

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΛΩΝ ΑΠΟ ΙΣΟΣΚΕΛΗ ΓΩΝΙΑΚΑ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

Ανδρέας Σπηλιόπουλος
Πολιτικός Μηχανικός, *
e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

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

Μαρία Ελένη Δασίου
Πολιτικός Μηχανικός, *
e-mail: medasiou@mail.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

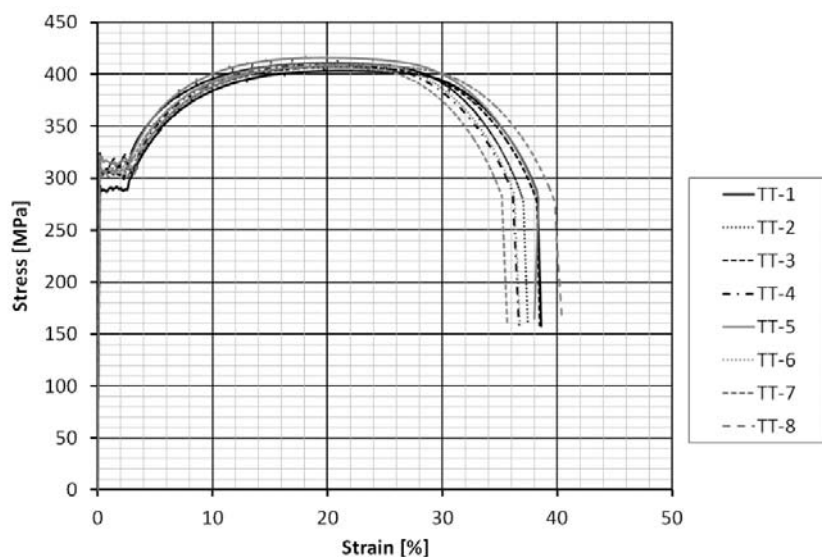
Οι γωνιακές διατομές χρησιμοποιούνται ευρέως στα έργα Πολιτικού Μηχανικού και ιδιαίτερα στους δικτυωτούς ιστούς τηλεπικοινωνιών. Οι κατασκευές αυτές ανεγείρονται συνήθως σε ορεινές και δύσβατες περιοχές με περιορισμένη προσβασιμότητα, συνεπώς η δυνατότητα μεταφοράς των υλικών και η απλούστευση του τρόπου ανέγερσης αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στο σχεδιασμό τους. Για τους παραπάνω λόγους αλλά και την ευκολία που παρέχουν οι γωνιακές διατομές στην υλοποίηση των συνδέσεων και την δυνατότητα ανέγερσης χωρίς απαίτηση βαρέων μηχανικών μέσων αποτελούν την πιο συνηθισμένη επιλογή για τέτοιου είδους κατασκευές. Παραταύτα οι αναλυτικές σχέσεις σχεδιασμού που παρέχονται στους Ευρωκώδικες EN1993-1-1 και EN 1993-3-1 δεν ισχύουν, λόγω των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών, για μέλη από γωνιακές διατομές. Στη βιβλιογραφία απαντώνται αρκετές αριθμητικές έρευνες που αφορούν τους ελέγχους διατομής και μελών με τις αντίστοιχες προτάσεις αναλυτικών σχέσεων, αλλά μόνο περιορισμένες πειραματικές έρευνες κυρίως για μέλη από γωνιακές διατομές ψυχρής έλασης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι πειραματικές διερευνήσεις σε μέλη από ισοσκελείς γωνιακές διατομές θερμής έλασης που έγιναν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν οκτώ (8) πειράματα κάμψης τριών σημείων (3-point bending tests) και τριάντα ένα (31) πειράματα έκκεντρης θλίψης. Σκοπός της παραπάνω έρευνας είναι η χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων στη βαθμονόμηση αριθμητικών προσομοιωμάτων με στόχο την ανάπτυξη νέων αναλυτικών σχέσεων εστιασμένων στο σχεδιασμό μελών από γωνιακές διατομές.

2. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ

Με σκοπό την διακρίβωση των βασικών μηχανικών χαρακτηριστικών του δομικού χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν οκτώ (8) δοκιμές μονοαξονικής φόρτισης σε μηχανή δοκιμών θλίψεως - εφελκυσμού (universal testing machine) τύπου INSTRON 300LX, στην οποία η δύναμη επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω υδραυλικού εμβόλου με επενεργητή ικανότητας 300 kN. Οι καταγραφές, οι οποίες λαμβάνονται μέσω του λογισμικού Instron Bluehill Material Testing Software (version 2.15), περιλαμβάνουν την εξασκούμενη από τη δυναμοκυψέλη δύναμη της συσκευής στατικής φορτίσεως και την παραμόρφωση στην κατάλληλα διαμορφωμένη περιοχή των δοκιμών μέσω ηλεκτρονικού μηχανομετρητή (LVDT). Το μέγιστο μήκος καταγραφής του LVDT είναι 50mm με ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,5\%$. Οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμών μετρήθηκαν, πριν την εκτέλεση των δοκιμών, με τη χρήση μικρόμετρου τύπου Mitutoyo με ακρίβεια $\pm 0.10\mu\text{m}$. Οι μέση τιμή των γεωμετρικών διαστάσεων των δοκιμών δίνεται στον πίνακα 1 ενώ στο σχήμα 2 δίνονται τα διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων των οκτώ (8) δοκιμών. Τα συνολικά αποτελέσματα όσον αφορά τις τιμές της τάσης διαρροής και της τάσης θραύσης, οι οποίες δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διασπορά, δίνονται στον πίνακα 2. Η μέση τιμή είναι 312.93MPa και 410.48MPa αντίστοιχα.

Δοκίμιο	Διάσταση	Μέγιστο [mm]	Ελάχιστο [mm]	Μέση Τιμή [mm]	Επιφάνεια [mm ²]
TT 1	Πλάτος	15,30	15,33	15,31	102,70
	Πάχος	6,70	6,72	6,71	
TT 2	Πλάτος	14,88	14,91	14,89	101,70
	Πάχος	6,82	6,84	6,83	
TT 3	Πλάτος	15,48	15,51	15,50	107,54
	Πάχος	6,93	6,95	6,94	
TT 4	Πλάτος	15,40	15,44	15,42	106,96
	Πάχος	6,93	6,94	6,93	
TT 5	Πλάτος	14,94	14,97	14,96	102,94
	Πάχος	6,87	6,90	6,88	
TT 6	Πλάτος	15,11	15,16	15,13	105,25
	Πάχος	6,95	6,96	6,95	
TT 7	Πλάτος	15,08	15,11	15,10	103,18
	Πάχος	6,81	6,88	6,83	
TT 8	Πλάτος	14,86	14,89	14,87	104,60
	Πάχος	7,03	7,04	7,03	

Πίν 1. Πραγματικές γεωμετρικές διαστάσεις των δοκιμών εφελκυσμού.



Σχήμα 2. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης των δοκιμίων εφελκυσμού

Δοκίμιο	Πραγματική τάση διαρροής [MPa]	Πραγματική τάση θραύσης [MPa]
TT1	292.84	405.26
TT2	316.08	413.52
TT3	324.29	409.05
TT4	314.83	410.84
TT5	321.65	417.04
TT6	312.80	411.63
TT7	311.35	407.13
TT8	309.60	409.40
Μέση τιμή	312.93	410.48

Πίν. 2. Μετρηθείσες τιμές τάσεων διαρροής και θραύσης των δοκιμίων εφελκυσμού

3. ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ 3-ΣΗΜΕΙΩΝ

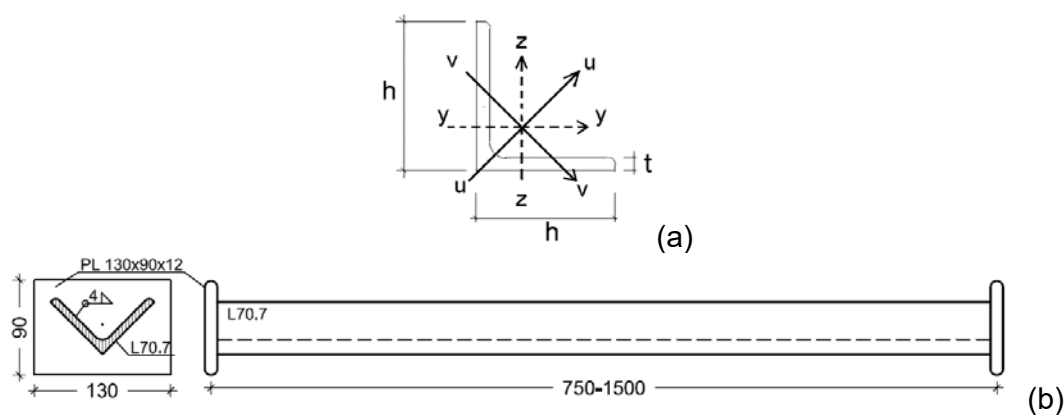
Η συμπεριφορά και η απόκριση, όσον αφορά την αντοχή σε κάμψη και την στρωφική ικανότητα, των ισοσκελών γωνιακών θερμής έλασης διερευνάται μέσω μιας σειράς δοκιμών κάμψης τριών σημείων. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν οκτώ (8) δοκιμές, τέσσερις (4) σε δοκίμια μήκους 750mm και τέσσερις (4) σε δοκίμια μήκους 1500mm, τα στοιχεία των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 3. Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μόνο μια διατομή για το σύνολο των δοκιμών η L70.7. Η δύναμη εφαρμόστηκε σε τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις με σκοπό να εξεταστεί η κάμψη περί τον γεωμετρικό (παράλληλο σε σκέλος) άξονα και περί τον ασθενή άξονα της διατομής, με τις άκρες των πελμάτων του γωνιακού να είναι υπό θλίψη και υπό εφελκυσμό κατά περίπτωση (Σχήμα 3). Η ονομασία των δοκιμών του πίνακα 3 υποδεικνύει το μήκος του δοκιμίου και την διεύθυνση που ασκείται το φορτίο.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην υλοποίηση των επιθυμητών συνοριακών συνθηκών. Στα δύο άκρα κάθε δοκιμίου συγκολλήθηκαν κατάλληλα διαμορφωμένες, ως προς την επεξεργασία της ακμής τους, μετωπικές πλάκες. Η αρθρωτή στήριξη των άκρων επιτεύχθηκε μέσω της ελεύθερης έδρασης των δοκιμίων επί δύσκαμπτων μεταλλικών πλακών ιδιαίτερα ομαλής επιφανείας οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως βάση της

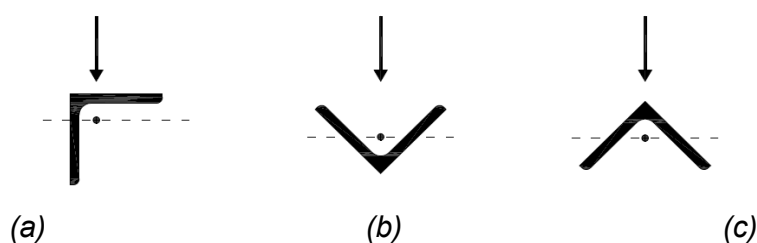
πειραματικής διάταξης. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 5, όπου τα δοκίμια εξετάστηκαν σε (α) κάμψη περί τον γεωμετρικό άξονα z-z (β) κάμψη περί τον ασθενή άξονα v-v με τις άκρες των σκελών του γωνιακού να είναι υπό θλίψη (γ) κάμψη περί τον ασθενή άξονα v-v με τις άκρες των σκελών του γωνιακού να είναι υπό εφελκυσμό (Σχήμα 4). Το φορτίο επιβλήθηκε ομοιόμορφα στο πλάτος του δοκιμίου μέσω μιας πρακτικά άκαμπτης μεταλλικής σφήνας, η οποία παρείχε την επιθυμητή ακρίβεια ως προς την θέση επιβολής του φορτίου, αλλά το σημαντικότερο, χωρίς να παρεμποδίζεται το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού.

Δοκίμιο	Μήκος [mm]	Κάμψη περί τον	Άκρο σκελών σε
B1 L750 V	750	Ασθενής [$M_v^{(-)}$]	Θλίψη
B2 L750 V		Ασθενής [$M_v^{(-)}$]	Θλίψη
B3 L750 Λ		Ασθενής [$M_v^{(+)}$]	Εφελκυσμό
B4 L750 L		Ισχυρός [M_z]	-
B5 L1500 V	1500	Ασθενής [$M_v^{(-)}$]	Θλίψη
B6 L1500 L		Ισχυρός [M_z]	-
B7 L1500 L		Ισχυρός [M_z]	-
B8 L1500 V		Ασθενής [$M_v^{(-)}$]	Θλίψη

Πίν. 3. Δεδομένα πειραμάτων κάμψης 3-σημείων.

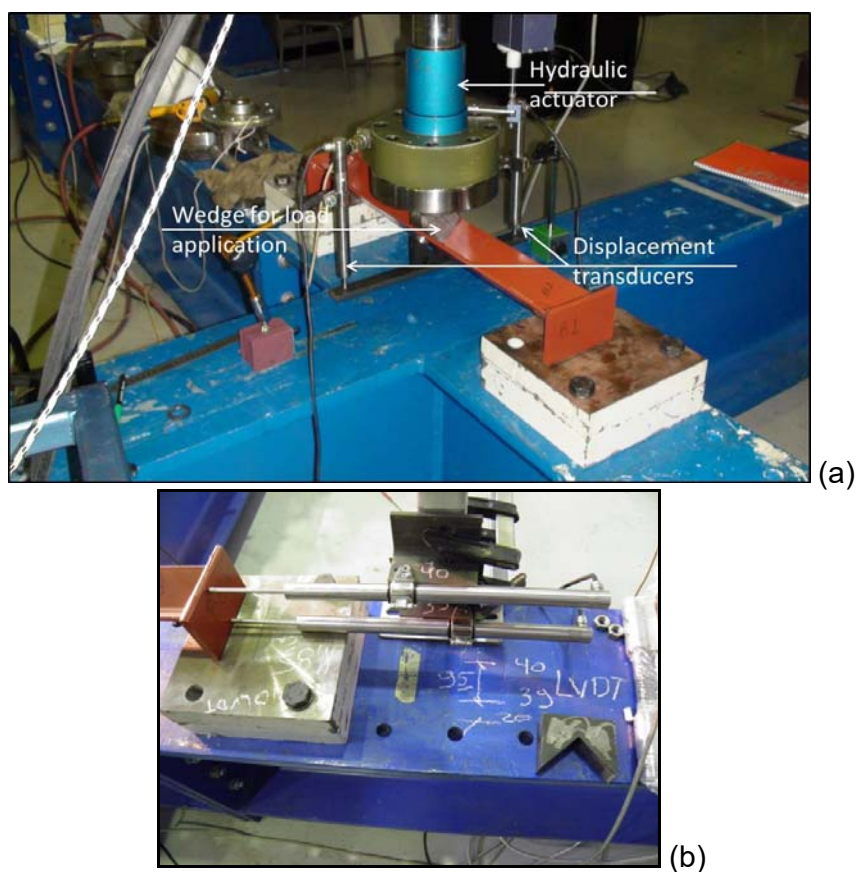


Σχήμα 3. (α) Ορισμός των αξόνων γωνιακών διατομών και (β) γεωμετρία των δοκιμίων



Σχήμα 4. Διεύθυνση φόρτισης για (α) κάμψη περί τον γεωμετρικό άξονα z-z (β) κάμψη περί τον ασθενή άξονα v-v με τις άκρες των πελμάτων του γωνιακού να είναι υπό θλίψη (γ) κάμψη περί τον ασθενή άξονα v-v με τις άκρες των πελμάτων του γωνιακού να είναι υπό εφελκυσμό

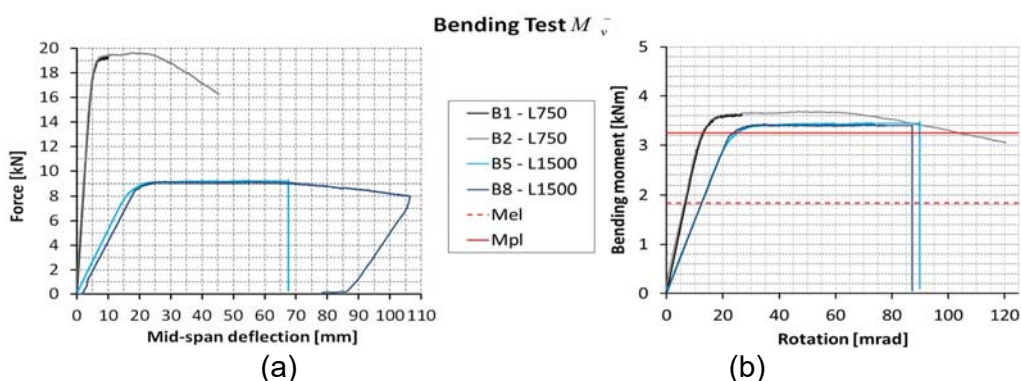
Η δύναμη επιβλήθηκε με τη χρήση υδραυλικού εμβόλου με επενεργητή ικανότητας 300 kN μέσω επιβαλλόμενης μετατόπισης. Για την μέτρηση του βέλους και της στροφής ως προς το διαμήκη άξονα στο μέσο των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν δύο γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές (LVDTs) ένας σε κάθε πλευρά της διατομής (Σχήμα 5α). Επιπρόσθετα, έγινε καταγραφή της στροφής στο άκρο του δοκιμίου μέσω δύο LVDTs τοποθετημένων σε προκαθορισμένα ύψη επί των μετωπικών πλακών (Σχήμα 5β). Τα δεδομένα συλλέχθηκαν, ψηφιοποιήθηκαν και καταγράφηκαν από ένα σύστημα National Instruments SCXI.



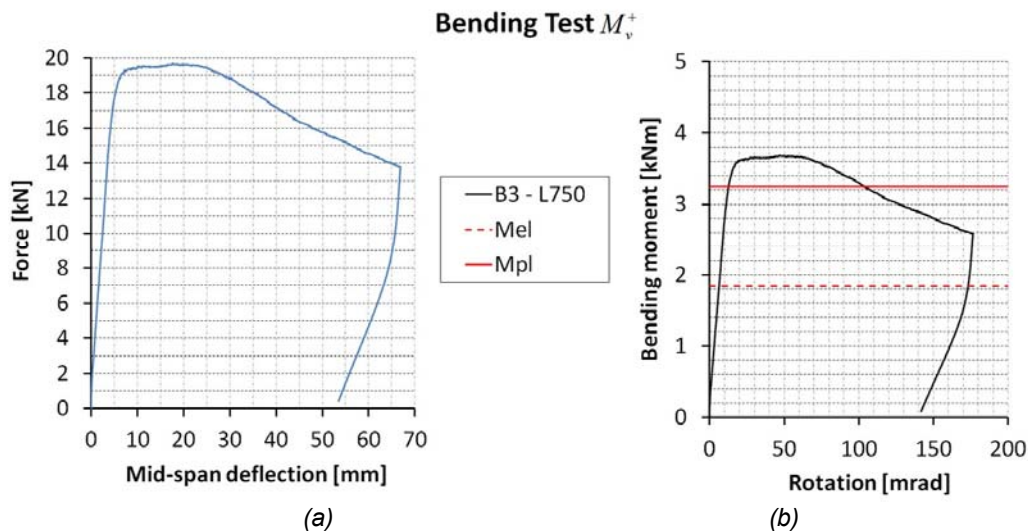
Σχήμα 5. (α) Αποψη της πειραματικής διάταξης (β) μετρήσεις για τον προσδιορισμό της στροφής στο άκρο.

Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα αποτελέσματα, σε μορφή διαγραμμάτων δύναμης – παραμόρφωσης και ροπής – στροφής, όπως προέκυψαν από τα πειράματα και για τα δύο μήκη δοκιμίων, για φορτίο που δρα παράλληλα προς τον ισχυρό άξονα u-u (το οποίο προκαλεί ροπή περί τον ασθενή άξονα v-v) όπου το άκρο των πελμάτων της διατομής είναι σε θλίψη. Όλα τα δοκίμια έφτασαν την πλαστική αντοχή σε κάμψη και εμφάνισαν σημαντική στροφική ικανότητα στην πλαστική άρθρωση με την στροφή να φτάνει τα 90mrad. Και στα τέσσερα πειράματα η αστοχία προήλθε από τοπικό λυγισμό. Στο Σχήμα 7 φαίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από το δοκίμιο μήκους 750mm, για φορτίο που δρα παράλληλα προς τον ισχυρό άξονα u-u με το άκρο των πελμάτων της διατομής να είναι σε εφελκυσμό. Σε αυτό το πείραμα δεν παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός ενώ η στροφή στην πλαστική άρθρωση έφτασε τα 120mrad. Σημειώνεται ότι η ελαστική αντοχή σε κάμψη περί τον ασθενή άξονα (Mv) όπως υπολογίζεται με βάση τον Ευρωκώδικα 3 και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως αυτές προέκυψαν από τα

αντίστοιχα πειράματα είναι 1.84kNm (Πίνακας 4), τιμή που αντιστοιχεί στο 60% αυτής των πειραματικών αποτελεσμάτων. Στο Σχήμα 8 φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα στα οποία το δοκίμιο υπόκειται σε κάμψη περί τον γεωμετρικό άξονα z-z της διατομής. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός στο άκρο του πέλματος που βρίσκεται υπό θλίψη. Παρατηρήθηκε μείωση της στρωφικής ικανότητας σε σχέση με τα προηγούμενα πειράματα (περίπου 60mrad). Σε αυτή την περίπτωση η ελαστική αντοχή σε κάμψη, με βάση τον Ευρωκώδικα 3 και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως αυτές προέκυψαν από τα αντίστοιχα πειράματα, είναι 2.47kNm (Πίνακας 4), τιμή που αντιστοιχεί στο 43% αυτής των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6. (α) Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης και (β) ροπής – στρώφης στο μέσο για τα δοκίμια με ροπή περί τον ασθενή άξονα v-v (άκρα σκελών σε θλίψη)

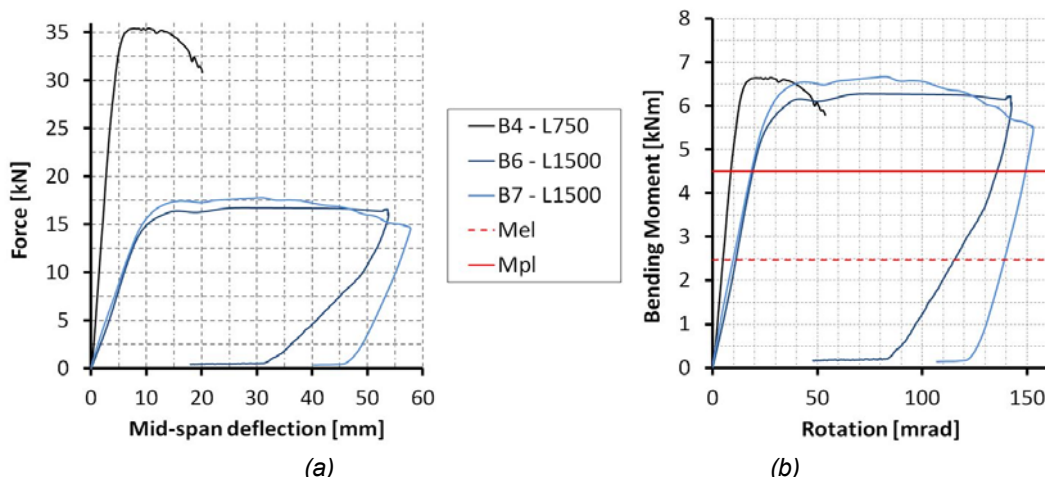


Σχήμα 7. (α) Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης και (β) ροπής – στρώφης στο μέσο για το δοκίμιο με ροπή περί τον ασθενή άξονα v-v (άκρα σκελών σε εφελκυσμό)

N_{pl} [kN]	M_{el} [kNm]			M_{pl} [kNm]		
	u	v	z	u	v	z
275.66	3.97	1.84	2.47	6.32	3.25	4.50

Πίν. 4 Ελαστικές και πλαστικές αντοχές της διατομής L70x7

Bending Test M_z



Σχήμα 8. (α) Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης και (β) ροπής – στρώσης στο μέσο για το δοκίμιο με ροπή περί τον γεωμετρικό άξονα zz .

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΚΚΕΝΤΡΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Ο σκοπός της τρίτης σειράς πειραμάτων είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς ράβδων από ισοσκελή γωνιακή διατομή θερμής έλασης, υπό κεντρική και έκκεντρη θλίψη, προκειμένου να δημιουργηθούν νέες σχέσεις αλληλεπίδρασης για τα μέλη από γωνιακές διατομές υπό θλίψη και κάμψη. Για το λόγο αυτό έγιναν τριάντα ένα (31) πειράματα αξονικής θλίψης σε ράβδους με διάφορες εκκεντρότητες και μήκη. Για να καταστεί δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μόνο μια διατομή για το σύνολο των δοκιμών η L70.7.

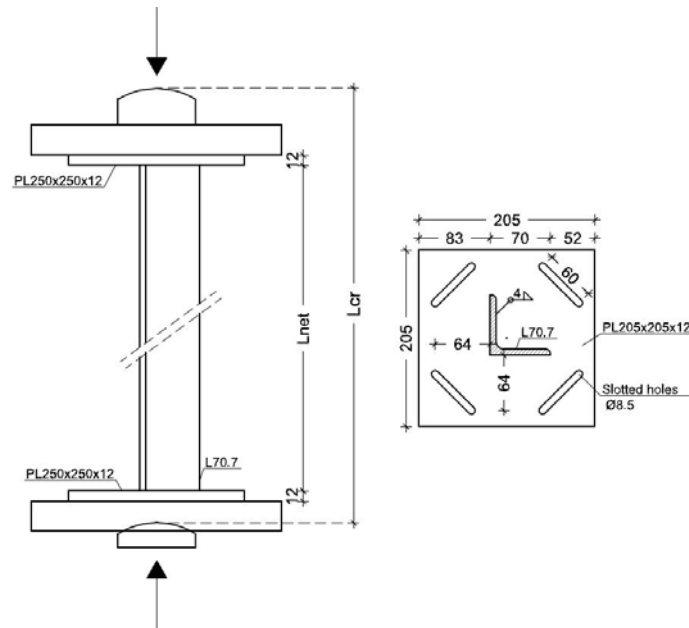
Πριν από τις δοκιμές, τα ακριβή γεωμετρικά δεδομένα όλων των δοκιμών μετρήθηκαν με ακρίβεια. Για κάθε σκέλος, ελήφθησαν τουλάχιστον 6 μετρήσεις του πλάτους και του πάχους, με τη χρήση ενός μικρομέτρου Mitutoyo που παρέχει ακρίβεια $\pm 0,10 \mu\text{m}$, τα αποτελέσματα των μέσων τιμών των μετρήσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 6. Επιπλέον, έγινε μέτρηση και καταγραφή της αρχικής ημιτονοειδούς ατέλειας για κάθε δοκίμιο. Οι τιμές που προέκυψαν ήταν ιδιαίτερα μικρές (περίπου $L / 5000$) και κρίνονται ως πρακτικά αμελητέες.

Κατά το σχεδιασμό των πειραμάτων προέκυψαν τρία σημαντικά προβλήματα τα οποία οφείλονταν κυρίως στην γωνιακή διατομή των δοκιμών. Το πρώτο πρόβλημα ήταν η υλοποίηση των επιθυμητών συντομικών συνθηκών, το δεύτερο αφορούσε τον τρόπο και την ακρίβεια της επιβολής του φορτίου σε διάφορες τιμές εκκεντροτήτων και το τρίτο την διάταξη και τον τύπο των καταγραφικών συστημάτων τα οποία θα έπρεπε να λειτουργούν σε όλη τη διάρκεια του πειράματος, ακόμα και στη μετα-λυγισμική περιοχή, με τέτοιο τρόπο όμως που να μην επηρεάζουν τη συμπεριφορά του δοκιμίου.

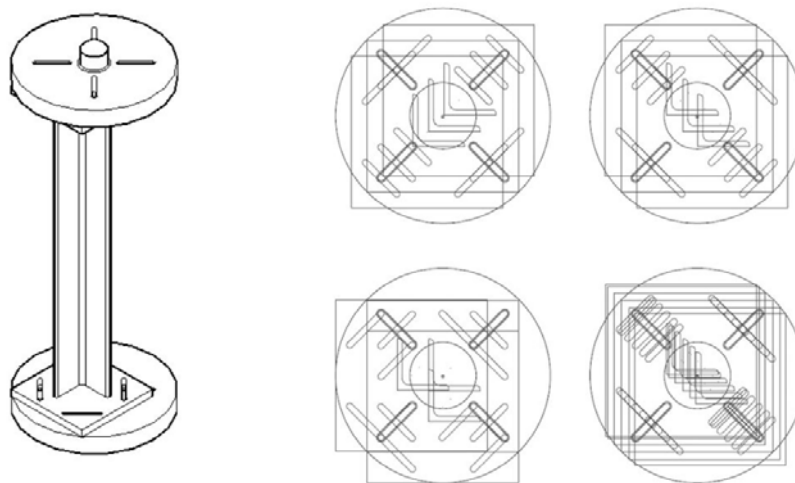
Η αρθρωτή σύνδεση στα άκρα των δοκιμών επιτεύχθηκε μέσω ειδικά σχεδιασμένων μεταλλικών εξαρτημάτων ημισφαιρικού σχήματος, τοποθετημένων ανά ζεύγη στα δύο άκρα του δοκιμίου. Επομένως, το πραγματικό μήκος (L_{net}) του δοκιμίου που μετράται μεταξύ των ακραίων πλακών διαφέρει από το μήκος λυγισμού (L_{cr}) που μετράται μεταξύ των δύο χαλύβδινων εξαρτημάτων ημισφαιρικού σχήματος.

Η δυνατότητα της ελεγχόμενης επιβολής της φόρτισης σε ένα φάσμα εκκεντροτήτων επιτεύχθηκε με την κατασκευή τεσσάρων επιμήκων οπών σε ακτινική διάταξη στις μετωπικές πλάκες οι οποίες είναι συγκολλημένες στα άκρα των δοκιμών (Σχήμα 9). Οι οπές αυτές συνδυαζόμενες με τις αντίστοιχες επιμήκεις οπές επί των μεταλλικών ημισφαιρικών κεφαλών επέτρεψαν την σύνδεση του δοκιμίου στον επενεργητή με την

επιθυμητή κατά περίπτωση εκκεντρότητα σε εύρος 70mm με διακύμανση $\pm 35\text{mm}$ (Σχήμα 10). Η φόρτιση επιβλήθηκε με τη χρήση υδραυλικού εμβόλου με επενεργητή ικανότητας 300 kN μέσω επιβαλλόμενης μετατόπισης. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν, ψηφιοποιήθηκαν και καταγράφηκαν από ένα σύστημα National Instruments SCXI. Για την μέτρηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης και της στροφής περί τον κατακόρυφο άξονα στο μέσο των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τρεις καλωδιωτοί γραμμικοί διαφορικοί μετασχηματιστές (wire transducers) (Σχήμα 11). Επιπλέον, έγινε μέτρηση της στροφής και στα δύο άκρα των υπό εξέταση μελών με τη χρήση δύο κλισιόμετρων, στερεωμένων στις μετωπικές πλάκες.



Σχήμα 9. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαμόρφωση των δοκιμών



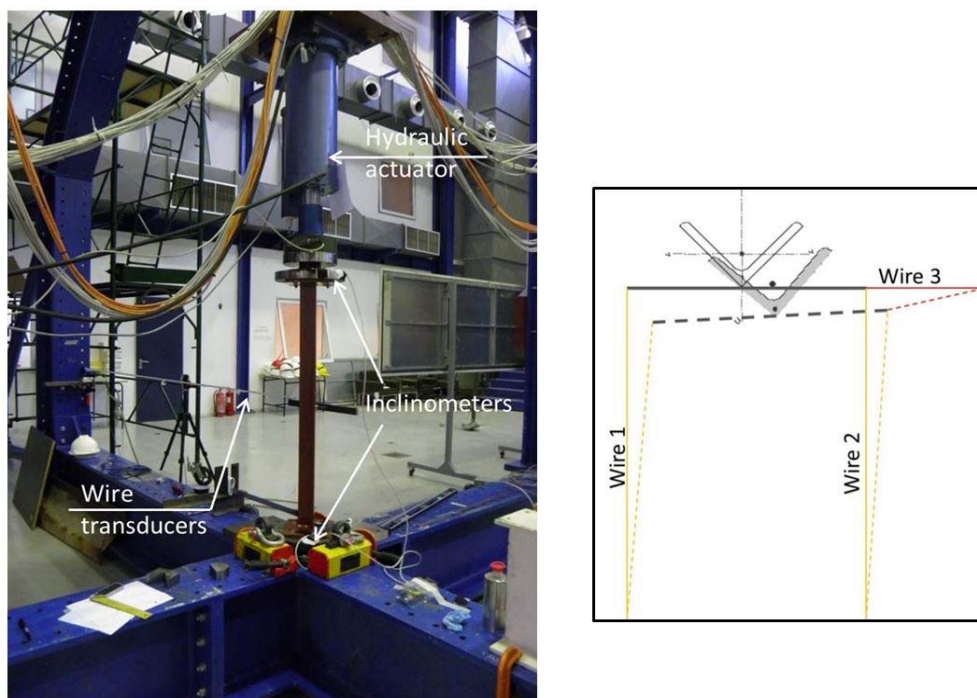
Σχήμα 10. Οι τέσσερις διαγώνιες επιμήκεις οπές οι οποίες επέτρεψαν την εφαρμογή διαφόρων εκκεντροτήτων.

Με σκοπό να διερευνηθεί η επιρροή της λυγνότητας, κατασκευάστηκαν δοκίμια με τέσσερα διαφορετικά μήκη λυγισμού, 650 mm, 1170 mm, 1750 mm και 2300 mm, τα

οποία αντιστοιχούν σε ανηγμένη λυγηρότητα περί τον ασθενή άξονα 0,57, 1,02; 1,53 και 2,01. Στον Πίνακα 5 φαίνονται το καθαρό μήκος και το μήκος λυγισμού, βλέπε σχήμα 9, καθώς και η ανηγμένη λυγηρότητα των δειγμάτων. Στον Πίνακα 6 δίνονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία για το σύνολο των πειραμάτων καθώς και τα πραγματικά γεωμετρικά στοιχεία αυτών όπως προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις.

Μήκος		Ανηγμένη λυγηρότητα		
L_{net} [mm]	L_{cr} [mm]	$\bar{\lambda}_u$	$\bar{\lambda}_v$	$\bar{\lambda}_{y,z}$
523	650	0.29	0.57	0.36
1043	1170	0.52	1.02	0.66
1623	1750	0.78	1.53	0.98
2173	2300	1.02	2.01	1.29

Πίν. 5. Μήκος και αδιάστατη λυγηρότητα των δοκιμίων



Σχήμα 11. Πειραματική διάταξη δοκιμών έκκεντρης θλίψης

Στο σχήμα 12 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης - βράχυνσης για τα έξι (6) δοκίμια με μήκος λυγισμού 650mm. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις έκκεντρότητας κατά την επιβολή του φορτίου έτσι ώστε να προκαλείται ροπή περί τον ασθενή άξονα v , περί τον κύριο άξονα u και διαξονική καταπόνηση αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται καλή αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων με ίδιες επιβαλλόμενες έκκεντρότητες και ότι το οριακό φορτίο των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κάμψη περί τον ασθενή άξονα ήταν 25% μικρότερο από το αντίστοιχο οριακό φορτίο των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κάμψη περί τον ισχυρό.

Στο σχήμα 13 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης - βράχυνσης για τα έξι (6) δοκίμια με μήκος λυγισμού 1170mm. Στο πείραμα (S1), το οποίο δεν εμφανίζεται στο διάγραμμα, η φόρτιση επιβλήθηκε κεντρικά, τέσσερα πειράματα (S2, S3, S4 και S7) έγιναν για διάφορες έκκεντρότητες κατά μήκος του ισχυρού άξονα (ροπή περί τον ασθενή), ένα

πείραμα (S6) με εκκεντρότητα κατά μήκος του ασθενή άξονα (ροπή περί τον ισχυρό) και ένα (S5) με εκκεντρότητα κατά μήκος του γεωμετρικού άξονα y προκαλώντας διαξονική καμπτική καταπόνηση. Τα πειράματα S6 και S2 εμφάνισαν μορφή αστοχίας και δυσκαμψία στην ελαστική περιοχή παρόμοια με αυτή του πειράματος κεντρικής θλίψης S1 λόγω της μικρής αναπτυσσόμενης ροπής περί τον ασθενή άξονα πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα η συμπεριφορά των δοκιμίων να ορίζεται από την θλίψη.

Δοκίμιο	Μήκος Λυγισμού [mm]	Διεύθυνση εκκεντρότητας	Εκκεντρότητα [mm]	Πλάτος [mm]		Πάχος [mm]		P_{exp} [kN]
				Leg 1	Leg 2	Leg 1	Leg 2	
				b_1	b_2	t_1	t_2	
S1	650	u	22	70.48	71.26	6.68	6.63	139.78
S2		u	22	70.17	71.38	6.64	6.68	134.61
S3		v	22	70.43	71.01	6.90	6.94	185.51
S4		v	22	70.33	71.17	6.64	6.64	172.72
S5		y	35	71.28	70.60	6.57	6.64	93.32
S6		y	35	70.57	71.29	6.86	6.96	95.19
S1	1170	-	0	70.81	70.83	7.00	6.93	228.74
S2		u	5	70.61	70.11	7.00	6.90	165.17
S3		u	15	70.89	70.19	6.97	6.89	125.92
S4		u	15	70.77	70.29	6.91	6.87	123.37
S7		u	22	70.09	70.64	6.86	6.98	101.29
S6		v	22	71.41	69.98	6.66	6.59	182.64
S5		y	35	71.18	69.94	6.60	6.64	74.87
S1	1750	u	30	71.46	70.45	7.03	6.93	55.13
S2		u	30	70.38	71.24	6.93	6.96	56.69
S3		v	30	71.72	70.97	7.01	6.92	116.54
S4		v	30	70.54	71.40	6.61	7.05	119.63
S5		y	35	71.90	71.68	6.61	6.64	58.49
S6		y	35	70.76	70.09	6.64	6.68	56.32
S7		u	5	70.32	70.70	6.72	6.67	125.62
S8		u	5	69.39	70.83	6.65	6.67	114.02
S1	2300	v	30	69.69	70.74	6.61	6.57	77.21
S5		v	30	69.43	70.92	6.55	6.67	76.47
S6		v	30	70.88	71.42	6.92	6.98	78.10
S2		u	30	70.81	71.65	6.90	7.00	38.79
S4		u	30	70.90	69.38	6.66	6.56	40.99
S8		y	35	70.00	70.98	6.64	6.49	43.32
S9		y	35	70.56	70.51	6.71	6.76	41.17
S3		-	0	71.42	70.91	6.77	6.62	214.07
S7		u	5	70.12	70.60	6.68	6.63	76.71
S10		u	5	71.20	71.63	6.76	6.84	84.60

Πίν. 6. Χαρακτηριστικά στοιχεία των πειραμάτων θλίψης, γεωμετρικά στοιχεία και οριακή αντοχή.

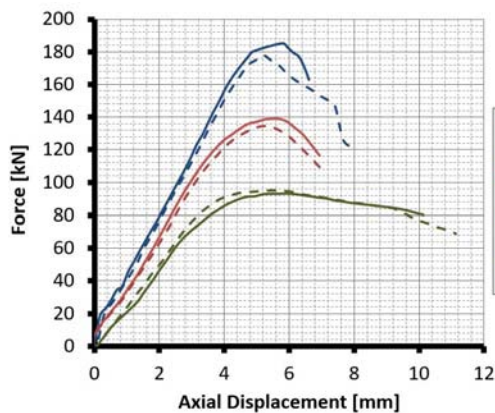
Στα σχήματα 14 και 15 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης - βράχυνσης για τα οκτώ (8) δοκίμια με μήκος λυγισμού 1750mm και τα εννέα (9) δοκίμια με μήκος λυγισμού 2300mm αντίστοιχα. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εκκεντρότητας κατά την επιβολή του φορτίου έτσι ώστε να προκαλείται ροπή περί τον ασθενή άξονα v , περί τον κύριο άξονα u και διαξονική καταπόνηση αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι επιτυγχάνεται καλή αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πειραμάτων με ίδιες επιβαλλόμενες εκκεντρότητες όσον αφορά την μορφή αστοχίας και το οριακό φορτίο. Το οριακό φορτίο των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε μονοαξονική κάμψη περί τον ασθενή άξονα (S1, S2) και διαξονική κάμψη (S5, S6) ήταν σχεδόν ίσο και μικρότερο από το αντίστοιχο οριακό φορτίο των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα. Μικρές τιμές εκκεντροτήτων (έως 5mm) κατά μήκος του ισχυρού άξονα, εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα με μια σημαντικά μεγαλύτερη εκκεντρότητα (περίπου 30mm) κατά μήκος του ασθενούς άξονα.

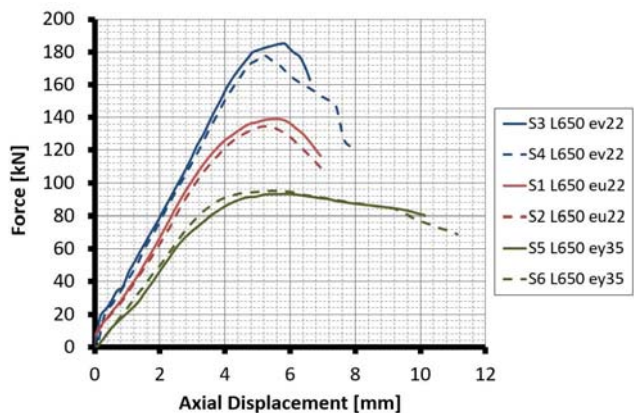
Στα σχήματα 16 έως 23 φαίνονται τα διαγράμματα δύναμης - εγκάρσιας παραμόρφωσης, στο μέσο του δοκιμίου, για όλα τα πειράματα, για τον ισχυρό και τον ασθενή άξονα κατά περίπτωση. Στα δοκίμια με μικρό μήκος οι παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα είναι αμελητέες. Άξιος λόγου παραμορφώσεις κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα εμφανίζονται όταν το φορτίο ασκείται με εκκεντρότητα κατά τον ίδιο άξονα. Σε κάποιες περιπτώσεις αυτές οι παραμορφώσεις αλλάζουν φορά κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Οι χρονοιστορίες των παραμορφώσεων αποτελεί σημαντικό στοιχείο με σκοπό τον υπολογισμό της χρονοιστορίας των καμπτικών ροπών.

Στο σχήμα 24 φαίνεται δίνεται η στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα στο μέσο των τεσσάρων (4) δοκιμίων με διαφορετικό μήκος και εκκεντρότητα κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα v . Στα δοκίμια με μικρό μήκος οι στροφές που καταγράφονται είναι πρακτικά αμελητέες. Μόνο στα μεγαλύτερου μήκους δοκίμια καταγράφονται αξιοσημείωτες στροφικές παραμορφώσεις οι οποίες πλησιάζουν τα 100 mrad.

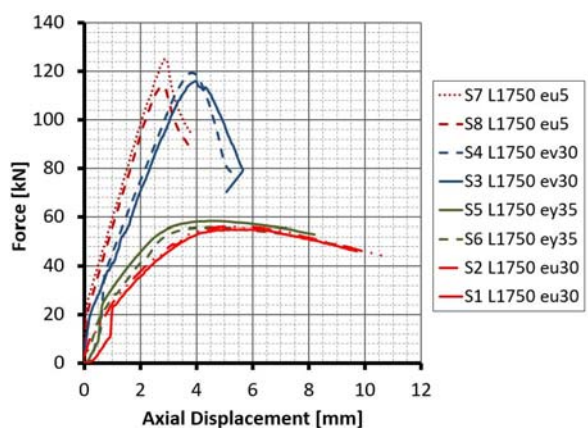
Στην τελευταία στήλη του πίνακα 6 δίνεται το οριακό φορτίο για κάθε πείραμα.



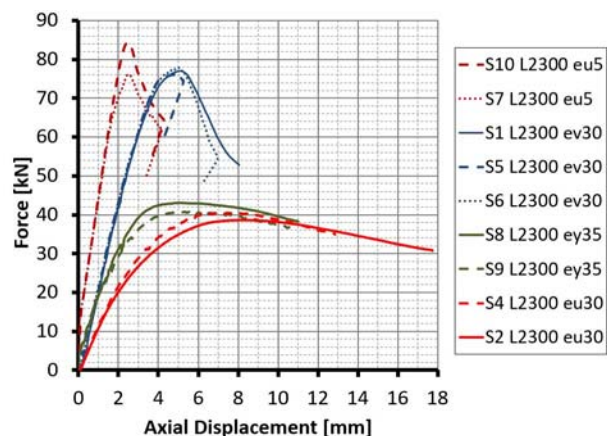
Σχήμα 12. Διαγράμματα δύναμης – βράχυνσης των δοκιμίων με μήκος λυγισμού 650mm



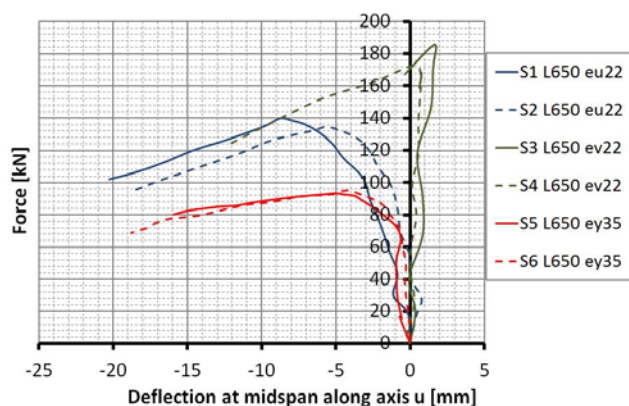
Σχήμα 13. Διαγράμματα δύναμης – βράχυνσης των δοκιμίων με μήκος λυγισμού 1170mm



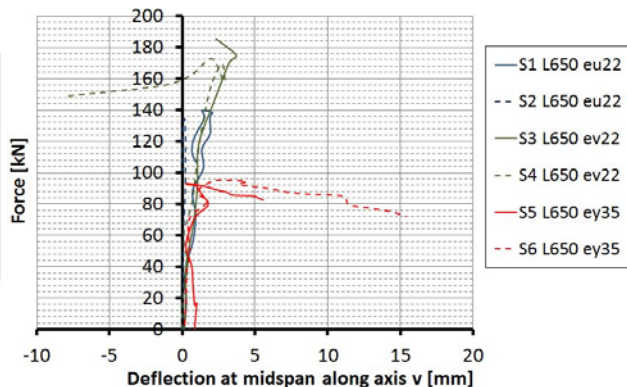
Σχήμα 14. Διαγράμματα δύναμης – βράχυνσης των δοκιμίων με μήκος λυγισμού 1750mm



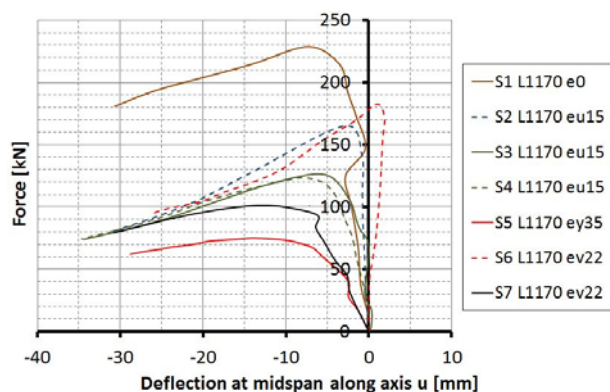
Σχήμα 15. Διαγράμματα δύναμης – βράχυνσης των δοκιμίων με μήκος λυγισμού 2300mm



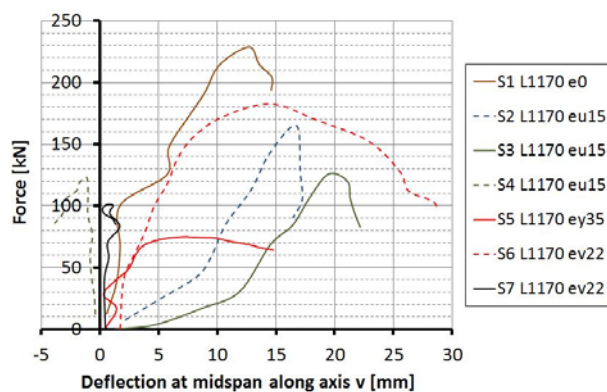
Σχήμα 16. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ασθενή άξονα των δοκιμίων με L_{cr} 650 mm



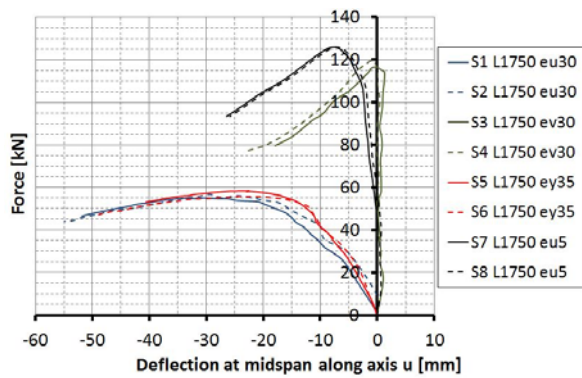
Σχήμα 17. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα των δοκιμίων με L_{cr} 650 mm



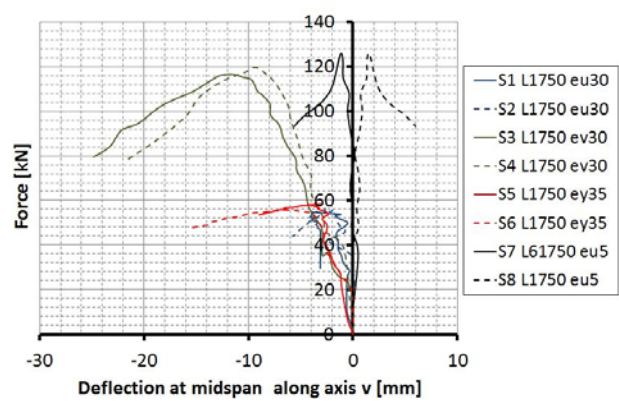
Σχήμα 18. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ασθενή άξονα των δοκιμίων με L_{cr} 1170 mm



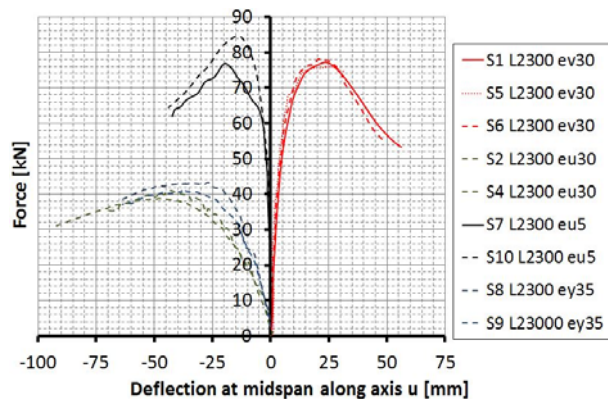
Σχήμα 19. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα των δοκιμίων με L_{cr} 1170 mm



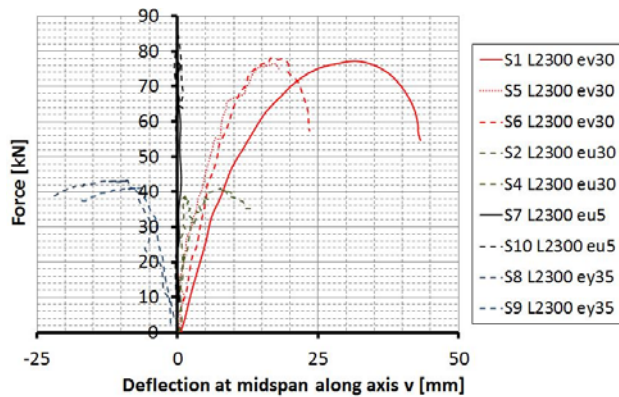
Σχήμα 20. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ασθενή άξονα των δοκιμών με $L_{cr} 1750 \text{ mm}$



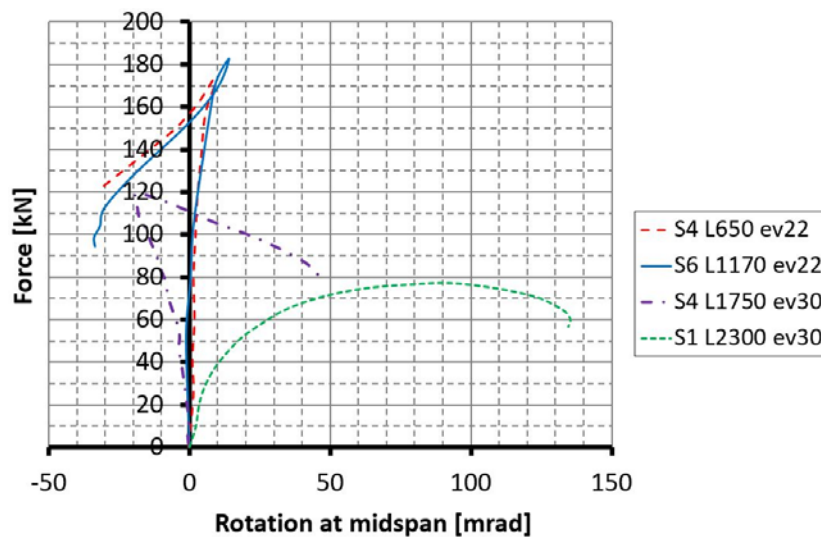
Σχήμα 21. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα των δοκιμών με $L_{cr} 1750 \text{ mm}$



Σχήμα 22. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ασθενή άξονα των δοκιμών με $L_{cr} 2300 \text{ mm}$



Σχήμα 23. Διαγράμματα δύναμης – παραμόρφωσης στο μέσο του μήκους κατά τη διεύθυνση του ισχυρού άξονα των δοκιμών με $L_{cr} 2300 \text{ mm}$



Σχήμα 24. Διαγράμματα δύναμης – στρώφης στο μέσο του μήκους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πειραματική διερεύνηση μελών με γωνιακές διατομές θερμής έλασης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Συγκεκριμένα έγιναν οκτώ (8) πειράματα κάμψης τριών σημείων (3-point bending tests) και τριάντα ένα (31) πειράματα κεντρικής και έκκεντρης θλίψης σε ράβδους με διαφορετικές λυγυρότητες. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων κάμψης προκύπτει ότι οι διατομές αυτού του τύπου έχουν αξιοσημείωτη αντοχή έναντι κάμψης, η οποία υπερβαίνει την πλαστική τους αντοχή, επιδεικνύοντας ταυτόχρονα πολύ μεγάλη στρωφική ικανότητα. Το σύνολο των πραγματοποιηθέντων πειραμάτων αποτελεί μια καλή πειραματική βάση στην οποία οι αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να βαθμονομηθούν για να δώσουν νέους τύπους για το σχεδιασμό των γωνιακών μελών. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων υποδεικνύουν ότι οι αναλυτικές σχέσεις που προτείνονται στα EN1993-1-1 και EN 1993-3-1 για γωνιακές διατομές θερμής έλασης έχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EN 1993-1-1. Design of steel structures. Part 1-1 General rules and rules for buildings, CEN 2005
- [2] EN 1993-3-1. Design of steel structures. Part 3-1 Tower, masts and chimneys. Towers and masts, CEN 2005
- [3] I. Vayas, A. Charalambakis, V. Koumoussis, “Inelastic resistance of angle sections subjected to biaxial bending and normal forces”, Steel Construction. Design and Research 2 (2009) 138-146
- [4] Load and resistance factor specification for single-angle members, AISC 2000
- [5] N. Trahair, “Bending, shear and torsion capacities of steel angle sections”, Research Report R810, U.Sydney, 2001
- [6] N. Trahair, “Biaxial bending of steel angle section beams”, Research Report R822, U.Sydney, 2002
- [7] N. Trahair, “Buckling and torsion of steel angle section beams”, Research Report R833, U.Sydney, 2003
- [8] K. Rasmussen, “Design of angle columns with locally unstable legs”. Research Report R830, University of Sydney, Australia, 2003
- [9] K. Rasmussen, “Design of slender angle section beam-columns by the direct stress method”, Journal of Structural Engineering ASCE, 132(2), 204-211, 2006
- [10] SMR Adluri, NK Madugula, “Flexural buckling of steel angles: experimental investigations”, Journal of Structural Engineering (ASCE), 122(3), 309-317, 1996
- [11] D. Popovic, GJ Hancock, K. Rasmussen, “Axial compression tests on cold-formed angles”, Journal of Structural Engineering (ASCE), 125(5), 515-523, 1999
- [12] B. Young, “Tests and design of fixed-ended cold-formed steel plain angle columns”, Journal of Structural Engineering (ASCE), 130(12), 1931-1940, 2004
- [13] PB Dinis, D. Camotim, V. Preto, “Behaviour and design of short-to-intermediate hot-rolled steel angle columns”, Proceedings of the International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Wiley, 477-484, 2016
- [14] EN ISO 6892-1, “Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature”

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF MEMBERS FROM HOT ROLLED ANGLE SECTIONS

Andreas Spiliopoulos

Civil Engineer *

e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Maria-Eleni Dasiou

Civil Engineer *

email: medasiou@mail.ntua.gr

Xenofon Lignos

Dr. Electrical Engineer, Lab & teaching staff*

e-mail: lignosx@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

A test campaign on members from equal leg hot rolled angle sections were carried out at the Institute of Steel Structures of the National Technical University of Athens (NTUA). Tests included eight (8) 3-point bending tests and thirty-one (31) buckling tests on columns subjected to concentric and eccentric compression. The behavior and response, in terms of bending resistance and rotational capacity of single angle sections, was investigated through the three point bending tests. Four (4) tests were carried out on a 750mm long beam and four (4) on a 1500mm long beam. Due to the shape of the specimens, special care has been given to the implementation of the boundary and support conditions. For the measurement of the mid span deflection and rotation, two linear variable displacement transducers (LVDTs) were used on each side of the angle section. In addition, two measurements of the longitudinal displacement at a specific height of the end plates at each side of the specimen were taken in order to record the end rotation of the specimen. The behavior of single angle columns subjected to concentric and eccentric compression was investigated through buckling tests. This was implemented by applying a compressive axial force at various eccentricities. The use of special designed welded end plates with four inclined slotted holes, combined with the radial slotted holes of the load actuator plates provided the possibility to apply the compressive force at various eccentricities. For the realization of the pin-ended boundary conditions, special-designed spherical-shaped steel components were used. The results of the bending tests show a considerable load capacity of angle sections, far exceeding the plastic moment, accompanied by a very high rotation capacity. This indicates that a rolled angle section may be designed plastically. Those in addition with the compression tests indicate that the design expressions provided in EN1993-1-1 and EN 1993-3-1 for rolled angles could be improved. Also provide a good experimental basis on which analytical and numerical methods can be calibrated to produce new formulas for angle members design.