

Μέθοδος Φασματικής Ικανότητας Βασισμένη σε Ανελαστικά Φάσματα Απόκρισης για Κατασκευές με Αποσβεστήρες Ιξώδους

Κοσμάς Μπαντίλας

MSc, Πολ. Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ

Ιωάννης Καββαδίας

Υποψήφιος. Διδάκτωρ, Πολ. Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ

Λάζαρος Βασιλειάδης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ

Εισαγωγή

Η φιλοσοφία των παθητικών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας βασίζεται στη ιδέα της κατανάλωσης σεισμικής ενέργειας σε προκαθορισμένα πρόσθετα μέλη της κατασκευής (παθητικά συστήματα) τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του συστήματος ανάληψης των κατακόρυφων φορτίων και μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα σε περίπτωση βλάβης (Constantinou *et al.* 1993). Παθητικά συστήματα απορρόφησης σεισμικής ενέργειας υπό τη μορφή ιξωελαστικών αποσβεστήρων ή αποσβεστήρων ιξώδους απόσβεσης συντελούν στην αύξηση της ενεργού απόσβεσης της κατασκευής και επομένως στη μείωση των σεισμικών απαιτήσεων και η εφαρμογή τους μελετάται συστηματικά από τις αρχές τις δεκαετίας του 1990 όπου και αναπτύχθηκαν οι πρώτες κανονιστικές διατάξεις για την χρήση τέτοιων συστημάτων σε κατασκευές (Whitteker *et al.* 1993).

Ωστόσο παρά τη βελτίωση της σεισμικής απόκρισης μέσω των παθητικών συστημάτων, βασική μέριμνα κατά την ανάλυση και τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών με ή χωρίς συστήματα απόσβεσης αποτελεί ο έλεγχος και ο περιορισμός των αναμενόμενων μετατοπίσεων. Δεδομένου ότι όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί τόσο για το σχεδιασμό όσο και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών δέχονται πως η κατασκευή θα αποκριθεί ανελαστικά, η ακριβέστερη μέθοδος ανάλυσης είναι η Μη Γραμμική Δυναμική Ανάλυση. Ωστόσο, οι κανονισμοί επιτρέπουν την εφαρμογή απλοποιημένων στατικών αναλύσεων όπως η Γραμμική Στατική Ανάλυση (FEMA 273, FEMA 368) και η Μη Γραμμική Στατική Ανάλυση (FEMA 273).

Αν και η ακρίβεια των απλοποιητικών μεθόδων έχει εξεταστεί εκτενώς τόσο για τις ελαστικές μεθόδους (Sadek *et al.* 2000) όσο και τις ανελαστικές (Tsopeles *et al.* 1997, Ramirez *et al.* 2002), η μη γραμμική στατική ανάλυση παρέχει μια ακριβέστερη εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης στις περιπτώσεις που η κατασκευή αναμένεται να αποκριθεί ανελαστικά.

Η μη γραμμική στατική ανάλυση που παρουσιάζεται στον FEMA 274 (Method 2) βασίζεται στη Μέθοδο της Φασματικής Ικανότητας (ΜΦΙ) η οποία αναπτύχθηκε αρχικά από τον Freeman (1978). Στις περισσότερες σχεδόν διατυπώσεις της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης που έχουν διερευνηθεί κατά καιρούς, με δεδομένο το φάσμα ικανότητας της κατασκευής και ένα ελαστικό φάσμα απαίτησης, συνήθως με απόσβεση $\xi=5\%$, το σημείο επιτελεστικότητας προκύπτει από την εξισορρόπηση της απαίτησης με την ικανότητα, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Κατά την επαναληπτική διαδικασία εισάγεται ένας ισοδύναμος ελαστικός μονοβάθμιος ταλαντωτής με ιδιοπερίοδο T_{eff} και ιξώδη απόσβεση ξ_{eff} . Με προσδιορισμένο το μέγεθος της ενεργού απόσβεσης πραγματοποιείται απομείωση του ελαστικού φάσματος μέσω μειωτικών συντελεστών απόσβεσης (B). Τιμές του

συντελεστή B υπάρχουν διαθέσιμες στη σχετική βιβλιογραφία για διάφορα επίπεδα απόσβεσης (Sadek *et al.* 2000, Ramirez *et al.* 2002, Palermo *et al.* 2013).

Μια εναλλακτική μορφή της ΜΦΙ με χρήση ανελαστικών φασμάτων έχει διερευνηθεί από τους Chopra and Goel (1999) καθώς και τον Fajfar (1999) για κατασκευές χωρίς συστήματα απόσβεσης. Η μέθοδος διαφέρει από την κλασική μορφή της ΜΦΙ καθώς δεν χρησιμοποιείται η έννοια του ισοδύναμου ελαστικού μονοβάθμιου ταλαντωτή αλλά η απομείωση του φάσματος απαίτησης πραγματοποιείται μέσω προσεγγιστικών σχέσεων που συνδέουν τον συντελεστή συμπεριφοράς της κατασκευής R με την πλαστιμότητα μ . Σχέσεις αυτής της μορφής υπάρχουν διαθέσιμες στη βιβλιογραφία (Miranda and Bertero 1994) και συχνά αναφέρονται ως σχέσεις $R - \mu - T$. Ωστόσο οι προτεινόμενες σχέσεις $R - \mu - T$ έχουν κατασκευαστεί για ποσοστό απόσβεσης 5%. Εξαίρεση αποτελεί η εργασία των Riddell and Newmark (1979) και Palermo *et al.* (2013) όπου προτείνονται σχέσεις $R - \mu - T$ για συστήματα με ιξώδη απόσβεση έως $\xi=10\%$. Τέλος, οι Ramirez *et al.* (2002), χωρίς τη χρήση σχέσεων $R - \mu - T$, συσχέτισαν την ελαστική μετατόπιση με την αναμενόμενη ανελαστική μέσω ενός συντελεστή C_1 , λαμβάνοντας υπόψη την πρόσθετη απόσβεση.

Με δεδομένο πως τα ανελαστικά φάσματα θεωρούνται ακριβέστερα από τα ελαστικά, ειδικά σε δύσκαμπτα συστήματα αλλά και στην περίπτωση υψηλών τιμών πλαστιμότητας (Chopra and Goel 1999, Fajfar 1999), στην παρούσα εργασία, για την εκτίμηση των αναμενόμενων παραμορφώσεων σε κατασκευές με αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης χρησιμοποιείται η ΜΦΙ βασισμένη σε ανελαστικά φάσματα απόκρισης. Δεδομένου ότι βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί ο προσδιορισμός της ενεργού απόσβεσης της κατασκευής, διερευνάται μια απλοποιημένη ιδιομορφική ιξώδης απόσβεση, της οποίας η αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα ελέγχεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από τις προτεινόμενες από τους κανονισμούς σχέσεις. Επίσης παρουσιάζονται μειωτικοί συντελεστές απόσβεσης (B) για τον προσδιορισμό της απαίτησης ελαστικών συστημάτων με υψηλή απόσβεση, καθώς και σχέσεις $R - \mu - T$ για συστήματα με ποσοστό απόσβεσης ως 50%. Επιπλέον, προτείνονται διορθωτικοί συντελεστές ψευδοταχύτητας (B_V). Τέλος γίνεται εφαρμογή της ΦΜΙ με ανελαστικά φάσματα υψηλής απόσβεσης σε τετραώροφο πλαίσιο ωπλισμένου σκυροδέματος.

2. Φασματική μέθοδος αποτίμησης για κατασκευές με ιξώδης αποσβεστήρες

Στη παρούσα εργασία για την αποτίμησης της σεισμικής απόκρισης κατασκευών που εφοδιάζονται με επιπρόσθετους αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης προτείνεται μία μέθοδος φασματικής ικανότητας βασισμένη σε ανελαστικά φάσματα διαρροής. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία το σημείο επιτελεσματικότητας προκύπτει από τη σχέση μεταξύ του συντελεστή συμπεριφοράς R με την πλαστιμότητα παραμορφώσεων του συστήματος μ , χωρίς να χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η υστερητική απόσβεση, πάρα μόνο το άθροισμα της ιξώδους με την επιπρόσθετη απόσβεση από τους αποσβεστήρες. Για αυτόν τον λόγο εξετάζεται μία απλοποιητική ιδιομορφική απόσβεση για τον προσδιορισμό της επιπρόσθετης απόσβεσης από τους αποσβεστήρες. Η ιδιομορφική ιξώδης απόσβεση υπολογίζεται μετασχηματίζοντας την εξίσωση κίνησης του πολυβάθμιου ταλαντωτή με απόσβεση με τα ιδιοδιανύσματα χωρίς απόσβεση.

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η κατασκευή του φάσματος ικανότητας της κατασκευής μέσω στατικής ανελαστικής ανάλυσης καθώς και η μετατροπή του φάσματος σε ισοδύναμο διγραμμικό. Με δεδομένο το ελαστικό φάσμα απαίτησης για απόσβεση 5%, η ελαστική απαίτηση για ξ_{eff} προσδιορίζεται εφαρμόζοντας μειωτικούς συντελεστές B ως εξής:

$$S_d(T, \xi_{eff}) = \frac{S_d(T, 5\%)}{B(T, \xi_{eff})} \quad (1)$$

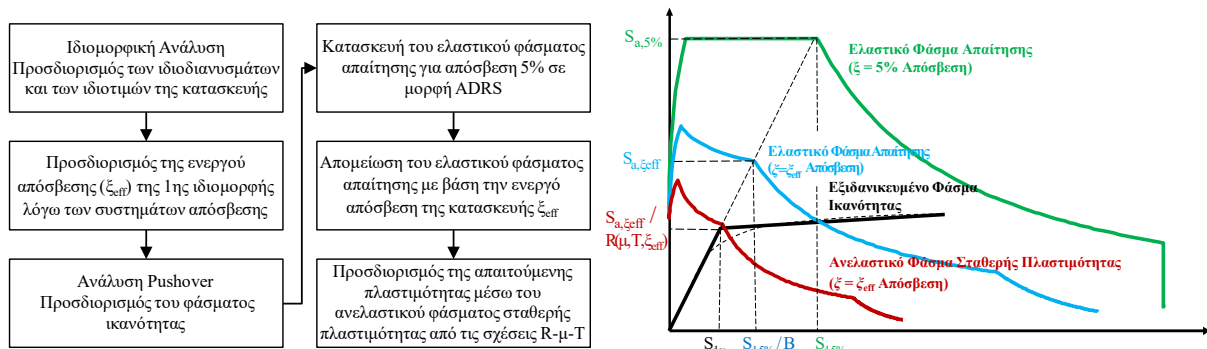
όπου $S_d(T, 5\%)$, είναι η απαιτούμενη μετατόπιση για απόσβεση 5% , $S_d(T, \xi_{eff})$ είναι η απαιτούμενη μετατόπιση για απόσβεση ξ_{eff} και $B(T, \xi_{eff})$ είναι ο μειωτικός συντελεστής για απόσβεση ξ_{eff} .

Μετέπειτα, το ανελαστικό φάσμα απαίτησης για απόσβεση ξ_{eff} κατασκευάζεται με τη χρήση σχέσεων $R - \mu - T$. Το ανελαστικό φάσμα σταθερής πλαστιμότητας κατασκευάζεται ως εξής:

$$S_{d,y}(T, \xi_{eff}) = \frac{S_{d,el}(T, \xi_{eff})}{R(\mu, T, \xi_{eff})} \quad (2)$$

όπου $S_{d,el}(T, \xi_{eff})$ είναι η απαιτούμενη μετατόπιση για ελαστική απόκριση και απόσβεση ξ_{eff} , $S_{d,y}(T, \xi_{eff})$ είναι η απαιτούμενη μετατόπιση στη διαρροή με απόσβεση ξ_{eff} , και $R(\mu, T, \xi_{eff})$ είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς για πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ και απόσβεση ξ_{eff} .

Τέλος, το σημείο επιτελεστικότητας υπολογίζεται από το ανελαστικό φάσμα στη διαρροή όπως έχει αναπτυχθεί από τους Aschheim and Black (2000). Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθόδου φασματικής ικανότητας καθώς και η γραφική της απεικόνιση περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 1 Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Εκτός από τις αναμενόμενες μετατοπίσεις, απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός των αναμενόμενων δυνάμεων που αναπτύσσονται στους αποσβεστήρες. Με δεδομένο πως οι αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης αποτελούν συσκευές εξαρτώμενες από την ταχύτητα φόρτισης, απαιτείται ο προσδιορισμός της σχετικής ταχύτητας των άκρων του αποσβεστήρα. Εάν η φασματική ταχύτητα S_v που αντιστοιχεί στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής είναι γνωστή τότε η δύναμη των αποσβεστήρων δίνεται από τη σχέση:

$$F_{D,i} = \Gamma^* S_v(T) \varphi_{ij} C_i \cos \theta_i \quad (3)$$

όπου $F_{D,i}$ είναι η δύναμη απόσβεσης της συσκευής i , θ_i η γωνία της συσκευής i με τον οριζόντιο άξονα, C_i ο συντελεστής απόσβεσης της συσκευής i και φ_{ij} οι ιδιομορφικές συντεταγμένες της πρώτης ιδιομορφής μεταξύ των ακρών της συσκευής i .

Ωστόσο στην πράξη το φάσμα των ταχυτήτων δεν είναι γνωστό και αντί αυτού χρησιμοποιείται το ψευδοφάσμα των ταχυτήτων. Επομένως, η θεώρηση ισότητας μεταξύ ταχύτητας και ψευδοταχύτητας δεν ισχύει σε όλο το εύρος του φάσματος (Sadek et al. 2000). Για το λόγο αυτό η εκτίμηση της φασματικής ταχύτητας γίνεται μέσω ενός διορθωτικού συντελεστή B_v .

Συμβατικές θεωρήσεις για τον υπολογισμό της ενεργού απόσβεσης

Ο υπολογισμός της ιξώδους απόσβεσης που παρέχεται τόσο από το σύστημα απόσβεσης όσο και από την υστερητική απόκριση του ταλαντωτή προσδιορίζεται μέσω του λόγου της ενέργειας που καταναλώνεται σε ένα κύκλο φόρτισης W_{Diss} προς το έργο των δυνάμεων επαναφοράς του ισοδύναμου ελαστικού ταλαντωτή W_R μέσω της Σχέσης (4) (FEMA 273, Chopra 2001).

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{W_{Diss}}{W_R} \quad (4)$$

όπου στην περίπτωση των αποσβεστήρων ιξώδους η Σχέση (4) παίρνει τη μορφή:

$$\xi_D = \frac{T_{eff} \sum c_j \cos^2 \theta_j \varphi_{rj}^2}{4\pi \sum m_i \varphi_i^2} \quad \text{ή} \quad \xi_D = \frac{\sqrt{\mu} T_{el} \sum c_j \cos^2 \theta_j \varphi_{rj}^2}{4\pi \sum m_i \varphi_i^2} \quad (5)$$

όπου c_j , ο συντελεστής απόσβεσης της συσκευής “j”; θ_j , η κλίση που σχηματίζει με την οριζόντιο η συσκευή “j”; φ_{rj} , η σχετική φασματική μετατόπιση των άκρων της συσκευής “j”; T_{eff} , η ιδιοπερίοδος που αντιστοιχεί στην τέμνουσα δυσκαμψία για επίπεδο πλαστιμότητας “μ”. Από τη Σχέση (5) φαίνεται πως το μέγεθος της πρόσθετης απόσβεσης εξαρτάται από την ενεργό ιδιοπερίοδο του ισοδύναμου ελαστικού ταλαντωτή.

Προτεινόμενη Μέθοδος για τον υπολογισμό της ενεργού απόσβεσης

Κατ’ αντιστοιχία με τα γραμμικά συστήματα χωρίς απόσβεση, η απόκριση ενός πολυβάθμιου ταλαντωτή με απόσβεση μπορεί να προκύψει από την επαλληλία αποκρίσεων αρμονικών ταλαντώσεων ισοδύναμων μονοβάθμιων ταλαντωτών. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα των ιδιοτιμών παίρνει τη μορφή:

$$(\lambda^2 \mathbf{m} + \lambda \mathbf{c} + \mathbf{k}) \boldsymbol{\phi} = 0 \quad (6)$$

Το παραπάνω πρόβλημα αποτελεί ένα τετραγωνικό πρόβλημα ιδιοτιμών που η λύση του οδηγεί σε μιγαδικές ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα. Επειδή η διαδικασία επίλυσης του τετραγωνικού προβλήματος των ιδιοτιμών απαιτεί περίπου οκτώ φορές περισσότερους υπολογισμούς σε σχέση με το πρόβλημα των ιδιοτιμών συστημάτων χωρίς απόσβεση (Chopra 2001), ένας προσεγγιστικός τρόπος για την εκτίμηση της απόκρισης πολυβάθμιων ταλαντωτών με απόσβεση περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό της εξίσωσης κίνησης του συστήματος με απόσβεση με τα ιδιοδιανύσματα της κίνησης χωρίς απόσβεση. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση κίνησης σε όρους ιδιομορφικών συντεταγμένων παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{M}^* \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^* \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^* \mathbf{q} = -\mathbf{L}^* \ddot{u}_g(t) \quad (7)$$

όπου $\mathbf{M}^* = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \boldsymbol{\Phi}$, μητρώο γενικευμένης μάζας; $\mathbf{C}^* = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{c} \boldsymbol{\Phi}$, μητρώο γενικευμένης απόσβεσης; $\mathbf{K}^* = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{k} \boldsymbol{\Phi}$, μητρώο γενικευμένης δυσκαμψίας; $\mathbf{L}^* = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \boldsymbol{\delta}$, συντελεστές διέγερσης.

Στην παραπάνω εξίσωση το μητρώο της γενικευμένης απόσβεσης δεν είναι απαραίτητα διαγώνιο, με αποτέλεσμα η παραπάνω διαδικασία να οδηγεί σε n συζευγμένους μονοβάθμιους ταλαντωτές (Chopra 2001). Στην πράξη μπορούν να παραληφθούν τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της διαγωνίου. Έτσι η διαφορική εξίσωση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή που αντιστοιχεί στην ιδιομορφή k ενός πολυβάθμιου συστήματος με γραμμική ιξώδη απόσβεση λόγω αποσβεστήρων ($\alpha = 1$) και ιξοελαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{M}_k^* \ddot{q}_k + \mathbf{C}_k^* \dot{q}_k + \mathbf{K}_k^* q_k = -\Gamma_k^* \mathbf{M}_k^* \ddot{u}_g(t) \quad (8)$$

όπου $\mathbf{M}_k^* = \varphi_{k,i} m_{ij} \varphi_{k,j}$, η γενικευμένη μάζα της k ιδιομορφής; $\mathbf{C}_k^* = \varphi_{k,i} c_{ij} \varphi_{k,j}$, η γενικευμένη απόσβεση της k ιδιομορφής; $\mathbf{K}_k^* = \varphi_{k,i} k_{ij} \varphi_{k,j}$, η γενικευμένη δυσκαμψία της k ιδιομορφής; $\mathbf{L}_k^* = \varphi_{k,i} m_{ij} \delta_j$, συντελεστές διέγερσης της k ιδιομορφής.

Θεωρώντας πως η απόκριση του πολυβάθμιου συστήματος μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά από την πρώτη ιδιομορφή, η ενεργός απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\xi_{eff} = \xi_o + \frac{C_1^*}{2M_{1,eff}^* / \Gamma_1^{*2} \omega_1} \quad (9)$$

Όπου ξ_o , ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης της κατασκευής χωρίς αποσβεστήρες; $C_1^* = \phi_{1,i} \cdot c_{ij} \cdot \phi_{1,j}$, γενικευμένη απόσβεση της πρώτης ιδιομορφής; $M_{1,eff}^* = (\Gamma_1^*)^2 M_1^*$, ενεργός ιδιομορφική μάζα της πρώτης ιδιομορφής; $\Gamma_1^* = L_1^* / M_1^*$, ο συντελεστής συμμετοχής της πρώτης ιδιομορφής; ω_1 , η κυκλική συχνότητα της πρώτης ιδιομορφής.

Οι όροι c_{ij} του μητρώου απόσβεσης C_D , εκφράζουν τη δύναμη απόσβεσης στο βαθμό ελευθερίας i όταν επιβληθεί μοναδιαία ταχύτητα στο βαθμό ελευθερίας j . Η δύναμη απόσβεσης F_D δίνεται από τη σχέση:

$$F_D = c_D |\dot{\mathbf{u}}_{//}|^a \text{sgn}(\dot{\mathbf{u}}_{//}) \quad (10)$$

όπου c_D , η σταθερά απόσβεσης του αποσβεστήρα; a , εκθέτης με τιμές $0.1 \div 1$; $\dot{\mathbf{u}}_{//}$ η σχετική ταχύτητα μετατόπισης των άκρων του αποσβεστήρα παράλληλα στη διεύθυνση του.

Έστω ταλαντωτής με n βαθμούς ελευθερίας που η κάθε μάζα m_i συνδέεται με την προηγούμενη με ιξώδη αποσβεστήρα ο οποίος διαθέτει σταθερά απόσβεσης c_i και σχηματίζει γωνία με την οριζόντιο θ_i . Το μητρώο απόσβεσης C_D μπορεί να υπολογιστεί ως εξής: κάθε φορά ένας βαθμός ελευθερίας κινείται με μοναδιαία ταχύτητα $\dot{\mathbf{u}}_i = \bar{1}$ ενώ ταυτόχρονα οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας παραμένουν ακίνητοι. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του αποσβεστήρα i παράλληλα στη διεύθυνσή του προκύπτει:

$$\dot{\mathbf{u}}_{//,i} = \dot{\mathbf{u}}_i \cos \theta_i = \cos \theta_i \quad (11)$$

και η αντίστοιχη δύναμη:

$$F_{d,i} = c_i \cos^\alpha \theta_i |\dot{\mathbf{u}}_{//,i}|^a \text{sgn}(\dot{\mathbf{u}}_{//,i}) = c_i \cos^\alpha \theta_i \quad (12)$$

ενώ η οριζόντια προβολή της δύναμης του αποσβεστήρα προκύπτει:

$$F_{d,x,i} = c_i \cos^{\alpha+1} \theta_i |\dot{\mathbf{u}}_{//,i}|^a \text{sgn}(\dot{\mathbf{u}}_{//,i}) = c_i \cos^{\alpha+1} \theta_i \quad (13)$$

Από την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε μάζα m_i λόγω των αποσβεστήρων προκύπτει πως οι όροι $c_{D,ij}$ του μητρώου απόσβεσης C_D δίνονται από τη σχέση

$$- \text{Για } i=j \quad C_{i,j} = c_i \cos^{\alpha+1} \theta_i + c_{i+1} \cos^{\alpha+1} \theta_{i+1} \quad (14a)$$

$$- \text{Για } j=i+1 \text{ ή } i-1 \quad C_{i,j} = -c_j \cos^{\alpha+1} \theta_j \quad (14b)$$

$$- \text{Σε κάθε άλλη περίπτωση} \quad C_{i,j} = 0 \quad (14\gamma)$$

Ελαστικά Φάσματα Υψηλής Απόσβεσης

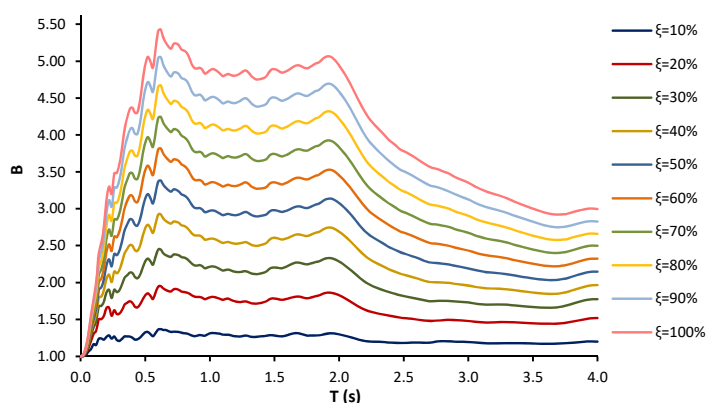
Η εφαρμογή της μεθόδου φασματικής ικανότητας προϋποθέτει τον προσδιορισμό του φάσματος απαίτησης της υπό εξέταση σεισμικής διέγερσης. Η ακριβέστερη οδός κατασκευής του (είτε του ελαστικού είτε του ανελαστικού φάσματος) είναι μέσω της ολοκλήρωσης της διαφορικής εξίσωσης της κίνησης ως προς το χρόνο. Στην πράξη ωστόσο για λόγους απλότητας χρησιμοποιούνται μειωτικοί συντελεστές μέσω των οποίων πραγματοποιείται η απομείωση του ελαστικού φάσματος με απόσβεση 5% ώστε να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση της πρόσθετης απόσβεσης της ανελαστικής

συμπεριφοράς. Στην περίπτωση των ελαστικών φασμάτων με υψηλή απόσβεση η απομείωση πραγματοποιείται μέσω ενός μειωτικού συντελεστή ο οποίος ορίζεται από τη Σχέση (1).

Εκφράσεις του μειωτικού συντελεστή B που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και αναφέρονται σε κανονισμούς (FEMA 274, FEMA 368, EC-8, Sadek et al. 2000, Ramirez et al. 2002, Palermo et al. 2013), συνήθως ορίζονται από διγραμμικά ή τριγραμμικά μοντέλα. Σε όλα τα μοντέλα η τιμή του μειωτικού συντελεστή παραμένει σταθερή μετά την περιοχή των σταθερών επιταχύνσεων του φάσματος απόκρισης.

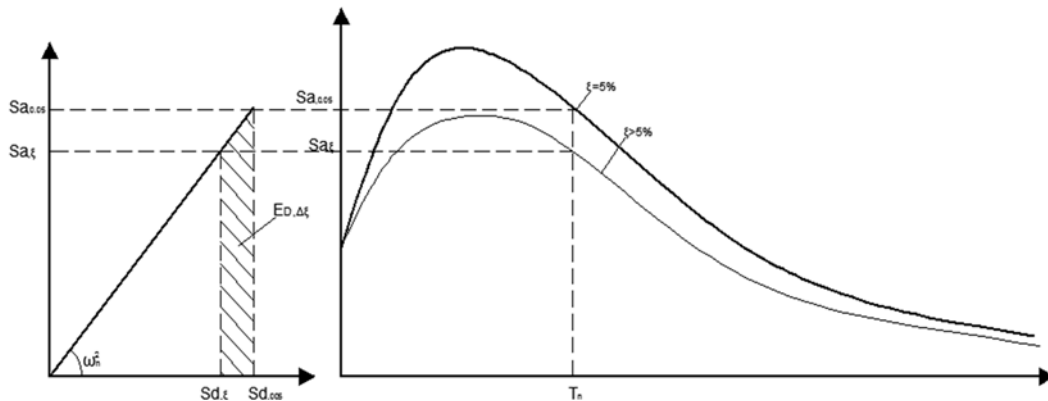
Πίνακας 1 Εξεταζόμενα σεισμικά γεγονότα

Date	Earthquake	M_s	Station	Component
1941	Northern Calif-01	6.4	Ferndale City Hall	315
1951	Imperial Valley-03	5.6	El Centro Array #9	000
1952	Kern County	7.36	Taft Lincoln School	021
1961	Hollister-01	5.6	Hollister City Hall	271
1966	Parkfield	6.19	Cholame - Shandon Array #12	050
1967	Northern Calif-05	5.6	Ferndale City Hall	314
1968	Borrego Mtn	6.63	El Centro Array #9	180
1971	San Fernando	6.61	Castaic - Old Ridge Route	291
1973	Point Mugu	5.65	Port Hueneme	270
1976	Friuli Italy-01	6.50	Barcis	000
1978	Santa Barbara	5.92	Cachuma Dam Toe	250
1978	Tabas Iran	7.35	Dayhook	L1
1979	Imperial Valley-06	6.53	Brawley Airport	225
1980	Livermore-01	5.80	APEEL 3E Hayward CSUH	146
1980	Mammoth Lakes-01	6.06	Long Valley Dam (Upr L Abut)	090
1980	Victoria Mexico	6.33	Cerro Prieto	315
1981	Taiwan SMART1(5)	5.90	SMART1 O07	EW
1981	Westmorland	5.90	Parachute Test Site	225
1984	Morgan Hill	6.19	San Juan Bautista_ 24 Polk St	213
1986	Mt. Lewis	5.60	Halls Valley	090



Σχ. 2 Μέση απομείωση του ελαστικού φάσματος λόγω απόσβεσης

Από αναλύσεις που έγιναν σε μία σειρά 20 σεισμικών διεγέρσεων οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 και είχαν τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να είναι συμβατές με το φάσμα του EC – 8 για κατηγορία εδάφους C, προέκυψε πως η απομείωση της απαίτησης δεν παραμένει σταθερή μετά την περιοχή της σταθερής φασματικής επιτάχυνσης αλλά αυτή φθίνει όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία επιχειρείται η κατασκευή μίας ενιαίας συνεχούς έκφρασης των μειωτικών συντελεστών απόσβεσης μέσω της οποίας θα λαμβάνεται υπόψη η απομείωση των συντελεστών για μεγάλες τιμές ιδιοπεριόδου.



Σχ. 3 Απομείωση του ελαστικού φάσματος λόγω απόσβεσης

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις δύο μονοβάθμιων ταλαντωτών με ιδιοπερίοδο T_n και λόγους απόσβεσης 5% και ξ οι οποίοι υπόκεινται σε σεισμική διέγερση. Η μέγιστη επιτάχυνση του ταλαντωτή για την ίδια σεισμική διέγερση είναι λογικό να αναμένεται μικρότερη στο σύστημα με την μεγαλύτερη απόσβεση ξ . Για τον προσδιορισμό της μειωμένης απαίτησης λόγω απόσβεσης θεωρείται ότι η διαφορά της μέγιστης δυναμικής ενέργειας του συστήματος για ποσοστά απόσβεσης 5% ($E_{P,0.05}$) και ξ ($E_{P,\xi}$) θα είναι ίση με την ενέργεια που αναλώθηκε στο σύστημα λόγω αύξησης της απόσβεσης κατά $\Delta\xi$ ($E_{D,\Delta\xi}$), δηλαδή:

$$E_{P,0.05} = E_{P,\xi} + E_{D,\Delta\xi} \quad (15)$$

Αρκεί λοιπόν να προσδιορισθεί το ποσό της ενέργειας που χάνεται λόγω αύξησης της απόσβεσης κατά $\Delta\xi$. Για το σκοπό αυτό θεωρείται ότι ο μονοβάθμιος ταλαντωτής εκτελεί εξαναγκασμένη ταλάντωση λόγω εξωτερικής δύναμης $P(t) = P_0 \sin(\Omega t)$. Η ενέργεια που καταναλώνεται σε ένα κύκλο φόρτισης λόγω ιξώδους απόσβεσης $\xi_* = \Delta\xi$ προκύπτει:

$$E_D = \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} c_* \dot{u}^2 dt = c_* \int_0^{2\pi/\omega} (\omega u_0 \cos(\omega t - \varphi))^2 dt = \pi c_* \omega u_0^2 = 2\pi \xi_* \frac{\omega}{\omega_n} k u_0^2 \quad (16)$$

Αναπτύσσοντας την Σχέση (15) και εισάγοντας την (16) προκύπτει:

$$B = \frac{Sa_{0.05}}{Sa_\xi} = \sqrt{1 + 4\pi \Delta\xi \frac{T_n}{T}} \quad (17)$$

όπου T είναι η περίοδος της αρμονικής εξωτερικής δύναμης διέγερσης $P(t)$ και T_n η ιδιοπερίοδος του ταλαντωτή.

Ωστόσο ο όρος T της Σχέσης (17) είναι δύσκολο να προσδιορισθεί λόγω τόσο της τυχαμικότητας των εδαφικών κινήσεων, αλλά κυρίως λόγω του γεγονότος ότι μια πραγματική σεισμική φόρτιση δεν έχει αρμονική μορφή. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιήθηκαν οι 20 σεισμικές διεγέρσεις του Πίνακα 1 έτσι ώστε να προσδιορισθεί μία συνάρτηση της μορφής $f(T, \xi)$ η οποία να περιγράφει τον όρο T_n / T . Ύστερα από βαθμονόμηση της Σχέσης (17) με τα αναλυτικά αποτελέσματα, η απομείωση του φάσματος δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

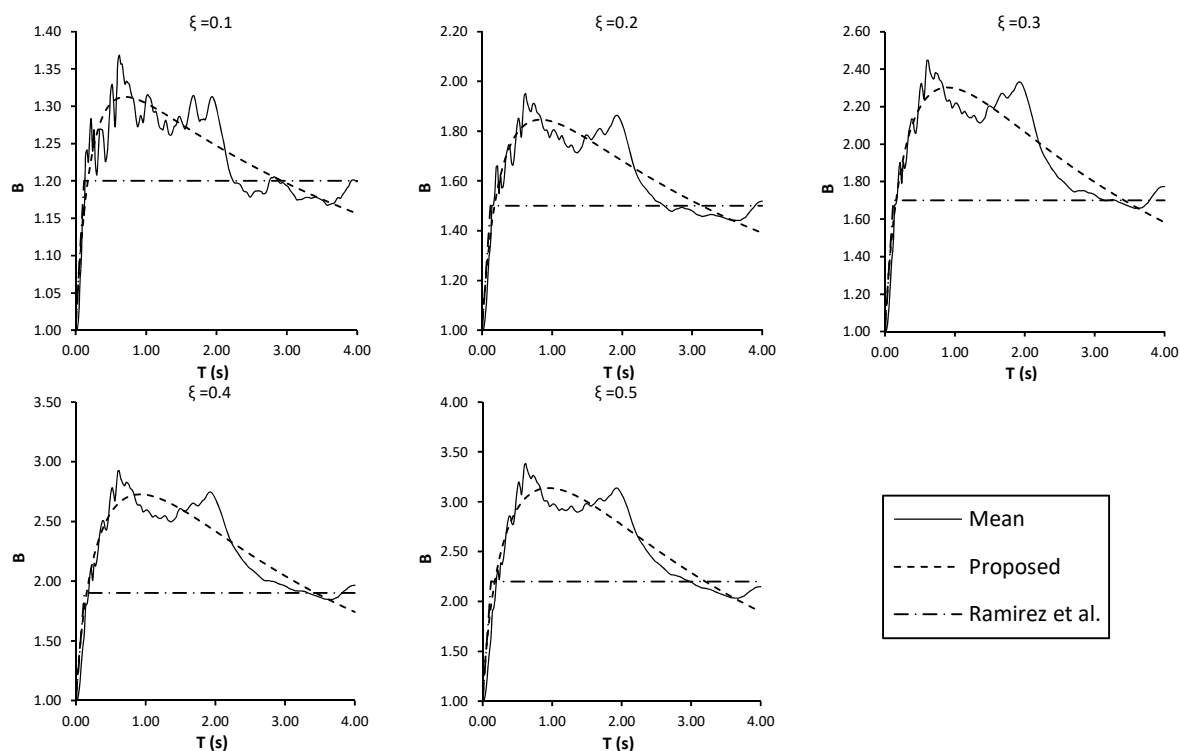
$$B = \frac{Sa_{0.05}}{Sa_\xi} = \sqrt{1 + 4\pi \Delta\xi f(T, \xi)} \quad (18)$$

$$f(T, \xi) = \alpha \left(e^{\frac{bT}{T_0}} - e^{\frac{cT}{T_0}} \right) \quad (19)$$

όπου a , b και c εξαρτώνται από το μέγεθος της απόσβεσης και δίνονται στον Πίνακα 2 και T_0 η τιμή της ιδιοπεριόδου που αντιστοιχεί την έναρξη της περιοχής σταθερών φασματικών ταχυτήτων.

Πίνακας 2 Συντελεστές a , b και c της Σχέσης (19)

ξ	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
a	1.46	1.92	2.34	2.82	3.40
b	-0.15	-0.20	-0.24	-0.27	-0.30
c	-2.56	-1.75	-1.45	-1.28	-1.15



Σχ. 4 Διαγράμματα μειωτικών συντελεστών B

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται συγκριτικά οι συντελεστές απομείωσης λόγω απόσβεσης που προέκυψαν από την Σχέση (18) και το αντίστοιχο μοντέλο των Ramirez et al. (2002), σε σχέση με την μέση απομείωση που υπολογίστηκε αναλυτικά μέσω των 20 αναλύσεων χρονοϊστορίας. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της προτεινόμενης συνεχούς μη γραμμικής σχέσης είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλο το εύρος τιμών των ιδιοπεριόδων. Επιπρόσθετα περιγράφει και την μείωση των συντελεστών πέρα από την περιοχή των σταθερών φασματικών επιταχύνσεων.

Ανελαστικά Φάσματα Σταθερής Πλαστιμότητας και Υψηλής Απόσβεσης

Στην περίπτωση των ανελαστικών φασμάτων στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μορφές των σχέσεων $R - \mu - T$ (Miranda and Bertero 1994) στις οποίες η ιξώδης απόσβεση του μονοβάθμιου ταλαντωτή κυμαίνεται μεταξύ του 1%÷10%, στα πλαίσια δηλαδή της απόσβεσης του υλικού. Εντούτοις, με τη χρήση παθητικών συστημάτων απορρόφησης ενέργειας, η απόσβεση του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή μπορεί να φτάσει στο 30% της κρίσιμης απόσβεσης του συστήματος. Έτσι με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης της απόσβεσης στα ανελαστικά φάσματα σταθερής πλαστιμότητας χρησιμοποιήθηκαν 20 σεισμικές διεγέρσεις (Πίνακας 1) για κάθε μία από τις

οποίες κατασκευάστηκαν αναλυτικά τα φάσματα σταθερής πλαστιμότητας για ποσοστά απόσβεσης $\xi = 5 \div 50\%$ και τιμές πλαστιμότητας $\mu = 1.5, 2, 2.5, 3$ και 4 . Στη συνέχεια προσδιορίστηκε ο μέσος συντελεστής συμπεριφοράς για κάθε ποσοστό απόσβεσης και κάθε επίπεδο πλαστιμότητας. Οι μέσοι συντελεστές συμπεριφοράς του ελαστικού φάσματος για τιμές απόσβεσης $\xi = 0.05 \div 0.5$, παρουσιάζονται παρακάτω, στο Σχήμα 5.

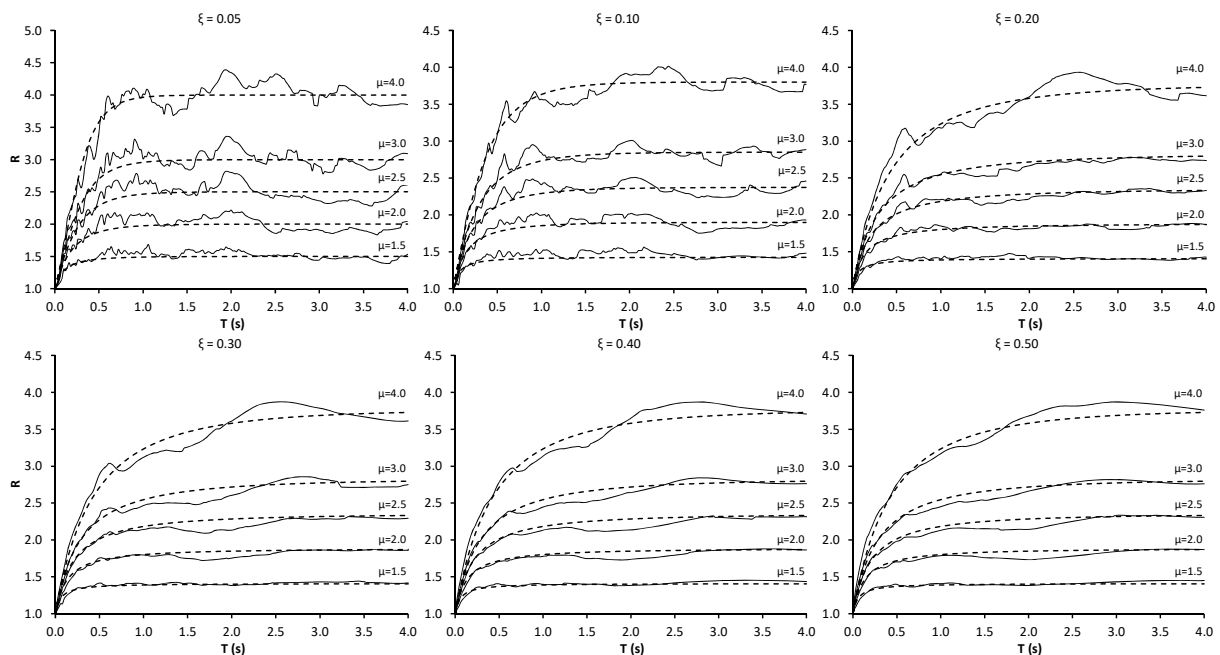
Στην παρούσα εργασία η απομείωση του φάσματος για τα διάφορα επίπεδα πλαστιμότητας και απόσβεσης δίνεται από τη Σχέση (20) η οποία έχει τη μορφή της σχέσης που προτείνεται από τους Hidalgo and Arias(1990).

$$R_{\mu} = 1 + \frac{T}{aT_0 \exp(b\mu T) + \frac{T}{c\mu - 1}} \quad (20)$$

όπου a , b και c συντελεστές που εξαρτώνται από την απόσβεση και δίνονται στον Πίνακα 3 και T_0 η τιμή της ιδιοπεριόδου που αντιστοιχεί στην έναρξη της περιοχής σταθερών φασματικών ταχυτήτων.

Πίνακας 3 Τιμές των συντελεστών a , b και c για διάφορα επίπεδα απόσβεσης

ξ	0.05	0.10	≥ 0.20
a	0.31	0.25	0.24
b	-0.97	-0.47	-0.13
c	1.00	0.95	0.94



Σχ. 5 Συντελεστές συμπεριφοράς R

Η απόσβεση δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς για την κατασκευή του ανελαστικού φάσματος σταθερής πλαστιμότητας. Είναι φανερό ότι για τιμές λόγου απόσβεσης πάνω από $\xi=20\%$ η απομείωση παραμένει σταθερή. Από το Σχήμα 5 φαίνεται ότι για μικρούς λογούς απόσβεσης ($\xi=0.05$) η θεώρηση ίσων μετατοπίσεων μεταξύ ελαστικής και ανελαστικής απόκρισης για κατασκευές υψηλών ιδιοπεριόδων επιβεβαιώνεται, ενώ για υψηλότερους λογούς απόσβεσης ($\xi>0.1$), η παραπάνω θεώρηση οδηγεί σε συντελεστή συμπεριφοράς R μικρότερο της πλαστιμότητας μ . Το

παραπάνω λαμβάνεται υπόψη μέσω της εισαγωγής του συντελεστή c στη Σχέση (20) όπου για κατασκευές υψηλών ιδιοπεριόδων ο συντελεστής συμπεριφοράς παίρνει τιμή $R = c \cdot \mu$.

Διορθωτικοί συντελεστές ψευδοταχύτητας

Η εκτίμηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο σύστημα απόσβεσης αποτελεί βασικό παράγοντα για το σχεδιασμό του συστήματος κατανάλωσης ενέργειας προκειμένου να αποφευχθούν αστοχίες λόγω υπέρβασης της φέρουσας ικανότητας του συστήματος. Δεδομένου ότι οι αποσβεστήρες ιξώδους αποτελούν συσκευές εξαρτώμενες από την ταχύτητα, η εκτίμηση της μέγιστης σχετικής ταχύτητας των άκρων του αποσβεστήρα είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της μέγιστης δύναμης απόσβεσης που αναπτύσσεται στη συσκευή. Η απλούστερη μέθοδος για την εκτίμηση της μέγιστης σχετικής ταχύτητας των άκρων ενός αποσβεστήρα περιλαμβάνει τη χρήση της ψευδοταχύτητας PS_V του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή και την κατανομή αυτής στους ορόφους της κατασκευής με βάση τη δεσπόζουσα ιδιομορφή. Η PS_V υπολογίζεται από το φάσμα των μετατοπίσεων από τη σχέση:

$$PS_V = \omega \cdot S_d \quad (21)$$

ενώ στην περίπτωση των ανελαστικών συστημάτων λαμβάνει τη μορφή:

$$PS_V = \left(\omega_{el} / \sqrt{\mu} \right) \cdot S_d \quad (22)$$

Ωστόσο, ακόμα και σε ελαστικά συστήματα η θεώρηση ισότητας μεταξύ φασματικής ταχύτητας και της PS_V ισχύει μόνο για ταλαντωτές με ιδιοπερίοδο κοντά στο 0.5s (Sadek *et al.* 2000). Για μεγαλύτερες τιμές ιδιοπεριόδου, η θεώρηση της ισότητας οδηγεί σε υποεκτίμηση της αναπτυσσόμενης ταχύτητας ενώ για μικρές τιμές η θεώρηση είναι συντηρητική. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι σεισμικές διεγέρσεις του Πίνακα 1 για τον προσδιορισμό ενός διορθωτικού συντελεστή των ψευδοταχυτήτων. Ο διορθωτικός συντελεστής B_V ορίζεται ως εξής

$$B_V = \frac{PS_V}{S_V} = \frac{\omega_{el} / \sqrt{\mu} S_d}{S_V} \quad (23)$$

Οι τιμές του διορθωτικού συντελεστή B_V , όπως αυτές προέκυψαν από τις αναλύσεις, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6 για διάφορα επίπεδα απόσβεσης και πλαστιμότητας. Από ανάλυση παλινδρόμησης των αναλυτικών αποτελεσμάτων, ο συντελεστής B_V δίνεται από τη σχέση

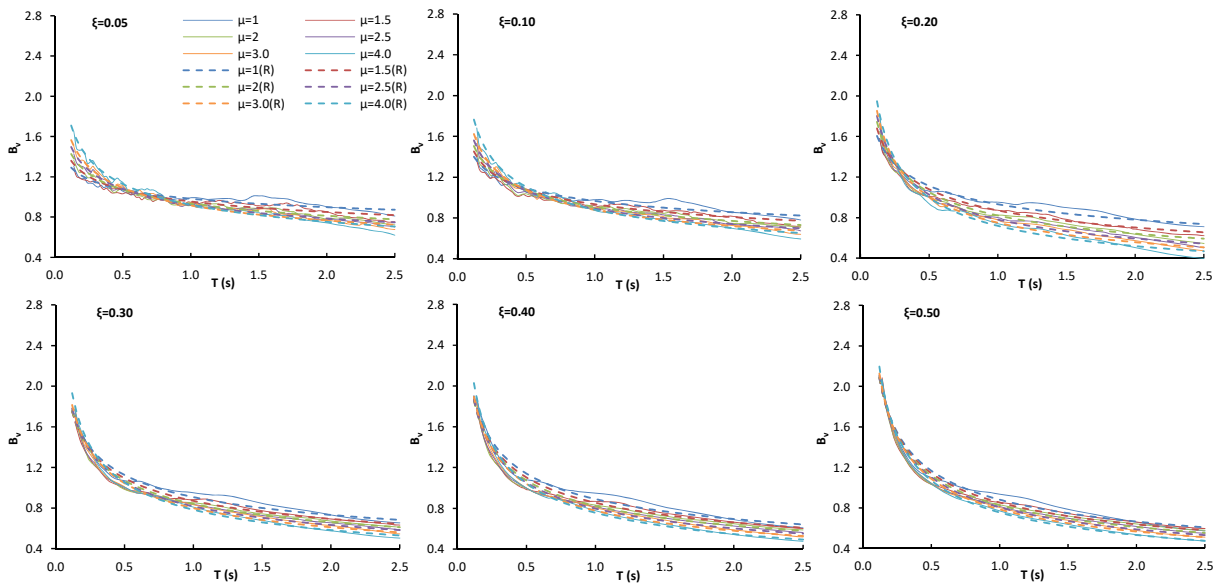
$$B_V = (a_1 \mu^2 + a_2 \mu + a_3) T^{a_4 \mu^2 + a_5 \mu + a_6} \quad (24)$$

όπου $a_1 - a_6$, συντελεστές που δίνονται στον Πίνακα 4 για διάφορα επίπεδα απόσβεσης.

Πίνακας 4 Τιμές των συντελεστών της Σχέσης (24)

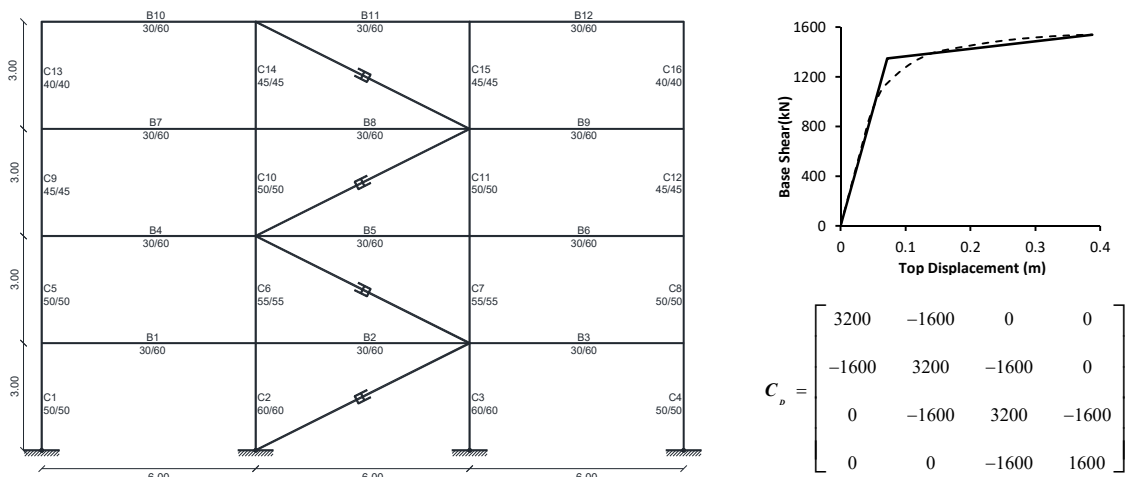
ξ	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
0.05	0.014	-0.089	1.058	0.008	-0.095	-0.043
0.10	0.015	-0.105	1.056	0.006	-0.083	-0.098
0.20	0.020	-0.169	1.080	0.014	-0.140	-0.131
0.30	0.013	-0.106	1.002	0.000	-0.038	-0.272
0.40	0.012	-0.104	0.984	-0.004	-0.014	-0.338
0.50	0.006	-0.072	0.946	0.000	-0.031	-0.375

Από τα αποτελέσματα του Σχήματος 6 είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η απαιτούμενη πλαστιμότητα και η ενεργός απόσβεση, τόσο οι διορθωτικοί συντελεστές παίρνουν μεγαλύτερες τιμές για τις δύσκαμπτες κατασκευές και μικρότερες για τις εύκαμπτες. Πιο συγκεκριμένα για κατασκευές με λόγο απόσβεσης $\xi=0.05$ και πλαστιμότητα $\mu=1$ ο συντελεστής B_V παίρνει τιμές 0.9-1.3, ενώ για λόγο απόσβεσης $\xi=0.20$ και πλαστιμότητα $\mu=4$ ο διορθωτικός συντελεστής παίρνει τιμές 2.40-0.50.

Σχ. 6 Διαρθρωτικοί συντελεστές B_v

Έλεγχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Με σκοπό την αξιολόγηση της ακρίβειας της Μεθόδου Φασματικής Ικανότητας με χρήση ανελαστικών φασμάτων σταθερής πλαστιμότητας και υψηλής απόσβεσης σε πολυβάθμια συστήματα με γραμμικούς αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης, η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τετραώροφο πλαίσιο ωπλισμένου σκυροδέματος (Σχήμα 7).



Σχ. 7 Εξεταζόμενο πλαίσιο

Το κτήριο σχεδιάστηκε με βάση τους κανονισμούς EC-2 και EC-8. Όσον αφορά τα συστήματα επιπρόσθετης απόσβεσης θεωρήθηκαν αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης με απόσβεση $C=2000\text{kNs/m}$ τοποθετημένοι σε γωνία 26.56° από την οριζόντιο στο κεντρικό φάτνωμα κάθε ορόφου. Εφαρμόζοντας τις Σχέσεις (14α-γ) υπολογίζεται το μητρώο απόσβεσης C_D .

Εφαρμόζοντας την προτεινόμενη σχέση από τον FEMA (Σχέση (5)) για ελαστική απόκριση καθώς και την προτεινόμενη Σχέση (9) η ενεργός απόσβεση του εξεταζόμενου πλαισίου υπολογίστηκε και από τις δύο σχέσεις ίση με $\xi_{\text{eff}}=20.8\%$, γεγονός το οποίο καθιστά τις δύο σχέσεις ισοδύναμες.

Ωστόσο με βάση τη Σχέση (5), η ενεργός απόσβεση πρέπει να αναπροσαρμόζεται σύμφωνα με την ενεργό ιδιοπερίοδο της κατασκευής στην ανελαστική περιοχή. Δεδομένου ότι στην ΜΦΙ με χρήση ανελαστικών φασμάτων η όποια μεταβολή της ενεργού απόσβεσης λόγω μεταβολής της ενεργού ιδιοπεριόδου λαμβάνεται υπόψη στο ανελαστικό φάσμα, η θεώρηση μεταβαλλόμενης απόσβεσης φαντάζει πλεονάζουσα διαδικασία. Για την αξιολόγηση της υπόθεσης που αφορά την αναπροσαρμογή της ενεργού απόσβεσης, η μέθοδος εφαρμόστηκε τόσο με μεταβαλλόμενη απόσβεση όσο και με σταθερή.

Για την ακριβέστερη αποτίμηση του υπολογισμού της ενεργού ιδιοπεριόδου, ο υπολογισμός του σημείου επιτελεστικότητας πραγματοποιείται με τη χρήση ανελαστικών φασμάτων σεισμικών διεγέρσεων και όχι με τις προσεγγιστικές σχέσεις $B(T, \xi)$ και $R-\mu-T$ οι οποίες παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Η μέθοδος εφαρμόστηκε με 5 σεισμικά γεγονότα (Πίνακας 5). Σε κάθε ένα από τα σεισμικά γεγονότα εφαρμόστηκαν αυξητικοί συντελεστές με σκοπό την διερεύνηση της ακρίβειας της μεθόδου για διάφορα επίπεδα πλαστιμότητας μετατοπίσεων της κατασκευής.

Πίνακας 5 Εξεταζόμενα σεισμικά γεγονότα και μεγεθυντικοί συντελεστές

Earthquake	Component	Scale Factors
Northern Calif-01	315	x1 x1.25 x1.50 x1.75 x2 x3
Kern County	21	x1 x1.25 x1.50 x1.75 x2 x3
Northern Calif-05	314	x1 x1.25 x1.50 x1.75 x2
San Fernando	291	x1 x1.25 x1.50 x1.75 x2 x3
Santa Barbara	250	x1 x1.25 x1.50 x1.75 x2

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 σε ζεύγη τιμών. Η πρώτη τιμή αναφέρεται στα αποτελέσματα με την θεώρηση σταθερής ενεργού απόσβεσης, ενώ η δεύτερη στην παρένθεση σύμφωνα με την θεώρηση μεταβαλλόμενης ενεργού απόσβεσης. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τους λόγους των εκτιμώμενων μετατοπίσεων κορυφής από την ΜΦΙ προς τις μετατοπίσεις κορυφής οι οποίες προκύπτουν από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας, ($S_{D_{push}} / S_{D_{TH}}$). Επίσης ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τον μέσο όρο των λόγων των σχετικών μετακινήσεων όλων των ορόφων ($Drift_{push} / Drift_{TH}$), καθώς και τον μέσο όρο των λόγων των δυνάμεων των αποσβεστήρων όλων των ορόφων ($F_{D, push} / F_{D, TH}$).

Πίνακας 6 Αποτελέσματα μετατοπίσεων κορυφής, σχετικών μετακινήσεων και δυνάμεων απόσβεσης

	$S_{D_{push}}/S_{D_{TH}}$	$Drift_{push}/Drift_{TH}$	$F_{D, push}/F_{D, TH}$
Total Average	1.04 (0.99)	0.99 (0.95)	1.03 (0.99)
Total Std. Dev.	0.078 (0.079)	0.11 (0.10)	0.09 (0.09)

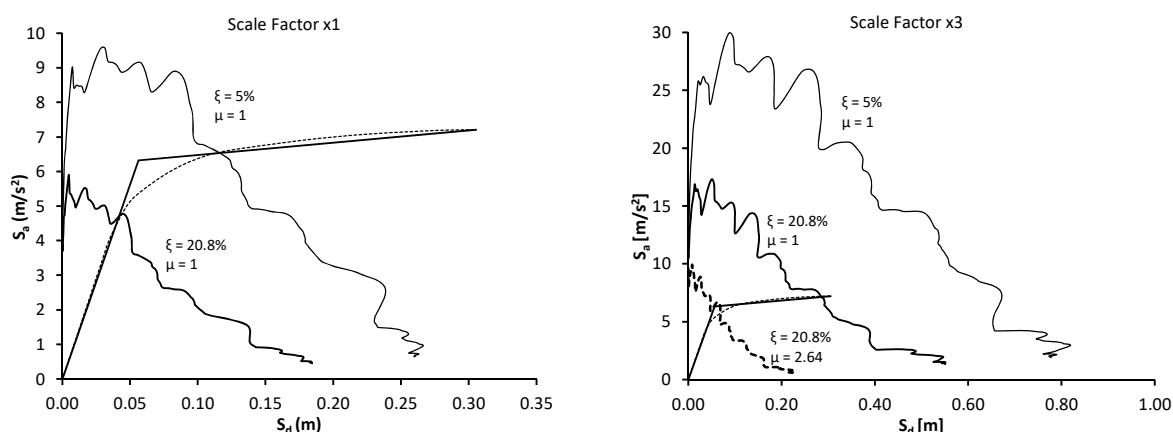
Σχετικά με τον υπολογισμό της ενεργού απόσβεσης, στην περίπτωση που το σημείο επιτελεστικότητας αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του ταλαντωτή ($\mu=1$) τα αποτελέσματα ταυτίζονται. Όταν η κατασκευή αναπτύσσει πλαστιμότητα μετατοπίσεων $\mu>1$ τα αποτελέσματα της ΜΦΙ με βάση τις δυο διαφορετικές θεωρήσεις απόσβεσης αρχίζουν να διαφέρουν μεταξύ τους. Όσο η απαιτούμενη πλαστιμότητα αυξάνεται, αυξανόμενη τείνει και η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Πέρα όμως από τη μετατόπιση κορυφής, η μεταβαλλόμενη ενεργός απόσβεση οδηγεί σε εντονότερη υποεκτίμηση των σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων, μέγεθος που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων στα δομικά στοιχεία της κατασκευής. Επιπρόσθετα, η εκτίμηση των δυνάμεων απόσβεσης που προκύπτουν από την ΜΦΙ (Σχέση (3)) και με τις δύο θεωρήσεις απόσβεσης κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι η ΜΦΙ εκτιμά με μεγάλη ακρίβεια την ανελαστική απόκριση κατασκευών που είναι εξοπλισμένες με αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης. Επιπλέον η χρήση της αρχικής ιδιοπεριόδου για τον προσδιορισμό της ενεργού απόσβεσης αποτελεί μια πιο συμβατή προσέγγιση με τη προτεινόμενη ΜΦΙ, δεδομένου ότι η μέθοδος στηρίζεται σε σχέσεις που συνδέουν τον συντελεστή συμπεριφοράς (R) με την πλαστιμότητα μετατοπίσεων μ και έτσι δεν εμπλέκεται στην όλη διαδικασία η ιδέα του ισοδύναμου ελαστικού ταλαντωτή με δυσκαμψία K_{eff} . Η παραδοχή της μεταβαλλόμενης ενεργού ιδιοπεριόδου οδηγεί σε υπερεκτίμηση της ενεργού απόσβεσης όταν απαιτούνται από την κατασκευή υψηλές τιμές πλαστιμότητας.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι σχέσεις απομειώσεις του ελαστικού φάσματος λόγω υψηλής απόσβεσης (Σχέσεις (18)-(19)), όπως και οι σχέσεις $R - \mu - T$ (Σχέση (20)), εφαρμόστηκε η διαδικασία για το μέσο φάσμα απαίτησης που αντιστοιχεί σε κάθε αυξητικό συντελεστή. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 και στο Σχήμα 8. Ο προσδιορισμός του σημείου επιτελεστικότητας έγινε γραφικά μέσω της πλαστιμότητας που αντιστοιχεί στο φάσμα απαίτησης που τέμνει το διγραμμικό φάσμα ικανότητας στο σημείο της διαρροής (Σχήμα 8). Από την εφαρμογή των προτεινόμενων σχέσεων προκύπτει ότι η εκτίμηση της μετατόπισης κορυφής σε σύγκριση με τη μέση τιμή της μετατόπισης που προέκυψε από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας είναι αρκετά ικανοποιητική.

Πίνακας 7 Φασματική μετατόπιση κορυφής χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη σχέση $R - \mu - T$

	Scale Factor	x1	x1.25	x1.5	x1.75	x2.00	x3.00	Average
Proposed	$S_d / S_{d,Ave}$	0.91	0.95	0.99	1.00	1.03	1.41	1.05
	$S_d / S_{d,Max}$	0.80	0.83	0.87	0.84	0.82	1.29	0.91



Σχ. 8 Προσδιορισμός του σημείου επιτελεστικότητας με χρήση των προτεινόμενων σχέσεων

Επιπρόσθετα, υπολογίζονται οι δυνάμεις των ιξωδών αποσβεστήρων με τη χρήση των Σχέσεων (23)-(24), ώστε να διορθωθούν οι τιμές της ψευδοταχύτητας PS_v . Με γνωστή την πλαστιμότητα του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή από την ΜΦΙ, οι δυνάμεις των αποσβεστήρων δίνονται από τη Σχέση (25):

$$F_{D,i} = \Gamma^* \left(\omega_{el} \sqrt{\mu} S_d \right) / B_v \varphi_j C_i \cos \theta_i \quad (25)$$

Οι διορθωτικοί συντελεστές ψευδοταχυτήτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 8. Λόγω της ιδιοπεριόδου της κατασκευής που είναι $T = 0.61$ s φαίνεται πως η PS_v σχεδόν ταυτίζεται με την S_v . Ο μέσος όρος του λόγου της δύναμης του αποσβεστήρα κάθε ορόφου που υπολογίστηκε από την διορθωμένη PS_v

προς τη μέση και τη μέγιστη δύναμη, $F_{d,Ave}$ και $F_{d,Max}$ αντίστοιχα, των τιμών που προέκυψαν από τις αναλύσεις χρονοϊστορίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 Τιμές διορθωτικών συντελεστών B_v , S_v και των λόγων $F_{d,Push} / F_{d,TH}$

Scale Factor	x1	x1.25	x1.5	x1.75	x2.00	x3.00	Average
μ	1.00	1.00	1.18	1.39	1.63	2.64	-
B_v	1.06	1.06	1.04	1.02	1.01	0.94	-
S_v	0.40	0.51	0.60	0.67	0.73	1.00	-
$F_d / F_{d,Ave}$	0.90	0.95	1.00	0.98	0.96	0.95	0.96
$F_d / F_{d,Max}$	0.82	0.84	0.90	0.87	0.86	0.89	0.86

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι μέθοδοι φασματικής ικανότητας σε συνδυασμό με ανελαστικά φάσματα σταθερής πλαστιμότητας και υψηλής απόσβεσης για κατασκευές με συστήματα παθητικής προστασίας και συγκεκριμένα με αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης. Η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στις παραδοχές εκείνες που γίνονται για τον προσδιορισμό της ενεργού απόσβεσης της κατασκευής καθώς και στον τρόπο απομείωσης του ελαστικού φάσματος με 5% απόσβεση με σκοπό την κατασκευή ανελαστικού φάσματος σταθερής πλαστιμότητας και υψηλής απόσβεσης. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε ένα πολυβάθμιο σύστημα με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η απομείωση του ελαστικού φάσματος για την κατασκευή ελαστικών φασμάτων με υψηλή απόσβεση δίνεται από μια μη γραμμική σχέση η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε όλο το φάσμα των ιδιοπεριόδων. Η μορφή της εξίσωσης είναι τέτοια ώστε να περιγράφει τον φθίνοντα κλάδο που παρατηρείται στους συντελεστές απομείωσης μετά την περιοχή της σταθερής φασματικής επιτάχυνσης.

Στην περίπτωση των ανελαστικών φασμάτων με υψηλή απόσβεση φάνηκε πως το μέγεθος της απόσβεσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την μορφή του φάσματος απομείωσης, με την απομείωση να παραμένει σταθερή για ποσοστά απόσβεσης μεγαλύτερα του 20%. Παρόμοια με τα ελαστικά φάσματα, στη περίπτωση των ανελαστικών φασμάτων παρουσιάστηκε μια μη γραμμική σχέση $R - \mu - T$ για την απομείωση του ελαστικού φάσματος, λαμβάνοντας υπόψη και το μέγεθος της απόσβεσης. Επιπλέον, με δεδομένο ότι οι ιξώδεις αποσβεστήρες είναι εξαρτώμενοι από την ταχύτητα φόρτισης τους, η ακριβής εκτίμηση της ταχύτητας έχει μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό της δύναμης απόσβεσης. Προς το σκοπό αυτό παρουσιάστηκαν εκφράσεις που συνδέουν την ψευδοταχύτητα με την ταχύτητα εισάγοντας έναν διορθωτικό συντελεστή (B_v) ο οποίος επηρεάζεται τόσο από την ενεργό απόσβεση όσο και από την απαιτούμενη πλαστιμότητα.

Από τις αναλύσεις που έγιναν σε τετραώροφο πλαίσιο ωπλισμένου σκυροδέματος με αποσβεστήρες ιξώδους απόσβεσης φάνηκε πως η μέθοδος της φασματικής ικανότητας παρέχει μια καλή εκτίμηση τόσο των μετατοπίσεων όσο και των δυνάμεων απόσβεσης των συσκευών. Ο συνδυασμός της συγκεκριμένης μεθόδου με τις προτεινόμενες σχέσεις για τον υπολογισμό της ενεργού απόσβεσης της κατασκευής όσο και της απομείωσης του φάσματος απαίτησης φαίνεται να παρέχει μια γρήγορη και ικανοποιητική εκτίμηση της ανελαστικής απόκρισης της κατασκευής.

Βιβλιογραφία

- Aschheim, M. A., Black, E. F. (2000), “Yield point spectra for seismic design and rehabilitation”, *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 2, 2000, pp. 317-35.
- Applied Technology Council (1997), “NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”, FEMA 273 and 274, prepared for the Building Seismic Safety Council and published by the Federal Emergency Management Agency: Washington, D.C.
- Building Seismic Safety Council (2001), “NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, 2000 edition”, FEMA 368 and 369, Federal Emergency Management Agency: Washington, D.C.
- CEN Eurocode 2 (2004), Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1, Brussels, Belgium.
- CEN Eurocode 8 (2004), Design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, Brussels, Belgium.
- Chopra, A. K. (2001), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2nd edn, Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA.
- Chopra, A. K. and Goel, R. K. (1999), “Capacity Demand Diagram Methods for estimating Seismic Deformations of Inelastic Structures: SDF Systems”. Report No. PEER-1999/02: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Constantinou, M. C., Symans, M. D., Tsopelas, P. and Taylor, D. P. (1993), “Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolation”, *Proceedings of the ATC 17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*, Vol. 2, No. 1, 1993, pp. 581–591.
- Fajfar, P. (1999), “Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 9, 1999, pp. 979-993.
- Freeman, S. A. (1978), “Prediction of Response of Concrete Buildings to Severe Earthquake Motion”, *Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures*, American Concrete Institute, Detroit.
- Hidalgo, P. A. and Arias, A. (1990), “New Chilean Code for Earthquake Resistant Design of Buildings”, *Proc. 4th U.S. Nat. Conf. Earthquake Eng.*, Palm Springs, California.
- Miranda, E. and Bertero, V. V. (1994), “Evaluation of strength reduction Factors for earthquake resistance design”, *Earthquake Spectra*, Vol. 10, No. 2, 1994, pp. 357-379.
- Palermo, M., Silvestri, S., Trombetti, T. and Landi, L. (2013), “Force reduction factor for building structures equipped with added viscous dampers”, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 5, 2013, pp. 1661–1681.
- Ramirez, O. M., Constantinou, M. C., Gomez, J. D., Whittaker, A. S. and Chrysostomou, C. Z. (2002), “Elastic and inelastic seismic response of buildings with damping systems”, *Earthquake Spectra*, Vol. 18, No. 3, 2002, pp. 531–547.
- Riddell, R. and Newmark, N. M. (1979), “Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to Earthquakes”, Structural Research series No. 468: Dept. of Civ. Eng., University of Illinois, Urbana.
- Sadek, F., Mohraz, B. and Riley, M. A. (2000), “Linear procedures for structures with velocity-dependent dampers”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 887–895.
- Tsopelas, P., Constantinou, M. C., Kircher, C. A. and Whittaker, A. S. (1997), “Evaluation of Simplified Methods of Analysis for Yielding Structures”, NCEER Report 97-0012: National Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY.
- Whittaker, A. S., Aiken, I.D., Bergman, D, Clark P. W., Cohen, J. M., Kelly, J. M. and Scholl, R. E. (1993) “Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems”. *Proceedings, ATC-17-1 Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*. Vol. 2, ATC, Redwood City, CA, pp. 497 – 508.