ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΝΕΛ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ

Μαρία-Ελένη Δασίου
Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφια διδάκτωρ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: medasiou@yhoo.com

Ιωάννης Βάγιας
Καθηγητής ΕΜΠ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: vastahl@central.ntua.gr

Ξενοφών Λιγνός
Δρ. Μηχανικός, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. ΕΜΠ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Αθήνα, Ελλάδα
e-mail: lignosx@central.ntua.gr

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς πλακών sandwich ISORIB και ISOWAVE της Εταιρείας ISOBAU, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως κατακόρυφες εξωτερικές επενδύσεις (wall panels) βιομηχανικών και άλλων κτιρίων από χάλυβα. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των πλακών με τη βοήθεια των οποίων προσδιορίζεται η αντοχή και λειτουργικότητά τους ως στοιχεία επενδύσεων. Όλες οι πειραματικές διαδικασίες έγιναν σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές και ιδιαίτερα τις διατάξεις του EN 14509 Self-supporting double skin metal faced insulating panels – Factory made products - Specifications. Η σύνταξη πινάκων σχεδιασμού και η αξιολόγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αριθμητικού μοντέλου.

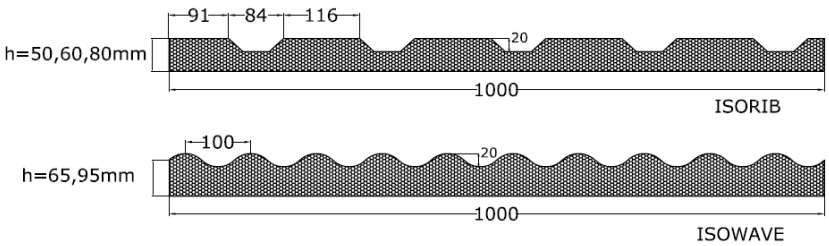
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των sandwich πάνελ ως στοιχεία εξωτερικών επενδύσεων βιομηχανικών κτιρίων, γραφείων, κατοικιών ή κτιρίων άλλων χρήσεων παρουσιάζει μεγάλη αύξηση τα τελευταία χρόνια, φτάνοντας πλέον σε μια μέση ετήσια παραγωγή 200 εκατομμυρίων m^2 στην Ευρώπη. Καθώς πρόκειται για προκατασκευασμένα στοιχεία, η εν ξηρώ δόμηση τους επιτρέπει στο εργοτάξιο την εύκολη και γρήγορη τοποθέτηση τους, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Στις πιο συνήθης εφαρμογές, τα πάνελ αποτελούνται από δύο λεπτά εξωτερικά μεταλλικά φύλλα διαφόρων μορφών και πάχους 0,4-0,75mm, με ενδιάμεσο πυρήνα πολυουρεθάνης πάχους 50-90 mm. Αν και τα πάνελ εν γένει στη πράξη δεν λειτουργούν προς το παρόν ως φέροντα στοιχεία μιας κατασκευής, υπόκεινται άμεσα και έμμεσα σε φορτία, τα οποία καλούνται να μεταφέρουν με ασφάλεια στις στηρίξεις της κατασκευής. Ο προσδιορισμός της αντοχής τους είναι απαραίτητος για τη χρήση τους, είναι όμως ταυτόχρονα και πολύπλοκος καθώς αποτελούνται από υλικά διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων και παχών. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να παρέχονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες πίνακες σχεδιασμού της αντοχής των προϊόντων τους, τα οποία θα πρέπει να καλύπτουν ταυτόχρονα και τις απαιτήσεις των νέων ευρωπαϊκών προδιαγραφών EN14509 [1]. Η συμμόρφωση των προϊόντων με τις απαιτήσεις πρέπει να αποδεικνύεται με αρχική δοκιμή τύπου (ITT), έλεγχο της παραγωγής (FPT) και όταν απαιτείται αρχική επιθεώρηση και συνεχή επιτήρηση (FPC). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις πλακών sandwich ISORIB και ISOWAVE της Εταιρείας ISOBAU διαφόρων παχών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως κατακόρυφες εξωτερικές επενδύσεις (wall panel).

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

3.1 Γενικά

Η πειραματική διερεύνηση της παρούσας εργασίας αφορά πέντε (5) τύπους πάνελ της εταιρείας ISOBAU που αποτελούνται από εξωτερικά μεταλλικά φύλλα τραπεζοειδούς (ISORIB) και κυματοειδούς μορφής (ISOWAVE) με ενδιάμεσο πυρήνα πολυουρεθάνης. Στο σχήμα 1 δίνονται η γεωμετρία και οι διαστάσεις των υπό εξέταση πάνελ. Η αναφορά σε κάθε τύπο πάνελ γίνεται στο εξής βάση της μορφής του εξωτερικού φύλου και του συνολικού πάχους τους.

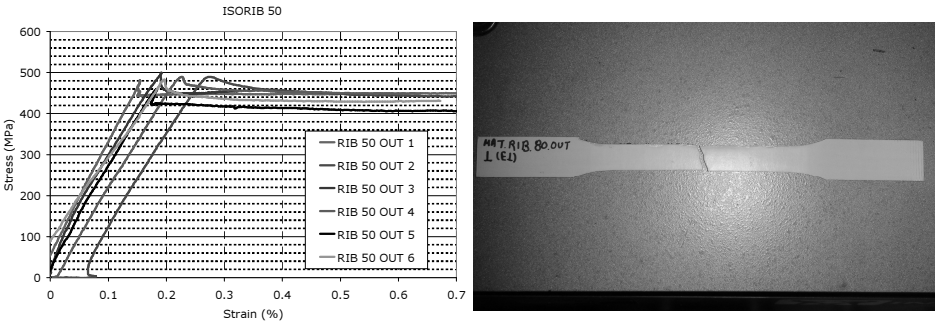


Σχ. 1: Γεωμετρία και διαστάσεις των εξεταζόμενων πάνελ. Οι διαστάσεις δίνονται σε mm.

3.2 Δοκιμές εφελκυσμού ελασμάτων και προσδιορισμός του πάχους τους

Τα εξωτερικά χαλύβδινα ελάσματα προέρχονται από ρόλους (coils), τα οποία διαθέτουν

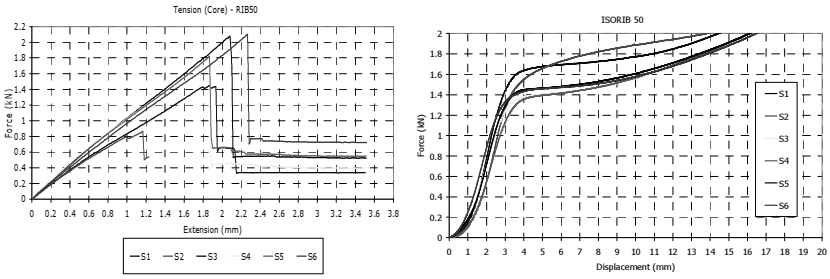
ονομαστικές τιμές του πάχους t και του ορίου διαρροής f_y. Η ποιότητα του χάλυβα ήταν S 320. Σκοπός των δοκιμών είναι ο προσδιορισμός των πραγματικών τιμών του πάχους t_{obs} με ακρίβεια 1/100mm και του ορίου διαρροής $f_{y,obs}$ των φύλλων. Οι μετρήσεις είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό διορθωτικών συντελεστών που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές κάμψης (σε αμφιέρειστες πλάκες και σε ενδιάμεση στήριξη). Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 10002 -1. Για τα πειράματα ο απαιτούμενος αριθμός δοκιμίων από κάθε coil είναι 6, από τα οποία 4 πρέπει να λαμβάνονται από την άκρη (σε ελάχιστη απόσταση 50 mm) και 2 από τη μέση. Η κατεύθυνση των δοκιμίων πρέπει να είναι παράλληλη στη διαμήκη διεύθυνση του πάνελ. Οι δοκιμές εφελκυσμού έγιναν με συσκευή δοκιμών θλίψεως - εφελκυσμού (universal testing machine) τύπου INSTRON 300LX, με επενεργητή ικανότητας 300 kN τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Στο σχήμα 2 δίνονται οι ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες σ – ε και η τυπική μορφή αστοχίας των δοκιμίων των ελασμάτων σε εφελκυσμό.



Σχ. 2: Πειραματικές καμπύλες των δοκιμών εφελκυσμού ελασμάτων και μορφή αστοχίας

3.3 Δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης πυρήνα

Οι δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης του πυρήνα πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής (f_{Ct}) και θλιπτικής αντοχής (f_{Cc}) του πυρήνα πολυουρεθάνης και του μέτρου ελαστικότητας. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής είναι απαραίτητες τόσο ως τιμές ελέγχου (FPC) όσο και για τον προσδιορισμό του διορθωτικού συντελεστή k_2 (EN 14509,A5.5.5.) της αντοχής σε ρυτίδωση σε περιπτώσεις χαμηλής αντοχής σε εφελκυσμό.
Τα δοκίμια είναι τετράγωνης διατομής διαστάσεων 100x100mm (με ανοχή ±3mm), τα οποία έχουν κοπεί από την δεσπόζουσα διάσταση του προφίλ των πάνελ. Στην δοκιμή εφελκυσμού τα ελάσματα δεν έχουν αποκολληθεί από τα δοκίμια έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής του πυρήνα και η αντοχή πρόσφυσης μεταξύ του πυρήνα και των μεταλλικών ελασμάτων. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια που βρίσκονταν σε κανονική θερμοκρασία (20^0C) αλλά και σε δοκίμια, τα οποία είχαν θερμανθεί σε φούρνο για 20h με 24h στους $80^{+3}_{-1}{}^0$C. Σύμφωνα με το EN 14509 παρ. 5.2.1.6, η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,018 MPa. Στο σχήμα 3 δίνονται οι ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες σ – ε και στο σχήμα 4 οι τυπικές μορφές αστοχίας των δοκιμίων των ελασμάτων σε εφελκυσμό.



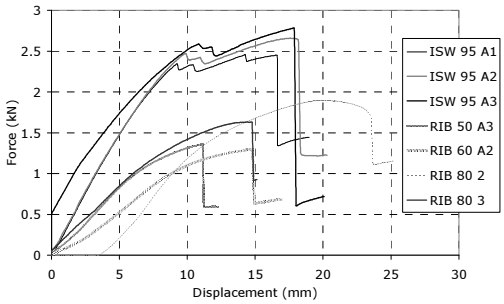
Σχ. 3: Ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες δοκιμών εφελκυσμού και θλίψης πυρήνα

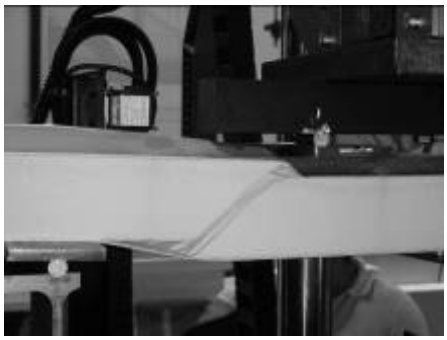
Σχ. 4: Μορφή αστοχίας δοκιμίων σε εφελκυσμό - αστοχία ένωσης της πολυουρεθάνης με το έλασμα.(πάνω) και αστοχία πολυουρεθάνης(κάτω)

3.4 Δοκιμές διάτμησης

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής του πυρήνα πολυουρεθάνης και του μέτρου διάτμησης πραγματοποιείται μέσω δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων μιας στενής λωρίδας της διαμήκης διεύθυνσης του πάνελ. Στην περίπτωση των πάνελ ISOWAVE εξετάζονται δοκίμια που έχουν κοπεί από το θηλυκό αλλά και από το αρσενικό τμήμα του προφίλ. Η έδραση των δοκιμίων υλοποιήθηκε με κύλιση στο ένα άκρο και με άρθρωση στο άλλο άκρο. Σύμφωνα με τον κανονισμό EN14509, το μήκος των δοκιμίων πρέπει να είναι τόσο ώστε η αστοχία στο πείραμα να είναι καθαρά διατμητική. Εάν αυτό δεν επιτευχθεί με το προτεινόμενο μήκος (περίπου 1m), τότε το άνοιγμα μειώνεται ανά 10cm έως ότου προκύψει διατμητική αστοχία. Αν και το άνοιγμα μεταξύ των εδράσεων ποίκιλε, δεν κατέστει δυνατό στις περισσότερες δοκιμές να προκληθεί διατμητική αστοχία, καθώς η αστοχία προήλθε εν γένει από σύνθλιψη του ελάσματος λόγω αποκόλλησης της πολυουρεθάνης (Σχήμα 5).Στο σχήμα 6 δίνονται οι ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες σ – ε και η μορφή αστοχίας των δοκιμίων στα οποία επετεύχθη διατμητική αστοχία.

Σχ. 5: Αστοχία λόγω σύνθλιψης του ελάσματος μετά την αποκόλληση της πολυουρεθάνης





Σχ. 6: Ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες δοκιμών και μορφή διατμητικής αστοχίας

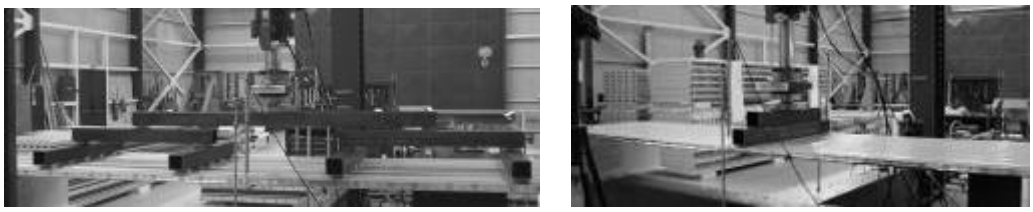
3.5 Δοκιμές κάμψης σε αμφιέρειστες πλάκες και σε ενδιάμεσες στηρίξεις

Οι δοκιμές κάμψης πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο δοκιμών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών ΕΜΠ. Το κατακόρυφο θλιπτικό φορτίο επιβάλλεται από υδραυλικό επενεργητή ±500 kN. Το μήκος των δοκιμίων πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλο ώστε η αστοχία της πλάκας να είναι καθαρά καμπτική. Στον EN14509 δίνεται πίνακας (Πίνακας A.1/EN14509), ο οποίος σχετίζει το απαιτούμενο μήκος με το ύψος των πλακών. Βάσει αυτού το μήκος των δοκιμίων τελικώς είναι 4,3m.

Η αντοχή σε κάμψη αμφιέρειστων πλακών προσδιορίζεται μέσω δοκιμών κάμψης τεσσάρων σημείων (Σχήμα 7α). Η ισοκατανομή του σε τέσσερα σημεία υλοποιήθηκε μέσω συστοιχίας κοιλοδοκών με υλοποιούμενες κύλισης και αρθρώσεις. Πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων, όπου τα παραπάνω συγκεντρωμένα φορτία ασκήθηκαν στην διαμορφωμένη πλευρά των πλακών μέσω κοιλοδοκών (διαστάσεων 100x100x5mm) και μια δεύτερη, όπου τα φορτία ασκήθηκαν στην ελαφρώς διαμορφωμένη (επίπεδη) πλευρά, προκαλώντας εφελκυσμό στη διαμορφωμένη πλευρά. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, στην περίπτωση των πάνελ ISORIB, για την ορθότερη κατανομή των φορτίων χρησιμοποιήθηκαν ξύλινα παρεμβύσματα τετραγωνικής διατομής, τα οποία μετέφεραν την φόρτιση στα ταπεινότερα τμήματα του προφίλ (Σχήμα 8α). Στην περίπτωση των πάνελ ISOWAVE η χρήση ξύλινων παρεμβυσμάτων δεν είναι εφικτή λόγω του σχήματος του προφίλ (κυματοειδές). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν ειδικά τεμάχια που δόθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρεία, τα οποία «κούμπωναν» με το προφίλ της πλάκας επιτρέποντας ομοιόμορφη κατανομή της φόρτισης (Σχήμα 8β).

Αντίστοιχα είναι απαραίτητη και η εύρεση της καμπτικής αντοχής σε ενδιάμεση στήριξη συνεχόμενων πάνελ δύο ή περισσοτέρων ανοιγμάτων, η οποία πραγματοποιείται μέσω δοκιμών κάμψης του πάνελ, στο οποίο ασκείται γραμμικό φορτίο στο μέσον του ανοίγματος στη μη-διαμορφωμένη πλευρά του μέσω κοιλοδοκών. Στο σχήμα 9 δίνονται οι

ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες σ – ε και στο σχήμα 10 η μορφή αστοχίας των δοκιμίων.

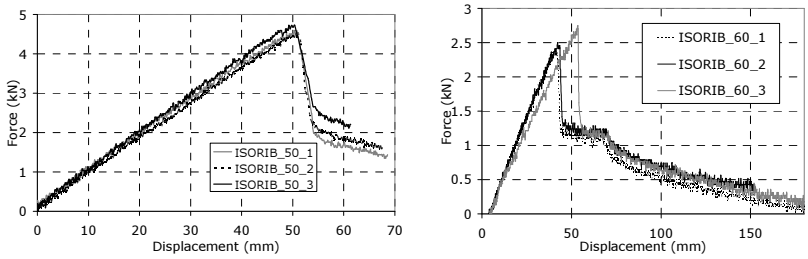


(α) (β)

Σχ. 7: Διάταξη των δοκιμών κάμψης (α) σε τέσσερα σημεία και (β) σε ενδιάμεση στήριξη

(α) (β)

Σχ. 8: Διάταξη των δοκιμών κάμψης (α) σε τέσσερα σημεία και (β) σε ενδιάμεση στήριξη



(α) (β)

Σχ. 9: Ενδεικτικές πειραματικές καμπύλες F-δ των δοκιμών κάμψης (α) σε τέσσερα σημεία και (β) σε ενδιάμεση στήριξη

Σχ. 10:Τυπική μορφή αστοχίας των δοκιμών κάμψης σε τέσσερα σημεία

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

4.1 Προσομοίωση

Για τον υπολογισμό της αντοχής πάνελ δίνονται στη βιβλιογραφία εν γένει μόνο αναλυτικές επιλύσεις. Στην παρούσα εργασία προτείνεται ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης πάνελ, με το οποίο είναι εφικτός ο υπολογισμός της αντοχής του (με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και συνθήκες στήριξης και φόρτισης), ενώ έχει εφαρμογή με τη χρήση απλών αριθμητικών εργαλείων. Το μοντέλο προσομοιώνει την πλάκα ως δικτύωμα από ραβδόμορφα στοιχεία αποτελούμενο από τα πέλματα που δίνονται ως στοιχεία δοκού και τις ράβδους δικτύωσης που δίνονται ως στοιχεία ράβδου με αξονική καταπόνηση μόνο. Στο Σχήμα 11 φαίνεται για παράδειγμα μία πλάκα τύπου ISORIB, με άνω πέλμα από τραπεζοειδές φύλλο και κάτω πέλμα από επίπεδο φύλλο. Το ύψος του δικτυώματος Δz είναι ίσο με την απόσταση των κέντρων βάρους των μεταλλικών φύλλων. Η αξονική δυσκαμψία τους (δυστένεια) τους προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$E_d A_d = \frac{G_c \quad A_c}{2 \quad sin^2 \alpha \quad cos \alpha} \qquad (1)$$

, όπου G_c είναι μέτρο διάτμησης του αφρού όπως προσδιορίστηκε από τα πειράματα, A_c το εμβαδόν του αφρού μεταξύ των εξωτερικών φύλλων και α η γωνία κλίσης των διαγωνίων με $\tan\alpha = \frac{\Delta z}{\Delta x}$.

Σχ. 11:Μοντέλο προσομοίωσης πάνελ

4.2 Επαλήθευση προσομοίωσης

Για την επαλήθευση του αριθμητικού προσομοιώματος κατασκευάσθηκαν δύο μοντέλα, ένα στο οποίο και τα δύο ελάσματα είναι επίπεδα και ένα στο οποίο το εξωτερικό έλασμα είναι διαμορφωμένο. Τα αποτελέσματα, συγκρίνονται σε όρους τάσεων και παραμορφώσεων με γνωστές από τη βιβλιογραφία αναλυτικές επιλύσεις (Πίνακας 1). Όλα τα πάνελ έχουν μήκος 4 m, στα οποία ασκείται ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο 1kN/m.

Τύπος ελάσματος / πάχος πάνελ/Αριθμός ανοιγμάτων	Αναλυτικά αποτελέσματα [Πίνακες Ε.10.1 και Ε.10.2, EN14509]		Αριθμητικά αποτελέσματα	
	Παραμόρφωση [mm]	Τάση [MPa]	Παραμόρφωση [mm]	Τάση [MPa]
Επίπεδο-Επίπεδο/50/1	39,90	100,80	38,30	100,50

Επίπεδο-Επίπεδο/60/1	34,70	93,20	33,10	93,20
Επίπεδο-Επίπεδο/80/1	21,10	69,80	21,00	69,10
Επίπεδο-Διαμορφωμένο/50/1	48,20	155,00	47,50	153,20
Επίπεδο-Διαμορφωμένο /60/1	39,00	130,00	38,00	123,00
Επίπεδο-Διαμορφωμένο/80/1	22,50	89,70	23,20	87,20

Πιν. 1: Σύγκριση αριθμητικών και αναλυτικών υπολογισμών.

4.3 Πίνακες σχεδιασμού πάνελ ISORIB και ISOWAVE

Βάση των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων προέκυψαν για τους δύο υπό εξέταση τύπους πάνελ της εταιρείας ISOBAU οι πίνακες σχεδιασμού, οι οποίοι διαμορφώθηκαν έτσι ώστε να παρέχουν για κάθε τύπο πάνελ τις χαρακτηριστικές τιμές αντοχής για ανεμοπίεση και αναρρόφηση συναντήσει του στατικού συστήματος, του μήκους του ανοίγματος και της κατηγορίας χρώματος. Ενδεικτικά δίνεται ένα κομμάτι του πίνακα σχεδιασμού στο σχήμα 12.

Three spans		Uniform wind loading Width of end supports: 40mm Width of middle support : 80mm				40 80 80 40					
Panel type	Color category	Wind load kN/m²									
		1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	4.5m	5.0m	5.5m	6.0m
ISORIB 50	I	4.106	2.914	2.270	1.708	1.272	0.983	0.771	0.607	0.491	0.406
	II	4.106	2.914	2.270	1.708	1.272	0.983	0.771	0.607	0.491	0.406
	III	4.106	2.914	2.270	1.708	1.272	0.983	0.771	0.607	0.491	0.406
ISORIB 60	I	4.195	3.015	2.363	1.864	1.574	1.117	0.834	0.647	0.516	0.422
	II	4.195	3.015	2.363	1.864	1.574	1.117	0.834	0.647	0.516	0.422
	III	4.195	3.015	2.363	1.864	1.574	1.117	0.834	0.647	0.516	0.422
ISORIB 80	I	5.102	3.651	2.855	2.350	1.999	1.740	1.523	1.247	1.035	0.843
	II	5.102	3.651	2.855	2.350	1.999	1.740	1.523	1.247	1.035	0.843
	III	5.102	3.651	2.855	2.350	1.999	1.740	1.523	1.247	1.035	0.843
ISOWAVE 65	I	3.959	2.877	2.268	1.874	1.599	1.208	0.915	0.718	0.579	0.477
	II	3.959	2.877	2.268	1.874	1.599	1.208	0.915	0.718	0.579	0.477
	III	3.959	2.877	2.268	1.874	1.599	1.208	0.915	0.718	0.579	0.477
ISOWAVE 95	I	7.560	5.552	4.398	2.689	1.766	1.245	0.916	0.688	0.535	0.428
	II	7.560	5.552	4.398	2.689	1.766	1.245	0.916	0.688	0.535	0.428
	III	7.560	5.552	4.398	2.689	1.766	1.245	0.916	0.688	0.535	0.428

Σχ. 12:Ενδεικτικός πίνακας σχεδιασμού πάνελ

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EN 14509: ‘Self-supporting double skin metal insulating panels – Factory made products – Specifications’, 2006

[2] European Recommendations for Sandwich Panels: Part 1: Design.ECCS/CIB Report – *CIB Publication No 257: 23 Oct 2000*

[3] J M DAVIES. “Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Science”, 2001

[4] BEMER, K.: ‘Praxisgerechte Nachweise zur Trag- und Gebrauchsfähigkeit von Sandwichbauteilen’, *Stahlbau 67*, 1998, H. 12, 910-925

[5] POTER, H.. “Metallleichtbaukonstruktionen: Früher und heute”, *Stahlbau 78*, 2009, H. 5, 288-297

[7] GOSOWSKI, B., KOZOW, M. “Selected problems of design of light cladding sandwich panels with slightly profiled metal faces”, *Archives of Civil Engineering*, 55, 3, 2009, 301-321

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF SANDWICH PANELS

Maria-Eleni Dasiou
Civil Engineer, Phd Student
Steel Structures Laboratory, National Technical University of Athens
Athens, Greece country
e-mail: medasiou@yahoo.com

Ioannis Vayas
Professor
Steel Structures Laboratory, National Technical University of Athens
Athens, Greece country
e-mail: vastahl@central.ntua.gr

Xenophon Lignos
Dr. Engineer, Member of Special & Lab Teaching Staff
Steel Structures Laboratory, National Technical University of Athens
Athens, Greece country
e-mail: lignosx@central.ntua.gr

SUMMARY

Sandwich panels composed of two metal faces and an insulating core are widely used as cladding and roofing elements of buildings. A new European Specification, EN 14509 [1], sets-up the requirements for these factory made products. This paper presents the necessary tests and the accompanying analyses that are required for the design of wall panels. It introduces an innovative numerical model operable with conventional software, which permits the design of sandwich panels with flat and profiled faces for any type of loading and supporting conditions.