

ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ RBS

**Βίκτωρ Μπαλόπουλος^a, Εμμανουήλ Φραντζεσκάκης^b, Δημήτριος Θ. Παχούμης^c,
Χρίστος Ν. Κάλφας^d**

^a Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ.

^b M.Sc., Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

^c Δρ., MSc, Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ.

^d Καθηγητής, Δ/ντής Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, Δ.Π.Θ.

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Βασ. Σοφίας 12, Ξάνθη, 67100, Ελλάδα

email: vbalop@civil.duth.gr, mslgroup@civil.duth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά σε ανάλυση και σχεδιασμό συνδέσεων RBS κυκλικής απότμησης για δοκούς HE. Το πρόβλημα περιγράφεται παραμετρικά κατά τρόπο που ενσωματώνει τις προδιαγραφές τόσο της FEMA όσο και του Ευρωκώδικα 8. Το επίπεδο φόρτισης όπου δημιουργείται πλαστική άρθρωση, η θέση αυτής, και ο επιτυγχανόμενος συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας της δοκού στην σύνδεση υπολογίζονται, κατόπιν καταλλήλων απλοποιητικών παραδοχών, ως στοιχειώδεις συναρτήσεις του σχήματος φόρτισης και των γεωμετρικών παραμέτρων της απότμησης. Με βάση αυτήν την αναλυτική περιγραφή, διερευνάται η περιοχή των εφικτών λύσεων και προτείνεται άμεση διαδικασία σχεδιασμού. Η ακρίβεια και αξιοπιστία των αναλυτικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται με αριθμητικά προσομοιώματα σε ABAQUS, τα οποία έχουν πιστοποιηθεί από προηγούμενους ερευνητές ως προς την ακριβή αναπαραγωγή πειραματικών μετρήσεων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά τους σεισμούς του Northridge (1994) και του Kobe (1995) αναπτύχθηκε ένα εκτεταμένο πρόγραμμα θεωρητικών και πειραματικών ερευνών [1] για τη μελέτη και αποφυγή της ψαθυρής αστοχίας συνδέσεων «ασθενούς δοκού-ισχυρού υποστυλώματος». Οι έρευνες έδειξαν ότι για να έχει μια σύνδεση ροπής υψηλή ολκιμότητα και αξιοπιστία πρέπει να αποφεύγεται η δημιουργία πλαστικής άρθρωσης κοντά στο μέτωπο του υποστυλώματος, με ενίσχυση της σύνδεσης ή με εξασθένηση της δοκού. Η ενίσχυση της σύνδεσης (κυρίως με συγκολλητές λεπίδες) αυξάνει την καμπτική αντοχή της περιοχής του κόμβου (άρα και την απαιτούμενη καμπτική αντοχή του υποστυλώματος) και είναι αντιοικονομική. Η εξασθένηση της δοκού με απομείωση των πελμάτων (*Reduced Beam Section* ή απλά *RBS*) επιβάλλει τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων μακριά από τον

κόμβο χωρίς ενίσχυση του κόμβου ή του υποστυλώματος και είναι, συνεπώς, πολύ οικονομικότερη.

Οι νέοι τύποι συνδέσεων ροπής, που προτάθηκαν μελετήθηκαν πειραματικά σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση και έτσι προέκυψαν οι πρώτες οδηγίες σχεδιασμού για τέτοιες συνδέσεις [2–5]. Το κυκλικό σχήμα απότμησης σύντομα επικράτησε, γιατί αποδείχτηκε ότι η απουσία γωνιών περιορίζει τις συγκεντρώσεις τάσεων και βελτιώνει τη συμπεριφορά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Η πρώτη εισαγωγή διατάξεων σχεδιασμού για συνδέσεις RBS έγινε από τη FEMA το 2000 [6]. Οι αντίστοιχες διατάξεις για συνδέσεις RBS κυκλικής απότμησης, που περιλήφθηκαν στον Ευρωκώδικα 8 το 2005 [7], υιοθέτησαν ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της απομείωσης είτε αυτούσιες τις προβλέψεις της FEMA είτε τα μέσα των προτεινόμενων διαστημάτων, αφού ελάχιστα πειραματικά δεδομένα υπήρχαν για Ευρωπαϊκές πρακτικές, μεθοδολογίες σχεδιασμού και διατομές.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια αναλυτική μεθοδολογία σχεδιασμού και ελέγχου δοκών με απομειωμένα πέλματα σε μονοτονική φόρτιση. Η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας των παραγόμενων αποτελεσμάτων γίνεται σε σύγκριση με αριθμητικά προσομοιώματα. Τα τελευταία προσφέρουν επίσης μια εικόνα των μετελαστικών συμπεριφορών δοκών με RBS, η οποία δεν είναι πάντα η αναμενόμενη. Τα προσομοιώματα είναι αξιόπιστα γιατί χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία, πυκνότητα διακριτοποίησης και απλοποιητικές παραδοχές που έχουν προηγούμενα αποδειχθεί ακριβή στην πρόβλεψη πειραματικών μετρήσεων από άλλους ερευνητές του Εργαστηρίου [9–11]. Οι περιπτώσεις που ελέγχονται αφορούν αμφίπακτες δοκούς υπό μονοτονική ομοιόμορφη φόρτιση, για τυπικά ανοίγματα και διατομές και για παραμέτρους απομείωσης στα άκρα ή στα μέσα των διαστημάτων που ορίζονται από την FEMA. Για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, εντοπίζεται το φορτίο και η θέση σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης και αξιολογείται η συμβολή του RBS στην προστασία της σύνδεσης.

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Θεωρείται δοκός διατομής HE με RBS διπλά συμμετρικών κυκλικών αποτμήσεων των πελμάτων, που φορτίζεται αναλογικά (σταθερό σχήμα φόρτισης, μεταβαλλόμενη ένταση) μέχρι την έναρξη της πλαστικοποίησης. Η αρχή των αξόνων λαμβάνεται στην σύνδεση, η μηχανική συμπεριφορά θεωρείται γραμμικά ελαστική Euler-Bernoulli, και η συνεισφορά του κορμού στις ροπές αντίστασης αγνοείται, ώστε $M_{Rd}(c(x)) \approx M_{Rd,0}(1 - 2c(x)/b_f)$ να θεωρείται ότι περιγράφει ακριβώς την επίδραση του βάθους απότμησης $c(x)$. Το RBS χαρακτηρίζεται από την θέση έναρξης, a , το εύρος, $2b$, την θέση του κέντρου, $s \equiv a + b$, το μέγιστο βάθος απότμησης, $c \equiv c(s)$, και την ακτίνα απότμησης $r = (b^2 + c^2)/2c$ (Σχ. 1). Σε όρους $0 < \rho = c/b \leq 1$ και $1 > \nu = \nu(\rho) = (1 + \rho^2)^{-1} \geq 1/2$, γράφονται τα αδιάστατα αντίστοιχα $0 < b/r \equiv 2\nu\rho \leq 1$ και $0 < c/r \equiv 2\nu\rho^2 \leq 1$, και ορίζονται ο μέγιστος λόγος απομείωσης, $\chi = 2c/b_f$, ο συμπληρωματικός του, $\hat{\chi} = 1 - \chi$, και η ανηγμένη (ως προς το πλάτος απομείωσης) θέση πριν το κέντρο της απομείωσης, $\zeta = (s - x)/b$.

Στην περιοχή της σύνδεσης η φόρτιση καθορίζεται κυρίως από τις εκεί δρώσες τιμές της ροπής, M_{Ed0} , και της τέμνουσας, V_{Ed0} . Το χαρακτηριστικό μήκος $\ell = M_{Ed0}/V_{Ed0}$ εξαρτάται μόνον από το σχήμα (όχι από την ένταση) φόρτισης και, απουσία διανεμημένων φορτίων,

δίνει την απόσταση μηδενισμού των ροπών. Βάσει αυτού μπορούν να ορισθούν αδιάστατες αποστάσεις, θέσεις και μέτρα λυγηρότητας, $\alpha = a/\ell$, $\beta = b/\ell$, $\sigma = s/\ell$, $\xi = x/\ell$, $\varphi = b_f/\ell$ και $\delta = d_f/\ell$, όπου $d_f = h - t_f$. Τα εντατικά μεγέθη αδιαστατοποιούνται διαιρώντας τα με M_{Rd0} επί κατάλληλη δύναμη του ℓ .

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας της δοκού δίπλα στην σύνδεση είναι $\gamma = M_{Rd0}/M_{Ed0,RBS}$, όπου $M_{Ed0,RBS}$ είναι η δρώσα ροπή στην σύνδεση στο επίπεδο φόρτισης όπου ενεργοποιείται το RBS. Επειδή πρέπει εξάπαντος να αποφεύγεται διπλή αστοχία (στην σύνδεση και στο RBS), επιβάλλεται $\gamma \geq \underline{\gamma}$ για κανονιστικά οριζόμενο κάτω φράγμα (ενδεικτικά $\underline{\gamma} = 1.1$) και, αν αυτή η συνθήκη δεν εξασφαλίζεται, πρέπει να επιλέγεται ισχυρότερη διατομή δοκού πριν προχωρήσει ο σχεδιασμός του RBS.

Η αδιάστατη δρώσα ροπή (χωρίς όρους ανωτέρας τάξεως) είναι:

$$\frac{M_{Ed}(x)}{M_{Rd0}} \approx \frac{M_{Ed0} - V_{Ed0}x}{M_{Ed0}} \frac{M_{Ed0}}{M_{Rd0}} \equiv \frac{1 - \xi}{\gamma} \equiv \frac{1 - \sigma + \beta\xi}{\gamma} \quad (1)$$

Τα πρόσημα στην εξίσωση (1) έχουν επιλεγεί ώστε όλες οι δράσεις να είναι θετικές, σε συνήθη φόρτιση. Αντίστοιχα, η αδιάστατη καμπτική αντοχή δίνεται από την σχέση:

$$\frac{M_{Rd}(\zeta)}{M_{Rd0}} \approx 1 - \chi(\zeta) \equiv \hat{\chi} + \chi \frac{1 - \sqrt{1 - (2\nu\rho\zeta)^2}}{2\nu\rho^2} \approx \hat{\chi} + \nu\chi\zeta^2 \quad (2)$$

Η σχέση (1) έχει σφάλμα $\varepsilon_p^2 \approx (p_{Ed0}s^2)/(2M_{Ed0}) \square 6s^2/L^2$ λόγω αγνόησης κατανεμημένων φορτίων. Η σχέση (2) έχει σφάλμα $\varepsilon_p^2 \approx (\varphi/4\gamma)^2$ λόγω αποκοπής όρων στο ανάπτυγμα της $M_{Rd}(x)$. Για συνήθη ανοίγματα και φορτίσεις και για γεωμετρία RBS εντός κανονιστικών πλαισίων, και τα δύο σφάλματα είναι κάτω από 2,5%, δηλαδή είναι συγκρίσιμα με το σφάλμα από την αγνόηση της συνεισφοράς του κορμού και μικρότερα από τις αβεβαιότητες της πολυαξονικής καταπόνησης στην περιοχή του RBS και της στήριξης.

Η γεωμετρία του RBS περιγράφεται από τρεις παραμέτρους, a, b, c , και η επίδρασή του για δεδομένο σχήμα φόρτισης από δύο επιπλέον, π.χ. τον συντελεστή ασφαλείας, γ , και την θέση της πλαστικής άρθρωσης, $x_{RBS} = s - \zeta_{RBS}b$. Οι πέντε παράμετροι υπόκεινται σε δύο περιορισμούς που προκύπτουν από την επαφή στο x_{RBS} μεταξύ του διαγράμματος ροπών και του διαγράμματος καμπτικής αντοχής (Σχ. 1), ήτοι από την διπλή ρίζα:

$$M_{Ed}(x_{RBS}) = M_{Rd}(x_{RBS}) \text{ και } \frac{dM_{Ed}}{dx}(x_{RBS}) = \frac{dM_{Rd}}{dx}(x_{RBS}) \quad (3)$$

Αν θεωρηθεί ότι η πλαστική άρθρωση δημιουργείται στο κέντρο της απότμησης ($\zeta_{RBS} \approx 0$) και επιβληθεί η προσεγγιστική εξίσωση $M_{Ed}(s) = M_{Rd}(s)$, προκύπτει η απλοποιημένη σχέση $\gamma \approx \hat{\sigma}/\hat{\chi} \equiv (1 - \sigma)/(1 - \chi)$. Ακριβής επίλυση του συστήματος (3) δίνει

$$\gamma = \frac{\hat{\sigma}}{2\hat{\chi}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\hat{\chi}\beta^2}{\nu\chi\hat{\sigma}^2}} \right) \approx \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\chi}} + \frac{\beta^2}{4\nu\chi\hat{\sigma}} \text{ και } \zeta_{RBS} = \frac{\beta}{2\nu\gamma\chi} \equiv \frac{\hat{\chi}\beta}{\nu\chi\hat{\sigma}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\hat{\chi}\beta^2}{\nu\chi\hat{\sigma}^2}} \right)^{-1} \approx \frac{\hat{\chi}\beta}{2\nu\chi\hat{\sigma}} \quad (4)$$

Σε κάθε περίπτωση, ένας σχεδιασμός RBS πρέπει να προδιαγράφει 5-2=3 ανεξάρτητες παραμέτρους, αλλά όχι απαραίτητα τις γεωμετρικές a, b, c . Για παράδειγμα, μπορεί να

προδιαγράφεται ο συντελεστής ασφαλείας, $\gamma = M_{Rd0}/M_{Ed0,RBS}$, ο μέγιστος λόγος απομείωσης, $\chi = 2c/b_f$, και η αναλογία της απότμησης, $\rho = c/b$.

Συνεπώς, για τον έλεγχο μιας δοκού με δεδομένη διατομή και φόρτιση και δεδομένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά RBS (κυκλικής απότμησης) χρειάζεται να υπολογιστούν:

- η ροπή M_{Ed0} και η τέμνουσα V_{Ed0} λόγω των δράσεων σχεδιασμού (στην ένταση που επιβάλλεται από τον κανονισμό, όχι στην άγνωστη ένταση που ενεργοποιεί το RBS) και το χαρακτηριστικό μήκος $\ell = M_{Ed0}/V_{Ed0}$ (ανεξάρτητο της έντασης),
- οι ανηγμένες διαστάσεις, $\alpha = a/\ell$, $\beta = b/\ell$, $\sigma = s/\ell$, $\chi = 2c/b_f$, $\hat{\sigma} = 1 - \sigma$, $\hat{\chi} = 1 - \chi$, η αναλογία της απότμησης, $\rho = c/b$, και το $\nu = (1 + \rho^2)^{-1}$,
- ο συντελεστής ασφαλείας της δοκού στην σύνδεση, $\gamma = \frac{\hat{\sigma}}{2\hat{\chi}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\hat{\chi}\beta^2}{\nu\chi\hat{\sigma}^2}} \right)$,
- η δρώσα ροπή στην σύνδεση κατά την ενεργοποίηση του RBS, $M_{Ed0,RBS} = M_{Rd0}/\gamma$, και
- η θέση της πλαστικής άρθρωσης $x_{RBS} = \sigma\ell - \zeta_{RBS}b$, όπου $\zeta_{RBS} = \beta/(2\nu\chi)$.

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών χρειάζεται να ελεγχθεί ότι:

- $\gamma \geq \underline{\gamma}$ (το RBS προστατεύει αρκετά την περιοχή της σύνδεσης),
- $M_{Ed0,RBS} \geq M_{Ed0}$ (η δοκός μπορεί να φέρει τα φορτία του κανονισμού) και
- $\zeta_{RBS} \ll 1$ (η πλαστική άρθρωση σχηματίζεται κοντά στο κέντρο της απότμησης, ώστε κατά την μετελαστική συμπεριφορά να περιορίζεται σε αυτήν).

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Θεωρήθηκε αμφίπακτη δοκός υπό ομοιόμορφο κατανομημένο στατικό φορτίο, με άνοιγμα $L = 7,5$ m (αντιπροσωπευτικό της συνήθους πρακτικής) και με RBS κυκλικής απότμησης. Για την διατομή επιλέχθηκε HE240 (σπανίως χρησιμοποιούνται πάνω από HE300 σε συνήθεις οικοδομές) και εξετάστηκαν τόσο η HE240A όσο και η HE240B. Για κάθε περίπτωση δοκού εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις γεωμετρίας RBS, ήτοι «μακρινό και ρηχό», «κοντινό και βαθύ», και «ενδιάμεσο καθ' όλα». Ως υλικό επιλέχθηκε χάλυβας S275 με μέτρο ελαστικότητας $E = 210$ GPa και λόγο Poisson $\nu = 0.3$, διαρροή στα 275 MPa με παραμόρφωση 2%, ιδανικά πλαστική συμπεριφορά μέχρι παραμόρφωση 2%, και γραμμική κράτυνση μέχρι την θραύση στα 430 MPa με παραμόρφωση 20%.

Για την δημιουργία του προσομοιώματος και την στατική ανάλυση μεταβλητού βήματος χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS/PRE, το οποίο είναι εγκατεστημένο στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ. Λόγω συμμετρίας ως προς το μέσο επίπεδο του κορμού, προσομοιώθηκε μόνον το μισό κάθε δοκού (με δεσμευμένες τις μετακινήσεις κάθετα στο επίπεδο συμμετρίας και τις στροφές περί άξονες εντός αυτού). Χρησιμοποιήθηκαν τετρακομβικά ισοπαραμετρικά στοιχεία λεπτού κελύφους μειωμένης τάξης αριθμητικής ολοκλήρωσης (S4R), που αποτελούν συνήθη, βολική και αξιόπιστη επιλογή για αναλύσεις κόμβων (π.χ. [12–15]), με 5 κατά το πάχος σημεία ολοκλήρωσης (επαρκή για μη γραμμική συμπεριφορά [16–18]). Στις στηρίξεις υπήρχε πάκτωση της διατομής αλλά και όλων των κελυφών (μετακινήσεις και στροφές). Ο κάνναβος ήταν πυκνός στις στηρίξεις και τα RBS (10 mm x 10 mm, για πάχος πελμάτων 12 mm και

ημιπάχος κορμού 3,75 mm της HE240A), και αραιότερος στην υπόλοιπη δοκό (μέχρι και 50 mm x 50 mm).

5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα από κάθε αριθμητικό προσομοίωμα αξιολογούνται καθ' εαυτά ποιοτικά (για το αν η αστοχία εμφανίζεται εντός του RBS και ως προς την έκταση και ένταση της καταπόνησης), βάσει εντατικών μεγεθών (ως προς τα φορτία στην αστοχία και την απόσταση της δοκού στη σύνδεση από την αστοχία υπό την ίδια ένταση φόρτισης), και κινηματικά (ως προς την ικανότητα ανάπτυξης στρωφών μακριά από την στήριξη). Τα ίδια αποτελέσματα χρησιμοποιούνται, επίσης, για να αξιολογηθεί η ακρίβεια (άρα και η χρησιμότητα) των απλοποιητικών αναλυτικών προβλέψεων. Για την σύγκριση αυτήν, ως «αστοχία» ορίζεται η διαρροή των πελμάτων, δηλαδή μια ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ της διαρροής ακραίας ίνας (θεωρητικό όριο εφαρμογής της αναλυτικής μεθόδου) και της εκτεταμένης διαρροής που οδηγεί στην αστοχία του αριθμητικού προσομοιώματος. Είναι αξιοσημείωτο ότι το χαρακτηριστικό μήκος (που έχει κεντρικό ρόλο στην αναλυτική προσέγγιση και την τιμή $\ell = L/6 = 1.25\text{m}$ για αμφίπακτη υπό ομοιόμορφο φορτίο) μειώνεται μεταξύ πρώτης διαρροής και πλήρους πλαστικοποίησης της κρίσιμης διατομής ακόμα και 15%, καθώς οι ροπές στις στηρίξεις αυξάνονται πολύ αργότερα από ότι αυτές στο άνοιγμα (λόγω μειούμενης δυσκαμψίας) ενώ το σχήμα του διαγράμματος τεμνουσών παραμένει αμετάβλητο (λόγω συμμετρίας).

Η ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι οπτική και στηρίζεται στην απεικόνιση (visualization) του ABAQUS/PRE. Η ένταση στον φορέα εκφράζεται σε ισοδύναμες τάσεις von Mises (δεύτερη αναλλοίωτη του αποκλίνοντος τανυστή των τάσεων), οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές της πολυαξονικής καταπόνησης σε όλκιμα υλικά και ανεξάρτητες από επιλογή αξόνων. Η χρωματική κλίμακα κυμαίνεται από μπλε (ασήμαντη) έως κόκκινη (κοντά στην διαρροή), ενώ σημεία που έχουν διαρρεύσει και βρίσκονται σε πλαστική ροή με κράτυνση απεικονίζονται με χρώμα γκρι (Σχ. 2α). Στο συγκεκριμένο σχήμα, που αφορά στο δείγμα S4-AV-B, δηλαδή σε δοκό HE240B με RBS μέσης απόστασης και βάθους απότμησης, υπάρχει καλή επικέντρωση της διαρροής στην περιοχή του RBS και επαρκής προστασία της δοκού από αστοχία στην σύνδεση.

Οι δρώσες αξονικές, τέμνουσες, και ροπές σε οποιαδήποτε διατομή υπολογίζονται βάσει ισορροπίας από τα δρώντα μεγέθη στην σύνδεση και το κατανεμημένο φορτίο στο ίδιο επίπεδο φόρτισης. Για να είναι συγκρίσιμα τα αναλυτικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι ελαστικές και πλαστικές ροπές αντίστασης δεν λαμβάνονται από τους πίνακες, αλλά υπολογίζονται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατομών όπως αυτές ορίζονται στο ABAQUS/CAE απαρτιζόμενες από τρία μερικώς αλληλοεπικαλυπτόμενα ελάσματα, ήτοι από δύο πέλματα $b_f \times t_f$ σε απόσταση $d_f = (h - t_f)$ και έναν κορμό $d_f \times t_w$. Επίσης, σύμφωνα με την κρατούσα πρακτική, δεν λαμβάνεται υπ' όψη η κράτυνση του υλικού κατά τον υπολογισμό των πλαστικών ροπών αντοχής. Παρά ταύτα, στα αριθμητικά προσομοιώματα χρησιμοποιείται κράτυνση, γιατί αλλιώς η μετελαστική συμπεριφορά έχει δυσμενή ποιοτικά χαρακτηριστικά που δεν είναι ρεαλιστικά.

Για την κινηματική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνονται διαγράμματα ροπής-στρωφής (Σχ. 2β) για τρεις χαρακτηριστικές διατομές του φορέα σε αποστάσεις από το μέτωπο του υποστυλώματος, αντίστοιχα, $a/2$ (δηλαδή $a/2$ πριν την αρχή της απομεί-

ωσης), $s = a + b$ (δηλαδή στο κέντρο της απομείωσης), και $3a/2 + 2b$ (δηλαδή $a/2$ μετά το πέρας της απομείωσης). Και οι τρεις στροφές είναι αθροιστικές (από την στήριξη, όπου η στροφή είναι μηδέν) και συσχετίζονται με την δρώσα ροπή στην στήριξη (και όχι στην οικεία διατομή), οπότε δείχνουν πόση ικανότητα για μετελαστική στροφή υπάρχει και πού. Και πάλι για το δείγμα S4-AV-B είναι σαφές ότι σχεδόν όλη η στροφή λαμβάνει χώρα εντός του RBS και ξεπερνά το πρακτικό κριτήριο ολκιμότητας των 0,03 rad.

Τα κύρια αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 1. Σε όλες τις περιπτώσεις η πλαστική άρθρωση ξεκίνησε να δημιουργείται στο επίπεδο φόρτισης που προβλεπόταν από την αναλυτική μέθοδο και λίγο πριν το κέντρο του RBS (σύγκριση της αναλυτικά προβλεπόμενης θέσης με αυτήν που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία δεν έχει νόημα, καθώς η απόσταση ήταν συνήθως μικρότερη του ενός στοιχείου). Η ακρίβεια της αναλυτικής μεθόδου σε σύγκριση με το αριθμητικό προσομοίωμα στην πρόβλεψη του συντελεστή ασφαλείας είναι παντού καλύτερη από 4% (όπως αναμενόταν και θεωρητικά), ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις το σφάλμα είναι λιγότερο από 1%. Η περιογή πίσω από την απομείωση και η σύνδεση παραμένουν ασφαλείς μέχρι την «αστοχία» (δηλαδή την πλαστικοποίηση των πελμάτων), αλλά η συνολική στροφή δεν καλύπτει σε όλες τις περιπτώσεις το πρακτικό κριτήριο ολκιμότητας των 0,03 rad.

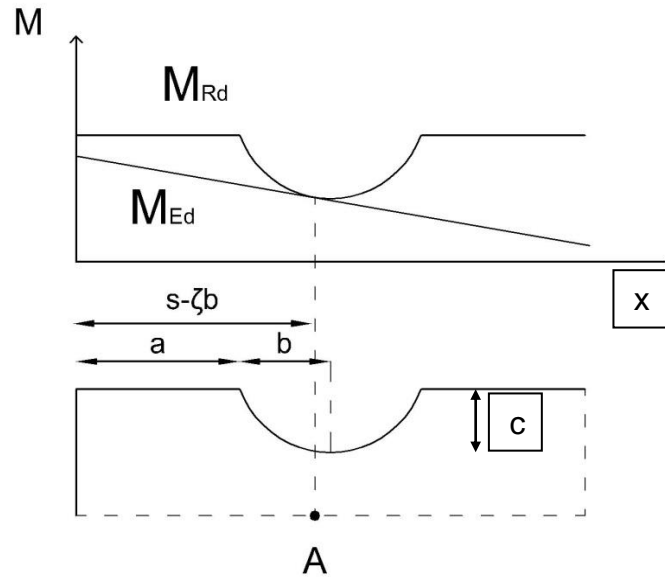
Το πιο ανησυχητικό εύρημα είναι ότι το δείγμα S4-FS-B («βαρειά» διατομή HE240B με μακρινό και αβαθές αλλά εντός προδιαγραφών RBS) παρουσιάζει απρόβλεπτη μετελαστική συμπεριφορά, όπου η διαρροή επεκτείνεται προς την στήριξη και έτσι η αρχική προστασία από το RBS *ακυρώνεται υπό την ικανοτική έννοια*. Είναι αξιοσημείωτο ότι από τα δύο δείγματα με μακρινό και αβαθές RBS που δίνουν και τους χαμηλότερους συντελεστές ασφαλείας (περίπου 1,25), το ένα ικανοποιεί οριακά το κριτήριο ολκιμότητας και το άλλο αποτυγχάνει να προστατεύσει την σύνδεση μέχρι την πλήρη αστοχία της δοκού. Αντίθετα, όλα τα δείγματα που επιδεικνύουν την στοχευόμενη ικανοτική και κινηματική συμπεριφορά έχουν συντελεστές ασφαλείας στην ονομαστική «αστοχία» πάνω από 1,40.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

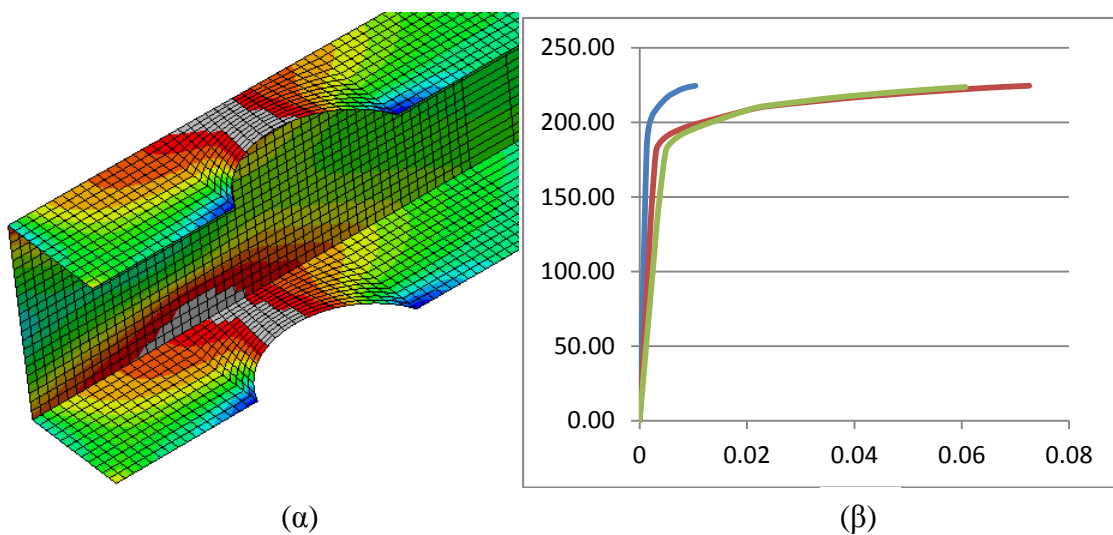
Η παρούσα αναλυτική και υπολογιστική εργασία για συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος με RBS κυκλικής απότμησης έχει ως κύριο περιορισμό το μικρό μέγεθος του δείγματος και το μικρό πλήθος εξεταζομένων παραμέτρων (περιορισμένο κυρίως στην γεωμετρία της απομείωσης). Παρά ταύτα, καταδεικνύει ότι:

- οι αναλυτικές προβλέψεις για την θέση της πλαστικής άρθρωσης και το επίπεδο ικανοτικής ασφάλειας (έναντι αστοχίας της δοκού στην σύνδεση) είναι ακριβείς, και
- η συμπεριφορά των δοκών μέχρι την πραγματική αστοχία (που είναι το ζητούμενο από μία παρέμβαση ικανοτικού χαρακτήρα όπως το RBS) είναι απρόβλεπτη και ευαίσθητη σε πλήθος παραμέτρων.

Υπό το πρίσμα των ευρημάτων, φαίνεται ότι απαιτείται κάποια κανονιστική πρόβλεψη για τον συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας *δίπλα* στην σύνδεση, ο οποίος αυτή την στιγμή μοιάζει, κατά τους κανονισμούς [6–8], να είναι μονάδα. Σε κάθε περίπτωση, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση των προτεινόμενων γεωμετρικών παραμέτρων σχεδιασμού αλλά και της επίδρασης παραμέτρων όπως το σχήμα φόρτισης και ο λόγος ανοίγματος προς στατικό ύψος της δοκού, οι μετελαστικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού (κράτυνση ή μη), η μετακίνηση του σημείου μηδενισμού των ροπών κατά την εξέλιξη της φόρτισης, η μακροσκοπική γεωμετρική μη γραμμικότητα, οι τοπικοί λυγισμοί και ο πολυαξονικός χαρακτήρας της έντασης, και τα όμοια.



Σχ. 1: Σχέση γεωμετρίας, έντασης και αντοχής σε RBS με αστοχία στο A.



Σχ. 2: Δείγμα S4-AV-B(α) Τάσεις von Mises στην πλαστικοποίηση των πελμάτων στο RBS. (β) Στροφές αριστερά (μπλε), στο κέντρο (κόκκινο) και δεξιά (πράσινο) από το RBS.

Δείγμα	HEA	a/b_f (%)	$2b/d_f$ (%)	$2c/b_f$ (%)	RBS Θραύση	0,03 rad	RBS Πέγματα	γ Πέγματα	γ Αναλυτ.	ζ_{RBS} Αναλυτ.
S1-AV-A	240A	60	70	45	NAI	\approx	NAI	1,44	1,45	0,083
S2-ND-A	240A	50	65	50	NAI	$>$	NAI	1,64	1,64	0,071
S3-FS-A	240A	75	85	40	NAI	\approx	NAI	1,27	1,23	0,116
S4-AV-B	240B	60	70	45	NAI	$>$	NAI	1,47	1,42	0,084
S5-ND-B	240B	50	65	50	NAI	$>$	NAI	1,65	1,64	0,071
S6-FS-B	240B	75	85	40	OXI		NAI	1,26	1,24	0,111

Πίν. 1: Συγκεντρωτικά ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα συμπεριφοράς RBS.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] SAC 96-03, *Interim guidelines*, FEMA 276/A, SAC Joint Venture, California, U.S.A.
- [2] Chen S.J., Yeh C.H., Chu J.M., “Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance”, *Journal of Structural Engineering*, Elsevier Science Ltd., Vol. 122, 1996, pp. 1292-1299.
- [3] Iwankiw N.R., Carter Ch.J., “The dogbone: a new idea to chew on”, *Journal of Modern Steel Construction*, Vol. 36, 1996, pp. 18-23.
- [4] Zekioglu A., Mozzaffarian H., Chang K.L., Uang C.M., Noel S., “Designing after Northridge”, *Journal of Modern Steel Construction*, Vol. 37, 1997, pp. 36-42.
- [5] Plumier A., “Reduced beam sections: A safety concept for structures in seismic zones”, *Scientific Bulletin of “Politehnica” University of Timisoara, Romania, Transactions on Civil Engineering*, Romania, Vol. 41(55), No. 2, 1996, pp. 46-59.
- [6] FEMA 350. ‘*Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings*’, Washington D.C., U.S.A., 2000.
- [7] EuroCode 8, ‘*Design of structures for earthquake resistance*’, Part 3, ‘*Assessment and retrofitting of buildings*’, EN 1998-3: June 2005E
- [8] EuroCode3, ‘*Design of steel structures*’, Part 1.8, ‘*Design of joints*’, EN 1993-1-8: May 2005.
- [9] Pachoumis D.T., Galoussis E.G., Kalfas C.N., and Efthimiou I.Z. “Cyclic performance of steel moment-resisting connections with reduced beam sections – Experimental analysis and finite element model simulation”, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 32, No. 9, 2010, 2683-2692.
- [10] Pachoumis D.T., Galoussis E.G., Kalfas C.N., and Christitsas A.D. “Reduced beam section moment connections subjected to cyclic loading: Experimental analysis and FEM simulation”, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 216-223.
- [11] Sofias C., Kalfas C., Pachoumis D., “Experimental and FEM analysis of reduced beam section moment endplate connections under cyclic loading”, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 59, 2014, 320-329.
- [12] Bahaari M.R., Sherbourne A.N., “Behavior of eight-bolt large capacity endplate connections”, *Journal of Computer & Structures*, Vol. 77, 2000, pp. 315-325.
- [13] Moslehi Tabar A., Deylami A., “Instability of beams with reduced beam section moment connections emphasizing the effect of column panel zone ductility”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, 2005, pp. 1475-1491.
- [14] Kassegne S.K., ‘Development of a closed-form 3-D RBS beam finite element associated case studies’, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, 2007, pp. 1580-1595.
- [15] Ricles J.M., Fisher J.W., Lu L.W., Kaufmann E.J., ‘Development of improved welded moment connections for earthquake-resistant design’, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, 2002, pp. 565-604.
- [16] Sandor A., Laszlo D., ‘Finite element simulation of the cyclic behaviour of endplate joints’, *Journal of Computer & Structures*, Vol. 82, 2004, pp. 2131-2143.
- [17] Bursi O.S., Jaspart J.P., ‘Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections’, *Journal of Computer & Structures*, Vol. 69, 1998, pp. 361-382.
- [18] Gebbeken C., Rothert H., Binder B., ‘On the numerical analysis of end –plate connections’, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 30, 1994, pp. 177- 196.

ANALYTICAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE DESIGN OF RBS CONNECTIONS

**Victor Balopoulos^a, Emmanouil Frantzeskakis^b, Dimitrios T. Pachoumis^c,
Christos N. Kalfas^d**

^a Assistant Professor, School of Civil Engineering, D.U.Th.

^b M.Sc., Civil Engineer, D.U.Th.

^c Dr, M.Sc., Civil Engineer, D.U.Th.

^d Professor, Head of Metal Structures Laboratory, D.U.Th.
School of Civil Engineering, Democritus University of Thrace
12 Vass.Sofias Str, Xanthi, 67100, Greece
email: vbалop@civil.duth.gr, mslgroup@civil.duth.gr

ABSTRACT

The present work regards the analysis and design of RBS connections with circular cutoffs for HE beams. The problem is parameterized in a manner consistent with the design guidelines of FEMA and Eurocode 8. The load at the onset of plasticity, the location of the RBS-induced plastic hinge, and the achieved safety factor against beam failure next to the connection are all obtained, after appropriate simplifying assumptions, as simple functions of the loading pattern and the geometric parameters of the RBS. On the basis of this analytical description, regions of feasibility are investigated and a direct design procedure is proposed. The accuracy and reliability of analytical results is confirmed by numerical models simulated in ABAQUS, which have been shown by previous investigators to accurately predict experimental measurements.

The six cases simulated vary only in the geometry of the cutoff. Despite their small number, they show that the proposed analytical predictions of the location of the plastic hinge (with respect to the center of the RBS) and of the induced safety factor against beam failure next to the connection (which is not prescribed by current Code provisions) are very accurate. More importantly, however, beam behavior up to the actual failure is found to be unpredictable and sensitive to details of the loading pattern and the post-yield material properties, and to the effects of multiaxial stress and strain near the connection, global geometric nonlinearity, local buckling, and the like. Thus, an RBS that complies with all regulations may fail to prevent plasticity from reaching the connection it is intended to protect. The reliability of RBS seems to be restored for high values of the safety factor in question (exceeding 1.3) and this suggests the need for further study and, eventually, for a Code prescribed minimum safety factor.