

Μελέτη συμμίκτων πλακών με χαλυβδόφυλλα ISOBAU**Π.Τσορώνης¹, Δ.Μπακάλμπασης²**

¹ Μηχανικός Πληροφορικής ² Μηχανικός Πληροφορικής
CCS AE
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: ptsor@ccs.gr

Ι.Βάγιας¹, Ο.Παλκοπούλου², Ξ.Λιγνός³

¹ Καθηγητής ² ΥΔ ³ Δρ. Μηχανικός
ΕΜΠ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: vastahl@ntua.gr

Κ.Μουλκιώτη

Πολ.Μηχανικός
ISOBAU A.E
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: kmoulkioti@isobau.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση της χρήσης σύμμικτων πλακών στις κατασκευές, καθιστά αναγκαία την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τους στη φάση κατασκευής και τη φάση λειτουργίας.. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει σύμμικτες πλάκες από χαλυβδόφυλλα ειδικού τύπου της εταιρείας ISOBAU, από γαλβανισμένα προφίλ τραπεζοειδούς σχήματος.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των εν λόγω πλακών, υλοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στο εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ και αναπτύχθηκε εξειδικευμένο λογισμικό από την CCS AE. Με τα πειράματα προσδιορίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων $m - k$, όπως απαιτείται για τον έλεγχο της σύμμικτης πλάκας σε διαμήκη διάτμηση. Η αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε με σύνταξη κατάλληλου λογισμικού και δημιουργία πινάκων σχεδιασμού που επιτρέπουν τη μελέτη των σύμμικτων πλακών στη φάση κατασκευής και τη φάση λειτουργίας.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διευρυνόμενη εφαρμογή του δομικού χάλυβα σε κτιριακές και άλλες κατασκευές οδηγεί στη χρήση συμμίκτων πλακών, αποτελούμενων από τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο και έγχυτο σκυρόδεμα. Η μελέτη των ως άνω πλακών διέπεται από τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 4 περί συμμίκτων κατασκευών. Η διαστασιολόγησή τους περιλαμβάνει το

χαλυβδόφυλλο στη φάση κατασκευής και τη σύμμικτη πλάκα στη φάση λειτουργίας. Τα χαλυβδόφυλλα παραλαμβάνουν στη φάση κατασκευής τα φορτία σκυροδέτησης λειτουργώντας ως μεταλλότυπος, ενώ μετά την πήξη του σκυροδέματος συμμετέχουν στη σύμμικτη λειτουργία της πλάκας.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται τη μελέτη συμμίκτων πλακών με χαλυβδόφυλλα ISOBAU. Η σύμμικτη συμπεριφορά μεταξύ του χαλυβδόφυλλου ISOBAU και του σκυροδέματος εξασφαλίζεται με μηχανική σύμπλεξη που δημιουργείται από παραμορφώσεις στο χαλυβδόφυλλο. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς των εν λόγω πλακών, υλοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων από το ΕΜΠ και αναπτύχθηκε εξειδικευμένο λογισμικό από την CCS AE, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

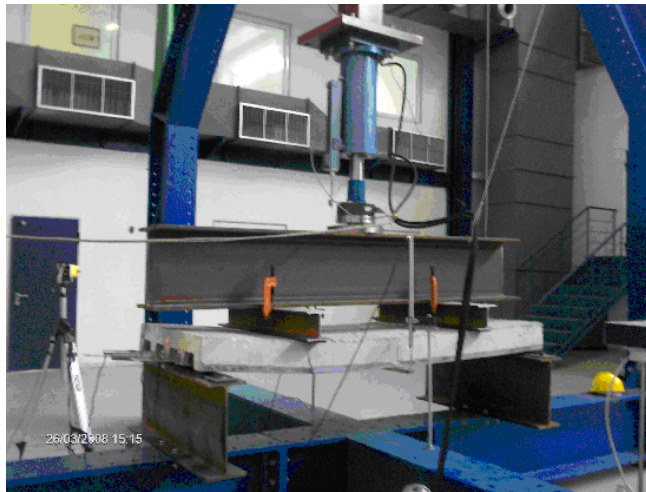
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΕΙΣ

Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός μεγεθών σχεδιασμού των παραμέτρων m και k με τη βοήθεια των οποίων προσδιορίζεται η αντοχή των συμμίκτων πλακών σε διαμήκη διάτμηση. Κατά την πειραματική διαδικασία ακολουθήθηκαν οι διατάξεις του Παραρτήματος Β3 του Ευρωκώδικα 4, Μέρος 1-1. Τα πειραματικά δοκίμια ήταν σύμμικτες πλάκες με χαλυβδόφυλλα ISOBAU. Εκτελέστηκαν δύο σειρές δοκιμών, σειρά Β και σειρά Α, με μήκη πλακών 2,0 και 4,0 m αντιστοίχως. Σε κάθε σειρά εξετάστηκαν δύο πάχη πλακών 15 και 20 cm. Ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων ήταν 12.

Τα δοκίμια χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες των τριών δοκιμών. Το ένα από τα τρία δοκίμια της κάθε ομάδας υποβάλλεται σε στατική δοκιμή υπό αυξανόμενο φορτίο μέχρι αστοχίας. Από τη δοκιμή αυτή προσδιορίζεται το φορτίο αστοχίας W_t (=επιβαλλόμενο φορτίο + βάρος πλάκας + βάρος διάταξης φόρτισης). Το φορτίο αστοχίας ορίζεται ως το μέγιστο φορτίο του πειράματος ή το φορτίο για το οποίο το μέγιστο βέλος υπερβαίνει το $L/50$ αν το βέλος εμφανίζεται πριν το μέγιστο φορτίο. Τα άλλα δύο δοκίμια υποβάλλονται σε δύο κύκλους φόρτισης ως εξής:

- α) επαναλαμβανόμενη φόρτιση 5000 κύκλων μεταξύ των φορτίων $0,20W_t$ και $0,60W_t$.
- β) Ακολουθεί φόρτιση υπό αυξανόμενο φορτίο μέχρι αστοχίας

Όλες οι ιδιότητες των δοκιμών (διαστάσεις, μηχανικά χαρακτηριστικά σκυροδέματος και χάλυβα των φύλλων κλπ.) μετρήθηκαν επί τόπου με κατάλληλες δοκιμές. Τα πειράματα εκτελέστηκαν στο πλαίσιο δοκιμών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ (Σχ. 1). Το κατακόρυφο φορτίο επιβάλλεται από υδραυλική πρέσσα 300 kN τύπου IMMΓ μέσω άκαμπτης μεταλλικής πλάκας σε κεντρική δοκό HEA 400, η οποία μεταφέρει το φορτίο σε δύο δοκούς HEA 140 τοποθετημένες στα τέταρτα του ανοίγματος και στη συνέχεια στο δοκίμιο. Μεταξύ των δοκών HEA 140 και του δοκιμίου παρεμβάλλεται ένα φύλλο σκληρημένης πολυουρεθάνης πλάτους 100 mm προς ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Η αρθρωτή στήριξη του δοκιμίου υλοποιείται μέσω ράβδων οπλισμού Φ16.



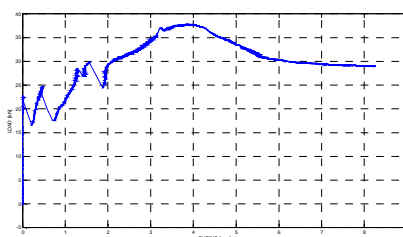
Σχήμα 1 Πειραματική διάταξη

Η μετρητική διάταξη περιλαμβάνει:

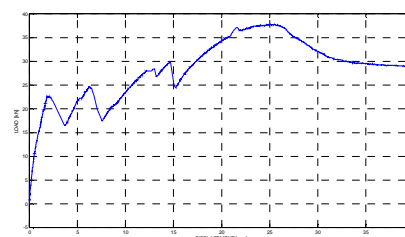
- Μία δυναμοκυψέλη (load cell) ευαισθησίας 5 N προσαρμοσμένη στην πρέσσα προς μέτρηση της επιβαλλόμενης δύναμης
- Δύο ηλεκτρονικά βελόμετρα LVDT, που μετρούν το μεσαίο βέλος αριστερά (W) και δεξιά (E) του δοκιμίου.
- Δύο ηλεκτρονικά βελόμετρα LVDT και δύο ηλεκτρικά βελόμετρα, που μετρούν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ σκυροδέματος και φύλλου

Όλα τα όργανα είναι συνδεδεμένα με Η/Υ προς αυτόματη καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων. Η φόρτιση επιβάλλεται οιονεί στατικά με ελεγχόμενη παραμόρφωση. Προς τούτο προσαρμόζεται ένα ηλεκτρονικό βελόμετρο στην πρέσσα, το οποίο συνδέεται με Η/Υ. Μέσω του Η/Υ προγραμματίζεται η ιστορία φόρτισης και δίνονται οι απαιτούμενες εντολές για την επιβολή της παραμόρφωσης.

Ενδεικτικά διαγράμματα φορτίου – βέλους και φορτίου – ακραίας ολίσθησης δίνονται στο Σχήμα 2.



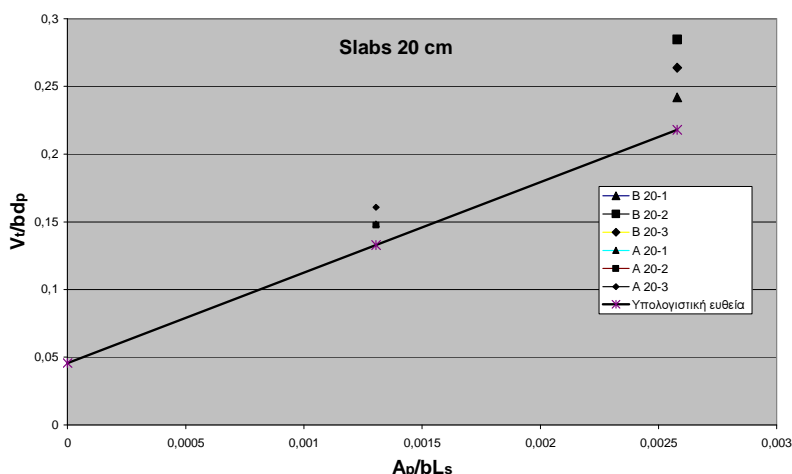
α) φορτίο – βέλος



β) φορτίο – ακραία ολίσθηση

Σχήμα 2 Ενδεικτικά αποτελέσματα πειραμάτων (δοκίμιο B 15 I)

Η αξιολόγηση των πειραμάτων έγινε με βάση τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 4. Τα αποτελέσματα των δοκιμών και η ευθεία προσδιορισμού των παραμέτρων $m - k$ δίνονται στο Σχήμα 3. Οι πειραματικές τιμές των παραμέτρων προσδιορίστηκαν ως $m=67,5$ MPa και $k=0,04372$ MPa. Όλα τα δοκίμια παρουσίασαν όλκιμη συμπεριφορά.



Σχήμα 3: Προσδιορισμός παραμέτρων $m - k$

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Το ειδικό λογισμικό που αναπτύχθηκε μελετά πλάκες δαπέδων από τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο της ISOBAU και έγχυτο σκυρόδεμα, των οποίων το άνοιγμα είναι κατά τη διεύθυνση των νευρώσεων. Περιλαμβάνονται πλάκες με ακραίες στηρίξεις και πλάκες υπό μορφήν προβόλου. Το λογισμικό εφαρμόζεται για το σχεδιασμό κτιριακών κατασκευών στις οποίες τα επιβαλλόμενα φορτία είναι κατά κύριο λόγο στατικά, όπως και βιομηχανικά κτίρια των οποίων τα δάπεδα μπορεί να υπόκεινται σε κινητά φορτία.

Η διαστασιολόγηση των συμμίκτων πλακών περιλαμβάνει το χαλυβδόφυλλο στη φάση κατασκευής και τη σύμμικτη πλάκα στη φάση λειτουργίας. Οι επιμέρους έλεγχοι συνοψίζονται στον Πίνακα 1 και υλοποιήθηκαν στο αναπτυχθέν εξειδικευμένο λογισμικό.

Φάσεις έργου	Διατομή	Ο.Κ.Α	Ο.Κ.Α
Φάση Κατασκευής	Χαλυβδόφυλλο	Παραμορφώσεις	<ul style="list-style-type: none"> • Κάμψη • Τέμνουσα • Αντίδραση στήριξης • Αλληλεπίδραση ροπών-τεμνουσών, ροπών – αντίδρασης στήριξης
Φάση λειτουργίας	Σύμμικτη πλάκα	<ul style="list-style-type: none"> • Παραμορφώσεις • Ρηγμάτωση • Ταλαντώσεις 	<ul style="list-style-type: none"> • Κάμψη • Τέμνουσα • Διατμητική σύνδεση • Διάτρηση (έναντι συγκεντρωμένων φορτίων) • Αντοχή σε πυρκαγιά

Πιν. 1- Απαιτούμενοι έλεγχοι συμμίκτων πλακών

5. ΣΤΑΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ - ΑΝΑΛΥΣΗ

5.1 Φάση κατασκευής (χαλυβδόφυλλο)

Ανάλογα με το τρόπο έδρασης τους επί των δοκών, το στατικό σύστημα των χαλυβδοφύλλων είναι αμφιέριστη ή συνεχής δοκός. Δεδομένου του λεπτοτόιχου της διατομής τους, τα εντατικά μεγέθη προσδιορίζονται με ελαστική ανάλυση, με ή χωρίς ανακατανομή ροπών (EN 1994-1-1 @ 9.4.1 (2)). Τα δρώντα εντατικά μεγέθη συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη αντοχής, όπως προσδιορίζονται από τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-3.

5.2 Φάση λειτουργίας (σύμμικτη πλάκα)

Οι σύμμικτες πλάκες επιλύονται ως γραμμικά στοιχεία, αμφιέριστες ή συνεχείς δοκοί. Ο προσδιορισμός των δρώντων εντατικών μεγεθών γίνεται με ελαστική αρηγμάτωση ανάλυση, (EN 1994-1-1 @ 9.4.1 (1a)), είτε πρόκειται για Ο.Κ.Α είτε για Ο.Κ.Λ (EN 1994-1-1 @ 9.4.1 (2)). Στην αρηγμάτωση ανάλυση, η οποία εφαρμόζεται πάντα από το λογισμικό, επιτρέπεται η ανακατανομή των ροπών στηρίζεων μέχρι 30% (EN 1994-1-1 @ 9.4.1 (3)).

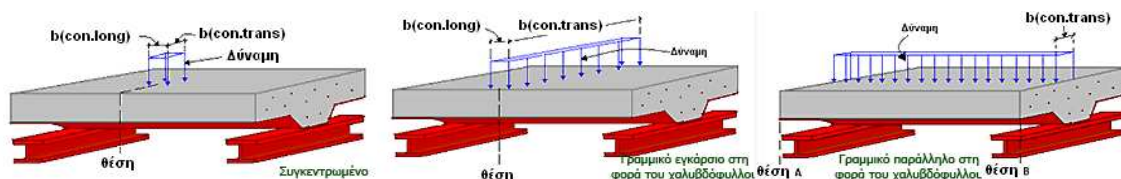
6. ΦΟΡΤΙΑ

Το χαλυβδόφυλλο εξετάζεται στη φάση κατασκευής, όπου χρησιμοποιείται ως μεταλλότυπος, δηλαδή πριν από την πήξη του έγχυτου σκυροδέματος. Τα κατακόρυφα φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι (EN 1994-1-1 @ 9.3.1 (2a)):

- Ίδιο βάρος χαλυβδοφύλλου g_p
- Ίδιο βάρος σκυροδέματος g_c .
- Τα κατασκευαστικά φορτία κατά τη φάση διάστρωσης του σκυροδέματος.

Τα ίδια βάρη προσδιορίζονται από τις ονομαστικές διαστάσεις των στοιχείων. Σε περίπτωση που το μέγιστο βέλος δ_{max} του χαλυβδόφυλλου υπό το ίδιο βάρος του και το ίδιο βάρος του υγρού σκυροδέματος είναι μεγαλύτερο από $h_c / 10$ (Σχ. 4), το πάχος της πλάκας πρέπει να προσαυξηθεί κατά $0,7 \cdot \delta_{max}$ (EN 1994-1-1 @ 9.3.2 (2)).

Το ίδιο βάρος του υγρού σκυροδέματος $\gamma_{c,wet}$ μπορεί να λαμβάνεται μεγαλύτερο από αυτό του πηγμένου κατά 1 kN/m^3 (EN 1991-1-6 @ 4.11.2 (2)). Η παραπάνω διάταξη απαιτεί μια αρχική επίλυση του φορέα με την ονομαστική τιμή του ίδιου βάρους του σκυροδέματος προκειμένου να υπολογιστεί το μέγιστο βέλος του χαλυβδόφυλλου και έτσι να προκύψει η τελική τιμή του φορτίου. Οι τύποι φορτίων που λαμβάνονται υπόψη κατά τη φάση λειτουργίας δίνονται στο Σχήμα 5.



Σχ. 5- Τύποι φορτίων

7. ΕΙΔΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΣΗΣ – ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Σύμμικτη διατομή και καταστάσεις φόρτισης

Η σύμμικτη πλάκα αποτελείται από χάλυβα και σκυρόδεμα με αποτέλεσμα την εμφάνιση μη γραμμικών φαινομένων κατά την στατική της επίλυση. Η προσομοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών μιας σύμμικτης διατομής επιτυγχάνεται μέσω του συντελεστή ισοδυναμίας χάλυβα-σκυροδέματος. Μια κατάσταση φόρτισης μπορεί να επιβάλλεται πριν ή μετά τη σκυροδέτηση, με αποτέλεσμα τη μεταβολή του φορέα. Έτσι, η κάθε φόρτιση εφαρμόζεται σε ένα φορέα με σταθερή γεωμετρία (μήκη ανοιγμάτων, στηρίξεις κλπ), αλλά πιθανόν διαφορετικά αδρανειακά χαρακτηριστικά διατομών μεταξύ φορτίσεων. Τέλος, οι συνδυασμοί φορτίσεων που δημιουργούνται, συνδυάζουν γραμμικά τα εντατικά μεγέθη κάθε φόρτισης (και ουσιαστικά κάθε διαφορετικού φορέα), προσεγγίζοντας έτσι ένα μη γραμμικό πρόβλημα με ένα ισοδύναμο γραμμικό.

Προσωρινές στηρίξεις και αριθμητική αντιμετώπισή τους από το λογισμικό

Το λογισμικό καλύπτει την πιθανή αναγκαιότητα ύπαρξης προσωρινών στηρίξεων στην φάση κατασκευής, που αλλάζουν τον φορέα όχι μόνο ως προς τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής αλλά και ως προς την γεωμετρία, αφού τώρα υπάρχουν στηρίξεις στην φάση κατασκευής που αφαιρούνται στη φάση λειτουργίας. Μια απλοποιητική προσέγγιση που θεωρεί δύο φορείς εντελώς ανεξάρτητους μεταξύ τους, έναν για τη φάση κατασκευής και έναν για τη φάση λειτουργίας που επιλύονται και διαστασιολογούνται ξεχωριστά δεν είναι αποδεκτή, λόγω του ότι όλα τα εντατικά μεγέθη της φάσης κατασκευής θα πρέπει να μεταφερθούν και στην σύμμικτη φάση όταν υπολογίζονται συνδυασμοί. Για παράδειγμα ένα βέλος που προκύπτει στο μέσο ενός ανοίγματος στη φάση κατασκευής δεν μπορεί να αγνοηθεί στη φάση λειτουργίας αλλά μεταφέρεται και στη σύμμικτη φάση, άσχετα εάν η σύμμικτη διατομή υπό την επίδραση των μόνιμων και των κινητών φορτίων παρουσιάζει μικρότερα βέλη.

Η ακριβής προσομοίωση της προσωρινής στήριξης στη φάση κατασκευής υλοποιείται ως εξής:

Ο φορέας με τις προσωρινές στηρίξεις επιλύεται στατικά και καταγράφεται η τιμή των αντιδράσεων σε αυτές τις στηρίξεις. Δημιουργείται νέος φορέας χωρίς τις προσωρινές στηρίξεις και η τιμή των αντιδράσεων που καταγράφηκε προστίθεται σαν συγκεντρωμένη φόρτιση σε όλες τις φορτίσεις της φάσης κατασκευής στα ίδια σημεία. Η αφαίρεση της προσωρινής στήριξης, επιτυγχάνεται με την δημιουργία νέων καταστάσεων φόρτισης, αντίγραφα αυτών που επιβάλλονται στη φάση κατασκευής και με συγκεντρωμένα φορτία τις προηγούμενες αντιδράσεις αλλά με αντίστροφη φορά.

8. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη ειδικού τμήματος στο λογισμικό, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο που έχουν την δυνατότητα να παραλάβουν οι σύμμικτες πλάκες με χαλυβδόφυλλο ISOBAU. Συγκεκριμένα, για κάθε τοπολογία σύμμικτης πλάκας, υπολογίστηκε με επαναληπτική διαδικασία το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο που μπορεί να παραλάβει. Σε περίπτωση αστοχίας λόγω βελών στη φάση κατασκευής προστέθηκαν μέχρι δύο

προσωρινές στηρίξεις. Στον πίνακα 2 δίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συνόλου των φορέων που μελετήθηκαν (σύνολο 1216 φορείς).

Αμφιέρειστη πλάκα		
Ανοιγμα	Ύψος πλάκας	Πάχη χαλυβδόφυλλων
1m έως 5.5m με βήμα 250mm (19 μήκη)	130mm έως 200mm με βήμα 10mm (8 ύψη)	0.75mm, 1.00mm, 1.25mm, 1.5mm (4 πάχη)
Συνεχής πλάκα δύο ανοιγμάτων		
Ανοιγμα	Ύψος πλάκας	Πάχη χαλυβδόφυλλων
1m έως 5.5m με βήμα 250mm (19 μήκη)	130mm έως 200mm με βήμα 10mm (8 ύψη)	0.75mm, 1.00mm, 1.25mm, 1.5mm (4 πάχη)

Πιν. 2- Στοιχεία φορέων παραμετρικής μελέτης

Παρατηρήθηκε σε συγκεκριμένη γεωμετρία φορέα να μειώνεται το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο ενώ αυξάνεται το ύψος της πλάκας σκυροδέματος, όπως φαίνεται και στο απόσπασμα αποτελεσμάτων στον πίνακα 3. Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος βελών στην φάση κατασκευής ικανοποιείται οριακά χωρίς ανάγκη προσωρινής στήριξης ενώ στη φάση λειτουργίας αποτυγχάνει με αποτέλεσμα τη μείωση του μέγιστου ωφέλιμου φορτίου. Σαν συμπέρασμα εξάγεται το ότι ακόμα και αν δεν απαιτείται η προσωρινή στήριξη στη φάση κατασκευής, πιθανόν να είναι χρήσιμη η τοποθέτησή της για την αποφυγή προβλημάτων με βέλη εκτός ορίων στη φάση λειτουργίας.

h/L	1750	2000	2250	2500	2750
170	15.51	13.21	11.43	9.99	8.82
180	16.10	13.70	11.83	10.34	9.12
190	16.68	14.18	12.23	10.68	6.94
200	17.24	14.64	12.62	11.01	9.68

Πιν. 3- Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο (kN/m^2) ανά άνοιγμα $L(mm)$ και ύψος πλάκας $h(mm)$

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΒΑΓΙΑΣ Ι., ΘΑΝΟΠΟΥΛΟΣ Π.: Οδηγός σχεδιασμού κτιρίων από σύμμικτη κατασκευή, 2005
- [2] ΒΑΓΙΑΣ Ι.: Σύμμικτες Κατασκευές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2001
- [3] ProfilArbed, Design Handbook for Braced Composite Steel-Concrete Buildings according to Eurocode 4, ECCS-Publication 96, 2000
- [4] LAWSON, R.M.: Design of Composite Slabs and Beams with Steel Decking, SCI Publication 055, 1989

Mechanical behaviour of the ISOBAU steel sheeting in composite slab**I. Vayas¹, O. Palkopoulou², X. Lignos³**¹ Professor ² PhD Student, ³ Dr. Engineer
NTUA, School of Civil Engineering
ATHENS

e-mail: vastahl@central.ntua.gr

P. Tsoroni¹, D. Bakalbasis²¹ Software Engineer ² Software Engineer
CCS S.A., ATHENSe-mail : ptsor@ccs.gr**K. Moulkioti**

Civil Engineer

ISOBAU, ATHENS

e-mail : kmoulkioti@isobau.gr

SUMMARY

The increased application of composite slabs in building structures necessitates the study of their mechanical behaviour. This paper presents experimental investigations on composite slabs using a special type of steel sheeting produced by the company ISOBAU and relevant design software. The sheeting is made of cold formed galvanised profiles of trapezoidal shape reinforced against local buckling.

A series of tests on composite slabs was performed by in the Laboratory of Steel Structures at NTUA. Twelve experiments were carried out. Both monotonic and cyclic tests were performed, following the provisions of EN 1994-1.1, Annex B. Subsequently, specialised software was developed by the software company CCS S.A that enables the quick design of composite slabs with ISOBAU sheeting in the construction phase, where the sheeting acts as shuttering, and the service state where the sheeting acts compositely with the concrete. Additionally design tables were developed that may be used for the practical applications.