

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Ανδρέας Σπηλιόπουλος, Μαρία-Ελένη Δασίου

Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος διδάκτωρ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: spiliopa@central.ntua.gr

Γεώργιος Ιωαννίδης

Καθηγητής ΕΜΠ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ελλάδα

e-mail: gioannid@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζεται η διερεύνηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας κοίλων διατομών με μετωπική πλάκα. Χρησιμοποιήθηκε αριθμητικό προσομοίωμα από επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, η βαθμονόμηση των βασικών παραμέτρων του οποίου πραγματοποιήθηκε με την σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με δεδομένα από αντίστοιχες πειραματικές διατάξεις. Εν συνεχεία έγιναν παραμετρικές αναλύσεις με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη συνεισφορά των βασικών στοιχείων αλλά και της γεωμετρίας της σύνδεσης στην αντοχή της. Στόχος των παραπάνω είναι η σύνταξη απλών κανόνων σχεδιασμού τέτοιου τύπου συνδέσεων.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

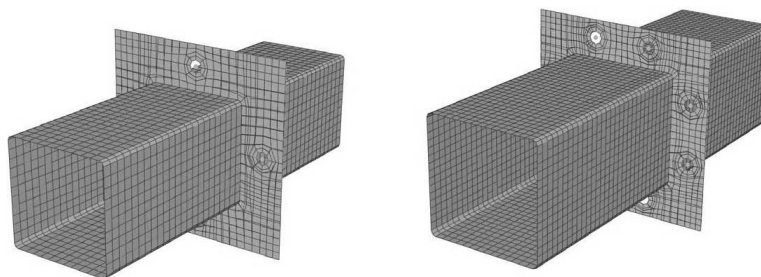
Η χρήση κυκλικών αλλά και ορθογωνικών κοίλων διατομών στην κατασκευή μεταλλικών κτιρίων για χρήση γραφείων, βιομηχανική, εμπορική αλλά και κατοικίας είναι συνεχώς αυξανόμενη. Αυτό οφείλεται στην αισθητά καλλίτερη συμπεριφορά των κοίλων διατομών σε σύγκριση με τις ανοιχτές, κυρίως υπό θλιπτικά και στρεπτικά φορτία. Το αισθητικό αποτέλεσμα που προσφέρουν είναι επίσης ένας σημαντικός λόγος που αυτές προτιμώνται από τους αρχιτέκτονες. Σε αντίθεση με τα παραπάνω έρχεται η σημαντική δυσκολία που συναντάται στην πράξη κατά το σχεδιασμό των συνδέσεων μεταξύ κοίλων διατομών,

δυσκολία που μπορεί να αποδοθεί τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους όσο και στις περιορισμένες κανονιστικές διατάξεις που παρέχει για αυτές ο Ευρωκώδικας 3. Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι η κοχλιωτή σύνδεση μεταξύ κοίλων διατομών ίδιου τύπου μέσω μετωπικών πλακών, καθώς μπορεί να έχει πολλές εφαρμογές όπως για παράδειγμα ως αποκατάσταση συνέχειας, ως σύνδεση χορδής δικτύωματος με υποστύλωμα κ.α.. Με σκοπό την κατανόηση της συμπεριφοράς της, αλλά και τον καθορισμό των βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν το σχεδιασμό της, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις με τη χρήση κατάλληλου αριθμητικού προσομοιώματος με το πρόγραμμα ABAQUS v.6.7 [1].

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ

Όπως προαναφέρθηκε η παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης αλλά και της συνεισφοράς σε αυτή των «βασικών στοιχείων» που την αποτελούν έγινε μέσω αριθμητικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά του κοχλία με τα εξαρτήματα του είναι ιδιαίτερα σύνθετη αφού διαφοροποιείται για θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις, ενώ πλησιάζοντας τα όρια της ελαστικής περιοχής, αναπτύσσεται και κάμψη στο κορμό του. Αναμενόμενο λοιπόν θα ήταν για την προσομοίωση του να χρησιμοποιηθούν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία θα επεκτεινόταν και στην προσομοίωση τουλάχιστον των μετωπικών πλακών και των νευρώσεων. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα τον υπερβολικό αριθμό στοιχείων τόσο λόγω του μεγέθους της σύνδεσης όσο και λόγω του πολύ πυκνού κανάβου που απαιτείται έτσι ώστε τα ελάσματα να αναπτύξουν την πραγματική καμπτική συμπεριφορά τους.

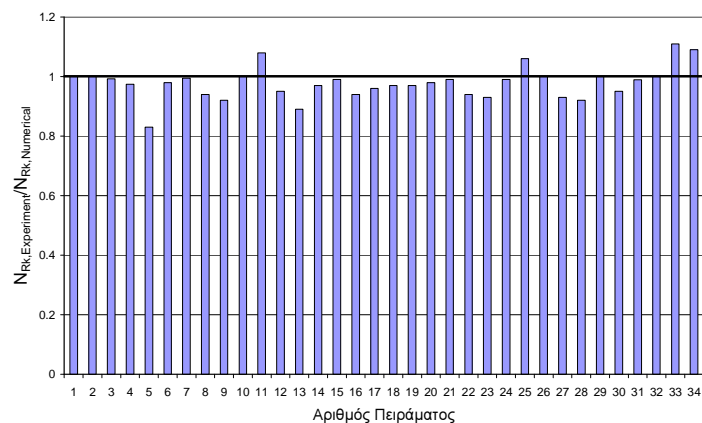
Θεωρώντας ότι το αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας δεν είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων τοπικού χαρακτήρα αλλά η γενικότερη συμπεριφορά της σύνδεσης κρίθηκε σκόπιμο οι κοίλες διατομές, οι μετωπικές πλάκες και τα ελάσματα ενίσχυσης, όπου αυτά χρησιμοποιήθηκαν, να προσομοιωθούν ως επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία αποδίδουν καλλίτερα την πραγματική συμπεριφορά της σύνδεσης. Επίσης η κοχλίωση προσομοιώθηκε μέσω μη-γραμμικού ελατηρίου, με κατάλληλα χαρακτηριστικά, το οποίο καταλήγει σε άκαμπτες απολήξεις που λειτουργούν όπως η κεφαλή και το περικόχλιο ενός πραγματικού κοχλία. Έχει ληφθεί ακόμη υπόψη η μη-γραμμικότητα των υλικών τόσο του δομικού χάλυβα όσο και των εξαρτημάτων της κοχλίωσης.



Σχ. 1: Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων των συνδέσεων

Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του προσεγγιστικού προσομοιώματος της κοχλίωσης αξιολογήθηκε μέσω της επίλυσης αντίστοιχων υπό-μοντέλων της σύνδεσης αποτελούμενων από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία με υψηλή διακριτοποίηση. Η

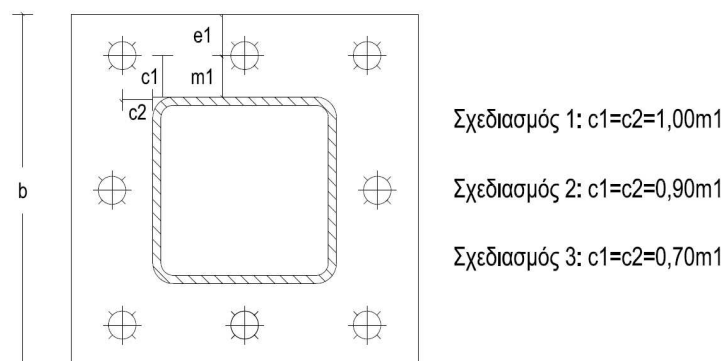
βαθμονόμηση του συνολικού προσομοιώματος της σύνδεσης και ο έλεγχος της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων του έγινε μέσω της σύγκρισης αυτών με αντίστοιχα δεδομένα που ελήφθησαν από τα πειράματα τα οποία πραγματοποίησαν οι Β.Κατο και Α.Μυκαί [1]. Πιο αναλυτικά χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από 34 πειράματα, στα οποία παράμετροι ήταν η διάμετρος του κοχλία, ο αριθμός των κοχλιών, το πάχος των ελασμάτων καθώς και η διατομή της κοίλης δοκού. Από τα δεδομένα του [1] έχουν ληφθεί και οι πραγματικές ποιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ανά πείραμα. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η προσομοίωση των συνδέσεων των πειραμάτων. Τα τελικά αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια αυτά των πειραματικών μετρήσεων καθιστώντας το προσομοίωμα αξιόπιστο για περαιτέρω παραμετρικές αναλύσεις .



Σχ. 2: Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ

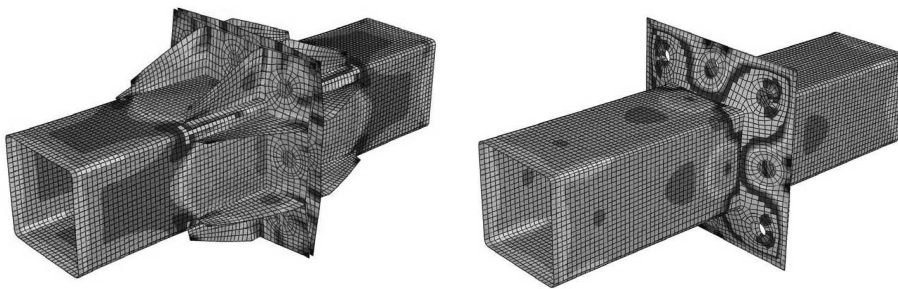
Γιά τη διερεύνηση της συμπεριφοράς αλλά και της επιρροής καθενός από τα «βασικά στοιχεία» που συνθέτουν την εν λόγω σύνδεση, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αριθμητικές επιλύσεις μέσω του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με οχτώ κοχλίες όπως αυτό περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



Σχ. 3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης σύνδεσης

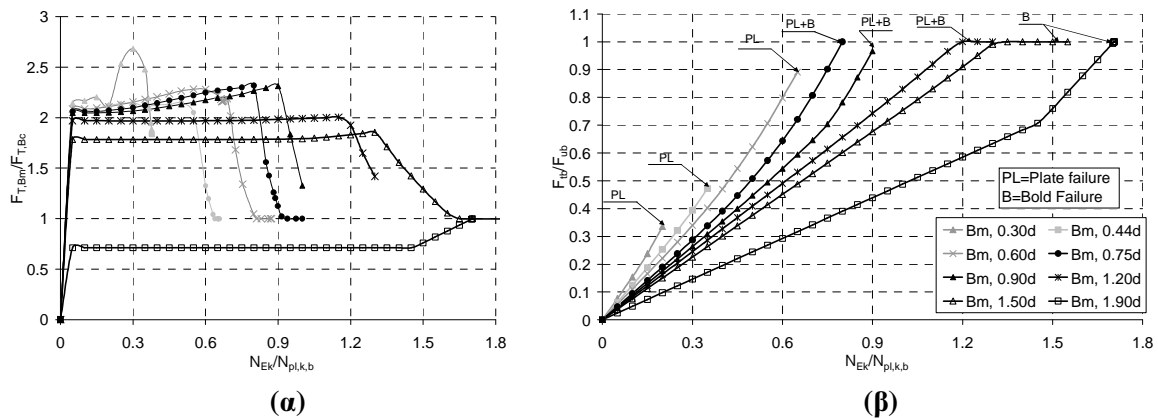
Οι διερευνήσεις έχουν ως παραμέτρους το πάχος της μετωπικής πλάκας, τη σχέση των αποστάσεων των κοχλιών τόσο από την κοίλη διατομή όσο και από την άκρη της πλάκας αλλά και τη γενικότερη γεωμετρία αυτών (Σχήμα 3).

Καταρχήν εξετάστηκε η επιρροή του πάχους της μετωπικής πλάκας στην τελική αντοχή της σύνδεσης αλλά και στην πιθανή μορφή αστοχίας αυτής. Σημαντικό ρόλο αποδείχθηκε ότι έχει η ύπαρξη ή μη νευρώσεων, η οποία ομαλοποιεί τη ροή των τάσεων από τον κοχλία προς την κοίλη διατομή δημιουργώντας πιο ομοιόμορφη κατανομή (Σχήμα 4) και οδηγώντας σε μεγαλύτερες γραμμές θραύσης και κατά συνέπεια σε αυξημένη αντοχή, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα μια πιο ισορροπημένη κατανομή της δρώσας δύναμης στους κοχλίες.

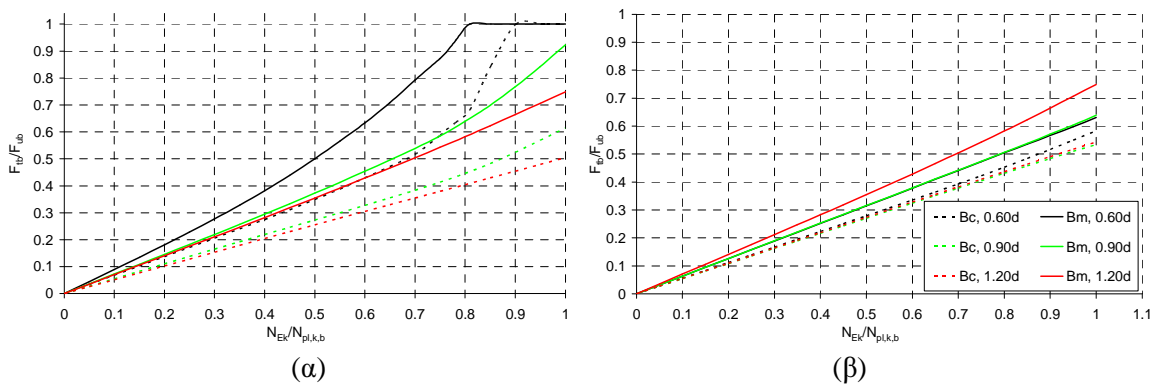


Σχ. 4: Κατανομή τάσεων στη σύνδεση με και χωρίς ενισχυτικά ελάσματα

Στην περίπτωση μη ενισχυμένων (μέσω νευρώσεων) πλακών γίνεται πιο σημαντική η επιλογή του κατάλληλου πάχους τους, κατ' αναλογία με τα υπόλοιπα «βασικά στοιχεία», αφού μικρά πάχη οδηγούν σε μεγάλες παραμορφώσεις και χαμηλή αντοχή ενώ υπερβολικό πάχος, εκτός της αντί-οικονομικότητας, οδηγεί σε αστοχία κοχλιών. Ως βέλτιστο πάχος πλάκας, σε μη-ενισχυμένες συνδέσεις, είναι αυτό μεταξύ 1,00 και 1,20d, όπου d είναι η διάμετρος κοχλίου. Τα σχήματα 5α και 5β αφορούν μη ενισχυμένες συνδέσεις με αποστάσεις κοχλιών $c_1=c_2=m_1$ και πάχη πλακών από 0,30d έως και 1,90d. Στο σχήμα 5α δίνεται το ποσοστό της δύναμης που παραλαμβάνουν οι μεσαίοι ως προς τους ακραίους κοχλίες για το σύνολο της χρονιστορίας της φόρτισης ενώ στο σχήμα 5β δίνεται η δύναμη που αναπτύσσεται στους κοχλίες, ως ποσοστό της εφελκυστικής αντοχής αυτών, αλλά και η μορφή αστοχίας της εκάστοτε σύνδεσης. Με σκοπό να διερευνηθεί η συμπεριφορά της κοχλίωσης οι τιμές του σχήματος 5α έχουν προκύψει μη λαμβάνοντας υπόψη, ως περιοριστικό παράγοντα στην ανάλυση, το εύρος των παραμορφώσεων της σύνδεσης. Αντιθέτως τα αποτελέσματα του σχήματος 5β έχουν προκύψει με κριτήριο αστοχίας της σύνδεσης, εκτός από την αντοχή των κοχλιών και των ελασμάτων και το εύρος των παραμορφώσεων αυτής. Στα σχήματα 6α και 6β δίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για μη ενισχυμένες και ενισχυμένες συνδέσεις αντιστοίχως με $c_1 < m_1$ και πάχη πλακών από 0,60d έως και 1,20d. Όπως φαίνεται από την κατανομή της δύναμης μεταξύ των ακραίων (B_c) και των μεσαίων (B_m) κοχλιών η σύνδεση παρουσιάζει αποδεκτή συμπεριφορά για πάχη πλακών έως 0,90d, τιμή η οποία μπορεί να είναι και οριακά μικρότερη, όταν επιπλέον της βελτιωμένης γεωμετρίας της κοχλίωσης, υπάρχουν και νευρώσεις ενίσχυσης.

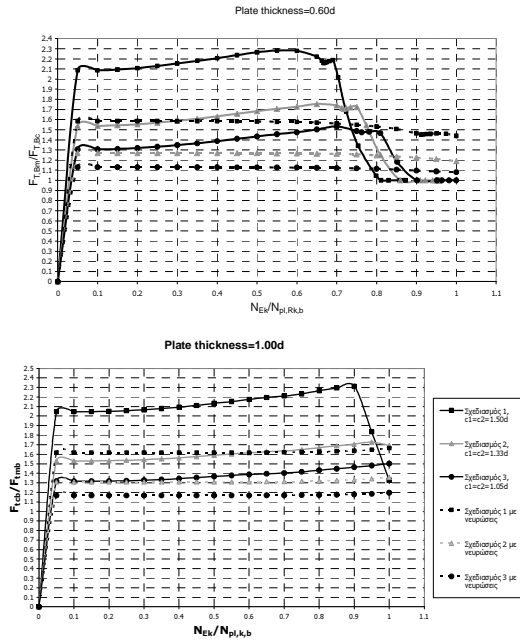


Σχ. 5: Δρώσα δύναμη των ακραίων (B_c) και μεσαίων κοχλιών (B_m) για διάφορα πάχη πλάκας ($0,15d \div 1,20d$) στην περίπτωση σχεδιασμού 1 χωρίς νευρώσεις



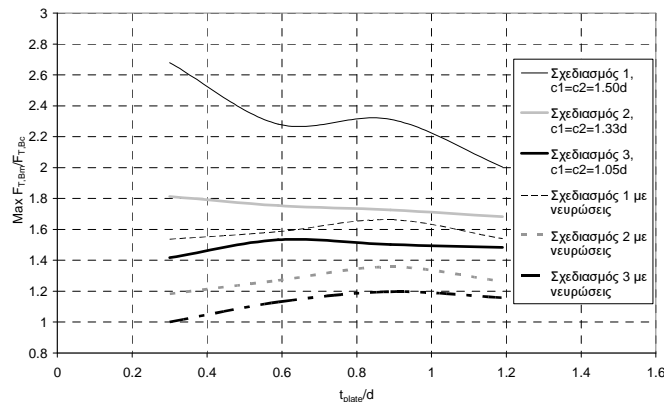
Σχ. 6: Κατανομή της δύναμης μεταξύ ακραίων (B_c) και μεσαίων (B_m) κοχλιών για πάχη πλακών από $0,60d$ έως $1,20d$ και $c_1=c_2=0,70 m_1$ (α) χωρίς και (β) με νευρώσεις

Η σχέση των αποστάσεων των μεσαίων κοχλιών τόσο από την παρειά της κοίλης διατομής όσο και από το άκρο του ελάσματος σε συνδυασμό με το πάχος της πλάκας ήταν η επόμενη υπό εξέταση παράμετρος. Η απόσταση (e_1) από το άκρο η οποία είναι καθοριστική για την ύπαρξη και το μέγεθος των δυνάμεων επαφής πρέπει να είναι τουλάχιστον $1,25d$ ενώ τιμές άνω του $2,25d$ δεν έχουν ουσιαστική επίδραση στη συμπεριφορά της σύνδεσης. Αντίστοιχα η απόσταση (m_1) από την παρειά της κοίλης διατομής πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ $1,50d$ και $2,50d$. Μεγαλύτερες τιμές οδηγούν σε πρόωρη εμφάνιση πλαστικοποιήσεων στη μετωπική πλάκα, στη θέση σύνδεσης με τη κοίλη διατομή, και σε συνολικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις και μικρότερη αντοχή. Εκτός των παραπάνω στοιχείων σύνδεσης εξετάστηκε η επιρροή της συνολικής γεωμετρίας της κοχλίωσης. Για τον λόγο αυτό επιλύθηκαν συνδέσεις με κοχλίωση σταθερής απόστασης από την άκρη του ελάσματος ($c_1=c_2=m_1$) και συνδέσεις στις οποίες οι ακραίοι κοχλίες πλησιάζουν στις γωνίες της κοίλης διατομής (περίπου ακτινική τοποθέτηση κοχλιών, $c_1=c_2 < m_1$). Από τα αποτελέσματα είναι σαφές ότι οι ακραίοι κοχλίες στην πρώτη περίπτωση παραλαμβάνουν σημαντικά μικρότερη δύναμη στην ελαστική περιοχή και μόνο μετά την πλαστικοποίηση της μετωπικής πλάκας και την πλήρη φόρτιση των μεσαίων κοχλιών γίνεται ανακατανομή των δυνάμεων και παραλαμβάνουν και αυτοί σταδιακά το φορτίο που τους αντιστοιχεί (Σχήμα 7).



Σχ. 7: Χρονοιστορία φόρτισης των κοχλιών για πάχη πλακών 0,60d και 1,00d

Στο προαναφερθέν «αρχικό» στάδιο και σε σχεδιαστικά αποδεκτά πάχη πλακών οι μεσαίοι κοχλίες δέχονται 230% περισσότερη δύναμη απο τους ακραίους, τιμή που δεν μειώνεται κάτω από 140% ακόμα και για πολύ μεγάλα πάχη πλακών. Είναι προφανές ότι η αιτία της παραπάνω συμπεριφοράς είναι η απόσταση των ακραίων κοχλιών από την παρειά της δοκού. Η τροποποιημένη γεωμετρία βελτιώνει τη συμπεριφορά της σύνδεσης στον τομέα αυτό με τη διαφορά έντασης μεταξύ των κοχλιών (ακραίων και ενδιάμεσων) να μην υπερβαίνει το 140%, τιμή που δεν επηρεάζεται πρακτικά από το πάχος της πλάκας. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνδέσεις με βελτιωμένη γεωμετρία και ενισχυτικά ελάσματα επέδειξαν πρακτικά άριστη συμπεριφορά ακόμα και σε σχετικά μικρά πάχη πλακών (0,80d) με τη διαφοροποίηση της δύναμης μεταξύ των ακραίων και των μεσαίων κοχλιών να μην ξεπερνάει το 120% (Σχήμα 8), τιμή εντός των ορίων ασφαλείας του κανονισμού ($\gamma_{M2}=1,25$).



Σχ. 8: Κατανομή δύναμης στους κοχλίες σε σχέση με το πάχος της πλάκας

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το τρισδιάστατο προσομοίωμα με τη χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, μη-γραμμικό ελατήριο ως κοχλία, κατάλληλες συνθήκες επαφής και μη γραμμικότητα υλικού προσεγγίζει επαρκώς τα πειραματικά αποτελέσματα των Kato και Mukai.
- Το απλοποιημένο προσομοίωμα του κοχλία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ιδιαίτερος όταν πρόκειται για αναλύσεις που αφορούν τη σύνδεση στο σύνολο της.
- Ο σχεδιασμός όσον αφορά τη γεωμετρία της κοχλίωσης είναι κρίσιμος για τη συμπεριφορά και την τελική αντοχή της σύνδεσης.
- Σε συνδέσεις με 8 ή/και παραπάνω κοχλίες, στις οποίες επιδιώκεται η ισοκατανομή της δύναμης σε αυτούς, θα πρέπει οι αποστάσεις τους από την κοίλη διατομή να είναι κατάλληλα διαμορφωμένες (ακτινική τοποθέτηση). Σε αντίθετη περίπτωση παρατηρούνται διαφορές μεταξύ της εφελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται στους ακραίους και στους μεσαίους κοχλίες οι οποίες μπορούν να ξεπεράσουν το 230%.
- Η επιλογή της διάταξης των κοχλιών με $c_1=0,70 m_1$, περιορίζει κατά πολύ την ανισοκατανομή της συνολικής δύναμης στους κοχλίες.
- Η χρήση νευρώσεων ομαλοποιεί τη λειτουργία της σύνδεσης και αμβλύνει το φαινόμενο της ανισοκατανομής των δυνάμεων μεταξύ των κοχλιών.
- Συνδέσεις με νευρώσεις και εύλογη γεωμετρία των λοιπών «βασικών στοιχείων» τους (αποστάσεις κοχλιών, πάχη ελασμάτων και συγκολλήσεων) έχουν αυξανόμενης της εντάσεως γραμμική συμπεριφορά χωρίς εξάρσεις και βίαιες ανακατανομές εντάσεων τα δε αποτελέσματα τους είναι εντός των περιθωρίων ασφαλούς σχεδιασμού.
- Με σκοπό να ληφθεί υπόψη και η επιπλέον ένταση λόγω των δυνάμεων επαφής, των οποίων η τιμή δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, προτείνεται κατά τον σχεδιασμό οι κοχλίες να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να λειτουργούν στο 75-80% της εφελκυστικής αντοχής τους.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] KATO B., MUKAI A.. “Bolted Tension Flanges Joining Square Hollow Section Members”, *J.Construct.Steel Research*, No. 5, 1985, pp. 163-177.
- [2] WHEELER A., MURRAY C., HANCOCK G. “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections Joining Rectangular Hollow Sections Using Eight Bolts”, *Research Report University of Sydney*, No. 827, 2003
- [3] WHEELER A., CLARKE M., HANCOCK G., MURRAY C. “Design Model for Bolted Moment End Plate Connections Joining Rectangular Hollow Sections”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(2), p.164-173, 1998
- [4] Ευρωκώδικας 3 : Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 1.8 : Σχεδιασμός κόμβων

NUMERICAL INVESTIGATION OF BOLTED HOLLOW SECTION CONNECTIONS WITH FLANGE PLATES

Andreas Spiliopoulos, Maria-Eleni Dasiou

Civil Engineer, Phd Student

Steel Structures Laboratory, National Technical University of Athens

Athens, Greece country

e-mail: spiliopa@central.ntua.gr, medasiou@yahoo.com

George Ioannidis

Professor

Steel Structures Laboratory, National Technical University of Athens

Athens, Greece country

e-mail: gioannid@central.ntua.gr

SUMMARY

Circular as well as rectangular hollow sections are nowadays widely used in the construction of industrial, commercial, office and other steel buildings, mainly due to their superior structural performance compared to standard open sections in terms of resistance in compression and torsion. The application of such sections is also very often preferred for aesthetic reasons. However, in practice many difficulties arise during the design of the connections between hollow sections. Such difficulties are present due to geometric characteristics of these closed sections, but also due to the limited information provided by the Eurocode or other guidelines. The study with FE models of bolted splice connections with flange plates, have lead to the conclusion that the resistance of the connections is significantly affected by its configuration, and can even result to an unsafe design. In the current study, each basic component of the connection, such as the bolts configuration, the thickness of the flange end plate, the use and the thickness of the stiffeners etc., is examined parametrically in order to determine its contribution to the resistance, which will lead to practical design guidelines.