

Ανελαστικά φάσματα «Επιταχύνσεων-Μετακινήσεων» στον σχεδιασμό και αποτίμηση κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος

A. N. Κοτσόγλου

MASc, Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτορας Δ.Π.Θ

Σ. Ι. Πανταζοπούλου

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγήτρια Δ.Π.Θ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οπλισμένου

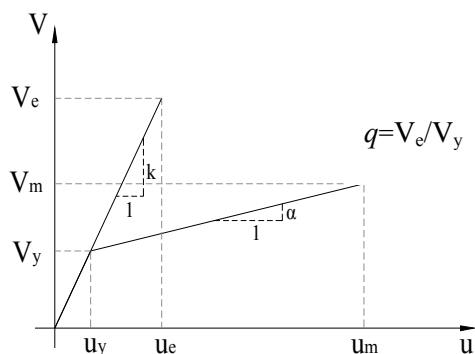
Σκυροδέματος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Δ.Π.Θ), τηλ/φαξ: +30-2541079639, pantaz@civil.duth.gr

Λέξεις κλειδιά: Ανελαστικά φάσματα, Τροποποιητικοί συντελεστές, Συντελεστές q , Φάσματα διαρροής, A.D.R.S, q -factors, Y.P.S

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο προσδιορισμός των ανελαστικών φασμάτων απόκρισης μονοβάθμιων συστημάτων έναντι διεγέρσεων δεδομένων χαρακτηριστικών αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων ερευνών. Ο υπολογισμός των ανελαστικών αυτών φασμάτων μπορεί να πραγματοποιείται με την εφαρμογή επί των αντίστοιχων ελαστικών φασμάτων κατάλληλων τροποποιητικών συντελεστών δύναμης και μετατόπισης (q -Factors, ductility μ). Οι συντελεστές αυτοί, οι οποίοι είναι εξαρτώμενοι από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου συστήματος, προέκυψαν από στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων μεγάλου αριθμού αναλύσεων. Κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί πολλά διαφορετικά μοντέλα «συντελεστών μετασχηματισμού απόκρισης» (response modification factors). Στην προκείμενη εργασία συγκρίνονται τα αναλυτικά εξαγόμενα των μοντέλων αυτών μέσω εφαρμογής τους στα ελαστικά φάσματα των κυριότερων σεισμικών διεγέρσεων του Ελλαδικού χώρου της τελευταίας εικοσαετίας. Διερευνάται η χρήση των ανελαστικών αυτών φασμάτων καθώς και των φασμάτων διαρροής στην διαδικασία αποτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την εφαρμογή κατάλληλων τροποποιητικών συντελεστών (response modification factors - RMF) επί των ελαστικών φασμάτων απόκρισης παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού των αντίστοιχων ανελαστικών φασμάτων συστημάτων μονοβάθμιων ταλαντωτών. Οι εφαρμοζόμενοι αυτοί συντελεστές « q » εκφράζουν το λόγο της απαιτούμενης δύναμης « V_e » για να παραμείνει το σύστημα ελαστικό σε μία συγκεκριμένη επιβαλλόμενη διέγερση, προς την δύναμη διαρροής « V_y » (Σχήμα 1). Άρα με διαίρεση του ελαστικού φάσματος επιταχύνσεων προκύπτει το αντίστοιχο ανελαστικό. Αντίστοιχη μετατροπή γίνεται στον άξονα των μετακινήσεων για την παραγωγή του σχετικού ανελαστικού φάσματος. Ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων που αφορά τον υπολογισμό των συντελεστών τροποποίησης RMF έχει αναπτυχθεί με βάση αποτελέσματα που προέκυψαν είτε από στατιστική επεξεργασία αποκρίσεων συστημάτων δεδομένων χαρακτηριστικών κατά την επιβολή μεγάλου αριθμού καταγεγραμμένων επιταχυνσιογραφημάτων, είτε από αναλύσεις οι οποίες εμπεριέχουν κάποια φυσική βάση όπως συμβαίνει στην περίπτωση μελέτης των αποκρίσεων έναντι προκαθορισμένου σχήματος παλμικών διεγέρσεων (Newmark and Hall 1973, Riddell et al. 1989, Nassar and Krawinkler 1991, Miranda 1993, Vidic et al. 1994, Ordaz and Perez-Rocha 1998, Cuesta and Aschheim 2001). Συνεπώς η διαδικασία υπολογισμού ανελαστικών φασμάτων απόκρισης από τα αντίστοιχα ελαστικά με την χρήση RMF παρέχει αξιόπιστα αλλά όχι μονοσήμαντα αποτελέσματα. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικές ειδικά σε ορισμένα πεδία τιμών της περιόδου « T ».



Σχήμα 1. Διάγραμμα Δύναμης-Μετατόπισης ελαστικού και διγραμμικού μονοβάθμιου συστήματος

Οι τροποποιητικοί συντελεστές « q » δίνονται ως συνάρτηση της απαιτούμενης πλαστιμότητας « μ », της περιόδου « T » και της ιξώδους απόσβεσης « ξ » του υπό εξέταση μονοβάθμιου συστήματος. Με την χρήση λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή (Κοτσόγλου 2003) κατασκευάστηκαν τα ανελαστικά φάσματα γνωστών σεισμικών διεγέρσεων που εκδηλώθηκαν στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια και παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού του εύρους διακύμανσης μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή των διαφόρων διατυπωμένων μοντέλων για τους συντελεστές τροποποίησης.

Δεδομένων των ελαστικών και ανελαστικών φασμάτων απόκρισης είναι δυνατή η εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Από την σύνθεση των φασμάτων των απολύτων επιταχύνσεων με τα φάσματα των σχετικών μετακινήσεων προκύπτουν τα αντίστοιχα φάσματα των «Απολύτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων» (Acceleration Displacement Response Spectra). Με την ταυτόχρονη γραφική απεικόνιση των φασμάτων «A.D.R.S» για διάφορες τιμές του δείκτη συμπεριφοράς « q » δημιουργείται μία δέσμη φασμάτων διαρροής. Με δεδομένη την υπερωθητική καμπύλη ενός μονοβάθμιου συστήματος το οποίο προσομοιώνει την εξεταζόμενη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα και της δέσμης φασμάτων διαρροής που προαναφέρθηκε, παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού πληθώρας παραμέτρων οι οποίες καθορίζουν την σεισμική συμπεριφορά της εν λόγω κατασκευής (Aschheim 2002).

2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΤΙΚΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ « q »

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει διατυπωθεί από πολλούς ερευνητές πλήθος μοντέλων υπολογισμού των συντελεστών « q » τα οποία διαφοροποιούνται τόσο ως προς τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπ' όψη, όσο και ως προς την βαθμονόμηση των παραμέτρων αυτών. Οι σχέσεις λοιπόν « q - μ - T » που προτείνονται, αναφέρονται σε συγκεκριμένες θεωρήσεις και συνθήκες οι οποίες δίνονται περιληπτικά στις επόμενες παραγράφους.

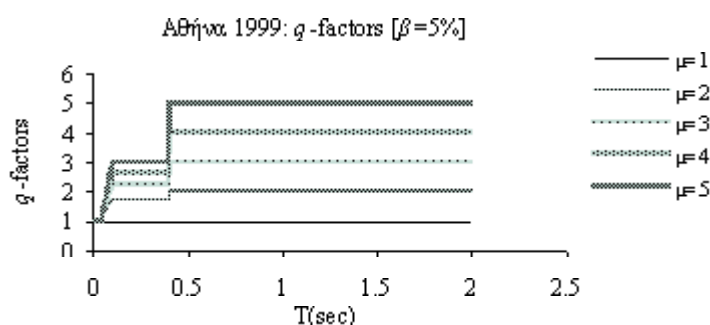
2.1 Το μοντέλο Newmark and Hall (1973)

Σύμφωνα με το μοντέλο Newmark and Hall (1973), ο υπολογισμός του τροποποιητικού συντελεστή « q » έχει ως βάση την μελέτη ενός μεγάλου αριθμού συστημάτων μονοβάθμιων ταλαντωτών ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς με απόσβεση « β » η οποία κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.5% και 20%. Ειδικότερα, η απόσβεση « β » των εξεταζόμενων αυτών συστημάτων λαμβάνει τις τιμές $\beta = 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 10$ και 20%, ενώ αντιστοίχως το εύρος της πλαστιμότητας είχε ως άνω όριο την τιμή $\mu = 10$. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στηρίζονται στην μελέτη τριών διαφορετικών τύπων επιταχυνσιογραφημάτων και παλμικών διεγέρσεων. Ο τροποποιητικός συντελεστής « q » ο οποίος παρέχεται σαν συνάρτηση της πλαστιμότητας « μ » και της περιόδου « T » του συστήματος, δίνεται από τις σχέσεις (1).

$$q = \begin{cases} 1 & T < T_1/10 \\ \sqrt{2 \cdot \mu - 1} \cdot [T_1/4 \cdot T]^{-2.513 \log(\sqrt{2 \cdot \mu - 1})} & T_1/10 \leq T < T_1/4 \\ \sqrt{2 \cdot \mu - 1} & T_1/4 \leq T < T_1' \\ \mu \cdot T/T_1 & T_1' \leq T < T_1 \\ \mu & T_1 \leq T < T_2 \\ \mu & T_2 \leq T < 10 \end{cases} \quad (1)$$

όπου: $T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \Phi_{eu} \cdot u_{g,max} / (\Phi_{ea} \cdot a_{g,max})$, $T_1' = T_1 \cdot \mu / (2 \cdot \mu - 1)^{1/2}$ και
 $T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \Phi_{ed} \cdot d_{g,max} / (\Phi_{eu} \cdot u_{g,max})$

Οι περίοδοι οριοθέτησης T_1 , T_1' και T_2 καθορίζουν το εύρος κάθε υποδιαστήματος περιόδων. Οι τιμές $a_{g,max}$, $u_{g,max}$ και $d_{g,max}$ είναι αντίστοιχα η μέγιστη επιτάχυνση, η μέγιστη ταχύτητα και η μέγιστη μετακίνηση του εδάφους. Τέλος, στις παραπάνω σχέσεις υπεισέρχονται και οι συντελεστές ενίσχυσης Φ_{ed} , Φ_{eu} και Φ_{ea} οι οποίοι εφαρμόζονται επί της μέγιστης μετακίνησης, της μέγιστης ταχύτητας και της μέγιστης επιτάχυνσης του εδάφους αντίστοιχως. Οι συντελεστές ενίσχυσης « Φ_e » δίνονται ως συνάρτηση της απόσβεσης « β » του συστήματος: $\Phi_{ed} = 2.73 - 0.45 \cdot \ln \beta$, $\Phi_{eu} = 3.38 - 0.67 \cdot \ln \beta$ και $\Phi_{ea} = 4.38 - 1.04 \cdot \ln \beta$.



Σχήμα 2. Οι συντελεστές q-factors έτσι όπως προέκυψαν από τις σχέσεις (1) για τον σεισμό των Αθηνών

2.2 Το μοντέλο Riddell et al. (1989)

Για την ανάπτυξη του μοντέλου Riddell et al. (1989), χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι επιταχυνσιογραφημάτων. Τα συστήματα τα οποία μελετήθηκαν διέθεταν σταθερή τιμή απόσβεσης ίση με $\beta = 5\%$, ενώ το εύρος διακύμανσης της πλαστιμότητας είχε ως ανώτατο όριο την τιμή $\mu = 10$. Η μέση τιμή του τροποποιητικού συντελεστή « q » δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$q = \begin{cases} 1 + (q^* - 1) \cdot T/T^* & T/T^* \leq 1 \\ q^* & T/T^* > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Οι μεταβλητές T^* και q^* δίνονται ως συνάρτηση της πλαστιμότητας του συστήματος, και προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή σύμφωνα με τα ζεύγη τιμών που ακολουθούν. Για τιμές πλαστιμότητας του συστήματος: $\mu = 2, 4$ και 8 , οι τιμές της μεταβλητής T^* θα είναι $T^* = 0.1, 0.3$ και 0.4 sec αντίστοιχως, ενώ οι τιμές της μεταβλητής q^* είναι $q^* = 2.0, 4.0$ και 6.8 αντίστοιχως.

2.3 Το μοντέλο Nassar and Krawinkler (1991)

Το μοντέλο Nassar and Krawinkler (1991) στηρίζεται σε αναλύσεις που αφορούν την απόκριση ελαστοπλαστικών, διγραμμικών και μειούμενης δυσκαμψίας συστημάτων (degrading stiffness systems). Για την ανάπτυξη του μοντέλου αυτού χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα με βάση καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Η τιμή της απόσβεσης « β » των εξεταζόμενων συστημάτων ήταν σταθερή και ίση με 5% ενώ αντίστοιχα το εύρος διακύμανσης της πλαστιμότητας είχε ως άνω όριο την τιμή $\mu = 8$. Στις περιοχές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι καταγραφές υπήρχαν είτε εδάφη ίλλος, είτε εδάφη βραχώδους σύστασης. Η τιμή του τροποποιητικού συντελεστή « q » έτσι όπως αυτή προέκυψε μέσα από εκτεταμένες αναλύσεις δίνεται από την σχέση:

$$q = [c \cdot (\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (3)$$

Η παράμετρος c η οποία εμφανίζεται στην σχέση (3), είναι συνάρτηση της περιόδου T του συστήματος, καθώς και της τιμής της κλίσης του κλάδου κράτυνσης « α » (Σχέση 3.1).

$$c(T, \alpha) = T^h / (1 + T^h) + b / T \quad (3.1)$$

Οι παράμετροι h και b οι οποίες υπεισέρχονται στην σχέση (3.1), δίνονται ως συνάρτηση της κλίσης του κλάδου της κράτυνσης α . Για τιμές $\alpha = 0, 2$ και 10% οι αντίστοιχες τιμές της παραμέτρου h θα είναι $h = 1.0, 1.0$ και 0.8, ενώ η παράμετρος b λαμβάνει τις τιμές $b = 0.42, 0.37$ και 0.29. Προκειμένου να είναι δυνατός ο υπολογισμός της παραμέτρου $c(T, \alpha)$ για μία οποιαδήποτε κλίση του κλάδου κράτυνσης α , απαιτείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ως άνω τιμών.

2.4 Το μοντέλο Miranda (1993)

Το μοντέλο Miranda (1993) στηρίζεται στην μελέτη ενός μεγάλου αριθμού καταγεγραμμένων επιταχυνσιογραφήματων (άνω των 100) τα οποία έχουν ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Η κατηγοριοποίηση των καταγραφών αυτών περιλαμβάνει τόσο βραχώδη και μαλακά εδάφη, όσο και εδαφικές συνθέσεις ίλλος. Τα συστήματα επί των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι αναλύσεις είχαν κλίση του κλάδου κράτυνσης $\alpha = 3\%$ και μέγιστη πλαστιμότητα $\mu = 6$:

$$q = 1 + (\mu - 1) / \Phi \geq 1 \quad (4)$$

Ο συντελεστής Φ είναι συνάρτηση των εδαφικών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περίπτωση:

- Για βραχώδη εδάφη: $\Phi = 1 + \frac{1}{10 \cdot T - \mu \cdot T} - \frac{1}{2 \cdot T} \exp \left[-\frac{3}{2} \cdot \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right]$ (4.1)

- Για εδάφη ίλλος: $\Phi = 1 + \frac{1}{12 \cdot T - \mu \cdot T} - \frac{2}{5 \cdot T} \exp \left[-2 \cdot \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right]$ (4.2)

- Για μαλακά εδάφη: $\Phi = 1 + \frac{T_G}{3 \cdot T} - \frac{3 \cdot T_G}{4 \cdot T} \exp \left[-3 \cdot \left(\ln \frac{T}{T_G} - \frac{1}{4} \right)^2 \right]$ (4.3)

Η περίοδος « T_G » των σχέσεων (4.1-4.3), είναι η δεσπόζουσα περίοδος του επιταχυνσιογραφήματος και ορίζεται ως η περίοδος στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη σχετική ταχύτητα για ένα ελαστικό σύστημα με απόσβεση $\beta = 5\%$.

2.5 Το μοντέλο Vidic et al. (1994)

Το μοντέλο Vidic et al. (1994) προέκυψε από την μελέτη συστημάτων διγραμμικής απόκρισης και μειούμενης δυσκαμψίας (Q-model). Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν είκοσι διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα από καταγραφές στην περιοχή της Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, την περιοχή του Μαυροβουνίου, την Χιλή καθώς και της πόλης του Μεξικού. Τα συστήματα επί των οποίων εφαρμόστηκαν οι παραπάνω σεισμικές διεγέρσεις είχαν κλίση του κλάδου κράτνσης ίση με 10% της αρχικής, ενώ το άνω όριο της διακύμανσης της πλαστιμότητας έφθασε την τιμή $\mu = 10$. Η απόσβεση των συστημάτων αυτών ήταν είτε σταθερή και ανάλογη της μάζας, είτε ανάλογη της τρέχουσας δυσκαμψίας. Οι σχέσεις υπολογισμού του τροποποιητικού συντελεστή « q » οι οποίες παρατίθενται (Σχέσεις 5), αφορούν συστήματα διγραμμικής απόκρισης με απόσβεση 5% ανάλογη της μάζας.

$$q = \begin{cases} 1.35 \cdot (\mu - 1)^{0.95} \cdot T / T_a + 1 & T / T_a \leq 1 \\ 1.35 \cdot (\mu - 1)^{0.95} + 1 & T / T_a > 1 \end{cases} \quad (5)$$

Η περίοδος T_a είναι συνάρτηση της πλαστιμότητας « μ » του συστήματος και δίνεται από τον τύπο: $T_a = 0.75 \cdot \mu^{0.2} \cdot T_1$ όπου $T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \Phi_{eu} \cdot u_{g,\max} / (\Phi_{ea} \cdot a_{g,\max})$. Οι τιμές $a_{g,\max}$ και $u_{g,\max}$ εκφράζουν την μέγιστη επιτάχυνση και την μέγιστη ταχύτητα του εδάφους, ενώ οι παράμετροι Φ_{ea} και Φ_{eu} αποτελούν τους αντίστοιχους συντελεστές ενίσχυσης της επιτάχυνσης και της ταχύτητας του εδάφους. Ανάλογα με τις εκάστοτε επικρατούσες συνθήκες, οι τιμές των συντελεστών ενίσχυσης τροποποιούνται κατάλληλα και έτσι ο συντελεστής ενίσχυσης της επιτάχυνσης λαμβάνει την τιμή $\Phi_{ea} = 2.5$, ενώ ο συντελεστής ενίσχυσης της ταχύτητας λαμβάνει τις τιμές $\Phi_{eu} = 2.0, 1.8, 2.6$ και 2.8 για γενική χρήση, για καταγραφές στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, για καταγραφές στην Χιλή και για καταγραφές στην πόλη του Μεξικού επί μαλακών εδαφών αντιστοίχως. Οι παραπάνω συντελεστές αφορούν τιμή απόσβεσης ίση με 5% και δεν συνίσταται η χρήση τους σε περιπτώσεις ύπαρξης χαλαρών εδαφών.

2.6 Το μοντέλο Ordaz and Pèrez-Rocha (1998)

Για την ανάπτυξη του μοντέλου Ordaz and Pèrez-Rocha (1998) χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός επιταχυνσιογραφήματων (περί τα 445) τα οποία έχουν προκύψει από καταγραφές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στις ευρύτερες περιοχές του «Guerrero» και της πόλης του Μεξικού. Τα εξεταζόμενα συστήματα διέθεταν τιμές πλαστιμότητας $\mu = 1.5, 2, 4$ και 8 , ενώ η απόσβεση « β » είχε την τιμή 5%. Ο τροποποιητικός συντελεστής « q » έτσι όπως προκύπτει από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$q = 1 + (\mu - 1) \cdot \left(D(T) / d_{g,\max} \right)^{\xi(\mu)} \quad (6)$$

Η συνάρτηση $\xi(\mu)$ προσδιορίζεται από την σχέση $\xi(\mu) = 0.388 \cdot (\mu - 1)^{0.173}$, ενώ η παράμετρος $d_{g,\max}$ εκφράζει την μέγιστη μετατόπιση του εδάφους. Η τιμή της συνάρτησης $D(T)$ αντιπροσωπεύει την ελαστική μετακίνηση του συστήματος για την τρέχουσα τιμή περιόδου « T » και απόσβεσης « β ». Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να εφαρμόζεται σε ένα ευρύ πεδίο εδαφικών συνθηκών οι οποίες θα συνυπολογίζονται με την χρήση της συνάρτησης $D(T)$. Τέλος, το επιτρεπόμενο εύρος διακύμανσης της απόσβεσης των εξεταζόμενων συστημάτων ορίζεται μεταξύ των τιμών $\beta = 2\%$ και $\beta = 5\%$.

2.7 Το μοντέλο Cuesta and Aschheim (2001)

Η χρήση διαφόρων παλμικών διεγέρσεων για τον προσδιορισμό ανελαστικών φασμάτων απόκρισης κερδίζει έδαφος έναντι των άλλων μοντέλων διεθνώς, καθώς αποδεικνύεται ότι η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων είναι σαφώς καλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες «συμβατικές μεθόδους» (Cuesta and Aschheim 2001c). Εκτεταμένες έρευνες κατά την δεκαετία του 1960, (Veletsos 1969, Veletsos and Vann 1971), οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στην απόκριση που παρουσιάζουν οι κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε μία σεισμική διέγερση και στην απόκριση των ίδιων κατασκευών έναντι μιας παλμικής διέγερσης. Αποδεικνύεται επίσης (Blume 1960, Veletsos and Newmark 1960), ότι η μέγιστη απαίτηση για πλαστιμότητα « μ » δεν εξαρτάται από την διάρκεια της επιβαλλόμενης διέγερσης, αλλά από έναν ή περισσότερους ακανόνιστους κύκλους παλμικής φόρτισης έτσι όπως αυτοί έχουν προκύψει από τις διάφορες καταγραφές. Ο συντελεστής « q », ο οποίος προκύπτει από την μελέτη διαφόρων επιβαλλόμενων παλμικών σχημάτων, εξαρτάται από μία σειρά παραμέτρων όπως η πλαστιμότητα « μ » του συστήματος, το χρησιμοποιούμενο μοντέλο φορτίου-παραμόρφωσης, η περίοδος του συστήματος « T », η περίοδος του παλμού « T_p », καθώς και η μορφή της παλμικής αυτής διέγερσης. Οι αναλύσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι με την εφαρμογή δύο τύπων παλμικών διεγέρσεων είναι δυνατή η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και η γενίκευση των αποτελεσμάτων που αφορούν τον υπολογισμό των ανελαστικών φασμάτων με χρήση των τροποποιητικών συντελεστών «Pulse q -Factors». Πρόκειται για τους παλμούς δευτεροβάθμιας (quadratic) και ημιτονοειδούς (sinusoidal) μορφής με διάρκεια « t_d » και μέγιστη επιτάχυνση « $a_{g,max}$ », με βάση τους οποίους είναι δυνατή η προσέγγιση ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων.

2.7.1 Ο παλμός δευτεροβάθμιας μορφής (Cuesta and Aschheim 2001 c)

Ο παλμός δευτεροβάθμιας μορφής (quadratic pulse) χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη μεγάλου αριθμού επιταχυνσιογραφημάτων. Οι δυνάμεις για τον παλμό αυτόν έχουν υπολογισθεί έτσι ώστε να αναπτύσσεται η οριακή απαιτούμενη πλαστιμότητα σε οποιαδήποτε στιγμή κατά την απόκριση του μονοβάθμιου ταλαντωτή ($0 < t/t_d \leq \infty$). Η τιμή της παραμέτρου « T_p » η οποία ονομάζεται «χαρακτηριστική περίοδος» του παλμού, όσον αφορά το υπό μελέτη παλμικό σχήμα ορίζεται ίση με την διάρκεια του παλμού ($T = t_d$). Το ιστορικό της επιβαλλόμενης επιτάχυνσης « a_g » προσδιορίζεται από τις σχέσεις (7), οι οποίες δίνονται σε κανονικοποιημένη μορφή. Η παλμική μορφή που προκύπτει δίνεται στο Σχήμα 3. Σημειώνεται ότι οι τιμές της επιτάχυνσης είναι ανηγμένες ως προς την μέγιστη τιμή. Ο παλμός δευτεροβάθμιας μορφής, χρησιμοποιήθηκε στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σεισμικών διεγέρσεων με επιτυχία (Cuesta and Aschheim 2001c), με τα εξαγόμενα αποτελέσματα να προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αρχικές καταγραφές.

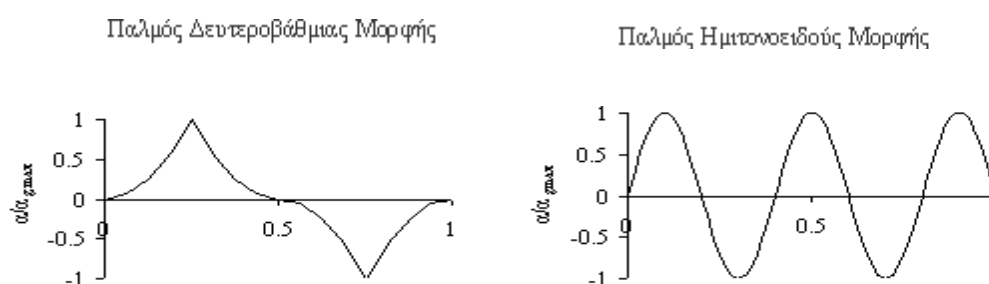
$$a_g / a_{g,max} = \begin{cases} 16 \cdot (t/t_d)^2 & 0 \leq t/t_d < 1/4 \\ 16 \cdot (t/t_d - 1/2)^2 & 1/4 \leq t/t_d < 1/2 \\ -16 \cdot (t/t_d - 1/2)^2 & 1/2 \leq t/t_d < 3/4 \\ -16 \cdot (t/t_d - 1)^2 & 3/4 \leq t/t_d < 1 \end{cases} \quad (7)$$

2.7.2 Ο παλμός ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal pulse) (Cuesta and Aschheim 2001c)

Ο παλμός ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal pulse) χρησιμοποιήθηκε σε περιπτώσεις για τις οποίες δεν είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός των τροποποιητικών συντελεστών «pulse q -Factors» με την εφαρμογή του παλμού δευτεροβάθμιας μορφής. Τέτοιες περιπτώσεις αδυναμίας παροχής αποτελεσμάτων ικανοποιητικής ακρίβειας, αποτελούν οι περίπου αρμονικές καταγραφές οι οποίες είναι λιγότερο συνηθισμένες. Προκειμένου λοιπόν να είναι δυνατή η εξαγωγή ασφαλών

συμπερασμάτων για σεισμικές διεγέρσεις αυτής της μορφής (καταγραφή «Michoacan 1985»), οι ερευνητές (Cuesta and Aschheim 2001c) εφάρμοσαν μία παλμική διεγέρση ημιτονοειδούς μορφής αποτελούμενη από πέντε ημικυκλικούς σχηματισμούς όπως φαίνεται στο Σχήμα 3. Για το εξεταζόμενο παλμικό σχήμα όλες οι υπολογιζόμενες δυνάμεις προσδιορίστηκαν έτσι ώστε η μέγιστη πλαστιμότητα που αναπτύσσεται κατά την επιβαλλόμενη παλμική διεγέρση ($0 < t/t_d \leq 1$) να είναι οριακή. Η τιμή της χαρακτηριστικής περιόδου « T_p » του παλμού ημιτονοειδούς μορφής ορίζεται ίση με τα δύο-πέμπτα της διάρκειας « t_d » και η τιμή της επιτάχυνσης « a_g » ανηγμένη ως προς την μέγιστη παρατηρούμενη επιτάχυνση $a_{g,max}$, δίνεται από την σχέση (8):

$$\frac{a_g}{a_{g,max}} = \sin(5 \cdot \pi \cdot t/t_d) = \sin(2 \cdot \pi \cdot t/T_p) \quad 0 \leq t/t_d \leq 1 \quad (8)$$



Σχήμα 3. Ο παλμός δευτεροβάθμιας (quadratic pulse) και ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal pulse)

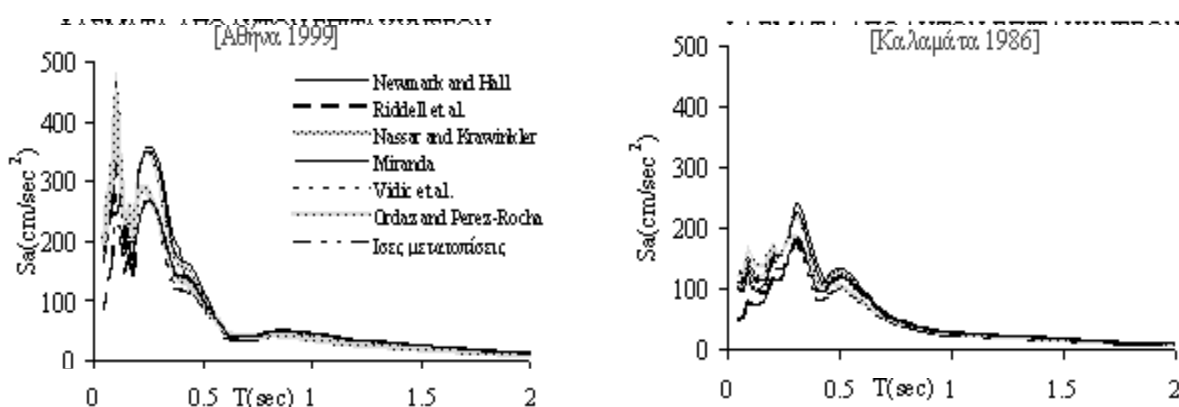
2.7.3 Υπολογισμός του συντελεστή «pulse q-factor»

Από την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την επιβολή των παραπάνω παλμικών διεγέρσεων συμπεραίνεται ότι για πολύ μικρές περιόδους των εξεταζόμενων συστημάτων ($T/t_d = 0.005$) οι υπολογιζόμενοι τροποποιητικοί συντελεστές «pulse q-Factors» δίνονται σαν συνάρτηση της κλίσης του κλάδου της κράτυνσης « α » και ακολουθούν σε κάθε περίπτωση την καμπύλη $q = 1 + \alpha \cdot (\mu - 1)$. Οι τιμές που προκύπτουν είναι ανεξάρτητες της απόσβεσης « β » του συστήματος. Όσον αφορά συστήματα με μεγάλη περίοδο ταλάντωσης, οι μέγιστες ελαστικές και ανελαστικές μετακινήσεις υπολογίζονται ίσες με την μέγιστη μετατόπιση του εδάφους. Για την υστερητική συμπεριφορά των υπό μελέτη συστημάτων, η καμπύλη που αποδίδει τις τιμές του τροποποιητικού συντελεστή δίνεται από την σχέση των «ίσων μετακινήσεων», $q = \mu$.

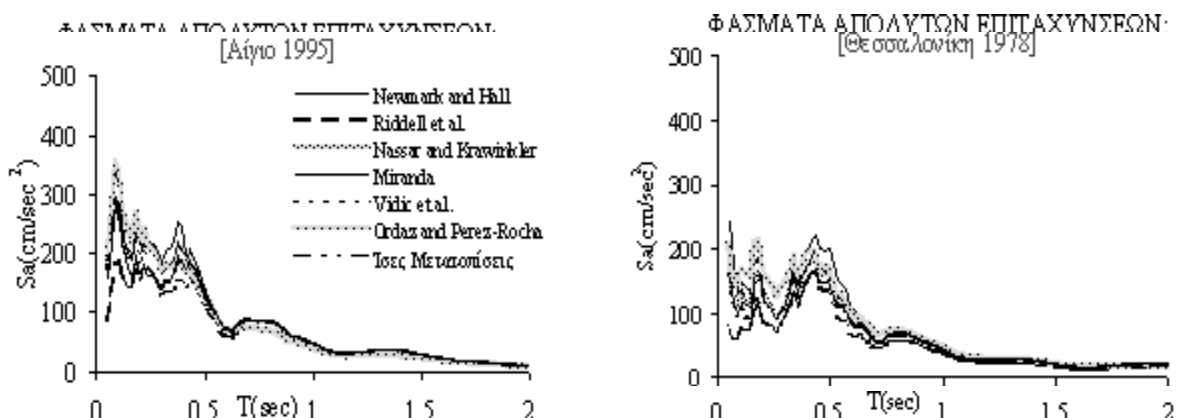
3. ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΙΕΓΕΡΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Ο υπολογισμός των ανελαστικών φασμάτων απόκρισης με την χρήση των διαφόρων σχέσεων « $q-\mu-T$ » πραγματοποιείται με βάση την υιοθέτηση πλήθους θεωρήσεων και παραδοχών, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με το εφαρμοζόμενο μοντέλο ανάλυσης. Κάθε μοντέλο προκύπτει από την μελέτη μεγάλου αριθμού βάσεων δεδομένων ποικίλων χαρακτηριστικών. Η αξιολόγηση και η βαθμονόμηση της συμμετοχής των χαρακτηριστικών αυτών στην απόκριση του μελετούμενου συστήματος πραγματοποιείται με διαφορετικό τρόπο και συνεπώς αναμένεται αρκετά σημαντική διασπορά των παρεχόμενων αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση όμως τα αποτελέσματα αυτά θα κυμαίνονται μεταξύ δύο ακραίων τιμών οι οποίες θα καθορίζονται από τις αντίστοιχες περιβάλλουσες των εξεταζόμενων διαγραμμάτων. Στα παρακάτω, παρατίθεται η γραφική

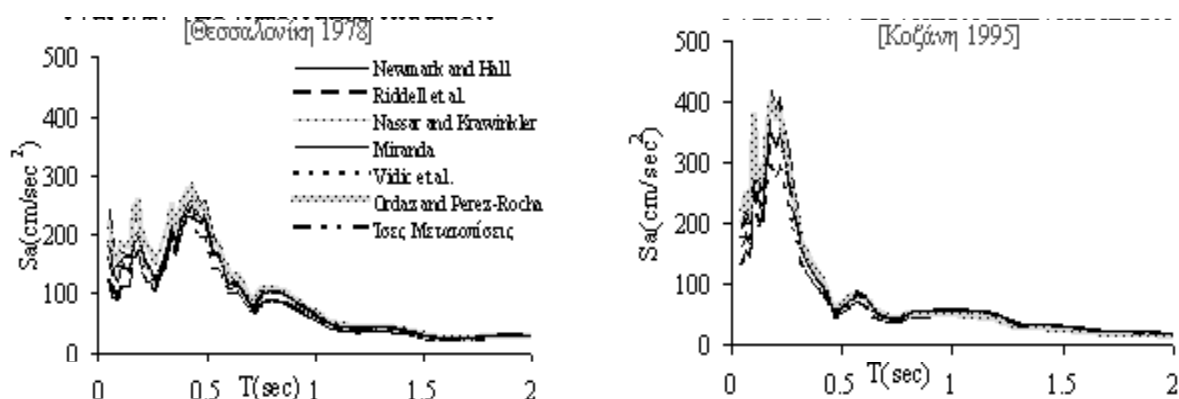
απεικόνιση ανελαστικών φασμάτων επί κοινού συστήματος αξόνων για γνωστά επιταχυνσιογραφήματα του Ελλαδικού χώρου, έτσι όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του συνόλου των σχέσεων που έχουν αναφερθεί για την ίδια τιμή πλαστιμότητας « μ ». Για τους σεισμούς των Αθηνών (1999), της Καλαμάτας (1986), της Θεσσαλονίκης (1978), της Κοζάνης (1995), και του Αιγίου (1995), τα ανελαστικά φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων συστημάτων απόσβεσης $\beta=5\%$ παρατίθενται στα Σχήματα 4, 5, 6. Από τις περιβάλλουσες των παρακάτω απεικονίσεων εξάγεται το συμπέρασμα ότι το εύρος διακύμανσης των εξεταζόμενων μεγεθών σε πολλές περιπτώσεις είναι σημαντικό. Στα φάσματα των απολύτων επιταχύνσεων και ειδικότερα στο πεδίο των μικρών τιμών περιόδου « T », τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζουν σημαντικές διασπορές ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα ανάλυσης. Αντίθετα στο πεδίο των ενδιάμεσων και μεγάλων περιόδων όλες οι τιμές συγκλίνουν ικανοποιητικά.



Σχήμα 4. Το εύρος διακύμανσης των τιμών επιτάχυνσης για $\mu=3$ (Αθήνα 1999, Καλαμάτα 1986)



Σχήμα 5. Το εύρος διακύμανσης των τιμών επιτάχυνσης για $\mu=3$ (Αίγιο 1995, Θεσσαλονίκη 1978)



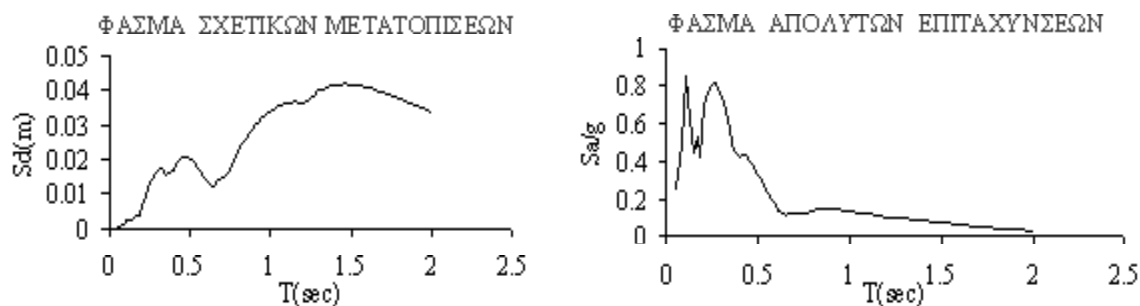
Σχήμα 6. Το εύρος διακύμανσης των τιμών επιτάχυνσης για $\mu=2$ (Θεσσαλονίκη 1978, Κοζάνη 1995)

4. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (Yield Point Spectra)

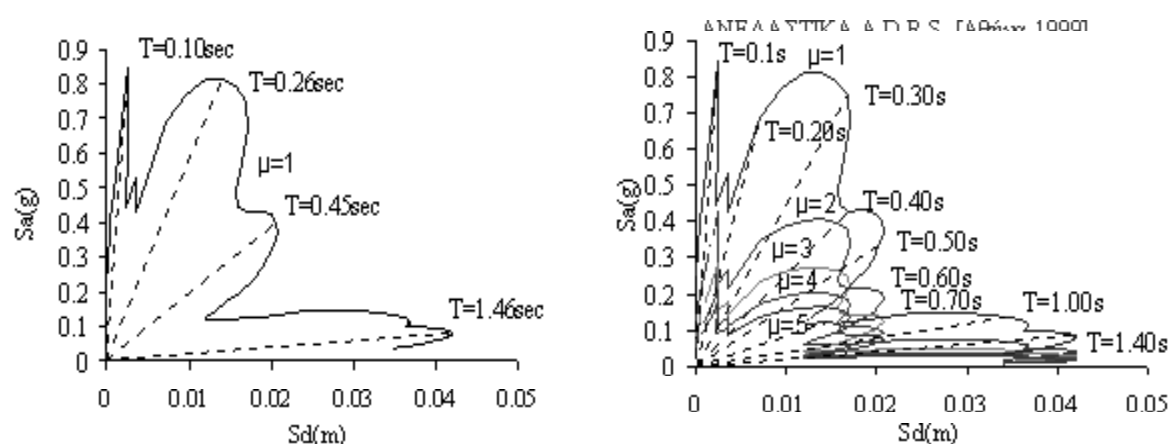
Η συμπεριφορά κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι σεισμικών διεγέρσεων δεδομένων χαρακτηριστικών είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με την χρήση των φασμάτων επιταχύνσεων-μετατοπίσεων «A.D.R.S». Ο συσχετισμός των φασμάτων αυτών με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis) προσδιορίζει τον απαιτούμενο συντελεστή συμπεριφοράς « q ». Εφόσον είναι δεδομένοι και οι συντελεστές τροποποίησης με τους οποίους εξάγονται ανελαστικά φάσματα από το ελαστικό φάσμα της σεισμικής διέγερσης είναι δυνατή η παρεμβολή του κατάλληλου φάσματος από το σημείο διαρροής της υπερωθητικής καμπύλης και άρα ο απ' ευθείας προσδιορισμός της πλαστιμότητας που θα απαιτήσει η εν λόγω διέγερση από την κατασκευή και άρα η ποσοτικοποίηση του αναμενόμενου βαθμού βλάβης. Βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων με την χρήση γραφικών μεθόδων χωρίς να απαιτείται η εκτέλεση πολύπλοκων και χρονοβόρων υπολογισμών.

4.1 Φάσματα απόκρισης των «Απολύτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων»

Τα φάσματα «Απολύτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων» (A.D.R.S) προκύπτουν από την σύνθεση του φάσματος των απολύτων επιταχύνσεων (τεταγμένες) και του αντίστοιχου φάσματος των σχετικών μετατοπίσεων (τετμημένες). Εάν οι τιμές των επιταχύνσεων δίνονται ως αδιάστατα μεγέθη (δηλ. ανηγμένες ως προς την επιτάχυνση της βαρύτητας « g ») τότε ταυτίζονται σημειολογικά με τον σεισμικό συντελεστή του φάσματος σχεδιασμού. Πολλαπλασιαζόμενες με το βάρος της κατασκευής δίνουν το μέγεθος της αναπτυσσόμενης τέμνουσας βάσης. Η περίοδος « T » που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο με συντεταγμένες το ζεύγος τιμών επιτάχυνσης-μετατόπισης, προσδιορίζεται από την κλίση της τέμνουσας ακτίνας που ξεκινάει από το μηδέν και καταλήγει στο σημείο του φάσματος. Από τον υπολογισμό των φασμάτων «A.D.R.S» για διάφορες τιμές πλαστιμότητας προκύπτει μία δέσμη ανελαστικών φασμάτων «Απόλυτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετατοπίσεων» όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.

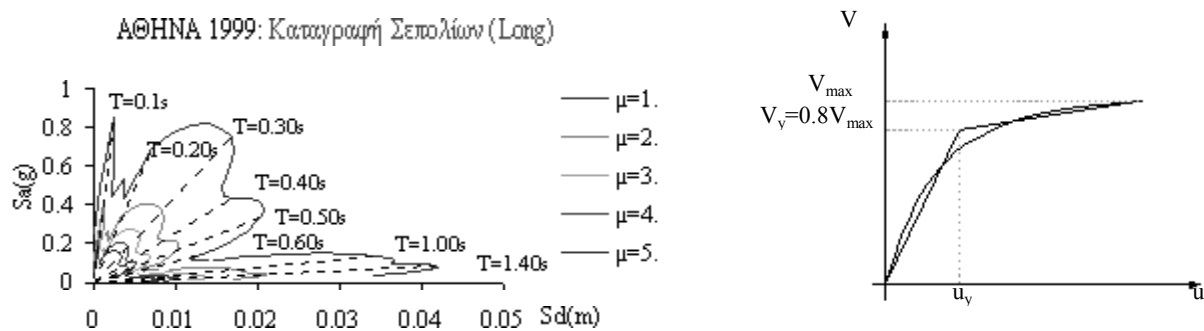


Σχήμα 7. Φάσματα «Σχετικών μετακινήσεων» και «Ψευδοεπιταχύνσεων» (Αθήνα 1999)



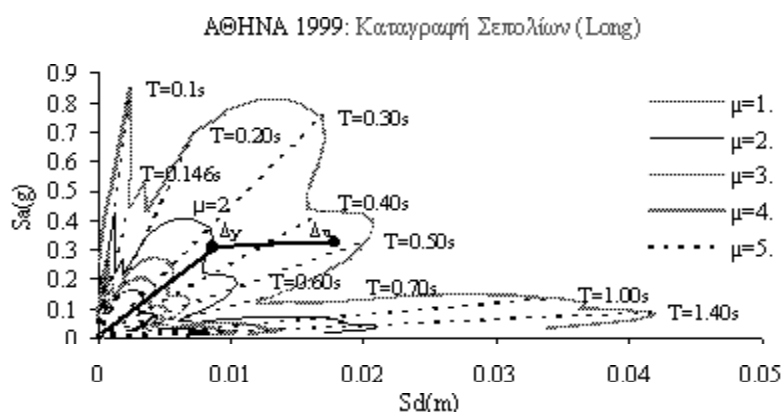
Σχήμα 8. Το φάσμα «Απολύτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων» (A.D.R.S) – Δέσμη ανελαστικών φασμάτων A.D.R.S (Capacity Spectrum)

Την στιγμή που το εξεταζόμενο μονοβάθμιο σύστημα διαρρέει, οι μετακινήσεις του θα δίνονται από την σχέση: $\Delta = \Delta_{inel} / \mu$ (όπου Δ_{inel} οι ανελαστικές μετακινήσεις) και συνεπώς τα φάσματα διαρροής (Yield Point Spectra) των «Απολύτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων» θα προκύπτουν από τα ελαστικά «A.D.R.S» με αναγωγή του άξονα των τετμημένων ως προς την τιμή της πλαστιμότητας « μ » (Σχήμα 9). Η σεισμική ικανότητα ενός ισοδύναμου συστήματος μονοβάθμιου ταλαντωτή είναι δυνατόν να προσδιορίζεται γραφικά με την ταυτόχρονη απεικόνιση επί κοινού συστήματος αξόνων τόσο της απλοποιημένης διγραμμικής υπερωθητικής καμπύλης (Pushover Curve), όσο και των σεισμικών απαιτήσεων οι οποίες αντιστοιχούν στα φάσματα διαρροής «Επιταχύνσεων-Μετατοπίσεων» (Y.P.S) (Aschheim 2002).



Σχήμα 9. Δέσμη φασμάτων διαρροής (Αθήνα 1999) – Προτεινόμενη ισοδύναμη διγραμμική απόκριση

Με απλή παράθεση των φασμάτων διαρροής «Απόλυτων επιταχύνσεων-Σχετικών μετακινήσεων» και της ισοδύναμης διγραμμικής υπερωθητικής καμπύλης παρέχεται η δυνατότητα εύρεσης της απαιτούμενης πλαστιμότητας « μ » και της μέγιστης μετατόπισης του συστήματος (Σχήμα 10).



Σχήμα 10. Προσδιορισμός της απαιτούμενης πλαστιμότητας « μ »

Όλα τα μεγέθη που αναφέρονται αφορούν σε συστήματα μονοβάθμιων ταλαντωτών. Για την μελέτη πολυβάθμιων συστημάτων με την χρήση της μεθόδου αυτής απαιτείται η μετατροπή τους σε ισοδύναμα μονοβάθμια συστήματα. Για την ερμηνεία των εξαγόμενων αποτελεσμάτων που αφορούν πολυβάθμια συστήματα και προκύπτουν από το παραπάνω διάγραμμα απαιτείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός. Σύμφωνα λοιπόν με την εξεταζόμενη μέθοδο η απαιτούμενη πλαστιμότητα « μ », θα προσδιορίζεται από το εκείνο το φάσμα διαρροής A.D.R.S που διέρχεται από το μονοσήμαντα ορισμένο σημείο διαρροής της διγραμμικής υπερωθητικής καμπύλης του συστήματος. Η μέγιστη μετακίνηση Δ_{\max} που είναι δυνατό να αναπτυχθεί λόγω της συγκεκριμένης επιβαλλόμενης σεισμικής διέγερσης προκύπτει από την σχέση $\Delta_{\max} = \mu \cdot \Delta_y$.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς με την χρήση ανελαστικών φασμάτων και φασμάτων διαρροής αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο και αρκετά αξιόπιστο εργαλείο ανάλυσης. Ο προσδιορισμός

των φασμάτων αυτών μπορεί να πραγματοποιείται με την χρήση των τροποποιητικών συντελεστών « q » έτσι όπως αυτοί προκύπτουν από τα διάφορα διατυπωμένα μοντέλα. Σημαντική παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπ' όψη στους υπολογισμούς αποτελεί η διασπορά των αποτελεσμάτων που εμφανίζονται ανάλογα με το προτεινόμενο μοντέλο τροποποίησης αφού για την ίδια τιμή πλαστικότητας οι τιμές επιτάχυνσης που υπολογίζονται σε ορισμένα πεδία τιμών της περιόδου « T » διαφέρουν κατά πολύ.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Aschheim, M. 2002. Seismic design based on the yield displacement, *Earthquake Spectra*. EERI, 18(4): 581-600
- Blume, J.A. (1960). A reserve energy technique for earthquake design and rating of structures in inelastic range. Proc., 2nd World Conf. Earthquake Engrg., Science Council of Japan, Tokyo, II, 1061-1083.
- Cuesta, I., and Aschheim, M. 2001a. Using pulse R -factors to estimate structural response to earthquake ground motions. Mid-America Earthquake Center Report Series, CD Release 01-03, University of Illinois, Urbana (March).
- Cuesta, I., and Aschheim, M. 2001b. Isoductile strengths and strength reduction factors of elasto-plastic SDOF systems subjected to simple waveforms. *Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics*, J. Wiley, 30(7): 1043-1059.
- Cuesta, I., and Aschheim, M. 2001c. Inelastic Response Spectra Using Conventional and Pulse R -factors. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 127(9): 1257-1281.
- Cuesta, I., Aschheim, M., and Fajfar P., 2003. Simplified R-factor Relationships for Strong Ground Motions. *Earthquake Spectra*. EERI, 19(1): 25-45
- Fajfar, P. 2000. A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16(3): 573-592.
- FEMA-274 1997. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. FEMA-274, Federal Emergency Management Agency, October.
- Κοτσόγλου Α.Ν. 2003. Λογισμικό υπολογισμού φασμάτων απόκρισης και εκτίμησης της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχ., Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, 125 pp.
- Miranda, E. 1993. Site-dependent strength reduction factors. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 119(12): 3503-3519
- Nassar, A.A., and Krawinkler, H. 1991. Seismic demands for SDOF and MDOF systems. Rep. No. 95, John A. Blume Earthquake Engrg. Ctr., Stanford University, Cal.
- Newmark, N. M., and Hall W. J 1973. Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. Building Practices for Disaster Mitigation, Rep. No. 46, Nat. Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 209-236.
- Ordaz, M, and Pérez-Rocha, L. E. 1998. Estimation of strength-reduction factors for elasto-plastic systems: New approach. *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, J. Wiley, 27: 889-901.
- Riddell, R., Hidalgo, P., and Cruz, E. (1989). Response modification factors for earthquake resistant design of short period structures. *Earthquake Spectra*, EERI, 5(3): 571-590.
- Veletsos, A.S. (1969). Maximum deformations of certain nonlinear systems. Proc., 4th World Conf. Earthquake Engrg., Santiago, Chile, Vol. 2, 155-170.
- Veletsos, A.S., and Newmark, N. M. (1960). Effect of inelastic behavior on response of simple systems to earthquake motions. Proc., 2nd World Conf. Earthquake Engrg., Science Council of Japan, Tokyo, Vol. 2: 895-912.
- Veletsos, A.S., and Vann, W.P. (1971). Response of ground-excited elasto-plastic systems. *J. Struct. Div.*, ASCE, 97(4), 1257-1281.
- Vidic, T., Fajfar, P., and Fischinger, M. 1994. Consistent inelastic design spectra: Strength and displacement. *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, J. Wiley, 23, 507-521.