ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διδακτορική διατριβή

Καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα FUSEIS με όλκιμους πείρους

Δανάη Δημακογιάννη

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διδακτορική διατριβή

Καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα FUSEIS με όλκιμους πείρους

Δανάη Δημακογιάννη

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Η διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου της Διδάκτορος Μηχανικού

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Ι. Βάγιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων) Γ. Ιωαννίδης, Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ι. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- Ι. Βάγιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
- Γ. Ιωαννίδης, Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Ι. Ψυχάρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Χ. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- C. Castiglioni, Professor Politecnico di Milano
- Β. Κουμούσης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Ι. Ραυτογιάννης, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Στο γιο μου Γιώργο και στο σύζυγό μου Πάνο

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ολοκλήρωση της οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη συνδρομή και υποστήριξη πολλών ανθρώπων, στους οποίους θέλω να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ιωάννη Βάγια, (Καθηγητή Ε.Μ.Π.), ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ πάνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο και να συμμετάσχω στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα «FUSEIS». Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαίτερα για το χρόνο που αφιέρωσε, την ενθάρρυνση και την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διατριβής μου. Με την ενεργό συνεισφορά του και τις επιστημονικές συμβουλές του συνέβαλε αποφασιστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της έρευνας.

Ευχαριστώ επίσης και τα άλλα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον κ. Γεώργιο Ιωαννίδη (Ομοτ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.) και τον κ. Ιωάννη Ψυχάρη (Καθηγητή Ε.Μ.Π.) για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου, τις εποικοδομητικές συμβουλές και παρατηρήσεις τους. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής: τον κ. Χάρη Γαντέ (Καθηγητή Ε.Μ.Π.), τον κ. Carlo Castiglioni (Professor Politecnico di Milano), τον κ. Βλάση Κουμούση (Καθηγητή Ε.Μ.Π.) και τον κ. Ιωάννη Ραυτογιάννη (Αναπλ. Καθηγητή Ε.Μ.Π.) για την πρόθυμη συμμετοχή τους στην κρίση της διδακτορικής μου διατριβής.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο αλλά πάνω απ' όλα φίλη μου κ. Γιούλη Δούγκα, για τη στενή συνεργασία που είχαμε στο ερευνητικό πρόγραμμα «FUSEIS» αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Την ευχαριστώ για την βοήθεια και τη συμβολή της που ήταν πολύτιμη και ουσιαστική καθώς επίσης για την πνευματική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια.

Ξεχωριστά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Φαίδωνα Καρυδάκη για την επιστημονική βοήθεια και τη συνεισφορά του στην προετοιμασία και διεξαγωγή των δοκιμών. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους κ. Ξενοφώντα Λιγνό και κ. Στυλιανό Κατσατσίδη η συμβολή των οποίων ήταν καθοριστική για την επιτυχή διεξαγωγή των δοκιμών, τους ευχαριστώ για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά τους. Δεν πρέπει να παραλείψω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους συντελεστές του ερευνητικού προγράμματος «FUSEIS», στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές και πολλές από τις αναλυτικές διερευνήσεις της παρούσας διατριβής, τους κ. Β. Hoffmeister και Τ. Rauert (Πολυτεχνείο Aachen), C.A. Castiglioni και Α. Kanyilmaz (Πολυτεχνείο Μιλάνου), L. Calado και Jorge Μ. Proença (Πολυτεχνείο Λισαβόνας) και Δ. Καλτεζιώτη (ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε.). Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου τον κ. Α. Σπηλιόπουλο, την κ. Μ.Ε. Δασίου, τον κ. Β. Κάρλο, τον κ. Κ.

Σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στα αδέλφια μου για τη συμπαράσταση, την υπομονή τους και για όλα όσα μου πρόσφεραν αυτά τα χρόνια. Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα το σύζυγό μου, Πάνο, για την κατανόηση και ανυπολόγιστη υποστήριξή του.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διδακτορική Διατριβή Δανάης Δημακογιάννη

«Καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα FUSEIS με όλκιμους πείρους»

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του καινοτόμου αντισεισμικού συστήματος με το όνομα «FUSEIS1-2», το οποίο είναι ικανό να απορροφά μεγάλη ποσότητα σεισμικής ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης προστατεύοντας το υπόλοιπο κτίριο. Το σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί σε πολυώροφα μεταλλικά ή σύμμικτα κτίρια (έως 10 ορόφων) συνδυάζοντας την αρχιτεκτονική ευελιξία των πλαισίων ροπής με την υψηλή δυσκαμψία των συνδέσμων δυσκαμψίας και προσφέροντας επιπλέον τη δυνατότητα εύκολης τοποθέτησης και επισκευής. Η παραλαβή των σεισμικών φορτίων μπορεί να γίνει είτε εξολοκλήρου από το σύστημα, είτε σε συνεργασία με πλαίσια ροπής (MRF).

Το σύστημα αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος «FUSEIS – Dissipative Devices for Seismic Resistant Steel Frames». Περιλαμβάνει δύο ισχυρούς στύλους σε μικρή απόσταση που συνδέονται με πολλαπλές συσκευές καθ' ύψος του ορόφου, οι οποίες δε συμμετέχουν στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων του κτιρίου. Κάθε συσκευή αποτελείται από δυο δοκούςυποδοχείς, που συνδέονται στο μέσο με πείρους κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής. Οι δοκοίυποδοχείς είναι ισχυρές και δύσκαμπτες και η σύνδεσή τους στα υποστυλώματα του συστήματος άκαμπτη, ώστε το σύστημα να συμπεριφέρεται όμοια με μία κατακόρυφη δοκό Vierendeel. Κατά τη διάρκεια ισχυρής σεισμικής φόρτισης οι πείροι παραμορφώνονται πλαστικά και απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Με ειδική εξασθένιση της διατομής τους στο μέσο η πλαστικοποίηση κατευθύνεται στην περιοχή αυτή, μακριά από τη επιφάνεια επαφής τους με τις μετωπικές πλάκες των δοκών-υποδοχέων, ώστε οι μετωπικές πλάκες και οι δοκοί-υποδοχείς να παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Λόγω του μικρού μεγέθους και του μεγάλου αριθμού των «ανταλλακτικών» πείρων, η παραγωγή, τοποθέτηση και αντικατάσταση/επισκευή των συσκευών είναι σχετικά απλή, γρήγορη και χαμηλού κόστους.

Με κατάλληλη επιλογή των διατομών και του μήκους των πείρων εντός του ορόφου ή μεταξύ των ορόφων παρέχεται στο μελετητή η δυνατότητα να καθορίσει την αλληλουχία πλαστικοποίησης τους. Έτσι η επιλογή των πείρων ακολουθεί την αύξηση της τέμνουσας ορόφου από την οροφή στη βάση του κτιρίου. Επιπλέον, με κατάλληλο σχεδιασμό το σύστημα μπορεί σχεδόν να επαναφέρει το κτίριο στην αρχική του θέση με μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις έπειτα από μία σεισμική καταπόνηση και να εξασφαλίσει ότι το κτίριο θα παραμείνει λειτουργικό.

Η μελέτη του συστήματος περιλαμβάνει αριθμητικές και πειραματικές διερευνήσεις της συμπεριφοράς του. Κατά τις πειραματικές διερευνήσεις ελέγχθηκαν υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση τόσο μεμονωμένες συσκευές με πείρους κυκλικής διατομής και δοκούς-υποδοχείς κοίλης διατομής όσο και ολόκληρο το σύστημα με τις συσκευές σε πραγματική κλίμακα. Οι αναλυτικές διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν πριν αλλά και κατά τη διάρκειά των δοκιμών με δύο βασικούς στόχους: τον προσδιορισμό της πραγματικής ικανότητας του συστήματος για το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης και την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) προς βαθμονόμηση βάσει των δοκιμών.

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων συντάχθηκε ο Οδηγός Σχεδιασμού (Design Guide) που περιλαμβάνει τη μεθοδολογία και όλες τις απαραίτητες οδηγίες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2» αλλά και για την πρόβλεψη των αναμενόμενων μηχανισμών πλαστικοποίησης και κατανομής της βλάβης. Η μεθοδολογία επιβεβαιώθηκε μέσω γραμμικών και μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων πλαισίων πραγματικών κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2». Ο Οδηγός Σχεδιασμού βασίστηκε στις διατάξεις των Ευρωκωδίκων με κατάλληλες τροποποιήσεις σε ορισμένες από αυτές, για να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών του συστήματος και περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να μπορέσει να ενταχθεί το σύστημα στους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Δημοσιεύσεις

i. Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά με κριτές

(1) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Innovative seismic-resistant steel frames (FUSEIS 1-2) experimental analysis", Steel Construction Design and Research, Volume 5, Issue 4, pp. 212-221, 2012.

(2) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1-1) - Experimental analysis", Journal of Constructional Steel Research, Volume 96, Issue 5, pp. 69-80, 2014.

(3) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Seismic behavior of frames with Innovative Energy Dissipation Systems (FUSEIS1-1)", Earthquakes and Structures, Volume 6, Issue 5, pp. 561-580, 2014.

(4) Vayas I., Dougka G., Dimakogianni D., "Umbau und Erweiterung des Kindergartens der Deutschen Schule Athen", Bauingenieur, Volume 6, pp.253-260, 2014.

(5) Vayas I., Spiliopoulos A., Dasiou M.E., Dougka G., Dimakogianni D., "Instandsetzung von Bauten des Kraftwerks Meliti, Griechenland, nach einem Brand", Stahlbau, Volume 83, Issue 1, pp. 47-56, 2014.

(6) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Seismic behavior of frames with innovative energy dissipation systems (FUSEIS1-2)", Engineering Structures, Volume 90, pp. 83-95, 2015.

(7) Briassoulis D., Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Analysis of the collapse of a greenhouse with vaulted roof", Biosystems Engineering, Volume 151, pp. 495-509, 2016.

ii. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων με κριτές

(1) Dougka G., Dimakogianni D., Karydakis Ph., Vayas I., "Energy dissipation systems (FUSEIS1) to seismic loading", Proceedings of 6th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2011), Budapest, Hungary, 31 August-2 September, 2011.

(2) Dimakogianni D., Dougka G., Karydakis Ph., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1): Analytical investigations", Proceedings of 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece, 29-30 September and 1 October, 2011.

(3) Dougka G., Dimakogianni D., Karydakis Ph., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1): Experimental investigations", Proceedings of 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece, 29-30 September and 1 October, 2011.

(4) Dimakogianni D., Dougka G., Karydakis Ph., Vayas I., Calado L. & Castiglioni C.A., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS 1)", Proceedings of 7th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2012), Santiago, Chile, 9-11 January, 2012.

(5) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., Karydakis Ph, "Seismic behaviour of innovative energy dissipation systems FUSEIS 1-2", Proceedings of 4th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2013), Kos, Greece, 12-14 June, 2013.

(6) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., Karydakis Ph., "Seismic behaviour of innovative energy dissipation systems FUSEIS 1-1", Proceedings of 4th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2013), Kos, Greece, 12-14 June, 2013.

(7) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Seismic behavior of frames with innovative energy dissipation systems - FUSEIS 1", Proceedings of 8th National Conference on Steel Structures, Tripoli, Greece, 2-4 October, 2014.

(8) Βάγιας Ι., Δούγκα Γ., Δημακογιάννη Δ., «Αναδιαρρύθμιση και επέκταση του νηπιαγωγείου της Γερμανικής Σχολής Αθηνών», Πρακτικά 8ου Συνεδρίου Μεταλλικών Κατασκευών, Τρίπολη, Ελλάδα, 2-4 Οκτωβρίου, 2014.

(9) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Performance evaluation of building frames with energy dissipation systems FUSEIS1", Proceedings of 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2015), Shanghai, China, July 1-3, 2015.

iii. Δημοσιεύσεις Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος FUSEIS: RFSR-CT-2008-00032

(1) Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C. A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic-resistant steel frames (FUSEIS)", Research Fund for Coal and Steel, European Commission, EU 25901 EN 2013.

(2) Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C.A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic resistant steel frames - The FUSEIS Project, Design Guide", Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, European Commission, 2012.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS FACULTY OF CIVIL ENGINEERING INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

PhD Thesis by Danai Dimakogianni

"Innovative seismic resistant systems FUSEIS with ductile pins"

Supervisor: Ioannis Vayas, Professor NTUA

Abstract

The research of this thesis presents an innovative seismic resistant system named «FUSEIS1-2» which dissipates a large amount of seismic energy through plastic deformations and as a result protects the rest of the structure. The system may be applied on multi-story steel or composite buildings (up to 10 stories) combining the advantages of moment resisting frames in respect to architectural transparency and those of braced frames in respect to stiffness and offers additionally the possibility of easy installation and removal. The «FUSEIS1-2» system may resist alone the entire seismic action or may be combined with moment resisting frame (MRF) action.

The system was developed in the frame of the European Research Project «FUSEIS-Dissipative Devices for Seismic Resistant Steel Frames». It consists of a pair of closely spaced strong columns jointed together by multiple devices that do not carry vertical loading. Each device includes two receptacle beams that are connected through a short steel pin, rectangular or circular in shape. The receptacle beams are strong and stiff and are rigidly connected to the system columns to realize a Vierendeel behavior. After a strong seismic event inelastic deformations are concentrated in the pins which are the dissipative elements. With the aim of directing the plastic hinge formation away from the contact area between the face plate of the receptacles and the pins, the pins are weakened around their middle, leaving the face plates and the receptacles undamaged. Due to the small size and large number of the "repairable" pins, the devices can be easily fabricated, installed and removed limiting cost and time required to make the building operational after the earthquake.

The system is versatile with regard to the selection of pin sections and offers the designer the possibility to control the plastification sequence of the pins. This can be achieved by changing either the sections or the length of the pins within the floor or between floors. In the second case the pin sections increase from higher to lower stories following the increase of the base shear from the top to the bottom of the building. Additionally, when the system is appropriately designed it is capable of almost self-recentering the structure limiting the deformations after a major earthquake and allowing for immediate occupancy.

The study includes numerical and experimental investigations of the behavior of the system. The experimental investigations were conducted on individual devices with circular pins and receptacle beams of hollow sections and on overall frames with the same devices under monotonic and cyclic

loading. Numerical investigations were carried out before and during the tests with two main objectives: the determination of realistic capacities of the system for the design of the experimental setup and the development of appropriate FEM models to be used for calibration of the tests.

The findings of the studies were summarized in a Design Guide. The Design Guide includes the design methodology and guidelines for the practical application of the «FUSEIS1-2» system and the prediction of the collapse mechanisms. The methodology was verified through linear and nonlinear static and dynamic analyses on real building frames with the «FUSEIS1-2» system. The Design Guide was based on the provisions of Eurocodes which were modified appropriately to cover the application of the devices by the normal Code provisions.

Publications

i. Journal publications

(1) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Innovative seismic-resistant steel frames (FUSEIS 1-2) experimental analysis", Steel Construction Design and Research, Volume 5, Issue 4, pp. 212-221, 2012.

(2) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1-1) - Experimental analysis", Journal of Constructional Steel Research, Volume 96, Issue 5, pp. 69-80, 2014.

(3) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Seismic behavior of frames with Innovative Energy Dissipation Systems (FUSEIS1-1)", Earthquakes and Structures, Volume 6, Issue 5, pp. 561-580, 2014.

(4) Vayas I., Dougka G., Dimakogianni D., "Umbau und Erweiterung des Kindergartens der Deutschen Schule Athen", Bauingenieur, Volume 6, pp.253-260, 2014.

(5) Vayas I., Spiliopoulos A., Dasiou M.E., Dougka G., Dimakogianni D., "Instandsetzung von Bauten des Kraftwerks Meliti, Griechenland, nach einem Brand", Stahlbau, Volume 83, Issue 1, pp. 47-56, 2014.

(6) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Seismic behavior of frames with innovative energy dissipation systems (FUSEIS1-2)", Engineering Structures, Volume 90, pp. 83-95, 2015.

(7) Briassoulis D., Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Analysis of the collapse of a greenhouse with vaulted roof", Biosystems Engineering, Volume 151, pp. 495-509, 2016.

ii. Conference papers

(1) Dougka G., Dimakogianni D., Karydakis Ph., Vayas I., "Energy dissipation systems (FUSEIS1) to seismic loading", Proceedings of 6th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2011), Budapest, Hungary, 31 August-2 September, 2011.

(2) Dimakogianni D., Dougka G., Karydakis Ph., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1): Analytical investigations", Proceedings of 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece, 29-30 September and 1 October, 2011.

(3) Dougka G., Dimakogianni D., Karydakis Ph., Vayas I., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS1): Experimental investigations", Proceedings of 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece, 29-30 September and 1 October, 2011.

(4) Dimakogianni D., Dougka G., Karydakis Ph., Vayas I., Calado L. & Castiglioni C.A., "Innovative energy dissipation systems (FUSEIS 1)", Proceedings of 7th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2012), Santiago, Chile, 9-11 January, 2012.

(5) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., Karydakis Ph, "Seismic behaviour of innovative energy dissipation systems FUSEIS 1-2", Proceedings of 4th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2013), Kos, Greece, 12-14 June, 2013.

(6) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., Karydakis Ph., "Seismic behaviour of innovative energy dissipation systems FUSEIS 1-1", Proceedings of 4th Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN2013), Kos, Greece, 12-14 June, 2013.

(7) Dimakogianni D., Dougka G., Vayas I., "Seismic behavior of frames with innovative energy dissipation systems - FUSEIS 1", Proceedings of 8th National Conference on Steel Structures, Tripoli, Greece, 2-4 October, 2014.

(8) Vayas I., Dougka G., Dimakogianni D., " Conversion and extension of the Kindergarten of the German School in Athens, 8th National Conference on Steel Structures, Tripoli, Greece, 2-4 October, 2014.

(9) Dougka G., Dimakogianni D., Vayas I., "Performance evaluation of building frames with energy dissipation systems FUSEIS1", 18th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2015), Shanghai, China, July 1-3, 2015.

iii. Technical documents of Research Project FUSEIS: RFSR-CT-2008-00032

(1) Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C. A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic-resistant steel frames (FUSEIS)", Research Fund for Coal and Steel, European Commission, EU 25901 EN 2013.

(2) Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C.A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic resistant steel frames - The FUSEIS Project, Design Guide", Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, European Commission, 2012.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή1					
1.	Εξέλι	ξη συστημάτων δυσκαμψίας χαλύβδινων και σύμμικτων κτιρίων	5		
	1.1.	Πλαίσια ροπής	5		
	1.2.	Πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας	8		
	1.3.	Διατμητικά Τοιχεία	13		
2.	Καιν	οτόμο σύστημα «FUSEIS»	15		
	2.1.	Περιγραφή συστήματος «FUSEIS1»	15		
	2.1.1	. Σύστημα «FUSEIS1-1»	16		
	2.1.2	. Σύστημα «FUSEIS1-2»	18		
	2.2.	Περιγραφή συστήματος «FUSEIS2»	19		
3.	Περι	γραφή και πειραματικές διερευνήσεις συστήματος «FUSEIS1-2»	21		
	3.1.	Συστήματα δυσκαμψίας με πείρους	21		
	3.2.	Περιγραφή συστήματος «FUSEIS1-2»	23		
	3.3.	Θεωρητική προσέγγιση – Ισοδύναμο στατικό προσομοίωμα	25		
	3.4.	Αρχικές προσομοιώσεις συσκευών «FUSEIS1-2»	28		
	3.5.	Πειραματικές διερευνήσεις μεμονωμένων συσκευών «FUSEIS1-2» στο RWTH	33		
	3.5.1	. Πειραματική Διάταξη	33		
	3.5.2	. Περιγραφή δοκιμίων	34		
	3.5.3	. Αποτελέσματα δοκιμών	36		
	3.5.4	. Δοκιμές εφελκυσμού	40		
	3.5.5	. Δοκιμές υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση	42		
	3.5.6	. Αδιάστατα διαγράμματα ροπής-στροφής	45		
	3.6.	Πειραματικές διερευνήσεις πλαισίων με συσκευές «FUSEIS1-2»	47		
	3.6.1	. Πειραματική Διάταξη	47		
	3.6.2	. Περιγραφή δοκιμίων	50		
	3.6.3	. Πρωτόκολλο φόρτισης και καταγραφές μετρήσεων	52		
	3.6.4	. Αποτελέσματα δοκιμών	53		
	3.6.5	. Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικού	62		
	3.6.6	. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τεμνουσών βάσης	63		
	3.6.7	. Απορρόφηση ενέργειας – Κριτήρια αστοχίας	65		
	3.6.8	. Ολιγοκυκλική κόπωση	67		
4.	Αναλ	.υτικές διερευνήσεις συστήματος «FUSEIS1-2»	69		
	4.1.	Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων συσκευών «FUSEIS 1-2»	69		
	4.2.	Προσομοιώματα πλαισίων με συσκευές «FUSEIS 1-2»	71		
	4.2.1	. Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων	71		
	4.2.2	. Απλοποιημένα μοντέλα πλαισίων και προσδιορισμός μη γραμμικών ιδιοτήτων πείρ	ων		
	«FUS	EIS1-2»	73		
	4.2.3	. Εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς q	78		
5.	Σχεδ	ιασμός κτιρίων με συστήματα «FUSEIS1-2»	81		
	5.1.	Μέθοδοι ανάλυσης κτιρίων	81		
	5.1.1	. Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (Pushover Analysis)	81		
	5.1.2	. Ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear Dynamic Analysis)	83		
	5.1.3	. Προσαυξητική δυναμική ανάλυση (IDA)	83		

	5.2.	Κανόνες σχεδιασμού κτιρίων με «FUSEIS1-2»	. 88				
	5.2.1	Προδιαστασιολόγηση (preliminary design)	. 88				
	5.2.2	Μεθοδολογία σχεδιασμού με ελαστική ανάλυση	. 89				
	5.2.3	Μεθοδολογία σχεδιασμού με στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)	. 95				
	5.2.4	. Μεθοδολογία σχεδιασμού με ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear Dynamic	С				
	Analy	rsis)	. 96				
6.	Διερε	ύνηση συμπεριφοράς πλαισίων κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2»	97				
	6.1.	Περιγραφή και προσομοίωση εξεταζόμενων πλαισίων	. 97				
	6.1.1	Γεωμετρία και παραδοχές	. 97				
	6.1.2	Προσομοίωση	. 99				
	6.2.	Φασματική ιδιομορφική ανάλυση	100				
	6.3.	Έλεγχοι φορέα για τους βασικούς (θεμελιώδεις) συνδυασμούς	101				
	6.3.1	Έλεγχοι στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)	101				
	6.3.2	Έλεγχοι στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)	103				
	6.4.	Έλεγχοι σε σεισμικά φορτία	104				
	6.4.1	Γωνιακή παραμόρφωση ορόφου	104				
	6.4.2	Επιρροές 2 ^{ης} τάξης	105				
	6.4.3	Πλάστιμα μέλη - Πείροι	105				
	6.4.4	Υποστυλώματα, δοκοί-υποδοχείς και πλήρης διατομή πείρων	108				
	6.4.5	Δυνάμεις σχεδιασμού συνδέσεων στα άκρα των δοκών-υποδοχέων «FUSEIS1-2»	109				
	6.5.	Μη γραμμικές στατικές αναλύσεις (pushover)	109				
	6.5.1	Αποτίμηση της συμπεριφοράς των πλαισίων	109				
	6.5.2	Εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς q	113				
	6.6.	Μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις	114				
	6.6.1	Επιταχυνσιογραφήματα	114				
	6.6.2	Παραμένουσες καθολικές γωνιακές παραμορφώσεις	116				
	6.6.3	Γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου	121				
	6.6.4	Ολιγοκυκλική κόπωση	123				
	6.7.	Προσαυξητική δυναμική ανάλυση (IDA)	124				
	6.7.1	Αποτίμηση της συμπεριφοράς του πλαισίου	124				
	6.7.2	Καμπύλες τρωτότητας (fragility curves)	127				
	6.8.	Σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης	128				
7.	Συμπ	εράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	129				
	7.1.	Συμπεράσματα	129				
	7.2.	Πρωτότυπη συμβολή	130				
	7.3.	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	131				
8.	Βιβλι	ογραφία	133				
Па	Παράρτημα 1 : Σχέδια πειραματικής διάταξης και δοκιμίων137						

Εισαγωγή

Σε αντίθεση με τα κτίρια από σκυρόδεμα, η πλευρική ευστάθεια και δυσκαμψία μεταλλικών κτιρίων εξασφαλίζεται από ένα πλήθος διαφορετικών συστημάτων σεισμικής προστασίας που παρέχουν μεγάλη ευελιξία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Τα κτίρια από σκυρόδεμα λειτουργούν σαν πλαίσια ροπής, με ή χωρίς διατμητικά τοιχεία, λόγω της μονολιθικότητας των συνδέσεων δοκούυποστυλώματος (άκαμπτες συνδέσεις). Αντίθετα, στα μεταλλικά κτίρια ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει άκαμπτες ή εύκαμπτες συνδέσεις σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα δυσκαμψίας όπως κεντρικούς ή έκκεντρους συνδέσμους κλπ. Λόγω της ευελιξίας αυτής σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές ιδιότητες του χάλυβα σαν δομικό υλικό, υψηλή αντοχή και πλαστιμότητα, οι μεταλλικές κατασκευές θεωρούνταν ιδανικές σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας για πολλές δεκαετίες.

Μετά τους ισχυρούς σεισμούς του Northridge και του Kobe όμως, αρκετά μεταλλικά κτίρια παρουσίασαν μορφές αστοχίας που δεν είχαν προβλεφθεί από τις πρακτικές σχεδιασμού της εποχής. Οι βλάβες, που περιλάμβαναν τοπικές αστοχίες σε κόμβους και μέλη, ανέδειξαν τις ελλείψεις στο σχεδιασμό και εισήγαγαν την επισκευασιμότητα των κτιρίων ως νέα παράμετρο για τον αντισεισμικό σχεδιασμό τους.

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των υπαρχόντων συστημάτων δυσκαμψίας και στην ανάπτυξη νέων με στόχο την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε να μην εμφανίζονται βλάβες στον κύριο φορέα του κτιρίου. Ο βαθμός της βλάβης και η δυνατότητα επισκευής καθορίζονται από τον τύπο του συστήματος και τη μέθοδο σχεδιασμού. Τα νέα αυτά συστήματα συνδυάζουν την αντοχή με τη δυσκαμψία και την πλαστιμότητα και ορισμένα από αυτά είναι σε θέση να περιορίζουν τις παραμένουσες παραμορφώσεις επαναφέροντας την κατασκευή στην αρχική της θέση (self-centering). Σε αυτά υπάγεται και το καινοτόμο σύστημα «FUSEIS1-2» το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος «FUSEIS – Dissipative Devices for Seismic Resistant Steel Frames» και αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

To «FUSEIS1-2» αποτελείται από δύο ισχυρά υποστυλώματα που συνδέονται με πολλαπλές συσκευές καθ' ύψος του ορόφου. Κάθε συσκευή περιλαμβάνει δύο δοκούς-υποδοχείς οι οποίες στο ένα άκρο τους συνδέονται άκαμπτα με τα υποστυλώματα και στο άλλο ενώνονται με πείρους μικρού μήκους. Οι συσκευές δε φέρουν κατακόρυφα φορτία και παραλαμβάνουν τα σεισμικά μέσω ανελαστικών παραμορφώσεων που περιορίζονται στους πείρους. Οι πείροι λόγω του μικρού μεγέθους τους μπορούν εύκολα και με ελάχιστο κόστος να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν, εξασφαλίζοντας ότι η υπόλοιπη κατασκευή θα παραμείνει ελαστική και προστατευμένη έπειτα από το σεισμό.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια αναφορά στα συνηθέστερα συστήματα δυσκαμψίας, πλαίσια ροπής, πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας και διατμητικά τοιχεία, και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους, οι ελλείψεις στο σχεδιασμό τους και οι δυσκολίες στην επισκευή τους μετά από σεισμό. Γίνεται επίσης μια περιγραφή ορισμένων νέων συστημάτων που έχουν αναπτυχθεί με στόχο τη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των συμβατικών συστημάτων όπως οι συνδέσεις πλαισίων ροπής PTED, οι συνδέσεις συνδέσμων δυσκαμψίας INERD και οι συσκευές απόσβεσης ADAS.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται εν συντομία τα καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα FUSEIS1 και FUSEIS2, περιγράφεται η γεωμετρία τους και η λειτουργία των συσκευών τους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια αναφορά σε συστήματα δυσκαμψίας με πείρους που έχουν αναπτυχθεί σε προηγούμενη έρευνα και στη συνέχεια μια εκτενής περιγραφή του συστήματος «FUSEIS1-2» που αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διατριβής. Περιγράφεται η θέση του στο κτίριο και η λειτουργία του υπό οριζόντια φόρτιση ως μια κατακόρυφη δοκός Vierendeel μέσω του ισοδύναμου θεωρητικού μοντέλου. Ακολουθούν τα αρχικά προσομοιώματα που μορφώθηκαν για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας των συσκευών των δοκιμών. Οι δοκιμές αποτελούν το βασικό μέρος του κεφαλαίου και διεξήχθησαν σε συσκευές και σε πλαίσια με τις συσκευές υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση σε πραγματική κλίμακα. Δίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης, των δοκιμίων, των επιβαλλόμενων φορτίσεων και τα αποτελέσματα των δοκιμών. Επιπλέον, παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών υλικού υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στη συνέχεια, βάσει των ιδιοτήτων του υλικού, υπολογίζονται οι θεωρητικές τέμνουσες βάσης και συγκρίνονται με τη μέγιστη αντίσταση των πλαισίων κατά τις δοκιμές για τον έλεγχο της ορθότητας της προσέγγισης με τη θεωρία της δοκού Vierendeeel. Τέλος, από τα αποτελέσματα των δοκιμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση υπολογίζεται η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ανά δοκιμή και προσδιορίζονται οι καμπύλες κόπωσης καθώς οι πείροι στις δοκιμές αυτές αστόχησαν σε ολιγοκυκλικη κόπωση.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (FEM) των δοκιμών σε συσκευές και σε πλαίσια στο λογισμικό ABAQUS και απλοποιημένα μοντέλα των δοκιμών σε πλαίσια με χρήση του εμπορικού και εύχρηστου λογισμικού SAP2000. Μέσω των τελευταίων προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες της πλαστικής άρθρωσης των πείρων και ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι μη γραμμικές μέθοδοι ανάλυσης κτιρίων και η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού μεταλλικών και σύμμικτων κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2». Η μεθοδολογία περιλαμβάνει κανόνες για την προδιαστασιολόγηση και το σχεδιασμό του κτιρίου και δίνει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την εκτέλεση μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων, συμπεριλαμβανόμενων των ιδιοτήτων των πλαστικών αρθρώσεων και των μη γραμμικών ελατηρίων.

Στο Κεφάλαιο 6 δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ενός τυπικού δισδιάστατου πλαισίου πενταώροφου σύμμικτου κτιρίου. Στο ένα άκρο του πλαισίου εφαρμόζεται ένα σύστημα «FUSEIS1-2» με πείρους κυκλικής διατομής, ως κύριο σύστημα παραλαβής των σεισμικών φορτίων, ενώ ο υπόλοιπος φορέας, που φέρει τα φορτία βαρύτητας, είναι ένα ημιάκαμπτο πλαίσιο ροπής (Partially fixed-PF). Οι γραμμικές αναλύσεις περιλαμβάνουν τρείς περιπτώσεις σεισμικών εντάσεων, με μέγιστη βασική επιτάχυνση εδάφους 0,16g, 0,24g, 0,36g. Μέσω μη γραμμικών στατικών αναλύσεων γίνεται επαλήθευση του προτεινόμενου συντελεστή συμπεριφοράς και αξιολογείται η απόδοση του πλαισίου για δύο ακόμα τύπους συνδέσεων δοκών - υποστυλωμάτων του κύριου πλαισίου, άκαμπτων και αρθρωτών. Στη συνέχεια, με διεξαγωγή μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων και εκτέλεση της Προσαυξητικής Δυναμικής Ανάλυσης (IDA), χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφήματα από πραγματικούς σεισμούς, ελέγχεται αν ο ελαστικός σχεδιασμός βάσει της προτεινόμενης μεθοδολογίας ικανοποιεί τις απαιτήσεις για τη σεισμική απόδοση του κτιρίου. Από τις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις υπολογίζεται ο βαθμός βλάβης για καθεμία από τις εξεταζόμενες καταγραφές. Στο τέλος του κεφαλαίου συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μεθόδων ανάλυσης μέσω των γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου.

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα κυριότερα αποτελέσματα της διερεύνησης και τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Περιγράφεται επίσης η πρωτότυπη συμβολή της διατριβής στην επιστήμη, καθώς πρόκειται για ένα νέο και πολλά υποσχόμενο σύστημα, και δίνονται προτάσεις για την επέκταση της διερεύνησης σε άλλες κατευθύνσεις.

Στο Κεφάλαιο 8 δίνονται τα στοιχεία για τις βιβλιογραφικές αναφορές του κειμένου κατά σειρά εμφάνισης μέσα στην εργασία. Στο τέλος της εργασίας δίνονται σε Παράρτημα τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμών.

1. Εξέλιξη συστημάτων δυσκαμψίας χαλύβδινων και σύμμικτων κτιρίων

Οι βλάβες που παρουσίασαν τα συμβατικά συστήματα δυσκαμψίας μετά από ισχυρές σεισμικές καταπονήσεις ανέδειξαν τις ελλείψεις στο σχεδιασμό και τις δυσκολίες στην επισκευή τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συνηθέστερα από αυτά τα συστήματα, πλαίσια ροπής, πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας και διατμητικά τοιχεία, καθώς επίσης κάποια νέα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωσή τους.

1.1. Πλαίσια ροπής

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 τα πλαίσια ροπής (Σχήμα 1.1) ήταν πολύ δημοφιλή σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας τόσο για την αρχιτεκτονική ευελιξία που παρέχουν όσο και για την καλή σεισμική τους απόκριση. Θεωρούνταν ασφαλέστερα σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα λόγω της ικανότητας τους να παραλαμβάνουν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις υπό κάμψη και διάτμηση.





Η πεποίθηση αυτή άλλαξε μετά από το σεισμό του Northridge (1994) κατά τον οποίο περισσότερα από 150 μεταλλικά κτίρια με πλαίσια ροπής υπέστησαν ψαθυρής μορφής αστοχίες στις συγκολλητές συνδέσεις δοκών – υποστυλωμάτων (Σχήμα 1.2, Σχήμα 1.3), ενώ η υπόλοιπη κατασκευή παρέμενε σχεδόν ελαστική και σε αρκετές περιπτώσεις δεν εμφάνιζε αστοχίες σε μη φέροντα στοιχεία. Τα κτίρια με πλαίσια ροπής που εμφάνισαν αστοχίες ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις των κανονισμών και παρόλο που εμφάνισαν περιορισμένες βλάβες σε φέροντα στοιχεία δεν κατέρρευσαν. Ωστόσο, η συμπεριφορά τους δεν ήταν η αναμενόμενη λόγω των αστοχιών σε συνδέσεις που επήλθαν ακόμα και για μικρότερες σεισμικές καταπονήσεις από το σεισμό σχεδιασμού. Ως αποτέλεσμα οι οικονομικές απώλειες είτε άμεσες, που σχετίζονταν με το κόστος επισκευής, είτε έμμεσες, που σχετίζονταν με προσωρινή ή και οριστική διακοπή της λειτουργίας των κτιρίων, ήταν σημαντικές. Αντίστοιχη ήταν και η εικόνα από τις βλάβες των κτιρίων έπειτα από το σεισμό του Κοbe (1995) επιβεβαιώνοντας τις ελλείψεις στους κανονισμούς και την ανάγκη βελτίωσης του σχεδιασμού των συνδέσεων δοκού – υποστυλώματος των πλαισίων ροπής.



Σχήμα 1.2: Ψαθυρής μορφής αστοχία συγκολλητού κόμβου μετά από το σεισμό του Northridge



Σχήμα 1.3: Προβλήματα τυπικής σύνδεσης δοκού υποστυλώματος μετά από το σεισμό του Northridge

Στους νέους κανονισμούς τα πλαίσια ροπής σχεδιάζονται ώστε να μπορούν να παραλαμβάνουν τα σεισμικά φορτία, με συγκέντρωση της πλαστικής παραμόρφωσης στα άκρα των δοκών σε απόσταση από τη σύνδεση χωρίς να μειώνεται η αντοχή τους, προστατεύοντας τον υπόλοιπο φορέα. Εξαιτίας της μικρής δυσκαμψίας τους για τη διαστασιολόγηση αυτών των πλαισίων κρίσιμος είναι συνήθως ο έλεγχος γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου (interstory drift) που οδηγεί σε επιλογή μεγαλύτερων διατομών από τις απαιτούμενες σε όρους αντοχής. Οι αναμενόμενες βλάβες περιλαμβάνουν διαρροή και τοπικό λυγισμό και όχι ψαθυρές θραύσεις. Η αποφυγή ψαθυρών θραύσεων επιτυγχάνεται με υψηλή ποιότητα συγκολλήσεων, εργοστασιακές συγκολλήσεις, ή ακόμα και με χρήση κοχλιωτών συνδέσεων.

Ενδεικτικές συνδέσεις δοκών - υποστυλωμάτων πλαισίων ροπής φαίνονται στο Σχήμα 1.4. Συγκεκριμένα στις συνδέσεις που φαίνονται στο Σχήμα 1.4ε, στ η χρήση ενισχυμένων διατομών δοκών (haunched beam), ελασμάτων και νευρώσεων στην περιοχή της σύνδεσης βελτιώνει τη συμπεριφορά της καθώς η πλαστική παραμόρφωση κατευθύνεται μακριά από τη διεπιφάνεια δοκούυποστυλώματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με τοπική εξασθένιση των πελμάτων των δοκών στα άκρα σε απόσταση από τη σύνδεση (dog-bone), η οποία πραγματοποιείται με αποκοπές σε σχήμα κυκλικό, τραπεζοειδές ή μικτού τύπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5. Με τον κυκλικό σχεδιασμό της αποκοπής η κατανομή των τάσεων στη δοκό είναι πιο ομαλή και για αυτό προτιμάται σε σχέση με τους άλλους τύπους. Η χρήση της απομειωμένης διατομής της δοκού πλεονεκτεί ως προς το κόστος και την ευκολία εφαρμογής της σε σχέση με την ενισχυμένη σύνδεση με χρήση ελασμάτων και έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένων πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων (Plumier [1], Iwankiw [2], Popov [3]). Ωστόσο, βασικό πρόβλημα των κτιρίων με πλαίσια ροπής εξακολουθεί να είναι η δυσκολία που παρουσιάζουν στην επισκευή ή αντικατάσταση των δοκών, που αποτελούν τα κύρια στοιχεία παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων.





Σχήμα 1.5: Δοκοί απομειωμένης διατομής

Σε αυτή την κατεύθυνση επικεντρώνεται η έρευνα τα τελευταία χρόνια με στόχο την ανάπτυξη κατάλληλων συνδέσεων ικανών να απορροφούν σεισμική ενέργεια σε συγκεκριμένα στοιχεία τους χωρίς να επηρεάζεται η υπόλοιπη κατασκευή. Μια χαρακτηριστική σύνδεση αυτού του τύπου είναι η προεντεταμένη σύνδεση απορρόφησης ενέργειας PTED (Christopoulos et al. [4]) που δίνεται στο Σχήμα 1.6. Η σύνδεση αυτή περιλαμβάνει προεντεταμένες ράβδους από χάλυβες υψηλής αντοχής (PT) και ράβδους απορρόφησης ενέργειας (ED). Μετά από το σεισμό οι προεντεταμένες ράβδοι (PT) που βρίσκονται στο μέσο του ύψους των δοκών παραμένουν ελαστικές και εξασφαλίζουν την επαναφορά του κτιρίου στην αρχική του κατάσταση (self-centering) (Σχήμα 1.7α). Οι ράβδοι απορρόφησης ενέργειας συγκολλούνται στο εσωτερικό των πελμάτων των δοκών και στις

νευρώσεις των υποστυλωμάτων, διαρρέουν σε θλίψη και εφελκυσμό (Σχήμα 1.7β) και εφόσον απαιτηθεί μπορούν εύκολα να επισκευαστούν. Η δράση των PT και ED, που συνδυάζει την επαναφορά του κτιρίου με την απορρόφηση ενέργειας, καθορίζει την υστερητική συμπεριφορά του συστήματος και προσδίδει στο διάγραμμα ροπής-στροφής τη μορφή "flag-shaped" (Σχήμα 1.7γ).



α) Πλαίσιο με συνδέσεις τύπου PTED









β) Παραμόρφωση σύνδεσης PTED

α) Συμμετοχή των ράβδων ΡΤ

β) Συμμετοχή των ράβδων ED

γ) Σχέση ροπής–στροφής σύνδεσης PTED

Σχήμα 1.7: Υστερητική συμπεριφορά σύνδεσης PTED

1.2. Πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας

Κεντρικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας

Οι πιο χαρακτηριστικές μορφές κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας είναι Χ, V, Λ, Κ όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Σε σχέση με τα πλαίσια ροπής τα πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας είναι λιγότερο πλάστιμα και πιο δύσκαμπτα. Η μειωμένη αυτή πλαστιμότητα εξισορροπούνταν στους παλιότερους κανονισμούς με χρήση μικρότερου συντελεστή συμπεριφοράς που είχε σαν αποτέλεσμα τα μέλη τους να σχεδιάζονται με αυξημένη αντοχή.



Σχήμα 1.8: Πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας

Όπως αποδείχτηκε από παρατηρήσεις βλαβών σε κτίρια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας έπειτα από ισχυρούς σεισμούς, η προσέγγιση αυτή δεν ήταν ικανή να προβλέψει και να αποτρέψει την ψαθυρή αστοχία του συστήματος (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9: Αστοχίες σε διαγώνιους συνδέσμους μετά από το σεισμό του Kobe (1995)

Για το λόγο αυτό στους νέους κανονισμούς εκτός από το χαμηλότερο συντελεστή συμπεριφοράς παρέχονται επιπλέον απλοποιημένες μέθοδοι και οδηγίες σχεδιασμού των βασικών στοιχείων απορρόφησης ενέργειας του συστήματος, των διαγωνίων, σύμφωνα με τις αρχές ικανοτικού σχεδιασμόυ (Goel [5], Bruneau et al.[6]). Τα υπόλοιπα μέλη, δοκοί, υποστυλώματα και συνδέσεις στα άκρα των διαγωνίων σχεδιάζονται με κατάλληλο συντελεστή υπεραντοχής για να παραμείνουν ελαστικά. Οι εφελκυόμενες διαγώνιοι παρέχουν πλευρική εξασφάλιση και λειτουργούν ως στοιχεία απορρόφησης ενέργειας ενώ οι θλιβόμενες αγνοούνται στο σχεδιασμό (εξαιρούνται οι σύνδεσμοι V και Λ). Η συμπεριφορά του συστήματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση χαρακτηρίζεται από σταδιακή υποβάθμιση της απορροφούμενης ενέργειας εξαιτίας του λυγισμού των διαγωνίων (Σχήμα 1.10α). Πρόσθετο μειονέκτημα αποτελεί η διαφορετική συμπεριφορά των μελών σε θλίψη και εφελκυσμό, όπως φαίνεται στο μη συμμετρικό διάγραμμα στο Σχήμα 1.10β. Σε αντίθεση με τα πλαίσια ροπής οι σύνδεσμοι δε συμμετέχουν στο σύστημα παραλαβής κατακόρυφων φορτίων γεγονός που καθιστά ευχερέστερη την αντικατάστασή τους μετά το σεισμό. Οι σύνδεσμοι μορφής Κ δε σχεδιάζονται ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας γιατί ενδέχεται να προκαλέσουν βλάβες στα υποστυλώματα μετά το λυγισμό της μιας διαγωνίου.



Σχήμα 1.10: Σύγκριση BRB με συνήθεις κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας

Ένας νέος τύπος κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας, που προτείνεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία (Saeki et al.[7], Sabelli et al. [8]) για την αντιμετώπιση του λυγισμού των διαγωνίων και έχει υιοθετηθεί από διεθνείς κανονισμούς (SEAOC – AISC [9]), είναι οι διαγώνιες τύπου BRB (Buckling Restrained Brace). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11 οι διαγώνιες BRB περιλαμβάνουν ένα χαλύβδινο μέλος ως πυρήνα για την παραλαβή της έντασης και ένα περίβλημα από κονίαμα που το εξασφαλίζει πλευρικά και εμποδίζει το λυγισμό του. Με αυτό τον τρόπο οι διαγώνιες λειτουργούν τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό και μπορούν να παραλάβουν θλιπτικές δυνάμεις όμοια με τις εφελκυστικές (Σχήμα 1.10δ), το οποίο αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα του συστήματος σε σχέση με τους συνήθεις κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας. Επιπλέον, στα BRB οι διαστάσεις του χαλύβδινου πυρήνα προσαρμόζονται εύκολα στις ανάγκες του σχεδιασμού σε αντίθεση με τους συνήθεις διαγώνιος συνδέσμους όπου υπάρχουν πολλοί γεωμετρικοί περιορισμοί.



Σχήμα 1.11: Σύστημα BRB

Η απορρόφηση ενέργειας μπορεί εναλλακτικά να πραγματοποιηθεί με χρήση κατάλληλων συνδέσεων όπως η σύνδεση τύπου INERD (Plumier et al. [10], Vayas et al. [11], Vayas et al. [12], Vayas et al. [13]). Στην περίπτωση αυτή η σύνδεση των συνδέσμων δυσκαμψίας με το υποστύλωμα γίνεται μέσω πείρων ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής οι οποίοι διέρχονται μέσω ελασμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12. Οι πείροι είναι τα στοιχεία που πλαστικοποιούνται και απορροφούν ενέργεια προσφέροντας αυξημένη πλαστιμότητα στην κατασκευή, προστασία έναντι λυγισμού στους διαγώνιους συνδέσμους και ευκολία στην επισκευή. Το σύστημα INERD εισήγαγε τη χρήση των πείρων ως στοιχείων απορρόφησης ενέργειας που υιοθετήθηκε στο καινοτόμο σύστημα «FUSEIS1-2».



Σχήμα 1.12: Παραμόρφωση σύνδεσης INERD κατά τη διάρκεια δοκιμών

Οι σύνδεσμοι μπορούν επίσης να συνδυαστούν με τις συσκευές απόσβεσης ADAS (Added Damping And Stiffness) που τοποθετούνται μεταξύ συνδέσμων και κυρίων δοκών (Σχήμα 1.13). Η συσκευή περιλαμβάνει μεταλλικά ελάσματα χαμηλής αντοχής χάλυβα, τα οποία έχουν την ικανότητα να απορροφούν σημαντική ποσότητα σεισμικής ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης χωρίς όμως να απομειώνουν την αντοχή του συστήματος ακόμα και μετά από πολλούς κύκλους φόρτισης. Πλεονέκτημα των συσκευών αποτελεί η δυνατότητα της πλήρους αντικατάστασης/επισκευής τους έπειτα από το σεισμό. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές παραλλαγές του συστήματος οι κυριότερες των οποίων είναι τα X-ADAS και T-ADAS που φαίνονται στο Σχήμα 1.14. Τα συστήματα αυτά έχουν διερευνηθεί από τους Whittaker et al. [14], Tsai et al. [15], Dargush και Soong [16], Tena-Colunga [17] και άλλους.



Σχήμα 1.13: Σύστημα ADAS



Σχήμα 1.14: Τύποι συστήματος ADAS

β) T-ADAS

Έκκεντροι σύνδεσμοι δυσκαμψίας \geq

Τα πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους συγκεντρώνουν τα πλεονεκτήματα των πλαισίων ροπής και των πλαισίων με κεντρικούς συνδέσμους προσδίδοντας στην κατασκευή υψηλή δυσκαμψία και πλαστιμότητα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο συντελεστής συμπεριφοράς τους είναι περίπου ίδιος με των πλαισίων ροπής. Μπορούν να διαμορφωθούν διάφορες διατάξεις έκκεντρων συνδέσμων όμοια με τους κεντρικούς (Σχήμα 1.15).



Σχήμα 1.15: Πλαίσια με έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας

Λόγω της εκκεντρότητας των συνδέσμων η κύρια δοκός του πλαισίου χωρίζεται σε δύο ή τρία τμήματα. Το μικρότερο τμήμα της, η ονομαζόμενη δοκός σύζευξης η οποία μπορεί να είναι οριζόντια ή κατακόρυφη, αποτελεί το στοιχείο απορρόφησης ενέργειας του συστήματος. Η δοκός σύζευξης σχεδιάζεται ώστε να διαρρέει σε κάμψη (μακρές δοκοί), σε διάτμηση (βραχείες) ή και σε συνδυασμό των δύο (ενδιάμεσες δοκοί) πριν από τα άλλα μέλη του φορέα κάτω από ισχυρή σεισμική καταπόνηση και ενισχύεται κατάλληλα με νευρώσεις για την αποφυγή διατμητικού λυγισμού (Σχήμα 1.16). Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας της δοκού σύζευξης καθορίζεται από την ικανότητα πλαστικής στροφής της. Επομένως, οι βραχείες δοκοί που έχουν μεγάλη στροφική ικανότητα αυξάνουν τη δυσκαμψία του συστήματος και προτιμώνται σε σχέση με τις μακρές. Σε περίπτωση σύμμικτων κτιρίων οι δοκοί σύζευξης δε συνδέονται μέσω ήλων με τη σύμμικτη πλάκα ώστε να επιτρέπεται η παραμόρφωσή τους. Μειονέκτημα των πλαισίων αυτών είναι η δυσκολία επισκευής των δοκών σύζευξης μετά το σεισμό, καθώς αποτελούν στοιχεία του μηχανισμού παραλαβής κατακόρυφων φορτίων και δεν είναι εύκολα προσβάσιμες.



Σχήμα 1.16: Δοκός σύζευξης έκκεντρων συνδέσμων δυσκαμψίας

1.3. Διατμητικά Τοιχεία

Ένας άλλος τύπος συστήματος απορρόφησης ενέργειας και δυσκαμψίας, που έχει ευρεία εφαρμογή σε νέες αλλά και σε υφιστάμενες κατασκευές, είναι τα διατμητικά τοιχεία από χάλυβα SP (Shear Panels) (Σχήμα 1.17). Στα διατμητικά τοιχεία τα ελάσματα, που χρησιμοποιούνται ως στοιχεία απορρόφησης ενέργειας, έχουν χαμηλό όριο διαρροής και αυξημένη οριακή παραμόρφωση, και ως εκ τούτου απαλλάσσουν τις συνδέσεις δοκών – υποστυλωμάτων των συμβατικών πλαισίων ροπής από ανελαστικές παραμορφώσεις. Το σύστημα επίσης περιλαμβάνει νευρώσεις για την ενίσχυση των ελασμάτων έναντι κύρτωσης (Σχήμα 1.17α). Συναντώνται σε διάφορους τύπους, οι πιο αντιπροσωπευτικοί από τους οποίους δίνονται στο Σχήμα 1.17β, γ και έχουν μελετηθεί από τους Νakashima [18], Nakashima et al. [19], Miyama et al. [20], Tanaka et al. [21], Matteis et al. [22] και άλλους. Ο τύπος "pillar" επιδεικνύει καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τον τύπο "Χ" στην απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας καθώς το έλασμα έχει δυνατότητα μεγαλύτερης παραμόρφωσης. Σημαντική εξέλιξη του συστήματος είναι η αντικατάσταση του χάλυβα του ελάσματος με αλουμίνιο, το οποίο αναβαθμίζει τη συμπεριφορά του ενώ παράλληλα μειώνει το βάρος και το κόστος της κατασκευής (Matteis et al. [22]).







2. Καινοτόμο σύστημα «FUSEIS»

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος με το όνομα «FUSEIS – Dissipative Devices for Seismic Resistant Steel Frames» αναπτύχθηκαν δύο καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα, «FUSEIS1» και «FUSEIS2», ικανά να απορροφούν μεγάλη ποσότητα σεισμικής ενέργειας μέσω πλαστικής παραμόρφωσης προστατεύοντας το υπόλοιπο κτίριο (Vayas et al. [23], [24]). Τα συστήματα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια (έως 10 όροφων) και να υποκαταστήσουν τα συνήθη συστήματα δυσκαμψίας (πλαίσια ροπής, κεντρικοί και έκκεντροι σύνδεσμοι κλπ.) προσφέροντας επιπλέον τη δυνατότητα εύκολης τοποθέτησης και επισκευής. Η απορρόφηση ενέργειας γίνεται με χρήση μικρού αριθμού «ανταλλακτικών» που συνεπάγεται μείωση του βάρους και του κόστους παραγωγής και επισκευής.

Το ερευνητικό πρόγραμμα περιλάμβανε αναλυτικές και πειραματικές διερευνήσεις της συμπεριφοράς του συστήματος υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση βάσει των οποίων συντάχθηκαν οδηγίες σχεδιασμού και εφαρμογής. Χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα (European Coal and Steel Community) και συμμετείχαν τέσσερα πανεπιστήμια και μία χαλυβουργία:

- Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (Ε.Μ.Π.), Ελλάδα
- Το Πολυτεχνείο του Aachen, (RWTH), Γερμανία
- Το Πολυτεχνείο του Μιλάνου, (POLIMI), Ιταλία
- Το Πολυτεχνείο της Λισαβόνας, (IST), Πορτογαλία
- Η χαλυβουργία ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., με έδρα την Ελλάδα.

Διεξήχθησαν πειράματα στις συσκευές των συστημάτων και σε πλαίσια με τις συσκευές και στα τέσσερα πανεπιστήμια. Η χαλυβουργία ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε προμήθευσε το χάλυβα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν:

- 70 δοκιμές πραγματικής κλίμακας στις συσκευές υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση, 32 στο RWTH για τα «FUSEIS1» και 38 στο IST για τα «FUSEIS2».
- 16 δοκιμές πραγματικής κλίμακας σε πλαίσια με τις συσκευές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, 8 στο
 Ε.Μ.Π. για τα «FUSEIS1» και 8 στο POLIMI για τα «FUSEIS2».

2.1. Περιγραφή συστήματος «FUSEIS1»

Το σύστημα «FUSEIS1» συνδυάζει την πλαστιμότητα και την αρχιτεκτονική ευελιξία των πλαισίων ροπής με την υψηλή δυσκαμψία των συνδέσμων δυσκαμψίας. Η παραλαβή των σεισμικών φορτίων μπορεί να γίνει είτε εξ ολοκλήρου από το σύστημα είτε σε συνεργασία με πλαίσια ροπής. Λόγω του μικρού μεγέθους των πλάστιμων μελών του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη και για την αντισεισμική αναβάθμιση υφιστάμενων μεταλλικών κτιρίων και κτιρίων από σκυρόδεμα. Επιπλέον, παρέχει τη δυνατότητα προοδευτικής πλαστικοποίησης και πρόβλεψης του μηχανισμού κατάρρευσης του κτιρίου και έπειτα από μία σεισμική καταπόνηση μπορεί σχεδόν να το επαναφέρει στην αρχική του θέση εμφανίζοντας πολύ μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις. Το σύστημα αποτελείται από δύο ισχυρούς στύλους σε μικρή απόσταση, που συνδέονται με οριζόντιες δοκούς καθ' ύψος του ορόφου. Οι δοκοί, οι οποίες δε συμμετέχουν στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων του κτιρίου, μπορεί να είναι συνεχείς «FUSEIS1-1» μεταξύ των υποστυλωμάτων ή εναλλακτικά να διακόπτονται και να συνδέονται με πείρους στο μέσο «FUSEIS1-2». Η σύνδεσή τους στα υποστυλώματα του συστήματος είναι άκαμπτη με αποτέλεσμα το σύστημα να συμπεριφέρεται όμοια με μία κατακόρυφη δοκό Vierendeel.

Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των συστημάτων ανά διεύθυνση, του τύπου των διατομών, των αποστάσεων των υποστυλωμάτων του συστήματος και του αριθμού των δοκών καθ' ύψος του ορόφου εξασφαλίζεται η πλευρική ευστάθεια του κτιρίου. Η παραγωγή, τοποθέτηση και αντικατάσταση ή/και επισκευή των συσκευών είναι σχετικά απλή, μειώνοντας το κόστος και το χρόνο που απαιτείται για να γίνει το κτίριο λειτουργικό μετά το σεισμό.

Το Σχήμα 2.1 περιλαμβάνει τις φωτογραφίες της πρόσφατης εφαρμογής του συστήματος «FUSEIS1» στο σύμμικτο κτίριο της επέκτασης του Νηπιαγωγείου της Γερμανικής Σχολής Αθηνών, όπου χρησιμοποιήθηκε ως μοναδικό σύστημα πλευρικής ευστάθειας λόγω της διαμόρφωσης αρθρωτών συνδέσεων δοκού - υποστυλώματος. Είναι φανερή η εύκολη προσαρμογή του στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό καθώς λόγω του μικρού μεγέθους του δεν παρεμποδίζει τα φατνώματα του κτιρίου (Vayas et al. [25])



Σχήμα 2.1: Εφαρμογή συστήματος «FUSEIS1» σε κτίριο

2.1.1. Σύστημα «FUSEIS1-1»

Υπό σεισμική φόρτιση οι δοκοί του συστήματος «FUSEIS1-1» (Σχήμα 2.2) καταπονούνται σε κάμψη και διάτμηση, απορροφούν ενέργεια και συγκεντρώνουν τις πλαστικές παραμορφώσεις στα άκρα τους. Η συμπεριφορά του συστήματος καθορίζεται από τη δυσκαμψία και την αντοχή των δοκών οι οποίες μπορεί να είναι ανοιχτές τύπου IPE και HEA ή κλειστές τύπου SHS και CHS (Σχήμα 2.2β). Οι συνδέσεις των δοκών στα υποστυλώματα του συστήματος προστατεύονται με κατάλληλη διαμόρφωση των δοκών ώστε οι πλαστικές αρθρώσεις να καθοδηγούνται σε προκαθορισμένες θέσεις σε απόσταση από τη σύνδεση. Η διαμόρφωση των δοκών μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, είτε με τοπική εξασθένηση των πέλματων της δοκού στα άκρα, όμοια με τα «RBS», είτε με ενίσχυση της δοκού στην περιοχή της σύνδεσης (haunched beam). Η σύνδεση στα υποστυλώματα του συστήματος γίνεται με κοχλιώσεις μέσω μετωπικών πλακών ώστε να είναι δυνατή η εύκολη και γρήγορη αντικατάσταση τους.



Σχήμα 2.2: Καινοτόμο σύστημα «FUSEIS1-1»

Αντικείμενο των πειραμάτων που διεξήχθησαν ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς του συστήματος για τους τέσσερις τύπους διατομών υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Σε επίπεδο συσκευών έγιναν εικοσιτέσσερις δοκιμές στο RWTH, επτά σε δοκούς IPE, οχτώ σε SHS, οχτώ σε CHS και μία σε HEA. Σε επίπεδο πλαισίων διερευνήθηκε επιπλέον η δυνατότητα προοδευτικής πλαστικοποίησής του συστήματος, που αποτέλεσε και το κριτήριο επιλογής των δοκιμίων. Έγιναν δύο προσεγγίσεις για την επίτευξη της προοδευτικής πλαστικοποίησης, στην πρώτη μεταβαλλόταν το μήκος των δοκών και στη δεύτερη το μέγεθος της διατομής. Τελικά, έγιναν έξι δοκιμές πλαισίων στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π., δύο με δοκούς IPE, δύο με δοκούς SHS και δύο με δοκούς CHS.

Οι πειραματικές διερευνήσεις ανέδειξαν την υψηλή πλαστιμότητα των δοκών του συστήματος και τη μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης και απορρόφησης ενέργειας που διαθέτουν όπως φαίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.3 από το βρόχο υστέρησης μιας δοκού τύπου SHS. Η διαρροή ξεκίνησε στις απομειωμένες ζώνες (RBS) οι οποίες πλαστικοποιήθηκαν και εμφάνισαν τις πρώτες ρωγμές (Σχήμα 2.4). Η πειραματική διάταξη και τα υποστυλώματα του συστήματος παρέμειναν ελαστικά καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (Σχήμα 2.5).

Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το σύστημα «FUSEIS1-1» δίνονται στη διδακτορική διατριβη «Ανάπτυξη συστημάτων σεισμικής προστασίας πολυώροφων κτιρίων» της Γ. Δούγκα [26] και στη διδακτορική διατριβη «Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια» του Φ. Καρυδάκη [27].



Σχήμα 2.3: Βρόχος υστέρησης δοκού τύπου SHS







Σχήμα 2.5: Πειραματική διάταξη συστήματος «FUSEIS1-1»

2.1.2. Σύστημα «FUSEIS1-2»

Η διαφορά σε σχέση με το «FUSEIS1-1» είναι ότι οι δοκοί δεν είναι συνεχείς αλλά διακόπτονται και συνδέονται με πείρους στο μέσο. Οι πείροι μπορεί να είναι κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής. Μετά από ισχυρή σεισμική φόρτιση συγκεντρώνουν τις πλαστικές παραμορφώσεις και απορροφούν μεγάλη ποσότητα ενέργειας, ενώ η υπόλοιπη συσκευή που αποτελείται από ισχυρές δοκούς «υποδοχείς» παραμένει ελαστική (Σχήμα 2.6). Για την απομάκρυνση της θέσης σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης από την περιοχή της στήριξης, που αποτελεί και τη θέση τραυματισμού της διατομής, οι πείροι μπορούν να απομειώνονται στο μέσο όμοια με το «RBS». Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί η εκτενής παρουσίαση των αναλυτικών και πειραματικών διερευνήσεων του συστήματος «FUSEIS1-2».


2.2. Περιγραφή συστήματος «FUSEIS2»

Το σύστημα «FUSEIS2» τοποθετείται στα άκρα της σύμμικτης δοκού πλαισίου ροπής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Τμήμα της δοκού αποκόπτεται σε μικρή απόσταση από τη σύνδεση με το υποστύλωμα και αντικαθίσταται από χαλύβδινα ελάσματα που συνδέονται με τη δοκό στον κορμό και στο κάτω πέλμα και συνθέτουν τη συσκευή «FUSEIS2». Σε αντίθεση με τα συνήθη πλαίσια ροπής όπου οι βλάβες μετά το σεισμό εμφανίζονται στις δοκούς και τις συνδέσεις, που είναι στοιχεία παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων και επισκευάζονται δύσκολα, οι επισκευές του συστήματος «FUSEIS2» περιορίζονται στην αντικατάσταση των ελασμάτων του που αποτελούν τα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας. Τα ελάσματα είναι είτε συγκολλητά είτε κοχλιωτά στη δοκό και σχεδιάζονται πιο ασθενή από τα συνδεόμενα τμήματά της ώστε ο σχηματισμός της πλαστικής άρθρωσης να γίνει σε αυτά. Για να επιτευχθεί αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπλέον ενισχυτικά ελάσματα κορμού και πέλματος στα συνδεόμενα τμήματα της δοκού. Η συνέχεια της πλάκας του σκυροδέματος διακόπτεται στη θέση της συσκευής ώστε να αποφευχθούν οι ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα και να επιτρέπεται η στροφή της δοκού. Ο οπλισμός της πλάκας αντίθετα είναι συνεχής για να εξασφαλίζει τη μεταφορά των δυνάμεων από την πλάκα στο υποστύλωμα.



Σχήμα 2.7: Καινοτόμο σύστημα «FUSEIS2»

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος πραγματοποιήθηκαν:

- 26 δοκιμές στις κοχλιωτές συσκευές και 12 στις συγκολλητές στο IST (Calado et al. [28]) και
- 8 δοκιμές σε πλαίσια με κοχλιωτές συσκευές στο POLIMI (Castiglioni et al. [29]).

Σε όλες τις δοκιμές η διατομή των ελασμάτων του κορμού παρέμενε σταθερή ενώ η διατομή των ελασμάτων του κάτω πέλματος μεταβαλλόταν ως προς το πάχος και το πλάτος του ελάσματος. Επίσης μεταβλητό ήταν το ελεύθερο μήκος λυγισμού των ελασμάτων, L₀. Ο λυγισμός των ελασμάτων ή η αστοχία στην καθαρή διατομή ήταν οι κρίσιμες μορφές αστοχίας που καθόρισαν την υστερητική συμπεριφορά του συστήματος (Σχήμα 2.8). Κατά τη διάρκεια των δοκιμών οι συσκευές μέσω της ανελαστικής τους παραμόρφωσης απορρόφησαν ενέργεια και προστάτευσαν τα υπόλοιπα μέλη, δοκούς, υποστυλώματα και πλάκα σκυροδέματος, τα οποία παρέμειναν στην ελαστική περιοχή όπως αναμενόταν.



α) Πρώτη σειρά κοχλιών

β) Μέσο ελάσματος

Σχήμα 2.8: Μορφές αστοχίας συστήματος «FUSEIS2» με κοχλίωση α) καθαρή διατομή, β) λυγισμός ελάσματος

Μέσω των πειραμάτων επιβεβαιώθηκαν τα βασικότερα πλεονεκτήματα του συστήματος που είναι η μεγάλη πλαστιμότητα, δυσκαμψία και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Επιπλέον, ξεχώρισαν οι κοχλιωτές συσκευές έναντι των συγκολλητών όχι μόνο ως προς την ευκολία στην κατασκευή, συναρμολόγηση και αντικατάστασή τους αλλά και ως προς την αντισεισμική συμπεριφορά τους επιδεικνύοντας μεγαλύτερη αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροπών – στροφών πλαισίου με κοχλιωτές συσκευές «FUSEIS2»

3. Περιγραφή και πειραματικές διερευνήσεις συστήματος «FUSEIS1-2»

3.1. Συστήματα δυσκαμψίας με πείρους

Η χρήση των πείρων ως στοιχείων απορρόφησης ενέργειας προτάθηκε αρχικά το 2004 στο κοινό Ευρωπαϊκό πρόγραμμα «Two Innovations for Earthquake Resistant Design», INERD, στα πλαίσια του οποίου αναπτύχθηκε ένας καινοτόμος τύπος συνδέσεων μερικής αντοχής με εφαρμογή σε μεταλλικά πλαίσια με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας (Plumier et al.[10], Vayas et al.[11], Vayas et al.[12], Vayas et al.[13]).

Η σύνδεση INERD με πείρο, πιθανές διατάξεις της οποίας φαίνονται στο Σχήμα 3.1, αποτελείται από εξωτερικές πλάκες, οι οποίες συνδέονται με τα πέλματα του υποστυλώματος, και από μια (β,δ) ή δυο (α,γ) εσωτερικές πλάκες, οι οποίες συνδέονται με το άκρο της διαγωνίου. Η σύνδεση των πλακών στο υποστύλωμα μπορεί να γίνεται μέσω συγκολλήσεων ή κοχλιώσεων. Ένας πείρος, ο οποίος μπορεί να είναι ορθογωνικής (α,β) ή στρογγυλεμένης (γ,δ) διατομής, διέρχεται μέσω κατάλληλων οπών από όλες τις πλάκες. Ο ισχυρός άξονας της διατομής του πείρου μπορεί να είναι είτε κάθετος είτε παράλληλος στην αξονική διεύθυνση του συνδέσμου δυσκαμψίας. Εκτός των διατάξεων που φαίνονται στο Σχήμα 3.1, μπορούν να δημιουργηθούν και άλλες παραλλαγές. Για παράδειγμα, το υποστύλωμα μπορεί να είναι στραμμένο κατά 90° και οι εξωτερικές πλάκες να συγκολλούνται στα άκρα των πελμάτων του. Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να γίνει σύνδεση με τη δοκό στην περίπτωση πλαισίων με έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας. Ακόμα, οι εσωτερικές πλάκες μπορούν να συνδέονται στην εξωτερικές πλάκες πλάκες μπορούν να συνδέονται στην εξωτερικές πλάκες πλάκες μπορού να συνδεόονται στην εξωτερική πλευρά των συνδέσμους δυσκαμψίας. Η συμπεριφορά των συνδέσεων ΙΝΕRD είναι η ίδια, ανεξάρτητα από τη διάταξη των επιμέρους στοιχείων της.



Σχήμα 3.1: Πιθανές διατάξεις της σύνδεσης INERD με πείρο

Η σύνδεση σχεδιάζεται έτσι ώστε στις Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας (Ο.Κ.Α.), εξαιρουμένης της σεισμικής, ο πείρος να παραμένει στην ελαστική περιοχή. Στην περίπτωση όμως του σεισμού σχεδιασμού, κατά τον οποίο είναι επιτρεπτή η πλαστικοποίηση της κατασκευής για να απορροφηθεί ενέργεια, οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας ενεργοποιούνται και φορτίζονται αξονικά, με αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση του πείρου. Η αντοχή της σύνδεσης είναι τέτοια ώστε λαμβάνοντας υπόψη τυχούσα υπεραντοχή, να είναι χαμηλότερη της αντοχής του συνδέσμου σε λυγισμό και προφανώς σε εφελκυσμό. Ως αποτέλεσμα, δεν επιτρέπεται να λειτουργήσει ο συνήθης μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας (κυρίως μέσω της διαρροής της εφελκυόμενης διαγωνίου), αλλά η πλαστικοποίηση περιορίζεται στις συνδέσεις INERD, με το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στον πείρο. Λόγω της μετατροπής της αξονικής δύναμης σε κάμψη του πείρου, ανεξάρτητα από τη φορά της δύναμης, οι συνδέσεις INERD συμπεριφέρονται κατά παρόμοιο τρόπο τόσο για τους εφελκυόμενους όσο και για τους θλιβόμενους συνδέσμους δυσκαμψίας.

Το ερευνητικό πρόγραμμα περιλάμβανε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα Πανεπιστήμια της Λιέγης, του Μιλάνου, της Λισαβόνας και του Τρέντο, ενώ στο Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκε μέρος της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων και οι αναλυτικές και αριθμητικές διερευνήσεις.

Στη συνέχεια το 2007 προτάθηκε ένα νέο σύστημα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας με χρήση πείρων (Καρυδάκης [27]) το οποίο αποτέλεσε τη βάση του καινοτόμου συστήματος «FUSEIS1-2». Στην πρώτη αυτή προσέγγιση του συστήματος έγιναν δοκιμές σε πραγματική κλίμακα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. κατά τις οποίες εξετάστηκαν πλαίσια με πέντε ίδιες συσκευές καθ' ύψος του ορόφου που αποτελούνταν από συνεχείς καμπτόμενους πείρους ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής (Σχήμα 3.2α, β) τύπου INERD και δοκούς-υποδοχείς ανοιχτής ή κλειστής διατομής αντίστοιχα. Οι πείροι αυτοί εμφάνισαν τοπικές αστοχίες στα άκρα τους στην περιοχή της επαφής με τις δοκούς-υποδοχείς, όπου αναπτύχθηκε η μέγιστη ροπή. Το πρόβλημα αυτό παρουσιάστηκε τόσο στους ορθογωνικούς πείρους, που είχαν σημειακή αιχμηρή στήριξη λόγω μηχανουργικής κατεργασίας, όσο και στους κυκλικούς, όπου η στήριξη είχε καμπύλη απόληξη χωρίς αιχμή λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας κατεργασίας του κυκλικού υποδοχέα σε τόρνο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος σε επόμενες δοκιμές, οι πείροι κυκλικής διατομής διαμορφώθηκαν με τοπικές αποτμήσεις (ring slots) σε απόσταση από τις στηρίξεις (Σχήμα 3.2γ). Με τον τρόπο αυτό προστατεύτηκε η περιοχή της στήριξης αλλά το περιορισμένο μήκος των αποτμήσεων οδήγησε σε ταχεία αστοχία των δοκιμίων στις θέσεις των δακτυλίων ως αποτέλεσμα υψηλής συγκέντρωσης τάσεων λόγω συνθηκών ολιγοκυκλικής κόπωσης. Ένα επιπλέον πρόβλημα που εντοπίστηκε στις δοκιμές αυτές ήταν η ταυτόχρονη πλαστικοποίηση όλων των πείρων που οφειλόταν στη χρήση ίδιων δοκιμίων καθ' ύψος του πλαισίου.



α) Πείρος ορθογωνικής διατομής



Σχήμα 3.2: Τύποι δοκιμίων αρχικών πειραματικών διερευνήσεων

Όπως αναλύεται στις επόμενες ενότητες στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «FUSEIS» το σύστημα βελτιώθηκε και τα παραπάνω προβλήματα επιλύθηκαν. Έγινε αντιληπτό ότι οι πείροι κυκλικής διατομής με επαρκές μήκος απότμησης είναι ο ιδανικός συνδυασμός. Το μήκος απότμησης πρέπει να εκτείνεται σε όλο το μήκος του πείρου, ξεκινώντας από μικρή απόσταση από το σημείο στήριξης και την περιοχή τραυματισμού, ώστε να επιτρέπεται η ανάπτυξη της πλαστικής ζώνης εντός του (Σχήμα 3.5). Με αυτό τον τρόπο ο πείρος είναι ικανός να παραμορφωθεί χωρίς ψαθυρές αστοχίες ή εκτεταμένες ρηγματώσεις. Σημαντική κρίθηκε επίσης η δυνατότητα πρόβλεψης του μηχανισμού κατάρρευσης με προοδευτική πλαστικοποίηση των πείρων το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με μεταβολή της δυσκαμψίας τους καθ' ύψος.

3.2. Περιγραφή συστήματος «FUSEIS1-2»

Το σύστημα «FUSEIS1-2» εφαρμόζεται σε μεταλλικά κτίρια για την παραλαβή των σεισμικών φορτίων παρέχοντας δυσκαμψία και αντοχή. Το σύστημα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αποτελείται από δύο ισχυρά υποστυλώματα που συνδέονται με πολλαπλές συσκευές καθ' ύψος του ορόφου (Σχήμα 3.4). Κάθε συσκευή περιλαμβάνει δύο δοκούς-υποδοχείς οι οποίες στο ένα άκρο τους συνδέονται άκαμπτα με τα υποστυλώματα και στο άλλο ενώνονται με πείρους μικρού μήκους (Σχήμα 3.3). Οι συσκευές δε φέρουν κατακόρυφα φορτία και παραλαμβάνουν τα σεισμικά μέσω ανελαστικών παραμορφώσεων που περιορίζονται στους πείρους. Οι πείροι είναι τα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας της συσκευής και λόγω του μικρού μεγέθους τους μπορούν εύκολα και με ελάχιστο κόστος να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν, εξασφαλίζοντας ότι η υπόλοιπη κατασκευή θα παραμείνει ελαστική και προστατευμένη έπειτα από το σεισμό.

Οι δοκοί-υποδοχείς, οι οποίες αποτελούν επέκταση των υποστυλωμάτων, πρέπει να είναι ισχυρές και δύσκαμπτες. Οι πείροι που χρησιμοποιούνται είναι ορθογωνικής διατομής όταν οι δοκοί-υποδοχείς είναι τύπου διπλού Τ και κυκλικής όταν οι δοκοί-υποδοχείς είναι κοίλες.

Στην πρώτη περίπτωση ο πείρος συγκολλάται απευθείας στον κορμό της δοκού-υποδοχέα ενώ στη δεύτερη ο πείρος συνδέεται στη μετωπική πλάκα που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση της δοκούυποδοχέα με το υποστύλωμα. Η σύνδεση αυτή είναι κοχλιωτή και υλοποιείται με σπείρωμα στο άκρο του πείρου, το οποίο κατασκευάζεται με μηχανική κατεργασία. Ο πείρος έχει σπείρωμα με αντίθετη φορά στα άκρα, πράγμα το οποίο διευκολύνει την προσαρμογή του μήκους του, την ακριβή τοποθέτηση και την αφαίρεσή του ακόμη και σε περίπτωση έντονης πλαστικοποίησης (Σχήμα 3.5). Με ειδική εξασθένιση της διατομής του πείρου στο μέσο, όμοια με τα RBS, η πλαστικοποίηση κατευθύνεται στην περιοχή αυτή και οι μετωπικές πλάκες και οι δοκοί-υποδοχείς εντείνονται ελαστικά. Η εξασθένιση αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50% της διατομής του πείρου. Για την προστασία των μετωπικών πλακών των δοκών-υποδοχέων από τοπικές αστοχίες στις θέσεις επαφής τους με τον πείρο, εξομαλύνεται η περίμετρος της οπής τους και η απομείωση του πείρου ξεκινά σε απόσταση από την πλάκα.

Οι συνδέσεις μεταξύ δοκών-υποδοχέων και υποστυλωμάτων είναι άκαμπτες ώστε το σύστημα να συμπεριφέρεται όμοια με τη δοκό Vierendeel και πραγματοποιούνται με κοχλιώσεις ώστε να διευκολύνουν την τοποθέτηση και αντικατάσταση των συσκευών. Οι δοκοί-υποδοχείς, τα υποστυλώματα και οι συνδέσεις τους σχεδιάζονται ικανοτικά με χρήση συντελεστή υπεραντοχής ώστε να εξασφαλιστεί ο σχηματισμός των πρώτων πλαστικών αρθρώσεων στους πείρους.

Τα υποστυλώματα του συστήματος είναι ισχυρά, ώστε εκτός από τις αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσουν ως τμήμα της κατακόρυφης δοκού Vierendeel να συμμετέχουν και στην παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων. Μπορούν να μορφώνονται από ανοιχτές ή κοίλες διατομές. Οι ανοιχτές πλεονεκτούν λόγω της ευκολίας που παρουσιάζουν στη σύνδεση τους με τις συσκευές του συστήματος. Ωστόσο, επειδή τα υποστυλώματα πρέπει να διαθέτουν ικανοποιητική αντοχή και έναντι εγκάρσιας λυγισμικής εκτροπής μια κατάλληλα ενισχυμένη ορθογωνική κοιλοδοκός αποτελεί πιο ενδεδειγμένη λύση. Στην περίπτωση αυτή η σύνδεση των υποστυλωμάτων με τις συσκευές του συστήματος μπορεί να πραγματοποιείται μέσω μιας διατομής-Τ η οποία συγκολλάται στο υποστύλωμα.



Σχήμα 3.5: Λεπτομέρειες πείρου κυκλικής διατομής

Όταν η πλευρική ευστάθεια του κτιρίου εξασφαλίζεται μόνο από το σύστημα «FUSEIS1-2» οι συνδέσεις των δοκών του κύριου πλαισίου στα υποστυλώματα είναι αρθρωτές, ενώ όταν το σύστημα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πλαίσιο ροπής οι συνδέσεις αυτές μορφώνονται ως άκαμπτες ή ημιάκαμπτες και οι σεισμικές δυνάμεις παραλαμβάνονται και από τα δύο συστήματα, οδηγώντας σε πιο οικονομικό σχεδιασμό του κτιρίου. Σε κάθε περίπτωση η σύνδεση των δοκών του κύριου πλαισίου με το σύστημα είναι αρθρωτή ώστε να μη μεταφέρονται στα υποστυλώματα του συστήματος ροπές αλλά μόνο κατακόρυφα φορτία.

Η αντοχή και η δυσκαμψία του συστήματος καθορίζονται από πλήθος παραμέτρων όπως ο αριθμός των συσκευών ανά όροφο, η αξονική απόσταση των υποστυλωμάτων και η επιλογή των διατομών των μελών του συστήματος. Σε ένα τυπικό όροφο 3 έως 4m μπορούν να χρησιμοποιηθούν τέσσερις ή πέντε συσκευές λαμβάνοντας υπόψη το ύψος των δοκών-υποδοχέων, την απαιτούμενη μεταξύ τους απόσταση για την τοποθέτησή των συσκευών και τους πιθανούς αρχιτεκτονικούς περιορισμούς. Στις βάσεις των υποστυλωμάτων του συστήματος τοποθετείται πάντα μια συσκευή για την αποφυγή μεταφοράς ροπών στη θεμελίωση. Επιπλέον, η γεωμετρία των πείρων μπορεί να μεταβληθεί εύκολα προσδίδοντας στο σύστημα ευελιξία και με κατάλληλη επιλογή των διατομών και του μήκους τους εντός του ορόφου ή μεταξύ των ορόφων παρέχεται στο μελετητή η δυνατότητα να καθορίσει την αλληλουχία πλαστικοποίησης των πείρων. Η επιλογή των διαστάσεων των πείρων ακολουθεί την αύξηση της τέμνουσας ορόφου από την οροφή στη βάση του κτιρίου.

Η ποιότητα του υλικού των πείρων είναι επίσης καθοριστική παράμετρος για το σχεδιασμό του συστήματος. Σύμφωνα με τον ΕΝ 1998-1-1 [30] η μέγιστη τιμή του ορίου διαρροής του χάλυβα είναι:

$$f_{y,max} \le 1, 1 \cdot \gamma_{ov} \cdot f_{y}$$
(3.

όπου:

γ_{ov}=1,25 ο συντελεστής υπεραντοχής και

f_y η ονομαστική τιμή ορίου διαρροής.

Η ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής των πείρων προτιμάται να είναι χαμηλή, για παράδειγμα ίση με 235 MPa. Αν οι ιδιότητες του υλικού του πείρου είναι ελεγχόμενες και το μέγιστο όριο διαρροής είναι μικρότερο από την τιμή της εξίσωσης (3.1), ο συντελεστής υπεραντοχής μπορεί να μειωθεί και ο σχεδιασμός να είναι ακόμα πιο οικονομικός. Στη περίπτωση αυτή ο συντελεστής γον υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\gamma_{\rm ov} = \frac{f_{\gamma,\rm act}}{f_{\gamma}} \tag{3.2}$$

όπου:

f_{v,act} το πραγματικό όριο διαρροής.

3.3. Θεωρητική προσέγγιση – Ισοδύναμο στατικό προσομοίωμα

Η λειτουργία του συστήματος «FUSEIS1-2», όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι αντίστοιχη με τη λειτουργία μιας κατακόρυφης δοκού Vierendeel, παραλαμβάνει δηλαδή τα εγκάρσια φορτία κυρίως μέσω κάμψης και διάτμησης των πείρων και αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων (Σχήμα 3.6). Τα

1)

εντατικά μεγέθη λόγω οριζόντιας φόρτισης για ελαστική ανάλυση μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τις εξισώσεις της στατικής θεωρώντας αρθρώσεις στα μέσα των πείρων και των υποστυλωμάτων.



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο στατικό προσομοίωμα και θεωρητικά εντατικά μεγέθη σύμφωνα με τη θεωρία δοκού Vierendeel

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) οι πείροι του συστήματος ως στοιχεία απορρόφησης ενέργειας αναπτύσσουν στα άκρα του απομειωμένου τμήματος την πλαστική ροπή αντοχής τους M_{pl,pin}. Η τέμνουσα δύναμη V_{pin} που αντιστοιχεί στη ροπή αυτή υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{\rm pin} = \frac{2 \cdot M_{\rm pl,pin}}{\ell_{\rm pin}}$$
(3.3)

όπου:

 $\boldsymbol{\ell}_{\mathsf{pin}}$ το μήκος του απομειωμένου τμήματος του πείρου και

 $M_{pl,pin} = W_{pl,pin} \cdot f_y$, με $W_{pl,pin}$ την πλαστική ροπή αντίστασης του απομειωμένου τμήματος του πείρου και f_y το όριο διαρροής του χάλυβα.

Από την ισορροπία κατακόρυφων δυνάμεων η αξονική δύναμη των υποστυλωμάτων Ν_{column} είναι ίση με:

$$N_{column} = \frac{M_{ov}}{L} = \frac{V_{story} \cdot h_{story}}{L} = \sum V_{pin}$$
(3.4)

όπου:

Μον η ροπή ανατροπής του πλαισίου,

V_{story} η τέμνουσα ορόφου,

h_{story} το ύψος του ορόφου και

L η αξονική απόσταση των υποστυλωμάτων του συστήματος.

Από τις εξισώσεις (3.3) και (3.4) προκύπτει η συνολική τέμνουσα ορόφου ίση με:

$$V_{\text{story}} = \frac{\sum V_{\text{pin}}}{h_{\text{story}}} \cdot L = 2 \cdot \sum \frac{M_{\text{pl,pin}}}{\ell_{\text{pin}}} \cdot \frac{L}{h_{\text{story}}}$$
(3.5)

Η παραμόρφωση των πείρων εκφράζεται με τη γωνία στροφής χορδής τους $\theta_{pl,pin}$ και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (3.6) βάσει της γωνιακής παραμόρφωσης του πλαισίου θ_{gl} .

$$\theta_{\rm pl,pin} = \frac{L}{\ell_{\rm pin}} \theta_{\rm gl}$$
(3.6)

Το παραπάνω τυπολόγιο εφαρμόζεται ενδεικτικά σε ένα σύστημα «FUSEIS1-2» και επιβεβαιώνεται μέσω της ελαστικής ανάλυσης του. Στο Σχήμα 3.7 δίνεται το προσομοίωμα ενός συστήματος με πείρους κυκλικής διατομής που κατασκευάστηκε και αναλύθηκε ελαστικά με χρήση του λογισμικού SAP2000 [31]. Τα υποστυλώματα του συστήματος είναι κοίλης ορθογωνικής διατομής RHS400x300x20 με ύψος 3,4m, αξονική απόσταση 2m και συνδέονται καθ' ύψος με πέντε όμοιες συσκευές που αποτελούνται από δοκούς-υποδοχείς SHS240x20 και πείρους Φ70. Στην κορυφή του υποστυλώματος επιβάλλεται οριζόντιο φορτίο 200kN (Σχήμα 3.7β).



Σχήμα 3.7: Προσομοίωμα συστήματος «FUSEIS1-2»

Ο Πίνακας 3.1 και το Σχήμα 3.8 περιλαμβάνουν τα εντατικά μεγέθη (N_{Ed}, V_{Ed}, M_{Ed}) της ανάλυσης τα οποία όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις (3.7), (3.8) συμπίπτουν με τα αντίστοιχα θεωρητικά επαληθεύοντας την θεωρητική προσέγγιση.

$$N_{col} = \Sigma V_{pin} = 274,44 + 65,56 = 340 \text{kN} = N_{col,th}$$
(3.7)

$$V_{\text{story}} = \frac{68}{0.2} \cdot \frac{2}{3.4} = 200 \text{kN} = V_{\text{story,inp}}$$
(3.8)

Πίνακας 3.1: Ροπές Μ_{Ed} και τέμνουσες V_{Ed} πείρων ανά στάθμη

Στάθμη	M _{Ed,pin,left} (kNm)	M _{Ed,pin,right} (kNm)	V _{Ed} (kN)
1	6,55	6,56	65,56
2	7,08	7,09	70,85
3	7,3	7,3	73,01
4	7,05	6,96	70,06
5	6,14	5,97	60,52



Σχήμα 3.8: Εντατικά μεγέθη από ελαστική ανάλυση

Η ορθότητα της προσέγγισης αυτής ελέγχεται επίσης και με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε πλαίσια «FUSEIS1-2» στην Παρ. 3.6.6.

3.4. Αρχικές προσομοιώσεις συσκευών «FUSEIS1-2»

Δεδομένου ότι στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος δεν ήταν εφικτή η διερεύνηση πολλών εναλλακτικών διατάξεων, η παρούσα έρευνα επικεντρώθηκε στις συσκευές με πείρους κυκλικής διατομής και δοκούς-υποδοχείς κοίλης διατομής, που θεωρήθηκαν ο βέλτιστος τύπος βάσει των αρχικών πειραματικών διερευνήσεων (Καρυδάκης [27]). Πριν από τις δοκιμές ήταν απαραίτητη η διεξαγωγή αναλυτικών διερευνήσεων στο λογισμικό ΑΒΑQUS [32] για τον προσδιορισμό της

λειτουργίας και της γεωμετρίας των συσκευών «FUSEIS1-2», δοκών-υποδοχέων και πείρων. Η λογική του σχεδιασμού ήταν οι δοκοί-υποδοχείς να παραμένουν ελαστικές και άκαμπτες και ο πείρος, που είναι αναλώσιμος, να είναι το μόνο στοιχείο απορρόφησης ενέργειας.

Η συσκευή που αναλύθηκε είχε συνολικό μήκος 400 mm και αποτελούταν από δύο δοκούς-υποδοχείς διατομής SHS120x10, δύο ενδιάμεσες χαλύβδινες πλάκες συγκολλημένες σε αυτές και έναν πείρο κυκλικής διατομής. Η διάμετρος του πείρου στα τμήματα εντός των δοκών-υποδοχέων ήταν Φ60mm και απομειωνόταν σε Φ45mm στο μεσαίο τμήμα του (Σχήμα 3.10). Η απομείωση αυτή ξεκινούσε σε απόσταση από την πλάκα της δοκού-υποδοχέα. Για να εξασφαλιστεί ότι θα διαρρεύσει πρώτα ο πείρος χρησιμοποιήθηκε χαμηλότερη αντοχή χάλυβα S235 στον πείρο και υψηλότερη S355 στις δοκούςυποδοχείς. Οι στηρίξεις στα άκρα των δοκών-υποδοχέων και των πείρων θεωρήθηκαν άκαμπτες. Στην έρευνα αυτή δεν εξετάστηκαν συσκευές με πείρους διαφορετικής γεωμετρίας καθώς δεν αναμενόταν να παρουσιάσουν σημαντικές αποκλίσεις στη συμπεριφορά τους.

Η συσκευή θεωρήθηκε ότι ανήκει σε ένα πλαίσιο ίδιων διαστάσεων με αυτό των αρχικών διερευνήσεων, ύψους H=3,40m και αξονικής απόστασης υποστυλωμάτων L=1,50m. Η επιβαλλόμενη φόρτιση ήταν η κατακόρυφη μετακίνηση u στο ένα άκρο της δοκού-υποδοχέα που προκαλείται από την οριζόντια μετακίνηση u' στην κορυφή του πλαισίου θεωρώντας ότι η συσκευή λειτουργεί σαν μια αμφίπακτη δοκός (Σχήμα 3.9, εξισώσεις (3.9) και (3.10)). Η ανάλυση έγινε υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση με αυξανόμενη μετακίνηση u έως 60mm, που ήταν η τιμή που προέκυψε για μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφου θ_{gl}=4% και u'=135mm.



Σχήμα 3.9: Σχέση μεταξύ σχετικής μετακίνησης ορόφου και πειραματικής μετακίνησης υ

$$\theta = \frac{\theta_{gl} \cdot L}{\ell}$$

$$u = \theta \cdot \ell$$
(3.9)
(3.10)

όπου:

ℓ η απόσταση των μετωπικών πλακών των δοκών-υποδοχέων στις θέσεις επαφής με τον πείρο και

θ η στροφή του πείρου.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, εξαεδρικά οκτώ κόμβων, προκειμένου να μπορούν να προσομοιωθούν τα φαινόμενα τοπικού λυγισμού με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επειδή το προσομοίωμα περιλάμβανε ολόκληρη τη συσκευή, ήταν αρκετά σύνθετο και απαιτούσε υψηλή πυκνότητα πλέγματος (Σχήμα 3.10α). Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην εξομάλυνση της περιμέτρου της οπής της μετωπικής πλάκας και στη διαμόρφωση του πείρου στις θέσεις έναρξης του απομειωμένου τμήματος. Μετά τη διεξαγωγή των δοκιμών, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πιο απλοποιημένα και περιλάμβαναν τις πραγματικές ιδιότητες του χάλυβα.

Στο Σχήμα 3.10β, γ φαίνεται η κατανομή των τάσεων στη συσκευή κατά την 1η διαρροή και κατά τη μέγιστη μετακίνηση αντίστοιχα. Η πρώτη διαρροή εμφανίζεται στον πείρο στο σημείο αλλαγής της διαμέτρου του (γκρι περιοχή τάση > f_y=235MPa) ενώ οι δοκοί-υποδοχείς είναι ελαστικές με τάσεις μικρότερες από την τάση διαρροής τους (f_y=355MPa). Με την αύξηση του φορτίου μέχρι τη μέγιστη μετακίνηση, η διαρροή επεκτείνεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του πείρου, ο οποίος επιδεικνύει εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (Σχήμα 3.10στ). Αντίστοιχα, η δοκός-υποδοχέας στο μέγιστο φορτίο παραμένει στην ελαστική περιοχή (Σχήμα 3.10θ), ενώ η μετωπική πλάκα αρχίζει να διαρρόει τοπικά σε κάποιες θέσεις της οπής λόγω εκτεταμένης παραμόρφωσης του πείρου.



Δοκοί SHS με συγκολλημένη μετωπική πλάκα



Σχήμα 3.10: Κατανομή τάσεων για τρεις διαφορετικές φάσεις

Για την περαιτέρω αξιολόγηση της συμπεριφοράς της συσκευής υπολογίστηκε ο λόγος ροπών της απομειωμένης διατομής του πείρου στη θέση έναρξης της απομείωσης προς την πλαστική ροπή αντοχής της (εξίσωση (3.11)).

$$m_{pin} = \frac{P \cdot \ell_{pin}}{2 \cdot M_{pl,pin}}$$
(3.11)

όπου:

Ρ η αντίδραση στη στήριξη των δοκών-υποδοχέων

 ℓ_{pin} το μήκος του απομειωμένου τμήματος του πείρου (Σχήμα 3.11) και

 $M_{\text{pl,pin}}$ η πλαστική ροπή αντοχής της απομειωμένης διατομής του πείρου.



Σχήμα 3.11: Ορισμός απομειωμένου μήκους πείρου $\boldsymbol{\ell}_{\mathsf{pin}}$

Στο Σχήμα 3.12 δίνονται οι βρόχοι υστέρησης της ανηγμένης ροπής m_{pin} προς την επιβαλλόμενη μετατόπιση u. Η συσκευή εμφανίζει πολύ καλή υστερητική συμπεριφορά με ευρείς κύκλους και μέγιστη τιμή που ξεπερνά έως και τρεις φορές τη θεωρητική αντοχή. Η αύξηση της δυσκαμψίας της συσκευής οφείλεται στην αυξημένη εφελκυστική αντοχή του πείρου λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων. Ωστόσο, παρατηρείται μείωση της πληρότητας του βρόχου υστέρησης (pinching), η οποία οφείλεται στο κενό που σχηματίζεται μεταξύ του πείρου και της μετωπικής πλάκας ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης πλαστικής παραμόρφωσης του πείρου και του φαινομένου Poisson κατά μήκος της περιφέρειας του.



Σχήμα 3.12: Διαγράμμα m_{pin} -u

Μια άλλη παράμετρος που ελέγχθηκε ήταν η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση PEEQ στις θέσεις όπου εμφανίστηκε η διαρροή, στην περίμετρο της οπής της μετωπικής πλάκας (θέσεις 1 και 2) και στην αρχή της απομείωσης του πείρου (Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Θέσεις ελέγχου τοπικών παραμορφώσεων συσκευής «FUSEIS1-2»

Από τις υψηλές τιμές της PEEQ στο Σχήμα 3.14α επιβεβαιώνεται ότι ο πείρος εισέρχεται σε περιοχή μεγάλων παραμορφώσεων προστατεύοντας τη μετωπική πλάκα, η οποία εμφανίζει πολύ μικρότερες τιμές, Σχήμα 3.14β.



Σχήμα 3.14: Σύγκριση ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης PEEQ σε τρεις θέσεις της συσκευής

Οι παραπάνω αναλύσεις, αν και αποτελούν μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της συσκευής, «FUSEIS1-2» έδειξαν ότι ο πείρος διαθέτει μεγάλη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης και καθόρισαν τις βασικές λεπτομέρειες σχεδιασμού των τμημάτων της συσκευής για την αποφυγή τοπικής συγκέντρωσης τάσεων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στο RWTH και στο Ε.Μ.Π. για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των συσκευών και των πλαισίων με τις συσκευές αντίστοιχα και παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα.

3.5. Πειραματικές διερευνήσεις μεμονωμένων συσκευών «FUSEIS1-2» στο RWTH

3.5.1. Πειραματική Διάταξη

Στο RWTH πραγματοποιήθηκαν οχτώ δοκιμές πραγματικής κλίμακας στις συσκευές «FUSEIS1-2» υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η πειραματική διάταξη προσομοίωνε τα υποστυλώματα του συστήματος συνδεόμενα στο μέσο με μια συσκευή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15 και ήταν ίδια σε όλες τις δοκιμές. Οι συνδέσεις εντός του επιπέδου έγιναν με χρήση πείρων ώστε να επιτρέπονται οι μετακινήσεις κατά την διεύθυνση του φορτίου ενώ οι εκτός του επιπέδου μετακινήσεις δεσμεύονταν με εγκάρσιες στηρίξεις. Οι οριζόντιες δοκοί της διάταξης συνδέονταν άκαμπτα με το δοκίμιο ώστε να μεταφέρονται σε αυτό διατμητικές δυνάμεις και ροπές κάμψης.

Το φορτίο επιβαλλόταν με χρήση υδραυλικού εμβόλου και η καταγραφή της οριζόντιας μετακίνησης της άνω δοκού γινόταν με ηλεκτρονικά βελόμετρα. Η καταλληλότητα της πειραματικής διάταξης επιβεβαιώθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών καθώς δεν παρουσίασε πλαστικές παραμορφώσεις και η τοποθέτηση και αντικατάσταση των δοκιμίων δεν εμφάνισε ιδιαίτερες δυσκολίες.



Σχήμα 3.15: Πειραματική διάταξη RWTH

Section 1-1

M10

M9

<u>M1</u>

E

D

β) Τομή 1-1

M11

F



Σχήμα 3.16: Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης





α) Σύνδεση με πείρο

β) Επιβολή φορτίου Σχήμα 3.17: Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης



В

(A)

C

γ) Στηρίξεις εμβόλου



δ) Εγκάρσιες στηρίξεις

3.5.2. Περιγραφή δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 3.4, η γεωμετρία της συσκευής καθορίστηκε από τις αρχικές αναλυτικές διερευνήσεις και περιλάμβανε δύο δοκούς-υποδοχείς SHS120x10 και ένα πείρο κυκλικής διατομής αρχικής διαμέτρου Φ60 που απομειωνόταν στο μεσαίο τμήμα του (Σχήμα 3.18). Βασικό κριτήριο για την επιλογή των πείρων ήταν να μπορούν να απορροφούν ενέργεια κυρίως μέσω καμπτικής διαρροής στο τμήμα αυτό. Επομένως η καθοριστική παράμετρος για το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης ήταν η πλαστική ροπή αντοχής της απομειωμένης διατομής του πείρου M_{pl,pin}, μέσω της οποίας υπολογίστηκε και το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο βάσει του ΕΝ 1993-1 [33]. Για τον υπολογισμό της θεωρήθηκε ποιότητα χάλυβα \$235 με προσαυξημένη εφελκυστική αντοχή 460 MPa για να ληφθεί υπόψη και η κράτυνση του υλικού. Στο σχεδιασμό των συνδέσεων και της διάταξης χρησιμοποιήθηκε συντελεστής ασφαλείας 1,5.



α) Πείροι κυκλικής διατομής

β) Δοκοί-υποδοχείς



Ο πείρος είχε μήκος 400mm και χωριζόταν σε τρία τμήματα. Στα άκρα του η διατομή είχε διάμετρο Φ60 και στο μεσαίο τμήμα, του οποίου το μήκος ήταν μεταβλητό, η διατομή του απομειωνόταν σε Φ45mm (Σχήμα 3.19α, β). Το καθαρό μήκος του απομειωμένου τμήματος του πείρου ήταν $\ell_{pin} = \{150mm, 120mm, 90mm\} \ge 2 \cdot M_{pl,pin} / V_{pl,pin} = 39mm$ για να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη μηχανισμού κάμψης. Προκειμένου να προστατευθεί η μετωπική πλάκα της δοκού-υποδοχέα και να εξασφαλιστούν οι συνθήκες τριαξονικότητας η απομείωση της διατομής του πείρου ξεκινούσε σε απόσταση από αυτή και οι ακμές της οπής της μετωπικής πλάκας λειάνθηκαν (Σχήμα 3.19γ). Επιπλέον, τα άκρα των πείρων διαμορφώθηκαν με σπείρωμα αντίθετης φοράς για διευκόλυνση της τοποθέτησης και αντικατάστασής τους. Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων.



2χημα 3.19: 20σκευη	«FUSEIST-Z»

Αρ. Διαμετρος		Φόρτιση	€ _{pin} (mm)	Πλαστική αντοχή απομειωμένης διατομής		F _{επιβ.} (kN)
Δοκιμων	πείρου			W _{pl,pin} (cm ³)	M _{pl,pin} (kNm)	
2	Ф45-60	Ανακυκλιζόμενη	150	15,2	7,0	186,5
2	Ф45-60	Ανακυκλιζόμενη	120	15,2	7,0	233,1
2	Ф45-60	Ανακυκλιζόμενη	90	15,2	7,0	310,8
1	Ф45-60	Μονοτονική	120	15,2	7,0	233,1
1	Ф45-60	Μονοτονική	90	15,2	7,0	310,8

Πίνακας 3.2: Υπολογισμός πλαστικής αντοχής συσκευών «FUSEIS» και επιβαλλόμενου φορτίου δοκιμών

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διάταξης για τις δοκιμές των συσκευών «FUSEIS1-2» βασίστηκε στη σχέση μεταξύ της γωνιακής παραμόρφωσης του πλαισίου (interstory drift) και της κατακόρυφης μετακίνησης μ των συσκευών σύμφωνα με το στατικό μοντέλο που δίνεται στο Σχήμα 3.9.

Μονοτονική Φόρτιση

Η συμπεριφορά των συσκευών υπό μονοτονική φόρτιση είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ήταν καθοριστική για την επιλογή της διαδικασίας που θα ακολουθούνταν στις δοκιμές υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών υπό μονοτονική φόρτιση η ταχύτητα του εμβόλου ήταν 0,1mm/s και η παραμόρφωση της άνω δοκού της πειραματικής διάταξης, που ισοδυναμεί με την κατακόρυφη μετακίνηση υ του δοκιμίου (Σχήμα 3.9), αυξανόταν μέχρι την αστοχία. Από τις δοκιμές προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα με κυριότερα το όριο της ελαστικής περιοχής, τη φέρουσα ικανότητα και τις αντίστοιχες μετακινήσεις.

Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται στον ECCS [34]. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης με κύκλους διαρκώς αυξανόμενου εύρους βάσει της παραμόρφωσης διαρροής (δ_v). Ξεκινώντας από μια μετακίνηση 1,125mm ασκούμενη κατά τον άξονα του εμβόλου, η φόρτιση αυξήθηκε μέχρι τα 60 mm όπως φαίνεται στο πρωτόκολλο φόρτισης στο Σχήμα 3.20. Η δοκιμή συνεχιζόταν με μετακίνηση 60 mm μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Πριν από κάθε δοκιμή υπολογιζόταν αναλυτικά η μετακίνηση διαρροής δ_v του δοκιμίου, η οποία ήταν στα περισσότερα δοκίμια ίση με 0,25%, και το πρωτόκολλο φόρτισης τροποποιούνταν κατάλληλα. Η αξονική απόσταση μεταξύ των υποστυλωμάτων ήταν L=1,5m και επομένως η μέγιστη τιμή του πρωτοκόλλου φόρτισης 60mm αντιστοιχεί σε σχετική μετακίνηση ορόφου 4% (1500 x 0,04 = 60 mm). Η ταχύτητα κατά τη διάρκεια των δοκιμών ήταν 0,3 mm/s μέχρι μετακίνηση u = 7,5 mm, 1,0 mm/s μέχρι μετακίνηση u = 30 mm και 2,0 mm/s μέχρι την αστοχία.



Σχήμα 3.20: Πρωτόκολλο φόρτισης συσκευών «FUSEIS1-2»

3.5.3. Αποτελέσματα δοκιμών

Αποτελέσματα δοκιμών υπό μονοτονική φόρτιση

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές υπό μονοτονική φόρτιση σε πείρους με μήκος απομειωμένου τμήματος θ_{pin}=90mm και 120mm. Οι καμπύλες φορτίου – μετακίνησης δίνονται στο Σχήμα 3.21 και ο Πίνακας 3.3 συνοψίζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι πείροι επέδειξαν όλκιμη συμπεριφορά με σημαντική αύξηση του φορτίου μετά την είσοδό τους στην πλαστική περιοχή. Το φαινόμενο αυτό οφειλόταν στην κράτυνση του υλικού και κυρίως στην αλλαγή του μηχανισμού παραλαβής των φορτίων. Για μικρές μετακινήσεις το φορτίο παραλαμβανόταν από τον πείρο μέσω κάμψης και διάτμησης ενώ για μεγαλύτερες μετακινήσεις αναπτύσσονταν αξονικές δυνάμεις που αύξαναν σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου.

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα	δοκιμών υπο	ό μονοτονική	φόρτιση

	Τύπος	o	Όριο ελαστικής περιοχής		Φέρουσα ικανότητα	
Αρ. Δοκιμών		e _{pin} (mm)	Φορτίο (kN)	Μετακίνηση (mm)	Φορτίο (kN)	Μετακίνηση (mm)
1	Ф=45-60	120	73	10,6	400	156
1	Ф=45-60	90	118	10,8	435	123



Σχήμα 3.21: Καμπύλες φορτίου – μετακίνησης και δοκίμια σε παραμορφωμένη κατάσταση υπό μονοτονική φόρτιση

Αποτελέσματα δοκιμών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές υπό ανακυκλιζόμ**ε**νη φόρτιση σε πείρους με μήκος απομειωμένου τμήματος θ_{pin}=90mm, 120mm και 150mm. Τα αποτελέσματα σε διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης δίνονται στο Σχήμα 3.22, όπου παρατηρείται ότι η μέγιστη μετακίνηση των συσκευών ήταν σε όλες τις δοκιμές μικρότερη από τη μέγιστη μετακίνηση του πρωτοκόλλου φόρτισης (60mm). Οι καμπύλες έχουν χαρακτηριστικό σχήμα καθώς εμφανίζουν μείωση της πληρότητας του βρόχου υστέρησης (pinching) που οφείλεται στην παραμόρφωση των συσκευών όταν ο πείρος δε βρίσκεται σε επαφή με την μετωπική πλάκα της δοκού-υποδοχέα. Στο κενό μεταξύ πείρου και μετωπικής πλάκας οφείλεται και η σχεδόν οριζόντια κλίση της καμπύλης στις θέσεις αλλαγής της φοράς του επιβαλλόμενου φορτίου. Κατά τους τελευταίους κύκλους φόρτισης, στις υψηλότερες τιμές του φορτίου, παρατηρείται αύξηση της φέρουσας ικανότητας των πείρων λόγω της εμφάνισης αξονικών δυνάμεων κάτω από μεγάλες παραμορφώσεις.













Σχήμα 3.22: Καμπύλες φορτίου – μετακίνησης και δοκίμια σε παραμορφωμένη κατάσταση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Από το εμβαδόν κάθε κύκλου φόρτισης υπολογίστηκε η ενέργεια που απορροφά η συσκευή, η οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23 αυξανόταν ανά κύκλο φόρτισης. Στο Σχήμα 3.24 δίνεται η σύγκριση της συνολικά απορροφούμενης ενέργειας ανά δοκιμή.



Σχήμα 3.23: Απορροφούμενη ενέργεια ανά κύκλο φόρτισης



Σχήμα 3.24: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια ανά δοκιμή

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι η συμπεριφορά των πείρων όσον αφορά στη μορφή των κύκλων υστέρησης, στη μέγιστη μετακίνηση (περίπου ίση με 40mm) και στην απορροφούμενη ενέργεια ήταν όμοια σε όλες τις δοκιμές, με λίγο μεγαλύτερες τιμές στους πείρους με το μικρότερο μήκος απομειωμένου τμήματος ℓ_{pin} =90mm.

3.5.4. Δοκιμές εφελκυσμού

Μια βασική παράμετρος του σχεδιασμού συστημάτων απορρόφησης ενέργειας είναι η ποιότητα του χάλυβα. Για τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού των πείρων κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον πείροι, από τους οποίους παράχθηκαν τρία δοκίμια 5Α, 5Β, 5C. Στο Σχήμα 3.25 φαίνεται η υδραυλική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των εφελκυστικών δοκιμών με έλεγχο μετακίνησης. Η γεωμετρία των δοκιμίων ήταν σύμφωνη με τις προδιαγραφές του DIN 50125 [35] και δίνεται στο Σχήμα 3.26.





Σχήμα 3.25: Διάταξη δοκιμής εφελκυσμού Σχήμα 3.26: Εφελκυστικό δοκίμιο (DIN 50125)

Από τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων (σ-ε) των τριών δοκιμίων 5Α, 5Β, 5C, τα οποία είχαν παραπλήσια συμπεριφορά, προέκυψαν οι μηχανικές ιδιότητες των εξεταζόμενων πείρων (Σχήμα 3.27α). Η μέση τιμή του ορίου διαρροής ήταν 220MPa και η αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή 415MPa περίπου, τιμές χαμηλότερες από τις ονομαστικές ιδιότητες του χάλυβα παραγγελίας S235 πιθανόν λόγω της ειδικής κατεργασίας των πείρων κατά την παραγωγή τους. Το όριο διαρροής f_γ ήταν απαραίτητο για τη μετατροπή των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης των δοκιμών πραγματικής κλίμακας σε αδιάστατες καμπύλες για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Παρ. 3.5.6). Για τη βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων FEM απαιτήθηκε αντίστοιχα η μετατροπή των διαγραμμάτων σ-ε σε διαγράμματα πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε_τ, Σχήμα 3.27β) μέσω των εξισώσεων (3.12) και (3.13) για να ληφθεί υπόψη η κράτυνση του χάλυβα από το μέγιστο φορτίο μέχρι τη θραύση, η οποία δεν ήταν δυνατό να αποτυπωθεί στα αρχικά διαγράμματα τάσεων παραγωρφώσεων των δοκιμών εφελκυσμού.

$$\sigma_{T} = \frac{F}{A_{T}} = \frac{F \cdot \ell}{A_{0} \cdot \ell_{0}} = \sigma \cdot \frac{\ell}{\ell_{0}} = \sigma \cdot \frac{\Delta \ell + \ell_{0}}{\ell_{0}} = \sigma \cdot (1 + \epsilon)$$

$$\varepsilon_{T} = \ln \frac{\ell_{1}}{\ell_{0}} = \ln \left(\frac{\Delta \ell + \ell_{0}}{\ell_{0}} \right) = \ln (1 + \epsilon)$$
(3.12)
(3.13)

όπου:

ε το μεταβαλλόμενο μήκος του μηκυνσιόμετρου και

ℓ₀ το αρχικό μήκος του μηκυνσιόμετρου.



Σχήμα 3.27: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

3.5.5. Δοκιμές υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Προκειμένου να διερευνηθούν οι ιδιότητες του χάλυβα των πείρων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και να προσδιοριστεί ο κατάλληλος νόμος κράτυνσης διεξήχθησαν δύο επιπλέον δοκιμές υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στο Σχήμα 3.28 φαίνεται η γεωμετρία του δοκιμίου. Για την εξασφάλισή του έναντι λυγισμού απαιτήθηκε ελάχιστη διάμετρος 20mm με αποτέλεσμα να μπορεί εξαχθεί μόνο ένα δοκίμιο από κάθε πείρο.



Σχήμα 3.28: Γεωμετρία εφελκυστικών δοκιμίων για ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στις αναλύσεις υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ο νόμος υλικού δεν μπορούσε να εκφραστεί με χρήση ενός απλού διγραμμικού μοντέλου τάσεων – παραμορφώσεων καθώς κατά τη διάρκεια εναλλαγών της κατεύθυνσης φόρτισης το σχήμα της επιφάνειας διαρροής διαφοροποιείται. Η ανάγκη λεπτομερούς καταγραφής της συμπεριφοράς αυτής οδήγησε στην επιλογή ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψη την κράτυνση. Ανάλογα με το νόμο κράτυνσης που χρησιμοποιείται, αλλάζει και η απόκριση του υλικού μετά την διαρροή. Οι πιο συνήθεις νόμοι κράτυνσης που χρησιμοποιούνται για το χάλυβα είναι:

- η ισότροπη (isotropic hardening)
- η κινηματική (kinematic hardening) και
- ο συνδυασμός τους (isotropic and kinematic hardening).

Στην ισότροπη κράτυνση, κατά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής διαστέλλεται ή συρρικνώνεται ενώ το κέντρο της παραμένει σταθερό όπως φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 3.29. Η ισότροπη κράτυνση σ⁰ περιγράφεται ως συνάρτηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης ε^{pl} σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma^{0} = \sigma \big|_{0} + \mathcal{Q}_{\infty} (1 - e^{-b\varepsilon^{p^{1}}})$$
(3.14)

όπου:

σ η αρχική τάση και

Q, b οι σταθερές του υλικού.



Σχήμα 3.29: Διαστολή επιφάνειας διαρροής σε συνθήκες απλής έντασης για ισότροπη κράτυνση

Ο μηχανισμός της κινηματικής κράτυνσης, είτε μόνος είτε σε συνδυασμό με την ισότροπη κράτυνση, αποτελεί ένα επιπρόσθετο μέσο για τη βελτίωση της περιγραφής της συμπεριφοράς του χάλυβα υπό ανακλυκλιζόμενη φόρτιση. Στην κινηματική κράτυνση, κατά τη διάρκεια του πλαστικού κλάδου μιας φόρτισης, η επιφάνεια διαρροής μετακινείται στο χώρο χωρίς να μεταβάλλονται το σχήμα και το μέγεθός της (Σχήμα 3.30), φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό και ως φαινόμενο Bauschinger [36]. Σύμφωνα με το φαινόμενο Bauschinger, η τάση διαρροής κατά τον εφελκυσμό ή τη θλίψη όταν ο χάλυβας υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση είναι μικρότερη από την τάση διαρροής κατά τη θλίψη ή τον εφελκυσμό αντίστοιχα μετά την αντιστροφή της διεύθυνσης του φορτίου. Το κινηματικό μοντέλο κράτυνσης προσομοιώνει την κίνηση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο χρησιμοποιώντας την παράμετρο backstress α η οποία απεικονίζει το κέντρο της επιφάνειας διαρροής στο χώρο.



Σχήμα 3.30: Μετακίνηση επιφάνειας διαρροής σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης

Ο όρος της κινηματικής κράτυνσης χρησιμοποιήθηκε πρώτος από τον Prager [37]. Αργότερα ο Ziegler [38] τροποποίησε το γραμμικό κινηματικό μοντέλο του Prager ώστε να μπορεί δώσει ακριβή αποτελέσματα στην περίπτωση τρισδιάστατων συνθηκών. Ο νόμος του Ziegler αν αμεληθούν οι θερμοκρασιακές επιρροές δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{\alpha} = C \cdot \frac{1}{\sigma^0} \cdot (\sigma - \alpha) \cdot \dot{\epsilon}^{\text{pl}}$$
(3.15)

όπου:

C το κινηματικό μέτρο κράτυνσης,

 $σ^0$ το αρχικό μέγεθος της επιφάνειας διαρροής και

ε^{pl} η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

Η μη γραμμικότητα εισάγεται στο παραπάνω μοντέλο λαμβάνοντας έναν επιπλέον όρο απόσβεσης (recall term). Ο νόμος κινηματικής κράτυνσης ορίζεται σε αυτήν την περίπτωση με την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{\alpha} = \mathbf{C} \cdot \frac{1}{\sigma^0} \cdot (\sigma - \alpha) \cdot \dot{\varepsilon}^{\mathrm{pl}} - \gamma \cdot \alpha \cdot \dot{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}$$
(3.16)

Η σταθερά γ καθορίζει το ρυθμό μείωσης του κινηματικού μέτρου κράτυνσης το οποίο μειώνεται καθώς η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται.

Ο νόμος υλικού που θεωρήθηκε καταλληλότερος για την περιγραφή της επιρροής της κράτυνσης στο σύστημα «FUSEIS1-2» αποτελούταν από ένα μη γραμμικό κινηματικό και ένα ισοτροπικό στοιχείο κράτυνσης, που προκύπτουν από τις εξισώσεις (3.16) και (3.14) αντίστοιχα. Για την εύρεση των σταθερών του νόμου κράτυνσης του υλικού, κινηματικών C, γ και ισοτροπικών Q, b οι παραπάνω δοκιμές προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS [32] με χρήση αξονοσυμμετρικού μοντέλου δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στην πρόβλεψη των μέγιστων τιμών φορτίου ανά κύκλο φόρτισης. Στο Σχήμα 3.31 φαίνεται το διάγραμμα φορτίου – μετακίνησης της πρώτης δοκιμής και το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε από το βαθμονομημένο μοντέλο στο ABAQUS [32].





Τα αριθμητικά αποτελέσματα προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πειραματική καμπύλη, επομένως οι παράμετροι κινηματικής και ισότροπης κράτυνσης που προέκυψαν από το βαθμονομημένο μοντέλο (Πίνακας 3.4) ήταν κατάλληλες για να εφαρμοστούν στις αναλυτικές διερευνήσεις των συσκευών «FUSEIS1-2». Παρατηρείται ότι η σ_γ είναι πολύ μικρότερη από το όριο διαρροής υπό μονοτονική φόρτιση, 220MPa.

Πίνακας 3.4: Τιμές παραμέτρων κράτυνσης αριθμητικών αναλύσεων

σ _y (MPa)	С	γ	Q	b
160	12000	80	50	80

3.5.6. Αδιάστατα διαγράμματα ροπής-στροφής

Δεδομένου ότι οι πραγματικές ιδιότητες του χάλυβα σπάνια συμπίπτουν με τις ονομαστικές τιμές κρίθηκε απαραίτητο μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων των συσκευών «FUSEIS1-2» υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχήμα 3.22 να μετασχηματιστούν σε αδιάστατη μορφή. Η μορφή αυτή διευκόλυνε την αξιολόγησή των δοκιμών αλλά επιπλέον μπορούσε να εφαρμοστεί και σε εμπορικά προγράμματα (π.χ. SAP2000 [31]) για τον προσδιορισμό των μη γραμμικών ιδιοτήτων των πείρων. Η αδιάστατη μορφή προέκυψε διαιρώντας τις δράσεις και τις παραμορφώσεις με τις αντίστοιχες τιμές πλαστικής αντοχής βάσει της πραγματικής τάσης διαρροής του υλικού f_γ. Η πλαστική ροπή αντοχής του πείρου υπό οριζόντια φόρτιση στη θέση της απομείωσης M_{pl,pin} υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{pl,pin} = W_{pl,pin} \cdot f_{y}$$
(3.17)

όπου:

W_{pl,pin} η πλαστική ροπή αντίστασης της απομειωμένης διατομής του πείρου και

fy η πραγματική τάση διαρροής που καθορίστηκε από τις δοκιμές εφελκυσμού (Παρ. 3.5.4)

Θεωρώντας ότι ο πείρος λειτουργεί σαν αμφίπακτη δοκός με επιβαλλόμενη μετακίνηση στο ένα άκρο ισχύουν τα παρακάτω:

$$M = \frac{6 \cdot EI \cdot u}{\ell^2}$$
(3.18)

$$\theta = \frac{u}{2} \tag{3.19}$$

$$\theta = \frac{\mathsf{M} \cdot \ell}{\mathsf{M} \cdot \mathsf{M}} \tag{3.20}$$

$$\Theta = \frac{1}{6 \cdot \text{El}} \tag{3.20}$$

όπου:

ΕΙ η καμπτική δυσκαμψία του πείρου και

υ η κατακόρυφη μετακίνηση στο άκρο.

Η πλαστική στροφή του πείρου $\theta_{pl,pin}$ επομένως είναι:

$$\theta_{pl,pin} = \frac{M_{pl,pin} \cdot \ell_{pin}}{6 \cdot El_{pin}}$$
(3.21)

όπου:

ΕΙ_{pin} η καμπτική δυσκαμψία του.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών μετρήθηκε η οριζόντια δύναμη V, από την οποία υπολογίστηκε η ροπή Μ που αναπτύχθηκε στο απομειωμένο τμήμα του πείρου (εξίσωση (3.22)), και η μετακίνηση u, από την οποία υπολογίστηκε η στροφή του πείρου θ (εξίσωση (3.19)).

$$M = V \cdot \frac{\ell_{\text{pin}}}{2}$$
(3.22)

Διαιρώντας τις παραπάνω τιμές με τα M_{pl,pin} και θ_{pl,pin} αντίστοιχα προέκυψαν τα αδιάστατα διαγράμματα M/M_{pl,pin} και θ/θ_{pl,pin} για όλα τα δοκίμια βάσει των οποίων στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι καμπύλες των μέγιστων τιμών ανά κύκλο (backbone curves). Οι καμπύλες αυτές αποτέλεσαν την αφετηρία για τον προσδιορισμό των μη γραμμικών ιδιοτήτων του πείρου μέσω μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων πλαισίων με συσκευές «FUSEIS1-2» (Κεφ. 4). Το Σχήμα 3.32 συνοψίζει τα αδιάστατα διαγράμματα ροπής - στροφής των δοκιμών υπό μονοτονική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση και τις καμπύλες των μεγίστων τιμών ανά κύκλο. Είναι εμφανές ότι τα διαγράμματα των δοκιμών υπό μονοτονική φόρτιση προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τις αντίστοιχες καμπύλες μεγίστων τιμών.





Σχήμα 3.32: Αδιάστατα διαγράμματα ροπής-στροφής και καμπύλες μεγίστων τιμών ανά κύκλο

3.6. Πειραματικές διερευνήσεις πλαισίων με συσκευές «FUSEIS1-2»

Οι πειραματικές διερευνήσεις των συσκευών «FUSEIS1-2» παρείχαν μια πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς του μεμονωμένου πείρου. Για να γίνει όμως μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της καθολικής συμπεριφοράς του συστήματος σε ένα ισχυρό σεισμικό γεγονός ήταν απαραίτητη και η διεξαγωγή δοκιμών σε πλαίσια με τις συσκευές σε πραγματική κλίμακα. Προς τούτο διεξήχθησαν δύο δοκιμές στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. σε πλήρη μονώροφα πλαίσια.

Η σεισμική απόκριση ενός πλαισίου με «FUSEIS1-2» εξαρτάται από τη δυσκαμψία και την αντοχή των πείρων. Ως εκ τούτου, η χρήση πανομοιότυπων πείρων εντός του ύψους του ορόφου οδηγεί στην ταυτόχρονη πλαστικοποίηση του συνόλου των πείρων, όπως φάνηκε και στις αρχικές πειραματικές διερευνήσεις (Παρ. 3.1). Με στόχο την ελεγχόμενη διαρροή των πείρων και τη βελτίωση της συμπεριφοράς του πλαισίου υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η έρευνα επικεντρώθηκε στην επίτευξη της διαδοχικής αστοχίας των πείρων μέσω των ακόλουθων προσεγγίσεων. Στην πρώτη προσέγγιση έγινε χρήση πείρων ίδιας διατομής και μεταβλητού μήκους καθ' ύψος του ορόφου, ενώ στη δεύτερη το μήκος του πείρου παρέμενε σταθερό και μεταβαλλόταν η διατομή του.

3.6.1. Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε ένα τρισδιάστατο πλαίσιο δοκιμών και ένα υδραυλικό έμβολο. Το τρισδιάστατο πλαίσιο δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ίδιο με των αρχικών πειραματικών διερευνήσεων του 2007 (Σχήμα 3.33α, [27]). Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δοκιμών ανέκυψαν κάποια προβλήματα, καθώς η δυσκαμψία του πλαισίου δοκιμών ήταν συγκρίσιμη με τη δυσκαμψία του εξεταζόμενου πλαισίου. Αυτό σε συνδυασμό με τις μικρές ανοχές του λοξού κόμβου είχαν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση παρασιτικών μετακινήσεων οι οποίες αυξάνονταν με την αύξηση της δυσκαμψίας των δοκιμίων. Για την αποφυγή των παραπάνω απαιτήθηκε επανασχεδιασμός και ενίσχυση του πλαισίου δοκιμών με στόχο την αύξηση της συνολικής δυσκαμψίας του, ώστε να μπορεί χωρίς μεγάλες παραμορφώσεις να δέχεται ισχυρότερα δοκίμια και μεγαλύτερο έμβολο, τον περιορισμό των ατελειών, ιδιαίτερα των αθροιστικών, και τέλος την ευκολία αντικατάστασης των στοιχείων της διάταξης.

Για την αύξηση της δυσκαμψίας στο νέο σχεδιασμό (Σχήμα 3.33β) ενισχύθηκε το ζύγωμα του πλαισίου, κυρίως ο κόμβος κεφαλής, και η σύνδεση του πλαισίου με το ισχυρό δάπεδο του εργαστηρίου (strong floor) με προσθήκη αντηρίδων ώστε να μην επιβαρύνεται ο στύλος με πρόσθετες καμπτικές καταπονήσεις. Ο ενισχυμένος κόμβος κεφαλής, που συνδέει το οριζόντιο ζύγωμα με το κεκλιμένο ανώτερο τμήμα του υποστυλώματος (Σχήμα 3.33γ), είχε μεγαλύτερο στατικό ύψος, ισχυρότερες κοχλιωτές συνδέσεις και διάταξη ενισχυτικών ελασμάτων για την εξασφάλιση της ομαλής τροχιάς των δυνάμεων και την ομαλή μεταφορά τους στο έδαφος. Οι αντηρίδες διατάχθηκαν στην επέκταση των κεκλιμένων τμημάτων των στύλων του πλαισίου, ώστε να εξασφαλίζουν το αμετακίνητο στην οριζόντια διεύθυνση του άνω ζυγώματος, και στην επέκταση του κάτω ζυγώματος (Σχήμα 3.33δ). Για τη σύνδεσή τους με το δάπεδο του εργαστηρίου έγιναν κοχλιώσεις με διαμπερείς κοχλίες και μετωπικές πλάκες.



α) Υφιστάμενη πειραματική διάταξη

β) Ενισχυμένη πειραματική διάταξη



γ) Ενίσχυση κόμβου κεφαλής δ) Προσθήκη αντηρίδων και σύνδεσή τους με το πλαίσιο δοκιμών

Η σύνδεση των υποστυλωμάτων των δοκιμίων στο πλαίσιο δοκιμών ήταν αρθρωτή με πείρους και υλοποιούταν με τη χρήση μιας κεφαλής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.34α. Η κεφαλή περιλάμβανε ένα κεντρικό πείρο - άρθρωση και πλάκες σύνδεσης με το κάτω πέλμα του ζυγώματος του πλαισίου. Η δοκός ανάρτησης στις θέσεις των συνδέσεων ενισχύθηκε με μετωπικές πλάκες και εγκάρσιες νευρώσεις ανάμεσα στα πέλματα, ώστε τα φορτία και οι αντίστοιχες ροπές που δημιουργούν να κατανέμονται ομοιόμορφα, προστατεύοντας την έναντι τοπικής βλάβης. Τα άκρα των πείρων είχαν κωνική διαμόρφωση στο ένα άκρο για διευκόλυνση της τοποθέτησής τους, η οποία πραγματοποιήθηκε με σφυρί και χρήση λιπαντικού για μείωση της τριβής. Η διαμήκης ολίσθηση των πείρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής εμποδιζόταν από εγκάρσιους κοχλίες M6. Η σύνδεση της κεφαλής στο ζύγωμα του πλαισίου δοκιμών προσομοίωνε το διάφραγμα της πλάκας του ορόφου, ώστε τα υποστυλώματα να έχουν ίδιες μετατοπίσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στους πόδες των υποστυλωμάτων συνδέονταν με πείρους δύο οριζόντιες δοκοί UPN260, μία σε κάθε πλευρά του συστήματος, προσομοιώνοντας τη

Σχήμα 3.33: Ενίσχυση υφιστάμενης πειραματικής διάταξης

διαφραγματική λειτουργία της κάτω πλάκας ή της θεμελίωσης (Σχήμα 3.34β). Η ανοχή της οπής σε αυτή τη σύνδεση ήταν 3mm και χρησιμοποιήθηκε μανσόν από ορείχαλκο για μείωση των τριβών και διευκόλυνση στην τοποθέτηση και αντικατάσταση των δοκιμίων. Επιπλέον, οι δοκοί UPN συνδέονταν με ειδική διάταξη μεταξύ τους, με κατάλληλο κομβοέλασμα ώστε να παρέχουν και στρεπτική σύνδεση των υποστυλωμάτων. Η εκτός επιπέδου μετακίνηση και στροφή στους πόδες των υποστυλωμάτων περιορίστηκε με ειδική διάταξη μεταλλικών πλακών/οδηγών (Σχήμα 3.34β).







β) Δοκοί UPN και μεταλλικές πλάκες / οδηγοί

Σχήμα 3.34: Λεπτομέρειες πειραματικής διάταξης

Το φορτίο επιβαλλόταν μέσω υδραυλικού εμβόλου μέγιστης ικανότητας 500kN σε θλίψη και εφελκυσμό και μέγιστης δυνατότητας μετακίνησης ±250mm (Σχήμα 3.35), το οποίο συνδεόταν αρθρωτά με τη βάση του υποστυλώματος του συστήματος ώστε να μεταφέρει μόνο οριζόντιες δυνάμεις στο πλαίσιο. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκε η σεισμική κίνηση του εδάφους και παράλληλα με το διάφραγμα της κεφαλής η αντίσταση της αδρανειακής μάζας του ορόφου στην κίνηση αυτή. Η στήριξη του εμβόλου στο πλαίσιο δοκιμών πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλα διαμορφωμένης διάταξης που συνδεόταν στο κάτω ζύγωμα και στο στύλο του πλαισίου. Κάθε δοκιμή ξεκινούσε από τη μέση της διαδρομής του εμβόλου για να είναι συμμετρική η επιβολή του φορτίου.



Σχήμα 3.35: Υδραυλικό έμβολο

Η χρήση πείρων και η εξάλειψη των τριβών στη διαμόρφωση των συνδέσεων των υποστυλωμάτων του συστήματος στο πλαίσιο δοκιμών (κεφαλή και πόδας) και στο έμβολο επέτρεπαν την ελεύθερη περιστροφή τους στην κορυφή και την οριζόντια μετακίνηση στον πόδα, με αποτέλεσμα η αντίσταση του συστήματος να καθορίζεται μόνο από τη δυσκαμψία των συσκευών «FUSEIS1-2». Οι συνδέσεις αυτές αλλά και η σύνδεση του εμβόλου στα υποστυλώματα του πλαισίου δοκιμών έγιναν σχεδόν εφαρμοστές για να αποφευχθούν πιθανές παρασιτικές σχετικές μετακινήσεις λόγω των κατασκευαστικών ανοχών των οπών, οι οποίες θα λειτουργούσαν αθροιστικά και θα αλλοίωναν τις καταγραφές.

3.6.2. Περιγραφή δοκιμίων

Εκτός από το τρισδιάστατο πλαίσιο δοκιμών και το εξεταζόμενο πλαίσιο των αρχικών δοκιμών παρουσίασε προβλήματα και ο επανασχεδιασμός του ήταν αναγκαίος. Το σύστημα υποστυλώματα – δοκοί-υποδοχείς ήταν ιδιαίτερα εύκαμπτο με αποτέλεσμα τη μη ικανοποιητική μεταφορά δυνάμεων και παραμορφώσεων στους πείρους.

Στις δοκιμές του συστήματος «FUSEIS1-2» το εξεταζόμενο πλαίσιο ενισχύθηκε κατάλληλα. Οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων προέκυψαν από ανάλυση πραγματικού πλαισίου κτιρίου σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN 1998-1-1 [30] και του EN 1993-1 [33]. Τα υποστυλώματα του εξεταζόμενου δοκιμίου, όπως αναφέρθηκε, συνδέονταν στην κορυφή τους με το ζύγωμα του πλαισίου δοκιμών με πείρους για την αποφυγή μεταφοράς ροπών. Επίσης, μεταξύ τους συνδέονταν με πέντε συσκευές με πείρους καθ' ύψος όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.36. Το ύψος του πλαισίου ήταν 3,40m, ίσο με το ύψος ενός ορόφου, και η απόσταση L μεταξύ των στηρίξεων των υποστυλωμάτων ήταν 1,50m.

Η δυσκαμψία των υφιστάμενων υποστυλωμάτων αυξήθηκε με την προσθήκη κατάλληλων ενισχύσεων, για να εξασφαλιστεί ότι δε θα παραμορφωθούν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Το ενισχυμένο υποστύλωμα είχε σύνθετη διατομή αποτελούμενη από μια κοίλη διατομή SHS250x10 και μια διατομή τύπου Τ συγκολλημένη στην εσωτερική πλευρά. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όμοιες με αυτές των δοκιμών σε μεμονωμένες συσκευές (Παρ. 3.5) και αποτελούνταν από ένα πείρο κυκλικής διατομής Φ60 μήκους 400mm και δύο δοκούς-υποδοχείς SHS120x10 που συνδέονταν άκαμπτα με κοχλιώσεις στα υποστυλώματα με συνήθεις κατασκευαστικές ανοχές (Σχήμα 3.37), σε αντίθεση με τις συνδέσεις της υπόλοιπης πειραματικής διάταξης. Κατά την τοποθέτηση των συσκευών εμφανίστηκαν δυσκολίες κυρίως λόγω κατασκευαστικών ατελειών που οφείλονταν στην ακρίβεια κατασκευής των δοκιμίων, σε αποκλίσεις στην επιπεδότητα των μετωπικών πλακών και των πελμάτων των υποστυλωμάτων του συστήματος εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των συγκολλήσεων, στη μεταφορά και συναρμολόγησή τους ακόμα και σε παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν κατά τη διεξαγωγή προηγούμενων δοκιμών. Οι κατασκευαστικές ανοχές σε συνδυασμό με τις ατέλειες, όπως ήταν αναμενόμενο, προκάλεσαν παρασιτικές μετακινήσεις. Η εμφάνιση αυτών των παρασιτικών μετακινήσεων στις συνδέσεις ήταν όμως αποδεκτή και δεν έγινε προσπάθεια εξάλειψής τους καθώς αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες της κατασκευής. Για τη βελτίωση της επαφής των μετωπικών πλακών των δοκών-υποδοχέων και των υποστυλωμάτων και τη μείωση των κενών μεταξύ τους οι κοχλίες προεντείνονταν πριν από κάθε δοκιμή. Η τοποθέτηση του δοκιμίου στο πλαίσιο δοκιμών πραγματοποιήθηκε με ένα γερανό, λόγω του μεγέθους και του βάρους του, και απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή και ακρίβεια. Τα σχέδια του εξεταζόμενου πλαισίου και των δοκιμίων δίνονται στο Παράρτημα 1.

Οι πείροι είχαν ένα απομειωμένο τμήμα στο μέσο και σπείρωμα αντίθετης φοράς στα άκρα, για να είναι δυνατή η ρύθμιση του μήκους τους ώστε να προσαρμόζονται στις κατασκευαστικές ατέλειες και να διευκολύνεται η τοποθέτηση και αντικατάστασή τους. Για την επίτευξη προοδευτικής πλαστικοποίησης των πείρων, ώστε η είσοδός τους στην πλαστική περιοχή να γίνεται σε διαφορετικό χρόνο, μεταβαλλόταν είτε το μήκος του απομειωμένου τμήματός τους είτε η αντοχή τους καθ' ύψος του πλαισίου. Όμοια με τις δοκιμές σε μεμονωμένες συσκευές οι διαστάσεις των πείρων επιλέχθηκαν με στόχο την ανάπτυξη καμπτικού μηχανισμού $\ell_{pin} \ge 2 \cdot M_{pl,pin} / V_{pl,pin}$. Η πρώτη δοκιμή, M4, περιλάμβανε επομένως πείρους με την ίδια διάμετρο (Φ45) και μεταβλητά μήκη απομειωμένου τμήματος $\ell_{pin} = 90$, 120, 150mm > 39mm και η δεύτερη, M5, πείρους με μεταβλητές διαμέτρους απομειωμένου τμήματος

Φ40, 45, 50 και ίδιο μήκος ℓ_{pin} = 120mm > 43,4mm (Σχήμα 3.38). Ο Πίνακας 3.5 περιλαμβάνει τις ιδιότητες των απομειωμένων διατομών αυτών των πείρων. Ο χάλυβας των πείρων ήταν ποιότητας S235 ενώ των υπόλοιπων μελών του εξεταζόμενου πλαισίου, δοκοί-υποδοχείς και υποστυλώματα, ήταν υψηλότερης αντοχής S355.



Σχήμα 3.36: Εξεταζόμενα δοκίμια



Σχήμα 3.37: Συσκευή «FUSEIS1-2» εντός του συστήματος



Σχήμα 3.38: Διαστάσεις δοκιμίων

Διατομή	W _{pl,pin} (cm³)	I _{y,pin} (cm ⁴)
Ф40	10,70	12,57
Ф45	15,20	20,13
Ф50	20,80	30,68

Πίνακας 3.5: Ιδιότητε	ς απομειωμένης	διατομής	πείρων
<i>,</i> .	, , , , <i>,</i>	• • • •	

3.6.3. Πρωτόκολλο φόρτισης και καταγραφές μετρήσεων

Οι δοκιμές των πλαισίων «FUSEIS1-2» υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση έγιναν με πρωτόκολλο επιβολής μετακινήσεων σύμφωνα με τον ECCS [34] κατ' αντιστοιχία με τις δοκιμές των μεμονωμένων συσκευών (Παρ. 3.5.2). Το πρωτόκολλο φόρτισης περιλάμβανε τριάδες κύκλων φόρτισης ίσων μετακινήσεων, θετικών και αρνητικών, που προοδευτικά αυξάνονταν. Ξεκινούσε από μια μετακίνηση του εμβόλου στον πόδα του υποστυλώματος ίση με 2,55mm και έφτανε έως τη μετακίνηση στόχο 170mm που αντιστοιχούσε σε γωνιακή παραμόρφωση (interstory drift) των διαφραγμάτων οροφής και πόδα ίση με 5% (Σχήμα 3.39). Το πρωτόκολλο συνεχιζόταν με κύκλους σταθερού εύρους 170mm μέχρι την αστοχία. Η ταχύτητα επιβολής της μετακίνησης ελεγχόταν ηλεκτρονικά μέσω υπολογιστή και ήταν σταθερή ίση με 1,5mm/s με μικρή παραμονή 5s, μεταξύ κύκλων ίσου εύρους, και 10s μετά από κάθε τριάδα κύκλων.





Οι δοκιμές περιλάμβαναν τις ακόλουθες μετρήσεις:

- Με ένα ηλεκτρονικό βελόμετρο (LVDT- Linear Variable Differential Transformer) καταγραφόταν η σχετική μετακίνηση της κεφαλής του υδραυλικού κυλίνδρου, δηλαδή η εκάστοτε θέση της κεφαλής σε σχέση με την αρχική μηδενική θέση.
- Με μία δυναμοκυψέλη "load cell" στην κεφαλή του υδραυλικού κυλίνδρου καταγραφόταν το φορτίο που ασκούσε το έμβολο στο σύστημα. Η μέτρηση ήταν ιδιαίτερα ακριβής.
- Με ηλεκτρονικά βελόμετρα μέγιστης μετακίνησης ±75mm καταγράφονταν οι εγκάρσιες διαφορικές μετακινήσεις στα άκρα των πείρων. Για τη στήριξή τους κατασκευάστηκαν ειδικές βάσεις που συνδέθηκαν κοχλιωτά στις μετωπικές πλάκες των δοκών-υποδοχέων. Τα βελόμετρα και οι βάσεις στήριξής τους φαίνονται στο Σχήμα 3.40.

- Με δύο ηλεκτρονικά βελόμετρα μέγιστης μετακίνησης ±50mm καταγράφονταν οι οριζόντιες μετακινήσεις στην κορυφή του πλαισίου δοκιμών.
- Με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) μονής κατεύθυνσης που εφαρμόστηκαν συμμετρικά σε δύο θέσεις του μεσαίου απομειωμένου τμήματος του πείρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.41, καταγράφονταν οι ανηγμένες παραμορφώσεις του πείρου.



Σχήμα 3.40: Μέτρηση διαφορικών μετακινήσεων



Σχήμα 3.41: Μέτρηση παραμορφώσεων

3.6.4. Αποτελέσματα δοκιμών

Οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν με μεγάλη επιτυχία με πλήρη αστοχία όλων των δοκιμίων και το σύστημα επέδειξε μεγάλη ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Μια εικόνα του εξεταζόμενου πλαισίου στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής δίνεται στο Σχήμα 3.42 και στο Σχήμα 3.43. Η συμπεριφορά του συστήματος ήταν παραπλήσια και στις δύο δοκιμές. Οι πλαστικές παραμορφώσεις περιορίστηκαν στους πείρους του συστήματος, ενώ τα υποστυλώματά του παρέμειναν σχεδόν ελαστικά μέχρι και την ολοκλήρωση της τελευταίας δοκιμής. Ομοίως και το ενισχυμένο πλαίσιο δοκιμών ήταν επαρκώς δύσκαμπτο και συμπεριφέρθηκε ελαστικά με ελάχιστες παραστικές μετακινήσεις.





Σχήμα 3.42: Εξεταζόμενο πλαίσιο στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής Μ4, πείροι με μεταβλητά μήκη





Σχήμα 3.43: Εξεταζόμενο πλαίσιο στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής M5, πείροι με μεταβλητές διαμέτρους απομειωμένου τμήματος

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης δοκιμής και πριν την πραγματοποίηση της επόμενης, ακολούθησε η αντικατάσταση των δοκών-υποδοχέων και των πείρων των συσκευών «FUSEIS1-2», καθώς και ο έλεγχος των μελών που θα επαναχρησιμοποιούνταν, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν είχε αλλοιωθεί η γεωμετρία τους. Ο απαιτούμενος χρόνος για την αντικατάσταση κάθε συσκευής ήταν περίπου μια ώρα. Η συμπεριφορά του πείρου ήταν η αναμενόμενη βάσει των αρχικών αναλυτικών διερευνήσεων και των πειραματικών διερευνήσεων σε μεμονωμένες συσκευές. Κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης ξεκίνησε η διαρροή στα άκρα του απομειωμένου τμήματος στις θέσεις αλλαγής της διαμέτρου και στους επόμενους κύκλους εντοπίστηκε πλαστικοποίηση και ρηγμάτωση στις ίδιες θέσεις που οφείλονταν σε τοπική συγκέντρωση τάσεων. Στο Σχήμα 3.44 και στο Σχήμα 3.45 δίνονται ενδεικτικές φωτογραφίες των δοκιμίων σε παραμορφωμένη κατάσταση καθώς επίσης φωτογραφίες που ελήφθησαν με θερμοκάμερα, όπου φαίνεται ότι οι υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας αναπτύχθηκαν στις παραπάνω θέσεις.



α) Αρχικές ρωγμές πείρου

β) Θραύση πείρου

γ) Φωτογραφία από θερμοκάμερα




α) Αρχικές ρωγμές πείρου

γ) Φωτογραφία από θερμοκάμερα β) Θραύση πείρου

Σχήμα 3.45: Φωτογραφίες δοκιμίων κατά τη διάρκεια της δοκιμής Μ5, πείροι με μεταβλητές διαμέτρους απομειωμένου τμήματος

Οι πείροι, στους πρώτους κύκλους φόρτισης είχαν κυρίως καμπτική καταπόνηση ενώ στη συνέχεια, σε μεγαλύτερες μετακινήσεις, ο μηχανισμός αντίστασής τους μετατράπηκε σε λειτουργία καλωδίου (catenary). Εμφάνισαν δηλαδή έντονες γωνιακές παραμορφώσεις και ανέπτυξαν σημαντικές αξονικές δυνάμεις, λόγω του σχετικά μικρού μήκους τους και της διπλής κοχλίωσης στα άκρα τους. Μετά από ικανό αριθμό κύκλων εμφάνισαν ρηγματώσεις και τελικά θραύση. Η επίδραση του μήκους του απομειωμένου τμήματος του πείρου ήταν εμφανής στη δοκιμή Μ4 όπου οι πείροι με το μικρότερο μήκος (θ_{pin}=90mm) αστόχησαν πρώτοι μετά από περιορισμένο αριθμό κύκλων και για μικρές γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου (interstory drifts) καθώς εμφάνισαν μεγαλύτερες στροφές και σχετικά γρήγορη εξάντληση της αντοχής τους σε ολιγοκυκλική κόπωση (Σχήμα 3.46). Στη δοκιμή M5, με πείρους με μεταβλητές διαμέτρους και ίσα μήκη απομειωμένου τμήματος, η αστοχία επήλθε με θραύση του πείρου με τη μικρότερη διάμετρο Φ40/120 στη Στάθμη 5 (Σχήμα 3.47).



β) Πείρος ℓ_{pin} =90mm



α) Πείρος Φ40

Σχήμα 3.46: Δοκιμή Μ4 – πείροι με μεταβλητά μήκη

β) Πείρος Φ50

Σχήμα 3.47: Δοκιμή Μ5 – πείροι με μεταβλητές διαμέτρους απομειωμένου τμήματος

Από τα διαγράμματα φορτίου - μετακίνησης του εμβόλου στο Σχήμα 3.48, φαίνεται ότι οι δοκιμές ακολούθησαν το πρωτόκολλο φόρτισης και ολοκληρώθηκαν με την πτώση του φορτίου. Στα διαγράμματα αυτά ενώ η μέτρηση του φορτίου από την κυψέλη φορτίου ήταν ακριβής, η μέτρηση της μετακίνησης της κεφαλής του εμβόλου εμπεριείχε τις πρόσθετες παρασιτικές μετακινήσεις που προαναφέρθηκαν στην Παρ. 3.6.2. Είναι φανερό ότι η επίδραση των παρασιτικών μετακινήσεων ήταν σημαντική μόνο στους πρώτους κύκλους φόρτισης και εξασθένησε στους επόμενους.



Σχήμα 3.48: Διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης πλαισίου από μετακίνηση βελόμετρου εμβόλου

Για την εξαγωγή των τελικών διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης των εξεταζόμενων πλαισίων οι μετρήσεις του φορτίου ελήφθησαν απευθείας από την κυψέλη του εμβόλου ενώ για τις μετακινήσεις δε χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του εμβόλου αλλά αυτές των εγκάρσιων διαφορικών μετακινήσεων στα άκρα των δοκιμίων. Οι μετρήσεις αυτές, αν και περιλάμβαναν μικρομετακινήσεις λόγω της σχετικής ολίσθησης των μετωπικών πλακών στις κατασκευαστικές ανοχές των οπών, θεωρήθηκαν πιο ακριβείς καθώς δεν επηρεάζονταν από τις παρασιτικές μετακινήσεις της υπόλοιπης πειραματικής διάταξης. Η μετατροπή των εγκάρσιων διαφορικών μετακινήσεων συστήματος για τις δοκιμές έγινε βάσει της ακόλουθης εξίσωσης:

$$D = \frac{d_{LVDT} \cdot H}{L}$$
(3.23)

όπου:

D η μετακίνηση του πλαισίου,

d_{LVDT} ο μέσος όρος των κατακόρυφων μετακινήσεων των LVDT,

H=3,40m το ύψος του πλαισίου και

L=1,50m η απόσταση των στηρίξεων των υποστυλωμάτων.

Τα διαγράμματα φορτίου – κατακόρυφης μετακίνησης όλων των LVDT για τη δοκιμή M4 δίνονται στο Σχήμα 3.49 και για τη δοκιμή M5 στο Σχήμα 3.50. Στο Σχήμα 3.51 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης του πλαισίου που προέκυψαν βάσει των μετρήσεων των LVDT των δοκιμίων.



Σχήμα 3.49: Διαγράμματα φορτίου – κατακόρυφης μετακίνησης LVDT δοκιμής M4







Σχήμα 3.51: Διαγράμματα φορτίου - μετακίνησης πλαισίου από μετατροπή εγκάρσιων διαφορικών μετακινήσεων LVDT

Στη συνέχεια έγινε σύγκριση της απορροφούμενης ενέργειας ανά κύκλο και για τις δύο καταγραφές (μετακίνηση εμβόλου και LVDT) και διαπιστώθηκε ότι στη δεύτερη περίπτωση η ενέργεια ήταν μικρότερη. Για να ληφθεί υπόψη η πραγματικά απορροφούμενη ενέργεια, όπως αυτή προέκυπτε από τις μετρήσεις του εμβόλου, έγινε τροποποίηση των διαγραμμάτων των μετρήσεων των LVDT των δοκιμίων με ένα συντελεστή ίσο με το λόγο των ενεργειών. Τα νέα διαγράμματα των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τη βαθμονόμηση των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων όσο και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η διαδικασία διόρθωσης των διαγραμμάτων φορτίου – μετακίνησης που περιγράφηκε παραπάνω εφαρμόστηκε και στις δύο δοκιμές και προέκυψαν τα τελικά διαγράμματα φορτίου – γωνιακής παραμόρφωσης πλαισίου (interstory drift) που δίνονται στο Σχήμα 3.52.



Σχήμα 3.52: Τελικά διαγράμματα φορτίου – γωνιακής παραμόρφωσης πλαισίου (interstory drift)

Στα τελικά διαγράμματα φαίνεται ότι η αντίσταση του συστήματος εξακολούθησε να αυξάνεται μετά την εξάντληση της ελαστικής αντοχής και την πλαστικοποίηση των πείρων χωρίς να χάσει το σύστημα την ευστάθειά του λόγω της λειτουργίας καλωδίου των πείρων (catenary) και της κράτυνσης του υλικού. Το σύστημα εμφάνισε ευρείς κύκλους υστέρησης υποδεικνύοντας ότι διαθέτει μεγάλη

ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η πρώτη σημαντική διαρροή στην πειραματική καμπύλη εμφανίστηκε σε γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) της τάξης του 0,66% και ορίζει την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ-SLS). Μετά την είσοδο στη πλαστική περιοχή και για μέγιστο φορτίο, που εμφανίστηκε σε γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) της τάξης του 1,38% και ορίζει την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ-ULS), η παραμόρφωση των πείρων συνεχιζόταν μέχρι την αστοχία που αντιστοιχούσε σε γωνιακή παραμόρφωση της τάξης του 2,25% και ορίζει την στάθμη επιτελεστικότητας Αποφυγή Κατάρρευσης (CPLS). Παρατηρείται ότι οι παραπάνω τιμές των γωνιακών παραμορφώσεων στις τρεις βασικές οριακές καταστάσεις είναι παραπλήσιες με τις τιμές που προτείνει ο FEMA-356 [39] για τα μεταλλικά κτίρια με συνδέσμους δυσκαμψίας (0,5%, 1,5%, 2,0%). Η μείωση της πληρότητας των βρόχων υστέρησης (pinching) που παρατηρείται οφείλεται κυρίως στη δημιουργία διάκενου στα σημεία στήριξης των πείρων με τη μετωπική πλάκα της δοκού-υποδοχέα λόγω τραυματισμού, εκτεταμένης πλαστικής παραμόρφωσης του πείρου και του φαινομένου Poisson στην περίμετρό του. Σε μικρότερο βαθμό οφείλεται στην ολίσθηση των κοχλιών και στις κατασκευαστικές ατέλειες στην επαφή των δοκών-υποδοχέων με τα υποστυλώματα του συστήματος. Τη μείωση της πληρότητας του βρόχου υστέρησης (pinching) διαδέχεται σημαντική πτώση της αρχικής αντίστασης του συστήματος λόγω των μεγάλων αξονικών δυνάμεων που αναπτύχθηκαν κατά τον προηγούμενο κύκλο φόρτισης. Τα διαγράμματα δεν είναι συμμετρικά πιθανόν λόγω των ανοχών των κοχλιωτών συνδέσεων του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 3.6.3 κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν και οι ανηγμένες παραμορφώσεις των πείρων με ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα (strain gauges) που εφαρμόστηκαν συμμετρικά σε δύο θέσεις του μεσαίου απομειωμένου τμήματος κάθε πείρου. Η πρόοδος των ανηγμένων παραμορφώσεων στο Σχήμα 3.53 περιγράφει τη μορφή της αστοχίας στη δοκιμή M4. Οι πείροι με το μικρότερο μήκος απομειωμενου τμήματος (ℓ_{pin} =90mm) στις Στάθμες 1 και 2, που αστόχησαν πρώτοι, είχαν καμπτική καταπόνηση κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης, η οποία στους επόμενους μετατράπηκε σε αξονική (catenary). Με την αύξηση του μήκους του απομειωμένου τμήματος των πείρων στις επόμενες στάθμες η καταπόνηση έγινε κυρίως καμπτική με πλήρως συμμετρικό διάγραμμα ως προς τον ουδέτερο άξονα στη Στάθμη 5, στην οποία ο πείρος είχε το μεγαλύτερο μήκος απομειωμένου τμήματος (ℓ_{pin} =150mm).





Σχήμα 3.53: Εξέλιξη παραμορφώσεων πείρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής Μ4

Αντίστοιχα στο Σχήμα 3.54 η πρόοδος των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής M5 δείχνει ότι οι πείροι με τη μεγαλύτερη διάμετρο απομειωμένου τμήματος, στις Στάθμες 1 και 2, εμφάνισαν κυρίως καμπτική καταπόνηση ενώ λόγω της μείωσης της διαμέτρου στις υψηλότερες στάθμες η καταπόνηση έγινε αξονική και η αστοχία ξεκίνησε από τη Στάθμη 5 με τη μικρότερη διάμετρο (Φ40).





Σχήμα 3.54: Εξέλιξη παραμορφώσεων πείρων κατά τη διάρκεια της δοκιμής Μ5

3.6.5. Καθορισμός μηχανικών ιδιοτήτων υλικού

Όπως έχει αναφερθεί στην Παρ. 3.6.2 για τους πείρους επιλέχθηκε χάλυβας αντοχής S235. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού τους έγιναν δοκιμές εφελκυσμού με χρήση κατάλληλης υδραυλικής μηχανής με έλεγχο μετακίνησης. Κατασκευάστηκαν δύο εφελκυστικά δοκίμια η γεωμετρία των οποίων ήταν σύμφωνη με τις προδιαγραφές του DIN 50125 [35] και δίνεται στο Σχήμα 3.55.



Σχήμα 3.55: Εφελκυστικό δοκίμιο

Από το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων στο Σχήμα 3.56α φαίνεται ότι η μέση τάση διαρροής των πείρων ήταν περίπου 210 MPa και η εφελκυστική τους αντοχή 396 MPa, τιμές χαμηλότερες από τις αντίστοιχες ονομαστικές του χάλυβα της συγκεκριμένης ποιότητας, όπως παρατηρήθηκε και στις

δοκιμές της Παρ. 3.5.4. Στο Σχήμα 3.56β παρουσιάζονται τα διαγράμματα πραγματικών τάσεων - πραγματικών παραμορφώσεων που προσδιορίστηκαν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στις αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία στο Κεφ. 4. Στο Σχήμα 3.57 φαίνεται το δοκίμιο πριν και μετά τη δοκιμή εφελκυσμού.



Σχήμα 3.56: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού



Σχήμα 3.57: Δοκίμιο πριν και μετά τη δοκιμή εφελκυσμού

3.6.6. Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τεμνουσών βάσης

Στη συνέχεια ελέγχθηκε η ορθότητα της προσέγγισης της συμπεριφοράς των πλαισίων με πείρους με τη θεωρία της δοκού Vierendeel. Αρχικά υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (3.5) η θεωρητική τέμνουσα βάσης V_{th1}, χρησιμοποιώντας την πραγματική τάση διαρροής του χάλυβα που προσδιορίστηκε από τις δοκιμές εφελκυσμού της προηγούμενης παραγράφου, και συγκρίθηκε με τη μέγιστη αντίσταση των εξεταζόμενων πλαισίων κατά τη διάρκεια των δοκιμών V_{exp}. Οι αποκλίσεις των τιμών ήταν μεγάλες με λόγους V_{exp}/V_{th1} περίπου 3 (Πίνακας 3.6). Οι αποκλίσεις αυτές δικαιολογούνται από τη συμπεριφορά των πείρων κατά τη διάρκεια των δοκιμών, οι οποίες ενώ κατά τους πρώτους κύκλους φόρτισης συμπεριφέρθηκαν σαν καμπτόμενες δοκοί, μετά από μερικούς κύκλους άλλαξαν μηχανισμό αντίστασης και εμφάνισαν πλαστικές αρθρώσεις κάτω από συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων, θεωρία 3^{ης} τάξης (Σχήμα 3.58). Οι πλαστικές στροφές των πείρων θ_{pl,pin}, που προκύπτουν από την εξίσωση (3.6) θεωρώντας αμελητέα τη στροφή των δοκών-υποδοχέων οι οποίες παρέμειναν σχεδόν άκαμπτες σε όλη τη διάρκεια των δοκιμών, είναι πολύ μεγαλύτερες από τη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου θ_{gl} (interstory drift) λόγω του μικρού μήκους του πείρου θ_{pin}.



Σχήμα 3.58: Στατικό σύστημα και θεωρητικά εντατικά μεγέθη σύμφωνα με τη θεωρία 3ης τάξης

Με την αύξηση των στροφών των πείρων αυξάνονται και οι αξονικές παραμορφώσεις τους και αναπτύσσουν την πλαστική αξονική τους αντίσταση N_{pl,pin} η οποία καθορίζει τη συνολική αντίσταση του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή η συνολική τέμνουσα βάσης V_{th2} προκύπτει από την κατακόρυφη συνιστώσα της πλαστικής αξονικής δύναμης του πείρου V_{pin} βάσει των Εξισώσεων (3.24) και (3.25). Από τη σύγκριση των πειραματικών τεμνουσών βάσης V_{exp} με τις θεωρητικές, οι αποκλίσεις που προκύπτουν είναι μικρές με λόγους κοντά στη μονάδα (Πίνακας 3.6).

$$V_{pin} = N_{pl,pin} \cdot \left(\theta_{pl,pin} - \theta_{gl}\right) = N_{pl,pin} \cdot \theta_{gl} \cdot \left(\frac{L}{\ell_{pin}} - 1\right)$$
(3.24)

$$V_{th2} = \frac{\sum V_{pin}}{h_{story}} \cdot L = \sum N_{pl,pin} \cdot \theta_{gl} \cdot \left(\frac{L}{\ell_{pin}} - 1\right) \cdot \frac{L}{h_{story}}$$
(3.25)

Δοκιμές	V _{exp} (kN)	V _{th1} (kN)	V_{exp}/V_{th1}	V _{th2} (kN)	V_{exp}/V_{th2}
M4	393,3	129,9	3,03	329,2	1,19
M5	354,1	129,4	2,74	314,4	1,13

Πίνακας 3.6: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τεμνουσών βάσης

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η θεωρία 3^{ης} τάξης αποτελεί καλύτερη προσέγγιση της ικανότητας του συστήματος σε σχέση με τη θεωρία της δοκού Vierendeel. Ωστόσο, αν και είναι ευεργετική στη συνολική απόκριση του συστήματος δεν εφαρμόζεται ευρέως από τους μελετητές λόγω της πολυπλοκότητάς της.

3.6.7. Απορρόφηση ενέργειας - Κριτήρια αστοχίας

Οι διευρυμένοι βρόχοι υστέρησης στα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης της προηγούμενης παραγράφου έδειξαν ότι το σύστημα «FUSEIS1-2» διαθέτει υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Η ικανότητα αυτή επιβεβαιώθηκε και ποσοτικά με τον αναλυτικό υπολογισμό της απορροφουμενης ενέργειας ανά δοκιμή. Ο υπολογισμός περιλάμβανε μόνο τους κύκλους υστέρησης μετά τη διαρροή του πλαισίου καθώς οι ελαστικοί κύκλοι είχαν πολύ μικρή απορρόφηση ενέργειας. Ως όριο της ελαστικής περιοχής θεωρήθηκε το φορτίο διαρροής του πλαισίου (V_{story}) σύμφωνα με τον ECCS [34] το οποίο υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.5) με χρήση της πραγματικής τάσης διαρροής του χάλυβα (f_y) των δοκιμών εφελκυσμού.

Η μέση απορροφούμενη ενέργεια ανά τριάδα κύκλων φόρτισης ίσου εύρους μετά τη διαρροή δίνεται στο Σχήμα 3.59. Είναι εμφανές ότι η αύξηση του εύρους των πλαστικών κύκλων οδηγεί σε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.60, η συνολική απορροφούμενη ενέργεια και των δύο δοκιμών ήταν παραπλήσια, καθώς η βασική παράμετρος του σχεδιασμού ήταν η επίτευξη της ίδιας συνολικής δυσκαμψίας των εξεταζόμενων πλαισίων.



Σχήμα 3.59: Μέση απορροφούμενη ενέργεια ανά τριάδα κύκλων φόρτισης ίσου εύρους



Σχήμα 3.60: Συνολική απορροφούμενη ενέργεια ανά δοκιμή

Βάσει του υπολογισμού των ενεργειών εφαρμόστηκε στη συνέχεια το κριτήριο αστοχίας χαλύβδινων μελών που προτείνουν οι Calado και Castiglioni [40] και παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της εξέλιξης της βλάβης κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό η αστοχία ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία η αδιάστατη παράμετρος η/η₀ γίνεται μικρότερη από τη σταθερή τιμή 0,5, η οποία συνιστάται για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση με συντηρητικές προβλέψεις, αλλά και ικανοποιητική ακρίβεια. Ως η ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το σύστημα σε κάθε κύκλο, προς την ενέργεια που θα απορροφούσε στον ίδιο κύκλο αν είχε ελαστική – πλήρως πλαστική συμπεριφορά (elastic-perfectly plastic -EPP) και ως η₀ ο ίδιος λόγος υπολογισμένος για τον κύκλο της διαρροής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.61, το διάγραμμα η/η₀ – κύκλοι φόρτισης αυξάνει μονοτονικά και στις δύο δοκιμές, ενώ η τιμή της παραμέτρου είναι μεγαλύτερη από την οριακή τιμή 0,5, πράγμα το οποίο δείχνει ότι το ως άνω κριτήριο αστοχίας δεν εφαρμόζεται στο σύστημα «FUSEIS1-2». Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό διαρροής και θραύσης.



Σχήμα 3.61: Κριτήριο αστοχίας Calado και Castiglioni

3.6.8. Ολιγοκυκλική κόπωση

Οι αρχικές αναλύσεις και δοκιμές τόσο σε μεμονωμένες συσκευές (RWTH) όσο και σε πλαίσια (Ε.Μ.Π.) «FUSEIS1-2» έδειξαν ότι η συμπεριφορά των πείρων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση καθορίζεται από συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης. Η αστοχία επέρχεται μετά από περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης, αρκετά νωρίτερα από την εξάντληση της αντοχής τους, λόγω μεγάλων παραμορφώσεων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε κόπωση είναι η μέθοδος S – N, στην οποία το S ισούται με την ονομαστική τιμή του εύρους μεταβολής των τάσεων Δσ. Η μέθοδος αυτή λόγω της απλότητάς της έχει υιοθετηθεί από πολλούς Κανονισμούς και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση. Η συνάρτηση πρόβλεψης αστοχίας λόγω κόπωσης εκφράζεται με την εξίσωση:

$$N\cdot S^m=K$$

όπου:

S το σταθερό εύρος τάσεων Δσ,

Ν ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για την αστοχία στο σταθερό εύρος τάσεων S και

m, K σταθερές που εξαρτώνται από τον τύπο και τις μηχανικές ιδιότητες του εξεταζόμενου μεταλλικού στοιχείου. Η σταθερά m είναι αδιάστατη ενώ η K δίνεται σε μονάδες τάσης.

Η παραπάνω σχέση σε λογαριθμική μορφή δίνεται στην εξίσωση (3.27) και αντιστοιχεί σε μια ευθεία γραμμή με κλίση -1/m που ονομάζεται καμπύλη αντοχής έναντι κόπωσης.

$$\log N = \log K - m \log \Delta \sigma$$

Η καμπύλη χωρίζει το επίπεδο σε δύο περιοχές, την ασφαλή και τη μη ασφαλή. Για τις φορτίσεις που αντιστοιχούν σε συντεταγμένες (logN_i, logΔ_σ) που βρίσκονται στην ασφαλή περιοχή δεν αναμένεται αστοχία λόγω κόπωσης. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης του συστήματος μέχρι την αστοχία υπολογίστηκε βάσει της μεθοδολογίας που προτείνεται από τον ΕΝ 1993-1-9 [41]. Για ολιγοκυκλική κόπωση οι καμπύλες Δσ-Ν μετασχηματίζονται σε Δφ-Ν ώστε να περιλαμβάνουν παραμορφώσεις, τις στροφές των άκρων του πείρου Δφ, αντί για τάσεις Δσ (εξίσωση (3.28)). Το εύρος στροφών Δφ υπολογίστηκε βάσει της μέγιστης φ_{pin,max} και ελάχιστης φ_{pin,min} στροφής του πείρου ανά κύκλο βάσει της εξίσωσης (3.6).

$$\log N = \log K - m \log \Delta \varphi$$

Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων από δοκιμές ανακυκλιζόμενης φόρτισης σταθερού εύρους, αρχικά θεωρήθηκαν δύο κλίσεις ευθειών m=3 και 2 όπως προτείνει ο EN 1993-1-9 [41]. Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων προέκυψε ότι η κλίση της ευθείας m=3 προσέγγιζε καλύτερα τα πειραματικά σημεία, με καμπύλες δοκιμών που σχεδόν ταυτίζονταν, και για αυτό υιοθετήθηκε στον προσδιορισμό των καμπυλών κόπωσης. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών, προέκυψαν οι καμπύλες κόπωσης των δοκιμών σε μεμονωμένες συσκευές και σε πλαίσια με συσκευές (Σχήμα 3.62). Για πιθανότητα 5% τα πειραματικά δεδομένα να βρίσκονται στη μη ασφαλή περιοχή (πάνω από την ευθεία) η σταθερά Κ προκύπτει ως το σημείο που τέμνει η καμπύλη τον άξονα των Ν. Η καμπύλη που προήλθε από τα πειράματα σε μεμονωμένες συσκευές, εξίσωση (3.29), αποτέλεσε μια πιο συντηρητική προσέγγιση ενώ οι άλλες δύο που προήλθαν από τα πειράματα σε πλαίσια, εξίσωση (3.30), ήταν πιο

(3.26)

(3.28)

(3.27)



αντιπροσωπευτικές λόγω της συνδυασμένης δράσης πολλών συσκευών. Ως προτεινόμενη καμπύλη σχεδιασμού επομένως επιλέχθηκε η εξίσωσή (3.30).

Σχήμα 3.62: Καμπύλες ολιγοκυκλικής κόπωσης logΔφ – logN

Με χρήση της παραπάνω καμπύλης και του κριτηρίου αστοχίας των Palmgren – Miner για τη γραμμική συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης (law of damage accumulation), μπορεί να υπολογιστεί ο βαθμός βλάβης του συστήματος (Damage index) που προκαλείται από δεδομένο αριθμό κύκλων με την παρακάτω εξίσωση (3.31).

$$\mathsf{D}_{i} = \frac{\mathsf{n}_{i}}{\mathsf{N}_{fi}} \tag{3.31}$$

όπου:

 n_i ο αριθμός των κύκλων φόρτισης με δεδομένη στροφή σταθερού εύρους Δ ϕ_i και

 $N_{\rm fi}$ ο αντίστοιχος αριθμός των κύκλων σταθερού εύρους έως την αστοχία.

Για κύκλους μεταβλητού εύρους η συνθήκη αστοχίας λόγω κόπωσης δίνεται από την εξίσωση (3.32).

$$D = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots + \frac{n_i}{N_{fi}} \ge 1$$
(3.32)

Η προτεινόμενη καμπύλη σχεδιασμού (εξίσωση (3.30)) εφαρμόζεται στη συνέχεια και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων (Time History) πλαισίων με το σύστημα «FUSEIS1-2» που παρουσιάζονται στην Παρ. 6.6.4.

4. Αναλυτικές διερευνήσεις συστήματος «FUSEIS1-2»

4.1. Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων συσκευών «FUSEIS 1-2»

Οι αναλυτικές διερευνήσεις των συσκευών «FUSEIS1-2» που πραγματοποιήθηκαν πριν τη διεξαγωγή αλλά και κατά τη διάρκειά των δοκιμών της Παρ. 3 είχαν δύο βασικούς στόχους: α) Τον προσδιορισμό της πραγματικής ικανότητας του συστήματος για το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης και β) την ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM) των δοκιμών στο λογισμικό ABAQUS [32].

Για να αποφευχθούν τα προβλήματα στην προσομοίωση των συσκευών των αρχικών αναλύσεων, και δεδομένου ότι η δοκός-υποδοχέας είναι συγκριτικά πολύ δύσκαμπτη, όπως παρατηρήθηκε και από τις δοκιμές, το νέο προσομοίωμα περιλάμβανε μόνο τον πείρο και τη μετωπική πλάκα της δοκούυποδοχέα ενώ η δοκός αντικαταστάθηκε από δεσμεύσεις των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας. Επίσης, λόγω της συμμετρίας του στατικού συστήματος προσομοιώθηκε απλοποιητικά η μισή συσκευή. Στο στατικό σύστημα που προέκυψε το άκρο της συσκευής ήταν πάκτωση, για να προσομοιωθεί η άκαμπτη σύνδεση με το υποστύλωμα. Στη μέση της συσκευής, στον άξονα συμμετρίας, η στήριξη θεωρήθηκε αρθρωτή. Στη θέση αυτή επιβαλλόταν η φόρτιση ως μετακίνηση κατά τον άξονα συμμετρίας. Το παραπάνω προσομοίωμα μείωσε σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο.

Για τη βαθμονόμηση των μοντέλων με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων (calibration) οι αναλύσεις επικεντρώθηκαν στα ακόλουθα:

- Λεπτομερή προσομοίωση των πλαστικών ζωνών
- Μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας
- Ικανότητα συστήματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- Εφαρμογή νόμου υλικού που περιλαμβάνει την κράτυνση και τα φαινόμενα Bauschinger

Χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, εξαεδρικά οκτώ κόμβων, με υψηλή πυκνότητα λόγω της σύνθετης γεωμετρίας της συσκευής. Για την επιλογή του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάστηκαν διαφορετικά μοντέλα του ίδιου δοκιμίου μεταβάλλοντας την πυκνότητα του πλέγματος. Η απομείωση του πείρου ξεκινούσε σε απόσταση από τη μετωπική πλάκα της δοκού-υποδοχέα με ειδική διαμόρφωση στις θέσεις έναρξης του απομειωμένου τμήματος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε επιπλέον στην προσομοίωση της οπής της μετωπικής πλάκας της δοκού-υποδοχέα με ειδική διαμόρφωση στις θέσεις έναρξης του απομειωμένου τμήματος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε επιπλέον στην προσομοίωση της οπής της μετωπικής πλάκας της δοκού-υποδοχέα που είχε κυκλική γεωμετρία για αποφυγή τραυματισμού του πείρου. Στη ζώνη επαφής μεταξύ πείρου και οπής χρησιμοποιήθηκαν ιδιότητες αλληλεπίδρασης "contact interaction" για να ληφθεί υπόψη η τριβή μεταξύ των επιφανειών με συντελεστή τριβής 0,4 και να αποφευχθεί η αλληλοεπικάλυψη των πεπερασμένων στοιχείων (hard contact). Έγινε επίσης πύκνωση του πλέγματος των αριθμητικών αναλύσεων.

Οι ιδιότητες του υλικού που εφαρμόστηκε στις αναλύσεις προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού και τις δοκιμές του υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση που παρουσιάζονται στις Παρ. 3.5.4 και 3.5.5 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η πραγματική τάση διαρροής του χάλυβα f_y, που υπολογίστηκε από τη μετατροπή των καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων (σ-ε) των δοκιμών εφελκυσμού σε καμπύλες πραγματικών τάσεων – πραγματικών παραμορφώσεων (σ-ε_T), και οι παράμετροι του νόμου κράτυνσης που προσδιορίστηκαν από τα βαθμονομημένα μοντέλα των δοκιμών υλικού στο ABAQUS [32] (Πίνακας 3.4).

Στο Σχήμα 4.1α δίνεται ενδεικτικά το βελτιωμένο προσομοίωμα της δοκιμής με πείρο διαμέτρου Φ60 που απομειώνεται στο μεσαίο τμήμα σε Φ45 για μήκος ℓ_{pin} =150mm. Εφαρμόστηκε πρωτόκολλο φόρτισης κατ' αντιστοιχία με το πρωτόκολλο των δοκιμών (Σχήμα 3.20) με τη διαφορά ότι επιβαλλόταν απλοποιητικά μόνο ένας κύκλος φόρτισης για κάθε τιμή του πλάτους, αντί για τρεις. Ο βασικός λόγος της απλούστευσης αυτής ήταν ο περιορισμός των υπολογιστικών απαιτήσεων και η αντιμετώπιση περιορισμών του λογισμικού, θεωρώντας ότι η παράλειψη των πρόσθετων κύκλων φόρτισης είχε μικρή επίδραση. Οι υψηλές τιμές των τάσεων και οι πλαστικές παραμορφώσεις μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, Σχήμα 4.1β και γ, εμφανίζονται στις θέσεις αλλαγής της διαμέτρου του πείρου αντίστοιχα με τις δοκιμές.

Το διάγραμμα φορτίου - μετακίνησης της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με το αντίστοιχο πειραματικό δίνεται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.1δ όπου φαίνεται ότι η αριθμητική καμπύλη προσέγγισε σε ικανοποιητικό βαθμό τα αποτελέσματα της δοκιμής επιβεβαιώνοντας την ορθότητα του αριθμητικού προσομοιώματος τόσο ως προς το υλικό όσο και ως προς τη γεωμετρία. Το προσομοίωμα αποδείχτηκε ικανό να αποτυπώσει τη συμπεριφορά των συσκευών «FUSEIS1-2» υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων στον ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό χρόνο.



Σχήμα 4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης δοκιμής με πείρο θ_{pin}=150mm και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

4.2. Προσομοιώματα πλαισίων με συσκευές «FUSEIS 1-2»

4.2.1. Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων

Οι αριθμητικές αναλύσεις της προηγούμενης παραγράφου παρείχαν τα βασικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων της συσκευής «FUSEIS1-2», πείρου και δοκού-υποδοχέα. Ωστόσο για τη μελέτη της συνολικής απόκρισης του συστήματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση ήταν απαραίτητη και η προσομοίωση των πλαισίων των δοκιμών M4 και M5 που παρουσιάστηκαν στην Παρ. 3.6. Τα προσομοιώματα αναπτύχθηκαν πριν από τις δοκιμές ώστε να επιβεβαιωθεί η επάρκεια της πειραματικής διάταξης και στη συνέχεια, μετά την ολοκλήρωσή τους, προσαρμόστηκαν στις πραγματικές συνθήκες στήριξης και φόρτισης των δοκιμών και βαθμονομήθηκαν βάσει του πραγματικού υλικού.

Με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS [32] προσομοιώθηκε ολόκληρο το εξεταζόμενο πλαίσιο ώστε να συμπεριληφθεί στην ανάλυση η επίδραση της στροφής των υποστυλωμάτων του συστήματος στη διαρροή των πείρων. Για να εξασφαλιστούν οι ίδιες συνθήκες στήριξης με τις δοκιμές, η ανάρτηση των υποστυλωμάτων του εξεταζόμενου πλαισίου στη δοκό του πλαισίου δοκιμών προσομοιώθηκε με αρθρώσεις (Σχήμα 3.34α). Στις βάσεις τους αντίστοιχα περιορίστηκε η εκτός επιπέδου μετακίνηση η οποία εξασφαλιζόταν στη δοκιμή μέσω ειδικής διάταξης (Σχήμα 3.34β). Η άκαμπτη σύνδεση μεταξύ δοκού-υποδοχέα και υποστυλώματος εξασφαλίστηκε με κατάλληλη δέσμευση μετακινήσεων και στροφών "tie constraint" που παρέχει το πρόγραμμα και στη ζώνη επαφής μεταξύ των πείρων και των οπών των δοκών-υποδοχέων χρησιμοποιήθηκαν ιδιότητες αλληλεπίδρασης ίδιες με αυτές των προσομοιωμάτων σε μεμονωμένες συσκευές (Παρ. 4.1).

Η φόρτιση του εξεταζόμενου πλαισίου γινόταν με επιβολή οριζόντιας μετακίνησης στην βάση των υποστυλωμάτων κατά τη διεύθυνσή του αντίστοιχα με την κίνηση του υδραυλικού κυλίνδρου. Επειδή τα εξεταζόμενα πλαίσια δε συμπεριφέρθηκαν με συμμετρικό τρόπο λόγω απωλειών (Παρ. 3.6.4), για ακριβέστερη αναπαραγωγή των δοκιμών δεν ακολουθήθηκε το πρωτόκολλο φόρτισης κατά ECCS [34] (Σχήμα 3.39) αλλά οι μετακινήσεις που εφαρμόστηκαν ήταν αυτές που προέκυψαν από τα τελικά διορθωμένα διαγράμματα φορτίου – μετακίνησης. Απλοποιητικά, επιβαλλόταν μόνο ένας κύκλος φόρτισης για κάθε τιμή του πλάτους, αντί για τρεις, εκτός από τους τελευταίους όπου επιβάλλονταν και οι τρεις για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η διακριτοποίηση των μελών των πλαισίων έγινε με χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων, οκτώ κόμβων. Για να περιοριστεί ο υπολογιστικός χρόνος χωρίς να επηρεαστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων (τάσεων και παραμορφώσεων) χρησιμοποιήθηκε διαφορετική πυκνότητα πλέγματος στα επιμέρους δομικά στοιχεία του εξεταζόμενου πλαισίου. Στους πείρους, που ήταν τα στοιχεία απορρόφησης, και στις μετωπικές πλάκες των δοκών-υποδοχέων όπου παρατηρήθηκε παραμόρφωση της οπής το πλέγμα ήταν πυκνότερο, ενώ στα υποστυλώματα και στις δοκούς-υποδοχείς, που παρέμειναν ελαστικά, ήταν πιο αραιό.

Στο υλικό των πείρων «FUSEIS1-2» χρησιμοποιήθηκε η πραγματική τάση διαρροής του χάλυβα (Παρ. 3.6.5) ενώ προκειμένου να ληφθεί υπόψη η κράτυνση και να συμπεριληφθούν τα φαινόμενα Bauschinger, λόγω της ανακυλιζόμενης φόρτισης, εφαρμόστηκε όμοια με τις συσκευές μη γραμμικός ισοτροπικός κινηματικός νόμος κράτυνσης με τις τιμές των παραμέτρων Q, b και C, γ των δοκιμών υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση (Πίνακας 3.4). Αντίθετα, επειδή τα υποστυλώματα του συστήματος συμπεριφέρθηκαν σχεδόν ελαστικά κατά τη διάρκεια των δοκιμών δεν απαιτήθηκε περαιτέρω διερεύνηση των χαρακτηριστικών του υλικού τους και εφαρμόστηκε απλοποιητικά διγραμμικός νόμος τάσης - παραμόρφωσης βάσει των ονομαστικών τιμών διαρροής και θραύσης του χάλυβα \$355. Κατά την ανάλυση ελήφθησαν υπόψη και τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης.

Το τελικό προσομοίωμα προέκυψε έπειτα από μια ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία και ήταν αρκετά σύνθετο με αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις λόγω του πυκνού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, του μεγάλου αριθμού δεσμεύσεων στις επιφάνειες επαφής δοκούυποδοχέα και υποστυλώματος και των ιδιοτήτων αλληλεπίδρασης μεταξύ πείρου και μετωπικών πλακών. Η ανάλυση ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα και η αριθμητική σύγκλιση δύσκολο να επιτευχθεί. Για το λόγο αυτό δεν ήταν δυνατό να εισαχθούν στο προσομοίωμα κάποιες πρόσθετες παράμετροι που επηρέασαν τις καταγραφές κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρά τα μέτρα που είχαν ληφθεί, όπως οι ανοχές των κοχλιών ή οι παραμορφώσεις των βοηθητικών μελών της διάταξης.

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η προσομοίωση του εξεταζόμενου πλαισίου με πείρους μεταβλητής διαμέτρου απομειωμένου τμήματος (Δοκιμή M5) και η κατανομή των τάσεων von Mises για τη μέγιστη μετακίνηση. Το προσομοίωμα ήταν σε θέση να περιγράψει με επιτυχία το μηχανισμό αστοχίας αποτυπώνοντας την προοδευτική πλαστικοποίηση των πείρων και τη συμπεριφορά των λοιπών δομικών μελών. Η παραμορφωμένη εικόνα του πλαισίου με τους πείρους να εμφανίζουν σημαντικές στροφές και να πλαστικοποιούνται στις θέσεις αλλαγής της διαμέτρου τους (κόκκινο χρώμα), ενώ οι δοκοί-υποδοχείς και τα υποστυλώματα παραμένουν σχεδόν ελαστικά, είναι όμοια με αυτή των δοκιμών και δείχνει ότι το προσομοίωμα αποτέλεσε μια καλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς του πλαισίου.





β) Τάσεις von Mises μετά τον τελευταίο κύκλο

Σχήμα 4.2: Εξεταζόμενο πλαίσιο δοκιμής M5, πείροι με μεταβλητές διαμέτρους απομειωμένου τμήματος

Η συγκέντρωση υψηλών τάσεων στην έναρξη της απομείωσης είναι εμφανής και στη λεπτομέρεια του πείρου στο Σχήμα 4.3, όπου φαίνεται η παραμόρφωσή του στο τέλος της φόρτισης. Επίσης, παρατηρείται ότι οι μετωπικές πλάκες αν και εμφανίζουν αυξημένες τάσεις στην περίμετρο των οπών παραμένουν στην ελαστική περιοχή επαληθεύοντας το σχεδιασμό του πείρου με απομείωση της διαμέτρου κατά αντιστοιχία με τα RBS (Reduced Beam Sections). Την ίδια συμπεριφορά παρουσίασε και η προσομοίωση του πλαισίου της δοκιμής M4.



Σχήμα 4.3: Λεπτομέρεια προσομοίωσης πείρου

Τα διαγράμματα φορτίου - μετακίνησης των αναλύσεων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα των δοκιμών M4 και M5 που δίνονται στο Σχήμα 4.4 δείχνουν ότι τα μοντέλα έδωσαν και ποσοτικά ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ οι όποιες αποκλίσεις οφείλονται κυρίως στην πολυπλοκότητα του προσομοιώματος. Η αριθμητική καμπύλη προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πειραματική ως προς τη μορφή της, αποτυπώνοντας τα φαινόμενα Bauschinger και τη μείωση της πληρότητας του βρόχου υστέρησης (pinching) που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών.



Σχήμα 4.4: Σύγκριση πειραματικής και αριθμητικής καμπύλης δοκιμών Μ4 και Μ5

4.2.2. Απλοποιημένα μοντέλα πλαισίων και προσδιορισμός μη γραμμικών ιδιοτήτων πείρων «FUSEIS1-2»

Τα μοντέλα των εξεταζόμενων πλαισίων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο κατέγραψαν επαρκώς την απόκριση του συστήματος κατά τη φόρτισή του. Ωστόσο, εξαιτίας της πολυπλοκότητάς τους κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη απλοποιημένων μοντέλων με χρήση ενός πιο εμπορικού και εύχρηστου λογισμικού με μικρότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο. Για τις

αναλύσεις επιλέχθηκε το λογισμικό SAP2000 [31] μέσω του οποίου ήταν δυνατό να προσομοιωθούν με απλό τρόπο με στοιχεία δοκού τα πλαίσια των δοκιμών και να αποτυπωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό η μη γραμμική συμπεριφορά των πείρων, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά του υλικού και τη θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων. Σε σχέση με το ABAQUS το SAP παρείχε επιπλέον τη δυνατότητα προσομοίωσης ολόκληρων κτιρίων για διάφορους τύπους φόρτισης όπως στατικά και δυναμικά φορτία, φορτία μεταβλητού εύρους με μη γραμμική στατική υπερωθητική ανάλυση (Incremental pushover) και μη γραμμική δυναμική ανάλυση (Χρονοϊστορία - timehistory), κάτι το οποίο αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εφαρμογή του συστήματος σε πλαίσια πολυώροφων κτιρίων που παρουσιάζεται στο Κεφ. 6.

Στο μοντέλο SAP όλα τα μέλη του πλαισίου προσομοιώθηκαν με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία δοκού και οι συνθήκες στήριξης ήταν αντίστοιχες με αυτές των προσομοιωμάτων στο ABAQUS. Δεδομένου ότι οι δοκοί-υποδοχείς ήταν αρκετά δύσκαμπτες και ότι μεταξύ δύο κόμβων μπορούσε να εισαχθεί μόνο ένα μέλος, η συσκευή προσομοιώθηκε με τρία τμήματα, το μεσαίο που αντιστοιχούσε στον απομειωμένο πείρο και τα δύο ακραία στις δοκούς-υποδοχείς, αγνοώντας το τμήμα του πείρου εντός των δοκών, ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση της πραγματικής δυσκαμψίας και αντοχής του συστήματος. Για να ληφθεί υπόψη το πραγματικό μήκος των συσκευών εφαρμόστηκαν άκαμπτα στοιχεία στο τμήμα μεταξύ των κέντρων των υποστυλωμάτων και των πελμάτων τους. Επίσης, οι κόμβοι δοκών – υποστυλωμάτων ήταν άκαμπτοι κατά αντιστοιχία με την λεπτομέρεια σύνδεσης της δοκιμής. Στο Σχήμα 4.5 δίνεται ενδεικτικά το προσομοίωμα της δοκιμής M4 στο SAP2000 [31], αντίστοιχο ήταν και το προσομοίωμα της δοκιμής M5.



Σχήμα 4.5: Προσομοίωμα πλαισίου δοκιμής Μ4 στο SAP2000

Η αξιολόγηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς του πλαισίου έγινε μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης με μετακίνηση στόχο ίση με τη μέγιστη μετακίνηση του πρωτοκόλλου φόρτισης των δοκιμών (170mm). Καθώς οι πείροι είναι τα πλάστιμα μέλη του συστήματος ορίστηκαν ως πιθανές θέσεις σχηματισμού των πλαστικών αρθρώσεων τα άκρα του απομειωμένου τμήματος τους (Σχήμα 4.6). Επειδή η κάμψη είναι καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς τους, οι ιδιότητες της πλαστικής άρθρωσης ορίστηκαν με ένα διάγραμμα ροπής κάμψης Μ και γωνίας στροφής χορδής θ.



Σχήμα 4.6: Επιβαλλόμενη φόρτιση μη γραμμικής στατικής και μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης και σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες ροπής – στροφής σε αδιάστατη μορφή, που προέκυψαν από τις περιβάλλουσες (backbone curves) των δοκιμών σε μεμονωμένες συσκευές στο RWTH (Παρ. 3.5.6). Οι καμπύλες αυτές αποτέλεσαν την αφετηρία για τον προσδιορισμό των μη γραμμικών ιδιοτήτων της πλαστικής άρθρωσης των συσκευών «FUSEIS1-2». Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7 το διάγραμμα ροπής – στροφής της πλαστικής άρθρωσης ορίζεται από τα πέντε σημεία Α, Β, C, D και Ε. Το B ορίζεται ως το σημείο διαρροής, το C ως το σημείο της αστοχίας και αντιστοιχεί στο όριο σημαντικής μείωσης της ικανότητας παραλαβής φορτίων. Το τμήμα DE αποτυπώνει την ικανότητα του μέλους να εξακολουθεί να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία ακόμα και μετά την αστοχία και το Ε είναι το σημείο στο οποίο το μέλος παύει να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία. Στην ίδια καμπύλη σημειώνονται επιπλέον οι τρείς στάθμες επιτελεστικότητας μεταξύ B και C οι οποίες αντιστοιχούν στην αποφυγή διακοπής λειτουργίας ΙΟ, στην προστασία ανθρώπινης ζωής LS και στην αποφυγή κατάρρευσης CP. Οι στάθμες αυτές χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των βλαβών στα στοιχεία του συστήματος (Πίνακας 4.1).



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα ροπής – στροφής πλαστικής άρθρωσης

Οριακή κατάσταση	Στάθμη επιτελεστικότητας	
IO (Immediate Occupancy) Αποφυγή διακοπής λειτουργίας	Ελαφρές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία. Μικρό κόστος επισκευών.	
LS (Life Safety): Προστασία ανθρώπινης ζωής	Σημαντικές βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία. Μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις. Μεγάλο κόστος επισκευών.	
CP (Collapse Prevention) Αποφυγή κατάρρευσης	Αστοχία σε μη φέροντα στοιχεία. Εκτεταμένες βλάβες σε φέροντα στοιχεία πιθανόν μη επισκευάσιμες. Διατήρηση ικανότητας παραλαβής των κατακόρυφων φορτίων.	

Πίνακας 4.1	: Ορισμός	σταθμών	επιτελεστικότ	τας
-------------	-----------	---------	---------------	-----

Για τη βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τα πειραματικά αποτελέσματα έγινε πλήθος επαναλήψεων, τροποποιώντας κάθε φορά τις παραμέτρους της πλαστικής άρθρωσης. Ο Πίνακας 4.2 περιλαμβάνει τις μη γραμμικές ιδιότητες της πλαστικής άρθρωσης που αποτέλεσαν την καλύτερη προσέγγιση. Η ροπή στη διαρροή υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.17) και η στροφή της χορδής στη διαρροή από την (3.21) αντίστοιχα.

Σημείο	M/M _{pl,pin}	$\theta/\theta_{pl,pin}$	
Α	0	0	
В	2	0	
С	2,5	100	
D	0,5	100	
E	0,5	150	
Όρια Σταθμών Επιτελεστικότητας (θ/θ _{pl,pin})			
10	30		
LS	45		
СР	60		

Στο Σχήμα 4.8 δίνονται: α) οι πειραματικές καμπύλες φορτίου – μετακίνησης, β) οι καμπύλες φορτίου μετακίνησης που προέκυψαν από την ανάλυση με χρήση των μη γραμμικών παραμέτρων που περιλαμβάνει ο Πίνακας 4.2 και γ) οι αντίστοιχες καμπύλες της ανάλυσης με χρήση των αρχικών παραμέτρων που προέκυψαν από τις δοκιμές σε μεμονωμένες συσκευές. Οι καμπύλες με τις παραμέτρους των μεμονωμένων συσκευών δείχνουν ότι οι μεμονωμένες συσκευές διαθέτουν μεγαλύτερη πλαστιμότητα από τα συνολικά πλαίσια. Οι προτεινόμενες καμπύλες πλαισίων αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα αποτελέσματα των δοκιμών.





Σχήμα 4.8: Αριθμητικά και πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετακίνησης

Στα ίδια μοντέλα πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις χρονοϊστορίας εφαρμόζοντας πρωτόκολλο φόρτισης όμοιο με των δοκιμών, (Σχήμα 3.39). Στο Σχήμα 4.9 δίνεται η σύγκριση των αντιδράσεων στήριξης στη βάση του υποστυλώματος με τις αντίστοιχες πειραματικές. Αν και οι τιμές είναι παραπλήσιες, οι πείροι αστόχησαν νωρίτερα στην ανάλυση σε σχέση με την αντίστοιχη δοκιμή γεγονός που δείχνει ότι η εφαρμογή των προτεινόμενων ιδιοτήτων πλαστικής άρθρωσης είναι συντηρητική. Η πρόωρη αυτή αστοχία μπορεί να οφείλεται εν μέρει και στην άκαμπτη σύνδεση του πείρου με τη δοκόυποδοχέα στην ανάλυση σε σχέση με την ελευθερία ολίσθησης και στροφής που είχε στη θέση αυτή κατά τις δοκιμές (οπή μετωπικής πλάκας δοκού-υποδοχέα).





Σχήμα 4.9: Σύγκριση αριθμητικής και πειραματικής αντίδρασης στήριξης για το πρωτόκολλο φόρτισης

Σε γενικές γραμμές τα βαθμονομημένα μοντέλα προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια την καθολική συμπεριφορά του συστήματος «FUSEIS1-2» και υποδεικνύουν ότι οι προτεινόμενες ιδιότητες της πλαστικής άρθρωσης μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος πέρα από την ελαστική περιοχή και την πρόβλεψη των αναμενόμενων μηχανισμών πλαστικοποίησης και κατανομής της βλάβης.

4.2.3. Εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς q

Ένας από τους στόχους του ερευνητικού προγράμματος ήταν η εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς q του συστήματος «FUSEIS1-2». Ο συντελεστής συμπεριφοράς προκύπτει ως το γινόμενο του δείκτη πλαστιμότητας με την υπεραντοχή. Μια αρχική εκτίμηση προέκυψε βάσει της καμπύλης ικανότητας των μη γραμμικών στατικών αναλύσεων στα πλαίσια των δοκιμών. Η υπεραντοχή Ω ορίστηκε ως ο λόγος του μέγιστου φορτίου V_{max} προς το φορτίο στην πρώτη διαρροή V_y και ο δείκτης πλαστιμότητας q_μ ως ο λόγος της μετακίνησης στο μέγιστο φορτίο d_u προς τη διορθωμένη μετακίνηση διαρροής d_y* (παραδοχή ίσων μετατοπίσεων), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Προσδιορισμός συντελεστή συμπεριφοράς

Ο Πίνακας 4.3 συνοψίζει τις τιμές της υπεραντοχής, του δείκτη πλαστιμότητας και του συντελεστή συμπεριφοράς που είναι παραπλήσιες και για τις δύο δοκιμές.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές συμπεριφοράς δοκιμών

Δοκιμή	$q_{\mu} = \frac{d_u}{d_v *}$	$\Omega = \frac{V_{max}}{V_{y}}$	$\mathbf{q} = \mathbf{q}_{\mu} \cdot \boldsymbol{\Omega}$
M4	1,64	1,83	3,00
M5	1,76	1,79	3,14

5. Σχεδιασμός κτιρίων με συστήματα «FUSEIS1-2»

5.1. Μέθοδοι ανάλυσης κτιρίων

Η ελαστική ανάλυση, που προτείνεται συνήθως από τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, διακρίνεται σε στατική και δυναμική οι οποίες αντιστοιχούν στην απλοποιημένη φασματική και στη δυναμική φασματική μέθοδο. Μπορεί να συμπεριλάβει την πιθανή μη-γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής κατά το σεισμό σχεδιασμού εφόσον ικανοποιούνται κάποια κριτήρια σχεδιασμού των Κανονισμών, όπως ο έλεγχος επιρροών 2^{ης} τάξης. Η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσο η κατασκευή βρίσκεται στην ελαστική περιοχή. Μετά την έναρξη της διαρροής όμως δεν μπορεί να αποτυπώσει την ανακατανομή των εντάσεων που εμφανίζεται κατά την σταδιακή διαρροή μελών του φορέα.

Οι ανελαστικές μέθοδοι ανάλυσης αντίθετα, στατικές και δυναμικές, αποτυπώνουν την πραγματική συμπεριφορά των κατασκευών πέρα από την ελαστική περιοχή και παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης των μηχανισμών αστοχίας. Για αυτό το λόγο εφαρμόζονται ευρέως για την αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς κτιρίων. Η Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (Nonlinear Static – Pushover Analysis) είναι η πιο διαδεδομένη μη γραμμική μέθοδος. Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι παρέχει επαρκή ακρίβεια αποτελεσμάτων με μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και εφόσον ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια μπορεί να εφαρμοστεί σε πλήθος κατασκευών. Η μη γραμμική δυναμική μέθοδος με χρονοϊστορίες σεισμικών διεγέρσεων (Nonlinear Dynamic Analysis ή Time-History Analysis) εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους κατασκευών, παρέχει ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη αποτύπωση της ανελαστικής συμπεριφοράς, έχει όμως μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις και αρκετές δυσκολίες στην προσομοίωση της κυκλικής συμπεριφοράς των μελών μετά τη διαρροή τους. Στις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις εντάσσεται και η «Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση» (Incremental Dynamic Analysis, IDA). Με τη μέθοδο αυτή γίνεται πλήρως κατανοητή η μετελαστική συμπεριφορά της κατασκευής και οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων (παραμόρφωση, αστοχία, αντοχή, κράτυνση κλπ) σε όλο το εύρος έντασης των σεισμικών καταπονήσεων.

5.1.1. Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (Pushover Analysis)

Η στατική υπερωθητική ανάλυση Pushover είναι η πιο απλή ανελαστική μέθοδος που προτείνεται από τους σύγχρονους κανονισμούς τόσο για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κτιρίων όσο και για την ανάλυση νέων κατασκευών. Η μέθοδος δίνει πλήρη εποπτεία του φορέα, καθώς μπορεί να ελέγξει την ευστάθειά και να προβλέψει τον αναμενόμενο πλαστικό μηχανισμό κατάρρευσης. Κατά τη μετάβαση του φορέα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή αποκαλύπτονται σταδιακά τα πιο αδύναμα και κρίσιμα σημεία του και η μορφή αστοχίας μέχρι την πλήρη κατάρρευση.

Η απόκριση της κατασκευής πέρα από τη διαρροή προσδιορίζεται μέσα από μια σειρά διαδοχικών ελαστικών αναλύσεων κατά τις οποίες τα φορτία βαρύτητας των στοιχείων συνδυάζονται με οριζόντια στατικά φορτία σταδιακά αυξανόμενα, σύμφωνα με το σεισμικό συνδυασμό που καθορίζει ο αντισεισμικός κανονισμός. Τα οριζόντια φορτία εφαρμόζονται σε συγκεκριμένη διεύθυνση και φορά με διάφορες καθ' ύψος κατανομές όπως ομοιόμορφη (ορθογωνική), τριγωνική και ιδιομορφική με βάση το σχήμα της θεμελιώδους ιδιομορφής στη θεωρούμενη διεύθυνση. Η χρήση της τελευταίας συνιστάται όταν οι ανώτερες ιδιομορφές έχουν μικρή επιρροή και η δρώσα ιδιομορφική μάζα της

θεμελιώδους ιδιομορφής είναι μεγαλύτερη από το 75% της συνολικής μάζας του κτιρίου. Σύμφωνα με τους ΕΝ 1998-1-1 [30] και FEMA 356 [39] σε όλες τις αναλύσεις είναι απαραίτητο να εξετάζονται τουλάχιστον δύο διαφορετικές καθ' ύψος κατανομές φορτίων, έτσι ώστε να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι δράσεις κατά τη διάρκεια της πραγματικής δυναμικής συμπεριφοράς του φορέα.

Για την προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της κατασκευής εφαρμόζεται η θεωρία των πλαστικών αρθρώσεων. Αρχικά, προσδιορίζονται οι μη γραμμικές ιδιότητες κάθε στοιχείου από την αντοχή και την ικανότητα παραμόρφωσής του, οι οποίες εισάγονται στις κρίσιμες θέσεις του στο προσομοίωμα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η αποδεκτή στάθμη επιτελεστικότητας του φορέα και βάσει αυτής υπολογίζεται η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση στην κορυφή του, η οποία ονομάζεται στοχευόμενη μετακίνηση (target displacement). Με την αύξηση του καθ' ύψος κατανεμημένου πλευρικού φορτίου σε κάθε ανάλυση το προσομοίωμα τροποποιείται κατάλληλα ώστε να λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή της εντατικής κατάστασης των επιμέρους δομικών στοιχείων και τη μείωση της δυσκαμψίας αυτών που έχουν διαρρεύσει. Η υπερωθητική ανάλυση διενεργείται μέχρι η συνολική μετακίνηση της κατασκευής να φτάσει τη στοχευόμενη μετακίνηση ή και νωρίτερα, σε περίπτωση που η κατασκευή χάσει τη συνολική της ευστάθεια, όπου η μέθοδος παύσει να συγκλίνει.

Η μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ικανότητας (capacity curve) η οποία εκφράζει τη διατιθέμενη αντοχή της και την καμπύλη απαίτησης (demand curve) η οποία εκφράζει την απαιτούμενη. Η καμπύλη ικανότητας καταγράφει τη μη-γραμμική μεταβολή της τέμνουσας βάσης καθώς αυξάνει η μετακίνηση στην κορυφή, ενώ η καμπύλη απαίτησης προκύπτει από τα ελαστικά φάσματα σχεδιασμού για διάφορους συντελεστές απόσβεσης (ATC-40 [42]). Συγκρίνοντας αυτές τις δύο χαρακτηριστικές αντοχές μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο επιτελεστικότητας (performance point) για δεδομένη σεισμική διέγερση ως το σημείο τομής τους. Η σύγκριση γίνεται μετατρέποντας τόσο την καμπύλη ικανότητας όσο και την καμπύλη απαίτησης σε διαγράμματα φασματικών συντεταγμένων Sa-Sd (Σχήμα 5.1).





Η φασματική καμπύλη ικανότητας του πολυβάθμιου συστήματος που προκύπτει από τη μετατροπή αυτή αντιστοιχεί στην καμπύλη ικανότητας ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου. Το σημείο επιτελεστικότητας αποτελεί μέτρο αξιολόγησης της κατασκευής καθώς με αυτό ελέγχεται αν οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις που αναπτύσσονται βρίσκονται εντός των ορίων της επιδιωκόμενης

στάθμης επιτελεστικότητας. Αν η καμπύλη ικανότητας βρίσκεται κάτω από την καμπύλη απαίτησης και δεν την τέμνει σε κανένα σημείο, η αντοχή του φορέα είναι μικρότερη από την απαιτούμενη και πρέπει είτε να ενισχυθεί είτε να ξανασχεδιαστεί, ανάλογα με το αν πρόκειται για υφιστάμενη ή νέα κατασκευή. Επιπλέον, μέσω της μεθόδου ελέγχεται αν η κατασκευή διαθέτει επαρκή πλαστιμότητα. Ο δείκτης πλαστιμότητας μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη ικανότητας όπως περιγράφεται στην Παρ. 4.2.3 και να χρησιμοποιηθεί τελικά στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς q της κατασκευής.

5.1.2. Ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear Dynamic Analysis)

Η ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear Dynamic Analysis) δίνει τη δυνατότητα διερεύνησης της ανελαστικής απόκρισης ενός κτιρίου κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής φόρτισης. Ομοίως με τη ανελαστική στατική, η ανάλυση διεξάγεται υπό τα φορτία του σεισμικού συνδυασμού, τα φορτία βαρύτητας και τα σεισμικά φορτία.

Η σεισμική φόρτιση εκφράζεται από επιταχυνσιογραφήματα εδαφικών δονήσεων πραγματικών σεισμικών γεγονότων ή από τεχνητά επιταχυνσιογραφήματα τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές των κανονισμών. Η απόκριση της κατασκευής επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιβαλλόμενης διέγερσης, συνεπώς η ανάλυση χρονοϊστορίας πρέπει να επαναλαμβάνεται για αρκετές χαρακτηριστικές εδαφικές διεγέρσεις της περιοχής ώστε τα αποτελέσματα να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικά. Σημαντικός είναι επίσης ο προσδιορισμός των νόμων ανακύκλισης των δομικών στοιχείων και η εφαρμογή τους στις αναμενόμενες θέσεις απορρόφησης ενέργειας του φορέα.

Η επιβολή της σεισμικής φόρτισης γίνεται σε χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια των οποίων αποτυπώνεται η μεταβολή των δυναμικών χαρακτηριστικών του φορέα και λαμβάνεται υπόψη η υποβάθμιση της αντοχής και δυσκαμψίας του λόγω ανελαστικής συμπεριφοράς και γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι χρονοϊστορίες των μεγεθών έντασης και παραμόρφωσης στις κρίσιμες θέσεις του φορέα. Με τη μεθοδολογία που ακολουθείται κατά την ανάλυση και την ακρίβεια στην προσομοίωση τα αποτελέσματα αυτά προσεγγίζουν σε μεγάλο βαθμό τα αναμενόμενα για το εξεταζόμενο κτίριο κατά τη διάρκεια ενός σεισμικού γεγονότος. Η αποτίμηση της συνολικής ανελαστικής συμπεριφοράς του κτιρίου γίνεται τελικά συγκρίνοντας τις τιμές έντασης και παραμόρφωσης με τα κριτήρια αποδοχής των αντισεισμικών κανονισμών (acceptance criteria).

5.1.3. Προσαυξητική δυναμική ανάλυση (IDA)

Με τη διεξαγωγή ικανοποιητικού αριθμού μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω η ανελαστική συμπεριφορά μιας κατασκευής με την Προσαυξητική Δυναμική Ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis, IDA), η οποία περιγράφει το πέρασμα από την ελαστική στην πλαστική περιοχή και τελικά στην πλήρη κατάρρευση. Η μεθοδολογία ανάλυσης έχει διερευνηθεί διεξοδικά από τους Vamvatsikos D. και Cornell CA. [43] και έχει συμπεριληφθεί στις διατάξεις του FEMA P695 [44].

Η IDA περιλαμβάνει μια σειρά μη - γραμμικών δυναμικών αναλύσεων που εκτελούνται με κλιμακούμενο επιταχυνσιογράφημα σε διάφορα επίπεδα έντασης. Η κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται είναι καθοριστικά για την εφαρμογή της μεθόδου. Συνήθως επιλέγεται κατάλληλος αλγόριθμος που κλιμακώνει σταδιακά το επίπεδο έντασης κάθε επιταχυνσιογραφήματος μέχρι να επέλθει συνολική δυναμική αστάθεια όταν η μέθοδος δε συγκλίνει (π.χ. hunt & fill, Vamvatsikos D. και Cornell CA. [45]). Μπορεί όμως να επιλεχθεί και η τεχνική της ομοιόμορφης κλιμάκωσης όλων των καταγραφών σύμφωνα με τη φασματική επιτάχυνση της πρώτης ιδιομορφής της κατασκευής για απόσβεση 5%, S_a(T₁,5%), που θεωρείται κατάλληλη για κανονικά κτίρια και κτίρια χαμηλού ύψους, στα οποία η πρώτη ιδιομορφή είναι η δεσπόζουσα, και δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα χωρίς να έχει ιδιαίτερες υπολογιστικές απαιτήσεις. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε και κατά τις αναλύσεις IDA στα πλαίσια με «FUSEIS1-2» που παρουσιάζονται στην Παρ. 6.6.

Η μέθοδος συμβάλλει στην κατανόηση του μηχανισμού κατάρρευσης της κατασκευής παρέχοντας πληροφορίες για τις μεταβολές στην απόκρισή της στο σύνολο (μέγιστες παραμορφώσεις) αλλά και στα επιμέρους δομικά στοιχεία (υποβάθμιση δυσκαμψίας, αντοχής κλπ). Για κάθε κλιμάκωση μιας καταγραφής που αντιστοιχεί σε ένα δείκτη έντασης (intensity measure – IM) καταγράφεται ο δείκτης απόκρισης (Engineering Demand Parameter - EDP). Διατάσσοντας τα ζεύγη τιμών IM – EDP όλων των αναλύσεων σε γράφημα και παρεμβάλλοντας ενδιάμεσα σημεία από πολυωνυμικές συναρτήσεις αριθμού ανάλογου αυτού των αναλύσεων κάθε καταγραφής, μπορεί να σχηματιστεί η καμπύλη IDA μπορεί να προσδιοριστεί ο δείκτης απόκρισης EDP σε οποιοδήποτε επίπεδο έντασης IM και αντιστρόφως.

Οι δείκτες έντασης ΙΜ μιας μονοτονικώς κλιμακούμενης εδαφικής κίνησης ενός βαθμονομημένου επιταχυνσιογραφήματος που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (PGA), η Μέγιστη Εδαφική Ταχύτητα και η Φασματική Επιτάχυνση για απόσβεση ξ=5% για την πρώτη ιδιοπερίοδο της κατασκευής (S_a(T₁,5%)). Οι δείκτες απόκρισης EDP εξάγονται από τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης και ανάλογα με τη χρήση τους μπορεί να είναι η μέγιστη τέμνουσα βάσης, οι στροφές των κόμβων, η μέγιστη πλαστιμότητα των ορόφων, η μέγιστη μετακίνηση κορυφής ενώ συνήθως επιλέγονται η συνολική κλίση κτιρίου και η μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (interstory drift), θ_{max}.

Στην μορφή μιας τυπικής καμπύλης IDA διακρίνονται τρεις βασικές περιοχές. Η πρώτη είναι μια διακριτή ελαστική περιοχή με σταθερή κλίση ευθείας IM/EDP μέχρι τη στιγμή που εμφανίζεται η πρώτη μη-γραμμικότητα. Ακολουθεί στη συνέχεια ένα τμήμα στο οποίο η κλίση μεταβάλλεται, είτε είναι μικρότερη από την αρχική και παρατηρείται έντονη απομείωση αντοχών, χαλάρωση (softening, Σχήμα 5.2α), είτε είναι μεγαλύτερη και παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της κράτυνσης (hardening, Σχήμα 5.2β), είτε εμφανίζονται διαδοχικά τμήματα χαλάρωσης – κράτυνσης και η μορφή της καμπύλης είναι κυματοειδής (Σχήμα 5.2γ,δ). Στο τελευταίο τμήμα υπάρχει απεριόριστη αύξηση του EDP και η καμπύλη γίνεται οριζόντια (flatline) λόγω μη αριθμητικής σύγκλισης της ανάλυσης και συνολικής δυναμικής αστάθειας της κατασκευής.



Σχήμα 5.2: Ενδεικτικές καμπύλες IDA πενταώροφου κτιρίου (Vamvatsikos D. και Cornell CA. [43])

Όταν το ίδιο κτίριο υποβληθεί σε διαφορετικές εδαφικές κινήσεις ενδέχεται να παράγει πολύ ανόμοιες μεταξύ τους αποκρίσεις και επομένως η μελέτη IDA μιας μόνο σεισμικής καταγραφής (single-record IDA study) δεν μπορεί να αντικατοπτρίσει πλήρως τη σεισμική συμπεριφορά του σε ένα μελλοντικό σεισμικό γεγονός. Δεδομένου λοιπόν ότι η καμπύλη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σεισμική καταγραφή που έχει επιλεγεί, στο εξεταζόμενο κτίριο πρέπει επιβληθεί επαρκής αριθμός εδαφικών καταγραφών, ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί αξιόπιστα και ρεαλιστικά η απόκρισή του. Μία μελέτη IDA πολλών καταγραφών (multi-record IDA study) περιλαμβάνει το σύνολο των καμπυλών IDA του ιδίου φορέα υπό τα εξεταζόμενα επιταχυνσιογραφήματα, οι οποίες όταν έχουν κοινούς δείκτες έντασης και απόκρισης μπορούν να παρασταθούν γραφικά στο ίδιο γράφημα (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση 30 καμπυλών IDA πενταώροφου κτιρίου (Vamvatsikos D. και Cornell CA. [43])

Για να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα των καταγραφών στις οποίες είναι πιθανόν να υποβληθεί το κτίριο, είναι απαραίτητη η πιθανοτική ανάλυση. Στις αναλύσεις των πλαισίων με «FUSEIS1-2» οι καταγραφές και οι αντίστοιχες καμπύλες IDA συνοψίστηκαν στα ποσοστημόρια για το 50% (διάμεσος δείγματος), το 16% και το 84% των φασμάτων απόκρισης (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Σύνοψη καμπυλών IDA σε ποσοστημόρια 16%, 50%,84% σε λογαριθμική κλίμακα (Vamvatsikos D. και Cornell CA. [43])

Η εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης ενός κτιρίου γίνεται μέσω του υπολογισμού της καμπύλης τρωτότητας (fragility curve) αφού καθοριστούν οι στάθμες βλάβης από τη μέση καμπύλη IDA (50%). Η καμπύλη τρωτότητας είναι μια τυπική αθροιστική λογαριθμική συνάρτηση πιθανότητας (cumulative distribution function, CDF) που ουσιαστικά παρέχει εκτιμήσεις για την πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης στάθμης βλάβης σε διάφορα επίπεδα έντασης της σεισμικής δράσης για μία κατασκευή. Για τον ορισμό της απαιτούνται η $S_a(T_1,5%)$ της μέσης καμπύλης IDA 50% που αντιστοιχεί στην κατάρρευση της κατασκευής και ονομάζεται S_{CT} (median collapse intensity) και η συνολική λογαριθμοκανονική (lognormal) τυπική απόκλιση, $β_{tot}$. Η τυπική απόαλιση προσδιορίζεται συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων από την εξίσωση (5.1). Οι τιμές των παραμέτρων αυτών εκτιμώνται με τη διαδικασία που περιγράφεται στις διατάξεις του FEMA P695 [44].

$$\beta_{\text{tot}} = \sqrt{\beta_{\text{RTR}}^2 + \beta_{\text{DR}}^2 + \beta_{\text{TD}}^2 + \beta_{\text{MDL}}^2}$$
(5.1)

όπου:

 $\beta_{\mathtt{RTR}}$ οι αβεβαιότητες των σεισμικών καταγραφών,

 β_{DR} οι αβεβαιότητες των απαιτήσεων σχεδιασμού,

 β_{TD} οι αβεβαιότητες της προσομοίωσης και

 β_{MDL} oi abebaióthtes ths diadikasías aválushs.

Στη συνέχεια, για να συμπεριληφθεί η επιρροή των ακραίων (σπάνιων) σεισμών που προκαλούν κατάρρευση, η καμπύλη τρωτότητας μετατοπίζεται προς τα δεξιά (Σχήμα 5.5β) με πολλαπλασιασμό της S_{CT} με το συντελεστή σχήματος του φάσματος SSF (Spectral Shape Factor), ο οποίος εξαρτάται από τη

δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο και την πλαστιμότητα της κατασκευής. Όσο πιο εύκαμπτο είναι το κτίριο τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής SSF και αντίστοιχα η μετατόπιση της καμπύλης. Η πιθανότητα κατάρρευσης στις προβλεπόμενες στάθμες βλάβης (IO, LS, CP) τελικά προσδιορίζεται από τη μετατοπισμένη καμπύλη τρωτότητας. Από την καμπύλη αυτή είναι δυνατό να ελεγχθεί και η ορθότητα του συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιήθηκε στη διαστασιολόγηση. Αρχικά υπολογίζεται το περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης (collapse margin ratio, CMR) από την εξίσωση (5.2) και με χρήση του συντελεστή SSF το διορθωμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης (collapse margin ratio, CMR) από την εξίσωση (adjusted collapse ratio, ACMR), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Ανάλογα με τον αριθμό των εξεταζόμενων κτιρίων το διορθωμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης 10% ή 20%, ACMR10% ή ACMR20%. Αν αυτό δεν ισχύει το κτίριο θα πρέπει να διαστασιολογηθεί εκ νέου μέχρι να προσδιοριστεί ο κατάλληλος συντελεστής συμπεριφοράς.

$$CMR = \frac{S_{CT}}{S_{MT}}$$
(5.2)

όπου:

 S_{MT} η τιμή της $S_a(T_1,5\%)$ του ελαστικού φάσματος απόκρισης στη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδο κατά EN1998-1-1 [30] και

 S_{cT} η τιμή της $S_a(T_1,5\%)$ της μέσης καμπύλης IDA 50% που αντιστοιχεί στην κατάρρευση της κατασκευής (median collapse intensity).





Συνοψίζοντας, η ανάλυση IDA ανήκει στις σύγχρονες μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού με στάθμες επιτελεστικότητας (performance - based earthquake engineering – PBEE) η οποία με ένα σχετικά ακριβές προσομοίωμα και την κατάλληλη επεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορεί να αποτελέσει μια ορθολογική προσέγγιση της ανελαστικής συμπεριφοράς του κτιρίου κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Για την εφαρμογή της μεθόδου ο μελετητής μηχανικός πρέπει να διαθέτει την απαιτούμενη εμπειρία ιδιαίτερα σε ότι αφορά στην προσομοίωση του νόμου ανακύκλισης των επιμέρους δομικών στοιχείων του κτιρίου. Επιπλέον, επειδή οι απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο είναι υψηλές και η ανάλυση γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη όταν γίνεται στο χώρο συνήθως εφαρμόζεται σε δισδιάστατους φορείς για έλεγχο υφιστάμενων κατασκευών και για ερευνητικούς λόγους. Με τον καθορισμό των επιθυμητών

επιπέδων απαίτησης και ικανότητας και την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για τη σωστή επιλογή του πλήθους σεισμικών διεγέρσεων η εφαρμογή της IDA μπορεί να γίνει περισσότερο προσιτή.

5.2. Κανόνες σχεδιασμού κτιρίων με «FUSEIS1-2»

Η μεθοδολογία και όλες οι απαραίτητες οδηγίες για το σχεδιασμό κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2» περιλαμβάνονται αναλυτικά σε έναν Οδηγό Σχεδιασμού (Design Guide) που συντάχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος. Ο Οδηγός βασίστηκε στις διατάξεις των Ευρωκωδίκων με κατάλληλες τροποποιήσεις σε ορισμένες από αυτές για να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών του συστήματος, όπως αναδείχθηκαν κατά τις αναλυτικές και πειραματικές διερευνήσεις. Οι κανόνες σχεδιασμού του Οδηγού εξασφαλίζουν την αντοχή και ευστάθεια του συνόλου και των τμημάτων του φορέα σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε Οριακή κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Επίσης με εφαρμογή των κανόνων επιτυγχάνεται η συνολική ευστάθεια του φορέα για το σεισμό σχεδιασμού η οποία εξασφαλίζεται με έναρξη της πλαστικοποίησης στους πείρους, και επαρκή υπεραντοχή στα υπόλοιπα μη πλάστιμα μέλη και στις συνδέσεις.

5.2.1. Προδιαστασιολόγηση (preliminary design)

Πριν την οριστική μελέτη ενός κτιρίου είναι απαραίτητη η προδιαστασιολόγηση. Αρχικά επιλέγεται ο τύπος του αντισεισμικού συστήματος και η διάταξή του στο κτίριο βάσει των αρχιτεκτονικών και γεωμετρικών περιορισμών και στη συνέχεια γίνεται μια πρώτη εκτίμηση των διαστάσεων των κύριων δομικών μελών. Με σωστή προδιαστασιολόγηση μειώνεται ο αριθμός των αναλύσεων που πρέπει να διεξαχθούν και ο μελετητής έχει καλύτερη εποπτεία του φορέα.

Με κριτήριο την αντοχή και θεωρώντας ότι το σύστημα «FUSEIS1-2» είναι το μοναδικό αντισεισμικό σύστημα του κτιρίου ο αριθμός των συστημάτων και οι διατομές τους μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα λαμβάνοντας υπόψη το ισοδύναμο στατικό προσομοίωμα του συστήματος (Παρ. 3.3). Ο απαιτούμενος αριθμός συστημάτων m προκύπτει από την εξίσωση:

$$m = \frac{V_{B}}{V_{story}}$$
(5.3)

όπου:

V_B η συνολική τέμνουσα βάσης του κτιρίου και

V_{story} η τέμνουσα που μπορεί να παραλάβει κάθε σύστημα μέσω των πείρων «FUSEIS1-2» όπως υπολογίζεται από την εξίσωση (3.5).

Αντίστοιχα οι διατομές των υποστυλωμάτων του συστήματος, θεωρώντας ότι εφαρμόζονται m ίδια συστήματα σε ένα κτίριο, προκύπτουν από την αξονική δύναμη που πρέπει να παραλάβουν η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$N_{\text{column}} = \frac{M_{\text{ov}}}{\text{m} \cdot \text{L}}$$
(5.4)

όπου:

Μον η ροπή ανατροπής υπό οριζόντια φόρτιση.

Τα παραπάνω δίνουν τις βασικές κατευθύνσεις για το σχεδιασμό, ωστόσο πρέπει εκτός από την αντοχή να ελέγχεται και η δυσκαμψία του συστήματος, πράγμα που επιτυγχάνεται με περιορισμό της σχετικής μετακίνησης ορόφων, καθώς και η επιρροή των φαινομένων 2^{ης} τάξης σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1-1 [30] όπως δίνονται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

5.2.2. Μεθοδολογία σχεδιασμού με ελαστική ανάλυση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα κτίριο με το σύστημα «FUSEIS1-2» η πλαστικοποίηση επιδιώκεται να ξεκινήσει από τους πείρους και πρέπει να σχεδιάζεται ώστε η απορρόφηση ενέργειας σε αυτά να πραγματοποιείται μέσω καμπτικού μηχανισμού. Ακολουθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού:

(1) Προσομοίωση

Αρχικά δημιουργείται προσομοίωμα ραβδωτών στοιχείων (beam elements) σε εμπορικό λογισμικό. Τα στοιχεία δοκών που χρησιμοποιούνται για τις συσκευές «FUSEIS 1-2» χωρίζονται σε τρία τμήματα με διαφορετικές διατομές, τις δοκούς-υποδοχείς στα άκρα και την απομειωμένη διατομή του πείρου στη μέση, Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6: Προσομοίωση συσκευής «FUSEIS1-2»

Οι κόμβοι δοκών-υποδοχέων και υποστυλωμάτων του συστήματος μορφώνονται και προσομοιώνονται ως άκαμπτοι. Για να ληφθεί υπόψη το πραγματικό μήκος των συσκευών και η πραγματική δυσκαμψία τους χρησιμοποιούνται άκαμπτα στοιχεία μεταξύ των κέντρων των υποστυλωμάτων και των πελμάτων τους όπου βρίσκονται οι κόμβοι. Στις βάσεις των υποστυλωμάτων του συστήματος τοποθετείται πάντα μια συσκευή για την αποφυγή μεταφοράς ροπών στη θεμελίωση.

Οι συνδέσεις των δοκών του κύριου πλαισίου με το σύστημα μορφώνονται ως αρθρωτές για την αποφυγή μεταφοράς πρόσθετων ροπών στα υποστυλώματα του συστήματος. Οι υπόλοιπες συνδέσεις των δοκών με τα υποστυλώματα του κύριου πλαισίου μπορεί να είναι αρθρωτές (Hinged), οπότε το «FUSEIS1-2» είναι το μοναδικό σύστημα πλευρικής ευστάθειας, άκαμπτες (Fixed) ή ημιάκαμπτες (Partially fixed), οπότε το σύστημα παραλαμβάνει τα πλευρικά φορτία σε συνεργασία με το κύριο πλαίσιο. Οι εδράσεις των υποστυλωμάτων όλου του κτιρίου προσομοιώνονται ως αρθρωτές.

Οι αναλύσεις σε πλαίσια με το σύστημα έδειξαν ότι η πλαισιακή λειτουργία του κύριου πλαισίου με άκαμπτες συνδέσεις οδηγεί σε βαριές κατασκευές λόγω της πρόσθετης απαίτησης να σχεδιαστούν οι δοκοί του με υπεραντοχή σε σχέση με τους πείρους του συστήματος. Αντίστοιχα δυσμενής είναι και η χρήση αρθρωτών συνδέσεων όπου επειδή το σύστημα καλείται να παραλάβει εξ ολοκλήρου τα εγκάρσια φορτία ο σχεδιασμός οδηγεί τελικά σε ένα εξαιρετικά δύσκαμπτο και βαρύ σύστημα με μεγάλες διατομές που καθιστούν δύσκολη τόσο την εφαρμογή όσο και την επισκευή του, κάτι το οποίο αντίκειται στη βασική ιδέα σχεδιασμού του. Προτεινόμενη είναι η χρήση ημιάκαμπτων συνδέσεων οι οποίες ενώ προσφέρουν όλα τα πλεονεκτήματα των συνδέσεων ροπής διαθέτουν απλούστερη κατασκευαστική λεπτομέρεια και περιορίζουν τις βλάβες στους πείρους του συστήματος οδηγώντας σε πιο οικονομικό σχεδιασμό. Στην περίπτωση αυτή η ικανότητα στροφής της περιοχής της πλαστικής άρθρωσης θ_p των δοκών του κύριου πλαισίου πρέπει να υπερβαίνει τα 40 mrad. Η οριακή αυτή τιμή προέκυψε από τις μη γραμμικές αναλύσεις σε πλαίσια με το σύστημα και είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτές που ορίζει ο EN1998-1-1 [30] για συνδέσεις δοκού - υποστυλώματος πλαισιωτών φορέων προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν θα διαρρεύσει η περιοχή αυτή πριν από τους πείρους του συστήματος.

(2) Ανάλυση

Διεξάγεται στατική ελαστική ανάλυση υπό την επιβολή των μονίμων και κινητών φορτίων και πραγματοποιούνται οι έλεγχοι των μελών του κυρίου πλαισίου σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) και Αστοχίας (ΟΚΑ) βάσει του ΕΝ1993-1-1 [33].

Για τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών υπό σεισμικά φορτία εφαρμόζεται δυναμική φασματική ανάλυση (Multi Modal Response Spectrum Analysis) κατά EN1998-1-1 [30] λαμβάνοντας σε κάθε κύρια διεύθυνση του φορέα τόσες ιδιομορφές ώστε το άθροισμα των ενεργών ιδιομορφικών μαζών να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής μάζας. Για τον ορισμό του φάσματος σχεδιασμού προτείνεται μέγιστος συντελεστής συμπεριφοράς q=3 που εκτιμήθηκε από τις μη γραμμικές στατικές αναλύσεις με εφαρμογή της μεθόδου IDA βάσει των διατάξεων του FEMA P695 [44].

(3) Περιορισμός της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου (Limitation of interstory drift)

Ο περιορισμός της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου εξασφαλίζει την προστασία των μη φερόντων στοιχείων από βλάβες και αποτελεί βασικό έλεγχο του συστήματος «FUSEIS1-2» έναντι των σεισμικών δράσεων. Η γωνιακή παραμόρφωση ορόφου παρέχει μια εκτίμηση του επιπέδου των βλαβών σε διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας και καθορίζει την κατανομή της δυσκαμψίας των μελών στο φορέα και κατ' επέκταση το μέγεθος και τον τύπο των διατομών του συστήματος. Οι ανελαστικές οριζόντιες μετακινήσεις d_s για το σεισμό σχεδιασμού προκύπτουν από τη φασματική ανάλυση βάσει των ελαστικών μετακινήσεων d_e σύμφωνα με την εξίσωση:

$$d_{s} = q \cdot d_{e} \tag{5.5}$$

Η τιμή σχεδιασμού της σχετικής μετακίνησης του ορόφου d_r λαμβάνεται ως η διαφορά των μέσων οριζόντιων μετακινήσεων d_s των δαπέδων του υπό εξέταση ορόφου. Ανάλογα με τον τύπο των μη φερόντων στοιχείων (ψαθυρά, όλκιμα, μη συνδεδεμένα) και τη σπουδαιότητα του κτιρίου η σχετική μετακίνηση του ορόφου d_r συγκρίνεται με τα αντίστοιχα όρια του Κανονισμού. Ο βέλτιστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται όταν οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις ορόφων του κτιρίου βρίσκονται κοντά στα επιτρεπόμενα όρια. Δεδομένου ότι οι οριζόντιες μετακινήσεις πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή συμπεριφοράς q, ο έλεγχος του περιορισμού των γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου δεν εξαρτάται από αυτόν.

(4) Έλεγχος επιρροών 2^{ης} τάξης

Για τον έλεγχο των επιρροών 2^{ης} τάξης υπολογίζεται ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας θ για κάθε όροφο στις δύο κύριες διευθύνσεις του κτιρίου από την εξίσωση:

$$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h_{story}}$$
(5.6)

όπου:
P_{tot}, V_{tot} η συνολική αξονική και τέμνουσα δύναμη των κατακόρυφων στοιχείων του ορόφου υπό το σεισμικό συνδυασμό δράσεων και

d, η σχετική μετακίνηση των πλακών του, βλ. (3).

Εναλλακτικά, ο ελαστικός δείκτης σχετικής μεταθετότητας θ_e μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια με γραμμική ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού (linear buckling analysis) μέσω του συντελεστή ευστάθειας α_{cr}, από τη σχέση (5.7). Για την ανάλυση αυτή απαιτείται η χρήση κατάλληλου λογισμικού το οποίο μπορεί, υπό την επιβολή των κατακόρυφων φορτίων του σεισμικού συνδυασμού, να προσδιορίσει τις ιδιομορφές λυγισμού και τους αντίστοιχους συντελεστές α_{cr}. Έπειτα για τον υπολογισμό του θ_e επιλέγονται οι δύο πρώτες ιδιομορφές που μετακινούν το κτίριο κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις x, y.

$$\alpha_{\rm cr} = \frac{1}{\theta_{\rm e}} = \frac{F_{\rm cr}}{F_{\rm Ed}}$$
(5.7)

όπου:

F_{cr} το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού και

 F_{Ed} το φορτίο σχεδιασμού του φορέα για το σεισμικό συνδυασμό.

Η ανάλυση αυτή δε λαμβάνει υπόψη ότι οι ανελαστικές πλευρικές παραμορφώσεις είναι επαυξημένες με το συντελεστή συμπεριφοράς q και επομένως οι πραγματικές τιμές του θ για ανελαστική συμπεριφορά υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\theta = \frac{q}{\alpha_{cr}}$$
(5.8)

Οι επιρροές 2^{ης} τάξης μπορούν να αμεληθούν όταν ο θ είναι μικρότερος του 0,1. Σε περίπτωση που 0,1 < θ < 0,2 τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης μπορούν να ληφθούν υπόψη προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας τα αποτελέσματα των σεισμικών δράσεων με ένα συντελεστή ίσο με 1/(1-θ) στον οποίο εφαρμόζεται απλοποιητικά η μέγιστη τιμή του θ όλων των ορόφων για κάθε οριζόντια διεύθυνση. Όταν 0,2 < θ < 0,3 απαιτείται ακριβέστερη ανάλυση με θεωρία 2^{ης} τάξης. Ο δείκτης θ δεν επιτρέπεται σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει την τιμή 0,3.

(5) Έλεγχος πλάστιμων μελών

Οι πείροι σχεδιάζονται ώστε να μπορούν να παραλαμβάνουν τα φορτία από το δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό και να ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες:

α) Έλεγχος σε αξονικές δυνάμεις

Με τον έλεγχο αυτό εξασφαλίζεται ότι δεν απαιτείται απομείωση στις αντοχές των διατομών σε τέμνουσα και ροπή.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,pin,Rd}} \leq 0,15$$
(5.9)

όπου:

Ν_{Ed} η αξονική δύναμη σχεδιασμού και

N_{pl,pin,Rd} η πλαστική αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε αξονική στη θέση της απομειωμένης διατομής του πείρου.

β) Έλεγχος σε διάτμηση

Ο έλεγχος σε διάτμηση γίνεται με κριτήρια ικανοτικού σχεδιασμού, θεωρώντας ότι αναπτύσσονται ταυτόχρονα πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα του απομειωμένου τμήματος του πείρου.

$$\frac{V_{\text{CD,Ed}}}{V_{\text{pl,pin,Rd}}} \le 1$$
(5.10)

όπου:

 $V_{\text{CD,Ed}} = \frac{2 \cdot M_{\text{pl,pin,Rd}}}{\ell_{\text{pin}}}$ η ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού που οφείλεται στην εφαρμογή των πλαστικών

ροπών αντίστασης στα άκρα της απομειωμένης διατομής του πείρου Μ_{pl,pin,Rd} με αντίθετα πρόσημα και

 $V_{pl,pin,Rd}$ η πλαστική διατμητική αντοχή της διατομής στη θέση της απομειωμένης διατομής.

γ) Έλεγχος σε κάμψη

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι οι πείροι αναπτύσσουν την πλήρη ροπή αντίστασης παρά την παρουσία μεγάλων διατμητικών δυνάμεων. Τα καθοριστικά επομένως μεγέθη για τον προσδιορισμό της αντοχής των πείρων είναι η ροπή κάμψης και η γωνία στροφής χορδής θ. Για τον έλεγχο σε κάμψη πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\mathsf{M}_{\mathsf{Ed}}}{\mathsf{M}_{\mathsf{pl},\mathsf{pin},\mathsf{Rd}}} = \frac{1}{\Omega} \le 1,0 \tag{5.11}$$

όπου:

Μ_{Ed} η ροπή κάμψης σχεδιασμού,

Μ_{pl,pin,Rd} η αντοχή σχεδιασμού της απομειωμένης διατομής του πείρου σε κάμψη και

Ω η υπεραντοχή της απομειωμένης διατομής του πείρου.

Για να εξασφαλιστεί ότι η πλαστική ροπή αντίστασης Μ_{pl,pin,Rd} δε θα απομειωθεί λόγω δυσμενούς επιρροής της τέμνουσας η επιλογή του μήκους της απομείωσης και του βάθους αποκοπής πρέπει να είναι τέτοια ώστε στην εξίσωση (5.10) η ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού V_{CD,Ed} να είναι μικρότερη ή ίση με το 50% της πλαστικής διατμητικής αντοχής V_{pl,pin,Rd}. Στην περίπτωση αυτή για το μήκος απομείωσης πρέπει να

$$\ell_{\text{pin}} \ge \frac{4 \cdot M_{\text{pl,pin,Rd}}}{V_{\text{pl,pin,Rd}}} = \frac{4 \cdot W_{\text{pl,pin}}}{A_{v} / \sqrt{3}}$$
(5.12)

δ) Καθολική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

Για να επιτευχθεί ομοιογενής ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρέπει οι λόγοι των μέγιστων προς τις ελάχιστες τιμές υπεραντοχής Ω των πείρων σε όλη την κατασκευή να μη διαφέρουν περισσότερο από 25%:

$$\frac{\max\Omega}{\min\Omega} \leq 1,25$$

```
ε) Στροφές πείρου
```

Είναι προφανές ότι οι στροφές που αναπτύσσει ο πείρος κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι σημαντικές λόγω του μικρού μήκους του ℓ_{pin} σε σχέση με την αξονική απόσταση των υποστυλωμάτων του συστήματος L (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Πειραματικές στροφές πείρων

Για το λόγο αυτό απαιτείται ένας πρόσθετος έλεγχος που περιορίζει τις στροφές των πείρων θ_{pin} . Θεωρώντας ότι οι δοκοί-υποδοχείς είναι σχετικά άκαμπτες σε σχέση με τον πείρο πρέπει να ισχύει:

$$\theta_{pin} \le \theta_{pl,pin} = \frac{L}{\ell_{pin}} \theta_{gl}$$
(5.14)

όπου:

 θ_{gl} =1,38% τιμή που προσδιορίστηκε από τις δοκιμές στα πλαίσια στην ΟΚΑ , βλ. Παρ. 3.6.4.

(6) Μη πλάστιμα μέλη συστήματος

Τα στοιχεία που δεν απορροφούν ενέργεια, τα υποστυλώματα του συστήματος, οι δοκοί-υποδοχείς και οι μεταξύ τους συνδέσεις, σχεδιάζονται ικανοτικά για προσαυξημένες τιμές δυνάμεων και ροπών σε σχέση με αυτές που προέκυψαν από την ανάλυση για το δυσμενέστερο σεισμικό συνδυασμό για να εξασφαλιστεί ότι η φέρουσα ικανότητα τους θα υπερέχει των στοιχείων απορρόφησης ενέργειας.

α) Τα ικανοτικά μεγέθη των υποστυλωμάτων και των δοκών-υποδοχέων προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις:

(5.13)

$N_{\text{CD,Ed}} = N_{\text{Ed,G}} + 1, 1 \cdot \alpha \cdot \gamma_{\text{ov}} \cdot \Omega \cdot N_{\text{Ed,E}}$	(5.15)
$\boldsymbol{M}_{\text{CD,Ed}} = \boldsymbol{M}_{\text{Ed,G}} + 1, 1 \cdot \alpha \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\text{ov}} \cdot \Omega \cdot \boldsymbol{M}_{\text{Ed,E}}$	(5.16)
$V_{\text{CD,Ed}} = V_{\text{Ed,G}} + 1, 1 \cdot \alpha \cdot \gamma_{\text{ov}} \cdot \Omega \cdot V_{\text{Ed,E}}$	(5.17)

όπου:

N_{Ed,G} (M_{Ed,G}, V_{Ed,G}) η αξονική δύναμη (αντίστοιχα η ροπή κάμψης και η τέμνουσα) των υποστυλωμάτων και των δοκών-υποδοχέων λόγω μη σεισμικών δράσεων που συμπεριλαμβάνονται στο σεισμικό συνδυασμό,

N_{Ed,E} (M_{Ed,E}, V_{Ed,E}) η αξονική δύναμη (αντίστοιχα η ροπή κάμψης και η τέμνουσα) των υποστυλωμάτων και των δοκών-υποδοχέων λόγω του σεισμού σχεδιασμού,

$$\Omega = \min \Omega_i = \min \left\{ \frac{M_{pl,pin,Rd,i}}{M_{Ed,i}} \right\} o ελάχιστος συντελεστής υπεραντοχής όλων των πείρων του κτιρίου, βλ.$$

εξίσωση (5.11),

γ_{ον} = 1,25 ο συντελεστής υπεραντοχής του υλικού, αν είναι γνωστό το πραγματικό όριο διαρροής του πείρου ο συντελεστής υπεραντοχής δίνεται από την εξίσωση (3.2), και

α=1,5 ένας πρόσθετος συντελεστής υπεραντοχής που προέκυψε από τη μη γραμμική ανάλυση για να εξασφαλιστεί ότι η πλήρης διαρροή των πείρων θα προηγηθεί της διαρροής των υπόλοιπων μελών.

Ο συντελεστής επαύξησης του σεισμικού φορτίου που προκύπτει από τα παραπάνω δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει το συντελεστή συμπεριφοράς της ανάλυσης (q=3). Για ένα οικονομικό σχεδιασμό πρέπει να επιλέγονται οι διαστάσεις των στοιχείων απορρόφησης ενέργειας με τρόπο ώστε ο συντελεστής Ω να μην είναι πολύ μεγαλύτερος από 1 και το πραγματικό όριο διαρροής του χάλυβα να μην απέχει σημαντικά της ονομαστικής τιμής του.

β) Η αντοχή σε κάμψη της πλήρους διατομής του πείρου στο άκρο πρέπει να ελέγχεται στις θέσεις επαφής του με τις μετωπικές πλάκες των δοκών-υποδοχέων με την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{M_{CD,Ed}}{M_{pl,Rd}} \le 1,0$$
 (5.18)

όπου:

 $M_{CD,Ed} = \frac{\ell}{\ell_{pin}} M_{pl,pin,Rd}$ η ικανοτική ροπή κάμψης σχεδιασμού με θ το μήκος του πείρου μεταξύ των

μετωπικών πλάκών των δοκών-υποδοχέων και

 $M_{pl,Rd}$ η αντοχή σχεδιασμού της πλήρους διατομής του πείρου σε κάμψη.

γ) Οι κοχλιωτές συνδέσεις των δοκών-υποδοχέων με τα υποστυλώματα του συστήματος μορφώνονται ως συνδέσεις τριβής κατηγορίας Β ή C με κοχλίες 8.8 ή 10.9 και θα πρέπει κατά κανόνα να έχουν επαρκή υπεραντοχή, ώστε να μη διαρρέουν πριν από την πλαστικοποίηση όλων των πείρων.

Η ικανοτική ροπή κάμψης σχεδιασμού της σύνδεσης υπολογίζεται βάσει της απομειωμένης διατομής του πείρου ως εξής:

$$M_{CD,con,Ed} = 1, 1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \frac{\Omega_{min}}{\Omega_{i}} \cdot \frac{L_{net}}{\ell_{pin}} M_{pl,pin,Rd}$$
(5.19)

όπου:

ί ο αριθμός του ορόφου και

 L_{net} το συνολικό μήκος της συσκευής μεταξύ των πελμάτων των υποστυλωμάτων.

Η ικανοτική τέμνουσα σχεδιασμού της σύνδεσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{CD,con,Ed} = 1, 1 \cdot \gamma_{ov} \cdot \frac{\Omega_{min}}{\Omega_{i}} \cdot \frac{2 \cdot M_{pl,pin,Rd}}{\ell_{pin}}$$
(5.20)

5.2.3. Μεθοδολογία σχεδιασμού με στατική υπερωθητική ανάλυση (Pushover Analysis)

(1) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο στατικό μοντέλο που κατασκευάστηκε για την ελαστική ανάλυση με την εισαγωγή επιπλέον παραμέτρων ώστε να είναι δυνατή η αποτύπωση της συμπεριφοράς των στοιχείων του πέρα από την ελαστική περιοχή και η εκτίμηση των πλαστικών μηχανισμών αστοχίας και της κατανομής της βλάβης.

(2) Εφόσον τα πλάστιμα μέλη είναι οι πείροι του συστήματος, πιθανές θέσεις πλαστικών αρθρώσεων ορίζονται στα άκρα του απομειωμένου τμήματός τους. Οι ιδιότητες των πλαστικών αυτών αρθρώσεων είναι καμπτικού τύπου (M3 hinge) και οι παράμετροί τους προσδιορίστηκαν από τα βαθμονομημένα μοντέλα των δοκιμών.

(3) Το Σχήμα 5.8 συνοψίζει τις προτεινόμενες παραμέτρους των πλαστικών αρθρώσεων των πείρων. Οι μη γραμμικές ιδιότητές τους, που προέκυψαν από τις πειραματικές και αναλυτικές διερευνήσεις, είχαν υψηλά όρια διαρροής (B) και αστοχίας (C) καθώς λόγω κράτυνσης και φαινομένων 3ης τάξης (catenary action) οι πείροι επέδειξαν σημαντική υπεραντοχή στις δοκιμές. Για το σχεδιασμό κτιρίων με το σύστημα τα όρια αυτά υποβιβάστηκαν υπέρ της ασφαλείας ώστε οι πείροι να διαρρέουν όταν εξαντλείται η καμπτική αντοχή τους (θεωρία δοκού Vierendeel).

Σημείο	M/M _{pl,pin}	θ/θ _{pl,pin}	
Α	0	0	
В	1	0	
С	2	100	
D	0,5	100	
E	0,5 150		
Όρια σταθμών επιτελεστικότητας (θ/θ _{pl,pin})			
10	30		
LS	45		
СР		60	



Σχήμα 5.8: Προτεινόμενες μη γραμμικές ιδιότητες πλαστικής άρθρωσης πείρων

(4) Εισάγονται πιθανές πλαστικές αρθρώσεις και στα υπόλοιπα μη πλάστιμα μέλη του συστήματος για να εξεταστεί η μη γραμμική συμπεριφορά τους. Οι ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων των δοκώνυποδοχέων είναι καμπτικές (M3 hinge), ενώ στα υποστυλώματα λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής και αξονικής (P-M3 hinges) βάσει του FEMA 356 [39].

5.2.4. Μεθοδολογία σχεδιασμού με ανελαστική δυναμική ανάλυση (Nonlinear Dynamic Analysis)

(1) Η μη γραμμική δυναμική ανάλυση διεξάγεται προκειμένου να προσδιοριστεί η απόκριση του κτιρίου στη διάρκεια της επιβολής πραγματικών σεισμικών διεγέρσεων. Η ανάλυση παρέχει τη δυνατότητα περιορισμού των βλαβών μετά από ένα σεισμικό γεγονός και τη διαπίστωση των παραμενουσών παραμορφώσεων ώστε με κατάλληλο σχεδιασμό το κτίριο σχεδόν να επανέρχεται στην αρχική του θέση.

(2) Η προσομοίωση της μη γραμμικής απόκρισης των πείρων γίνεται ως εξής: στα άκρα του απομειωμένου τμήματος του πείρου εισάγονται δύο μη γραμμικά ελατήρια (multi-linear plastic link elements) μήκους περίπου ίσου με το 25% του μήκους του πείρου και το μεσαίο τμήμα προσομοιώνεται με στοιχείο δοκού (Σχήμα 5.9α). Το μη γραμμικό ελατήριο ορίζεται σύμφωνα με το κινηματικό μοντέλο υστέρησης (Multi-linear plastic kinematic model, Σχήμα 5.9β) μόνο για το στροφικό βαθμό ελευθερίας κατά τον κύριο άξονα ενώ οι υπόλοιποι βαθμοί ελευθερίας προσομοιώνονται γραμμικά. Το Σχήμα 5.9γ περιλαμβάνει τις ιδιότητες του μη γραμμικού ελατηρίου. Πρόκειται για μια καμπύλη ροπής - στροφής οι τιμές της οποίας προκύπτουν συναρτήσει της πλαστικής ροπής αντίστασης και της αρχικής δυσκαμψίας του απομειωμένου τμήματος του πείρου.





β) Κινηματικός νόμος υστέρησης

Σημείο	Στροφή	Ροπή
1	$-100\theta_{pl,pin}$	-2M _{pl,pin}
2	-20θ _{pl,pin}	-1M _{pl,pin}
З	0	0
4	$20\theta_{pl,pin}$	1M _{pl,pin}
5	$100\theta_{\rm pl,pip}$	2M _{pl pip}

γ) Ιδιότητες μη γραμμικού ελατηρίου

Σχήμα 5.9: Προτεινόμενη προσομοίωση μη γραμμικών ελατηρίων για μη γραμμική δυναμική ανάλυση

(3) Μέσω των μη γραμμικών αναλύσεων χρονοϊστορίας μπορεί επιπλέον να καθοριστεί ο βαθμός βλάβης της κατασκευής για κύκλους μεταβλητού εύρους με το κριτήριο αστοχίας των Palmgren – Miner (εξίσωση (3.32)). Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης των πείρων μέχρι την αστοχία Ν υπολογίζεται από το εύρος στροφών Δφ εφαρμόζοντας την προτεινόμενη καμπύλη κόπωσης (εξίσωση (3.30)). Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται με την υπόθεση ότι οι δοκοί υποδοχείς παραμένουν σχεδόν άκαμπτες, επομένως οι στροφές των πείρων είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές και δεν απαιτείται η εισαγωγή επιπρόσθετου συντελεστή ασφαλείας για τον προσδιορισμό του βαθμού βλάβης τους.

6. Διερεύνηση συμπεριφοράς πλαισίων κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2»

Οι προτεινόμενες τιμές των διαφόρων παραμέτρων και οι έλεγχοι του Οδηγού Σχεδιασμού επιβεβαιώθηκαν με πλήθος αναλύσεων σε πλαίσια πραγματικών κτιρίων με το σύστημα «FUSEIS1-2» με χρήση του λογισμικού SAP2000 [31]. Οι δισδιάστατοι αυτοί φορείς, απλοποίησαν την προσομοίωση, διευκόλυναν τις αλλαγές στο προσομοίωμα (φορτία, διατομές κ.α.) και μείωσαν σημαντικά το χρόνο ανάλυσης, δεν επηρέασαν όμως την ποιότητα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τους τρισδιάστατους και ήταν αντιπροσωπευτικοί της συμπεριφοράς του συστήματος στην εξεταζόμενη διεύθυνση. Αρχικά τα πλαίσια σχεδιάστηκαν μέσω ελαστικής ανάλυσης σε ΟΚΑ και ΟΚΛ και στη συνέχεια μέσω μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων διερευνήθηκε η μετελαστική συμπεριφορά τους και επαληθεύτηκε ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος q=3.

6.1. Περιγραφή και προσομοίωση εξεταζόμενων πλαισίων

6.1.1. Γεωμετρία και παραδοχές

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα πλαίσιο πενταώροφου σύμμικτου κτιρίου το οποίο στην εξεταζόμενη διεύθυνση αποτελείται από όμοια πλαίσια σε απόσταση 8m. Ο φορέας του εξεταζόμενου πλαισίου, η γεωμετρία του οποίου δίνεται στο Σχήμα 6.1, περιλαμβάνει ένα ημιάκαμπτο πλαίσιο ροπής (Partially fixed-PF), το οποίο χρησιμοποιείται για την παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων, και το σύστημα «FUSEIS1-2», το οποίο εφαρμόζεται στο ένα άκρο του για την παραλαβή των σεισμικών.

`		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη Η	EA260	_	Fuse 5	
											Fuse 5	
400											Fuse 5	
3											Fuse 5	
		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη Η	EA260	_	Fuse 4	
											Fuse 4	
3400											Fuse 4	
											Fuse 4	
		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη Η	EA260	_	Fuse 3	
	X 15			X 15			X 15			seis	Fuse 3	seis
400	200			200			200			αFu	Fuse 3	αFu
ŝ	SHS			SHS			SHS			л/ш	Fuse 3	п/шо
		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη Η	EA260	_	Fuse 2	Ĩ
											Fuse 2	
400											Fuse 2	
60				_ I							Fuse 2	
		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη	HEA260		σύμμικτη Η	EA260	_	Fuse 1	
				_ I							Fuse 1	850
400-	2			_ I							Fuse 1	850
ĺ	5			I							Fuse 1	850
		ļ					ļ			J	Fuse 1	850
		2		- 4	\sum		4	\sum		\square	Δ Z	\sum
	,	6	000		, (8000		600	0		, 2000	
	(A)		В	\mathbf{D}		Ċ	5		Ċ		Ď

Σχήμα 6.1: Γεωμετρία και διατομές τυπικού πλαισίου

Το ημιάκαμπτο πλαίσιο έχει τρία φατνώματα των 6m και συνδέεται με τα υποστυλώματα του συστήματος με απλές συνδέσεις τέμνουσας όπως αναφέρεται στην Παρ. 5.2.2, (1). Με βάση την παραπάνω διάταξη διερευνήθηκαν τρεις περιπτώσεις για διαφορετικές εντάσεις σεισμού που αντιστοιχούν στις τρεις σεισμικές ζώνες του ελληνικού χώρου Ι,ΙΙ και ΙΙΙ με επιτάχυνση εδάφους a_g=0,16g, 0,24g και 0,36g.

Τα μέλη του κυρίως πλαισίου έχουν ίδιες διατομές και στις τρείς περιπτώσεις σεισμικής φόρτισης για να είναι εφικτή η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος ως κύριο σύστημα πλευρικής ευστάθειας, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων από αλλαγές στη δυσκαμψία του ημιάκαμπτου πλαισίου. Τα υποστυλώματά του έχουν κοίλη ορθογωνική διατομή SHS200x15 και οι δοκοί του είναι σύμμικτες και αποτελούνται από τη σιδηροδοκό HEA260 και το συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας σκυροδέματος πάχους 15cm. Οι εδράσεις όλων των υποστυλωμάτων είναι αρθρωτές.

Το σύστημα περιλαμβάνει ένα ζεύγος κοίλων ισχυρών υποστυλωμάτων ορθογωνικής διατομής σε κεντροβαρική απόσταση 2m που συνδέονται άκαμπτα με πέντε συσκευές «FUSEIS1-2» ανά όροφο. Μια επιπλέον συσκευή τοποθετείται στη στάθμη της θεμελίωσης (Παρ. 5.2.2, (1)). Οι συσκευές αποτελούνται από πείρους κυκλικής διατομής και δοκούς-υποδοχείς κοίλης διατομής κατ' αντιστοιχία με τις δοκιμές. Το μήκος του πείρου μεταξύ των δοκών-υποδοχέων είναι 200mm.

Ο Πίνακας 6.1 και ο Πίνακας 6.2 συνοψίζουν τις διατομές των μελών του συστήματος που επιλέχθηκαν. Δεδομένου ότι το σύστημα είναι το κύριο σύστημα παραλαβής των σεισμικών φορτίων όσο μειώνεται η ένταση του σεισμού μειώνονται και οι διατομές των υποστυλωμάτων του συστήματος, των δοκώνυποδοχέων και των πείρων. Παρατηρείται ότι στο πλαίσιο με a_g =0,16g οι διατομές των υποστυλωμάτων του συστήματος και των δοκών-υποδοχέων είναι ίδιες σε όλους τους ορόφους και οι διάμετροι των πείρων αυξάνονται από τους ανώτερους προς τους κατώτερους ορόφους ακολουθώντας την αύξηση της τέμνουσας ορόφου από την οροφή στη βάση του κτιρίου. Στα πλαίσια με a_g =0,24g και 0,36g, αυξάνονται οι απαιτήσεις σε δυσκαμψία και χρησιμοποιούνται ισχυρότερες διατομές υποστυλωμάτων και δοκών-υποδοχέων στους δύο κατώτερους ορόφους ενώ οι διατομές των πείρων μεταβάλλονται ανά όροφο όμοια με το πλαίσιο με a_g =0,16g.

Fuse No	0,16g	0,24g	0,36g
1	70	80	95
2	65	75	90
3	60	70	85
4	55	65	80
5	50	60	70

Πίνακας 6.2: Διατομές υποστυλωμάτων συστήματος κα	αι δοκών-υποδοχέων εξεταζόμενων πλαισίων
---	--

a _g	Όροφοι	Διατομές υποστυλωμάτων συστήματος	Διατομές δοκών- υποδοχέων
0,16g	1-5	RHS 300x200x20	SHS 240x10
0.24a	1-2	RHS 300x200x30	SHS 240x20
0,24g	3-5	RHS 300x200x20	SHS 240x10
0.26 a	1-2	RHS 400x300x35	RHS 260x220x25
0,36g	3-5	RHS 400x300x20	SHS 240x20

Ο Πίνακας 6.3 περιλαμβάνει τα δεδομένα για τα υλικά της ανάλυσης. Οι πείροι ως πλάστιμα στοιχεία επιλέγεται να έχουν χαμηλότερης αντοχής χάλυβα από όλα τα υπόλοιπα μέλη του εξεταζόμενου πλαισίου.

Πίνακας 6.3: Δεδομένα υ	υλικών εξεταζόμενων	πλαισίων
-------------------------	---------------------	----------

Σκυρόδεμα	C25/30, γ=25KN/m ³ , E=31GPa	
Χάλυβας οπλισμού πλακών	B500C	
Δομικός χάλυβας	S235: Μέλη απορρόφησης ενέργειας (πείροι)	
	S355: Λοιπά μέλη	

Δεδομένου ότι το σύμμικτο κτίριο περιλαμβάνει όμοια πλαίσια σε αξονική απόσταση 8m, η δυσκαμψία του κατά την εγκάρσια διεύθυνση εξασφαλίζεται από τη συνεισφορά όλων των πλαισίων εξίσου. Επομένως η ζώνη επιρροής των κατακόρυφων φορτίων είναι 8m, όση και η απόσταση των πλαισίων. Αντίστοιχα, η σεισμική μάζα προσδιορίζεται από το ίδιο βάρος του πλαισίου και τα φορτία που εφαρμόζονται στην παραπάνω ζώνη επιρροής. Ο Πίνακας 6.4 περιλαμβάνει τις παραδοχές για τα κατακόρυφα και τα σεισμικά φορτία.

Πίνακας 6.4: Παραδοχές φορτίσεων

Κατακόρυφα φορτία				
	Υπολογίζονται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των			
ιοια ραρή κατασκευής	διατομών			
Λοιπά μόνιμα (επικαλύψεις, δάπεδα, κλπ)	2,00kN/m² (ανάγεται σε γραμμικό φορτίο δοκών 16,00kN/m)			
Ωφέλιμα	2,00kN/m ² (ανάγεται σε γραμμικό φορτίο δοκών 16,00kN/m)			
Σ	εισμικά φορτία			
Τύπος φάσματος	1			
Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Ι	Επιτάχυνση εδάφους 0,16g - 0,24g - 0,36g			
Κατηγορία σπουδαιότητας ΙΙ	γι = 1,0 (Συνήθη κτίρια)			
Έδαφος	B ($T_B = 0,15 \text{ s}, T_C = 0,50 \text{ s}$)			
Προτεινόμενος συντελεστής συμπεριφοράς q	3			
Απόσβεση	5%			
Συντελεστές φορτίων λειτουργίας για το	φ=1,00 (οροφή)			
σεισμικό συνδυασμό	φ=0,80 (λοιποί όροφοι με συσχετισμένες χρήσεις)			
Συντελεστής σεισμικού συνδυασμού για				
μακροχρόνιες («οιονεί μόνιμες») μεταβλητές	ψ ₂ =0,30			
δράσεις				

6.1.2. Προσομοίωση

Η προσομοίωση του συστήματος ακολουθεί την προτεινόμενη μεθοδολογία της Παρ. 5.2.2, (1). Όλα τα μέλη του φορέα προσομοιώνονται με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων που διέρχονται από το κέντρο βάρους τους. Το άνοιγμα της δοκού που λαμβάνεται υπόψη με την προσομοίωση αυτή είναι μεγαλύτερο από το καθαρό άνοιγμα (εσωτερική απόσταση πελμάτων υποστυλωμάτων). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το καθαρό μήκος και η πραγματική δυσκαμψία των δοκών παρεμβάλλονται άκαμπτα στοιχεία μεταξύ του κέντρου βάρους του υποστυλώματος και του πέλματός του.

Οι δοκοί του ημιάκαμπτου πλαισίου χωρίζονται σε τρία τμήματα. Στα ακραία τμήματα, όπου αναπτύσσονται αρνητικές ροπές, η συμμετοχή του σκυροδέματος είναι αμελητέα λόγω ρηγματωμένης ανάλυσης (EN1994-1-1 [46]) και για μήκος 0,15L από τη στήριξη λαμβάνεται υπόψη μόνο η μεταλλική διατομή. Στο μεσαίο τμήμα όπου η δοκός έχει σύμμικτη λειτουργία η διατομή αποτελείται από τη

μεταλλική διατομή και το συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας σκυροδέματος b_{eff}, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$b_{eff} = b_{e1} + b_{e2} = \frac{0, 7 \cdot L}{4} \le b_1 + b_2$$
(6.1)

όπου:

 b_{e1} , b_{e2} τα συνεργαζόμενα πλάτη του πέλματος της πλακοδοκού εκατέρωθεν του κορμού και

 b_1 , b_2 τα αντίστοιχα γεωμετρικά.

Η ημιάκαμπτη σύνδεση των δοκών στα υποστυλώματα προσομοιώνεται με στροφικά γραμμικά ελατήρια οι σταθερές των οποίων υπολογίζονται σύμφωνα με τους EN1994-1-1 [46] και EN1993-1-8 [47]. Το αναλυτικό προσομοίωμα του πλαισίου δίνεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Προσομοίωμα πλαισίου στο SAP2000

6.2. Φασματική ιδιομορφική ανάλυση

Ο Πίνακας 6.5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της φασματικής ιδιομορφικής ανάλυσης, ποσοστά ταλαντούμενης μάζας και ιδιοπεριόδους, για τις τρεις σεισμικές ζώνες. Σε όλες τις περιπτώσεις οι δύο πρώτες σημαντικές ιδιομορφές συγκεντρώνουν περισσότερο από το 90% της συνολικής ταλαντούμενης μάζας και είναι μεταφορικές (Σχήμα 6.3).

a _g	Αριθμός ιδιομορφής	Ιδιοπερίοδος (sec)	Ποσοστό ταλαντούμενης μάζας (%)	Σύνολο (%)
0.16a	1	1,445	79,11	05.26
0,10g	2	0,432	16,15	95,20
0.24a	1	1,253	75,35	02 71
0,24g	2	0,377	18,36	93,71
0.26 a	1	0,990	74,80	02.60
0,36g	2	0,295	18,80	93,00



Σχήμα 6.3: Ιδιοδιάνυσμα 1^{ης} ιδιομορφής

Σύμφωνα με τον EN1998-1-1 [30] όταν $T_C \leq T \leq T_D$ πρέπει να ελέγχεται το κατώτατο όριο για το φάσμα σχεδιασμού με την εξίσωση:

$$S_{d}(T) = \frac{V_{tot}}{P_{tot}} \ge \beta \cdot a_{g}$$
(6.2)

όπου:

V_{tot} η τέμνουσα βάσης που προκύπτει από την φασματική ανάλυση,

P_{tot} η συνολική αξονική δύναμη που προκύπτει από την ενεργή μάζα του πλαισίου για το σεισμικό συνδυασμό και

β=0,2 ο συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού.

Ο έλεγχος επαληθεύεται και στις τρείς περιπτώσεις και επομένως δεν απαιτείται προσαύξηση της τέμνουσας βάσης (Πίνακας 6.6).

Πίνακας 6.6: Έλεγχος κατώτατου ορίου για το φάσμα σχεδιασμού

a _g	V _{tot} (kN)	P _{tot} (kN)	V _{tot} /P _{tot}	β.a _g
0,16g	237	4594	0,052	0,032
0,24g	396	4614	0,086	0,048
0,36g	716	4666	0,153	0,072

6.3. Έλεγχοι φορέα για τους βασικούς (θεμελιώδεις) συνδυασμούς

6.3.1. Έλεγχοι στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)

Ο έλεγχος στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) είναι κρίσιμος για τα μέλη του ημιάκαμπτου πλαισίου καθώς αυτό παραλαμβάνει τα κατακόρυφα φορτία. Τα υποστυλώματα ελέγχονται για τη δυσμενέστερη αξονική δύναμη N_{Ed}, οι χαλύβδινες δοκοί στα άκρα για τη δυσμενέστερη τέμνουσα V_{Ed} και οι σύμμικτες δοκοί στο μεσαίο τμήμα για τη δυσμενέστερη ροπή M_{Ed} του ανοίγματος. Στα παρακάτω Σχήματα (Σχήμα 6.4 - Σχήμα 6.6) δίνονται ενδεικτικά τα διαγράμματα των δυσμενέστερων εντατικών μεγεθών για το πλαίσιο με a_g=0,36g.



Σχήμα 6.4: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων των υποστυλωμάτων (N_{Ed}) για το πλαίσιο με a_g =0,36g



Σχήμα 6.5: Διαγράμματα τεμνουσών δυνάμεων των δοκών (V_{ed}) για το πλαίσιο με ag=0,36g



Σχήμα 6.6: Διαγράμματα ροπών των δοκών (M_{Ed}) για το πλαίσιο με a_g =0,36g

Ο Πίνακας 6.7 συνοψίζει τους συντελεστές εκμετάλλευσης των μελών σε ροπή, τέμνουσα και αξονική οι οποίοι είναι μικρότεροι του 1 και για τις τρεις περιπτώσεις. Οι πείροι και τα υποστυλώματα του συστήματος «FUSEIS1-2» δεν εμφανίζουν σημαντικά εντατικά μεγέθη σε ΟΚΑ και ο έλεγχός τους δε θεωρείται κρίσιμος.

	Υποστυλώματα	Χαλύβδινες δοκοί	Σύμμικτες δοκοί
a _g	≤1	<u></u> ≤1	$\frac{M_{Ed}}{1} \leq 1$
	χ ·Ν _{pl,Rd}	V _{pl,Rd}	M _{pl,Rd}
0,16g	0,827	0,746	0,514
0,24g	0,826	0,745	0,515
0,36g	0,822	0,738	0,509

Πίνακας 6.7: Συντελεστές εκμετάλλευσης ημιάκαμπτου πλαισίου σε ΟΚΑ

6.3.2. Έλεγχοι στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Στην Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας ελέγχονται τα βέλη κάμψης των δοκών του ημιάκαμπτου πλαισίου υπό την επιβολή των μόνιμων και των ωφέλιμων φορτίων. Θεωρείται ότι στη φάση σκυροδέτησης εξασφαλίζεται προσωρινή στήριξη της σιδηροδοκού και επομένως ο έλεγχος γίνεται στη φάση που η δοκός λειτουργεί ως σύμμικτη. Οι μέγιστες τιμές των βελών για τα τρία φατνώματα δίνονται στον παρακάτω Πίνακα και είναι αρκετά χαμηλότερες από την οριακή τιμή L/250=6000/250=24mm του EN1993-1-1 [33].

ag	A-B	В-Г	Γ-Δ	
0,16g	9,27	8,50	9,30	
0,24g	9,30	8,50	9,25	
0,36g	9,22	8,55	8,93	
Οριακή τιμή L/250=24mm				

Πίνακας 6.8: Βέλη δοκών ημιάκαμπτου πλαισίου (mm)

6.4. Έλεγχοι σε σεισμικά φορτία

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην Παρ. 5.2.2 η επάρκεια των μελών του φορέα και η συνολική του ευστάθειά του σε σεισμικά φορτία εξασφαλίζονται όταν πληρούνται οι έλεγχοι που ακολουθούν.

6.4.1. Γωνιακή παραμόρφωση ορόφου

Ο έλεγχος της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου γίνεται βάσει της εξίσωσης (6.3) θεωρώντας ότι τα εξεταζόμενα πλαίσια ανήκουν σε κτίριο με πλάστιμα μη φέροντα στοιχεία. Αρχικά, υπολογίζεται η σχετική μετακίνηση των ορόφων d_r από τις ελαστικές οριζόντιες μετακινήσεις d_e του πλαισίου για το σεισμό σχεδιασμού και το συντελεστή συμπεριφοράς q.

$$\frac{\mathsf{d}_{\mathsf{r}} \cdot \mathsf{v}}{\mathsf{h}} \le 0,0075 \tag{6.3}$$

όπου:

ν=0,50 ο μειωτικός συντελεστής λόγω της κατηγορίας σπουδαιότητας του κτιρίου (συνήθη κτίρια) και h=3,40m το ύψος του προς εξέταση ορόφου.

Ο Πίνακας 6.9 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των αναλύσεων όπου φαίνεται ότι ο έλεγχος επαληθεύεται σε όλους τους ορόφους και στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις σεισμικής επιτάχυνσης, με τιμές αρκετά μικρότερες από την οριακή 0,0075. Η επιλογή των διατομών των υποστυλωμάτων και των δοκών-υποδοχέων του συστήματος έγινε με κριτήριο τον παραπάνω έλεγχο.

Πίνακας 6.9: Έλεγχος γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου

		0,16g			
Όροφος	1	2	3	4	5
d _{e,άνω} (mm)	6,90	14,90	23,30	31,60	39,10
d _{e,κάτω} (mm)	0,00	6,90	14,90	23,30	31,60
d _r = (d _{e,άνω} - d _{e, κάτω})·q (mm)	20,70	24,00	25,20	24,90	22,50
d _r ·v/h≤0,0075	0,0030	0,0035	0,0037	0,0037	0,0033
		0,24g			
Όροφος	1	2	3	4	5
d _{e,άνω} (mm)	7,30	16,50	28,30	40,40	51,20
d _{e,κάτω} (mm)	0,00	7,30	16,50	28,30	40,40
d _r = (d _{e,άνω} - d _{e, κάτω})·q (mm)	21,90	27,60	35,40	36,30	32,40
d _r ·v/h≤0,0075	0,0032	0,0041	0,0052	0,0053	0,0048
		0,36g			
Όροφος	1	2	3	4	5
d _{e,άνω} (mm)	8,20	19,10	32,80	47,50	61,00
d _{e,κάτω} (mm)	0,00	8,20	19,10	32,80	47,50
d _r = (d _{e,άνω} - d _{e, κάτω})·q (mm)	24,60	32,70	41,10	44,10	40,50
d _r ·v/h≤0,0075	0,0036	0,0048	0,0060	0,0065	0,0060

6.4.2. Επιρροές 2^{ης} τάξης

Για τον έλεγχο των επιρροών 2^{ης} τάξης διεξάγεται ιδιομορφική ανάλυση λυγισμού για το σεισμικό συνδυασμό 1,0·G+0,3·φ·Q από την οποία προκύπτουν οι κρίσιμες ιδιομορφές και κατ' επέκταση οι κρίσιμοι συντελεστές λυγισμού. Η κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού που μετακινεί το πλαίσιο κατά την οριζόντια διεύθυνση του πλαισίου με a_g=0,36g φαίνεται στο Σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7: 1^η πλευρική ιδιομορφή λυγισμού στο SAP2000

Από τους κρίσιμους συντελεστές λυγισμού υπολογίζονται στη συνέχεια οι δείκτες σχετικής μεταθετότητας ορόφου θ και ελέγχεται αν πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιρροές 2^{ης} τάξης. Ο Πίνακας 6.10 συνοψίζει τους κρίσιμους συντελεστές λυγισμού των τριών πλαισίων και τους αντίστοιχους δείκτες θ. Παρατηρείται ότι στα πλαίσια με a_g =0,24g και 0,36g ο δείκτης θ < 0,1 επομένως οι επιρροές 2^{ης} τάξης μπορούν να αμεληθούν. Στο πλαίσιο με a_g =0,16g, αντίθετα, 0,1 < θ < 0,2 και απαιτείται μια μικρή επαύξηση των σεισμικών δράσεων με το συντελεστή 1/(1-θ).

a _g	Κρίσιμος συντελεστής λυγισμού	α _{cr}	θ	Συντελεστής επαύξησης σεισμικού φορτίου, β
0,16g	23,66	7,89	0,127	1,15
0,24g	30,96	10,32	0,097	1,00
0,36g	47,30	15,77	0,063	1,00

6.4.3. Πλάστιμα μέλη - Πείροι

Οι πείροι του συστήματος ελέγχονται για τα εντατικά μεγέθη του σεισμικού συνδυασμού 1,0·G+0,3· ϕ ·Q+E_x. Στο πλαίσιο με a_g=0,16g λαμβάνεται υπόψη και ο συντελεστής επαύξησης του σεισμικού φορτίου β που προέκυψε από τον έλεγχο επιρροών 2^{ης} τάξης της προηγούμενης παραγράφου. Το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος για να εξασφαλιστεί η ανάπτυξη μηχανισμού κάμψης στους πείρους όλων των πλαισίων προκύπτει από την εξίσωση (5.12) και κυμαίνεται μεταξύ 81mm - 154mm. Το μήκος του απομειωμένου τμήματος του πείρου ℓ_{pin} επιλέχθηκε σε όλους τους ορόφους ίσο με 200mm, μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο. Οι παρακάτω πίνακες (Πίνακας 6.11 - Πίνακας

6.13) συνοψίζουν τα αποτελέσματα όλων των ελέγχων των πείρων όπου φαίνεται ότι δεν απαιτείται απομείωση στην αντοχή των διατομών σε κάμψη λόγω αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων. Ο Πίνακας 6.13 περιλαμβάνει εκτός από τον έλεγχο των διατομών σε κάμψη τις τιμές των συντελεστών υπεραντοχής Ω των πείρων και τον έλεγχο της καθολικής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των πλαισίων, η οποία εξασφαλίζεται όταν οι τιμές του Ω των πείρων όλων των ορόφων δε διαφέρουν περισσότερο από το 25% της ελάχιστης τιμής του.

0,16g				
Όροφος	N _{Ed} (kN)	N _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,pin,Rd}} \leq 0,15$	
1	38,40	898,41	0,04	
2	33,10	774,80	0,04	
3	29,90	660,12	0,05	
4	29,85	554,60	0,05	
5	51,30	458,25	0,11	
		0,24g		
Όροφος	N _{Ed} (kN)	N _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,pin,Rd}} \leq 0,15$	
1	46,80	1173,59	0,04	
2	53,40	1031,42	0,05	
3	44,80	898,41	0,05	
4	42,20	774,80	0,05	
5	71,30	660,12	0,11	
		0,36g		
Όροφος	N _{Ed} (kN)	N _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,pin,Rd}} \le 0,15$	
1	59,40	1655,11	0,04	
2	76,00	1485,44	0,05	
3	74,40	1324,93	0,06	
4	75,00	1173,59	0,06	
5	123,00	898,41	0,14	

Πίνακας 6.11: Έλεγχος σε αξονικές δυνάμεις

Πίνακας 6.12: Έλεγχος σε διάτμηση

	0,16g					
Όροφος	V _{Ed} (kN)	V _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,pin,Rd}} \le 0,50$			
1	133,03	468,36	0,28			
2	106,53	404,32	0,26			
3	83,78	344,08	0,24			
4	64,53	288,99	0,22			
5	48,48	238,79	0,20			
		0,24g				
Όροφος	V _{Ed} (kN)	V _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,pin,Rd}} \leq 0,50$			
1	198,60	611,90	0,32			
2	163,63	537,69	0,30			
3	133,03	468,36	0,28			
4	106,53	404,32	0,26			
5	83,78	344,08	0,24			

0,36g						
Όροφος	V _{Ed} (kN)	V _{pl,pin,Rd} (kN)	$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,pin,Rd}} \le 0,50$			
1	332,53	862,91	0,39			
2	282,71	774,17	0,37			
3	238,29	690,60	0,35			
4	198,60	611,90	0,32			
5	133,03	468,36	0,28			

Πίνακας 6.13: Έλεγχος σε κάμψη

	0,16g					
Όροφος	M _{Ed} (kN.m)	M _{pl,pin,Rd} (kN.m)	$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,pin,Rd}} \leq 1,00$	$\Omega = \frac{M_{pl,pin,Rd}}{M_{Ed}}$	$\frac{\max\Omega}{\min\Omega} \leq 1,25$	
1	10,80	13,30	0,81	1,23		
2	9,30	10,65	0,87	1,15		
3	7,50	8,38	0,90	1,12	1,18	
4	6,20	6,45	0,96	1,04		
5	4,55	4,85	0,94	1,07		
			0,24g			
Όροφος	M _{Ed} (kN.m)	M _{pl,pin,Rd} (kN.m)	$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,pin,Rd}} \leq 1,00$	$\Omega = \frac{M_{pl,pin,Rd}}{M_{Ed}}$	$\frac{\max\Omega}{\min\Omega} \le 1,25$	
1	16,00	19,86	0,81	1,24		
2	14,05	16,36	0,86	1,16		
3	10,30	13,30	0,77	1,29	1,11	
4	8,90	10,65	0,84	1,20		
5	6,50	8,38	0,78	1,29		
			0,36g			
Όροφος	M _{Ed} (kN.m)	M _{pl,pin,Rd} (kN.m)	$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,pin,Rd}} \leq 1,00$	$\Omega = \frac{M_{pl,pin,Rd}}{M_{Ed}}$	$\frac{\max\Omega}{\min\Omega} \le 1,25$	
1	28,70	33,25	0,86	1,16		
2	26,30	28,27	0,93	1,07		
3	20,40	23,83	0,86	1,17	1,09	
4	17,20	19,86	0,87	1,15		
5	11,40	13,30	0,86	1,17		

Ένας ακόμα έλεγχος που απαιτείται για τη διαστασιολόγηση των πείρων αφορά στη στροφή τους. Με βάση τις γεωμετρικές συνθήκες των εξεταζόμενων περιπτώσεων και λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή επαύξησης β και το συντελεστή συμπεριφοράς για το όριο στροφών της χορδής του πείρου πρέπει να ισχύει:

$$\theta_{pin} \le \theta_{pl,pin} = \frac{2000}{200} \cdot 1,38\% = 13,8\% (138 \text{mrad})$$
(6.4)

όπου:

 $θ_{pl, pin}$ η πλαστική στροφή που υπολογίζεται από τη εξίσωση (5.14) για $θ_{gl}$ =1,38%.

Ο Πίνακας 6.14 συνοψίζει τις τιμές των θ_{pin} όλων των πλαισίων οι οποίες είναι χαμηλότερες σε σχέση με την επιτρεπόμενη τιμή.

Όροφος	0,16g	0,24g	0,36g	
1	70	64	72	
2	81	81	96	
3	85	104	121	
4	84	107	130	
5	76	95	119	
Οριακή τιμή 138 mrad				

Πίνακας	6.14: <i>'</i> E	λενχος	των στ	τροφών	των ι	πείρων	θ _{nin} (mrad)
	0.1 5					tetp w t	∼pin v	

6.4.4. Υποστυλώματα, δοκοί-υποδοχείς και πλήρης διατομή πείρων

Τα υποστυλώματα και οι δοκοί-υποδοχείς του συστήματος ελέγχονται με υπεραντοχή σε σχέση με τους πείρους για τα ικανοτικά μεγέθη που προκύπτουν από τις εξισώσεις (5.15) - (5.17) λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη τιμή του Ω όλων των πείρων του πλαισίου (Πίνακας 6.13), το συντελεστή υπεραντοχής του υλικού γ_{ov}=1,25, τον πρόσθετο συντελεστή υπεραντοχής α=1,5 και το συντελεστή επαύξησης β που προέκυψε από τον έλεγχο επιρροών 2^{ης} τάξης. Ο Πίνακας 6.15 περιλαμβάνει τους λόγους εκμετάλλευσης των υποστυλωμάτων και των δοκών-υποδοχέων του συστήματος που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1993-1-1 [33] και για τα τρία πλαίσια a_g=0,16g, 0,24g και 0,36g και είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότεροι του 1.

Πίνακας 6.15: Λόγοι εκμετάλλευσης υποστυλωμάτων και δοκών-υποδοχέων συστήματος

a _g	Υποστυλώματα «FUSEIS1-2»		Δοκοί-υποδοχείς		
0,16g	RHS300X200X20	0,834	RHS 240x240x10	0,758	
0.24a	RHS300X200X20	0,720	RHS 240x240x10	0,788	
0,24g	RHS300X200X30	0,939	RHS 240x240x20	0,690	
0.26 a	RHS400X300X20	0,776	RHS 240x240x20	0,758	
0,36g	RHS400X300X35	0,903	RHS 260x220x25	0,854	

Η ελάχιστη απαίτηση αντοχής σε κάμψη της πλήρους διατομής του πείρου στις θέσεις επαφής του με τις μετωπικές πλάκες των δοκών-υποδοχέων M_{CD,Ed} προκύπτει από τη ροπή αντοχής της απομειωμένης διατομής M_{pl,pin,Rd} από την εξίσωση (5.18). Οι υπολογιζόμενες αντοχές είναι μεγαλύτερες των αντίστοιχων τιμών σχεδιασμού σε όλους τους ορόφους των πλαισίων, Πίνακας 6.16.

Πίνακας 6.16: Έλεγχος πλήρους διατομής πείρου στα άκρα

0,16g					
Όροφος	M _{CD+Ed} (kNm)	M _{pl,Rd} (kNm)	$\frac{M_{CD,Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,00$		
1	15,96	16,52	0,97		
2	12,78	16,52	0,77		
3	10,05	16,52	0,61		
4	7,74	16,52	0,47		
5	5,82	16,52	0,35		
		0,24g			
Όροφος	M _{CD+Ed} (kNm)	M _{pl,Rd} (kNm)	$\frac{M_{CD,Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq \! 1,00$		
1	23,83	24,05	0,99		
2	19,64	24,05	0,82		
3	15,96	24,05	0,66		
4	12,78	24,05	0,53		
5	10,05	24,05	0,42		

0,36g					
Όροφος	M _{CD/Ed} (kNm)	M _{pl,Rd} (kNm)	$\frac{M_{CD,Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,00$		
1	49,88	52,13	0,96		
2	42,41	52,13	0,81		
3	35,74	52,13	0,69		
4	29,79	52,13	0,57		
5	19,96	52,13	0,38		

6.4.5. Δυνάμεις σχεδιασμού συνδέσεων στα άκρα των δοκών-υποδοχέων «FUSEIS1-2»

Τα κομβοελάσματα, οι κοχλίες και οι συγκολλήσεις των συνδέσεων των δοκών-υποδοχέων στα υποστυλώματα του συστήματος σχεδιάζονται ικανοτικά για τις ροπές και τις τέμνουσες στα άκρα τους. Ο Πίνακας 6.17 περιλαμβάνει τις δυνάμεις σχεδιασμού που υπολογίζονται από τις εξισώσεις (5.19) - (5.20) για τα τρία εξεταζόμενα πλαίσια.

0,16g		0,24g		0,36g		
Όροφος	M _{CD,con,Ed} (kNm)	V _{CD,con,Ed} (kN)	M _{CD,con,Ed} (kNm)	V _{CD,con,Ed} (kN)	M _{CD,con,Ed} (kNm)	V _{CD,con,Ed} (kN)
1	123,65	154,56	204,97	256,22	339,35	424,19
2	106,48	133,10	179,99	224,99	310,98	388,72
3	85,87	107,33	131,95	164,94	241,21	301,52
4	70,98	88,73	114,02	142,52	203,38	254,22
5	52,09	65,12	83,27	104,09	134,80	168,49

Πίνακας 6.17: Δυνάμεις σχεδιασμού συνδέσεων δοκών-υποδοχέων

6.5. Μη γραμμικές στατικές αναλύσεις (pushover)

6.5.1. Αποτίμηση της συμπεριφοράς των πλαισίων

Τα προσομοιώματα των εξεταζόμενων πλαισίων που αναπτύχθηκαν για τη διεξαγωγή της ελαστικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται και για τη διερεύνηση της συνολικής ανελαστικής απόκρισης της κατασκευής και τον προσδιορισμό των αναμενόμενων πλαστικών μηχανισμών αστοχίας και της κατανομής της βλάβης μέσω μη γραμμικών στατικών αναλύσεων (pushover).

Η ανάλυση πραγματοποιείται υπό την δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων μέχρι τη μετακίνηση-στόχο, η οποία εφαρμόζεται στο επίπεδο του διαφράγματος του ανώτερου ορόφου του φορέα και αντιστοιχεί σε μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση πλαισίου 5%, στάθμη επιτελεστικότητας Αποφυγή Κατάρρευσης (CPLS) για πλαίσιο ροπής κατά FEMA 356 [39]). Ο πλαστικός μηχανισμός προσδιορίζεται για δύο καθ' ύψος κατανομές των οριζόντιων φορτίων: μια «ομοιόμορφη» και μια «ιδιομορφική» κατανομή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κατανομή της πλευρικής φόρτισης ανάλογη της πρώτης ιδιομορφής του φορέα. Η ανάλυση λαμβάνει επίσης υπόψη τα φαινόμενα P-Delta, δηλαδή τη γεωμετρική μη γραμμικότητα.

Στα προσομοιώματα εισάγονται πιθανές πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των απομειωμένων τμημάτων των πείρων, όπως δίνονται στη μεθοδολογία σχεδιασμού της Παρ. 5.2.3 (Σχήμα 5.8). Για τα εξεταζόμενα πλαίσια τα όρια των στροφών των πείρων κυμαίνονται μεταξύ 76 και 152 mrad για τους λεπτούς πείρους με διάμετρο Φ50 και μεταξύ 40 και 80 mrad για τους μεγαλύτερους πείρους με

διάμετρο Φ95, ανάλογα με τη στάθμη επιτελεστικότητας (ΙΟ, LS, CP). Οι παραπάνω τιμές είναι αρκετά μικρότερες από τα 225 mrad που έφτασαν οι πείροι στις δοκιμές.

Επιπλέον, εισάγονται πιθανές πλαστικές αρθρώσεις και στα υπόλοιπα μη πλάστιμα μέλη του φορέα για να εξεταστεί η μη γραμμική συμπεριφορά τους. Οι μη γραμμικές ιδιότητες των στροφικών ελατηρίων που προσομοιώνουν τους ημιάκαμπτους κόμβους κύριας δοκού – υποστυλώματος είναι καμπτικές (M3 hinge) και υπολογίζονται για θετικές και αρνητικές ροπές. Οι ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων των δοκών-υποδοχέων είναι επίσης καμπτικές (M3 hinge), ενώ στα υποστυλώματα λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση ροπής και αξονικής (P-M3 hinges) βάσει του FEMA 356 [39].

Για όλα τα εξεταζόμενα πλαίσια προσδιορίζεται η καμπύλη ικανότητας, η καμπύλη απαίτησης και το σημείο επιτελεστικότητας (ΑΤC40 [42]) το οποίο ορίζεται ως το σημείο τομής της καμπύλης ικανότητας με την καμπύλη απαίτησης. Η καμπύλη απαίτησης παράγεται αυτόματα στο εμπορικό λογισμικό SAP2000 [31] με εισαγωγή των παραμέτρων του ελαστικού φάσματος του σεισμού σχεδιασμού σύμφωνα με τον ΑΤC-40 [42]. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης, που συνοψίζονται στο Σχήμα 6.8, δείχνουν ότι η ικανότητα και των τριών πλαισίων είναι μεγαλύτερη από την απαίτηση του σεισμού σχεδιασμού. Η κατανομή των πλαστικών αρθρώσεων των παραμορφωμένων πλαισίων στην πρώτη διαρροή, στο σημείο επιτελεστικότητας και στη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου των δοκιμών που αντιστοιχεί στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (OKA-ULS 1,38%) δίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 6.9 - Σχήμα 6.11). Όλα τα υποστυλώματα των πλαισίων παραμένουν ελαστικά μέχρι το τέλος της ανάλυσης και οι πλαστικές αρθρώσεις εμφανίζονται στους πείρους και στα άκρα των δοκών του ημιάκαμπτου πλαισίου. Η ικανότητα παραμόρφωσης των πείρων εξαντλείται στους ορόφους 2 και 3 όπου σχηματίζονται και οι πρώτες πλαστικές αρθρώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου των δοκιμών στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας οι πλαστικές αρθρώσεις των πείρων βρίσκονται στη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS) ενώ των δοκών του ημιάκαμπτου πλαισίου στη στάθμη επιτελεστικότητας Αποφυγή Διακοπής Λειτουργίας (ΙΟ).



Σχήμα 6.8: Καμπύλες ικανότητας - απαίτησης και προσδιορισμός του σημείου επιτελεστικότητας: α) ag=0,16g, β) ag=0,24g, γ) ag=0,36g







Σχήμα 6.10: Παραμορφωμένο πλαίσιο με $a_g=0,24g$ και σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων



Σχήμα 6.11: Παραμορφωμένο πλαίσιο με ag=0,36g και σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων

Βάσει των τριών βασικών οριακών καταστάσεων σχεδιασμού, Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (OKΛ - SLS), Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (OKA - ULS) και Αποφυγή Κατάρρευσης (CPLS), ελέγχονται οι γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου για κλιμάκωση της επιτάχυνσης εδάφους του σεισμού σχεδιασμού (ag) με συντελεστές 0,5, 1,0 και 1,5 αντίστοιχα. Ο Πίνακας 6.18 συνοψίζει τις τιμές των μέγιστων γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου που υπολογίζονται για τα νέα σημεία επιτελεστικότητας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές (Παρ. 3.6.4) και τις οριακές τιμές του FEMA-356 [39]. Οι τιμές των αναλύσεων είναι σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερες από τις πειραματικές, οι οποίες είναι παραπλήσιες με τις τιμές που προτείνει ο FEMA-356 [39] για μεταλλικά κτίρια με συνδέσμους δυσκαμψίας.

Οριακές	Λοκιμές	Μη γραμμική ανάλυση			FEMA 356	
καταστάσεις	Δυκιμες	0,16g	0,24g	0,36g	Πλαίσια με συνδέσμους δυσκαμψίας	
SLS	0,66	0,40	0,55	0,66	0,50	
ULS	1,38	0,76	1,03	1,19	1,50	
CPLS	2,25	1,04	1,50	1,82	2,00	

Πίνακας 6.18: Σύγκριση πειραματικών, αναλυτικών και οριακών τιμών FEMA356 γωνιακών παραμορφώσεων ορόφων (%)

Στο πλαίσιο με a_g=0,36g εκτός από τις ημιάκαμπτες συνδέσεις δοκών - υποστυλώματων του κύριου πλαισίου διερευνήθηκαν δύο ακόμη περιπτώσεις, απλές και άκαμπτες συνδέσεις, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδρασή τους στην απόκριση όλου του πλαισίου. Στην περίπτωση των απλών συνδέσεων εισάγονται αρθρώσεις στα άκρα των δοκών με μη γραμμικές ιδιότητες τύπου τέμνουσας (V2 hinge) και ο φορέας έχει το συμβολισμό «FUSEIS», που είναι και το μοναδικό αντισεισμικό σύστημα της κατασκευής. Στην περίπτωση των άκαμπτων συνδέσεων αφαιρούνται τα στροφικά ελατήρια και εισάγονται πιθανές καμπτικές πλαστικές αρθρώσεις (M3 hinge), το αντισεισμικό σύστημα είναι συνδυασμός του συστήματος και ενός πλαισίου ροπής και ο φορέας έχει το συμβολισμό «FUSEIS+FR», ενώ στην αρχική περίπτωση των ημιάκαμπτων συνδέσεων ο φορέας έχει το συμβολισμό «FUSEIS+PF» για να υποδηλώσει ότι το αντισεισμικό σύστημα του πλαισίου είναι συνδυασμός του συστήματος με ένα πλαίσιο ροπής με ημιάκαμπτους κόμβους.

Οι καμπύλες ικανότητας για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις πλαισίων «FUSEIS+PF», «FUSEIS+FR» και «FUSEIS» δίνονται στο Σχήμα 6.12, όπου ορίζονται το σημείο επιτελεστικότητας (performance point), το σημείο όπου οι πλαστικές αρθρώσεις των πείρων έφτασαν για πρώτη φορά στη στάθμη Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS) και το σημείο όπου το πλαίσιο φτάνει την γωνιακή παραμόρφωση των δοκιμών στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας 1,38% (experimental).

Η μορφή των καμπύλων ικανότητας είναι όμοια και στις τρεις περιπτώσεις, καθώς η συμπεριφορά του πλαισίου καθορίζεται κυρίως από τη δυσκαμψία του συστήματος. Η πλαστικοποίηση μεμονωμένων πείρων φαίνεται ότι δεν επηρεάζει την κλίση της καμπύλης, η οποία όμως αλλάζει όταν πολλοί πείροι πλαστικοποιούνται ταυτόχρονα και η κατασκευή γίνεται πιο «μαλακή». Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις το σημείο επιτελεστικότητας είναι κάτω από την κατάσταση Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS) και η περίπτωση του πλαισίου με αρθρώσεις «FUSEIS» οδηγεί σε απαίτηση LS μεγαλύτερη από την πειραματική. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η πλαισιακή λειτουργία, «FUSEIS+FR» ή «FUSEIS+PF», οδηγεί σε μικρότερες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου σε σχέση με το πλαίσιο με αρθρώσεις «FUSEIS» και ότι το πλαίσιο «FUSEIS+FR» έχει μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα λόγω της συμμετοχής του πλαισίου ροπής. Ωστόσο, όταν εφαρμόζονται συνδέσεις ροπής οι δοκοί του πλαισίου πρέπει να σχεδιάζονται με υπεραντοχή σε σχέση με τους πείρους του συστήματος για να μπορούν παραλάβουν εγκάρσια φορτία και επομένως η χρήση ενός δεύτερου συστήματος όπως το «FUSEIS1-2» δεν είναι απαραίτητη γιατί οδηγεί σε πιο αντιοικονομική κατασκευή. Η χρήση αρθρωτών συνδέσεων, αν και έχει παραπλήσια συμπεριφορά με τις ημιάκαμπτες, οδηγεί σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Πιο αποτελεσματική λύση θεωρείται η χρήση ημιάκαμπτων συνδέσεων, οι οποίες συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των συνδέσεων ροπής και των αρθρωτών συνδέσεων, παρέχοντας μεγάλη φέρουσα ικανότητα στο φορέα με περιορισμένες παραμορφώσεις και σχετικά εύκολη κατασκευή.



Σχήμα 6.12: Σύγκριση καμπύλων ικανότητας πλαισίων «FUSEIS+FR», «FUSEIS+PF» και «FUSEIS»

6.5.2. Εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς q

Από τις καμπύλες ικανότητας που προέκυψαν από τις μη γραμμικές στατικές αναλύσεις υπολογίστηκε ο συντελεστής συμπεριφοράς q του συστήματος ως το γινόμενο του δείκτη πλαστιμότητας q_μ και της υπεραντοχής Ω με την ακόλουθη εξίσωση:

$$q = q_{\mu} \cdot \Omega \tag{6.5}$$

Στο Σχήμα 6.13, όπου δίνεται μια τυπική καμπύλη ικανότητας, ορίζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό. Δεδομένου ότι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος των εξεταζόμενων πλαισίων είναι T₁≥T_c (εύκαμπτα), στον υπολογισμό του δείκτη πλαστιμότητας q_μ εφαρμόζεται ο «κανόνας ίσων μετατοπίσεων» σύμφωνα με τον οποίο η μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος είναι ίση με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού με την ίδια περίοδο. Ο δείκτης πλαστιμότητας επομένως υπολογίζεται από την εξίσωση (6.6) ως ο λόγος της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης κορυφής του πραγματικού πλαισίου προς τη μετακίνηση διαρροής του ισοδύναμου απεριόριστα ελαστικού συστήματος. Η μέγιστη ανελαστική μετακίνηση ορίζεται ως η μετακίνηση δ_{LS} στην οποία οι πείροι βρίσκονται στη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS) ή ως η μετακίνηση δ_{Exp} στην οποία η κατασκευή φτάνει στην πειραματική γωνιακή παραμόρφωση ορόφου στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ULS), όποια είναι δυσμενέστερη.

$$q_{\mu} = \frac{\delta_{LS} \dot{\eta} \delta_{Exp}}{\delta_{el}}$$
(6.6)

Η υπεραντοχή Ω ορίζεται από την εξίσωση (6.7) ως ο λόγος της τέμνουσας διαρροής V_{LS} ή V_{Exp} του ισοδύναμου απεριόριστα ελαστικού συστήματος προς την τέμνουσα διαρροής V_y :

$$\Omega = \frac{V_{LS} \dot{\eta} V_{Exp}}{V_{v}}$$
(6.7)



Σχήμα 6.13: Εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς από την καμπύλη ικανότητας

Ο Πίνακας 6.19 περιλαμβάνει τις τιμές του δείκτη πλαστιμότητας, της υπεραντοχής και του συντελεστή συμπεριφοράς των πλαισίων «FUSEIS+PF» για τις τρεις διαφορετικές σεισμικές ζώνες. Οι τιμές του συντελεστή συμπεριφοράς είναι παραπλήσιες με τις πειραματικές (Πίνακας 4.3) και κοντά στην τιμή q=3 που θεωρήθηκε κατά το σχεδιασμό.

Πίνακας 6.19: Εκτιμώμενος συντελεστής συμπεριφοράς q

a _g	q_{μ}	Ω	q
0,16g	1,80	1,71	3,07
0,24g	1,57	1,84	2,89
0,36g	1,48	1,77	2,62

6.6. Μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις

Κάνοντας χρήση χαρακτηριστικών επιταχυνσιογραφημάτων από πραγματικές σεισμικές καταγραφές, πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις του εξεταζόμενου πλαισίου της τρίτης περίπτωσης (a_g=0,36g) για να επιβεβαιωθεί ότι ο ελαστικός σχεδιασμός ενός κτιρίου με το σύστημα με τον προτεινόμενο συντελεστή συμπεριφοράς δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την απόκρισή του σε πραγματικό σεισμό. Όμοια με τη μη γραμμική στατική ανάλυση Pushover, εκτός από τους ημιάκαμπτους κόμβους «FUSEIS+PF» εξετάζεται και η περίπτωση απλών συνδέσεων τέμνουσας μεταξύ των δοκών και των υποστυλωμάτων του κύριου πλαισίου «FUSEIS». Οι συνθήκες φόρτισης στην αρχική κατάσταση είναι ίδιες με της μη γραμμικής στατικής ανάλυσης Pushover και περιλαμβάνουν τα κατακόρυφα φορτία του σεισμικού συνδυασμού. Επιπλέον, στα άκρα των πείρων εφαρμόζονται κατάλληλα μη γραμμικά ελατήρια προκειμένου να αποτυπωθεί η υστερητική συμπεριφορά τους (Παρ. 5.2.4, Σχήμα 5.9).

6.6.1. Επιταχυνσιογραφήματα

Στις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις εφαρμόζεται η μεθοδολογία που περιγράφεται στον FEMA -P695 [44] για την αποτίμηση κατάρρευσης κτιρίων σύμφωνα με την οποία το κτίριο υποβάλλεται σε μια ομάδα επιταχυνσιογραφημάτων της βάσης δεδομένων PEER NGA. Χρησιμοποιήθηκαν είκοσι δύο ζεύγη των ισχυρότερων οριζόντιων σεισμικών διεγέρσεων που καταγράφηκαν σε περιοχές που βρίσκονταν σε απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με 10km από το ρήγμα (fault rupture). Επειδή τα περισσότερα από τα ως άνω επιταχυνσιογραφήματα δεν είναι τόσο ισχυρά ώστε να προκαλέσουν κατάρρευση στα σύγχρονα κτίρια, απαιτείται να γίνει κλιμακωσή τους (scaling) στην επιθυμητή σεισμική ένταση. Στην παρούσα έρευνα για την κλιμάκωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SeismoMatch [48] το οποίο προσαρμόζει τις σεισμικές καταγραφές στο ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1998-1-1 [30] για φυσικά επιταχυνσιογραφήματα (recorded accelerograms).

Σύμφωνα με τους Vamvatsikos και Cornell [49] για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια σε μεσαίου ύψους κτίρια αρκούν δέκα με είκοσι καταγραφές. Η διαδικασία της κλιμάκωσης πραγματοποιήθηκε για όλες τις καταγραφές και τελικά επιλέχθηκαν δώδεκα καταγραφές (Πίνακας 6.20) με κριτήριο οι τιμές του μέσου φάσματός τους στη ζώνη μεταξύ των ιδιοπεριόδων 0,2T₁ και 2T₁ (T₁ η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος) να διαφέρουν λιγότερο από 10% από τις αντίστοιχες του ελαστικού, όπως ορίζει ο EN1998-1-1 [30]. Τα χαρακτηριστικά αυτών των καταγραφών ήταν αντιπροσωπευτικά για το εξεταζόμενο πλαίσιο όπως επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων που δίνονται στις Παρ. 6.6.2 - 6.6.3.

α/α	Έτος	Οριζόντιες Καταγραφές	ιζόντιες Καταγραφές Σταθμός	
1	1999	1999 Chi-Chi, Taiwan TCU045		0,51
2	1999	Duzce, Turkey	Bolu	0,82
3	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	0,35
4	1999	Hector Mine	Hector	0,34
5	1979	Imperial Valley	Delta	0,35
6	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	0,50
7	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	0,36
8	1992	Landers	Coolwater	0,42
9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array	0,37
10	1990	Manjil, Iran	Abbar	0,51
11	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	0,48
12	1987	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	0,26

Πίνακας 6.20: Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών από τη βάση PEER-NGA (FEMA - P695 [44])

Στο Σχήμα 6.14 δίνονται τα αρχικά φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων (normalized), τα φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων μετά από την κλιμάκωσή τους (matched) και το ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης. Το Σχήμα 6.14β περιλαμβάνει επίσης τη μέση φασματική απόκριση (mean matched spectrum) των δώδεκα καταγραφών η οποία, στη ζώνη μεταξύ των ιδιοπεριόδων 0,2T₁ και 2T₁, έχει μέγιστη απόκλιση από το ελαστικό φάσμα 6,7%.

Επειδή η προσαρμογή των επιταχυνσιογραφημάτων γίνεται στις ακραίες τιμές του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης τα τελικά επιταχυνσιογραφήματα μετά την κλιμάκωση είναι ισχυρότερα από τα αρχικά και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα είναι πιο συντηρητικά. Ωστόσο, στην προκειμένη περίπτωση, που αξιολογείται η συμπεριφορά ενός καινοτόμου συστήματος και επιδιώκεται η επιβεβαίωση της μεθοδολογίας σχεδιασμού του, η προσέγγιση αυτή θεωρείται ικανοποιητική.



Σχήμα 6.14: Φάσματα ψευδοεπιταχύνσεων (Pseudo – accelerations response)

6.6.2. Παραμένουσες καθολικές γωνιακές παραμορφώσεις

Η δυναμική απόκριση του συστήματος υπό πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις αξιολογήθηκε αρχικά μέσω των χρονοϊστοριών μετακινήσεων κορυφής του εξεταζόμενου πλαισίου για όλους τους σεισμούς. Στο Σχήμα 6.15 δίνονται οι χρονοϊστορίες μετακίνησης για τις δύο περιπτώσεις σύνδεσης των σύμμικτων δοκών με τα υποστυλώματα του κύριου πλαισίου, «FUSEIS+PF» και «FUSEIS», όπου παρατηρείται ότι η κατασκευή ακολουθεί τη σεισμική κίνηση και ότι στο τέλος της σεισμικής διέγερσης οι τιμές των διαγραμμάτων σχεδόν μηδενίζονται ανεξάρτητα από τον τύπο σύνδεσης.





Σχήμα 6.15: Χρονοϊστορίες μετακινήσεων κορυφής πλαισίων FUSEIS+PF και FUSEIS

Στη συνέχεια, από το λόγο των μετακινήσεων κορυφής στο τέλος της σεισμικής διέγερσης προς το ύψος του πλαισίου (17m) υπολογίστηκαν οι παραμένουσες καθολικές γωνιακές παραμορφώσεις (residual global drifts) των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων, ο περιορισμός των οποίων είναι σημαντικό κριτήριο τόσο για το σχεδιασμό νέων κτιρίων όσο και για την αποτίμηση υφιστάμενων μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Οι τιμές είναι σχεδόν μηδενικές και για τις δύο περιπτώσεις, με μέγιστη τιμή 0,156% στο πλαίσιο «FUSEIS» (Πίνακας 6.21).

Πίνακας 6.21: Παραμένουσες	καθολικές γωνιακές	παραμορφώσεις (%)
----------------------------	--------------------	-------------------

Σεισμική διέγερση	FUSEIS + PF	FUSEIS
Chi-Chi, Taiwan	0,043	0,026
Duzce, Turkey	0,045	0,084
Friuli, Italy	0,043	0,053
Hector Mine	0,062	0,040
Imperial Valley	0,027	0,073
Kobe, Japan	0,090	0,156
Kocaeli, Turkey	0,021	0,117
Landers	0,052	0,069
Loma Prieta	0,034	0,013
Manjil, Iran	0,023	0,048
Northridge	0,064	0,003
Superstition Hills	0,010	0,011
Μέσος όρος	0,043	0,058
Τυπική απόκλιση (±)	0,022	0,046

Είναι φανερό ότι το σύστημα μετά από μια ισχυρή σεισμική διέγερση σχεδόν επαναφέρει το πλαίσιο στην αρχική του θέση. Η επαναφορά της κατασκευής εξασφαλίζεται από τα ισχυρά υποστυλώματα και τις δοκούς-υποδοχείς χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά από τον τύπο σύνδεσης δοκού – υποστυλώματος του κύριου πλαισίου. Επομένως, το σύστημα, εφόσον σχεδιαστεί κατάλληλα με ελεγχόμενη απορρόφηση ενέργειας, εξασφαλίζει ότι η κατασκευή σε περίπτωση ισχυρού σεισμού θα παραμείνει λειτουργική με μικρές έως μηδενικές παραμένουσες μετακινήσεις, χωρίς την ανάγκη επισκευής.

Η συμπεριφορά του πλαισίου «FUSEIS+PF» διερευνήθηκε επιπλέον για πέντε επίπεδα έντασης κλιμακώνοντας όλες τις καταγραφές με τους συντελεστές 0,50/0,75/1,00/1,25/1,50 ώστε να αποτυπωθεί όλο το φάσμα της απόκρισής του πλαισίου, από την ελαστική περιοχή στην ανελαστική και τελικά την κατάρρευση (να κυμαίνεται από το SLS στο CPLS). Όπως παρατηρείται στις χρονοϊστορίες μετακινήσεων κορυφής όλων των διεγέρσεων που δίνονται στο Σχήμα 6.16 οι παραμένουσες σχετικές μετακινήσεις ορόφου αν και αυξάνονται από το SLS στο CPLS εξακολουθούν να είναι πολύ μικρές. (Πίνακας 6.22).





Σχήμα 6.16: Χρονοϊστορίες μετακινήσεων κορυφής πλαισίων FUSEIS+PF για πέντε επίπεδα έντασης

Πίνακας 6.22: Παραμένουσε	ς καθολικές γ	νωνιακές παρ	αμορφώσεις γι	ια πέντε ε	επίπεδα έντασηα	ς (%)
---------------------------	---------------	--------------	---------------	------------	-----------------	-------

Σεισμική διέγερση	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
Chi-Chi, Taiwan	0,020	0,035	0,043	0,058	0,042
Duzce, Turkey	0,007	0,021	0,045	0,114	0,178
Friuli, Italy	0,025	0,034	0,043	0,046	0,138
Hector Mine	0,021	0,036	0,062	0,075	0,117
Imperial Valley	0,008	0,017	0,027	0,047	0,066
Kobe, Japan	0,019	0,030	0,090	0,136	0,165
Kocaeli, Turkey	0,004	0,018	0,021	0,010	0,013
Landers	0,004	0,001	0,052	0,055	0,025
Loma Prieta	0,029	0,027	0,034	0,035	0,044
Manjil, Iran	0,021	0,025	0,023	0,059	0,069
Northridge	0,062	0,055	0,064	0,126	0,186
Superstition Hills	0,017	0,059	0,010	0,068	0,115

6.6.3. Γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου

Μια επιπλέον παράμετρος που εξετάστηκε είναι η γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) για επίπεδο έντασης 1,00. Οι καμπύλες των παραμενουσών και των μέγιστων γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις δίνονται στο Σχήμα 6.17.









Σχήμα 6.17: Μέγιστες και παραμένουσες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου (%)

Οι καμπύλες είναι παρόμοιες και για τις δυο περιπτώσεις που μελετήθηκαν, «FUSEIS+PF» και «FUSEIS». Παρατηρείται ότι οι παραμένουσες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου είναι σχεδόν μηδενικές, όμοια με τις παραμένουσες καθολικές γωνιακές παραμορφώσεις, και οι μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου για το πλαίσιο «FUSEIS+PF» είναι λίγο μικρότερες σε σχέση με το πλαίσιο «FUSEIS» όπου το σύστημα παραλαμβάνει μόνο του τα σεισμικά φορτία. Ο Πίνακας 6.23 περιλαμβάνει τις μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου οι οποίες είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μεταξύ των πειραματικών οριακών τιμών ULS (1,38%) και CPLS (2,25%).

Σεισμική διέγερση	FUSEIS+PF	FUSEIS	Λόγος	
Chi-Chi, Taiwan	1,63	1,91	1,18	
Duzce, Turkey	1,59	1,83	1,15	
Friuli, Italy	1,47	1,79	1,22	
Hector Mine	1,41	1,52	1,08	
Imperial Valley	1,34	1,56	1,17	
Kobe, Japan	1,37	1,61	1,18	
Kocaeli, Turkey	1,47	1,61	1,10	
Landers	1,53	1,79	1,16	
Loma Prieta	1,48	1,58	1,07	
Manjil, Iran	1,02	1,17	1,15	
Northridge	1,56	1,80 1,15		
Superstition Hills	1,34	1,60	1,20	

Πίνακας 6.23: Μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου (%)

6.6.4. Ολιγοκυκλική κόπωση

Οι πείροι υπόκεινται σε μεγάλες πλαστικές στροφές λόγω του μικρού μήκους τους και είναι πιθανό να αστοχήσουν πρόωρα κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης λόγω ολιγοκυκλικής κόπωσης. Μέσω των μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο βαθμός βλάβης των πείρων (Damage index) βάσει του κριτηρίου αστοχίας των Palmgren – Miner για κύκλους μεταβλητού εύρους (εξίσωση (3.31)). Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης των πείρων μέχρι την αστοχία (Ν) υπολογίζεται από την καμπύλη κόπωσης (εξίσωση (3.30)) που προέκυψε από τις δοκιμές σε πλαίσια με συσκευές όπως περιγράφεται στην Παρ. 3.6.8.

Ο Πίνακας 6.24 δίνει το βαθμό βλάβης που υπολογίστηκε για το πλαίσιο «FUSEIS+PF» για καθεμία από τις εξεταζόμενες καταγραφές, όπως φαίνεται το κριτήριο των Palmgren – Miner ικανοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις και είναι D≤1.

Σεισμική διέγερση	Βαθμός βλάβης (D ≤ 1)			
Chi-Chi, Taiwan	0,09			
Duzce, Turkey	0,16			
Friuli, Italy	0,11			
Hector Mine	0,45			
Imperial Valley	0,88			
Kobe, Japan	0,15			
Kocaeli, Turkey	0,13			
Landers	0,26			
Loma Prieta	0,34			
Manjil, Iran	0,19			
Northridge	0,27			
Superstition Hills	0,15			

Πίνακας 6.24: Βαθμός βλάβης

6.7. Προσαυξητική δυναμική ανάλυση (IDA)

6.7.1. Αποτίμηση της συμπεριφοράς του πλαισίου

Η ανελαστική συμπεριφορά του συστήματος διερευνήθηκε περαιτέρω με την προσαυξητική δυναμική ανάλυση (Incremental Dynamic Analysis, IDA), η μεθοδολογία της οποίας περιγράφεται στην Παρ. 5.1.3. Για να παραχθούν οι καμπύλες IDA η κλιμάκωση των σεισμικών καταγραφών έγινε αρχικά στα πέντε επίπεδα έντασης της Παρ. 6.6.2 με τους συντελεστές 0,50/0,75/1,00/1,25/1,50 και συνεχίστηκε σε αυξανόμενες εντάσεις μέχρι την τελευταία αριθμητική σύγκλιση. Η καμπύλη IDA κάθε καταγραφής καθορίστηκε με τα πλέον αντιπροσωπευτικά μέτρα έντασης ΙΜ και απόκρισης EDP, τα οποία θεωρήθηκαν η φασματική επιτάχυνση στην πρώτη ιδιομορφή της κατασκευής για απόσβεση 5%, $S_a(T_1,5\%)$, και η γωνιακή παραμόρφωση ορόφων (interstory drift), θ_{max} , αντίστοιχα.

Το Σχήμα 6.18 περιλαμβάνει τις καμπύλες IDA όλων των καταγραφών. Οι καμπύλες παρατηρείται ότι έχουν αρχικά ένα ελαστικό κλάδο με σταθερή κλίση μέχρι τη διαρροή στο S₃(T1,5%)≈0,4g και θ_{max}≈1,0%, στη συνέχεια ένα κλάδο με λίγο μεγαλύτερη κλίση λόγω κράτυνσης και στο τέλος ένα οριζόντιο κλάδο (flatline), στον οποίο λόγω μη αριθμητικής σύγκλισης της μεθόδου οι παραμορφώσεις EDP αυξάνονται απεριόριστα και η κατασκευή εμφανίζει συνολική δυναμική αστάθεια. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές ΙΜ των καμπυλών έχουν μικρή διασπορά λόγω της κλιμάκωσης των επιταχυνσιογραφημάτων με το λογισμικό SeismoMatch [48], το οποίο προσαρμόζει τις σεισμικές καταγραφές στο ελαστικό φάσμα επιτάχυνσης. Στις καμπύλες IDA ορίστηκαν και οι τρείς οριακές καταστάσεις Αποφυγή Διακοπής Λειτουργίας (ΙΟ), Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS) και Αποφυγή Κατάρρευσης (CP) βάσει των μέγιστων πειραματικών γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου (SLS, ULS, CPLS). Ο Πίνακας 6.25 περιλαμβάνει τις αντίστοιχες τιμές των IM και EDP.

124



Σχήμα 6.18: Καμπύλες IDA και πειραματικές τιμές γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου στις τρείς στάθμες επιτελεστικότητας (IO, LS, CP)

Πίνακας 6.25: Δείκτες έντασης (ΙΜ)	και δείκτες απόκρισης (EDP) για όλες τις καταγραφές στις τρείς στάθμες
επιτελεστικότητας (IO, LS, CP)	

Σεισμική διέγερση	S _a (T ₁ ,5%) (g)		θ _{max} (%)			
	10	LS	СР	10	LS	СР
Chi-Chi, Taiwan	0,22	0,45	0,69			
Duzce, Turkey	0,23	0,48	0,87			
Friuli, Italy	0,21	0,54	0,91			
Hector Mine	0,20	0,47	0,77			
Imperial Valley	0,28	0,59	0,92			
Kobe, Japan	0,26	0,54	0,96	0,66	1,38	2,25
Kocaeli, Turkey	0,18	0,46	0,96			
Landers	0,17	0,48	0,83			
Loma Prieta	0,24	0,49	0,91			
Manjil, Iran	0,29	0,81	1,15			
Northridge	0,25	0,51	0,92			
Superstition Hills	0,24	0,64	0,73			

Οι παραπάνω καμπύλες IDA συνοψίζονται στη διάμεσο καμπύλη 50% και στις καμπύλες στο 16% και 84% των καταγραφών. Στο Σχήμα 6.19 δίνεται μόνο η διάμεσος καμπύλη καθώς οι άλλες δύο λόγω της μικρής διασποράς των καταγραφών έχουν μικρές διαφορές από αυτή. Στο ίδιο Σχήμα δίνονται και τα σημεία IO, LS και CP που προκύπτουν από τις πειραματικές γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου, θ_{max}, και τις τιμές S_a(T₁,5%) του παραπάνω Πίνακα που αντιστοιχούν στο 50% των εξεταζόμενων σεισμικών καταγραφών σε αύξουσα σειρά (S_a(T₁,5%)=0,23g, 0,49g, 0,91g). Τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω στη διάμεσο καμπύλη επιβεβαιώνοντας τον ορισμό των σταθμών επιτελεστικότητας.



Σχήμα 6.19: Καμπύλη στη διάμεσο (median curve 50%)

Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε αύξουσα σειρά οι μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου για κάθε όροφο και προσδιορίστηκαν εκείνες που αντιστοιχούν στο 50% των καταγραφών. Στο Σχήμα 6.20 δίνονται τα διαγράμματα για κλιμάκωση των καταγραφών με τους συντελεστές 0,5, 1,0 και 1,5, όπου παρατηρείται ότι όσο μικρότερες είναι οι τιμές του ΙΜ τόσο πιο μικρές και ομοιόμορφες είναι οι παραμορφώσεις σε όλους τους ορόφους ενώ όσο αυξάνουν οι τιμές του ΙΜ (συντελεστής κλιμάκωση 1,5) ο τρίτος όροφος εμφανίζεται πιο αδύναμος με σημαντικές παραμορφώσεις, οι οποίες όμως είναι μικρότερες του ορίου 2,25% για την οριακή κατάσταση Αποφυγή Κατάρρευσης (CP). Αντιθέτως για κλιμάκωση των καταγραφών με το συντελεστή 1,0 υπάρχει μια μικρή υπέρβαση του ορίου Προστασία Ανθρώπινης Ζωής (LS), 1,38%, στον τέταρτο όροφο.



Σχήμα 6.20: Μέγιστες γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου της IDA 50% σε τρεις στάθμες S_a(T₁,5%)
6.7.2. Καμπύλες τρωτότητας (fragility curves)

Αφού καθορίστηκαν οι στάθμες βλάβης από τη μέση καμπύλη IDA (50%) κατασκευάστηκε η καμπύλη τρωτότητας (fragility curve) που παρέχει εκτιμήσεις για την πιθανότητα υπέρβασης μιας δεδομένης στάθμης βλάβης σε διάφορα επίπεδα έντασης της σεισμικής δράσης για μία κατασκευή. Η καμπύλη τρωτότητας του εξεταζόμενου πλαισίου (Σχήμα 6.21(1)), όπως και η καμπύλη IDA 50%, είναι συντηρητική για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος «FUSEIS1-2» λόγω της μεθόδου κλιμάκωσης που ακολουθείται. Για τον ορισμό της χρησιμοποιούνται η S_a(T₁,5%)=SCT=0,86g της τελευταίας σύγκλισης της μέσης καμπύλης IDA 50% και η συνολική λογαριθμοκανονική τυπική απόκλιση για να ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες, β_{tot}=0,39, που προκύπτει από την εξίσωση (5.1). Στη συνέχεια, για να συμπεριληφθεί η επιρροή των ακραίων (σπάνιων) σεισμών που προκαλούν κατάρρευση απαιτείται η τροποποίηση της καμπύλη τρωτότητας βάσει του συντελεστή σχήματος του φέσματος SSF=1,13, που ορίζεται από το FEMA P695 [44] βάσει της δεσπόζουσας ιδιοπεριόδου και του δείκτη πλαστιμότητας. Η πιθανότητα κατάρρευσης στις επιθυμητές στάθμες βλάβης (IO, LS, CP) τελικά προσδιορίζεται από τη μετατοπισμένη προς τα δεξιά καμπύλη τρωτότητας (Σχήμα 6.21(2)) η οποία δίνει σημαντικά μικρότερες τιμές. Στη στάθμη CP για παράδειγμα η πιθανότητα κατάρρευσης είναι ίση με 32,1%, αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα 44,0% της αρχικής καμπύλης (1).

Από την καμπύλη αυτή ελέγχεται και η ορθότητα του συντελεστή συμπεριφοράς q=3 που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό. Αρχικά υπολογίζεται το περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης CMR=1,59 (εξίσωση (5.2)) και στη συνέχεια με χρήση του συντελεστή SSF το διορθωμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης ACMR= 1,80. Το διορθωμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης ACMR= 1,80. Το διορθωμένο περιθώριο ασφαλείας έναντι κατάρρευσης ΑCMR= 1,80.



Σχήμα 6.21: Καμπύλες τρωτότητας τροποποιημένες για να ληφθούν υπόψη (1) η συνολική τυπική απόκλιση β_{tot} και (2) η επιρροή του σχήματος του φάσματος SSF

6.8. Σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης

Για τον έλεγχο της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού θεωρήθηκε σκόπιμο να συγκριθούν τα αποτελέσματα της ελαστικής, της ανελαστικής στατικής (Pushover) και της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης (IDA). Για τη σύγκριση αυτή επιλέχθηκε ως πιο αντιπροσωπευτική παράμετρος η γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) καθώς παρέχει μια εκτίμηση του επιπέδου των βλαβών σε διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας και είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό.

Οι γωνιακές παραμόρφωσεις ορόφου για τις τρεις μεθόδους ανάλυσης δίνονται στο Σχήμα 6.22. Η διαγραμμισμένη περιοχή περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της IDA και ορίζεται από τις καμπύλες IDA 16% και 84%. Η καμπύλη της ελαστικής φασματικής ανάλυσης βρίσκεται μεταξύ των ορίων των καμπυλών της IDA ενώ η καμπύλη Pushover (SPO) είναι ελαφρώς μικρότερη στους δύο ανώτερους ορόφους καθώς δε λαμβάνει υπόψη την επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών. Επιπλέον, στις δύο ως άνω καμπύλες οι μέγιστες τιμές των γωνιακών παραμορφώσεων ορόφου δεν ξεπερνούν την οριακή τιμή των δοκιμών στην ΟΚΑ 1,38% και σε καμία από τις αναλύσεις δεν σχηματίζεται «μαλακός όροφος», επιβεβαιώνοντας τους προτεινόμενους κανόνες σχεδιασμού.



Σχήμα 6.22: Γωνιακές παραμορφώσεις ορόφου από ελαστική, pushover (SPO) και IDA ανάλυση

7. Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

7.1. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο σύστημα δυσκαμψίας με την ονομασία «FUSEIS1-2» και αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του σε μεταλλικά και σύμμικτα κτίρια σε περιοχές υψηλής σεισμικότητας. Βασικό χαρακτηριστικό της συμπεριφοράς του συστήματος είναι η δυνατότητά του να διατηρεί τη δομική του ακεραιότητα, ακόμα και μετά την είσοδο στην κράτυνση, και μέσω της μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης των πείρων του να απορροφά ικανές ποσότητες ενέργειας. Παράλληλα, αξιοποιώντας όλα τα δομικά πλεονεκτήματα του χάλυβα το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό.

Με τη διεξαγωγή μιας σειράς πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος και προσδιορίστηκαν οι καθοριστικές παράμετροι σχεδιασμού του. Στα πλαίσια της έρευνας δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάπτυξη της μεθοδολογίας σχεδιασμού η οποία επιβεβαιώθηκε με μη γραμμικές στατικές και δυναμικές αναλύσεις σε αντιπροσωπευτικά πλαίσια πραγματικών κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του υλικού, των μελών, των συνδέσεων, την τοπική και καθολική ευστάθεια και τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης. Αποτέλεσμα της διερεύνησης ήταν ο καθορισμός των παρακάτω βασικών χαρακτηριστικών του συστήματος:

(1) Μπορεί να εφαρμοστεί σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια σαν εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών συστημάτων αντισεισμικής προστασίας συνδυάζοντας την αντοχή με τη δυσκαμψία. Η πλευρική ευστάθεια ενός κτιρίου μπορεί να εξασφαλιστεί με πρόβλεψη ικανοποιητικού αριθμού συστημάτων και στις δύο διευθύνσεις.

(2) Συμπεριφέρεται έναντι εγκάρσιων φορτίων ως μια κατακόρυφη δοκός Vierendeel μέχρι την πλήρη διαρροή των πείρων.

(3) Αποτελεί μια ευέλικτη αρχιτεκτονική λύση για την εξασφάλιση της ευστάθειας κτιρίων σε εγκάρσια φορτία καθώς μπορεί να τοποθετηθεί σε μικρές περιοχές του κτιρίου χωρίς να παρεμποδίζει τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Μπορεί επίσης να είναι εμφανές τμήμα του κτιρίου υποδεικνύοντας το αντισεισμικό του σύστημα

(4) Οι ανελαστικές παραμορφώσεις περιορίζονται στους πείρους ενώ τα υπόλοιπα δομικά μέλη του κύριου πλαισίου και του συστήματος (δοκοί και υποστυλώματα) παραμένουν ελαστικά. Οι πείροι δεν αποτελούν τμήμα του συστήματος παραλαβής των φορτίων βαρύτητας και είναι μικροί με απλή κατασκευαστική λεπτομέρεια που διευκολύνει την παραγωγή, την τοποθέτηση και την αφαίρεσή τους μετά από ένα ισχυρό σεισμικό γεγονός. Επιπλέον οι πείροι κυκλικής διατομής λόγω της δυνατότητας αυξομείωσης του μήκους τους μπορούν να προσαρμόζονται με απόλυτη ακρίβεια στις κατασκευαστικές ατέλειες του υπόλοιπου φορέα και σε περίπτωση ανάγκης αντικατάστασής τους η επανατοποθέτηση της συσκευής είναι ιδιαίτερα απλή.

(5) Η συμπεριφορά των πείρων υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση καθορίζεται από συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης, όπως παρατηρήθηκε από τη μορφή της αστοχίας των δοκιμίων. Από την επεξεργασία των δοκιμών σε μεμονωμένες συσκευές και σε πλαίσια κατασκευάστηκαν οι καμπύλες κόπωσης και τελικά επιλέχθηκε ως πιο αντιπροσωπευτική η καμπύλη κόπωσης των δοκιμών σε πλαίσια. Η καμπύλη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βαθμού της βλάβης ενός κτιρίου με το σύστημα.

(6) Η προοδευτική και ελεγχόμενη πλαστικοποίηση των πείρων μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλη επιλογή των διατομών τους μεταβάλλοντας τη σχέση μεταξύ δυσκαμψίας και αντοχής.

(7) Προτείνεται να συνδυάζεται με ημιάκαμπτο πλαίσιο (Partially fixed), ώστε τα πλευρικά φορτία να παραλαμβάνονται και από τα δύο συστήματα. Οι ημιάκαμπτες συνδέσεις ενώ προσφέρουν όλα τα πλεονεκτήματα των συνδέσεων ροπής, δεν έχουν απαίτηση για ικανοτικό σχεδιασμό, διαθέτουν απλούστερη κατασκευαστική λεπτομέρεια και περιορίζουν τις βλάβες στους πείρους του συστήματος οδηγώντας σε πιο οικονομικό σχεδιασμό.

(8) Η μεθοδολογία και όλες οι απαραίτητες οδηγίες για τον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων με το σύστημα περιλαμβάνονται στον Οδηγό Σχεδιασμού [24]. Ο Οδηγός αυτός βασίστηκε στις διατάξεις των Ευρωκωδίκων με κατάλληλες τροποποιήσεις σε ορισμένες από αυτές για να ληφθούν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των συσκευών του συστήματος που αναδείχθηκαν κατά τις αναλυτικές και πειραματικές διερευνήσεις.

(9) Ο προτεινόμενος συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος που προσδιορίστηκε πειραματικά και επιβεβαιώθηκε με μη γραμμικές στατικές και δυναμικές αναλύσεις έχει μέγιστη τιμή q=3.

(10) Τα όρια της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου που περιγράφουν την απόδοση του συστήματος στις στάθμες επιτελεστικότητας και προσδιορίστηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι IO(0,66%), LS (1,38%) και CP (2,25%).

(11) Οι ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων των πείρων για τη διεξαγωγή μη γραμμικών στατικών αναλύσεων προσδιορίστηκαν από τις αναλυτικές διερευνήσεις του συστήματος έπειτα από τις δοκιμές.

(12) Αν σχεδιαστεί κατάλληλα μπορεί σχεδόν να επαναφέρει το κτίριο στην αρχική του θέση με πρακτικά μηδενικές παραμένουσες παραμορφώσεις και να επιτρέπει την ταχεία επαναλειτουργία του κτιρίου μετά το σεισμό.

7.2. Πρωτότυπη συμβολή

Τα τελευταία χρόνια η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση των συστημάτων σεισμικής προστασίας και στην ανάπτυξη νέων με στόχο την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας σε συγκεκριμένες θέσεις ώστε να μην εμφανίζονται βλάβες στον κύριο φορέα του κτιρίου. Σε αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε και η έρευνα του καινοτόμου συστήματος «FUSEIS1-2», το οποίο είναι ικανό να απορροφά μεγάλη ποσότητα σεισμικής ενέργειας σε «ανταλλακτικά» στοιχεία μικρού μεγέθους τα οποία αντικαθίστανται εύκολα και οικονομικά μετά από ισχυρό σεισμό ενώ παράλληλα επιτρέπει την ταχεία επαναλειτουργία του κτιρίου.

Στα πλαίσια της έρευνας πραγματοποιήθηκε μια σειρά αριθμητικών και πειραματικών διερευνήσεων και συντάχθηκε ο Οδηγός Σχεδιασμού του συστήματος που περιλαμβάνει τη μεθοδολογία και όλους τους απαραίτητους ελέγχους για την εφαρμογή του σε κτίρια. Στον Οδηγό Σχεδιασμού δίνονται:

- Όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να μπορέσει να ενταχθεί το σύστημα στους αντισεισμικούς κανονισμούς, όπως συστάσεις για την επιλογή των κατάλληλων στοιχείων απορρόφησης σαν συνάρτηση των πιο σημαντικών παραμέτρων, έλεγχοι των μελών και κατασκευαστικές λεπτομέρειες.
- Ο προτεινόμενος συντελεστής συμπεριφοράς q=3.

- Τα όρια της γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου στις στάθμες επιτελεστικότητας ΙΟ, LS και CP.
- Οι ιδιότητες των πλαστικών αρθρώσεων και των μη γραμμικών ελατηρίων για τη διεξαγωγή μη γραμμικών στατικών και δυναμικών αναλύσεων αντίστοιχα, που παρέχουν στο μελετητή τη δυνατότητα πρόβλεψης των αναμενόμενων μηχανισμών πλαστικοποίησης και κατανομής της βλάβης.
- Η καμπύλη κόπωσης του συστήματος η οποία προέρχεται από τις πειραματικές διερευνήσεις και μέσω της οποίας μπορεί να καθοριστεί ο βαθμός βλάβης ενός κτιρίου με το σύστημα.

7.3. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Κατά την εκπόνηση της εν λόγω διατριβής αξιολογήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος και προσδιορίστηκαν οι βασικοί άξονες για τη διαστασιολόγηση και εφαρμογή του σε κτίρια. Πρόκειται όμως για ένα νέο και πολλά υποσχόμενο σύστημα του οποίου η διερεύνηση δεν εξαντλήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και μπορεί να επεκταθεί μελλοντικά και σε άλλες κατευθύνσεις όπως:

(1) Στη δυνατότητα πρόβλεψης της ρηγμάτωσης των πείρων μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας επιλογής του χάλυβα με χρήση της αρχής της ενεργού βλάβης (damage mechanics), που αποτελεί αντικείμενο του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος MATCH και είναι σε εξέλιξη.

(2) Στη μελέτη μεγαλύτερης ποικιλίας διατάξεων και αριθμού κτιρίων με το σύστημα, ώστε να εξεταστεί πώς επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους διάφορες παράμετροι όπως ο αριθμός των ορόφων, η κανονικότητα, η ένταση του σεισμού, ο αριθμός και η θέση των συστημάτων σε κάτοψη κ.α. Επιπλέον, με τη διερεύνηση αυτή θα οριστικοποιηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του συντελεστή συμπεριφοράς.

(3) Στη διερεύνηση της δυνατότητας του συστήματος να χρησιμοποιηθεί σαν αντισεισμικό σύστημα σε κτίρια από σκυρόδεμα αλλά και για την ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβες.

(4) Στη διερεύνηση συζευγμένων συστημάτων FUSEIS μέσω ισχυρών δοκών σε επιλεγμένες στάθμες των ορόφων.

(5) Στη απλοποίηση της σύνδεσης των πείρων μέσω κατάργησης των δοκών-υποδοχέων, όπως μελετάται στο πρόγραμμα MATCH.

(6) Στην προσομοίωση πραγματικών κτιρίων με το σύστημα σε σεισμική τράπεζα και τη διεξαγωγή δοκιμών κάτω από πραγματικές συνθήκες σεισμού. Κατά τις δοκιμές αυτές μπορεί να αξιολογηθεί και η συμπεριφορά του κτιρίου για τους τρείς διαφορετικούς τύπους συνδέσεων κύριας δοκού - υποστυλώματος (άκαμπτες, ημιάκαμπτες και αρθρωτές) ως προς το κόστος και την ικανότητα επαναφοράς του συστήματος.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Plumier A., "New idea for safe structures in seismic zones, IABSE Symposium, Mixed structures including new materials, Brussels, 1990.
- [2] Iwankiw N. and Carter C., "The dogbone: A new idea to chew on", Modern Steel Construction, Volume 36, Issue 4, pp. 18-23, 1996.
- [3] Popov E., Blondet M. and Stepanov L., "Application of 'dog bones' for improvement of seismic behavior of steel connections", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-96/05, University of California, Berkley, California, 1996.
- [4] Christopoulos, C., Filiatrault A., Folz B., and Uang C-M., "Post-Tensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames", Journal of Structural Engineering (ASCE), Volume 128, Issue 9, pp.1111-1120, 2002.
- [5] Goel S.C., "Earthquake Resistant Design of Ductile Braced Steel Structures," Stability and Ductility of Steel Structures under Cyclic Loading, pp. 297-308, 1992.
- [6] Bruneau M., Uang C.M. and Whittaker A., "Ductile Design of Steel Structures", McGraw-Hill, Boston, 1998.
- [7] Saeki E., Iwamatu K., and Wada A., "Analytical study by finite element method and comparison with experiment results concerning buckling-restrained unbonded braces", Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan, Volume 484, pp.111- 120, 1996.
- [8] Sabelli R., Mahin S., and Chang C., "Seismic demands on steel braced buildings with bucklingrestrained braces", Engineering Structures, Volume 25, Issue 5, pp.665-666, 2003.
- [9] SEAOC AISC, "Recommended Provisions for Buckling- Restrained Braced Frames", Structural Engineers Association of California and American Institute of Steel Construction, 2001.
- [10] Plumier A., Doneux C., Castiglioni C., Brescianini J., Crespi A., Dell' Anna S. et al., "Two INnovations for Earthquake Resistant Design - The INEReD Project", Final Report, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Report EUR22044EN, 2006.
- [11] Vayas I. and Thanopoulos P., "Innovative Dissipative (INERD) Pin Connections for Seismic Resistant Braced Frames", International Journal of Steel Structures, Volume 5, Issue 5, pp.453-464, 2005.
- [12] Vayas I. and Thanopoulos P., "Dissipative (INERD) Verbindungen für Stahltragwerke in Erdbebengebieten", Stahlbau, Volume 75, Issue 12, pp.993–1003, 2006.
- [13] Vayas I., Thanopoulos P. and Castiglioni C., "Stabilitätsverhalten von Stahlgeschossbauten mit dissipativen INERD unter Erdbebenbeanspruchung", Bauingenieur, Volume 82, Issue 3, pp.125-133, 2007.
- [14] Whittaker A.S., Bertero V.V., Thomson C.L., Alonso L.J., "Seismic testing of steel plate energy dissipation devices", Earthquake Spectra, Volume 7, Issue 4, pp.563-604, 1991.

- [15] Tsai K.C., Chen H.W., Hong C. and Su Y., "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", Earthquake Spectra, Volume 9, Issue 3, pp.505-528, 1993.
- [16] Dargush G. and Soong T., "Behavior of metallic plate dampers in seismic passive energy dissipation systems", Earthquake Spectra, Volume 11, Issue 4, pp.545-568, 1995.
- [17] Tena-Colunga A., "Mathematica modeling of the ADAS energy dissipation device", Engineering Structures, Volume 19, Issue 10, pp.811-820, 1997.
- [18] Nakashima M., "Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. I:Test", Journal of Structural Engineering, Volume 121, Issue 12, pp. 1742-1749, 1995.
- [19] Nakashima M., Akazawa T. and Tsuji B., "Strain-hardening behavior of shear panels made of lowyield steel. II:Model.", Journal of Structural Engineering, Volume 121, Issue 12, pp.1750-1757, 1995.
- [20] Miyama T., Tanaka K., Meng L., Kato Y., Hirasawa M., and Sasaki M., "Study on the highly damped building with low-yield-point steel shear panel", Proceedings of the 11th Conference on Earthquake Engineering, Number 416, Elsevier Science, Ltd, 1996.
- [21] Tanaka K., Torii T., Sasaki Y., Miyama T., Kawai H., Iwata M., and Wada A., "Practical application of Damage Tolerant Structures with seismic control panel using low yield point steel to a high-rise steel building", Structural Engineering World Wide, Elsevier, Paper T190-4, 1998.
- [22] Matteis G., Mazzolani F.M. and Panico S., "Seismic protection of steel buildings by pure aluminium shear panels", Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper no. 2704, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004.
- [23] Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C.A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic-resistant steel frames (FUSEIS)", Research Fund for Coal and Steel, European Commission, EU 25901 EN 2013.
- [24] Vayas I., Karydakis Ph., Dimakogianni D., Dougka G., Castiglioni C.A., Kanyilmaz A. et al., "Dissipative devices for seismic resistant steel frames - The FUSEIS Project, Design Guide", Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, European Commission, 2012.
- [25] Vayas I., Dougka G., Dimakogianni D., "Umbau und Erweiterung des Kindergartens der Deutschen Schule Athen", Bauingenieur, Volume 6, pp.253-260, 2014.
- [26] Δούγκα Γ., "Ανάπτυξη συστημάτων σεισμικής προστασίας πολυώροφων κτιρίων", Διδακτορική διατριβή, 2016.
- [27] Καρυδάκης Φ., "Καινοτόμα συστήματα δυσκαμψίας και απορρόφησης ενέργειας σε πολυώροφα αντισεισμικά μεταλλικά κτίρια", Διδακτορική διατριβή, 2011.
- [28] Calado L., Proença J.M., Espinha M., Castiglioni C.A., "Hysteretic behaviour of dissipative bolted fuses for earthquake resistant steel frames", Journal of Constructional Steel Research, Volume 85, pp.151–162, 2013.

- [29] Castiglioni C.A., Kanyilmaz A., Calado L., "Experimental analysis of seismic resistant composite steel frames with dissipative devices", Journal of Constructional Steel Research, Volume 76, pp.1–12, 2012.
- [30] EN1998-1-1, "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1-1: General rules, seismic actions and rules for buildings", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2004.
- [31] SAP2000, CSI, Computers and Structures Inc., www.csiberkeley.com.
- [32] ABAQUS 6.10 online documentation, Simulia, 2010.
- [33] EN1993-1-1, "Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-1: General rules and rules for buildings", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2005.
- [34] ECCS –Publication no 45, "Recommended testing procedure for assessing the behaviour of structural steel elements under cyclic loads", Technical committee 1: Structural safety and Loadings, Technical Working Group 1.3: Seismic Design, Rotterdam, The Netherlands, 1986.
- [35] DIN 50125, "Testing of metallic materials Tensile test pieces", German Institute for Standardisation, 2009.
- [36] Bauschinger J., "Changes of the elastic limit and the modulus of elasticity on various metals", Zivilingenieur, Volume 27, pp.289-348, 1881.
- [37] Prager W., "A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids", Journal of Applied Mechanics, Volume 23, pp. 493-496, 1956.
- [38] Ziegler H., "A modification of Prager's hardening rule", Quarterly of Applied Mathematics, Volume 17, pp.55, 1959.
- [39] FEMA–356, "Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, 2000.
- [40] Calado L., and Castiglioni C.A., "Steel beam-to-column connections under low-cycle fatigue: Experimental and numerical research", Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper no. 1227, Acapulco, Mexico, 23-28 June, 1996.
- [41] EN1993-1-9, "Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-9: General Fatigue strength", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2005.
- [42] ATC-40, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", Applied Technology Council, California, 1996.
- [43] Vamvatsikos D. and Cornell C.A., "Incremental dynamic analysis", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 31, Issue 3, pp. 491-514, 2002.
- [44] FEMA–P695, "Quantification of building seismic performance factors", Federal Emergency Management Agency, Washington, 2009.

- [45] Vamvatsikos D. and Cornell C.A., "Tracing and post-processing of IDA curves: Theory and software implementation", Report No.RMS-44, RMS Program, Stanford University, Stanford, 2001.
- [46] EN1994-1-1, "Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2004.
- [47] EN1993-1-8, "Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints", European Committee for Standardisation (CEN), Brussels, 2005.
- [48] Seismomatch v.2.1.0, Seismosoft, www.seismosoft.com.
- [49] Vamvatsikos D., Cornell C.A., "The incremental dynamic analysis and its application to performancebased earthquake engineering", Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper no. 479, London, 2002.

Παράρτημα 1 : Σχέδια πειραματικής διάταξης και δοκιμίων





ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ



Διδακτορική Διατριβή Δανάης Δημακογιάννη



Καινοτόμα αντισεισμικά συστήματα FUSEIS με όλκιμους πείρους

