

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ RBS ΜΕ ΟΠΕΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΔΙΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΑ ΠΕΛΜΑΤΑ ΜΕ FEM**

**Δημήτριος Θ. Παχούμης<sup>a</sup>, Χρίστος Κ. Ζεμπίλης<sup>b</sup>, Στέφανος Χ. Δημητριάδης<sup>b</sup>,  
Χρίστος Ν. Κάλφας<sup>c</sup>, Ευάγγελος Γ. Γαλούσης<sup>d</sup>,**

<sup>a</sup> Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός

<sup>b</sup> MSc Πολιτικός Μηχανικός

<sup>c</sup> Επικ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

<sup>d</sup> Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail : [mslgroup@civil.duth.gr](mailto:mslgroup@civil.duth.gr)

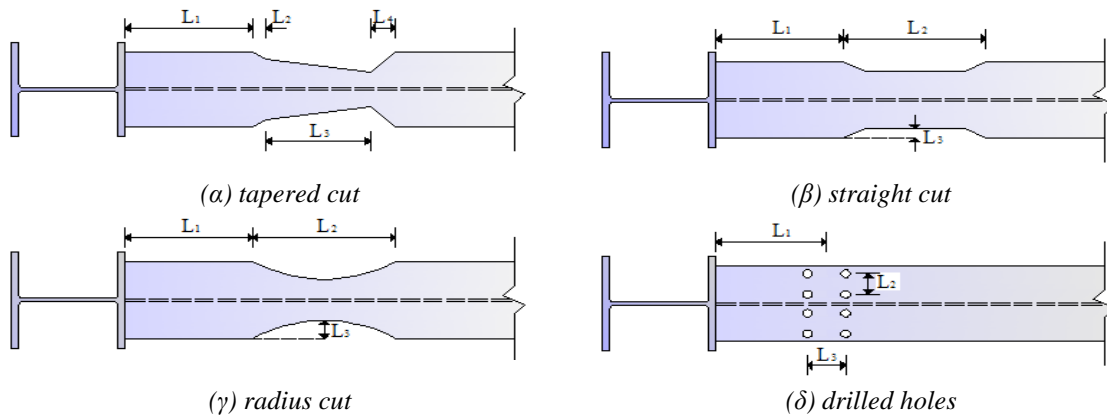
**1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα από την ανάλυση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία σύνδεσης δοκού – υποστυλώματος με απομείωση των πελμάτων της δοκού, με οπές διαφόρων διαμέτρων και διατάξεων. Ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης, ο οποίος αποτελεί μια από τις παραλλαγές της σύνδεσης RBS, είναι απολύτως εμπειρικός και βασίζεται σε πειραματικές δοκιμές χωρίς περαιτέρω ανάλυση και μελέτη. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής, σε Ευρωπαϊκού προφίλ διατομές, με ταυτόχρονη διατήρηση της αντοχής του κόμβου στη δυνατό υψηλότερη τιμή. Όπως προκύπτει από την ανάλυση, η εφαρμογή της τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων είναι ασφαλής υπό προϋποθέσεις, οι οποίες αναλύονται εκτενώς στην παρούσα έρευνα.

**2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ο ικανοτικός σχεδιασμός των κόμβων στις μεταλλικές κατασκευές προβλημάτισε ερευνητές και κατασκευαστές την τελευταία δεκαετία και ιδιαίτερα μετά τους σοβαρούς σεισμούς του Northridge (1994, Η.Π.Α.) και του Kobe (1995, Ιαπωνία). Προτάθηκαν πολλές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος της προστασίας του κόμβου, οι οποίες ελέγχθηκαν και πειραματικά, με επικρατέστερη τη μέθοδο απομείωσης του πέλματος της δοκού (Reduced Beam Section). Σκοπός της είναι η αποφυγή δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της συγκόλλησης και η μεταφορά της σε απόσταση από το μέτωπο του υποστυλώματος, στο εσωτερικό της δοκού. Εξάλλου, οι νέες απαιτήσεις αντισεισμικότητας επιβάλλουν τη δημιουργία ισχυρού υποστυλώματος και ασθενούς δοκού, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία μηχανισμού «μαλακού ορόφου» που έχει ως συνέπεια την κατάρρευση της κατασκευής [1-4]. Η απομείωση μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους (σχ. 1) και συγκεκριμένα, είτε με πολυγωνικές αποκοπές (tapered cut) συνεχούς απομείωσης, είτε με ευθύγραμμες κοπές (straight cut) σταθερής απομείωσης,

είτε με κυκλική κοπή (radius cut), είτε με διάνοιξη οπών διαφόρων διαμέτρων στα πέλματα της δοκού (drilled holes) [1], [4-9]. Η τελευταία μέθοδος αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



σχ. 1. Τύποι RBS ( Reduced Beam Section – Απομείωσης πέλματος δοκού ).

Η απομείωση της διατομής της δοκού, σε αντίθεση με τις άλλες συνδέσεις, δεν απαιτεί την πραγματοποίηση περισσότερων συγκολλήσεων και την προσθήκη επιπλέον λεπίδων ενισχύσεων στα υποστυλώματα με αποτέλεσμα τη μείωση του βάρους και του συνολικού κόστους της κατασκευής. Αν και η απομείωση επιφέρει μείωση της δυσκαμψίας του πλαισίου, αυτή δεν είναι σημαντική με αποτέλεσμα να μην απαιτείται η αύξηση των διαστάσεων της δοκού ή του υποστυλώματος. Η διαδικασία κοπής των συνδέσεων τύπου RBS γίνεται πλήρως εργοστασιακά και επομένως είναι εντελώς αξιόπιστες από πλευράς κατασκευής. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η σύνδεση RBS είναι η πιο οικονομική ανάμεσα στις άλλες συνδέσεις που προτάθηκαν. Ειδικότερα η μορφή του RBS με κυκλική κοπή καθώς και με διάνοιξη οπών είναι οι ευκολότερες στην παραγωγή και η χρήση τους είναι αποδεκτή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τουλάχιστον στις Η.Π.Α και στην Ιαπωνία [4], [10-12].

### 3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Η συγκεκριμένη έρευνα παρουσιάζει τη συμπεριφορά συγκολλητού κόμβου δοκού-υποστυλώματος. Τα πέλματα της δοκού, διατομής HE 240A, απομειώνονται με διάνοιξη οπών. Για το υποστύλωμα επιλέγεται διατομή HE 300B, το οποίο ενισχύεται με 2 λεπίδες κορμού και οριζόντιες εγκάρσιες ενισχύσεις στο ύψος των πελμάτων της δοκού, με σκοπό την ισχυροποίησή του, ώστε να παραμείνει ανεπηρέαστο κατά τη μελέτη της λειτουργίας της συγκεκριμένης τεχνικής απομείωσης. Στο σημείο επιβολής του φορτίου τοποθετούνται 2 εγκάρσιες ενισχύσεις στη δοκό με σκοπό την αποφυγή φαινομένων τοπικού λυγισμού και για τη διατήρηση της συνέχειας της δοκού τοποθετείται στο ελεύθερο άκρο της ακραία μετωπική λεπίδα. Η μοντελοποίηση και ανάλυση των δοκιμών γίνεται με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία κελύφους ορθογωνικής μορφής (S4R, thin shell elements). Με τέτοιου είδους στοιχεία προσομοιώνονται όλα τα επί μέρους τμήματα του κόμβου, εκτός από τη συγκόλληση, η προσομοίωση της οποίας γίνεται με τη χρήση στοιχείων όγκου (C3D20 solid elements). Για τη διακριτοποίηση επιλέγεται πυκνότερος κάρναβος στις περιοχές ενδιαφέροντος, που είναι η περιοχή της απομείωσης και εκείνη της σύνδεσης της δοκού με το υποστύλωμα (σχ. 4 και σχ. 5).

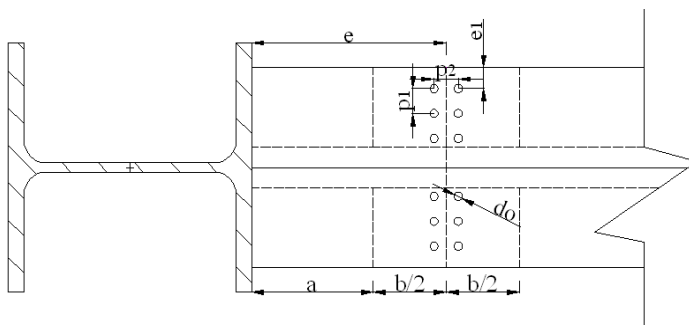
Για υπολογιστικούς λόγους μοντελοποιείται το ήμισυ του δοκιμίου, δεδομένου ότι αυτό είναι συμμετρικό ως προς το διαμήκη άξονα της δοκού. Για τις εξωτερικές στηρίξεις του

μοντέλου απαιτούνται, η διαμόρφωση πακτώσεων στα άκρα του υποστυλώματος και η προσομοίωση της συμμετρίας ως προς το διαμήκη άξονα της δοκού. Οι πακτώσεις, προσομοιώνονται με τη δέσμευση των αντίστοιχων ακμών του υποστυλώματος σε μετακινήσεις και στροφές.

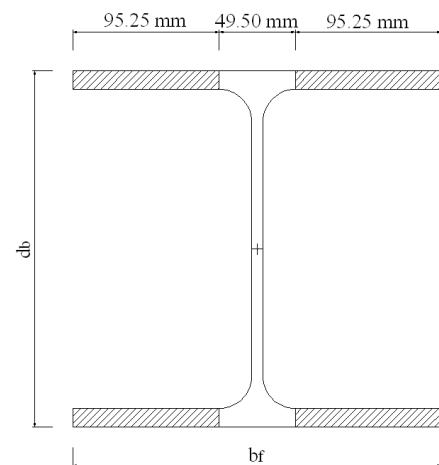
Το υλικό είναι χάλυβας ποιότητας S235 με μέτρο ελαστικότητας  $E=210$  GPa και λόγο του Poisson  $\nu=0.30$ . Για τη μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα υιοθετείται το τροποποιημένο διγραμμικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, στο οποίο ο πλαστικός κλάδος παρουσιάζει μια μικρή σχετικά κράτυνση [12].

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΟΡΙΑ		
	FEMA 350	ΚΑΝΑΔΙΚΟΣ	EC8 : Part 3
<b>a</b>	<b>0.50 – 0.75 <math>b_f</math></b>	<b>0.50 – 0.75 <math>b_f</math></b>	<b>0.60 <math>b_f</math></b>
<b>b</b>	<b>0.65 – 0.85 <math>d_b</math></b>	<b>0.65 – 0.85 <math>d_b</math></b>	<b>0.75 <math>d_b</math></b>
<b>c</b>	<b>0.25 <math>b_f</math></b>	<b>0.25 <math>b_f</math></b>	<b>0.25 <math>b_f</math></b>

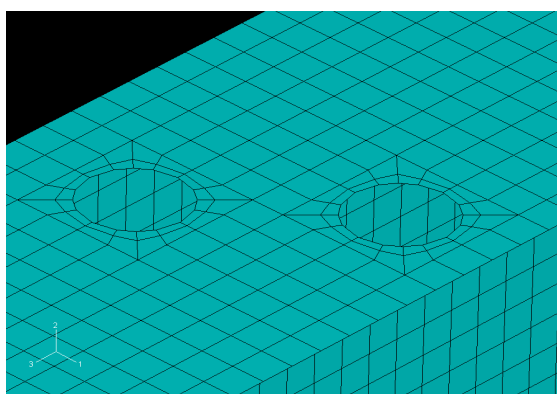
πιν. 1 : Ορια αποστάσεων  $a$ ,  $b$  και  $c$  .



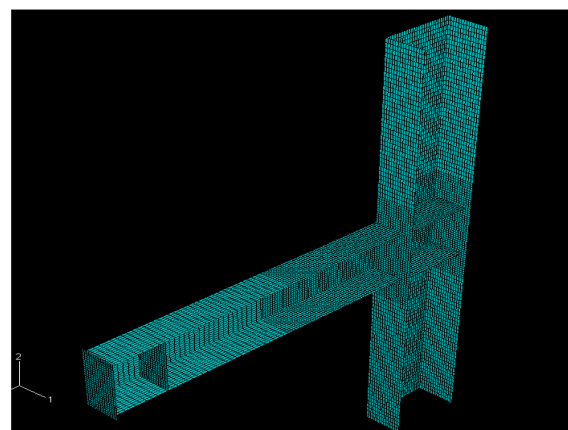
σχ.2 : Γενική διάταξη RBS με οπές



σχ. 3 Θέσεις οπών στη διατομή.



σχ. 4 : Διακριτοποίηση στην περιοχή της απομείωσης με οπές διάταξης V.



σχ. 5: Τρισδιάστατη απεικόνιση διακριτοποίησης δοκιμίου.

Οι Κανονισμοί δεν προβλέπουν ειδικές διατάξεις που να αφορούν απομειώσεις πελμάτων με οπές, αλλά υποδεικνύουν ότι για τις απομειώσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι διατάξεις που αφορούν RBS με κυκλικές αποκοπές. Για τις αποστάσεις  $a$ ,  $b$  και  $c$  (σχ.2), που είναι βασικής σημασίας για τη λειτουργία του RBS, οι διάφοροι Κανονισμοί προτείνουν τα όρια που αναγράφονται στον πιν. 1. Τα όρια αυτά αφορούν σε απομειώσεις με κυκλικές αποκοπές και, σύμφωνα με την υπόδειξη του Κανονισμού, υιοθετούνται και στην παρούσα εργασία, στην οποία λαμβάνονται οι τιμές του Ευρωκώδικα 8 [2]. Ένας ακόμα περιορισμός, ο οποίος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι πως οι οπές, ανεξαρτήτου διάταξης, πρέπει να διανοίγονται στο τμήμα του πέλματος από το άκρο του και μέχρι το άκρο του τόξου προσαρμογής. Για το θεωρούμενο μοντέλο διατομής HE 240A, η απόσταση μέσα στην οποία θα πρέπει να αναπτυχθεί οποιαδήποτε διάταξη οπών δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 95 mm και από τις δύο πλευρές του πέλματος της δοκού (σχ. 3). Επίσης, ο σχεδιασμός των οπών γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ποσοστό απομείωσης του πέλματος να μην υπερβαίνει το 50% του συνολικού πλάτους του .

Η φόρτιση ασκείται σε απόσταση 1000 mm από την παρειά του υποστυλώματος με τη μέθοδο της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Οι εντάσεις (διάτμηση και καμπτική ροπή) στις περιοχές ενδιαφέροντος υπολογίζονται από τις αντιδράσεις των στηρίξεων. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση επιλέγεται να φθάνει μέχρι 200mm και έχει διεύθυνση τέτοια ώστε ο κόμβος να καταπονείται με αρνητική ροπή.

Η έρευνα περιλαμβάνει την ανάλυση ενός αριθμού μοντέλων με διάφορες διαστάσεις και διατάξεις οπών καθώς και διάφορα ποσοστά απομείωσης, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων αυτών στη συμπεριφορά του κόμβου. Για την κωδικοποίηση των μοντέλων χρησιμοποιείται ο συμβολισμός Μκ-λ-μ, όπου ο πρώτος αριθμός κ εκφράζει το ποσοστό της απομείωσης, ο λ τον αριθμό των σειρών (1 ή 2, ή V για τις οπές λοξού καννάβου) και ο μ τη διάμετρο των οπών. Η παραμετρική ανάλυση έχει ως σκοπό τη σύγκριση των διαφόρων διατάξεων τόσο μεταξύ τους όσο και με το dogbone (RBS με κυκλική αποκοπή), προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του κόμβου. Ενδεικτικά αποτελέσματα της ανάλυσης δίνονται με τα διαγράμματα των *σχημάτων 8,9,12, και 13*.

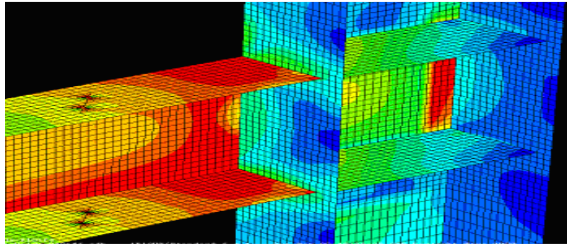
#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων επικεντρώνονται στις παραμορφώσεις που εμφανίζονται στην περιοχή της απομείωσης και στους κόμβους των μοντέλων. Για τις περιπτώσεις των δοκιμών που επέδειξαν φτωχή συμπεριφορά υπό μονοτονική φόρτιση, η ύπαρξη των οπών δεν μεταβάλλει την κατανομή των τάσεων και τη συμπεριφορά της δοκού. Πλαστική άρθρωση δημιουργείται στην περιοχή πλησίον της σύνδεσης (σχ. 6) και εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης τάσεων προκύπτει θραύση των συγκολλήσεων (σχ. 7), μορφή αστοχίας παρόμοια με εκείνη της συγκολλητής σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος. Οι καμπύλες των σχ. 8 & 9 παρουσιάζουν τα διαγράμματα ροπής-στροφής των μοντέλων, στα οποία η συμπεριφορά τους δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη των οπών.

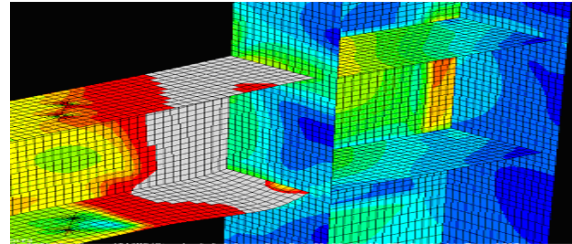
Στις περιπτώσεις των μοντέλων που επιδεικνύουν καλή συμπεριφορά υπό μονοτονική φόρτιση, η παρουσία της απομείωσης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή των οπών (σχ. 10) και όχι στη σύνδεση. Η συμπεριφορά του κόμβου μεταβάλλεται οδηγώντας την πλαστική άρθρωση στο εσωτερικό της δοκού (σχ. 10) και προστατεύοντας έτσι τη συγκολλητή σύνδεση και το υποστυλώμα. Σε ορισμένα

μοντέλα, κυρίως σε αυτά όπου η διάταξη των οπών ήταν ευθύγραμμη, επέρχεται διάρρηξη του πέλματος λόγω συγκέντρωσης τάσεων στις παρειές των οπών. Τα διαγράμματα ροπής-στροφής, για την περιοχή του κόμβου και της απομείωσης, των μοντέλων στα οποία η απομείωση έχει πρακτικό αποτέλεσμα παρατίθεται στα σχ. 12 & 13, αντίστοιχα.

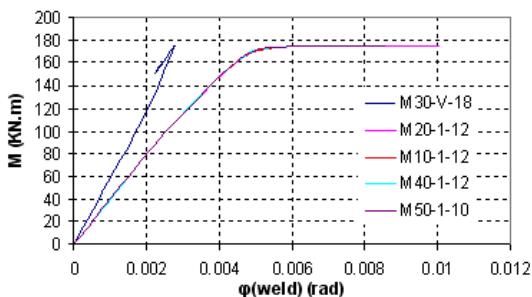
Επισημαίνεται πως σε όλα τα μοντέλα και καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης το υποστύλωμα παραμένει ανεπηρέαστο, λόγω της μεγάλης του διατομής και των ενισχύσεων που έχουν τοποθετηθεί, ενώ στα περισσότερα δοκίμια παρατηρείται στρέβλωση του θλιβόμενου (κάτω) πέλματος της δοκού (σχ. 11).



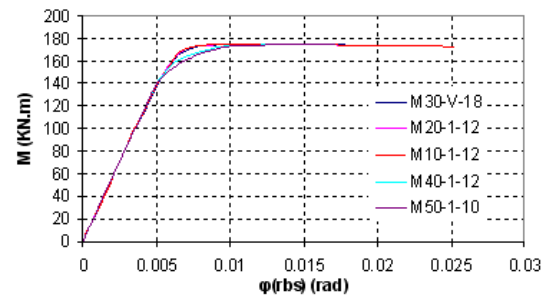
σχ. 6 : δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της σύνδεσης.



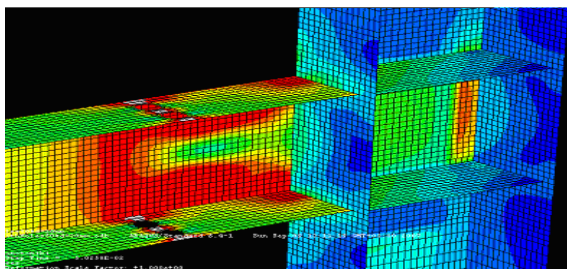
σχ. 7 : λειτουργία σύνδεσης ως συγκολλητής.



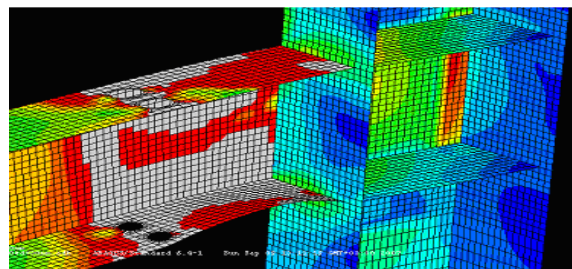
σχ. 8 : ενδεικτικό διάγραμμα ροπής στροφής στην περιοχή του κόμβου.



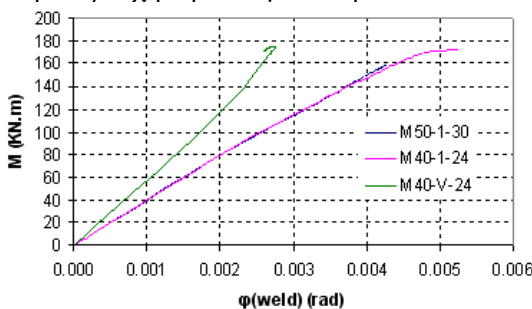
σχ. 9 : ενδεικτικό διάγραμμα ροπής στροφής στην περιοχή της απομείωσης.



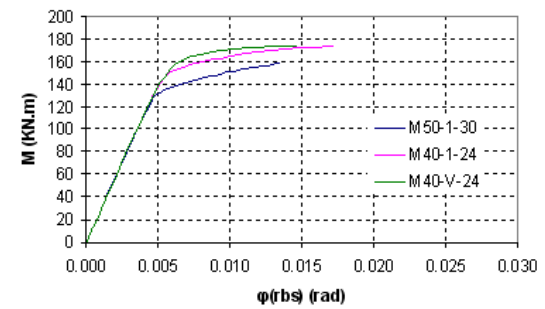
σχ. 10 : δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στην περιοχή της απομείωσης



σχ. 11 : λειτουργία της απομείωσης.



σχ. 12 : ενδεικτικό διάγραμμα ροπής στροφής στην περιοχή του κόμβου.



σχ. 13 : ενδεικτικό διάγραμμα ροπής στροφής στην περιοχή της απομείωσης.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τη μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων της, εξάγονται τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- Για ποσοστά απομείωσης έως και 30% του πλάτους του πέλματος της δοκού και ανεξαρτήτως των διαμέτρων και της διάταξης των οπών, η απομείωση δεν έχει κανένα πρακτικό αποτέλεσμα. Εξαιτίας της μεγάλης συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή της σύνδεσης προκαλείται θραύση των συγκολλήσεων. Η ψαθυρή αυτή μορφή αστοχίας της σύνδεσης είναι η ίδια με αυτή της συγκολλητής σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος χωρίς την παρουσία της απομείωσης και κατά συνέπεια καμία διαφοροποίηση δεν παρατηρείται λόγω της ύπαρξης των οπών. Ουσιαστικά δηλαδή το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα από την απομείωση του πέλματος δεν εξυπηρετείται από τέτοιου μεγέθους ποσοστά απομείωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα μοντέλα M10-1-12, M10-V-6, M20-V-12, M20-1-6, M30-1-18 και M30-2-9.
- Παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύουν και τα μοντέλα με ποσοστό απομείωσης μεγαλύτερο του 30%, στα οποία ανεξαρτήτως της διάταξης, το μέγεθος των οπών ήταν μικρό. Συνάγεται δηλαδή ότι για να έχει πρακτικά αποτελέσματα η απομείωση πρέπει η διάμετρος των οπών να είναι σχετικά μεγάλη και πιο συγκεκριμένα η ανάλυση έδειξε ότι η απομείωση αρχίζει να λειτουργεί με οπές διαμέτρου άνω των 20mm. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα μοντέλα M40-1-12 και M50-2-10,
- Από τα παραπάνω εξάγεται το γενικό συμπέρασμα ότι για να έχει αποτέλεσμα η απομείωση πρέπει το ποσοστό της να είναι άνω του 30% και οι διάμετροι των οπών να υπερβαίνουν τα 20mm.
- Από την ανάλυση προκύπτει επίσης ότι η διάρρηξη του πέλματος λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στις παρειές των οπών, επέρχεται σε μικρότερα φορτία όταν η διάταξη των οπών είναι ευθύγραμμη. Για οπές σε διάταξη λοξού καννάβου η διάρρηξη εμφανίζεται σε μεγαλύτερα φορτία, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της καλύτερης συμπεριφοράς της διάταξης αυτής σε θραύση.

Τα παραπάνω γενικά συμπεράσματα προέκυψαν μετά την ανάλυση αντιπροσωπευτικού αριθμού μοντέλων FEM. Για την εκτενέστερη διερεύνηση του συγκεκριμένου τύπου σύνδεσης και για την περαιτέρω τεκμηρίωση των ανωτέρω συμπερασμάτων, απαιτείται η ανάλυση περισσότερων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικού μεγέθους και διατάξεις οπών, καθώς και η πειραματική τους επιβεβαίωση.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Anastasiadis A. and Gioncu V. “Influence of joint details on the local ductility of steel moment resisting frames”, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> National Greek Conference on Steel Structures*, 1998, pp.311-319.
- [2] EC 8, Part 3: “Design of structures for earthquake resistance. Assessment and retrofitting of buildings”, EN 1998-3: June 2005E.
- [3] FEMA 350. “Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame



- buildings”, Washington D.C., 2000.
- [4] Anastasiadis A., Mateescu G., Gioncu V. “Improved ductile design of steel MR-Frames based on constructional details”, *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Metal Structures*, Timisoara, Romania, 19-22 October 2000, pp. 367-376.
- [5] Chen SJ., Chu JM. and Chou ZL. “Dynamic behavior of steel frames with beam flanges shaved around connection”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.42, No1, 1997, pp.49-70.
- [6] Chen SJ., Yeh CH., Chu JM. “Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance”, *Journal of structural Engineering*, Vol.122, No11, 1996, pp.1292-1299.
- [7] Jones SL., Fry GT., Engelhardt MD. “Experimental evaluation of cyclically loaded beam section moment connections”, *Journal of Structural Engineering*, Vol.128, No4, 2002, pp.441-451.
- [8] Popov E., Blondet M. and Stepanov L. “Application of dog bones for improvement of seismic behavior of steel connections”, *Report No UCB/EERC 96/05*, 1996, U.S.A.
- [9] Wilkinson S., Hurdman G. and Crowther A. “A moment resisting connection for earthquake resistant structures”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.62, No3, 2006, pp.295-302.
- [10] Plumier A., “Reduced beam section ; a safety concept for structures in seismic zones”, *Buletinul Stiintific, Seria Constructii Architectura*, Tomul 41 (55), Fascicola 2, 1996, pp.46-60.
- [11] Roeder CW. “Connection performance for seismic design of steel moment frames”, *Journal of Structural Engineering.*, Vol.128, No4, 2002, pp.517-525.
- [12] EC 3, Part 1.1: “Design of steel structures – General rules and rules for buildings”, EN 1993-1-1:2005.

**A F.E.M. ANALYSIS OF RBS CONNECTIONS WITH DRILLED FLANGES**

**Dimitrios T. Pachoumis<sup>a</sup> Christos K. Zebilis<sup>d</sup> Stefanos C. Dimitriadis<sup>d</sup> Christos N. Kalfas<sup>b</sup>, Evangelos G. Galoussis<sup>c</sup>,**

<sup>a</sup> Phd. Cand., MSc Civil Engineer

<sup>b</sup> Assistant Professor DUTH

<sup>c</sup> Professor DUTH

<sup>d</sup> MSc Civil Engineer

Steel Structures Laboratory DUTH

Xanthi, Greece

e-mail: [msslgroup@civil.duth.gr](mailto:msslgroup@civil.duth.gr)

**1. SUMMARY**

Reduced beam section (RBS) moment resisting connections are among the most economical and practically rigid steel connections. An alternative to RBS moment connections that with cyclic cut is the one of drilled flanges. Although the effectiveness of this type of connections was thoroughly investigated according to US design and construction practices, there is no data from European research. In the present paper the results of an analytical study of RBS moment connection with drilled flanges subjected to monotonic loading and using the HEA profiles, widely used as beam members in Europe, is presented. As a conclusion of the FEM analyses for a member of models some additional restrictions need to be taken into account.