

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΜΙΚΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ
ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΙΔΕΑΤΩΝ ΑΜΙΓΩΣ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ**

**Άννα Α. Μαρινοπούλου^a, Χρίστος Ν. Κάλφας^b, Ευάγγελος Γ. Γαλούσης^c,
Δημήτριος Θ. Παχούμης^a**

^a Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός

^b Επικ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

^c Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ.

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail: msslgroup@civil.duth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε προηγούμενη εργασία [1] έχει παρουσιασθεί μεθοδολογία προσομοίωσης σύμμικτων διατομών υποστυλωμάτων μερικώς εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα με αμιγώς χαλύβδινες διατομές. Η μέθοδος στηρίζεται στην ισοδυναμία των αξονικών και καμπτικών ακαμψιών της σύμμικτης και της ιδεατής διατομής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ελάχιστες αποκλίσεις και αυτό μόνο για την ακαμψία ως προς τον ισχυρό άξονα. Σκοπός της μεθόδου είναι ο ακριβής προσδιορισμός ισοδύναμων αμιγώς χαλύβδινων διατομών, με τις οποίες να αντικαθίστανται οι διατομές των σύμμικτων υποστυλωμάτων, προκειμένου να καταστεί ευχερέστερη η καθολική ελαστική ανάλυση σύμμικτων δομημάτων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ο πειραματικός έλεγχος αμφιαρθρωτών μερικώς εγκιβωτισμένων σύμμικτων υποστυλωμάτων, καθώς και των αντιστοίχων τους ιδεατών αμιγώς χαλύβδινων, προκειμένου να διερευνηθεί και πειραματικά ο βαθμός αξιοπιστίας της προταθείσης μεθοδολογίας. Τα υποστυλώματα καταπονούνται σε αξονικό θλιπτικό φορτίο, καθώς και σε εγκάρσιο, που προκαλεί κάμψη της διατομής στον ισχυρό άξονά της. Τα μεγέθη που μετρούνται είναι οι παραμορφώσεις των διατομών στα σημεία επιβολής του εγκάρσιου φορτίου. Όπως προκύπτει από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι παραμορφώσεις των δύο διαφορετικών διατομών συγκλίνουν ικανοποιητικά, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της προταθείσης μεθοδολογίας προσομοίωσης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

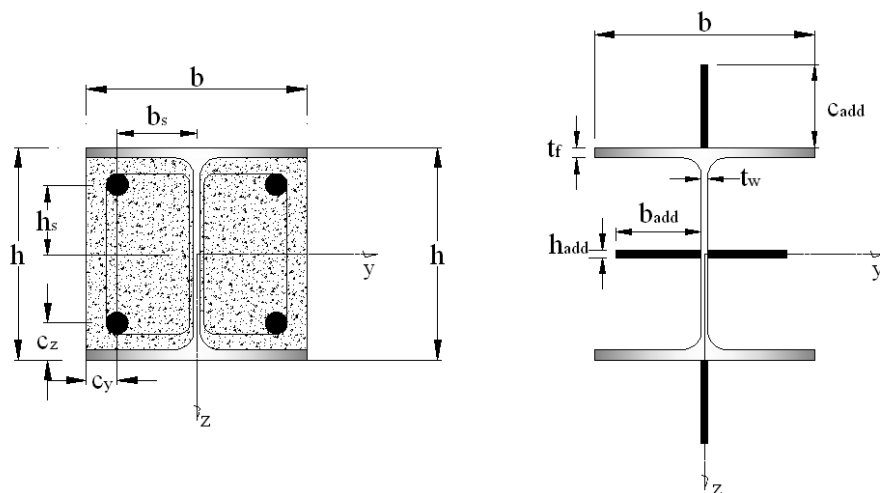
Η μέθοδος προσομοίωσης σύμμικτων μερικώς εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα διατομών υποστυλωμάτων με αμιγώς χαλύβδινες ιδεατές διατομές, που έχει παρουσιασθεί [1], εξασφαλίζει την ισοδυναμία ιδεατής και πραγματικής διατομής, που επιτυγχάνεται με την κάλυψη των ακόλουθων απαιτήσεων:

1. Η αξονική ακαμψία της ιδεατής διατομής να είναι ίση με την ακαμψία της σύμμικτης διατομής.
2. Οι καμπτικές ακαμψίες και ως προς τους δύο κεντροβαρικούς άξονες της ιδεατής διατομής να είναι, επίσης, ίσες με τις αντίστοιχες ακαμψίες της σύμμικτης διατομής.

Προκειμένου να βρεθεί η μορφή της ιδεατής διατομής με την οποία θα προσομοιωθεί αυτή του μερικώς εγκιβωτισμένου σύμμικτου υποστυλώματος, λαμβάνεται υπόψη ότι η σύμμικτη διατομή έχει μεγαλύτερη ακαμψία ως προς τον ασθενή άξονα σε σχέση με τη διατομή του χαλύβδινου μέρους της. Προς το σκοπό αυτό επιλέγεται για την προσομοίωση μία χαλύβδινη διατομή, η οποία μορφώνεται από τη χαλύβδινη διατομή του σύμμικτου υποστυλώματος, στην οποία προστίθενται εκατέρωθεν του μέσου του κορμού της δύο όμοιες χαλύβδινες λεπίδες που προσδίδουν στη διατομή αυξημένη ακαμψία ως προς τον ασθενή άξονα zz (Σχ. 1). Επιπλέον, στο μέσο του άνω και κάτω πέλματος αυτής τίθενται δύο χαλύβδινες λεπίδες, προκειμένου να διορθωθούν τα σφάλματα που προκύπτουν στην ακαμψία ως προς τον ισχυρό άξονα yy από την τοποθέτηση των δύο πρώτων λεπίδων. Στο Σχ. 1 εικονίζονται αφ' ενός η διατομή του σύμμικτου υποστυλώματος και αφ' ετέρου η ιδεατή αμιγώς χαλύβδινη διατομή, με την οποία προσομοιώνεται.

Από τα κριτήρια ισοδυναμίας των δύο διατομών, που αναφέρονται ανωτέρω, προκύπτει ένα μη-γραμμικό σύστημα τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους, τις αδιαστατοποιημένες γεωμετρικές παραμέτρους β , η και χ , όπου $\beta = b_{add}/b$, $\eta = h_{add}/h$ και $\chi = c_{add}/h$, αντίστοιχα (Σχ. 1). Από την κλειστή λύση του συστήματος προκύπτουν οι αναγκαίες διαστάσεις της ιδεατής διατομής συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της αρχικής σύμμικτης διατομής. Από τη σύγκριση των ακαμψιών των δύο διατομών προκύπτει ότι είναι ίδιες εκτός από τις ακαμψίες ως προς τον ισχυρό άξονα, όπου οι αποκλίσεις δεν ξεπερνούν το 1%.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται πειραματικός έλεγχος προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η αξιοπιστία της μεθοδολογίας προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάζονται δοκίμια υποστυλωμάτων σύμμικτης διατομής, καθώς και τα αντίστοιχα ιδεατά με διαστάσεις που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης [1]. Τα δοκίμια αυτά αποτελούν αμφιαρθρωτά υποστυλώματα ενός επίπεδου πλαισίου, που υπόκεινται σε μονοαξονική ως προς τον ισχυρό άξονα κάμψη και ταυτόχρονη θλίψη, και γίνεται έλεγχος των παραμορφώσεών τους στο σημείο επιβο-



α. Σύμμικτη διατομή

β. Ιδεατή χαλύβδινη διατομή

Σχ. 1. Προσομοίωση σύμμικτης μερικώς εγκιβωτισμένης διατομής με ιδεατή αμιγώς χαλύβδινη

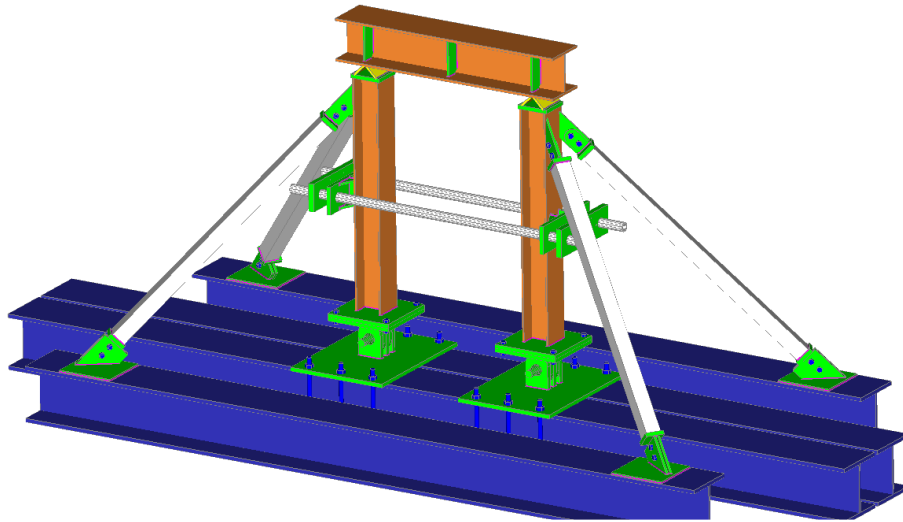
λής του εγκάρσιου φορτίου. Μετρώνται οι παραμορφώσεις στο σημείο επιβολής του φορτίου τόσο του σύμμικτου υποστυλώματος όσο και του αντίστοιχου ιδεατού αμιγώς χαλύβδινου για να διαπιστωθεί ο βαθμός ομοιότητας της συμπεριφοράς τους.

3. ΕΠΙΛΟΓΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των παραμορφώσεων των υποστυλωμάτων και της εν γένει συμπεριφοράς τους αποτελείται βασικά από ένα επίπεδο πλαίσιο με δύο αμφιαρθρωτά υποστυλώματα και φαίνεται στο Σχ. 2. Η άρθρωση στη βάση εκάστου υποστυλώματος υλοποιείται με μια κλασική σύνδεση βλήτρου (Φωτ. 1), με τρεις λεπίδες συγκολλημένες στην κάτω λεπίδα με την οποία στηρίζεται το σύστημα στο πλαίσιο φόρτισης και δύο λεπίδες συγκολλημένες στην άνω λεπίδα σύνδεσης του υποστυλώματος. Στις οπές των πέντε αυτών λεπίδων έχουν προσαρμοσθεί λιπαινόμενοι κυλισιοτριβείς (ρουλεμάν), από τους οποίους διέρχεται το βλήτρο. Η σχεδόν τέλεια επαφή των ρουλεμάν με το βλήτρο δεν αφήνει ανεπιθύμητες ανοχές και η λίπανση τους εξουδετερώνει τις τριβές, που μπορούν να προκαλέσουν ατέλειες στη λειτουργία της άρθρωσης. Η άρθρωση στην κορυφή του υποστυλώματος επιτυγχάνεται με δύο τεμνόμενες ράβδους (αντιρρίδες), οι οποίες, λόγω της τοποθέτησής τους εμποδίζουν, επιπλέον, τις εκτός επιπέδου ανεπιθύμητες μετακινήσεις των υποστυλωμάτων.

Το ζύγωμα του πλαισίου αποτελεί μια μεγάλης ακαμψίας μεταλλική γέφυρα (διατομής HE 240A), η οποία εδράζεται σε κάθε υποστυλώμα επί μεταλλικής γωνίας, που είναι συγκολλημένη, με την κορυφή προς τα άνω, σε οριζόντια λεπίδα, που με τη σειρά της είναι συγκολλημένη στο υποστυλώμα (Φωτ. 2). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η σημειακή στήριξη της γέφυρας στα υποστυλώματα.

Το αξονικό φορτίο επιβάλλεται από την υδραυλική πρέσα του πλαισίου φόρτισης και εφαρμόζεται στο μέσο της γέφυρας. Λόγω της σχετικά μεγάλης ακαμψίας της γέφυρας και της σημειακής στήριξής της, το φορτίο αυτό ισοκατανέμεται στα δύο υπο-



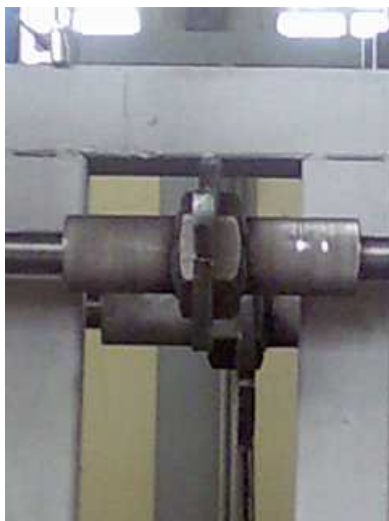
Σχ. 2: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης



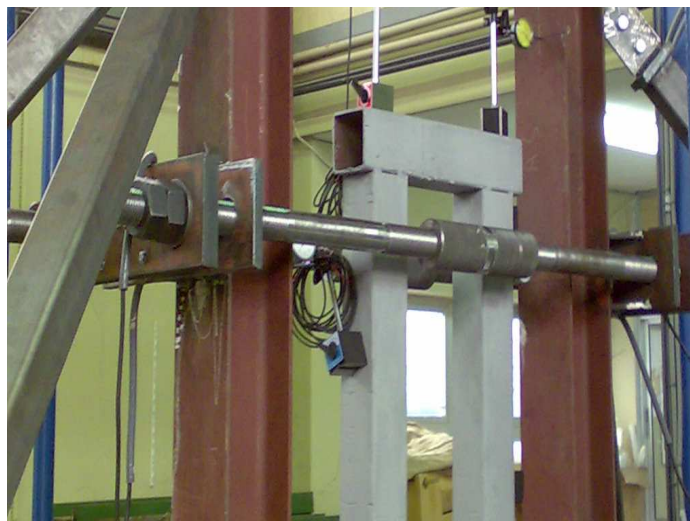
Φωτ. 1: Η άρθρωση με βλήτρο στη βάση των υποστυλωμάτων



Φωτ. 2: Πρέσα φόρτισης, μέσω της οποίας μεταβιβάζεται αξονικό θλιπτικό φορτίο στα υποστυλώματα



Φωτ. 3: Λεπτομέρεια κοχλιοστροφέα ντιζών



Φωτ. 4: Το σύστημα επιβολής του εγκάρσιου φορτίου στα υποστυλώματα

στυλώματα ως καθαρά αξονικό φορτίο.

Το εγκάρσιο φορτίο, που προκαλεί κάμψη ως προς τον ισχυρό άξονα της διατομής των στύλων, εφαρμόζεται με ιδιοκατασκευασμένο σύστημα (φωτ. 4), το οποίο περιλαμβάνει κυρίως δύο ελκυστήρες (ντίτζες), οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με κοχλιοστροφέα (μούφα). Στο εσωτερικό των άκρων του κοχλιοστροφέα έχουν κατασκευασθεί αντίρροπα σπειρώματα, στα οποία κοχλιώνονται τα αντίστοιχα σπειρώματα των άκρων των δύο τμημάτων του κάθε ελκυστήρα. Στους δύο ελκυστήρες, που είναι τοποθετημένοι εκατέρωθεν των δοκιμίων, κοχλιώνονται στα άκρα τους κατακόρυφες λεπίδες, στις οποίες στερεώνονται οι κυψέλες μέτρησης φορτίου (*load cells*). Οι ακίδες των δύο κυψελών της κάθε πλευράς είναι σε επαφή με κατακόρυφη λεπίδα όμοια με τις προηγούμενες, η οποία είναι συγκολλημένη στα πέλαμα των υποστυλωμάτων με δύο λεπίδες κάθετες σε αυτά. Με το σύστημα αυτό και καθώς συσφίγγεται ο κοχλιοστροφέας των ελκυστήρων, η εφελκυστική δύναμη, που αναπτύσσεται, μεταβιβάζεται μέσω των ακίδων των κυψελών φόρτισης και των λεπίδων στα πέλαμα-

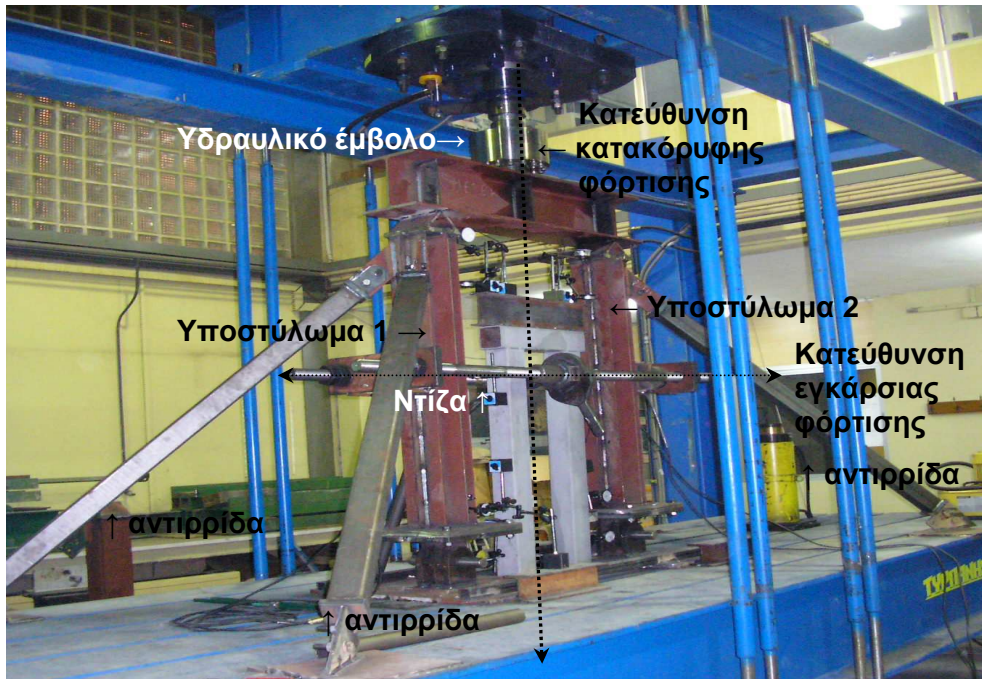
Δοκίμιο σύμμικτου υποστυλώματος		Δοκίμιο προσομοιωμένου υποστυλώματος	
Χαλύβδινη διατομή	HE 160A	Χαλύβδινη διατομή	HE 160A
Ποιότητα χάλυβα	S 275	Λεπίδες κορμού (mm)	106 x 6
Κατηγορία σκυροδέματος	C 20/25	Λεπίδες πελμάτων (mm)	33.8 x 6
Διαμήκεις οπλισμοί	Ø 12	Ποιότητα χάλυβα	S 275
Συνδετήρες	Ø 8/10		
Χάλυβας οπλισμών	S 500s		

Πιν. 1 Διαστάσεις και υλικά δοκιμίων

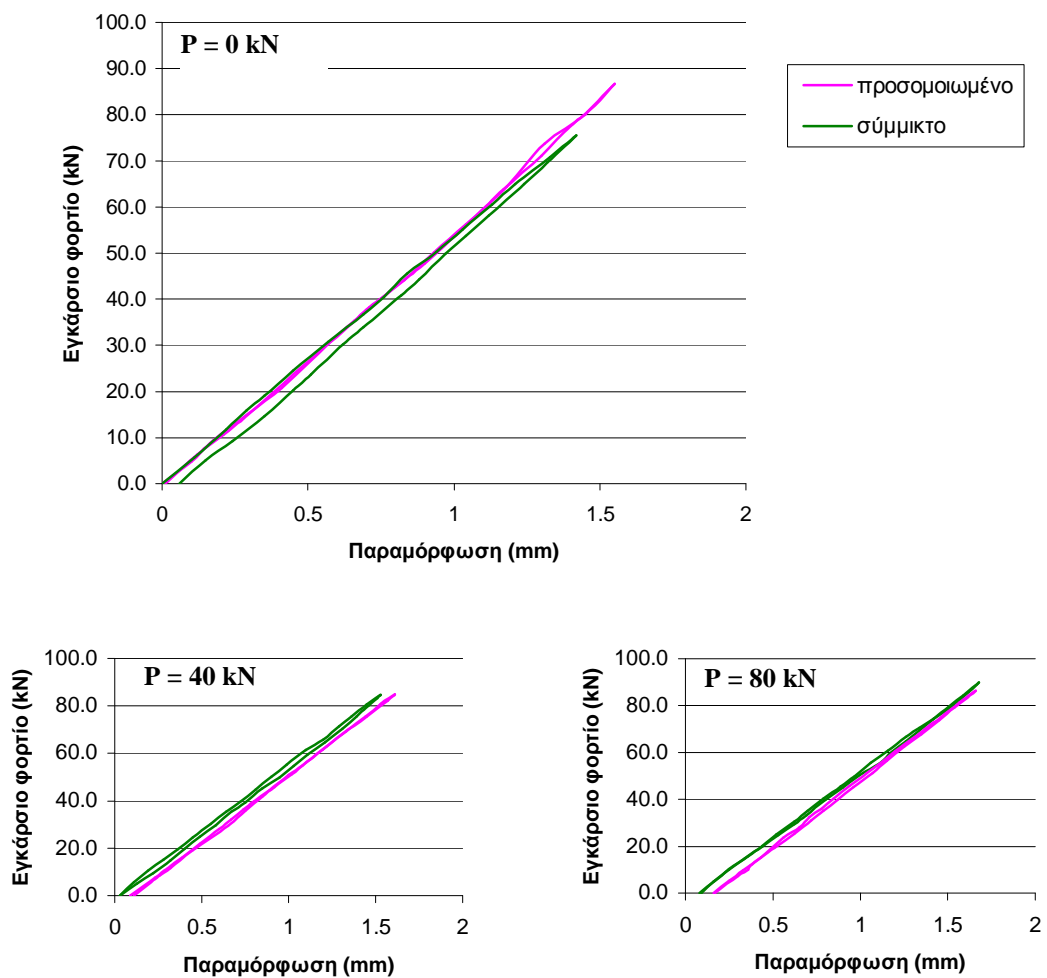
τα των υποστυλωμάτων, η οποία ως εγκάρσιο φορτίο προκαλεί κάμψη του υποστυλώματος ως προς τον ισχυρό άξονα. Η συμμετρική τοποθέτηση των κυψελών ως προς τον άξονα zz της διατομής εξασφαλίζει την ισομερή κατανομή του φορτίου, η οποία ελέγχεται σε κάθε φάση της φόρτισης μέσω των καταγραφών των φορτίων που λαμβάνονται στο χρησιμοποιούμενο συμβατό καταγραφικό της *Kyowa*.

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Τα πειραματικά δοκίμια σχεδιάστηκαν σε κλίμακα 1:1. Η εκλογή της διατομής των πειραματικών δοκιμίων έγινε με βάση αφ' ενός τις δυνατότητες του υπάρχοντος μηχανολογικού εξοπλισμού του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ. και αφ' ετέρου την απαίτηση όπως οι παραμορφώσεις είναι σχετικά μεγάλες, ώστε να είναι μετρήσιμες χωρίς αισθητά σφάλματα. Το πλάτος και το πάχος των πρόσθετων λεπίδων που απαιτούνται για το προσομοιωμένο υποστυλώμα υπολογίστηκαν με εφαρμογή της μεθόδου προσομοίωσης [1]. Οι διαστάσεις και τα υλικά, που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των δοκιμίων, αναγράφονται στον Πιν. 1. Όσον αφορά



Φωτ. 5: Το δοκίμιο με τις προσομοιωμένες ιδεατές διατομές υποστυλωμάτων



Σχ. 5: Διαγράμματα εγκάρσιου φορτίου-παραμόρφωσης για διάφορα αξονικά φορτία

στους συνδετήρες, αυτοί τοποθετούνται ανά 10 cm, ενώ στην περιοχή, όπου θα ασκηθεί το εγκάρσιο φορτίο, πυκνώνουν τοπικά και τοποθετούνται ανά 5 cm. Όλες οι εργασίες, που αφορούν στα μεταλλικά μέρη των δοκιμίων, εκτελέστηκαν με κάθε επιμέλεια στο διαπιστευμένο εργοστάσιο της ΜΕΤΕΚΟ, ενώ η σκυροδέτηση των σύμμικτων δοκιμίων έγινε επί τόπου.

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στο πλαίσιο φόρτισης του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Δ.Π.Θ. υπήρξε ιδιαίτερη φροντίδα, προκειμένου η κορυφή της γωνιακής διατομής στο άνω μέρος του υποστυλώματος και ο άξονας του βλήτρου να βρίσκονται στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες εκκεντρότητες. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε νέας τεχνολογίας θεοδόλιχος. Ενδεικτικά το δοκίμιο με τις ιδεατές διατομές εικονίζεται στη *Φωτ. 5*.

Κατά τη φόρτιση των δοκιμίων πραγματοποιούνται διάφοροι κύκλοι φόρτισης εντός της ελαστικής περιοχής. Αρχικά, επιβάλλεται μόνον αξονικό φορτίο στα υποστυλώματα και, εν συνεχεία, μόνον εγκάρσιο. Κατόπιν, επιβάλλεται εγκάρσιο φορτίο με διάφορες τιμές (π.χ. 20, 40, 60 και 80 kN) και αυξανόμενο σταδιακά αξονικό φορτίο, καθώς και το αντίθετο, δηλ. σταθερό αξονικό φορτίο (της τάξεως των 20, 40, 60 και 80 kN) και αυξανόμενο σταδιακά εγκάρσιο φορτίο. Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις μετρούνται με αναλογικά βελόμετρα και τα διαγράμματα εγκάρσιου φορτίου -παραμόρφωσης στο σημείο επιβολής του εγκάρσιου φορτίου παρουσιάζονται στο *Σχ. 5*. Τα διαγράμματα αυτά αντιστοιχούν σε μηδενικό αξονικό φορτίο και σε αξονικό φορτίο των 40 και 80 kN. Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα, η διαφορά των παραμορφώσεων μεταξύ σύμμικτου και προσομοιωμένου υποστυλώματος δεν υπερβαίνει το 4%, γεγονός που αποδεικνύει την ομοιότητα στη συμπεριφορά τους και ως εκ τούτου και την ορθά υπολογισμένη ισοδυναμία των ακαμψιών τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται ο πειραματικός έλεγχος μερικώς εγκιβωτισμένων σύμμικτων διατομών υποστυλωμάτων και των αντίστοιχων τους ιδεατών, όπως αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή της προταθείσας μεθόδου προσομοίωσης [1], προκειμένου να διερευνηθεί και πειραματικά η αξιοπιστία της εν λόγω μεθόδου. Ο πειραματικός έλεγχος περιλαμβάνει την καταπόνηση σε κεντρική θλίψη και κάμψη δοκιμίων σύμμικτων και αντίστοιχων προσομοιωμένων υποστυλωμάτων. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει αρκετές ιδιοκατασκευές και για το λόγο αυτό ελέγχθηκε κατ' αρχήν με χαλύβδινα υποστυλώματα τυποποιημένων διατομών. Γίνονται δοκιμές για διάφορες τιμές αξονικών και εγκάρσιων φορτίων, μετρώνται οι παραμορφώσεις στο σημείο επιβολής του εγκάρσιου φορτίου και κατασκευάζονται διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης για τις διάφορες φορτιστικές περιπτώσεις.

Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι οι αποκλίσεις στις μετρούμενες παραμορφώσεις δεν υπερβαίνουν το 4%, που μπορεί να οφείλονται σε σφάλματα μετρήσεων ή σε μικροατέλειες της πειραματικής διάταξης, αλλά και σε διαφορετική από την προβλεφθείσα συμπεριφορά των υλικών και κυρίως του σκυροδέματος. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, οι αποκλίσεις αυτές είναι εντός των αποδεκτών ορίων για πειραματικές δοκιμές. Προκύπτει, επομένως, το συμπέρασμα ότι σύμμικτο και

προσομοιωμένο υποστύλωμα παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι ακαμψίες ως προς τον ισχυρό άξονα των διατομών των δύο υποστυλωμάτων είναι ισοδύναμες, το οποίο ήταν και το ζητούμενο της πειραματικής έρευνας. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται περαιτέρω ο βαθμός αξιοπιστίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας προσομοίωσης [1] και κατά συνέπεια η μέθοδος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στη γραμμική ελαστική ανάλυση σύμμικτων δομημάτων, κάνοντας χρήση των ευρέως διαδεδομένων εμπορικών λογισμικών για μεταλλικές κατασκευές, χωρίς την εισαγωγή σφαλμάτων στην αποτίμηση των εντάσεων και των παραμορφώσεων

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Marinopoulou A, Balopoulos V, Kalfas C. Simulation of Partially Encased Composite Steel-Concrete Columns with Steel Columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2007; 63:1058-65.
- [2] Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings
- [3] ECCS – Joint Committee on Composite Structures, Composite Structures, Section 16: Composite Columns, No. 28, 1981, pp. 148–173

**EXPERIMENTAL TESTING OF
COMPOSITE STEEL – CONCRETE COLUMN SECTIONS AND
THEIR FICTITIOUS PURELY STEEL COUNTERPARTS**

**Anna A. Marinopoulou^a, Christos N. Kalfas^b, Evangelos G. Galoussis^c,
Dimitrios Th. Pachoumis^a**

^a Phd. Cand., MSc Civil Engineer

^b Assistant Professor DUTH

^c Professor DUTH

Steel Structures Laboratory DUTH

Xanthi, Greece

e-mail: msslgroup@civil.duth.gr

SUMMARY

A method for simulating steel-concrete composite columns of double-symmetric, partially encased cross-sections as equivalent steel columns of fictitious cross-section, for the purposes of linear elastic analysis, has been presented in [1]. The fictitious cross-section proposed there consists of the actual steel cross-section of the composite column and of two additional pairs of plates, one perpendicular to the web at mid-height and one perpendicular to the flanges at mid-width too. The dimensions of the additional plates are chosen to match the contributions of the concrete and reinforcement to the three essential stiffnesses of the composite section, namely its axial stiffness and its flexural stiffnesses about both principal centroidal axes. These requirements of section equivalence are expressed by three nonlinear algebraic equations. By ignoring a higher order term in the major-axis stiffness, the equations may be solved for the dimensions of the fictitious cross-section in closed form. The results provide exact matching of the axial and the minor-axis flexural stiffnesses. Errors only arise in the major-axis flexural stiffness (because of the neglected term), but these errors never exceed 1%. To establish further the reliability of the proposed methodology, columns made of partially – encased composite steel-concrete cross-sections and their fictitious purely-steel counterparts are experimentally tested and compared in this work. For each cross-section examined, a simply supported span is subjected to axial compression and major-axis bending (the latter due to a transverse point load) and the deformations under the transverse load are measured. The experimental results show that the deformations of the composite sections agree to within 3% with those of their fictitious counterparts. Therefore, the proposed methodology of simulation is proven reliable also experimentally.