

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΡΟΠΗΣ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Στέλλα Αυγερινού

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια Διδάκτωρ*
e-mail: avgerinoustella@gmail.com

Ξενοφών Λιγνός

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, ΕΕΔΙΠ*
e-mail: lignosx@central.ntua.gr

Ανδρέας Σπηλιόπουλος

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ*
e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Παύλος Θανόπουλος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Λέκτορας*
e-mail: pavlosth@central.ntua.gr

Ιωάννης Βάγιας

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής*
e-mail: vastahl@central.ntua.gr

* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο
Μεταλλικών Κατασκευών, Αθήνα, Ελλάδα

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ διεξήχθησαν πειράματα ανακυκλιζόμενης φόρτισης σε τρία συγκολλητά πλαίσια ροπής, ως μέρος του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος MATCH, το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το Ερευνητικό Κονδύλι Ανθρακα και Χάλυβα (RFCS) [1]. Δύο από τα πλαίσια ήταν διώροφα με δύο φατνώματα, ενώ το τρίτο ήταν διώροφο με ένα φάτνωμα. Σε όλα τα δοκίμια τα υποστυλώματα είναι συνεχή και οι δοκοί συγκολλούνται στα πέλματά τους. Επιλεγμένοι κόμβοι δοκών- υποστυλωμάτων σχεδιάστηκαν με απομειωμένα πέλματα στις δοκούς (RBS) ενώ οι λοιποί κόμβοι ενισχύθηκαν. Επιπλέον, διανοίχθηκαν οπές διαμέτρου 13 mm στα πέλματα των δοκών για το ενδεχόμενο επιβολής πρόσθετων κατακόρυφων φορτίων, οι οποίες τελικά αξιοποιήθηκαν για να διερευνηθεί η δημιουργία και επέκταση των ρωγμών σε συνθήκες μεγάλης πλαστικής παραμόρφωσης και σε θέσεις πέραν των RBS.

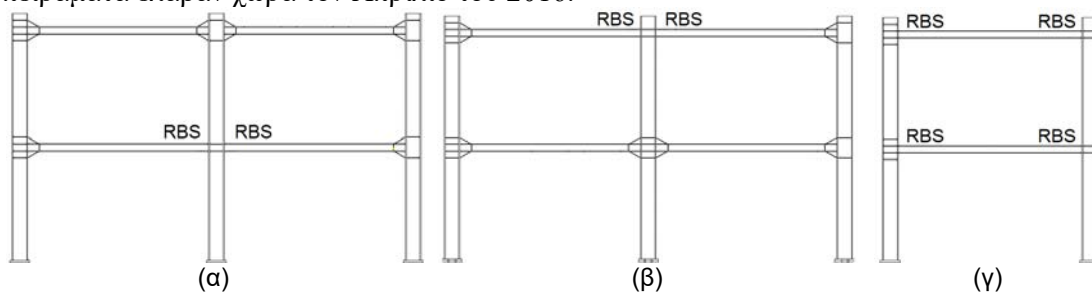
Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε: (α) ένα χωρικό πλαίσιο μεγάλης δυσκαμψίας (οιονεί στερεό), (β) μία δοκό έδρασης αγκυρωμένη στο ισχυρό δάπεδο και συνδεδεμένη κοχλιωτά με το δύσκαμπτο χωρικό πλαίσιο, (γ) το εκάστοτε δοκίμιο (επίπεδο πλαίσιο) εδραζόμενο αρθρωτά στη δοκό έδρασης, (δ) το υδραυλικό έμβολο, το οποίο στηριζόταν στο πρακτικά άκαμπτο πλαίσιο και έφερε διάταξη κατανομής του επιβαλλόμενου φορτίου σε δύο στάθμες των δοκιμίων, (ε) πλαίσια αντιστήριξης που παρεμπόδιζαν τις εκτός επιπέδου μετατοπίσεις των δοκιμίων, και (στ) τα όργανα μετρήσεων.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μέσω της επιβολής ελεγχόμενων μετακινήσεων σε κύκλους φόρτισης διαρκώς αυξανόμενου εύρους, με όριο τη μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση του υποστυλώματος ίση με 5%. Στην παρούσα δημοσίευση παρουσιάζονται συνοπτικά η προετοιμασία των πειραματικών διατάξεων, τα αποτελέσματά των πειραμάτων καθώς και η προσομοίωση τους με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ

2.1. Εισαγωγή

Τρία διάφορα πλαίσια ροπής κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ και υποβλήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Τα δύο από αυτά (Π1 και Π2) είχαν δύο φάτνωματά και σχεδιάστηκαν με εξασθενημένα τα πέλματα των δοκών (RBS) σε επιλεγμένες θέσεις κοντά στους εσωτερικούς κόμβους σύνδεσης, ενώ παράλληλα είχαν τριγωνικές ενισχύσεις και εγκάρσιες νευρώσεις στους λοιπούς κόμβους (Σχ. 1). Το τρίτο πλαίσιο (Π3) είχε ένα φάτνωμα και απομειωμένα πέλματα δοκών σε όλους τους κόμβους. Η μέθοδος της εξασθένησης τμήματος των δοκών μέσω RBS αποσκοπεί στη μετατόπιση των πλαστικών ζωνών μακριά από τις συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων, δημιουργώντας ένα είδος «ασφάλειας» που προστατεύει τις συνδέσεις έναντι πρόωρης θραύσης [2]. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομείωσης των πελμάτων των δοκών και η απόσταση από τις συνδέσεις, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 [3]. Οι κυκλικές οπές (Φ13) κατά μήκος των πελμάτων των δοκών, είχαν κατ'αρχήν διανοιχθεί για τη διευκόλυνση της στήριξης κατακόρυφων φορτίων. Ωστόσο, η επιβολή κατακόρυφων φορτίων, συμπληρωματικών ως προς τα ανακυκλιζόμενα οριζόντια, δεν κρίθηκε απαραίτητη και κατ' επέκταση οι ήδη διαμορφωμένες οπές θεωρήθηκαν μια εναλλακτική περίπτωση εξασθένησης δοκών. Τα πειράματα έλαβαν χώρα τον Απρίλιο του 2016.



Σχ. 1: Πειραματικά δοκίμια, πλαίσια Π1, Π2, Π3

2.2. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη απαρτιζόταν από ένα πρακτικά άκαμπτο χωρικό πλαίσιο στήριξης του υδραυλικού εμβόλου και μια εσχάρα δοκών έδρασης –αγκυρωμένων στο ισχυρό δάπεδο – πάνω στις οποίες τοποθετήθηκαν τα πλαίσια-δοκίμια καθώς και τα πλαίσια πλευρικής εξασφάλισης των δοκιμίων (Φωτ. 1). Οι δοκοί έδρασης ήταν αγκυρωμένες στο ισχυρό δάπεδο του Εργαστηρίου ενώ η κύρια δοκός έδρασης των πλαισίων-δοκιμίων ήταν επιπλέον συνδεδεμένη με το δύσκαμπτο χωρικό πλαίσιο ούτως ώστε οι οριζόντιες αντιδράσεις λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης του εμβόλου να μεταβιβάζονται απευθείας στη βάση του δύσκαμπτου πλαισίου, ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις δυνάμεις που μεταβιβάζονται στο δάπεδο του Εργαστηρίου. Τα δοκίμια στηρίζονταν αρθρωτά μέσω κατάλληλων διατάξεων με πείρους, οι οποίες είχαν κοχλιωθεί πάνω στη δοκό έδρασης και παρέμεναν σταθερές κατά την εναλλαγή των δοκιμίων.

Λόγω των περιορισμών του Εργαστηρίου, η αξονική απόσταση των υποστυλωμάτων των δοκιμίων ήταν 3.0m και το ύψος ορόφου 1.7 m. Οι διαστάσεις αυτές αντιπροσωπεύουν ένα ρεαλιστικό φάτνωμα πλαισίου με ύψος 3.4 m και μήκος 6.0 m, υπό κλίμακα 1:2. Οι δοκοί ήταν τύπου HEA140 ενώ τα υποστυλώματα HEB240. Οι δοκοί και τα υποστυλώματα που αποτέλεσαν τα πειραματικά δοκίμια κατασκευάστηκαν στην Ιταλία από την εταιρεία

ILVA Spa και μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο του ΕΜΠ στην Αθήνα όπου πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με περιμετρικές εξωραφές. Όλα τα μέλη αποτελούνταν από χάλυβα ποιότητας S355.



Φωτ. 1 Πειραματική διάταξη

Η συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης καθώς και η τελική τοποθέτηση των δοκιμίων έγινε με τη χρήση γερανογέφυρας και αρκετών ικριωμάτων λόγω του μεγέθους και του βάρους των επιμέρους μελών αλλά και λόγω του πλήθους των κοχλιώσεων που έπρεπε να πραγματοποιηθούν σε μεγάλο ύψος. (Φωτ. 2) Οι αντηρίδες αποτελούνται από έξι πλαίσια διατομής HEB140 που περιλαμβάνουν και λοξές ράβδους κυκλικής διατομής CHS 114×8. Στις διατάξεις της πλευρικής εξασφάλισης των δοκιμίων παρεμβάλλονταν πλάκες από τεφλόν που επέτρεπαν τις διαμήκεις μετακινήσεις χωρίς τριβές.



Φωτ. 2 Μεταφορά των δοκιμίων και συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης

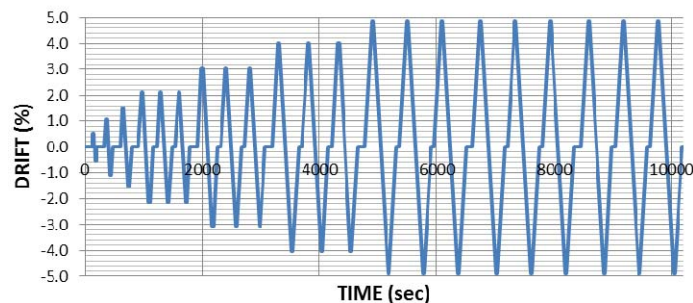
Το φορτίο του εμβόλου ασκήθηκε στα πλαίσια στις δύο στάθμες των ορόφων μέσω μιας κατακόρυφης δοκού κατανομής (Φωτ. 3). Η θέση του εμβόλου ως προς την κατακόρυφη δοκό κατανομής ήταν τέτοια έτσι ώστε το φορτία που θα κατέληγαν στο δοκίμιο να είχαν σχήμα ανεστραμμένου τριγώνου κατ'αντιστοιχία με την θεμελιώδη ιδιομορφή ταλάντωσης. Η δοκός κατανομής εξασφαλίστηκε έναντι εγκάρσιας μετακίνησης μέσω ενός συστήματος εκατέρωθεν δοκών και ρουλεμάν, το οποίο λειτούργησε εν είδει πλευρικών τροχιών (Φωτ. 3).



Φωτ. 3 Κατακόρυφη δοκός κατανομής φορτίου εμβόλου και σύστημα πλευρικής εξασφάλισής της

2.3. Πρωτόκολλο φόρτισης και καταγραφή αποτελεσμάτων

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με ελεγχόμενες ανακυκλιζόμενες μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν μέσω υδραυλικού εμβόλου. Το επιθυμητό πρωτόκολλο μετατοπίσεων προγραμματίστηκε μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή ελέγχου του εμβόλου, η δε ταχύτητα φόρτισης ήταν ίση με 1.2 mm/s. Το εύρος των μετατοπίσεων που επιβάλλονταν σε κάθε κύκλο ήταν αυξανόμενο μέχρις ότου στα δοκίμια-πλαίσια αναπτύχθηκε γωνιακή παραμόρφωση περίπου ίση με 5%. Η χρονοϊστορία φόρτισης αποφασίστηκε βάση των συστάσεων ECCS [4]. Στην αρχή κάθε πειράματος, πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι φόρτισης στην ελαστική περιοχή. Μετά το σημείο διαρροής, εφαρμόζονταν τρεις κύκλοι φόρτισης για κάθε εύρος μετακίνησης. Σε κάθε τριάδα πραγματοποιούνταν μικρές παύσεις στις θέσεις μεταξύ των διαδοχικών κύκλων (μηδενικές μετατοπίσεις) και στις ακραίες θέσεις (μέγιστες/ελάχιστες μετατοπίσεις). Αντίθετα, οι παύσεις που σηματοδοτούσαν τη μετάβαση σε επόμενη τριάδα κύκλων και κατ'επέκταση σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις ήταν μεγαλύτερες σε διάρκεια. Μετά την επιβολή της μέγιστης επιβαλλόμενης μετακίνησης, η οποία αντιστοιχεί σε γωνιακή παραμόρφωση 5%, οι κύκλοι φόρτισης έγιναν σταθερού εύρους (Σχ. 2). Κάθε πείραμα συνεχίστηκε μέχρι είτε να προκληθεί εκτεταμένη ρηγμάτωση στο δοκίμιο είτε το πλήθος των επιβαλλόμενων κύκλων μέγιστου εύρους να υπερβεί το όριο της υπερολιγοκυκλικής κόπωσης.



Σχ. 2: Πρωτόκολλο φόρτισης

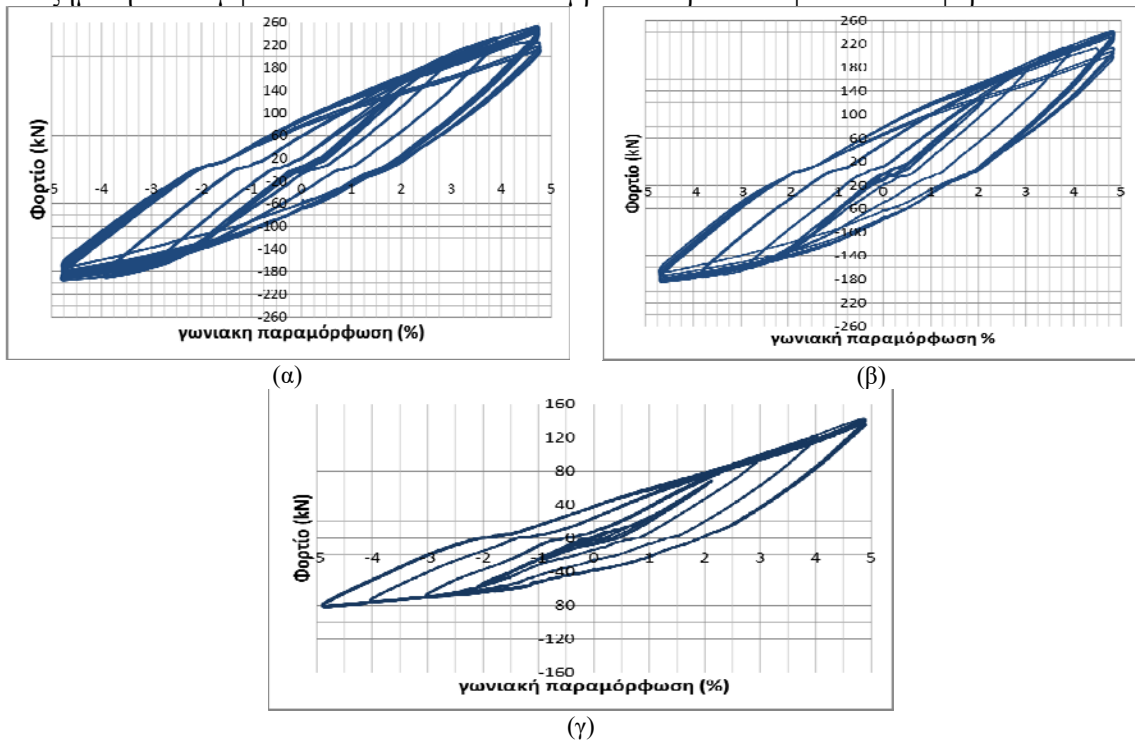
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγράφονταν οι παρακάτω μετρήσεις:

- Μετατοπίσεις του υδραυλικού εμβόλου
- Επιβαλλόμενο φορτίο μέσω του εμβόλου
- Επιβαλλόμενο φορτίο στη στάθμη του πρώτου ορόφου των πλαισίων (πρόσθετη δυναμοκυψέλη)

- Οριζόντιες μετατοπίσεις των υποστυλωμάτων των δοκιμίων σε δύο στάθμες (LVDTs)
 - Οριζόντιες ολισθήσεις των στηρίξεων των δοκιμίων (LVDTs)
 - Κατακόρυφες μετατοπίσεις των πείρων στήριξης των δοκιμίων καθώς και της δοκού έδρασης στα ίδια σημεία (LVDTs)
 - Στροφή επιλεγμένων κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων (κλισιόμετρα και LVDTs)
 - Ανηγμένες παραμορφώσεις στο μέσο των απομειωμένων πελμάτων των δοκών (strain gages)
 - Ανηγμένες παραμορφώσεις στα πέλματα των υποστυλωμάτων σε επιλεγμένη απόσταση από τις βάσεις τους και από τους κόμβους σύνδεσης δοκών-υποστυλωμάτων (strain gages)
- Επιπλέον μια θερμοκάμερα κατέγραφε την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της διαρροής του χάλυβα σε διάφορους κόμβους κατά τη διάρκεια του πειράματος.

2.4. Αποτελέσματα πειραματικών διερευνήσεων

Στο Σχ. 3 παρουσιάζεται η απόκριση των τριών δοκιμίων σε όρους επιβαλλόμενου φορτίου (kN)-γωνιακής παραμόρφωσης (%). Μπορεί να παρατηρηθεί ασυμμετρία στην φέρουσα ικανότητα όλων των πλαισίων σε θλίψη και εφελκυσμό, και συγκεκριμένα αυξημένη δυσκαμψία των πλαισίων όταν το έμβολο επιβάλλει εφελκυστικό φορτίο.



Σχ. 3: Επιβαλλόμενο φορτίο (kN) – γωνιακή παραμόρφωση (%) για τα πλαίσια (α) Π1, (β) Π2 και (γ) Π3

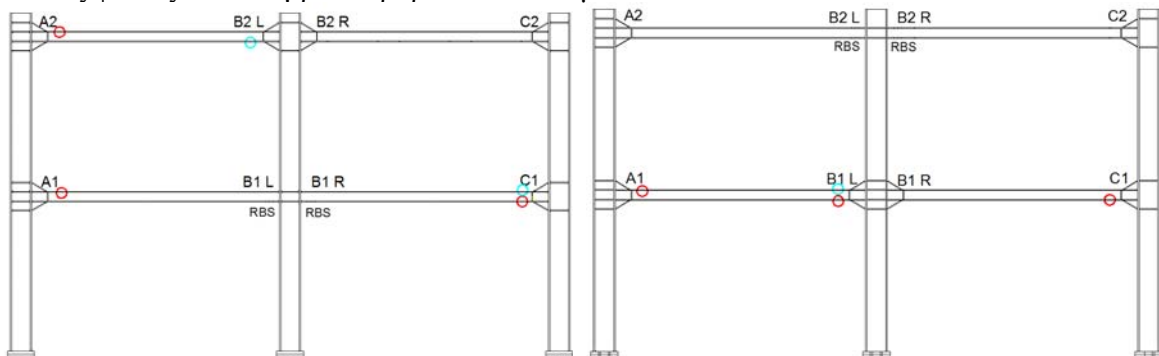
Η απόκριση των πλαισίων ήταν πλαστική. Σε όλα τα πειράματα, η πτώση του φορτίου επήλθε αφότου οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις είχαν φτάσει στο μέγιστο εύρος τους και λόγω εφαρμογής σημαντικού αριθμού κύκλων μέγιστης μετακίνησης. Η πτώση του φορτίου οφείλταν στο σχηματισμό και την επέκταση των ρωγμών, καθώς και σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Στην περίπτωση των τρίστυλων πλαισίων (Π1 και Π2), οι ρωγμές δημιουργήθηκαν γύρω από τις προαναφερθείσες οπές Φ13 και όχι κοντά στους κόμβους που διέθεταν εξασθενημένες δοκούς (Φωτ. 4). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η

επέκταση των ρωγμών από τα πέλματα στους κορμούς ήταν ταχεία και οδήγησε σε πτώση του φορτίου κατά 15% στους τελευταίους λίγους κύκλους του πειράματος.



Φωτ. 4 Επέκταση ρωγμών στα πλαίσια Π1 και Π2

Στο Σχ. 4 συνοψίζονται οι παρατηρήσεις βλαβών που έγιναν στα πλαίσια Π1 και Π2. Οι κόκκινοι κύκλοι συμβολίζουν την ανάπτυξη ρωγμών ενώ οι γαλάζιοι κύκλοι φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Δεδομένου ότι το έμβολο ήταν τοποθετημένο δίπλα στους κόμβους A1 και A2, εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι ρωγμές είχαν την τάση να επεκτείνονται στις φάσεις που το έμβολο τραβούσε τα δοκίμια.



Σχ. 4: Αστοχίες (ρηγμάτωση και τοπικός λυγισμός) στα πλαίσια Π1 και Π2

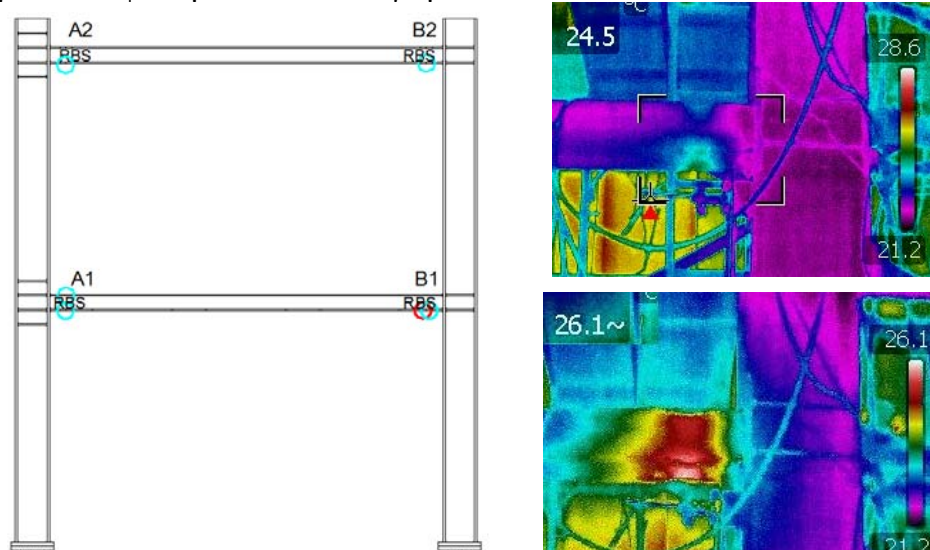
Η απόκριση του δίπτυλου πλαισίου (Π3) διαφοροποιήθηκε ελαφρώς από τα υπόλοιπα πλαίσια αφενός λόγω γεωμετρίας και αφετέρου λόγω του ότι όλοι οι κόμβοι ήταν σχεδιασμένοι με RBS. Όπως φαίνεται και στη Φωτ. 5, τοπικός λυγισμός και ρωγμές εμφανίστηκαν σε ένα από τα απομειωμένα πέλματα.



Φωτ. 5 Σχηματισμός ρωγμών και τοπικός λυγισμός σε κρίσιμη διατομή με RBS

Η διαδικασία του σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης επιβεβαιώνεται και από τις λήψεις τις θερμοκάμερας, όπου η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας στην κρίσιμη διατομή είναι εμφανής (Σχ. 5). Ωστόσο, στην περίπτωση του πλαισίου Π3 τα παραπάνω φαινόμενα εξελίχθηκαν πολύ αργά, προκαλώντας μια πιο ομαλή πτώση του φορτίου. Ως αποτέλεσμα,

στο πλαίσιο Π3 επιβλήθηκαν πενήντα (50) κύκλοι μεγάλου εύρους ενώ στα πλαίσια Π1 και Π2 μόλις εννέα (9) αντίστοιχοι κύκλοι προκάλεσαν μεγαλύτερη πτώση στην αντοχή τους. Μέχρι το πέρας του πειράματος, ο τοπικός λυγισμός ήταν εμφανής σε όλες τις περιοχές με RBS. Στο Σχ. 5 συνοψίζονται οι παρατηρήσεις βλαβών που έγιναν για το πλαίσιο Π3. Οι κόκκινοι κύκλοι επισημαίνουν ρωγμές ενώ οι γαλάζιοι κύκλοι αναφέρονται σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού.



Σχ. 5: Αστοχίες (ρηγμάτωση και τοπικός λυγισμός) στο πλαίσιο Π3 και θερμική απεικόνιση της δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης στον (κρίσιμο) κόμβο B1

Στον πίνακα Πίν. 1 συνοψίζονται οι πειραματικές διερευνήσεις σε όρους μέγιστης επιβαλλόμενης γωνιακής παραμόρφωσης (θ_{max}), τύπου βλάβης και πλήθους κύκλων φόρτισης. Σημειώνεται ότι το αναγραφόμενο πλήθος των κύκλων αναφέρεται μόνο στους κύκλους με το μέγιστο επιβαλλόμενο εύρος. Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει βεβαιότητα ως προς τον ακριβή κύκλο όπου ξεκίνησε η ρηγμάτωση, έχει χρησιμοποιηθεί σύμβολο ανισότητας ($\leq$).

Πλαίσιο	Φατνώματα	θ_{max} (%)	Κρίσιμοι κόμβοι	Κύκλος σχηματισμού ρωγμής	Συνολικοί κύκλοι
Π.1	2	4.9	Οπές (A2, A1)	$N \leq 7$	$N = 9$
Π.2	2	4.9	Οπές (A1, B1)	$N = 4$	$N = 9$
Π.3	1	4.9	RBS (B1)	$N \leq 30$	$N = 50$

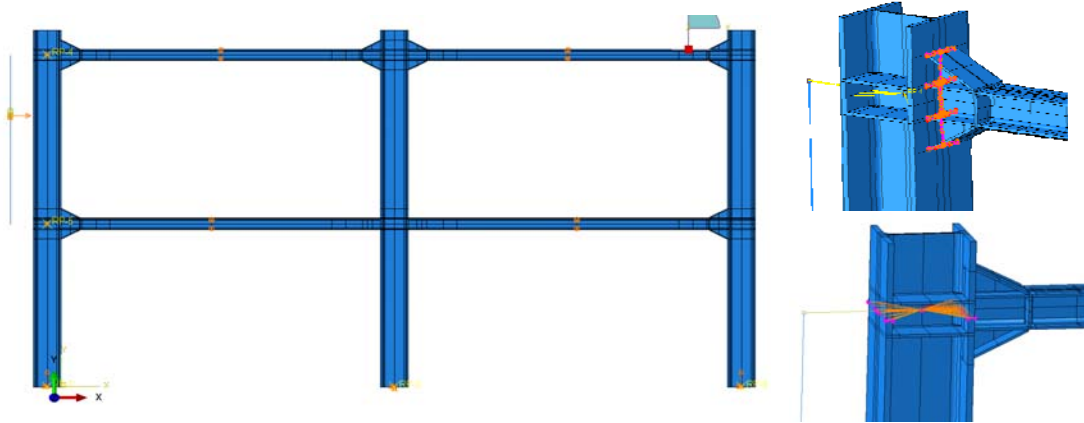
Πίν. 1 Σύνοψη πειραμάτων

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1. Παραδοχές προσομοίωσης

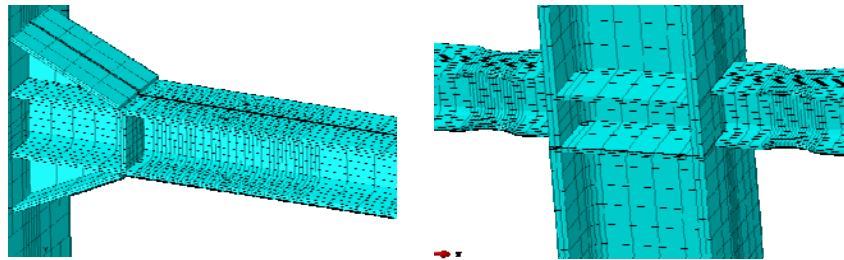
Για την προσομοίωση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το προσομοίωμα συμπεριελάμβανε το εκάστοτε δοκίμιο-πλαίσιο και την κατακόρυφη δοκό για την κατανομή του φορτίου του εμβόλου αλλά όχι την υπόλοιπη

πειραματική διάταξη (Φωτ. 6). Τα δοκίμια προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία οκτώ κόμβων (C3D8R with enhanced hourglass control, [5]) ενώ για την κατακόρυφη δοκό χρησιμοποιήθηκε στοιχείο δοκού. Τα επιμέρους τμήματα του πλαισίου προσομοιώθηκαν ως διακριτά μέλη και στη συνέχεια συνδέθηκαν μεταξύ τους με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την πραγματική τους σύνδεση. Πιο συγκεκριμένα οι συγκολλητοί κόμβοι δοκού-υποστυλώματος προσομοιώθηκαν με δεσμεύσεις που δεν επιτρέπουν καμία σχετική μετακίνηση ανάμεσα στις δυο επιφάνειες (tie constraints, [5]) ενώ για τις στηρίξεις μέσω πείρων καθώς και τις αρθρωτές συνδέσεις των δοκιμίων με την κατακόρυφη δοκό χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός από κόμβους αναφοράς και δεσμεύσεις επιλεγμένων βαθμών ελευθερίας (coupling constraints, [5]) (Φωτ. 6).



Φωτ. 6 Γενική διάταξη προσομοιώματος και λεπτομέρειες δεσμεύσεων

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν πυκνότερο στις κρίσιμες περιοχές - όπως τα RBS και οι οπές Φ13 - ενώ αραιώνει προς το μέσον των δοκών των πλαισίων, όπως φαίνεται στη Φωτ. 7. Απαραίτητο βήμα πριν την ανάθεση των δεσμεύσεων αλληλεπίδρασης αλλά και τη μόρφωση του πλέγματος, ήταν η επιμελής διακριτοποίηση των επιμέρους τμημάτων (“partitioning”) [5].



Φωτ. 7 Πύκνωση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στις κρίσιμες περιοχές

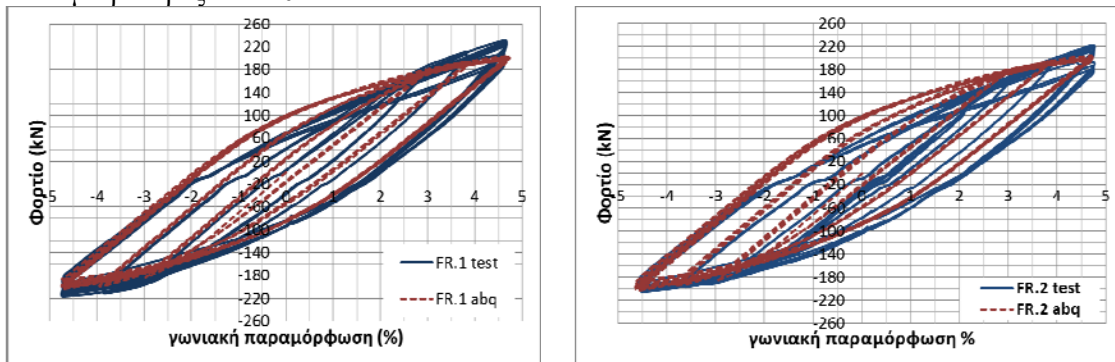
Η ανάλυση έγινε λαμβάνοντας υπόψη φαινόμενα μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Η φόρτιση μέσω του εμβόλου προσομοιώθηκε ως επιβαλλόμενη οριζόντια μετακίνηση στην κατακόρυφη δοκό φόρτισης. Δεδομένου ότι τα πλαίσια πλευρικής εξασφάλισης δεν εντάχθηκαν στο προσομοίωμα, οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις των δοκιμίων παρεμποδίστηκαν μέσω του ορισμού κατάλληλων δεσμεύσεων/συνοριακών συνθηκών. Επίσης, επιβλήθηκαν κατακόρυφες μετατοπίσεις στις στηρίξεις του προσομοιώματος, ίσες με αυτές που μετρήθηκαν στις βάσεις των πείρων κατά την ανακύκλιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον προσδιορισμό των οριζόντιων μετατοπίσεων χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από τα βελόμετρα και όχι οι ονομαστικές μετατοπίσεις που είχαν εισαχθεί κατά τον προγραμματισμό του εμβόλου. Η διόρθωση αυτή ήταν απαραίτητη για την

αναπαραγωγή του πειράματος, έτσι ώστε να εξαλειφθεί η επίδραση των κοχλιωτών και αρθρωτών συνδέσεων της πειραματικής διάταξης, καθώς ήταν πρακτικά αναπόφευκτες οι ολισθήσεις λόγω των ανοχών των οπών και των κατασκευαστικών ατελειών.

Όσον αφορά στο υλικό, εισήχθησαν στο προσομοίωμα οι πραγματικές του ιδιότητες, αξιοποιώντας τη δυνατότητα του λογισμικού να χρησιμοποιεί υπορουτίνες της FORTRAN. Έτσι, εισήχθηκε μια υπορουτίνα η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MATCH [1] κατόπιν πειραματικών διερευνήσεων μικρής κλίμακας και προσομοίωνε τη μετελαστική/υστερητική συμπεριφορά του υλικού λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις αρχές της Μηχανικής της Βλάβης. Μέσω της εφαρμογής αυτών των υπορουτίνων, εξετάστηκε η δυνατότητα πρόβλεψης της έναρξης της ρηγμάτωσης στις κρίσιμες περιοχές. Τα αποτελέσματα ήταν, σε γενικές γραμμές, ικανοποιητικά όσον αφορά στην πρόβλεψη της ρηγμάτωσης. Ωστόσο, το γεγονός ότι το μητρώο δυσκαμψίας του φορέα δεν τροποποιούνταν ανάλογα μετά την εκπλήρωση του κριτηρίου αστοχίας, είχε σαν αποτέλεσμα η πτώση της φέρουσας ικανότητας του προσομοιώματος να οφείλεται κατά βάση σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού και κατά συνέπεια να εξελίσσεται πιο αργά από ότι συνέβαινε στα πειράματα λόγω της επέκτασης των ρωγμών.

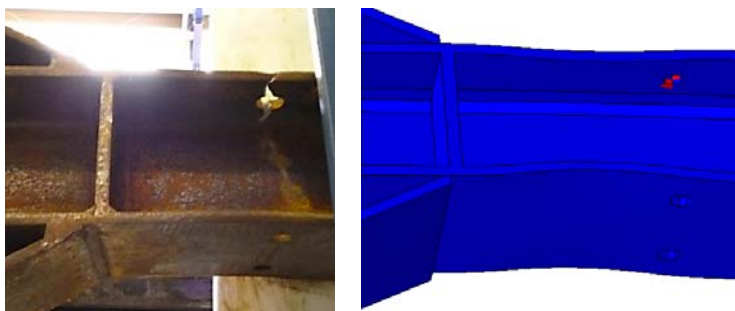
3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων

Η πιστοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων έγινε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα σε όρους δυσκαμψίας, φέρουσας ικανότητας, πλαστιμότητας και βλάβης. Στο Σχ. 6 γίνεται υπέρθεση των πειραματικών και αριθμητικών καμπύλων απόκρισης των πλαισίων Π1 και Π2 σε όρους φορτίου - γωνιακής παραμόρφωσης. Όπως παρατηρείται, η προσέγγιση των καμπύλων είναι ικανοποιητική, καθώς η δυσκαμψία των προσομοιωμάτων σχεδόν ταυτίζεται με αυτή των πειραματικών δοκιμών, ιδίως στις φάσεις της αποφόρτισης, ενώ οι αποκλίσεις στον υπολογισμό της φέρουσας ικανότητας είναι μικρότερες από 10%.



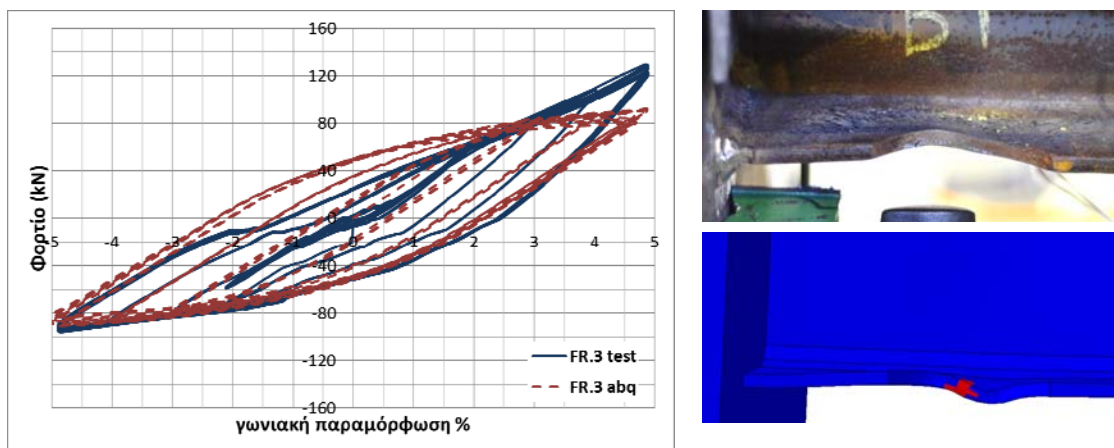
Σχ. 6: Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τα πλαίσια Π1, Π2

Όπως προαναφέρθηκε, η πτώση του φορτίου που σημειώθηκε στα πειράματα λόγω της επέκτασης των ρωγμών δε μπορούσε να αναπαραχθεί στα προσομοιώματα λόγω περιορισμών της υπορουτίνας του υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Ωστόσο, οι ενδείξεις πρόβλεψης της έναρξης της ρηγμάτωσης που περιλαμβάνονταν στα αποτελέσματα της υπορουτίνας, αποτέλεσαν ρεαλιστικές εκτιμήσεις (Φωτ. 8). Επίσης, στους κύκλους φόρτισης που προηγούνταν της ρηγμάτωσης, υπήρξε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και των μετρήσεων των strain gages.



Φωτ. 8: Σχηματισμός ρωγμής στο πείραμα και στο προσομοίωμα

Στην περίπτωση του πλαισίου Π3, σημειώθηκε σημαντική ασυμμετρία στην απόκριση, καθώς το δοκίμιο παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία και φέρουσα ικανότητα όταν έλκοταν από το έμβολο, σε σχέση με τις φάσεις που το έμβολο ωθούσε το δοκίμιο. Η ασυμμετρία αυτή οφείλεται σε ατέλειες που αφορούν στην πειραματική διάταξη και οι οποίες δεν έχουν ερμηνευθεί πλήρως, και κατ'επέκταση δεν μπορούν να αποτυπωθούν στο προσομοίωμα. Όπως προκύπτει από την υπέρθεση των πειραματικών και αριθμητικών καμπύλων απόκρισης του πλαισίου Π3 (Φωτ. 9), η σύγκλιση είναι ικανοποιητική μόνο κατά τη μια διεύθυνση φόρτισης, και συγκεκριμένα για τις αρνητικές τιμές του φορτίου, που αντιστοιχούν σε ώθηση του πλαισίου. Στο πλαίσιο Π3, ο σχηματισμός και η διάδοση της ρωγμής συνέβησαν σε ένα από τα RBS και καθυστέρησαν σημαντικά σε σύγκριση με τα πλαίσια Π1 και Π2, όπου κρίσιμότερες αποδείχθηκαν οι διατομές με τις οπές. Στην προσομοίωση, οι παραμορφώσεις και οι κρίσιμες περιοχές βλάβης του δοκιμίου αναπαραστάθηκαν ικανοποιητικά. Ωστόσο, το κριτήριο σχηματισμού ρωγμής που περιγράφεται στην υπορουτίνα του υλικού οδήγησε σε συντηρητική εκτίμηση του κρίσιμου αριθμού κύκλων φόρτισης.



Φωτ. 9 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων για τα πλαίσιο Π3 (απόκριση και σχηματισμός ρωγμής)

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Schaffrath S., Münstermann S., Di Y., Vayas I., Avgerinou S., Salvatore W., et al, “ Material Choice for Seismic Resistant Structures – MATCH project, Final Technical Report”, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, 2017. Unpublished

- [2] Θανόπουλος Π., “Αντισεισμική συμπεριφορά μεταλλικών φορέων με συστήματα απορρόφησης ενέργειας”, Διδακτορική διατριβή, 2006
- [3] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and Retrofitting of buildings; EN 1998-3:2004
- [4] ECCS: 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, 1986.
- [5] ABAQUS 6.11 documentation, Simulia, Dassault Systèmes, 2011.

FULL SCALE TESTS ON STEEL MOMENT-RESISTANT-FRAMES UNDER CYCLIC LOADING

Stella Avgerinou

Civil Engineer, PhD student*
e-mail: avgerinoustella@gmail.com

Xenofon Lignos

Dr. Electrical Engineer, Lab & teaching staff*
e-mail: lignosx@central.ntua.gr

Andreas Spiliopoulos

Civil Engineer, PhD student*
e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Pavlos Thanopoulos

Dr. Civil Engineer, Lecturer*
e-mail: pavlosth@central.ntua.gr

Ioannis Vayas

Dr. Civil Engineer, Professor*
e-mail: vastahl@central.ntua.gr

* National Technical University of Athens (NTUA), School of Civil Engineering, Institute of Steel Structures, Athens, Greece

SUMMARY

Three large scale tests on two-story Moment Resistant Frames (MRF) under cyclic loading were conducted in the Laboratory of Steel Structures of NTUA in the frame of the RFCS-supported project MATCH. Selected joints of the frames were formed with Reduced Beam Sections (RBS), in order to achieve plastic hinge formation away from the welded connections and the heat affected zones. In addition, holes were drilled in the flanges in order to study the crack initiation and crack propagation under large plastic deformations.

The experimental set-up consisted of a rigid test rig frame providing horizontal support to the hydraulic actuator, a base girder on which rested the test frame and a supporting frame, which prevented the out-of-plane movement of the test frames. The base girder was attached to the test rig so that no net horizontal force was transferred to the ground. The experimental set-up was anchored to the Laboratory's strong floor. The test frames were simply supported on the base girder.

The test frames were designed with weak beams and strong columns. The beam-to-column joints were realized with all-around fillet welds. In the two-bay frames the beams of a selected joint were designed with RBS near the connection regions while the rest of the connection regions were locally reinforced with stiffeners and beam haunches in order to ensure plastic deformation would occur in the selected joint. In the one-bay frame all beams were designed with RBS sections towards the joints.

The tests were performed under displacement control. A cyclic load of increasing amplitude was applied according to ECCS provisions while the maximum interstory drift reached was approximately 5%.

In the present paper, the preparation, the results as well as the numerical simulation of the experimental investigations are presented.