

**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](mailto:aris@4m.gr)**Γεώργιος Μαρούλης**

Μηχανολόγος Μηχανικός

4M-VK Προγράμματα Πολιτικού Μηχανικού

**Όλγα Καπετάνου**

Τελειόφοιτη ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ

**1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

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.

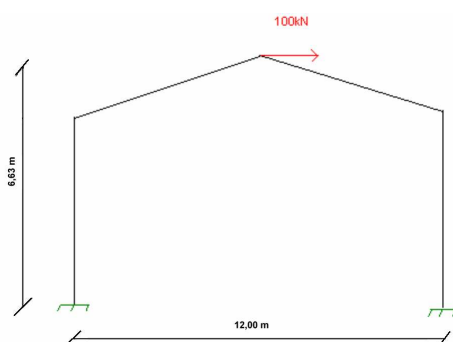
Η λεπτομερής προσομοίωση του συνόλου της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία οδηγεί σε σημαντικό πλήθος βαθμών ελευθερίας και μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Σε αυτή την εργασία προσομοιώθηκαν λεπτομερώς μόνον οι κόμβοι σύνδεσης, ενώ τα μέλη του φορέα προσομοιώθηκαν με ραβδωτά στοιχεία. Τα αποτελέσματα αυτής 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**

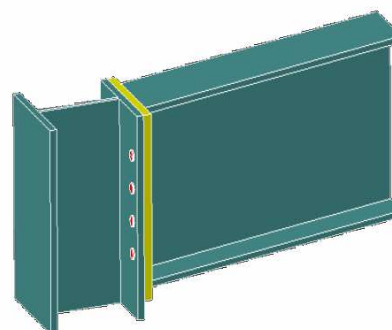
Στην εργασία αυτή γίνεται παραμετρική προσομοίωση των κόμβων μεταλλικών κατασκευών με διαφορετικές τοπικές (local) και καθολικές (global) θεωρήσεις. Εξετάζονται διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης ολόκληρου του φορέα με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων [1], [2], [3], [4] και διερευνάται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων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

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ

Ο φορέας, 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

Εξετάσθηκαν 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.

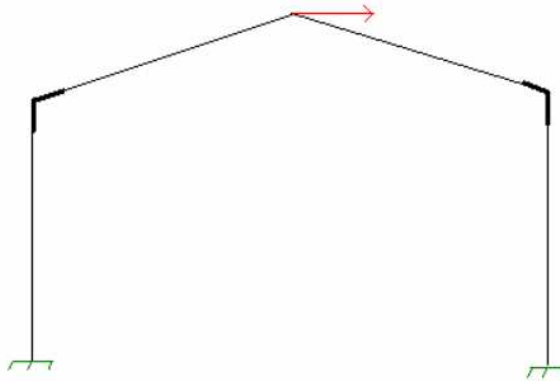
Διατομή	$J_x$ (cm <sup>4</sup> )	$J_y$ (cm <sup>4</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )
"HE240B"	11260,0	3920,0	106,0
"IPE330"	11770,0	788,0	72,6

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

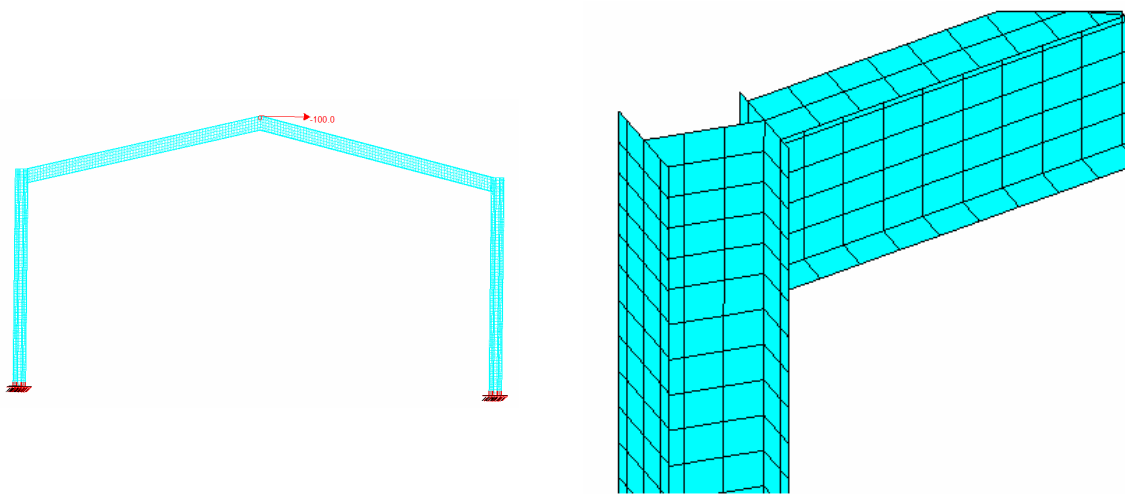
Στο μοντέλο αυτό η κάθετη διατομή των ζυγμάτων καταλήγει να εφάπτεται με το πέλμα του υποστυλώματος. Τα επίπεδα των πελμάτων των υποστυλωμάτων διακριτοποιούνται έτσι ώστε να ταυτίζονται οι κόμβοι του πέλματος με αυτούς της διατομής της δοκού. Το μοντέλο αποτελείται από 3266 κόμβους και 2954 μέλη.

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

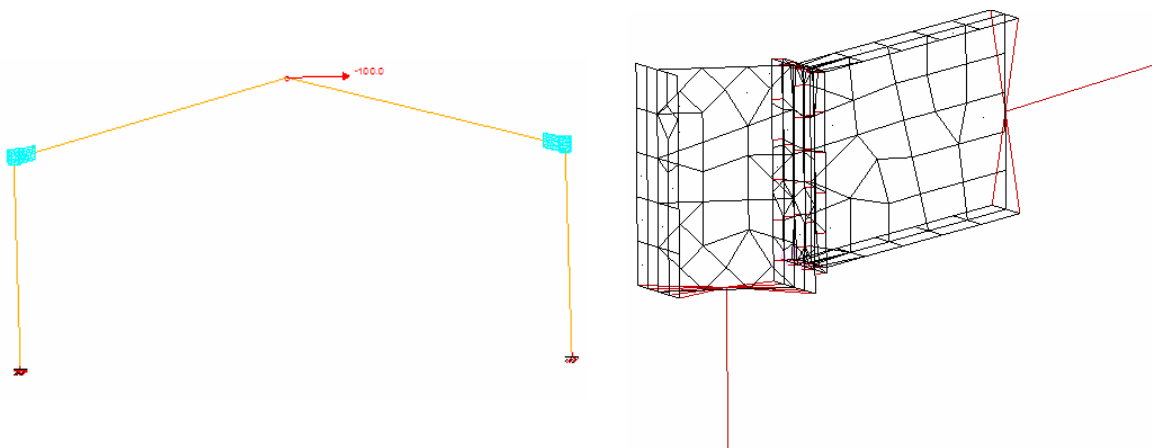
Η προσομοίωση της σύνδεσης γίνεται με συνδυασμό ραβδωτών και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Γίνεται η παραδοχή ότι η διατομή παραμένει κάθετη στον άξονα του μέλους. Αναλυτικά, τα ελάσματα προσομοιώνονται με τριγωνικά ή τετραπλευρικά επιφανειακά στοιχεία κελύφους με το πάχος και τις ιδιότητες του ελάσματος, 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 πέλματα I διατομής). Τέλος, αναφερόμενοι στον τρόπο προσομοίωσης της σύνδεσης των ελασμάτων μεταξύ τους (πχ. πέλμα I διατομής με πλάκα σύνδεσης) χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ελατήρια κατάλληλης δυσκαμνίας τα οποία παραλαμβάνουν μόνο θλίψη (compression only springs), (Bahaari και Sherbourne [1]).

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.



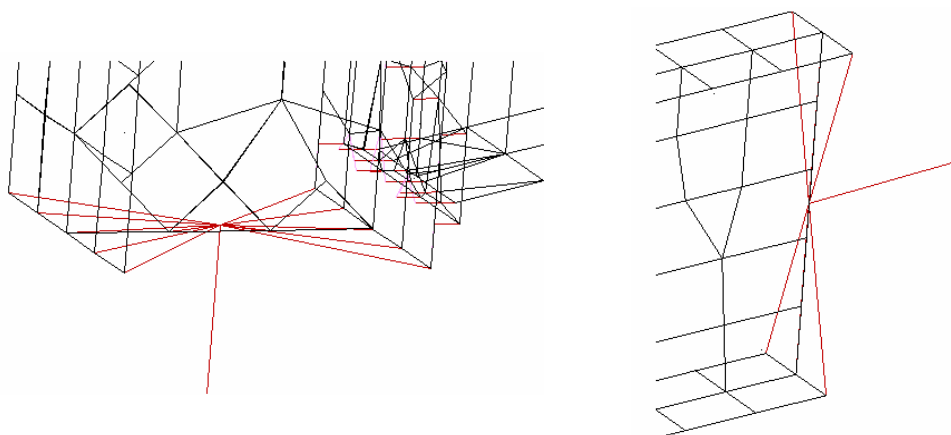
Εικ 4: Μοντέλο III



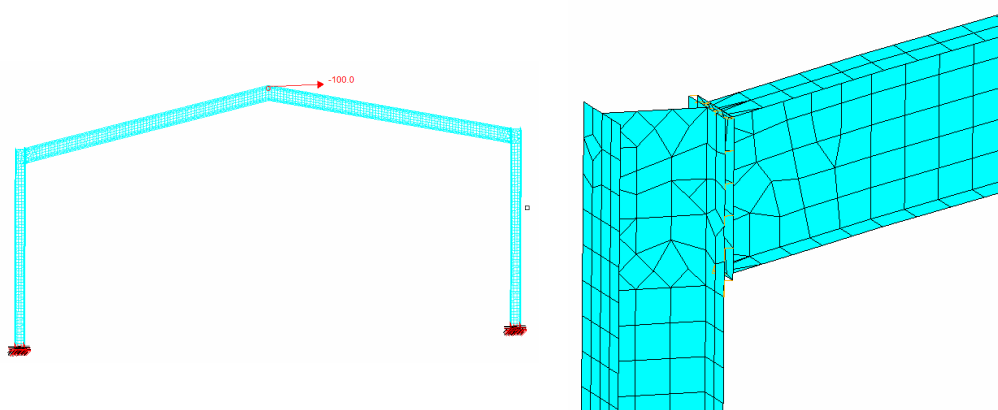
Εικ 5: Μοντέλο IV

### 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 6: Master κόμβος στις παρειές της σύνδεσης



Εικ 7: Μοντέλο V

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

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

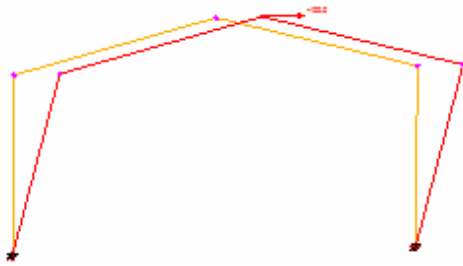
##### 4.1 Μετατοπίσεις

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις στον κορφιά για όλα τα μοντέλα. Παράλληλα, εμφανίζονται οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε Μοντέλου και υπολογίζονται και οι αποκλίσεις από τη λεπτομερέστερη εκ των προσομοιώσεων (Μοντέλο V).

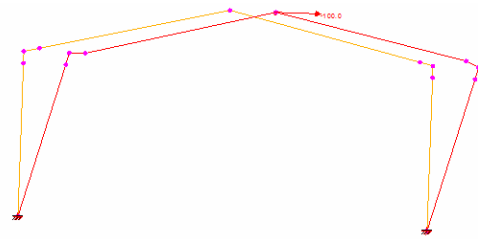
Μοντέλο	Βαθμοί ελευθερίας	Μετατοπίσεις (mm)	Απόκλιση (%)
I	18	47,93	2,72
II	21	41,99	10,00
III	19 452	46,41	0,54
IV	2 370	45,65	2,16
V	20 604	46,66	-

Πιν.3: Μετατοπίσεις

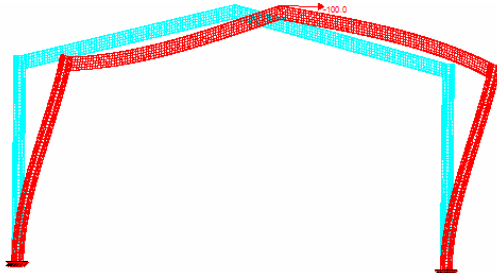
Οι μετατοπίσεις για το κάθε μοντέλο φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



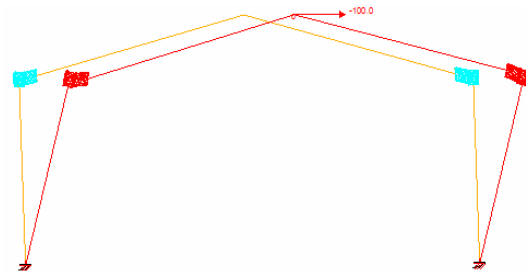
Εικ. 8: Μετατοπίσεις Μοντέλου I



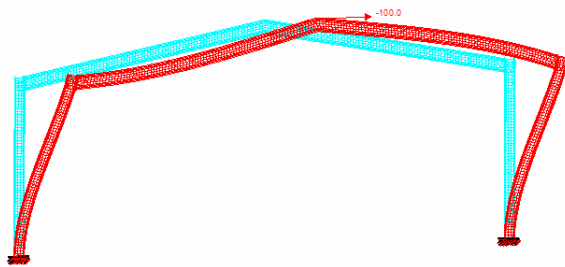
Εικ. 9: Μετατοπίσεις Μοντέλου II



Εικ. 10: Μετατοπίσεις Μοντέλου III



Εικ. 11: Μετατοπίσεις Μοντέλου IV



Εικ. 12: Μετατοπίσεις Μοντέλου V

#### 4.1 Εντατικά μεγέθη

Στον Πίνακα 4 παρατίθενται η αξονική (N), η τέμνουσα δύναμη (Q), η ροπή βάσης του υποστυλώματος, καθώς επίσης και η ροπή στην παρειά της σύνδεσης. Παράλληλα υπολογίζονται οι αποκλίσεις στις ροπές των υπολοίπων μοντέλων από τη λεπτομερέστερη εκ των προσομοιώσεων.

Μοντέλο	Δυνάμεις (kN)		Ροπή βάσης (kNm)	Απόκλιση (%)	Ροπή παρειάς (kNm)	Απόκλιση (%)
	N	Q				
I	N	27,88	164,21	0,56	85,30	12,53
	Q	50,00				
II	N	29,62	153,78	5,84	95,36	25,80
	Q	50,00				
III	N	28,12	162,76	0,34	76,93	1,49
	Q	50,00				
IV	N	27,89	164,15	0,50	75,01	1,04
	Q	50,00				
V	N	28,03	163,32	-	75,80	-
	Q	50,00				

Πιν.4: Εντατικά μεγέθη

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα στους παραπάνω πίνακες προκύπτει πως οι προσομοιώσεις με ραβδωτά στοιχεία παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση στις δυνάμεις στην παρειά (12,53% - 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 σημαντικό πλήθος βαθμών ελευθερίας, ανάλογο του Μοντέλου V. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο IV το οποίο συνδυάζει μικρό αριθμό βαθμών ελευθερίας, μικρές αποκλίσεις στις μετατοπίσεις (2,16%) και ροπές (0,50% στη βάση - 1,04% στην παρειά). Συνδυάζει δηλαδή το μικρό υπολογιστικό κόστος με την ακρίβεια αποτελεσμάτων. Μία τέτοια προσομοίωση των συνδέσεων, συμβατή με τα παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη του υπόλοιπου φορέα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για τον έλεγχο των κόμβων συνδέσεων. Σε επόμενη εργασία θα εξετασθούν οι παραπάνω τρόποι προσομοίωσης θεωρώντας μή-γραμμικό καταστατικό νόμο υλικού για τον χάλυβα.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [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.STRUDDL, Computer Aided Structural Engineering - Center School of Civil and Environmental Engineering - Georgia Institute of Technology - Atlanta, USA.
- [6] Connect / STEEL, 4M-VK Civil Engineering Software Ltd, Mykinon 9, 152 33 Chalandri, Athens, Greece.
- [7] Eurocode 3. Design of steel structures Part 11: General rules and rules for buildings. CEN, EN 1993 11, 2005.

**MOMENT-RESISTING CONNECTION MODELING USING FINITE ELEMENT METHOD. FROM LOCAL TO GLOBAL APPROACH****Aristidis G. Papachristidis**

Civil Engineer

4M-VK Civil Engineering Software

Athens, Greece

e-mail: [aris@4m.gr](mailto:aris@4m.gr)**George Maroulis**

Mechanical Engineer

4M-VK Civil Engineering Software

**Olga Kapetanou**

School of Applied Mathematical and Physical Sciences, NTUA

**SUMMARY**

In this work a parametric modeling of moment-resisting connection modeling is being done, using different local and global approaches. Detailed modeling using finite elements leads into a large number of unknowns and large computational cost. A single bay steel frame is modeled in five different test cases. The first two models consist of beam elements only. The third one consists of shell finite elements, without any special modeling for the beam-column connection, while in the last two cases beam-column connection is modeled using shell elements. Results are compared in terms of accuracy and computational cost.