ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΛΩΝ ΑΠΟ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΕΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ

Μάριος-Ζώης Μπέζας[1,2], Maxime Vermeylen[1], Jean-François Demonceau[1]

[1]Steel and Composite Construction, UEE Research Unit, Liège University, Liège, Belgium, Marios-Zois.Bezas@uliege.be, Maxime.Vermeylen@uliege.be, jfdemonceau@uliege.be

[2]Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή ΠΑΔΑ, Αθήνα, Ελλάδα, mzbezas@uniwa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δομικά μέλη από λεπτότοιχες χαλύβδινες διατομές ψυχρής έλασης χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεταλλικές κατασκευές λόγω του μικρού ιδίου βάρους και της υψηλής αποδοτικότητάς τους. Ωστόσο, μέλη με μονοσυμμετρικές διατομές που υπόκεινται σε κάμψη παρουσιάζουν αυξημένη ευαισθησία σε τοπικό, στρεβλωτικό και πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Με σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς τέτοιων μελών υπό κάμψη, όπου είναι δυνατόν να εμφανιστούν τοπικές, καθολικές ή συνδυασμένες μορφές λυγισμού, πραγματοποιήθηκε μια σειρά 16 πειραματικών δοκιμών που περιλάμβανε δοκιμές κάμψης τριών και τεσσάρων σημείων σε δοκούς διατομών C και Σ. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές, μαζί με τις μετρήσεις των αρχικών γεωμετρικών ατελειών των δοκιμίων, καθώς και οι δοκιμές εφελκυσμού για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Στην συνέχεια, οι πειραματικά προσδιορισμένες αντοχές συγκρίνονται με τις αντοχές σχεδιασμού που προκύπτουν από την εφαρμογή των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3.

Λέξεις κλειδιά: *λεπτότοιχες διατομές, διατομές ψυχρής διαμόρφωσης, πλευρικός στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ευστάθεια, τοπικές μορφές λυγισμού.*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δομικά μέλη από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης χρησιμοποιούνται συχνά ως κύρια ή δευτερεύοντα φέροντα στοιχεία σε διάφορα είδη κατασκευών, όπως κτίρια κατοικιών ή μεταλλικά συστήματα αποθήκευσης παλετών. Παρότι η χρήση τους προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μικρό ίδιο βάρος και μεγάλη ποικιλία στη γεωμετρία των διατομών [1], οι μονοσυμμετρικές διατομές ως προς τον κύριο άξονά τους —όπως τα προφίλ τύπου C και Σ που εξετάζονται στην παρούσα εργασία— παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που επηρεάζουν σημαντικά τη δομική τους συμπεριφορά. Οι διατομές αυτές είναι ανοικτές και διαθέτουν με πολύ μικρή στρεπτική δυσκαμψία, γεγονός που τις καθιστά ευάλωτες σε τοπικό ή στρεβλωτικό λυγισμό. Επιπλέον, όταν δεν εξασφαλίζεται επαρκής πλευρική στήριξη και φορτίζονται κάθετα στον άξονα συμμετρίας τους, είναι επιρρεπείς και σε πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Η διαστασιολόγηση μελών από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης χωρίς πλευρική στήριξη που υπόκεινται σε κάμψη, πραγματοποιείται σύμφωνα με το κανονιστικό πρότυπο EN 1993-1-3 [2], που αφορά τον σχεδιασμό διατομών ψυχρής διαμόρφωσης, το οποίο, όπου απαιτείται, παραπέμπει στις διατάξεις του EN 1993-1-1 [3]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο τοπικός και ο

στρεβλωτικός λυγισμός λαμβάνονται υπόψη μέσω των ενεργών γεωμετρικών ιδιοτήτων της διατομής, ενώ ο πλευρικός στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Lateral-Torsional Buckling, LTB) αντιμετωπίζεται μέσω του μειωτικού συντελεστή χ_{LT}.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί πολυάριθμες πειραματικές [4-7], αριθμητικές και αναλυτικές μελέτες [8-11] σχετικά με τη συμπεριφορά δοκών λεπτότοιχων διατομών C και Σ υπό κάμψη. Οι έρευνες εξετάζουν ζητήματα όπως η καμπτική αντοχή των διατομών, οι αλληλεπιδράσεις τοπικού και στρεβλωτικού λυγισμού, η επίδραση της γεωμετρίας των νευρώσεων, καθώς και η πλευρική ευστάθεια των μελών. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί αναλυτικά και αριθμητικά μοντέλα για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής ροπής λυγισμού τέτοιων μελών [12].

Με στόχο την περαιτέρω διερεύνηση της ευστάθειας λεπτότοιχων μονοσυμμετρικών διατομών ψυχρής έλασης υπό κάμψη, όπου τοπικές, στρεβλωτικές και καθολικές μορφές αστάθειας μπορεί να εμφανιστούν ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στο Πανεπιστήμιο Λιέγης. Σκοπός ήταν η διεύρυνση της διαθέσιμης βάσης πειραματικών δεδομένων για λεπτότοιχες διατομές μορφής C και Σ, με έμφαση στην επίδραση της γεωμετρίας και της θέσης των νευρώσεων, που όπως έχει παρατηρηθεί [13], έχουν σημαντική επίδραση στην ευστάθεια των μελών αυτών. Επιπλέον, εξετάστηκε ο χάλυβας ποιότητας HX420LAD, για τον οποίο δεν υπάρχουν προηγούμενα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 6 δοκιμές κάμψης τριών σημείων και 10 δοκιμές τεσσάρων σημείων, ώστε να εξεταστούν διαφορετικές κατανομές καμπτικών ροπών κατά μήκος των δοκών. Παράλληλα με τις δοκιμές κάμψης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των αρχικών γεωμετρικών ατελειών των δοκιμίων, καθώς και δοκιμές εφελκυσμού με στόχο τον προσδιορισμό των πραγματικών μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Οι πειραματικά προσδιορισμένες αντοχές συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τις αντοχές σχεδιασμού που προβλέπει ο Ευρωκώδικας 3.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

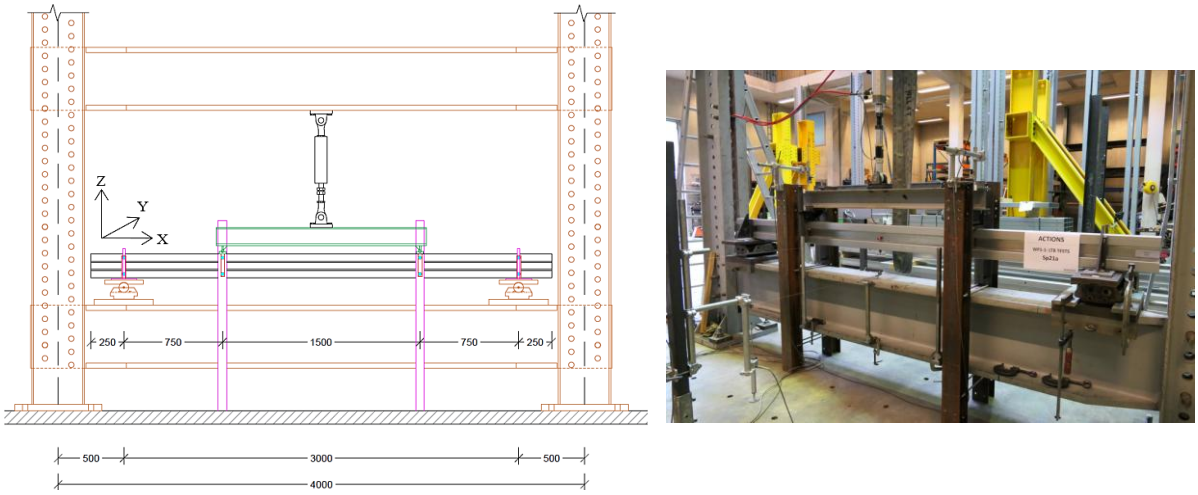
2.1. Εξεταζόμενα δοκίμια

Στο πειραματικό πρόγραμμα εξετάστηκαν διατομές τύπου Σ και C με νευρώσεις, από χάλυβα ποιότητας HX420LAD. Οι διατομές επιλέχθηκαν μεταξύ αυτών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε μεταλλικά συστήματα αποθήκευσης (SISB 130/60/2.0, SISB 180/70/1.5, SISB 160/60/2.0, C 240/65/15/1.5), ώστε ορισμένες να παραμένουν ανεπηρέαστες από φαινόμενα τοπικού λυγισμού, ενώ άλλες να εμφανίζουν φαινόμενα τοπικού ή/και στρεβλωτικού λυγισμού (διατομές πάχους 1,5 mm), σύμφωνα με τις διαταξεις του EN 1993-1-3 [2]. Για όλα τα δοκίμια, το μήκος μεταξύ των ακραίων στηρίξεων (L) διατηρήθηκε σταθερό και ίσο με 3000 mm (βλ. Σχ. 1). Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε τυπικό μήκος δοκών που συναντάται συχνά σε συστήματα αποθήκευσης, τα οποία αποτέλεσαν το αντικείμενο μελέτης της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Επιπλέον, για την αποφυγή τοπικού λυγισμού του κορμού λόγω συγκεντρωμένων φορτίων στις στηρίξεις και στα σημεία εφαρμογής του φορτίου, τοποθετήθηκαν ενισχυτικά ελάσματα (stiffeners) στις αντίστοιχες θέσεις. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στην εργασία [14].

Η κωδική ονομασία κάθε δοκιμίου, η διατομή και ο τύπος της δοκιμής συνοψίζονται στον Πίν. 2. Ο κωδικός αποτελείται από δύο αριθμούς και το γράμμα a ή b (π.χ. Sp12a). Ο πρώτος αριθμός προσδιορίζει τη γεωμετρία της διατομής, ενώ ο δεύτερος το είδος της δοκιμής (1: κάμψη τεσσάρων σημείων, 2: κάμψη τριών σημείων). Τα γράμματα a και b χρησιμοποιούνται για τη διάκριση των δύο επαναλαμβανόμενων δοκιμών του ίδιου τύπου.

2.2. Πειραματική διάταξη

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με υδραυλικό έμβολο θλιπτικής ικανότητας 100 kN το οποίο συνδέθηκε με τη δοκό του πλαισίου αντίδρασης (κίτρινα στοιχεία στο Σχ. 1) μέσω ειδικού συνδέσμου, ο οποίος επέτρεπε την εκτός επιπέδου περιστροφή γύρω από τον άξονα Y. Η διάταξη των δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων παρουσιάζεται στο Σχ. 1.



Σχήμα 1: Διάταξη δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων

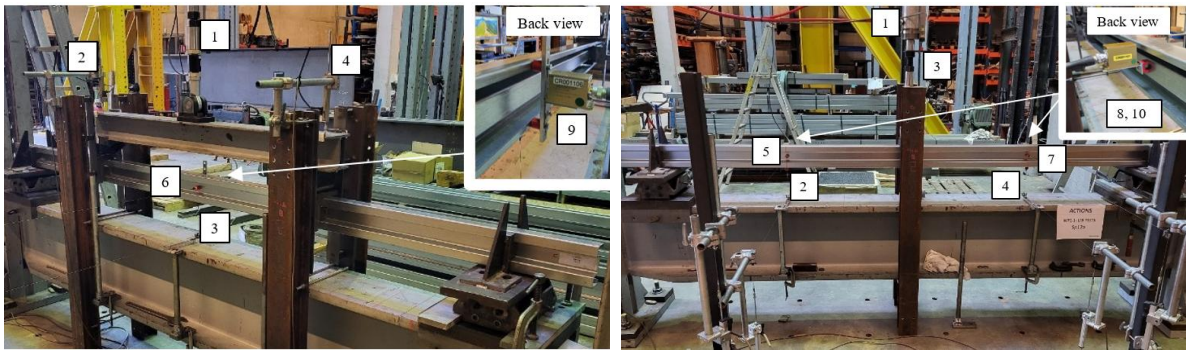
Όλα τα δοκίμια στηρίζονται στα άκρα τους μέσω κυλίσεων, επιτρέποντας έτσι την περιστροφή τους περί τον άξονα Y. Ταυτόχρονα παρεμποδίζονται οι πλευρικές μετακινήσεις τόσο στα άκρα όσο και στις θέσεις εφαρμογής των φορτίων (μωβ στοιχεία στο Σχ. 1). Η οριζόντια μετακίνηση κατά τον άξονα X επιτρέπεται μόνο στην αριστερή στήριξη. Η παρουσία των πλευρικών στηρίξεων σε συνδυασμό με τα ελάσματα ενίσχυσης στα σημεία εφαρμογής φόρτισης αποτρέπει τη στρέψη των δοκιμίων λόγω πιθανών εκκεντροτήτων μεταξύ του εφαρμοζόμενου φορτίου και του κέντρου διάτμησης της διατομής. Στις δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων, για την διαμοίραση του φορτίου που εφαρμόζεται από το υδραυλικό έμβολο στα δύο σημεία φόρτισης, χρησιμοποιήθηκε μια δοκός διατομής HEB140 (πράσινο στοιχείο στο Σχ. 1), η οποία είναι πλευρικά εξασφαλισμένη. Στις δοκιμές κάμψης τριών σημείων το φορτίο εφαρμόζεται απευθείας από το έμβολο στο δοκίμιο. Όλες οι λεπτομέρειες σύνδεσης των δοκιμίων με την πειραματική διάταξη (διαστάσεις συνδέσμων και συνδετικών πλακών) παρέχονται στην εργασία [14].

2.3. Ενοργάνωση δοκιμών κάμψης

Στο Σχ. 2 παρουσιάζεται η ενοργάνωση των δοκιμών κάμψης τεσσάρων (αριστερά) και τριών (δεξιά) σημείων, ενώ οι αριθμοί που εμφανίζονται στο σχήμα αντιστοιχούν στο σύστημα αρίθμησης που χρησιμοποιείται στην παρούσα υποενότητα. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κάμψης καταγράφηκαν διάφορες μετρήσεις, οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω:

1. Εφαρμοζόμενο φορτίο (στο έμβολο)
2. Κατακόρυφη μετατόπιση στο L/4 (στο μέσο του πλάτους του άνω πέλματος)
3. Κατακόρυφη μετατόπιση στο L/2 (στο μέσο του πλάτους του άνω πέλματος)
4. Κατακόρυφη μετατόπιση στο 3L/4 (στο μέσο του πλάτους του κάτω πέλματος)
5. Πλευρική μετατόπιση στο L/4 (στο μέσο του ύψους του κορμού)
6. Πλευρική μετατόπιση στο L/2 (στο μέσο του ύψους του κορμού)
7. Πλευρική μετατόπιση στο 3L/4 (στο μέσο του ύψους του κορμού)

8. Εκτός επιπέδου στροφή στο L/4 (στο μέσο του ύψους του κορμού)
9. Εκτός επιπέδου στροφή στο L/2 (στο μέσο του ύψους του κορμού)
10. Εκτός επιπέδου στροφή στο 3L/4 (στο μέσο του ύψους του κορμού)



Σχήμα 2: Διάταξη καταγραφής δοκιμών κάμψης 4 σημείων (αριστερά) και 3 σημείων (δεξιά)

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο της επιβαλλόμενης δύναμης (load-controlled), ενώ το φορτίο που εφαρμοζόταν από το έμβολο καταγραφόταν απευθείας από το μετρητικό σύστημα του εμβόλου. Όλες οι μετατοπίσεις μετρήθηκαν με χρήση LVDT's και στροφές με χρήση ινκλινομέτρων. Στις δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στις θέσεις L/4 και 3L/4 μετρήθηκαν στη δοκό HEB140, καθώς αυτές αναμένεται να είναι ίδιες τόσο στο δοκίμιο όσο και στη δοκό λόγω της ύπαρξης των πλευρικών στηρίξεων.

3. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

3.1. Μετρήσεις μηχανικών ιδιοτήτων χάλυβα

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα των δοκιμίων προσδιορίστηκαν μέσω τεσσάρων δοκιμών εφελκυσμού για κάθε διατομή, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 6892-1 [15]. Ο Πίν. 1 παρουσιάζει τις μέσες τιμές της ανώτερης τάσης διαρροής (R_{eH}) ή της τάσης διαρροής για μόνιμη παραμόρφωση 0,2% ($R_{p0.2}$), της κατώτερης τάσης διαρροής (R_{eL}), της αντοχής σε εφελκυσμό (R_m) και του μέτρου ελαστικότητας (E) για κάθε μια από τις ελεγχόμενες διατομές.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Διατομή	R_{eH} ή $R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	E [MPa]
SISB 130/60/2.0	497,65	490,19	573,07	200041
SISB 180/70/1.5	413,88	413,88	538,39	204105
SISB 160/60/2.0	469,76	461,31	546,06	204940
C 240/65/15/1.5	435,06	424,44	488,06	208192
C 240/65/25/3.5	416,53	411,71	497,15	200864

3.2. Μετρήσεις γεωμετρίας δοκιμίων και αρχικών γεωμετρικών ατελειών

Η πραγματική γεωμετρία των διατομών μετρήθηκε σε τρεις θέσεις κατά μήκος του κάθε δοκιμίου: κοντά στα δύο άκρα και στο μέσον του ανοίγματος. Μετρήθηκε επίσης το συνολικό

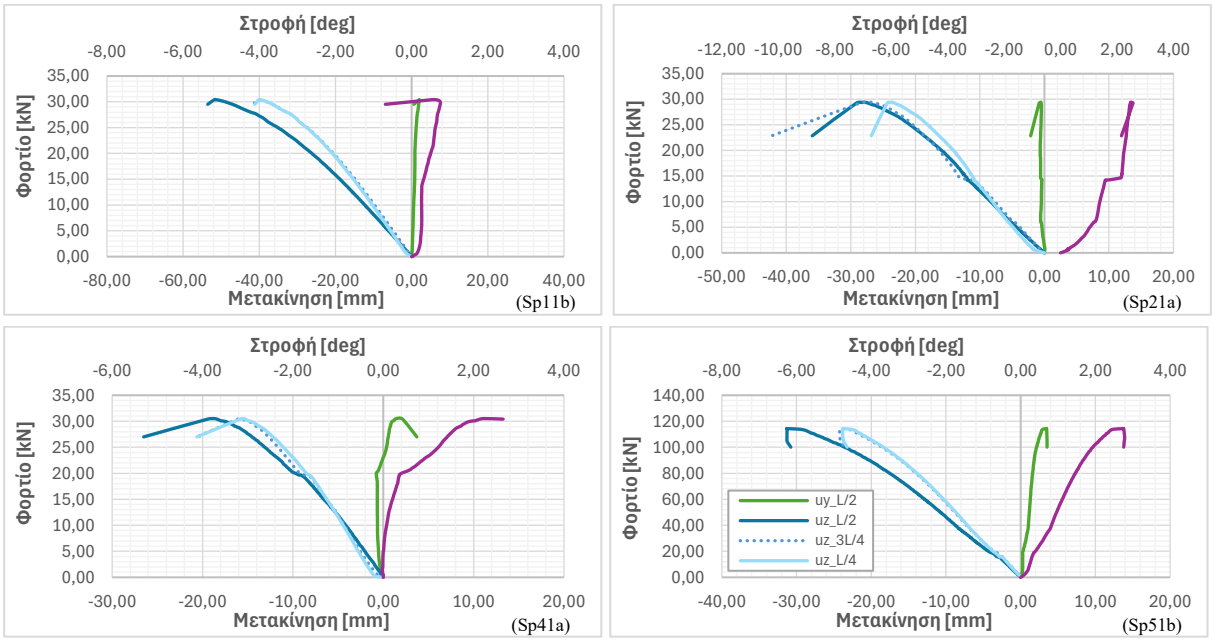
μήκος του κάθε δοκιμίου, καθώς και οι γωνίες των τεσσάρων ακμών της διατομής. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι η πραγματική γεωμετρία των διατομών δεν διέφερε σημαντικά από την αντίστοιχη ονομαστική, με τη μέγιστη καταγεγραμμένη απόκλιση να ανέρχεται στο 4%.

Επιπλέον, μετρήθηκαν οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες όλων των δοκιμίων. Το σύστημα μέτρησης, καθώς και η επεξεργασία των μετρήσεων αναλύονται εκτενέστατα στην εργασία [14]. Σύμφωνα με τον EN 1993-1-3 [2], οι μεταλλικές κατασκευές από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις διατάξεις του EN 1090-4 [16], το οποίο παραπέμπει στο EN 10162 [17] όσον αφορά τις γεωμετρικές ανοχές των διατομών. Σύμφωνα με το EN 10162, η εκτός επιπέδου καμπυλότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει το L/500, ενώ η στροφή του μέλους πρέπει να είναι μικρότερη από 1,0° ανά μέτρο μήκους. Επιπλέον, η επιτρεπόμενη ανοχή για τη γωνία στρέβλωσης των πελμάτων πλάτους 40–80 mm είναι 1,15°. Από τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι όλα τα δοκίμια είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, με μόνη εξαίρεση τις διατομές SISB 180/70/1.5, όπου η γωνία στρέβλωσης ξεπερνά την επιτρεπόμενη από τον κανονισμό τιμή.

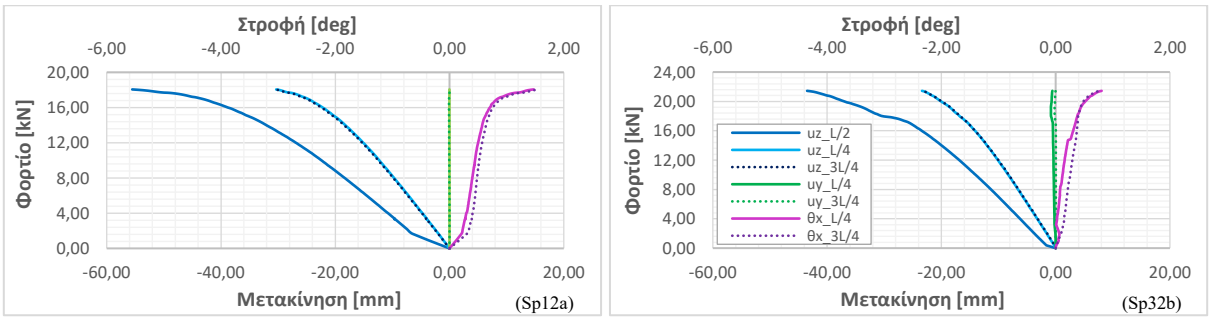
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΜΨΗΣ

Για κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δύο κύκλοι φόρτισης–αποφόρτισης. Κατά τον πρώτο κύκλο, τα δοκίμια φορτίστηκαν έως περίπου το 33% της εκτιμώμενης αντοχής σχεδιασμού που υπολογίστηκε σύμφωνα με τον EN 1993-1-3 [2] και στη συνέχεια αποφορτίστηκαν έως το 10% της αντοχής. Αυτός κύκλος φόρτισης είχε ως στόχο να εξασφαλίσει την πλήρη επαφή μεταξύ όλων των στοιχείων της πειραματικής διάταξης (πλευρικές στηρίξεις, ελάσματα κ.λπ.) και να απορροφήσει τυχόν κενά που προέκυψαν λόγω των αποδεκτών ανοχών συναρμογής, ενώ παράλληλα επέτρεψε την ακριβέστερη καταγραφή της αρχικής δυσκαμψίας του μέλους. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε δεύτερος κύκλος φόρτισης έως την αστοχία του μέλους, μετά τον οποίο τα δοκίμια αποφορτίστηκαν πλήρως. Για λόγους καλύτερης παρουσίασης των διαγραμμάτων, οι κλάδοι του πρώτου κύκλου φόρτισης–αποφόρτισης έχουν αφαιρεθεί. Στα Σχ. 3 και 4 παρουσιάζονται ενδεικτικές καμπύλες φορτίου–μετακίνησης και φορτίου–στροφής από τις δοκιμές κάμψης τεσσάρων και τριών σημείων, αντίστοιχα. Οι αναγραφόμενες μετακινήσεις είναι σύμφωνες με το σύστημα αξόνων που παρατίθεται στο Σχ. 1.

Για όλα τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων, εκτός από το Sp21a, οι δύο κατακόρυφες μετακινήσεις $u_{z,L/4}$ και $u_{z,3L/4}$ είναι σχεδόν ίδιες, γεγονός που επιβεβαιώνει την συμμετρική εφαρμογή του φορτίου από την δοκό HEB140 στα σημεία εφαρμογής. Επιπλέον, όπως αναμενόταν, η αστοχίες εμφανίστηκαν μεταξύ των δύο ενδιάμεσων πλευρικών στηρίξεων,. Ωστόσο, στην περίπτωση του Sp21a, παρατηρήθηκε μικρή ολίσθηση για φορτίο περίπου 14,2 kN, μετά την οποία το δοκίμιο φορτίστηκε άνισα δημιουργώντας ασύμμετρη φόρτιση στη θέση 3L/4. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί ο τρόπος αστοχίας διαφέρει από εκείνον του Sp21b και γιατί η αστοχία εμφανίστηκε στη θέση εφαρμογής του φορτίου (βλ. Πίν. 2). Επίσης, η οριζόντια μετακίνηση $u_{y,L/2}$ μετρήθηκε στο μέσο του ύψους της διατομής και παρέμεινε μικρή για τα περισσότερα δοκίμια (μέγιστη μετακίνηση 2,14 mm για το Sp41a), με εξαίρεση τα Sp51a και Sp51b, για τα οποία καταγράφηκαν μετατοπίσεις 2,44 mm και 3,53 mm, αντίστοιχα. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι πλευρικές μετακινήσεις των άνω πελμάτων ήταν ελαφρώς μεγαλύτερες. Η συστροφή της μεσαίας διατομής παρέμεινε επίσης χαμηλή, με μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή 2,75°. Όλες οι μετρήσεις και τα διαγράμματα για κάθε δοκίμιο είναι διαθέσιμα στην εργασία [14].



Σχήμα 3: Ενδεικτικές καμπύλες φορτίου–μετακίνησης και φορτίου–στροφής των δοκιμών κάμψης 4 σημείων



Σχήμα 4: Ενδεικτικές καμπύλες φορτίου–μετακίνησης και φορτίου–στροφής των δοκιμών κάμψης 3 σημείων

Σε όλα τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων, οι κατακόρυφες μετακινήσεις $u_{z,L/4}$ και $u_{z,3L/4}$ ήταν σχεδόν ίσες, ενώ οι οριζόντιες μετακινήσεις $u_{y,L/4}$ και $u_{y,3L/4}$ ήταν μικρότερες από 0,80 mm, με εξαίρεση τα δοκίμια Sp22a και Sp22b για τα οποία καταγράφηκαν τιμές 1,50 mm και 1,84 mm αντίστοιχα. Η συστροφή της μεσαίας διατομής παρέμεινε επίσης χαμηλή (μικρότερη από 1,60°). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα δοκίμια αστόχησαν στη μεσαία διατομή τους, παρουσιάζοντας σχεδόν συμμετρική παραμορφωμένη μορφή ως προς τον άξονα Z στη θέση L/2.

Ο Πίν. 2 συνοψίζει τις μορφές αστοχίας και το μέγιστο φορτίο (P_{exp}), ενώ το Σχ. 5 απεικονίζει αντιπροσωπευτικές μορφές αστοχίας για τους δυο τύπους δοκιμών. Συγκεκριμένα, για τις δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων η αστοχία προέκυψε ως συνδυασμός τοπικών και καθολικών μορφών λυγισμού, συνοδευόμενων από διαρροή της κρίσιμης διατομής. Εξαίρεση αποτέλεσαν τα δοκίμια Sp51a και Sp51b, στα οποία παρατηρήθηκε πλευρικός στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Αντίθετα, στις δοκιμές κάμψης τριών σημείων δεν διαπιστώθηκε κάποια μορφή λυγισμού και όλα τα δοκίμια έφθασαν την καμπτική αντοχή της διατομής τους. Αυτό οφείλεται στις σχετικά μικρές αρχικές γεωμετρικές ατέλειες των μελών, οι οποίες ελαττώθηκαν περεταίρω κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στη διάταξη δοκιμών.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Κωδικός δοκιμίου	Διατομή	Τύπος δοκιμής	P_{exp} [kN]	Μορφή αστοχίας
Sp11a / Sp11b	SISB 130/60/2.0	Τεσσάρων σημείων	30,51 / 30,42	Τοπικός/καθολικός λυγισμός και διαρροή χάλυβα
Sp21a	SISB 180/70/1.5	Τεσσάρων σημείων	29,42	Διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη άνω πέλματος
Sp21b	SISB 180/70/1.5	Τεσσάρων σημείων	29,25	Τοπικός/καθολικός λυγισμός και διαρροή χάλυβα
Sp31a / Sp31b	SISB 160/60/2.0	Τεσσάρων σημείων	32,29 / 34,22	Τοπικός/καθολικός λυγισμός και διαρροή χάλυβα
Sp41a / Sp41b	C 240/65/15/1.5	Τεσσάρων σημείων	30,53 / 31,56	Τοπικός λυγισμός και διαρροή χάλυβα
Sp51a / Sp51b	C 240/65/25/3.5	Τεσσάρων σημείων	115,18 / 114,32	Πλευρικός στρεπτοκαμπτικός λυγισμός
Sp12a / Sp12b	SISB 130/60/2.0	Τριών σημείων	18,06 / 17,56	Διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη άνω πέλματος
Sp22a / Sp22b	SISB 180/70/1.5	Τριών σημείων	15,18 / 15,12	Διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη άνω πέλματος
Sp32a / Sp32b	SISB 160/60/2.0	Τριών σημείων	20,46 / 21,44	Διαρροή χάλυβα και σύνθλιψη άνω πέλματος



Σχήμα 5: Ενδεικτικές μορφές αστοχίας δοκιμών κάμψης

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ

Οι πειραματικά προσδιορισμένες αντοχές συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες αντοχές σχεδιασμού που προκύπτουν από την εφαρμογή των διατάξεων του EN 1993-1-3, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές γεωμετρικές και μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Σύμφωνα λοιπόν με το EN 1993-1-3, §6.2.4, η καμπτική αντοχή σχεδιασμού ενός μέλους που είναι ευαίσθητο σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με το EN 1993-1-1, §6.3.2 με χρήση της καμπύλης πλευρικού λυγισμού *b*. Επομένως, η καμπτική αντοχή θα πρέπει να λαμβάνεται από την Εξ. (1).

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} \frac{W_y f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (1)$$

όπου f_{yb} είναι η βασική τάση διαρροής, γ_{M1} ο συντελεστής ασφαλείας για την αντοχή των μελών έναντι λυγισμού (ίσος με 1,0 όπως συνιστάται στο EN 1993-1-1), και W_y είναι είτε η ενεργός ροπή

αντίστασης της διατομής υπολογιζόμενη σύμφωνα με τον EN 1993-1-3, για διατομές επιρρεπείς σε τοπικό ή στρεβλωτικό λυγισμό, είτε η ελαστική ροπή αντίστασης. Ο μειωτικός συντελεστής για τον πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό χ_{LT} υπολογίζεται από την Εξ. (2):

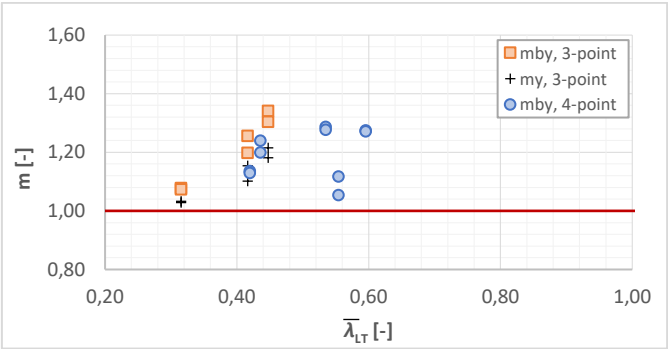
$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,eff} f_{yb}}{M_{cr}}} \quad (2)$$

όπου η κρίσιμη ελαστική ροπή M_{cr} υπολογίζεται σύμφωνα με το CEN/TR 1993-1-103 [18]. Οι πραγματικές γεωμετρικές ιδιότητες συνοψίζονται στον Πίν. 3. Οι ροπές αδρανείας (I_z, I_T και I_w) έχουν υπολογισθεί για ολόκληρη την διατομή με χρήση του λογισμικού Calpro/FineLg [19]. Η ροπή αντίστασης έχει υπολογισθεί αναλυτικά, σύμφωνα με τον EN 1993-1-3.

Πίνακας 3: Πραγματικές γεωμετρικές ιδιότητες διατομών

Διατομή	$I_z \cdot 10^4$ [mm^4]	I_T [mm^4]	$I_W \cdot 10^9$ [mm^6]	W_y [mm^3]
SISB 130/60/2.0	23,96	901	1,212	21827
SISB 180/70/1.5	34,44	487	3,247	25573
SISB 160/60/2.0	28,19	970	2,056	28989
C 240/65/15/1.5	28,55	383	3,175	24685
C 240/65/25/3.5	70,95	5180	8,164	93981

Για τους αναλυτικούς υπολογισμούς, το κρίσιμο μήκος ορίζεται ως το μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών πλευρικών στηρίξεων, δηλαδή 1500 mm και για τους δύο τύπους δοκιμών, ενώ ο συντελεστής C_1 λαμβάνεται ίσος με 1,0 και 1,77 για κάμψη τεσσάρων και τριών σημείων, αντίστοιχα. Επιπλέον, παρότι το φορτίο εφαρμόζεται στο άνω πέλμα, θεωρείται ότι $z_g = 0$ λόγω της παρουσίας των πλευρικών στηρίξεων και των ενισχυτικών ελασμάτων στις θέσεις αυτές. Παρόλο που στον σχεδιασμό της διάταξης δοκιμών οι συντελεστές k_w και k_z είχαν συντηρητικά ληφθεί ίσοι με 1,0, κατά τη διάρκεια των δοκιμών διαπιστώθηκε ότι η παρουσία των ενισχυτικών ελασμάτων πάχους 30 mm δεν επέτρεπε την ελεύθερη ανάπτυξη της στρέβλωσης στις θέσεις αυτές. Συνεπώς, οι πραγματικές τιμές των k_w και k_z ελήφθησαν ίσες με 0,5 και 1,0 για τους αναλυτικούς υπολογισμούς.



Σχήμα 6: Σύγκριση πειραματικών και κανονιστικών αντοχών

Στο Σχ. 6 παρουσιάζεται για όλα τα δοκίμια ο λόγος m_{by} της πειραματικά προσδιορισμένης μέγιστης ροπής (M_{exp}) που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή πρώτης τάξης που αναπτύχθηκε στο δοκίμιο, προς τη καμπτική αντοχή σχεδιασμού της δοκού έναντι λυγισμού ($M_{by,Rk}$) υπολογιζόμενη

σύμφωνα με την Εξ. (1), συναρτήσει της λυγηρότητας. Για τις δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων, η πειραματική ροπή υπολογίζεται ως $M_{exp} = P_{exp} \cdot L/8$, με L = 3,0 m. Αντίστοιχα, για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων ισχύει $M_{exp} = (P_{exp}/2) \cdot L_e$, όπου L_e = 1,44 m είναι η απόσταση από την ακραία στήριξη έως τη θέση αστοχίας. Επιπλέον, για τις δοκιμές τριών σημείων υπολογίζεται και ο λόγος $m_y = M_{exp}/M_{y,Rk}$, όπου $M_{y,Rk}$ είναι η καμπτική αντοχής της διατομής.

Όπως φαίνεται από την σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι αντοχές σχεδιασμού που υπολογίζονται με βάσει τις διατάξεις του EN 1993-1-3 δίνουν ασφαλή αποτελέσματα. Ειδικότερα, για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων, η μέση τιμή του λόγου m_{by} ισούται με 1,26 και έχει τυπική απόκλιση 10,8%. Οι σχετικά αυξημένες τιμές οφείλονται στο γεγονός ότι οι αναλυτικοί υπολογισμοί λαμβάνουν υπόψη τον πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, ο οποίος ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε πειραματικά για αυτόν τον τύπο δοκιμής. Αντίθετα, η σύγκριση των πειραματικών αντοχών με την καμπτική αντοχή των διατομών δίνει καλύτερα και λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα με m_y = 1,12 και CoV 7,1%. Για τις δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων, η μέση τιμή του λόγου m_{by} είναι 1,20 με CoV 7,9%. Η αυξημένη πειραματική αντοχή ωφελείται αφενός στις αυξημένες αντοχές των γωνιών των διατομών λόγω της ψυχρής κατεργασίας που υφίστανται και αφετέρου στον υπολογισμό των ενεργών ιδιοτήτων των διατομών, που όπως φαίνεται και από τις δοκιμές τριών σημείων δίνουν συντηρητικά αποτελέσματα κατά μέσο όρο 12%.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντοχή και η ευστάθεια δοκών μικρής έως μεσαίας λυγηρότητας με μονοσυμμετρικές λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης υπό κάμψη διερευνήθηκαν πειραματικά. Το πειραματικό πρόγραμμα περιλάμβανε 6 δοκιμές κάμψης τριών σημείων και 10 δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε διατομές Σ και C. Στις δοκιμές τεσσάρων σημείων, η αστοχία προέκυψε κυρίως από συνδυασμό καθολικών και τοπικών μορφών λυγισμού με ταυτόχρονη διαρροή του χάλυβα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκε πλευρικός στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Αντίθετα, στις δοκιμές τριών σημείων δεν εμφανίστηκαν φαινόμενα λυγισμού και όλα τα δοκίμια έφθασαν την αντοχή της διατομής τους σε κάμψη. Η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις προβλέψεις του EN 1993-1-3 έδειξε ότι ο κανονισμός παρέχει ασφαλείς εκτιμήσεις τόσο για τις αντοχές διατομής όσο και για τον πλευρικό στρεπτοκαμπτικό λυγισμό δοκών από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης χωρίς πλευρική στήριξη.

7. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τη Logistics in Wallonia ASBL, την Περιφέρεια της Βαλλονίας και την Pôle MecaTech για την οικονομική υποστήριξη που παρείχαν στο πλαίσιο του έργου ACTIONS: «Advanced Eurocodes Compliant Tools for Industrial Optimized Innovative Structures», στο οποίο συμμετείχαν οι εταιρείες STOW, GDTech και CRM, καθώς και το Πανεπιστήμιο της Λιέγης.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dubina, D.; Ungureanu, V.; Landolfo, R. (2012) Design of Cold-formed Steel Structures (book), ECCS-European convention for constructional steel, ISBN: 978-92-9147-107-2.

2. EN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, Brussels, Comité Europeen de Normalisation (CEN), 2006.
3. EN 1993-1-1: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels (CEN), Comité Européen de Normalisation, 2005.
4. Wang, L.; Young, B. (2014) "Design of cold-formed steel channels with stiffened webs subjected to bending". Thin-Walled Struct. 85, 81-92.
5. Chen, M.T.; Young, B.; Martinis, A.D.; Camotim, D.; Dinis, P.; (2021) "Experimental investigation on cold-formed steel lipped channel beams affected by local-distortional interaction under non-uniform bending". Thin-Walled Struct. 161, 107494.
6. Wang, H.; Zhang, Y. (2009) "Experimental and numerical investigation on cold-formed steel C-section flexural members", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, Iss. 5, pp. 1225-1235, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.08.007.
7. Laim, L.; Rodrigues, J.P.; Silva, L.S. (2013) "Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams". Thin-Walled Struct. 72, 1-13.
8. Schafer, B.W.; Sarawit, A.; Peköz, T. (2006). "Complex edge stiffeners for thin-walled members". Journal of Structural Engineering, 132(2), 212-226.
9. Shan-shan, C.; Boksun, K.; Long-yuan, L. (2013) "Lateral–torsional buckling of cold-formed channel sections subject to combined compression and bending", Journal of Constructional Steel Research, vol.80, pp. 174–180.
10. Lindner, J.; Aschinger, R. (1994) "Load-carrying capacity of cold-formed beams subjected to overall lateral–torsional buckling and local plate buckling". Journal of Constructional Steel Research, 31 (2-3), pp. 267-287.
11. Basaglia, C.; Camotim, D. (2012) "Buckling, Postbuckling, Strength, and DSM Design of Cold-Formed Steel Continuous Lipped Channel Beams". Journal of Structural Engineering, Vol. 139, Iss. 5, https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000651.
12. Vermeylen, M., Bezas, M., Crispin, M., Jaspart, J., & Demonceau, J.-F (2023). "Lateral-torsional buckling of beams made of mono-symmetrical thin-walled sections". ce/papers, 6(3–4), 1649–1654. https://doi.org/10.1002/cepa.2358
13. Haidarali, M. R., & Nethercot, D. A. (2012). "Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with both edge and intermediate stiffeners in their compression flanges". Thin-Walled Structures, 54, 106-112.
14. Bezas, M.-Z. et al. (2026) Resistance and stability of cold-formed thin-walled beams with open cross-sections subjected to bending: experimental investi-gations. Engineering Structures 360, pp. 122812, doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.122812.
15. ISO 6892 – 1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature, Brussels, Comité Europeen de Normalisation (CEN), 2016.
16. ISO 1090-4: Execution of steel structures and aluminium structures - Part 4: Technical requirements for cold-formed structural steel elements and cold-formed structures for roof, ceiling, floor and wall applications, Comité Europeen de Normalisation (CEN), 2018.
17. ISO EN 10162: Cold rolled steel sections – Technical delivery conditions – Dimensional and cross-sectional tolerances, Comité Europeen de Normalisation (CEN), 2003.
18. CEN/TR 1993-1-103 (2019) Design of steel structures - Part 1-103: Elastic critical buckling of members. CEN, Brussels.
19. FINELG: Non-linear finite element analysis program, User's manual, Version 9.0, Greisch Ingeniere, 2003.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THIN-WALLED COLD-FORMED STEEL BEAMS UNDER BENDING

Marios-Zois Bezas[1,2], Maxime Vermeylen[1], Jean-François Demonceau[1]

[1]Steel and Composite Construction, UEE Research Unit, Liège University, Liège, Belgium, Marios-Zois.Bezas@uliege.be, Maxime.Vermeylen@uliege.be, jfdemonceau@uliege.be

[2]Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering UNIWA, Athens, Greece, mzbezas@uniwa.gr

ABSTRACT

Thin-walled cold-formed steel members are frequently used as primary or secondary load-bearing elements in various types of structures, such as residential buildings or pallet racking systems. Although their use offers significant advantages—such as low self-weight and a wide variety of cross-sectional geometries—monosymmetric sections about their principal axis (like the C and Σ profiles examined in this study) possess certain characteristics that significantly affect their structural behavior. These sections are open, with very low torsional stiffness, making them susceptible to local or distortional buckling. Furthermore, when adequate lateral restraint is not provided and they are loaded perpendicular to their axis of symmetry, they are also prone to lateral-torsional buckling.

To study the behavior of such members under bending, where various forms of local, global, or combined buckling modes may occur, a series of 16 experimental tests was carried out, including three-point and four-point bending tests on beams with C and Σ cross-sections made of HX420LAD steel grade. The experimental tests are accompanied by measurements of the initial geometrical imperfections of the specimens, as well as tensile tests to determine the mechanical properties of the material. The experimentally determined resistances are then compared with the ones obtained by applying the provisions of EN 1993-1-3.

This study is funded by SPW (Service public de Wallonie) and is part of the project entitled ACTIONS: "Advanced Eurocodes Compliant Tools for Industrial Optimized Innovative Structures," involving the companies STOW group, GDTech, and CRM, as well as the University of Liège.

Keywords: *Lateral-torsional buckling, Cold-formed steel, Stability, Thin-walled sections, local buckling modes*