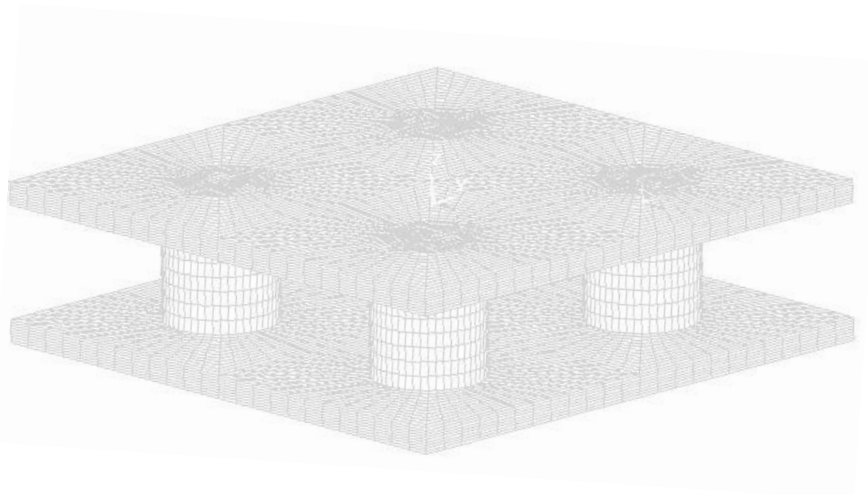




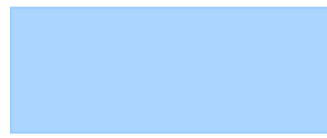
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
‘ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ’

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ
ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ**



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΜΠ





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΕΠΟΞΕΙΚΟΥ ΑΦΡΟΥ
ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΟΥ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟΥ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ'

ΑΘΗΝΑ , ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013



Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε για τις ανάγκες του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών 'Εφαρμοσμένη Μηχανική' της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ) στο Τομέα Μηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον σπουδαστή Παπαπέτρου Βασίλειο, Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ. Η διατριβή ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2013 στην Αθήνα. Ως κύριο αντικείμενο έχει την μοντελοποίηση σύνθετων κατασκευών ανθρακονημάτων/εποξεικού αφρού με εσωτερική κυλινδρική ενίσχυση, με την βοήθεια του εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και την μελέτη της μηχανικής του απόκρισης για διάφορες κατασκευαστικές παραμέτρους, σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων.

Αυτό δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ Τσαμασφύρου Γεώργιου, καθώς και τον διδακτορικών φοιτητών Κουλάλη Ηλία, που συνέβαλε στην δημιουργία του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, και Χριστόπουλου Άγγελου για την αμέριστη συμπαράστασή του καθ'όλη την διάρκεια προετοιμασίας αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στηρίζουν το τελευταίο διάστημα, έμμεσα ή άμεσα, όχι μόνο στην ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου αλλά και των μακροπρόθεσμων ακαδημαϊκών και ερευνητικών μου στόχων.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή **13**

Abstract **15**

Περίληψη **17**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Γενικά **18**

1.1 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών **19**

1.2 Υλικά - Ιδιότητες Μήτρας **23**

1.2.1 Πολυμερικές Μήτρες **24**

1.2.2 Κεραμικές Μήτρες **27**

1.2.3 Μεταλλικές Μήτρες **28**

1.3 Υλικά - Ιδιότητες Εγκλεισμάτων **31**

1.3.1 Γυαλί **32**

1.3.2 Άνθρακας **34**

1.3.3 Αραμίδιο **36**

1.3.4 Βόριο **37**

1.3.5 Συγκριτικά Στοιχεία **39**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΘΕΤΑ SANDWICH

ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ

Γενικά **41**

2.1 Σύνθετα Sandwich **42**

2.1.1 Κυψελωτά Σύνθετα - Honeycombs **42**

2.1.2 Τύποι Κυψελωτών Σύνθετων **43**

2.1.3 Σχεδιασμός Κυψελωτών Σύνθετων **44**

2.1.4 Υλικά – Ιδιότητες Κυψελωτών Σύνθετων **47**

2.2 Συντακτικοί Αφροί **48**

2.2.1 Δομή Συντακτικών Αφρών **49**

2.2.2 Υλικά Συντακτικών Αφρών **51**

2.2.3 Ιδιότητες Συντακτικών Αφρών **52**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Γενικά **57**

3.1 Τάσεις στην επιφάνεια και τον πυρήνα **58**

3.2 Κλασσική Ανάλυση Παραμορφώσεων **59**

3.2.1	Κινηματική των παραμορφώσεων	59
3.2.2	Τάσεις στις στρώσεις	62
3.2.3	Συνισταμένες δυνάμεων και ροπών	63
3.2.4	Ελαστικές σταθερές στρώσης σύνθετου	64
3.3	Ανάλυση Παραμορφώσεων Α' Τάξης	66
3.3.1	Εξισώσεις ισορροπίας	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Γενικά 75

4.1	Περιγραφή εξεταζόμενου υλικού	76
4.1.1	Διαδικασία μοντελοποίησης	77
4.2	Σύνθετο σε μονοαξονική θλίψη	80
4.2.1	Μελέτη σύνθετου σε μονοαξονική θλίψη	81
4.3	Σύνθετο σε κάμψη τριών σημείων	89
4.3.1	Μελέτη σύνθετου σε κάμψη	90
4.3.2	Αφρός εντός κυλινδρικών ενισχύσεων	95
4.3.3	Πύκνωση κυλινδρικών ενισχύσεων	99

Παράρτημα 101

Βιβλιογραφία 107

Εισαγωγή

Τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη χρήση τα τελευταία χρόνια σε πολλές εφαρμογές από την αυτοκινητοβιομηχανία, την διαστημική, τις αεροναυπηγικές κατασκευές μέχρι και τον ενεργειακό τομέα, τα αθλητικά είδη και τις ηλεκτρικές συσκευές.

Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι η μεγάλη τους αντοχή και δυσκαμψία σε συνδυασμό με μειωμένο βάρος και ευελιξία σχεδιασμού. Άλλες ιδιότητες των σύνθετων υλικών αποτελούν η πολύ καλή αντοχή τους σε κρούση και κόπωση, σε υψηλές θερμοκρασίες και διάβρωση. Η χρήση τους αυξάνει με γοργούς ρυθμούς, ενώ νέες εφαρμογές τους ανακαλύπτονται συνεχώς.

Μια νέα υβριδική σύνθετη κατασκευή φαίνεται πως μπορεί να έχει μελλοντικά ευρεία χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία και τις αεροπορικές κατασκευές, ως εξωτερική στρώση ικανή να αναλάβει κρουστικά και στατικά φορτία, όπως έχουν δείξει κάποιες πρόσφατες μελέτες. Ανάλογη κατασκευή σε μορφή σύνθετου sandwich εξετάζεται σε αυτή την εργασία.

Ο πυρήνα της αποτελείται από εποξεικό συντακτικό αφρό ενώ εξωτερικά είναι ενισχυμένος με οχτώ διπλές στρώσεις ανθρακονημάτων (0/90). Επιπλέον, κάθετα στο επίπεδο του πυρήνα είναι τοποθετημένες ενισχυτικές κυλινδρικές στρώσεις από το ίδιο υλικό με αυτό των εξωτερικών στρώσεων και οι οποίες ενώνουν τις δύο αυτές επιδερμικές ενισχύσεις. Το σύνθετο αυτό πάνελ, αφού μοντελοποιηθεί με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, εξετάζεται σε στατική μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Γίνεται επίσης μελέτη της επιρροής διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως της διαμέτρου των εσωτερικών ενισχύσεων, της ύπαρξης ή μη αφρού στο εσωτερικό τους, του αριθμού τους και της πυκνής ή μη διάταξής τους. Στοιχεία που υπολογίζονται είναι η μετατόπιση-παραμόρφωση της κατασκευής καθώς και οι αναπτυσσόμενες τάσεις κατά von Misses. Χρήσιμα συμπεράσματα εξήχθησαν και περαιτέρω έρευνα αποκτά μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως πειραματική, που θα ελέγξει αυτές τις εκτιμήσεις.

Στο *Κεφάλαιο 1* γίνεται μια εισαγωγή στα σύνθετα υλικά, τα βασικά υλικά από τα οποία αποτελούνται, καθώς και στις εφαρμογές τους.

Το *Κεφάλαιο 2* αναφέρεται στα σύνθετα sandwich τους συντακτικούς αφρούς, τα οποία παρουσιάζουν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα.

Στο *Κεφάλαιο 3* γίνεται μια συνοπτική αναφορά στην μηχανική των σύνθετων sandwich, η οποία κυρίως περιλαμβάνει την κλασική θεωρία πολύστρωτων πλακών (ΚΘΠΠ) και την θεωρία παραμορφώσεων πρώτης τάξης.

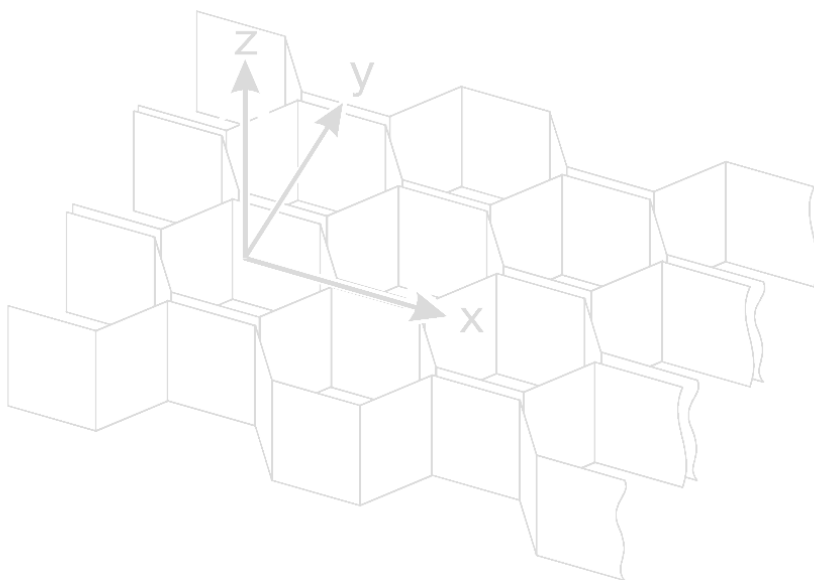
Το *Κεφάλαιο 4* περιλαμβάνει την αριθμητική προσομοίωση των εξεταζόμενων πάνελ και τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται αριθμητική μελέτη σύνθετων sandwich ανθρακονημάτων/εποξεικού αφρού με εσωτερικές κυλινδρικές ενισχύσεις σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Οι ορθοτροπικές στρώσεις ανθρακονημάτων είναι πανομοιότυπες τόσο εξωτερικά όσο και στο πυρήνα της κατασκευής, υπό την μορφή κολώνας, και αποτελούνται από στρώσεις δύο διευθύνσεων 0/90. Παράμετροι που εξετάζονται είναι η διάμετρος των κυλινδρικών ενισχύσεων, το πάχος του πυρήνα, ο αριθμός των εσωτερικών στρώσεων ενίσχυσης, η πυκνότητα διάταξής τους και η παρουσία ή μη αφρού εντός των κυλινδρικών ενισχύσεων. Τα εξεταζόμενα μεγέθη αφορούν τις μετατοπίσεις – παραμορφώσεις σε διάφορα σημεία και διευθύνσεις του υλικού καθώς και τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις von Misses. Η μοντελοποίηση του σύνθετου sandwich πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS και έγινε χρήση της συμμετρίας 1/8 στην περίπτωση της θλίψης και 1/2 στην κάμψη για μείωση του υπολογιστικού κόστους. Χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβικά τρισδιάστατα στοιχεία (SOLID185) για την μοντελοποίηση του συντακτικού αφρού και των εξωτερικών στρώσεων και 4-κομβικά επίπεδα στοιχεία (SHELL181) για τις κολώνες με δυνατότητα εισαγωγής πάχους και διεύθυνσης ενίσχυσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντικά αυξημένη ακαμψία στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης. Για σημαντικά μεγάλες τιμές της διαμέτρου των κυλινδρικών ενισχύσεων όμως, λόγω της μεγάλης απουσίας συντακτικού αφρού στον πυρήνα, το σύνθετο εμφάνισε μεγάλες μετατοπίσεις και αναπτυσσόμενες τάσεις. Αν θεωρήσουμε συντακτικό αφρό εντός των εσωτερικών ενισχύσεων, υπάρχει μια σχεδόν γραμμική μείωση των παραμορφώσεων με την αύξηση της διαμέτρου. Η συμβολή του αριθμού των εσωτερικών ενισχυτικών στρωμάτων είναι σημαντική μόνο για μεγάλες τιμές της διαμέτρου. Στην κάμψη τριών σημείων είναι ακόμα πιο εμφανής η συμβολή του συντακτικού αφρού στην μηχανική απόκριση της κατασκευής, αφού ακόμα και για μικρές τιμές της διαμέτρου των κυλινδρικών ενισχύσεων, δηλαδή μικρή μείωση του αφρού στον πυρήνα, το σύνθετο δεν παρουσιάζει αυξημένη ακαμψία. Αν θεωρήσουμε όμως κολώνες με αφρό στο εσωτερικό τους, οι παραμορφώσεις μειώνονται γραμμικά με την αύξηση της διαμέτρου. Αυτό επιβεβαιώνεται από την μέτρηση των μετατοπίσεων σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις. Η πυκνωση της διάταξης των εσωτερικών ενισχύσεων συμβάλλει επίσης στην ακαμψία της κατασκευής, αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για ίδια ποσοστά συντακτικού αφρού στον πυρήνα. Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων είναι αναγκαία ώστε να έχουμε ασφαλή συμπεράσματα.

Abstract

This master thesis focuses on numerical study of carbon-fibre reinforced/syntactic foam core composites with internal tubular reinforcements under uniaxial compression and 3-point bending. The mechanical response of these hybrid composites under static loads was estimated, such as the displacements, strains and von Mises stresses in various points. Many construction parameters were examined in order to establish their influence in the response of the structure such as the geometrical characteristics of the internal columns, the number of the reinforcement plies, the thickness of the core, the layout of the tubular reinforcements. The orthotropic carbon-fibre reinforced skins (0/90) of the panel are assumed to enclose an epoxy closed-cell syntactic foam core. In addition, internal CF tubular reinforcements connecting the external faceplates, made from the same orthotropic material as the skins, were implemented in order to maximize the strength and stiffness of the panel. Similar structures are candidates for aerospace and automotive applications. The numerical modelling of the sandwich panel was performed using ANSYS finite element code. Considering the symmetry configuration and in order to reduce the required calculation time, 1/8 and 1/2 of the whole structure was modelled for the case of compression and bending respectively. Eight-node brick elements (SOLID185) were utilized for the core and the faceplates and four-node shell elements (SHELL181) were used for the internal reinforcing columns. The composite exhibited improved stiffness, compared to the structure with no columns, indicated by decreased maximum displacements, strains and von Mises stresses under flatwise compression. The number of column reinforcing plies seems to be important only for relative large internal tubular reinforcements. However, in the case of 3-point bending the decreased amount of syntactic foam in the core, due to the hollow reinforcing columns, plays an important role in the mechanical response of the structure. Even for small column diameters, strain and stresses elevate again and the structure does not exhibit improved stiffness and rigidity. Therefore, assuming columns filled with foam, we obtain the optimum mechanical response of the sandwich panel which exhibit a linear displacement diminution in every direction associated with larger column diameters. Finally, as it is shown by numerical modelling and relevant diagrams, a very stiff and lightweight structure, regarding the percentage of syntactic foam of the core, can be achieved by implementing a denser grid of reinforcing columns. Experimental data are needed in order to establish these results.



Ετσι μικρό Εταίρα.....



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Ως σύνθετα υλικά αναφέρονται τα τεχνητά αυτά υλικά τα οποία συντίθενται από δύο ή περισσότερα επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους ώστε το ίδιο το σύνθετο υλικό να έχει σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως *συστατικό ενίσχυσης* και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται *μήτρα*, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης και δίνει σχήμα στο τελικό προϊόν. Άλλα συστατικά όπως ο καταλύτης, ο σταθεροποιητής και κάποια άλλα πρόσθετα χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών κατά την διάρκεια των τελευταίων 40 ετών υπήρξε ραγδαία. Σε αυτό συντέλεσε η δημιουργία νέων υλικών, η βελτίωση των μεθόδων παραγωγής τους και η ανάπτυξη των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών ενίσχυσης όπως το γυαλί, το βόριο, ο άνθρακας, το αραμίδιο, το πυρίτιο και πολλά άλλα. Η αντοχή και η δυσκαμψία των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες, π.χ. η αντοχή και η δυσκαμψία των ινών ενίσχυσης έχουν φθάσει στο 15πλάσιο των αντίστοιχων τιμών του αλουμινίου.

Εκτός από τα ινώδη και τα κοκκώδη εγκλείσματα, τα σύνθετα υλικά πολλές φορές ενισχύονται με τη μορφή στρωμάτων ή φύλλων (laminates) καθώς επίσης και με δομική στοιχεία κυψελωτού σχήματος (honeycombs) ή δομικών αφρών (syntactic foams). Επομένως, η συμπεριφορά καθώς και οι ιδιότητες του σύνθετου καθορίζονται από τα υλικά από τα οποία αποτελείται, από τη μορφή των συστατικών και τη διεύθυνση τους, καθώς και από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών, γι' αυτό και οι ιδιότητες κάθε συστατικού που συμμετέχει στο σύνθετο είναι κρίσιμης σημασίας. Η μεγάλη ποικιλία υλικών, καθώς και οι διάφορες μέθοδοι κατασκευής παρέχουν στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να επιλέξει την πιο κατάλληλη σύνθεση και σύσταση που καλύπτει τις απαιτήσεις του, δημιουργώντας ένα σύνθετο που έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που πολλές φορές μπορεί να είναι και μοναδικό. Τα συστατικά τους μπορούν να επιλεγούν κατά τρόπο που να δίνουν στο σύνθετο υλικό ασυνήθιστους συνδυασμούς σκληρότητας, αντοχής, βάρους, αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες, αντοχής σε διάβρωση ή αγωγιμότητας και άλλες ιδιότητες.

Πολλά από τα αρχικά τους μειονεκτήματα όπως τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, έχουν αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό. Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών κινείται προς αυτή την κατεύθυνση.

1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.1

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών γίνεται με βάση το υλικό της μήτρας, της ενίσχυσης και της δομής του. Με βάση το υλικό της μήτρας οι τρεις κύριες κατηγορίες που συναντάμε είναι οι εξής :

- Πολυμερικές μήτρες
- Κεραμικές μήτρες
- Μεταλλικές μήτρες

Πρόσθετη ταξινόμηση των σύνθετων υλικών αφορά το μέσο ενίσχυσης :

- Ενίσχυση με την μορφή κόκκων ή νιφάδων
- Ινώδη εγκλείσματα

Οι ίνες τοποθετούνται συνήθως υπό μια ή πολλαπλές διευθύνσεις κατά τις οποίες αναμένονται κατά την φάση σχεδιασμού οι μέγιστες τάσεις. Σε άλλες περιπτώσεις

τοποθετούνται σε τυχαίες διευθύνσεις ή υπό την μορφή πλέξης ώστε να έχουν πιο ισορροπημένες ιδιότητες.

Τέλος, όσον αφορά την δομή τους συναντάμε τις δύο εξής κατηγορίες :

- Σύνθετα σε μορφή στρώσεων ή φύλλων, πολύστρωτα (*laminates*).

Ουσιαστικά αποτελούνται από πολλές στρώσεις απλών ή σύνθετων υλικών.

- Σύνθετα με κυψελωτή δομή (*honeycombs*) ή με βάση δομικούς αφρούς (*syntactic foams*). Στη βιβλιογραφία ονομάζονται και ως sandwich panels/composites και αποτελούνται από ελαφρύ πυρήνα και λεπτές σε πάχος αλλά μεγάλης ακαμψίας εξωτερικές στρώσεις. Ένα τέτοιο σύνθετο με πυρήνα από συντακτικό αφρό και ενίσχυση με ανθρακονήματα μελετάται στην παρούσα εργασία.

Τα τελευταία 30 χρόνια ένα καινούργιο είδος σύνθετου υλικού βρήκε εφαρμογή στις αεροπορικές κατασκευές. Είναι ένα υβριδικό πολύστρωτο με φύλλα αλουμινίου και στρώσεις σύνθετου με πολυμερική μήτρα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GLARE) ή αραμιδίου (ARALL). Με αυτό τον τρόπο, εκτός των άλλων, συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα τόσο της μεταλλικής όσο και της πολυμερικής μήτρας αν και το κόστος παραγωγής του παραμένει αρκετά υψηλό.

1.2 ΥΛΙΚΑ - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΗΤΡΑΣ

1.2

Τρία είναι όπως είδαμε τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρα: πολυμερικά, κεραμικά και μεταλλικά.

Η μήτρα εξυπηρετεί τρεις βασικούς σκοπούς :

- Είναι υπεύθυνη για την μεταφορά φορτίων από και προς το υλικό ενίσχυσης
- Συγκρατεί το σύνθετο όταν η ενίσχυση αστοχεί σε κάποιο σημείο και καθυστερεί την αστοχία γειτονικών ινών.
- Προστατεύει τα εγκλείσματα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και δίνει το τελικό σχήμα στο σύνθετο υλικό.

Η διεπιφάνεια μήτρας-ενίσχυσης παίζει πρωταρχικό ρόλο στην αντοχή του σύνθετου και αποτελεί ουσιαστικά μια ενδιάμεση φάση μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης αφού οι ιδιότητές της είναι διαφορετικές από την υπόλοιπη κατασκευή. Ειδικά στην περίπτωση ινών γυαλιού ως μέσο ενίσχυσης, αυτή η ενδιάμεση φάση είναι ακόμα πιο περίπλοκη λόγω της ύπαρξης ειδικής κόλλας μεταξύ ινών και μήτρας ώστε να επιτευχθεί ένα πιο ισχυρό δέσιμο μεταξύ τους και να μειωθούν στο ελάχιστο οι αστοχίες των ινών κατά την παραγωγή.

Οι ιδιότητες που ελέγχονται κυρίως από το υλικό της μήτρας είναι :

- Αντίσταση σε ακραίες θερμοκρασίες και περιβαλλοντικούς παράγοντες
- Διαμήκης αντοχή σε θλίψη
- Εγκάρσια αντοχή σε εφελκυσμό
- Διατμητική αντοχή

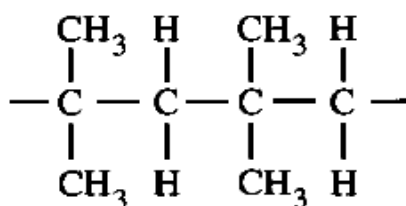
Η βέλτιστη σχεδίαση και παραγωγή τους επιβάλλει συνθήκες και τεχνικές όπου με το χαμηλότερο δυνατό κόστος επιτυγχάνεται η παραγωγή των επιθυμητών γεωμετριών, χωρίς να υπάρξει αστοχία σημαντικού αριθμού ινών ή κακή τοποθέτησή τους.

1.2.1 ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

1.2.1

Τα πολυμερικά υλικά είναι αυτά με την μεγαλύτερη εφαρμογή ως μέσο συγκράτησης της ενίσχυσης σε ένα σύνθετο υλικό. Διακρίνονται σε *θερμοπλαστικές* (thermoplastic) και *θερμοσκληρυνόμενες* (thermosetting).

Ο όρος θερμοπλαστικά καλύπτει τα πολυμερή υλικά τα οποία υπό την επίδραση θερμότητας και πίεσης καθίστανται εύπλαστα και ρέουν. Κατ' αυτόν τον τρόπο, τα περισσότερα θερμοπλαστικά μπορούν να μορφοποιηθούν πολλές φορές, αν και η εμφάνιση φαινομένων αποπολυμερισμού μειώνει σε πολλές περιπτώσεις το δυνατό αριθμό των κύκλων μορφοποίησης. Από άποψη δομής, θερμοπλαστικές ιδιότητες παρουσιάζουν τα γραμμικά ή διακλαδωμένα πολυμερή, στα οποία μία αύξηση της θερμοκρασίας ή η επίδραση ενός διαλύτη επιτρέπει μια σημαντική αναβάθμιση της κινητικότητας των μακρομορίων, ώστε να επιτρέπεται τελικά μια πλήρης ανεξαρτησία κινήσεως του ενός σε σχέση με το άλλο. Με άλλα λόγια, ανάμεσα στα μακρομόρια των θερμοπλαστικών πολυμερών δεν υπάρχουν χημικοί δεσμοί και οι θερμικές κινήσεις τους είναι αρκετές ώστε να παρουσιάζονται ως τήγματα σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, λοιπόν, γίνονται οι διεργασίες μορφοποίησής τους σε χρήσιμα προϊόντα. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, στην κατάσταση τήγματος, γίνεται και η παρασκευή των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούν τα θερμοπλαστικά πολυμερή ως μήτρα.



Σχήμα 1.1 Παράδειγμα μιας απλής πολυμερικής αλυσίδας

Τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής πολυμερικής μήτρας παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες. Συγκεκριμένα έχουν μεγάλες ενέργειες θραύσης, γιατί έχουν διαθέσιμο ελεύθερο όγκο που απορροφά την ενέργεια που συνδέεται με μετάδοση ρωγμής. Γενικά τα υλικά αυτής της κατηγορίας οφείλουν την αντοχή και την ακαμψία τους στις ιδιότητες των μονομερών, από τα οποία παρασκευάστηκαν, και στο μεγάλο μοριακό βάρος τους, και όχι στη δημιουργία ενός πλέγματος (*cross-linking*).

Όλα τα θερμοπλαστικά πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες. Από πλευράς όμως βιομηχανικής παραγωγής χρησιμοποιούνται ορισμένα πολυμερή τα οποία επιδέχονται ενίσχυση και παρουσιάζουν δυνατότητες εφαρμογής ως κατασκευαστικά υλικά. Ανάμεσα στα θερμοπλαστικά πολυμερή που χρησιμοποιούνται ως μήτρες είναι το πολυστυρένιο υψηλής αντοχής σε κρούση (High Impact Polystyrene – HIPS), το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυαιθυλένιο (PE).

Όσον αφορά τις εφαρμογές τους ως δομικά υλικά, τα θερμοπλαστικά πολυμερή συγκεντρώνουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η δυνατότητα ανακύκλωσης, και οι ευκολότερες διεργασίες μορφοποίησής τους. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται οι περιορισμοί στις μεθόδους παραγωγής, το υψηλό ιξώδες του τήγματος στις διεργασίες μορφοποίησης, οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται και ο ερπυσμός που μπορεί να παρουσιάσουν.

Ο όρος θερμοσκληρυνόμενα αποδίδεται στα πολυμερή τα οποία στην τελική φάση επεξεργασίας αποκτούν σταυροδεσμούς και σχηματίζουν ένα δικτύωμα με την επίδραση της θερμότητας. Τα μόρια δηλαδή στο τελικό προϊόν συνδέονται σταθερά με κύριους δεσμούς μεταξύ τους κι έτσι επιτυγχάνεται τέτοια συνοχή στο πλέγμα, ώστε δεν μπορεί πλέον το πολυμερές να μεταβεί στην πλαστική κατάσταση με θέρμανση. Τέτοιου είδους δικτυώματα συνιστούν εξαιρετικά κατασκευαστικά υλικά, λόγω της διασταλτικής τους σταθερότητας σε υψηλές θερμοκρασίες και το υψηλό μέτρο ελαστικότητάς τους. Η παρουσία των σταυροδεσμών παρεμποδίζει τη πλαστική παραμόρφωση και τον ερπυσμό του υλικού, καθώς αναστέλλει την ελευθερίας κινήσεως των μακρομοριακών αλυσίδων. Με αυτόν τον τρόπο η πλαστική παραμόρφωση του υλικού γίνεται αδύνατη χωρίς τη θραύση των σταυροδεσμών. Επίσης, τα υλικά αυτά παραμένουν αδιάλυτα από τους διαλύτες, που δεν μπορούν να καταστρέψουν τους σταυροδεσμούς.

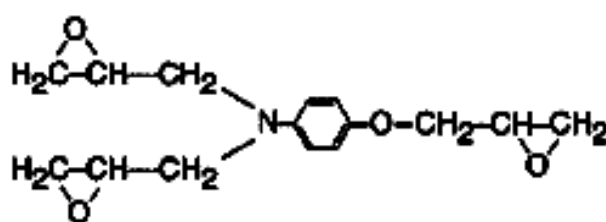
Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή - πλέγματα παρασκευάζονται με την χημική αντίδραση ανάμεσα σε μοριακές μονάδες (μονομερή) που διαθέτουν πολλαπλά σημεία αντίδρασης, ή από πολυμερή, τα μόρια των οποίων συνδέονται μεταξύ τους μέσω πολυδραστικών αντιδραστηρίων. Οι μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος εξαρτώνται από τη φύση των μοριακών μονάδων που συνθέτουν το πλέγμα και από την πυκνότητα των σημείων διασταύρωσης. Η δομή του τελικού δικτυώματος

καθορίζεται από το είδος των αρχικών αντιδρώντων/πολυμερών/πολυδραστικών αντιδραστηρίων, και από τις συνθήκες δικτύωσης όπως ο χρόνος και η θερμοκρασία.

Έτσι, για παράδειγμα, σύνθετα με μήτρα φαινολικής ρητίνης και ενίσχυση από ίνες γυαλιού έχουν πολύ καλή συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλο χρονικό διάστημα, δηλαδή μηδενικό ερπυσμό.

Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ μεγάλη εφαρμογή στις αεροπορικές κατασκευές λόγω των πολύ καλών μηχανικών και χημικών ιδιοτήτων τους.

Οι ρητίνες μελαμίνης χαρακτηρίζονται από σκληρότητα, καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή σε θερμική προσβολή και αντοχή στη φθορά.



Σχήμα 1.2 Πολυμερική αλυσίδα εποξειδικής μήτρας ευρέως χρησιμοποιούμενης σε αεροπορικές κατασκευές (τριγλυκερίδιο π-αμινοφαινόλης, TGAP)

Η χρήση σιλικώνων ως μήτρα οδηγεί σε σύνθετα με εξαιρετική αντοχή σε θερμική προσβολή και υψηλού επιπέδου ηλεκτρικές - μονωτικές ιδιότητες. Η εφαρμογή τους, όμως, περιορίζεται λόγω των υποβαθμισμένων μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Οι πολυεστέρες, λόγω της ποικιλίας της σύστασης τους και των πολλών δυνατών μεθόδων παραγωγής, είναι εύχρηστοι και από τις πιο διαδεδομένες μήτρες σε σύνθετα υλικά. Οι περισσότερες βάρκες και σκάφη κάτω από 20 μέτρα μήκους είναι φτιαγμένες από σύνθετο υλικό με πολυεστερική μήτρα και υαλονήματα ως ενίσχυση. Τα συνηθέστερα λοιπόν χρησιμοποιούμενα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή ως μήτρες είναι οι εποξειδικές ρητίνες, οι φαινολικές ρητίνες, οι ρητίνες μελαμίνης και ουρίας, οι σιλικόνες και οι ακόρεστοι πολυεστέρες.

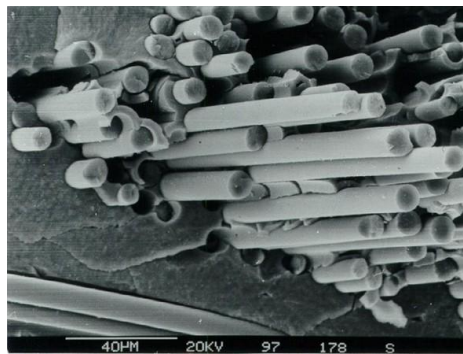
Τα περισσότερα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και συνεχείς ίνες έχουν σήμερα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές ως μήτρα. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο λόγος είναι ότι τα συστατικά της μήτρας έχουν χαμηλό ιξώδες πριν τον σχηματισμό του δικτυώματος, δηλαδή τον πολυμερισμό, και μπορούν έτσι να διαβρέξουν εύκολα τις ενισχυτικές ίνες. Το βασικό τους μειονέκτημα, όμως, είναι ότι ο πολυμερισμός τους, και το υλικό, γίνεται με τη μορφοποίηση του τελικού προϊόντος. Αυτό επιβάλλει αρκετούς περιορισμούς στη μορφή και πολυπλοκότητα του προϊόντος και στη μέθοδο παρασκευής. Επίσης η ανακύκλωση του υλικού είναι πολύ δύσκολη.

1.2.2 ΚΕΡΑΜΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

1.2.2

Ο κυριότερος λόγος που τα κεραμικά υλικά αποκτούν όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή στις σύγχρονες κατασκευές είναι η υψηλή τους αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες που κυμαίνεται από 500° – 1500° C.

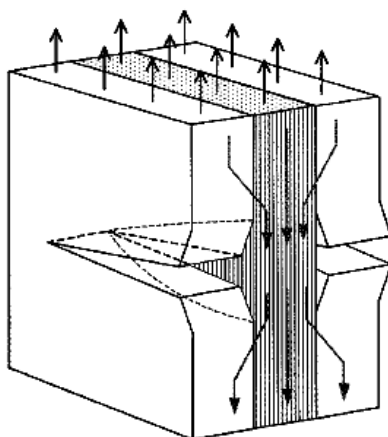
Υλικά αυτής της κατηγορίας που χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά είναι ο άνθρακας (C), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC), το νιτρίδιο του πυριτίου (Si₃N₄), η αλουμίνα (Al₂O₃), ο μολύβδος (Al₂O₃-SiO₂). Όταν αυτά συνδυαστούν με κάποιο μέσο ενίσχυσης, συνήθως παρόμοιου υλικού, αποκτούν πολύ καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες πέραν της αντίστασής τους σε ακραίες θερμοκρασίες.



Εικόνα 1.1 Επιφάνεια θραύσης ινώδους κεραμικού σύνθετου υλικού SiC/ SiC (μήτρα και ίνες από καρβίδιο του πυριτίου)

Η μεγαλύτερη πρόκληση στη τεχνολογία κεραμικών σύνθετων υλικών αποτελεί η ανάπτυξη τέτοιων υλικών ενίσχυσης που συνδυάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, χημική αντίσταση και βέλτιστη οξειδωτική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο λόγος είναι πως η δημιουργία μικρορωγμών σε μια ψαθυρή κεραμική μήτρα επιτρέπει την άμεση επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών στο μέσο ενίσχυσης.

Η χρήση ινών ως μέσο ενίσχυσης ενδείκνυται ώστε να επιτευχθούν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες κυρίως λόγω του φαινομένου της ινώδους γεφύρωσης (*fiber bridging*). Η ανάπτυξη των μικρορωγμών σε μια κεραμική μήτρα οδηγεί σε συγκέντρωση τάσεων στα σημεία αυτά, οπότε οι ίνες αναλαμβάνουν τώρα να μεταφέρουν τις εξωτερικές τάσεις στην υπόλοιπη κατασκευή και μειώνουν σημαντικά την μετάδοση της ρωγμής.



Σχήμα 1.3 Ινώδης γεφύρωση μήτρας αλουμινίου με ίνες γυαλιού/αραμιδίου

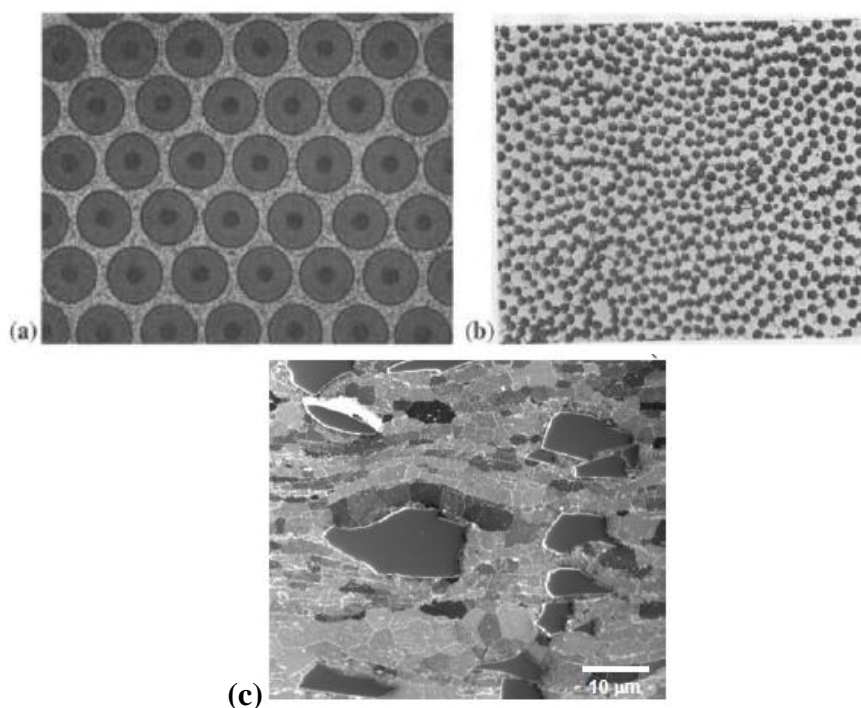
Το σημαντικότερο πρόβλημα εντοπίζεται στη συνάφεια ινών-μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών.

Οι εφαρμογές των κεραμικών ως υλικό μήτρας αυξάνονται συνεχώς και περιλαμβάνουν πυρίμαχα σε αεροπορικές και αεροδιαστημικές κατασκευές, κλίβανους, εργαλεία, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά υποστρώματα, επιφάνειες αντιδιάβρωσης, ιατρικά εμφυτεύματα, υδραυλικά, θωρακίσεις, χημικές εφαρμογές. Συμπερασματικά, τα πλεονεκτήματα που προσδίδει μια κεραμική μήτρα είναι η υψηλή αντοχή σε ακραίες θερμοκρασίες, η μικρή θερμική διαστολή, η πολύ καλή συμπεριφορά σε περιβαλλοντικές συνθήκες όπως υγρασία / χημική προσβολή και η μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα κεραμικά σύνθετα και αποτελούν αντικείμενο έρευνας είναι το υψηλό κόστος και η δυσκολία κατασκευής σύνθετων γεωμετριών, η ψαθυρή συμπεριφορά και η σχετικά χαμηλή αντοχή τους σε μηχανικά φορτία.

1.2.3 ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

1.2.3

Ως μεταλλικές μήτρες συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά όπως το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο και σε εφαρμογές όπου επικρατούν ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, το κοβάλτιο και το κράμα κοβαλτίου – νικελίου. Οι μήτρες αυτής της κατηγορίας συνήθως ενισχύονται με συνεχείς/διακεκομμένες ίνες άνθρακα και βορίου ή κοκκώδη εγκλείσματα από καρβίδιο του πυριτίου.

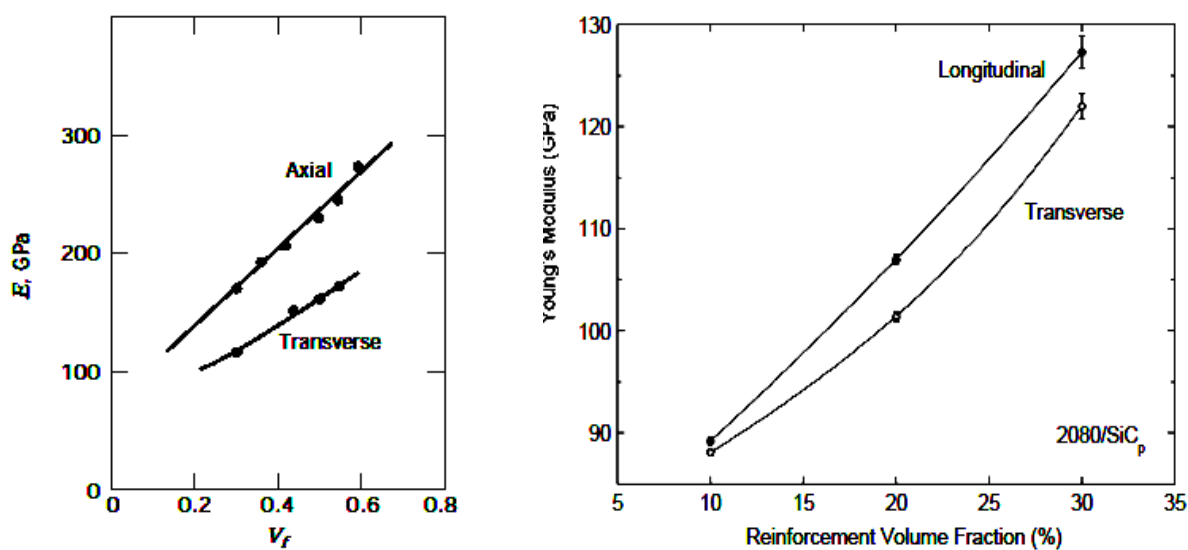


Εικόνα 1.2 Μεταλλική μήτρα αλουμινίου (α) με ίνες βορίου διαμέτρου $125\mu\text{m}$ (b) με ίνες άνθρακα διαμέτρου $8\mu\text{m}$ και (c) με σωματίδια καρβιδίου του πυριτίου SiC

Τα σύνθετα ενισχυμένα υλικά με μεταλλική μήτρα παρουσιάζουν σημαντικές ιδιότητες και πλεονεκτήματα σε σχέση με τα απλά μεταλλικά υλικά. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται το αυξημένο όριο διαρροής και θραύσεως σε μονοαξονική καταπόνηση, το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε κόπωση, η μεγαλύτερη αντίσταση σε διάβρωση και ο μειωμένος ερπυσμός ειδικά σε μεγάλες θερμοκρασίες.

Είναι πολύ σημαντικό κατά την διαδικασία παραγωγής τέτοιων υλικών, να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή συνάφεια μεταξύ ινών ενίσχυσης και μεταλλικής μήτρας. Αυτό αποτρέπει την εμφάνιση αστοχιών λόγω αποκόλλησης των ινών και την μειωμένο ρυθμό αύξησης και μετάδοσης των ρωγμών. Επιπλέον, υπάρχει μια γραμμική σχέση της αύξησης των μηχανικών ιδιοτήτων και του ποσοστιαίου όγκου των εγκλεισμάτων σε μια μεταλλική μήτρα.

Τα σύνθετα αυτά υλικά, παρόλο που εμφανίζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις πολυμερικές και κεραμικές μήτρες, δεν έχουν το ανάλογο ποσοστό βιομηχανική παραγωγής κυρίως λόγω του αρκετά υψηλού τους κόστους.



Σχήμα 1.4 Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μήτρας αλουμινίου-λιθίου σε σχέση με την κατόγγο περιεκτικότητα ινών αλουμίνιας και μήτρας αλουμινίου με κόκκους SiC

Επιπλέον, μεγάλο μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός πως σε σχέση με τις άλλες μήτρες, είναι περιορισμένη η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων γεωμετριών και η ποικιλία μεγεθών, καθώς και η συμπεριφορά τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά, τα σύνθετα υλικά με μεταλλική μήτρα βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροναυπηγικής καθώς και σε ηλεκτρονικά είδη.

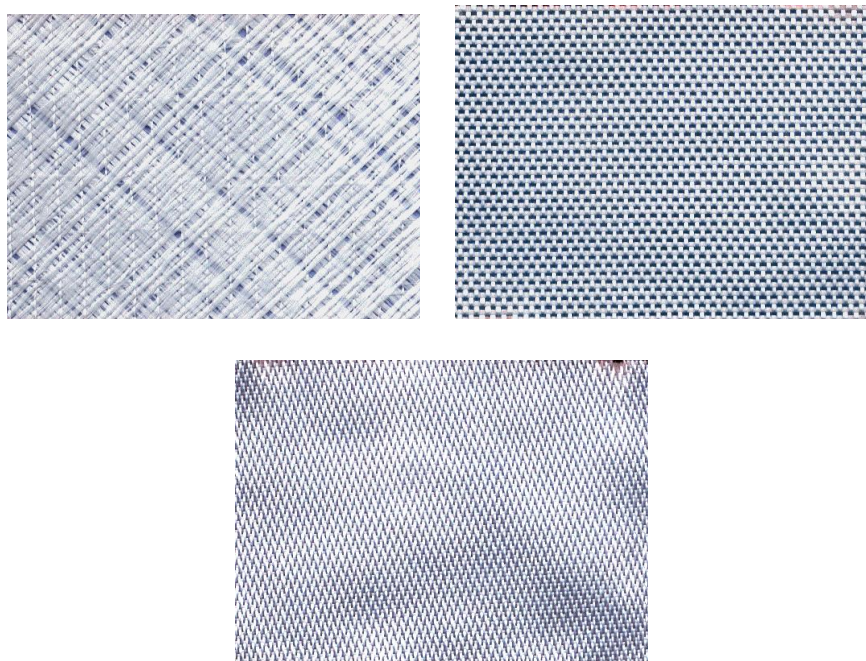
1.3 ΥΛΙΚΑ - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ

1.3

Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά σε διάφορες μορφές που ενσωματώνονται στο υλικό της μήτρας προκειμένου να αυξηθούν οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του σύνθετου. Τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να βρίσκονται σε μορφή κόκκων, σφαιριδίων, νιφάδων, συνεχών ή ασυνεχών ινών, ινών σε πλέξη και κυψελωδών φύλλων.

Ήδη από την εποχή των Αιγυπτίων - περίπου 5.000 π.Χ - χρησιμοποιούσαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με πλέγμα άχρωων, με αποτέλεσμα τη μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονταν κατά την ξήρανση του πηλού. Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση κατά την διάρκεια των τελευταίων 40 ετών υπήρξε ραγδαία. Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1920 και επρόκειτο για μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη, γνωστό αργότερα ως βακελίτης προς τιμή του Βέλγου επιστήμονα Leo Baekeland. Σημαντικό ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού (1960), άνθρακα (1964), αραμιδίου (1971), βορίου και άλλων υλικών, καθώς και η έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους των δομικών τους κατασκευών.

Τα περισσότερα υλικά εγκλεισμάτων είναι ψαθυρά και έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Ειδικότερα οι ίνες τοποθετούνται σε μία ή πολλές διευθύνσεις, προσανατολισμένες ή μη και μπορούν να είναι πλεκτές ή υφασμένες.



Εικόνα 1.3 Διάφοροι τύποι ύφανσης ινών άνθρακα και γυαλιού

Οι συνεχείς μεγάλου μήκους ίνες (*continuous fibers*) έχουν λόγο μήκους προς διάμετρο μεγαλύτερο από 100 ενώ για τις ασυνεχείς ή κοντές ίνες (*discontinuous fibers*) ισχύει $l/d < 100$. Τέλος, υπάρχουν και τα νημάτια ή τριχίτες (*whiskers*) με $d < 1 \mu\text{m}$ και l περίπου ίσο με $100 \mu\text{m}$. Είναι ουσιαστικά λεπτοί μονοκρύσταλλοι κεραμικού υλικού με περιορισμένη χρήση.

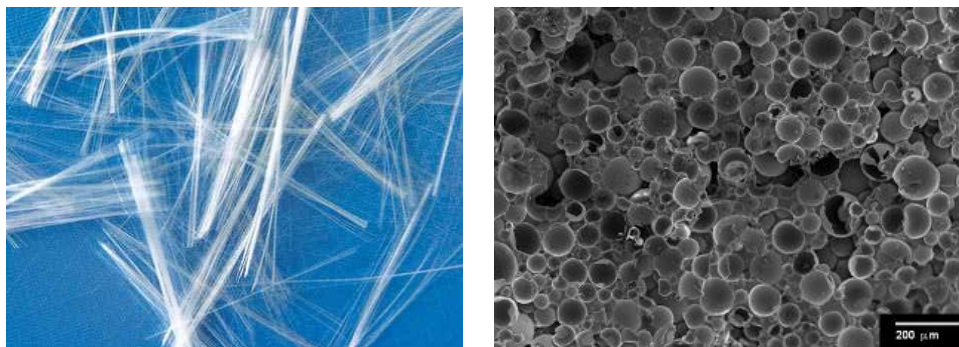
1.3.1 ΓΥΑΛΙ

1.3.1

Από το 1939 άρχισε η εμπορική διάθεση νημάτων γυαλιού ως μέσο ενίσχυσης των υλικών. Η εφαρμογή τους σε απαιτητικές κατασκευές όπως σε θαλάμους υψηλής πίεσης και την αεροναυπηγική ξεκίνησε περίπου το 1960. Μόνο στον τομέα των μεταφορών, η παραγωγή σύνθετων με εγκλείσματα γυαλιού φτάνει τους 60.000 tn/χρόνο στην Ευρώπη, ενώ στην Αμερική η παραγωγή είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη.

Το γυαλί παράγεται με την μορφή ινών (συνεχής ή κοντές), πλεκτών υαλονημάτων και σφαιριδίων. Η δομική τους βάση είναι τα οξειδία πυριτίου, ασβεστίου, βορίου και αλουμινίου. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά με σημαντικές όμως ιδιότητες, οι οποίες εξαρτώνται από την χημική τους σύνθεση.

Όσο αυξάνει το ποσοστό του οξειδίου του πυριτίου στο τελικό προϊόν, παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου, ενώ παράλληλα αναβαθμίζεται και το μέτρο ελαστικότητας. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία.



Εικόνα 1.4 Ίνες και σφαιρίδια γυαλιού ως ενισχυτικά σε σύνθετα και δομικούς αφρούς

Ειδικότερα οι ίνες γυαλιού χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες με βάση τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες έχουν οι **E-Glass** (electricity), ενώ οι **C-Glass** (corrosion) διαθέτουν αντίσταση σε χημική

διάβρωση και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, αν και πιο ακριβές. Οι **S-Glass** (stiffness) τέλος, έχουν την υψηλότερη δυσκαμψία και αντοχή σε εφελκυσμό γι' αυτό χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε αεροπορικές κατασκευές.

Οι ίνες γυαλιού είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με τις μηχανικές ιδιότητες και την σύνθεση των δύο πιο πολυχρησιμοποιούμενων τύπων ινών, των E-Glass και S-Glass.

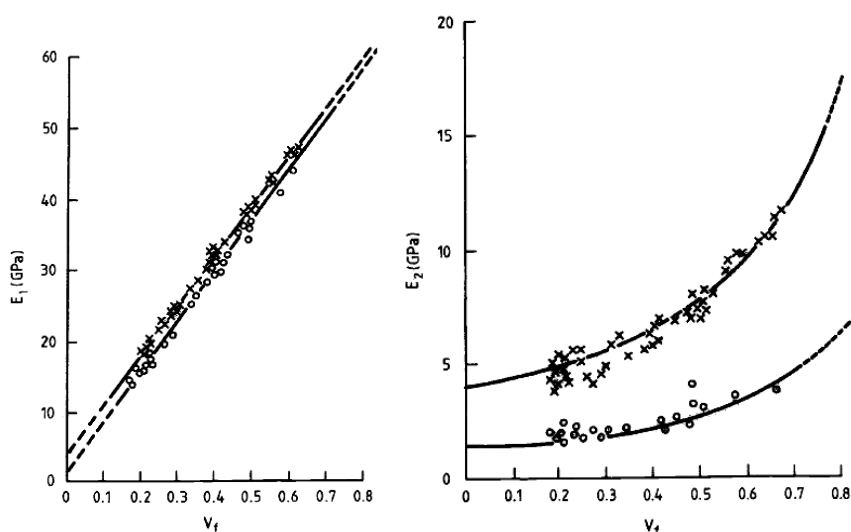
Fiber	Fiber diameter (μm)	Specific gravity	Stiffness (GPa)	Specific stiffness	Ultimate strain (%)	Strength (GPa)	Specific strength
Glass							
E-Electrical	5–20	2.6	73	1.1	3.5	3.5	11.2
S-High strength	8–14	2.5	87	1.3	4.5	4.6	15.3
Glass type	Si	Al ₂ O ₃	CaO	B ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
E-Electrical	53	14	18	10	5	<1	
S-High strength	65	25	—	—	10		—

Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού προσδιορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Λόγω αυτής της δομής τα υαλονήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συμμετοχή και των μεταλλικών οξειδίων στη σύνθεση των ινών επιφέρει αλλαγές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες.

Ένας επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας στο καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων εγκλεισμάτων από γυαλί είναι η ύπαρξη ελαττωμάτων. Αυτά τα ελαττώματα και οι μικρορωγμές, ειδικότερα οι επιφανειακές, είναι πολύ μικρές σε διαστάσεις αλλά μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αντοχής των ενισχύσεων και κατ' επέκταση του σύνθετου υλικού. Μια επιφανειακή ατέλεια είναι τόσο επιβλαβής για το υλικό όσο μια εσωτερική ατέλεια διπλάσιων διαστάσεων.

Η πρόσληψη υγρασίας είναι αρνητικός παράγοντας για την αντοχή των ενισχύσεων από γυαλί. Το νερό απορροφάται από την επιφάνεια των μικρορωγμών και μειώνει την επιφανειακή τους ενέργεια διευκολύνοντας την επέκτασή τους σε κρίσιμο βαθμό. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *στατική κόπωση* του γυαλιού.

Τα φύλλα γυαλιού έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή αραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, το γυαλί δεν παρουσιάζει ερπυσμό, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση.



Σχήμα 1.5 Αύξηση του διαμήκου και εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας δύο σύνθετων με πολυεστερική μήτρα σε σχέση με την κατ'όγκο περιεκτικότητα ινών γυαλιού

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

1.3.2 ΑΝΘΡΑΚΑΣ

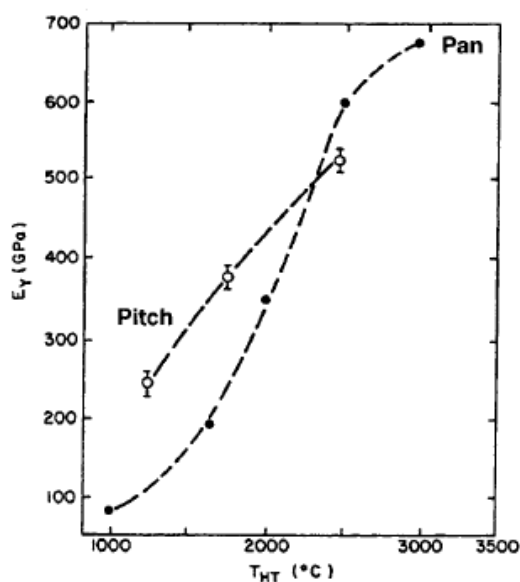
1.3.2

Ο άνθρακας με την μορφή ινών χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές ως μέσο ενίσχυσης των σύνθετων υλικών. Το κόστος παραγωγής του είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερο από τις ίνες γυαλιού, όμως οι ιδιότητες του είναι μοναδικές. Αυτές είναι άμεσα εξαρτώμενες από την μέθοδο παραγωγής του και οδηγούν σε τρεις βασικούς τύπους ινών. Τις ίνες με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (**H**igh **M**odulus – Type I), τις ίνες με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό (**H**igh **S**trength – Type II) και τις ίνες με ενδιάμεσο μέτρο ελαστικότητας (**I**ntermediate **M**odulus – Type III).

Property	HM Type I	HS Type II	IM Type III
Specific gravity	1.9	1.8	1.8
Tensile modulus (GPa)	276–380	228–241	296
Tensile strength (MPa)	2415–2555	3105–4555	4800
Ultimate strain (%)	0.6–0.7	1.3–1.8	2.0
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	-0.7	-0.5	N/A
Thermal conductivity ($\text{Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	64–70	8.1–9.3	N/A
Electrical resistivity ($\mu\Omega \text{ m}$)	9–10	15–18	N/A

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα ως στοιχείου και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Στην παραγωγή ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μέταξας (rayon) και πίσσα.

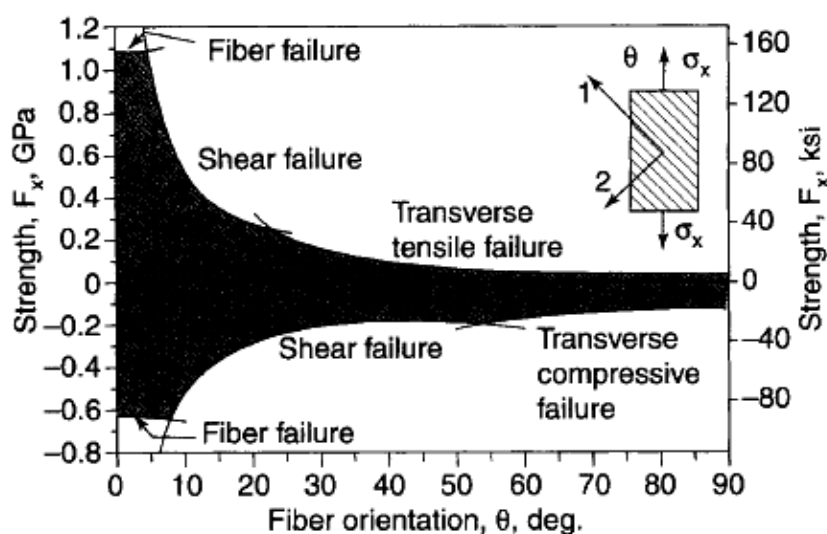
Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφιτιάσης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφιτιάσης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν, τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.



Σχήμα 1.6 Επίδραση της θερμοκρασίας κατεργασίας στο μέτρο ελαστικότητας για ίνες άνθρακα από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) και από πίσσα

Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Σε σύνθετα με ενίσχυση ινών άνθρακα κατά μία διεύθυνση, η γωνία εφαρμογής του φορτίου παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή του υλικού, όπως άλλωστε σε όλα τα σύνθετα υλικά, και πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα κατά την φάση σχεδιασμού.



Σχήμα 1.7 Μείωση της αντοχής σύνθετου εποξειδικής ρητίνης ενισχυμένο με ίνες άνθρακα σε σχέση με την γωνία εφαρμογής του φορτίου

Όταν χρησιμοποιούνται σε μορφή πλέξης, παρουσιάζουν πιο ισορροπημένες μηχανικές ιδιότητες και πολύ καλή αντοχή σε κρούση.

Δεδομένου πως τα εγκλείσματα από άνθρακα έχουν πολύ χαμηλό βάρος αλλά ταυτόχρονα τόσο καλές μηχανικές ιδιότητες, έκανε την χρήση τους πολύ δημοφιλή στις χερσαίες και αεροπορικές μεταφορές, σε κατασκευές παραγωγής αεροσκάφους καθώς και σε δομικά έργα ως μέσο τοπικής ενίσχυσης ή επισκευής π.χ σε υποστρώματα και δοκάρια από σπλισμένο σκυρόδεμα.

Η παγκόσμια ζήτηση των ενισχύσεων από άνθρακα αναμένεται να φθάσει περίπου τα 20 δις δολάρια το 2015, με μέση ετήσια αύξηση τουλάχιστον 7%.

1.3.3 ΑΡΑΜΙΔΙΟ

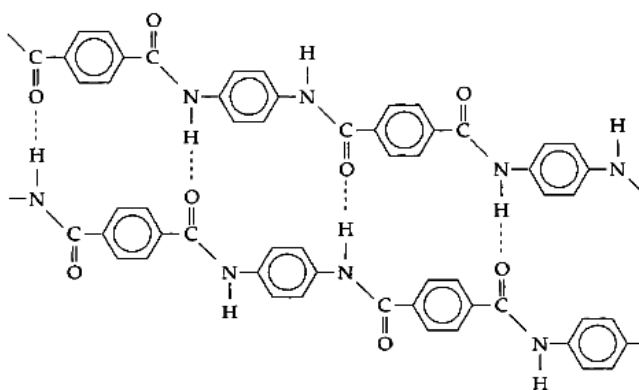
1.3.3

Η βιομηχανική παραγωγή ινών αραμιδίου ουσιαστικά ξεκίνησε από την δεκαετία του 1960 και έφθασε σήμερα περίπου τους 20.000 τόνους κάθε χρόνο. Παρόλο που από μηχανικής άποψης δεν κατατάσσονται στις ίνες υψηλής απόδοσης, εντούτοις το χαμηλό κόστος παραγωγής τους τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά.

Η πρώτη υψηλής απόδοσης οργανική ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε σε τρεις διαφορετικούς τύπους από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar. Το μέτρο ελαστικότητάς τους κυμαίνεται από 60-180MPa και η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι 3.5 GPa.

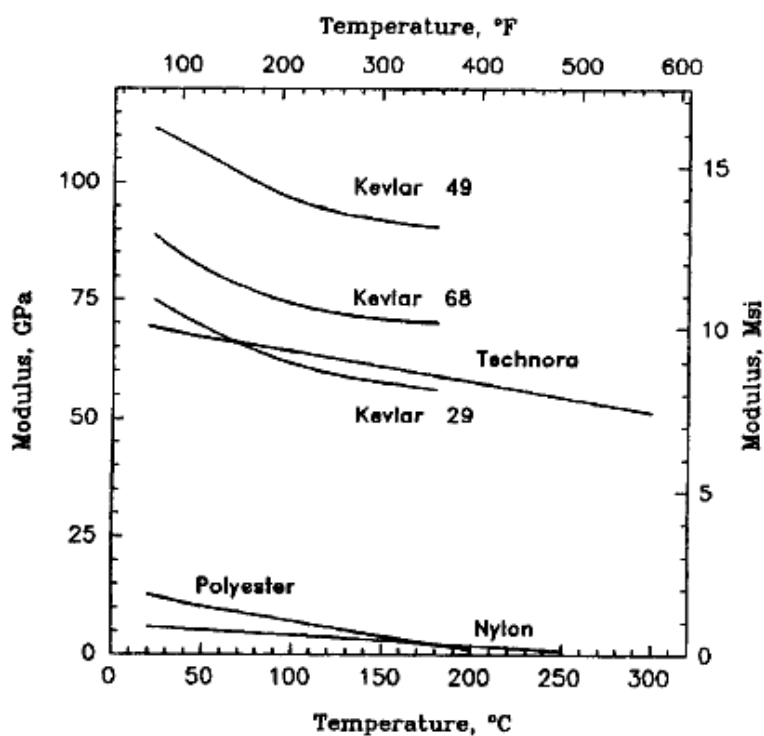
Δημιουργούν ένα σταθερό πλέγμα σε μορφή επίπεδης ταινίας. Ο κυλινδρικός φλοιάς της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο προϊόν ιδιαίτερα υψηλές επιδόσεις κατά την αξονική διεύθυνση, αλλά φτωχή

συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη και κάμψη όπου αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία για μικρές παραμορφώσεις



Σχήμα 1.7 Μοριακή δομή Kevlar (PPTA)

Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands). Σε μεγάλες θερμοκρασίες οι μηχανικές του ιδιότητες επίσης μειώνονται σημαντικά.



Σχήμα 1.8 Επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας διάφορων ινών ενίσχυσης Kevlar

Παρατηρείται ότι στους 180°C το μέτρο ελαστικότητάς του πέφτει κατά περίπου 20%. Ανάλογη μείωση συμβαίνει και κατά την πρόσληψη υγρασίας, όπου επηρεάζεται σημαντικά η εγκάρσια αντοχή του, για αυτό πρέπει να λαμβάνεται ειδική πρόληψη ώστε να μην έρχεται σε επαφή με νερό. Επίσης πρέπει να αποφεύγεται η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία.

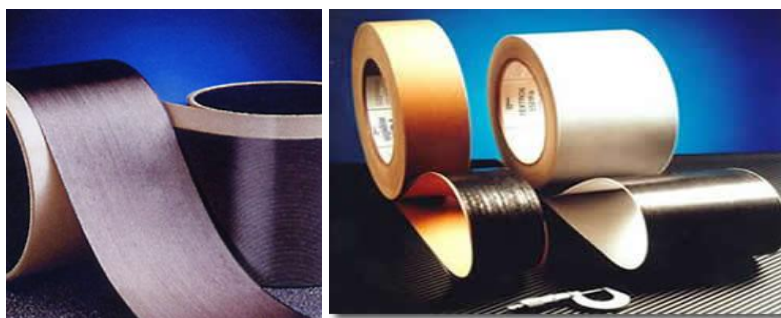
Σε φορτία κόπωσης καθώς και σε φαινόμενα ερπυσμού οι ίνες Kevlar έχουν άριστη συμπεριφορά που θεωρείται ανώτερη των ινών από γυαλί αλλά και αυτών από άνθρακα.

1.3.4 ΒΟΡΙΟ

1.3.4

Μια κατηγορία ψαθρών μεταλλικών εγκλεισμάτων είναι τα υλικά από βόριο. Όταν χρησιμοποιείται με την μορφή ινών, η διάμετρος τους φθάνει τα 125-140 μm, αρκετά μεγάλη δηλαδή σε σχέση με του άνθρακα που δεν ξεπερνάει τα 10 μm. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του είναι η πολύ μεγάλη του ακαμψία –τουλάχιστον 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή των γυάλινων ινών- ενώ η σκληρότητά του προσεγγίζει αυτή του διαμαντιού. Το γεγονός αυτό όμως κάνει δύσκολή την κατεργασία του και οι τεχνικές παραγωγής του ως μέσο ενίσχυσης σύνθετων υλικών είναι αρκετά δαπανηρές, περίπου 6 φορές ακριβότερο του άνθρακα. Σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες βορίου έχουν σήμερα χρήση κυρίως στην πολεμική αεροπορία.

Το βόριο αποτίθεται σε νήμα άνθρακα ή βολφραμίου με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Οι ίνες βορίου έχουν υψηλή μηχανική αντοχή 3-4 GPa και μέτρο ελαστικότητας που φθάνει τα 400 GPa, ενώ οι τιμές των ιδιοτήτων τους διατηρούνται σταθερές ως τους 500 °C. Η πυκνότητά τους είναι 15% περίπου μικρότερη του αλουμινίου. Για τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιείται προστατευτικό επίστρωμα καρβιδίου του πυριτίου (ίνες Borsic) ή νιτριδίου του βορίου.



Εικόνα 1.5 Ίνες βορίου/γραφίτη (Hy-Bor) σε μορφή ταινίας

Τα επιστρώματα αυτά αποτρέπουν την αντίδραση του υλικού ενίσχυσης με αυτό της μήτρας, δεδομένου ότι σε υψηλές θερμοκρασίες, κυρίως σε σύνθετα με μεταλλική μήτρα τιτανίου ή αλουμινίου, ευνοούνται η διάχυση μέσω της διεπιφάνειας ίνας-μήτρας και οι αντιδράσεις σε στερεά κατάσταση που οδηγούν στο σχηματισμό εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων και αστοχία του συνθέτου. Σημαντική μείωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων επιφέρει η παρουσία ελαττωμάτων και ξένων σωματιδίων κατά την διαδικασία παραγωγής τους. Η αντοχή των ινών μπορεί να βελτιωθεί με κατάλληλες διεργασίες λείανσης των επιφανειών όμως το κόστος είναι αρκετά μεγάλο και δεν εφαρμόζεται συνήθως κατά την βιομηχανική παραγωγή.

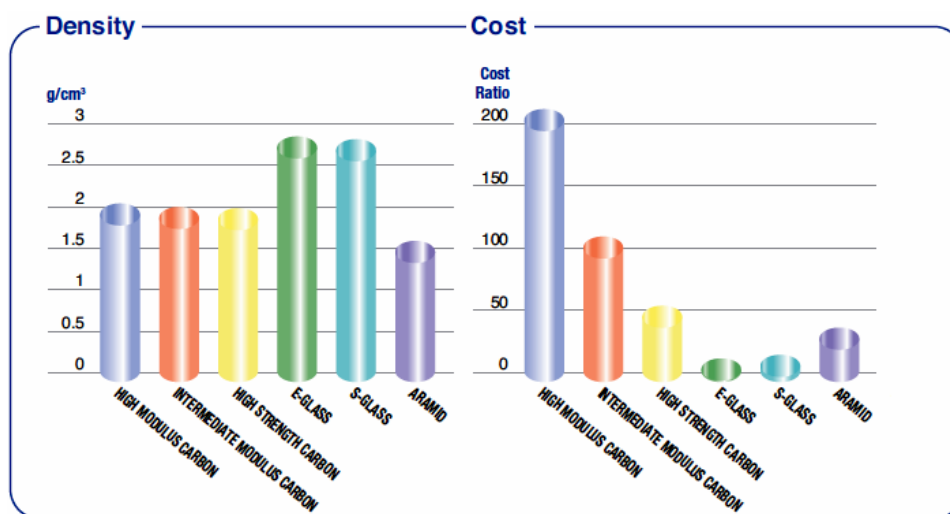
1.3.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.3.5

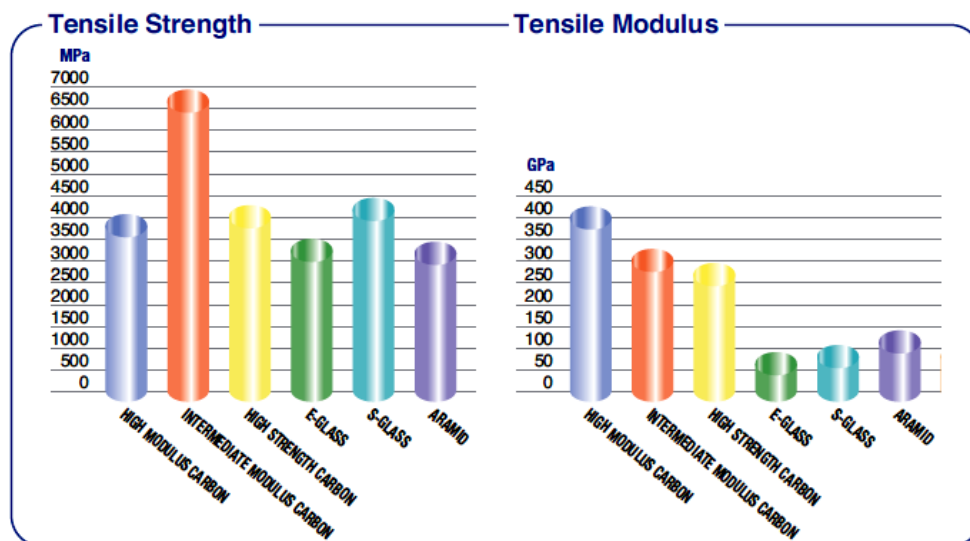
Εκτός των προαναφερθέντων υλικών, πολλές φορές σαν μέσο ενίσχυσης σε ένα σύνθετο υλικό χρησιμοποιούνται το πυρίτιο, τα καρβίδια και τα νιτρίδια του, το nylon, η αλουμίνη, τα χαλύβδινα και τα σύρματα τιτανίου καθώς και τα οργανικά υλικά όπως ξύλο, bamboo, λινάρι, πολυαιθυλένιο κ.α

Τα υλικά ενίσχυσης όπως είδαμε προσδίδουν στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, ακαμψία και αντοχή, καθώς και ηλεκτρικές και χημικές ιδιότητες ενώ παράλληλα μειώνουν το βάρος του σε σχέση με τα περισσότερα μέταλλα. Η επιλογή του κατάλληλου εγκλείσματος εξαρτάται από την σχεδιαζόμενη χρήση του καθώς και την συμβατότητά του με το υλικό της μήτρας.

Ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν την πυκνότητα, το κόστος, το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή των κυριότερων εγκλεισμάτων.



Σχήμα 1.9 Πυκνότητα και κόστος διαφόρων υλικών ενίσχυσης



Σχήμα 1.10 Αντοχή σε εφελκυσμό και μέτρο ελαστικότητας διαφόρων υλικών ενίσχυσης

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 δημιουργήθηκε μια νέα μορφή υλικού από άνθρακα με μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες οι οποίες είναι μοναδικές. Ουσιαστικά πρόκειται για στρώσεις άνθρακα εξαγωνικής δομής, οι οποίες τυλίγονται ώστε να δημιουργηθούν σωλήνες κυλινδρικού σχήματος. Το μέτρο ελαστικότητας τους φθάνει τα 1000 GPa (1 TPa) και αντοχή άνω των 100 GPa. Νέα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρα ή ενίσχυση σε ένα σύνθετο υλικό και οι συνδυασμοί τους αποτελεί αντικείμενο συνεχιζόμενης έρευνας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΝΘΕΤΑ SANDWICH - ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ

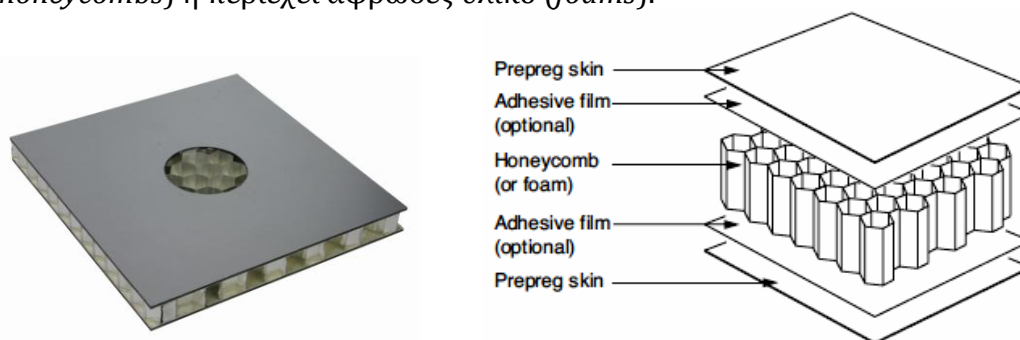
Τα σύνθετα sandwich ή *sandwich panels* αποτελούν μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών λόγω της διαφορετικής δομής τους από τα ευρέως γνωστά πολύστρωτα σύνθετα και αναπτύχθηκαν τα τελευταία κυρίως χρόνια. Οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτές των πολύστρωτων, προσφέρουν όμως ένα συνδυασμό άλλων χαρακτηριστικών και έχουν πολύ μικρό κόστος παραγωγής, κάτι που τα κάνει αρκετά δημοφιλή. Ανάλογα με την χρήση τους, η ακαμψία τους μπορεί να φθάσει έως και 40 φορές περισσότερο από αυτή του αλουμινίου και η αντοχή τους να είναι 10πλάσια. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως δάπεδα σε αεροπορικές κατασκευές, σαν εσωτερικά χωρίσματα σε πλοία, τραίνα και αεροπλάνα, στο κατασκευαστικό τομέα και την αυτοκινητοβιομηχανία και σε ειδικές περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη μιας στιβαρής αλλά ελαφριάς κατασκευής. Η ευκολία σύνθεσης περίπλοκων κατασκευαστικών γεωμετριών είναι επίσης ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των sandwich panels . Ανάλογα με την εφαρμογή, είναι δυνατή η παραγωγή τους σχεδόν σε οποιοδήποτε σχήμα και μέγεθος.

Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται είναι ανάλογα με αυτά των σύνθετων υλικών που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, όταν σε ένα ελαφρύ υλικό πυρήνα ενσωματωθούν σφαιρίδια γυαλιού, τότε παράγονται οι *συντακτικοί αφροί*. Στη παρούσα διπλωματική έγινε η μελέτη μηχανικής απόκρισης σύνθετων sandwich με πυρήνα από συντακτικό αφρό και εξωτερικές στρώσεις ενισχυμένες με ανθρακονήματα. Οι ιδιότητες και οι εφαρμογές τους εξετάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ SANDWICH

2.1

Η δομή τους αποτελείται από την προσαρμογή δύο λεπτών αλλά άκαμπτων επιφανειών σε έναν ελαφρύ αλλά μεγάλο σε πάχος πυρήνα. Το υλικό του πυρήνα είναι συνήθως χαμηλής αντοχής, όμως λόγω του πάχους του το σύνθετο επιδεικνύει υψηλή καμπτική αντοχή και χαμηλή πυκνότητα. Η δομή του είναι κυψελωτή (*honeycombs*) ή περιέχει αφρώδες υλικό (*foams*).



Εικόνα 2.1 Τα διάφορα μέρη ενός σύνθετου sandwich

Σήμερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία υλικών που χρησιμοποιούνται ως πυρήνες σε σύνθετα sandwich και παράγονται από μεγάλες εταιρίες όπως η Diab, Baltec, Rohacell και η Dow. Μεγάλη ποικιλία υλικών υπάρχει και στην περίπτωση των εξωτερικών επιφανειών, καθώς και συνδυασμός τους με το υλικό του πυρήνα. Αυτό που καθορίζει την τελική επιλογή είναι οι εκάστοτε ανάγκες και οι σχεδιαζόμενες εφαρμογές του σύνθετου.

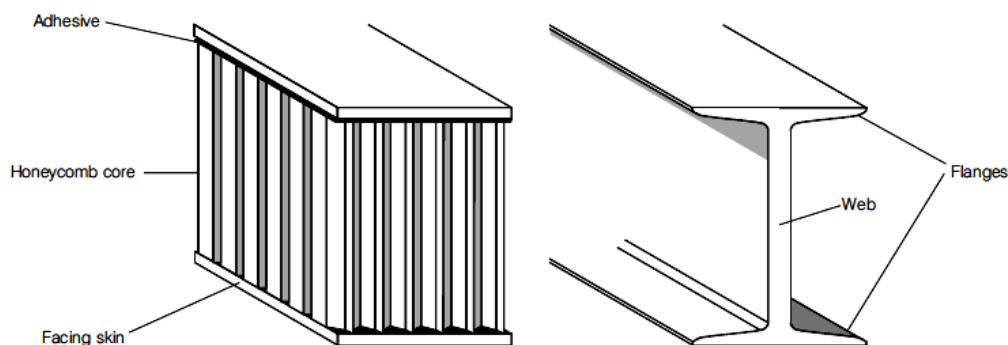
2.1.1 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ - HONEYCOMBS

2.1.1

Ένα sandwich panel κυψελωτής δομής λειτουργεί περίπου όπως μια επαλληλία δοκών διπλού ταυ. Οι εξωτερικές στρώσεις (*skins*) είναι σε απόσταση μεταξύ τους ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή ακαμψία. Όπως και σε μια δοκό διπλού ταυ, όταν οι εξωτερικές επιφάνειες τοποθετηθούν σε μεγαλύτερη απόσταση, η ακαμψία της κατασκευής αυξάνεται. Αν για παράδειγμα διπλασιάσουμε το πάχος του πυρήνα, τότε το σύνθετο θα αποκτήσει 12 φορές μεγαλύτερη ακαμψία και 6 φορές μεγαλύτερη αντοχή. Το πλεονέκτημα των σύνθετων sandwich είναι πως όταν το πάχος τους μεγαλώνει, αυτό συνεπάγεται πολύ μικρή αύξηση του βάρους τους.

Οι επιφανειακές στρώσεις λοιπόν αναλαμβάνουν τις καμπτικές ροπές, με την μία επιφάνεια να υπόκειται σε θλίψη και την άλλη σε εφελκυσμό. Ο πυρήνας αναλαμβάνει τα διατμητικά φορτία, αυξάνει την ακαμψία του σύνθετου και συγκρατεί τις δύο επιφάνειες σε σταθερή απόσταση ώστε το φορτίο κατανεμηθεί

ομαλά στο σύνολο της κατασκευής. Το υλικό συγκόλλησης κρατάει ενωμένα τον πυρήνα και τις επιφανειακές στρώσεις ώστε να λειτουργούν σαν ένα σώμα υπό καμπτικά και στρεπτικά φορτία και αποτρέπει την διαστρωματική αποκόλληση. Αν και είναι η προτιμότερη η χρήση συγκολλητικών υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας, εντούτοις η επιλογή τους θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην παρουσιάζουν ψαθυρή συμπεριφορά σε ένα σύνθετο με πολύ ελαφρύ πυρήνα.



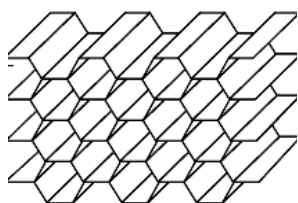
Σχήμα 2.1 Συσχέτιση ενός σύνθετου sandwich με μια δοκό διπλού ταυ

Οι θερμοκρασίες στις οποίες τα σύνθετα αυτά έχουν βέλτιστη απόδοση κυμαίνεται από -55 °C έως 170 °C. Συγκεκριμένη επιλογή υλικών μπορεί να τα κάνει ανθεκτικά στη φωτιά και την υγρασία και να τους προσδώσει αντιδιαβρωτικές ιδιότητες.

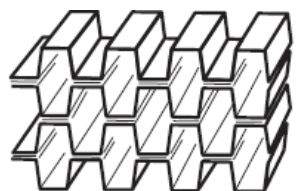
2.1.2 ΤΥΠΟΙ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

2.1.2

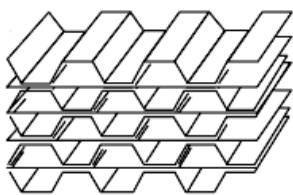
Έχουν κατασκευαστεί τουλάχιστον 700 διαφορετικοί τύποι διαφορετικών κυψελωτών σύνθετων. Οι πιο πολυχρησιμοποιημένες δομές συμπεριλαμβάνουν :



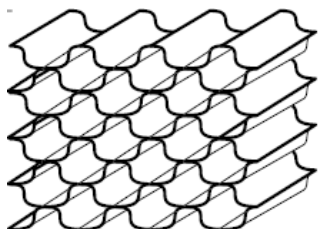
i) Την κλασική εξαγωνική δομή με τις περισσότερες χρήσεις σε όλες σχεδόν τις εφαρμογές και διαθέσιμη για όλα τα υλικά



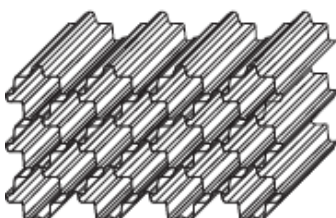
ii) Την πεπλατυσμένη εξαγωνική δομή όταν θέλουμε αυξημένη διατμητική αντοχή κατά μια διεύθυνση.



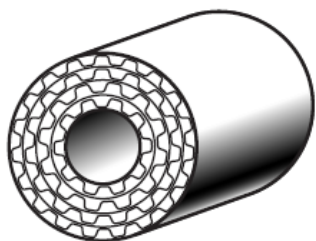
iii) Την εξαγωνική δομή με φύλλα ενίσχυσης η οποία έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.



iv) Την εύκαμπτη κυψελωτή δομή η οποία προσδίδει την μεγαλύτερη διατμητική αντοχή προς όλες τις διευθύνσεις. Κατασκευάζεται κυρίως από αλουμίνιο και υαλονήματα.



v) Την διπλά - εύκαμπτη κυψελωτή δομή κατασκευασμένη από αλουμίνιο με την καλύτερη αντοχή σε θλίψη.



vi) Την σωληνοειδή δομή με μεγάλη αντοχή σε κρούση κατά την διεύθυνση των ελεύθερων άκρων λόγω της μεγάλης δυνατότητάς της για απορρόφηση ενέργειας. Κατασκευάζεται από διαδοχικές στρώσεις αλουμινίου με εξωτερική διάμετρο 1-60cm και μήκος 1- 80cm περίπου.

Η λίστα δεν εξαντλείται σε αυτές τις διατομές λόγω της ευχέρειας κατασκευής οποιασδήποτε επιθυμητής γεωμετρίας.

2.1.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

2.1.3

Το σύνθετο υποβάλλεται σε διάφορες φορτίσεις κατά την διάρκεια λειτουργίας του που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την φάση σχεδιασμού ώστε να γίνει η κατάλληλη επιλογή υλικών και γεωμετρίας.

Οι καμπτικές παραμορφώσεις του σύνθετου εξαρτώνται άμεσα από την εφελκυστική και θλιπτική αντοχή των εξωτερικών στρώσεων, ενώ οι διατμητικές παραμορφώσεις από το μέτρο διάτμησης του πυρήνα.

Οι τρόποι αστοχίας που παρουσιάζονται σε σύνθετα sandwich είναι έξι.

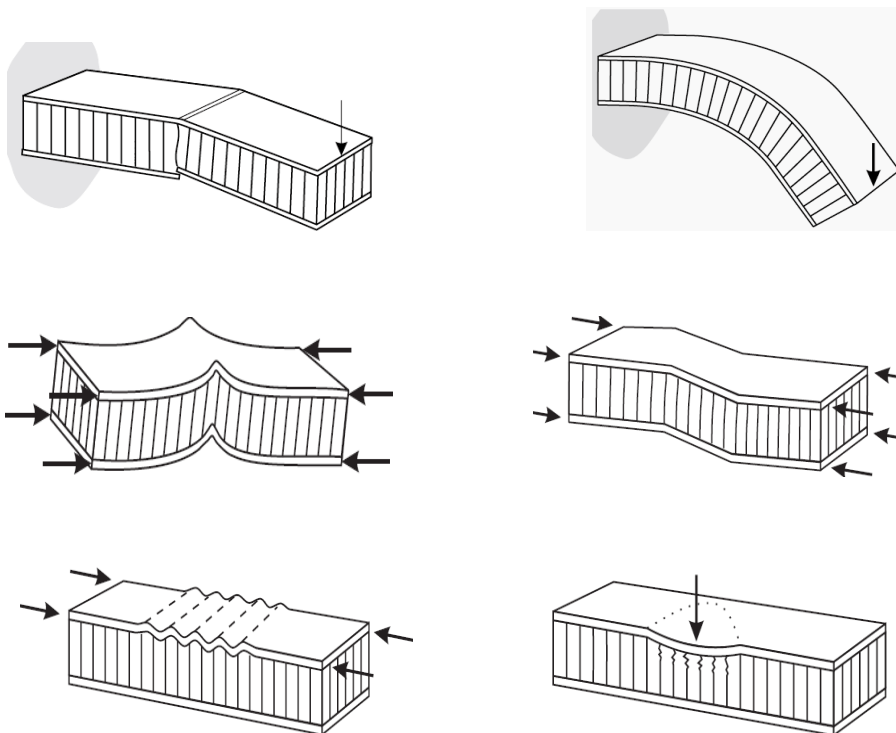
Οι επιφανειακές στρώσεις υπόκεινται σε εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία, άρα θα πρέπει να έχουν την κατάλληλη αντοχή.

Η κατασκευή πρέπει να έχει υψηλή καμπτική και διατμητική ακαμψία ώστε να μην παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις.

Το πάχος του πυρήνα και η διατμητική του αντοχή πρέπει να είναι αρκετά ώστε να αποτρέπουν τον λυγισμό και την δημιουργία επιφανειακών ρυτιδώσεων σε διαμήκη θλιπτικά φορτία.

Η θλιπτική αντοχή του πυρήνα επίσης πρέπει να είναι μεγάλη ώστε να αναλαμβάνει τα αντίστοιχα θλιπτικά φορτία στα οποία υπόκειται η κατασκευή.

Τέλος, για δεδομένο υλικό της εξωτερικής επιφάνειας, το μέγεθος των εξαγωγικών δομών του πυρήνα πρέπει να είναι αρκετά μικρό ώστε να μην παρουσιάσουν πτυχώσεις.



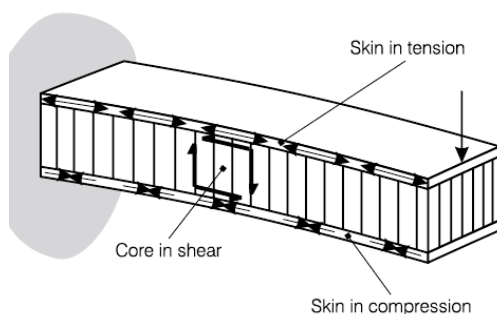
Σχήμα 2.2 Οι έξι τρόποι αστοχίας ενός σύνθετου sandwich

Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την ορθή λειτουργία του σύνθετου κατά την διάρκεια λειτουργίας του είναι ο καθορισμός των αναμενόμενων φορτίων στα οποία θα υποβληθεί. Αυτά μπορεί να είναι σημειακά, καταναμημένα, δυναμικά ή στατικά, ακόμα και θερμικά. Οι συντοριακές συνθήκες ορίζονται με βάση τον τρόπο στήριξης τους σε μια κατασκευή, η οποία μπορεί να θεωρηθεί πάκτωση μόνον όταν η ακαμψία της είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μην παραμορφώνεται κατά την επιβολή των φορτίων. Επιπλέον, οι ανάγκες της εκάστοτε κατασκευής επιβάλλουν συγκεκριμένα όρια σε σχέση με την γεωμετρία του σύνθετου, τις ανεκτές παραμορφώσεις του, το συνολικό του βάρος και τον επιθυμητό συντελεστή ασφαλείας.

Η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ χρήσιμα εργαλεία για την μοντελοποίηση ενός σύνθετου sandwich και της περίπλοκης καταπόνησης στην οποία υποβάλλεται. Στην πιο απλή περίπτωση θεωρούμαι πως είναι ορθοτροπικά και πως ο πυρήνας αναλαμβάνει τις διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται κάθετα στο επίπεδο του σύνθετου, ενώ οι καμπτικές ροπές και οι συνεπίπεδες δυνάμεις μεταβιβάζονται σαν μεμβρανικές δυνάμεις στις εξωτερικές στρώσεις.

Όταν το μήκος του είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του, οι διατμητικές παραμορφώσεις αγνοούνται. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση επίπεδων στοιχείων (*shell elements*) μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, πως η συνεπίπεδη ακαμψία του κυψελωτού πυρήνα είναι αμελητέα σε σχέση με αυτή των επιφανειακών στρώσεων.

Όταν είναι αναγκαία μια πιο λεπτομερής ανάλυση, τότε χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στοιχεία (*3D elements*). Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως δεν είναι αναγκαία ούτε χρήσιμη η μοντελοποίηση κάθε εξαγωνικής δομής του πυρήνα και για λόγους υψηλού υπολογιστικού κόστους πρέπει να αποφεύγεται.



Σχήμα 2.3 Οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σύνθετο sandwich

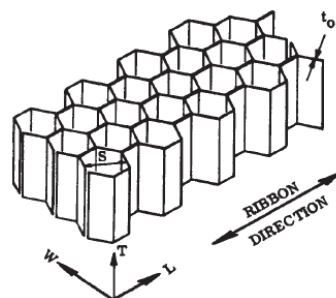
Οι ελαστικές σταθερές του σύνθετου που λαμβάνονται υπόψη είναι οι εξής :

$$\begin{aligned} E_x &\approx E_y \approx 0 \\ \mu_{xy} &\approx \mu_{xz} \approx \mu_{yz} \approx 0 \\ G_{xy} &\approx 0 \end{aligned}$$

Για να αποφύγουμε απειρισμούς ή υπολογιστικές ανωμαλίες συνήθως χρησιμοποιούμε μια πολύ μικρή τιμή για αυτές τις ελαστικές σταθερές

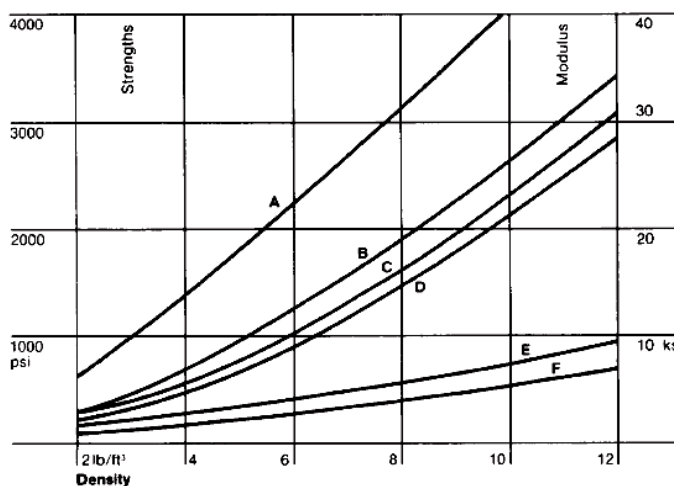
$$\begin{aligned} G_{xz} &= G_L \\ G_{yz} &= G_W \\ E_z &= E_C \end{aligned}$$

Οι τιμές των ελαστικών σταθερών δίνονται από τον κατασκευαστή και τις αντίστοιχες γνωστές τιμές των υλικών



Ελαστικές σταθερές και αντοχή σύνθετου ενισχυμένο με αραμίδιο για διάφορες τιμές της πυκνότητας του πυρήνα

- A : Διάμηκες μέτρο διάτμησης
- B : Αντοχή σε θλίψη
- C : Εγκάρσιο μέτρο διάτμησης
- D : Ειδική αντοχή σε θλίψη
- E : Διαμήκης αντοχή σε διάτμηση
- F : Εγκάρσια αντοχή σε διάτμηση



2.1.4 ΥΛΙΚΑ - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΥΨΕΛΩΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ

2.1.4

Τα βασικότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των κυψελωτών σύνθετων και ειδικότερα για τις εξωτερικές επιφάνειες είναι το αλουμίνιο, ο χάλυβας, τα πολυμερή υλικά ενισχυμένα με υαλονήματα, αραμίδιο, ανθρακονήματα ή φυσικές ίνες. Σαν υλικό πυρήνα συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο θερμοπλαστικό πολυμερικό υλικό, το αλουμίνιο, το χαρτί, το ξύλο από μπάλα ή κέδρο, ακόμα και το τιτάνιο.

Τα σύνθετα sandwich από αλουμίνιο έχουν σχετικά χαμηλό κόστος, απορροφούν ικανοποιητικά την ενέργεια κρούσης, έχουν μεγάλη αντοχή σε σχέση με το βάρος τους, είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας και κατεργάζονται εύκολα.

Τα σύνθετα με ενίσχυση αραμιδίου έχουν καλή αντίσταση στην φωτιά, είναι μονωτικά, δεν διαθέτουν δι-ηλεκτρικές ιδιότητες και μπορούν να παραχθούν εύκολα σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών.

Όταν ενισχύονται με πλεκτά υαλονήματα προσφέρουν ισορροπημένες μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις επιβολής του φορτίου και είναι επίσης μονωτικά υλικά.

Τα κυψελωτά σύνθετα με ίνες άνθρακα έχουν υψηλή μονοαξονική και διατμητική αντοχή, οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν επηρεάζονται από την υψηλή θερμοκρασία και δεν παρουσιάζουν θερμική διαστολή.

Ακολουθεί ένας συγκριτικός πίνακας διαφόρων υλικών σε σχέση με τις ιδιότητες που παρουσιάζουν.

	Fiber			Resin				Core						
	E-Glass	Kevlar	Carbon	Polyester	Vinyl Ester	Epoxy	Phenolic	Thermoplastic	Balsa	Cross Link PVC	Linear PVC	Nomex/Alum Honeycomb	Thermoplastic Honeycomb	Syntactic Foam
Εφελκυστική αντοχή	■	■	■	□	□	■	□	□	■	■	■	□	□	□
Εφελκυστική ακαμψία	□	■	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Θλιπτική αντοχή	■	□	□	□	□	□	□	□	■	□	■	■	□	□
Θλιπτική ακαμψία	□	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	■	□	□
Αντοχή σε κόπωση	□	■	■	□	■	■	□	■	■	□	■	□	■	□
Αντοχή σε κρούση	■	■	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Αντίσταση σε υγρασία	■	□	□	□	■	■	□	■	□	■	■	□	□	□
Αντίσταση σε φωτιά	■	□	□	□	□	□	■	□	■	□	□	■	□	□
Εργασιμότητα	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	□	■
Κόστος	■	□	□	■	□	□	□	■	■	□	□	□	■	■
	■ Καλή απόδοση □ Μέτρια απόδοση													

2.2 ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΟΙ ΑΦΡΟΙ

2.2

Συντακτικοί αφροί ονομάζονται τα σύνθετα υλικά που παράγονται από την ενσωμάτωση κούφιων σφαιρικών σωματιδίων σε μια πολυμερική, μεταλλική ή κεραμική μήτρα. Η Αμερικάνικη Εταιρία Δοκιμών και Υλικών (ASTM) ορίζει πως οι συντακτικοί αφροί έχουν μήτρα ρητίνης.

Η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη υψηλής ποιότητας και πυκνότητας αφρών είχε σημαντική επίδραση στην αντίληψη κατασκευής και χρήσης των σύνθετων υλικών. Οι αφροί δεν προσφέρουν την ίδια με τους κυψελωτούς πυρήνες, υψηλή σκληρότητα και αναλογία σχέσης αντίστασης - βάρους. Είναι όμως λιγότερο ακριβοί και η κατασκευή των σύνθετων sandwich με πυρήνα από αφρούς είναι πολύ πιο εύκολη. Η αφρώδης επιφάνεια είναι εύκολα κατεργάσιμη για την παραγωγή του συμπαγούς πυρήνα και την διαμόρφωσή του, ενώ η συγκόλληση του πυρήνα με τα φύλλα των εξωτερικών επιφανειών γίνεται με κόλλα. Επιπλέον, τα αφρώδη υλικά προσφέρουν υψηλή θερμική μόνωση, χαμηλό βάρος και επιπλευσιμότητα όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα στην

ναυπηγική αφού τα εγκλείσματα που περιέχουν έχουν χαμηλότερη πυκνότητα από αυτή της μήτρας. Αύξηση του ποσοστού των σφαιριδίων στο τελικό προϊόν οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του βάρους. Επίσης, η χρήση ινών ως μέσο ενίσχυσης σε μια μήτρα από συντακτικό αφρό βελτιώνει τις μηχανικές του ιδιότητες.

Η κατεργασία τους είναι εύκολη και μπορούν με την χρήση καλουπιών να παραχθούν σε οποιοδήποτε σχήμα.

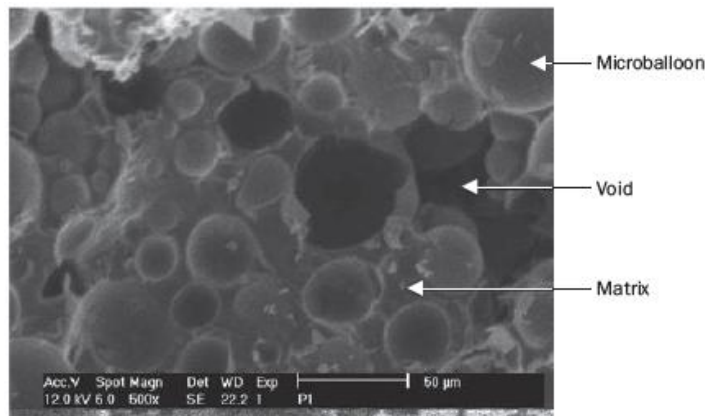
Η χρησιμοποίηση κούφιων σφαιριδίων γυαλιού σαν έγκλεισμα σε μια μήτρα ρητίνης βρήκε μεγάλη εφαρμογή στις ναυπηγικές κατασκευές αφού εκτός της επιπλευσιμότητας που προσφέρουν, αυξάνουν την θλιπτική αντοχή του σύνθετου και δεν απορροφούν υγρασία. Το μεγαλύτερο ποσοστό τέτοιων αφρών που παράγεται ετησίως και φθάνει αρκετές χιλιάδες τόνους, καταλήγει στην κατασκευή σκαφών, σε παράκτιες και θαλάσσιες εγκαταστάσεις, υποβρύχια, κελύφη και υποθαλάσσια όργανα. Συντακτικοί αφροί διαφορετικής σύνθεσης χρησιμοποιούνται ακόμα και στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική σαν μέρη σκαφών και οργάνων, σε αθλητικά είδη, στην επιπλοποιία κ.α

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μελέτη συνθέτου sandwich με μήτρα από συντακτικό αφρό και της απόκρισης του σε διάφορες μηχανικές φορτίσεις.

2.2.1 ΔΟΜΗ ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

2.2.1

Ο συντακτικός αφρός αποτελείται από κάποια πολυμερική μήτρα στην οποία ενσωματώνονται τα σφαιρίδια του εγκλείσματος. Κατά την διάρκεια παραγωγής όμως είναι αναπόφευκτη η ύπαρξη μικροκενών στο τελικό προϊόν η οποία οφείλεται είτε στις συσσωματώσεις των εγκλεισμάτων είτε στην μη πλήρη διαβροχή τους από την ρητίνη. Σε κάποιες περιπτώσεις και ανάλογα με την εφαρμογή, η ύπαρξη των μικροκενών ή και φυσαλίδων αέρα είναι επιθυμητή. Αυτό μειώνει όμως τις μηχανικές του ιδιότητες και κάνει πιο μεγάλη την προσρόφηση υγρασίας.



Εικόνα 2.2 Φωτογραφία αφρού από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Η διαδικασία παραγωγής τους καθορίζεται από διάφορους παραμέτρους και δεν αφορά μόνο μια απλή ανάμιξη της ρητίνης με τα μικροσφαιρίδια αν θέλουμε να αποφύγουμε την αστοχία μεγάλου αριθμού εγκλεισμάτων. Οι παράμετροι αυτοί έχουν να κάνουν με την συγκέντρωση των σφαιριδίων, την σύνθεση και το ιξώδες της μήτρας, την θερμοκρασία, το χρόνο και τον τρόπο ανάμιξης.

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες σε σύνθετα με συντακτικούς αφρούς συνήθως προτιμώνται λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που διαθέτουν κατά την διάρκεια παραγωγής τους έναντι των θερμοπλαστικών. Η κατεργασία τους γίνεται σε μικρότερη θερμοκρασία, μειώνοντας έτσι το κόστος παραγωγής. Το μικρό τους ιξώδες επιτρέπει την ελαφριά ανάμιξη των γυάλινων μικροσφαιριδίων χωρίς να οδηγεί στην αστοχία τους. Το πλεονέκτημα των συντακτικών αφρών από θερμοπλαστική μήτρα είναι η αυξημένη τους σκληρότητα.

Οι σημαντικότερες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες συμπεριλαμβάνουν τις εποξειδικές, τις φαινολικές, τους κυανικούς εστέρες, τις δισμηλεϊνιμίδες, τους ακόρεστους πολυεστέρες και τις πολυουρεθάνες. Θερμοπλαστικές μήτρες είναι το πολυαιθυλένιο, το πολυπροπυλένιο, το πολυστυρένιο και το νάιλον.

Από την άλλη, τα κούφια σφαιρίδια που εισάγονται στην μήτρα του συντακτικού αφρού συμβάλλουν στην ελάττωση του βάρους του, την αύξηση της ειδικής αντοχής του, και την αντίσταση στην πρόσληψη υγρασίας. Αυτά αποτελούνται συνήθως από γυαλί, άνθρακα ή κάποιο πολυμερικό, κεραμικό ή μεταλλικό υλικό. Τα μικροσωματίδια χαρακτηρίζονται από το μέγεθός τους, το πάχος του τοιχώματος και την πυκνότητά τους. Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από 1-50 μm, τα τοιχώματά τους από 1-4 μm, η πυκνότητα του υλικού τους από 70-500 kg/m³ και η πυκνότητα του κάθε μικροσφαιριδίου από 50-500 kg/m³. Σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα σε μέγεθος σφαιρίδια διαστάσεων 1-100mm.

Σημαντική παράμετρος των μικροσφαιριδίων είναι ο ακτινικός λόγος που αντιστοιχεί στον λόγο εσωτερικής r_i προς εξωτερική ακτίνα r_o του τοιχώματός τους.

$$\eta = \frac{r_i}{r_o}$$

Όσο μεγαλύτερος ο λόγος αυτός, τόσο μειώνεται και η τελική πυκνότητα του αφρού και το αντίστροφο. Η παράμετρος η σχετίζεται με την πυκνότητα των μικροσφαιριδίων ρ_{mb} (microballoons) και του υλικού τους ρ_g με τον τύπο :

$$\eta = \left(1 - \frac{\rho_{mb}}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Το γυαλί είναι ένα από τα πιο συνηθισμένα υλικά κατασκευής των μικροσφαιριδίων λόγω της υψηλής ειδικής αντοχής, της ομαλής επιφάνειας που

δημιουργούν, την ευκολία κατεργασίας, την ικανότητα πλήρους διαβροχής και απορρόφησης ενέργειας και το χαμηλό τους κόστος. Στην κατηγορία των πολυμερικών εγκλεισμάτων, οι φαινολικές ρητίνες έχουν πιο φτωχές μηχανικές ιδιότητες αλλά και μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με το γυαλί. Τα μικροσφαιρίδια από άνθρακα έχουν πυκνότητα από 0.05-0.25 g/cm³ και την χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα που κυμαίνεται από 0.049–0.064 W/m.

2.2.2 ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

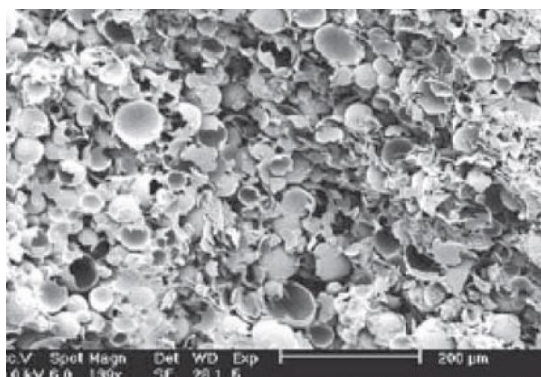
2.2.2

Οι εποξεικοί συντακτικοί αφροί προτιμώνται σαν υλικό μήτρας λόγω των καλών μηχανικών τους ιδιοτήτων όπως αντοχή και δυσκαμψία, τον μικρό ερπυσμό και την αντίσταση σε υγρασία. Στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική χρησιμοποιούνται λόγω της καλής τους θερμικής αντοχής, την μειωμένη υποβάθμιση δηλαδή των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε αυξημένη θερμοκρασία. Το μεγάλο τους ξώδες είναι ένα από τα μειονεκτήματα των εποξεικών αφρών αλλά αντιμετωπίζεται με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας.

Οι φαινολικές ρητίνες σαν υλικό μήτρας σε συντακτικούς αφρούς οφείλουν τις ιδιότητές τους στην χημική τους σύσταση και ιδιαίτερα στους δεσμούς C-C (άνθρακα). Έχουν χαμηλή πυκνότητα και πολύ καλή θερμική αντοχή έως και 300°C. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αεροπλάνων και διαστημοπλοίων, στην βιομηχανία πετρελαίου και αερίου - ειδικά σε παράκτιες κατασκευές. Μειονέκτημα αποτελεί η ευπάθεια τους σε χημικό περιβάλλον όπου και πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα προστασίας του ή ανάμιξη του με άλλα προσθετικά.

Οι συντακτικοί αφροί από πολυιμίδιο έχουν πολύ καλές μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες και η χρήση τους είναι μεγάλη σε ηλεκτρονικές συσκευές. Συνήθως συνδυάζονται με σφαιρίδια πυριτίου. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό και θλίψη είναι πολύ μεγάλη, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία παραγωγής του παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα αφού κατά την χρονοβόρα διάρκεια της σκλήρυνσης, ο αφρός συρρικνώνεται έως και 20%. Παρουσιάζει επίσης μεγάλη προσρόφηση υγρασίας με την παρουσία νερού.

Οι συντακτικοί αφροί πολυουρεθάνης έχουν καλή θλιπτική αντοχή και υψηλή αντίσταση στην πρόσληψη νερού. Μπορούν να είναι εμποτισμένοι σε υγρό περιβάλλον για πάνω από 10 χρόνια και σε θερμοκρασία ύδατος έως και 40°C χωρίς σημαντική υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Επίσης, παραλλαγές στην σύνθεση τους οδηγεί σε υλικά με εξαιρετική αντίσταση σε φωτιά για αυτό πολλές φορές χρησιμοποιούνται στην θέση του ξύλου σε ανάλογες κατασκευές.



Εικόνα 2.3 Φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο συντακτικού αφρού με σφαιρίδια γυαλιού που έχουν αστοχήσει

Οι πολυεστερικοί συντακτικοί αφροί σε συνδυασμό με κούφια μικροσφαιρίδια γυαλιού βρήκαν μεγάλη εφαρμογή στην κατασκευή σκαφών θαλάσσης και υποβρύχιων κατασκευών λόγω της πλευστότητάς τους, την μη προσρόφηση υγρασίας και το χαμηλό τους κόστος. Η χρήση διαφόρων πρόσθετων μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τις σημαντικές αυτές ιδιότητες των πολυεστερικών αφρών.

Οι συντακτικοί αφροί πυριτίου έχουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες και είναι πολλά υποσχόμενες για εφαρμογή σε ηλεκτρομαγνητικές συσκευές.

Το πολυπροπυλένιο χρησιμοποιείται με σφαιρίδια γυαλιού ώστε να έχει χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές και θερμομονωτικές ιδιότητες. Η ανάπτυξή του ως υλικό μήτρας, οδήγησε στην παρασκευή του συντακτικού αφρού με την εμπορική ονομασία *carizite*, το οποίο διαθέτει εξαιρετική θλιπτική αντοχή και ευκολία κατασκευής, ιδανικό για την αυτοκινητοβιομηχανία.

Οι συντακτικοί αφροί άνθρακα – άνθρακα (carbon-carbon) αποτελούνται από μήτρα και σφαιρίδια άνθρακα. Η ειδική αντοχή τους είναι μεγάλη σε εφελκυσμό και θλίψη, όπως και οι θερμικές και μονωτικές τους ιδιότητες που φθάνουν ακόμα και τους 3000°C.

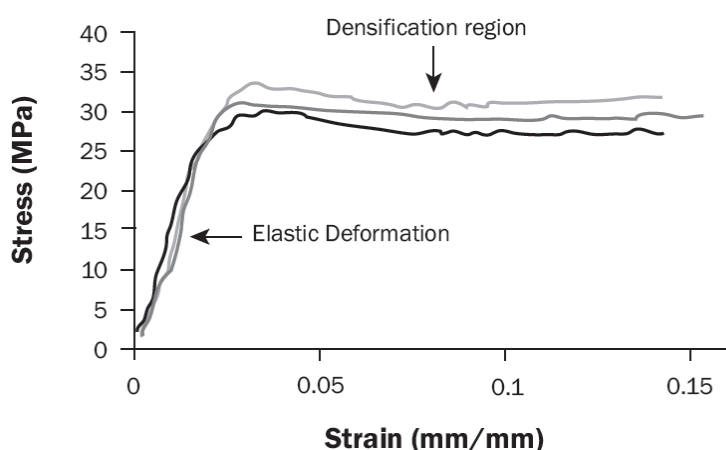
2.2.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΩΝ ΑΦΡΩΝ

2.2.3

Οι κυριότερες ιδιότητες των συντακτικών αφρών που έδωσαν ώθηση στην παραγωγή και ανάπτυξή τους συμπεριλαμβάνουν το μειωμένο βάρος, την αυξημένη ακαμψία, την πλευστότητα και το μειωμένο κόστος. Αν συνυπολογίσουμε την αντοχή τους σε θλίψη και υδροστατικά φορτία, την σχετικά καλή απόκριση σε κρούση και κόπωση και την αντίστασή τους σε τριβή και χημικές ουσίες, καταλαβαίνουμε το λόγο που γνώρισαν μεγάλη εφαρμογή σε διάφορου είδους κατασκευές.

Οι ιδιότητες ενός συντακτικού αφρού μπορούν να καθορισθούν σε μεγάλο βαθμό μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους κατά την παραγωγή τους όπως το υλικό της μήτρας και των εγκλεισμάτων, το μέγεθος των μικροσφαιριδίων, το πάχος του τοιχώματός τους και τον αριθμό τους - τον λόγο του όγκου τους δηλαδή σε σχέση με τον συνολικό όγκο του αφρού. Η ευκολία κατασκευής τους είναι ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συντακτικών αφρών.

Η εφελκυστική τους αντοχή σχετίζεται κυρίως με το υλικό της μήτρας, ενώ η θλιπτική τους αντοχή από το υλικό των σφαιριδίων. Καθοριστικοί παράγοντες για τις τελικές ιδιότητες του συντακτικού αφρού είναι η πυκνότητα της ρητίνης και η συγκέντρωση των σφαιριδίων. Όταν η ρητίνη έχει μικρή πυκνότητα η αστοχία επέρχεται σε όλη την κατασκευή, ενώ για μεγάλες πυκνότητες παρατηρείται πρώτα η αστοχία ενός μεγάλου μέρους του αριθμού των σφαιριδίων και μετέπειτα του σύνθετου. Η ύπαρξη κενών επηρεάζει επίσης αρνητικά τις μηχανικές του ιδιότητες. Μια τυπική καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σε θλίψη δίνεται στο σχήμα 2.4

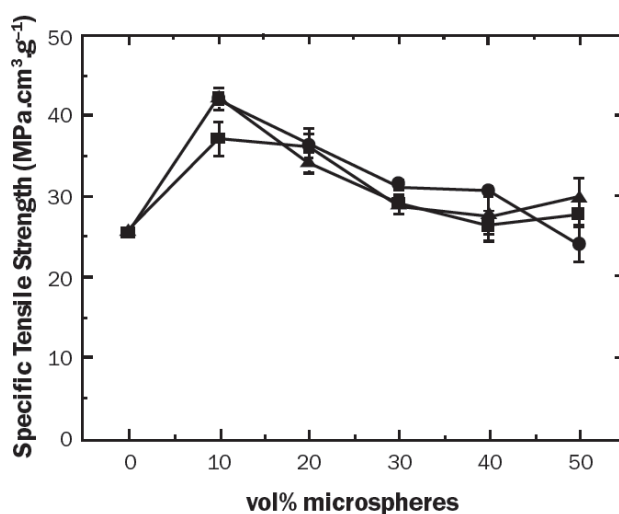


Σχήμα 2.4 Τυπικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων συντακτικών αφρών σε θλίψη

Είναι χαρακτηριστική η περιοχή του διαγράμματος όπου υπό σταθερή περίπου τάση, η παραμόρφωση αυξάνει (*densification region*). Αντιστοιχεί στην ενέργεια που απορροφά ένας συντακτικός αφρός όταν υπόκειται σε θλιπτικά φορτία.

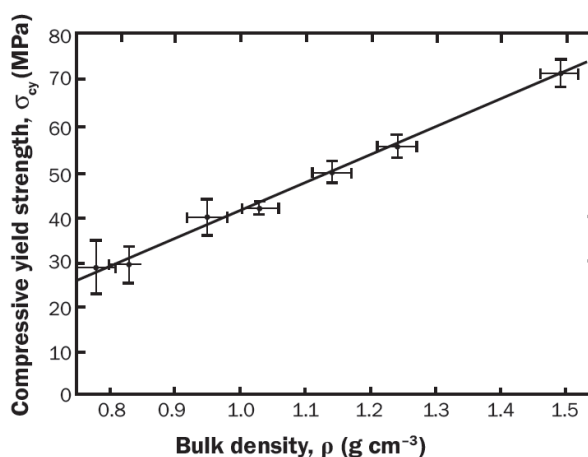
Όσον αφορά την ιδιότητα που επιδεικνύουν να μην προσλαμβάνουν υγρασία, αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις χημικές και φυσικές ιδιότητες της μήτρας και των εγκλεισμάτων. Επηρεάζεται από την συγκέντρωση και το μέγεθος των μικροσφαιριδίων και κατά μεγάλο ποσοστό από την διεπαφή ρητίνης - εγκλεισμάτων. Η πρόσληψη υγρασίας δεν ξεπερνάει το 1% κατά βάρος ακόμα και για πλήρη εμποτισμό ενός υλικού από συντακτικό αφρό σε θερμοκρασία δωματίου και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Μόνο κάτω από υψηλή πίεση - άνω των 100 MPa - η πρόσληψη υγρασίας αυξάνει σταδιακά.

Η αύξηση της πυκνότητας των σφαιριδίων φαίνεται να οδηγεί σε μείωση της εφελκυστικής αντοχής και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Το ίδιο ποιοτικά αποτέλεσμα έχει και η αύξηση της συγκέντρωσής των εγκλεισμάτων ανεξάρτητα από το υλικό τους όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Wouterson, 2005). Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι κούφιων γυάλινων σφαιριδίων (K-15 και K-16) και ένας από φαινολική ρητίνη. Για συγκέντρωση εγκλεισμάτων 10% είχαμε την μέγιστη ειδή εφελκυστική αντοχή και για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, η αντοχή μειωνόταν.

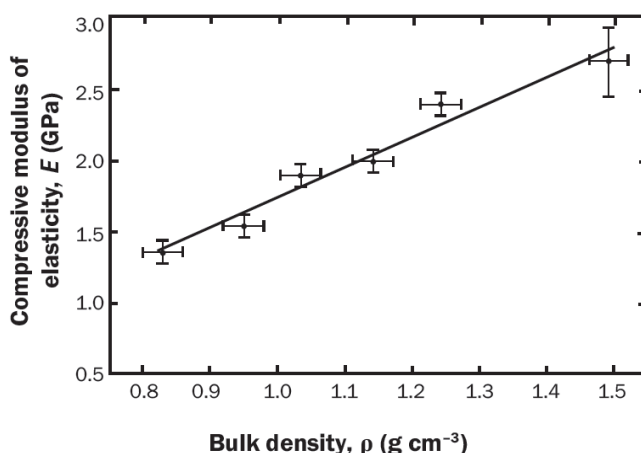


(■) K15, (▲) K46 (●) phenolic

Σχήμα 2.5 Συγκέντρωση εγκλεισμάτων και ειδική εφελκυστική αντοχή συντακτικού αφρού για σφαιρίδια γυαλιού (K15,K46) και φαινολικής ρητίνης.



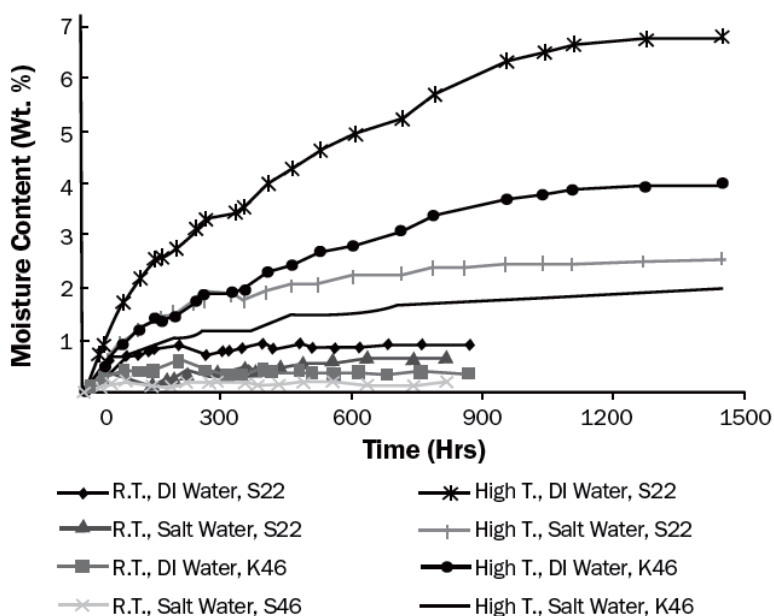
Σχήμα 2.6 Πυκνότητα σφαιριδίων φαινολικής ρητίνης και θλιπτική αντοχή του συντακτικού αφρού



Σχήμα 2.6 Πυκνότητα σφαιριδίων φαινολικής ρητίνης και μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη του συντακτικού αφρού

Αντιθέτως, η θλιπτική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη αυξάνει περίπου γραμμικά με την αύξηση της πυκνότητας των εγκλεισμάτων. Για σφαιρίδια φαινολικής ρητίνης με πυκνότητα από 0.78 έως 1.5g/cm³ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η σχέση αυτή (Bunn - Mottram, 1993).

Ακολουθεί το διάγραμμα υδροαπορροφητικότητας για συντακτικό αφρό με μήτρα εποξεικής ρητίνης και δύο τύπους σφαιριδίων διαφορετικής πυκνότητας που καταδεικνύει την αντίστασή τους σε απορρόφηση νερού.



Σχήμα 2.7 Πείραμα υδροαπορροφητικότητας για δύο τύπους εγκλεισμάτων S22 και K46 με μήτρα εποξεική ρητίνης. (R.T : Room Temperature, H.T: High Temperature = 70°C)

Η απορρόφηση υγρασίας εποξεικών συντακτικών αφρών με εγκλείσματα S22 (πυκνότητας 220 kg/m³) και K46 (πυκνότητας 460 kg/m³) σε θερμοκρασία δωματίου βρέθηκε μικρότερη από 1% κατά βάρος.

Για τα S22 μικροσφαιρίδια η απορρόφηση σε απιονισμένο νερό και θαλασσινό νερό είναι περίπου 6.7% και 2.5% αντίστοιχα σε θερμοκρασία 70°C. Για τα K46 μικροσφαιρίδια οι τιμές αυτές είναι 3.9% και 1.9% (Gurta – Woldesenber, 2003).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ SANDWICH

Για να γίνει σωστά η επιλογή υλικών του πυρήνα και των εξωτερικών στρώσεων, απαιτείται πρώτα από όλα η γνώση της μηχανικής των σύνθετων sandwich. Η κατανόηση της συμπεριφοράς μιας τέτοιας κατασκευής και της συνεισφοράς της κάθε στρώσης ξεχωριστά στην απόκρισή της υπό την επίδραση μηχανικών φορτίων, παίζει κρίσιμο ρόλο για τον ορθό σχεδιασμό.

Ο πυρήνας αποτελείται από ελαφρύ και χαμηλής πυκνότητας υλικό για αυτό αποτελεί συνήθως το 'αδύνατο' σημείο της κατασκευής. Σε μερικές περιπτώσεις όμως, η ένωση μεταξύ πυρήνα και εξωτερικών στρώσεων μπορεί να είναι η σημαντική παράμετρος της δομικής ακεραιότητας του σύνθετου.

Το θέμα της μηχανικής των σύνθετων είναι σίγουρα πολύ ευρύ και δεν μπορεί να καλυφθεί σε αυτό το κεφάλαιο. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί για μελέτη σύνθετων sandwich με πυρήνα μακροσκοπικά ισότροπου υλικού και χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (όπως οι συντακτικού αφροί) και λεπτές σε πάχος εξωτερικές στρώσεις ενισχυμένες με ίνες, ανάλογης δομής δηλαδή των σύνθετων που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο Κεφάλαιο 2 είδαμε πως τα σύνθετα sandwich και ειδικά αυτά με κυψελωτή δομή πυρήνα, παρουσιάζουν έξι διαφορετικούς τρόπους αστοχίας, κάποιες από τις οποίες αφορούν επιφανειακές ρυτιδώσεις ή λυγισμό. Η ανάλυση όλων των τρόπων αστοχίας ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας, η οποία εμβαθύνει περισσότερο σε στατική απόκριση σύνθετων sandwich με πυρήνα από εποξεικό συντακτικό αφρό υπό μονοαξονικό φορτίο και κάμψη τριών σημείων.

3.1 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

Θεωρούμε σύνθετο υπό καθαρή κάμψη όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1. Ο πυρήνας δεν συνεισφέρει στην καμπτική αντοχή της κατασκευής και οι επιφανειακές στρώσεις είναι πολύ λεπτές σε σχέση με το πάχος του πυρήνα. Τότε, η ροπή μπορεί να εξισωθεί με μια θλιπτική και μια εφελκυστική δύναμη που ασκούνται στο κέντρο της κάθε επιφανειακής στρώσης – κάτω και πάνω αντιστοίχως. Προκύπτει τότε :

$$\sigma = \frac{M}{bdh_f}$$

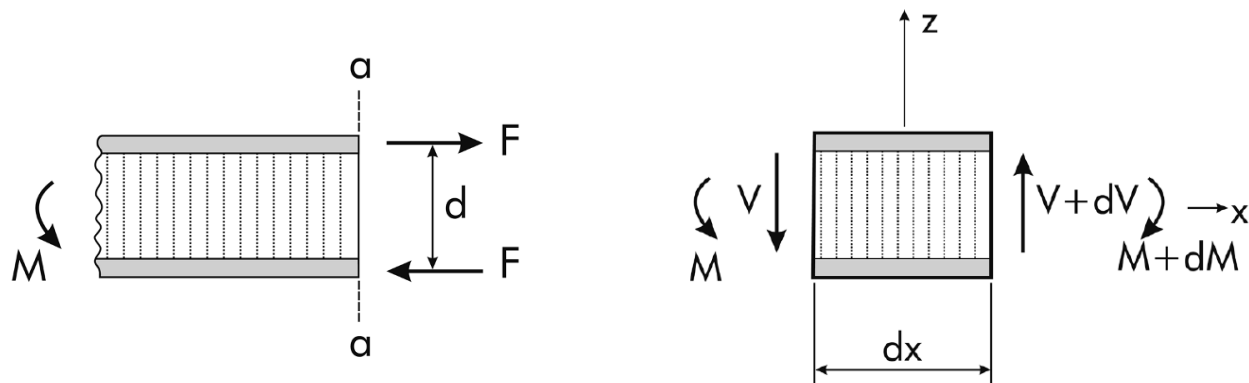
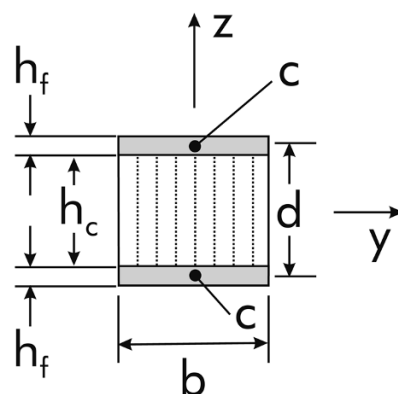
Επομένως, οι εξωτερικές στρώσεις πρέπει να έχουν αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη ώστε να υποστούν τα καμπτικά φορτία.

Αν το σύνθετο δέχεται ροπές που μεταβάλλονται κατά μήκος του, τότε θα ασκηθεί κάθετα στον x άξονα μια διατμητική δύναμη V στον πυρήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, όπου :

$$V = \frac{dM}{dx}$$

Η διατμητική τάση τ_{xz} που ασκείται στον πυρήνα είναι:

$$\tau_{xz} = \frac{dM}{dx} \frac{1}{bd} = \frac{V}{bd}$$



Σχήμα 3.1 Σύνθετο Sandwich σε κάμψη

Η σχέση αυτή δείχνει πως η διατμητική τάση έχει σταθερή τιμή, ανεξάρτητη του z , και βασίζεται όπως είδαμε στην υπόθεση των λεπτών επιφανειακών στρώσεων και της μη ανάληψης καμπτικών φορτίων από τον ελαφρύ πυρήνα. Ακριβής ανάλυση (Zenkert, 1997) δείχνει πως η διατμητική τάση έχει αυτή την τιμή στην διεπιφάνεια πυρήνα-εξωτερικών στρώσεων και μειώνεται σχεδόν γραμμικά έως ότου μηδενιστεί στις επιφάνειες του σύνθετου. Συμπερασματικά, είναι επιτακτική ανάγκη το υλικό του πυρήνα να έχει αντοχή σε διατμητικές τάσεις.

3.2 ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

3.2

Η ανάλυση των παραμορφώσεων, ανάλογα με την γεωμετρία της εκάστοτε κατασκευής αλλά και την επιθυμητή ακρίβεια, μπορεί να γίνει με την βοήθεια διαφόρων θεωριών μεταξύ των οποίων είναι η κλασσική θεωρία πολύστρωτων πλακών (ΚΘΠΠ) καθώς και οι θεωρίες ανώτερης τάξης.

Η ΚΘΠΠ είναι ουσιαστικά μια επέκταση της θεωρίας για ομογενείς ισότροπες πλάκες που παρουσίασαν οι Timoshenko και Woinowsky – Krieger (1959) για λεπτά πολύστρωτα και δεν λαμβάνει υπόψη τις εγκάρσιες διατμητικές παραμορφώσεις. Συνεπώς, δεν έχει τόσο μεγάλη εφαρμογή σε σύνθετα sandwich τα οποία συνήθως έχουν πυρήνα σημαντικού πάχους και άρα επιδεικνύουν διατμητικές παραμορφώσεις. Παρόλα αυτά, η ΚΘΠΠ είναι σημαντικό εργαλείο στην μελέτη των συνεπίπεδων παραμορφώσεων των επιφανειακών στρώσεων καθώς επίσης και σε σύνθετα sandwich μεγάλης επιφάνειας σε σχέση με το πάχος τους.

3.2.1 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

3.2.1

Το διάνυσμα παραμόρφωση μίας στρώσης του σύνθετου είναι :

$$\mathbf{u} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k}$$

και οι παραμορφώσεις :

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

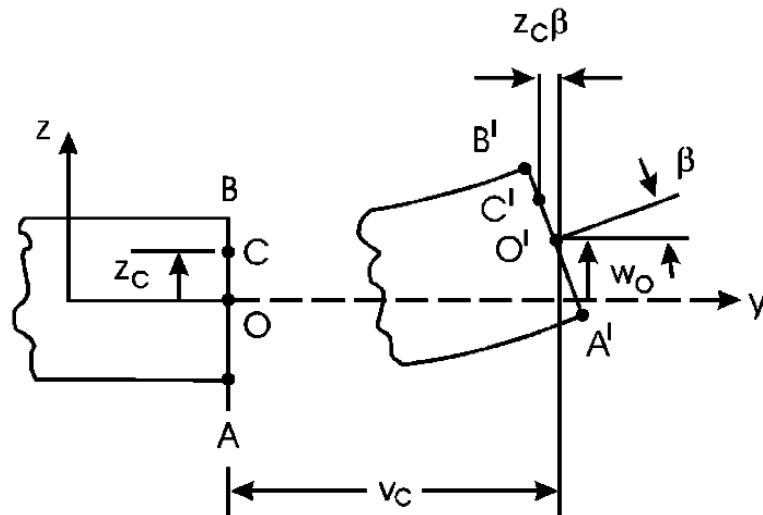
$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Στο επόμενο βήμα θεωρούμε μια τομή της στρώσης πριν και μετά την παραμόρφωση (AB και A'B'). Οι μετατοπίσεις του σημείου O κατά τον άξονα y και z είναι u_0 και w_0 , η τομή AB, A'B' παραμένει κάθετη στον κεντρικό άξονα και το μήκος της παραμένει σταθερό κατά την παραμόρφωση.

$$w(x, y) = w_0(x, y)$$

Αυτές οι υποθέσεις ουσιαστικά αποτελούν την βάση της θεωρίας πλακών του Kirchhoff. Επιπλέον, η κλίση β της τομής ισούται με την κλίση της στρώσης λόγω των παραπάνω υποθέσεων, δηλαδή :

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial y}$$



Σχήμα 3.2 Τομή μιας στρώσης σύνθετου πριν και μετά την παραμόρφωση

Η μετατόπιση κατά τον άξονα y του σημείου O της στρώσης είναι :

$$v_c = v_0 - \beta z_c$$

Με αντικατάσταση έχουμε :

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

Με όμοια διαδικασία μπορούμε να βρούμε την μετατόπιση για τομή παράλληλη στον x άξονα :

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

Με διαφορίση των παραπάνω εκφράσεων προκύπτουν οι αναγκαίες εξισώσεις για τις παραμορφώσεις της στρώσης.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \varepsilon_z &= 0 \end{aligned} \right| \begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \\ \gamma_{yz} &= 0 = \gamma_{xz} \end{aligned}$$

Όπως παρατηρούμε, η ΚΘΠΠ δεν συμπεριλαμβάνει την εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση, ούτε την παραμόρφωση του πάχους του πυρήνα. Οι παραμορφώσεις γράφονται επίσης και στην μορφή :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

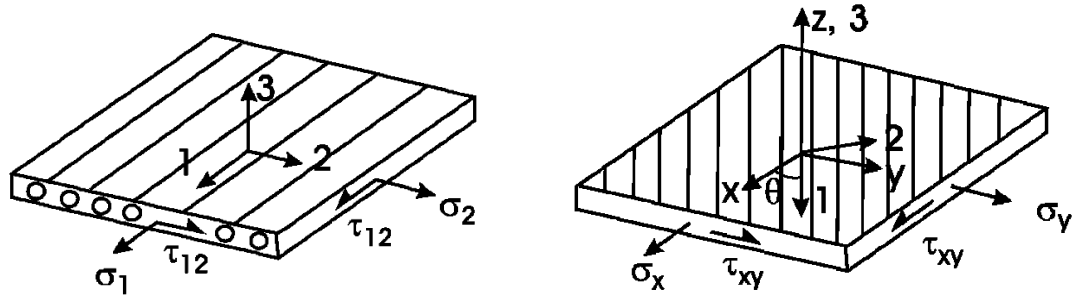
όπου $[\kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}]$ οι καμπυλότητες στο επίπεδο αναφοράς. Οι κ_x, κ_y προκαλούνται από κάμψη ενώ η κ_{xy} από συστροφή στο επίπεδο xy.

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad \kappa_y = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad \kappa_{xy} = -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

3.2.2 ΤΑΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

3.2.2

Οι τάσεις για την ορθοτροπική στρώση του παρακάτω σχήματος – Σχήμα 3.3- σε σχέση με τις παραμορφώσεις είναι :



Σχήμα 3.3 Τάσεις σε ορθοτροπική στρώση σύνθετου κατά μήκος της ενίσχυσης αλλά και σε τυχαία διεύθυνση

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

και οι ακαμψίες Q δίνονται από τους τύπους :

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad Q_{12} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) = \nu_{21}E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$$

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad Q_{66} = G_{12}$$

Για στρώση με διεύθυνση της ενίσχυσης υπό γωνία θ σε σχέση με τους άξονες x-y, οι τάσεις, οι παραμορφώσεις και τα μέτρα ακαμψίας Q πρέπει να μετασχηματιστούν στο καθολικό σύστημα αναφοράς.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q}_{11} = m^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + n^4 Q_{22},$$

$$\bar{Q}_{12} = m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (m^4 + n^4) Q_{12},$$

$$\bar{Q}_{22} = n^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + m^4 Q_{22},$$

$$\bar{Q}_{16} = m^3 n (Q_{11} - Q_{12}) + mn^3 (Q_{12} - Q_{22}) - 2mn (m^2 - n^2) Q_{66},$$

$$\bar{Q}_{26} = mn^3 (Q_{11} - Q_{12}) + m^3 n (Q_{12} - Q_{22}) + 2mn (m^2 - n^2) Q_{66},$$

$$\bar{Q}_{66} = m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) + (m^4 - n^4) Q_{66}$$

όπου : $m = \cos\theta$ και $n = \sin\theta$ και ο δείκτης k υποδηλώνει τον αριθμό της στρώσης σε ένα πολύστρωτο σύνθετο. Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως οι τάσεις μπορεί να είναι διαφορετικές σε κάθε στρώση αλλά οι παραμορφώσεις μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο.

3.2.3 ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΡΟΠΩΝ

3.2.3

Οι συνισταμένες δυνάμεων και ροπών προκύπτουν από την χρήση ολοκληρώματος των τάσεων στο συνολικό πάχος του σύνθετου αλλά για κάθε μία στρώση ξεχωριστά κι αυτό γιατί οι τάσεις μπορεί να είναι ασυνεχείς από στρώση σε στρώση αλλά μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο σε κάθε μία από αυτές.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k dz,$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k z dz$$

Οι μονάδες τους είναι αντίστοιχα δύναμη ανά μονάδα μήκους και ροπή ανά μονάδα μήκους και εξαρτώνται από τις συντεταγμένες x και y αλλά όχι τις συντεταγμένες του άξονα z μετά την ολοκλήρωση.

Μετά την ολοκλήρωση και αντικαθιστώντας στην αρχική εξίσωση των τάσεων – παραμορφώσεων σε μορφή πινάκων :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Οι πίνακες [A], [B] και [D] ουσιαστικά καθορίζουν την απόκριση των σύνθετων στις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές. Τα στοιχεία των πινάκων δίνονται από τις σχέσεις:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}),$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

Μπορεί να δειχτεί πως όταν οι στρώσεις του σύνθετου είναι κατανεμημένες συμμετρικά ως προς τον κεντρικό του άξονα – όπως συμβαίνει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων- τότε τα στοιχεία του πίνακα [B] είναι όλα μηδενικά. Αυτό απλοποιεί αρκετά τους υπολογισμούς κι επιπλέον όταν για μια στρώση σύνθετου με διεύθυνση ενίσχυσης θ υπάρχει μια αντίστοιχη στρώση με διεύθυνση ενίσχυσης $-\theta$, τότε ισχύει $A_{16}=A_{26}=0$. Όταν τα στοιχεία αυτά είναι μη-μηδενικά, τότε έχουμε σύζευξη μεταξύ εκτατικών και διατμητικών παραμορφώσεων.

3.2.4 ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΤΡΩΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ

Αν θεωρήσουμε στρώση συμμετρικού σύνθετου και φόρτιση στο επίπεδο xy , σύμφωνα με τα προηγούμενα :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Για να προσδιορίσουμε τις ελαστικές σταθερές, είναι πιο εύκολο να γράψουμε τις παραμορφώσεις συναρτήσει των δυνάμεων, δηλαδή :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = \frac{A_{22}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad a_{22} = \frac{A_{11}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}$$

$$a_{12} = \frac{-A_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2} \quad a_{66} = \frac{1}{A_{66}}.$$

Η μορφή αυτών των εξισώσεων συμπίπτει με αυτή για ορθοτροπικό ομογενές υλικό που φορτίζεται στο κύριο σύστημα :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{21}/E_2 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

Επομένως, οι ελαστικές σταθερές προκύπτουν ως εξής :

$$E_x = \frac{1}{ha_{11}} \quad \nu_{yx} = \frac{-a_{12}}{a_{22}}$$

$$\nu_{xy} = \frac{-a_{12}}{a_{11}} \quad G_{xy} = \frac{1}{ha_{66}}$$

$$E_y = \frac{1}{ha_{22}}$$

Οι λόγοι του Poisson συνδέονται μεταξύ τους μέσω της σχέσης: $\nu_{xy} = \nu_{yx} \frac{E_x}{E_y}$

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό των εκτός επιπέδου ελαστικών σταθερών. Μια πρώτη εκτίμηση για πολύστρωτο σύνθετο με εγκαρσίως ισότροπες στρώσεις είναι :

$$E_z \cong E_3 = E_2,$$

$$G_{xz} \cong G_{yz} \cong G_{13} = G_{12}$$

Τέτοιες προσεγγίσεις είναι παραδεκτές για πολύστρωτα με παραπλήσιες ιδιότητες εντός και εκτός επιπέδου.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ Α' ΤΑΞΕΩΣ

3.3

Θεωρούμε σύνθετο sandwich με πάχος πυρήνα h_c και πάχος εξωτερικών στρώσεων h_1 και h_2 , όπως στο σχήμα 3.4. Τα υλικά που το αποτελούν μπορεί να είναι ορθοτροπικά ή ισοτροπικά. Η ανάλυση που ακολουθεί είναι ουσιαστικά μια επέκταση της θεωρίας του Whitney (1987) όπου οι συνεπίπεδες παραμορφώσεις u και v είναι αυτές στο κεντρικό επίπεδο των εξωτερικών στρώσεων.

Οι αρχικές υποθέσεις είναι οι εξής :

- i) Οι εξωτερικές στρώσεις έχουν πολύ μικρότερο πάχος από αυτό του πυρήνα και βρίσκονται σε επίπεδη ένταση.
- ii) Οι συνεπίπεδες τάσεις στο πυρήνα είναι αμελητέες.
- iii) Οι συνεπίπεδες παραμορφώσεις u και v στις εξωτερικές στρώσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες και το επίπεδο αναφοράς τους βρίσκεται στο μέσο του πάχους τους (Σχήμα 3.4).
- iv) Η παραμόρφωση w είναι ανεξάρτητη από τις συντεταγμένες του z άξονα, παραμένει δηλαδή σταθερή κατά μήκος του : $\epsilon_z = \partial w / \partial z = 0$
- v) Οι παραμορφώσεις u και v μεταβάλλονται γραμμικά κατά τον z άξονα.

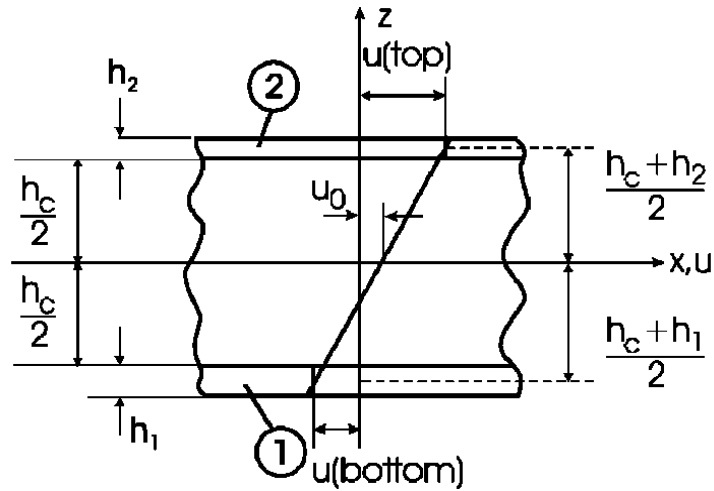
Βασιζόμενη στις υποθέσεις (iv) και (v), οι μετατοπίσεις του πυρήνα μπορούν να γραφτούν :

$$u = u_0(x, y) + z\psi_x(x, y)$$

$$v = v_0(x, y) + z\psi_y(x, y)$$

$$w = w_0(x, y)$$

Οι παράμετροι ψ_x και ψ_y αφορούν την κλίση των αρχικά κάθετων τομών στον κεντρικό άξονα x και y αντίστοιχα. Λόγω της υπόθεσης (iii) και της συνέχειας των μετατοπίσεων στην διεπιφάνεια πυρήνα - εξωτερικής στρώσης, οι μετατοπίσεις των επιφανειακών στρωμάτων στο μέσο του πάχους τους είναι :



Σχήμα 3.4 Σύνθετο sandwich με εξωτερικές στρώσεις πάχους h_1 και h_2

$$u(\text{bottom}) = u_0 - \frac{(h_c + h_1)}{2} \psi_x,$$

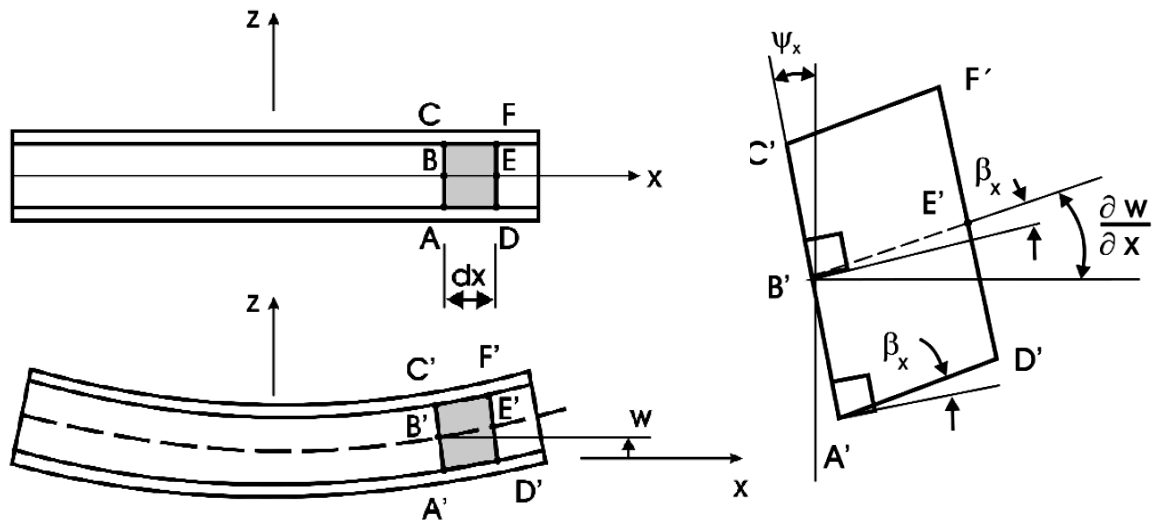
$$u(\text{top}) = u_0 + \frac{(h_c + h_2)}{2} \psi_x,$$

$$v(\text{bottom}) = v_0 - \frac{(h_c + h_1)}{2} \psi_y,$$

$$v(\text{top}) = v_0 + \frac{(h_c + h_2)}{2} \psi_y,$$

$$w = w_0,$$

Όπου bottom (κάτω) και top (πάνω) αναφέρονται στις αντίστοιχες εξωτερικές στρώσεις. Στο επόμενο σχήμα 3.5 φαίνεται μια τομή του σύνθετου στο x-z επίπεδο. Το στοιχείο του πυρήνα ACFD έχει επιφάνειες AC και DF κάθετες στον x άξονα πριν την παραμόρφωση. Όπως και στην κλασσική θεωρία πλακών για ομογενή και ισότροπα υλικά των Timoshenko και Woinowsky-Krieger (1959) αλλά και την ΚΘΠΠ (όπως περιγράφεται παραπάνω), η θεωρία πρώτης τάξης προϋποθέτει πως οι κάθετες τομές στον κεντρικό άξονα του πυρήνα (π.χ AC και DF) παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες όμως θεωρίες, οι τομές των επιπέδων δεν παραμένουν υποχρεωτικά κάθετες στον κεντρικό άξονα και μετά την παραμόρφωση του σύνθετου.



Σχήμα 3.5 Σύνθετο σε τομή με το επίπεδο x-z

Από το σχήμα 3.5 φαίνεται πως η διαφορά αυτή είναι : $\beta_x = \frac{\partial w}{\partial x} - |\psi_x|$ και αποτελεί την διατμητική παραμόρφωση.

Η στροφή ψ_x σύμφωνα με τα παραπάνω είναι αρνητική, οπότε τελικά :

$$\gamma_{xy} = \psi_x + \frac{\partial w}{\partial x}$$

και οι συνεπίπεδες παραμορφώσεις δίνονται από τους τύπους :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z\kappa_x,$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y^0 + z\kappa_x,$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy}$$

όπου $[\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0]$ είναι οι παραμορφώσεις του κεντρικού επιπέδου του πυρήνα και ορίζονται ως εξής :

$$\varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_y^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}$$

και η καμπυλότητα τους :

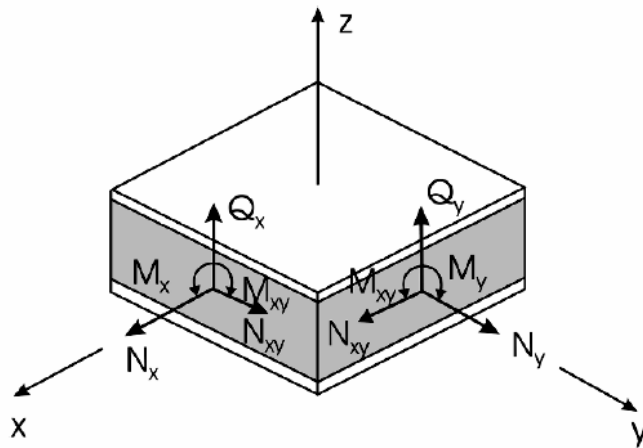
$$\kappa_x = \frac{\partial \psi_x}{\partial x}, \quad \kappa_y = \frac{\partial \psi_y}{\partial y}, \quad \kappa_{xy} = \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x}$$

ενώ οι αντεπίπεδες διατμητικές παραμορφώσεις είναι :

$$\gamma_{xz} = \psi_x + \frac{\partial w}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \psi_y + \frac{\partial w}{\partial y}$$

Αν συμβολίσουμε με (1) την κάτω στρώση και (2) την πάνω στρώση του σύνθετου τότε :

$$\begin{aligned} \varepsilon_x(1) &= \varepsilon_x^0 - \frac{(h_c + h_1)}{2} \kappa_x, & \varepsilon_x(2) &= \varepsilon_x^0 + \frac{(h_c + h_2)}{2} \kappa_x, \\ \varepsilon_y(1) &= \varepsilon_y^0 - \frac{(h_c + h_1)}{2} \kappa_y, & \varepsilon_y(2) &= \varepsilon_y^0 + \frac{(h_c + h_2)}{2} \kappa_y, \\ \gamma_{xy}(1) &= \gamma_{xy}^0 - \frac{(h_c + h_1)}{2} \kappa_{xy} & \gamma_{xy}(2) &= \gamma_{xy}^0 + \frac{(h_c + h_2)}{2} \kappa_{xy} \end{aligned}$$



Σχήμα 3.6 Συνισταμένες ροπών και δυνάμεων σε σύνθετο sandwich

Με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε προηγουμένως, οι συνεπίπεδες τάσεις για κάθε στρώση k είναι :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x(i) \\ \sigma_y(i) \\ \tau_{xy}(i) \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_x(i) \\ \varepsilon_y(i) \\ \gamma_{xy}(i) \end{bmatrix}$$

Οι συνισταμένες ροπών και δυνάμεων, όπως φαίνονται και στο σχήμα 3.6, δίνονται από τις σχέσεις :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Τώρα όμως, επειδή πρέπει να λάβουμε υπόψη τις εξωτερικές στρώσεις, για τους πίνακες [A], [B], [C] και [D] ισχύει :

$$\begin{aligned} A_{ij} &= A_{ij}(1) + A_{ij}(2) \\ B_{ij} &= \frac{(h_c + h_2)}{2} A_{ij}(2) - \frac{(h_c + h_1)}{2} A_{ij}(1) \\ C_{ij} &= C_{ij}(1) + C_{ij}(2), \\ D_{ij} &= \frac{(h_c + h_2)}{2} C_{ij}(2) - \frac{(h_c + h_1)}{2} C_{ij}(1) \end{aligned}$$

Όπου :

$$\begin{aligned} A_{ij}(1), C_{ij}(1) &= \int_{-(h_c/2+h_1)}^{-h_c/2} \bar{Q}_{ij}(1, z) dz \\ A_{ij}(2), C_{ij}(2) &= \int_{h_c/2}^{h_c/2+h_2} \bar{Q}_{ij}(1, z) dz \end{aligned}$$

Για συμμετρικό σύνθετο όμως, με ίδιο πάχος εξωτερικών στρώσεων και ενίσχυση ίδιας διεύθυνσεως (π.χ 0/90 και 90/0 στην πάνω και κάτω στρώση αντίστοιχα), δηλαδή:

$$\begin{aligned} A_{ij}(1) &= A_{ij}(2), \\ C_{ij}(1) &= -C_{ij}(2) \end{aligned}$$

Τότε, όταν το πάχος της κάθε στρώσης είναι h_f , οι προηγούμενοι πίνακες γίνονται:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= 2A_{ij}(2) \\ B_{ij} &= 0 = C_{ij} \end{aligned}$$

$$\text{και } D_{ij} = (h_c + h_f)C_{ij}(2)$$

Τελικώς, οι συνισταμένες δυνάμεων και ροπών, για συμμετρικό ως προς τον κεντρικό άξονα, σύνθετο είναι :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

Μια ακόμα πολύ χρήσιμη απλοποίηση γίνεται αν θεωρήσουμε το υλικό των εξωτερικών στρώσεων ομογενές και με μέση τιμή ακαμψίας :

$$\bar{Q}_{ij}(1) = A_{ij}(1)/h_1,$$

$$\bar{Q}_{ij}(2) = A_{ij}(2)/h_2.$$

Σε αυτή την περίπτωση, οι προηγούμενες ολοκληρώσεις των πινάκων[C] γίνονται :

$$C_{ij}(1) = \frac{-A_{ij}(1)}{2}(h_c + h_1),$$

$$C_{ij}(2) = \frac{A_{ij}(2)}{2}(h_c + h_2).$$

και με αντικατάσταση στις αρχικές εξισώσεις έχουμε :

$$A_{ij} = A_{ij}(1) + A_{ij}(2)$$

$$B_{ij} = \frac{(h_c + h_2)}{2}A_{ij}(2) - \frac{(h_c + h_1)}{2}A_{ij}(1)$$

$$C_{ij} = B_{ij}$$

$$D_{ij} = \left(\frac{h_c + h_1}{2}\right)^2 A_{ij}(2) + \left(\frac{h_c + h_2}{2}\right)^2 A_{ij}(2)$$

Τέλος, για συμμετρικό σύνθετο sandwich και ομογενές υλικό των εξωτερικών στρώσεων :

$$A_{ij} = 2A_{ij}(2) = 2\bar{Q}_{ij}(f)h_f$$

$$B_{ij} = C_{ij} = 0$$

$$D_{ij} = 2\left(\frac{h_c + h_f}{2}\right)^2 \bar{Q}_{ij}(f)h_f$$

Οι εγκάρσιες διατμητικές τάσεις, τ_{yz} και τ_{xz} είναι :

$$\tau_{xz} = G_{xz}\gamma_{xz}$$

$$\tau_{yz} = G_{yz}\gamma_{yz}$$

Για ομογενείς στρώσεις, συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας ή και δύο διορθωτικοί συντελεστές, k_1 και k_2 , για τις διατμητικές παραμορφώσεις, που εφάρμοσαν οι Reissner (1945), Mindlin (1951) και Chow (1971). Η ανάγκη χρήσης αυτών των συντελεστών για ομογενείς πλάκες προέρχεται από το γεγονός πως οι εγκάρσιες διατμητικές τάσεις και οι διατμητικές παραμορφώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το πάχος του σύνθετου, σε αντίθεση με την κλασική παραβολοειδής κατανομή των διατμητικών τάσεων όπου η τιμή της είναι μηδενική στην επιφάνεια της εξωτερικής στρώσης. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις των σύνθετων sandwich, δεν γίνεται χρήση των διορθωτικών συντελεστών καθώς η διατμητική τάση στον πυρήνα παραμένει σταθερή σε όλο το πάχος του και επιπλέον οι εξωτερικές στρώσεις θεωρούνται απαλλαγμένες από διατμητικές τάσεις, σύμφωνα με την υπόθεση (i). Επομένως, η τιμή των -σταθερών- διατμητικών τάσεων στον πυρήνα (σχήμα 3.6), σύμφωνα με τα προηγούμενα, είναι :

$$Q_x = h_c G_{xz} \left(\psi_x + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$Q_y = h_c G_{yz} \left(\psi_y + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

Μπορεί επίσης εύκολα να δειχθεί σύμφωνα με την θεωρία πρώτης τάξης για σύνθετη δοκό, πως η βύθιση στο κέντρο ενός σύνθετου sandwich σε κάμψη 3 σημείων δίνεται από τον τύπο :

$$\delta = \frac{PL^3}{48bD_x} + \frac{PL}{4h_c b G_{xz}}$$

όπου b το πλάτος της σύνθετης δοκού και D_x η καμπτική ακαμψία της.

3.3.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

3.3.1

Οι εξισώσεις ισορροπίας για τις συνισταμένες των δυνάμεων και ροπών, σύμφωνα με τον Whitney (1987), είναι :

$$\frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} - Q_x = 0, \quad \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} - Q_y = 0,$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + q = 0$$

όπου : $q = \sigma_z(h/2) - \sigma_z(-h/2)$ (όπου h είναι πάχος του σύνθετου)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων μηχανικής αυξάνεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η πολυπλοκότητα των φαινομένων που προκύπτουν κατά την φάση σχεδιασμού και λειτουργίας των κατασκευών, η αδυναμία εύρεσης αναλυτικής λύσης καθώς και το μεγάλο κόστος των πειραματικών διαδικασιών έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη προγραμμάτων στατικής και δυναμικής προσομοίωσης με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα (π.χ ANSYS, ABAQUS, COMSOL, Nastran κ.α). Τα προγράμματα αυτά, τα οποία στηρίζονται κυρίως στην χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και βασικών αρχών της σύγχρονης μηχανικής, βελτιώνονται συνεχώς και αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της δουλειάς του μελετητή. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεν προσεγγιστική, μπορεί όμως να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε πολύπλοκες κατασκευές. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που χρησιμοποιείται εκτενώς στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Πολύ μεγάλος αριθμός εργασιών δημοσιεύεται κάθε χρόνο βασιζόμενος στην αριθμητική προσομοίωση σύνθετων υλικών. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια αριθμητικής προσομοίωσης δοκιμίων εποξεικού συντακτικού αφρού/ανθρακονημάτων με εσωτερική κυλινδρική ενίσχυση, σε θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Στην ανάλυση που ακολουθεί έχει γίνει χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Multiphysics 13.0.

Σε πρώτη φάση γίνεται η περιγραφή του εξεταζόμενου υλικού και η διαδικασία μοντελοποίησής του. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων διαγραμμάτων. Επίσης, γίνεται η ποιοτική συσχέτιση των αποτελεσμάτων με άλλες παρόμοιες εργασίες. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο παράρτημα.

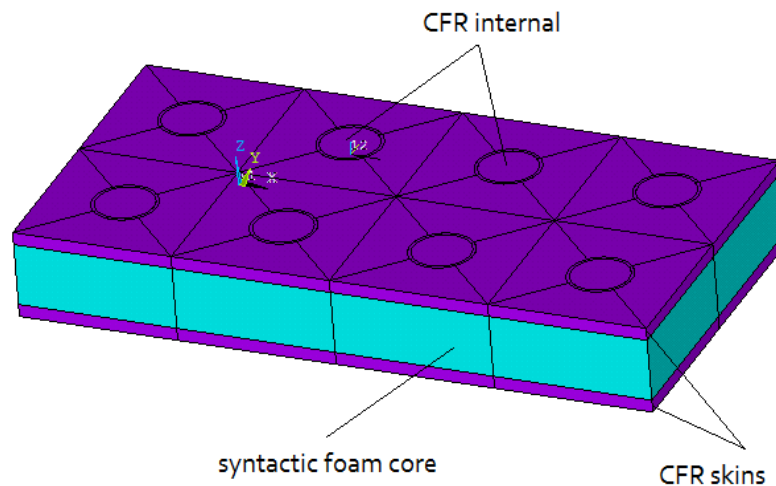
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

4.1

Όπως είδαμε, τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται πλέον σε αναρίθμητες κατασκευές υψηλής τεχνολογίας λόγω των πολύ καλών τους ιδιοτήτων. Εκτεταμένη έρευνα διεξάγεται για τον προσδιορισμό της μηχανικής απόκρισής τους σε διάφορα είδη φορτίσεων στις οποίες αυτά υποβάλλονται κατά την διάρκεια λειτουργίας τους όπως θλίψη, εφελκυσμός, διάτμηση, κόπωση κτλ.

Στη παρούσα μελέτη εξετάζονται ειδικότερα σύνθετα υλικά με πυρήνα από συντακτικό αφρό, ενισχυμένα εξωτερικά με ίνες άνθρακα. Για την περαιτέρω αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου, χρησιμοποιήθηκαν εσωτερικές κυλινδρικές ενισχύσεις τοποθετημένες κάθετα στο επίπεδο του πυρήνα. Οι ενισχύσεις αυτές συνδέουν τις εξωτερικές επιφανειακές στρώσεις και είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό με αυτές (σχήμα 4.1).

Παρόμοιες κατασκευές μελετώνται σε αρκετές εργασίες που αφορούν κυρίως εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής. Τα αποτελέσματά τους αναδεικνύουν την μεγάλη τους αντοχή σε θλίψη και κάμψη καθώς και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε κρούση, κάτι που τις καθιστά ιδανικές σαν εξωτερικό υλικό αμαξωμάτων και αεροπορικών κατασκευών.



Σχήμα 4.1 Διάταξη σύνθετου με εσωτερική κυλινδρική ενίσχυση

Η συμπεριφορά ενός τόσο σύνθετου και ετερογενούς υλικού σε ένα συνδυασμό φορτίσεων, όπως αυτές ασκούνται στην διάρκεια λειτουργίας του, είναι σίγουρα αρκετά πολύπλοκη και ογκώδης και δεν μπορεί να καλυφθεί σε μία μεμονωμένη έρευνα. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η ανάλυση της μηχανικής του απόκρισης σε θλίψη και κάμψη τριών σημείων. Παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη ήταν η

διάμετρος της εσωτερικής κυλινδρικής ενίσχυσης, η αναλογία διαμέτρου και πάχους δοκιμίου, ο αριθμός των στρώσεων των κυλινδρικών ενισχύσεων, η ύπαρξη ή μη συντακτικού αφρού στο εσωτερικό των κυλινδρικών ενισχύσεων κ.α. Όλες αυτές οι παράμετροι φαίνεται πως επηρεάζουν σημαντικά κάποιες ιδιότητες της κατασκευής όπως την παραμόρφωσή της, το μέγεθος των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων κ.α

Οι ελαστικές σταθερές της κάθε στρώσης φαίνονται στους πίνακες 4.α και επιλέχθηκαν με βάση την διεθνή βιβλιογραφία και παρόμοιες μελέτες.

GPa	Πολυμερές ενισχυμένο με Ίνες Άνθρακα	E (GPa)	Συντακτικός αφρός
E11	176	v	3.4
E22	11.6		0.324
E33	11.6		
G12	7.8		
G23	7.8		
G13	3.9		
v12	0.36		
v23	0.02		
v13	0.48		

Πίνακας 4.α Ελαστικές σταθερές στρώσεων ενίσχυσης και συντακτικού αφρού

Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε συντακτικό αφρό εποξεικής ρητίνης πυκνότητας $\rho=0.7626\text{g/m}^3$, με σφαιρίδια γυαλιού κλειστού τύπου K37 και κατ'όγκο περιεκτικότητα 51,5%. Όσον αφορά τις ενισχυτικές στρώσεις, θεωρούμε μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης με συνεχείς ίνες άνθρακα μιας διεύθυνσης και κατ'όγκο περιεκτικότητα 61%. Οι εξωτερικές επιφάνειες αποτελούνται από 8 στρώσεις με ίνες άνθρακα δύο διευθύνσεων 0/90, συνολικού πάχους 1mm και το συνολικό πάχος του δοκιμίου είναι 7mm. Η αρχική διάμετρος των εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων ήταν 5mm και θεωρούμε σε αυτές 4 στρώσεις από ίνες άνθρακα 0/90 συνολικού πάχους 0.5cm.

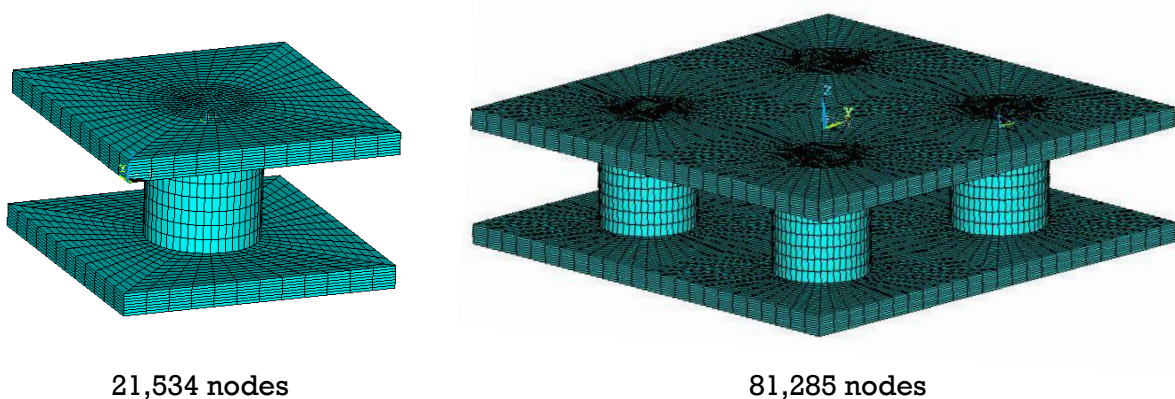
4.1.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.1.1

Για την μοντελοποίηση της σύνθετης αυτής κατασκευής συγκεκριμένα βήματα ακολουθήθηκαν ενώ κάποιες απλουστεύσεις και παραδοχές έπρεπε να εισαχθούν.

Τα βασικά βήματα περιελάμβαναν την επιλογή του πεπερασμένου στοιχείου, την εισαγωγή των ελαστικών σταθερών των εξεταζόμενων υλικών, την δημιουργία της γεωμετρίας, την διακριτοποίηση του μοντέλου, την επιβολή των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών και τέλος την επίλυση που μας έδωσε τα οριστικά αποτελέσματα. Έγινε επίσης χρήση της συμμετρίας ώστε να αποφευχθεί υψηλό υπολογιστικό κόστος και να μειωθεί ο χρόνος επίλυσης. Για αυτό το σκοπό, κατασκευάστηκε το 1/8 της αρχικής διάταξης για την περίπτωση της θλίψης και το 1/2 για την περίπτωση της κάμψης 3 σημείων (σχήμα 4.2).

Για την μοντελοποίηση του συντακτικού αφρού και των επιφανειακών στρώσεων χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο στοιχείο SOLID185 το οποίο είναι 8-κομβικό με τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (U_x, U_y, U_z) και είναι κατάλληλο για μεγάλες παραμορφώσεις και μοντελοποίηση σύνθετων υλικών. Για τις εσωτερικές κυλινδρικές ενισχύσεις χρησιμοποιήθηκαν τα τρισδιάστατα στοιχεία SHELL181 τα οποία διαθέτουν 4 κόμβους με έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, κατάλληλο επίσης για σύνθετα υλικά. Τα δύο αυτά πεπερασμένα στοιχεία έχουν δυνατότητα εισαγωγής πάχους στρώσης, ορθοτροπικών ελαστικών ιδιοτήτων και διεύθυνση ενίσχυσης.

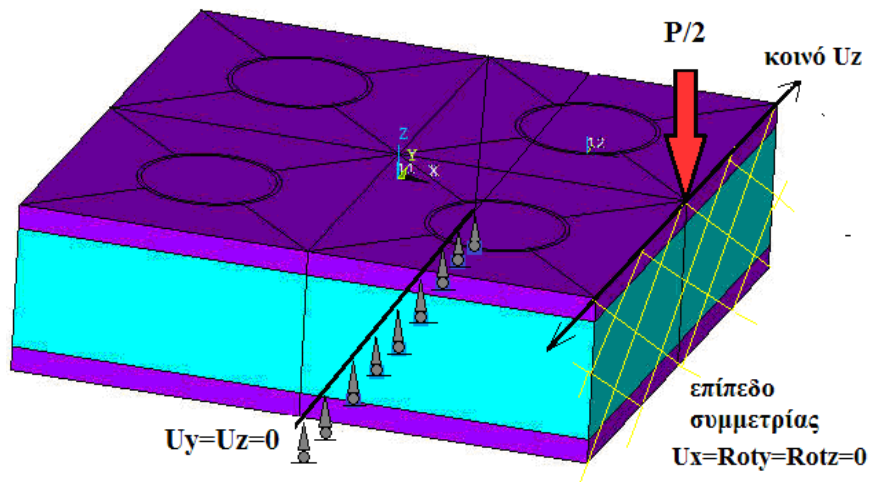


Σχήμα 4.2 Συμμετρία 1/8 και 1/2 για την θλίψη και κάμψη αντίστοιχα.

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των ελαστικών σταθερών (πίνακας 4.α) και της γεωμετρίας της κατασκευής. Το τελικό μοντέλο της συμμετρίας 1/8 περιέχει 21.354 κόμβους, ενώ του 1/2 έχει 81.285 κόμβους.

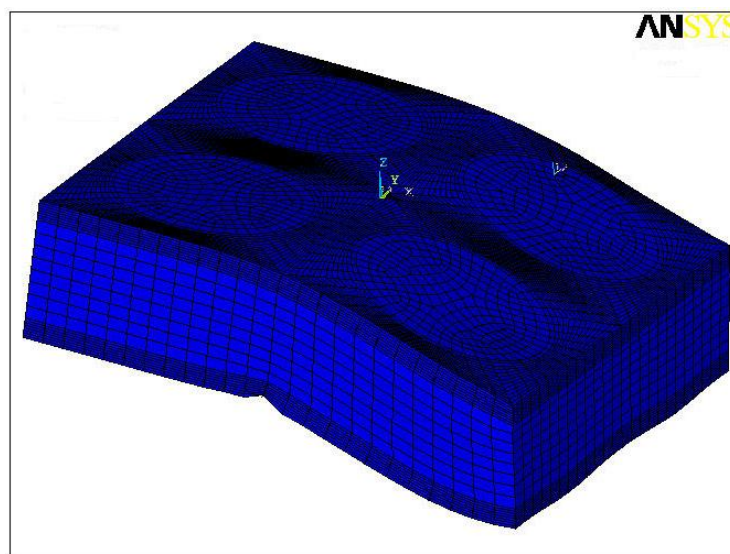
Θεωρούμε μέγεθος θλιπτικής τάσης 100 KPa και στην περίπτωση της κάμψης τριών σημείων δύναμη 100 N ή μετατόπιση 1 mm. Για την καλύτερη προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας μονοαξονικής θλίψης, επιβλήθηκε ομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση U_z της άνω επιφάνειας της κατασκευής και μηδενική μετατόπιση της κάτω επιφάνειας. Όσον αφορά την κάμψη τριών σημείων, θεωρήθηκε συμμετρία συνοριακών συνθηκών στην μία παρειά της κατασκευής

(σχήμα 4.3), ομοιόμορφη κατακόρυφη μετατόπιση της άνω ίνας αυτής της παρειάς και επιβολή σημειακού φορτίου στο μέσο της ή κατακόρυφη μετατόπισή της κατά 1mm καθώς και κύλιση κατά τον x άξονα ($U_z=U_y=0$) στην κάτω ίνα του μέσου της συμμετρικής κατασκευής.



Σχήμα 4.3 Επιβολή φορτίου και συνοριακών συνθηκών για την κάμψη 3 σημείων.

Η μετεπεξεργασία (post processing) των αποτελεσμάτων περιλαμβάνει την οπτική απεικόνιση του παραμορφωμένου σώματος (σχέδιο 4.4), της κατανομής των τάσεων και μετατοπίσεων καθώς και την παρουσίαση των επιθυμητών διαγραμμάτων.



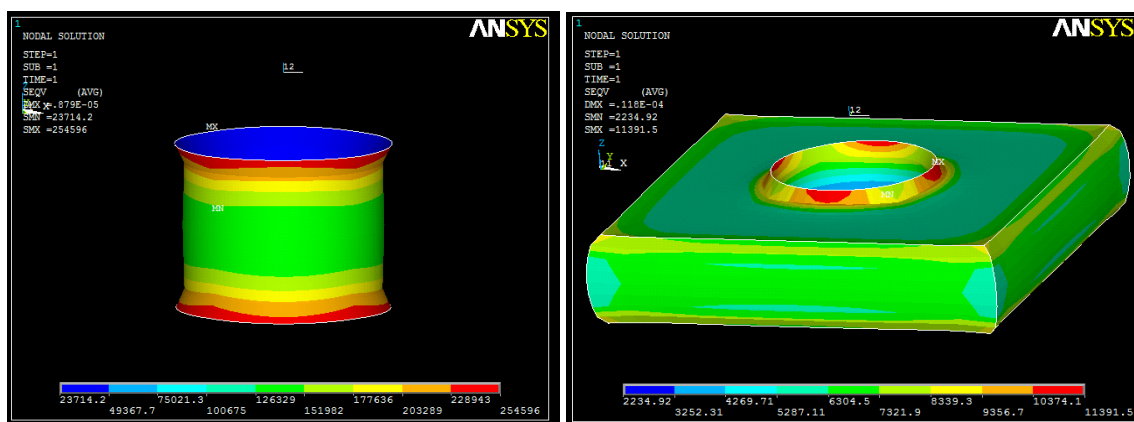
Σχήμα 4.4 Παραμόρφωση σε κάμψη σύνθετου αυξημένης κυλινδρικής ενίσχυσης.

4.2 ΣΥΝΘΕΤΟ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

4.2

Σε πρώτη φάση, η κατασκευή υποβλήθηκε σε προσομοίωση μονοαξονικής θλίψης. Παρόμοιες μελέτες ανέδειξαν την υπεροχή σύνθετων ινών άνθρακα ή γυαλιού –με ή χωρίς εσωτερικές ενισχύσεις- έναντι των αντίστοιχων από αλουμίνιο ή χάλυβα σε στατικά και δυναμικά θλιπτικά φορτία (Camponeshi E.T 1991, Mamalis *et al.* 2002, Hosseinzabeh *et al.* 2005, Wu & Hamanda 2011, Tarlochan & Ramesh 2011, Oshkovr 2012, Fan *et al.* 2013 κ.α). Εκτενής αναφορά γίνεται επίσης στην ικανότητά τους να απορροφούν ενέργεια κατά την κρούση, κάτι που επίσης ενισχύει την πιθανότητα εφαρμογής τους σε οχήματα και κινούμενες κατασκευές.

Σε αυτές τις έρευνες η σύγκριση της αριθμητικής προσομοίωσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι σε πολύ καλή συμφωνία, δεν προκαλούνται μεγάλες διακυμάνσεις του θλιπτικού φορτίου κατά την πειραματική διαδικασία και το φαινόμενο μοιάζει να είναι αρκετά προβλέψιμο. Οι εξωτερικές επιφάνειες ενίσχυσης θλίβονται αλλά δεν παραμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό καθώς το φορτίο μεταφέρεται στις εσωτερικές κολώνες ενίσχυσης και τον πυρήνα από συντακτικό αφρό. Ακόμα και στα σημεία επαφής επιφάνειας και κολώνας δεν παρατηρήθηκε τοπική λέπτυνση ή παραμόρφωση των ενισχυτικών εξωτερικών στρώσεων σε πείραμα μονοαξονικής θλίψης (Mamalis *et al.* 2002), αν και εκεί αναπτύσσονται οι μέγιστες τάσεις όπως έδειξε η αριθμητική προσομοίωση στην παρούσα έρευνα. Αυτό το γεγονός δείχνει πως το απαιτούμενο φορτίο για την παραμόρφωση των επιφανειακών στρώσεων ενίσχυσης είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο θλιπτικό φορτίο αστοχίας των εσωτερικών κατακόρυφων στοιχείων ενίσχυσης, οι οποίες αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα των τάσεων και εμφανίζουν λυγισμό (σχέδιο 4.5) και αποκόλληση στρώσεων (delamination) μετά από κάποια κρίσιμη τιμή.



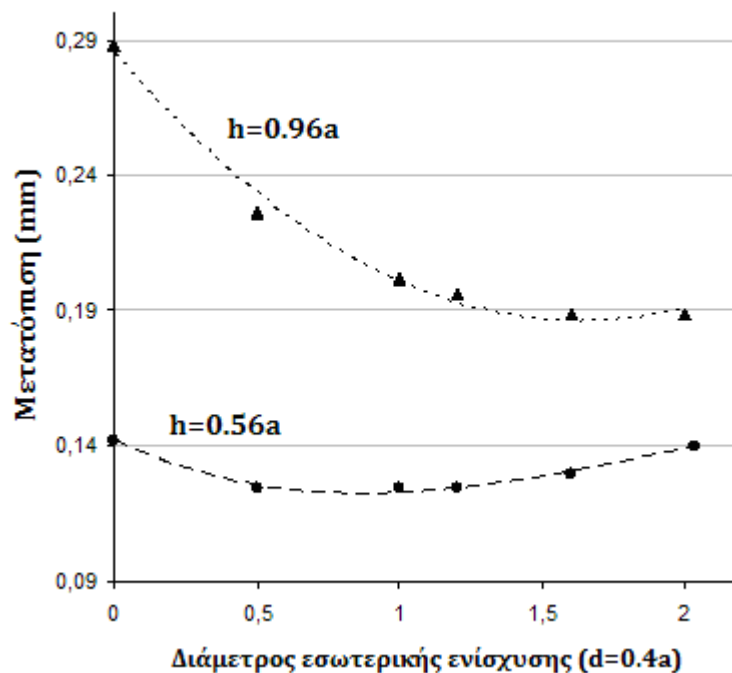
Σχήμα 4.5 Κατανομή θλιπτικού φορτίου στις κολώνες ενίσχυσης και τον πυρήνα.

Όπως επίσης ήταν αναμενόμενο, η διαδικασία αυτή προκαλεί παραμόρφωση του αφρού στον πυρήνα (σχέδιο 4.5) και πύκνωσή του (densification). Τελικά, η δυσκαμψία των κυλινδρικών ενισχύσεων οδήγησε σε μεγάλη αύξηση της ικανότητας αντίστασης της κατασκευής σε θλιπτικά φορτία.

4.2.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

4.2.1

Το αρχικό μας μοντέλο υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη 100 ΚΡα. Όπως αναφέρθηκε, έγινε χρήση της συμμετρίας 1/8 για μείωση του υπολογιστικού κόστους και του χρόνου επίλυσης. Τα παρακάτω αποτελέσματα (διάγραμμα 1) συμπεριλαμβάνουν την συνολική μετατόπιση του ύψους του σύνθετου σε σχέση με την μεταβολή της διαμέτρου (d) των κυλινδρικών εσωτερικών ενισχύσεων από ίνες άνθρακα καθώς και του πάχους της κατασκευής (h). Το μήκος της πλευράς συμβολίζεται με (a).

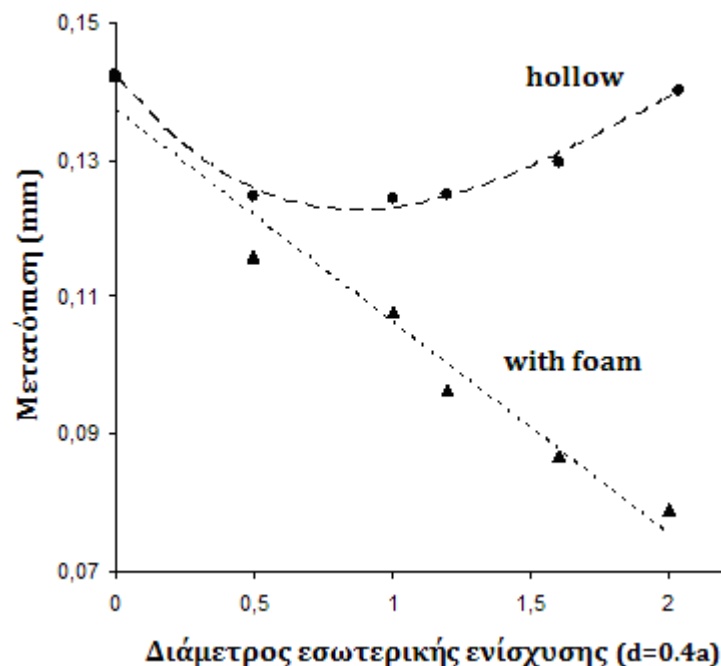


Διάγραμμα 1. Μεταβολή του ύψους του σύνθετου σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την διάμετρο d της κυλινδρικής ενίσχυσης και του πάχους του h .

Είναι εμφανής η συμβολή της εσωτερικής ενίσχυσης στην μείωση της μεταβολής του πάχους της κατασκευής, ειδικά σε δοκίμια με μεγάλη αναλογία ύψους προς μήκος πλευράς, όπου φθάνει και έως και το 35%. Το γεγονός αυτό αποκτά ακόμα

μεγαλύτερη βαρύτητα αν λάβουμε επίσης υπόψη την μείωση του βάρους της κατασκευής, αφού εσωτερικά οι κυλινδρικές κολώνες είναι κούφιες. Η μείωση του όγκου του συντακτικού αφρού σε αυτή την περίπτωση κυμαίνεται από 3.1% έως και 50.3%. Για αυτό το λόγο, όταν η διάμετρος ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή (περίπου 1.2d), η περαιτέρω μείωση του συντακτικού αφρού στον πυρήνα επιδρά αρνητικά στην απόκριση της κατασκευής σε θλιπτικά φορτία, ειδικά σε σύνθετα με μικρή αναλογία ύψους – πλάτους. Τελικά, για μεγάλες τιμές της διαμέτρου (π.χ $d=0.8a$) η μεταβολή του πάχους της κατασκευής λόγω θλιπτικών φορτίων γίνεται περίπου ίση με αυτή ενός σύνθετου χωρίς κολώνες, ενώ για σύνθετα με αναλογία ύψους – πλάτους κοντά στην μονάδα η περαιτέρω αύξηση της διαμέτρου μετά την τιμή 1.2d δεν φαίνεται να οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση της μετατόπισης.

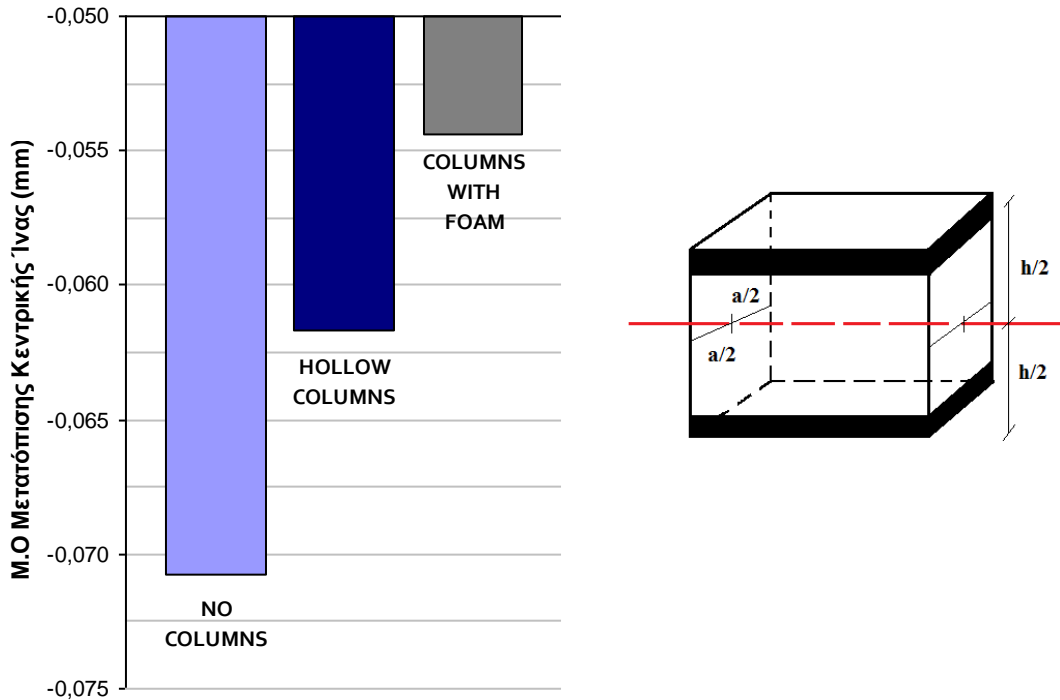
Κάτι τέτοιο δεν ισχύει όμως όταν οι εσωτερικές ενισχύσεις δεν είναι κούφιες αλλά περιέχουν συντακτικό αφρό. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πώς η παρουσία συντακτικού αφρού εντός των κυλινδρικών στρωμάτων οδηγεί σε μια συνεχή γραμμική μείωση της μεταβολής του πάχους της κατασκευής (διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 2. Μεταβολή του ύψους του σύνθετου σε σχέση με την διάμετρο d της κυλινδρικής ενίσχυσης και την παρουσία συντακτικού αφρού εντός των εσωτερικών ενισχύσεων.

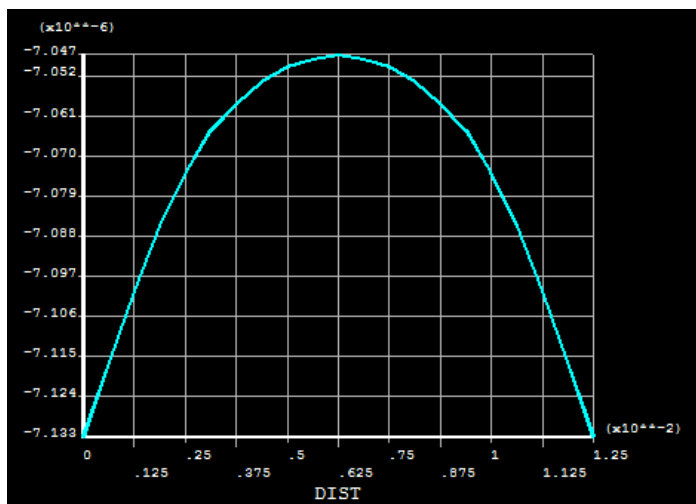
Η κατακόρυφη μετατόπιση της κεντρικής ίνας του πυρήνα για τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στα διαγράμματα 3 έως και 6. Η πρώτη περίπτωση

αφορά το σύνθετο χωρίς εσωτερικές κολώνες, η δεύτερη περίπτωση αφορά την αρχική διάταξη με εσωτερικές κούφιες κολώνες και η τρίτη περίπτωση αφορά το σύνθετο με συντακτικό αφρό εντός των κυλινδρικών ενισχύσεων.



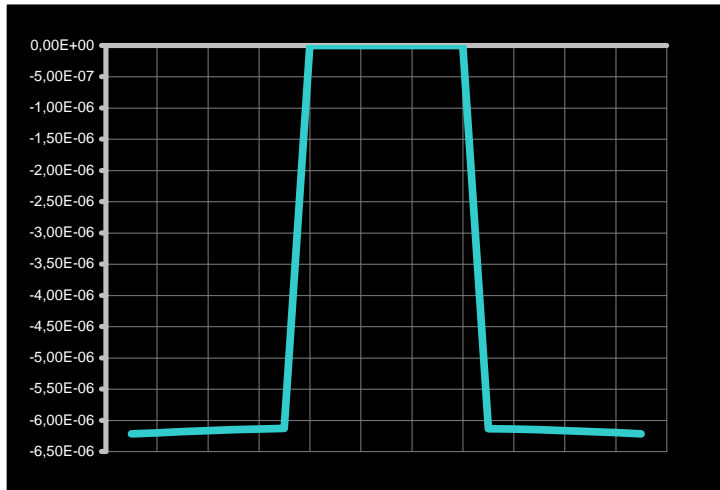
Διάγραμμα 3. Μέσος όρος κατακόρυφης μετατόπισης των σημείων της κεντρικής ίνας για σύνθετο χωρίς κολώνες, για σύνθετο με κούφιες κολώνες ενίσχυσης και για σύνθετο με κολώνες με συντακτικό αφρό.

Είναι επίσης εμφανής η διαφορετική μορφή μετατόπισης των σημείων της κεντρικής ίνας, ανάλογα με την διάταξη της κατασκευής. Η απουσία εσωτερικής ενίσχυσης δημιουργεί μια ομαλή μεταβολή της παραμόρφωσης κατά μήκος του

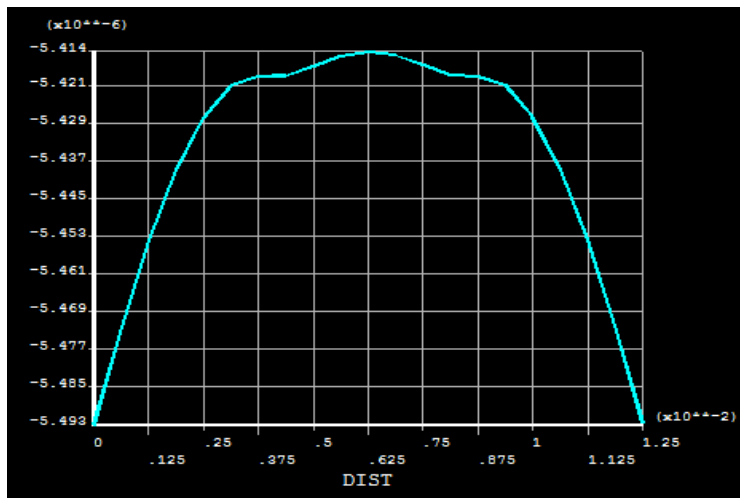


Διάγραμμα 4. Κατακόρυφη μετατόπιση της κεντρικής ίνας για σύνθετο χωρίς κολώνες.

σύνθετου, ενώ αντίθετα η ύπαρξη κοίλης ενίσχυσης δημιουργεί ασυνέχεια στις μετατοπίσεις, όπου φυσικά μηδενίζεται τοπικά εντός των ενισχύσεων. Η σημαντική μείωση των μετατοπίσεων στην τρίτη περίπτωση οφείλεται στην ανάληψη θλιπτικών τάσεων τόσο από τον συντακτικό αφρό, όσο και από τις κολώνες.



Διάγραμμα 5.
Κατακόρυφη μετατόπιση της κεντρικής ίνας για σύνθετο με κούφιες κολώνες.

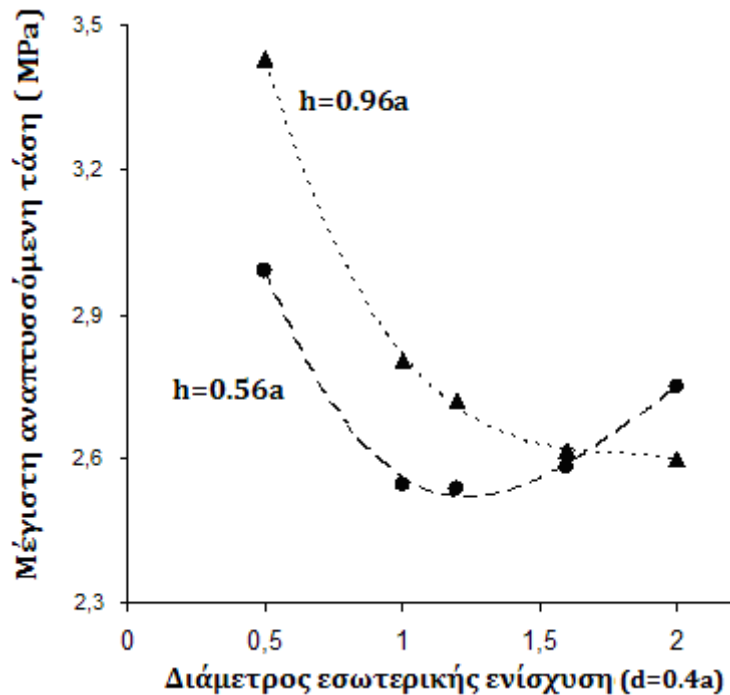


Διάγραμμα 6.
Κατακόρυφη μετατόπιση της κεντρικής ίνας για σύνθετο με συντακτικό αφρό στο εσωτερικό των κυλινδρικών ενισχύσεων.

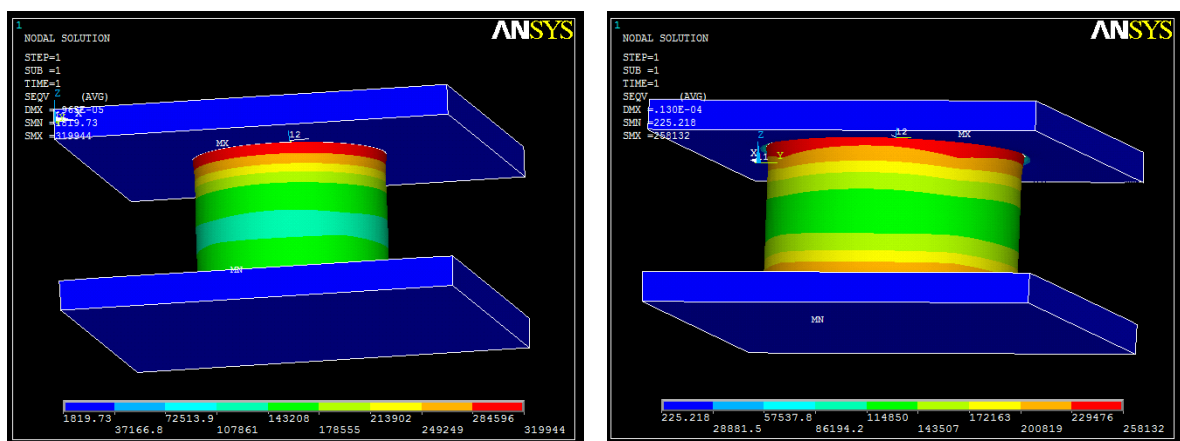
Η απότομη αλλαγή των κλίσεων που παρατηρείται επίσης σε δύο σημεία στο διάγραμμα 6 οφείλεται στην παρουσία των κυλινδρικών στρώσεων ενίσχυσης, αφού στα σημεία αυτά η μετατόπιση τείνει να αποκτήσει σταθερή τιμή.

Οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις κατά von Mises αναπτύσσονται στην επαφή εξωτερικών στρώσεων και εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων. Ως εκ τούτου, έχουν μεγαλύτερη τιμή όσο η διάμετρος των κυλινδρικών ενισχύσεων είναι μικρή αφού η θλιπτική τάση κατανέμεται σε μικρότερη επιφάνεια (διάγραμμα 7). Στα παρακάτω διαγράμματα όμως παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές της διαμέτρου, η μεγάλη απουσία συντακτικού αφρού – που φθάνει όπως αναφέρθηκε έως 50% - οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Αντίθετα, στην

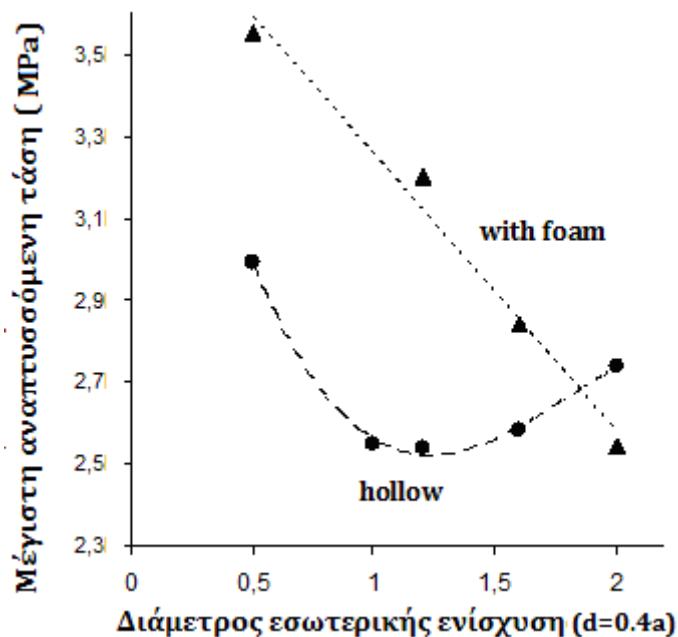
περίπτωση των εσωτερικών ενισχύσεων με αφρό η συνεχής μείωση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης μοιάζει να είναι γραμμική (διάγραμμα 8).



Διάγραμμα 7. Μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις von Mises σε σύνθετο με κοίλες εσωτερικές κολώνες σε σχέση με την διάμετρό τους και το πάχος της κατασκευής.



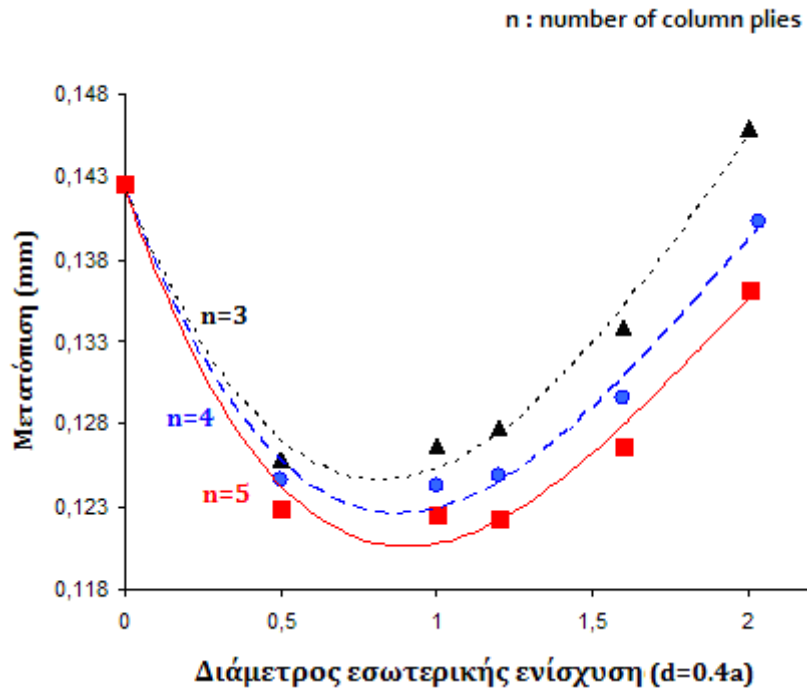
Σχήμα 4.6. Αναπτυσσόμενες τάσεις von Mises σε σύνθετο με κολώνες και αφρό διαμέτρου $d=0.48a$ και κοίλες κολώνες $d=0.64a$.



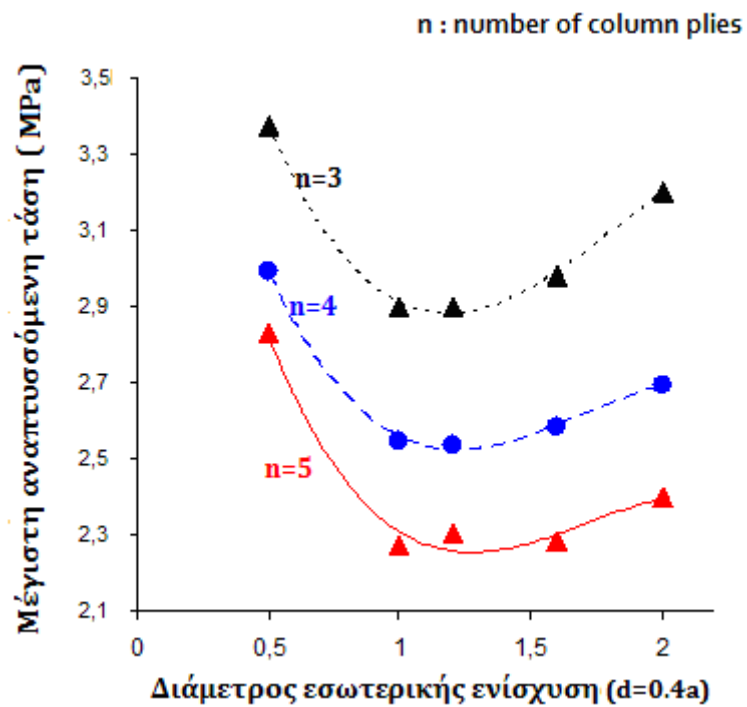
Διάγραμμα 8. Μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις von Misses σε σύνθετα με κοίλες εσωτερικές κολώνες και σε κολώνες με συντακτικό αφρό, σε σχέση με την διάμετρό τους και το πάχος της κατασκευής.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος της μηχανικής απόκρισης των σύνθετων αυτών κατασκευών είναι ο αριθμός των στρώσεων από ίνες άνθρακα που τοποθετούνται στις εσωτερικές κυλινδρικές ενισχύσεις. Στην αρχική διάταξη θεωρούμε 4 τέτοιες διπλές στρώσεις με κατεύθυνση ινών 0/90. Εξετάζουμε την μεταβολή των μετατοπίσεων και των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων στην περίπτωση 3 και 5 στρώσεων (διάγραμμα 9 και 10).

Η μορφή του διαγράμματος μετατοπίσεων είναι ανάλογη με αυτή της αρχικής διάταξης (διάγραμμα 1), όπως αναμενόταν. Η συμβολή του αριθμού των στρώσεων στην μείωση των μετατοπίσεων είναι μεγαλύτερη κυρίως σε σύνθετα με αυξημένη εσωτερική διάμετρο ενίσχυσης. Η μείωση των μετατοπίσεων φθάνει έως και το 6.8%, ένα μέγεθος αρκετά σημαντικό για μία τόσο μικρή αύξηση των στρώσεων ενίσχυσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της χρήσης 5 διπλών στρώσεων ενίσχυσης σε σύνθετο με αναλογία εσωτερικής διαμέτρου και πάχους 2/1 (όπου η παρουσία συντακτικού αφρού στον πυρήνα μειώνεται κατά 50%), η μείωση της μεταβολής του συνολικού πάχους του για θλιπτικό φορτίο 100KPa φθάνει το 4.5% σε σύγκριση με το ίδιο σύνθετο χωρίς κολώνες αλλά με σχεδόν διπλάσια ποσότητα συντακτικού αφρού.



Διάγραμμα 9. Μετατόπιση σύνθετου με εσωτερικές κοίλες ενισχύσεις σε σχέση με τον αριθμό των κυλινδρικών στρώσεων και την διάμετρο



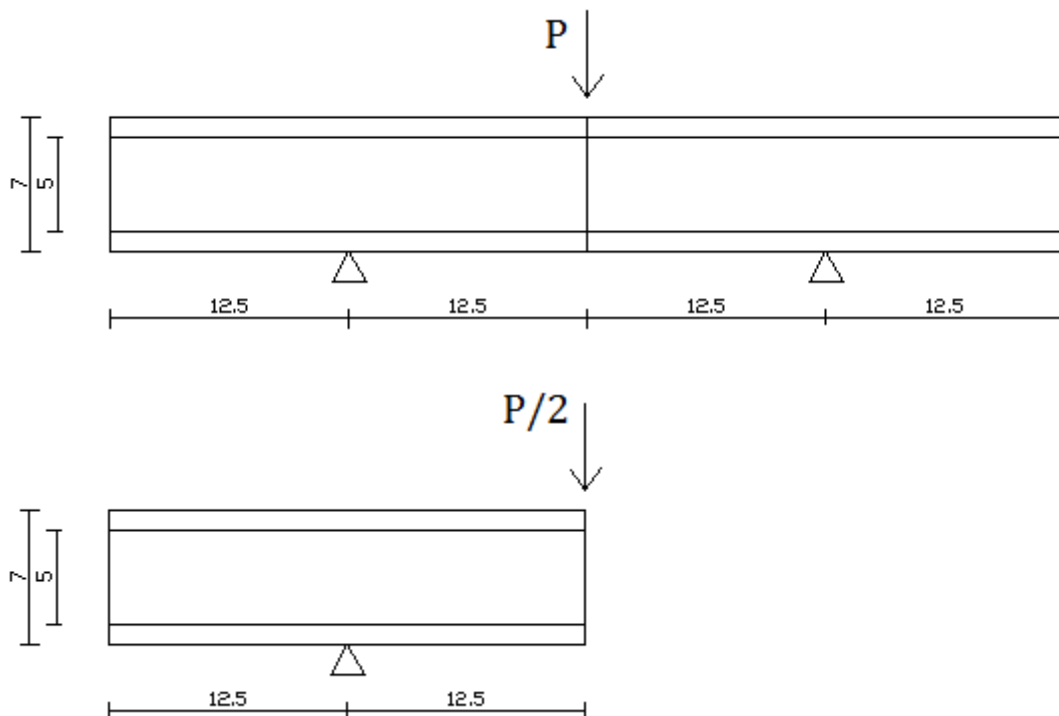
Διάγραμμα 10. Μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις von Mises σε σχέση με τον αριθμό των κυλινδρικών στρώσεων ενίσχυσης και την διάμετρό τους.

Οι τιμές των μέγιστων αναπτυσσόμενων τάσεων κατά von Mises με την μεταβολή των στρώσεων ενίσχυσης ακολουθούν πάντα ίδια μορφή, αλλάζοντας κλίση για μεγάλες τιμές της διαμέτρου κυλινδρικών ενισχύσεων, αφού όπως είδαμε κάτι τέτοιο συνεπάγεται και μεγάλη μείωση του συντακτικού αφρού του πυρήνα. Με κάθε αύξηση του αριθμού στρώσεων ενίσχυσης, η αντίστοιχη μείωση των τάσεων κυμαίνεται από 8-13% για όλες τις αναλογίες διαμέτρου – μήκους πλευράς.

4.3 ΣΥΝΘΕΤΟ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

4.3

Η σύνθετη κατασκευή υποβλήθηκε σε προσομοίωση κάμψης τριών σημείων. Ανάλογη μελέτη σύνθετων με πυρήνα από συντακτικό αφρό και ενίσχυση με ίνες γυαλιού ή άνθρακα σε κάμψη 3 σημείων αναφέρεται αρκετά συχνά στην βιβλιογραφία. Οι Corigliano, Rizzi και Para (2000) μελέτησαν την απόκριση σύνθετων συντακτικού αφρού με ίνες γυαλιού και εσωτερική ενίσχυση σε μορφή κάθετων στρώσεων και ανέδειξαν την πολύ καλή τους αντοχή σε σχέση με το μικρό τους βάρος. Παρατηρείται επίσης σε όλα τα πειραματικά δεδομένα αυξημένη ακαμψία αλλά και κίνδυνος εμφάνισης ρωγμών στον πυρήνα και αποκόλληση στρώσεων (Steeves & Fleck 2004, W.J Na 2008, Ullah *et al.* 2011, Fan *et al.* 2013). Οι Steeves και Fleck (2004) εξετάζουν επίσης σύνθετα συντακτικού αφρού με ίνες γυαλιού χωρίς εσωτερικές ενισχύσεις σε διάφορα πάχη πυρήνα και αριθμού εξωτερικών στρώσεων σε πειράματα κάμψης 3 σημείων. Ένας άλλος μηχανισμός αστοχίας τους είναι η τοπική παραμόρφωση των εξωτερικών στρώσεων και του πυρήνα στα σημεία επιβολής της κατακόρυφης δύναμης.



Σχήμα 4.7 Κάμψη 3 σημείων και χρήση συμμετρίας για μείωση του υπολογιστικού κόστους.

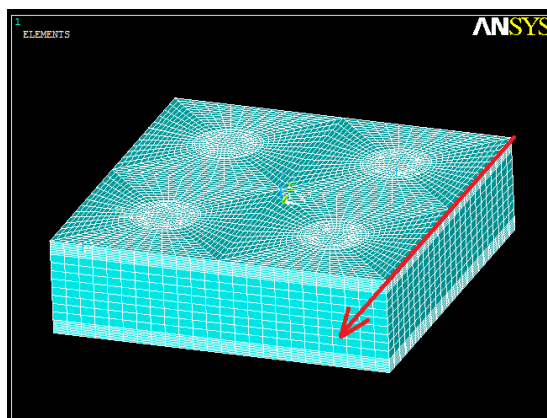
Τα αναλυτικά μοντέλα και η αριθμητική προσομοίωση φαίνεται να δίνουν ασφαλή αποτελέσματα, ειδικά σε σύνθετα με μικρό πάχος επιφανειακών στρώσεων ενίσχυσης (Triantafyllou & Gibson 1987, Lingaiah & Suryanarayana 1991, F. Mujika 2006, R.Umer *et al.*2011).

Οι D. Zangani, M. Robinson και A.G Gibson (2007) έκαναν μελέτη σε σύνθετα συντακτικού αφρού με εσωτερική ενίσχυση z-core από ίνες γυαλιού σε κάμψη 3 σημείων. Το κυριότερο συμπέρασμα που προκύπτει από ανάλογες εργασίες είναι η μεγάλη συμβολή των υλικών ενίσχυσης στην ακαμψία του σύνθετου και λιγότερο του υλικού της στρώσης του πυρήνα, όπως δείχνει η αριθμητική προσομοίωση μέσω ANSYS και τα πειραματικά δεδομένα (Herranen *et al.*2012).

4.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

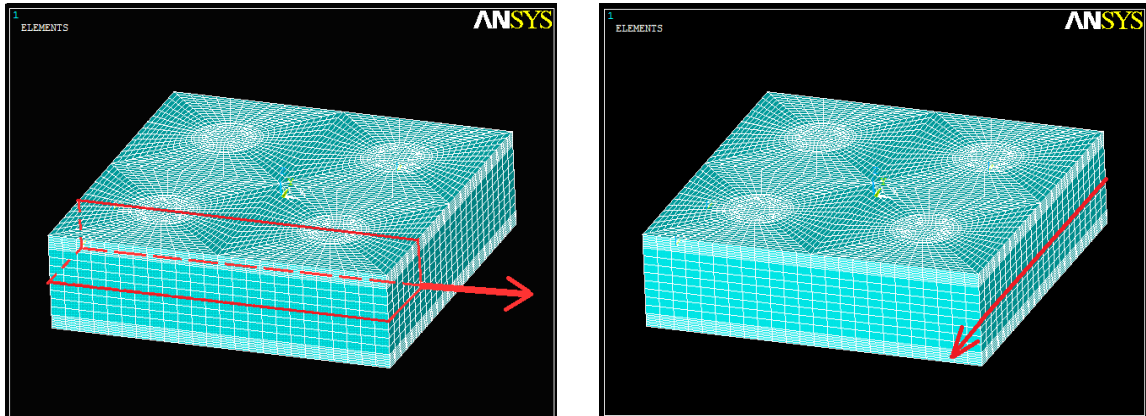
4.3.1

Έγινε χρήση της συμμετρίας 1/2 και εξετάστηκαν δύο ειδών φορτίσεις στο μέσο του σύνθετου (σχέδιο 4.7). Στην πρώτη περίπτωση ασκήθηκε δύναμη 10N και μετρήθηκαν η κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων της άνω πλευράς στην ευθεία εφαρμογής του φορτίου (σχέδιο 4.8) καθώς και οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις. Στην δεύτερη περίπτωση επιβλήθηκε κατακόρυφη μετατόπιση 1mm στην ίδια παρειά και μετρήθηκαν οι μετατοπίσεις στο μέσο ύψος της, καθώς επίσης και στο μέσο ύψος του σύνθετου κατά τον άξονα x, στη διεύθυνση των εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων (σχέδιο 4.9).



Σχήμα 4.8 Διεύθυνση μέτρησης κατακόρυφων μετατοπίσεων στην περίπτωση εφαρμογής δύναμης στο κέντρο της.

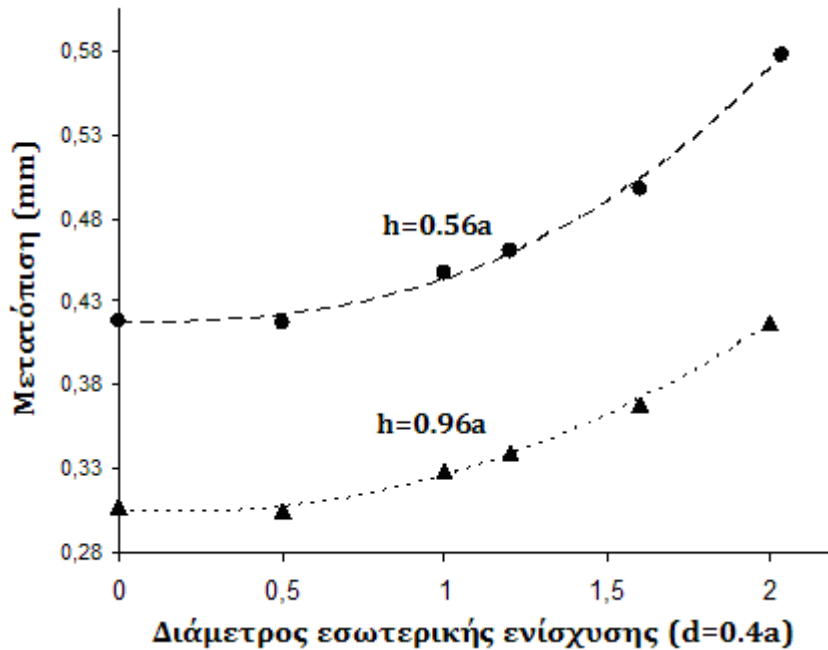
Γίνεται επίσης η σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων για σύνθετο με διπλάσιο πάχος συντακτικού αφρού στο πυρήνα καθώς και για σύνθετο με συντακτικό αφρό στο εσωτερικό των κυλινδρικών ενισχύσεων.



Σχήμα 4.9 Μέτρηση κατακόρυφων μετατοπίσεων σε δύο διευθύνσεις για δεδομένη μετατόπιση της άνω ίνας του άξονα συμμετρίας.

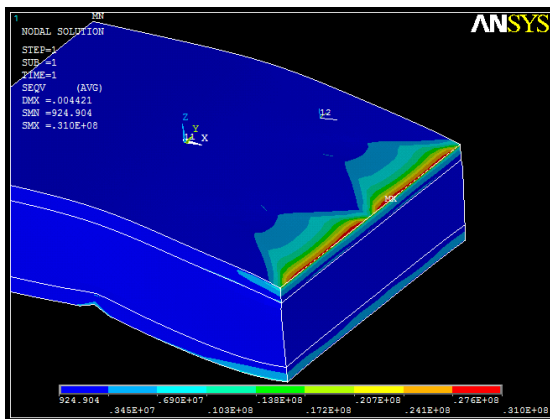
Η απουσία μεγάλου ποσοστού συντακτικού αφρού λόγω της παρουσίας των κοίλων εσωτερικών ενισχύσεων παίζει σημαντικό ρόλο στην απόκριση της κατασκευής σε κάμψη, όπως άλλωστε είδαμε και στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης. Φαίνεται μάλιστα πως η απουσία συντακτικού αφρού ακόμα και σε μικρό ποσοστό δρα αρνητικά στην συνολική ακαμψία της κατασκευής. Στο πρώτο διάγραμμα, η κατακόρυφη μετατόπιση της άνω ίνας λόγω καμπτικού φορτίου μειώνεται ελάχιστα για μικρές τιμές της διαμέτρου κυλινδρικής ενίσχυσης, ενώ για τιμές πάνω $d=0.4a$, αυξάνει σε σχέση με το σύνθετο χωρίς κολώνες (διάγραμμα 10). Η μείωση δηλαδή του συντακτικού αφρού κατά 13% και πάνω οδηγεί σε μειωμένες καμπτικές αντοχές. Το ίδιο ισχύει και για σύνθετα μεγαλύτερης αναλογίας ύψους - πλάτους, που φυσικά έχουν αυξημένη ακαμψία - άρα και μικρότερες μετατοπίσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα σύνθετα με μικρότερο πάχος - αλλά το διάγραμμά τους ακολουθεί την ίδια μορφή για μεγάλες τιμές της διαμέτρου των εσωτερικών ενισχύσεων.

Η μικρή μεταβολή του αριθμού των εσωτερικών κυλινδρικών στρώσεων δεν φαίνεται να συμβάλλει σημαντικά στην μείωση ή αύξηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων, άρα και της βελτιωμένης μηχανικής απόκρισης της κατασκευής σε καμπτικά φορτία, που παρουσιάζει έτσι μεγάλη συσχέτιση με την παρουσία του συντακτικού αφρού στον πυρήνα (διάγραμμα 11).

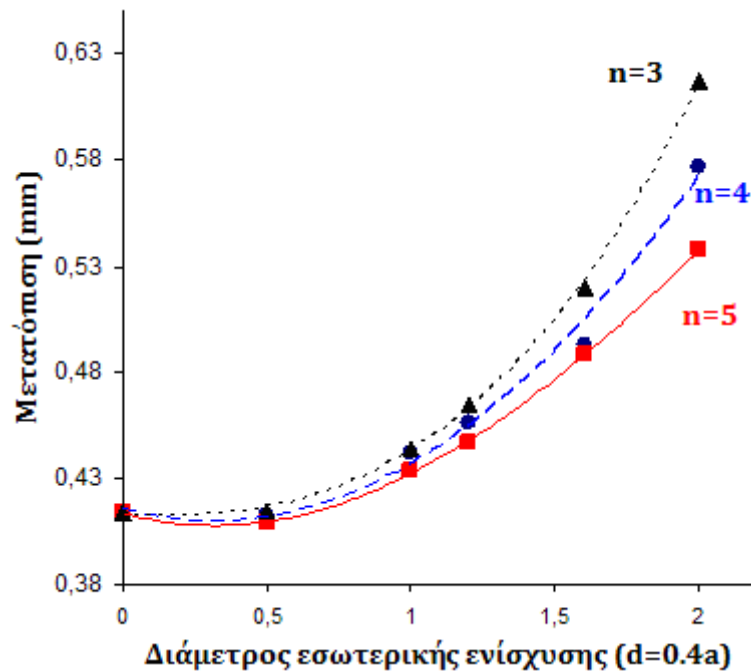


Διάγραμμα 10. Κατακόρυφη μετατόπιση άνω ίνας σε σχέση με την διάμετρο των εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων και το ύψος του σύνθετου σε κάμψη τριών σημείων.

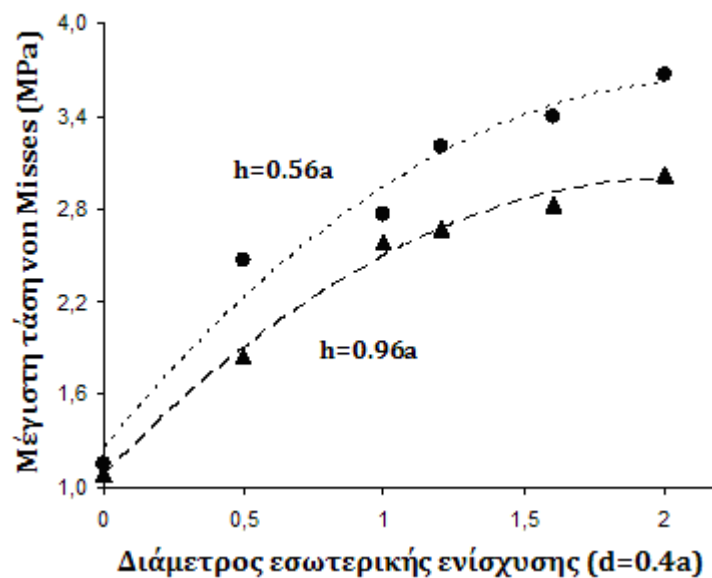
Η συμβολή όμως των στρώσεων ενίσχυσης είναι καθοριστική για μεγάλες τιμές της διαμέτρου. Η μείωση των μετατοπίσεων για σύνθετα με αναλογία διαμέτρου – πλάτους ίση με 0.80. και από 3 σε 5 στρώσεις κυλινδρικής εσωτερικής ενίσχυσης, φθάνει έως και το 12.8%.



Σχήμα 4.10. Κατανομή τάσεων κατά von Mises σύνθετου σε κάμψη 3 σημείων.



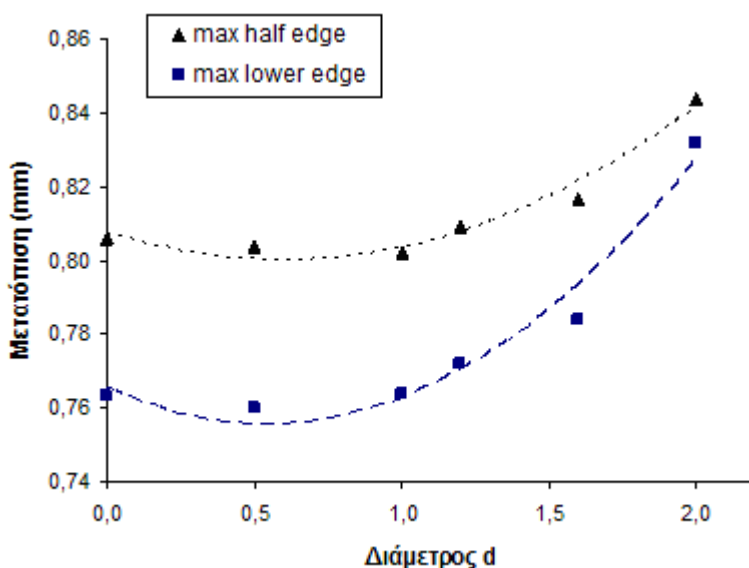
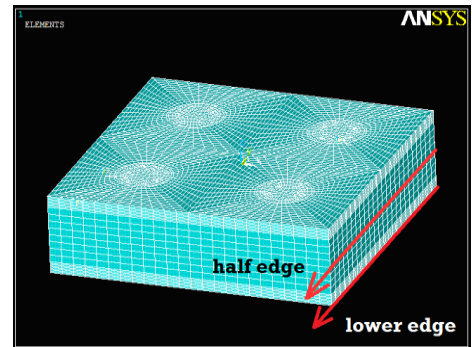
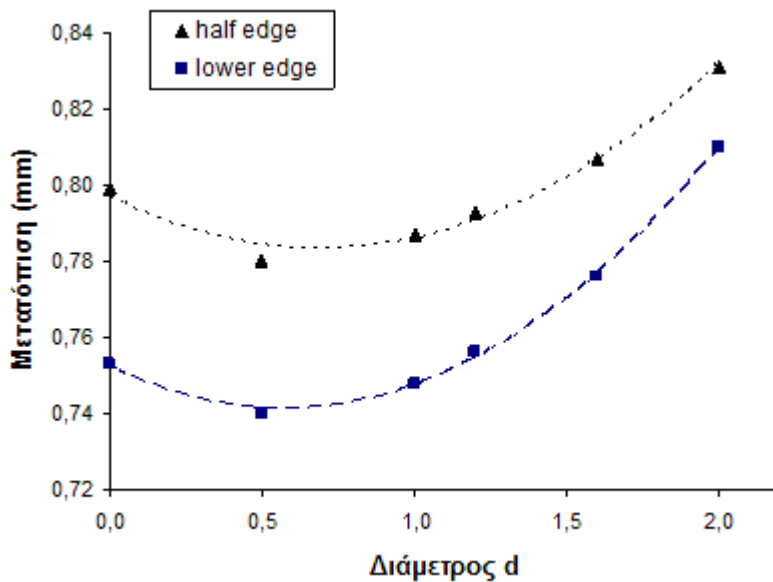
Διάγραμμα 11. Κατακόρυφη μετατόπιση άνω ίνας σε σχέση με την διάμετρο των εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων και τον αριθμό των στρώσεών τους σε κάμψη τριών σημείων.



Διάγραμμα 12. Μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις von Mises σε σύνθετα υπό κάμψη, σε σχέση με την διάμετρο της εσωτερικής ενίσχυσης και το πάχος της κατασκευής.

Μέγιστες τάσεις κατά von Mises αναπτύσσονται στο σημείο επιβολής της δύναμης και στην παρακείμενη περιοχή, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. και είναι σαφώς μικρότερες στην περίπτωση σύνθετου με διπλάσιο πάχος στρώσης συντακτικού αφρού (διάγραμμα 12).

Όταν ασκηθεί κάθετη μετατόπιση 1 mm στην άνω ίνα της πλευράς επιβολής συνθηκών συμμετρίας (σχέδιο 4.8), η συμπεριφορά του σύνθετου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά. Σε αυτή την περίπτωση, μετρήθηκαν οι μέσοι όροι των μετατοπίσεων καθώς και οι μέγιστες τιμές τους κατά την διεύθυνση στο μέσο ύψος της ίδιας πλευράς (σχέδιο 4.9β), όπως επίσης και στην διεύθυνση της κάτω ίνας. Το διάγραμμα τους ακολουθεί πάλι την ίδια μορφή και εμφανίζει αυξημένες τιμές για μεγάλες τιμές της διαμέτρου εσωτερικής ενίσχυσης (διάγραμμα 13).

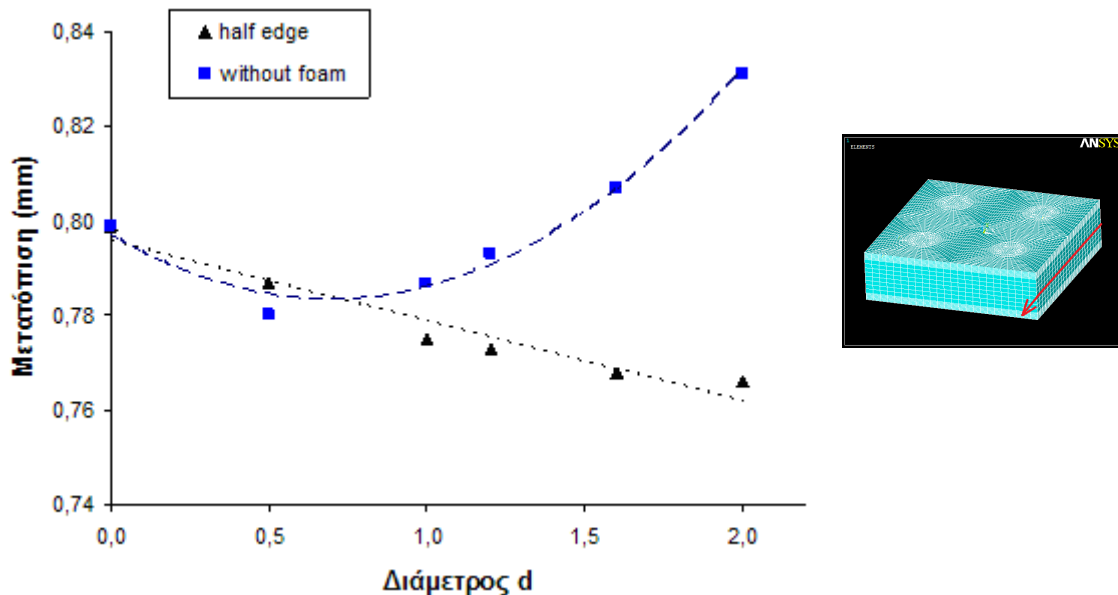


Διάγραμμα 13.
Μέσος όρος και μέγιστες μετατοπίσεις σε δύο διευθύνσεις, σε σχέση με την διάμετρο των κυλινδρικών ενισχύσεων.

4.3.2 ΑΦΡΟΣ ΕΝΤΟΣ ΤΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

4.3.2

Η παρουσία συντακτικού αφρού εντός των εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων συνεισφέρει σημαντικά στην ακαμψία της κατασκευής. Όπως είδαμε, στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης το διάγραμμα των μετατοπίσεων είχε μια συνεχή γραμμική μείωση με την αύξηση της διαμέτρου κάθε κολώνας. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στην περίπτωση της κάμψης 3 σημείων, όταν δεν θεωρούμε πλέον κούφια κολώνες. Τώρα, το διάγραμμα των μετατοπίσεων συνεχίζει να έχει φθίνουσα μορφή – και μάλιστα γραμμική – ακόμα και για μεγάλες τιμές της διαμέτρου (διάγραμμα 14,15). Οι μετρούμενες μετατοπίσεις είναι στην διεύθυνση του μέσου της πλευράς συμμετρίας καθώς και στο μέσο ύψος του κέντρου των κυλινδρικών ενισχύσεων κατά τον x-άξονα (σχέδιο 4.9).

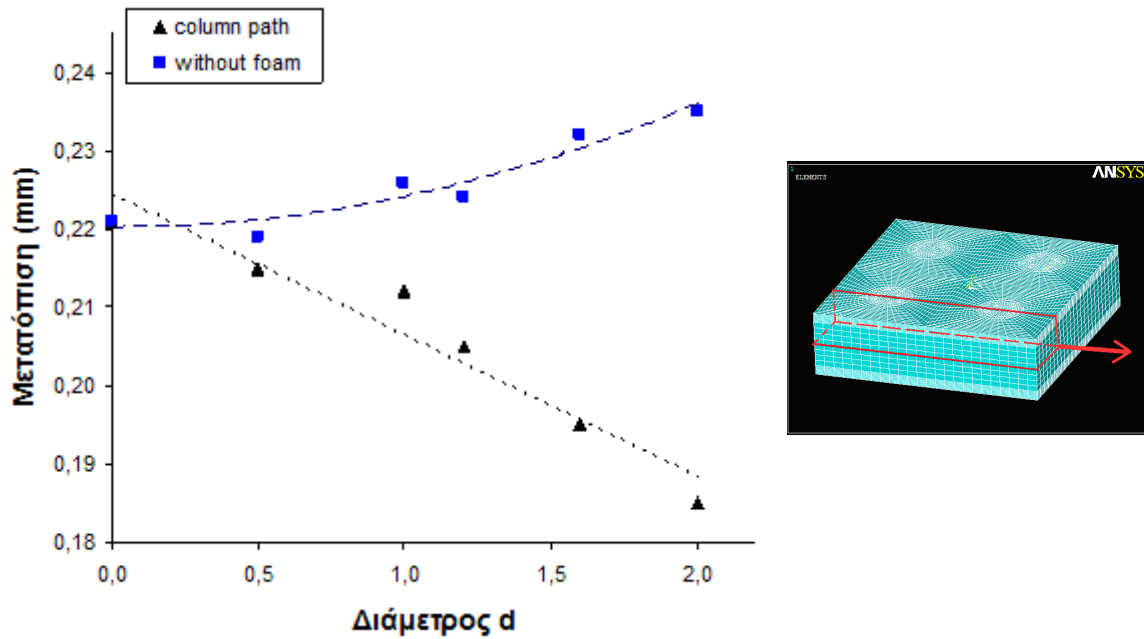


Διάγραμμα 14. Κατακόρυφη μετατόπιση κατά την διεύθυνση στο μέσο του ύψους της πλευράς συμμετρίας για κοίλες κολώνες και για κολώνες με συντακτικό αφρό, σε σχέση με την διάμετρό τους.

4.3.3 ΠΥΚΝΩΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

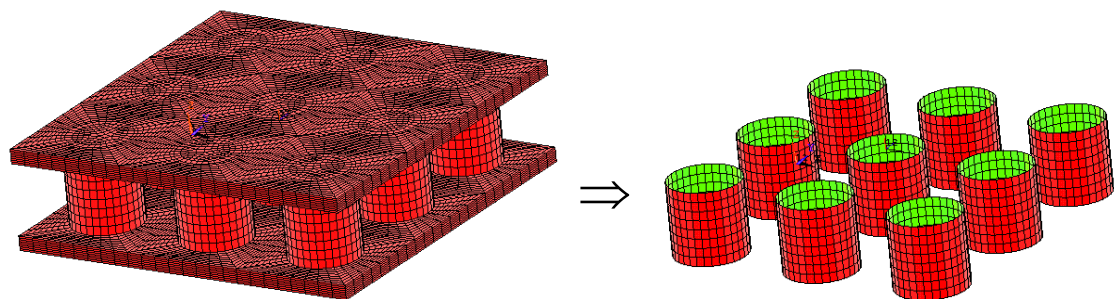
4.3.3

Συμπληρωματική μελέτη εφαρμόσθηκε για την ανάδειξη βελτιωμένων μηχανικών αποκρίσεων ανάλογων σύνθετων κατασκευών αλλά και την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους όταν υποβάλλονται σε καμπτικά φορτία. Σε μια τέτοια προσπάθεια, πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αριθμητική προσομοίωση



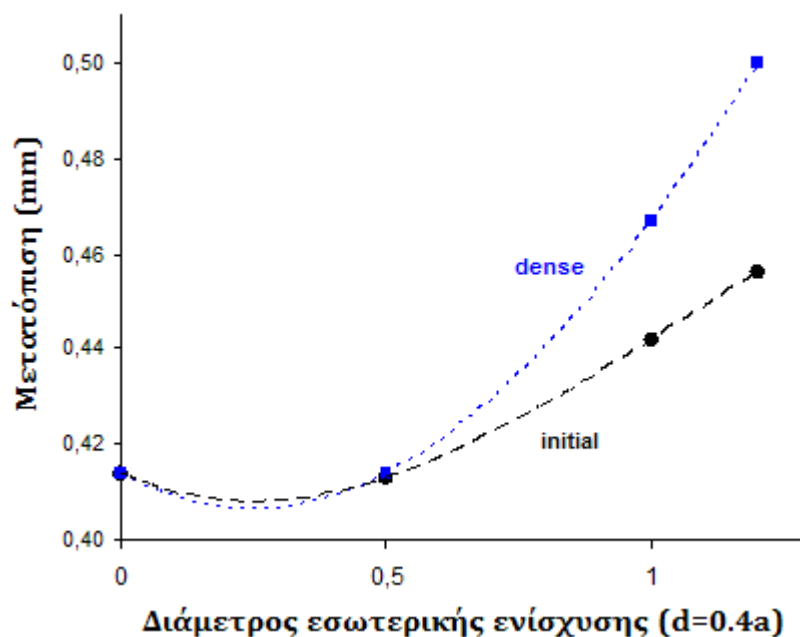
Διάγραμμα 15. Κατακόρυφη μετατόπιση στο μέσο ύψος, κατά την x-διεύθυνση του κέντρου των κυλινδρικών ενισχύσεων, σε σχέση με την διάμετρό τους.

παρουσίασαν μοντέλα με μεγαλύτερο αριθμό εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων. Στη παρούσα φάση, έγινε η μελέτη σύνθετου με 18 εσωτερικές κολώνες (από 8 που ήταν αρχικά) σε κάμψη 3 σημείων κι έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι μέγιστες μετατοπίσεις για διάμετρο ίση με την αρχική ($d=0.4a$), για $d=0.48a$ καθώς και για $d=0.2a$ (σχήμα 4.11).



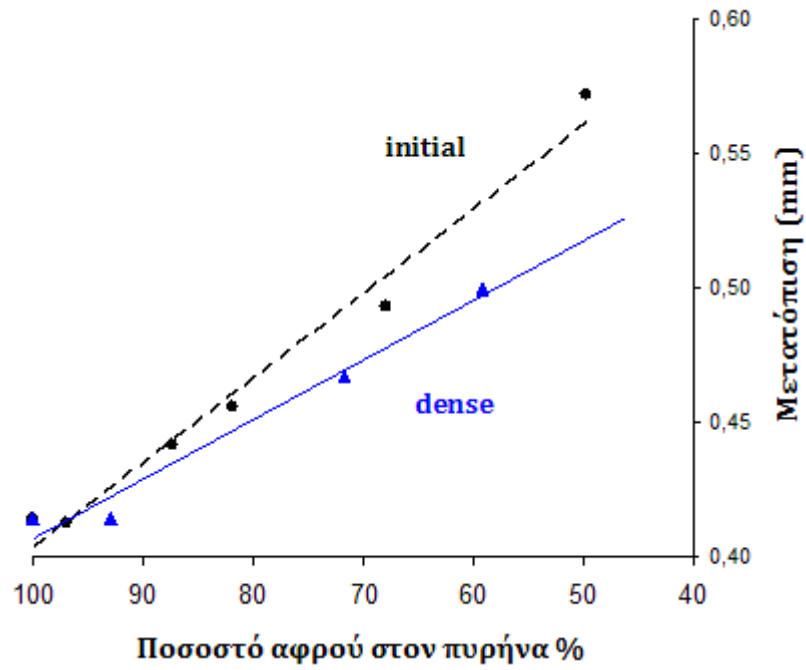
Σχήμα 4.11 Πύκνωση εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων

Μια τέτοια τροποποίηση της αρχικής διάταξης επηρεάζει την ακαμψία του σύνθετου με δύο κυρίως τρόπους. Αύξηση του αριθμού των εσωτερικών ενισχύσεων συνεπάγεται και μεγαλύτερη ικανότητα ανάληψης φορτίων. Κατά δεύτερον όμως, έχουμε περαιτέρω μείωση του βάρους της κατασκευής αφού μειώνεται ο όγκος του συντακτικού αφρού στον πυρήνα, λόγω των κοίλων ενισχύσεων, κάτι που επηρεάζει σημαντικά όπως είδαμε τις αναμενόμενες μετατοπίσεις λόγω κάμψης.



Διάγραμμα 16. Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση αρχικής διάταξης και πυκνής διάταξης εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων

Για διάμετρο κολώνας ίση με την αρχική, $d=0.4a$, η μέγιστη μετατόπιση στο κέντρο του σύνθετου είναι 0.47mm για φορτίο 10N . Το αντίστοιχο μέγεθος για 8 κολώνες ήταν 0.44mm και 0.41mm όταν δεν υπάρχουν καθόλου κολώνες, όμως στην περίπτωση της πυκνότερης διάταξης έχουμε περίπου 18% και 30% αντίστοιχα λιγότερο συντακτικό αφρό. Η βελτιωμένη ακαμψία της διάταξης αυτής είναι εμφανής και στην περίπτωση της μικρής διαμέτρου, $d=0.2a$. Πλέον, η μέγιστη μετατόπιση ταυτίζεται με αυτή της κατασκευής χωρίς εσωτερικές ενισχύσεις αλλά με 10% λιγότερο συντακτικό αφρό στον πυρήνα. Στο διάγραμμα 17 φαίνεται η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση σε σχέση με το ποσοστό συντακτικού αφρού στον πυρήνα και την διάταξη των κυλινδρικών ενισχύσεων.



Διάγραμμα 17. Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση αρχικής διάταξης και πυκνής διάταξης εσωτερικών κυλινδρικών ενισχύσεων σε σχέση με το ποσοστό συντακτικού αφρού στο πυρήνα

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα έρευνα έγινε αριθμητική προσομοίωση και μελέτη σύνθετου ανθρακονημάτων/εποξεικού αφρού με εσωτερική κυλινδρική ενίσχυση υπό στατικά θλιπτικά και καμπτικά φορτία. Παρατηρήθηκε η συμπεριφορά της κατασκευής για διαφορετικές τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εσωτερικών ενισχύσεων, του πάχους του πυρήνα, των αριθμών στρώσεων ενίσχυσης. της διάταξης των κυλινδρικών ενισχύσεων καθώς και για κοίλες κολώνες και κολώνες με εσωτερικό συντακτικό αφρό.

Οι αναλογίες της διαμέτρου d των κυλινδρικών ενισχύσεων, του πλάτους w , του μήκους l και του πάχους h της κατασκευής ήταν : $w/l=1/2$, $h/l=0.14$, $d/w=0.2$. Αν a είναι το μήκος της στοιχειώδους πλευράς (συμμετρίας $1/8$) τότε : $a=w/2=1/8$.

Η προσομοίωση του σύνθετου έγινε με την βοήθεια του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Χρησιμοποιήθηκε το $1/8$ και $1/2$ του αρχικού μοντέλου λόγω συμμετρίας, για την περίπτωση θλίψης και κάμψης 3 σημείων αντίστοιχα, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος. Τρισδιάστατα 8-κομβικά στοιχεία (brick elements, SOLID185) θεωρήθηκαν για την μοντελοποίηση του πυρήνα από συντακτικό αφρό και των εξωτερικών στρώσεων ενίσχυσης ανθρακονημάτων, λόγω του σημαντικού πάχους σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις, ενώ στην περίπτωση των κυλινδρικών κατακόρυφων ενισχύσεων χρησιμοποιήθηκαν 4-κομβικά επίπεδα στοιχεία (SHELL181), με δυνατότητα εισαγωγής πάχους, ορθοτροπικών ελαστικών σταθερών και διεύθυνσης ενίσχυσης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα περιλαμβάνουν τα εξής:

- Η σύνθετη κατασκευή, λόγω της παρουσίας των εσωτερικών ενισχύσεων παρουσίασε αυξημένη ακαμψία. Αυτό γίνεται φανερό από τις μειωμένες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν σε διάφορα σημεία της, σε σχέση με το σύνθετο χωρίς κολώνες.
- Σε μονοαξονική θλίψη η μείωση του πάχους ήταν έως και 35% λιγότερη για αναλογία: $d/a=0.48$. Για μεγαλύτερες τιμές της διαμέτρου εσωτερικών ενισχύσεων $d/a=0.80$, το σύνθετο εμφανίζει μειωμένη ακαμψία, αφού πλέον ο συντακτικός αφρός στον πυρήνα είναι λιγότερος κατά 50% τουλάχιστον.
- Η παρουσία συντακτικού αφρού εντός των κυλινδρικών στρώσεων ενίσχυσης φαίνεται να οδηγεί σε μια συνεχή γραμμική μείωση των μετατοπίσεων καθώς αυξάνεται η διάμετρος d .
- Η μικρή μεταβολή του αριθμού των στρώσεων ενίσχυσης δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπολογιζόμενες παραμορφώσεις και τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις στο σύνθετο, ειδικά για αναλογίες έως και $d/a=0.60$.

- Στην περίπτωση της κάμψης 3 σημείων, η παρουσία του συντακτικού αφρού φαίνεται να είναι καθοριστική για την μηχανική απόκριση της κατασκευής. Ακόμα και για μικρές σχετικά τιμές της διαμέτρου των κοίλων εσωτερικών ενισχύσεων, το σύνθετο έχει παραμορφώσεις ανάλογες της κατασκευής χωρίς κολώνες, κάτι που αποδίδεται στην μείωση του αφρού στον πυρήνα.
- Αντιθέτως, το σύνθετο παρουσιάζει μεγάλη ακαμψία όταν θεωρήσουμε συντακτικό αφρό εντός των κυλινδρικών ενισχύσεων. Μετρώντας το μέσο όρο των μετατοπίσεων σε δύο διαφορετικές διευθύνσεις, όπως και στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης, η μείωσή τους ακολουθεί πάλι μια συνεχή γραμμική μείωση όσο μεγαλώνει η διάμετρος d .
- Η πύκνωση της διάταξης των εσωτερικών ενισχύσεων κάνει την κατασκευή πιο άκαμπτη, για ίδια ποσοστά συντακτικού αφρού στον πυρήνα.
- Η μοντελοποίηση του σύνθετου έγινε με ένα σχετικά μεγάλο αριθμό στοιχείων ώστε να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια με αποδεκτό υπολογιστικό κόστος. Παρόμοια ποιοτικά αποτελέσματα θα μπορούσε ενδεχομένως να δώσει ένα μοντέλο με μια διακριτοποίηση λιγότερων στοιχείων. Παρόλα αυτά, δεν έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων για διαφορετικό αριθμό στοιχείων γιατί η μελέτη βασίστηκε κυρίως σε συμπεράσματα ποιοτικού χαρακτήρα.
- Μεγάλο ενδιαφέρον για περαιτέρω μελέτη αποτελεί η διερεύνηση πειραματικών αποτελεσμάτων, που θα επιβεβαίωναν ή όχι τα συμπεράσματα της αριθμητικής προσομοίωσης. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εκτελεστεί η προσομοίωση του μοντέλου με διαφορετικό αριθμό στοιχείων ώστε να επιβεβαιωθεί η σύγκλιση των αριθμητικών τιμών των αποτελεσμάτων.

Παράρτημα

Ακολουθεί ο κώδικας του ANSYS για την μοντελοποίηση του σύνθετου σε μονοαξονική θλίψη.

```
FINISH  
/CLEAR,START  
/PREP7
```

```
!*****ELEMENT TYPES*****
```

```
!Foam Element type = 1  
ET,1,SOLID185
```

```
!Skins Element type = 2  
ET,2,SOLID185  
KEYOPT,2,3,1           ! LAYERED SOLID ELEMENTS  
KEYOPT,2,2,2           ! ENHANCED STRAIN FORMULATION  
KEYOPT,2,8,1           ! STORE DATA FOR ALL LAYERS
```

```
!Composite columns Element type = 3  
ET,3,SHELL181  
KEYOPT,3,3,2
```

```
ET,4,SHELL181
```

```
!foam Material Num = 1  
mp,ex,1,34e5  
mp,prxy,1,0.324
```

```
!composite skins Material Num = 2  
MP,EX,2,172E6  
MP,EY,2,116E5  
MP,EZ,2,116E5  
MP,GXY,2,78E5  
MP,GYZ,2,78E5
```

```
MP,GXZ,2,39E5
MP,PRXY,2,0.36
MP,PRYZ,2,0.02
MP,PRXZ,2,0.48
```

```
seltol,1e-8 !tolerance of selection
```

```
THICK = (0.125E-3)/2 !0.125 mm plain weave 0.0625 every ply
```

```
!*****SHELL SECTIONS*****
```

```
!****SHELL181*****
```

```
sect,1,shell,,column
```

```
secdata, THICK,2,0,3 !3=Number of integration points in layer (default)**
```

```
secdata, THICK,2,90,3
```

```
secdata, THICK,2,0,3
```

```
secdata, THICK,2,90,3
```

```
secdata, THICK,2,0,3
```

```
secdata, THICK,2,90,3
```

```
secdata, THICK,2,0,3
```

```
secdata, THICK,2,90,3
```

```
secoffset, TOP !Shell node will be offset to top of the section**
```

```
!****SOLID185*****
```

```
sect,2,shell,,skins
```

```
secdata, THICK,2,0
```

```
secdata, THICK,2,90
```

```
*GET, SKLAY, SHEL, 2, PROP, NLAY !define scalar parameter SKLAY=number
of skin layers=2, as defined above**
```

```
*GET, COLLAY, SHEL, 1, PROP, NLAY !define scalar parameter
COLLAY=number of column layers=8, as defined above**
```

```
!PARAMETERS
```

```
SKTH = 16*THICK !SKIN THICKNESS
```

```
COLTH = 8*THICK !COLUMN THICKNESS
```

```
DIAM = 0.005 !0.5 cm
```

```
DIAM2 = DIAM - COLTH
```

```
A = 0.0125
```

```
HEIGHT = 0.005
```

```
P=10000
```

DISRC1 = 12

DISRC2 = 8

!*****CONSTRUCT THE MAIN AREA*****

K,1,0,0

K,2,A,0

K,3,A,A

K,4,0,A

!CIRCLE

CENTER = 100

K,100,A/2,A/2

K,5,A/2-(DIAM/2)*(SQRT(2)/2), A/2-(DIAM/2)*(SQRT(2)/2)

K,6,A/2+(DIAM/2)*(SQRT(2)/2), A/2-(DIAM/2)*(SQRT(2)/2)

K,7,A/2+(DIAM/2)*(SQRT(2)/2), A/2+(DIAM/2)*(SQRT(2)/2)

K,8,A/2-(DIAM/2)*(SQRT(2)/2), A/2+(DIAM/2)*(SQRT(2)/2)

K,9,A/2-(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2), A/2-(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2)

K,10,A/2+(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2), A/2-(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2)

K,11,A/2+(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2), A/2+(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2)

K,12,A/2-(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2), A/2+(DIAM2/2)*(SQRT(2)/2)

*DO,I,1,3,1 !do: for I=1 to 3, step 1**

L,I,I+1,DISRC1 !L: Line from KP 1 to KP 2, divisions 12**

*ENDDO

L,4,1,DISRC1

*DO,I,5,7,1

LARC,I,I+1,CENTER,DIAM/2,DISRC1 !LARC generates arcs**

*ENDDO

LARC,8,5,CENTER,DIAM/2,DISRC1

*DO,I,9,11,1

LARC,I,I+1,CENTER,DIAM2/2,DISRC1

*ENDDO

LARC,12,9,CENTER,DIAM2/2,DISRC1

*DO,I,1,8,1

*IF,I,LT,5,THEN

L,I,4+I,DISRC1

```

*ELSE
L,I,4+I,8/COLLAY
*ENDIF
*ENDDO
KDELE,100

*DO,I,1,8,1
*IF,I,EQ,4,OR,I,EQ,8,THEN
AL,I,I+9,I+4,I+12  !AL generates area from lines**
*ELSE
AL,I,I+13,I+4,I+12
*ENDIF
*ENDDO
AL,9,10,11,12

ALLSEL
AGLUE,ALL
NUMCMP,ALL  !redefine numbering**

!*****MESH THE MAIN AREA*****
TYPE,4      !define the constructed area as SHELL181
AMESH,ALL

!***TOP SKIN*****
ALLSEL
*GET, MAXKP, KP, 0, NUM, MAX      !define scalar parameter MAXKP=maximum
numbering of KP=12, as defined above**
K,MAXKP+1,0,0,SKTH                !define KP=13, located at 0,0,z=total thickness of
skins**
LSEL,S,LOC,Z,0                    !select all lines located at z=0**
KSLL,S                             !Selects those keypoints contained in the selected lines**
K1=KP(0,0,0)                       !define kp 1 as center of the coordinate system**
ALLSEL
LSEL,NONE
L,K1,MAXKP+1,16/SKLAY             !LESIZE
LDR = LSNEXT(0)                   !define line 21=ldr, height of skin thickness**
ALLSEL
LSEL,S,LOC,Z,0                    !select all lines located at z=0**
ASLL,S,1                           !select all areas defined by the above lines**
ESLA,S                             !Selects those elements associated with the
selected areas**

```



```

TYPE,2
ESYS,0                !Sets the element coordinate system attribute
pointer, 0=as defined previously (K1)**
MAT,2
SECNUM,2
VDRAG,ALL,,,,,LDR
ALLSEL
LDELE,LDR,,,1        !Deletes unmeshed lines, ldr=all lines, 1=plus kp
attached to these lines ONLY**

LSEL,S,LOC,Z,0
ASLL,S,1
ACLEAR,ALL           !Deletes nodes and area elements associated with
selected areas, (bottom area)**
ALLSEL
NUMMCMP,ALL

local,11,0
wpcsys,,11
ALLSEL
VGEN,2,ALL,,,,,-HEIGHT-SKTH,,0

LSEL,S,LOC,Z,0
ASLL,S,1
LOCAL,12,1,A/2,A/2
wpcsys,,12
ASEL,U,LOC,X,0,DIAM/2  !Area outside the cylindrical reinforcement
CM,DRAGAR,AREA        !Groups area into a component defined as 'DRAGAR'**

local,11,0
wpcsys,,11
K2=KP(0,0,-HEIGHT)
LSEL,NONE
L,K1,K2,DISRC2
LDR=LSNEXT(0)

CMSEL,S,DRAGAR
TYPE,1
ESYS,0
MAT,1
VDRAG,ALL,,,,,LDR
ALLSEL

```

```
LDELE,LDR,,,1
NUMMRG,ALL
```

```
!*****define material properties TO internal reinforcement*****
```

```
LSEL,S,LOC,Z,-HEIGHT,0
LOCAL,12,1,A/2,A/2
wpcsys,,12
LSEL,R,LOC,X,0,DIAM/2
ASLL,S,1
local,11,0
wpcsys,,11
LSEL,S,LOC,Z,0
LSEL,A,LOC,Z,-HEIGHT
ASLL,U,1
```

```
MAT,2
TYPE,3
ESYS,12
SECNUM,1
AMESH,ALL
ALLSEL
```

```
NSEL,S,LOC,Z,SKTH
CP,1,UZ,ALL
ALLSEL
NUMMRG,ALL
```

```
!*****SOLUTION*****
```

```
/SOLU
local,11,0
wpcsys,,11
```

```
LSEL,S,LOC,Z,-HEIGHT-SKTH
ASLL,S,1
DA,ALL,ALL
```

```
LSEL,S,LOC,Z,SKTH
ASLL,S,1
SFA,ALL,1,PRES,P
```

```
ALLSEL
SOLVE
```

Βιβλιογραφία

1. *Handbook of Composites 2nd edition*, S.T Peters, Process Research, CHAPMAN & HALL, 1998.
2. *Advanced Polymer Composite Materials*, Jang Z. Rar. ASM International, 1994.
3. *Carbon Fibers and their composites*, P. Morgan, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
4. *Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα*, Ε.Καβελάκης, Δ.Δ Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010.
5. *Metal Matrix Composites*, K.K.Chawla,N.Chawla, University of Alabama.
6. *Principles of Composite Materials Mechanics*, R.F.Gibson, McGraw-Hill.
7. *Composite Materials for Aircraft Structures 2nd edition*, A.Baker, S.Dutton,D.Kelly, AIAA EDUCATION SERIES, 2004.
8. *Sandwich Composites*, Charles E.S. Ueng, Georgia Institute of Technology.
9. *Update on Syntactic Foams*, J.Bibin, C.P. Reghunandan Nair, iSMITHERS, 2010.
10. *HexWeb - Honeycomb attributes & Properties*, HEXCEL COMPOSITES.
11. *HexWeb - Honeycomb sandwich design technology*,HEXCEL COMPOSITES.
12. *Finite Element Analysis of Composite Materials*, Ever J. Barbero, CRC PRESS, 2007.
13. *Finite Element Analysis of Composite Laminates*, O.O.Ochoa & J.N Reddy, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1992.
14. *COMPOSITE MATERIALS, Testing,Design, and Acceptance Criteria*, Abdul-Hamid Zureich & A.T NETTLES, ASTM INTERNATIONAL,2002.
15. *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*, L.A Carlsson & G.A Kardomateas, SPRINGER, 2011.
16. *Mechanical behaviour of glass-filled epoxy resins: experiments,homogenization methods for syntactic foam and applications*, L.Bardella, PhD thesis, University of Brescia,2000.
17. *Mechanics of Composite Materials, Part II – Theoretical Aspects*, S.W Tsai, 1966.
18. *Experimental Analysis of Behavior and Damage of Sandwich Composite Materials in three-point Bending Part 1. Static Tests and Stiffness Degradation at Failure Studies*,Bezazi A., Mahi A.E., Berthelot M., SPRINGER SCIENCE, 2007.
19. *Experimental Analysis of Behaviour and Damage of Sandwich Composite Materials in three-point Bending Part 2.Fatigue Tests Results and Damage Mechanisms*,Bezazi A., Mahi A.E., Berthelot M., SPRINGER SCIENCE, 2009.
20. *Shear Deformation Laminate Theory used for Sandwiches*, Kormanikova E. & Mamuzic I., 2010.

21. *Three-Point Flexural Behaviour of GFRP Sandwich Composites: A Failure Map*, Valenza A., Fiora V. and Calabrese L., University of Palermo, 2008.
22. *Axial Compressive Failure of Carbon Fibers*, M. Nakatami, Shioya M., Yamashita J., Department of Organic and Polymeric Materials, Tokyo Institute of Technology, 1998.
23. *Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic foam/glass-fibre composite sandwich*, Corigliano A., Rizzi E., Papa E., ELSEVIER, 2000.
24. *Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjective to compressive loading*, Juhamat A, Soutis C., Jones F.R, Hodzic A., ELSEVIER, 2009.
25. *Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials*, Herraren H. et al, 2011, MATERIAL SCIENCE, Talin University of Technology.
26. *On the compressive failure of fiber reinforced composites*, Kyriakides S., Arseculeratne R., Perry E.J., Liechti K.M, PERGAMON, 1994.
27. *Structure change of carbon fibers during axial compression*, Sugimote Y. et al, 2013, CARBON JOURNAL– ELSEVIER.
28. *Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in 3-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling*, Steeves C. & Fleck N., INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES 46 – ELSEVIER, 2004.
29. *Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in 3-point bending. Part I: Analytical models and minimum weight design*, Steeves C. & Fleck N., INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCES 46 – ELSEVIER, 2004.
30. *The determination of Young Modulus for CFRP using three point bending tests at different span lengths*, Petrescu I, Mohora C., Ispas C., U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 75, Iss. 1, 2013.
31. *An evaluation on bending properties according to fiber material of FRP composites*, Young Jun Kim et al., 2013, 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, Korea.
32. *Finite element modelling of axially crushed silk/epoxy composite square tubes*, S.A Oshkovr et al., 2013, Journal of COMPOSITE STRUCTURES 95, ELSEVIER.
33. *Composite sandwich structures with nested inserts for energy absorption application*, Tarlochan F. & Ramesh S., Journal of COMPOSITE STRUCTURES 94, ELSEVIER, 2012.
34. *Finite element investigation of the influence of material properties on the crushing characteristics of in-plane loaded composite sandwich panels*, Mamalis A.G, Spentzas K.N, Papapostolou D.P, Pantelalis N., THIN-WALLED STRUCTURES 63, ELSEVIER, 2013.
35. *Modelling and optimization of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs*, Jing Bi, Fang H., Wang Q., Ren X., FINITE ELEMENT IN ANALYSIS AND DESIGN, ELSEVIER, 2009.

36. *A Unified Approach to Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite Tubes*, Hull D., University of Cambridge, COMPOSITES SCIENCE & TECHNOLOGY 40, 1991.
37. *On the compression of hybrid sandwich composite panels reinforced with internal tubes inserts: experimental*, Mamalis A.G *et al.*, 2002, COMPOSITE STRUCTURES 56, ELSEVIER.
38. *Modelling and testing of energy absorbing lightweight materials and structures for automotive applications*, Fregmen C., Mkrtychyan L., Huber U., Maier M., SCIENCE & TECHNOLOGY FOR ADVANCED MATERIALS 6, ELSEVIER, 2005.
39. *Finite element modelling of the crushing response of composite sandwich panels with FRP tubular reinforcements*, Mamalis A.G *et al.*, 2010, INTERNATIONAL JOURNAL OF CRASWORTHINESS, NTUA.
40. *Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams*, Prebhakar R. Marur, FINITE ELEMENT ANALYSIS & DESIGN 46, 2010.
41. *Composite Sandwich Construction with Syntactic Foam Core*, Hiel C., Dittman D., Ishai O., NASA Ames Research Center, COMPOSITES N5, 1993.
42. *Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams*, Koopman M., Chawla K.K., Carlisle K.B., USA, SYNTACTIC AND COMPOSITE FOAMS 41, 2006.
43. *Finite element modelling of bending CFRP laminates: Multiple delaminations*, Ullah H. *et al*, 2012, COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE 52, ELSEVIER.
44. *Numerical Investigation of Energy Absorbers in Composite Materials for Automotive Applications*, Boria S. & Belingardi G., INTERNATIONAL JOURNAL OF CRASWORTHINESS, Politecnico di Torino.
45. *Compression and bending performances of CFR lattice-core sandwich composites*, Fan H. *et al.*, 2013, COMPOSITES: PART A 52, ELSEVIER.

