

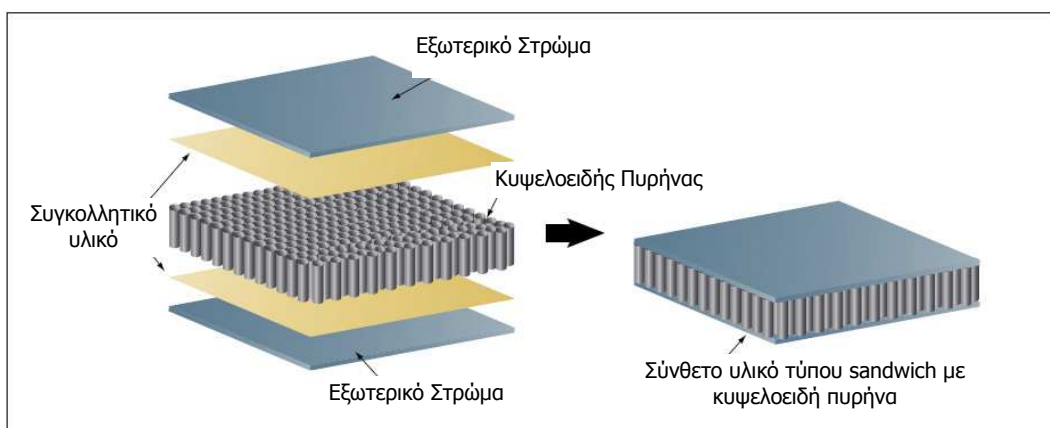


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων δομικών σύνθετων υλικών
τύπου sandwich και βέλτιστος σχεδιασμός**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΤΑΜΟΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΧΑΤΖΗΓΕΩΡΓΙΟΥ**

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2020

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο σπουδών για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος ειδίκευσης που απονέμει το Τμήμα Μηχανικών και Επιστήμης των Υλικών της Πολυτεχνικής σχολής Ιωαννίνων.

Εγκρίθηκε την από την εξεταστική επιτροπή:

1. **Ευάγγελος Χατζηγεωργίου**, Αναπληρωτής Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
2. **Βασίλειος Καλπακίδης**, Καθηγητής του ΤΜΕΥ της Πολυτεχνικής σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
3. **Κων/νος Μπέλτσιος**, Καθηγητής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε κάτω από τους διεθνείς ηθικούς και ακαδημαϊκούς κανόνες δεοντολογίας και προστασίας την πνευματικής ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, δεν έχω προβεί σε ιδιοποίηση ξένου επιστημονικού έργου και έχω πλήρως αναφέρει της πηγές που χρησιμοποίησα στην εργασία αυτή.

(Υπογραφή υποψήφιου)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης Υλικών και Επιστημονικών Υπολογισμών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του κύκλου σπουδών μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Χημεία και Τεχνολογία Υλικών». Η εργασία αναφέρεται στην μελέτη των ιδιοτήτων δομικών σύνθετων πολυστρωματικών υλικών τύπου «σάντουιτς» με κυψελοειδή πυρήνα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ευάγγελο Χατζηγεωργίου, για την πολύτιμη βοήθειά του, στην επίβλεψη και την επιστημονική του καθοδήγηση, το αμέριστο ενδιαφέρον του, τις εποικοδομητικές συζητήσεις και τις εύστοχες παρατηρήσεις του για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω επίσης, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου κατά την ανάθεση αυτής της διατριβής και που στάθηκε δίπλα μου όλο αυτό τον καιρό και με κατανόηση ως προς τις επαγγελματικές μου υποχρεώσεις.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συμπαράσταση και την ηθική στήριξη που μου παρείχε και στους οποίους οφείλω όλη τη διαδρομή των σπουδών μου μέχρι σήμερα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σύνθετες δομές τύπου sandwich (sandwich panel) έχουν εξαιρετικές ιδιότητες και χρησιμοποιούνται ευρέως στους τομείς υψηλής τεχνολογίας όπως στις κατασκευές, την αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία κλπ. Η έρευνα και η μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων δομών τύπου sandwich διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της δυνατότητας εφαρμογής τους σε διάφορα πεδία της εφαρμοσμένης μηχανικής και των κατασκευών.

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην αναλυτική περιγραφή και μελέτη της δομής πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα. Αρχικά περιγράφονται οι σύνθετες δομές τύπου sandwich και στη συνέχεια η μελέτη επικεντρώνεται ιδιαίτερα σε δομές με δισδιάστατο κυψελοειδή πυρήνα.

Οι μέθοδοι κατασκευής κυψελοειδών πυρήνων, τα υλικά, η διαμόρφωση των κελιών ή αφρών, η ορολογία και οι χρήσεις αναλύονται στη συνέχεια. Αναλύονται ακόμα οι τρόποι αστοχίας που παρουσιάζονται καθώς και οι τυποποιημένοι τύποι σχεδίασης.

Στην απλούστερη μορφή του, μία δομή τύπου sandwich, η οποία είναι μια ειδική μορφή σύνθετων υλικών, αποτελείται από δύο λεπτά δύσκαμπτα εξωτερικά στρώματα και ένα πυκνό ελαφρύ πυρήνα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Μια δομή τύπου sandwich προσφέρει διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες με τη χρήση διαφορετικών τύπων υλικών, επειδή η συνολική απόδοση των δομών αυτών εξαρτάται από τις ιδιότητες των συστατικών τους (Daniel 2008). Ως εκ τούτου, η βέλτιστη επιλογή υλικού λαμβάνεται συχνά σύμφωνα με τις ανάγκες σχεδιασμού.

Σε μια τέτοια δομή, γενικά τα φορτία κάμψης μεταφέρονται από το ζεύγος δυνάμεων που σχηματίζεται από τα εξωτερικά στρώματα (όψεις ή φύλλα προσώπου) και τα φορτία διάτμησης μεταφέρονται από το ελαφρύ υλικό του πυρήνα. Τα εξωτερικά στρώματα είναι ισχυρά και δύσκαμπτα τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη σε σύγκριση με το υλικό χαμηλής πυκνότητας του πυρήνα (π.χ. κυψελοειδές με εξαγωνικά κελιά ή αφρώδες υλικό) του οποίου πρωταρχικός σκοπός είναι να διατηρεί υψηλή ροπή αδράνειας στο σύνθετο υλικό. Η χαμηλή πυκνότητα του υλικού του πυρήνα έχει σαν αποτέλεσμα τη χαμηλή πυκνότητα του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα τα υλικά τύπου sandwich να έχουν υψηλές ειδικές μηχανικές ιδιότητες σε φορτία κάμψης σε σχέση με τις συμπαγείς δομές. Κατά συνέπεια τα υλικά αυτά είναι εξαιρετικά αποδοτικά για τη μεταφορά φορτίων κάμψης. Στα προβλήματα κάμψης το ένα εξωτερικό στρώμα είναι υπό θλίψη και το άλλο υπό εφελκυσμό, ενώ, ο πυρήνας αντιστέκεται στις εγκάρσιες δυνάμεις και σταθεροποιεί τα εξωτερικά στρώματα

έναντι του τοπικού και ολικού λυγισμού (Glenn and Hyer 2005). Επιπρόσθετα, ο πυρήνας παρέχει αυξημένη αντίσταση στο λυγισμό και την ολική αστοχία σε διατμητικές και συμπιεστικές φορτίσεις (Smith and Shivakumar 2001).

Οι κρίσιμες ιδιότητες των δομών τύπου sandwich ποικίλλουν ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής της κατασκευής. Για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία οι εκτός επιπέδου (out of plane) θλιπτικές ιδιότητες είναι πιο κρίσιμες, ενώ στην κατασκευή ανεμογεννητριών οι εντός του επιπέδου (in plane) θλιπτικές ιδιότητες είναι πιο σημαντικές. Επομένως, ανάλογα με την περιοχή εφαρμογής, απαιτούνται διαφορετικές ιδιότητες ή χαρακτηριστικά των υλικών τύπου sandwich (Davies, et al., 2004).

Στο κεφάλαιο 1 και 2 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτές τις σύνθετες δομές καθώς και ο τρόπος παρασκευής τους (υλικά εξωτερικών στρωμάτων, πορώδης πυρήνας, συγκολλητικά υλικά). Για την σωστή επιλογή των υλικών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πυρήνων που περιέχονται στις δομές αυτές, σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδιασμού, στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τεχνικές υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων, με σκοπό τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των δομών πριν την κατασκευή των πραγματικών τμημάτων. Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται τρόποι σχεδιασμού και υπολογισμού των εντατικών μεγεθών δομών τύπου sandwich και στο κεφάλαιο 5 χρησιμοποιώντας κατάλληλη υπολογιστική εφαρμογή που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας, μοντελοποιούνται οι φυσικές ιδιότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών της σύνθετης δομής χρησιμοποιώντας τις αναλυτικές μαθηματικές μεθόδους των κεφαλαίων 3 και 4. Με βάση αυτά, παρουσιάζονται παραδείγματα βέλτιστου σχεδιασμού σύνθετων δομών με βάση τις προϋποθέσεις και τους περιορισμούς της κατασκευής και γίνεται ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μηχανικών μεγεθών τους.

SUMMARY

Composite sandwich structures have excellent properties and they are widely used in the fields of high technology such as aeronautics and astronautics, civil engineering, etc. Investigations of the mechanical properties of composite sandwich structures play a vital role in determining their applicability in various engineering fields.

This paper describes in detail a sandwich panel with porous core (solid cell). First the study describes the sandwich-type composite structures and then it focus on structures with honeycomb cores.

The methods of making cell solids, materials, cell or foam formation, terminology and uses are discussed below. The basic concepts of honeycomb sandwiches, the failure modes presented, and standard design types are analyzed.

In its simplest form a structural sandwich, which is a special form of laminated composites, is composed of two thin stiff facesheets and a thick lightweight core bonded between them. A sandwich structure will offer different mechanical properties with the use of different types of materials because the overall performance of sandwich structures depends on the properties of the constituents (Daniel 2008). Hence, optimum material choice is often obtained according to the design needs.

In a sandwich structure generally the bending loads are carried by the force couple formed by the facesheets and the shear loads are carried by the lightweight core material (Nguyen, et al. 2005). The facesheets are strong and stiff both in tension and compression as compared to the low density core material (etc. honeycomb or foam) whose primary purpose is to maintain a high moment of inertia. The low density of the core material results in low panel density, therefore under flexural loading sandwich panels have high specific mechanical properties relative to the monocoque structures. Therefore, sandwich panels are highly efficient in carrying bending loads. In these bending problems one facesheet is under compression and the other under tension. On the other hand, the core resists transverse forces and stabilizes the laminates against global buckling and local buckling (Glenn and Hyer 2005). Additionally, the core providew increased buckling and crippling resistance to shear panels and compression members (Smith and Shivakumar 2001).

The critical properties of sandwich structures vary according to the application area of the structure. In automotive industry for example the out of plane compressive properties are more critical, whereas in wind turbines the in plane compressive properties are more

important. Therefore, depending on the application area, different properties or characteristics of sandwich panels are needed to be evaluated (Davies, et al. 2004).

Chapters 1 and 2 give us general characteristics of the properties of the composite materials and how they are prepared (facesheets materials, porous core of sandwich structures, adhesives). In order to select the correct selection of the material and geometrical characteristics of the cores contained in the sandwich structures according to the design specifications, we analyze techniques (Chapter 3) of their mechanical properties to determine the behavior of the structures so that they can be observed before from the construction of real parts. In Chapter 4 we analyze how to design and calculate intensive sizes of sandwich structures, and in Chapter 5, using the excel accounting software, we model the physical properties and geometrical properties of the materials that make up the composite structure and using the mathematical equations of chapters 3 and 4. On this basis, examples of optimal design of complex structures based on the conditions and limitations of the construction are presented and their characteristic mechanical sizes are determined.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΩΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
SUMMARY	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΟ	3
1.3. Γιατί επιλέγω πάνελ τύπου sandwich;	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	9
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	9
2.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	9
2.2. ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ.....	11
2.2.1. Στρώματα από χάλυβα	11
2.2.2. Στρώματα από αλουμίνιο.....	15
2.2.3. Άλλα μεταλλικά υλικά εξωτερικών στρωμάτων	18
2.2.4. Άλλα υλικά εξωτερικών στρωμάτων	19
2.3. ΥΛΙΚΑ ΠΥΡΗΝΩΝ	21
2.3.1. Γενικά.....	21
2.3.2. Αφρώδης πυρήνας.....	22
2.3.3. Παραδείγματα αφρώδη υλικών.....	25
2.3.3.1. Πολυουρεθάνη (PUR) /Πολυϊσοκυανουρικό (PIR) αφρώδες	25
2.3.3.2. Πολυστυρένιο (EPS and XPS)	28
2.3.3.3. Αφρός από φαινολική ρητίνη (PF)	29
2.3.3.4. Ανόργανα υλικά πυρήνα.....	30
2.3.4. Δισδιάστατος κυψελοειδής πυρήνας.....	33
2.3.4.1. Διάφορα κυψελοειδή ως προς το σχήμα των κελιών	35
2.3.4.2. Ορολογία κυψελοειδών πυρήνων με εξαγωνικό σχήμα κελιών	37
2.3.4.3. Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών πυρήνων	38
2.3.4.4. Διάφορα κυψελοειδή πλέγματα ως προς το υλικό και τον τρόπο κατασκευής των κελιών	43
2.3.5. Ιδιότητες κυψελοειδών πυρήνων	45
2.3.5.1. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες δύσκαμπτων αφρών.....	46
2.3.5.2. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες οрукτών ινών.....	48
2.3.5.3. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες δισδιάστατων κυψελοειδών.....	49
2.3.5.4. Κόπωση	50
2.3.5.5. Ερπυσμός.....	54
2.3.5.6. Θερμικές ιδιότητες.....	56

2.3.5.7.	Ηχομονωτικές ιδιότητες	58
2.3.5.8.	Ευφλεκτότητα και άλλες ιδιότητες φωτιάς.....	59
2.3.5.9.	Ευκολία κατεργασίας και τοποθέτησης.....	60
2.3.5.10.	Η διάρκεια ζωής σε σχέση με τη φθορά στο χρόνο	60
2.3.5.11.	Περιεχόμενη πρωτογενής ενέργεια	60
2.3.5.12.	Η αντοχή σε προσβολές από μικροοργανισμούς και έντομα	60
2.3.5.13.	Επιλογή του υλικού του πυρήνα.....	61
2.3.6.	Κόλες και άλλα συστατικά	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο		65
3.	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ	65
3.1.	Γενικά.....	65
3.2.	Μηχανισμοί παραμόρφωσης κυψελοειδών	67
3.2.1.	Παραμόρφωση στο επίπεδο	68
3.2.2.	Παραμόρφωση εκτός επίπεδου.....	70
3.3.	Μηχανικές ιδιότητες των περιοδικών κυψελοειδών με εξαγωνικό σχήμα κελιών.	71
3.3.1.	Οι ιδιότητες στο επίπεδο των κυψελοειδών: μονοαξονική φόρτωση.....	71
3.3.1.1.	Γραμμική ελαστική παραμόρφωση - Υπολογισμός μέτρων E, G, αναλογίας Poisson ν	73
3.3.1.2.	Πλαστική συμπεριφορά - Υπολογισμός τάσεων σ , τ	77
3.3.2.	Οι ιδιότητες εκτός επίπεδου των κυψελοειδών: μονοαξονική φόρτωση.....	79
3.3.2.1.	Γραμμική ελαστική παραμόρφωση	79
3.3.2.2.	Λυγισμός.....	83
3.3.2.3.	Πλαστική συμπεριφορά κελιού	83
3.4.	Μηχανικές ιδιότητες των περιοδικών κυψελοειδών με τετραγωνικό ή τριγωνικό σχήμα κελιών	84
3.4.1.	Κυψελοειδής πυρήνας με τετραγωνικό σχήμα κελιών	85
3.4.1.1.	Γραμμικές ελαστικές ιδιότητες	86
3.4.1.2.	Πλαστική συμπεριφορά κελιού	87
3.4.1.2.1.	Αξονική θλίψη.....	87
3.4.1.2.2.	Διατμητική φόρτιση.	88
3.4.1.2.3.	Θλιπτική φόρτιση υπό 45 μοίρες σε άξονες συμμετρίας τετραγώνου στο επίπεδο.	90
3.4.2.	Κυψελοειδής πυρήνας με τριγωνικό σχήμα κελιών	91
3.4.2.1.	Γραμμικές ελαστικές ιδιότητες.....	93
3.4.2.2.	Πλαστική συμπεριφορά κελιού	95
3.4.2.2.1.	Μονοαξονική θλιπτική φόρτιση.....	95
3.4.2.2.2.	Διατμητική Φόρτιση.....	96

3.5. Μηχανικές ιδιότητες κυψελοειδών πυρήνων με εξαγωνικό σχήμα κελιών διπλού τοιχώματος	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 °	99
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΑΝΕΛ ΤΥΠΟΥ SANDWICH.....	99
4.1. Γενικά.....	99
4.2. Έννοιες πάνελ τύπου sandwich.....	99
4.3. Δομικός σχεδιασμός πάνελ τύπου sandwich	101
4.4. Βασικοί μέθοδοι υπολογισμού τάσεων - παραμορφώσεων.....	104
4.4.1. Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού τάσεων δοκού	105
4.4.2. Ακριβής μέθοδος υπολογισμού τάσεων δοκού.....	105
4.4.3. Μέθοδος υπολογισμού παραμορφώσεων δοκού	109
4.4.4. Υπολογισμός παραμόρφωσης κελιού (dimpling) σε τοπικό λυγισμό δοκού	111
4.4.5. Υπολογισμός επιφανειακής ρυτίδωσης (wrinkling) σε τοπικό λυγισμό δοκού	111
4.4.6. Υπολογισμός τάσεων σε επίπεδη επιφάνεια πάνελ τύπου sandwich με τη θεωρία πλακών.....	112
4.4.6.1. Λύση Navier για εγκάρσια κατανεμημένη φόρτιση με ημιτονοειδή μορφή σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη	112
4.4.6.2. Λύση Navier για εγκάρσια κατανεμημένη φόρτιση με την βοήθεια τριγωνομετρικής σειράς σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη	114
4.4.6.3. Εναλλακτική λύση για εγκάρσια κατανεμημένη φόρτιση σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη (Λύση M. Levy).....	118
4.4.7. Υπολογισμός τάσεων σε επίπεδη επιφάνεια πάνελ τύπου sandwich με το Τεχνικό Εγχειρίδιο 23Α	123
4.5. Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού ομοιόμορφα φορτισμένης - (Παράδειγμα)	124
4.5.1. Προσεγγιστική λύση	124
4.5.2. Αναλυτική λύση.....	126
4.5.3. Σύγκριση λύσεων	128
4.6. Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων για απλά στηριζόμενες και ομοιόμορφα φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες με την λύση M. Levy – (Παράδειγμα) .	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 °	131
5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH.....	131
5.1. Γενικά.....	131
5.2. Υπολογισμός μέτρων και τάσεων δισδιάστατων κυψελοειδών.....	131
5.3. Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων δοκού.....	135
5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα	143
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	152
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2	156

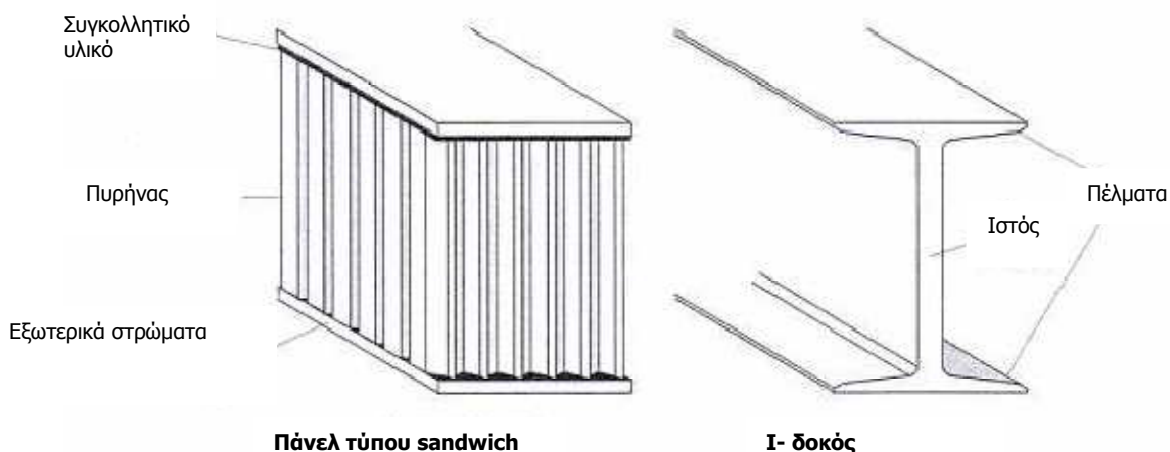
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3	159
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4	164
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	167

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γενικά

Ο αρχικός σχεδιασμός του σύνθετου πάνελ (δομή τύπου sandwich) βασίζεται στα χαρακτηριστικά των υψίκορμων δοκών, δηλαδή δοκών με διατομή σχήματος I (βλ. σχήμα 1.1) που είναι ένα αποτελεσματικό δομικό σχήμα. Στις δομές αυτές τοποθετείται όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό στα δυο πέλματα τα οποία βρίσκονται μακριά από το κέντρο κάμψης ή τον ουδέτερο άξονα. Αρκετό υλικό μένει μόνο στον ιστό της δοκού για τον συνδυασμό της λειτουργίας των πελμάτων και την αντίσταση στις διατμητικές τάσεις και τα φορτία λυγισμού.



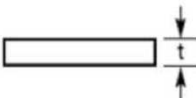
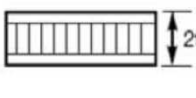
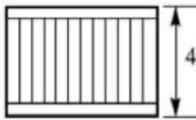
Σχήμα 1.1. Σύγκριση δομής sandwich και I-δοκού

Στο σύνθετο πάνελ, τα εξωτερικά στρώματα (όψεις ή φύλλα προσώπου) αντικαθιστούν τον ρόλο του πέλματος και ο πυρήνας τη θέση του ιστού στους I- δοκούς. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός, ότι ο πυρήνας μιας δομής τύπου sandwich μπορεί να είναι από διαφορετικό υλικό από ότι τα εξωτερικά στρώματα και απλώνεται ως ένα συνεχόμενο στήριγμα για αυτά, χωρίς να είναι συγκεντρωμένο σε στενή παρειά όπως στην δοκό.

Οι δομές τύπου sandwich συνήθως αποτελούνται από δύο λεπτά εξωτερικά στρώματα και ελαφριάς πυκνότητας πυρήνα. Τα κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται για τις εξωτερικές επιφάνειες είναι σύνθετα πολυστρωματικά υλικά (laminated) και μέταλλα, ενώ οι πυρήνες κατασκευάζονται από μεταλλικά και μη μεταλλικά κυψελοειδή, αφρούς, ξύλο balsa ή δικτυώματα. Η δομική απόδοση των πάνελ τύπου sandwich εξαρτάται όχι μόνο από τις ιδιότητες των εξωτερικών επιφανειών, αλλά και από τις ιδιότητες του πυρήνα, το

συγκολλητικό υλικό που συνδέει τον πυρήνα με τα εξωτερικά στρώματα και τις γεωμετρικές διαστάσεις των στρωμάτων.

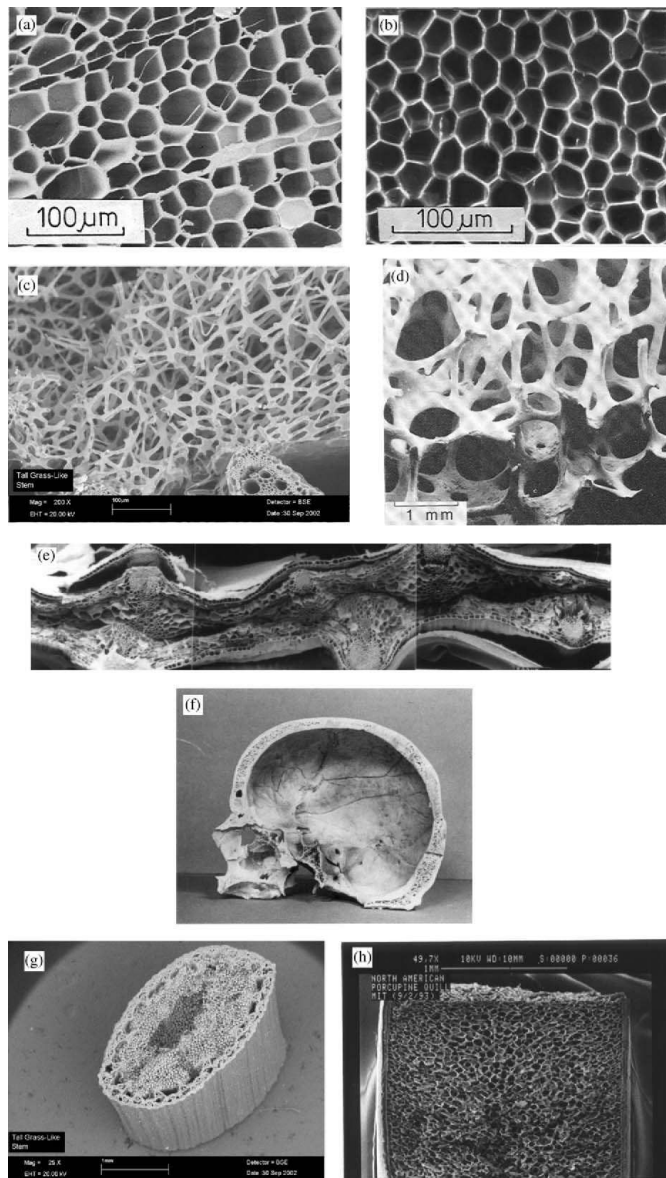
Τα εξωτερικά στρώματα συνδέονται τυπικά με τον πυρήνα με ένα συγκολλητικό υλικό και φέρουν τα περισσότερα από τα φορτία κάμψης. Ο πυρήνας αποτελεί την πιο σημαντική στρώση καθώς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και τα χαρακτηριστικά της σύστασης του είναι καθοριστικά και ορίζουν τη συνολική συμπεριφορά της δομής τύπου sandwich. Στην πραγματικότητα ο πυρήνας απαιτείται προκειμένου να κρατάει τα δύο εξωτερικά στρώματα στην κατάλληλη απόσταση ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε πιθανότητα τα δύο αυτά στρώματα να έρθουν σε επαφή σε καταστάσεις κάμψης της δομής. Αυτής της μορφής οι δυσκαμψίες που οφείλονται στον πυρήνα της δομής ονομάζονται εγκάρσια και διατμητική δυσκαμψία του πυρήνα. Έτσι με άλλα λόγια ο πυρήνας πρέπει να είναι δύσκαμπτος και με μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη (κάθετα προς τα εξωτερικά στρώματα) και σε διάτμηση. Η παρουσία του πάχους του πυρήνα σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης της δομής τύπου sandwich είναι διαφορετικά από αυτά που αποτελούνται από συγκολλημένα στρώματα ή άλλες μονοστρωματικές δομές. Ενώ η συμβολή του πυρήνα στο συνολικό βάρος της δομής τύπου sandwich είναι ελάχιστη, η ροπή αδράνειας της δομής αυξάνει σημαντικά από το διαχωρισμό των εξωτερικών στρωμάτων από τον πυρήνα, χάρη στην παρουσία του πάχους του πυρήνα. Στον πίνακα 1.1 βλέπουμε τις επιπτώσεις στην αντοχή, στην δυσκαμψία και στο βάρος με την παρεμβολή διαφορετικού πάχους πυρήνα. Σε καταστάσεις κάμψης η μεγαλύτερου πάχους διαμόρφωση είναι 37 φορές πιο άκαμπτη και έχει 9 φορές μεγαλύτερη αντοχή, με μόνο 6% αύξηση του βάρους.

	Solid Metal Sheet	Sandwich Construction	Thicker Sandwich
			
Relative Stiffness	100	700 7 times more rigid	3700 37 times more rigid!
Relative Strength	100	350 3.5 times as strong	925 9.25 times as strong!
Relative Weight	100	103 3% increase in weight	106 6% increase in weight

Πίνακας 1.1 Αύξηση της δυσκαμψίας λόγω της παρουσίας της κυψελοειδούς δομής.

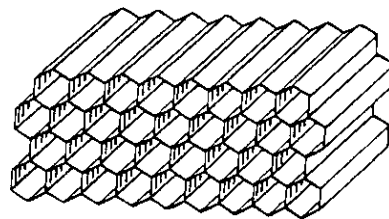
1.2. ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Όπως αναφέρθηκε και στα εισαγωγικά, ένα σύνθετο πολυστρωματικό υλικό με κυψελοειδή πυρήνα αποτελείται από δύο τουλάχιστον λεπτά εξωτερικά στρώματα και ελαφριάς πυκνότητας πυρήνα στο κέντρο. Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κατανοήσουμε είναι ο ορισμός του κυψελοειδή πυρήνα (κύτταρο). Η λέξη "κύτταρο" προέρχεται από το λατινικό *cel*: ένα μικρό διαμέρισμα, ένας κλειστός χώρος. Μια άλλη ερμηνεία του κυττάρου (κελιού) στηρίζεται στην κηρήθρα της μέλισσας που βρίσκεται στη φύση. Το ενδιαφέρον μας είναι σε συστάδες κελιών δηλαδή στα κυψελοειδή. Με αυτό εννοούμε ένα συγκρότημα κελιών με συμπαγή άκρα ή πρόσωπα, γεμάτα ή όχι μεταξύ τους έτσι ώστε να γεμίζουν χώρο. Τέτοια υλικά είναι κοινά στη φύση: το ξύλο, ο φελλός, το σφουγγάρι και τα κοράλλια είναι μερικά παραδείγματα. Παραδείγματα φυσικών υλικών με πρισματικά, κυψελοειδή κελιά είναι το ξύλο και ο φελλός (Σχήμα 1.2a,b), ενώ αυτά με πολυεδρικά κύτταρα είναι ο εσωτερικός πυρήνας στα φυτικά στελέχη και τα οστά (Σχήμα 1.2c, d). Εμφανίζονται επίσης, ως πυρήνες σε φυσικές δομές τύπου *sandwich* : σε μακρά, στενά φύλλα φυτών, όπως το αγριόκρινο, και σε οστά όπως τα κρανία (Σχήμα 1.2e, f). Οι φυσικές σωληνοειδείς δομές έχουν συχνά έναν κυψελοειδή πυρήνα, που στηρίζει ένα πυκνότερο εξωτερικό κυλινδρικό κέλυφος, αυξάνοντας την αντίσταση του κελύφους προς τη συστροφή ή την τοπική αστοχία λυγισμού (πχ φυτικά στελέχη και πτερύγια ζώων, (Σχήμα 1.2ζ, η)).



Σχήμα 1.2 Παραδείγματα κυψελοειδών στη φύση: (α) ξύλο balsa (β) φελλός (γ) εσωτερικός πυρήνας φυτικού στελέχους (δ) οστό (ε) φύλλο στελέχους αγριόκρινου (h) φραγκόσυκο.

Συνήθως τα κελιά κυψελοειδών σχηματίζουν εξάγωνα (Σχήμα 1.3), αλλά υπάρχουν και άλλες διαμορφώσεις κυψελοειδών που θα περιγραφούν και θα συζητηθούν στο Κεφάλαιο 2.



Σχήμα 1.31.3 Κυψελοειδές με εξάγωνικά κελιά.

Μπορεί να κατασκευαστούν από οποιοδήποτε λεπτό επίπεδο υλικό και στο παρελθόν έχουν κατασκευαστεί πάνω από 500 διαφορετικά είδη κυψελοειδών. Ο άνθρωπος έχει χρησιμοποιήσει αυτά τα φυσικά κυψελοειδή υλικά εδώ και αιώνες: στις πυραμίδες της Αιγύπτου έχουμε αποκομίσει ξύλινα αντικείμενα ηλικίας τουλάχιστον 5000 ετών καθώς και ο φελλός που χρησιμοποιήθηκε για τα μπουκάλια κρασιού στους ρωμαϊκούς χρόνους (Οράτιος 27 π.Χ.). Το χάρτινο κυψελοειδές κατασκευάστηκε για πρώτη φορά πριν από περίπου 2000 χρόνια από τους Κινέζους, οι οποίοι το χρησιμοποιούσαν για στολίδια και όχι για δομικά υλικά που τα χρησιμοποιούμε σήμερα.

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας κυψελοειδή πυρήνα, που περιγράφει μια μέθοδο κατασκευής για την παραγωγή χαρτοσανίδας Kraft, είναι πιθανώς το δίπλωμα Budwig, το οποίο εκδόθηκε το 1905 στη Γερμανία. Μία από τις πρώτες κατασκευές τύπου sandwich που κατασκευάστηκαν από τον άνθρωπο και των οποίων έχουμε καταγραφή ήταν μια σωληνωτή γέφυρα σιδηροδρόμων στην Ουαλία, που κατασκευάστηκε το 1845. Αποτελούνταν από ένα μεγάλο ορθογώνιο σωλήνα, το δάπεδο του οποίου στήριζε σιδηροτροχιές και μέσω των οποίων κυλούσαν τα τρένα. Ο άνω πίνακας συμπίεσμένου σωλήνα είχε δύο επίπεδες πλάκες συνδεδεμένες με πυρήνα ξύλου τύπου ωοειδές κελιού.

Το 1919 κατασκευάστηκε το πρώτο πάνελ τύπου sandwich αεροσκάφους με τη χρήση λεπτών επιφανειών από μαόνι που συνδέονται με έναν πυρήνα ξύλου balsa. Χρησιμοποιήθηκε ως η κύρια δομή των πλωτών πλωτήρων ενός υδροπλάνου. Αργότερα, μεταξύ του Α' Παγκοσμίου Πολέμου και του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, τα πλακίδια κόντρα πλακέ κολλημένα σε έναν πυρήνα ξύλου balsa χρησιμοποιήθηκαν ως η κύρια δομή στα ιταλικά υδροπλάνα.

Η κατασκευή σύγχρονων δομών κυψελοειδών πυρήνων πιθανότατα ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 όταν ο J. D. Lincoln κατασκεύασε την χαρτοσανίδα Kraft για χρήση στα έπιπλα που κατασκευάστηκαν από την Lincoln Industries στο Marion της Βιρτζίνια των ΗΠΑ. Το υλικό χρησιμοποιήθηκε σε πάνελ τύπου sandwich το οποίο αποτελούνταν από λεπτά στρώματα σκληρού ξύλου συνδεδεμένα με μια σχετικά χοντρή φέτα χάρτινου κυψελοειδή πυρήνα.

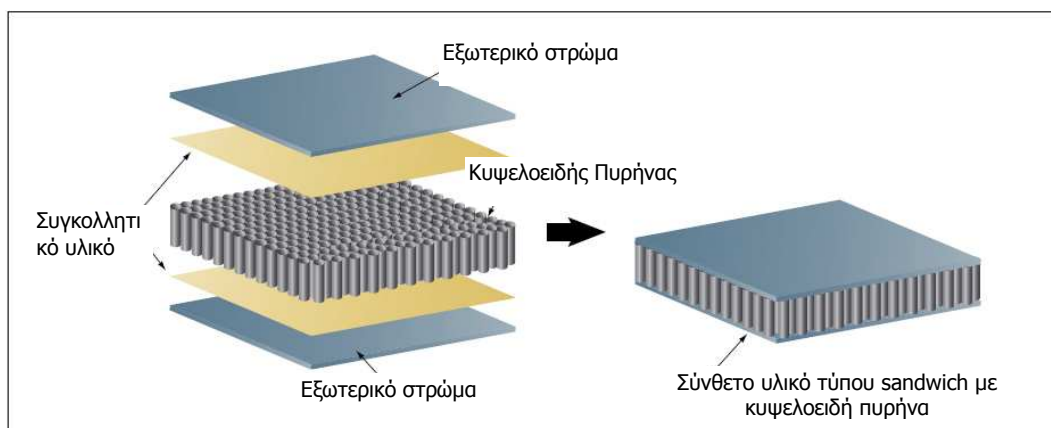
Πιο πρόσφατα ο άνθρωπος έχει κάνει τα δικά του κυψελοειδή στερεά. Στο απλούστερο επίπεδο υπάρχουν τα κυψελοειδή, που αποτελούνται από παράλληλα, πρισματικά κελιά, τα οποία χρησιμοποιούνται για ελαφρά δομικά στοιχεία. Πιο διαδεδομένοι είναι οι πολυμερείς αφροί που χρησιμοποιούνται από τα φλιτζάνια καφέ μιας χρήσης μέχρι και τα μαξιλαράκια πρόσκρουσης του πιλοτηρίου του αεροσκάφους. Οι τεχνικές που υπάρχουν τώρα για αφρισμό δεν είναι μόνο για τα πολυμερή, αλλά και για μέταλλα, κεραμικά και γυαλιά.

Αυτοί οι νεότεροι αφροί χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο δομικά - για μόνωση, καθώς και σε συστήματα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας από κρούση. Οι χρήσεις τους εκμεταλλεύονται τον μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων που προσφέρουν τα κυψελοειδή στερεά, ιδιότητες οι οποίες τελικά προέρχονται από την κυψελοειδή δομή.

Το 1945 δημιουργήθηκε ο πρώτος αλουμινένιος πίνακας τύπου sandwich. Η πραγματική πρόοδος ήρθε λίγο πριν με την ανάπτυξη καλύτερων συγκολλητικών για την προσκόλληση των εξωτερικών στρώματων με τους πυρήνες. Τα συγκολλητικά που αναπτύχθηκαν είχαν τη σωστή ρεολογία (ροή κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης) για χρήση με κυψελοειδή πυρήνα. Τα συγκολλητικά παραμένουν στις άκρες του κυψελοειδή όταν συγκολλούνται τα εξωτερικά στρώματα. Οι παλαιότερες συγκολλητικές ουσίες δεν παρέμεναν στην κορυφή της κυψελοειδούς επιφάνειας αλλά αντί αυτού έτρεχαν προς τα κάτω στα τοιχώματα των κελιών. Κατά συνέπεια, δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί ένας καλός δεσμός με τα ανώτερα στρώματα. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα τα περισσότερα συγκολλητικά εξέπεμπαν πτητικά κατά την σκλήρυνση έτσι οι κυψελοειδείς πυρήνες αλουμινίου έπρεπε να διατρπηθούν (μικρές οπές καρφιών τοποθετούνται στα εξωτερικά στρώματα πριν γίνουν πυρήνες) για να επιτρέψουν στα αέρια να διαφύγουν κατά τη διάρκεια της ξήρανσης. Εάν ο πυρήνας δεν ήταν διάτρητος, η συσσώρευση πίεσης εντός των κελιών θα μπορούσε να αποτρέψει έναν καλό προσανατολισμό στον δεσμό με τον πυρήνα ακόμη και να εκραγεί ο πυρήνας.

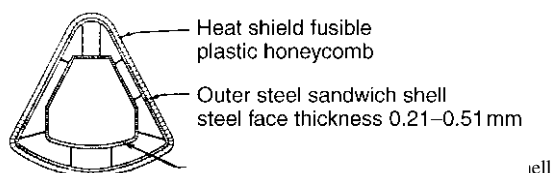
Τώρα οι πιο σύγχρονες κόλλες είναι 100% στερεές και δεν εκπέμπουν πτητικά. Επομένως, τα κυψελοειδή δεν χρειάζεται να διατηρηθεί για αυτόν τον λόγο. Σήμερα ο πυρήνας είναι διάτρητος για μερικές διαστημικές εφαρμογές όπου ο αέρας δεν είναι επιθυμητός στα κελιά.

Το σχήμα 1.4 δείχνει μία τυπική δομή (πανελ) τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα το οποίο αποτελείται από εξωτερικά στρώματα, συγκολλητική ουσία και κυψελοειδή πυρήνα.



Σχήμα 1.4 Σύνθετο υλικό τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα

Την 20 Ιουλίου 1969 έγινε η πρώτη επιτυχής προσγείωση του διαστημόπλοιου Apollo στο φεγγάρι. Αν και όλος ο κόσμος επικεντρώθηκε στην τεχνολογία της πυραυλικής και της πληροφορικής, μόνο με τη βοήθεια της τεχνολογίας τύπου sandwich θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα κέλυφος του διαστημικού σκάφους που να είναι ελαφρύ σε βάρος και αρκετά ισχυρό για να αντέξει τις πιέσεις της επιτάχυνσης κατά την απογείωση και την προσγείωση. Το σχήμα 1.5 δείχνει την κατασκευή τοιχώματος της κάψουλας Apollo που αποτελείται από δύο διασυνδεδεμένα κελύφη τύπου sandwich.



Σχήμα 1.5 Κατασκευή sandwich της κάψουλας Apollo.

1.3. Γιατί επιλέγω πάνελ τύπου sandwich;

Ο βασικός λόγος είναι για να εξοικονομήσουμε βάρος. Μια δομή τύπου sandwich είναι μια ειδική μορφή σύνθετων ελασμάτων. Μία τυπική δομή τύπου sandwich αποτελείται από δύο λεπτά, υψηλής αντοχής εξωτερικά στρώματα συνδεδεμένα με έναν πυκνό πυρήνα ελαφρού βάρους. Τα εξωτερικά στρώματα είναι δύσκαμπτα και ο πυρήνας είναι σχετικά αδύνατος και εύκαμπτος, αλλά όταν συνδυάζονται σε ένα πάνελ τύπου sandwich παράγουν μια δομή που είναι σκληρή και ελαφρού βάρους. Τα Πάνελ τύπου sandwich αποτελούνται γενικά από τρία ή περισσότερα διαφορετικά υλικά συνδεδεμένα μεταξύ τους προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ιδιότητες κάθε συστατικού για τη δομική βελτίωση ολόκληρου του συγκροτήματος. Τα σύνθετα υλικά επικρατούν έναντι των παραδοσιακών μονολιθικών υλικών καθώς προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως υψηλή αντοχή, υψηλή δυσκαμψία, μεγάλη διάρκεια ζωής στην κόπωση, χαμηλή πυκνότητα, αντοχή στη φθορά και τη διάβρωση και ακουστική και θερμική μόνωση. Ο λόγος που τα σύνθετα έχουν ανώτερη δομική απόδοση είναι ο πολύ υψηλός λόγος δυσκαμψίας/βάρους και ο υψηλός λόγος αντίστασης καμπτικής καταπόνησης / βάρους. Εξαιτίας αυτού, τα σύνθετα εξαρτήματα είναι ελαφρύτερα από ό,τι τα αντίστοιχα παραδοσιακά. Η δομή τύπου sandwich ενισχύει την αντοχή στην κάμψη της δομής χωρίς την προσθήκη ουσιαστικού βάρους. Τα σύνθετα πάνελ τύπου sandwich έχουν δείξει σε πολλές εφαρμογές τις ιδιότητές τους ως προς την αντοχή στην καταπόνηση, ηχομόνωση και πρόσθετη θερμομόνωση. Η χρήση κυψελοειδών πυρήνων προλαμβάνει την ανάγκη ενίσχυσης θερμικής μόνωσης, εξασφαλίζοντας χαμηλό δομικό βάρος, δεδομένου ότι οι περισσότεροι κυψελοειδείς πυρήνες έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.

Ακόμη ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα σύνθετα πάνελ τύπου sandwich, είναι η μείωση του κόστους λόγω του χαμηλού βάρους και της μείωσης των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την αποδοτική σχετικά με το κόστος, παραγωγική διαδικασία.

Η αποδοτικότητα των υλικών καθορίζεται από την ικανότητα μιας δομής με όσο το δυνατό ελάχιστο βάρος, να αντέχει όσο το δυνατό μεγαλύτερο φορτίο. Αν το γεωμετρικό σχήμα, η φόρτιση και ο τύπος στήριξης δεν αλλάξουν η αποδοτικότητα όλης της δομής εξαρτάται μόνο από την αποδοτικότητα των υλικών. Η αποδοτικότητα ενός υλικού συνήθως προσδιορίζεται ως ο λόγος των μηχανικών επιδόσεων προς το βάρος. Για την αντοχή στην κάμψη και στην στρέβλωση των ελασμάτων η αποδοτικότητα του υλικού προς το βάρος είναι $E/3\rho$ και για την αντοχή σε εφελκυσμό και συμπίεση είναι E/ρ (όπου E είναι ο συντελεστής ελαστικότητας και ρ η πυκνότητα του υλικού). Στον πίνακα 1.2 αναφέρονται οι ιδιότητες κάποιων από τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως και ενδεικτικό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους, αλλά και το κέρδος που προκύπτει από το κόστος που εξοικονομείται χάρις στο ελαφρύ βάρος τους

Υλικό	Συντελεστής ελαστικότητας E (GPa)	Πυκνότητα υλικού ρ (kg/dm ³)	Κόστος υλικού που εξοικονομείται σε βάρος (€/kg)	Κόστος του υλικού κατασκευής των πόνελ ανά όγκο (€/dm ³)	Κόστος του υλικού που εξοικονομείται με 2€/kg σε όγκο (€/dm ³)	Συνολικό κόστος (€/dm ³)	
Εξωτερική επένδυση (όψη)	Χάλυβας	210	7,8	0,6	4,68	15,60	20,28
	Αλουμίνιο	72	2,7	2,0	5,40	5,40	10,80
	Ενισχυμένο με υάλινο πλαστικό	20	1,7	3,3	5,61	3,40	9,01
	Ενισχυμένο με φυ- τικές ίνες πλαστικό	6	1,0	1,1	1,10	2,20	3,30
Πυρήνας	Πολυπροπυλένιο	1,2	0,8	1,0	0,90	1,80	2,70
	Ξύλο από μπαλα	0,15	0,15	10,0	1,50	0,30	1,80
	Κυελωτά πολυπροπυλένιο	0,03	0,08	4,0	0,32	0,16	0,48
	Κυελωτά χαρτί	0,02	0,08	2,0	0,16	0,16	0,32

Πίνακας 1.2 : Ιδιότητες και ενδεικτικό κόστος κάποιων υλικών για την κατασκευή σύνθετων πάνελ τύπου sandwich.

Τα πάνελ τύπου sandwich με λεπτά εξωτερικά στρώματα από χάλυβα ή αλουμίνιο και πυρήνα από πλαστικό ή ορυκτοβάμβακα χαμηλής πυκνότητας έχουν έναν ιδιαίτερο συνδυασμό ιδιοτήτων που τα καθιστούν ιδανικά για πολλές κατασκευές. Συνδυάζουν τις θετικές ιδιότητες των μεταλλικών επιφανειών, δηλαδή τη φέρουσα ικανότητα τους, την προστασία της μόνωσης από μηχανικές βλάβες, την προστασία από τις καιρικές συνθήκες και το φράγμα υδρατμών με τις συμπληρωματικές θετικές ιδιότητες του πυρήνα, δηλαδή τη θερμική και ακουστική μόνωση και την προστασία από τη διάβρωση.

Επιπλέον, τα πάνελ τύπου sandwich προσφέρουν ευελιξία σχεδίασης και εναλλακτικές διαδρομές κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

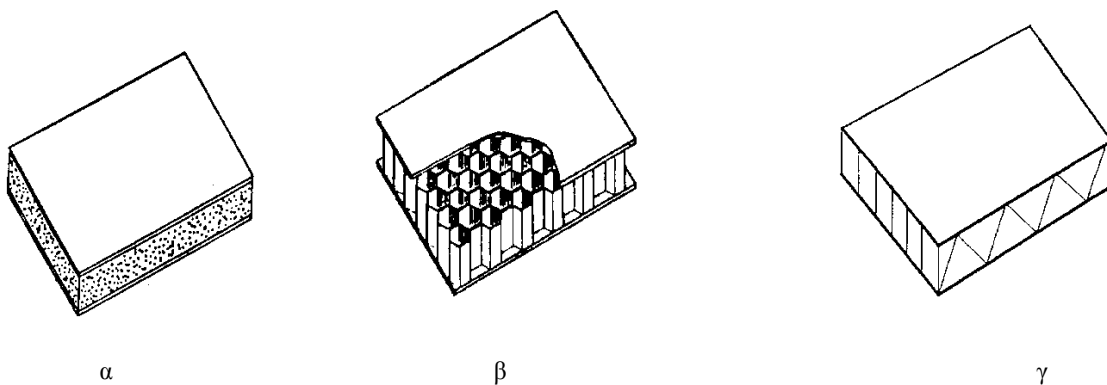
2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Σχεδόν οποιοδήποτε από τα γνωστά υλικά που διατίθεται σε μορφή λεπτού φύλλου μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τα εξωτερικά στρώματα ενός σύνθετου πάνελ. Οι ιδιότητες πρωταρχικού ενδιαφέροντος που πρέπει να πληρούν τα εξωτερικά στρώματα είναι:

- Υψηλός βαθμός σκληρότητας που δίνει μεγάλη αντοχή στην κάμψη.
- Υψηλή αντίσταση στον εφελκυσμό και αντοχή στην θλίψη.
- Αντοχή σε κρούση.
- Επιφανειακό φινίρισμα.
- Αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες (νερό, άνεμος, φωτιά).
- Αντίσταση στην φθορά (διάβρωση).

Δεν είναι όλες οι απαιτήσεις αυτές εξίσου σημαντικές σε οποιαδήποτε εφαρμογή, αλλά είναι σαφές ότι ικανοποιούνται οικονομικά από μεταλλικά φύλλα, ειδικά από φύλλα χάλυβα ή αλουμινίου. Τα μεταλλικά στρώματα παράγονται από ρολά (coils) και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν με κυλίνδρωση και να ενσωματωθούν σε μια συνεχή διαδικασία παραγωγής χρησιμοποιώντας μια γραμμή ελασματοποίησης.

Τα υλικά πυρήνα χωρίζονται γενικά σε τέσσερις τύπους. Αυτά είναι αφρός ή συμπαγής πυρήνας (τρισδιάστατος κυψελοειδής πυρήνας), δισδιάστατος κυψελοειδής πυρήνας, πυρήνας δοκού I και ο κυματοειδής πυρήνας ή δικτυωτός πυρήνας.



Σχήμα 2.1: Παραδείγματα πυρήνων σύνθετων πάνελ τύπου sandwich : α) πάνελ με πυρήνα από αφρό πολουρεθάνης ή πολυστυρένιο, β) πάνελ με δισδιάστατο κυψελοειδή πυρήνα, γ) πάνελ με πετροβάμβακα (δικτυωτός πυρήνας)

Καταρχήν το υλικό του πυρήνα πρέπει να έχει χαμηλή πυκνότητα προκειμένου να προσθέτει το λιγότερο δυνατόν βάρος στο συνολικό βάρος της κατασκευής του πάνελ. Ο πυρήνας είναι αυτός που υποβάλλεται κατά κύριο λόγο σε διάτμηση και η παραμόρφωσή του λόγω διάτμησης προκαλεί ολικές παραμορφώσεις και διατμητικές καταπονήσεις στο πάνελ. Κατά συνέπεια, το υλικό του πυρήνα πρέπει να επιλέγεται με κριτήριο την ανθεκτικότητα σε εγκάρσια φορτία και το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση να είναι αρκετά υψηλό, ώστε να είναι δύσκολο να υποστεί διατμητική παραμόρφωση. Εάν ο πυρήνας καταρρεύσει, το πλεονέκτημα της μηχανικής δυσκαμψίας χάνεται. Το κρίσιμο φορτίο δημιουργίας ρυτίδωσης (wrinkling stress) εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας (E) και από το μέτρο διάτμησης (G) του πυρήνα. Οι άλλες ιδιότητες του πάνελ, όπως η θερμική και ακουστική μόνωση, εξαρτώνται κυρίως από το υλικό του πυρήνα και το πάχος του. Οι βασικές ιδιότητες λοιπόν του πυρήνα είναι η πυκνότητα, το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης, η δυσκαμψία και η θερμική και ακουστική μόνωση.

Οι αφροί ή συμπαγείς πυρήνες είναι σχετικά ακριβοί και μπορούν να αποτελούνται από ξύλο balsa ή ακόμη και από μεγάλη επιλογή αφρού / πλαστικών υλικών με ευρεία ποικιλία πυκνότητας και μέτρο διάτμησης. Οι δομές δισδιάστατων κυψελοειδών πυρήνων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι η κυψελοειδή δομή με εξαγωνικό ή τετραγωνικό ή τριγωνικό σχήμα κελιού. Η κατασκευή πυρήνα δοκού δημιουργείται από μια ομάδα I-δοκών με τα πέλματά τους συγκολλημένα μεταξύ τους. Στις δομές του πυρήνα δοκού και του δικτυωτού πυρήνα, ο χώρος στον πυρήνα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση υγρών ή ως εναλλάκτης θερμότητας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι των πυρήνων αφρού, ένας από αυτούς είναι ο αφρός φύλλων βινυλίου, είναι ένα από τα πιο ευπροσάρμοστα υλικά πυρήνα στην αγορά. Πρόκειται για ένα άκαμπτο κλειστό κυψελοειδές υλικό που αντιστέκεται στους υδρογονάνθρακες, το θαλασσινό νερό, τη βενζίνη και το ντίζελ. Έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα σε αεροσκάφη και αυτοκινητοβιομηχανίες επιδόσεων, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί οπουδήποτε απαιτούνται υψηλές ιδιότητες και εύκολος χειρισμός. Ο αφρός βινυλίου μπορεί να θερμοδιαμορφωθεί σε φούρνο ή με πιστόλι θέρμανσης κατά την εφαρμογή απαλής πίεσης. Ένας άλλος τύπος αφρού είναι ο αφρός πολυουρεθάνης ο οποίος είναι ένα άκαμπτο κλειστό κυψελοειδές υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες θερμικής μόνωσης και επίπλευσης. Αυτός ο πυρήνας χρησιμοποιείται ευρέως στη ναυτιλιακή βιομηχανία εδώ και δεκαετίες καθώς και ως μονωτικό υλικό στα κτίρια. Είναι συμβατό με συστήματα πολυεστέρα και εποξειδικής ρητίνης.

Οι δομές δισδιάστατων κυψελοειδών είναι μια σειρά κελιών, ενωμένα μεταξύ τους για να σχηματίσουν πάνελ παρόμοια σε εμφάνιση με την εγκάρσια τομή μιας κηρήθρας. Στην

εκτεταμένη μορφή της, το κυψελοειδές είναι 90-99% ανοιχτού χώρου. Τα δισδιάστατα κυψελοειδή είναι επιβραδυντικά πυρκαγιάς, είναι εύκαμπτα, ελαφριά και έχουν καλή αντοχή στην κρούση. Προσφέρουν την καλύτερη αναλογία αντοχής / βάρους των υλικών πυρήνα. Τα δισδιάστατα κυψελοειδή χρησιμοποιείται κυρίως για δομικές εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Τα κυψελοειδή κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία διαφορετικών υλικών, ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή και τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του μπορεί να είναι είτε η χαμηλή αντοχή και δυσκαμψία για εφαρμογές χαμηλού φορτίου, είτε η υψηλή αντοχή και δυσκαμψία για εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Η αντοχή των πάνελ τύπου sandwich εξαρτάται από το μέγεθος του πάνελ, από το υλικό των εξωτερικών στρωμάτων που χρησιμοποιούνται και από τον αριθμό ή την πυκνότητα των κελιών του κυψελοειδή πυρήνα (Vinson 1999).

2.2. ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.2.1. Στρώματα από χάλυβα

Γενικά, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για εξωτερικά στρώματα μόνο φύλλα με μεταλλικές και οργανικές (πλαστικές) επικαλύψεις. Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται φύλλα βιολογικής επικάλυψης χωρίς μεταλλική στρώση προστασίας έναντι της διάβρωσης. Τα λεπτότατα φύλλα χάλυβα είναι το υλικό που χρησιμοποιείται πιο συχνά.

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή και την τελική τους χρήση. Ο ίδιος ο χάλυβας είναι συνήθως ψυχρής έλασης μετά από προεπίστρωση ενός μεταλλικού στρώματος προστασίας για τη διάβρωση, το πιο συνηθισμένο είναι ο καθαρός ψευδάργυρος θερμής εμβάπτισης. Τα κράματα ψευδαργύρου-αλουμινίου ή αλουμινίου-ψευδαργύρου εφαρμόζονται επίσης σε φύλλα χάλυβα ως επίστρωση. Τα στρώματα ψευδαργύρου μόνο, δεν παρέχουν γενικά επαρκή προστασία από τη διάβρωση και η αισθητική τους εμφάνιση είναι φτωχή. Ταυτόχρονα, είναι δύσκολο να επιτευχθεί ένας αξιόπιστος δεσμός μεταξύ του πυρήνα και της μεταλλικής εξωτερικής επιφάνειας, έτσι ώστε να προστίθενται συνήθως επιπλέον οργανικές επικαλύψεις. Αυτές προστατεύουν το μεταλλικό στρώμα από τη μηχανική και χημική φθορά.

Όλες οι επικαλύψεις παράγονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες στο χαλβουργείο ή σε μια ειδική γραμμή βαφής και έχουν καλό δεσμό με τις στρώσεις κάτω από τις οποίες μπορεί να επιβιώσει η εν ψυχρώ διαδικασία σχηματισμού. Μόνο ένα στρώμα αλουμινίου-ψευδαργύρου παρέχει καλή προστασία από τη διάβρωση. Ο γαλβανισμένος χάλυβας χωρίς οργανική επικάλυψη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εσωτερικές εφαρμογές.

Το γαλβανισμένο υλικό που καλύπτεται από τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 10142 (χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα) και το EN 10147 (δομικό χάλυβα) είναι το βασικό υλικό για τις επιφάνειες που εκτίθενται σε εξωτερικούς χώρους. Τα πρότυπα EN 10214 και EN 10215 ασχολούνται με άλλες μεταλλικές επικαλύψεις.

Ο Sardemann δίνει μια επισκόπηση των νέων τύπων μεταλλικών επικαλύψεων. Το εύρος του πάχους χάλυβα που χρησιμοποιείται στην πράξη είναι τυπικά από 0,5 έως 1,5 mm. Τα συνιστώμενα ελάχιστα πάχη είναι 0,3mm για την εσωτερική επιφάνεια και 0,5mm για την εξωτερική. Ο Πίνακας 2.1 συνοψίζει τις βασικές ιδιότητες των συνηθέστερα χρησιμοποιούμενων φύλλων χάλυβα. Σημειώστε επίσης ότι οι δυνατότητες εξαρτώνται συνήθως γραμμικά από το πραγματικό πάχος του χαλύβδινου υποστρώματος. Πρέπει να συμβουλευτείτε τους όρους παράδοσης (ανοχές για το πάχος) προκειμένου να προσδιορίσετε το κατάλληλο πάχος σχεδιασμού (βλ. Ευρωπαϊκό Δελτίο EN 10143 για τις ανοχές).

Σε κατασκευή δομής τύπου sandwich, το όριο διαρροής του χάλυβα είναι γενικά μειωμένου ενδιαφέροντος επειδή η φέρουσα ικανότητα συνήθως καθορίζεται από τη ρυτίδωση (wrinkling) των επιφανειακών στρωμάτων λόγω θλίψης ή από την διατμητική αστοχία του πυρήνα, παρά από την διαρροή του υλικού των εξωτερικών στρωμάτων. Στα επίπεδα πάνελ, η ρυτίδωση ακολουθεί μάλλον αμέσως μετά τον λυγισμό (elastic buckling) του εξωτερικού στρώματος έτσι ώστε η τάση του λυγισμού να εξαρτάται μόνο από τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών. Χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα πρέπει να χρησιμοποιείται στις ανώτερες επιφάνειες των πάνελ οροφής κτιρίων εάν οι ραφές κατασκευάζονται με κρυφή τεχνική στερέωσης που απαιτεί μια ονομαστικά μηδενική ακτίνα κάμψης και συνεπώς υψηλό βαθμό ολκιμότητας. Όταν πραγματοποιούνται τέτοιες ραφές στην περιοχή, ενδέχεται να απαιτείται προθέρμανση όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από τους 10°C.

Πίνακας 2.1 Ιδιότητες των κοινών χαλύβδινων φύλλων και μεταλλικών επιχρισμάτων

Χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα EN 10142			Δομικό φύλλο χάλυβα EN 10147		
Ποιότητα χάλυβα	Όριο διαρροής ^α max. (N/mm ²)	Όριο αντοχής σε εφελκυσμό ^β max. (N/mm ²)	Ποιότητα χάλυβα	Όριο διαρροής ^α max. (N/mm ²)	Όριο αντοχής σε εφελκυσμό ^β max. (N/mm ²)
DX51D	—	500	S220GD	220	300
DX52D	300	420	S250GD	250	330
			S280GD	280	360
			S320GD	320	390
			S350GD	350	420
			S550GD	550	560
^α Μπορεί να αναμένεται ελάχιστη τιμή 140N/mm ²					
^β Μπορεί να αναμένεται ελάχιστη τιμή 270 N/mm ²					
Διαθέσιμες επιστρώσεις ψευδαργύρου (EN 10142, EN 10147)					
Ψευδάργυρος εν θερμό	Συνολική ποσό- τητα ψευδαργύρου και στις 2 πλευρές (g/m ²)	Πάχος επικάλυψης μίας επιφάνειας (μm)	Κραματοποιη- μένος ψευδάργυρος	Συνολική ποσό- τητα ψευδαργύρου και στις 2 πλευρές (g/m ²)	Πάχος επικάλυψης μίας επιφάνειας (μm)
Z100	100	7	ZF100	100	7
Z140	140	10	ZF140	140	10
Z200	200	14			
Z225	225	16			
Z275	275	19.5			
Z350	350	25			
Άλλες διαθέσιμες μεταλλικές επικαλύψεις (EN10214, EN10215)					
Εν θερμό κράμα ψευδαργύρου-αλουμινίου ^γ EN 10214 (95% Zn/5% Al)			Εν θερμό κράμα αλουμινίου - ψευδαργύρου ^δ En 10215 (55% Al/1.5% Si/rest Zn)		
	Συνολική ποσό- τητα επικάλυψης και στις 2 πλευρές (g/m ²)	Πάχος επικάλυψης μίας επιφάνειας (μm)		Συνολική ποσό- τητα επικάλυψης και στις 2 πλευρές (g/m ²)	Πάχος επικάλυψης μίας επιφάνειας (μm)
ZA200	200	15	AZ150	150	20
ZA255	255	20	AZ185	185	25
ZA300	300	23			
^γ εμπορική επωνυμία Galfan ^δ εμπορικές ονομασίες Aluzinc, Galvalume, Aluzinc, Zastite, Algafort					

Εντούτοις, τα πάνελ τύπου sandwich αποκτούν κάποιο πλεονέκτημα με τη χρήση ενός χάλυβα με υψηλό όριο διαρροής επειδή η ρυτίδωση των εξωτερικών επιφανειών μπορεί να λάβει χώρα μόνο μετά από σημαντική ανακατανομή των τάσεων μετά από ελαστικό λυγισμό και επίσης επειδή τόσο η ικανότητα αντίδρασης στη στήριξη και στη διάτμηση αυξάνουν με την αύξηση του ορίου διαρροής.

Η επιλογή του πλέον κατάλληλου συστήματος αντιδιαβρωτικής προστασίας για ικανοποιητική διάρκεια ζωής του πάνελ υπό δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι σημαντική και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών συζητήσεων. Δεν υπάρχει ενιαίο σύστημα διάβρωσης που να μπορεί να αντισταθεί σε όλους τους τύπους ατμοσφαιρικών συνθηκών. Επομένως, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν οι σχετικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες σε δεδομένο τόπο, λαμβανομένων υπόψη παράγοντες όπως η βροχόπτωση, η τοπική ρύπανση και η εναπόθεση βρωμιάς στην επιφάνεια.

Η Ευρωπαϊκή Σύμβαση για την Κατασκευαστική Χαλυβουργία (ECCS) έχει δώσει ορισμένες οδηγίες σχετικά με την αναμενόμενη διάρκεια ζωής του γαλβανισμένου και επικαλυμμένου χάλυβα σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες (Πίνακα 2.2). Τα συνιστώμενα συστήματα προστασίας από τη διάβρωση των τραπεζοειδών χαλύβδινων φύλλων ισχύουν εξίσου και για τις όψεις των πάνελ τύπου sandwich και τα δεδομένα που ακολουθούν προέρχονται από το έγγραφο ECCS και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών πάνελ. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των γαλβανισμένων φύλλων χάλυβα με διαφορετικά βάρη γαλβανισμού σε διαφορετικά περιβάλλον παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.2 Τυπικά πάχη και διαμορφώσεις κοινών επιστρώσεων

Επίστρωση	Τυπικό πάχος επικάλυψης (μm)	Τιμή θερμοκρασίας λειτουργίας περιοχής κυμαίνεται σε (° C)	Αντοχή σε ρηγμάτωση λόγω κάμψης 180° , T ^a
PVC(P)	100-200	-20	0
PVDF	25-30	-40	3-4
SP	25-30	-40	4-5
PVF(F)	40-50	-40	3-4
SP-SI	25-30	-40	6-10
PUR-PA	20-50		3-4
^a Σε αυτή τη στήλη, το T είναι ο λόγος της ελάχιστης καμπυλότητας κάμψης και του πάχους του μετάλλου όταν το φύλλο κάμπτεται κατά 180° με την επικαλυμμένη πλευρά προς τα έξω χωρίς ορατές ρωγμές στην επικάλυψη (πρότυπα ISO 1519, BS 3900 / E1, ECCAT7). Ο βαθμός χάλυβα μπορεί επίσης να περιορίσει τη διάμετρο κάμψης. Σημειώστε ότι οι τιμές είναι για τη θερμοκρασία δωματίου.			

Το συνηθέστερο σύστημα προστασίας από τη διάβρωση αποτελείται από γαλβανισμένο φύλλο χάλυβα με οργανική επικάλυψη. Η οργανική επικάλυψη είναι κυρίως υπεύθυνη για την αντίσταση κατά της διάβρωσης και το στρώμα ψευδαργύρου παραμένει παθητικό μέχρι να σταματήσει η προστασία του οργανικού στρώματος. Ο ψευδάργυρος είναι ενεργός μόνο στα κομμένα άκρα του φύλλου ή εάν η οργανική επιστρώση έχει υποστεί ζημιά. Ο χρόνος ζωής του στρώματος οργανικής επικάλυψης μπορεί να επεκταθεί χωρίς περιορισμό εάν συντηρηθεί οποιαδήποτε ζημιά στην οργανική επικάλυψη με καθαρισμό και σωστή βαφή. Αυτό είναι δυνατό για τις περισσότερες από τις οργανικές επικαλύψεις που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Πίνακας 2.3 Ανθεκτικότητα γαλβανισμένων φύλλων με ή χωρίς κοινά χρησιμοποιούμενα οργανικά επιχρίσματα

	Παράκτια περιοχή 1-20 km	Παράκτια περιοχή < km	Βιομηχανική περιοχή	Αστική	Αγροτική
<i>Μόνο Ψευδάργυρος</i>					
Z200	—	—	—	—	+
Z275	+	—	—	+	++
Z350	+	—	+	+	++
<i>Γαλβανισμένος Χάλυβας</i>					
PVC(P)	++	++	++	++	++
PVDF	+++	++	+++	+++	+++
PVF(F)	+++	++	+++	+++	+++
SP-SI	+	—	+	++	++
SP	(+)	—	+	+	++
Εσωτερικό περιβάλλον					
	Κλίμα δωματίου + 5°C < T < +50°C			Ψυχρός χώρος	
	Χωρίς συμπύκνωση	Περιστασιακή συμπύκνωση	Μόνιμη συμπύκνωση	-20°C < T < +5°C	T < -20°C
<i>Μόνο Ψευδάργυρος</i>					
Z225	+++	—	—	—	—
Z275	+++	+	—	(+)	—
Z350	+++	+	—	(+)	—
<i>Γαλβανισμένος Χάλυβας</i>					
PVC(P)	+++	+++	+	++	—
PVDF	+++	+++	—	+++	++
PVF(F)	+++	+++	+	+++	+++
SP-SI	+++	+++	—	++	++
SP	+++	+++	—	+	++
Οι τιμές που δίνονται είναι ενδεικτικές και πρέπει να ληφθούν οι συμβουλές του κατασκευαστή. Οι αναμενόμενες διάρκειες ζωής είναι: +++ μεγάλη διάρκεια ζωής, ++ μέση διάρκεια ζωής, + μικρή διάρκεια ζωής, - δεν συνιστάται. Για οργανικές επικαλύψεις, αυτές υποδεικνύουν τις απαιτήσεις συντήρησης και όχι την πλήρη διάρκεια προστασίας της επικάλυψης.					

2.2.2. Στρώματα από αλουμίνιο

Τα πάνελ τύπου sandwich με εξωτερικά στρώματα από καθαρό φύλλο αλουμινίου χρησιμοποιούνται μερικές φορές σε εφαρμογές όπου υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για αντοχή στη διάβρωση ή υγιεινή καθώς και σε ελαφριές κατασκευές. Για παράδειγμα, στην παραγωγή ή στην αποθήκευση τροφίμων. Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται κράματα όπως AlMn (κράμα αλουμινίου-μαγγανίου), AlMg (κράμα αλουμινίου-μαγνησίου) και AlMgMn (κράμα αλουμινίου-μαγνησίου- μαγγανίου). Ένα τυπικό κράμα μπορεί να έχει αντοχή σε εφελκυσμό της τάξης των 200-250 N/mm² και συμβατικό όριο διαρροής 0,2% κάτω από 200 N/mm². Ο πίνακας 2.4 παρέχει ορισμένες μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με το πρότυπο EN 485-2.

Πίνακας 2.4 Ποιοτική σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών υλικών επικάλυψης

Υλικό	Αντοχή στη διάβρωση	Σταθερότητα χρώματος
PVC(P)	5	3
PVDF	3-4	5
PVF(F)	3	4-5
SP-SI	3	4
PUR-PA	4	4
SP	3-4	4
AY	3-4	3-4

Πίνακας 2.5 Σύγκριση της αντοχής μεταξύ εναλλακτικών υλικών επίστρωσης

	Έλεγχος σκληρότητας με δοκιμή μολυβιού ¹ ASTM D3363 ISO1518/ECCA T4	Δοκιμή χάραξης επιφάνειας ² BS3900/ECCA E2 (g)	
PVC(P) 200 μm	N	> 3500	
PVDF 25 μm	F-H	3000	
SP-SI 25 μm	H-2H	3000	
SP 25 μm	H-2H	2800	
¹ Κλίμακα από χαμηλότερη σε υψηλότερη αντοχή: N, F, H, 2H ² Μεγαλύτερη αξία σημαίνει καλύτερη αντοχή			
	Αντοχή στη τριβή με Taber Abrader ³ ASTM D4060 (g)	Αντοχή στην τριβή με άμμο πυριτίου ⁴ ASTM D968 (l)	Αντοχή σε κρούση ASTM D2794 ECCA T5 (J)
PVC(P) 200 μm	10-12	465	18
PVDF 25 μm	16	33	11
SP-SI 25 μm	30	27	1
SP 25 μm	20	19	16
³ Μικρότερη τιμή σημαίνει καλύτερη αντίσταση ⁴ Μεγαλύτερη τιμή σημαίνει καλύτερη αντίσταση			
	Έλεγχος στιλπνότητας ⁵ ASTM D523 ECCA T2 (%)	Αντοχή σε ψεκασμό αλατιού ⁶ ASTM B117 ECCA T8 (h)	Έκθεση φωτός και νερού ⁶ ASTM G53 ECCA T10 (h)
PVC(P) 200 μm	10-20/50 ⁷	100 0	2000
PVDF 25 μm	20-35	100 0	3000
SP-SI 25 μm	30-50	750	1500
SP 25 μm	30-50	500	1500
⁵ Οι τιμές είναι για μια ομαλή επιφάνεια: μεγαλύτερη τιμή σημαίνει μια πιο φωτεινή επιφάνεια ⁶ Μεγαλύτερη αξία σημαίνει καλύτερη αντοχή ⁷ Υφή / λεία επιφάνεια			

Πίνακας 2.6 Τυπικές ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου σύμφωνα με το EN 485-2

Κράματα και ιδιοσυγκρασία	Συμβατικό όριο διαρροής 2% minimum (N/mm ²)	Όριο αντοχής minimum (N/mm ²)
EN AW 3004 [AlMn1Mg1] H14	180	220
EN AW 3005 [AlMn1Mg0.5] H16	175	195
EN AW 5005A [AlMg1] H18	165	185
Το H υποδηλώνει τον τύπο κράματος		

Η αντοχή και η ικανότητα μορφοποίησης καθώς και η αντοχή στη διάβρωση των κραμάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο από τη χημική σύνθεση αλλά και από τον τύπο κράματος (temper). Οι σκληρότερες ποιότητες μπορεί να έχουν πολύ περιορισμένη ολκιμότητα για τον σχηματισμό εν ψυχρώ. Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου είναι περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα, δηλ. 70.000N/mm^2 , και η πυκνότητα είναι επίσης περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα δηλαδή 2.700 kg/m^3 . Αντίστροφα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι σχεδόν διπλάσιος από αυτόν του χάλυβα, δηλ. 23×10^{-6} ανά $^{\circ}\text{C}$.

Ελλείπει οποιασδήποτε επίστρωσης, απλές επιφάνειες αλουμινίου οξειδώνονται μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, το στρώμα του οξειδίου που προκύπτει είναι ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες και την υγρασία για τιμές pH με εύρος 5-8. Το στρώμα οξειδίου είναι επιρρεπές για την προσβολή τόσο σε όξινα όσο και σε αλκαλικά διαλύματα με τιμές pH εκτός αυτής της περιοχής, καθώς και από ιόντα χλωρίου και χαλκού. Όπου αναμένεται τέτοια επιθετική ατμόσφαιρα, οι επιφάνειες από αλουμίνιο πρέπει να προστατεύονται με επικάλυψη. Αυτό είναι ιδιαίτερα απαραίτητο στις περιοχές γύρω από τα χυτήρια χαλκού ή των συμπυκνωμένων καπνών από μονάδες θερμάνσεως πετρελαίου. Η αντίσταση στην διάβρωση μπορεί να επιτευχθεί από μια προσεκτική επιλογή κράματος. Για παράδειγμα, το AlMn1 έχει γενικά καλή συνολική ανθεκτικότητα και τα κράματα AlMg-έχουν καλή αντοχή, ακόμη και σε παράκτια περιβάλλοντα.

Όπως στην περίπτωση απλού γαλβανισμένου χάλυβα, το πρόβλημα με τις λείες αλουμινένιες επιφάνειες στα πάνελ τύπου sandwich είναι η σχετικά κακή σύνδεση με τον πυρήνα. Για να εξασφαλιστεί επαρκής συγκολλητικός δεσμός, τα φύλλα αλουμινίου πρέπει να υποβληθούν σε επιφανειακή επεξεργασία που περιλαμβάνει μηχανική και χημική αφαίρεση των αλάτων, θερμική επεξεργασία και διεργασία απομάκρυνσης ακαθαρσιών επιφανειών (pickling). Ένα στρώμα αστάρι που εφαρμόζεται στην αντίθετη πλευρά είναι ο καλύτερος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Όταν χρησιμοποιείτε άλλες μεθόδους, το βέλτιστο φινίρισμα της επιφάνειας σε σχέση με τον συγκολλητικό δεσμό προσδιορίζεται καλύτερα με προσεκτικό έλεγχο και πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη μακροχρόνια ανθεκτικότητα. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οι υπολειπόμενες καταπονήσεις που προκαλούνται από τη μηχανική επεξεργασία.

Ωστόσο, τα εξωτερικά στρώματα αλουμινίου επικαλύπτονται συνήθως με τις ίδιες οργανικές επικαλύψεις με αυτά των επιφανειών από χάλυβα (βλέπε ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1396). Αυτό απαιτείται συνήθως για αισθητικούς λόγους, καθώς είναι λιγότερο σημαντικό από την άποψη της ανθεκτικότητας στη διάβρωση. Στην περίπτωση αυτή, η προστασία από

τη διάβρωση και άλλες ιδιότητες είναι ίδιες με εκείνες του μεταλλικού υποστρώματος σε γαλβανισμένο χάλυβα.

2.2.3. Άλλα μεταλλικά υλικά εξωτερικών στρωμάτων

Τα εξωτερικά στρώματα από ανοξείδωτο χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκεί που οι απαιτήσεις υγιεινής είναι υψηλές ή όπου πρέπει να υπάρξει αντίσταση από ένα επιθετικό εσωτερικό περιβάλλον. Οι προσόψεις πχ κτιρίων υψηλής ποιότητας και χωρίς συντήρηση μπορούν να καλυφθούν με επενδύσεις από ανοξείδωτο χάλυβα ή χαλκό. Δεν απαιτείται προστασία από τη διάβρωση. Η έκταση του πάχους και η ικανότητα σχηματισμού των επενδύσεων από ανοξείδωτο χάλυβα είναι παρόμοιες με εκείνες των επιχρισμένων επιφανειών από χάλυβα.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τύπων από ανοξείδωτο χάλυβα, αλλά γενικά χρησιμοποιούνται οστενιτικοί χάλυβες (γ -Fe). Είναι συνήθως οι λεγόμενοι χάλυβες 18/8 που περιέχουν περίπου 18% χρώμιο και περίπου 8% νικέλιο, έχουν συμβατικό όριο διαρροής 2% περίπου 200 N/mm² (βαθμός AISI 304). Έχουν καλή αντοχή σε διάβρωση σε αγροτικό και αστικό περιβάλλον. Σε βιομηχανικά και παράκτια περιβάλλοντα, θα πρέπει να επιλέγεται ο χάλυβας με κάποια περιεκτικότητα σε μολυβδαίνιο (βαθμός AISI 316, λεγόμενος χάλυβας 18/10/3). Η αντίσταση στη διάβρωση βασίζεται κυρίως στο χρώμιο που εμποδίζει την οξείδωση του σιδήρου.

Ο πίνακας 2.7 παρουσιάζει μερικές μηχανικές ιδιότητες ανοξείδωτων χαλύβων σύμφωνα με το πρότυπο EN 10088. Το μέτρο ελαστικότητας είναι περίπου 200.000 N/mm², το οποίο είναι περίπου το ίδιο όπως και για τον μαλακό χάλυβα. Η πυκνότητα είναι επίσης σχεδόν η ίδια, ήτοι 7.700 kg/m³ και ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι κάπως υψηλότερος, 16×10^{-6} ανά °C. Υπάρχουν ορισμένες μέθοδοι για τον προσδιορισμό ανοξείδωτων χαλύβων. Το ευρωπαϊκό σύστημα χρησιμοποιεί τη σήμανση XaCrNibc ή XaCrNiMobcd, όπου τα a, b, c και d αντιπροσωπεύουν αριθμό που δίνει την περιεκτικότητα σε άνθρακα (πολλαπλασιασμένη επί εκατό), χρώμιο, νικέλιο και μολυβδαίνιο ως ποσοστό αντίστοιχα.

Πίνακας 2.7 Μηχανικές ιδιότητες ανοξείδωτου χάλυβα ψυχρής ελάσεως

Κράματα	Συμβατικό όριο διαρροής 2% minimum(N/mm ²)	Όριο αντοχής minimum (N/mm ²)
X 4 CrNi 18 10	230	540...750
X 4 CrNiMo 17 12 2	240	530...680

Τα φύλλα χαλκού είναι επίσης ένα εναλλακτικό υλικό εξωτερικών στρωμάτων. Η αντοχή στη διάβρωση βασίζεται στο πυκνόφιλμ οξειδίου που σχηματίζεται σταδιακά στην επιφάνεια και προσφέρεται για αγροτικό, αστικό και παράκτιο περιβάλλον. Το αρχικό ελαφρύ χρώμα σκουραίνει λόγω της οξείδωσης. Η πλήρης οξείδωση λαμβάνει χώρα σε 4 έως 6 χρόνια σε παράκτια περιβάλλοντα, σε 8 έως 15 χρόνια σε αστικά περιβάλλοντα και μπορεί να απαιτήσει 20 έως 50 χρόνια σε αγροτικό περιβάλλον.

Ο Πίνακας 2.8 δίνει τις μηχανικές ιδιότητες του χαλκού σύμφωνα με το πρότυπο ISO 1634. Οι τιμές πρέπει να θεωρούνται μόνο πληροφοριακές και τα δεδομένα των κατασκευαστών πρέπει να χρησιμοποιούνται για λεπτομερή σχεδιασμό. Η πυκνότητα χαλκού είναι 8.900 kg/m^3 και το μέτρο ελαστικότητας είναι 118.000 N/mm^2 για τον τύπο Cu-DHP. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι 17×10^{-6} ανά $^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 2.8 Μηχανικές ιδιότητες του χαλκού

Κράμα	Ιδιοσυγκρασία	Συμβατικό όριο διαρροής 2% minimum (N/mm ²)	Όριο αντοχής minimum (N/mm ²)
Cu-DHP ^a	M	50	220
^a Αυτός ο χαλκός παραδίδεται επίσης εκτός ISO 1634 με ιδιοσυγκρασία που καταλήγουν σε συμβατικό όριο διαρροής 0,2% μεταξύ 180 και 350 N/ mm ²			

Από την άποψη της κατασκευής, ο δεσμός μεταξύ απλών ανοξειδωτων χαλύβδινων επιφανειών ή επιφανειών χαλκού και του πυρήνα είναι παρόμοιος με την περίπτωση απλού γαλβανισμένου χάλυβα ή αλουμινίου. Προκειμένου να εξασφαλισθεί ένας ικανοποιητικός δεσμός με τον πυρήνα, οι εσωτερικές πλευρές πρέπει γενικά να επικαλυφθούν με ένα κατάλληλο αστάρι. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλες επεξεργασίες, μηχανικές ή χημικές, αλλά η αξιοπιστία τους πρέπει να επαληθεύεται με δοκιμές.

2.2.4. Άλλα υλικά εξωτερικών στρωμάτων

Οι ξύλινοι και άλλοι τύποι σανίδων δόμησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερικά στρώματα σε δομές τύπου sandwich. Οι ξύλινες μοριοσανίδες και τα κόντρα πλακέ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλοντα όπου δεν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις της υγρασίας του αέρα, αλλά υπό μακροχρόνια φόρτιση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ολίσθηση του εξωτερικού στρώματος καθώς και ο ερπυσμός του υλικού του πυρήνα. Άλλες σανίδες κατασκευής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι γυψοσανίδες, γυψοσανίδες ενισχυμένες με ίνες, τσιμεντοσανίδες και πλαστικές σανίδες.

Το κόντρα πλακέ αποτελείται από στρώματα ξύλου που έχουν κολληθεί μεταξύ τους έτσι ώστε οι κόκκοι σε μία στρώση να είναι κάθετοι στους κόκκους στην επόμενη στρώση και στα εξωτερικά φύλλα οι κόκκοι να είναι παράλληλοι στην κατεύθυνση της τάσης. Ο πίνακας

2.9 παρέχει ορισμένες ενδεικτικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες του κόντρα πλακέ σε ξηρές συνθήκες.

Πίνακας 2.9 Μηχανικές ιδιότητες του κόντρα πλακέ σε ξηρές συνθήκες

	Σημύδα	Έλατο
Αντοχή σε κάμψη (N/mm^2)	80	35
Αντοχή σε θλίψη (N/mm^2)	60	35
Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm^2)	70	30
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm^2)	1.5×10^4	1.1×10^4
Σημειώστε ότι μόνο στρώματα που έχουν κόκκους παράλληλους με την τάση είναι αποτελεσματικοί.		

Οι μοριοσανίδες είναι κατασκευασμένες από ξύλινα τσιπ, πάχους 0,2-0,4 mm, τα οποία συγκολλούνται με υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Η ποσότητα της κόλλας είναι κατά προσέγγιση 10% κατά βάρος και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ορισμένα άλλα πρόσθετα όπως το τσιμέντο. Ο Πίνακας 2.10 δίνει ορισμένες ενδεικτικές τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες του μοριοσανίδων σε ξηρές συνθήκες.

Πίνακας 2.10 Μηχανικές ιδιότητες των μοριοσανίδων σε ξηρές συνθήκες

Αντοχή σε κάμψη (N/mm^2)	8.5-7.0
Αντοχή σε θλίψη (N/mm^2)	5.0-4.0
Αντοχή σε εφελκυσμό (N/mm^2)	4.0-3.0
Μέτρο ελαστικότητας (N/mm^2)	1.9×10^3 to 1.2×10^3
Λάβετε υπόψη ότι οι τιμές μειώνονται όσο αυξάνεται το πάχος.	

Οι γυψοσανίδες, με παχιά χαρτόνια και με τον πυρήνα γεμάτο με γύψο, έχουν μάλλον χαμηλή αντοχή, αλλά από την άλλη προσφέρουν καλή πυροπροστασία. Το συνολικό πάχος αυτών των σανίδων είναι της τάξης των 6-15 mm. Η αντοχή κάμψης βασίζεται κυρίως στην αντοχή εφελκυσμού των χαρτονένιων επιφανειών. Οι γυψοσανίδες είναι σχετικά μη ευαίσθητες στις μικρές μεταβολές της υγρασίας, αλλά θα πρέπει, ωστόσο, να χρησιμοποιηθούν μόνο σε ξηρές συνθήκες. Οι γυψοσανίδες μπορούν να ενισχυθούν με ίνες χαρτιού ή χαρτοπολτού (ποσότητα ινών 15-20% κατά βάρος) ή ίνες γυαλιού. Οι μηχανικές και άλλες ιδιότητες είναι παρόμοιες με τις γυψοσανίδες με χαρτόνια.

Άλλες κατάλληλες σανίδες είναι κατασκευασμένες από τσιμέντο και άλλα πυριτικά ενισχυμένα με ίνες. Έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις σανίδες με βάση το γύψο. Ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες δίνονται επίσης στον Πίνακα 2.11.

Πίνακας 2.11 Ενδεικτικές μηχανικές ιδιότητες των οικοδομικών πλακών

	Γυψοσανίδες με			τσιμεντοσανίδες με ίνες Χαρτιού / χαρτοπολτού
	επιφάνεια χαρτονιού	ίνες γυαλιού	ίνες Χαρτιού / χαρτοπολτού	
Πυκνότητα (kg/m^3)	1100	1100	1200	1100
Όριο αντοχής σε εφελκυσμού (N/mm^2)	1.5		3.5	2.5
Μέτρο εφελκυσμού (N/mm^2)	2		3	
Αντοχή σε θλίψη (N/mm^2)	6		9.5	20
Συντελεστής θλίψεως (N/mm^2)	2		3	
Σημειώστε ότι οι μηχανικές τιμές δίνονται για τη διαμήκη κατεύθυνση των σανίδων και ότι λαμβάνονται διαφορετικές τιμές στην εγκάρσια κατεύθυνση.				

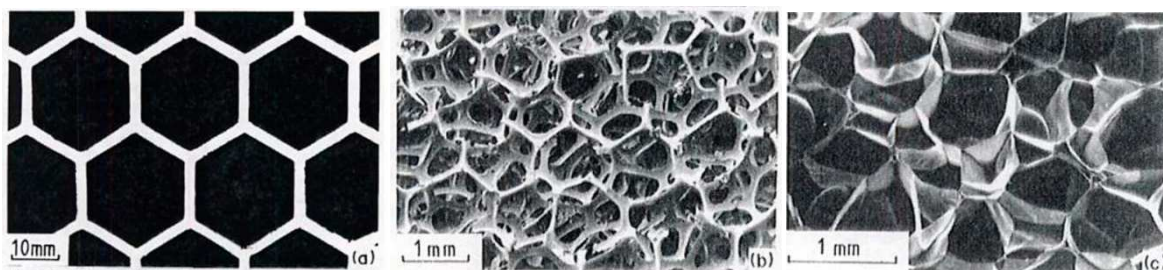
Μπορεί να προστεθεί ένα επιπλέον στρώμα γυψοσανίδας ή μοριοσανίδων μεταξύ των λεπτών μεταλλικών φύλλων και του άκαμπτου πλαστικού πυρήνα για την προστασία του πυρήνα σε περίπτωση πυρκαγιάς. Όταν χρησιμοποιείτε αυτή την τεχνική, η σανίδα πρέπει να κολληθεί στα εξωτερικά στρώματα πριν από την κατασκευή του πάνελ.

Οι πλαστικές σανίδες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως υλικά πρόσοψης και ορισμένες εφαρμογές κτιριακής κατασκευής με γυάλινες επιφάνειες (GRP). Ωστόσο, οι κυριότερες εφαρμογές κατασκευής sandwich με στρώσεις GRP είναι στην κατασκευή σκαφών και, σε μικρότερο βαθμό, στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου.

2.3. ΥΛΙΚΑ ΠΥΡΗΝΩΝ

2.3.1. Γενικά

Ο πυρήνας των πάνελ τύπου sandwich είναι συνήθως πορώδες μιας και το ζητούμενο μας είναι το μικρό βάρος του τελικού υλικού. Πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά, γυαλιά, ακόμα και σύνθετα υλικά, μπορούν να μας συνθέσουν τον πορώδη πυρήνα που αναζητούμε. Η δομή του πορώδη πυρήνα κυμαίνεται από την κοντινή εκδοχή της κηρήθρας της μέλισσας έως τα διαταραγμένα τρισδιάστατα δίκτυα σφουγγαριών και αφρών.



Σχήμα 2.2 Παραδείγματα κυψελοειδή πυρήνα: (α) δισδιάστατο κυψελοειδές, (β) τρισδιάστατος αφρός με ανοικτά κελιά, (γ) τρισδιάστατος αφρός με κλειστά κελιά

Η δομή των κυψελοειδών έχει γοητεύσει τους φυσικούς φιλοσόφους για τουλάχιστον 300 χρόνια. Ο Hooke εξέτασε το σχήμα τους, ο Kelvin ανέλυσε τη συσκευασία τους και ο

Darwin εξέφρασε την εικασία για την προέλευση και τη λειτουργία τους. Το θέμα είναι σημαντικό για μας εδώ επειδή οι ιδιότητες των κυψελοειδών εξαρτώνται άμεσα από το σχήμα και τη δομή των κελιών. Στόχος μας είναι να χαρακτηρίσουμε το μέγεθος, το σχήμα και την τοπολογία τους: δηλαδή τη συνδεσιμότητα των τοιχωμάτων των κελιών και του χώρου των πόρων και των γεωμετρικών τάξεων.

Το μοναδικό σημαντικότερο δομικό χαρακτηριστικό ενός κυψελοειδούς είναι η σχετική πυκνότητά του, ρ^* / ρ_s (η πυκνότητα, ρ^* , του πορώδους υλικού που διαιρείται με εκείνη του στερεού του οποίου κατασκευάζεται, ρ_s). Το κλάσμα του χώρου πόρων στον αφρό για παράδειγμα είναι το πορώδες του, δηλαδή είναι απλά το $(1 - \rho^* / \rho_s)$. Γενικά, τα κελιά έχουν σχετικές πυκνότητες οι οποίες είναι μικρότερες από περίπου 0,3. Τα περισσότερα κελιά είναι της τάξης του 0,003. Εκ πρώτης όψεως μπορεί κανείς να υποθέσει ότι το μέγεθος των κελιών, θα πρέπει να είναι μια σημαντική παράμετρος. Αλλά (όπως φαίνεται στα επόμενα κεφάλαια) οι περισσότερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες εξαρτώνται μόνο ασθενώς από το μέγεθος των κελιών. Το σχήμα των κελιών επηρεάζει πολύ περισσότερο. Όταν τα κελιά είναι ισοδύναμα, οι ιδιότητες είναι ιστροπικές, αλλά όταν τα κελιά είναι ακόμη ελαφρώς επιμήκη ή πεπλατυσμένα οι ιδιότητες εξαρτώνται από την κατεύθυνση, συχνά πολύ έντονα. Και υπάρχουν και σημαντικές τοπολογικές διακρίσεις. Η πρώτη είναι μεταξύ των δισδιάστατων και τρισδιάστατων κελιών, στα οποία τα τοιχώματα των κελιών έχουν τυχαίους προσανατολισμούς στο χώρο (όπως πχ σε έναν αφρό). Η διάκριση είναι χρήσιμη: η μοντελοποίηση των ιδιοτήτων σε δύο διαστάσεις είναι πολύ απλούστερη από ότι σε τρεις διαστάσεις, αλλά μεγάλο μέρος της απλούστερης ανάλυσης μπορεί να επεκταθεί χρησιμοποιώντας προσεγγιστικά επιχειρήματα, στην πιο σύνθετη γεωμετρία. Σε τρεις διαστάσεις υπάρχει επίσης η διάκριση μεταξύ κελιών που είναι κλειστά (δηλαδή, κάθε κύτταρο σφραγίζεται από τους γείτονές του με μεμβρανοειδείς όψεις) και εκείνα που είναι ανοιχτά (έτσι ώστε τα κύτταρα να διασυνδέονται). Οι λεπτότερες, τοπολογικές λεπτομέρειες - η συνδεσιμότητα των ακμών και των όψεων των κελιών, για παράδειγμα - μπορεί να φαίνονται λιγότερο σημαντικές. Αλλά και αυτές μπορούν να έχουν βαθιά επίδραση στις ιδιότητες.

Επομένως, είναι χρήσιμο να αναπτύξουμε μια εξοικείωση με τη δομή των κελιών.

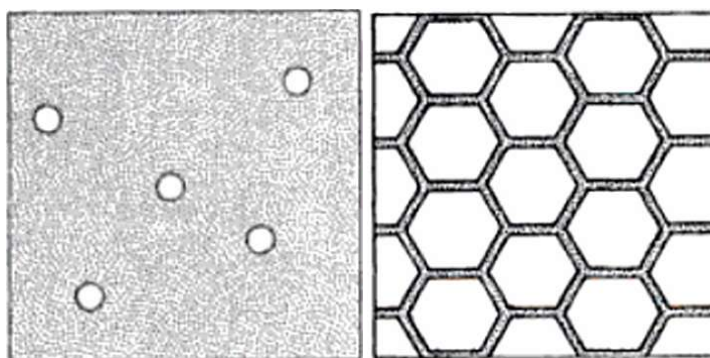
2.3.2. Αφρώδης πυρήνας

Η πρόσφατη μαζική αύξηση στη χρήση πάνελ τύπου sandwich για εφαρμογές κτιρίων και όχι μόνο, οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στον αφρώδη πυρήνα. Τόσο η θερμομόνωση

όσο και η σύνδεση με τις εξωτερικές επιφάνειες προέρχονται από τη διαδικασία αφρισμού. Το βασικό υλικό που χρησιμοποιείται είναι η πολυουρεθάνη.

Οι αναλογίες των διαφόρων συστατικών και προσθέτων καθορίζουν την πυκνότητα του αφρού, την δυσκαμψία και άλλες μηχανικές ιδιότητες καθώς και τον χρόνο που απαιτείται για τις διάφορες φάσεις της κατασκευής τους.

Διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για τον αφρισμό διαφορετικών τύπων στερεών. Τα πολυμερή αφρίζονται με την εισαγωγή φυσαλίδων αερίου στο υγρό μονομερές ή το θερμό πολυμερές, επιτρέποντας στις φυσαλίδες να αναπτυχθούν και να σταθεροποιηθούν, και στη συνέχεια στερεοποιούν ολόκληρο το υλικό με ψύξη (Suh and Skochdopole, 1980). Το αέριο εισάγεται είτε με μηχανική ανάδευση είτε με ανάμιξη ενός παράγοντα εμφύσησης στο πολυμερές.



Σχήμα 2.3 Σύγκριση μεταξύ κυψελοειδούς με εξαγωνικά κελιά και κυψελοειδούς με απομονωμένους πόρους.

Οι φυτικοί παράγοντες εμφύσησης είναι αδρανή αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα ή άζωτο. Αυτά αναγκάζονται να διαλύονται στο καυτό πολυμερές υπό υψηλή πίεση και διογκώνονται σε φουσκάλες μειώνοντας την πίεση. Εναλλακτικά, υγρά χαμηλού σημείου τήξεως, όπως χλωροφθορο-άνθρακες ή χλωριούχο μεθυλένιο, αναμιγνύονται στο πολυμερές και εξατμίζονται κατά την θέρμανση για σχηματισμό φυσαλίδων ατμού. Οι μικροκυτταρικοί αφροί, με μεγέθη κελιών της τάξεως του 10μ, μπορούν να παρασκευαστούν με κορεσμό, υπό πίεση και σε θερμοκρασία δωματίου, πολυμερούς με αδρανές αέριο και στη συνέχεια ανακούφιση της πίεσης και θέρμανση του υπερκορεσμένου πολυμερούς στη θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως προκαλώντας κυτταρική πυρήνωση και ανάπτυξη. Οι χημικοί παράγοντες εμφύσησης είναι πρόσθετα τα οποία είτε αποσυντίθενται κατά την θέρμανση είτε συνδυάζονται όταν αναμειγνύονται για να απελευθερώσουν αέριο. Το νατριοκαρβαμίδιο είναι ένα παράδειγμα. Κάθε διαδικασία μπορεί να παράγει αφρούς ανοικτού ή κλειστού κελιού. Η τελική δομή εξαρτάται από τη ρεολογία και την επιφανειακή τάση των ρευστών στο τήγμα. Οι αφροί κλειστού κελιού υποβάλλονται ενίοτε σε μια περαιτέρω διαδικασία που

ονομάζεται δικτυωτή, στην οποία οι όψεις των κυττάρων θραύονται για να δώσουν αφρό ανοικτού κελιού. Τέλος, αφροί μικροκυτταρικού πολυμερούς χαμηλής πυκνότητας και αερογέλες με σχετικές πυκνότητες τόσο χαμηλές όσο 0,002 και μεγέθη κελιών τόσο μικρά όσο 0,1 μ μπορούν να κατασκευαστούν με μια ποικιλία μεθόδων διαχωρισμού φάσεων: το ένα είναι να καθιζάνει το πολυμερές ως γέλη χαμηλής πυκνότητας σε ένα υγρό και στη συνέχεια να αφαιρείτε το υγρό με εξάτμιση (LeMay et al., 1990).

Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν να κατασκευαστούν με χρήση επεξεργασίας υγρών ή στερεών καταστάσεων (Shapovalov, 1994 και Davies and Zhen, 1983). Το κονιοποιημένο μέταλλο και το κονιοποιημένο υδρίδιο του τιτανίου ή το υδρίδιο του ζirkονίου μπορούν να αναμιχθούν, να συμπυκνωθούν και στη συνέχεια να θερμανθούν στο σημείο τήξης του μετάλλου για να εξαλλωθεί το υδρογόνο ως αέριο και να σχηματιστεί ο αφρός. Η μηχανική ανάδευση ενός μίγματος υγρών σωματιδίων αλουμινίου και καρβιδίου του πυριτίου σχηματίζει έναν αφρό που μπορεί να ψυχθεί για να δώσει αφρό αλουμινίου. Τα υγρά μέταλλα μπορούν επίσης να διεισδύσουν γύρω από τα κοκκία τα οποία στη συνέχεια απομακρύνονται: για παράδειγμα, τα σφαιρίδια άνθρακα μπορούν να καούν ή οι κόκκοι αλατιού μπορούν να ξεπλυθούν. Τα μέταλλα μπορούν να επικαλυφθούν σε υπόστρωμα πολυμερούς αφρού ανοικτού κελιού χρησιμοποιώντας εναπόθεση χωρίς ηλεκτρόλυση, ηλεκτροχημική εναπόθεση ή χημική εναπόθεση ατμών. Οι μεταλλικοί αφροί μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με ευτηκτικό μετασχηματισμό: το μέταλλο τήκεται σε μια ατμόσφαιρα υδρογόνου και στη συνέχεια ψύχεται απευθείας μέχρι το εύτηκτο σημείο, αποδίδοντας το αέριο ως χωριστή φάση μέσα στο μέταλλο. Οι διεργασίες στερεάς κατάστασης συνήθως χρησιμοποιούν μεταλλουργική σκόνη. Στη μέθοδο πυροσυσσωμάτωσης με σκόνη, το κονιοποιημένο μέταλλο αναμειγνύεται με έναν παράγοντα διαχωρισμού ο οποίος αποσυντίθεται ή εξατμίζεται κατά την σύντηξη. Εναλλακτικά, ένας πολτός από μεταλλική σκόνη αναμειγμένος με έναν παράγοντα αφρισμού σε ένα οργανικό φορέα μπορεί να αναδεύεται μηχανικά για να σχηματίσει έναν αφρό που στη συνέχεια θερμαίνεται για να δώσει το πορώδες μέταλλο. Μεταλλικοί αφροί μπορούν επίσης να σχηματιστούν με επικάλυψη ενός οργανικού σπόγγου με ένα πολτό από κονιοποιημένο μέταλλο, ξήρανση του πολτού και ψήσιμο για απομάκρυνση του οργανικού σπόγγου. Σε μία από τις πιο αξιοσημείωτες διεργασίες, το πυριτικό μονοκρυσταλλικό μπορεί να γίνει πορώδες με ανοδίωση: ένα πλακίδιο πυριτίου βυθίζεται σε διάλυμα υδροφθορικού οξέος, αιθανόλης και νερού και υποβάλλεται σε ρεύμα για μικρό χρονικό διάστημα (Bellet and Dolino, 1994). Οι σήραγγες ανοδικών διεργασιών, δίνουν ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο πόρων με μέγεθος κελιού 10 nm και σχετική πυκνότητα τόσο χαμηλή όσο 0,1. Αλλά το υλικό παραμένει ένας απλός κρύσταλλος.

Οι αφροί από γυαλί παράγονται με μεθόδους που είναι παρόμοιες με εκείνες των πολυμερών. Βασικά, με τη χρήση παραγόντων εμφύσησης (συχνά, H_2S). Οι αφροί άνθρακα μπορούν να κατασκευαστούν με πολυμερισμό αφρώδους γραφίτη σε προσεκτικά ελεγχόμενο περιβάλλον. Οι κεραμικοί αφροί κατασκευάζονται με διήθηση ενός αφρού πολυμερούς με μια ολίσθηση (ένας λεπτός πολτός κεραμικού στο νερό ή σε κάποιο άλλο ρευστό). Οι κεραμικοί αφροί μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με χημική εναπόθεση ατμών επί ενός υποστρώματος δικτυωτού αφρού άνθρακα. Οι αφροί τσιμέντου μπορούν να παρασκευαστούν με ανάμιξη ενός πολτού τσιμέντου με έναν προσχηματισμένο υδατικό αφρό που παρασκευάζεται με ανάμιξη πεπιεσμένου αέρα με ένα υδατικό διάλυμα κατάλληλων παραγόντων αφρισμού.

Τα κυψελοειδή μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με τη σύνδεση των προηγούμενων διογκωμένων σφαιριδίων ή κοκκίων. Το πολυστυρένιο μερικές φορές χυτεύεται με αυτόν τον τρόπο. Οι αφροί από γυαλί και μέταλλο μπορούν να παρασκευαστούν με τη συμπύκνωση κοίλων σφαιρών μαζί. Συντακτικοί αφροί παρασκευάζονται με ανάμιξη κοίλων σφαιρών, συνήθως κατασκευασμένων από γυαλί, με συνδετικό υλικό όπως εποξειδική ρητίνη. Και οι ίνες μπορούν να συνδεθούν για να δώσουν χαλάκια χαμηλής πυκνότητας (όπως τσόχα) τα οποία έχουν πολλά κοινά με άλλους τύπους κυψελοειδών.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι πολλά τρόφιμα είναι αφροί. Μερικοί, όπως η μαρέγκα, γίνονται με μηχανικά χτυπήματα. Άλλοι, όπως τα ψωμιά, χρησιμοποιούν ένα βιολογικό παράγοντα εμφύσησης (προζύμη) και δίνουν έναν τρισδιάστατο αφρό με κλειστά κύτταρα. Ακόμα άλλοι, όπως το κορνφλάουρ, βασίζεται σε ένα φυσικό παράγοντα εμφύσησης (ατμό). Και η φύση έχει επινοήσει τους τρόπους της δημιουργίας αφρών είτε ως μέρος της διαδικασίας ανάπτυξης ενός μόνο οργανισμού (όπως στα οστά, τα ξύλα, τον φελλό και τα φύλλα) είτε ως προϊόν μιας κοινότητας οργανισμών (όπως το κοράλλι ή το σφουγγάρι ή οι φωλιές ορισμένων εντόμων).

2.3.3. Παραδείγματα αφρώδη υλικών

2.3.3.1. Πολυουρεθάνη (PUR) /Πολυϊσοκυανουρικό (PIR) αφρώδες

Αυτά είναι θερμοσκληρυνόμενα υλικά, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να σχηματιστούν μόνο μια φορά, μετά την οποία το σχήμα δεν μπορεί να αλλάξει εξαιτίας της εκτεταμένης χημικής διασύνδεσης μεταξύ των μορίων. Τα δύο υλικά ομαδοποιούνται επειδή δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ τους. Εντός της γενικής περιγραφής, υπάρχουν περιθώρια για μια σημαντική ποικιλία πρώτων υλών, προσθέτων και παραγόντων εμφυσήσεως, που όλα αυτά μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητές τους. Τα κύρια συστατικά

του άκαμπτου αφρού πολυουρεθάνης είναι η πολυόλη και το ισοκυάνιο, παράγοντες εμφύσησης και ενεργοποιητές που ελέγχουν την αντίδραση. Μέχρι πρόσφατα ο χρησιμοποιούμενος παράγοντας εμφύσησης ήταν σχεδόν πάντα το τριχλωροφθορομεθάνιο γνωστός καλύτερα ως CFC11 ή R11 ή με την εμπορική ονομασία Frigen. Τα CFC-αέρια (χλωροφθοράνθρακες) είναι γνωστό ότι αποτελούν μία από τις αιτίες της εξάντλησης του στρατοσφαιρικού στρώματος όζοντος και η χρήση τους απαγορεύεται πλέον σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ. Σήμερα υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες εμφύσησης για χρήση στην κατασκευή πάνελ τύπου sandwich, που περιλαμβάνουν: υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC22 ή R22, HCFC142b ή R142b, HCFC141b ή R141b), υδροφθοράνθρακες (HFCs όπως R134a), διάφορες μορφές πεντανίου και νερού που παράγουν CO₂ διοξειδίου του άνθρακα όταν αντιδρά με το ισοκυάνιο.

Μετά την ανάμιξη των συστατικών χημικών ουσιών, οι υγροί αφροί αρχίζουν να διαστέλλονται γρήγορα. Σε μια συνεχή γραμμή αφρισμού, ο αφρός επεκτείνεται κυρίως στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Στην κατακόρυφη κατασκευή της μήτρας, ο αφρός ρέει σαν ένα κύμα από ένα άκρο πυθμένα προς το άλλο άκρο και ταυτόχρονα ανεβαίνει κατακόρυφα. Ο χρόνος από την πρώτη ανάμιξη των συστατικών έως την στιγμή που ο πυρήνας αφρού γίνεται σκληρός είναι μεταξύ 3 και 6 λεπτά ανάλογα με το πάχος του πυρήνα. Επειδή η χημική αντίδραση είναι εξώθερμη, τα υλικά πυρήνα των πάνελ παχύτερων από περίπου 100 mm μπορεί να φθάσουν θερμοκρασίες άνω των 150 °C. Επομένως, είναι απαραίτητο να αποθηκεύονται προσωρινά παχιά στοιχεία για τουλάχιστον 24 ώρες για να ολοκληρωθεί η διαδικασία σκλήρυνσης και ψύξης προτού μεταφερθούν για τελική αποθήκευση. Κατά την επεξεργασία δημιουργούνται κλειστά κελιά μέσα στα οποία παγιδεύεται αέριο που χρησιμοποιείται σαν διογκωτικό μέσο. Το αέριο καλύπτει το 97% περίπου του όγκου του μονωτικού αφρού, δίνοντας έτσι υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες με ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Οι πολυισοκυανουρικοί αφροί (PIR) διαφέρουν από τους καθαρούς αφρούς πολυουρεθάνης μόνο στην αναλογία στην οποία αναμειγνύονται τα κύρια συστατικά, η πολυόλη και το ισοκυάνιο. Αυτή η αναλογία είναι περίπου 100:150 σε σύγκριση με περίπου 100:100 για PUR. Υπάρχει, συνεπώς, περισσότερος ισοκυανικός εστέρας σε PIR παρά σε PUR. Οι διεργασίες αφρισμού και οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες είναι κατά τα άλλα γενικά παρόμοιες, αν και ορισμένες ιδιότητες μπορεί να διαφέρουν λόγω της διαφορετικής χημικής δομής.

Οι παλαιότεροι αφροί PIR έδειξαν ανώτερες θερμικές ιδιότητες αλλά είχαν μεγάλη ευθραστότητα και ήταν δύσκολο να υποστούν επεξεργασία. Η τροποποίηση αυτών των

προηγούμενων τυποποιήσεων με κατάλληλες πολυόλες οδήγησε σε πολυμερή πολυουρεθάνης τροποποιημένα με PIR τα οποία τώρα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά. Αν και η επιλογή της πολυόλης είναι σημαντική, το ίδιο ισχύει και για την επιλογή του καταλύτη που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες καθώς και την επεξεργασία.

Οι τροποποιημένοι αφροί με PIR χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την ανώτερη θερμική τους σταθερότητα και απόδοση στη φωτιά. Ενώ ο καθαρός αφρός πολυουρεθάνης αποσυντίθεται σταδιακά σε έκθεση σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 250 °C, ο τροποποιημένος αφρός PIR γενικά διατηρεί θερμοκρασίες άνω των 350 °C πριν αρχίσει η αποσύνθεση. Επίσης δημιουργεί έναν πιο σταθερό χαρακτήρα, ο οποίος βελτιώνει σημαντικά την αντοχή στη φωτιά.

Αυτή η βελτίωση της συμπεριφοράς κατά της φωτιάς είναι εις βάρος μιας πιο δαπανηρής διαδικασίας παρασκευής επειδή η χημική αντίδραση απαιτεί θερμοκρασία περίπου 40-45 °C, δηλαδή περίπου το διπλάσιο εκείνης που απαιτείται για μια αντίδραση πολυουρεθάνης.

Μετά τη διεργασία αφρισμού, η δομή του αφρού αποτελείται κυρίως από κλειστά κύτταρα που διαχωρίζονται από λεπτά τοιχώματα των κελιών. Τα κύτταρα γεμίζονται με παράγοντα εμφύσησης και κανονικά επίσης με κάποιο διοξείδιο του άνθρακα, CO₂. Το CO₂ διαφεύγει πολύ γρήγορα από τα τοιχώματα των κελιών σε σύγκριση με άλλα αέρια και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα το αποτέλεσμα είναι κλειστά κελιά που περιέχουν κυρίως παράγοντες εμφύσησης που έχουν εξαιρετικές ιδιότητες μόνωσης. Αφού περάσει πολύς καιρός, κάποιος αέρας μπορεί να διαχέεται στον αφρό, αλλά αυτό έχει μικρή επίδραση στις ιδιότητες μόνωσης. Στις δομές τύπου sandwich, ο πυρήνας προστατεύεται με στεγανά εξωτερικά στρώματα και τα αέρια των κελιών μπορούν να εισέλθουν ή να περάσουν μόνο από τις άκρες του πάνελ.

Με μια συνεχή γραμμή αφρισμού, η ποιότητα του αφρού μπορεί να ποικίλει στην κατεύθυνση του πάχους του πάνελ. Είναι απαραίτητο να ληφθεί μια υπερβολική δόση του ελαφρού μίγματος, έτσι ώστε ο αφρός να ανέβει στην επάνω επιφάνεια και να γεμίσει το πάνελ κάτω από μικρή πίεση. Αυτό σημαίνει ότι η πυκνότητα του αφρού είναι κάπως μεγαλύτερη κοντά στις επιφάνειες απ' ότι στο μέσο του πάνελ όπου η διαστολή ήταν ελεύθερη. Επειδή η γραμμή κινείται συνεχώς, τα κελιά συνήθως έχουν σχήμα αυγού και προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση του αφρισμού. Εν τούτοις, οι πολυστρωματικοί πυρήνες αφρού μπορεί να έχουν αρκετή κυτταρική δομή και ιδιότητες κυψελοειδών.

Με την τεχνική αφρισμού καλουπιού, οι ιδιότητες του αφρού επίσης μεταβάλλονται στο επίπεδο του πίνακα. Στον πυθμένα του καλουπιού, όπου εισήχθη το μίγμα, ο αφρός είναι

βαρύτερος επειδή η ροή είναι πιο περιορισμένη. Στην κατεύθυνση του πάχους του πάνελ, η χαμηλότερη πυκνότητα βρίσκεται στο μέσο ύψος. Αυτή η τεχνική μπορεί επίσης να προκαλέσει κάποιο στροβιλισμό κατά τον αφρισμό και μπορεί να σχηματιστούν κενά στον αφρό επειδή η ροή δεν είναι ομοιόμορφη. Η τοπική εισαγωγή του υγρού και η παρουσία διαχωριστικών μεταξύ των επιφανειών μπορεί να προκαλέσει επιπλέον ανομοιομορφία.

Υπό πίεση, η άκαμπτη δομή αφρού πολυουρεθάνης καταρρέει όταν τα τοιχώματα των κελιών λυγίζουν και θραύονται (σε θλίψη ή διάτμηση) ή σπάνε (σε εφελκυσμό). Η μέση πυκνότητα που χρησιμοποιείται συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 35-50 kg / m³.

2.3.3.2. Πολυστυρένιο (EPS and XPS)

Το πολυστυρένιο είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό που σημαίνει ότι μπορεί να αναμορφωθεί με θέρμανση. Είναι γνωστό παγκοσμίως ως καλό θερμομονωτικό υλικό. Ωστόσο, είναι μάλλον λιγότερο σημαντικό όσον αφορά την εφαρμογή σε πάνελ τύπου sandwich, επειδή δύσκολα συνδέεται με τα εξωτερικά στρώματα. Κατά συνέπεια, το πολυστυρένιο είναι διαθέσιμο μόνο σε πλάκες που πρέπει να συνδεθούν με το υλικό προσκόλλησης χρησιμοποιώντας κόλλες. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται επομένως συνήθως όταν απαιτούνται μικρές ποσότητες σχετικά απλού σχεδιασμού λόγω του χαμηλού κόστους του εξοπλισμού παραγωγής.

Το υλικό πυρήνα διογκωμένου πολυστυρενίου (EPS) (γνωστό και ως διογκωμένη πολυστερίνη ή φελιζόλ για την Ελληνικά αγορά) κατασκευάζεται από ένα κοκκοποιημένο πολυστυρένιο που περιέχει έναν παράγοντα διογκώσεως, πεντάνιο, το οποίο προκαλεί το κοκκοποιημένο υλικό να αφρίσει υπό την επίδραση της θερμοκρασίας. Οι πλάκες παράγονται είτε σε συνεχή γραμμή είτε σε καλούπια. Και στις δύο περιπτώσεις, θερμαίνονται με θερμό ατμό που προκαλεί την επέκταση των κόκκων και την απελευθέρωση του πεντανίου που παραμένει ενθυλακωμένο (εγκλωβισμένο) μέσα στα διογκωμένα σφαιρίδια διαμέτρου 5-6mm. Τα σφαιρίδια συγκολλούνται αλλά δεν σχηματίζουν μια εντελώς κλειστή κυτταρική δομή. Σε μια συνεχή γραμμή, οι πλάκες τυλίγονται στο απαιτούμενο πάχος, ενώ, στην τεχνική του καλουπιού, οι πλάκες πριονίζονται από μεγαλύτερα μπλοκ. Λόγω της διαδικασίας κατασκευής, το EPS τείνει να συρρικνώνεται όταν το πεντάνιο διαφεύγει από τον αφρό και οι διαφορές πίεσης εξισώνονται.

Όταν συγκρίνονται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες πολυστυρενίου και αφρών πολυουρεθάνης, διαπιστώνεται ότι το μισό περίπου βάρος του πολυστυρενίου είναι γενικά ισοδύναμο με ένα δεδομένο βάρος πολυουρεθάνης. Αντιστρόφως, όσον αφορά την τιμή μετάδοσης θερμότητας, το PUR είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή του EPS και αυτός είναι ένας

σημαντικός λόγος για τον οποίο προτιμάται γενικά το PUR. Η πυκνότητα του πολυστυρενίου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή πάνελ τύπου sandwich είναι συνήθως μεταξύ περίπου 15 και 20 kg/m³ και αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι το συνιστώμενο εύρος πυκνότητας.

Το πολυστυρένιο που επεξεργάζεται με τη μέθοδο εξώθησης (XPS), γνωστό ως εξηλασμένο πολυστυρένιο, αποδίδει έναν πιο ομοιόμορφο αφρό, με δομή μικρών κλειστών κελιών και επίπεδες, συμπαγείς επιφάνειες. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής, οι κόκκοι πολυστυρενίου τήκονται και στη συνέχεια εξωθούνται. Το αέριο διογκώσεως που παράγεται αναμιγνύεται και το μίγμα και στη συνέχεια ψύχεται. Προηγουμένως, το αέριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το τριχλωροφθορομεθάνιο (R11) αλλά σήμερα αυτό αντικαταστάθηκε από αέρια με μικρότερο δυναμικό εξάντλησης του όζοντος, όπως διοξείδιο του άνθρακα CO₂ ή R22. Το υλικό αυτό έχει πυκνότητα περίπου 30-50 kg/m³ και έχει εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες. Είναι πολύ εύπλαστο και σχετικά ισχυρό σε σύγκριση με άλλους άκαμπτους πλαστικούς αφρούς. Ιδιαίτερα εντυπωσιακή είναι η πολύ χαμηλή τιμή απορρόφησης νερού η οποία, λόγω της κλειστής δομής κελιών, είναι σχεδόν μηδενική. Δεν υπάρχει σχεδόν καμία συρρίκνωση του XPS μετά την κατασκευή.

Και οι δύο τύποι σανίδων από πολυστυρένιο πρέπει να κολληθούν σε μεταλλικές επιφάνειες για να σχηματίσουν ένα πάνελ τύπου sandwich και συνιστάται η συγκόλληση χωρίς διαλύτες, διότι η αντίσταση του πολυστυρενίου στο διαλύτη είναι χαμηλή. Τα καλά αποτελέσματα έχουν ληφθεί με τη χρήση συγκολλητικών δύο συστατικών με βάση την πολυουρεθάνη. Οι σανίδες πρέπει να είναι πλανισμένες πριν από τη συγκόλληση και οι σανίδες EPS πρέπει πρώτα να σκληρυνθούν για να εξαλειφθεί η συρρίκνωση.

2.3.3.3. Αφρός από φαινολική ρητίνη (PF)

Με την αυξανόμενη πίεση για τη βελτίωση της πυρασφάλειας των πάνελ τύπου sandwich, ο άκαμπτος φαινολικός αφρός είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο υλικό που αξίζει επίσης να ληφθεί υπόψη. Σε σύγκριση με άλλα άκαμπτα υλικά πυρήνα αφρού, έχει εξαιρετική απόδοση στη φωτιά. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο υψηλή αντίσταση στην ανάφλεξη και βραδεία χαρακτηριστικά καύσης αλλά και πολύ χαμηλό ρυθμό εκπομπής καπνού. Επιπλέον, η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να είναι πολύ χαμηλή, αλλά αυτό εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα ειδικών προϊόντων.

Ο φαινολικός αφρός κατασκευάζεται από υγρή ρητίνη φαινολικής φορμαλδεΐδης, η οποία αναμιγνύεται με ένα ελαφρύ πτητικό διαλύτη ως παράγοντα εμφύσησης και έναν παράγοντα σκλήρυνσης. Με την εφαρμογή της θερμοκρασίας, το μείγμα αφρίζει και σκληραίνει. Ο φαινολικός αφρός παράγεται είτε ως πλακίδιο και κομμένο σε σχήμα για

συναρμολόγηση με κόλλες είτε, εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας τις τελευταίες εξελίξεις, τα πάνελ μπορούν να κατασκευαστούν με συνεχή ελασματοποίηση. Οι μηχανικές ιδιότητες αυτού του σχετικά νέου αφρού είναι παρόμοιες με αυτές των PUR και PIR.

Οι αφροί PF πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, όταν θεωρήθηκε ότι η αντίσταση στη φωτιά των σκληρών αφρών PUR χρειάστηκε βελτίωση. Εκείνη την εποχή διαπιστώθηκε ότι η PF είχε κάποιες μάλλον προβληματικές ιδιότητες, οι οποίες αποτελούσαν εμπόδιο στην ευρύτερη χρήση της σε πάνελ τύπου sandwich με μεταλλικές επιφάνειες. Το υλικό ήταν δύσκολο να επεξεργαστεί, ήταν μάλλον εύθρυπτο και, κατά τη διάρκεια της κατασκευής, παράχθηκε μια σημαντική ποσότητα νερού που έπρεπε να απομακρυνθεί κατά τη διάρκεια της φάσης σκλήρυνσης. Αυτό εμπόδιζε την στρωματοποίηση με μεταλλικές επιφάνειες, οι οποίες είναι υδατοστεγείς και ατμοστεγείς. Περαιτέρω, αυτό το αυξημένο υπολειμματικό νερό θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα όξινο και αυτό θα προκαλούσε σοβαρά προβλήματα διάβρωσης όταν θα χρησιμοποιούνταν φαινολικός αφρός σε μεταλλικά εξωτερικά στρώματα.

Πολύ πρόσφατες εξελίξεις έχουν βελτιώσει σημαντικά αυτές τις ιδιότητες με αποτέλεσμα το PF να θεωρηθεί τώρα σοβαρό υποψήφιο για κατασκευή πάνελ τύπου sandwich, συμπεριλαμβανομένης της συνεχούς ελασματοποίησης. Για πάνελ τύπου sandwich με μεταλλικά εξωτερικά στρώματα συνιστάται να δίδεται προσοχή κατά τον προσδιορισμό αυτού του υλικού έως ότου οι ιδιότητές του γίνουν ευρύτερα κατανοητές. Το υλικό πυρήνα που έχει σκληρυνθεί με όξινο PF θα πρέπει πιθανώς να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν κόβεται από την πλάκα και στη συνέχεια μόνο μετά από ένα χρόνο αποθήκευσης τουλάχιστον μιας εβδομάδας πριν από την χρησιμοποίησή του σε παραγωγή πάνελ.

Έχουν επίσης αναφερθεί ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων όταν το υλικό αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για στέγες και οροφές που υπόκεινται σε σημαντική κυκλοφορία. Φαίνεται ότι η σχετικά εύθρυπτη φύση του PF μπορεί να οδηγήσει σε πρόωμη αποκόλληση κάτω από επαναλαμβανόμενες κρούσεις. Αυτός είναι ένας ακόμη λόγος για τον οποίο το PF πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή μέχρι να κατανοηθούν καλύτερα οι ιδιότητές του.

2.3.3.4. Ανόργανα υλικά πυρήνα

Πλάκες που σχηματίζονται από ανόργανες ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό πυρήνα τύπου sandwich όταν υπάρχει ιδιαίτερη απαίτηση όσον αφορά την πυρασφάλεια. Οι πιο συνηθισμένες πρώτες ύλες είναι τα τετηγμένα ορυκτά, δηλαδή η πέτρα, το γυαλί ή η σκωρία υψικαμίνου (κυρίως τα απόβλητα της χαλυβουργίας), τα οποία δημιουργούν υλικά που ονομάζονται ορυκτοβάμβακας, πετροβάμβακας και υαλοβάμβακα.

Οι πλάκες από ίνες από πετροβάμβακα παράγονται από τήγμα πυριτικού άλατος. Από την τηγμένη πέτρα παράγονται οι ίνες είτε με εμφύσηση αέρα ή ατμού, είτε με νεώτερες τεχνολογίες με περιστρεφόμενες διατάξεις υψηλής ταχύτητας που δημιουργούν φυγοκεντρικές δυνάμεις, μια μέθοδος παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή νημάτων ζάχαρης στο μαλλί της γριάς, αλλά προσαρμοσμένη στις ιδιαίτερα ψηλότερες θερμοκρασίες της παραγωγής των υλικών αυτών. Το τελικό προϊόν είναι μια μάζα από λεπτές, πλεγμένες ίνες. Μέρος της παραγωγικής διαδικασίας είναι και η επικάλυψη των ινών με ένα συνδετικό υλικό το οποίο αφενός μειώνει την παραγωγή σκόνης και αφετέρου δίνει μηχανικές ιδιότητες στον πετροβάμβακα. Για τη δέσμευση των ινών μεταξύ τους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα οργανικό ή ανόργανο συνδετικό υλικό, ενώ η φαινολική ρητίνη είναι η πιο κοινή. Η περιεκτικότητα του συνδετικού υλικού κυμαίνεται κανονικά, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του προϊόντος, από 1 έως 10% του βάρους του μαλλιού. Τα έλαια μπορούν επίσης να προστεθούν για να κάνουν το μαλλί απωθητικό στο νερό. Οι πλάκες συμπιέζονται και σκληραίνουν πριν κοπούν στο κατάλληλο μέγεθος.

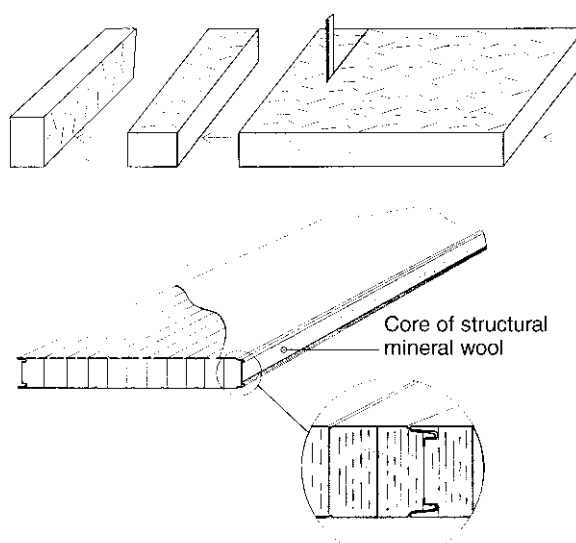
Οι πλάκες από γυάλινο μαλλί μπορούν να παραχθούν με τον ίδιο τρόπο από ένα τήγμα μείγματος χαλαζιακής άμμου, σόδας και ασβεστόλιθο ή ανακυκλωμένο γυαλί. Σε μια άλλη μέθοδο παραγωγής (η μέθοδος TEL) το τήγμα πιέζεται ή τραβιέται μέσω των ακροφυσίων μέσω πεπιεσμένου αέρα. Οι ιδιότητες του υαλοβάμβακα είναι παρόμοιες με αυτές του πετροβάμβακα εκτός από ένα χαμηλότερο σημείο τήξης και μια αυξημένη ποσότητα συνδετικού παράγοντα που είναι συνήθως μεταξύ 4 και 15%.

Οι ίνες από πετροβάμβακα έχουν μέσο μήκος 2-4 mm και μέσο πάχος 3-7 μm . Οι ίνες γυαλιού είναι μακρύτερες, με μέσο μήκος 5-10 mm, αλλά έχουν το ίδιο εύρος πάχους. Ρυθμίζοντας την ταχύτητα της ζώνης και άλλες παραμέτρους διεργασίας, η πυκνότητα και το πάχος της πλάκας μπορούν να μεταβληθούν εύκολα.

Υπάρχουν αρκετές άλλες μέθοδοι παραγωγής και το μέγεθος των ινών ποικίλει αναλόγως. Λόγω της διαδικασίας κατασκευής, όλες οι πλάκες από μαλλί είναι εξαιρετικά ορθοτροπικές. Οι μακρύτερες ίνες ευθυγραμμίζονται κατά μήκος του μεταφορέα και θα παραμείνουν στον ίδιο προσανατολισμό στην κατασκευασμένη πλάκα. Οι βραχύτερες ίνες έχουν πιο τυχαίο προσανατολισμό, που είναι ο λόγος για τον οποίο οι πλάκες από μαλλί είναι πιο σκληρές και ισχυρότερες στο δικό τους επίπεδο. Στην άκαμπτη κατεύθυνση, οι ίνες δρουν ως ελαστικά υποστηριζόμενες μικροί στύλοι, ενώ σε άλλες διευθύνσεις ως ελαστικά υποστηριζόμενοι μικρές δοκοί. Οι πλάκες από μαλλί αντλούν ένα μεγάλο μέρος της δυσκαμψίας και της αντοχής τους από τους παράγοντες συγκόλλησης.

Από τους προαναφερθέντες τύπους, ο ορυκτοβάμβακας, με φυσικό πέτρωμα ως πρώτη ύλη, έχει την καλύτερη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες και την καλύτερη αντοχή στην υγρασία. Αυτό το υλικό είναι επομένως με ορισμένα πρόσθετα, ο πλέον κατάλληλος τύπος μαλλιού για χρήση ως υλικό πυρήνα σε πάνελ τύπου sandwich .

Σε σύγκριση με τις πλάκες άκαμπτου αφρού, οι πλάκες από ορυκτοβάμβακα έχουν πιο ανοικτή κυτταρική δομή και υψηλό βαθμό ελαστικότητας κάμψης κατά τη διαμήκη κατεύθυνση. Επιπλέον, η δομή των ινών δεν έχει κλειστούς πόρους, έτσι ώστε οι πλάκες να είναι σημαντικά πιο ευαίσθητες στην απορρόφηση νερού και τη διάχυση ατμών. Με τα κατάλληλα πρόσθετα, η απορρόφηση νερού από ορυκτοβάμβακα μπορεί να μειωθεί ώστε να είναι μικρότερη από αυτή του πολυστυρενίου. Μέσα σε ένα πάνελ τύπου sandwich με στεγανές επιφάνειες και ραφές και με κανονικές πυκνότητες μαλλιού, δεν υπάρχει κίνδυνος μετακίνησης αέρα. Ως συνέπεια της εσωτερικής δομής τους, οι πλάκες από ορυκτοβάμβακα έχουν μάλλον χαμηλή εφελκυστική, διατμητική και θλιπτική αντοχή σε κατεύθυνση κάθετη στο μήκος τους. Ωστόσο, το ορυκτό μαλλί είναι άκαυστο και αυτό παρέχει το ερέθισμα για να μελετηθεί πώς μπορούν να βελτιωθούν οι μηχανικές ιδιότητες. Έχει ανακαλυφθεί μια απλή λύση. Η πλάκα κόβεται σε λωρίδες (ελάσματα) σε ορθή γωνία προς τον προσανατολισμό των ινών και με πλάτος ίσο με το απαιτούμενο ύψος του πυρήνα. Χρησιμοποιώντας κόλλες, αυτές οι λωρίδες συναρμολογούνται για να σχηματίσουν πάνελ με τις ίνες προσανατολισμένες κάθετα στις επιφάνειες όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5. Τα πάνελ τύπου sandwich που κατασκευάστηκαν με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνουν σημαντικούς χρόνους πυρασφάλειας. Το εύρος πυκνότητας των ορυκτών μαλλιών που χρησιμοποιούνται συνήθως σε πάνελ τύπου sandwich είναι 70-150 kg/m³.



Σχήμα 2.5 Κατασκευή πάνελ τύπου sandwich με πυρήνες λωρίδων ορυκτοβάμβακα.

Σε μη φέροντα πάνελ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά μαλακά ορυκτά μαλλιά και οι ίνες μπορεί να προσανατολίζονται κατά μήκος του επιπέδου ενός πάνελ. Αυτό συμβαίνει συχνά όταν απαιτούνται καλές ακουστικές ιδιότητες.

Ορισμένα άλλα οργανικά υλικά πυρήνα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Το αφρώδες γυαλί με πυκνότητα που υπερβαίνει τα 150 kg/m^3 είναι πλήρως σφικτό και δεν είναι ευαίσθητο στους διαλύτες. Έχει θερμική αγωγιμότητα λ πάνω από $0,09 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Σε όλα τα πάνελ που αποτελούνται από μεταλλικές επιφάνειες με πυρήνα κατασκευασμένα από υλικό τύπου πλακών, είναι σημαντικό να δίνεται προσοχή στην επιπεδότητα των επιφανειών πυρήνα. Αυτό τονίζεται σε πάνελ με επίπεδες επιφάνειες, όπου κάθε ανισότητα στον πυρήνα αντανakλάται άμεσα στο σχήμα των επιφανειών. Αν ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από πολλά κομμάτια, πρέπει να είναι ομοιόμορφου ύψους για τον ίδιο λόγο.

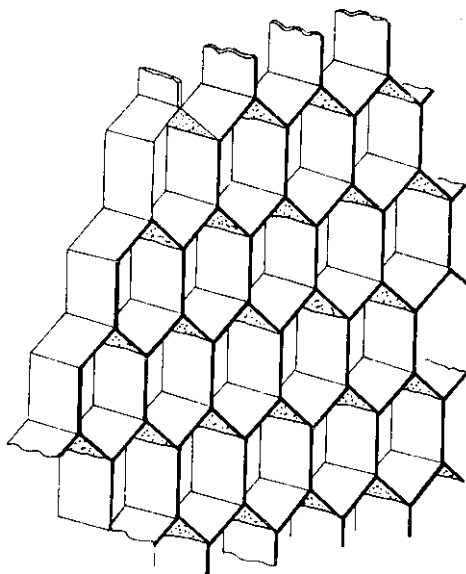
2.3.4. Δισδιάστατος κυψελοειδής πυρήνας

Με την γενική της έννοια, ο όρος δισδιάστατος κυψελοειδής πυρήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει οποιαδήποτε σειρά πανομοιότυπων πρισματικών κελιών τα οποία είναι ενωμένα μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια επαναλαμβανόμενη επίπεδη δομή. Τα κελιά είναι συνήθως εξαγωνικά σε τομή, όπως είναι στην κηρήθρα της μέλισσας, αλλά μπορούν επίσης να είναι τριγωνικά ή τετράγωνα ή ρομβικά. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε κυρίως, από πρακτικής άποψης, στα συνήθως εξαγωνικά, όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.6. Στο Κεφάλαιο 3 θα αναλύσουμε κάποιες διαφορές που προκύπτουν αν χρησιμοποιήσουμε κυψελοειδείς πυρήνες άλλου σχήματος. Λόγω των διαφορετικών μεθόδων παραγωγής, οι περισσότεροι κυψελοειδείς πυρήνες έχουν διαφορετικές ιδιότητες ο ένας από τον άλλο. Αυτό φαίνεται εύκολα, καθώς τόσο η διαδικασία δημιουργίας πτυχώσεων όσο και διαστολής προκαλεί ένα διπλό τοίχωμα προς μια κατεύθυνση και μονά τοιχώματα προς την άλλη. Υπερτεταμένα “κυψελοειδή” δημιουργούν πρόσθετη ανισοτροπία. Οι ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι περισσότεροι κυψελοειδείς πυρήνες, σχετίζονται με τρεις κατευθύνσεις: το πλάτος (W), το μήκος (L) και το πάχος (T ή R). Οι κυψελοειδείς πυρήνες έχουν άριστες ιδιότητες όπως πολύ υψηλή, κάθετα προς τις εξωτερικές επιφάνειες σκληρότητα, μεγάλη αντοχή στην διάτμηση και την μεγαλύτερη ως προς το βάρος σχέση, αντίσταση σε ολικό φορτίο θραύσης, από σχεδόν όλους τους υπάρχοντες πυρήνες. Τα κύρια μειονεκτήματα τους, είναι το υψηλό κόστος, ο δύσκολος χειρισμός κατά τη διάρκεια της παραγωγής του πάνελ (στρώσιμο και συνένωση του πυρήνα με τις εξωτερικές επιφάνειες),

και το γεγονός ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με υγρή στρώση προεμποτισμού στην κατασκευή.

Το κυψελοειδές μπορεί να κατασκευαστεί από σχεδόν οποιοδήποτε λεπτό επίπεδο φύλλο υλικού. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:

- μεταλλικό - αλουμίνιο, ανοξείδωτο χάλυβα, τιτάνιο
- μη μεταλλικό - ύφασμα εμποτισμένου υαλονήματος, Nomex, χαρτί Kraft.



Σχήμα 2.6 Κυψελοειδές πυρήνας με εξαγωνικό σχήμα κελιών.

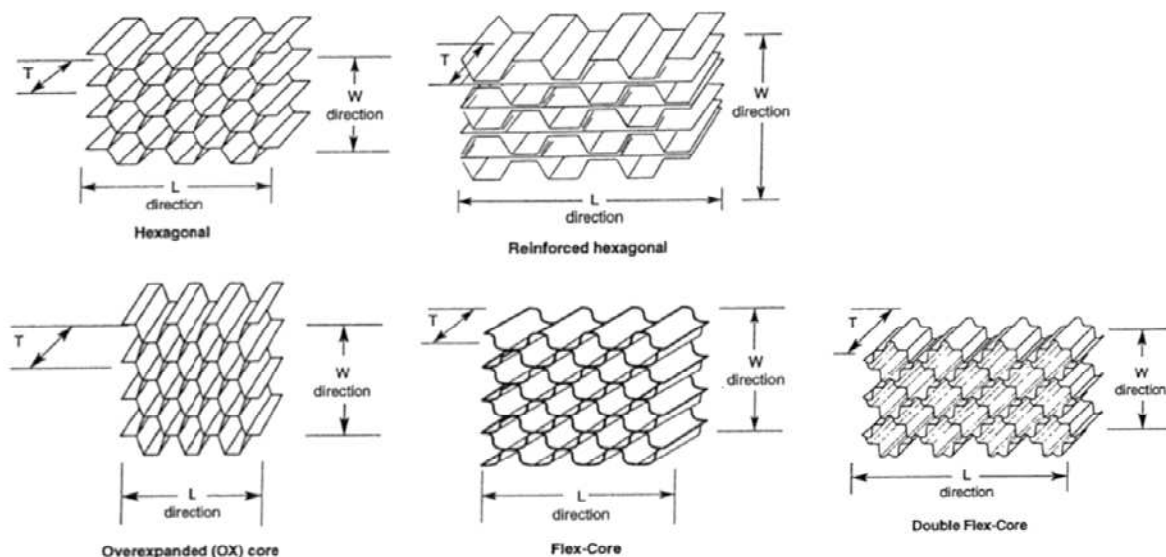
Μερικά από τα πιο ασυνήθιστα υλικά της ύφανσης του κυψελοειδές είναι ο χαλκός, ο μόλυβδος, ο αμιάντος, το Karton, το Mylar και το Kevlar. Ένα νέο υλικό είναι το ύφασμα άνθρακα, το οποίο παράγει κυψελοειδές που έχει εξαιρετικά υψηλές μηχανικές ιδιότητες, ειδικά για έναν μη μεταλλικό πυρήνα. Στην πραγματικότητα, είναι ο πρώτος μη μεταλλικός πυρήνας που έχει συντελεστή διάτμησης τόσο υψηλό όσο το κυψελοειδές αλουμινίου.

Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το 3003 για το κοινό κυψελοειδές εμπορικής παραγωγής και τα 5052, 5056 και 2024 για τις ειδικές προδιαγραφές με το 5052 να είναι το πιο κοινό. Το κράμα 2024 χρησιμοποιείται όταν απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Μπορεί να αντέξει τις θερμοκρασίες λειτουργίας των 216°C, ενώ οι άλλοι πυρήνες κραμάτων αλουμινίου έχουν θερμοκρασία λειτουργίας 177°C. Το χαρτί Nomex έρχεται επίσης σε εμπορικό επίπεδο με το E-78 (τώρα T-722) και για ιδιαίτερες προδιαγραφές χρησιμοποιούμε τον τύπο 412. Το χαρτί T-722 Nomex παράγει κυψελοειδές με μόνο ελαφρώς χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες, αλλά δεν επιτυγχάνει την απαίτηση του FAR 25.853 για την αναφλεξιμότητα μετά τη φωτιά. Οι πυρήνες κυψελοειδών

από υαλοβάμβακα κατασκευάζονται από τα ακόλουθα υφάσματα από υφαντικές ίνες υάλου: 106, 108, 116, 117 και 1526. Το ύφασμα 106 είναι το ελαφρύτερο και λεπτότερο. Επομένως, χρησιμοποιείται για τους πυρήνες ελαφριάς πυκνότητας των μικρών κελιών. Το χαρτί Kraft έρχεται ακατέργαστο ή εμποτισμένο με ρητίνη από 11 έως 25% κατά βάρος σε χαρτί βάρους 60, 80 και 90lb ανά δεσμίδα. Μία δεσμίδα ισούται με 3000 τετραγωνικά πόδια (27, 36 και 41kg ανά δεσμίδα, μία δεσμίδα ισούται με 279m²). Τα επιβραδυντικά φλόγας μπορούν να προστεθούν για να επιτρέψουν στο κυψελοειδές χαρτιού Kraft να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις εξάπλωσης της φλόγας από την UL, ώστε να είναι αυτοσβενές. Τα κράματα που χρησιμοποιούνται σε πυρήνες από ανοξείδωτο χάλυβα είναι 17-PH, PH 15-7, AM 350, AM 355, 316L και 347. Οι πυρήνες τιτανίου κατασκευάζονται από εμπορικά καθαρό 6Al-4V, 6Al-2Sn-4Zr-2Mo και 3Al-2.5V φύλλο χαρτιού. Τα Inconel και Hastelloy-X είναι δύο κράματα με βάση το νικέλιο, τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης για την κατασκευή κυψελοειδή πυρήνων. Τα κράματα Inconel είναι υλικά ανθεκτικά στην οξείδωση-διάβρωση και είναι κατάλληλα για ακραία περιβάλλοντα που υπόκεινται σε πίεση και θερμότητα. Τα κράματα HASTELLOY X έχουν αντοχή σε υψηλή θερμοκρασία και αντοχή στην οξείδωση.

2.3.4.1. Διάφορα κυψελοειδή ως προς το σχήμα των κελιών

Τα υλικά πυρήνα που χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή και σχεδιασμό των ελαφριών και δύσκαμπτων σύνθετων υλικών τύπου sandwich, πρέπει να προσφέρουν χαμηλή πυκνότητα και καλές διατμητικές και θλιπτικές ιδιότητες. Τα περισσότερα κυψελοειδή υλικά αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες σειρές εξαγωνικών κελιών και κατασκευάζονται από πλήθος διαφορετικών υλικών όπως χαρτί, ύφασμα, μεταλλικά φύλλα, υβρίδια ινών ρητίνης κτλ. Ακόμα υπάρχουν πλήθος μη-εξαγωνικών κυψελοειδών δομών που χρησιμοποιούνται συχνά, όμως οι εξαγωνικές είναι αυτές που συνήθως εμφανίζουν υψηλότερη αντοχή και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Οι διαφορετικές διαμορφώσεις που μπορεί να έχουν τα κυψελοειδή εξαγωνικά υλικά πυρήνα δίνονται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Διαμορφώσεις των κυψελοειδών στερεών "εξαγωνικού τύπου κελιά", Μήκος L , Πάχος T , Πλάτος W .

Εξαγωνικού πυρήνα (Hexagonal): Τα κυψελοειδή υλικά πυρήνα με εξαγωνικού σχήματος κελιά συνήθως κατασκευάζονται από μεταλλικά και μη μεταλλικά υλικά. Το εξάγωνο κελί είναι μακράν το πιο συνηθισμένο συγκολλημένο κυψελοειδές, ενώ οι περισσότεροι συγκολλημένοι με ηλεκτρική αντίσταση ή με ετερογενή συγκόλληση πυρήνες έχουν τετραγωνικά κελιά (πολύ στενούς κόμβους).

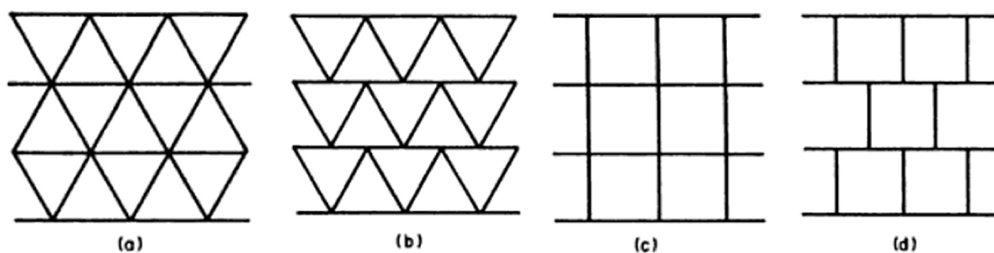
Αναπτυγμένος εξαγωνικός πυρήνας (Overexpanded Ox-Core): Τα κυψελοειδή υλικά τύπου Ox-core είναι εξαγωνικής διαμόρφωσης κελιά που έχουν υποστεί περισσότερη επέκταση στην κατεύθυνση (w). Δίνει μια ορθογωνική διαμόρφωση που διευκολύνει τις διαδικασίες δημιουργίας καμπυλών και την επεξεργασία της φόρμας τους στην κατεύθυνση " L ". Σ' αυτή την διαμόρφωση οι διατμητικές ιδιότητες στην κατεύθυνση " w " είναι βελτιωμένες συγκριτικά με την εξαγωνική διαμόρφωση, δεν ισχύει το ίδιο για την κατεύθυνση " L ".

Ενισχυμένοι εξαγωνικοί πυρήνες (Reinforced hexagonal): Αυτή η διαμόρφωση έχει ένα υπόστρωμα που παρεμβάλλεται μεταξύ των κόμβων, προκειμένου να αυξήσει την πυκνότητα και να βελτιώσει τις μηχανικές του ιδιότητες. Ο πυρήνας αλουμινίου με πυκνότητα μέχρι 55 pcf (880 kg / m³) έχει κατασκευαστεί με αυτό τον τρόπο. Αυτός ο τύπος πυρήνα χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως απορροφητής ενέργειας.

Εύκαμπτοι πυρήνες (Flex-core): Αυτή η διαμόρφωση είναι ξεχωριστή για την εξαιρετική ικανότητα της να μπορεί να διαμορφώνεται σε σύνθετες καμπύλες και χωρίς να εμφανίζει φαινόμενα λυγισμού στα τοιχώματα των κελιών. Όταν αυτού του τύπου οι πυρήνες διαμορφώνονται σε καμπυλόμορφες δομές με μικρές ακτίνες, τότε προσφέρουν υψηλή αντοχή σε διάτμηση σε σχέση με τα κυψελοειδή εξαγωνικής διατομής της ίδιας πυκνότητας.

Διπλοί εύκαμπτοι πυρήνες (Double-Flex): Η διαμόρφωση αυτή αποτελείται από μεγάλα κελιά με δομή flex-core. Παρουσιάζει άριστη ευκολία σε επεξεργασίες διαμόρφωσης και υψηλές θλιπτικές ιδιότητες. Αποτελεί την πιο εύκαμπτη κυψελοειδή διαμόρφωση.

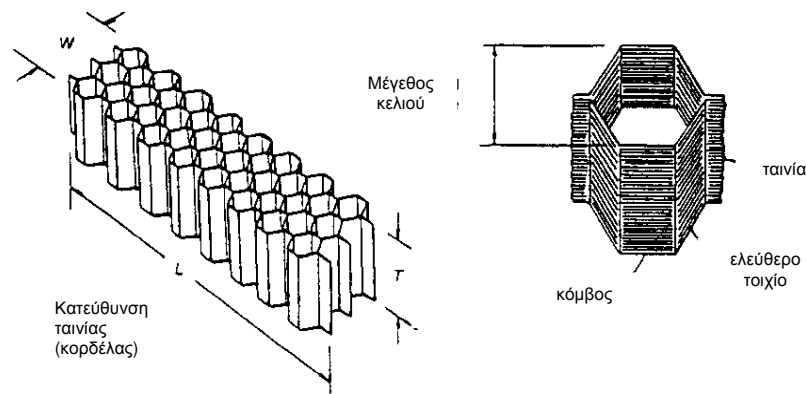
Τα κελιά στα κυψελοειδή δεν είναι πάντα εξαγωνικά. Για παράδειγμα, κεραμικά και μεταλλικά κυψελοειδή που χρησιμοποιούνται για ανταλλαγές θερμότητας και υποστηρίγματα καταλύτη έχουν μερικές φορές τετράγωνα ή τριγωνικά σχήματος κελιά, που απεικονίζονται στο σχήμα 2.8, είτε για να αυξήσουν το εμβαδό της επιφάνειας είτε για να δώσουν μια πιο σκληρή δομή.



Σχήμα 2.8 Διαμορφώσεις των κυψελοειδών στερεών μη εξαγωνικών κυψελοειδών.

2.3.4.2. Ορολογία κυψελοειδών πυρήνων με εξαγωνικό σχήμα κελιών

Όπως και οι περισσότεροι κλάδοι, η επιστήμη των κυψελοειδών έχει τη δική της ορολογία και ο ακόλουθος κατάλογος ορίζει ορισμένους από τους πιο συνηθισμένους όρους του κυψελοειδούς, που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Γεωμετρία της δομής ενός κυψελοειδές στερεού και των κύριων κατευθύνσεων

- Πυκνότητα - το βάρος ενός κυβικού μέτρου πυρήνα, εκφρασμένο σε χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο (kg / m^3).
- Κελί (Cell) - μια ενιαία μονάδα κυψέλης, συνήθως ένα εξάγωνο.
- Ταινία (Ribbon) - το επίπεδο υλικό στρώματος που αποτελεί το κυψελοειδές, που επίσης αναφέρεται ως ιστός (μεμβράνη).
- Κόμβος - το δεσμευμένο τμήμα των παρακείμενων φύλλων ταινίας, διπλά φύλλα.
- Ελεύθερα τοιχώματα - τμήματα τοιχώματος του κελιού απλών μη δεσμευμένων φύλλων.
- L κατεύθυνση - την κατεύθυνση της ταινίας (κορδέλας) του πυρήνα, την κατεύθυνση των συνεχών φύλλων.
- Κατεύθυνση W - η κατεύθυνση στην οποία ο πυρήνας επεκτείνεται ή κάθετα στην κατεύθυνση της ταινίας.
- Κατεύθυνση T - η κατεύθυνση του πυρήνα παράλληλη με τα ανοίγματα κελιών.
- HOBE - Κυψελοειδές πριν από την επέκταση, το συμπαγές μπλοκ δεσμευμένων φύλλων.
- CUE - Πυρήνας μη διογκωμένος, το συμπαγές μπλοκ δεσμευμένων φύλλων.

2.3.4.3. Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών πυρήνων

Υπάρχουν πέντε βασικοί τρόποι παρασκευής πυρήνων κυψελοειδών: συγκόλληση με κόλλα, συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, ετερογενής συγκόλληση, συγκόλληση με διάχυση και η θερμική σύντηξη. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στον τρόπο σύνδεσης των κόμβων.

- Η συνηθέστερη μέθοδος παραγωγής είναι η συγκόλληση με κόλλα. Το 95% των κυψελοειδών πυρήνων γίνεται με αυτόν τον τρόπο. Η υψηλότερη θερμοκρασία που μπορούν να αντέξουν οι κόμβοι που συγκολλούνται με κόλλα είναι περίπου 399°C , και αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιούμε κόλλα πολυϊμίδιου. Χρησιμοποιούνται

συνήθως εποξειδικές και νιτρίλικές φαινολικές συγκολλητικές κόλλες που οι μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας τους είναι περίπου 204°C.

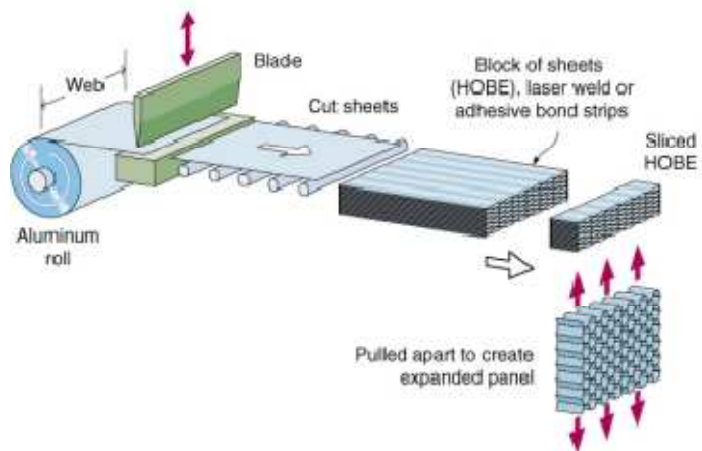
- Η Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση (electric resistance welding), όπου πρώτα προσδίδεται θερμότητα με τη βοήθεια ηλεκτρικού ρεύματος που διαπερνά τα υπό ένωση μέταλλα (φαινόμενο Joule) και μετά εφαρμόζεται εξωτερική πίεση. Η λεγόμενη συγκόλληση κατά σημείο (ηλεκτροπόντα) είναι μια διαδεδομένη τεχνική που εντάσσεται σ' αυτή την κατηγορία.
- Ετερογενής συγκόλληση ή ένωση σε υγρή - στερεή φάση (liquid – solid phase joining). Στην περίπτωση αυτή τα υπό ένωση μέταλλα θερμαίνονται μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία λίγο μικρότερη του σημείου τήξης τους και συγχρόνως προστίθεται διαφορετικό μέταλλο (χαμηλότερου σημείου τήξης) σε υγρή κατάσταση, έτσι ώστε μετά την απόψυξη να δημιουργηθεί ένωση σε στερεή κατάσταση. Ως παραδείγματα αναφέρονται η ετερογενής συγκόλληση με φλόγα (π.χ. κασσιτεροκόλληση) και η επαγωγική συγκόλληση.
- Συγκόλληση σε στερεή φάση (solid-phase welding), όπου εφαρμόζεται εξωτερική πίεση χωρίς προηγούμενη τήξη των υπό συγκόλληση μετάλλων, εκτός από ένα πολύ λεπτό στρώμα κοντά στις επιφάνειες συγκόλλησης. Η συγκόλληση με διάχυση αποτελεί τυπική τεχνική αυτής της κατηγορίας
- Στη μέθοδο της θερμικής σύντηξης, ορισμένα υλικά (θερμοπλαστικά) θερμαίνονται μέχρι οι κόμβοι τους να φτάσουν σε θερμοκρασία τήξης. Τότε τα δύο φύλλα ταινίας πιέζονται μαζί ελαφρά και συντήκονται στους κόμβους. Σε αυτή τη μέθοδο δεν απαιτείται κόλλα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν, μεταξύ άλλων, η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου με ηλεκτρόδιο, η συγκόλληση με αέριο και η συγκόλληση με laser.

Η συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, η ηλεκτροσυγκόλληση ή η διάχυση χρησιμοποιείται μόνο σε πυρήνες που πρέπει να εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες ή σοβαρές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς είναι πολύ πιο ακριβό να κατασκευαστεί πυρήνας από αυτές τις διεργασίες.

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή για τη μετατροπή του αρχικού στρώματος σε κυψελοειδή δομή: η διαδικασία επέκτασης και η διαδικασία κυματοειδούς διαμορφώσεως.

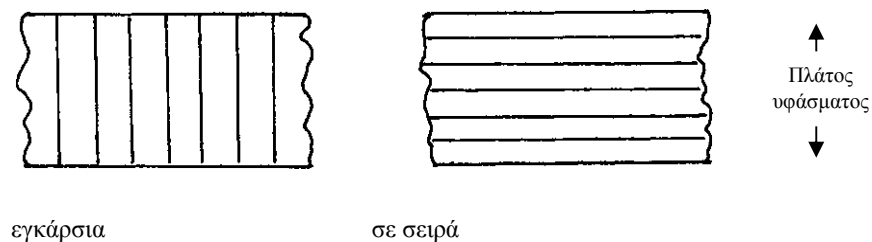
Σχεδόν όλοι οι κολλητικά συνδεδεμένοι πυρήνες κατασκευάζονται με την διαδικασία επέκτασης που απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Για τους μεταλλικούς πυρήνες, εφαρμόζεται μια ανθεκτική στη διάβρωση επίστρωση στα λεπτά φύλλα του μετάλλου και τυπώνονται

παράλληλες γραμμές κολλητικής ουσίας. Στην συνέχεια ακολουθεί η ωρίμανση της κόλλας, υπό πίεση σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ένα μπλοκ υλικού το οποίο ονομάζεται HOBE (Honeycomb before expansion). Το HOBE στην συνέχεια υφίσταται μια διαδικασία επέκτασης ώστε να δημιουργηθεί η κυψελοειδή δομή, λωρίδες κατάλληλου πάχους T μπορούν να κοπούν από το επεκταμένο μπλοκ. Εναλλακτικά το μπλοκ HOBE μπορεί να κοπεί σε λωρίδες HOBE πάχους T και στην συνέχεια να επεκταθεί. Οι λωρίδες μπορούν να επεκταθούν σε διαμόρφωση κανονική εξαγωνική με επέκταση σχήματος εξάπλευρου διαμαντιού ή να υπερεπεκταθεί σε σχεδόν ορθογωνικού σχήματος κελιά. Τα επεκταμένα φύλλα κόβονται στις επιθυμητές διαστάσεις L και W .



Σχήμα 2.10 Διαδικασία επέκτασης κατασκευής.

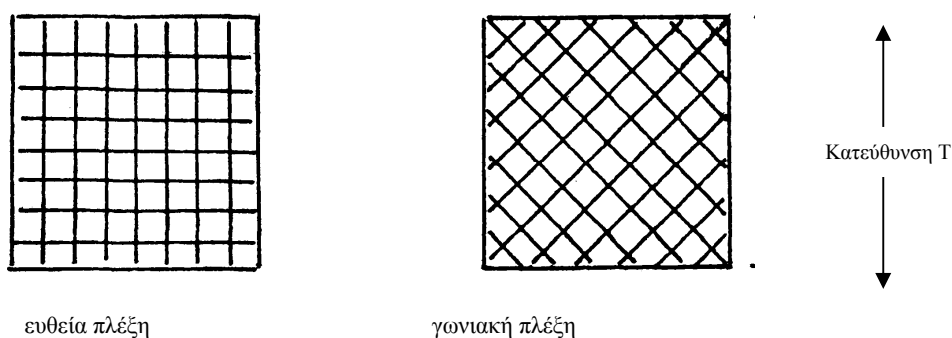
Η διαδικασία για παρασκευή μη μεταλλικών κυψελοειδών είναι ελαφρώς διαφορετική. Εδώ το κυψελοειδές δεν διατηρεί το σχήμα του μετά την επέκταση και πρέπει να κρατηθεί με στήριξη. Το μεμβρανώδες υλικό του μπλοκ (block web material) περιέχει μια μικρή ποσότητα ρητίνης η οποία θερμαίνεται σε ένα φούρνο. Οι περισσότεροι πυρήνες χαρτιού (όπως το Nomex) θα διατηρήσουν το αναπτυγμένο σχήμα τους. Στη συνέχεια, το κυψελοειδές μπλοκ, μερικές φορές τόσο μεγάλο όσο 1,2-2,4m και πάχος 0,9m, βυθίζεται σε



Σχήμα 2.11. Εκτύπωση γραμμής προσανατολισμού.

υγρή ρητίνη (συνήθως φαινολική ή πολυϊμιδίου) και ωριμάζει σε κλίβανο. Ο κύκλος εμβάπτισης-σκλήρυνσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το μπλοκ να βρίσκεται στην επιθυμητή πυκνότητα. Συνήθως απαιτούνται μόνο δύο ή τρεις βυθίσεις, αλλά μερικές φορές το μπλοκ πρέπει να βυθιστεί μέχρι και 30 φορές. Οι περισσότεροι πυρήνες από υαλοβάμβακα πρέπει να παραμείνουν στη βάση στήριξης ενώ εκτελούνται οι διαδικασίες εμβάπτισης και ωρίμανσης στον κλίβανο.

Οι κολλητικές γραμμές των κόμβων μπορούν να εκτυπωθούν εγκάρσια ή σε σειρά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11. Στην πρώτη μέθοδο η κατεύθυνση L του πυρήνα δεν περιορίζεται στο φάρδος του υλικού όπως στην τελευταία περίπτωση. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε εφαρμογές που απαιτούν ένα κομμάτι κυψελοειδές με μακρά κατεύθυνση L. Το πρώτο κυψελοειδές από υαλοβάμβακα κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας το ύφασμα όπως βγήκε από το ρολό ή από την ευθεία πλέξη σε κατεύθυνση $0^\circ - 90^\circ$. Αργότερα ανακαλύφθηκε ότι ο συντελεστής διάτμησης κυψελοειδές από υαλοβάμβακα ήταν πολύ υψηλότερος, έως και τρεις φορές, αν το ύφασμα υφάνθηκε σε κατεύθυνση $\pm 45^\circ$ όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12. Είναι πιο κοστοβόρο να γίνει ο πυρήνας με αυτόν τον τρόπο καθώς το ύφασμα πρέπει να κοπεί και να ανακατασκευαστεί για να δώσει αυτό το ρολό υλικού με αυτή την κλίση. Ο Πίνακας 2.12 δίνει τις μηχανικές ιδιότητες δύο κυψελοειδών πυρήνων υαλοβάμβακα / φαινολικών 64kg/m^3 - μιας ευθείας ($0-90^\circ$) και μιας γωνιακής -ζεύξης (45°) ύφανσης. Παρατηρήστε τη μεγάλη διαφορά στο μέτρο διάτμησης (shear moduli). Οι άλλες μηχανικές ιδιότητες είναι περίπου ίδιες, εκτός του ότι στη ευθεία πλέξη το μέτρο θλίψεως είναι υψηλότερο όπως θα περίμενε κανείς επειδή οι ίνες από ίνες υάλου είναι παράλληλες με το εφαρμοζόμενο θλιπτικό φορτίο. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του πυρήνα με γωνιακή ύφανση είναι ότι είναι πιο σκληρός και είναι πιο ανθεκτικός στη βλάβη.



Σχήμα 2.12 Κυψελοειδές με ευθεία και γωνιακή ύφανση.

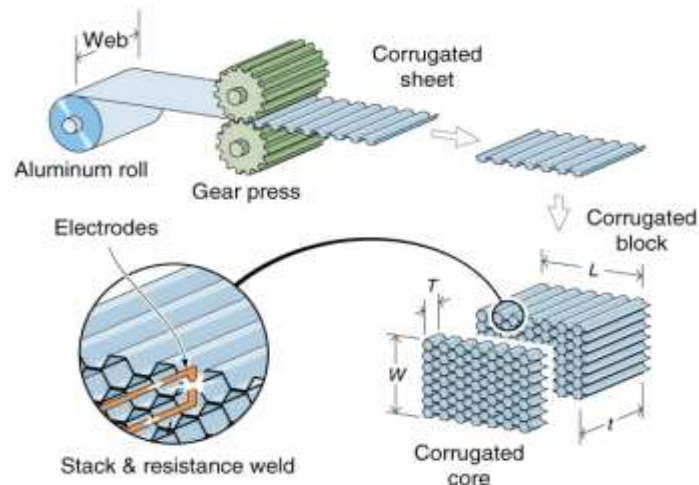
Πίνακας 2.12 Σύγκριση των ιδιοτήτων των κυψελοειδών υφασμάτων με γωνιακή και ευθεία πλέξη

Ιδιότητα	HFT-3/16-4.0	HRP-3/16-4.0
	45° γωνιακή	0°-90° ευθεία
Αντοχή σε θλίψη	550 psi	590 psi
Μέτρο θλίψης	44 ksi	57 ksi
Διατμητική αντοχή στην L κατεύθυνση	275 psi	310 psi
Μέτρο διάτμησης στην L κατεύθυνση	23 ksi	13 ksi
Διατμητική αντοχή στην W κατεύθυνση	140 psi	160 psi
Μέτρο διάτμησης στην W κατεύθυνση	14 ksi	7 ksi

1 ksi = 1000 psi.

Η μέθοδος κυματοειδούς διαμόρφωσης, που απεικονίζεται στην Σχήμα 2.13, είναι η αρχική τεχνική που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του κυψελοειδή πυρήνα. Αν και είναι εντατική εργασία, αυτή η μέθοδος εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεταλλικών πυρήνων υψηλής πυκνότητας και ορισμένων μη μεταλλικών πυρήνων.

Σε αυτή την μέθοδο απλώνεται κόλλα στους κόμβους της κυματοειδούς διαμόρφωσης, τα κυματοειδή φύλλα στοιβάζονται και κολλιούνται μεταξύ τους, στην συνέχεια ακολουθεί η ωρίμανση της κόλλας. Τέλος κόβονται λωρίδες από το μπλόκ στο επιθυμητό πάχος πυρήνα.

**Σχήμα 2.13.** Μέθοδος της κυματοειδούς διαμόρφωσης.

Ορισμένα μη μεταλλικά κυματοειδή μπλοκ πρέπει να φθάσουν στην τελική πυκνότητα με εμφάνιση ρητίνης, για να επιτευχθούν οι βέλτιστοι λόγοι ρητίνης προς ενίσχυση (resin-to-reinforcement.)

Αντί της χρήσης συγκολλητικής ουσίας για τη σύνδεση των κόμβων, μερικοί μεταλλικοί κυματοειδείς κυψελοειδείς πυρήνες έχουν τους κόμβους τους συγκολλημένους με

ετερογενή συγκόλληση ή συνδεδεμένους με διάχυση ή με συγκόλληση σημείου (συγκόλληση με αντίσταση). Αυτό επιτρέπει σε μερικούς πυρήνες όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας και το Inconel (υπερκράμα με βάση το νικέλιο και το χρώμιο) να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες έως και 704 °C.

Άλλες πιθανές μέθοδοι διαμόρφωσης κυψελοειδών διαμορφώσεων είναι η διαδικασία μορφοποίησης ενός στρώματος ενός υλικού με συμπίεση, η διαδικασία της χύτευσης σε καλούπι ή η διαδικασία της εξώθησης. Τα κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τον καταλύτη καυσαερίων των αυτοκινήτων κατασκευάζονται με την τελευταία διαδικασία.

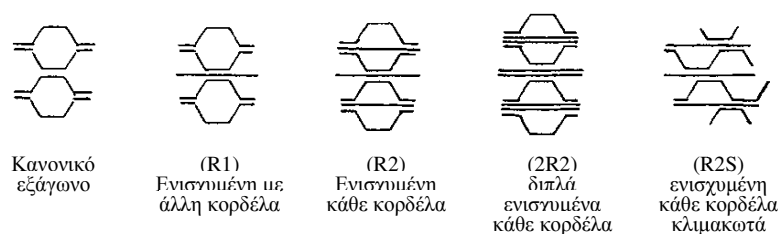
2.3.4.4. Διάφορα κυψελοειδή πλέγματα ως προς το υλικό και τον τρόπο κατασκευής των κελιών

Οι πιο κοινές συγκολλημένες με κόλλα κυψελοειδείς πυρήνες είναι από αλουμίνιο, Nomex, fiberglass και χαρτί Kraft. Ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι ο πιο ευρέως παραγόμενος κυματοειδής πυρήνας. Ωστόσο, το κυψελοειδές μπορεί να κατασκευαστεί από σχεδόν οποιοδήποτε λεπτό φύλλο υλικού. Έχουν παραχθεί περισσότερες από 500 τύποι κυψελοειδών.

Οι μη μεταλλικοί πυρήνες είναι ρητίνες εμποτισμένες με φαινολικές (συνηθέστερες), πολυϊμιδικές (για υψηλές θερμοκρασίες), εποξειδικές και θερμοπλαστικές (για σκληρότητα) ρητίνες. Για βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες πυρήνα, η περιεκτικότητα σε ρητίνες κατά βάρος είναι συνήθως μεταξύ 40 και 60%. Επίσης, το ύφασμα μπορεί να είναι προσανατολισμένο σε κατεύθυνση 0°-90° (ευθεία πλέξη) ή $\pm 45^\circ$ (πλέξιμο ζεύξης ή γωνιακή πλέξη). Η γωνιακή πλέξη δίνει τιμές μέτρου διάτμησης περίπου τριπλάσια από το κυψελοειδές με ίσια πλέξη.

Η διαδικασία παραγωγής κυψελοειδή πυρήνα αλουμινίου κυματοειδούς μορφής (συνήθως εξαγωνικού σχήματος κελιών) είναι πιο χρονοβόρα από τη μέθοδο κανονικής επέκτασης. Επομένως, το κυψελοειδές είναι συνήθως πιο ακριβό. Οι κυψελοειδείς πυρήνες αλουμινίου κατασκευάζονται σε πυκνότητες από 192-880 kg/m³ χρησιμοποιώντας φύλλα πάχους 0,076-0,152 mm στις διαμορφώσεις κελιών που φαίνονται στο σχήμα 2.14.

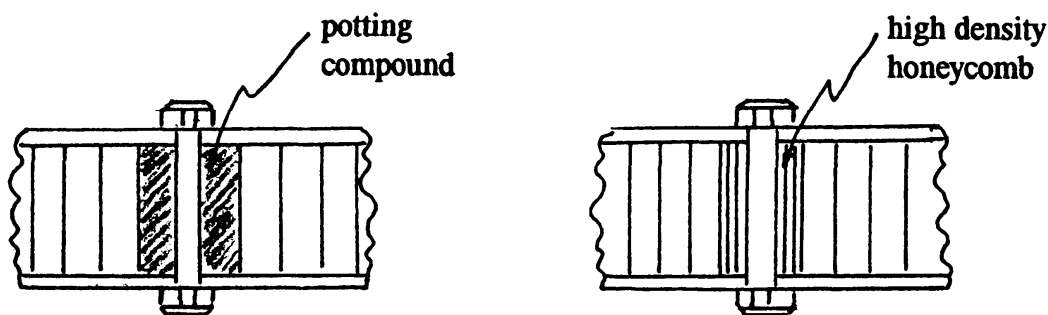
Κυματοειδές κυψελοειδές αλουμινίου γίνεται επειδή πάνω από 12pcf (192 kg/m³) καθίσταται αδύνατη η επέκταση του μη εξελιγμένου μπλοκ (HOBΕ).



Σχήμα 2.14 Κυματοειδείς διαμορφώσεις κελιών πυρήνα.

Η δύναμη για την επέκταση του μπλοκ ή του τεμαχίου είναι πολύ μεγάλη για τους κόμβους, ώστε να συγκρατούν το μπλοκ. Ως γενικός οδηγός χρησιμοποιείτε πάντοτε το διογκωμένο (επεκταμένο) προϊόν όποτε είναι δυνατόν. Εάν τα κριτήρια σχεδιασμού απαιτούν κυψελώδη πυρήνα αλουμινίου με πυκνότητα άνω των 192 kg/m^3 πρέπει να χρησιμοποιηθεί κυματοειδής πυρήνας.

Οι διαμορφώσεις των ενισχυμένων κελιών αυξάνουν σημαντικά την αντοχή διατμήσεως και το μέτρο διάτμησης στην κατεύθυνση L, ώστε να μπορεί να λάβει τιμές τόσο υψηλές όσο 34 MPa . Ο πυρήνας 2R2 παράγει ένα προϊόν 880 kg/m^3 το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για τα σκληρά σημεία σε πάνελ τύπου sandwich. Εάν ένα μπουλόνι ή συνδετήρας πρέπει να περάσει από το πάνελ, μερικές φορές μια συγκολλητική ύλη χρησιμοποιείται για την πλήρωση των κελιών κυψελοειδών ή αντικαθίσταται τμήμα του πυρήνα ελαφριάς πυκνότητας με ένα κυματοειδή πυρήνα 880 kg/m^3 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 Κυματοειδές σκληρό σημείο πυρήνα.

Είναι δύσκολο να κυλήσει η κυψελοειδή μορφή αλουμινίου λόγω της υψηλής πυκνότητάς του και οι αντοχές των κόμβων είναι μικρότερες από αυτές που επιτυγχάνονται με τον ενισχυμένο επεξεργασμένο πυρήνα. Στη μέθοδο επέκτασης η συγκολλητική ουσία κόμβου σκληρύνεται σε υψηλή θερμοκρασία υπό πίεση περίπου 300 psi (2.1 MPa) καθώς ολόκληρο το HOBE τίθεται στην πρέσα. Στη μέθοδο κυματοειδούς διαμόρφωσης οι συγκολλημένοι κόμβοι αντέχουν στη θερμοκρασία αλλά όχι στην πίεση.

Όταν τα κυματοειδή διαμορφώνονται σε ρολά στην κατεύθυνση W, οι κόμβοι μερικές φορές διαχωρίζονται. Ανακαλύφθηκε ότι η εναλλαγή των κόμβων (διαμόρφωση κελιών R2S) έκανε το ρολό να σχηματίζεται κάπως ευκολότερα. Αντί η κάθε κορδέλα κόμβου να έρχεται σε επαφή με ολόκληρο τον απέναντι κόμβο, μετατοπίζοντας αυτή παίρνουμε την διαμόρφωση κελιών R2S. Η μεγαλύτερη βιβλιογραφία προϊόντων δίνει στο κυματοειδές προϊόν “bare and stabilized” αντοχή θλίψης, αντοχή σε θραύση και αντοχές διάτμησης σε L και W κατεύθυνση. Τα μέτρα διάτμησης δεν δίδονται συνήθως επειδή σε έναν πυρήνα υψηλής πυκνότητας η

μέθοδος διάτμησης πλακών δεν θα λειτουργήσει καθώς η συγκόλληση πυρήνα - εξωτερικών στρωμάτων δεν είναι αρκετά δυνατή ώστε να επιτρέψει την αστοχία του κυψελοειδούς. Η μέθοδος διάτμησης βραχέων δοκών (ASTM D2344) χρησιμοποιείται για την επίτευξη του υπολογισμού αντοχών διάτμησης, αλλά τα περισσότερα εργαστήρια δοκιμών δεν εκτελούν τη δοκιμή για να πάρουν συντελεστή διάτμησης. Ο Πίνακας 2.13 παρουσιάζει τις αντοχές κυματοειδούς κυψελοειδούς και τους συντελεστές που δίδονται για εννέα τυποποιημένα προϊόντα.

Πίνακας 2.13 Ιδιότητες κυματοειδούς κυψελοειδούς σε θερμοκρασία δωματίου

Ονομασία	R. T. θλιπτικές ιδιότητες				R. T. διατμητικές ιδιότητες				
	Πυκνότη τα (pcf)	Bare Strength (psi)	Stabilized Strength (psi)	Μέτρο Ελαστικότη τας (ksi)	Αντοχή σε θλίψη (psi)	L Strength (psi)	L Modulus (ksi)	W Strength (psi)	W Modulus (ksi)
1 /8-5052-.003	12.0	2 300	2400	560	1600	1950	210	1500	75
1/8-5052-.0038	14.5	2 900	3 050	650	2150	2200	260	1600	80
1 /8-5052-.006	22.1	5 100	5 200	970	4000	3000	440	2050	100
1/8-5052-.006(R1)	28.0	5 800	5 900	1220	4500	3700	740	2100	120
1/8-5052-.006(R2)	38.0	8 500	8 700	1650	6500	4300	950	2200	140
1 / 8-5052-.006(2R2)	55.0	12 500	13 000	2400	—	4900	1370	2610	180
3/16-5052-.006	15.7	3 200	3 300	700	2400	2400	280	1500	85
3 / 16-5052-.006(R2S)	25.0	5 700	5 800	1100	4400	3350	670	1700	105
1/4-5052-.006	10.5	2100	2200	480	1350	1300	180	800	70

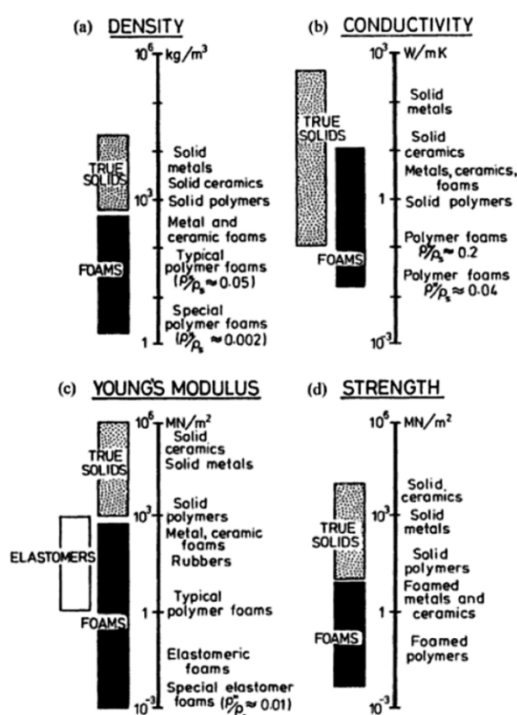
Το κυματοειδές κυψελοειδές καθώς και τα ελαφρύτερα επεκταμένα προϊόντα δεν συνθλίβονται τόσο εύκολα. Αυτό συμβαίνει επειδή σε υψηλότερες πυκνότητες ο πυρήνας είναι πολύ ισχυρότερος και τα τοιχώματα των κελιών δεν λυγίζουν τόσο εύκολα και δεν υπάρχει τόσο μεγάλος χώρος ώστε τα τοιχώματα των κελιών να διπλώσουν χωρίς να χτυπήσουν άλλα τοιχώματα των κελιών.

2.3.5. Ιδιότητες κυψελοειδών πυρήνων

Τα κυψελοειδή έχουν φυσικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες οι οποίες μετριοούνται με τις ίδιες μεθόδους όπως αυτές που χρησιμοποιούνται για πλήρως συμπαγή στερεά. Στην περίπτωση των αφρών για παράδειγμα, το σχήμα 2.16 δείχνει το εύρος τεσσάρων από αυτές τις ιδιότητες: την πυκνότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, το μέτρο ελαστικότητας και τη θλιπτική αντοχή. Η μπάρα με διακεκομμένη σκίαση δείχνει το εύρος της ιδιότητας που εκτείνεται σε συμβατικά στερεά. Η συμπαγής μπάρα δείχνει την επέκταση αυτού του εύρους που έγινε δυνατή με τον αφρισμό. Αυτή η τεράστια επέκταση των ιδιοτήτων δημιουργεί εφαρμογές για αφρούς ή δισδιάστατα κυψελοειδή που δεν μπορούν εύκολα να πληρωθούν με πλήρως πυκνά στερεά, και προσφέρουν δυνατότητες για μηχανική εφευρετικότητα. Οι

χαμηλές πυκνότητες επιτρέπουν τον σχεδιασμό ελαφρών, δύσκαμπτων στοιχείων όπως πάνελ τύπου sandwich. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει φτηνή, αξιόπιστη θερμομόνωση που μπορεί να βελτιωθεί μόνο με ακριβές μεθόδους με βάση το κενό.

Η χαμηλή δυσκαμψία καθιστά τα κυτταρικά στερεά ιδανικά για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι ελαστομερείς αφροί, για παράδειγμα, είναι τα πρότυπα υλικά για καθίσματα. Οι χαμηλές αντοχές και οι μεγάλες θλιπτικές καταπονήσεις καθιστούν τους αφρούς ελκυστικούς για εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας. Ακόμη υπάρχουν πολλά κυψελοειδή υλικά που λόγω της υψηλής αντοχής σε θλίψη χρησιμοποιούνται στην αεροναυτική όπως και στην κατασκευή δομικών υλικών σε γέφυρες και υπόγεια κτίρια.



Σχήμα 2.16 Το φάσμα ιδιοτήτων που διαθέτει ο μηχανικός μέσω αφρισμού: (α) πυκνότητα, (β) θερμική αγωγιμότητα (γ) μέτρο ελαστικότητας Young (δ) αντοχή σε θλίψη

2.3.5.1. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες δύσκαμπτων αφρών

Η πυκνότητα του αφρώδους υλικού έχει μεγάλη σημασία επειδή το κόστος της πρώτης ύλης είναι σημαντικότερο από το κόστος κατασκευής έτσι ώστε είναι σημαντικό να ληφθούν οι απαιτούμενες φυσικές ιδιότητες με τη μικρότερη δυνατή πυκνότητα. Εν τούτοις, οι περισσότερες από τις μηχανικές ιδιότητες (π.χ. οι εφελκυστικές, οι θλιπτικές και διατμητικές αντοχές και τα μέτρα ελαστικότητας) συνήθως σχετίζονται με την πυκνότητα. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές που λαμβάνονται κατά την εξέταση των υλικών

που προέρχονται από διαφορετικές διαδικασίες εγκαταστάσεων και παραγωγής. Ωστόσο, η πυκνότητα των αφρών σε πάνελ τύπου sandwich δεν αποκλίνει πολύ από τη βέλτιστη τιμή και ούτε οι μηχανικές ιδιότητες.

Οι αντοχές των δύσκαμπτων πλαστικών αφρών ποικίλλουν ανάλογα με την κατεύθυνση στην οποία μετρούνται. Οι σημαντικές κατευθύνσεις σε πάνελ τύπου sandwich απαιτούν ότι η θλίψη και ο εφελκυσμός μετριούνται και δίδονται σε δύο ορθογώνια επίπεδα κανονικά και παράλληλα προς τις επιφάνειες και ότι η διάτμηση μετράται στο επίπεδο της πλάκας. Η τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης ενός άκαμπτου αφρού είναι συνήθως εξαιρετικά μη γραμμική από ένα πρώιμο στάδιο τόσο στη δοκιμή θλίψης όσο και αυτή της διάτμησης. Δεν υπάρχει ξεχωριστό «όριο διαρροής» και συνήθως ορίζεται ως η τάση που αποδίδει 0,1% πλαστική παραμόρφωση (συμβατική τάση διαρροής). Σε δοκιμές εφελκυσμού, η αστοχία είναι παρόμοια με αστοχία ψαθυρού υλικού. Πρέπει να θυμόμαστε ότι ο ρυθμός παραμόρφωσης που χρησιμοποιείται στις δοκιμές έχει μεγάλη επίδραση στις τιμές που λαμβάνονται λόγω του ερπυσμού. Συνήθως συνιστάται ρυθμός μεταξύ 4% και 10% ανά λεπτό σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα.

Ένας επαρκής εφελκυστικός δεσμός μεταξύ του πυρήνα και των εξωτερικών στρωμάτων είναι μεγάλης σημασίας, επειδή ο πυρήνας και ο δεσμός είναι σε εφελκυσμό όταν τα εξωτερικά στρώματα τείνουν να λυγίσουν προς τα πάνω κατά τη διάρκεια της ρυτίδωσης. Γενικά, η αντοχή του δεσμού πρέπει να είναι υψηλότερη από εκείνη του ίδιου του πυρήνα. Δεν μπορεί να δοθεί ακριβές όριο, αλλά οι αναλύσεις δείχνουν ότι η τιμή των 0,10 N/mm² είναι επαρκής σε τυπικά πάνελ και μια ασθενέστερη ισχύς συγκόλλησης από αυτή δίνει κακής ποιότητα κατασκευής.

Ωστόσο, αυτές οι τιμές δίδονται σε θερμοκρασία δωματίου και πρέπει να θεωρηθούν ως ενδεικτικές μόνο. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, οι άκαμπτοι πλαστικοί αφροί τείνουν να γίνονται πιο μαλακοί και πιο ιξωδοελαστικοί και σε χαμηλές θερμοκρασίες γίνονται πιο ψαθυροί και πιο δύσκαμπτοι. Οι αντιπροσωπευτικές τιμές υπό αυτές τις συνθήκες μπορούν να βρεθούν στην βιβλιογραφία. Οι ακριβείς ιδιότητες εξαρτώνται από τη διαδικασία δοκιμής που χρησιμοποιείται και από την κατεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τη κυτταρική δομή του αφρού.

Ο ερπυσμός είναι ένα κυρίαρχο χαρακτηριστικό των πλαστικών αφρών και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν τα πάνελ υπόκεινται σε μόνιμη ή μακροχρόνια φόρτιση. Οι άκαμπτοι πλαστικοί αφροί συμπεριφέρονται σαν ιξώδη ρευστά υπό μακροχρόνια φόρτιση, έτσι ώστε τα επίπεδα τάσης κάτω από τη μακροπρόθεσμη φόρτιση να παραμένουν κάτω από το όριο πάνω από το οποίο αυξάνεται σημαντικά ο ερπυσμός.

2.3.5.2. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες ορυκτών ινών

Πλάκες που σχηματίζονται από ανόργανες ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό πυρήνα δομής τύπου sandwich όταν υπάρχει ιδιαίτερη απαίτηση όσον αφορά την πυρασφάλεια. Οι πιο συνηθισμένες πρώτες ύλες είναι τα τετηγμένα ορυκτά, δηλαδή η πέτρα, το γυαλί ή η σκωρία υψικαμίνου (κυρίως τα απόβλητα της χαλυβουργίας), τα οποία δημιουργούν υλικά που ονομάζονται ορυκτοβάμβακας, πετροβάμβακας και υαλοβάμβακας.

Σε σύγκριση με τις πλάκες άκαμπτου αφρού, οι πλάκες από ορυκτοβάμβακα έχουν μια πιο ανοικτή δομή κελιών και υψηλό βαθμό ελαστικότητας σε κάμψη κατά τη διαμήκη κατεύθυνση. Επιπλέον, η δομή των ινών δεν έχει κλειστούς πόρους έτσι ώστε οι πλάκες να είναι σημαντικά πιο ευαίσθητες στην απορρόφηση νερού και τη διάχυση ατμών. Με τα κατάλληλα πρόσθετα, η απορρόφηση νερού από ορυκτοβάμβακα μπορεί να μειωθεί ώστε να είναι μικρότερη από αυτή του πολυστυρενίου. Μέσα σε ένα πάνελ τύπου sandwich με σφικτά εξωτερικά στρώματα και ραφές και με κανονικές πυκνότητες μαλλιού, δεν υπάρχει κίνδυνος μετακινήσεων αέρα. Ως συνέπεια της εσωτερικής δομής τους, οι πλάκες από ορυκτοβάμβακα έχουν μάλλον χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό, διάτμηση και θλίψη σε κατεύθυνση κανονική προς το μήκος τους. Ωστόσο, το ορυκτό μαλλί είναι άκαυστο και αυτό παρέχει το ερέθισμα για να μελετηθεί πώς μπορούν να βελτιωθούν οι μηχανικές του ιδιότητες.

Τα ορυκτά μαλλιά είναι σταθερά υλικά. Τόσο οι ίδιες οι ίνες όσο και οι συνδετικοί παράγοντες διατηρούν τις ιδιότητές τους για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η θερμοκρασία έχει ελάχιστη ή καθόλου επίδραση στις μηχανικές τους ιδιότητες. Αυτά τα υλικά από μαλλί παύουν να συμπεριφέρονται ελαστικά μόνο όταν σπάσουν οι ίνες και οι δεσμοί μεταξύ τους.

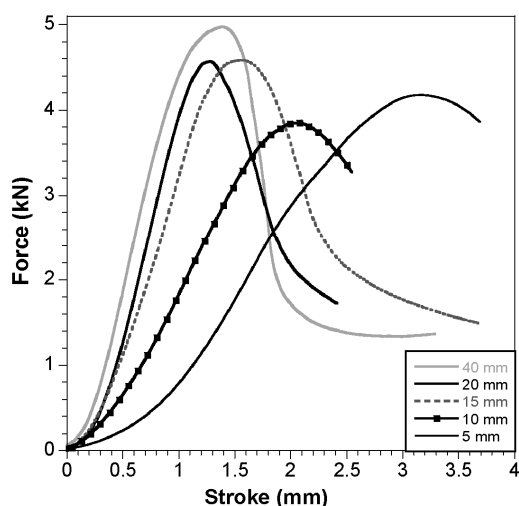
Η αντοχή αυξάνεται με την πυκνότητα, αλλά εξαρτάται περισσότερο από την εσωτερική δομή του μαλλιού παρά από την πυκνότητα. Η αντοχή σε θλίψη σε κατεύθυνση κάθετη στον προσανατολισμό των ινών, κυμαίνεται τυπικά από 0,005-0,08 N/mm² για εύρος πυκνότητας 60-150 kg/m³. Η αντίστοιχη αντοχή σε εφελκυσμό είναι μικρότερη και κυμαίνεται από 0,001-0,01 N/mm². Οι ιδιότητες στην κατεύθυνση των ινών είναι πολύ υψηλότερες. Η αντοχή διατμήσεως κυμαίνεται από 0,03 έως 0,20 N/mm² ανάλογα με τον βαθμό ανισοτροπίας της δομής των ινών και το αντίστοιχο μέτρο διατμήσεως κυμαίνεται από 2 έως 20 N/mm². Η αντοχή εφελκυσμού είναι μεταξύ 0,03 και 1,0 N/mm² και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 5 και 40 N/mm². Η αντοχή θλίψης είναι στην περιοχή 0,10-0,15 N/mm² και το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας είναι στην περιοχή 6-20 N/mm².

2.3.5.3. Πυκνότητα και μηχανικές ιδιότητες δισδιάστατων κυψελοειδών

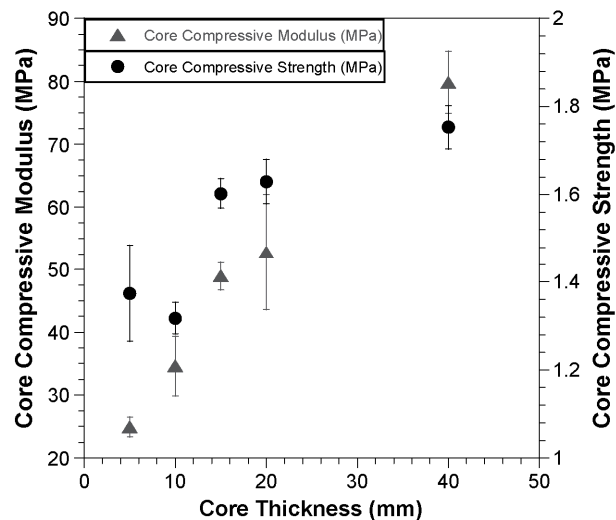
Οι μηχανικές ιδιότητες συσχετίζουν την παραμόρφωση με ένα ασκούμενο φορτίο ή δύναμη. Οι κύριες μηχανικές ιδιότητες των υλικών θεωρούνται η αντοχή σε εφελκυσμό, σε θλίψη, σε κάμψη και σε διάτμηση. Οι μηχανικές αυτές ιδιότητες μελετούνται και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος αλλά και σε άλλες θερμοκρασίες χαμηλότερες ή υψηλότερες.

Για παράδειγμα παραθέτουμε τις τυπικές γραφικές παραστάσεις force-stroke για πυρήνα πολυπροπυλενίου PP με κυψελοειδή δομή για διάφορα πάχη που φορτίζονται υπό επίπεδη θλίψη (σχήμα 2.17). Για κάθε πάχος πυρήνα, η μηχανική συμπεριφορά του υλικού ήταν παρόμοια. Στο αρχικό στάδιο της φόρτισης υπό θλίψη, παρατηρήθηκε ότι τα τοιχώματα των κελιών παραμορφώθηκαν γραμμικά. Τα τοιχώματα των κελιών του πυρήνα λύγισαν εξαιτίας του τοπικού λυγισμού, ο οποίος περιόρισε την τελική αντοχή και πραγματοποιήθηκε μια σχετικά ξαφνική κατάρρευση μετά το μέγιστο επίπεδο φορτίου. Από αυτές τις καμπύλες παρατηρήθηκε επίσης ότι τα παχύτερα υλικά πυρήνα βιώνουν τα μέγιστα επίπεδα δύναμης σε χαμηλότερες τιμές παραμόρφωσης από εκείνες των λεπτότερων. Αυτό οφείλεται στο λυγισμό των μακρύτερων κυτταρικών τοιχωμάτων σε χαμηλότερες τιμές διαδρομής.

Το Σχήμα 2.18 δείχνει τις επίπεδες τιμές θλιπτικής αντοχής και μέτρων θλίψης για το υλικό πυρήνα από πολυπροπυλένιο PP ως συνάρτηση του πάχους του πυρήνα. Όπως φαίνεται από το σχήμα, αυξάνεται τόσο η θλιπτική αντοχή όσο και το μέτρο θλίψης του πυρήνα PP τύπου κυψελοειδή καθώς το πάχος του πυρήνα αυξάνεται.



Σχήμα 2.17. Επίπεδη συμπίεστική συμπεριφορά κυψελοειδή υλικού με βάση το PP για κάθε πάχος



Σχήμα 2.18. Μέτρηση πυκνότητας πυρήνα και τιμές αντοχής σε σχέση με το πάχος του πυρήνα.

Η δομή των δισδιάστατων κυψελοειδών σε αντίθεση με αυτή των αφρών μπορεί εύκολα να μοντελοποιηθεί λόγω των πανομοιότυπων πρισματικών κελιών τα οποία είναι ενωμένα μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια επαναλαμβανόμενη επίπεδη δομή. Η δομική μηχανική των κυψελοειδών πυρήνων είναι καλά ανεπτυγμένη, αν και σχετικά περίπλοκη. Έτσι, η δύναμη και η δυσκαμψία των κανονικών πυρήνων κυψελοειδών μπορούν να υπολογιστούν. Μπορούν επίσης να προσδιοριστούν με δοκιμή.

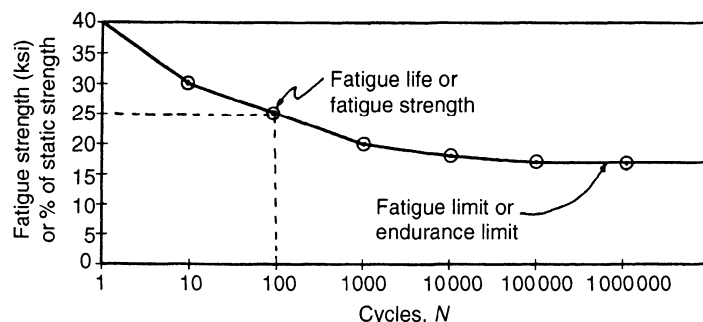
2.3.5.4. Κόπωση

Είναι γνωστό ότι η αντοχή ενός υλικού υπό επαναλαμβανόμενες φορτίσεις είναι μικρότερη από εκείνη που θα επιτυγχανόταν υπό στατική φόρτιση. Αυτό το φαινόμενο μειωμένης αντοχής ενός υλικού υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση ονομάζεται κόπωση (Fatigue). Η αύξηση της τάσης, όπως οι απότομες αλλαγές στην διατομή, οι οπές, οι εγχοπές και οι επαναλαμβανόμενες γωνίες, έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή σε κόπωση από ότι στις στατικές δυνάμεις.

Μια αστοχία (failure) κόπωσης ξεκινά με μια μικρή ρωγμή. Η αρχική ρωγμή είναι τόσο μικρή που δεν μπορεί να ανιχνευθεί με γυμνό μάτι. Η ρωγμή θα αναπτυχθεί αρχικά με συγκέντρωση τάσης ή τοπικό ελάττωμα στο υλικό. Μόλις αναπτυχθεί μια ρωγμή, το αποτέλεσμα συγκέντρωσης τάσης γίνεται μεγαλύτερο και η ρωγμή εξελίσσεται ταχύτερα. Καθώς η περιοχή πίεσης μειώνεται σε μέγεθος, η τάση αυξάνεται σε μέγεθος μέχρι τελικά η απομένουσα περιοχή αποτυγχάνει ξαφνικά. Μια αστοχία κόπωση, ως εκ τούτου, χαρακτηρίζεται από δύο διακριτές περιοχές της αστοχίας. Η πρώτη από αυτές οφείλεται στην προοδευτική ανάπτυξη της ρωγμής, ενώ η δεύτερη οφείλεται στη ξαφνική θραύση. Αυτή η

θραύση είναι εύθραυστου τύπου, ακόμη και αν το υλικό μπορεί να είναι όλκιμο. Όταν τα εξαρτήματα αποτυγχάνουν στατικά, συνήθως αναπτύσσουν πολύ μεγάλη παραμόρφωση, διότι η τάση έχει υπερβεί το όριο διαρροής. Έτσι, πολλές στατικές αστοχίες είναι ορατές και δίνουν προειδοποιητικά σήματα εκ των προτέρων. Αλλά μια αστοχία κόπωσης δεν δίνει καμία προειδοποίηση. Είναι ξαφνική και ολική και επομένως επικίνδυνη.

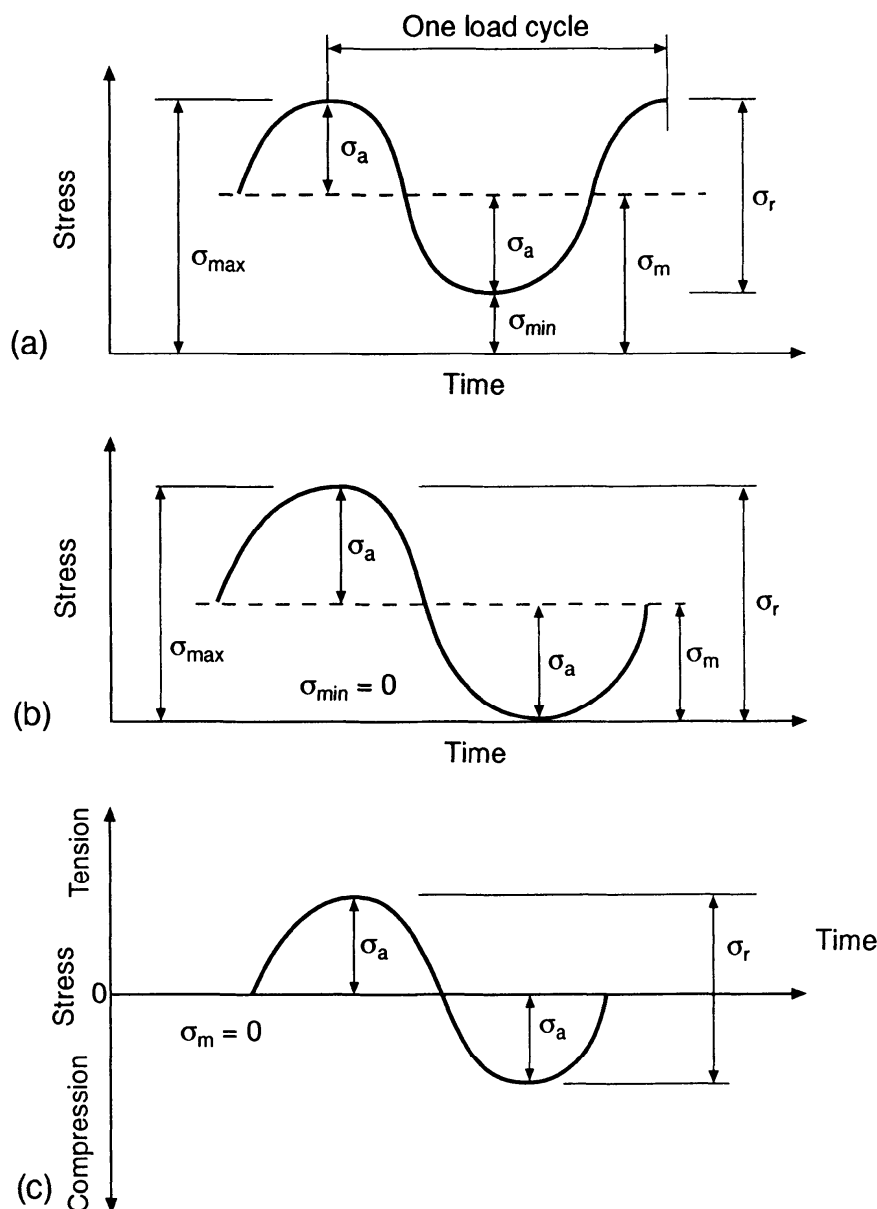
Οι δοκιμές κόπωσης μπορούν να εκτελεστούν σε κάμψη, αξονική τάση ή συμπίεση, διάτμηση ή στρέψη ή συνδυασμένες φορτίσεις. Οι δοκιμές κόπωσης πραγματοποιούνται μερικές φορές σε ένα πρωτότυπο υπό πραγματικές συνθήκες φόρτωσης. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος εμφάνισης των αποτελεσμάτων των δοκιμών είναι ένα διάγραμμα καμπύλων S-N ή όπως είναι πιο γνωστές, καμπύλων Wöhler, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19. Η καμπύλη επιτυγχάνεται τοποθετώντας μια συγκεκριμένη τάση στο δοκίμιο και απαριθμώντας τον αριθμό των κύκλων φόρτισης μέχρι την θραύση. Αυτό γίνεται για αρκετά επίπεδα τάσης για να αναπτυχθεί μια καμπύλη. Οι βασικές τάσεις κόπωσης (κυμαινόμενες, επαναλαμβανόμενες και ανεστραμμένες) που εφαρμόζονται σε ένα δείγμα παρουσιάζονται στο σχήμα 2.20. Μερικοί από τους σημαντικούς όρους που σχετίζονται με το διάγραμμα S-N είναι οι ακόλουθοι.



Σχήμα 2.19 S-N διάγραμμα.

- Όριο κόπωσης ή όριο διαρκούς αντοχής σε κόπωση (Fatigue limit or endurance limit) - μέγιστη καταπόνηση από κόπωση, ένα υλικό μπορεί να αντέξει για έναν άπειρο αριθμό κύκλων. Τα υλικά έχουν αυτό το όριο μόνο αν η καμπύλη γίνει οριζόντια.
- Ζωή κόπωσης (Fatigue life) - αριθμός κύκλων φόρτισης, συγκεκριμένης φύσης, που θα διατηρηθεί ένα υλικό πριν από την αποτυχία. Είναι συνάρτηση του μεγέθους της τάσης, της γεωμετρίας του δείγματος και των συνθηκών δοκιμής.
- Συμβατική αντοχή σε κόπωση (Fatigue strength) - το μέγεθος της τάσης που απαιτείται για να προκαλέσει αστοχία σε ένα δείγμα δοκιμής σε κόπωση μετά από έναν καθορισμένο αριθμό κύκλων φόρτωσης.

- Λόγος τάσης (Stress ratio) - η ελάχιστη τάση διαιρείται με τη μέγιστη τάση. Μια τυπική τιμή του R είναι +0,1, πράγμα που σημαίνει ότι η ελάχιστη τάση είναι το 10% της μέγιστης τάσης και έχει το ίδιο πρόσημο (τόσο σε διάτμηση όσο και σε θλίψη).



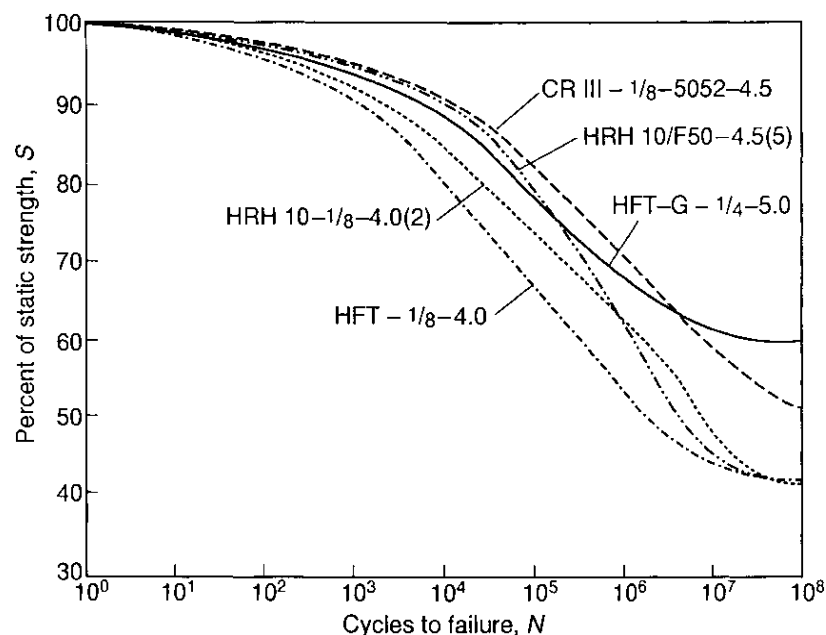
Σχήμα 2.20. Βασικές τάσεις κόπωσης, (α) Κυμαινόμενη τάση. (β) επαναλαμβανόμενη καταπόνηση. (γ) ανεστραμμένη τάση. σ_a = εύρος τάσης. σ_r = εύρος τάσεων, σ_m = μέση τάση, σ_{max} = μέγιστη τάση, σ_{min} = ελάχιστη τάση.

Η κυψελοειδής δομή τύπου sandwich είναι εξαιρετικά ανθεκτική στην κόπωση. Το πιο κρίσιμο μέρος μιας δομής τύπου sandwich σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της κόπωσης είναι στα σημεία στερέωσής του. Όταν υποβάλλετε σε δοκιμές κόπωσης, ένα πάνελ συνήθως αποτυγχάνει σε αυτά τα σημεία και όχι σε οποιοδήποτε άλλο μέρος της δομής.

Στην κυψελοειδή δομή τα εξωτερικά στρώματα λαμβάνουν όλες τις τάσεις κάμψης ενώ ο πυρήνας φέρει το φορτίο διάτμησης. Για το λόγο αυτό οι διατμητικές αστοχίες λόγω κόπωσης του πυρήνα εμφανίζονται συνήθως ως εξής. Οι μεταλλικοί πυρήνες αποτυγχάνουν από διατμητικό λυγισμό και ρηγμάτωση λόγω των διαγώνιων εκφυλιστικών τάσεων (diagonal tension cracking) των κυτταρικών τοιχωμάτων. Τα εύθραυστα φύλλα τείνουν να αστοχούν με ρωγμές και να μην λειτουργούν τόσο καλά στην κόπωση. Όσο πιο εύκαμπτα φύλλα τόσο πιο εύκολα αποτυγχάνουν σε διατμητικό λυγισμό. Οι διατρήσεις τείνουν να προάγουν ρωγμές κόπωσης και πρόωρη αστοχία. Οι μη μεταλλικοί πυρήνες μπορεί να αποτυγχάνουν στην κόπωση από τον θρυμματισμό της ρητίνης του υλικού του ιστού αφήνοντας το υλικό του ιστού μη υποστηριγμένο ή μπορεί να αποτύχει στην κανονική λειτουργία του διατμητικού λυγισμού.

Οι μεταβλητές των κυψελοειδών που επηρεάζουν το όριο κόπωσης του πυρήνα παρατίθενται παρακάτω μαζί με μερικές γενικές παρατηρήσεις.

- Η κακή διαμόρφωση των κελιών προκαλεί χαμηλή αντοχή στην κόπωση.
- Ελαφρώς υψηλότερες αντοχές κόπωσης βρίσκονται για μικρά μεγέθη κελιών.
- Οι αντοχές στην κόπωση είναι ελαφρώς χαμηλότερες για τους πυρήνες με πάχος μεγαλύτερο από 1 in.
- Ελαφρώς χαμηλότερες αντοχές κόπωσης εμφανίζονται με τους πυρήνες χαμηλότερης πυκνότητας.
- Η κατεύθυνση L διατηρεί περισσότερη αντοχή στην κόπωση από την κατεύθυνση W.

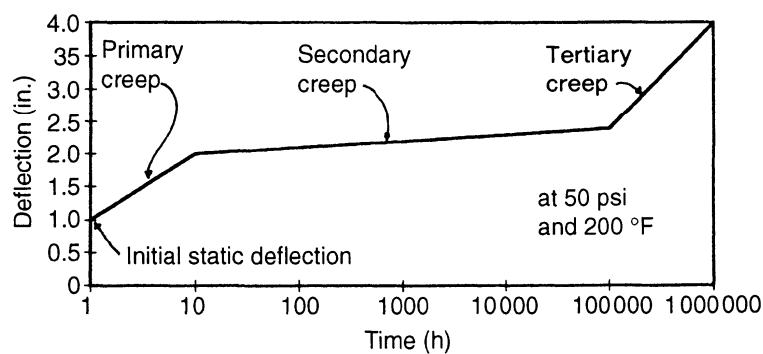


Σχήμα 2.21. Καμπύλη αντοχή διατμητικής πλάκας στην κατεύθυνση L - κύκλου φόρτισης σε θερμοκρασία δωματίου για 1/2 in. (12,7 mm) πάχους κυψελοειδή. R = +0,1, 20 Hz.

Το σχήμα 2.21 δείχνει τις καμπύλες S-N για την αντοχή διάτμησης στην κατεύθυνση L διαφόρων τύπων πυρήνα. Φαίνεται ότι ο κυψελοειδής πυρήνας άνθρακα συμπεριφέρεται καλύτερα στην κόπωση, ακολουθεί ο πυρήνας αλουμινίου και μετά οι πυρήνες Nomex και fiberglass συμπεριφέρονται περίπου το ίδιο. Όλοι οι τύποι κυψελοειδή φαίνεται να έχουν όρια αντοχής άνω του 40%.

2.3.5.5. Ερπυσμός

Ο Ερπυσμός (creep) ορίζεται ως η παραμόρφωση που υπερβαίνει την αρχική ελαστική παραμόρφωση όταν ένα υλικό υπόκειται σε σταθερή τάση για μια χρονική περίοδο. Το φαινόμενο συνήθως εξαρτάται από το επίπεδο τάσης, τη θερμοκρασία και το χρονικό διάστημα που έχει εφαρμοστεί το φορτίο, καθώς και από τις ιδιότητες του υλικού. Το σχήμα 2.22 απεικονίζει τον ερπυσμό με καμπύλη, απόκλιση έναντι χρόνου σε δεδομένη θερμοκρασία και για δεδομένη τάση στο υλικό.

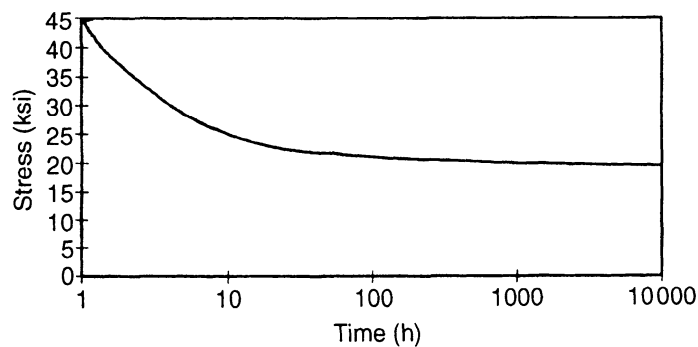


Σχήμα 2.22 Καμπύλη απόκλισης έναντι χρόνου. Μετρήσεις σε 50 psi και 200 ° F.

Όπως φαίνεται, η ροή ερπυσμού (creep flow) μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο, ή πρωτογενής ερπυσμός, αρχίζει με γρήγορο ρυθμό και επιβραδύνεται με το χρόνο. Το δεύτερο στάδιο (δευτερογενής ερπυσμός) έχει σχετικά ομοιόμορφο ρυθμό, ενώ το τρίτο στάδιο (τριτογενής ερπυσμός) παρουσιάζει ρυθμό επιτάχυνσης και τερματίζεται από την αστοχία του υλικού.

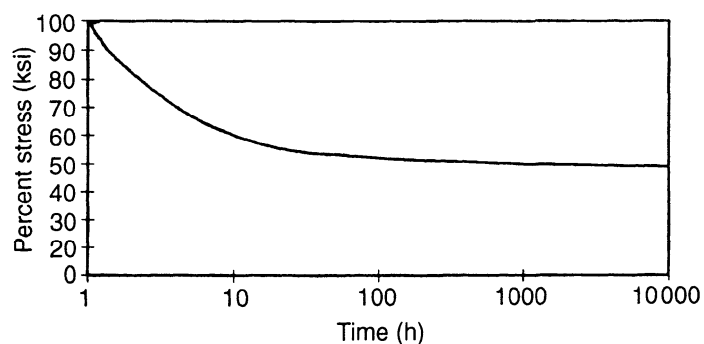
Ο ερπυσμός δεν είναι συνήθως πρόβλημα σε θερμοκρασία δωματίου αλλά γίνεται όλο και πιο σημαντικός σε υψηλές θερμοκρασίες, μπορεί να προκαλέσει απαράδεκτες μεγάλες παραμορφώσεις ή και δομική αστάθεια. Από την άλλη πλευρά, το φαινόμενο ερπυσμού είναι ένα πλεονέκτημα για τον δομικό σχεδιαστή σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, όπως οπές, εγκοπές ή επαναπροσδιορισμένες γωνίες. Σε αυτή την περίπτωση, η ιξωδοελαστική ροή σε περιοχές υψηλής τάσης θα οδηγήσει σε ευνοϊκή ανακατανομή του φορτίου. Αυτό το φαινόμενο χαλάρωσης φορτίου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.23. Μια γραφική παράσταση του

φορτίου έναντι του χρόνου για μια δεδομένη παραμόρφωση σε σταθερή θερμοκρασία ονομάζεται συνήθως καμπύλη χαλάρωσης.



Σχήμα 2.23 Καμπύλη χαλάρωσης τάσης σε θερμοκρασία 300 ° F και σταθερή τάση 0,002.

Οι πληροφορίες ερπυσμού παρουσιάζονται συχνά γραφικά όπως στο Σχήμα 2.24, μόνο από μια οικογένεια καμπυλών αντί για μία μόνο, όπου κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει δεδομένα σε διαφορετική θερμοκρασία για το ίδιο επίπεδο τάσης ή αντίστροφα. Μια άλλη παράσταση δείχνει το χρόνο αστοχίας έναντι του ποσοστού του στατικού φορτίου αστοχίας στη δομή, που συχνά ονομάζεται καμπύλη αντοχής ερπυσμού. Αυτή μπορεί να είναι μία γραμμή ή μια οικογένεια καμπυλών για διαφορετικές θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.24. Καμπύλη αντοχής θραύσεως σε ερπυσμό. Θερμοκρασία 400 ° F.

Η εκτροπή ερπυσμού μιας συγκολλημένης δομής τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- θερμοκρασία της δομής
- ιδιότητες του πυρήνα τύπου sandwich, εξωτερικές στρώσεις και κόλλα
- διαστάσεις του sandwich
- αρχική κατανομή τάσεων
- μέγεθος κελιών πυρήνα
- προσανατολισμό των ταινιών πυρήνα

Πολύ λίγα δεδομένα δοκιμών υπάρχουν σχετικά με τη συμπεριφορά ερπυσμού σε πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα. Επιπλέον, λόγω της εξάρτησης από τόσους πολλούς παράγοντες που αναφέρονται παραπάνω, τα περισσότερα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα είναι αρκετά εξατομικευμένα. Γενικά, το μεγαλύτερο μέρος ερπυσμού που δέχεται ένα πάνελ είναι στην συγκολλητική ουσία πυρήνα – εξωτερικών στρώσεων. Οι περισσότεροι κυψελοειδείς πυρήνες δεν εμφανίζουν μεγάλο ερπυσμό. Εάν χρησιμοποιείται η κατάλληλη κόλλα, ο ερπυσμός δεν θα πρέπει να αποτελεί μείζον πρόβλημα στα πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα.

Μερικά από τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από μερικές από τις δοκιμές που έχουν γίνει είναι:

- ο ρυθμός ερπυσμού αυξάνεται με αυξημένες τάσεις του πυρήνα ή των εξωτερικών στρωμάτων,
- ο ρυθμός ερπυσμού αυξάνεται με την αύξηση του μέγεθος κελιών,
- ο ερπυσμός στην κατεύθυνση L του κυψελοειδή είναι μικρότερος από αυτόν στην κατεύθυνση W,
- ο ρυθμός ερπυσμού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας σκλήρυνσης και την αύξηση του χρόνου σκλήρυνσης του συγκολλητικού υλικού πυρήνα - εξωτερικών στρωμάτων.

2.3.5.6. Θερμικές ιδιότητες

Τα θερμομονωτικά υλικά καθορίζουν τη συμπεριφορά του κελύφους από πλευράς δομικής φυσικής και έχουν ως προορισμό τους να μειώσουν το συντελεστή θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων με στόχο τη μείωση των θερμικών απωλειών κατά τη χειμερινή περίοδο και μείωση της θερμικής προσόδου κατά τη περίοδο δροσισμού.

Η μετάδοση της θερμότητας μέσα από τα αδιαφανή δομικά στοιχεία και υλικά γίνεται στο μεγαλύτερο ποσοστό με αγωγιμότητα, η οποία ποσοτικοποιείται, στα ομοιογενή και ισότροπα υλικά, όπως προαναφέρθηκε, με τη βοήθεια του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ . Στα σύνθετα δομικά στοιχεία η αγωγιμότητα ποσοτικοποιείται με τη βοήθεια του συντελεστή θερμοπερατότητας U.

Γενικά, τα θερμομονωτικά υλικά οφείλουν την ιδιότητα της θερμικής αντίστασης στον αέρα που περιέχεται μέσα τους. Ο αέρας θεωρείται «κακός αγωγός» της θερμότητας, δηλαδή, έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ . Σε θεωρητικό επίπεδο η θερμική αγωγιμότητα ελαχιστοποιείται σε συνθήκες κενού, επειδή η έλλειψη μάζας καθιστά αδύνατη τη μεταφορά της θερμότητας με αγωγιμότητα. Στην πράξη, η μικρότερη δυνατή θερμική

αγωγιμότητα επιτυγχάνεται όταν υπάρχει ακίνητος, ξηρός αέρας. Τα θερμομονωτικά υλικά επιτυγχάνουν το σκοπό τους, ακριβώς επειδή διαθέτουν, στην «πορώδη» μάζα τους, πολλούς μικρούς θύλακες ακίνητου αέρα, εγκλωβισμένου σε κελιά ή μέσα σε ένα πλέγμα ινών. Για το λόγο αυτό τα θερμομονωτικά υλικά έχουν κατά κανόνα και μικρό φαινόμενο βάρος. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ ενός πορώδους υλικού είναι μικρότερος σε σχέση με το λ του ίδιου υλικού εάν αυτό ήταν πιο συμπαγές. Το φαινόμενο αυτό και η λειτουργία του πορώδους των υλικών οδήγησε στην ανάπτυξη θερμομονωτικών υλικών, κοινό γνώρισμα των οποίων είναι η ύπαρξη σε μεγάλο ποσοστό πόρων που περιέχουν είτε αέρα είτε κάποιο άλλο αέριο που χαρακτηρίζεται ως κακός αγωγός της θερμότητας και άρα διαθέτει μικρό συντελεστή αγωγιμότητας λ . Η πορώδης δομή των βιομηχανικά παραγόμενων μονωτικών υλικών επιτυγχάνεται με τη χρήση λεπτών ακανόνιστων ινών ή με την παραγωγή κελιών από στερεοποιητικά υλικά.

Η θερμική τους αγωγιμότητα καθορίζεται πρωταρχικά από τον αριθμό και το μέγεθος των ελών που υπάρχουν στη μάζα του υλικού τους και που περιέχουν τον ακίνητο, με θερμομονωτικές ιδιότητες, αέρα.

Σε μικρότερο βαθμό επηρεάζεται από τη χημική σύσταση του υλικού, τη θερμοκρασία και την υγρασία στην οποία βρίσκονται. Η αύξηση της υγρασίας σημαίνει και αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, ανεπιθύμητη για ένα θερμομονωτικό υλικό, καθώς το εγκλωβισμένο νερό, με το κατά πολύ μεγαλύτερο λ από αυτό του αέρα καταλαμβάνει τη θέση του τελευταίου. Σημειώνεται ότι το νερό και ο πάγος έχουν περίπου 24 και 92 φορές, αντίστοιχα, μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ από τον αέρα. Για το λόγο αυτό η υγρασία θεωρείται και το μεγαλύτερο αίτιο προβλημάτων της θερμομόνωσης σε μια κατασκευή.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας καθορίζει τη θερμομονωτική ικανότητα του στοιχείου κατασκευής και δίδει την ποσότητα της θερμότητας σε Wh η οποία μεταδίδεται, σε σταθερή θερμική κατάσταση, ωριαία, από επιφάνεια 1m^2 του στοιχείου κατασκευής, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται σε επαφή με τις δυο πλευρές του στοιχείου είναι 1 βαθμός Κέλβιν. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την επιφάνεια της κατασκευής, το πάχος και το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ των οικοδομικών υλικών και η μονάδα μέτρησης είναι $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

ΥΛΙΚΟ			ΥΛΟΒΑΜΒΑΚΑΣ	ΠΕΤΡΟΒΑΜΒΑΚΑΣ	ΕΞΗΛΑΣΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ	ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ	ΛΕΠΡΟΣ ΠΟΛΥΟΥΡΕΘΑΝΗΣ
Φυσικές ιδιότητες	Πυκνότητα [kg/m ³]	min	13	30	20	8	30
		max	100	180	80	50	80
	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ [W/mK]	min	0,030	0,033	0,025	0,029	0,020
		max	0,045	0,045	0,035	0,041	0,027
	Εύρος χρήσης (°C)	min	-100	-100	-60	-80	-50
		max	500	750	75	80	120
	Συντελεστής αντίστασης στη διάχυση υδρατμών	min	<1	<1	80	25	50
		max	1	1	200	200	>100
	Ποσότητα υγρασίας εξομοίωσης στους 23 °C/80%RH	min	<0,1	<0,1	<1*	5*	5*
		max	1	1,5			
	Κατηγορία πυραντοχής		A1 A2 B1	A1 A2 B2	B1 B2	B1 B2	B1 B2
	Αντοχή στον εφελκυσμό [N/mm ²]	min	0,005*		0,30	0,15	
		max			0,35	0,52	
	Όριο θραύσης [N/mm ²]	min	0,00500	0,00012		0,09000	
		max	0,01500	0,00750		0,22000	
Περιβαλλοντικές	Βαθμός απορρόφησης στα 125 Hz	min	0,10	0,05			
		max	0,79	0,19			
	Βαθμός απορρόφησης στα 1000 Hz	min	0,71	0,92			
		max	0,97	0,99			
	Πρόσθεια για παρουσία από βιολογικούς παράγοντες		OXI	OXI	OXI	OXI	NAI
	Περιεχόμενη πρωτογενής ενέργεια [kWh/m ³]	min	90	110	85	151	15,8
		max	430	660	114	269	36,1

Πίνακας 2.14 : Βασικές φυσικές και περιβαλλοντικές ιδιότητες των κυριότερων θερμομονωτικών υλικών

2.3.5.7. Ηχομονωτικές ιδιότητες

Οι ηχομονωτικές ιδιότητες, που ενώ αποτελούν διαφορετική παράμετρο της δομικής φυσικής, σε ότι αφορά τα υλικά οφείλουν να συνεξετάζονται με τις θερμομονωτικές ιδιότητες. Με την έννοια ηχομόνωση εννοούμε την προσπάθεια προστασίας των χρηστών ενός χώρου από τους θορύβους, δηλαδή από την επίδραση κάθε ενοχλητικού ή δυσάρεστου ήχου. Οι θόρυβοι μπορεί να προέρχονται είτε από το εξωτερικό περιβάλλον π.χ. κυκλοφορία

οχημάτων, λειτουργία μηχανημάτων, είτε από το εσωτερικό περιβάλλον των κατασκευών (πχ κτιρίων). Οι απαιτήσεις για ηχοπροστασία βασίζονται σε προδιαγραφμένες τιμές ανεκτής στάθμης θορύβων, οι οποίες υπολογίζονται σε μονάδες Decibel. Κάθε μια μονάδα Decibel αντιστοιχεί σε αύξηση της έντασης του θορύβου κατά 26%. Ο βαθμός απορρόφησης ήχου περιγράφει την ηχοαπορροφητικότητα του υλικού για διάφορες συχνότητες ήχου. Όσο μεγαλύτερος ο συντελεστής, τόσο καλύτερη η ηχοαπορροφητικότητα του υλικού.

2.3.5.8. Ευφλεκτότητα και άλλες ιδιότητες φωτιάς

Ως συνέπεια της οργανικής τους βάσης, όλα τα πλαστικά υλικά είναι εύφλεκτα. Η συμπεριφορά κατά της φωτιάς μπορεί να βελτιωθεί με την επιλογή κατάλληλων πρώτων υλών, με ειδικές διεργασίες αφρισμού, με τη χρήση επιβραδυντικών παραγόντων ή με την προσθήκη ανόργανου υλικού πλήρωσης. Ωστόσο, οι θερμοκρασίες στις οποίες οι πλαστικοί αφροί αρχίζουν να αποσυντίθενται χημικά και αναφλέγονται μπορεί να επηρεάζονται ελάχιστα από τα πρόσθετα. Τα πρόσθετα επιβραδύνουν κυρίως τη διαδικασία καύσης.

Υπάρχουν όμως και θερμοσκληρυνόμενα υλικά όπως η πολυουρεθάνη (PUR) και το πολυισοκυανουρικό (PIR) τα οποία δεν τήκονται όταν εκτίθενται σε φωτιά αλλά σχηματίζουν άνθρακα. Τα διογκωμένα και εξωθημένα πολυστυρόλια (EPS και XPS) είναι θερμοπλαστικά υλικά των οποίων η συμπεριφορά στη φωτιά κυριαρχείται από την δυσμενή τάση τους να τήκονται σε θερμοκρασίες μόνο λίγο πάνω από τους 100 ° C με αποτέλεσμα να τήκονται πριν αναφλεγούν και έπειτα τείνουν να σχηματίσουν σταγονίδια καύσης. Ο φαινολικός αφρός (PF), όπως το PUR και το PIR, είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο υλικό με ιδιαίτερες ευνοϊκές ιδιότητες σχηματισμού άνθρακα και χαμηλή εκπομπή καπνού. Είναι συνεπώς ο άκαμptos πλαστικός αφρός με τις καλύτερες ιδιότητες φωτιάς. Αρχίζει να αποσυντίθεται στους 350-500 ° C και αναφλέγεται στους 530-580 ° C. Κατά την καύση σχηματίζεται ένας σταθερός χαρακτήρας και τα προϊόντα καύσης είναι κυρίως υδρογονάνθρακες και μονοξείδιο του άνθρακα, CO.

Οι ιδιότητες πυρκαγιάς των άκαμπτων πλαστικών υλικών πυρήνα είναι μία από τις πιο προβληματικές πτυχές της τεχνολογίας πάνελ τύπου sandwich και θέλει ιδιαίτερη προσοχή.

Τα ορυκτά μαλλιά με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικά συνδετικά είναι πρακτικά άκαυστα. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί η διαφορά μεταξύ γυαλιού και πετροβάμβακα. Οι ίδιες οι ίνες δεν καίγονται αλλά μάλλον λιώνουν. Γυαλί περίπου στους 650 ° C και πέτρα μόνο στους 1000 ° C περίπου. Επειδή η περιεκτικότητα σε συνδετικό υλικό υαλοβάμβακα είναι γενικά υψηλότερη από 5%, το γυάλινο μαλλί δεν ταξινομείται συνήθως ως μη καύσιμο.

Οι κυψελοειδείς μεταλλικοί πυρήνες συνήθως πλεονεκτούν έναντι των ανόργανων διότι έχουν υψηλό σημείο τήξης και δύσκολα καίγονται. Θα πρέπει βέβαια εάν πρόκειται για κυψελοειδή με συγκολλητικό υλικό να γίνει προσεκτική επιλογή του συγκολλητικού υλικού.

2.3.5.9. Ευκολία κατεργασίας και τοποθέτησης

Πρόκειται για μία πολύ σημαντική ιδιότητα, αφού αφορά άμεσα στους πραγματικούς χρήστες των υλικών, στους τεχνίτες στο εργοτάξιο. Είναι εύλογο, ότι ένα υλικό που είναι ελαφρύ, μεταφέρεται εύκολα στο εργοτάξιο ενός κτιριακού έργου. Ένα υλικό που είναι μαλακό και όχι εύθρυπτο κόβεται εύκολα και προσαρμόζεται στις κατασκευαστικές διαμορφώσεις ενός ξυλότυπου ή μίας τοιχοποιίας. Ένα υλικό που ψεκάζεται με μορφή αφρού, μπορεί να καλύψει μία γεωμετρικά περίπλοκη επιφάνεια, όπως έναν θόλο, μεταλλικές κατασκευές, κ.ό.κ. Η αξιολόγηση και ταξινόμηση των υλικών γίνεται ως προς την κατεργασία και τοποθέτηση ποιοτικά, με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, και ανάλογα με τις ικανότητες του συγκεκριμένου εργατικού δυναμικού.

2.3.5.10. Η διάρκεια ζωής σε σχέση με τη φθορά στο χρόνο

Η αντοχή στο χρόνο αποτελεί ακόμη μια παράμετρο των θερμομονωτικών υλικών, παράμετρο που εκφράζεται σε έτη διάρκειας ζωής, όπως προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές γήρανσης των υλικών και από πολυετείς παρατηρήσεις σε πραγματικές συνθήκες.

2.3.5.11. Περιεχόμενη πρωτογενής ενέργεια

Η περιεχόμενη πρωτογενής ενέργεια εκφράζει το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας όγκου θερμομονωτικού υλικού, συνήθως σε μονάδες kWh/m³ ή kWh/kg. Τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται μία τάση για χρήση υλικών φιλικών προς το περιβάλλον, τάση που δεν περιορίζεται ασφαλώς μόνο στα θερμομονωτικά υλικά, αλλά γενικότερα στο σύνολο του πεδίου των κατασκευών. Επομένως, προτιμώνται υλικά με χαμηλή περιεχόμενη ενέργεια.

2.3.5.12. Η αντοχή σε προσβολές από μικροοργανισμούς και έντομα

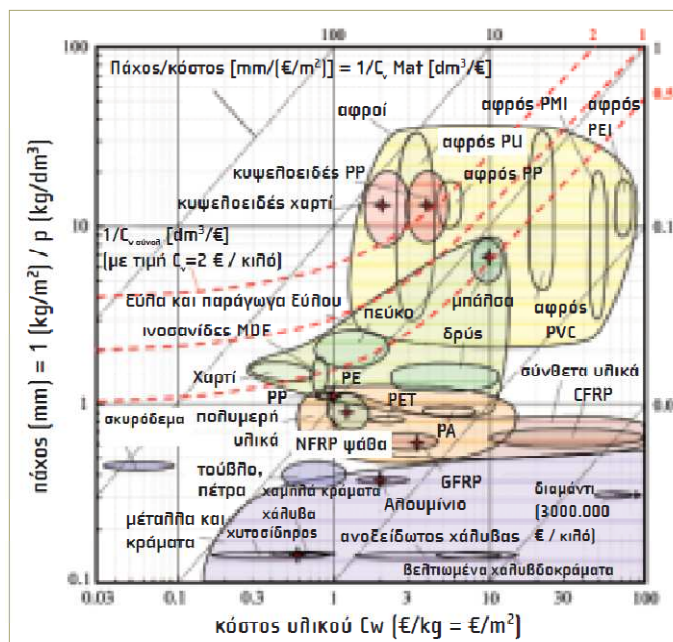
Τα θερμομονωτικά υλικά κινδυνεύουν από έντομα, σκώρο, τρωκτικά και μύκητες. Για το λόγο αυτό, προστίθενται σ' αυτά διάφορες πρόσθετες χημικές ουσίες, που στόχο έχουν την προστασία των θερμομονωτικών υλικών από βιολογικούς παράγοντες. Επειδή οι ουσίες αυτές επιβαρύνουν το περιβάλλον συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση τους και να αναζητούνται άλλοι τρόποι αντιμετώπισης επιθέσεων από μικροοργανισμούς. Η αντοχή σε προσβολές από

μικροοργανισμούς και έντομα εκφράζεται ποιοτικά, με το αν ένα υλικό είναι ευπρόσβλητο ή όχι, μετά από εργαστηριακές δοκιμές γήρανσης των υλικών και από πολυετείς παρατηρήσεις σε πραγματικές συνθήκες.

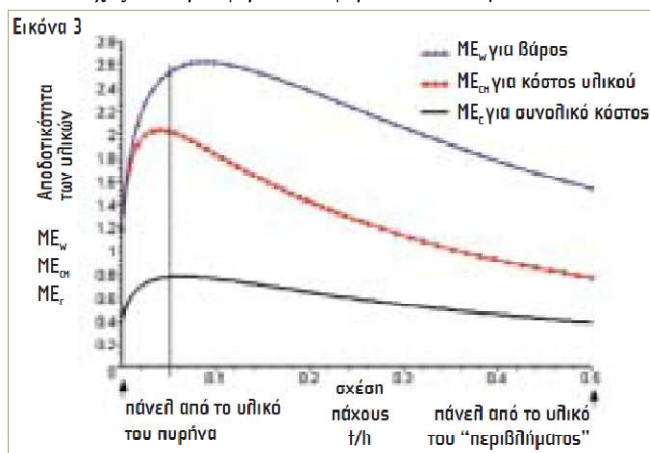
2.3.5.13. Επιλογή του υλικού του πυρήνα

Για την πιο οικονομική επιλογή του υλικού του πυρήνα, εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες απαιτείται και χαμηλή πυκνότητα και χαμηλό κόστος του υλικού. Το πάχος ενός πάνελ με βάρος ανά μονάδα επιφανείας 1kg/m^2 μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας το βάρος ανά μονάδα επιφανείας με την πυκνότητα ρ . Αυτό το πάχος του 1kg/m^2 των πάνελ μπορεί να ληφθεί ως συνάρτηση του κόστους του υλικού. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το πάχος που προσφέρουν διαφορετικά υλικά για το ίδιο κόστος και βάρος. Όπως και να έχει, στο σχήμα 2.6 φαίνονται όλα τα υλικά με ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, με τα πιο ελαφρά να εμφανίζονται στο επάνω μέρος του διαγράμματος, ενώ τα υλικά με το χαμηλότερο κόστος σε €/kg, εμφανίζονται στο αριστερό μέρος του διαγράμματος. Αν για μια εφαρμογή είναι σημαντικά τόσο το χαμηλό κόστος όσο και το χαμηλό βάρος, μια άριστη επιλογή υλικού μπορεί να γίνει υπολογίζοντας και την πρόσθετη αξία που επιφέρει το βάρος που εξοικονομείται. Οι καμπύλες με τις διακεκομμένες κόκκινες γραμμές που εμφανίζονται στο διάγραμμα, δείχνουν το αντίστοιχο σύνολο του κόστους του υλικού και του κόστους βάρους σε 0,5, 1 και 2 $\text{dm}^3/\text{€}$ για τιμή εξοικονόμησης βάρους 2 €/kg. Μπορεί να γίνει σύγκριση του πάχους και του κόστους ενός κιλού πάνελ ανά τετραγωνικό μέτρο. Για παράδειγμα, ένα φύλλο πολυπροπυλαινίου ενός τετραγωνικού μέτρου και ενός κιλού ξύλου μπάλα είναι περίπου 1,1 χιλιοστό παχύ και το κόστος του είναι 1€. Μπορεί να γίνει σύγκριση του παχύτερου ή λεπτότερου στρώματος κάθε υλικού κατά μήκος των γραμμών με το αντίστοιχο πάχος ανά κόστος. Το κόστος κάθε υλικού ανάλογα με το πάχος του μπορεί να βρεθεί και κατά μήκος των διαγώνιων μαύρων γραμμών στο διάγραμμα του σχήματος 2.25. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας δύο στρώσεις υλικών σε στερεά μορφή, η μία από πολυπροπυλαίνιο και η άλλη από ξύλο μπάλα με το ίδιο πάχος, φαίνεται ότι το πολυπροπυλαίνιο κοστίζει 60% περισσότερο από το ξύλο μπάλα και ότι είναι 6 φορές βαρύτερο. Το σχεδιάγραμμα του σχήματος 2.26 δίνει την δυνατότητα σύγκρισης βάρους και κόστους διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πυρήνων των σύνθετων πάνελ. Πρέπει όμως να λαμβάνονται πάντα υπόψη και οι ιδιότητες του κάθε υλικού για μια αντικειμενική σύγκριση. Αφού γίνει η επιλογή με βάση τις ιδιότητες των υλικών για τον πυρήνα και το περίβλημα, μπορεί να βρεθεί και το ιδανικό πάχος του sandwich. Ο βαθμός

απόδοσης των υλικών μπορεί να εκφραστεί γραφικά ως συνάρτηση προς τον λόγο του πάχους t/h .



Σχήμα 2.25. Το πάχος που προσφέρουν διαφορετικά υλικά για το ίδιο κόστος και βάρος



Σχήμα 2.26. Σχεδιάγραμμα επιλογής υλικού για την κατασκευή του πυρήνα. Φαίνεται η διαφορά πάχους των διαφόρων υλικών για το ίδιο βάρος και κόστος.

Γενικά, οι πυρήνες κυψελοειδών αλουμινίου προσφέρουν τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες για το χαμηλότερο βάρος και κόστος, ενώ οι Nomex και οι θερμοπλαστικοί κυψελοειδείς πυρήνες προσφέρουν ανθεκτικότητα και αντοχή στις ζημιές. Οι πυρήνες χαρτιού εμπορικής ποιότητας Kraft συνήθως κοστίζουν το λιγότερο.

Στον παρακάτω πίνακα 2.26, παρουσιάζονται κάποια θετικά και αρνητικά γνωρίσματα κυψελοειδών πυρήνων που είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά υλικά. Σύμφωνα με αυτά τα χαρακτηριστικά γίνεται πιο εύκολη η βέλτιστη επιλογή υλικού πυρήνα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Κυψελοειδή υλικά πυρήνα	Θετικά χαρακτηριστικά	Αρνητικά χαρακτηριστικά
Χαρτί Kraft	Καλές μονωτικές ιδιότητες, Διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες/ Καλή απορρόφηση ενέργειας/ Μικρό κόστος / Φιλικό προς το περιβάλλον	Σχετικά μικρή αντοχή Ευαίσθητο στην υγρασία Χρησιμοποιείται περισσότερο σε εμπορικά προϊόντα
Θερμοπλαστικά (πολυουρεθάνη, πολυπροπυλένιο, πολυκαρβονικό)	Καλές μονωτικές ιδιότητες/ Καλή απορρόφηση ενέργειας /Λεία τοιχώματα κελιών Καλή αντίσταση στην υγρασία/ Σχετικά μικρό κόστος	Επιρρεπείς στον ερπυσμό
Αλουμίνιο	Καλή αντοχή σε σχέση με το βάρος του Πολύ καλή απορρόφηση ενέργειας Καλός αγωγός θερμότητας Ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης Επεξεργάσιμο Λεπτότερα τοιχώματα Σχετικά μικρό κόστος	Γαλβανική διάβρωση με υλικά άνθρακα ή γραφίτη
Ατσάλι	Ισχυρό/Καλός αγωγός θερμότητας Ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης Αντοχή στην θέρμανση	Πιο βαρύ υλικό Κάποια μπορεί να εμφανίζουν Γαλβανική διάβρωση
Εξειδικευμένα μέταλλα(Τίτανο, κράματα νικελίου ή κοβαλτίου)	Σχετικά υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος Καλός αγωγός θερμότητας/Καλή αντοχή σε χημικά/Καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	Δεύτερα στην ιεραρχία των πιο βαριών υλικών
Υλικά ινών αραμιδίου (Aramid fiber), Kevlar	Καλή αντίσταση ευφλεκτότητας /Καλή επιβράδυνση της φωτιάς/Καλές μονωτικές ιδιότητες/Εύπλαστο/Ελαφρύ	Όχι τόσο καλές θλιπτικές και διατμητικές ιδιότητες/Συλλέγει υψηλότερο βαθμό υγρασίας/Ανομοιογενής ιδιότητες κάμψης
Υλικά ινών γυαλιού	Ευπροσάρμοστες διατμητικές ιδιότητες με διάστρωσης/Χαμηλές διηλεκτρικές ιδιότητες Καλές μονωτικές ιδιότητες/Εύκολο στην μορφοποίηση	Το πιο βαρύ στην κατηγορία των ενισχυμένων υλικών με ίνες
Υλικά ινών άνθρακα	Καλή σταθερότητα διαστάσεων Εξαιρετικές ιδιότητες υψηλής θερμοκρασίας Υψηλή ακαμψία Πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής Ευπροσάρμοστη θερμική αγωγιμότητα Σχετικά υψηλό μέτρο διάτμησης Ελαφρύ	Πολύ ακριβό υλικό
Κεραμικά	Αντοχή σε θέρμανση υψηλών θερμοκρασιών Καλές μονωτικές ιδιότητες Διαθέσιμο σε πολύ μικρό μέγεθος κελιών.	Πολύ ακριβό Συνήθως υψηλή πυκνότητα

Πίνακας 2.14 : θετικά και αρνητικά γνωρίσματα κυψελοειδών πυρήνων που είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά υλικά

2.3.6. Κόλλες και άλλα συστατικά

Οι κόλλες πολυουρεθάνης ενός και δύο συστατικών είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες για τη συγκόλληση των εξωτερικών στρωμάτων με τον πυρήνα. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία πιθανών συνδυασμών υλικών και οι κόλλες μπορούν να προσαρμοστούν για να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες ανάγκες σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας ή την αντίσταση στη φωτιά . Η ποσότητα της κόλλας είναι συνήθως μεταξύ 200 και 350 g / m2 ανά

πλευρά. Οι κόλλες είναι γενικά υγρές έτσι ώστε να μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε αυτοματοποιημένες διαδικασίες παραγωγής. Αυτές ψεκάζονται στις επιφάνειες και ένας υδατοστεγής δεσμός λαμβάνεται συνήθως με τις μεταλλικές επιφάνειες.

Οι κόλλες δύο συστατικών παράγονται με παρόμοιο τρόπο με το υλικό πυρήνα από αφρώδες υλικό PUR. Η βασική ρητίνη (πολυόλη) αναμιγνύεται με ένα μέσο σκλήρυνσης που είναι συνήθως ισοκυανικό (MDI). Η ρητίνη βάσης μπορεί να περιλαμβάνει επιβραδυντές πυρκαγιάς, πληρωτικά κ.λπ. και ορισμένα συγκολλητικά μπορούν να ταξινομηθούν ως μη καύσιμα. Οι κόλλες δύο συστατικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σχετικά άκαμπτα υλικά πυρήνα όπως το XPS και το EPS. Η κόλλα εφαρμόζεται στις επιφάνειες και ο χρόνος πρεσαρίσματος (ο χρόνος που απαιτείται για να κρατηθούν τα πρόσωπα που πιέζονται στον πυρήνα κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης) μπορεί να διαφέρει από μερικά λεπτά έως μισή ώρα, ανάλογα με τη συνταγή. Η θέρμανση των επιφανειών θα επιταχύνει επίσης τη σκλήρυνση.

Οι κόλλες ενός συστατικού είναι προενεργοποιημένες συγκολλητικές ουσίες δύο συστατικών που συνεχίζουν να σκληραίνουν όταν εκτίθενται σε υγρασία. Το νέφος του νερού πρέπει να ψεκαστεί πάνω στο συγκολλητικό για να το θεραπεύσει. Μπορούν να προστεθούν ειδικά πληρωτικά για την επιτάχυνση της ταχύτητας σκλήρυνσης και τη βελτίωση της αντοχής στη φωτιά και της αντοχής του δεσμού. Ο χρόνος πίεσης είναι συνήθως μικρότερος από μία ώρα, αλλά μπορεί να μειωθεί σε λιγότερο από 20 λεπτά αν τα πρόσωπα προθερμανθούν. Οι κόλλες ενός συστατικού είναι κατάλληλες για χρήση με υλικά μαλακού πυρήνα. Αυτές αφρίζουν κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης και διεισδύουν μέσα στα κενά του υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

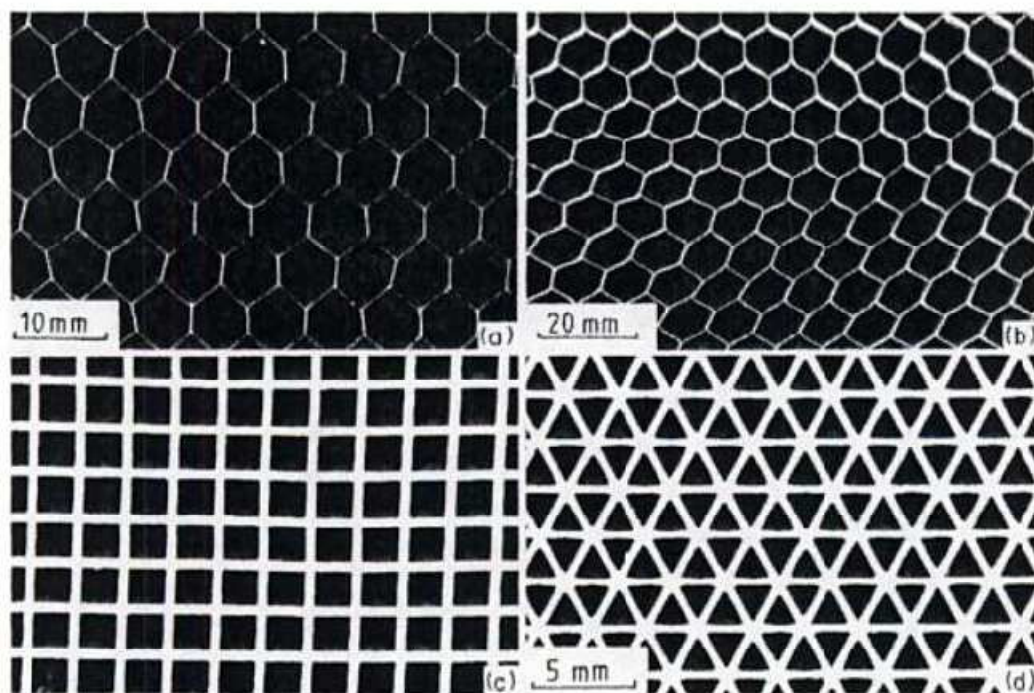
3. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ

3.1. Γενικά

Τα δισδιάστατα, πρισματικά κυτταρικά υλικά με κανονική και περιοδική μικροδομή καλούνται κυψελοειδή. Επειδή τα κυψελοειδή είναι ελκυστικά για χρήση σε ελαφρές δομικές δοκούς τύπου sandwich, πλαίσια ή σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας (τα πόδια της μονάδας προσγείωσης Apollo 11 χρησιμοποιούσαν αποσπασματικά κυψελοειδή αλουμινίου ως αμορτισέρ) και μεταφοράς θερμότητας (ως φορείς καταλύτη και εναλλάκτες θερμότητας, για παράδειγμα), διάφορες πτυχές της μηχανικής συμπεριφοράς των κυψελοειδών έχουν λάβει σημαντική προσοχή.

Προηγούμενες μελέτες κυψελοειδών έχουν επικεντρωθεί κυρίως σε αυτή με εξαγωνικό σχήμα κελιών για την οποία έχουν αναπτυχθεί οι συνήθεις μέθοδοι κατασκευής αυτών. Οι Gibson και Ashby παρουσιάζουν βασικά αποτελέσματα για ιδανικά και εμπορικά κυψελοειδή με εξαγωνικό σχήμα κελιών, όπως παρουσιάζονται παρακάτω (ενότητα 3.3). Τέτοια κυψελοειδή συχνά έχουν πολύ χαμηλές σχετικές πυκνότητες, της τάξης μικρότερες από 0,07, και ο ελαστικός λυγισμός είναι ένας βιώσιμος τρόπος αστοχίας. Τόσο η θεωρητική ανάλυση όσο και οι πειραματικές μελέτες έχουν διεξαχθεί σε κυψελοειδή με εξαγωνικό σχήμα κελιών.

Άλλα σχήματα κυψελοειδών μπορεί να προτιμούνται για δομικές εφαρμογές, ή για εφαρμογές που περιλαμβάνουν πολυλειτουργικές επιδόσεις όπως ανταλλαγή θερμότητας, απορρόφηση ενέργειας και ούτω καθεξής. Οι πολυλειτουργικές εφαρμογές συχνά απαιτούν όχι μόνο αντοχή ή δυσκαμψία αλλά μια άλλη κατηγορία ιδιοτήτων όπως η θερμική αγωγιμότητα, η μεταφορά θερμότητας, η μεταφορά υγρών κλπ. Ως εκ τούτου, έχουν σχεδιαστεί περιοδικές δομές που είναι πιο περίπλοκες από την κανονική εξαγωνική για πολλές εφαρμογές. Το σχήμα 3.1. δείχνει διατομές των περιοδικών μεταλλικών κυψελοειδών με τετραγωνικά κελιά (που μπορούν επίσης να κατασκευαστούν με συμβατική τεχνολογία κάμψεως μετάλλου) και μία σειρά κυψελοειδών με τριγωνικά κελιά τα οποία δεν μπορούν να κατασκευαστούν με συμβατικά μέσα κοπής ή κάμψης. Οι A-JWang&D.L. McDowell παρουσιάζουν βασικά αποτελέσματα για τέτοιες δομές (ενότητα 3.4).



Σχήμα 3.1 Δισδιάστατα κυψελοειδή υλικά: (α) κυψελοειδές αλουμινίου, (β) κυψελοειδές με χάρτινη -φαινολική ρητίνη, (γ) κυψελοειδές με τετραγωνικού σχήματος κελιά, (δ) κυψελοειδές με τριγωνικού σχήματος κελιά

Υπάρχει κι ένας δεύτερος καλός λόγος για τη μελέτη των κυψελοειδών: είναι ότι τα αποτελέσματα ρίχνουν φως στη μηχανική των πολύ πιο σύνθετων τρισδιάστατων αφρών. Η ανάλυση των αφρών είναι ένα δύσκολο εγχείρημα: τα τοιχώματα των κελιών σχηματίζουν ένα περίπλοκο τρισδιάστατο δίκτυο το οποίο στρεβλώνει κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης με τρόπους που είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να μελετηθούν. Τα κυψελοειδή είναι πολύ πιο εύκολα να κατανοηθούν. Τα μεγάλης κλίμακας μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν από καουτσούκ, μέταλλο ή κεραμικό και οι τρόποι παραμόρφωσης τους να παρατηρηθούν και να ταξινομηθούν. Και επειδή τα κυψελοειδή έχουν μια κανονική γεωμετρία, οι παραμορφώσεις τους μπορούν να αναλυθούν λίγο πολύ για να δώσουν εξισώσεις που περιγράφουν τις ιδιότητές τους. Τέλος, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να ελεγχθούν πειραματικά με ειδικά διαμορφωμένα μοντέλα.

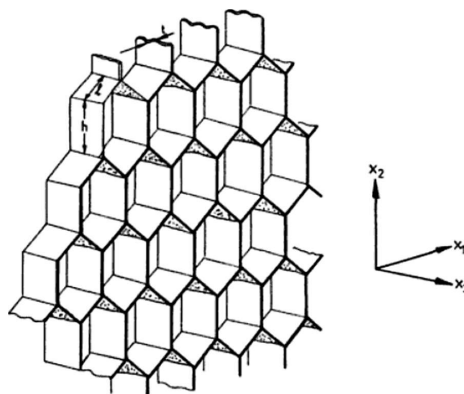
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας δίνουν την εξής εικόνα. Εάν ένα κυψελοειδές θλίβεται στο επίπεδο, τα τοιχώματα των κελιών αρχίζουν να κάμπτονται, δίνοντας γραμμική ελαστική παραμόρφωση. Πέρα από μία κρίσιμη παραμόρφωση, τα κύτταρα καταρρέουν είτε από ελαστικό λυγισμό (elastic buckling), είτε ξεπερνώντας το όριο πλαστικότητας (plastic yielding), είτε λόγω ερπυσμού (creep) ή ψαθυρής αστοχίας (brittle fracture), ανάλογα με τη φύση του υλικού του τοιχώματος του κελιού. Η κατάρρευση των κυττάρων σταματά όταν τα απέναντι τοιχώματα των κελιών αρχίσουν να αγγίζουν το ένα το άλλο. Τα κύτταρα που

κλείνουν τη δομή πυκνώνουν (densifies) και η δυσκαμψία τους αυξάνεται ταχύτατα. Σε εφελκυσμό τα τοιχώματα των κελιών στην αρχή κάμπτονται (όπως στη θλίψη), αλλά ο ελαστικός λυγισμός δεν είναι δυνατός. Εάν το υλικό τοιχώματος του κελιού διαρρέει πλαστικά, το ίδιο το κυψελοειδές εμφανίζει εκτεταμένη πλαστικότητα, ενώ εάν τα κελιά είναι ψαθυρά, σπάνε. Κατά την φόρτιση εκτός επιπέδου (έτσι ώστε μία συνιστώσα της τάσης να δρα παράλληλα με τον άξονα των πρισματικών κελιών) τα τοιχώματα των κελιών υφίστανται επέκταση ή συμπίεση και τα μέτρα και οι τάσεις κατάρρευσης είναι πολύ μεγαλύτερες.

Σε αυτή την εργασία, ερευνούμε τις μηχανικές ιδιότητες των διαφόρων περιοδικών κυψελοειδών δομών που φαίνονται στο σχήμα 3.1. Οι μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν το ενεργό μέτρο Young, το ισχύον ελαστικό μέτρο διάτμησης, την ισχύουσα αναλογία Poisson, την ισχύουσα αρχική δύναμη απόδοσης στην διάτμηση και την ισχύουσα αρχική αντοχή διαρροής σε εφελκυσμό υπό μονοαξονική φόρτιση. Για περιπτώσεις ανισοτροπίας στο επίπεδο, αυτές οι τιμές προσδιορίζονται για τους κύριους άξονες της ορθοτροπίας για κάθε κελί. Για τις περιπτώσεις στις οποίες οι ιδιότητες είναι ίδιες σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις (π.χ. Σχήμα 3.1 (c)), το ενεργό μέτρο του Young και η αρχική αντοχή διαρροής, σε μια ενδιάμεση κατεύθυνση (π.χ. 45° ή κατά μήκος του διαγώνιου κελιού) προς τους κύριους άξονες της ορθοτροπίας στο επίπεδο, μπορούν να υπολογιστούν.

3.2. Μηχανισμοί παραμόρφωσης κυψελοειδών

Το σχήμα 3.2 δείχνει ένα κυψελοειδές με εξαγωνικό σχήμα κελιών, μακράν το συνηθέστερο είδος. Οι δυσκαμψίες και οι αντοχές στο επίπεδο (δηλαδή, εκείνες στο επίπεδο X_1 - X_2) είναι χαμηλές, επειδή οι τάσεις στο επίπεδο αυτό κάνουν τα τοιχώματα των κελιών να κάμπτονται. Οι δυσκαμψίες και οι αντοχές εκτός επιπέδου (αυτές στην κατεύθυνση X_3) είναι πολύ μεγαλύτερες από τις εντός επιπέδου, επειδή απαιτούν την αξονική επέκταση ή συμπίεση των τοιχωμάτων των κελιών. Σε αυτό το κεφάλαιο διαχωρίζουμε τις ιδιότητες σε αυτές του εντός επιπέδου και στις εκτός επιπέδου και τις αναλύουμε. Η μελέτη των ιδιοτήτων εντός του επιπέδου υπογραμμίζει τους μηχανισμούς με τους οποίους τα κυψελοειδή παραμορφώνονται και αστοχούν. Η ανάλυση εκτός του επιπέδου δίνει τις πρόσθετες δυσκαμψίες που απαιτούνται για το σχεδιασμό κυψελοειδών πυρήνων για πάνελ τύπου sandwich και για την πλήρη περιγραφή της συμπεριφοράς κυψελοειδών υλικών.

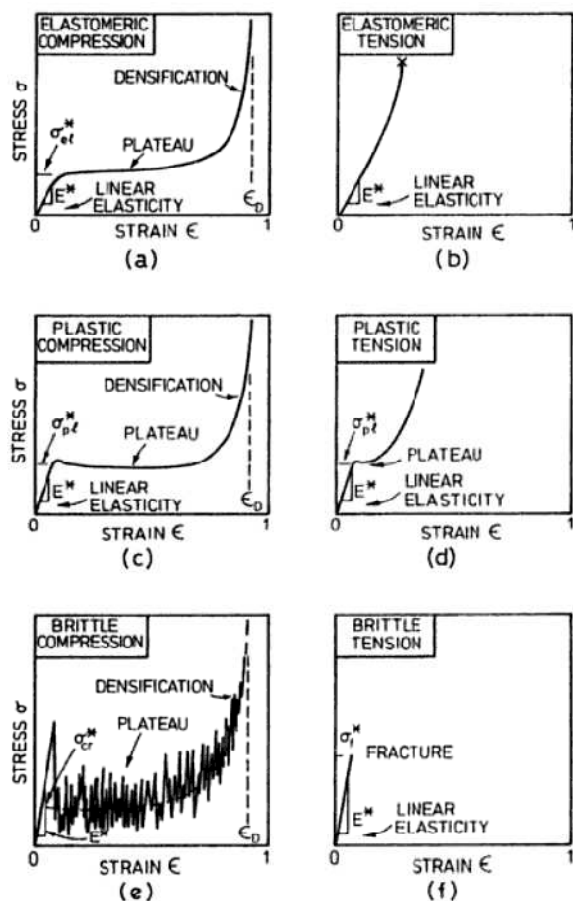


Σχήμα 3.2 Κυψελοειδές με εξαγωνικό σχήμα κελιών. Οι ιδιότητες στο επίπεδο είναι εκείνες που σχετίζονται με τα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο X_1 - X_2 . Οι ιδιότητες με τα φορτία που εφαρμόζονται κατά μήκος του άξονα των κελιών - κατεύθυνση X_3 αναφέρονται ως ιδιότητες εκτός του επιπέδου.

3.2.1. Παραμόρφωση στο επίπεδο

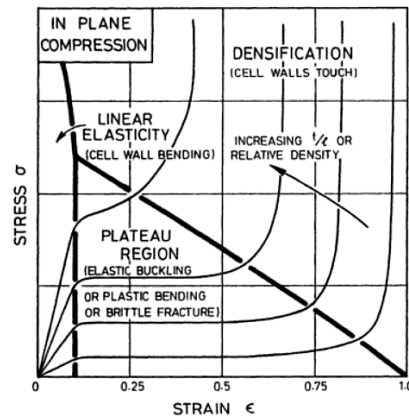
Το σχήμα 3.3 μας δίνει τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης σε θλίψη και εφελκυσμό για ελαστομερές κυψελοειδές (ελαστικό), ελαστικό - πλαστικό κυψελοειδές (μεταλλικό) και ελαστικό-ψαθυρό (κεραμικό). Έχουν σε μεγάλο βαθμό παρόμοια σχήματα, αλλά για διαφορετικούς λόγους. Κατά την θλίψη, όλα τα διαγράμματα δείχνουν αρχικά μία γραμμική - ελαστική συμπεριφορά, εν συνεχεία μια περιοχή με σχεδόν σταθερή τάση (πλατώ), και τέλος μια περιοχή όπου έχουμε απότομη αύξηση της τάσης. Κατά την πρώτη φόρτιση, τα τοιχώματα των κελιών κάμπτονται δίνοντας γραμμική ελαστικότητα (με την προϋπόθεση, φυσικά, ότι το υλικό των τοιχωμάτων των κελιών είναι το ίδιο γραμμικό-ελαστικό). Αλλά όταν επιτευχθεί μια κρίσιμη τάση τα κελιά αρχίζουν να καταρρέουν (collapse). Στα ελαστομερή υλικά η κατάρρευση οφείλεται στον ελαστικό λυγισμό των τοιχωμάτων των κελιών και έτσι είναι ανακτήσιμη. Σε υλικά με πλαστικό σημείο διαρροής (plastic yield point) η κατάρρευση οφείλεται στον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στο τμήμα που ασκείται η μέγιστη ροπή στα λυγισμένα μέλη. Σε ψαθυρά υλικά προκύπτει από την ψαθυρή θραύση των τοιχωμάτων των κελιών. Στους τελευταίους δύο τρόπους, βέβαια, η κατάρρευση δεν είναι ανακτήσιμη.

Τελικά, σε μεγάλες παραμορφώσεις, τα κελιά καταρρέουν μιας και αγγίζουν τα απέναντι τοιχώματα των κελιών (ή τα σπασμένα τεμάχια τους συσσωρεύονται) και η περαιτέρω παραμόρφωση συμπιέζει το ίδιο το τοίχωμα των κελιών. Αυτό δίνει το τελικό, απότομα αυξανόμενο τμήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης που χαρακτηρίζεται ως συμπύκνωση (*densification*).



Σχήμα 3.3 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων υπό θλίψη και εφελκυσμό για κυψελοειδές: (α) και (β) ελαστομερές κυψελοειδές, (c) και (d) ελαστικό - πλαστικό κυψελοειδές, (e) και (f) ελαστικό-εύθραστο κυψελοειδές.

Μία αύξηση της σχετικής πυκνότητας μιας κυψελοειδούς δομής αυξάνει το σχετικό πάχος των τοιχώματα των κελιών. Στη συνέχεια, η αντίσταση στην κάμψη των τοιχώματα των κελιών και της κατάρρευσης των κελιών ανυψώνεται, δίνοντας υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και τάση "πλατώ" (plateau stress), λόγω του ότι τα τοιχώματα των κελιών αγγίζουν νωρίτερα τα απέναντι τοιχώματα, μειώνοντας την παραμόρφωση στην οποία αρχίζει η συμπίκνωση. Το Σχήμα 3.4 συνοψίζει τους μηχανισμούς για την θλιπτική παραμόρφωση των κυψελοειδών και δείχνει πώς αλλάζει η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας (t/l).



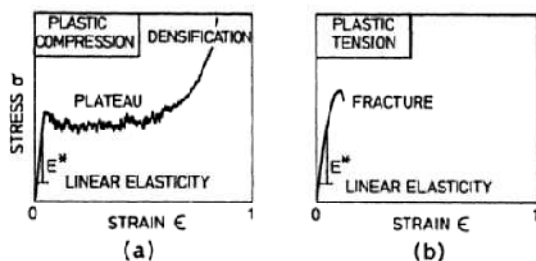
Σχήμα 3.4 Ένα σχηματικό διάγραμμα για ένα κυψελοειδές φορτισμένο υπό θλίψη στο επίπεδο X1-X2, που δείχνει τον τρόπο αλλαγής της καμπύλης τάσης-καταπόνησης συνάρτηση του λόγου t/l

Ο μηχανισμός της εφελκυστικής παραμόρφωσης όμως είναι διαφορετικός. Αρχικά τα τοιχώματα των κελιών κάμπτονται, δίδοντας γραμμική-ελαστική παραμόρφωση με την ίδια κλίση (και έτσι τα ίδια μέτρα ελαστικότητας) όπως στη θλίψη. Αλλά στον εφελκυσμό ένα ελαστομερές κυψελοειδές δεν λυγίζει. Αντίθετα, τα τοιχώματα των κελιών περιστρέφονται προς τον άξονα εφελκυσμού και η δυσκαμψία αυξάνεται. Τα πλαστικά κυψελοειδή συμπεριφέρονται σχεδόν με τον ίδιο τρόπο που κάνουν και στην θλίψη: σχηματίζουν πλαστικές αρθρώσεις, επιτρέποντας μεγάλες παραμορφώσεις σε μια σχεδόν σταθερή τάση 'plateau', μόνο η αλλαγή γεωμετρίας εισάγει μια διαφορά που συνήθως πιέζει την καμπύλη εφελκυσμού πάνω από την θλιπτική καμπύλη. Τα εύθραυστα (ψαθυρά) κυψελοειδή αστοχούν απότομα σε εφελκυσμό, σε μία τάση που είναι συνήθως χαμηλότερη από την πραγματική αντοχή θλίψης. Όπως και με κάθε εύθρυπτο (ψαθυρό) στερεό, η θραύση σε εφελκυσμό εμφανίζεται με ένα μεγαλύτερο ελάττωμα (μια ρωγμή, ή εγκοπή, ή ένα σύμπλεγμα κατεστραμμένων κυττάρων), που διαδίδεται κατά τρόπο που υπολογίζεται με τις μεθόδους της μηχανικής θραύσης (fracture mechanics). Η αύξηση της σχετικής πυκνότητας έχει παρόμοιο αποτέλεσμα με εκείνη της θλίψης: το μέτρο ελαστικότητας, η πλαστική τάση διαρροής και η ψαθυρή τάση θραύσης αυξάνουν όλα.

3.2.2. Παραμόρφωση εκτός επιπέδου

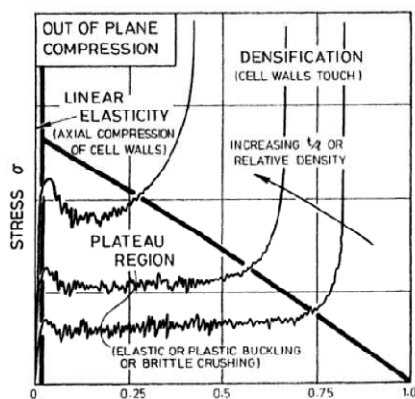
Τα κυψελοειδή είναι πολύ πιο άκαμπτα και ισχυρότερα όταν φορτίζονται κατά μήκος του άξονα των κυττάρων - κατεύθυνση X_3 (σχήμα 3.2). Το ίδιο ισχύει και για τα κυψελοειδή που φορτίζονται σε διάτμηση εκτός επιπέδου (όπως σε πάνελ τύπου sandwich φορτισμένα σε κάμψη). Σε αυτές τις περιπτώσεις η αρχική γραμμική-ελαστική παραμόρφωση συνεπάγεται σημαντικές ορθές ή διατμητικές παραμορφώσεις των ίδιων των τοιχωμάτων των κελιών.

Κατά την θλίψη το γραμμικό ελαστικό σχήμα κόπτεται υπό λυγισμό (ελαστικά για ένα ελαστομερές, πλαστικά για μέταλλο ή άκαμπτα για πολυμερές) και η τελική αστοχία συμβαίνει με σχίσσιμο ή θραύση δίνοντας μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.5. Σε εφελκυσμό το κυψελοειδές είναι ελαστικό έως ότου σκιστεί, διαρρέυσει πλαστικά ή σπάσει.



Σχήμα 3.5 Διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων για αξονική φόρτιση κυψελοειδές (α) σε θλίψη και (β) σε εφελκυσμό.

Οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για κυψελοειδές με μία σειρά σχετικών πυκνοτήτων σχηματίζουν και πάλι μια οικογένεια όπως φαίνεται στο σχ. 3.6.



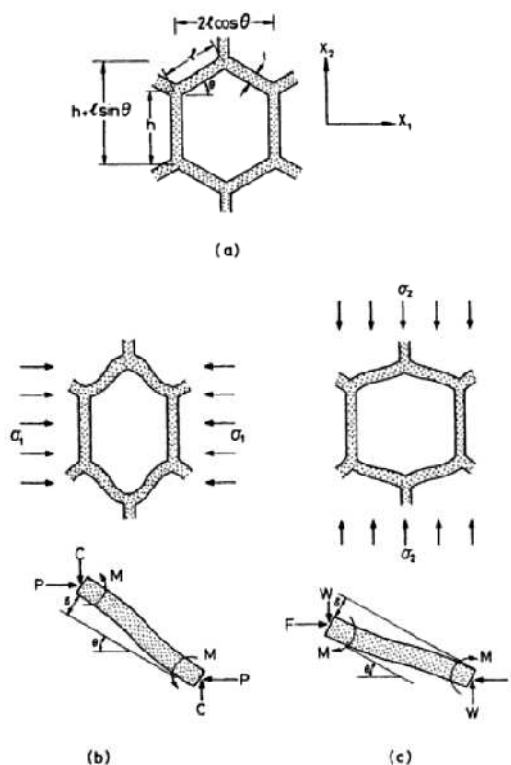
Σχήμα 3.6 Ένα σχηματικό διάγραμμα για ένα κυψελοειδές φορτισμένο υπό θλίψη στην αξονική διεύθυνση X3, που δείχνει τον τρόπο αλλαγής της καμπύλης τάσης-καταπόνησης συνάρτηση του λόγου t/l

3.3. Μηχανικές ιδιότητες των περιοδικών κυψελοειδών με εξαγωνικό σχήμα κελιών

3.3.1. Οι ιδιότητες στο επίπεδο των κυψελοειδών: μονοαξονική φόρτωση

Σύμφωνα με τους Gibson και Ashby παίρνουμε μία στοιχειώδες μονάδα εξαγωνικού κελιού (σχήμα 3.7 (α)). Θέλουμε να αναλύσουμε την απόκρισή της στα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο X_1 - X_2 . Εάν το εξάγωνο είναι κανονικό (δηλαδή, οι πλευρές είναι ίσες και οι γωνίες είναι όλες 120°) και τα τοιχώματα των κυττάρων έχουν όλα το ίδιο πάχος, τότε οι ιδιότητες στο επίπεδο είναι ισοτροπικές: δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια τέτοια δομή έχει δύο ανεξάρτητα μέτρα ελαστικότητας (το μέτρο Young E^* και ένα μέτρο διάτμησης G^*) και μια μοναδική τιμή σχεδόν σταθερή τάση πλατώ', σ^* .

Αλλά όταν το εξάγωνο είναι ακανόνιστο (όπως στο σχήμα) ή τα τοιχώματα των κελιών σε μια κατεύθυνση είναι παχύτερα από αυτά των άλλων, οι ιδιότητες είναι ανισότροπες και μια πλήρης περιγραφή των ιδιοτήτων στο επίπεδο απαιτεί τέσσερα μέτρα (E^*_1 , E^*_2 , G^*_{12} και ν^*_{12} όπου ν^*_{12} είναι ο λόγος Poisson) και δύο τιμές για την τάση του πλατώ (σ^*_1 και σ^*_2).



Σχήμα 3.7 Κυτταρική παραμόρφωση με κάμψη τοιχώματος κελιού, δίνοντας γραμμική-ελαστική επέκταση ή συμπίεση του κυψελοειδούς: (α) μη παραμορφωμένο κελί. (β) και (γ) η κάμψη που προκαλείται από φορτία στις X_1 και X_2 κατευθύνσεις

Θα αξιολογήσουμε τα μέτρα και τις τάσεις κατάρρευσης για ένα γενικό κελί για την οποία τα h και l διαφέρουν, και για μια αυθαίρετη γωνία τοιχώματος κελιού, θ . Τα ιστροπικά αποτελέσματα λαμβάνονται εύκολα από αυτά. Υποθέτουμε ότι το κελί έχει χαμηλή σχετική πυκνότητα, ρ^* / ρ_s , έτσι ώστε το t / l να είναι μικρό. Η απλή γεωμετρία δίνει τη σχέση μεταξύ των δύο ως:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t/l(h/l + 2)}{2\cos\theta(h/l + \sin\theta)} \quad (3.1)$$

η οποία μειώνει σε:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \quad (3.1\alpha)$$

όταν τα κελιά είναι κανονικά ($h = l$, $\theta = 30^\circ$)

Υποθέτουμε επίσης ότι οι παραμορφώσεις είναι επαρκώς μικρές ώστε οι αλλαγές στη γεωμετρία να μπορούν να παραμεληθούν. Μπορούν να προστεθούν βελτιώσεις για την αντιμετώπιση αυτών (Gibson, 1981), αλλά τα αποτελέσματα είναι πολύ πιο περίπλοκα και η πρόσθετη προσπάθεια είναι απαραίτητη μόνο όταν το $t/l > 1/4$ ή οι παραμορφώσεις είναι μεγαλύτερες από 20%.

Πολλά εμπορικά κυψελοειδή δημιουργούνται με την επέκταση ταινιών από συγκολλημένα φύλλα. Στη συνέχεια, κάθε κελί έχει τέσσερα τοιχώματα πάχους t και δύο (εκείνα του ύψους h) που διπλασιάζονται και έχουν πάχος $2t$. Ο διπλασιασμός αυτού του ζεύγους κυτταρικών τοιχωμάτων δεν αλλάζει (εκπληκτικά) τις τιμές Young's και Poisson εντός επιπέδου που υπολογίζονται κατωτέρω, αν και αλλάζει το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο, σε αντίθεση με τα μέτρα εκτός επιπέδου που αλλάζουν όλα και φυσικά, η πυκνότητα. Οι τιμές του θα περιγραφούν αναλυτικά στην παράγραφο 3.5.

Οι ιδιότητες των υλικών στερεών κυτταρικών τοιχωμάτων λαμβάνονται συχνά από εγχειρίδια. Μπορούν να ληφθούν αξιόπιστα δεδομένα τόσο για το μέτρο του Young όσο και για την αντοχή διαρροής του τοιχώματος του κελιού των κοινών μεταλλικών κυψελοειδών. Στα κεραμικά και πολυμερή κυψελοειδή είναι πιο δύσκολα. Τα τοιχώματα των κελιών των κεραμικών κυψελοειδών είναι συχνά πορώδη. Τότε, οι ιδιότητές τους πρέπει να βρεθούν από μετρήσεις σε μεμονωμένα μέλη τοιχώματος του κελιού που κόβονται από το κυψελοειδές.

Το μέτρο του Young υπολογίζεται εύκολα προκαλώντας διέγερση με δονήσεις του κοπτόμενου μέλους και τη μέτρηση των συχνοτήτων χρησιμοποιώντας ένα μικρόφωνο συνδεδεμένο σε έναν αναλυτή φάσματος. Το μέτρο κάμψης στη συνέχεια υπολογίζεται από τη συχνότητα και την πυκνότητα που μετρούνται ξεχωριστά (Hunt, 1993). Το μέτρο θραύσης του τοιχώματος του κελιού, επίσης, μπορεί να μετρηθεί είτε με ένα μόνο στύλο, χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό ζυγό για τη μέτρηση του φορτίου θραύσης (Hunt, 1993), ή με ένα τετράγωνο μοναδιαίο κελί το οποίο φορτίζεται επί της διαγωνίου του κελιού σε ένα στάδιο παραμόρφωσης σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Huang and Gibson, 1991).

3.3.1.1. Γραμμική ελαστική παραμόρφωση - Υπολογισμός μέτρων E , G , αναλογίας Poisson ν

Όταν ένα κυψελοειδές, φορτισμένο στην κατεύθυνση X_1 ή X_2 , παραμορφώνεται γραμμικά-ελαστικά, τα τοιχώματα των κελιών κάμπτονται.

Η απόκριση περιγράφεται καταλλήλως από πέντε μέτρα: δύο μέτρα Young E^*_1 και E^*_2 , ένα μέτρο διάτμησης C^*_{12} , και δύο αναλογίες Poisson, ν^*_{12} και ν^*_{21} . Αλλά τα πέντε μέτρα δεν είναι ανεξάρτητα. Η αμοιβαία σχέση που δίνεται παρακάτω, μειώνει τον αριθμό

των ανεξάρτητων μέτρων σε τέσσερα μιας και $E^*_1 \nu^*_{21} = E^*_2 \nu^*_{12}$. Είναι τα ίδια τόσο σε εφελκυσμό όπως και σε θλίψη, και υπολογίζονται ως εξής.

Τα δύο μέτρα Young (σύμφωνα με τον Gibson), υπολογίζονται με τη μέθοδο που απεικονίζεται στο σχήμα 3.7(b) και (c). Μια τάση σ_1 , παράλληλη με το X_1 , προκαλεί κάμψη ενός συνόλου τοιχωμάτων του κελιού - αυτών του μήκους l . Ένα τοίχωμα του κελιού παρουσιάζεται λεπτομερώς κάτω από το κελί. Η ισορροπία απαιτεί ότι η συνιστώσα της δύναμης C παράλληλη με το X_2 να είναι μηδέν. Η ροπή M που τείνει να κάμψει το τοίχωμα του κελιού (το οποίο αντιμετωπίζουμε ως δοκό μήκους, l , πάχους, t , βάθος b και συντελεστής Young, E_s) είναι

$$M = \frac{Pl \sin \theta}{2} \text{ όπου,} \quad (3.2)$$

$$P = \sigma_1(h + l \sin \theta)b \quad (3.3)$$

Από τυπική θεωρία δοκού (π.χ. Roark and Young, 1976), το τοίχωμα εκτρέπεται κατά

$$\delta = \frac{Pl^3 \sin \theta}{12E_s I}, \quad (3.4)$$

όπου I είναι η ροπή αδράνειας του τοιχώματος του κελιού ($I = bt^3/12$ για τοίχωμα ομοιόμορφου πάχους t). Από αυτή, ένα στοιχείο $\delta \sin \theta$ είναι παράλληλο με τον άξονα X_1 , δίνοντας μια παραμόρφωση

$$\varepsilon_1 = \frac{\delta \sin \theta}{l \cos \theta} = \frac{\sigma_1(h + l \sin \theta)bl^2 \sin^2 \theta}{12E_s l \cos \theta} \quad (3.5)$$

Το μέτρο του Young παράλληλο προς το X_1 ισούται με $E_1 = \sigma_1 / \varepsilon_1$, δίνοντας τελικά

$$\frac{E_1^*}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin^2 \theta} \quad (3.6)$$

Η φόρτιση στην κατεύθυνση X_2 φαίνεται στο σχήμα 3.7(c). Η ισορροπία απαιτεί ότι η συνιστώσα της δύναμης F παράλληλη με το X_1 να είναι μηδέν. Η ροπή M που τείνει να κάμψει το τοίχωμα του κελιού είναι

$$M = \frac{Wl \cos \theta}{2}, \text{ όπου} \quad (3.7)$$

$$W = \sigma_2 l b \cos \theta \quad (3.8)$$

Από τυπική θεωρία δοκού (π.χ. Roark and Young, 1976), το τοίχωμα εκτρέπεται κατά

$$\delta = \frac{Wl^3 \cos \theta}{12E_s I}, \quad (3.9)$$

Από αυτή, ένα στοιχείο $\delta \cos \theta$ είναι παράλληλο με τον άξονα X_2 , δίνοντας μια παραμόρφωση

$$\varepsilon_2 = \frac{\delta \cos \theta}{h + l \sin \theta} = \frac{\sigma_2 bl^4 \cos^3 \theta}{12E_s I(h + l \sin \theta)} \quad (3.10)$$

Το μέτρο του Young παράλληλο προς το X_2 ισούται με $E_2 = \sigma_2 / \varepsilon_2$, δίνοντας τελικά

$$\frac{E_2^*}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\cos^3\theta} \quad (3.11)$$

Για κανονικά εξάγωνα με ομοιόμορφου πάχους τοιχώματα, τα μέτρα Young, E_1 και E_2 , μειώνουν την ίδια τιμή:

$$\frac{E_1^*}{E_s} = \frac{E_2^*}{E_s} = 2,3 \left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (3.11\alpha)$$

Όταν φορτίζονται είτε στην κατεύθυνση X_1 είτε στην X_2 , τα κεκλιμένα μέλη ενός εξαγωνικού κελιού φέρουν αξονικά και διατμητικά φορτία επιπλέον των συνιστωσών κάμψης που εξετάστηκαν παραπάνω. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγονται αξονικές και διατμητικές παραμορφώσεις του μέλους, οι οποίες, για μικρά t/l , είναι αμελητέες σε σχέση με την εκτροπή κάμψης.

Οι λόγοι Poisson υπολογίζονται με τη λήψη του αρνητικού λόγου των ορθών αποκλίσεων και παράλληλα με την κατεύθυνση φόρτισης.

Έτσι για φόρτιση στην κατεύθυνση X_1 βρίσκουμε:

$$\nu_{12}^* = - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\cos^2\theta}{(h/l + \sin\theta)\sin\theta} \quad (3.12)$$

Έτσι για φόρτιση στην κατεύθυνση X_2 βρίσκουμε:

$$\nu_{21}^* = - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{(h/l + \sin\theta)\sin\theta}{\cos^2\theta} \quad (3.13)$$

$$\text{για κανονικά εξάγωνα έχουμε: } \nu_{12}^* = \nu_{21}^* = 1 \quad (3.14)$$

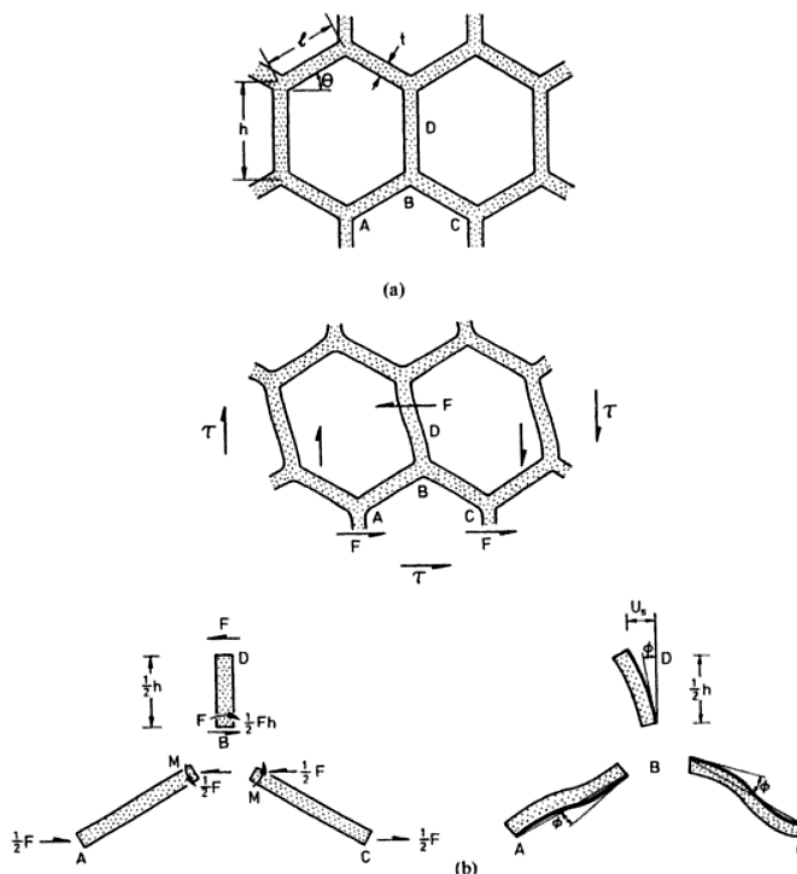
Υπάρχει ένα ασυνήθιστο χαρακτηριστικό για αυτά τα αποτελέσματα. Όταν το θ είναι μικρότερο από το μηδέν (δηλαδή τα κελιά είναι ανεστραμμένα) ο λόγος Poisson είναι αρνητικός, υποδηλώνοντας ότι μια τάση θλίψεως σε μία κατεύθυνση προκαλεί συστολή στην κανονική κατεύθυνση εντός του επιπέδου, αντί της συνηθισμένης επέκτασης (διαστολή). Οι δομές που είναι κατασκευασμένες από άκαμπτες ράβδους που συνδέονται με ελαστικές αρθρώσεις ή κυλίνδρους προσαρτημένους σε ελαστικές λωρίδες, μπορούν επίσης να δείξουν αρνητικούς λόγους Poisson (Evans, 1989, Lakes, 1991). Υποθετικές δισδιάστατες μικροδομές που δίνουν αρνητική αναλογία Poisson έχουν επίσης περιγραφεί από τους Wojciechowski (1989), Wojciechowski και Branka (1989), Rothenburg et al. (1991) και Milton (1992).

Για το κυψελοειδές, ισχύει το αμοιβαίο θεώρημα (Εξ. (4.2)):

$$E_1^* \nu_{21}^* = E_2^* \nu_{12}^* = E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{1}{\sin\theta \cos\theta} \quad (3.15)$$

έτσι ώστε μόνο τρεις από τις τέσσερις μονάδες E_1^* , E_2^* , ν_{12}^* και ν_{21}^* να είναι ανεξάρτητες.

Αλλά ένα γενικό κελί έχει τέσσερις ανεξάρτητες σταθερές στο επίπεδο. Η τέταρτη είναι το μέτρο διάτμησης G_{12}^* , που υπολογίζεται όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8. Λόγω συμμετρίας δεν υπάρχει σχετική κίνηση των σημείων A, B και C όταν το κελί διατμίζεται (sheared). Η εκτροπή στην διάτμηση οφείλεται εξ ολοκλήρου στην κάμψη της δοκού BD και στην περιστροφή της (δια της γωνίας ϕ) γύρω από το σημείο B. Οι δυνάμεις παρουσιάζονται στο σχήμα. Συνοψίζοντας οι ροπές στο B ισούνται με τη ροπή που εφαρμόζεται στα μέλη AB και BC:



Σχήμα 3.8 Κυτταρική παραμόρφωση σε κάμψη και περιστροφή τοιχώματος κελιού, δίνοντας γραμμική ελαστική διάτμηση του κυψελοειδή: (α) μη παραμορφωμένο κυψελοειδές. (β) φορτία, ροπές, μετατοπίσεις και περιστροφές που προκαλούνται από την διατμητική τάση

Αυτά τα αποτελέσματα έχουν ελεγχθεί εκτενώς με πειράματα σε ελαστομερή και μεταλλικά κυψελοειδή (Gibson, 1981, Gibson et al., 1982). Για πρακτικούς σκοπούς τα μέτρα εντός επιπέδου των κυψελοειδών περιγράφονται επαρκώς από τις εξισώσεις που δίνονται παραπάνω.

$$\frac{G_{12}^*}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 (1 + 2h/l)\cos\theta} \quad (3.16)$$

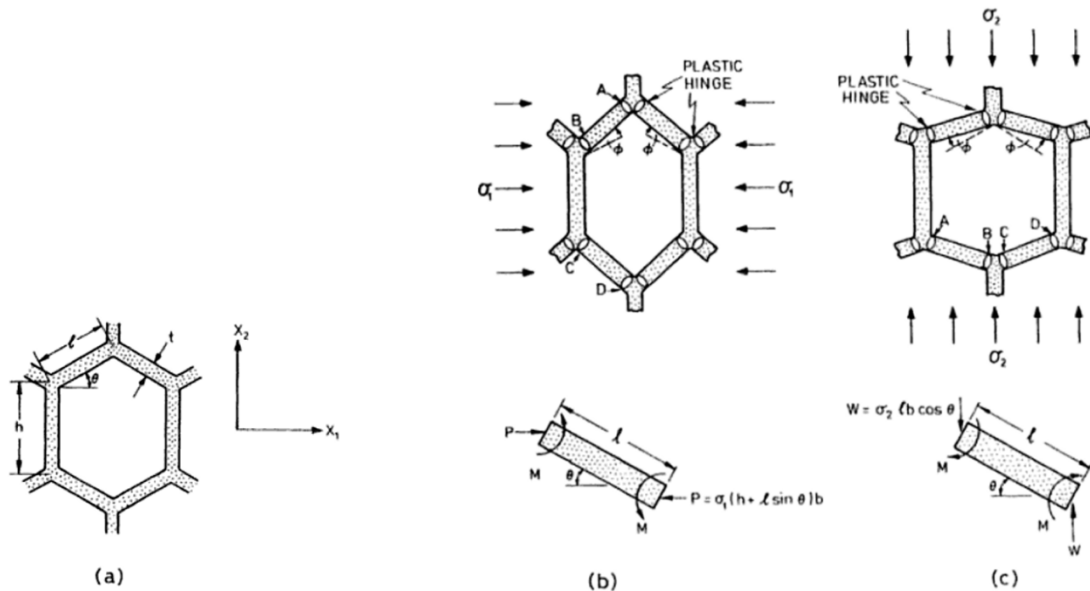
όπου για κανονικά, ομοιόμορφο, εξάγωνο, η εξίσωση μειώνεται σε:

$$\frac{G_{12}^*}{E_s} = 0,57 \left(\frac{t}{l} \right)^3 = \frac{1}{4} \frac{E^*}{E_s} \quad (3.16a)$$

η οποία υπακούει στην σχέση $G = E/(2(1+\nu))$ για ισότροπα στερεά.

3.3.1.2. Πλαστική συμπεριφορά - Υπολογισμός τάσεων σ , τ

Τα μέταλλα και πολλά πολυμερή είναι ελαστικά πλαστικά στερεά. Τα κελιά που φτιάχνονται από αυτά καταρρέουν πλαστικά όταν η ροπή κάμψης στα τοιχώματα των κελιών προσεγγίζει την πλήρως πλαστική ροπή. Αυτό δίνει μια καμπύλη τάσης καταπόνησης με ένα πλατώ (οροπέδιο) τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό στην πλαστική τάση κατάρρευσης σ_{pl}^* . Εξετάζουμε πρώτα τη φόρτιση στην κατεύθυνση X_1 (Εικ. 3.9 (b)). Ένα ανώτερο όριο στην πλαστική τάση κατάρρευσης δίνεται από την εξίσωση του παραγόμενου έργου με την δύναμη P όπου:



Σχήμα 3.9 Παραμόρφωση κελιού υπό πλαστική κατάρρευση: (α) μη παραμορφωμένο κελί (β) και (γ) περιστροφές, δυνάμεις και ροπές υπό φόρτιση στις κατευθύνσεις X_1 και X_2 .

$$P = \sigma_1 (h + l \sin \theta) b$$

κατά τη διάρκεια μιας πλαστικής περιστροφής ϕ των τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων A, B, C και D το πλαστικό έργο που εφαρμόζετε στις αρθρώσεις δίνει ένα πάνω όριο:

$$4M_p \phi \geq 2\sigma_1 b (h + l \sin \theta) \phi l \sin \theta \quad (3.17)$$

όπου M_p η πλήρως πλαστική ροπή του τοιχώματος του κελιού σε κάμψη έχουμε:

$$M_p = 1/4 \sigma_{ys} b t^2 \quad (3.18)$$

όπου σ_{ys} η τάση διαρροής του υλικού του τοιχώματος του κελιού

Επομένως έχουμε:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_1}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin \theta) \sin \theta} \quad (3.19)$$

Ένα κάτω όριο δίνεται εξίσωνοντας τη μέγιστη ροπή στη δοκό με την M_p . Αυτή η μέγιστη ροπή είναι:

$$(M_{\max})_1 = 1/2 \sigma_1 b(h + l \sin \theta) b l \sin \theta \quad (3.20)$$

Επομένως έχουμε:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_1}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin \theta) \sin \theta} \quad (3.21)$$

Τα κατώτερα και ανώτερα όρια είναι ταυτόσημα, και έτσι ορίζουν την ακριβή λύση στο πρόβλημα. Για κανονικά ομοιόμορφα εξάγωνα μειώνεται σε:

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = \frac{2}{3} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (3.22)$$

Η πλαστική κατάρρευση στην κατεύθυνση X_2 αντιμετωπίζεται με τον ίδιο τρόπο. Ένα ανώτερο όριο δίνεται από την εξίσωση του πλαστικού έργου που προκύπτει σε μία υποτιθέμενη συμβατή παραμόρφωση με το έργο που προκύπτει από την τάση $w = \sigma_2 l \sin \theta$ (Εικ. 3.9 (c)).

Όπως αναλύσαμε και για την τάση σ_1 έχουμε:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_2}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (3.23\alpha)$$

Ένα κάτω όριο δίνεται από την εξίσωση της μέγιστης ροπής στη δοκό (Εικ. 3.9 (c)):

$$(M_{\max})_2 = 1/2 \sigma_2 l^2 b \cos^2 \theta \quad (3.24)$$

για την πλήρη πλαστική ροπή. Όπως και πριν, τα δύο αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα και επομένως ίσα με την ακριβή λύση:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_2}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (3.23\beta)$$

Η πλαστική διάτμηση αντιμετωπίζεται με παρόμοιο τρόπο. Εάν ένα κελί φορτίζεται σε απλή διάτμηση με διατμητική τάση τ_{12} που ενεργεί στο επίπεδο X_1 - X_2 , σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα κάθετα τοιχώματα. Η δύναμη διάτμησης σε κάθε κατακόρυφο τοίχωμα ισούται με $F = 2\tau_{12} b l \cos \theta$. Αν η ροπή $Fh/2$ που ασκείται από αυτή τη δύναμη υπερβαίνει την πλήρως πλαστική ροπή Εξ. (3.18), το κελί διατμίζεται πλαστικά, δίνοντας ένα κατώτερο όριο για την διατμητική αντοχή στο επίπεδο:

$$\frac{(\tau_{pl}^*)_{12}}{\sigma_{ys}} = \frac{1}{4} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{h/l \cos \theta} \quad (3.25)$$

όπου για κανονικά εξάγωνα μειώνεται σε

$$\frac{(\tau_{pl}^*)_{12}}{\sigma_{ys}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (3.26)$$

Το ανώτερο όριο για την διατμητική αντοχή στο επίπεδο βρίσκεται εξισώνοντας το πλαστικό έργο που προκύπτει από τη δύναμη F στο κάθετο τοίχωμα με το πλαστικό έργο που προκύπτει από την πλαστική ροπή στην άρθρωση. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο με το κατώτερο όριο το οποίο, ως εκ τούτου δίνει την ακριβή λύση.

3.3.2. Οι ιδιότητες εκτός επιπέδου των κυψελοειδών: μονοαξονική φόρτωση

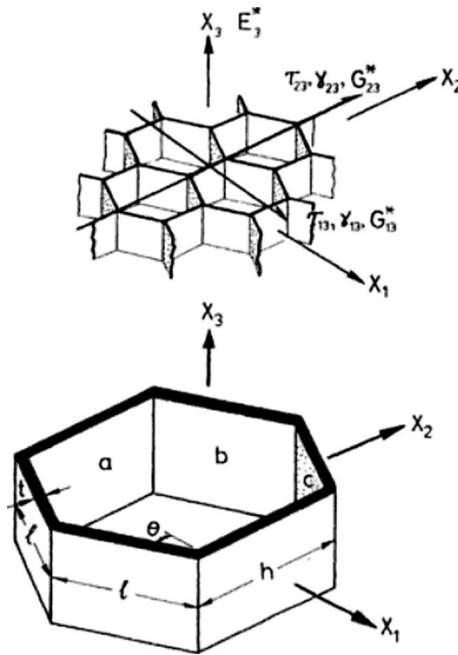
3.3.2.1. Γραμμική ελαστική παραμόρφωση

Τα κυψελοειδή χρησιμοποιούνται συχνά ως πυρήνες σε πάνελ τύπου sandwich. Ο ρόλος του κυψελοειδή πυρήνα είναι να φέρει ορθά και διατμητικά φορτία όταν αυτός φορτίζεται παράλληλα με τον άξονα X_3 των εξαγωνικών πρισμάτων, όπως φαίνεται και στο σχ. 3.10. Όταν φορτίζεται προς αυτή την κατεύθυνση, τα τοιχώματα των κελιών εκτείνονται ή συμπιέζονται (αντί να κάμπτονται) και τα μέτρα (moduli), για τα κυψελοειδή με εξαγωνικό σχήμα κελιών, είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που υπολογίζονται στην ενότητα 3.3.1 για φορτία εντός επιπέδου. Οι δυνάμεις πλαστικής κατάρρευσης είναι επίσης μεγαλύτερες για τον ίδιο λόγο. Εμπλέκονται τόσο οι αξονικές, όσο και οι καμπτικές παραμορφώσεις. Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων, υποθέτουμε χαμηλή πυκνότητα πυρήνα, δηλαδή $t \ll l$, και ότι όλα τα τοιχώματα έχουν το ίδιο πάχος, t .

Πέντε μέτρα απαιτούνται για την περιγραφή της παραμόρφωσης εκτός επιπέδου, από ένα σύνολο εννέα μιας πλήρους περιγραφής του μοναδιαίου κελιού. Το ένα είναι προφανές. Το μέτρο ελαστικότητας Young E_3^* για ορθή φόρτιση στην κατεύθυνση X_3 αντικατοπτρίζει απλώς το μέτρο ελαστικότητας του στερεού, E_s , κλιμακούμενο από την περιοχή του τμήματος που φέρει το φορτίο. (One is obvious: Young's modulus E_3^* for normal loading in the X_3 direction simply reflects the solid modulus, E_s , scaled by the area of the load-bearing section.)

$$\frac{E_3^*}{E_s} = \left\{ \frac{\frac{h}{l} + 2}{2(h/l + \sin\theta)\cos\theta} \right\} \frac{t}{l} = \frac{\rho^*}{\rho_s} \approx \frac{t}{l} \quad (3.27)$$

όπου για κανονικά, ομοιόμορφο, εξάγωνο, η ο όρος της αγκύλης της εξ. ισούται με 1,15.



Σχήμα 3.10 (α) Κυψελοειδές που φέρει φορτίο στον άξονα στο X_3 (β) ένα κελί που δείχνει τα τοιχώματα a , b και c .

Οι δύο λόγοι Poisson ν_{31}^* και ν_{32}^* είναι απλά ίσοι με εκείνους για το ίδιο το στερεό.

$$\nu_{31}^* = \nu_{32}^* = \nu_s \quad (3.28)$$

Οι δύο λόγοι Poisson ν_{13}^* και ν_{23}^* σύμφωνα με τον Gibson ισούνται με:

$$\nu_{13}^* = \frac{E_1^*}{E_3^*} \nu_s \approx 0, \quad \nu_{23}^* = \frac{E_2^*}{E_3^*} \nu_s \approx 0 \quad (3.29)$$

Εντούτοις, τα μέτρα διάτμησης είναι πιο περίπλοκα. Η κατανομή τάσης σε ένα διατμημένο κυψελοειδές δεν είναι απλή. Κάθε κυψελοειδής επιφάνεια υφίσταται μία μη ομοιόμορφη παραμόρφωση λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τους γείτονές της και το αρχικό επίπεδο κυψελοειδή μπορεί να μην παραμείνει επίπεδο. Οι ακριβείς υπολογισμοί είναι δυνατοί μόνο με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Αλλά τα ανώτερα και κατώτερα όρια για τα δύο μέτρα διάτμησης μπορούν να τυποποιηθούν σχετικά εύκολα χρησιμοποιώντας μια απλοποίηση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε από τους Kelsey et al. (1958). Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό της ενεργειακής παραμόρφωσης που συνδέεται, πρώτον, με κατανομή παραμορφώσεων που επιτρέπει συμβατή παραμόρφωση και, δεύτερον, με κατανομή τάσεων που ικανοποιεί την ισορροπία. Αν οι δύο συμπίπτουν, η λύση είναι ακριβής. Αν όχι, η πραγματική λύση βρίσκεται μεταξύ των δύο κατανομών.

Για να μπορέσουμε να τις υπολογίσουμε, χρησιμοποιούμε τα θεωρήματα της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας και της ελάχιστης συμπληρωματικής ενέργειας (Sokolnikoff, 1956; McClintock and Argon, 1966). Το πρώτο θεώρημα δίνει ένα άνω όριο. Δηλώνει ότι η ενέργεια παραμόρφωσης που υπολογίζεται από οποιοδήποτε υποθετικό σύνολο μετατοπίσεων που είναι συμβατές με τις εξωτερικές συνθήκες ορίων και με τον εαυτό τους θα είναι ένα

ελάχιστο για την ακριβή κατανομή μετατόπισης. Εξετάζουμε, συνεπώς, μια ομοιόμορφη διάτμηση, γ_{13} , που προκαλείται από μια διατμητική τάση τ_{13} που δρα στην ορθή επιφάνεια X_3 προς την κατεύθυνση X_1 (σχ. 3.10). Απομονώνουμε ένα μοναδιαίο στοιχείο της δομής, όπως φαίνεται, το οποίο επαναλαμβάνεται για τη δημιουργία ολόκληρου του κυψελοειδή. Σχεδόν όλη η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης αποθηκεύεται στις διατμητικές μετατοπίσεις (displacement) στα τοιχώματα των κελιών. Οι δυσκαμψίες λόγω κάμψης και οι ενέργειες που σχετίζονται με την κάμψη είναι πολύ μικρότερες. Οι διατμητικές παραμορφώσεις στα τοιχώματα a, b και c είναι:

$$\gamma_a = 0, \gamma_b = \gamma_c = \gamma_{13} \cos \theta \quad (3.30)$$

Το θεώρημα μπορεί στη συνέχεια να εκφραστεί ως ανισότητα, η οποία, για διάτμηση στην κατεύθυνση X_1 , έχει τη μορφή:

$$\frac{1}{2} G_{13}^* \gamma_{13}^2 V \leq \frac{1}{2} \sum_i (G_s \gamma_i^2 V_i) \quad (3.31)$$

όπου G_s είναι το μέτρο διάτμησης του υλικού τοιχώματος των κελιών, γ_i , είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις στις τρεις διευθύνσεις των τοιχωμάτων των κελιών και η άθροιση πραγματοποιείται στα τρία τοιχώματα a, b και c, των όγκων V_a , V_b και V_c . Κατ' εκτίμηση το άθροισμα δίνει:

$$\frac{G_{13}^*}{G_s} \leq \frac{\cos \theta}{h/l + \sin \theta} \left(\frac{t}{l} \right) \quad (3.32)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο για μια διάτμηση γ_{23} στην κατεύθυνση X_2 , βρίσκουμε διατμητικές παραμορφώσεις:

$$\gamma_a = \gamma_{23}, \gamma_b = \gamma_c = \gamma_{23} \sin \theta \quad \text{και} \quad (3.33)$$

$$\frac{G_{23}^*}{G_s} \leq \frac{1}{2} \frac{h/l + 2 \sin^2 \theta}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta} \left(\frac{t}{l} \right) \quad (3.34)$$

Το δεύτερο θεώρημα δίνει ένα κατώτερο όριο για τα μέτρα. Δηλώνεται ότι μεταξύ των κατανομών τάσεων που ικανοποιούν την ισορροπία, σε κάθε σημείο και βρίσκονται σε ισορροπία με τα εξωτερικά φορτία, η τάση παραμόρφωσης παρουσιάζει ένα ελάχιστο για την ακριβή κατανομή τάσεων. Εκφράζεται ως ανισότητα, για διάτμηση στην κατεύθυνση X_1 :

$$\frac{1}{2} \frac{\tau_{13}^2}{G_{13}^*} V \leq \frac{1}{2} \sum_i \left(\frac{\tau_i^2}{G_s} V_i \right) \quad (3.35)$$

Για την φόρτιση στην κατεύθυνση X_1 υποθέτουμε ότι μια εξωτερική τάση τ_{13} επιφέρει ένα σύνολο διατμητικών τάσεων τ_a , τ_b και τ_c στα τρία τοιχώματα των κελιών. Σε συμμετρία έχουμε: (By symmetry)

$$\tau_b = \tau_c \text{ και } \tau_a = 0 \quad (3.36)$$

μιας και ο τοίχος a φορτίζεται σε απλή κάμψη δεν φέρει σημαντικό φορτίο. Η ισορροπία απαιτεί:

$$2\tau_{13}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \cos\theta \quad (3.37)$$

Η παραπάνω εξίσωση ανισότητας, μαζί με αυτή την εξίσωση ισορροπίας, δίνουν ένα κάτω όριο:

$$\frac{G_{13}^*}{G_s} \geq \frac{\cos\theta}{(h/l + \sin\theta)} \left(\frac{t}{l}\right) \quad (3.38)$$

το οποίο είναι ταυτόσημο με το άνω όριο: το αποτέλεσμα είναι ακριβές. Για κανονικά εξάγωνα, μειώνεται σε:

$$\frac{G_{13}^*}{G_s} \geq 0.577 \left(\frac{t}{l}\right) \quad (3.39)$$

Για φόρτιση στην κατεύθυνση X_2 υποθέτουμε και πάλι ότι η εξωτερική τάση διατμήσεως τ_{23} προκαλεί ένα σύνολο διατμητικών τάσεων τ_a , τ_b και τ_c στα τρία τοιχώματα των κελιών. Η συμμετρία και πάλι απαιτεί $\tau_b = \tau_c$

Η ισορροπία στην κατεύθυνση X_3 των κόμβων σημαίνει ότι:

$$\tau_a = \tau_b + \tau_c = 2\tau_b \quad (3.40)$$

και η ισορροπία με την εξωτερική τάση δίνει

$$2\tau_{23}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \sin\theta + \tau_a t h, \text{ ούτως ώστε} \quad (3.41)$$

$$\tau_b = \tau_{23}\cos\theta l/t \quad (3.42)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω έχουμε:

$$\frac{G_{23}^*}{G_s} \geq \frac{h/l + \sin\theta}{(1 + 2h/l)\cos\theta} \left(\frac{t}{l}\right) \quad (3.43)$$

Στην περίπτωση αυτή τα δύο όρια δεν συμπίπτουν για ένα γενικά, ανισότροπο κελί, αν και είναι κοντά. Αλλά για τα κανονικά εξάγωνα τα όρια συμπίπτουν και οι δύο εξισώσεις μειώνουν σε:

$$\frac{G_{23}^*}{G_s} \geq 0.577 \left(\frac{t}{l}\right) \quad (3.44)$$

Αυτό είναι πανομοιότυπο με το αποτέλεσμα για το G_{13}^* , όπως θα έπρεπε να είναι: τα κανονικά εξάγωνα είναι ισοτροπικά στο επίπεδο X_1 - X_2 .

Τα εκτός επιπέδου μέτρα όλων των αναλογιών (t/l), εξαρτώνται γραμμικά από τη σχετική πυκνότητα. Σε αυτό διαφέρουν από τα μέτρα στο επίπεδο αναλογιών $(t/l)^3$. Σε γενικές γραμμές, τα μέτρα εκτός επιπέδου είναι μεγαλύτερα από αυτά που βρίσκονται εντός επιπέδου κατά ένα παράγοντα $(t/l)^2$, ή, για τυπικά κυψελοειδή, ένα παράγοντα μεταξύ 10 και 1000. Τα δύο μέτρα διάτμησης εκτός επιπέδου είναι ίσα για κανονικά εξάγωνα, όπως αναμενόταν.

3.3.2.2. Λυγισμός

Ο ελαστικός λυγισμός ενός κυψελοειδούς σε διάτμηση έξω από το επίπεδο μπορεί να αναλυθεί συνδυάζοντας την διατμητική τάση που αναλύσαμε στην παράγραφο 3.3.2.1, με τη διατμητική τάση λυγισμού ενός τοιχώματος μοναδιαίου κελιού, τ_{crit} (Roark και Young, 1975)

Για φόρτιση στο επίπεδο X_1 - X_3 απαιτείται ισορροπία:

$$2\tau_{13}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \cos\theta \quad (3.45)$$

Ελαστικός λυγισμός συμβαίνει ταυτόχρονα στα τοιχώματα b και c . Τοποθετώντας όπου $\tau_b = \tau_{crit}$ έχουμε:

$$\tau_{13}^* = \frac{CE_s(t/l)^3}{(1 - \nu_s^2) \left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right)} \quad (3.46)$$

Για φόρτιση στο επίπεδο X_2 - X_3 απαιτείται ισορροπία:

$$2\tau_{23}l(h + l\sin\theta)\cos\theta = 2\tau_b t l \sin\theta + \tau_a t h \quad (3.47)$$

Η διατμητική τάση στο τοίχωμα a είναι διπλάσια από αυτή στα τοιχώματα b και c . Αναμένουμε λυγισμό λόγο διάτμησης για την κίνηση στο τοίχωμα a , δίνοντας:

$$\tau_{23}^* = \frac{CE_s(t/l)^3}{2(1 - \nu_s^2)\cos\theta} \quad (3.48)$$

Στην πράξη, η αντοχή σε διάτμηση έξω από το επίπεδο των κυψελοειδών μπορεί να μετρηθεί μόνο με τη σύνδεση του κυψελοειδή σε πλάκες. Για αυτό το λόγο, υποθέτουμε ότι και οι τέσσερις άκρες κάθε τοιχώματος του κελιού είναι ουσιαστικά σταθερές και λαμβάνει $C = 8,44$, μια τιμή ενδιάμεση με εκείνη για $b/l = 2$ και $h/l = \infty$. Για τα εμπορικά κυψελοειδές, με τοιχώματα κελιών διπλού πάχους μήκους h , τα αποτελέσματα είναι παρόμοια (Zhang and Ashby, 1992a).

3.3.2.3. Πλαστική συμπεριφορά κελιού

Εάν η τάση της καθαρής διατομής στο επίπεδο κάθετα προς το X_3 υπερβαίνει την αντοχή διαρροής σ_{ys} του υλικού του τοιχώματος του κελιού, τότε τα τοιχώματα του κελιού θα διαρρεύσουν αξονικά. Αυτό ορίζει ένα άνω όριο για την πλαστική αντοχή κατάρρευση των κυψελοειδών:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_3}{\sigma_{ys}} = \frac{h/l + 2}{2\cos\theta(h/l + \sin\theta)} \frac{t}{l} \quad (3.49)$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει σωστά την αξονική αντοχή σε τάση. Αλλά σε συμπίεση το όριο αυτό επιτυγχάνεται σπάνια, διότι ο πλαστικό λυγισμό συμβεί πρώτα.

Η αξονική κατάρρευση των κυψελοειδών με εξαγωνικό σχήμα κελιών με πλαστικό λυγισμό έχει αντιμετωπιστεί από τον McFarland (1963) και πιο πρόσφατα και με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον Wierzbicki (1983). Έτσι ορίστηκε με εκτίμηση ένα όριο για την πλαστική αντοχή κατάρρευση των κυψελοειδών:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_3}{\sigma_{ys}} \approx \frac{\pi}{4} \frac{h/l + 2}{(h/l + \sin\theta)\cos\theta} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (3.50)$$

3.4. Μηχανικές ιδιότητες των περιοδικών κυψελοειδών με τετραγωνικό ή τριγωνικό σχήμα κελιών

Τα κελιά των κυψελοειδών δεν είναι πάντα εξαγωνικά. Για παράδειγμα, κεραμικά και μεταλλικά κυψελοειδή που χρησιμοποιούνται για ανταλλαγές θερμότητας και υποστηρίγματα καταλύτη έχουν μερικές φορές τετράγωνα ή τριγωνικά κελιά, είτε για να αυξήσουν το εμβαδό της επιφάνεια είτε για να δώσουν μια πιο σκληρή δομή. Οι ελαστικές σταθερές στο επίπεδο των δομών αυτών διαφέρουν θεμελιωδώς από εκείνες με εξαγωνικά κύτταρα.

Η διαφορά προκύπτει επειδή οι ροπές κάμψης στα τοιχώματα των κελιών είναι ίσες με το μηδέν για ορισμένες κατευθύνσεις φόρτισης. Όταν αυτό συμβαίνει, η ελαστική παραμόρφωση είναι δυνατή μόνο με την αξονική επέκταση ή συμπίεση των τοιχωμάτων των κελιών.

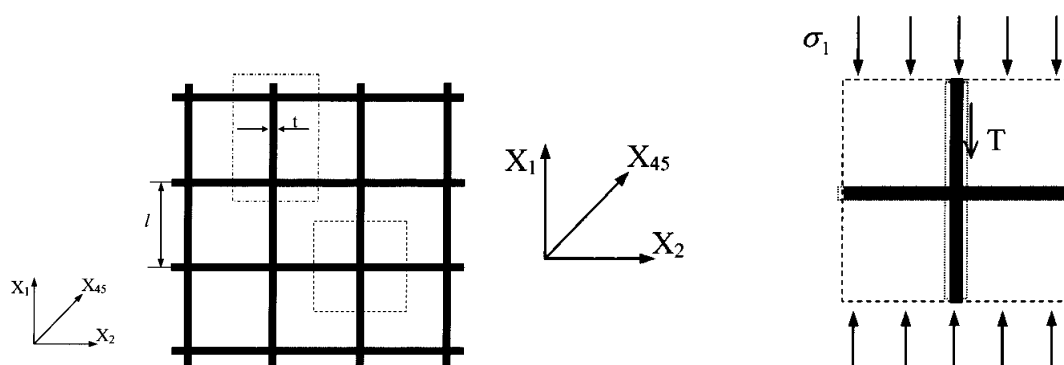
Οι A-J Wang & D.L. McDowell για να παρουσιάσουν τις βασικές μηχανικές ιδιότητες τέτοιων δομών χρησιμοποίησαν τις θεωρίες δοκού και στήλης του Τιμοσένκο που χρησιμοποιούνται για την εξέταση της διάτμησης, της αξονικής τάσης και της περιστροφής, συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης της κάμψης. Κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης στο επίπεδο, μπορεί να υπάρχουν τρεις τύποι εντατικών καταστάσεων στα τοιχώματα των κελιών της κυψελοειδούς δομής: κάμψη, ορθή και διατμητική τάση. Για μονοαξονική φόρτωση, τα τοιχώματα των κελιών ορισμένων άκαμπτων κυψελοειδών υποβάλλονται κυριαρχικά σε αξονική καταπόνηση, δημιουργώντας ένα κυρίαρχο εκτατικό τρόπο παραμόρφωσης. Το τριγωνικό κελί, το μικτό τετράγωνο / τριγωνικό κύτταρο ανήκουν σε αυτήν την περίπτωση, επειδή οι κυψελοειδείς δομές στο επίπεδο είναι άκαμπτες αν αντικατασταθούν από άκαμπτα στοιχεία δικτύωματος με άρθρωση, αντιστέκονται στην κατάρρευση αρχικά με παρατεταμένη παραμόρφωση. Από την άλλη πλευρά, τα τοιχώματα

των κελιών ορισμένων κυψελοειδών συμπεριφέρονται ως μηχανισμοί όταν αντικαθίστανται από άκαμπτα τοιχώματα κελιών που συνδέονται με αρθρώσεις με πείρους (ακίδες), όπως τα συμβατικά εξαγωνικά κελιά ή δομές τετραγωνικών κελιών που φορτίζονται διαγώνια ή σε διάτμηση. Αυτά τα πλαίσια βιώνουν από την αρχή σημαντική καταπόνηση λόγω κάμψης όταν τα τοιχώματα συνδέονται με άκαμπτες αρθρώσεις και είναι πολύ πιο συμβατά και έχουν χαμηλότερη αντοχή κατάρρευσης.

3.4.1. Κυψελοειδής πυρήνας με τετραγωνικό σχήμα κελιών

Λόγω της υψηλής ειδικής αντοχής και δυσκαμψίας σε ορισμένες κατευθύνσεις, σε συνδυασμό με την χαμηλή αντίσταση τριβής στη ροή του ρευστού σε σύγκριση με των κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών, τα μεταλλικά κυψελοειδή με τετραγωνικό σχήμα κελιών προσφέρουν δυνατότητες για πολυλειτουργικά ανταλλακτικά θερμότητας / δομικά στοιχεία. Υπό φορτίο παράλληλο με τις ακμές των κελιών, τα τετραγωνικά τοιχώματα των κελιών παραμορφώνονται με αξονική επέκταση ή συμπίεση, ελλείψει ελαστικού λυγισμού. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχουν ροπές κάμψης στα τοιχώματα των κελιών της περιοδικής δομής. Δεδομένου ότι τα περιοδικά κυψελοειδή με τετραγωνικό σχήμα κελιών είναι ένας μηχανισμός παρά μια άκαμπτη δομή, η κάμψη του τοιχώματος του κελιού μακριά από το άξονα ή η διατμητική φόρτιση μειώνει δραματικά την ελαστική δυσκαμψία.

Θεωρήστε μια απέραντα μακρά, κανονική περιοδική τετράγωνη μεταλλική δομή κυψελοειδούς δομής που φαίνεται στο σχήμα 3.10. Τα μοναδιαία κελιά που παρεμβάλλονται από τις διακεκομμένες γραμμές θα υποβάλλονται σε περιοδική ανάλυση κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 3.10 (α) Ένα άπειρο περιοδικό κυψελοειδές τετραγωνικών κελιών, με άξονες X_1 και X_2 κατά μήκος των κατευθύνσεων των τοιχωμάτων του κελιού (b) Μονάδα κελιού υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση.

3.4.1.1. Γραμμικές ελαστικές ιδιότητες.

Τα μέτρα Young E^*_1 και E^*_2 παράλληλα προς τα τοιχώματα των κελιών για κυψελοειδή με τετραγωνικό σχήμα κελιών (σχ. 3.9), δίδονται από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για τα κυψελοειδή με εξαγωνικό σχήμα κελιών:

$$\frac{E^*_1}{E_s} = \frac{E^*_2}{E_s} = \frac{t}{l} \quad (3.51)$$

Το μέτρο Young στη διαγώνια κατεύθυνση, που θα ονομάσουμε E^*_{45} , μπορεί να ληφθεί από το όριο των εξισώσεων για τα εξαγωνικά κελιά όταν $h = 0$ και $\theta = 45^\circ$

$$\frac{E^*_{45}}{E_s} = 2 \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3.52)$$

Το ενεργό ελαστικό μέτρο διάτμησης δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{G^*_{12}}{E_s} = \frac{1}{l^2} \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3.53)$$

Αυτή η κυβική εξάρτηση από τη σχετική πυκνότητα υποδηλώνει ένα περιοριστικό χαρακτηριστικό των κυψελοειδών με τετραγωνικό σχήμα κελιών υπό συνδυασμένες εντατικές καταστάσεις.

Ο ενεργός λόγος Poisson για εφαρμοζόμενη φόρτιση προς την κατεύθυνση οποιουδήποτε από τα τοιχώματα των κελιών λαμβάνεται από την ανάλυση μιας από τις στοιχειώδεις μονάδες του σχήματος 3.10. Η δύναμη στο κάθετο τοίχωμα του κελιού είναι:

$$T = \sigma_1 b$$

Από την άλλη πλευρά, η αξονική δύναμη στα οριζόντια τοιχώματα των κελιών είναι μηδέν. Ως εκ τούτου, η ανοιγμένη παραμόρφωση του μοναδιαίου κελιού είναι ίση με την ανοιγμένη παραμόρφωση της κάθετης στήλης, δηλ.

$$\varepsilon_1 = \frac{T/bt}{E_s} = \frac{T}{btE_s} \quad (3.54)$$

Αντί να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον αριθμητικά στοιχεία για να απεικονίσουμε ελεύθερα διαγράμματα σώματος μεμονωμένων αντηρίδων τοιχώματος των κελιών, θα επισημάνουμε απλώς τις δυνάμεις που δρουν σε κάθε μέλος, παρακολουθώντας την έννοιά της στην ανάλυση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Η εγκάρσια παραμόρφωση στην κατακόρυφη στήλη δίνεται από το

$$\varepsilon'_2 = -\nu_s \varepsilon_1 \quad (3.55)$$

Η εγκάρσια παραμόρφωση του κελιού μονάδας προκαλείται μόνο από την επέκταση του κάθετου τοιχώματος. Συνεπώς, η οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση του κελιού μονάδας είναι:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_{\leftrightarrow}}{l_{\leftrightarrow}} = \frac{t\varepsilon'_2}{l} = -\frac{t}{l}\nu_s\varepsilon_1 \quad (3.56)$$

όπου $\Delta l_{\leftrightarrow}$ και $l_{\leftrightarrow}$, αντίστοιχα, αντιπροσωπεύουν τη συνολική αύξηση του μήκους και του αρχικού μήκους σε εγκάρσια κατεύθυνση. Ο ενεργός λόγος Poisson ν^*_{12} δίνεται από

$$\nu^*_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \nu_s \frac{t}{l} \quad (3.57)$$

Για φόρτιση στην εγκάρσια κατεύθυνση, έχουμε τον ίδιο ενεργό λόγο Poisson, δηλ. $\nu^*_{12} = \nu^*_{21}$. Οι ενεργές ιδιότητες δεν ικανοποιούν τη σχέση $G^* = E^* / 2(1+\nu^*)$, λόγω της τετραγωνικής συμμετρίας.

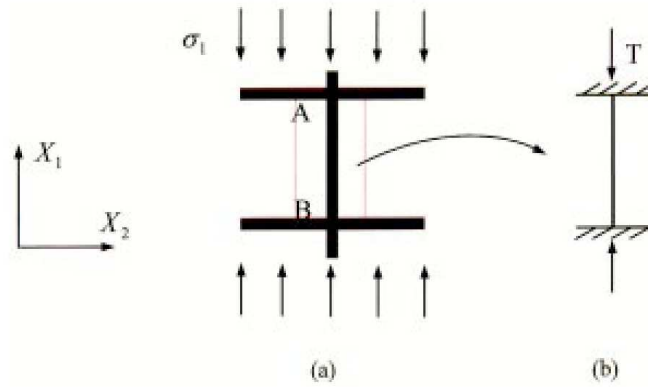
3.4.1.2. Πλαστική συμπεριφορά κελιού

Οι ακόλουθες ενότητες αφορούν την ανάλυση της αρχικής αντοχής διαρροής (κατάρρευσης) κάτω από διαφορετικές συνθήκες μονοαξονικής φόρτισης. Απεριόριστες παραμορφώσεις θεωρούνται, όπως και στις ελαστικές αναλύσεις.

3.4.1.2.1. Αξονική θλίψη

Για τη θλίψη των κυψελοειδών με τετραγωνικό σχήμα κελιών στο επίπεδο, παράλληλα με τα τοιχώματα των κελιών, τα τοιχώματα των κελιών δρουν ως στήλες, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Για μια περιοχή σχετικής πυκνότητας από περίπου 0,10 έως 0,3, τα τοιχώματα συμπεριφέρονται ως βραχείες στήλες με αμελητέα διόρθωση λόγου λεπτότητας προς τη μείωση αντοχής σε θλίψη. Η επίδραση της αξονικής θλίψης στην μετατόπιση του ουδέτερου άξονα επιδεινώνει την αστάθεια. Ως εκ τούτου, το τοίχωμα των κελιών διαρρέει υπό απλή θλίψη λόγω εμφάνισης του πλαστικού λυγισμού. Σε αυτό το κείμενο προσδιορίζουμε την αρχική διαρροή του κυψελοειδή που αντιστοιχεί στην διαρροή του πρώτου τοιχώματος μίας περιοδικής κυψελοειδούς δομής, αναγνωρίζοντας ότι η συνολική τάση ροής στη συνέχεια εξαρτάται από την ακολουθία των συμβάντων διαρροής / κατάρρευσης τοιχώματος του κελιού. Για τα μοναδιαία κελιά που αναλύονται εδώ δεν υπάρχει πλεονάζων ελαστική συμπεριφορά πριν από την διαρροή / κατάρρευση των δευτερευόντων στοιχείων δικτυώματος.

Λόγω της τετραγωνικής συμμετρίας, εξετάζεται μόνο μια κατεύθυνση φόρτισης. Το τοίχωμα του κελιού αντιμετωπίζεται ως στήλη πλάτους b και πάχους t . Υποτίθεται ότι τα άκρα είναι σταθερά μέχρι το σημείο της αρχικής διαρροής.



Σχήμα 3.11 Παραμόρφωση κελιού με αρχική πλαστική κατάρρευση / βραχύ πλαστική κατάρρευση ή ελαστικός λυγισμός. Τα τοιχώματα των κελιών αντιμετωπίζονται ως σταθερές στήλες. c.

Η κατάσταση διαρροής δίνει:

$$\sigma_{ys} = \frac{T}{bt} \quad (3.58)$$

Δεδομένου ότι η τάση στο μοναδιαίο κελί στην αρχική διαρροή δίνεται από $(\sigma_{pl}^*) = T / (bl)$, η αρχική αντοχή διαρροής δίνεται από

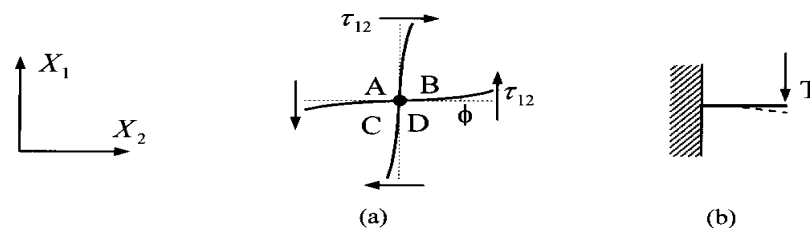
$$\frac{(\sigma_{pl}^*)}{\sigma_{ys}} = \frac{t}{l} \quad (3.59)$$

Όταν το τοίχωμα του κελιού είναι πολύ λεπτό, ο ελαστικός λυγισμός μπορεί να προηγείται της πλαστικής διαρροής και κατάρρευσης των κυτταρικών τοιχωμάτων κάτω από την αξονική θλιπτική φόρτιση είτε στις κατευθύνσεις X_1 είτε X_2 .

Στα πραγματικά κυψελοειδή, οι ατέλειες της γεωμετρίας και του υλικού μειώνουν το αρχικό φορτίο λυγισμού σε σχέση με την ιδανική περίπτωση, προκαλώντας την επιρροή της κάμψης τοιχώματος του κελιού ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση.

3.4.1.2.2. Διατμητική φόρτιση.

Το περιοδικό κυψελοειδές στο Σχ. 3.10 υποβάλλεται σε απλή φόρτιση διατμήσεως στο επίπεδο X_1 - X_2 , όπως απεικονίζεται στην Σχ. 3.12. Αρχικά εξάγουμε το ενεργό ελαστικό μέτρο διάτμησης και στη συνέχεια αναλύουμε την διατμητική αντοχή διαρροής ενός περιοδικού κυψελοειδούς με τετραγωνικό σχήμα κελιών.



Σχήμα 3.12 Παραμόρφωση μοναδιαίων κελιών που οδηγεί σε πλαστική κατάρρευση υπό φορτίο διάτμησης: (α) τρόπος παραμόρφωσης και (β) τοιχώματα των κελιών που λειτουργούν ως δοκοί προβόλου.

Θυμηθείτε ότι το τετραγωνικό κελί δεν είναι μια άκαμπτη δομή και επομένως κυριαρχείται από κάμψη τοιχώματος του κελιού υπό γενικές εντατικές καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένης της διάτμησης. Κάτω από φορτίο διάτμησης, τα άκρα κάθε τοιχώματος του κελιού περιορίζονται έναντι της περιστροφής λόγω της περιοδικότητας της κυτταρικής δομής. Ως αποτέλεσμα, τα τοιχώματα των κελιών υφίστανται κάμψη δοκού ως τον κύριο τρόπο παραμόρφωσης. Η αξονική θλιπτική τάση είναι αμελητέα. Εμφανίζεται ένα στοιχείο περιοδικής μονάδας Σχ. 3.12. Κάθε μισό τοίχωμα του κελιού αντιμετωπίζεται ως αρθρωτός δοκός (πρόβολος).

Η δύναμη διάτμησης σε κάθε τοίχωμα του κελιού είναι:

$$T = \tau_{12}bl \quad (3.60)$$

Για ένα σύστημα ισορροπίας διατμητικών δυνάμεων, η συνολική τάση διάτμησης γ μπορεί να γραφτεί ως:

$$\gamma = 4 \frac{\delta}{l} = \frac{4(l/2)^3}{l \cdot 3E_s I} = \frac{2t_{12}l^3}{E_s t^3}, \text{ όπου } I = 1/12bt^3 \quad (3.61)$$

Ως εκ τούτου, το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο για τον προσανατολισμό X_1 - X_2 που φαίνεται στο σχήμα 3.12 δίδεται από:

$$G_{12}^* = \frac{\tau_{12}}{\gamma} \quad (3.62)$$

και το ενεργό μέτρο διάτμησης στο επίπεδο ως:

$$\frac{G_{12}^*}{E_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3.63)$$

Αυτό το αποτέλεσμα έχει αναφερθεί τόσο από τους Evans et al., Gu et al. όσο και από τον Torquato et al.

Όσον αφορά την αρχική αντοχή διαρροής του κυψελοειδή με τετραγωνικό σχήμα κελιών σε διάτμηση, σχηματίζονται τέσσερις πλαστικές αρθρώσεις A, B, C και D σε ένα μοναδιαίο κελί που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12, καθένα με πλαστική περιστροφή ϕ . Στη συνέχεια, το ανώτερο όριο στην τάση της πλαστικής κατάρρευσης δίνεται εξισώνοντας το έργο που πραγματοποιείται από τις δυνάμεις διάτμησης στο σχήμα 3.12 με το έργο που δίνεται από την κάμψη των πλαστικών αρθρώσεων, δηλ.

$$4M_p\phi = 2\tau_{12}bl^2\phi \quad (3.64)$$

Δεδομένου ότι η M_p είναι η πλήρως πλαστική ροπή του τοιχώματος του κελιού σε κάμψη,

$$M_p = \frac{1}{4}\sigma_{ys}bt^2 \quad (3.65)$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

$$\frac{(\tau_{pl}^*)_{12}}{\sigma_{ys}} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (3.66)$$

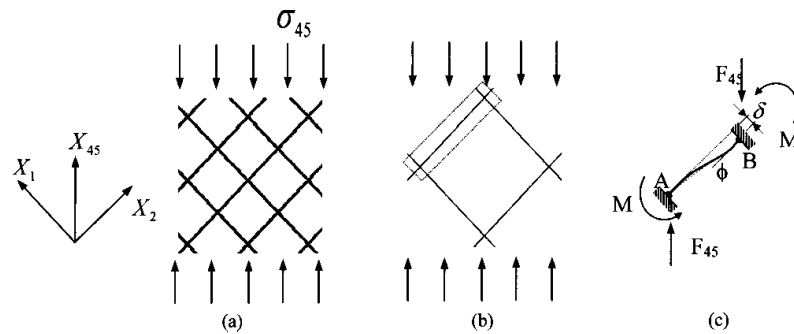
Το κάτω όριο δίνεται εξισώνοντας την μέγιστη ροπή των κυτταρικών τοιχωμάτων της μονάδας με την πλήρως πλαστική ροπή M_p για κάθε τοίχωμα του κελιού, δηλαδή

$$M_{max} = \frac{1}{2} \tau_{12} b l^2 = M_p \quad (3.67)$$

Επειδή τα κατώτερα και ανώτερα όρια είναι ίσα, το αποτέλεσμα είναι ακριβές.

3.4.1.2.3. Θλιπτική φόρτιση υπό 45 μοίρες σε άξονες συμμετρίας τετραγώνου στο επίπεδο.

Δεδομένου ότι το κυψελοειδές με τετραγωνικό σχήμα κελιών έχει τις ίδιες ελαστικές ιδιότητες δυσκαμψίας και αντοχής στις κατευθύνσεις X_1 και X_2 , είναι χρήσιμο να εξεταστεί ένας ενδιάμεσος προσανατολισμός. Εξετάστε την δυσκαμψία και την αντοχή του κυψελοειδή με τετραγωνικό σχήμα κελιών για φόρτιση κατά 45° προς τα τοιχώματα των κελιών. Το σχήμα 3.13 δείχνει τον προσανατολισμό της φόρτισης. Για αυτόν τον προσανατολισμό, η κάμψη του τοιχώματος του κελιού είναι η πρωταρχική λειτουργία παραμόρφωσης στα κυψελοειδή. Ένα κυψελοειδές με τετραγωνικό σχήμα κελιών περιγράφεται στο Σχήμα 3.13 (b). Οι αρθρώσεις στα άκρα του κάθε τοιχώματος του κελιού περιορίζονται έναντι περιστροφής με συμμετρία. Ένα διάγραμμα δύναμης δίνεται στο σχήμα 3.13 (γ).



Σχήμα 3.13 Παραμόρφωση υπό διαγώνια φόρτωση (α) θλίψη κατά μήκος της κατεύθυνσης 45° . (b) ένα μοναδιαίο κελί (c) παραμόρφωση ενός αντιπροσωπευτικού τοιχώματος του κελιού.

Η συνολική κατακόρυφη δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε τμήμα της άρθρωσης είναι:

$$F_{45} = \sqrt{2}/2 \sigma_{45} b l \quad (3.68)$$

Σε ισορροπία, η ροπή κάμψης M είναι:

$$M = 1/2 F_{45} l \cos 45^\circ \quad (3.69)$$

Από την τυπική θεωρία δοκού έχουμε:

$$\delta = \frac{M l^2}{6 E I}, \text{ όπου } I = 1/12 b t^3 \quad (3.70)$$

Υπό θλίψη, η παραμόρφωση ε κάθε τοιχώματος του κελιού σε διεύθυνση 45° μπορεί να γραφτεί ως:

$$\varepsilon = \frac{\delta \cos 45 \deg}{l \cos 45 \deg} = \frac{\sigma_{45} b l^4}{24 E_s I} = \frac{\sigma_{45} l^3}{2 E_s t^3} \quad (3.71)$$

Το ενεργό μέτρο Young's ισούται με:

$$E_{45}^* = \frac{\sigma_{45}}{\varepsilon} \quad (3.72)$$

που μπορεί να ξαναγραφεί σε ομαλοποιημένη μορφή ως:

$$\frac{E_{45}^*}{E_s} = 2 \left(\frac{t}{l} \right)^3 \quad (3.73)$$

Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου, σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις με περιστροφή ϕ στα άκρα κάθε τοιχώματος του κελιού στο Σχήμα 3.13 (c). Το άνω όριο στην τάση της πλαστικής κατάρρευσης δίνεται εξισώνοντας το έργο των δυνάμεων, δηλ.

$$2M_p \phi = F_{45} l \phi \cos 45 \deg \quad (3.74)$$

Εδώ, M_p είναι η πλήρως πλαστική ροπή του τοιχώματος του κελιού σε κάμψη, που υπολογίστηκε ανωτέρω. Η επίδραση της μετατόπισης του ουδέτερου άξονα στην έκφραση M_p λόγω της αξονικής τάσης εντός του τοιχώματος του κελιού δεν λαμβάνεται υπόψη διότι είναι αποτέλεσμα δεύτερης τάξης (μεταβάλλεται η M_p μόνο μερικά ποσοστά για σχετικές πυκνότητες μικρότερες από 0,3) για αυτή την συγκεκριμένη περίπτωση κυψελοειδών τετραγωνικού σχήματος κελιών υπό μονοαξονική φόρτιση στις 45° . Ακολουθεί αυτό:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_{45}}{\sigma_{ys}} = \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad (3.75)$$

Το κατώτερο όριο επιτυγχάνεται εξισώνοντας τη μέγιστη ροπή με την πλήρως πλαστική ροπή M_p ,

$$M_{\max} = F_{45} l / 2 \cos 45 \deg = 1/4 \sigma_{45} b l^2 = M_p \quad (3.76)$$

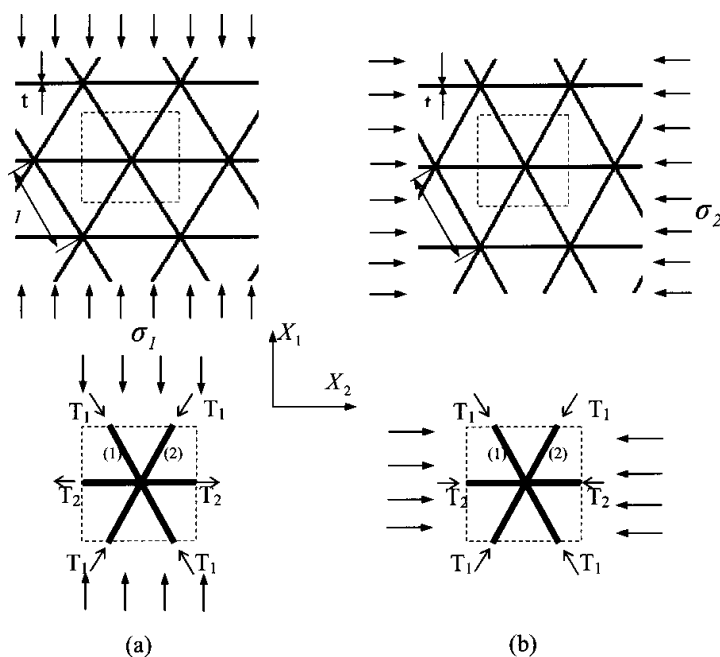
Επειδή τα κατώτερα και ανώτερα όρια είναι ίσα, το αποτέλεσμα είναι ακριβές.

3.4.2. Κυψελοειδής πυρήνας με τριγωνικό σχήμα κελιών

Τα κυψελοειδή με τριγωνικό σχήμα κελιών είναι ισότροπα και είναι, γενικά, τα πιο σκληρά (Gulati, 1975). Τα κυψελοειδή με κανονικά εξαγωνικό σχήμα κελιών με τοίχους σταθερού πάχους είναι επίσης ισοτροπικά, αλλά είναι πολύ λιγότερο δύσκαμπτα.

Μία ματιά στο σχ. 3.14 δείχνει ότι τα τοιχώματα των κελιών εκτείνονται ή συμπίεζονται για οποιαδήποτε κατεύθυνση φόρτισης. Τα κυψελοειδή με τριγωνικό σχήμα κελιών συμπεριφέρονται διαφορετικά υπό φορτίο εντός επιπέδου από ότι τα κυψελοειδή με εξαγωνικό και τετραγωνικό σχήμα κελιών. Σκεφτείτε μια απέραντα μακρά, κανονική

περιοδική κυψελοειδή δομή με εξαγωνικά διατεταγμένα με παράθεση έξι ισόπλευρων τριγωνικών κελιών με κοινή κορυφή. Η παραμόρφωση του τοιχώματος του κελιού αυτού του κυψελοειδή κυριαρχείται από διάτμηση, επειδή είναι μια κινηματικώς σταθερή / καθορισμένη δομή εάν οι αρθρώσεις θεωρούνται ότι έχουν αγκυρωθεί. Επομένως, αρκεί η απλή ανάλυση στήριξης. Επιπλέον, οι αναλύσεις των ελαστικών ιδιοτήτων και της αρχικής διαρροής για αυτό το αρθρωτό πλαίσιο είναι ακριβείς, εξαιτίας του στατικού και κινηματικού προσδιορισμού του. Το σχήμα 3.14 δείχνει περιπτώσεις θλίψης σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις. Τα τοιχώματα των κελιών υποτίθεται ότι είναι ελαστικά - τέλεια πλαστικά και αντιμετωπίζονται ως στήλες / στηρίξεις μήκους l πλάτους b , πάχους t , μέτρου Young E_s και τάσης διαρροής σ_{ys} . Το κυψελοειδές υποβάλλεται σε εφαρμοζόμενη θλιπτική τάση σ_1 ή σ_2 στο επίπεδο. Οι δυνάμεις στο τοίχωμα του κελιού εμφανίζονται ως T_1 και T_2 . Επειδή οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις θλίψεως προκαλούν διαφορετικές δυνάμεις εντός των τοιχωμάτων των κελιών, οι περιπτώσεις (α) και (β) διακρίνονται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 : Κυψελοειδές πυρήνας με τριγωνικό σχήμα κελιών κάτω από δύο περιπτώσεις θλιπτικής φόρτωσης

Είναι εύκολο να προσδιοριστούν οι τιμές των T_1 και T_2 στις δύο περιπτώσεις (βλ. Πίνακα 3.1). Η δύναμη T_1 είναι θλιπτική και η T_2 είναι εφελκυστική στην υπόθεση (α), ενώ η T_2 είναι θλιπτική στην υπόθεση (β).

Πίνακας 3.1 : Οι εσωτερικές δυνάμεις των κυτταρικών τοιχωμάτων για δύο περιπτώσεις φόρτισης

	Περίπτωση (α)	Περίπτωση (β)
T_1	$\frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_1 bl$	0
T_2	$\frac{1}{2\sqrt{3}} \sigma_1 bl$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_2 bl$

3.4.2.1. Γραμμικές ελαστικές ιδιότητες

Η ελαστική συμπεριφορά του περιοδικού κυψελοειδή με τριγωνικό σχήμα κελιών είναι ισότροπη στο επίπεδο X_1 - X_2 και επομένως η ενεργή δυσκαμψία ή μέτρο Young είναι η ίδια για τις περιπτώσεις (α) και (β) δηλ.

$$\frac{E_1^*}{E_s} = \frac{E_2^*}{E_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \quad (3.77)$$

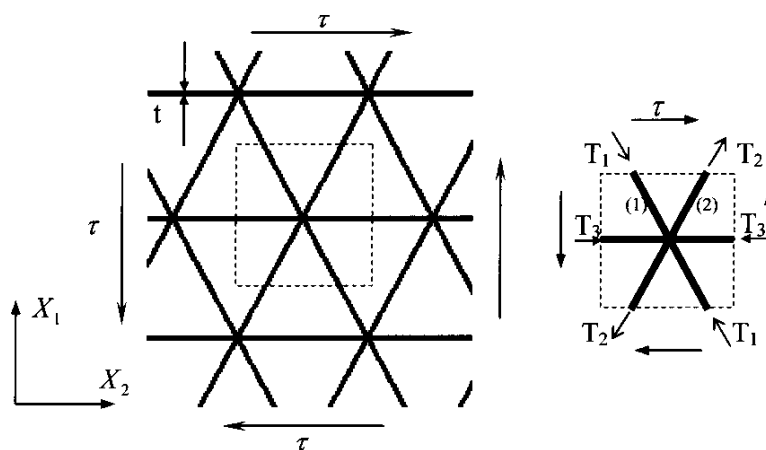
Για να υπολογίσουμε τον ενεργό συντελεστή διατμήσεως, πρέπει να λάβουμε τις δυνάμεις T_1 , T_2 στα τοιχώματα των κελιών υπό φορτίο διατμήσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15. Από τις εξισώσεις ισορροπίας έχουμε:

$$T_1 \cos 60^\circ + T_2 \cos 60^\circ = \tau_{12} bl + T_3 \quad (3.78)$$

$$T_1 \sin 60^\circ + T_2 \sin 60^\circ = \sqrt{3} \tau_{12} bl \quad (3.79)$$

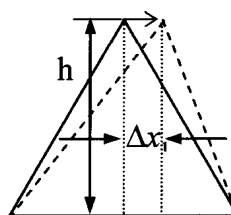
όπου οι εξισώσεις αντιπροσωπεύουν τις ισορροπίες δυνάμεων στις κατευθύνσεις X_1 και X_2 αντίστοιχα του κελιού μονάδας των κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών. Δεδομένου ότι η $T_1 = T_2$ λόγω συμμετρίας, οι αντίστοιχες δυνάμεις είναι:

$$T_1 = T_2 = \tau_{12} bl \text{ και } T_3 = 0 \quad (3.80)$$



Σχήμα 3.15 : Κυψελοειδές με τριγωνικό σχήμα κελιών κάτω από διατμητική φόρτωση

Για λεπτές αντηρίδες, η ανοιγμένη παραμόρφωση της δομής δεν επηρεάζεται σημαντικά από την εγκάρσια σύνδεση των αρθρώσεων και συνεπώς η αξονική επέκταση ή συμπίεση στα τοιχώματα των κελιών είναι ο κύριος τρόπος παραμόρφωσης υπό φορτίο διατμήσεως.



Σχήμα 3.16 : Παραμόρφωση του μοναδιαίου κελιού

Εξετάζουμε τη διατμητική παραμόρφωση ενός αντιπροσωπευτικού ισόπλευρου τριγώνου που φαίνεται στο σχήμα 3.16. Η μεταβολή του μήκους του αριστερού άκρου του τριγώνου είναι Δl , και η οριζόντια μετατόπιση της άνω άρθρωσης είναι Δx . Το εκτεινόμενο τρίγωνο και το πρωτότυπο, μη παραμορφωμένο τρίγωνο σχετίζονται με:

$$h^2 + \left(\frac{1}{2} + \Delta x\right)^2 = (l + \Delta l)^2 \quad (3.81)$$

$$h^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 = l^2 \quad (3.82)$$

Παραβλέποντας όρους δεύτερης τάξης για μικρή επέκταση και συμπίεση, λαμβάνουμε:

$$\Delta x \approx 2\Delta l$$

Υπό φορτίο διατμήσεως, η μεταβολή στο μήκος της πλευράς του τριγώνου λαμβάνεται από την παραμόρφωση, δηλ.

$$\varepsilon_1 = \frac{T_1/bt}{E_s} = \frac{\tau bl}{btE_s} = \frac{\tau l}{tE_s}, \quad \Delta l = \varepsilon l = \frac{\tau l^2}{tE_s} \quad (3.83)$$

έτσι ώστε η μηχανική διατμητική παραμόρφωση δίνεται από:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{h} = \frac{\Delta l}{h} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\tau l}{tE_s} \quad (3.84)$$

Και έχοντας υπόψη ότι $G = \tau/\gamma$ το εντός επιπέδου ενεργό μέτρο διάτμησης του κυψελοειδή τριγωνικού σχήματος κελιών δίνεται από:

$$\frac{G_{12}^*}{E_s} = \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{t}{l} \quad (3.85)$$

Ο λόγος Poisson ν_{12}^* προσδιορίζεται στη συνέχεια. Η παραμόρφωση ενός κελιού μονάδας περιγράφεται στο σχήμα 3.17 για θλίψη στην κατεύθυνση X_1 . Το θλιμμένο ύψος του τριγώνου είναι $h - \Delta h$. Χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο θεώρημα στο Σχήμα 3.17 (b) παίρνουμε:

$$(h - \Delta h)^2 + \left(\frac{l_2 + \Delta l_2}{2}\right)^2 = (l_1 + \Delta l_1)^2$$

Χρησιμοποιώντας το Πυθαγόρειο θεώρημα στο αρχικό τρίγωνο παίρνουμε:

$$h^2 + (l/2)^2 = l^2.$$

Αγνοώντας όρους δεύτερης τάξης για μικρές επεκτάσεις, γράφουμε:

$$\sqrt{3}\Delta h = 1/2\Delta l_2 + 2\Delta l_1$$

όπου Δh , Δl_2 , Δl_1 είναι όλες θετικές ποσότητες για την παραμόρφωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.17 (b). Αυτό οδηγεί σε:

$$\varepsilon_{\uparrow} = \frac{1}{3} \varepsilon_{\leftrightarrow} + \frac{4}{3} \varepsilon_{\cdot} \quad (3.86)$$

όπου $\varepsilon_{\uparrow}$, $\varepsilon_{\leftrightarrow}$, και $\varepsilon_{\cdot}$ είναι, αντίστοιχα, τα απόλυτα μεγέθη των εντατικών παραμορφώσεων μέσα στα κάθετα, οριζόντια και κεκλιμένα τοιχώματα των κελιών. Σε αυτή τη συγκεκριμένη περίπτωση, η εφελκυστική παραμόρφωση του κελιού μονάδας του κυψελοειδή με τριγωνικό σχήμα κελιών στην κατεύθυνση X_2 είναι:

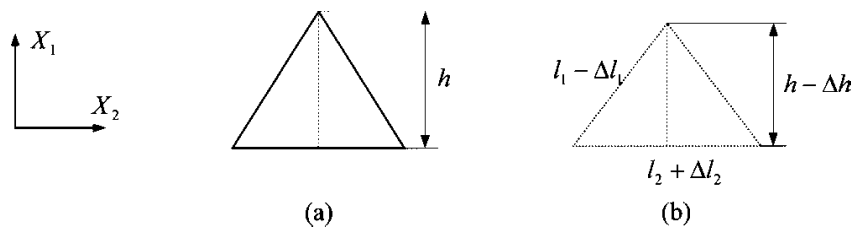
$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{\leftrightarrow} = \frac{T_2}{btE_s} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{\sigma l}{tE_s} \quad (3.87)$$

και ο η θλιπτική παραμόρφωση του κελιού μονάδας στην κατεύθυνση X_1 δίνεται από:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_{\uparrow} = -\left(\frac{1}{3} \varepsilon_{\leftrightarrow} + \frac{4}{3} \varepsilon_{\cdot}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma l}{tE_s} \quad (3.88)$$

Ο λόγος Poisson ν_{12} * μπορεί να ληφθεί ως:

$$\nu_{12}^* = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{1}{3} \quad (3.89)$$



Σχήμα 3.17 : Παραμόρφωση υπό θλίψη στην κατεύθυνση X_1

3.4.2.2. Πλαστική συμπεριφορά κελιού

Οι ακόλουθες ενότητες είναι για την ανάλυση της διαρροής υπό μονοαξονική φόρτιση σε διαφορετικούς προσανατολισμούς. Η αρχική διαρροή εξετάζεται δεδομένου ότι χρησιμεύει ως πρόδρομος στην πλαστική αστάθεια λυγισμού κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών.

3.4.2.2.1. Μονοαξονική θλιπτική φόρτιση

Υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση, τα τοιχώματα των κελιών των κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών διαρρέουν κυρίως υπό αξονική τάση. Η συνεισφορά της ροπής κάμψης στην αρχική διαρροή για την περίπτωση (α) στο σχήμα 3.14 είναι αποτέλεσμα δεύτερης τάξης εκτός εάν τα τοιχώματα των κελιών είναι πολύ λεπτά, δηλ. σχετική πυκνότητα μικρότερη από περίπου 0,05. Για την περίπτωση (β), η αρχική πλαστική κατάρρευση οφείλεται κυρίως στη θλίψη των τοιχωμάτων των κελιών. Για την περίπτωση (α), η αξονική δύναμη στα τοιχώματα των κελιών είναι $T_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_1 b l$, που συνοψίζεται στον Πίνακα 3.1. Το μέγεθος της τάσης που παράγεται από την αξονική δύναμη είναι:

$$\sigma_a = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_1 bl}{bt} = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_1 \frac{l}{t} \quad (3.90)$$

Κατά την αρχική διαρροή:

$$\sigma_a = \sigma_{ys}$$

και ως εκ τούτου η αρχική αντοχή διαρροής δίνεται από:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_1}{\sigma_{ys}} = \sqrt{3} \frac{t}{l} \quad (3.91)$$

Για την περίπτωση (b), η δύναμη στα τοιχώματα των κελιών είναι $T_1 = \sqrt{3}/2 \sigma_2 bl$, που δίνεται στον Πίνακα 3.1. Κατά την αρχική διαρροή:

$$\sigma_{ys} = \frac{\sqrt{3}\sigma_2 bl}{bt} = \sqrt{3}\sigma_2 \frac{l}{t} \quad (3.92)$$

και ως εκ τούτου η αρχική αντοχή διαρροής κάτω από το θλιπτικό φορτίο της περίπτωσης (b) στο σχήμα 3.14 δίνεται από:

$$\frac{(\sigma_{pl}^*)_2}{\sigma_{ys}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} \quad (3.93)$$

Παρατηρείται ότι οι αρχικές αντοχές διαρροής δεν είναι ίδιες στις δύο κατευθύνσεις. Η ελαστική ισοτροπία στο επίπεδο δεν μεταφράζεται σε ισοτροπία στο επίπεδο λόγω πλαστικής κατάρρευσης, σε αντίθεση με την περίπτωση των κυψελοειδών με εξαγωνικό σχήμα κελιών που λυγίζουν μέσω της κάμψης τοιχωμάτων των κελιών.

3.4.2.2. Διατμητική Φόρτιση.

Κάτω από φορτίο διατμήσεως, η αξονική τάση στα τοιχώματα των κελιών εξακολουθεί να είναι ο μηχανισμός της αρχικής διαρροής που χρησιμεύει ως πρόδρομος στην πλαστική κατάρρευση των κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών. Σε αντίθεση με τα κυψελοειδή με εξαγωνικό και τετραγωνικό σχήμα κελιών, η αρχική διαρροή κυριαρχείται από αξονικές τάσεις στα τοιχώματα των κελιών και όχι από τη ροπή κάμψης. Έτσι, τα κυψελοειδή με τριγωνικό σχήμα κελιών είναι ανώτερα στην αντίσταση στη διάτμηση στο επίπεδο σε σύγκριση με αυτές των άλλων κυψελοειδών.

Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα, η αξονική δύναμη στα τοιχώματα των κελιών είναι $T_1 = \tau_{12} bl$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Στο σημείο της αρχικής διαρροής έχουμε,

$$\frac{T_1}{bt} = \frac{\tau_{12} bl}{bt} = \sigma_{ys} \quad (3.94)$$

και ως εκ τούτου, η αρχική αντοχή διαρροής λόγω διάτμηση των κυψελοειδών με τριγωνικό σχήμα κελιών δίνεται από:

$$\frac{(\tau_{pl}^*)_{12}}{\sigma_{ys}} = \frac{t}{l} \quad (3.95)$$

3.5. Μηχανικές ιδιότητες κυψελοειδών πυρήνων με εξαγωνικό σχήμα κελιών διπλού τοιχώματος

Οι εμπορικοί κυψελοειδείς πυρήνες με εξαγωνικό σχήμα κελιών κατασκευάζονται συνήθως με τη συγκόλληση λωρίδων υλικού περιοδικά, έτσι ώστε όταν τραβηχτούν ή εξαπλωθούν (αναπτυχθούν), σχηματίζουν κυψελοειδή με εξαγωνικό σχήμα κελιών. Τα προκύπτοντα κελιά των κυψελοειδών έχουν τέσσερα τοιχώματα μήκους h πάχους t και δύο τοιχώματα μήκους h πάχους $2t$. Η σχετική πυκνότητα των κυψελοειδών δίνεται στη συνέχεια από:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t/l(h/l + 1)}{(h/l + \sin\theta)\cos\theta} \quad (3.96)$$

Επειδή η μονοαξονική παραμόρφωση στο επίπεδο ελέγχεται από τα τοιχώματα πάχους t , τα μέτρα Young E_1 και E_2 , και οι αναλογίες Poisson, ν_{12} και ν_{21} είναι οι ίδιες με εκείνες για ένα κυψελοειδές με τοιχώματα ομοιόμορφου πάχους. Τροποποιώντας την προηγούμενη ανάλυση των ενοτήτων 3.3 βρίσκουμε τα αποτελέσματα και των άλλων ιδιοτήτων

Συγκεντρωτικά παρατίθενται στον πίνακα 3.2. οι ιδιότητες όλων των κυψελοειδών που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 3.2 : Μηχανικές ιδιότητες περιοδικών κυψελοειδών

	Εξαγωνικό κελί Μονό τοίχωμα	Εξαγωνικό κελί Διπλό τοίχωμα	Τετραγωνικό κελί	Τριγωνικό κελί
Ιδιότητες στο επίπεδο				
$\frac{E_1^*}{E_s}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos\theta}{(h/l + \sin\theta)\sin^2\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos\theta}{(h/l + \sin\theta)\sin^2\theta}$	$\frac{t}{l}$	$\frac{2\sqrt{3}t}{3l}$
$\frac{E_2^*}{E_s}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\cos^3\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\cos^3\theta}$	$\frac{t}{l}$	$\frac{2\sqrt{3}t}{3l}$
$\frac{E_{45}^*}{E_s}$	-	-	$2\left(\frac{t}{l}\right)^3$	-
$\frac{G_{12}^*}{E_s}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 (1 + 2h/l)\cos\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin\theta)}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 (1 + 16h/l)\cos\theta}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{t}{l}\right)^3$	$\frac{\sqrt{3}t}{4l}$
$\frac{(\sigma_{pl}^*)_1}{\sigma_{ys}}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin\theta)\sin\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin\theta)\sin\theta}$	$\frac{t}{l}\left(1 - \frac{1}{2}\frac{t}{l}\right)$	$\sqrt{3}\frac{t}{l}$
$\frac{(\sigma_{pl}^*)_2}{\sigma_{ys}}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{\cos^2\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2\cos^2\theta}$		$\frac{2\sqrt{3}t}{3l}$
$\frac{(\sigma_{pl}^*)_{45}}{\sigma_{ys}}$	-	-	$\left(\frac{t}{l}\right)^2$	-
$\frac{(\tau_{pl}^*)_{12}}{\sigma_{ys}}$	$\frac{1}{4}\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{h/l \cos\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{h/l \cos\theta}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{t}{l}\right)^2$	$\frac{t}{l}$
Ιδιότητες εκτός επίπεδου				
$\frac{E_3^*}{E_s}$	$\left\{ \frac{\frac{h}{l} + 2}{2(h/l + \sin\theta)\cos\theta} \right\} \frac{t}{l}$	$\left\{ \frac{\frac{h}{l} + 1}{(h/l + \sin\theta)\cos\theta} \right\} \frac{t}{l}$		
$\frac{G_{13}^*}{G_s}$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{\cos\theta}{h/l + \sin\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{\cos\theta}{h/l + \sin\theta}$		
$\frac{G_{23}^*}{G_s} \leq$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{1}{2} \frac{h/l + 2\sin^2\theta}{(h/l + \sin\theta)\cos\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{h/l + \sin^2\theta}{(h/l + \sin\theta)\cos\theta}$		
$\frac{G_{23}^*}{G_s} \geq$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{h/l + \sin\theta}{(1 + 2h/l)\cos\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right) \frac{h/l + \sin\theta}{(1 + h/l)\cos\theta}$		
$\frac{(\sigma_{pl}^*)_3}{\sigma_{ys}}$	$\frac{h/l + 2}{2\cos\theta(h/l + \sin\theta)} \frac{t}{l}$	$\frac{h/l + 1}{\cos\theta(h/l + \sin\theta)} \frac{t}{l}$		
τ_{13}^*	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 E_s}{(1 - \nu_s^2)(h/l + \sin\theta)}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 E_s}{(1 - \nu_s^2)(h/l + \sin\theta)}$		
τ_{23}^*	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 E_s}{2(1 - \nu_s^2)\cos\theta}$	$\left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 E_s}{2(1 - \nu_s^2)\cos\theta} \frac{(1 + \sin\theta)}{(h/l + \sin\theta)}$		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

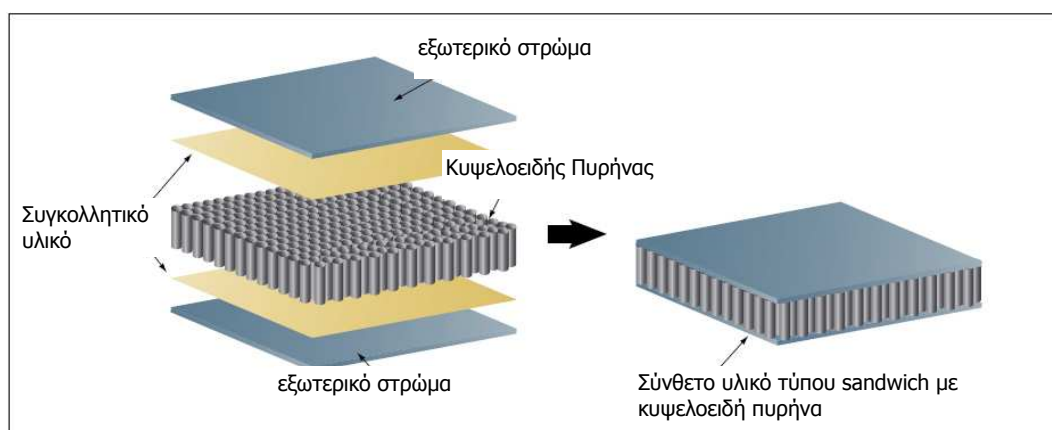
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΑΝΕΛ ΤΥΠΟΥ SANDWICH

4.1. Γενικά

Αυτό το κεφάλαιο ασχολείται με το σχεδιασμό πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα. Εξετάζονται οι έννοιες sandwich, οι βασικοί τύποι και οι τρόποι αστοχίας. Περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των τάσεων κάμψης των εξωτερικών στρωμάτων των πάνελ, η τάσης διάτμησης του πυρήνα και η παραμόρφωση του πάνελ.

4.2. Έννοιες πάνελ τύπου sandwich

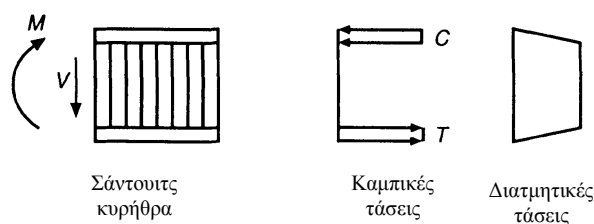
Το sandwich δεν είναι υλικό με μοναδικές μηχανικές ιδιότητες. Αντίθετα, είναι μια δομή που σχεδιάζεται για συγκεκριμένες χρήσεις στις οποίες πρόκειται να υποβληθεί. Η σύνθεση του πάνελ περιορίζεται μόνο από τη διαθεσιμότητα υλικών και την εφευρετικότητα του μηχανικού. Η βασική ιδέα της κατασκευής πάνελ τύπου sandwich είναι η χρήση λεπτών, πυκνών, ισχυρών εξωτερικών στρωμάτων συνδεδεμένων με έναν πυκνό, ελαφρύ πυρήνα (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1. Υλικά σχεδιασμού πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα

Κάθε συστατικό από μόνο του είναι σχετικά αδύναμο και εύκαμπτο, αλλά όταν δουλεύουν από κοινού, παρέχουν μια εξαιρετικά δύσκαμπτη, ισχυρή και ελαφριά δομή. Σε αυτή τη δομή θεωρείται ότι τα εξωτερικά στρώματα λαμβάνουν το φορτίο κάμψης (ένα στρώμα βρίσκεται σε θλίψη και το άλλο σε εφελκυσμό) και ο πυρήνας δέχεται το φορτίο διάτμησης. Συνήθως υποτίθεται ότι οι τάσεις των εξωτερικών στρωμάτων είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες και το κυψελοειδές δεν προσφέρει αντίσταση στην κάμψη. Με άλλα λόγια, το

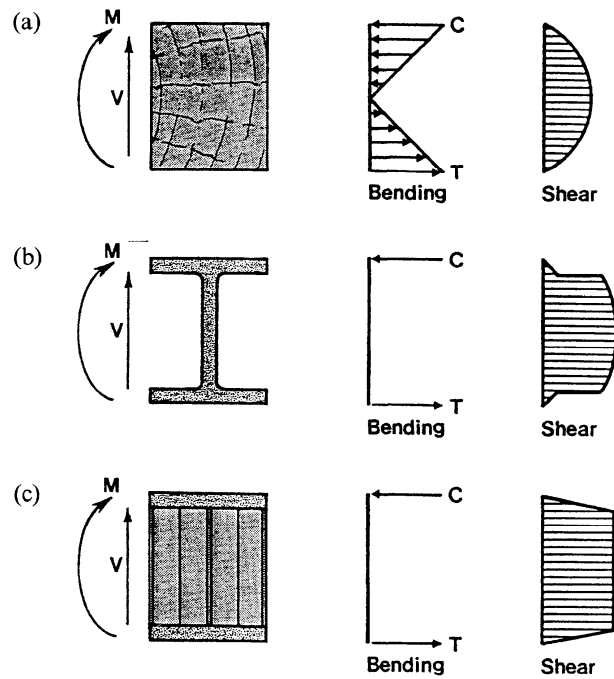
μέτρο κάμψης του πυρήνα E'_c ισούται με μηδέν. Αυτή η υπόθεση οδηγεί επίσης σε ομοιόμορφη τάση διάτμησης σε όλο το πάχος του πυρήνα. Αυτές οι βασικές έννοιες δίδονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Βασικές έννοιες. M = ροπή κάμψης, V = διάτμηση, C = θλιπτική τάση, T = εφελκυστική τάση.

Το σχήμα 4.3 δείχνει πώς εξελίχθηκε το πάνελ τύπου sandwich. Αρχικά οι περισσότερες δομές κατασκευάστηκαν από ξύλινα δοκάρια. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα οι υψηλότερες τάσεις κάμψης βρίσκονται στις εξωτερικές επιφάνειες ενώ στη μέση είναι μηδέν. Κατά συνέπεια, το κεντρικό τμήμα του ξύλινου δοκαριού φέρει πολύ λίγο από το φορτίο κάμψεως. Λαμβάνει κυρίως το φορτίο διάτμησης. Στη συνέχεια ήρθε η υψίκορμος δοκός. Εδώ υπάρχουν δύο πέλματα που χωρίζονται από έναν κατακόρυφο ιστό. Τα πέλματα λαμβάνουν το φορτίο κάμψης, το ένα βρίσκεται σε θλίψη και το άλλο σε εφελκυσμό, με τον ιστό να λαμβάνει όλα τα φορτία διάτμησης. Αυτή η ιδέα λειτουργεί πολύ καλά και χρησιμοποιείται εκτεταμένα στις δομές κτιρίων, καθώς το βάρος συνήθως δεν αποτελεί κρίσιμο ζήτημα. Ωστόσο, στις δομές που το βάρος είναι εξαιρετικά σημαντικό η ιδέα της υψίκορμου δοκού δεν είναι χρήσιμη. Για να μειώσετε το βάρος στις υψίκορμους δοκούς μειώνεται το πάχος των πελμάτων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα τοπικού λυγισμού στα άκρα των πελμάτων. Έτσι ολόκληρο το πέλμα δεν φέρει την πλήρη τάση διαρροής του υλικού. Εδώ είναι όπου η κυψελοειδής δομή τύπου sandwich είναι επωφελής. Ο κυψελοειδής πυρήνας υποστηρίζει πλήρως τα εξωτερικά στρώματα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ λεπτά στρώματα τα οποία δεν θα λυγίσουν. Αυτά τα στρώματα μπορεί να λειτουργήσουν σε πλήρη τάση διαρροής του υλικού.

Εάν τα φορτία σχεδιασμού είναι μεγάλα και απαιτούν παχιά εξωτερικά στρώματα, ο λυγισμός δεν θα είναι πρόβλημα και η ιδέα της υψίκορμου δοκού μπορεί να είναι η πιο οικονομική και η καλύτερη προσέγγιση. Ωστόσο, κάθε φορά που συμβαίνει τοπικός λυγισμός πέλματος, η ιδέα τύπου sandwich είναι η καλύτερη.



Σχήμα 4.3 Δομική ιστορία, α) ξύλινο μπλοκ, (β) δοκού ευρείας φλάντζας (υψίκορμος δοκός), (γ) κατασκευή δομής τύπου sandwich.

4.3. Δομικός σχεδιασμός πάνελ τύπου sandwich

Ως εισαγωγή στην δομική συμπεριφορά των πάνελ τύπου sandwich, θεωρήστε την απλά υποστηριζόμενη δοκό sandwich με επίπεδες επιφάνειες που φαίνονται στο Σχ. 4.4 (α). Έστω ότι η δοκός υπόκειται σε ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο.

Τα διαγράμματα των διατμητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών που προκύπτουν από αυτό το φορτίο παρουσιάζονται στα σχήματα 3.4 (β) και (γ) αντίστοιχα. Για τους σκοπούς αυτής της συζήτησης, αρκεί να υποθέσουμε ότι όλη η δύναμη διατμήσεως αντισταθμίζεται από μία ομοιόμορφη διατμητική τάση στον πυρήνα και ότι η ροπή κάμψεως αντιστέκεται από αξονικές τάσεις στα φύλλα των όψεων όπως φαίνεται στο σχ. 4.4 (α). Έτσι, η συμπεριφορά μοιάζει με αυτή μιας υψίκορμης δοκού στην οποία οι εξωτερικές επιφάνειες αντιστοιχούν στα πέλματα και ο πυρήνας συμπεριφέρεται ως ιστός. Ο συγκολλητικός δεσμός μεταξύ των επιφανειών και του πυρήνα θα φέρει μία τάση διατμήσεως ίση με την τάση διατμήσεως του πυρήνα.

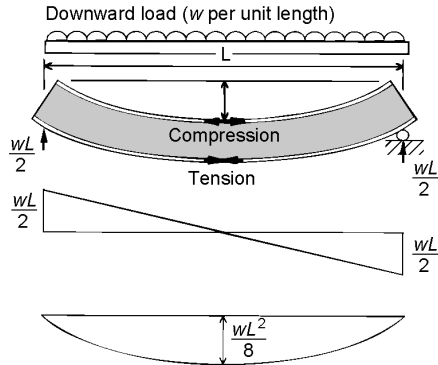
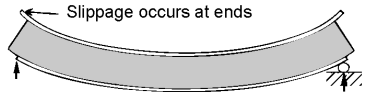
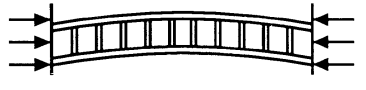
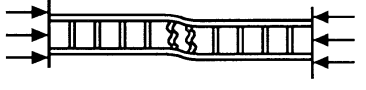
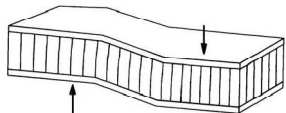
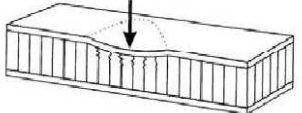
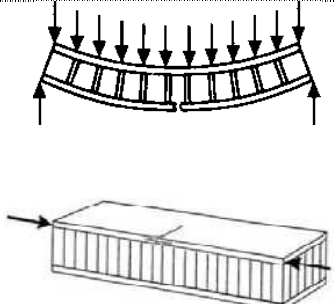
Μια βασική λειτουργία του υλικού του πυρήνα και του συγκολλητικού του δεσμού είναι να αποτρέψει την ολίσθηση της άνω επιφάνειας (άνω φύλλο όψεως) σε σχέση με την κάτω επιφάνεια. Το σχήμα 4.4 (I) δείχνει, σε μια υπερβολική μορφή, την ολίσθηση (Bond Failure) που προκαλείται από τη χρήση μιας κόλλας με πολύ χαμηλή αντοχή διατμήσεως, ενώ το σχήμα 4.4 (II) απεικονίζει τις συνέπειες της χρήσης ενός υλικού πυρήνα με ανεπαρκή

αντοχή στη διάτμηση ή στην δυσκαμψία λόγο γενικού λυγισμού (General buckling). Η πρόληψη αυτής της ανεπιθύμητης συμπεριφοράς απαιτεί έναν πυρήνα με επαρκώς υψηλό μέτρο διάτμησης καθώς και επαρκή αντοχή διατμήσεως (shear strength).

Δομές τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα που φορτίζονται σε κάμψη μπορεί να εμφανίσουν αστοχία λόγω της αστοχίας του πυρήνα τους. Τέτοιοι τρόποι αστοχίας είναι η καμπτική σύνθλιψη του πυρήνα (flexural crushing of core), το τσάκισμα λόγω διάτμησης (buckling - shear crimping), η εγκάρσια διατμητική αστοχία (core shear) ή η αστοχία τοπικής εγκοπής (Local crushing of core) λόγω της τοπικής θλίψης όπως φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα 4.4 (III, IV, V, VI).

Καθώς η ανώτερη εξωτερική επιφάνεια του πίνακα είναι σε θλίψη, μια άλλη σημαντική λειτουργία του υλικού του πυρήνα και του συγκολλητικού του δεσμού είναι να συγκρατήσει την άνω επιφάνεια έτσι ώστε να μην υποστεί τοπικό λυγισμό υπό θλίψη, ένα φαινόμενο που γενικά ονομάζεται επιφανειακή ρυτίδωση. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζεται στα σχήματα 4.4 (VIII, IX). Η τάση στην οποία λαμβάνει χώρα η βλάβη της ρυτίδωσης - παραμόρφωσης εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες δυσκαμψίας του πυρήνα και αυτός είναι ένας άλλος λόγος για τον οποίο οι μηχανικές ιδιότητες του πυρήνα παίζουν κρίσιμο ρόλο στο δομικό σχεδιασμό. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε τα κύρια χαρακτηριστικά στα οποία η αστοχία εγκοπής διαφέρει από την αστοχία ρυτίδωσης των εξωτερικών επιφανειών. Στην αστοχία εγκοπής το εξωτερικό φύλλο παραμορφώνεται μετά την αστοχία με μήκος κύματος της ίδιας κλίμακας με το μήκος επαφής του στοιχείου που προκαλεί την εγκοπή και του εξωτερικού στρώματος. Ενώ στην αστοχία ρυτίδωσης η παραμόρφωση του εξωτερικού στρώματος μετά την αστοχία εμφανίζει μήκος κύματος που είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μήκος επαφής.

Ο τελικός τρόπος αστοχίας, ο οποίος φαίνεται στο Σχ. 3.4 (VII) και ονομάζεται επιφανειακή πλαστική παραμόρφωση. Η αστοχία προκαλείται στο ανώτερο εξωτερικό στρώμα εξ αιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης στην εξωτερική επιφάνεια όταν η τάση σε οποιοδήποτε από τα δύο εξωτερικά στρώματα φτάσει την αντοχή στο επίπεδο σ_{fy} του υλικού των εξωτερικών στρωμάτων για φορτίσεις κατά μήκος του άξονα της δοκού, όπου $\sigma_{fy} = \sigma_{fx}$. Η υποπερίπτωση της διαρροής λόγω εφελκυσμού (tensile yielding) του κάτω στρώματος που φαίνεται στο πρώτο σχήμα της περίπτωσης του Σχ. 4.4 (VII) είναι γενικά η λιγότερη πιθανή από τους εναλλακτικούς τρόπους που φαίνονται στο Σχ. 4.4. Για τον σχεδιασμό ενός πάνελ τύπου sandwich, είναι απαραίτητο να εξεταστούν όλες αυτές οι πιθανές λειτουργίες αστοχίας.

α) Απλά υποστηριζόμενο πάνελ τύπου sandwich β) Διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων γ) Διάγραμμα ροπών κάμψεων	
I. Ολίσθηση άκρων (Bond Failure) Η κόλλα χαμηλής αντοχής επιτρέπει την ολίσθηση των εξωτερικών στρωμάτων μεταξύ τους	
II. Γενικός λυγισμός (General buckling) Προκαλείται από το ανεπαρκές πάχος του πάνελ ή την ανεπαρκή διατμητική ακαμψία του πυρήνα	
III. Καμπτική σύνθλιψη του πυρήνα (Flexural crushing of core) Προκαλείται λόγω ανεπαρκούς θλιπτικής αντοχής του πυρήνα ή υπερβολικής κάμψης της δοκού	
IV. Τσάκισμα λόγω διάτμησης (buckling - Shear crimping) Μερικές φορές συμβαίνει μετά, και ως συνέπεια, γενικού λυγισμού. Προκαλείται από το χαμηλό συντελεστή διάτμησης του πυρήνα ή τη χαμηλή δύναμη διάτμησης του συγκολλητικού υλικού	
V. Εγκάρσια διατμητική αστοχία (Core shear) Προκαλείται λόγω ανεπαρκούς αντοχής του πυρήνα σε διάτμηση ή ανεπαρκούς πάχους πάνελ	
VI. Τοπική σύνθλιψη του πυρήνα (Local crushing of core) Προκαλείται από χαμηλή αντοχή του πυρήνα σε θλίψη	
VII. Επιφανειακή πλαστική παραμόρφωση (Face yielding / fracture) Μπορεί να παρουσιαστεί αστοχία στα εξωτερικά στρώματα λόγω θλίψης ή εφελκυσμού. Προκαλείται λόγω ανεπαρκούς πάχους πάνελ, πάχους ή αντοχής φύλλων όψεων	

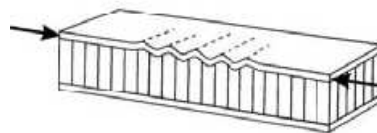
VIII. Επιφανειακή Ρυτίδωση (buckling -Face wrinkling)

Κάμψη εξωτερικού στρώματος ως πλάκα σε ελαστική βάση. Μπορεί να λυγίσει προς τα μέσα ή προς τα έξω, ανάλογα με τις σχετικές αντοχές του πυρήνα, στη θλίψη και του συγκολλητικού σε επίπεδη τάση (flatwise tension)



IX. Ενδοκυτταρική παραμόρφωση λόγω λυγισμού (buckling -Intracell dimpling)

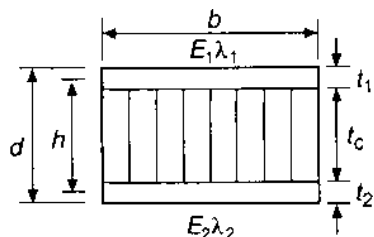
Εφαρμόζεται μόνο στους δισδιάστατους κυψελοειδείς πυρήνες. Εμφανίζεται σε πολύ λεπτές επιφάνειες και μεγάλα κελιά πυρήνα. Αυτή η επίδραση μπορεί να προκαλέσει βλάβη με διάδοση σε παρακείμενα



Σχήμα 4.4 Δομική συμπεριφορά ενός απλά υποστηριζόμενου πάνελ τύπου sandwich

4.4. Βασικοί μέθοδοι υπολογισμού τάσεων - παραμορφώσεων

Σε πρώτη φάση θα δοθεί η ονοματολογία που θα χρησιμοποιηθεί σ' αυτό το κεφάλαιο.



b = Πλάτος πάνελ τύπου sandwich

d = Πάχος πάνελ τύπου sandwich

E = Μέτρο ελαστικότητας εξωτερικών στρωμάτων

E_c = Μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο κάμψης πυρήνα, ισούται με μηδέν

h = Απόσταση από το κέντρο των δύο φύλλων

t = Πάχος εξωτερικών στρωμάτων

$\lambda = 1 - \nu_x \nu_y$, όπου ν ο λόγος Poisson, οι δείκτες x και y υποδεικνύουν την κατεύθυνση

τ_c = διατμητική τάση πυρήνα

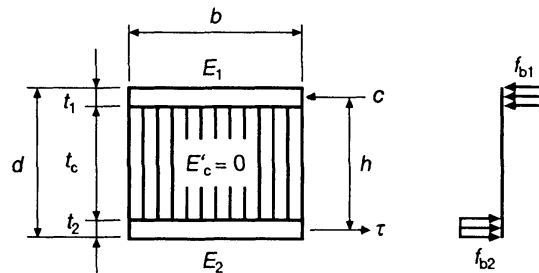
σ_f = τάση κάμψης εξωτερικών στρωμάτων

Ο δείκτης c υποδηλώνει τον πυρήνα, ενώ οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν τα επάνω και κάτω εξωτερικά στρώματα. Αν και τα εξωτερικά στρώματα είναι ίδια, τότε $t_1 = t_2 = t_f$, $E_1 = E_2 = E_f$ and $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_f$.

Εν συνεχεία θα εξετάσουμε τις μεθόδους που υπολογίζουμε τις τάσεις και τις παραμορφώσεις μίας δομής τύπου sandwich.

4.4.1. Προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού τάσεων δοκού

Οι τάσεις των εξωτερικών επενδύσεων (φύλλα όψεων) προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας το διάγραμμα που φαίνεται στο σχήμα 4.5. Οι επενδύσεις λαμβάνουν όλο το φορτίο κάμψης με την μία να βρίσκεται υπό θλίψη και την άλλη σε εφελκυσμό που ενεργεί σε απόσταση h μεταξύ τους (απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των επενδύσεων). Αυτή η δύναμη υποτίθεται ότι προκαλεί ομοιόμορφα κατανομημένη τάση σε όλο το πάχος της επένδυσης. Στις περισσότερες κανονικές καταστάσεις, η προσεγγιστική λύση είναι επαρκής.



Σχήμα 4.5. Τάσεις κάμψης πάνελ τύπου sandwich με την προσεγγιστική μέθοδο.

Γενικά γνωρίζουμε ότι η ορθή τάση σε δοκό υπό μονοαξονική καταπόνηση ισούται με την αξονική δύναμη προς το εμβαδό της διατομής της δοκού. Η καμπτική ροπή ισούται με τον γινόμενο της δύναμης επί τον μοχλοβραχίονα των εσωτερικών δυνάμεων. Έτσι έχουμε:

$$\text{Θλιπτική τάση πάνω στρώματος } f_{b1} = \sigma_{b1} = \frac{C}{t_1 b}, \text{ όπου } M = Ch \rightarrow C = \frac{M}{h},$$

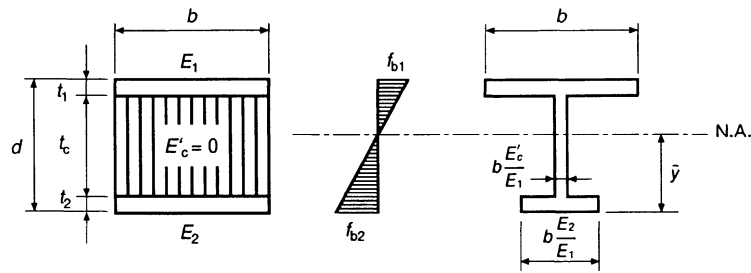
$$\text{άρα } f_{b1} = \frac{M}{t_1 h b} \quad (4.1)$$

$$\text{Εφελκιστική τάση κάτω στρώματος } f_{b2} = \sigma_{b2} = \frac{T}{t_2 b}, \text{ όπου } M = Th \rightarrow T = \frac{M}{h},$$

$$\text{άρα } f_{b2} = \frac{M}{t_2 h b} \quad (4.2)$$

4.4.2. Ακριβής μέθοδος υπολογισμού τάσεων δοκού

Για τις περιπτώσεις με λεπτό πάνελ και επιφάνειες που έχουν πολύ διαφορετικά πάχη, η καλύτερη προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι E'_c ισούται με μηδέν και να χρησιμοποιήσουμε την ακριβή μέθοδο. Η ακριβής μέθοδος απεικονίζεται στο σχήμα 4.6. Εδώ λαμβάνεται υπόψη η δυσκαμψία λόγω κάμψης του πυρήνα και παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης συναρτήσει του πάχους. Ακόμη και αν η καμπτική δυσκαμψία του πυρήνα E'_c ληφθεί ίση με μηδέν, αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τον ουδέτερο άξονα της δοκού και την αντίστοιχη κατανομή τάσεων στις επενδύσεις.



Σχήμα 4.6. Τάσεις κάμψης πάνελ τύπου sandwich με την ακριβή μέθοδο

Σε κάποια προβλήματα μηχανικής δημιουργείται η ανάγκη να υπολογίσουμε τη ροπή που δημιουργείται από ένα τριγωνικό καταναμεμένο φορτίο. Το σημαντικότερο παράδειγμα είναι το πρόβλημα της κάμψης, όπως εξηγείται στο παραπάνω σχήμα. Αποδεικνύεται ότι για να βρούμε τη σχέση ανάμεσα στη ροπή κάμψης M και το τριγωνικό φορτίο f_b πρέπει ενδιάμεσα να υπολογίσουμε μία παράσταση που λέγεται γεωμετρική ροπή αδράνειας. Πιο συγκεκριμένα: αν στη δοκό ασκείται μία ροπή M που τείνει να το περιστρέψει γύρω από τον άξονα x , πρέπει για την κάθετη τομή του δοκαριού να υπολογισθεί η παράσταση $I_z = \sum A_i y_i^2$ που είναι η γεωμετρική ροπή αδράνειας της κάθετης τομής γύρω από τον άξονα x (συγγενική προς τη μαζική ροπή αδράνειας που θα εμφανίζε μία λεπτή ομογενής πλάκα με το ίδιο σχήμα αν περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα x). Η τιμή της ροπής αδράνειας εξαρτάται από τη θέση του κέντρου περιστροφής ή του άξονα περιστροφής που έχουμε διαλέξει για το σώμα.

Πρέπει να υπολογίζουμε την ροπή αδράνειας ως προς άξονα που περνούν από το κέντρο βάρους της κάθετης τομής του δοκαριού. Αν η κάθετη τομή έχει κάποιον άξονα συμμετρίας, πρέπει να υπολογισθεί η ροπή αδράνειας γύρω από αυτόν τον άξονα συμμετρίας και γύρω από τον κάθετό του κεντροβαρικό άξονα. Για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας απλών σχημάτων υπάρχουν στην βιβλιογραφία έτοιμοι τύποι, ενώ για σύνθετα σχήματα και με την βοήθεια ολοκληρωμάτων υπολογίζονται με το “θεώρημα του Steiner”. Για την δική μας περίπτωση (Ορθογώνιο παραλληλόγραμο) έχουμε $I_z = bh^3/12$.

Αν τα κέντρα βάρους των μερών της διατομής βρίσκονται σε διαφορετικό ύψος, και με διαφορές ύψους y_1 , y_c , y_2 αντίστοιχα από το γενικό κέντρο βάρους, τότε η ροπή αδράνειας του συνόλου ισούται με $I_{z,ολ} = I_1 + y_1^2 A_1 + I_c + y_c^2 A_c + I_2 + y_2^2 A_2$ όπου I_1 , I_c , I_2 οι ροπές αδράνειας των μερών ως προς άξονες που περνούν από τα δικά τους κέντρα βάρους και A_1 , A_c , A_2 τα εμβαδά των μερών. Αυτό είναι το λεγόμενο θεώρημα του Steiner.

Βάσει του νόμου του Hooke, και της υπόθεση του Bernoulli, η οποία είναι απόλυτα ορθή για ελαστικές δοκούς ορθογωνικής διατομής σε καθαρή κάμψη και κατά πολύ καλή προσέγγιση ορθή για δοκούς με άλλες διατομές ή όταν δρα και τέμνουσα δύναμη ή ακόμα

και όταν το υλικό της δοκού έχει ξεπεράσει την ελαστική περιοχή, αρκεί το ύψος της δοκού να είναι “μικρό” σε σχέση με το μήκος (π.χ. για λόγους μήκους προς ύψος της τάξης του 8-10 και πάνω) η ορθή παραμόρφωση ϵ_x έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ορθής τάσης σ_x όπου $\sigma_x = E^* \epsilon_x = E^* y/R$, όπου E = μέτρο ελαστικότητας του υλικού, y απόσταση από την ουδέτερη γραμμή, R = ακτίνα καμπυλότητας. Ακολουθώντας χρησιμοποιώντας τις συνθήκες ισορροπίας, δηλαδή ότι το άθροισμα όλων των ορθών τάσεων ισούται με την αξονική δύναμη, δηλαδή μηδέν, ενώ το άθροισμα των ροπών που δίνουν όλες οι ορθές τάσεις ισούται με τη ροπή κάμψης έχουμε

$$\sigma_x = Mz^*/I \quad (4.3)$$

Έτσι για την περίπτωση του πάνελ τύπου sandwich όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.6 οι θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις των εξωτερικών στρωμάτων δίνονται από τις σχέσεις

$$f_{b1} = \frac{M(d-\bar{y})}{I} \text{ και } f_{b2} = \frac{M(\bar{y})}{I} \times \frac{E_2}{E_1} \quad (4.4)$$

όπου,

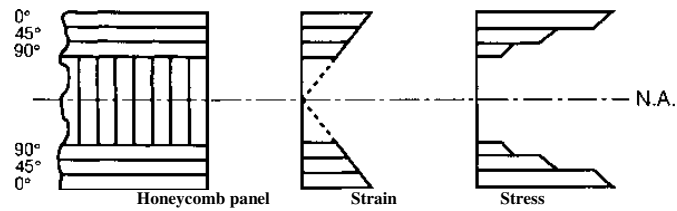
$$\bar{y} = \frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{bt_1 \left[d - \frac{t_1}{2} \right] + \left(b \frac{E_1'}{E_1} \right) t_c \left[t_2 + \frac{d-t_1-t_2}{2} \right] + \left(b \frac{E_2}{E_1} \right) t_2 \left[\frac{t_2}{2} \right]}{bt_1 + \left(b \frac{E_1'}{E_1} \right) t_c + \left(b \frac{E_2}{E_1} \right) t_2} \quad (4.5)$$

και

$$I = \sum (I_0 + Ad^2) = \frac{bt_1^3}{12} + b t_1 \left[d - \frac{t_1}{2} - \bar{y} \right]^2 + \frac{\left(b \frac{E_1'}{E_1} \right) t_c^3}{12} + \left(b \frac{E_1'}{E_1} \right) t_c \left[\left(t_2 + \frac{d-t_1-t_2}{2} - \bar{y} \right) \right]^2 + \frac{\left(b \frac{E_2}{E_1} \right) t_2^3}{12} + \left(b \frac{E_2}{E_1} \right) t_2 \left[\bar{y} - \frac{t_2}{2} \right]^2 \quad (4.6)$$

Τα μέρη που περιέχουν τον όρο E_1' μπορούν να παραλυφθούν μιας και το E_1' θεωρούμε ότι ισούται με το μηδέν.

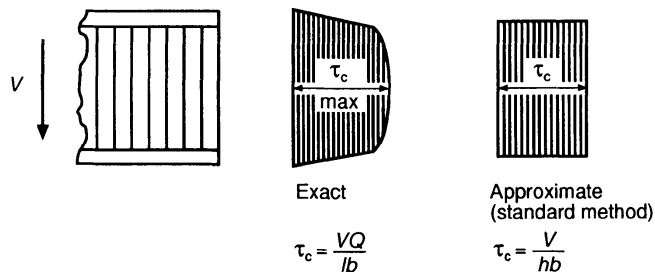
Για τον υπολογισμό των τάσεων θεωρήσαμε ότι τα φύλλα των όψεων αποτελούνται από λεπτές ισότροπες και συμπαγείς επιφάνειες. Οι σύνθετες επιφάνειες αποτελούμενες από ίνες άνθρακα, fiderglass ή Kevlar μπορούν να παρουσιάσουν διαφορετικά προβλήματα. Συνήθως τα εξωτερικά στρώματα αποτελούνται από ίνες ή λωρίδες που έχουν τοποθετηθεί σε διαφορετικές γωνίες. Εδώ κάθε πτυχή έχει ένα διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τον άξονα της δοκού, επομένως η κατανομή τάσεων στα στρώματα μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Σύνθετες τάσεις. N.A. = ουδέτερος άξονας.

Η κατανομή τάσεων σε τέτοια σύνθετα υλικά δεν είναι ομοιόμορφη, όπως υποτίθεται. Κατά συνέπεια, οι τάσεις για κάθε στρώση πρέπει να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την κλασική θεωρία των πολυστρωματικών υλικών. Υπάρχουν επίσης διαθέσιμα προγράμματα λογισμικού για αυτούς τους υπολογισμούς. Για σύνθετες επιφάνειες που έχουν όλες τις στρώσεις προσανατολισμένες στην ίδια κατεύθυνση ή επιφάνειες αποτελούμενες από λωρίδες με κατεύθυνση στημόνι, τα προηγούμενως εξηγούμενα πρότυπα ή ακριβείς λύσεις δίνουν καλά αποτελέσματα.

Ο γενικός τύπος τάσης διάτμησης είναι $\tau = F / A$, όπου F η παράλληλη συνιστώσα της δύναμης εφαρμογής και A η επιφάνεια εφαρμογής. Οι κατά προσέγγιση τιμές των τάσεων διάτμησης κυψελοειδών προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας την παραδοχή σταθερής διατμητικής τάσης στον πυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Διατμητικές τάσεις πυρήνα.

Η σχέση αυτή $\tau_c = \frac{VQ}{Ib}$ παρέχει τις διατμητικές τάσεις στη διατομή μιας δοκού σε μία απόσταση y από τον άξονα z . Στη σχέση αυτή η ποσότητα Q είναι η στατική ροπή αδράνειας της επιφάνειας A' της διατομής, που βρίσκεται κάτω από το y . Η στατική ροπή αδράνειας για απλοποιημένες διατομές υπολογίζεται από τη σχέση $Q = A' \bar{y}$ όπου $\bar{y}$ είναι η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα του κέντρου βάρους της επιφάνειας A' .

Η σύνδεση των δύο σχέσεων υπολογισμού διατμητικής τάσης αναλύεται παρακάτω.

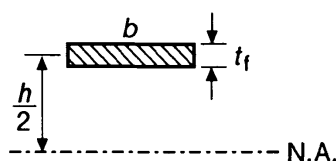
Αρχικά χρησιμοποιώ παραδοχές: $E'_c = 0$, και $\frac{bt_f^3}{12} = 0$ (ο όρος αυτός παραλείπεται).

Έτσι χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις για ίσα εξωτερικά στρώματα προκύπτει:

$$Q = A'\bar{y} = (bt_f) \left(\frac{h}{2}\right), \quad I = 2(bt_f) \left(\frac{h}{2}\right)^2$$

Συνεπώς:

$$\tau_c = \frac{V(bt_f) \left(\frac{h}{2}\right)}{2(bt_f) \left(\frac{h}{2}\right)^2 b} = \frac{V}{hb} \quad (4.7)$$

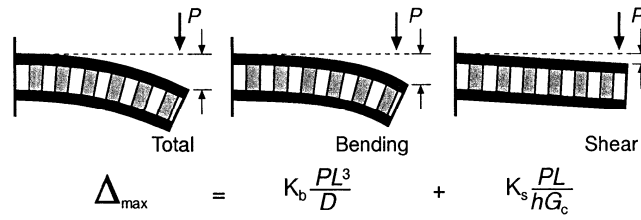


4.4.3. Μέθοδος υπολογισμού παραμορφώσεων δοκού

Στα πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα εκτός του υπολογισμού των τάσεων σύμφωνα με τον Bitcer (1997) έχουμε τρία στοιχεία που πρέπει ακόμη να ελεγχθούν. Αυτά είναι οι διατμητικές παραμορφώσεις, η ρυτίδωση και η ενδοκυτταρική παραμόρφωση.

Οι παραμορφώσεις διάτμησης, προκαλούνται από το σχετικά χαμηλό συντελεστή διάτμησης του κυψελοειδή. Οι δοκοί χάλυβα (εξωτερικά στρώματα πάνελ) έχουν επίσης παραμορφώσεις διατμήσεως, αλλά επειδή ο συντελεστής διάτμησης χάλυβα είναι περίπου 89.600 MPa, η παραμόρφωση της διάτμησης της δοκού είναι τόσο μικρή που παραμελείται. Ο κυψελοειδής πυρήνας έχει συντελεστή διάτμησης στην κλίμακα 69-690 MPa. Αυτή είναι πολύ χαμηλότερη από ό,τι του χάλυβα και ως εκ τούτου μπορεί να έχει επίδραση επί της συνολικής παραμόρφωσης (απόκλιση ή βύθιση) του πάνελ. Στις περισσότερες συνήθειες καταστάσεις (λεπτά πάνελ με σχετικά μεγάλα ανοίγματα) η απόκλιση λόγω διάτμησης που οφείλεται στον κυψελωειδή πυρήνα είναι συνήθως κάτω από το 2% της ολικής απόκλισης. Η μόνη φορά που γίνεται σημαντική είναι όταν ένα παχύ πάνελ σε σύντομο χρονικό διάστημα έχει πολύ κρίσιμο όριο απόκλισης (deflection).

Στα πάνελ τύπου sandwich η ολική απόκλιση αποτελείται από την απόκλιση λόγω κάμψης και την απόκλιση λόγω διάτμησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Οι τιμές για K_b και K_s για διάφορες δοκούς δίνονται στο Παράρτημα 2.



Σχήμα 4.9 Απόκλιση πάνελ τύπου sandwich . Η απόκλιση λόγω κάμψης εξαρτάται από την δυσκαμψία του πάνελ ($D = EI / \lambda$), ενώ η απόκλιση λόγω διάτμησης εξαρτάται από το συντελεστή διάτμησης του πυρήνα (G_c). P = φορτίο, L = διάστημα.

Η δυσκαμψία σε κάμψη και η διατμητική ακαμψία του πάνελ χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνολικής απόκλιση του πάνελ. Για τον υπολογισμό της τυπικής δυσκαμψίας κάμψης, D , και της διατμητικής ακαμψίας, U , υποθέτουμε ότι η ροπή αδράνειας των επιφανειών I_0 και το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα, E'_c , είναι ίσες με το μηδέν. Στην πραγματικότητα η ροπή αδράνειας των εξωτερικών στρωμάτων του πάνελ δίνεται από την $I_0 = \frac{bt_f^3}{12}$. Για λεπτά εξωτερικά στρώματα το t_f έχει μια πολύ μικρή τιμή και έτσι μηδενίζοντάς το δεν εισάγεται κάποιο σημαντικό σφάλμα.

Υπολογισμός δυσκαμψία σε κάμψη

Προσεγγιστική μέθοδος

Παραδοχές: $I = I_0 + Ad^2$ (το I_0 παραλείπεται), $E'_c = 0$ και $b = 1$

$$D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2}{E_1 t_1 \lambda_1 + E_2 t_2 \lambda_2} \quad (4.8)$$

Για πάνελ τύπου sandwich με επιφάνειες ίδιου υλικού και πάχους έχουμε:

$$D = \frac{E_t t_f h^2}{2\lambda_f} \quad (4.9)$$

Ακριβής μέθοδος

$$D = \frac{1}{\left(\frac{E_1 t_1}{\lambda_1} + \frac{E'_c t_c}{\lambda_c} + \frac{E_2 t_2}{\lambda_2}\right)} \left[\frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2}{\lambda_1 \lambda_2} + \frac{E_1 t_1 E'_c t_c}{\lambda_1 \lambda_c} \left(\frac{t_1 + t_c}{2}\right)^2 + \frac{E_2 t_2 E'_c t_c}{\lambda_2 \lambda_c} \left(\frac{t_2 + t_c}{2}\right)^2 \right] + \frac{1}{12} \left[\frac{E_1 t_1^3}{\lambda_1} + \frac{E'_c t_c^3}{\lambda_c} + \frac{E_2 t_2^3}{\lambda_2} \right] \quad (4.10)$$

Για πάνελ τύπου sandwich με επιφάνειες ίδιου υλικού και πάχους έχουμε:

$$D = \frac{E t h^2}{2\lambda} + \frac{1}{12} \left[\frac{2E t^3}{\lambda} + \frac{E t_c^3}{\lambda_c} \right] = \frac{EI}{l} \quad (4.11)$$

Υπολογισμός ακαμψία σε διάτμηση (για $b = 1$)

$$U = hG_c \quad (4.12)$$

4.4.4. Υπολογισμός παραμόρφωσης κελιού (dimpling) σε τοπικό λυγισμό δοκού

Ένας όρος που εμφανίζεται στην εξίσωση της δυσκαμψίας σε κάμψη είναι ο λ_f . Αυτός ισούτε με $1 - \nu_x \nu_y$ και έχει τιμές 0,89 για αλουμίνιο, 0,91 για χάλυβα και 0,98 για fiberglass. Αυτός ο όρος πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο σε πάνελ τύπου sandwich που λειτουργούν ως πλάκες, όχι στενά δοκάρια. Το φαινόμενο του λόγου Poisson (ν) καθιστά μια ευρεία δοκό πιο δύσκολη να εκτραπεί από ότι μια στενή δοκό. Είναι δύσκολο να πούμε πότε μια δοκός συμπεριφέρεται ως πλάκα, αλλά εάν το πλάτος της δοκού είναι μεγαλύτερο από επτά φορές το πάχος της και μεγαλύτερο από το ένα τρίτο του εύρους μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι λειτουργεί ως πλάκα.

Πρέπει επίσης να ελεγχθεί ο τοπικός λυγισμός των πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα. Εάν χρησιμοποιούνται λεπτές επιφάνειες σε κυψελοειδή με μεγάλα κελιά, η επιφάνεια που βρίσκετε υπό θλίψη μπορεί να φράξει (dimple) μέσα στο κελί και να προκαλέσει πρόωρη αστοχία. Υπάρχουν αρκετές εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης ενδοκυτταρικής παραμόρφωσης σε λυγισμό. Μία εξίσωση παρουσιάζεται παρακάτω.

$$\sigma_{cr}^D = \frac{2E_f}{\lambda_f} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 \quad (4.13)$$

όπου σ_{cr}^D είναι η κρίσιμη τάση ενδοκυτταρικής παραμόρφωσης, E_f είναι το μέτρο ελαστικότητας της επιφάνειας, $\lambda = 1 - \nu_x \nu_y$, t_f είναι το πάχος της επιφάνειας και s είναι το μέγεθος του κελιού.

Αυτή η εξίσωση υποθέτει ότι η επιφάνεια είναι αρχικά επίπεδη, χωρίς ατέλειες. Αν θέλουμε να αποφύγουμε το φαινόμενο της πτύχωσης χρησιμοποιούμε κυψελοειδή με μικρά κελιά.

4.4.5. Υπολογισμός επιφανειακής ρυτίδωσης (wrinkling) σε τοπικό λυγισμό δοκού

Η επιφανειακή ρυτίδωση είναι ένα άλλο τοπικό πρόβλημα λυγισμού. Ρυτίδωση έχουμε όταν η θλιβόμενη επιφάνεια λυγίζει προς τα μέσα στον πυρήνα ή λυγίζει προς τα έξω με αποτέλεσμα της αστοχία του συγκολλητικού δεσμού με τον πυρήνα. Ο τρόπος αστοχίας είναι παρόμοιος με μια πλάκα συμπίεσης σε ελαστική βάση. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω εξίσωση για να ελέγξουμε αυτή την κρίσιμη τάση ρυτίδωσης.

$$\sigma_{cr}^w = 0.82E_f \left[\frac{E_c t_f}{E_f t_c} \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

όπου σ_{cr}^w είναι η κρίσιμη τάση ρυτίδωσης, E_c είναι ο συντελεστής θλίψεως του πυρήνα και t_c είναι το πάχος του πυρήνα.

Αυτή η εξίσωση υποθέτει επίσης ότι η επιφάνεια είναι αρχικά επίπεδη χωρίς καμία ατέλεια. Ο καλύτερος τρόπος για να αυξήσετε αυτή την κρίσιμη τάση ρυτίδωσης είναι να χρησιμοποιήσετε κυψελοειδή με υψηλότερο συντελεστή θλίψης, E_c . Αυτός ο τρόπος αστοχίας δεν συμβαίνει πολύ συχνά.

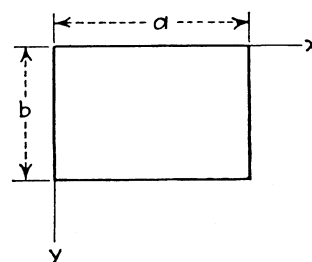
4.4.6. Υπολογισμός τάσεων σε επίπεδη επιφάνεια πάνελ τύπου sandwich με τη θεωρία πλακών

Σε αυτή την παράγραφο, αναπτύσσονται αναλυτικές λύσεις για παραμορφώσεις και καταπονήσεις ορθογωνίων πλακών απλά στηριζόμενων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Navier και τη μέθοδο Levy. Οι λύσεις Navier μπορούν να αναπτυχθούν για ορθογώνιες πλάκες όταν στηρίζονται απλά και οι τέσσερις άκρες. Οι λύσεις Levy μπορούν να αναπτυχθούν για ορθογώνιες πλάκες με δύο απέναντι άκρα απλά στηριζόμενα και τα υπόλοιπα δύο άκρα να είναι ελεύθερα ή απλά στηριζόμενα ή πακτωμένα.

4.4.6.1. Λύση Navier για εγκάρσια κατανεμημένη φόρτιση με ημιτονοειδή μορφή σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη

Λαμβάνοντας τους άξονες των συντεταγμένων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10, υποθέτουμε ότι το φορτίο που κατανέμεται πάνω στην επιφάνεια της πλάκας δίνεται από την έκφραση $q = q_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}$ (4.15)

όπου q_0 αντιπροσωπεύει την ένταση του φορτίου στο κέντρο της πλάκας. Η λύση αυτή είναι πρώτου όρου δηλαδή ($m = n = 1$)



Σχήμα 4.10

Βασικές εξισώσεις για τα εντατικά μεγέθη

$$\text{Ροπές κάμψης: } M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = D(1 - \nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (4.16)$$

$$\text{Απόκλιση (βέλος κάμψης): } \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (4.17)$$

αντικαθιστώντας το q_0 της σχέσης (4.15) στην σχέση (4.17) έχουμε:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q_0}{D} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4.18)$$

Οι οριακές συνθήκες για ορθογώνια πλάκα σε απλή στήριξη είναι

$$w = 0, \quad M_x = 0 \quad \text{για } x = 0 \text{ και } x = a$$

$$w = 0, \quad M_y = 0 \quad \text{για } y = 0 \text{ και } y = b$$

Χρησιμοποιώντας τις εκφράσεις (4.16) για τις ροπές κάμψης και παρατηρώντας ότι, δεδομένου ότι $w = 0$ στα άκρα, $\partial^2 w / \partial x^2 = 0$ και $\partial^2 w / \partial y^2 = 0$ για τα άκρα παράλληλα προς τους x και y άξονες, αντίστοιχα, μπορούμε να αντιπροσωπεύσουμε τις οριακές συνθήκες με την ακόλουθη μορφή:

$$w = 0, \quad \partial^2 w / \partial x^2 = 0 \quad \text{για } x = 0 \text{ και } x = a$$

$$w = 0, \quad \partial^2 w / \partial y^2 = 0 \quad \text{για } y = 0 \text{ και } y = b$$

Έτσι, μπορεί να φανεί ότι όλες οι οριακές συνθήκες είναι ικανοποιημένες αν παίρνουμε για απόκλιση την έκφραση

$$w = C \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4.19)$$

στην οποία η σταθερά C πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να ικανοποιεί την εξίσωση (4.18).

Αντικαθιστώντας την έκφραση (4.19) στην εξίσωση (4.18), βρίσκουμε:

$$\pi^4 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 C = \frac{q_0}{D}$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η παραμόρφωση για ισοτροπική πλάκα που ικανοποιεί την εξ. (4.18) και τις οριακές συνθήκες δίνεται από τον τύπο:

$$w_0(x, y) = \frac{q_0 b^4}{\pi^4 D (s^2 + 1)^2} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}, \quad \text{όπου } s = b/a \quad (4.20)$$

Για τον υπολογισμό της απόκλισης ή παραμόρφωσης αρχικά θεωρήσαμε ότι $m, n = 1$. Για $m, n \neq 1$ έχουμε:

$$w_0(x, y) = \frac{q_0}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.21)$$

Η μεγίστη απόκλιση είναι στην θέση $x=a/2, y=b/2$, άρα

$$w_{max} = \frac{q_0 b^4}{\pi^4 D (s^2 + 1)^2}$$

Οι ροπές κάμψης για ισοτροπική πλάκα δίνονται από τον τύπο:

$$M_{xx}(x, y) = \frac{q_0 b^2 (s^2 + \nu)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4.22a)$$

$$M_{yy}(x, y) = \frac{q_0 b^2 (v s^2 + 1)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (4.22b)$$

$$M_{xy}(x, y) = -\frac{q_0 s b^2 (1 - v)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \cos \frac{\pi x}{a} \cos \frac{\pi y}{b} \quad (4.22c)$$

Οι μέγιστες ροπές κάμψης είναι στην θέση $x=a/2$, $y=b/2$, άρα

$$M_{xx}max = \frac{q_0 b^2 (s^2 + v)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \quad (4.23a)$$

$$M_{yy}max = \frac{q_0 b^2 (v s^2 + 1)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \quad (4.23b)$$

Η διατμητική τάση είναι ίση με το άθροισμα των δυνάμεων αντίδρασης στα υποστηριζόμενα άκρα της ισοτροπικής πλάκας ($x=a$, $y=b$):

$$R = 2M_{xy}max = \frac{2q_0 b^2 (1 - v)}{\pi^2 (s^2 + 1)^2} \quad (4.24)$$

4.4.6.2. Λύση Navier για εγκάρσια κατανεμημένη φόρτιση με την βοήθεια τριγωνομετρικής σειράς σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη

Η πρώτη λύση του προβλήματος της κάμψης ορθογώνιων πλακών με απλή στήριξη και η χρήση για το σκοπό αυτό των διπλών τριγωνομετρικών σειρών οφείλονται στο Navier. Για φορτία εκτός από την ημιτονοειδής μορφή, η λύση Navier χρησιμοποιεί μια σειρά λύσεων που μπορούν να αξιολογηθούν για έναν επιθυμητό αριθμό όρων στη σειρά.

Η λύση της προηγούμενης παραγράφου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό των εκτροπών (παραμορφώσεων ή αποκλίσεων) που παράγονται σε μία ορθογώνια πλάκα με απλή στήριξη με οποιοδήποτε είδος φόρτισης που δίνεται από την εξίσωση $q = f(x, y)$. Παραδείγματα συντελεστών φόρτισης στην διπλή τριγωνομετρική σειρά επέκτασης φορτίων στη μέθοδο Navier δίνονται στον πίνακα 4.1.

Για το σκοπό αυτό αντιπροσωπεύουμε τη συνάρτηση $f(x, y)$ με τη μορφή μιας διπλής τριγωνομετρικής σειράς

$$f(x, y) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.25)$$

Για να υπολογίσουμε οποιονδήποτε ειδικό συντελεστή $a_{m'n'}$ αυτής της σειράς πολλαπλασιάζουμε και τις δύο πλευρές της εξίσωσης (4.25) με $\sin \frac{n'\pi y}{b} dy$ και ολοκληρώνουμε από 0 έως b. Έτσι παρατηρούμε ότι:

$$\int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{n'\pi y}{b} dy = 0 \quad \text{όπου } n \neq n'$$

$$\int_0^b \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{n'\pi y}{b} dy = \frac{b}{2} \quad \text{όπου } n = n'$$

Με αυτό τον τρόπο παίρνουμε:

$$\int_0^b f(x, y) \sin \frac{n'\pi y}{b} dy = \frac{b}{2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.26)$$

πολλαπλασιάζοντας και τις δύο πλευρές της εξίσωσης (4.26) με $\sin \frac{m'\pi x}{a} dx$ ολοκληρώνοντας από το 0 έως α παίρνουμε:

$$\int_0^a \int_0^b f(x, y) \sin \frac{m'\pi x}{a} \sin \frac{n'\pi y}{b} dx dy = \frac{ab}{4} a_{m'n'}$$

Έτσι καταλήγουμε σε:

$$a_{m'n'} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b f(x, y) \sin \frac{m'\pi x}{a} \sin \frac{n'\pi y}{b} dx dy \quad (4.27)$$

Επιλύοντας την ολοκλήρωση που υποδεικνύεται στην έκφραση (4.27) για μια δεδομένη κατανομή φορτίου, δηλ. για ένα δεδομένο $f(x, y)$, βρίσκουμε τους συντελεστές των σειρών (4.25) και παριστάνουμε με αυτό τον τρόπο το δεδομένο φορτίο ως άθροισμα των μερικών ημιτονοειδών φορτίσεων. Η απόκλιση που παράγεται από κάθε μερική φόρτιση συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο και η ολική απόκλιση θα ληφθεί με άθροισμα των όρων που δίδονται από την εξίσωση (4.21). Ως εκ τούτου, βρίσκουμε

$$w = \frac{1}{\pi^4 D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{a_{mn}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.28)$$

Ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο

Θεωρούμε την περίπτωση ενός φορτίου ομοιόμορφα κατανεμημένου σε ολόκληρη την επιφάνεια της πλάκας ως παράδειγμα της εφαρμογής της γενικής λύσης (4.28). Σε αυτή την περίπτωση $f(x, y) = q_0$, όπου q_0 είναι το ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Από τον τύπο (4.27) λαμβάνουμε τον συντελεστή a_{mn} :

$$a_{mn} = \frac{4q_0}{ab} \int_0^a \int_0^b \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy = \frac{16q_0}{\pi^2 mn}$$

όπου m και n είναι περιττοί ακέραιοι αριθμοί. Αν το m ή n ή και οι δύο είναι άρτιοι αριθμοί, $a_{mn} = 0$. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.28), βρίσκουμε

$$w = \frac{16q_o}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{mn \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad \text{ή}$$

$$w = \frac{16q_o b^4}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{mn(m^2 s^2 + n^2)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad \text{όπου } s = \frac{b}{a} \quad (4.29)$$

Εφαρμόζοντας ένα ομοιόμορφο φορτίο έχουμε μία επιφάνεια εκτροπής συμμετρική ως προς τους άξονες $x = a/2$, $y = b/2$ και φυσικά όλοι οι όροι με ζυγούς αριθμούς για m ή n σε σειρά εξαφανίζονται, επειδή είναι ασύμμετροι σε σχέση με τους προαναφερθέντες άξονες. Η μέγιστη απόκλιση της πλάκας βρίσκεται στο κέντρο της και βρίσκεται με αντικατάσταση των $x = a/2$, $y = b/2$:

$$w_{max} = \frac{16q_o b^4}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{m+n}{2}-1}}{mn(m^2 s^2 + n^2)^2} \quad (4.30)$$

Πρόκειται για μια ταχέως συγκλίνουσα σειρά και επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση με τη λήψη μόνο του πρώτου όρου της σειράς, για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας τετραγωνικής πλάκας έχουμε

$$w_{max} = \frac{4q_o \alpha^4}{\pi^6 D} = 0,00416 \frac{q_o \alpha^4}{D} \quad (4.31)$$

η οποία έχει ποσοστό λάθους 2,4% σε σύγκριση με την εξίσωση που θα ληφθεί αν πάρουμε $m, n=1,3,\dots,9$.

Έχοντας υπόψη ότι $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ για ισотροπική πλάκα $\nu = 0,3$ τελικά παίρνουμε

$$w_{max} = 0,0454 \frac{q_o \alpha^4}{Eh^3} \quad (4.32)$$

Περαιτέρω εφαρμογές της λύσης Navier

Από τα ανωτέρω φαίνεται ότι η παραμόρφωση μίας ορθογώνιας πλάκας με απλή στήριξη μπορεί πάντοτε να παρασταθεί με τη μορφή μίας διπλής τριγωνομετρικής σειράς (4.28), με τους συντελεστές a_{mn} να δίδονται από την εξίσωση (4.27). Ας εφαρμόσουμε αυτό το αποτέλεσμα στην περίπτωση ενός μοναδικού φορτίου P ομοιόμορφα κατανεμημένου πάνω στην περιοχή του ορθογωνίου που φαίνεται στο Σχ. 4.11 Βάση της εξίσωσης (4.27) έχουμε:

$$a_{mn} = \frac{4P}{abuv} \int_{\xi-u/2}^{\xi+u/2} \int_{n-v/2}^{n+v/2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy$$

$$\eta \quad a_{mn} = \frac{16P}{\pi^2 \mu \nu} \sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b} \sin \frac{m\pi u}{2a} \sin \frac{n\pi v}{2b} \quad (4.33)$$

Μια περίπτωση πρακτικού ενδιαφέροντος είναι ένα φορτίο συγκεντρωμένο σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο $\chi = \xi$, $y = \eta$ της πλάκας. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.33) και αφήνοντας τα u και v να τείνουν στο μηδέν έχουμε:

$$a_{mn} = \frac{4P}{\alpha b} \sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b}$$

και εφαρμόζοντας στην εξίσωση (4.28) παίρνουμε:

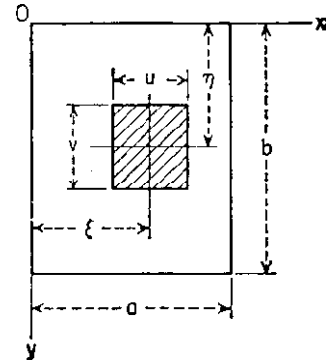
$$w = \frac{4P}{\pi^4 \alpha b D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{n\pi\eta}{b}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.34)$$

Η σειρά συγκλίνει ταχέως και μπορούμε να επιτύχουμε την απόκλιση σε οποιοδήποτε σημείο της πλάκας με επαρκή ακρίβεια λαμβάνοντας μόνο τους πρώτους λίγους όρους της σειράς. Αν, για παράδειγμα, υπολογίσουμε την απόκλιση (βύθιση) στη μέση, όταν το φορτίο εφαρμόζεται στη μέση. Τότε έχουμε $\xi = x = a/2$, $\eta = y = b/2$, και η σειρά (4.34) απλοποιείται σε:

$$w_{max} = \frac{4P}{\pi^4 \alpha b D} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \quad (4.35)$$

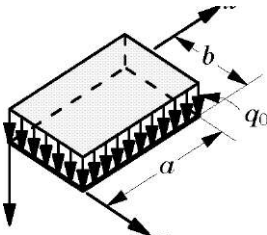
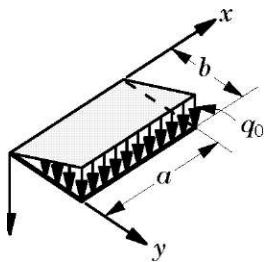
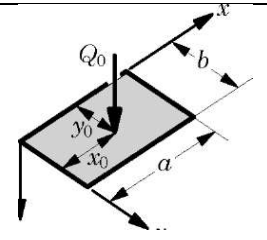
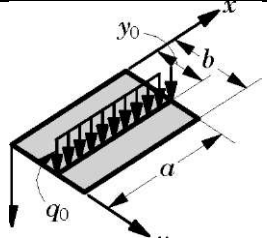
Όπως η σειρά (4.25) που αντιπροσωπεύει την ένταση του συγκεντρωμένου φορτίου αποκλίνει στο $\chi = \xi$, $y = \eta$, έτσι αποκλίνουν και οι σειρές που εκφράζουν τις ροπές κάμψης και τις δυνάμεις διάτμησης στο σημείο εφαρμογής του φορτίου.

Στον πίνακα 4.1 δίνονται οι συντελεστές φορτίου για διάφορες περιπτώσεις φορτίσεων.



Σχήμα 4.11

Πίνακας 4.1. Συντελεστές στην διπλή τριγωνομετρική σειρά επέκτασης φορτίων στη μέθοδο Navier.

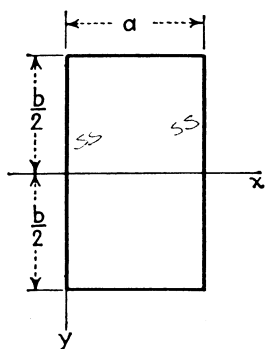
	Ομοιόμορφα καταναμεμημένο φορτίο
	$q(x,y) = q_0$ $q_{mn} = \frac{16q_0}{\pi^2 mn}$ $(m, n = 1, 3, 5, \dots)$
	Τριγωνικά καταναμεμημένο φορτίο
	$q(x,y) = q_0 \frac{y}{b}$ $q_{mn} = \frac{8q_0}{\pi^2 mn} (-1)^{n+1}$ $(m = 1, 3, 5, \dots)$ $(n = 1, 2, 3, \dots)$
	Σημειακό φορτίο
	$Q_0(x_0, y_0)$ $q_{mn} = \frac{4Q_0}{ab} \sin \frac{m\pi x_0}{a} \sin \frac{n\pi y_0}{b}$ $(m, n = 1, 3, 5, \dots)$
	Γραμμικό φορτίο
	$q(x,y) = q_0 \delta(y - y_0)$ $q_{mn} = \frac{8q_0}{\pi b m} \sin \frac{n\pi y_0}{b}$ $(m = 1, 3, 5, \dots)$ $(n = 1, 2, 3, \dots)$

4.4.6.3. Εναλλακτική λύση για εγκάρσια καταναμεμημένη φόρτιση σε ορθογώνιες πλάκες με απλή στήριξη (Λύση M. Levy)

Κατά τη συζήτηση προβλημάτων κάμψης ορθογώνιων πλακών που έχουν δύο αντίθετες άκρες με απλή στήριξη, ο M. Levy πρότεινε να ληφθεί η λύση με τη μορφή μιας σειράς

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} Y_m \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.36)$$

όπου Y_m είναι μια συνάρτηση του y . Υποτίθεται ότι οι πλευρές $x = 0$ και $x = a$ (Σχήμα 4.12) υποστηρίζονται απλά. Επομένως, κάθε όρος της παραπάνω σειράς ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες $w = 0$ και $\partial^2 w / \partial^2 x = 0$ σε αυτές τις δύο πλευρές. Παραμένει να προσδιοριστεί το Y_m σε μια τέτοια μορφή ώστε να ικανοποιεί τις δεσμευμένες οποιεσδήποτε συνθήκες στις πλευρές $y = \pm b/2$ και επίσης την εξίσωση της απόκλισης της επιφάνειας.



Σχήμα 4.12

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (4.37)$$

Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο σε ομοιόμορφα φορτισμένες και απλά υποστηριζόμενες ορθογώνιες πλάκες, μπορεί να γίνει μια περαιτέρω απλοποίηση της εξίσωσης (4.37) στη μορφή¹

$$w = w_1 + w_2 \quad (4.38)$$

$$\text{όπου } w_1 = \frac{q}{24D} (x^4 - 2ax^3 + a^3x) \quad (4.39)$$

Δηλαδή, το w_1 αντιπροσωπεύει την απόκλιση ενός ομοιόμορφου φορτισμένου επιπέδου παράλληλο προς τον άξονα x . Εξαρτάται από την εξίσωση (4.37) και επίσης τις οριακές συνθήκες στις άκρες $x = 0$ και $x = a$.

Η έκφραση w_2 προφανώς πρέπει να ικανοποιήσει την εξίσωση

$$\frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w_2}{\partial y^4} = 0 \quad (4.40)$$

και πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα (4.38β) να ικανοποιεί όλες τις οριακές συνθήκες της πλάκας. Λαμβάνοντας w_2 με τη μορφή της σειράς (4.36) στην οποία, λόγω συμμετρίας, $m = 1, 3, 5, \dots$ και αντικαθιστώντας το στην εξίσωση (4.40), λαμβάνουμε:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left(Y_m^{IV} - 2 \frac{m^2 \pi^2}{a^2} Y_m'' + \frac{m^4 \pi^4}{a^4} Y_m \right) \sin \frac{m\pi x}{a} = 0 \quad (4.41)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να ικανοποιηθεί για όλες τις τιμές x μόνο αν η συνάρτηση Y_m ικανοποιεί την εξίσωση

$$Y_m^{IV} - 2 \frac{m^2 \pi^2}{a^2} Y_m'' + \frac{m^4 \pi^4}{a^4} Y_m = 0 \quad (4.42)$$

Το γενικό ολοκλήρωμα αυτής της εξίσωσης μπορεί να ληφθεί με τη μορφή²:

¹ Αυτή η μορφή επίλυσης χρησιμοποιήθηκε από τους A. Nadai, Forschungsarb Βερολίνο, 1915, δείτε επίσης το βιβλίο του "Elastische Platten", Βερολίνο, 1925.

² Μια κάπως διαφορετική μορφή για το Y_m , πιο βολική για να ικανοποιήσει κάποιες συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, έχει προταθεί από τον P. F. Papkovitch, Priklad. Mat. Mekh vol. 5, 1941.

$$Y_m = \frac{q\alpha^4}{D} \left(A_m \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} + B_m \frac{m\pi y}{\alpha} \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} + C_m \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} + D_m \frac{m\pi y}{\alpha} \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} \right) \quad (4.43)$$

Παρατηρώντας ότι η απόκλιση (ή βύθιση) της επιφάνεια της πλάκας είναι συμμετρική ως προς τον άξονα x (σχήμα 3.12) διατηρούμε στην έκφραση (4.43) μόνο τις άρτιες συναρτήσεις ως προς y και θέτουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης $C_m = D_m = 0$.

Η απόκλιση της επιφάνειας (4.38) στη συνέχεια εκφράζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$w = \frac{q}{24D} (x^4 - 2\alpha x^3 + \alpha^3 x) + \frac{q\alpha^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left(A_m \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} + B_m \frac{m\pi y}{\alpha} \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} \right) \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.44)$$

που ικανοποιεί την εξίσωση (4.37) και επίσης τις οριακές συνθήκες στις πλευρές $x = 0$ και $x = \alpha$. Απομένει να προσαρμόσουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης A_m και B_m με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες στις πλευρές $y = \pm b / 2$.

$$w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (4.45)$$

Ξεκινάμε αναπτύσσοντας την έκφραση (4.39) σε μια τριγωνομετρική σειρά, που σύμφωνα με τον S. Timoshenko, στο σύγγραμμα "Strength of Materials" δίνει:

$$\frac{q}{24D} (x^4 - 2\alpha x^3 + \alpha^3 x) = \frac{4q\alpha^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^5} \sin \frac{m\pi x}{\alpha}$$

όπου $m = 1, 3, 5, \dots$. Η απόκλιση της επιφάνεια (4.44) θα αναπαρασταθεί τώρα με την μορφή:

$$w = \frac{q\alpha^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{4}{\pi^5 m^5} + A_m \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} + B_m \frac{m\pi y}{\alpha} \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} \right) \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.46)$$

όπου $m = 1, 3, 5, \dots$. Αντικαθιστώντας αυτή την έκφραση στις συνοριακές συνθήκες (4.45) και χρησιμοποιώντας την ισότητα:

$$\frac{m\pi b}{2\alpha} = \alpha_m \quad (4.47)$$

λαμβάνουμε τις ακόλουθες εξισώσεις για τον προσδιορισμό των σταθερών A_m και B_m

$$\begin{aligned} \frac{4}{\pi^5 m^5} + A_m \cosh \alpha_m + \alpha_m B_m \sinh \alpha_m &= 0 \\ (A_m + 2B_m) \cosh \alpha_m + \alpha_m B_m \sinh \alpha_m &= 0 \end{aligned}$$

από τις οποίες:

$$A_m = -\frac{2(\alpha_m \tanh \alpha_m + 2)}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m} \quad \text{και} \quad B_m = -\frac{2}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m} \quad (4.48)$$

Αντικαθιστώντας αυτές τις τιμές των σταθερών στην εξίσωση (4.46), λαμβάνουμε την απόκλιση στην επιφάνεια της πλάκας, ικανοποιώντας την εξίσωση (4.37) και τις οριακές συνθήκες, με την ακόλουθη μορφή:

$$w = \frac{q\alpha^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{m^5} \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \cosh \frac{2\alpha_m y}{b} + \frac{\alpha_m}{\cosh \alpha_m} \frac{2y}{b} \sinh \frac{2\alpha_m y}{b} \right) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (4.49)$$

από την οποία η απόκλιση σε οποιοδήποτε σημείο μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας πίνακες υπερβολικών συναρτήσεων. Η μέγιστη απόκλιση λαμβάνεται στο μέσο της πλάκας ($x = a/2, y = 0$), όπου

$$w_{max} = \frac{q\alpha^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \left(1 - \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \right) \quad (4.50)$$

Αν δεν ληφθεί υπόψη ο δεύτερος όρος στις παρενθέσεις, αυτή η σειρά αντιπροσωπεύει την βύθιση στη μέση μιας ομοιόμορφα φορτισμένης λωρίδας. Ως εκ τούτου, μπορούμε να αντιπροσωπεύσουμε την έκφραση (4.50) με την ακόλουθη μορφή:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \frac{q\alpha^4}{D} - \frac{4q\alpha^4}{\pi^5 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(m-1)/2}}{m^5} \frac{\alpha_m \tanh \alpha_m + 2}{2 \cosh \alpha_m} \quad (4.51)$$

Οι σειρές σε αυτή την έκφραση συγκλίνουν πολύ γρήγορα και επιτυγχάνεται επαρκής ακρίβεια λαμβάνοντας μόνο τον πρώτο όρο. Λαμβάνοντας ένα τετράγωνο πάνελ ως παράδειγμα, ξέρουμε από την εξ. (4.47) παίρνουμε $\alpha_1 = \pi/2$ και $\alpha_3 = 3\pi/2$

Η εξ. (4.51) γίνεται:

$$w_{max} = \frac{5}{384} \frac{q\alpha^4}{D} - \frac{q\alpha^4}{\pi^5 D} (0,68562 - 0,00025 + \dots) = 0,00406 \frac{q\alpha^4}{D} \quad (4.52)$$

Φαίνεται ότι ο δεύτερος όρος της σειράς σε παρένθεση είναι αμελητέος και ότι λαμβάνοντας μόνο τον πρώτο όρο ο τύπος για την βύθιση λαμβάνεται σωστά σε τρεις σημαντικούς αριθμούς.

Χρησιμοποιώντας τον τύπο (4.51), μπορούμε να παρουσιάσουμε τη μέγιστη βύθιση μιας πλάκας στη μορφή

$$w = a \frac{q\alpha^4}{D} \quad (4.53)$$

όπου a είναι ένας αριθμητικός παράγοντας που εξαρτάται από την αναλογία b/a των πλευρών της πλάκας. Οι τιμές του a παρατίθενται στον πίνακα 1 του Παραρτήματος 3 για διάφορους λόγους b/a .

Γνωρίζουμε είδη ότι οι ροπές κάμψης M_x και M_y (4.16) δίνονται από:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

Οι ροπές κάμψης M_x και M_y μπορούν να υπολογιστούν και μέσω της έκφρασης (4.44) Αντικατάσταση του αλγεβρικού τμήματος αυτής της έκφρασης στις εξισώσεις (4.16), μας δίνει:

$$M_x = \frac{qx(a-x)}{2}, \quad M_y = \nu \frac{qy(a-x)}{2} \quad (4.54)$$

Η υποκατάσταση της σειράς της έκφρασης (4.44) στις ίδιες εξισώσεις δίνει:

$$M'_x = (1-\nu)q\alpha^2\pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} m^2 \left[A_m \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} + B_m \left(\frac{m\pi y}{\alpha} \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} - \frac{2}{1-\nu} \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} \right) \right] \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.55a)$$

$$M'_y = -(1-\nu)q\alpha^2\pi^2 \sum_{m=1}^{\infty} m^2 \left[A_m \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} + B_m \left(\frac{m\pi y}{\alpha} \sinh \frac{m\pi y}{\alpha} + \frac{2}{1-\nu} \cosh \frac{m\pi y}{\alpha} \right) \right] \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.55b)$$

Οι συνολικές ροπές κάμψης λαμβάνονται με άθροισμα των εκφράσεων (4.54) και (4.55). Κατά μήκος του άξονα x η έκφραση για τις ροπές κάμψης γίνεται:

$$(M_x)''_{y=0} = \frac{qx(a-x)}{2} - q\alpha^2\pi^2 \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} m^2 [2\nu B_m - (1-\nu)A_m] \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.56a)$$

$$(M_y)''_{y=0} = \nu \frac{qx(a-x)}{2} - q\alpha^2\pi^2 \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} m^2 [2B_m + (1-\nu)A_m] \sin \frac{m\pi x}{\alpha} \quad (4.56b)$$

Και οι δύο σειρές συγκλίνουν γρήγορα και οι ροπές μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και να αναπαρασταθούν με την μορφή:

$$(M_x)_{y=0} = \beta' q\alpha^2 \quad \text{και} \quad (M_y)_{y=0} = \beta_1'' q\alpha^2 \quad (4.57)$$

Οι τιμές του β' , β_1'' παρατίθενται στον πίνακα 2 του Παραρτήματος 3 για διάφορους λόγους b/a .

Οι ροπές κάμψης που επενεργούν κατά μήκος της μεσαίας γραμμής $x = a/2$ μπορούν να υπολογιστούν με παρόμοιο τρόπο και να απεικονίζονται στη μορφή

$$(M_x)_{x=a/2} = \beta'' q\alpha^2 \quad \text{και} \quad (M_y)_{x=a/2} = \beta_1' q\alpha^2 \quad (4.58)$$

Οι τιμές του β'' , β_1' παρατίθενται στον πίνακα 3 του Παραρτήματος 3 για διάφορους λόγους b/a .

Οι μέγιστες τιμές αυτών των ροπών:

$$(M_x)_{max} = \beta q a^2 \quad \text{και} \quad (M_y)_{max} = \beta_1 q a^2 \quad (4.59)$$

βρίσκονται στο κέντρο της πλάκας ($x = a/2, y = 0$) και οι αντίστοιχοι συντελεστές β και β_1 βρίσκονται στον πίνακα 1 του Παραρτήματος 3 για διάφορους λόγους b/a .

Η έκφραση (4.44) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό των δυνάμεων διάτμησης (τέμνουσες δυνάμεις) και των αντιδράσεων. Έτσι σε αντιστοιχία με τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$(Q_x)_{z=0,y=0} = \gamma q a \quad \text{και} \quad (Q_y)_{z=a,y=-b/2} = \gamma_1 q a$$

$$(V)_{z=0,y=0} = \delta q a$$

Στο παράρτημα 3 επίσης δίνονται πίνακες υπολογισμού καθώς και εξισώσεις των εντατικών μεγεθών για ορθογώνιες πλάκες με διάφορες συνθήκες φόρτισης.

4.4.7. Υπολογισμός τάσεων σε επίπεδη επιφάνεια πάνελ τύπου sandwich με το Τεχνικό Εγχειρίδιο 23A

Αυτό το εγχειρίδιο, αν και αρκετά παλιό, αφού δημοσιεύθηκε το 1968, δίνει μηχανικές ιδιότητες για πολλούς τύπους δισδιάστατων κυψελωιδών, αφρούς και ξύλο Basla και πολύ καλές πληροφορίες. Είναι ένα πολύ χρήσιμο εγχειρίδιο.

Ένας τρόπος που λειτουργεί πολύ καλά αυτό το εγχειρίδιο είναι να υποθέσουμε ένα sandwich (εξωτερικά στρώματα και υλικά πυρήνα και πάχη) και στη συνέχεια να καθορίσουμε τις τάσεις των εξωτερικών στρωμάτων, τις τάσεις του πυρήνα και την βύθιση του πάνελ.

Ωστόσο, το μοναδικό επίπεδο πάνελ που ασχολείται με αυτό είναι ένα ομοιόμορφα φορτισμένο, απλά στηριγμένο πάνελ τύπου sandwich. Αυτή η προσέγγιση λαμβάνει υπόψη την βύθιση λόγω διάτμησης του πυρήνα.

Οι κύριες εξισώσεις για τον προσδιορισμό των εντατικών μεγεθών είναι:

$$- \text{Τάση εξωτερικών στρωμάτων } \sigma_f = K_2 \frac{p d^2}{h t} \quad (4.60)$$

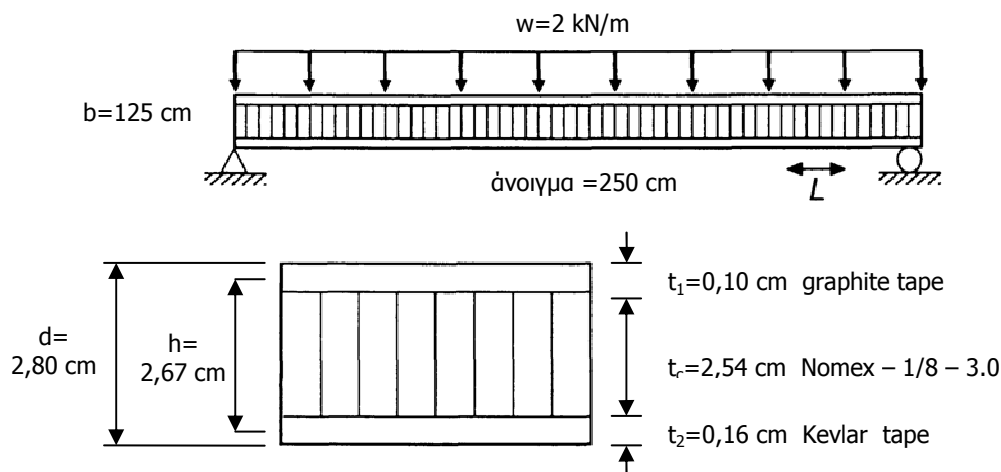
$$- \text{Διατμητική τάση πυρήνα } F_{sc} = K_3 \frac{p d}{h} \quad (4.61)$$

$$- \text{Απόκλιση (Βέλος κάμψης) } \Delta_{max} = \delta = K_1 \frac{2 p d^4}{E_t h^2} \quad (4.62)$$

Οι συντελεστές K_1 , K_2 και K_3 προσδιορίζονται μέσω διαγραμμάτων λαμβάνοντας υπόψη τον λόγο b/a (λόγος πλευρών του πάνελ). Τα διαγράμματα αυτά παρατίθενται στο παράρτημα 4.

4.5. Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού ομοιόμορφα φορτισμένης - (Παράδειγμα)

Έστω ότι έχουμε μια απλά στηριζόμενη δοκό πάνελ μήκους 8 ft, πλάτους 4 ft και πάχους 1.1 in στην οποία ασκείται ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $w=2 \text{ KN/m}$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.13. Ο προσανατολισμός L του πυρήνα είναι προς την κατεύθυνση του μήκους του ανοίγματος.



Σχήμα 4.13. Αμφιέρεστη δοκός πάνελ ομοιόμορφα φορτισμένη και σχηματική τομή

Πειραματικές ιδιότητες υλικών που αποτελούν το πάνελ (από βιβλιογραφία)

Carbon tape: $F_c = 1,29 \text{ GPa}$, $E_c = 126 \text{ GPa}$, $\lambda = 0,99$, $\rho = 1.700 \text{ Kg/m}^3$

Kevlar tape: $F_t = 1,08 \text{ GPa}$, $E_t = 65,5 \text{ GPa}$, $\lambda = 1.00$, $\rho = 1.380 \text{ Kg/m}^3$

HRH-10-3.2-48 honeycomb:

minimum values: $\sigma_c = 2,24 \text{ MPa}$, $\tau_L = 1,21 \text{ MPa}$, $\tau_w = 0,69 \text{ MPa}$

typical values: $E_c = 138 \text{ MPa}$, $G_L = 41 \text{ MPa}$, $G_w = 24 \text{ MPa}$

Εντατικά φορτία πάνελ (από τυπολόγιο που προσάπτεται στο παράρτημα 2)

Χρησιμοποιώντας την επίλυση αμφιέρεστης δοκού θεωρούμε ότι η διεύθυνση b είναι πολύ μικρή

Μέγιστη τέμνουσα δύναμη $V_{\max}$:
$$V_{\max} = \frac{wl}{2} = \frac{2.000 \times 2,5}{2} = 2.500 \text{ N}$$

Μέγιστη ροπή κάμψης $M_{\max}$:
$$M_{\max} = \frac{wl^2}{8} = \frac{2.000 \times 2,5^2}{8} = 1.562,5 \text{ Nm}$$

4.5.1. Προσεγγιστική λύση

Στη μέθοδο αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη ο ουδέτερος άξονας λόγω διαφορετικού υλικού εξωτερικών στρωμάτων του πάνελ.

a) Διατμητική τάση πυρήνα

$$\tau_c = \frac{V}{hb} = \frac{2,5}{0,0267 \times 1,25} = 74,91 \text{ kPa}$$

$$F.S. = \frac{t_L}{t_c} = \frac{1.210 \times 0,94}{74,91} = 15,2 \quad \text{όπου } F.S. \text{ είναι ο συντελεστής ασφαλείας}$$

και 0,94 είναι συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από το διάγραμμα του Παραρτήματος 2

b) Τάση πάνω στρώματος πάνελ

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb} = \frac{1.562,5 \times 10^{-6}}{0,001 \times 0,0267 \times 1,25} = 46,82 \text{ MPa}$$

Έλεγχος σε πτύχωση

$$\sigma_{cr}^D = \frac{2E_f}{\lambda_f} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 = \frac{2 \times 126 \times 10^3}{0,99} \left[\frac{0,001}{0,0032} \right]^2 = 24.900 \text{ MPa}$$

Έλεγχος σε ρυτίδωση

$$\sigma_{cr}^W = 0,82E_f \left[\frac{E_c t_f}{E_f t_c} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,82 \times 126 \times 10^3 \left[\frac{138 \times 80\% \times 0,001}{126 \times 10^3 \times 0,0254} \right]^{\frac{1}{2}} = 606,80 \text{ psi}$$

Χρησιμοποιούμε το 80% της τυπικής τιμής του μέτρου ελαστικότητας του κυψελοειδή, διότι η τιμή αναφέρετε στο τυπικό και όχι το ελάχιστο μέτρο.

Διαπιστώνουμε ότι και οι δύο τάσεις τοπικού λυγισμού είναι αρκετά μεγαλύτερες από την τάση διαρροής του εξωτερικού στρώματος, άρα δεν είναι κρίσιμες. Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας λαμβάνουμε υπόψιν την τάση διαρροής του πυρήνα και έτσι έχουμε:

$$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = \frac{1.290}{46,82} = 27,6$$

c) Τάση κάτω στρώματος πάνελ

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb} = \frac{1.562,5 \times 10^{-6}}{0,0016 \times 0,0267 \times 1,25} = 29,26 \text{ MPa}$$

$$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = \frac{1.080}{29,26} = 36,9$$

Δεδομένου ότι το κάτω στρώμα βρίσκεται υπό εφελκυσμό δεν παρατηρούνται τοπικά προβλήματα λυγισμού όπως πτύχωση ή ρυτίδωση.

d) Ματατόπιση πάνελ

$$\begin{aligned} \Delta \text{υσκαμψία σε κάμψη, } D &= \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2 b}{E_1 t_1 \lambda_2 + E_2 t_2 \lambda_2} \\ &= \frac{(126 \times 10^9) \times 0,001 \times (65,5 \times 10^9) \times 0,0016 \times 0,0267^2 \times 1,25}{(126 \times 10^9) \times 0,001 \times 1,00 + (65,5 \times 10^9) \times 0,0016 \times 0,99} \\ &= 5,1 \times 10^4 \text{ N m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Ακαμψία σε διάτμηση } U = h G_c b = 0,0267 \times 41 \times 10^6 \times 80\% \times 1,25 = 1,09 \times 10^6 \text{ N}$$

Για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου θεωρώ ότι το κατανεμημένο φορτίο ασκείται σε όλο το εύρος του πάνελ.

$$\text{Συνολικό φορτίο } P_{\text{tot}} = q l b = 2.000 \times 2,50 \times 1,25 = 6.250 \text{ N}$$

$$\Delta_{\text{max}} = K_b \frac{P l^3}{D} + K_c \frac{P l}{U} = 0,01302 \times \frac{6.250 \times 2,5^3}{5,1 \times 10^4} + 0,125 \times \frac{6.250 \times 2,5}{1,09 \times 10^6} = 2.66 \text{ cm}$$

όπου K_b, K_c δίνονται από πίνακα του παραρτήματος 2

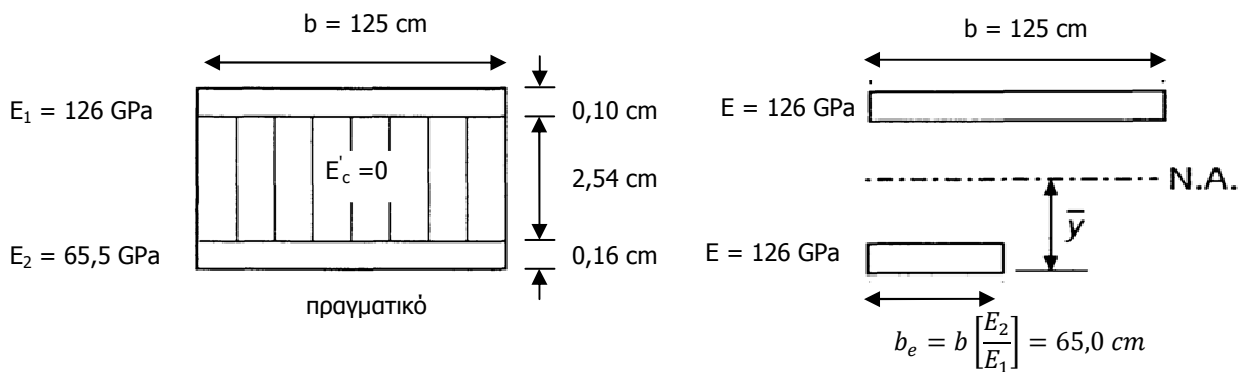
e) Βάρος πάνελ

$$\begin{aligned} W &= W_{t1} + W_c + W_{t2} + W_{\text{adhesive}} \\ &= \frac{0,10}{100} \times 1.700 + \frac{2,54}{100} \times 48 + \frac{0,16}{100} \times 1.700 + 0 = 5,64 \text{ kgr/m}^2 \end{aligned}$$

Στον υπολογισμό θεωρήσαμε ότι τα φύλλα συγκολλούνται με τον πυρήνα με θέρμανση και όχι με κόλλα. Σε περίπτωση συγκόλλησης με κόλλα το παραπάνω βάρος αυξάνει κατά 2,9 kgr / m² περίπου.

4.5.2. Αναλυτική λύση

Για τις περιπτώσεις με λεπτό πάνελ και εξωτερικά στρώματα που έχουν πολύ διαφορετικά πάχη, η καλύτερη προσέγγιση είναι να υποθέσουμε ότι E'c ισούται με μηδέν και να χρησιμοποιήσουμε την ακριβή μέθοδο. Η ακριβής μέθοδος απεικονίζεται στο σχήμα 4.14. και περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.2. του παρόντος. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τον ουδέτερο άξονα της δοκού και την αντίστοιχη κατανομή τάσεων στις επενδύσεις (εξωτερικά φύλλα).



Σχήμα 4.14. Πραγματική τομή πάνελ - μετασχηματισμένη τομή

Υπολογισμός ροπής αδράνειας

$$\bar{y} = \frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{0,16 \times 65,0 \times 0,08 + 0,10 \times 125 \times 2,75}{0,16 \times 65,0 + 0,10 \times 125} = 1,537 \text{ cm}$$

$$I = \sum (I_0 + Ad^2) = \frac{65 \times 0,16^3}{12} + 0,16 \times 65 \times (1,537 - 0,16/2)^2 + \frac{125 \times 0,10^3}{12} + 0,10 \times 125 \times (2,67 + 0,16/2 - 1,537)^2 = 40,50 \text{ cm}^4$$

a) Διατμητική τάση πυρήνα

$$\tau_c = \frac{VQ}{Ib} = \frac{2,5 \times \max(15,163, 15,153) \times 10^{-6}}{40,50 \times 10^{-8} \times 1,25} = 74,88 \text{ kPa}$$

$$Q_T = A_1 \bar{y} = 0,10 \times 125 \times (2,67 + 0,16/2 - 1,537) = 15,163$$

$$Q_B = A_2 \bar{y} = 0,16 \times 65 \times (1,537 - 0,16/2) = 15,153$$

$$F.S. = \frac{t_L}{t_c} = \frac{1210 \times 0,94}{74,88} = 15,2 \quad \text{όπου } F.S. \text{ είναι ο συντελεστής ασφαλείας}$$

και 0,94 είναι συντελεστής διόρθωσης που δίνεται από το διάγραμμα του Παραρτήματος 2

b) Τάση πάνω στρώματος πάνελ

$$\sigma_f = \frac{M \times y}{I} = \frac{1.562,5 \times 10^{-6} \times (2,8 - 1,537) \times 10^{-2}}{40,50 \times 10^{-8}} = 48,72 \text{ MPa}$$

$$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = \frac{1.290}{48,72} = 26,5$$

c) Τάση κάτω στρώματος πάνελ

$$\sigma_f = \frac{M \times \bar{y} \left[\frac{E_2}{E_1} \right]}{I} = \frac{1.562,5 \times 10^{-6} \times 1,537 \times 10^{-2}}{40,50 \times 10^{-8}} \left[\frac{65,5}{126,0} \right] = 30,82 \text{ MPa}$$

$$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = \frac{1.080}{30,82} = 35,0$$

d) Ματατόπιση πάνελ

$$\text{Δυσκαμψία σε κάμψη, } D = \frac{EI}{\lambda} = \frac{126 \times 10^9 \times 40,5 \times 10^{-8}}{\frac{1,00+0,99}{2}} = 5,1 \times 10^4 \text{ N m}^2$$

$$\text{Ακαμψία σε διάτμηση } U = hG_c b = 0,0267 \times 41 \times 10^6 \times 80\% \times 1,25 = 1,09 \times 10^6 \text{ N}$$

$$\Delta_{max} = K_b \frac{Pl^3}{D} + K_c \frac{Pl}{U} = 0,01302 \times \frac{6.250 \times 2,5^3}{5,1 \times 10^4} + 0,125 \times \frac{6.250 \times 2,5}{1,09 \times 10^6} = 2.66 \text{ cm}$$

όπου K_b, K_c δίνονται από πίνακα του παραρτήματος 2

4.5.3. Σύγκριση λύσεων

Τα αποτελέσματα των λύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα

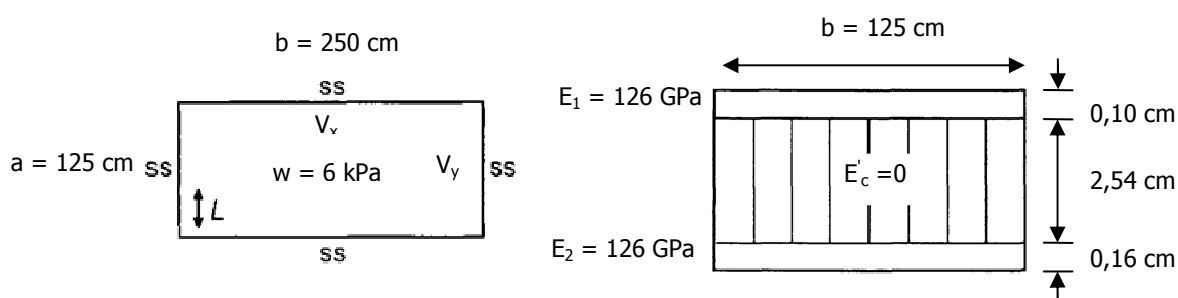
Πίνακας 4.1 Σύγκριση προσεγγιστικών και ακριβών λύσεων				
	Διατμητική τάση πυρήνα	Τάση πάνω στρώματος πάνελ	Τάση κάτω στρώματος πάνελ	Συνολική μετατόπιση (βύθιση)
Προσεγγιστική λύση	74,91 MPa	46,82 MPa	29,26 MPa	2,66 cm
Ακριβής λύση	74,88 MPa	48,72 MPa	30,82 MPa	2,66 cm
Διαφορές	0,0%	-3,9%	-5,1%	0,0%

Η κατά προσέγγιση πρότυπη μέθοδος έδωσε τάσεις κάμψης των προσόψεων ελαφρώς χαμηλότερες από την ακριβή μέθοδο, αλλά οι υπολογισθείσες τάσεις διάτμησης και μετατοπίσεις του πυρήνα ήταν οι ίδιες. Αυτή είναι η συνηθισμένη περίπτωση, καθώς η κατά προσέγγιση μέθοδος υποθέτει ότι οι καταπονήσεις και η εφελκυστική τάση είναι ομοιόμορφες σε κάθε εξωτερικό φύλλο. Αυτό δεν ισχύει, καθώς οι τάσεις θα είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στις ακραίες εξωτερικές επιφάνειες

4.6. Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων για απλά στηριζόμενες και ομοιόμορφα φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες με την λύση M. Levy – (Παράδειγμα)

Για την επίλυση του παραδείγματος θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του M. Levy όπως αυτή αναπτύχθηκε στην ενότητα 4.4.6.3.

Έστω ότι έχουμε μια απλά στηριζόμενη πλάκα πάνελ μήκους 8 ft, πλάτους 4 ft και πάχους 1.08 in στην οποία ασκείται ομοιόμορφο καταναμεμημένο φορτίο $w=120$ psf όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.3. Ο προσανατολισμός L του πυρήνα είναι προς την κατεύθυνση του πλάτους της πλάκας.



Σχήμα 5.3. Αμφιέρεστη πλάκα πάνελ ομοιόμορφα φορτισμένη και σχηματική τομή

Πειραματικές ιδιότητες υλικών που αποτελούν το πάνελ (από βιβλιογραφία)

Carbon tape: $F_c = 1,29$ GPa, $E_c = 126$ GPa, $\lambda = 0,99$, $\rho = 1.700$ Kg/m³

HRH-10-3.2-48 honeycomb:

minimum values: $\sigma_c = 2,24$ MPa, $\tau_L = 1,21$ MPa, $\tau_w = 0,69$ MPa

typical values: $E_c = 138$ MPa, $G_L = 41$ MPa, $G_w = 24$ MPa

Εντατικά φορτία πάνελ (από τυπολόγιο που προσάπτεται στο παράρτημα 3)

Συνολική βύθισξη $w_{\max}$: $w_{\max} = a \frac{q a^4}{D}$

Μέγιστη τέμνουσα δύναμη $V_{\max}$: $V_{\max} = \delta q a$

Μέγιστη ροπή κάμψης $M_{\max}$: $M_{\max} = (M_x)_{\max} = \beta q a^2$

Οι συντελεστές α , β , δ δίνονται από τον πίνακα 1 του Παραρτήματος 3.

Για λόγο $b/a = 2$ έχουμε:

$$\alpha = 0,01013, \beta = 0,1017, \delta_x = 0,503, \delta_y = 0,496$$

a) Διατμητική τάση πυρήνα

$$V_x^{\max} = \delta q a = 0,503 \times 6 \times 1,25 = 3,77 \text{ kPa/m}$$

$$\tau_C^L = \frac{V}{hb} = \frac{3,77}{0,0267 \times 1} = 141,2 \text{ kPa}, \quad F.S = \frac{1210 \times 0,88}{141,2} = 7,54$$

$$V_y^{max} = \delta q \alpha = 0,496 \times 6 \times 1,25 = 3,72 \text{ kPa/m}$$

$$\tau_C^L = \frac{V}{hb} = \frac{3,72}{0,0267 \times 1} = 139,3 \text{ kPa}, \quad F.S = \frac{1210 \times 0,88}{139,3} = 4,36$$

b) Τάση πάνω στρώματος πάνελ

$$M_{max} = \beta q \alpha^2 = 0,1017 \times 6.000 \times 1,25^2 = 953,4 \text{ Pa m/ m}$$

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb} = \frac{953,4}{0,001 \times 0,0267 \times 1} = 35,7 \text{ MPa}, \quad F.S = \frac{1.290}{35,7} = 36,13$$

c) Τάση κάτω στρώματος πάνελ

$$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb} = \frac{953,4}{0,0016 \times 0,0267 \times 1} = 22,3 \text{ MPa}, \quad F.S = \frac{1.290}{22,3} = 57,85$$

d) Ματατόπιση πάνελ

$$D = \frac{E_1 t_1 E_1 t_2 h^2 b}{E_1 t_1 \lambda_1 + E_1 t_2 \lambda_1} = \frac{(126 \times 10^9) \times 0,001 \times (126 \times 10^9) \times 0,0016 \times 0,0267^2 \times 1}{(126 \times 10^9) \times 0,001 \times 0,99 + (126 \times 10^9) \times 0,0016 \times 0,99} = 55.834 \text{ N m}$$

$$w_{max} = a \frac{q \alpha^4}{D} = 0,01013 \frac{6.000 \times 1,25^4}{55.834} = 2,66 \times 10^{-3} \text{ m}$$

e) Βάρος πάνελ

$$W = W_{t1} + W_c + W_{t2} + W_{adhesive} \\ = \frac{0,10}{100} \times 1.700 + \frac{2,54}{100} \times 48 + \frac{0,16}{100} \times 1.700 + 0 = 5,64 \text{ kgr/m}^2$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

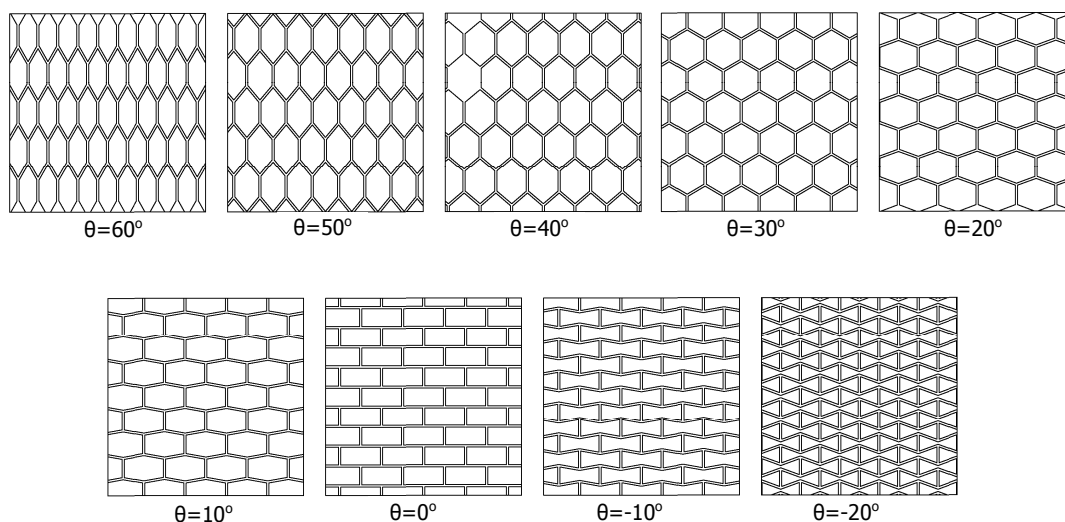
5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΥΠΟΥ SANDWICH

5.1. Γενικά

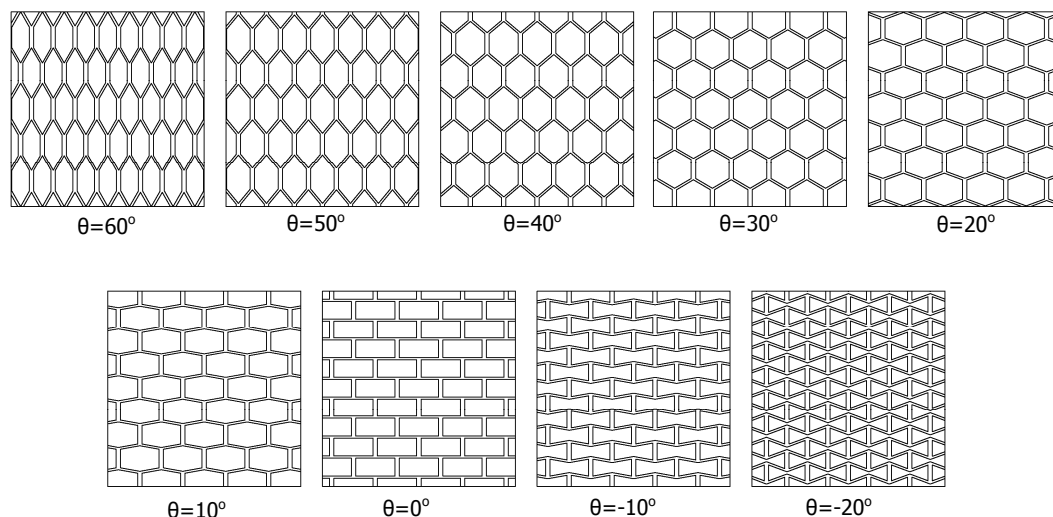
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παραθέσουμε με την βοήθεια του προγραμματισμού και της σύνδεσης υπολογιστικών φύλλων excel τα αποτελέσματα διαφόρων περιπτώσεων και θα αναλύσουμε τον σχεδιασμό σύνθετων υλικών τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα με εξαγωνικού σχήματος κελιά. Για την επίλυση του προβλήματος θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις και την θεωρία των κεφαλαίων 3 και 4 του παρόντος για μια δοκό πάνελ με διάφορο τρόπο στήριξης και διάφορο τρόπο φόρτισης. Κατά την επίλυση του προβλήματος θα διαπιστώσουμε διαφορετική συμπεριφορά της δοκού τύπου sandwich ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης, τον τρόπο στήριξης της δοκού, τα υλικά που χρησιμοποιούμε αλλά και την γεωμετρική δομή του πυρήνα.

5.2. Υπολογισμός μέτρων και τάσεων δισδιάστατων κυψελοειδών

Στην διεθνή βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει τις ιδιότητες (E, G, ν, σ) πολλών εμπορικών κυψελοειδών που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Πριν προχωρήσουμε όμως στην επίλυση του προβλήματος θα θέλαμε να σχεδιάσουμε ένα κυψελοειδές, να βρούμε τις ιδιότητές του καθώς και να τις συγκρίνουμε με αυτές που προκύπτουν αν αλλάξουμε για παράδειγμα την σχετική πυκνότητα του πυρήνα ή το σχήμα του κελιού (σχ. 5.1, 5.2).

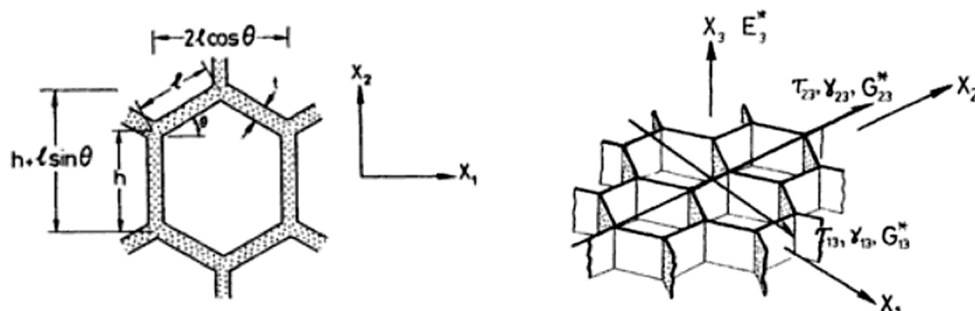


Σχήμα 5.1 Ανάπτυγμα κυψελοειδές μονού τοιχώματος t με εξαγωνικά κελιά για $h=1$ και $-20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$

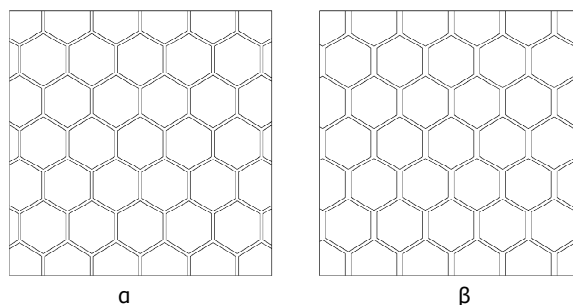


Σχήμα 5.2 Ανάπτυγμα κυψελοειδές διπλού τοιχώματος $2t$ με εξαγωνικά κελιά για $h = 1$ και $-20^\circ \geq \theta \geq 60^\circ$

Έστω ένα ακανόνιστο εξάγωνο όπου $h \neq 1$ και $\theta \neq 30^\circ$ (σχήμα 5.3) ή και ένα με τα τοιχώματα των κελιών σε μια κατεύθυνση να είναι παχύτερα από αυτά των άλλων (σχήμα 5.4). Οι ιδιότητες είναι ανισότροπες και μια πλήρης περιγραφή των ιδιοτήτων εντός και εκτός επίπεδου απαιτεί τον υπολογισμό των μέτρων E^*_1 , E^*_2 , E^*_3 , G^*_{12} , G^*_{13} , G^*_{23} , των ορθών τάσεων σ^*_1 , σ^*_2 , σ^*_3 και των διατμητικών τάσεων τ^*_{13} , τ^*_{23} .



Σχήμα 5.3 Ακανόνιστο κυψελοειδές με εξαγωνικού σχήματος κελιά. Οι ιδιότητες στο επίπεδο είναι εκείνες που σχετίζονται με τα φορτία που εφαρμόζονται στο επίπεδο X_1 - X_2 . Οι ιδιότητες με τα φορτία που εφαρμόζονται κατά μήκος του άξονα των κελιών - κατεύθυνση X_3 αναφέρονται ως ιδιότητες εκτός του επιπέδου



Σχήμα 5.4 Ανάπτυγμα κυψελοειδές με εξαγωνικού σχήματος κελιά. α) Κυψελοειδές μονού τοιχώματος t , β) Κυψελοειδές διπλού τοιχώματος $2t$

Με την βοήθεια του προγράμματος excel σχεδιάστηκε ένα υπολογιστικό φύλλο με το οποίο χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 3 υπολογίζουμε τα μέτρα και τις τάσεις

που απαιτούνται για την πλήρη περιγραφή των ιδιοτήτων των κυψελοειδών μονού ή διπλού τοιχώματος για $h \neq l$, $\theta \neq 30^\circ$.

Αρχικά σχεδιάζουμε το κυψελοειδές επιλέγοντας τα γεωμετρικά στοιχεία που επιθυμούμε δίνοντας τιμές στα κελιά που αντιστοιχούν οι μεταβλητές h , l , t , θ . Εν συνεχεία επιλέγουμε υλικό κατασκευής του πυρήνα δίνοντας τιμές στα κελιά που αντιστοιχούν οι μεταβλητές E_s , G_s , σ_{ys} , ρ , και ν . Τέλος δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε μεταξύ ενός κυψελοειδούς με εξαγωνικά κελιά με μονό ή διπλό τοίχωμα. Τα εμπορικά κυψελοειδή κατασκευάζονται συνήθως με τη συγκόλληση λωρίδων υλικού περιοδικά, έτσι ώστε όταν τραβηχτούν ή εξαπλωθούν (αναπτυχθούν), σχηματίζουν εξαγωνικά κελιά διπλού τοιχώματος.

Για το παράδειγμα που παραθέτουμε επιλέγουμε ένα κυψελοειδές αλουμινίου με εξαγωνικού σχήματος κελιά διπλού τοιχώματος (στην ερώτηση δώσε τιμή μεταξύ α ή β επιλέγουμε την ένδειξη β), πλάτους κελιού 0,32cm ($h = l = 0,183\text{cm}$) και πυκνότητας 34kg/m^3 που αντιστοιχεί σε πάχος περίπου $t = 0,002\text{cm}$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας - μέτρου διάτμησης και τάσεων κυψελοειδών με εξαγωνικού σχήματος κελιά													
2														
3														
4	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ													
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ													
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΜΕ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΑ													
23	Σταθερές κελιών													
24	h (cm) =	0,183 cm	E_s (GPa)=	69,00 GPa	ρ (KPa) =	2.700 Kg/m ³								
25	l (cm) =	0,183 cm	G_s (GPa)=	24,80 GPa	ν =	0,34								
26	t (cm) =	0,002 cm	σ_{ys} (MPa)=	34,5 MPa										
27	θ (°)=	30												
28														
29	Επέλεξε τύπο κυψελοειδή													
30	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΕΞΑΓΩΝΙΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ													
31	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΕΞΑΓΩΝΙΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ													

Σχήμα 5.5 Εισαγωγή δεδομένων στο λογιστικό φύλλο με τίτλο «εντατικά μεγέθη» του Excel

Αφού αποτυπωθούν όλα τα δεδομένα και οι παράμετροι του παραδείγματος, παρατίθενται για ενημέρωση του χρήστη οι μαθηματικές σχέσεις που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3 για τους δύο τύπους κυψελοειδών.

The figure consists of two screenshots of a Microsoft Excel spreadsheet. The top screenshot shows a table with two columns: 'ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΜΕ ΕΞΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΑ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ' (Single-walled hexagonal cellular structures) and 'ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΜΕ ΕΞΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ' (Double-walled hexagonal cellular structures). The bottom screenshot shows a continuation of the same table, with formulas for various properties like G_{23} , σ_{yz} , and τ_{13} .

ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΜΕ ΕΞΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΑ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ	ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΗ ΜΕ ΕΞΑΓΩΓΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΑ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ
$E_1^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin^2 \theta}$	$E_1^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos \theta}{(h/l + \sin \theta) \sin^2 \theta}$
$E_2^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{\cos^3 \theta}$	$E_2^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{\cos^3 \theta}$
$E_3^* = \left(\frac{h}{l} + 2\right) \frac{t}{2(h/l + \sin \theta) \cos \theta} = \frac{\rho^*}{\rho_s}$	$E_3^* = \left(\frac{t}{l}\right) \frac{(1 + h/l)}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta}$
$G_{12}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{(h/l)^2 (1 + 2h/l) \cos \theta}$	$G_{12}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{(h/l + \sin \theta)}{(h/l)^2 \cos \theta (1 + 16h/l)}$
$G_{23}^* \leq \frac{1}{2} \frac{h/l + 2 \sin^2 \theta}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta} \left(\frac{t}{l}\right)$	$G_{23}^* \leq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{h/l + \sin^2 \theta}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta}$
$G_{23}^* \geq \frac{h/l + \sin \theta}{(1 + 2h/l) \cos \theta} \left(\frac{t}{l}\right)$	$G_{23}^* \geq \left(\frac{t}{l}\right) \frac{h/l + \sin \theta}{(1 + h/l) \cos \theta}$
$(\sigma_{yz}^*)_1 = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin \theta) \sin \theta}$	$(\sigma_{yz}^*)_1 = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2(h/l + \sin \theta) \sin \theta}$
$(\sigma_{yz}^*)_2 = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2 \cos^2 \theta}$	$(\sigma_{yz}^*)_2 = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{2 \cos^2 \theta}$
$(\sigma_{yz}^*)_3 = \frac{(h/l + 2)}{2 \cos \theta} \left(\frac{t}{l}\right)$	$(\sigma_{yz}^*)_3 = \left(\frac{t}{l}\right) \frac{(1 + h/l)}{(h/l + \sin \theta) \cos \theta}$
$(\tau_{12}^*)_{yz} = \frac{1}{4} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{h/l \cos \theta}$	$(\tau_{12}^*)_{yz} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{1}{(h/l) \cos \theta}$
$\tau_{13}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 * E_s}{(1 - \nu_s^2) * (h/l + \sin \theta)}$	$\tau_{13}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 * E_s}{(1 - \nu_s^2) * (h/l + \sin \theta)}$
$\tau_{23}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 * E_s}{2 * (1 - \nu_s^2) * \cos \theta}$	$\tau_{23}^* = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{8,44 * E_s}{(1 - \nu_s^2) * \cos \theta} \frac{(1 + \sin \theta)}{(h/l + \sin \theta)}$

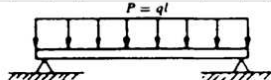
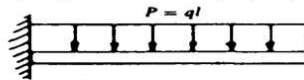
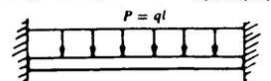
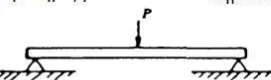
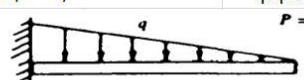
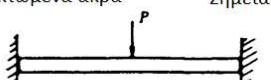
Σχήμα 5.6 Μαθηματικές σχέσεις που θα χρησιμοποιήσει το λογιστικό φύλλο του Excel για τους δύο τύπους κυψελοειδών.

Με τις δυνατότητες που διαθέτει το πρόγραμμα Excel με την εισαγωγή των συναρτήσεων και των μαθηματικών πράξεων που υπολογίζει, παρατίθενται οι ιδιότητες των κυψελοειδών που σχεδιάσαμε. Πολύ εύκολα αλλάζοντας τα δεδομένα (h , l , t , θ , E_s , G_s , σ_{ys} , ρ , ν και μονό ή διπλό τοίχωμα) σχεδιάζουμε νέα είδη κυψελοειδών με εξαγωνικού σχήματος κελιά ανάλογα με τις απαιτήσεις που θα ζητηθούν παρακάτω στην παράγραφο 5.3. Τέλος, αν περιστρέψουμε το κυψελοειδές κατά 90° μπορούμε πάλι να υπολογίσουμε τα μέτρα και τις τάσεις αν αντιστρέψουμε του άξονες 1, 2. Για παράδειγμα για μέτρο ελαστικότητας E_1 θα χρησιμοποιούμε αυτό του E_2 και αντίστροφα.

Παράδειγμα δοκού κεφ 5 - Microsoft Excel

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Πρόσθετα PDF Architect 7 Creator

Επικόλληση Αντιγραφή Πενόλο μορφοποίησης Πρόχειρο Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός Μορφοποίηση υπό όρους Μορφοποίηση ως πίνακας Στυλ Εισαγωγή Διαγραφή Μορφοποίηση Κελιά Αυτόματη Αθροισή Συμπλήρωση Απολοιοφή Ταξινόμηση & Εύρεση & Φίλτρο Επεξεργασία

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Υπολογισμός τάσεων – παραμορφώσεων δοκού πάνελ τύπου sandwich																
2																	
3	Τύπος δοκού																
4	A	Απλή στήριξη	Ομοιόμορφο φορτίο		E	Πρόβολος	Ομοιόμορφο φορτίο										
5																	
6	B	Πακτωμένα άκρα	Ομοιόμορφο φορτίο		ΣΤ	Πρόβολος	Σημειακή φόρτιση										
7																	
8	Γ	Απλή στήριξη	Σημειακή φόρτιση		Z	Πρόβολος	Τριγωνική φόρτιση										
9																	
10	Δ	Πακτωμένα άκρα	Σημειακή φόρτιση														
11																	
12																	
13	Επιλέξτε τύπο δοκού			φορτίο	ΔΩΣΕ ΤΙΜΗ	ΜΗΝ ΠΛΗΚΤΡΟΛΟΓΕΙΣ											
14	ΔΩΣΕ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΞΥ A - Z			α	q(kN/m) =	2,00 kN/m	P(ksf) =										
15																	
16	Προσανατολισμός πάνελ σε σχέση με την δοκό																
17	Προσανατολισμός L του πυρήνα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του μήκους του ανοίγματος (Ναι - Όχι) Ναι																
18																	

εντοπισμό μεγέθους κυματοειδούς Επένδυση δοκού Πίνακας 1 Πίνακας 2 Πίνακας 3 Πίνακας 4 Πίνακας 5 Πίνακας 6 Πίνακας 7

Ετοιμο 154% 7:24 μμ 14/1/2020

Σχήμα 5.8 Επιλογή τύπου στήριξης και φόρτισης δοκού

Έτσι το μέτρο ελαστικότητας και η ορθή τάση διαρροής του πυρήνα δίνονται από το μέτρο και την τάση στην κατεύθυνση εκτός επιπέδου (άξονας 3), δηλαδή τα E^*_3 και σ^*_3 . Αν ο προσανατολισμός L του πυρήνα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του μήκους του ανοίγματος τότε το μέτρο διάτμησης και η διατμητική τάση στην κατεύθυνση L θα είναι η G^*_{23} και η τ^*_{23} . Αντίστοιχα στην κατεύθυνση W θα είναι η G^*_{13} , και τ^*_{13} .

Για την επίλυση του προβλήματος δηλώνεται αν ο πυρήνας είναι μεταλλικός ή μη ώστε το πρόγραμμα να αξιολογήσει σωστά το διάγραμμα του παραρτήματος 2 και να υπολογίζει τον συντελεστή διόρθωσης ή ασφαλείας. Τέλος οι συντελεστές παραμόρφωσης K_b και K_s του παραρτήματος 2 υπολογίζονται αυτόματα με την είσοδο του τύπου φόρτισης και δοκού (α έως ζ).

Το πρόγραμμα στο φύλλο αυτό (επίλυση δοκού), χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που του δώσαμε σε συνδυασμό με αυτά που άντλησε από το πρώτο φύλλο (εντατικά μεγέθη κυψελοειδή) επιλύει την δοκό πάνελ τόσο με την προσεγγιστική όσο και με την αναλυτική μέθοδο (κεφ. 4) καθώς και συγκρίνει τα αποτελέσματα. Έτσι μπορούμε να επιλύσουμε πολύ εύκολα μια δοκό πάνελ χρησιμοποιώντας διάφορα υλικά ή και πάχη υλικών, ώστε να καταλήξουμε κάθε φορά στην επιθυμητή σχεδίαση ενός πάνελ τύπου sandwich.

Παραδειγμα δοκού κρφ 5 - Microsoft Excel

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Πρόσθετα PDF Architect 7 Creator

Επικόλληση Αποκοπή Αντιγραφή Πενέλο μορφοποίησης Προχειρό Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός Μορφοποίηση υπό όρους Μορφοποίηση ως πίνακα Στυλ Εισαγωγή Διαγραφή Μορφοποίηση Κελιά Επεξεργασία

Q49

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
54	Προσεγγιστική Μέθοδος																					
55	Στη μέθοδο αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη ο ουδέτερος άξονας λόγω διαφορετικού υλικού																					
56	εξωτερικών στρωμάτων πάνελ.																					
57																						
58	α) Διατμητική τάση πυρήνα																					
59																						
60	$\tau_c = \frac{V}{hb} = 74,91 \text{ KPa}$																					
61																						
62	$F.S. = \frac{t_c}{t_e} = 12,4$ όπου F.S. είναι ο συντελεστής ασφαλείας																					
63	και η τάση πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή διόρθωσης																					
64																						
65	β) Τάση πάνω στρώματος πάνελ																					
66																						
67	$\sigma_f = \frac{M}{t_f hb} = 46,82 \text{ MPa}$																					
68																						
69	<u>Έλεγχος σε πτύχωση</u>																					
70																						
71	$\sigma_{cr}^D = \frac{2E_f}{\lambda_f} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 = 25.330 \text{ MPa}$																					
72																						
73	<u>Έλεγχος σε ρυτίδωση</u>																					
74																						
75	$\sigma_{cr}^W = 0,82E_f \left[\frac{E_c t_f}{E_f t_c} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.760 \text{ MPa}$																					
76																						
77	Χρησιμοποιούμε το 80% της τυπικής τιμής του μέτρου ελαστικότητας του κυψελοειδούς,																					
78	διότι η τιμή αναφέρετε στο τυπικό και όχι το ελάχιστο μέτρο.																					
79																						
80	Διαπιστώνουμε ότι και οι δύο τάσεις τοπικού λυγισμού είναι αρκετά μεγαλύτερες από την τάση																					
81	διαρροής του εξωτερικού στρώματος, άρα δεν είναι κρίσιμες. Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό																					
82	του συντελεστή ασφαλείας λαμβάνουμε υπόψη την τάση διαρροής του υλικού και έτσι έχουμε:																					
83																						
84	$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = 27,6$																					
85																						

εντατικό μεγέθη κυψελοειδούς Επένδυση δοκού Πίνακας 1 Πίνακας 2 Πίνακας 3 Πίνακας 4 Πίνακας 5 Πίνακας 6 Πίνακας 7

Ετοιμο 125% 7:35 μμ 14/1/2020

Παραδειγμα δοκού κρφ 5 - Microsoft Excel

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Πρόσθετα PDF Architect 7 Creator

Επικόλληση Αντιγραφή Πίναλο μορφοποίησης Προχύρο Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός Μορφοποίηση υπο όρους Μορφοποίηση ως πίνακας Στυλ Εισαγωγή Διαγραφή Μορφοποίηση Κελιά Συμπλήρωση Απολοιφή Ταξινόμηση & Φιλτράρισμα Εύρεση & Επύλωση Επεξεργασία

Q49 fx

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
86																						
87	γ)	Τάση κάτω στρώματος πάνελ																				
88																						
89		$\sigma_f = \frac{M}{t_f h b} =$		29,26 MPa																		
90																						
91																						
92																						
93		$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} =$		36,9																		
94																						
95		Δεδομένου ότι το κάτω φύλλο βρίσκεται υπό εφελκυσμό δεν παρατηρούνται τοπικά προβλήματα																				
96		λυγισμού όπως πτύχωση ή ρυτίδωση.																				
97																						
98	δ)	Ματατόπιση πάνελ																				
99																						
100		Δυσκαμψία σε κάμψη, $D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2 b}{E_1 t_1 \lambda_2 + E_2 t_2 \lambda_2} =$							5,1E+04 N m^2													
101																						
102		Ακαμψία σε διάτμηση $U = h G_c b =$						6,62E+06 N														
103																						
104		Χρησιμοποιούμε το 80% της τυπικής τιμής του μέτρου διάτμησης του κυψελοειδούς,																				
105		διότι η τιμή αναφέρετε στο τυπικό και όχι το ελάχιστο μέτρο.																				
106																						
107		Για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου θεωρώ ότι το κατανεμημένο φορτίο ασκείται σε																				
108		όλο το εύρος του πάνελ.																				
109		Συνολικό φορτίο $P_{tot} :$		$P_{tot} = q l b =$				6.250 N														
110																						
111		$\Delta_{max} = K_b \frac{P l^3}{D} + K_c \frac{P l}{U} =$						2,51 cm														
112																						
113	ε)	Βάρος πάνελ																				
114																						
115		$W = W_{t1} + W_c + W_{t2} =$						5,06 Kg/m^2														
116																						
117																						

εντατικά μεγέθη κυψελοειδούς Επίλυση δοκού Αναλυτικό Μ60α8αα Πίνακας 1 Πίνακας 2 Πίνακας 3 Πίνακας 4 Πίνακας 5 Πίνακας 6 Πίνακας 7

Ετομιο 125% 7:35 μμ 14/1/2020

Σχήμα 5.10 Επίλυση δοκού πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα με την προσεγγιστική λύση

Παραδειγμα δοκού κρφ 5 - Microsoft Excel

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Πρόσθετα PDF Architect 7 Creator

Επικόλληση Αποκοπή Αντιγραφή Πενέλο μορφοποίησης Προηγμένο Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός Μορφοποίηση υπό όρους Μορφοποίηση ως πίνακα Σημειώσεις Εισαγωγή Διαγραφή Μορφοποίηση Κελιά Σύνολο

Q49 f_x

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
116																						
117																						
118																						
119																						
120																						
121																						
122																						
123																						
124																						
125																						
126																						
127																						
128																						
129																						
130																						
131																						
132																						
133																						
134																						
135																						
136																						
137																						
138																						
139																						
140																						
141																						
142																						
143																						
144																						
145																						
146																						

εντατικό μέγεθος κυρτωσίδους Επένδυση δοκού Πίνακας 1 Πίνακας 2 Πίνακας 3 Πίνακας 4 Πίνακας 5 Πίνακας 6 Πίνακας 7

Ετοιμότητα

EN 7:37 μμ 14/1/2020

Παράδειγμα δοκού κλπ 5 - Microsoft Excel

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή Πρόσθετα PDF Architect 7 Creator

Αποκοπή Αντιγραφή Πίναλο μορφοποίησης Πρώχειρο Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός Μορφοποίηση υπό έρους Μορφοποίηση ως πίνακα Στυλ Εισαγωγή Διαγραφή Μορφοποίηση Κελία Σύνταξη Αριθμοί Συμπλήρωση Ταίνομηση & φιλτράρισμα Εύρεση & επιλογή Επεξεργασία

Q49 fx

146

147 γ) Τάση κάτω στρώματος πάνελ

148

149
$$\sigma_f = \frac{M \times \bar{y}}{I} \left[\frac{E_2}{E_1} \right] = 30,82 \text{ MPa}$$

150

151
$$F.S. = \frac{F_c}{\sigma_f} = 35,0$$

152

153

154 δ) Ματατόπιση πάνελ

155

156 Δυσκαμψία σε κάμψη, $D = \frac{EI}{\lambda} = 5,1E+04 \text{ N m}^2$

157

158 Ακαμψία σε διάτμηση $U = hG_c b = 6,62E+06 \text{ N}$

159

160 Χρησιμοποιούμε το 80% της τυπικής τιμής του μέτρου διάτμησης του κυψελοειδούς,

161 διότι η τιμή αναφέρετε στο τυπικό και όχι το ελάχιστο μέτρο.

162

163
$$\Delta_{max} = K_b \frac{Pl^3}{D} + K_c \frac{Pl}{U} = 2,51 \text{ cm}$$

164

165

166

167 Σύγκριση προσεγγιστικών και ακριβών λύσεων

	Διατμητική τάση πυρήνα	Τάση πάνω στρώματος πάνελ	Τάση κάτω στρώματος πάνελ	Συνολική μετατόπιση (βύθιση)
168 Προσεγγιστική λύση	74,91 MPa	46,82 MPa	29,26 MPa	2,51 cm
169 Ακριβής λύση	74,88 MPa	48,72 MPa	30,82 MPa	2,51 cm
170 Διαφορές	0,0%	-3,9%	-5,1%	0,0%

171

172

εντατικά μεγέθη κυψελοειδούς Επίλυση δοκού Πίνακας 1 Πίνακας 2 Πίνακας 3 Πίνακας 4 Πίνακας 5 Πίνακας 6 Πίνακας 7

Ετοιμο

EN 7:39 μμ 14/1/2020

Σχήμα 5.11 Επίλυση δοκού πάνελ τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα με την αναλυτική λύση

5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Έχοντας σαν εργαλείο το πρόγραμμα που αναλύσαμε παραπάνω θα παρουσιάσουμε ομοιότητες και διαφορές που προκύπτουν αν αλλάξουμε για παράδειγμα την γεωμετρία ή το υλικό τόσο των εξωτερικών στρωμάτων όσο και του κυψελοειδή πυρήνα του πάνελ τύπου sandwich.

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιήσουμε τα αρχικά δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε στις παραγράφους 5.3 και 5.4 και θα πειραματιστούμε αρχικά πάνω στην αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κελιού του κυψελοειδή. Στον πίνακα 5.1 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ομοιόμορφα φορτισμένης αμφιέρεστης δοκού αν κρατήσουμε σταθερή την γωνία θ και αυξήσουμε ή μειώσουμε το κάθετο ύψος h σε σχέση με το κεκλιμένο l . Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις κυψελοειδών οι τάσεις τόσο των εξωτερικών στρωμάτων όσο και του πυρήνα παραμένουν σταθερές και ισοδύναμες. Σταθερή παραμένει και η συνολική μετατόπιση (βύθισμα) του πάνελ με μια μικρή αύξηση (1%) σε αυτή με μονό τοίχωμα κυψελοειδές. Αυτό που αλλάζει είναι ο συντελεστής ασφάλειας της διατμητικής τάσης του πυρήνα και μάλιστα μόνο στην περίπτωση πάνελ κυψελοειδή πυρήνα διπλού τοιχώματος. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος h/l τόσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ασφάλειας για την διάτμηση του πυρήνα. Αυτό συμβαίνει γιατί σύμφωνα με τις εξισώσεις που συνοψίζονται στον πίνακα 3.2 ο λόγος h/l εισέρχεται στον παρανομαστή και μάλιστα μόνο στην περίπτωση του κυψελοειδή διπλού τοιχώματος. Συνεπώς όσο μικρότερος λόγος h/l τόσο μεγαλύτερη διατμητική τάση διαρροής του υλικού άρα και μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας, δηλαδή πιο ασφαλές πάνελ.

Αύξηση σε σχέση με την μείωση του λόγου h/l παρουσιάζεται και στον έλεγχο σε ρυτίδωση και στις δύο περιπτώσεις κυψελοειδών επειδή στον υπολογισμό του εμπεριέχεται το μέτρο ελαστικότητας του πυρήνα. Όπως αναφέραμε και στο παράδειγμα της παραγράφου 4.5 οι τάσεις τοπικού λυγισμού είναι αρκετά μεγαλύτερες από την τάση διαρροής του εξωτερικού στρώματος, άρα δεν είναι κρίσιμες.

Τέλος μικρή αύξηση του βάρους (6%) παρατηρείται μεταξύ του κυψελοειδή πάνελ διπλού τοιχώματος σε σχέση με αυτή μονού τοιχώματος καθώς και σε κάθε αλλαγή των γεωμετρικών στοιχείων του κελιού.

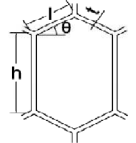
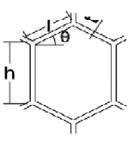
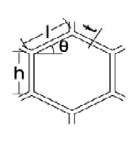
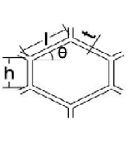
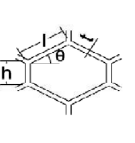
Στον πίνακα 5.2 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ομοιόμορφα φορτισμένης αμφιέρεστης δοκού αν θέσουμε όπου $h = l$ και μεταβάλουμε την γωνία θ σε ένα εύρος από -20° έως 60° . Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις κυψελοειδών οι τάσεις τόσο των εξωτερικών στρωμάτων όσο και του πυρήνα παραμένουν σταθερές και ισοδύναμες. Ο συντελεστής ασφάλειας της διατμητικής τάσης του πυρήνα αυξάνει όσο η γωνία θ γίνεται

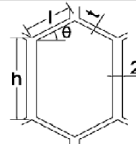
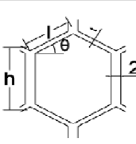
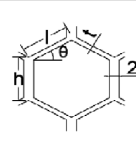
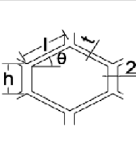
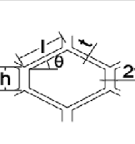
μεγαλύτερη από 0° ανεξαρτήτως του πρόσημου, λόγω του $\cos\theta$ που περιέχεται στον παρανομαστή του υπολογισμού της τάσης διαρροής του πυρήνα. Λιγότερο ασφαλές είναι δηλαδή το κυψελοειδές που το σχήμα της τείνει να γίνει ορθογώνιο. Και σε αυτό το παράδειγμα βλέπουμε ότι το πάνελ με κυψελοειδές διπλού τοιχώματος όπως και στο παράδειγμα του πίνακα 1 είναι ποιοτικά ασφαλέστερο. Ο έλεγχος σε πτύχωση ακολουθεί την ίδια διακύμανση που παρατηρείται και στον συντελεστή ασφάλειας του πυρήνα λόγω του τετραγώνου του μεγέθους του κελιού που εμπεριέχεται στον παρανομαστή της εξίσωσης υπολογισμού της τάσης σε πτύχωση. Όταν $\theta = 0$ τότε έχουμε το μεγαλύτερο εύρος κελιού και άρα μικρότερη κρίσιμη τάση σε πτύχωση. Ο έλεγχος σε ρυτίδωση μας δίνει ελάχιστη κρίσιμη τάση στο πάνελ με πυρήνα σχήματος κανονικού εξαγώνου. Κι εδώ στην περίπτωση πάνελ με κυψελοειδή πυρήνα διπλού τοιχώματος ο έλεγχος σε ρυτίδωση μας δίνει μεγαλύτερες τιμές. Όπως αναφέραμε και στο παράδειγμα της παραγράφου 4.5 οι τάσεις τοπικού λογισμού είναι αρκετά μεγαλύτερες από την τάση διαρροής του εξωτερικού στρώματος, άρα δεν είναι κρίσιμες και δεν θα ασχοληθούμε ξανά.

Η συνολική μετατόπιση (βύθισμα) του πάνελ εμφανίζει την μέγιστη τιμή όταν η γωνία βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0° και 10° , διότι τότε παρουσιάζεται η ελάχιστη δυσκαμψία σε διάτμηση U. Μικρή αύξηση (περίπου 1%) στη συνολική μετατόπιση δίνουν τα πάνελ με μονό τοίχωμα κυψελοειδές.

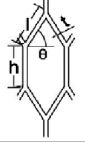
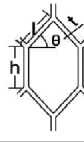
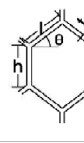
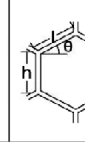
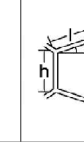
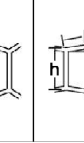
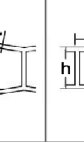
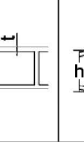
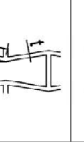
Στον πίνακα 5.3 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ομοιόμορφα φορτισμένης αμφιέρεστης δοκού αν θέσουμε $h = 1$ και μεταβάλουμε την γωνία θ σε ένα εύρος από -20° έως 60° και ταυτόχρονα αλλάξουμε τον προσανατολισμό L του πυρήνα, δηλαδή τον τοποθετήσουμε κάθετα προς το μήκος της δοκού. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις κυψελοειδών οι τάσεις τόσο των εξωτερικών στρωμάτων όσο και του πυρήνα παραμένουν σταθερές και ισοδύναμες. Ο συντελεστής ασφάλειας της διατμητικής τάσης του πυρήνα παρουσιάζει διακύμανση. Γενικά παρουσιάζεται αύξηση του συντελεστή όταν η γωνία θ μικραίνει σε σχέση με τις 30° του κανονικού εξαγώνου και μείωση όταν η γωνία αυξάνει. Τέλος σε σχέση με την περίπτωση του πίνακα 5.2 παρατηρούμε ότι με τον προσανατολισμό του πυρήνα κάθετα προς το μήκος L της δοκού αυξάνεται το βέλος κάμψης της δοκού.

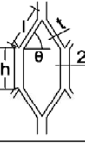
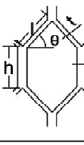
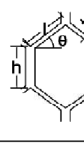
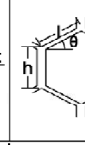
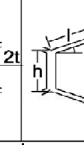
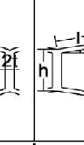
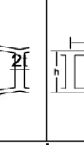
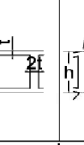
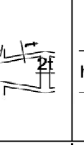
Πίνακας 5.1. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης σε σχέση με τον τύπο κελιού ($h \neq l$ & $\theta = 30^\circ$)

		ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ($\theta = 30^\circ$ & $h \neq l$)				
		$h = 2l$	$h = 3/2l$	$h = l$	$h = 2/3l$	$h = 1/2l$
						
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
2.	Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.370 MPa	1.420 MPa	1.520 MPa	1.630 MPa	1.710 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4.	Μετατόπιση	2,53 cm	2,53 cm	2,53 cm	2,53 cm	2,53 cm
5.	Βάρος πάνελ	4,60 Kg/m ³	4,67 Kg/m ³	4,77 Kg/m ³	4,90 Kg/m ³	4,99 Kg/m ³

		ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ ($\theta = 30^\circ$)				
		$h = 2l$	$h = 3/2l$	$h = l$	$h = 2/3l$	$h = 1/2l$
						
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	7,5	9,3	12,4	16,1	18,7
2.	Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.670 MPa	1.710 MPa	1.760 MPa	1.820 MPa	1.870 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4.	Μετατόπιση	2,51 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,52 cm
5.	Βάρος πάνελ	4,95 Kg/m ³	4,99 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,14 Kg/m ³	5,21 Kg/m ³

Πίνακας 5.2. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης σε σχέση με τον τύπο κελιού ($h = l$ & $\theta \neq 30^\circ$) και προσανατολισμός κυψελοειδούς παράλληλος προς την κατεύθυνση L δοκού

ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ (ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΦΟΡΗ ΤΩΝ 30°)									
	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -10^\circ$	$\theta = -20^\circ$
									
1. Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	10,8	8,4	7,0	6,3	5,8	5,5	5,4	5,5	5,8
2. Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α. Έλεγχος σε πτύχωση	76.010 MPa	46.090 MPa	32.470 MPa	25.330 MPa	21.510 MPa	19.640 MPa	19.000 MPa	19.640 MPa	21.510 MPa
2β. Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.800 MPa	1.630 MPa	1.550 MPa	1.520 MPa	1.550 MPa	1.620 MPa	1.740 MPa	1.930 MPa	2.210 MPa
3. Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4. Μετατόπιση	2,50 cm	2,51 cm	2,52 cm	2,53 cm	2,54 cm	2,55 cm	2,55 cm	2,54 cm	2,53 cm
5. Βάρος πάνελ	5,11 Kg/m ³	4,90 Kg/m ³	4,80 Kg/m ³	4,77 Kg/m ³	4,80 Kg/m ³	4,88 Kg/m ³	5,03 Kg/m ³	5,29 Kg/m ³	5,73 Kg/m ³

ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ (ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΦΟΡΗ ΤΩΝ 30°)									
	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -10^\circ$	$\theta = -20^\circ$
									
1. Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	21,6	16,8	14,1	12,4	11,4	10,9	10,8	10,9	11,4
2. Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α. Έλεγχος σε πτύχωση	76.010 MPa	46.090 MPa	32.470 MPa	25.330 MPa	21.510 MPa	19.640 MPa	19.000 MPa	19.640 MPa	21.510 MPa
2β. Έλεγχος σε ρυτίδωση	2.080 MPa	1.880 MPa	1.790 MPa	1.760 MPa	1.790 MPa	1.860 MPa	2.010 MPa	2.220 MPa	2.550 MPa
3. Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4. Μετατόπιση	2,50 cm	2,50 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,52 cm	2,52 cm	2,52 cm	2,51 cm	2,51 cm
5. Βάρος πάνελ	5,51 Kg/m ³	5,23 Kg/m ³	5,10 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,10 Kg/m ³	5,20 Kg/m ³	5,41 Kg/m ³	5,75 Kg/m ³	6,33 Kg/m ³

Πίνακας 5.3. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης σε σχέση με τον τύπο κελιού ($h = l$ & $\theta \neq 30^\circ$) και προσανατολισμός κυψελοειδούς κάθετος προς την κατεύθυνση L δοκού

		ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΜΟΝΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ (ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΦΟΡΗ ΤΩΝ 30°)								
		$\theta = 60^\circ$	$\theta = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -10^\circ$	$\theta = -20^\circ$
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	5,8	6,1	6,5	7,2	8,0	9,2	10,8	13,1	16,4
2.	Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	76.010 MPa	46.090 MPa	32.470 MPa	25.330 MPa	21.510 MPa	19.640 MPa	19.000 MPa	19.640 MPa	21.510 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.800 MPa	1.630 MPa	1.550 MPa	1.520 MPa	1.550 MPa	1.620 MPa	1.740 MPa	1.930 MPa	2.210 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4.	Μετατόπιση	2,58 cm	2,56 cm	2,54 cm	2,53 cm	2,52 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,50 cm
5.	Βάρος πάνελ	5,11 Kg/m ³	4,90 Kg/m ³	4,80 Kg/m ³	4,77 Kg/m ³	4,80 Kg/m ³	4,88 Kg/m ³	5,03 Kg/m ³	5,29 Kg/m ³	5,73 Kg/m ³

		ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΕΣ ΕΞΑΓΩΝΙΚΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΚΕΛΙΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΟ (ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΦΟΡΗ ΤΩΝ 30°)								
		$\theta = 60^\circ$	$\theta = 50^\circ$	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = -10^\circ$	$\theta = -20^\circ$
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa	74,91 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	5,8	6,1	6,5	7,2	8,0	9,2	10,8	13,1	16,4
2.	Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa	46,82 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	76.010 MPa	46.090 MPa	32.470 MPa	25.330 MPa	21.510 MPa	19.640 MPa	19.000 MPa	19.640 MPa	21.510 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	2.080 MPa	1.880 MPa	1.790 MPa	1.760 MPa	1.790 MPa	1.860 MPa	2.010 MPa	2.220 MPa	2.550 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa	29,26 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
4.	Μετατόπιση	2,58 cm	2,56 cm	2,54 cm	2,53 cm	2,52 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,51 cm	2,50 cm
5.	Βάρος πάνελ	5,51 Kg/m ³	5,23 Kg/m ³	5,10 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,10 Kg/m ³	5,20 Kg/m ³	5,41 Kg/m ³	5,75 Kg/m ³	6,33 Kg/m ³

Στον πίνακα 5.4 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ομοιόμορφα φορτισμένης αμφιέρεστης δοκού κρατώντας σταθερά τα πάχη των εξωτερικών φύλλων και μεταβάλλοντας το πάχος του πυρήνα.

Πίνακας 5.4. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης σε σχέση με το πάχος του πυρήνα

		ΔΟΚΟΣ ΤΥΠΟΥ ΣΑΝΤΟΥΙΤΣ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΑ ΠΑΧΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ ΠΥΡΗΝΑ t_c				
		$1/2t_c$	$2/3t_c$	t_c	$3/2t_c$	$2t_c$
						
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	142,86 KPa	109,69 KPa	74,91 KPa	50,76 KPa	38,39 KPa
	Συντελεστής ασφαλείας F.S.	7,3	9,1	12,4	16,6	20,1
2.	Τάση πάνω στρώματος	89,29 MPa	68,56 MPa	46,82 MPa	31,73 MPa	23,99 MPa
	Συντελεστής ασφαλείας F.S.	14,4	18,8	27,6	40,7	53,8
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	2.490 MPa	2.150 MPa	1.760 MPa	1.440 MPa	1.240 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	55,80 MPa	42,85 MPa	29,26 MPa	19,83 MPa	15,00 MPa
	Συντελεστής ασφαλείας F.S.	19,4	25,2	36,9	54,5	72,0
4.	Μετατόπιση	9,09 cm	5,37 cm	2,51 cm	1,16 cm	0,67 cm
5.	Βάρος πάνελ	4,48 Kg/m ³	4,68 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,64 Kg/m ³	6,22 Kg/m ³

Διαπιστώνουμε ότι αυξάνοντας το πάχος του πυρήνα μειώνεται αισθητά η διατμητική τάση του πυρήνα. Διπλασιασμός του πάχους συνεπάγεται μείωση κατά 50% περίπου της διατμητικής τάσης. Ανάλογα ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται όσο αυξάνει το πάχος του πυρήνα. Δηλαδή το πάνελ που θα χρησιμοποιήσουμε είναι πιο ασφαλές. Αντίστοιχα αποτελέσματα παίρνουμε και για την τάση του πάνω και κάτω φύλλου που συνθέτουν το πάνελ. Αύξηση έχουμε όμως και στο βάρος του πάνελ της τάξης του 5-10%. Η τιμή όμως που μειώνεται δραματικά είναι αυτή της συνολικής μετατόπισης (βύθισμα) του πάνελ. Από μία τιμή της τάξεως 9cm με 4πλασιασμό του πάχους του πυρήνα η μετατόπιση σχεδόν μηδενίζεται.

Στον πίνακα 5.5 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης της ομοιόμορφα φορτισμένης αμφιέρεστης δοκού κρατώντας σταθερό το πάχος του πυρήνα και μεταβάλλοντας τα πάχη των εξωτερικών φύλλων.

Διαπιστώνουμε ότι αυξάνοντας το πάχος των εξωτερικών φύλλων η μείωση της διατμητικής τάσης του πυρήνα είναι αμελητέα. Αντίθετα η επίδραση στην τάση των εξωτερικών φύλλων είναι μεγάλη, προκαλώντας μείωση της τάξεως από 13-52% και για τα δύο φύλλα ισόποσα. Αντίστροφα ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει αύξηση της τάξεως από 12-26% και για τα δύο φύλλα. Αύξηση έχουμε όμως και στο βάρος του πάνελ της τάξης του 20-35% με ότι αυτό συνεπάγεται για την κατασκευή. Η τιμή της συνολικής μετατόπισης

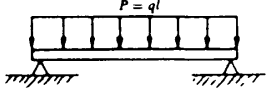
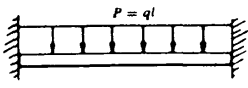
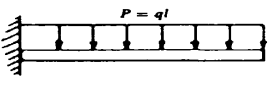
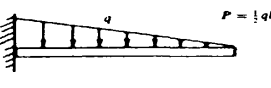
(βύθισμα) του πάνελ μειώνεται αισθητά, με ρυθμό όμως μικρότερο από ότι αν αυξάναμε το πάχος του πυρήνα.

Πίνακας 5.5. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων αμφιέρεστης δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης σε σχέση με το πάχος των εξωτερικών στρωμάτων

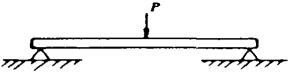
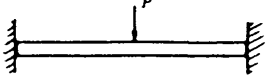
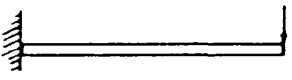
		ΔΟΚΟΣ ΤΥΠΟΥ SANDWICH ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΑΧΟΣ ΠΥΡΗΝΑ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΠΑΧΟΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ t_f				
		$1/2t_f$	$2/3t_f$	t_f	$4/3t_f$	$3/2t_f$
						
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	76,78 KPa	76,14 KPa	74,91 KPa	73,71 KPa	73,13 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	12,1	12,2	12,4	12,6	12,7
2.	Τάση πάνω στρώματος	95,97 MPa	71,38 MPa	46,82 MPa	34,55 MPa	30,47 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	13,4	18,1	27,6	37,3	42,3
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	6.330 MPa	11.260 MPa	25.330 MPa	45.030 MPa	56.990 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.240 MPa	1.440 MPa	1.760 MPa	2.030 MPa	2.150 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	59,98 MPa	44,61 MPa	29,26 MPa	21,59 MPa	19,04 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	18,0	24,2	36,9	50,0	56,7
4.	Μετατόπιση	5,25 cm	3,88 cm	2,51 cm	1,83 cm	1,61 cm
5.	Βάρος πάνελ	3,11 Kg/m³	3,76 Kg/m³	5,06 Kg/m³	6,36 Kg/m³	7,02 Kg/m³

Στους πίνακες 5.6 και 5.7 παραθέτονται τα αποτελέσματα της επίλυσης δοκού του αρχικού πάνελ τύπου sandwich που σχεδιάσαμε και επιλύσαμε στις ενότητες 5.2 και 5.3 με διαφορετικό τρόπο στήριξης και με διαφορετικό είδος φόρτισης. Τα αποτελέσματα δίνουν πληροφορίες στον μηχανικό για να καταλάβει ότι το πάνελ που θα χρησιμοποιήσει μπορεί να είναι μεν αποδεχτό για ένα είδος κατασκευής αλλά μη αποδεχτό για κάποιο άλλο. Για παράδειγμα βρίσκουμε μεγάλες διαφορές (σχεδόν διπλάσια) στις τάσεις και κυρίως στις μετατοπίσεις που εμφανίζονται στον πρόβολο σε σχέση με τα άλλα είδη στήριξης.

Πίνακας 5.6. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων δοκού τύπου sandwich ομοιόμορφα φορτισμένης αλλά με διαφορετικό τύπο στήριξης

					
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	149,81 KPa	74,91 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	12,4	12,4	6,2	12,4
2.	Τάση πάνω στρώματος	46,82 MPa	31,21 MPa	187,27 MPa	62,42 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	27,6	41,3	6,9	20,7
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.760 MPa	1.760 MPa	1.760 MPa	1.760 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	29,26 MPa	19,51 MPa	117,04 MPa	39,01 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	36,9	55,4	9,2	27,7
4.	Μετατόπιση	2,51 cm	5,00 cm	23,95 cm	6,40 cm
5.	Βάρος πάνελ	5,06 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³

Πίνακας 5.7. Σύγκριση τάσεων – παραμορφώσεων δοκού τύπου sandwich με σημειακή φόρτιση αλλά με διαφορετικό τύπο στήριξης

				
1.	Διατμητική τάση πυρήνα	74,91 KPa	74,91 KPa	149,81 KPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	12,4	12,4	6,2
2.	Τάση πάνω στρώματος	93,63 MPa	46,82 MPa	374,53 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	13,8	27,6	3,4
2α.	Έλεγχος σε πτύχωση	25.330 MPa	25.330 MPa	25.330 MPa
2β.	Έλεγχος σε ρυτίδωση	1.760 MPa	1.760 MPa	1.760 MPa
3.	Τάση κάτω στρώματος	58,52 MPa	29,26 MPa	234,08 MPa
	Συντελεστής ασφάλειας F.S.	18,5	36,9	4,6
4.	Μετατόπιση	3,23 cm	0,84 cm	51,04 cm
5.	Βάρος πάνελ	5,06 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³	5,06 Kg/m ³

Συμπεραίνοντας θα θέλαμε να τονίσουμε ότι για τη σωστή επιλογή των υλικών και των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιήσουμε για να σχεδιάσουμε και εντάξουμε στην κατασκευή πάνελ τύπου sandwich θα πρέπει να λάβουμε υπόψη πολλούς παράγοντες. Αρχικά με την βοήθεια της γρήγορης επίλυσης πολλών τύπων πάνελ και σε μεγάλο εύρος φορτίσεων και στηρίξεων με την χρήση του προγράμματος που σχεδιάστηκε στο excel μπορούμε να υπολογίσουμε τα εντατικά μεγέθη των πάνελ και να τα συγκρίνουμε. Ακολούθως θα πρέπει να επιλέξουμε το οικονομικότερο υλικό στο επιθυμητό πάχος και βάρος που μας χρειάζεται στην κατασκευή.

Πέραν όμως όλων αυτών θα πρέπει τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν να ανταποκρίνονται και σε άλλες απαιτήσεις σχεδιασμού. Θα πρέπει λοιπόν να συνδυάζονται οι θετικές ιδιότητες των μεταλλικών επιφανειών, δηλαδή η φέρουσα ικανότητα τους, η προστασία της μόνωσης από μηχανικές βλάβες, η προστασία από τις καιρικές συνθήκες και το φράγμα υδρατμών με τις συμπληρωματικές θετικές ιδιότητες του πυρήνα, δηλαδή τη θερμική και ακουστική μόνωση και την προστασία από τη διάβρωση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Βασικές έννοιες της μηχανικής υλικών

- Στην Κλασική Μηχανική, **δύναμη** είναι η αιτία που προκαλεί κάθε μεταβολή της κίνησης ή της γεωμετρίας των σωμάτων. Ένα σώμα μπορεί να δεχθεί ταυτόχρονα πολλές δυνάμεις το αποτέλεσμα των οποίων θα είναι σε κάθε σημείο μία συνισταμένη δύναμη και μία συνισταμένη ροπή. Όταν οι δυνάμεις αυτές εξουδετερώνονται μεταξύ τους τότε λέγεται ότι το σώμα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.
- **Τάση** (stress) σε μία διατομή, δηλαδή στην επιφάνεια νοητής τομής, στερεού σώματος ορίζεται η εσωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφανείας που ασκείται σε συγκεκριμένη επιφάνεια. Όταν η δύναμη είναι εφαπτόμενη στην επιφάνεια, η τάση ονομάζεται διατμητική τάση (shear stress). Όταν η δύναμη είναι κάθετη στην επιφάνεια, η τάση ονομάζεται ορθή τάση (normal stress). Όταν η ορθή τάση κατευθύνεται προς την επιφάνεια, τείνει να την συμπίσει, ονομάζεται θλιπτική τάση (compressive stress), και όταν η ορθή τάση κατευθύνεται μακριά από την επιφάνεια, τείνει να το επιμηκύνει, καλείται τάση εφελκυσμού (tensile stress).
- **Τέμνουσα δύναμη** (shear force) κείται στο επίπεδο της διατομής και ονομάζεται ακόμη εγκάρσια ή διατμητική δύναμη.
- **Κάμψη** (Bending) είναι το αποτέλεσμα κάθετων δυνάμεων ή ροπών που ασκούνται σε ένα σώμα. Όπως το σώμα τείνει να καμπυλωθεί στη μία πλευρά του προκαλείται θλίψη (συμπίεση) και στην άλλη εφελκυσμός (τράβηγμα). Η κάμψη προκαλεί την παραμόρφωση ή ακόμα και την θραύση του σώματος.
- **Διάτμηση** (shear) ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα όταν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις ενεργούν κάθετα στον άξονα του. Στη μηχανική διατμητική τάση ονομάζεται το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται σε μια διατομή του υλικού προς την επιφάνεια της διατομής. Δηλαδή η διατμητική τάση είναι η τάση που είναι παράλληλη στο επίπεδο της διατομής.
- **Εφελκυσμός** (tensile) ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα όταν επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το διασπάσουν.

- **Θλίψη** (compressive) ονομάζεται η καταπόνηση που εμφανίζεται σε ένα σώμα, όταν επάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να το συνθλίψουν.
- **Λυγισμός** (buckling) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια λεπτή ελαστική ράβδος με ευθύγραμμο άξονα που υποβάλλεται σε κεντρική θλίψη συνεχώς αυξανόμενης έντασης μεταπίπτει μετά από κάποια οριακή φόρτιση σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας. Σε αυτή την κατάσταση με την επίδραση μιας ελάχιστης αιτίας παρουσιάζει μεγάλο βέλος κάμψης και ξεφεύγει από την ευθύγραμμη μορφή χωρίς να επανέρχεται μετά την αποφόρτιση.
- **Ροπή δυνάμεως** ως προς σημείο είναι το διανυσματικό φυσικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο προς το γινόμενο της δύναμης επί την (κάθετη) απόσταση της δύναμης από το σημείο. Στην ουσία πρόκειται για ένα ψευδοδιάνυσμα που περιγράφει την ύπαρξη ή δημιουργία ζεύγους δυνάμεων.
- Το **μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο Young (E)** (modulus of elasticity or Young's modulus or Tensile Modulus) εκφράζει την ακαμψία του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε ελαστική παραμόρφωση. Το μέτρο ελαστικότητας Young ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει κατά μήκος προς την μεταβολή του μήκους του.
- Το **μέτρο διάτμησης G** (shear modulus or modulus of rigidity) χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που παραμορφώνεται το σχήμα τους χωρίς να μεταβάλλεται ο όγκος του. Αποτελεί μια ελαστική σταθερά – φυσική ιδιότητα των υλικών και εκφράζει την αντίσταση που έχει ένα υλικό κατά την ελαστική διατμητική παραμόρφωση που υφίσταται. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή την μεταβολή του μήκους της μίας του πλευράς στην οποία ασκείται η τάση προς το μήκος της πλευράς στην οποία δεν εφαρμόζεται τάση.
- Το **μέτρο ελαστικότητας όγκου** (bulk modulus) χαρακτηρίζει τρισδιάστατα υλικά σώματα που κατά την παραμόρφωσή τους μεταβάλλεται ο όγκος τους. Ισούται με την τάση που εφαρμόζεται στο σώμα και το παραμορφώνει προς την μεταβολή του όγκου του σώματος.
- **Δυσθραυστότητα** (fracture toughness) είναι η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια χωρίς να υφίσταται θραύση. Το εμβαδόν της περιοχής που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό της ενέργειας

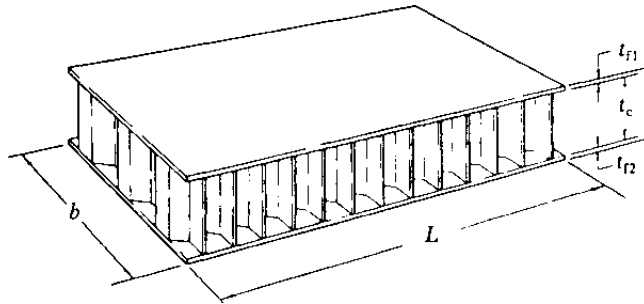
που μπορεί να απορροφηθεί από το υλικό πριν σπάσει. Το εμβαδόν αυτό αποτελεί ένα μέτρο της δυσθραυστότητας του υλικού.

- **Μέτρο ανθεκτικότητας** (resilience) ή μέτρο δυσθραυστότητας ελαστικής περιοχής είναι η ελαστική ενέργεια ανά μονάδα όγκου, η οποία απαιτείται για την παραμόρφωση του δοκιμίου έως το σημείο διαρροής, δηλ. το εμβαδόν κάτω από το ελαστικό τμήμα της καμπύλης του διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης.
- **Σκληρότητα** (toughness) ή μέτρο δυσθραυστότητας πλαστικής περιοχής είναι η συνολική ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται από το δοκίμιο μέχρι τη θραύση του, δηλ. το εμβαδόν κάτω από ολόκληρη την καμπύλη του διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης. Δηλαδή είναι η ιδιότητα του υλικού να αντιστέκεται στην πλαστική παραμόρφωση, συνήθως υπό κρουστικό φορτίο.
- Ο λόγος του **Poisson ν** ορίζεται ως ο αρνητικός λόγος της εγκάρσιας προς τη διαμήκη παραμόρφωση του υλικού όταν αυτό εντείνεται μονοαξονικά κατά τη διαμήκη διεύθυνση.
- **Ανηγμένη Παραμόρφωση ϵ** (strain) (για μονοαξονική φόρτιση) είναι ο λόγος της μεταβολής του μήκους ενός σώματος προς το μήκος του σώματος. Είναι το αποτέλεσμα της ανάπτυξης των τάσεων ως αντίδραση στις εξωτερικά επιβαλλόμενες δυνάμεις ή στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η παραμόρφωση είναι αδιάστατη ποσότητα.
- **Παραμόρφωση** (deformation) είναι η αλλαγή στο σχήμα ή τις διαστάσεις ενός σώματος που παράγεται από τις τάσεις. Η επιμήκυνση χρησιμοποιείται συχνά για εφελκυστική παραμόρφωση, συμπίεση ή βράχυνση για θλιπτική παραμόρφωση και εφαπτομενική παραμόρφωση (distortion) για διατμητική παραμόρφωση. Η ελαστική παραμόρφωση (elastic deformation) είναι παραμόρφωση που πάντα εξαφανίζεται κατά την αφαίρεση της τάσης, ενώ η μόνιμη ή πλαστική παραμόρφωση (permanent or plastic deformation) είναι αυτή που παραμένει μετά την αφαίρεση της τάσης.
- Η **ροπή αδράνειας** είναι μέγεθος της μηχανικής και εκφράζει την κατανομή των υλικών σημείων ενός σώματος ως προς έναν άξονα περιστροφής. Συμβολίζεται συνήθως ως I και υπολογίζεται ως άθροισμα γινομένων στοιχειωδών μαζών επί το τετράγωνο της απόστασής τους από έναν άξονα.
- **Όριο ή τάση διαρροής** (yield stress) καλείται η κρίσιμη τιμή εφαρμοζόμενης τάσης σε ένα στερεό σώμα πέρα από την οποία μέρος της παραμόρφωσης παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλαστική. Σε υλικά που είναι δύσκολο να ευρεθεί ορίζεται ως η τάση που αποδίδει 0,2% πλαστική παραμόρφωση (συμβατική τάση διαρροής).

- **Όριο Αντοχή σε εφελκισμό** (Tensile Strength) ή Όριο αντοχής είναι η μέγιστη τάση στην καμπύλη τάσεως παραμορφώσεως, δηλαδή η τιμή της τάσης μετά την οποία το δοκίμιο σχηματίζει λαιμό και τελικά σπάει.
- **Τάση θραύσεως** (fracture strength) ή Όριο αστοχίας είναι το τελευταίο σημείο στην καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, και αντιστοιχεί στην τάση στην οποία αστόχησε το υλικό. Για όλκιμα υλικά το όριο αντοχής είναι μεγαλύτερο της τάσης θραύσεως.
- **Δυσκαμψία** (stiffness) είναι η αντίσταση σε ελαστική παραμόρφωση.
- **Ψαθυρότητα** (brittle) ονομάζεται η ιδιότητα των υλικών να παρουσιάζουν μικρές παραμορφώσεις πριν τη θραύση τους. Αποτέλεσμα της μικρής παραμόρφωσης είναι η μειωμένη ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια πριν αστοχήσουν.
- **Ερπυσμός** (creep) λέγεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Το φαινόμενο εκδηλώνεται σε ψηλές θερμοκρασίες και όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για παρατεταμένο χρόνο.
- **Ισότροπο** υλικό όταν έχει σε όλες τις διευθύνσεις τις ίδιες ιδιότητες. Δηλαδή έχουν την ίδια δύναμη και ελαστικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, μέτρο διάτμησης και λόγο Poisson) σε όλες τις κατευθύνσεις.
- **Φέρουσα ικανότητα** σώματος (load-bearing capacity) ονομάζουμε την αντοχή του σώματος σε θραύση λόγω διατμητικών δυνάμεων.
- Η **ενδοτράχυνση ή εργοσκλήρυνση** (strain hardening) είναι μέθοδος αύξησης της αντοχής και της σκληρότητας ενός μεταλλικού υλικού (μετάλλου ή κράματος) σε παραμόρφωση πέρα από το όριο διαρροής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Εντατικά μεγέθη δοκών τύπου sandwich με κυψελοειδή πυρήνα



$$h = \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f2}}{2} + t_c$$

Τύπος δοκού	Μέγιστη τέμνουσα δύναμη V	Μέγιστη ροπή κάμψης M	Σταθερά καμπτικής απόκλισης K _b	Σταθερά διατμητικής απόκλισης K _s
Απλή στήριξη Ομοιόμορφο φορτίο $P = ql$	0,5P	0,125PL	0,01302	0,125
Πακτωμένα άκρα Ομοιόμορφο φορτίο $P = ql$	0,5P	0,08333PL	0,002604	0,125
Απλή στήριξη Σημειακή φόρτιση P	0,5P	0,25PL	0,02083	0,25
Πακτωμένα άκρα Σημειακή φόρτιση P	0,5P	0,125PL	0,00521	0,25
Πρόβολος Ομοιόμορφο φορτίο $P = ql$	P	0,5PL	0,125	0,5
Πρόβολος Σημειακή φόρτιση P	P	PL	0,3333	1
Πρόβολος Τριγωνική φόρτιση $P = \frac{1}{2}ql$	P	0,3333PL	0,06666	0,333

Τάση εξωτερικών στρωμάτων λόγω κάμψης

$$\sigma_{fi} = \frac{M}{t_{fi}hb} \quad \text{όπου } i = 1 \text{ ή } 2$$

Διατμητική τάση πυρήνα

$$\tau_c = \frac{V}{hb}$$

Συνολική απόκλιση δοκού (βέλος κάμψης)

$$\Delta = K_b \frac{PL^3}{D} + K_s \frac{PL}{hG_c b}$$

$$\text{όπου } D = \frac{E_1 t_1 E_2 t_2 h^2 b}{E_1 t_1 \lambda_1 + E_2 t_2 \lambda_2}$$

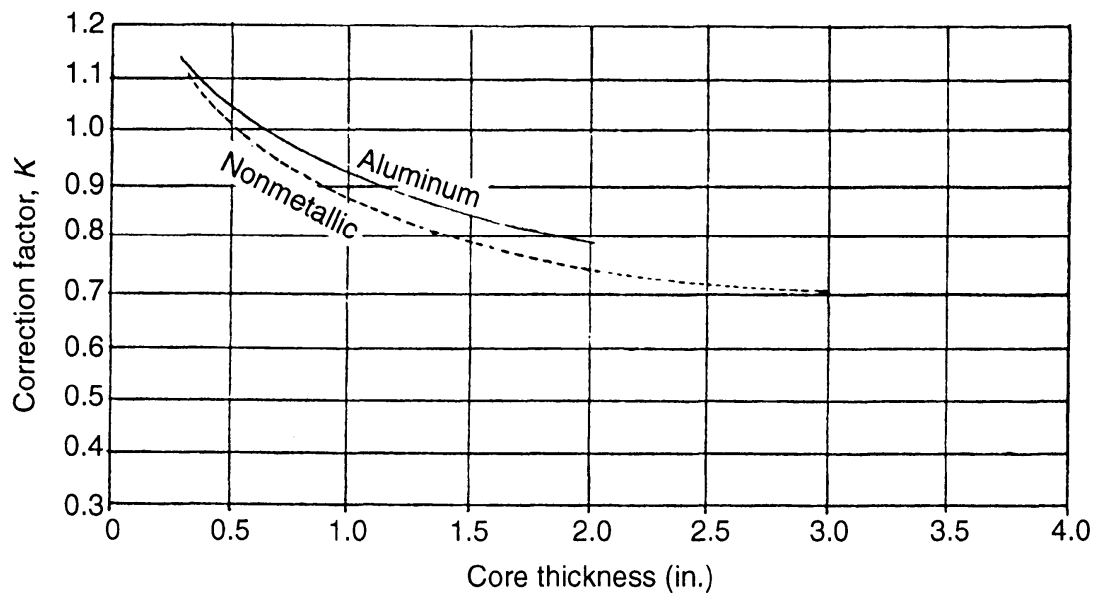
Παραμόρφωσης κελιού (dimpling) σε τοπικό λυγισμό

$$\sigma_{cr}^D = \frac{2E_f}{\lambda_f} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2$$

Επιφανειακής ρυτίδωσης (wrinkling) σε τοπικό λυγισμό

$$\sigma_{cr}^w = 0.82E_f \left[\frac{E_c t_f}{E_f t_c} \right]^{1/2}$$

Διάγραμμα Υπολογισμού συντελεστή διόρθωσης K



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

Διαγράμματα υπολογισμού συντελεστών α , β , δ , n για τον υπολογισμό τάσεων πάνελ τύπου sandwich σύμφωνα με την εναλλακτική λύση για απλά υποστηριζόμενες ορθογώνιες πλάκες (M. Levy)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Αριθμητικοί παράγοντες α , β , γ , δ , n για απλά υποστηριζόμενες και ομοιόμορφα φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες
 $\nu = 0,3$

b/a	$w_{\max}$ $= \alpha \frac{qa^4}{D}$	$(M_x)_{\max}$ $= \beta qa^2$	$(M_y)_{\max}$ $= \beta_1 qa^2$	$(Q_x)_{\max}$ $= \gamma qa$	$(Q_y)_{\max}$ $= \gamma_1 qa$	$(V_x)_{\max}$ $= \delta qa$	$(V_y)_{\max}$ $= \delta_1 qa$	R $= nqa^2$
	α	β	β_1	γ	γ_1	δ	δ_1	n
1.0	0.00406	0.0479	0.0479	0.338	0.338	0.420	0.420	0.065
1.1	0.00485	0.0554	0.0493	0.360	0.347	0.440	0.440	0.070
1.2	0.00564	0.0627	0.0501	0.380	0.353	0.455	0.453	0.074
1.3	0.00638	0.0694	0.0503	0.397	0.357	0.468	0.464	0.079
1.4	0.00705	0.0755	0.0502	0.411	0.361	0.478	0.471	0.083
1.5	0.00772	0.0812	0.0498	0.424	0.363	0.486	0.480	0.085
1.6	0.00830	0.0862	0.0492	0.435	0.365	0.491	0.485	0.086
1.7	0.00883	0.0908	0.0486	0.444	0.367	0.496	0.488	0.088
1.8	0.00931	0.0948	0.0479	0.452	0.368	0.499	0.491	0.090
1.9	0.00974	0.0985	0.0471	0.459	0.369	0.502	0.494	0.091
2.0	0.01013	0.1017	0.0464	0.465	0.370	0.503	0.496	0.092
3.0	0.01223	0.1189	0.0406	0.493	0.372	0.505	0.498	0.093
4.0	0.01282	0.1235	0.0384	0.498	0.372	0.502	0.500	0.094
5.0	0.01297	0.1246	0.0375	0.500	0.372	0.501	0.500	0.095
∞	0.01302	0.1250	0.0375	0.500	0.372	0.500	0.500	0.095

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Αριθμητικοί παράγοντες β' , β_1' για υπολογισμό ροπών κάμψεων απλά υποστηριζόμενες και ομοιόμορφα φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες $\nu = 0,3$, $b \geq a$

b/a	$M_x = \beta' q a^2, y = 0$					$M_y = \beta_1' q a^2, y = 0$				
	$x = 0.1a$	$x = 0.2a$	$x = 0.3a$	$x = 0.4a$	$x = 0.5a$	$x = 0.1a$	$x = 0.2a$	$x = 0.3a$	$x = 0.4a$	$x = 0.5a$
1.0	0.0209	0.0343	0.0424	0.0466	0.0479	0.0168	0.0303	0.0400	0.0459	0.0479
1.1	0.0234	0.0389	0.0486	0.0541	0.0554	0.0172	0.0311	0.0412	0.0475	0.0493
1.2	0.0256	0.0432	0.0545	0.0607	0.0627	0.0174	0.0315	0.0417	0.0480	0.0501
1.3	0.0277	0.0472	0.0599	0.0671	0.0694	0.0175	0.0316	0.0419	0.0482	0.0503
1.4	0.0297	0.0509	0.0649	0.0730	0.0755	0.0175	0.0315	0.0418	0.0481	0.0502
1.5	0.0314	0.0544	0.0695	0.0783	0.0812	0.0173	0.0312	0.0415	0.0478	0.0498
1.6	0.0330	0.0572	0.0736	0.0831	0.0862	0.0171	0.0309	0.0411	0.0472	0.0492
1.7	0.0344	0.0599	0.0773	0.0874	0.0908	0.0169	0.0306	0.0405	0.0466	0.0486
1.8	0.0357	0.0623	0.0806	0.0913	0.0948	0.0167	0.0301	0.0399	0.0459	0.0479
1.9	0.0368	0.0644	0.0835	0.0948	0.0985	0.0165	0.0297	0.0393	0.0451	0.0471
2.0	0.0378	0.0663	0.0861	0.0978	0.1017	0.0162	0.0292	0.0387	0.0444	0.0464
2.5	0.0413	0.0729	0.0952	0.1085	0.1129	0.0152	0.0272	0.0359	0.0412	0.0430
3.0	0.0431	0.0763	0.1000	0.1142	0.1189	0.0145	0.0258	0.0340	0.0390	0.0406
4.0	0.0445	0.0791	0.1038	0.1185	0.1235	0.0138	0.0246	0.0322	0.0369	0.0384
∞	0.0450	0.0800	0.1050	0.1200	0.1250	0.0135	0.0240	0.0315	0.0360	0.0375

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Αριθμητικοί παράγοντες β'' , β_1'' για υπολογισμό ροπών κάμψεων απλά υποστηριζόμενες και ομοιόμορφα φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες $\nu = 0,3$, $b \geq a$

b/a	$M_x = \beta'' q a^2, x = a/2$					$M_y = \beta_1'' q a^2, x = a/2$				
	$y = 0.4a$	$y = 0.3a$	$y = 0.2a$	$y = 0.1a$	$y = 0$	$y = 0.4a$	$y = 0.3a$	$y = 0.2a$	$y = 0.1a$	$y = 0$
1.0	0.0168	0.0303	0.0400	0.0459	0.0479	0.0209	0.0343	0.0424	0.0466	0.0479
1.1	0.0197	0.0353	0.0465	0.0532	0.0554	0.0225	0.0363	0.0442	0.0481	0.0493
1.2	0.0225	0.0401	0.0526	0.0600	0.0627	0.0239	0.0379	0.0454	0.0490	0.0501
1.3	0.0252	0.0447	0.0585	0.0667	0.0694	0.0252	0.0391	0.0462	0.0494	0.0503
1.4	0.0275	0.0491	0.0639	0.0727	0.0755	0.0263	0.0402	0.0468	0.0495	0.0502
1.5	0.0302	0.0532	0.0690	0.0781	0.0812	0.0275	0.0410	0.0470	0.0493	0.0498
1.6	0.0324	0.0571	0.0737	0.0832	0.0862	0.0288	0.0417	0.0471	0.0489	0.0492
1.7	0.0348	0.0607	0.0780	0.0877	0.0908	0.0295	0.0423	0.0470	0.0484	0.0486
1.8	0.0371	0.0641	0.0819	0.0917	0.0948	0.0304	0.0428	0.0469	0.0478	0.0479
1.9	0.0392	0.0673	0.0854	0.0953	0.0985	0.0314	0.0433	0.0467	0.0472	0.0471
2.0	0.0413	0.0703	0.0887	0.0986	0.1017	0.0322	0.0436	0.0464	0.0465	0.0464
2.5	0.0505	0.0828	0.1012	0.1102	0.1129	0.0360	0.0446	0.0447	0.0435	0.0430
3	0.0586	0.0923	0.1092	0.1168	0.1189	0.0389	0.0447	0.0431	0.0413	0.0406
4	0.0723	0.1054	0.1180	0.1224	0.1235	0.0426	0.0436	0.0406	0.0389	0.0384
∞	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.1250	0.0375	0.0375	0.0375	0.0375	0.0375

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Αριθμητικός παράγοντας α για εκτροπές απλά υποστηριζόμενης ορθογώνιας πλάκας υπό τριγωνική φόρτιση $q = q_0x/a$
 $\nu = 0,3, \beta > \alpha$
 $w = \alpha q_0 a^4/D, y = 0$**

b/a	$x = 0.25a$	$x = 0.50a$	$x = 0.60a$	$x = 0.75a$
1	0.00131	0.00203	0.00201	0.00162
1.1	0.00158	0.00243	0.00242	0.00192
1.2	0.00186	0.00282	0.00279	0.00221
1.3	0.00212	0.00319	0.00315	0.00248
1.4	0.00235	0.00353	0.00348	0.00273
1.5	0.00257	0.00386	0.00379	0.00296
1.6	0.00277	0.00415	0.00407	0.00317
1.7	0.00296	0.00441	0.00432	0.00335
1.8	0.00313	0.00465	0.00455	0.00353
1.9	0.00328	0.00487	0.00475	0.00368
2.0	0.00342	0.00506	0.00494	0.00382
3.0	0.00416	0.00612	0.00592	0.00456
4.0	0.00437	0.00641	0.00622	0.00477
5.0	0.00441	0.00648	0.00629	0.00483
∞	0.00443	0.00651	0.00632	0.00484

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Αριθμητικοί παράγοντες β, β_1 για υπολογισμό ροπών κάμψεων απλά υποστηριζόμενες και τριγωνικά φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες $q = q_0x/a$
 $\nu = 0,3, b \geq a$**

b/a	$M_x = \beta a^2 q_0, y = 0$				$M_y = \beta_1 a^2 q_0, y = 0$			
	$x = 0.25a$	$x = 0.50a$	$x = 0.60a$	$x = 0.75a$	$x = 0.25a$	$x = 0.50a$	$x = 0.60a$	$x = 0.75a$
1.0	0.0132	0.0239	0.0264	0.0259	0.0149	0.0239	0.0245	0.0207
1.1	0.0156	0.0276	0.0302	0.0289	0.0155	0.0247	0.0251	0.0211
1.2	0.0179	0.0313	0.0338	0.0318	0.0158	0.0250	0.0254	0.0213
1.3	0.0200	0.0346	0.0371	0.0344	0.0160	0.0252	0.0255	0.0213
1.4	0.0221	0.0376	0.0402	0.0367	0.0160	0.0253	0.0254	0.0212
1.5	0.0239	0.0406	0.0429	0.0388	0.0159	0.0249	0.0252	0.0210
1.6	0.0256	0.0431	0.0454	0.0407	0.0158	0.0246	0.0249	0.0207
1.7	0.0272	0.0454	0.0476	0.0424	0.0155	0.0243	0.0246	0.0205
1.8	0.0286	0.0474	0.0496	0.0439	0.0153	0.0239	0.0242	0.0202
1.9	0.0298	0.0492	0.0513	0.0452	0.0150	0.0235	0.0238	0.0199
2.0	0.0309	0.0508	0.0529	0.0463	0.0148	0.0232	0.0234	0.0197
3.0	0.0369	0.0594	0.0611	0.0525	0.0128	0.0202	0.0207	0.0176
4.0	0.0385	0.0617	0.0632	0.0541	0.0120	0.0192	0.0196	0.0168
5.0	0.0389	0.0623	0.0638	0.0546	0.0118	0.0187	0.0193	0.0166
∞	0.0391	0.0625	0.0640	0.0547	0.0117	0.0187	0.0192	0.0165

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Αριθμητικοί παράγοντες δ' , δ_1 για υπολογισμό ροπών κάμψεων απλά υποστηριζόμενες και τριγωνικά φορτισμένες ορθογώνιες πλάκες $q = q_0x/a$
 $\nu = 0,3$, $b \geq a$

b/a	Reactions $\delta q_0 a$				Reactions $\delta_1 q_0 b$			
	$x = 0$		$x = a$		$y = \pm b/2$			
	$y = 0$	$y = 0.25b$	$y = 0$	$y = 0.25b$	$x = 0.25a$	$x = 0.50a$	$x = 0.60a$	$x = 0.75a$
1.0	0.126	0.098	0.294	0.256	0.115	0.210	0.234	0.239
1.1	0.136	0.107	0.304	0.267	0.110	0.199	0.221	0.224
1.2	0.144	0.114	0.312	0.276	0.105	0.189	0.208	0.209
1.3	0.150	0.121	0.318	0.284	0.100	0.178	0.196	0.196
1.4	0.155	0.126	0.323	0.292	0.095	0.169	0.185	0.184
1.5	0.159	0.132	0.327	0.297	0.090	0.160	0.175	0.174
1.6	0.162	0.136	0.330	0.302	0.086	0.151	0.166	0.164
1.7	0.164	0.140	0.332	0.306	0.082	0.144	0.157	0.155
1.8	0.166	0.143	0.333	0.310	0.078	0.136	0.149	0.147
1.9	0.167	0.146	0.334	0.313	0.074	0.130	0.142	0.140
2.0	0.168	0.149	0.335	0.316	0.071	0.124	0.135	0.134
3.0	0.169	0.163	0.336	0.331	0.048	0.083	0.091	0.089
4.0	0.168	0.167	0.334	0.334	0.036	0.063	0.068	0.067
5.0	0.167	0.167	0.334	0.335	0.029	0.050	0.055	0.054
∞	0.167	0.167	0.333	0.333				

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Αριθμητικός παράγοντας α για απλά υποστηριζόμενες ορθογώνιες πλάκες φορτισμένες με σημειακό φορτίο

$$w_{\max} = \frac{Pa^2}{2\pi^3 D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} \left(\tanh \alpha_m - \frac{\alpha_m}{\cosh^2 \alpha_m} \right) = \alpha \frac{Pa^2}{D}$$

$b/a =$	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	∞
$\alpha =$	0.01160	0.01265	0.01353	0.01484	0.01570	0.01620	0.01651	0.01690	0.01695

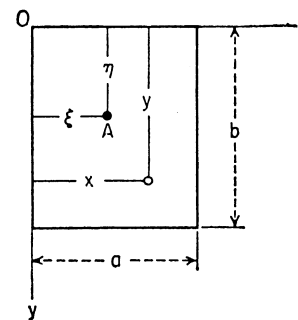
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Αριθμητικοί παράγοντες γ_1, γ_2 για υπολογισμό ροπών κάμψεων απλά υποστηριζόμενες ορθογώνιες πλάκες φορτισμένες με σημειακό φορτίο

$$M_x = \frac{(1+\nu)P}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} + \gamma_1 \frac{P}{4\pi}$$

$$= \frac{P(1+\nu)}{4\pi} \log \frac{2a \sin \frac{\pi\xi}{a}}{\pi r} + \gamma_1 \frac{P}{4\pi}$$

$$M_y = \frac{(1+\nu)P}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \sin \frac{m\pi\xi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} + \gamma_2 \frac{P}{4\pi}$$

$$= \frac{P(1+\nu)}{4\pi} \log \frac{2a \sin \frac{\pi\xi}{a}}{\pi r} + \gamma_2 \frac{P}{4\pi}$$



b/a	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	∞
γ_1	-0.565	-0.350	-0.211	-0.125	-0.073	-0.042	0
γ_2	+0.135	+0.115	+0.085	+0.057	+0.037	+0.023	0

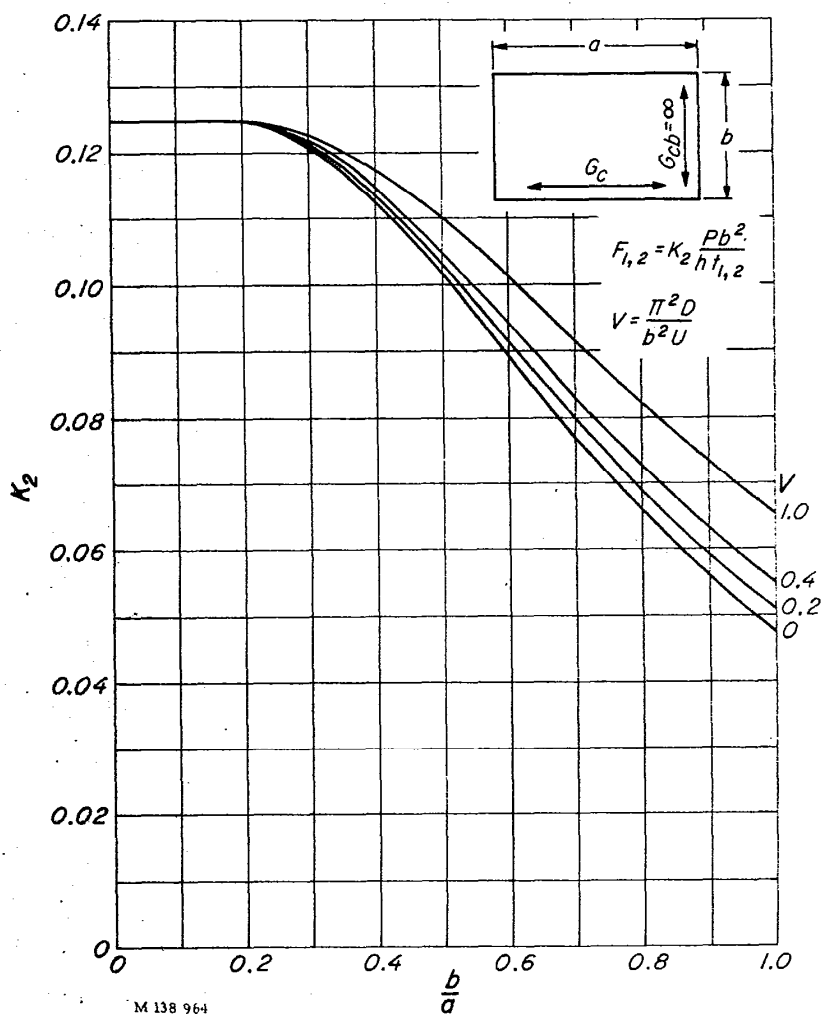
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. Αριθμητικός παράγοντας n για υπολογισμό τεμνουσών δυνάμεων απλά υποστηριζόμενων ορθογώνιων πλακών φορτισμένες με σημειακό φορτίο

$$R = nP$$

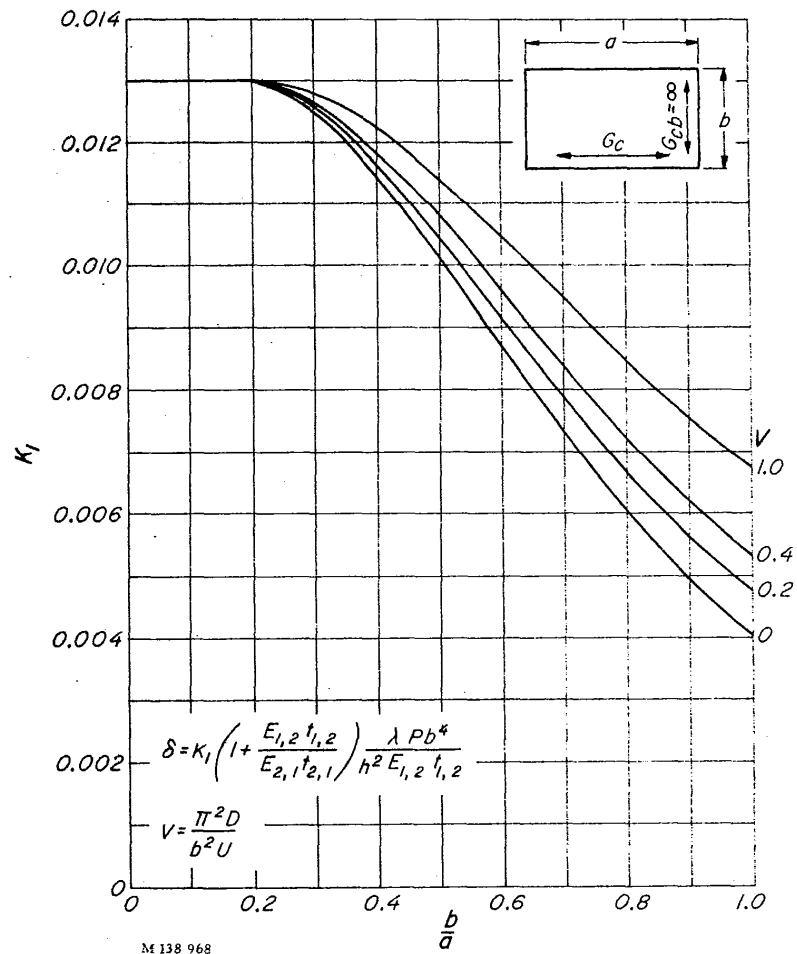
$b/a =$	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0	∞
$n =$	0.1219	0.1162	0.1034	0.0884	0.0735	0.0600	0.0180	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

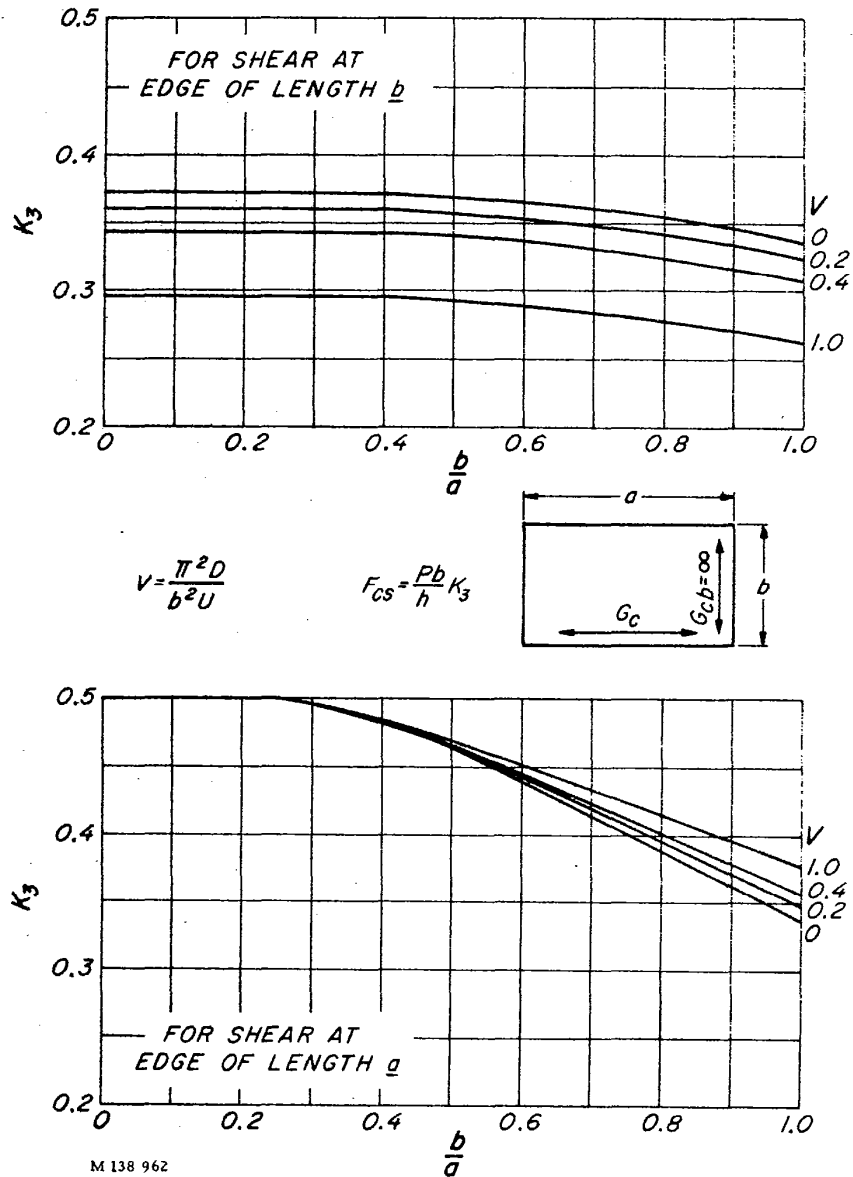
Διαγράμματα υπολογισμού συντελεστών α , β , δx , δy για τον υπολογισμό τάσεων πάνελ τύπου sandwich το τεχνικό εγχειρίδιο (Military Handbook 23A solutions) υπό ομοιόμορφα καταναμεμένο φορτίο σε απλά στηριζόμενες πλάκες



Σχήμα 1 K_2 για τον προσδιορισμό των τάσεων των τ εξωτερικών στρωμάτων, F , στην κατεύθυνση b των επίπεδων ορθογώνιων πάνελ τύπου sandwich, με ισοτροπικές επιφάνειες και κυψελοειδή πυρήνα, υπό ομοιόμορφα καταναμεμένο φορτίο.



Σχήμα 2 K_1 για τον προσδιορισμό των τάσεων των εξωτερικών στρωμάτων, F , στην κατεύθυνση b των επίπεδων ορθογώνιων πάνελ τύπου sandwich, με ισοτροπικές επιφάνειες και κυψελοειδή πυρήνα, υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο.



Σχήμα 3 K_3 για τον προσδιορισμό της μέγιστης διατμητικής τάσης του πυρήνα, F_{cs} , για επίπεδα ορθογωνικά πάνελ τύπου sandwich, με ιστροπικές επιφάνειες και κυψελοειδή πυρήνα, υπό ομοιόμορφα καταναμεμένο φορτίο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Comparison Study and Mechanical Characterisation of a Several Composite Sandwich Structures (Arbaoui, 2015)
2. Mechanical behavior and modeling of honeycomb cored laminated fiberpolymer sandwich structures (Sezgin, Msc 2008)
3. Development and rapid prototyping of new numerical models oriented to the honeycomb sandwich panels modeling (Luca Albertario 2009-2010)
4. Analysis and Design of Structural Sandwich Panels (Allen, Book 1969)
5. Design of Sandwich Structures of a dissertation to Cambridge University Engineering Department (Achilles Petras, 2008)
6. Κατεργασίες Ι: Συγκολλήσεις (Δρ. Ν.Μ. Βαξεβανίδης, 2007)
7. Πειραματική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων και των μορφών αστοχία σύνθετων δομών πάνελ τύπου sandwich υπό σύνθετη καταπόνηση (διπλωματική εργασία του Κουντουρή Αντώνιου, 2009)
8. Lightweight Sandwich Construction (Davies, Book 2001)
9. Cellular_Solid (Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby, 1999)
10. Honeycomb Technology (Bitzer, Book 1997)
11. Sandwich Core Materials & Technologies, Dr. Scott W. Beckwith, SAMPE International Technical Director and President, BTG Composites Inc., Salt Lake City, UT, Part1-Part2
12. Θερμομονωτικά και Ηχομονωτικά Υλικά και Νέες Τεχνολογίες (διπλωματική εργασία του Καναβού Αλέξανδρου, 2012)
13. Μηχανική υλικών του Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών του τμήματος Πολιτικών μηχανικών Πανεπιστημίου Πάτρας (Αθ. Χ. Τριανταστρώματος)
14. In-Plane Stiffness and Yield Strength of Periodic Metal Honeycombs (A.-J. Wang & D. L. McDowell 2004)
15. Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells (Reddy, Book 2006)
16. Roark's formulas for stress and strain (Warren C. Young & Richard G. Budynas, Copyright 2002, 1989 by the McGraw-Hill Companies, Inc)
17. Timoshenko, S. and Woinowsky-Krueger, S. (1987) Theory of Plates and Shells,
18. Military Handbook 23A, Structural Sandwich Composites.