

Υπολογισμός ισοδύναμης ιξώδους απόσβεσης μεταλλικών πλαισίων με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας

Καραβίας Δημήτριος

Μεταπτ. Φοιτητής ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ
dikaravias@gmail.com, std156733@ac.eap.gr

Σκαλωμένος Κωνσταντίνος

Επικ. Καθηγητής Πανεπιστήμιου Δυτικής Αττικής

Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστήμιου του
Μπέρμιγχαμ και Μέλος ΣΕΠ ΣΜΑ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

k.skalomenos@uniwa.gr, k.skalomenos@bham.ac.uk

Περίληψη - Μία ολοένα και πιο διαδεδομένη μέθοδος αντισεισμικού σχεδιασμού είναι η μέθοδος του απευθείας αντισεισμικού σχεδιασμού με βάση την επιθυμητή μετακίνηση (Direct Displacement-Based Design - DDBD). Σε αυτή τη μέθοδο, η απόκριση ενός ανελαστικού πολυβάθμιου συστήματος εκφράζεται ως απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου ελαστικού συστήματος, το οποίο προσδιορίζεται μέσω της ισοδύναμης δυσκαμψίας και του ισοδύναμου συντελεστή ιξώδους απόσβεσης. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση μιας μαθηματικής σχέσης για τον υπολογισμό της ιξώδους απόσβεσης σε μεταλλικά πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας (braces with intentional eccentricity - BIE). Μέσω παραμετρικής ανάλυσης σε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό OpenSees και χρησιμοποιώντας για τον υπολογισμό του ισοδύναμου συντελεστή ιξώδους απόσβεσης, τη μέθοδο του Jacobsen, διαπιστώθηκε ότι η απόσβεση μειώνεται με την αύξηση της εκκεντρότητας αλλά παραμένει ικανοποιητική για μεγαλύτερες πλαστιμότητες. Για τον αντισεισμικό σχεδιασμό με βάση τις μετακινήσεις, προτείνεται η χρήση μιας διγραμμικής σχέσης συναρτήσει της πλαστιμότητας, η οποία εξαρτάται από τη λυγρηρότητα και την εκκεντρότητα του συνδέσμου.

Λέξεις-Κλειδιά: Μεταλλικές κατασκευές, ιξώδες απόσβεση, αντισεισμικός σχεδιασμός, OpenSees, ανελαστική ανάλυση, πεπερασμένα στοιχεία

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

A. Η ανάγκη για νέο σύστημα απορρόφησης σεισμικής ενέργειας

Οι μεταλλικές κατασκευές προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα δόμησης. Παρέχουν γρήγορη ανέγερση κτιρίων, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος κατασκευής. Η προκατασκευή των χαλύβδινων στοιχείων στο εργοστάσιο και η συναρμολόγησή τους στο εργοτάξιο εξασφαλίζει ακρίβεια και ποιότητα στη κατασκευή. Ο χάλυβας είναι ανακυκλώσιμος, συμβάλλοντας στη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Προσφέρει επίσης μεγάλη ευελιξία στη διαμόρφωση εσωτερικών χώρων, πολύ μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη, κάτι που το κάνει υλικό ιδανικό εφαρμογές με καταπονήσεις από σεισμούς και άνεμους. Η ολκιμότητα του χάλυβα επιτρέπει υψηλές πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς απότομη αστοχία, όπως συμβαίνει με ψαθυρά υλικά (π.χ.,

οπλισμένο σκυρόδεμα), επιτρέποντας ανακατανομή των τάσεων και απορρόφηση ενέργειας μέσω υστερητικής απόκρισης.

Ωστόσο, η ολκιμότητα του χάλυβα έχει και αρνητικές επιπτώσεις, όπως η ανάπτυξη μεγάλων μετακινήσεων υπό μεγάλα οριζόντια φορτία (π.χ., σεισμός). Για αυτό, είναι απαραίτητη η παραλαβή πλευρικών σεισμικών δράσεων και η αύξηση της δυσκαμψίας του φορέα για τον περιορισμό της πλευρικής μετακίνησης. Η συνηθέστερη διάταξη είναι τα κεντρικά διασυνδεδεμένα πλαίσια (Concentrically Braced Frames - CBF). Τα διαγώνια μεταλλικά στοιχεία συνδέονται στις θέσεις ένωσης των υποστυλωμάτων με τις δοκούς μέσω κομβοελασμάτων, προσφέροντας απλότητα στην κατασκευή και στον υπολογισμό τους.

Κατά τη σεισμική δράση, τα οριζόντια φορτία παραλαμβάνονται από τους διαγώνιους συνδέσμους ως αξονικά φορτία (θλιπτικά ή εφελκυστικά). Αυτό περιορίζει τη σχετική μετακίνηση του πλαισίου και καταναλώνει την εισερχόμενη σε αυτό ενέργεια μέσω λυγισμού (θλίψη) και διαρροής (εφελκυσμός). Ωστόσο, τα CBF παρουσιάζουν περιορισμένη πλαστιμότητα και απορρόφηση ενέργειας, καθώς οι κοίλοδοκοί αστοχούν μετά από λίγους κύκλους φόρτισης λόγω κόπωσης στη θέση πλαστικής άρθρωσης. Παράλληλα οι διαγώνιοι σύνδεσμοι έχουν χαμηλή δυσκαμψία μετά τη διαρροή, οδηγώντας σε θραύση και απότομη μείωση της δυσκαμψίας του φορέα. Η αυξημένη δυσκαμψία των CBF μειώνει τις ιδιοπεριόδους, αυξάνοντας τις επιταχύνσεις και τις δυνάμεις, απαιτώντας μεγαλύτερες διατομές και αυξάνοντας το κόστος.

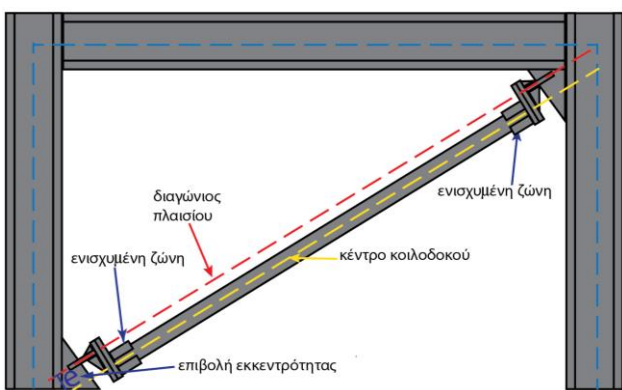
Σημαντικοί παράγοντες που περιορίζουν τη χρήση των CBF είναι η χαμηλή δυσκαμψία μετά τη διαρροή και η περιορισμένη πλαστιμότητα λόγω πιθανής αστοχίας σε λίγους κύκλους φόρτισης. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχουν προταθεί πληθώρα εναλλακτικών διατάξεων, μια από τις οποίες είναι και αυτή των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας.

Β. Διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί σε φορείς με διαγώνιους σύνδεσμους δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας (Brace with Intentional Eccentricity-BIE). Οι σύνδεσμοι αυτοί έχουν προταθεί από τους Skalomenos et al. (2018) ως ένας εναλλακτικός σύνδεσμος με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζουν τα κεντρικά διασυνδεδεμένα πλαίσια. Ουσιαστικά, ο σύνδεσμος αποτελείται από μία κοιλοδοκό, η οποία όμως δεν βρίσκεται ακριβώς στον άξονα της διαγώνιου του πλαισίου, όπως στη περίπτωση των συμβατικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας (Σχήμα 1). Αντίθετα, τοποθετείται μεν παράλληλα της διαγώνιου, αλλά σε απόσταση από αυτή. Έτσι δίνουμε στο σύνδεσμο μία «σκόπιμη» εκκεντρότητα.

Εξαιτίας της εκκεντρότητας, που θέσαμε στον σύνδεσμο, κατά τη διάρκεια εφαρμογής σεισμικών φορτίων εκτός των αξονικών φορτίων εμφανίζονται ταυτόχρονα και ροπές. Η ταυτόχρονη ύπαρξη αξονικών δυνάμεων και ροπών οδηγεί στην ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά μήκος του συνδέσμου. Αυτό βοηθάει να καθυστερήσει ο τοπικός λυγισμός και ως εκ τούτου προσφέρει καλύτερη πλαστιμότητα σε σχέση με τους κλασικούς συνδέσμους.

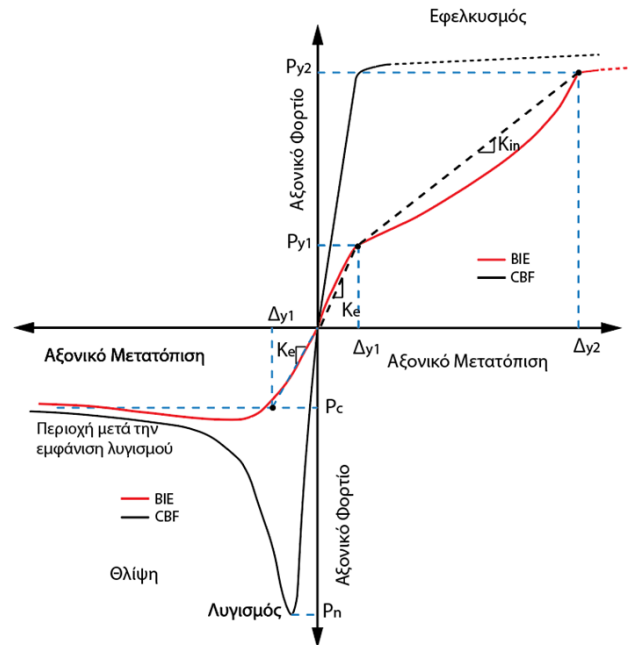
Κατά τον εφελκυσμό έχουμε την εμφάνιση τριγωνικού διαγράμματος δυνάμεων- παραμορφώσεων (σε αντίθεση με το διγραμμικό των κεντρικά διασυνδεδεμένων πλαισίων) (Σχήμα 2). Εμφανίζουν πρόωρη μετάβαση από ελαστική σε ανελαστική απόκριση, όμως διαθέτουν σημαντική δυσκαμψία αφού παρουσιαστεί διαρροή, με την τελική αντοχή του συνδέσμου να παραμένει η ίδια (όμως με αυξημένη παραμόρφωση). Σε θλίψη η αντοχή του συνδέσμου μειώνεται ελαφρώς, παρουσιάζεται όμως ομαλή μετάβαση στην μετά τον λυγισμό φάση (post buckling behavior), ενώ η δυσκαμψία εμφανίζει μια μικρή μείωση



Σχήμα 1. Διαγώνιος σύνδεσμος δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας

Για την λειτουργία του συνδέσμου όπως έχει περιγράψει θα πρέπει να έχουμε ελεύθερη στρόφιξη στα άκρα του συνδέσμου, επιτρέποντας την παραμόρφωση εντός ή εκτός επιπέδου του πλαισίου. Μπορεί να επιλεγεί ιδανικά, αλλά κατασκευαστικά πιο δύσκολο, η υιοθέτηση πραγματικής άρθρωσης. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει χρήση κατάλληλων διατάξεων κομβοελασμάτων.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι στην κοιλοδοκό, και στο σημείο της ένωσης με την διάταξη που επιβάλλει την εκκεντρότητα ενισχύεται κατάλληλα ώστε να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα της σύνδεσης. Αυτό οδηγεί στη θέση αυτή ένα τμήμα της κοιλοδοκού να είναι σημαντικά πιο δύσκαμπτο από τον υπόλοιπο σύνδεσμο (Σχήμα 1).



Σχήμα 2. Διάγραμμα συνδέσμων δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας σε σύγκριση με αυτό των συμβατικών συνδέσμων

Γ. Απευθείας Αντισεισμικός Σχεδιασμός με βάση την επιθυμητή μετακίνηση

Κύριο συστατικό των υπαρχόντων κανονισμών είναι ο σχεδιασμός με βάση τις δυνάμεις. Είναι μια μέθοδος ευρείας χρήσης με πολλά κτήρια να έχουν σχεδιαστεί βάση αυτής εδώ και πολλές δεκαετίες. Όμως η μέθοδος αυτή έχει ένα σημαντικό περιορισμό, δεν δείχνει την πραγματική «εικόνα» των μετακινήσεων που θα υποστεί η κατασκευή που σχεδιάζουμε στην περίπτωση που υποστεί σεισμικά φορτία με την παραμόρφωση τελικά να είναι κρίσιμότερη της αντοχής. Το έλλειμα αυτό προσπαθούν να καλύψουν νεότερες μέθοδοι που βασίζονται στην επιτελεσματικότητα του φορέα. Επικεντρωνόμαστε δηλαδή στην εξασφάλιση της επιθυμητής απόδοσης του κτηρίου για το επίπεδο επιτελεσματικότητας που επιθυμούμε. Κυρίως αντιπρόσωπος των εν λόγω μεθόδων είναι ο απευθείας αντισεισμικός σχεδιασμός με βάση τις μετακινήσεις. Η μέθοδος βρίσκει τα τελευταία χρόνια έντονο ενδιαφέρον από το επιστημονικό κοινό με πλούσια αρθρογραφία. Εν συντομία να αναφέρουμε ότι ανελαστικό φορέας αντικαθίσταται από ένα ισοδύναμο ελαστικό. Ο ισοδύναμος φορέας θα έχει στην περίπτωση σεισμού την ίδια μετακίνηση. Και θα χαρακτηρίζεται από ορισμένες ιδιότητες, την ενεργή δυσκαμψία την ενεργή μάζα και την ενεργή απόσβεση. Έτσι για τον σχεδιασμό με την εφαρμογή της μεθόδου είναι κρίσιμο ο μελετητής να έχει τα απαραίτητα «εργαλεία» ώστε να προσδιοριστεί ο ισοδύναμος ελαστικός φορέας. Για την απόσβεση λοιπόν θα πρέπει να παρέχεται μια μαθηματική σχέση για να την προσδιορίζει ανάλογα με τον φορέα. Πράγματι μεγάλο μέρος της ερευνάς

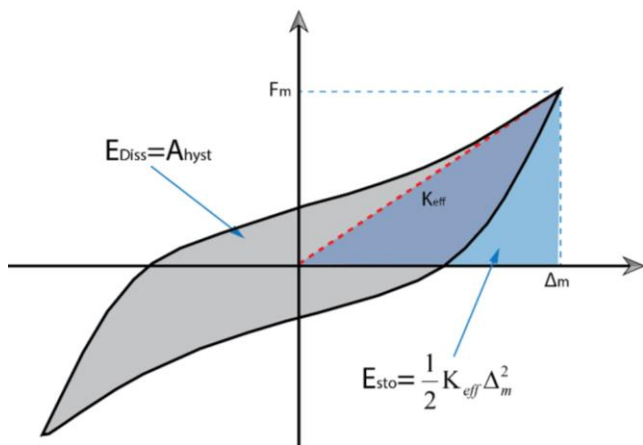
επικεντρώνεται στην ανάπτυξη τέτοιων σχέσεων έτσι υπάρχουν σχέσεις για καμπτικά πλαίσια, για πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας, πλαισιακοί φορείς με συνδέσμους εξασφαλισμένους έναντι λυγισμού. Εμείς όπως προαναφέραμε θα επικεντρώσουμε την προσπάθεια στη διατύπωση μιας μαθηματικής σχέσης για ένα πρωτότυπο σύνδεσμο δυσκαμψίας, το διαγώνιο σύνδεσμο σκόπιμης εκκεντρότητας ο οποίος έχει προταθεί για την αντιμετώπιση μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι διαγώνιοι συμβατικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

A. Υπολογισμός ισοδύναμου συντελεστή ιξώδους απόσβεσης-μέθοδος Jacobsen

Όπως αναφέραμε στη μέθοδο υπολογισμού απευθείας σχεδιασμού με βάση την επιθυμητή μετακίνηση καθοριστικής σημασίας είναι η γνώση από τον μελετητή, της απόσβεσης του φορέα που σχεδιάζεται. Μάλιστα εν αντιθέσει με την μέθοδο δυνάμεων δεν είναι επαρκής η θεώρηση μιας σταθερής τιμής αφού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ανελαστική-υστεριτική συμπεριφορά του φορέα για την επιθυμητή μετακίνηση. Όπως έχουμε αναφέρει αντικείμενο της εργασίας είναι ακριβώς αυτός ο προσδιορισμός της ισοδύναμης απόσβεσης πλαισιωτών φορέων με σκόπιμη εκκεντρότητα, ώστε να χρησιμοποιηθεί από τον μελετητή κατά την εφαρμογή της μεθόδου απευθείας σχεδιασμού με βάση την επιθυμητή μετακίνηση. Για τον προσδιορισμό της απόσβεσης που έχουμε σε ανελαστικά συστήματα, κατά κύριο λόγο γίνεται χρήση της μεθόδου Jacobsen (μέθοδος εμβαδού). Ουσιαστικά η μέθοδος βασίστηκε στην εξίσωση της ενέργειας που καταναλώνεται από ένα μη γραμμικό σύστημα με την ενέργεια που καταναλώνεται από ένα γραμμικά ελαστικό υπό ημιτονοειδής διέγερση. Σε ένα βρόγχο υστέρησης το εμβαδόν που περικλείεται σε αυτόν προσεγγίζει την ενέργεια που καταναλώνεται ενώ η ενέργεια που αποθηκεύεται φαίνεται στο Σχήμα 2. Έχουμε το συντελεστή υστεριτικής ιξώδους απόσβεσης:

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_{Diss}}{E_{sto}} \Rightarrow \xi_{hyst} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{hyst}}{F_m \Delta_m} \quad (1)$$



Σχήμα 3. Βρόγχος Υστέρησης

Υπάρχει εκτεταμένη αρθρογραφία πάνω στο προσδιορισμό του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης με την

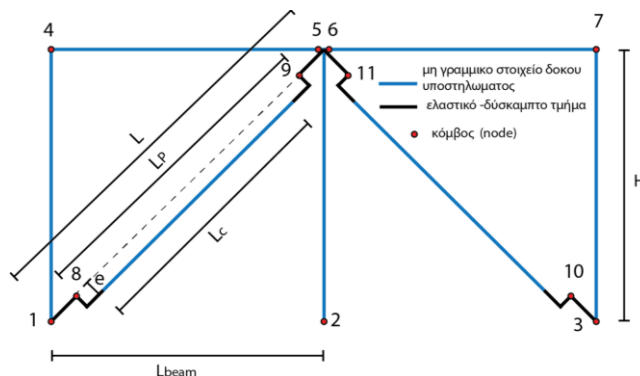
παραπάνω μέθοδο. Φαίνεται ότι μπορεί να προσεγγίσει το συντελεστή απόσβεσης σε ικανοποιητικό βαθμό κάνοντας χρήση βρόγχων υστέρησης από πειραματικές μετρήσεις ή μοντέλα υστέρησης (ελαστοπλαστικό, Takeda, Rasberg Osgood κλπ.). Παράλληλα όμως έχει παρατηρηθεί ότι:

- Η απόκριση λόγω σεισμικής δράσης είναι πολυπλοκότερη από την αρμονική διέγερση που βασίστηκε η μέθοδος με αποτέλεσμα να προκύπτουν αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές του συντελεστή (Gulkan P., Sozen M. 1979).
- Δεν προβλέπεται επαρκώς η ανελαστική απόκριση για χρονοϊστορίες με μεγάλους παλμούς (Kowalsky M.J., Ayers J.P. 2002).
- Η χρήση μιας και μόνο σεισμικής δράσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα (Miranda E., Ruiz-Garcia J. 2002).

Από τα παραπάνω η κοινή πρακτική για το προσδιορισμό του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης είναι να γίνεται μια αρχική προσέγγιση του ξ , με εφαρμογή την μεθόδου του εμβαδού σε βρόγχους υστέρησης, και κατόπιν να ακολουθεί η διόρθωση του με την εφαρμογή ανελαστικών αναλύσεων χρονοϊστορίας.

B. Μοντελοποίηση φορέα

Η μοντελοποίηση του φορέα έγινε με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων OpenSees (<https://opensees.berkeley.edu/>) (S. Mazzoni et. al. 2005) Οι πλαισιωτοί φορείς ορίστηκαν σε τρεις διαστάσεις, με το μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 4. Το υλικό των συνδέσμων ορίστηκε ως steel02, ακολουθώντας το μοντέλο Giuffre Menegotto Pinto με κινηματική και ισοτροπική σκλήρυνση ($F_y=355$ MPa, $E=210$ GPa, λόγος κράτυνσης 1%). Τα πολύ δύσκαμπτα τμήματα εξομοιώθηκαν με γραμμικό ελαστικό υλικό μεγάλου μέτρου ελαστικότητας, ενώ στις αρθρώσεις χρησιμοποιήθηκαν zerolength element για ανεμπόδιστη στροφή εντός επιπέδου πλαισίου. Το πλαίσιο δύο ανοιγμάτων που εξετάστηκε είχε μήκος ανοίγματος 6m και ύψος 4m, με διαγώνιο $L=7211.1$ mm. Τα δύσκαμπτα τμήματα ορίστηκαν ως 0.07L και 0.1L, με μήκη $L_p=5768.83$ mm και $L_c=4759.33$ mm αντίστοιχα. Οι αναλογίες μεταξύ διαγώνιου συνδέσμου και δύσκαμπτων τμημάτων ακολούθησαν αυτές των εργαστηριακών δοκιμών (παράγραφος D).



Σχήμα 4. Μοντελοποίηση φορέα στο OpenSees.

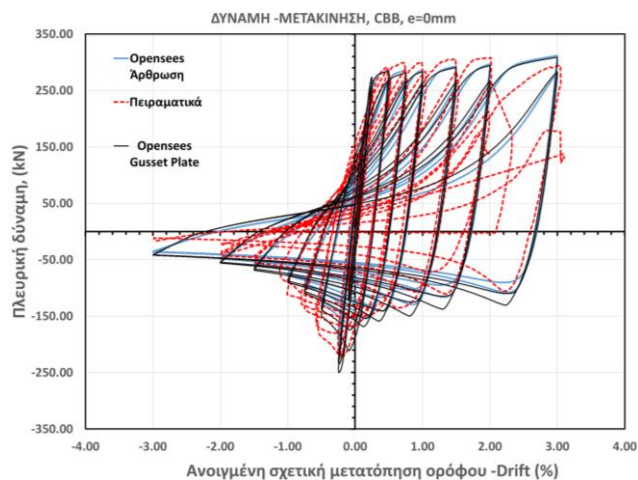
Τα υποστυλώματα, οι δοκοί, και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι εξομοιώθηκαν ως μη γραμμικά στοιχεία (nonlinear Beam Column Element). Κάθε σύνδεσμος χωρίστηκε σε δέκα

τμήματα, με τη διατομή να διακριτοποιείται σε δέκα ακτινικά τμήματα, και δύο τμήματα ως προς το πάχος της, ακολουθώντας τη συνήθη πρακτική για ανελαστικό λυγισμό σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Uriz et. al. 2008)

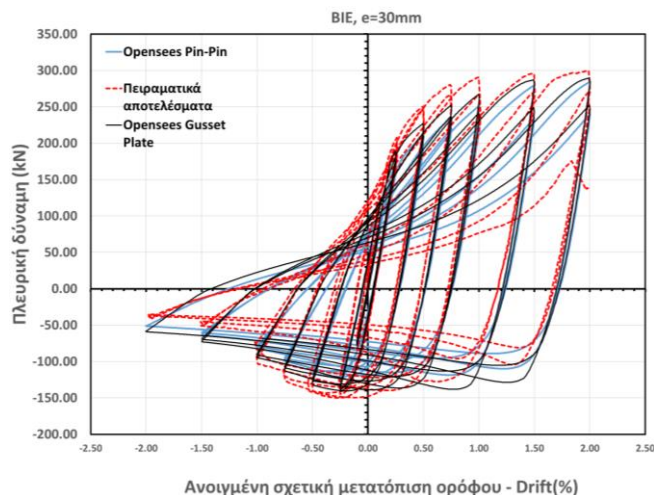
D. Επιβεβαίωση του μοντέλου

Για να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο λογισμικό OpenSees, κρίθηκε απαραίτητο να συγκριθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και με αποτελέσματα από αντίστοιχα επιστημονικά μοντέλα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με βάση την περιγραφή του άρθρου των Skalomenos et al. (2022), και τα δεδομένα των εργαστηριακών δοκιμών παραχωρήθηκαν από τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε μια κοιλοδοκό κυκλικής διατομής με εξωτερική διάμετρο $D=114.3$ mm και πάχος τοιχώματος 3.5 mm, κατασκευασμένη από χάλυβα STK400. Το ύψος της διάταξης ήταν 1753 mm και η οριζόντια απόσταση μεταξύ των σημείων σύνδεσης του διαγώνιου συνδέσμου με τις δύο δοκούς ήταν επίσης 1753 mm, δίνοντας μια διαγώνιο συνολικού μήκους 2479.1 mm. Ο σύνδεσμος εξετάστηκε για δύο μορφές σύνδεσης: μια διάταξη κομβοελασμάτων με διάκενο $2t_p$ και μια πραγματική άρθρωση. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για συνδέσμους με εκκεντρότητες 0 mm, 30 mm, και 60 mm, αντιστοιχώντας και λόγους εκκεντρότητας προς ακτίνα αδρανείας (e/i) 0, 0.77, και 1.53 αντίστοιχα. Το καθαρό μήκος του συνδέσμου ήταν 1575 mm ενώ η λυγηρότητα του συνδέσμου ήταν 1.19. Στη βάση αυτών των δεδομένων, προσαρμόστηκε το μοντέλο της παραγράφου Β, δημιουργώντας ένα πλαίσιο ενός ανοίγματος 1753mm και ύψους 1753mm με έναν διαγώνιο σύνδεσμο. Ο σύνδεσμος περιλάμβανε δύσκαμπτα τμήματα μήκους 174.06mm στα άκρα και τμήματα μήκους 278 mm που αντιπροσώπευαν την διάταξη εκκεντρότητας. Το υλικό που επιλέχθηκε ήταν το Steel02 με μέτρο ελαστικότητας $E=205$ GPa, αντοχή χάλυβα $F_y=329$ MPa και λόγο κράτυνσης 0.01. Αυτή η διάταξη επέτρεψε την επαλήθευση του μοντέλου μέσω της σύγκρισης με τους βρόγχους υστέρησης που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές έχοντας πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήματα 5, 6).



Σχήμα 5. Σύγκριση ανακυκλιζόμενης φόρτισης στο OpenSees με πειραματικά αποτελέσματα για $e=0$ mm



Σχήμα 6. Σύγκριση ανακυκλιζόμενης φόρτισης στο OpenSees με πειραματικά αποτελέσματα για $e=30$ mm

E. Παραμετρική ανάλυση

Συνολικά θα εξεταστούν επτά πλαισιωτοί φορείς δύο ανοιγμάτων με ύψος πλαισίου 4m και μήκος ανοίγματος 6m. Κριτήριο της επιλογής των διατομών ήταν η εξέταση ενός φάσματος ανοιγμένη λυγηρότητα με $\bar{\lambda}=0.4, 0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6$.

Επίσης, επειδή θέλουμε να εξετάσουμε την συσχέτιση του ισοδύναμου ιξώδους συντελεστή απόσβεσης και του μεγέθους της εκκεντρότητας του συνδέσμου επιλέχθηκε να αναλυθούν οι εξής περιπτώσεις λόγου εκκεντρότητας προς ακτίνα αδρανείας $e/i = 0.7, 1.1, 1.5, 1.9, 2.3$ (σημειώνουμε για τους ίδιους φορείς για συγκριτικούς λόγους θα γίνει υπολογισμός των αντίστοιχων κεντρικά συνδεδεμένων συνδέσμων, δηλαδή περίπτωση $e/i=0$)

Οι διατομές που επιλέχθηκαν να εξεταστούν είναι κυκλικοί κοιλοδοκοί CHS 559x17.5, CHS 355.6x14.2, CHS 273x12.5, CHS 219.10x10, CHS 193.7x8.8, CHS 168.3x11 και CHS 139.7x6.3.

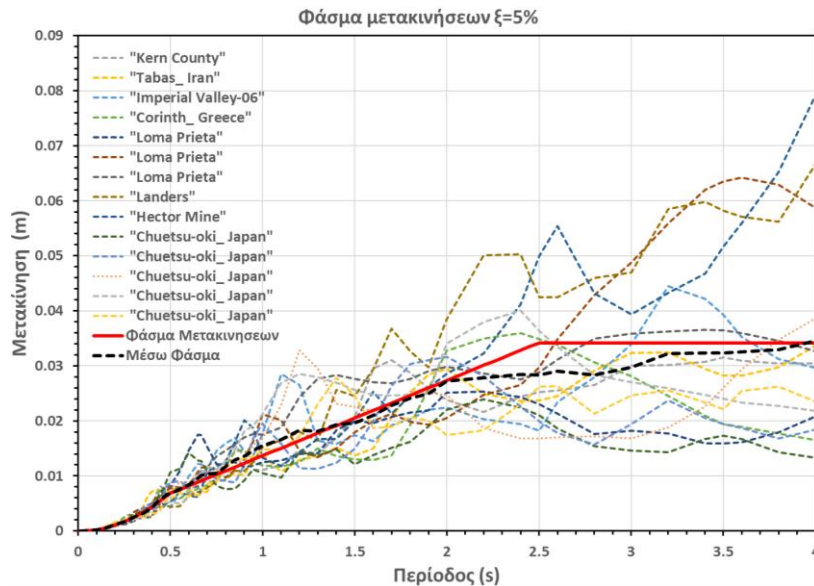
Θεωρήσαμε ότι οι συνδέσεις των διαγωνίων στοιχείων με το πλαισιακό φορέα θα είναι αρθρωτές με επιβολή της στροφής και της παραμόρφωση, του διαγώνιου συνδέσμου να εμφανίζεται εντός επιπέδου του πλαισίου. Ως υλικό κατασκευής των στοιχείων θεωρήθηκε χάλυβας με αντοχή $F_y=355$ MPa και μέτρο ελαστικότητας $E=210$ GPa, λόγο Poisson $\nu=0.3$ και λόγο κράτυνσης 0.01 (δηλαδή κατηγορία χάλυβα S355).

F. Υπολογισμός ισοδύναμου συντελεστή ιξώδους

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Εφαρμόστηκε ανακυκλιζόμενη φόρτιση στους πλαισιακούς φορείς που περιεγράφηκαν από που και προέκυψαν οι βρόγχοι υστέρησης της πλευρικής δύναμης και της οριζόντιας μετακίνησης της κορυφής του πλαισίου.

2. Για επιλεγμένη πλαστιμότητα ($\mu=\Delta_m/\Delta_y$) άρα και οριζόντια μετακίνηση Δ_m υπολογίστηκε από τους βρόγχους υστέρησης το εμβαδόν A_{hyst} του κύκλου που εξετάζουμε και υπολογίζεται η αρχική προσέγγιση του συντελεστής ιξώδους απόσβεσης ξ_{hys} [Σχέση (1)].



Σχήμα 7. Μέσω φάσμα μετακινήσεων που προέκυψε από τα 14 επιταχυνσιογραφήματα

Επίσης προκύπτει η μέγιστη δύναμη F_m για τη μετακίνηση Δ_m , από όπου υπολογίζεται η ισοδύναμη δυσκαμψία K_{eff}

$$K_{eff} = \frac{F_m}{\Delta_m} \quad (2)$$

3. Επιλέχθηκαν 14 επιταχυνσιογραφήματα με χρήση της βάσης δεδομένων Peer Ground Motion Database (<https://ngawest2.berkeley.edu/>). Η επιλογή έγινε για ελαστικό φάσμα σχεδιασμού συντελεστή απόσβεσης $\xi=5\%$, κατηγορία εδάφους B, κατηγορία σπουδαιότητας θεωρούμαι ότι είναι II (με $\gamma=1.0$) και ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z3 άρα $\alpha_{gR}/g=0.36$ (Ευρωκώδικας 8, Ελληνικό προσάρτημα). Από τα επιταχυνσιογραφήματα προκύπτει το μέσο φάσμα μετακινήσεων για $\xi=5\%$ (Σχήμα 7).

Από αυτό το φάσμα προσδιορίζεται το αποσβεσμένο φάσμα μετακινήσεων για $\xi=\xi_{el}+\xi_{hyst}$, με τιμές $\xi_{el}=5\%$. Ο υπολογισμός του αποσβεσμένου φάσματος μετακινήσεων έγινε με χρήση της σχέσης (3):

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \quad (3)$$

(Η παραπάνω σχέση αναφέρεται ότι δίνει καλύτερη συμφωνία με το φάσμα μετακινήσεων σε σχέση με τη σχέση που δίνεται στον Ευρωκώδικας 8, Blandon 2004)

4. Με δεδομένα τα K_{eff} και T_{eff} από τα προηγούμενα βήματα, υπολογίζεται η ενεργή μάζα m_{eff} , η οποία διαμοιράζεται στις δύο ακραίες γωνίες του πλαισίου, σχέση (4).

$$m_{eff} = \frac{K_{eff} \cdot T_{eff}^2}{4\pi^2} \quad (4)$$

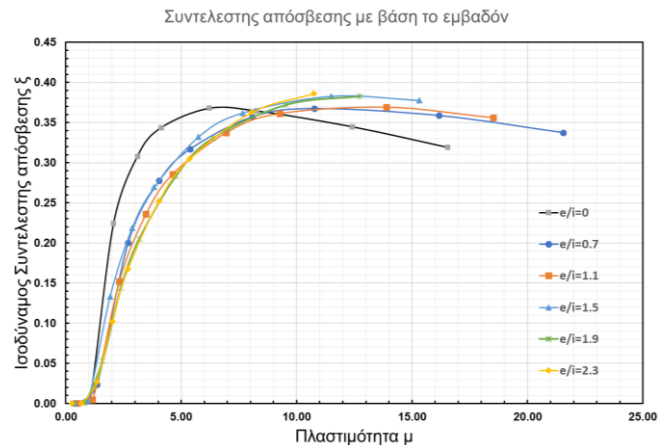
5. Εφαρμόζονται ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας για τα 14 επιταχυνσιογραφήματα, από τις οποίες προκύπτει η μέγιστη μετακίνηση. Υπολογίζεται ο μέσος όρος της μέγιστης μετακίνησης Δ_{ITH} .

6. Αν η διαφορά είναι μικρότερη του 5%, η τιμή του συντελεστή απόσβεσης ξ_{hyst} είναι αποδεκτή. Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη, επαναλαμβάνεται η διαδικασία θεωρώντας μια νέα τιμή του ξ .

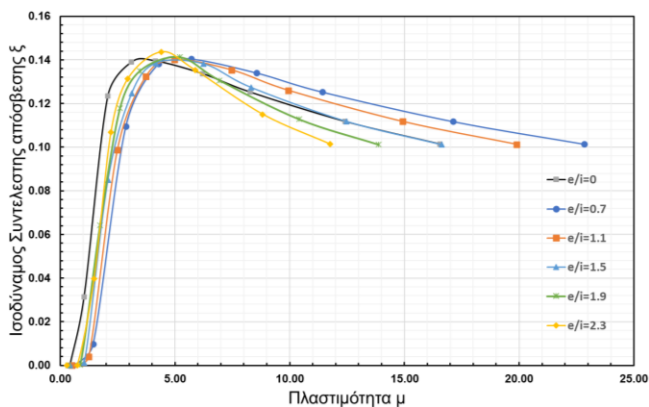
Για τις ανελαστικές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος αριθμητικής ολοκλήρωσης Newmark με $\beta=0.25$ και $\gamma=0.5$. Αρχικό χρονικό βήμα ήταν το Δt της καταγραφής, ενώ σε περίπτωση προβλημάτων σύγκλισης, το χρονικό βήμα μειωνόταν αυτόματα. Η ελαστική απόσβεση λήφθηκε υπόψη μόνο ως ανάλογη του μητρώου δυσκαμψίας, προσφέροντας ρεαλιστική απεικόνιση της απόσβεσης σε μη γραμμικά-ανελαστικά δυναμικά προβλήματα (Priestley, M. J. N., & Grant, D. N, 2005).

III. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αρχικά γίνεται η αρχική προσέγγιση του ισοδύναμου συντελεστή ιξώδους απόσβεσης με εφαρμογή της μεθόδου Jacobsen (σχέση 1). Για τον υπολογισμό είχε προηγηθεί ανακυκλιζόμενη φόρτιση δύο κύκλων με μέγεθος ανοιγμένων μετακινήσεων (drift) $\pm 0.1\%, \pm 0.25\%, \pm 0.50\%, \pm 0.75\%, \pm 1.0\%, \pm 1.5\%, \pm 2.0\%, \pm 3.0\%, \pm 4.0\%$.



Σχήμα 8. Συντελεστής ιξώδους απόσβεση ξ_{hyst} για CHS 559x17.5 με $\bar{\lambda}=0.4$ για κάθε e/i

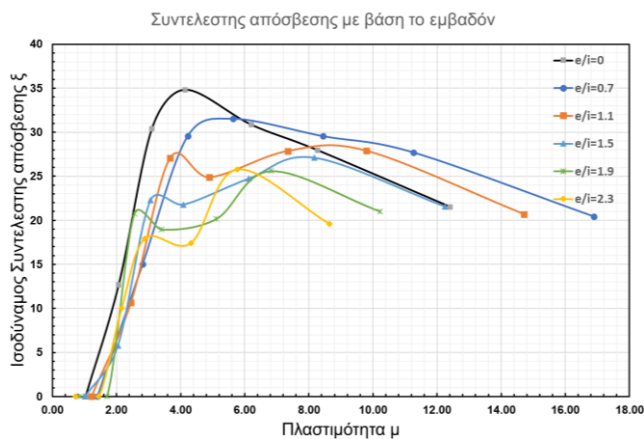


Σχήμα 9. Συντελεστής ιξώδους απόσβεσης ξ_{hyst} για CHS 168.3x11 με $\bar{\lambda}=1.4$ για κάθε e/i

Παρατηρείται:

- Συσχέτιση των αποτελεσμάτων του ξ_{hyst} με τη πλαστιμότητα.
- Σε γενικές γραμμές για τον ίδιο σύνδεσμο η αύξηση του e/i οδηγεί σε αύξηση του ξ_{hyst} .
- Για συνδέσμους με ανοιγμένη λυγηρότητα $\lambda > 0.8$ φαίνεται ότι ο συντελεστής ξ_{hyst} να μην αυξάνεται με την αύξηση της εκκεντρότητας όμως με ολόένα και πιο ραχδαία μείωση του για μεγαλύτερες τιμές e .
- Η αύξηση της ανοιγμένης λυγηρότητας εμφανίζει μετριασμό στο όφελος που προσφέρει η επιβολή εκκεντρότητας έτσι για διατομές με $\lambda > 1.4$ έχουμε περιορισμένη αύξηση της απόσβεσης.

Ακολουθεί η διόρθωση του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης με την εφαρμογή ανελαστικών αναλύσεων χρονοϊστορίας. Ενδεικτικά βλέπουμε στο σχήμα 10 τη περίπτωση για $\bar{\lambda}=0.6$.

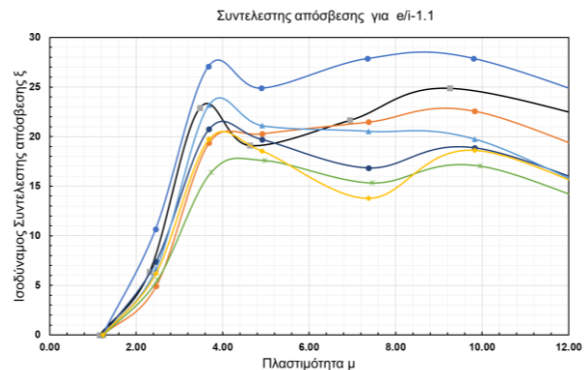


Σχήμα 10. Διορθωμένος συντελεστής ιξώδους απόσβεσης ξ_{hyst} για $\bar{\lambda}=0.6$

Παρατηρείται:

- Οι σύνδεσμοι σκόπιμης εκκεντρότητας εμφανίζουν μεγαλύτερη διόρθωση σε σχέση με τους συμβατικούς.
- Οι συνήθεις σύνδεσμοι δυσκαμψίας παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσβεση.
- Οι σύνδεσμοί σκόπιμης εκκεντρότητας διατηρούν σημαντική απόσβεση σε μεγαλύτερες πλαστιμότητες σε σχέση με συμβατικούς συνδέσμους οι οποίοι εμφανίζουν σχετικά απότομη μείωση μετά την εμφάνιση της μέγιστης τιμής απόσβεσης

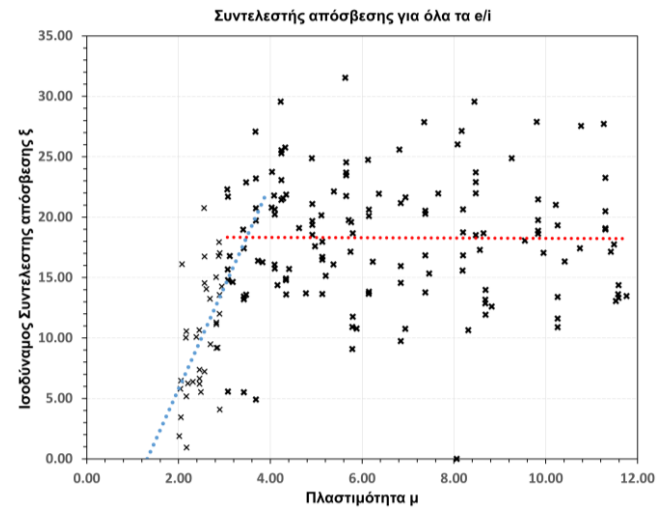
- Σύνδεσμοι σκόπιμης εκκεντρότητας με λόγο εκκεντρότητας προς ακτίνα αδρανείας $e/i > 1.1$ εμφανίζουν τη μεγαλύτερη απομείωση στο συντελεστή ξ_{hyst} και θα πρέπει να αποφεύγονται.



Σχήμα 11. Διορθωμένος συντελεστής ιξώδους απόσβεσης ξ_{hyst} για $e/i=1.1$

Ακολουθώντας γίνεται επεξεργασία των δεδομένων συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα ανά λόγο e/i για όλες τις διατομές συναρτήσει της πλαστιμότητας (Σχήμα 11). Βλέπουμε μια γραμμική σχέση ξ -μ μέχρι μια τιμή πλαστιμότητας ενώ στην συνέχεια οι καμπύλες «οριζοντιώνονται». Στη συνέχεια συγκεντρώνονται το σύνολο των αποτελεσμάτων για όλες τις διατομές (Σχήμα 12) και προσαρμόζονται στα δεδομένα δύο ευθείες. Παρατηρούμαι ότι:

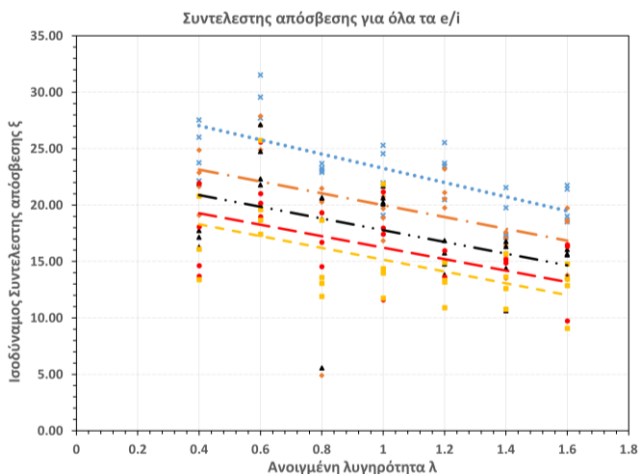
- Για $\mu \leq 3$: σχέση ξ -μ γραμμική
- Για $\mu \geq 3$: σχέση ξ -μ σταθερή-ανεξάρτητη του μ



Σχήμα 12. Προσέγγιση σταθερής τιμής του ξ για $\mu \geq 3$

Στη συνέχεια, έγινε ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και προσαρμογή γραμμικών σχέσεων μεταξύ του συντελεστή ιξώδους απόσβεσης και της ανοιγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ για κάθε λόγο e/i . Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης μειώνεται με την αύξηση της λυγηρότητας. Παράλληλα, ο συντελεστής εξαρτάται από την εκκεντρότητα του συνδέσμου και μειώνεται με την αύξηση του λόγου εκκεντρότητας προς ακτίνα αδρανείας (e/i). Οι ευθείες γραμμές που προσαρμόζονται στα δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες μεταξύ τους (Σχήμα 13), υποδεικνύοντας ότι η μεταβολή του συντελεστή απόσβεσης λόγω της εκκεντρότητας είναι

περίπου η ίδια για όλες τις τιμές της ανοιγμένης λυγηρότητας ($\bar{\lambda}$).



Σχήμα 13. Συντελεστή ιξώδους απόσβεσης συναρτήσει της λυγηρότητας και προσαρμοσμένες ευθείες στα δεδομένα

Έτσι για τους συνδέσμους δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης (σε ποσοστό %) προέκυψαν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\mu \leq 3: \quad \xi_{BIE} = 5 + \left[27 - 8.4 \ln \left(\frac{e}{i} \right) - 5.4 \cdot \bar{\lambda} \right] \left(\frac{\mu - 1}{2} \right) \quad (4)$$

$$\mu \geq 3: \quad \xi_{BIE} = 32 - 8.4 \ln \left(\frac{e}{i} \right) - 5.4 \cdot \bar{\lambda} \quad (5)$$

Όπου μ είναι η πλαστιμότητα, $\bar{\lambda}$ είναι η ανοιγμένη λυγηρότητα και e/i ο λόγος της εκκεντρότητας προς την ακτίνα αδρανείας της διατομής.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Κατά την εφαρμογή της μεθόδου παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της εκκεντρότητας σε έναν διαγώνιο σύνδεσμο σταδιακά μειώνει την απόσβεση του φορέα
- Οι συμβατικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας εμφανίζουν μεγαλύτερη τιμή συντελεστή ιξώδους απόσβεσης άρα απορροφούν και μεγαλύτερη σεισμική ενέργεια.
- Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας εμφανίζεται να διατηρούν ικανοποιητική απόσβεση για μεγάλο εύρος καμπυλοτήτων ενώ οι συμβατικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας εμφανίζουν απότομη μείωση μετά την εμφάνιση της μέγιστης τιμής.
- Διατηρούν σημαντική δυσκαμψία μετά την πρώτη διαρροή και για σημαντική παραμόρφωση του φορέα. Αυτό επιβεβαιώνεται από μονοτονικές φορτίσεις που πραγματοποιήθηκαν αλλά και από τις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις αφού φαίνεται να μειώνεται η αρχική δυσκαμψία του φορέα με μέγιστη πλευρική φόρτιση να παρουσιάζετε σε μεγαλύτερες σχετικές μετακινήσεις σε σχέση με τους συμβατικούς συνδέσμους
- Προτείνεται σε εφαρμογή συνδέσμων σκόπιμης εκκεντρότητας η εφαρμοζόμενη εκκεντρότητα να

περιορίζεται μέχρι $e/i=1.1$. Μεγαλύτερη εκκεντρότητα φαίνεται να μειώνει σημαντικά την απόσβεση του συστήματος.

- Ο συντελεστή ιξώδους απόσβεσης στους συνδέσμους δυσκαμψίας σκόπιμης εκκεντρότητας εξαρτάται από την ανοιγμένη λυγηρότητα του συνδέσμου και από την εκκεντρότητα του ενώ μπορεί να εκφραστεί ως μία διγραμμική σχέση [σχέσεις (4) και (5)].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Blandon, C. (2004). *Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design*. master. Rose School, Pavia.
- Blandon, C. A., & Priestley, M. J. N. (2005). *Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design*. Journal of Earthquake Engineering, 9(sup2), 257-278.
- CEN (2004) EC8: *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Standard, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Dwairi H.M., Kowalski M.J, Nau M.J. (2007). *Equivalent Damping in Support of Direct Displacement- Based Design*. Journal of Earthquake Engineering. 11: 1-19.10.1080/13632460601033884
- Gulkan, P., & Sozen, M. A. (1974, December). *Inelastic responses of reinforced concrete structure to earthquake motions*. In Journal proceedings (Vol. 71, No. 12, pp. 604-610).
- Hsiao, P. C., Lehman, D. E., & Roeder, C. W. (2012). *Improved analytical model for special concentrically braced frames*. Journal of Constructional Steel Research, 73, 80-94.
- Jayasooriya, E. M. S. D., Indika, D. W. U., Wijesundara, K. K., & Rajeev, P. (2021). *Equivalent viscous damping for steel eccentrically braced frame structures with buckling restraint braces*. Innovative Infrastructure Solutions, 6, 1-14.
- Kowalsky, M. J., & Ayers, J. P. (2002, July). *Investigation of equivalent viscous damping for direct displacement-based design*. In The 3rd Japan-US workshop on performance based earthquake engineering methodology for reinforced concrete building structures.
- Miranda, E., & Ruiz - Garcia, J. (2002). *Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(3), 539-560.
- Papagiannopoulos G., Hatzigeorgiou G., Beskos D. (2021). *Seismic Design Methods for Steel Building Structures*. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, 51.10.1007/978-3-030-80687-3_4.
- Priestley, M. J. N., & Grant, D. N. (2005). *Viscous damping in seismic design and analysis*. Journal of Earthquake Engineering, 9(spec02), 229-255.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsy M.J.(2007).*Displacement-Base Seismic Design of Structures* .IUSS Press, Pavia, Italy
- S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 2006.
- Skalomenos K., Inamasu H., Shimad H., Nakashima M. (2017). *Development of Steel Brace with Intentional Eccentricity and Experimental validation*.J. Struct. Eng. ASCE. 143(8) :04017072
- Skalomenos K., Whittall T., Kurata M. , Pickering J. (2022). *Component testing and multilevel seismic design of steel braced frames with high post-yielding stiffness and two-pahse yielding*. Soil Dynamics an Earthquake Engineering. 157. 107248
- Skalomenos K.A., Kurada M., Shimada H. Nishiyama M. (2018). *Use of Induction-heating in steel structures Material properties and novel brace deisgn*. Journal of Contructional Steel Research.148.112-123.2018.05.016
- Urena G.A., Tremblay R., Rogers A.C. (2021). *Earthquake-resistant design steel frames with Intentional eccentric Braces*. Journal of Constructional Steel Research.178.106483
- Uriz P., Filippou F.C., Mahin S.A.,(2008).*Model for Cyclic Inelastic Buckling of Steel Braces*. Journal of Structural Engineering ASCE, April; 2008, 619, 169.229.157.158
- Wijesundara, K. K., Nascimbene, R., & Sullivan, T. J. (2011). *Equivalent viscous damping for steel concentrically braced frame structures*. Bulletin of Earthquake Engineering, 9, 1535-1558.