



ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΝΕΑΩΡΟΦΟΥ  
ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΚΤΙΡΙΟΥ ΣΕ ΣΕΙΣΜΟΥΣ  
ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ  
ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΔΑ*

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ταυλάκη Μαρία

Επιβλέπων: Ι. Ψυχάρης, Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Ι. Ταφλαμπάς, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός



## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον αναπληρωτή καθηγητή Ι. Ψυχάρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ πάνω στο θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον Δρ. Πολιτικό Μηχανικό κύριο Ι. Ταφλαμπά καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κύριο Π. Μίμογλου για την πολύτιμη και απαραίτητη βοήθειά τους σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	3
Εισαγωγικό Σημείωμα .....	7
1 Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis) .....	9
1.1 Γενικά.....	9
1.2 Εισαγωγή .....	9
1.3 Βασικές έννοιες της μεθόδου <i>IDA</i> για μία καταγραφή χρονοϊστορίας.....	12
1.4 Κάποιες γενικές ιδιότητες της καμπύλης <i>IDA</i> .....	15
1.5 Σημείο Δυναμικής Αστάθειας καμπύλης <i>IDA</i> .....	20
1.6 Καμπύλες <i>IDA</i> πολλών καταγραφών και πώς αυτές συνοψίζονται .....	20
1.7 Σύγκριση της ανάλυσης <i>IDA</i> με τη Στατική Προσαυξητική Μέθοδο Pushover..	22
2 Χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης σε σεισμική διέγερση κοντινού πεδίου.....	27
2.1 Εισαγωγή .....	27
2.1.1 Μηχανισμός Γένεσης-Χαρακτηριστικά .....	27
2.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου. ....	32
2.2 Ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών Κατευθυντικότητας της Διάρρηξης- Διαθέσιμα Μοντέλα .....	42
2.2.1 Φασματική επιτάχυνση.....	42
2.2.2 Διάρκεια και ισοδύναμος αριθμός ομοειδών κύκλων .....	42
2.2.3 Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV) .....	44
2.2.4 Περίοδος παλμού.....	47
2.2.5 Αριθμός σημαντικών παλμών .....	51
2.3 Ποσοτικοποίηση της Παραμένουσας Μετακίνησης .....	52
2.4 Χαρακτηριστικά των Επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν .....	54
3 Παρουσίαση του Φορέα.....	59
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	59
3.2 Αναλυτική Περιγραφή.....	62
3.3 Δυναμικά Χαρακτηριστικά της κατασκευής.....	65

3.3.1	Αρίθμηση Βαθμών Ελευθερίας της κατασκευής.....	65
3.3.2	Μάζες .....	66
3.3.3	Ιδιομορφές.....	66
3.3.4	Υπολογισμός των Συντελεστών Συμμετοχής $\Gamma_n$ και των Ενεργών Ιδιομορφικών Μαζών $M_n^*$ .....	68
3.3.5	Καμπύλη αντίστασης της Κατασκευής και Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Σύστημα .....	69
4	Μελέτη της Απόκρισης της Κατασκευής στα υπό εξέταση επιταχυνσιογραφήματα 75	
4.1	Ελαστική Απόκριση .....	75
4.2	Ανελαστική Απόκριση του Φορέα .....	78
4.2.1	Εισαγωγή-Περιγραφή της Ανάλυσης-Παράμετροι επίλυσης .....	78
4.2.2	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης.....	80
4.3	Επεξεργασία των Αποτελεσμάτων.....	117
4.3.1	Μοναδιαία Επιταχυνσιογραφήματα .....	117
4.3.2	Καμπύλες <i>IDA</i> .....	120
4.3.3	Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα .....	122
4.4	Σχολιασμός-Συμπεράσματα .....	124
5	Βιβλιογραφία .....	127
6	Παράρτημα .....	128
6.1	Πίνακας αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover.....	128
6.2	Τιμές Καμπύλης SA-SD ισοδύναμου μονοβάθμιου .....	129
6.2.1	Στοιχεία υπολογισμών της μεθόδου N2 .....	130



## Εισαγωγικό Σημείωμα

Η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων χρόνων έχει οδηγήσει στην αλματώδη ανάπτυξη ολοένα συνθετότερων μεθόδων ανάλυσης των κατασκευών. Πλέον η επιστημονική μέθοδος έχει προχωρήσει σταδιακά από την ελαστική στατική στην ανελαστική δυναμική ανάλυση. Μία εφαρμογή της τελευταίας αποτελεί η μέθοδος IDA, η οποία περιλαμβάνει την υποβολή της κατασκευής σε επιταχυνσιογραφήματα κλιμακωμένα με κατάλληλους συντελεστές, ώστε να καλυφθεί ολόκληρο το φάσμα απόκρισής της, από την ελαστική ως την ανελαστική συμπεριφορά και τέλος την κατάρρευση.

Εν προκειμένω, μελετάται η απόκριση μιας εννιαώροφης μεταλλικής πλαισιακής κατασκευής με χρήση της μεθόδου *IDA*, η οποία υποβάλλεται σε σεισμούς κοντινού πεδίου, ένα φαινόμενο που μελετήθηκε σχετικά πρόσφατα και διεγείρει τις κατασκευές με τρόπο αρκετά διαφορετικό από ό,τι οι συνηθισμένοι σεισμοί μακρινού πεδίου.

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη: Πρώτα εισάγονται κάποια θεωρητικά στοιχεία για τη μέθοδο *IDA* και τους σεισμούς κοντινού πεδίου στα κεφάλαια 1 και 2. Έπειτα γίνεται παρουσίαση του φορέα που χρησιμοποιήθηκε και περιγράφονται τα βασικά δυναμικά χαρακτηριστικά του στο Κεφάλαιο 4. Στη συνέχεια προχωράμε στην παράθεση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, και έπειτα στην επεξεργασία τους, στις παραγράφους 5.1 και 5.2. Τέλος, συνάγονται κάποια γενικά συμπεράσματα για την απόκριση της κατασκευής και την αξιοπιστία της μεθόδου ανάλυσης στην παράγραφο 5.3.





## 1 Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis)

### 1.1 Γενικά

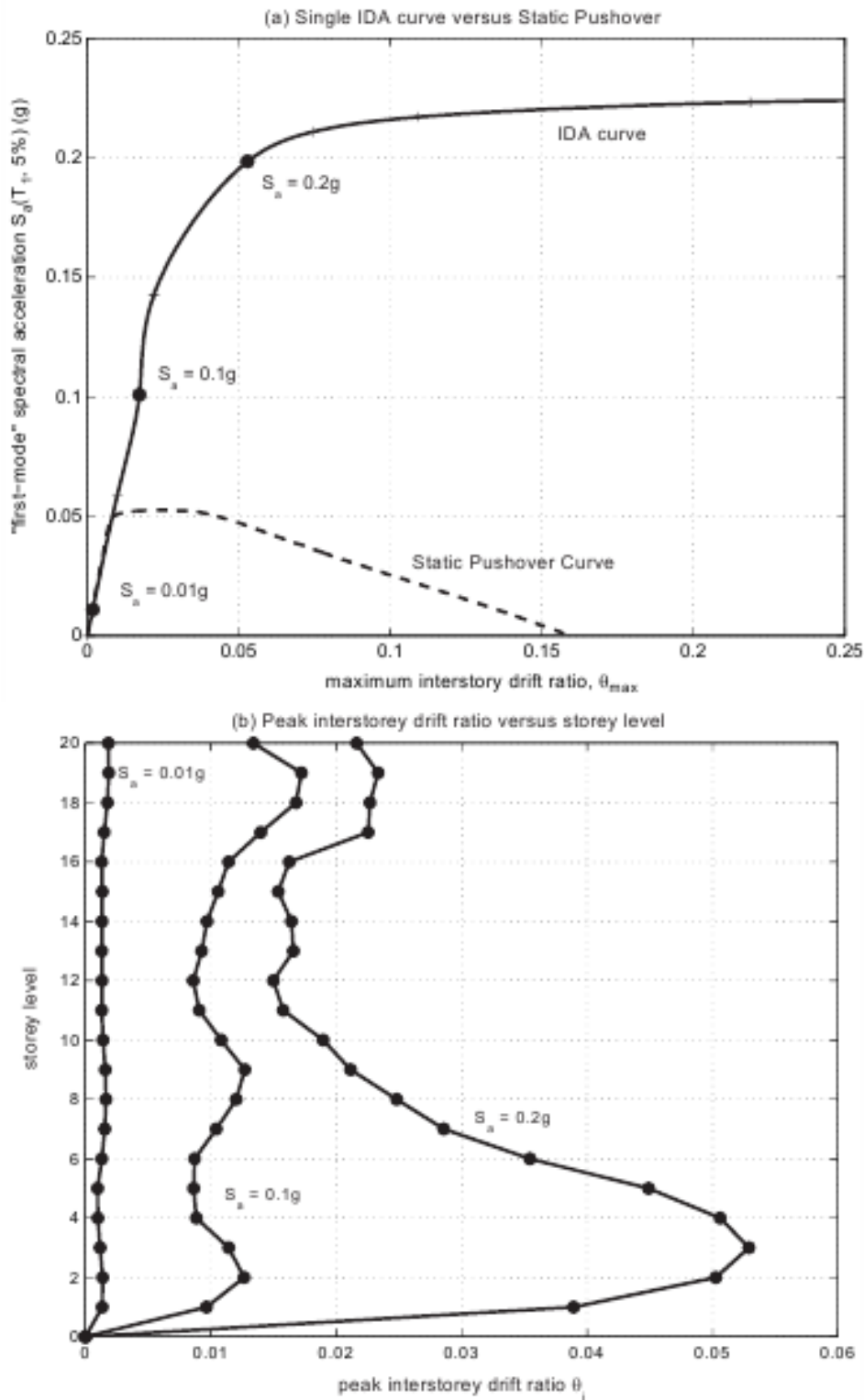
Η Δυναμική Προσαυξητική Ανάλυση (*Incremental Dynamic Analysis*) είναι μία παραμετρική μέθοδος ανάλυσης, η οποία εμφανίστηκε πρόσφατα σε διάφορες μορφές προκειμένου να εκτιμήσει εκτενέστερα τη συμπεριφορά των κατασκευών υπό σεισμικά φορτία. Περιλαμβάνει την υποβολή του μοντέλου κάποιας κατασκευής σε μία (ή περισσότερες) καταγραφές εδαφικής κίνησης, η καθεμία από τις οποίες κλιμακώνεται σε διάφορα επίπεδα έντασης, παράγοντας έτσι μία (ή περισσότερες) καμπύλες απόκρισης ως προς μέτρο έντασης.

### 1.2 Εισαγωγή

Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος επιτρέπει την αναζήτηση ολοένα ακριβέστερων αλλά και συνθετότερων μεθόδων ανάλυσης. Έτσι, η τελευταία λέξη της τεχνολογίας έχει προχωρήσει σταδιακά από την ελαστική στατική ανάλυση στη δυναμική ελαστική, την ανελαστική στατική και τελικώς στην ανελαστική δυναμική ανάλυση. Στην τελευταία περίπτωση μέχρι πρότινος το σύνηθες ήταν το τρέξιμο διαφόρων καταγραφών, από μία φορά την κάθε μία, και η παραγωγή μίας ή περισσότερων αναλύσεων «του ενός σημείου», οι οποίες χρησιμοποιούνταν κατά κύριο λόγο για τον έλεγχο της σχεδιασθείσας κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, μέθοδοι όπως η *Ανάλυση Οριακής Ώθησης (Static Pushover Analysis / SPO)* (ATC, 1996) προσφέρουν, με κατάλληλη κλιμάκωση των στατικών επιβαλλόμενων δυνάμεων, μία «συνεχή» εικόνα, καθώς διερευνάται ολόκληρο το εύρος της συμπεριφοράς της κατασκευής, από την ελαστικότητα μέχρι τη διαρροή και τελικώς την κατάρρευση, διευκολύνοντας έτσι σημαντικά την αντίληψή μας.

Κατ'αναλογία με το πέρασμα από μία μοναδική στατική ανάλυση στην προσαυξητική στατική ανάλυση *pushover*, η ανάλυση των κατασκευών έχει προχωρήσει από μία μοναδική ανάλυση χρονοϊστορίας σε μία προσαυξητική (*Incremental Dynamic Analysis* ή *IDA*), στην οποία κλιμακώνεται η σεισμική «φόρτιση». Η ιδέα απαντάται ήδη από το 1977 από τον Bertero (1977), και έχει προταθεί σε διάφορες μορφές στο έργο διαφόρων ερευνητών, συμπεριλαμβανομένων και των Lucio και Cornell (1998, 2000), Bazzurro και Cornell (1994a,b), Yun et al. (2002), Mehanny και Deierlein (2000), Dubina et al. (2000), De Matteis et al. (2000), Nassar και Krawinkler (1991, pg.62–155) και Psycharis et al. (2000). Η μελέτη *IDA* έχει πλέον ευρύτατη και πολυσχιδή εφαρμογή και οι στόχοι της, κάποιοι από τους οποίους φαίνονται στο Σχ. 1-1, περιλαμβάνουν:

1. Την κατανόηση σε βάθος του εύρους της απόκρισης της κατασκευής ή των «απαιτήσεων», σε σχέση με το εύρος των πιθανών διαβαθμίσεων του επιπέδου της έντασης των καταγραφών εδαφικών κινήσεων.
2. Την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων που επιφέρουν στην κατασκευή σπανιότερες/σοβαρότερες εδαφικές κινήσεις.
3. Την καλύτερη κατανόηση των αλλαγών στη φύση της απόκρισης της κατασκευής καθώς αυξάνεται το επίπεδο της έντασης της εδαφικής κίνησης (π.χ. αλλαγές στην καθ' ύψος απόκριση της κατασκευής, έναρξη της μείωσης της δυσκαμψίας και αντοχής της κατασκευής καθώς και τα μοτίβα και την ένταση με την οποία εμφανίζονται τα παραπάνω).
4. Την εκτίμηση της *δυναμικής αντοχής* ολόκληρου του φορέα,
5. Και τέλος, δοθέντος ενός συνόλου εδαφικών καταγραφών, την εκτίμηση της ευστάθειας (ή αστάθειας) των παραπάνω παραγόντων από καταγραφή σε καταγραφή.



Σχ. 1-1: Ένα παράδειγμα της πληροφορίας που μπορεί να συναχθεί από μία μελέτη *IDA*. Στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για τη μελέτη ενός 20ώροφου χαλύβδινου καμπτικού πλαισίου με όλκιμα μέλη και συνδέσεις ( $T_1=4\text{sec}$ ), λαμβάνοντας υπόψιν φαινόμενα P- $\Delta$  δευτέρας τάξεως, υποβαλλόμενο στην καταγραφή EI Centro, 1940 (συνιστώσα παράλληλη στο ρήγμα)

### 1.3 Βασικές έννοιες της μεθόδου *IDA* για μία καταγραφή χρονοϊστορίας

Σε πρώτη φάση ας ορίσουμε με σαφήνεια όλους τους χρησιμοποιούμενους όρους και ας ξεκινήσουμε τη δόμηση της μεθοδολογίας που θα ακολουθήσουμε, χρησιμοποιώντας σαν δομικό στοιχείο την ιδέα της κλιμάκωσης ενός επιταχυνσιογραφήματος.

Έστω επιταχυνσιογράφημα, το οποίο έχουμε επιλέξει από μια βάση δεδομένων επιταχυνσιογραφήματων, στο οποίο θα αναφερόμαστε σαν *βασικό*, όπως αυτό έχει καταγραφεί (παρ'όλο που μπορεί να έχει υποστεί κάποια επεξεργασία από σεισμολόγους), *μη βαθμονομημένο επιταχυνσιογράφημα*  $a_1$ , ένα διάνυσμα με στοιχεία  $a_1(t_i)$ ,  $t_i=0, t_1, \dots, t_{n-1}$ . Προκειμένου να αποδοθούν ισχυρότερες ή ηπιότερες εδαφικές κινήσεις εισάγουμε έναν απλό μετασχηματισμό, βάσει του οποίου πολλαπλασιάζουμε με έναν κοινό προσαυξητικό ή μειωτικό συντελεστή  $\lambda \in [0, +\infty)$ :  $a_\lambda = \lambda \cdot a_1$  το πλάτος ταλάντωσης για όλες τις συχνότητες του επιταχυνσιογραφήματος, αφήνοντας έτσι αναλλοίωτο το φυσικό περιεχόμενό του. Η παραπάνω διαδικασία ισοδυναμεί με τον πολλαπλασιασμό του φάσματος ελαστικής επιτάχυνσης με  $\lambda$ , ή, ταυτόσημα, με τον πολλαπλασιασμό με  $\lambda$  των εντάσεων όλων των συχνοτήτων των συναρτήσεων μετασχηματισμού Fourier, χωρίς να μεταβάλλουμε το συχνοτικό περιεχόμενο.

**Ορισμός 1:** *Ορίζουμε σαν ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΙΚΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ  $\lambda$  (SCALE FACTOR / SF) ενός κλιμακωμένου επιταχυνσιογραφήματος  $a_\lambda$  το μη-μηδενικό συντελεστή  $\lambda \in [0, +\infty)$ , ο οποίος παράγει το επιταχυνσιογράφημα  $a_\lambda$  όταν εφαρμοστεί πολλαπλασιαστικά στην αρχική, μη-κλιμακωμένη χρονοϊστορία  $a_1$ .*

Ας σημειωθεί εδώ ότι ο SF δημιουργεί μία ένα-προς-ένα απεικόνιση του αρχικού επιταχυνσιογραφήματος προς όλες τις κλιμακωμένες εικόνες του. Για  $\lambda=1$  προκύπτει το αρχικό επιταχυνσιογράφημα, για  $\lambda < 1$  ένα μειωμένο, ενώ για  $\lambda > 1$  ένα αυξημένο.

Παρ'όλο που ο SF αποτελεί τον απλούστερο τρόπο περιγραφής των κλιμακωμένων εικόνων ενός επιταχυνσιογραφήματος, εντούτοις δεν προσφέρεται σε καμία περίπτωση για τους σκοπούς του μηχανικού, καθώς δεν παρέχει καμία πληροφορία για την πραγματική «ισχύ» της κλιμακωμένης καταγραφής, καθώς και της επίπτωσής της σε κάποια κατασκευή. Πρακτικότερο θα ήταν ίσως κάποιο μέγεθος το οποίο θα αποτελούσε μία ένα-προς-ένα απεικόνιση του SF, παράλληλα όμως θα έδινε πληροφορία για την καταστροφική δύναμη του τελευταίου.

**Ορισμός 2:** Ορίζουμε σαν ΜΕΤΡΟ ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΙΑΣ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΑ ΚΛΙΜΑΚΟΥΜΕΝΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ  $\alpha_\lambda$  (ή αλλιώς INTENSITY MEASURE / IM) το μη-αρνητικό συντελεστή  $IM \in [0, +\infty)$ , ο οποίος αποτελεί μία συνάρτηση  $IM = f_{\alpha_1}(\lambda)$ , η οποία εξαρτάται από το μη-κλιμακωμένο επιταχυνσιογράφημα  $a_1$ , και αυξάνεται μονοτονικά με τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή  $\lambda$ .

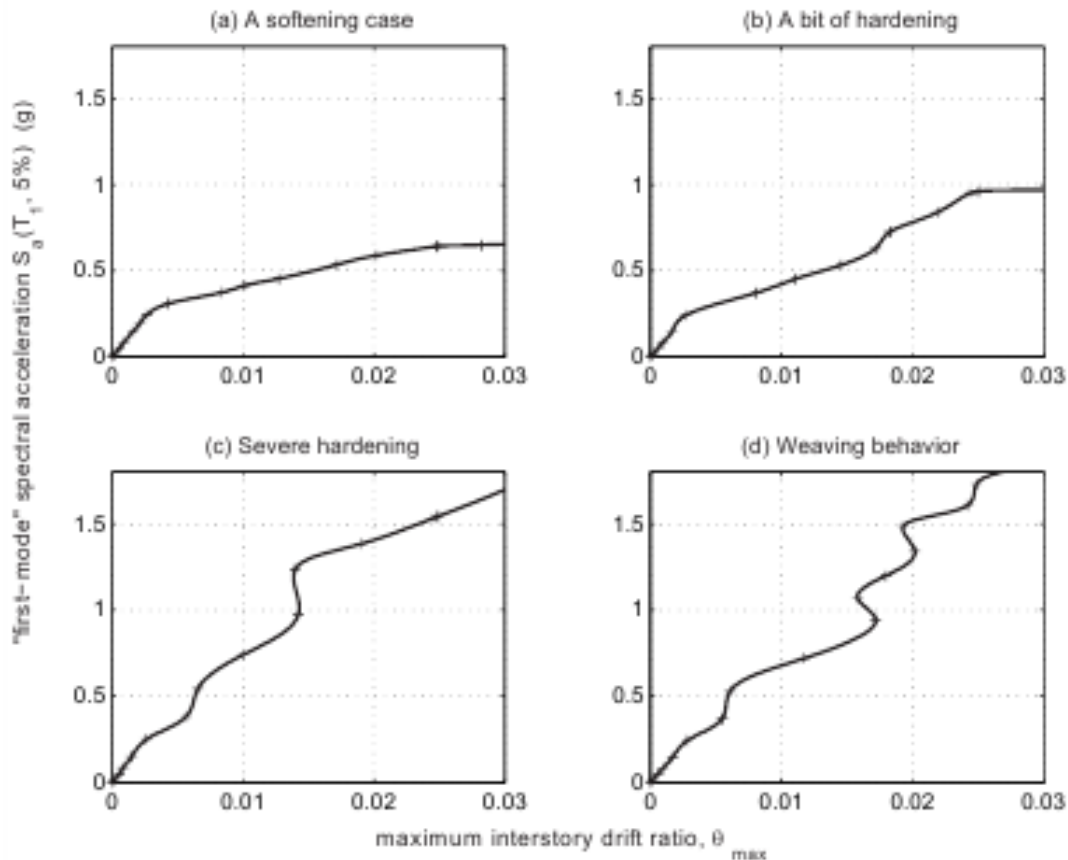
Παρόλο που έχουν προταθεί πολλές ποσότητες για το χαρακτηρισμό της «έντασης» μιας εδαφικής καταγραφής, δεν είναι πάντοτε προφανές το πώς αυτές θα κλιμακωθούν (λ.χ. το Μέγεθος Σεισμικής Ροπής, η διάρκεια, η Τροποποιημένη κλίμακα Mercalli)- οι παραπάνω ποσότητες θα πρέπει να χαρακτηρισθούν σαν μη-κλιμακούμενες. Συνηθισμένα παραδείγματα κλιμακούμενων IM αποτελούν η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA), η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα, η Φασματική Επιτάχυνση για απόσβεση  $\xi=5\%$  για την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής ( $S_a(T_1, 5\%)$ ), και ο κανονικοποιημένος συντελεστής  $R = \lambda / \lambda_{yield}$ , (όπου  $\lambda_{yield}$  για δεδομένη κατασκευή και επιταχυνσιογράφημα ο μικρότερος απαιτούμενος συντελεστής προκειμένου να προκληθεί διαρροή), ο οποίος είναι ισοδύναμος με το μειωτικό συντελεστή ορίου διαρροής  $R_y$  (για παράδειγμα για διγραμμικά μονοβάθμια συστήματα). Οι παραπάνω IM είναι αναλογικοί ως προς τον SF, καθώς ικανοποιούν τη σχέση  $IM_{prop} = \lambda \cdot f_{\alpha_1}$ . Από την άλλη πλευρά, η ποσότητα  $S_{am}(T_1, \xi, b, c, d) = [S_a(T_1, \xi)]^b \cdot [S_a(cT_1, \xi)]^d$ , η οποία προτάθηκε από τους Shome και Cornell (1999), και Mehanney και Deierlein (2000), είναι μεν κλιμακούμενη και μονοτονική, όχι όμως αναλογική, εκτός αν  $b+d = 1$ . Έχουν προταθεί επίσης κάποιοι μη-μονοτονικοί IM, όπως η ανελαστική μετατόπιση μονοβάθμιου ταλαντωτή από τους Lucio και Cornell (2004).

Τώρα, αφού καθορίσαμε τα «δεδομένα εισόδου» στα οποία υποβάλλεται μια κατασκευή, θα χρειαστούμε και ένα μέγεθος με το οποίο θα καταγράψουμε την κατάσταση της, την απόκρισή της στο σεισμικό φορτίο.

**Ορισμός 3:** Ορίζουμε σαν ΔΕΙΚΤΗ ΒΛΑΒΗΣ ή ΔΕΙΚΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (DAMAGE MEASURE (DM) ή STRUCTURAL STATE VARIABLE) το μη-αρνητικό συντελεστή  $DM \in [0, +\infty]$ , ο οποίος χαρακτηρίζει την επιπρόσθετη απόκριση του μοντέλου της κατασκευής στο προδιαγεγραμμένο σεισμικό φορτίο.

Με άλλα λόγια ο DM είναι μέρος του, ή μπορεί να συναχθεί από το αποτέλεσμα της αντίστοιχης μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης. Πιθανές επιλογές είναι η Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης, οι στροφές των κόμβων, η μέγιστη πλαστιμότητα των ορόφων, διάφοροι άλλοι δείκτες βλάβης (όπως η συνολική αθροιστική υστερητική ενέργεια, ο

δείκτης Park–Ang κατά τους Ang και De Leon, 1997, ο δείκτης ευστάθειας κατά τους Mehanny και Deierlein, 2000), η μέγιστη μετατόπιση κορυφής,  $\theta_{roof}$ , η μέγιστη γωνία στροφής ορόφου  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  μιας κατασκευής με  $n$  ορόφους ή το μέγιστο αυτών,  $\theta_{max} = \max(\theta_1, \dots, \theta_n)$ . Η επιλογή του κατάλληλου συντελεστή εξαρτάται από τη χρήση του καθώς και από την ίδια την κατασκευή- μπορεί να είναι σκόπιμη η χρήση δύο ή και περισσότερων  $DM$  (οι οποίοι προκύπτουν από τις ίδιες μη-γραμμικές αναλύσεις) προκειμένου να αποτιμήσουμε διαφορετικά χαρακτηριστικά της απόκρισης της κατασκευής, οριακές καταστάσεις ή τύπους αστοχίας. Π.χ. αν θέλουμε να εκτιμήσουμε τις βλάβες σε μη-δομικά στοιχεία ενός πολυώροφου πλαισίου, είναι προφανής η επιλογή των μέγιστων επιταχύνσεων των ορόφων. Από την άλλη πλευρά, όταν πρόκειται για τις κατασκευαστικές βλάβες πλαισιωτών κτιρίων, η στροφή  $\theta_{max}$  σχετίζεται επαρκώς με τις στροφές των κόμβων, καθώς και με τη συνολική κατάρρευση της κατασκευής ή την τοπική κατάρρευση ορόφου- επομένως είναι ισχυρός υποψήφιος για το δείκτη  $DM$ .



Σχ. 1-2: Καμπύλες  $IDA$  ενός 5ώροφου χαλύβδινου πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8\text{sec}$ ), υποβαλλόμενου σε 4 διαφορετικές καταγραφές.

**Ορισμός 4:** *Ορίζουμε σαν ΜΕΛΕΤΗ IDA ΜΙΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ (SINGLE-RECORD IDA STUDY) τη μελέτη δυναμικής ανάλυσης ενός δοσμένου μοντέλου κατασκευής που παραμετροποιείται από τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή μιας δοσμένης χρονοϊστορίας εδαφικής κίνησης.*

Γνωστή απλά σαν IDA ή *Δυναμική Ανάλυση Pushover (Dynamic Pushover (DPO))*, περιλαμβάνει μια σειρά δυναμικών ανελαστικών αναλύσεων υπό την επίδραση κλιμακωμένων εικόνων ενός επιταχυνσιογραφήματος, των οποίων οι IM επιλέγονται έτσι ώστε να καλύπτουν στην ιδανική περίπτωση ολόκληρο το εύρος απόκρισης της κατασκευής, από την ελαστική έως την ανελαστική και τελικά την κατάρρευσή της. Σκοπός της είναι η καταγραφή του δείκτη DM της κατασκευής σε κάθε επίπεδο IM της κλιμακωμένης εδαφικής κίνησης- οι τιμές που προκύπτουν συχνά παριστάνονται γραφικά ως προς το δείκτη IM σαν συνεχείς καμπύλες.

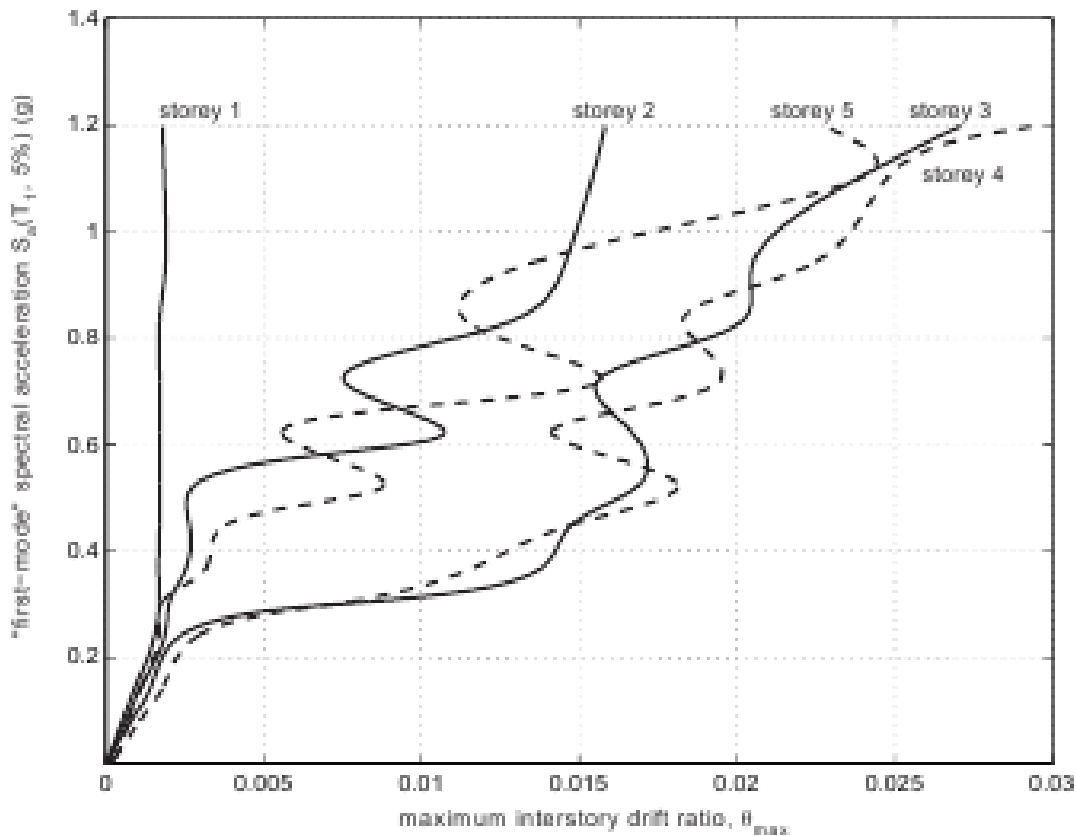
**Ορισμός 5:** *Ορίζουμε σαν καμπύλη IDA τη γραφική αναπαράσταση ενός καταγραφόμενου δείκτη DM ως προς ένα ή περισσότερους δείκτες IM του εφαρμοζόμενου κλιμακωμένου επιταχυνσιογραφήματος.*

Η καμπύλη IDA μπορεί να απεικονισθεί σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις, ανάλογα με των αριθμό των δεικτών IM. Προφανώς τουλάχιστον ένας από αυτούς πρέπει να διαθέτει δυνατότητα κλιμάκωσης. Στη συνήθη πρακτική τέτοια διαγράμματα συχνά απεικονίζονται «ανάποδα», δηλαδή η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ο δείκτης IM, ο οποίος θεωρείται ανάλογος προς τη «δύναμη», και παριστάνεται γραφικά στον κατακόρυφο άξονα, όπως σε μία καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, δύναμης-μετατόπισης ή Pushover. Όπως είναι προφανές, τα αποτελέσματα μιας συγκεκριμένης ανάλυσης IDA μπορούν να παρασταθούν γραφικά σε πολλά διαφορετικά μεταξύ τους διαγράμματα, ανάλογα με τους εκάστοτε χρησιμοποιούμενους δείκτες IM και DM.

#### 1.4 Κάποιες γενικές ιδιότητες της καμπύλης IDA

Η κάθε μελέτη IDA αναφέρεται ειδικά στο εκάστοτε επιταχυνσιογράφημα και μοντέλο κατασκευής- υποβαλλόμενο σε διαφορετικές εδαφικές κινήσεις, ένα συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να παραγάγει πολύ διαφορετικές μεταξύ τους αποκρίσεις, οι οποίες είναι δύσκολο να προσδιορισθούν εκ των προτέρων. Παρατηρώντας για παράδειγμα το Σχ.1-2, διαπιστώνουμε ότι η απόκριση του εν λόγω πλαισίου κυμαίνεται από σταδιακή εξασθένιση μέχρις ότου επέλθει κατάρρευση, μέχρι μια γρήγορη, μη-μονοτονική, κυματοειδή συμπεριφορά. Καθένα από τα γραφήματα παρουσιάζει τις απαιτήσεις που επιβάλλονται στην κατασκευή από κάθε εδαφική καταγραφή σε διάφορα επίπεδα

έντασης, και τόσο οι ομοιότητες όσο και οι διαφορές τους παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον.

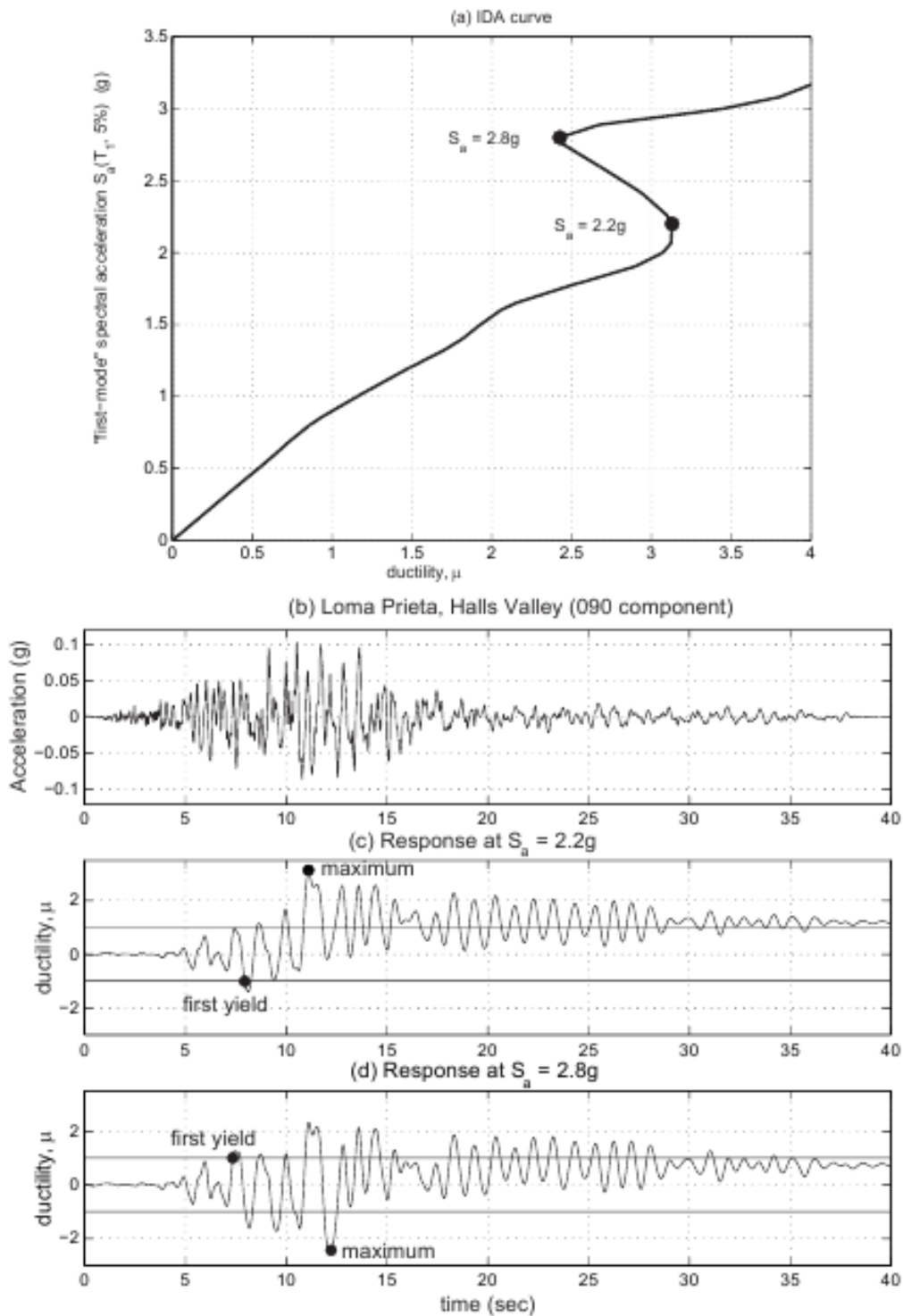


Σχ. 1-3: Καμπύλες IDA της μέγιστης στροφής ορόφου για κάθε όροφο ενός 5ώροφου χαλύβδινου πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8\text{sec}$ ). Παρατηρήστε τη σύνθετη «κυματοειδή» αλληλεπίδραση των ορόφων- το μεγάλο «μαλάκωμα» του 2<sup>ου</sup> ορόφου λειτουργεί σαν ασφάλεια, ανακουφίζοντας τους ορόφους που βρίσκονται ψηλότερα (3,4,5).

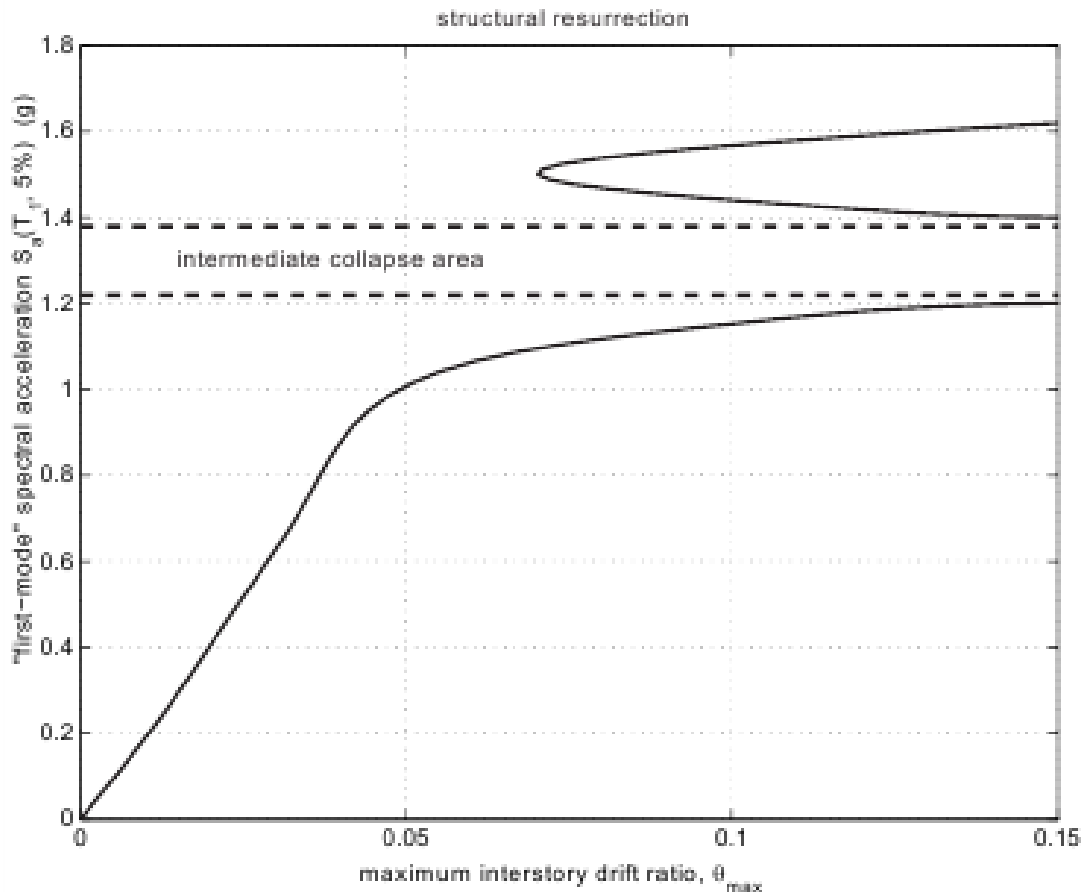
Όλες οι καμπύλες παρουσιάζουν μια διακριτή ελαστική περιοχή, η οποία λήγει για  $S_a^{\text{yield}}(T_1, 5\%) \approx 0.2g$  και  $\theta_{\text{max}}^{\text{yield}} \approx 0.2\%$ , οπότε και συμβαίνει ο πρώτος λυγισμός των συνδέσμων δυσκαμψίας. Στην πραγματικότητα, κάθε μοντέλο με αρχικώς ελαστικά στοιχεία παρουσιάζει τέτοια συμπεριφορά, η οποία τερματίζεται τη στιγμή που εμφανίζεται η πρώτη μη-γραμμικότητα, π.χ. όταν οποιοδήποτε στοιχείο φτάσει στο τέλος της ελαστικής περιοχής του. Την κλίση  $IM/DM$  αυτού του κλάδου για κάθε καμπύλη IDA θα την ονομάζουμε ελαστική «στιβαρότητα» του για τα δοθέντα  $IM, DM$ . Συνήθως μεταβάλλεται σε κάποιο βαθμό από καταγραφή σε καταγραφή - όμως παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως καταγραφής για μονοβάθμια συστήματα ή ακόμα και για πολυβάθμια συστήματα, αν ο  $IM$  λαμβάνει υπόψιν την επιρροή ανώτερων ιδιομορφών (π.χ. Luco και Cornell, 2004).



Εστιάζοντας στο άλλο άκρο των καμπυλών του Σχ.1-2, παρατηρούμε ότι τερματίζονται σε διαφορετικά επίπεδα  $IM$ . Η καμπύλη (α) «μαλακώνει» απότομα μετά τον πρώτο λυγισμό και επιταχύνει απότομα προς μεγάλες μετατοπίσεις μέχρι την τελική



Σχ. 1-4: Απόκριση πλαστιμότητας μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού ταλαντωτή με  $T_1=1\text{sec}$  για διάφορα επίπεδα δόνησης. Η νωρίτερη διαρροή σε εδαφικές κινήσεις μεγαλύτερης έντασης οδηγεί σε μικρότερη μέγιστη απόκριση.



Σχ. 1-5: «Ανάσταση» που παρατηρείται στην καμπύλη *IDA* ενός 3ώροφου χαλύβδινου καμπτικού πλαισίου με ψαθυρές συνδέσεις ( $T_1=1.3\text{sec}$ )

κατάρρευση. Από την άλλη πλευρά, οι καμπύλες (c) και (d) φαίνεται να ελίσσονται γύρω από την ευθεία του ελαστικού κλάδου. Ακολουθούν στενά το γνωστό κανόνα *ίσων μετατοπίσεων*, δηλ. την εμπειρική παρατήρηση ότι για κατασκευές μεσαίας περιόδου οι ανελαστικές συνολικές μετατοπίσεις είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες ελαστικές (π.χ. Veletsos και Newmark, 1960). Οι κυματοειδείς μορφές που εμφανίζουν οι καμπύλες (c) και (d) αποτελούν διαδοχικά τμήματα «φαινόμενης μείωσης ακαμψίας» (*softening*) και «φαινόμενης αύξησης ακαμψίας» (*hardening*), περιοχές δηλαδή όπου η τοπική κλίση της καμπύλης, ή δυσκαμψία, μειώνεται με την αύξηση του *IM* και άλλες στις οποίες αυξάνεται. Σε όρους μηχανικής αυτό σημαίνει ότι κατά διαστήματα η κατασκευή εμφανίζει επιταχυνόμενο ρυθμό συσσώρευσης του *DM* ενώ σε άλλες χρονικές στιγμές επιβραδυνόμενο- η επιβράδυνση αυτή μπορεί να είναι τόσο ισχυρή ώστε να ανακόψει προσωρινά τη συσσώρευση *DM* ή ακόμα και να την αναστρέψει, τραβώντας έτσι τοπικά την καμπύλη *IDA* προς χαμηλότερους *DM* και κάνοντάς την μια μη-μονοτονική συνάρτηση του *IM* (Σχ.1-2(d)). Τέλος, υποθέτοντας ότι το μοντέλο προβλέπει κάποιο μηχανισμό κατάρρευσης και ότι ο χρησιμοποιούμενος

*DM* μπορεί να τον εντοπίσει, παρουσιάζεται ένα τελικό τμήμα μειωμένης ακαμψίας, στον οποίο η κατασκευή συσσωρεύει *DM* με ολοένα αυξανόμενους ρυθμούς, σηματοδοτώντας την έναρξη *δυναμικής αστάθειας*. Αυτή ορίζεται κατ' ανάλογο τρόπο με τη στατική αστάθεια, σαν το σημείο στο οποίο οι παραμορφώσεις αυξάνονται απεριόριστα για απειροστή αύξηση του *IM*. Τότε, για για τη μέγιστη τιμή *IM* η καμπύλη γίνεται οριζόντια καθώς το *DM* κινείται προς το άπειρο (Σχ.1-2 (a),(b)). Παρ' όλο που τα παραδείγματα που παρουσιάζονται αφορούν τα μεγέθη  $S_a(T_1, 5\%)$  και  $\theta_{max}$ , αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται για μια ευρεία γκάμα *DM* και *IM*.

Η φαινόμενη αύξηση ακαμψίας στις καμπύλες *IDA* δεν είναι καινούργια παρατήρηση, μιας και έχει αναφερθεί ακόμα και για απλά διγραμμικά ελαστικά-τελείως πλαστικά συστήματα (π.χ. Chopra (1995, pg.257-259)). Παρ' όλα αυτά εξακολουθεί να είναι αντίθετο με την κοινή λογική το γεγονός ότι ένα σύστημα το οποίο παρουσίασε υψηλή απόκριση για δεδομένο επίπεδο έντασης μπορεί να παρουσιάσει την ίδια ή και χαμηλότερη απόκριση όταν υποβληθεί σε υψηλότερες σεισμικές εντάσεις λόγω πολύ υψηλής φαινόμενης αύξησης της ακαμψίας του. Όμως πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι σημαντικό ρόλο παίζει όχι μόνο η ένταση του επιταχυνσιογραφήματος, αλλά μάλλον η μορφή του και το timing που αυτό ακολουθεί. Καθώς το επιταχυνσιογράφημα μεγαθύνεται, ασθενείς κύκλοι απόκρισης νωρίς στη χρονοϊστορία γίνονται αρκετά ισχυροί ώστε να προκαλέσουν βλάβη (δηλ. διαρροή), αλλάζοντας έτσι τις ιδιότητες της κατασκευής για τους επόμενους, ισχυρότερους κύκλους. Για πολυώροφες κατασκευές, μια ισχυρότερη εδαφική κίνηση μπορεί να προκαλέσει νωρίτερη διαρροή κάποιου ορόφου, η οποία με τη σειρά της λειτουργεί σαν ασφάλεια, ανακουφίζοντας κάποιον άλλο (συνήθως ψηλότερο) όροφο, όπως στο Σχ.1-3. Ακόμα και απλοί ταλαντωτές, όταν αυτοί αναγκάζονται να διαρρεύσουν σε κάποιον νωρίτερο κύκλο, μπορεί να εμφανίσουν μικρότερη απόκριση σε επόμενους κύκλους, οι οποίοι είχαν προκαλέσει υψηλότερες τιμές *DM* προηγουμένως (Σχ.2-4), ίσως λόγω της παρατηρούμενης «επιμήκυνσης περιόδου». Τα ίδια φαινόμενα εξηγούν την «επανόρθωση της κατασκευής» (structural resurrection), μία ακραία περίπτωση αύξησης ακαμψίας, στην οποία ένα σύστημα ωθείται μέχρι τη συνολική κατάρρευση (δηλ. ο κώδικας της ανάλυσης δε συγκλίνει, παράγοντας «αριθμητικώς άπειρο» *DM*) για κάποιον *IM*, για να επανέλθει σε κατάσταση μη-κατάρρευσης σε κάποιο μεγαλύτερο επίπεδο έντασης, στον οποίο παρουσιάζει μεν υψηλή απόκριση, ισορροπεί όμως παρ' όλα αυτά (π.χ. Σχ.1-5).

Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζει η καμπύλη *IDA* ακόμα και σε δύο διαστάσεις, είναι φυσικό να εξετάσουμε τις ιδιότητές της ως μαθηματικής οντότητας.

Υποθέτοντας μονοτονικό  $IM$  η καμπύλη  $IDA$  γίνεται συνάρτηση ( $[0,+\infty) \rightarrow [0,+\infty]$ ), δηλ. κάθε τιμή  $IM$  παράγει μοναδική τιμή  $DM$ , ενώ για κάθε δοθείσα τιμή  $DM$  υπάρχει τουλάχιστον ένας (περισσότεροι για μη-μονοτονικές καμπύλες)  $IM$ , καθώς η απεικόνιση δεν είναι απαραίτητα ένα-προς-ένα. Επίσης, η καμπύλη  $IDA$  δεν είναι απαραίτητα ομαλή, μιας και ο  $DM$  ορίζεται συχνά σαν η μέγιστη (κατ' απόλυτη τιμή ή όχι) τιμή της απόκρισης, οπότε εξ ορισμού είναι μη διαφορίσιμος. Επιπλέον, μπορεί να περιέχει έναν αριθμό (ας ελπίσουμε πεπερασμένο) ασυνεχειών, λόγω των πολλαπλών καταρρεύσεων και διαδοχικών «επανορθώσεων» της κατασκευής.

### 1.5 Σημείο Δυναμικής Αστάθειας καμπύλης $IDA$

Συνήθως στον ορισμό της κατάρρευσης μιας κατασκευής ταυτίζουμε τη δυναμική με την αριθμητική αστάθεια. Σαφέστατα, η μη-σύγκλιση της αριθμητικής χρονικής ολοκλήρωσης είναι το ασφαλέστερο και ίσως το μόνο αριθμητικό ισοδύναμο του πραγματικού φαινομένου της δυναμικής κατάρρευσης. Θα πρέπει όμως εδώ να τονιστεί ότι η μη-σύγκλιση επηρεάζεται από την αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιούμε, το μέγεθος βήματος της επανάληψης, ακόμα και από το σφάλμα στρογγυλοποίησης. Στο εξής θα υποθέτουμε ότι έχουμε φροντίσει τα παραπάνω θέματα όσο το δυνατόν καλύτερα, ώστε οι προβλέψεις που κάνουμε να είναι ακριβείς σε ικανοποιητικό βαθμό.

Σύμφωνα με τον κανονισμό Fema το τελευταίο σημείο της καμπύλης με εφαιπτόμενη κλίση ίση με το 20% ορίζεται σαν το σημείο αντίστασης. Αυτό προκύπτει θεωρώντας ότι οριζοντίωση της καμπύλης  $IDA$  είναι ένα δείγμα δυναμικής αστάθειας (δηλαδή ο  $DM$  παίρνει πολύ μεγάλες τιμές και επιταχύνεται προς το “άπειρο”). Καθώς το “άπειρο” δεν είναι ένα πιθανό αριθμητικό αποτέλεσμα κάνουμε την παραπάνω προσέγγιση.

### 1.6 Καμπύλες $IDA$ πολλών καταγραφών και πώς αυτές συνοψίζονται

Όπως συνάγεται από τα παραπάνω, μια μελέτη  $IDA$  μίας καταγραφής δεν μπορεί να συλλάβει πλήρως την απόκριση του κτιρίου σε κάποιο μελλοντικό γεγονός. Η  $IDA$  εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλεγείσα καταγραφή, επομένως χρειάζεται επαρκής αριθμός καταγραφών, ώστε να καλυφθεί όλο το εύρος των πιθανών αποκρίσεων της κατασκευής. Επομένως, καταφεύγουμε αναγκαστικά στην υποβολή του μοντέλου της κατασκευής σε ένα σετ καταγραφών εδαφικών κινήσεων.

**Ορισμός 6:** Ορίζουμε σαν ΜΕΛΕΤΗ  $IDA$  ΠΟΛΛΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ (*MULTI-RECORD IDA STUDY*) το σετ των μελετών  $IDA$  του ίδιου κατασκευαστικού μοντέλου για διάφορα επιταχυνσιογραφήματα.

Μία τέτοια μελέτη παράγει αντίστοιχα σετ καμπυλών *IDA*, οι οποίες μπορούν να παρασταθούν γραφικά στο ίδιο διάγραμμα, όπως στο Σχ.2-6 για ένα 5ώροφο χαλύβδινο πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας (εφόσον φυσικά επιλέξουμε ίδιους *IM* και *DM* για όλες τις καμπύλες).

**Ορισμός 7:** Ορίζουμε σαν ΣΕΤ ΚΑΜΠΥΛΩΝ *IDA* τη συλλογή των καμπυλών *IDA* ενός δεδομένου μοντέλου κατασκευής υποβαλλόμενο σε διάφορα επιταχυνσιογραφήματα, παραμετροποιημένων ως προς ίδιους *IM*, *DM*.

Παρόλο που κάθε καμπύλη είναι πλήρως καθορισμένη ντετερμινιστική οντότητα για δεδομένο μοντέλο και εδαφική κίνηση, αν θέλουμε να λάβουμε υπόψιν την έμφυτη τυχαιότητα των καταγραφών στις οποίες είναι πιθανόν να υποβληθεί το κτίριο, πρέπει να καταφύγουμε σε στοχαστική ανάλυση. Η *IDA* για δεδομένο μοντέλο και πληθυσμό καταγραφών παύει να είναι ντετερμινιστική- είναι πια μια στοχαστική καμπύλη, ή στοχαστική συνάρτηση  $DM = f(IM)$  (για ένα συγκεκριμένο, μονοτονικό *IM*). Έτσι, όπως ακριβώς μπορούμε να συνοψίσουμε ένα σετ καταγραφών δημιουργώντας για παράδειγμα φάσματα απόκρισης που αντιστοιχούν στη μέση τιμή, στη διάμεσο και στο πολλοστημόριο για το 16% ή το 84%, με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να ορίσουμε καμπύλες *IDA* που αντιστοιχούν στη μέση τιμή, στη διάμεσο και στο πολλοστημόριο για το 16% ή το 84% (π.χ. Σχ.2-6(b)) για να περιγράψουμε (οριακά) ένα σετ καμπυλών *IDA*. Γι' αυτό το λόγο χρειαζόμαστε μεθόδους στατιστικής ανάλυσης ενός τυχαίου δείγματος δισδιάστατων καμπυλών *IDA* (για δεδομένο, μοναδικό *IM*), ένα θέμα με το οποίο ασχολείται η Λειτουργική Ανάλυση Δεδομένων (Ramsay και Silverman, 1996). Αυτές εμπίπτουν συνήθως σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

Κατ' αρχάς υπάρχουν οι παραμετρικές μέθοδοι ανάλυσης. Σε αυτήν την περίπτωση υποθέτουμε ότι ο *DM* για δεδομένο *IM* ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο, στο οποίο προσαρμόζουμε την καμπύλη *IDA* για κάθε καταγραφή χωριστά. Παράγεται έτσι ένα σύνολο τιμών για κάθε παράμετρο του μοντέλου, του οποίου τα στατιστικά στοιχεία υπολογίζουμε. Εναλλακτικά μπορούμε να προσαρμόσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο στη διάμεσο της κατανομής *DM* για δεδομένο *IM* για όλες τις καμπύλες ταυτοχρόνως. Για παράδειγμα, έστω το διπαραμετρικό εκθετικό μοντέλο  $\theta_{\max} = \alpha \cdot [S_a(T_1, 5\%)]^\beta$  (εισήχθη από τους Shome και Cornell, (1999)) το οποίο, υποθέτοντας ότι οι  $\theta_{\max}$  ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή για δεδομένο  $S_a(T_1, 5\%)$  (υπόθεση καλά τεκμηριωμένη), παρέχει σε πολλές περιπτώσεις μια απλή αλλά ισχυρή περιγραφή των καμπυλών, επιτρέποντας την εξαγωγή σημαντικών αναλυτικών συμπερασμάτων (Jalayer και Cornell, 2002; Cornell et al., 2002). Αυτή είναι

μια γενική ιδιότητα των παραμετρικών μεθόδων- παρόλο που δε διαθέτουν την απαιτούμενη ευελιξία ώστε να περιγράψουν με ακρίβεια κάθε καμπύλη χωριστά, εντούτοις επιτρέπουν την απλή και γρήγορη περιγραφή του συνόλου των καμπυλών.

Στην άλλη άκρη του φάσματος βρίσκονται οι μη-παραμετρικές μέθοδοι, οι οποίες περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο «εξομαλυντές γραφικών παραστάσεων» όπως τον τρέχοντα μέσο όρο, την τρέχουσα διάμεσο, τον εξομαλυντή LOESS ή την εξομαλυντική συνάρτηση παρεμβολής spline (Hastie και Tibshirani, 1990). Ίσως ο πιο απλός εξομαλυντής από όλους, ο τρέχων μέσος όρος, περιλαμβάνει απλώς τον υπολογισμό του συνόλου των τιμών  $DM$  για διάφορα επίπεδα  $IM$  και έπειτα τον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισής του για κάθε επίπεδο  $IM$ . Η μέθοδος δουλεύει χωρίς πρόβλημα μέχρι το πρώτο σημείο που καμπύλη  $IDA$  εξαντλεί την αντοχή της, οπότε ο  $DM$  τείνει στο άπειρο, όπως και η μέση καμπύλη  $IDA$ . Δυστυχώς οι περισσότεροι εξομαλυντές πάσχουν από το παραπάνω πρόβλημα, εκτός από την τρέχουσα διάμεσο ή το πολλοστημόριο που αντιστοιχεί σε κάποιο ποσοστό του δείγματος, τα οποία είναι γενικώς πιο αξιόπιστα στο συγκεκριμένο θέμα. Αντί λοιπόν να υπολογίζουμε το μέσο όρο για κάθε επίπεδο  $IM$ , υπολογίζουμε τη διάμεσο και τα πολλοστημόρια που αντιστοιχούν στο 16% και 84% για το δείγμα, τα οποία τείνουν στο άπειρο μόνο όταν η κατάρρευση συμβαίνει στο 50%, 84% και 16% των καταγραφών αντίστοιχα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι ότι υπό κατάλληλες προϋποθέσεις (λ.χ. συνέχεια και μονοτονικότητα των καμπύλων), η καμπύλη που συνδέει τα πολλοστημόρια  $\chi\%$  της κατανομής του  $DM$  για δεδομένο  $IM$  είναι η ίδια με εκείνη που συνδέει τα πολλοστημόρια  $(100-\chi)\%$  του  $IM$  για δεδομένο  $DM$ . Επιπλέον, η μέθοδος εναρμονίζεται πολύ καλά με την καλά τεκμηριωμένη υπόθεση της λογαριθμοκανονικής κατανομής της  $\theta_{max}$  για δεδομένη  $S_a(T_1, 5\%)$ , όπου η διάμεσος είναι η κανονική «κεντρική τιμή» και τα πολλοστημόρια που αντιστοιχούν στα 16%, 84% αντιστοιχούν στη διάμεσο επί  $e^{\mp \text{διασπορά}}$ , όπου «διασπορά» είναι η τυπική απόκλιση των λογαρίθμων των τιμών (Jalayer και Cornell, 2002).

### 1.7 Σύγκριση της ανάλυσης $IDA$ με τη Στατική Προσαυξητική Μέθοδο Pushover

Η ομοιότητα των αναλύσεων  $IDA$  και  $SPO$  ως προς την προσαύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων υποδεικνύει τη διερεύνηση της σύνδεσης μεταξύ των αποτελεσμάτων τους. Καθώς και οι δύο αποσκοπούν στην περιγραφή μιας κατασκευής, θα περίμενε κανείς κάποιο βαθμό συσχέτισης μεταξύ της καμπύλης  $SPO$  και οποιασδήποτε καμπύλης  $IDA$  του κτιρίου (λ.χ. Σχ.2-1), ακόμα περισσότερο δε μεταξύ της  $SPO$  και της «μέσης» (π.χ.

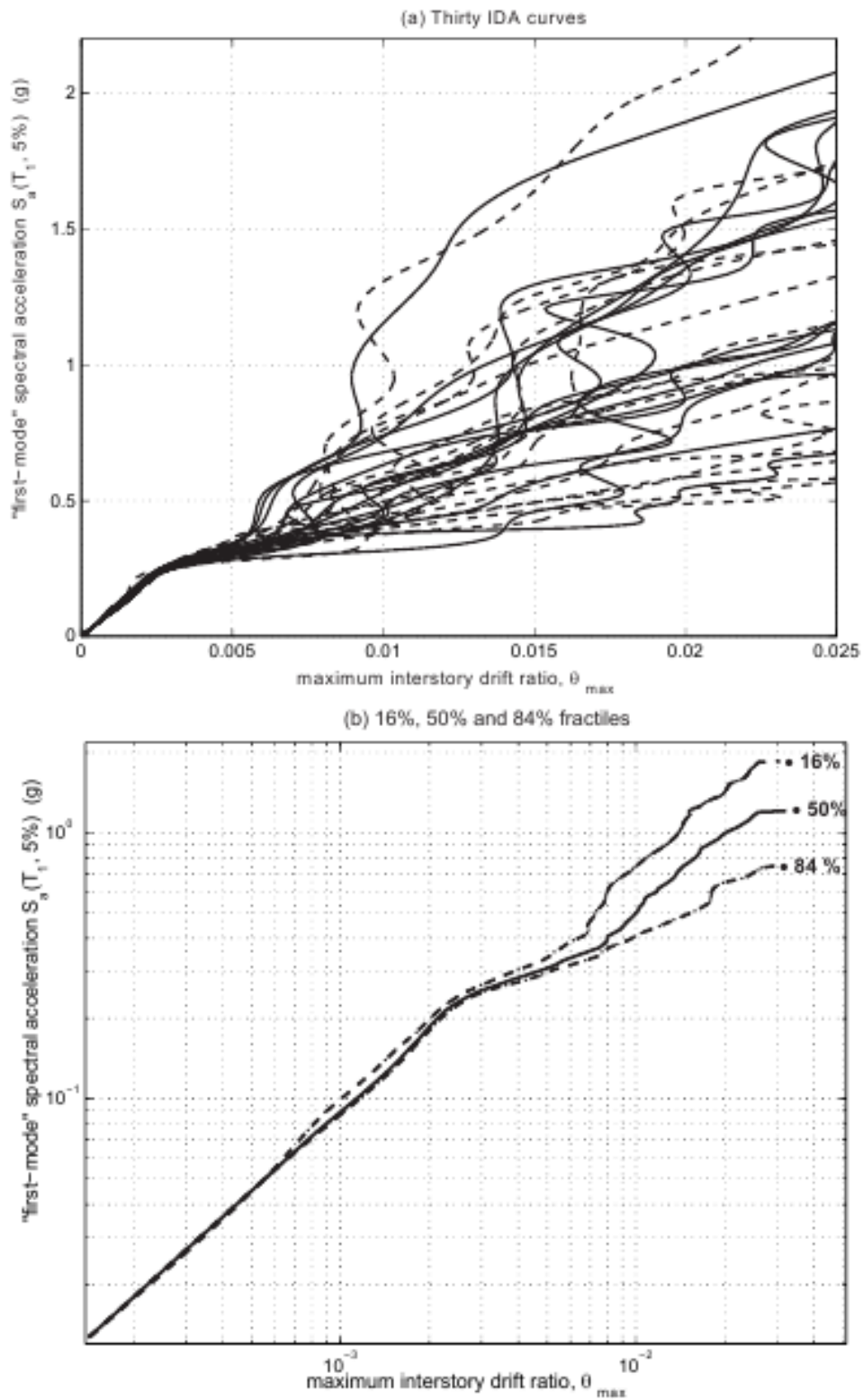
διαμέσου) καμπύλης *IDA*, καθώς η τελευταία παρουσιάζει μικρότερη μεταβλητότητα από καταγραφή σε καταγραφή. Προκειμένου να παραστήσουμε και τις δύο καμπύλες στο ίδιο διάγραμμα, είναι προτιμητέο να εκφράσουμε την καμπύλη *SPO* ως προς τις συντεταγμένες *IM*, *DM* οι οποίες έχουν επιλεγεί για τη «μέση» καμπύλη *IDA*. Παρ'όλο που κάποιοι *DM* (λ.χ. η  $\theta_{\max}$ ) μπορούν εύκολα να συναχθούν τόσο από τη στατική όσο και από τη δυναμική ανάλυση, δεν είναι πάντα εύκολη η μετατροπή των *IM*, π.χ. της συνολικής τέμνουσας βάσης σε  $S_a(T_1, 5\%)$ . Η συνιστώμενη αντιμετώπιση είναι η προσαρμογή της «ελαστικής δυσκαμψίας» της *SPO* ώστε να εξισωθεί με αυτήν της *IDA*, λ.χ. ταιριάζοντας τα ελαστικά τμήματα των δύο καμπυλών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στο προαναφερθέν παράδειγμα διαιρώντας την τέμνουσα βάσης με τη μάζα του κτιρίου. Αυτό αρκεί για μονοβάθμια συστήματα. Για πολυβάθμια συστήματα ο παραπάνω λόγος πρέπει να πολλαπλασιαστεί με κάποιον κατάλληλο συντελεστή.

Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχ.1-7, όπου σχεδιάζουμε την καμπύλη *SPO*, η οποία έχει παραχθεί χρησιμοποιώντας κατανομή δυνάμεων κατά την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή, συγκριτικά με τη διάμεσο καμπύλη *IDA* για ένα 20ώροφο χαλύβδινο καμπτικό πλαίσιο με όλκιμες συνδέσεις και για ένα 5ώροφο χαλύβδινο πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας, με συντεταγμένες  $S_a(T_1, 5\%)$ ,  $\theta_{\max}$ . Είναι εμφανές ότι οι δύο καμπύλες διαθέτουν παρόμοιες τιμές *DM*. Ωστόσο, η καμπύλη *IDA* βρίσκεται συνεχώς υψηλότερα από την καμπύλη *SPO* σε όρους *IM*. Παρ'όλο που η εξεύρεση ποσοτικής σχέσης μεταξύ των δύο καμπυλών είναι δύσκολη και αξίζει βαθύτερη μελέτη (π.χ. Seneviratna και Krawinkler, 1997), εντούτοις μπορούμε να κάνουμε κάποια γενικά ποιοτικά σχόλια, παρατηρώντας απλώς το προσεγγιστικό σχήμα της διαμέσου *IDA* ως προς την *SPO*.

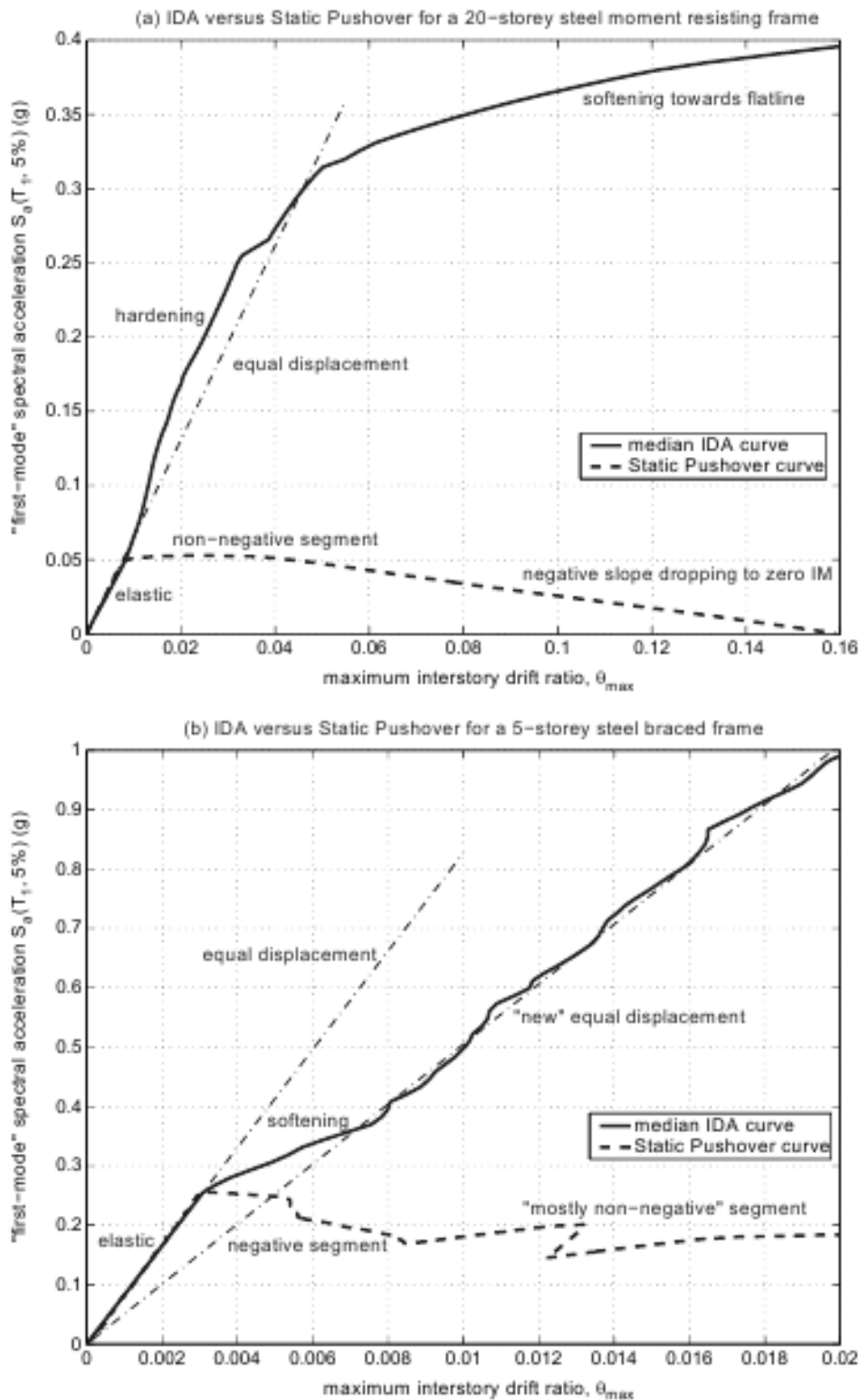
1. Εκ κατασκευής ο ελαστικός κλάδος της *SPO* προσεγγίζει ικανοποιητικά αυτόν της *IDA*, συμπεριλαμβανομένου και του πρώτου σημείου μη-γραμμικότητας, το οποίο παρουσιάζεται για τις ίδιες τιμές *IM* και *DM* και για τις δύο.
2. Ο επόμενος κλάδος μειωμένης, αλλά μη-αρνητικής δυσκαμψίας της *SPO* συσχετίζεται με την *IDA* βάσει του προσεγγιστικού κανόνα των «ίσων μετατοπίσεων» (για κατασκευές μεσαίας περιόδου) (Veletsos και Newmark, 1960), δηλ. υπάρχει σχεδόν συνέχιση του ελαστικού κλάδου. Στην πραγματικότητα αυτό το σχεδόν ελαστικό τμήμα της *IDA* συχνά προηγείται ενός τμήματος αυξημένης δυσκαμψίας (Σχ.1-7(α)). Αντιθέτως, κατασκευές μικρότερης περιόδου επιδεικνύουν συνήθως κάποια μείωση δυσκαμψίας.
3. Η αρνητική κλίση της *SPO* μεταφράζεται σε μείωση της δυσκαμψίας στην *IDA*, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση, λ.χ. οριζόντια καμπύλη *IDA*,

- (Σχ.1-7(a)) εκτός αν ανασχεθεί πριν φτάσει το μηδέν σε όρους *IM* από κάποιο μη-αρνητικό τμήμα της *SPO* (Σχ.1-7(b)).
4. Το μη-αρνητικό τμήμα της *SPO*, το οποίο ακολουθεί το τμήμα με την αρνητική κλίση (η οποία έχει προκαλέσει σημαντική μείωση του *IM*) εμφανίζεται κατά τα φαινόμενα στην *IDA* σαν καινούργιος, τροποποιημένος κανόνας «ίσων μετατοπίσεων» (δηλ. ένα σχεδόν γραμμικό τμήμα το οποίο κείται σε εφαιπτομένη), το οποίο έχει μικρότερη «δυσκαμψία» από το ελαστικό (Σχ.1-7(b)).





Σχ. 1-6: Μελέτη IDA τριάντα καταγραφών για 5ώροφο μεταλλικό πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1=1.8\text{sec}$ ). Παρουσιάζονται (α) οι τριάντα καμπύλες ξεχωριστά και (β) οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε ποσοστημόρια 16%, 50% και 84%. (Σε διλογαριθμική κλίμακα.)



Σχ. 1-7: Η διάμεσος IDA σε σύγκριση με την καμπύλη Pushover: (α) για ένα 20ώροφο χαλύβδινο καμπτικό πλαίσιο με όλκιμες συνδέσεις ( $T_1 = 4$  sec) (β) για ένα 5ώροφο χαλύβδινο πλαίσιο με συνδέσμους δυσκαμψίας ( $T_1 = 1.8$  sec)

## 2 Χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης σε σεισμική διέγερση κοντινού πεδίου

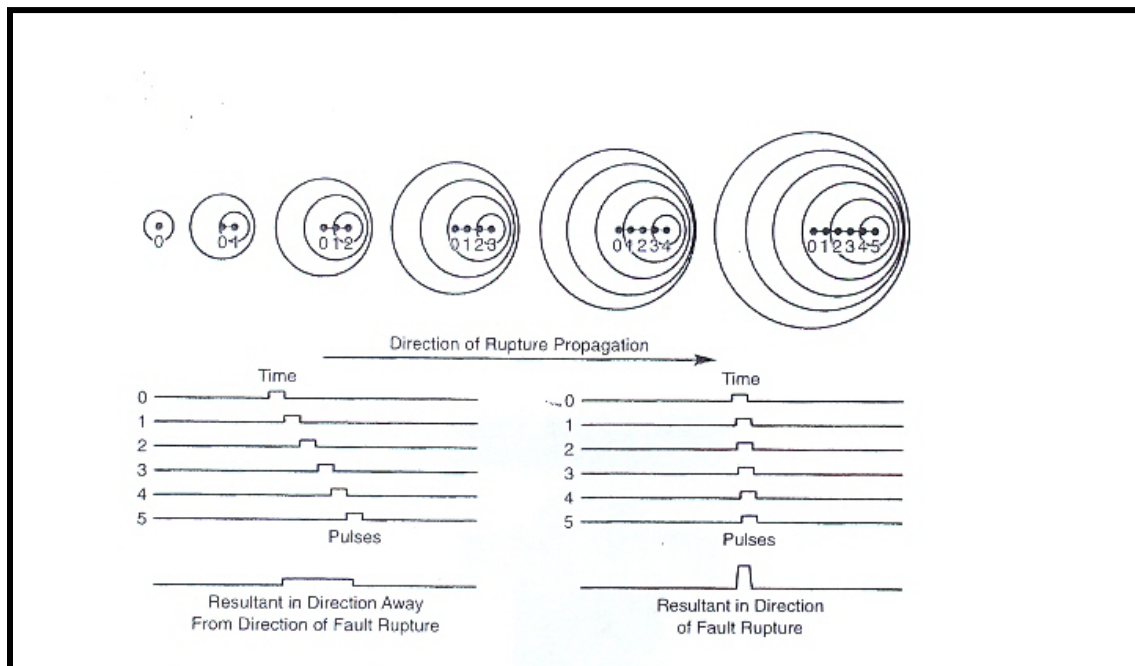
### 2.1 Εισαγωγή

#### 2.1.1 Μηχανισμός Γένεσης-Χαρακτηριστικά

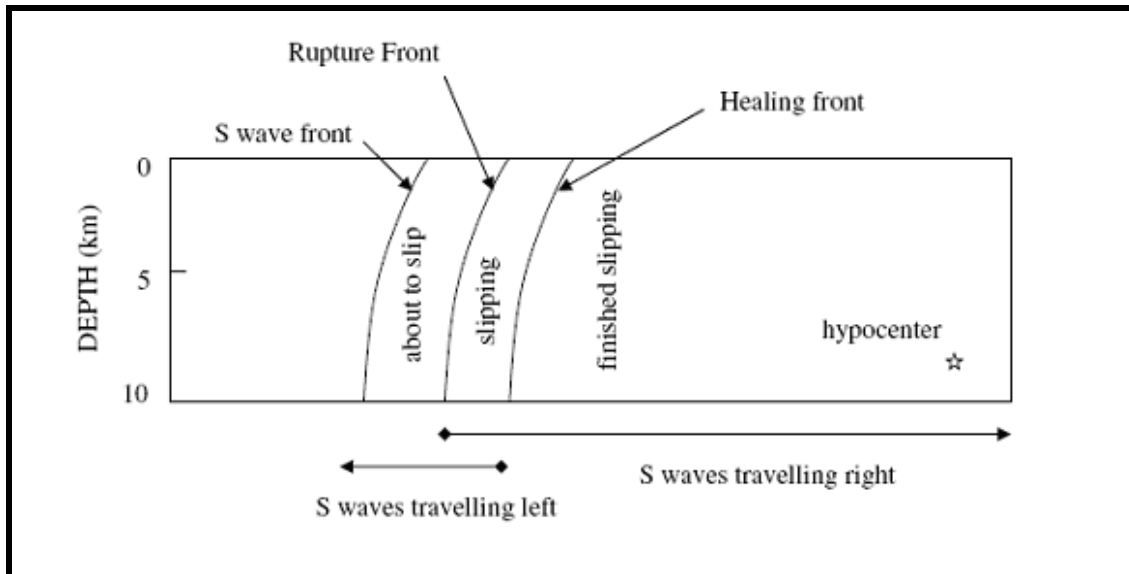
Οι εδαφικές κινήσεις κοντά σε ένα ρήγμα μπορεί να είναι σε μεγάλο βαθμό διαφορετικές από εκείνες που βρίσκονται μακριά από τη σεισμική πηγή. Αναλυτικότερα, η διάρρηξη στο επίπεδο του ρήγματος που αποτελεί την αιτία ενός σεισμικού γεγονότος, επέρχεται όταν οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις ξεπεράσουν την «φαινομένη» (φύσει και θέσει) αντοχή του πετρώματος στην περιοχή της σεισμικής εστίας. Η ρηγμάτωση που προκαλείται απαρτίζεται από μία σειρά μικρότερες διαρρήξεις (θραύση «κλειδιών» κατα μήκος του ρήγματος) που μπορούν να θεωρηθούν σαν μία σειρά μικρών σεισμών με μεγάλη χωρική και χρονική εγγύτητα. Η περιοχή στην οποία επικεντρώνονται οι βλάβες κατά την διάρκεια ενός σεισμού είναι συνήθως συγκεντρωμένη γύρω από το ρήγμα και έχει διαστάσεις ανάλογες με την επιφάνεια ρηγμάτωσης. Θεωρητικά η ζώνη αυτή βρίσκεται μέσα σε μια απόσταση 20-60 km από ένα ρήγμα. Η περιοχή αυτή ονομάζεται κοντινό πεδίο και κοντά της η εδαφική κίνηση χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο της κατευθυντικότητας. Μέσα σε αυτήν την ζώνη κοντινού πεδίου, οι εδαφικές κινήσεις επηρεάζονται σημαντικά από το μηχανισμό διάρρηξης, την κατεύθυνση της διάδοσης της διάρρηξης σε σχέση με την εξεταζόμενη θέση, και τις πιθανές μόνιμες εδαφικές μετατοπίσεις ως αποτέλεσμα της ολίσθησης του ρήγματος.

Όταν η ρηγμάτωση κατευθύνεται από το επίκεντρο του σεισμού προς μία θέση παρουσιάζεται ένα φαινόμενο αντίστοιχο με το Doppler (Σχ.2-1). Όπως είδαμε, η διάρρηξη γίνεται σταδιακά σε επιμέρους περιοχές του ρήγματος. Κατά την διάρκεια κάθε τέτοιας διάρρηξης παράγεται ένας παλμός ταχύτητας που διαδίδεται ως κύμα S με ταχύτητα ανάλογη της ταχύτητας διάρρηξης. Επειδή η ταχύτητα της διάρρηξης στο ρήγμα είναι κοντά στην (γενικά λίγο μικρότερη) ταχύτητα διατμητικών κυμάτων (κύματα S) του βράχου κοντά στην πηγή, όταν η διάδοση της διάρρηξης γίνεται προς μια περιοχή και η κατεύθυνση της ολίσθησης στο ρήγμα είναι επίσης προς την περιοχή εμφανίζεται το φαινόμενο της έμπροσθεν κατευθυντικότητας (*forward directivity*). Για έναν μηχανισμό οριζόντιας ολίσθησης (Σχ.2-2), όπου το μέτωπο 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. Ο παλμός της κίνησης χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος ενδιάμεσα στις μεγάλες περιόδους και τη μικρή διάρκεια. Εάν αντίθετα μια περιοχή βρίσκεται κοντά στο επίκεντρο, δηλαδή, η διάρρηξη διαδίδεται μακριά από την περιοχή, η άφιξη κάθε παλμού επιμέρους σεισμικής διάρρηξης γίνεται στο τέλος του προηγούμενου του. Αυτός ο όρος, καλούμενος ως "όπισθεν 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.



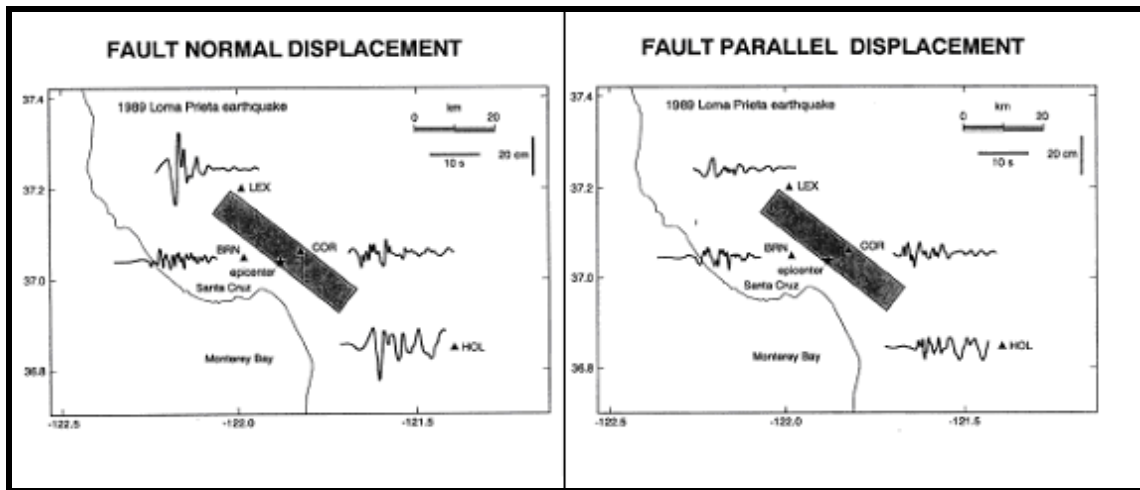
Σχ. 2-1: Επίδραση της κατευθυντικότητας της διάρρηξης που εξηγείται από το φαινόμενο Doppler



Σχ. 2-2: Σχηματικό διάγραμμα επίδρασης της κατευθυντικότητας της διάρρηξης για ένα οριζόντιο ρήγμα ολίσθησης. Η διάρρηξη αρχίζει στο υπόκεντρο και διαδίδεται με μια ταχύτητα που είναι περίπου 80% της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων. Η εικόνα παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο του μετώπου ρήξης σε μια δεδομένη στιγμή (από Somerville et al 1997a).

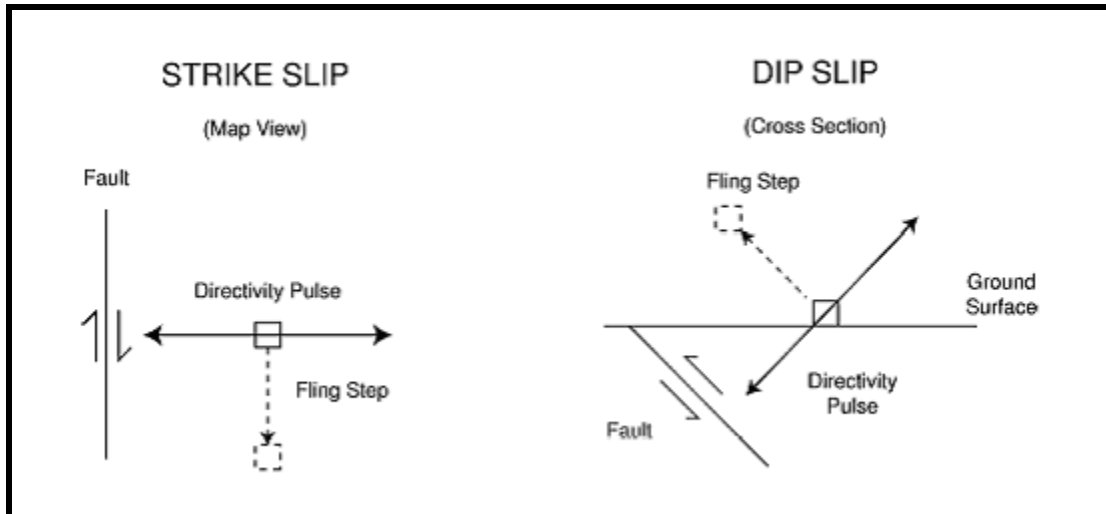
Οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις εδαφικές μετατοπίσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού στο Loma Prieta του 1989 παρουσιάζονται στο Σχ.2-3. Το επίκεντρο του σεισμού είναι κοντά στο Corralitos και Branciforte Drive, όπου οι οριζόντιες εδαφικές μετακινήσεις είναι μέτριες και στις κάθετες και στις παράλληλες με το ρήγμα συνιστώσες. Αυτό αποδίδεται στην οπίσθια κατευθυντικότητα. Στα άκρα του ρήγματος εντούτοις, 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 παράλληλων 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 παρουσιασθούν τόσο σε ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, όσο και σε κατακόρυφης ολίσθησης - 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).

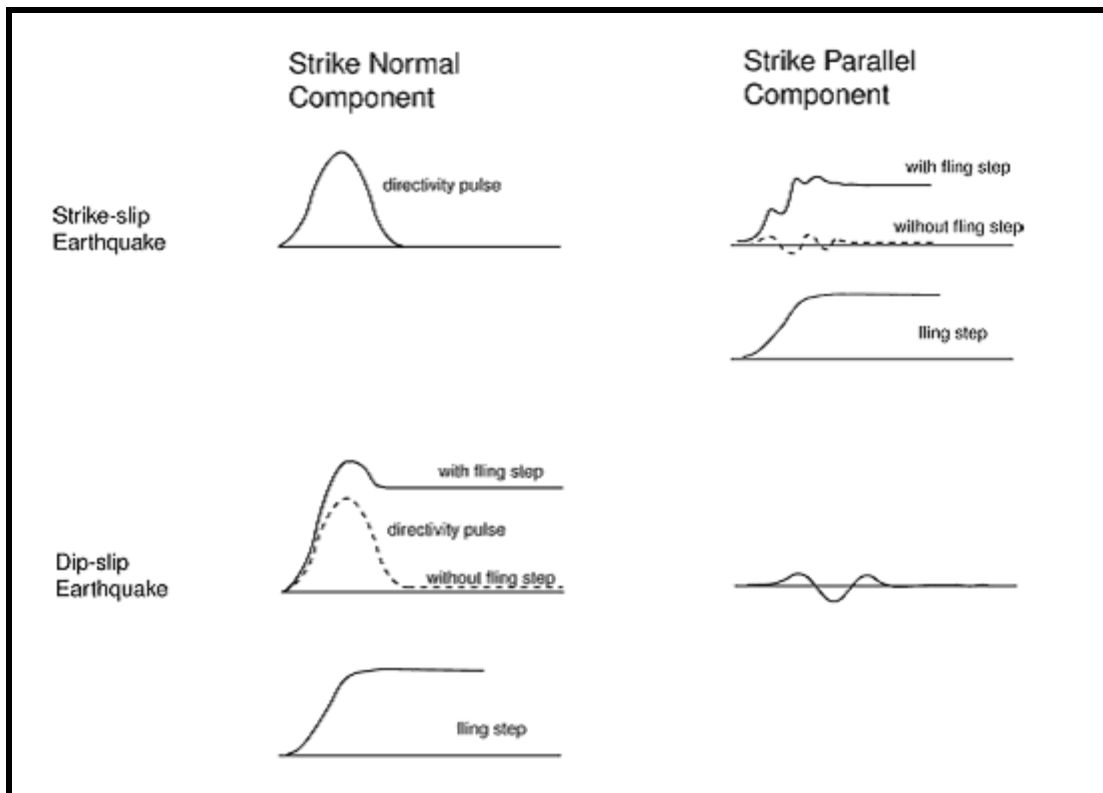


Σχ. 2-3: Αποτελέσματα της κατευθυντικότητας της διάρρηξης στις καταγεγραμμένες χρονοϊστορίες μετακινήσεων του σεισμού του Loma Prieta του 1989, για τις κάθετες (αριστερά) και παράλληλες (δεξιά) στο ρήγμα συνιστώσες. Πηγή: EERI, 1995.

Οι σύγχρονες ψηφιακές καταγραφές των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου περιέχουν μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω του στατικού πεδίου παραμόρφωσης του σεισμού. Αυτές οι στατικές μετατοπίσεις, που καλούνται "παραμένουσες μετακινήσεις" (fling step), εμφανίζονται μετά από ένα χρονικό διάστημα αρκετών δευτερολέπτων καθώς η ολίσθηση του ρήγματος προχωρά. Οι παραμένουσες μετακινήσεις (fling step) εμφανίζονται παράλληλες στην διεύθυνση ολίσθησης του ρήγματος, και επομένως δεν 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 εμφανίζεται 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 παρουσιάζονται στο Σχ.2-4, και οι χρονοϊστορίες στις οποίες αυτές οι συνεισφορές εμφανίζονται μαζί και χωριστά, παρουσιάζονται στο Σχ.2-5.



Σχ. 2-4: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τους προσανατολισμούς της παραμένουσας μετακίνησης και του παλμού κατευθυντικότητας για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και για ρήγμα κατακόρυφης βύθισης.



Σχ. 2-5: Σχηματικό διάγραμμα των χρονόιστοριών για ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και ρήγμα κατακόρυφης βύθισης στο οποίο η παραμένουσα μετακίνηση και ο παλμός κατευθυντικότητας δείχνονται μαζί και χωριστά.

Τα διαθέσιμα στοιχεία κινήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρηθούν οι επιδράσεις 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 έμπροσθεν κατευθυντικότητα. Ακολούθως γίνεται μικρή αναφορά στις επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης στο κοντινό πεδίο του ρήγματος.

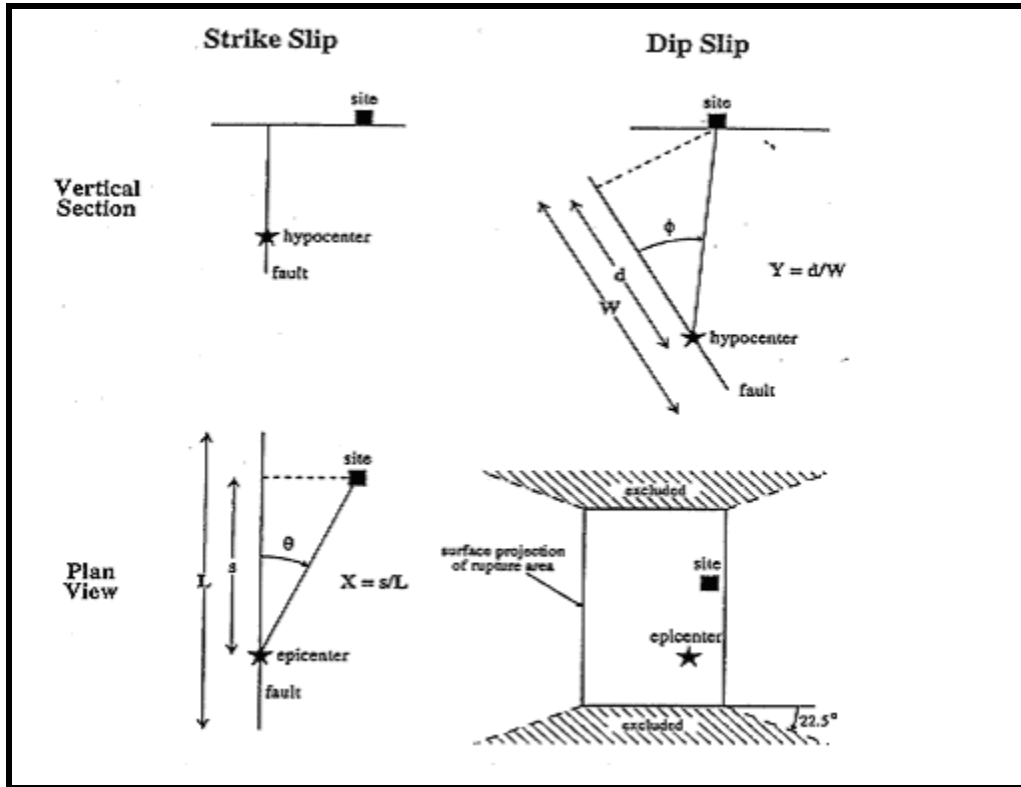
### 2.1.2 Παραμετροποίηση των εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου.

Οι Somerville et al (1997a) παραμετροποίησαν τις συνθήκες που οδηγούν σε εμπρόσθια και οπίσθια κατευθυντικότητα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6, η διαφοροποίηση στο χώρο των επιδράσεων της κατευθυντικότητας εξαρτάται από τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διάδοσης ρήξης και της κατεύθυνσης των κυμάτων που ταξιδεύουν από το ρήγμα στην περιοχή ( $\theta$  για τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης, και  $\phi$  για τα ρήγματα ολίσθησης βύθισης), και στο τμήμα 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 μικρότερες γωνίες μεταξύ της εξεταζόμενης περιοχής και του ρήγματος και για μεγαλύτερα μέρη του διερρηγμένου ρήγματος μεταξύ της θέσης και υποκέντρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι, ακόμα και όταν ικανοποιούνται οι γεωμετρικές συνθήκες για την εμπρόσθια κατευθυντικότητα, τα αποτελέσματα της εμπρόσθιας κατευθυντικότητας μπορούν να μην εμφανιστούν. Αυτό θα μπορούσε να συμβεί εάν ένας σταθμός είναι στο τέλος ενός ρήγματος και η διάρρηξη εμφανίζεται προς το σταθμό αλλά η ολίσθηση συγκεντρώνεται προς το τέλος του ρήγματος όπου ο σταθμός βρίσκεται.

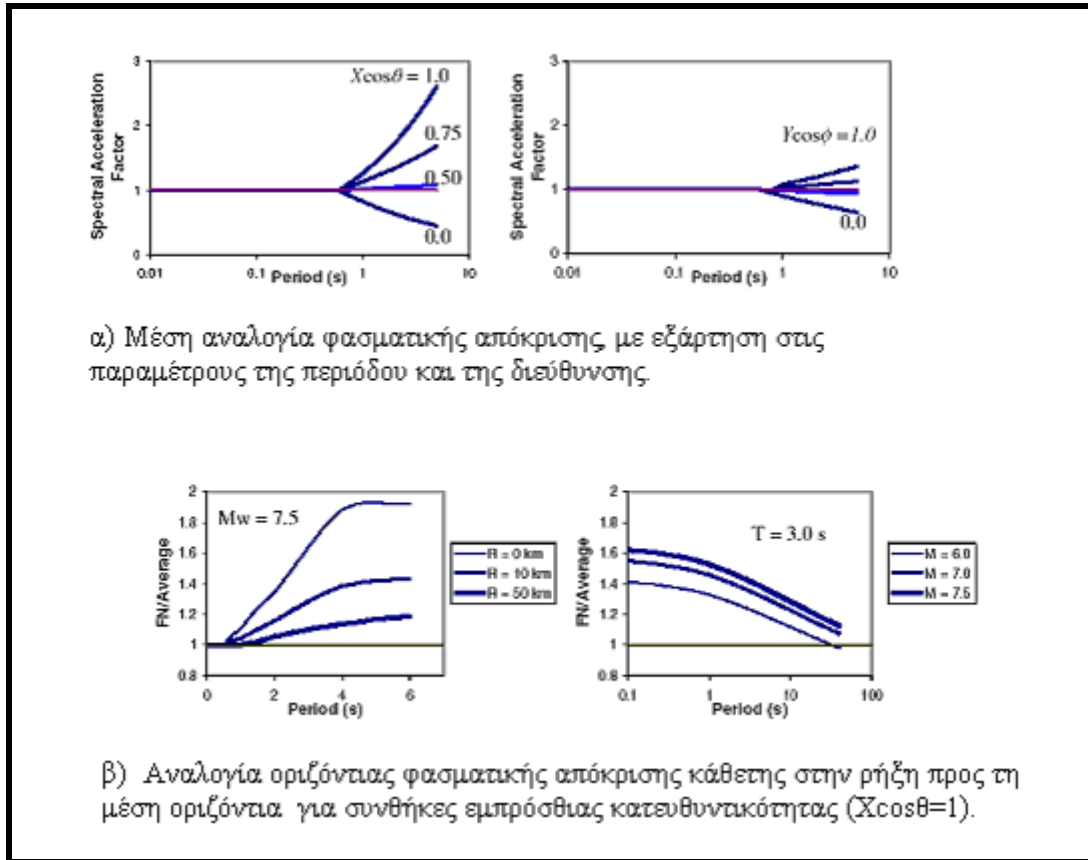
Για να ληφθούν υπ όψιν τα αποτελέσματα της κατευθυντικότητας, οι Somerville et al (1997a) συσχέτισαν τις ανηγμένες προς ένα μέσο φάσμα, τιμές των φασμάτων απόκρισης (με 5% απόσβεση) με τις γεωμετρικές παραμέτρους που καθορίζονται στο σχήμα 2.5, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.7. Οι παράμετροι 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 15km και για τρεις διαφορετικούς τύπους σεισμικών πηγών (πίνακας 2.1). Οι παράγοντες κοντινής πηγής από τον κανονισμό UBC (1997) είναι συμβατοί με το μέσο όρο των καθέτων και των παράλληλων στο ρήγμα συνιστωσών στο μοντέλο Somerville



et al (1997a), και ως εκ τούτου, οι διατάξεις του κανονισμού δεν εξετάζουν τη μεγαλύτερη κάθετη συνιστώσα της κίνησης Somerville (1998).



Σχήμα 2.6: Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν τις συνθήκες της κατευθυντικότητας της διάρρηξης από Somerville et al (1997).



Σχήμα 2.7: Προβλέψεις από την σχέση των Somerville et al (1997 a) μεταξύ διαφορετικών συνθηκών κατευθυντικότητας.

α) Παράγοντας μικρής περιόδου ( $N\alpha$ )

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 ( $N\nu$ )

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

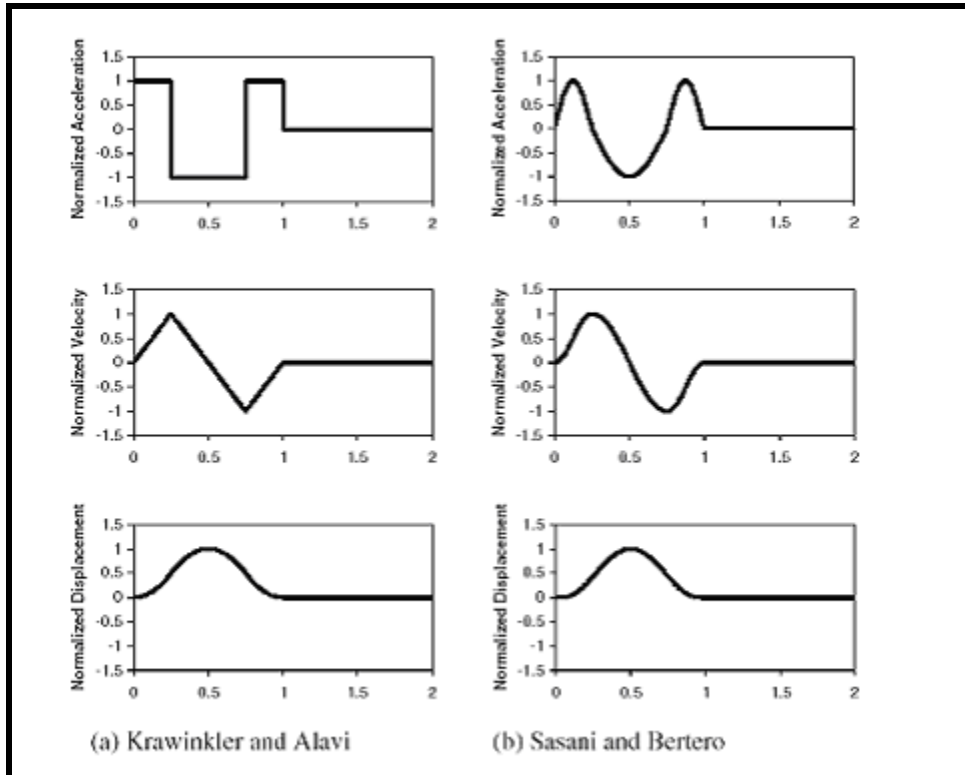
Πίνακας 2.1: Παράγοντες κοντινής πηγής από UBC (1997)

Η έρευνα για την απόκριση των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου κατέδειξε ότι η γραφική αναπαράσταση της χρονοϊστορίας των κινήσεων είναι προτιμητέα σε σχέση με τη γραφική αναπαράσταση του φάσματος απόκρισης στις παραπάνω κινήσεις (π.χ. Somerville, 1998 Alavi και Krawinkler, 2000 Sasaki και Bertero, 2000 Rodriguez-Marek, 2000). Μια παρουσίαση χρονοϊστορίας είναι προτιμητέα επειδή ο χαρακτηρισμός στο πεδίο συχνοτήτων της εδαφικής κίνησης (δηλ. μέσω ενός φάσματος

απόκρισης) υπονοεί μια πιθανοτική διαδικασία που έχει μια σχετικά ομοιόμορφη διανομή της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της κίνησης. Όταν η ενέργεια συγκεντρώνεται σε λίγους παλμούς κίνησης, το φαινόμενο συντονισμού το οποίο το φάσμα απόκρισης καλείται να παρουσιάσει μπορεί να μη διαθέτει επαρκή χρόνο να αναπτυχθεί (Somerville, 1998).

Οι μελέτες από τους Krawinkler και Alavi (1998) και Sasani και Bertero (2000) έχουν δείξει ότι απλουστευμένες θεωρήσεις του παλμού ταχύτητας μπορούν να «συλλάβουν» τα βασικά χαρακτηριστικά της απόκρισης κατασκευών που υποβάλλονται σε εδαφικές κινήσεις κοντινού πεδίου. Μερικοί απλουστευμένοι παλμοί παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8. Για να αναπαρασταθεί μια δόνηση δύο διευθύνσεων, απαιτείται η αναπαράσταση του ημιτονικού παλμού της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας καθώς και η χρονική υστέρηση μεταξύ της έναρξης της κάθετης και της παράλληλης με το ρήγμα συνιστώσας. Ο πίνακας 2.2 παρέχει ορισμούς συνηθισμένων παραμέτρων εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 2.9. 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.

Ο ορισμός της περιόδου του παλμού χρησιμοποιεί είτε το χρόνο μηδενισμού των τιμών (zero crossing time) είτε το χρόνο στον οποίο η ταχύτητα είναι ίση με 10% της μέγιστης ταχύτητας για αυτόν τον παλμό. Αυτό είναι απαραίτητο για τους παλμούς στους οποίους έχει προηγηθεί απόκλιση από το μηδενικό άξονα στη χρονοϊστορία της ταχύτητας. Ο παραπάνω ορισμός ενέχει κάποιο βαθμό υποκειμενικότητας και μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις στην εκτίμηση της  $T_v$ . Εντούτοις, η αβεβαιότητα που συνδέεται με την πρόβλεψη της  $T_v$  από σεισμολογικές μεταβλητές είναι πολύ μεγαλύτερη από τα λάθη στον υπολογισμό της από τα σημεία μηδενισμού. Οι Krawinkler και Alavi (1998) προσδιορίζουν τον παλμό ταχύτητας με βάση ένα σαφές συνολικό μέγιστο του φάσματος απόκρισης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης. Ως εκ τούτου, η παραπάνω εκτίμηση της ισοδύναμης περιόδου παλμού ( $T_{v-p}$ ) είναι σχετικά μονοσήμαντη. Για τις μονοπαλμικές κινήσεις, αυτοί οι διαφορετικοί ορισμοί της περιόδου του παλμού παρέχουν κατά προσέγγιση ταυτόσημα αποτελέσματα, αλλά για πιο σύνθετες καταγραφές αυτά μπορεί να διαφέρουν σημαντικά. Συνολικά, ο λόγος μεταξύ της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  είναι 0.84 με τυπική απόκλιση 0.28 (Rodriguez- Marek 2000). Η ταύτιση της  $T_v$  και της  $T_{v-p}$  για κάποια εδαφική σεισμική κίνηση υποδηλώνει ότι ο παλμός ταχύτητας εμπεριέχει ενέργεια σε στενό εύρος περιόδων.



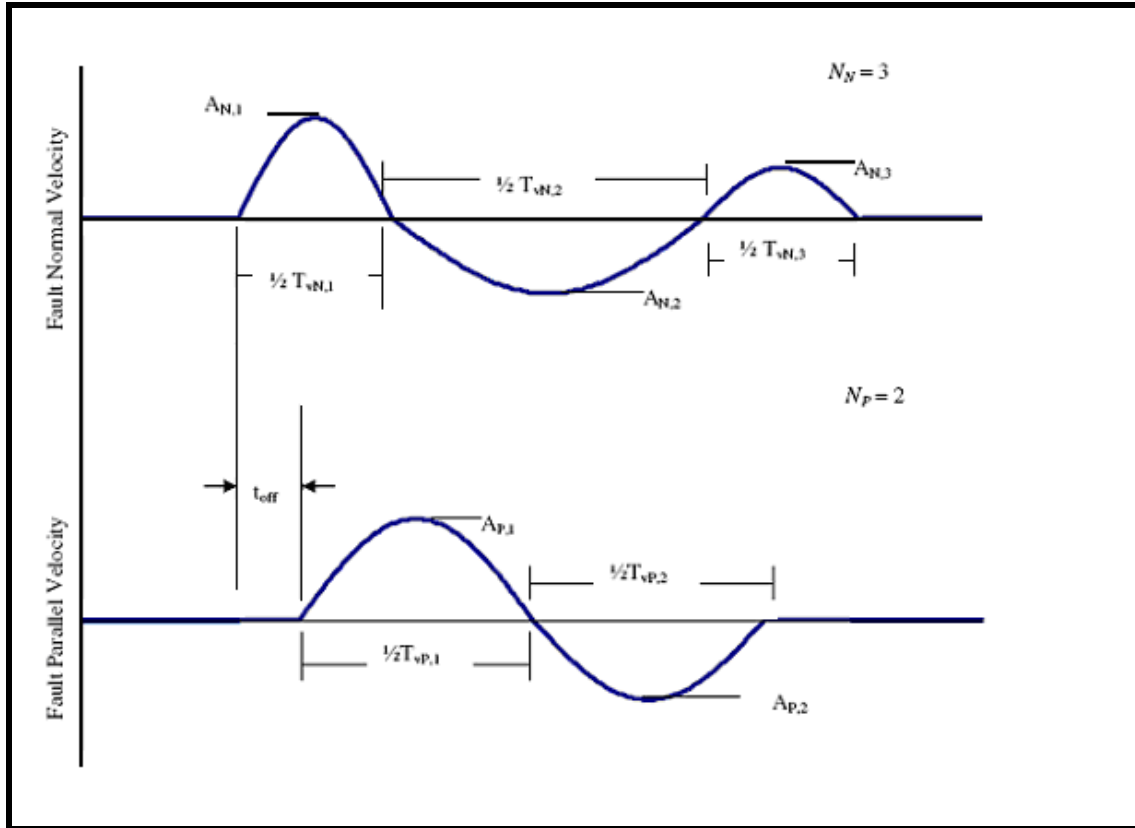
Σχήμα 2.8: Απλοποιημένοι παλμοί που έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές

Οι μελέτες απόκρισης των κατασκευών στις κινήσεις κοντινού πεδίου έχουν εστιάσει στα αποτελέσματα της μεγαλύτερης, κάθετης στο ρήγμα συνιστώσας (π.χ. Alavi και Krawinkler 2000). Εντούτοις, υπάρχουν εφαρμογές για τις οποίες η παράλληλη συνιστώσα στο ρήγμα μπορεί επίσης να είναι σημαντική. Μη γραμμικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης σε δύο κατευθύνσεις 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 δύο διευθύνσεις. Δύο κινήσεις κοντινού πεδίου με πολύ διαφορετικές κινήσεις της παράλληλης στο ρήγμα συνιστώσας παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10.

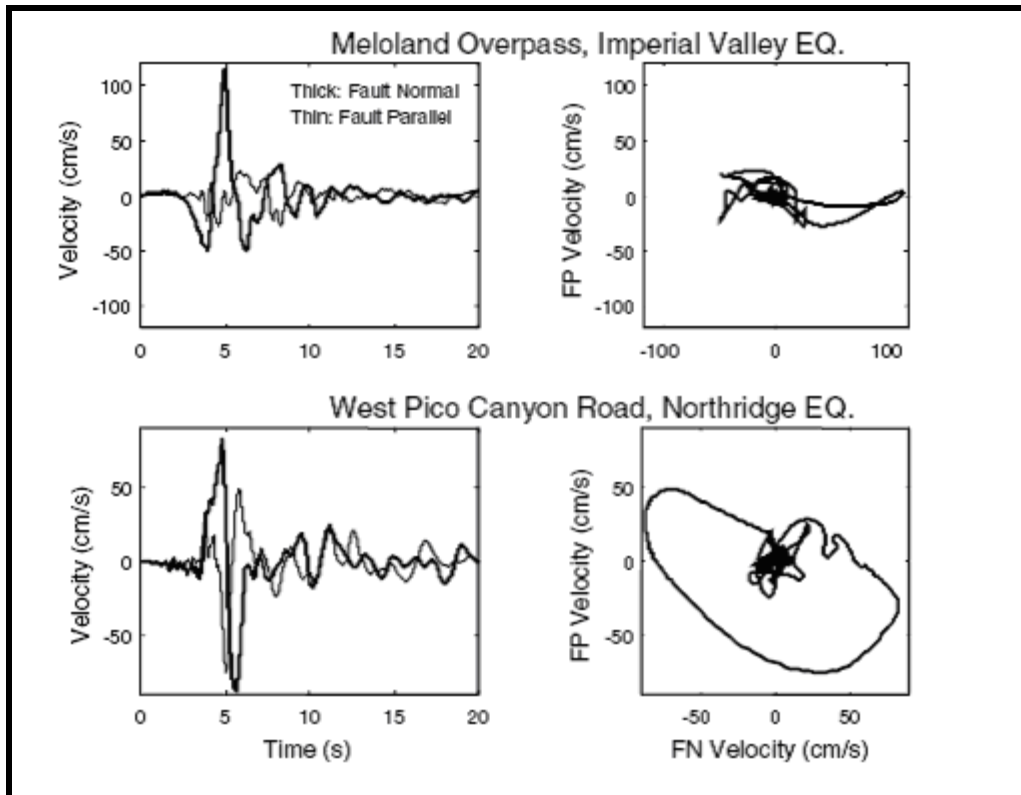
Πρόσθετη έρευνα απαιτείται για τη διαπίστωση των επιπτώσεων της δόνησης σε δύο κατευθύνσεις στην απόκριση του εδάφους και των κατασκευών στη ζώνη κοντινού πεδίου, όπου οι δύο συνιστώσες της οριζόντιας εδαφικής κίνησης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά. Από μια εξέταση καταγεγραμμένων κινήσεων κοντινού πεδίου που παρουσιάζουν την εμπρόσθια κατευθυντικότητα από τον Rodriguez-Marek (2000), διαπιστώθηκε ότι οι απλουστευμένες κινήσεις που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 2.11 θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να ερευνηθούν τη σημασία της δόνησης σε δύο κατευθύνσεις σε μελλοντικές μελέτες. Τέλος, εφόσον παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των κατασκευών, οι κατακόρυφες κινήσεις στη ζώνη κοντινού πεδίου πρέπει πιθανόν να υπολογιστούν.

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 2.2: Παράγοντες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις απλοποιημένες εδαφικές κινήσεις ημικονικού παλμού (από Rodriguez-Marek 2000)

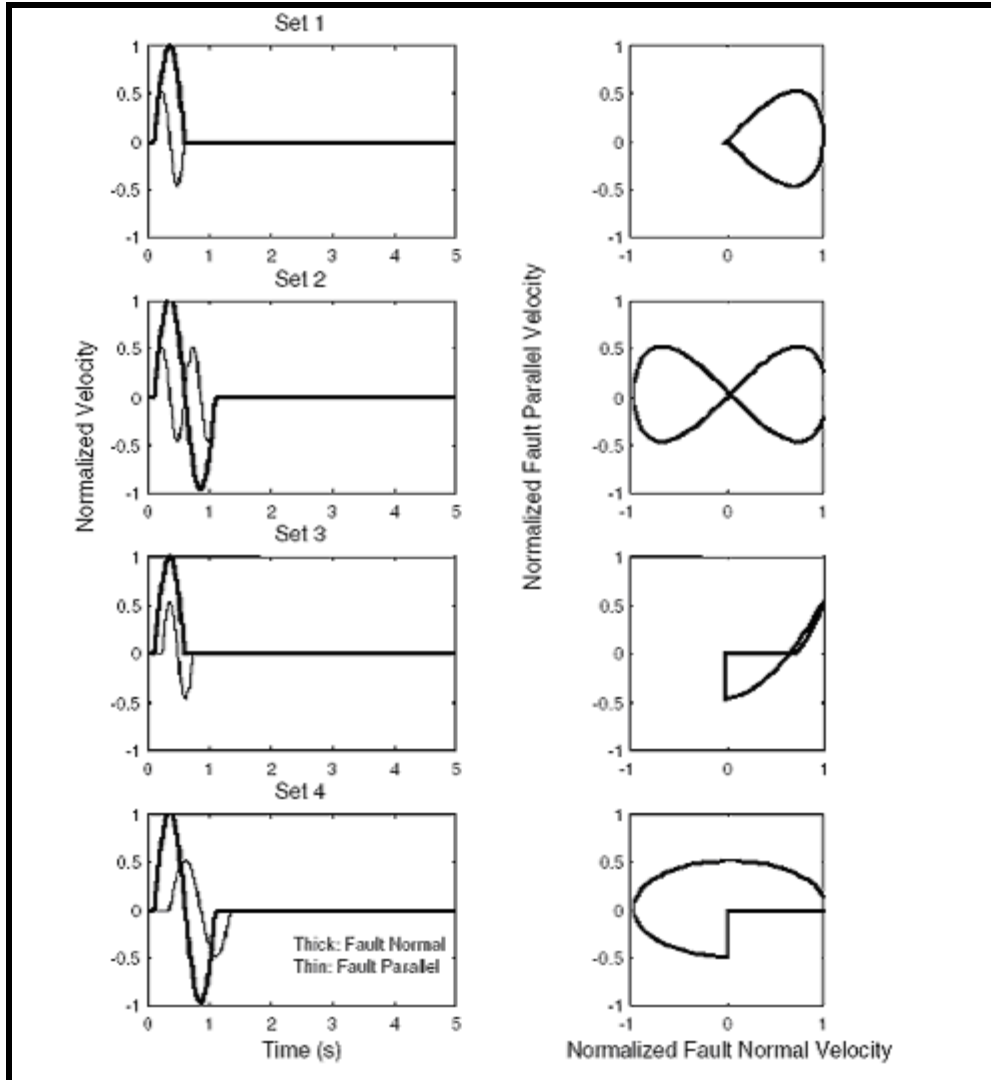


Σχήμα 2.9: Παράγοντες που χρειάζονται για να καθορίσουν την παράλληλη και την κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα για απλοποιημένους παλμούς ταχύτητας. Τα σύμβολα N, P αντιστοιχούν στις κάθετες και παράλληλες κινήσεις ως προς τη διεύθυνση του ρήγματος, αντίστοιχα (Rodriguez-Marek 2000).



Σχήμα 2.10: Χρονοϊστορίες ταχύτητας και οριζόντια τροχιακά σχέδια για κάθετη (FN) και παράλληλη (FP) στο ρήγμα συνιστώσα για δύο καταγραφές κοντινού πεδίου. Και οι δύο καταγραφές παρουσιάζουν σημαντικές «κάθετες» ταχύτητες, αλλά το Meloland έχει σχετικά μικρότερες «παράλληλες» ταχύτητες.





Σχήμα 2.11: 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).

## 2.2 Ποσοτικοποίηση των χαρακτηριστικών Κατευθυντικότητας της Διάρρηξης-Διαθέσιμα Μοντέλα

### 2.2.1 Φασματική επιτάχυνση

Οι Somerville et al (1997a) και ο Abrahamson (2000) έχουν παρουσιάσει μοντέλα για την τροποποίηση των τεταγμένων των φασμάτων απόκρισης (απόσβεση  $\zeta = 5\%$ ) από τη σχέση απόσβεσης Abrahamson και Silva (1997). Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν με παλινδρόμηση μεταβλητών αυτής της σχέσης απόσβεσης ως προς τις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2.6. Παρουσιάζονται μοντέλα για την τροποποίηση του γεωμετρικού μέσου των δύο οριζόντιων συνιστωσών και του λόγου της κάθετης προς τη μέση οριζόντια φασματική τεταγμένη. Οι λεπτομέρειες των μοντέλων φαίνονται στις δύο κορυφαίες σειρές του πίνακα 2.3.

### 2.2.2 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 ως προς τις γεωμετρικές παραμέτρους του κοντινού πεδίου του ρήγματος (σχήμα 2.6). Το μοντέλο ισχύει για τη διάρκεια του γεωμετρικού μέσου των δύο 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 δύο κατώτατες σειρές του πίνακα 2.3.

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 $T_m \times y$ 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 $T_d \times y$ 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 2.3: Τροποποίηση παραμέτρων εδαφικής κίνησης για την εκτίμηση επιδράσεων κατευθυντικότητας Οι παράμετροι  $X, Y, \theta, \phi$  ορίσθηκαν στο Σχήμα 2.5. Οι τροποποιήσεις στα φάσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.6

### 2.2.3 Μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (PHV)

Η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα (peak horizontal velocity, PHV) επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος, την απόσταση, 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 επαυξημένα κατά 12 τεχνητές χρονοϊστορίες. Οι καταγραφές αντιστοιχούν σε μεγέθη  $m = 6.2-7.5$  και απόσταση  $r = 0-10\text{km}$ . Για να αποφύγει μη ρεαλιστικές προβλέψεις της PHV σε κοντινές αποστάσεις, ο Somerville (1998) χρησιμοποίησε αποκοπή αποστάσεων μικρότερων από 3km. Η σχέση του Somerville (1998) για την PHV στη ζώνη κοντά στο ρήγμα είναι:

$$\ln(\text{PHV}) = -2.31 + 1.15 m - 0.5 \ln(r) \quad (2.1)$$

όπου το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα υπό τον περιορισμό ότι είναι τουλάχιστον ίση με 3km.

Μια παρόμοια μελέτη που συσχετίζει την PHV με το μέγεθος σεισμικής ροπής και την απόσταση στη ζώνη κοντινού πεδίου παρουσιάστηκε από τους Alavi και Krawinkler (2000), βασισμένη στο ίδιο σύνολο στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε από τον Somerville (1998). Η σχέση για την PHV των Alavi και Krawinkler (2000) είναι:

$$\ln(\text{PHV}) = -5.11 + 1.59 m - 0.58 \ln(r) \quad (2.2)$$

Ο Rodriguez- Marek (2000) πραγματοποίησε αναλύσεις παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας 48 χρονοϊστορίες ταχύτητας από 11 γεγονότα. Τα στοιχεία αφορούσαν αποστάσεις  $r$  από την πηγή  $r < 20\text{km}$  και  $m = 6.1-7.4$ . Χωριστές αναλύσεις εκτελέστηκαν για τις κινήσεις που καταγράφηκαν επί βράχου και εδάφους. Με βάση την ανάλυση αυτών των καταγραφών, προτάθηκε η ακόλουθη σχέση για την PHV:

$$\ln(\text{PHV}) = a + b m + c \ln(r^2 + d^2) + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.3)$$

όπου η PHV είναι σε μονάδες cm/s, το  $a$ , το  $b$ , το  $c$  και το  $d$  είναι οι παράμετροι του μοντέλου, το  $r$  είναι η ελάχιστη απόσταση από το ρήγμα, το  $m$  είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής,  $\eta_i$  είναι ο όρος που αφορά τη διαφοροποίηση από γεγονός σε γεγονός  $i$  και ο  $\epsilon_{ij}$  αντιπροσωπεύει την εσωτερική διαφοροποίηση μέσα σε κάποιο γεγονός, όπου το  $j$  αφορά την κάθε καταγραφή του γεγονότος και το  $i$  αφορά το γεγονός. Οι όροι σφάλματος από γεγονός σε γεγονός και μέσα σε κάποιο γεγονός θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητες, τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή με αποκλίσεις  $\sigma^2$  και  $\tau^2$  αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης της PHV δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma^2 + \tau^2 \quad (2.2.\beta)$$

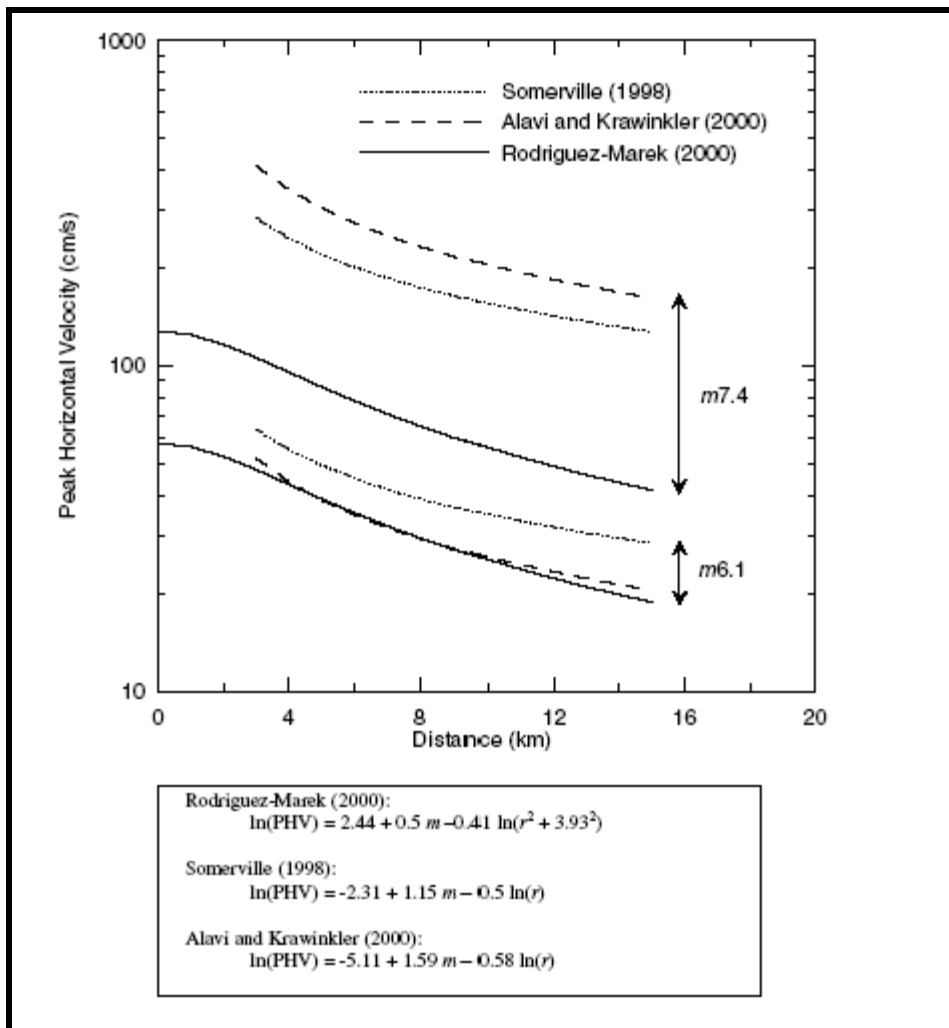
Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Rodriguez- Marek (2000) παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.

Data Set	$a$	$b$	$c$	$d$
All Motions	2.44	0.50	-0.41	3.93
Rock	1.46	0.61	-0.38	3.93
Soil	3.86	0.30	-0.42	3.93

Πίνακας 2.4: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την PHV.

Το σχήμα 2.12 συγκρίνει τη σχέση για όλες τις τοποθεσίες, που προτάθηκε πρόσφατα από τον Rodriguez-Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville

(1998) και τους Alavi και Krawinkler (2000). Οι σχέσεις διαφέρουν κυρίως στην επίδραση του μεγέθους  $m$ . Οι Somerville (1998) και Alavi and Krawinkler (2000) προτείνουν πολύ μεγαλύτερη διαφοροποίηση της PHV ως προς το μέγεθος  $m$ . Η διαφοροποίηση αυτή δεν μπορεί να αποδοθεί στη χρήση των επιπρόσθετων τεχνητών χρονοϊστοριών, γιατί ο Somerville (1998) καταδεικνύει ότι η PHV των καταγεγραμμένων χρονοϊστοριών αυξάνεται πιο γρήγορα με το μέγεθος από ό,τι αυτή των τεχνητών χρονοϊστοριών. Οι διαφορές οφείλονται πιθανώς στη μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην πιο πρόσφατη μελέτη.



Σχήμα 2.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης για εκτίμηση του 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)

### 2.2.4 Περίοδος παλμού

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

$$\log_{10}T_v = -2.5 + 0.425 m \quad (2.4)$$

όπου η  $T_v$  είναι η περίοδος του μεγαλύτερου κύκλου της κίνησης και  $m$  είναι το μέγεθος της σεισμικής ροπής. Σε μια μεγαλύτερη μελέτη των διανομών ολίσθησης, χρησιμοποιώντας μοντέλα ολίσθησης για 15 σεισμούς, οι Somerville et al (1999) αιτιολογούν τη χρήση σχέσεων που κλιμακώνονται αυτο-όμοια, προκειμένου να περιορίσουν αριθμητικά τις παραμέτρους του ρήγματος. Σε ένα αυτό-όμοιο σύστημα, γεγονότα διαφορετικής έντασης δε διαφέρουν παρά μόνο ως προς το συντελεστή κλιμάκωσης. Χρησιμοποιώντας αυτό το αυτό-όμοια κλιμακούμενο μοντέλο, ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής της έντασης στην παραπάνω εξίσωση ισούται με 0.5, οπότε προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\log_{10}T_v = -3.0 + 0.5 m \quad (2.5)$$

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

$$T_v = 2.2 t_R \quad (2.6)$$

Η σχέση μεταξύ της περιόδου του παλμού και της χρονικής διάρκειας  $t_R$  μπορεί επίσης να προκύψει εξετάζοντας το φαινόμενο της διάρρηξης από φυσική σκοπιά. Εάν θεωρήσουμε σημειακό ρήγμα και οι επιδράσεις της κατευθυντικότητας αγνοηθούν, 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, στην ουσία, ένα κάτω όριο της περιόδου του παλμού.

Οι Alani και Krawinkler (2000) όρισαν την περίοδο παλμού ως τη δεσπόζουσα περίοδο στο φάσμα απόκρισης ταχύτητας ( $T_{v-p}$ ). Η σχέση τους που χρησιμοποιεί αυτόν τον ορισμό για την περίοδο παλμού είναι:

$$\log_{10}T_{v-p} = -1.76 + 0.31 m \quad (2.7)$$

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

$$\ln(T_{v})_{ij} = a + bm + \eta_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.8)$$

όπου  $(T_v)_{ij}$  είναι η περίοδος του παλμού της  $j$ -καταγραφής του  $i$ -γεγονότος, τα  $a$  και  $b$  είναι οι παράμετροι του μοντέλου, ο  $\eta_i$  αφορά τη διαφοροποίηση από γεγονός σε γεγονός και ο  $\varepsilon_{ij}$  αντιπροσωπεύει την εσωτερική διαφοροποίηση κάποιου γεγονότος.

Εκτιμήσεις παρέχονται για τη περίοδο του παλμού,  $T_v$ , και τη δεσπόζουσα περίοδο του φάσματος ταχύτητας,  $T_{v-p}$ . Οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5. Η σχέση ισχύει για  $m = 6.1-7.4$  και για  $r < 20\text{km}$ . Οι όροι σφάλματος από γεγονός σε γεγονός και μέσα σε κάποιο γεγονός θεωρούνται ανεξάρτητες, κανονικά κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές με διασπορές  $\sigma^2$  και  $\tau^2$  αντίστοιχα. Το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης της  $T_v$  δίδεται από τη σχέση (2.2.β).

(a)  $T_v$

Data Set	$a$	$b$
All Motions	-8.33	1.33
Rock	-11.10	1.70
Soil	-5.81	0.97

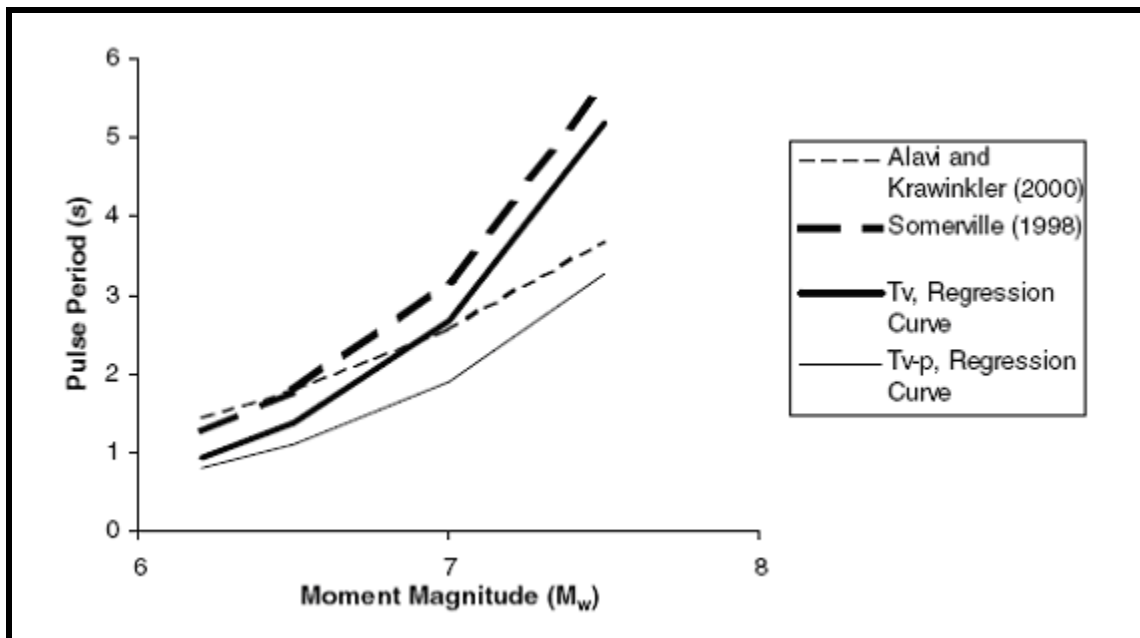
(b)  $T_{v-p}$

Data Set	$a$	$b$
All Motions	-6.92	1.08
Rock	-9.53	1.42
Soil	-5.66	0.91

Πίνακας 2.5: Παράμετροι του μοντέλου Rodriguez - Marek (2000) για την περίοδο του παλμού



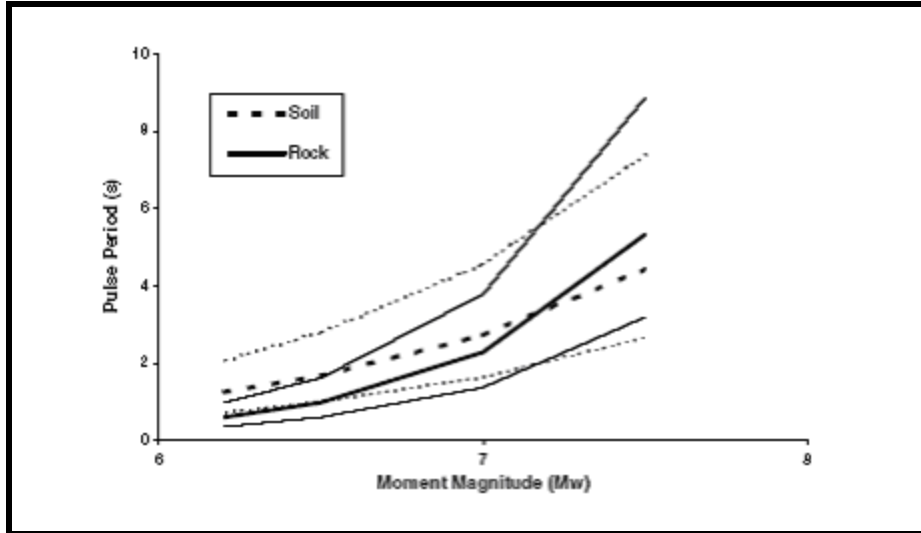
Στο σχήμα 2.13 γίνεται σύγκριση της σχέσης που προτάθηκε πρόσφατα από τον Rodriguez-Marek (2000) με τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) και τους Alavi και Krawinkler (2000). Οι σχέσεις του Rodriguez-Marek (2000) για τις  $T_v$  και  $T_{v-p}$  προβλέπουν συστηματικά μικρότερες περιόδους παλμού από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν από τον Somerville (1998) για το  $T_v$  και από τους Alavi και Krawinkler (2000) για  $T_{v-p}$ . Οι διαφορές στις προβλέψεις κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι σημαντικές στις περισσότερες περιπτώσεις λόγω των μεγάλων αβεβαιοτήτων στην εκτίμηση της περιόδου του παλμού, ειδικά για μεγάλους σεισμούς ( $m > 7.0$ ), για τους οποίους οι καμπύλες παλινδρόμησης είναι αρκετά κοντά.



Σχήμα 2.13.: Σύγκριση μοντέλου Rodriguez - Marek με σχέσεις που αναπτύχθηκαν από Somerville (1998) για τη  $T_v$  και από Alavi και Krawinkler (2000) για τη  $T_{v-p}$ . (Rodriguez- Marek 2000).

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών μπορεί να ερευνηθεί μέσω της χρήσης των σχέσεων του Rodriguez - Marek (2000) για την περίοδο του παλμού για βράχο και έδαφος (Σχήμα 2.14). Η διαφορά μεταξύ των τιμών της περιόδου του παλμού για βράχο και έδαφος είναι μικρή για τα μεγάλα μεγέθους γεγονότα ( $m > 7$ ), αλλά η περίοδος του παλμού είναι μεγαλύτερη για έδαφος απ' ό,τι για βράχο για γεγονότα

χαμηλότερης έντασης. Η εξέταση ζευγών καταγραφικών σταθμών σε βράχο και έδαφος και τα αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων απόκρισης επιβεβαιώνουν αυτήν την παρατήρηση (Rodriguez - Marek 2000).



Σχήμα 2.14: 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)

### 2.2.5 Αριθμός σημαντικών παλμών

Ο αριθμός των παλμών της κίνησης (καλούμενος και ως αριθμός σημαντικών παλμών,  $N_v$ ) ορίζεται ως ο αριθμός ημικύκλων ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 50% της μέγιστης ταχύτητας της εδαφικής κίνησης (πίνακας 2.3). Για τον υπολογισμό του αριθμού σημαντικών παλμών ταχύτητας, εξετάζεται μόνο η κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα της κίνησης. Η επιλογή του 50% σαν όριο αποκοπής είναι αυθαίρετη, και ο αριθμός των σημαντικών παλμών είναι κάπως ευαίσθητος ως προς αυτήν την παράμετρο. Ο αριθμός σημαντικών παλμών στη κάθετη συνιστώσα 48 καταγραφών κοντινού πεδίου παρουσιάζεται στον πίνακα 2.6. Οι περισσότερες καταγραφές περιέχουν δύο σημαντικούς παλμούς (δηλ. έναν πλήρη παλμό εδαφικής κίνησης). Ο Somerville (1998) υποδεικνύει ότι ο αριθμός ημιπαλμών ημιτόνου στη χρονοϊστορία της ταχύτητας συνδέεται με τον αριθμό των ασυνεχειών (asperities) σε ένα ρήγμα, ο οποίος στη συνέχεια συνδέεται με τη διανομή ολίσθησης ρήγματος. Αυτό το φαινόμενο φυσικά είναι δύσκολο να εκτιμηθεί εκ των προτέρων. Προς το παρόν 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. Για σεισμικές αναλύσεις το  $N_v = 2$  αποτελεί μία ικανοποιητική προσέγγιση.

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>		48	7 (0)	24 (10)	7 (13)	10 (25)

Πίνακας 2. 6: Αριθμός παλμών ( $N_v$ ) από γεγονός για 48 κοντινού πεδίου κινήσεις (κάθετη στο ρήγμα συνιστώσα). Οι τιμές στις παρενθέσεις είναι οι αριθμοί των ημι-κύκλων του παλμού της ταχύτητας που έχουν εύρη τουλάχιστον 33% της PHV. (Rodriguez - Marek 2000)

### 2.3 Ποσοτικοποίηση της Παραμένουσας Μετακίνησης

Οι επιδράσεις της παραμένουσας μετακίνησης (fling step) της εδαφικής κίνησης στην απόκριση των κατασκευών έχουν τύχει μικρότερης προσοχής από αυτές της κατευθυντικότητας. Οι πρόσφατοι σεισμοί στην Τουρκία (1999) και στην Ταϊβάν (1999), κατέδειξαν τη σημασία της παραμένουσας εδαφικής παραμόρφωσης που συνδέεται με τη ρήξη επιφάνειας στην απόκριση των κτιρίων που τέμνουν ή βρίσκονται κοντά σε ενεργά σεισμικά ρήγματα. Οι ευδιάκριτες εδαφικές μεταθέσεις, οι διαφορικές καθιζήσεις και η παραμόρφωση του εδάφους, είναι μερικές εκφάνσεις αυτού του φαινομένου.

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

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

$$\log_{10}(\text{MD}) = -5.46 + 0.82 m \quad (2.9)$$

όπου η τυπική απόκλιση γι' αυτήν την εκτίμηση είναι 0.42 (σε μονάδες  $\log_{10}$ ). Η παραπάνω εξίσωση ισχύει για εύρος έντασης  $m=5.2-8.1$  και για εύρος MD από 0.01m σε 14.6m. Η εκτίμηση της μετατόπισης της ρηγμάτωσης εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τον τύπο του ρήγματος, και στη μελέτη των Wells και Coppersmith (1994) δίδονται συντελεστές συχέτισης χωριστά για ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης και κανονικά ρήγματα. Η μέγιστη μετατόπιση ρήγματος απαντάται σε κάποιο σημείο κατά μήκος του ρήγματος, και το μέτρο της μετατόπισης της ρηγμάτωσης μεταβάλλεται κατά μήκος του ίχνους του ρήγματος.

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

$$\log_{10}(\text{AD}) = -4.80 + 0.69 m \quad (2.10)$$

όπου η τυπική απόκλιση γι' αυτήν την εκτίμηση είναι 0.36 (σε μονάδες  $\log_{10}$ ). Το εύρος της έντασης γι' αυτά τα γεγονότα είναι  $m = 5.6-8.1$ . Γενικώς η μέση μετατόπιση κατά

μήκος της επιφάνειας διάρρηξης ισούται με περίπου το μισό της μέγιστης μετατόπισης, αλλά αυτός ο λόγος διαφέρει σημαντικά κατά περίπτωση.

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

## 2.4 Χαρακτηριστικά των Επιταχυνσιογραφημάτων που χρησιμοποιήθηκαν

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια ευρεία γκάμα καταγραφών σεισμικών κινήσεων κοντινού πεδίου. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται συνοπτικά πληροφορίες για το καθένα από αυτά.

LOCATION	STATION	CODE	COMP.	DATE	Mw	FAULT MECHANISM	SITE CODE	DIRECTION	CLOSEST FAULT DISTANCE (km)
Chi-Chi,Taiwan	TCU068	TCU068	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.2
Chi-Chi,Taiwan	TCU068	TCU068	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.2
Chi-Chi,Taiwan	TCU052	TCU052	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.8
Chi-Chi,Taiwan	TCU052	TCU052	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.8
Chi-Chi,Taiwan	TCU065	TCU065	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.1
Tabas,Iran	Tabas	TAB	074	16/9/1978	7.1	RV	SL	N	1.2
Chi-Chi,Taiwan	CHY101	CHY101	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	7.7
Chi-Chi,Taiwan	TCU102	TCU102	090	21/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.6
Chi-Chi,Taiwan	TCU067	TCU067	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.2
Chi-Chi,Taiwan	TCU101	TCU101	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	1.5
Chi-Chi,Taiwan	TCU051	TCU051	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	6.9
Duzce,Turkey	Duzce	DZC	270	27/9/1999	7.1	OB	SL	N	8.3
Chi-Chi,Taiwan	TCU087	TCU087	090	20/9/1999	7.6	RV	SR	F	5.8
Northridge,CA,USA	Lucerne Valley	LUC	090	28/6/1992	7.3	SS	SL	F	1.1
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 6, Huston Rd	E06	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	0.3
Chi-Chi,Taiwan	TCU054	TCU054	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	4.7
Chi-Chi,Taiwan	TCU049	TCU049	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	2.7
Chi-Chi,Taiwan	TCU049	TCU049	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	2.7
Chi-Chi,Taiwan	TCU082	TCU082	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	5
Duzce,Turkey	Duzce	DZC	180	27/9/1999	7.1	OB	SL	N	8.3
Chi-Chi,Taiwan	TCU075	TCU075	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	0.6
Chi-Chi,Taiwan	TCU082	TCU082	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	5
Chi-Chi,Taiwan	TCU054	TCU054	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	4.7
Chi-Chi,Taiwan	TCU055	TCU055	360	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	6.5
Northridge,CA,USA	Sylmar Converter Station	SCG	052	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.1
Tabas,Iran	Tabas	TAB	344	16/9/1978	7.1	RV	SL	N	1.2
Chi-Chi,Taiwan	TCU053	TCU053	090	20/9/1999	7.6	RV	SL	F	4.6

Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 5, James Rd	E05	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	2.7
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 4, Kawerson Rd	E04	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 7, Imperial Val. Cl	E07	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	1.8
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 5, James Rd	E05	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	2.7
Northridge,CA,USA	Jensen Filtration Plant	JFA	022	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.2
Northridge,CA,USA	Sylmar Converter Station East	SCH	011	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5
Imperial Valley, CA,USA	Differential Array- Dogwood Rd	EDA	270	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6.3
Northridge,CA,USA	Sylmar Converter Station	SCG	142	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.1
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 8, Cruickshank Rd	E08	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	5
Northridge,CA,USA	Newhall,Pico Canyon	NWS	046	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.3
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 8, Cruickshank Rd	E08	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	5
Northridge,CA,USA	Sylmar Country Hospital	SYH	360	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.5
Hanshin (Kobe),Japan	Kobe Port Iskai, Surface	KPI	000	17/1/1995	6.8	SS	SL	F	3.2
Imperial Valley, CA,USA	Post Office,Hotville	HVP	315	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6.9
Northridge,CA,USA	Jensen Filtration Plant	JFA	292	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.2

Imperial Valley, CA,USA	Post Office,Hotville	HVP	225	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6.9
Northridge,CA,USA	Sylmar Converter Station East	SCH	281	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 4, Katerson Rd	E04	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6
Hanshin (Kobe),Japan	Kobe Port Iskai, Surface	KPI	090	17/1/1995	6.8	SS	SL	F	3.2
Northridge,CA,USA	Rinaldi Receiving Station	RRS	318	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	6
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 6, Huston Rd	E06	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	0.3
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 7, Imperial Val. Cl	E07	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	1.8
Northridge,CA,USA	Newhall,LA Country Fire Station	NWH	360	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	6.5
Northridge,CA,USA	Sylmar Country Hospital	SYH	090	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.5
Coyote Lake ,CA,USA	Gilroy Array 6	GA6	230	8/6/1979	5.6	SS	SR	F	1.2
Northridge,CA,USA	Rinaldi Receiving Station	RRS	228	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	6
Imperial Valley, CA,USA	Brawley Airport	BRA	315	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	8.2
Petrolia,CA,USA	Erzincan	ERZ	000	13/3/1992	6.6	SS	SL	F	2
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 3, Pine Union Schl	E03	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	11.7
Northridge,CA,USA	Sepulveda Veterans Hospital	VSP	360	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	8
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 3, Pine Union Schl	E03	140	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	11.7



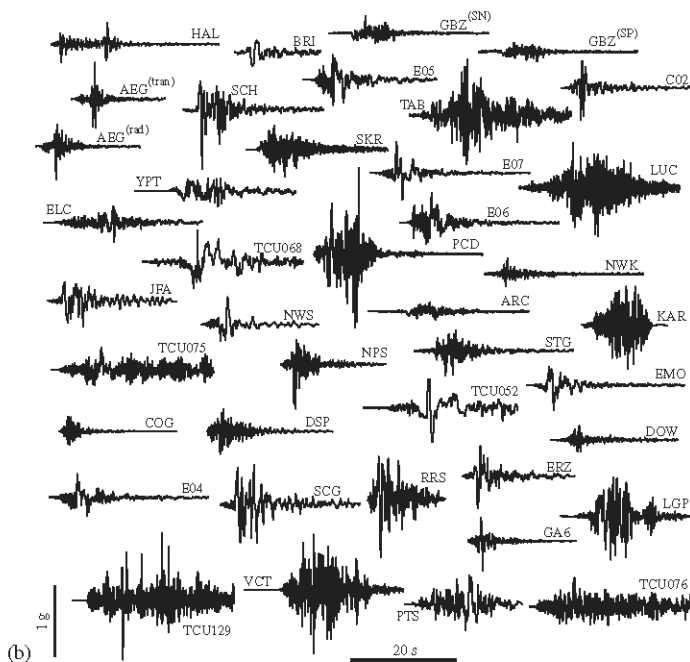
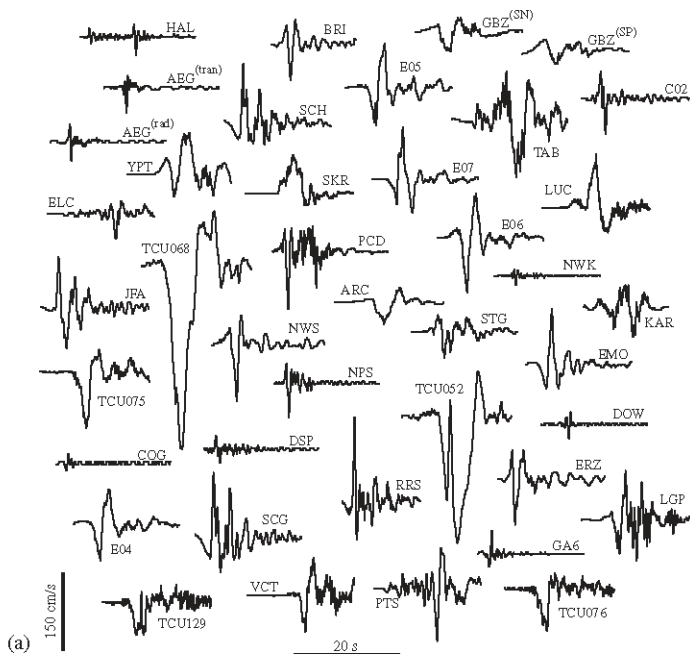
Northridge,CA,USA	Northridge White Oak Cov.Church	NRG	090	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	11.5
Imperial Valley, CA,USA	El Centro Array 10, Hospital	E10	230	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	9.6
Northridge,CA,USA	Los Angeles Dam	LDW	064	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.6
Imperial Valley, CA,USA	Melolkaí Route Overpass	EMO	000	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	1.2
Imperial Valley, CA,USA	Calexico Fire Station	CXO	225	15/10/1979	6.4	SS	SL	N	11
Imperial Valley, CA,USA	Differential Array-Dogwood Rd	EDA	000	15/10/1979	6.4	SS	SL	F	6.3
Northridge,CA,USA	Los Angeles Dam	LDW	334	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.6
Northridge,CA,USA	Newhall,Pico Canyon	NWS	316	17/1/1994	6.7	RV	SL	F	5.3
Northridge,CA,USA	Canoga Park Epiphany Church	CPC	196	17/1/1994	6.7	RV	SL	N	13.7
Northridge,CA,USA	Pacoima Kagel Canyon	PKC	090	17/1/1994	6.7	RV	HR	N	7.4
Hanshin (Kobe),Japan	Tarzana Nursery	TAR	360	17/1/1994	6.7	RV	SL-SR	B	14.8
Hanshin (Kobe),Japan	Kobe University	KBU	000	17/1/1995	6.8	SS	HR	F	0.7
Northridge,CA,USA	Joshua Tree-Fire Station	JSH	090	28/6/1992	7.3	SS	SL	B	11.6
Northridge,CA,USA	Joshua Tree-Fire Station	JSH	000	28/6/1992	7.3	SS	SL	B	11.6
Morgan Hill,CA,USA	Halls Valley	HAL	150	24/4/1984	6.2	SS	SL	B	2

Σημ: SS: Strike-Slip (Οριζόντιας Μετατόπισης), RV:Reverse(Ανάστροφο) OB:oblique (Πλάγιας Ολίσθησης) NM: Normal (Κανονικό)

HR:Hard Rock (Σκληρός Βράχος) SR:Sedimentary και Conglomerate Rock (Ιζηματογενής ή κροκαλοπαγής βράχος) SL: Soil και Alluvium (έδαφος και αλλούβια)

SN:Strike-Normal (Κάθεται στο ρήγμα), SP:Strike-Parallel (Παράλληλα με το ρήγμα)  
 Rad:Radial (Ακτινικό), Long: Longitudinal (Διάμηκες) Tran:Transverse(Εγκάρσιο)

Σχ. 2-6



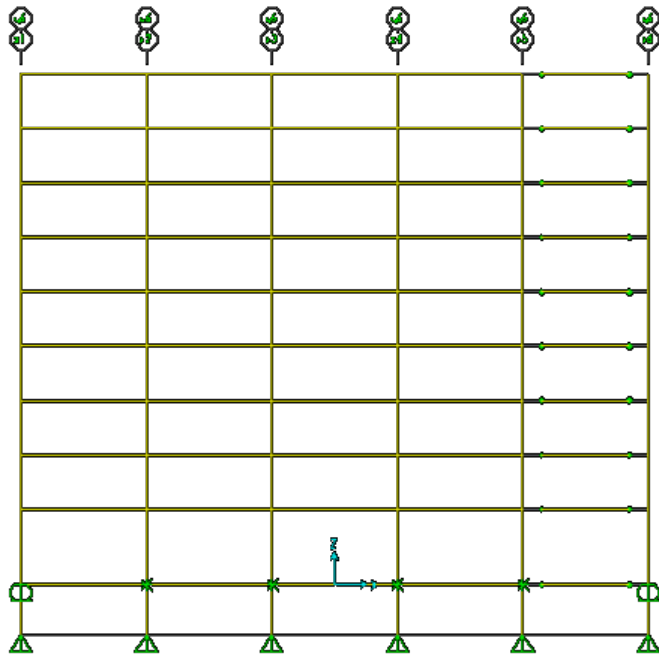
FD:Forward Directivity  
 (Εμπροσθεν  
 κατευθυντικότητα) PT:  
 Permanent Translation  
 (Μόνιμη Μετατόπιση)

Στο διπλανό σχήμα  
 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι  
 παλμοί (α) εδαφικής  
 ταχύτητας και (β)εδαφικής  
 επιτάχυνσης για κάποια από  
 τα παραπάνω  
 επιταχυνσιογραφήματα.

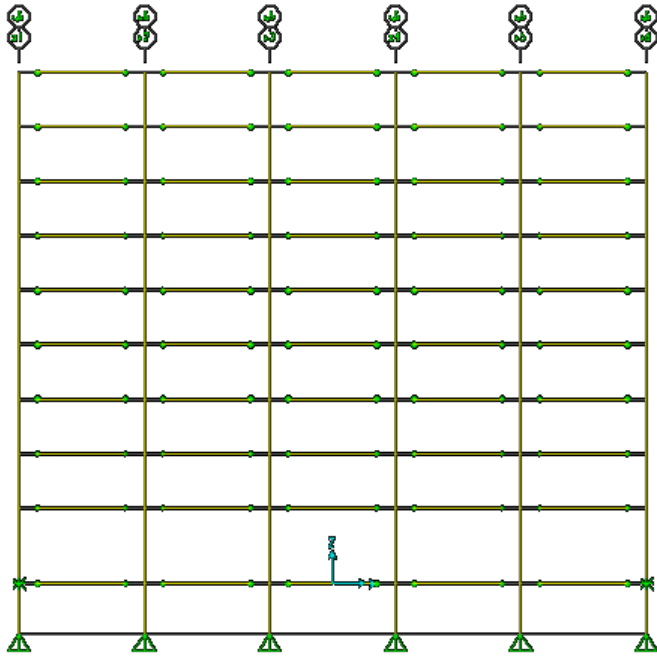
### 3 Παρουσίαση του Φορέα

#### 3.1 Γενικά Στοιχεία

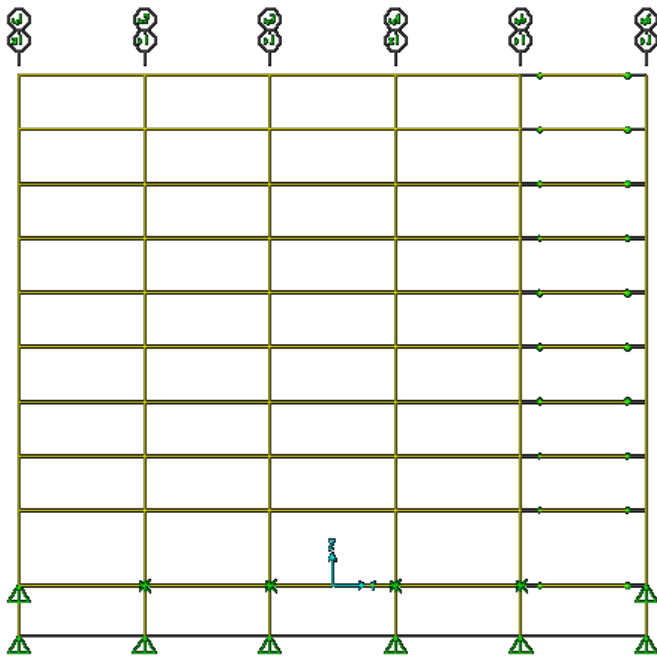
Ο φορέας που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα εννιαώροφο πλαίσιακό κτίριο από χάλυβα με ένα υπόγειο. Η κάτοψη διαθέτει 5×5 φατνώματα και είναι συνολικών διαστάσεων 30×30ft<sup>2</sup>. Το κτίριο εκτείνεται υπεργείως μέχρις ύψους 122ft. και υπογείως μέχρι βάθους 12ft.. Το στατικό σύστημα της κατασκευής παρουσιάζεται στα Σχ.3-1 έως 3-6.



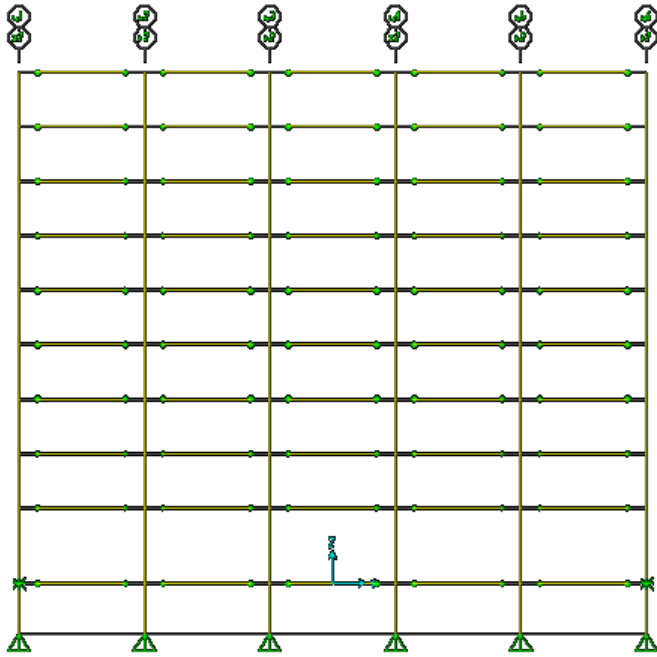
Σχ. 3-1: Εξωτερικά Πλαίσια, τομή X-Z, Z: κατακόρυφος άξονας



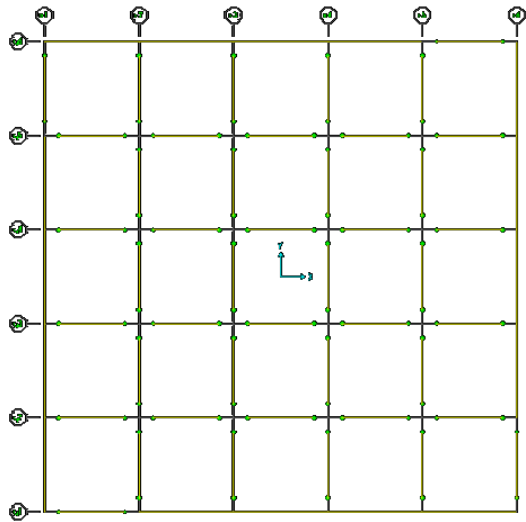
Σχ. 3-2: Εσωτερικά Πλαίσια, Τομή X-Z



Σχ. 3-3: Εξωτερικά Πλαίσια, τομή Y-Z



Σχ. 3-4: Εσωτερικά Πλαίσια, Τομή Y-Z



Σχ. 3-5: Κάτοψη Κατασκευής

### 3.2 Αναλυτική Περιγραφή

Ο πρωτότυπος φορέας έχει διαστάσεις κάτοψης 30×30ft<sup>2</sup>.

Οι διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με τα φορτία που καταπονούν το αρχικό κτίριο είναι οι ακόλουθες:

- Μεταλλικός σκελετός: Όπως σχεδιάστηκε
- Δάπεδο οροφής και στέγης: 3 ίντσες ο φέρων μεταλλικός οργανισμός του δαπέδου, εκ των οποίων οι 2.5 να αντιστοιχούν σε πλήρωση σκυροδέματος και σε υλικά πυροπροστασίας.
- Επικάλυψη στέγης: κατά μέσο όρο 7psf.
- Δάπεδο οροφής και στέγης: Κατά μέσο όρο 3psf, λαμβάνοντας υπόψιν και την πυροπροστασία.
- Μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις: 7 psf κατά μέσο όρο για όλους τους ορόφους, ενώ έχουμε πρόσθετα 40 psf στο δώμα για εξοπλισμό.
- Χωρίσματα: Όπως ορίζεται από τον ισχύοντα κανονισμό (10 psf για τα σεισμικά φορτία και 20 psf για το φορτία σχεδιασμού βαρύτητας).
- Εξωτερικοί τοίχοι: 25 psf για την επιφάνεια των τοίχων συμπεριλαμβανομένου και του δώματος
- Κινητά φορτία: έχουν χρησιμοποιηθεί οι τυπικές τιμές φορτίων που δίνονται από τον κανονισμό για χρήση του κτιρίου ως κτίριο γραφείων (50 psf για όλη την έκταση της κάτοψης του κτιρίου)
- Φορτία ανέμου: όπως ορίζεται από τον κανονισμό και σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή.
- Σεισμικά φορτία: όπως ορίζονται από τον κανονισμό,

όπου η μονάδα psf αντιστοιχεί σε 48Pa.

Ο κανονισμός Post-Northridge που εφαρμόστηκε στο συγκεκριμένο κτίριο προσθέτει στον κανονισμό της FEMA 267(1995) νέες προσαρμοσμένες παροχές και οι σχεδιαστές επιλέγουν την χρήση ελασμάτων ενίσχυσης στα δοκάρια με στόχο να εξασφαλίσουν τη μεταφορά της θέσης της πλαστικής άρθρωσης από το μέτωπο των υποστυλωμάτων στα δοκάρια.

Τα φορτία που αναφέρθηκαν παραπάνω υπολογίζονται ως εξής για κάθε όροφο του κτιρίου:

- Μόνιμα φορτία για κάθε όροφο για τον υπολογισμό του βάρους, 96 psf
- Μόνιμα φορτία για κάθε όροφο για τον υπολογισμό ης μάζας, 86 psf

- Μόνιμο φορτίο για τη στέγη χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η ύπαρξη του δώματος, 83 psf
- Μόνιμα φορτία λόγω του δώματος, 116 psf
- Μειωμένα κινητά φορτία ανά όροφο και για τη στέγη, 20 psf

Το κτίριο σχεδιάστηκε με βάση τις Post-Northridge οδηγίες για τα σεισμικά φορτία, καθώς αυτά επικράτησαν έναντι των φορτίων ανέμου, το Παρόν κτίριο παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αντοχή έναντι των σεισμικών φορτίσεων που του εφαρμόστηκαν, γεγονός που εν μέρει δικαιολογείται από τις Post-Northridge οδηγίες που ακολουθήθηκαν για το σχεδιασμό του. Έχει σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε τα τελευταία ζυγώματα σε κάθε πλευρά του κτιρίου να μην αναλαμβάνουν φορτία.

Οι Post-Northridge οδηγίες αποτελούν μια συνέχεια των Pre-Northridge, που έως τότε εφαρμόζονταν στις κατασκευές. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τόσο οι κατασκευές του Seattle, αλλά και αυτές του LA που σχεδιάστηκαν με τις Post-Northridge οδηγίες παρουσιάζουν αναμφισβήτητα καλύτερες συμπεριφορές σε σχέση με άλλες που σχεδιάστηκαν στις ίδιες περιοχές με βάση τις Pre-Northridge.

Το πρώτο στοιχείο που διαφοροποιεί τις δύο αυτές οδηγίες είναι οι επιλεγόμενες διατομές των μελών της κατασκευής. Με βάση τις Post-Northridge οδηγίες, οι διατομές που επιλέγονται είναι αρκετά μεγαλύτερων διαστάσεων έναντι αυτών που προβλέπονται από τις Pre-Northridge. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να αναφέρουμε ότι για τις δοκούς, με βάση τις Post-Northridge οδηγίες επιλέγεται διατομή μέλους με διαστάσεις 30×108, ενώ για την ίδια διατομή με βάση τις Pre-Northridge οδηγίες οι διαστάσεις είναι 27×114, παρατηρείται δηλαδή μια ουσιαστική αύξηση του ύψους της διατομής.

Τα μεγέθη των νέων μελών που προβλέπονται με τον Post-Northridge σχεδιασμό είναι μεγαλύτερα, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη καμπτική αντοχή της κατασκευής.

Μια δεύτερη και ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι σύμφωνα με τον Post-Northridge σχεδιασμό προβλέπεται η χρήση ελασμάτων ενίσχυσης στη θέση του κόμβου σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος, κάτι που δεν ίσχυε στον Pre-Northridge κανονισμό. Η κύρια αιτία της χρήσης των ελασμάτων αυτών από τους σχεδιαστές ήταν η επιθυμία τους να μεταφέρουν την αστοχία εκτός του κόμβου σύνδεσης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, στόχος τους ήταν η μεταφορά της θέσης της πλαστικής άρθρωσης από το μέτωπο του υποστυλώματος στη δοκό και εκτός του κόμβου συνδέσεώς τους, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο και μεγαλύτερη καμπτική

αντοχή του μέλους. Τα ελάσματα ενίσχυσης επομένως αποτελούν μια πρόσθετη τροποποίηση του Pre-Northridge κανονισμού. Οι διαστάσεις των ελασμάτων ενίσχυσης

**TOP AND BOTTOM FLANGE COVER PLATE DETAILS**

Girder Section		W21X62	W24X76	W24X84	W24X103
Top Plate	L x W1 x T1	11 x 8-1/4 x 3/4	12 x 9 x 3/4	12 x 9 x 7/8	12 x 9 x 1-1/8
Bottom Plate	L x W2 x T2	11 x 10-1/4 x 5/8	12 x 11 x 5/8	12 x 11 x 3/4	12 x 11 x 1

Girder Section		W27X94	W27X129	W33X141	
Top Plate	L x W1 x T1	14 x 10 x 7/8	14 x 10 x 1-1/4	17 x 11-1/2 x 1-1/8	
Bottom Plate	L x W2 x T2	14 x 12 x 3/4	14 x 12 x 1-1/8	17 x 13-1/2 x 1	

Πίνακας 3-1: Διαστάσεις ελασμάτων ενίσχυσης, όπως αυτά επιλέχθηκαν με βάση τον Post-Northridge Σχεδιασμό

που χρησιμοποιήθηκαν στο υπό μελέτη κτίριο δίδονται στον ακόλουθο πίνακα.

Οι λεπίδες που χρησιμοποιούνται είναι δύο: μία στο πάνω μέρος της δοκού (top plate) και μία στο κάτω της (bottom plate).

Στον παραπάνω πίνακα τώρα οι τιμές με ένδειξη L αντιστοιχούν στο μήκος του ελάσματος ενίσχυσης, με W στο πλάτος της λεπίδας και με T στο πάχος της. Η λεπίδα που βρίσκεται στο κάτω μέρος της δοκού έχει αμειώτη ορθογωνική διατομή, ενώ η λεπίδα στο πάνω μέρος έχει πλάτος που μειώνεται ομοιόμορφα. Πιο συγκεκριμένα για την επάνω λεπίδα, το πλάτος W, το οποίο δίνεται από τον πίνακα 3.1, διατηρείται σταθερό από το μέτωπο του υποστυλώματος και για ένα μήκος ίσο με 2-1/2 ίντσες από το σημείο αυτό, ενώ από εκεί και πέρα και μέχρι το τέλος τους ελάσματος το πλάτος αρχίζει να μειώνεται ομοιόμορφα, Η τιμή του πλάτος στο τέλος του ελάσματος μπορεί να είναι μειωμένη έως και 3-1/2 ίντσες από την αρχική τιμή.

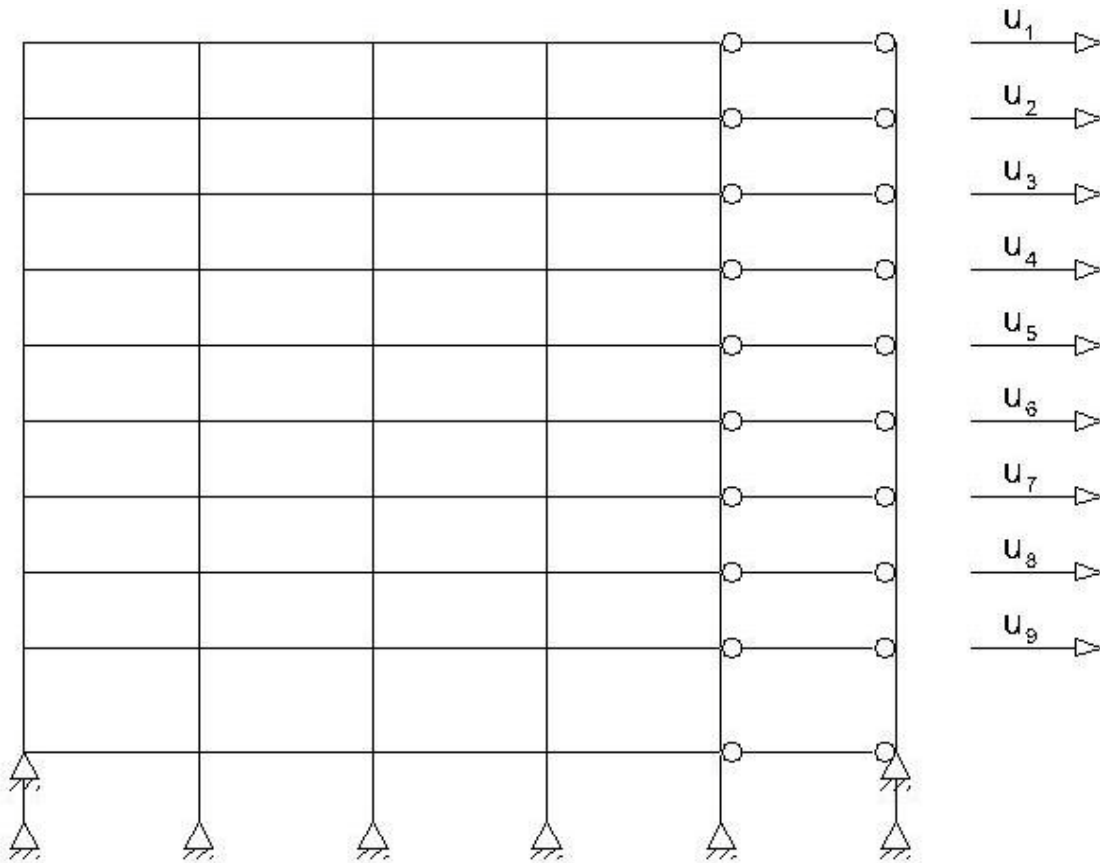
Στο σημείο αυτό θα πρέπει βέβαια να αναφέρουμε ότι τα είδη των διατομών που δίνονται στον πίνακα 3.1 είναι αποτέλεσμα μελέτης που έχει γίνει καθώς πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την τελική επιλογή της διατομής, Ενδεικτικά θα αναφέρουμε δύο από αυτούς τους παράγοντες, πρώτον είναι ότι το μήκος των ελασμάτων ενίσχυσης θα πρέπει να αντιστοιχεί στο μισό του ύψους της δοκού και δεύτερον ότι το πάχος του ελάσματος πρέπει να είναι ίσο με το πάχος του πέλματος της δοκού. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το γεγονός ότι, παρά τις μεταβολές που έγιναν ανάμεσα στον Post-Northridge και τον Pre-Northridge σχεδιασμό για το κτίριο, η ολική ακαμψία του κτιρίου παρέμεινε πρακτικά σταθερή, καθώς αυτό που κατόρθωσαν να επηρεάσουν κυρίως ήταν η τοπική κατανομή των απαιτήσεων στην περιοχή της σύνδεσης.



### 3.3 Δυναμικά Χαρακτηριστικά της κατασκευής

#### 3.3.1 Αρίθμηση Βαθμών Ελευθερίας της κατασκευής

Οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας κατά την κατεύθυνση  $X$  της κατασκευής αριθμούνται όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 3-6: Μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας κατά  $X$

### 3.3.2 Μάζες

Το μητρώο μάζας της κατασκευής δίδεται από τον παρακάτω πίνακα:

Mass Table (tn)								
1145.655	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1183.472	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1183.472	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1183.471	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1183.472	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1183.472171	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1183.472	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1183.472	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1183.472

Πίνακας 3-2: Μητρώο μάζας της Κατασκευής

Η συνολική μάζα της κατασκευής ισούται με  $M_{tot}=10613.43tn$

### 3.3.3 Ιδιομορφές

Οι ιδιομορφές της κατασκευής υπολογίζονται για το αρχικό μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής. Το μητρώο των μεταφορικών ιδιοδιανυσμάτων κατά X δίδεται από τον παρακάτω πίνακα:

$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$	$\phi_5$	$\phi_6$	$\phi_7$	$\phi_8$	$\phi_9$
1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.910369	0.508514	-0.11182	-0.83027	-3.83164	-3.51370344	-3.75115	15.34695	-1.33872
0.801685	-0.01073	-0.88772	-1.16965	7.181718	4.955024596	5.714286	-37.3811	-2.64512
0.68173	-0.44809	-0.96649	-0.00914	-9.34322	-3.03021785	-4.42704	54.60269	11.77149
0.562903	-0.71489	-0.43455	1.108475	8.973165	-1.84469431	-0.59754	-52.5741	-17.8534
0.444021	-0.80697	0.318223	1.019945	-5.70518	6.28601546	6.768049	44.96363	9.401039
0.32471	-0.7411	0.89288	-0.09484	1.324593	-7.02670415	-10.2028	-48.7969	12.79862
0.20921	-0.55592	1.025147	-1.10903	1.583139	4.468025299	9.087558	53.34359	-30.1327
0.103532	-0.30203	0.688504	-1.10579	-1.70935	-1.50105411	-4.73425	-40.5008	24.1431

Πίνακας 3-3: Μητρώο Ιδιοδιανυσμάτων της κατασκευής. Τα ιδιοδιανύσματα έχουν κανονικοποιηθεί ως προς την κορυφαία μετατόπιση

Οι πρώτες εννιά ιδιοπερίοδοι της κατασκευής δίδονται από τον παρακάτω πίνακα:

Mode								
$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$
sec	sec	sec	sec	sec	sec	sec	sec	sec
3.25436	1.11943	0.55253	0.32827	0.24840	0.24840	0.24840	0.24840	0.24840

Πίνακας 3-4: Πίνακας ιδιοπεριόδων της κατασκευής

Η παραμόρφωση της κατασκευής για τις τέσσερις πρώτες μεταφορικές ιδιομορφές κατά X φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

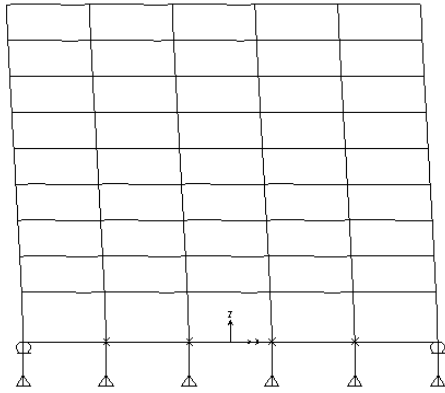


Figure 1: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή

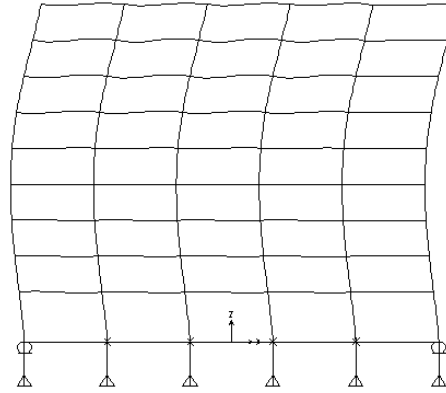


Figure 2: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή

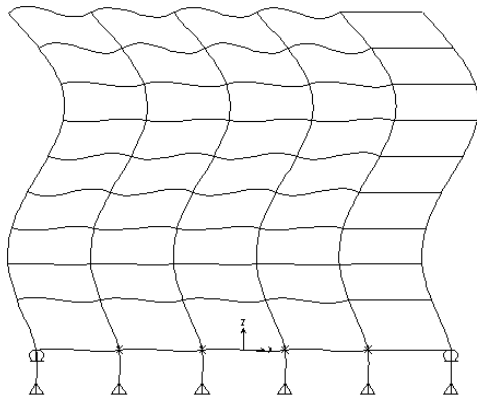


Figure 3: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή

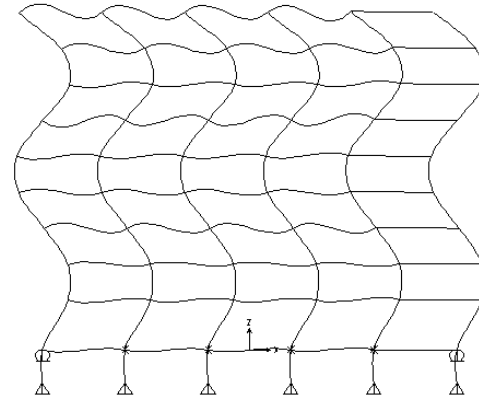


Figure 4: 4<sup>η</sup> Ιδιομορφή

Σχ. 3-7: Παραμόρφωση της κατασκευής για τις τέσσερις πρώτες μεταφορικές ιδιομορφές κατά X

### 3.3.4 Υπολογισμός των Συντελεστών Συμμετοχής $\Gamma_n$ και των Ενεργών Ιδιομορφικών Μαζών $M_n^*$

Για κάθε ιδιομορφή  $\phi_n$  ο συντελεστής  $\Gamma_n$  δίδεται από τη σχέση:

$$\Gamma_n = \frac{L_n}{M_n}, L_n = \varphi_n^T \mathbf{m} \mathbf{i}, M_n = \varphi_n^T \mathbf{m} \varphi_n, \mathbf{i} = \{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1\}^T$$

Για κάθε ιδιομορφή η δρώσα ιδιομορφική μάζα  $M_n^*$  δίδεται από τη σχέση:

$$M_n^* = \frac{L_n^2}{M_n}$$

Οι τιμές για κάθε ιδιομορφή δίδονται στον παρακάτω πίνακα:

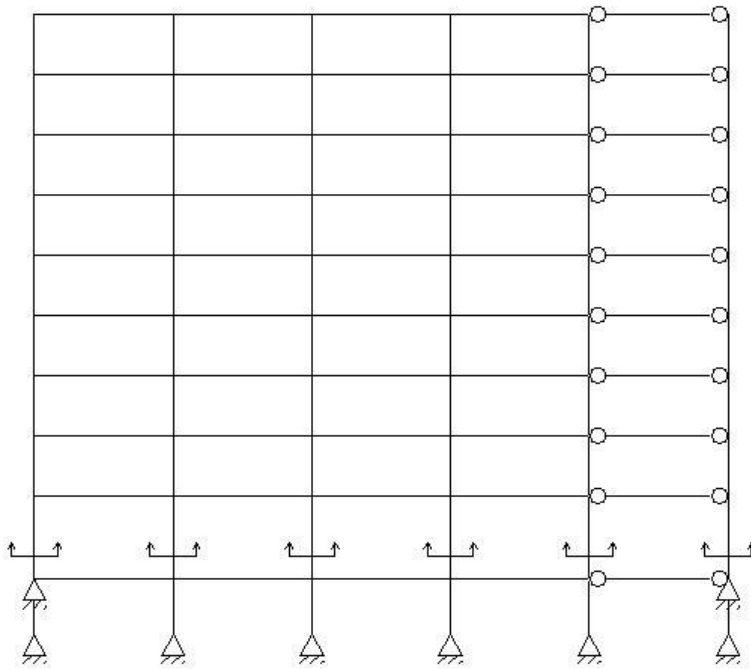
$\Gamma_1$	$\Gamma_2$	$\Gamma_3$	$\Gamma_4$	$\Gamma_5$	$\Gamma_6$	$\Gamma_7$	$\Gamma_8$	$\Gamma_9$
1.3991	-0.5942	0.2808	-0.1576	-0.0020	-0.0015	-0.0036	-0.0006	0.0032

$M_1^*$	$M_2^*$	$M_3^*$	$M_4^*$	$M_5^*$	$M_6^*$	$M_7^*$	$M_8^*$	$M_9^*$
8289.1374	1479.0682	495.8107	227.9448	1.3445	0.4193	5.0640	7.3157	27.0868

Πίνακας 3-5

### 3.3.5 Καμπύλη αντίστασης της Κατασκευής και Ισοδύναμο Μονοβάθμιο Σύστημα

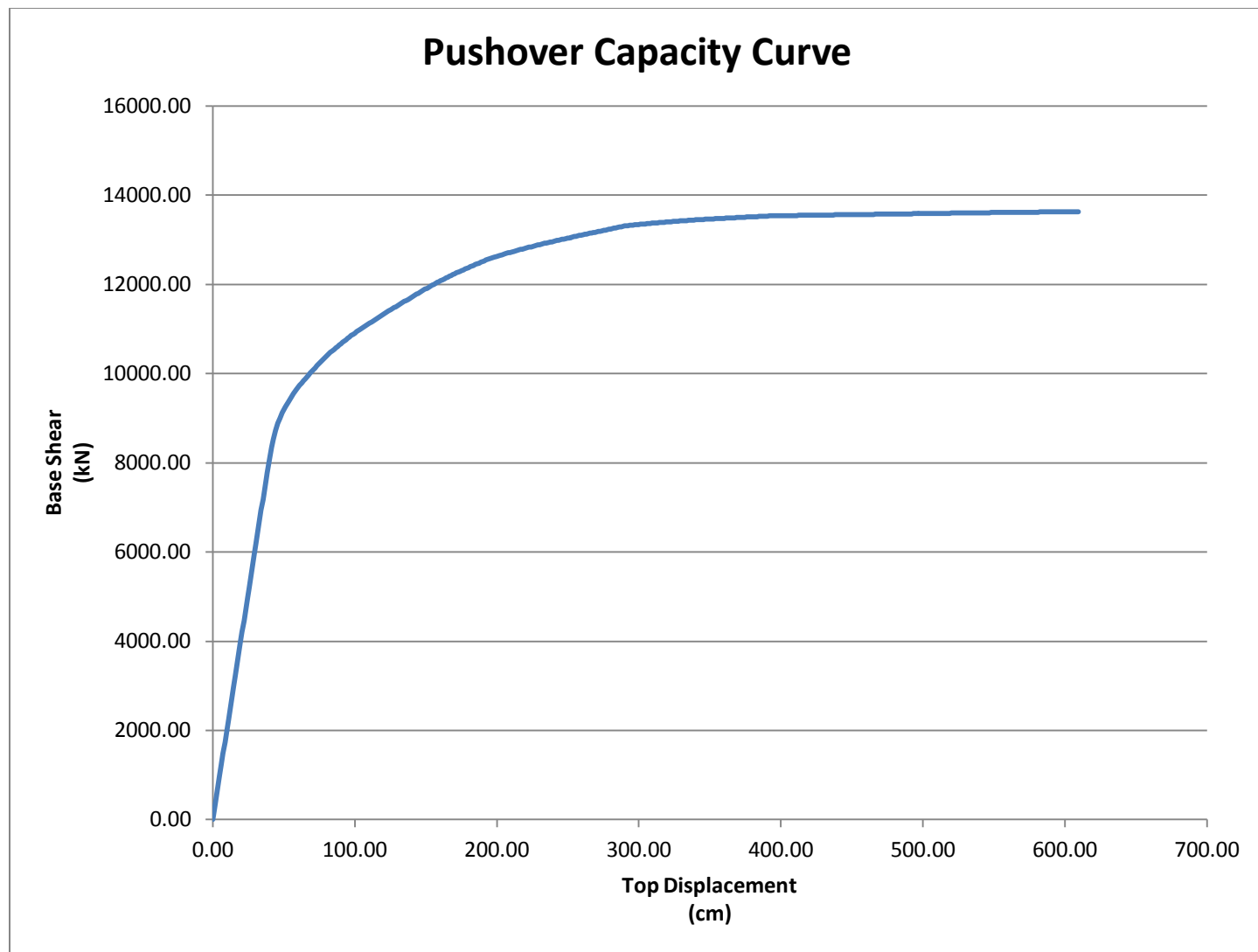
Η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής προέκυψε από προσαυξητική ανάλυση pushover, με καθ' ύψος κατανομή φορτίων σύμφωνα με την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή. Ως προς τις αρχικές συνθήκες της κατασκευής, τα φορτία της ανάλυσης PUSHOVER επιβλήθηκαν μετά τη (μη-γραμμική) επιβολή των στατικών φορτίων της κατασκευής. Στην ανάλυση ελήφθησαν υπόψιν φαινόμενα P-Δ. Επίσης ακολουθήθηκε τοπική ανακατανομή της έντασης για την περίπτωση που κάποια από τις δημιουργούμενες πλαστικές αρθρώσεις ξεπεράσει το όριο αντοχής της. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της καμπύλης είναι η ανελαστική μετατόπιση κορυφής και η συνολική τέμνουσα βάσης, η οποία προκύπτει ως άθροισμα των τεμνουσών των υποστυλωμάτων στα σημεία που φαίνονται στο Σχ. 3-8 για ένα τυπικό πλαίσιο της κατασκευής.



Σχ. 3-9: Θέσεις υπολογισμού των τεμνουσών δυνάμεων από τις οποίες προκύπτει η συνολική τέμνουσα βάσης της καμπύλης pushover για ένα τυπικό πλαίσιο της κατασκευής.

Από την ανάλυση προέκυψε η παρακάτω καμπύλη αντίστασης της κατασκευής (για τους πίνακες αποτελεσμάτων βλ. Παράρτημα)

Οι παραπάνω τιμές παριστάνονται γραφικά στην ακόλουθη καμπύλη αντίστασης της κατασκευής:



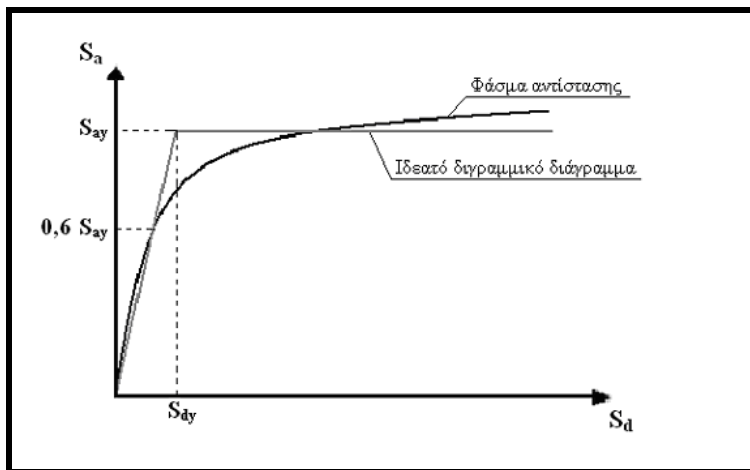
Σχ. 3-10

Για τη μετατροπή του συστήματος της κατασκευής σε ισοδύναμο μονοβάθμιο, διαιρούμε τη μετατόπιση κορυφής με το συντελεστή  $\Gamma_1=1.3991$  της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής, ώστε να προκύψει η ισοδύναμη φασματική μετατόπιση  $SD$ , και την τέμνουσα βάσης με τη δρώσα ιδιομορφική μάζα για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή  $M_1^*=8289.1374tn$ , ώστε να προκύψει η ισοδύναμη φασματική επιτάχυνση  $SA$ .

Για τη μετατροπή της καμπύλης αντίστασης του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος σε ιδεατό διγραμμικό ακολουθήθηκε η προσέγγιση N2, που έχει προταθεί από τον Fajfar. Σύμφωνα με αυτήν το ισοδύναμο συνήθως κατασκευάζεται με κλίση ελαστικού κλάδου ίση με την τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί στο 60% της επιτάχυνσης διαρροής και οριζόντιο μετελαστικό κλάδο. Βάσει της μεθόδου θα πρέπει τα εμβαδά που περικλείονται από τις δύο καμπύλες (την αρχική και την ισοδύναμη διγραμμική) να είναι ίσα. Από την κλίση του ελαστικού κλάδου του διγραμμικού διαγράμματος προκύπτει η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ως

$$T_1^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{SD_y}{SA_y}}$$

όπου  $SD_y$  η φασματική μετακίνηση διαρροής και  $SA_y$  η φασματική επιτάχυνση διαρροής του ισοδύναμου μονοβαθμίου.



Σχ. 3-11: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος βάσει της μεθόδου N2

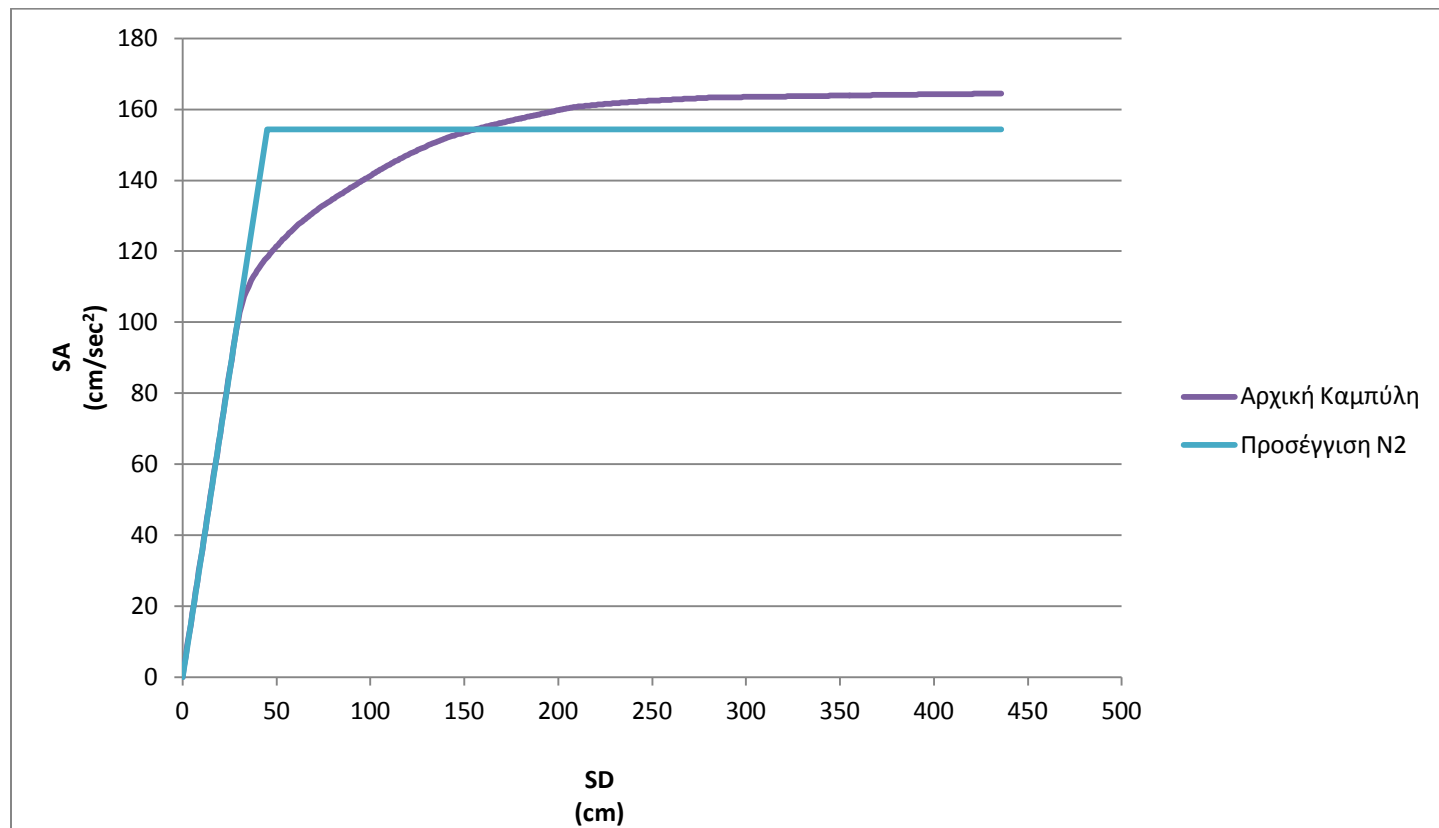
Μετά από την εφαρμογή των παραπάνω για το υπό ανάλυση κτίριο προέκυψε διγραμμικό διάγραμμα με τα παρακάτω στοιχεία:

- Μετατόπιση διαρροής  $SD_y=45.03cm$ , επιτάχυνση διαρροής  $SA_y=154.43cm/sec^2$
- Μέγιστη μετατόπιση  $SD_u=435.71cm$ , μέγιστη επιτάχυνση  $SA_u=154.43cm/sec^2$



- Ιδιοπερίοδος ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος  $T_1^* = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{SD_y}{SA_y}} = 3.392957$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά και στο διάγραμμα SA-SD (για αναλυτικά αποτελέσματα βλ. Παράρτημα). Από το διάγραμμα παρατηρούμε, όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε, ότι η κλίση του αρχικού ελαστικού κλάδου του διαγράμματος SA-SD αντιστοιχεί σε ιδιοπερίοδο ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με την ελαστική πρώτη ιδιοπερίοδο ( $T_1^{el} = 3.254\text{sec}$  έναντι  $3.392\text{sec}$ , αύξηση 4%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τη στιγμή της επιβολής των φορτίων της PUSHOVER η κατασκευή έχει αρχίσει να αποκλίνει ελαφρά από την απολύτως ελαστική κατάσταση (που αντιστοιχεί σε μηδενική φόρτιση), λόγω του ότι προηγουμένως έχουν επιβληθεί τα φορτία βαρύτητας.



Σχ. 3-12

## 4 Μελέτη της Απόκρισης της Κατασκευής στα υπό εξέταση επιταχυνσιογραφήματα

### 4.1 Ελαστική Απόκριση

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθεται η ελαστική απόκριση σε όρους επιτάχυνσης για απόσβεση  $\zeta=2\%$  για την ισοδύναμη πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής καθώς και για την ελαστική 2<sup>η</sup>, 3<sup>η</sup>, 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> ιδιοπερίοδο.

NAME	COMP	SA <sub>1</sub> * (cm/sec <sup>2</sup> )	SA <sub>2</sub> (cm/sec <sup>2</sup> )	SA <sub>3</sub> (cm/sec <sup>2</sup> )	SA <sub>4</sub> (cm/sec <sup>2</sup> )	SA <sub>5</sub> (cm/sec <sup>2</sup> )
BRA	315	151.78	214.81	152.15	337.9	684.55
CPC	196	105.81	510.93	992.7	1373.2	1066.2
CXO	225	55.622	132.79	643.45	924.69	790.09
E03	230	141.82	181.51	416.36	484.27	779.44
E03	140	142.53	331.87	714.86	1041	1111.8
E06	140	253.54	458.37	700.81	1065.4	1104.8
E07	140	175.08	736.86	650.78	969.15	664.27
E10	230	185.71	241.67	604.62	819.84	497.76
EDA	0	82.727	565.68	1276.9	1131.9	1827.8
EMO	0	193.09	402.64	831.02	686.56	639.08
ERZ	0	215.93	925.38	665.29	873.97	869.14
GA6	230	209	871.19	691.9	760.18	540.83
HAL	150	11	202.66	483.07	583.67	475.52
JSH	90	172.27	801.19	580.19	980.31	1084.9
JSH	0	42.594	667.61	601.33	977.74	710.32
KBU	0	132.56	968.09	611.43	756.81	680.01
KPI	90	168.94	1048	738.42	592.31	398.69
LDW	64	176.59	593.7	953.86	1538.1	818.03
LDW	334	90.207	744.53	890.07	934.78	1091.4
NRG	90	97.337	562.54	1061.2	1794.4	1279.5
NWH	360	194.78	1415.6	1798.8	2507.7	2283.7
NWS	316	141	544.85	1001.1	698.55	1067.2
PKC	90	148.61	299.2	865.75	1427.4	908.45
RRS	318	168.31	803.43	980.37	1814.6	1781.4
RRS	228	223.83	1823	1799.8	2269.7	2447.6
SYH	90	200.27	378.73	1489.6	1587.5	868.03
TAR	360	129.73	511.93	2660.3	3519.7	2664.1
VSP	360	192.32	826.06	2081.9	2865.1	2600.7

E04	230	374.75	656.2	488.99	819.22	1006.5
E04	140	81.084	493.37	860.38	1304.8	1022.8
E05	230	463.92	691.87	891.16	1436.4	663.78
E05	140	179.1	486.33	914.55	1408.3	1187.9
E07	230	435.26	576.57	863.64	857.43	772.82
E08	230	207.22	417.57	860.36	880.49	1366.3
E08	140	104.96	432.07	1029.5	1047.4	881.43
EDA	270	219.4	275.39	608.08	657.57	1719.3
HVP	315	238.68	327.25	503.02	704.81	973.25
HVP	225	205.85	423.52	619.98	1287.7	792.44
JFA	22	414.42	1041.3	871.74	835.89	780.26
JFA	292	153.21	2299.5	1909.3	1259.2	927.7
KPI	0	274.47	1158.3	833.34	651.25	745.35
NWS	46	306.28	932.09	760.66	810.24	860.37
SCG	142	184.9	2258.2	2363.8	1381.1	1465.7
SCH	11	385.99	1425.4	1509	1774.3	1907.2
SCH	281	200.89	1082.4	1628.3	1191.3	1716.8
SYH	360	245.32	995.09	1697.7	3092	1729.7
TCU053	90	108.43	448.5	571.23	637.64	636.45
SCG	52	504.11	1872.9	1429.5	1111.2	1170.5
TAB	344	244.69	785.63	1324.5	1930.1	5418
TCU049	360	177.19	407.37	634.29	699.29	947.52
TCU054	90	194.2	411.08	558.5	454.21	432.39
TCU055	360	227.57	337.03	525.17	761.87	762.24
TCU075	90	402.1	302.94	933.57	1272.4	1292
TCU082	90	200.52	426.14	764.43	719.27	670.04
TCU082	360	280.47	359.44	687.53	691.34	509.44
LUC	90	385.39	537.04	613.45	982.52	1906.5
TCU049	90	130.77	454.41	632.96	575.29	730.68
TCU051	360	167.45	329.38	562.51	644.83	816.85
TCU054	360	184.08	450.86	656.78	580.53	443.43
TCU087	90	150.11	276.44	704.97	272.5	382.63
DZC	270	245.85	582.18	1207.8	1600.8	1391.5
DZC	180	322.66	501.19	1516.1	1529.7	1027
E06	230	552.07	522.87	695.91	938.89	1656.3
CHY101	360	337.07	730.14	937.6	734.83	746.58
TAB	74	321.7	792.05	2311.2	2583.5	4092.2
TCU067	90	152.12	1295.9	962.8	1281.9	981.43
TCU101	90	174.77	315.65	619.38	655.34	1031.7
TCU102	90	323.03	827.5	1013.7	458.51	489.71
TCU052	360	301.32	1419.2	576.28	874.67	842.69

TCU052	90	444.7	1033.8	611.93	582.23	705.71
TCU065	90	402.74	1856	1111.9	1047.1	744.95
TCU068	360	221.73	954.76	666.81	842.86	762.13
TCU068	90	464.58	1092.9	1333.4	1364.1	1072.8

## 4.2 Ανελαστική Απόκριση του Φορέα

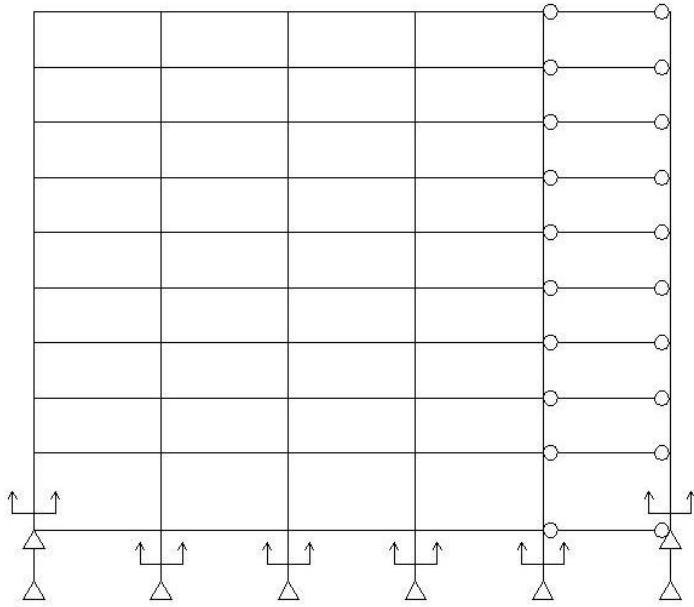
### 4.2.1 Εισαγωγή-Περιγραφή της Ανάλυσης-Παράμετροι επίλυσης

Παρακάτω παρατίθεται η ανελαστική απόκριση του φορέα, υποβαλλόμενου σε καθεμία από τις παραπάνω εδαφικές κινήσεις. Πριν όμως προχωρήσουμε στην παράθεση των αποτελεσμάτων, ας σταθούμε στη μέθοδο επίλυσης που ακολουθήθηκε.

Κατ' αρχάς, σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν παραπάνω, σε άμεση εφαρμογή της μεθόδου *IDA*, σε καθένα από τα παραπάνω επιταχυνσιογραφήματα εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου εφαρμόζουμε ένα σετ πολλαπλασιαστικών συντελεστών *SF* (στην περίπτωση μας τους καλούμε *multip.factor*), με τιμές τέτοιες ώστε η ελαστική επιτάχυνση του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος που περιγράψαμε στην παράγραφο 3.3.5 με συντ. απόσβεσης  $\zeta=2\%$  υποβαλλόμενο σε καθένα από τα παραπάνω παραγόμενα επιταχυνσιογραφήματα να καλύπτει όλη τη γκάμα απόκρισης της κατασκευής από την έναρξη της διαρροής μέχρι την κατάρρευση.

Για καθένα από τα παραπάνω επιταχυνσιογραφήματα εφαρμόστηκε ανελαστική δυναμική ανάλυση, με απευθείας ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων κίνησης. Στην ανάλυση ελήφθησαν υπόψιν φαινόμενα *P-Δ* με μεγάλες μετατοπίσεις. Όσον αφορά την απόσβεση της κατασκευής, χρησιμοποιήθηκε αναλογικό μητρώο αποσβέσεως με λόγο αποσβέσεως  $\xi=2\%$  για την πρώτη και τη δεύτερη ιδιομορφή. Τέλος, το σεισμικό φορτίο εφαρμόστηκε στην κατασκευή μετά τα μόνιμα φορτία (τα οποία αντιστοιχούν στη μη-γραμμική στατική ανάλυση *INITIAL* για το συγκεκριμένο μοντέλο).

Προκειμένου να εκτιμήσουμε την απόκριση της κατασκευής για το εκάστοτε επιταχυνσιογράφημα χρησιμοποιήθηκαν κατ' αρχάς δύο παράμετροι: η σχετική μετατόπιση κορυφής και η τέμνουσα βάσης, η οποία υπολογίζεται με τομή στις ακόλουθες θέσεις των υποστυλωμάτων του κάθε πλαισίου της κατασκευής:



Σχ. 4-1: Θέσεις υπολογισμού των τεμνουσών δυνάμεων από τις οποίες προκύπτει η συνολική τέμνουσα βάσης για την περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης και για ένα τυπικό πλαίσιο της κατασκευής

## 4.2.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δυναμικής ανάλυσης

### 4.2.2.1 Μετατόπιση Κορυφής ως προς τέμνουσα βάσης

Παρουσιάζεται εδώ η μέγιστη μετατόπιση κορυφής ως προς τη μέγιστη τέμνουσα βάσης για κάθε επιταχυνσιογράφημα και κάθε πολλαπλασιαστικό συντελεστή.

Name			Results			
Station	Comp.	multipl. factor	max displ (cm)	$t_{displ}$ (sec)	Base Force (kN)	$t_{maxv}$ (sec)
BRA	315	1.00	63.75	10.36	4990.68	10.00
BRA	315	1.60	73.75	10.58	5929.36	9.96
BRA	315	2.20	108.73	8.86	5788.25	10.06
BRA	315	2.70	145.50	8.94	6610.27	8.94
BRA	315	3.30	181.97	9.02	7731.83	8.92
CHY101	360	0.60	75.57	20.76	7139	20.82
CHY101	360	1.00	179.4	21.34	10830	20.89
CHY101	360	1.50	262	21.71	13820	21.41
CHY101	360	2.00	251.5	21.87	13820	21.5
CXO	225	1.00	21.94	19.54	2147.03	14.70
CXO	225	3.00	80.78	32.14	5739.30	21.68
CXO	225	5.00	177.45	22.24	9863.10	21.72
CXO	225	7.10	303.05	22.44	13251.05	21.74
CXO	225	9.10	475.01	22.72	17972.39	22.16
DZC	180	1.00	76.82	12.67	7272	5.865
DZC	270	1.00	92.58	11.46	9244	7.415
DZC	270	2.00	342.2	19.57	17190	12.34
DZC	270	4.00	430.9	25.9	18050	54.4
E03	140	1.00	56.14	9.62	6133.86	9.54
E03	140	1.60	85.39	9.84	6916.31	9.56
E03	140	2.30	87.94	9.86	6569.61	8.08
E03	140	2.90	94.03	8.32	8415.59	8.10
E03	140	3.50	116.88	8.34	9501.41	8.12
E03	230	1.00	51.88	11.50	5049.53	11.72
E03	230	1.60	80.60	9.90	6239.76	9.92
E03	230	2.30	140.73	10.18	9670.64	9.92
E03	230	2.90	200.69	10.40	11202.30	9.92
E03	230	3.60	266.84	10.54	13802.34	9.94
E04	140	1.00	32.44	6.22	2974.15	11.18
E04	140	2.30	71.89	6.38	5505.30	5.28
E04	140	3.60	96.23	31.76	8321.44	5.28
E04	140	4.90	126.01	10.20	10005.44	5.30



E04	140	6.20	153.17	10.32	13179.68	5.30
E04	230	0.30	45.02	8.00	3943.50	9.44
E04	230	0.60	85.74	8.32	6607.18	7.72
E04	230	1.00	106.12	6.56	7153.30	8.28
E04	230	1.20	140.55	6.66	8628.16	6.00
E04	230	1.50	198.46	6.76	10061.15	6.02
E05	140	0.60	46.72	10.74	5043.48	7.64
E05	140	1.00	70.92	10.74	6963.50	7.64
E05	140	1.60	87.65	6.42	7349.67	10.18
E05	140	2.40	153.28	6.76	9423.67	6.22
E05	140	3.00	215.18	6.80	10978.19	6.22
E05	230	0.40	73.86	8.78	5923.61	8.30
E05	230	0.60	97.40	8.96	6783.78	8.34
E05	230	0.80	101.51	9.08	6909.54	6.78
E05	230	1.00	121.50	7.38	8964.00	6.80
E05	230	1.20	162.00	7.46	9928.19	6.84
E06	140	0.40	39.33	8.96	4516.95	9.00
E06	140	1.00	98.68	7.82	8039.81	7.30
E06	140	1.30	125.76	7.90	9057.62	7.34
E06	140	1.70	148.52	7.98	9675.10	7.34
E06	140	2.00	161.12	8.00	10076.26	7.36
E06	230	0.60	95.83	7.20	7168.00	7.16
E06	230	0.80	151.60	7.40	9855.00	7.16
E06	230	1.00	215.20	7.54	11420.00	7.16
E06	230	1.50	333.80	7.68	14530.00	7.18
E06	230	2.00	435.80	7.86	17400.00	7.18
E07	140	0.60	43.04	14.38	4689.73	11.26
E07	140	1.00	53.49	14.46	5751.47	9.60
E07	140	1.60	83.55	9.52	5787.81	9.76
E07	140	2.30	142.38	9.62	7138.85	9.76
E07	140	2.90	205.75	9.78	9227.73	9.74
E07	230	0.60	78.14	7.54	6854.00	7.54
E07	230	0.80	94.05	7.62	8197.00	7.56
E07	230	1.00	99.85	7.74	9118.00	7.62
E07	230	1.50	146.60	6.06	9057.00	7.74
E07	230	2.00	216.00	6.12	9683.00	5.32
E08	140	1.00	43.28	6.64	5190.70	8.06
E08	140	2.00	96.61	14.96	8305.60	14.98
E08	140	3.00	167.96	15.06	11417.21	6.50
E08	140	4.00	268.59	15.32	14668.07	6.38
E08	140	5.00	436.64	15.54	16797.92	15.00

E08	230	0.60	44.75	8.54	6061.23	8.54
E08	230	1.00	62.02	8.98	7368.50	8.72
E08	230	1.60	108.66	7.26	9331.54	6.70
E08	230	2.20	165.74	7.32	11620.81	7.10
E08	230	3.00	218.34	7.38	14850.88	7.12
E10	230	0.60	42.19	8.80	4662.84	8.50
E10	230	1.00	65.35	8.92	6653.42	8.86
E10	230	1.60	84.28	7.30	7068.17	7.02
E10	230	2.10	122.25	7.48	9369.71	7.02
E10	230	2.70	178.03	7.58	11187.62	7.06
EDA	000	1.00	37.97	6.46	4512.64	7.88
EDA	000	2.30	97.22	7.72	8604.20	7.18
EDA	000	3.60	173.35	7.74	12120.31	7.22
EDA	000	4.80	217.88	7.76	14241.08	7.66
EDA	000	6.10	288.96	23.08	14509.31	7.68
EDA	270	0.50	44.58	8.24	4485.70	8.48
EDA	270	1.00	72.18	8.46	6613.50	8.54
EDA	270	1.50	106.25	7.02	9011.71	6.92
EDA	270	2.00	160.78	7.12	11267.67	6.94
EDA	270	2.50	220.61	7.16	15072.48	6.96
ERZ	000	0.60	52.87	3.85	3756.00	3.42
ERZ	000	0.80	73.95	3.92	5034.00	12.95
ERZ	000	1.00	96.46	3.98	6181.00	3.42
ERZ	000	1.50	141.50	4.06	8795.00	3.42
GA6	230	0.50	41.29	5.75	5460.71	7.06
GA6	230	1.00	85.58	5.82	5960.79	5.44
GA6	230	1.50	137.99	5.99	8873.29	5.47
GA6	230	1.90	185.30	6.07	10368.60	5.51
GA6	230	2.40	253.74	7.85	14506.93	5.54
HAL	150	0.60	3.695	16.69	609.7	17.92
HAL	150	0.80	4.926	16.69	813	17.92
HAL	150	1.00	6.158	16.69	1016	17.92
HAL	150	1.50	9.236	16.69	1524	17.92
HAL	150	2.00	12.31	16.69	2032	17.92
HVP	225	0.50	42.31	10.08	3880.07	9.72
HVP	225	1.00	81.48	8.58	6901.70	8.12
HVP	225	1.50	131.63	8.80	9430.88	8.14
HVP	225	2.00	168.95	8.96	9844.86	8.18
HVP	225	2.50	199.43	9.14	10351.40	8.20
HVP	315	0.50	45.07	10.32	4506.46	15.26
HVP	315	1.00	64.29	10.60	5323.00	13.70

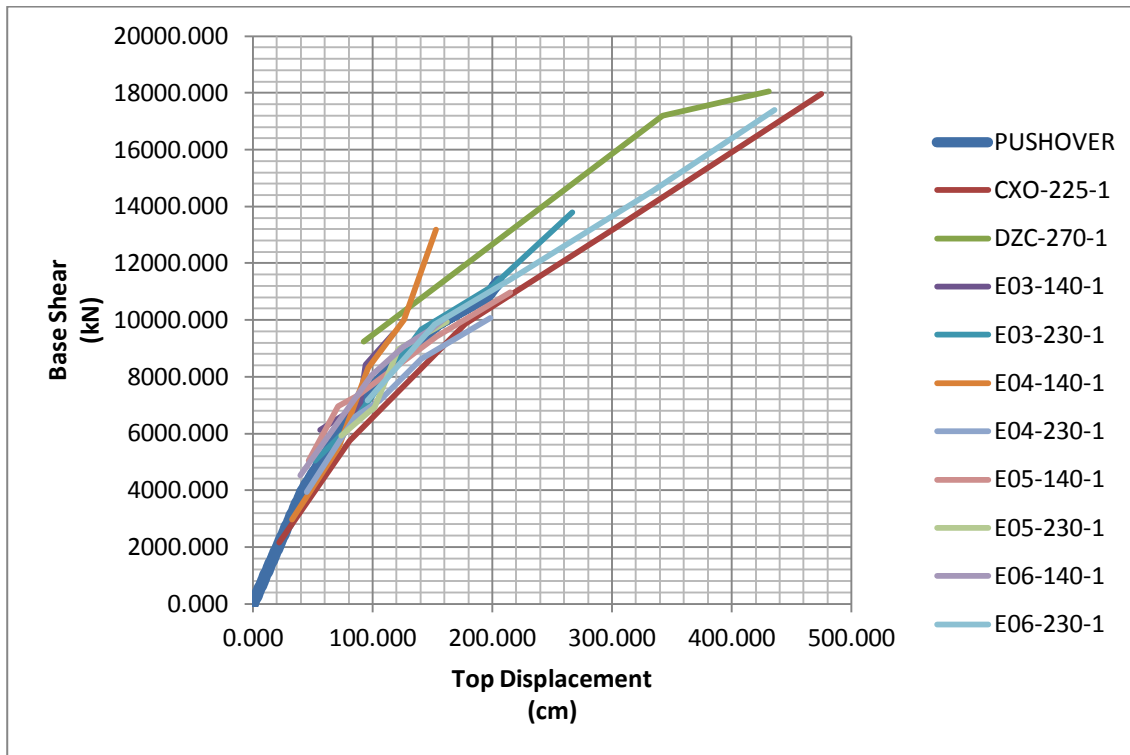
HVP	315	1.40	102.49	8.92	6603.24	9.08
HVP	315	1.70	140.36	9.06	8215.05	9.10
HVP	315	2.10	191.78	9.18	10067.05	9.08
JFA	022	0.30	47.57	9.69	5242.56	6.67
JFA	022	0.50	55.90	5.05	6342.84	5.10
JFA	022	0.80	80.93	9.59	6214.23	5.24
JFA	022	1.00	100.07	9.59	0.00	0.00
JFA	022	1.30	126.22	9.59	9993.67	9.12
JFA	292	0.70	40.15	6.48	5371.28	5.28
JFA	292	1.00	59.75	12.43	6251.70	5.27
JFA	292	1.80	167.18	12.57	11370.88	6.01
JFA	292	2.50	259.79	12.72	15692.39	6.04
JFA	292	3.30	424.73	27.85	17685.57	12.69
JSH	000	0.60	13.63	31.96	2569.00	29.04
JSH	000	0.80	17.61	30.26	3191.00	29.04
JSH	000	1.00	20.70	30.28	3580.00	27.32
JSH	000	1.50	31.38	30.34	4882.00	26.14
JSH	000	2.00	46.23	13.20	5789.00	24.42
JSH	090	0.60	41.28	37.16	4890.00	28.92
JSH	090	0.80	46.32	35.46	5952.00	27.26
JSH	090	1.00	47.16	35.50	5327.00	27.22
JSH	090	1.50	69.96	27.74	7473.00	27.32
JSH	090	2.00	100.20	27.80	8912.00	27.32
KPI	000	0.40	43.31	12.43	4662.73	11.17
KPI	000	0.70	78.24	11.05	5111.24	9.44
KPI	000	1.00	102.44	11.19	6838.20	9.49
KPI	000	1.40	107.07	11.31	8970.36	9.62
KPI	000	1.80	135.11	10.10	11201.60	9.70
KPI	000	4.20	520.45	37.56	17510.27	26.72
KPI	090	0.60	40.62	10.77	5062.60	11.15
KPI	090	1.00	57.34	14.59	6756.74	9.39
KPI	090	1.70	90.07	9.95	9072.65	9.46
KPI	090	2.30	125.63	10.01	11119.09	9.52
KPI	090	3.00	168.71	10.09	14104.25	9.59
LDW	064	0.60	49.02	5.16	4358.18	4.69
LDW	064	1.00	65.50	5.28	6201.46	4.70
LDW	064	1.60	98.25	3.74	6771.98	3.88
LDW	064	2.20	160.08	3.87	9091.39	3.86
LDW	064	2.90	269.90	9.02	11080.05	3.86
LDW	334	1.00	45.82	3.45	4889.30	3.01
LDW	334	2.10	104.59	3.55	9033.91	3.02

LDW	334	3.30	205.50	4.99	13446.19	3.04
LDW	334	4.40	311.90	5.23	14626.30	4.52
LDW	334	5.60	433.61	5.46	15614.13	4.42
LUC	090	0.30	45.90	14.90	4622.98	12.87
LUC	090	0.80	77.77	11.58	8110.15	13.24
LUC	090	1.00	105.03	11.65	8939.40	11.06
LUC	090	1.40	163.14	11.85	11645.97	11.25
NRG	090	1.00	39.87	9.56	4232.09	8.38
NRG	090	2.00	58.21	9.56	6239.08	8.40
NRG	090	3.10	130.16	28.84	7972.57	19.84
NRG	090	4.10	144.76	28.88	9218.95	19.88
NRG	090	5.20	171.74	22.84	11276.01	19.92
NWH	360	0.50	40.43	6.38	5522.27	6.02
NWH	360	1.00	77.69	4.68	6385.42	5.38
NWH	360	1.50	149.28	12.24	10341.56	5.42
NWH	360	2.10	283.82	12.34	14957.52	5.44
NWH	360	2.60	402.95	12.44	16075.64	5.46
NWS	046	0.40	57.73	6.14	4327.80	7.42
NWS	046	0.70	117.16	6.34	6654.42	5.76
NWS	046	1.00	167.16	13.20	8769.20	5.78
NWS	046	1.30	203.16	13.26	9747.85	5.80
NWS	046	1.70	245.63	10.62	11168.57	5.82
NWS	316	1.00	71.69	8.50	5047.55	7.08
NWS	316	1.60	126.63	8.50	6632.16	5.24
NWS	316	2.30	170.13	10.88	8774.65	7.94
NWS	316	2.90	204.28	10.88	10463.53	10.50
NWS	316	3.60	221.89	10.86	13642.83	10.54
RRS	228	0.50	44.04	3.53	4703.96	4.04
RRS	228	1.00	60.99	7.52	7901.98	2.44
RRS	228	1.40	79.77	2.59	9398.16	2.45
RRS	228	1.80	101.91	2.59	12028.47	2.46
RRS	228	2.30	129.69	2.59	14076.93	2.46
RRS	318	0.60	48.37	5.90	4310.26	8.98
RRS	318	1.00	52.25	5.90	6147.65	5.54
RRS	318	1.70	85.31	7.10	9588.45	5.67
RRS	318	2.30	126.32	7.14	11122.64	5.70
RRS	318	3.00	160.66	7.21	14183.59	3.14
SCG	052	0.60	67.80	4.21	6517.10	6.97
SCG	052	0.80	100.95	4.29	8382.76	6.94
SCG	052	1.00	137.70	4.33	9918.30	6.93
SCG	052	1.20	176.16	4.37	11431.88	6.95

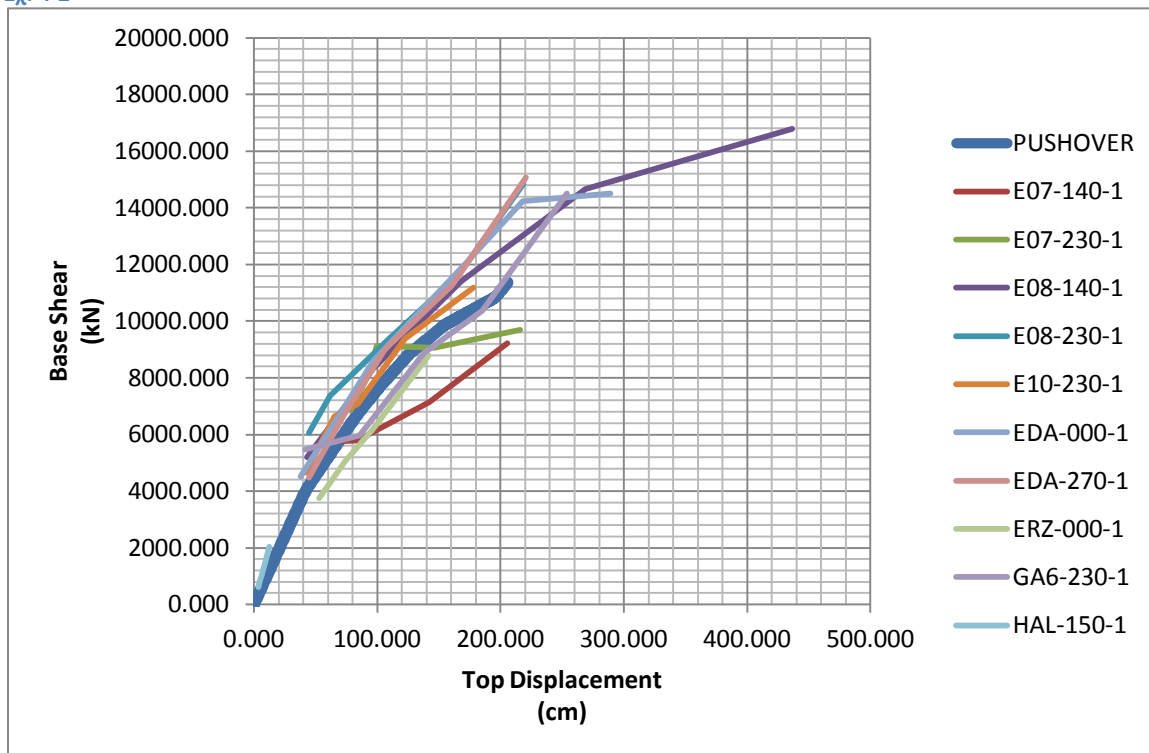
SCG	052	1.60	280.32	7.15	15073.45	3.76
SCG	142	0.60	50.64	7.17	6344.53	6.84
SCG	142	1.00	66.08	7.31	7723.40	6.84
SCG	142	1.60	85.68	3.95	9649.32	6.78
SCG	142	2.30	132.43	5.72	13750.18	6.86
SCG	142	3.00	195.90	5.76	15157.57	6.89
SCH	011	0.30	47.25	7.17	5551.53	6.96
SCH	011	0.60	87.47	9.90	7487.32	6.97
SCH	011	0.90	145.61	9.88	9944.22	6.97
SCH	011	1.00	165.60	9.87	10581.00	6.96
SCH	011	1.40	261.09	9.89	15313.30	6.96
SCH	281	0.50	42.72	6.79	4245.19	11.53
SCH	281	1.00	76.25	5.74	5704.80	11.52
SCH	281	1.50	80.01	5.77	6914.11	4.30
SCH	281	2.00	116.11	10.23	8797.63	6.38
SCH	281	2.50	186.28	10.21	12164.25	6.40
SYH	090	0.50	42.93	6.82	3598.51	6.62
SYH	090	1.00	66.94	6.84	5932.82	5.38
SYH	090	1.50	100.69	14.26	7707.00	6.58
SYH	090	2.00	165.55	11.44	9995.75	6.58
SYH	090	2.50	217.63	11.40	12093.97	6.58
SYH	360	0.50	48.76	5.18	4126.00	3.80
SYH	360	1.00	80.31	4.26	8026.30	3.80
SYH	360	1.40	115.51	4.28	9511.53	3.80
SYH	360	1.80	150.27	4.30	12255.09	3.82
SYH	360	2.20	184.47	4.30	13812.74	3.82
TAB	074	0.60	59.22	14.44	7007	14.3
TAB	074	0.80	87.36	14.74	9068	14.46
TAB	074	1.00	105	12.24	9648	14.48
TAB	074	1.50	260.7	12.72	14080	12.16
TAB	074	2.00	438.9	13.04	16450	12.9
TAB	344	1.00	90.18	11.92	7507.124	19.08
TCU049	090	1.00	57	13.94	6504	13.5
TCU049	360	1.00	69.18	15.62	5404	14.91
TCU051	360	1.00	56.35	23.18	5387	24.62
TCU051	360	2.00	81.63	23.42	6249	37.42
TCU051	360	4.00	267.6	37.85	14350	37.59
TCU052	090	0.60	73.53	14.71	5847	16.49
TCU052	090	1.00	216	20.43	11290	19.81
TCU052	090	1.50	284	21	15070	17.71
TCU052	360	0.80	154.9	15.08	10250	14.64

TCU052	360	1.00	214.5	15.76	11520	15.54
TCU052	360	1.50	404.5	15.37	18400	15.15
TCU054	090	1.00	49.55	32.66	5664	25.82
TCU054	360	1.00	56	19.23	5173.366	14.315
TCU055	360	1.00	76.16	24.33	6561	16.87
TCU065	090	0.60	126.4	28.5	9368	17.12
TCU065	090	1.00	168.4	11.66	11470	11.24
TCU065	090	1.50	322.8	12.02	16700	11.4
TCU067	090	0.60	42.88	28.34	4531	12.24
TCU067	090	1.00	113.3	28.41	7610	28.08
TCU067	090	2.00	191.9	13.31	11390	12.88
TCU067	090	4.00	3718	36.15	57510	37.69
TCU068	090	0.30	49.97	16.21	5849.35	16.36
TCU068	090	0.60	145.4	15.02	10650	14.91
TCU068	090	0.80	241.9	15.28	13270	14.99
TCU068	090	1.00	337.6	18.44	16530	17.9
TCU068	090	1.50	582.7	17.23	19260	16.22
TCU068	090	2.00	816.4	17.77	20660	17.12
TCU068	360	0.50	53.84	28.68	5825.60	16.85
TCU068	360	0.60	75.88	16.77	7189	17.05
TCU068	360	0.80	168.4	17.3	10610	17.14
TCU068	360	1.00	312.1	19.41	17300	19.36
TCU068	360	1.50	1083	58.07	21890	58.04
TCU068	360	2.00	3385	26.96	27360	22.67
TCU075	090	1.00	159.2	9.445	10020	9
TCU082	090	1.00	56.21	35.3	6466	28.51
TCU082	360	1.00	70.65	16.55	7022	16.14
TCU087	090	1.00	51.12	35.56	4996	31.74
TCU101	090	1.00	78	18.55	6863	18.75
TCU101	090	3.00	349.4	19.78	16600	26.78
TCU101	090	5.00	474.7	20.27	18350	20.61
TCU102	090	0.50	59.06	19.16	6630	18.84
TCU102	090	1.00	82.24	17.57	9088	19.25
TCU102	090	2.00	212	17.78	13060	17.13
VSP	360	0.50	43.27	8.73	4422.83	13.52
VSP	360	1.00	52.91	5.83	5981.49	5.84
VSP	360	1.50	80.97	5.94	7517.04	5.85
VSP	360	2.10	102.38	11.25	8959.05	5.85
VSP	360	2.60	117.06	11.23	9384.50	5.86

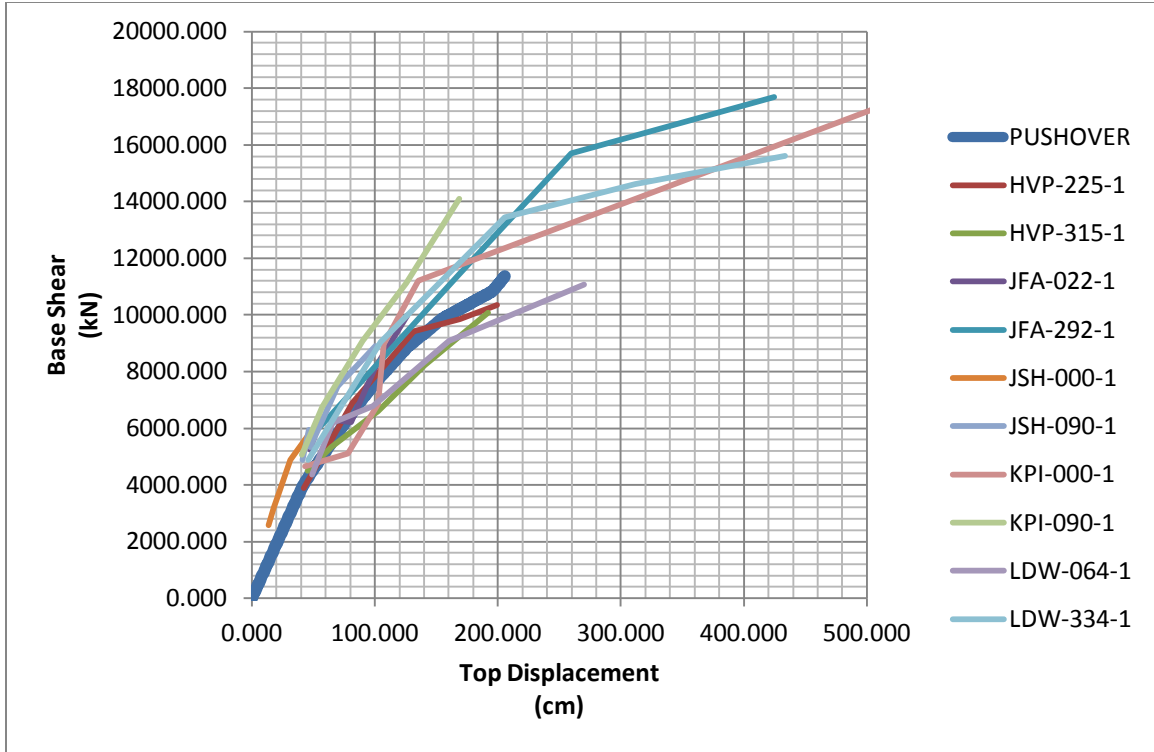
Τα παραπάνω παρουσιάζονται εποπτικά στα ακόλουθα διαγράμματα:



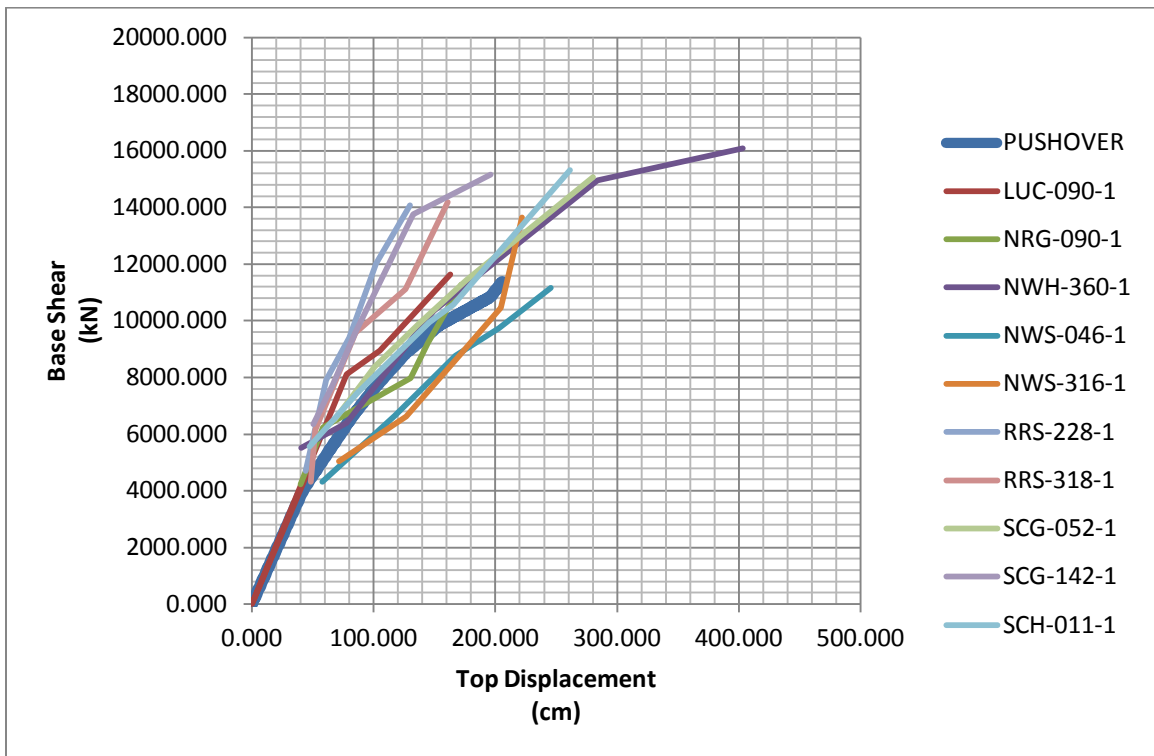
Σχ. 4-2



Σχ. 4-3

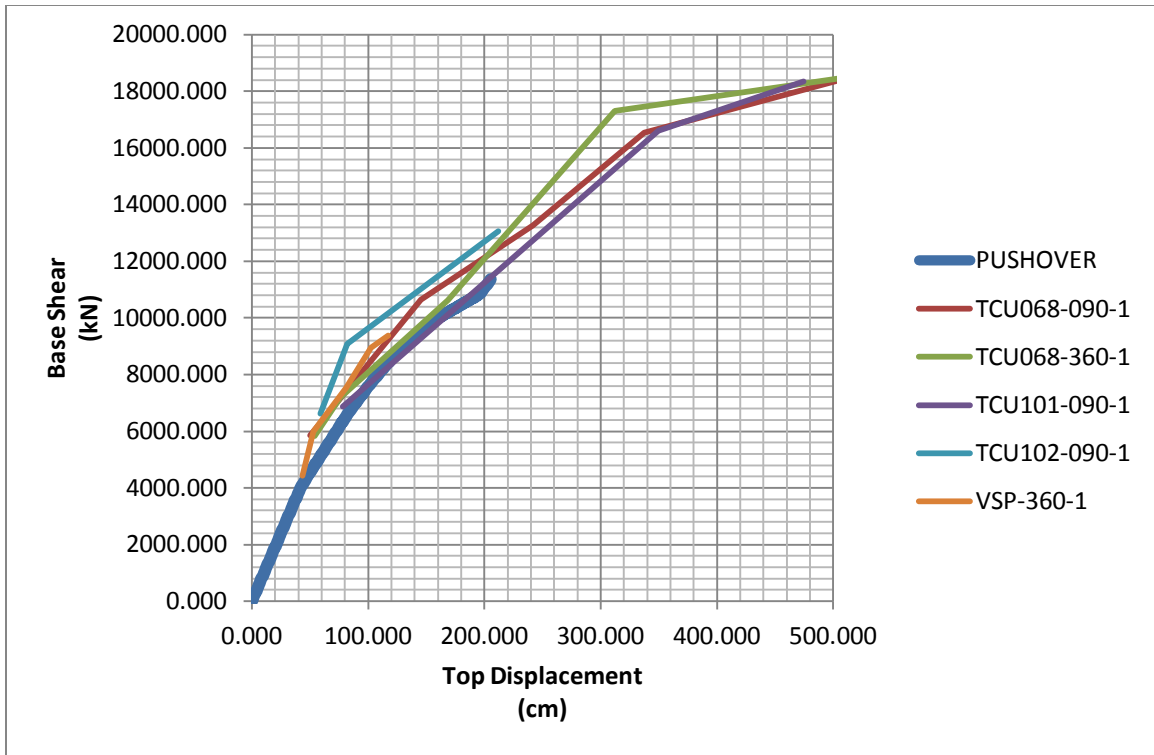


Σχ. 4-4

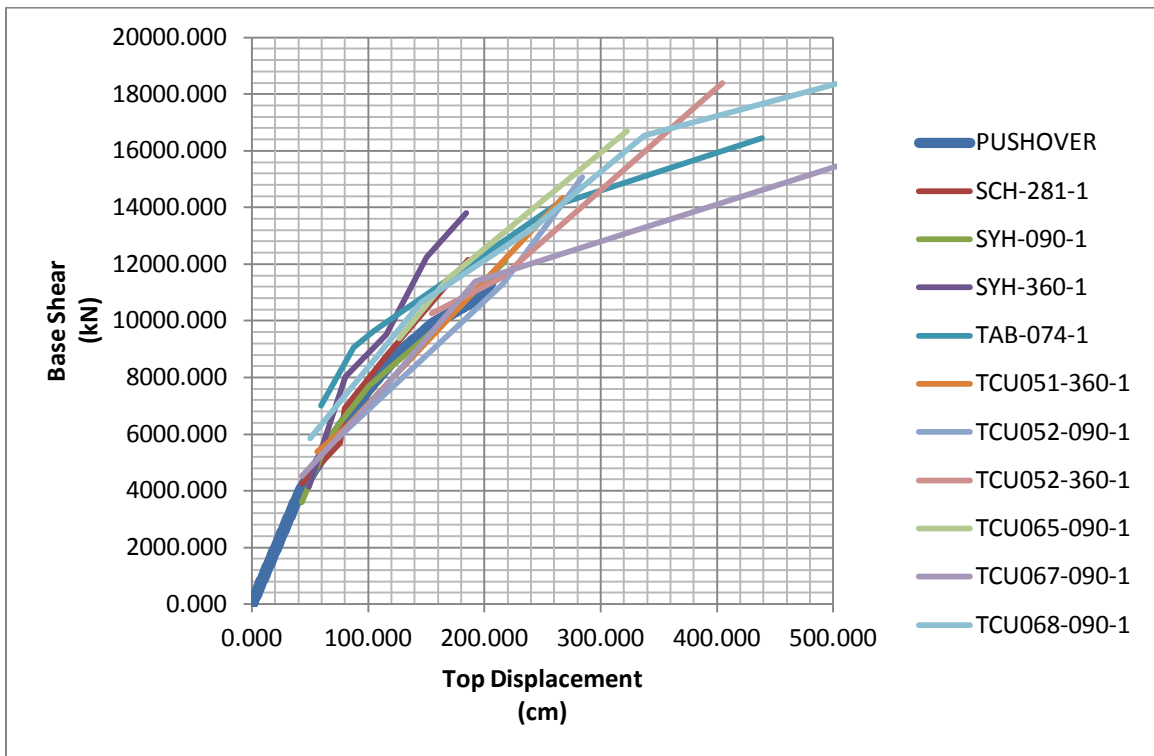


Σχ. 4-5



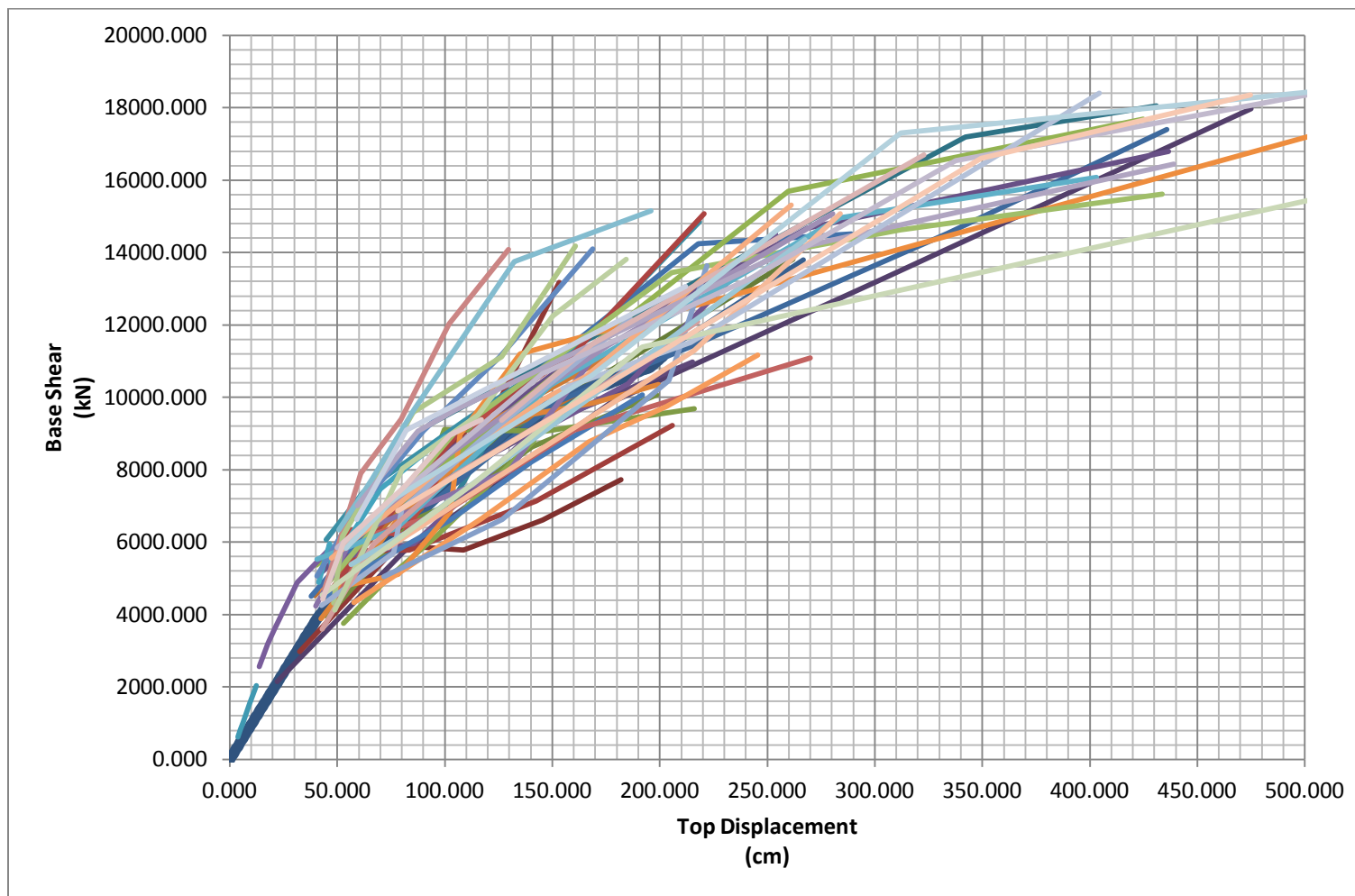


Σχ. 4-6



Σχ. 4-7

Συνολικά:



Σχ. 4-8

#### 4.2.2.2 *Ισοδύναμη Φασματική Μετατόπιση SD ως προς Ελαστική Φασματική Επιτάχυνση SA<sub>el</sub>*

Παρουσιάζεται εδώ η απόκριση της κατασκευής (δηλ. η μετατόπιση κορυφής) σε σχέση με την «ένταση» του επιταχυνσιογραφήματος (δηλ. την ελαστική απόκριση του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος με λόγο απόσβεσης  $\xi=2\%$  σε όρους επιτάχυνσης). Προκειμένου να έχουμε μία κοινή βάση αναφοράς, την απόκριση της κατασκευής την εκφράζουμε σε όρους φασματικής μετατόπισης. Δηλαδή, όπως και στην περίπτωση του υπολογισμού της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής, υπολογίζουμε την ισοδύναμη φασματική μετατόπιση από τη σχέση  $SD = \delta_{top} / \Gamma_1$ , όπου

$\Gamma_1$  ο συντελεστής ιδιομορφικής συμμετοχής της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Name			Results	
Station	Comp.	multipl. factor	SD (cm)	SA <sub>el</sub> (cm/sec <sup>2</sup> )
BRA	315	1.00	45.56705	151.78
BRA	315	1.60	52.71498	242.848
BRA	315	2.20	77.71714	333.916
BRA	315	2.70	103.9967	409.806
BRA	315	3.30	130.0645	500.874
CHY101	360	0.60	54.01329	202.242
CHY101	360	1.00	128.2253	337.07
CHY101	360	1.50	187.2632	505.605
CHY101	360	2.00	179.7584	674.14
CXO	225	1.00	15.68418	55.622
CXO	225	3.00	57.7378	166.866
CXO	225	5.00	126.8349	278.11
CXO	225	7.10	216.6021	394.9162
CXO	225	9.10	339.5125	506.1602
DZC	180	1.00	54.90673	322.66
DZC	270	1.00	66.17111	245.85
DZC	270	2.00	244.5858	491.7
DZC	270	4.00	307.9837	983.4
E03	140	1.00	40.12433	142.53
E03	140	1.60	61.02992	228.048
E03	140	2.30	62.85768	327.819
E03	140	2.90	67.211	413.337
E03	140	3.50	83.53978	498.855

E03	230	1.00	37.07988	141.82
E03	230	1.60	57.61014	226.912
E03	230	2.30	100.5841	326.186
E03	230	2.90	143.4441	411.278
E03	230	3.60	190.7261	510.552
E04	140	1.00	23.1881	81.084
E04	140	2.30	51.3844	186.4932
E04	140	3.60	68.78195	291.9024
E04	140	4.90	90.06669	397.3116
E04	140	6.20	109.4761	502.7208
E04	230	0.30	32.17623	112.425
E04	230	0.60	61.28236	224.85
E04	230	1.00	75.84833	374.75
E04	230	1.20	100.4542	449.7
E04	230	1.50	141.8476	562.125
E05	140	0.60	33.39275	107.46
E05	140	1.00	50.68916	179.1
E05	140	1.60	62.64662	286.56
E05	140	2.40	109.5559	429.84
E05	140	3.00	153.8016	537.3
E05	230	0.40	52.79067	185.568
E05	230	0.60	69.61909	278.352
E05	230	0.80	72.55654	371.136
E05	230	1.00	86.84154	463.92
E05	230	1.20	115.7867	556.704
E06	140	0.40	28.11385	101.416
E06	140	1.00	70.53389	253.54
E06	140	1.30	89.88316	329.602
E06	140	1.70	106.1518	431.018
E06	140	2.00	115.1594	507.08
E06	230	0.60	68.49403	331.242
E06	230	0.80	108.3554	441.656
E06	230	1.00	153.8132	552.07
E06	230	1.50	238.5819	828.105
E06	230	2.00	311.486	1104.14
E07	140	0.60	30.76039	105.048
E07	140	1.00	38.23522	175.08
E07	140	1.60	59.71467	280.128
E07	140	2.30	101.7669	402.684
E07	140	2.90	147.0624	507.732
E07	230	0.60	55.85019	261.156

E07	230	0.80	67.22179	348.208
E07	230	1.00	71.36731	435.26
E07	230	1.50	104.7816	652.89
E07	230	2.00	154.385	870.52
E08	140	1.00	30.93117	104.96
E08	140	2.00	69.05271	209.92
E08	140	3.00	120.0519	314.88
E08	140	4.00	191.9758	419.84
E08	140	5.00	312.0882	524.8
E08	230	0.60	31.9828	124.332
E08	230	1.00	44.328	207.22
E08	230	1.60	77.66413	331.552
E08	230	2.20	118.4602	455.884
E08	230	3.00	156.0578	621.66
E10	230	0.60	30.15714	111.426
E10	230	1.00	46.71125	185.71
E10	230	1.60	60.2395	297.136
E10	230	2.10	87.37777	389.991
E10	230	2.70	127.2495	501.417
EDA	000	1.00	27.14158	82.727
EDA	000	2.30	69.49051	190.2721
EDA	000	3.60	123.9002	297.8172
EDA	000	4.80	155.7297	397.0896
EDA	000	6.10	206.5361	504.6347
EDA	270	0.50	31.8604	109.7
EDA	270	1.00	51.59052	219.4
EDA	270	1.50	75.94162	329.1
EDA	270	2.00	114.92	438.8
EDA	270	2.50	157.683	548.5
ERZ	000	0.60	37.78858	129.558
ERZ	000	0.80	52.85541	172.744
ERZ	000	1.00	68.94432	215.93
ERZ	000	1.50	101.1364	323.895
GA6	230	0.50	29.51222	104.5
GA6	230	1.00	61.17023	209
GA6	230	1.50	98.62435	313.5
GA6	230	1.90	132.44	397.1
GA6	230	2.40	181.3576	501.6
HAL	150	0.60	2.640983	6.6
HAL	150	0.80	3.520835	8.8
HAL	150	1.00	4.401401	11

HAL	150	1.50	6.601387	16.5
HAL	150	2.00	8.798513	22
HVP	225	0.50	30.2417	102.925
HVP	225	1.00	58.23858	205.85
HVP	225	1.50	94.08275	308.775
HVP	225	2.00	120.7534	411.7
HVP	225	2.50	142.5433	514.625
HVP	315	0.50	32.21652	119.34
HVP	315	1.00	45.94761	238.68
HVP	315	1.40	73.25211	334.152
HVP	315	1.70	100.3202	405.756
HVP	315	2.10	137.0708	501.228
JFA	022	0.30	34.00198	124.326
JFA	022	0.50	39.95115	207.21
JFA	022	0.80	57.84772	331.536
JFA	022	1.00	71.52198	414.42
JFA	022	1.30	90.21575	538.746
JFA	292	0.70	28.69822	107.247
JFA	292	1.00	42.70288	153.21
JFA	292	1.80	119.4912	275.778
JFA	292	2.50	185.6809	383.025
JFA	292	3.30	303.5739	505.593
JSH	000	0.60	9.741977	25.5564
JSH	000	0.80	12.58666	34.0752
JSH	000	1.00	14.79523	42.594
JSH	000	1.50	22.4287	63.891
JSH	000	2.00	33.04267	85.188
JSH	090	0.60	29.50468	103.362
JSH	090	0.80	33.107	137.816
JSH	090	1.00	33.70738	172.27
JSH	090	1.50	50.00357	258.405
JSH	090	2.00	71.61747	344.54
KPI	000	0.40	30.95208	109.788
KPI	000	0.70	55.91818	192.129
KPI	000	1.00	73.21893	274.47
KPI	000	1.40	76.53007	384.258
KPI	000	1.80	96.57027	494.046
KPI	000	4.20	371.9898	1152.774
KPI	090	0.60	29.03589	101.364
KPI	090	1.00	40.98262	168.94
KPI	090	1.70	64.37431	287.198

KPI	090	2.30	89.79264	388.562
KPI	090	3.00	120.5815	506.82
LDW	064	0.60	35.037	105.954
LDW	064	1.00	46.81705	176.59
LDW	064	1.60	70.22656	282.544
LDW	064	2.20	114.4192	388.498
LDW	064	2.90	192.913	512.111
LDW	334	1.00	32.75031	90.207
LDW	334	2.10	74.75748	189.4347
LDW	334	3.30	146.8795	297.6831
LDW	334	4.40	222.9257	396.9108
LDW	334	5.60	309.9177	505.1592
LUC	090	0.30	32.8103	115.617
LUC	090	0.80	55.58408	308.312
LUC	090	1.00	75.07176	385.39
LUC	090	1.40	116.6069	539.546
NRG	090	1.00	28.49566	97.337
NRG	090	2.00	41.60831	194.674
NRG	090	3.10	93.03242	301.7447
NRG	090	4.10	103.4641	399.0817
NRG	090	5.20	122.7528	506.1524
NWH	360	0.50	28.89979	97.39
NWH	360	1.00	55.52544	194.78
NWH	360	1.50	106.7001	292.17
NWH	360	2.10	202.8614	409.038
NWH	360	2.60	288.0067	506.428
NWS	046	0.40	41.26403	122.512
NWS	046	0.70	83.73848	214.396
NWS	046	1.00	119.4803	306.28
NWS	046	1.30	145.2101	398.164
NWS	046	1.70	175.5601	520.676
NWS	316	1.00	51.23682	141
NWS	316	1.60	90.50869	225.6
NWS	316	2.30	121.5982	324.3
NWS	316	2.90	146.0074	408.9
NWS	316	3.60	158.5973	507.6
RRS	228	0.50	31.47824	111.915
RRS	228	1.00	43.59476	223.83
RRS	228	1.40	57.01512	313.362
RRS	228	1.80	72.84124	402.894
RRS	228	2.30	92.69738	514.809

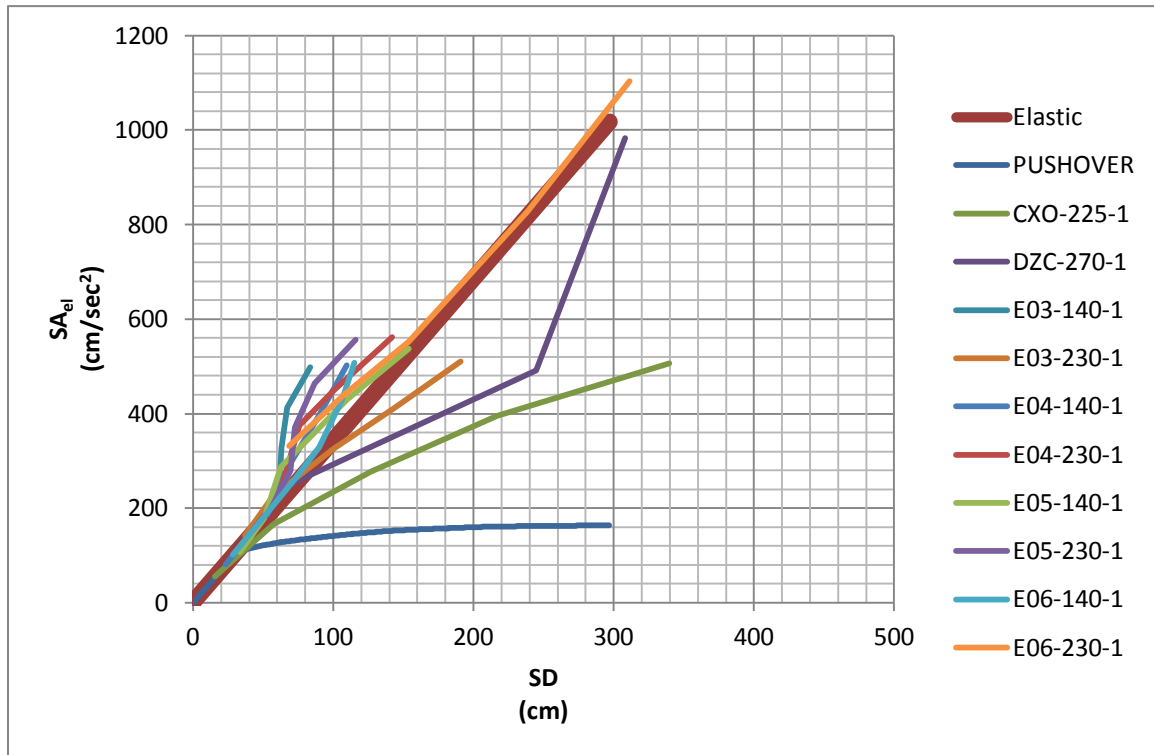
RRS	318	0.60	34.57489	100.986
RRS	318	1.00	37.34697	168.31
RRS	318	1.70	60.9729	286.127
RRS	318	2.30	90.29005	387.113
RRS	318	3.00	114.8308	504.93
SCG	052	0.60	48.45631	302.466
SCG	052	0.80	72.15668	403.288
SCG	052	1.00	98.42163	504.11
SCG	052	1.20	125.9129	604.932
SCG	052	1.60	200.3548	806.576
SCG	142	0.60	36.19408	110.94
SCG	142	1.00	47.23229	184.9
SCG	142	1.60	61.23992	295.84
SCG	142	2.30	94.6523	425.27
SCG	142	3.00	140.0185	554.7
SCH	011	0.30	33.77255	115.797
SCH	011	0.60	62.52169	231.594
SCH	011	0.90	104.0749	347.391
SCH	011	1.00	118.3589	385.99
SCH	011	1.40	186.6149	540.386
SCH	281	0.50	30.53056	100.445
SCH	281	1.00	54.49768	200.89
SCH	281	1.50	57.19023	301.335
SCH	281	2.00	82.98788	401.78
SCH	281	2.50	133.1403	502.225
SYH	090	0.50	30.68518	100.135
SYH	090	1.00	47.84678	200.27
SYH	090	1.50	71.9651	300.405
SYH	090	2.00	118.3294	400.54
SYH	090	2.50	155.5479	500.675
SYH	360	0.50	34.84823	122.66
SYH	360	1.00	57.4039	245.32
SYH	360	1.40	82.55949	343.448
SYH	360	1.80	107.4035	441.576
SYH	360	2.20	131.8519	539.704
TAB	074	0.60	42.32721	193.02
TAB	074	0.80	62.44014	257.36
TAB	074	1.00	75.04825	321.7
TAB	074	1.50	186.3341	482.55
TAB	074	2.00	313.7017	643.4
TAB	344	1.00	64.45572	244.69



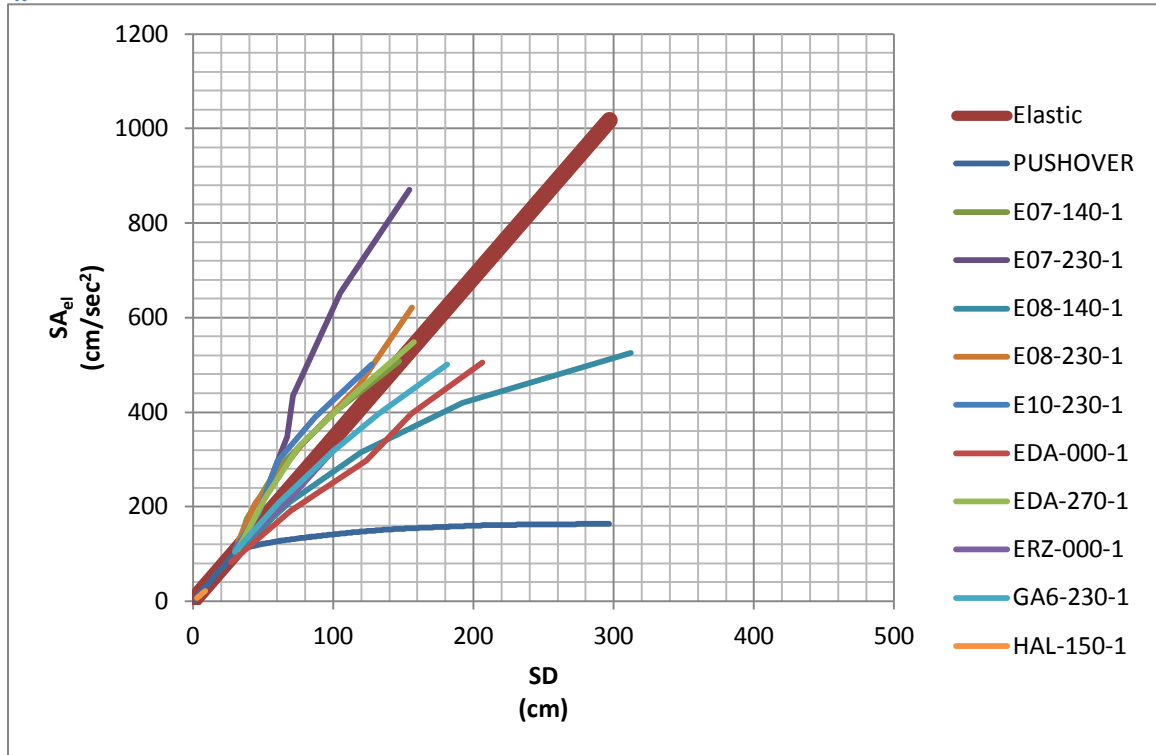
TCU049	090	1.00	40.74048	130.77
TCU049	360	1.00	49.44607	177.19
TCU051	360	1.00	40.27589	167.45
TCU051	360	2.00	58.34465	334.9
TCU051	360	4.00	191.2658	669.8
TCU052	090	0.60	52.55521	266.82
TCU052	090	1.00	154.385	444.7
TCU052	090	1.50	202.9876	667.05
TCU052	360	0.80	110.714	241.056
TCU052	360	1.00	153.3128	301.32
TCU052	360	1.50	289.1144	451.98
TCU054	090	1.00	35.41562	194.2
TCU054	360	1.00	40.02573	184.08
TCU055	360	1.00	54.43499	227.57
TCU065	090	0.60	90.34379	241.644
TCU065	090	1.00	120.3631	402.74
TCU065	090	1.50	230.7197	604.11
TCU067	090	0.60	30.64827	91.272
TCU067	090	1.00	80.98063	152.12
TCU067	090	2.00	137.1596	304.24
TCU067	090	4.00	2657.423	608.48
TCU068	090	0.30	35.71299	139.374
TCU068	090	0.60	103.924	278.748
TCU068	090	0.80	172.8969	371.664
TCU068	090	1.00	241.298	464.58
TCU068	090	1.50	416.482	696.87
TCU068	090	2.00	583.518	929.16
TCU068	360	0.50	38.4847	110.865
TCU068	360	0.60	54.23487	133.038
TCU068	360	0.80	120.3631	177.384
TCU068	360	1.00	223.072	221.73
TCU068	360	1.50	774.069	332.595
TCU068	360	2.00	2419.412	443.46
TCU075	090	1.00	113.7874	402.1
TCU082	090	1.00	40.17583	200.52
TCU082	360	1.00	50.49675	280.47
TCU087	090	1.00	36.53777	150.11
TCU101	090	1.00	55.75013	174.77
TCU101	090	3.00	249.732	524.31
TCU101	090	5.00	339.2895	873.85
TCU102	090	0.50	42.21285	161.515

TCU102	090	1.00	58.78064	323.03
TCU102	090	2.00	151.526	646.06
VSP	360	0.50	30.9263	96.16
VSP	360	1.00	37.8198	192.32
VSP	360	1.50	57.87346	288.48
VSP	360	2.10	73.17548	403.872
VSP	360	2.60	83.66546	500.032

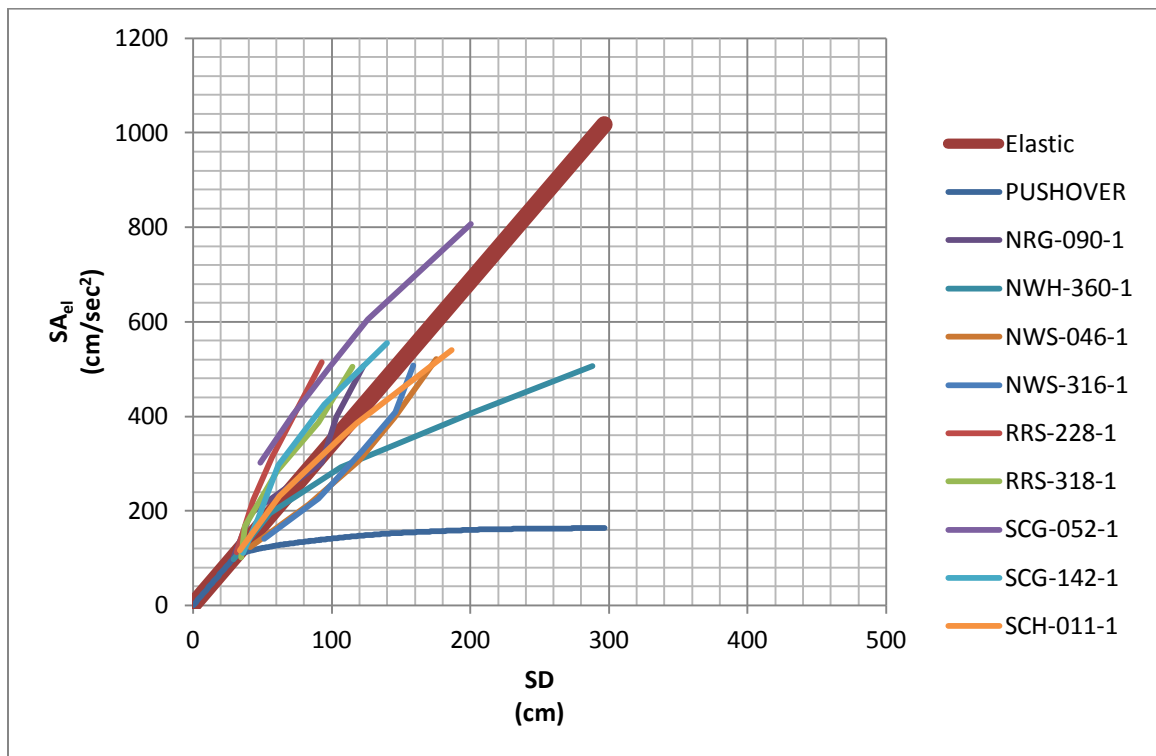
Τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις παραπάνω τιμές είναι τα ακόλουθα: (Σημ.: Στα διαγράμματα έχουν παρασταθεί επίσης η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής, καθώς και η ευθεία με εξίσωση:  $SA_{el} = \omega_1^{*2} \cdot SD_{el}$ , η οποία αντιστοιχεί στον εμπειρικό νόμο ίσων μετατοπίσεων.



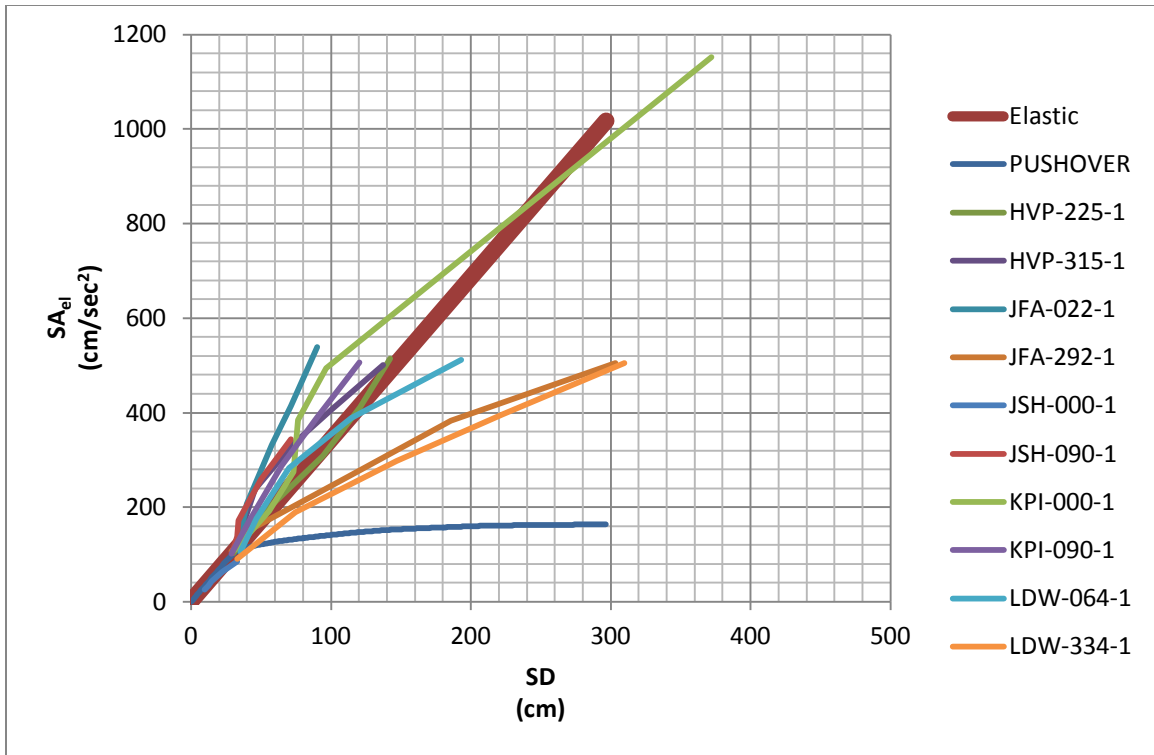
Σχ. 4-9



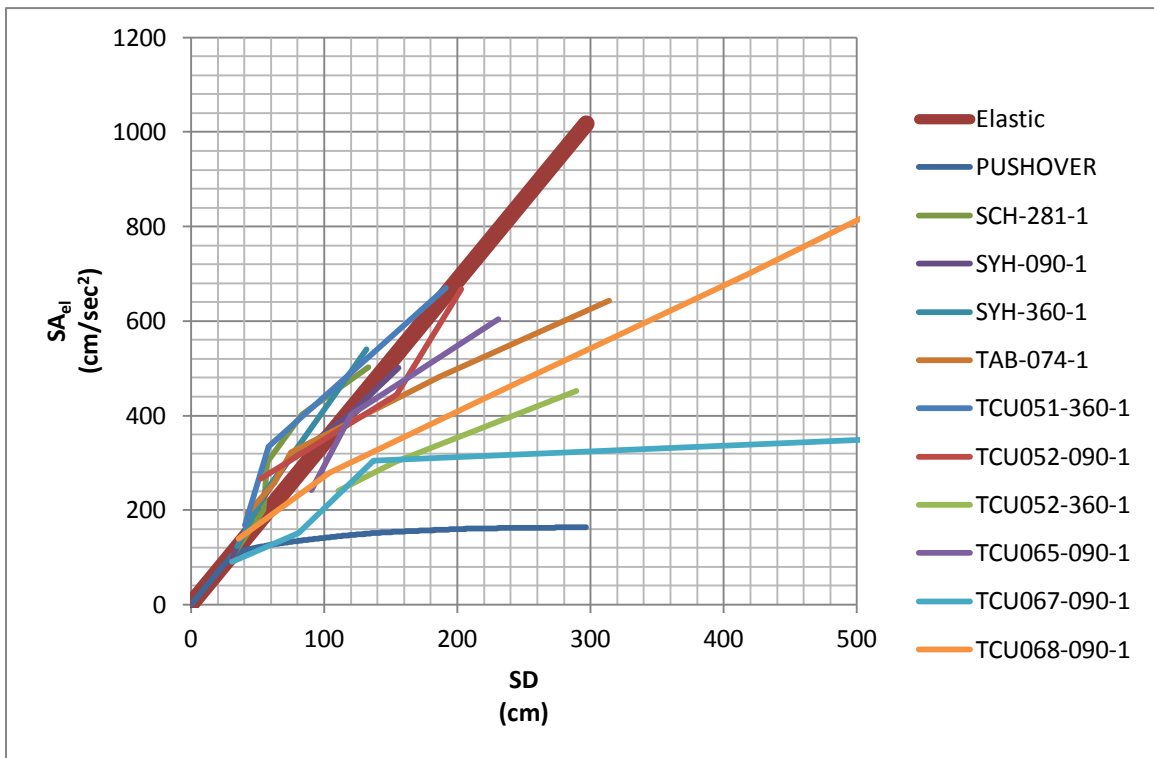
Σχ. 4-10



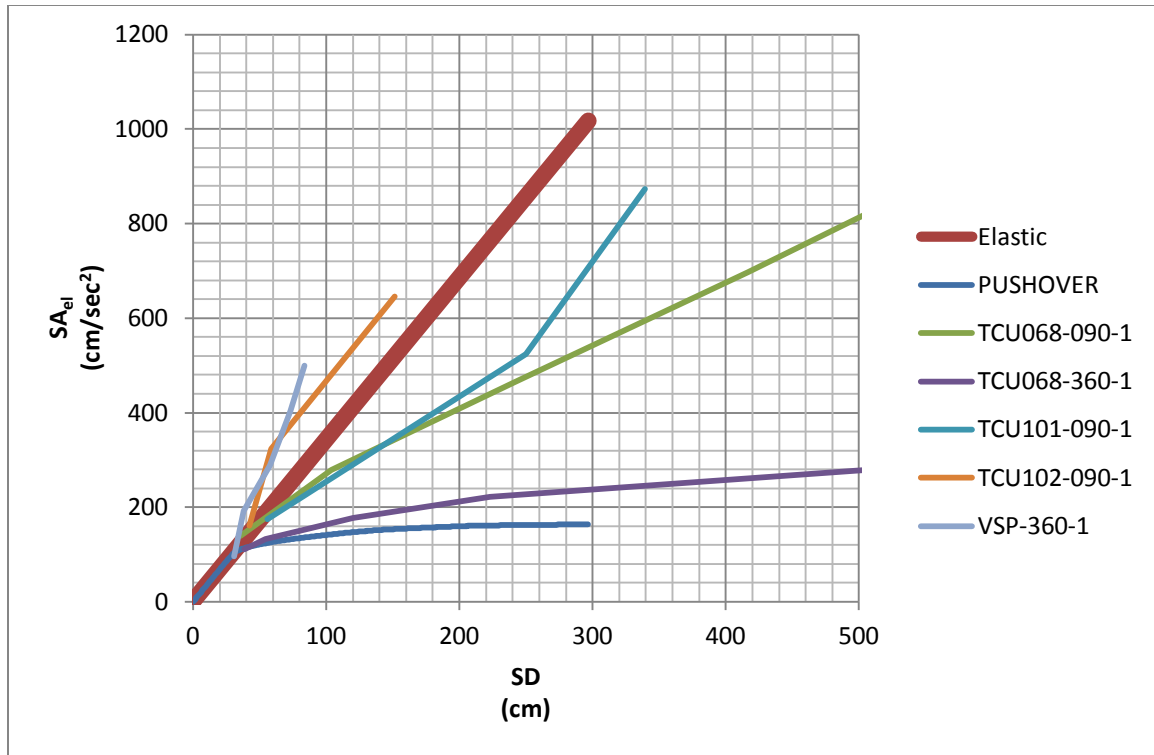
Σχ. 4-11



Σχ. 4-12

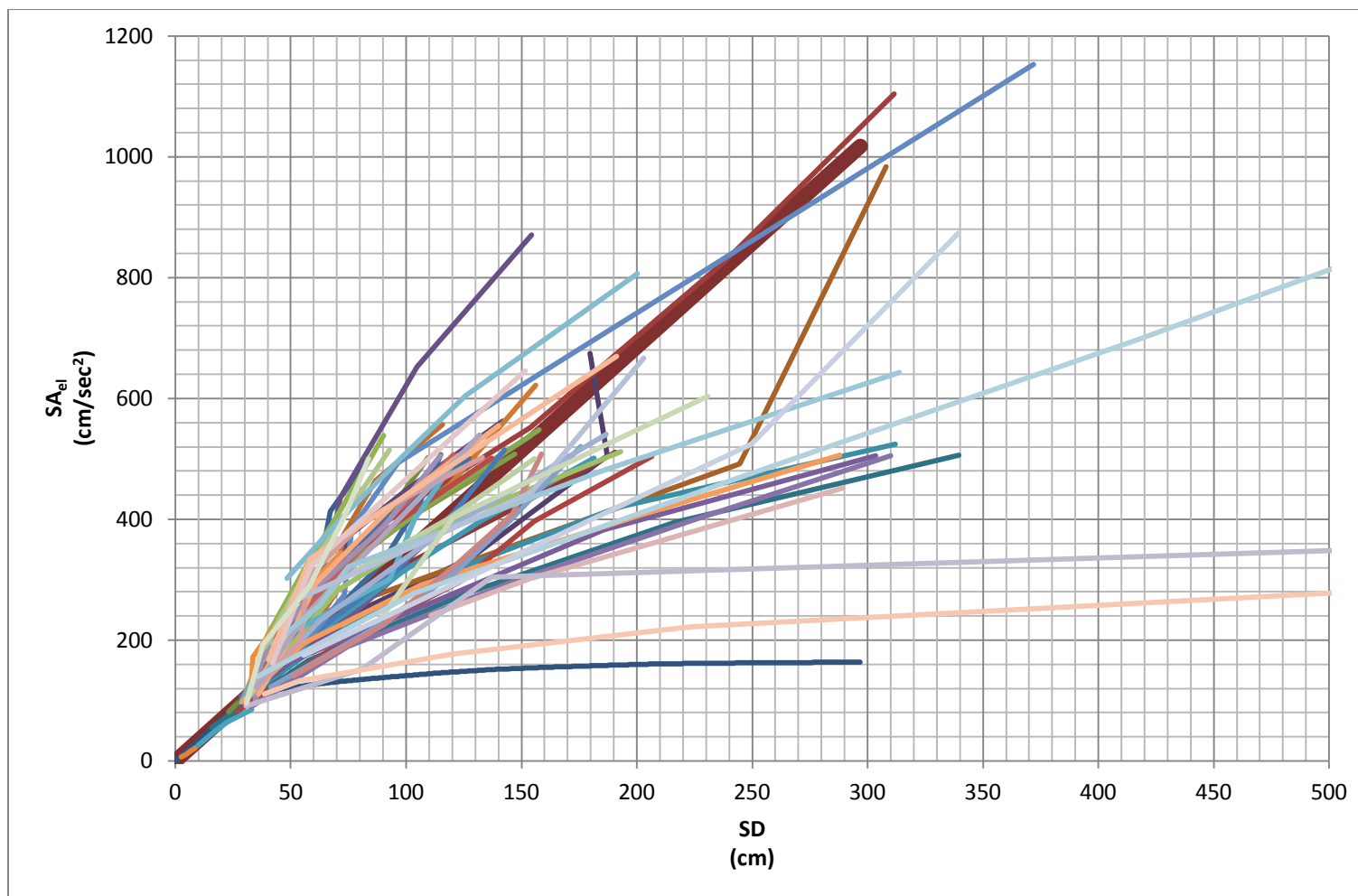


Σχ. 4-13



Σχ. 4-14

Συνολικά:



#### 4.2.2.3 Δείκτης Πλαστιμότητας $\mu$ ως προς Δείκτη Συμπεριφοράς $q$

Προκειμένου να αποκτήσουμε μια εικόνα για την τάση που ακολουθούν οι πλαστιμότητες της κατασκευής, καταρτίζουμε διαγράμματα Δείκτη Πλαστιμότητας  $\mu$  ως προς Δείκτη Συμπεριφοράς  $q$ . Οι παραπάνω υπολογίζονται ως εξής: Ο  $\mu$  μεν δείκτης πλαστιμότητας σαν ο λόγος της μέγιστης φασματικής μετακίνησης  $SD$  για τη συγκεκριμένη εδαφική κίνηση προς τη φασματική μετακίνηση διαρροής  $SD_y$ , δηλ.  $\mu = \frac{SD}{SD_y}$ , ο δε δείκτης συμπεριφοράς σαν ο λόγος της ελαστικής φασματικής επιτάχυνσης  $SA$  του ισοδύναμου μονοβαθμίου για τη συγκεκριμένη διέγερση προς τη φασματική επιτάχυνση διαρροής, δηλ.  $q = \frac{SA}{SA_y}$ . (Υπενθυμίζουμε ότι τα μεγέθη  $SD_y$ ,  $SA_y$  υπολογίζονται από το διγραμμικό διάγραμμα που προσεγγίζει την καμπύλη αντίστασης της κατασκευής.)

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Name			Results	
Station	Comp.	multipl. factor	$\mu$	$q$
BRA	315	1.00	0.65	0.63
BRA	315	1.60	0.76	1.02
BRA	315	2.20	1.11	1.40
BRA	315	2.70	1.49	1.71
BRA	315	3.30	1.87	2.10
CHY101	360	0.60	0.77	0.85
CHY101	360	1.00	1.84	1.41
CHY101	360	1.50	2.69	2.11
CHY101	360	2.00	2.58	2.82
CXO	225	1.00	0.22	0.23
CXO	225	3.00	0.83	0.70
CXO	225	5.00	1.82	1.16
CXO	225	7.10	3.11	1.65
CXO	225	9.10	4.87	2.12
DZC	180	1.00	0.79	1.35
DZC	270	1.00	0.95	1.03
DZC	270	2.00	3.51	2.06
DZC	270	4.00	4.42	4.11
E03	140	1.00	0.58	0.60
E03	140	1.60	0.88	0.95
E03	140	2.30	0.90	1.37
E03	140	2.90	0.96	1.73



E03	140	3.50	1.20	2.09
E03	230	1.00	0.53	0.59
E03	230	1.60	0.83	0.95
E03	230	2.30	1.44	1.36
E03	230	2.90	2.06	1.72
E03	230	3.60	2.74	2.14
E04	140	1.00	0.33	0.34
E04	140	2.30	0.74	0.78
E04	140	3.60	0.99	1.22
E04	140	4.90	1.29	1.66
E04	140	6.20	1.57	2.10
E04	230	0.30	0.46	0.47
E04	230	0.60	0.88	0.94
E04	230	1.00	1.09	1.57
E04	230	1.20	1.44	1.88
E04	230	1.50	2.03	2.35
E05	140	0.60	0.48	0.45
E05	140	1.00	0.73	0.75
E05	140	1.60	0.90	1.20
E05	140	2.40	1.57	1.80
E05	140	3.00	2.21	2.25
E05	230	0.40	0.76	0.78
E05	230	0.60	1.00	1.16
E05	230	0.80	1.04	1.55
E05	230	1.00	1.25	1.94
E05	230	1.20	1.66	2.33
E06	140	0.40	0.40	0.42
E06	140	1.00	1.01	1.06
E06	140	1.30	1.29	1.38
E06	140	1.70	1.52	1.80
E06	140	2.00	1.65	2.12
E06	230	0.60	0.98	1.39
E06	230	0.80	1.55	1.85
E06	230	1.00	2.21	2.31
E06	230	1.50	3.42	3.46
E06	230	2.00	4.47	4.62
E07	140	0.60	0.44	0.44
E07	140	1.00	0.55	0.73
E07	140	1.60	0.86	1.17
E07	140	2.30	1.46	1.68
E07	140	2.90	2.11	2.12

E07	230	0.60	0.80	1.09
E07	230	0.80	0.96	1.46
E07	230	1.00	1.02	1.82
E07	230	1.50	1.50	2.73
E07	230	2.00	2.21	3.64
E08	140	1.00	0.44	0.44
E08	140	2.00	0.99	0.88
E08	140	3.00	1.72	1.32
E08	140	4.00	2.75	1.76
E08	140	5.00	4.48	2.20
E08	230	0.60	0.46	0.52
E08	230	1.00	0.64	0.87
E08	230	1.60	1.11	1.39
E08	230	2.20	1.70	1.91
E08	230	3.00	2.24	2.60
E10	230	0.60	0.43	0.47
E10	230	1.00	0.67	0.78
E10	230	1.60	0.86	1.24
E10	230	2.10	1.25	1.63
E10	230	2.70	1.83	2.10
EDA	000	1.00	0.39	0.35
EDA	000	2.30	1.00	0.80
EDA	000	3.60	1.78	1.25
EDA	000	4.80	2.23	1.66
EDA	000	6.10	2.96	2.11
EDA	270	0.50	0.46	0.46
EDA	270	1.00	0.74	0.92
EDA	270	1.50	1.09	1.38
EDA	270	2.00	1.65	1.84
EDA	270	2.50	2.26	2.29
ERZ	000	0.60	0.54	0.54
ERZ	000	0.80	0.76	0.72
ERZ	000	1.00	0.99	0.90
ERZ	000	1.50	1.45	1.35
GA6	230	0.50	0.42	0.44
GA6	230	1.00	0.88	0.87
GA6	230	1.50	1.41	1.31
GA6	230	1.90	1.90	1.66
GA6	230	2.40	2.60	2.10
HAL	150	0.60	0.04	0.03
HAL	150	0.80	0.05	0.04

HAL	150	1.00	0.06	0.05
HAL	150	1.50	0.09	0.07
HAL	150	2.00	0.13	0.09
HVP	225	0.50	0.43	0.43
HVP	225	1.00	0.84	0.86
HVP	225	1.50	1.35	1.29
HVP	225	2.00	1.73	1.72
HVP	225	2.50	2.04	2.15
HVP	315	0.50	0.46	0.50
HVP	315	1.00	0.66	1.00
HVP	315	1.40	1.05	1.40
HVP	315	1.70	1.44	1.70
HVP	315	2.10	1.97	2.10
JFA	022	0.30	0.49	0.52
JFA	022	0.50	0.57	0.87
JFA	022	0.80	0.83	1.39
JFA	022	1.00	1.03	1.73
JFA	022	1.30	1.29	2.25
JFA	292	0.70	0.41	0.45
JFA	292	1.00	0.61	0.64
JFA	292	1.80	1.71	1.15
JFA	292	2.50	2.66	1.60
JFA	292	3.30	4.35	2.11
JSH	000	0.60	0.14	0.11
JSH	000	0.80	0.18	0.14
JSH	000	1.00	0.21	0.18
JSH	000	1.50	0.32	0.27
JSH	000	2.00	0.47	0.36
JSH	090	0.60	0.42	0.43
JSH	090	0.80	0.47	0.58
JSH	090	1.00	0.48	0.72
JSH	090	1.50	0.72	1.08
JSH	090	2.00	1.03	1.44
KPI	000	0.40	0.44	0.46
KPI	000	0.70	0.80	0.80
KPI	000	1.00	1.05	1.15
KPI	000	1.40	1.10	1.61
KPI	000	1.80	1.39	2.07
KPI	000	4.20	5.34	4.82
KPI	090	0.60	0.42	0.42
KPI	090	1.00	0.59	0.71

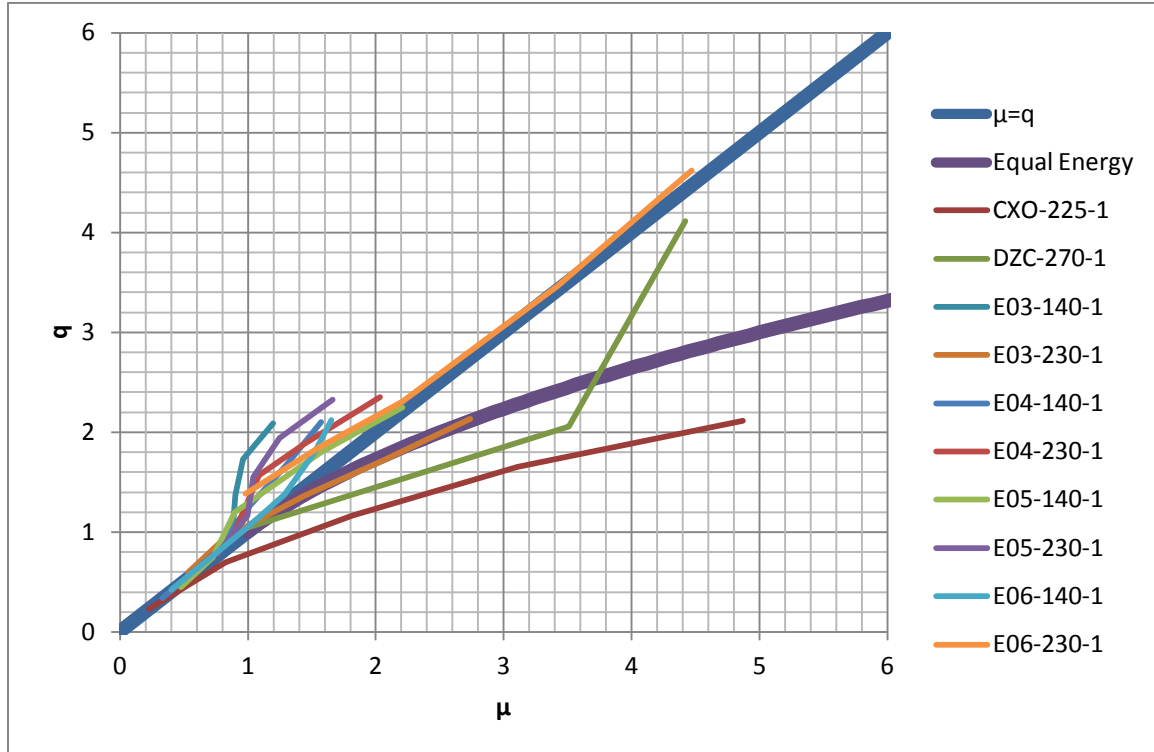
KPI	090	1.70	0.92	1.20
KPI	090	2.30	1.29	1.63
KPI	090	3.00	1.73	2.12
LDW	064	0.60	0.50	0.44
LDW	064	1.00	0.67	0.74
LDW	064	1.60	1.01	1.18
LDW	064	2.20	1.64	1.63
LDW	064	2.90	2.77	2.14
LDW	334	1.00	0.47	0.38
LDW	334	2.10	1.07	0.79
LDW	334	3.30	2.11	1.25
LDW	334	4.40	3.20	1.66
LDW	334	5.60	4.45	2.11
LUC	090	0.30	0.47	0.48
LUC	090	0.80	0.80	1.29
LUC	090	1.00	1.08	1.61
LUC	090	1.40	1.67	2.26
NRG	090	1.00	0.41	0.41
NRG	090	2.00	0.60	0.81
NRG	090	3.10	1.33	1.26
NRG	090	4.10	1.48	1.67
NRG	090	5.20	1.76	2.12
NWH	360	0.50	0.41	0.41
NWH	360	1.00	0.80	0.81
NWH	360	1.50	1.53	1.22
NWH	360	2.10	2.91	1.71
NWH	360	2.60	4.13	2.12
NWS	046	0.40	0.59	0.51
NWS	046	0.70	1.20	0.90
NWS	046	1.00	1.71	1.28
NWS	046	1.30	2.08	1.67
NWS	046	1.70	2.52	2.18
NWS	316	1.00	0.73	0.59
NWS	316	1.60	1.30	0.94
NWS	316	2.30	1.74	1.36
NWS	316	2.90	2.09	1.71
NWS	316	3.60	2.27	2.12
RRS	228	0.50	0.45	0.47
RRS	228	1.00	0.63	0.94
RRS	228	1.40	0.82	1.31
RRS	228	1.80	1.04	1.69

RRS	228	2.30	1.33	2.15
RRS	318	0.60	0.50	0.42
RRS	318	1.00	0.54	0.70
RRS	318	1.70	0.87	1.20
RRS	318	2.30	1.30	1.62
RRS	318	3.00	1.65	2.11
SCG	052	0.60	0.70	1.27
SCG	052	0.80	1.04	1.69
SCG	052	1.00	1.41	2.11
SCG	052	1.20	1.81	2.53
SCG	052	1.60	2.87	3.37
SCG	142	0.60	0.52	0.46
SCG	142	1.00	0.68	0.77
SCG	142	1.60	0.88	1.24
SCG	142	2.30	1.36	1.78
SCG	142	3.00	2.01	2.32
SCH	011	0.30	0.48	0.48
SCH	011	0.60	0.90	0.97
SCH	011	0.90	1.49	1.45
SCH	011	1.00	1.70	1.61
SCH	011	1.40	2.68	2.26
SCH	281	0.50	0.44	0.42
SCH	281	1.00	0.78	0.84
SCH	281	1.50	0.82	1.26
SCH	281	2.00	1.19	1.68
SCH	281	2.50	1.91	2.10
SYH	090	0.50	0.44	0.42
SYH	090	1.00	0.69	0.84
SYH	090	1.50	1.03	1.26
SYH	090	2.00	1.70	1.68
SYH	090	2.50	2.23	2.09
SYH	360	0.50	0.50	0.51
SYH	360	1.00	0.82	1.03
SYH	360	1.40	1.18	1.44
SYH	360	1.80	1.54	1.85
SYH	360	2.20	1.89	2.26
TAB	074	0.60	0.61	0.81
TAB	074	0.80	0.90	1.08
TAB	074	1.00	1.08	1.35
TAB	074	1.50	2.67	2.02
TAB	074	2.00	4.50	2.69

TAB	344	1.00	0.92	1.02
TCU049	090	1.00	0.58	0.55
TCU049	360	1.00	0.71	0.74
TCU051	360	1.00	0.58	0.70
TCU051	360	2.00	0.84	1.40
TCU051	360	4.00	2.74	2.80
TCU052	090	0.60	0.75	1.12
TCU052	090	1.00	2.21	1.86
TCU052	090	1.50	2.91	2.79
TCU052	360	0.80	1.59	1.01
TCU052	360	1.00	2.20	1.26
TCU052	360	1.50	4.15	1.89
TCU054	090	1.00	0.51	0.81
TCU054	360	1.00	0.57	0.77
TCU055	360	1.00	0.78	0.95
TCU065	090	0.60	1.30	1.01
TCU065	090	1.00	1.73	1.68
TCU065	090	1.50	3.31	2.53
TCU067	090	0.60	0.44	0.38
TCU067	090	1.00	1.16	0.64
TCU067	090	2.00	1.97	1.27
TCU067	090	4.00	38.12	2.55
TCU068	090	0.30	0.51	0.58
TCU068	090	0.60	1.49	1.17
TCU068	090	0.80	2.48	1.55
TCU068	090	1.00	3.46	1.94
TCU068	090	1.50	5.97	2.91
TCU068	090	2.00	8.37	3.89
TCU068	360	0.50	0.55	0.46
TCU068	360	0.60	0.78	0.56
TCU068	360	0.80	1.73	0.74
TCU068	360	1.00	3.20	0.93
TCU068	360	1.50	11.10	1.39
TCU068	360	2.00	34.71	1.85
TCU075	090	1.00	1.63	1.68
TCU082	090	1.00	0.58	0.84
TCU082	360	1.00	0.72	1.17
TCU087	090	1.00	0.52	0.63
TCU101	090	1.00	0.80	0.73
TCU101	090	3.00	3.58	2.19
TCU101	090	5.00	4.87	3.66

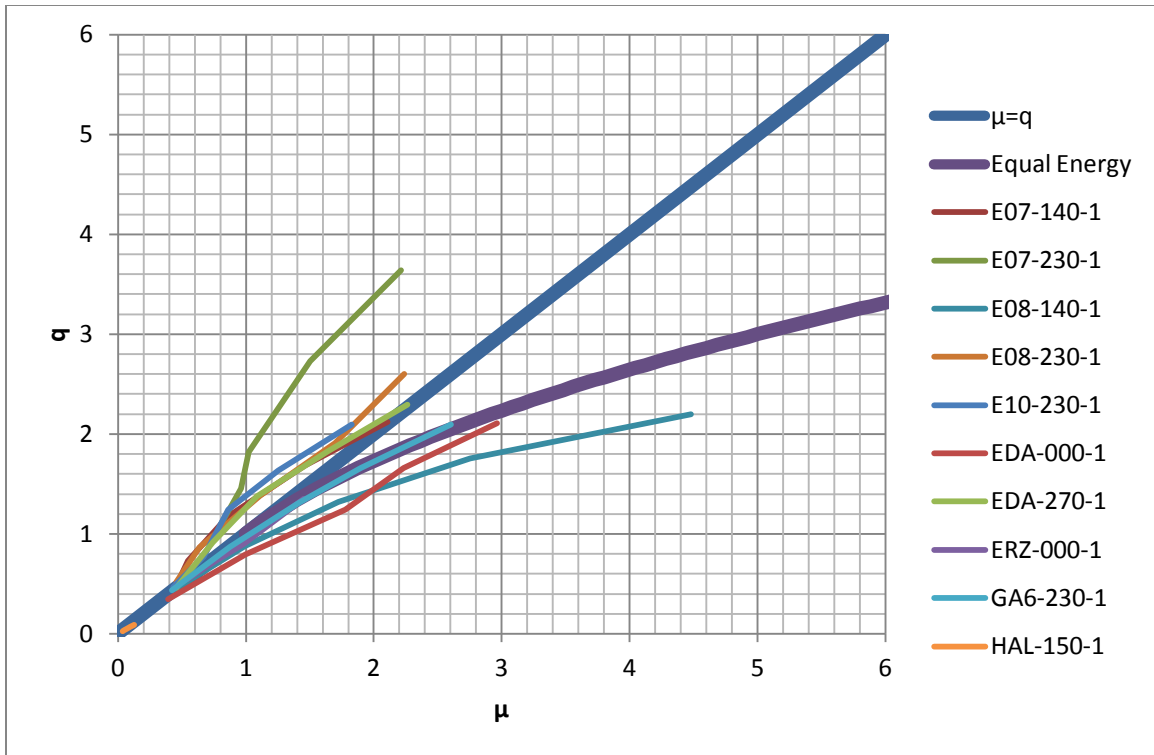
TCU102	090	0.50	0.61	0.68
TCU102	090	1.00	0.84	1.35
TCU102	090	2.00	2.17	2.70
VSP	360	0.50	0.44	0.40
VSP	360	1.00	0.54	0.80
VSP	360	1.50	0.83	1.21
VSP	360	2.10	1.05	1.69
VSP	360	2.60	1.20	2.09

Τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις παραπάνω τιμές είναι τα ακόλουθα: (Σημ: Στα διαγράμματα έχουν επίσης παρασταθεί οι καμπύλες  $q = \mu$  και  $q = \sqrt{2\mu - 1}$ , που αντιστοιχούν στους εμπειρικούς κανόνες ίσων μετακινήσεων και ίσων ενεργειών αντίστοιχα.

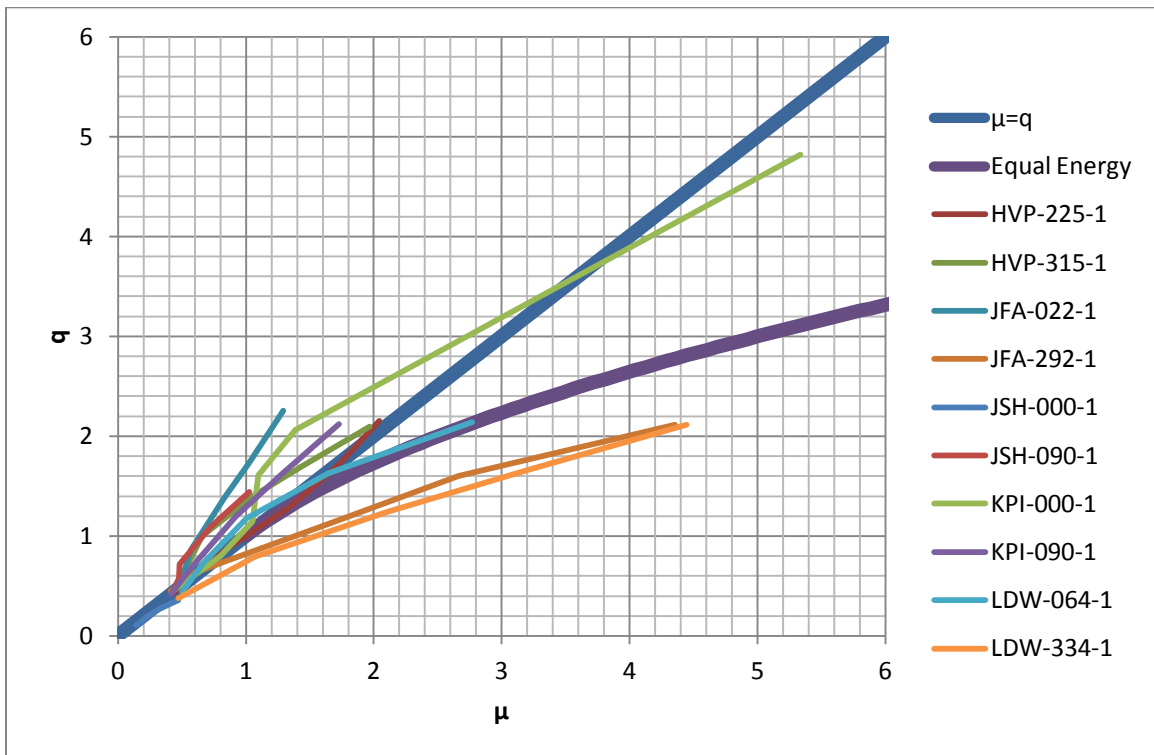


Σχ. 4-15

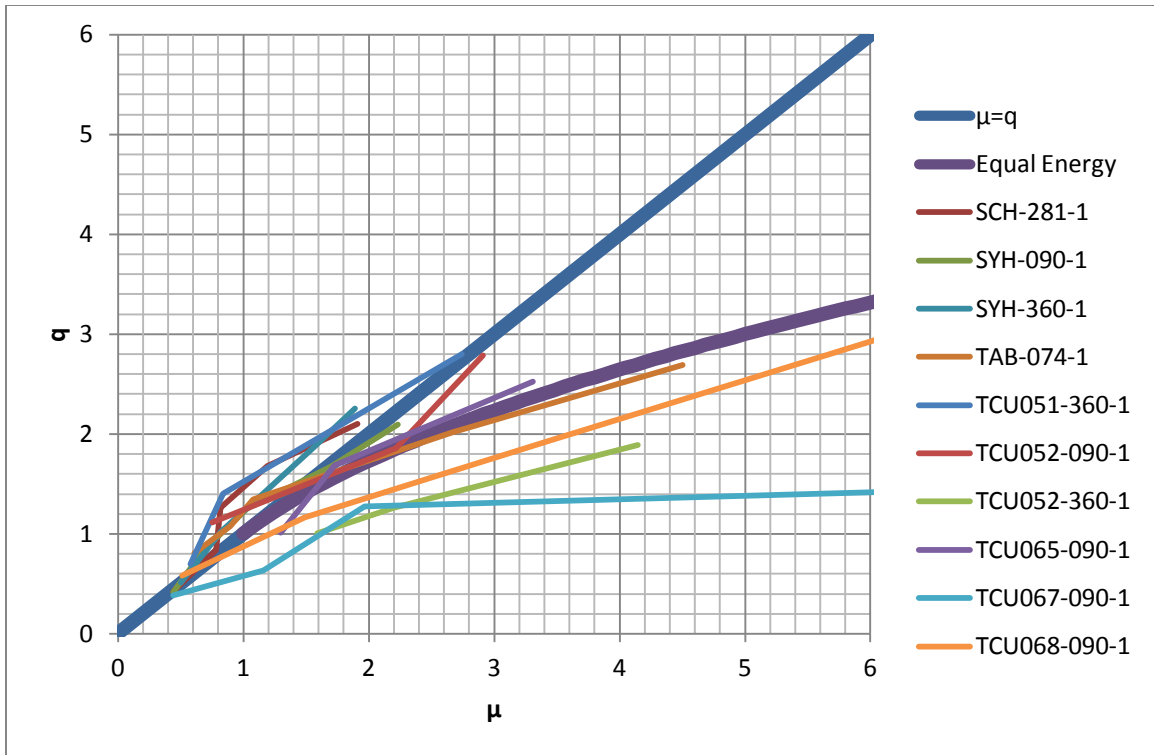




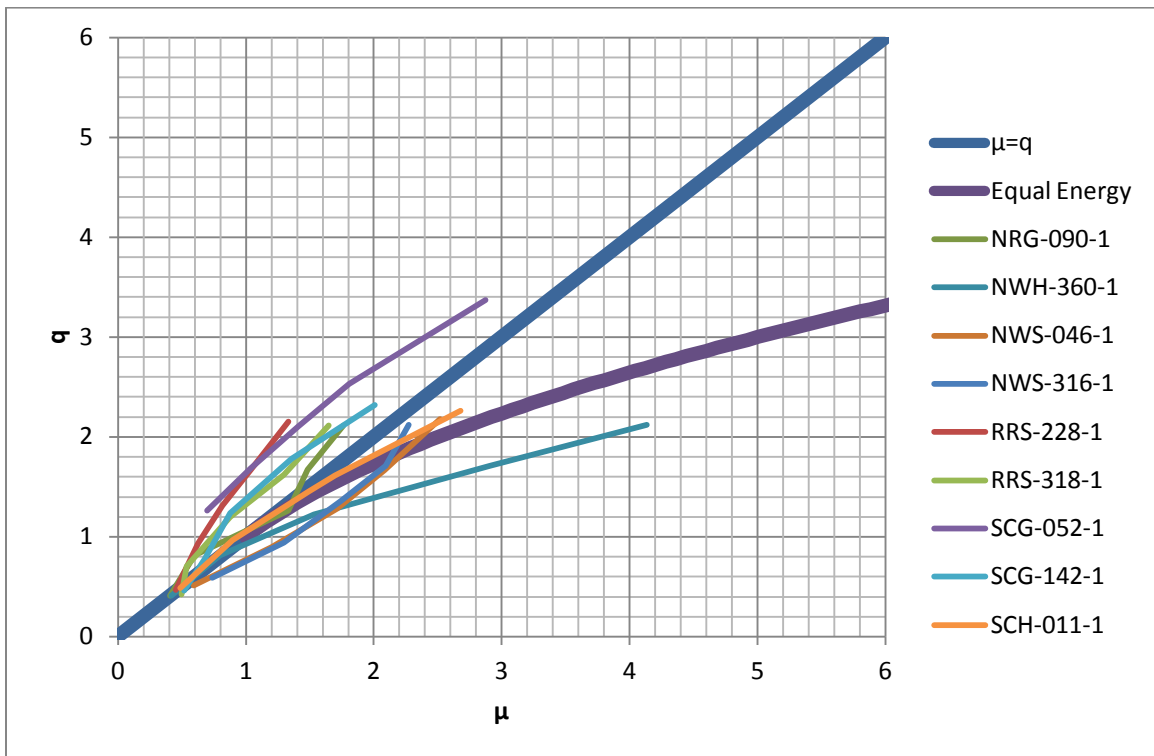
Σχ. 4-16



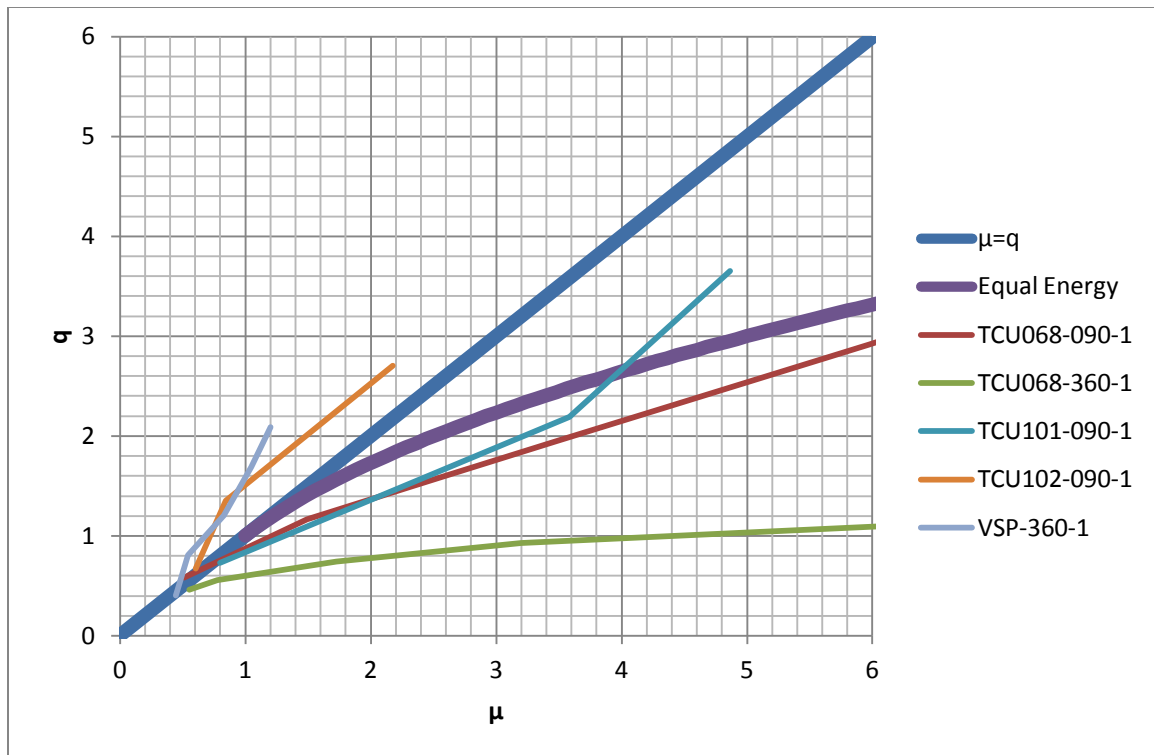
Σχ. 4-17



Σχ. 4-18

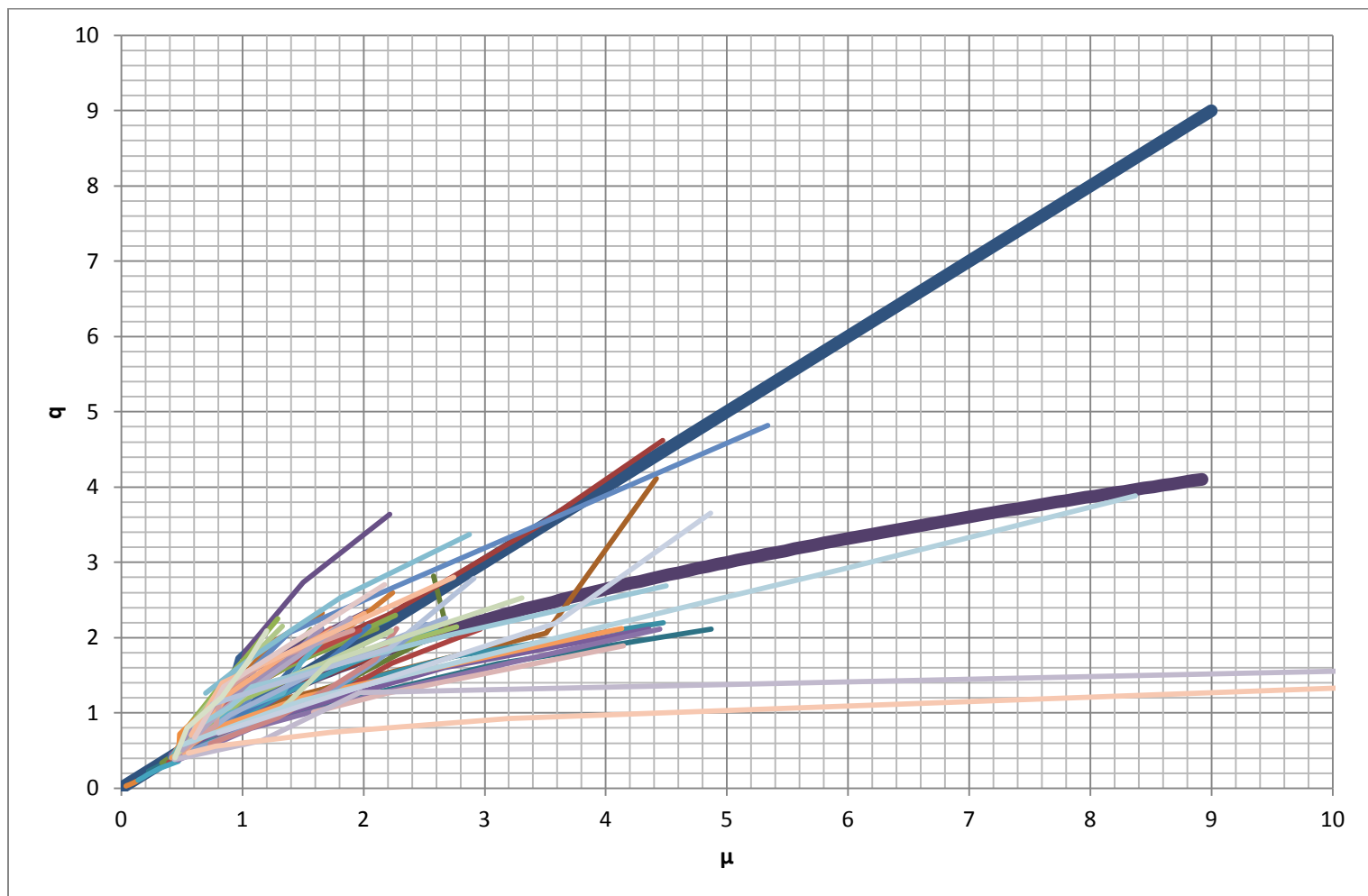


Σχ. 4-19



Σχ. 4-20

Συνολικά:



## 4.3 Επεξεργασία των Αποτελεσμάτων

### 4.3.1 Μοναδιαία Επιταχυνσιογραφήματα

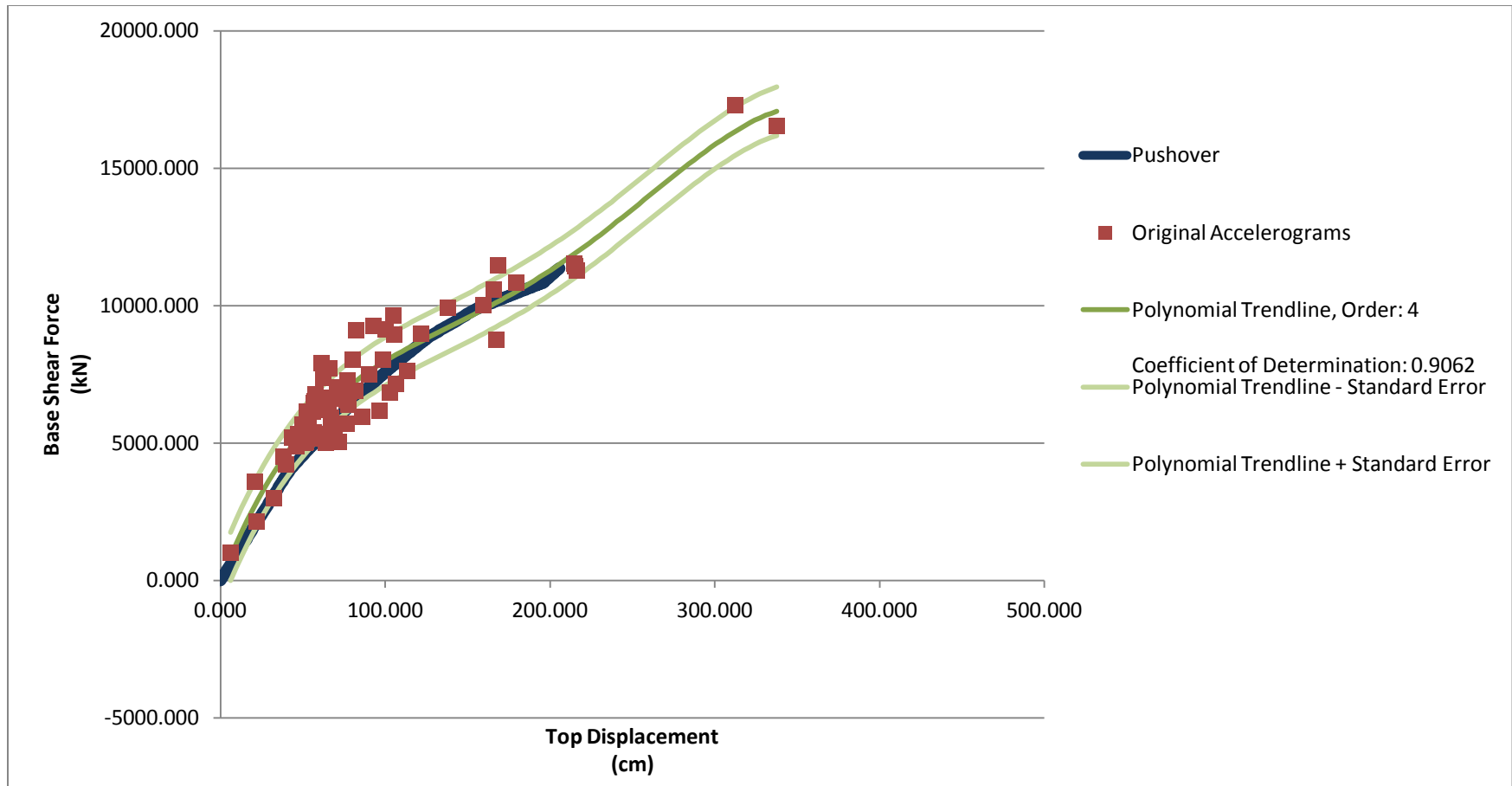
#### 4.3.1.1 Διάγραμμα V-δ

Σε πρώτη φάση θα επιχειρήσουμε να συνάγουμε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της κατασκευής στα πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα κοντινού πεδίου. Για το σκοπό αυτό προσαρμόζουμε στις τιμές (V,δ) που προκύπτουν από τα μοναδιαία επιταχυνσιογραφήματα μία πολυωνυμική καμπύλη 4<sup>ου</sup> βαθμού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η καμπύλη προσαρμόζεται στα δεδομένα με συντελεστή προσδιορισμού R<sup>2</sup>=0.9062. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τις καμπύλες που αντιστοιχούν σε +1×τυπικό σφάλμα και −1×τυπικό σφάλμα.

Υπενθυμίζουμε ότι στην περίπτωση της απλής γραμμικής παρεμβολής το τυπικό σφάλμα δίδεται από τη σχέση:

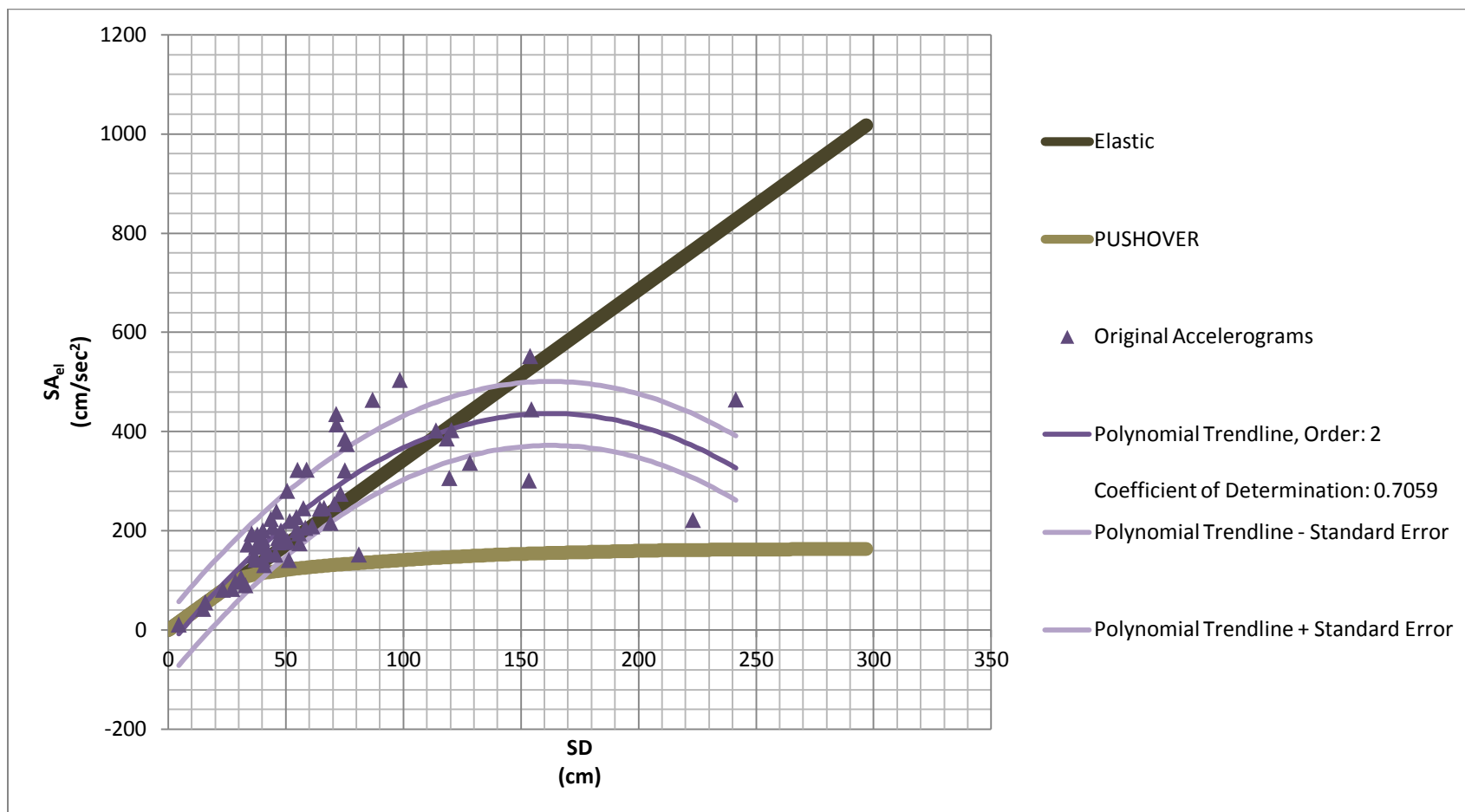
$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(n-p)} \cdot \sum e_i^2$$
, όπου  $e_i^2$  το τετράγωνο της απόκλισης της πραγματικής τιμής από την πρόβλεψη, n ο αριθμός των καταγραφών και p ο βαθμός ελευθερίας της κατανομής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



#### 4.3.1.2 Διάγραμμα SA-SD

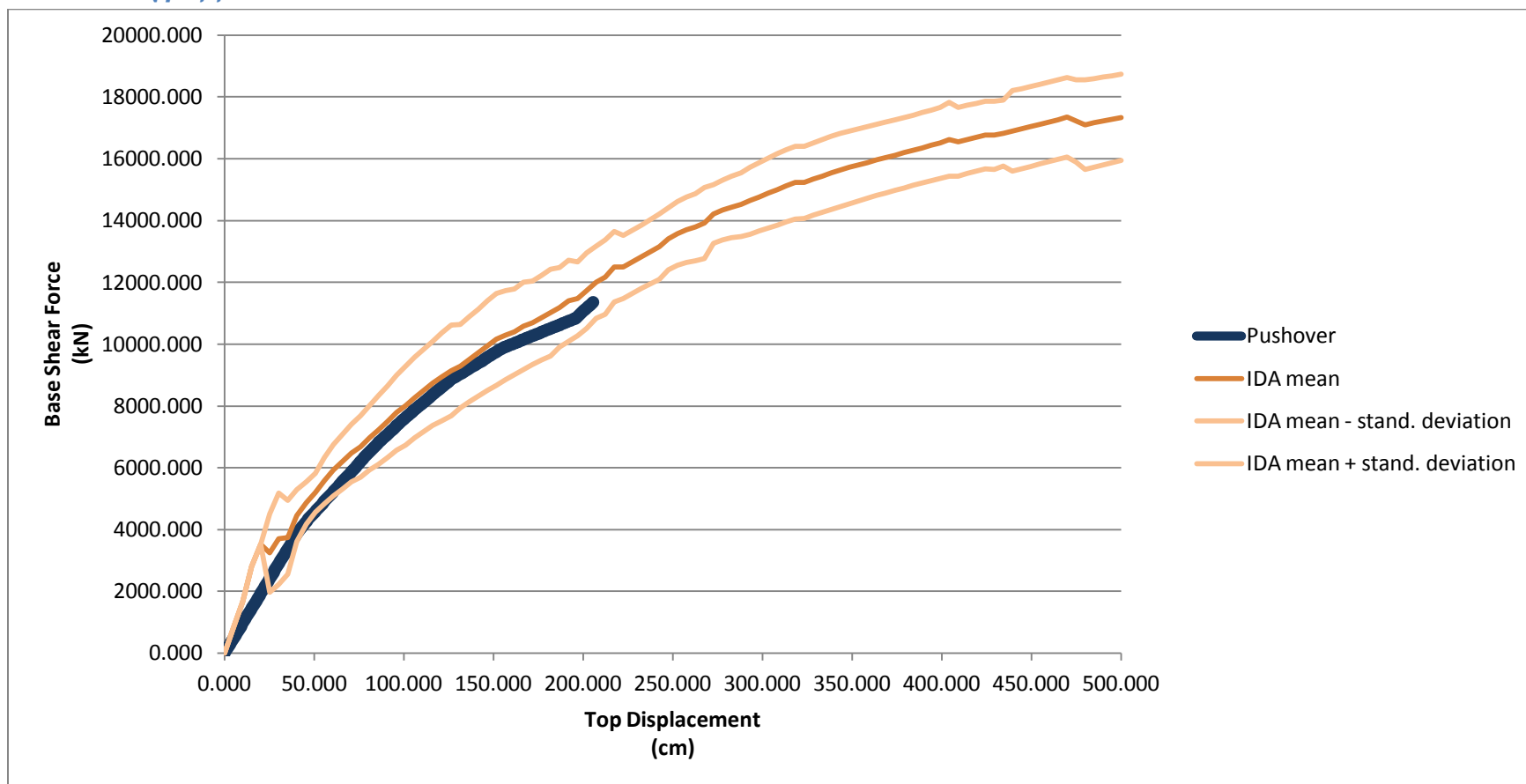
Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για το διάγραμμα φασματικών επιταχύνσεων-ισοδύναμων φασματικών μετατοπίσεων. Στην περίπτωση αυτή προσαρμόζουμε μια καμπύλη 2<sup>ου</sup> βαθμού στην κατανομή. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



### 4.3.2 Καμπύλες IDA

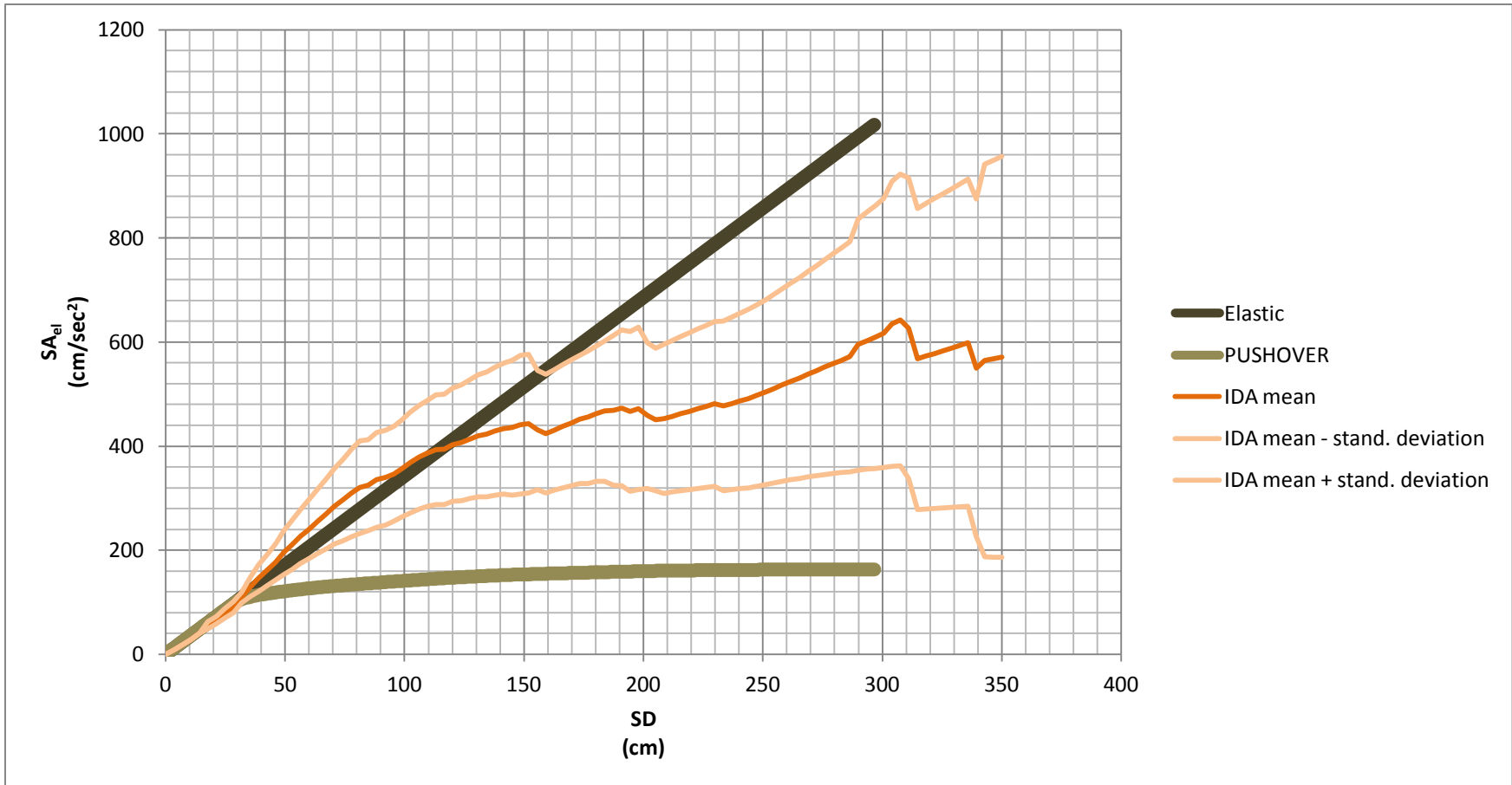
Προκειμένου να αποκτήσουμε μια εικόνα για την κατανομή που ακολουθούν οι καμπύλες IDA για διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης, σχεδιάζουμε τις μέσες καμπύλες IDA και τις καμπύλες  $\pm$ τυπική απόκλιση, εφαρμόζοντας τη μέθοδο του τρέχοντος μέσου, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στις επόμενες ενότητες.

#### 4.3.2.1 Διάγραμμα V-δ



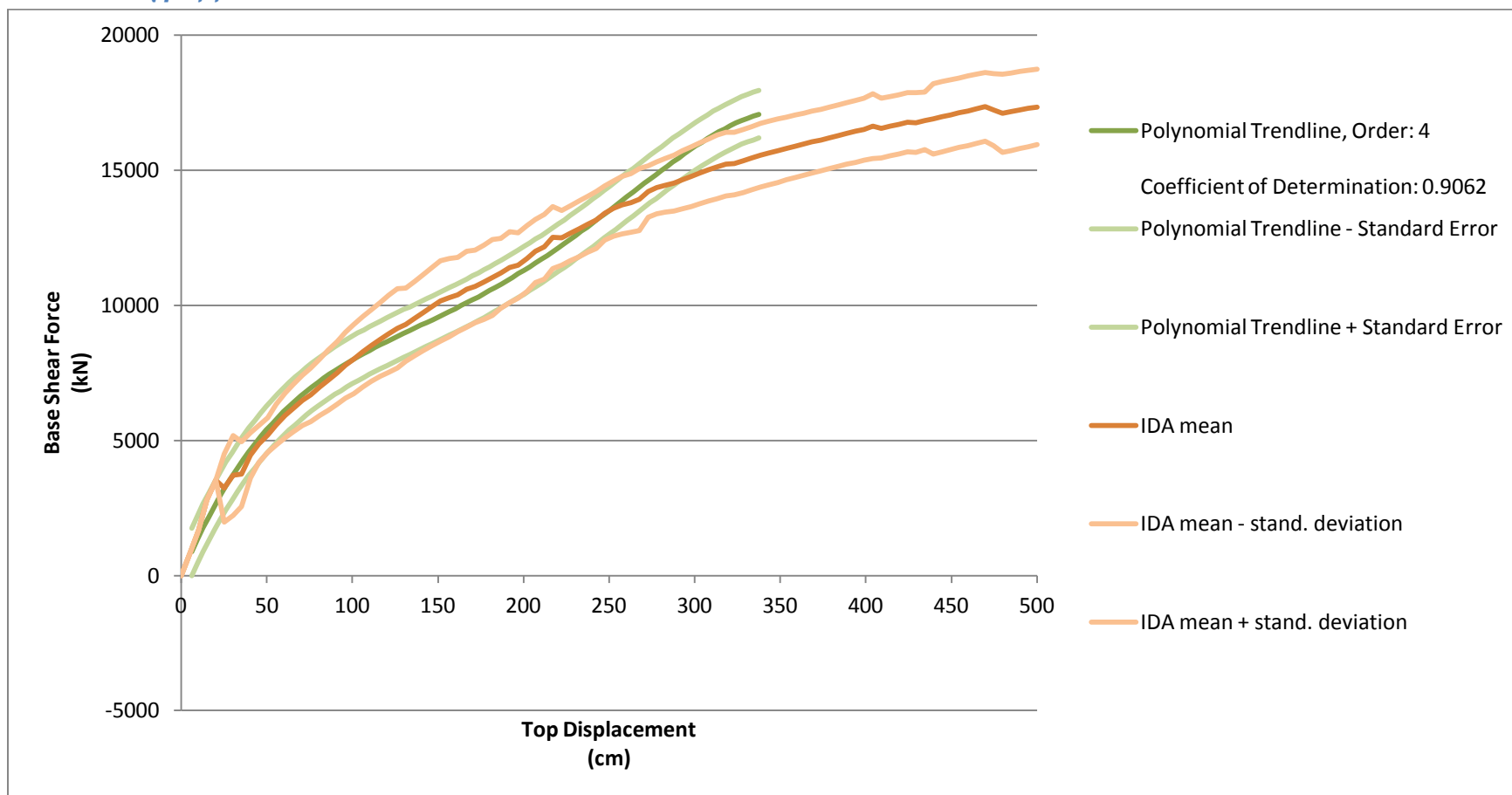


## 4.3.2.2 Διάγραμμα SA-SD

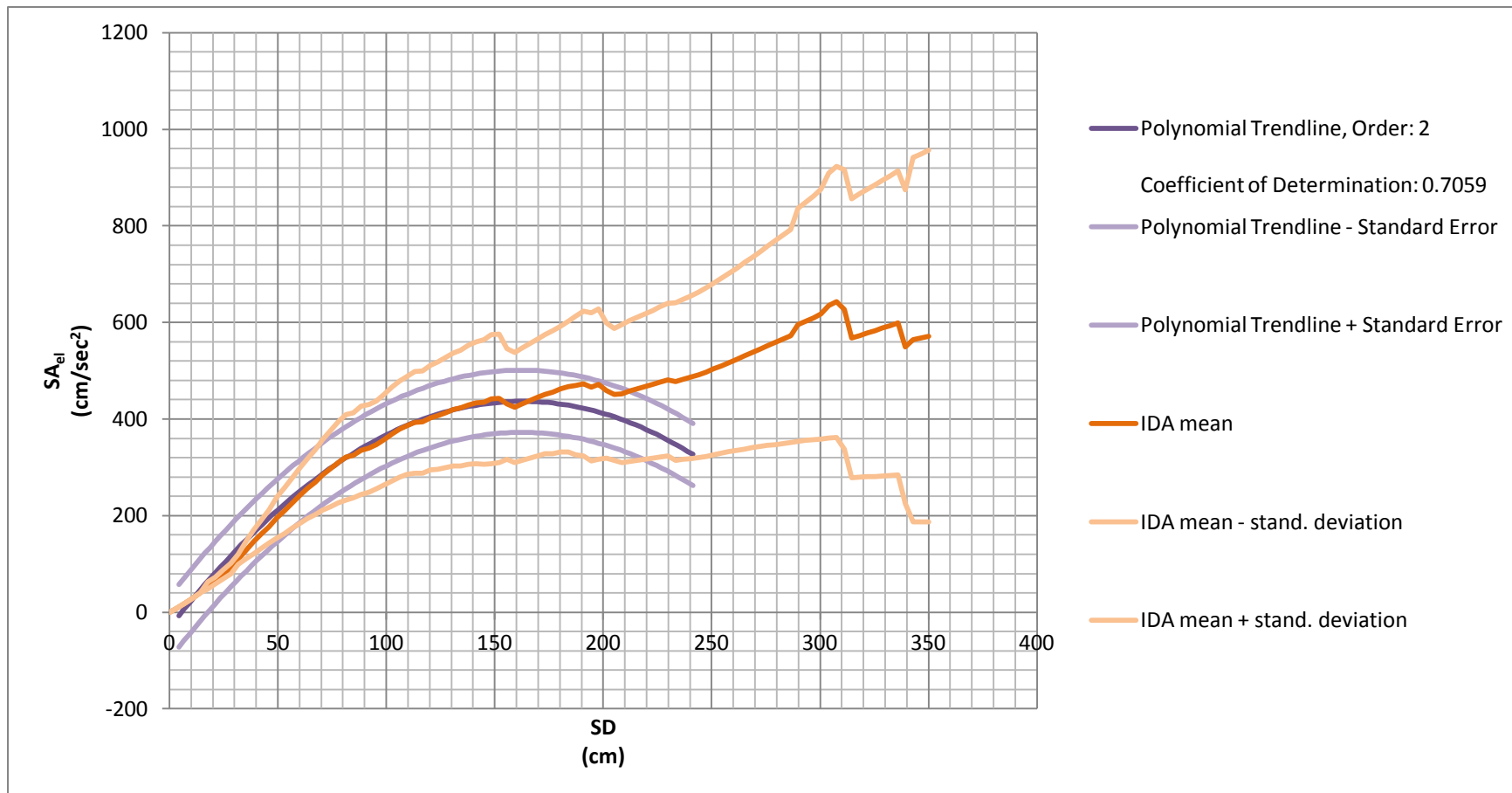


### 4.3.3 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

#### 4.3.3.1 Διάγραμμα V-δ



## 4.3.3.2 Διάγραμμα SA-SD



#### 4.4 Σχολιασμός-Συμπεράσματα

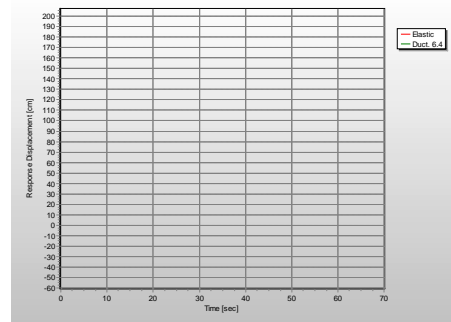
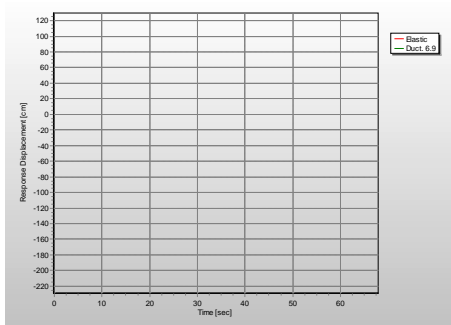
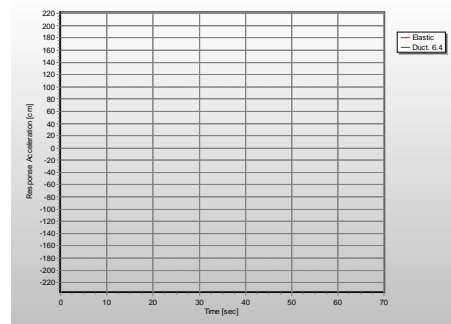
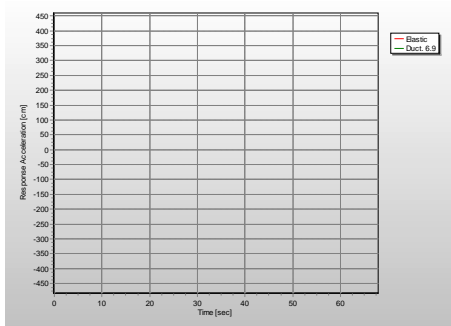
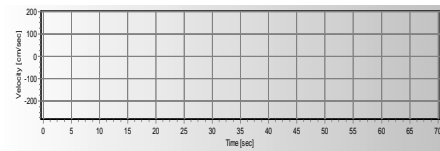
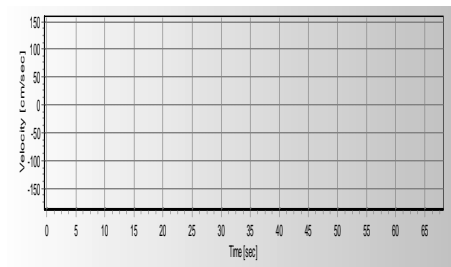
Θα επιχειρήσουμε στο σημείο αυτό να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της κατασκευής υπό τα επιταχυνσιογραφήματα εδαφικών κινήσεων κοντινού πεδίου, είτε αυτά έχουν προκύψει από πολλαπλασιασμό των καταγεγραμμένων επιταχυνσιογραφημάτων με κάποιο πολλαπλασιαστικό συντελεστή είτε όχι.

- Αρχικά, όσον αφορά τις καταγραφές V-δ των αρχικών επιταχυνσιογραφημάτων (πριν την κλιμάκωση), παρατηρούμε ότι αυτές προσαρμόζονται με πολύ ικανοποιητικό βαθμό στην καμπύλη Pushover της κατασκευής κατά την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή (ο συντελεστής συσχέτισης για τη γραμμική παλινδρόμηση την οποία εφαρμόσαμε είναι περίπου ίσος με 91%). Αυτό υποδηλώνει ότι η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών της κατασκευής στην απόκριση για τα συγκεκριμένα επιταχυνσιογραφήματα δεν είναι πολύ σημαντική. Έτσι, ακόμα και μια απλή ανάλυση Pushover για τη δεδομένη κατασκευή και καταγραφές θα έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην πλειονότητά τους οι καταγραφές προκαλούν μετατοπίσεις στο διάστημα 50-120cm, δηλαδή στο τέλος του ελαστικού και το πρώτο κομμάτι του πλαστικού κλάδου της καμπύλης Pushover.
- Παρατηρούμε όμως ότι τα παραπάνω δεν ισχύουν για τις καταγραφές SA-SD. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μεγάλη διασπορά μεταξύ των καταγραφών (συντελεστής συσχέτισης παλινδρόμησης 70% έναντι 90% προηγούμενως). Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι η ελαστική φασματική επιτάχυνση κατά την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή δεν περιγράφει ικανοποιητικά την «καταστρεπτική ισχύ» του σεισμού για κάποιο μη ελαστικό σύστημα, δεν αρκεί δηλαδή για να προβλέψει κανείς την ανελαστική μετατόπιση της κατασκευής.

Αυτό οφείλεται εν μέρει στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των σεισμικών καταγραφών κινήσεων κοντινού πεδίου ως παλμοί μικρής χρονικής διάρκειας και μεγάλης έντασης. Λόγω της μεγάλης έντασής τους, η παραμικρή ασυμμετρία στον παλμό της εδαφικής κίνησης μπορεί να μεταβάλει πολύ σημαντικά την απόκριση του ελαστικού συστήματος σε σχέση με το ελαστοπλαστικό.

Για να γίνει καλύτερα κατανοητό αυτό το φαινόμενο θα αναφερθούμε ενδεικτικά σε δύο καταγραφές εδαφικής κίνησης, την TCU068-090-1 και TCU068-360-1. Παρόλο που η πρώτη προκαλεί σχεδόν διπλάσια ελαστική

επιτάχυνση ( $465\text{cm/sec}^2$  έναντι  $222\text{cm/sec}^2$ ), εντούτοις και οι δύο προκαλούν σχεδόν ίδιες ανελαστικές μετακινήσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω της ασυμμετρίας του παλμού της εδαφικής κίνησης για την εδαφική κίνηση TCU068-360-1. Δηλαδή, η TCU068-090-1 προκαλεί μεν πλαστικοποίηση της κατασκευής, αυτή όμως δεν προχωράει, λόγω της αλλαγής στην κατεύθυνση της εδαφικής κίνησης λίγο μετά την πρώτη πλαστικοποίηση. Αντιθέτως, η TCU068-360-1, της οποίας ο παλμός κίνησης είναι ασύμμετρος, προκαλεί πολύ μεγάλες μετατοπίσεις στο ελαστοπλαστικό σύστημα, καθώς η κατασκευή συνεχίζει να ωθείται βαθύτερα στην πλαστική περιοχή για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μετά την πλαστικοποίησή του. Αυτό δεν προκαλεί μεγάλες μετατοπίσεις για το ελαστικό σύστημα, δημιουργεί όμως μεγάλα προβλήματα για ένα ελαστοπλαστικό σύστημα.



Σχ. 4-21 Εδαφική Ταχύτητα και απόκριση SA, SD για την εδαφική κίνηση TCU090-1

Σχ. 4-22 Εδαφική Ταχύτητα και απόκριση SA, SD για την εδαφική κίνηση TCU360-1

- Όσον αφορά την ανάλυση *IDA*, ισχύουν σε γενικές γραμμές τα όσα αναφέραμε παραπάνω. Δηλαδή, για το μεν διάγραμμα *V-δ* η μέση καμπύλη *IDA* προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την καμπύλη *PUSHOVER*, για το δε διάγραμμα *SA-SD* υπάρχει μεγάλη διασπορά των τιμών της ανάλυσης για δεδομένη στάθμη *SD* (μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διασπορά για τα αρχικά επιταχυνσιογραφήματα), η οποία αυξάνεται όσο προχωράμε προς μεγαλύτερες φασματικές μετατοπίσεις.
- Συγκρίνοντας τέλος τις μέσες καμπύλες *IDA* με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την παρεμβολή των τιμών των αρχικών επιταχυνσιογραφημάτων, παρατηρούμε ότι αυτές βρίσκονται εντυπωσιακά κοντά, ιδιαίτερα όσον αφορά το διάγραμμα *V-δ*. Αυτό αντιβαίνει σε πρώτη ματιά με τα όσα γνωρίζουμε για τις καταγραφές κοντινού πεδίου. Δηλαδή, λόγω της αναλογικής σχέσης του λογαρίθμου της περιόδου της παλμικής κίνησης με το μέγεθος του σεισμού (σεισμική ροπή), οι σεισμικές καταγραφές μεγάλης έντασης χαρακτηρίζονται από παλμούς μεγαλύτερης περιόδου από ό,τι οι καταγραφές μικρής έντασης. Άρα περιμένουμε τα μεγεθυμένα επιταχυνσιογραφήματα μικρής αρχικής έντασης να δίνουν διαφορετική απόκριση από ό,τι τα επιταχυνσιογραφήματα μεγάλης αρχικής έντασης. Και πράγματι, όσο προχωράμε προς μεγαλύτερες μετατοπίσεις, παρατηρείται μια κάπως πιο αυξημένη διασπορά των αποτελεσμάτων, η οποία όμως δε δίνει τελικά πολύ μεγάλες αποκλίσεις από την καμπύλη των αρχικών επιταχυνσιογραφημάτων. Λόγω όμως της αυξημένης διασποράς αυτής, της αβεβαιότητας δηλαδή των αποτελεσμάτων, είναι μάλλον επίφοβη η κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων, ιδιαίτερα των επιταχυνσιογραφημάτων πολύ ασθενών καταγραφών, τουλάχιστον για σεισμικές καταγραφές κοντινού πεδίου.

## 5 Βιβλιογραφία

- D.Vamvatsikos, C.Allin Cornell. «Incremental dynamic analysis. Earthquake engineering and structural dynamics». John Wiley & Sons, Ltd.USA 2001
- Anil Chopra, «Δυναμική των κατασκευών. Θεωρία και εφαρμογές στη σεισμική μηχανική». Εκδόσεις Μ.Γκιούρδας. Αθήνα 2008
- Δ. Παπασταματίου, Ι.Ψυχάρης, Βοηθητικές Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας, ΕΜΠ, 2005.
- Ι. Κατσικαδέλης, «Δυναμική των Κατασκευών» Τομοι Ι, ΙΙ. Συμμετρία, 2007.
- Π.Γ Καρύδης, Ι.Μ. Ταφλαμπάς. «Τεχνική σεισμολογία». Αθήνα 2007.
- Β.Κ. Παπαζάχος, Γ.Φ. Καρακαΐσης, Π.Μ. Χατζηδημητρίου, «Εισαγωγή στη Σεισμολογία», Εκδόσεις Ζήτη, 2005.
- JP Stewart, «Ground motion evaluation procedures for performance based design», PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING. RESEARCH CENTER. *PEER* 2001/09
- G. P. Mavroeidis, G. Dong and A. S. Papageorgiou, «Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems», Wiley, 2004.
- LI Shuang , XIE Li-li, « Progress and trend on near-field problems in civil engineering», ACTA SEISMOLOGICA SINICA, 2007.
- Εγχειρίδιο χρήσης προγράμματος Sap 2000 version 14

## 6 Παράρτημα

### 6.1 Πίνακας αποτελεσμάτων Ανάλυσης Pushover

Step	Top Displacement (cm)	Base Shear (kN)	Step (continue)	Top Displacement (continue) (cm)	Base Shear (continue) (kN)	Step (continue)	Top Displacement (continue) (cm)	Base Shear (continue) (kN)
1	0.00	0.00	205	257.00	13086.90	409	415.14	13547.36
7	7.32	1486.20	211	264.32	13136.37	415	415.14	13547.36
13	14.63	2972.39	217	271.64	13185.69	421	415.14	13547.36
19	21.95	4458.59	223	278.95	13235.00	427	415.14	13547.36
25	29.26	5944.79	229	286.28	13284.18	433	415.14	13547.36
31	36.58	7430.98	235	293.59	13322.85	439	415.14	13547.36
37	44.34	8722.00	241	300.92	13346.10	445	415.14	13547.36
43	54.29	9427.30	247	308.23	13367.79	451	415.14	13547.36
49	62.54	9789.81	253	315.56	13388.16	457	415.14	13547.36
55	71.00	10092.60	259	322.88	13407.44	463	415.14	13547.36
61	79.27	10365.26	265	330.20	13423.95	469	415.14	13547.36
67	86.58	10576.98	271	337.52	13440.16	475	415.14	13547.36
73	93.90	10760.11	277	344.27	13454.91	481	415.14	13547.36
79	101.22	10937.62	283	351.59	13467.17	487	415.14	13547.36
85	109.32	11107.98	289	358.90	13479.43	493	415.14	13547.36
91	116.63	11256.03	295	366.22	13491.70	496	415.14	13547.36
97	123.95	11404.09	301	373.53	13503.96			
103	131.26	11546.11	307	380.88	13516.28			
109	138.58	11685.42	313	388.20	13528.44			
115	145.89	11823.82	319	394.30	13537.14			
121	153.21	11955.92	325	401.61	13540.74			
127	160.53	12081.42	331	409.05	13544.39			
133	167.86	12199.40	337	415.14	13547.36			
139	175.19	12308.31	343	415.14	13547.36			
145	182.52	12412.21	349	415.14	13547.36			
151	189.85	12511.42	355	415.14	13547.36			
157	197.18	12602.76	361	415.14	13547.36			
163	205.73	12683.58	367	415.14	13547.36			
169	213.05	12749.97	373	415.14	13547.36			
175	220.39	12812.74	379	415.14	13547.36			
181	227.71	12872.03	385	415.14	13547.36			
187	235.03	12927.78	391	415.14	13547.36			
193	242.36	12981.54	397	415.14	13547.36			
199	249.68	13034.79	403	415.14	13547.36			



## 6.2 Τιμές Καμπύλης SA-SD ισοδύναμου μονοβάθμιου

Step	SD (cm)	SA (cm/sec <sup>2</sup> )	Step (continue)	SD (continue) (cm)	SA (continue) (cm/sec <sup>2</sup> )	Step (continue)	SD (continue) (cm)	SA (continue) (cm/sec <sup>2</sup> )
1	0.00	0.00	205	183.69	157.89	409	296.72	163.44
7	5.23	17.93	211	188.92	158.48	415	296.72	163.44
13	10.46	35.86	217	194.15	159.08	421	296.72	163.44
19	15.69	53.79	223	199.38	159.67	427	296.72	163.44
25	20.91	71.72	229	204.62	160.27	433	296.72	163.44
31	26.14	89.65	235	209.85	160.73	439	296.72	163.44
37	31.69	105.23	241	215.08	161.01	445	296.72	163.44
43	38.81	113.73	247	220.31	161.27	451	296.72	163.44
49	44.70	118.11	253	225.54	161.52	457	296.72	163.44
55	50.75	121.76	259	230.78	161.75	463	296.72	163.44
61	56.66	125.05	265	236.01	161.95	469	296.72	163.44
67	61.89	127.60	271	241.24	162.15	475	296.72	163.44
73	67.11	129.81	277	246.07	162.32	481	296.72	163.44
79	72.34	131.96	283	251.29	162.47	487	296.72	163.44
85	78.13	134.01	289	256.52	162.62	493	296.72	163.44
91	83.36	135.80	295	261.75	162.77	496	296.72	163.44
97	88.59	137.58	301	266.98	162.92			
103	93.82	139.30	307	272.23	163.07			
109	99.05	140.98	313	277.46	163.21			
115	104.28	142.65	319	281.82	163.32			
121	109.50	144.24	325	287.05	163.36			
127	114.74	145.75	331	292.36	163.40			
133	119.98	147.18	337	296.72	163.44			
139	125.22	148.49	343	296.72	163.44			
145	130.46	149.75	349	296.72	163.44			
151	135.69	150.94	355	296.72	163.44			
157	140.93	152.04	361	296.72	163.44			
163	147.04	153.02	367	296.72	163.44			
169	152.28	153.82	373	296.72	163.44			
175	157.52	154.58	379	296.72	163.44			
181	162.75	155.29	385	296.72	163.44			
187	167.99	155.97	391	296.72	163.44			
193	173.23	156.61	397	296.72	163.44			
199	178.46	157.26	403	296.72	163.44			

### 6.2.1 Στοιχεία υπολογισμών της μεθόδου N2

Εμβαδόν που περικλείεται από την αρχική καμπύλη SA-SD:  $64159.83(\text{cm}/\text{sec})^2$

Εμβαδόν που περικλείεται από το ισοδύναμο διγραμμικό σύστημα:  $63807.39(\text{cm}/\text{sec})^2$