

ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Ι. Βάγιας¹, Ο. Παλκοπούλου²¹Καθηγητής, ²Πολιτικός Μηχανικός, Υ.Δ.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: opal@mail.ntua.gr**1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στα πλαίσια ανάπτυξης καινοτόμων αντισεισμικών συστημάτων δυσκαμψίας προτείνεται ένα νέο σύστημα με εφαρμογή σε μεταλλικά κτίρια. Το σύστημα αποτελείται από ισχυρά υποστυλώματα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, τα οποία συνδέονται κοχλιωτά με πυκνά διατεταγμένες δοκούς, ικανές προς απορρόφηση ενέργειας. Σε περίπτωση βλάβης μετά από ισχυρό σεισμό, υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης των δοκών οι οποίες έτσι χρησιμοποιούνται ως «ανταλλακτικά». Η συμπεριφορά του νέου συστήματος διερευνήθηκε πειραματικά και αναλυτικά στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια παρουσίαση του προτεινόμενου συστήματος, καθώς και συγκριτικών αποτελεσμάτων της σεισμικής συμπεριφοράς ενός μεταλλικού πολυώροφου κτιρίου με χρήση του καινοτόμου και συμβατικών συστημάτων δυσκαμψίας.

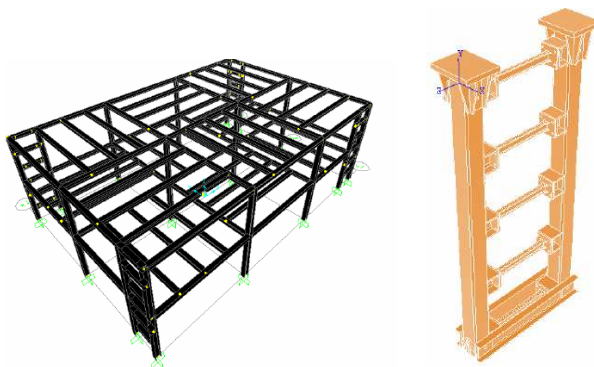
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πλευρική ευστάθεια μεταλλικών πολυώροφων κτιρίων επιτυγχάνεται με διάφορα συστήματα δυσκαμψίας, τα πλέον συνήθη των οποίων είναι επίπεδα και χωρικά πλαίσια, κεντρικοί και έκκεντροι κατακόρυφοι σύνδεσμοι, διάφοροι τύποι τοιχωμάτων (χαλύβδινα, σύμμικτα, από σκυρόδεμα) και συνδυασμός των ανωτέρω. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τόσο από άποψη σεισμικής συμπεριφοράς ως προς τη δυσκαμψία, αντοχή και ολκιμότητα, όσο και από άποψη αρχιτεκτονική.

Το προτεινόμενο σύστημα αναπτύχθηκε ώστε να συνδυάζει τα οφέλη των πλαισίων ροπής, σε ό,τι αφορά την ολκιμότητα και την αρχιτεκτονική ευχέρεια, και τα οφέλη των πλαισίων με συνδέσμους σε ό,τι αφορά την δυσκαμψία.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από ισχυρούς στύλους σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, συνδεδεμένους με πυκνά διατεταγμένες ασθενέστερες δοκούς όχι μόνο στις στάθμες των ορόφων αλλά και ενδιάμεσα αυτών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής, της δυσκαμψίας, και της ικανότητας απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας.

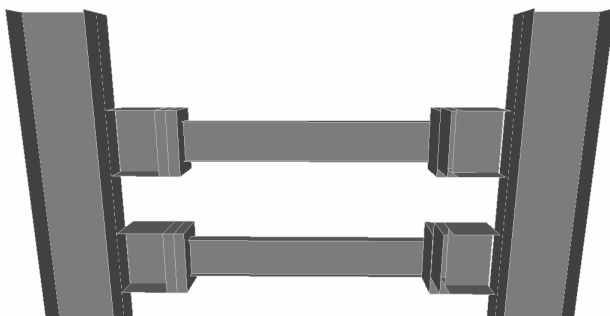


Σχ. 1: Παράδειγμα εφαρμογής καινοτόμου συστήματος

Το Σχήμα 1 δείχνει ένα παράδειγμα του στοιχείου-συστήματος, το οποίο συμπεριφέρεται σε πλευρική φόρτιση ως μια κατακόρυφη δοκός Vierendeel και εξασφαλίζει την πλευρική ευστάθεια του φορέα. Έτσι, οι συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων του συστήματος είναι συνδέσεις ροπής, ενώ οι αντίστοιχες συνδέσεις στο υπόλοιπο κτίριο μπορεί να διαμορφωθούν ως απλές συνδέσεις τέμνουσας.

Στο παρόν σύστημα, οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας είναι οι δοκοί οι οποίες λειτουργούν ανελαστικά υπό έντονη σεισμική δράση. Ο κατάλληλος σχεδιασμός επιτρέπει την πλαστικοποίηση μακριά από την σύνδεση. Η σύνδεση των δοκών με τα υποστυλώματα είναι κοχλιωτή, διευκολύνοντας έτσι την αντικατάστασή τους μετά από βλάβη προερχόμενη από έντονη σεισμική διέγερση. Σημειώνεται ότι οι δοκοί δεν μεταφέρουν αναγκαστικά κατακόρυφα φορτία, δεδομένου ότι δεν τοποθετούνται μόνο στις στάθμες των ορόφων. Η διαμόρφωση της έδρασης των υποστυλωμάτων του συστήματος και του συνολικού φορέα ως πάκτωση προσφέρει μεγαλύτερη δυσκαμψία και οδηγεί σε καλύτερη συμπεριφορά του φορέα.

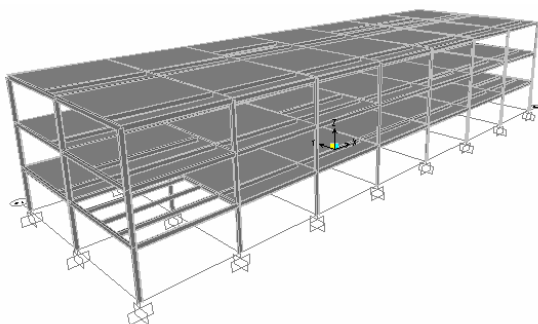
Ο σχεδιασμός της περιοχής του κόμβου δοκού-υποστυλώματος του συστήματος είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπει την δημιουργία ανελαστικών παραμορφώσεων μακριά από την περιοχή της σύνδεσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διάταξη ισχυρών υποστυλωμάτων και ενίσχυσης των άκρων της δοκού. Η σύνδεση είναι κοχλιωτή με μετωπική πλάκα στα άκρα των δοκών, η οποία επιτρέπει την αντικατάστασή τους αν αυτό απαιτηθεί.



Σχ. 2: Λεπτομέρεια σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος συστήματος

4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Η συμπεριφορά του καινοτόμου συστήματος συγκριτικά με συμβατικά συστήματα δυσκαμψίας παρουσιάζεται σε ένα παράδειγμα εφαρμογής. Πρόκειται για ένα τριώροφο μεταλλικό κτίριο, με ύψος ορόφου 3,4m και 7 ανοίγματα των 7m κατά τον διαμήκη άξονα, και 2 ανοίγματα των 8m κατά τον εγκάρσιο άξονα. Οι δευτερεύουσες δοκοί είναι σύμμικτες, και διατεταγμένες κατά την διαμήκη διεύθυνση του κτιρίου τοποθετούνται δε ανά 2m. Η πλάκα δαπέδου είναι σύμμικτη πλάκα πάχους 15cm. Τα μόνιμα φορτία πέραν του ιδίου βάρους των στοιχείων είναι 3kN/m^2 , ενώ τα κινητά φορτία είναι $2,5\text{kN/m}^2$.

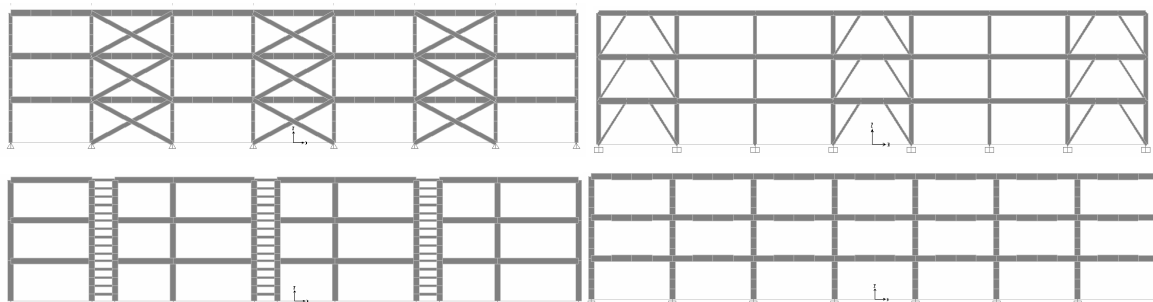


Σχ. 3: Τρισδιάστατη όψη κτιρίου

Η πλευρική ευστάθεια του κτιρίου εξασφαλίζεται με τέσσερα διαφορετικά συστήματα, τα οποία διατάσσονται κατά την διαμήκη έννοια στην περίμετρο του κτιρίου. Τα συστήματα αυτά είναι (Σχ. 4):

- Κεντρικοί σύνδεσμοι (centrically braced frames, C.B.F.)
- Έκκεντροι σύνδεσμοι (eccentrically braced frames, E.B.F.), με μήκος δοκών σύζευξης 2m
- Πλαίσια ροπής (moment resisting frames, M.R.F.)
- Καινοτόμο σύστημα δυσκαμψίας, με αξονική απόσταση στύλων 2m, και 4 δοκούς ανά όροφο (NEO)

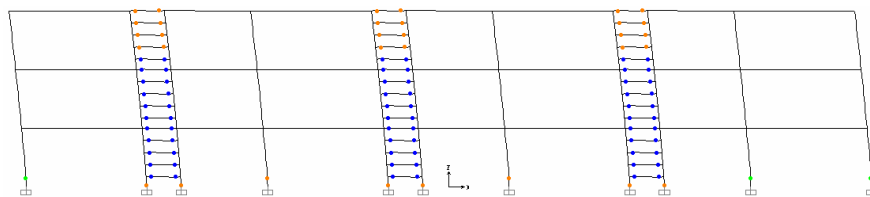
Το κτίριο σχεδιάζεται έναντι σεισμού για εδαφική επιτάχυνση $0,24g$, έδαφος τύπου Β, φάσμα τύπου 1 κατά Ευρωκώδικα 8 [2], απόσβεση 3%, λόγω συνδυασμού κοχλιωτών και συγκολλητών συνδέσεων και περίοδο επαναφοράς του σεισμού 475 έτη για το κριτήριο μη κατάρρευσης. Οι πλευρικές μετατοπίσεις κατά τον συχνό σεισμό περιορίζονται στο 0,7% για λόγους λειτουργικότητας.



Σχ. 4: Εναλλακτικές προτάσεις σχεδιασμού πλαισίου

Για τα πλαίσια με τους έκκεντρους και κεντρικούς συνδέσμους θεωρήθηκε συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς 4, ενώ για το πλαίσιο ροπής και το καινοτόμο σύστημα συντελεστής σεισμικής συμπεριφοράς 5. Η έδραση των υποστυλωμάτων των πλαισίων είναι πάκτωση. Θεωρείται διαφραγματική λειτουργία των κόμβων στις στάθμες δαπέδου των ορόφων.

Η απόκριση των συστημάτων γίνεται με υπολογισμό στο επίπεδο πλαίσιο λόγω κανονικότητας του τρισδιάστατου φορέα. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών συστημάτων γίνεται με τη βοήθεια στατικής μη γραμμικής ανάλυσης. Η κατανομή της πλευρικής φόρτισης γίνεται με βάση την κύρια ιδιομορφή κάθε πλαισίου. Το σχήμα 5 δείχνει εικόνα του καινοτόμου συστήματος κατά την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις ζώνες απορρόφησης ενέργειας. Στα πλαίσια με συμβατικά συστήματα δυσκαμνιάς εμφανίζονται ανελαστικές παραμορφώσεις στα αναμενόμενα στοιχεία. Στο καινοτόμο σύστημα παρατηρείται ταυτόχρονη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε πολλές δοκούς του συστήματος, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή απορρόφησης ενέργειας.

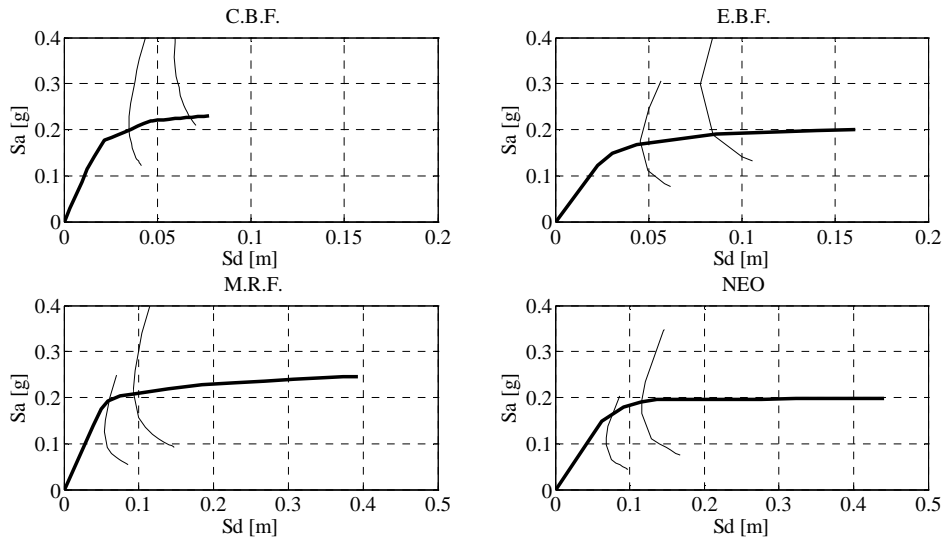


Σχ. 5: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα σε ανελαστική περιοχή

Στα σχήματα 6 και 7 δείχνεται η απόκριση των εξεταζόμενων συστημάτων. Το σχήμα 6 δείχνει την φασματική επιτάχυνση των συστημάτων ως προς την φασματική μετατόπιση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή του φάσματος ικανότητας βάσει του ATC-40 [4] (Capacity Spectrum Method), χρησιμοποιώντας ισοδύναμους συντελεστές $C_a = 0,32$ και $C_v = 0,40$. Κάθε διάγραμμα έχει τρεις καμπύλες. Η έντονη καμπύλη είναι η φασματική ικανότητα του φορέα. Οι άλλες δύο καμπύλες δείχνουν τη σεισμική απαίτηση για περιόδους επαναφοράς 475 και 95 έτη, οι οποίες αντιστοιχούν στις απαιτήσεις μη-κατάρρευσης, και περιορισμού βλαβών. Η καμπύλη των 95 ετών προκύπτει από αυτή των 475 ετών με

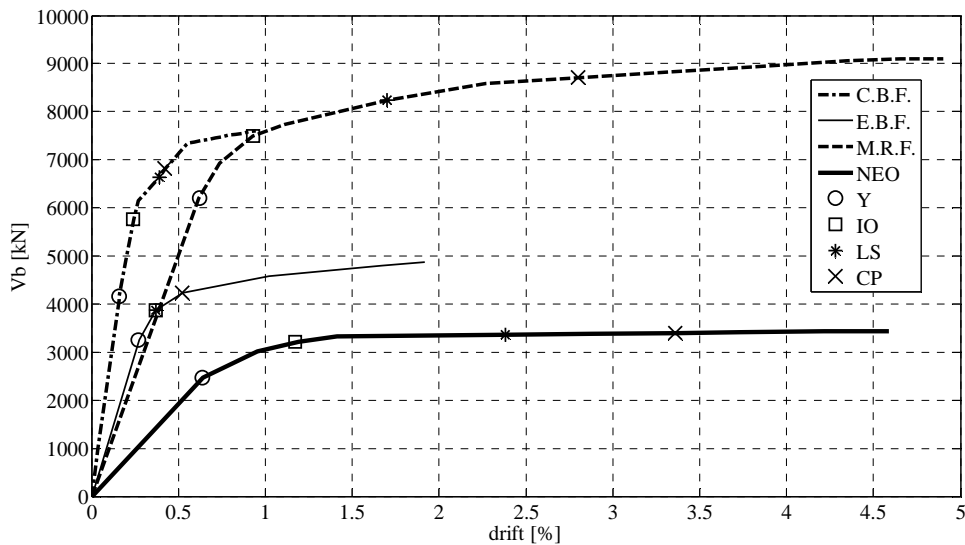
εφαρμογή του μειωτικού συντελεστή γ_I σύμφωνα με την εξ.(1) , του Ευρωκώδικα 8 [2]:

$$\gamma_I = \left(\frac{T_{LR}}{T_L} \right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{475}{95} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,5848 \quad (1)$$



Σχ. 6: Διαγράμματα φασματικής επιτάχυνσης – φασματικής μετατόπισης

Το σχήμα 7 παρουσιάζει το διάγραμμα σχετικής μετατόπισης κορυφής του πλαισίου (drift %) ως προς την τέμνουσα βάσης του πλαισίου (V_b). Στο διάγραμμα απεικονίζονται 4 καμπύλες απόκρισης, μια για κάθε τύπο πλαισίου. Πάνω σε κάθε καμπύλη είναι σημειωμένα 4 χαρακτηριστικά σημεία. Το σημείο ‘Y’ εμφάνισης πρώτης διαρροής – πλαστικοποίησης στο πλαίσιο, και τα σημεία ‘IO’(immediate occupancy), ‘LS’(life safety), ‘CP’(collapse prevention), κατά τα οποία η πλαστική άρθρωση οποιουδήποτε μέλους του φορέα θα παρουσιάσει παραμόρφωση για πρώτη φορά, ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου, βάσει



Σχ. 7: Διάγραμμα κλίσης πλαισίου με τέμνουσα βάσης και βαθμοί τοπικής βλάβης

ορίων που δίνονται σε πίνακες του FEMA 356 [3] για τις στάθμες συμπεριφοράς του κτιρίου. Το καινοτόμο σύστημα, λόγω συμπεριφοράς θεωρείται ότι ανήκει στην κατηγορία των πλαισίων ροπής. Από την σύγκριση των ορίων στους πίνακες FEMA 356 [3] με τις τιμές του διαγράμματος παρατηρείται η σημασία της διαφοράς της τοπικής και ολικής πλαστιμότητας – παραμορφωσιμότητας και βλάβης.

Τύπος πλαισίου	Σημείο επιτελεστικότητας για CP (475 έτη)	Σημείο επιτελεστικότητας για IO (95 έτη)	Ελαστική ανάλυση με φάσμα σχεδιασμού (475 έτη)	Ελαστική ανάλυση με φάσμα σχεδιασμού (95 έτη)
	Βαθμός τοπικής βλάβης	Βαθμός τοπικής βλάβης		
Πλαίσιο ροπής	1,15%	0,75%	1,19%	0,69%
	IO	Y		
Κεντρικοί σύνδεσμοι	0,81%	0,41%	0,74%	0,43%
	>CP	CP		
Έκκεντροι σύνδεσμοι	1,01%	0,55%	0,94%	0,55%
	>CP	CP		
Καινοτόμο σύστημα	1,21%	0,80%	1,20%	0,70%
	IO	Y		

Πίν. 1. Συνολική κλίση κτιρίου και βαθμός τοπικής βλάβης

Ο πίνακας 1 δείχνει συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων του σχήματος 6, όσον αφορά τις σχετικές μετατοπίσεις οροφής του πλαισίου. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, τα πλαίσια με συνδέσμους είναι πιο δύσκαμπτα, λόγω μεγαλύτερης απαίτησης περιορισμού των βλαβών. Παρά την απαίτηση αυτή παρατηρείται ότι η τοπική βλάβη μελών του κάθε πλαισίου διαφέρει αναλόγως του τύπου του, για την ίδια στάθμη απαίτησης συμπεριφοράς.

Τύπος πλαισίου	V_y / V_d	V_e / V_d	Τοπική συμπεριφορά
			d_u / d_y
Πλαίσιο ροπής	3,22	6,84	4,51
Κεντρικοί σύνδεσμοι	1,31	2,21	2,62
Έκκεντροι σύνδεσμοι	1,32	2,06	1,92
Καινοτόμο σύστημα	3,38	14,1	5,42

Πίν. 2. Υπεραντοχή και πλαστιμότητα πλαισίων

Ο πίνακας 2 παρουσιάζει την υπεραντοχή, την προσέγγιση του δείκτη συμπεριφοράς, καθώς και την τοπική πλαστιμότητα μετατοπίσεων κάθε φορέα. Ως υπεραντοχή του πλαισίου εννοείται ο λόγος της τέμνουσα βάσης διαρροής V_y του ισοδύναμου ελαστο-πλαστικού μοντέλου ως προς την τέμνουσα βάσης του ανελαστικού σχεδιασμού V_d . Ο δείκτης συμπεριφοράς του πλαισίου θεωρείται ίσος με τον λόγο της ελαστικής τέμνουσας βάσης V_e ως προς την ανελαστική V_d . Η τοπική πλαστιμότητα μετατοπίσεων ισούται με τον λόγο της μετατόπισης που αντιστοιχεί σε τοπική αστοχία (CP) d_u , ως προς την μετατόπιση που αντιστοιχεί σε τοπική διαρροή (Y) d_y . Παρατηρείται ότι το καινοτόμο σύστημα εμφανίζει καλή πλαστιμότητα, και υπεραντοχή. Η προσέγγιση υπολογισμού του δείκτη συμπεριφοράς, δείχνει ότι το πλαίσιο έχει ικανότητα πλαστικοποίησης και απορρόφησης σεισμικής ενέργειας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι παραπάνω αναλύσεις οδηγούν στα εξής συνοπτικά συμπεράσματα:

- Η ελαστική και η ανελαστική ανάλυση (βλέπε Πίνακα 1) οδηγεί στον υπολογισμό αντίστοιχων μετατοπίσεων.
- Η βαθμός τοπικής βλάβης διαφέρει σημαντικά από σύστημα σε σύστημα για την ίδια συνολική μετατόπιση. Το καινοτόμο σύστημα και το πλαίσιο ροπής εμφανίζουν σημαντικά μικρότερο βαθμό βλάβης.
- Για την ίδια στάθμη τοπικής βλάβης, το καινοτόμο σύστημα έχει μεγαλύτερη διαθέσιμη πλαστιμότητα.
- Το καινοτόμο σύστημα και το πλαίσιο ροπής δέχονται πολύ μεγαλύτερο σεισμό από τον σεισμό σχεδιασμού.

Επιπρόσθετα, το καινοτόμο σύστημα παρουσιάζει ομαλή μετάβαση από την ελαστική στην ανελαστική περιοχή. Αυτό οφείλεται στην ομοιόμορφη κατανομή ζωνών απορρόφησης ενέργειας. Το πλαίσιο μπορεί να σχεδιαστεί πιο στιβαρό, ή πιο εύκαμπτο ανάλογα με την επιλογή των διατομών των δοκών του συστήματος, και την καθ' ύψος τοποθέτησή τους. Η ευελιξία που προσφέρει κατά τον σχεδιασμό, αρχιτεκτονικό και στατικό, σε συνδυασμό με την όλκιμη συμπεριφορά του, προστίθενται στα οφέλη του πλαισίου, παρουσιάζοντάς το ως μια ελκυστική επιλογή συστήματος δυσκαμψίας.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 1993 (Eurocode 3), Design of steel structures. CEN, European Committee for Standardization, (2004)
- [2] EN 1998 (Eurocode 8), Design of structures for earthquake resistance. CEN, European Committee for Standardization, (2004)
- [3] FEMA 356, Federal Emergency Agency, Washington, D.C.
- [4] ATC-40, Applied Technology Council

INNOVATIVE SEISMIC RESISTANT SYSTEM FOR STEEL BUILDINGS**I. Vayas¹, O. Palkopoulou²**

¹Professor, ²Civil Engineer, PhD Student
National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: opal@mail.ntua.gr

1. SUMMARY

In the present work an innovative bracing system, applicable for steel buildings in seismic regions is proposed. This system consists of two strong columns in small axial distance which are connected with multiple weak beams. The beams are densely placed along the height of the two columns. They only carry lateral loading, and act as dissipative fuses for the entire structure. Damage will concentrate only in the fuses, which will be exchangeable. This system is architecturally versatile, since the small bay width between the strong columns does not obstruct the bays of the building. It combines the ductility of the moment resisting frames and the rigidity of the conventional braced frames. The performance of this innovative system is investigated experimentally and analytically at NTUAthens. This paper presents results of the relevant analytical studies.