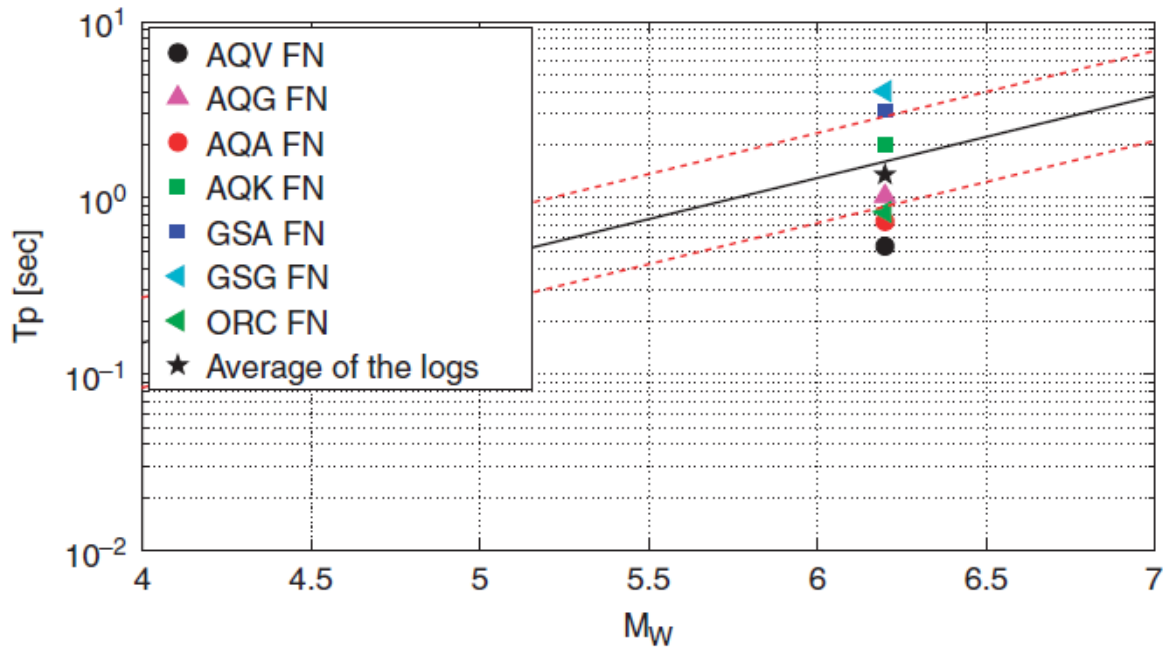
Με σκοπό την επιβεβαίωση ύπαρξης παλμικών κινήσεων και του αν χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης σε σχέση με τις κατασκευές λόγω της μη συνήθους σεισμικής τους απαίτησης, διεξάχθηκε μια σύγκριση των σεισμικών δράσεων σε σχέση με τις καταγραφές της νέας βάσης δεδομένων NGA. Αρχικά, οι προκύπτουσες περίοδοι παλμών  $T_p$  συγκρίθηκαν με την αναμενόμενη διασπορά παλμικής περιόδου σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος. Από την **εξίσωση [5]** προκύπτει ο φυσικός λογάριθμος της περιόδου του παλμού  $T_p$  ως συνάρτηση του σεισμικού μεγέθους  $M_w$  με τυπική απόκλιση υπολοίπων ίση με 0.59 μια γραφική απεικόνιση της οποίας παρουσιάζεται στην **εικόνα 6.11** (η ολόκληρη γραμμή είναι η μέση τιμή ενώ οι διακεκομμένες συμβολίζουν την  $\pm$ τυπική απόκλιση).

$$\ln T_p = -6.19 + 1.07 \cdot M_w \quad [5]$$



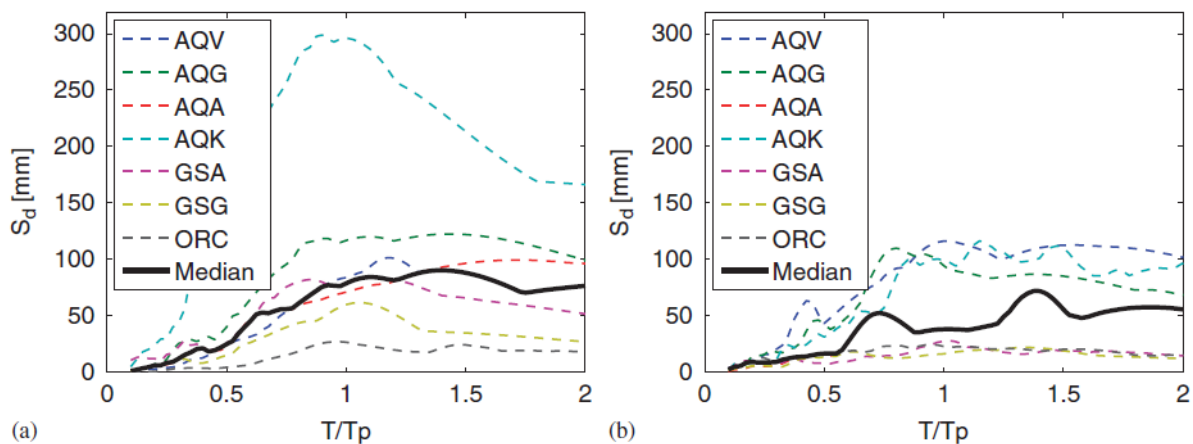
**Εικόνα 6.10:** Ισοϋψείς πιθανότητας εμφάνισης παλμικών σημάτων και καταγραφικοί σταθμοί με καταγραφή παλμού (με έντονη γραφή).





**Εικόνα 6.11:** Σύγκριση των περιόδων παλμού του σεισμού της L' Aquila και των προβλεπόμενων τιμών από τη μείωση των δεδομένων της νέας βάσης NGA.

Στην **εικόνα 6.12** παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα μετακινήσεων των παλμικών σταθμών ως συνάρτηση του λόγου  $T/T_p$ , ο οποίος λαμβάνει τιμές μεταξύ 0.1 και 2. Το φάσμα υπολογίζεται για χρονικό βήμα 0.025 και τα σήματα κατηγοριοποιούνται ως παράλληλης και κάθετης συνιστώσας. Οι δυο συνιστώσες του σταθμού AQV είναι παρόμοιες μεταξύ τους, κάτι που ήταν αναμενόμενο από τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Επίσης, οι εικόνες δείχνουν ότι η κάθετη συνιστώσα του σταθμού GSA είναι σημαντικά διαφορετική από την παράλληλη, κάτι το οποίο βρίσκεται σε συμφωνία με την απόφαση των ερευνητών να θεωρήσουν αυτή την καταγραφή ως παλμική.



**Εικόνα 6.12:** Ελαστικό φάσμα μετακίνησης των σταθμών με καταγραφή παλμού για (a) τις κάθετες και (b) τις παράλληλες συνιστώσες.

Για την ποσοτικοποίηση του πόσο ισχυρότερες είναι οι κάθετες από τις παράλληλες στο ρήγμα καταγραφές, η **εικόνα 6.13** παρουσιάζει τις μέσες τιμές του φυσικού λογαρίθμου των λόγων ελαστικής προς ανελαστικής φασματικής μετακίνησης. Συγκρίνοντας τις **εικόνες 6.13** και **6.5a-6.5c** συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματα είναι όμοια με αυτά της βάσης δεδομένων NGA. Μέγιστες τιμές του λόγου κάθετης προς παράλληλη συνιστώσα αποτελούν οι 1.71, 1.70, 2.10 και 1.98 αντίστοιχα για τιμές  $R_s=1, 2, 4$  και 6.

Στην **εικόνα 6.14** φαίνεται ο λόγος της ανελαστικής προς την ελαστική μετακίνηση ως προς το λόγο  $T/T_p$ . Οι γραφικές παραστάσεις δημιουργήθηκαν για τρεις τιμές του συντελεστή  $R_s$  και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της βάσης NGA για την κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση. Αν και το δείγμα ήταν μικρό σε μέγεθος, οι λόγοι μετακίνησης του σεισμού της L' Aquila έχουν σχήματα παρόμοια με αυτά των καταγραφών της NGA χωρίς παλμικά χαρακτηριστικά. Επίσης, τα αποτελέσματα για τους παλμικούς σταθμούς καταγραφής συμφωνούν με τα αναμενόμενα αν και τα παράλληλα σήματα φαίνεται να είναι σημαντικά.

Όπως έγινε για τις καταγραφές NGA, υπολογίστηκαν οι τιμές  $\varepsilon$  για παλμικές και μη συνιστώσες του σεισμού της L' Aquila σύμφωνα με τη σχέση εξασθένισης της εδαφικής κίνησης των Sabetta και Pugliese, η οποία βασίζεται στη μεγαλύτερη οριζόντια συνιστώσα της ισχυρής εδαφικής κίνησης των ιταλικών καταγραφών. Η συγκεκριμένη σχέση δημιουργήθηκε ώστε να αφαιρεί την τάση πόλωσης της μέσης τιμής γι' αυτό και χρησιμοποιείται ένας πρόσθετος παράγοντας  $\alpha(T)$ :

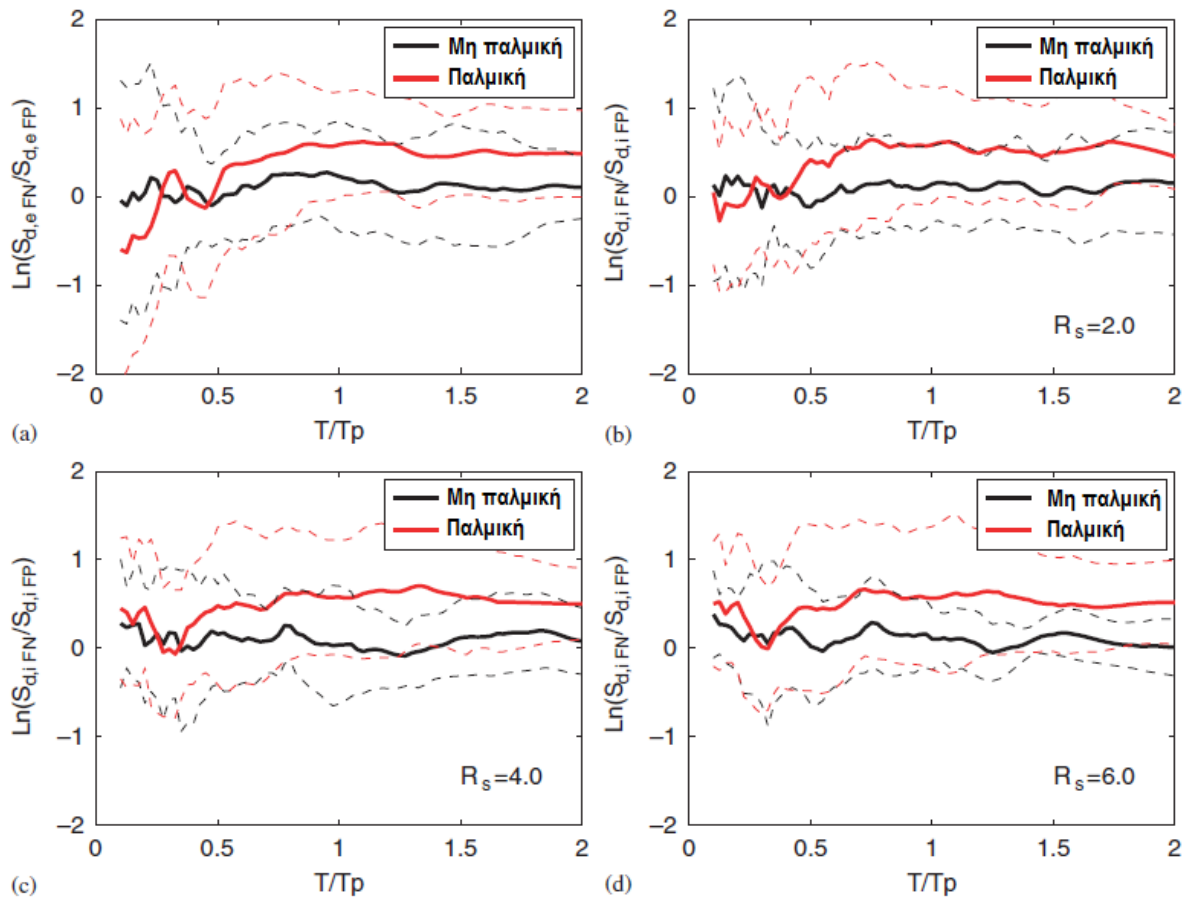
$$\overline{(\log_{10} S_{a,e}(T))} = a + bM + c \log_{10}(R_{epi}^2 + h^2)^{1/2} + e_1 S_1 + e_2 S_2 + a \quad [6]$$

όπου  $\overline{(\log_{10} S_{a,e}(T))}$  είναι η τιμή της φασματικής επιτάχυνσης που προέκυψε από την τροποποιημένη εξίσωση εξασθένισης,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $h$ ,  $e_1$  και  $e_2$  είναι οι συντελεστές της αυθεντικής σχέσης εξασθένισης που εξαρτώνται από την περίοδο και επιτρέπουν τον προσδιορισμό του σεισμικού μεγέθους ( $M$ ), της επικεντρικής απόστασης ( $R_{epi}$ ) και της κατάστασης της θέσης καταγραφής ( $e_1$  και  $e_2$ ). Οι τελευταίοι παίρνουν την τιμή 1 για ρηχές και βαθιές αλλουβιακές θέσεις αντίστοιχα και μηδέν σε όλες τις άλλες περιπτώσεις. Το  $\alpha(T)$  προσδιορίζεται από την **εξίσωση [7]** χρησιμοποιώντας μόνο τιμές της φασματικής επιτάχυνσης των καθέτων συνιστωσών της μη παλμικής κίνησης κοντινού πεδίου.

$$\alpha(T) = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \log_{10}(S_{a,e}(T))_i - (a + bM + c \log_{10}(R_{epi}^2 + h^2)^{1/2} + e_1 S_1 + e_2 S_2)_i \quad [7]$$

Η τυπική απόκλιση μεταξύ των γεγονότων  $\sigma(T)$  εκτιμήθηκε ως η τυπική απόκλιση των υπολοίπων των μη παλμικών κάθετων συνιστωσών σε απόσταση 30km. Αριθμητικές τιμές των  $\alpha$  και  $\sigma$  παρουσιάζονται στον **πίνακα 6.9** για κάθε περίοδο ταλαντωτή.

Στην **εικόνα 6.15a** παρουσιάζονται οι μέσες τιμές  $\varepsilon$  της κάθετης και παράλληλης συνιστώσας των παλμικών κινήσεων. Στην ίδια εικόνα περιλαμβάνονται και οι τιμές  $\varepsilon$  των μέσων μη στραμμένων οριζόντιων συνιστωσών των σταθμών με καταγεγραμμένο παλμό. Όπως φαίνεται και από τη βάση δεδομένων NGA, οι στραμμένες και μη τιμές  $\varepsilon$  έχουν το ίδιο σχήμα διαγραμμάτων με τις μη στραμμένες τιμές να βρίσκονται σε μια ενδιάμεση θέση των τιμών των κάθετων και παράλληλων συνιστωσών.

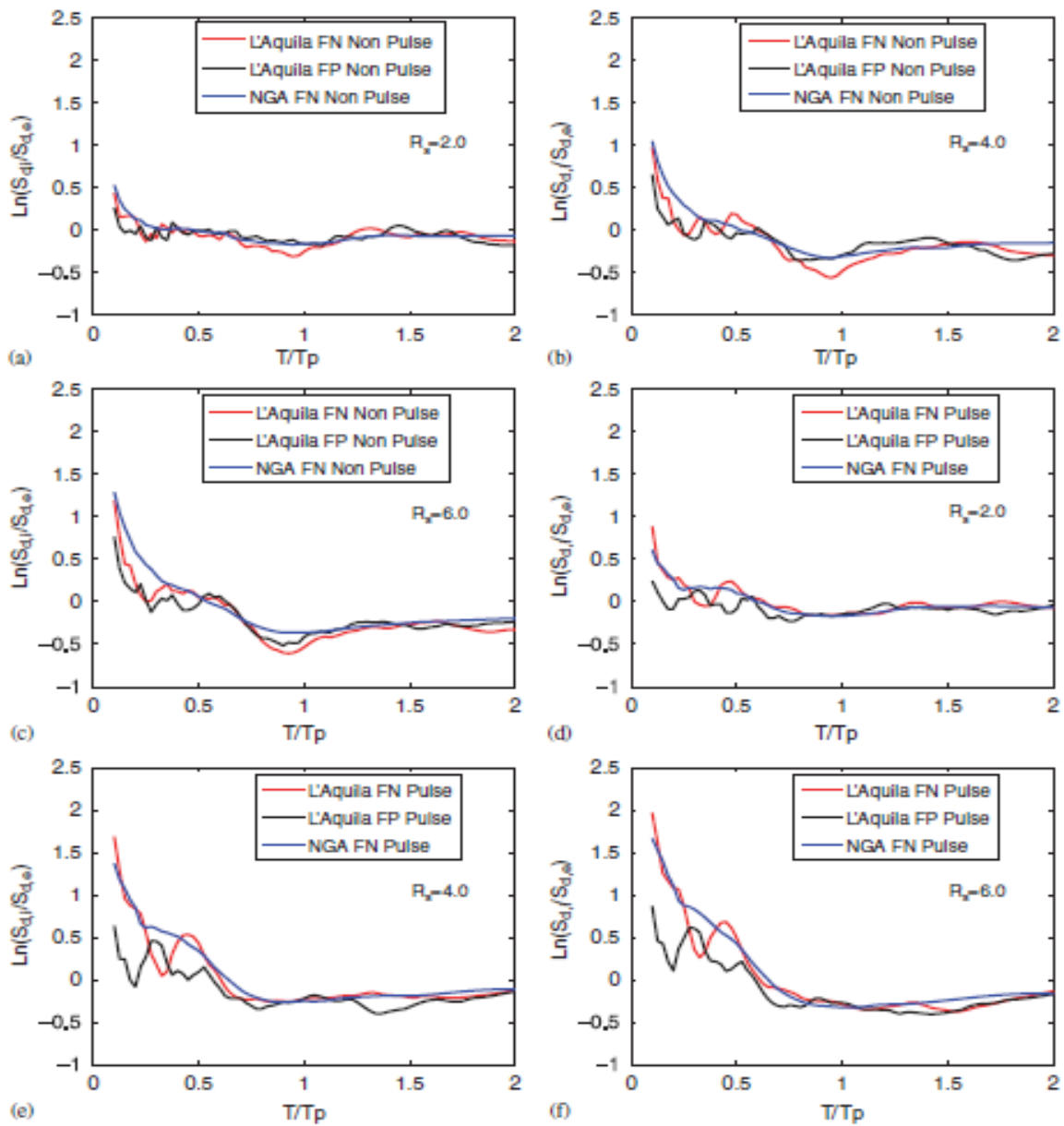


**Εικόνα 6.13:** Λόγος κάθετης προς παράλληλη (a) ελαστικής και (b, c και d) ανελαστικής μετακίνησης για  $R_s=2, 4$  και  $6$ .

Οι τιμές  $\epsilon$  των μη στραμμένων παράλληλων συνιστωσών υπολογίστηκαν με τη σχέση εξασθένισης τροποποιημένη ώστε να περιλαμβάνει τις μη παλμικές κάθετες συνιστώσες και με χρήση των τιμών  $\sigma(T)$ . Στην **εικόνα 6.15b** παρουσιάζονται οι τιμές  $\epsilon$  των κάθετων συνιστωσών των παλμικών κινήσεων λαμβάνοντας υπόψη την τροποποίηση της **εξίσωσης [2]** για το χαρακτηριστικό φασματικό σχήμα των παλμικών καταγραφών (δηλαδή **εξίσωση [8]**). Στην ίδια εικόνα παρουσιάζονται και τιμές  $\epsilon$  των καθέτων συνιστωσών μη παλμικών καταγραφών.

$$\overline{\ln(S_{a,S\&P}(T))} = (\log_{10}(e))^{-1} \cdot \overline{\log_{10}(S_{a,e}(T))} + e^{-\left(\ln\left(\frac{T}{T_p}\right)\right)^2} \quad [8]$$

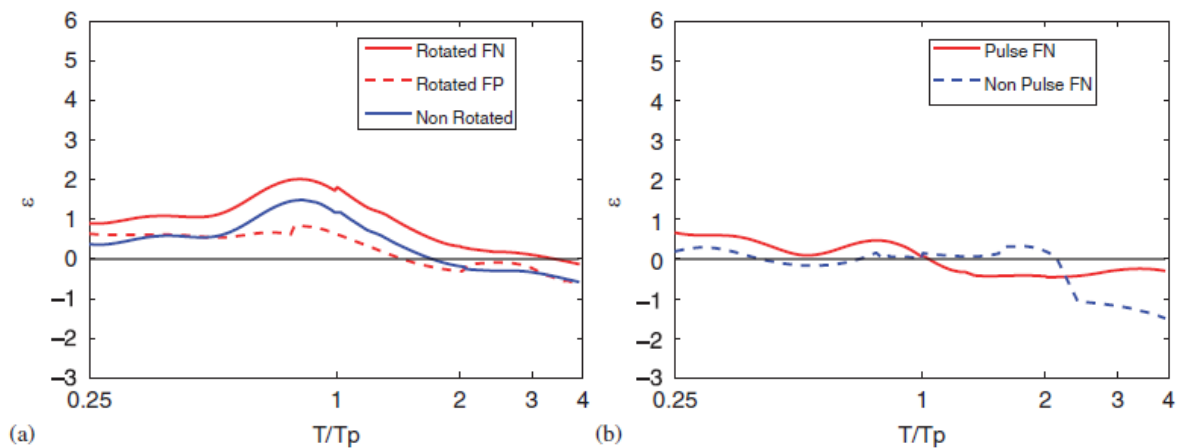
Λόγω του ότι η εξίσωση των Sabetta και Pugliese δεν ισχύει για τιμές  $T$  μεγαλύτερες των  $4sec$ , οι τιμές  $\epsilon$  για όλες τις περιόδους  $T_p > 1sec$  δεν μπορούν να παρουσιαστούν εξ ολοκλήρου στο εύρος  $0-4 T/T_p$  γι' αυτό και η γραφική παράσταση της **εικόνας 6.15** περιέχει μια απρόσμενη κατεύθυνση για μεγάλους λόγους  $T/T_p$ .



**Εικόνα 6.14:** (a-c) Λόγος ανελαστικής προς ελαστική απαίτηση μετακίνησης για  $R_s=2, 4$  και  $6$  για μη παλμικές κινήσεις και (d-f) Αντίστοιχος λόγος για παλμικές κινήσεις.

$T$ (s)	0	0.04	0.07	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	1.5	2	3.03	4
$\alpha$	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.1
$\sigma$	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	0.4	0.4

**Πίνακας 6.9:** Γεωμετρικές προβλέψεις και πιθανότητα εμφάνισης παλμού για κάθε καταγραφικό σταθμό.

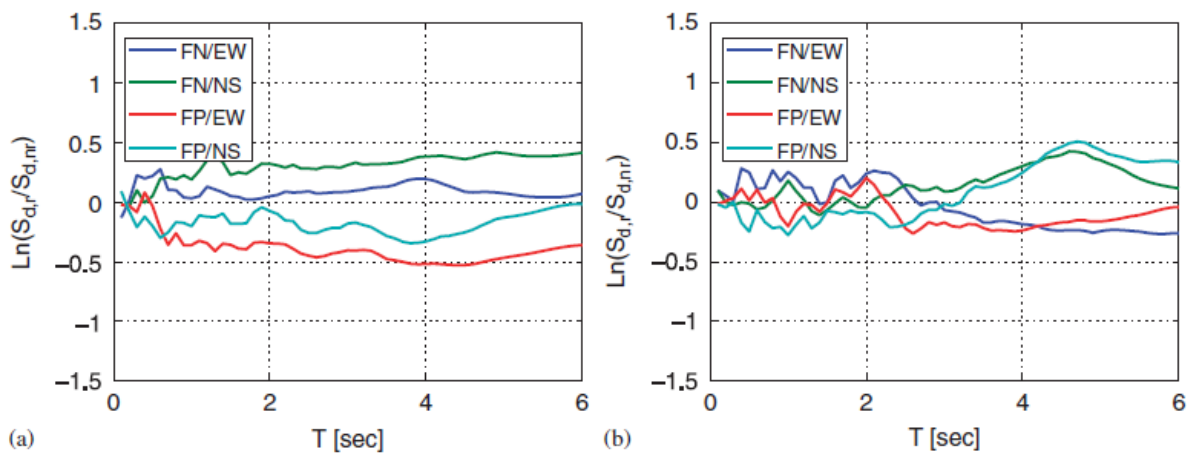


**Εικόνα 6.15:** (a) Μέσες τιμές  $\varepsilon$  για τις παλμικές κινήσεις της L' Aquila και (b) μέσες τιμές  $\varepsilon$  για την κάθετη συνιστώσα των παλμικών και μη παλμικών καταγραφών με τροποποιημένη εξίσωση εξασθένισης.

#### 6.4.4 Μη στραμμένες καταγραφές

Παρόμοια ανάλυση μη στραμμένων συνιστωσών με αυτή που ακολουθήθηκε για τις στραμμένες, φαίνεται να επιβεβαιώνει την ύπαρξη φαινομένων κατευθυντικότητας και συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση των παλμικών σημάτων, στην κάθετη διεύθυνση υφίσταται σεισμική απαίτηση μετακινήσεων μεγαλύτερη από τις άλλες δυο με στραμμένες συνιστώσες ενώ αντίθετα η παράλληλη διεύθυνση παρουσιάζει τη μικρότερη απαίτηση. Αυτό φαίνεται συνοπτικά στην **εικόνα 6.16a** όπου δίνονται οι μέσοι λογάριθμοι των στραμμένων προς τους μη στραμμένους φασματικούς λόγους των παλμικών κινήσεων. Στο διάστημα 0-3sec οι λόγοι κάθετης διεύθυνσης προς διεύθυνση ανατολής-δύσης και κάθετης διεύθυνσης προς διεύθυνση βορρά-νότου είναι αντίστοιχα ίσοι με 1.12 και 1.32. ομοίως, οι λόγοι παράλληλης διεύθυνσης προς διεύθυνση ανατολής-δύσης και παράλληλης διεύθυνσης προς διεύθυνση βορρά-νότου παρουσιάζουν μέσες τιμές 0.80 και 0.91 αντίστοιχα. Αντίθετα, αναλύοντας τους μη παλμικούς λόγους, η περιστροφή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα και αυτό φαίνεται στην **εικόνα 6.16b**. Οι ίδιες μέσες τιμές παρουσιάζονται για μη παλμικές κινήσεις και οι λόγοι ισούνται με 1.17 και 1.10 (κάθετη προς διεύθυνση A-Δ και κάθετη προς διεύθυνση B-N) ή 1.05 και 0.89 (παράλληλη προς διεύθυνση A-Δ και παράλληλη προς διεύθυνση B-N). παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν για τις μέσες τιμές του  $\varepsilon$  των δεδομένων της βάσης NGA.
- Επεξεργαζόμενοι τα μη στραμμένα σήματα, εντοπίστηκαν παλμοί τόσο στη διεύθυνση B-N όσο και στην A-Δ με μη συστηματική όμως εμφάνιση. Ειδικότερα, πέντε σήματα της διεύθυνσης A-Δ και τέσσερα της B-N κατηγοριοποιήθηκαν ως παλμικά και οι δυο συνιστώσες της καταγραφής CLN χαρακτηρίστηκαν παλμικές.



**Εικόνα 6.16:** Περιστρεμμένοι και μη λόγοι ελαστικής φασματικής μετακίνησης για (a) παλμικές και (b) μη παλμικές καταγραφές.

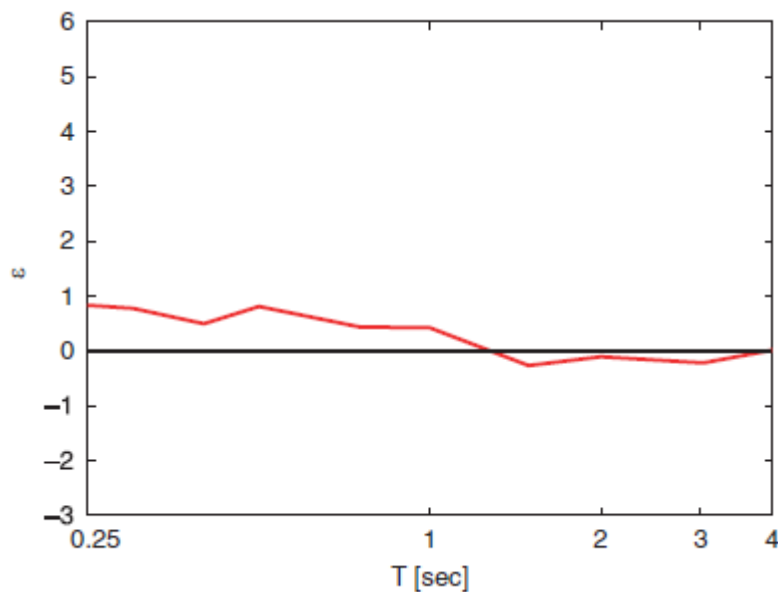
#### 6.4.5 Κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση και κατακόρυφη συνιστώσα

Στην περούσα μελέτη η οριζόντια συνιστώσα εδαφικής κίνησης που προέκυψε από ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης θεωρήθηκε και αναλύθηκε ως κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Λαμβάνοντας αυστηρά υπόψη τη γεωμετρία της διάρρηξης, η κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση δεν είναι οριζόντια για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης (**εικόνα 6.1b**) καθώς απαιτείται χωρική περιστροφή των καταγραφών. Για το λόγο αυτό, οι οριζόντιες κάθετες στο ρήγμα και περιστρεμμένες συνιστώσες περιστράφηκαν ξανά (συμπεριλαμβάνοντας και την κατακόρυφη συνιστώσα) ώστε να προκύψουν ακριβή σήματα κάθετα και παράλληλα στη διάρρηξη. Παρ' όλα αυτά, αναλύοντας τις περιστρεμμένες καταγραφές (**πίνακας 6.10**), τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο σαφή όσο στην περίπτωση των περιστροφών στην κάθετη και παράλληλη στο ρήγμα διεύθυνση. Στην πραγματικότητα, παλμικά σήματα εντοπίστηκαν τόσο στην κάθετη όσο και στην παράλληλη διεύθυνση και για την ακρίβεια 8 συνολικά παλμικά σήματα, 4 στην κάθε διεύθυνση.

Επίσης, έγινε ξεχωριστή ανάλυση της κατακόρυφης συνιστώσας. Από τους 13 σταθμούς καταγραφής που λήφθηκαν υπόψη ο αλγόριθμος εντόπισε μόνο ένα παλμικό κατακόρυφο σήμα (CLN). Ακόμα, υπολογίστηκαν οι τιμές  $\varepsilon$  για τους σταθμούς με οριζόντια παλμικά σήματα και η εξίσωση των Sabetta και Pugliese τροποποιήθηκε ώστε να λαμβάνει υπόψη τη μέση επίδραση του σεισμού. Σε αναλογία με την οριζόντια συνιστώσα, οι σταθμοί με μη παλμικά χαρακτηριστικά στην οριζόντια διεύθυνση χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του κατακόρυφου συντελεστή τροποποίησης  $\alpha(T)$  και τα αποτελέσματα σχεδιάζονται στην **εικόνα 6.17**, όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια σημαντική τάση.

Component	Pulse indicator	Late pulse indicator	PGV (cm/s)	Classified as pulse	$T_p$ (s)
AQV_RN	0.06	0.00	29.40	No	0.55
AQV_RP	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>26.62</b>	<b>Yes</b>	<b>0.53</b>
AQG_RN	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>31.89</b>	<b>Yes</b>	<b>0.96</b>
AQG_RP	<b>0.93</b>	<b>0.00</b>	<b>16.67</b>	<b>Yes</b>	<b>1.11</b>
AQA_RN	0.75	0.00	26.10	No	1.11
AQA_RP	0.03	0.00	15.34	No	1.74
AQK_RN	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>42.33</b>	<b>Yes</b>	<b>1.88</b>
AQK_RP	0.00	1.00	23.52	No	1.70
GSA_RN	0.13	0.00	7.89	No	3.02
GSA_RP	0.65	0.00	8.43	No	3.28
CLN_RN	0.01	1.00	4.16	No	5.40
CLN_RP	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>6.83</b>	<b>Yes</b>	<b>1.97</b>
AVZ_RN	0.94	1.00	11.45	No	1.90
AVZ_RP	0.28	1.00	6.62	No	1.65
MTR_RN	0.04	1.00	3.76	No	2.98
MTR_RP	0.00	0.00	3.21	No	3.06
GSG_RN	<b>0.99</b>	<b>0.00</b>	<b>4.13</b>	<b>Yes</b>	<b>3.72</b>
GSG_RP	<b>1.00</b>	<b>0.00</b>	<b>2.85</b>	<b>Yes</b>	<b>3.66</b>
FMG_RN	0.00	1.00	1.97	No	3.44
FMG_RP	0.00	1.00	1.94	No	1.59
ANT_RN	0.00	1.00	1.98	No	2.32
ANT_RP	0.00	0.00	1.84	No	0.92
CSO_RN	0.00	1.00	1.79	No	5.51
CSO_RP	0.97	1.00	2.74	No	3.97
ORC_RN	<b>0.98</b>	<b>0.00</b>	<b>7.01</b>	<b>Yes</b>	<b>0.85</b>
ORC_RP	0.00	1.00	2.42	No	4.7

**Πίνακας 6.10:** Αποτελέσματα της ανάλυσης για την κάθετη και την παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα.



**Εικόνα 6.17:** Μέσες τιμές  $\varepsilon$  των συνιστωσών κατακορύφων σημάτων παλμικών κινήσεων.

#### 6.4.6 Συμπεράσματα

Αν και το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και η επίδρασή του είναι γνωστά εδώ και πολλά χρόνια, η ποσοτικοποίηση της επίδρασής του στις κατασκευές και ο εντοπισμός της ύπαρξής του σε παρατηρούμενα σεισμικά γεγονότα δεν έχει επιτευχθεί ακόμα. Στην παρούσα μελέτη, εφαρμόστηκαν σύγχρονα εργαλεία για τη



διερεύνηση των παλμικών καταγραφών ώστε να προσεγγιστεί όσο καλύτερα γίνεται το συγκεκριμένο φαινόμενο.

Αρχικά, ερευνήθηκε η ενίσχυση της ελαστικής και ανελαστικής απαίτησης των κατασκευών για παλμικές κάθετες στο ρήγμα καταγραφές και το χαρακτηριστικό σχήμα του φάσματος που καθορίζεται από την ύπαρξη παλμών αναφορικά με παράλληλες και μη παλμικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Η βάση δεδομένων αποτελεί ένα υποσύνολο των περιστρεμμένων κάθετων και παράλληλων συνιστωσών της NGA. Η ανάλυση αποδεικνύει ότι τα παλμικά σήματα χαρακτηρίζονται από κάθετες στο ρήγμα καταγραφές ισχυρότερες γενικότερα από τις παράλληλες συνιστώσες και τις μη παλμικές κινήσεις. Επιπρόσθετα, κάθετες παλμικές καταγραφές χαρακτηρίζονται από ένα μη σταθερό φασματικό σχήμα με ένα μέγιστο φασματικών τιμών σε ένα εύρος περιόδων γύρω από την περίοδο του παλμού. Συγκρίσεις μεταξύ των παλμικών και μη καταγραφών αποδεικνύουν ότι ο λόγος ανελαστικών προς ελαστικές φασματικές μετακινήσεις των παλμικών καταγραφών μπορεί να είναι 20-70% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των συνήθων κινήσεων που εξαρτώνται από το επίπεδο μη γραμμικότητας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της βάσης NGA χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς μετρήσεων για τη διερεύνηση των φαινομένων κοντινού πεδίου στον πρόσφατο σεισμό της L' Aquila το 2009. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οριζόντιες περιστρεμμένες καταγραφές του κύριου σεισμικού γεγονότος και εντοπίστηκαν οι παλμοί και η σεισμική απαίτηση. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα φαίνεται ότι συμπίπτουν με αυτά της ανάλυσης των δεδομένων της NGA και αποδεικνύουν ότι υφίσταται όντως η επίδραση της κατευθυντικότητας και ότι η μη συνήθης σεισμική απαίτηση επηρεάζει τις κατασκευές στο κοντινό πεδίο.

Επίσης, εντοπίστηκαν ποικίλα αποτελέσματα πεδίου όπως το ότι η παράλληλη συνιστώσα των παλμικών κινήσεων περιέχει λόγο ανελαστικής προς ελαστικής μετακίνησης όχι τελείως όμοιο με αυτόν των συνήθων καταγραφών. Επίσης, μια ανάλυση που λαμβάνει υπόψη την κατακόρυφη συνιστώσα δεν παρέχει ξεκάθαρες αποδείξεις της ύπαρξης κατευθυντικότητας στην κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα. Ως τελικό συμπέρασμα, συγκεκριμένη τροποποίηση της ανελαστικής απαίτησης σε περιοχές κοντά σε ρήγματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία σχεδιασμού των κατασκευών.

## 6.5 Παρουσίαση της έρευνας των Celebi et al για τις κτηριακές βλάβες του σεισμού της L' Aquila

### 6.5.1 Είδος κατασκευών και βλάβες

Στην περιοχή που συνέβη ο σεισμός δε χρησιμοποιούνται διατμητικά τοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος και υφίστανται ελάχιστες μεταλλικές κατασκευές άρα οι κυρίαρχοι τύποι κατασκευών κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Παλαιότερα ή ιστορικά κτήρια, θεωρούμενα ως «πολιτιστική κληρονομιά», τα οποία είναι κατασκευασμένα από τοιχοποιία με πέτρα ή τούβλα. Οι καταστροφές εντοπίζονται σε ένα σημαντικό ποσοστό αυτών των κατασκευών (συμπεριλαμβανομένων και των ιστορικών εκκλησιών), και ειδικότερα σε

αυτές με κακώς διατηρημένη τοιχοποιία και χωρίς ενισχύσεις. Στις περιπτώσεις όπου υπήρχαν μεταλλικές ή ξύλινες ενισχύσεις, αποτράπηκαν σημαντικές βλάβες και καταρρεύσεις τμημάτων των όψεων (**εικόνα 6.11**).

- Τυπικές μεσογειακού τύπου κατασκευές χαμηλές (2-4 ορόφων) και ενδιάμεσου ύψους (5-8 ορόφων) από οπλισμένο σκυρόδεμα με μπατική τοιχοποιία και διαφόρων τύπων αρχιτεκτονικές κατόψεις (**εικόνες 6.13 και 6.14**). Λόγω της απαίτησης θερμομόνωσης υπάρχουν πολλές τοιχοποιίες χωρίς οπλισμό, οι περισσότερες από τις οποίες είναι κατασκευασμένες από δυο και τρεις σειρές τούβλων. Αυτού του είδους οι κατασκευές δημιουργήθηκαν μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο και κυρίως μετά το 1960.
- Βιομηχανικά κτήρια με προκατασκευασμένα στοιχεία και μεταλλικές κατασκευές.

Γενικότερα, οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος με μπατική τοιχοποιία συμπεριφέρθηκαν καλύτερα στο σεισμό. Σε πολλές περιπτώσεις, νεότερες κατασκευές τέτοιου τύπου υπέστησαν καταστροφές, οι οποίες όμως ήταν περιορισμένες σε μη φέροντα στοιχεία ενώ ο φέρων οργανισμός παρέμεινε ανέπαφος. Τα παλαιότερα και μη πλάσιμα κτήρια υπέστησαν τις σοβαρότερες καταστροφές. Λιγοστά κτήρια ανέπτυξαν μηχανισμό πλαστικού ορόφου ενώ οι **εικόνες 6.12-6.15** απεικονίζουν μερικές από τις τυπικές παρατηρηθείσες βλάβες. Ο βαθμός των βλαβών ποικίλλει και εξαρτάται από την ποικιλιομορφία των κατασκευών, την ανομοιομορφία της εδαφικής κίνησης, των επιδράσεων πεδίου και της τοπογραφίας της περιοχής.



(a)



(b)

**Εικόνα 6.11:** (a) Αγία Μαρία της Paganica. (b) Αγία Μαρία στο Collemaggio

Οι κατασκευαστικές βλάβες μπορεί γενικότερα να θεωρηθεί ότι προκλήθηκαν λόγω τριών κυρίων αιτιών:

- Κατασκευαστική ανεπάρκεια: προκαλείται από τη σχεδιαστική ή την κατασκευαστική διαδικασία και την ηλικία της κατασκευής, την έλλειψη πλαστιμότητας, την κακή ποιότητα υλικών, τις κατασκευαστικές ατέλειες, την ανεπάρκεια διαμήκους ή διατμητικού οπλισμού και την ανεπαρκή όπλιση των κόμβων. Ο μεγαλύτερος αριθμός βλαμμένων κατασκευών οπλισμένου

σκυροδέματος με τοιχοποιία διακρινόταν από ανεπαρκείς διατμητικούς συνδετήρες, τοποθετημένους σε μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες αποστάσεις και ανεπαρκείς διαμέτρους οπλισμών. Στα περισσότερα κτήρια η ποιότητα του σκυροδέματος ήταν αμφίβολη και δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις του Hassan. Σύμφωνα με τα ανωτέρω, το ποσοστό επιφανείας υποστυλωμάτων και τοιχίων του ισογείου πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό των ανωτέρω ορόφων ώστε να αυξάνεται η κτηριακή απόκριση (Hassan και Sozen 1994).

- Μορφή κατόψεων: αρχιτεκτονικές παρατυπίες όπως οι μεγάλες εκκεντρότητες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική ταλάντωση που εμπεριέχει φαινόμενα στρέψης, λυγισμού, αστοχία τύπου κοντών υποστυλωμάτων και μαλακού ορόφου (**εικόνες 6.12 και 6.14**).
- Εδαφική ταλάντωση άνω των ορίων των κανονισμών: αυτό αφορά τη μεγαλύτερη σεισμική απαίτηση από την αντοχή των κατασκευών. Η εντονότερη εδαφική κίνηση προκαλείται από επιδράσεις πεδίου όπως η τοπογραφία και το βάθος λεκάνης. Επίσης, πιθανή εμφάνιση παλμού λόγω του φαινομένου της κατευθυντικότητας μπορεί να αυξήσει τις απαιτήσεις σχεδιασμού των κατασκευών (**εικόνα 6.15**).



(a)



(b)



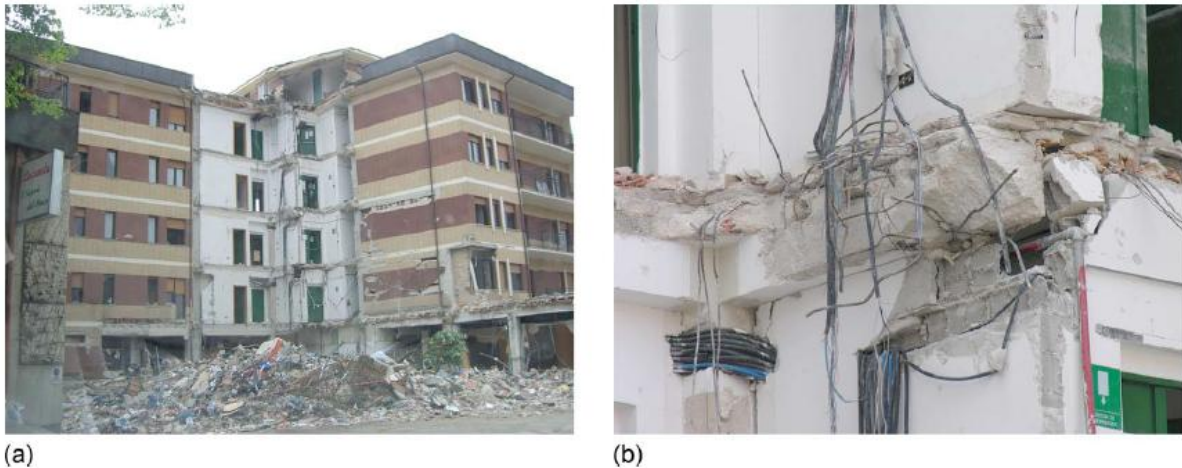
(c)



(d)

**Εικόνα 6.12:** (a) εικόνα ξενοδοχείου πριν και (b) μετά το σεισμό. (c) κτήριο πριν και (d) μετά το σεισμό





**Εικόνα 6.13:** (a) μετασεισμική απεικόνιση της περιοχής κατάρρευσης κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. (b) κακή διαμόρφωση κόμβων και ποιότητα σκυροδέματος οδήγησαν σε πολλαπλές βλάβες

#### 6.5.2 Κύριοι καταγραφικοί σταθμοί και δεδομένα της έρευνας

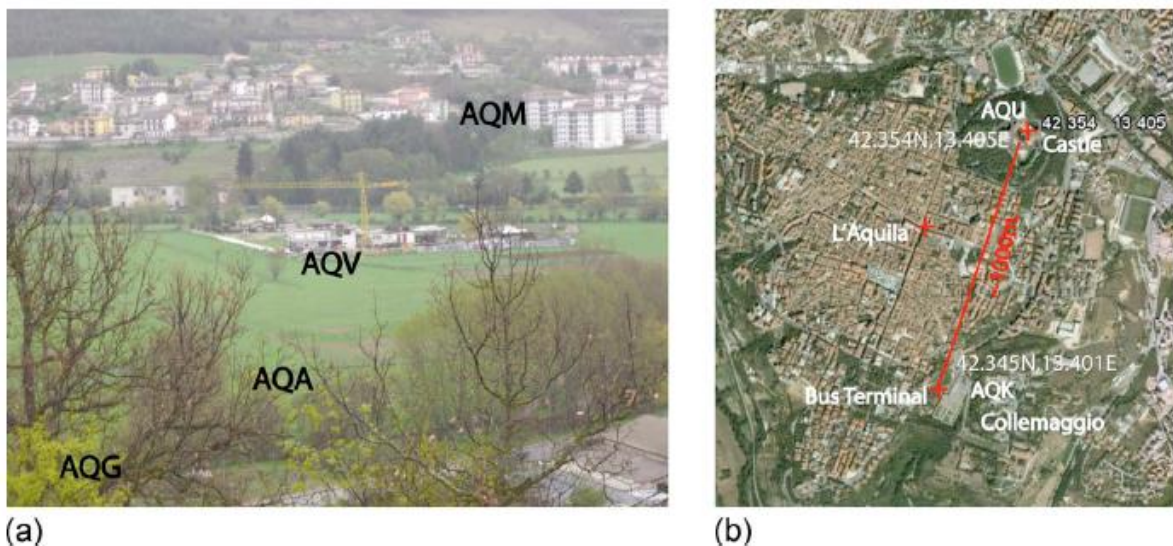
Κατά τη διάρκεια του σεισμού λειτούργησαν 58 από τους 300 ψηφιακούς σταθμούς καταγραφής και 113 σειсмоγράφοι ευρείας συχνότητας. Δυο από αυτούς τους σταθμούς, οι AQK και AQU βρίσκονται στην περίμετρο της L' Aquila. Σε διάστημα μιας εβδομάδας από το σεισμό, δόθηκαν στη δημοσιότητα στοιχεία αναφορικά με τις συντεταγμένες, τις μέγιστες επιταχύνσεις και τις επικεντρικές αποστάσεις των 56 σταθμών καταγραφής και ιδιαίτερη προσοχή αφιερώθηκε στις καταγεγραμμένες επιταχύνσεις των θέσεων κοντά στο επίκεντρο (**πίνακας 6.11**).



**Εικόνα 6.14:** Λόγω λανθασμένης κατακόρυφης διαρρύθμισης (με το νέο κτήριο να εφάπτεται στο παλαιότερο χωρίς κοινά υψόμετρα ορόφων) προκλήθηκαν καταστροφές στο νέο κτήριο στα δεξιά.



**Εικόνα 6.15:** Περιπτώσεις όπου οι τοπογραφικές συνθήκες έπαιξαν σημαντικό ρόλο επηρεάζοντας τον κραδασμό των κτηρίων. (a) κτήριο με βλάβες στην τοιχοπλήρωση, (b) ο σταθμός λεωφορείων πίσω από τον οποίο υπάρχει τοίχος αντιστήριξης και ο καταγραφικός σταθμός AQK, (c) κατάρρευση μεσαίου ορόφου στην οδό Gualtieri d' Ocrea και (d) μερική κατάρρευση κτηρίου που θεμελιώνεται σε πλαγιά.



**Εικόνα 6.16:** (a) καταγραφικοί σταθμοί ισχυρής εδαφικής κίνησης όπως φαίνονται από τη θέση του AQG. Ο σταθμός AQM κοντά στην περισσότερο πληγείσα περιοχή κατέγραψε επιτάχυνση >1g. (b) σχετικές θέσεις των σταθμών AQK, AQU που βρίσκονται στα περίχωρα της L' Aquila.



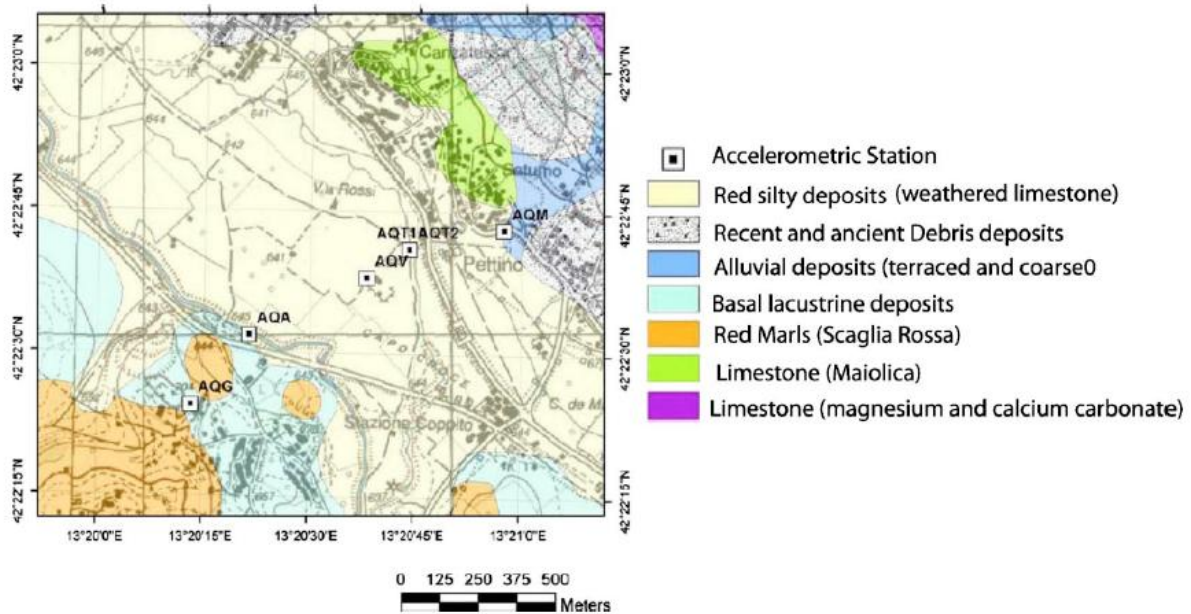
Stations with PGA > 0.1 g on hanging wall of the fault								
Station Name/Record Name/Lat & Long.	Station code	$R_{JB}$ distance (Km)	Epic. distance (Km)	EC8 site class	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	Arias Intensity (cm/s)	Housner Intensity (cm)
V. Aterno Moro/ [42.379N, 13.349E]	AQM	0	5.2	A	1000 (saturated)	42.18	435.4	90.1
V. Aterno—Centro Valle/GX066 [42.377N, 13.344E]	AQV	0	4.9	B	646.1	42.83	285.7	94.5
V. Aterno—Colle Grilli/FA030 [42.373N, 13.337E]	AQG	0	4.4	A	506.9	35.54	137.0	92.2
V. Aterno—fiume Aterno/CU104 [42.376N, 13.339E]	AQA	0	4.6	B	435.6	32.03	175.0	86.1
L'Aquila parcheggio/AM043 [42.345N, 13.401E]	AQK	0	5.6	B	347.2	36.21	128.9	68.1
L'Aquila Castello (INGV) [42.354N, 13.402E]	AQU	0	5.8	B	309.5	35.00	71.0	78.0
Stations with PGA > 0.1 g on foot wall of the fault								
Gran Sasso/EF021 [42.421N, 13.519E]	GSA	0	14.1	A	149.1	9.84	44.0	17.8

**Πίνακας 6.11:** Οι κοντινότεροι σταθμοί που κατέγραψαν επιταχύνσεις >0.1g καθώς και ο σταθμός AQU

Σε διάστημα 10 ημερών προέκυψαν μη διορθωμένες χρονοϊστορίες όλων των καταγραφών και πολλών μετασεισμών. Οι Ameri et al (2009) παρουσίασαν μια λεπτομερή μελέτη των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης. Έξι καταγραφικοί σταθμοί σε αποστάσεις <6km βρίσκονται στο φρύδι του ρήγματος (δηλαδή σε μηδενική απόσταση Joyner – Boore) και σε αυτούς υπάρχουν καταγραφές μεγίστων εδαφικών επιταχύνσεων >0.3g, με τις μεγαλύτερες τιμές να σημειώνονται στους σταθμούς AQM ( $a>1g$ ) και AQV ( $a=0.67g$ ). Ο σταθμός RAN με επικεντρική απόσταση 14.1km και στον πόδα του ρήγματος κατέγραψε μόνο 0.15g.

Όσον αφορά τη γεωλογία στις περιοχές καταγραφών, γενική εικόνα αυτής, όπως και της τοπογραφίας, παρουσιάζεται στις **εικόνες 6.16 και 6.17**. Μια ασβεσπιτική γεωλογία χαρακτηρίζει την περιοχή της L' Aquila και τις γειτονικές της από το νότο προς την ανατολή, η οποία στην Ιταλία είναι γνωστή ως «σηματισμός scaglia (γύψος που μοιάζει με μάρμαρο)». Ειδικότερα, η L' Aquila κείται επί αλλουβίων που κατακλύζουν την αριστερή όχθη του ποταμού Aterno. Οι αλλουβιακές αποθέσεις προέρχονται από την ύστερη τεταρτογενή περίοδο και αποτελούνται από συγκολλημένους αιχμηρούς βράχους με παρεμβολές ασβεστολιθικών ογκολίθων και τμήματα μάργας. Οι βράχοι έχουν πάχη ορισμένων

δεκάδων μέτρων και επικαλύπτουν ιζήματα με κενά που σχηματίστηκαν κυρίως από αμμώδεις και αργιλικές αποθέσεις και δευτερευόντως από στρώματα χαλικιών. Τμήματα ασβεστολίθου βγαίνουν στην επιφάνεια στα βορειοανατολικά και νοτιοδυτικά τμήματα της πόλης (**εικόνα 6.17**). Οι καταγραφικοί σταθμοί AQG και AQM βρίσκονται σε ασβεστόλιθο, οι AQK και AQU σε ογκολίθους βράχου και οι υπόλοιποι σε αλλουβιακές αποθέσεις πάνω από τον ασβεστόλιθο. Παρόμοια ασβεστιπικής προέλευσης γεωλογία εντοπίζεται και σε άλλες περιοχές που σχετίζονται με σοβαρές καταστροφές κατά τη διάρκεια σεισμικών γεγονότων όπως το Ιζμίτ στην Τουρκία (1999), όπου συνέβησαν πολλαπλές καταρρεύσεις κτηρίων και απώλειες ζωής που αποδίδονται στην εδαφική ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού.



**Εικόνα 6.17:** Γεωλογία της περιοχής που καταγράφηκαν οι ισχυρές εδαφικές κινήσεις και οι μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων. Ο σταθμός AQM κατέγραψε επιτάχυνση  $>1g$  ενώ οι AQT1 και AQT2 είχαν απεγκατασταθεί πριν το σεισμό.

Τα δεδομένα των σταθμών AQM, AQK και AQU είναι υψίστης σημασίας καθώς βρίσκονται κοντά σε περιοχές που υπέστησαν σοβαρότατες βλάβες. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών της περιοχής των καταγραφών:

- Ο σταθμός AQG μπορεί να έχει τοπογραφικά και λιθολογικά φαινόμενα ενίσχυσης καθώς βρίσκεται σε μια πλαγιά διαβρωμένου ασβεστολιθικού βράχου.
- Για το σταθμό AQV προέκυψε από μετρήσεις cross-hole προφίλ ταχυτήτων στο οποίο παρατηρείται αντιστροφή της διατμητικής ταχύτητας μεταξύ των 15m και 30m και  $V_{s,30} \approx 475m/sec$ . Στη συγκεκριμένη θέση υπάρχει ένας διαχωριστικός φράχτης 0.15-0.2m, του οποίου το βάθος έμπηξης και η επιρροή στις μετρήσεις είναι άγνωστα. Επιπρόσθετα, υπάρχει ένας κατασκευαστικός γερανός του οποίου η επίδραση είναι επίσης άγνωστη.
- Ο σταθμός AQA είναι παρόμοιος με τον AQV με μικρότερο πάχος αλλουβιακών αποθέσεων.

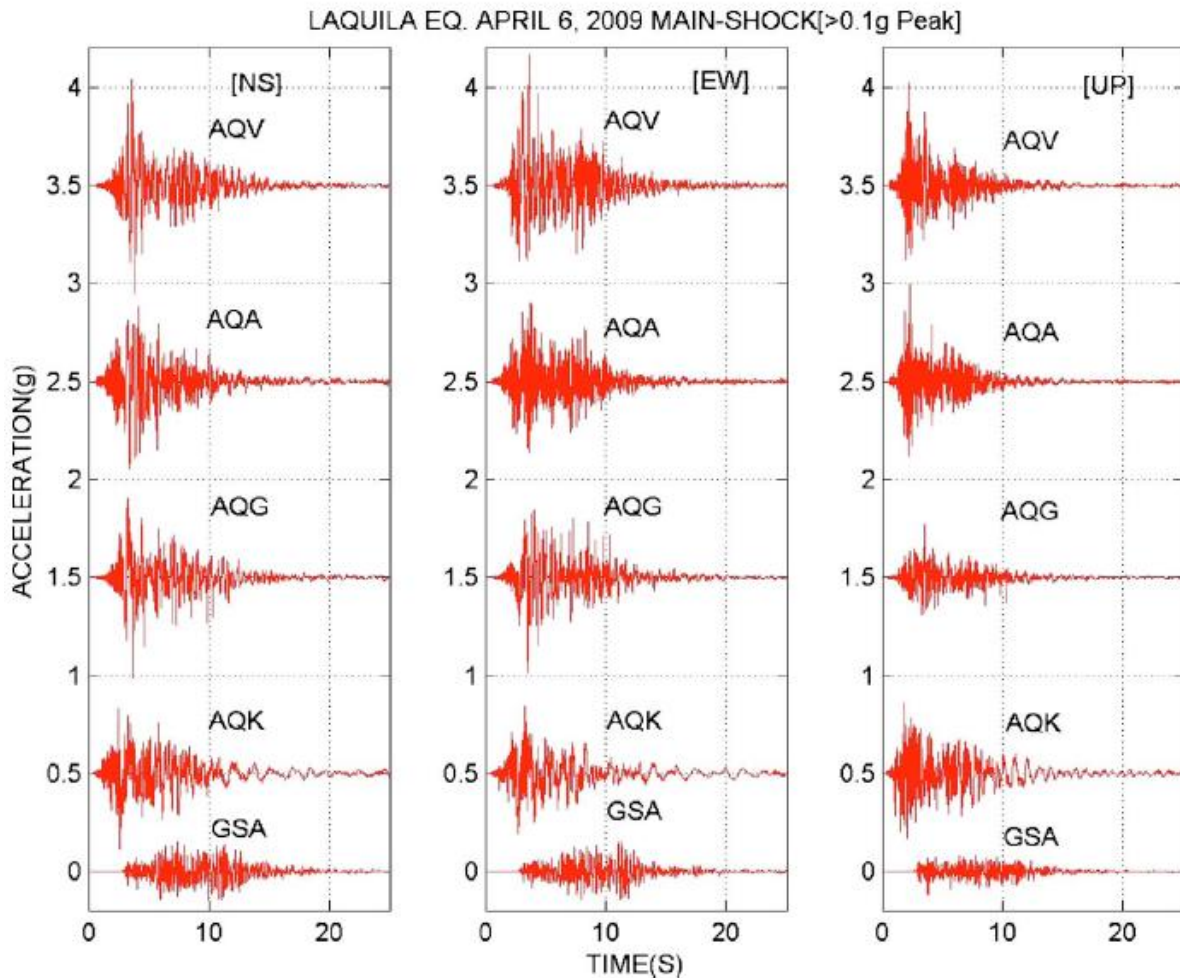


- Ο σταθμός AQM βρίσκεται στη βορειοανατολική γωνία της κοιλάδας Aterno και ανάμεσα σε δυο τοίχους αντιστήριξης. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από σφιγρό βραχώδες έδαφος (κατηγορίας A στον ευρωκώδικα 8), σχετιζόμενο με λόγο  $H/V$  που δίνει μέγιστα κοντά στα 10Hz. Τα κτήρια κοντά σε αυτό το σταθμό παρουσίασαν ελάχιστες ή ανύπαρκτες βλάβες.
- Ο σταθμός AQK βρίσκεται πάνω σε ένα τοίχο αντιστήριξης πίσω από μια στάση λεωφορείου η οποία παρουσίασε βλάβες στο μη φέροντα οργανισμό. Δίπλα στον τοίχο αντιστήριξης υπάρχει σήραγγα που συνδέει τη στάση με το κέντρο της πόλης. Παρατηρήθηκε ότι όλοι οι λόγοι  $H/V$  παρουσίαζαν ενισχύσεις σε συχνότητα 0.6Hz.
- Ο σταθμός AQU βρίσκεται σε μια υπόγεια κρύπτη κάτω από το βόρειο πύργο του κάστρου της L' Aquila στη βορειοανατολική γωνία της παλιάς πόλης, πάνω σε έδαφος παρόμοιας σύνθεσης με αυτό του σταθμού AQK.

### 6.5.3 Σημαντικές εδαφικές κινήσεις και φάσματα

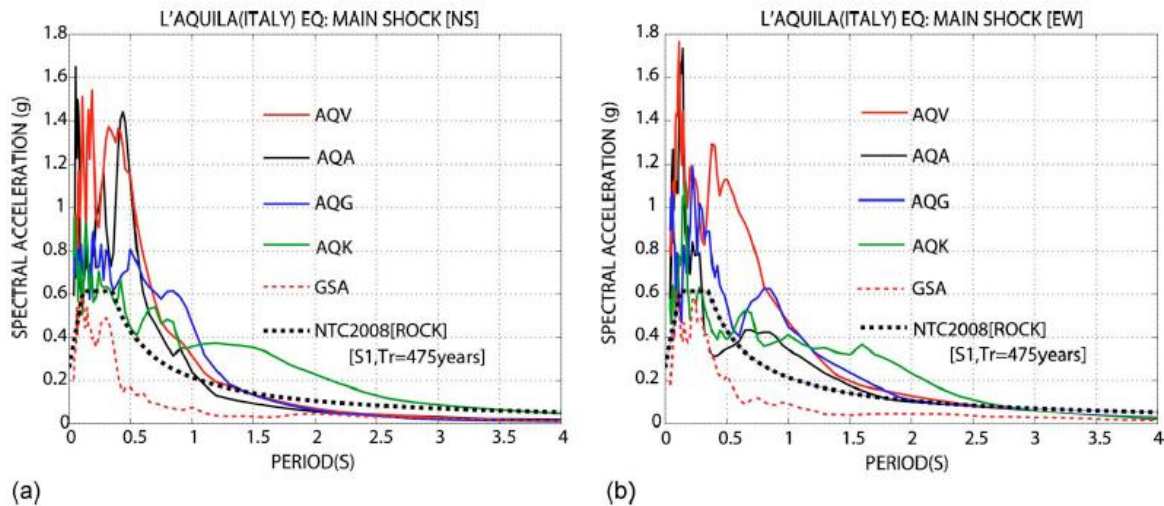
Η **εικόνα 6.18** παρουσιάζει τις χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των πέντε σταθμών καταγραφής ενώ στην **εικόνα 6.19** παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης της οριζόντιας συνιστώσας για απόσβεση 5%. Στην ίδια εικόνα παρουσιάζεται το φάσμα σχεδιασμού του ιταλικού κανονισμού του 2008 με περίοδο επαναφοράς 475 ετών (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια). Είναι φανερό ότι τα φάσματα απόκρισης των καταγραφών υπερβαίνουν τα προσφάτως ενημερωμένα φάσματα του κανονισμού και περεταίρω έρευνα πρέπει να διεξαχθεί καθώς η εδαφική κίνηση σε πολλούς σταθμούς καταγραφής ενδέχεται να υπέστη ενίσχυση. Συνεπώς, καμία κατασκευή στην ευρύτερη περιοχή της L' Aquila δεν είχε σχεδιαστεί με απαιτήσεις συμβατές με αυτές του κανονισμού του 2008.

Καθώς η σύγκριση με το ελαστικό φάσμα του κανονισμού είναι ενδιαφέρουσα, η σύγκριση των φασμάτων απόκρισης των τριών μεγαλύτερων καταγραφών επιτάχυνσης (εξαιρώντας το σταθμό AQM) με τον κανονισμό του 1996 και του 2008 για διαφορετικές εδαφικές κατηγορίες είναι ακόμα πιο αποδοτική (**εικόνα 6.20**). Τα περισσότερα μοντέρνα κτήρια της περιοχής πιθανότατα κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τον κανονισμό του 1996 και όχι του 2008. Στον εν λόγω κανονισμό υφίσταται συντελεστής συμπεριφοράς ίσος με 4 για τυπικά πλαίσια (αλλά με μεγάλη ποικιλία υλικών και μορφών) και μειωτικός συντελεστής αντοχής ίσος με 1.5, ο οποίος είναι έντονα κυμαινόμενος μεταξύ διαφόρων υλικών. Για οπλισμένο σκυρόδεμα ο συντελεστής μείωσης λαμβάνεται μεταξύ του 1.35 και 1.50, θεωρώντας μια ενδιάμεση τιμή μεταξύ των ισχυουσών για σκυρόδεμα και χάλυβα.

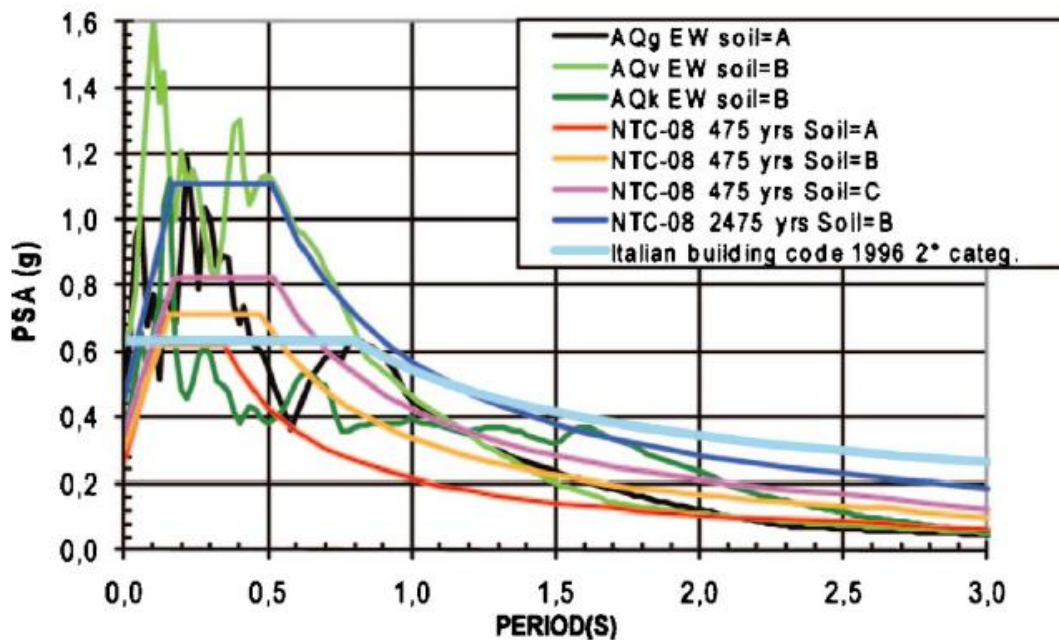


**Εικόνα 6.18:** Χρονοϊστορίες πέντε καταγραφικών σταθμών με επιταχύνσεις  $>1g$ . Οι καταγραφές δεν είναι συγχρονισμένες.

Η καταγεγραμμένη εδαφική επιτάχυνση του σταθμού AQM (εικόνα 6.21) θεωρήθηκε ως μικρής σημασίας λόγω του ότι είναι μεγαλύτερη του  $1g$  τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση, λόγω της μικρής διάρκειας των παλμών υψηλών συχνοτήτων ( $>10Hz$ ) της περιόδου ήταν  $3.5sec$  μετά την πρώτη άφιξη, κάτι το οποίο δεν παρατηρείται σε γειτονικές περιοχές. Ο κορεσμός δεν επιτρέπει τη χρήση της συνολικής κυματομορφής για τον καθορισμό της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Για το λόγο αυτό, η συσχέτιση μεταξύ αυτής της καταγραφής και του βαθμού βλαβών δε μπορεί να δημιουργηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Επίσης, σημειώνεται η έλλειψη εκτεταμένων βλαβών σε κατασκευές (κυρίως 6 ορόφων) της ενδιάμεσης περιοχής του σταθμού.



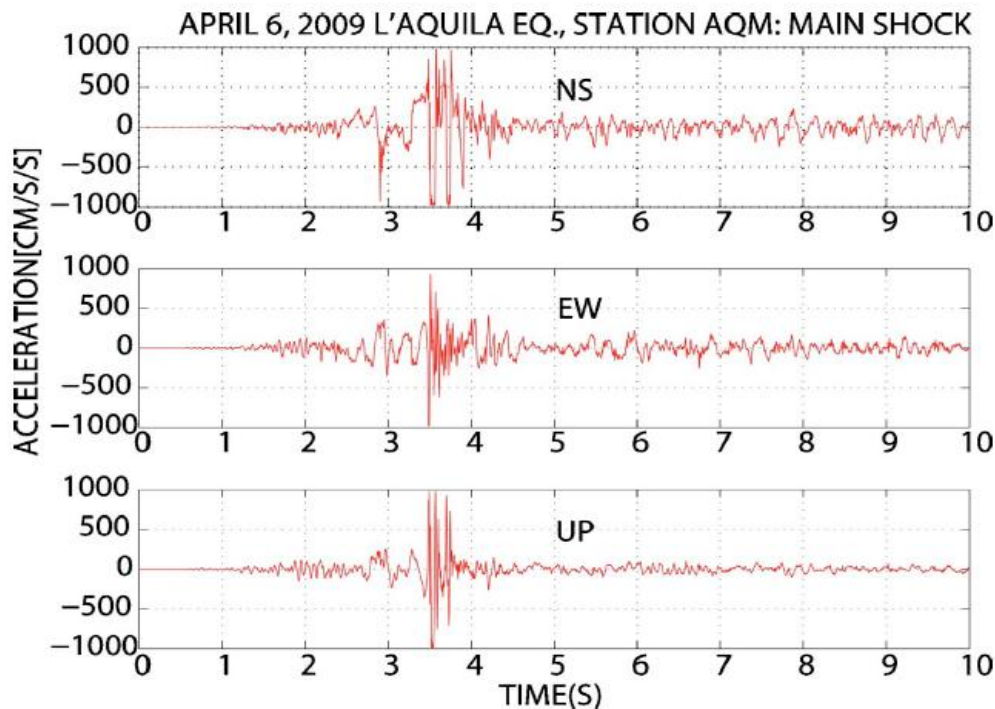
**Εικόνα 6.19:** Φάσματα απόκρισης πέντε σταθμών καταγραφών με επιταχύνσεις >1g για 5% απόσβεση και σύγκριση με το φάσμα του κανονισμού 2008 για βραχώδες έδαφος.



**Εικόνα 6.20:** Φάσμα απόκρισης των τριών σταθμών καταγραφής με τις μεγαλύτερες PGA για 5% απόσβεση και σύγκριση με το φάσμα του κανονισμού του 1996 και του 2008 για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Οι υποθέσεις για την κατασκευή του φάσματος του κανονισμού 1996 ήταν συντελεστής συμπεριφοράς ίσος με 4 για τυπικά πλαίσια και συντελεστής αντίστασης ίσος με 1.5, εξαρτώμενος από το υλικό κατασκευής. Για οπλισμένο σκυρόδεμα λαμβάνεται 1.5 αλλά μπορεί να ποικίλλει μεταξύ των τιμών 1.35 και 1.5, οι οποίες είναι οι τιμές για το σκυρόδεμα και το χάλυβα αντίστοιχα.

Εξαιρώντας ένα δώροφο κτήριο στην ενδιάμεση περιοχή του σταθμού AQV, η περιοχή της κοιλάδας κοντά στους σταθμούς AQA και AQV δεν είναι οικοδομημένη και για το λόγο αυτό οι κινήσεις που καταγράφηκαν σε αυτούς τους δύο σταθμούς μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτικές των κινήσεων της L' Aquila. Οι σταθμοί AQG και GSA επίσης δε βρίσκονται κοντά στη L' Aquila για το λόγο αυτό λόγω απουσίας δεδομένων από το ιστορικό κέντρο της πόλης, οι εδαφικές κινήσεις που δέχτηκαν οι

κατασκευές στο κέντρο της πόλης εκπροσωπούνται καλύτερα από τις καταγραφείσες στους σταθμούς AQK και AQU που βρίσκονται μέσα στην πόλη και απέχουν 1km. Τα δυο σπουδαιότερα ορόσημα της πόλης, το κάστρο στο οποίο βρίσκεται ο καταγραφικός σταθμός AQU και το Collemaggio, μια ιστορική εκκλησία κοντά στο σταθμό AQK, υπέστησαν σοβαρότατες καταστροφές.



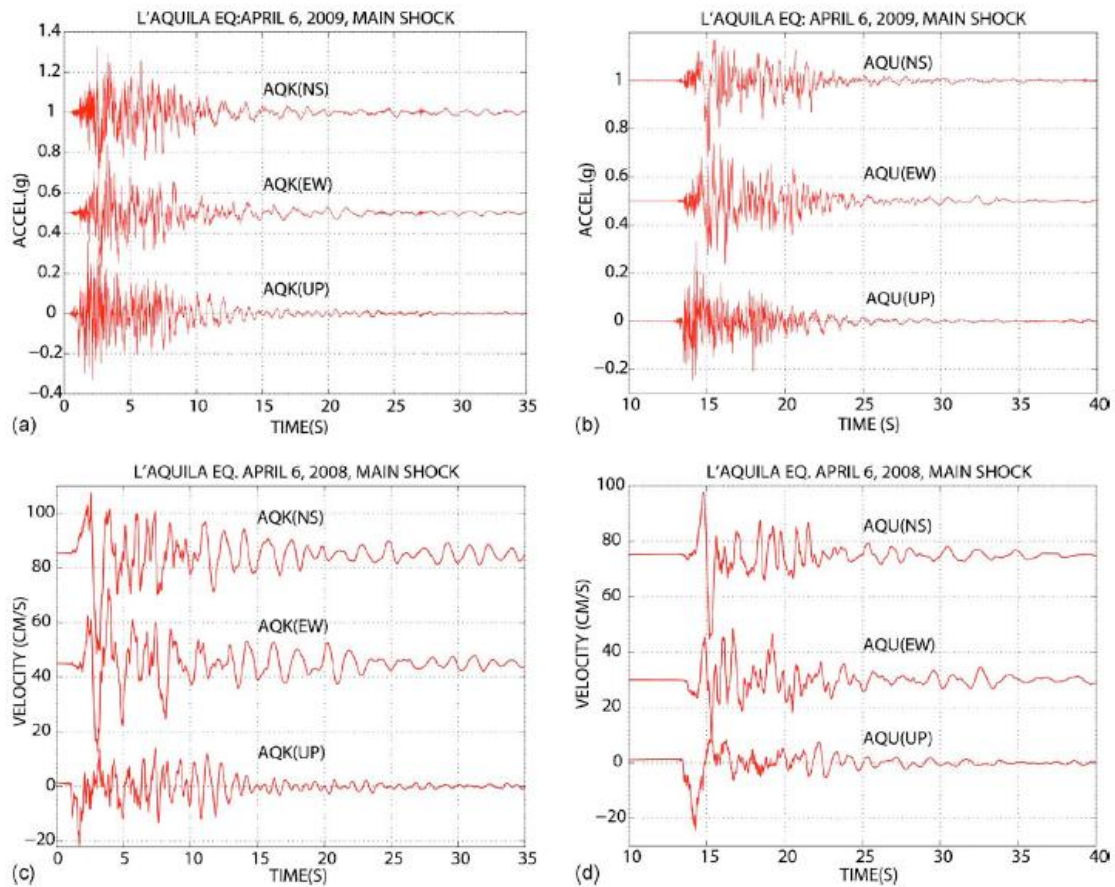
**Εικόνα 6.21:** Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων του σταθμού AQM οι οποίες παρουσιάζουν μέγιστο στο 1g. Παλμοί υψηλής συχνότητας κυριαρχούν στην περιοχή των 3.5sec.

Στην **εικόνα 6.22** παρουσιάζονται λεπτομερείς χρονοϊστορίες επιταχύνσεων και ταχυτήτων του AQK και AQU συγκριτικά. Όπως φαίνεται και στους δυο σταθμούς υπάρχουν έντονοι διπλοί παλμοί ταχύτητας, οι οποίοι αν συμβούν στην αρχή της κίνησης αποτελούν χαρακτηριστικό στοιχείο του κοντινού πεδίου και μεταδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας στις κατασκευές. Στην **εικόνα 6.23** παρουσιάζονται τα φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων για τους δυο καταγραφικούς σταθμούς τόσο για τη διεύθυνση βορρά - νότου όσο και για αυτή της ανατολής – δύσης και συγκρίνονται με το φάσμα του νεότερου κανονισμού. Το φάσμα ενίσχυσης των επιταχύνσεων που καταγράφηκε στους δυο εν λόγω σταθμούς στην περίμετρο της L' Aquila συγκρίνεται με αυτό του AQV στην **εικόνα 6.24**. Από την έρευνα των Petti και Marino (2009) αναφορικά με τα φάσματα του συγκεκριμένου σεισμού συμπεραίνεται ότι στο εύρος μικρών περιόδων οι απαιτήσεις των κατασκευών είναι έντονες, συγκρινόμενες με αυτές των κανονισμών.

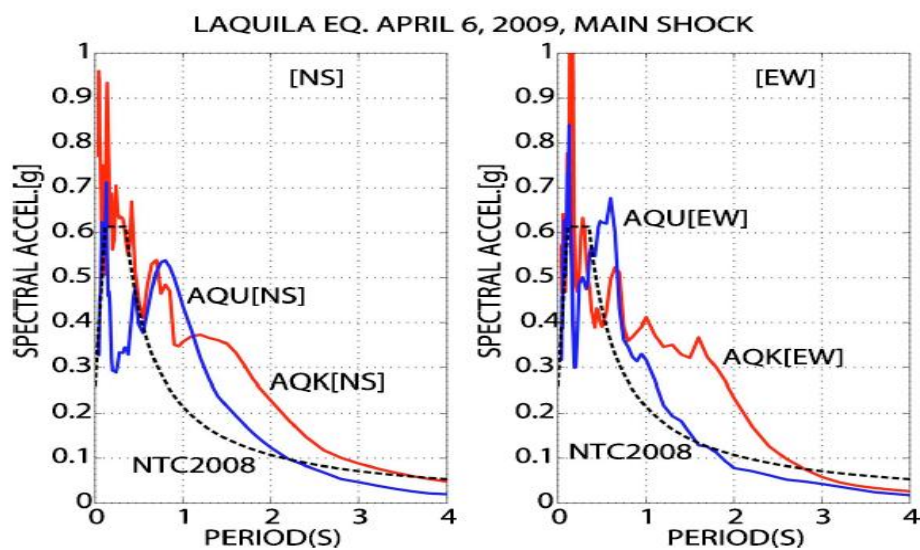
Τόσο τα φάσματα απόκρισης όσο και ενίσχυσης υποδεικνύουν ομοιότητες στο συχνοτικό περιεχόμενο και αποδεικνύουν ότι ο κραδασμός του ελευθέρου πεδίου είναι πλούσιος σε συχνότητες εύρους 1-4Hz (0.25-1sec) και 5-8Hz (0.12-0.2sec), οι οποίες είναι παρόμοιες με τις δεσπόζουσες συχνότητες ταλάντωσης κτηρίων ενός μέχρι 8 ορόφων. Αυτό το συμπέρασμα θα ήταν πιο σωστό αν αναφερόμασταν σε



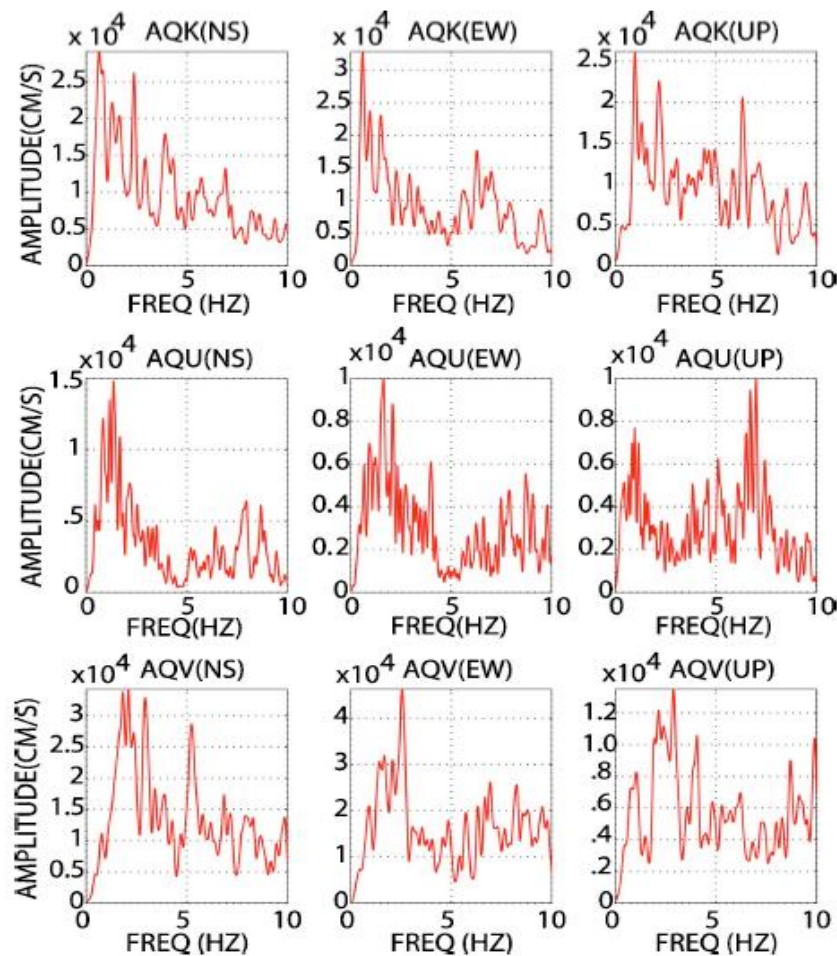
κτήρια λιγότερο άκαμπτα, με μικρότερη αντοχή και χαμηλότερα σε ύψος, τα οποία καταστράφηκαν κατά τη διάρκεια του πρώτου κραδασμού και συμπερασματικά θα μπορούσαν να αποκριθούν σε μεγαλύτερες περιόδους (μικρότερες συχνότητες) κοντά στο εύρος δεσποζουσών περιόδων της δόνησης.



**Εικόνα 6.22:** (α) καταγεγραμμένες επιταχύνσεις και (β) ταχύτητες στους σταθμούς AQK και AQU.



**Εικόνα 6.23:** Ελαστικά φάσματα απόκρισης επιταχύνσεων με 5% απόσβεση για τις συνιστώσες βορρά-νότου και ανατολής-δύσης της επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το αντίστοιχο φάσμα του κανονισμού του 2008.



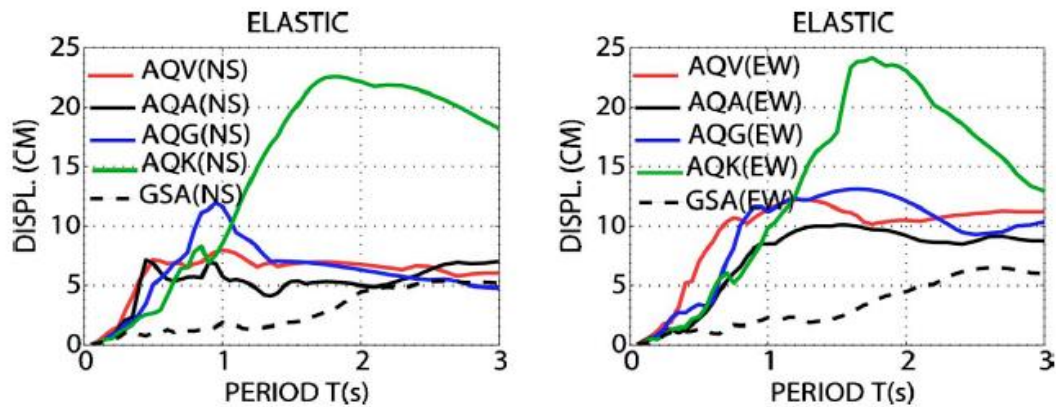
**Εικόνα 6.24:** Σύγκριση των φασμάτων ενίσχυσης που υπολογίστηκαν από καταγεγραμμένες επιταχύνσεις στους σταθμούς AQK, AQU και AQV.

#### 6.5.4 Ελαστικά και ανελαστικά φάσματα απόκρισης

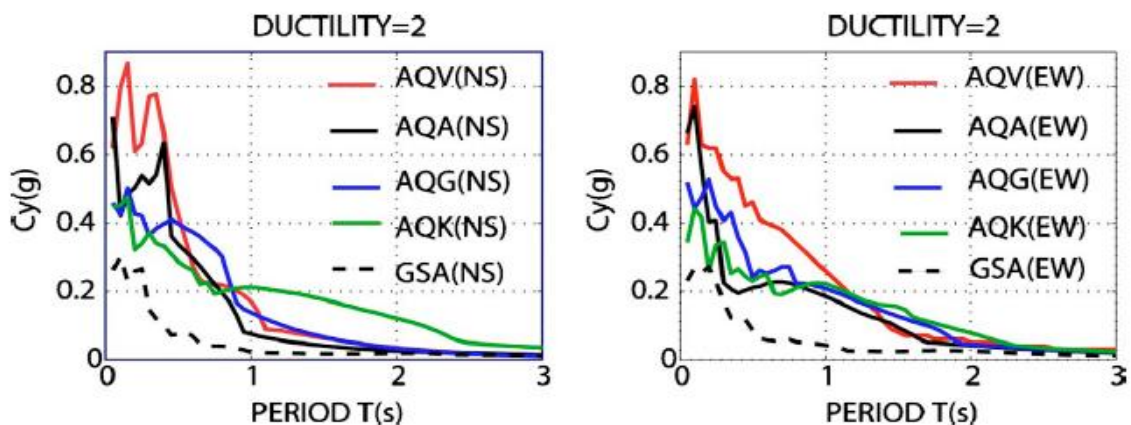
Αναλύοντας τις απαιτήσεις ελαστικών μετακινήσεων ( $d$ ) (**εικόνα 6.25**) για τα δεδομένα ισχυρής εδαφικής κίνησης που δεν επηρεάστηκαν από τη θέση των οργάνων μέτρησης, είναι πιθανό να προκύψει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της σεισμικής απαίτησης απ' ότι εξετάζοντας το συμβατό με τις παρατηρηθείσες βλάβες ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης. Στο εύρος μεταξύ  $0-1\text{sec}$  οι φασματικές μετακινήσεις δεν ξεπερνούν τα  $12\text{cm}$ . Ακόμα μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση αναφορικά με την πιθανότητα βλάβης από σεισμικές κινήσεις μπορεί να προέλθει εξετάζοντας το ανελαστικό φάσμα απαιτήσεων αντοχής σε όρους  $C_y$  (λόγος μεταξύ της μέγιστης τέμνουσας βάσης και του βάρους της κατασκευής) που περιγράφεται στην **εικόνα 6.26** για πλαστιμότητα  $\mu=2$ . Η εικόνα ξεκάθαρα αποδεικνύει ότι εκτός του GSA η ανελαστική απαίτηση των κατασκευών ήταν πολύ μεγάλη, και για κατασκευές που δεν ακολουθούσαν τους αντισεισμικούς κανονισμούς οι απαιτήσεις ξεπερνούσαν κατά πολύ τις κατασκευαστικές αντοχές.

Η **εικόνα 6.27** παρουσιάζει τις εξισώσεις μετάβασης που υπολογίστηκαν από τους λόγους  $H/V$  σύμφωνα με τη μέθοδο του Nakamura (1989) για τα ομαλοποιημένα φάσματα ενίσχυσης των σταθμών AQK, AQU και AQV. Φανερά, τα πεδία ενισχυμένων συχνοτήτων είναι διαφορετικά για την κοιλάδα (AQV) παρά για τα

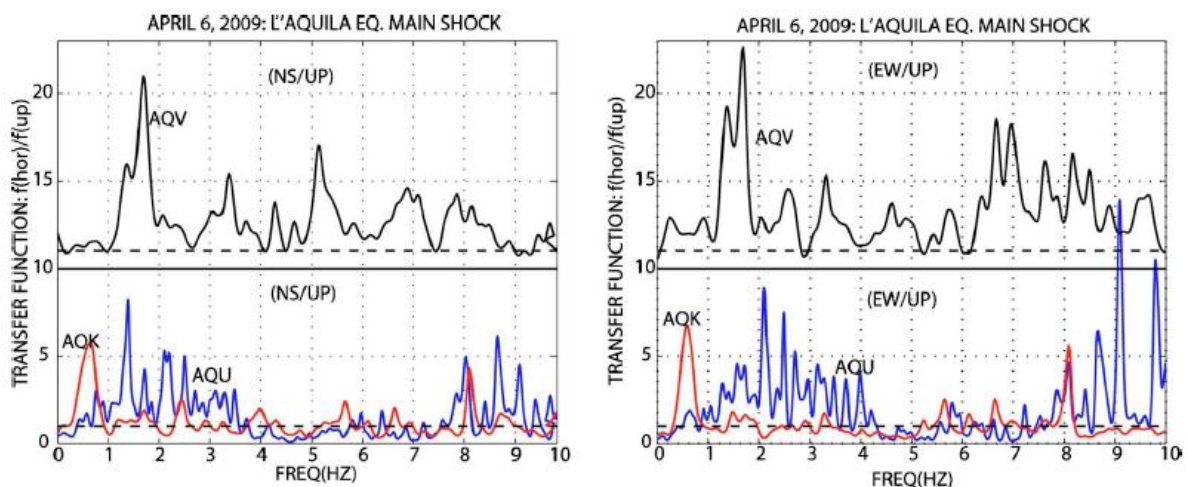
AQK και AQU που βρίσκονται στην περίμετρο της L' Aquila. Για το AQK μια ζώνη ενίσχυσης εντοπίζεται μεταξύ των 0.4-0.6Hz και των 8Hz ενώ για το AQU είναι φανερό ότι οι συντονισμοί βρίσκονται μεταξύ των 1-4Hz και 7.5-10Hz, ξεκάθαρα στην περιοχή συχνοτήτων των τυπικών κτηρίων ενός έως οκτώ ορόφων. Για το λόγο αυτό συμπεραίνουμε ότι οι επιδράσεις πεδίου έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των κατασκευών.



Εικόνα 6.25: Ελαστικά φάσματα μετακίνησης για πέντε καταγραφικούς σταθμούς.



Εικόνα 6.26: Ανελαστικά φάσματα απαίτησης αντοχής  $C_y$  (g) για πλαστιμότητα μετακινήσεων ίση με 2.

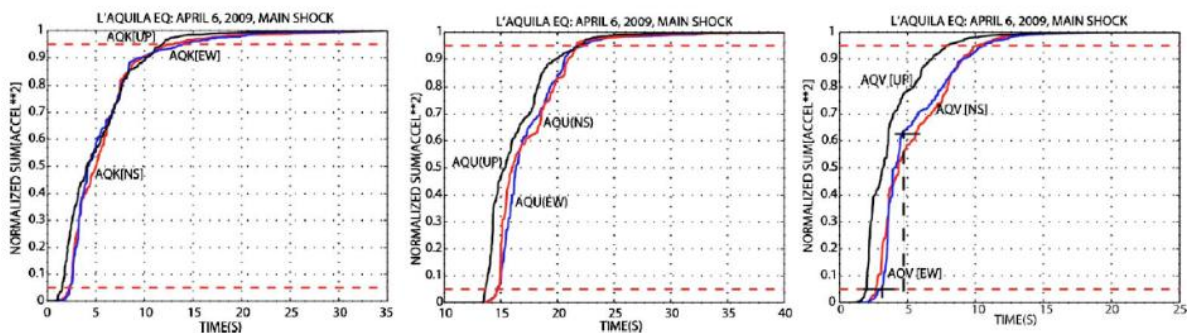


Εικόνα 6.27: Εξισώσεις μεταφοράς για τους σταθμούς AQK, AQU και AQV υπολογιζόμενες από τους λόγους H/V των φασμάτων ενίσχυσης.



### 6.5.5 Διάρκεια ισχυρής εδαφικής κίνησης

Όπως παρουσιάζεται από το ομαλοποιημένο άθροισμα των τετραγώνων των επιταχύνσεων στην **εικόνα 6.28**, η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης είναι μικρή. Για αυτό το λόγο, η ισχυρή εδαφική κίνηση κατέστρεψε την πλειοψηφία των κατασκευών με ανεπάρκειες μέσα σε ένα αριθμό κύκλων. Αν η διάρκεια ήταν μεγαλύτερη σε μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων, οι απαιτήσεις μετακινήσεων θα ήταν επίσης αυξημένες. Με βεβαιότητα, η περιοχή είναι ικανή για την παραγωγή μεγαλύτερων σεισμικών γεγονότων (όπως για παράδειγμα αυτό του 1915 με  $M_w=7$ ). Επιπρόσθετα, η **εικόνα 6.28** δείχνει ότι περίπου το 90% της ενέργειας έπληξε τις κατασκευές κατά τα 3-10sec και στην περίπτωση του AQV το 60% της ενέργειας κατά τα 2sec ή λιγότερο. Κραδασμός μεγαλύτερης διάρκειας σίγουρα θα απέδιδε διαφορετικά στατιστικά στοιχεία για τις κατασκευές.



**Εικόνα 6.28:** Άθροισμα των τετραγώνων των επιταχύνσεων των σταθμών AQK, AQU και AQV που αποδεικνύουν ότι η ισχυρή εδαφική κίνηση (90% της ενέργειας) βρίσκεται μεταξύ των 3-10sec και το 60% μεταξύ 3-5sec.

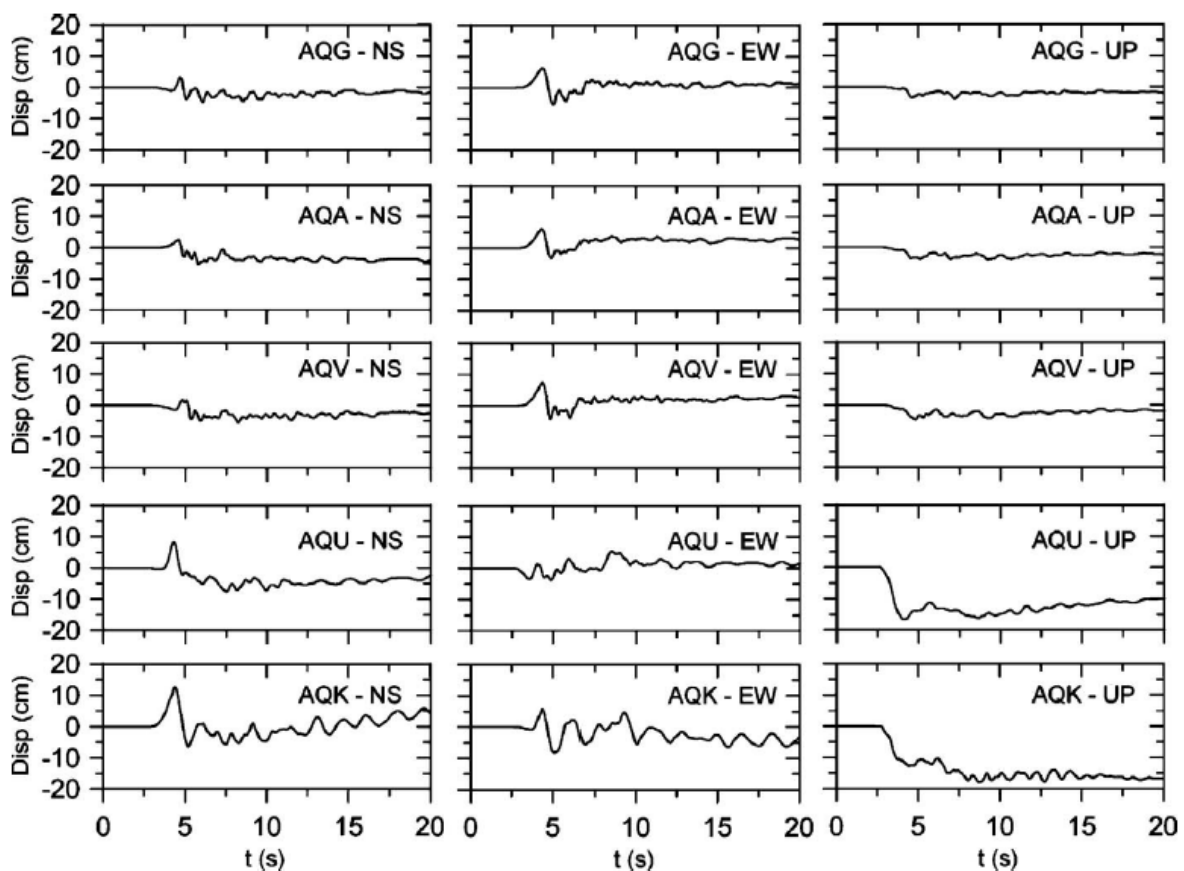
### 6.5.6 Μόνιμες μετακινήσεις των καταγραφών

Λόγω του ότι οι τυπικές τεχνικές επεξεργασίας της ισχυρής εδαφικής κίνησης αφαιρούν το σήμα μεγάλων περιόδων με τη χρήση φίλτρων, είναι απαραίτητη η ανάλυση των δεδομένων της πραγματικής χρονοϊστορίας μετακινήσεων. Έπειτα από την αφαίρεση της συνιστώσας των προσεισμικών δεδομένων, τα δεδομένα ολοκληρώνονται δυο φορές ως προς το χρόνο ώστε να προκύψουν οι μόνιμες μετακινήσεις που ανέρχονται μέχρι τα 15cm στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η **εικόνα 6.29** απεικονίζει τις γραφικές παραστάσεις τριών συνιστωσών συσχετιζόμενων χρονοϊστοριών μετακίνησης των σταθμών της κοιλάδας Aterno (AQG, AQA, AQV) καθώς και αυτών της πόλης L' Aquila (AQU, AQK).

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μόνιμες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού μπορεί να επηρεάσουν αντίθετα τη μοίρα των κατασκευών που είναι κατασκευασμένες σε θέσεις πολύ κοντά στη διάρρηξη. Γενικότερα, είναι πολύ δύσκολος ο προσδιορισμός αυτής της επίδρασης εκτός αν οι κατασκευές βρίσκονται ακριβώς στην κορυφή της επιφάνειας διάρρηξης με τις μόνιμες παραμορφώσεις.

### 6.5.7 Εξισώσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης

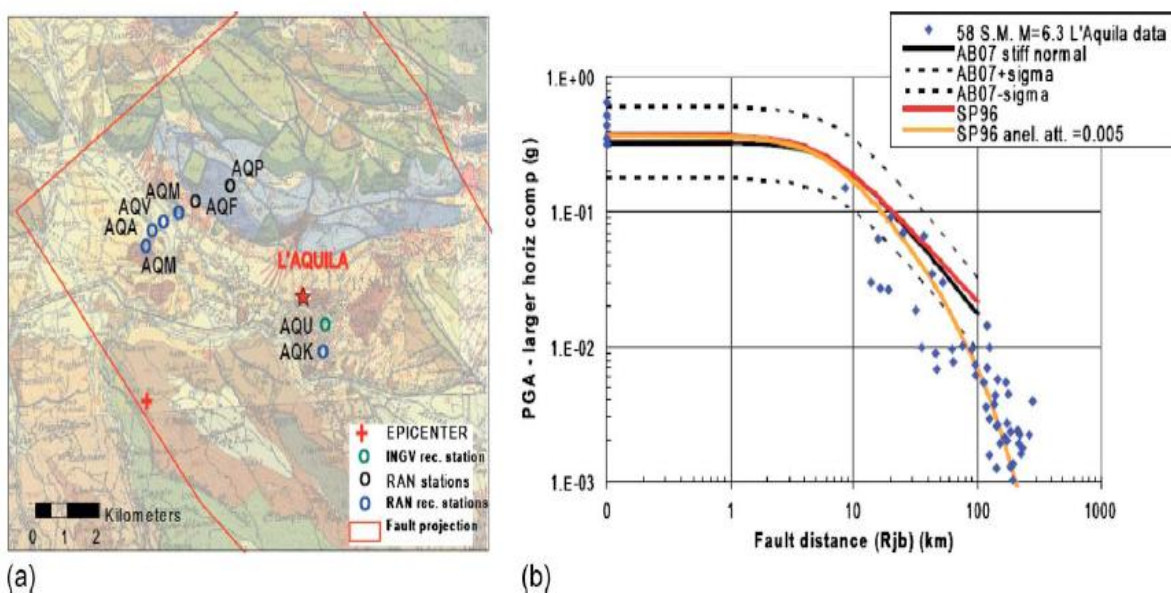
Η πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης με εξισώσεις και η σύγκριση με τις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις ενός σεισμού είναι υψίστης σημασίας ώστε να επικυρωθεί ο τοπικός σχεδιασμός των επιπέδων εδαφικής κίνησης και να αποτιμηθεί η εγκυρότητα της πιθανοτικής ανάλυσης σεισμικού κινδύνου. Για το λόγο αυτό, η εξασθένηση της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής κίνησης με την απόσταση του σεισμού της L' Aquila, συγκρίνεται με τις προβλέψεις εδαφικής κίνησης από διάφορες σχέσεις απομείωσης, σύμφωνα με δυο εντελώς διαφορετικούς ορισμούς αποστάσεων. Στην παρούσα μελέτη, 58 συνιστώσες μέγιστων οριζοντίων επιταχύνσεων χρησιμοποιήθηκαν για τις εν λόγω συγκρίσεις.



**Εικόνα 6.29:** Συσχετιζόμενες χρονοϊστορίες μετακινήσεων των σταθμών της κοιλάδας Aterno (AQG, AQA, AQV) και αυτών της L' Aquila (AQU, AQK): (a) κατεύθυνση βορρά-νότου, (b) κατεύθυνση ανατολής-δύσης και (c) κάθετη στο έδαφος κατεύθυνση. Για να προκύψουν οι μετακινήσεις, οι επιταχύνσεις προσομοιώθηκαν με μια τεχνική διόρθωσης βάσης αποτελούμενης από ελάχιστα τετράγωνα που προσεγγίζουν τις χρονοϊστορίες ταχυτήτων με τρεις συνεχείς ευθείες.

Στην πρώτη περίπτωση, ο ορισμός της απόστασης αφορά αυτόν των Joyner – Boore (1997) ως την κοντινότερη απόσταση από τον καταγραφικό σταθμό στην επιφανειακή εμφάνιση του επιπέδου του ρήγματος. Στην **εικόνα 6.30** γίνεται η σύγκριση της PGA του σεισμού της L' Aquila με δυο ευρωπαϊκές εξισώσεις πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης που χρησιμοποιούν τον ορισμό απόστασης των

Joyner – Boore (1997). Η εξίσωση των Akkar και Bommer (2007) βασίζεται σε 532 επιταχυνσιογραφήματα από την Ευρώπη και τη μέση ανατολή, καταγεγραμμένα σε 131 σεισμικά γεγονότα με εύρος σεισμικών μεγεθών από 5 έως 7.6. Όπως αναμενόταν, λόγω του ότι το επίπεδο της διάρρηξης βρίσκεται κάτω από αρκετούς καταγραφικούς σταθμούς, τα δεδομένα των κοντινότερων σταθμών έχουν απόσταση Joyner – Boore (1997) ίση με  $R_{JB}=0km$ . Αναφορικά με τα δεδομένα μεγαλύτερων αποστάσεων, ένας απλός συνυπολογισμός του ανελαστικού συντελεστή ( $0.005$ -απόσταση) προσεγγίζει πολύ καλά την πραγματικότητα. Στην πραγματικότητα, η διαθεσιμότητα καταγραφικών οργάνων υψηλής ευαισθησίας έκανε προσιτές επιταχύνσεις πολύ μικρών τιμών, καταγεγραμμένων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις οι οποίες αποδεικνύουν την επίδραση της ανελαστικής εξασθένησης.

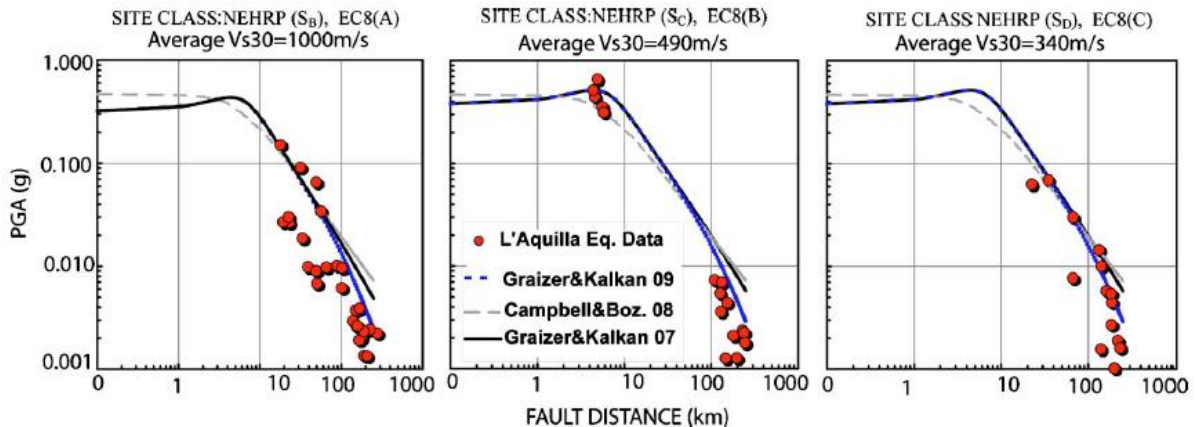


**Εικόνα 6.30:** (a) Λεπτομέρειες της ισχυρής κίνησης των κοντινότερων στο επίκεντρο σταθμών καταγραφής, συμπεριλαμβανομένου και του AQU, μαζί με την επιφανειακή εμφάνιση της διάρρηξης στο γεωλογικό χάρτη. Για τους σταθμούς AQF και AQP λήφθηκαν υπόψη μόνο οι μετασεισμοί. (b) Σύγκριση των τιμών PGA του κύριου σεισμικού γεγονότος με διαφορετικές σχέσεις εξασθένησης.

Στη δεύτερη περίπτωση, η απόσταση ορίζεται ως η κοντινότερη από το σταθμό καταγραφής στην επιφανειακή προβολή του ρήγματος (όχι του επιπέδου του ρήγματος) των Campbell και Bozorgnia 2008. Τα δεδομένα του σεισμού της L' Aquila υποδιαιρούνται σε τρεις ομάδες ανάλογα με τη θέση του οργάνου καταγραφής και το υποκείμενο έδαφος σύμφωνα με την εδαφική κατηγοριοποίηση του ευρωκώδικα 8 (έδαφος A, B και C). Όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 6.31**, οι συγκρίσεις με τις σχέσεις εξασθένησης παρουσιάζουν μια καλή συσχέτιση για καταγραφές μέχρι αποστάσεις  $100km$  από το ρήγμα. Είναι έκδηλο το ότι για όλες τις εδαφικές κατηγορίες τα δεδομένα παρουσιάζουν γρηγορότερη εξασθένηση για  $R=4$  πάνω από τα  $100km$  και πιο αργή για  $R=1.5$  σε κοντινότερες αποστάσεις. Ειδικότερα σε αυτή την περιοχή της Ιταλίας οι τιμές του παράγοντα  $Q$  ( $Q=0.5 \cdot \xi$ , όπου  $\xi$  η απόσβεση) είναι μικρές γι' αυτό η εδαφική κίνηση παρουσιάζει γρηγορότερη εξασθένηση. Η

γρηγορότερη εξασθένηση αποτελεί τυπική μορφή για τις περιοχές των δυτικών ηνωμένων πολιτειών με αντίστοιχες τιμές του παράγοντα Q.

Οι **εικόνες 6.30 και 6.31** αποδεικνύουν ότι στο κοντινό πεδίο ο ορισμός της απόστασης ( $<10\text{km}$ ) είναι σημαντικός και ότι για αποστάσεις μέχρι  $100\text{km}$  οι πιο πρόσφατες σχέσεις εξασθένησης προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την εδαφική συμπεριφορά.



**Εικόνα 25:** Σύγκριση της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης του σεισμού της L' Aquila με προβλέψεις τεσσάρων σχέσεων εξασθένησης για τις εδαφικές κατηγορίες A, B και C του EC- 8.

### 6.5.8 Η εδαφική κίνηση σε συνάρτηση με τις κτηριακές βλάβες

Αν και έχει αποδειχτεί ότι η PGA δεν αποτελεί ένα καλό δείκτη της πιθανότητας εμφάνισης βλαβών (Bertero 1992), τα πλάτη της εδαφικής κίνησης του σεισμού της L' Aquila και των γειτονικών περιοχών σε επικεντρική απόσταση  $10\text{km}$  υπερέβαιναν τα  $0.3g$  και πιθανώς έφταναν έως το  $1g$  στην περιοχή Pettino. Όπως αποδεικνύεται από το φάσμα απόκρισης, το συχνοτικό περιεχόμενο των καταγεγραμμένων κινήσεων ήταν υψηλό, κυρίως στο εύρος συχνοτήτων  $1-10\text{Hz}$  ( $0.1-1\text{sec}$ ), που αντιστοιχεί στο εύρος δεσποζουσών συχνοτήτων (περιόδων) των περισσότερων κατασκευών της πληγείσας περιοχής. Η διάρκεια του κραδασμού ήταν μικρή μεταξύ  $5-10\text{sec}$ . Στην περίπτωση του κραδασμού στο σταθμό AQV της κεντρικής κοιλάδας,  $60\%$  της ενέργειας της ισχυρής κίνησης απελευθερώθηκε σε  $3\text{sec}$ . Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σεισμού καθώς υποδηλώνει ότι οι εδαφικές κινήσεις με υψηλά πλάτη και μεσαίες προς ισχυρές συχνότητες που επηρεάζουν τις κατασκευές διατηρούνται μόνο για κάποιο αριθμό κύκλων. Επιπρόσθετα, οι καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες του κοντινού πεδίου και οι αντίστοιχες ομαλοποιημένες γραφικές παραστάσεις ενέργειας αποκαλύπτουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που εισάγεται από μια σεισμική πηγή, μεταδίδεται στα κτήρια μέσω πολλών έντονων διπλής κατεύθυνσης παλμών ταχυτήτων. Επίσης, οι δεσπόζουσες συχνότητες των ισχυρών παλμών ταχυτήτων αντιστοιχούν στις δεσπόζουσες περιόδους μερικών κτηρίων, γι' αυτό οδηγούν στην απορρόφηση ενέργειας από τα κτήρια σε μικρό χρονικό διάστημα. Η συμπεριφορά κάθε κατασκευής ποικίλλει ανάλογα με την ευπάθειά της και σε πολλές περιπτώσεις με το βαθμό πλασιμότητάς της.

Όπως αποδεικνύεται από τα δεδομένα πολλών σεισμών παγκοσμίως, η εδαφική ενίσχυση και ο συντονισμός (που προκαλείται από το συγχρονισμό της συχνότητας ταλάντωσης της θέσης με τη συχνότητα της κατασκευής) λόγω της γεωλογικής και τοπογραφικής απόκρισης πεδίου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των κατασκευών, ειδικότερα αυτών που βρίσκονται στις ράχες των αλλουβιακών αποθέσεων της περιοχής της L' Aquila. Παρ' όλα αυτά, δεν υπάρχουν καταγραφές της ισχυρής εδαφικής κίνησης που να επιβεβαιώνουν την τοπογραφική ενίσχυση. Παρατηρείται ότι τουλάχιστον δύο από τους σημαντικότερους σταθμούς καταγραφών (AQG και AQK) περιείχαν καταγραφές που ενδεχομένως να έχουν επηρεαστεί από τοπογραφικές συνθήκες λόγω των τοπικών εδαφικών συνθηκών. Είναι πιθανό ότι η αλληλεπίδραση εδάφους κατασκευής επηρέασε τις καταγραφές του σταθμού AQK και ακόμα αποδεικνύεται ότι η γεωλογική ενίσχυση συνέβη σε εύρη περιόδων παρόμοια με αυτά των τυπικών κατασκευών στη L' Aquila. Προκειμένου να γίνει πλήρως αντιληπτή η συμπεριφορά του εδάφους, της γεωμετρίας και της τοπογραφίας, χρειάζεται συγκεκριμένη ζωνοποίηση της περιοχής μελέτης και είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση της επίδρασης του ασβεστιτικού γεωλογικού σχηματισμού της περιοχής στους συντελεστές πεδίου που χρησιμοποιούνται στους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Η πλειοψηφία των μη πλάστιμων, μη σωστά κατασκευασμένων και μη οπλισμένων τοιχοποιιών (συμπεριλαμβανομένων των ιστορικών κτηρίων) και ένα σημαντικό ποσοστό των κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος περιορισμένης πλαστιμότητας και χαμηλής αντοχής λόγω σχεδιασμού και κατασκευαστικών πρακτικών, πιθανώς δεν είχαν την απαιτούμενη αντοχή ώστε να αντισταθμίσουν την επιβαλλόμενη δόνηση χωρίς να παρουσιάσουν βλάβες. Είναι πολύ πιθανό ότι κατά τη μικρή διάρκεια, την υψηλή συχνότητα και το μεγάλο πλάτος της εδαφικής κίνησης, η πλειοψηφία των ανεπαρκών κατασκευών καταστράφηκαν σε μεγάλο βαθμό μόνο με τη δράση ενός μικρού αριθμού κύκλων φόρτισης. Με άλλα λόγια, οι σεισμικές κινήσεις δεν συνεισφέρουν σε βλάβες που αναμένονται από επιμηκυμένους κύκλους φόρτισης μετακινήσεων. Αυτή είναι και η ερμηνεία του γιατί τόσο πολλές (σχεδόν 25) κατασκευές κατέρρευσαν. Είναι λογικό να υποθεθεί ότι αν συνέβαινε ένας σεισμός μεγαλύτερου μεγέθους όπως αυτός του 1915 ( $M_w=7$ ), η αναμενόμενη μεγαλύτερη διάρκεια του κραδασμού θα έδινε διαφορετικές στατιστικές για τις βλάβες των κατασκευών καθώς και οι απαιτήσεις μετακινήσεων θα ήταν μεγαλύτερες και ένα μεγαλύτερο ποσοστό των ελαττωματικών κατασκευών θα αναμενόταν να καταρρεύσει. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι οι τοιχοποιίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κτηριακή απόκριση με το να αποτρέπουν την κατάρρευση πολλών μη πλάστιμων πλαισιωτών κατασκευών, ακόμα κι αν οι ίδιες οι τοιχοποιίες υφίστανται καταστροφές. Ένα μεγάλο ποσοστό τοιχοπληρώσεων προσδίδει πρόσθετη διαμητική αντίσταση ακόμα και αν η ποιότητά τους είναι αμφίβολη. Αντιθέτως, η εν λόγω θετική επίδραση των τοιχοπληρώσεων ήταν αρκετή ώστε να αποτραπούν καταρρεύσεις κυρίως λόγω της σχετικά μικρής διάρκειας του ισχυρού κραδασμού. Μια μεγαλύτερη διάρκεια θα είχε περεταίρω εκφυλίσει ή εντελώς εξαλείψει τη θετική επίδραση της τοιχοπλήρωσης. Επιπρόσθετα, η απουσία πλαστιμότητας σε παλαιότερα κτήρια ή νεότερα χτισμένα με τον αντισεισμικό κανονισμό πριν το 2003,

έπαιξε σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση ή στις πολύ σοβαρές βλάβες της πλειοψηφίας αυτών των κατασκευών.

Συνοψίζοντας, γενικότερα αποτέλεσε έκπληξη το ότι πολλές από τις βλαμμένες κατασκευές δεν κατέρρευσαν αν και υπήρχαν μεγάλες σεισμικές απαιτήσεις, κάτι που όπως προαναφέρθηκε αποδίδεται στη μικρή διάρκεια της δόνησης. Αν η διάρκεια ήταν μεγαλύτερη και σε μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων, οι απαιτήσεις μετακίνησης θα ήταν επίσης μεγαλύτερες προκαλώντας πιθανώς την κατάρρευση πολλών κτηρίων. Άλλος ένας τρόπος για να αποδειχτεί η απαίτηση αντοχής των κατασκευών είναι η κατασκευή τοιχοπληρώσεων με ενσωματωμένη όπλιση στο πλαίσιακό σύστημα, κάτι που θα τις μετατρέψει σε διατμητικά τοιχία.

#### 6.5.9 Συμπεράσματα για τις Ηνωμένες Πολιτείες και τις χώρες της μεσογείου

Τα κεντρικά, ανατολικά καθώς και άλλα τμήματα των ηνωμένων πολιτειών και όλων των μεσογειακών χωρών έχουν μεγάλο ποσοστό κτηρίων με ελλείψεις, χαμηλού (δύο με τέσσερις όροφοι) και ενδιάμεσου (πέντε με οκτώ όροφοι) ύψους, από οπλισμένο σκυρόδεμα ή τοιχοποιία σε σεισμικά επικίνδυνες περιοχές. Ο σχετιζόμενος κίνδυνος με τις εν λόγω κατασκευές είναι σημαντικός και μπορεί και επιζήμιος τόσο από άποψη απώλειας ανθρώπινων ζωών, όσο και υλικών αγαθών. Συστηματική μείωση του αριθμού των ευπαθών κατασκευών με αντικατάστασή τους από νεότερες ή με επισκευή και ενίσχυσή τους, δύναται να μειώσει των κίνδυνο βλαβών από σεισμό.

Η πρακτική σχεδιασμού και κατασκευής χωρίς τη χρήση πλάστιμων διατμητικών τοιχίων (ή ενός συνδυασμού τοιχίων και πλαίσιακού φορέα) σε σεισμικά ευπαθείς περιοχές, παρά η χρήση των κατασκευών με φέροντα οργανισμό οπλισμένου σκυροδέματος και τοιχοπληρώσεις δύναται να μην επιφέρει μείωση του μελλοντικού σεισμικού κινδύνου. Σε πολλές άλλες περιοχές με αυξημένο σεισμικό κίνδυνο, ένα σημαντικό ποσοστό της κατόψεως των κτηρίων λαμβάνεται υπόψη και σχεδιάζεται με ενισχυμένα τοιχία οπλισμένου σκυροδέματος. Κτήρια με ποσοστό επιφανείας αντιστεκόμενων μελών στα σεισμικά φορτία ίσο με το 0.35-0.4% του συνόλου της κατόψεως παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια σεισμών.



# 7

## Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΣΤΙΣ 7 ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 1999

### 7.1 Το χρονικό του σεισμού της Αθήνας

Οι σεισμοί αποτελούν μια από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές στην περιοχή της Ευρώπης και κυρίως στη Βαλκανική χερσόνησο, την Ιταλία, τμήματα της Ρωσίας κλπ. Πολλές περιπτώσεις εκτεταμένων καταστροφών, απώλειας ζωής αλλά και σημαντικών κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων έχουν καταγραφεί. Δραματική κατάσταση έχουν προκαλέσει επίσης σεισμοί σε μητροπολιτικές περιοχές όπως το Βουκουρέστι (1997) και η Αθήνα (1981, 1999).

Ο μεσαίου μεγέθους προς ισχυρός σεισμός ( $M=5.9$ ) της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην πόλη των Αθηνών εξετάζεται ως μια συγκεκριμένη περίπτωση μη αναμενόμενου καταστροφικού γεγονότος. Είναι δε χαρακτηριστικός καθώς συνέβη σε περιοχή που παραδοσιακά χαρακτηριζόταν από χαμηλή σεισμικότητα, αφού ποτέ προηγουμένως δεν είχε σημειωθεί ισχυρός σεισμός. «Ο σεισμός της Αθήνας», όπως αργότερα ονομάστηκε, αποτελεί το μεγαλύτερο, σημαντικότερο και καταστροφικότερο σεισμικό γεγονός που έχει ποτέ καταγραφεί στην περιοχή της πόλης των Αθηνών.

Αν και συνέβη γεωγραφικά κοντά στη γνωστή ζώνη Θήβας – Ωρωπού, φαίνεται να σχετίζεται με μια άλλη διάρρηξη που συνδέεται με μια τοπική διάρρηξη μικρού μήκους περίπου 30km βόρεια αυτής της ζώνης. Η κύρια δόνηση ( $M_s=5.9$ , NOAGI  $M_w=5.9$  και  $M_o=7.8 \cdot 10^{17} Nm$  USGS) συνέβη στις 11:56:50.5 GMT σε απόσταση περίπου 18km από το ιστορικό κέντρο της πόλης. Ήταν το πρώτο σεισμικό γεγονός με θύματά που έχει καταγραφεί στην Αθήνα. Περίπου 100 κτήρια κατέρρευσαν προκαλώντας 143 απώλειες ζωής ενώ άλλα 800 υπέστησαν πολύ σοβαρές ζημιές. Περίπου 65000 κτήρια υπέστησαν σοβαρές ή μέτριες ζημιές. Τις πρώτες ημέρες μετά το σεισμό σχεδόν 100000 άνθρωποι έμειναν άστεγοι, η οικονομική ζημία αγγίζει



τα 3b US\$ και από την άποψη αυτή ήταν η πιο μεγάλη φυσική καταστροφή στη σύγχρονη ιστορία της Ελλάδας.

Ο κύριος σεισμός ακολούθησε ένα σύνολο προσεισμών μεγέθους  $M_L=3.2, 2.5, 2.5$  και  $3.2$  καταγεγραμμένων 18 με 2 λεπτά πριν την κύρια δόνηση. Περισσότεροι των 1500 μετασεισμών έλαβαν χώρα στη γύρω περιοχή αμέσως μετά το σεισμό σύμφωνα με τις καταγραφές φορητών οργάνων τοποθετημένων από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο (NOAGI).

Η πιο ενεργή σεισμικά περιοχή στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών είναι αυτή της Θήβας – Ωρωπού που εκτείνεται στον άξονα ανατολή-δύση ως το βορρά της μητρόπολης των Αθηνών. Οι νεοτεκτονικές διαρρήξεις του ρήγματος ξεκάθαρα αποδεικνύουν ρήγμα κανονικής διάρρηξης με το ένα τέμαχός του να βυθίζεται προς το βορρά. Η Αττική, άλλωστε, βρίσκεται μεταξύ της διευρυμένης περιοχής του Αιγαίου, όπου τα ρήγματα κανονικής διάρρηξης κυριαρχούν. Πρόσφατη έρευνα πεδίου απέδειξε ότι η διάρρηξη συνέβη κατά μήκος του ρήγματος της Φυλής, μήκους 8-10km που βρίσκεται στο όρος Πάρνηθα στα ΒΔ της Αττικής.

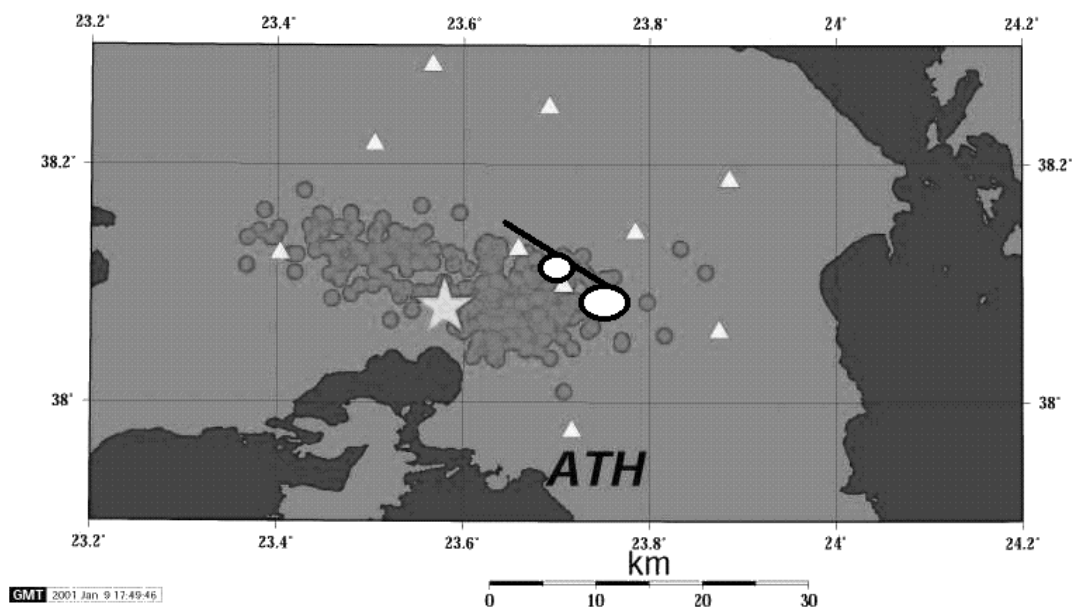
Η περιοχή του όρους Πάρνηθα εκτείνεται μεταξύ δυο τεταρτογενούς περιόδου συστημάτων διάρρηξης στην κεντρική Ελλάδα: του ρήγματος στον κόλπο του Κορινθιακού και του ρήγματος στον κόλπο του Ευβοϊκού. Η περιοχή εκτείνεται σε 1400m καθ' ύψος (HAGS 1978) και περικλείεται βόρεια από τη ζώνη ρηγμάτωσης Καπαρελίου – Ωρωπού, η οποία έχει προκαλέσει τρεις μεγάλου μεγέθους σεισμούς ( $M>6$ ) κατά τη διάρκεια των τελευταίων 110 χρόνων (το 1893, 1938 και 1981). Στο εσωτερικό αυτής της έκτασης οι υπάρχοντες χάρτες ρηγμάτωσης (π.χ. IGME 1989) δεν περιλαμβάνουν ενεργά ρήγματα ή περιλαμβάνουν ρηγματώσεις με μη διευκρινισμένη δραστηριότητα.

Η νεοτεκτονική δημιουργία του όρους Πάρνηθα χαρτογραφήθηκε κατά τα έτη 2001-2002 και οι ερευνητές εστίασαν στον εντοπισμό ενεργών ρηγμάτων (δηλαδή ρηγμάτων που έχουν κινηθεί τα τελευταία 130000 χρόνια και μπορούν να προκαλέσουν επιφανειακές διαρρήξεις κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών) στην κεντρική και νότια κυρίως περιοχή καθώς εκεί εντοπίζεται μεγαλύτερη πιθανότητα κινδύνου για την πόλη των Αθηνών. Τα κύρια ρήγματα εντοπίζονται κατά μήκος του πόδα του βουνού στις περιοχές των Θρακομακεδόνων, της Φυλής και της Αυλώνας. Ένα κυρίαρχο ρήγμα κανονικής διάρρηξης οριοθετείται στις δυτικές πλαγιές της Πάρνηθας (Θριάσιο πεδίο, **εικόνα 7.1**), ωστόσο, και από γεωλογικές αποδείξεις αλλά και από αισθητήρες εξ αποστάσεως φαίνεται ότι η συγκεκριμένη διάρρηξη είναι μη ενεργή. Είναι πιθανό ότι άλλες εκδηλώσεις ρηγμάτων αποδεικνύουν την ύπαρξη κινήσεων στην πρόσφατη τεταρτογενή περίοδο στη συγκεκριμένη περιοχή.

Γενικότερα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε είναι το ότι ο σεισμός προήλθε από ένα «τυφλό» μη χαρτογραφημένο, κανονικό ρήγμα. Σύμφωνα με τις επικρατούσες σήμερα απόψεις, αν το επίπεδο της διάρρηξης επεκτεινόταν ως την επιφάνεια, ίσως να δημιουργούσε ίχνος παραπλήσιο προς το γνωστό ρήγμα της Φυλής. Ακόμα, ο μηχανισμός γενέσεως του κυρίως σεισμού και η χωρική και χρονική κατανομή των μετασεισμών υποδεικνύουν ότι το επίπεδο του ρήγματος παρουσιάζει κλίση περί τις  $52^\circ$  με διεύθυνση N-NA, αλλά εμφανίζεται περισσότερο κατακόρυφο στο ανατολικό του άκρο. Η διάρρηξη ξεκίνησε σε βάθος 8-15km και διαδόθηκε προς

τα πάνω, με μεγαλύτερο πλήθος μετασεισμών στο ανατολικό τμήμα του ρήγματος, δηλαδή προς την Αθήνα. Έτσι, λοιπόν, θα ανέμενε κανείς την παρουσία φαινομένων κατευθυντικότητας στις σεισμικές δονήσεις που έλαβαν χώρα στις περιοχές ανατολικά της ζώνης διαρρήξεως και σε απόσταση μόνο μερικών χιλιομέτρων από αυτήν. Φαίνεται ότι η διαδικασία διάρρηξης σταμάτησε απότομα στο όρος Αιγάλεω, του οποίου ο άξονας είναι σχεδόν κάθετος στη διεύθυνση του ρήγματος άρα το βουνό πιθανό είναι να λειτούργησε ως φραγμός, επιβάλλοντας στη διάρρηξη να στραφεί προς το βορρά, ενεργοποιώντας έτσι κι άλλα ρήγματα. Δεν αποκλείεται η απότομη διακοπή της διάρρηξης να λειτούργησε ως φρένο, προκαλώντας τη δημιουργία υψίσυχνων σεισμικών κυμάτων μεγάλης επιτάχυνσης. Ακόμα, φαίνεται ότι ο Κηφισσός λειτούργησε ως φυσικό όριο μη επέκτασης της δόνησης και το γεγονός αυτό ενισχύεται από το ότι κανένα επίκεντρο μετασεισμού δεν εντοπίστηκε ανατολικότερα της γραμμής του ποταμού.

### Athens EQ Aftershocks 7-17/9



**Εικόνα 7.1:** Επίκεντρο κύριας δόνησης σεισμού Αθήνας 7/9/1999 (άστρο) και μετασεισμοί (κύκλοι) για το χρονικό διάστημα 7-17 Σεπτεμβρίου 1999. Σεισμογραφικοί σταθμοί (τρίγωνα), ρήγμα Φυλής (ευθεία γραμμή) και κύριες ζώνες καταστροφών (ελλείψεις) εικονίζονται επίσης. (αρχείο από Papadopoulos et al, 2000, 2001)

Σύμφωνα με τη μελέτη των Α. Τσελέντη και J. Zahradnik, βασιζόμενοι σε λεπτομερή μετασεισμική παρακολούθηση, δημιουργήθηκε το πρώτο μοντέλο του σεισμού της Αθήνας, το οποίο είναι συμβατό με παγκόσμια, περιφερειακά και τοπικά δεδομένα σεισμικής εδαφικής κίνησης και προσαρμοσμένο στα γεωλογικά δεδομένα. Το προσωρινό δίκτυο καταγραφών αποτελούνταν από 30 σταθμούς που κατέγραψαν 450 μετασεισμικές δονήσεις, καθεμιά από τις οποίες έδωσε πάνω από 40 καταγραφές άφιξης κυμάτων S και P. Κατά τη διάρκεια των πρώτων 20 ημερών καταγραφής, οι μετασεισμοί ήταν συγκεντρωμένοι σε βάρη 3.5 με 15.5 km κατά

μήκος της επιφάνειας του ρήγματος και οριοθέτησαν το ρήγμα το οποίο αποδείχτηκε ότι είχε γωνία βύθισης  $52^\circ$  και διεύθυνση  $117^\circ$ , κάτι το οποίο επαληθεύεται και από την τηλεσεισμική επίλυση του ρήγματος. Μια επιμήκυνση της ευθείας του ρήγματος προς την επιφάνεια τέμνει την εδαφική επιφάνεια κοντά στο ρήγμα της Φυλής. Αριθμητική προσομοίωση δεδομένων από 10 σταθμούς καταγραφής με επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 140 και 370km προσδιορίζει ένα μέσο εστιακό βάθος 10km και μια μέση διάρκεια ταλάντωσης της πηγής περί τα 5-6sec. Αντιμετωπίζοντας κάθε σταθμό καταγραφής ξεχωριστά, προκύπτει μικρότερη διάρκεια ταλάντωσης για τις βόρειο-βορειοανατολικές περιοχές του ρήγματος (4-5sec) και μεγαλύτερη διάρκεια για τις νότιο-νοτιοδυτικές (7-8sec). Η ποικιλία της διάρκειας ταλάντωσης ανάμεσα στους σταθμούς καταγραφής υποδεικνύει την ύπαρξη παλμού κατευθυντικότητας. Μοντελοποίηση με την εμπειρική εξίσωση του Green προσδιορίζει το μήκος του ρήγματος το οποίο προέκυψε 20 ή 10km. Τόσο η αριθμητική όσο και η εμπειρική προσομοίωση έδωσαν μια μικρή περίοδο ανόδου της τάξεως των 0.1-0.3sec. Η μικρή αυτή τιμή ευνοεί την πλήρη απελευθέρωση τάσεων μιας περιοχής με χαμηλή τραχύτητα (asperity). Μια τέτοια περιοχή 10km (με πτώση τάσης 2.7MPa) βρίσκεται σε συμφωνία με ένα χάσμα που ταυτοποιήθηκε κατά τις πρώτες 12 μέρες της παρακολούθησης μεταξύ δυο μετασεισμών και για το λόγο αυτό προτιμάται έναντι του χάσματος των 20km. Τα επιταχυνσιογραφήματα ισχυρής εδαφικής κίνησης του σεισμού της Αθήνας υποδηλώνουν μια εμφανή μικρή διάρκεια (περίπου 3sec) λόγω της ύπαρξης της κατευθυντικότητας και επιβεβαιώνουν μια απότομη έναρξη της διάρρηξης. Δεν υπάρχουν αποδείξεις για απότομη διακοπή της διάρρηξης αλλά η μικρή περίοδος ανόδου και η μικρή διάρκεια ταλάντωσης είναι δυο κύριοι παράγοντες καθορισμού της καταστροφικής εδαφικής κίνησης στην Αθήνα.

Η σεισμική ένταση ανέρχεται στα IX στα βορειοδυτικά της πόλης των Αθηνών. Από την κατάρρευση ενός τετραώροφου εργοστασίου στην πλαγιά του ρέματος της Χελιδονούς υπήρξαν 34 απώλειες ανθρώπινης ζωής. Πολλές καταστροφές παρατηρήθηκαν σε κτίσματα οπλισμένου σκυροδέματος που είχαν κατασκευαστεί σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό του 1978. Δεν παρατηρήθηκαν μεγάλες καταστροφές σε κοινωφελή δίκτυα ή δευτερεύουσες καταστροφές από πυρκαγιές, χημική ρύπανση κλπ. Ο σεισμός έγινε αντιληπτός από όλες τις περιοχές της πρωτεύουσας με εντάσεις περί το VI. Τα ιστορικά μνημεία παρέμειναν σχεδόν ανέπαφα με ορισμένες μόνο μικρές μετακινήσεις σε κάποιους κίονες. Παρά την κοινωνική του σημαντικότητα, ο σεισμός προσέλκυσε την προσοχή λόγω του ότι συνέβη σε μια περιοχή χαμηλού σεισμικού κινδύνου της Ελλάδας. Πράγματι, δεν υπάρχουν καταγραφές σεισμών μεγέθους  $M$  πάνω από 5 σε περιοχές με απόσταση μικρότερη των 30km από την πόλη της Αθήνας. Επίσης, δεν υπήρχε χαρτογραφημένο ενεργό ρήγμα στην επικεντρική περιοχή.

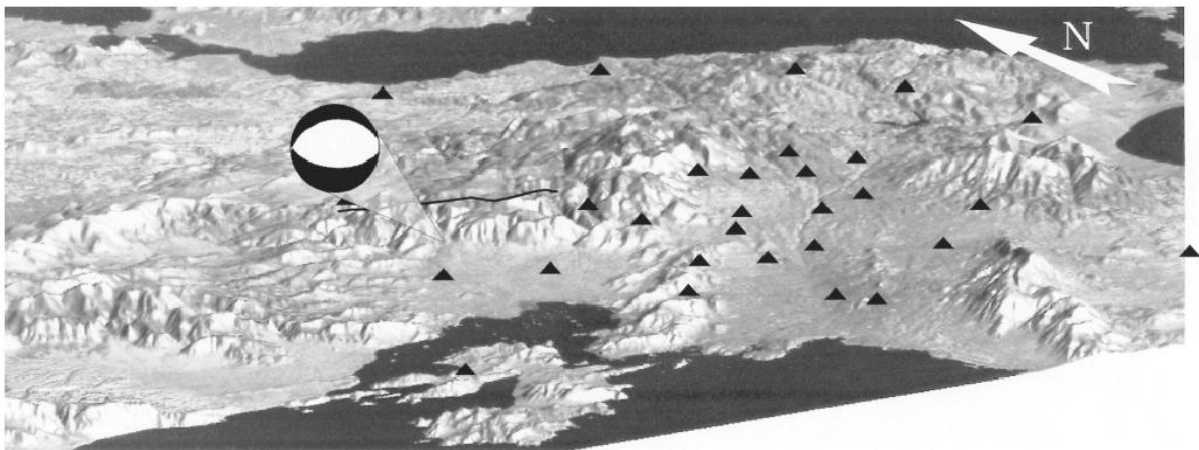
Οι παράμετροι του κύριου σεισμού παρουσιάζονται στον **πίνακα 7.1** σύμφωνα με το εθνικό αστεροσκοπείο Αθηνών (NOA) και τα δεδομένα από παγκόσμιους καταγραφείς (USGS). Και οι δυο πηγές εντοπίζουν το γεγονός κοντά στην περιοχή με τις μεγαλύτερες βλάβες αλλά οι διαφορές μεταξύ των καταγραφών του επικέντρου και των βαθών κυμαίνονται μεταξύ 10 και 20km. Οι τρεις επιλύσεις του σεισμικού ρήγματος (**πίνακας 7.1**) συμφωνούν απολύτως με τη ΒΔΔ-ΝΑΑ (βορειοδυτική

δυτική, νοτιοανατολική ανατολική) διεύθυνση του ρήγματος. Η τραπεζοειδής συνάρτηση της πηγής που δημιουργήθηκε από το γεωφυσικό ινστιτούτο του πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης (*GLUT*) έχει διάρκεια 6sec με περιόδους ανόδου και καθόδου περίπου 1sec.

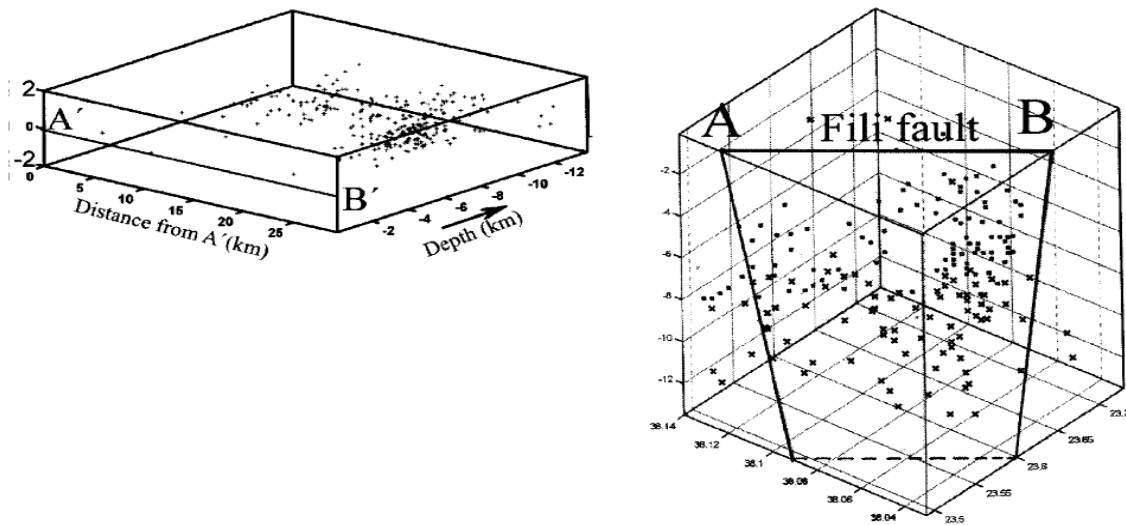
	Lat. (deg N)	Long. (deg E)	Depth (km)	Moment (Nm)	Strike (deg)	Dip (deg)	Rake (deg)
NOA	38.15	23.62	30	–	–	–	–
USGS	38.13	23.55	9	7.8e17	123	55	– 84
Harvard	38.02	23.71	15	1.2e18	114	45	– 73
GLUT	38.04	23.61	11–18	7.6e17	119	56	– 82

**Πίνακας 7.1:** Παράμετροι εστίας του κύριου σεισμικού γεγονότος από διάφορες πηγές.

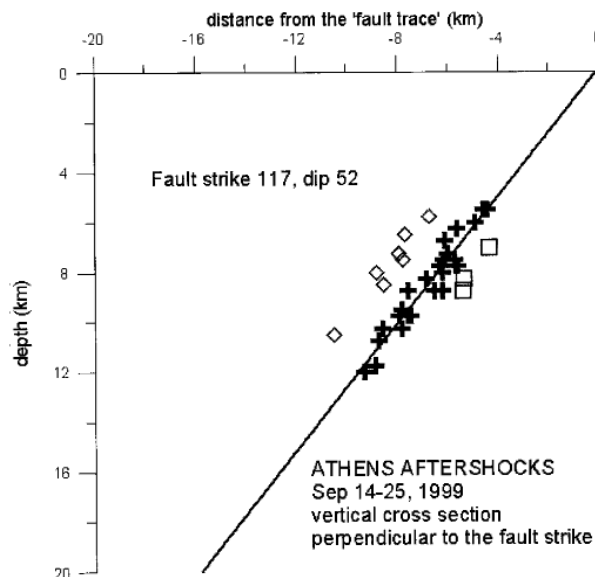
Μερικές μέρες μετά το σεισμικό γεγονός, το σεισμικό εργαστήριο του πανεπιστημίου Πατρών εγκατέστησε 30 προσωρινούς σταθμούς καταγραφής στην περιοχή των Αθηνών (**εικόνα 7.2**). Η κατανομή των σταθμών σχεδιάστηκε ώστε (α) να εντοπιστούν μετασεισμοί με μεγάλη ακρίβεια, καθώς και η συσχέτισή τους με τα υπάρχοντα ρήγματα και να εξεταστεί μια πιθανή μετακίνηση της μετασεισμικής δραστηριότητας σε σημαντικά κοντινά ρήγματα που προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές στην Αθήνα σε παρελθοντικά σεισμικά γεγονότα (για παράδειγμα τα ρήγματα της Αταλάντης και των Θηβών) και (β) να καταγραφούν μετασεισμοί σε ποικίλους γεωλογικούς σχηματισμούς μέσα στην επικεντρική περιοχή που θα επιτρέψουν περαιτέρω μελέτη της σεισμικής επίδρασης. Κάθε σταθμός ήταν εξοπλισμένος με αισθητήρες 4Hz τριών κατευθύνσεων, δέκτη GPS και καταγραφές εδαφικής κίνησης. Ο σκοπός της έρευνας ήταν να συνοψίσει τα σεισμικά δεδομένα που προέκυψαν μεταξύ της 13<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου και της 28<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1999, να τα ενισχύσει με τυπικά δεδομένα κύριας εδαφικής κίνησης και να προσδιορίσει ένα τυπικό μοντέλο σεισμικής κίνησης για το σεισμό της Αθήνας. Το μοντέλο βρίσκεται σε συνάρτηση με τη γνωστή γεωλογία της επικεντρικής περιοχής και των βασικών χαρακτηριστικών των καταγραφών επιτάχυνσης.



**Εικόνα 7.2:** Προσωρινό δίκτυο σταθμών καταγραφής από το πανεπιστήμιο Πατρών. Απεικονίζεται επίσης το ρήγμα της Φυλής και ο εστιακός μηχανισμός.



**Εικόνα 7.3:** Αριστερά: τρισδιάστατη απεικόνιση κατά μήκος του ρήγματος AB. Δεξιά: τρισδιάστατη εικόνα της αλληλουχίας των μετασεισμών και του επιπέδου του ρήγματος της Φυλής.



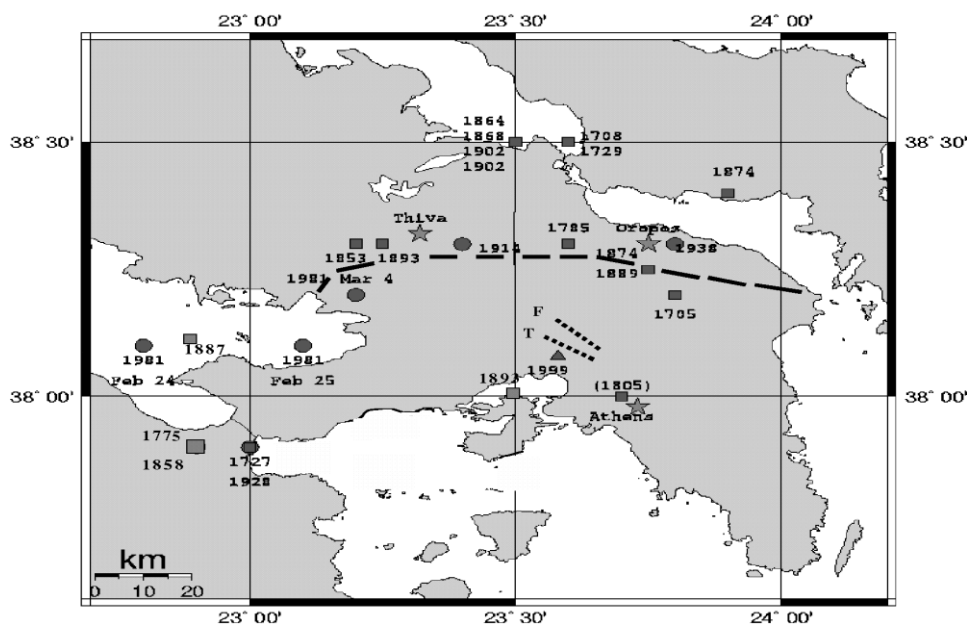
**Εικόνα 7.4:** Η κατανομή των μετασεισμών κατά τη διάρκεια των πρώτων 12 ημερών καταγραφής παρουσιάζεται σε τομή καθώς έτσι μειώνεται η διασπορά. Τα κεντρικά σημεία-σταυροί υποδεικνύουν το ρήγμα που έχει διεύθυνση  $117^\circ$  και γωνία βύθισης  $52^\circ$ . Μια επέκταση του ρήγματος προς την επιφάνεια του εδάφους προσδιορίζει μια θεωρητική γραμμή εμφάνισης επιφανειακού ρήγματος.

## 7.2 Ιστορικοί σεισμοί – Παλαιότερη σεισμικότητα

Η μελέτη της ιστορικής σεισμικότητας είναι μεγίστης σημασίας για μια αξιόπιστη εκτίμηση σεισμικού κινδύνου καθώς προσφέρει αποδείξεις για μια μακράς περιόδου σεισμική δραστηριότητα. Για το λόγο αυτό, έγινε προσπάθεια συγκέντρωσης των ιστορικών σεισμών της περιοχής της Θήβας – Ωρωπού και των γειτονικών περιοχών τους. Προηγούμενες λίστες σεισμών, έρευνες, αναφορές, βιβλία και δυο μη δημοσιευμένα σεισμικά άρθρα από το NOAGI που καλύπτουν τις χρονικές περιόδους 1893 έως 1901 και 1902 έως 1915, χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές δεδομένων. Για τους εν λόγω σεισμούς δίνονται επίσης διάφοροι παράμετροι όπως

η ώρα, οι επικεντρικές συντεταγμένες, η μέγιστη ένταση και το μέγεθος σε κλίμακα Richter. Πρόσθετες αποδείξεις για ύπαρξη ισχυρών σεισμών στη ζώνη Θήβας – Ωρωπού προέρχονται από αρχαιολογική έρευνα. Εκσκαφές σε εργαστήριο παλατιού στη Θήβα αποδεικνύουν ότι ένας σεισμός ήταν η αιτία καταστροφής κατά το 13<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. ενώ μια άλλη καταστροφή πιθανώς σεισμικής προέλευσης συνέβη ξανά στη Θήβα στο τέλος της τρίτης χιλιετίας π.Χ. (Sampson, 1996).

Τρεις ισχυρές αλληλουχίες σεισμών συνέβησαν στην περιοχή των Αθηνών κατά τη διάρκεια οργανοληπτικών μετρήσεων, δηλαδή το 1914, το 1938 και το 1981, ενώ άλλες έξι ισχυρές δονήσεις καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του 18<sup>ου</sup> και 19<sup>ου</sup> αιώνα. Το γεγονός της 4<sup>ης</sup> Μαρτίου 1981 μεγέθους  $M=6.2$  ήταν ένα από τους δυο ισχυρότερους μετασεισμούς του μεγάλου μεγέθους ( $M=6.7$ ) κύριου σεισμού της 24<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 1981. Ο εστιακός μηχανισμός του σεισμού της 4<sup>ης</sup> Μαρτίου 1981 όπως καθορίστηκε από τους Jackson et al (1982), Papazachos et al (1984) και Taymaz et al (1991) είναι συμβατός με τη γεωμετρία και τις κινηματικές συνθήκες των νεοτεκτονικών ρηγματώσεων του ρήγματος στη ζώνη Θήβας – Ωρωπού. Ωστόσο, εστιακοί μηχανισμοί σεισμών μικρότερου μεγέθους δεν είναι διαθέσιμοι. Από τη στιγμή που η ζώνη Θήβας – Ωρωπού αποτελεί μεγάλο σεισμικό κίνδυνο για την Αθήνα, επιλέχθηκε ως μια από τις περιοχές μελέτης του Ευρωπαϊκού προγράμματος ASPELEA (Assessment of Seismic Potential in European Large Earthquake Areas).



**Εικόνα 7.5:** Η ενεργή τεκτονική περιοχή Θήβα-Ωρωπός (έντονη γραμμή). Τα περιστατικά που είναι καταγεγραμμένα με όργανα σημειώνονται με κύκλο ενώ τα ιστορικά με τετράγωνο, με τρίγωνο ο σεισμός της Αθήνας στις 7/9/1999.

Μικρού μεγέθους σεισμοί καταγράφηκαν κατά καιρούς όπως αυτός της 3<sup>ης</sup> Απριλίου ( $M_s=4.25$ ), αυτός της 4<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου ( $M_s=3.5$ ) 1965 και ένα σύνολο δεκατεσσάρων σεισμών με μέγεθος κυμαινόμενο από 3.8 έως 4.5 που συνέβησαν σε διάστημα τριών ημερών από τις 4 έως τις 6 Νοεμβρίου 1997. Οι ισχυρότερες δονήσεις ( $M_s=6$ ) που καταγράφηκαν στη ζώνη Θήβα – Ωρωπός και στις όμορες περιοχές τους παρουσιάζονται στον **πίνακα 7.2** και στην **εικόνα 7.5**.

ID	YY	MM	DD	hh	mm	ss	Acc	Lat	Long	I	M	h	Region
1	1705	09	03				0Y	(38.0)	(23.7)	7(+)		n	Athens
2	1708	05(-)					?	38.5	23.6	7	6.0	n	Chalkis
3	1727	02	21(-)				?	37.9	23.0			n	Corinthos
4	1729	10	11(-)				?	38.5	23.6			n	Chalkis
5	1775	04	16				0	37.9	22.9	7.0	6.0	n	Corinthos
6	1785	06	24				0	38.3	23.6	7(+)	6.0	n	Oropos-Chalkis
7	1805	10	17	night			1M	(38.0)	(23.7)	6?		n	Athens
8	1853	08	18	08	30		20	38.3	23.2	8	6.5	n	Thiva
9	1858	02	21	09	02		10	37.9	22.9	9	6.5	n	Corinthos
10	1864	07	17	00			1	38.5	23.5	6(+)		n	Evia
11	1868	12	28	09	28		1	38.5	23.5	6		n	Chalkis
12	1874	01	17	01	46		30	38.25	23.75	6(-)		n	Athens
13	1874	03	18	03	08		30	38.4	23.9	7	6.0	n	Eretria
14	1882	02	10	10	12		0.5	37.9	22.9	7		n	Corinthos
15	1887	10	03	22	53		15	38.1	22.9	8-9	6.4	n	Xilocastro-Kiatio
16	1889	01	22	04	15		30	38.25	23.75	6		n	Athens
17	1893	05	23	20	04	45	60	38.3	23.25	8-9	6.0	10	Thiva
18	1893	11	14	08	39		30	38.0	23.5	7		n	Salamis
19	1902	04	11	18	37		2	38.5	23.5	6		n	Chalkis
20	1902	05	01	11	08		20	38.5	23.5	6		n	Chalkis

Year	Month	Day	Hour	Min	Sec	Lat	Long	h (km)	Ms
1914	10	17	6	22	32	38.3	23.4	n	6.0
1928	04	22	20	13	46	37.9	23.0	n	6.3
1938	07	20	00	23	35	38.3	23.8	n	6.0
1981	02	24	20	53	37	38.1	22.8	12	6.7
1981	02	25	02	35	54	38.1	23.1	8	6.4
1981	03	4	21	58	07	38.2	23.2	7	6.2

**Πίνακας 7.2:** Ιστορική σεισμικότητα στη ζώνη Θήβας-Ωρωπού και στις γειτονικές περιοχές το 18<sup>ο</sup> και 19<sup>ο</sup> αιώνα. ID:Κωδικός αριθμός, YY: έτος, MM:μήνας, DD:ημέρα, hh: ώρα, mm:λεπτά, ss: δευτερόλεπτα, Acc: ακρίβεια ώρας, Lat: γεωγραφικό πλάτος, Long: γεωγραφικό μήκος, I:μέγιστη ένταση, M:μέγεθος στην κλίμακα Richter ισοδύναμο με το μέγεθος επιφανειακού κύματος, h: εστιακό βάθος σε km, n: ρηχή δόνηση.

### 7.3 Γεωλογία της περιοχής

Στη βόρεια και ανατολική Αττική κυριαρχούν τα βουνά Πάρνηθα και Πεντέλη, τα οποία οριοθετούνται από ρηχές ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ λεκάνες νεογενούς γεωλογικής περιόδου (Freyberg, 1951, Mettos et al, 2000). Οι λεκάνες προσανατολίζονται πλαγίως της διεύθυνσεως της ηπειρωτικής Ελλάδας ( $B-N \pm 10^\circ$ , Clarke et al 1998) και δεν υποδεικνύουν την ύπαρξη σεισμικής διάρρηξης τα τελευταία 2500 χρόνια (Ambraseys και Jackson, 1998). Από κοινού ιστορικά και οργανοληπτικά δεδομένα



της περιοχής σε απόσταση έως 30km από το επίκεντρο του σεισμού της Αθήνας στις 7/9/1999 ( $38.08^{\circ}B, 23.58^{\circ}A$ ) δεν παρουσιάζουν ισχυρές δονήσεις για τα έτη 1700-2000, με εξαίρεση το γεγονός του 1705. Οι Ambraseys και Jackson (1997) όπως επίσης και οι Goldsworthy και Jackson (2002) εντόπισαν το επίκεντρο του γεγονότος της 9/3/1705 ( $M=6.5$ ) στις βορειοανατολικές πλευρές της Πάρνηθας.

Ο βράχος της Πάρνηθας ανήκει στην Υποπελαγονική ισοπική ζώνη (γεωλογική ζώνη της Ελλάδας που περιλαμβάνει τμήματα της Βοιωτίας και της Αττικής, της βόρειας Εύβοιας, της Θεσσαλίας και Ηπείρου και εκτείνεται μέχρι και τη Μακεδονία. Η Ελλάδα γενικότερα χωρίζεται σε 12 γεωλογικές ζώνες διαγωνίως από ανατολή προς δύση). Οι ανθρακικής προέλευσης βράχοι είναι πρώην υποθαλάσσια υλικά Τριασικής περιόδου τα οποία ανακατατάχθηκαν στην πρώιμη Κρητιδική περίοδο και παρέμειναν η βάση στην οποία τοποθετήθηκε και ένα στρώμα οφιολίθου. Μεγάλες οφιολιθικές μάζες εντοπίζονται μεταξύ των Υποπελαγονικών βράχων μαζί με ένα ετερογενές μείγμα σχηματισμών όπως επίσης και με χαλαζιακά πετρώματα. Η βάση αποτελείται από Παλαιοζωικό γνεύσιο, μίκα, σχιστόλιθο, αμφιβολίτη και παρεμβολές μαρμάρου. Οι Υποπελαγονικοί βράχοι εκτείνονται στα ανατολικά και νοτιοανατολικά και εντοπίζονται άνωθεν της Αττικοκυκλαδικής, μεταμορφωμένης κατά τη διάρκεια της τριτογενούς περιόδου, κύριας ορεινής ζώνης (περιοχή Πεντέλης) (η Αττικοκυκλαδική ζώνη είναι άλλη μια από τις 12 γεωλογικές ζώνες της Ελλάδας που περιλαμβάνει κυρίως μεγάλο τμήμα της Αττικής και όλες τις Κυκλάδες). Τα πετρώματα που διαρρήχθηκαν περιλαμβάνουν καρστικό ασβεστόλιθο, χαλαζίτη και σύνολο ποτάμιων και μη στερεοποιημένων αποθέσεων (Mettos et al 2000). Τεταρτογενείς σχηματισμοί περιλαμβάνουν αλλουβιακές αποθέσεις και απότομους κώνους αποσαθρωμένου βράχου. Οι αποθέσεις βρίσκονται στα χαμηλά τμήματα της Πάρνηθας, όπου υπάρχει ένα εντοπισμένο σπάσιμο στην πλαγιά. Αποτελούνται από καλά διαστρωμένο ασβεστόλιθο και χαλίκια που μεταφέρθηκαν μέσω του δικτύου απορροής, ενώ οι αποθέσεις αποσαθρωμένου βράχου είναι χαλαρά τοποθετημένες και σχηματίστηκαν με ξηρή μεταφορά ατομικών κόκκων ή ροών ξηρής μάζας.

Η ΒΑ Αττική διαχωρίζεται από ένα κύριο ΒΒΑ-ΝΝΔ (βόρειο βορειοανατολικό-νότιο νοτιοδυτικό) χάσμα που αποσυνδέει τα μεταμορφωμένα πετρώματα στα ανατολικά από τα μη μεταμορφωμένα στα δυτικά και φτάνει μέχρι τα βορειοδυτικά της Αθηναϊκής πεδιάδας, σχεδόν μέχρι το ποτάμι του Κηφισού. Η εν λόγω ρήξη ήταν ενεργή κατά την ύστερη Μειόκαινη-πρώιμη Πλειόκαινη περίοδο, προκαλώντας χαλάσματα πολλών εκατοντάδων μέτρων και το ανασήκωμα των μεταμορφωμένων πετρωμάτων από το βαθύτερο κομμάτι της λιθόσφαιρας, όπου η μεταμόρφωση συνέβη στην Ηώκαινη-Ολιγόκαινη περίοδο. Η αποκόλληση χωρίζει επίσης τα κατευθυνόμενα στον άξονα Α-Δ ρήγματα της δυτικής πλευράς από τα ΒΔ-ΝΑ λιγότερο ενεργά κανονικής διάρρηξης ρήγματα της ανατολικής πλευράς. Το σύνολο των ενεργών ρηγμάτων με κατεύθυνση Α-Δ στη βόρεια Αττική περιορίζεται αποκλειστικά από μη μεταμορφωμένες Αλπικές μονάδες και ελαττώνεται σταδιακά σε εύρος καθώς προσεγγίζει τη ζώνη αποκόλλησης. Για το λόγο αυτό, η αποκόλληση έμμεσα φαίνεται να επιδρά σημαντικά στη νεοτεκτονική δημιουργία πετρωμάτων, επηρεάζοντας τη γεωμετρία, τη μορφή και την ένταση της παραμόρφωσής τους. Τα μετά-Αλπικά πετρώματα της περιοχής αποτελούνται από

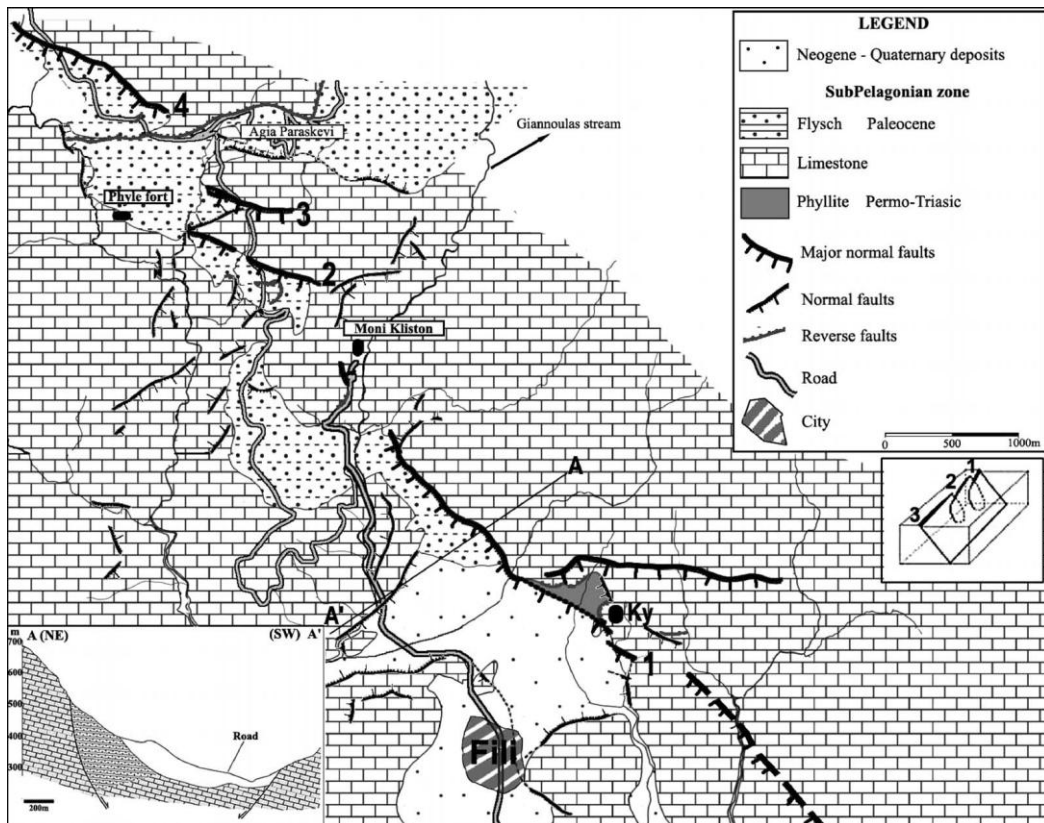
ύστερες Μειόκαινες -Πλειόκαινες ηπειρωτικές αποθέσεις και ελάχιστες προεξοχές Πλειστόκαινης και Ολόκαινης αλλουβιακής προέλευσης εδαφών. Τα αρχαιότερα τμήματα αποτελούνται από κλαστικούς ιζηματογενείς σχηματισμούς που εμφανίζονται στην επιφάνεια στην περιοχή του Καπανδριτίου και μεταξύ του Αγίου Στεφάνου και των Αφιδνών, σχηματίζοντας μια ΒΑ-ΝΔ ζώνη αλλουβιακών αποθέσεων πάχους πολλών εκατοντάδων μέτρων. Στην κορυφή του συνονθυλεύματος αιχμηρών σχηματισμών εμφανίζεται καρστικός ασβεστόλιθος πάχους εκατοντάδων μέτρων που ανομοιόμορφα επικάθεται στα υποκείμενα μεταμορφωμένα πετρώματα. Τέλος, πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις περιορισμένου πάχους παρατηρούνται μόνο σε μερικές στενές λωρίδες κατά μήκος της ακτής (Ωρωπός, Κάλαμος, Μαραθώνας) και στην περιοχή των Αφιδνών.

## 7.4 Τα ενεργά ρήγματα της Πάρνηθας

### 7.4.1 Το ρήγμα της Φυλής

Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής της Φυλής φαίνεται στην **εικόνα 7.6** και καλύπτει περιοχή 8km Α-Δ επί 6km Β-Ν. Το ρήγμα διαχωρίζεται σε τέσσερις κλάδους, ορατούς ακόμα και από δορυφόρο υψηλής ανάλυσης, με κοινή διεύθυνση  $B120^{\circ}$ - $B130^{\circ}$  και πορεία καταβύθισης νοτιοδυτική. Τα επίπεδα του ρήγματος δεν είναι ορατά στην εικόνα αλλά η θέση τους μπορεί να προσδιοριστεί από τις παράλληλες αυλακώσεις του ασβεστόλιθου, οι οποίες αναγνωρίζονται εύκολα από τον ελαφρώς γκρι τόνο και το ημιελλειψοειδές σχήμα. Τα τμήματα που βρίσκονται πιο βορειοδυτικά βρίσκονται και σε υψηλότερα υψόμετρα και αντί για φλύσχη (που περιέχουν τα κατώτερα) περιέχουν ανθρακικά πετρώματα.

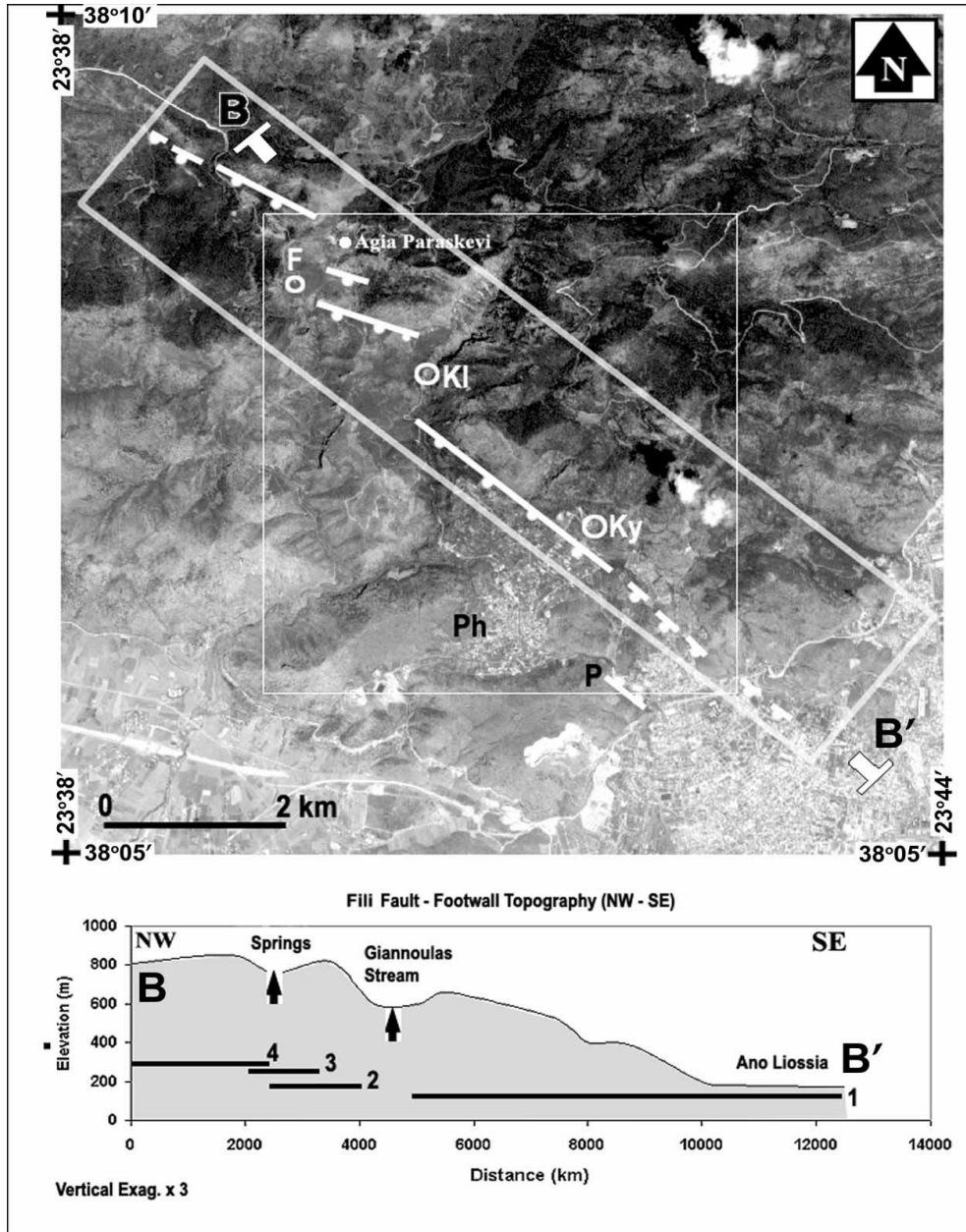
Ο βασικός κλάδος του ρήγματος έχει μήκος 4.5km και ορίζει τη μικρή λεκάνη της Φυλής της Νεογενούς περιόδου που χαρτογραφήθηκε από τους Katsikakos et al (1986). Είναι πιθανό το συγκεκριμένο τμήμα να εκτείνεται και νοτιοανατολικά για άλλα 2km φτάνοντας στο δήμο Άνω Λιοσίων, παρ' όλα αυτά δεν εντοπίζονται στην περιοχή πλαγιές κάποιου ρήγματος. Η πιθανότητα όμως ύπαρξής του ενισχύεται από το γεγονός του ότι ένα προεξέχον περίγραμμα εμφανίζεται στις εικόνες από δορυφόρο και στους χάρτες σκιερού αναγλύφου, προς το νοτιοανατολικό άκρο του πρώτου τμήματος εμφανίστηκε μια επιφανειακή διάρρηξη μετά το σεισμό της Αθήνας το 1999 που ερμηνεύτηκε ως κίνηση λόγω βαρύτητας κατά μήκος ενός αντίθετου ρήγματος του πρώτου κομματιού και γεωφυσικά δεδομένα εντοπίζουν ίχνη ΒΔ-ΝΑ κανονικής διάρρηξης στην περιοχή των Άνω Λιοσίων. Επίσης, και άλλα κανονικά ρήγματα υφίστανται με διεύθυνση  $B40^{\circ}$ - $B45^{\circ}$  αλλά διακόπτονται από το νεότερο ρήγμα Φυλής.



**Εικόνα 7.6:** Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του ρήγματος της Φυλής. Οι αραβικοί αριθμοί υποδεικνύουν τα τμήματα του ρήγματος, το κουτί πάνω αριστερά δείχνει το σημείο τομής AA' και η εικόνα δεξιά σχετίζει την τοπογραφία με το βάθος (Ferrill et al 1999).

Ο δεύτερος κλάδος του ρήγματος Φυλής εντοπίζεται στα βορειοδυτικά του κυρίως τμήματος και εκτείνεται σε μήκος  $1200m$ . Το τμήμα-σύνορο μεταξύ του 1<sup>ου</sup> και του 2<sup>ου</sup> κομματιού εκτείνεται κατά μήκος ενός αιχμηρού γεωμορφολογικού σχηματισμού, ο λαιμός του σχηματίστηκε από την πηγή Γιαννούλας (**εικόνα 7.7**) και έχει μήκος  $900m$ . Αυτό το τμήμα αποτελείται από καλά σχηματισμένες αυλακώσεις κατά μήκος λείων πλαγιών και νεοσχηματισμένες λωρίδες πλάτους περίπου 10% του μήκους του. Το ύψος των λωρίδων κυμαίνεται μεταξύ 30 και 50cm και δημιουργήθηκαν λόγω μετακινήσεων των τεμαχών του ρήγματος σε σεισμικά γεγονότα, αν και δεν είναι σαφές αν προήλθαν από μεμονωμένες ή πολλαπλές κανονικές ολισθήσεις.

Το τέταρτο τμήμα έχει μήκος  $1500m$  και τα τεμάχια του κατά μήκος βυθίζονται κατά  $50-60^\circ$ , σχηματίζοντας μια στενή λωρίδα πάχους  $10cm$  κατά μέσο όρο. Στο άκρο αυτού του τεμαχούς κοντά στην Αγία Παρασκευή σχηματίζεται μια πηγή σε περιοχή καρστικών πετρωμάτων. Σύμφωνα με μαρτυρίες των πυροσβεστών της περιοχής το νερό της πηγής εξαφανίστηκε περίπου τρεις ώρες πριν το σεισμό της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999. Ακόμα, το αρχαίο οχυρό της Φυλής που υπέστη σοβαρές καταστροφές στο σεισμό της Αθήνας εκτείνεται στην περιοχή του 3<sup>ου</sup> και 4<sup>ου</sup> κομματιού. Το μήκος του ρήγματος συνολικά αγγίζει τα  $8.5km$ , ο μέσος όρος απόστασης μεταξύ των τεμαχών είναι  $700m$  χωρίς επικάλυψη (εκτός από την περιοχή επικάλυψης 50% των κομματιών 2 και 3).

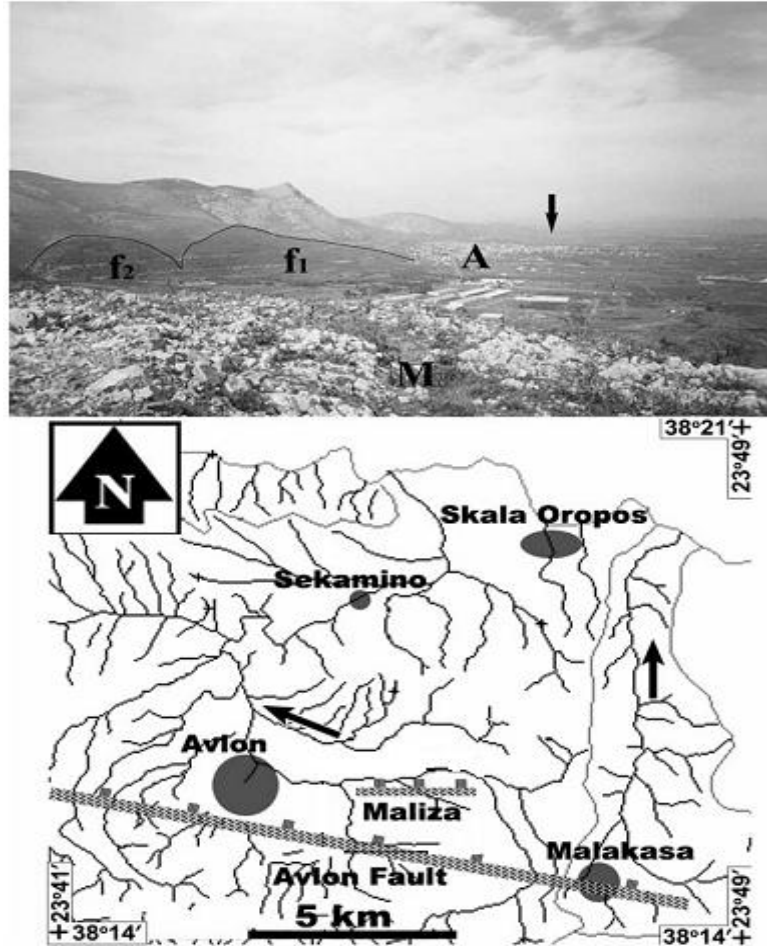


**Εικόνα 7.7.** Εικόνα από δορυφόρο σε γκρι κλίμακα της περιοχής της Φυλής. Δορυφόρος IRS-IC, Ιούλιος 1999. Το κουτί αποτελεί επέκταση της εικόνας 3, το επικλινές κουτί δείχνει πιθανή επέκταση της ζώνης του ρήγματος της Φυλής και τη μέση διεύθυνσή της  $B125^\circ$ , οι παχιές άσπρες γραμμές υποδεικνύουν τμήματα κανονικής καταβύθισης (σημειωμένα στα ανάντη), ο κύκλος  $K_y$  τοποθετεί το μοναστήρι του Αγίου Κυπριανού όπου οι ρήξεις εμφανίστηκαν στην επιφάνεια στο σεισμό της Αθήνας το 1999, ο κύκλος F τοποθετεί το οχυρό της Φυλής το οποίο υπέστη σοβαρότατες βλάβες στο σεισμό της Αθήνας 1999. Ph είναι η πόλη της Φυλής, P είναι η τοποθεσία Πλάτωμα, όπου η αντίθετη διεύθυνσης διάρρηξη εντοπίστηκε και η κάτω εικόνα είναι η τομή BB' που εκτείνεται BA-ΝΔ.

Η μετακίνηση του ρήγματος είναι δύσκολο να προσδιοριστεί καθώς απουσιάζουν οι επαφές φλύσχη-ασβεστολίθου στο κατάντη τέμαχος και φυλλίτη-ασβεστολίθου στο ανάντη. Παρ' όλα αυτά, μια εκτίμηση  $320m$  στην κορυφή του Κρητιδικού ασβεστολίθου μπορεί να εξαχθεί καθώς εμφανίζεται στην επιφάνεια βόρεια της περιοχής της Φυλής (**εικόνα 7.6**). Υποθέτοντας επίπεδη τοπογραφία πριν τη διέγερση, παράγεται μια μετακίνηση  $715m$  για το κομμάτι 1 άρα μια μέση μετακίνηση για το συγκεκριμένο ρήγμα είναι  $0.18mm/yr$ .

#### 7.4.2 Το ρήγμα της Αυλώνας

Η βορειότερη πλευρά της Πάρνηθας περικλείεται από το ρήγμα της Αυλώνας, το οποίο έχει ξεκάθαρη γεωμορφολογική έκφραση με κορυφογραμμές ασβεστολίθου ευθυγραμμισμένες κατά μήκος του κατάντη πρानούς του ρήγματος (**εικόνα 7.8**).



**Εικόνα 7.8:** (πάνω) Φωτογραφία της περιοχής του ρήγματος της Αυλώνας, Μάρτιος 2001. Τα  $f_1$  και  $f_2$  υποδεικνύουν αλλοιωμένες τριγωνικές όψεις σε ανθρακικό πέτρωμα. Τα άκρα των όψεων σημειώνονται με μαύρη γραμμή. Το κατακόρυφο βέλος δείχνει το άκρο του ρήγματος, το γράμμα A την πόλη της Αυλώνας και το M τη δυτική όψη του ρήγματος της Μαλίζας. (κάτω) Χάρτης απορροής της περιοχής της Αυλώνας που απεικονίζει τις διαφορετικές κατευθύνσεις των ρευμάτων (μαύρα βέλη) κατά μήκος της διάρρηξης (σκιασμένο ορθογώνιο εστιγμένο στην κατάντη πλευρά της απόρριψης). Οι σκούρες γκρι γραμμές δείχνουν την πορεία του νερού και οι ανοιχτές γκρι την έκταση στην οποία φτάνει.

Τα δεδομένα υψομέτρων κατά μήκος του ρήγματος δείχνουν δυο διαφορετικές περιοχές, μια επίπεδη στο βορρά (ανάντη πρανές) και μια υπερυψωμένη στο νότο (κατάντη πρανές) με υψόμετρα που αγγίζουν τα 933m (HAGS 1978, **εικόνα 7.8**).

Τα υψόμετρα αυτά μειώνονται καθώς κινούμαστε προς τα άκρα του ρήγματος, όπως δείχνουν και τα βέλη στην **εικόνα 7.8** με αποτέλεσμα οι περιοχές ανάντη να έχουν υψόμετρο που κυμαίνεται μεταξύ των 150-200m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Λαμβάνοντας υπόψη τα εκτιμώμενα πάχη κατά τη διάρκεια της διάρρηξης στην περιοχή της Αυλώνας (περιοχή Τανάγρας – Μαλακάσας από Mettos et al, 2000)

τα οποία υπερβαίνουν τα 600m, πρέπει να δεχτούμε την ύπαρξη μιας λεκάνης 600m δίπλα στην Αυλώνα. Για το λόγο αυτό μια ελάχιστη εκτίμηση γεωλογικής πτώσης κατά μήκος του ρήγματος φτάνει τα 1500m και μέσω τριγωνομετρίας παράγεται μια συνολική μετακίνηση 2000m κατά μήκος του ρήγματος, έχοντας υποθέσει βύθιση 50° και επίπεδη τοπογραφία πριν τη διάρρηξη. Εξαιτίας γεωτρήσεων την ανώτερη Μειόκαινη περίοδο δίπλα στην Αυλώνα, οι παραμορφώσεις τελικά περιορίζονται σε ένα μέσο ρυθμό μετακίνησης περίπου ίσο με 0.2mm/yr.

#### 7.4.3 Το ρήγμα της Μαλίζας

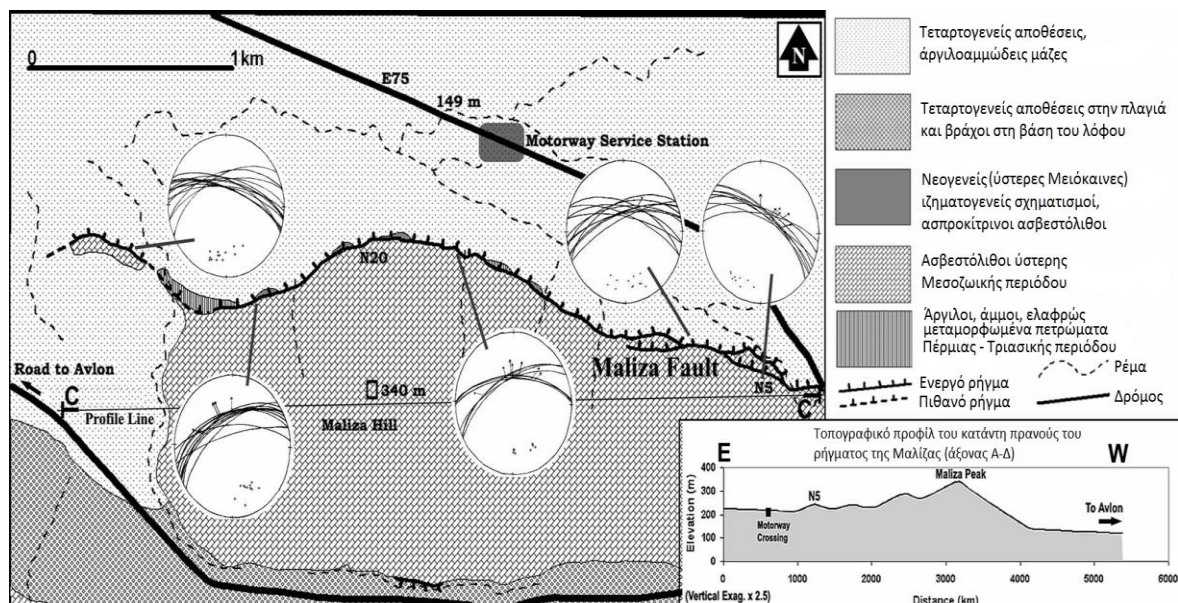
Στην περιοχή του Ωρωπού, βόρεια του ρήγματος της Αυλώνας, πολλαπλά κανονικά ρήγματα έχουν εντοπιστεί (Paranikolaou et al, 1988 , Goldsworthy et al, 2002). Η χαρτογράφηση της περιοχής δείχνει ότι στο ανάντη πρηνές του ρήγματος της Αυλώνας μια διάρρηξη σε ασβεστόλιθο, πλάτους 2-5m και μήκους 4-7km, διασχίζει κατά μήκος τους πρόποδες του λόφου της Μαλίζας (Μ στην **εικόνα 7.8**), ακριβώς νότια της εθνικής οδού (**εικόνα 7.9**). Το κατάντη μη διερρηγμένο πρηνές αποτελείται από πυκνούς ασβεστόλιθους Κρητιδικής περιόδου με μικρές παρεμβολές σχιστολίθου της ανώτερης Παλαιοζωικής περιόδου. Το διερρηγμένο κομμάτι αποτελείται από χερσαίες Νεογενείς αποθέσεις, κυρίως καρστικοποιημένου ασβεστόλιθου, αργίλου και αλλουβιακών αποθέσεων. Τεταρτογενείς (=Νεογενείς) αποθέσεις καλύπτουν ανομοιόμορφα τα Νεογενή πετρώματα όπως επίσης και το μη διερρηγμένο πέτρωμα. Γύρω από την Αυλώνα οι αποθέσεις αυτές είναι κυρίως αλλουβιακές και αποκτούν μεγάλο πάχος (Mettos et al, 2000). Τα εναποτεθέντα ιζήματα περιλαμβάνουν μη συνεκτικές μάζες, αργίλους, αργιλικές ιλύες και παρεμβολές άμμου και εμφανίζονται σε καφέ-κόκκινη απόχρωση. Ακριβώς δυτικά του λόφου της Μαλίζας κατά μήκος της φυσικής πλαγιάς, εντοπίζονται ποτάμιες αποθέσεις, πιθανώς της νεότερης Πλειστόκαινης – Ολόκαινης περιόδου, οι οποίες βυθίζονται νότια με διεύθυνση 10-15°.

Το βάθος της διάρρηξης κυμαίνεται μεταξύ 5m στο μέσο και μειώνεται σταδιακά μέχρι το 1m στα άκρα. Αυτό το προφίλ υψομέτρων ταιριάζει με το προφίλ ανύψωσης του κατάντη πρηνούς (**εικόνα 7.9**, γραμμή CC') παρουσιάζοντας ελλειπτική γεωμετρία παρόμοια με άλλων κανονικών ρηγμάτων της κεντρικής Ελλάδας. Η διάρρηξη κατευθύνεται παράλληλα σε υψόμετρο 180-200m διαμορφώνοντας το περίγραμμά της στη διεύθυνση Α-Δ. Σε διάφορες περιοχές η ρήξη σχηματίζει αυλακώσεις μήκους 3-4m έως πολλών δεκάδων μέτρων (N5 και N10 στην **εικόνα 7.6**), οι οποίες είναι σύνηθες χαρακτηριστικό των κανονικών ρηγμάτων και ο σχηματισμός τους σχετίζεται με τη διαδικασία ανάπτυξης του ρήγματος.

Η επιφάνεια του ρήγματος καλύπτεται τοπικά από μια λεπτή λευκή κρούστα ασβεστιπικής πούδρας, προϊόν χημικής αποσάθρωσης της επιφάνειας του ρήγματος. Σε πολλά σημεία παρατηρούνται αξιοσημείωτες διαφορές στην ανώμαλη επιφάνεια του ρήγματος που κυρίως εξομαλύνονται καθώς κινούμαστε προς τη βάση του, όπου και εντοπίζεται μια γκριζωπή επιφάνεια πάχους 30cm. Το εν λόγω εξομαλυμένο τμήμα αποδεικνύει την πρόσφατη επανενεργοποίηση του ρήγματος της Μαλίζας.



Κατά τη διάρκεια της όψιμης τεταρτογενούς(=Νεογενούς) περιόδου το ρήγμα προκάλεσε πολλές ισχυρές δονήσεις ( $M_w > 5.8$ ), οπότε μπορεί να δώσει ακόμα μεγαλύτερες αν η διάρρηξη επεκταθεί στα δυτικά του λόφου της Μαλίζας. Είναι λογικό να υπάρχει η πεποίθηση ότι το ρήγμα της Μαλίζας επικοινωνεί με αυτό της Αυλώνας δυτικά λόγω της χαρτογράφησης κεκλιμένων αλλουβιακών στρωμάτων δυτικά του λόφου της Μαλίζας. Αντιθέτως, το συγκεκριμένο ρήγμα δεν επεκτείνεται ανατολικά καθώς η απορροή του ανάντη πρσανούς γίνεται προς το βορρά (βέλη **εικόνας 7.8**). Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας την κατάντη τοπογραφία και βασιζόμενοι στις μικρές γεωλογικές πτώσεις που παρατηρούνται κατά μήκος του ρήγματος της Μαλίζας (**εικόνα 7.9**) είναι πιθανό ότι ο ρυθμός μετακίνησης του ρήγματος δε διαφέρει από αυτόν του αρχαιότερου ρήγματος της Αυλώνας. Μια πιο ακριβής εκτίμηση δεν είναι δυνατή καθώς το πάχος πολλών σχηματισμών είναι άγνωστο.



**Εικόνα 7.9:** Νεοτεκτονικός χάρτης της περιοχής της Μαλίζας. Η παχιά εστιγμένη γραμμή ταυτοποιεί το ρήγμα της Μαλίζας. Στερεογραφικές απεικονίσεις σε επιλεγμένα σημεία κατά μήκος της διάρρηξης υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ολίσθησης. Το σχήμα κάτω απεικονίζει το A-Δ προφίλ ανύψωσης του κατάντη πρσανούς κατά μήκος της τομής CC'.

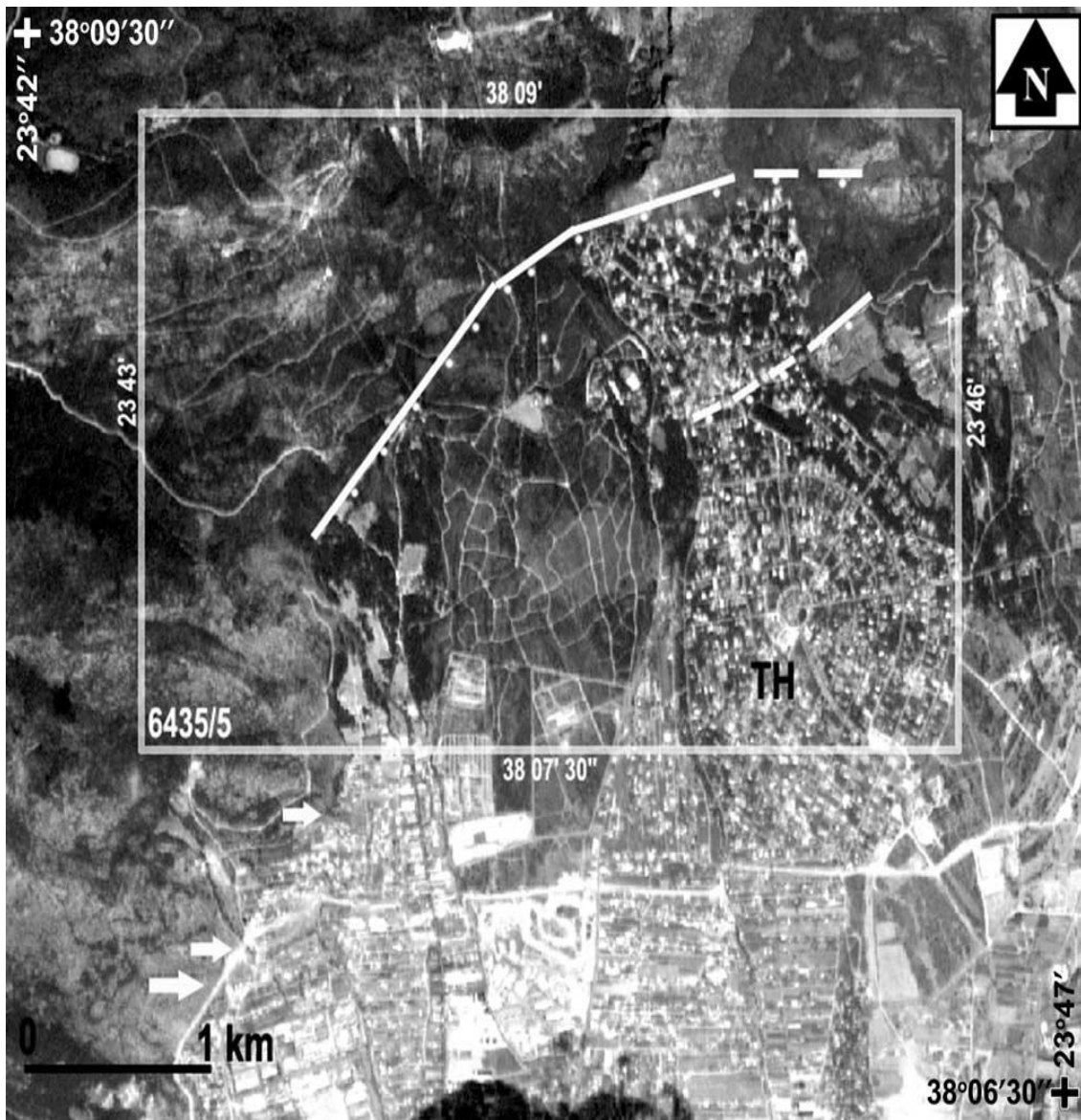
#### 7.4.4 Το ρήγμα των Θρακομακεδόνων

Το νότιο σύνορο του όρους Πάρνηθα είναι μια επιμήκης όψη με μεγάλες αλλουβιακές αποθέσεις που εκτείνονται ως την επιφάνεια και πολλαπλούς γκρεμούς που προσανατολίζονται στον άξονα ΒΑ-ΝΔ. Η περιοχή των Θρακομακεδόνων που δέχτηκε ισχυρό πλήγμα από το σεισμό της Αθήνας στις 7/9/1999, απεικονίστηκε με φωτογραφία από δορυφόρο τον Ιούλιο του 1999 (**εικόνα 7.10**) όπου φαίνεται ότι ένας διάδρομος οικιστικής ανάπτυξης από το νότο προς το βορρά διασχίζει μια πιθανή γραμμή ρήγματος.

Η γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής (**εικόνα 7.12**) απεικονίζει δυο νεοτεκτονικές, πιθανώς ενεργές, κανονικές διαρρήξεις, ίδιας πορείας ( $B60^\circ$ ) που βυθίζονται προς τα νότια-νοτιοανατολικά. Η πρώτη διάρρηξη μήκους 4km



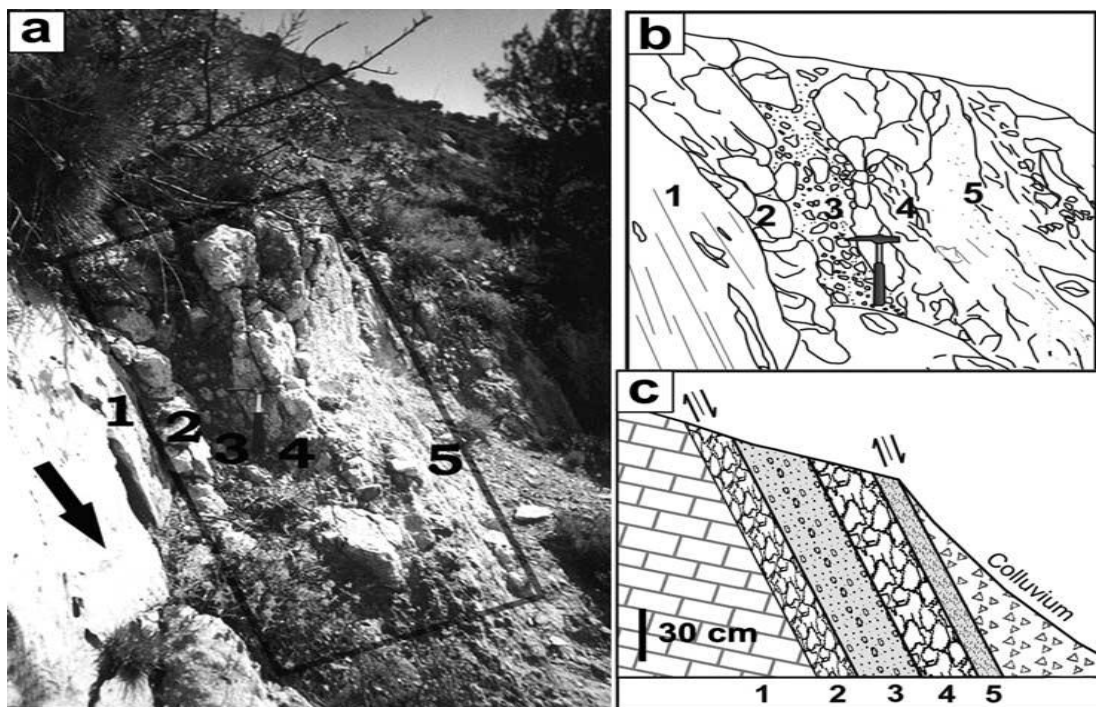
κατευθύνεται κατά μήκος των προπόδων της Πάρνηθας και εμφανίζει πολλαπλές καλοσηματισμένες επιφάνειες ολίσθησης κατά μήκος του ανατολικού της τμήματος (**εικόνα 7.11**). Δεν είναι σαφές το γιατί η τυπική αρχιτεκτονική ρηγμάτωση εμφανίζεται μόνο στην ανατολική πλευρά του, αλλά χρήζει έρευνας καθώς το ρήγμα των Θρακομακεδόνων ορίζει μια περιοχή Νεογενούς λεκάνης και θα έπρεπε να υπάρχει παρόμοια αρχιτεκτονική ρηγμάτωση κατά μήκος του. Στην εν λόγω περιοχή Ν6 υπάρχει μια απότομη πλαγιά ύψους 4m.



**Εικόνα 7.10:** Φωτογραφία της περιοχής των Θρακομακεδόνων από δορυφόρο. Το λευκό κουτί δείχνει μια μεγέθυνση της **εικόνας 7.11**, η συνεχής λευκή γραμμή υποδεικνύει το κανονικό ρήγμα, η διακεκομμένη λευκή γραμμή την επιμήκυνση του ρήγματος και τα λευκά βέλη την πιθανή νοτιοδυτική επέκταση του ρήγματος (Δορυφόρος IRS-IC, Ιούλιος 1999).

Η αρχιτεκτονική της ζώνης θραύσης ορίζεται από μια σειρά στρωμάτων αιχμηρών βράχων. Ξεκινά με μια ομαλή επιφάνεια από καλοδιαβαθμισμένο τεμαχισμένο ασβεστόλιθο(1), συνεχίζει με ενδιάμεσως διαβαθμισμένο ασβεστόλιθο στο ανάντη τέμαχος(2), ακολουθεί μια λεπτή λωρίδα μικρών ασβεστολιθικών

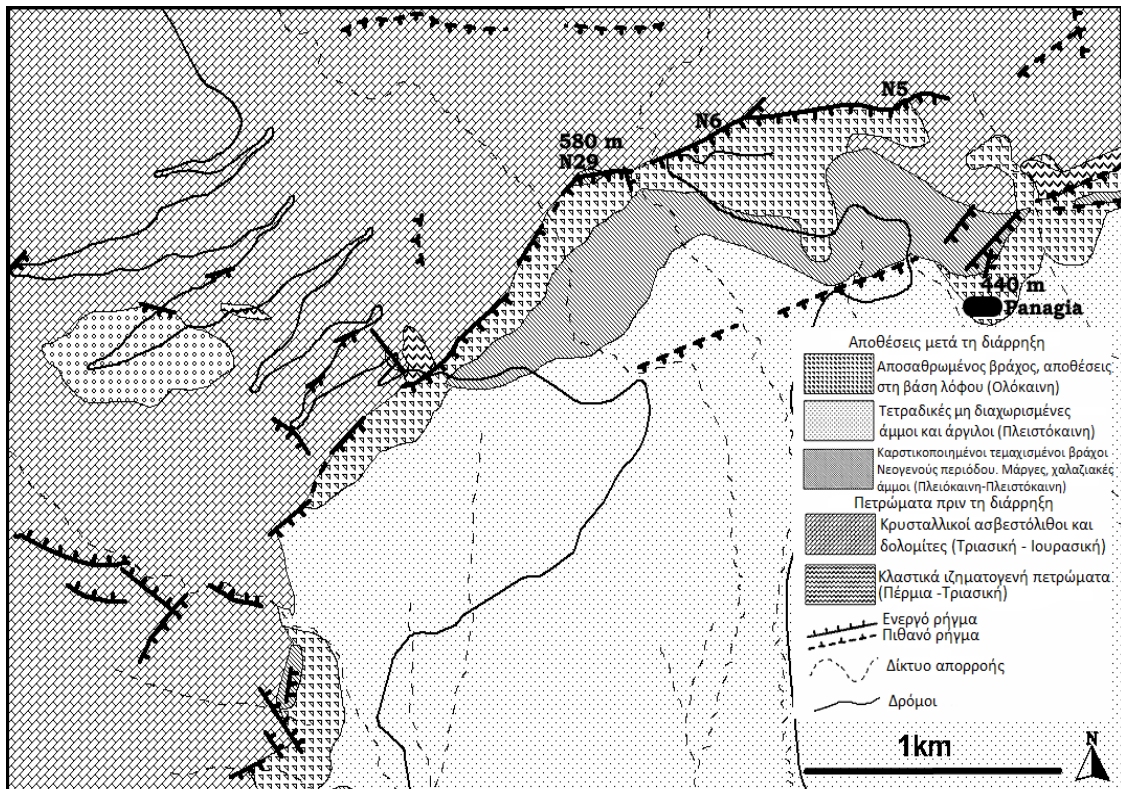
χαλικιών με κόκκινη απόχρωση(3), ξαναεμφανίζεται ενδιάμεσα διαβαθμισμένος ασβεστόλιθος(4) και καταλήγει σε μια ανάπτυξη ασθενούς επιφάνειας ολίσθησης με ασβεστιτική πούδρα (5). Οι εν λόγω στρωματώσεις λέγεται ότι αντιπροσωπεύουν τις περιόδους γρηγορότερης και πιο αργής ολίσθησης κατά τη διάρκεια ζωής του ρήγματος. Οι γρηγορότεροι ρυθμοί ολίσθησης σχηματίζουν πυκνότερες στρώσεις καλοδιαβαθμισμένου υλικού αποτελούμενου από γωνιώδη κομμάτια ασβεστολίθου ενώ οι λιγότερο ενεργές και πιο αργές περιόδους ολίσθησης σχηματίζουν μη συνεκτικά υλικά κόκκινης αργίλου. Το δυτικό τμήμα του ρήγματος δεν είναι ευκρινές στην φωτογραφία από δορυφόρο (**εικόνα 7.10**) λόγω του μικρού ύψους της διάρρηξης και της πυκνής βλάστησης.



**Εικόνα 7.11:** α) Φωτογραφία της τοποθεσίας N6 κατά μήκος του ρήγματος των Θρακομακεδόνων (**εικόνα 7.12**) που απεικονίζει την τομή της αρχιτεκτονικής του ρήγματος. Το βέλος υποδεικνύει τη φορά της κίνησης κατά την επιφάνεια ολίσθησης, το επικλινές κουτί δείχνει την αποσαθρωμένη ζώνη πάχους 0.9m (όψη βορειοανατολική, Ιούλιος 2002). β) Σκιαγράφιση της αρχιτεκτονικής της διάρρηξης που απεικονίζει τα πέντε διαφορετικά στρώματα. γ) Μοντέλο – τομή της ζώνης ανάπτυξης του ρήγματος. Το ρήγμα αντιπαραθέτει Μεσοζωικό ασβεστόλιθο στα κατάντη με τεταρτογενούς (=νεογενούς) περιόδους αποθέσεις στα ανάντη. Η ζώνη διάρρηξης χαρακτηρίζεται από εναλλαγές μη συνεκτικών ζωνών αιχμηρών βράχων (3 και 5) και συμπαγών πετρωμάτων (2 και 4).

Η δεύτερη διάρρηξη βρίσκεται στα ανάντη της πρώτης και βυθίζεται προς τα νοτιοανατολικά. Η διαφορά υψομέτρου μεταξύ των δυο ρηγμάτων είναι 140m. Το ρήγμα αυτό είναι ασυνεχές και εμφανίζεται στην επιφάνεια στη γειτονική περιοχή του μοναστηριού της Παναγίας (**εικόνα 7.12**). Η επιμήκυνσή του προς τη δύση βρίσκεται κάτω από τις αλλουβιακές αποθέσεις της περιοχής των Θρακομακεδόνων, κάτι που έμμεσα αποδεικνύεται από το γεγονός ότι το ρέμα της Αγίας Τριάδας αποκλίνει απότομα κατά 800m προς το νότιο τμήμα του ρήγματος των Θρακομακεδόνων (κουτί πάνω αριστερά **εικόνας 7.8**). Επίσης, υπάρχει άλλο ένα μικρό τμήμα ακόμα πιο νοτιοδυτικά (οριζόντια λευκά βέλη **εικόνας 7.10**) το οποίο βρίσκεται στο δεξί

πρόσθιο τμήμα του απότομου βουνού και ίσως να εξηγεί τη δραστηριότητα ενός κανονικού ρήγματος που πιθανώς να συνδέεται με το ρήγμα των Θρακομακεδόνων.



**Εικόνα 7.12:** Νεοτεκτονικός χάρτης των Θρακομακεδόνων. Η παχιά εστιγμένη γραμμή συμβολίζει το ρήγμα των Θρακομακεδόνων, το άνω αριστερό κουτί αποτελεί τμήμα τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:5000 που δείχνει την απότομη αλλαγή ροής του ρέματος κατά μήκος του πιθανού ενεργού ρήγματος (πηγή χάρτες 6435/5 Ελληνικής γεωγραφικής υπηρεσίας στρατού).

Η χαρτογράφηση έδειξε υπερυψωμένες πλαγιές σε υψόμετρο περίπου 580m δίπλα στην περιοχή N29 της **εικόνας 7.12**. Αυτοί οι καρστικοί βράχοι ίσως να αντιστοιχούν στα αρχαιότερα υποστρώματα του ΒΔ Αττικού λεκανοπεδίου. Τα νεογενή στρώματα στην ευρύτερη περιοχή των Θρακομακεδόνων δεν υπερβαίνουν τα 500m (Freyberg,1951). Έτσι, συσχετίζοντας τη βάση των πετρωμάτων που μετακινήθηκαν και στα δυο τεμάχια του ρήγματος και εκτιμάται η κατακόρυφη μετακίνηση σε 1080m, ή αθροιστικά κατακόρυφη ολίσθηση 1240-1300m για βύθιση περί τις 55-60°, άρα οδηγούμαστε σε ένα μέσο ρυθμό μετακίνησης ίσο με 0.25±0.01mm/yr. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν δυο αβεβαιότητες, η πιθανότητα ότι τα 1080m συσσωρεύτηκαν από κίνηση κατά μήκος δυο παράλληλων ενεργών ρηγμάτων όπως φαίνεται στην **εικόνα 7.12** και ότι είναι πιθανό η ηλικία της ρωγμής να είναι μεγαλύτερη (πχ να ανήκει στην ύστερη Πλειόκαινη περίοδο όπως το ρήγμα της Αυλώνας).

## 7.5 Μελέτες που έχουν διεξαχθεί την περιοχή της Αττικής με αφορμή το σεισμό της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα.

Οι Ganas, Pavlides και Karastathis (2004) εφήρμοσαν την υπάρχουσα γεωλογική γνώση σε ρήγματα μέσω ψηφιακής απεικόνισης με μοντέλα ανύψωσης (DEM) με σκοπό να εντοπίσουν περιοχές ενεργών ρηγμάτων. Η ανάλυση βασίστηκε σε ημιαυτόματη παρουσίαση μοντέλων υψομέτρου 20-60m και των προϊόντων τους (κλίση, σκιασμένο ανάγλυφο). Στη βορειοανατολική Αττική πέντε ρήγματα κανονικής διάρρηξης, με κατεύθυνση δυτική, βορειοδυτική - ανατολική, νοτιοανατολική, εντοπίστηκαν στα μοντέλα DEM 20m. Τα εν λόγω ρήγματα είναι (από δύση προς ανατολή): Θριάσιο, Φυλής, Αφιδνών, Αυλώνας και Πεντέλης και το μήκος τους κυμαίνεται από 10 έως 20km. Όλα έχουν γεωμορφολογικές αποδείξεις πρόσφατης ενεργοποίησης, όπως σημαντικές διαρρήξεις, κοιλάδες σχήματος V, τριγωνικές όψεις και κεκλιμένες περιοχές κατάντη, παρ' όλα αυτά η μορφολογία των διαρρήξεων και η κατάντη γεωμετρία αποκαλύπτουν συστηματικές διαφορές μεταξύ των εξωτερικών τμημάτων (Πεντέλη, Θριάσιο, Αυλώνα) και των εσωτερικών (Αφίδναι, Φυλή), οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ τμημάτων αλλά και σε προϋπάρχουσα τοπογραφία. Επιπρόσθετα, εγκάρσιες τομές κατά μήκος των πέντε ρηγμάτων δείχνουν μέσες γωνίες κλίσης πρηνών της τάξεως των  $22.1^{\circ} \pm 0.7^{\circ}$  για ανθρακικά και μεταμορφωμένα πετρώματα. Η εξίσωση κλίσης πρηνούς για τα εξωτερικά τμήματα φανερώνει ασυμπτωτική συμπεριφορά με αυξανόμενο ύψος εμπειρικά υποτίθεται ότι η γωνία κλίσης είναι συνάρτηση του μακρόχρονου ρυθμού ολίσθησης που κυμαίνεται μεταξύ 0.13 και 0.3mm/yr. Τα αναγνωρισμένα ρήγματα μπορεί να διαρρηχθούν δίνοντας σεισμούς μεγέθους 6.4-6.6. Η ανάλυση των μοντέλων DEM δείχνει διαφοροποίηση στις μεθόδους διάρρηξης μεταξύ της δυτικής και της ανατολικής Αττικής, κάτι το οποίο σχετίζεται με κρυσταλλικές ρεολογικές διακυμάνσεις.

Οι Παπανικόλαου και Lekkas μελέτησαν τα ρήγματα αργού ρυθμού ολίσθησης που βρίσκονται κοντά σε πόλεις, και συγκεκριμένα το ρήγμα των Αφιδνών. Τα εν λόγω ρήγματα τείνουν να έχουν μεγάλο χρόνο επαναφοράς και συνήθως θεωρείται πως έχουν μικρή πιθανότητα σεισμικού κινδύνου. Παρ' όλα αυτά, όταν βρίσκονται κοντά σε κάποια πόλη ο κίνδυνος αυξάνεται. Λόγω των μεγάλων περιόδων επαναφοράς τα συγκεκριμένα ρήγματα απουσιάζουν συνήθως από τους καταλόγους σεισμών, γι' αυτό αποκλείονται από εκτιμήσεις σεισμικού κινδύνου. Στις περιπτώσεις αυτές μόνο γεωλογικά δεδομένα μπορούν να υπερβούν την ιστορία ενός ρήγματος στο χρόνο, απεικονίζοντας τη χρόνια μορφή παραμόρφωσης της ολίσθησης. Μετατοπίσεις πλειστοκαινών πλαγιών χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μετακίνησης των 0.1-0.3 mm/yr του ρήγματος των Αφιδνών. Βασιζόμενοι στο χειρότερο σενάριο, το μήκος 14m ρήγμα των Αφιδνών μπορεί να δημιουργήσει σεισμούς μέγιστου μεγέθους  $M=6.4$  κάθε 2000 χρόνια. συνυπολογίζοντας ότι η πλειονότητα τέτοιων γεγονότων στην Ελλάδα έχει περίοδο επαναφοράς 200 έτη, είναι προφανές ότι αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό κλάσμα του μέσου χρόνου

επιβεβαίωσης του ρήγματος. τέλος, η παλαιοσεισμολογία και η γεωλογία σεισμών μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό και υπολογισμό των κινδύνων λόγω ύπαρξης τέτοιων ρηγμάτων κοντά σε πόλεις.

Οι Ganas, Pavlides, Sboras, Valkaniotis, Papaioannou, Alexandris, Plessa και Papadopoulos μελέτησαν τις κινήσεις ρηγμάτων στην περιοχή της Πάρνηθας και κατέληξαν, μέσω άφθονων αποδείξεων πεδίου πρόσφατων μετακινήσεων κατά μήκος των επιφανειών ολισθήσης, στο ότι οι δυτικοί, νοτιοδυτικοί – ανατολικοί, βορειοανατολικοί σχηματισμοί είναι πιο ενεργοί κατά τη διάρκεια της ύστερης τεταρτογενούς περιόδου. επιπρόσθετα, η ανάλυση τάσεων υποδεικνύει κατεύθυνση  $B7^{\circ}A-B25^{\circ}A$  (BBA-NNΔ) και εκτεταμένο πεδίο τάσεων, συμβατό με τον εστιακό μηχανισμό του σεισμού της Αθήνας το 1999. Τα αρχεία ολισθήσεων των ρηγμάτων της Πάρνηθας έχουν προσανατολισμούς όμοιους με άλλων περιοχών της Ελλάδας, όπως του ρήγματος του Ευβοϊκού κόλπου προς το βορρά. Οι συγκεκριμένες εκτιμήσεις ολισθήσεων ερμηνεύουν τη μικρή περίοδο επαναφοράς των μεγάλων σεισμικών δονήσεων της Αττικής, αντιτιθέμενες στους μεγαλύτερους ρυθμούς ολισθήσεων των περιοχών της κεντρικής Ελλάδας, όπως αυτής του Κορινθιακού κόλπου.

Οι Papadopoulos, Matsumoto, Ganas, Karastathis και Pavlides μελέτησαν τη μορφή μετακινήσεων του σεισμού της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 μέσω των μεθόδων BEM και των ιντερφερομέτρων SAR, οι οποίες κατέληξαν σε ταυτόσημα αποτελέσματα. α) Για ένα ρήγμα που εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, το πεδίο βυθίσεων καλύπτει το ανάντη τέμαχος του νεοτεκτονικού και κανονικού ρήγματος της Φυλής μεγίστου πλάτους  $d_{max}=5.5-7cm$ , συμβατό δηλαδή με την πιθανή μετασεισμική μετακίνηση των  $6-10cm$  που παρατηρείται στο πεδίο, το μέσο ρυθμό μετατόπισης του ρήγματος των  $5-8cm$  που βρέθηκε από την εφαρμογή κυκλικών μοντέλων πηγής και τη μετακίνηση των  $6cm$  που προβλέφθηκε από εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ μεγέθους σεισμού και μετακίνησης. Το πεδίο ανύψωσης καλύπτει την περιοχή κατόντη του ρήγματος με  $d_{max}=1.5cm$  (η  $d$  σταδιακά μειώνεται με την απόσταση από το ρήγμα με ρυθμό  $0.4cm/km$ ). β) Για ένα ρήγμα που δεν εμφανίζεται στην επιφάνεια, το μέγιστο πλάτος είναι  $d_{max}=1.8$  και  $0.3cm$  αντίστοιχα στο ανάντη και κατόντη τέμαχος (πολύ μικρότερες τιμές από αυτές του ρήγματος που εμφανίζεται στην επιφάνεια) και ο ρυθμός αποσάθρωσης είναι της τάξης των  $0.15cm/km$ . γ) Η συνολική περιοχή παραμόρφωσης έχει διαστάσεις  $15km*15km$  και το ρήγμα της Φυλής με μέση διεύθυνση βύθισης  $60^{\circ}$ , αποτελεί το φυσικό σύνορο μεταξύ των ζωνών βύθισης και ανύψωσης. Η πλειοψηφία εντάσεων σεισμού βρίσκεται στα ανάντη τμήματα του ρήγματος της Φυλής και η μέγιστη τιμή έντασης εμφανίζεται πολύ κοντά στο ανάντη τέμαχος, ενώ παρατηρείται βαθμιαία μείωση των εντάσεων με την απομάκρυνση από το ρήγμα. Εξαιτίας της ομοιότητας μεταξύ της μορφής διανομής των εντάσεων και της μορφής των στατικών παραμορφώσεων του εδάφους, υποτίθεται ότι οι παραμορφώσεις προβλέπουν με καλή προσέγγιση τα κύρια χαρακτηριστικά των εντάσεων αν και η μετακίνηση του εδάφους κυριαρχείται από χαμηλές συχνότητες συγκρινόμενη με την εδαφική επιτάχυνση.

Οι Papadopoulos, Ganas και Pavlides εξέτασαν την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου με αφορμή του σεισμού της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα. Κατά τις προηγούμενες δεκαετίες υπήρχε η πεποίθηση ότι η πιθανότητα σεισμικού κινδύνου στην Αθήνα ήταν μικρή αλλά επιλύσεις μετά τον Αθηναϊκό σεισμό αποδεικνύουν ότι σχετίζεται με ρήγμα κανονικής διάρρηξης, κατεύθυνσης ABA-ΔΝΔ και ΝΔ βύθισης. Γεωλογικές παρατηρήσεις στην περιοχή 15-20km βόρεια της Αθήνας, οι οποίες διεξήχθησαν μετά το σεισμικό γεγονός του ρήγματος της Φυλής, δίνουν την υπόνοια ότι πιθανώς η κατασκευή της βασικής διάρρηξης είχε επανενεργοποιηθεί σε πολύ πρόσφατο γεωλογικό χρόνο. Αρχαιοσεισμολογική παρατήρηση στο οχυρό της Φυλής αποκάλυψε επισκευασμένη ζημιά στην κατασκευή που πολύ πιθανώς να προήλθε από σεισμό την παλαιοχριστιανική ή Βυζαντινή περίοδο. Από ένα νέο κατάλογο ιστορικών σεισμών αποδεικνύεται ότι τα γεγονότα των 1705, 1805 και 1889 τοποθετούνται διστακτικά σε απόσταση περίπου 30km από την Αθήνα αν και οι λιγοστές διαθέσιμες μακροσεισμικές πληροφορίες προσδίδουν αβεβαιότητα στην τοποθέτησή των γεγονότων αυτών. Κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατήρησης με όργανα, μόνο λίγες, μικρές σε μέγεθος δονήσεις καταγράφηκαν στην περιοχή των Αθηνών. Είναι φανερό ότι αν είχε προηγηθεί έρευνα του σεισμού του 1999, τουλάχιστον μια ισχυρή δόνηση θα είχε καταγραφεί στην ευρύτερη περίοδο και θα είχε αποδειχτεί ότι το ρήγμα της Φυλής είναι ενεργό και ικανό να δημιουργήσει ισχυρές δονήσεις στο μέλλον. Παρ' όλα αυτά, μια τέτοιου είδους μελέτη δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ.

Οι Μπουκοβάλας και Κουρετζής εκτίμησαν τις επιταχύνσεις στις πλειόσειστες περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχει καμία καταγραφή του σεισμού. Όλες οι θέσεις καταγραφών βρίσκονται σε κεντρικές περιοχές των Αθηνών και σε απομακρυσμένα αστικά κέντρα (Θήβα, Λαύριο, Αλιβέρι) με αποστάσεις από το ρήγμα 9 έως 52km. Για το χαρακτηρισμό των εδαφικών συνθηκών στις θέσεις καταγραφής υπολογίστηκαν οι λόγοι των ελαστικών φασμάτων απόκρισης των δυο οριζοντίων προς την κατακόρυφη συνιστώσα της κίνησης, τεχνική που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ταλάντωσης του εδάφους (Nakamura 1989, Theodoulidis et al, 1996). Στη φάση αυτή έλαβαν υπόψη μόνο καταγραφές στην ελεύθερη επιφάνεια και εξαιρέθηκαν περιπτώσεις όπου υπάρχουν βάσιμες ενδείξεις αλλοίωσης της καταγραφής λόγω δυναμικής αλληλεπίδρασης με γειτονικά ογκώδη έργα (π.χ. σταθμός του μετρό στο Σύνταγμα). Μετά την αξιολόγηση των γεωτεχνικών ερευνών διακρίθηκαν δυο εδαφικές κατηγορίες, οι βραχώδεις - ημιβραχώδεις σχηματισμοί (υγιείς ως μετρίως αποσαθρωμένες φάσεις Αθηναϊκού σχιστολίθου, μεταμορφωμένοι σχιστόλιθοι και μάρμαρα, συνεκτικοί κώνοι κορημάτων και μέτρια έως καλά συγκολλημένα κροκαλοπαγή ή νεογενείς μάργες με θεμελιώδεις περιόδους ταλάντωσης 0.1-0.27sec) και οι εδαφικοί σχηματισμοί (ικανού πάχους προϊόντα αποσάθρωσης του γεωλογικού υποβάθρου, αλούβια με μέτρια έως πυκνή δομή ή ιστορικές και πρόσφατες τεχνητές αποθέσεις με θεμελιώδεις περιόδους ταλάντωσης 0.2-0.44sec). Τέλος έγινε κανονικοποίηση των φασμάτων επιταχύνσεως ως προς την αντίστοιχη μέγιστη καταγεγραμμένη εδαφική επιτάχυνση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της απόστασης από το ρήγμα και να αναδειχτεί η επίδραση των τοπικών εδαφικών συνθηκών.



Παρατηρείται ότι για βραχώδεις - ημιβραχώδεις σχηματισμούς οι μέγιστες φασματικές επιταχύνσεις αντιστοιχούν σε δύσκαμπτα κτήρια με θεμελιώδη περίοδο 0.10-0.15sec ενώ αρκετά υψηλές φασματικές επιταχύνσεις εμφανίζονται και σε αυτά με ιδιοπερίοδο 0.10-0.30sec. Τα αντίστοιχα φάσματα για τις εδαφικές αποθέσεις είναι λιγότερο υψίσυχνα και οι κορυφαίες τιμές αντιστοιχούν σε πιο εύκαμπτα κτήρια περιόδων 0.20-0.30sec ενώ το εύρος περιόδων με σημαντικές επιταχύνσεις είναι 0.10-0.40sec. Η εκτίμηση απόλυτων τιμών επιταχύνσεων στις πλειοσείστες περιοχές βασίστηκε σε συσχέτιση των σεισμολογικών δεδομένων με την απόσταση από το ρήγμα, οι οποίες ήταν υψηλές όχι μόνο για τα ελληνικά αλλά και για τα διεθνή δεδομένα. Το φασματικό περιεχόμενο της δόνησης εμφανίζεται πλούσιο στις μικρές και μεσαίες περιόδους που αντιστοιχούν σε συνήθη κτήρια 2-6 ορόφων και σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι εδαφικές αποθέσεις ενίσχυσαν τη σεισμική κίνηση παρά την πυκνή και συνεκτική δομή τους και στις επικεντρικές περιοχές η μέση ενίσχυση σε σχέση με τους βραχώδεις – ημιβραχώδεις σχηματισμούς εκτιμάται σε 35-55% για τη μέγιστη οριζόντια και τη μέση φασματική επιτάχυνση, ενώ η αντίστοιχη επίδραση στην κατακόρυφη επιτάχυνση είναι ασήμαντη.

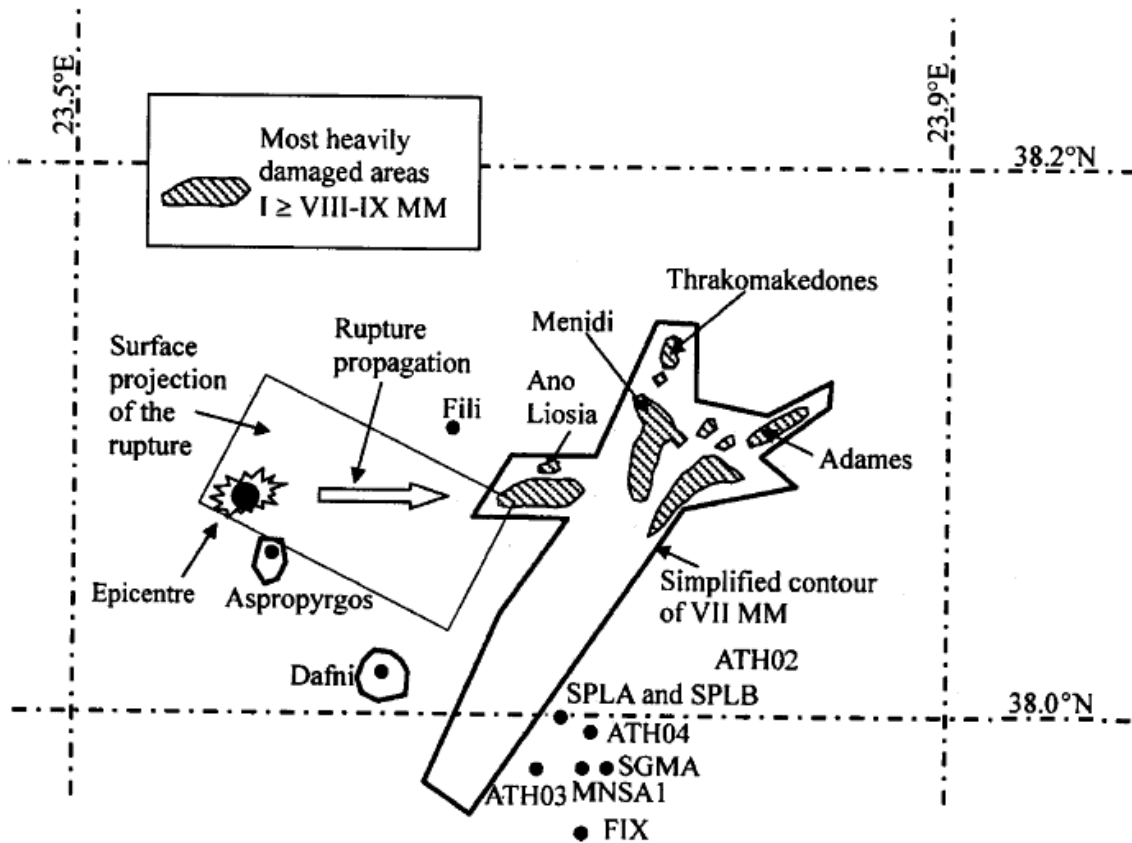
Ο Α. Elenas εστιάζει στις επιταχύνσεις του σεισμού της Αθήνας και στην ικανότητα ποικίλλων παραμέτρων επιταχύνσεων να περιγράψουν την πιθανότητα σεισμικού κινδύνου. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται οι καταστροφικές συνέπειες του σεισμού μέσω υποδειγματικών παρατηρηθησών καταστροφών κατασκευών. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι οι σεισμικές παράμετροι παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Παρατηρούνται υψηλά αλλά και χαμηλά σε τιμή αποτελέσματα για όλες τις εξεταζόμενες μηχανικές παραμέτρους λόγω διαφορετικών γεωλογικών συνθηκών. Οι κτηριακές καταστροφές μπορούν να αποδοθούν πρώτον στο ότι το επίκεντρο του σεισμού βρισκόταν πολύ κοντά στην αστική περιοχή και σε πολλές περιπτώσεις στη μεγάλη ευπάθεια των κατασκευών λόγω κακής ποιότητας κατασκευαστικών λεπτομερειών και μη ικανοποιητικής κατασκευής.

Την επομένη του σεισμού, μια επιτροπή αποτελούμενη από δυο μηχανικούς υπό την καθοδήγηση του ΥΠΕΧΩΔΕ, περιόδευσε στις πληγείσες περιοχές για την αποτίμηση των βλαβών. Ο αριθμός των κτηρίων που κατηγοριοποιήθηκαν ως «κόκκινα», «κίτρινα» και «πράσινα» στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών ήταν περίπου 13000, 62000 και 110000 αντίστοιχα. Το «κόκκινο» υποδεικνύει κατασκευές με μη επισκευάσιμες ή με μεγάλες αλλά επισκευάσιμες καταστροφές και τα κτήρια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πριν την επισκευή τους. Το «κίτρινο» αναφέρεται σε κατασκευές με επισκευάσιμες καταστροφές, με μικρές βλάβες σε φέροντα στοιχεία και σημαντικές βλάβες σε μη φέροντα και τα κτήρια πρέπει να επισκευαστούν πριν τη μόνιμη χρήση. Το «πράσινο», τέλος, αναφέρεται σε κατασκευές με μη εμφανείς καταστροφές που δεν επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα άρα τα κτήρια μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν.

Στην **εικόνα 7.13** φαίνονται τα δεδομένα όπως καταγράφηκαν από τους 18 εγκατεστημένους σταθμούς καταγραφών. Καθώς πρόκειται για στατιστικά δεδομένα, στον **πίνακα 7.3** παρουσιάζεται η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή και το κάτω και άνω όριο ενός διαστήματος εμπιστοσύνης 95%. Στην προκειμένη μελέτη οι καταγραφές επιλέχθηκαν ώστε η μέση εδαφική επιτάχυνση της



οριζόντιας συνιστώσας να είναι τουλάχιστον ίση με  $0.1g$ . Επίσης, παρουσιάζεται ένας χάρτης με σημειωμένο το επίκεντρο του σεισμού, την πλειόσειστη περιοχή, την κυρίως επηρεαζόμενη αστική περιοχή, την κατανομή της σεισμικής έντασης και τις θέσεις των επιταχυνσιογράφων. Ο **πίνακας 7.3** περιέχει τα δεδομένα από τους 16 εγκατεστημένους σταθμούς καταγραφής που πληρούν το προαναφερθέν κριτήριο τιμών της εδαφικής επιτάχυνσης.



**Εικόνα 7.13:** Περιφερειακή απεικόνιση του επίκεντρου, της επίκεντρικής περιοχής, των ισοσεισμικών γραμμών και της θέσης των επιταχυνσιογράφων.

Seismic Parameter	Average	Standard Deviation	Minimum Value	Maximum Value	95% Confidence Interval for Mean	
					Lower Limit	Upper Limit
PGA (g)	0.158	0.107	0.044	0.511	0.117	0.199

**Πίνακας 7.3:** Στατιστικά δεδομένα μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης της κύριας καταγραφής του σεισμού της Αθήνας.

Η καταγραφή της επιτάχυνσης στο σταθμό του Μοναστηρακίου περιείχε μια απομονωμένη υψηλή τιμή  $0.511g$  αν και δεν παρατηρήθηκαν εμφανείς καταστροφές στην περιοχή. Πιθανώς, λοιπόν, να επηρεάστηκε από τις συνθήκες θεμελίωσης και την απόκριση της μεταλλικής κατασκευής που κάλυπτε μια αρχαιολογική ανασκαφή κοντά στον επιταχυνσιογράφο. Όπως προαναφέρθηκε, δεν υπήρχαν καταγραφές σε κοντινές στο επίκεντρο αποστάσεις ώστε να γίνει άμεση εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ισχυρής εδαφικής κίνησης στην επίκεντρική ζώνη και στις περισσότερο πληγείσες περιοχές. Παρ' όλα αυτά, μια έμμεση εκτίμηση βασισόμενη σε παρατηρηθείσες κινήσεις (ολίσθησης και αντροπής) σε νεκροταφεία κοντά στην

επικεντρική περιοχή, αποδεικνύει ότι οι τιμές της οριζόντιας επιτάχυνσης μπορεί να υπερéβαιναν τα  $0.5g$ . Η ανάλυση εδαφικής ενίσχυσης κατέληξε σε τιμές κοντά στα  $0.6-0.7g$  σε σιφρά εδάφη και μαλακό βράχο σε απόσταση  $5km$  περίπου από το ρήγμα. Επιπρόσθετα, οι Gazetas et al. (2002) εκτίμησαν ακόμα υψηλότερες τιμές σε αργιλώδεις άμμους και αμμώδεις ιλύες στις Αδάμες σε απόσταση  $9km$  από το ρήγμα. Οι Bouckonas et al. (2002) προέβλεψαν μέσες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης για βραχώδεις και εδαφικούς σχηματισμούς και για διαφορετικές αποστάσεις από τη σεισμική διάρρηξη, ενώ οι εκτιμηθείσες επιταχύνσεις στην επικεντρική περιοχή ( $1-3km$  μακριά από το ρήγμα) είναι περίπου  $0.35-0.42g$  για βραχώδεις περιοχές και  $0.49-0.57g$  για τους υπόλοιπους εδαφικούς σχηματισμούς. Αυτές οι τιμές μπορεί τοπικά να γίνονται ακόμα μεγαλύτερες ακόμα και κατά  $70\%$  λόγω της μεγάλης απόκλισης των δεδομένων. Βασιζόμενος στα δεδομένα που παρουσιάστηκαν, ο **πίνακας 7.5** περιλαμβάνει τις εκτιμώμενες μέσες τιμές επιτάχυνσης και τη μέση απόσταση των 12 δήμων με τις περισσότερες καταστροφές.

No.	Station	Component	Site Geology	Epicentral Distance (km)
1	Monastiraki (MNSA1)	Longitudinal	Manmade deposits	17
2	Monastiraki (MNSA1)	Transverse	Manmade deposits	17
3	Syntagma A (SGMA1)	Longitudinal	Schist	18
4	Syntagma A (SGMA1)	Transverse	Schist	18
5	Sepolia A (SPLA1)	Longitudinal	Alluvium	15
6	Sepolia A (SPLA1)	Transverse	Alluvium	15
7	Sepolia B (SPLB1)	Longitudinal	Alluvium	15
8	Sepolia B (SPLB1)	Transverse	Alluvium	15
9	Sygrou-Fix (Fix1)	Longitudinal	Alluvium	19
10	Sygrou-Fix (Fix1)	Transverse	Alluvium	19
11	Chalandri (ATH02)	Longitudinal	Alluvium	15
12	Chalandri (ATH02)	Transverse	Alluvium	15
13	Kalithea (ATH03)	Longitudinal	Alluvium	18
14	Kalithea (ATH03)	Transverse	Alluvium	18
15	Kipseli (ATH04)	Longitudinal	Schist	15
16	Kipseli (ATH04)	Transverse	Schist	15

**Πίνακας 7.4:** Δεδομένα των χρησιμοποιούμενων επιταχυνσιογραφημάτων στην παρούσα έρευνα.

Οι περισσότερες καταστροφές παρατηρήθηκαν σε μια απόσταση  $12km$  από το επίκεντρο και οι κτηριακές βλάβες φαίνεται να μειώνονται σημαντικά καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό. Σε πολλές περιοχές της Αθήνας οι καταστροφές δεν ήταν κτηριακές (πχ ρηγμάτωση τοιχοπληρώσεων από τούβλα). Η κατανομή της έντασης των βλαβών παρουσιάζει ανομοιομορφία λόγω των γεωλογικών συνθηκών, ενώ κακής ποιότητας θεμελιώσεις ή η τοπική τοπογραφία έπαιξαν μεγάλο ρόλο στις καταστροφές.

Ο **πίνακας 7.6** συνοψίζει τα στατιστικά των βλαβών σε κατοικίες στους 12 περισσότερο πληγέντες δήμους. Η τελευταία στήλη αφορά την τροποποιημένη ένταση στην κλίμακα Mercalli (*MMI*) σε κάθε δήμο. Ο λόγος καταστροφών (*DR*) είναι το πηλίκο των κόκκινων και κίτρινων σπιτιών προς το άθροισμά τους. Η τελευταία γραμμή του πίνακα παρουσιάζει τα στατιστικά βλαβών για το σύνολο των 30 υπολοίπων δήμων της πρωτεύουσας. Οι εν λόγω δήμοι κατατάσσονται στην κατηγορία έντασης *VI* και θεωρείται ότι επηρεάστηκαν ελαφρά. Επιπρόσθετα, ο **πίνακας 7.6** αποδεικνύει ότι ο λόγος βλαβών των πέντε κοντινότερων στο επίκεντρο δήμων (Φυλή, Άνω Λιόσια, Αχαρνές, Θρακομακεδόνες και Νέα Φιλαδέλφεια) ήταν μεγαλύτερος του 40%.

<b>Municipality</b>	<b>Mean Distance (km)</b>	<b>Mean PGA (g)</b>
Thrakomakedones	7	0.374
Ano Liosia	3	0.490
Phyli	2	0.530
Nea Philadelphia	12	0.270
Aharnes	4	0.460
Zephyrion	8	0.346
Kamateron	6	0.402
Aspropyrgos	7	0.374
Metamorphosis	8	0.346
Elefsis	12	0.270
Drapetsona	20	0.190
Kifisia	16	0.230

**Πίνακας 7.5:** Εκτιμώμενες μέσες PGA για τους δήμους με τις μεγαλύτερες καταστροφές.

Ο **πίνακας 7.7** παρουσιάζει τα στατιστικά δεδομένα των κατοικιών του δήμου Άνω Λιοσίων, ο οποίος παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο βλαβών ( $DR=62\%$ ) στην επικεντρική περιοχή ( $MMI=IX$ ). Λεπτομερώς, παρουσιάζεται το ποσοστό των κτηρίων σύμφωνα με τον αριθμό των ορόφων, το έτος κατασκευής και τον τύπο ανάληψης των φορτίων. Το έτος κατασκευής σχετίζεται με τις ημερομηνίες τροποποίησης των αντισεισμικών κανονισμών αφού ο αρχικός αντισεισμικός κανονισμός του 1959 τροποποιήθηκε το 1984 και ξανά το 1995. Οι κατασκευές κατανέμονται ομοιόμορφα σε αντίθεση με τις βλάβες που περιορίζονται στην κεντρική και βόρεια περιοχή των Αθηνών, κάτι το οποίο μπορεί να αποδοθεί στις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά, κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα αποδείχτηκε ότι αντιστάθηκαν περισσότερο στα σεισμικά φορτία από ότι κατασκευές

από τοιχοποιία. Ακόμα, η ευπάθεια των κατασκευών που χτίστηκαν μετά το 1984, πόσο μάλλον μετά το 1995, ήταν σημαντικά μειωμένη.

Municipality	Population	Dwelling Units	Red	Yellow	Red + Yellow	Approximate DR	MMI
Thracomakedones	3135	1204	82	923	1005	84%	VII-VIII
Ano Liosia	21397	6844	1107	3132	4239	62%	VI-IX
Phyli	2925	909	135	374	509	56%	VII-IX
Nea Philadelphia	25261	10155	399	3766	4165	41%	VI-VIII
Aharnes	59698	20504	1340	7200	8540	42%	VII-IX
Zephyrion	8985	2378	61	858	919	39%	VI-VII
Kamateron	17410	6506	140	1410	1550	24%	VI-VIII
Aspropyrgos	15034	5651	175	881	1056	19%	VI-VII
Metamorphosis	21052	7691	115	1481	1596	21%	VI-IX
Elefsis	22793	7960	105	1065	1170	15%	VI-VII
Drapetsona	13094	5116	154	611	765	15%	VI
Kifisia	39166	15535	168	1283	1451	9%	VI-VII
Total	249950	90453	3981	22984	26965	30%	VI-IX
Remaining 30 Municipalities	2848825	958716	1835	42692	44527	5%	V-VII

**Πίνακας 7.6:** Στατιστικά στοιχεία οικιών που υπέστησαν βλάβες

	Percentage of Buildings	
<b>Number of Storeys</b>	<b>1</b>	52
	<b>2</b>	38
	<b>3</b>	8
	<b>&gt;4</b>	2
<b>Date of Construction</b>	<b>Before 1959</b>	6
	<b>Between 1959-1985</b>	67
	<b>Between 1986-1995</b>	20
	<b>After 1995</b>	7
<b>Type of Structure</b>	<b>Masonry</b>	62
	<b>Masonry and R/C</b>	14
	<b>R/C</b>	13
	<b>Others</b>	11

**Πίνακας 7.7:** Στατιστικά στοιχεία κατοικιών του δήμου Άνω Λιοσίων

Εστιάζοντας στους 12 δήμους με τις μεγαλύτερες καταστροφές, χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές συσχέτισης ώστε να δοθεί έμφαση στο βαθμό αλληλοσυσχέτισης μεταξύ των βαθμών βλάβης, των τιμών *MMI*, της μέσης απόστασης από το επίκεντρο και της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Οι αριθμητικές τιμές αυτών των ποσοτήτων δίνονται στους **πίνακες 7.4** και **7.5**. Υποτίθεται ότι συντελεστής συσχέτισης έως 0.5 υποδεικνύει χαμηλή συσχέτιση, από 0.5 έως 0.8 μεσαία συσχέτιση και μεγαλύτερος από 0.8 μεγάλη.

Σε μεγάλο μέρος της περιοχής των Αθηνών πολλαπλές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος υπέστησαν σοβαρές καταστροφές και κάποιες από αυτές κατέρρευσαν είτε ολοκληρωτικά είτε τμηματικά. Οι περισσότερες από τις σοβαρά βλαμμένες κατασκευές ήταν σχεδιασμένες σύμφωνα με τους παλαιότερους αντισεισμικούς κανονισμούς (1959 είτε 1984), άρα σχεδιασμένες να αναλάβουν μικρότερες σεισμικές δυνάμεις από αυτές που δέχθηκαν στο σεισμό των Αθηνών. Ακόμη, αυτές οι κατασκευές δεν είχαν επαρκή πλαστιμότητα. Τυπικά, οι βλαμμένες κατασκευές στην πλειόσειστη περιοχή ήταν κυρίως από δυο μέχρι πέντε ορόφων και κακής ποιότητας κατασκευής και χρησιμοποιούμενων υλικών κατασκευής (χαμηλότερης ποιότητας σκυρόδεμα και χάλυβας).

Οι ευρύτερα παρατηρούμενες βλάβες σε κτήρια με φέροντα οργανισμό οπλισμένου σκυροδέματος κατατάσσονται ανάλογα με την αιτία της καταστροφής στις ακόλουθες κατηγορίες:

1. Καταστροφές σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων λόγω κακής ποιότητας σκυροδέματος και μη επαρκούς οπλισμού. Συχνά οι συνδετήρες ήταν ανύπαρκτοι.
2. Βλάβες διατμητικού τύπου σε υποστυλώματα λόγω του φαινομένου των κοντών υποστυλωμάτων με απότομη αύξηση της κατακόρυφης φέρουσας ικανότητας.
3. Καταστροφές τύπου μαλακού ορόφου. Κτήρια με μαλακό ισόγειο είναι συνήθως πρακτική στην Ελλάδα και μικρότερη ακαμψία στον όροφο αυτό, συγκρινόμενη με την υπόλοιπη ακαμψία του κτηρίου, οδηγεί σε μεγάλες μετακινήσεις του μαλακού ορόφου. Οι καταστροφές παρατηρούνται κυρίως στους κόμβους, οι οποίοι καταστρέφονται ολοσχερώς στις περισσότερες περιπτώσεις.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκαν προβλήματα διάβρωσης τα οποία προκλήθηκαν λόγω έλλειψης προσοχής κατά την κατασκευή και προκάλεσαν σοβαρές ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα επικάλυψης των οπλισμών. Τα βλαμμένα κτήρια υποβλήθηκαν σε αριθμητική ανάλυση της οποίας τα αποτελέσματα προέκυψαν άμεσα συγκρίσιμα με τις παρατηρηθείσες καταστροφές και επιβεβαίωσαν τις κυριότερες αιτίες βλαβών. Σημαντικές καταστροφές καταγράφηκαν σε κτήρια από τοιχοποιία στη μεσόσειστη ζώνη. Οι περισσότερες κατασκευές του πρώτου μισού του αιώνα υπέστησαν σοβαρές καταστροφές που περιελάμβαναν μερική κατάρρευση των εξωτερικών τοίχων, κατάρρευση των γωνιών του κτηρίου, αποχωρισμό των δυο τοίχων στο σημείο της γωνίας και εκτεταμένες ρηγματώσεις. Αντίθετα, κατασκευές από τσιμεντόλιθους με ενισχυμένες ζώνες οπλισμένου σκυροδέματος (σενάζ) ή οροφή από οπλισμένο σκυρόδεμα που λειτούργησε σαν διάφραγμα, κατασκευασμένες τα τελευταία χρόνια, επιβίωσαν χωρίς σημαντικές βλάβες.

Ακόμα, δεν αναφέρθηκαν σοβαρές καταστροφές σε γέφυρες, στον υπόγειο σιδηρόδρομο των Αθηνών (ΜΕΤΡΟ) και στο πρόσφατα κατασκευασμένο δίκτυο φυσικού αερίου αν και αγωγοί υψηλής πίεσης διαπερνούσαν την πλειόσειστη περιοχή σε βάθος περίπου 1.5m. Επίσης, δεν αναφέρθηκαν καταστροφές στο σιδηροδρομικό και το οδικό δίκτυο με εξαίρεση ένα συγκεκριμένο δρόμο που

οδηγούσε στο βουνό Πάρνηθα και βρισκόταν πολύ κοντά στο επίκεντρο. Σε πολλές περιπτώσεις, σημαντικές κατολισθήσεις προκάλεσαν μερική κατάρρευση των πλευρικών τοίχων αντιστήριξης των οδών, ενώ υπήρξαν και περιπτώσεις κατάπτωσης βράχων στο οδόστρωμα. Σε περιοχές κοντά στο επίκεντρο παρατηρήθηκαν διαρροές στο δίκτυο ύδραυσης ενώ το δίκτυο αποχέτευσης δεν υπέστη καμία βλάβη. Τα λιμάνια του Πειραιά και της Ελευσίνας βρίσκονται σε επικεντρική απόσταση της τάξης των 15km και οι παρατηρηθείσες βλάβες ήταν ελάχιστες. Μερικοί κρηπιδοτόιχοι παρουσίασαν ανεπαίσθητες καθιζήσεις και μικρή κλίση προς τα έξω περίπου 10cm. Στην τελευταία περίπτωση, η παραμόρφωση προκάλεσε στρέβλωση των τροχιών ορισμένων γερανών και καταστροφές σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αλλά δεν αναφέρθηκαν καταστροφές βάθρων και πασσάλων θεμελίωσης.

Η **εικόνα 7.14 αριστερά** δείχνει την ανεπάρκεια συνδετήρων στη βάση του υποστυλώματος σε μαλακό όροφο μιας 10όροφης κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος. Οι συνδετήρες είναι ανεπαρκείς μέχρι το ύψος των 1.2m. Η **εικόνα 7.14 δεξιά** παρουσιάζει μια εκτεθειμένη αγκύρωση χωρίς συνδετήρες στη βάση της κολώνας ενώ υφίσταται και η περίπτωση μιας διαμήκου ράβδου οπλισμού που αστοχεί σε λυγισμό. Όλες αυτές οι περιπτώσεις υπογραμμίζουν την απουσία συνδετήρων στις κρίσιμες περιοχές. Τα υποστυλώματα μπορεί να υποστούν καταστροφές στην οροφή τους λόγω ανεπαρκούς όπλισης. Οι μαλακοί όροφοι συχνά οδηγούν σε τεράστιες καταστροφές, ακόμα και σε κατάρρευση.



**Εικόνα 7.14:** αριστερά: εκτεθειμένη ράβδος οπλισμού χωρίς συνδετήρες και δεξιά: εκτεθειμένος γάντζος αγκύρωσης χωρίς συνδετήρες σε υποστύλωμα.



Η **εικόνα 7.15 αριστερά** δείχνει καταστροφές σε ένα υποστύλωμα μαλακού ορόφου, όπου είναι εμφανής η έλλειψη οπλισμού. Μια ρωγμή σχήματος  $\chi$  παρουσιάζεται στην **εικόνα 7.15 δεξιά** που βρίσκεται σε υποστύλωμα μαλακού ορόφου κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Το φαινόμενο αυτής της βλάβης είναι συχνό σε κοντά υποστυλώματα. Επιπρόσθετα, η **εικόνα 7.16 αριστερά** παρουσιάζει μια διατμητική ρωγμή σε ένα κοντό υποστύλωμα λόγω ανεπαρκούς περισφιγξης. Η **εικόνα 7.17** παρουσιάζει τη μερική κατάρρευση μιας σκάλας λόγω ανεπαρκών μηκών αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού. Η κατάρρευση του μεσαίου τμήματος ενός κτηρίου παρουσιάζεται στην **εικόνα 7.16 δεξιά** και προκλήθηκε από μικρό μήκος αγκύρωσης του διαμήκους οπλισμού του μεσαίου τμήματος της δοκού ενώ μπορεί να δημιουργηθεί και μερική κατάρρευση από αστοχία κάποιου υποστυλώματος μαλακού ορόφου στο ισόγειο.



**Εικόνα 7.15:** αριστερά: αστοχία σε τοίχο μαλακού ορόφου και δεξιά: διατμητική ρωγμή τύπου  $\chi$  σε τοίχο οπλισμένου σκυροδέματος.

Ακόμα, παρατηρήθηκαν καταστροφές λόγω μη αναμενόμενων εγκαταστάσεων σε φέροντα στοιχεία όπως η υδροροή της **εικόνας 7.18 α** και το καλώδιο ηλεκτρικού ρεύματος της **εικόνας 7.18 β**, το οποίο μειώνει την αντοχή στον κόμβο. Επίσης, ανεπαρκή μήκη αγκύρωσης τοιχίου που τερματίζουν ακριβώς πάνω από την πλάκα ορόφου παρουσιάζονται στην **εικόνα 7.18 γ**, ενώ στην **7.18 δ** φαίνονται τα μεγάλα κενά λόγω μη κατάλληλης συμπύκνωσης του σκυροδέματος κατά τη σκυροδέτηση. Άλλη αιτία σημαντικών βλαβών αποτελεί η κρούση γειτονικών κτηρίων κατά τη δόνηση. Για παράδειγμα, στην **εικόνα 7.19 αριστερά** παρουσιάζονται βλάβες που προκλήθηκαν από την κρούση μιας κατασκευής από τοιχοποιία και μιας από οπλισμένο σκυρόδεμα. Επιπρόσθετα, μια κατάρρευση δοκού που προκλήθηκε από κρούση μεταξύ της δοκού και του υποστυλώματος της όμορης κατασκευής, παρουσιάζεται στην **εικόνα 7.19 δεξιά** και οδηγεί σε διατμητική αστοχία της κοντής δοκού. Ακόμα, κακοτεχνίες στις κατασκευές των αρμών οδηγούν σε καταστροφές της



**εικόνας 7.20 αριστερά** όπου ένα υποστύλωμα και ένα τοίχιο αποχωρίστηκαν από μη κατάλληλο αρμό διαστολής. Τέλος, η **εικόνα 7.21 αριστερά** απεικονίζει ένα παραπέτο οροφής το οποίο έχει καταρρεύσει.



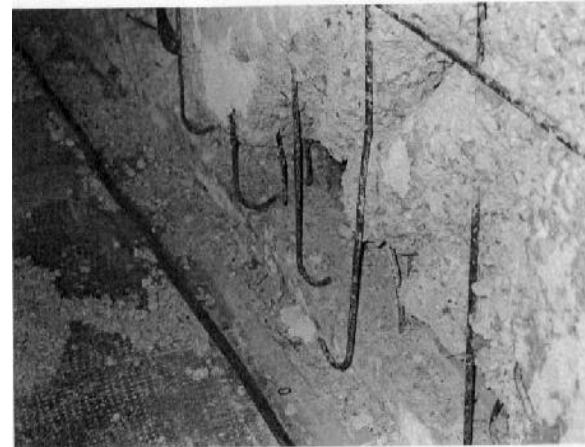
**Εικόνα 7.16:** αριστερά: διαμητική ρωγμή σε κοντό υποστύλωμα λόγω ανεπαρκούς περίσφιξης και δεξιά:κατάρρευση μεσαίου τμήματος κτηρίου.



**Εικόνα 7.17:** Μερική κατάρρευση σε κλίμακα



(α)

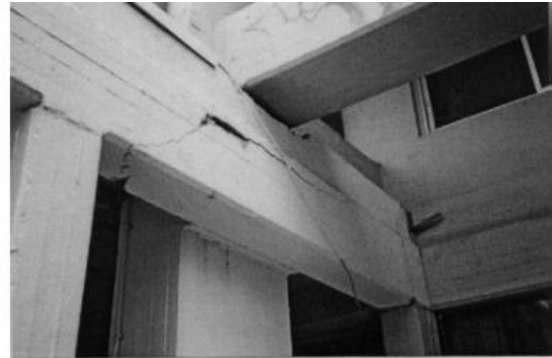


πάνω (β) και κάτω (γ)



(δ)

**Εικόνα 7.18:** (α): υδροροή τοποθετημένη μέσα σε υποστύλωμα, (β): ηλεκτρική εγκατάσταση μέσα σε υποστύλωμα, (γ): ανεπαρκής αγκύρωση οπλισμού τοιχίου και (δ): μεγάλα κενά λόγω ανεπαρκούς συμπύκνωσης του σκυροδέματος



**Εικόνα 7.19:** αριστερά: κρούση γειτονικής κατασκευής και δεξιά: αστοχία δοκού λόγω κρούσης

Όμως υφίστανται και αρχιτεκτονικές παρατυπίες οι οποίες οδήγησαν σε καταστροφές όπως ασθενή υποστυλώματα και ισχυρές δοκοί (**εικόνα 7.20 δεξιά**) που δημιουργούν πλαστικές αρθρώσεις στα υποστυλώματα κάτι που είναι ανεπιθύμητο, μακριές αρθρωτές δοκοί (μέχρι και  $10m$ ) για προστασία από τον ήλιο (**εικόνα 7.21 δεξιά**) όπου προστίθεται μάζα στην κατασκευή άρα δέχεται μεγαλύτερη σεισμική δύναμη. Σε συνάρτηση με το ότι η συγκεκριμένη κατασκευή δημιουργήθηκε στις αρχές του 1960, υπάρχει λόγος να πιστεύεται ότι δεν υπήρξε συγκεκριμένη μελέτη σχεδίασης ώστε να ανθίσταται τη σεισμική κατακόρυφη συνιστώσα. Αν και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές καταστροφές σε αντίστοιχα κτήρια, οι αρχιτεκτονικές παρατυπίες μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση σε μελλοντικούς σεισμούς.



**Εικόνα 7.20:** αριστερά: ανεπαρκής κατασκευή κενου και δεξιά: σύστημα ισχυρής δοκού με ασθενή υποστυλώματα



**Εικόνα 7.21:** αριστερά: κατάρρευση παραπέτου στέγης και δεξιά: σύστημα μακρίας αρθρωτής δοκού

Οι L. Decanini, A De Sortis, L. Liberatore και F. Mollaioli παρατήρησαν τις σοβαρότερες καταστροφές σε κτήρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και τοιχοποιία στα βόρεια προάστια της Αθήνας. Οι απαιτήσεις υστερητικής ενέργειας που επιβλήθηκαν στα κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος θα έπρεπε να είναι υψηλές και μη συμβατές με το στατικό σύστημα και τις ανεπαρκείς κατασκευαστικές λεπτομέρειες, αλλά ο πλεονασμός σε αντοχές και ειδικότερα η παρουσία τοιχοπληρώσεων, συνέβαλλαν σε μια σημαντική αύξηση της σεισμικής ικανότητας. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να εξηγηθεί το ότι πολλά κτήρια έμειναν ανέπαφα. Συγκεκριμένα, η απαίτηση εκλυόμενης ενέργειας και μετακινήσεων που παράγονται από τα διαθέσιμα σεισμικά δεδομένα συγκρίνεται με την προκύπτουσα κατασκευαστική ικανότητα ανάληψης φορτίων των τυπικών κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος στις περιοχές που υπέστησαν καταστροφές. Η σύγκριση έγινε μέσω προσομοιώσεων της δυναμικής μη γραμμικής απόκρισης των πλαισίων οπλισμένου σκυροδέματος με και χωρίς τοιχοπλήρωση.

Λόγω της μη καλώς προσδιορισμένης τεκτονικής ιστορίας και δραστηριότητας του ρήγματος, δεν αναμένονταν καταστροφικές συνέπειες από το σεισμό του 1999. Στην πραγματικότητα, η απουσία ισχυρών σεισμικών κραδασμών και η παρουσία πολλών αρχαίων μνημείων οδήγησαν στο να θεωρηθεί η Αθήνα ως περιοχή χαμηλής σεισμικότητας το 1959. Σύμφωνα με τους τότε ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς ο σεισμικός συντελεστής ήταν 0.04, 0.06 και 0.08 αντίστοιχα για σιφρά, ενδιάμεσα και μαλακά εδάφη και ανεξάρτητος από τον τύπο και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Διεξήχθησαν έλεγχοι με τη μέθοδο των επιτρεπομένων τάσεων και λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές ασφαλείας, οι σεισμικοί συντελεστές που αντιστοιχούν στην ανώτατη επιτρεπόμενη αντοχή εκτιμήθηκαν ως ίσοι με 0.07, 0.10 και 0.14. Πιθανότατα πολλά από τα κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος στην Αθήνα είχαν σχεδιαστεί σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό του 1959, αλλά στις πλειόσειστες περιοχές και ειδικότερα στα Άνω Λιόσια, ένας μεγάλος αριθμός κτηρίων φαίνεται να είχαν σχεδιαστεί αυθαίρετα, μη βασιζόμενα σε κάποιο κανονισμό και για το λόγο αυτό δεν ανταποκρίνονταν στις σεισμικές

απαιτήσεις. Στο νέο αντισεισμικό κανονισμό του 1995, η Αθήνα και τα προάστια της επανακατηγοριοποιήθηκαν και χαρακτηρίστηκαν ως ζώνη μέσης σεισμικότητας (ζώνη II) με ενεργό επιτάχυνση  $EPA=0.16g$ . Το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού χαρακτηρίζεται από ένα πλατώ ( $PSA=2.5 \cdot EPA$ ) μέχρι τις περιόδους των 0.4, 0.6 και 0.8sec αντίστοιχα για σκληρά, ενδιάμεσα και μαλακά εδάφη. Οι δυνάμεις σχεδιασμού των κτηρίων υπολογίζονται με συντελεστή συμπεριφοράς  $q=3.5$  και για κτήρια με ιδιοπερίοδο που βρίσκεται στο πλατώ ο συντελεστής απόκρισης λαμβάνεται ίσος με 0.12. Ο εν λόγω συντελεστής φαίνεται μικρός συγκρινόμενος με τις δράσεις που πιθανόν να έδρασαν στο σεισμό στην μεσόσειστη περιοχή. Για το λόγο αυτό, οι τοιχοπληρώσεις και πιθανόν ο πλεονασμός στην κατασκευή και οι υπεραντοχές των μελών μπορούν να εξηγήσουν την απουσία βλαβών σε πολλές περιπτώσεις κτηρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι παράγοντες αυτοί δικαιολογούν την καλή συμπεριφορά κτηρίων στο κέντρο της Αθήνας. Οι παρατηρήσεις βλαβών επιβεβαιώνουν κάποιες θεωρήσεις που αναπτύχθηκαν για την επεξήγησή τους και νέες έρευνες που σχετίζονται με παραμέτρους ενέργειας και μετακινήσεων φαίνεται να προσεγγίζουν καλύτερα την κτηριακή απόκριση. Ο σημαντικός ρόλος τόσο της κανονικότητας της κατασκευής όσο και της παρουσίας τοιχοπληρώσεων είναι έκδηλος καθώς η πρώτη εξασφαλίζει την ικανοποιητική διασπορά των πλαστικών αρθρώσεων σε όλους τους κόμβους της κατασκευής και η δεύτερη παρέχει μια σημαντική αύξηση της απορρόφησης ενέργειας.

Η μικρή διάρκεια και οι μεγάλες συχνότητες της εδαφικής κίνησης μπορούν να συσχετιστούν με χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, αν και σε πολλούς σταθμούς υπήρχαν καταγραφές με υψηλή εδαφική επιτάχυνση. Οι χαμηλές τιμές ενέργειας μπορούν να εξηγήσουν τις ελάχιστες ζημιές που παρατηρήθηκαν κοντά στις περιοχές των καταγραφών. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνει την άποψη μερικών ότι η εδαφική επιτάχυνση δεν αποτελεί ισχυρό δείκτη του σεισμικού κινδύνου. Αντίθετα, μια καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται παρατηρώντας τις τιμές της εδαφικής ταχύτητας.

Διεξάχθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις προκειμένου να αναπαραχθεί η σεισμική συμπεριφορά τυπικών κτηρίων οπλισμένου σκυροδέματος της μεσοσεισμικής περιοχής. Οι αναλύσεις περιελάμβαναν τρία μοντέλα τετραόροφης κατασκευής με πλαίσιο δυο ανοιγμάτων κενό, με τοιχοπλήρωση και με δημιουργία μαλακού ορόφου. Η πλευρική αντοχή του κενού πλαισίου δυο ανοιγμάτων επιλέχθηκε κοντά σε αυτή που προβλέπεται από τον κανονισμό του 1959, ώστε να περιγράψει καλύτερα τη συμπεριφορά των κτηρίων. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των μοντέλων παρουσιάζονται στον **πίνακα 7.8**.

Η συμπεριφορά των εξεταζόμενων κατασκευών αναλύθηκε και με δυναμική μη γραμμική ανάλυση αλλά και με ανάλυση pushover. Ο πρώτος στόχος ήταν η κατασκευή τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων για το κοντινό πεδίο, καθώς δεν υπήρχαν καταγραφές σε εκείνη την περιοχή. Αυτά δημιουργήθηκαν με επαναληπτική διαδικασία μέχρι να προσεγγιστούν οι παρατηρούμενες βλάβες στην περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη και τον προσδιορισμό παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το σεισμικό κίνδυνο.

Frames		Masonry			
Dimensions	Materials	Description	Mechanical Characteristic		
Inter-story height = 3.2 m Span length (between columns) = 5 m Beams: 20(d)x50(b) cm Columns: 1° and 2° levels 30x30 cm, 3° and 4° levels 25x25 cm	Concrete $f_{ck}=21$ MPa  Steel $f_y=380$ MPa	Hollow bricks thickness 145 mm;  Mortar: cement and sand	$\sigma_m$ (MPa)	$\tau_{m0}$ (MPa)	$E_m$ (MPa)
			2.10	0.40	1880
$\sigma_m$ = compressive strength, $\tau_{m0}$ = shear strength, evaluated through diagonal compressive test, $E_m$ = initial elastic modulus.					

**Πίνακας 7.8:** Βασικά χαρακτηριστικά των αναλυόμενων κατασκευών

Στο πρώτο βήμα, προέκυψε η εδαφική κίνηση από ενίσχυση μόνο της εδαφικής επιτάχυνσης αλλά κρίθηκε ότι δεν ήταν ικανή για την περιγραφή της παρατηρούμενης εδαφικής συμπεριφοράς. Έτσι, στο δεύτερο βήμα ενισχύθηκαν και οι επιταχύνσεις αλλά και ένα τμήμα περιόδων ώστε να προκύψουν βλάβες σε κατασκευές όμοιες με τις παρατηρούμενες στο σεισμό. Για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς λήφθηκαν υπόψη οι παράμετροι απώλειας υστερητικής ενέργειας, σχετικής μετακίνησης των ορόφων (drift) και τέμνουσας βάσης ανηγμένης ως προς το βάρος της κατασκευής (σεισμικός συντελεστής  $C_y$ ). Έπειτα, έγινε σύγκριση μεταξύ της σεισμικής απαίτησης και της υπάρχουσας αντοχής ώστε να εκτιμηθεί η κατάσταση των κατασκευών σε σχέση με τις βλάβες και τις καταρρεύσεις. Οι σεισμικές απαιτήσεις προέκυψαν άμεσα από τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση ενώ η εκλυόμενη υστερητική ενέργεια και η τέμνουσα βάσης καθορίστηκαν από την ανάλυση pushover. Τα όρια σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων παράχθηκαν από διαφορετικές θεωρήσεις (συστάσεις των κανονισμών, παρατηρούμενες βλάβες, ικανότητα στροφής των κατασκευών κλπ). Η εκλυόμενη ενέργεια και η τέμνουσα βάσης λήφθηκαν υπόψη αγνοώντας την επίδραση των κατασκευαστικών ατελειών, καθώς ήταν δύσκολη η εκτίμησή τους. Για να τις λάβουμε υπόψη, οι προκύπτουσες τιμές απομειώθηκαν με συντελεστή 0.8 με εξαίρεση την ενεργειακή ικανότητα των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με τοιχοπληρώσεις που κατανεμήθηκε ομοιόμορφα καθ' ύψος του κτηρίου. Στην πραγματικότητα, σε αυτή την περίπτωση η ενέργεια αποσβένυται κυρίως από την τοιχοπλήρωση και για το λόγο αυτό δεν επηρεάζεται από τυχόν ατέλειες του φέροντος οργανισμού. Όσον αφορά τη σχετική μετακίνηση των ορόφων, οι ατέλειες λήφθηκαν υπόψη αυξάνοντας τις απαιτήσεις μετακινήσεων με συντελεστή 1.2. Η κατηγορία βλάβης προσδιορίζεται σύμφωνα με τις τρεις ακόλουθες σχέσεις.

No Collapse (NC)	Incipient Collapse (PC)	Collapse (C)
$\frac{Demand}{Capacity} < 1$	$\frac{Demand}{Capacity} \cong 1$	$\frac{Demand}{Capacity} > 1$

Τονίζεται πως προέκυψε πιο πιθανή η κατάρρευση στις περιπτώσεις κτηρίων με μαλακό όροφο (με ή χωρίς ατέλειες) και αρκετά πιθανή για σκελετό με ατέλειες



χωρίς τοιχοπλήρωση. Αντίθετα, ο σκελετός με τοιχοπληρώσεις φαίνεται να μη διατρέχει κίνδυνο κατάρρευσης. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με τις παρατηρηθείσες βλάβες στο σεισμό της Αθήνας. Πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση του πραγματικού σεισμού τα αποτελέσματα μπορεί να είναι λίγο δυσμενέστερα λόγω της ταυτόχρονης δράσης της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της επιτάχυνσης. Η σημαντικότητα της βλάβης δίνεται από το λόγο βλάβης  $D$ , ο οποίος συνδυάζει την υστερητική ενέργεια και τις απαιτήσεις σχετικής μετακίνησης των ορόφων σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις.

$$D = 0.5 \left( \frac{Demand}{Capacity} \right)_{Energy} + 0.5 \left( \frac{Demand}{Limit} \right)_{Drift}$$

Οι τιμές του λόγου δίνονται στον **πίνακα 7.9**. Η μεγαλύτερη ευπάθεια των κτηρίων με μαλακό όροφο και η θετική και σημαντική επίδραση των τοιχοπληρώσεων είναι εμφανείς. Επιπρόσθετα, η επίδραση των ατελειών επισημαίνεται ξεκάθαρα.

Input	Soft Story		Bare Frame		Full Infilled	
	Without Imperfection	With Imperfection	Without Imperfection	With Imperfection	Without Imperfection	With Imperfection
ATH-3T/B	1.26	1.55	0.91	1.10	0.75	0.82
ATH-3T/C	2.71	3.34	2.03	2.48	1.18	1.28

**Πίνακας 7.9:** Τιμές του δείκτη βλαβών  $D$

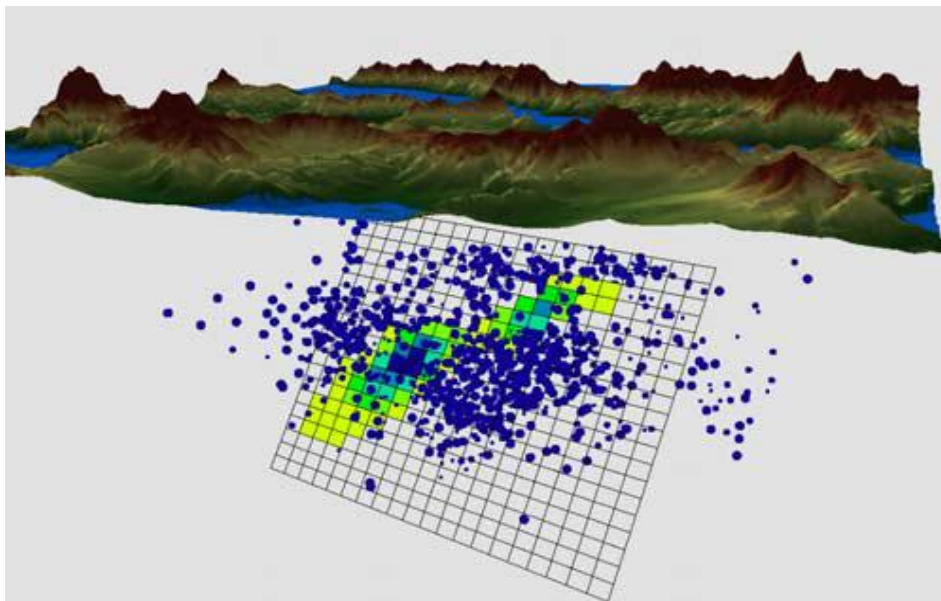
Συμπερασματικά, πολλές καταρρεύσεις μπορούν να αποδοθούν στο μηχανισμό μαλακού ορόφου. Συχνά στην περίπτωση αυτή, η παρουσία μεγάλης ενίσχυσης στα υποστυλώματα δεν ήταν επαρκής ώστε να αποτρέψει την κακή συμπεριφορά της κατασκευής. Σε κτήρια με pilotis η κατάρρευση αποφεύχθηκε στις περιπτώσεις που υπήρχαν τοιχοπληρώσεις, ενώ συχνά η απουσία εγκάρσιας ενίσχυσης στους κόμβους, προκάλεσε σημαντικές καταστροφές στα υποστυλώματα αλλά χωρίς να υπάρξει καθολική κατάρρευση της κατασκευής. Τυπικές τοιχοπληρώσεις της περιοχής κατασκευάζονταν από τούβλα (με ποσοστό κενών περίπου 30%) και σενάζ οριζόντια και κάθετα. Συχνά οι συνδέσεις των τοιχοπληρώσεων με τις άνω δοκούς ενισχύονταν με κλίση της τελευταίας σειράς των τούβλων κατά  $45^\circ$ . Σε κάποιες περιπτώσεις, λόγω μη καλής σύνδεσης των τοιχοπληρώσεων με τη δοκό, παρατηρήθηκε ανατροπή της τοιχοπλήρωσης με διεύθυνση εκτός του επιπέδου του πλαισίου. Σε πολλές περιπτώσεις η λανθασμένη κατακόρυφη διανομή των τοιχοπληρώσεων οδήγησε σε φαινόμενα αστοχιών λόγω παρουσίας κοντών υποστυλωμάτων με καθολική διάλυση των κόμβων οι οποίοι δεν διέθεταν επαρκή περίσφιγξη.

Οι S. Atzori, M. Manunta, G. Fornaro, A. Ganas και S. Salvi υπολόγισαν τη χρονοϊστορία μετατοπίσεων από το 1992 μέχρι το 2002 και με την εφαρμοζόμενη μεθοδολογία ήταν δυνατό να διαχωριστούν οι μετακινήσεις που δημιουργήθηκαν αποκλειστικά κατά τη διάρκεια του σεισμού από αυτές που δημιουργήθηκαν

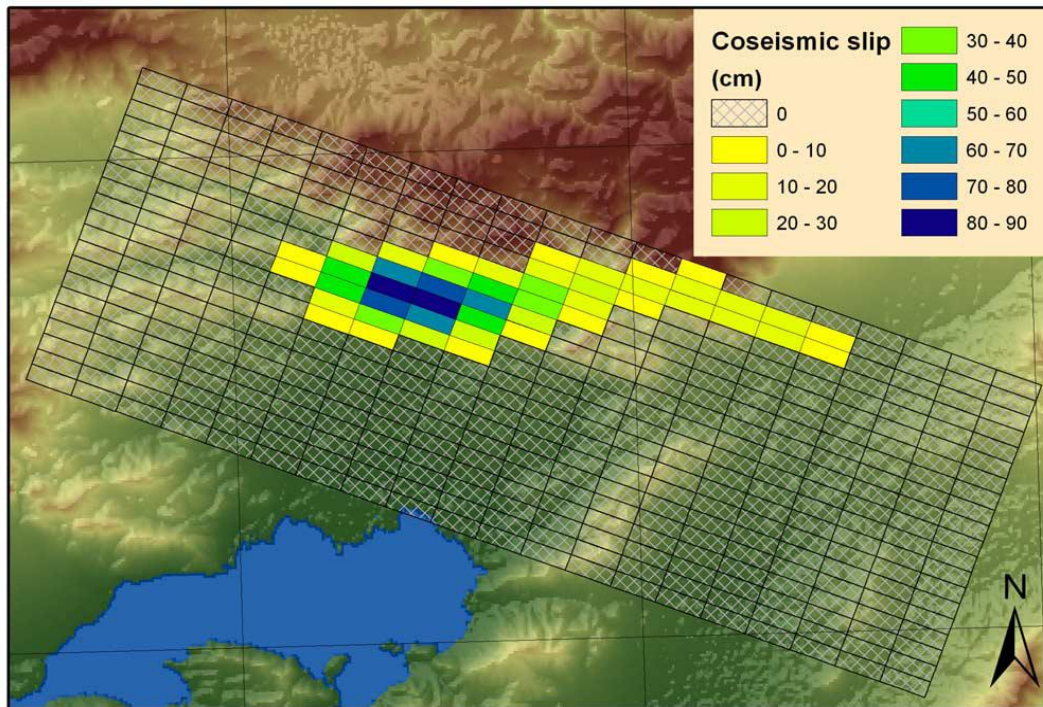


μεταγενέστερα και έφτασαν μέχρι τα 3cm σε περίοδο 2.5 ετών. Οι μετακινήσεις μοντελοποιήθηκαν με όρους μεταγενέστερων ολισθήσεων πάνω στο ρήγμα και η κατανομή των μεταγενέστερων ολισθήσεων που προέκυψε από γραμμική αντιστροφή είναι όμοια με την κατανομή μετακινήσεων κατά τη διάρκεια του σεισμού και εντείνεται κυρίως στην περιοχή όπου το ρήγμα βυθίζεται προς τα κάτω. Η ανάλυση των στατικών τάσεων υποδηλώνει ότι οι μετακινήσεις μετά το σεισμό προκλήθηκαν από το κύριο σεισμικό γεγονός και έπειτα συνέχισαν να εκδηλώνονται σεισμικά κατά μήκος του επιπέδου του ρήγματος. Παρατηρείται μια μερική επικάλυψη μεταξύ της περιοχής που συμβαίνουν μετακινήσεις κατά τη διάρκεια του σεισμού και της περιοχής που συμβαίνουν μετακινήσεις σεισμικά, κυρίως στην περιοχή του υποκέντρου. Αυτό υποδηλώνει ότι η επιφάνεια διάρρηξης του σεισμού του 1999 δεν είχε σταματήσει να δρα, τουλάχιστον μέχρι τη στιγμή της τελευταίας μετασεισμικής παρακολούθησης (Απρίλιος 2002).

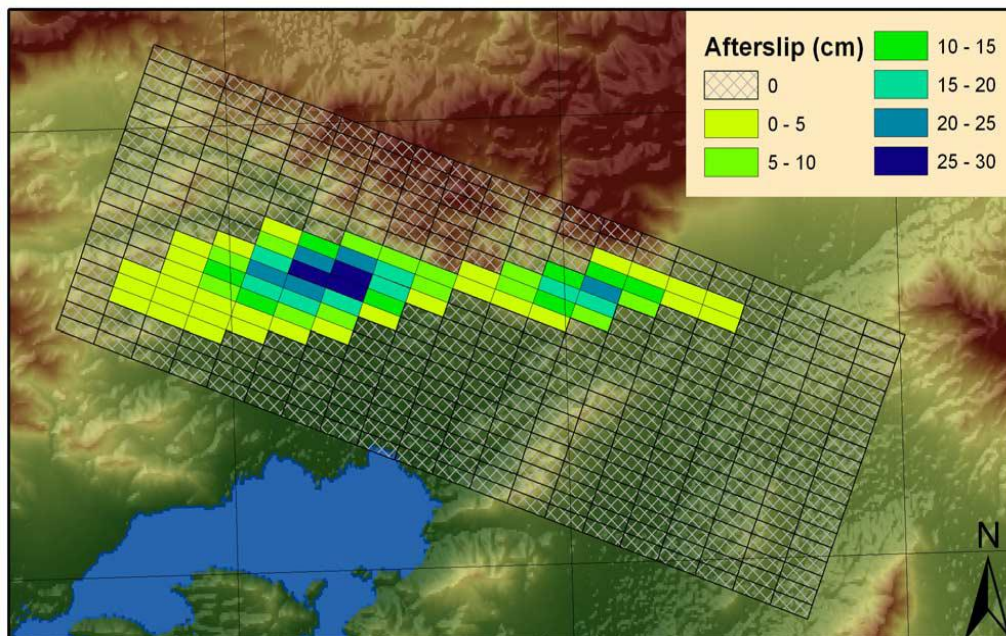
Στην προκειμένη μελέτη αναλύθηκαν οι δορυφορικές εικόνες, προσδιορίζοντας τις περιοχές ανόδου και καθόδου του ρήγματος του σεισμού της Αθήνας. Το μετασεισμικό σήμα έχει πολύ μικρή ένταση (περίπου 3cm μέσα σε 2 χρόνια) και μπορεί να απομονωθεί μόνο μέσω τεχνικών χρονοϊστορίας που όπως έχει αποδειχτεί είναι πολύ αξιόπιστες στην ανάκτηση σημάτων χαμηλής έντασης. Αν και έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση των μετακινήσεων τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά το σεισμικό γεγονός, δεν υπάρχει κάποια καλύτερα προτεινόμενη μέθοδος στη βιβλιογραφία. Μια πρώτη αδρή προσέγγιση διαχωρίζει τη βραχυχρόνια μετασεισμική μετακίνηση του ανώτερου φλοιού από τη μακροχρόνια βισκοελαστική χαλάρωση στον κατώτατο φλοιό – ανώτατο μανδύα. Πολλοί ερευνητές τόνισαν τη δυσκολία διαχωρισμού αυτών των δύο κινήσεων καθώς το αποτέλεσμα τους είναι ελάχιστα διαφορετικό. Η ανάλυση γίνεται περισσότερο περίπλοκη όταν και τα δυο φαινόμενα δρουν ταυτόχρονα.



**Εικόνα 7.22:** Τρισδιάστατη απεικόνιση της θέσης των μετασεισμών που καταγράφηκαν μεταξύ της 8<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 και της 29<sup>ης</sup> Οκτωβρίου 1999, συγκρινόμενες με τις μετασεισμικές ολισθήσεις που προέκυψαν από γραμμική αντιστροφή των μετασεισμικών μετακινήσεων.



**Εικόνα 7.23:** Κατανομή μετασεισμικών μετακινήσεων που προκύπτουν από τη γραμμική αντιστροφή της ανοδικής και καθοδικής μετασεισμικής μετακίνησης. Η γεωμετρία του κύριου ρήγματος προήλθε από μη γραμμική αντιστροφή. Για τη γραμμική αντιστροφή το ρήγμα χωρίστηκε σε 20\*20 όμοια τμήματα (1.75km κατά μήκος της οριζόντιας ολίσθησης και 1.25km κατά μήκος της βύθισης). Στην εικόνα το ρήγμα παρουσιάζεται σε οριζόντια προβολή στην εδαφική επιφάνεια.



**Εικόνα 7.24:** Κατανομή μετασεισμικών μετακινήσεων που προκύπτουν από τη γραμμική αντιστροφή της καθοδικής μετασεισμικής μετακίνησης. Η γεωμετρία του κύριου ρήγματος προήλθε από μη γραμμική αντιστροφή. Για τη γραμμική αντιστροφή το ρήγμα χωρίστηκε σε 20\*20 όμοια τμήματα (1.75km κατά μήκος της οριζόντιας ολίσθησης και 1.25km κατά μήκος της βύθισης). Στην εικόνα το ρήγμα παρουσιάζεται σε οριζόντια προβολή στην εδαφική επιφάνεια. Η μετασεισμική ολίσθηση αναπαριστά την κατανομή μετακινήσεων που συνέβη κατά τη διάρκεια 2.5 χρόνων μετά το σεισμικό γεγονός.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι η απεικόνιση των μετακινήσεων μέσω δορυφόρου βελτιώνει την ποιότητα και την αξιοπιστία των μετασεισμικών αποτελεσμάτων μετακινήσεων και επιβεβαιώνει πλήρως προγενέστερες μελέτες μετακινήσεων. Τέλος, χαρτογραφήθηκαν οι μετασεισμικές μετακινήσεις ενός σεισμικού γεγονότος μεγέθους  $M=5.68$  για την περίοδο 22 Σεπτεμβρίου 1999 μέχρι 4 Απριλίου 2002. Η μεγάλη μετατόπιση παρατηρήθηκε κυρίως στην περιοχή βύθισης προς τα κάτω της περιοχής ολίσθησης του βασικού σεισμικού γεγονότος. Η συσχέτιση της θετικής αύξησης των τάσεων και της περιοχής ολίσθησης υποδηλώνει ότι η μετασεισμική ολίσθηση συνέβη λόγω της απότομης παρουσίας φορτίου που εφαρμόστηκε μετασεισμικά στο κατώτατο σημείο του επιπέδου του ρήγματος.

Γενικά συμπεράσματα:

1. Σεισμοί μεσαίου μεγέθους ( $M<6$ ) μπορεί να δημιουργήσουν σημαντικές καταστροφές αν συμβούν κοντά σε κάποια πυκνοκατοικημένη περιοχή. Μεγέθη μικρότερα του 6 μπορεί να δημιουργήσουν μεγάλες εδαφικές επιταχύνσεις (πάνω από 0.5g) και μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις (πάνω από 1.5g) στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Οι καταστροφές μπορεί να αυξηθούν σημαντικά αν η περιοχή που επηρεάζεται είναι σεισμικά απροετοίμαστη. Σπάνιοι σεισμοί μεγάλου μεγέθους ( $M>7$ ) δεν επηρεάζουν αναγκαστικά την κτηριακή απόκριση, ειδικότερα για κανονικές κτηριακές κατασκευές. Αυτό το γεγονός έχει σημαντικές επιδράσεις στους ισχύοντες κανονισμούς σε περιοχές μεσαίας σεισμικότητας όπως η ανατολική βόρεια Αμερική και η Ευρώπη.
2. Υπάρχουν αποδείξεις ότι η επιφανειακή στρώση μαλακού βράχου και στιφρών εδαφών παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε κάποιες από τις ισχυρότερα πληγείσες περιοχές από σεισμούς. Αυτή η επίδραση δε λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των κατασκευών γι' αυτό χρήζει σημαντικής προσοχής από την κοινότητα των μηχανικών.
3. Κρίνοντας από το γεγονός ότι ελάχιστες καταστροφές παρατηρήθηκαν σε χαμηλά κτήρια στο κέντρο της Αθήνας, από τα διαθέσιμα ανελαστικά φάσματα προκύπτει ότι ο σεισμικός συντελεστής διαρροής θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον ίσος με 0.2 και ότι η δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος τουλάχιστον 0.3-0.4sec. Και οι δυο παράμετροι είναι πολύ μεγαλύτερες από τις προτεινόμενες στον αντισεισμικό κανονισμό όπου ο συντελεστής αντιστοιχεί σε 0.06 στον αντισεισμικό κανονισμό του 1959 και η ιδιοπερίοδος καθορίζονται ως  $T=0.07*(\text{αριθμός ορόφων κτηρίου})$ . Καθώς οι διαφορές στην αντοχή μπορούν να εξηγηθούν βάσει την υπεραντοχής και των συντελεστών ασφαλείας, καμία απλή εξήγηση για όλους τους τύπους κατασκευών δε μπορεί να δοθεί για τις διαφορές που αφορούν την ιδιοπερίοδο.
4. Οι καταστροφές στην πλειοσειστη περιοχή μπορούν να εξηγηθούν θεωρώντας την πιθανότητα μεγάλης περιόδου (πάνω από 0.4sec), υψηλών παλμών επιτάχυνσης της εδαφικής κίνησης που δημιουργούνται από φαινόμενα κατευθυντικότητας και ενισχύονται από φαινόμενα πεδίου.



Χρησιμοποιώντας εξιδανικευμένα μοντέλα τριγωνικών και ημιτονοειδών παλμών, εκτιμήθηκε ότι ο συνδυασμένος παλμός επιτάχυνσης των 0.6g διάρκειας 0.2sec (που αντιστοιχεί σε μέγιστη εδαφική ταχύτητα της τάξεως των 60cm/sec) μπορεί να δημιουργήσει σοβαρότατες καταστροφές σε χαμηλά κτήρια της περιοχής των Αθηνών. Οι εν λόγω τιμές είναι συγκρίσιμες με εκτιμήσεις που προέκυψαν από τις καταγραφές κοντινού πεδίου σεισμών μεσαίου μεγέθους ( $M < 6$ ) στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο.

## 7.6 Καταγραφές σεισμού 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα

Η σεισμική δόνηση καταγράφηκε από ένα σημαντικό αριθμό επιταχυνσιογράφων, εγκατεστημένων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, εκτός όμως της πλειόσειστης περιοχής. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί που είχε εγκαταστήσει επιταχυνσιογράφους το γεωδυναμικό ινστιτούτο είναι αυτοί του Παλαιού Φαλήρου (Πλανητάριο), του Νέου Ψυχικού και της Ραφήνας. Το 1998 εγκαταστάθηκε επιταχυνσιογράφος στην Αγία Παρασκευή προκειμένου να ελέγχονται οι μετακινήσεις των κατασκευών στην περιοχή λόγω των δονήσεων από την κατασκευή της Αττικής οδού, έρευνα που διεξήγαγε ο Δημόκριτος. Σε συνεργασία με την «Αττικό μετρό» το 1998 για λογαριασμό του ερευνητικού προγράμματος «Σεισμολογική μελέτη του Αττικό μετρό», τοποθετήθηκαν 8 επιπλέον σταθμοί καταγραφών σε διάφορους σταθμούς του μετρό, καλύπτοντας ευρύ φάσμα γεωλογικών σχηματισμών και βάθους τοποθέτησης. Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονταν στο Σύνταγμα (2 όργανα σε διαφορετικά επίπεδα), στο Μοναστηράκι, στη Δάφνη, στα Σεπόλια (2 όργανα σε διαφορετικό επίπεδο), στο σταθμό Συγγρού-Φιξ και στου Παπάγου. Δυστυχώς, αν και κατά τη διάρκεια του σεισμού πολλά όργανα βρίσκονταν σε λειτουργία, μόνο 10 τον κατέγραψαν (οι 6 από τις καταγραφές έγιναν μέσα στους σταθμούς σε βάθος από 7 έως 26m από την επιφάνεια, σε διάφορα δηλαδή επίπεδα των σταθμών) σε επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 10 και 25m, κανένας επιταχυνσιογράφος όμως δεν ήταν εγκατεστημένος στη μεσοσεισμική ζώνη (ζώνη γύρω από το επίκεντρο που περιλαμβάνει τη βιομηχανική περιοχή κατά μήκος της δυτικής όχθης του Κηφισού και των προαστίων των περιοχών Μενιδίου, Άνω Λιοσίων και Θρακομακεδόνων). Ακριβώς μετά από το γεγονός αυτό, 6 νέα όργανα εγκαταστάθηκαν στη Δεκέλεια, την Εκάλη, τις Αφίδνες, τα Λιόσια, το Ρέντη και τη Μονή Δαφνίου. Τρεις άλλοι αναλογικοί επιταχυνσιογράφοι εγκατεστημένοι από το μόνιμο εθνικό δίκτυο του Ι.Τ.Σ.Α.Κ. κατέγραψαν τη σεισμική δόνηση στο Χαλάνδρι (στο ισόγειο διώροφου κτηρίου), στην Κυψέλη (στο ισόγειο τριώροφου κτηρίου της Γενικής Υπηρεσίας Στρατού) και στον Ταύρο (στο δάπεδο ισογείου κτηρίου του Κ.Ε.Δ.Ε.). Τέλος, τρεις ακόμα καταγραφές ελήφθησαν από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. στα εργοστάσιά της στο Αλιβέρι, στο Κερατσίνι και στο Λαύριο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δεδομένα λήφθηκαν από τη βάση δεδομένων του γεωδυναμικού ινστιτούτου (ATHENS – DB) και συγκεκριμένα από τις 64 καταγραφές της κύριας δόνησης και των μετασεισμών, επιλέχθηκαν μόνο αυτές της κύριας δόνησης και ειδικότερα των σταθμών που ήταν εγκατεστημένοι σε βραχώδες υπόβαθρο, καθώς η καταγεγραμμένη εδαφική κίνηση σε οποιαδήποτε

άλλη εδαφική στρώση μπορεί να είχε ενισχυθεί ή αποσβεστεί, λόγω της πρόσθετης κίνησης του εδάφους πάνω στο οποίο εδραζόταν το όργανο καταγραφής. Οι καταγραφές, λοιπόν, που επιλέχθηκαν και η γεωλογία του εδάφους έδρασης των οργάνων είναι οι εξής:

- Σεπόλια (SPLA1): αλλούβια/σχιστόλιθος (-13m, επίπεδο -2 σταθμού μετρό)  
(SPLB1): τεχνητές αποθέσεις/αλλούβια/σχιστόλιθος (επιφάνεια εδάφους, τριώροφο κτήριο ωπλισμένου σκυροδέματος)
- Σύνταγμα (SGMA1): σχιστόλιθος (-7m, επίπεδο -1 σταθμού μετρό)  
(SGMB1): σχιστόλιθος (-26m, -3 επίπεδο σταθμού μετρό)
- Δάφνη (DFNA1): αλλούβια/σχιστόλιθος (-13.5m, επίπεδο -2 σταθμού μετρό)
- Συγγρού-Φιξ (FIX1): αλλούβια/σχιστόλιθος (-15m, επίπεδο -2 σταθμού μετρό)
- Κ.Ε.Δ.Ε. (KEDE): μάργα (επιφάνεια εδάφους, ισόγειο μονώροφου κτηρίου)

Αναφορικά με ορισμένες από τις θέσεις των καταγραφών αξίζει να τονιστεί ότι οι καταγραφές στο Κ.Ε.Δ.Ε. και τα Σεπόλια είναι πρακτικά δονήσεις ελευθέρου πεδίου και καταγράφηκαν στην επιφάνεια στιφρών εδαφικών σχηματισμών. Η εδαφική τομή στο σταθμό Κ.Ε.Δ.Ε. αποτελείται από στιφρό εδαφικό στρώμα πάχους 10m με μέση τιμή  $V_s \approx 320-400m/s$  και τον υποκείμενο μαλακό βράχο που χαρακτηρίζεται από μεγάλη δυστημψία. Η κατατομή στα Σεπόλια είναι κατά τι μαλακότερη αφού αποτελείται από 13m εδάφους με  $V_s \approx 300m/s$ , υπερκείμενη πιο στιφρού βραχώδους σχηματισμού. Η δόνηση στο σταθμό του Συντάγματος (sigma) κατεγράφη στο εσωτερικό του μόλις ολοκληρωθέντος σταθμού μετρό, σε βάθος 7m και υπάρχουν λόγοι να πιστευτεί κανείς ότι η καταγραφή επηρεάστηκε από την κατασκευή. Πάντως, το έδαφος που υποστηρίζει και περιβάλλει το σταθμό του μετρό είναι ελαφρώς αποσασθρωμένος βράχος άρα θεωρείται ως δόνηση σε επιφανειακή εκδήλωση βράχου (rock outcrop).

## 7.7 Η επίδραση του κοντινού πεδίου στο σεισμό της Αθήνας

### 7.7.1 Εισαγωγή

Κατά την τελευταία δεκαετία έγινε μια σοβαρή προσπάθεια εκτίμησης της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης και των φασματικών τιμών στο κοντινό πεδίο διαφόρων σεισμικών γεγονότων. Έτσι, δημιουργήθηκαν νέες σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης με σκοπό να ληφθούν υπόψη οι διάφορες παράμετροι που επηρεάζουν την εδαφική απόκριση. Οι εν λόγω παράμετροι σχετίζονται με χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος του σεισμού, η απόσταση από το ρήγμα, ο τύπος ρήγματος, η κατάσταση του εδάφους κλπ. Οι νέες σχέσεις εξασθένησης εκτιμούν τιμές των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης που σχετίζονται με το γεωμετρικό μέσο της οριζόντιας φασματικής απαίτησης, μικρότερης δηλαδή από τη μέγιστη απαίτηση του κοντινού πεδίου, η οποία επηρεάζεται από την πρόσω κετευθυντικότητα. Ως αποτέλεσμα, διεξήχθη περεταίρω έρευνα ώστε να συσχετιστούν οι προβλεπόμενες φασματικές τιμές με τη μέγιστη φασματική απαίτηση (Huang et al, 2008). Μέχρι σήμερα η έρευνα συνεχίζεται για σεισμικά γεγονότα με μεγέθη μεγαλύτερα από 6.5. Στην παρούσα εργασία διεξάγεται η αντίστοιχη έρευνα για σεισμικά γεγονότα

μεγέθους κοντά στο 6, τα οποία συμβαίνουν συχνότερα και είναι πολύ πιθανότερο να συμβούν κοντά σε μεγάλα αστικά κέντρα.

Ως παράδειγμα εφαρμογής εξετάζεται η περίπτωση του σεισμού της Αθήνας στις 7 Σεπτεμβρίου 1999. Συγκεκριμένα, παράγονται τα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα που σχετίζονται με το σεισμικό γεγονός μεγέθους  $M_w=5.9$  για δυο εδαφικές κατηγορίες και τρεις τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς. Επίσης, θεωρούνται δυο περιπτώσεις φασμάτων, αυτών που σχετίζονται με τις νέες σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης και προβλέπουν μέσες τιμές μεγεθών στο κοντινό πεδίο και αυτών που προβλέπουν τη μέγιστη φασματική απαίτηση στην περιοχή και λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Στην περίπτωση του σεισμού της Αθήνας, τα υπάρχοντα δεδομένα της εδαφικής κίνησης είναι καταγραφές που λήφθηκαν σε μεγάλη απόσταση από την περισσότερη επηρεαζόμενη περιοχή. Οι καταγραφές βρίσκονται κυρίως σε μαλακό βράχο, κοντά σε σταθμούς μετρό στο κέντρο της Αθήνας.

Όπως είναι γνωστό από πολλές έρευνες, η δεσπόζουσα περίοδος των παλμών κατευθυντικότητας εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος και μεταβάλλεται εκθετικά με αυτό. Συνεπώς, η φασματική ενίσχυση που σχετίζεται με τους εν λόγω παλμούς εξαρτάται από το μέγεθος και την περίοδο. Στην παρούσα μελέτη, τέλος, γίνεται η εκτίμηση των λόγων της μέγιστης με τη μέση φασματική απόκριση, υπολογίζονται οι πιθανότητες υπέρβασης διαφόρων σταθμών βλάβης που προκύπτουν από εμπειρικές σχέσεις και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των καταγραφιστών βλαβών του σεισμού της Αθήνας.

### 7.7.2 Διαδικασία της μελέτης

Αρχικά, η αντιπροσωπευτική σχέση των Boore και Atkinson (2008) που εκτιμά το φάσμα επιταχύνσεων στο κοντινό πεδίο χρησιμοποιείται ώστε να εκτιμηθεί η μέση εδαφική κίνηση κοντινού πεδίου για δυο εδαφικές κατηγορίες του ευρωκώδικα (κατηγορίες A και B). τα φάσματα προκύπτουν σε 16 σημεία που βρίσκονται στην περίμετρο της περιοχής της Αθήνας που υπέστη τις περισσότερες βλάβες (**εικόνα 7.25**). Ακολούθως, εφαρμόζεται η εμπειρική εξίσωση των Shahi και Baker (2011) για την παραγωγή φασμάτων επιτάχυνσης, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση του φαινομένου της κατευθυντικότητας για τις ίδιες εδαφικές κατηγορίες και θέσεις που αναφέρθηκαν ανωτέρω.

Επίσης, παράγεται η εξίσωση της περιόδου του παλμού που εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος και συγκρίνεται με τις περιόδους διαφόρων καταγραφών στους σταθμούς μετρό της Αθήνας και συγκεκριμένα των: Σύνταγμα A (SGMA), Σύνταγμα B (SGMB), Σεπόλια A (SPLA), Σεπόλια B (SPLB), Δάφνη (DFNA), Συγγρού – Φίξ (FIX) και ΚΕΔΕ (ΚΕΔΕ). Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τόσο η εξίσωση των Shahi και Baker (2011) όσο και των Chioccarelli και Iervolino (2011) για την εξάρτηση της περιόδου του παλμού από το σεισμικό μέγεθος.

Ακόμα, παράχθηκαν τα ελαστικά και τα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων για τις εδαφικές κατηγορίες A και B και για τρεις τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς ( $q=2, 3$  και  $4$ ). Σύμφωνα με τα ανελαστικά φάσματα, χρησιμοποιήσαμε την

προτεινόμενη εξίσωση του Fajfar (2003) ώστε να προσδιορίσουμε τις τιμές πλαστιμότητας. Τα προκύπτοντα φάσματα συγκρίθηκαν με αυτά του ευρωκώδικα 8 για τις εδαφικές κατηγορίες A και B ώστε να εκτιμηθεί κατά πόσο το φάσμα του κανονισμού επαρκεί για το σχεδιασμό των κατασκευών.



**Εικόνα 7.25:** Πλειόσειστη περιοχή του σεισμού της Αθήνας. Με πράσινο παρουσιάζονται τα ρήγματα γύρω από την πόλη, με γαλάζιο η επιφανειακή εμφάνιση του ρήγματος και με ρόζ οι περιοχές που υπέστησαν τις περισσότερες βλάβες στο σεισμό της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999.

Για τις φασματικές τιμές μετακίνησης που αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές περιόδους του EC8 σύμφωνα με τον τύπο και το ύψος της κατασκευής, προέκυψαν οι πιθανότητες υπέρβασης για όλα τα στάδια βλαβών σύμφωνα με τις καμπύλες τρωτότητας που προτείνονται από τους Rossetto και Elnashai (2003) και από τη σύγκριση των αντίστοιχων μετακινήσεων πραγματικών σεισμών προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα..

### 7.7.3 Προκύπτοντα φάσματα Boore – Atkinson

Σύμφωνα με τις **εξισώσεις [1]-[13]** των Boore και Atkinson (2008) (**κεφάλαιο 2**) παράγονται τα φάσματα επιταχύνσεων για 16 σημεία στην περίμετρο της περισσότερο πληγείσας περιοχής στο σεισμό της Αθήνας. Τα σημεία φαίνονται στην **εικόνα 7.25**. Τα φάσματα κατασκευάζονται για τις εδαφικές κατηγορίες A και B του EC8. Όπως ήταν αναμενόμενο, στις περιοχές κοντά στο ρήγμα (θέσεις E, F, G και T) οι φασματικές τιμές είναι μεγαλύτερες από αυτές των θέσεων σε μεγαλύτερες αποστάσεις (όπως οι I και J).



Site	R <sub>JB</sub> (km)	Site	R <sub>JB</sub> (km)	Site	R <sub>JB</sub> (km)	Site	R <sub>JB</sub> (km)
E	1.126	I	6.681	M	10.682	Q	8.389
F	0.000	J	8.169	N	14.449	R	9.938
G	2.883	K	7.755	O	14.707	S	8.212
H	2.305	L	12.783	P	11.176	T	3.167

**Πίνακας 7.10:** Αποστάσεις Joyner – Boore που χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις

Όσον αφορά τις τιμές της διατμητικής ταχύτητας, χρησιμοποιείται μια μέση τιμή για κάθε εδαφική κατηγορία, η οποία προκύπτει από τη μέση τιμή των ορίων ταχύτητας που θέτει ο κανονισμός. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι τιμές  $V_{s,30}^A=940m/sec$  και  $V_{s,30}^B=520m/sec$  για τις εδαφικές κατηγορίες A και B αντίστοιχα. Ακόμα, οι αποστάσεις Joyner – Boore που χρησιμοποιήθηκαν στις εξισώσεις παρουσιάζονται στον παραπάνω **πίνακα 7.10** και προέκυψαν από τις γεωγραφικές συντεταγμένες κάθε θέσης αναφορικά με τις συντεταγμένες των διαφόρων σημείων της επιφανειακής προβολής του ρήγματος.

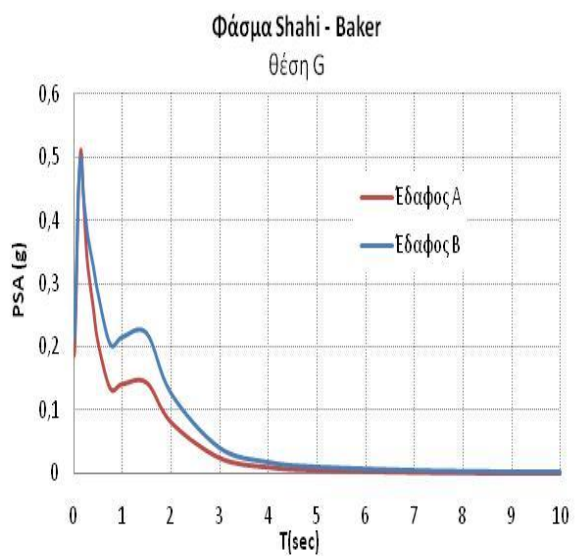
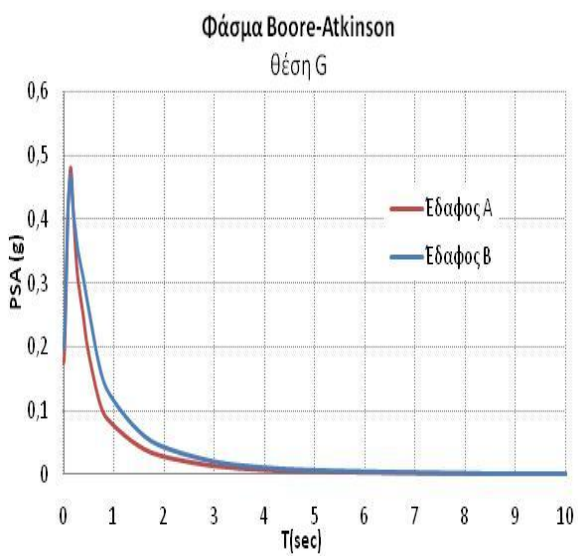
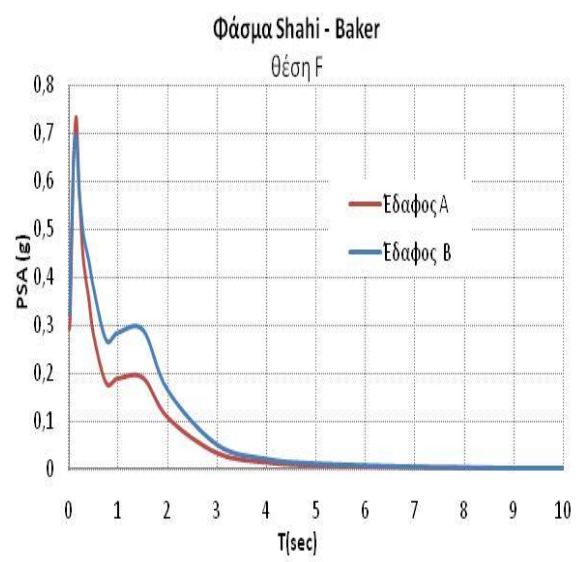
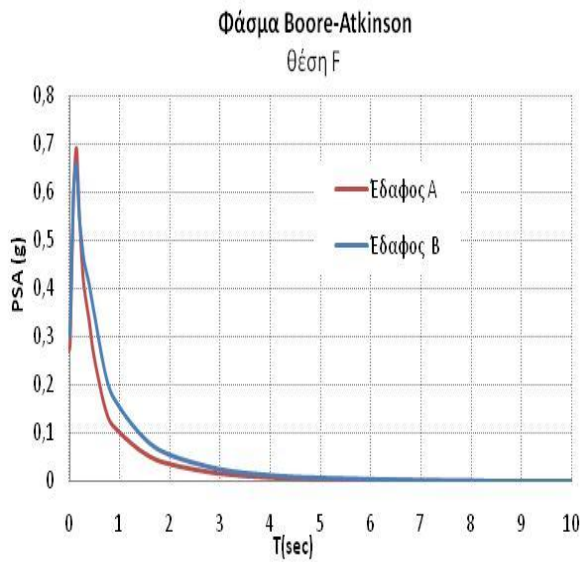
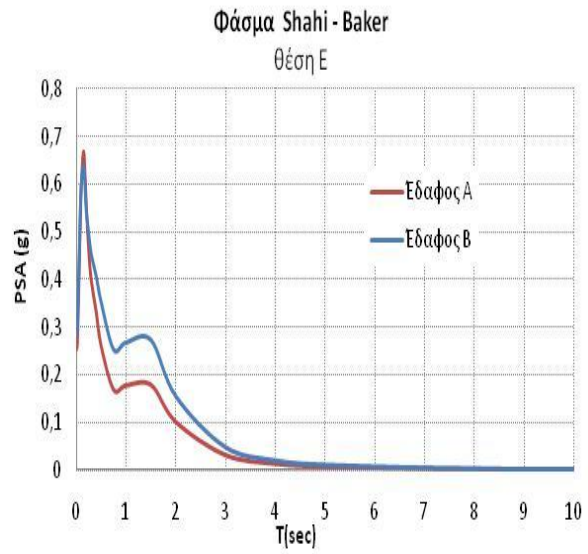
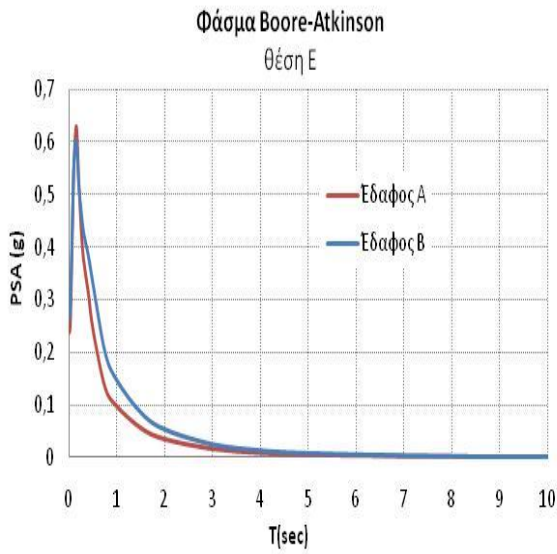
Τα προκύπτοντα φάσματα επιταχύνσεων για κάθε θέση και για τις δυο εδαφικές κατηγορίες παρουσιάζονται παρακάτω, μαζί με αυτά των Shahi και Baker (2011) ώστε να γίνεται ευκολότερα αντιληπτή η επίδραση της κατευθυντικότητας.

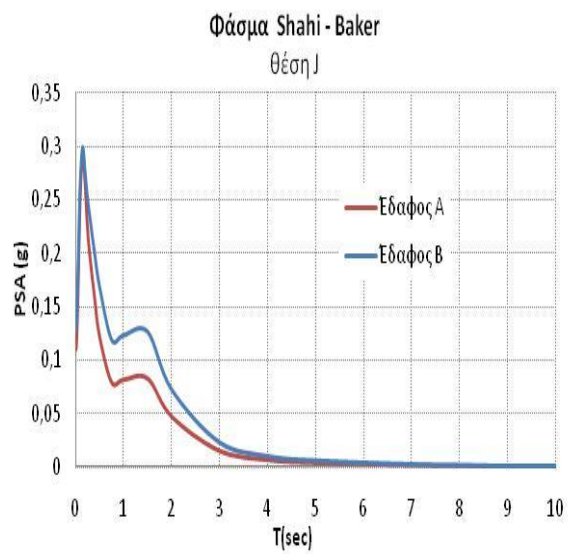
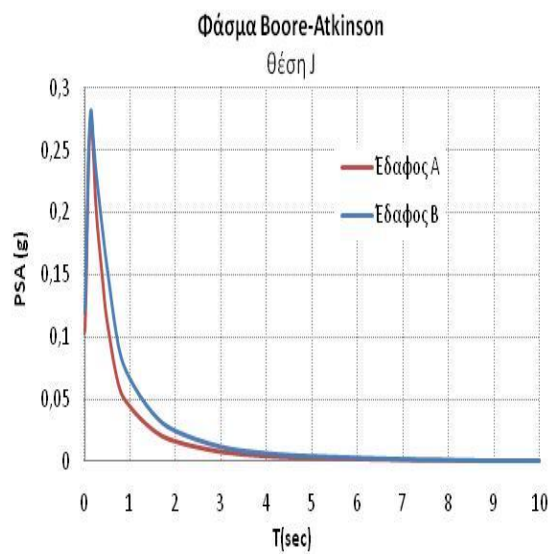
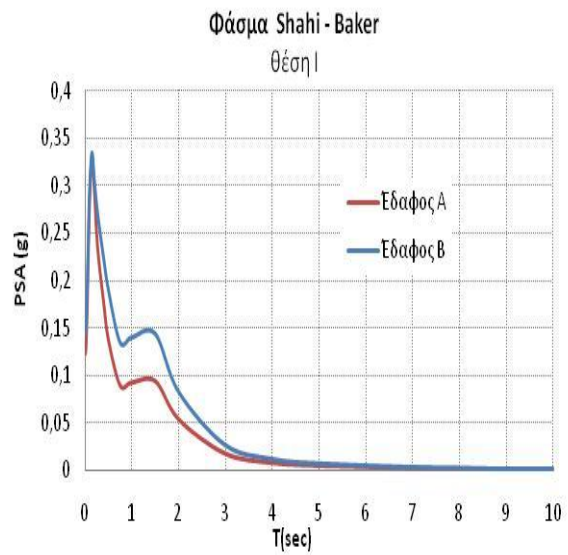
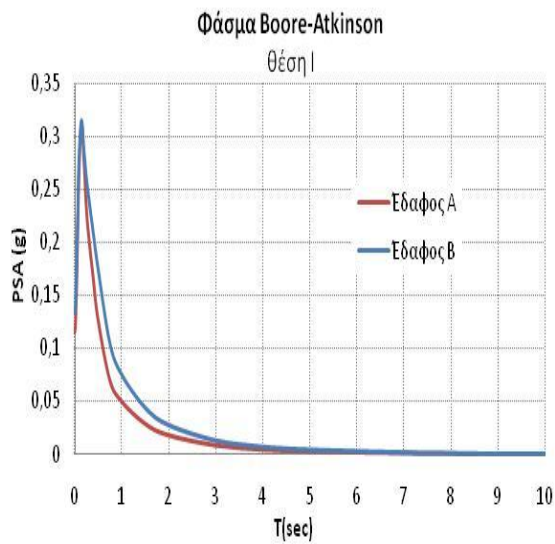
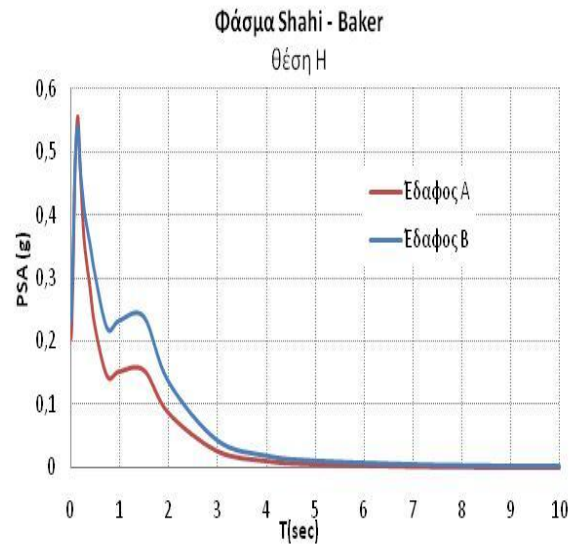
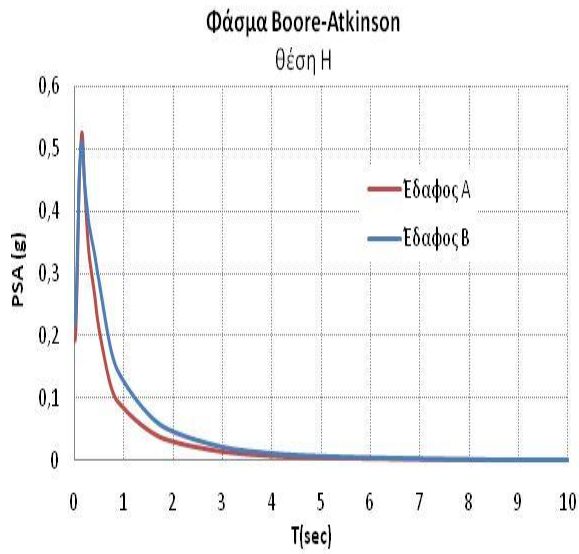
#### 7.7.4 Προκύπτοντα φάσματα Shahi – Baker

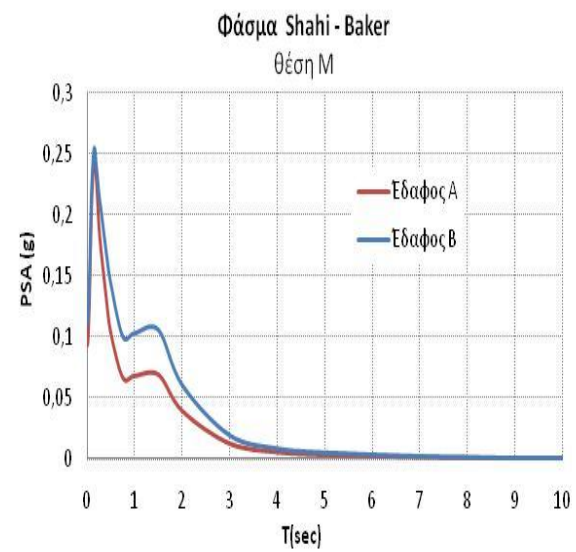
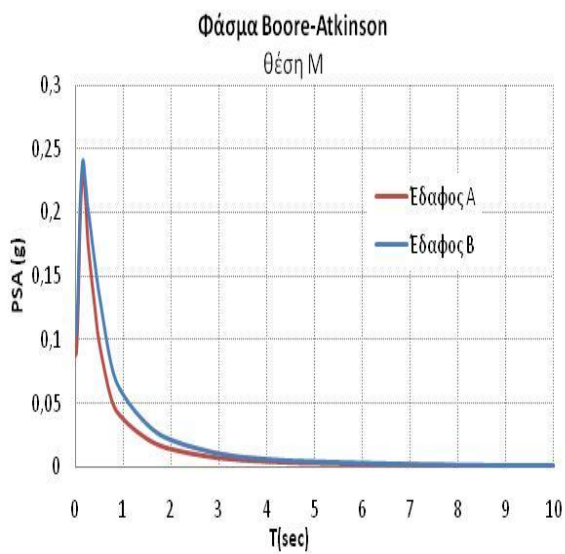
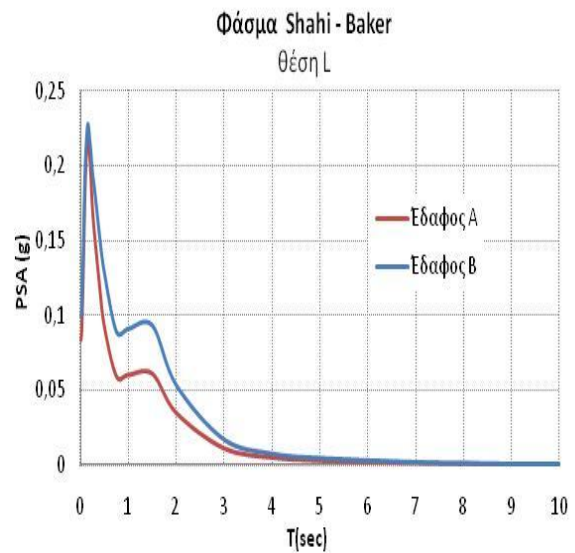
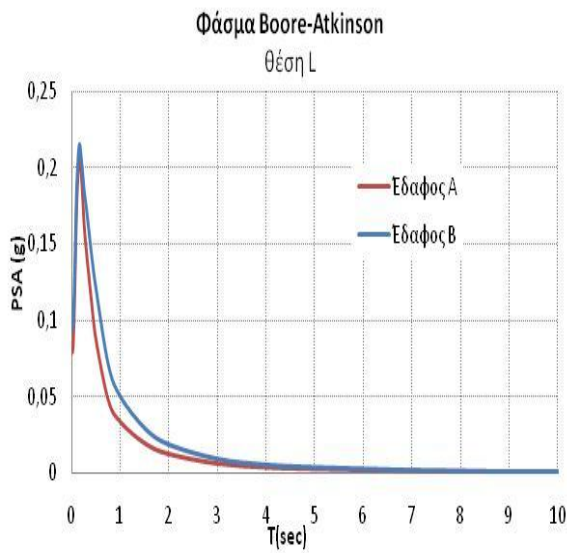
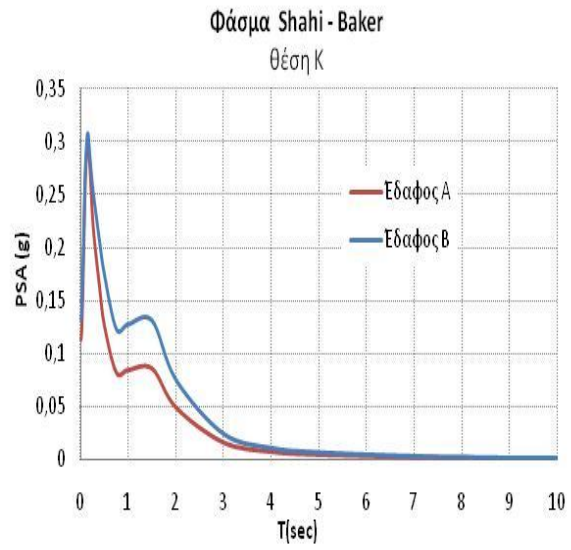
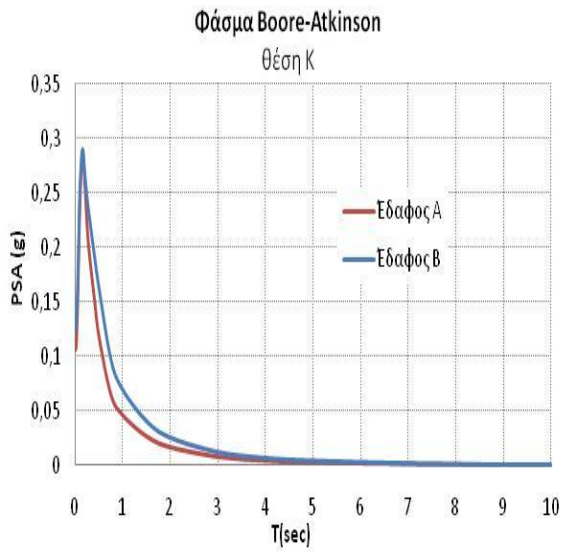
Θέλοντας να λάβουμε υπόψη τα φαινόμενα κατευθυντικότητας της διάρρηξης, παράγονται τα φάσματα απόκρισης για τις 16 θέσεις της **εικόνας 7.25** και για τις εδαφικές κατηγορίες A και B του EC8, σύμφωνα με την **εξίσωση [21]** των Shahi και Baker (2011). αναφορικά με τις τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στις διάφορες εξισώσεις, στην εξίσωση: (**κεφαλαίο 3**)

$$\mu_{lnAf} = \begin{cases} 1.131 \cdot \exp\left(-3.11 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.058 & \text{αν } T \leq 0.88 \cdot T_p \\ 0.896 \cdot \exp\left(-2.11 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_p}\right) + 0.127\right)^2 + 0.255 & \text{αν } T > 0.88 \cdot T_p \end{cases}$$

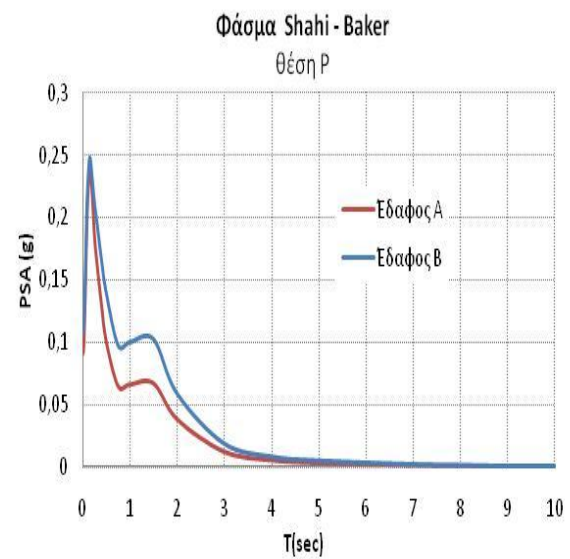
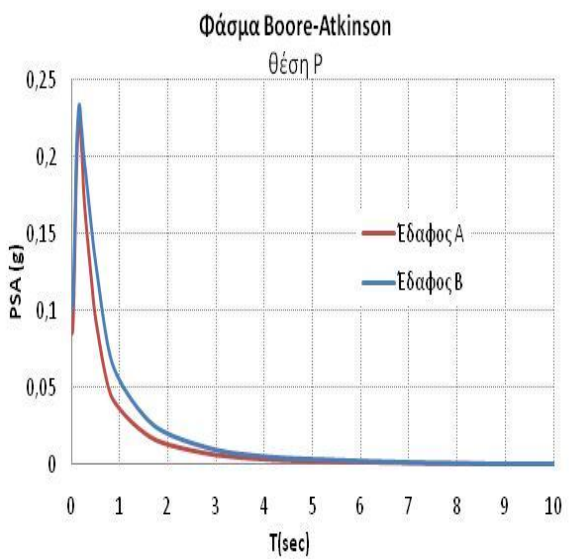
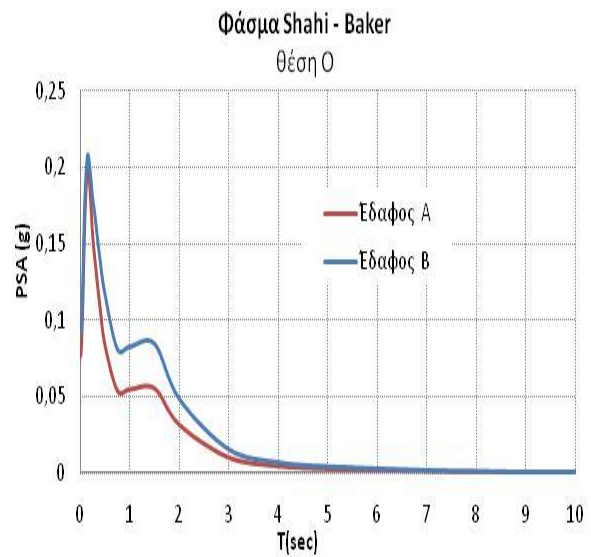
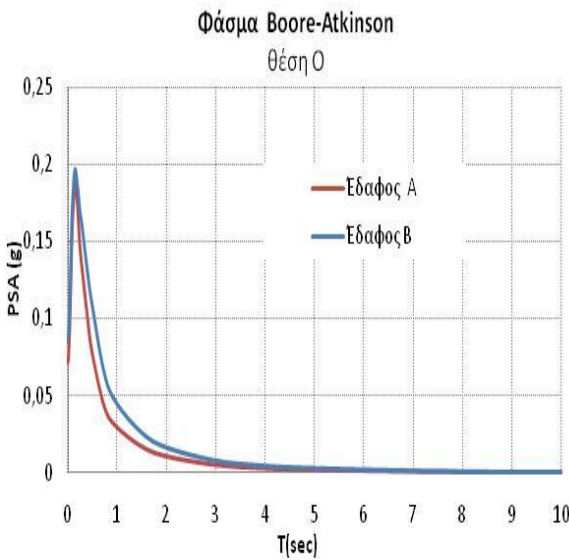
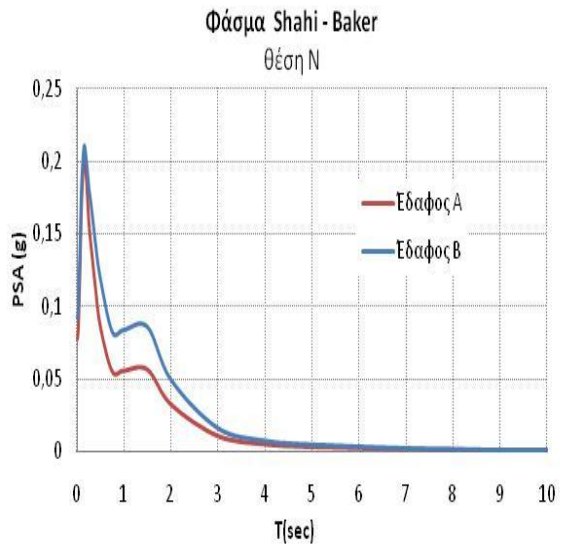
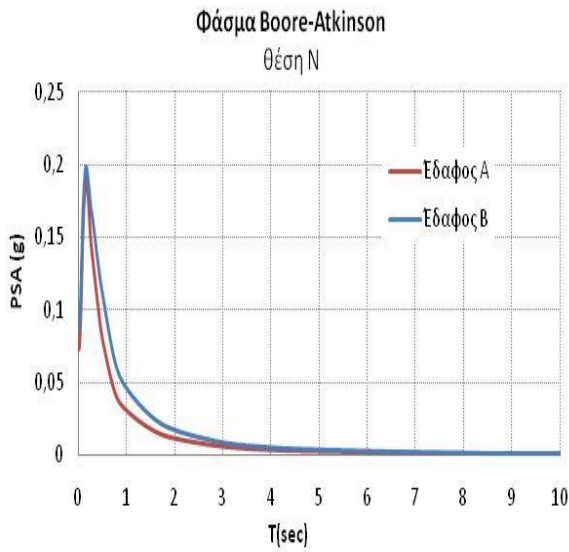
η περίοδος του παλμού αντικαταστάθηκε από την τιμή  $T_p=1.84sec$ , η οποία αποτελεί τη μέση τιμή των παλμών των καταγραφών Σύνταγμα A (SGMA), Σύνταγμα B (SGMB), Σεπόλια A (SPLA), Σεπόλια B (SPLB), Δάφνη (DFNA), Συγγρού – Φίξ (FIX) και ΚΕΔΕ (ΚΕΔΕ) του σεισμού. Έπειτα, παράγεται η μέση σχέση ενίσχυσης χρησιμοποιώντας τον προαναφερθέντα τύπο και το τελικό φάσμα που λαμβάνει υπόψη την κατευθυντικότητα προκύπτει από πολλαπλασιασμό του φάσματος των Boore και Atkinson (2008) με την προαναφερόμενη τιμή της ενίσχυσης.

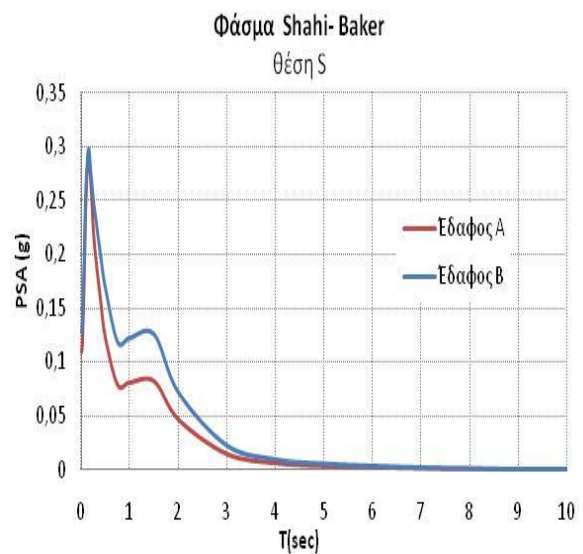
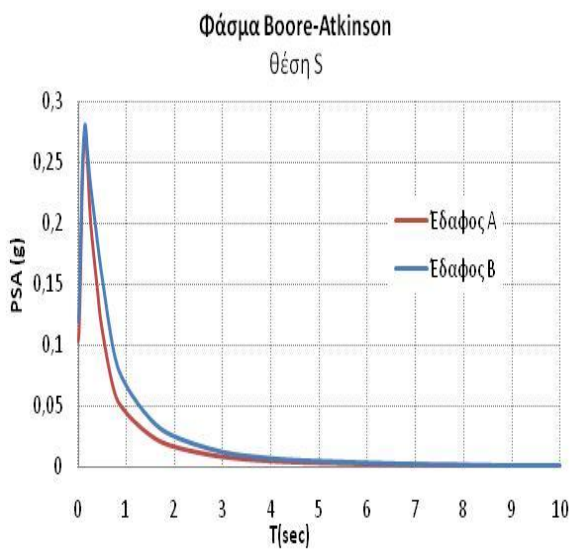
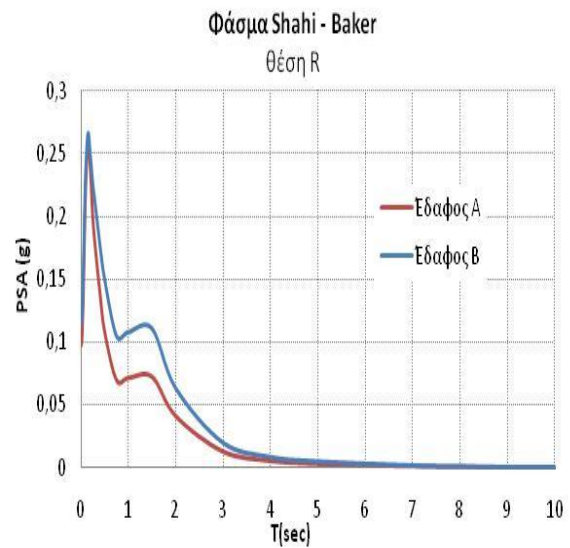
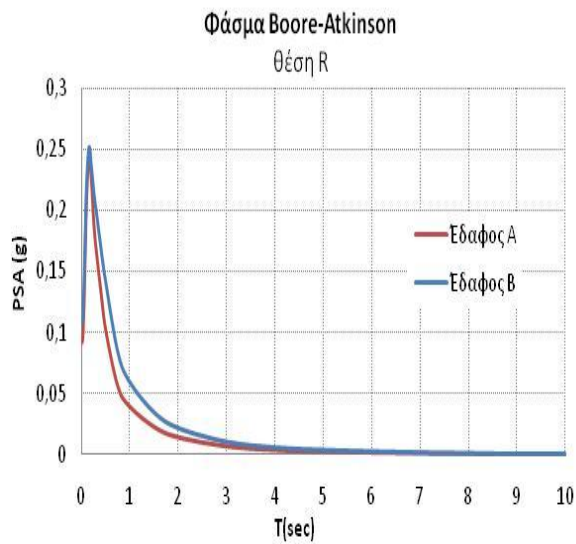
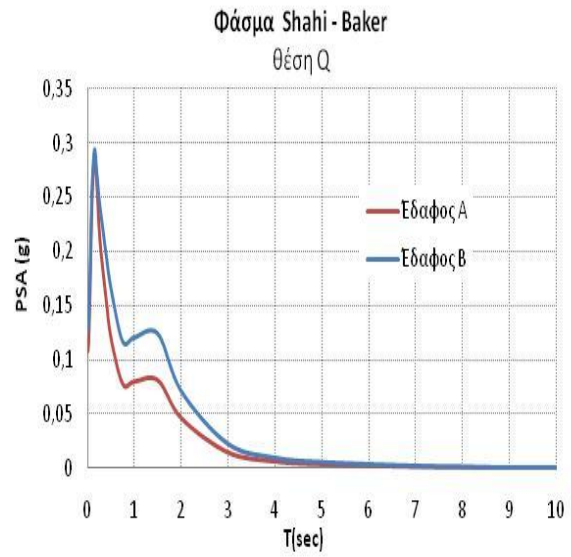
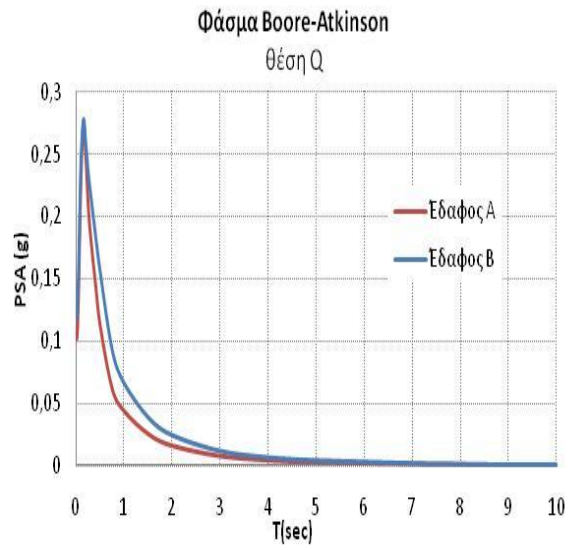


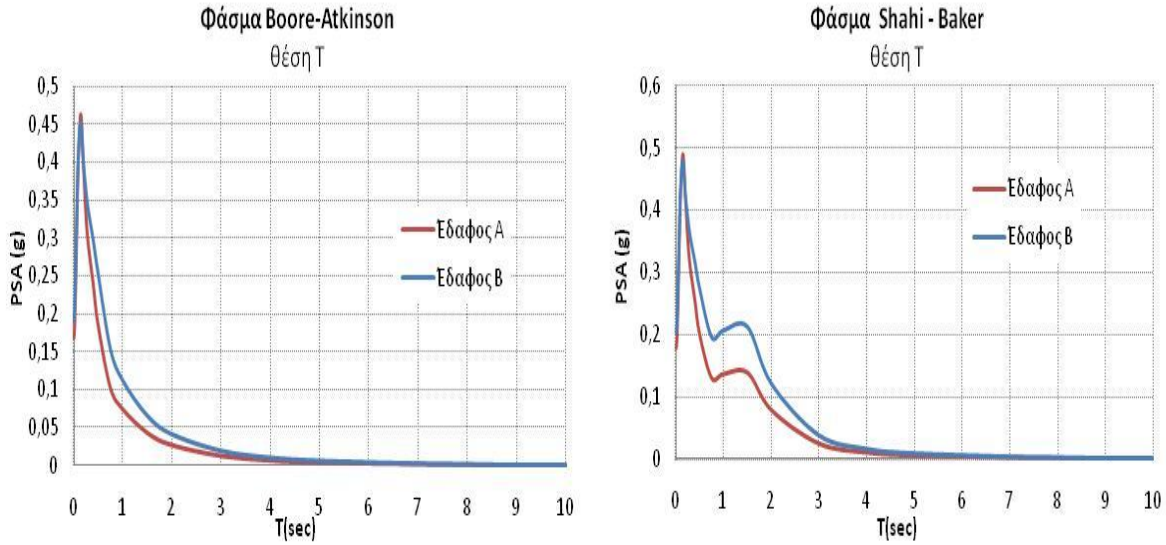




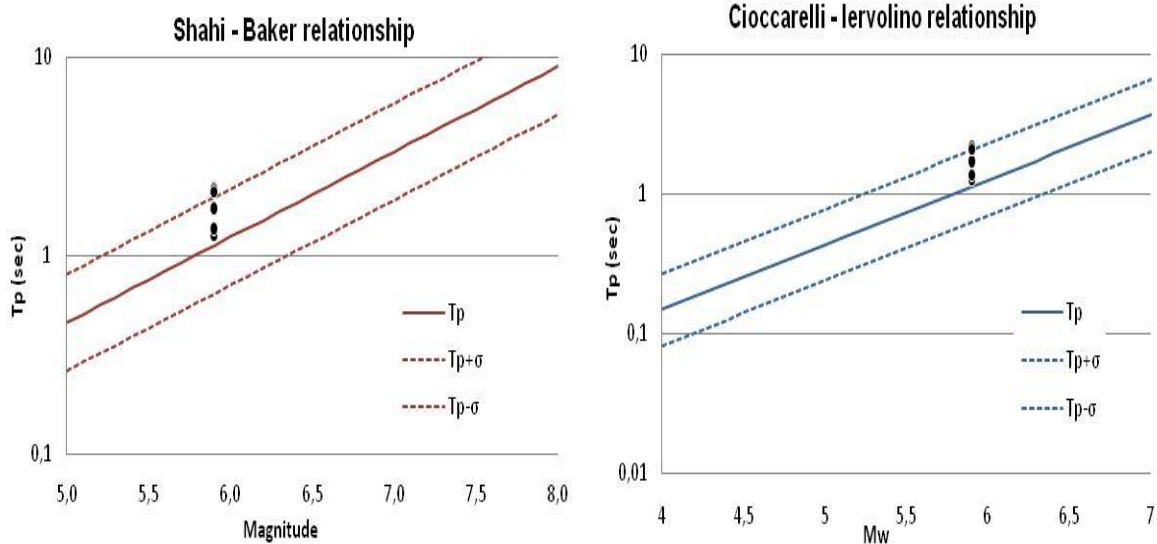








Επιπρόσθετα, οι περίοδοι παλμών των προαναφερθέντων επτά σταθμών καταγραφής σχεδιάζονται μαζί με τις γραφικές παραστάσεις συνάρτησης της περιόδου του παλμού από το σεισμικό μέγεθος  $\mu_{\ln T_p} = -5.73 + 0.99 \cdot M$ ,  $\sigma_{\ln T_p} = 0.56$  των Shahi - Baker (2011) και  $\mu_{\ln T_p} = -6.19 + 1.07 \cdot M$ ,  $\sigma_{\ln T_p} = 0.59$  των Chioccarelli - Iervolino (2010). Παρατηρούμε ότι για το σεισμικό μέγεθος  $M_w=5.9$  του σεισμού της Αθήνας, οι περίοδοι παλμών των καταγραφών ικανοποιούν τα όρια που θέτουν οι δυο έρευνες.



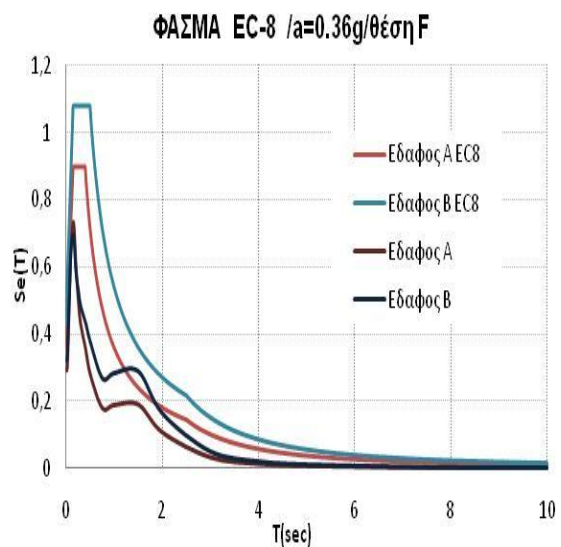
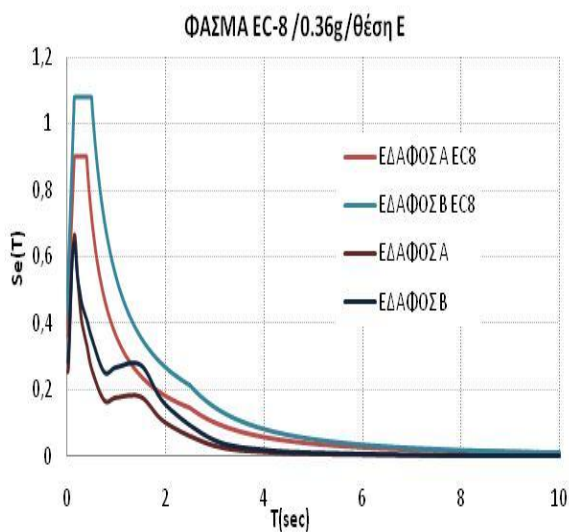
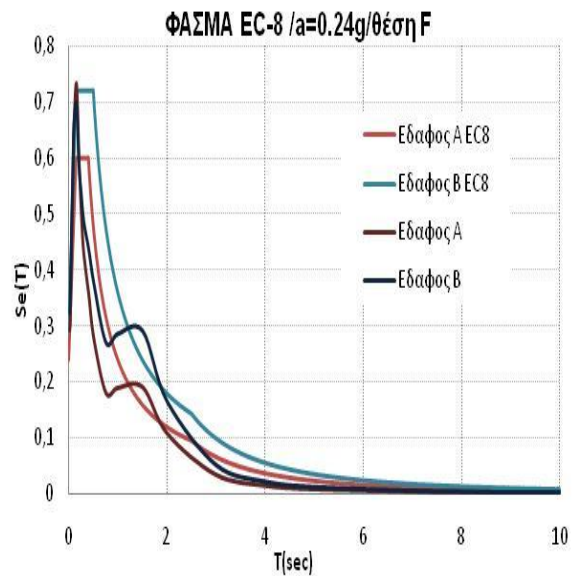
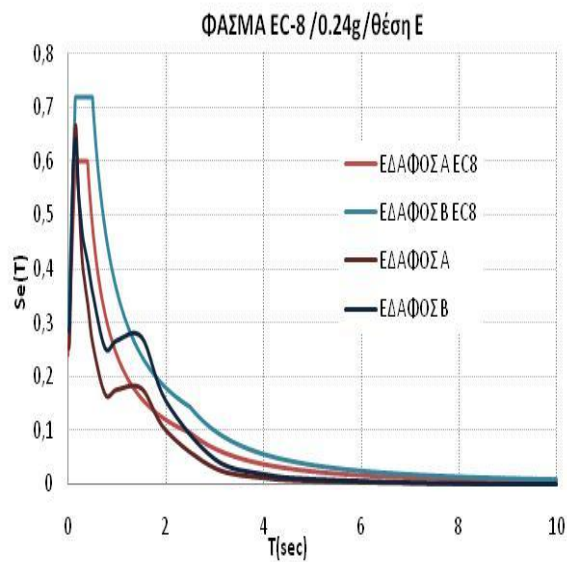
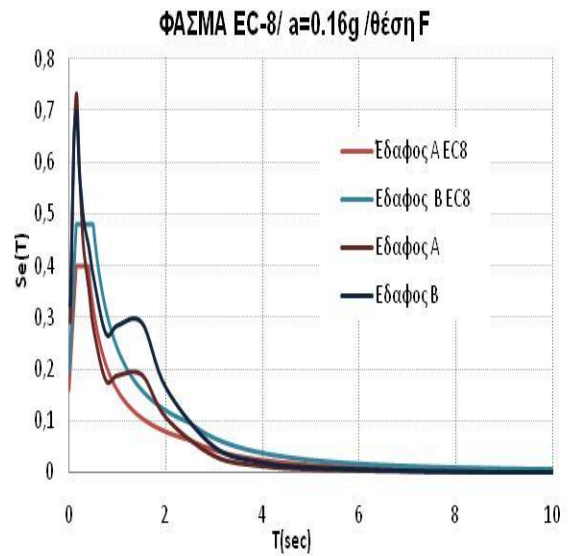
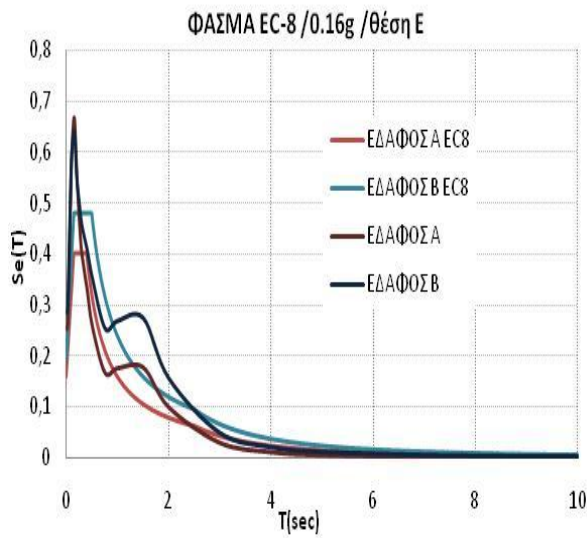
**Εικόνα 7.26:** Σχέσεις των Shahi & Baker (2011) και των Chioccarelli & Iervolino (2010) για την εξάρτηση της περιόδου του παλμού από το σεισμικό μέγεθος, μαζί με τις περιόδους παλμών των καταγραφών του σεισμού της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα.

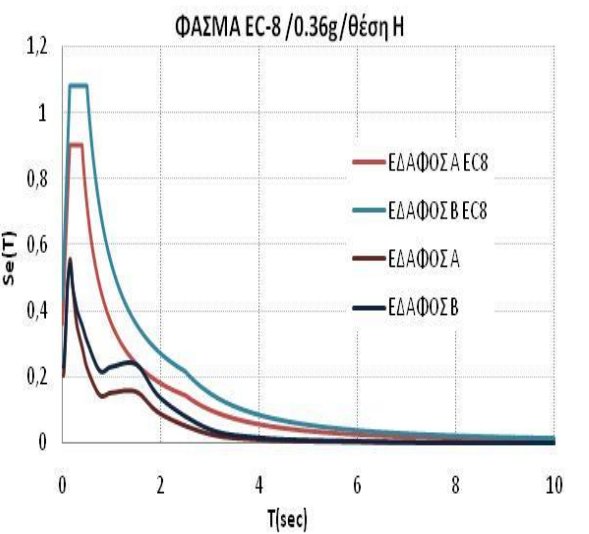
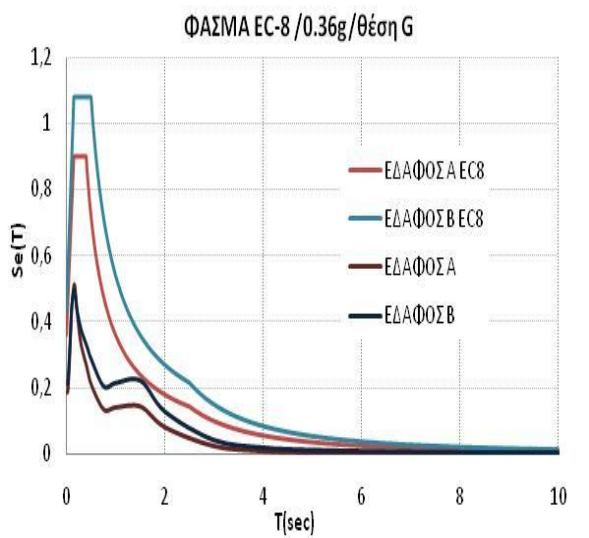
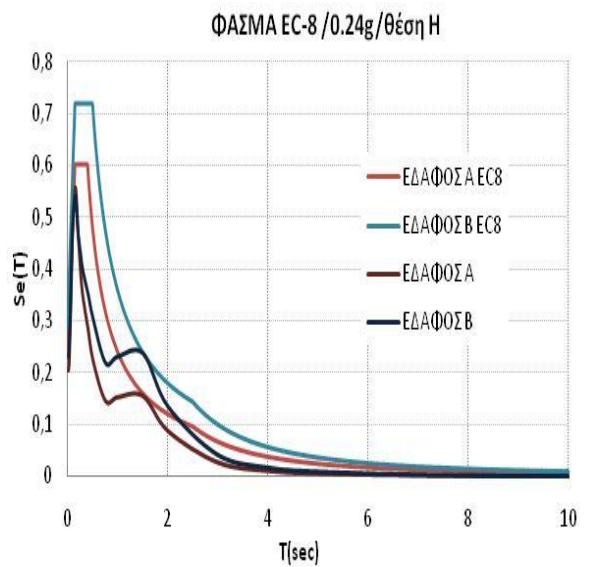
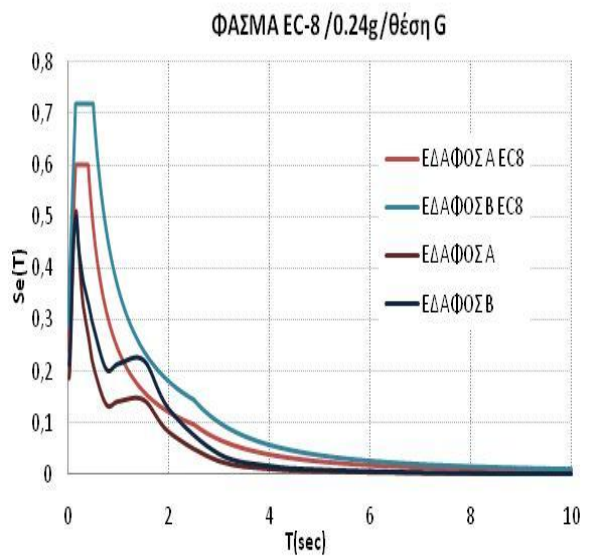
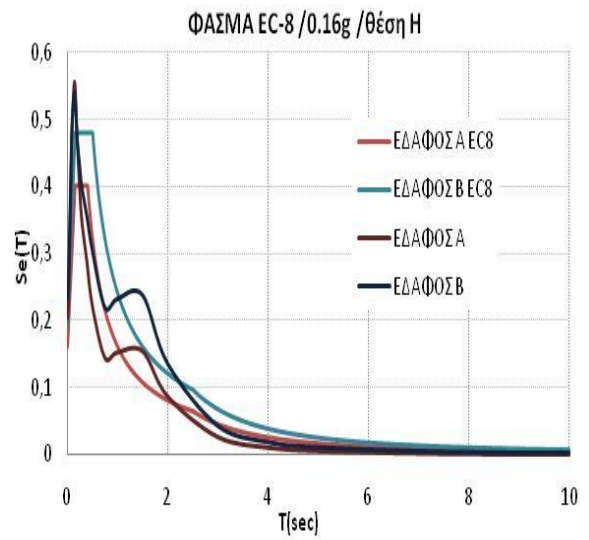
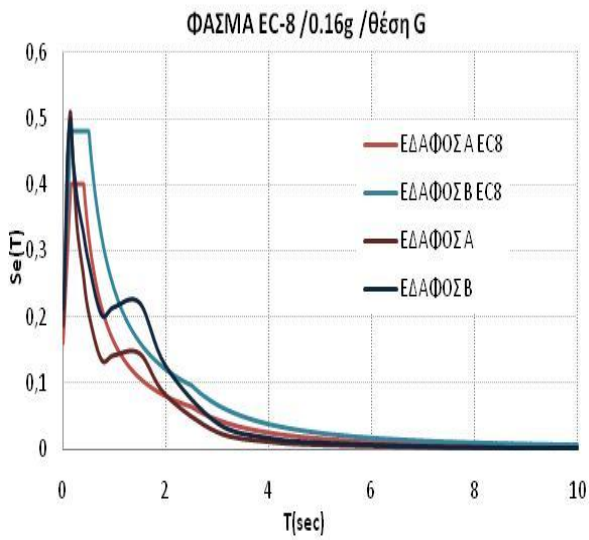


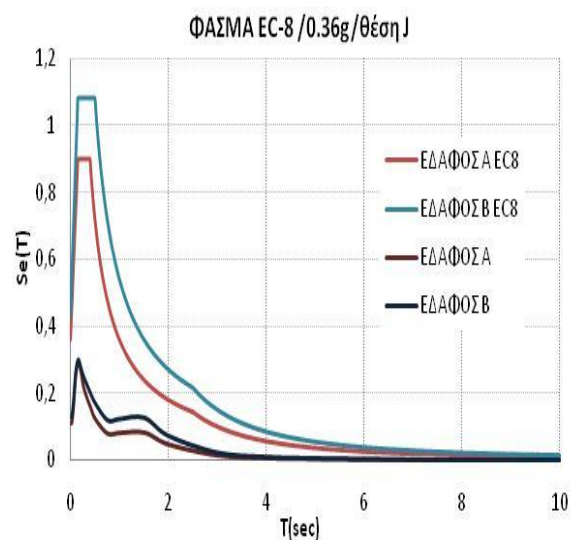
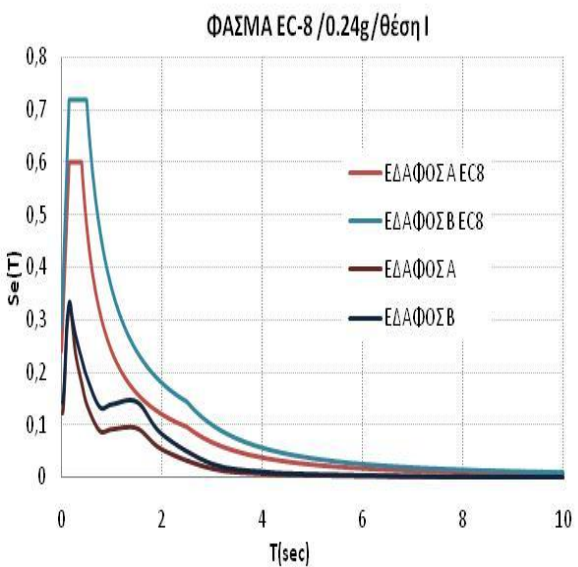
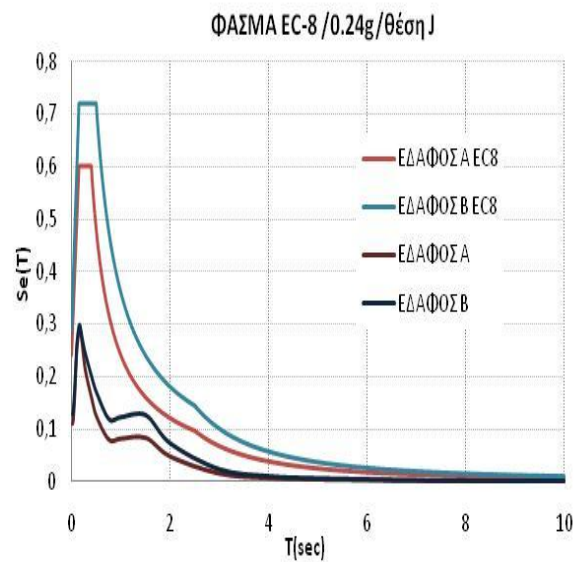
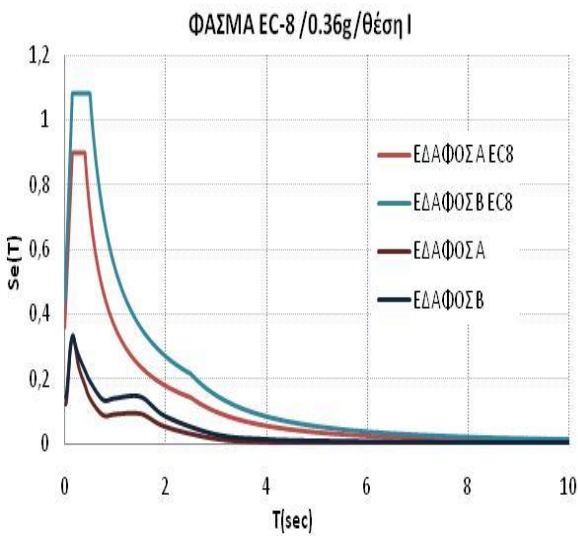
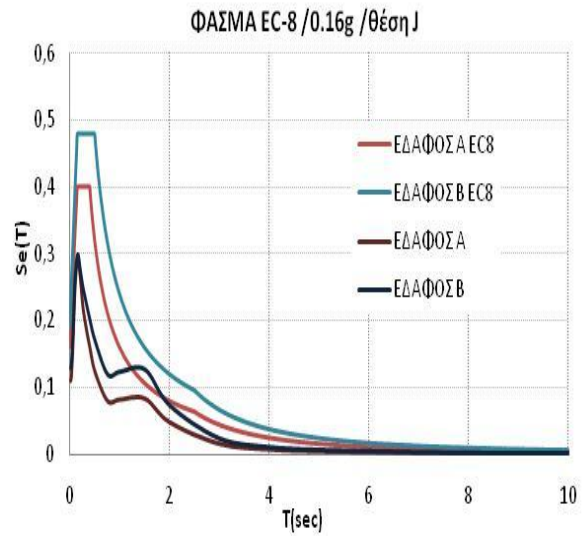
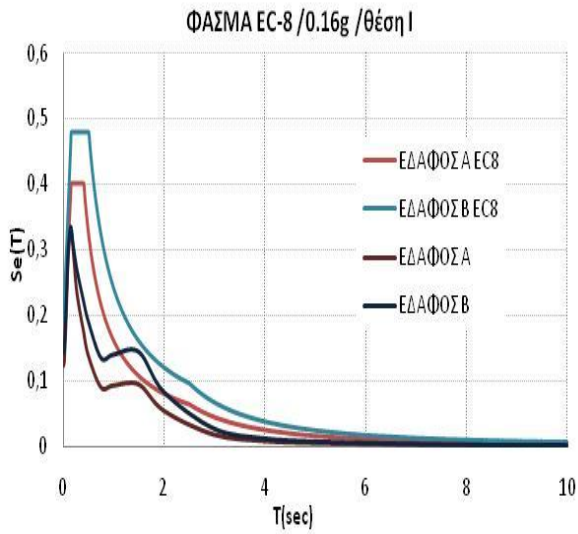
### 7.7.5 Σύγκριση των φασμάτων επιτάχυνσης με αυτά του κανονισμού

Η σύγκριση με τα φάσματα του κανονισμού έγινε για δυο κατηγορίες εδαφών (Α και Β), για τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (I, II και III με  $a=0.16g$ ,  $0.24g$  και  $0.36g$  αντίστοιχα) και όσον αφορά τα φάσματα που προέκυψαν από τη σχέση Shahi - Baker (2011).

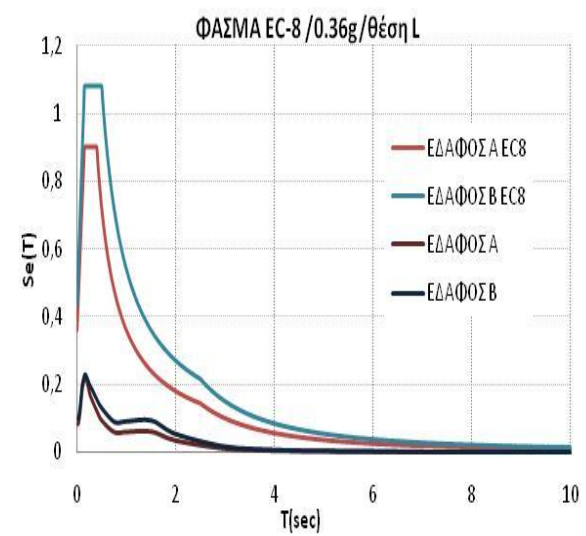
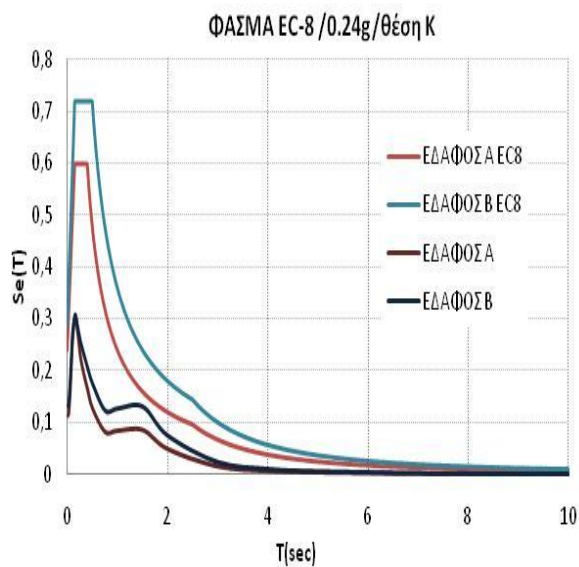
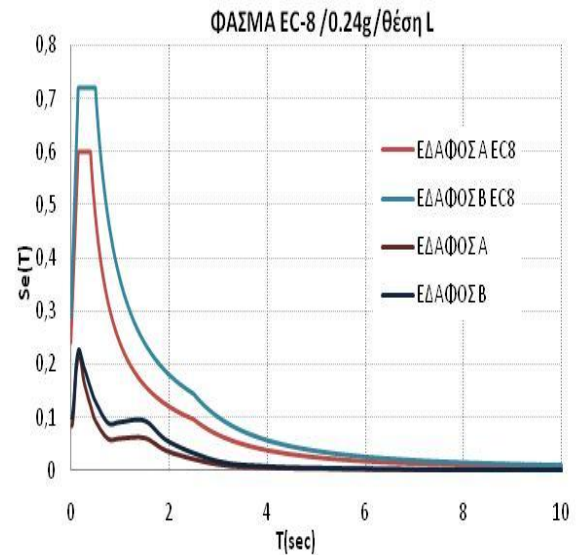
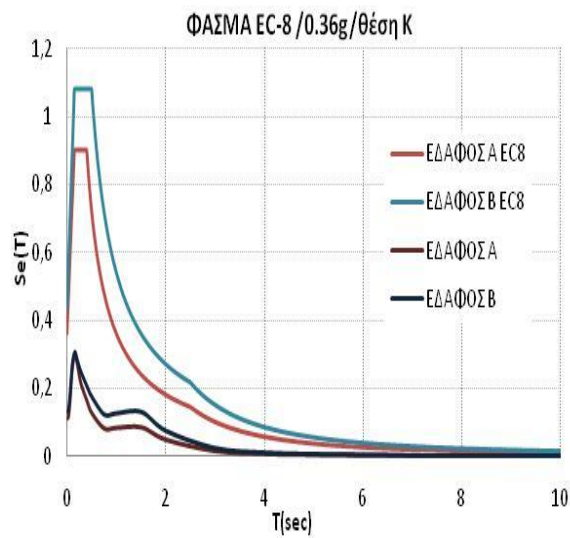
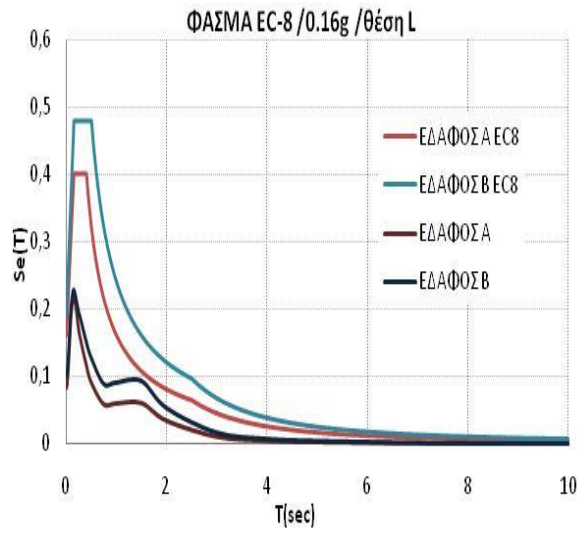
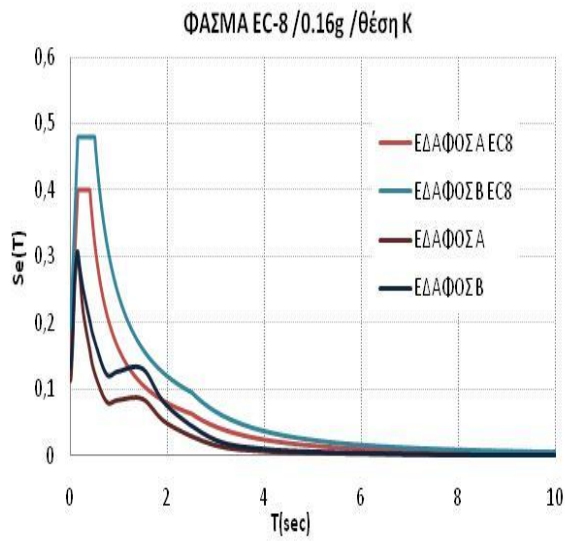
Παρατηρούμε ότι για τις θέσεις που βρίσκονται πιο μακριά από την επιφανειακή προβολή του ρήγματος, ο κανονισμός μας καλύπτει. Επίσης, δεν υφίστανται προβλήματα στις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας II και III αφού το φάσμα του κανονισμού βρίσκεται πάνω στο φάσμα των καταγραφών του σεισμού. Το πρόβλημα παρουσιάζεται στη ζώνη I ( $a=0.16g$ ) όπου το φάσμα του σεισμού ξεπερνά αυτό του κανονισμού και η απόκλιση είναι μεγαλύτερη στις κοντινότερες στο ρήγμα θέσεις όπως είναι φυσικό, αφού η απόκρισή τους είναι μεγαλύτερη. Συνεπώς, το φάσμα του κανονισμού χρειάζεται τροποποίηση στην περιοχή του φθίνοντα κλάδου, ώστε να λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κατευθυντικότητας καθώς αφορά την εμφάνιση του παλμού που ξεπερνά το φάσμα κανονισμού. Τέλος, μεγαλύτερη απόκριση παρατηρείται στη θέση  $F$  και μικρότερη στη θέση  $O$ .

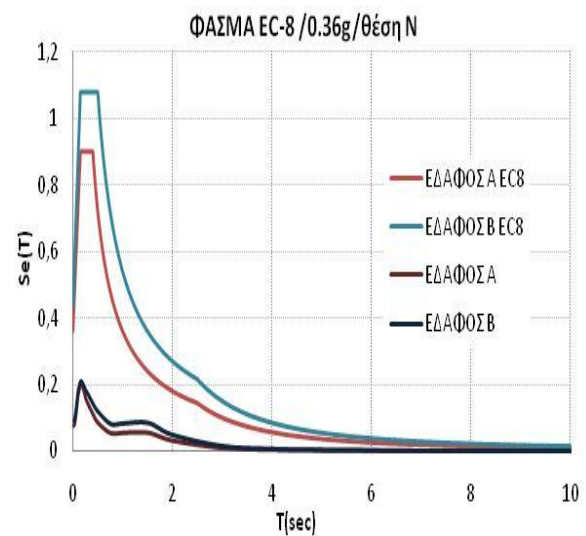
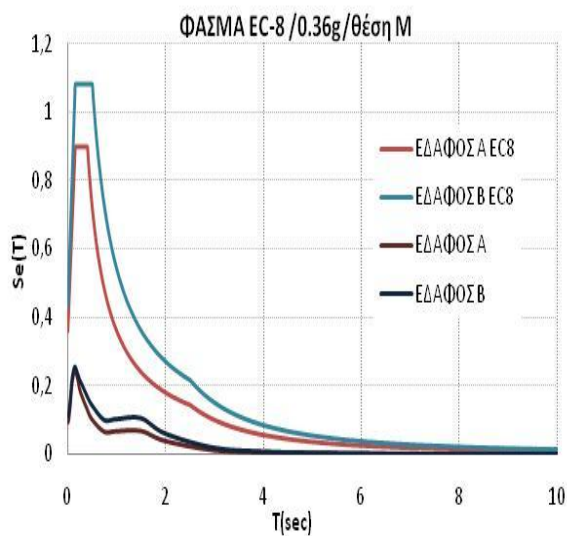
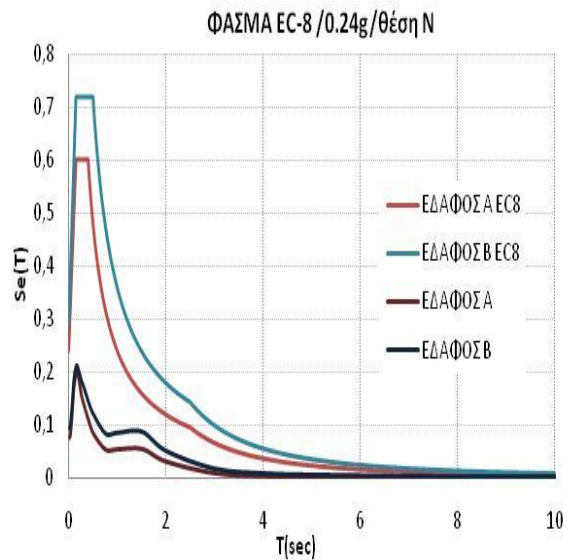
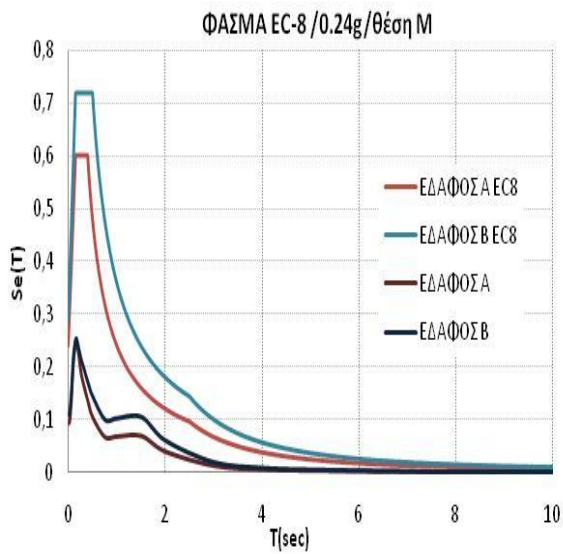
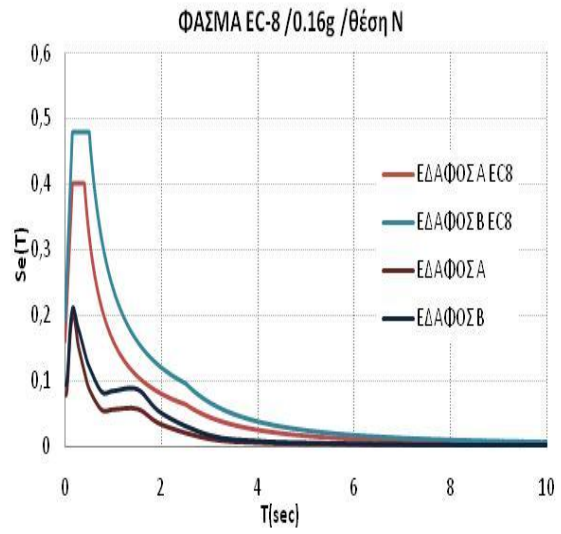
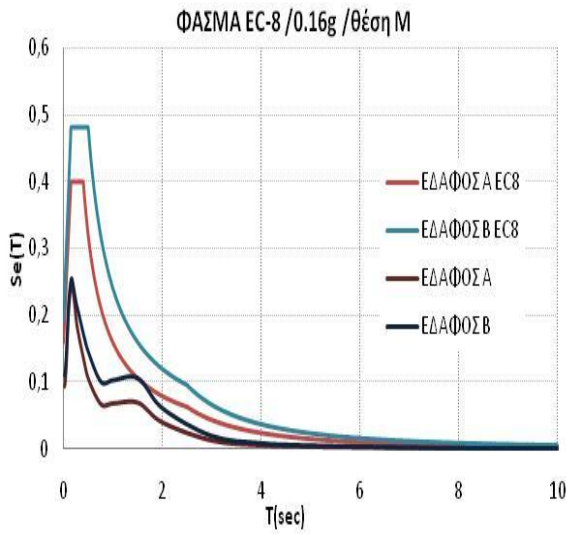




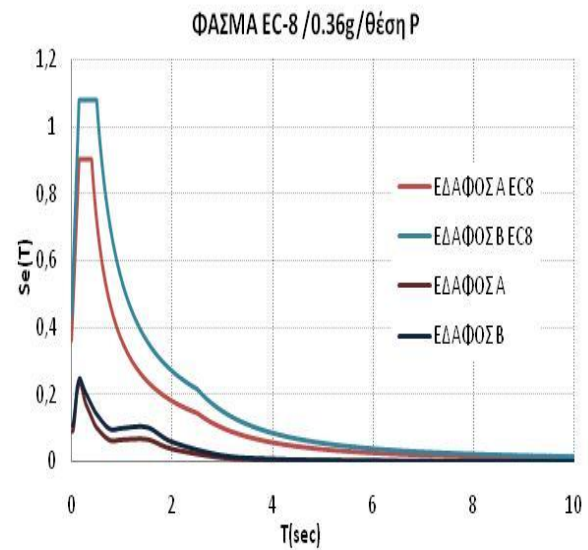
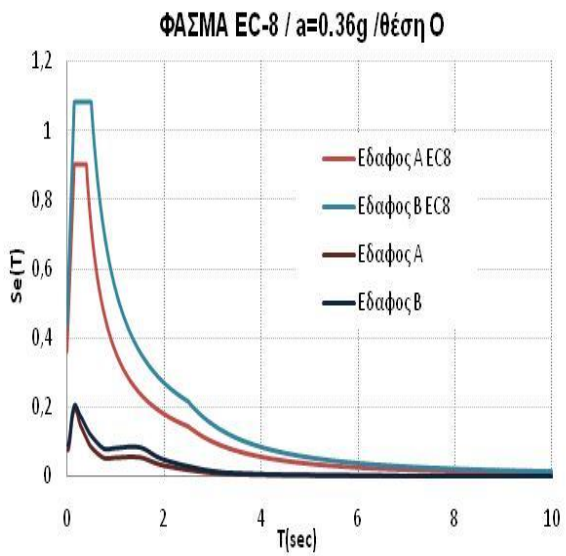
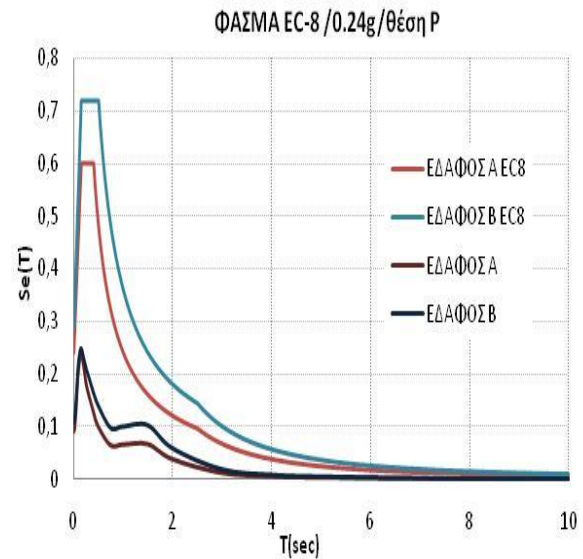
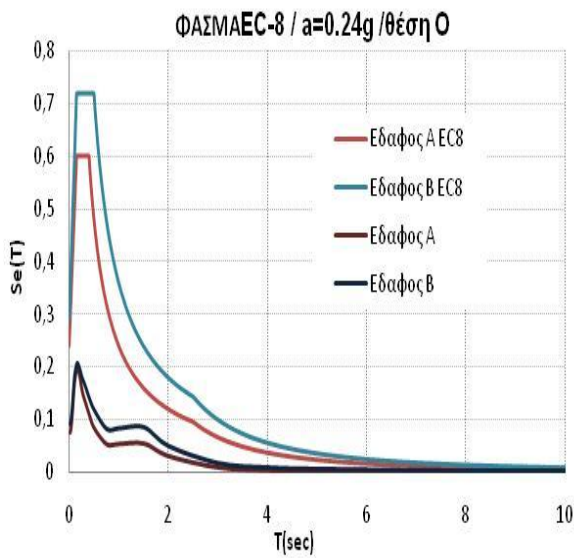
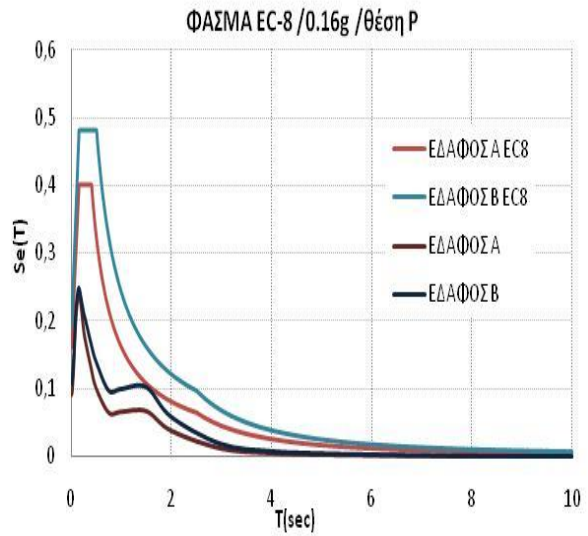
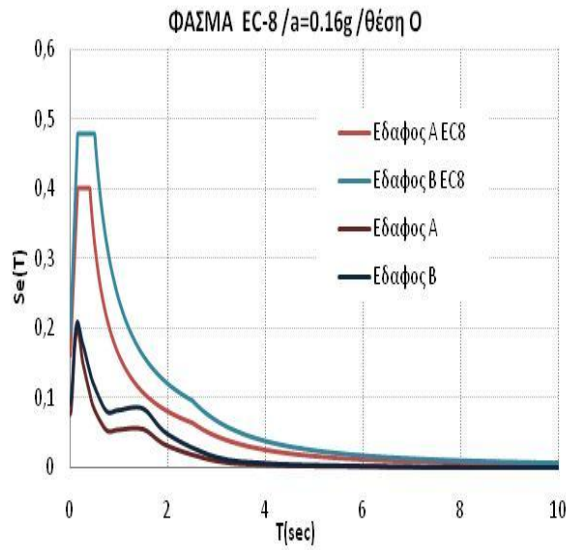


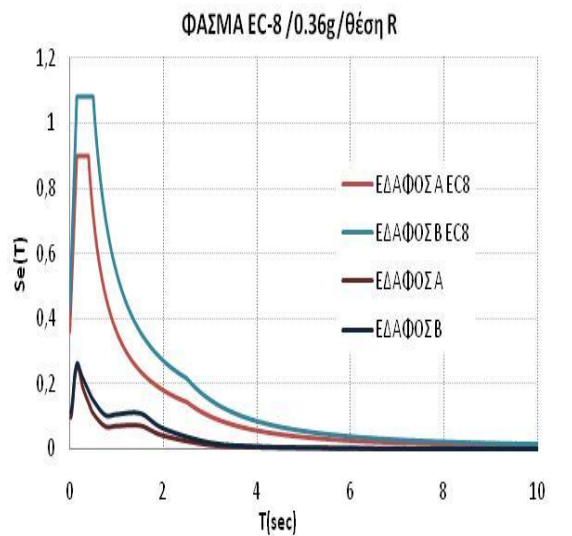
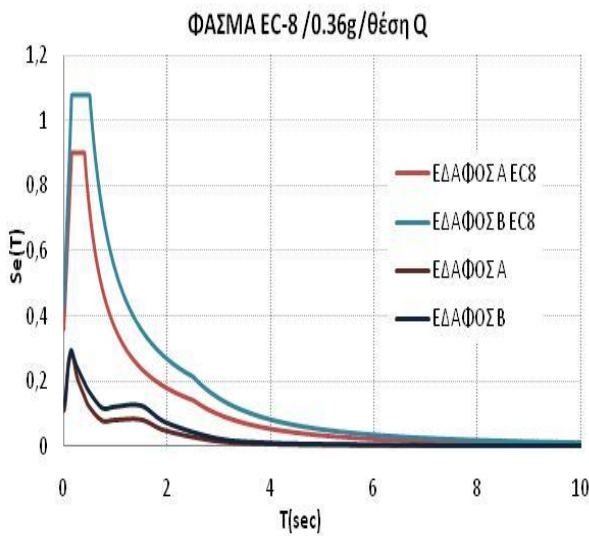
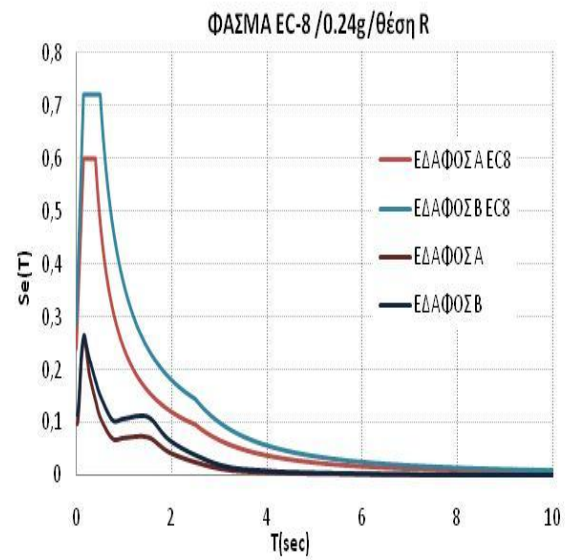
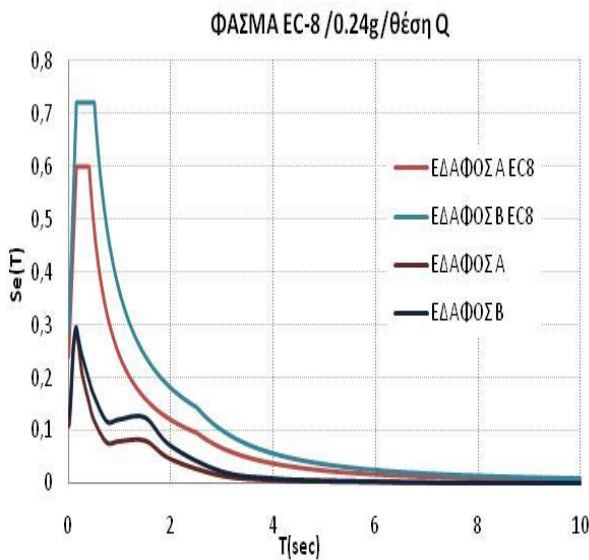
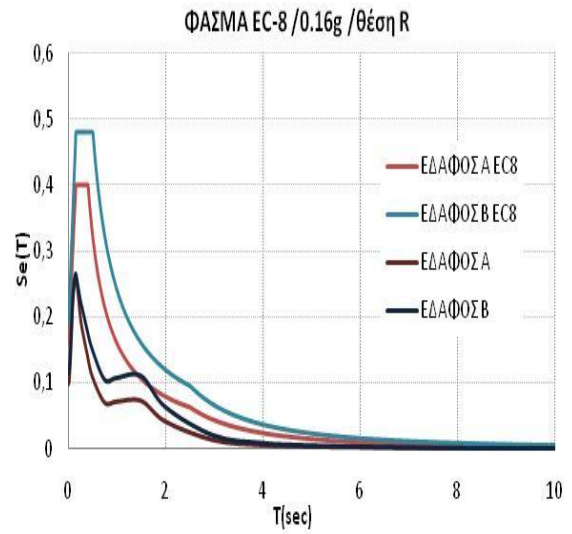
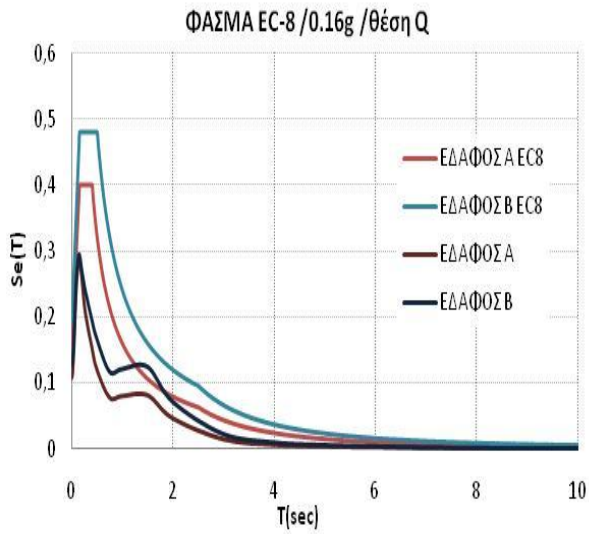


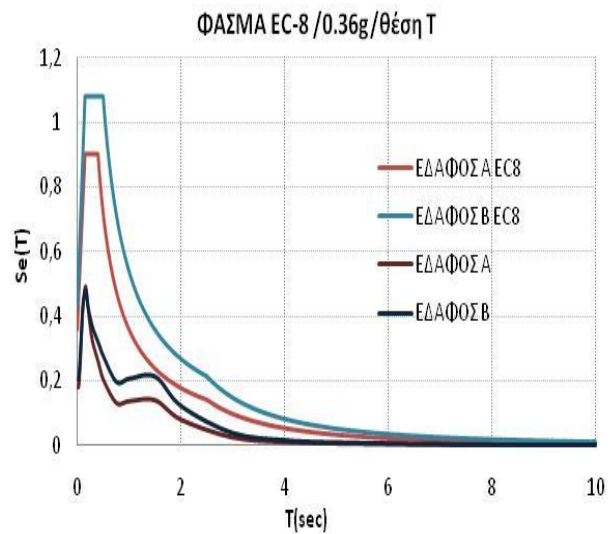
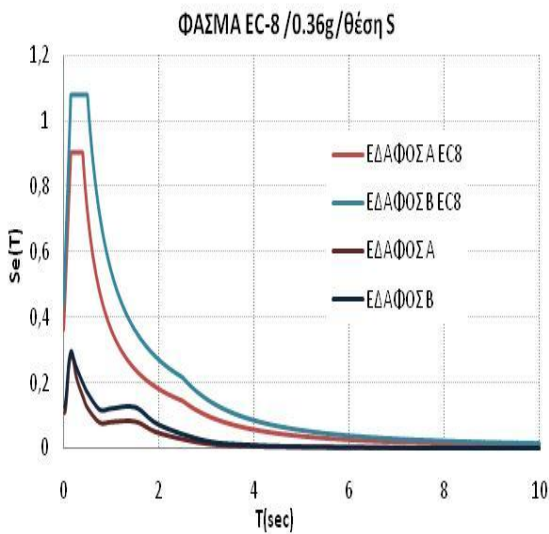
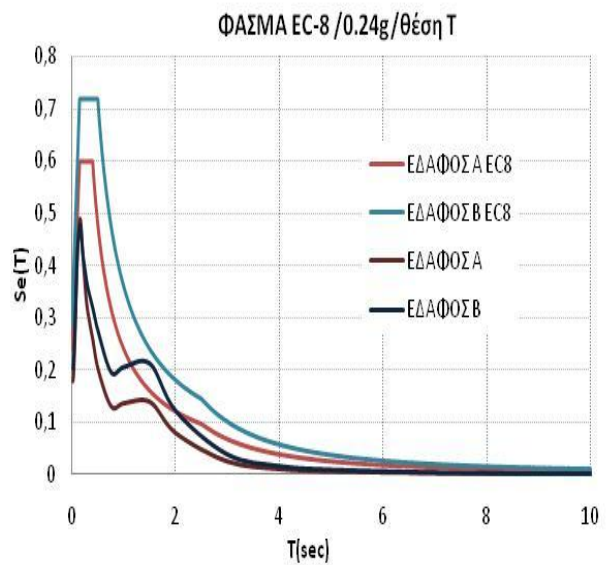
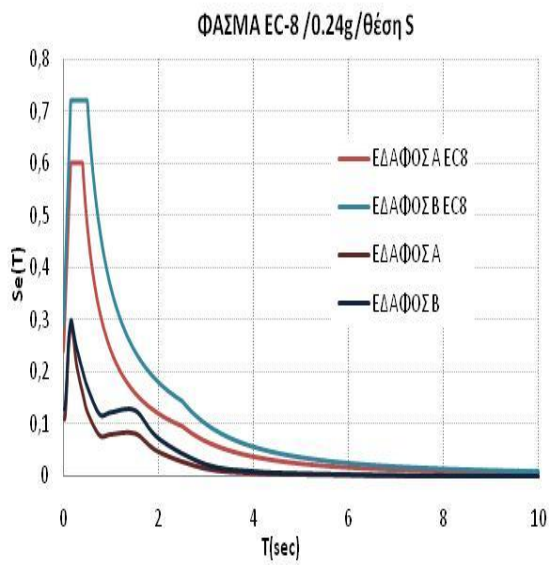
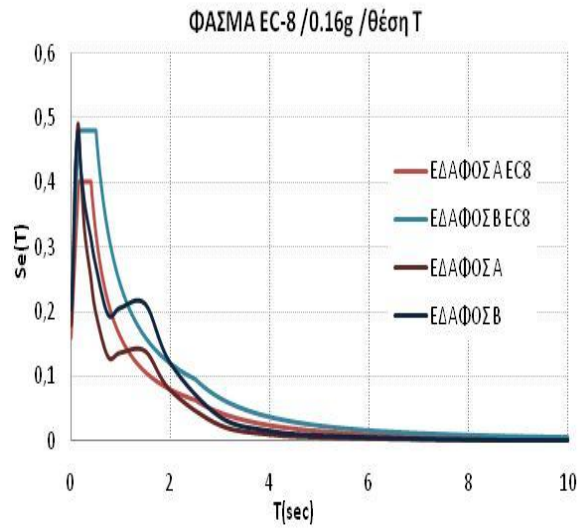
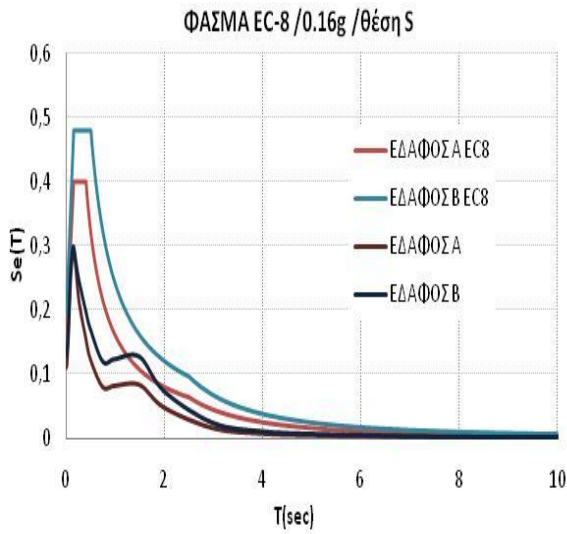












### 7.7.6 Παραγωγή ανελαστικών φασμάτων μετακινήσεων

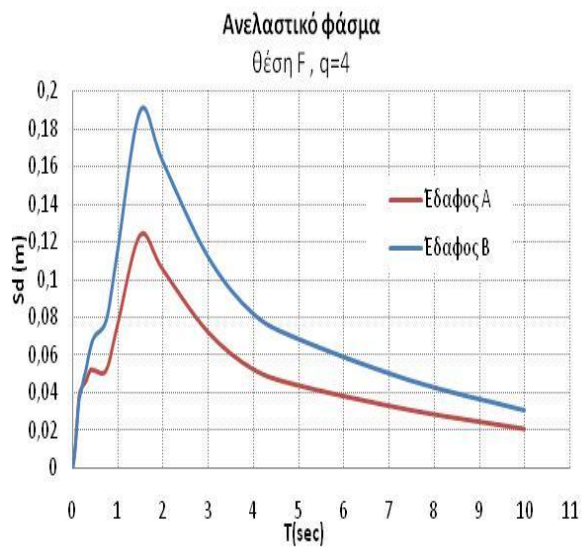
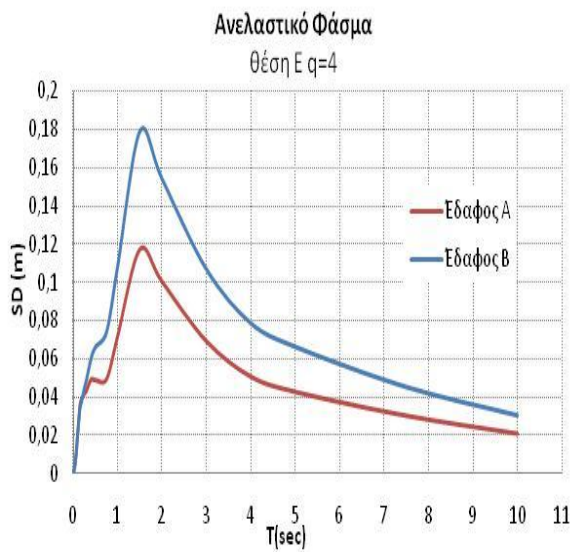
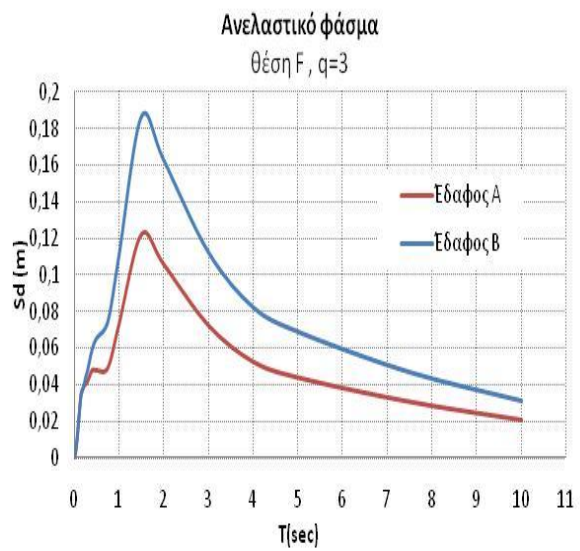
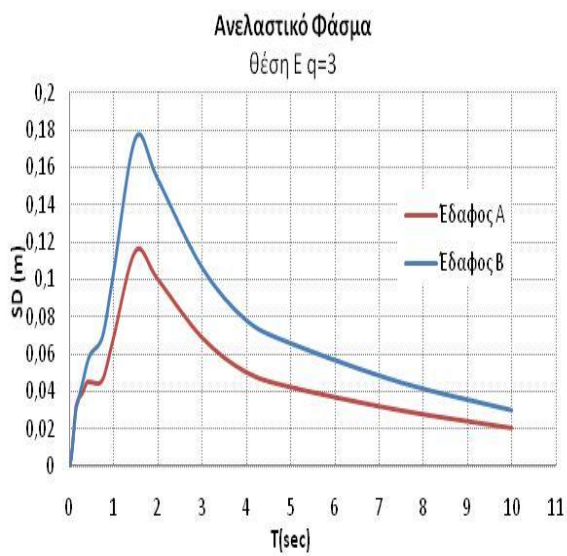
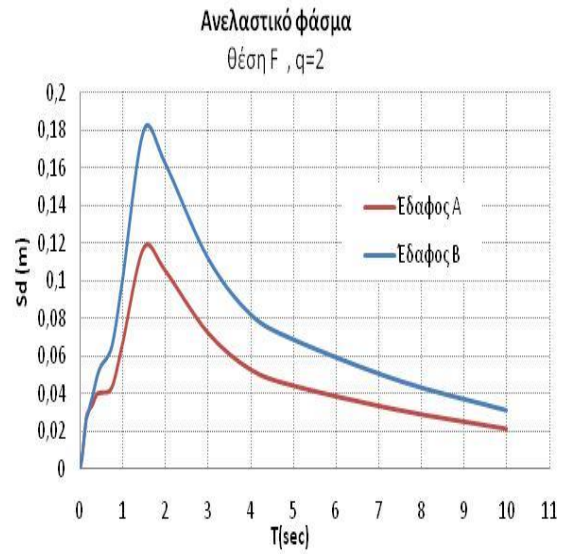
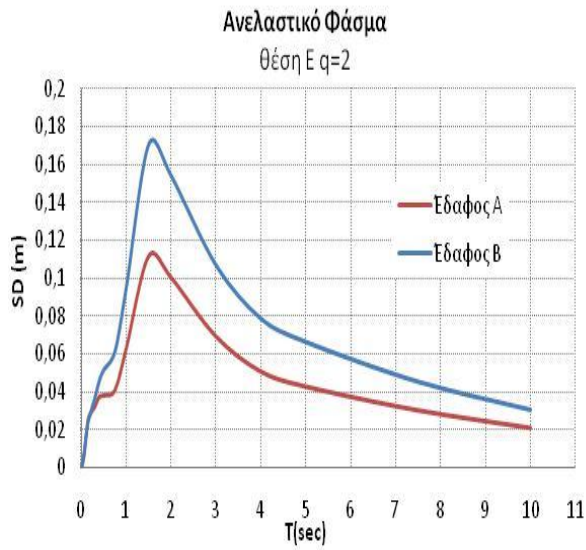
Στην παρούσα έρευνα ο μεσαίου μεγέθους σεισμός της 7<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 1999 που έδρασε στην πόλη των Αθηνών, παρουσιάζεται ως παράδειγμα εφαρμογής για την εκτίμηση της επίδρασης της πρόσω κατευθυντικότητας στο κοντινό πεδίο μικρών και μεσαίων σεισμικών γεγονότων. Οι καταγραφές της εδαφικής κίνησης σε κάποια απόσταση από το ρήγμα, αναλύονται ώστε να εκτιμηθούν τα σημαντικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το γεγονός, όπως η πιθανή ύπαρξη παλμών κατευθυντικότητας και η περίοδός τους. Οι καταγεγραμμένες σε βραχώδες έδαφος εδαφικές κινήσεις χρησιμοποιούνται στις νέες σχέσεις εξασθένησης της εδαφικής κίνησης με χαρακτηριστικό φάσμα επιταχύνσεων και υπολογίζεται είτε η μέση ενίσχυση επιτάχυνσης του κοντινού πεδίου είτε η ύπαρξη παλμών ταχύτητας που σχετίζονται με την κατευθυντικότητα. Ακόμα, δημιουργούνται τα ανελαστικά φάσματα και εξάγεται η διαφορά μεταξύ της μέσης από τη μέγιστη εδαφική κίνηση. Για τις κινήσεις που επηρεάζονται από την πρόσω κατευθυντικότητα συμπεραίνεται ότι ακόμα και για σεισμικούς συντελεστές γεγονότων μεσαίου μεγέθους, οι παρεχόμενοι αντισεισμικοί κανονισμοί είναι ανεπαρκείς για ασφαλή σεισμικό σχεδιασμό. Οι συντελεστές των διαφόρων ζωνών σεισμικότητας πρέπει να επανεξεταστούν και πιθανότατα να αυξηθούν ώστε να λαμβάνουν υπόψη την κατευθυντικότητα ακόμα και στην περίπτωση των γεγονότων μεσαίου μεγέθους.

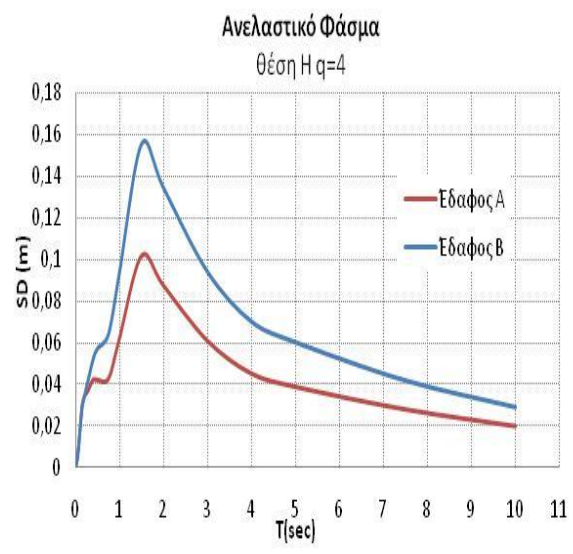
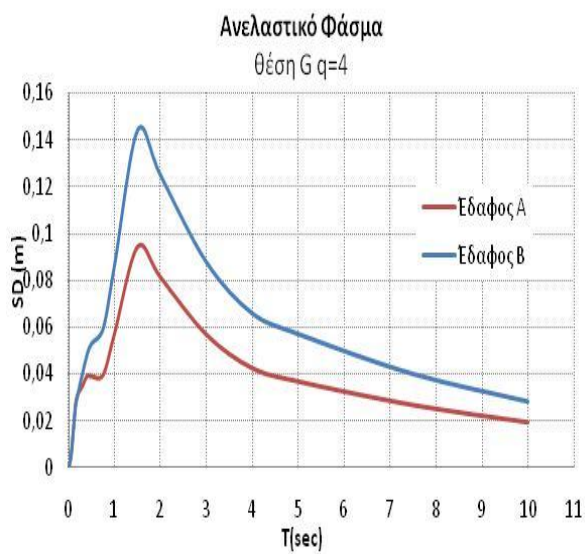
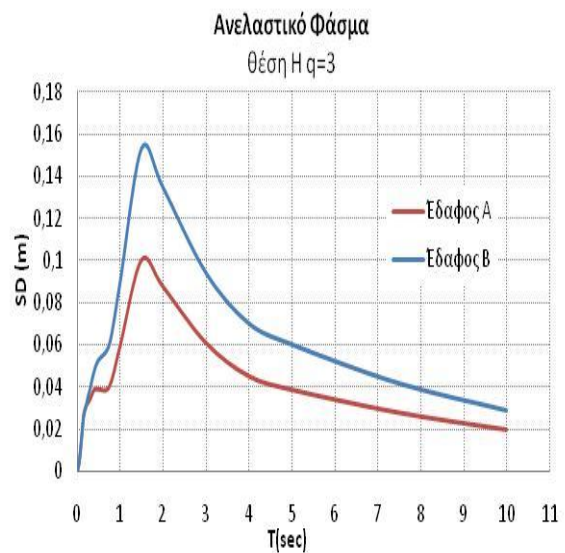
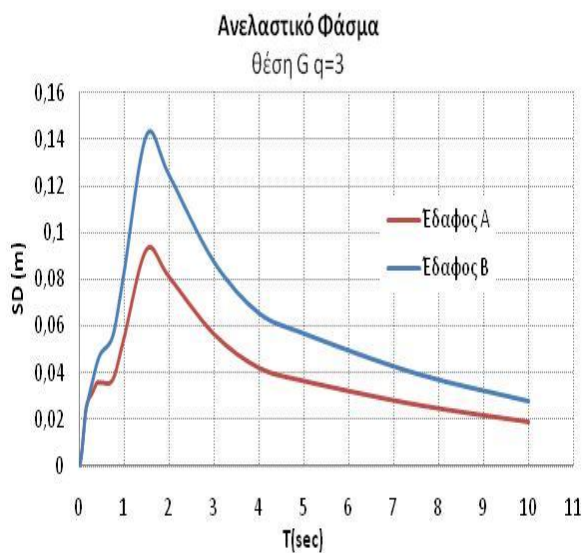
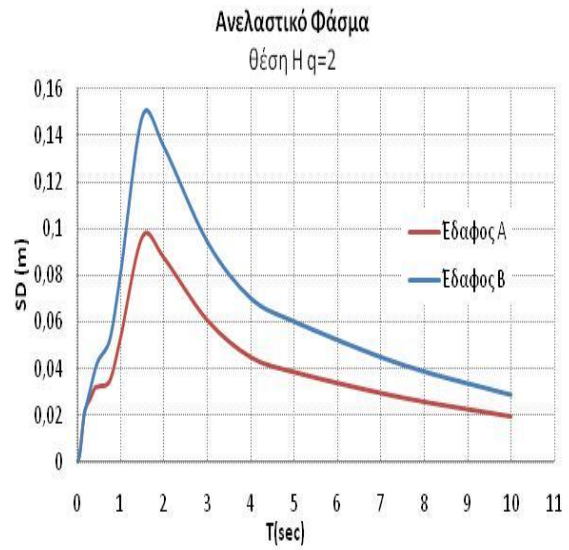
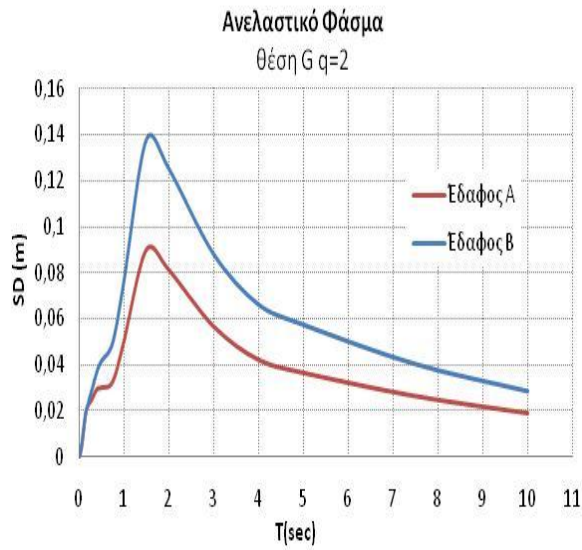
Για την παραγωγή του ανελαστικού φάσματος απόκρισης μετακινήσεων χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση του Fajfar (2003), ο οποίος απλοποιεί το μοντέλο για το δείκτη συμπεριφοράς των Vidic et al., δίνοντάς του την παρακάτω μορφή (**εξίσωση 21 κεφαλαίου 4**):

$$q = \begin{cases} c_1 \cdot (\mu - 1) \cdot \frac{T}{T_g} + 1 & \text{for } \frac{T}{T_p} \leq 1 \\ c_1 \cdot (\mu - 1) + 1 & \text{for } \frac{T}{T_p} > 1 \end{cases}$$

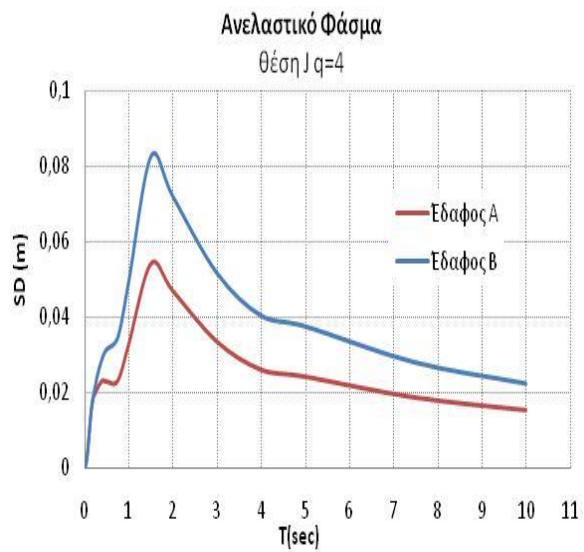
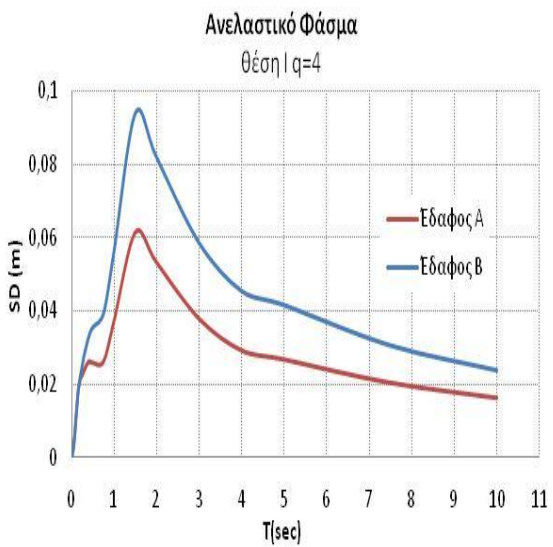
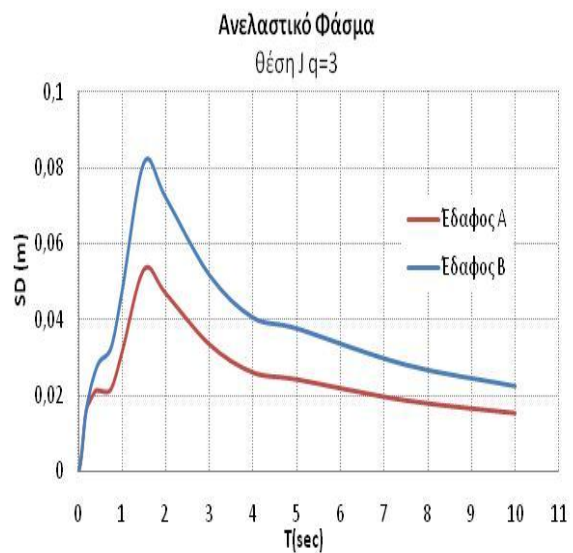
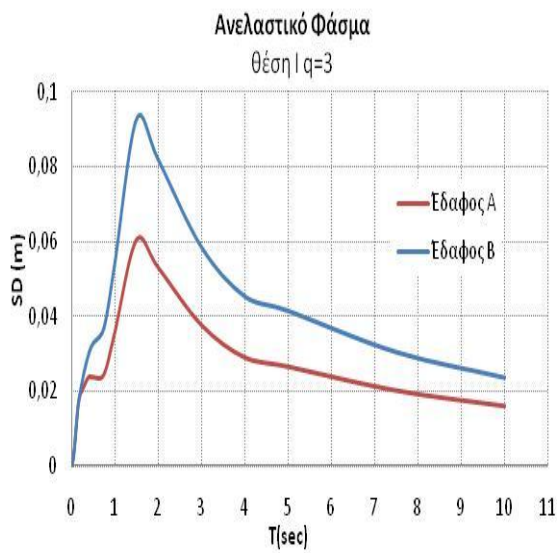
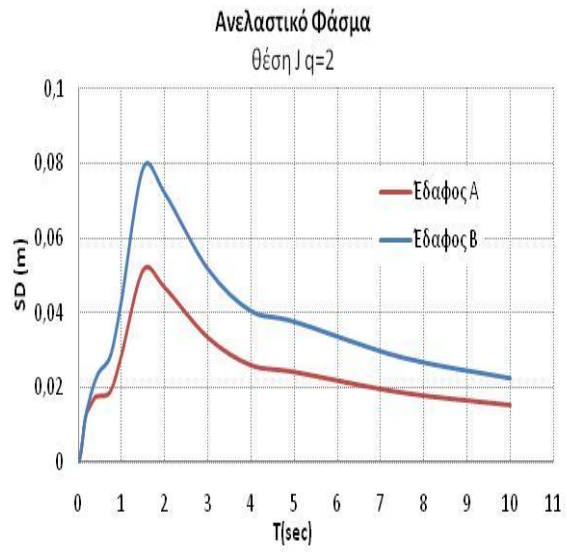
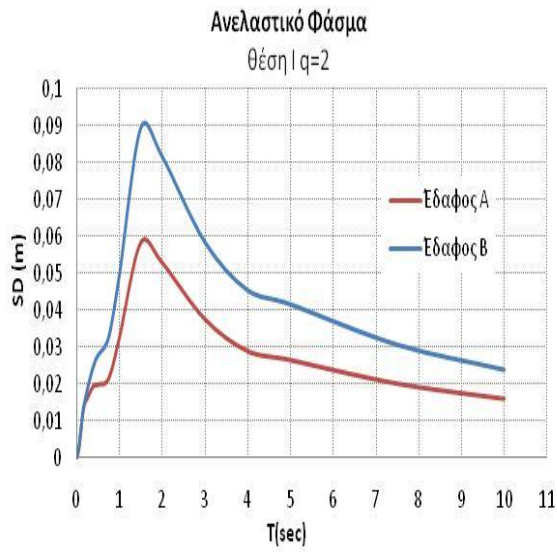
όπου  $T_p$  είναι η περίοδος του παλμού και  $c_1=1.3$  είναι ένας συντελεστής για μια πιο ακριβή εκτίμηση του παράγοντα  $q$  για συστήματα με περιορισμένη μείωση ακαμψίας και  $c_1=1$  για συστήματα με υποτυπώδη μείωση ακαμψίας ή ως συντηρητική παραδοχή συστημάτων με περιορισμένη μείωση ακαμψίας. Ως αποτέλεσμα, στην προκειμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή της περιόδου του παλμού ( $T_p=1.84\text{sec}$ ) των επτά καταγραφικών σταθμών που λήφθηκαν υπόψη και  $c_1=1$ . Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τρεις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ( $q=2, 3$  και  $4$ ) και πάλι για τις εδαφικές κατηγορίες A και B του EC8. Παρακάτω παρουσιάζονται τόσο τα ανελαστικά φάσματα για όλες τις θέσεις μελέτης και για τους δυο τύπους εδαφών όσο και σχήματα με τα ελαστικά και ανελαστικά φάσματα παράλληλα για τις θέσεις F, J και O. Τέλος, παρουσιάζονται σε αντιδιαστολή τα φάσματα επιταχύνσεων και μετακινήσεων μέσης τιμής και μέσης τιμής συν τυπική απόκλιση για τις θέσεις F, J και O. Παρατηρείται ότι οι φασματικές τιμές είναι σαφώς μεγαλύτερες στις περιπτώσεις μέσης τιμής συν τυπική απόκλιση, στις κοντινότερες θέσεις στο ρήγμα και στο έδαφος B που είναι πιο μαλακό και η επίδρασή του ενισχύει την εδαφική κίνηση.

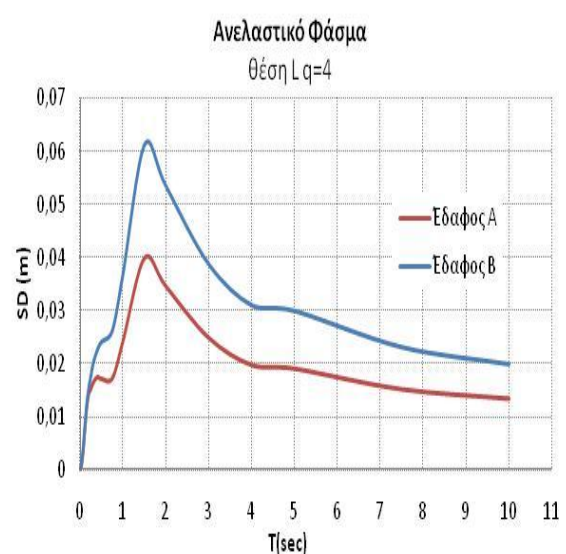
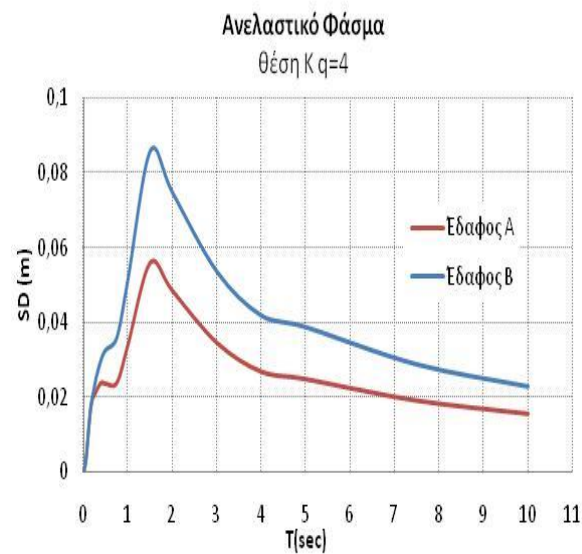
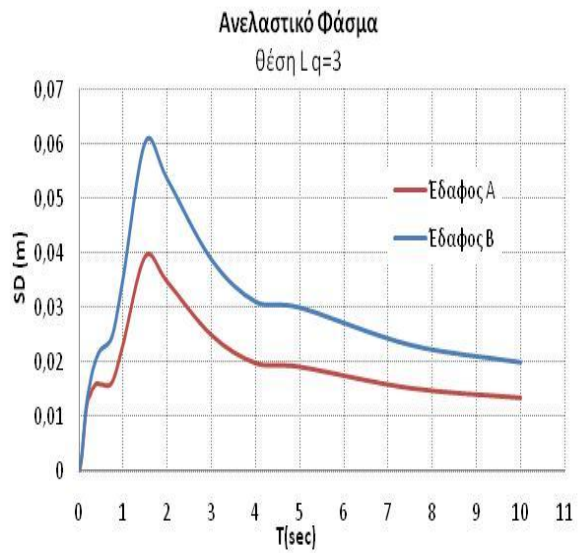
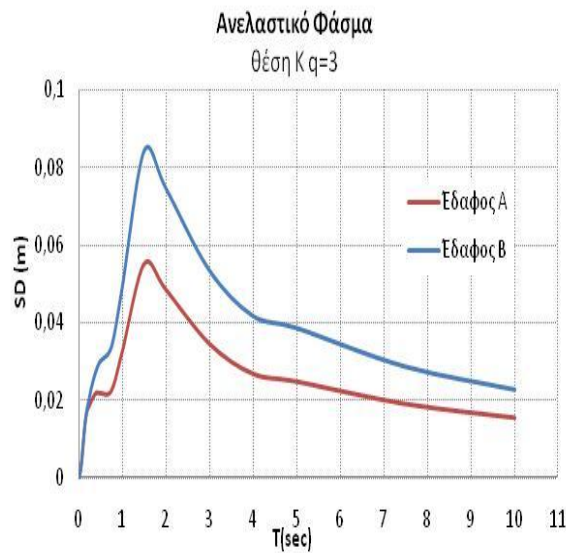
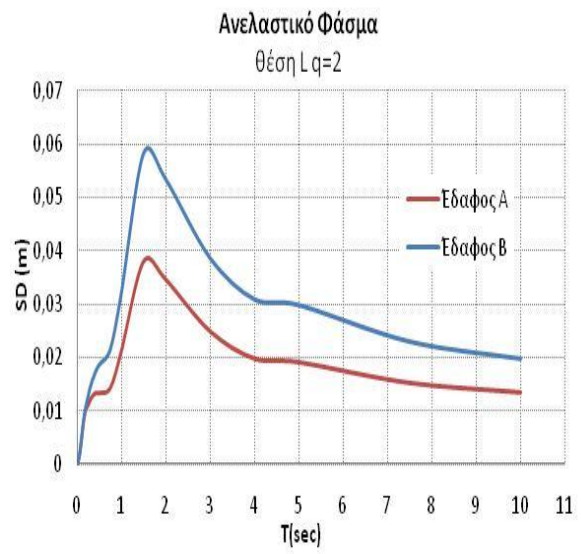
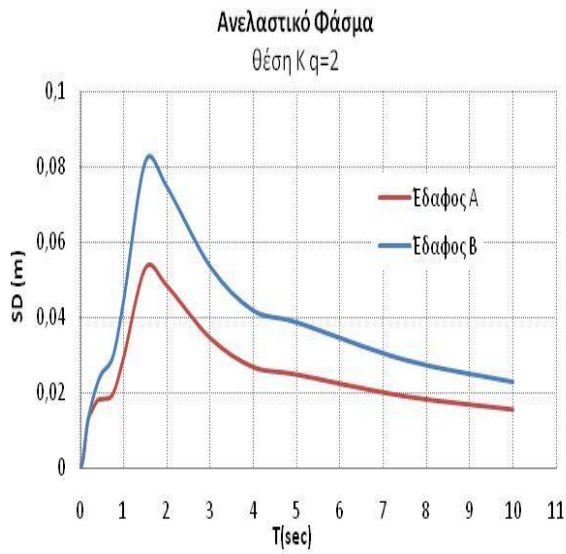


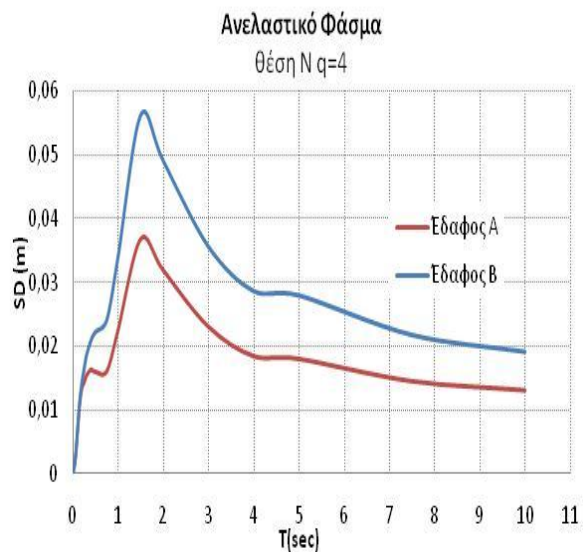
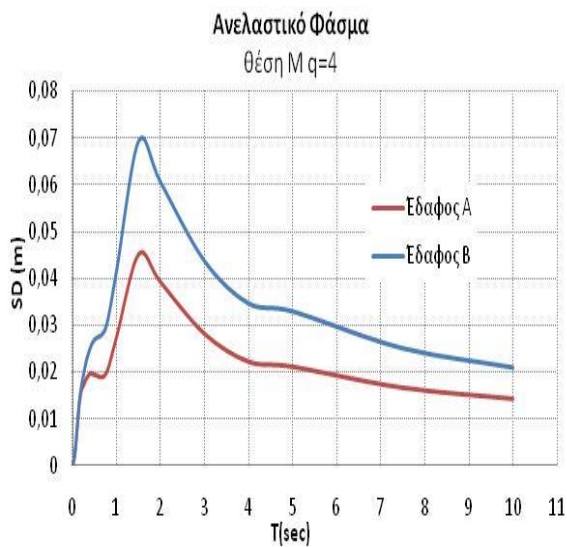
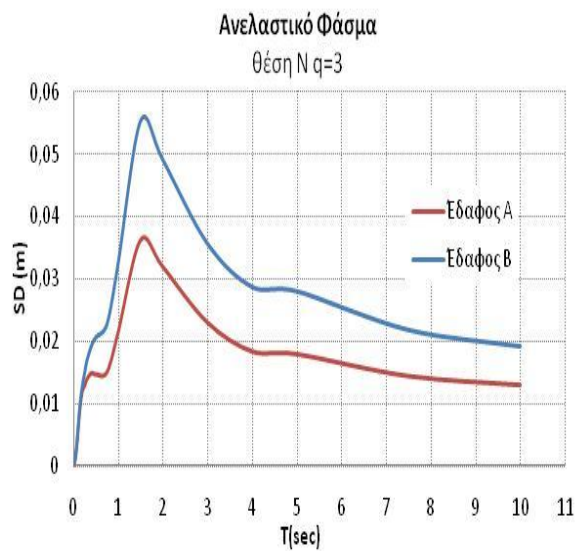
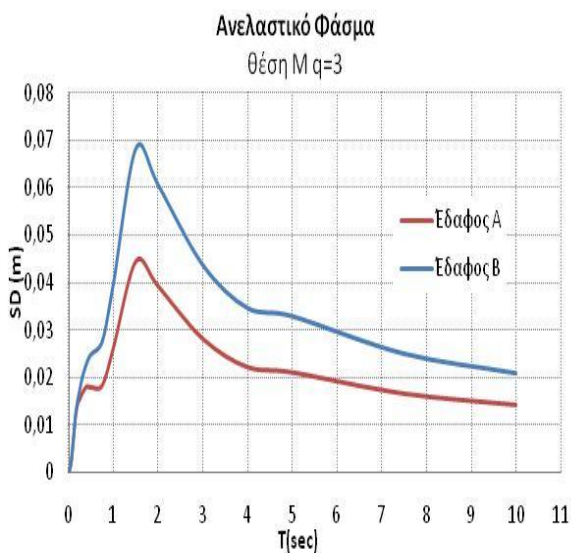
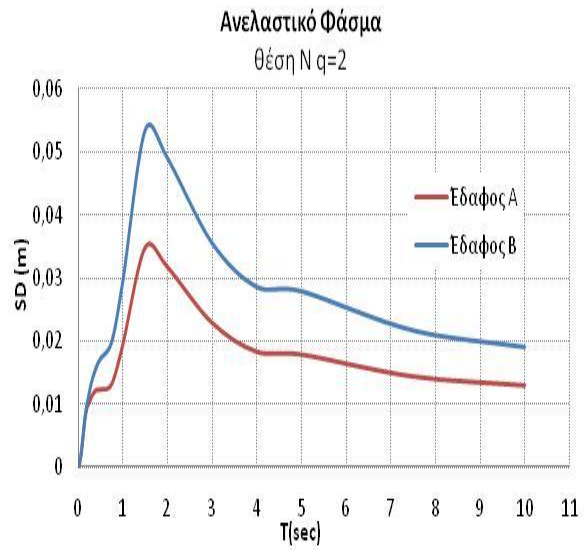
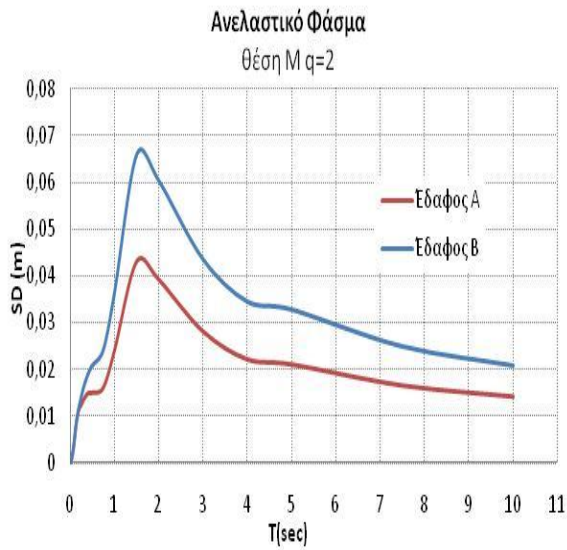




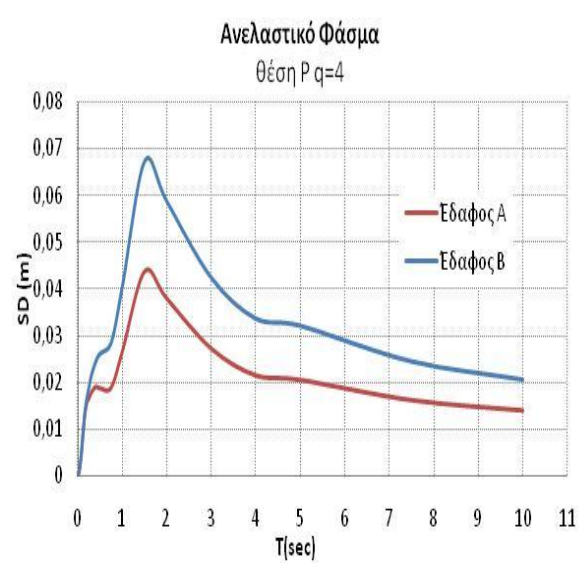
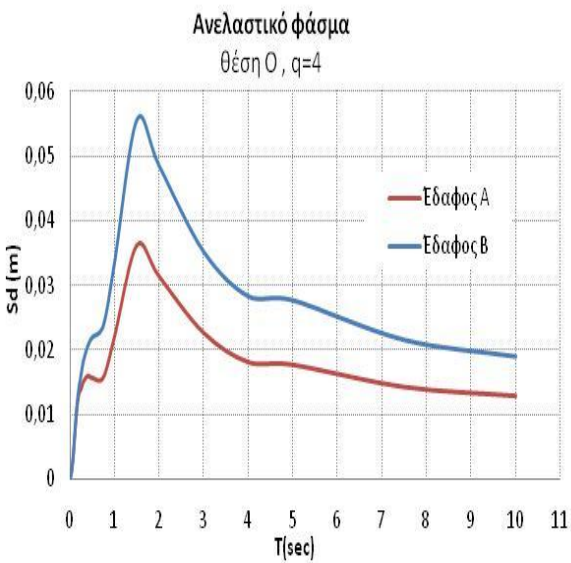
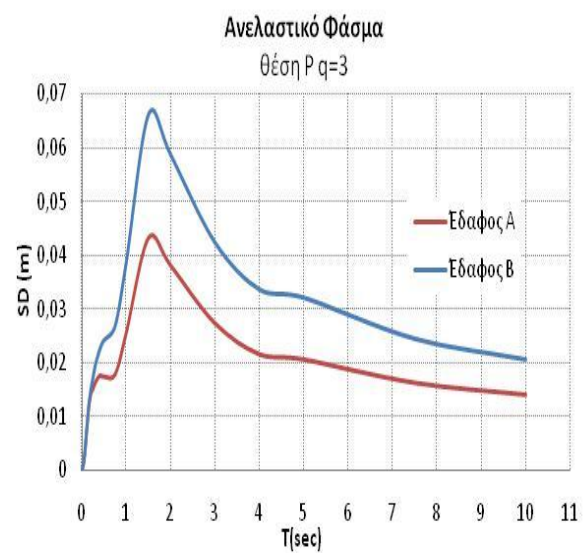
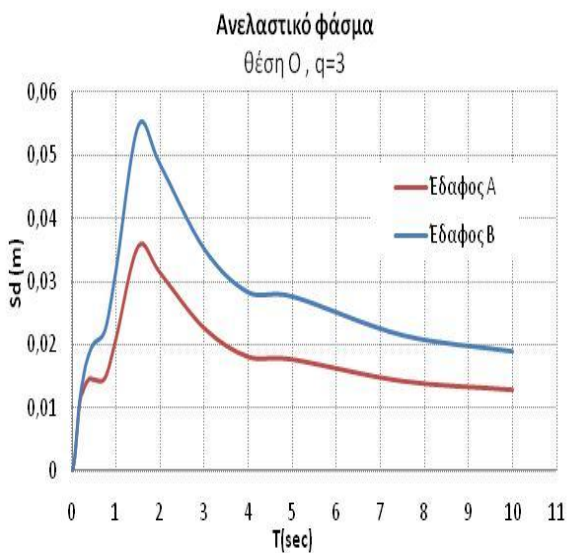
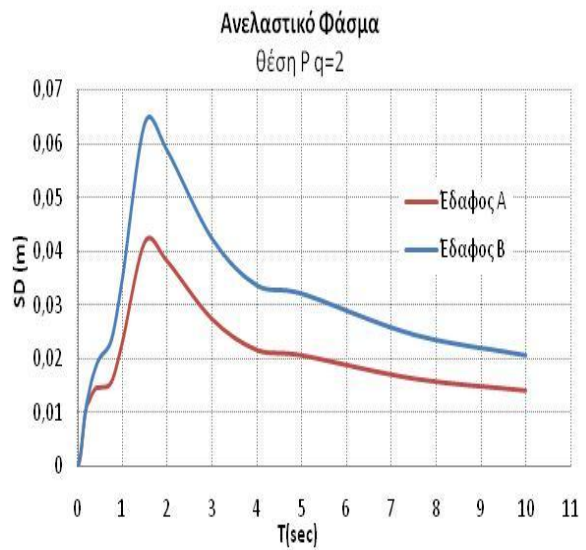
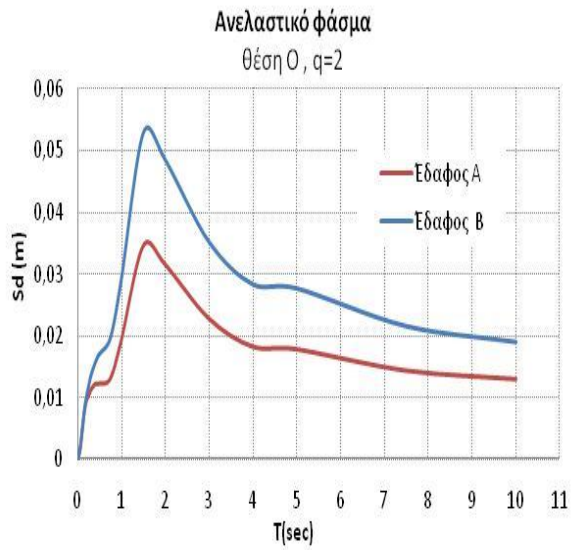


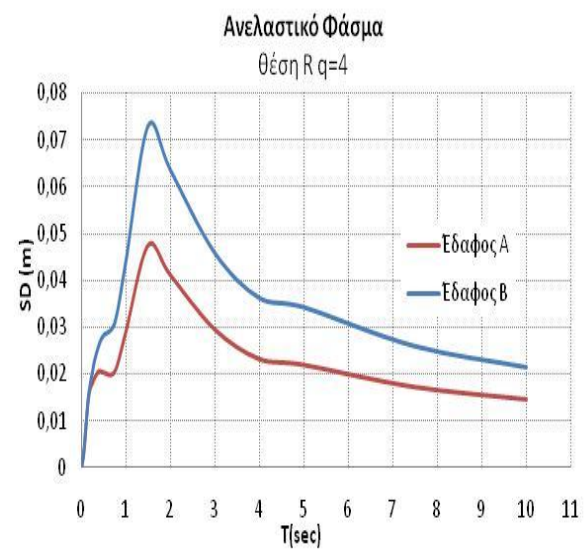
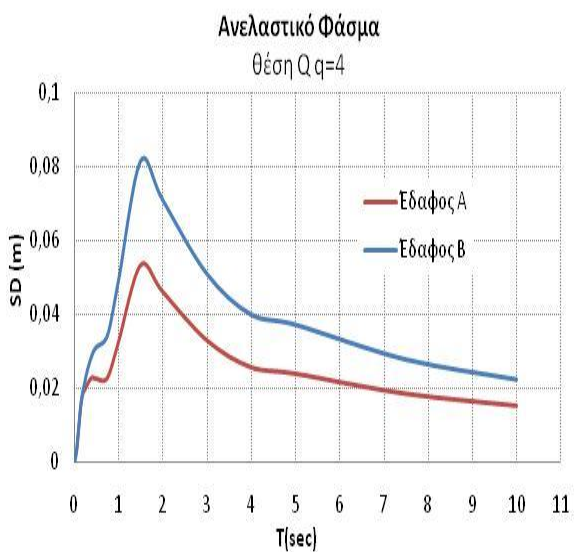
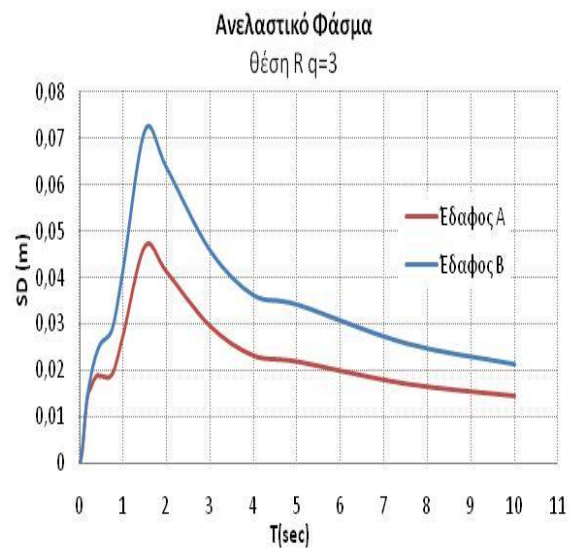
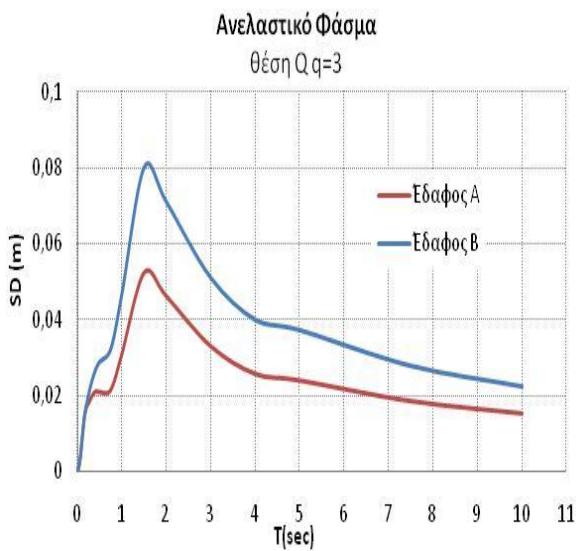
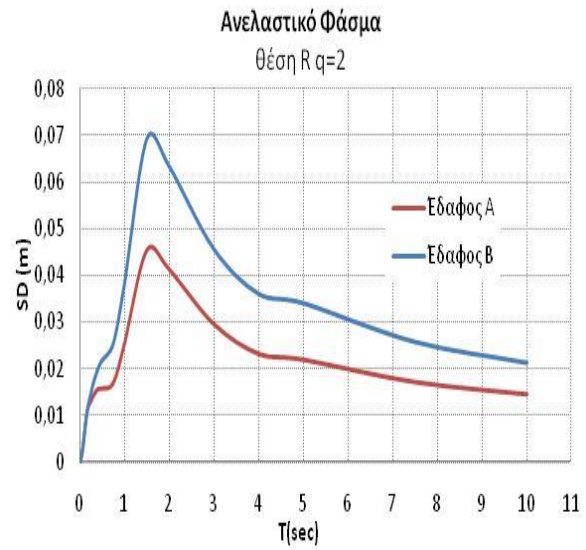
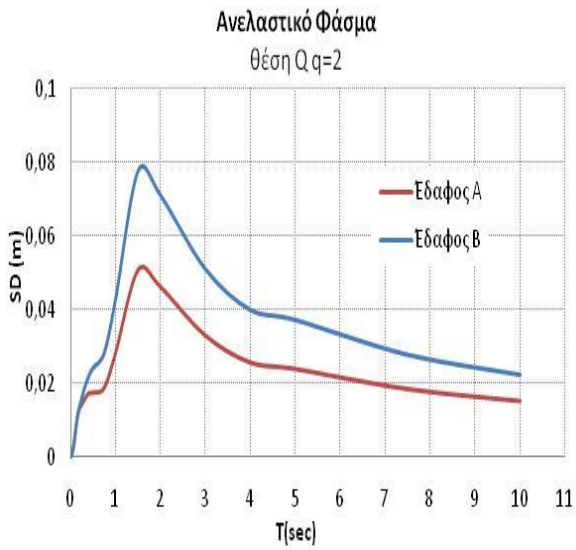


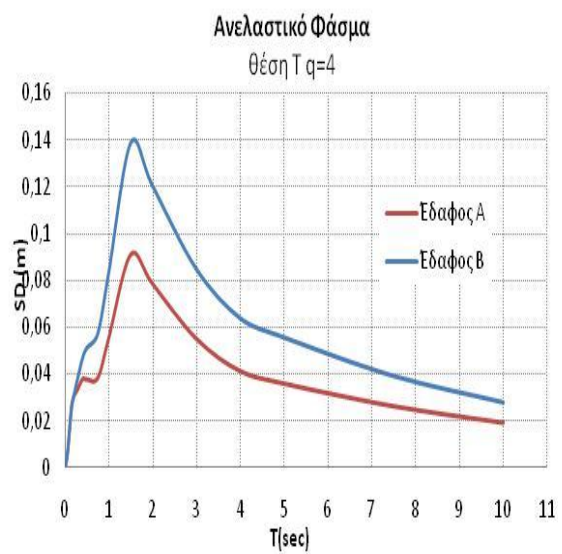
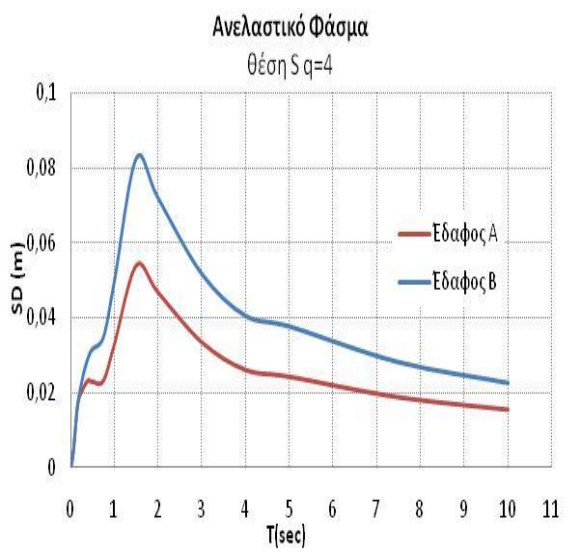
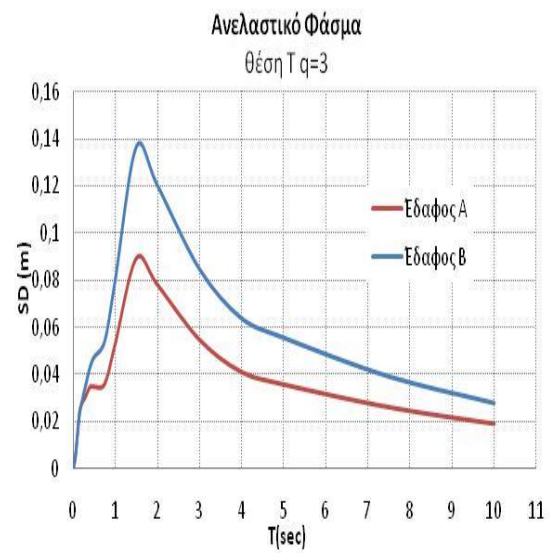
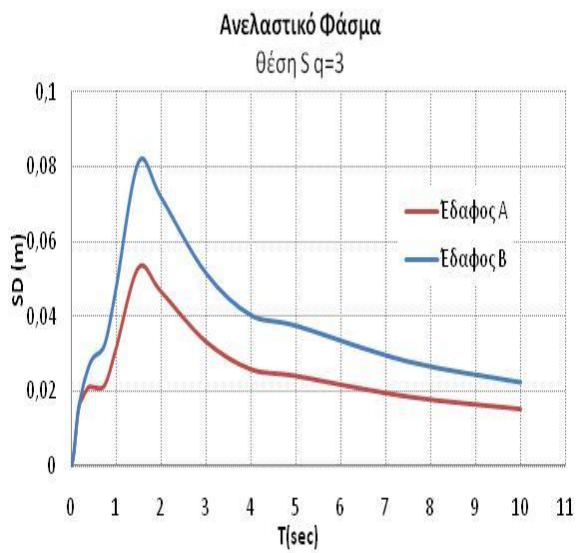
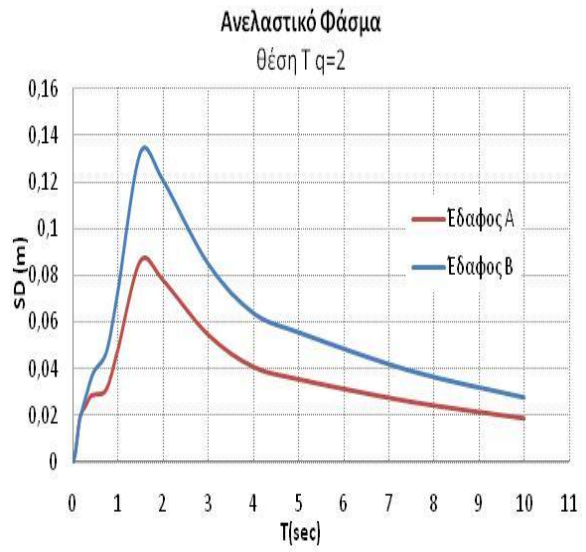
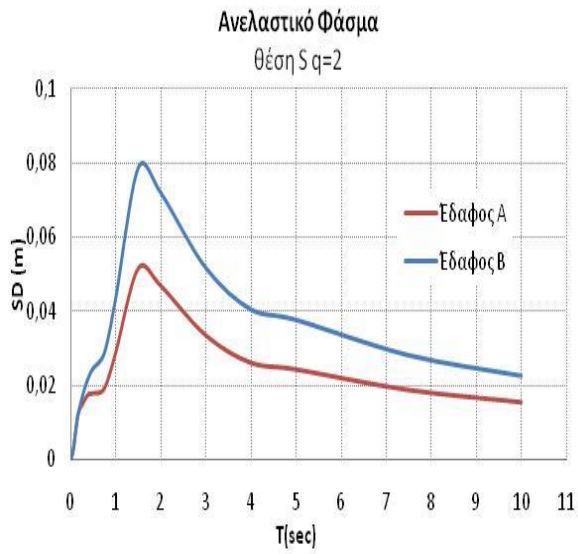




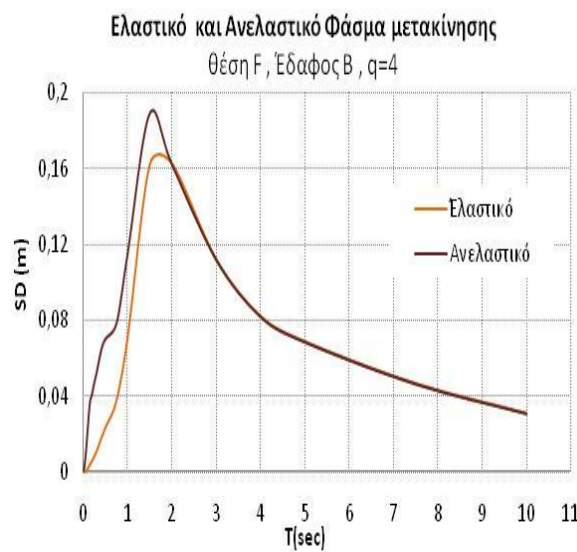
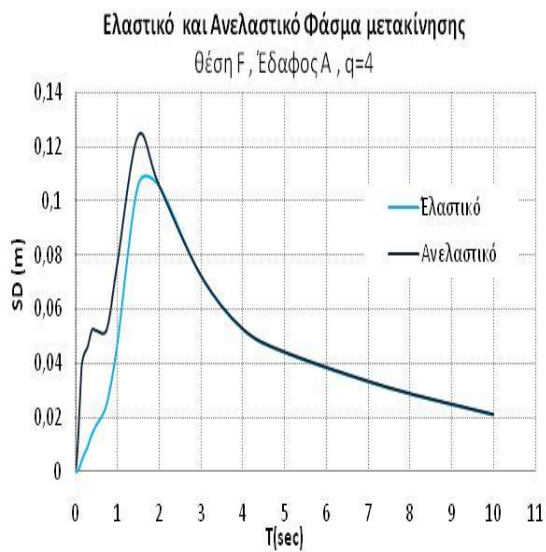
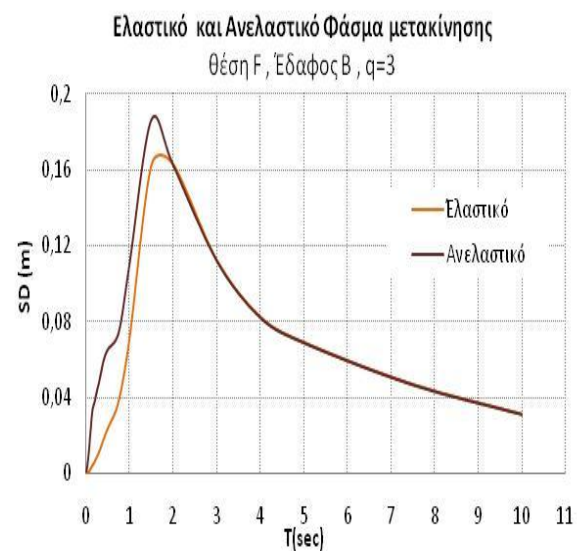
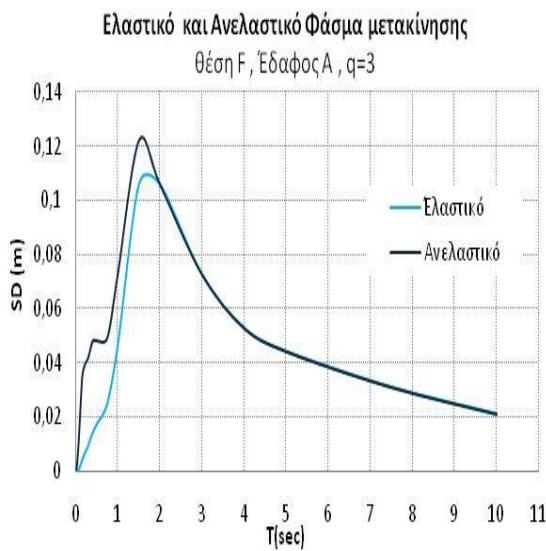
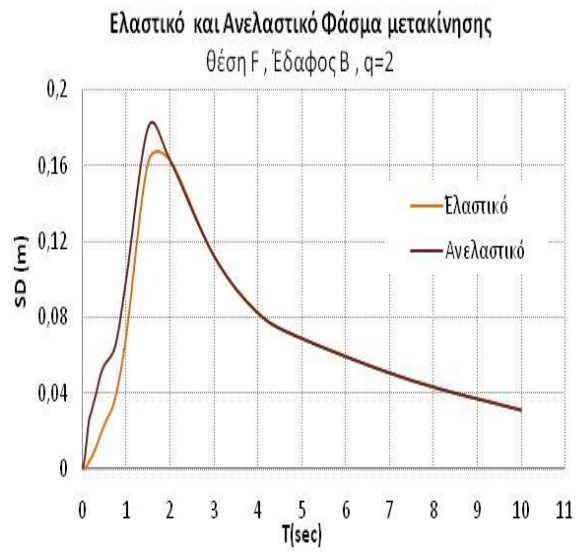
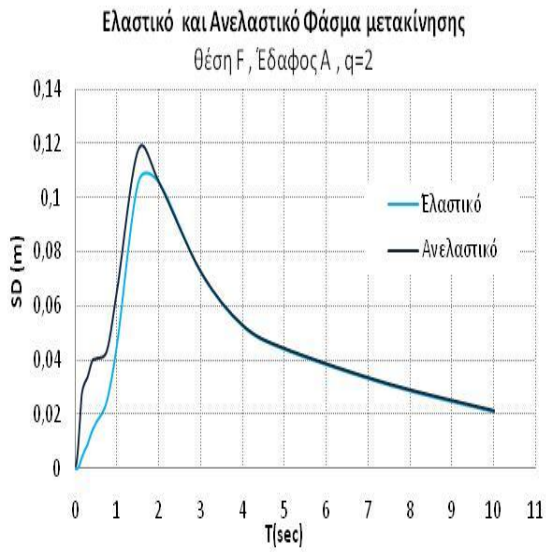


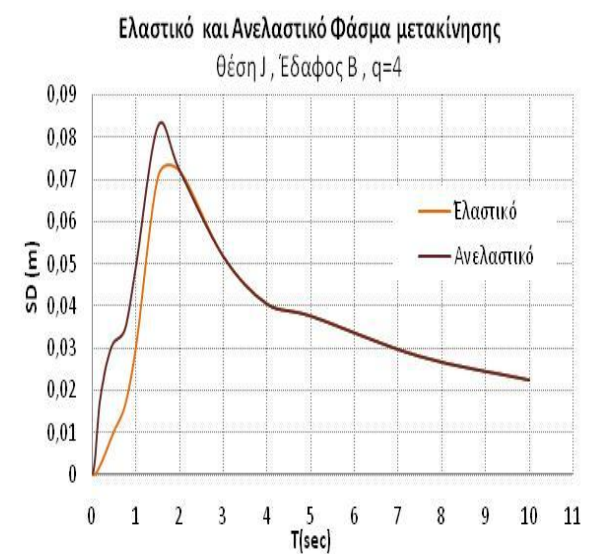
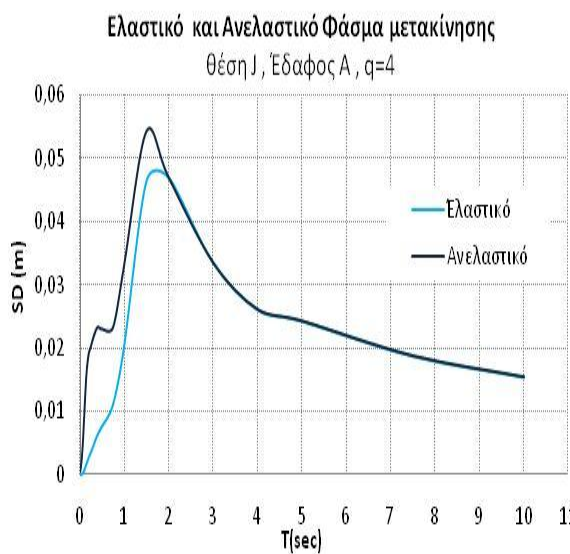
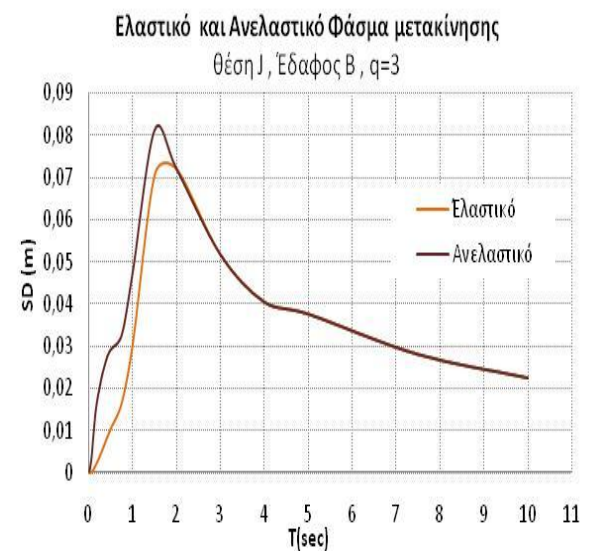
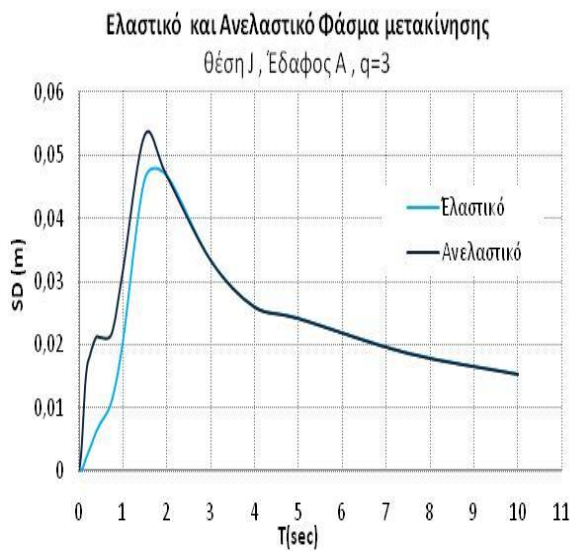
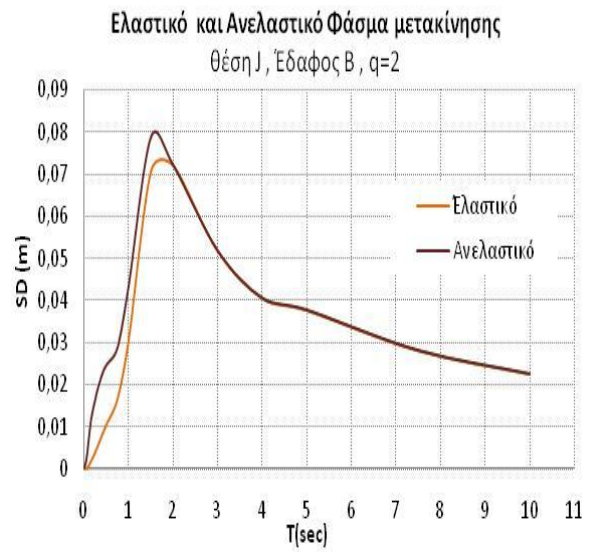
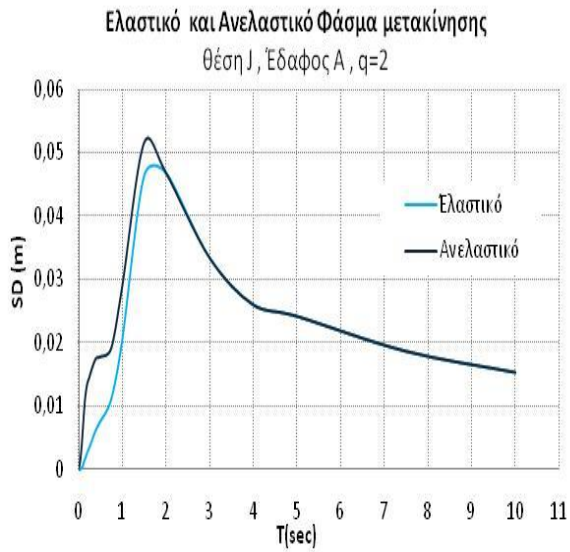


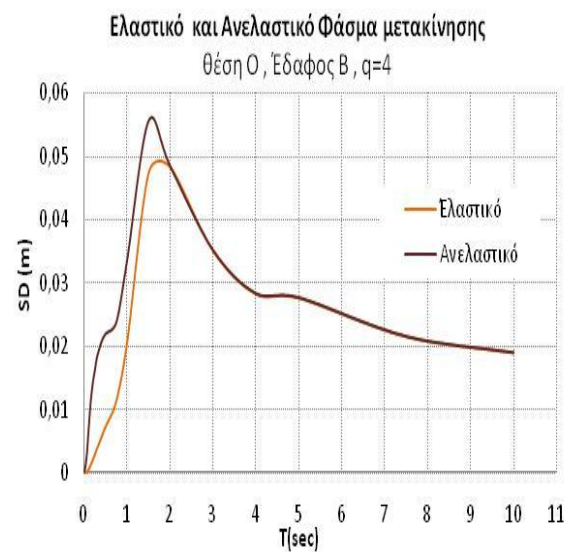
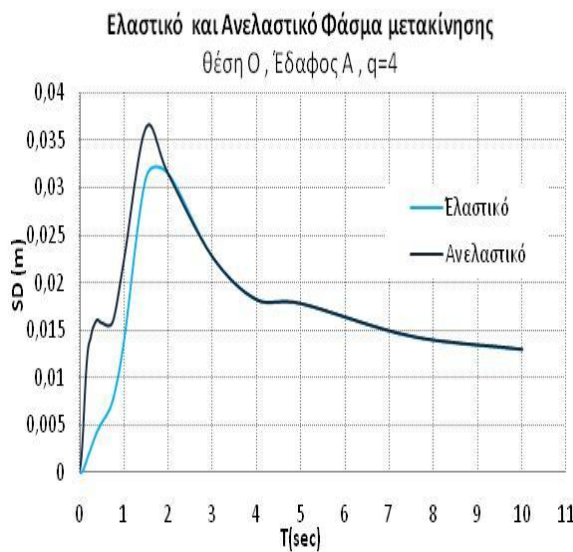
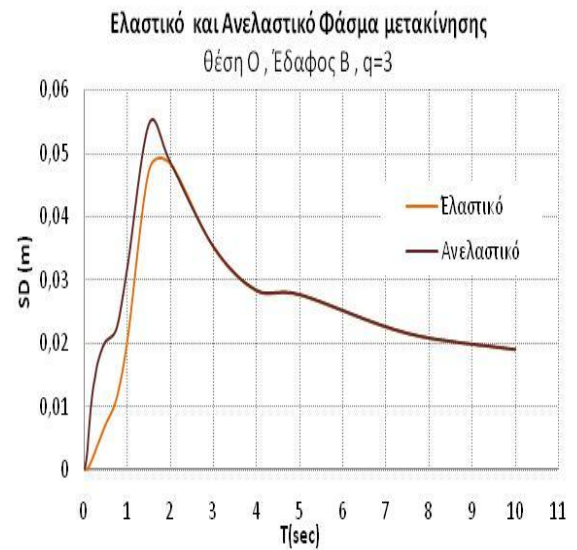
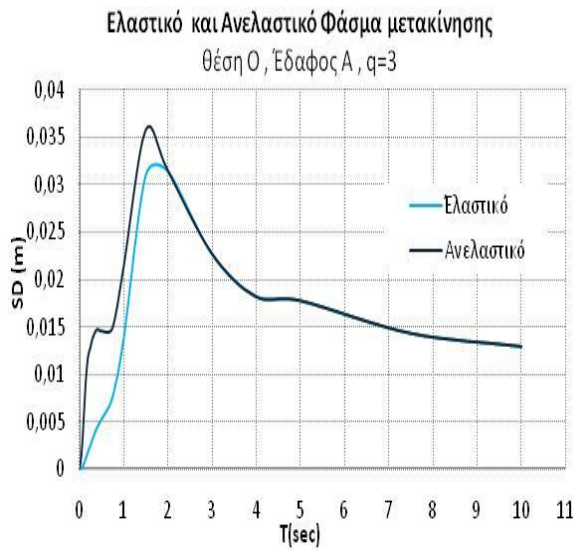
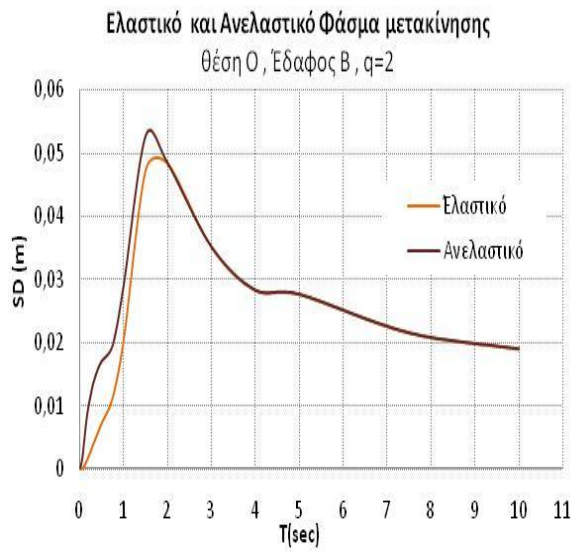
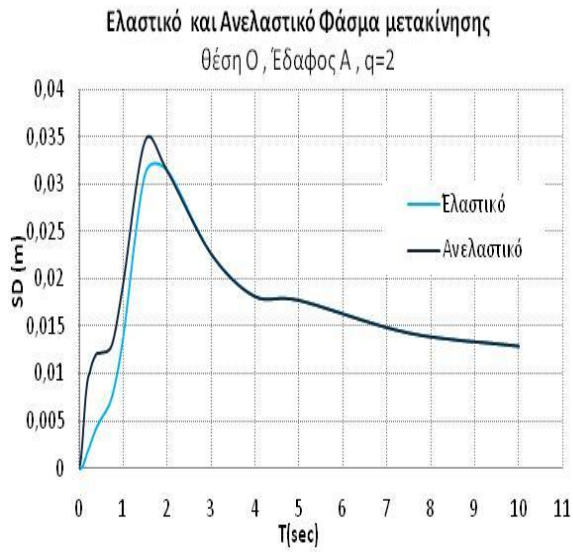




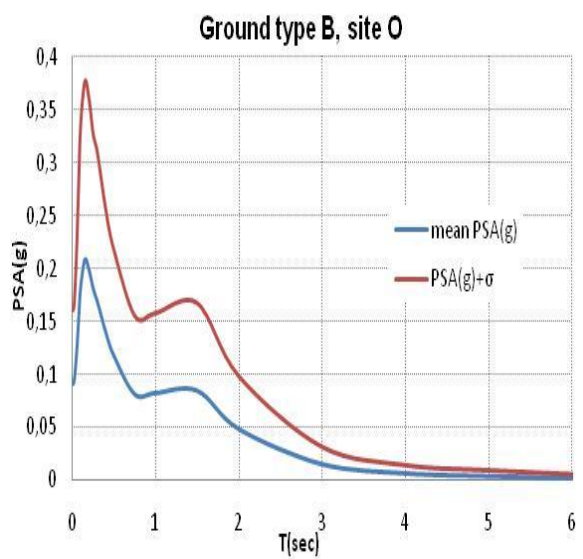
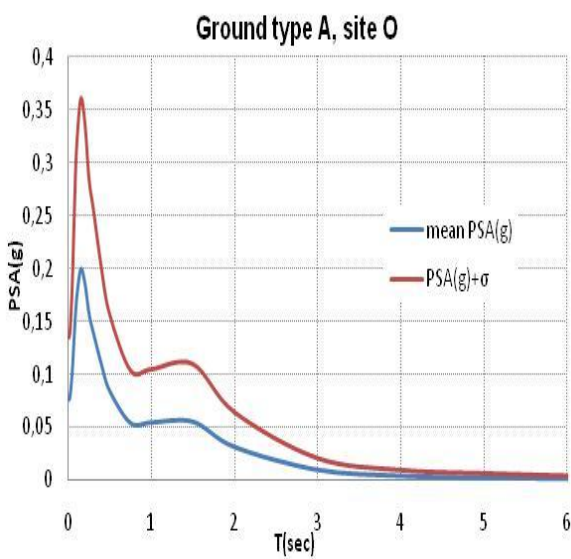
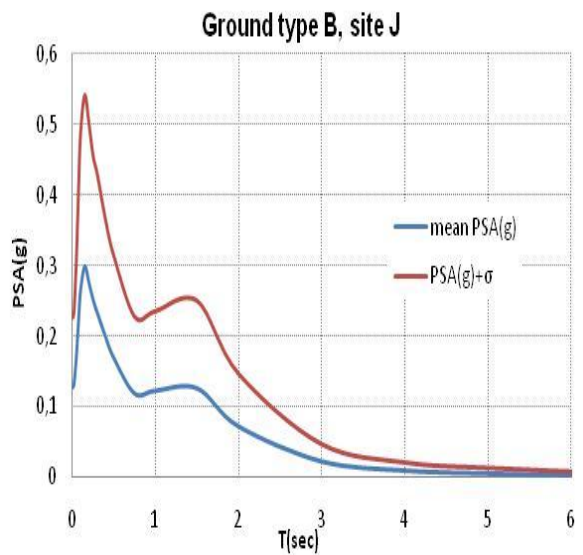
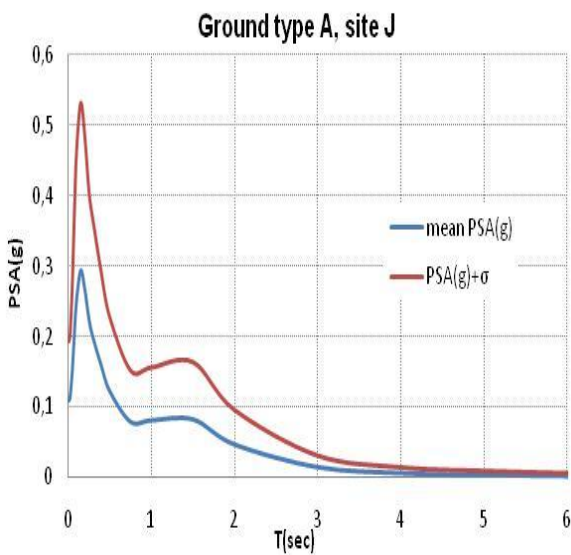
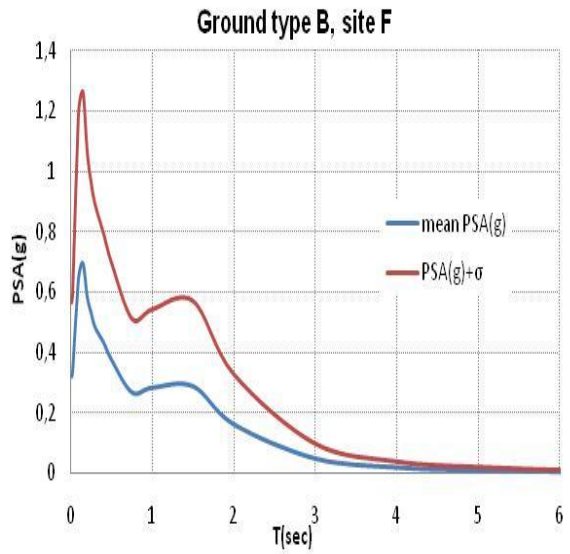
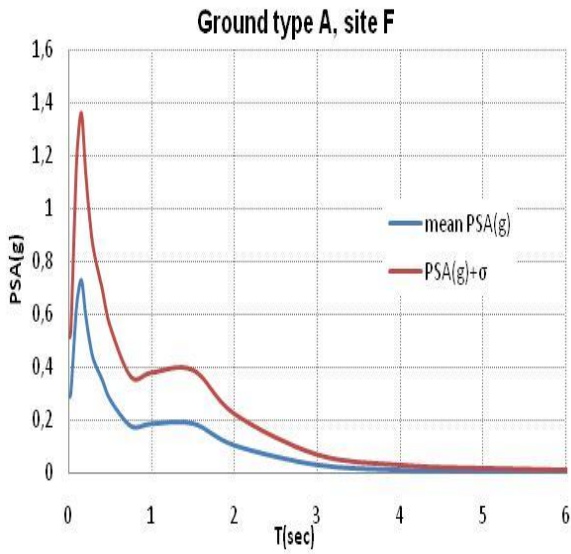


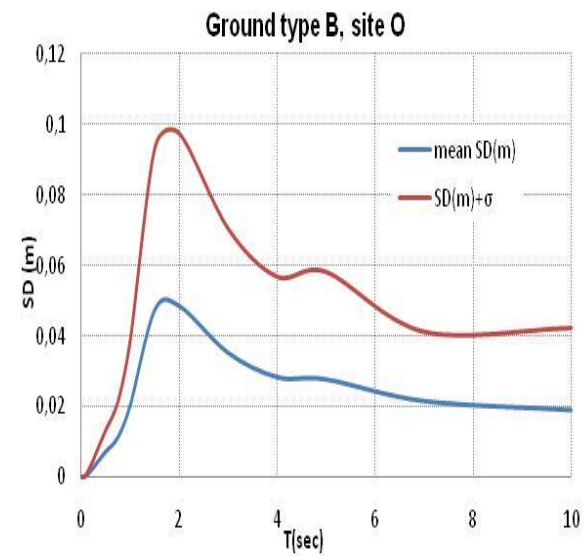
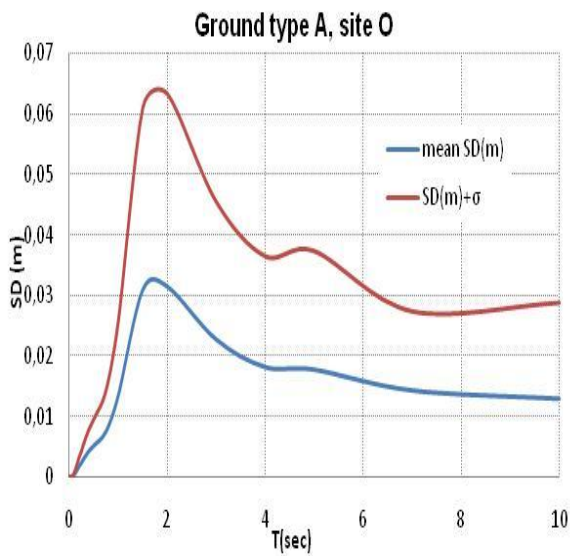
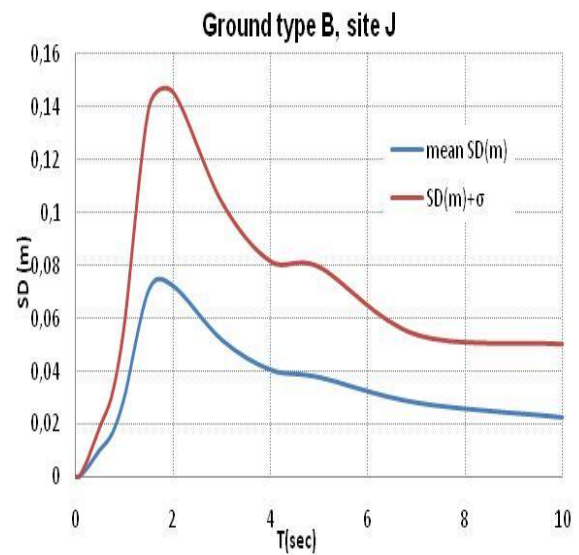
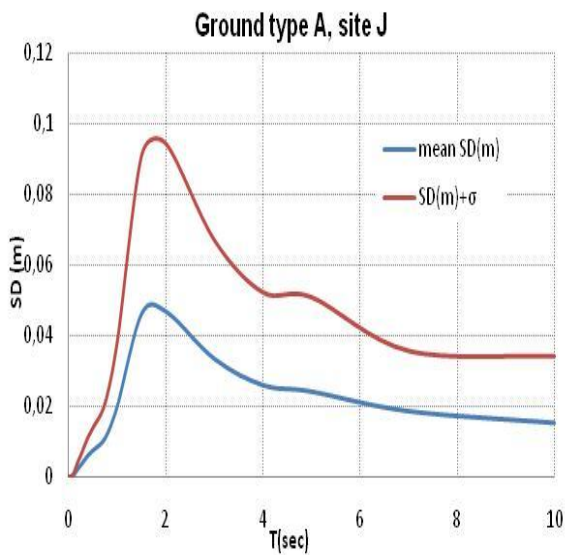
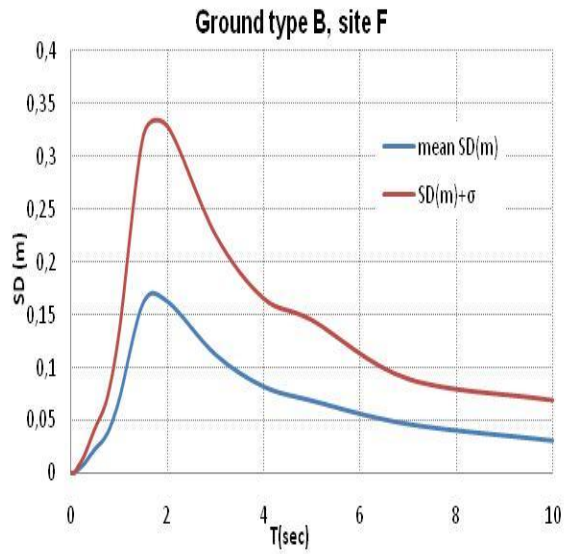
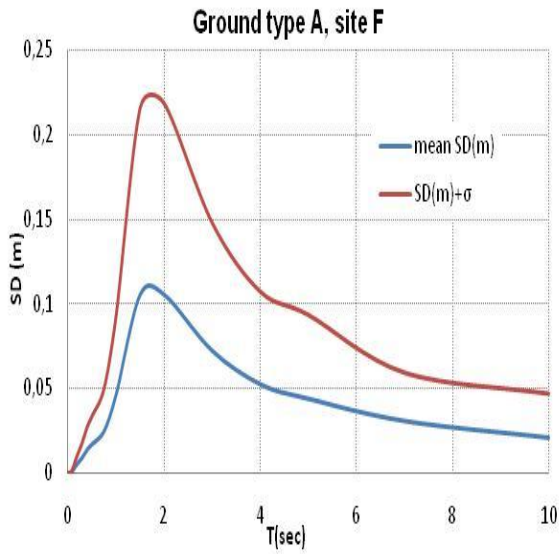










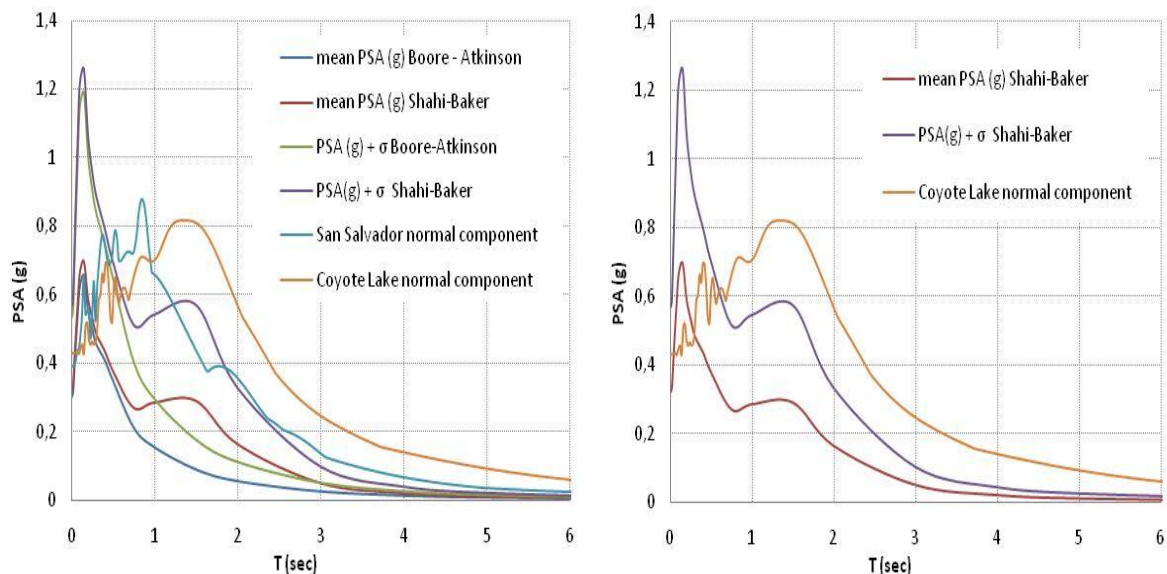


### 7.7.7 Σύγκριση με τους πραγματικούς σεισμούς

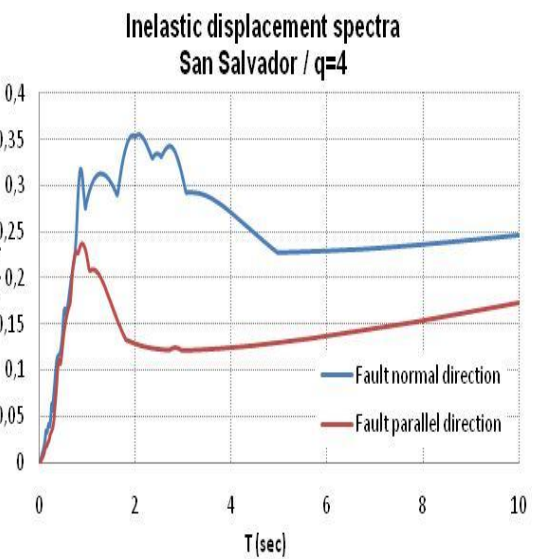
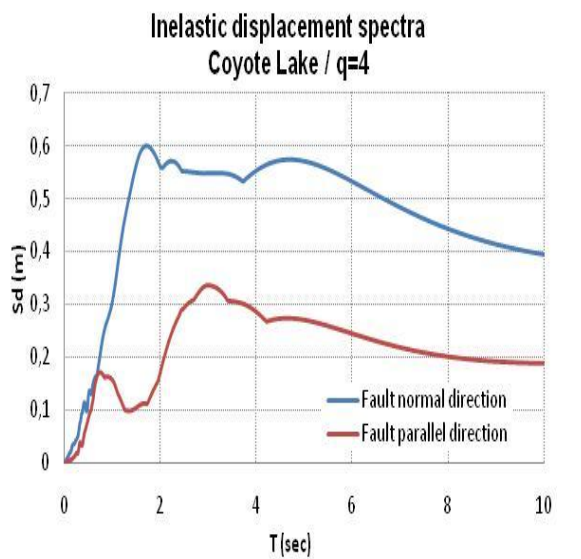
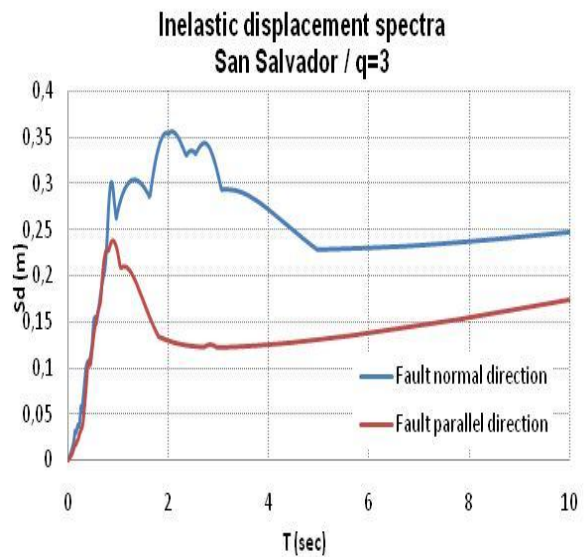
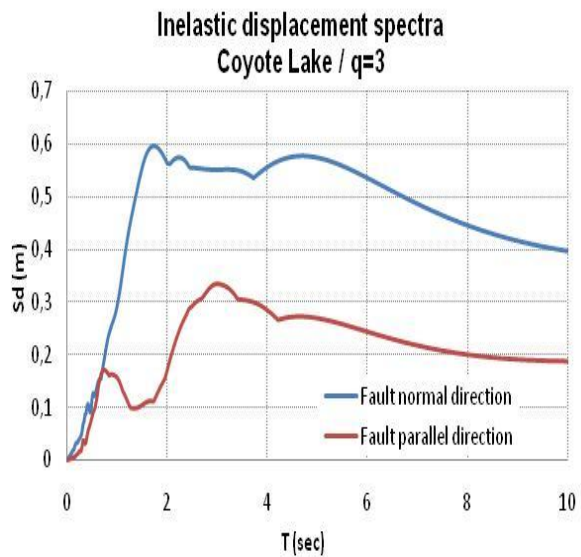
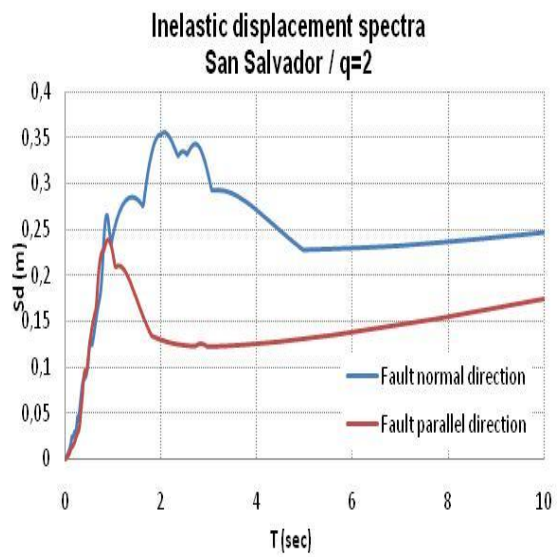
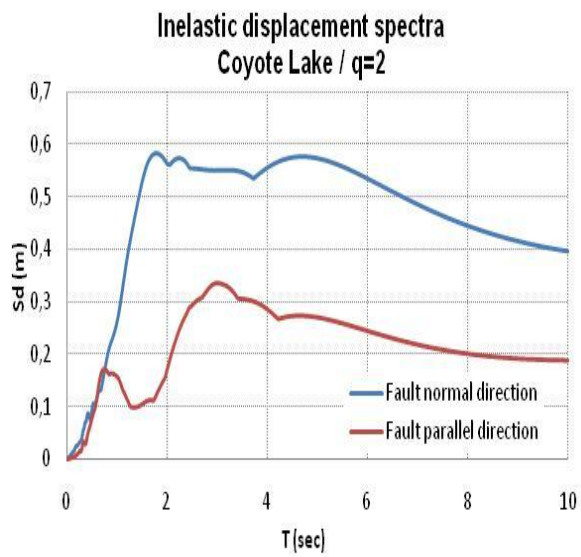
Με την ίδια διαδικασία σχηματίζονται τα φάσματα ανελαστικών μετακινήσεων για τους σεισμούς του San Salvador 1986 και του Coyote Lake 1979, στην παράλληλη και κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα και για τρεις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ( $q=2, 3$  και  $4$ ). Χρησιμοποιήθηκε περίοδος παλμού  $T_p=2\text{sec}$  και  $T_p=0.66\text{sec}$  για την κάθετη και την παράλληλη συνιστώσα καταγραφής του Coyote Lake και  $T_p=2\text{sec}$  και  $T_p=0.82\text{sec}$  για το San Salvador. Ορισμένα χαρακτηριστικά των σεισμών περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

EVENT NAME	EVENT DATE (D/M/Y)	TIME UTC/GMT	MAGNITUDE	LATITUDE (°N)	LONGITUDE (°W)	FOCAL DEPTH (km)
Coyote Lake, California	6/8/1979	17:05	Mw=5.7	37.11	-121.52	10
San Salvador	10/10/1986	17:49:24	Ms=5.4	13.829	89.126	7

Από το παρακάτω σχήμα παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας του σεισμού στο Coyote Lake βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτά της μέσης τιμής συν τυπική απόκλιση. Όσον αφορά τις φασματικές τιμές της κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας, και αυτές του σεισμού του San Salvador βρίσκονται πολύ κοντά σ' αυτές των Shahi – Baker για τη δυσμενέστερη θέση F αλλά τα μέγιστα δεν παρουσιάζονται στην ίδια θέση λόγω διαφορετικού συχνοτικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης. Στο Coyote Lake η περίοδος του παλμού βρίσκεται πιο κοντά στη μέση τιμή περιόδων παλμού που χρησιμοποιήθηκε για τις διάφορες καταγραφές του σεισμού της Αθήνας.







### 7.7.8 Καμπύλες τρωτότητας σύμφωνα με τους Rossetto και Elnashai

Οι Rossetto και Elnashai (2003) παρήγαγαν νέες εμπειρικές καμπύλες τρωτότητας για ευρωπαϊκά κτήρια οπλισμένου σκυροδέματος διαφόρων τύπων, βασιζόμενοι σε 99 παρατηρήσεις πεδίου που προέκυψαν από 19 σεισμικά γεγονότα, λαμβάνοντας υπόψη 340000 κατασκευές συνολικά. Οι ερευνητές προτείνουν μια νέα καμπύλη βλαβών στηριζόμενοι στην παράμετρο σχετικής μετακίνησης μεταξύ των ορόφων για κατασκευές με διαφορετική αντίσταση στα σεισμικά φορτία. Τελικά, παράγεται μια ομοιογενής και γενική καμπύλη τρωτότητας για όλους τους τύπους κατασκευών.

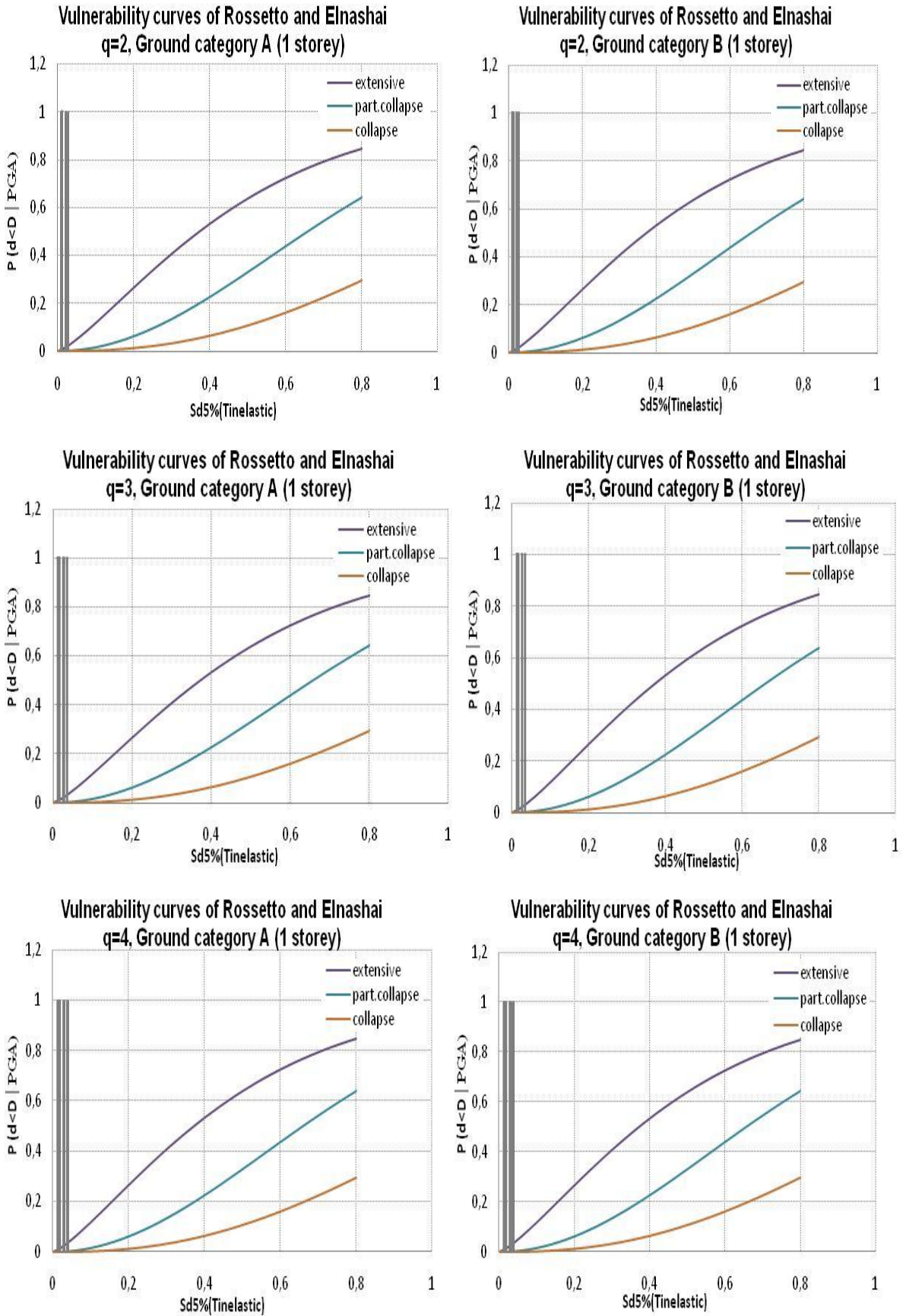
Η χαρακτηριστική περίοδος κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος του EC8 δίνεται από τον τύπο **(εξίσωση [1] κεφαλαίου 4)**:

$$T = c_t \cdot H^{3/4}$$

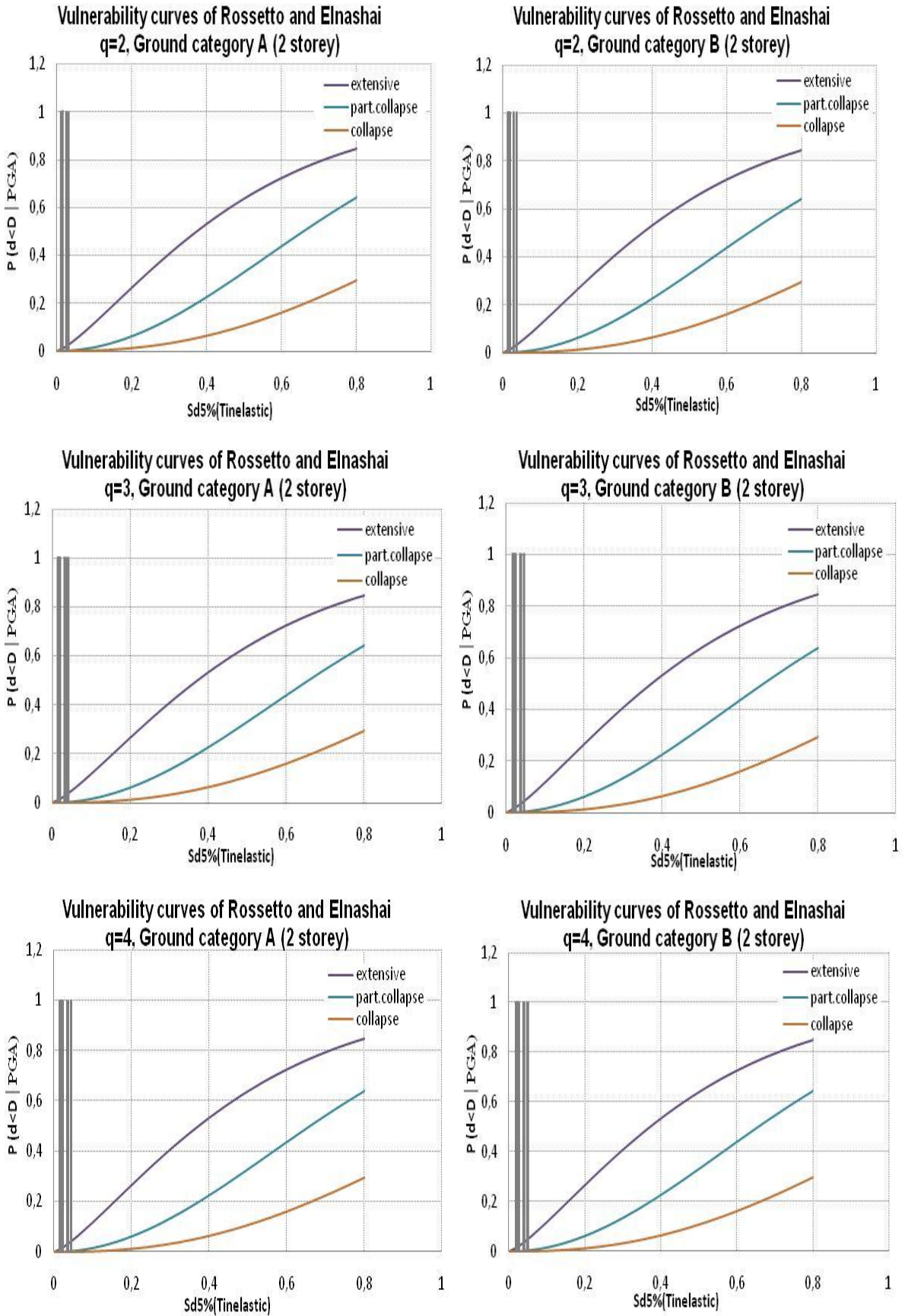
Πολλοί μελετητές ακολουθώντας τον EC8 θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν  $c_t=0.075$  στην εξίσωση για όλες τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ανεξαρτήτως της μορφής και του υλικού των τοιχοπληρώσεων. Για το λόγο αυτό, θεωρώντας ότι πολλές κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος στην Ευρώπη κατασκευάζονται με πολύ δύσκαμπτες τοιχοποιίες οι οποίες συχνά λειτουργούν ανεξάρτητα από τον υπόλοιπο φέροντα οργανισμό, η περίοδος ταλάντωσης υπερεκτιμάται και η τέμνουσα βάσης υποεκτιμάται.

Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε  $c_t=0.075$  και ύψη ορόφων  $H=3, 6, 9$  και  $12m$  αντίστοιχα για 1, 2, 3 και 4 ορόφους. Έτσι προέκυψαν τιμές περιόδων  $T_1=0.17$ ,  $T_2=0.2875$ ,  $T_3=0.3897$  και  $T_4=0.4836$ . Ακολούθως, από τα ανελαστικά φάσματα μετακίνησης εξάχθηκαν οι τιμές μετακίνησης που αντιστοιχούν σε κτήρια ενός, δυο, τριών και τεσσάρων ορόφων. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται οι ανελαστικές καμπύλες τρωτότητας μαζί με τις ανελαστικές μετακινήσεις για τις τέσσερις κατηγορίες κτηρίων που διαφέρουν ως προς το ύψος, για τρεις διαφορετικές τιμές του δείκτη συμπεριφοράς ( $q=2, 3$  και  $4$ ) και για δυο κατηγορίες εδαφών A και B του EC8. Επίσης, παρουσιάζονται οι ελαστικές καμπύλες τρωτότητας με τις ελαστικές μετακινήσεις και τέλος με τις ελαστικές μετακινήσεις λαμβάνοντας υπόψη και την τυπική απόκλιση. Παράλληλα δίνονται και οι αντίστοιχοι πίνακες με τις πιθανότητες υπέρβασης των διαφόρων σταθμών επιτελεστικότητας.

**Ανελαστικές καμπύλες με ανελαστικές μετακινήσεις (1 όροφος)**

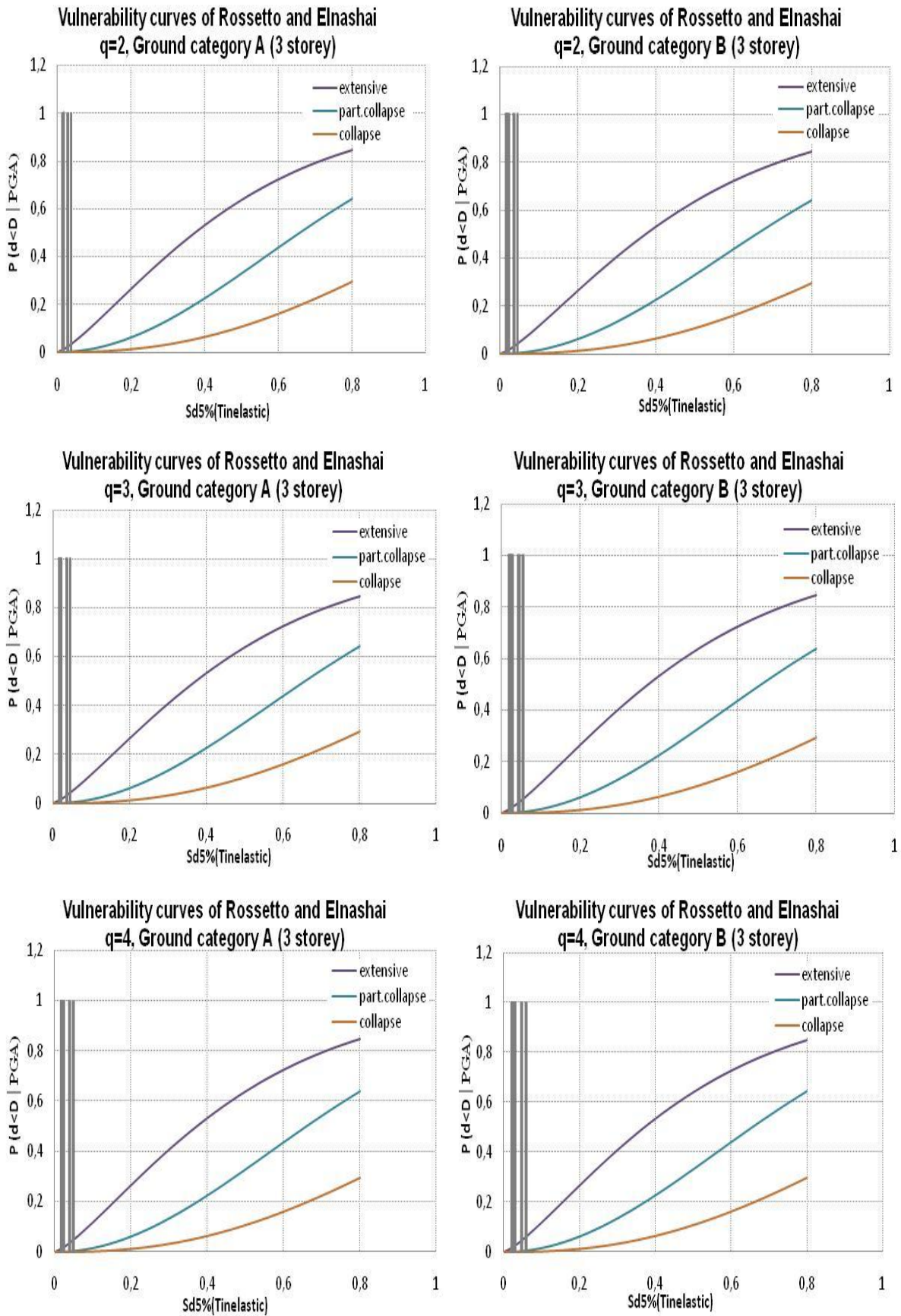


**Ανελαστικές καμπύλες με ανελαστικές μετακινήσεις (2 όροφοι)**

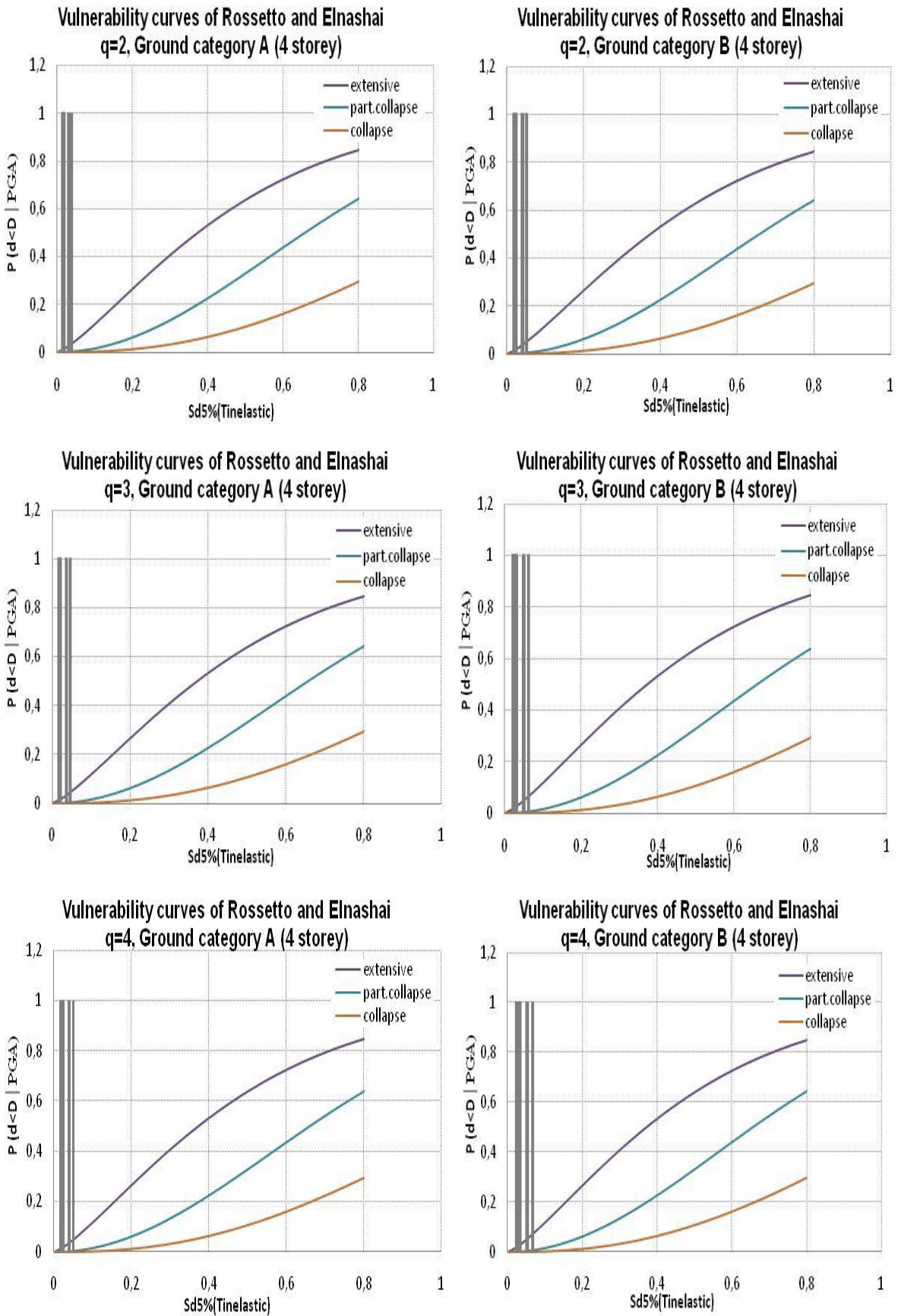




**Ανελαστικές καμπύλες με ανελαστικές μετακινήσεις (3 όροφοι)**



**Ανελαστικές καμπύλες με ανελαστικές μετακινήσεις (4 όροφοι)**





ΕΔΑΦΟΣ Α (1 όροφος)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.00464	0.06758	0.03283	0.01337	0.00277	0.00005	0.00001
F	0.00503	0.07372	0.03616	0.01469	0.00308	0.00006	0.00001
G	0.00362	0.05182	0.02446	0.01006	0.00201	0.00003	0.00000
H	0.00392	0.05655	0.02694	0.01105	0.00223	0.00004	0.00000
I	0.00240	0.03339	0.01505	0.00630	0.00118	0.00001	0.00000
J	0.00214	0.02946	0.01312	0.00552	0.00102	0.00001	0.00000
K	0.00221	0.03045	0.01360	0.00572	0.00106	0.00001	0.00000
L	0.00162	0.02180	0.00942	0.00402	0.00071	0.00001	0.00000
M	0.00182	0.02469	0.01080	0.00458	0.00082	0.00001	0.00000
N	0.00150	0.01995	0.00855	0.00366	0.00064	0.00001	0.00000
O	0.00148	0.01970	0.00843	0.00361	0.00063	0.00001	0.00000
P	0.00177	0.02394	0.01044	0.00443	0.00079	0.00001	0.00000
Q	0.00211	0.02896	0.01287	0.00542	0.00100	0.00001	0.00000
R	0.00190	0.02592	0.01140	0.00482	0.00087	0.00001	0.00000
S	0.00213	0.02936	0.01307	0.00550	0.00101	0.00001	0.00000
T	0.00348	0.04974	0.02337	0.00963	0.00191	0.00003	0.00000

ΕΔΑΦΟΣ Β (1 όροφος)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.00451	0.06557	0.03175	0.01295	0.00267	0.00005	0.00000
F	0.00486	0.07106	0.03471	0.01412	0.00295	0.00006	0.00001
G	0.00358	0.05131	0.02419	0.00996	0.00198	0.00003	0.00000
H	0.00386	0.05562	0.02645	0.01085	0.00219	0.00004	0.00000
I	0.00246	0.03418	0.01545	0.00646	0.00121	0.00002	0.00000
J	0.00221	0.03045	0.01360	0.00572	0.00106	0.00001	0.00000
K	0.00227	0.03140	0.01407	0.00591	0.00110	0.00001	0.00000
L	0.00171	0.02306	0.01002	0.00426	0.00076	0.00001	0.00000
M	0.00190	0.02587	0.01137	0.00481	0.00087	0.00001	0.00000
N	0.00159	0.02125	0.00916	0.00391	0.00069	0.00001	0.00000
O	0.00157	0.02100	0.00904	0.00386	0.00068	0.00001	0.00000
P	0.00185	0.02514	0.01102	0.00467	0.00084	0.00001	0.00000
Q	0.00218	0.02998	0.01337	0.00562	0.00104	0.00001	0.00000
R	0.00198	0.02706	0.01195	0.00505	0.00092	0.00001	0.00000
S	0.00220	0.03036	0.01356	0.00570	0.00105	0.00001	0.00000
T	0.00346	0.04940	0.02320	0.00956	0.00189	0.00003	0.00000

ΕΔΑΦΟΣ Α (2 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.00857	0.12851	0.06740	0.02693	0.00615	0.00018	0.00002
F	0.00917	0.13767	0.07285	0.02906	0.00671	0.00021	0.00003
G	0.00689	0.10249	0.05225	0.02100	0.00463	0.00012	0.00001
H	0.00742	0.11064	0.05694	0.02283	0.00510	0.00014	0.00002
I	0.00471	0.06869	0.03343	0.01361	0.00283	0.00006	0.00001
J	0.00422	0.06118	0.02940	0.01202	0.00245	0.00004	0.00000
K	0.00435	0.06308	0.03041	0.01242	0.00255	0.00005	0.00000
L	0.00325	0.04629	0.02159	0.00892	0.00175	0.00003	0.00000
M	0.00362	0.05194	0.02452	0.01009	0.00201	0.00003	0.00000
N	0.00302	0.04267	0.01973	0.00818	0.00159	0.00002	0.00000
O	0.00298	0.04217	0.01947	0.00808	0.00156	0.00002	0.00000
P	0.00353	0.05048	0.02376	0.00978	0.00194	0.00003	0.00000
Q	0.00416	0.06023	0.02889	0.01182	0.00241	0.00004	0.00000
R	0.00378	0.05434	0.02578	0.01059	0.00213	0.00004	0.00000
S	0.00421	0.06099	0.02929	0.01198	0.00245	0.00004	0.00000
T	0.00665	0.09883	0.05016	0.02018	0.00443	0.00011	0.00001

ΕΔΑΦΟΣ Β (2 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.00966	0.14523	0.07740	0.03084	0.00718	0.00023	0.00003
F	0.01030	0.15484	0.08325	0.03313	0.00780	0.00027	0.00003
G	0.00787	0.11760	0.06098	0.02442	0.00550	0.00015	0.00002
H	0.00843	0.12630	0.06609	0.02641	0.00602	0.00018	0.00002
I	0.00550	0.08092	0.04012	0.01624	0.00346	0.00008	0.00001
J	0.00496	0.07262	0.03556	0.01445	0.00303	0.00006	0.00001
K	0.00510	0.07472	0.03671	0.01490	0.00313	0.00006	0.00001
L	0.00388	0.05593	0.02661	0.01092	0.00220	0.00004	0.00000
M	0.00430	0.06230	0.02999	0.01226	0.00251	0.00005	0.00000
N	0.00362	0.05183	0.02446	0.01006	0.00201	0.00003	0.00000
O	0.00358	0.05125	0.02416	0.00994	0.00198	0.00003	0.00000
P	0.00419	0.06066	0.02912	0.01191	0.00243	0.00004	0.00000
Q	0.00489	0.07156	0.03498	0.01422	0.00297	0.00006	0.00001
R	0.00447	0.06499	0.03143	0.01282	0.00264	0.00005	0.00000
S	0.00495	0.07241	0.03545	0.01441	0.00302	0.00006	0.00001
T	0.00761	0.11368	0.05870	0.02352	0.00527	0.00014	0.00002

ΕΔΑΦΟΣ Α (3 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.01235	0.18581	0.10251	0.04069	0.00987	0.00038	0.00005
F	0.01321	0.19855	0.11062	0.04389	0.01077	0.00044	0.00006
G	0.00987	0.14830	0.07926	0.03157	0.00738	0.00024	0.00003
H	0.01065	0.16021	0.08653	0.03442	0.00815	0.00028	0.00004
I	0.00661	0.09815	0.04978	0.02003	0.00439	0.00011	0.00001
J	0.00589	0.08700	0.04350	0.01757	0.00378	0.00009	0.00001
K	0.00607	0.08981	0.04507	0.01819	0.00393	0.00009	0.00001
L	0.00448	0.06510	0.03149	0.01285	0.00265	0.00005	0.00000
M	0.00501	0.07338	0.03598	0.01461	0.00307	0.00006	0.00001
N	0.00414	0.05984	0.02868	0.01174	0.00239	0.00004	0.00000
O	0.00409	0.05911	0.02829	0.01158	0.00235	0.00004	0.00000
P	0.00487	0.07123	0.03481	0.01415	0.00296	0.00006	0.00001
Q	0.00580	0.08559	0.04271	0.01726	0.00370	0.00008	0.00001
R	0.00524	0.07690	0.03790	0.01537	0.00325	0.00007	0.00001
S	0.00587	0.08672	0.04334	0.01751	0.00377	0.00009	0.00001
T	0.00951	0.14290	0.07600	0.03029	0.00704	0.00023	0.00003

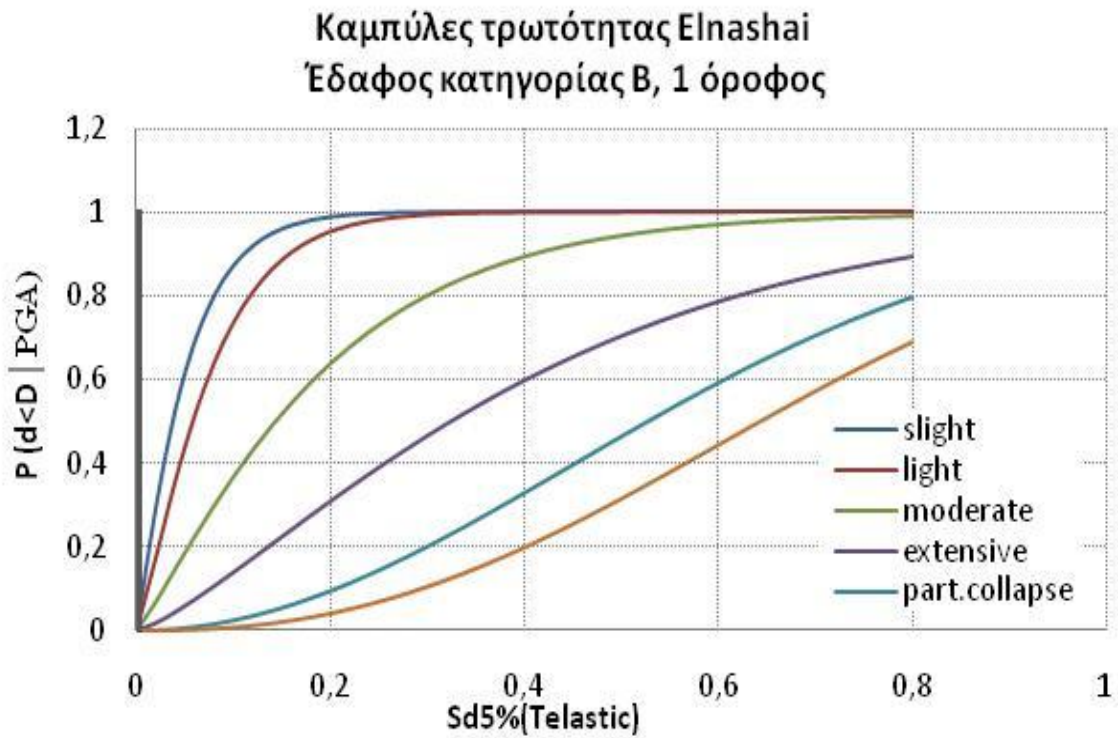
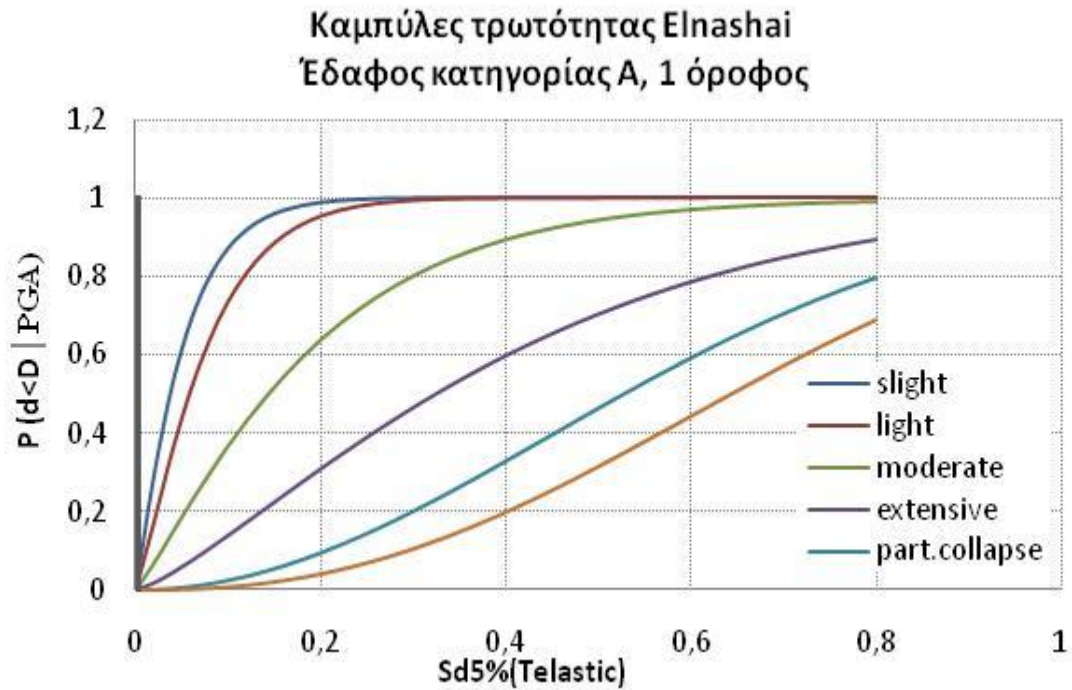
ΕΔΑΦΟΣ Β (3 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.01502	0.22491	0.12775	0.05066	0.01270	0.00056	0.00008
F	0.01601	0.23925	0.13727	0.05445	0.01380	0.00064	0.00010
G	0.01211	0.18213	0.10019	0.03978	0.00962	0.00037	0.00005
H	0.01303	0.19580	0.10887	0.04319	0.01057	0.00042	0.00006
I	0.00825	0.12351	0.06445	0.02577	0.00585	0.00017	0.00002
J	0.00739	0.11022	0.05670	0.02274	0.00507	0.00014	0.00002
K	0.00761	0.11358	0.05864	0.02350	0.00527	0.00014	0.00002
L	0.00568	0.08377	0.04170	0.01686	0.00361	0.00008	0.00001
M	0.00633	0.09382	0.04733	0.01907	0.00415	0.00010	0.00001
N	0.00527	0.07734	0.03814	0.01547	0.00327	0.00007	0.00001
O	0.00521	0.07644	0.03765	0.01527	0.00322	0.00007	0.00001
P	0.00616	0.09123	0.04586	0.01850	0.00401	0.00009	0.00001
Q	0.00728	0.10853	0.05572	0.02236	0.00497	0.00013	0.00001
R	0.00661	0.09808	0.04974	0.02002	0.00439	0.00011	0.00001
S	0.00737	0.10989	0.05650	0.02266	0.00505	0.00014	0.00002
T	0.01169	0.17591	0.09628	0.03824	0.00919	0.00034	0.00005

ΕΔΑΦΟΣ Α (4 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.01558	0.23303	0.13312	0.05280	0.01332	0.00061	0.00009
F	0.01664	0.24816	0.14324	0.05683	0.01450	0.00069	0.00011
G	0.01244	0.18705	0.10330	0.04100	0.00996	0.00039	0.00005
H	0.01344	0.20184	0.11274	0.04472	0.01100	0.00045	0.00006
I	0.00826	0.12361	0.06450	0.02579	0.00586	0.00017	0.00002
J	0.00734	0.10940	0.05622	0.02255	0.00502	0.00013	0.00002
K	0.00757	0.11298	0.05829	0.02336	0.00523	0.00014	0.00002
L	0.00554	0.08152	0.04045	0.01637	0.00349	0.00008	0.00001
M	0.00622	0.09204	0.04632	0.01868	0.00405	0.00010	0.00001
N	0.00511	0.07485	0.03678	0.01493	0.00314	0.00007	0.00001
O	0.00505	0.07392	0.03627	0.01473	0.00309	0.00006	0.00001
P	0.00604	0.08931	0.04479	0.01808	0.00390	0.00009	0.00001
Q	0.00722	0.10759	0.05518	0.02215	0.00492	0.00013	0.00001
R	0.00650	0.09652	0.04885	0.01967	0.00430	0.00011	0.00001
S	0.00731	0.10904	0.05601	0.02247	0.00500	0.00013	0.00001
T	0.01199	0.18031	0.09904	0.03933	0.00949	0.00036	0.00005

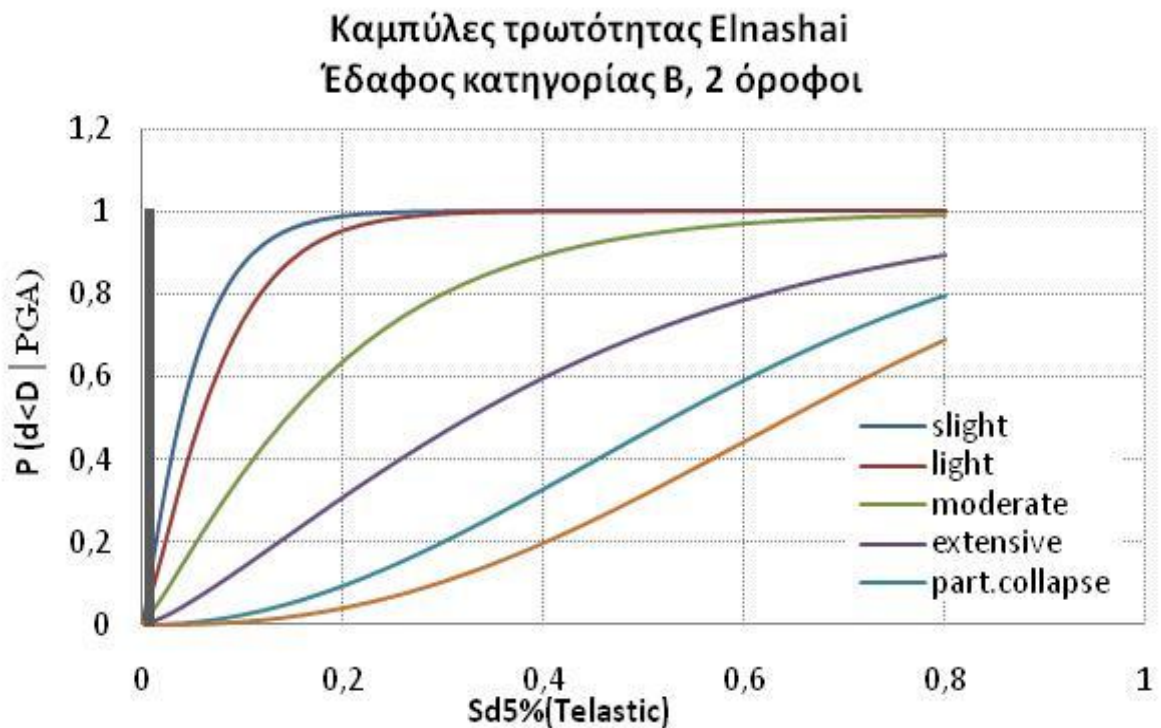
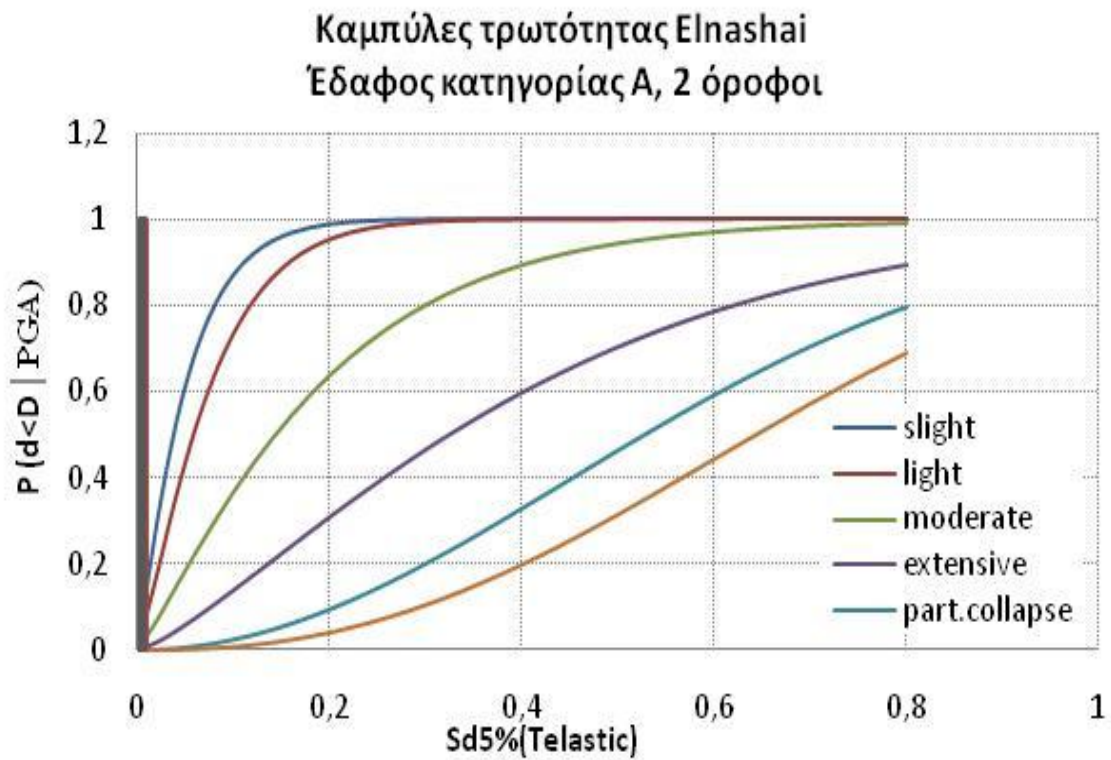
ΕΔΑΦΟΣ Β (4 όροφοι)							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	part.collapse	collapse
E	0.02081	0.30572	0.18311	0.07289	0.01935	0.00108	0.00018
F	0.02219	0.32396	0.19620	0.07824	0.02102	0.00123	0.00021
G	0.01672	0.24929	0.14401	0.05713	0.01459	0.00070	0.00011
H	0.01802	0.26762	0.15648	0.06213	0.01608	0.00081	0.00013
I	0.01122	0.16883	0.09186	0.03651	0.00871	0.00031	0.00004
J	0.01000	0.15035	0.08051	0.03206	0.00751	0.00025	0.00003
K	0.01031	0.15503	0.08336	0.03317	0.00781	0.00027	0.00003
L	0.00761	0.11360	0.05865	0.02351	0.00527	0.00014	0.00002
M	0.00851	0.12755	0.06683	0.02670	0.00609	0.00018	0.00002
N	0.00703	0.10469	0.05351	0.02149	0.00476	0.00012	0.00001
O	0.00695	0.10345	0.05280	0.02121	0.00469	0.00012	0.00001
P	0.00828	0.12394	0.06470	0.02587	0.00588	0.00017	0.00002
Q	0.00985	0.14800	0.07908	0.03150	0.00736	0.00024	0.00003
R	0.00890	0.13347	0.07034	0.02808	0.00645	0.00020	0.00002
S	0.00997	0.14989	0.08022	0.03195	0.00748	0.00025	0.00003
T	0.01613	0.24089	0.13836	0.05488	0.01393	0.00065	0.00010



Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις (1 όροφος)

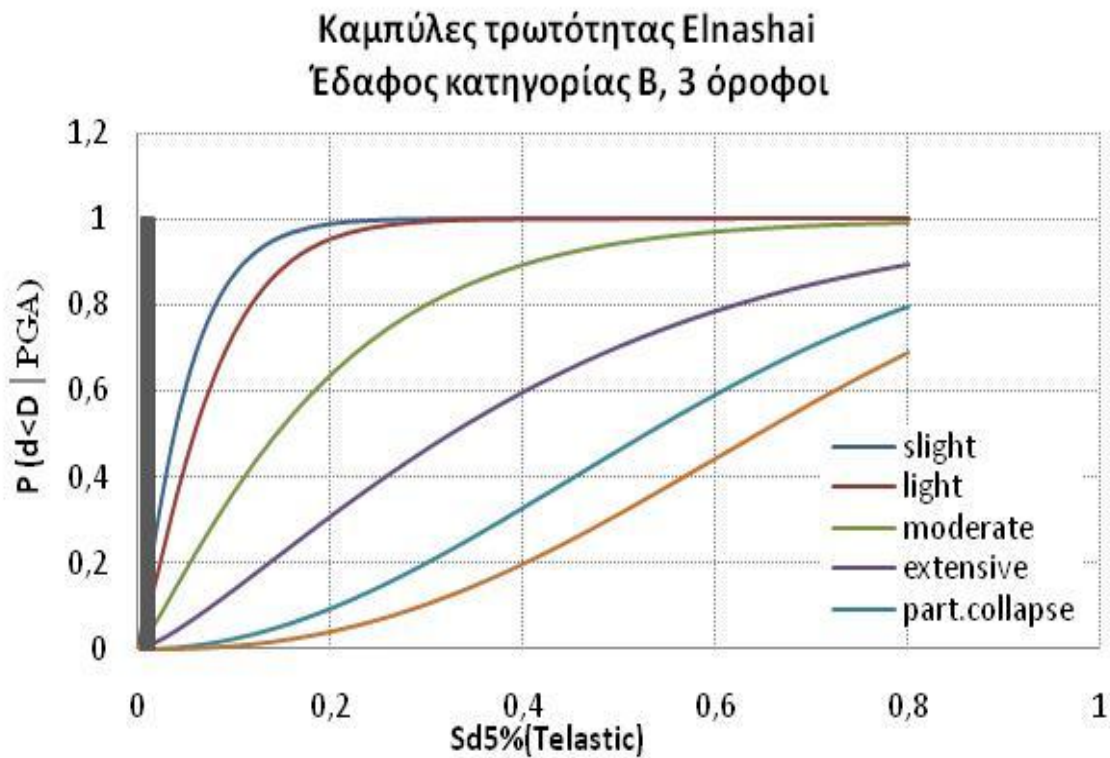
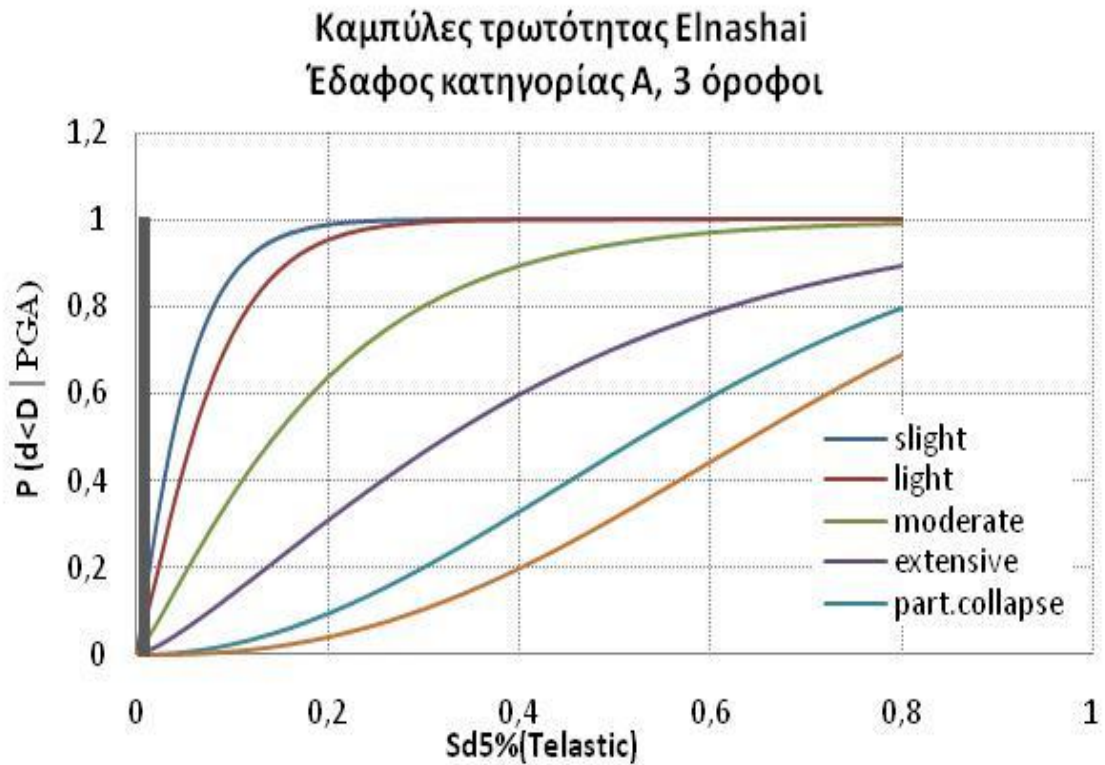


Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις (2 όροφοι)

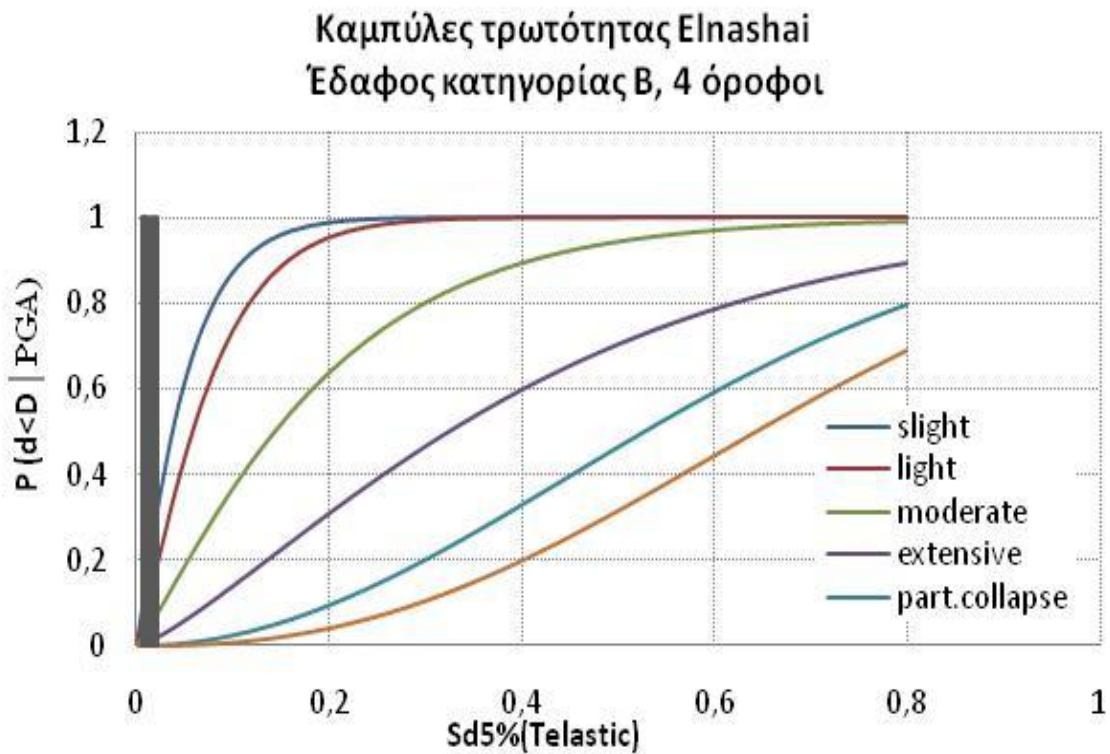
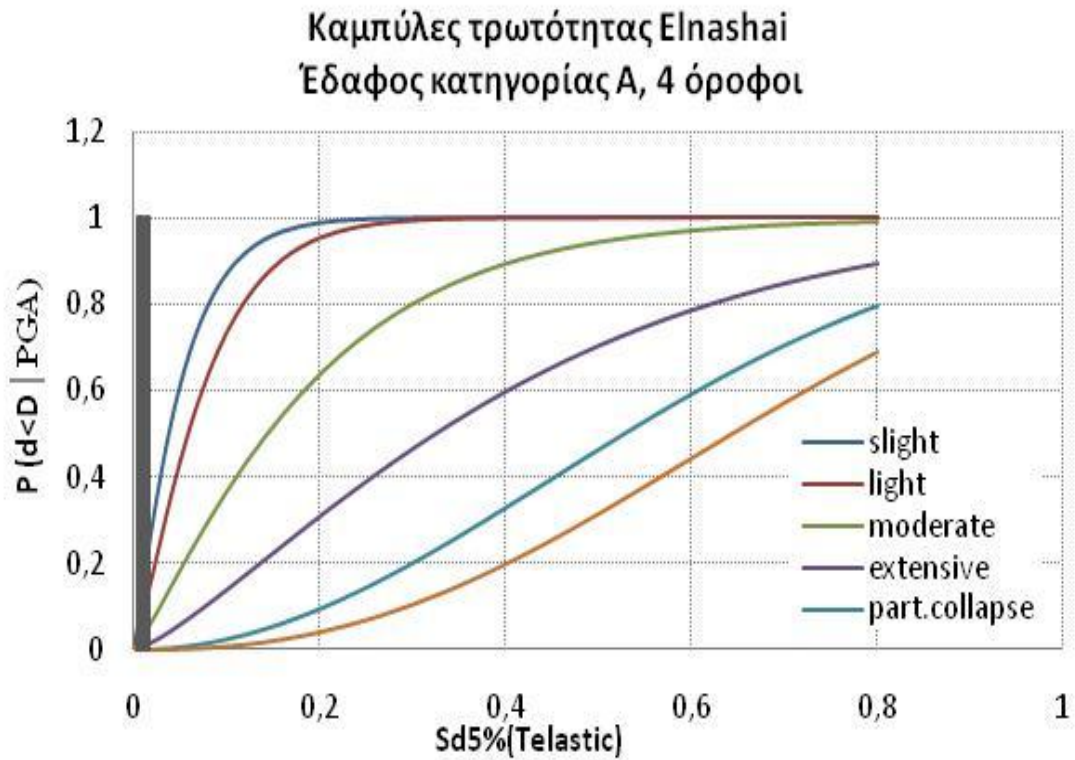




Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις (3 όροφοι)



Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις (4 όροφοι)



ΕΔΑΦΟΣ Α (1 όροφος)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.02652	0.022063	0.001124	9.88E-05	0.033809	0.030134	0.001827	0.000177	0.037456	0.034351	0.002242	0.000226
F	0.02881	0.024543	0.001327	0.00012	0.036733	0.033507	0.002157	0.000216	0.040696	0.038188	0.002646	0.000276
G	0.02063	0.015971	0.000681	5.41E-05	0.026303	0.021836	0.001106	9.69E-05	0.029139	0.024905	0.001358	0.000124
H	0.02240	0.017757	0.000802	6.59E-05	0.028558	0.02427	0.001304	0.000118	0.031638	0.027678	0.0016	0.000151
I	0.01368	0.009393	0.000299	2.02E-05	0.017439	0.012857	0.000486	3.61E-05	0.019319	0.014673	0.000597	4.62E-05
J	0.01218	0.008082	0.000237	1.53E-05	0.015526	0.011064	0.000386	2.73E-05	0.017199	0.012628	0.000473	3.49E-05
K	0.01256	0.008408	0.000252	1.64E-05	0.016008	0.01151	0.00041	2.94E-05	0.017733	0.013137	0.000503	3.76E-05
L	0.00921	0.00563	0.000136	7.81E-06	0.011745	0.007711	0.000221	1.4E-05	0.013011	0.008803	0.000271	1.79E-05
M	0.01034	0.006538	0.000171	1.03E-05	0.013181	0.008952	0.000278	1.85E-05	0.014601	0.010219	0.000341	2.36E-05
N	0.00849	0.005065	0.000115	6.43E-06	0.010825	0.006937	0.000187	1.15E-05	0.011991	0.00792	0.00023	1.47E-05
O	0.00839	0.004987	0.000113	6.24E-06	0.010696	0.006831	0.000183	1.12E-05	0.011848	0.007798	0.000225	1.43E-05
P	0.01005	0.0063	0.000162	9.62E-06	0.01281	0.008627	0.000263	1.72E-05	0.01419	0.009848	0.000322	2.2E-05
Q	0.01199	0.007919	0.00023	1.47E-05	0.015283	0.010841	0.000374	2.63E-05	0.01693	0.012374	0.000459	3.36E-05
R	0.01082	0.006931	0.000187	1.15E-05	0.013789	0.00949	0.000304	2.06E-05	0.015275	0.010833	0.000373	2.63E-05
S	0.01214	0.00805	0.000236	1.52E-05	0.015478	0.01102	0.000383	2.71E-05	0.017146	0.012578	0.00047	3.47E-05
T	0.01985	0.015197	0.00063	4.93E-05	0.025309	0.02078	0.001024	8.83E-05	0.028038	0.023703	0.001257	0.000113

ΕΔΑΦΟΣ Β (1 όροφος)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.025733	0.021229	0.001059	9.19E-05	0.032808	0.028996	0.001721	0.000165	0.036345	0.033056	0.002111	0.00021
F	0.02778	0.023424	0.001234	0.00011	0.03542	0.031983	0.002005	0.000198	0.039239	0.036454	0.002461	0.000253
G	0.020409	0.015749	0.000666	5.27E-05	0.026017	0.021531	0.001082	9.44E-05	0.028822	0.024558	0.001328	0.000121
H	0.02202	0.01737	0.000775	6.32E-05	0.028072	0.02374	0.00126	0.000113	0.031098	0.027073	0.001546	0.000145
I	0.013963	0.009645	0.000312	2.12E-05	0.017798	0.013199	0.000507	3.79E-05	0.019716	0.015063	0.000622	4.85E-05
J	0.012542	0.008394	0.000252	1.64E-05	0.015986	0.011489	0.000409	2.93E-05	0.017708	0.013113	0.000502	3.75E-05
K	0.012901	0.008707	0.000266	1.75E-05	0.016444	0.011917	0.000433	3.14E-05	0.018216	0.0136	0.000531	4.01E-05
L	0.009692	0.006011	0.00015	8.82E-06	0.012353	0.008231	0.000244	1.58E-05	0.013683	0.009396	0.0003	2.02E-05
M	0.010781	0.006901	0.000186	1.14E-05	0.013742	0.009448	0.000302	2.04E-05	0.015222	0.010784	0.000371	2.61E-05
N	0.008988	0.005452	0.000129	7.36E-06	0.011456	0.007465	0.00021	1.32E-05	0.01269	0.008523	0.000258	1.68E-05
O	0.008889	0.005374	0.000126	7.17E-06	0.01133	0.007359	0.000205	1.28E-05	0.01255	0.008401	0.000252	1.64E-05
P	0.0105	0.006669	0.000176	1.07E-05	0.013384	0.009131	0.000287	1.91E-05	0.014825	0.010423	0.000352	2.45E-05
Q	0.01236	0.008237	0.000244	1.58E-05	0.015755	0.011275	0.000397	2.83E-05	0.017452	0.012869	0.000487	3.62E-05
R	0.01124	0.007283	0.000202	1.26E-05	0.014326	0.009971	0.000328	2.25E-05	0.01587	0.011381	0.000403	2.88E-05
S	0.012506	0.008363	0.00025	1.63E-05	0.01594	0.011447	0.000406	2.91E-05	0.017658	0.013065	0.000499	3.72E-05
T	0.019696	0.015043	0.00062	4.84E-05	0.025108	0.020568	0.001008	8.66E-05	0.027814	0.023461	0.001237	0.000111



ΕΛΑΦΟΣ Α (2 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.03146	0.027483	0.001583	0.000149	0.039094	0.036281	0.002442	0.000251	0.042909	0.040853	0.002942	0.000313
F	0.03366	0.029961	0.001811	0.000175	0.04182	0.039537	0.002794	0.000295	0.045901	0.04451	0.003365	0.000368
G	0.02528	0.020744	0.001022	8.8E-05	0.031404	0.027415	0.001577	0.000148	0.034468	0.030888	0.001899	0.000185
H	0.02721	0.022805	0.001184	0.000105	0.033805	0.030129	0.001827	0.000177	0.037103	0.033939	0.0022	0.000221
I	0.01727	0.0127	0.000477	3.53E-05	0.021463	0.016806	0.000737	5.95E-05	0.023557	0.018948	0.000888	7.43E-05
J	0.01549	0.011032	0.000384	2.72E-05	0.019248	0.014603	0.000593	4.58E-05	0.021126	0.016466	0.000714	5.72E-05
K	0.01594	0.011449	0.000407	2.91E-05	0.019807	0.015153	0.000628	4.9E-05	0.02174	0.017086	0.000756	6.13E-05
L	0.01194	0.007873	0.000228	1.45E-05	0.014829	0.010426	0.000352	2.45E-05	0.016276	0.01176	0.000424	3.06E-05
M	0.01329	0.009048	0.000283	1.88E-05	0.016512	0.011981	0.000436	3.17E-05	0.018123	0.013511	0.000525	3.96E-05
N	0.01107	0.007137	0.000196	1.21E-05	0.013748	0.009453	0.000302	2.04E-05	0.015089	0.010663	0.000364	2.55E-05
O	0.01094	0.007035	0.000192	1.18E-05	0.013596	0.009318	0.000296	1.99E-05	0.014922	0.010511	0.000356	2.49E-05
P	0.01294	0.008741	0.000268	1.77E-05	0.016078	0.011575	0.000414	2.97E-05	0.017647	0.013054	0.000498	3.72E-05
Q	0.01526	0.010824	0.000373	2.62E-05	0.018966	0.014327	0.000575	4.42E-05	0.020816	0.016156	0.000693	5.52E-05
R	0.01386	0.009556	0.000307	2.08E-05	0.017224	0.012651	0.000475	3.51E-05	0.018904	0.014267	0.000572	4.38E-05
S	0.01545	0.010991	0.000382	2.7E-05	0.019192	0.014548	0.000589	4.55E-05	0.021064	0.016405	0.00071	5.68E-05
T	0.02441	0.019833	0.000953	8.09E-05	0.030326	0.026214	0.00147	0.000136	0.033285	0.029537	0.001771	0.00017

ΕΛΑΦΟΣ Β (2 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.035419	0.031982	0.002005	0.000198	0.044003	0.042183	0.003093	0.000333	0.048295	0.047478	0.003725	0.000416
F	0.037736	0.034681	0.002276	0.00023	0.046883	0.045723	0.003511	0.000388	0.051456	0.051451	0.004227	0.000485
G	0.028822	0.024558	0.001328	0.000121	0.035808	0.032432	0.002049	0.000203	0.0393	0.036526	0.002468	0.000254
H	0.030891	0.026843	0.001526	0.000142	0.038378	0.035435	0.002354	0.00024	0.042122	0.039901	0.002835	0.0003
I	0.020145	0.015488	0.000649	5.11E-05	0.025028	0.020483	0.001002	8.6E-05	0.027469	0.023087	0.001207	0.000107
J	0.018182	0.013568	0.000529	3.99E-05	0.022589	0.01795	0.000816	6.72E-05	0.024792	0.020235	0.000983	8.4E-05
K	0.01868	0.014049	0.000558	4.26E-05	0.023206	0.018585	0.000861	7.17E-05	0.02547	0.02095	0.001037	8.97E-05
L	0.014225	0.00988	0.000324	2.22E-05	0.017673	0.013079	0.0005	3.73E-05	0.019396	0.014749	0.000602	4.66E-05
M	0.01574	0.011261	0.000396	2.82E-05	0.019554	0.014904	0.000612	4.75E-05	0.021461	0.016804	0.000737	5.94E-05
N	0.013247	0.00901	0.000281	1.87E-05	0.016457	0.011928	0.000433	3.14E-05	0.018062	0.013452	0.000522	3.93E-05
O	0.013109	0.008889	0.000275	1.82E-05	0.016286	0.011768	0.000424	3.07E-05	0.017874	0.013272	0.000511	3.83E-05
P	0.01535	0.010902	0.000377	2.66E-05	0.01907	0.014429	0.000582	4.48E-05	0.020929	0.016269	0.000701	5.6E-05
Q	0.017931	0.013327	0.000514	3.86E-05	0.022277	0.017632	0.000794	6.5E-05	0.02445	0.019877	0.000956	8.13E-05
R	0.016377	0.011854	0.000429	3.11E-05	0.020346	0.015686	0.000662	5.23E-05	0.02233	0.017686	0.000797	6.54E-05
S	0.018133	0.01352	0.000526	3.97E-05	0.022527	0.017887	0.000812	6.68E-05	0.024724	0.020164	0.000978	8.35E-05
T	0.02789	0.023543	0.001244	0.000111	0.03465	0.031096	0.001919	0.000188	0.038029	0.035025	0.002311	0.000235

ΕΔΑΦΟΣ Α (3 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.03596	0.032607	0.002067	0.000205	0.043827	0.041969	0.003069	0.00033	0.047761	0.046813	0.003643	0.000405
F	0.03846	0.035529	0.002364	0.000241	0.046872	0.04571	0.003509	0.000387	0.05108	0.050974	0.004166	0.000476
G	0.02873	0.024453	0.001319	0.00012	0.035013	0.031514	0.00196	0.000192	0.038156	0.035174	0.002327	0.000237
H	0.03100	0.02697	0.001537	0.000144	0.03779	0.034743	0.002282	0.000231	0.041182	0.038771	0.00271	0.000284
I	0.01926	0.014615	0.000593	4.58E-05	0.023477	0.018864	0.000881	7.37E-05	0.025585	0.021072	0.001047	9.06E-05
J	0.01717	0.012601	0.000472	3.48E-05	0.020931	0.016271	0.000701	5.6E-05	0.022811	0.018178	0.000832	6.88E-05
K	0.01770	0.013103	0.000501	3.74E-05	0.021572	0.016916	0.000744	6.02E-05	0.02351	0.018899	0.000884	7.4E-05
L	0.01306	0.008846	0.000273	1.8E-05	0.015921	0.011429	0.000405	2.9E-05	0.017351	0.012773	0.000482	3.57E-05
M	0.01462	0.010232	0.000342	2.36E-05	0.017817	0.013217	0.000508	3.8E-05	0.019417	0.014769	0.000603	4.68E-05
N	0.01207	0.007986	0.000233	1.49E-05	0.014712	0.010319	0.000346	2.4E-05	0.016034	0.011534	0.000411	2.95E-05
O	0.01193	0.007868	0.000228	1.45E-05	0.014543	0.010166	0.000338	2.34E-05	0.01585	0.011363	0.000402	2.87E-05
P	0.01421	0.009869	0.000323	2.21E-05	0.017326	0.012748	0.00048	3.56E-05	0.018882	0.014246	0.00057	4.37E-05
Q	0.01691	0.012351	0.000457	3.35E-05	0.020608	0.015948	0.000679	5.39E-05	0.022459	0.017818	0.000807	6.63E-05
R	0.01528	0.010835	0.000373	2.63E-05	0.018623	0.013994	0.000555	4.23E-05	0.020296	0.015637	0.000659	5.2E-05
S	0.01712	0.012552	0.000469	3.46E-05	0.020867	0.016207	0.000696	5.56E-05	0.022741	0.018107	0.000827	6.83E-05
T	0.02770	0.023337	0.001227	0.00011	0.033762	0.03008	0.001822	0.000176	0.036793	0.033577	0.002164	0.000217

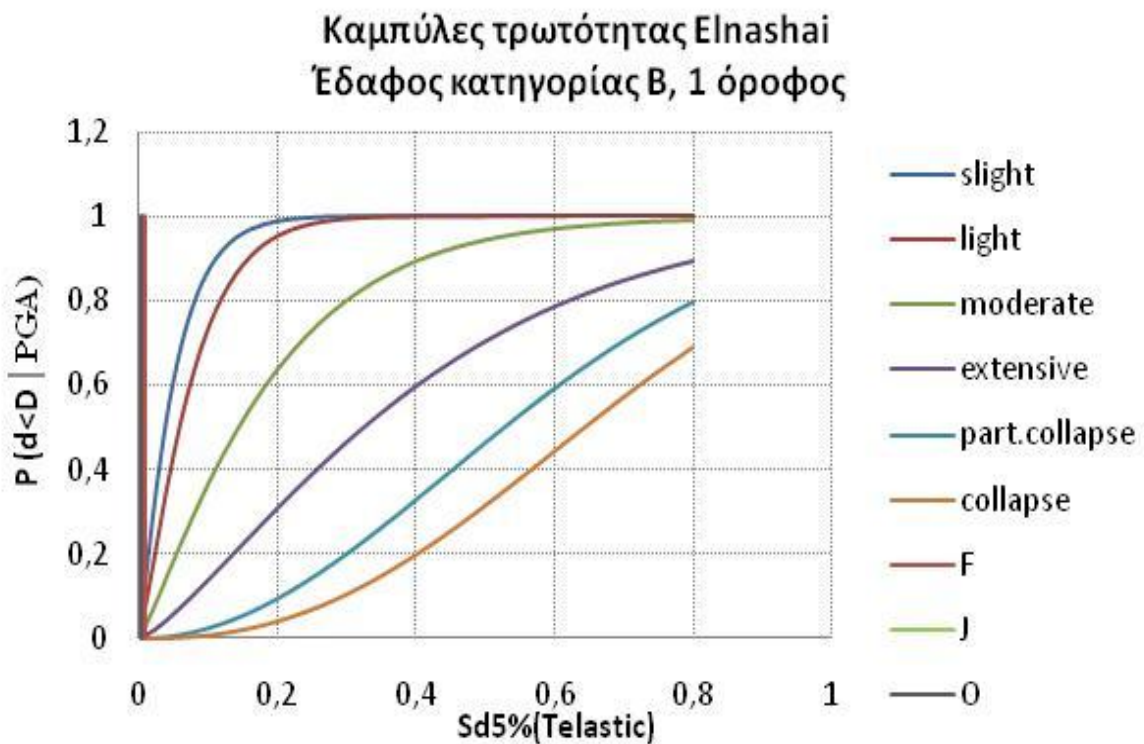
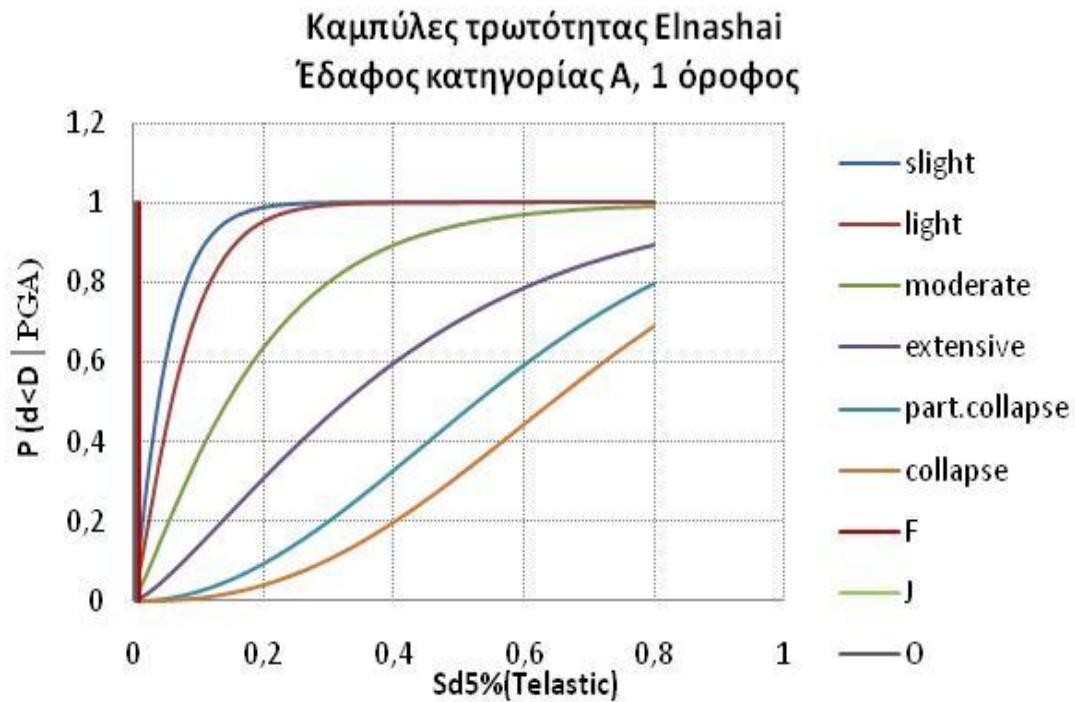
ΕΔΑΦΟΣ Β (3 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse	Sd	extensive	art.collaps	collapse
E	0.0436	0.041692	0.003037	0.000326	0.053128	0.053575	0.004506	0.000523	0.057892	0.05971	0.005348	0.000643
F	0.046494	0.045242	0.003453	0.00038	0.056654	0.058104	0.005122	0.000611	0.061734	0.06474	0.006079	0.00075
G	0.035169	0.031693	0.001977	0.000194	0.042856	0.040789	0.002934	0.000313	0.0467	0.045496	0.003483	0.000384
H	0.037834	0.034796	0.002288	0.000232	0.046103	0.04476	0.003395	0.000372	0.050238	0.049913	0.00403	0.000458
I	0.023986	0.019393	0.00092	7.76E-05	0.029232	0.025007	0.001366	0.000125	0.031855	0.027921	0.001622	0.000153
J	0.02149	0.016833	0.000739	5.96E-05	0.026191	0.021716	0.001097	9.59E-05	0.028541	0.024251	0.001302	0.000118
K	0.02212	0.017472	0.000783	6.39E-05	0.026958	0.022537	0.001162	0.000103	0.029377	0.025167	0.00138	0.000126
L	0.016539	0.012005	0.000438	3.18E-05	0.020158	0.0155	0.00065	5.11E-05	0.021967	0.017316	0.000772	6.29E-05
M	0.018419	0.013797	0.000543	4.12E-05	0.022449	0.017807	0.000806	6.62E-05	0.024464	0.019891	0.000957	8.14E-05
N	0.015335	0.010888	0.000376	2.65E-05	0.01869	0.014059	0.000559	4.27E-05	0.020368	0.015709	0.000664	5.24E-05
O	0.015166	0.010733	0.000368	2.58E-05	0.018485	0.01386	0.000547	4.15E-05	0.020144	0.015486	0.000649	5.11E-05
P	0.017933	0.013328	0.000514	3.86E-05	0.021856	0.017204	0.000764	6.21E-05	0.023818	0.019218	0.000907	7.63E-05
Q	0.021173	0.016514	0.000717	5.75E-05	0.025804	0.021304	0.001065	9.25E-05	0.028119	0.023792	0.001264	0.000114
R	0.019216	0.014572	0.000591	4.56E-05	0.02342	0.018805	0.000877	7.33E-05	0.025522	0.021005	0.001042	9.01E-05
S	0.021427	0.01677	0.000734	5.92E-05	0.026114	0.021634	0.001091	9.52E-05	0.028458	0.02416	0.001295	0.000117
T	0.033965	0.030312	0.001844	0.000179	0.041389	0.039019	0.002737	0.000287	0.045101	0.043527	0.003249	0.000353

ΕΔΑΦΟΣ Α (4 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
E	0.03767	0.034602	0.002267836	0.000229	0.045033	0.043444	0.00323955	0.000352	0.048715	0.048003	0.003789876	0.000425
F	0.040235	0.037637	0.002586796	0.000269	0.0481	0.047235	0.003694964	0.000412	0.052033	0.052181	0.004322505	0.000498
G	0.030073	0.025934	0.001445962	0.000134	0.035951	0.032598	0.002065872	0.000205	0.038891	0.036041	0.002417051	0.000248
H	0.032487	0.028634	0.001687265	0.000161	0.038838	0.035978	0.002410497	0.000247	0.042013	0.03977	0.002820175	0.000298
I	0.019966	0.01531	0.000637596	5E-05	0.023869	0.019271	0.00091114	7.67E-05	0.02582	0.021322	0.001066147	9.26E-05
J	0.017741	0.013144	0.000503447	3.76E-05	0.021209	0.01655	0.000719468	5.78E-05	0.022943	0.018314	0.000841886	6.98E-05
K	0.018301	0.013682	0.000535715	4.06E-05	0.021878	0.017226	0.000765574	6.23E-05	0.023667	0.019062	0.000895831	7.52E-05
L	0.013395	0.00914	0.00028702	1.92E-05	0.016014	0.011515	0.000410208	2.94E-05	0.017323	0.012746	0.000480024	3.56E-05
M	0.015033	0.010612	0.000361516	2.53E-05	0.017972	0.013366	0.000516663	3.88E-05	0.019442	0.014793	0.000604588	4.69E-05
N	0.012354	0.008232	0.000244184	1.58E-05	0.01477	0.010372	0.000348993	2.42E-05	0.015978	0.011482	0.000408393	2.93E-05
O	0.01221	0.008107	0.000238489	1.54E-05	0.014597	0.010215	0.000340854	2.36E-05	0.015791	0.011308	0.00039887	2.85E-05
P	0.014608	0.010225	0.00034136	2.36E-05	0.017464	0.01288	0.000487862	3.62E-05	0.018892	0.014256	0.000570887	4.38E-05
Q	0.017459	0.012875	0.0004876	3.62E-05	0.020873	0.016212	0.000696826	5.56E-05	0.022579	0.017941	0.000815393	6.71E-05
R	0.015732	0.011254	0.000395913	2.82E-05	0.018808	0.014174	0.000565815	4.33E-05	0.020346	0.015687	0.000662101	5.23E-05
S	0.017685	0.013091	0.000500293	3.74E-05	0.021143	0.016483	0.000714962	5.73E-05	0.022871	0.01824	0.000836613	6.93E-05
T	0.028981	0.024732	0.00134291	0.000122	0.034646	0.031092	0.001918685	0.000188	0.037478	0.034378	0.002244874	0.000227

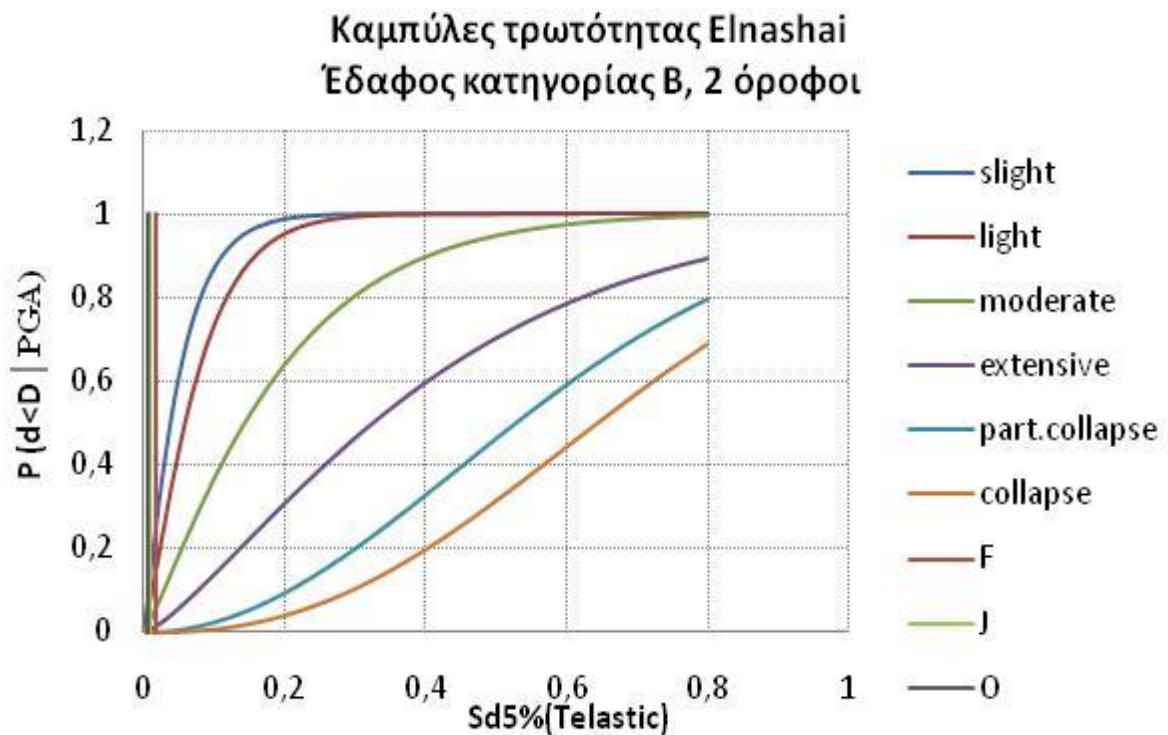
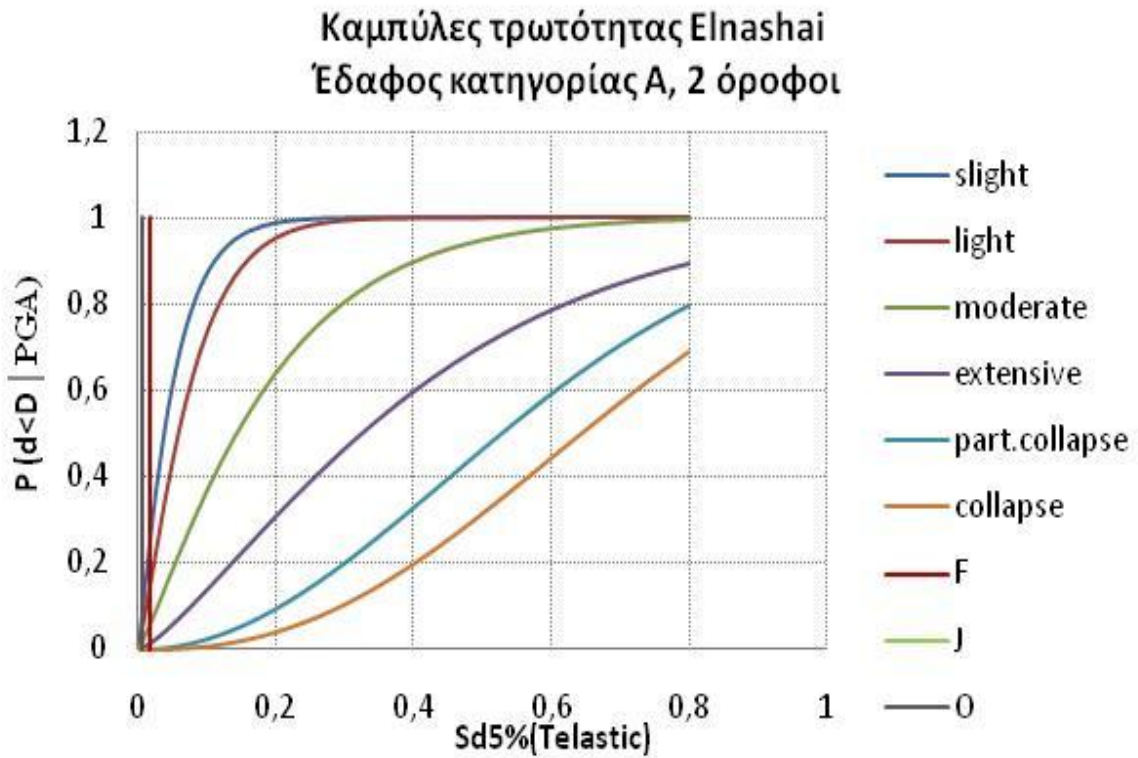
ΕΔΑΦΟΣ Β (4 όροφοι)												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
E	0.050199	0.049863	0.004023715	0.000457	0.059993	0.062452	0.005742172	0.000701	0.064891	0.068923	0.006714647	0.000846
F	0.053518	0.054073	0.004572244	0.000533	0.063961	0.067686	0.006524224	0.000817	0.069182	0.074677	0.007628647	0.000986
G	0.040324	0.037744	0.002598322	0.00027	0.048193	0.047351	0.003709207	0.000414	0.052127	0.052301	0.004338162	0.0005
H	0.04347	0.041534	0.003018854	0.000323	0.051952	0.052079	0.004309107	0.000496	0.056193	0.057508	0.00503951	0.000599
I	0.027072	0.022659	0.001171925	0.000104	0.032356	0.028485	0.001673607	0.000159	0.034997	0.031496	0.00195779	0.000192
J	0.024132	0.019545	0.000931364	7.88E-05	0.028843	0.024581	0.001330167	0.000121	0.031198	0.027185	0.001556093	0.000146
K	0.024873	0.020321	0.000989374	8.47E-05	0.029728	0.025553	0.00141299	0.00013	0.032155	0.028259	0.001652968	0.000157
L	0.01836	0.01374	0.000539215	4.09E-05	0.021945	0.017294	0.000770211	6.27E-05	0.023737	0.019134	0.000901092	7.57E-05
M	0.020541	0.015881	0.000674888	5.35E-05	0.024551	0.019983	0.000963956	8.21E-05	0.026556	0.022106	0.001127732	9.91E-05
N	0.016972	0.012413	0.000460776	3.38E-05	0.020286	0.015627	0.000658191	5.19E-05	0.021942	0.017291	0.000770049	6.27E-05
O	0.016778	0.012231	0.000450322	3.29E-05	0.020054	0.015397	0.00064326	5.05E-05	0.021692	0.017037	0.000752582	6.1E-05
P	0.019976	0.01532	0.000638264	5E-05	0.023876	0.019278	0.000911657	7.68E-05	0.025825	0.021327	0.001066555	9.27E-05
Q	0.02376	0.019158	0.000902838	7.59E-05	0.028398	0.024095	0.00128944	0.000116	0.030716	0.026648	0.001508455	0.000141
R	0.02147	0.016813	0.000737265	5.95E-05	0.025661	0.021153	0.001053026	9.13E-05	0.027757	0.023398	0.001231922	0.00011
S	0.024059	0.019469	0.000925689	7.82E-05	0.028755	0.024485	0.001322065	0.00012	0.031103	0.027079	0.001546617	0.000145
T	0.038899	0.036051	0.00241812	0.000248	0.04649	0.045237	0.003452114	0.00038	0.050285	0.049972	0.004037571	0.000459



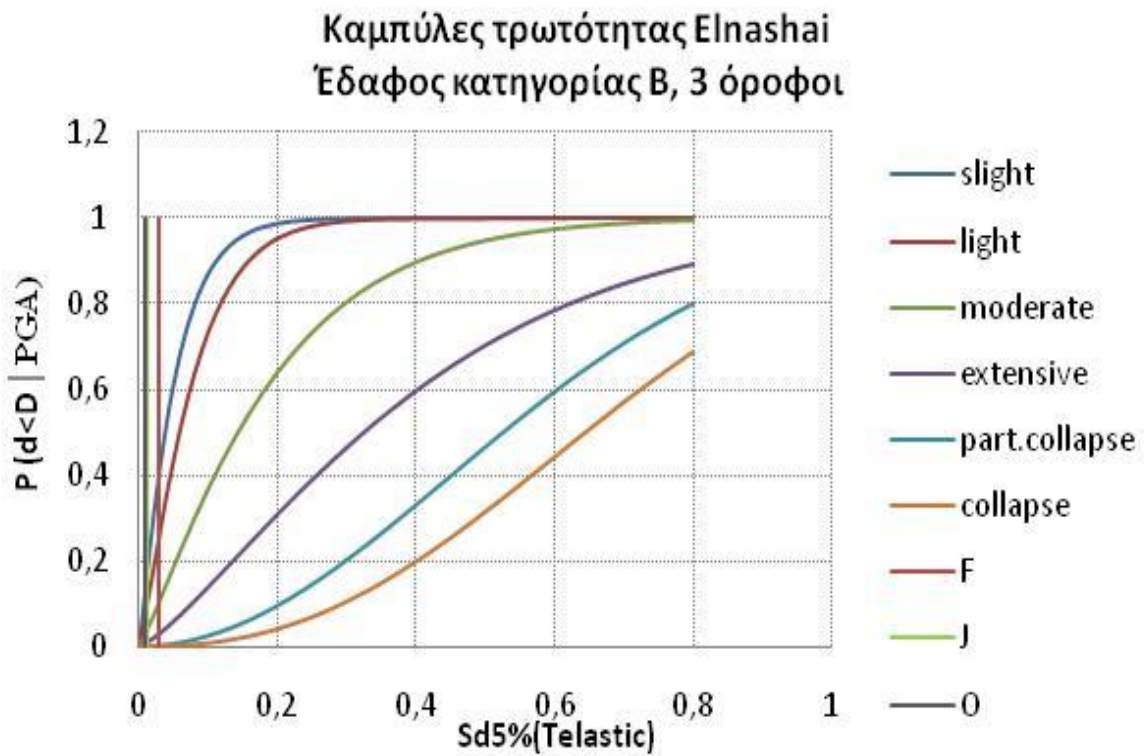
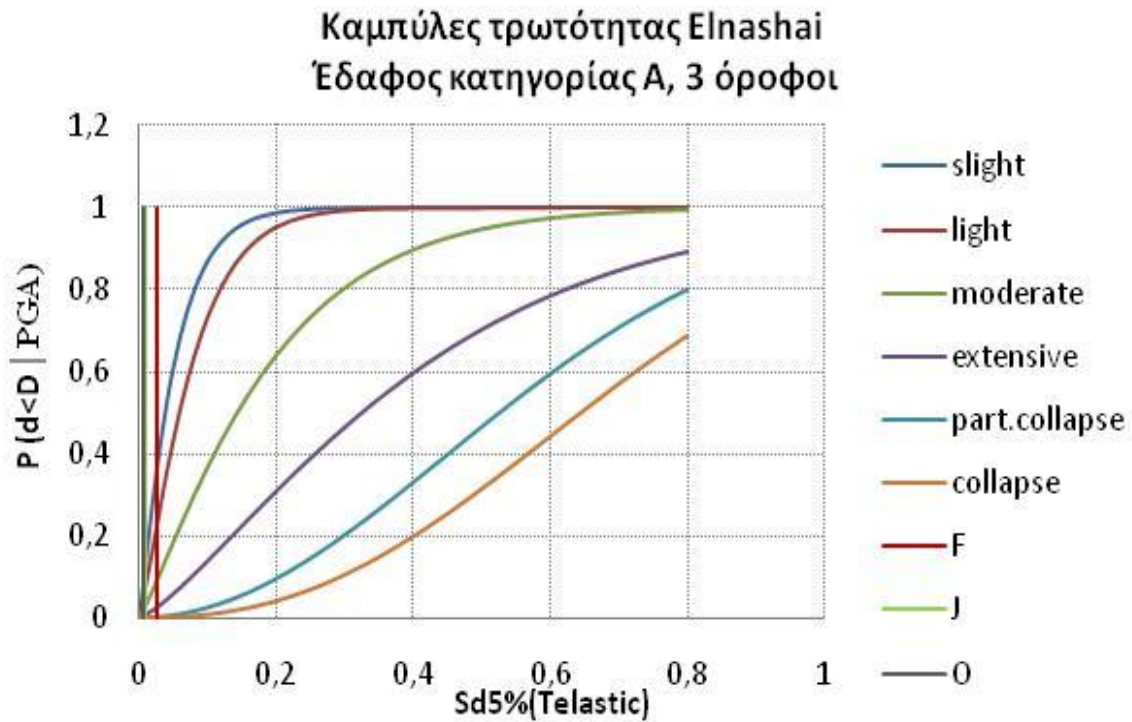
Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις +σ (1 όροφος)



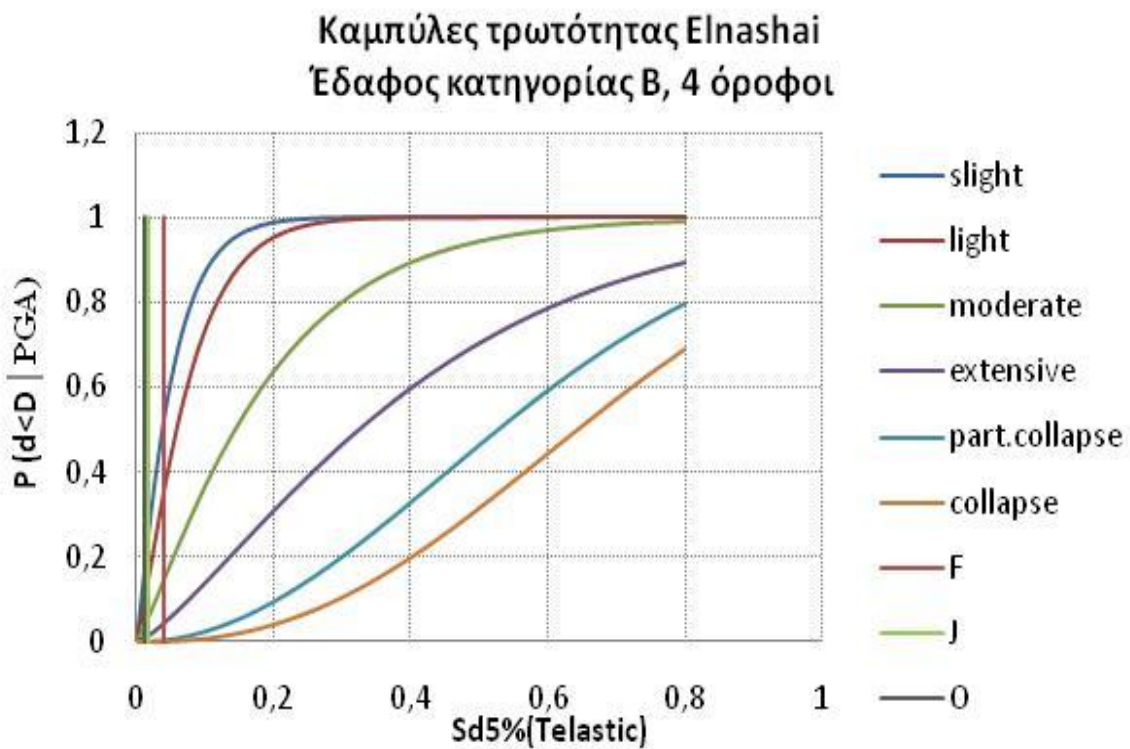
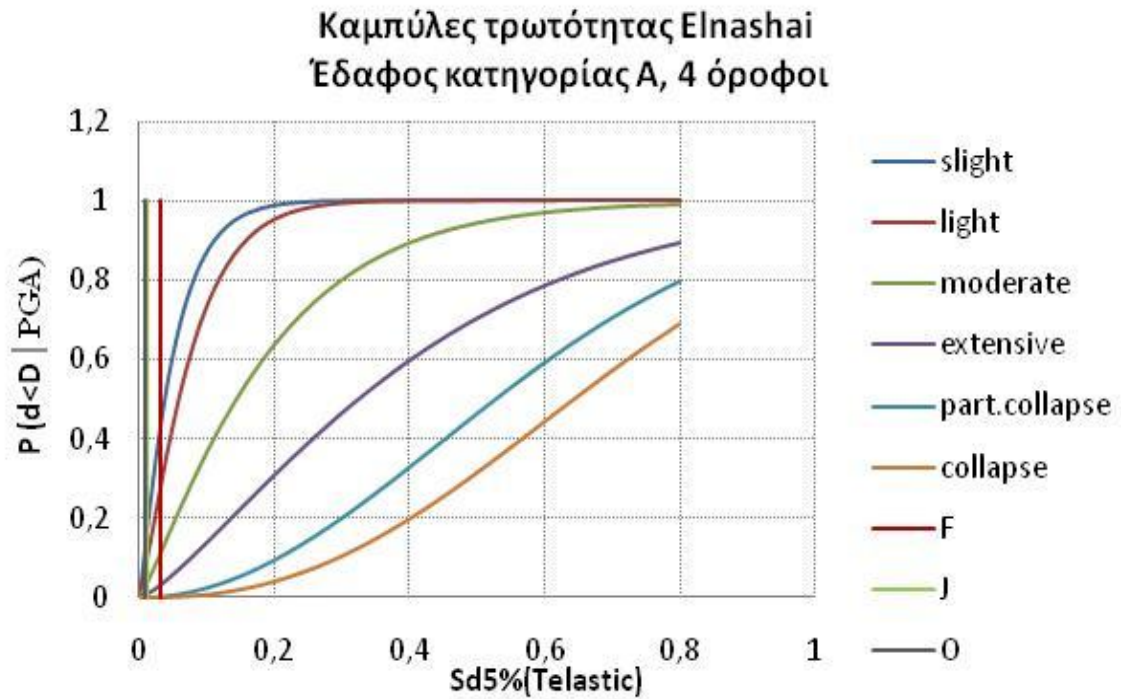
Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις +σ (2 όροφοι)



Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις +σ (3 όροφοι)



Ελαστικές καμπύλες με ελαστικές μετακινήσεις +σ (4 όροφοι)





ΕΔΑΦΟΣ Α, 1 όροφος							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.00946	0.14214	0.07553	0.03011	0.00699	0.00022	0.00003
J	0.00388	0.05593	0.02661	0.01092	0.00220	0.00004	0.00000
O	0.00268	0.03756	0.01714	0.00714	0.00136	0.00002	0.00000
ΕΔΑΦΟΣ Β, 1 όροφος							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.00882	0.13225	0.06962	0.02780	0.00638	0.00019	0.00002
J	0.00400	0.05779	0.02759	0.01131	0.00229	0.00004	0.00000
O	0.00400	0.05779	0.02759	0.01131	0.00229	0.00004	0.00000

ΕΔΑΦΟΣ Α, 2 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.01794	0.26650	0.15571	0.06182	0.01598	0.00080	0.00013
J	0.00774	0.11562	0.05983	0.02397	0.00538	0.00015	0.00002
O	0.00547	0.08043	0.03985	0.01614	0.00343	0.00007	0.00001
ΕΔΑΦΟΣ Β, 2 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.01886	0.27924	0.16451	0.06536	0.01705	0.00089	0.00015
J	0.00909	0.13649	0.07214	0.02878	0.00664	0.00021	0.00003
O	0.00656	0.09734	0.04932	0.01985	0.00434	0.00011	0.00001

ΕΔΑΦΟΣ Α, 3 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.02585	0.37063	0.23071	0.09253	0.02557	0.00167	0.00031
J	0.01077	0.16209	0.08769	0.03487	0.00827	0.00029	0.00004
O	0.00748	0.11163	0.05751	0.02306	0.00515	0.00014	0.00002

ΕΔΑΦΟΣ Β, 3 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.02929	0.41211	0.26264	0.10603	0.03000	0.00214	0.00042
J	0.01351	0.20298	0.11347	0.04501	0.01108	0.00046	0.00007
O	0.00953	0.14314	0.07614	0.03035	0.00705	0.00023	0.00003

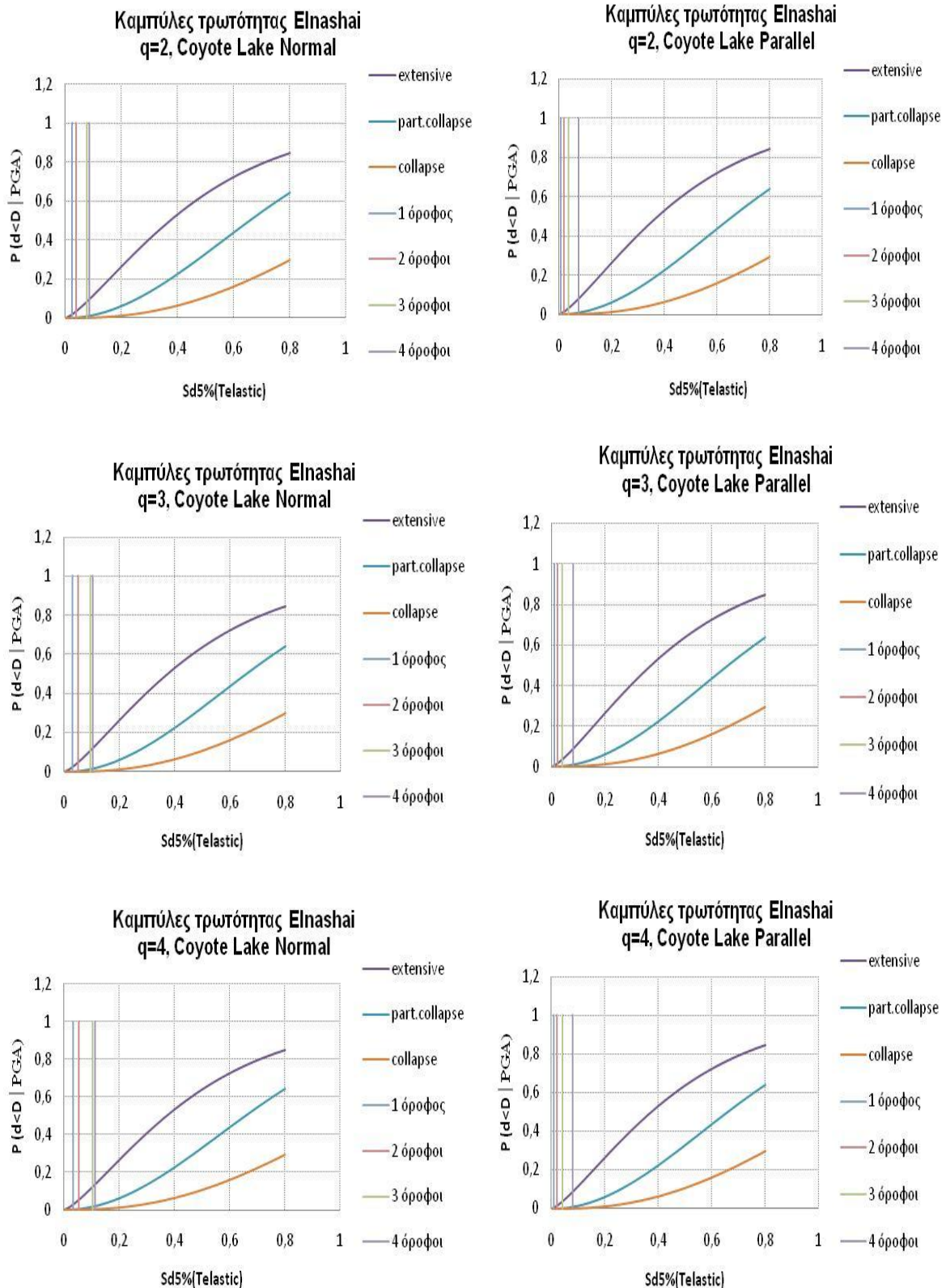
ΕΔΑΦΟΣ Α, 4 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.03279	0.45205	0.29458	0.11984	0.03467	0.00268	0.00055
J	0.01354	0.20338	0.11373	0.04511	0.01111	0.00046	0.00007
O	0.00932	0.13991	0.07419	0.02959	0.00685	0.00022	0.00003

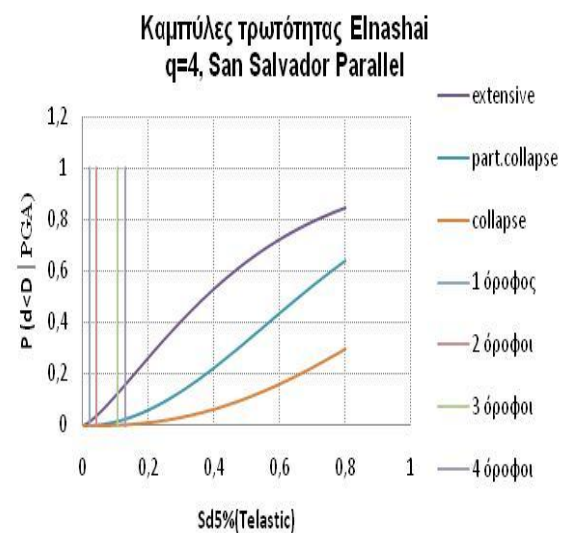
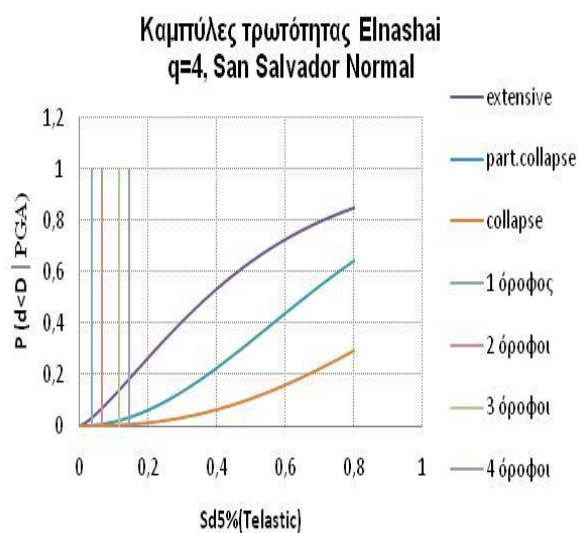
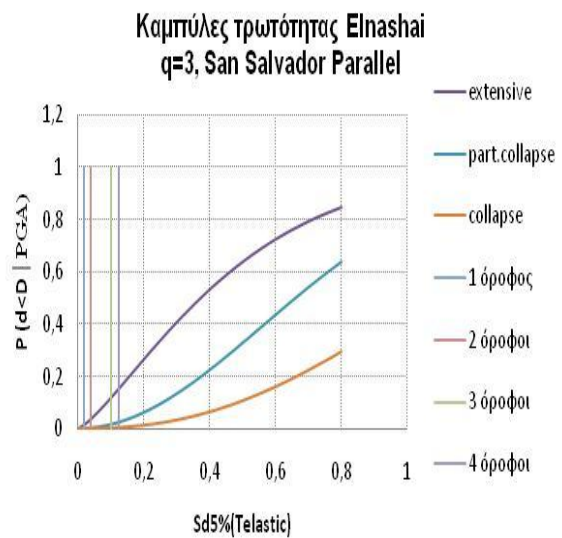
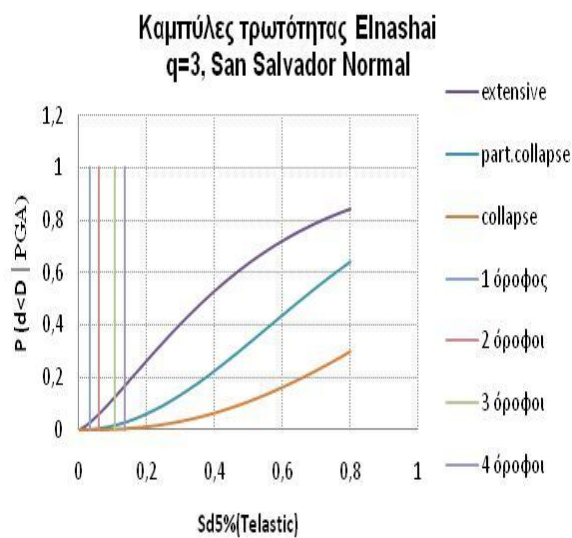
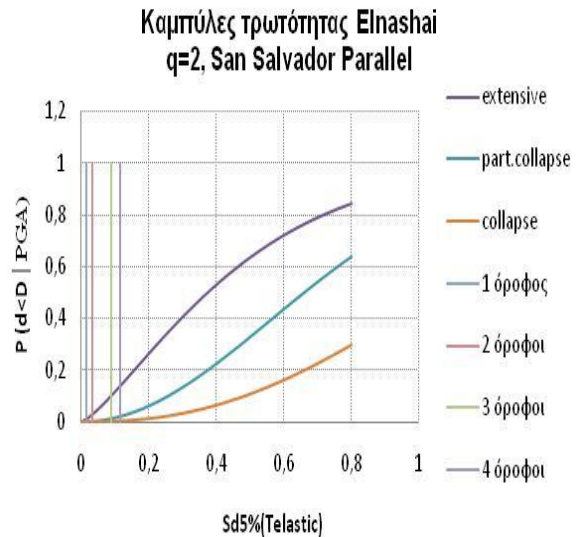
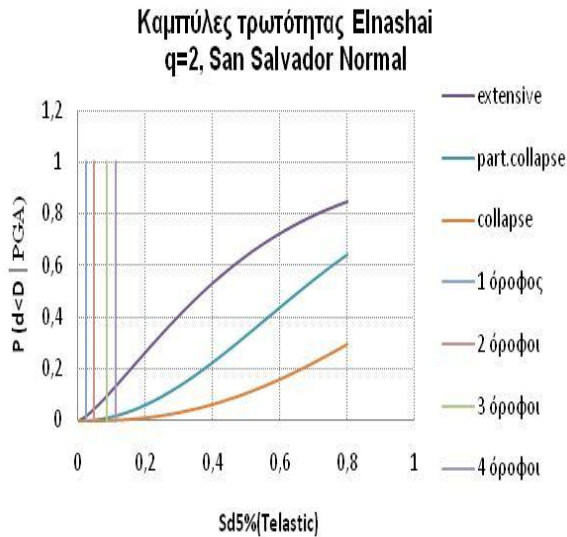
  

ΕΔΑΦΟΣ Β, 4 όροφοι							
	Sd	slight	light	moderate	extensive	art.collaps	collapse
F	0.04097	0.53629	0.36608	0.15202	0.04604	0.00419	0.00093
J	0.01846	0.27372	0.16068	0.06382	0.01658	0.00085	0.00014
O	0.01283	0.19293	0.10703	0.04247	0.01037	0.00041	0.00006



Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των καμπυλών τρωτότητας με τις ανελαστικές μετακινήσεις των πραγματικών σεισμών του Coyote Lake και του San Salvador για την παράλληλη και την κάθετη συνιστώσα, τις τέσσερις κατηγορίες κτηρίων και τις τρεις τιμές του δείκτη συμπεριφοράς, όπως και οι πιθανότητες υπέρβασης όλων των βαθμών βλάβης.





Coyote Lake Normal												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
T1	0.0236	0.018992	0.000890739	7.47E-05	0.03023	0.026108	0.001461096	0.000135	0.033545	0.029833	0.001798807	0.000174
T2	0.039622	0.036908	0.002508695	0.000259	0.049477	0.048956	0.003909033	0.000441	0.054404	0.055206	0.004724456	0.000554
T3	0.077227	0.085653	0.009497011	0.001284	0.094556	0.109972	0.014203423	0.002086	0.10322	0.122402	0.016902555	0.002574
T4	0.086481	0.098538	0.011894991	0.001684	0.103942	0.123445	0.017137806	0.002617	0.112673	0.136119	0.020107358	0.003176

Coyote Lake Parallel												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
T1	0.006612	0.003661	6.99472E-05	3.52E-06	0.007907	0.004617	0.000100028	5.41E-06	0.008554	0.005113	0.000117067	6.54E-06
T2	0.018358	0.013738	0.000539089	4.09E-05	0.020726	0.016065	0.000687054	5.47E-05	0.02191	0.017258	0.00076775	6.25E-05
T3	0.036157	0.032836	0.002089511	0.000208	0.039235	0.036449	0.002460009	0.000253	0.040774	0.038282	0.002656549	0.000277
T4	0.074691	0.082168	0.008886331	0.001185	0.078361	0.087218	0.0097767	0.00133	0.080196	0.089759	0.010237584	0.001405

San Salvador Normal												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
T1	0.02512	0.020581	0.001009128	8.67E-05	0.032177	0.028283	0.001655179	0.000157	0.035705	0.032313	0.002037682	0.000202
T2	0.047514	0.046506	0.003605643	0.0004	0.059326	0.061579	0.005615504	0.000682	0.065232	0.069378	0.006785216	0.000856
T3	0.08685	0.099057	0.011996037	0.001701	0.10635	0.126928	0.017933882	0.002765	0.116101	0.141127	0.02133611	0.003412
T4	0.111816	0.134871	0.019805867	0.003118	0.134405	0.168087	0.028489933	0.004845	0.1457	0.184847	0.033395116	0.005877

San Salvador Parallel												
	P (q=2)				P (q=3)				P (q=4)			
	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse	Sd	extensive	part.collapse	collapse
T1	0.015485	0.011026	0.00038358	2.72E-05	0.018866	0.01423	0.000569312	4.36E-05	0.020556	0.015896	0.000675873	5.36E-05
T2	0.033366	0.029629	0.001779686	0.000171	0.038666	0.035776	0.002389293	0.000244	0.041317	0.038932	0.002727579	0.000286
T3	0.089038	0.102142	0.012604398	0.001806	0.09957	0.117148	0.015737619	0.002361	0.104836	0.124737	0.017431293	0.002672
T4	0.115125	0.139699	0.020982695	0.003344	0.124779	0.153868	0.024603844	0.004055	0.129606	0.160988	0.02651827	0.004441

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι για τετραόροφα κτήρια που κυρίως υφίστανται στην περιοχή των Αθηνών, το ποσοστό βλάβης προκύπτει αρκετά μεγάλο, κυρίως για έδαφος κατηγορίας Β και για συντελεστή  $q=3$ . Ακόμα, στους πραγματικούς σεισμούς οι πιθανότητες υπέρβασης των διαφόρων σταθμών επιτελεστικότητας είναι επίσης μεγάλες και μάλιστα αρκετά μεγαλύτερες από αυτές του σεισμού της Αθήνας.

# 8

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζει μια διαδικασία προσδιορισμού της φασματικής επιτάχυνσης για σεισμούς μεσαίου μεγέθους που διέπονται από ισχυρά φαινόμενα κατευθυντικότητας σε εύρος περιόδων 1-2sec. Η δυσκολία έγκειται στον ορισμό του ορίου κοντινού πεδίου για σεισμούς μικρού μεγέθους και στον ορισμό του μικρότερου μεγέθους στο οποίο δύνανται να εμφανιστούν καταστροφικά φαινόμενα κατευθυντικότητας.

Για σεισμούς μεγάλου μεγέθους τα φαινόμενα κατευθυντικότητας κοντινού πεδίου δημιουργούν αρκετά μεγάλες φασματικές τιμές σε μεγάλες περιόδους της τάξεως των 3-4sec, ενώ οι τιμές κοντά στο 1sec σχετίζονται άμεσα με τα αποτελέσματα των σχέσεων εξασθένησης της εδαφικής κίνησης. Η ενισχυτική επίδραση της κατευθυντικότητας δεν αποτελεί μονοτονικά αυξανόμενη συνάρτηση με την περίοδο αλλά προσδίδει επίδραση σε ένα στενό εύρος περιόδων γύρω από μια περίοδο που εξαρτάται από το σεισμικό μέγεθος και αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση αυτού. Η εμφάνιση παλμών κοντινού πεδίου σε περιόδους της τάξεως των 0.5sec για σεισμούς μεγέθους μικρότερου του 6.5 όπως αυτός του San Salvador, είναι άμεσα συσχετισμένη με την παραπάνω υπόθεση.

Στη μελέτη των Bommer, Georgallides και Tromans (2001) έχει αποδειχτεί η ύπαρξη φαινομένων κοντινού πεδίου στο σεισμό του San Salvador στις 10 Οκτωβρίου 1986, μεγέθους  $M=5.4$ , ενώ ανάλογα φαινόμενα και παρατηρήσεις προέκυψαν εξετάζοντας το σεισμό μεγέθους  $M=6.3$  της L' Aquila στις 6 Απριλίου 2009. Συνεπώς, διερευνάται η ενδεχόμενη επίδραση των συγκεκριμένων φαινομένων στο σεισμό της Αθήνας μεγέθους  $M=5.9$  στις 7 Σεπτεμβρίου 1999.

Από τη μελέτη των Bommer, Georgallides και Tromans (2001) για το σεισμό του San Salvador προκύπτει ότι οι μεγάλες καταστροφές σε αστικά κέντρα



οφείλονται ίσως στην ύπαρξη της σεισμικής πηγής μέσα στην πόλη. Επίσης, μπορεί να οφείλονται στην ισχυρή εδαφική κίνηση και στην κακή ποιότητα των κατασκευών. Ακόμα, καταστροφικές εδαφικές κινήσεις μπορούν να εμφανιστούν και στο μακρινό πεδίο, όπου οφείλονται σε ενίσχυση λόγω της τοπογραφίας και των εδαφικών χαρακτηριστικών. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του κοντινού πεδίου είναι το εύρος στο οποίο η εδαφική κίνηση παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία οφείλονται στην πόλωση της δόνησης που οδηγεί σε ισχυρότερο κραδασμό στην κάθετη στο ρήγμα διεύθυνση. Άλλα χαρακτηριστικά αποτελούν η κατευθυντικότητα η οποία σχετίζεται με τη διάδοση της διάρρηξης και με παλμούς ταχύτητας μεγάλης διάρκειας, οι οποίοι παρουσιάζονται στη χρονοϊστορία ταχυτήτων υποδηλώνοντας μια συγκέντρωση ενέργειας που δύναται να προκαλέσει σοβαρές καταστροφές. Επίσης, μαλακές εδαφικές αποθέσεις δύνανται να ενισχύσουν την εδαφική κίνηση.

Ακόμα, φαίνεται ότι το να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα κατευθυντικότητας σε σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου του 6.5 αποτελεί μη συντηρητική παραδοχή. Πολλοί ερευνητές αποδίδουν την ισχυρή εδαφική κίνηση του San Salvador στο μικρό εστιακό βάθος και στην ενισχυτική ικανότητα στρωμάτων μη στερεοποιημένων εδαφικών αποθέσεων που καλύπτουν μεγάλο μέρος της πόλης. Αν και αποδεικνύεται ότι υπήρξε εδαφική ενίσχυση, αυτή δεν αποτελεί εξήγηση της μεγάλης έντασης των καταγεγραμμένων εδαφικών κινήσεων. Οι μεγάλες φασματικές τιμές τόσο σε μικρές όσο και σε μεσαίες περιόδους οφείλονται στο ότι οι θέσεις καταγραφής βρίσκονται πολύ κοντά στο ρήγμα και στην ενισχυτική επίδραση της δυναμικής εδαφικής συμπεριφοράς. Σε έρευνες που αναφέρονται στο σεισμό της L'Aquila το 2009, τα αποτελέσματα της ανάλυσης της βάσης NGA χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς μετρήσεων για τη διερεύνηση των φαινομένων κοντινού πεδίου. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν οριζόντιες περιστρεμμένες καταγραφές του κύριου σεισμικού γεγονότος και εντοπίστηκαν οι παλμοί και η σεισμική απαίτηση. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα φαίνεται ότι συμπίπτουν με αυτά της ανάλυσης των δεδομένων της NGA και αποδεικνύουν ότι υφίσταται όντως η επίδραση της κατευθυντικότητας και ότι η μη συνήθης σεισμική απαίτηση επηρεάζει τις κατασκευές στο κοντινό πεδίο. Αν και το φαινόμενο της κατευθυντικότητας και η επίδρασή του είναι γνωστά εδώ και πολλά χρόνια, η ποσοτικοποίηση της επίδρασής του στις κατασκευές και ο εντοπισμός της ύπαρξής του σε παρατηρούμενα σεισμικά γεγονότα δεν έχει επιτευχθεί ακόμα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός δεδομένων που αποδεικνύουν την ύπαρξή του στο κοντινό πεδίο σεισμών μικρού μεγέθους και αυτή εξετάζεται και στην παρούσα μελέτη για το σεισμό της Αθήνας.

Μετά από εξέταση των σχέσεων των Boore – Atkinson (2008) και των Shahi – Baker (2011) και των παραδοχών τους προέκυψε ότι οι Boore – Atkinson (2008) εξετάζουν το κοντινό πεδίο σε σχέση με τις μέγιστες επιταχύνσεις ενώ οι Shahi – Baker (2011) λαμβάνουν υπόψη την έννοια της κατευθυντικότητας άρα είναι λογικό να δίνουν πολύ μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων. Έτσι, το φαινόμενο της κατευθυντικότητας προσδίδει καταπύηση στην κατασκευή και πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη αυξάνοντας τις απαιτήσεις σχεδιασμού της. Ακόμη, και οι δυο



σχέσεις συγκρινόμενες με φάσματα πραγματικών σεισμών προκύπτει ότι προσεγγίζουν πολύ ικανοποιητικά την εδαφική κίνηση.

Επίσης, το μοντέλο του Rowshandel (2006) για την επίδραση του κοντινού πεδίου στην εδαφική κίνηση λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε μορφή διάρρηξης σε οποιαδήποτε γεωμετρία ρήγματος οπότε διευκολύνεται η εκτίμηση της κατευθυντικότητας στη διεύθυνση της διάρρηξης και δεν εξαρτά την εδαφική κίνηση από τη βύθιση του ρήγματος αλλά λαμβάνει υπόψη και την κατανομή των διαρρήξεων. Οι Shahi- Baker (2011) θέλοντας να προσεγγίσουν τα φαινόμενα του κοντινού πεδίου, εισάγουν μια κωδωνοειδή μορφή επαύξησης του φάσματος γύρω από την περίοδο του παλμού  $T_P$ , λαμβάνοντας υπόψη την κατευθυντικότητα μέσω του πολλαπλασιασμού με το συντελεστή  $\mu_{lnAf}$ . Οι τελευταίοι σε αντίθεση με τον Rowshandel (2006) αναφέρονται σε εμφάνιση φαινομένων κατευθυντικότητας σε οποιαδήποτε θέση γύρω από το ρήγμα. Στην περίπτωση του σεισμού της Αθήνας το μοντέλο του Rowshandel αποδείχτηκε ότι εκτιμά καλύτερα από τους Shahi – Baker τη δράση της κατευθυντικότητας.

Από τη προκύπτουσες καταγεγραμμένες τιμές του σεισμού της L'Aquila στους καταγραφικούς σταθμούς AQK και AQU προκύπτουν έντονοι διπλοί παλμοί ταχύτητας, οι οποίοι αν συμβούν στην αρχή της κίνησης αποτελούν χαρακτηριστικό στοιχείο του κοντινού πεδίου και μεταδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας στις κατασκευές. Επίσης, οι δεσπόζουσες συχνότητες των ισχυρών παλμών ταχυτήτων αντιστοιχούν στις δεσπόζουσες περιόδους μερικών κτηρίων, γι' αυτό οδηγούν στην απορρόφηση ενέργειας από τα κτήρια σε μικρό χρονικό διάστημα. Τόσο τα φάσματα απόκρισης όσο και ενίσχυσης υποδεικνύουν ομοιότητες στο συχνοτικό περιεχόμενο και αποδεικνύουν ότι ο κραδασμός του ελευθέρου πεδίου είναι πλούσιος σε συχνότητες παρόμοιες με τις δεσπόζουσες συχνότητες ταλάντωσης κτηρίων ενός μέχρι 8 ορόφων. Είναι φανερό ότι οι συντονισμοί βρίσκονται στην περιοχή συχνοτήτων των τυπικών κτηρίων ενός έως οκτώ ορόφων. Για το λόγο αυτό συμπεραίνουμε ότι οι επιδράσεις πεδίου έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των κατασκευών.

Φαινόμενα κατευθυντικότητας παρατηρούνται αρχικά στις θέσεις με την εμφάνιση του μεγίστου αριθμού βλαβών. Οι βλάβες στο σεισμό της Αθήνας εντοπίζονται στα βόρεια της πόλης, δημιουργώντας νέες ευπαθείς περιοχές από τα σεισμογενή ρήγματα που εντοπίζονται στη βόρεια περιοχή. Επίσης, η κατευθυντικότητα συνδέεται με τη μικρή διάρκεια εδαφικής κίνησης. Όπως παρατηρείται στις καταγραφές του σεισμού της Αθήνας, όπως και σε αυτές του San Salvador και της L'Aquila, η διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης είναι μικρή (περίπου 2-3sec). Για αυτό το λόγο, η ισχυρή εδαφική κίνηση κατέστρεψε την πλειοψηφία των κατασκευών με ανεπάρκειες μέσα σε ένα αριθμό κύκλων. Αν η διάρκεια ήταν μεγαλύτερη σε μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων, οι απαιτήσεις μετακινήσεων θα ήταν επίσης αυξημένες. Καθώς η εδαφική κίνηση στα σεισμικά γεγονότα μικρού προς μεσαίου μεγέθους έχει μικρή διάρκεια λόγω του αναλόγως μικρού μεγέθους, και η διάρκεια μειώνεται περαιτέρω λόγω της πρόσω κατευθυντικότητας, μπορεί να μην οδηγήσει απαραίτητως σε μεγάλες καταστροφές. Παρ' όλα αυτά, λόγω του ότι σεισμοί μικρότερου μεγέθους συμβαίνουν συχνότερα,

υπάρχει πάντοτε ο κίνδυνος ότι τα κτήρια δύνανται να αποδυναμωθούν από την ενισχυμένη δόνηση και ακόμα και να καταρρεύσουν λόγω μεταγενέστερων σεισμών. Τέλος, η κατευθυντικότητα ευνοείται όταν η περίοδος του παλμού βρίσκεται εντός της αναμενόμενης παλμικής διασποράς σε σχέση με το σεισμικό μέγεθος, γεγονός που συμβαίνει σε όλους τους εξεταζόμενους σεισμούς της παρούσας μελέτης.

Από τα προαναφερθέντα, αποδεικνύεται η ύπαρξη φαινομένων κατευθυντικότητας στο σεισμό της Αθήνας οπότε εφαρμόζονται οι σχέσεις των Boore – Atkinson (2008) και Shahi-Baker (2011) για τον προσδιορισμό των φασμάτων επιταχύνσεων λαμβάνοντας ή μη υπόψη την επίδραση του κοντινού πεδίου αντίστοιχα. Οι φασματικές τιμές σε περιόδους κοντά στην περίοδο του παλμού κυμαίνονται μεταξύ των 0.1 έως 0.4g, εξαρτώμενες από την απόσταση από το επίπεδο του ρήγματος, το σεισμικό μέγεθος, τα εδαφικά χαρακτηριστικά και τον τύπο του ρήγματος. Το φάσμα των καταγραφών της L'Aquila παρουσιάζει ένα μέγιστο των τιμών επιταχύνσεων (μια απότομη αύξηση) στο εύρος περιόδων γύρω από την περίοδο του παλμού, όπως ακριβώς δηλαδή και το φάσμα των Shahi-Baker (2011). Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς οι παρούσες σχέσεις εξασθένισης της εδαφικής κίνησης δεν είναι ικανές να το περιγράψουν και για το λόγο αυτό ο σεισμικός κίνδυνος και η ανάλυση απαίτησης των κατασκευών μπορεί να είναι μη συντηρητική.

Από τη σύγκριση των φασμάτων με αυτά του EC-8 προκύπτει ότι σε πιο μαλακό έδαφος αυξάνονται οι φασματικές τιμές και οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε μεγαλύτερες περιόδους και ότι η επίδραση του εδαφικού στρώματος αυξάνει τη μέγιστη φασματική επιτάχυνση ανάλογα με τις ιδιότητες της κίνησης, το πάχος και τις ιδιότητες της εδαφικής στρώσης. Ακόμα, ο σχεδιασμός στη ζώνη I είναι περισσότερο επίφοβος και μάλλον απαγορευτικός για θέσεις πολύ κοντά στο ρήγμα, κυρίως για έδαφος κατηγορίας A όπου ο φθίνων κλάδος του φάσματος βρίσκεται χαμηλότερα και ανεπαρκής για την αντιμετώπιση του φαινομένου της κατευθυντικότητας. Ακόμη, από τη σύγκριση με άλλους σεισμούς παρόμοιων χαρακτηριστικών αποδεικνύεται ότι στην Αθήνα τελικά ενδεχομένως να υπήρχε το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Υπάρχουν αποδείξεις ότι η επιφανειακή στρώση μαλακού βράχου και σιφρών εδαφών επιδρά σημαντικά στην ενίσχυση της σεισμικής κίνησης σε κάποιες από τις ισχυρότερα πληγιέσες περιοχές από σεισμούς. Στο σχεδιασμό δε λαμβάνεται υπόψη αυτή η επίδραση γι' αυτό χρήζει ιδιαίτερης προσοχής από την κοινότητα των μηχανικών.

Επίσης, εξάγονται τόσο τα ελαστικά φάσματα μετακινήσεων μέσης τιμής και μέσης τιμής συν τυπική απόκλιση όσο και τα ανελαστικά φάσματα μετακινήσεων για όλες τις θέσεις. Για την εξαγωγή τους χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Fajfar καθώς τα αποτελέσματά της είναι έντονα συσχετιζόμενα με τα αποτελέσματα ανελαστικών προς ελαστικές μετακινήσεις των Chioccarelli – Iervolino (2010) για το σεισμό της L' Aquila (6 Απριλίου 2009). Οι προκύπτουσες φασματικές τιμές συγκρίνονται με αυτές χαρακτηριστικών σεισμικών καταγραφών κοντινού πεδίου και φαίνεται ότι οι τιμές ελαστικών φασμάτων μετακινήσεων συν τυπική απόκλιση του σεισμού της Αθήνας προσεγγίζουν ικανοποιητικά αυτές των πραγματικών καταγραφών άλλων σεισμών. Τέλος, στο σεισμό της L'Aquila προκύπτει ότι ο λόγος της ανελαστικής προς την

ελαστική απόκριση δεν είναι ίδιος με αυτόν των τυπικών καταγραφών δηλαδή μπορεί να παραβιάσει τον κανόνα των ίσων μετακινήσεων και για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί κατάλληλα στο σεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Από τα αποτελέσματα μετακινήσεων καταλήγουμε στο ότι οι απαιτήσεις σχεδιασμού μιας κατασκευής είναι αυξημένες σε μαλακότερο έδαφος, πιο κοντά στο ρήγμα, για μέση τιμή συν τυπική απόκλιση και στην περίπτωση που επιδρά το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Συνεπώς, όταν το κτήριο δέχεται μεγαλύτερη καταπόνηση χρειάζεται μεγαλύτερος συντελεστής συμπεριφοράς και μεγαλύτερη προσοχή στο σχεδιασμό του. Επιπρόσθετα, ελάχιστες καταστροφές παρατηρήθηκαν σε χαμηλά κτήρια στο κέντρο της Αθήνας. Από τα ανελαστικά φάσματα προκύπτει συντελεστής διαρροής τουλάχιστον 0.2 και δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος 0.3-0.4sec. Ο κανονισμός 1959 προτείνει πολύ μικρότερες παραμέτρους γι' αυτό και παρατηρήθηκαν πολλαπλές καταστροφές. Οι καταστροφές στην πλειόσειστη περιοχή μπορούν να εξηγηθούν θεωρώντας την πιθανότητα μεγάλης περιόδου (>0.4sec), υψηλών παλμών επιτάχυνσης λόγω φαινομένων κατευθυντικότητας και ενίσχυσης από φαινόμενα πεδίου. Οι τιμές επιταχύνσεων είναι άμεσα συγκρίσιμες με εκτιμήσεις από καταγραφές κοντινού πεδίου σεισμών μεσαίου μεγέθους ( $M < 6$ ) στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο.

Καταλήγοντας, αναπαράχθηκαν οι καμπύλες τρωτότητας των Rossetto – Elnashai (2002) για ελαστικές μετακινήσεις μέσης τιμής και μέσης τιμής συν τυπική απόκλιση και ανελαστικές μετακινήσεις και παράχθηκαν οι αντίστοιχες πιθανότητες υπέρβασης των διαφόρων επιπέδων βλαβών για μονώροφα, διώροφα, τριώροφα και τετραώροφα κτήρια. Τονίζεται ότι οι αντίστοιχες πιθανότητες και καμπύλες κατασκευάστηκαν και για τους πραγματικούς σεισμούς του Coyote Lake και του San Salvador. Τελικά εμφανίζεται αρκετά μεγάλη πιθανότητα βλαβών σε τετραώροφα κτήρια.

Στα επόμενα 25 χρόνια ο πληθυσμός της γης θα έχει διπλασιαστεί και θα αυξηθεί η πιθανότητα εμφάνισης σεισμών μικρού προς μεσαίου μεγέθους στα αστικά κέντρα. Πολλές περιοχές θα επεκταθούν με άγνωστο επίπεδο σεισμικού κινδύνου λόγω της αδυναμίας εντοπισμού μικρών διαρρήξεων και του ότι πολύ σημαντικά σεισμικά γεγονότα δεν έχουν καταγραφεί. Η μικρή περίοδος επαναφοράς μικρών σεισμικών γεγονότων σημαίνει τη σημαντική επίδρασή τους στην εκτίμηση σεισμικού κινδύνου, άρα δεν θα πρέπει να αμελείται. Τα φαινόμενα κοντινού πεδίου μικρών σεισμών είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε περιοχές χαμηλής σεισμικότητας όπως η βορειοδυτική Ευρώπη. Φαινόμενα κατευθυντικότητας για μικρότερα σεισμικά γεγονότα φαίνεται να αυξάνουν τη φασματική ενίσχυση σε περιόδους που συμπίπτουν με την ιδιοπερίοδο πολλών κατασκευών σε αστικές περιοχές.

Τα κεντρικά, ανατολικά καθώς και άλλα τμήματα των Ηνωμένων Πολιτειών και όλων των μεσογειακών χωρών έχουν μεγάλο ποσοστό κτηρίων με ελλείψεις, χαμηλού (δύο με τέσσερις όροφοι) και ενδιάμεσου (πέντε με οκτώ όροφοι) ύψους, από οπλισμένο σκυρόδεμα ή τοιχοποιία σε σεισμικά επικίνδυνες περιοχές. Ο σχετιζόμενος κίνδυνος με τις εν λόγω κατασκευές είναι σημαντικός και μπορεί και επιζήμιος τόσο από άποψη απώλειας ανθρώπινων ζώων, όσο και υλικών αγαθών. Συστηματική μείωση του αριθμού των ευπαθών κατασκευών με αντικατάστασή τους

από νεότερες ή με επισκευή και ενίσχυσή τους, δύναται να μειώσει των κίνδυνο βλαβών από σεισμό. Συμπερασματικά, ακόμα και για γεγονότα μεσαίου μεγέθους στο εύρος περιόδων 1-2sec, εντοπίζονται ισχυρά φαινόμενα κατευθυντικότητας που είναι επιτακτικό πλέον να ληφθούν υπόψη από τους εκάστοτε κανονισμούς. Άρα οι συγκεκριμένοι σεισμοί ( $M < 6$ ) μπορεί να δημιουργήσουν σημαντικές καταστροφές αν συμβούν κοντά σε πυκνοκατοικημένη περιοχή. Μεγέθη μικρότερα του 6 μπορεί να δημιουργήσουν μεγάλες εδαφικές ( $> 0.5g$ ) και φασματικές ( $> 1.5g$ ) επιταχύνσεις στην περιοχή γύρω από το ρήγμα. Σπάνιοι σεισμοί μεγάλου μεγέθους ( $M > 7$ ) δεν επηρεάζουν αναγκαστικά την κτηριακή απόκριση, ειδικότερα για κανονικές κτηριακές κατασκευές. Το γεγονός αυτό έχει σημαντικές επιδράσεις στους ισχύοντες κανονισμούς σε περιοχές μεσαίας σεισμικότητας όπως η ανατολική βόρεια Αμερική και η Ευρώπη.

## 9

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. S. Atzori, M. Manunta, G. Formaro, A. Ganas, S. Salvi. *Postseismic displacement of the 1999 Athens earthquake retrieved by the differential interferometry by synthetic aperture radar time series*, Journal of geophysical research, Vol.113, 2008
2. Boore DM, Joyner WB, Fumal TE. *Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report*. Open-File Report 93-509, US Geological Survey, 1993
3. Boore DM, Joyner WB. *Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake*. Bull Seismol Soc Am 1981;71(6):2011-38
4. David M.Boore. *Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method*, 2003
5. D. M. Boore, G. M. Atkinson, M. Eeri. *Ground motion prediction equations for the average horizontal equations of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10s*, Earthquake spectra, Vol.24, No.1, pages 99-138, February 2008
6. J. Bray, A. Rodriguez-Marek. *Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004) 815-828
7. I. Cuesta, M. Eeri, M.A. Aschheim, P. Fajfar. *Simplified R- Factor relationships for Strong Ground Motions*, Earthquake spectra, Volume 19, No.1, pages 25-45, February 2003
8. L. Decanini, A De Sortis, L. Liberatore, F. Mollaioli. *Damage characterization of the 1999 Athens earthquake*, 12th European conference on Earthquake Engineering, paper reference 287
9. D.J. Dowrick, *Αντισεισμικός σχεδιασμός 1978* (Γκιούρδας)

10. A. Elenas. *Athens earthquake of 7 September 1999: Intensity measures and observed damages*, ISET Journal of Earthquake Technology, Technical Note, Vol.40, No. 1, pp.77-97, March 2003
11. A.Ganas, S.B.Pavlidis, S.Sboras, S.Valkaniotis, S.Papaioannou, G.A.Alexandris, A.Plessa, G.A.Papadopoulos. *Active fault geometry and kinematics in Parnitha Mountain, Attica, Greece*, Journal of Structural Geology 26 (2004) 2103-2118
12. Ganas Athanasios, Pavlidis Spyros, Karastathis Vassilios. *DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates*, Geomorphology 65 (2005) 301-319
13. Halldorsson and Papageorgiou. *Region specific ground motion simulations using the specific barrier model*, 2004
14. A. Kappos, V. Lekidis, G. Panagopoulos, I. Sous, N. Theodoulidis, Ch. Karakostas, T. Anastasiadis, T. Salonikios, B. Margaris. *Analytical Estimation of Economic Loss for Buildings in the Area Struck by the 1999 Athens Earthquake and Comparison with Statistical Repair Costs*, Earthquake spectra, Vol.23, No.2, pages 333-355, May 2007
15. G. Mavroeidis and A. Papageorgiou. *A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions*, 2003
16. Papageorgiou and Aki. *A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion*, 1983
17. Gerassimos A. Papadopoulos, Hiroyuki Matsumoto, Athanassios Ganas, Vassilis Karastathis and Spyros Pavlidis. *Deformation patterns associated with the M5.9 Athens (Greece) earthquake of 7 September 1999*, Journal of Seismology 8: 381-394, 2004
18. Gerassimos A. Papadopoulos, Athanasios Ganas and Spyros Pavlidis. *The problem of seismic potential assessment: Case study of the unexpected earthquake of September 1999 in Athens, Greece*, Earth Planets Space, 54, 9-18, 2002
19. I.D.Papanikolaou, D.I.Papanikolaou and E.L.Lekkas. *Low slip rate faults around big cities: a challenging threat. The Afidnai fault as a case study for the city of Athens*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China
20. R. Pinho, H. Crowley. *Revisiting Eurocode 8 formulae for periods of vibration and their employment in linear seismic analysis*, E. Cosenza, Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, 95-108, Doppiavoce, Napoli, Italy, 2009
21. Adrian Rodriguez-Marek. *Near-Fault Seismic Site Response*, 2000
22. T. Rossetto, A. Elnashai. *Derivation of vulnerability functions for European type RC structures based on observational data*, Engineering structures 25, pp. 1241-1263, 2003
23. S. K. Shahi, J. W. Baker. *An Empirically Calibrated Framework for Including the Effects of Near – Fault Directivity in Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, Bulletin of the seismological society of America, Vol.101, No.2, pp. 742-755, April 2011



24. Paul G. Somerville. *Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse*, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137 (2003) 201-212
25. Jonathan P. Stewart. *Ground Motion Evaluation Procedures for Performance –Based Design*, 2001
26. G.A.Tselentis, J. Zahradnik. *The Athens earthquake of 7 September 1999*, Bulletin of the seismological society of America, 90, 5, pp.1143-1160, October 2000
27. Α. Αναγνωστόπουλος, Μ. Καββαδάς και Β. Παπαδόπουλος, *Σημειώσεις για τον Ευρωκώδικα 7 (EN 1997)*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα, Οκτώβριος 2009
28. Γ. Γκαζέτας, Γ. Μπουκοβάλας, Ι. Πρωτονοτάριος, Α. Παπαδημητρίου, Π. Ψαρρόπουλος, Ν. Γερόλυμος, Α. Αντωνίου, Γ. Κουρετζής, Π.Κάλλου, *Μελέτη του σεισμού της Αθήνας της 7-9-99, υπολογιστική εκτίμηση των επιταχύνσεων στις πλειόσειστες περιοχές, έκθεση προς το τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος, απόφαση ΔΕ Γ/18/3/99*
29. Π. Καρύδης, Ι.Ταφλαμπάς, *Σημειώσεις μαθήματος Τεχνικής σεισμολογίας 2007*
30. Γ. Μπουκοβάλας και Γ. Κουρετζής, *Προκαταρκτική εκτίμηση των επιταχύνσεων στις πλειόσειστες περιοχές του σεισμού της Αθήνας (07/09/99)*
31. Π. Παπαζάχος, *Εισαγωγή στη σεισμολογία*
32. *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ) 2000*, ΟΑΣΠ, 2001
33. *Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ)*, ΟΑΣΠ, 2001
34. Αρχείο text που συνόδευε τις καταγραφές του σεισμού από το γεωδυναμικό ινστιτούτο