

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Μηνάς Ε. Λεμονής

Διδάκτορας Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

E-mail: mlemonis@central.ntua.gr

Χάρης Ι. Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

E-mail: chgantes@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της πλήρους καμπύλης ροπής-στροφής κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην κατασκευή κατάλληλων μηχανικών προσομοιωμάτων, αξιοποιώντας τη μέθοδο των συστατικών μερών. Για κάθε συστατικό μέρος υπολογίζεται το πλήρες εύρος της μη γραμμικής απόκρισής του, με τη μορφή μιας καμπύλης δύναμης-μετακίνησης. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στην προσομοίωση των συστατικών μερών της εφελκόμενης ζώνης, τα οποία έχουν τη μορφή ισοδύναμων συνδέσεων βραχέος ταυ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα πρόσφατα δημοσιευμένο επαυξητικό προσομοίωμα βραχέος ταυ. Η αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας επαληθεύεται μέσω συγκρίσεων με αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών και αναλύσεων σύνθετων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Προκύπτει από τα αποτελέσματα ότι είναι δυνατή η εκτίμηση της πλήρους καμπύλης ροπής-στροφής καθώς και των επιμέρους μεγεθών της αρχικής δυσκαμψίας, της αντοχής και της στρωφικής ικανότητας εντός ικανοποιητικού περιθωρίου σφάλματος.

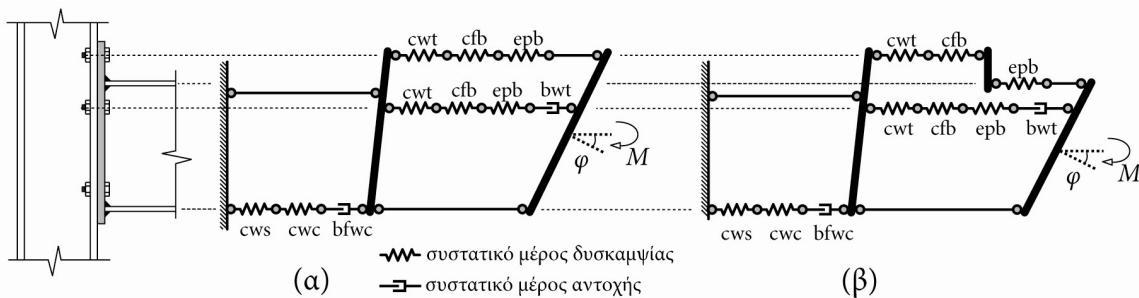
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καμπύλη ροπής M – στροφής φ αποτελεί το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της απόκρισης ενός κόμβου μεταφοράς ροπής. Η πλήρης καμπύλη M - φ , με την οποία περιγράφεται το συνολικό εύρος της απόκρισης του κόμβου, μέχρι και τη θραύση του, επιτρέπει την εκτέλεση μη γραμμικών αναλύσεων της κατασκευής, όπου οι κόμβοι προσομοιώνονται χωρίς να εξιδανικεύεται η συμπεριφορά τους, σύμφωνα με την καθιερωμένη πρακτική, ως πλήρως άκαμπτη ή αρθρωτή. Έτσι οι κόμβοι μπορούν να συμμετέχουν στην ανάλυση ενεργά, με τρόπο ανάλογο με τα υπόλοιπα μέλη. Ορισμένα πλεονεκτήματα αυτής της πρακτικής είναι η δυνατότητα επαύξησης της διαθέσιμης πλαστιμότητας της κατασκευής, με την προϋπόθεση ότι επιτρέπεται η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο εσωτερικό των κόμβων, καθώς και η πιο ακριβής προσέγγιση της πραγματικής απόκρισης με την ανάλυση της κατασκευής. Επίσης είναι δυνατόν να επιτευχθούν σημαντικά οικονομικά οφέλη από τη μη χρήση άκαμπτων κόμβων και μέσω βελτιστοποιημένης επιλογής των συνδεόμενων μελών. Στις αναφορές [1-5] περιλαμβάνονται υπάρχουσες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της πλήρους καμπύλης M - φ κόμβων δοκού-υποστυλώματος.

Στο παρόν άρθρο χρησιμοποιούνται μηχανικά προσομοιώματα για την εκτίμηση της πλήρους καμπύλης M-φ. Τα μηχανικά προσομοιώματα αποτελούνται από ελατήρια και άκαμπτα στοιχεία και μπορούν να θεωρηθούν ως ένας εύλογος συμβιβασμός μεταξύ των σύνθετων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων και των απλούστερων αναλυτικών προσομοιωμάτων. Το βασικό στοιχείο της προσομοίωσης με μηχανικά προσομοιώματα είναι ο προσδιορισμός μεμονωμένων συστατικών μερών στο εσωτερικό των κόμβων, των οποίων η συμπεριφορά μπορεί να χαρακτηριστεί σαφής και απλή. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας προσομοίωσης είναι η ευελιξία με την οποία μπορούν να αντιμετωπισθούν διαφορετικοί τύποι και διαμορφώσεις κόμβων, αξιοποιώντας τις ίδιες βασικές αρχές και τα ίδια συστατικά μέρη. Στο άρθρο αυτό εξετάζονται κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με κοχλιωτές συνδέσεις και ειδικότερα οι ευρέως διαδομένες συνδέσεις με μετωπική πλάκα και με γωνιακά.

3. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Ως πρότυπο για τα μηχανικά προσομοιώματα στο παρόν άρθρο χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα δυσκαμψίας του Ευρωκώδικα 3 [6]. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται τα μηχανικά προσομοιώματα για συνδέσεις με μετωπική πλάκα. Οι συντομογραφίες για κάθε συστατικό μέρος εξηγούνται στον Πίνακα 1. Τα προσομοιώματα συντίθενται από δύο τύπους ελατηρίων: τα ελατήρια που αντιστοιχούν σε συστατικά μέρη δυσκαμψίας, τα οποία προέρχονται απευθείας από το προσομοίωμα δυσκαμψίας του Ευρωκώδικα 3 [6] και τα ελατήρια που αντιστοιχούν σε συστατικά μέρη αντοχής. Τα ελατήρια της πρώτης περίπτωσης επηρεάζουν ταυτόχρονα την παραμορφωσιμότητα και την αντοχή του κόμβου, και η συμπεριφορά τους περιγράφεται από μία μη γραμμική καμπύλη δύναμης F – μετακίνησης δ. Τα ελατήρια της δεύτερης περίπτωσης δε συμβάλουν στην παραμορφωσιμότητα του κόμβου αλλά επηρεάζουν μόνο την αντοχή του. Η συμπεριφορά τους περιγράφεται από μία ιδεατός πλαστική καμπύλη F-δ.

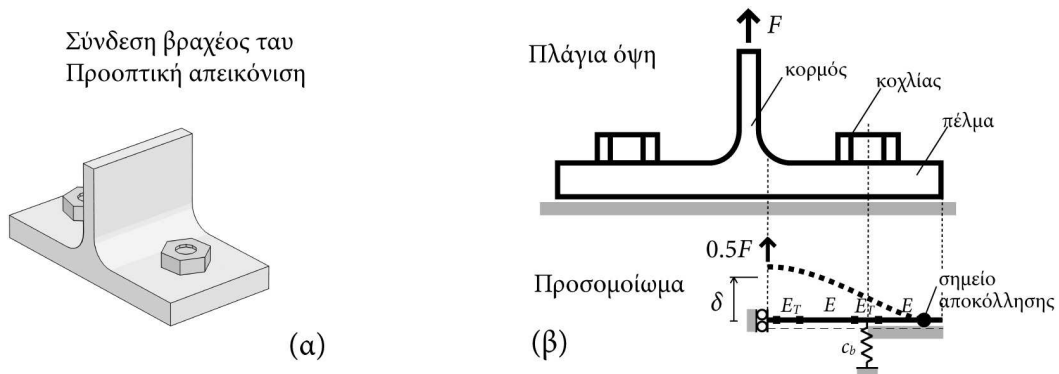


Σχ. 1. Προτεινόμενο ισόσταθμο (α) και ανισόσταθμο (β) μηχανικό προσομοίωμα για συνδέσεις με μετωπική πλάκα.

Πιν. 1. Συντομογραφίες για τα διάφορα συστατικά μέρη των μηχανικών προσομοιωμάτων

Συστατικό μέρος	Συντομογραφία	Συστατικό μέρος	Συντομογραφία
Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση	cws	Κοχλίες σε διάτμηση	bs
Κορμός υποστυλώματος σε θλίψη	cwc	Σκέλος γωνιακού σε σύνθλιψη	ab
Πέλμα/κορμός δοκού σε θλίψη	bfwc	Πέλμα δοκού σε σύνθλιψη	bfb
Κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό	cwt	Κάτω γωνιακό σε θλίψη	sac
Πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη	cfb	Άνω γωνιακό σε κάμψη	tab
Κοχλίες σε εφελκυσμό	bt	Άνω γωνιακό σε εφελκυσμό	tat
Μετωπική πλάκα σε κάμψη	epb	Γωνιακό κορμού σε κάμψη	wab
Κορμός δοκού σε εφελκυσμό	bwt	Κορμός δοκού σε σύνθλιψη	bwb

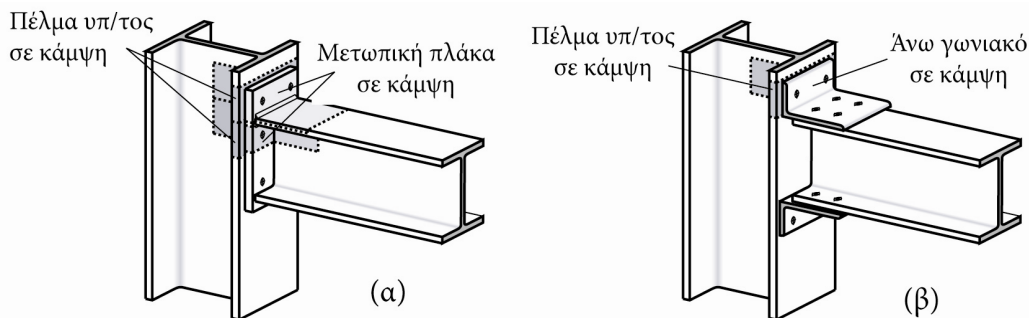
Η απόκριση των κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια συνδέσεων βραχέος ταυ, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση συστατικών μερών της εφελκόμενης ζώνης [6-9]. Για συνδέσεις με μετωπική πλάκα αυτά τα συστατικά μέρη κατά βάση είναι η μετωπική πλάκα και το πέλμα του υποστυλώματος σε κάμψη. Κατά το σχεδιασμό, είναι συνήθως προτιμότερο τα συγκεκριμένα συστατικά μέρη να είναι κρίσιμα στην απόκριση του κόμβου, καθώς μπορούν να εμφανίσουν υψηλή πλαστιμότητα [10] και συνεπώς να ενισχύσουν την στρωφική ικανότητα του κόμβου και την αποτελεσματικότητά του για τον πλαστικό σχεδιασμό της κατασκευής. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα προσομοίωμα βραχέος ταυ που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες προσομοίωσης των εν λόγω συστατικών μερών. Το προσομοίωμα έχει παρουσιαστεί εκτενώς στις [11] και [12], ενώ μια σύντομη μόνο περιγραφή του θα ακολουθήσει στη συνέχεια. Η πλήρης καμπύλη F-δ υπολογίζεται επαυξητικά και κατά συνέπεια το προσομοίωμα δεν προσφέρεται για υπολογισμούς στο χέρι αλλά για προγραμματισμό σε υπολογιστή. Το πέλμα του βραχέος ταυ προσομοιώνεται ως απλή δοκός, ενώ ο κοχλίας ως μετακινησιακό ελατήριο, συνδεδεμένο με το πέλμα. Λόγω συμμετρίας προσομοιώνεται μόνο το ήμισυ της σύνδεσης. Η μη γραμμικότητα υλικού λαμβάνεται υπόψη μέσω διγραμμικού νόμου ροπής καμπυλότητας για το πέλμα και δύναμης-μετακίνησης για τον κοχλία. Ορισμένα τμήματα του πέλματος αναμένεται να πλαστικοποιηθούν με την επαύξηση της φόρτισης. Η απόκριση των τμημάτων αυτών καθορίζεται από το μέτρο κράτνσης E_T του υλικού. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα επαφής που αναπτύσσονται στο πέλμα. Ένα σημείο αποκόλλησης προσδιορίζεται ως το σύνορο μεταξύ του παραμορφωμένου και του απαραμόρφωτου τμήματος του πέλματος. Μια σημαντική καινοτομία του προσομοιώματος είναι ότι η θέση του σημείου αποκόλλησης υπολογίζεται αναλυτικά, σε κάθε επαυξητικό βήμα, επιτρέποντας έτσι την μετακίνηση του εξαιτίας της εξελισσόμενης πλαστικοποίησης τμημάτων του πέλματος και του κοχλία. Η αποτελεσματικότητά του προσομοιώματος έχει αξιολογηθεί με πειραματικά αποτελέσματα και με σύνθετα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά στην εκτίμηση της πλήρους καμπύλης F-δ [11, 12].



Σχ. 2. Σύνδεση βραχέος ταυ (α) και προσομοίωμα βραχέος ταυ για την προσομοίωση της εφελκόμενης ζώνης κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος (β)

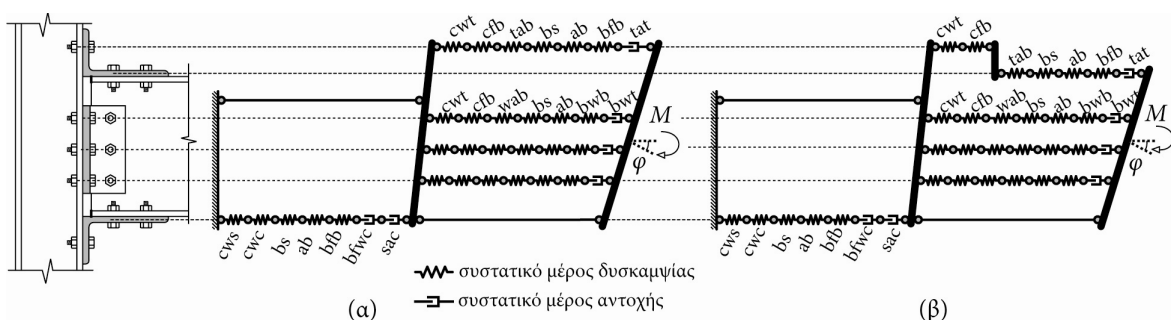
Η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων του σχήματος 1 βρίσκεται στην πρώτη σειρά ελατηρίων, η οποία αντιστοιχεί στη σειρά κοχλίωσης στο προεκτεινόμενο τμήμα της μετωπικής πλάκας. Στο πρώτο προσομοίωμα (σχήμα 1α) όλα τα ελατήρια βρίσκονται στην ίδια στάθμη με τους άξονες των κοχλίων. Αυτή η διαμόρφωση εφαρμόζεται στον Ευρωκώδικα 3 [6], και αναφέρεται στο άρθρο ως ισόσταθμο προσομοίωμα. Αντίθετα, στο σχήμα 1β παρουσιάζεται μια τροποποιημένη διαμόρφωση, όπου το ελατήριο του συστατικού μέρους «μετωπική πλάκα σε κάμψη» είναι στην ίδια στάθμη με το πέλμα της δοκού και όχι με τον άξονα του κοχλία. Αυτή η διαμόρφωση

αναφέρεται στο άρθρο ως ανισόσταθμο προσομοίωμα. Η διαφοροποίηση οφείλεται στον προσανατολισμό του συστατικού μέρους μορφής βραχέος ταυ, για το συγκεκριμένο ελατήριο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, στο προεκτεινόμενο τμήμα της μετωπικής πλάκας, το ισοδύναμο βραχύ ταυ για το συστατικό μέρος «μετωπική πλάκα σε κάμψη» είναι προσανατολισμένο με τέτοιο τρόπο ώστε ο κορμός του να ταυτίζεται με το πέλμα της δοκού. Κατά συνέπεια, θεωρείται πιο συνεπές προς τον πραγματικό μηχανισμό μεταφοράς δυνάμεων στο εσωτερικό του κόμβου, ότι η δύναμη F και η μετακίνηση δ επενεργούν στη στάθμη του πέλματος της δοκού.



Σχ. 3. Συστατικά μέρη μορφής βραχέος ταυ για σύνδεση με μετωπική πλάκα (α) και για σύνδεση με γωνιακά άνω και κάτω πέλματος (β)

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μηχανικά προσομοιώματα για την εκτίμηση της καμπύλης $M-\phi$ συνδέσεων με γωνιακά. Οι συντομογραφίες για κάθε συστατικό μέρος επεξηγούνται στον Πίνακα 1. Το προσομοίωμα του σχήματος 4β έχει προταθεί από τους Faella et al. [2] για συνδέσεις με γωνιακά άνω και κάτω πέλματος και διπλό γωνιακό κορμού και χαρακτηρίζεται από την ανισόσταθμη διαμόρφωση της πρώτης σειράς ελατηρίων, η οποία αντιστοιχεί στη σειρά κοχλίωσης του άνω γωνιακού. Εξαιτίας του προσανατολισμού του συστατικού μέρους «άνω γωνιακό σε κάμψη» (σχήμα 3) θεωρείται πιο συνεπές το αντίστοιχο ελατήριο να βρίσκεται στη στάθμη του οριζόντιου σκέλους του άνω γωνιακού. Στην ίδια στάθμη βρίσκονται και όσα άλλα ελατήρια σχετίζονται άμεσα με το οριζόντιο σκέλος. Στο παρόν άρθρο εξετάζεται επίσης και η ισόσταθμη διαμόρφωση του συγκεκριμένου μηχανικού προσομοιώματος (σχήμα 4α).



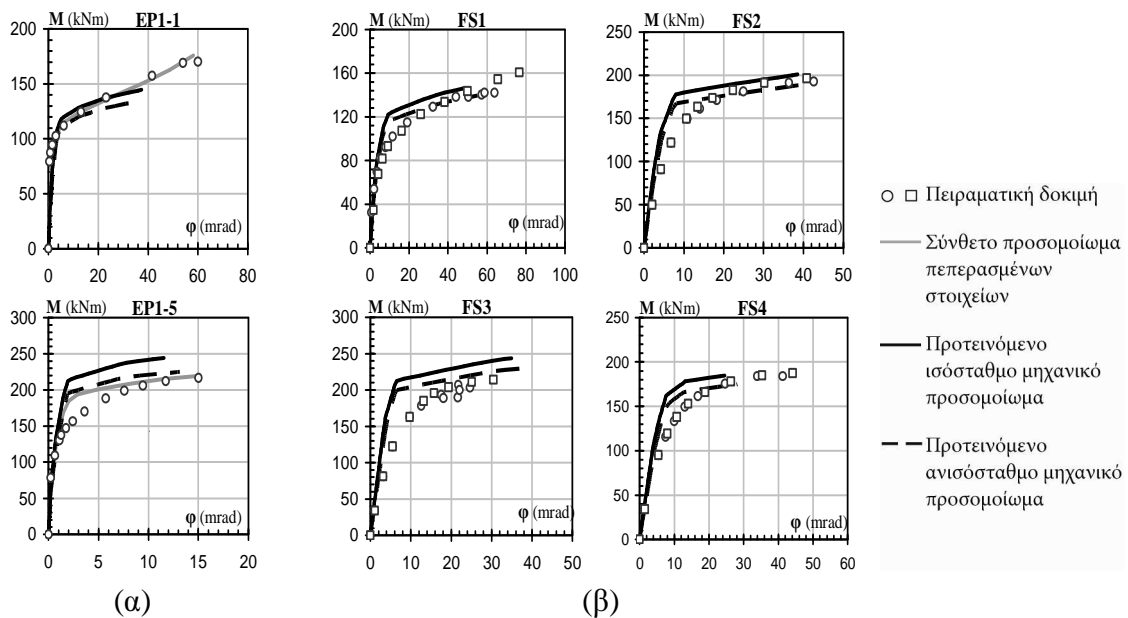
Σχ. 4. Προτεινόμενο ισόσταθμο (α) και ανισόσταθμο (β) μηχανικό προσομοίωμα για συνδέσεις με γωνιακά

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η αποτελεσματικότητα των μηχανικών προσομοιωμάτων αξιολογήθηκε με βάση πειραματικά αποτελέσματα κόμβων δοκού-υποστυλώματος από τη βιβλιογραφία. Για συνδέσεις με μετωπική πλάκα χρησιμοποιήθηκαν οι δοκιμές των Bursi και Jaspart [13] και των Coelho et al. [14], ενώ για συνδέσεις με γωνιακά οι μονοτονικές δοκιμές των

Azizinamini et al. [15]. Για τα ελατήρια της εφελκόμενης ζώνης, που αντιστοιχούν σε συστατικά μέρη μορφής βραχέος ταυ, η καμπύλη F-δ υπολογίστηκε με το προσομοίωμα βραχέος ταυ που αναφέρθηκε στην ενότητα 1. Το ισοδύναμο πλάτος των βραχέων ταυ εκτιμήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 [6]. Για τα υπόλοιπα ελατήρια που δεν αντιστοιχούν σε συστατικά μέρη μορφής βραχέος ταυ, αξιοποιήθηκαν υπάρχουσες μεθοδολογίες για την εκτίμηση της αντίστοιχης καμπύλης F-δ [12]. Πρέπει να σημειωθεί ότι για όλες τις πειραματικές δοκιμές που εξετάστηκαν, κρίσιμα για την απόκριση ήταν τα συστατικά μέρη μορφής βραχέος ταυ, ενώ η συμβολή των υπολοίπων ήταν δευτερεύουσα.

Στο Σχήμα 5α παρουσιάζονται οι καμπύλες M-φ για τις δύο δοκιμές με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα των Bursi και Jaspert [13]. Οι πειραματικές καμπύλες συγκρίνονται με εκείνες των προτεινόμενων μηχανικών προσομοιωμάτων, καθώς και έναντι σύνθετων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν από τους ίδιους συγγραφείς [13]. Τα μηχανικά προσομοιώματα εμφανίζονται αποτελεσματικά στην εκτίμηση της πραγματικής καμπύλης M-φ. Η σύγκλιση τους είναι ακόμα καλύτερη με τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Για την πρώτη δοκιμή παρατηρείται μια σημαντική υποεκτίμηση της αρχικής δυσκαμψίας από όλα τα προσομοιώματα, ακόμα και εκείνα των πεπερασμένων στοιχείων. Η αιτία βρίσκεται μάλλον στην ύπαρξη αρχικών ατελειών, οι οποίες αναφέρονται και από τους συγγραφείς [13]. Επίσης, στην πρώτη δοκιμή παρατηρείται μια υστέρηση κατά 35% στην εκτίμηση της στρωφικής ικανότητας, η οποία αποδίδεται στην επίδραση μεμβρανικών δράσεων, που αναπτύσσονται στην ασθενή μετωπική πλάκα. Τα φαινόμενα αυτά δε λαμβάνονται υπόψη με τα προτεινόμενα προσομοιώματα. Παρόλα αυτά, το σχετικό σφάλμα κρίνεται αποδεκτό για την εκτίμηση αυτού του μεγέθους. Στη δεύτερη δοκιμή η προσέγγιση της καμπύλης M-φ από τα μηχανικά προσομοιώματα κρίνεται πολύ ικανοποιητική. Το ανισόσταθμο προσομοίωμα αποδεικνύεται πιο αποτελεσματικό.

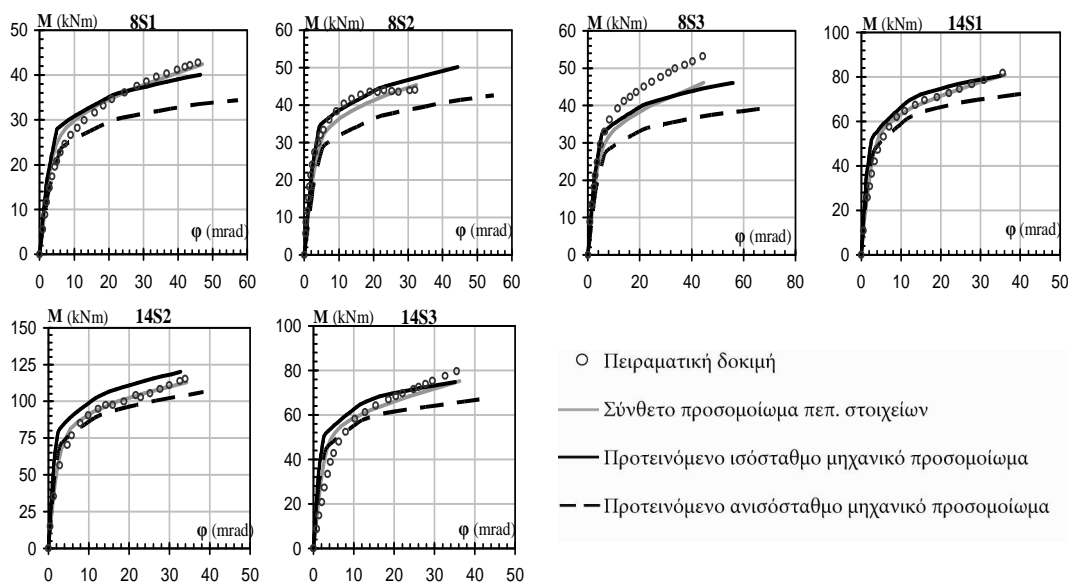


Σχ. 5. Καμπύλες M - φ δοκιμών των Bursi και Jaspert [13] (α) και Coelho et al. [14] (β)

Στο Σχήμα 5β παρουσιάζονται οι καμπύλες M-φ για τις τέσσερις δοκιμές προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας που εκτελέστηκαν από τους Coelho et al. [14]. Επειδή τα υλικά των μετωπικών πλακών περιγράφονται από τετραγραμμικό καταστατικό νόμο, ενώ για τα αντίστοιχα συστατικά μέρη, το προσομοίωμα βραχέος ταυ βασίζεται σε διγραμμικό νόμο,

πραγματοποιήθηκε μια προσαρμογή με κριτήριο την ισοδυναμία μέγιστης ροπής στη διατομή της μετωπικής πλάκας [12]. Η αποτελεσματικότητα των προσομοιωμάτων κρίνεται αρκετά ικανοποιητική στην εκτίμηση της καμπύλης M-φ. Για τις δοκιμές FS1 και FS2 η σύγκλιση είναι πολύ καλή, με μια μέτρια υπερεκτίμηση της αρχικής δυσκαμψίας. Για τη δοκιμή FS3, η οποία διαθέτει δύσκαμπτη μετωπική πλάκα, παρατηρείται μια σημαντική υπερεκτίμηση της αρχικής δυσκαμψίας, ενώ η αντοχή προσεγγίζεται πολύ καλά, ιδιαίτερα από το ανισόσταθμο προσομοίωμα. Από το ίδιο προσομοίωμα το μέσο σφάλμα εκτίμησης της στρωφικής ικανότητας είναι 30%, το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό για το συγκεκριμένο μέγεθος. Τέλος, για τη δοκιμή FS4, η οποία διαθέτει μετωπική πλάκα χάλυβα υψηλής αντοχής (S690), το ανισόσταθμο προσομοίωμα υπερεκτιμά την αρχική δυσκαμψία κατά 35%, ενώ στη στρωφική ικανότητα υστερεί κατά 35%. Η αντοχή προσεγγίζεται εντός μικρού περιθωρίου σφάλματος.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι καμπύλες M-φ για μερικές από τις μονοτονικές δοκιμές των Azizinamini et al. [15]. Οι υπόλοιπες δοκιμές δεν παρουσιάζονται στο άρθρο λόγω περιορισμένου χώρου, αλλά μπορούν να ανευρεθούν στην [12]. Επιπλέον, στο Σχήμα 6 εμφανίζονται οι καμπύλες M-φ των σύνθετων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων των Kishi et al. [16]. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται στα μηχανικά προσομοιώματα ταυτίζονται με εκείνες των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων [16]. Γενικά τα μηχανικά προσομοιώματα προσεγγίζουν αξιόπιστα την πλήρη καμπύλη M-φ και τις χαρακτηριστικές ιδιότητες της αρχικής δυσκαμψίας, της αντοχής και της στρωφικής ικανότητας. Η σύγκλιση είναι καλύτερη με τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Συγκρίνοντας τα δύο μηχανικά προσομοιώματα, το ισόσταθμο αποδεικνύεται πιο αποτελεσματικό συνολικά, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητική απόδοση.



Σχ. 6. Καμπύλες M - φ μονοτονικών δοκιμών των Azizinamini et al. [15]

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο επιχειρήθηκε η εκτίμηση της πλήρους καμπύλης M-φ κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος, χρησιμοποιώντας μηχανικά προσομοιώματα. Δημιουργήθηκαν μηχανικά προσομοιώματα κατάλληλα για συνδέσεις με μετωπική πλάκα και γωνιακά, στα οποία τα συστατικά μέρη του κόμβου ενσωματώνονται με την πλήρη τους καμπύλη F-δ. Το κυρίαρχο στοιχείο της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η προσομοίωση των

συστατικών μερών μορφής βραχέος ταυ της εφελκόμενης ζώνης, χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο επαυξητικό προσομοίωμα βραχέος ταυ, το οποίο αναπτύχθηκε ειδικά για το σκοπό αυτό. Εξετάστηκαν διαφοροποιημένες διαμορφώσεις ελατηρίων, σε σχέση με την τοποθέτηση των ελατηρίων της πρώτης σειράς κοχλίωσης. Τα προτεινόμενα προσομοιώματα αξιολογήθηκαν έναντι πειραματικών δοκιμών και σύνθετων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων, αποδεικνύοντας συνεπή και ικανοποιητική απόδοση στην εκτίμηση της πλήρους καμπύλης Μ-φ. Ειδικότερα για τη στροφική ικανότητα, τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά και αποδεικνύουν ότι τα προτεινόμενα μηχανικά προσομοιώματα προσφέρουν μια εφικτή και αξιοποιήσιμη λύση για τον αξιόπιστο υπολογισμό της. Για συνδέσεις με μετωπική πλάκα τα ανισόσταθμα προσομοιώματα εμφανίστηκαν πιο αποτελεσματικά, ενώ αντίθετα για συνδέσεις με γωνιακά πιο αξιόπιστα αποδείχθηκαν τα ισόσταθμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Shi YJ, Chan SL, Wong YL. Modeling for moment-rotation characteristics for end-plate connections. *Journal of Structural Engineering ASCE* 1996; 122(11):1300-1306.
- [2] Faella C, Piluso V, Rizzano G. Structural steel semi-rigid connections - Theory, design and software. Boca Raton, Florida: *CRC Press*; 2000.
- [3] Silva LS, Coelho AMG. A ductility model for steel connections. *Journal of Constructional Steel Research* 2001; 57(1):45-70.
- [4] Beg D, Zupancic E, Vayas I. On the rotation capacity of moment connections. *Journal of Constructional Steel Research* 2003; 60(3-5): 601-620.
- [5] Coelho AMG, Silva LS. Ductility analysis of end plate beam-to-column joints. *Eurosteel 2005 – 4th European conference on steel and composite structures*; Maastricht; 2005.
- [6] CEN - Comité Européen de Normalisation. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.8: Design of joints (prEN 1993-1-8:2003), Stage 49 Draft, Brussels, 2003.
- [7] Zoetemeijer P. A design method for the tension side of statically loaded, bolted beam-to-column connections. *Heron* 1974; 20(1):1-59
- [8] Packer JA, Morris LJ. A limit state design method for the tension region of bolted beam-column connections. *The Structural Engineer* 1979; 55(10):446-458
- [9] Mann AP, Morris LJ. Limit design of extended end-plate connections. *Journal of the Structural Division ASCE* 1979; 105(3):511-526.
- [10] Kuhlmann U, Kuhnemund F. Procedures to verify rotation capacity. In: Ivanyi M, Baniotopoulos CC, editors: *Semi-rigid joints in structural steelwork, CISM courses and lectures – No.419*, Wien-New York, Springer-Verlag, 2000.
- [11] Lemonis ME, Gantes CJ. Incremental modeling of T-stub connections. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2006; 1(7):1135-1159.
- [12] Λεμονής ΜΕ. Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος σε μεταλλικά πλαίσια. Διδακτορική διατριβή: *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*. Αθήνα; 2006.
- [13] Bursi OS, Jaspart JP. Calibration of a finite element model for isolated bolted end-plate steel connections. *Journal of Constructional Steel Research* 1997; 44(3):225-262.
- [14] Coelho AMG, Bijlaard FSK, Silva LS. Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections. *Engineering Structures* 2004; 26(9):1185-1206.
- [15] Aziznamini A, Radziminski JB. Static and cyclic performance of semirigid steel beam-to-column connections. *Journal of Structural Engineering ASCE* 1989; 115(12):2979-2999.
- [16] Kishi N, Ahmed A, Yabuki N, Chen WF. Nonlinear finite element analysis of top- and seat-angle with double web-angle connections. *Structural Engineering and Mechanics* 2001; 12(2):201-214.

SIMULATION OF THE RESPONSE OF BEAM-TO-COLUMN JOINTS USING MECHANICAL MODELS

Minas E. Lemonis

Dr. Civil Engineer

Metal Structures Laboratory, National Technical University of Athens
Athens, Greece

e-mail: mlemonis@central.ntua.gr

Charis J. Gantes

Associate Professor

Metal Structures Laboratory, National Technical University of Athens
Athens, Greece

e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

In this paper a methodology for the calculation of the complete moment-rotation curve of beam-to-column joints is presented. The proposed methodology employs appropriate mechanical models, in the context of the component method. For every component the full range of its nonlinear response is characterized, through a respective force-displacement curve. Special emphasis is placed on the modeling of the tensile components that have the form of equivalent T-stub connections. For this purpose, a recently published incremental T-stub model is utilized. The reliability of the proposed methodology is evaluated by comparison to the results of experimental tests and advanced finite element analyses. From the results it is shown that the estimation of the complete moment-rotation curve, as well as the characteristic attributes of initial stiffness, strength and rotational capacity, becomes possible within a satisfactory error margin.