

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΟΠΙΚΗ ΣΤΗΝ
ΚΑΘΟΛΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Αριστείδης Γ. Παπαρησιτίδης

Πολιτικός Μηχανικός

4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: aris@4m.gr

Γεώργιος Μαρούλης

Μηχανολόγος Μηχανικός

4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού

Όλγα Καπετάνου

Τελειόφοιτη ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημασία του ακριβέστερου υπολογισμού των κόμβων μεταλλικών κατασκευών είναι εμφανής από τον αριθμό των αστοχιών που έχουν παρατηρηθεί σε αυτούς. Ο Ευρωκώδικας-3 υιοθετεί τον υπολογισμό συνδέσεων μέσω προσομοίωσής τους με «ισοδύναμη διατομή» (T-stub). Μια τέτοια θεώρηση δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τον κάθε πιθανό κόμβο που μπορεί να συναντηθεί στην πράξη.

Στην εργασία αυτή γίνεται παραμετρική προσομοίωση των κόμβων μεταλλικών κατασκευών με διαφορετικές τοπικές (local) και καθολικές (global) θεωρήσεις. Εξετάζεται η συμβατότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των κόμβων με τα αποτελέσματα της ανάλυσης του υπολοίπου φορέα.

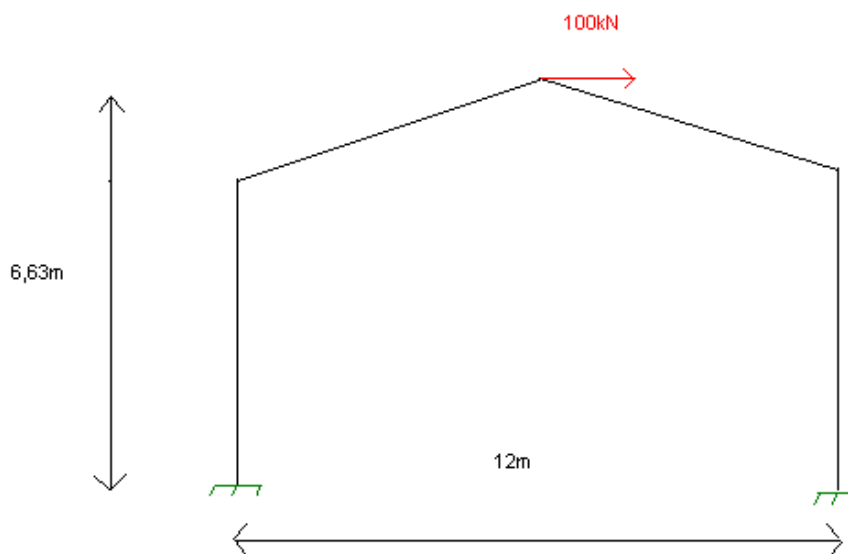
Η λεπτομερής προσομοίωση του συνόλου της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε σημαντικό πλήθος βαθμών ελευθερίας και μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Σε αυτή την εργασία προσομοιώθηκαν λεπτομερώς μόνον οι κόμβοι σύνδεσης (surrogate elements), ενώ τα μέλη του φορέα προσομοιώθηκαν με ραβδωτά στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης αρχικά συγκρίνονται με αυτά της λεπτομερούς προσομοίωσης. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα συμβατικής ανάλυσης, θεωρώντας τα μέλη ελαστικά πακτωμένα.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

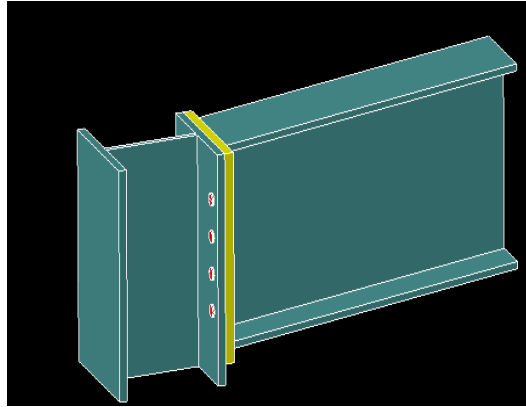
Στην εργασία αυτή γίνεται παραμετρική προσομοίωση των κόμβων μεταλλικών κατασκευών με διαφορετικές τοπικές (local) και καθολικές (global) θεωρήσεις. Εξετάζονται διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης ολόκληρου του φορέα με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων [1], [2], [3], [4] και διερευνάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων σε σχέση με το υπολογιστικό κόστος.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Το πλαίσιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 είναι ένα δίστηλο αμφικλινές πλαίσιο ανοίγματος 12,00m και ύψους 6,63m. Τα υποστυλώματα είναι διατομής "HE240B" ενώ οι δοκοί διατομής "IPE330". Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι χάλυβας ποιότητας Fe S275. Στην παρειά της δοκού έχει τοποθετηθεί ένα έλασμα 340x240x20 από χάλυβα. Η σύνδεση του πέλματος του υποστυλώματος με το έλασμα γίνεται με 8 κοχλίες M20 ποιότητας 4,6 όπου είναι τοποθετημένοι σε 4 σειρές με 2 κοχλίες στη σειρά απόσταση 0,80cm από την άνω παρειά και συμμετρικά τοποθετημένους ως προς στο έλασμα. Η σύνδεση απεικονίζεται στην Εικόνα 2. Το πλαίσιο είναι πακτωμένο ενώ φέρει συγκεντρωμένη οριζόντια δύναμη εντός του επιπέδου του, στη θέση του κορφιά, ίση με 100 kN.



Εικ 1: Μοντέλο I



Εικ 2: Σύνδεση

3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Εξετάστηκαν 5 διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης του πλαισίου (Μοντέλο I-V). Οι παραδοχές που έγιναν σε κάθε μία από αυτές αναλύονται παρακάτω:

3.1 Ραβδωτά στοιχεία (Μοντέλο I)

Η προσομοίωση γίνεται με ραβδωτά μέλη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, ορίζοντας την κατάλληλη διατομή για τα υποστυλώματα "HE240B" και "IPE330" για τα ζυγώματα με τα αντίστοιχα αδρανειακά μεγέθη που αναφέρονται στον Πίνακα 1.

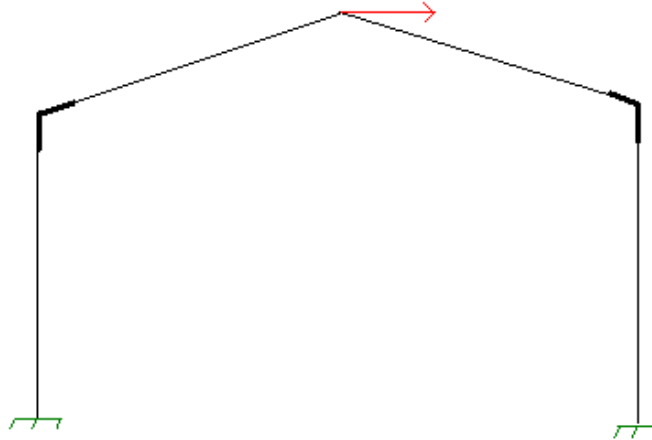
Διατομή	$J_x(\text{cm}^4)$	$J_y(\text{cm}^4)$	$A(\text{cm}^2)$
"HE240B"	11260,0	3920,0	106,0
"IPE330"	11770,0	788,0	72,6

Πιν.1: Αδρανειακά μεγέθη μελών

Τα υποστυλώματα είναι πακτωμένα στη βάση τους και αγνοείται ο τρόπος σύνδεσης με τα ζυγώματα. Το μοντέλο αποτελείται από 5 κόμβους και 4 μέλη.

3.2 Ραβδωτά στοιχεία με άκαμπτα τμήματα (Μοντέλο II)

Η προσομοίωση γίνεται με ραβδωτά μέλη ενώ ένα τμήμα 0,37m από τα υποστυλώματα και 0,47m από τα ζυγώματα θεωρείται άκαμπτο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Όμοια με το Μοντέλο I τα υποστυλώματα είναι πακτωμένα στη βάση τους και αγνοείται ο τρόπος σύνδεσης με τα ζυγώματα. Το μοντέλο αποτελείται από 5 κόμβους και 4 μέλη.



Εικ 3: Μοντέλο II

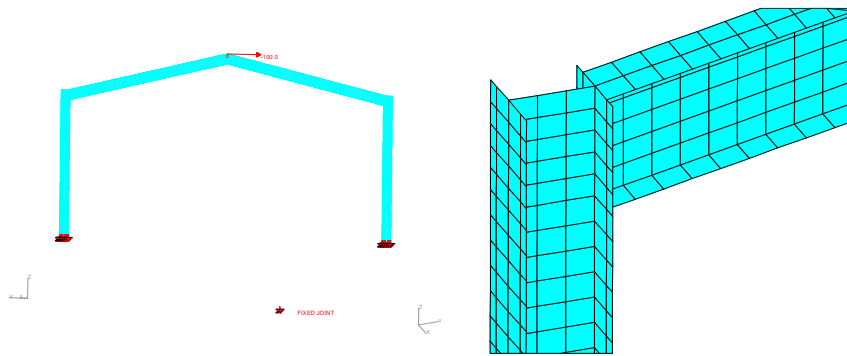
3.3 Επιφανειακά στοιχεία (Μοντέλο III)

Η προσομοίωση γίνεται με επιφανειακά τετρακομβικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, τα οποία δημιουργούν τρία επίπεδα κάθετα ανά δύο μεταξύ τους κατάλληλου πάχους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, ώστε να δημιουργούν την κατάλληλη διατομή "HE240B" για τα υποστυλώματα και "IPE330" για τις δοκούς.

Διατομή	Πάχος πέλματος (cm)	Πάχος κορμού (cm)
"HE240B"	1,70	1,00
"IPE330"	0,75	1,15

Πιν.2: Πάχος κορμού-πέλματος μελών

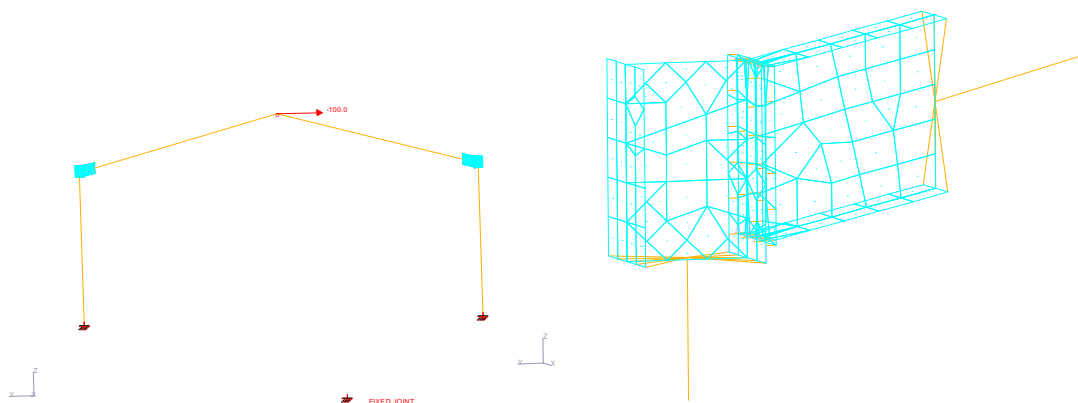
Στο μοντέλο αυτό η κάθετη διατομή των ζυγωμάτων καταλήγει να εφάπτεται με το πέλμα του υποστυλώματος. Τα επίπεδα των πελμάτων των υποστυλωμάτων διακριτοποιούνται έτσι ώστε να ταυτίζονται οι κόμβοι του πέλματος με αυτούς της διατομής της δοκού. Το μοντέλο αποτελείται από 3266 κόμβους και 2954 μέλη.



Εικ 4: Μοντέλο III

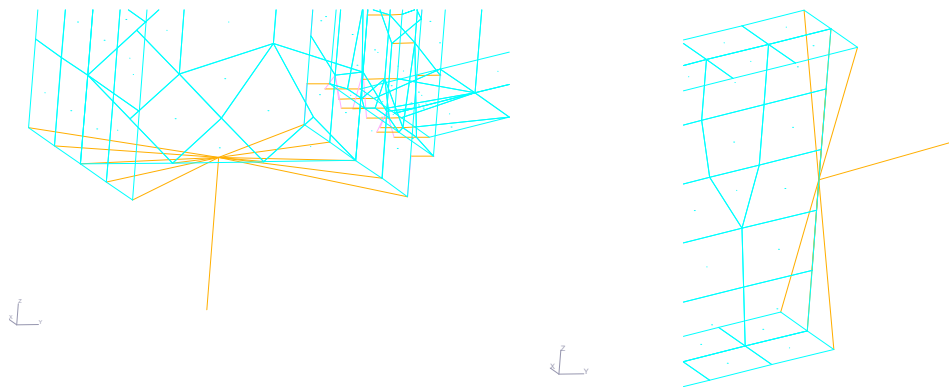
3.4 Ραβδωτά στοιχεία και λεπτομερής προσομοίωση της σύνδεσης (Μοντέλο IV)

Η προσομοίωση της σύνδεσης γίνεται με συνδυασμό ραβδωτών και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 . Γίνεται η παραδοχή ότι η διατομή παραμένει κάθετη στον άξονα του μέλους. Αναλυτικά, τα ελάσματα προσομοιώνονται με τριγωνικά ή τετραγωνικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους με το πάχος και τις ιδιότητες του ελασματος, οι κοχλίες προσομοιώνονται με στοιχεία δοκού στο χώρο τα οποία συνδέουν τους κοινούς κόμβους των ελασμάτων που συγκολλούνται, τα ελάσματα που ανήκουν στο ίδιο μέλος προσομοιώνονται με στοιχεία κελύφους και συνδέονται μεταξύ τους μέσω κοινών κόμβων (πχ. κορμός I διατομής με πέλμα Ι διατομής). Τέλος, αναφερόμενοι στον τρόπο προσομοίωσης της σύνδεσης των ελασμάτων μεταξύ τους (πχ. πέλμα Ι διατομής με πλάκα σύνδεσης) χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ελατήρια κατάλληλης δυσκαμψίας τα οποία παραλαμβάνουν μόνο θλίψη (compression only springs), (Bahaari και Sherbourne [1]).



Εικ 5: Μοντέλο IV

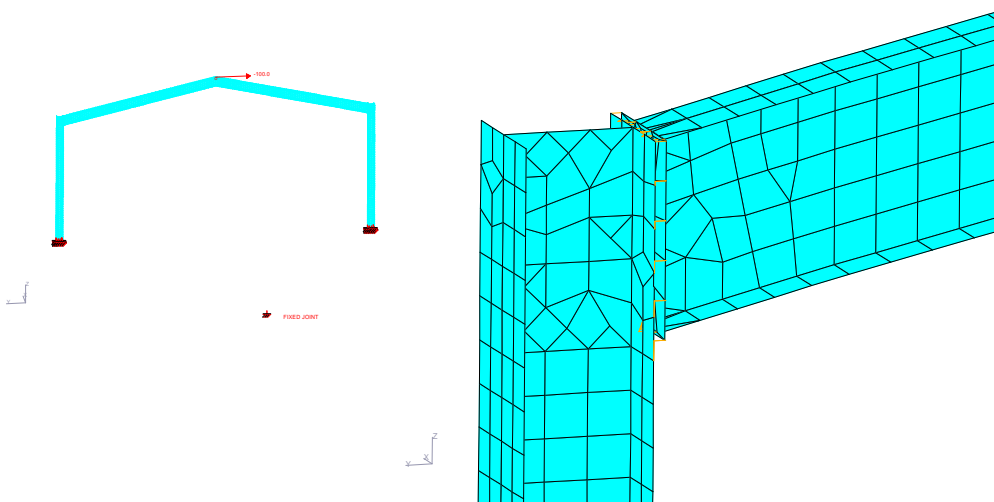
Οι δοκοί και τα υποστυλώματα ,που έχουν προσομοιωθεί με ραβδωτά μέλη, συνδέονται με έναν κοινό κόμβο (master) σε κάθε παρειά της σύνδεσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι που ανήκουν στην παρειά της σύνδεσης εξαρτώνται κινηματικά από τον master κόμβο, ώστε να εξασφαλίζεται η επιπεδότητα της διατομής. Τα υποστυλώματα είναι πακτωμένα στη βάση τους. Το μοντέλο αποτελείται από 397 κόμβους και 496 μέλη.



Εικ 6: Master κόμβος στις παρειές της σύνδεσης

3.5 Επιφανειακά στοιχεία και λεπτομερής προσομοίωση της σύνδεσης (Μοντέλο V)

Η προσομοίωση της σύνδεσης γίνεται λεπτομερώς, όπως ακριβώς στο Μοντέλο IV, ενώ η προσομοίωση των επιφανειακών μελών όπως στο Μοντέλο III, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Το μοντέλο αποτελείται από 3458 κόμβους και από 3267 μέλη.



Εικ 7: Μοντέλο V

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την επίλυση του φορέα έγινε με στατική μη γραμμική ανάλυση και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής σε κάθε ένα από τα Μοντέλα προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν.

4.1 Μετατοπίσεις

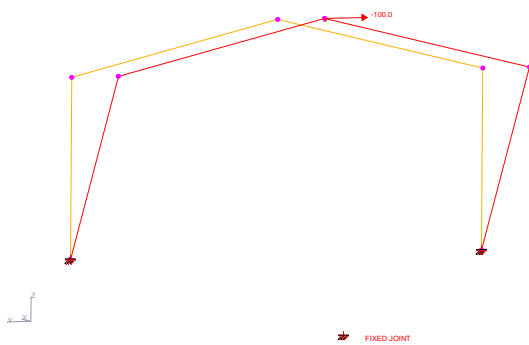
Παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις των κόμβων στους οποίους έχουν εφαρμοστεί οι φορτίσεις σε όλα τα μοντέλα. Στον Πίνακα 3, παραθέτονται οι μετατοπίσεις και οι βαθμοί

ελευθερίας του κάθε Μοντέλου. Παράλληλα, υπολογίζονται και οι αποκλίσεις από τη λεπτομερέστερη εκ των προσομοιώσεων (Μοντέλο V).

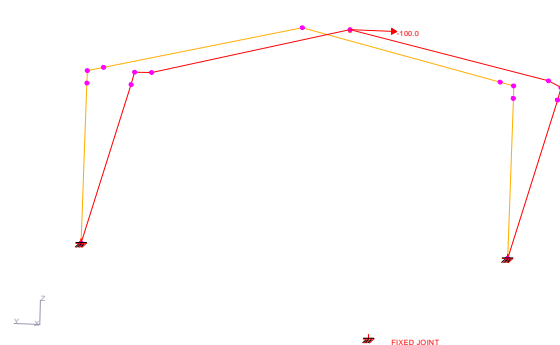
Μοντέλα	Βαθμοί ελευθερίας	Μετατοπίσεις (mm)	Απόκλιση (%)
Μοντέλο I	18	47,93	2,72
Μοντέλο II	21	41,99	10,00
Μοντέλο III	19 452	46,41	0,54
Μοντέλο IV	2 370	45,65	2,16
Μοντέλο V	20 604	46,66	-

Πιν.3: Μετατοπίσεις

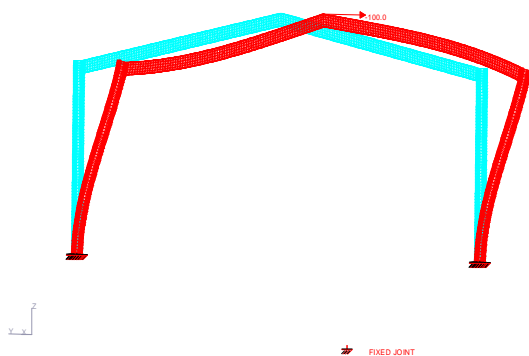
Οι μετατοπίσεις για το κάθε μοντέλο φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



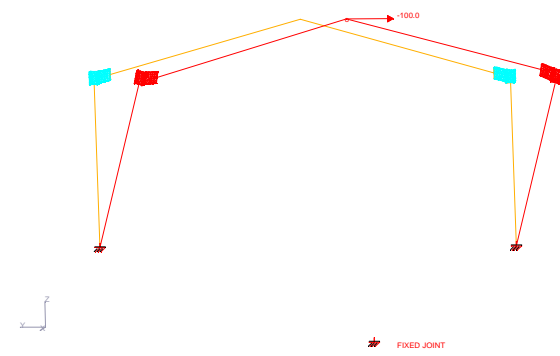
Εικ. 8 :Μετατοπίσεις στο Μοντέλο I



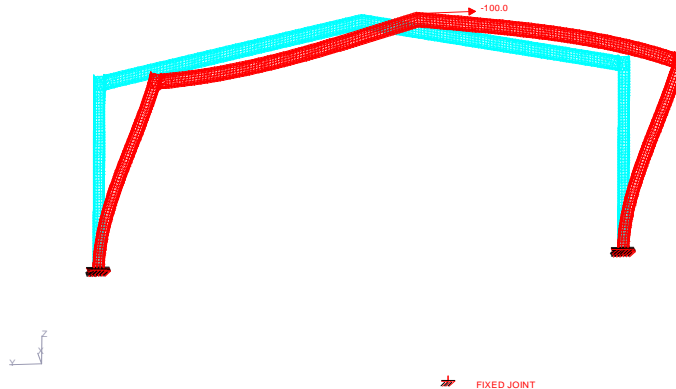
Εικ. 9:Μετατοπίσεις στο Μοντέλο II



Εικ. 10:Μετατοπίσεις στο Μοντέλο III



Εικ. 11:Μετατοπίσεις στο Μοντέλο IV



Εικ 12: :Μετατοπίσεις στο Μοντέλο V

4.1 Εντατικά μεγέθη

Στον πίνακα 4 παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της αξονικής και της τέμνουσας δύναμης, της ροπή βάσης του υποστυλώματος καθώς επίσης και της ροπής στην παρειά της σύνδεσης. Δεδομένου ότι το τελευταίο μοντέλο περιγράφει με την καλύτερη ακρίβεια τον φορέα υπολογίζεται η απόκλιση στις ροπές των υπόλοιπων μοντέλων από αυτό.

	Δυνάμεις (kN)		Ροπές βάσης (kNm)	Απόκλιση (%)	Ροπές παρειάς (kNm)	Απόκλιση (%)
Μοντέλο I	Αξονική	27,88	164,21	0,56	85,30	12,53
	Τέμνουσα	50,00				
Μοντέλο II	Αξονική	29,62	153,78	5,84	95,36	25,80
	Τέμνουσα	50,07				
Μοντέλο III	Αξονική	26,87	162,76	0,34	76,93	1,49
	Τέμνουσα	50,00				
Μοντέλο IV	Αξονική	27,89	164,15	0,50	75,01	1,04
	Τέμνουσα	50,00				
Μοντέλο V	Αξονική	26,66	163,32	-	75,80	-
	Τέμνουσα	49,86				

Πιν.4: Εντατικά μεγέθη

5.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στους παραπάνω πίνακες προκύπτει πως τα μοντέλα με τα ραβδωτά στοιχεία παρά το γεγονός ότι διαθέτουν τους λιγότερους βαθμούς ελευθερίας παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση στις δυνάμεις στην παρειά (12,53% και 25,80% για το πρώτο και το δεύτερο μοντέλο αντίστοιχα). Το τρίτο μοντέλο παρουσιάζει την

μικρότερη απόκλιση στις μετατοπίσεις (μόνο 0,54%) και σχετικά μικρή (1,49%) στις δυνάμεις όμως έχει ελάχιστα μικρότερο πλήθος βαθμών ελευθερίας με το πρότυπο μοντέλο, το Μοντέλο V. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο IV όπου συνδυάζει λίγους βαθμούς ελευθερίας και μικρές αποκλίσεις στις μετατοπίσεις (2,16%) και στις δυνάμεις την μικρότερη τιμή που παρατηρείται (0,50% στη βάση και 1,04% στην παρειά). Επομένως συνδυάζεται ταχύτητα στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και ακρίβεια. Ενδεχομένως το πρόβλημα να επιδέχεται βελτίωση μελετώντας τον φορέα σε επίπεδο μη γραμμικής ανάλυσης.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ (12 pt, Times new Roman font bold)

- [1] M. R. Bahaari και A. N. Sherbourne. “Computer modeling of an extended end-plate bolted connection”, Computers & Structures Vol. 52, No 5, pp. 879-893, 1994
- [2] O. S. Bursi και J. P. Jaspart. “Benchmarks for Finite Element Modeling of Bolted Steel Connections”, J. Construct. Steel Res. Vol. 43, Nos. 1-3, pp. 17-42, 1997
- [3] O. S. Bursi και J. P. Jaspart. “Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections”, Computers & Structures 69 (1998) 361-382
- [4] Chris P. Pantelides, Scott M. Adan, και Lawrence D. Reaveley. “Analysing steel moment-resisting connections using finite elements modeling”, ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, Crete, Greece, 13-16 June 2007.
- [5] GT STRUDL, Computer Aided Structural Engineering - Center School of Civil and Environmental Engineering - Georgia Institute of Technology - Atlanta, USA.
- [6] Connect / SteelCAD, 4M-VK Civil Engineering Software Ltd, Mykinon 9, 152 33 Chalandri, Athens, Greece.
- [7] Eurocode 3. Design of steel structures part 1.1: General rules and rules for building, ENV 1993-1-1. Brussels, 1992

MOMENT-RESISTING CONNECTION MODELING USING FINITE ELEMENT METHOD. FROM LOCAL TO GLOBAL APPROACH

Αριστείδης Γ. Παπαρησιτίδης

Πολιτικός Μηχανικός

4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: aris@4m.gr

Γεώργιος Μαρούλης

Μηχανολόγος Μηχανικός

4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού

Όλγα Καπετάνου
Τελειόφοιτη ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

SUMMARY (12 pt, Times new Roman font bold)

(1 κενό)

Η σημασία του ακριβέστερου υπολογισμού των κόμβων μεταλλικών κατασκευών είναι εμφανής από τον αριθμό των αστοχιών που έχουν παρατηρηθεί σε αυτούς. Ο Ευρωκώδικας-3 υιοθετεί τον υπολογισμό συνδέσεων μέσω προσομοίωσής τους με «ισοδύναμη διατομή» (T-stub). Μια τέτοια θεώρηση δεν μπορεί να αντιμετωπίσει τον κάθε πιθανό κόμβο που μπορεί να συναντηθεί στην πράξη.

Στην εργασία αυτή γίνεται παραμετρική προσομοίωση των κόμβων μεταλλικών κατασκευών με διαφορετικές τοπικές (local) και καθολικές (global) θεωρήσεις. Εξετάζεται η συμβατότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των κόμβων με τα αποτελέσματα της ανάλυσης του υπολοίπου φορέα.

Η λεπτομερής προσομοίωση του συνόλου της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε σημαντικό πλήθος βαθμών ελευθερίας και μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Σε αυτή την εργασία προσομοιώθηκαν λεπτομερώς μόνον οι κόμβοι σύνδεσης (surrogate elements), ενώ τα μέλη του φορέα προσομοιώθηκαν με ραβδωτά στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης αρχικά συγκρίνονται με αυτά της λεπτομερούς προσομοίωσης. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα συμβατικής ανάλυσης, θεωρώντας τα μέλη ελαστικά πακτωμένα.