

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ
ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ****Εμμανουήλ Γ. Γραμματικάκης**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: mgrammatikakis@teemail.gr**Ιωάννης Β. Κουτσούκος**

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: jkoutsoukos@teemail.gr**Ξενοφών Α. Λιγνός**

Δρ. Μηχανικός μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: lignosx@central.ntua.gr**1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αναλυτική και πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς μεταλλικών κόμβων σύνδεσης δοκού - υποστυλώματος. Το βασικό μοντέλο της έρευνας είναι ένας χαλύβδινος κοχλιωτός κόμβος αποτελούμενος από υποστύλωμα συγκολλητής διατομής τύπου Η και δοκό τύπου ΙΡΕ συγκολλημένη σε μετωπική πλάκα. Η σύνδεση υλοποιήθηκε μέσω οκτώ κοχλιών διατεταγμένων συμμετρικά σε τέσσερις σειρές. Ο κάθε κόμβος υποβλήθηκε σε κατακόρυφη μονοτονική στατική φόρτιση στο ελεύθερο άκρο της δοκού μέχρι αστοχίας. Οι παράμετροι που ερευνήθηκαν είναι το πάχος και η ποιότητα του χάλυβα της μετωπικής πλάκας, καθώς και η διάμετρος των κοχλιών σύνδεσης για τρία διαφορετικά μεγέθη διατομής ΙΡΕ. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια διεξοδική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα οποία έδειξαν ότι η αύξηση του πάχους της μετωπικής πλάκας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της καμπτικής αντοχής και της δυσκαμψίας του κόμβου, ενώ παρατηρήθηκε μείωση της στρωφικής ικανότητάς του. Αντίστοιχα συμπεράσματα προέκυψαν κατά την αύξηση της ποιότητας της μετωπικής πλάκας. Τα παραπάνω αναλυτικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα που προέκυψαν από πειράματα τα οποία διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μεταλλικές συνδέσεις δοκού – υποστυλώματος παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά η οποία προκύπτει από μια σύνθεση φαινόμενων, όπως είναι οι ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις, οι επαφές, η απόκλιση και ο διαχωρισμός από τα θεμελιώδη στοιχεία τους. Η ανάλυση όμως μιας τέτοιας συμπεριφοράς είναι πολύπλοκη και για ευκολία επιμερίζεται σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση, των οποίων οι μεταβολές έχουν αντίκτυπο στη γενικότερη συμπεριφορά του κόμβου. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο καθοριστικός παράγοντας που ορίζει την απόκρισή τους είναι η καταπόνηση από τις καμπτικές ροπές. Η σχέση μεταξύ της εφαρμοζόμενης ροπής στον κόμβο από τη συνδεόμενη δοκό και της στροφής μεταξύ των συνδεόμενων μελών περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφής $M-\varphi$. Σε μια υπολογιστική καμπύλη ροπής-στροφής καθορίζονται τρία βασικά χαρακτηριστικά, η ροπή αντοχής $M_{j,Rd}$, η αρχική στροφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$ και η στροφική ικανότητα φ_{cd} . Ο Ευρωκώδικας 3 (EC3) παρέχει μεθόδους εκτίμησης της ροπής αντοχής και της αρχικής στροφικής δυσκαμψίας χρησιμοποιώντας την πρακτική ανάλυση του κόμβου σε συστατικά μέρη και σύνθεσης των επιμέρους ιδιοτήτων αυτών. Όσον αφορά στη στροφική ικανότητα, δεν υπάρχει άμεση μέθοδος υπολογισμού. Συχνά επιλέγεται η προσομοίωση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 Περιγραφή του θεωρητικού μοντέλου

Το βασικό μοντέλο της έρευνας είναι ένας χαλύβδινος κοχλιωτός κόμβος αποτελούμενος από υποστύλωμα συγκολλητής διατομής τύπου H και δοκό τύπου IPE συγκολλημένη σε μετωπική πλάκα (Σχ.1). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ποιότητες των συνδεόμενων μελών μεταβάλλονται σύμφωνα με τους Πίν.1&2.

Συνδεόμενο μέλος	1η σειρά	2η σειρά	3η σειρά
Δοκός	IPE160 $L_b = 512$	IPE200 $L_b = 540$	IPE240 $L_b = 540$
Μετωπική πλάκα	150x270 $t_p = 8$ $t_p = 10$ $t_p = 12$ $t_p = 16$	150x270 $t_p = 10$ $t_p = 12$ $t_p = 16$ $t_p = 18$	150x270 $t_p = 12$ $t_p = 16$ $t_p = 18$ $t_p = 20$
Κοχλίες	M12 M16	M12 M16	M16 M20
Υποστύλωμα	Συγκολλητή υψίκορμη διατομή τύπου H 150x250 $t_f = 30$, $t_w = 10$, $L_c = 1170$		

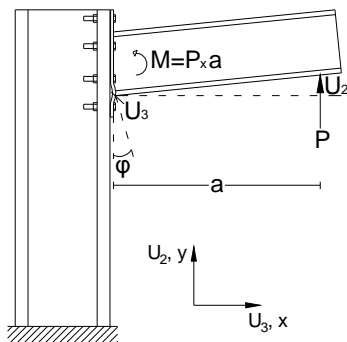
Πίν. 1 – Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (mm)

Συνδεόμενο μέλος	Δοκός	Μετωπική πλάκα	Κοχλίες	Υποστύλωμα
Ποιότητα	S355	S235, S275, S355	8.8	S355

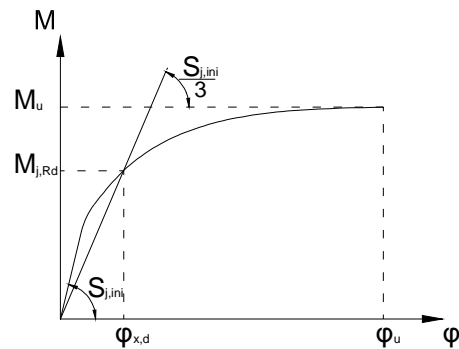
Πίν. 2 – Ονομαστικές ποιότητες υλικών

3.2 Ανάλυση

Η προσομοίωση των μοντέλων των τριών σειρών έγινε με τη χρήση τρισδιάστατων εξαεδρικών ορθογωνικών πεπερασμένων στοιχείων οκτώ κόμβων (C3D8R hexahedral solid 8-node finite elements) με τη χρήση του προγράμματος Abaqus v.6.5 [3]. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης δεσμεύτηκε η επιφάνεια της βάσης του υποστυλώματος με συνοριακές συνθήκες δέσμευσης των μετακινήσεων κατά τους άξονες x , y , z . Κατά τον άξονα y επιβλήθηκε ένα στατικό ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο (P) στην επιφάνεια της διατομής του ελεύθερου άκρου της δοκού (Σχ.1).



Σχ.1 - Διάταξη τυπικού κόμβου



Σχ.2 - Τυπική καμπύλη ροπής – στροφής

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΤΑ EC3 – μέρος 1.8

4.1 Ροπή αντοχής σχεδιασμού

Η ροπή αντοχής σχεδιασμού προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd} \quad (1)$$

όπου $F_{tr,Rd}$ είναι η ενεργός εφελκυστική αντοχή της σειράς κοχλιών r , h_r είναι η απόσταση της σειράς κοχλιών r από το κέντρο θλίψης και r είναι ο αριθμός της σειράς κοχλιών. Επειδή η συμπεριφορά της σύνδεσης καθορίζεται κυρίως από τη μετωπική πλάκα και τους κοχλίες, ο υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής των κοχλιών βασίζεται στην εξιδανίκευση της εφελκυστικής ζώνης με ένα βραχύ ταυ το οποίο μπορεί να αστοχήσει σύμφωνα με τρεις πιθανούς μηχανισμούς κατάρρευσης [2]. Ο πρώτος τύπος χαρακτηρίζεται από πλήρη διαρροή του πέλματος, ο δεύτερος τύπος από διαρροή πέλματος με ταυτόχρονη αστοχία κοχλία, ενώ ο τρίτος τύπος χαρακτηρίζεται μόνο από αστοχία κοχλία.

4.2 Αρχική στρωφική δυσκαμψία

Η αρχική στρωφική δυσκαμψία δίνεται από τον τύπο :

$$S_i = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (2)$$

όπου k_i είναι ο συντελεστής δυσκαμψίας του στοιχείου i , z ο μοχλοβραχίονας μεταξύ του κέντρου θλίψης και της μέσης απόστασης των δύο ακραίων εφελκυσμένων σειρών κοχλιών. Για έναν μονόπλευρο κόμβο δοκού – υποστυλώματος με κοχλιωτή μετωπική πλάκα, οι συντελεστές δυσκαμψίας που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτοί που σχετίζονται με τον κορμό του υποστυλώματος σε διάτμηση (k_1) και σε θλίψη (k_3), καθώς και ένας ισοδύναμος συντελεστής δυσκαμψίας k_{eq} που αντιπροσωπεύει τα βασικά συστατικά που σχετίζονται με τις σειρές κοχλιών σε εφελκυσμό.

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z}, \quad k_2 = \frac{0,7b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}, \quad k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}} \quad \text{με} \quad z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r} \quad (3)$$

όπου β είναι η παράμετρος μετασχηματισμού (για τον τύπο της σύνδεσης που μελετάται λαμβάνει προσεγγιστικά την τιμή $\beta=1$), $b_{eff,c,wc}$ είναι το ενεργό πλάτος του κορμού του υποστυλώματος σε θλίψη, d_c είναι το καθαρό ύψος του κορμού του υποστυλώματος, h_r είναι η απόσταση μεταξύ της σειράς των κοχλιών r και του κέντρου θλίψης, και $k_{eff,r}$ είναι ο συντελεστής ενεργού δυσκαμψίας για τη σειρά r λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές δυσκαμψίας k_i των βασικών συστατικών. Προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}} \quad (4)$$

4.3 Στροφική ικανότητα

Στον EC3 - part 1.8 (CEN 2003) οι διατάξεις για τον υπολογισμό της διαθέσιμης στροφικής ικανότητας των κόμβων είναι πιο συνοπτικές σε σύγκριση με τις διατάξεις που αφορούν στα άλλα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη της συμπεριφοράς ενός κόμβου, δηλαδή στην αντοχή και στην αρχική δυσκαμψία. Ένας κόμβος δοκού – υποστυλώματος όπου η ροπή αντοχής σχεδιασμού του κόμβου $M_{j,Rd}$ καθορίζεται από την αντοχή σχεδιασμού του κορμού του υποστυλώματος σε διάτμηση, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει επαρκή στροφική ικανότητα για πλαστική ανάλυση εφόσον :

$$\frac{d}{t_w} \leq 69\epsilon \quad (5)$$

Οι κόμβοι με κοχλιωτή σύνδεση μέσω μετωπικής πλάκας μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν επαρκή στροφική ικανότητα για πλαστική ανάλυση, εάν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι ακόλουθες συνθήκες. Η ροπή αντοχής σχεδιασμού του κόμβου $M_{j,Rd}$ καθορίζεται από την αντοχή είτε του πέλματος του υποστυλώματος είτε της μετωπικής πλάκας, ενώ παράλληλα θα πρέπει και το πάχος t του πέλματος του υποστυλώματος ή της μετωπικής πλάκας της δοκού (όχι υποχρεωτικά του ίδιου μέλους της παραπάνω συνθήκης) να ικανοποιεί τη σχέση:

$$t \leq 0,36d \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}} \quad (6)$$

όπου f_y είναι το όριο διαρροής του σχετικού βασικού συστατικού, f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή των κοχλιών και d η ονομαστική διάμετρος των κοχλιών.

4.4 Καμπύλη ροπή - στροφής

Από τις καμπύλες ροπής στροφής (Σχ.2) υπολογίστηκαν η αρχική στροφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$, η ροπή αντοχής M_j του κόμβου, καθώς και η στροφή φ_{xd} . Επιπλέον, από τις ίδιες καμπύλες υπολογίστηκε και η ροπή αστοχίας για κάθε κόμβο M_u και η αντίστοιχη στροφή φ_u . Η αρχική στροφική δυσκαμψία $S_{j,ini}$ υπολογίστηκε από την κλίση του διαγράμματος στην ελαστική περιοχή. Η ροπή αντοχής M_j του κόμβου υπολογίστηκε ως η ροπή που αντιστοιχεί σε στροφική δυσκαμψία $S_{j,ini}/3$. Αυτό προκύπτει από την εξίσωση 6.28b του Ευρωκώδικα 3 – μέρος 1.8 :

$$\mu = \left(\frac{1,5M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi \quad \text{για} \quad \frac{2}{3}M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd} \quad (7)$$

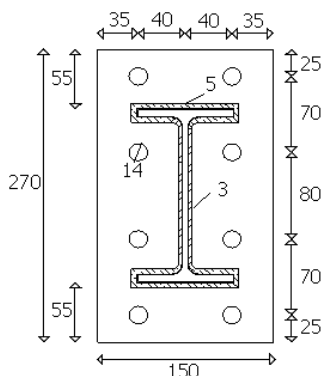
Εάν τεθεί $M_{j,Ed} = M_{j,Rd}$ και $\psi = 2,7$ (κοχλιωτή μετωπική πλάκα), προκύπτει ότι :

$$\mu = \left(\frac{1,5M_{j,Rd}}{M_{j,Rd}} \right)^{2,7} = 2,988 \approx 3,0 \Rightarrow \frac{S_{j,ini}}{S_j} = 3,0 \quad (8)$$

Τέλος, η στροφή φ_{xd} είναι η στροφή που αντιστοιχεί στην M_j .

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Προκειμένου να υπάρξει κοινή βάση για σύγκριση των αποτελεσμάτων, τα τέσσερα πειραματικά δοκίμια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πρώτης σειράς των παραμετρικών μοντέλων με κοχλίες M12 και ποιότητα μετωπικής πλάκας S235 (Πιν.1&2).



Σχ.3 – Γεωμετρία μετωπικής πλάκας



Φωτ.1- Πλευρική εξασφάλιση

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο πλαίσιο φορτίσεων του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π., στο οποίο είναι προσαρμοσμένος ο επενεργητής εφαρμογής φόρτισης με δυνατότητα στατικής φόρτισης έως 300 kN. Για τη πειραματική διαδικασία κρίθηκε απαραίτητη η χρήση τριών βελομέτρων. Ένα βελόμετρο τοποθετήθηκε επαπτομενικά στο έμβολο για να καταγράφει την ανύψωση του ελεύθερου άκρου της δοκού στο σημείο της φόρτισης, ένα κάθετα στο επίπεδο της μετωπικής πλάκας, ώστε να καταγράφεται η μέγιστη παραμόρφωσή της, και ένα κάθετα στην επιφάνεια του πέλματος του υποστυλώματος, ώστε να καταγράφει την εκτροπή του από την αρχική κατάσταση. Η δοκός εξασφαλίστηκε πλευρικά για τις εντός επιπέδου μετακινήσεις της με την τοποθέτηση δυο κατακόρυφων πλευρικών ελασμάτων εκατέρωθεν της δοκού στο μέσον της (Φωτ.1).

Η ποιότητα των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετωπικές πλάκες ελέγχθηκε με δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήθηκαν στο Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (Κ.Ε.Δ.Ε.). Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού δίνονται στον πίνακα 3.

Μοντέλα	ονομαστικό πάχος πλάκας (mm)	πραγματικό πάχος πλάκας (mm)	E (GPa)	f _y (MPa)	f _u (MPa)	P _{max} (kN)	ε _u (%)
Πλάκα 8mm	8	8,20	196148	214.31	351.38	71.43	19.85
Πλάκα 10mm	10	10,10	203752	226.49	337.67	82.83	20.24
Πλάκα 12mm	12	12,30	214076	321.57	431.34	131.16	13.94
Πλάκα 16mm	16	16,80	-	-	833.65	408.26	-

Πίν.3 - Μηχανικές ιδιότητες ελασμάτων

Στα δοκίμια με εύκαμπτη πλάκα οι κοχλίες της εφελκυσόμενης ζώνης καταπονήθηκαν ταυτόχρονα σε εφελκυσμό και κάμψη, ενώ στα δοκίμια με δύσκαμπτη πλάκα καταπονήθηκαν μόνο σε εφελκυσμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε εύκαμπτες πλάκες οι πλαστικές παραμορφώσεις ήταν έντονες, ενώ σε ένα δοκίμιο σημειώθηκε αστοχία της μετωπικής πλάκας, με πιθανή αιτία την αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα της πλάκας στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη της συγκόλλησης λόγω ταχείας ψύξεως. Σε κάποια δοκίμια παρατηρήθηκε αστοχία του σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου. Αυτό οφείλεται σε κακή ποιότητα του υλικού τους.

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

Τα παρακάτω αποτελέσματα (Πιν.4&5) προκύπτουν από τη διεξοδική σύγκριση των πειραματικών δοκιμών με τα παραμετρικά, καθώς και με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την ανάλυση κατά τον EC3 - part 1.8.

			FR1a-I	FR1b-I	FR1c-I	FR1d-I
EC3 – part 1.8	$S_{i,ini}$ (kNm/mrad)		4,75	5,73	6,30	6,83
	$M_{i,Rd}$ (kNm)		19,72	25,71	30,92	35,91
	Φ_{cd} (στροφ. Ικανότητα)		επαρκής	ανεπαρκής	ανεπαρκής	ανεπαρκής
Πειράματα	$S_{i,ini}$ (kNm/mrad)		2,31	2,11	1,03	1,02
	M_j (kNm)		30,49	38,51	50,10	50,10
	Φ_{xd} (mrad)		39,88	50,71	146,22	144,89
	P_{max} (kN)		70,55	77,94	98,54	99,21
	$U_{2P_{max}}$ (mm)		72,70	27,35	86,70	73,00
	$U_{3P_{max}}$ (mm)		12,55	4,30	10,90	7,80
	M_{max} (kNm)		36,16	39,91	50,45	50,15
	$\Phi_{M_{max}}$ (mrad)		142,19	53,44	170,95	145,06
Πεπερασμένα Στοιχεία	$S_{i,ini}$ (kNm/mrad)		2,33	2,71	2,92	3,22
	M_j (kNm)		31,13	37,71	42,92	50,89
	Φ_{xd} (mrad)		42,19	41,60	44,37	47,91
	P_u (kN)		78,13	93,42	101,60	116,11
	$maxU_2$ (mm)		52,43	59,95	59,33	61,83
	$maxU_3$ (mm)		11,40	11,16	10,40	9,44
	M_u (kNm)		40,63	48,77	53,24	61,31
	Φ_u (mrad)		101,00	115,10	113,46	117,37

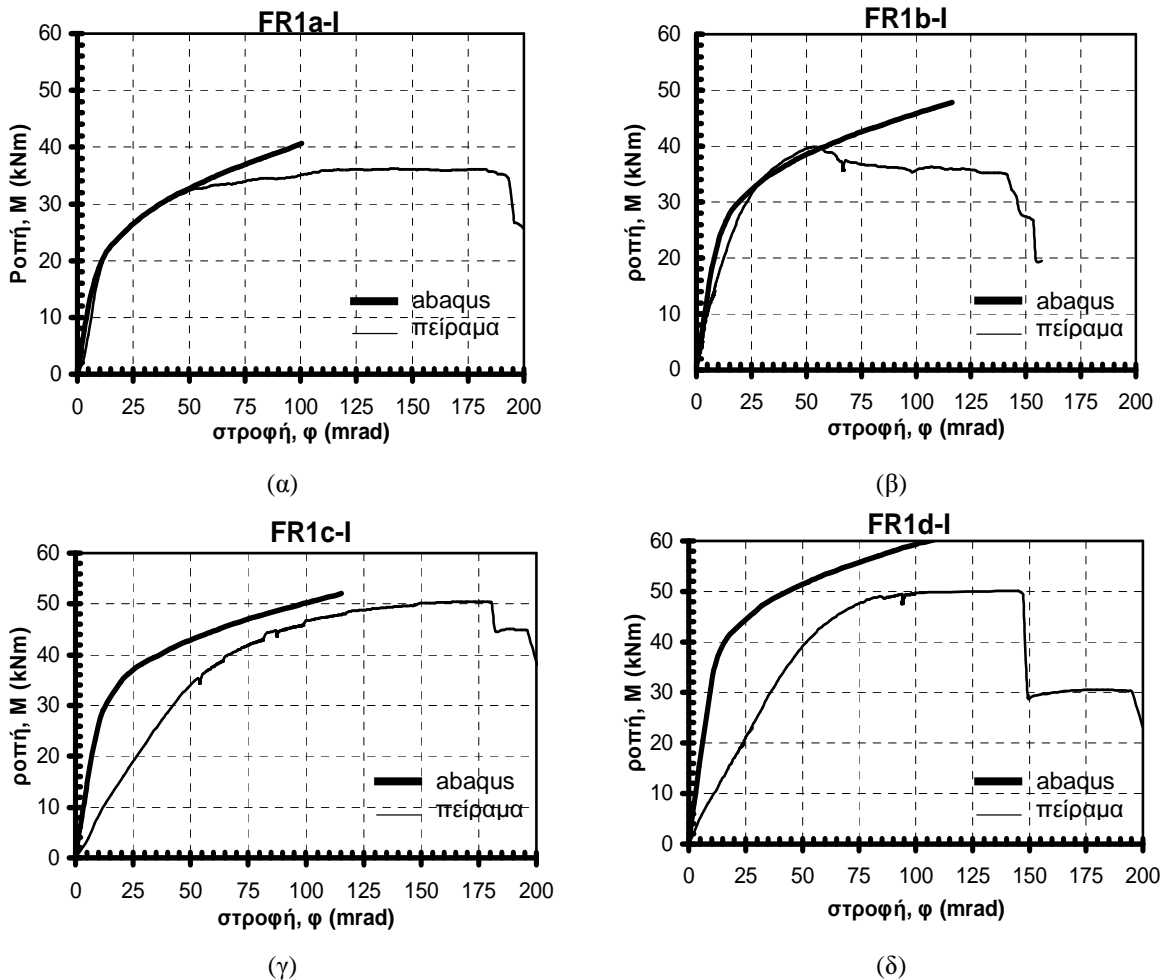
Πίν. 4 - Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

	FR1a-I	FR1b-I	FR1c-I	FR1d-I	μέσος όρος	τυπική απόκλιση
λόγος $S_{j,ini}$ (EC3 / πεπ.στοιχ.)	2,04	2,11	2,16	2,12	2,11	0,05
λόγος M_j (EC3 / πεπ.στοιχ.)	0,63	0,68	0,72	0,71	0,69	0,04
λόγος $S_{j,ini}$ (EC3 / πείραμα)	2,06	2,71	6,13	6,70	4,40	2,35
λόγος M_j (EC3 / πείραμα)	0,65	0,67	0,62	0,72	0,66	0,04
λόγος $S_{j,ini}$ (πεπ.στοιχ. / πείραμα)	1,01	1,28	2,84	3,16	2,07	1,09
λόγος M_j (πεπ.στοιχ. / πείραμα)	1,02	0,98	0,86	1,02	0,97	0,08
λόγος Φ_{xd} (πεπ.στοιχ. / πείραμα)	1,06	0,82	0,30	0,33	0,63	0,37
λόγος P_{max} (πεπ.στοιχ. / πείραμα)	1,11	1,20	1,03	1,17	1,13	0,07
λόγος $U_{2P_{max}}$ (πεπ.στοιχ. / πείραμα)	0,72	2,19	0,68	0,85	1,11	0,72
διαφορά ΔM_j (%) (EC3 - πεπ.στοιχ.)	57,86	46,67	38,81	41,72	46,26	8,38
διαφορά ΔM_j (%) (EC3 - πείραμα)	54,61	49,79	62,03	39,52	51,49	9,44

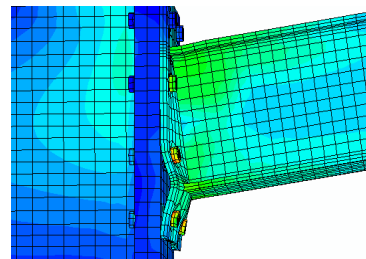
Πίν. 5 - Συγκριτικά αποτελέσματα

Οι καμπύλες των Σχ.4&5 που αφορούν τα διαγράμματα ροπής-στροφής και φορτίου-μετακινήσεως βραχέος T, για τις τέσσερις πειραματικές και παραμετρικές συνδέσεις, προκύπτουν από τις μετρήσεις της κατακόρυφης μετακίνησης του ελεύθερου άκρου της

δοκού και του επιβαλλόμενου φορτίου. Η μελέτη των τεσσάρων διαγραμμάτων δείχνει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι σε θέση να προσδιορίσει την πλήρη καμπύλη ροπής-στροφής της σύνδεσης βραχέος ταυ, καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτής, με μικρό περιθώριο σφάλματος. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες ίσως οφείλονται στην αδυναμία των προσομοιωμάτων να ενσωματώσουν τις ποικίλες ατέλειες που χαρακτηρίζουν έναν πραγματικό κόμβο και επηρεάζουν την απόκρισή του.



Σχ. 4 - Σύγκριση καμπυλών ροπής – στροφής πειραματικών και παραμετρικών μοντέλων



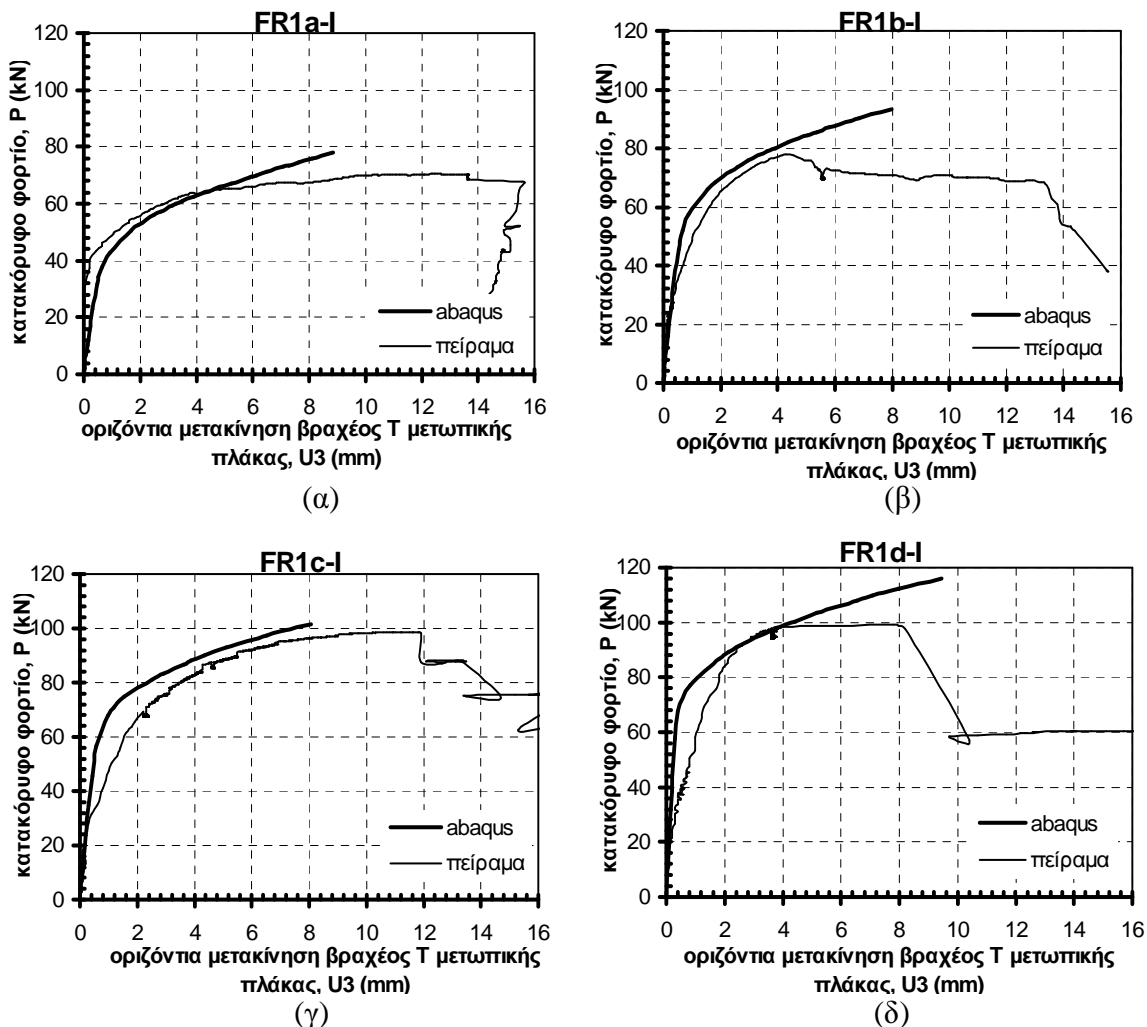
Φωτ.2 - Σύγκριση πειραματικής και παραμετρικής σύνδεσης στη φάση αστοχίας



Φωτ.3 - Αστοχία κοχλία



Φωτ.4 - Ίχνος θερμοκρασιακών μεταβολών



Σχ.5 - Σύγκριση καμπυλών κατακόρυφου φορτίου – οριζόντιας μετακίνησης βραχέος T, πειραματικών και παραμετρικών μοντέλων

		1 ^η σειρά		2 ^η σειρά		3 ^η σειρά	
		Ασθενείς κοιλίες	Ισχυροί κοιλίες	Ασθενείς κοιλίες	Ισχυροί κοιλίες	Ασθενείς κοιλίες	Ισχυροί κοιλίες
λόγος $S_{j,ini}$ EC3/abaqus	Μέσος όρος	2,11	2,11	2,03	3,17	3,50	3,43
	Τυπική απόκλιση	0,07	0,10	0,01	0,16	0,10	0,14
λόγος M_j EC3/abaqus	Μέσος όρος	0,70	0,70	0,69	0,62	0,67	0,70
	Τυπική απόκλιση	0,04	0,05	0,05	0,03	0,10	0,09
Διαφορά ΔM_j (%) EC3-abaqus	Μέσος όρος	43,70	43,37	44,75	60,64	50,13	44,73
	Τυπική απόκλιση	7,75	11,45	10,41	9,26	14,99	18,72

Πίν. 6 - Σύγκριση αποτελεσμάτων των 72 παραμετρικών μοντέλων

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του μέσου όρου της αρχικής στρωφικής δυσκαμψίας, της ροπής αντοχής και του ποσοστού αύξησης της ροπής αντοχής για τα 72 παραμετρικά μοντέλα. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο κορμός του υποστρώματος στα μοντέλα της 2^{ης} σειράς με ισχυρούς κοιλίες και της 3^{ης} σειράς ενισχύθηκε με ελάσματα πάχους 5mm. Αυτό έγινε ώστε να αποφευχθεί η εκτός επιπέδου του κορμού μετακίνηση.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πειραματικές τιμές για τη ροπή αντοχής βρέθηκαν κατά μέσο όρο 51,49% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν από τον EC3 (CEN 2003) με τυπική απόκλιση 9,44% (4 πειραματικά μοντέλα). Οι παραμετρικές τιμές της ροπής αντοχής υπολογίστηκαν ότι είναι μεγαλύτερες κατά 47,95% από τις αντίστοιχες του EC3 με τυπική απόκλιση 13,69% (72 παραμετρικά μοντέλα). Η ροπή αντοχής σχεδιασμού αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της μετωπικής πλάκας και το ίδιο συμβαίνει με την αύξηση της ποιότητάς της. Ο μέσος όρος του λόγου της αρχικής στροφικής δυσκαμψίας του EC3 προς αυτή της παραμετρικής ανάλυσης προέκυψε 2,72 με τυπική απόκλιση 0,66, το οποίο δείχνει ότι ο EC3 υπερεκτιμά αυτό το μέγεθος. Επίσης, η αρχική στροφική δυσκαμψία αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της μετωπικής πλάκας, αλλά η επιρροή της μεταβολής της ποιότητάς της δεν είναι αξιοσημείωτη. Η κάμψη των κοχλίων μπορεί να αποτελέσει κρίσιμο παράγοντα της απόκρισης της σύνδεσης των βραχέων ταυ. Σε περιπτώσεις βραχέων ταυ με ασθενείς κοχλίες, η ταυτόχρονη κάμψη και ο εφελκυσμός οδηγούν σε μείωση της ροπής αντοχής του κόμβου αλλά και μείωση της στροφικής ικανότητάς του. Ο EC3 (CEN 2003) δίνει ασφαλή κριτήρια αλλά πολύ συντηρητικά. Δεν περιλαμβάνει διατάξεις για τον αναλυτικό υπολογισμό της στροφικής ικανότητας, πλην ενός κριτηρίου το οποίο, εφόσον ικανοποιείται, επιτρέπει το χαρακτηρισμό του κόμβου ως κατάλληλου για το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης στα πλαίσια πλαστικής ανάλυσης της κατασκευής. Είναι απαραίτητη η παρουσίαση ενός κώδικα που να δίνει μια ποσοτική προσέγγιση της στροφικής ικανότητας.

8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ερευνητική ομάδα αισθάνεται την ανάγκη να ευχαριστήσει το Διευθυντή του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. Καθ. Ιωάννη Ερμούπουλο και το Δρ. Γεώργιο Σταματόπουλο για την επιστημονική τους βοήθεια και τις συμβουλές τους σε εξειδικευμένα θέματα.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Coelho A.M.G, Bijlaard F.S.K and Silva L.S, "Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections", *Engineering Structures*, Vol.26, 2004, pp.1185-1206.
- [2] EUROCODE 3 : Design of Steel Structures, Part 1.8 : "Design of joints", *European Committee for Standardization*, November 2003.
- [3] Abaqus version 6.5 for Windows, Software & Documentation, 2005, USA
- [4] Ermopoulos J.Ch, Stamatopoulos G.N., "Mathematical modeling of column – base plates connections" *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.36(2), 1996, pp.79-100.
- [5] Gantes Ch.S.Lemonis M.E, "Influence of equivalent bolt length infinite element modeling of T-stub steal connections" *Computer and Structures*, Elsevier, Vol.81, 2003, pp.595-604.
- [6] Lignos X.A, Raftoyiannis I.G, Michaltsos G.T, "A fem research on the contact surface of beam – to column bolted joints", *Proceedings of 5th National Conference on Steel Structures MSRS*, Vol.1, 2005, Xanthi, pp.362-368.
- [7] Ερμούπουλος Ι.Χ, Σταματόπουλος Γ.Ν, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων σε χαλύβδινες κατασκευές", *Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονικές Εκδόσεις ΤΕΕ*, Ι, Τεύχ.2, 2001, σελ.97-105.

**ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STEEL
END-PLATE BEAM TO COLUMN JOINTS****Emmanouil G. Grammatikakis**

Dipl. Civil Engineer NTUA

School of Civil Engineering NTUA, Laboratory of Metal Structures

9 Iroon Politechneiou str., 157 80

Athens, Greece

e-mail: mgrammatikakis@teemail.gr**Ioannis B. Koutsoukos**

Dipl. Civil Engineer NTUA

School of Civil Engineering NTUA, Laboratory of Metal Structures

9 Iroon Politechneiou str., 157 80

Athens, Greece

e-mail: jkoutsoukos@teemail.gr**Xenofon A. Lignos**

Dr. Engineer, Member of Special & Lab Teaching Staff

School of Civil Engineering NTUA, Laboratory of Metal Structures

9 Iroon Polytechneiou Str., 15780

Athens, Greece

e-mail: lignosx@central.ntua.gr**SUMMARY**

In this paper, the analytical and experimental behavior of beam to column steel connections has been thoroughly investigated. The basic research model is a steel bolted joint constituted from an H-section column and an IPE-section steel beam with a welded extended end-plate. This connection was materialized using eight bolts symmetrically aligned in two pairs. Each node was subjected to a perpendicular monotonic static load on the non-welded free-end of the beam up to failure. The parameters investigated are the end-plate thickness, the steel grade as well as the bolts diameters for three different sizes of the IPE-sections. Then, an extensive processing of the results has been performed, which showed that an increase of the end-plate thickness resulted to an increase of flexural capacity and stiffness of the joint, while its rotational capacity was reduced. Similar results have been observed for increasing the end-plate grade. The above analytical results were compared with corresponding experimental ones that were carried out in the Laboratory of Metal Structures at NTUA.