

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΕΝΟΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ

Μηνάς Λεμονής

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, μεταδιδακτορικός ερευνητής,
Εργαστήριο Ανάλυσης και Σχεδιασμού Κατασκευών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
Βόλος, Ελλάδα
e-mail: mlemonis@central.ntua.gr

Χάρης Ι. Γαντές

Αναπληρωτής Καθηγητής
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών,
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο άρθρο παρουσιάζεται ένα αναλυτικό προσομοίωμα για την εκτίμηση της ανακυκλιζόμενης απόκρισης κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Επιλέγεται μια απλοποιημένη αναλυτική σχέση της ανακυκλιζόμενης καμπύλης $M-\varphi$, χρησιμοποιώντας φυσικής σημασίας παραμέτρους καθώς και εμπειρικές παραμέτρους ελέγχου για την προσομοίωση της χειρότερης αντοχής και δυσκαμψίας με την εξέλιξη της φόρτισης. Για την εκτίμηση των παραμέτρων παρουσιάζεται μια διαδικασία βελτιστοποίησης, με εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου, ώστε να ελαχιστοποιείται η απόσταση από πειραματικές καμπύλες ροπής-στροφής, από τη βιβλιογραφία. Η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόζεται σε έξι πειραματικές δοκιμές, επιτυγχάνοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, επιχειρείται μια εκτίμηση των παραμέτρων θεωρητικά, χρησιμοποιώντας μηχανικό προσομοίωμα.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

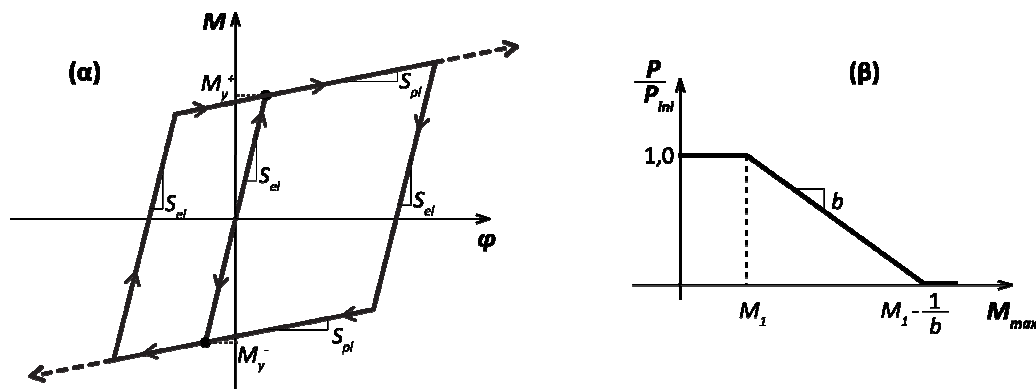
Η προσομοίωση της ανακυκλιζόμενης συμπεριφοράς κόμβων δοκού-υποστυλώματος μέσω απλών μεθοδολογιών γενικής εφαρμογής και χαμηλού υπολογιστικού κόστους, μπορεί να τύχει σημαντικής εφαρμογής στη σεισμική, μη γραμμική ανάλυση κατασκευών, όπου λαμβάνεται υπόψη και η ημι-άκαμπτη απόκριση των κόμβων. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η διατύπωση κατάλληλων αναλυτικών προσομοιωμάτων, τα οποία να μπορούν να αναπαράγουν τη σχέση ροπής M - στροφής φ των κόμβων, για πολλαπλούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης, τυχαίου εύρους και περιοδικότητας, προσεγγίζοντας ικανοποιητικά τη μορφή των κύκλων υστέρησης και την υστερητική ενέργεια. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί, για διάφορες μορφές κόμβων, υστερητικά προσομοιώματα γραμμικής μορφής [1-4], με βάση την εξίσωση Ramberg-Osgood [5], με βάση την

εξίσωση Richard-Abbott [6], με βάση το προσομοίωμα Bouc-Wen [7,8] καθώς και μορφής εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου [9]. Η αποτελεσματικότητα των αναλυτικών υστερητικών προσομοιωμάτων εξαρτάται αφενός από τη διατύπωση τους, κατά πόσο είναι δηλαδή κατάλληλη να προσεγγίσει τη μορφή των κύκλων υστέρησης με χειροτέρευση της δυσκαμψίας και αντοχής ή την εμφάνιση ratcheting, και αφετέρου από τη μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων τους. Αυτή μπορεί να βασίζεται σε θεωρητικό υπόβαθρο, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά των κόμβων, όπως για παράδειγμα με χρήση μηχανικών προσομοιωμάτων [2,4] ή με κάποια μεθοδολογία βελτιστοποίησης ώστε να ελαχιστοποιείται η απόκλιση από πειραματικά αποτελέσματα. Η πρώτη περίπτωση έχει πρακτική αξία καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό, όπου συνήθως δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, ενώ η δεύτερη τυγχάνει εφαρμογής σε παραμετρικές αναλύσεις, που μπορούν να οδηγήσουν στη διατύπωση εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού.

3. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ M-φ

Για την αναλυτική περιγραφή της καμπύλης M-φ, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση του κόμβου επιλέγεται καταρχήν μια απλοποιημένη, διγραμμικής μορφής προσέγγιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1α. Οι κύκλοι υστέρησης, μπορούν να περιγραφούν με τους ακόλουθους όρους:

- Οι κλάδοι αποφόρτισης και επαναφόρτισης είναι γραμμικοί με δυσκαμψία S_{el}
- Η ροπή πλαστικοποίησης κάθε κλάδου αποφόρτισης η επαναφόρτισης κείται επί ευθείας, δυσκαμψίας S_{pl} , που διέρχεται από τα σημεία στροφής, ροπής $(M_y^- / S_{el}, M_y^-)$ ή $(M_y^+ / S_{el}, M_y^+)$ αντίστοιχα.
- Οι ροπές M_y^+ και M_y^- θεωρούνται ίσες σε μέγεθος (M_y στη συνέχεια).



Σχ. 1: Αναλυτικό προσομοίωμα ανακυκλιζόμενης καμπύλης M-φ (α) και νόμος χειροτέρευσης χαρακτηριστικών παραμέτρων (β)

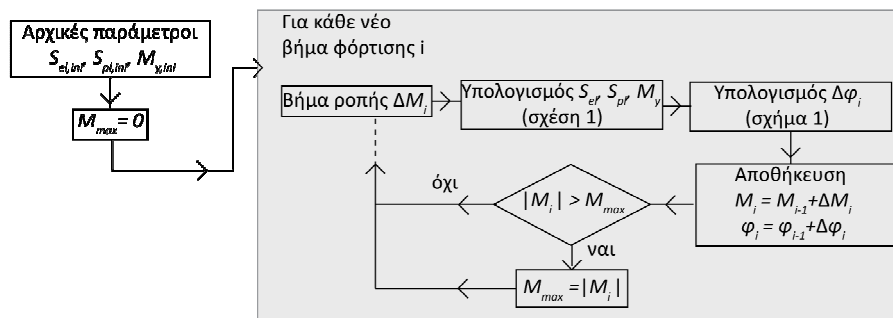
Η απλοποιημένη μορφή της αναλυτικής καμπύλης M-φ, που περιγράφηκε προηγούμενα, δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε περιπτώσεις, όπου εμφανίζεται χειροτέρευση των χαρακτηριστικών αντοχής και δυσκαμψίας σε κάθε νέο κύκλο υστέρησης. Ωστόσο, από πολυάριθμες πειραματικές δοκιμές [1,5] έχει αποδειχθεί πως τόσο η δυσκαμψία όσο και η ροπή αντοχής χειροτερεύουν σταδιακά με την εξέλιξη της φόρτισης. Η μορφή δηλαδή κάθε νέου κύκλου υστέρησης εξαρτάται από την προϋπάρχουσα ιστορία φόρτισης και ειδικότερα από τα μέγιστα μεγέθη ροπής και στροφής που προϋπήρξαν, καθώς και από τον αριθμό κύκλων φόρτισης. Για την προσομοίωση του συγκεκριμένου φαινομένου,

επιλέγεται στο παρόν άρθρο, η συσχέτιση, σε κάθε στιγμή της ιστορίας φόρτισης, των χαρακτηριστικών μεγεθών S_{el} , S_{pl} και M_y , με το μέγιστο μέγεθος ροπής M_{max} που έχει προϋπάρξει. Η συσχέτιση πραγματοποιείται με τη φθίνουσα, γραμμικοποιημένη συνάρτηση του Σχήματος 1β. Συμβολίζοντας με P το κάθε εξαρτημένο από την M_{max} χαρακτηριστικό μέγεθος (S_{el} , S_{pl} , M_y), και αν P_{ini} η αρχική του τιμή, η διατύπωση της συνάρτησης χειροτέρευσης είναι η εξής:

$$\frac{P}{P_{ini}} = \begin{cases} 1,0 & , \text{για } M_{max} \leq M_1 \\ b(M_{max} - M_1) + 1 & , \text{για } M_1 < M_{max} < M_1 - \frac{1}{b} \\ 0,01 & , \text{για } M_{max} \geq M_1 - \frac{1}{b} \end{cases} \quad (1)$$

όπου b και M_1 εμπειρικές παράμετροι προς προσδιορισμό.

Η διαδικασία υπολογισμού της καμπύλης $M-\varphi$, με χειροτέρευση των παραμέτρων, υλοποιήθηκε σε πρόγραμμα υπολογιστή. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το σχετικό διάγραμμα ροής. Ο προγραμματισμός είναι ιδιαίτερα απλός και χαμηλού υπολογιστικού κόστους καθώς υπεισέρχονται μόνο γραμμικές σχέσεις.



Σχ. 2: Διάγραμμα ροής υπολογισμού καμπύλης $M-\varphi$ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και με χειροτέρευση των παραμέτρων

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΓΕΝΕΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Προκειμένου να είναι δυνατή η εφαρμογή του αναλυτικού προσομοιώματος σε πραγματικούς κόμβους δοκού-υποστυλώματος απαιτείται αφενός η εκτίμηση των αρχικών τιμών των φυσικής σημασίας παραμέτρων $\{S_{el,ini}, S_{pl,ini}, M_{y,ini}\}$ και αφετέρου ενός ζεύγους εμπειρικών παραμέτρων χειροτέρευσης για κάθε μία από αυτές. Δηλαδή, επιπλέον έξι παράμετροι, ήτοι:

- παράμετροι χειροτέρευσης δυσκαμψίας S_{el} : $\{M_{1,Sel}, b_{Sel}\}$
- παράμετροι χειροτέρευσης δυσκαμψίας S_{pl} : $\{M_{1,Spl}, b_{Spl}\}$
- παράμετροι χειροτέρευσης ροπής M_y : $\{M_{1,My}, b_{My}\}$

Συνολικά επομένως, απαιτείται ο προσδιορισμός εννέα παραμέτρων. Για λόγους ευστάθειας του αλγόριθμου επιλέχθηκε η αρχική ελαστική δυσκαμψία $S_{el,ini}$ να μη

συμμετέχει στη βελτιστοποίηση αλλά να εκτιμάται απευθείας από την αρχική κλίση των πειραματικών καμπυλών. Έτσι απομένουν οκτώ παράμετροι προς εκτίμηση.

Η μέθοδος των γενετικών αλγόριθμων, βρίσκει εφαρμογή σε ποικίλα προβλήματα βελτιστοποίησης κατασκευών, αντιγράφοντας τις διαδικασίες επιβίωσης του ικανότερου που παρατηρούνται στη φύση. Στην περιοχή των κόμβων, η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί για την εκτίμηση υστερητικής καμπύλης Bouc-Wen [8] και της πλαστικής δυσκαμψίας υπό μονοτονική φόρτιση [10]. Η προσαρμογή της, για τις ανάγκες του προβλήματος βελτιστοποίησης στο παρόν άρθρο, υλοποιήθηκε από τον πρώτο συγγραφέα και παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Για την υλοποίηση της εξελικτικής γενετικής διαδικασίας σε υπολογιστή απαιτείται καταρχήν η κωδικοποίηση των υπό βελτιστοποίηση παραμέτρων σε ένα χρωμόσωμα. Κάθε χρωμόσωμα αποτελεί μία πιθανή λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο τρόπος κωδικοποίησης των παραμέτρων σε χρωμόσωμα μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους και μορφές, αποτελώντας μια καθαρά υποκειμενική και εν πολλοίς οδηγούμενη από το πρόβλημα πρακτική. Στην παρούσα περίπτωση, επειδή οι υπό βελτιστοποίηση παράμετροι είναι συνεχείς, πραγματικές μεταβλητές και για λόγους ταχύτητας των υπολογισμών επιλέχθηκε η κωδικοποίηση να υλοποιηθεί με τη μορφή διανύσματος 8 μεταβλητών διπλής ακρίβειας. Κάθε στοιχείο του διανύσματος (γονίδιο) αντιστοιχεί σε μία παράμετρο του προβλήματος. Για την σύγκριση της ικανότητας ενός χρωμοσώματος σε σχέση με ένα διαφορετικό στην επίτευξη του αντικειμενικού στόχου, απαιτείται ο καθορισμός μιας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία έχοντας ως δεδομένο το χρωμόσωμα παράγει ως αποτέλεσμα μία βαθμονομημένη τιμή της ικανότητας του. Επιλέχθηκε ως αντικειμενική συνάρτηση το άθροισμα των τετραγώνων των αποστάσεων μεταξύ των σημείων των δύο καμπυλών και στόχος είναι η εύρεση του χρωμοσώματος που την ελαχιστοποιεί. Επειδή όπως παρουσιάστηκε προηγουμένα στο Σχήμα 2, η διαδικασία υπολογισμού της αναλυτικής καμπύλης γίνεται υπολογίζοντας σε κάθε βήμα τη στροφή φ_i , για δεδομένη ροπή M_i , η αντικειμενική συνάρτηση Z μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$Z = \sum_{i=1}^n (\varphi_{i,exp} - \varphi_{i,model})^2 \quad (2)$$

όπου $\varphi_{i,exp}$ η πειραματική στροφή, στο βήμα φόρτισης i , $\varphi_{i,model}$ η αντίστοιχη στροφή του αναλυτικού προσομοιώματος και n ο αριθμός των βημάτων φόρτισης που λαμβάνεται ίσος με τον αριθμό των σημείων διακριτοποίησης της πειραματικής καμπύλης.

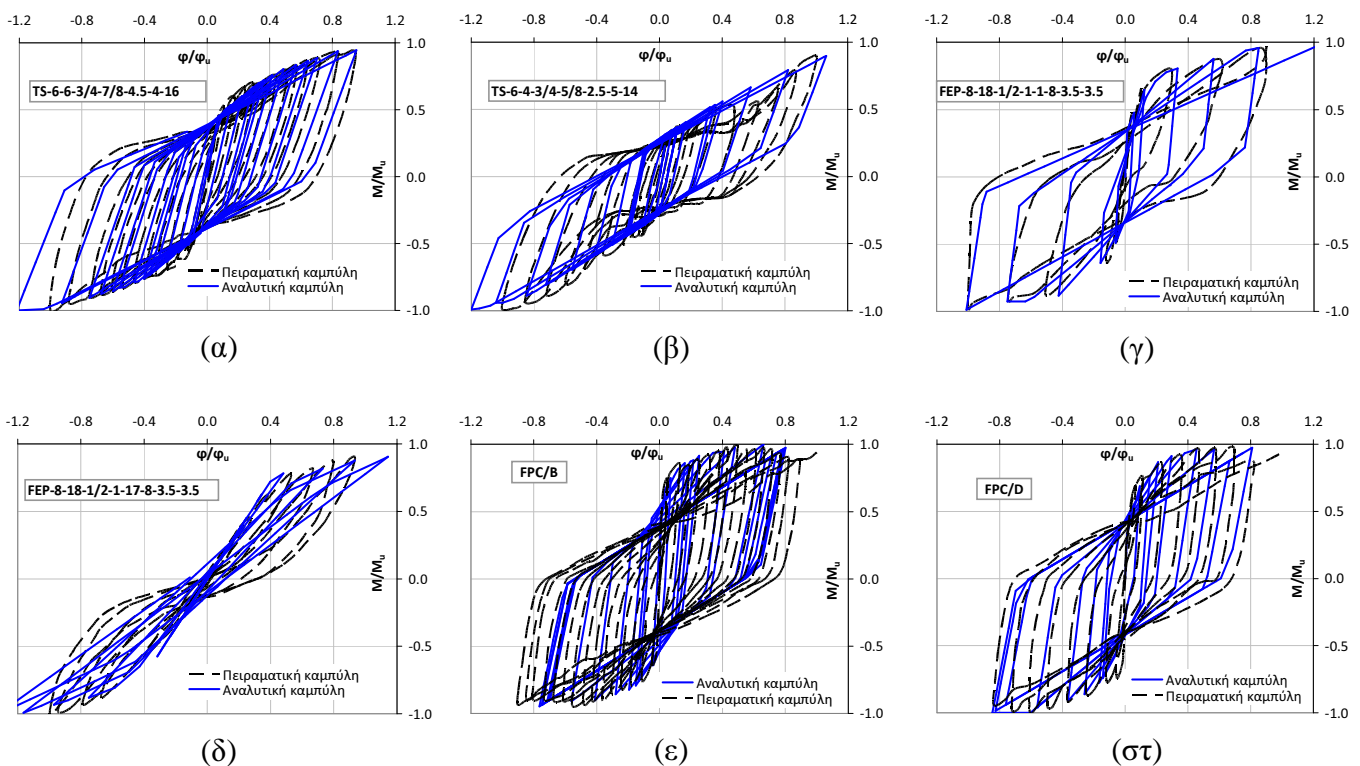
Για τον προγραμματισμό του αλγόριθμου αξιοποιήθηκε ο ανοιχτός κώδικας GALib [11] σε γλώσσα C++. Ο πληθυσμός των χρωμοσωμάτων ορίστηκε σε 50 άτομα και επιλέχθηκε να είναι στάσιμος μεταξύ δύο διαδοχικών γενεών, απομακρύνοντας όμως σε ποσοστό 70% τα λιγότερο ικανά άτομα. Τα άτομα αυτά αναπληρώνονται από νέα που προέρχονται από διασταύρωση (70% πιθανότητα) και μετάλλαξη (1% πιθανότητα). Το εύρος τιμών των γονιδίων φράζεται, ώστε να αποκλείονται μη ρεαλιστικές τιμές των παραμέτρων. Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται τα κάτωθι πεδία ορισμού:

$$\begin{aligned} 0.001S_{el,ini} \leq S_{pl,ini} \leq 0.3S_{el,ini} & & 0.3M_u \leq M_{1,Spl} \leq M_u \\ 0.3M_u \leq M_{y,ini} \leq M_u & & -5,0 \leq b_{1,Spl} \leq 0,0 \\ 0.3M_u \leq M_{1,SEL} \leq M_u & & 0.3M_u \leq M_{1,My} \leq M_u \\ -5,0 \leq b_{1,SEL} \leq 0,0 & & -5,0 \leq b_{1,My} \leq 0,0 \end{aligned}$$

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος και της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης του, έναντι πειραματικών αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν 6 δοκιμές κόμβων μεταφοράς ροπής, δοκού-υποστυλώματος, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, από τη βιβλιογραφία. Πρόκειται για 4 δοκιμές των Abolmaali et al. 2009 [5] (σχήματα 3α ως 3δ) και 2 δοκιμές από τους Bernuzzi et al. 1996 [1] (σχήματα 3ε, 3στ). Οι πειραματικές καμπύλες προέκυψαν από ψηφιοποίηση μέσω κατάλληλου λογισμικού των διαθέσιμων δημοσιευμένων διαγραμμάτων $M-\varphi$. Λόγω της πεπερασμένης ανάλυσης, ένα σφάλμα ψηφιοποίησης είναι αναμενόμενο, ιδιαίτερα για μικρές τιμές της στροφής φ , όπου υπάρχει μεγάλη επικάλυψη των κύκλων υστέρησης.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται συγκριτικά οι καμπύλες $M-\varphi$ των πειραματικών δοκιμών και του προτεινόμενου αναλυτικού προσομοιώματος. Οι καμπύλες, για λόγους γενίκευσης, έχουν αδιαστατοποιηθεί ως προς M_u και φ_u , που είναι η μέγιστη ροπή και στροφή αντίστοιχα, κάθε πειραματικής δοκιμής. Η σύγκλιση είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, ειδικά αν ληφθεί υπόψη η απλότητα της αναλυτικής διατύπωσης. Επιπλέον διερεύνησης αξίζει η αντιμετώπιση του φαινομένου pinching (ζούληγμα) που εμφανίζεται σε αρκετές πειραματικές καμπύλες και με την διαγραμματική διατύπωση δεν μπορεί να προσεγγισθεί, καθώς και η εξάρτηση της χειροτέρευσης των κύκλων υστέρησης, εκτός από την μέγιστη ροπή M_{max} , και από τον αριθμό των κύκλων υστέρησης (εμφανές στο σχήμα 3ε). Στον Πίνακα 1, παρατίθενται οι τιμές της συνολικής υστερητικής ενέργειας που υπολογίστηκαν για κάθε καμπύλη $M-\varphi$. Οι τιμές αφορούν τις αδιαστατοποιημένες καμπύλες. Η σύγκλιση πειραματικών και αναλυτικών τιμών αποδεικνύεται πολύ ικανοποιητική, με μέση τιμή σφάλματος 2,2% και τυπική απόκλιση 14%.



Σχ. 3: Σύγκριση πειραματικών και προτεινόμενων αναλυτικών καμπύλων $M - \varphi$

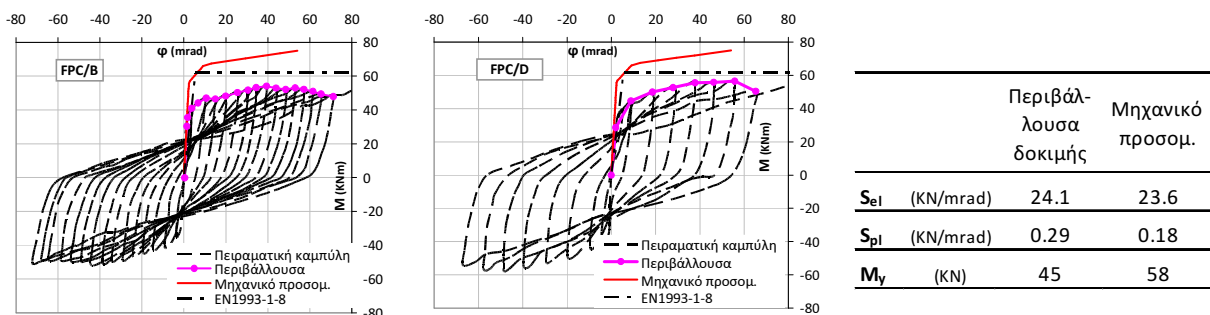
	TS-6-6-3/4-7/8-4.5-4-16	TS-6-4-3/4-5/8-2.5-5-14	FEP-8-18-1/2-1-1-8-3.5-3.5	FEP-8-18-1/2-1-17-8-3.5-3.5	FPC/B	FPC/D
Πειραματικές δοκιμές	7,16	3,93	2,97	1,30	11,06	5,88
Αναλυτικό προσομοίωμα	7,30	4,26	3,63	1,01	11.41	5.87

Πίν. 1. Συνολικές υστερητικές ενέργειες για τις υπό εξέταση δοκιμές

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ

Στη παράγραφο αυτή θα επιχειρηθεί η εκτίμηση των φυσικής σημασίας παραμέτρων του αναλυτικού προσομοιώματος θεωρητικά, με βάση δηλαδή τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των κόμβων, χρησιμοποιώντας το μηχανικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε από τους συγγραφείς [12], για την προσομοίωση της μονοτονικής καμπύλης $M-\varphi$ κόμβων με μετωπική πλάκα και με γωνιακά. Το μηχανικό προσομοίωμα χρησιμοποιεί τη συνδεσμολογία συστατικών μερών του Ευρωκώδικα 3 [13], ωστόσο το κύριο γνώρισμα του είναι η προσομοίωση των συστατικών της εφελκυόμενης ζώνης μέσω ενός επαυξητικού προσομοιώματος βραχέος ταυ, με το οποίο λαμβάνεται υπόψη τόσο η μη γραμμικότητα υλικού όσο και τα φαινόμενα επαφής. Ο υπολογισμός έγινε για τις δύο δοκιμές των Bernuzzi et al. [1], για τις οποίες είναι διαθέσιμες οι ιδιότητες των υλικών. Οι δύο δοκιμές διαφέρουν μόνο ως προς την ιστορία φόρτισης.

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζονται οι μονοτονικές καμπύλες $M-\varphi$ που υπολογίζονται με το μηχανικό προσομοίωμα, με τον Ευρωκώδικα 3 [13], καθώς και η περιβάλλουσα των κύκλων υστέρησης. Είναι εμφανές ότι υπάρχει μια σημαντική απόκλιση των καμπυλών του μηχανικού προσομοιώματος και του Ευρωκώδικα 3 [13], που βασίζονται σε παραδοχές μονοτονικής φόρτισης, από την περιβάλλουσα των κύκλων υστέρησης, σε ότι αφορά τη ροπή διαρροής M_y . Αντίθετα, για την ελαστική δυσκαμψία S_{el} και λιγότερο για την δυσκαμψία του πλαστικού κλάδου S_{pl} , η εκτίμηση του μηχανικού προσομοιώματος είναι ικανοποιητική. Κρίνεται πάντως, πως δεν προσφέρεται η χρησιμοποίηση παραδοχών μονοτονικής φόρτισης για την εκτίμηση της απόκρισης κόμβων υπό ανακυκλιζόμενη και επομένως, για τον σκοπό αυτό, είναι αναγκαία η ανάπτυξη αντίστοιχων μεθοδολογιών με τις οποίες να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ιστορίας φόρτισης.



Σχ. 4: Σύγκριση πειραματικών δοκιμών, μηχανικού προσομοιώματος και Ευρωκώδικα 3 στην εκτίμηση της καμπύλης $M - \varphi$

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εκτίμηση της καμπύλης $M-\phi$ κόμβων δοκού-υποστυλώματος, υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση, με το απλό αναλυτικό προσομοίωμα που προτείνεται στο παρόν άρθρο αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική. Το σχήμα των κύκλων υστέρησης καθώς και η συνολική υστερητική ενέργεια μπορούν να προσεγγισθούν πολύ ικανοποιητικά, εφόσον οι χαρακτηριστικοί παράμετροι του προσομοιώματος έχουν επιλεγεί κατάλληλα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με εφαρμογή του γενετικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης, ο οποίος εξασφαλίζει αποτελεσματικά τη σύγκλιση με πειραματικές δοκιμές, ή με θεωρητικές μεθοδολογίες, οι οποίες εκτός από τα γεωμετρικά και μηχανικά μεγέθη του κόμβου, πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και τη μορφή της ιστορίας φόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bernuzzi C., Zandoninin R., Zanon P., “Experimental analysis and modeling of semi rigid steel joints under cyclic reversal loading”, *J. Constr. Steel Res.*, Vol.38(2), 1996, pp.95
- [2] Shen J., Astaneh A., “Hysteresis model of bolted-angle connections”, *J. Constr. Steel Res.*, Vol.54, 2000, pp.317
- [3] Ibarra L., Medina R., Krawinkler H., “Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration”, *Earthquake Eng. & Str. Dynamics.*, Vol.34, 2005, pp.1489
- [4] Kim J., Ghaboussi J., Elnashai A., “Mechanical and informational modeling of steel beam-to-column connections”, *Eng. Structures*, Vol.32, 2010, pp.449
- [5] Abolmaali A., Kukreti A., Motahari A., Ghassemieh M., “Energy dissipation characteristics of semi-rigid connections”, *J. Constr. Steel Res.*, Vol.65, 2009, pp.1187
- [6] Nogueiro P., Silva LS., Bento R., Simoes R., “Numerical implementation and calibration of a hysteretic model with pinching for the cyclic response of steel joints”, *Advanced Steel Construction*, Vol.3(1), 2007, pp.459
- [7] Wang C., Wen Y., “Evaluation of pre-Northridge low-rise steel buildings. I: Modeling”, *J. Str. Engineering*, Vol.126, 2000, pp.1160
- [8] Charalambakis A., Koumousis V., “Identification of Bouc–Wen hysteretic systems by a hybrid evolutionary algorithm”, *J. Sound & Vibration*, Vol.314, 2008, pp.571
- [9] Yun G., Ghaboussi J., Elnashai A., “A design-variable-based inelastic hysteretic model for beam–column connections”, *Earthquake Eng. & Str. Dynamics.*, Vol.37, 2008, pp.535
- [10] Lima L., Vellasco P., Silva J., Borges L., Silva L., “Post-limit stiffness prediction of semi-rigid joints using genetic algorithms”, *Latin Amer. J. Solids & Struct.*, Vol.2, 2005, pp.305
- [11] Matthew Wall, “GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components”, v2.4.7, *Massachusetts Institute of Technology*
- [12] Lemonis M., Gantes C., “Mechanical modeling of the nonlinear response of beam-to-column joints”, *Constr. Steel Res.*, Vol.65, 2009, pp.879
- [13] CEN, Eurocode 3: Design of structures-Part 1-8: Design of joints, 2003

CALIBRATION OF AN ANALYTICAL MODEL FOR THE CYCLIC RESPONSE OF BEAM-TO-COLUMN JOINTS

Minas Lemonis

Civil Engineer, PhD, postdoctoral researcher,
Laboratory of Structural Analysis and Design, Dept, of Civil Engineering,
University of Thessaly
Volos, Greece
e-mail: mlemonis@central.ntua.gr

Charis J. Gantes

Associate Professor
Laboratory of Steel Structures, School of Civil Engineering,
National Technical University of Athens
Athens, Greece
e-mail: chgantes@central.ntua.gr

SUMMARY

In this paper an analytical model is presented for the estimation of the cyclic response of beam-to-column joints. A simple mathematical representation of the cyclic $M-\phi$ curve is adopted, which is shaped by a set of physical parameters as well as empirical control parameters, for the simulation of strength and stiffness deterioration. For the estimation of the parameters, a genetic algorithm optimization approach is presented, aiming at the minimization of the distance from experimental moment-rotation curves, found in the literature. The proposed procedure is implemented on six experimental tests, achieving very good results. In addition, an estimation of the model parameters through a mechanical model is presented.