

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΔΟΚΟΥ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΟ Ή ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Καλλιόπη Δ. Στεφανάκη^a, Χρίστος Ν. Κάλφας^b, Δημήτριος Θ. Παχούμης^c, Ιωάννης Ζ. Ευθυμίου^a

^a Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός

^b Αναπλ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

^c Δρ. MSc Πολιτικός Μηχανικός

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail : msslgroup@civil.duth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια επισκόπηση των αντιλήψεων που αφορούν τους σύμμικτους κόμβους, και ειδικότερα αυτούς της σύνδεσης σύμμικτης δοκού σε σύμμικτο ή μεταλλικό υποστύλωμα. Με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων π/σ μελετάται η συμπεριφορά συγκολλητών κόμβων σύμμικτης δοκού σε σύμμικτο υποστύλωμα, ελατής ή συγκολλητής διατομής. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί και η μελέτη της συμπεριφοράς συγκολλητών και κοχλιωτών κόμβων σύμμικτης δοκού επί μεταλλικού υποστυλώματος. Η συμπεριφορά των εν λόγω αναλυτικών προσομοιωμάτων συγκρίνεται με αυτή αντίστοιχου μοντέλου μεταλλικής δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα ώστε να διαπιστωθεί η δυνατότητα εφαρμογής του κανονισμού, στην περίπτωση της θεωρούμενης σύνδεσης.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

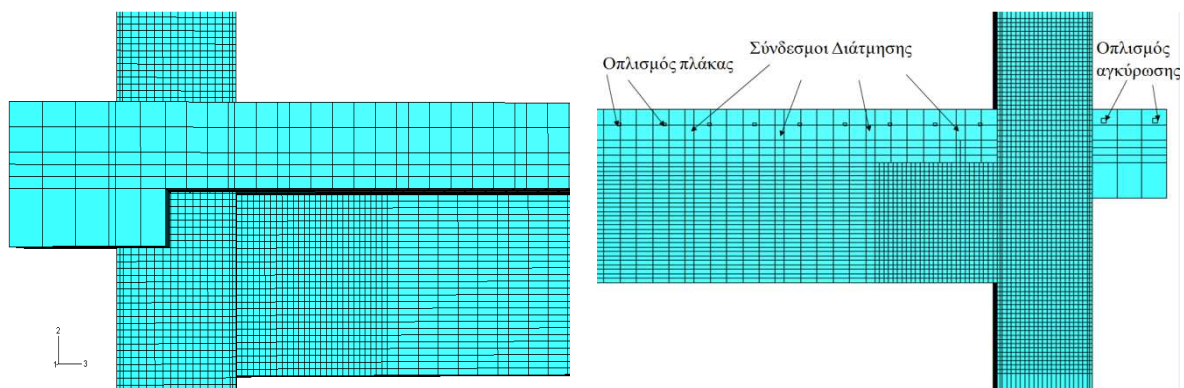
Σύμμικτες κατασκευές ονομάζονται αυτές στις οποίες τα δομικά στοιχεία (πλάκες, δοκοί, υποστυλώματα) προκύπτουν από τη συνδυασμένη χρήση δομικού χάλυβα και σκυροδέματος. Η συνεργασία των δύο υλικών εξασφαλίζεται μέσω διατμητικών συνδέσμων στην διεπιφάνεια τους [5]. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική άνοδος της χρήσης των σύμμικτων κατασκευών, τόσο παγκοσμίως όσο και στον Ελλαδικό χώρο.

Παρά την συνεχώς αυξανόμενη χρήση των σύμμικτων κατασκευών, αρκετά σημεία παραμένουν ασαφή και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση τους. Το θέμα της ανάλυσης των σύμμικτων κόμβων δοκού - υποστυλώματος σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται λυμένο. Εξισώσεις πρόβλεψης δεν υπάρχουν παρά μόνο οδηγίες του Ευρωκώδικα 4 [1], που ουσιαστικά παραπέμπουν στον Ευρωκώδικα 3 [2] για κόμβους μεταλλικών κατασκευών. Για τους λόγους αυτούς, η μελέτη των σύμμικτων κόμβων και η ανάπτυξη εξισώσεων

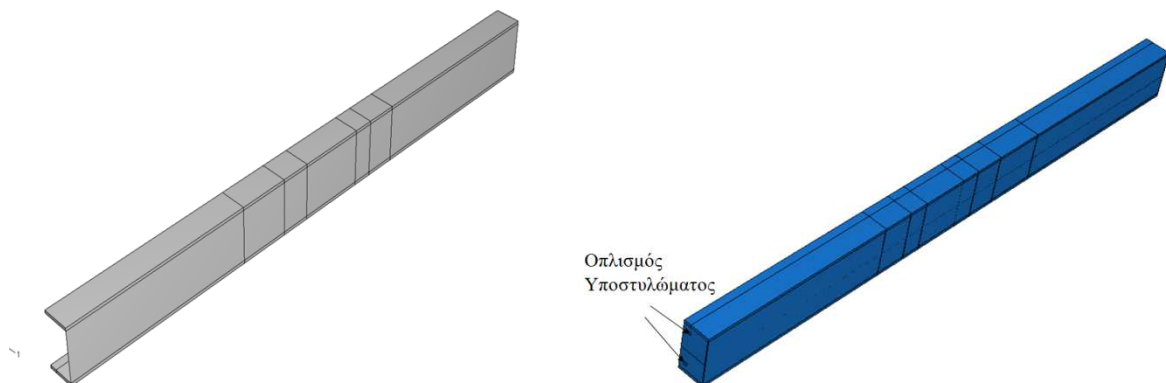
πρόβλεψης για κάθε μορφή αστοχίας τους, κρίνεται αναγκαία, καθώς η αυξημένη ακαμψία που παρουσιάζουν και η μεγάλη πλαστιμότητα τους είναι ιδανικά χαρακτηριστικά για σεισμογενείς περιοχές, όπως η Ελλάδα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέγεται να προσομοιωθεί και να μελετηθεί ένας συγκολλητός κόμβος σύμμικτης δοκού σε σύμμικτο υποστύλωμα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τον κόμβο σύμμικτης δοκού με χαλύβδινη διατομή IPE 270, σε σύμμικτο υποστύλωμα διατομής HE 220A (σχ. 1) [4]. Η σύνδεση μεταξύ των δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται με τη συγκόλληση της δοκού επί του υποστυλώματος. Η πλάκα σκυροδέματος είχε πάχος 12 cm και για την πλήρη διατμητική σύνδεσή της με τη χαλύβδινη δοκό χρησιμοποιήθηκαν οκτώ σύνδεσμοι διάτμησης τύπου block, οι οποίοι αντιστοιχούν σε οκτώ σειρές δύο κεφαλοποιημένων ήλων ύψους 10 cm και διαμέτρου 19 mm. Η πλάκα οπλίστηκε με 10 ράβδους, διαμέτρου 12 mm, από τις οποίες 4 ράβδοι περιέβαλλαν το υποστύλωμα σαν 2 ράβδοι U και οι υπόλοιπες αγκυρώθηκαν σε βραχύ πρόβολο εκτεινόμενο από την ακραία παρειά του υποστυλώματος κατά 16,5 cm. Το σύμμικτο υποστύλωμα προέκυψε από τον εγκιβωτισμό της χαλύβδινης διατομής HE 220A σε σκυρόδεμα. Ο οπλισμός του υποστυλώματος επιτεύχθηκε με 2 ράβδους διαμέτρου 12 mm (σχ. 2).



Σχ.1: Σύμμικτος κόμβος



Σχ.2: Προσομοίωση σύμμικτου υποστυλώματος (εφαρμογή συμμετρίας)

Το δοκίμιο φορτίστηκε με σημειακό φορτίο σε απόσταση 1.40 m από την παρειά του υποστυλώματος. Στο σημείο επιβολής του φορτίου στην πλάκα σκυροδέματος τοποθετήθηκε μεταλλική πλάκα πάχους 30 mm ώστε η κατανομή των τάσεων στο υλικό να είναι ομοιόμορφη, καθώς αυτό μπορούσε να οδηγήσει σε τοπική διαρροή του υλικού του στοιχείου και κατά συνέπεια σε τερματισμό της ανάλυσης πριν από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η φόρτιση δόθηκε με γραμμική σχέση συναρτήσεως του χρόνου και με έλεγχο της βύθισης που υπολογίστηκε να φτάσει τα 80 mm.

Όσον αφορά τις συνθήκες στήριξης, το υποστύλωμα θεωρήθηκε ως αμφιέριστο με άρθρωση στο κάτω άκρο, η οποία προσομοιώθηκε με δέσμευση των τριών συνιστωσών της μετακίνησης σε μία ακμή του, και κύλιση στο άνω άκρο η οποία προσομοιώθηκε με δέσμευση της παράλληλης ως προς τη δοκό συνιστώσας της μετακίνησης.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής [7]:

- Επιφανειακά στοιχεία τεσσάρων κόμβων και έξι βαθμών ελευθερίας S4R, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της χαλύβδινης δοκού, του κορμού του υποστυλώματος και των λεπίδων, όπου τοποθετήθηκαν τέτοιες.
- Στοιχεία όγκου οχτώ κόμβων και τριών βαθμών ελευθερίας C3D8R με τα οποία προσομοιώθηκαν όλα τα υπόλοιπα μέρη του μοντέλου.

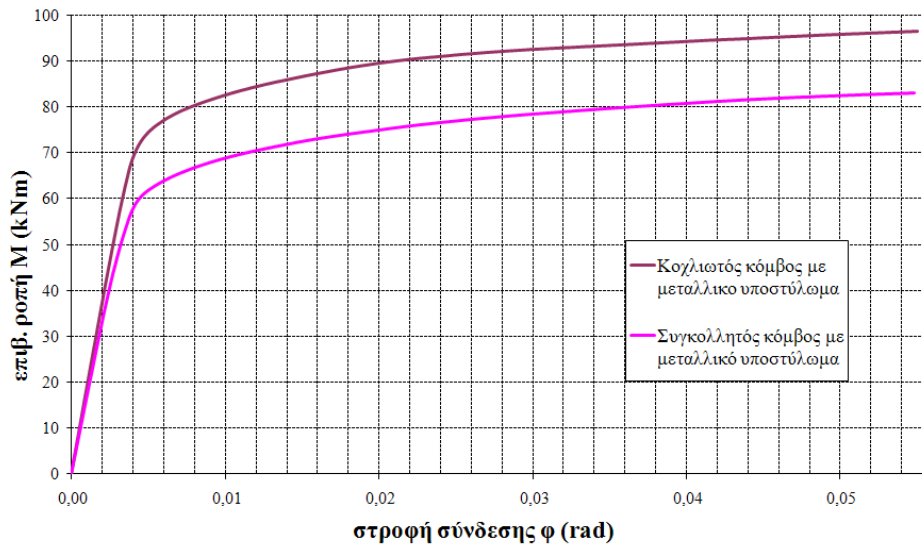
Κατά την ανάλυση του μοντέλου αξιοποιήθηκε η συμμετρία του, έτσι ώστε να μειωθεί ο χρόνος ανάλυσης. Το προαναφερθέν αναλυτικό μοντέλο βασίστηκε στην εξέλιξη προηγούμενης αναλυτικής έρευνας [3], η οποία μελέτησε τη συμπεριφορά κοχλιωτού κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα απ' όπου ελήφθησαν διαγράμματα ροπής στροφής τα οποία αποτέλεσαν και τα συγκρίσιμα μεγέθη

4.ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετά από μη – γραμμική ανάλυση βάση της μεθόδου Newton-Raphson [7], ελήφθησαν διαγράμματα ροπής-στροφής, τα οποία συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της προηγούμενης αναλυτικής έρευνας, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Στο σχήμα 3 φαίνονται τα διαγράμματα ροπής - στροφής του συγκολλητού κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα καθώς και του αντίστοιχου κοχλιωτού κόμβου. Στις περισσότερες αναλύσεις κόμβων λαμβάνεται υπόψη μόνο η σχετική στροφή της δοκού. Στο συγκεκριμένο τύπο κόμβου όμως αναπτύσσονται πολύ ισχυρές διατμητικές δυνάμεις στο υποστύλωμα, που οδηγούν σε μεγάλες στροφές, οι οποίες επιβάλλεται να ληφθούν υπόψη.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι στην ελαστική περιοχή οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Η διαρροή για τον κοχλιωτό κόμβο επέρχεται μετά τη διαρροή του συγκολλητού και η απόκλιση είναι περίπου της τάξης του 20%. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ο κοχλιωτός κόμβος αντέχει για μεγαλύτερες επιβαλλόμενες φορτίσεις. Στην πλαστική περιοχή παρατηρείται διαφορά περίπου της τάξης του 18%, γεγονός το οποίο αποδεικνύει τη μεγαλύτερη αντοχή και ακαμψία του κοχλιωτού κόμβου. Όσον αφορά τη συμπεριφορά του δοκιμίου παρατηρείται καταρχήν ότι στον ελαστικό κλάδο η θλίψη μεταβιβάζεται απευθείας στο υποστύλωμα ενώ ο εφελκυσμός παραλαμβάνεται από τους οπλισμούς και μεταβιβάζεται στο υποστύλωμα υπό τη μορφή τοπικής θλίψης από τον βραχύ πρόβολο, με αποτέλεσμα ο κορμός του υποστυλώματος να ξεπερνά το όριο διαρροής του. Η διαρροή

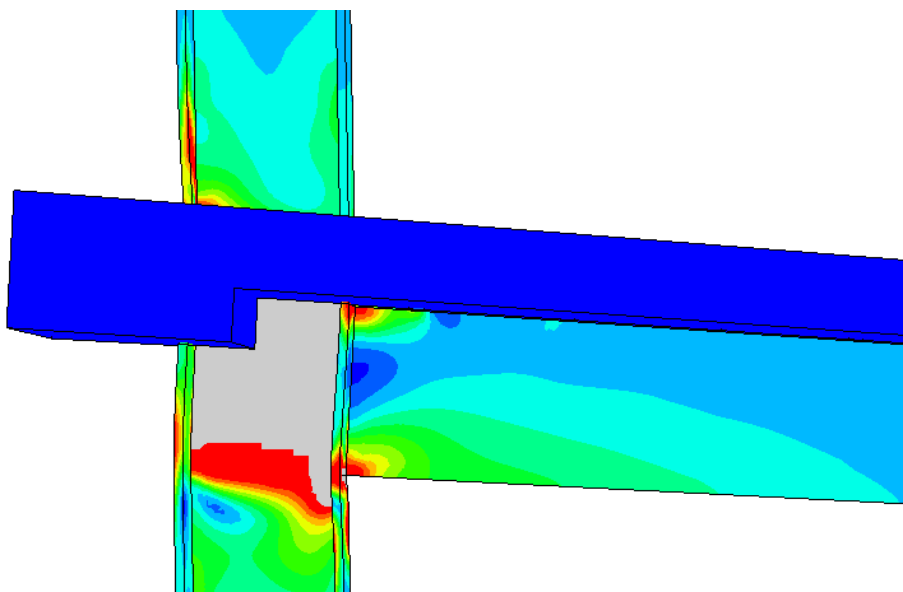
του κορμού του υποστύλωματος οδηγεί σε ανελαστική ή απόκριση, με την πλαστική άρθρωση



Σχ.3: Σύγκριση κοχλιωτού με συγκολλητού κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα

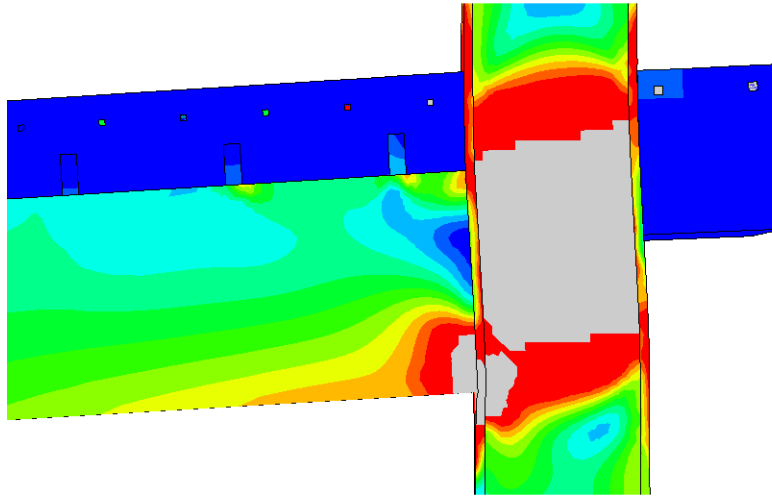
να σχηματίζεται εντός του κόμβου. Η απόκριση της δοκού παραμένει ελαστική και στις περιοχές της διατμητικής σύνδεσης οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του σκυροδέματος. Η περιοχή του βραχέος προβόλου καταπονείται έντονα, καθώς έχουμε τόσο αστοχία σε θλίψη και ρηγμάτωση της περιοχής γύρω από το υποστύλωμα, όσο και αστοχία σε εφελκυσμό του κάτω τμήματος του. Η αστοχία του κόμβου είναι αυτή που διακρίνεται στο σχήμα 4.

Καθώς η κύρια μορφή αστοχίας του προηγούμενου αναλυτικού μοντέλου (προσομοίωμα A), παρουσιάζεται καταρχάς στο υποστύλωμα, κρίθηκε αναγκαία η ενίσχυσή του με εγκιβωτισμό της μεταλλικής διατομής του υποστύλωματος σε σκυρόδεμα (προσομοίωμα B).

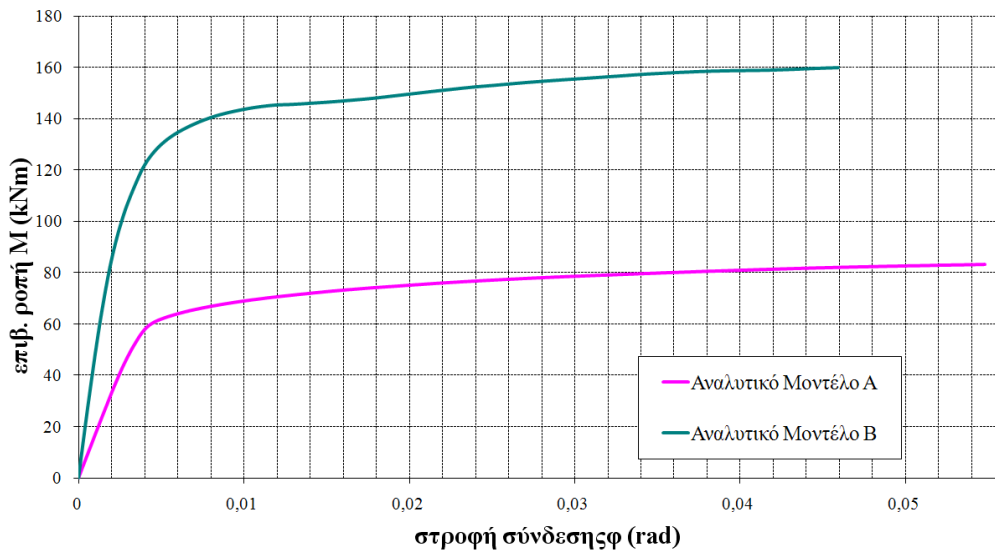


Σχ.4: Απεικόνιση αστοχίας προσομοιώματος A (μεταλλικό υποστύλωμα.)

Ο μηχανισμός αστοχίας του νέου προσομοιώματος, παρουσιάζεται στο σχήμα 5 και είναι παρόμοιος με εκείνον του προσομοιώματος A. Το υποστύλωμα αδυνατεί να παραλάβει τις διατμητικές τάσεις. Παρόλα αυτά φαίνεται από τη σύγκριση των διαγραμμάτων ροπής - στροφής μεταξύ των δυο προσομοιωμάτων (σχ. 6), ότι η ενίσχυση του κόμβου με σκυρόδεμα οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του προσομοιώματος B κατά 50%.



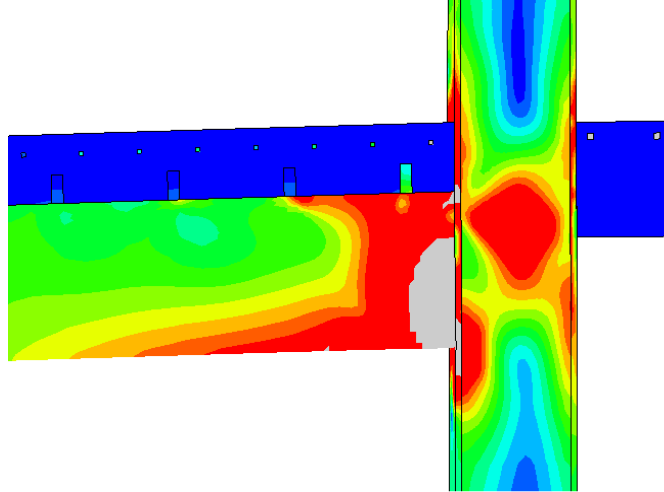
Σχ.5: Απεικόνιση αστοχίας προσομοιώματος B



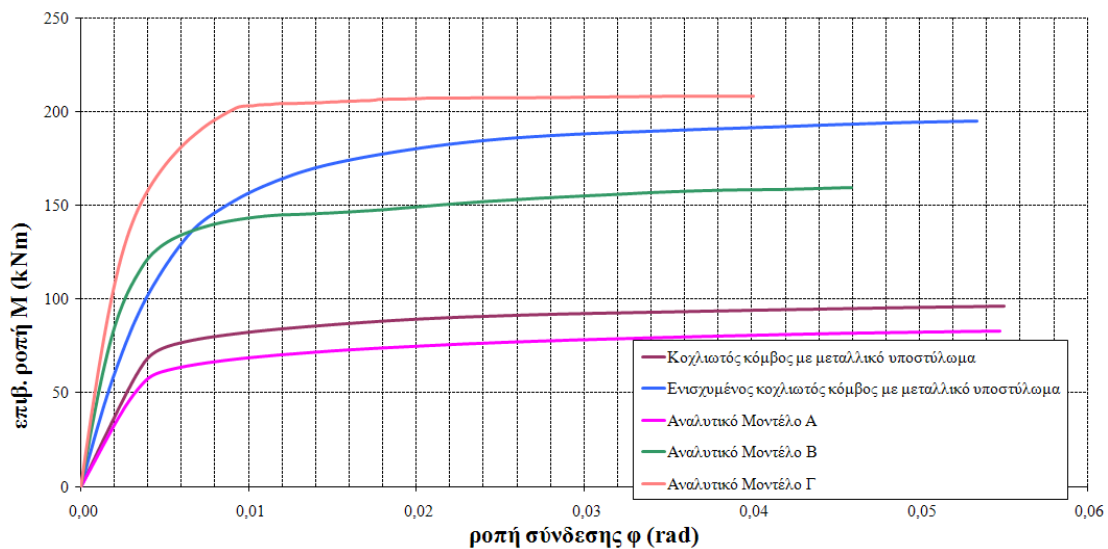
Σχ.6: Σύγκριση διαγραμμάτων μοντέλου A-μοντέλου B.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το προσομοίωμα Γ, το οποίο προέκυψε για τις ανάγκες περαιτέρω έρευνας του σύμμικτου κόμβου και μεταφορά της αστοχίας του από το υποστύλωμα στη δοκό. Έτσι χρησιμοποιήθηκε μια νέα συγκολλητή πλέον διατομή υποστυλώματος με μεγαλύτερο πάχος κορμού κατά 7 mm. Αυτή τη φορά, η μορφή αστοχίας διαφέρει από τα προηγούμενα δυο αναλυτικά προσομοιώματα. Όπως διακρίνεται (σχήμα 7), ο κορμός του

υποστυλώματος εξακολουθεί να εμφανίζει συγκέντρωση τάσεων χωρίς όμως να έχει διαρρεύσει. Το κάτω πέλμα καθώς και τμήμα του κορμού της δοκού ξεπερνούν το όριο διαρροής τους και παραμορφώνονται έντονα. Από το διάγραμμα ροπής στρώσης (σχήμα 8), φαίνεται ότι το προσομοίωμα Γ αντέχει για μεγαλύτερες φορτίσεις από όλα τα υπόλοιπα μοντέλα.



Σχ.7: Απεικόνιση αστοχίας μοντέλου Γ.



Σχ.8: Σύγκριση διαγραμμάτων μοντέλων

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης σύμμικτων συγκολλητών κόμβων με π/σ. Το μοντέλο δημιουργείται στη βάση προηγούμενης αναλυτικής έρευνας που αφορούσε κοχλιωτούς σύμμικτους κόμβους. Τα αποτελέσματα της προηγούμενης έρευνας αποτελούν τα συγκρίσιμα μεγέθη αξιοπιστίας του αναπτυχθέντος νέου μοντέλου το οποίο εφαρμόζεται για διάφορες καταστάσεις και προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Οι συγκολλητοί κόμβοι σύμμικτων δοκών σε μεταλλικά υποστυλώματα συμπεριφέρονται με τον ίδιο σχεδόν τρόπο με τους αντίστοιχους κοχλιωτούς κόμβους εντός της ελαστικής περιοχής. Είναι φανερό όμως ότι μετά τη διαρροή ο συγκολλητός κόμβος παρουσιάζει μειωμένη αντοχή έναντι εκείνης του κοχλιωτού.
- Η χρήση σύμμικτου υποστυλώματος με πλήρη εγκιβωτισμό της μεταλλικής διατομής του, αυξάνει την αντοχή του κόμβου σε σημαντικό βαθμό (περίπου κατά 50%) έναντι του αμιγώς χαλύβδινου. Παρ' όλα αυτά η αστοχία συνεχίζει να εμφανίζεται στον κορμό του υποστυλώματος, πράγμα ανεπιθύμητο για ικανοτικό σχεδιασμό.
- Στην περίπτωση κατά την οποία η σύνδεση της δοκού γίνεται σε αμιγώς χαλύβδινο υποστυλώμα, η ενίσχυση του κόμβου με λεπίδες (stiffeners), προσδίδει μεγαλύτερη ακαμψία στον κόμβο [3,6], μεταφέροντας την αστοχία από την περιοχή του κορμού του υποστυλώματος στη δοκό, ικανοποιώντας έτσι και τον ικανοτικό σχεδιασμό. Κατά συνέπεια το σκυρόδεμα εγκιβωτισμού στα σύμμικτα υποστυλώματα, αυξάνει μεν την αντοχή του κόμβου, αλλά δεν προσφέρει την απαιτούμενη ενίσχυση στον κορμό του υποστυλώματος προκειμένου να μην εμφανιστεί καταρχήν αστοχία σε αυτό. Συμπεραίνεται επομένως ότι η χρήση λεπίδων ακαμψίας είναι απαραίτητη προκειμένου ο κόμβος να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ικανοτικού σχεδιασμού.
- Αύξηση του πάχους του κορμού, του υποστυλώματος έχει ως συνέπεια τη μεταφορά της αστοχίας από το υποστυλώμα (σύμμικτο ή μεταλλικό) στη δοκό και επομένως εκπλήρωση των απαιτήσεων του ικανοτικού σχεδιασμού. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η χρήση λεπίδων ενίσχυσης του κορμού του υποστυλώματος έχει ως αποτέλεσμα αφ' ενός μεν την καταρχήν εμφάνιση αστοχίας στη δοκό και αφ' ετέρου την επαύξηση σε σημαντικό βαθμό της αντοχής του κόμβου.
- Για την ενίσχυση ενός κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστυλώμα, εφόσον τα φαινόμενα είναι ανάλογα με αυτά ενός μεταλλικού κόμβου, είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν οι αλγόριθμοι του EC 3. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του αναλυθέντος μοντέλου, επιβεβαιώνει αυτό το συμπέρασμα. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνουν και άλλες αναλύσεις, συνοδευμένες από πειραματικά μοντέλα, ώστε να σχεδιαστούν εξισώσεις πρόβλεψης, που θα καλύπτουν κάθε περίπτωση αστοχίας.

6. ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

- [1] EN 1994-1-1:2004. “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, CEN, 2004.
- [2] EN 1993-1-8:2005. “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints”, CEN, 2005.
- [3] Ευθυμίου Ι.Ζ., Παχούμης Δ.Θ., Κάλφας Χ.Ν., Γαλούσης Ε.Γ. και Μαρινοπούλου Α.Α. “Μελέτη συμπεριφοράς κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστυλώμα”, *Πρακτικά του 6ου Εθνικού Συνεδρίου Μεταλλικών Κατασκευών*, Ιωάννινα, Ελλάδα, Τόμος Ι, 2008, σελ. 133-141.
- [4] Χ. Ν. Κάλφας, “Κατασκευές από Χάλυβα”, *Εκδόσεις Icon*, Ξάνθη, 2010.

- [5] Βάγιας Κ. Ιωάννης, “Σύμμικτες κατασκευές”, *Κλειδάριθμος*, 2η έκδοση, 2001.
- [6] The Steel Construction Institute. “Moment Connections in Composite Construction: Interim guidance for end-plate connections”, *Technical Report SCI*, Publication 143.
- [7] Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., ABAQUS PRE. User’s manual., 1997.

FEM ANALYSIS OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE BEAM TO COMPOSITE OR BARE STEEL COLUMN JOINT

Kalliopi D. Stefanaki^a, Christos N. Kalfas^b, Dimitrios T. Pachoumis^c, Ioannis Z. Efthimiou^a

^a Phd. Cand., MSc Civil Engineer

^b Assistant Professor DUTH

^c Dr, MSc Civil Engineer

Steel Structures Laboratory DUTH

Xanthi, Greece

e-mail : mslgroup@civil.duth.gr

ABSTRACT

This paper focuses on the general perceptions in the field of steel-concrete composite connections, especially the composite beam to bare steel or composite column joints. The investigation of the behavior of composite beam to composite column welded joints, fir or welded cross sections is achieved, using analytical finite element models. Subject of paper is also the investigation of the behaviour of welded and bolted composite beam joints to bare steel column. The behavior of such analytical simulations is compared with the corresponding model constituted by a steel beam to steel column joint to determine the applicability of the regulation, in the case of the given conjunction.