

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΜΒΟΥ ΣΥΜΜΙΚΤΗΣ ΔΟΚΟΥ  
ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑ**

**Ιωάννης Ζ. Ευθυμίου<sup>a</sup>, Δημήτριος Θ. Παχούμης<sup>b</sup>, Χρίστος Ν. Κάλφας<sup>c</sup>,  
Ευάγγελος Γ. Γαλούσης<sup>d</sup>, Άννα Α. Μαρινοπούλου<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> MSc Πολιτικός Μηχανικός

<sup>b</sup> Υποψ. Διδ., MSc Πολιτικός Μηχανικός

<sup>c</sup> Επικ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

<sup>d</sup> Καθηγήτριας Δ.Π.Θ.

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών Δ.Π.Θ

Ξάνθη, Ελλάδα

e-mail : [mslgroup@civil.duth.gr](mailto:mslgroup@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 μεταλλικό υποστύλωμα. Λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία μια δεδομένη πειραματική διάταξη και με βάση αυτή δημιουργείται ένα αναλυτικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου, ελέγχεται με σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα πειραματικά δεδομένα. Περαιτέρω, προτείνονται ενισχύσεις ώστε να εξαλειφθούν ανεπιθύμητες μορφές αστοχίας στην περιοχή του κόμβου. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχο μοντέλο μεταλλικής δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα ώστε να διαπιστωθεί η δυνατότητα εφαρμογής του κανονισμού, στην περίπτωση της θεωρούμενης σύνδεσης.

**2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το θέμα της ανάλυσης των κόμβων δοκού – υποστυλώματος σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται λυμένο. Το πλήθος των δυνάμεων που συγκεντρώνονται στο σημείο ενός κόμβου, αλλά και οι θεωρητικά άπειρες φορτιστικές περιπτώσεις, καθιστούν συνεχώς ανοικτό το κεφάλαιο της έρευνας για την ανάλυση του εκάστοτε τύπου κόμβου. Ωστόσο, στην περίπτωση των μεταλλικών κόμβων, ή των κόμβων από ωπλισμένο σκυρόδεμα, υπάρχουν κανονισμοί, που εισάγουν εξισώσεις πρόβλεψης για την ανάλυση και το σχεδιασμό τους. Αντίθετα, στην περίπτωση των σύμμικτων κατασκευών, υπάρχουν μόνο οδηγίες του Ευρωκώδικα 4, που ουσιαστικά παραπέμπουν στον Ευρωκώδικα 3 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.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 4 [1] κατά το σχεδιασμό ενός σύμμικτου κόμβου, μπορεί να ακολουθηθεί η διαδικασία που αναφέρεται στο Τεύχος 1-8 του EC 3 [2], με την προϋπόθεση ότι τα μεταλλικά μέρη της σύνδεσης είναι σχεδιασμένα σύμφωνα με τον EC 3 [3]. Σε κάθε περίπτωση ο σχεδιασμός του σύμμικτου κόμβου πρέπει να επιβεβαιώνεται από πειράματα, ή από αναλυτικές λύσεις που επαληθεύονται από πειραματικές διαδικασίες. Επιπλέον κατά το σχεδιασμό του κόμβου, μια σειρά ράβδων οπλισμού σε εφελκυσμό, μπορεί να θεωρείται ισοδύναμη με μια αντίστοιχη σειρά εφελκυόμενων κοχλιών με μηχανικές παραμέτρους ίδιες με εκείνες των ράβδων. Οι σύμμικτοι κόμβοι θα πρέπει να έχουν διατμητική αντοχή που υπολογίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-1-8 [2], οι οποίες καθορίζουν ότι οι διατμητικές δυνάμεις παραλαμβάνονται από τους κοχλίες. Όσον αφορά τη στρωφική ακαμψία, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση του σκυροδέματος και η διαρροή των ράβδων οπλισμού και ο προσδιορισμός της θα πρέπει να υποστηρίζεται από πειραματικά δεδομένα.. Οι διαμήκεις ράβδοι της πλάκας θεωρούνται ικανές να παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις που προκύπτουν εφόσον βρίσκονται εντός του συνεργαζόμενου πλάτους. Επιπροσθέτως, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πλάκα, μεταφέρονται στο υποστύλωμα βάση ενός μοντέλου δικτυωμάτων. Η ροπή αντίστασης της σύμμικτης σύνδεσης μπορεί να υπολογιστεί με πλαστική ανάλυση εφόσον πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- οι θλιπτικές τάσεις μεταφέρονται επιτυχώς στο υποστύλωμα
- το ποσοστό του οπλισμού είναι πάνω από το ελάχιστο επιτρεπόμενο, ώστε να είναι ελεγχόμενη η ρηγμάτωση του σκυροδέματος
- η διατμητική σύνδεση μεταξύ πλάκας σκυροδέματος και χαλύβδινης δοκού είναι πλήρης
- ο οπλισμός αγκυρώνεται επαρκώς
- οι κοχλίες είναι υπολογισμένοι ώστε να μην έχουμε διατμητική αστοχία
- η μεταλλική δοκός και το υποστύλωμα είναι κλάσεως 1, ή 2

### 3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την προσομοίωση του σύμμικτου κόμβου επιλέγεται μια δεδομένη πειραματική διάταξη, προερχόμενη από τη βιβλιογραφία [4], η οποία μοντελοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία. Πρόκειται για ένα κόμβο σύμμικτης δοκού με χαλύβδινη διατομή IPE 270 σε μεταλλικό υποστύλωμα διατομής HE 220A. Η σύνδεση επιτυγχάνεται με ακραία λεπίδα εκτεινόμενη στο κάτω μέρος της δοκού, η οποία κοχλιώνεται στο πέλμα του υποστυλώματος με τρεις σειρές κοχλιών M20,8.8, εκ των οποίων η μια σειρά βρίσκεται κάτωθεν του κάτω πέλματος της δοκού. Η πλάκα σκυροδέματος έχει πάχος 12 cm και για την πλήρη διατμητική σύνδεση της με τη χαλύβδινη δοκό χρησιμοποιούνται 8 σύνδεσμοι διάτμησης τύπου block, οι οποίοι αντιστοιχούν σε 8 σειρές 2 κεφαλοποιημένων ήλων, ύψους 10 cm και διαμέτρου 19 mm. Ο οπλισμός της πλάκας οπλίζεται γίνεται με 10 Ø12, από τις οποίες 4 ράβδοι περιβάλλουν το υποστύλωμα σαν 2 ράβδοι U, και οι υπόλοιπες αγκυρώνονται σε βραχύ πρόβολο εκτεινόμενο από την ακραία παρειά του υποστυλώματος κατά 16.5 cm. Το δοκίμιο φορτίζεται με σημειακό φορτίο σε απόσταση 1.40 m από την παρειά του υποστυλώματος. Από τις πειραματικές δοκιμές ελήφθησαν διαγράμματα ροπής-στρωφής, τα οποία αποτελούν και τα συγκρίσιμα μεγέθη.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που επιλέχθηκαν για τη μοντελοποίηση είναι τα εξής [5]:

- Επιφανειακά στοιχεία 4 κόμβων και 6 βαθμών ελευθερίας ( $u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ ), S4R, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του συνόλου της χαλύβδινης

δοκού, του κορμού του υποστυλώματος και των λεπίδων όπου τοποθετούνται τέτοιες.

- Στοιχεία όγκου (χωρικά στοιχεία) 8 κόμβων και 3 βαθμών ελευθερίας ( $u_x, u_y, u_z$ ), C3D8R, με τα οποία προσομοιώνονται όλα τα υπόλοιπα μέρη του μοντέλου.

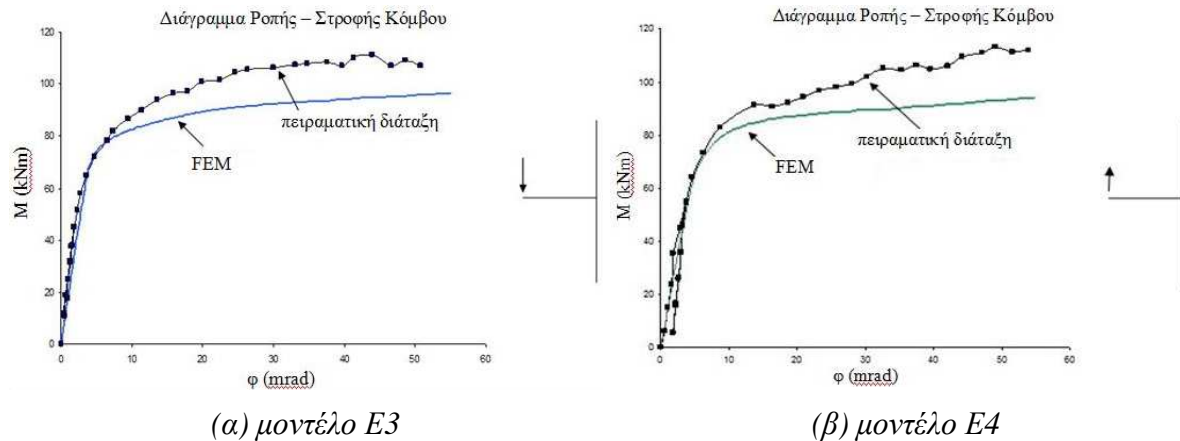
Στο προς εξέταση μοντέλο η φόρτιση είναι μονοτονική, γίνεται με υδραυλικό έμβολο και το ιστορικό φόρτισης είναι γραμμικό ως προς το χρόνο. Στο υπολογιστικό μοντέλο το σημειακό φορτίο ασκείται στην ίδια ακριβώς θέση με εκείνη του πειράματος. Στο σημείο επιβολής του στην πλάκα σκυροδέματος, τοποθετείται μεταλλική πλάκα πάχους 30 mm ώστε η κατανομή των τάσεων στο υλικό να είναι ομοιόμορφη, καθώς τούτο μπορούσε να οδηγήσει σε τοπική διαρροή του υλικού του στοιχείου στο σημείο της φόρτισης, και κατά συνέπεια σε τερματισμό της ανάλυσης πριν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η φόρτιση στο υπολογιστικό μοντέλο δίνεται με γραμμική σχέση συναρτήσεως του χρόνου και με έλεγχο της βύθισης του σημείου, που υπολογίζεται να φτάσει στα 80 mm.

Όσον αφορά τις συνθήκες στήριξης, στο πειραματικό μοντέλο, το υποστύλωμα θεωρείται αρθρωτό στο κάτω άκρο, και δεσμευμένο ως προς τις πλευρικές μετακινήσεις στο άνω και ουσιαστικά πρόκειται για ένα αμφιέριστο στοιχείο. Η άρθρωση του κάτω άκρου προσομοιώνεται με δέσμευση των τριών συνιστωσών της μετακίνησης σε μια ακμή, ώστε να διατηρείται η ικανότητα στροφής του μοντέλου, ενώ η κύλιση του άνω άκρου προσομοιώνεται με δέσμευση της παράλληλης ως προς τη δοκό συνιστώσας της μετακίνησης.

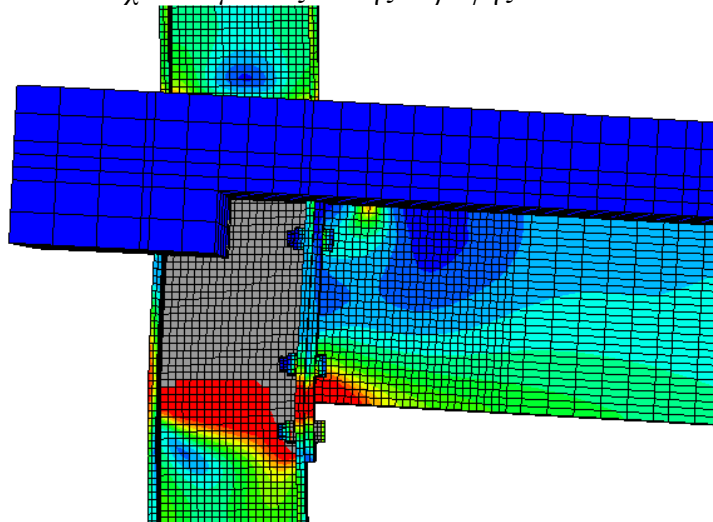
#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μετά από μη – γραμμική ανάλυση βάση της μεθόδου Newton-Raphson [5], λαμβάνονται διαγράμματα ροπής-στροφής, τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της πειραματικής ανάλυσης, ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Τόσο η ανάλυση όσο και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του αναλυτικού μοντέλου και του πειράματος γίνεται ξεχωριστά για δύο δοκίμια, το δοκίμιο E3 και το δοκίμιο E4, στα οποία η μόνη διαφορά είναι το πρόσημο της φόρτισης (θετικό στο E3, με θετική να θεωρείται η φορά της βαρύτητας, και αρνητικό στο E4).

Στο σχήμα 1 φαίνονται τα διαγράμματα ροπής - στροφής του κόμβου τόσο της πειραματικής διάταξης όσο και της ανάλυσης με FEM. Η στροφή του κόμβου προκύπτει από το άθροισμα της σχετικής στροφής της δοκού ως προς το υποστύλωμα, με τη στροφή της περιοχής του κορμού του υποστυλώματος. Στις περισσότερες αναλύσεις κόμβων λαμβάνεται



Σχ.1- Καμπύλες Ροπής-Στροφής



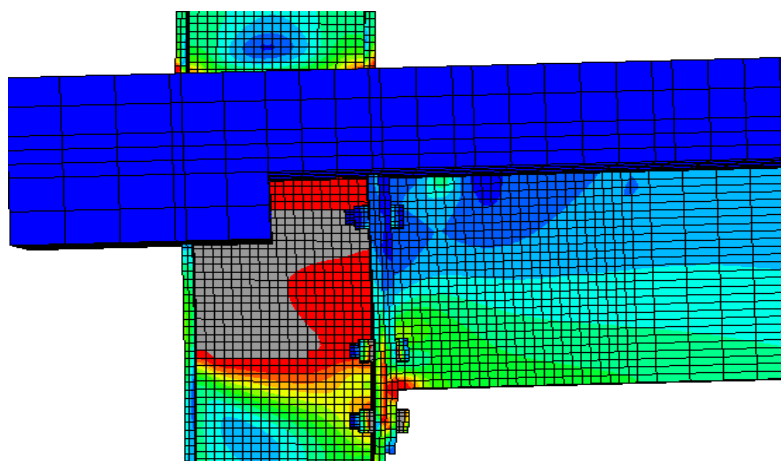
Φωτ. 1-Απεικόνιση αστοχίας μοντέλου E3 με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

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.

Για τη συμπεριφορά του δοκιμίου παρατηρείται κατ' αρχήν ότι στον ελαστικό κλάδο σχηματίζεται μοχλοβραχίονας με εφελκόμενο στοιχείο τους διαμήκεις οπλισμούς, και θλιβόμενο στοιχείο το τμήμα της δοκού κάτω από τον ουδέτερο άξονα, δηλαδή το κάτω πέλμα, και μια περιοχή του κορμού. Η θλίψη μεταβιβάζεται απευθείας στο υποστύλωμα, ενώ ο εφελκυσμός παραλαμβάνεται από το βραχύ πρόβολο αγκύρωσης των οπλισμών, ο οποίος στη συνέχεια το μεταβιβάζει στο υποστύλωμα ως τοπική θλίψη. Ουσιαστικά σχηματίζεται ένα διατμητικό πεδίο παρόμοιο με εκείνο ενός κοντού προβόλου. Στη συνολική στροφή, αλλά και στη στροφή του κορμού του υποστυλώματος, η σύγκλιση των πειραματικών και αναλυτικών καμπύλων είναι ικανοποιητική. Στη συνέχεια, ο κορμός του υποστυλώματος διαρρέει, και η απόκριση είναι πλέον ανελαστική, με την πλαστική άρθρωση 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. Επίσης, λόγω του μεγάλου ποσοστού οπλισμών, ο άνω κοχλίας αναλαμβάνει ελάχιστες εφελκυστικές δυνάμεις, συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας κοχλιών ή λεπίδας λόγω εφελκυσμού. Εκτός του κορμού του υποστυλώματος, καταπονείται έντονα και η περιοχή του βραχέος προβόλου, καθώς έχουμε τόσο αστοχία σε

θλίψη και ρηγματώση της περιοχής γύρω από το υποστύλωμα, αλλά και αστοχία σε εφελκυσμό του κάτω τμήματος του. Η συμπεριφορά του δοκιμίου E3 απεικονίζεται στη Φωτ. 1

Η πειραματική διάταξη του μοντέλου E4 όσον αφορά στη γεωμετρία και την κατασκευή της είναι πανομοιότυπη με αυτή του μοντέλου E3, με μόνη αλλαγή τη διεύθυνση της φόρτισης που είναι αντίστροφη αυτής του μοντέλου E3. Στην περίπτωση αυτή, η πλάκα σκυροδέματος βρίσκεται στη θλιβόμενη ζώνη και κατά συνέπεια, η χαλύβδινη δοκός και τα μέσα σύνδεσης της στο υποστύλωμα στην εφελκυσόμενη. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μορφές αστοχίας των μεταλλικών κόμβων ροπής [2] και, αναλυτικότερα, η λειτουργία των ισοδύναμων βραχέων ταυ όσον αφορά στην αντοχή της λεπίδας και του πέλματος του υποστυλώματος υπό εφελκυσμό. Όσον αφορά τη συμπεριφορά του δοκιμίου, στον ελαστικό κλάδο, ο μοχλοβραχίονας που σχηματίζεται αποτελείται από την θλιβόμενη πλάκα σκυροδέματος, που δρα ως διανεμημένο φορτίο στο αντίστοιχο ύψος του υποστυλώματος, και από την εφελκυστική δύναμη που μεταβιβάζεται από τις δύο κάτω σειρές κοχλίων, η οποία



Φωτ. 2-Απεικόνιση αστοχίας μοντέλου E4 με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων

θεωρείται ότι δρα στο κέντρο του μορφώματος. Οι δύο δυνάμεις αυτές δημιουργούν στο ύψος του μοχλοβραχίονα διατμητική δύναμη που παραλαμβάνεται από τον κορμό του υποστυλώματος. Στη συνέχεια, ο κορμός του υποστυλώματος διαρρέει και η απόκριση του κόμβου είναι πλαστική. Η στροφή του υποστυλώματος είναι πλέον έντονη και επηρεάζει σημαντικά τη συνολική λειτουργία του κόμβου, ενώ το τμήμα της πλάκας σκυροδέματος που μεταβιβάζει τις θλιπτικές δυνάμεις στο υποστύλωμα υπερβαίνει το όριο διαρροής και ρηγματώνεται μέχρι το σημείο της τοπικής θραύσης. Παράλληλα, η λεπίδα αστοχεί στην περιοχή όπου εφελκύεται, και παρατηρείται μικρή αποκόλληση της από το υποστύλωμα.

Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων ροπής-στροφής του σχήματος 1, προκύπτει ότι στον ελαστικό κλάδο υπάρχει ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με τα πειραματικά δεδομένα. Καθώς όμως ο κόμβος εισέρχεται στην πλαστική περιοχή, παρατηρείται μια απόκλιση της τάξεως του 10% για το δοκίμιο E3 και του 12% για το δοκίμιο E4. Οι αποκλίσεις αυτές είναι εντός των γενικά αποδεκτών ορίων του 10-15%, που δικαιολογούνται από το ότι η ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι προσεγγιστική μέθοδος, αλλά και από το ότι οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών συχνά ξεφεύγουν από τις ονομαστικές τους τιμές.

## 5. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΜΒΩΝ

Με δεδομένη την αξιοπιστία του αναπτυχθέντος αναλυτικού μοντέλου, στο μοντέλο αυτό εφαρμόζονται διαδοχικά διαφόρων τύπων ενισχύσεις του κόμβου, προκειμένου να επαληθευθεί η υπόδειξη του EC 4 [1], σύμφωνα με την οποία για τις ενισχύσεις σύμμικτων κόμβων μπορούν να εφαρμόζονται οι σχετικές διατάξεις του EC 3 [2]. Οι ενισχύσεις που εφαρμόζονται στα υποστυλώματα των δύο μοντέλων E3 και E4 περιγράφονται στους πίνακες 1 και 2, αντίστοιχα, όπου δίνεται επίσης η ποσοστιαία αύξηση της αντοχής του κόμβου και επισημαίνεται και το κρίσιμότερο φαινόμενο αστοχίας του. Στον πίνακα 3, αναγράφονται συγκεντρωτικά οι αυξήσεις στις αντοχές των κόμβων και η σύγκριση με αντίστοιχο αμιγώς μεταλλικό κόμβο σχεδιασμένο σύμφωνα με τις οδηγίες του EC 3, στον οποίο εφαρμόζονται ίδια φορτία και γίνονται αντίστοιχες ενισχύσεις. Από τη σύγκριση των τιμών του πίνακα 3, διαπιστώνεται ότι οι ποσοστιαίες αυξήσεις των αντοχών του ενισχυμένου κόμβου σε σχέση με εκείνες του μη ενισχυμένου είναι όμοιες μεταξύ του σύμμικτου κόμβου, και του αμιγώς μεταλλικού.

Κωδικός Μοντέλου	Είδος ενίσχυσης	Αύξηση της αντοχής	Κρίσιμο Φαινόμενο
E03-a	Λεπίδες κορμού	32%	Μεγάλη παραμόρφωση πελμάτων υποστυλώματος, διαρροή κάτω πέλματος δοκού
E03-b	Λεπίδες κορμού και εγκάρσιες ενισχύσεις	57%	Διαρροή κάτω πέλματος δοκού, αποκόλληση πλάκας σκυροδέματος από υποστυλώμα
E03-c	Λεπίδες κορμού, εγκάρσιες ενισχύσεις, και ζεύξη της πλάκας με το υποστυλώμα με συγκολλητές ράβδους οπλισμού	85%	Διαρροή κάτω πέλματος δοκού

*Πίν. 1 - Ενισχύσεις μοντέλου E3*

Κωδικός Μοντέλου	Είδος ενίσχυσης	Αύξηση της αντοχής	Κρίσιμο Φαινόμενο
E04-a	Λεπίδες κορμού	36%	Αστοχία λεπίδας κοχλίωσης και πέλματος υποστυλώματος υπό εφελκυσμό
E04-b	Λεπίδες κορμού και εγκάρσιες ενισχύσεις	58%	Αστοχία λεπίδας κοχλίωσης υπό εφελκυσμό
E04-c	Λεπίδες κορμού, εγκάρσιες ενισχύσεις, και αύξηση πάχους λεπίδας κοχλίωσης	130%	Αστοχία πέλματος υποστυλώματος υπό εφελκυσμό

<b>E04-d</b>	Λεπίδες κορμού, εγκάρσιες ενισχύσεις, αύξηση πάχους λεπίδας κοχλίωσης, και ενίσχυση πελμάτων υποστυλώματος	180%	Αστοχία εφελκόμενου τμήματος δοκού, θραύση πλάκας σκυροδέματος
--------------	--	------	--

Πίν. 2 - Ενισχύσεις μοντέλου E4

Σύμμικτος κόμβος		Μεταλλικός κόμβος	
Κωδικός	Αύξηση αντοχής	Κωδικός	Αύξηση αντοχής
<b>E03-a</b>	<b>32%</b>	Eb-a	32%
<b>E04-a</b>	<b>36%</b>		
<b>E03-b</b>	<b>57%</b>	Eb-b	55%
<b>E04-b</b>	<b>58%</b>		

Πίν. 3 – Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης σύμμικτων κόμβων (σύνδεσης σύμμικτης δοκού με χαλύβδινο υποστύλωμα) με πεπερασμένα στοιχεία. Το μοντέλο δημιουργείται στη βάση πειραματικής διάταξης ληφθείσης από τη βιβλιογραφία [4], οι μετρήσεις της οποίας χρησιμοποιούνται προκειμένου να καταδειχθεί η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου. Με δεδομένη την αξιοπιστία του, το μοντέλο εφαρμόζεται για διάφορες καταστάσεις του σύμμικτου κόμβου και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του, τα περισσότερα από τα οποία επαληθεύονται από τη βιβλιογραφία. Τα κυριότερα από τα συμπεράσματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Η πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, δεδομένου οπλισμού και διατμητικής σύνδεσης της με τη χαλύβδινη δοκό, έχει μεγάλη επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες του κόμβου. Όσο πιο εύκαμπτη η σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη η επιρροή. Μπορούν να σχεδιαστούν κόμβοι με μεγάλο βαθμό ακαμψίας χρησιμοποιώντας σχετικά απλές αρθρωτές μεταλλικές συνδέσεις [6].
- Η ακαμψία αυξάνει καθώς αυξάνεται ο οπλισμός. Κατά την αύξηση αυτή όμως πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή διατμητικής αστοχίας του υποστυλώματος, με τον εγκιβωτισμό το σε σκυρόδεμα ή με την χρησιμοποίηση εγκαρσίων ενισχύσεων μεταξύ των πελμάτων του υποστυλώματος [6,7].
- Η στροφική ικανότητα, παρόλο που είναι μικρότερη από τους αντίστοιχους μεταλλικούς κόμβους, θεωρείται επαρκής (μεγαλύτερη από 25 mrad) για την ανακατανομή των ροπών, και την πλαστική ανάλυση της κατασκευής [6].
- Το είδος της διατμητικής σύνδεσης της σύμμικτης δοκού (πλήρης ή μερική), είναι καθοριστικός παράγοντας για τη συμπεριφορά του κόμβου. Μια μερική διατμητική σύνδεση μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη αστοχία των συνδέσμων, πριν ο κόμβος αναλάβει πλήρως τις επιθυμητές δυνάμεις [6].
- Η αγκύρωση του οπλισμού σε εξωτερικούς κόμβους είναι σημαντική, καθώς αναφέρεται ότι οι ενώσεις αυτές πρέπει να θεωρούνται αρθρωτές, εκτός αν παρέχεται επαρκής αγκύρωση των ράβδων. Επαρκής αγκύρωση υπάρχει όταν τουλάχιστον το 40% των ράβδων περιβάλλει το υποστύλωμα [7].

- Στην περίπτωση σύμμικτων πλακών, ο προσανατολισμός των πτυχώσεων του χαλυβδόφυλλου επηρεάζει την ακαμψία του κόμβου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που οι πτυχώσεις είναι παράλληλες στη δοκό η ακαμψία είναι αρκετά αυξημένη, λόγω του μεγαλύτερου εμβαδού του σκυροδέματος, αλλά και τη συμβολή της ακαμψίας του χαλυβδόφυλλου[5].
- Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, οι κόμβοι σχεδιάζονται υπό μονοτονική φόρτιση, όπου ο κόμβος καταπονείται με αρνητικές ροπές. Αν ένας κόμβος θεωρηθεί ονομαστικά αρθρωτός, και δεν προβλεφθεί παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από τους οπλισμούς ή αγκύρωση των οπλισμών (για ακραίο κόμβο), ο κόμβος λειτουργεί ως ονομαστικά αρθρωτός και δεν αναλαμβάνει ροπές, ή παραλαμβάνει μικρό μέγεθος, που δεν είναι ικανό να αλλάξει τα δεδομένα της ανάλυσης. Όταν όμως αντιστραφεί η φόρτιση και η ροπή στον κόμβο γίνει θετική ροπή (όπως για παράδειγμα σε περίπτωση σεισμού), ο εφελκυσμός παραλαμβάνεται από τους κοχλίες και η θλίψη μεταβιβάζεται από το σκυρόδεμα στο πέλμα του υποστυλώματος. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί μια ημιάκαμπτη σύνδεση η οποία δεν είχε ληφθεί υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό και η οποία μεταβιβάζει στο υποστύλωμα μη αναμενόμενη ροπή αλλά και διάτμηση στον κορμό του οδηγώντας σε αστοχία του κορμού του υποστυλώματος. Προτείνεται λοιπόν, να μελετηθεί η μη-ομοιογενής συμπεριφορά ενός σύμμικτου κόμβου, ώστε να λαμβάνονται υπόψη αυτά τα φαινόμενα. Η ανομοιογένεια αυτή εξαλείφεται όταν ο κόμβος μελετηθεί ως ημι-άκαμπτος ή άκαμπτος και εξασφαλισθεί η παραλαβή τόσο των θετικών όσο και των αρνητικών ροπών.
- Η ρηγμάτωση της πλάκας σκυροδέματος στις περιοχές επαφής με το υποστύλωμα, μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση οπλισμών. Ωστόσο, είναι προτιμότερο να μην είναι ιδιαίτερα ισχυρό τοπικά το σκυρόδεμα, ώστε να ρηγματώνεται πριν δώσει μη επιθυμητά συγκεντρωμένα φορτία στο υποστύλωμα.
- Για την ενίσχυση ενός κόμβου σύμμικτης δοκού σε μεταλλικό υποστύλωμα, εφόσον τα φαινόμενα είναι ανάλογα με αυτά ενός μεταλλικού κόμβου, μπορούν να εφαρμοσθούν οι αλγόριθμοι του EC 3. Τούτο προκύπτει από την ανάλυση του προτεινομένου μοντέλου, αλλά, σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να γίνουν και περαιτέρω αναλύσεις, συνοδευμένες από πειραματικές επιβεβαιώσεις, ώστε να εξαχθούν εξισώσεις πρόβλεψης, που θα καλύπτουν κάθε περίπτωση αστοχίας.
- Γενικότερα, είναι προτιμότερο να σχεδιάζονται εξολοκλήρου σύμμικτοι κόμβοι, παρά κόμβοι σύμμικτων δοκών σε μεταλλικά υποστυλώματα. Σε ένα σύμμικτο κόμβο, η μεγάλη ακαμψία του σύμμικτου υποστυλώματος, το αποτρέπει από το να αστοχήσει πρώτο. Επίσης, το σκυρόδεμα προσφέρει αντιστήριξη στον κορμό και στα πέλματα, χωρίς τη χρήση λοιπών ενισχύσεων, που χρειάζεται ένα μεταλλικό υποστύλωμα για να ικανοποιείται ο ικανοτικός σχεδιασμός.

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [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] EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.1: General rules and rules for buildings, CEN 2005.
- [4] L. Simoes da Silva, Rui D. Simoes, Paulo J.S. Cruz. Experimental behavior of end-plate beam-to-column composite joints under monotonical loading. *Engineering Structures*, vol. 23, 2001, pp 1383-1409.
- [5] Hibbit, Karlsson & Sorensen. ABAQUS/Standard User's Manual
- [6] The Steel Construction Institute. Moment Connections in Composite Construction: Interim guidance for end-plate connections. *Technical Report SCI Publication 143*
- [7] Elnashai A.S, Broderick BM, Dowling PJ. Earthquake resistant composite steel/concrete structures. *Structural Engineer*, 1975, pp 121-132.

## BEHAVIOR OF COMPOSITE STEEL-CONCRETE BEAM TO STEEL COLUMN JOINT

Ioannis Z. Efthimiou<sup>a</sup>, Dimitrios Th. Pachoumis, Christos N. Kalfas<sup>c</sup>,  
Evangelos G. Galoussis<sup>d</sup>, Anna A. Marinopoulou<sup>b</sup>

<sup>a</sup> MSc Civil Engineer

<sup>b</sup> Phd. Cand., MSc Civil Engineer

<sup>c</sup> Assistant. Professor DUTH

<sup>d</sup> Professor DUTH

Steel Structures Laboratory DUTH

Xanthi, Greece

e-mail: [msslgroup@civil.duth.gr](mailto:msslgroup@civil.duth.gr)

## SUMMARY

This paper focuses on the general perceptions in the field of steel-concrete composite connections, especially the composite beam-to-bare steel column joints. A FEM model is designed, based on the results of an already published experimental analysis. The general purpose is to create an accurate model that describes the exact behavior of the joint. In addition, several improvements are proposed, such as adding web plates and stiffeners in the column, in order to increase the initial stiffness and the rotational capacity of the joint, and also to eliminate local failures. The results are compared to model of a bare steel joint, with

the exact mechanical parameters of the composite joint, in order to validate the proposals of Eurocode 4 for the design of composite connections.