

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ-ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΣΥΜΜΙΚΤΕΣ ΠΛΑΚΕΣ ΕΝΟΣ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ****Θεμιστοκλής Τσαλκατίδης**

Υποψήφιος διδάκτορας

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

e-mail: thtsalka@civil.auth.gr

Άρης Αβδελάς

Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

e-mail: avdelas@civil.auth.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθοριστικό στοιχείο της σύμμικτης λειτουργίας ενός στοιχείου αποτελεί η συνεργασία σκυροδέματος-χάλυβα. Κατά την μελέτη των σύμμικτων πλακών πρέπει να δίδεται, συνεπώς, ιδιαίτερη σημασία στην καταγραφή της λειτουργίας και στον υπολογισμό της αντοχής του διατμητικού δεσμού των δύο υλικών. Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση, μέσω κατάλληλων πειραμάτων κάμψης και υπολογιστικού προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, της δομικής συμπεριφοράς των σύμμικτων πλακών ενός ανοίγματος με χαλυβδόφυλλο μορφής. Για την πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκαν οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 4. Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές πειραμάτων σε σύμμικτα δοκίμια, τα οποία υποβλήθηκαν σε στατική και κυκλική φόρτιση. Η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε με τη μέθοδο της μερικής διατμητικής σύνδεσης. Για την υπολογιστική προσέγγιση του προβλήματος δημιουργήθηκε τρισδιάστατο μοντέλο με χρήση στοιχείων επαφής. Η σύγκριση των πειραματικών και των υπολογιστικών εξαγόμενων δίνει χρήσιμα συμπεράσματα.

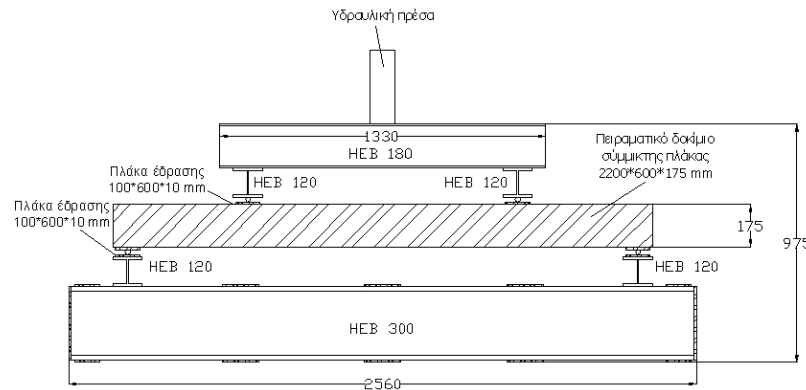
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο γνωστικό πεδίο των σύμμικτων κατασκευών και ειδικότερα των σύμμικτων πλακών. Η μελέτη σύμμικτων πλακών είναι περίπλοκη λόγω ύπαρξης στοιχείων μη γραμμικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, πέρα από τη γεωμετρική μη γραμμικότητα και τη μη γραμμικότητα υλικού (σκυροδέματος), καθοριστικό σημείο της ανάλυσης αποτελεί η επαφή χάλυβα και σκυροδέματος. Η επαφή αυτή είναι μονόπλευρου τύπου λόγω της μη γνώσης, εκ των προτέρων, των περιοχών επαφής των δύο σωμάτων. Τα σώματα έρχονται σε επαφή με ασυνεχή τρόπο που εξαρτάται από τη στιγμιαία φόρτιση, το υλικό και τις διαρκώς μεταβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες. Η εργασία στοχεύει σε

πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση του προβλήματος επαφής χαλυβδόφυλλου μορφής και σκυροδέματος σε σύμμικτες πλάκες ενός ανοίγματος.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Στην περίπτωση των σύμμικτων πλακών με χαλυβδόφυλλο μορφής ακολουθείται η πειραματική διαδικασία με δοκίμια σε φυσικό μέγεθος, όπως ορίζει ο Ευρωκώδικας 4 [1]. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχ. 1.



Σχ. 1: Πειραματική διάταξη

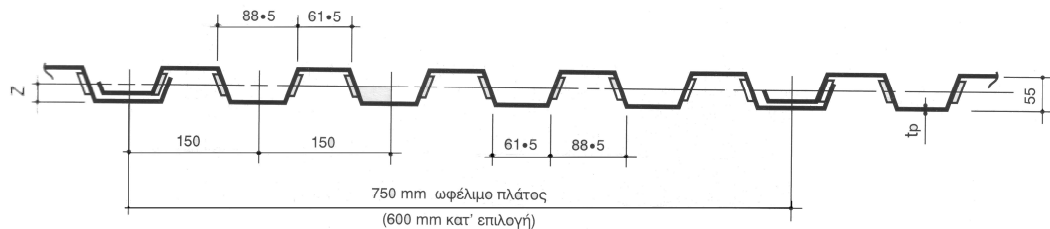
Ο αριθμός των απαιτούμενων παραμετρικών πειραμάτων για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των σύμμικτων πλακών μπορεί να μειωθεί στην περίπτωση πειραμάτων που αποσκοπούν στη διερεύνηση των ιδιοτήτων συγκεκριμένων σύμμικτων πλακών. Τα πειράματα αυτά ονομάζονται συγκεκριμένα (specific) και μπορούν να πραγματοποιηθούν σε μία μόνο σειρά, αποτελούμενη από τρία δοκίμια [1].

Στην παρούσα μελέτη, πραγματοποιήθηκε στατική και δυναμική φόρτιση έξι δοκιμίων σύμμικτης πλάκας, τα οποία χωρίστηκαν σε δύο σειρές τριών δοκιμίων. Τα δοκίμια της σύμμικτης πλάκας υποβάλλονται σε στατικό και κυκλικό πείραμα που αντιπροσωπεύουν την φόρτιση που πρόκειται να δεχθεί η σύμμικτη πλάκα σε πραγματικές σύμμικτες κατασκευές.

Το στατικό πείραμα, χρησιμοποιείται για την εύρεση του κυκλικού φορτίου που θα επιβληθεί στα δοκίμια της σύμμικτης πλάκας και για μια αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς της. Τρία δοκίμια της σύμμικτης πλάκας υποβλήθηκαν σε αυξανόμενο στατικό φορτίο για τουλάχιστον μία ώρα μέχρι να αστοχήσουν. Το φορτίο αστοχίας της σύμμικτης πλάκας, που προκύπτει από το στατικό πείραμα, καθορίζει το κυκλικό φορτίο του δυναμικού πειράματος. Η μέση τιμή του φορτίου αστοχίας από το στατικό πείραμα υπολογίστηκε ίση με 45 kN. Το κυκλικό πείραμα, που αποτελεί το κυρίως πείραμα, χωρίζεται σε δύο στάδια που αντιπροσωπεύουν τα τυπικά φορτία που δρουν σε μία σύμμικτη πλάκα με χαλυβδόφυλλο μορφής. Στο πρώτο στάδιο η σύμμικτη πλάκα υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση με 5000 κύκλους φόρτισης, για τουλάχιστον τρεις ώρες, και στο δεύτερο στάδιο σε αυξανόμενο στατικό φορτίο, για τουλάχιστον μία ώρα, μέχρι την αστοχία [1]. Η επιβολή των κύκλων φόρτισης στην σύμμικτη πλάκα έγινε με σταθερή συχνότητα 0.5 Hz [2] και έλεγχο της δύναμης. Στην περίπτωση της κυκλικής φόρτισης η τιμή του φορτίου κυμαίνεται μεταξύ μιας κατώτερης τιμής του φορτίου που ορίζεται ίση

με 3.3 kN ($0.5 W_q$) και μιας ανώτερης τιμής ίσης με 9.9 kN ($1.5 W_q$). Οι τιμές αυτές προέκυψαν από την αναμενόμενη τιμή της χαρακτηριστικής φόρτισης W_q που αναμένεται να επιβληθεί στη φάση λειτουργίας της σύμμικτης πλάκας.

Τα χαλυβδόφυλλα που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν τραπεζοειδούς διατομής με πάχος 1 mm, πλάτος 600 mm, ύψος 55 mm και μήκος 2200 mm (Τύπος Comp Deck 55/150-600, προμηθευτής Αφοί Κάμτση Α.Ε.). Η ποιότητά τους ήταν S320. Στην εξωτερική τους πλευρά είχαν κατάλληλη οδοντωτή διαμόρφωση, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2, που αυξάνει την συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος [3] και [4]. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για την επί τόπου κατασκευή των σύμμικτων πλακών ήταν κατηγορίας C25/30 και δεν τοποθετήθηκε πρόσθετος οπλισμός. Το δοκίμιο θεωρείται αμφιέριστα εδραζόμενο κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Έγινε χρήση κατάλληλων βλήτρων και κυλινδρικών εφέδρανων προκειμένου να προσομοιωθούν ρεαλιστικά οι θέσεις στήριξης της σύμμικτης πλάκας.



Σχ. 2: Το υπό μελέτη χαλυβδόφυλλο μορφής

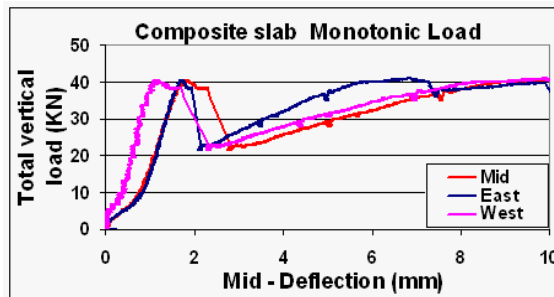
Η αστοχία των δοκιμίων ξεκινά με τη διαμήκη καταστροφή του χημικού δεσμού χαλυβδόφυλλου-σκυροδέματος στη διεπιφάνεια των σύμμικτων δοκιμίων [4]. Ακολουθεί ρηγματώση του σκυροδέματος, αποκόλληση του χάλυβα από το σκυρόδεμα στη διεπιφάνεια επαφής και κατόπιν αμοιβαία ολίσθηση, όπως φαίνεται στη Φωτ. 1. Η αντοχή της σύμμικτης πλάκας μειώνεται δραματικά, όμως λόγω της ύπαρξης μηχανικού δεσμού (εξογκωμάτων χαλυβδόφυλλου μορφής) και δυνάμεων τριβής έχουμε νέα αύξηση της αντοχής της σύμμικτης πλάκας. Τελικά, η σύμμικτη πλάκα αστοχεί λόγω κάμψης με συνεχώς αυξανόμενη ολίσθηση στη διεπιφάνειά της, όπως απεικονίζεται στη Φωτ. 2. Στα Σχ. 3 και Σχ. 4 παρουσιάζονται τα πειραματικά διαγράμματα φόρτισης-βύθισης και φόρτισης-ολίσθησης για μονότονα αυξανόμενο στατικό φορτίο.



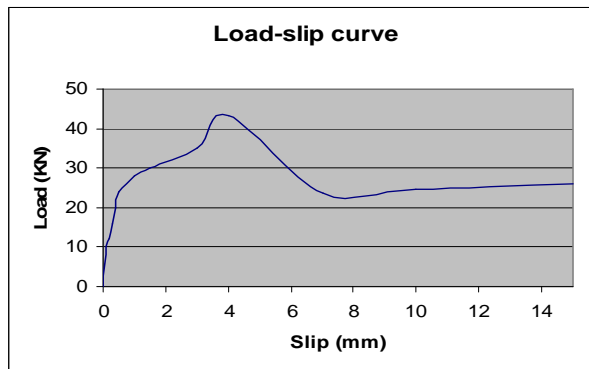
Φωτ. 1.: Ολίσθηση σύμμικτης πλάκας



Φωτ. 2.: Αστοχία σύμμικτης πλάκας



Σχ. 3.: Διάγραμμα φόρτισης-βύθισης για μονότονα αυξανόμενο στατικό φορτίο

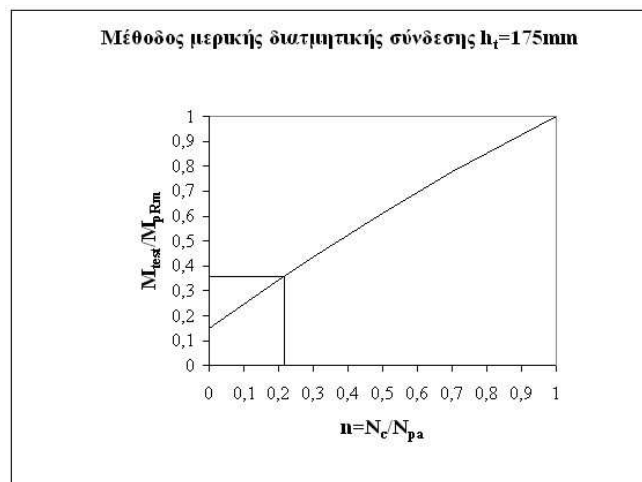


Σχ. 4.: Διάγραμμα φόρτισης-ολίσθησης για μονότονα αυξανόμενο στατικό φορτίο

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πειραματικής προσέγγισης της σύμμικτης πλάκας πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της μερικής διατμητικής σύνδεσης. Η μέθοδος σχεδιασμού μερικής διατμητικής σύνδεσης αποσκοπεί στον προσδιορισμό της τιμής σχεδιασμού της διατμητικής τάσης σε διαμήκη διάτμηση $\tau_{u,Rd}$ στην περίπτωση σύμμικτης πλάκας με μερική διατμητική σύνδεση [1]. Στο πλαίσιο της μεθόδου, δημιουργήθηκε η θεωρητική καμπύλη μερικής διατμητικής σύνδεσης και προέκυψε η τιμή της διατμητικής τάσης επαφής. Η ροπή αντοχής της σύμμικτης πλάκας με πλήρη διατμητική σύνδεση βρέθηκε ίση με $M_{pRm} = 33.6kNm$. Για μέση μέγιστη καμπτική ροπή πειράματος ίση με

$$M_{test} = 11.66kNm, \text{ υπολογίζεται ο λόγος } \frac{M_{test}}{M_{pRm}} = 0.35.$$

Από την θεωρητική καμπύλη μερικής διατμητικής σύνδεσης του Σχ. 4 προκύπτει ο βαθμός διατμητικής σύνδεσης $\eta = 0.22$.



Σχ. 5.: Θεωρητική καμπύλη μερικής διατμητικής σύνδεσης

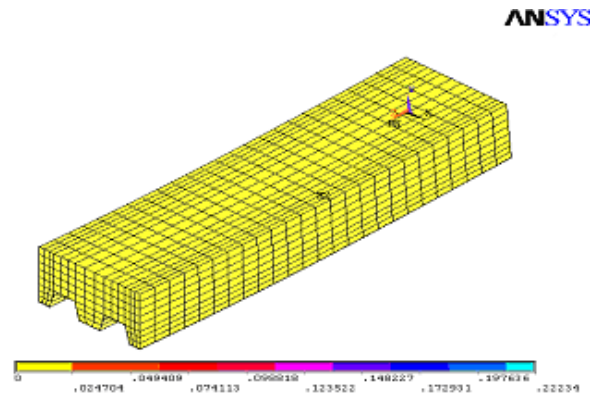
Τελικά, η διατμητική τάση σε διαμήκη διάτμηση της σύμμικτης πλάκας υπολογίζεται ίση με $\tau_u = 0.20\text{MPa}$ και η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής τάσης σε διαμήκη διάτμηση της σύμμικτης πλάκας $\tau_{u,Rd} = 0.16\text{MPa}$.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

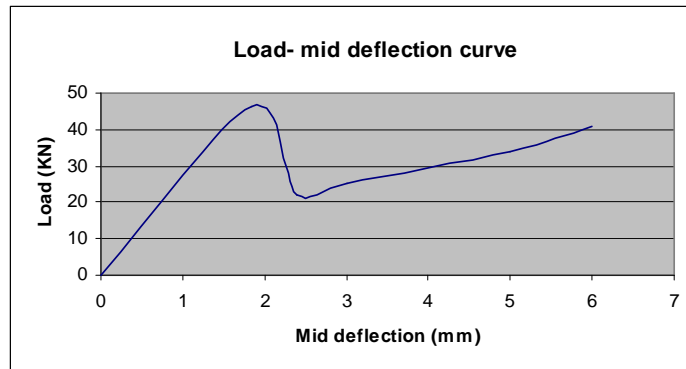
Για την κατασκευή του υπολογιστικού μοντέλου της σύμμικτης πλάκας με χαλυβδόφυλλο μορφής, έγινε χρήση του λογισμικού μη γραμμικής ανάλυσης ANSYS. Λόγω συμμετρίας της σύμμικτης πλάκας μοντελοποιήθηκε το μισό τμήμα της κατά τη διαμήκη έννοια (τελικές διαστάσεις μοντέλου μήκος*πλάτος*ύψος=1.1*0.600*0.175 m). Για την πλάκα σκυροδέματος προκρίθηκε η χρήση τρισδιάστατου δομικού ισοπαραμετρικού στοιχείου. Το χαλυβδόφυλλο μορφής μοντελοποιήθηκε με τη χρήση στοιχείου κελύφους και η διεπιφάνεια των δύο σωμάτων με τη χρήση στοιχείων επαφής [5]. Ο νόμος υλικού του χάλυβα επιλέχθηκε διγραμμικός ελαστικοπλαστικός [6]. Η τάση διαρροής σε εφελκυσμό του χαλυβδόφυλλου μορφής ορίστηκε σε 320 MPa και το μέτρο ελαστικότητας σε 210 GPa. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε η μη γραμμική προσομοίωση του ANSYS, που χρησιμοποιεί ως κριτήριο αστοχίας του σκυροδέματος το κριτήριο των William-Warnke. Η χαρακτηριστική τάση διαρροής σε θλίψη του σκυροδέματος ορίστηκε ίση με 25 MPa και το μέτρο ελαστικότητας ίσο με 30.5 GPa. Και τα δύο υλικά θεωρήθηκαν ισότροπα. Ο λόγος του Poisson του δομικού χάλυβα λήφθηκε ίσος με $\nu=0.3$ και του σκυροδέματος ίσος με $\nu=0.2$ [7]. Ητριβή λήφθηκε υπόψη με σταθερό συντελεστή τριβής $\mu=0.3$ [8,9]. Οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης του μοντέλου λήφθηκαν ίδιες με τις πειραματικές. Η μέγιστη διατμητική τάση επαφής στη διεπιφάνεια χαλυβδόφυλλου μορφής- σκυροδέματος, κατά τη διαμήκη έννοια, βρέθηκε ίση με 0.222 MPa, Σχ. 6. Στα Σχ. 7 και Σχ. 8, παρατίθενται τα υπολογιστικά διαγράμματα φόρτισης-βύθισης και φόρτισης-ολίσθησης.

5. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

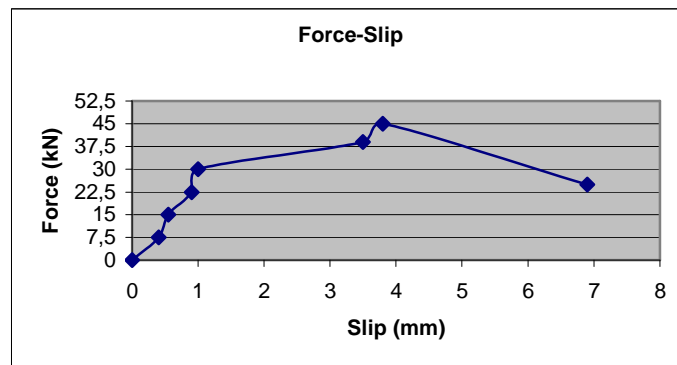
- Η διαφορά στην πτώση της αντοχής της σύμμικτης πλάκας ανάμεσα στο πείραμα και στο υπολογιστικό μοντέλο (Σχ. 3 και Σχ. 7) οφείλεται στην αδυναμία μοντελοποίησης, υπολογιστικά, των πιθανών θέσεων και του εύρους των ρωγμών του σκυροδέματος.



Σχ. 6.: Μέγιστη διατμητική τάση επαφής στη διεπιφάνεια της σύμμικτης πλάκας



Σχ. 7.: Υπολογιστικό διάγραμμα φόρτισης-βύθισης



Σχ. 8.: Υπολογιστικό διάγραμμα φόρτισης-ολίσθησης

- Ο ρυθμός ολίσθησης στη διεπιφάνεια της σύμμικτης πλάκας αυξάνεται μετά την επίτευξη της μέγιστης φέρουσας ικανότητάς της (Σχ. 4). Το αντίστοιχο υπολογιστικό διάγραμμα (Σχ. 8) επιβεβαιώνει την παρατήρηση αυτή, αλλά υπάρχει διαφορά στο ρυθμό ολίσθησης. Η διαφορά αυτή πιθανόν οφείλεται σε τοπική παραμόρφωση των

πεπερασμένων στοιχείων στα οποία ανήκουν οι γειτονικοί κόμβοι. Η διαφορά των οριζόντιων μετακινήσεων των κόμβων ισούται με την τιμή της ολίσθησης.

- Ο τελευταίος, σχεδόν οριζόντιος, κλάδος των διαγραμμάτων φόρτισης-βύθισης (Σχ. 3 και Σχ. 7) αντιστοιχεί στην συμπεριφορά της σύμμικτης πλάκας ως μηχανισμού. Η σύμμικτη πλάκα δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία και τελικά καταρρέει. Πειραματικά η κατάρρευση της σύμμικτης πλάκας συνοδεύτηκε από αποκόλληση του χαλυβδόφυλλου μορφής από το σκυρόδεμα.
- Η αντοχή του διατμητικού δεσμού χαλυβδόφυλλου μορφής και σκυροδέματος εκφράζεται με την διατμητική τάση σε διαμήκη διάτμηση τ_u . Η τιμή της τάσης τ_u βρέθηκε από την υπολογιστική ανάλυση ίση με 0.22 MPa (Σχ. 6) και από την πειραματική ανάλυση ίση με 0.20 MPa (Σχ. 5). Η απόκλιση των δύο τιμών είναι της τάξης του 10%.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν: Τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας και το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την οικονομική ενίσχυση στο πλαίσιο του Προγράμματος "Υπολογιστική Προσομοίωση και Πειραματική Τεκμηρίωση Ιδιοτήτων Σύμμικτων Πλακών με Χαλυβδόφυλλο Μορφής" (ΠΕΝΕΔ 03ΕΔ769). Την εταιρία Αφοι Κάμτση Α.Ε. για την παροχή των χαλυβδόφυλλων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές. Τους καθηγητές Γ. Μάνο και Μ. Ζυγομαλά καθώς και τον Δρα Β. Κουρτίδη για τη βοήθεια που προσέφεραν κατά την εκτέλεση των δοκιμών στο Α.Π.Θ.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ENV 1994-1-1: EUROCODE 4 "Design of composite steel and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings", 1994.
- [2] MARIMUTHU, V., SEETHARAMAN, S., ARUL JAYACHANDRAN, S., CHELLAPAN, A., BANDYOPADHYAY, T.K. AND DUTTA, D. "Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic (m-k) values of the embossed profiled sheet", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, 2006, pp. 791-803.
- [3] CHEN, S. "Load carrying capacity of composite slabs with various end constraints", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, 2003, pp. 385-403.
- [4] HOSSAIN, K.M. and WRIGHT, H.D. "Experimental and theoretical behaviour of composite walling under in- plane shear", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, 2004, pp. 59-83.
- [5] CLUBLEY, S., MOY, S. AND XIAO, R. "Shear strength of steel-concrete-steel composite panels. Part II-detailed numerical modeling of performance", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 59, 2003, pp. 795-808.
- [6] AKHAND, A.M., BADARUZZAMAN, W.H.W. AND WRIGHT, H.D. "Combined flexure and web crippling strength of a low- ductility high strength steel decking: experiment and a finite element model", *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, 2004, pp. 1067- 1082.
- [7] DE ANDRADE, S.A.L., DA S. VELLASCO, P.C.G., DA SILVA, J.G.S. AND TAKEY, T.H. "Standardized composite slab systems for building constructions", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, 2004, pp. 493- 524.
- [8] MOAVENI, S. "Finite element analysis: theory and application with ANSYS",

- Prentice Hall, 1999.
- [9] BODE, H. “Ευρωπαϊκές σύμμικτες κατασκευές: Εκτέλεση και διαστασιολόγηση”, Εκδόσεις Μ. Γκιούρδας, 2004.

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL RESEARCH OF CONCRETE-STEEL COLLABORATION IN ONE SPAN COMPOSITE SLABS

Themistoklis Tsalkatidis

PhD Student

Department of Civil Engineering , Aristotle University of Thessaloniki

Thessaloniki, Greece

e-mail: thtsalka@civil.auth.gr

Aris Avdelas

Professor

Department of Civil Engineering , Aristotle University of Thessaloniki

Thessaloniki, Greece

e-mail: avdelas@civil.auth.gr

SUMMARY

The key point of achieving composite behaviour in construction is the collaboration between concrete and steel. Therefore, during the study of composite slabs, the shear bond between the two materials should be monitored and its strength must be measured. The current paper aims to study, through an experimental procedure and a computational model, the behaviour of one span composite slabs with profiled steel sheeting. For the experimental procedure the norms of the Eurocode 4 have been applied. Two lines of experiments have been carried out. Static and cyclic loading have been applied to the composite slab specimens. The experimental results have been processed by using the Partial Shear Connection method. For the computational approach of the problem, a three-dimensional model has been created, where contact elements have been implemented at the interface. The comparison between experimental and computational results leads to useful conclusions.