



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΞΟΝΙΚΗ
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ
ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΑΦΡΟ.*

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΧΡΟΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κατά το χρονικό διάστημα Ιανουαρίου έως Οκτωβρίου του 2007, με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και αναφέρεται στη μελέτη της επίδρασης αφρών ως υλικά πλήρωσης κελυφών σύνθετου υλικού ορθογωνικής διατομής με σκοπό την αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε περίπτωση καταστροφικής καταπόνησης. Με τα πρωτότυπα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται αλλά και με τη μέθοδο της υπολογιστικής εξομοίωσης, φιλοδοξούμε να προσθέσουμε ένα ακόμη λιθαράκι στην επιστήμη της προστασίας από συγκρούσεις (crashworthiness).

Επιβλέπων αυτής της εργασίας υπήρξε ο αναπληρωτής καθηγητής κ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου τόσο για την εμπιστοσύνη την οποία μου επέδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος αρωγός σε ολόκληρο το διάστημα των σπουδών μου στο Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον καθηγητή και διευθυντή του τομέα Δρ. Αθανάσιο Μάμαλη για τη διάθεση του εξοπλισμού του εργαστηρίου, καθώς και προς τον επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Πρωτεσίλαο Κωστάζο ο οποίος επέδειξε καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα την αμέριστη συμπαράστασή του.

Ακόμη, θερμές ευχαριστίες πρέπει να εκφράσω προς τους γονείς μου, τους φίλους μου Γεωργία, Γιάννη, Εύελυν, Ηρώ, Θάνο, Μηνά, Νίκο, Σταύρο, Τσάπα και τέλος την Ελένη για την ανοχή και την ψυχολογική ενίσχυση που μου προσέφεραν το διάστημα αυτό.

Αθήνα Οκτώβριος 2007,

Χρονόπουλος Δημήτριος



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή – Ανάγκη για ασφαλέστερες κατασκευές

1.1 Γενικά.....	σελ.	1
1.2 Ατυχήματα οχημάτων: Στατιστικά στοιχεία και συνέπειες.....	σελ.	3
1.2.1 Παγκόσμια κλίμακα	σελ.	3
1.2.2 Τα τροχαία ατυχήματα στον Ελλαδικό χώρο.....	σελ.	8
1.2.3 Συνέπειες των ατυχημάτων με οχήματα.....	σελ.	10
1.2.4 Αεροπορικά δυστυχήματα.....	σελ.	11
1.3 Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού.....	σελ.	13
1.4 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης.....	σελ.	16
1.4.1 Στοιχεία θεωρίας.....	σελ.	16
1.4.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.....	σελ.	17
1.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	σελ.	22

Κεφάλαιο 2: Σύνθετα υλικά – Πηγή εξέλιξης της σύγχρονης τεχνολογίας

2.1 Γενικά	σελ.	23
2.1.1 Ορισμός.....	σελ.	23
2.1.2 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών.....	σελ.	24
2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών	σελ.	26
2.2.1 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών κατά τύπο	σελ.	26
2.2.2 Σημαντικότερες κατηγορίες σύνθετων κατά υλικό.....	σελ.	27
2.3 Μηχανική των σύνθετων υλικών.....	σελ.	36
2.3.1 Μικρομηχανική σύνθετων υλικών.....	σελ.	36
2.3.2 Μακροσκοπική ανάλυση.....	σελ.	39
2.4 Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών	σελ.	42
2.4.1 Μορφές αστοχίας.....	σελ.	42
2.4.2 Θραύση ινών.....	σελ.	43

2.4.3	Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας.....	σελ.	43
2.4.4	Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding).....	σελ.	44
2.4.5	Διαστρωματική αποκόλληση (delamination).....	σελ.	44
2.5	Η αξονική κατάρρευση σύνθετων λεπτότοιχων σωλήνων.....	σελ.	45
2.5.1	Αξονική και καμπτική καταπόνηση τετραγωνικών κατασκευών λεπτού πάχους.....	σελ.	45
2.5.2	Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών.....	σελ.	46
2.5.3	Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης.....	σελ.	50
2.6	Βιβλιογραφία κεφαλαίου	σελ.	54

Κεφάλαιο 3: Θεωρία εφαρμογές και μηχανική των αφρωδών υλικών

3.1	Εισαγωγικά.....	σελ.	55
3.1.1	Ορισμοί.....	σελ.	55
3.1.2	Η στατιστική έννοια της κυψέλης.....	σελ.	56
3.1.3	Βασικές σχέσεις.....	σελ.	57
3.2	Πολυμερή αφρώδη υλικά.....	σελ.	58
3.2.1	Εισαγωγικά.....	σελ.	58
3.2.2	Παρασκευή πολυμερών αφρών.....	σελ.	59
3.2.3	Ο αφρός πολυουρεθάνης.....	σελ.	61
	-Χαμηλής πυκνότητας (εύκαμπτος).....	σελ.	61
	-Υψηλής πυκνότητας (άκαμπτος).....	σελ.	64
3.2.4	Θλιπτική καταπόνηση των πολυμερών αφρωδών υλικών με ανοικτές κυψέλες.....	σελ.	68
3.2.5	Θλιπτική καταπόνηση των πολυμερών αφρωδών υλικών με κλειστές κυψέλες.....	σελ.	72
3.3	Μεταλλικά αφρώδη υλικά	σελ.	77
3.3.1	Εισαγωγικά.....	σελ.	77
3.3.2	Εφαρμογές.....	σελ.	78
3.3.3	Μηχανική των μεταλλικών αφρών.....	σελ.	78
3.3.4	Καταστροφική θλιπτική καταπόνηση μεταλλικού αφρού.....	σελ.	82
3.4	Βιβλιογραφία κεφαλαίου	σελ.	86

Κεφάλαιο 4: Οι δομές sandwich στις κατασκευές

4.1	Εισαγωγικά – Περιγραφή των δομών sandwich.....	σελ.	87
4.2	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δομών sandwich.....	σελ.	90
4.3	Προέλευση των δομών sandwich.....	σελ.	93
4.4	Εφαρμογές των δομών sandwich.....	σελ.	96
4.4.1	Κελύφη sandwich (Sandwich Shells).....	σελ.	98
4.5	Η μηχανική-δομική συμπεριφοράς των sandwich υλικών.....	σελ.	100
4.5.1	Γενικές παρατηρήσεις στη θεωρητική προσέγγιση των sandwich υλικών.....	σελ.	100
4.5.2	Θεωρίες ESL για τα στοιχεία κελυφών	σελ.	101
4.5.3	Στρωματικές θεωρίες για τα στοιχεία κελυφών	σελ.	102
4.5.4	Τρισδιάστατη διατύπωση ελαστικότητας για τα τρισδιάστατα στοιχεία	σελ.	102
4.5.5	Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων υπό τρισδιάστατη καταπόνηση	σελ.	103
4.5.6	Κινηματική προσέγγιση.....	σελ.	103
4.6	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	σελ.	106

Κεφάλαιο 5: Εκτέλεση και σχολιασμός δοκιμών σύνθλιψης (πειραματικό μέρος της εργασίας)

5.1	Επιλογή και ετοιμασία των δοκιμών.....	σελ.	107
5.1.1	Επιλογή των δοκιμών.....	σελ.	107
5.1.2	Ετοιμασία των δοκιμών.....	σελ.	108
5.2	Χαρακτηριστικά των υλικών.....	σελ.	109
5.3	Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού.....	σελ.	113
5.4	Αξιολόγηση συμπεριφοράς των συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας	σελ.	119
5.5	Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις.....	σελ.	120
5.5.1	Δοκιμή σύνθετου σωλήνα.....	σελ.	120
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	124
5.5.2	Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με πολυμερή αφρό....	σελ.	125
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	129

5.5.3	Δοκιμή πολυμερούς αφρού.....	σελ.	129
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	132
5.5.4	Δοκιμή μεταλλικού αφρού.....	σελ.	132
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	136
5.5.5	Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με μεταλλικό αφρό....	σελ.	136
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	140
5.5.6	Δοκιμή σύνθετου υλικού με διαμορφωμένο πρόσωπο (triggered).....	σελ.	140
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	144
5.5.7	Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με μεταλλικό αφρό και διαμορφωμένο πρόσωπο (triggered).....	σελ.	144
	- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης.....	σελ.	148

Κεφάλαιο 6: Αριθμητική προσομοίωση καταστροφικής καταπόνησης δοκιμίων

6.1	Εισαγωγικά.....	σελ.	149
6.2	Μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων	σελ.	150
6.3	Βασική θεωρία πεπερασμένων στοιχείων	σελ.	153
6.3.1	Περιγραφή Φυσικών Ιδιοτήτων.....	σελ.	153
6.3.2	Τυποποίηση Διαφορικών Εξισώσεων.....	σελ.	155
6.3.3	Μέθοδος επίλυσης εξισώσεων κινήσεως.....	σελ.	157
6.4	Ο κώδικας LS-DYNA	σελ.	162
6.4.1	Γενικά.....	σελ.	162
6.4.2	Χρήση του προγράμματος.....	σελ.	163
6.5	Οι επεξεργαστές FEMB	σελ.	165
6.5.1	Pre-Processor.....	σελ.	165
6.5.2	Post-Processor.....	σελ.	168
6.6	Προσομοίωση κατάρρευσης μεταλλικού αφρού.....	σελ.	169
6.7	Προσομοίωση κατάρρευσης σύνθετου κελύφους	σελ.	172
6.7.1	Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους.....	σελ.	172
6.7.2	Προσομοίωση με στέρα πεπερασμένα στοιχεία.....	σελ.	173
6.8	Προσομοίωση κατάρρευσης σύνθετου κελύφους πληρωμένο με πολυμερή αφρό.....	σελ.	176

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

7.1	Οικονομοτεχνική αξιολόγηση των λύσεων.....	σελ.	178
7.1.1	Αξιολόγηση λειτουργικότητας.....	σελ.	178
7.1.2	Αξιολόγηση κόστους	σελ.	180
7.2	Σύγκριση μεταλλικού και πολυμερούς αφρού.....	σελ.	181
7.3	Συμπεράσματα υπολογιστικής προσομοίωσης	σελ.	182
7.4	Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	σελ.	184

Η ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - Η ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

1.1 Γενικά

Στην εποχή μας, το ενδιαφέρον για ασφαλή μεταφορικά μέσα είναι έντονο. Και αυτό γιατί τα οχήματα εκτός από την εξυπηρέτηση που προσφέρουν στον χρήστη, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλα ατυχήματα. Έτσι οι σχεδιαστές των μεταφορικών μέσων προσπαθούν να εφεύρουν και να ενσωματώσουν σε αυτά, νέα συστήματα που αυξάνουν το επίπεδο της παρεχόμενης ασφάλειας.

Τα συστήματα αυτά διαχωρίζονται σε εκείνα που προορίζονται να βελτιώσουν την **ενεργητική ασφάλεια**, και σε εκείνα που βελτιώνουν την **παθητική ασφάλεια** του οχήματος [1-1]. Η ενεργητική ασφάλεια βοηθάει στην αποφυγή ενός ατυχήματος, ενώ αν αυτό τελικά συμβεί, η παθητική ασφάλεια είναι αυτή που περιορίζει στο ελάχιστο δυνατό τις συνέπειες του. Για να το επιτύχουν αυτό, υιοθετούν στοιχεία και διατάξεις που περιορίζουν τις επιπτώσεις μιας πιθανής σύγκρουσης στους επιβάτες.

Η κατάσταση πριν από λίγες δεκαετίες ήταν διαφορετική. Τόσο το κοινό όσο και οι κατασκευαστές ουσιαστικά αγνοούσαν το πρόβλημα της επικινδυνότητας των οχημάτων. Ένα τυπικό σασί (chassis) αυτοκινούμενου οχήματος αποτελούνταν από συγκολλημένες στιβαρές ράβδους, πάνω στις οποίες βιδώνονταν τα καθίσματα και οι αναρτήσεις (βλέπε παράπλευρη εικόνα) χωρίς να λαμβάνεται μέριμνα για την παραμόρφωση των μερών αυτών σε περίπτωση



σύγκρουσης. Στον τομέα της ασφάλειας των επιβατών υπήρχε η λανθασμένη πεποίθηση ότι το αυτοκίνητο που δεν παραμορφώνεται σε περίπτωση σύγκρουσης ήταν και το ασφαλέστερο. Η άποψη αυτή πήγαζε από την παρατήρηση πραγματικών ατυχημάτων που συνέβαιναν όταν μικρά αυτοκίνητα συγκρούονταν με μεγαλύτερα. Οι επιβάτες των μεγαλύτερων αυτοκινήτων καταπονούνταν λιγότερο λόγω των μικρότερων επιβραδύνσεων που δεχόντουσαν κατά την σύγκρουση αφού η αυξημένη μάζα του μεγάλου οχήματος ανέπτυξε, λόγω μεγάλης αδράνειας, μικρότερη επιβράδυνση από ότι ένα μικρότερο όχημα.

Η προστασία που προσέφεραν τα ογκωδέστερα οχήματα είχε λανθασμένα συνδεθεί με το γεγονός ότι τα μεγαλύτερα οχήματα παραμορφώνονταν λιγότερο σε μία σύγκρουση για τον απλούστατο λόγο ότι σε περίπτωση σύγκρουσης 2 βαρέων αυτοκινήτων το ένα πρέπει να απορροφήσει την ενέργεια του 2^{ου}. Καθώς όμως περνούσαν τα χρόνια **η ενεργειακή κρίση αλλά και οι αυξημένες ανάγκες για μετακίνηση** των ανθρώπων, έκανε επιτακτική την κατασκευή φθηνών, ελαφρών και μικρών οχημάτων. Έτσι με την αύξηση των κυκλοφορούντων οχημάτων αυξήθηκε και ο αριθμός των τροχαίων ατυχημάτων. Αυτό είχε οδυνηρές συνέπειες τόσο για τους επιβάτες όσο και για την ίδια την κοινωνία. Η δραματική αυτή κατάσταση ανάγκασε τους κατασκευαστές να ασχοληθούν πιο διεξοδικά με το θέμα της ασφάλειας. Γίνεται αξιολόγηση αποτελεσμάτων της σύγκρουσης των οχημάτων στην προστασία των ανθρώπινων οργανισμών, και το εφαρμοσμένης μηχανικής ιστορικό των μελετών της ενεργειακής απορρόφησης των δομών και των υλικών αναθεωρείται. Οι γενικές αρχές που περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό των δομών και την επιλογή των υλικών με σκοπό την ενεργειακή απορρόφηση θέτονται επίσης σε νέα βάση.

1.2 Ατυχήματα οχημάτων: Στατιστικά στοιχεία και συνέπειες

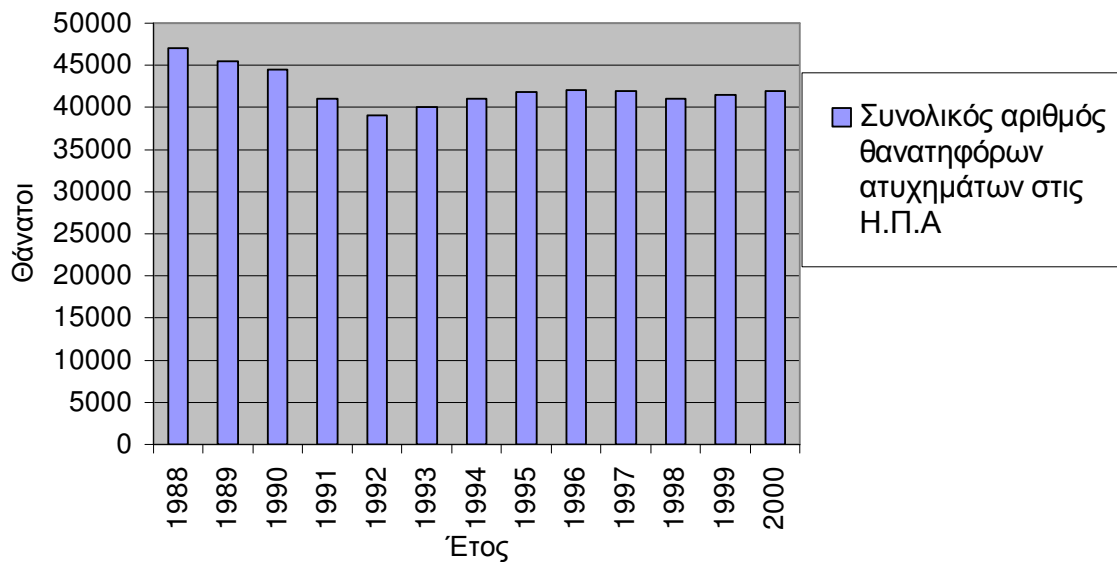
1.2.1 Παγκόσμια κλίμακα

Ο σύγχρονος κόσμος στηρίζεται πολύ στα διάφορα μεταφορικά μέσα, και ο αριθμός οχημάτων αυξάνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια του τελευταίου αιώνα. Στις ΗΠΑ μόνο σύμφωνα με το NCSA (*National Center for Statistics & Analysis*), το 2000 υπήρξαν 217.930.000 καταχωρημένα οχήματα (μια αύξηση 18% από το 1990), ενώ το VMT (*Vehicle Miles Traveled*) υπολογίστηκε ως 2.688.312M (μια αύξηση 25% από τον αριθμό το 1990). Έναντι του πληθυσμού 278.129.687 για τις ΗΠΑ το 2000, οι ανωτέρω αριθμοί δείχνουν ότι κατά μέσον όρο κάθε πέντε άτομα υπήρχαν τέσσερα οχήματα, και κάθε όχημα ταξίδεψε 20000 χιλιόμετρα ετησίως [1-2].

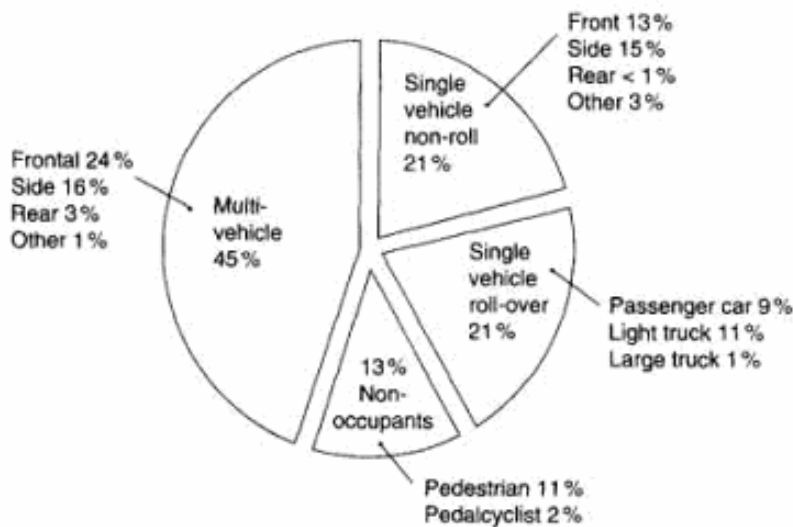
Οι πρόοδοι στην τεχνολογία έχουν οδηγήσει όχι μόνο στους **αυξανόμενους αριθμούς και βάρη οχημάτων** και VMT αλλά και σε **υψηλότερες ταχύτητες** (π.χ. μεγάλα φορτηγά και αεροσκάφη). Αυτό σημαίνει ότι τα οχήματα αυτά, εάν λάβουν μέρος σε ατυχήματα, η ζημία στους ανθρώπους και το περιβάλλον θα είναι πολύ σοβαρές.

Τα ατυχήματα μηχανοκίνητων οχημάτων είναι ένα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα και αποτελούν μια μεγάλη οικονομική απώλεια για την κοινωνία. Παραδείγματος χάριν, **τα τροχαία ατυχήματα σκοτώνουν περισσότερους ανθρώπους μεταξύ των ηλικιών 1 και 34** από οποιαδήποτε άλλη πηγή τραυματισμού ή τύπου ασθένειας. Στις ΗΠΑ περισσότερο από 95% όλων των σχετικών θανάτων λαμβάνουν χώρα στους αυτοκινητόδρομους, έναντι 2% για τα τρένα και 2% για τα αεροσκάφη.

Συνολικός αριθμός θανατηφόρων ατυχημάτων στις Η.Π.Α



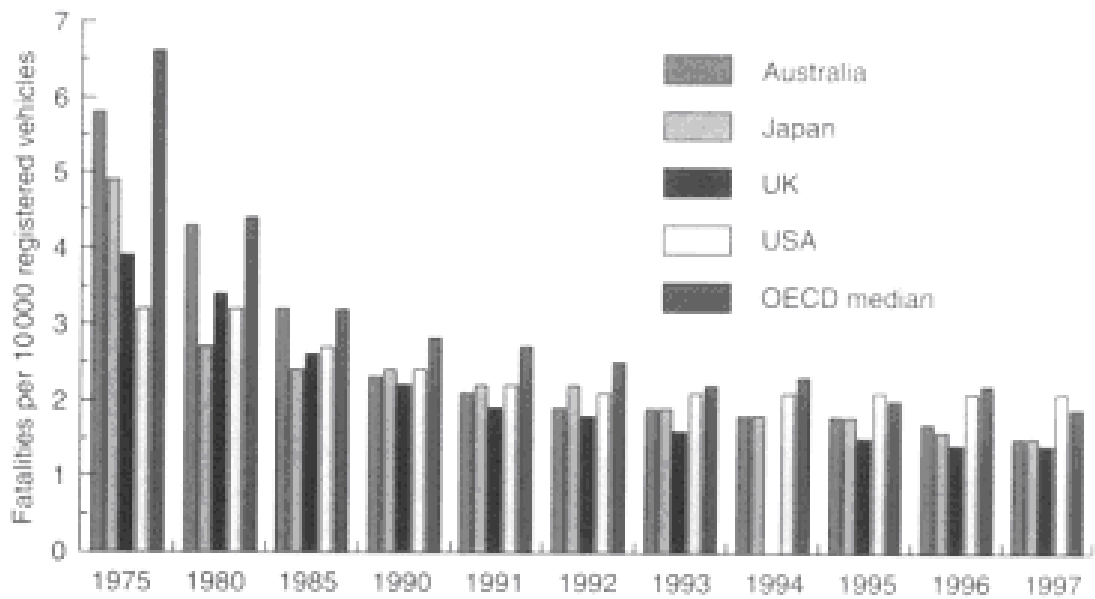
Σύμφωνα με τα ενημερωτικά δελτία ασφάλειας κυκλοφορίας που δημοσιεύθηκαν από το NCSA, το 1999 υπήρξαν 6.279.000 τροχαία δυστυχήματα (στις Η.Π.Α). Στο κάτωθεν σχήμα παριστάνονται ποσοστιαία τα είδη των ατυχημάτων για το συγκεκριμένο έτος. Όπως βλέπουμε το 45% των ατυχημάτων ενέπλεξαν 2 συγκρουόμενα μεταξύ τους οχήματα, το οποίο εύλογα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρούς τραυματισμούς αφού κατά τη σύγκρουση και τα 2 οχήματα έχουν κινητική ενέργεια η οποία πρέπει να αποσβεστεί κατά την κατάρρευση των αμαξωμάτων.



Αν και τα ζητήματα οδικής ασφάλειας ισχύουν σε όλο τον κόσμο, μόνο οι στατιστικές για τα έθνη του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης) ή αντίστοιχα *OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development)* είναι γενικά διαθέσιμες. Κάθε χώρα μέλος του ΟΟΣΑ παρέχει κανονικές στατιστικές οδικής ασφάλειας σε μια διεθνή βάση δεδομένων κυκλοφορίας και ατυχημάτων (*International Traffic and Accident Database- IRTAD*) που βασίζεται στη Γερμανία.

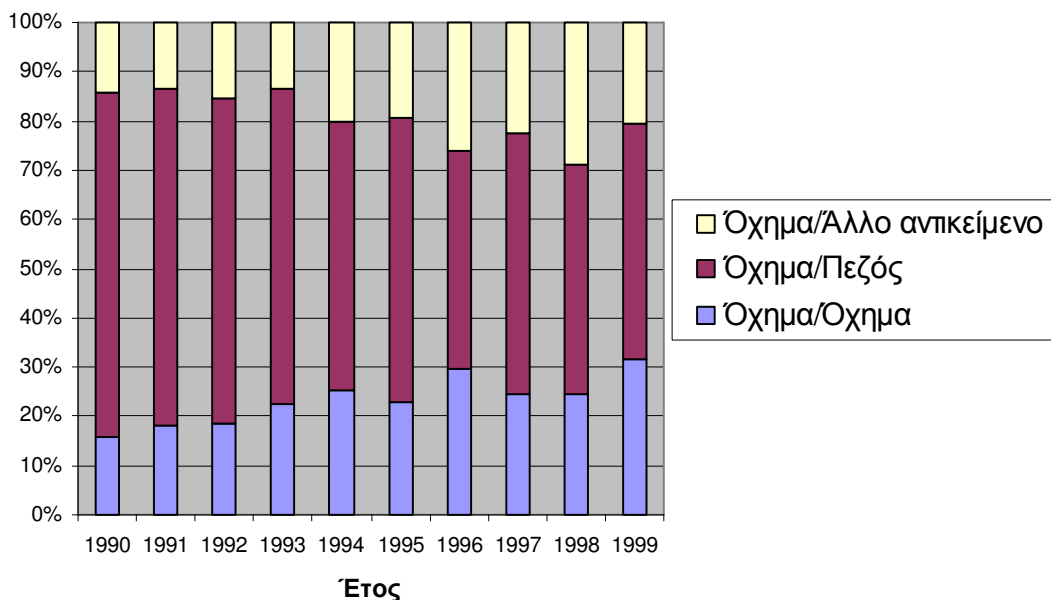
Ο αριθμός θανάτων για κάθε 10.000 καταχωρημένα οχήματα είναι μια μέθοδος για να αντικατοπτρίσουμε το ποσοστό θανάτων. Η διάμεσος αυτού του αριθμού για τα έθνη του ΟΟΣΑ ήταν 2,0 το 1997, μειωμένος από 6.7 το 1975, Μεταξύ των μελών του ΟΟΣΑ, αυτός ο αριθμός το 1997 κυμάνθηκε από 0.7 (Ισλανδία) ως 11.1 (Κορέα).

Το κάτωθεν σχήμα παρουσιάζει την τάση στα μοιραία περιστατικά ανά 10.000 καταχωρημένα οχήματα για επιλεγμένες χώρες του ΟΟΣΑ μαζί με τη διάμεσο του ΟΟΣΑ.



Ελλιπείς στατιστικές μπορούν να βρεθούν και για άλλες χώρες ή περιοχές. Παραδείγματος χάριν, η Κίνα ανέφερε ότι περίπου 84.000 άνθρωποι σκοτώθηκαν από τροχαία ατυχήματα το 2000. Αυτός ο αριθμός είναι μάλλον υψηλός εάν συγκριθεί με τον αριθμό καταχωρημένων οχημάτων, αλλά δεν είναι πάρα πολύ υψηλός εάν συγκριθεί με τον πληθυσμό 1.3 δισεκατομμυρίων της Κίνας [1-2]. Στατιστικές ειδικά για το Χονγκ Κονγκ, σχετικά με το ποσοστό του είδους των τροχαίων εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα.

Τύποι θανατηφόρων ατυχημάτων στο Hong-Kong



Η οικονομική απώλεια που προκαλείται από τις οδικές συντριβές είναι επίσης τεράστια για κάθε χώρα. Επί παραδείγματι σύμφωνα με το αυστραλιανό γραφείο ασφάλειας μεταφορών (*Australian Transport Safety Bureau*) το 1996 οι ετήσιες οδικές συντριβές κόστισαν στο κράτος της Αυστραλίας : \$7.15 δισεκατομμύρια για τις σοβαρές συντριβές τραυματισμών, \$2.92 δισεκατομμύρια για τις μοιραίες συντριβές, \$2.44 δισεκατομμύρια για τις συντριβές ζημίας ιδιοκτησίας και \$2.47 δισεκατομμύρια για τις συντριβές δευτερευόντων τραυματισμών. Συνολικά, το ετήσιο κόστος των οδικών συντριβών στην Αυστραλία ήταν περίπου \$15 δισεκατομμύρια.

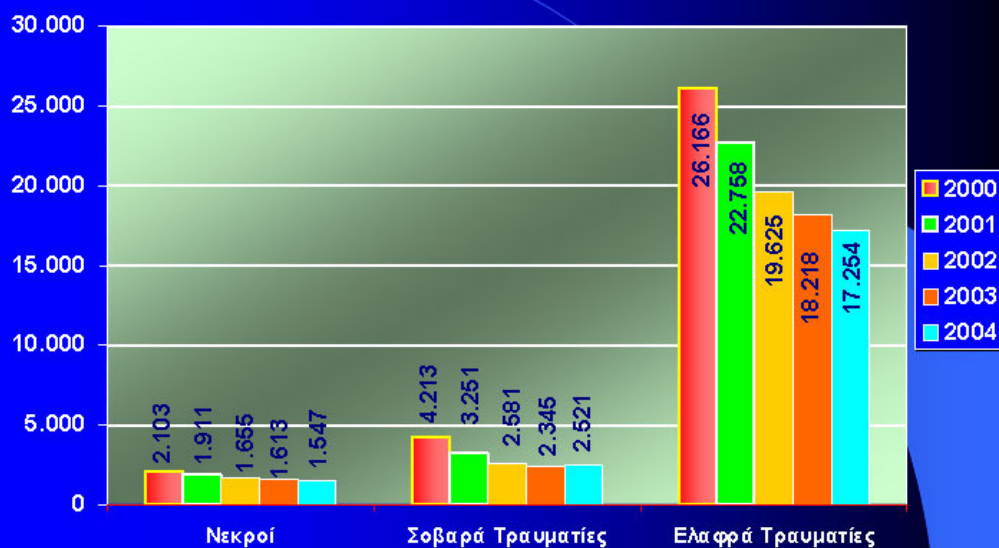
1.2.2 Τα τροχαία ατυχήματα στον Ελλαδικό χώρο

Μέχρι πρόσφατα η χώρα μας κατείχε εξέχουσα θέση στον τομέα των τροχαίων ατυχημάτων. Ευτυχώς τα ποσοστά δυστυχημάτων αργά αλλά σταθερά μειώνονται [1-3]. Στο κάτωθεν σχήμα φαίνονται οι αριθμοί των ατυχημάτων κατά τα τελευταία έτη με ταξινόμηση σοβαρότητας σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος.



Όσον αφορά στα θύματα που θρηνούμε κάθε χρόνο στην ασφαλτο παραμένουν σε υψηλά επίπεδα αν και μειώνονται σταδιακά μαζί με τα τροχαία ατυχήματα. Στο κάτωθεν σχήμα παριστάνονται γραφικά τα θύματα στον Ελλαδικό χώρο από τροχαία ατυχήματα συναρτήσεως των ετών. Συνάπτεται ακόμη ένας πίνακας (πηγή : Τροχαία Αθηνών [1-4]) στον οποίο φαίνονται τα ποσοστά των παθόντων ανάλογα με τα μέτρα ασφάλειας που είχαν λάβει. Βλέπουμε λοιπόν πόσο πολύ βοηθούν προστατευτικά μέτρα όπως ζώνες και κράνη (φτιαγμένα από σύγχρονα υλικά ώστε να απορροφούν την ενέργεια της σύγκρουσης) στην ασφάλεια των επιβαινόντων των οχημάτων!

ΓΡΑΦΗΜΑ ΠΑΘΟΝΤΩΝ 2000-2004 ΑΝΑ ΕΤΟΣ



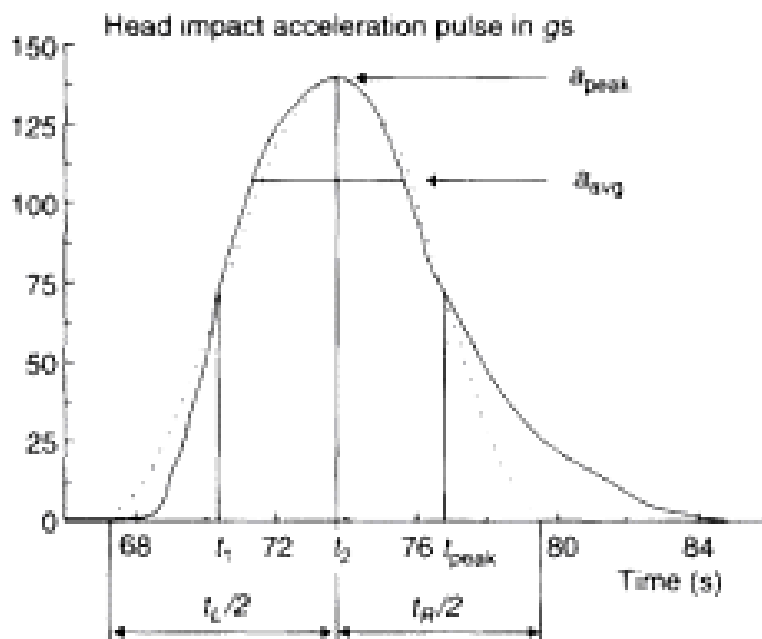
Ποσοστιαία συμμετοχή παθόντων ανάλογα με την θέση που είχαν και την λήψη προστατευτικών μέτρων ή μη που έλαβαν

	Οδηγοί		Επιβάτες		Πεζοί
	Με χρήση ζώνης ή κράνους	Χωρίς την χρήση ζώνης ή κράνους	Με χρήση ζώνης ή κράνους	Χωρίς την χρήση ζώνης ή κράνους	
2000	14,8 %	45,8 %	5,6 %	21,1 %	12,7 %
2001	15,5 %	44,5 %	5,3 %	22,3 %	12,3 %
2002	17,3 %	42,0 %	4,6 %	23,0 %	13,1 %
2003	21,5 %	38,6 %	5,7 %	20,4 %	13,9 %
2004	22,9 %	36,7 %	7,4 %	19,6 %	13,4 %

Η ΠΟΣΟΣΤΩΣΗ ΑΝΑΦΕΡΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΠΑΘΟΝΤΩΝ

1.2.3 Συνέπειες των ατυχημάτων με οχήματα

Είναι ευρέως γνωστό ότι όπως σε όλες τις συγκρούσεις, μια συντριβή οχήματος συμβαίνει σε έναν πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αρχικά, μια μέση δύναμη F που επικρατεί κατά τη διάρκεια του χρόνου t και που αναπτύσσεται στις προσκρουόμενες επιφάνειες παράγεται από την ανάγκη να αλλαχτεί η ορμή $m*u$. Είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το t ($F=m*u/t$), και συνεπώς, ο πιο σύντομος χρόνος t προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη F . Αυτή η μεγάλη δύναμη θα προκαλέσει μια τεράστια επιτάχυνση (επιβράδυνση) στους επιβαίνοντες του οχήματος, ειδικά για τα κεφάλια τους, τα οποία είναι ασυγκράτητα από τις ζώνες ασφαλείας. Το κάτωθεν σχήμα επιδεικνύει έναν χαρακτηριστικό επικεφαλής ρυθμό επιτάχυνσης, δείχνοντας έναν σύντομο (συνήθως 3- 25ms) αλλά πολύ ισχυρό παλμό.



Αυτή η μεγάλη δύναμη ή επιτάχυνση μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή ζημία ανθρώπων ή αντικειμένων. Τα αποτελέσματα μιας συντριβής οχήματος μπορούν να απαριθμηθούν ως εξής:

- Τραυματισμός έναντι των ανθρώπων (ή περιστασιακά σε άλλους οργανισμούς όπως ζώα), που καταλήγουν στο φυσικό ή/και ψυχολογικό τραυματισμό των επιβαινόντων του οχήματος ή των πεζών,
- Δομική ζημία, που αναφέρεται συνήθως στην πλαστική παραμόρφωση και το σπάσιμο της δομής του οχήματος και περιλαμβάνει επίσης τις καταστροφές από ενδεχόμενη πυρκαγιά επόμενη στη συντριβή,
- Ζημία στο φορτίο, όπως η ζημία που προκαλείται με τη μετατόπιση του φορτίου, διαρροές πετρελαίου από μεταφερόμενη δεξαμενή, κ.λ.π
- Ζημία στο περιβάλλον, όπως η ζημία στα αντικείμενα στις άκρες του δρόμου (δέντρα, προστατευτικά κιγκλιδώματα κ.λ.π)

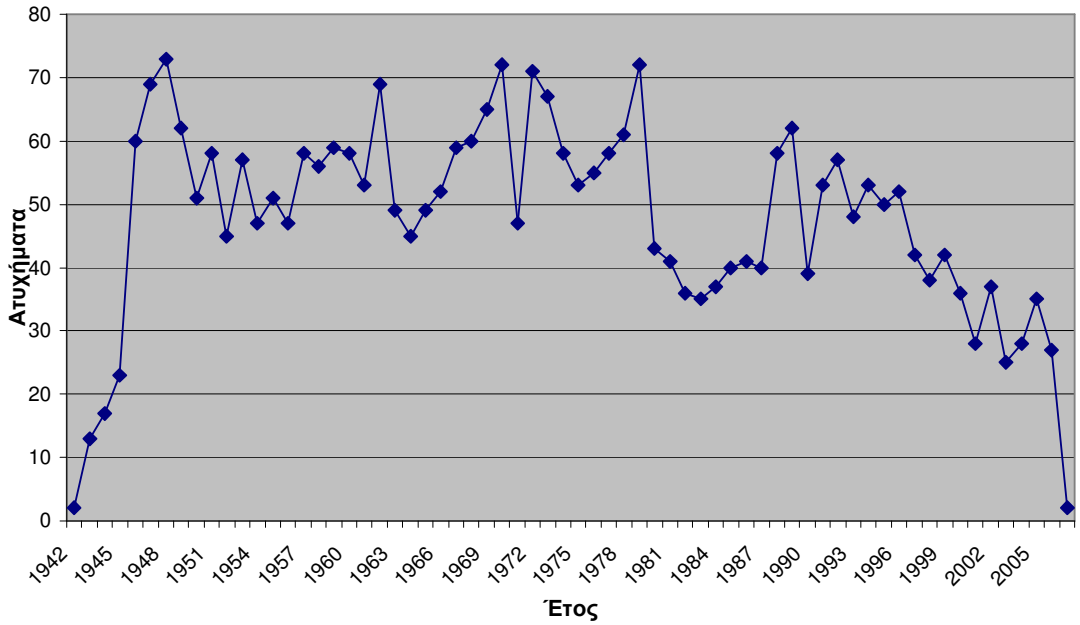
Όσον αφορά τη ζημία και τον τραυματισμό έναντι των επιβαινόντων του οχήματος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε ένα ατύχημα συντριβής με γρήγορη επιβράδυνση, τα κεφάλια των επιβαινόντων δύνανται να προσκρούσουν στα μέρη του εσωτερικού του οχήματος, όπως τα πλευρικά κιγκλιδώματα στυλοβατών, τη σκεπή ή τον ανεμοθώρακα. Αυτό καλείται δεύτερη σύγκρουση, και μπορεί επίσης να είναι πολύ επικίνδυνη.

1.2.4 Αεροπορικά δυστυχήματα

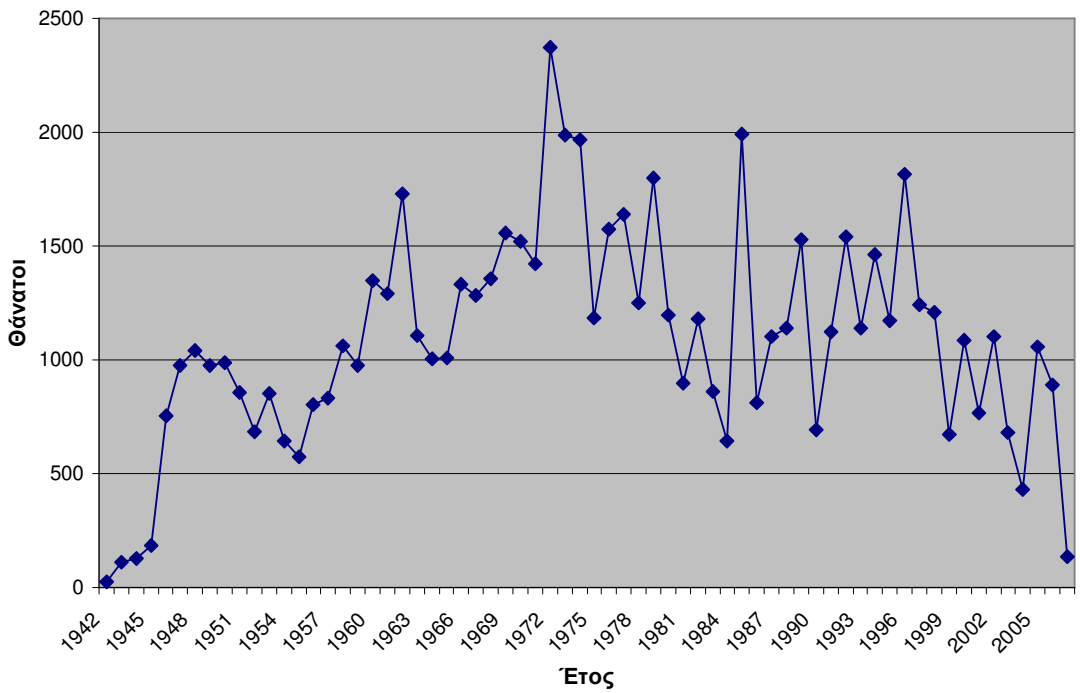
Ένας ακόμη τεχνολογικός τομέας στον οποίο **απαιτούνται σύγχρονα υλικά με υψηλές δυνατότητες απορρόφησης ενέργειας** κατά τη σύγκρουση είναι τα αεροπορικά δυστυχήματα. Μπορεί τα ατυχήματα αυτά να συμβαίνουν σπάνια, προκαλούν όμως μαζικές απώλειες, γι' αυτό πρέπει να παίρνονται όλες οι απαραίτητες δυνατές προφυλάξεις και να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ατυχήματος.

Για να μιλήσουμε και εδώ με αριθμούς επισυνάπτονται 2 διαγράμματα. Το 1^ο αναφέρεται στα ατυχήματα και το 2^ο στους νεκρούς που θρηνήθηκαν σε αεροπορικά δυστυχήματα [1-5] από το 1945 έως σήμερα (2007). Να σημειωθεί ότι τα δυστυχήματα αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου υπήρξε αστοχία ή διάλυση της ατράκτου του αεροσκάφους, είτε σε πτώση είτε στον αέρα (hull loss).

Αριθμός αεροπορικών ατυχημάτων με καταστροφή της ατράκτου του αεροσκάφους (hull loss)



Αριθμός θανάτων από αεροπορικά ατυχήματα



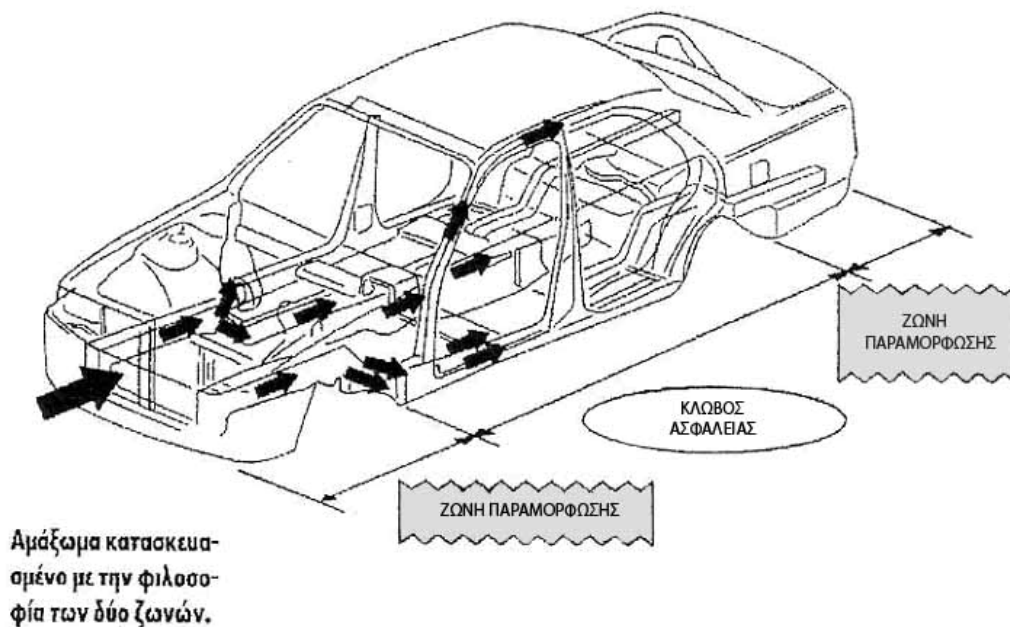
Παρακάτω αναφέρονται οι δέκα τύποι αεροσκαφών με τις περισσότερες ανθρώπινες απώλειες. Σε παρένθεση αναφέρεται ο αριθμός των αεροσκαφών που έχουν κατασκευαστεί ανά τύπο:

Τύπος αεροσκάφους	Απώλειες
1. Boeing 727(1832)	3699
2. Boeing 737(4338+)	3182
3. McDonnell Douglas DC-9/MD-80s/MD90/B717 (2350+)	3003
4. Boeing 707/720 (1012)	2908
5. Boeing 747(1334)	2850
6. Tupolev 154(923+)	2442
7. McDonnell Douglas DC-8(556)	2257
8. Airbus A300/A310(802+)	1768
9. Yakovlev 40/42(1316+)	1331
10. Tupolev 134(725)	1318

1.3 Η νέα φιλοσοφία σχεδιασμού

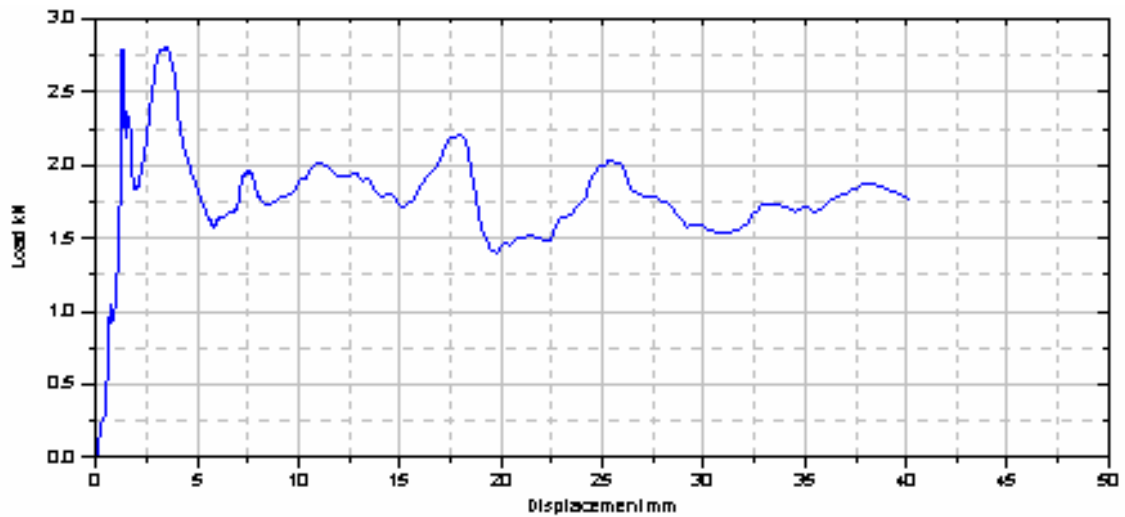
Από όλες τις άνωθεν παρατηρήσεις προκύπτει έντονη η ανάγκη για σχεδιασμό οχημάτων σε αυτοκινητοδρόμους θάλασσα αέρα και ράγες που **να ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο για τραυματισμούς θανάτους ή ζημιές** σε περίπτωση σύγκρουσης ή ατυχήματος.

Για το λόγο αυτό χρηματοδοτήθηκαν μεγάλα ερευνητικά προγράμματα που είχαν σκοπό τον σχεδιασμό συστημάτων που θα έδιδαν στα οχήματα μεγάλα περιθώρια παθητικής ασφάλειας. Οι έρευνες αυτές οδήγησαν στην **μέθοδο σχεδίασης του οχήματος με βάση τον διαχωρισμό του αμαξώματος σε δύο ζώνες**. Την **ζώνη παραμόρφωσης** η οποία με την σειρά της διαχωρίζεται στην εμπρόσθια και στην οπίσθια ζώνη, και στην **άκαμπτη ζώνη** που σχηματίζει έναν κλωβό ασφαλείας γύρω από τους επιβάτες, εξασφαλίζοντάς τους τον αναγκαίο ζωτικό χώρο για να επιβιώσουν σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης. Στο κάτωθεν σχέδιο διακρίνεται η σχηματική διάταξη αμαξώματος διαχωρισμένου σε δύο ζώνες



- Κατά την διάρκεια μιας μετωπικής σύγκρουσης διακρίνουμε τα εξής τρία στάδια,
1. αρχική επαφή με το εμπρός ή όπισθεν παραμορφώσιμο τμήμα του οχήματος,
 2. σταδιακή παραμόρφωση του αμαξώματος,
 3. πιθανή (μη επιθυμητή) παραμόρφωση της καμπίνας επιβατών.

Το επόμενο γράφημα φορτίου-μετατόπισης είναι χαρακτηριστικό και δείχνει τον τρόπο που αυξάνει το φορτίο συναρτήσει της συμπίεσης σε περίπτωση σύγκρουσης. **Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη αναπαριστά την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το αμάξιωμα.** Αυτή εξαρτάται από την μέγιστη παραμόρφωση και το φορτίο λυγισμού.



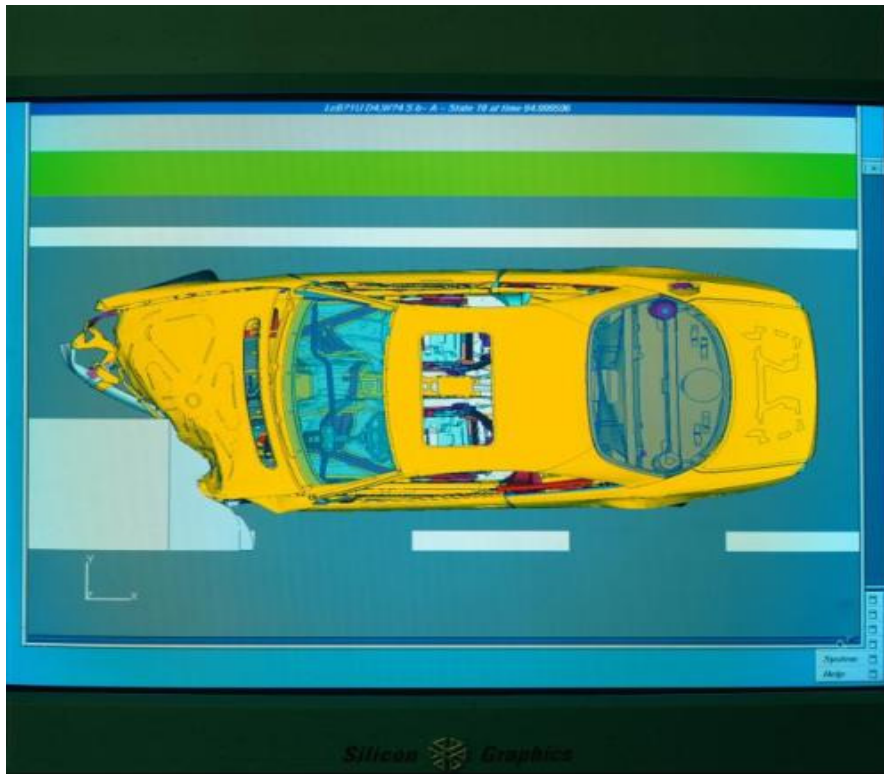
Εφόσον υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση του οχήματος, για να αυξήσουμε το ποσό της ενέργειας που απορροφάται, πρέπει να αυξήσουμε το φορτίο λυγισμού κάνοντας την δομή στιβαρότερη. **Αυτός είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Να μελετήσουμε τον τρόπο αύξησης της ποσότητας απορροφούμενης ενέργειας σε δομικά στοιχεία που σκοπό έχουν την προστασία έναντι συγκρούσεων.**

Η βελτίωση της κατασκευαστικής αντοχής σε σύγκρουση μπορεί να επιτευχθεί μέσα από ορισμένους περιορισμούς, όπως του καθορισμού ορίων στις παραμορφώσεις και στην μεταβίβαση φορτίων. Η φύση των τιθέμενων περιορισμών καθορίζει τους μηχανισμούς βελτίωσης της κατασκευαστικής αντοχής. Ένας βέλτιστος τρόπος, με τον οποίο μπορεί τούτο να επιτευχθεί, είναι μέσω αποκλειστικής χρήσης της παραμόρφωσης του φέροντος σκελετού, περιλαμβάνοντας **εφαρμογή ειδικών κατασκευών απορρόφησης ενέργειας, όπως στρατηγικά τοποθετημένα σωληνωτά στοιχεία**. Αξιίζει όμως εδώ να τονιστεί ότι η σύγκρουση ενός οχήματος είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, όπου η ταυτόχρονη κατασκευαστική απόκριση πολλών διαφορετικών αλληλεπιδρουσών μονάδων σπάνια μπορεί να περιγραφεί αποδεκτά από την συνήθη λεπτομερή ανάλυση που έχει θεμελιωθεί για μεμονωμένα δομικά στοιχεία. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κάθε ενός από τα δομικά στοιχεία διαφέρει και **εξαρτάται από τον τρόπο παραμόρφωσης και το υλικό κατασκευής τους**.

1.4 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας

1.4.1 Στοιχεία θεωρίας

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου, βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπιση), (βλέπε άνωθεν σχήμα). Αρχικά το αντικείμενο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης.



Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η **ειδική ενέργεια απορρόφησης (specific energy), Ws** . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του W , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει, m_c , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ .

1.4.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Το πρόβλημα της ασφάλειας των επιβατών, ή αλλιώς η "επιβιωσιμότητα" μετά από κάποιο ατύχημα έχει οδηγήσει τους ερευνητές και τις βιομηχανίες γενικότερα να εστιάσουν την προσοχή τους στην μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο περιβάλλοντας χώρος - ή ακόμα και ολόκληρη η κατασκευή - σε καταστροφική καταπόνηση, με πρωταρχικής σημασίας παράγοντα την ικανότητα προς απορρόφηση ενέργειας.

Η μελέτη της συμπεριφοράς αυτής σε μία κατασκευή, δίδει το μηχανισμό βάσει του οποίου ένα ποσοστό της ενέργειας που προσδίδεται, απορροφάται από την κατασκευή, ενώ ένα ποσοστό της μεταβιβάζεται στον επιβάτη. Για να έχει η κατασκευή την απαιτούμενη συμπεριφορά, η μελέτη της κατασκευής σε καταστροφική καταπόνηση πρέπει να γίνει στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι για την εκπόνηση της πιο πάνω μελέτης [1-1]. Η πρώτη είναι **με δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής**. Η δεύτερη είναι **με τη χρήση λεπτομερούς μαθηματικού μοντέλου** με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Το να ενσωματωθεί αυτή η αμιγώς θεωρητική ανάλυση στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, ιδίως όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για την κατασκευή και το υλικό της, είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη εργασία. Από την άλλη μεριά, η κατασκευή και εν συνεχεία η καταστροφική καταπόνηση των πρωτοτύπων, ανεβάζει πολύ το κόστος. Γι' αυτούς του λόγους είναι απαραίτητο να διαθέτει ο μηχανικός ένα σύστημα, με βάση το οποίο να μπορεί να μελετήσει εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτούμενες συνθήκες φόρτισης .

Η τεχνική της ανάλυσης για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας κατασκευής συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια

1. *Βάση δεδομένων των στοιχείων της κατασκευής:* Αναπτύσσεται το σκεπτικό για την αρχή του σχεδιασμού. Συλλέγονται στοιχεία για το υλικό που θα βρεθούν με δοκιμές ή με ανάλυση.
2. *Απόκτηση στοιχείων μέσω δοκιμής ή ανάλυσης.* Αν για ένα συγκεκριμένο στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων, το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του.

3. *Συνολική ανάλυση της κατάρρευσης.* Μόλις προσδιορισθούν όλες οι απαιτούμενες - μη γραμμικές - ιδιότητες για όλες τις συνιστώσες της κατασκευής (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας), εκτελείται στατική (quasi static) ανάλυση της κατασκευής, με σκοπό το προσδιορισμό της συνολικής ικανότητάς της να φέρει φορτίο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με βάση τις ακόλουθες προϋποθέσεις :
(α) Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα, (β) Η διεύθυνση και φορά των φορτίων που αναπτύσσονται στην καταρρέουσα κατασκευή κατά την δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν.

4. *Βελτιστοποίηση της κατασκευής.* Μαζί με την ικανότητα της κατασκευής να φέρει φορτία, συνυπολογίζεται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου της. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν το σχεδιαστή να απομονώσει τα στοιχεία που δεν είναι "συμβατά" με την κατασκευή. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι αν και κατά πόσο κάθε στοιχείο μπορεί να μεταβιβάσει τα επιβαλλόμενα φορτία μέσω της κατασκευής και ταυτόχρονα να απορροφήσει ένα ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας.

5. *Βελτιώσεις στην αντοχή και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου.* Μόλις προσδιοριστούν τα "μη συμβατά" στοιχεία, μπορεί να αποφασιστεί το μέγεθος και το είδος της βελτίωσης.

6. *Υπολογισμός σε κάμψη.* Έχοντας υπολογίσει τις απαιτούμενες ιδιότητες (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διαστάσεις του απλοποιημένου στοιχείου που, καταπονούμενο σε θλίψη ή κάμψη, θα φτάσει και θα διατηρήσει το απαιτούμενο εσωτερικό φορτίο.

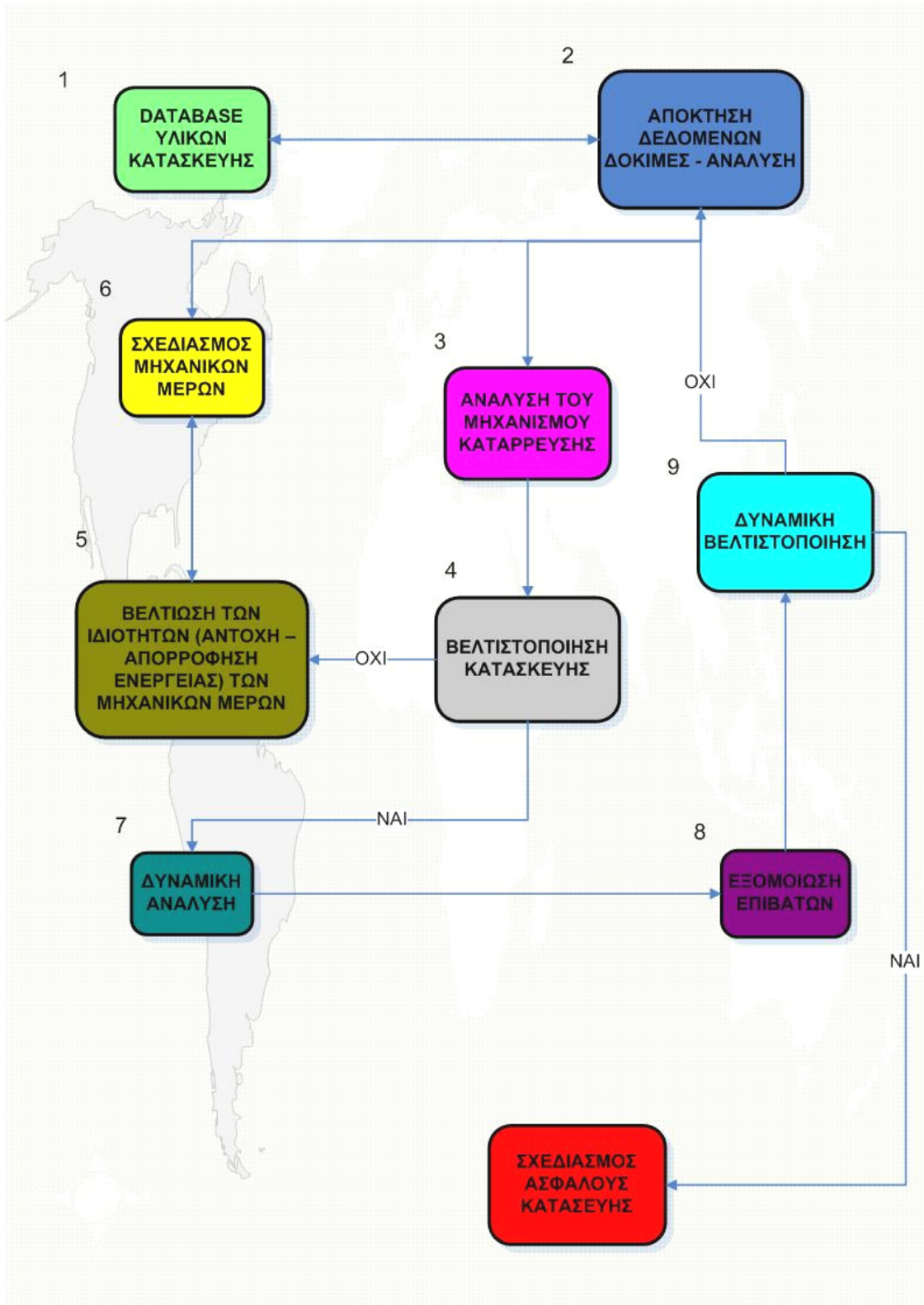
7. *Σχεδιασμός του στοιχείου.* Παρά το γεγονός ότι το απλοποιημένο στοιχείο που υπολογίστηκε αρκεί για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, αποτελεί μόνο ένα οδηγό για τον υπολογισμό των τελικών διαστάσεων της κατασκευής. Εντούτοις, λόγω ποικίλων άλλων απαιτήσεων, ο υπολογισμός μετατρέπεται σε μια σύνθετη διεργασία, με αφετηρία τις αρχικά υπολογισμένες απλοποιημένες μορφές.

8. *Δυναμική ανάλυση.* Η ανάλυση αυτή γίνεται με βάση δύο κριτήρια. Από τη μία, αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα κρούσης δεν είναι πολύ μεγάλη (π.χ. ανατροπή ή πλευρική πρόσκρουση οχήματος), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη του φορτίου που παρέχεται από τα προηγούμενα στάδια.

9. *Προσομοίωση επιβάτη.* Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 8, όπου η ταχύτητα και η υπό κατάρρευση κατασκευή είναι πια γνωστές, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή και του περιεχομένου της κατασκευής γενικότερα, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για όλα τα επιβατικά οχήματα.

10. *Δυναμική βελτιστοποίηση.* Αν στο στάδιο 9 προκύψουν μη παραδεκτά αποτελέσματα όσον αφορά την ασφάλεια του επιβάτη, χρησιμοποιείται και πάλι όλο το σύστημα ανάλυσης μέχρι την επίτευξη παραδεκτών αποτελεσμάτων, ειδ' άλλως ο σχεδιασμός της ασφαλούς κατασκευής έχει ολοκληρωθεί.

Στο κάτωθεν διάγραμμα παριστάνονται τα άνωθεν στάδια σχεδιασμού της κατασκευής για εποπτική κατανόηση της διαδικασίας:



1.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[1-1] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, '*Crashworthiness of composite thin-walled structural components*', Technomic Publishing Co., Athens (1998)

[1-2] G. Lu, T.X. Yu, '*Energy Absorption of Structures and Materials*', Woodhead Publishing, (2003)

[1-3] Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Της Ελλάδος, *Πειραιώς 46 και Επονητών*, www.statistics.gr,

[1-4] www.ydt.gr – Υπουργείο Δημόσιας Τάξης

[1-5] <http://aviation-safety.net>

ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ: ΠΗΓΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

2.1 Γενικά

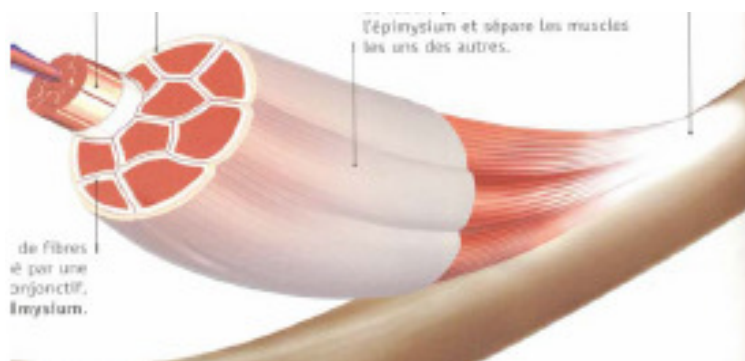
2.1.1 Ορισμός

Ως σύνθετα ορίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία **συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους**, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές 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, [2-1] είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, ακολουθείται ο εξής κανόνας: *Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (> 10 %).*

Επίσης στη βιβλιογραφία συναντάται και ο εξής ορισμός (Agarwal–1990): *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Όπως διαπιστώνουμε ο γενικός ορισμός του σύνθετου υλικού σαν ο συνδυασμός δύο ή και περισσότερων μερών



για τη δημιουργία ενός συστήματος με "βελτιωμένες" ιδιότητες, είναι μάλλον υπερβολικά ευρύς. Για παράδειγμα, οι μυϊκοί ιστοί αποτελούνται από ίνες κολλαγόνου εμβαπτισμένες σε μήτρα με μειωμένη δυσκαμψία. Οι ίνες είναι ευθυγραμμισμένες έτσι ώστε να παρέχουν τη μέγιστη δυσκαμψία στην διεύθυνση του φορτίου, ενώ παράλληλα μπορούν να ολισθαίνουν η μία δίπλα στην άλλη, ώστε ο μυϊκός ιστός να είναι ελκύσιμος. Η ιδέα του σύνθετου υλικού έχει επίσης εφαρμοστεί και σε μεγαλύτερη μακροσκοπική κλίμακα, όπως στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Περισσότερες εφαρμογές των σύνθετων υλικών θα αναφερθούν και θα αναλυθούν πιο κάτω.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους **παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών** για μεγάλο πλήθος εφαρμογών.

Μερικά **μειονεκτήματα** των σύνθετων υλικών, όπως: τα υψηλά επίπεδα ερπυσμού, η μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, η ιδιαίτερη και πολλές φορές ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος (θαλάσσιο περιβάλλον, υψηλές θερμοκρασίες, χημικό περιβάλλον, κλπ.) καθώς και το αρκετά υψηλό αρχικό τους κόστος, βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά μέσω της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης στην παραγωγή νέων και καλλίτερων ινών, ρητινών και εξέλιξης των μεθόδων παραγωγής.

2.1.2 Ιστορική εξέλιξη των σύνθετων υλικών

Σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο εδώ και χιλιάδες χρόνια. Υλικά ευρισκόμενα στη φύση, όπως το ξύλο, το κόκαλο, ο πηλός, η πέτρα, είχαν αρχικά ευρύτατη χρήση. Σύντομα ο άνθρωπος έμαθε να βελτιώνει τις ιδιότητες τους με το να τα

ενισχύει με πρόσθετα συστατικά. Παράδειγμα αποτελεί η μείωση των τάσεων συστολής που αναπτύσσονται κατά την ξήρανση του πηλού με την ανάμειξη άχυρου.

Οι Αιγύπτιοι δε, αρκετά νωρίς, αντιλήφθηκαν ότι οι πλάκες από πολυστρωματικές βέργες ξύλου ήταν πολύ ανθεκτικότερες στη στρέβλωση από απορρόφηση υγρασίας από το φυσικό ξύλο αυτό κάθε αυτό. Γύρω στο 1000 π.χ. στη Μεσοποταμία, εφαρμόστηκε το βερνίκωμα των τούβλων και πλακιδίων για περιορισμό της επιφανειακής φθοράς. Η ανάμειξη γύψου με ζωικό τρίχωμα ήταν μία πολύ πρακτική μέθοδος ενίσχυσης εύθραυστων υλικών κατασκευής, σε αναπτυσσόμενους πολιτισμούς. Η χρήση της σιδηρόβεργας για προεντεταμένο σκυρόδεμα της σύγχρονης εποχής δεν είναι παρά η μετεξέλιξη αυτής της τεχνικής.



Το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού εμφανίστηκε γύρω στο 1920. Αποτελείται από ένα μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη και έγινε γνωστό με το όνομα βακελίτης, από το Βέλγο επιστήμονα Leo Baekland. Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα από τον άνθρωπο από αρχαιοτάτων χρόνων.

Η ανάπτυξη των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών **κατά την διάρκεια των τελευταίων 30 ετών [2-2]** υπήρξε ραγδαία και συνδυάστηκε με την προηγηθείσα ανάπτυξη των υψηλής αντοχής ινών γυαλιού και των υψηλής δυσκαμψίας ινών βορίου (1960) και την έντονη τάση της αεροδιαστημικής βιομηχανίας για μεγαλύτερη απόδοση με παράλληλη μείωση βάρους αεροσκαφών και διαστημοπλοίων.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά, αρχικά σε μικρές ποσότητες, οι ίνες άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες τελευταία αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες

ενισχύσεις στις **αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές**. Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα ελαστικά αυτοκινήτων, καθώς και σε αρκετές αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές.

Η **ειδική αντοχή** (λόγος αντοχής προς πυκνότητα) και η **ειδική δυσκαμψία** (λόγος δυσκαμψίας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών βαίνουν συνεχώς αυξανόμενες τα τελευταία 30 χρόνια. Τα σύνθετα υλικά καλύπτουν μεγάλο μέρος των εφαρμογών των νέων τεχνολογιών αιχμής στις κατασκευές και έχουν μεταβάλει σημαντικά τις ακολουθούμενες **διαδικασίες σχεδίασης, παραγωγής, ελέγχου και συντήρησης**.

2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

2.2.1 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών κατά τύπο

Μια γενική διαίρεση των συνθέτων υλικών, ευρύτερα αποδεκτή στην βιβλιογραφία είναι η ακόλουθη:

➤ **Ινώδη σύνθετα (Fibrous composites)** αποτελούμενα από ίνες εμποτισμένες σε υλικό μήτρας. Οι ίνες αποτελούν τον οπλισμό (ενίσχυση) του υλικού μήτρας και μπορεί να είναι μεγάλου ή μικρού μήκους σε σχέση με τη διάμετρό τους. Φυσικά, οι μεγάλου μήκους ίνες μπορούν να ευθυγραμμιστούν πολύ ευκολότερα εντός του υλικού μήτρας, παρά οι μικρού μήκους.

Οι ενισχυτικές ίνες μπορεί να είναι μεταλλικές (αλουμινίου, τιτάνιου, χάλυβα), κεραμικές (γυαλιού, πυριτικές, ανθρακικές), ή και πολυμερικές (Kevlar, πολυδιακετυλενίου κ.α.). Κάθε υλικό σε ινώδη μορφή παρουσιάζει υψηλότερες τιμές αντοχής και δυσκαμψίας παρά σε οποιαδήποτε άλλη μορφή. Τούτο οφείλεται στο γεγονός της **τελειότερης κρυσταλλικής δομής που εμφανίζεται σε μία ίνα**. Η μείωση του μεγέθους συντελεί στατιστικά στην ελαχιστοποίηση των κρυσταλλικών ατελειών και κατά συνέπεια στην βελτίωση των ιδιοτήτων του υλικού.

Το υλικό της μήτρας μπορεί να είναι μεταλλικό, κεραμικό ή οργανικό. Πρόσφατα, τεχνικές ανθρακοποίησης ή γραφίτοποίησης πολυμερών μητρών

παράγουν σύνθετα μήτρας και οπλισμού από άνθρακα, με τη μοναδική ιδιότητα να αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας με αύξηση της θερμοκρασίας. Μοναδικός εχθρός τους το οξυγόνο και η χημική του δραστηριότητα, όταν το υλικό θερμαίνεται σε ατμόσφαιρα οξυγόνου.

- **Στρωματικά σύνθετα (Laminated composites)** αποτελούμενα από στρώματα διαφόρων υλικών. Δημιουργούνται με την εναπόθεση και σύνδεση πλακών ή στρωμάτων δύο ή περισσότερων υλικών. Οι ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν με την στρωματοποίηση είναι η αντοχή, η δυσκαμψία, η αντίσταση σε διάβρωση και φθορά, η θερμομόνωση, η ηχομόνωση κ.α. Όμως τα πολύστρωτα υλικά που ενδιαφέρουν κατεξοχήν την προηγμένη τεχνολογία κατασκευαστικών και αεροπορικών υλικών είναι τα πολύστρωτα και ινώδη μαζί σύνθετα υλικά. Στρώματα από υλικό ενισχυμένο μονοδιάστατα με ίνες, εναποτίθενται το ένα επί του άλλου, έτσι ώστε ο προσανατολισμός των ινών του κάθε στρώματος να **διαφέρει και να προσδίδει ανόμοια αντοχή και δυσκαμψία** σε διαφορετικές διευθύνσεις του τελικού προϊόντος, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σχεδιαστή.
- **Κοκκώδη σύνθετα (Particulate composites)** αποτελούμενα από σωματίδια διασκορπισμένα σε υλικό μήτρας.

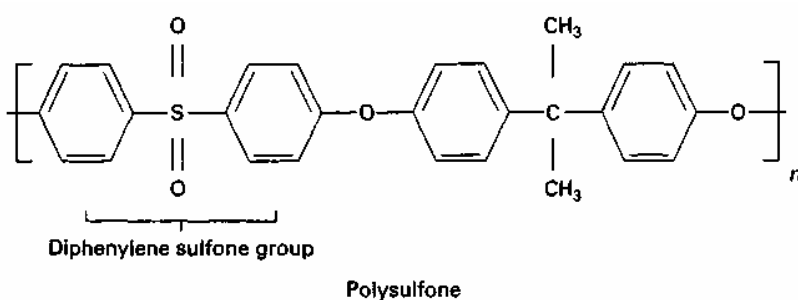
2.2.2 Σημαντικότερες κατηγορίες σύνθετων κατά υλικό

Τα σημαντικότερα σύνθετα υλικά που υπάρχουν σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν στα σύνθετα **πολυμερών μητρών (PMCs)**, τα σύνθετα **μεταλλικών μητρών (MMCs)**, τα σύνθετα **κεραμικών μητρών (CMCs)**, τα σύνθετα **άνθρακα-άνθρακα (CCCs)**, τα **μεσομεταλλικά** σύνθετα (IMCs), και τα **υβριδικά** σύνθετα.

i) Σύνθετα PMC (polymer matrix composites)

Τα PMC είναι η πλέον αναπτυγμένη κατηγορία σύνθετων υλικών δεδομένου ότι έχουν διαδεδομένη εφαρμογή, μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες, σύνθετες μορφές, και χρησιμοποιούνται σε ποικίλες αεροδιαστημικές και εμπορικές εφαρμογές. Κατασκευάζονται από συστατικά όπως οι **ίνες άνθρακα ή βορίου που δεσμεύονται μαζί με μια οργανική πολυμερή μήτρα**. Αυτά τα ενισχυμένα πλαστικά είναι ένας συνδυασμός υψηλής απόδοσης ινών και μητρών. Οι ίνες παρέχουν μεγάλο συντελεστή ελαστικότητας, ενώ η μήτρα διαδίδει το φορτίο προσφέροντας αντίσταση στη διάβρωση.

Η σύνθετη δύναμη είναι σχεδόν ευθέως ανάλογη προς τη βασική δύναμη ινών και μπορεί να βελτιωθεί με αντάλλαγμα την ακαμψία του υλικού. Οι οργανικές ίνες υψηλού συντελεστή ελαστικότητας κατασκευάζονται με απλά πολυμερή σώματα με την αναδιάταξη των μορίων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, η οποία οδηγεί σε ευθύγραμμη μοριακή δομή. Η βελτιστοποίηση της ακαμψίας και της αντοχής των ινών παραμένουν ένας θεμελιώδης στόχος της κατασκευής. Επιπλέον, λόγω των διαφορών στην ευελιξία μεταξύ των ινών και των άμορφων ζωνών της μήτρας, διαμητικές πιέσεις μπορούν να οδηγήσουν να οδηγήσουν τελικώς σε ρωγμή κόπωσης. Αρκετά δημοφιλής θερμοπλαστική πολυμερική μήτρα είναι η **πολυσουλφόνη (polysulfone)**, της οποίας η μοριακή επαναλαμβανόμενη δομή εικονίζεται πιο κάτω:



Ακόμη μια κατηγορία ευρέως χρησιμοποιούμενων μητρών είναι οι ρητίνες με χαμηλό βάρος, που σχηματίζουν γενικά τριμελής δακτυλίους με ένα άτομο οξυγόνου και δυο άτομα άνθρακα (βλ. παραπλεύρως):



ii) *Σύνθετα MMC (metal matrix composites)*

Τα σύνθετα αυτά αποτελούνται από κράματα μετάλλων που ενισχύονται με λεπτές, μικρές σε μήκος ίνες, τα λεγόμενα μουστάκια (whiskers-μια έκδοση των κοντών ινών υπό μορφή ενιαίων κρυστάλλων), ή μόρια (λεπτά μόρια, σε αντίθεση με τις ίνες). Λόγω της χρήσης μετάλλων τους ως υλικά μητρών, έχουν **υψηλότερη αντίσταση στη θερμότητα** από τα PMCs αλλά γενικά είναι βαρύτερα υλικά. Δεν είναι τόσο ευρέως χρησιμοποιούμενα όσο τα PMCs, αλλά τελευταία βρίσκουν αυξανόμενη εφαρμογή σε πολλές περιοχές. Η περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνικών κατασκευής και επεξεργασίας είναι ουσιαστική για την επιτάχυνση της χρήσης των MMCs και την μείωση των δαπανών κατασκευής προϊόντων από αυτά τα υλικά.

Η έρευνα συνεχίζεται στο πεδίο των ενισχυμένων MMCs λόγω της **ουσιαστικής υπεροχής των στην αντοχή και την ακαμψία τους** σε σύγκριση με τα μη ενισχυμένα κράματα μετάλλων. Επίσης, τα πλεονεκτήματα των μετάλλων ως μήτρες, έναντι των πολυμερών μητρών, είναι το υψηλό όριο θραύσης και το υψηλό μέτρο διάτμησης, το υψηλό σημείο τήξης, ο μικρός συντελεστής διαστολής, η αντίσταση στην υγρασία, και η διαστατική σταθερότητα.

Οι προσπάθειες κατευθύνονται προς τα σύνθετα ελαφριά κράματα ικανά για χρήση σε χαμηλές και μέσες θερμοκρασίες όπως για τις διαστημικές δομές και για τις υψηλής θερμοκρασίας εφαρμογές όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι άτρακτοι αεροσκαφών. Η ακραία χαμηλή πυκνότητα του γραφίτη που χρησιμοποιείται ως ενίσχυση, μαζί με τον πολύ υψηλό συντελεστή ελαστικότητας, το καθιστά ένα ιδιαίτερα επιθυμητό υλικό.

Εντούτοις, ένα εμπόδιο είναι ο **αδύναμος ενδιάμεσος δεσμός μεταξύ του γραφίτη και των μετάλλων** όπως το αργίλιο και το μαγνήσιο. Ο ενδιάμεσος δεσμός μπορεί να ενισχυθεί με τη χρησιμοποίηση ενός επιστρώματος καρβιδίου μετάλλων. Η ανάπτυξη κατευθυντικά σταθεροποιημένων κραμάτων έχει αυξήσει την ικανότητα

χρήσης σε υψηλές θερμοκρασίες με την ευθυγράμμιση των ορίων των δεσμών μακριά από την κύρια κατεύθυνση των τάσεων.

iii) Σύνθετα CMC (ceramic matrix composites)

Τα μονολιθικά κεραμικά υλικά έχουν από τη φύση τους αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες αλλά και βασικούς περιορισμούς στις δομικές εφαρμογές εξ αιτίας της **ψαθυρότητας και της ευθραυστότητάς** τους. Η ενσωμάτωση μιας ενίσχυσης, παραδείγματος χάριν, μιας κεραμικής ενίσχυσης ινών, στην κεραμική μήτρα μπορεί να βελτιώσει την αντοχή του υλικού με την καθυστέρηση της εμφάνισης ρωγμών από τις διεπιφάνειες ινών-μητρών.

Τα CMCs είναι μια κατηγορία δομικών υλικών με ενισχύσεις όπως οι ίνες SiC που ενσωματώνονται σε μια κεραμική μήτρα όπως οι Al_2O_3 , Si_3N_4 ή SiC. Οι ενισχύσεις δύνανται να είναι συνεχείς ίνες, τεμαχισμένες ίνες, μικρά ασυνεχή τριχίδια, ή μόρια. Έχουν δυνατότητα για εφαρμογή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες επάνω από τους $1649^\circ C$.

Η αναφερθείσα νωρίτερα ευθραυστότητα προκύπτει επειδή τα κεραμικά υλικά δεν μπορούν να παραμορφωθούν στα επίπεδα διάτμησης όπως κάνουν τα μέταλλα για να ανακουφίσουν την πίεση. Η μέση ανθεκτικότητα θραύσης, η σημαντικότερη αδυναμία των κεραμικών, διπλασιάζεται με τα CMCs. Έχουν επιτρέψει στους κατασκευαστές να προωθήσουν μια τεχνολογία για την κατασκευή δομών ικανές για **εφαρμογή σε ακραία περιβάλλοντα**. Τα CMCs διαθέτουν επίσης ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπερκράματα [2-3] όπως τη χαμηλότερη μέχρι και 70% πυκνότητα και την υψηλότερη έως και $500^\circ C$ θερμοκρασία εφαρμογής των.

Τα υλικά συνεχών-ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχύσεις για τα CMCs και τα MMCs. Εντούτοις, καμία κεραμική ενίσχυση δεν αποδίδει αρκετά παραπάνω από τους $1371^\circ C$, καθώς η θερμική σταθερότητα των τριχιδίων και της ινώδους ενίσχυσης περιορίζει τις δυνατότητές των. Πολλά **συστατικά στις στροβιλομηχανές και τα υπερηχητικά σκάφη λειτουργούν επάνω από τους $1649^\circ C$!**

Μήτρες όπως οι κεραμικές, οι πυρίμαχες μεταλλικές, και οι των μεσομεταλλικών υλικών είναι διαθέσιμες για λειτουργία σε θερμοκρασίες επάνω από τους 1649°C, αλλά **νέες ενισχύσεις απαιτούνται**. Ένα σημαντικό πρόβλημα που απασχολεί την αεροδιαστημική βιομηχανία είναι η έλλειψη ενισχύσεων για υψηλές θερμοκρασίες που να μην οξειδώνονται.

iv) Σύνθετα CCC (carbon-carbon composites)

Τα CCCs αποτελούνται από ενισχύσεις ινών άνθρακα που ενσωματώνονται σε μια ανθρακούχο μήτρα. Η προκαταρκτική επεξεργασία είναι παρόμοια με αυτήν για τα PMCs, αλλά εν συνεχεία η οργανική μήτρα **θερμαίνεται μέχρι το σημείο όπου μετατρέπεται σε άνθρακα**. Η σύνδεση άνθρακα-άνθρακα είναι ένα ανώτερο δομικό υλικό για εφαρμογές όπου απαιτείται αντίσταση στις πολύ υψηλές θερμοκρασίες και το θερμικό κλονισμό.

Κανένα άλλο υλικό δεν έχει τις υψηλότερη ειδική αντοχή (αντοχή προς πυκνότητα) σε θερμοκρασίες πάνω από τους 1371°C. Συστήματα προστασίας οξείδωσης, μέθοδοι φθηνής κατασκευής, και μεγαλύτερη κλίμακα των δομών C/C απαιτείται για την πιο διαδεδομένη χρήση στις βιομηχανικές εφαρμογές. Στα 30 και πλέον έτη όπου αυτή η κατηγορία υλικών βρίσκεται υπό ανάπτυξη, έχει βρει πάρα πολλές εφαρμογές υψηλής κυρίως τεχνολογίας και αναμένεται να βρει αρκετές ακόμα.

Τα CCC υλικά δύνανται να ταξινομηθούν γενικά σε δύο κατηγορίες χρήσης: μη - δομικά σύνθετα και δομικά σύνθετα (βλ. παράπλευρο σχήμα). Η ωριμότητα αυτών των δύο κατηγοριών είναι

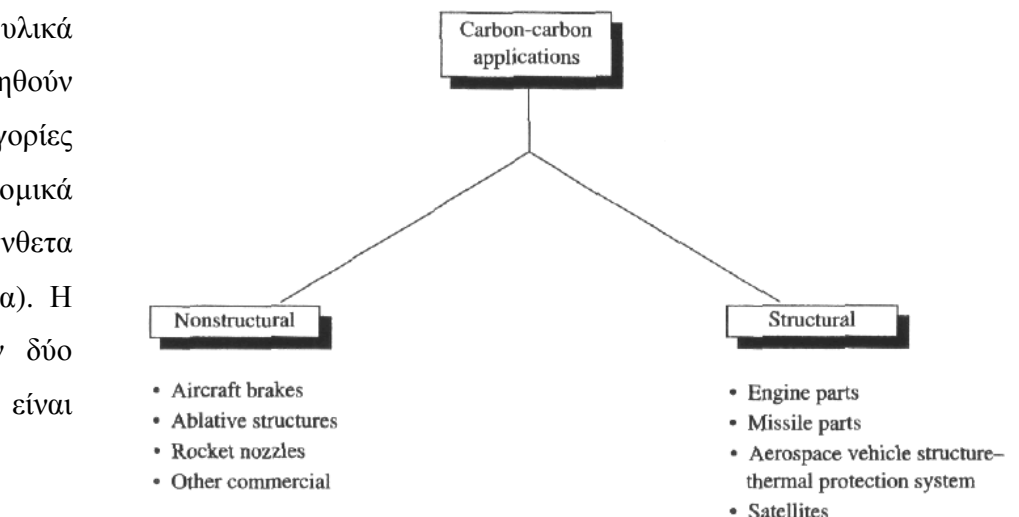


Figure 1.3. Types of CCC applications.

διαφορετική. Η κατηγορία των **μη-δομικών υλικών** είναι στην παραγωγή για εμπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές και είναι σχετικά ώριμη. Η κατηγορία **δομικών υλικών**, που έχουν πολύ υψηλές σε κόστος εφαρμογές, δεν είναι ακόμη στην παραγωγή και απαιτεί ιδιαίτερη ανάπτυξη. Οι κύριοι λόγοι για την ιδιαίτερη διαφορά στην ανάπτυξη των δύο κατηγοριών σύνθετων C/C είναι οι σημαντικά υψηλότερες απαιτήσεις που περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, τη διάρκεια ζωής, και την ικανότητα των δομικών εφαρμογών στο να φέρουν φορτία.

v) Σύνθετα IMC (intermetallic composites)

Τα IMC υλικά είναι αυτήν την περίοδο υψηλού ενδιαφέροντος για τη χρήση τους στις υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής απόδοσης εφαρμογές στις στροβιλομηχανές για πολιτικές και στρατιωτικές χρήσεις.

Η χαμηλή πυκνότητα των μεσομεταλλικών ενώσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος και **εάν συνδυαστεί με υψηλής αντοχής και χαμηλής πυκνότητας ίνες**, η χαμηλή αντοχή των μεσομεταλλικών μητρών δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα. Κατά συνέπεια, η μήτρα μπορεί να βελτιστοποιηθεί ως προς άλλες ιδιότητες, δηλαδή την ολκιμότητα, την αντίσταση οξειδωσης, και την πυκνότητα. Ένα παράδειγμα των πειραματικών αποτελεσμάτων αυτής της έννοιας εμφανίζεται [2-4] στα αποτελέσματα των πειραμάτων του Brindley. Η εκτατή συμπεριφορά των συνθέτων αποδείχθηκε ότι ακολουθεί έναν προβλεφθέντα κανόνα της συμπεριφοράς μιγμάτων. Ακόμη όσων αφορά στη σύγκριση σε συνάρτηση με την πυκνότητα του υλικού, το ενισχυμένο με SiC αλουμίνιο αποδείχθηκε για να έχει τις καλύτερες ιδιότητες εφελκυσμού έναντι των επεξεργασμένων κραμάτων βάσεων νικελίου και βάσεων κοβαλτίου.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η εξάπλωση των IMCs είναι η **συμβατότητα μεταξύ των ινών και της μήτρας από χημικής άποψης**. Τα προβλήματα που συνδέονται με IMCs παρέχουν προκλήσεις αλλά και ευκαιρίες για τα υλικά και τους ερευνητές δομών. Για να υπερνικηθούν τα προβλήματα συμβατότητας

των ινών και των μήτρων στα IMCs, έχουν εκπονηθεί πολλές μελέτες για τους τύπους χημικής αντίδρασης μεταξύ των υλικών ώστε να βρεθεί μια μεθοδολογία [2-5] για να προσδιορίζονται οι πλέον κατάλληλες ίνες για τις μεσομεταλλικές μήτρες.

vi) Τα υβριδικά σύνθετα

Τα υβριδικά σύνθετα υλικά **αντιπροσωπεύουν το νεώτερο τύπο των διάφορων σύνθετων υλικών που βρίσκονται υπό ανάπτυξη.** Η υβριδική σύνθετη κατηγορία καλύπτει και την υβριδοποίηση ενός σύνθετου υλικού με άλλα υλικά (είτε άλλα σύνθετα είτε μη ενισχυμένα υλικά βάσεων) αλλά και τα σύνθετα που εμπεριέχουν πολλαπλές ενισχύσεις. Περαιτέρω, αυτή η κατηγορία καλύπτει τη χρήση πολλαπλών υλικών (τουλάχιστον ένα εκ των οποίων είναι σύνθετο) στις δομικές εφαρμογές και δίνει έμφαση στις χρήσεις και τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών.

Τα υβριδικά σύνθετα μπορούν να διαιρεθούν σε πέντε σημαντικές υποκατηγορίες: (1) υβριδικά σύνθετα υλικά (2) επιλεκτικές ενισχύσεις, (3) διαχείριση θερμότητας, (4) έξυπνες επιφάνειες και δομές, και (5) υπερελαφρά υλικά

(1) **Υβριδικά σύνθετα υλικά (HCMs):** Το HCM ορίζεται ως ένα σύστημα σύνθετου υλικού που προέρχεται από την ενσωμάτωση ανόμοιων υλικών τουλάχιστον ένα από τα οποία είναι σύνθετο υλικό. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός υβριδικού σύνθετου υλικού είναι ένα ενισχυμένο πολυμερές σύνθετο που συνδυάζεται με ένα συμβατικό μη ενισχυμένο ομοιογενές μέταλλο. Το υβριδικό σύνθετο υλικό συνδυάζει τις επιθυμητές ιδιότητες δύο ή περισσότερων τύπων υλικών σε ένα ενιαίο υλικό σύστημα που επιδεικνύει τα ευεργετικά χαρακτηριστικά των χωριστών συστατικών.

Ένα υπάρχον παράδειγμα ενός υβριδικού σύνθετου είναι το ενισχυμένο με αραμιδικές ίνες φύλλο αργιλίου (ARALL). Το

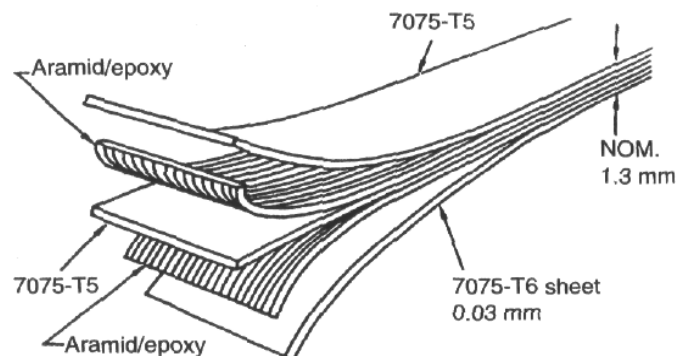


Figure 1.4. ARALL is an example of a hybrid composite material in production.

υβριδικό σύνθετο ARALL είναι **βασικό σε αρκετά δευτεροβάθμια δομικά στοιχεία των υποηχητικών αεροσκαφών**. Άλλα παραδείγματα περιλαμβάνουν τα αλληλοδιαπερατά πολυμερή δίκτυα (IPNs), τα οποία είναι υβριδικές μήτρες ρητίνης. Ακόμα μια υβριδική έννοια σύνθετου υλικού περιλαμβάνει πολλαπλούς τύπους ενίσχυσης μέσα σε μια κοινή μήτρα όπως τεμαχισμένες και συνεχείς ίνες μέσα σε μια πολυμερή μήτρα.

Η τεχνολογία των HCMs είναι στα σπάργαλα σε σύγκριση με αυτή των άλλων τύπων σύνθετων υλικών. Μόνο τα ARALL και IPNs έχουν χρησιμοποιηθεί την προηγούμενη δεκαετία, ενώ οι άλλοι τύποι υβριδικών σύνθετων υλικών είναι αληθινά εμβρυϊκοί. Από σχεδόν όλες τις πτυχές της έρευνας, αυτά τα υβριδικά σύνθετα υλικά προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες για τις δομικές εφαρμογές, εντούτοις, η διαδεδομένη χρήση τους απαιτεί μια δεκαετία ή και περισσότερο στο μέλλον.

(2) **Επιλεκτικές ενισχύσεις:** Η επιλεκτική ενίσχυση είναι η κατηγορία σύνθετων υβριδικών υλικών που παρέχουν ενίσχυση σε ένα δομικό συστατικό σε μια συγκεκριμένη περιοχή με τη βοήθεια της προσθήκης ενός σύνθετου υλικού. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση της υπερπλαστικού δεσμού που σχηματίζεται με διάχυση (SPF/DB) ως μέσο ενσωμάτωσης ενός ενισχυμένου με τιτάνιο MMC σε μια δομή τιτανίου. Προσοχή πρέπει να δοθεί στη σχεδίαση που απαιτείται για την τοποθέτηση του υλικού ενίσχυσης μέσα στη δομή.

Η προσέγγιση της εκλεκτικής ενίσχυσης επιτρέπει στον αεροδιαστημικό σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει τα δαπανηρότερα υλικά μόνο όπου απαιτούνται, και τα λιγότερο ακριβά υλικά στις περιοχές όπου μπορούν να εκτελέσουν την εργασία. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί στην βελτιστοποίηση και του κόστους, αλλά και της απόδοσης.

(3) **Θερμική διαχείριση:** Στον τομέα της θερμικής διαχείρισης, τα σύνθετα υλικά και τα υβριδικά σύνθετα υλικά μπορούν να κατασκευαστούν καινοτομικά για να περιορίσουν αποτελεσματικά τη μέγιστη θερμοκρασία του δομικού υλικού και γρήγορα να μεταβιβάσουν τη θερμότητα από τις καυτές στις πιο κρύες περιοχές. Οι από γραφίτη

ίνες ενεργούν ως αγωγοί θερμότητας και, δύνανται να αφαιρέσουν τη θερμότητα με τη διαβίβασή της κατά μήκος των. Αντίθετα, τα υλικά μητρών μπορούν να λειτουργήσουν ως θερμοκοιτίδες. Αυτό επιτρέπει στους σχεδιαστές να αναπτύξουν μια δομή που είναι θερμοκοιτίδα σε μερικές κατευθύνσεις αλλά θερμοαγωγός σε άλλες.

Με το συνδυασμό των ινών γραφίτη και γυαλιού σε μια φαινολική ρητίνη, ένα υβρίδιο αναπτύσσεται που παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε φλόγα παραμένοντας εύκολα κατεργάσιμο. Τα υβρίδια όπως αυτό είναι βασικά για το εσωτερικό αεροσκαφών για να φέρουν φορτία, να μειώσουν το βάρος, και να παρέχουν ασφάλεια για τους επιβάτες σε περίπτωση ατυχήματος. Ο συνδυασμός ινών γραφίτη και γυαλιού μειώνει το βάρος και το κόστος, ενώ η φαινολική ρητίνη αυξάνει την αντίσταση στις φλόγες και μειώνει τον καπνό σε περίπτωση πυρκαγιάς.

(4) **Έξυπνες επιφάνειες και δομές:** Οι έξυπνες επιδερμίδες (skins) και οι έξυπνες δομές συσχετίζονται δεδομένου ότι κάθε μια περιλαμβάνει ενσωματωμένα, μη δομικά στοιχεία. Μια έξυπνη δομή περιέχει αισθητήρες που ελέγχουν την κατάσταση της ίδιας της δομής, ώστε να ανιχνεύσουν τις δομικές ή θερμοκρασιακές παραμορφώσεις ή τις ρωγμές. Η έξυπνη τεχνολογία δομών, όπως αυτή των έξυπνων επιδερμίδων-κελυφών, εξελίσσεται ακόμα. Η παρούσα τεχνολογία επιδιώκει την ενσωμάτωση αισθητήρων στα δομικά στοιχεία στο στάδιο της υλικής επεξεργασίας.

(5) **Υπερελαφρά υλικά:** Η κατηγορία υπερελαφρών υλικών (ultralightweight) περιλαμβάνει την αναδυόμενη οικογένεια των υγρών διατεταγμένων κρυσταλλικά πολυμερών σωμάτων, τα οποία εξ' αιτίας της μοριακής δομής τους επιδεικνύουν εξαιρετικά υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία. Αυτά τα ιδιαίτερα κατευθυντικά υλικά είναι παρόμοια με τα σύνθετα υλικά δεδομένου ότι οι μακριές, διατεταγμένες μοριακές αλυσίδες μέσα στο πολυμερές σώμα ενεργούν παρόμοια με την ενίσχυση των ινών σε ένα σύνθετο υλικό.

Αυτά τα πολυμερή, υπό μορφή λεπτών ταινιών, βρίσκουν χρήση σαν **επιφάνειες διατμητικών φορτίων για τα αεροσκάφη**. Αυτές οι λεπτές ταινίες μπορούν επίσης να κατεργαστούν σε κυψελωτές κατασκευές (honeycombs) για τις ελαφριές δομικές

εφαρμογές. Έχει υπολογιστεί ότι ένας ιστός διάτμησης φτιαγμένος από PbZt ζυγίζει το ένα όγδοο του βάρους ενός ιστού αργιλίου και το ένα έκτο του βάρους ενός ιστού από εποξικό γραφίτη.

2.3 Μηχανική των σύνθετων υλικών

2.3.1 Μικρομηχανική σύνθετων υλικών

Οι τελικές ιδιότητες ενός ινώδους σύνθετου υλικού εξαρτώνται από τα υλικά αλλά και από γεωμετρικές παραμέτρους [2-6] όπως διάμετρος, μήκος, περιεκτικότητα σε όγκο των ινών V_f ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού μήτρας.

i) Συνεχείς ίνες σε μονοδιάστατη στρώση

Σε μία μονοδιάστατη στρώση οι ίνες θεωρούνται διατεταγμένες παράλληλα η μία δίπλα στην άλλη σχηματίζοντας τετραγωνικό ή εξαγωνικό πλέγμα. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών, V_f (volume fraction), προκύπτει αναλυτικά για κάθε μία ιδανική διάταξη συναρτήσει της διαμέτρου των ινών και της μεταξύ τους απόστασης. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο μεγιστοποιείται όταν οι ίνες εφάπτονται η μία στην άλλη. Πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα και για τιμές $V_f = 0.3$ η απόσταση μεταξύ των περιμέτρων των ινών, είναι μικρότερη της διαμέτρου των. Πρακτικά, περιεκτικότητα 0.7 είναι από τις μεγαλύτερες που επιτυγχάνεται. **Όσο μικρότερη η περιεκτικότητα V_f τόσο χειρότερη η ευθυγράμμιση των ινών εντός της στρώσης.** Η περιεκτικότητα των ινών κατά βάρος W_f , εκφράζεται ως συνάρτηση της περιεκτικότητας κατ' όγκο και της πυκνότητας ρ των συστατικών υλικών,

$$W_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_m V_m} \quad (2-1)$$

όπου $V_m = 1 - V_f$. Οι δείκτες f, m υποδεικνύουν την ίνα (f= fibre) και τη μήτρα (m=matrix) αντίστοιχα.

ii) Πεπλεγμένες συνεχείς ίνες

Σε μερικές εφαρμογές η επιλογή υφάσματος πεπλεγμένων ινών εξυπηρετεί καλύτερα τις προδιαγραφές του προϊόντος από τη μονοδιάστατη στρώση. Στις γεωμετρικές μικρομηχανικές παραμέτρους, όπως διάμετρος, μήκος και διάταξη ινών, πρέπει εδώ να προστεθούν το μήκος του κυματισμού του πλέγματος, το πλήθος των ινών ανά δεσμίδα και η γωνία μεταξύ των πεπλεγμένων δεσμίδων (συνήθως 90°). Ένα τέτοιο σύνθετο υλικό είναι ακόμα περισσότερο ανομοιογενές μιας και θύλακες ρητίνης δημιουργούνται στα σύνορα της πλέξης με αποτέλεσμα **η μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα κατ' όγκο για πεπλεγμένα σύνθετα υλικά να είναι μικρότερη αυτής για μονοδιάστατα σύνθετα υλικά.**

iii) Διάκενα.

Η επίδραση των διακένων στην διατμητική και διαστρωματική αντοχή ενός συνθέτου υλικού είναι σημαντικότερη. Ανεξαρτήτως του τύπου των ινών ή της μητρας έχει διαπιστωθεί ότι διάκενα της τάξεως του 4% επιφέρουν ελάττωση της διατμητικής αντοχής μέχρι 30%. Τα διάκενα δημιουργούνται κατά την παρασκευή του συνθέτου υλικού. Εμφανίζονται είτε **εντός μίας στρώσης, παράλληλα των ινών, με ελλειψοειδή ή σφαιρική μορφή, είτε μεταξύ των στρώσεων ενός πολύστρωτου.** Η δημιουργία τους οφείλεται σε δυο κυρίως λόγους: (α) στη παγίδευση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στη ρητίνη και τις ίνες και (β) στην παρουσία πτητικών ουσιών που παράγονται κατά τη θερμική κατεργασία των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ή κατά την τήξη των θερμοπλαστικών. Πρακτικά, η περιεκτικότητα κατ' όγκο των διακένων εντός ενός συνθέτου υλικού προσδιορίζεται με ποσοτική ανάλυση βασισμένη σε μικροφωτογράφιση πλήθους τομών, καθώς και με τεχνικές υπερηχητικής σάρωσης (C-scan), οι οποίες είναι μη καταστροφικές και βασίζονται στη μέτρηση της απόσβεσης ενός υπερηχητικού παλμού μετά τη διαπέραση του δοκιμίου.

iv) Η φύση και ο ρόλος της διεπιφάνειας (interface)

Η διεπιφάνεια ίνας – μήτρας (fibre – matrix interface) ορίζεται ως **κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας**. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της διεπιφάνειας διαφέρουν και από αυτές της μήτρας και από αυτές της ίνας. Για λόγους θεωρητικής ανάλυσης και μόνο, θεωρείται ως έχουσα μηδενικό πάχος. Στην πραγματικότητα όμως, και κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας - μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων και στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφορικών θερμικών φαινομένων. Αυτές οι δραστηριότητες επεκτείνονται από μερικά νανόμετρα ως μερικές εκατοντάδες νανόμετρα, έτσι ώστε να **έχει περισσότερη σημασία να μιλούμε για ενδιάμεση φάση (interphase) παρά για διεπιφάνεια (interface)**.

v) Η μεταφορά του φορτίου από τη μήτρα στην ίνα

Ο μηχανισμός μεταβίβασης των τάσεων (ή μεταφοράς του φορτίου) από τη μήτρα στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας ενεργοποιείται στα **σημεία ασυνέχειας** του συνθέτου υλικού, όπως τα άκρα των ινών, τα σημεία θραύσης, εγχοπές και ρωγμές. Το τασικό πεδίο στη διεπιφάνεια ίνας - μήτρας δημιουργείται υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων και των θερμικών τάσεων. **Η ένταση αυτού του πεδίου εξαρτάται από τη διάταξη των ινών**.

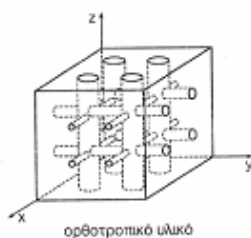
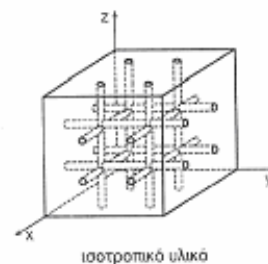
Όταν ένα ινώδες σύνθετο υλικό καταπονείται στη διεύθυνση των ευθυγραμμισμένων ινών, η ακεραιότητα του συνθέτου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να αντέξει στις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή. Με την προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία των ινών είναι πολύ μεγαλύτερη από της μήτρας, η ελαστική ανάλυση του τασικού πεδίου της διεπιφάνειας **βασίζεται στην παραδοχή ότι οι ίνες μεταφέρουν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα φέρει τις διατρητικές τάσεις**.

2.3.2 Μακροσκοπική ανάλυση

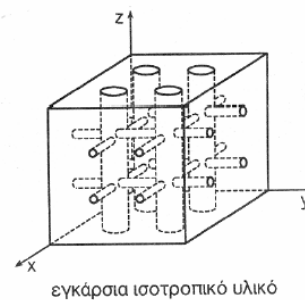
i) Ισοτροπικότητα – Ανισοτροπικότητα

Τα περισσότερα συμβατικά κατασκευαστικά υλικά είναι ομοιογενή και ισότροπα.

Ομοιογενές είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες έχουν την ίδια τιμή σε οποιαδήποτε θέση, δηλ. η ιδιότητα είναι ανεξάρτητη της θέσεως εντός του σώματος. **Ισότροπο** είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες σε κάθε σημείο του είναι ίδιες σε κάθε διεύθυνση, δηλ. η ιδιότητα είναι ανεξάρτητη της



διευθύνσεως ή του προσανατολισμού. Σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά, τα σύνθετα υλικά είναι κατά κανόνα ανομοιογενή και ανισότροπα, τις περισσότερες δε φορές ορθοτροπικά. Κατ' αντιστοιχία με τους παραπάνω ορισμούς: **Ανομοιογενές** είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες σε κάποιο σημείο είναι συνάρτηση του προσανατολισμού ή της διεύθυνσεως και, **ορθοτροπικό** είναι το σώμα του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές στις τρεις διευθύνσεις του καρτεσιανού συστήματος, έχουν όμως τρία επίπεδα συμμετρίας, που ορίζονται από το καρτεσιανό σύστημα.



ii) Ελαστικές ιδιότητες

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται στην διεύθυνση των ινών ενός μονοδιεύθυντου (οι ίνες προσανατολισμένες σε μία διεύθυνση) στρώματος συνθέτου υλικού, ίνες και μήτρα παραμορφώνονται το ίδιο ($\epsilon_f = \epsilon_m = \epsilon_1$), εφ' όσον η πρόσφυση

μεταξύ τους είναι τέλεια (ο δείκτης 1 δεικνύει την διεύθυνση των ινών). Εάν, επιπλέον, τα συστατικά υλικά συμπεριφέρονται ελαστικά, τότε οι αντίστοιχες τάσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_1 \qquad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_1 \qquad (2-2)$$

Καθώς οι ίνες αποτελούν την ενισχυτική φάση του υλικού ($E_f > E_m$), φέρουν και το μεγαλύτερο μέρος του εξωτερικού φορτίου. Εάν P είναι η εφαρμοζόμενη δύναμη επί διατομής συνθέτου υλικού τότε η μέση ορθή τάση υπολογίζεται,

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (2-3)$$

Η δύναμη P κατανέμεται και στις δύο φάσεις έτσι ώστε

$$P = P_f + P_m$$

ενώ ισχύει επίσης

$$P_f = \sigma_f \cdot A_f \text{ και } P_m = \sigma_m \cdot A_m$$

συνεπώς,

$$P = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

όπου P_f η δύναμη επί των ινών, P_m η δύναμη επί της μήτρας, A_f η καθαρή διατομή ινών στην διατομή του δοκιμίου και A_m η καθαρή διατομή μήτρας στην διατομή του δοκιμίου

Η τάση στην διεύθυνση 1 επί της διατομής A είναι,

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \qquad (2-4)$$

όπου E_1 το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού στη διεύθυνση 1 και ε_1 η μηχανική παραμόρφωση στην ίδια διεύθυνση. Με αντικατάσταση των Εξ. (2-3), (2-4) στην Εξ. (2-1) προσδιορίζεται το μέτρο ελαστικότητας του συνθέτου υλικού στη διεύθυνση 1

$$E_1 = E_f \cdot (A_f/A) + E_m \cdot (A_m/A) + E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f)$$

που δεν είναι τίποτε άλλο από τον νόμο των μίξεων. Στην πραγματικότητα, οι πειραματικές μετρήσεις δίνουν μια απόκλιση της τάξεως του 2% και αυτό οφείλεται στους διαφορετικούς λόγους Poisson των δύο φάσεων.

Παρόμοια είναι η ανάλυση για τον προσδιορισμό του εγκάρσιου μέτρου ελαστικότητας E_2

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f}$$

Ο προσδιορισμός του λόγου Poisson ν_{12} βασίζεται στις ίδιες υποθέσεις στις οποίες βασίστηκε η εξαγωγή του διαμήκους μέτρου ελαστικότητας E_1 . Έτσι βρίσκουμε για τον ν_{12} ,

$$\nu_{12} = \nu_f \cdot V_f + \nu_m \cdot V_m \quad (2-5)$$

Ο λόγος Poisson ν_{21} μπορεί να βρεθεί από την σχέση Maxwell αφού είναι γνωστά τα E_1 , E_2 και ν_{12} .

Το μέτρο διάτμησης G_{12} προσδιορίζεται εάν υποθέσουμε ότι διατρητικές τάσεις στην ίνα και στην μήτρα είναι ίδιες για διάτμηση στο επίπεδο 12. Επίσης θα πρέπει να αγνοήσουμε την μη γραμμική συμπεριφορά σε διατμητική τάση που παρουσιάζουν τα ινώδη υλικά και να θεωρήσουμε ότι η συμπεριφορά αυτή είναι γραμμική. Το αποτέλεσμα για το G_{12} είναι,

$$G_{12} = \frac{G_f \cdot G_m}{G_f \cdot V_m + G_m \cdot V_f} \quad (2-6)$$

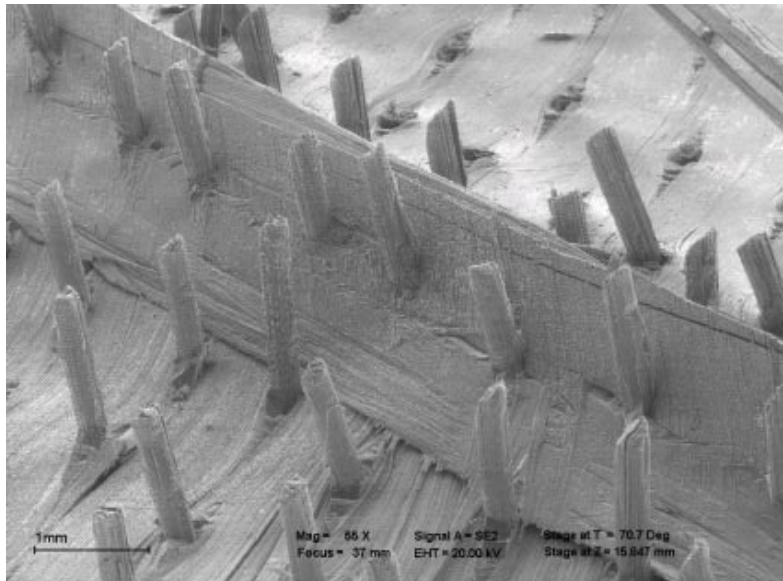
2.4 Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών

2.4.1 Μορφές αστοχίας

Ο καθορισμός της αστοχίας μιας κατασκευής διαφέρει από εφαρμογή σε εφαρμογή. Σε μερικές περιπτώσεις μια πολύ μικρή παραμόρφωση μπορεί να θεωρηθεί ως αστοχία, ενώ συχνά για να θεωρηθεί ότι κάποια κατασκευή έχει αστοχήσει θα πρέπει να παρουσιάζει συνολική θραύση ή αποκόλληση/ διαχωρισμό των δομικών μερών της. Σε γενικές γραμμές, μπορούμε να πούμε ότι έχει λάβει χώρα αστοχία ενός δομικού στοιχείου, όταν τούτο, αδυνατεί να ανταποκριθεί λειτουργικά με επιτυχία.

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών η αστοχία συνήθως αρχίζει να αναπτύσσεται εσωτερικά πριν εκδηλωθεί οποιαδήποτε μακροσκοπική μεταβολή στην συμπεριφορά τους. Η

εσωτερική αστοχία [2-7] μπορεί να παρατηρηθεί σε διάφορες μορφές είτε ξεχωριστά είτε με ταυτόχρονη εμφάνιση δύο ή και περισσότερων από αυτές. Σαν πιο βασικές μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών θα μπορούσαν να αναφερθούν οι κάτωθι:



- (α) θραύση/σπάσιμο των ινών (fibre breakage)
- (β) παραμόρφωση και θραύση της μήτρας (matrix deformation and cracking)
- (γ) αποχωρισμός των ινών από τη μήτρα είτε,
 - (i) λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών στην διεπιφάνεια ίνας μήτρας (debonding),
 - (ii) λόγω θραύσης, των ινών και εκρίζωσης τους από τη μήτρα (pull-out),

- (δ) διαχωρισμός μιας στρώσης από την άλλη σ' ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό που καλείται διαστρωματική αποκόλληση (delamination)

Η επίδραση της εσωτερικής αστοχίας πάνω στην μακροσκοπική συμπεριφορά του υλικού παρατηρείται μόνο όταν η συχνότητα των εσωτερικών αστοχιών είναι εξαιρετικά μεγάλη.

2.4.2 Θραύση ινών

Όταν μία ρωγμή διαδίδεται σε κάθετη διεύθυνση προς τις ίνες, προκαλείται βαθμιαία θραύση των ινών μέχρι τον πλήρη διαχωρισμό, κατά την έννοια του πάχους, του σύνθετου ελάσματος. Οι ίνες θραύονται όταν η παραμόρφωση τους προσεγγίσει την παραμόρφωση θραύσης τους. Αν και οι ίνες συμμετέχουν ουσιωδώς στην υψηλή αντοχή των σύνθετων υλικών, **η απαιτούμενη ενέργεια για την θραύση των ινών, αντιστοιχεί σ' ένα πολύ μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας που αναφέρεται στην υπέρθεση των μηχανισμών αστοχίας του υλικού.**

2.4.3 Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας

Το υλικό της μήτρας που περιβάλλει τις ίνες πρέπει να θραυστεί για να ολοκληρωθεί η θραύση του συνθέτου υλικού. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως εποξειδικές και πολυεστερικές, ανήκουν στα ψαθυρά υλικά και επιδέχονται περιορισμένη συνολική παραμόρφωση μέχρι την θραύση τους, ενώ αντίθετα οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να υποστούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. **Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση μητρών από πολυμερές υλικό χαρακτηρίζεται από θραύση και μικρή παραμόρφωση της μήτρας** και συνεπώς, η συνεισφορά του στην συνολική απορροφούμενη ενέργεια είναι σχετικά πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

2.4.4 Αποκόλληση ινών από μήτρα (debonding)

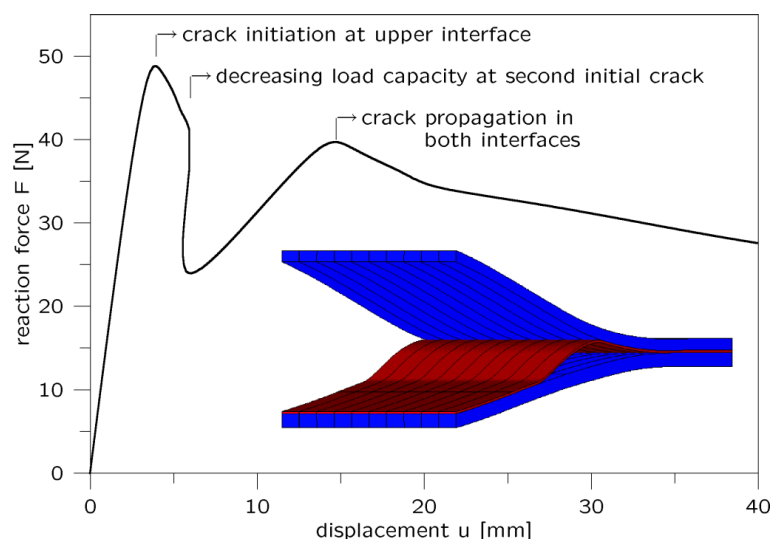
Κατά την διαδικασία θραύσης οι ίνες μπορούν να αποκολληθούν από το υλικό της μήτρας λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών παράλληλα προς τις ίνες (debonding cracks). Σε αυτή την διαδικασία **οι χημικοί ή δευτερεύοντες δεσμοί μεταξύ των ινών και του υλικού μήτρας σπάνε**. Μια τέτοια ρωγμή (debonding crack) μπορεί να διαδίδεται στην διεπιφάνεια ίνας - μήτρας ή μέσα στην μήτρα, ανάλογα με τη σχετική τους αντοχή. Με μείωση της αντοχής της διεπιφάνειας μπορεί να συμβεί εκτεταμένη αποκόλληση οδηγώντας συνεπώς σε μία σημαντική αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας.

2.4.5 Διαστρωματική αποκόλληση (delamination)

Μία ρωγμή που διαδίδεται σε μία στρώση ενός πολύστρωτου ελάσματος από σύνθετο υλικό, μπορεί να αποτελέσει την κορυφή ρωγμής που θα προσεγγίσει τις ίνες της γειτονικής στρώσης. **Αυτή η διαδικασία προσέλκυσης ρωγμών είναι όμοια με την περίπτωση ρωγμής που**

διαδίδεται στη μήτρα και προσελκύεται στην διεπιφάνεια ίνας - μήτρας. Λόγω όμως μεγάλων διατμητικών τάσεων στη μήτρα που γειτονεύει με την κορυφή της ρωγμής, η ρωγμή μπορεί να διακλαδωθεί και να αρχίσει να διατρέχει την διεπιφάνεια παράλληλα προς το επίπεδο των στρώσεων. Αυτές οι

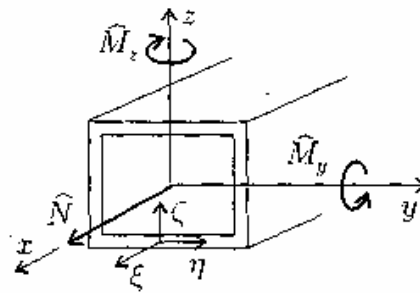
ρωγμές λέγονται ρωγμές διαστρωματικής αποκόλλησης και όπου εμφανίζονται είναι "υπεύθυνες" για την απορρόφηση ενός πολύ σημαντικού ποσού ενέργειας θραύσεως. Συνήθως εμφανίζονται με μεγάλη συχνότητα, όταν πολύστρωτα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε καμπτικές καταπονήσεις.



2.5 Η αξονική κατάρρευση σύνθετων λεπτότοιχων σωλήνων

2.5.1 Αξονική και καμπτική καταπόνηση τετραγωνικών κατασκευών λεπτού πάχους

Έστω τετραγωνικός λεπτότοιχος σύνθετος σωλήνας, που υπόκειται σε ταυτόχρονη κάμψη και θλίψη, και με το σύστημα συντεταγμένων που φαίνεται στο παράπλευρο σχήμα. Σε μια τυχαία διατομή έχουμε τη δύναμη \bar{N} κατά την αξονική διεύθυνση και τις ροπές \bar{M}_y και \bar{M}_z . Σε ένα αυθαίρετο σημείο



στην επιφάνεια αναφοράς του τοιχώματος ισχύει $\epsilon_{\xi}^o = \epsilon_{\chi}^o$. Εφόσον έχουμε να κάνουμε με ορθοτροπικό υλικό παίρνουμε τις αξονικές δυνάμεις [2-8] καταπόνησης από κάμψη: $N_{\xi} = \frac{\bar{N} \cdot \delta_{11}}{E \cdot A \cdot D}$ και $M_{\xi} = -\frac{\bar{N} \beta_{11}}{E \cdot A \cdot D}$. Άρα λοιπόν οι σχέσεις δυνάμεων παραμορφώσεων σε ταυυστική μορφή μπορούν να γραφτούν ως:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{\xi}^o \\ \epsilon_{\eta}^o \\ \gamma_{\xi\eta}^o \\ \kappa_{\xi} \\ \kappa_{\eta} \\ \kappa_{\xi\eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \beta_{11} & \beta_{12} \\ \alpha_{12} & \beta_{21} & \beta_{22} \\ 0 & 0 & 0 \\ \beta_{11} & \delta_{11} & \delta_{12} \\ \beta_{12} & \delta_{12} & \delta_{22} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} N_{\xi} \\ M_{\xi} \\ M_{\eta} \end{bmatrix}$$

όπου

$$M_{\eta} = -\frac{\beta_{12}}{\delta_{22}} N_{\xi} - \frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} M_{\xi}.$$

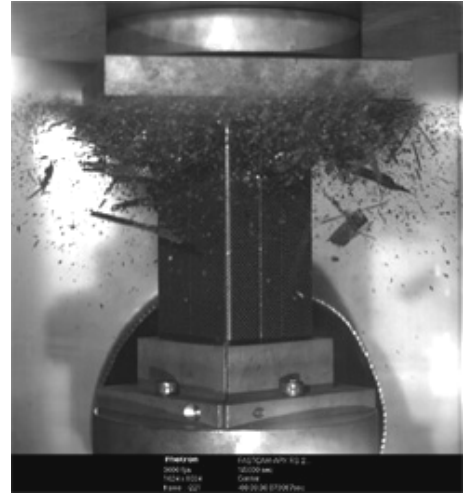
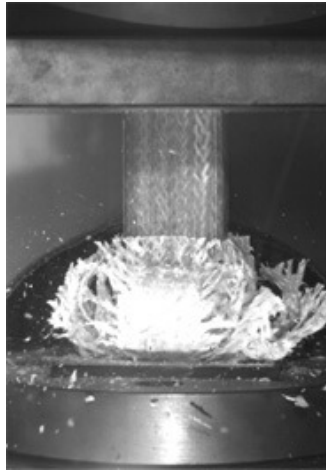
2.5.2 Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών

Η χρήση των ενισχυμένων με ίνες πλαστικών σύνθετων υλικών στις αυτοκινούμενες δομές δύναται λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων των υλικών να οδηγήσει σε πολλά οικονομικά και λειτουργικά οφέλη, που κυμαίνονται από τη μείωση του βάρους ως την αυξημένη αντοχή και διάρκεια. Η ικανότητα προστασίας σε περίπτωση σύγκρουσης (crashworthiness) των σύνθετων δομών και συνδέσμων φτιαγμένων από σύνθετα υλικά μόνο πρόσφατα έχει ερευνηθεί, επομένως, η αντοχή στην σύγκρουση ενός δομικού συστατικού υπό αξονική συμπίεση και κάμψη **αποτελεί ένα αντικείμενο περαιτέρω λεπτομερούς έρευνας.**

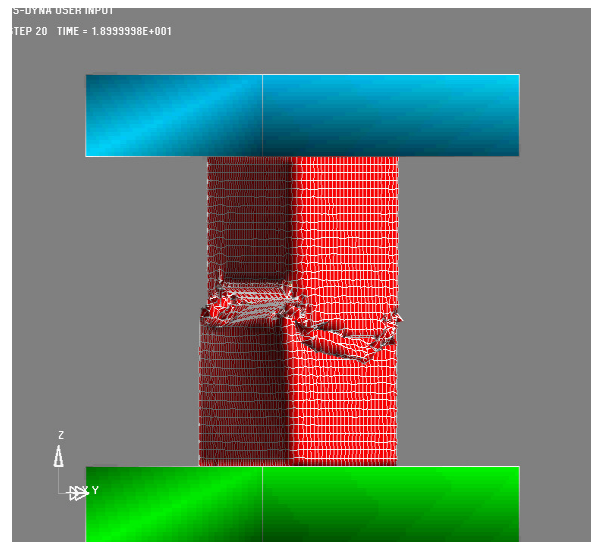
Οι προηγούμενες έρευνες σχετικά με την αξονική συμπίεση των λεπτότοιχων σύνθετων δομών υπό μορφή κυλινδρικών ή τετραγωνικών σωλήνων, έδειξαν ότι αυτά τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται κατά τρόπο διαφορετικό από παρόμοιες δομές φτιαγμένες από συμβατικά υλικά. Η πλαστική παραμόρφωση εδώ δεν είναι ο κυβερνώντας μηχανισμός της κατάρρευσης, αλλά η εκτενής ανάπτυξη μικρορωγμών που μπορεί να ελεγχθεί εύκολα ανάλογα με τις ιδιότητες των ινών και των ρητινών, καθώς επίσης και με τον προσανατολισμό των ινών. **Οι τρόποι κατάρρευσης επομένως, εξαρτώνται από τη γεωμετρία, τα υλικά και τις παραμέτρους του πειράματος.**

Σε όλες τις περιπτώσεις, παρατηρήθηκε ότι **σύνθετοι σωλήνες, που καταρρέουν κατά τρόπο σταθερό, προοδευτικό και ελεγχόμενο, μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας.** Από την ευρεία πειραματική επεξεργασία των αξοσυμμετρικών σύνθετων σωλήνων ενισχυμένων με ίνες παρατηρήθηκαν [2-9] οι ακόλουθοι κύριοι τρόποι αστοχίας κατά τη διάρκεια της αξονικής συμπίεσής τους:

- Προοδευτική συντριβή με μικρορωγμές του σύνθετου υλικού που συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας σύνθλιψης (τρόπος I)



- Ψαθυρό σπάσιμο της δομής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία με χαμηλή ενεργειακή απορρόφηση (τρόπος II και III ανάλογα από τη μορφή ρωγμών)



- Προοδευτικό δίπλωμα (folding) παρόμοιο με τη συμπεριφορά συντριβής λεπτότοιχου μεταλλικού και πλαστικού σωλήνα, που παρουσιάζει μέτρια ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης (τρόπος IV).

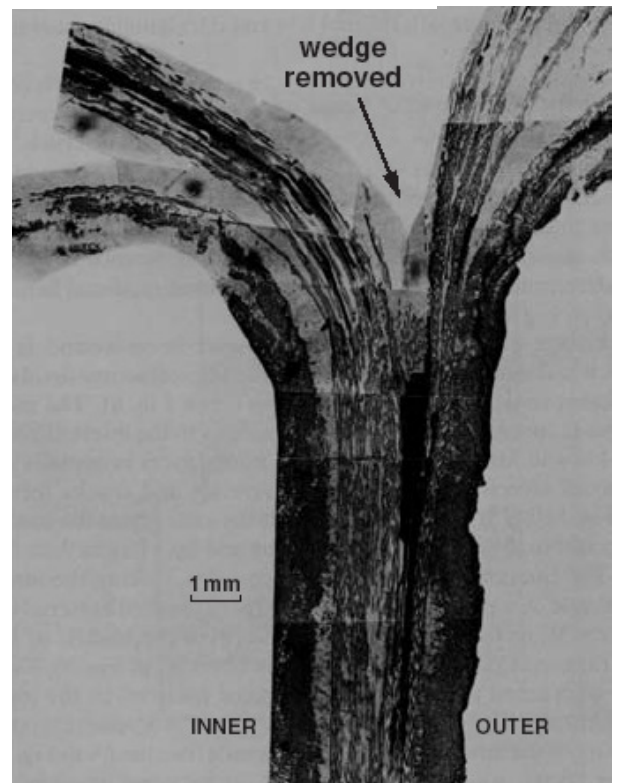


Πιο συγκεκριμένα:

❖ Τρόπος κατάρρευσης I

Χαρακτηρίζεται κυρίως από την **σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου** καθώς και τον συνεχή θρυμματισμό του υλικού στην ζώνη παραμόρφωσης του. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης παρατηρείται σε τρεις διαφορετικές μορφές.

(i) Η πρώτη μορφή κατάρρευσης, η οποία λόγω ομοιότητας αναφέρεται και σαν μορφή αστοχίας "μανιτάρι" (βλέπε παράπλευρη εικόνα.) ("mushrooming" failure), χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων (axial splits) στο εξωτερικό μέτωπο.



(ii) Η δεύτερη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την προοδευτική στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου

υλικού προς τα μέσα. Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα μέσα εξελίσσεται σε όλη τη περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος. Δεν εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις.

(iii) Η τρίτη μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την ολική στροφή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω. Οι αξονικές διαρηγματώσεις αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της μορφής αυτής. Η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται στη βάση του κελύφους.

❖ Τρόπος κατάρρευσης II

Ο τρόπος κατάρρευσης II χαρακτηρίζεται κυρίως από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση που οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους. Στην περίπτωση των κωνικών κελυφών ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από την **ανάπτυξη μίας ελικοειδούς ή διαμήκου ρωγμής διαδιδόμενης στην περιφέρεια του κελύφους**, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών πυραμίδων κύριο χαρακτηριστικό του τρόπου αυτού είναι η εμφάνιση διαμηκών ρωγμών στις τέσσερις γωνίες της βάσης του κελύφους.

❖ Τρόπος κατάρρευσης III

Ο τρόπος κατάρρευσης III χαρακτηρίζεται από την καταστροφική αστοχία του υλικού με την **εμφάνιση περιφερειακής θραύσης περίπου στο μέσο ύψος του κελύφους** η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα. Αυτός ο τρόπος αστοχίας έχει ορισμένα χαρακτηριστικά όμοια με τον λυγισμό κατά Euler πολύ λεπτών μεταλλικών και PVC σωλήνων.



❖ Τρόπος κατάρρευσης IV

Ο τρόπος κατάρρευσης IV χαρακτηρίζεται βασικά από την **εμφάνιση σχεδόν με την έναρξη της φόρτισης γραμμών πτυχώσεως** (κατά το ορθότερο, γραμμών θραύσεως) ομοίων με αυτές που εμφανίζονται στους μεταλλικούς και PVC σωλήνες. Πρόκειται για καθαρά καταστροφικής μορφής κατάρρευση των κελυφών.

Πρέπει να τονιστεί ότι από τους τέσσερις τρόπους κατάρρευσης **μόνο ο πρώτος δίνει την δυνατότητα στην κατασκευή να απορροφήσει σημαντικά ποσά ενέργειας** κατά την διαδικασία εξέλιξης του μηχανισμού κατάρρευσης. Η ενέργεια αυτή διαχέεται στους επιμέρους μηχανισμούς αστοχίας του υλικού.

Αν και σημαντική πειραματική εργασία έχει εκτελεσθεί στη στατική κατάρρευση δομών, μελέτες στη δυναμική συντριβή είναι αρκετά περιορισμένες σε αριθμό. Γενικώς αναφέρεται ότι τα αποτελέσματα αξιολόγησης της δυνατότητας απορρόφησης ενεργείας κατά τη διάρκεια της δυναμικής δοκιμής ήταν χαμηλότερα σε σχέση με τις στατικές, για λεπτότοιχου σωλήνες πολυεστέρα (ενισχυμένου με υαλονήματα). Παρατηρείται ακόμη γενικά ότι **οι κυλινδρικοί σωλήνες παρουσιάζουν υψηλότερη ειδική ενέργεια απορρόφησης από τους τετραγωνικούς σωλήνες.**

Όταν το φορτίο εφαρμόζεται στις άκρες ενός σωλήνα, **εμφανίζεται τοπική αποτυχία του υλικού και διαστρωματικές μικρές ρωγμές.** Το μήκος των ρωγμών αυτών και το εάν οι στρωματώσεις του σύνθετου υλικού συσσωρεύσουν την αστοχία, καθορίζουν το εάν ο προκύπτων τρόπος συντριβής θα είναι εγκάρσια διάτμηση, κάμψη του υλικού, ή ένας συνδυασμός αυτών των τρόπων (ψαθυρό σπάσιμο). Δύο ευδιάκριτοι τρόποι κατάρρευσης, που ταξινομούνται ως τρόπος I και II (βλέπε ανωτέρω), αντίστοιχα, παρατηρούνται στις περισσότερες από τις αξονικές στατικές και δυναμικές δοκιμές. Τα μικρού μήκους δείγματα, ακολουθούν την προοδευτική κατάρρευση (τρόπος I) ενώ τα σχετικά μακρόστενα δείγματα χαρακτηρίζονται από τον τρόπο αστοχίας II.

2.5.3 Χαρακτηριστικά ενεργειακής απορρόφησης

Χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίων / μετατοπίσεων για κάθε τρόπο κατάρρευσης (στατική και δυναμική φόρτιση) παρουσιάζονται στο κάτωθεν σχήμα. **Αρχικά το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο ανεγκύεται με σταθερό ρυθμό σε μια τιμή κορύφωσης, P_{max} , και μειώνεται έπειτα απότομα.**

Καθώς η παραμόρφωση προχωρεί η μορφή της καμπύλης φορτίων/μετατοπίσεων, εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο κατάρρευσης. Για τα λεπτότοιχα σύνθετα κελύφη που υποβάλλονται σε αξονική φόρτιση παρατηρείται ότι η συμπεριφορά θραύσης του δοκιμίου εμφανίζεται να έχει επιπτώσεις στη σταθερότητα της φόρτισης καθώς επίσης και στο μέγεθος του φορτίου συντριβής (crush load) και την ενεργειακή απορρόφηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατάρρευσης. Στο στάδιο που το φορτίο σύνθλιψης φθάνει την τιμή P_{max} , και για τον τρόπο κατάρρευσης I, ρωγμές διαμορφώνονται σε κάθε γωνία του δοκιμίου (για τετραγωνικό δοκίμιο) συνοδευόμενες από το σχηματισμό περιφερειακής εσωτερικής ρωγμής. Η περιοχή του διαγράμματος μετά την σύνθλιψη χαρακτηρίζεται από ταλαντώσεις γύρω από ένα μέσο φορτίο \bar{P} .

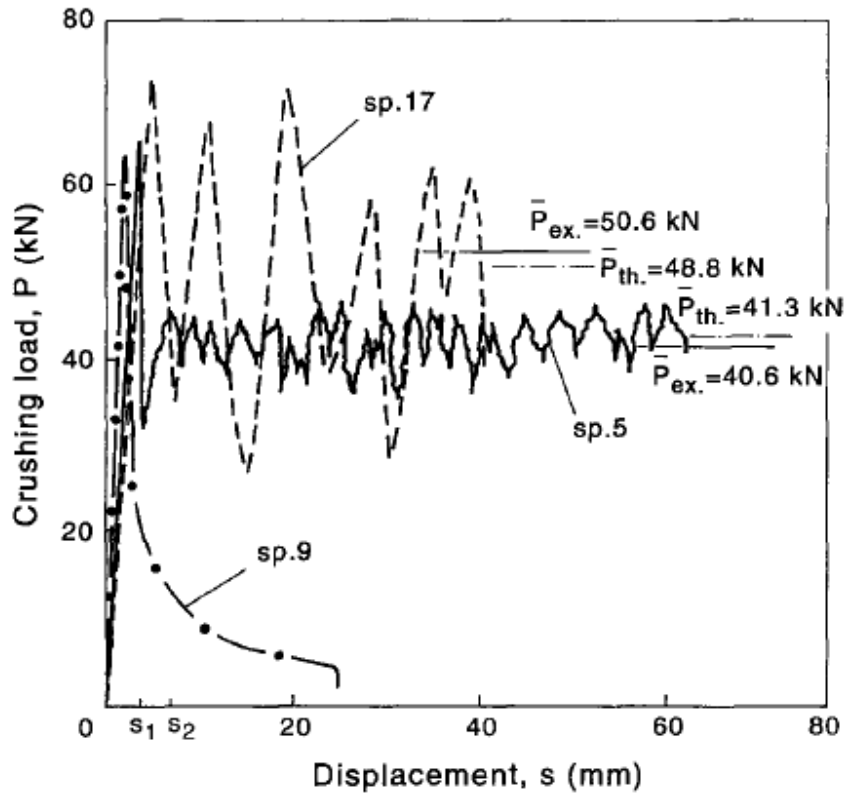


Figure 4 Load–displacement curves for square tubes subjected to static and dynamic loading for various collapse mode (— Mode I, static (sp. 5); Mode II, static (sp. 9); - - - Mode I, dynamic (sp. 17))

Οι δυναμικές καμπύλες φορτίων/μετατοπίσεων παρουσιάζουν εντονότερες διακυμάνσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες στατικές (βλέπε παράπλευρο σχήμα). Κατά τη διάρκεια δυναμικών δοκιμών είναι πιο δύσκολο να διαπιστωθεί ο τρόπος κατάρρευσης. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια μιας στατικής δοκιμής ο τρόπος κατάρρευσης είναι εμφανής από το σχέδιο της καμπύλης φορτίων/μετατοπίσεων. Επιπλέον, λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου (σημειώστε ότι η διάρκεια του φαινομένου κυμαίνεται

στα 20ms) η ακολουθία του σχηματισμού μικρορωγμών σε σχέση με τη μορφή της αποκτηθείσας καμπύλης, δεν μπορεί να ακολουθηθεί ευδιάκριτα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις άνωθεν παρατηρήσεις, δύο διαφορετικοί μηχανισμοί σπασίματος μπορούν να προταθούν στην εξήγηση της μορφής των καμπυλών, που αντιστοιχούν στις δυναμικές φορτίσεις.

Οι προτεινόμενοι μηχανισμοί είναι βασισμένοι στις παρατηρήσεις σχετικά με τη διάδοση ρωγμών στα σύνθετα υλικά, αμελώντας τις δυνάμεις τριβής και την κάμψη, καθώς επίσης και τις μικροσκοπικές παρατηρήσεις σχετικά με τον τρόπο κατάρρευσης των κελυφών. Εντούτοις, η δυναμική φύση της διαδικασίας δεν πρέπει να αγνοηθεί, επομένως, **φαινόμενα όπως οι ταλαντώσεις που συνδέονται με τα προβλήματα αδράνειας**, πρέπει να ληφθούν υπόψη επίσης:

- Σύμφωνα με τον πρώτο μηχανισμό, η ρωγμή αναπτύσσεται ταυτόχρονα με την τριβή και την κάμψη, εντούτοις διαδίδεται γρηγορότερα από τα μηχανικά φαινόμενα.
- Οι ρωγμές και οι αποκολλήσεις αναπτύσσονται απότομα σε ένα ορισμένο διάστημα και ακολουθούνται από τριβή και κάμψη, ενώ αυτή η διαδοχή επαναλαμβάνεται μέχρι την τελική κατάρρευση του κελύφους.

Οι καμπύλες φορτίων/μετατοπίσεων που αντιστοιχούν στον τρόπο κατάρρευσης II παρουσιάζει τυπική συμπεριφορά πριν από τη σύνθλιψη, αλλά η αρχική ελαστική απόκριση ακολουθείτε από πολύ απότομη πτώση στο φορτίο. Ο τρόπος II είναι παρόμοιος με αυτόν της θεώρησης του Euler κατά την αξονική συμπίεση των πολύ λεπτών σωλήνων μετάλλων ή PVC, που **προσφέρουν πολύ μικρή ενεργειακή απορρόφηση.**

Παρατηρείται επίσης ότι για τους φορτισμένους σωλήνες, το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου φέρεται στις άκρες τους, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών δοκιμίων αυτό συμβαίνει στις γωνίες τους

Όσον αφορά στην αρχική μέγιστη τιμή του φορτίου στην ελαστική περιοχή, P_{max} , πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μέγεθος **επηρεάζεται πολύ από το πάχος των τοιχωμάτων και τη μέση περιφέρεια των κελυφών** και για τη στατική αλλά και για τη δυναμική κατάρρευση. Από την καμπύλη φορτίου παρατηρείται επίσης ότι το αξονικό μήκος των σωλήνων δεν έχει καμία επίδραση στο μέγιστο φορτίο P_{max} . Για ένα δεδομένο υλικό το μέγεθος της περιοχής ελαστικής παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερο για τους σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος. Αυτό μπορεί ακόμη να επηρεαστεί από το πόσο παράλληλες είναι η μια ως προς την άλλη οι πλευρές του τετραγωνικού σωλήνα. Το φορτίο που επιτυγχάνεται στο τέλος της ελαστικής περιοχής, για το κέλυφος που υποβάλλεται στον τρόπο κατάρρευσης I, είναι συνήθως το μέγιστο φορτίο που το κέλυφος μπορεί να στηρίξει. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγιστο φορτίο έχει πολύ λίγη επίδραση στο μέσο φορτίο και τη συνολική ενέργεια που απορροφάται.

2.6 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[2-1] Mel M. Schwartz: *'Composite Materials, Volume I'* Prentice Hall, 1997

[2-2] http://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material

[2-3] D. L. McDanel, J. R. Stephens: *'High temperature engine materials technology - Intermetallics and metal matrix composites'*, NASA TM-100844 1988

[2-4] P. K Brindley, P.A. Bartolotta, S. J. Klima, *'Investigation of a SiC/Ti-24Al Nb composite'* NASA TM-100956, 1988

[2-5] J. R Stephens, *'Intermetallic and ceramic matrix composites for 815 to 1370°C gas turbine engine applications'*, Int. Conf. Ceramic Matrix Composite Process Modeling, pp. 3-12, February 1990, Anaheim, CA. 1990

[2-6] R.M Jones, *'Mechanics of Composite Materials'* Scripta Book, Washington DC, 1975

[2-7] M. Guarliano, *'Fracture and damage of composites'* , Southampton WIT Press, 2006

[2-8] László Kollár, George Springer: *'Mechanics of composite structures'* , Cambridge University Press , 2003

[2-9] A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis: *'The static and dynamic axial crumbling of thin-walled fiberglass composite square tubes'* , Athens, December 1995

ΘΕΩΡΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΑΦΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

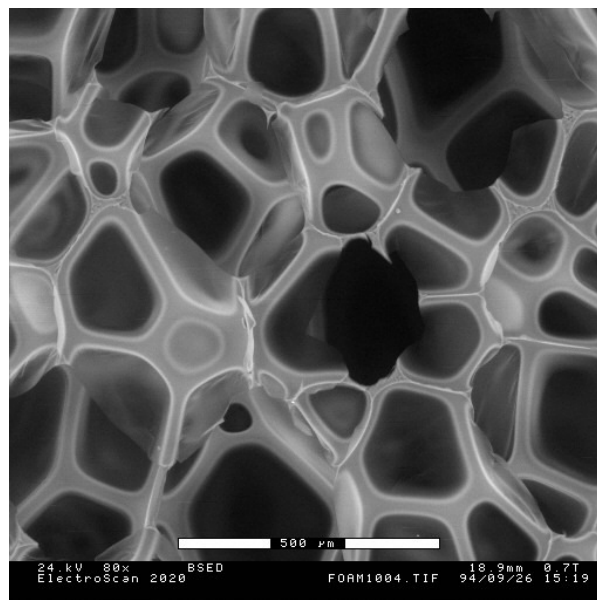
3.1 Εισαγωγικά

3.1.1 Ορισμοί

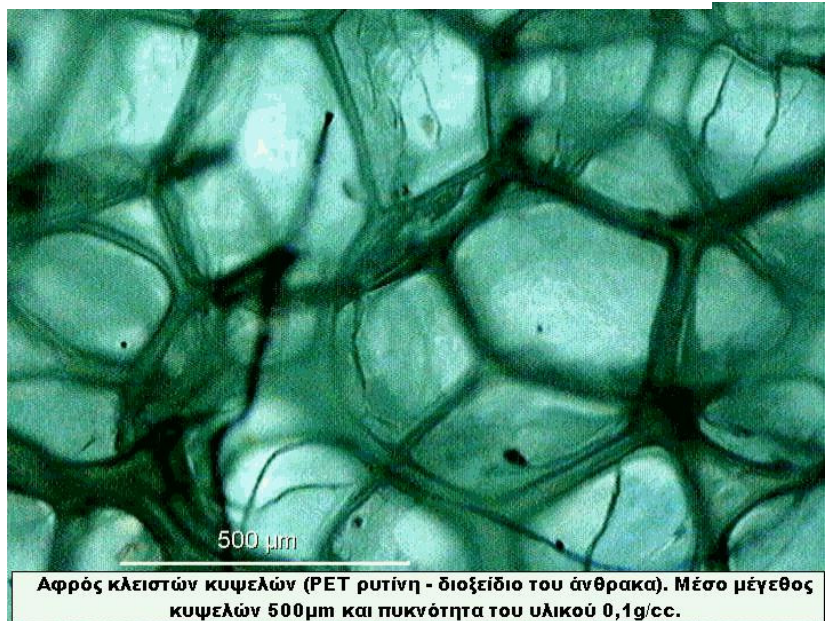
Τα κυψελοειδή υλικά ή οι [3-1] αφροί, επίσης καλούμενα ως επεκταθέντα ή σπογγώδη υλικά, αποτελούνται γενικά από κατ' ελάχιστο δύο φάσεις. **Μιας στερεάς πολυμερούς ή μεταλλικής μήτρας και μιας αεριώδους φάσης που δημιουργείται από έναν φυσητήρα.** Μπορούν να υπάρξουν περισσότερα από ένα προϊόντα στερεάς φάσης, όπως στην περίπτωση ενός μίγματος ή ενός κράματος πολυμερών σωμάτων (γενικά ετερογενών).

Υπάρχει μια απειρία μορφών αφρωδών και κυψελοειδών υλικών. Η απλούστερη είναι μια διδιάστατη διάταξη από πολύγωνα, τα οποία είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε να καλύπτουν μια επίπεδη επιφάνεια μορφής παρόμοιας με τις εξαγωνικές κυψέλες των μελισσών. Αυτός είναι κι ο λόγος για τον οποίο αποκαλούμε τέτοια διδιάστατα κυψελοειδή υλικά ως «κηρήθρες».

Εάν το στερεό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός περιέχεται μόνο στις άκρες των κυψελών (έτσι ώστε οι κυψέλες να συνδέονται μεταξύ τους, μέσω των ανοικτών όψεων τους) τότε ο αφρός λέμε ότι είναι **ανοικτών κυψελών (open celled)**. Παραπλεύρως εικονίζονται οι ανοικτοί πόροι ενός πολυμερούς αφρώδους υλικού.



Εάν και οι όψεις των κυψελών είναι επίσης στερεές, έτσι ώστε κάθε κυψέλη να είναι αποκλεισμένη, δίχως συνδέσεις με τις διπλανές της (βλ. παράπλευρη εικόνα [3-2]), λέμε ότι ο αφρός είναι **κλειστών κυψελών (closed celled)**. Υπάρχουν βέβαια και κάποιοι αφοί οι οποίοι είναι εν μέρει ανοιχτοί και εν μέρει κλειστοί.



Το πλέον σημαντικό χαρακτηριστικό σε ένα κυψελοειδές στερεό, είναι η **σχετική του πυκνότητα ρ^*/ρ_s** , δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας του κυψελοειδούς υλικού ρ^* , δια της πυκνότητας του στερεού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών ρ_s . Είναι δυνατόν να παραχθούν αφοί ιδιαίτερα χαμηλής πυκνότητας, των οποίων η σχετική πυκνότητα είναι της τάξης του 0.001.

3.1.2 Η στατιστική έννοια της κυψέλης

Όπως είναι ευνόητο κατά τη διαδικασία σχηματισμού ενός αφρώδους υλικού οι κυψέλες που παράγονται δεν είναι πανομοιότυπες σε σχήμα και μέγεθος, αλλά **στατιστικά καταναμημένες**. Για αρκετές δεκαετίες, τα κυψελοειδή και πορώδη συστήματα έχουν ταξινομηθεί μορφολογικά από προσομοιώσεις του πραγματικού συστήματος, ενός γεωμετρικού ή στερεομετρικού σχεδίου (πάντα φανταστικών και απλοποιημένων), το οποίο χρησιμοποιεί ένα τεχνητά διαταγμένο πρότυπο της δομής.

Οι ταξινομήσεις έχουν βασιστεί στην αρχή ότι σε οποιοδήποτε κυψελοειδές ή πορώδες σύστημα είναι δυνατό να απομονωθεί ένα δομικό στοιχείο (ένα κύτταρο-κυψέλη ή ένας πόρος). Εντούτοις, η ποικιλομορφία των κυττάρων και των τύπων πόρων

ακόμη και στα μικρά συστήματα, δεν επιτρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις, τον καθορισμό από μια ενιαία γεωμετρική δομική παράμετρο, όπως συμβαίνει για άλλους τύπους στερεών (που μπορούν να καθοριστούν από τον τύπο και τον όγκο των διαστρωματικών ή διατομικών αποστάσεων των κυττάρων μονάδων).

Δεδομένου ότι είναι δύσκολο και μερικές φορές ακόμα και αδύνατο να δοθεί ένας ευδιάκριτος καθορισμός των όρων "κυψέλη" και "πόρος" όταν αναφερόμαστε στα πραγματικά συστήματα, η τρέχουσα ευρέως αποδεκτή άποψη, είναι ότι ένας αυστηρός και σωστός χαρακτηρισμός των πορώδων μέσων **μπορεί να ληφθεί μόνο με στατιστικές μεθόδους**.

3.1.3 Βασικές σχέσεις

Θα θεωρήσουμε τα πληρωμένα με αέρια συστήματα ως σώματα αποτελούμενα από πολύ μεγάλο αριθμό μεμονωμένων μονάδων που περιέχουν διαστήματα. Γενικά, αυτά τα διαστήματα **μπορούν να είναι είτε κενά είτε γεμισμένα με το αέριο ή υγρό**. Για απλότητα, τα ίδια τα μόρια θα υποτίθεται ότι είναι μη-πορώδη.

Έστω ότι ένα κομμάτι του πορώδους συστήματος [3-1] έχει καθαρό όγκο V_0 , που αποτελείται από τον όγκο της ουσίας (στερεά φάση) V_m και το συνολικό όγκο όλων των κενών V_g . Η **αναλογία πλήρωσης του αερίου G** (gas-filling ratio) θα δοθεί συνεπώς από την αναλογία V_g στο συνολικό όγκο του συστήματος, από την εξίσωση:

$$G = \frac{V_g}{V_g + V_m} = \frac{V_g}{V_0} \quad (3-1)$$

Η παράμετρος G αντιπροσωπεύει την καθαρή (ή συνολική) πλήρωση αερίου των δομικών στοιχείων, GSE (Gas Structural Elements). Προκειμένου να υπολογίσουμε εκείνο το μέρος των GSEs που μπορεί, υπό συγκεκριμένους όρους, να συμμετέχει στο σχηματισμό αερίου, πρέπει να εισαγάγουμε την έννοια της ενεργούς πλήρωσης αερίου (active gas-filling factor) (ή ενεργό πορώδες) G_m : $G_m = \frac{V_g - V_m}{V_0}$ όπου το V_m είναι ο όγκος εκείνων των GSEs που δεν περιλαμβάνονται στη διαδικασία σχηματισμού.

Είναι επίσης συχνά κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ο παράγοντας G_f , αντί του προηγούμενου: $G_f = \frac{V_g}{V_s}$. Από τους ορισμούς ισχύει: $\frac{1}{G} = \frac{1}{G_f} + 1$

Εάν αμελήσουμε το βάρος του αερίου μέσα στο αφρώδες πλαστικό, το κλάσμα όγκου ϕ_g των κυττάρων (πόροι) δίνεται από την εξίσωση: $\phi_g = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p}$ (3-2)

όπου ρ και ρ_p είναι η προφανής πυκνότητα του αφρώδους πλαστικού και η πυκνότητα του αρχικού μη απλωμένου (μονολιθικού ή συμπαγούς) σώματος.

Γενικά, η αληθινή πυκνότητα ρ^* και η προφανής πυκνότητα ρ των αφρισμένων σωμάτων είναι διαφορετικές, δεδομένου ότι η ρ^* αντιπροσωπεύει την μάζα ανά όγκο μονάδων, ενώ η ρ δείχνει τις αθροισμένες μάζες σωμάτων και αερίου στον ίδιο όγκο μονάδων. Είναι προφανές ότι γενικά $\rho^* < \rho$, και μόνο σε ένα κενό είναι $\rho^* = \rho$.

Κανονικά, τα αφρώδη πλαστικά είναι **τριφασικά συστήματα**, δεδομένου ότι περιέχουν πάντα κάποια υγρασία που προσροφάται από το περιβάλλον. Μπορούμε επομένως να γράψουμε την εξίσωση: $\phi_p + \phi_w + \phi_g = 1$ όπου ϕ_p , ϕ_w , ϕ_g είναι κλάσματα όγκου του σώματος, της υγρασίας, και του αερίου αντίστοιχα, στο αφρώδες πλαστικό.

Τέλος ισχύει: $\phi_p = \frac{m}{V_0 \rho_p} = \frac{\rho}{\rho_p}$ (3-3), $\phi_w = \frac{m_w - m}{V_0 \rho_w}$ (3-4), και $\phi_g = \frac{m_g}{V_0 \rho_g}$ (3-5)

3.2 Πολυμερή αφρώδη υλικά

3.2.1 Εισαγωγικά

Η χρήση των πολυμερών αφρών στη σημερινή τεχνολογία συνεχίζει να αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό παγκοσμίως. Οι πολυάριθμοι λόγοι για αυτήν την αύξηση συνίστανται στο **μικρό βάρος, την άριστη αναλογία αντοχής/βάρος, τις υψηλές δυνατότητες μόνωσης, την ενεργειακή απορρόφηση** (συμπεριλαμβανομένου του κλονισμού, της δόνησης, και του ήχου), και τα χαρακτηριστικά των πολυμερών αφρών.

Οι αφροί μπορούν να παρασκευαστούν από ουσιαστικά οποιοδήποτε πολυμερές σώμα. Το απαιτούμενο είναι η εισαγωγή ή η παραγωγή ενός αερίου μέσα στην πολυμερή μήτρα. Η επιλογή πολυμερών σωμάτων κατάλληλων για τις βιομηχανικές εφαρμογές αφρού εξαρτάται από τις **ιδιότητές τους, την ευκολία κατασκευής τους, και των οικονομικών** του όλου συστήματος.

Οι πολυμερείς αφροί περιλαμβάνουν μια ευρεία ποικιλία υλικών, με τις πυκνότητες να κυμαίνονται από χαμηλές ($1,6 \text{ kg/m}^3$ ως 960 kg/m^3). Συνήθως ταξινομούνται ως εύκαμπτοι, ημι-εύκαμπτοι (ημισυμπαγής), ή άκαμπτοι, και μπορούν να κατασκευαστούν σε **οποιοδήποτε επιθυμητό βαθμό σκληρότητας**. Μπορούν να κατασκευαστούν με ποικίλες διαδικασίες, ανάλογα με την εφαρμογή [3-3]. Οι χαρακτηριστικές μέθοδοι επεξεργασίας περιλαμβάνουν την **χύτευση** (pour-in-place), τη **σχηματοποίηση** (molding), τον **ψεκασμό** (spraying) και την **ελασματοποίηση** (lamination).

Οι κύριες εφαρμογές των πολυμερών αφρών περιλαμβάνουν τα **έπιπλα, τον κλάδο των μεταφορών, την κλινοστρωμή, το υπόστρωμα ταπήτων, τη συσκευασία, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, τα παιχνίδια, στολίσματα, αθλητικές εφαρμογές, παπούτσια, και την απορρόφηση των κραδασμών και του ήχου** (αυτοκίνητα, ένθετα παπουτσιών, κ.λ.π.). Ακόμη εφαρμογή βρίσκουν μεταξύ των άλλων στη μόνωση, τις συσκευές, την επίπλευση, τις διακοσμητικές σχηματοποιήσεις, τα εμπορευματοκιβώτια τροφίμων και ποτών. Οι αφροί χαμηλότερης πυκνότητας χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές συσκευασίας και τη μόνωση ψύξης, ενώ οι υψηλότεροι αφροί πυκνότητας χρησιμοποιούνται για τις μεταφέρουσες δομικές εφαρμογές.

3.2.2 Παρασκευή πολυμερών αφρών

Οι περισσότεροι αφροί σχηματίζονται με τη διαδικασία της διασποράς και εμπλέκουν γενικά τρία βήματα: **i) σχηματισμός φυσαλίδων, ii) αύξηση φυσαλίδων, και iii) σταθεροποίηση.**

Ο σχηματισμός φυσαλίδων απαιτεί συνήθως την παρουσία ενός μεγάλου αριθμού μικρόκενων ή ενός λεπτόρευστης ουσίας σχηματισμού κενών καθώς ο αυτοσχηματισμός κενών είναι απίθανος. Η αύξηση φυσαλίδων προκύπτει πρώτιστα από τη **διάχυση αερίου από το διάλειμμα στα μικρόκενων**.

Τρεις παράγοντες, προάγουν τη **σταθεροποίηση των φυσαλίδων αφρού**:

- i) Η αύξηση στο ιξώδες της πολυμερούς φάσης, (οφειλόμενη στην ψύξη ή τον περαιτέρω πολυμερισμό), είναι η σημαντικότερη σταθεροποιητική επιρροή.
- ii) Αύξηση στην περιοχή επιφάνειας απαιτεί αύξηση στην ελεύθερη ενέργεια. Μια πολύ μικρή αύξηση στην επιφανειακή περιοχή είναι απαραίτητη για τη θραύση του υλικού. Συνεπώς υπάρχει μια ελάχιστη ενέργεια ενεργοποίησης της ρήξης.
- iii) Μια ηλεκτρική δια-στρωματική φόρτιση δύναται να αναγκάσει τις δύο επιφάνειες ενός film να απομακρύνει η μία την άλλη.

Τέσσερις άλλοι παράγοντες προάγουν την **εκλέπτυνση των μεμβρανών**, και ως εκ τούτου την κατάρρευση του υλικού:

- i) Η μεταφορά του ρευστού από τις μεμβράνες προς τα άκρα, λόγω της βαρύτητας, είναι ο σημαντικότερος παράγοντας.
- ii) Υπερβολική επέκταση του πολυμερούς από το αέριο δημιουργεί έλλειψη πολυμερούς σώματος στα άκρα και τις πλευρές του αφρού. Αυτός είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που περιορίζει το βαθμό επέκτασης και την αντοχή του υλικού που μπορεί να ληφθεί.
- iii) Η έλξη των δεσμών Van der Waals μεταξύ των επιφανειών ενός λεπτού film μπορεί να οδηγήσει στην περαιτέρω εκλέπτυνση.
- iv) Οποιαδήποτε τοπική αύξηση των επιφανειακών τάσεων (π.χ. λόγω της υπερβολικής θερμότητας) μπορεί να προκαλέσει υπερβολική αύξηση των κενών ή την κατάρρευση.

Δύο πρόσθετοι παράγοντες καθιστούν την παραγωγή πολυμερών αφρών δύσκολη:

i) Αύξηση στην ελεύθερη ενέργεια του συστήματος πραγματοποιείται στη διαδικασία δημιουργίας αφρού, η οποία είναι ευθέως ανάλογη με την αύξηση στην επιφανειακή περιοχή. Η θερμοδυναμική ευνοεί έτσι την κατάρρευση.

ii) Ο δεύτερος είναι η λεπτή ισορροπία που απαιτείται συνήθως μεταξύ της αντοχής των μεμβρανών και των τοιχωμάτων και του χρόνου της επίτευξης της μέγιστης ανόδου αφρού. Τα τοιχώματα, πρέπει να είναι αρκετά ισχυρά ώστε να διατηρήσουν τον όγκο του αφρού εκείνη την στιγμή. Οι μεμβράνες προφανώς πρέπει να σπάσουν σε εκείνο το σημείο για την παραγωγή των αφρών ανοικτών-κύψελων, και δεν πρέπει να σπάσουν για την παραγωγή των αφρών κλειστών-κυψελών.

Αποτελεί έπαινο για τη βιομηχανία αφρών το ότι τέτοια περίπλοκα φυσικά συστήματα έχουν ρυθμιστεί και για να δώσουν ένα τόσο **ευρύ φάσμα των εμπορικά επιτυχών αφρών**, συμπεριλαμβανομένων πολλών χημικών τύπων, ένα πολύ ευρύ φάσμα πυκνοτήτων, όπως και μια πολύ εκτενή ποικιλία μηχανικών ιδιοτήτων.

3.2.3 Ο αφρός πολυουρεθάνης

-Χαμηλής πυκνότητας (εύκαμπτος)

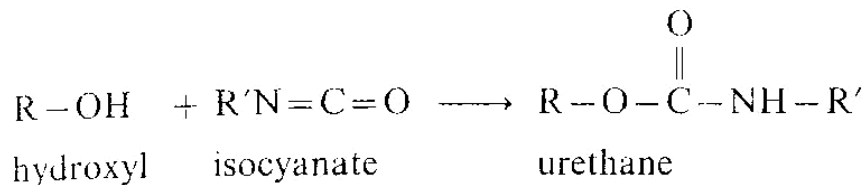
Οι **σημαντικότερες εφαρμογές** για τον εύκαμπτο αφρό πολυουρεθάνης είναι η επένδυση επίπλων (βλ. παράπλευρη εικόνα), τα στρώματα, η διάταξη θέσεων (ιδιαίτερα στις δημόσιες μεταφορές), τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (ιδιαίτερα για τη μόνωση και τις αθλητικές ενδυμασίες), και η υποστήριξη ταπήτων για τους φουντωτούς τάπητες. Ένα μη αμελητέο ποσό εύκαμπτου αφρού χρησιμοποιείται επίσης στη συσκευασία, ιδιαίτερα στην ημιμόνιμη συγκράτηση οργάνων και εργαλείων όπου από την κοπή



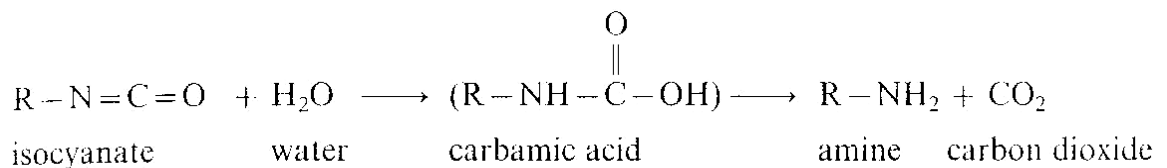
περιγράμματος του αφρού, αυτά τα προσεκτικά συσκευασμένα στοιχεία μπορούν να κρατηθούν στην προσαρμοσμένη θέση τους στα εμπορευματοκιβώτια. Οι εύμορφοι εύκαμπτοι αφροί πολουρεθάνιου χρησιμοποιούνται επίσης για τη μόνωση μικρών δονήσεων και ήχων.

Οι χημικές αντιδράσεις που εμφανίζονται στο σχηματισμό αφρού polyurethanic είναι σχετικά απλές. **Υπάρχουν τρεις κύριες αντιδράσεις:**

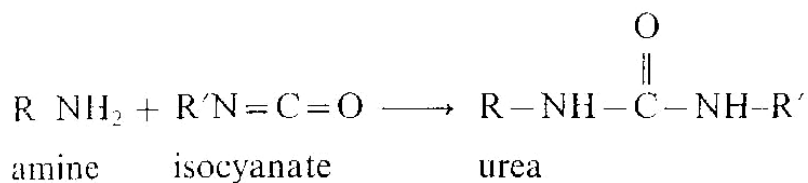
(1) αντίδραση του ισοκυανικού άλατος με το υδροξύλιο για να διαμορφώσει ουρεθάνη:



(2) αντίδραση του ισοκυανικού άλατος με το ύδωρ, που περιλαμβάνει ένα παροδικό καρβαμικό οξύ, για να παραγάγει διοξείδιο του άνθρακα και μια αμίνη,



(3) αντίδραση της αμίνης με το ισοκυανικό άλας για να διαμορφώσει έναν σύνδεσμο της ουρίας.

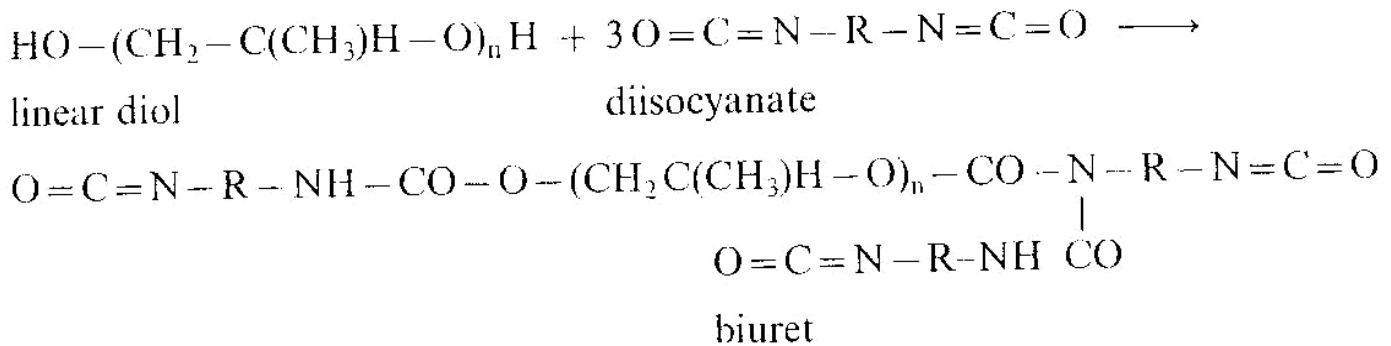


Η πολυπλοκότητα προκύπτει λόγω του στενού ελέγχου, και της ισορροπίας, που απαιτούνται για τις συγκεκριμένες αντιδράσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας συγκριτικά γρήγορης σειράς αντιδράσεων.

Αυτή η ισορροπία επιτυγχάνεται με την επιλογή ικανών καταλυτών αμέσου αντιδράσεως κατάλυσης. Η ποιοτική ικανότητα αντίδρασης κάθε ουσίας με το ισοκυανικό άλας συνοψίζεται στον παράπλευρο άνωθεν πίνακα (τα νούμερα αναπαριστούν αναλογίες).

Hydroxyls with phenyl isocyanate:	
Primary hydroxyl	1.0
Secondary hydroxyl	0.3
Tertiary hydroxyl	0.005
Isocyanate with <i>n</i> -butanol:	
2,4-toluene diisocyanate:	
4-NCO	1.0
2-NCO	0.2
4,4'-diisocyanato-diphenylmethane	0.75

Κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των αφρών πολουρεθάνιου στις αρχές της δεκαετίας του '50, οι εύκαμπτοι αφροί πολουρεθάνιου γίνονταν με την προετοιμασία ενός προ-πολυμερούς δυσοκυανικού πολυαιθέρα, ο οποίος είχε μοριακό βάρος περίπου 1000. Συνήθως, λίγο ύδωρ περιλαμβανόταν στην κατασκευή του προ-πολυμερούς, ως καταλύτης της ένωσης των μορίων για να αυξήσει το μοριακό βάρος του και να παρέχει μερικές περιοχές κλάδων για να αυξηθεί τη λειτουργικότητα του προ-πολυμερούς μέσω του σχηματισμού συνδέσμων biuret (βλ. κάτωθεν αντίδραση):



Αυτό το προϊόν ερχόταν σε αντίδραση έπειτα με το ύδωρ, χρησιμοποιώντας μερικούς καταλύτες τριτογενών αμινών, για να παραγάγει έναν αφρό. Η περαιτέρω επέκταση αλυσίδων εμφανιζόταν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αφρίσματος, μαζί με τη διακλάδωση και τη διασύνδεση μέσω του σχηματισμού συνδέσμων ουρίας, και μέσω της αντίδρασης του ισοκυανικού άλατος με το ουρεθάνιο και με τις ουρίες (για να παραγάγουν μονάδες biuret), για να λάβει το **ελαστομερικό, αφρισμένο δίκτυο πολυμερών αλυσίδων**.

-Υψηλής πυκνότητας (άκαμπτοι)

Όπως σημειώνεται νωρίτερα, η **πρακτική χρήση των άκαμπτων αφρών πολουρεθάνης άρχισε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκόσμιου πολέμου** ως υπερ-ελαφριά, ισχυρή δομική ενίσχυση για τα μέρη αεροσκαφών.

Η ανακάλυψη του πολυεστέρα και του τολουολίου δισοκυανικής βάσης, πληρωμένου με διοξείδιο του άνθρακα άκαμπτου αφρού πολουρεθάνης οδήγησε στις εφαρμογές ως δομικά στοιχεία, στοιχεία θερμικής μόνωσης, και υλικών επίπλευσης.

Οι περισσότερες εφαρμογές του συμπαγούς άκαμπτου αφρού πολουρεθανίου εκμεταλλεύονται τη **χαμηλή θερμική αγωγιμότητά του** και τα αυξανόμενα κίνητρα για να μειώσουν την καταναλισκόμενη ενέργεια. Οι καθαρώς δομικές εφαρμογές είναι σχετικά σπάνιες και εκμεταλλεύονται την υψηλή αναλογία αντοχής/βάρους αυτών των υλικών. Οι δύο μεγαλύτερες αγορές είναι **υλικά δόμησης και θερμικής μόνωσης**. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα 3,9 δισεκατομμύρια μετρικών τόνων (8,6 δισεκατομμύρια λίβρες) πολουρεθανίου που καταναλώθηκαν παγκοσμίως το 1986 περιέλαβαν 0,43 εκατομμύρια μετρικούς τόνους (946 εκατομμύρια λίβρες) οικοδομικών υλικών, και 0,27 μετρικούς τόνους (602 εκατομμύρια λίβρες) θερμικής μόνωσης για ψυγεία.

Τα οικοδομικά υλικά παρέχονται συχνά ως φύλλα που παράγονται από ειδικά μηχανήματα και που εφαρμόζονται ως υλικό κατασκευής σκεπών. Ο ψεκαζόμενος αφρός χρησιμοποιείται για τις σύνθετες ή ανώμαλες επιφάνειες. Η θερμική μόνωση για τη μεγάλη αγορά ψυγείων και ψυκτών.

Ο συμπαγής αφρός πολουρεθανίου έχει τη χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα των κοινών μονωτικών υλικών [3-4], και



που επιτρέπει τα λεπτά σχέδια τοίχων και την αποδοτικότερη χρήση του χώρου (βλ. παράπλευρη εικόνα). Εκτός από την κατασκευή, οι εφαρμογές ως θερμική μόνωση περιλαμβάνουν τα **μονωμένα φορτηγά, και τα μεταφορικά κιβώτια**. Οι κατεψυγμένες δεξαμενές, παραδείγματος χάριν για τα υγροποιημένα αέρια, περιλαμβάνουν συχνά μονωτικό αφρό πολουρεθάνιου. Παρόμοιος αφρός μονώνει επίσης τη δια-τμηματική σωλήνωση στην Αλάσκα και άλλους σωλήνες για τα προϊόντα που πρέπει να διατηρηθούν μέσα στα διευκρινισμένα όρια θερμοκρασίας.

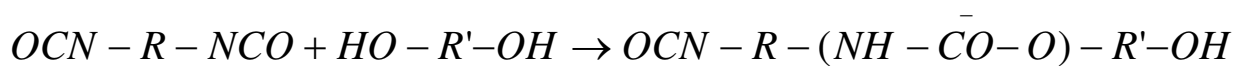
Οι άκαμπτοι αφροί πολουρεθάνιου είναι καλά πολύ χρήσιμα υλικά αλλά πρέπει να παραχθούν εφαρμόζοντας με πλήρη γνώση των **πιθανών κινδύνων υγείας**. Δύο κύριες ανησυχίες αφορούν **την εκρηκτικότητα του ολοκληρωμένου προϊόντος** και την **τοξικότητα των χημικών αρχικών υλικών**. Τα οργανικά ισοκυανικά άλατα επί παραδείγματι είναι ισχυρά αναπνευστικά ερεθιστικά, **τα οποία μπορούν να προκαλέσουν άσθμα στα εκτιθέμενα πρόσωπα**. Η υψηλή συγκέντρωση ή η επαναλαμβανόμενη υπερέκθεση μπορεί να παραγάγει, σε μερικά πρόσωπα, χημική ευαισθητοποίηση που χαρακτηρίζεται από περαιτέρω αντίδραση σε πολύ χαμηλά επίπεδα έκθεσης. Η μείωση στη λειτουργία πνευμόνων έχει αναφερθεί επίσης.

Όσον αφορά στις **μηχανικές ιδιότητες των συμπαγών αφρών πολουρεθάνης** στην πράξη τα υλικά αυτά δρουν περισσότερο ως δομές παρά ως στερεά υλικά. Οι ιδιότητες των άκαμπτων αφρών επηρεάζονται από τη δομή των κλειστών κυψελών και από τη ροή του αέρα ή άλλων ρευστών μέσω των ανοικτών κυψελών. Αυτά τα δομικά στοιχεία είναι σημαντικά και πρέπει να αντιμετωπιστούν χωριστά από εκείνα του πολυμερούς σώματος. Η ποικιλία των άκαμπτων αφρών πολουρεθάνιου καθιστά δύσκολη την απαρίθμηση των ακριβών μηχανικών ιδιοτήτων. Γενικά, αυτοί οι αφροί έχουν λεπτές δομές κλειστών κυψελών και τείνουν να είναι **περισσότερο όλκιμοι παρά ψαθυροί. Η μηχανική αντοχή τους είναι υψηλή για την πυκνότητά τους**.

Οι άκαμπτοι πολυμερείς αφροί **χρησιμοποιούνται συχνότερα σε συμπίεση απ'ότι σε έκταση** αν και μπορούν να εκτεθούν σε καμπτικές ή διατμητικές καταπονήσεις. Πολλές εφαρμογές, (παραδείγματος χάριν η θερμική μόνωση), δεν είναι

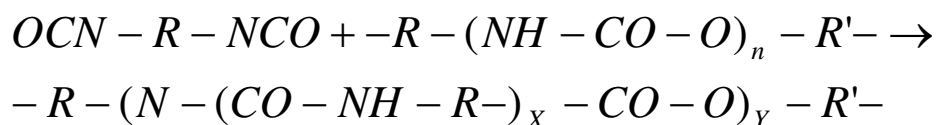
δομικές. Η σταθερότητα των διαστάσεων και της σύνθεσης είναι πολύ σημαντική για τα υλικά αυτά. Οι αλλαγές που προκαλούνται από την απορρόφηση ύδατος ή από τη διάχυση αερίων στους πόρους του αφρού δύνανται να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις ιδιότητες. Οι άκαμπτοι αφροί πολουρεθάνιου δεν παρουσιάζουν κάποια ευκρινή θερμοκρασία μετάβασης. Η συμπεριφορά τους εξαρτάται από τη σύνθεσή τους: Οι τυπικοί αφροί μαλακώνουν βαθμιαία στις θερμοκρασίες επάνω από 150°C και αποσυνθέτονται επάνω από τους περίπου 200°C.

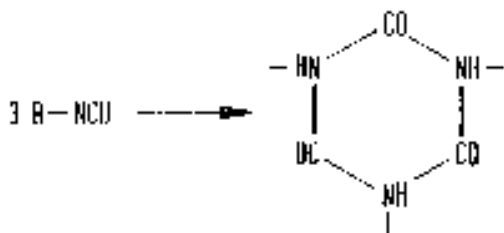
Για να είμαστε ακριβείς, οι άκαμπτοι αφροί πολουρεθάνιου πρέπει να θεωρηθούν **συμπολυμερή που περιέχουν αιθέρα, εστέρα, και άλλες λειτουργικές ομάδες εκτός από το δεσμό ουρεθανίου**. Η κύρια αντίδραση διαμόρφωσης πραγματοποιείται μεταξύ των ισοκυανικών αλάτων και των πολυυδροξυλικών ενώσεων, διαμορφώνοντας το σύνδεσμο ουρεθάνης:



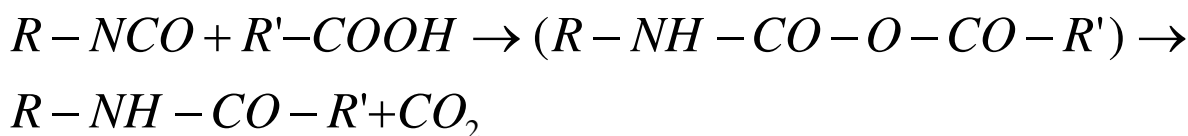
Η συνεχής αντίδραση παράγει πολυμερή σώματα υψηλού μοριακού βάρους που μπορούν να ολοκληρωθούν είτε σε ομάδες ισοκυανικού άλατος είτε υδροξυλίου ανάλογα με τη μοριακή αναλογία των αντιδραστηρίων.

Παρουσία των ομάδων ισοκυανικού άλατος, οι περαιτέρω αντιδράσεις μπορούν να εμφανιστούν για να παραγάγουν αλλοφαναμίνες και άλλα δευτεροβάθμια προϊόντα.

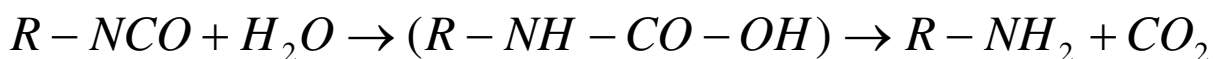




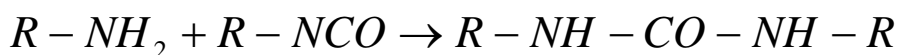
Όπως σημειώνεται προηγουμένως, οι αρχικοί άκαμπτοι αφροί πολυουρεθάνιου εξαρτήθηκαν από το διοξείδιο του άνθρακα για την επέκτασή τους. Μερικά από τα αέρια διαμορφώνονταν από την αντίδραση των ισοκυανικών αλάτων με τις τελικές καρβοξυλικές ομάδες, παράγοντας πρώτα έναν ασταθή ανυδρίτη, έπειτα ένα αμίδιο και ένα διοξείδιο του άνθρακα.



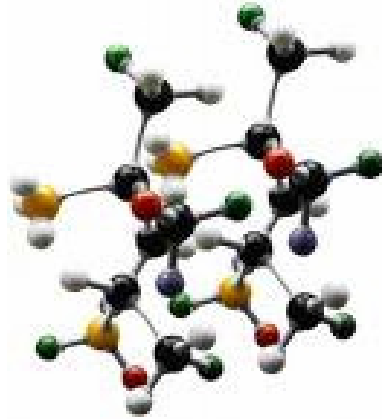
Το διοξείδιο του άνθρακα, παραδείγματος χάριν στην παραγωγή των εύκαμπτων αφρών πολυουρεθάνιου, παράγεται από την αντίδραση των ισοκυανικών αλάτων και του ύδατος. Αυτή η αντίδραση προχωρά επίσης μέσω ενός ασταθούς μεσάζοντος.



Η περαιτέρω αντίδραση της αμίνης με το πρόσθετο ισοκυανικό άλας παράγει τις αντικατασταθείσες ουρίες και, παρουσία ισοκυανικού άλατος, δεσμούς biurets.



Το διοξείδιο του άνθρακα είναι αποτελεσματικό αέριο διόγκωσης για τους άκαμπτους αφρούς πολυουρεθάνιου αλλά η χρήση του διαφέρει από αυτές του CFCl_3 και άλλων ανενεργών χλωροφλωροανθράκων. Πολύ συχνά αναφέρεται επίσης η **υψηλή θερμική αγωγιμότητα του διοξειδίου του άνθρακα, ένα μειονέκτημα στις εφαρμογές μόνωσης**. Συχνά, το διοξείδιο του άνθρακα διαχέεται μέσω των τοιχωμάτων του πολυουρεθάνιου κυττάρων, γρηγορότερα από τους χλωροφλωροάνθρακες και παράγει μεγαλύτερες δυσαναλογίες πίεσης μεταξύ των κυψελών και της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να εξισορροπηθούν οι πιέσεις και η σύνθεση του αερίου.



3.2.4 Θλιπτική καταπόνηση των πολυμερών αφρωδών υλικών με ανοικτές κυψέλες

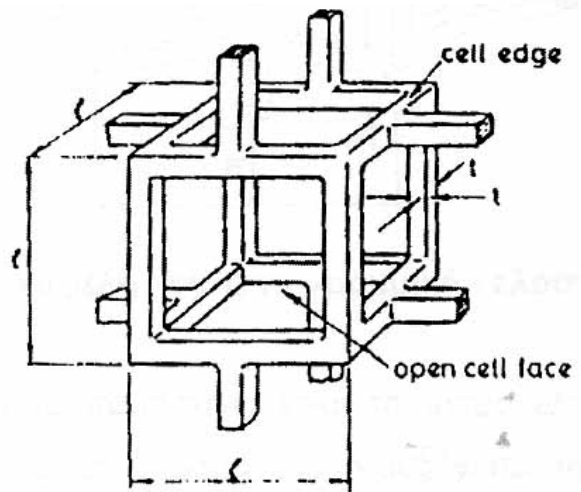
Οι βιομηχανικοί αφροί, που είναι οι πιο συνηθισμένοι στην εποχή μας χρησιμοποιούνται κυρίως για την απορρόφηση ενέργειας σε συγκρούσεις (συσκευασίες προϊόντων) και σε ελαφρές κατασκευές. Άρα για την αποτελεσματική χρησιμοποίησή τους, απαιτείται λεπτομερής γνώση της μηχανικής τους συμπεριφοράς [3-3]. Ακόμα και όταν η χρήση τους δεν είναι μηχανική, δηλαδή όταν ο αφρός χρησιμοποιείται για θερμική μόνωση ή σαν φίλτρο η αντοχή τους και η συμπεριφορά τους κατά τη θραύση εξακολουθούν να μας ενδιαφέρουν. Από τα παραπάνω καθίσταται προφανής η ανάγκη κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς των αφρών. Τα κυριότερα δομικά χαρακτηριστικά της δομής ενός αφρού, είναι η *σχετική του πυκνότητα* ρ^*/ρ_s , ο βαθμός στον οποίο οι κυψέλες του είναι *ανοικτές* ή *κλειστές*, και οι *λόγοι ανισοτροπίας* του R_{12} και R_{13} . Οι κρίσιμες ιδιότητες των τοιχωμάτων των κυψελών είναι η πυκνότητα του στερεού από το οποίο αποτελούνται, ρ_s , το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) E_s , το όριο διαρροής σ_{v3} , το όριο θραύσης σ_{fs} και οι παράμετροι ερπυσμού n_s , ϵ_{os} , και σ_{os} . Οι ιδιότητες ενός αφρού αναλύονται με βάση αυτές

τις παραμέτρους και κατόπιν συγκρίνονται και συσχετίζονται με τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να δώσουν κατάλληλες εξισώσεις.

Για να περιγραφεί ένας ισοτροπικός αφρός χρειάζονται δύο μέτρα. Συνήθως επιλέγονται δύο απ' τα εξής: το μέτρο ελαστικότητας E^* , το μέτρο διάτμησης G^* και το λόγο του Poisson ν . Περισσότερα από δύο χρειάζονται σε άλλες περιπτώσεις: πέντε αν η δομή του αφρού είναι αξονοσυμμετρική, εννιά αν η δομή του είναι ορθοτροπική.

Σε αφρούς ανοικτών κυψελών, τα τοιχώματα των κυψελών κάμπτονται όταν εφαρμόζεται φορτίο. Οι αφροί κλειστών κυψελών συμπεριφέρονται με πιο πολύπλοκο τρόπο. Αν οι μεμβράνες που σχηματίζουν τις έδρες των κυψελών δε διαρρηχθούν, τότε υπάρχουν δύο σημαντικές επιδράσεις στους συντελεστές. Η πρώτη εμφανίζεται λόγω του ότι η επιβολή παραμόρφωσης εκτείνει τις μεμβράνες, με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη αντοχή τους σε εφελκυσμό να συνεισφέρει στην αντοχή σε εφελκυσμό ολόκληρου του αφρού. Η δεύτερη προκαλείται από τη συμπίεση του ρευστού (συνήθως αέρα), που είναι εγκλεισμένο μέσα στις κυψέλες.

Στο απλούστερο επίπεδο ένας αφρός ανοικτών κυψελών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κύβος ακμών μήκους l και τετραγωνικής διατομής κορυφών πάχους t (βλ. παράπλευρο σχήμα). Οι γειτονικές κυψέλες έχουν αραιωθεί έτσι ώστε οι ακμές τους να συναντώνται στα μέσα τους. Η σχετική πυκνότητα της κυψέλης ρ^*/ρ_s , και η ροπή αδρανείας μιας ακμής, I , συσχετίζονται με τις διαστάσεις t και l με τις σχέσεις,



$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad \text{και} \quad I \propto t^4 \quad (3-6)$$

Το μέτρο ελαστικότητας του αφρού υπολογίζεται από τη γραμμική - ελαστική κάμψη μιας δοκού μήκους l η οποία καταπονείται από φορτίο F στο μέσο της. Σύμφωνα με τη θεωρία περί δοκών, η προκαλούμενη κάμψη δ θα είναι ανάλογη προς το μέγεθος $F l^3 / E_s I$, όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δοκού. Όταν εφαρμόζεται μονοαξονική τάση στον αφρό έτσι ώστε κάθε ακμή της κυψέλης να μεταδίδει δύναμη F οι ακμές κάμπτονται, και η γραμμική - ελαστική κάμψη της δομής θεωρούμενης ως σύνολο, είναι ανάλογη προς $F l^3 / E_s I$. Έτσι το μέτρο ελαστικότητας για τον αφρό δίνεται από τη σχέση,

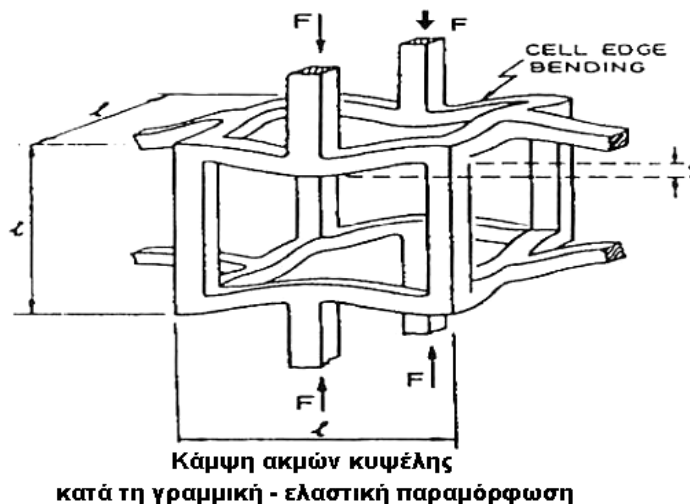
$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{C_1 \cdot E_s \cdot I}{l^4} \quad (3-7)$$

από την οποία παίρνουμε,

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (3-8)$$

όπου το C_1 εμπεριέχει όλες τις γεωμετρικές σταθερές αναλογίας. Κάθε ισοαξονική κυψελική μορφή οδηγεί σ' αυτό το αποτέλεσμα. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στην τιμή της σταθεράς C_1 .

Πρέπει να τονιστεί ότι το παραπάνω είναι το μέτρο ελαστικότητας για μικρές παραμορφώσεις. Όσο η ελαστική παραμόρφωση αυξάνεται, το αξονικό φορτίο πάνω σε



μια κυψελική ακμή (ας το ονομάσουμε P), αυξάνει επίσης. Αν το P προσεγγίσει το κρίσιμο φορτίο κατά Euler, P_{crit} της ακμής, αυτή υφίσταται λυγισμό. **Αλλά ακόμη και πριν το λυγισμό, το αξονικό φορτίο ασκεί μια πρόσθετη ροπή** (την οποία αγνοήσαμε ως τώρα) στην καμπτόμενη ακμή.

Κατά τη συμπίεση αυτή η αλληλεπίδραση δοκού - κολώνας έχει ως συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας E^* , ενώ στον εφελκυσμό το αυξάνει. Έτσι το μέρος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης που αποκαλέσαμε γραμμικό - ελαστικό, δεν είναι πραγματικά γραμμικό, αλλά στρέφεται προς τα κάτω. Εξάλλου, και το μέτρο ελαστικότητας, αν μετρηθεί για πεπερασμένη παραμόρφωση, είναι μικρότερο στη θλίψη απ' ό,τι στον εφελκυσμό.

Το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται ομοίως. Αν εφαρμόσουμε διατμητική τάση τ σε αφρό, οι ακμές των κυψελών αντιδρούν καμπτόμενες. Αφού η κάμψη δ είναι ανάλογη προς $Fl^3/E_s I$, και η συνολική τάση τ και η παραμόρφωση γ είναι ανάλογες προς F/l^2 και δ/l^2 , αντιστοίχως, θα έχουμε,

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{C_{21} \cdot E_s \cdot I}{l^4} \quad (3-9)$$

απ' όπου προκύπτει:

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (3-10)$$

για ισοαξονική μορφή ακμών. Από πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι $C_2=3/8$.

Ο λόγος Poisson ν^* , είναι το αρνητικό πηλίκο της πλευρικής προς την αξονική παραμόρφωση. Αφού και οι δύο είναι ανάλογες προς το μέγεθος της κάμψης ανά μονάδα μήκους κυψέλης, ο λόγος τους θα είναι μια σταθερά και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο λόγος Poisson εξαρτάται μόνον από τη γεωμετρία της κυψέλης και όχι από την πυκνότητα της. Για ένα γραμμικό - ελαστικό και ισότροπο υλικό ισχύει:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

απ' όπου,

$$\nu^* = \frac{C_1}{2C_2} - 1 = C_3 \quad (3-11)$$

Η ανάλυση για τα E^* , G^* και ν^* που προηγήθηκε, περιέχει κάποιες προσεγγιστικές παραδοχές. Για παράδειγμα, βάσει του τρόπου υπολογισμού της πυκνότητας μετράμε

διπλά τις γωνίες μεταξύ των κυψελών. Επίσης οι αξονικές και εγκάρσιες μετατοπίσεις των τοιχωμάτων των κυψελών έχουν αγνοηθεί, γιατί είναι συνήθως μικρές συγκρινόμενες με τις μετατοπίσεις λόγω κάμψης.

3.2.5 Θλιπτική καταπόνηση των πολυμερών αφρωδών υλικών με κλειστές κυψέλες

Οι αφροί με κλειστές κυψέλες είναι πολυπλοκότεροι. Όταν οι αφροί παρασκευάζονται από υγρά συστατικά, η επιφανειακή τάση μπορεί να θέλξει υλικό προς τις ακμές των κυψελών, αφήνοντας μόνο μια λεπτή μεμβράνη κατά μήκος των εδρών της κυψέλης, που διαρρηγνύεται εύκολα. Έπειτα, καθώς ο αφρός έχει κυψέλες αρχικά κλειστές, η σκληρότητα του προέρχεται αποκλειστικά από τις ακμές των κυψελών, και τα διάφορα μέτρα του θα είναι πανομοιότυπα με αυτά ενός αφρού ανοικτών κυψελών.

Αλλά δεν είναι όλοι οι αφροί κλειστών κυψελών έτσι. Ορισμένα πολυμερή και γυαλιά δίνουν αφρούς στους οποίους σημαντικό τμήμα του στερεού περιέχεται στις έδρες των κυψελών, οι οποίες τώρα **συνεισφέρουν στην ακαμψία του**. Πολλά φυσικά κυψελοειδή στερεά (όπως τα φύλλα) έχουν κλειστές κυψέλες με παχιές κυψελικές έδρες. Τότε τα μέτρα εξαρτώνται από την πυκνότητα κατά έναν ελαφρώς διαφορετικό τρόπο.

Ας θεωρήσουμε έναν αφρό κλειστών κυψελών, στον οποίο ένα κλάσμα ϕ του στερεού περιέχεται στις κυψελικές ακμές πάχους t_c . Το εναπομείναν κλάσμα $(1-\phi)$, είναι στις έδρες που έχουν πάχος t_f .

Το μέτρο ελαστικότητας για αφρούς κλειστών κυψελών προκύπτει ως η συνισταμένη τριών συνιστωσών. Η πρώτη εμπεριέχει τη συνεισφορά των κάμψεων των κυψελικών ακμών. Σχεδόν πάντα, είναι ίδια με τον συντελεστή που υπολογίσαμε στην

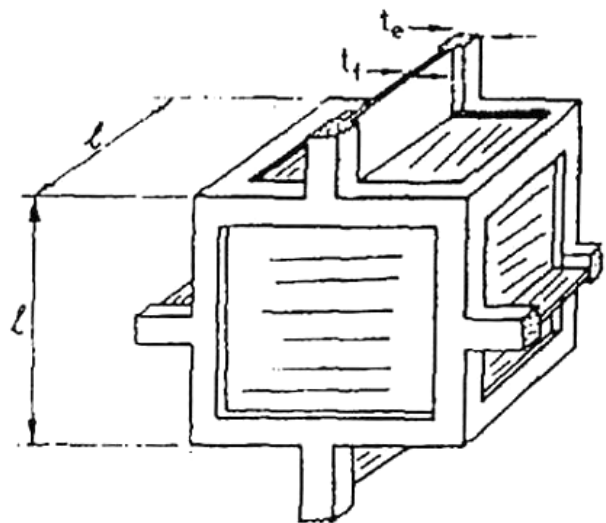
$$\text{εξίσωση } \frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \text{ πολλαπλασιασμένη με τον παράγοντα } (0.86\phi)^2 .$$

Η δεύτερη συνιστώσα περιέχει τη συνεισφορά η οποία προκαλείται από τη συμπίεση του ρευστού της κυψέλης. Αυτή υπολογίζεται θεωρώντας δείγμα αφρού όγκου V_o και σχετικής πυκνότητας ρ^*/ρ_s , οι κυψέλες του οποίου περιέχουν ένα αέριο. Αν το δείγμα συμπιέζεται αξονικά με παραμόρφωση ε , ο όγκος του μειώνεται από V_o σε V , όπου

$$\frac{V}{V_o} = 1 - \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*) \quad (3-12)$$

Το αέριο καταλαμβάνει το χώρο της κυψέλης και αποκλείεται από τον όγκο που καταλαμβάνεται από τις στερεές έδρες και ακμές, και έτσι ο όγκος του μειώνεται από V_g^0 σε V_g όπου,

$$\frac{V_g}{V_g^0} = \frac{1 - \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*) - \frac{\rho^*}{\rho_s}}{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}} \quad (3-13)$$



Μοντέλο κυβικής κυψέλης για αφρό κλειστών κυψελών, με πάχος ακμής t_c και πάχος εδρών t_f .

Η συνεισφορά στο μέτρο υπολογίζεται από το νόμο του Boyle. Αν η αρχική πίεση του αερίου είναι p_o (συνήθως ατμοσφαιρική) τότε η πίεση p , μετά από παραμόρφωση ε δίνεται από την εξίσωση,

$$p \cdot V_g = p_o \cdot V_g^o$$

Η πίεση που πρέπει να υπερνικηθεί από την εφαρμοζόμενη τάση είναι,

$$p' = p - p_o$$

Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη εξίσωση βρίσκουμε ότι,

$$p' = \frac{p_o \cdot \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot v^*)}{1 - \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot v^*) - \frac{\rho^*}{\rho_s}} \quad (3-14)$$

Η συνεισφορά στο συντελεστή (παίρνοντας το όριο για μικρό ε) είναι,

$$E_g^* = \frac{dp'}{d\varepsilon} = \frac{p_o \cdot (1 - 2 \cdot v^*)}{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}} \quad (3-15)$$

Όταν το p_o είναι η ατμοσφαιρική πίεση (0,1 MPa), η συνεισφορά είναι μικρή. Υφίσταται συνεισφορά στο μέτρο ενός ελαστομερούς αφρού κλειστών κυψελών, αλλά δεν αλλάζουν τα μέτρα άλλων αφρών. Από την άλλη, αν η p_o είναι πολύ μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση, ή το ρευστό της κυψέλης είναι υγρό και όχι αέριο (όταν μ' άλλα λόγια το ρευστό συμπεριφέρεται ως ασυμπίεστο οπότε και απαιτείται πρόσθετη επιμήκυνση των κυψελικών τοιχωμάτων), **η συνεισφορά του ρευστού της κυψέλης δε μπορεί να αγνοηθεί**. Και αυτή είναι σημαντική και από μια άλλη άποψη: αλλάζει το σχήμα του ελαστικού επιπέδου κατάρρευσης. Αλλά πρώτα θα εξετάσουμε την τρίτη συνεισφορά στην ακαμψία των αφρών κλειστών κυψελών.

Αυτή προέρχεται από τις **μεμβρανικές τάσεις στις επιφάνειες των κυψελών**. Όταν ένας αφρός κλειστών κυψελών φορτίζεται, η κάμψη των ακμών των κυψελών προκαλεί την επιμήκυνση των επιφανειών των κυψελών. Η κατεύθυνση της επιμήκυνσης κατά τη συμπίεση, είναι 90° ως προς την αντίστοιχη του εφελκυσμού, αλλά το μέγεθος είναι ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Η δύναμη F προκαλεί **παρέκκλιση κατά δ στην ακμή της κυψέλης**.

Η δομή είναι γραμμική ελαστική, οπότε παράγεται έργο $(1/2)F\delta$ εξαιτίας της δύναμης επαναφοράς που οφείλεται στο **λυγισμό των ακμών των κυψελών και στην επιμήκυνση των επιφανειών τους**. Η πρώτη από αυτές είναι ανάλογη προς την ποσότητα $(1/2)S\delta^2$, όπου S είναι η δυσκαμψία της κυψελικής ακμής. Η δεύτερη είναι ανάλογη προς την ποσότητα $E_s \varepsilon^2 V_f / 2$, όπου ε είναι η παραμόρφωση που προκαλείται απ'

την επιμήκυνση μιας κυψελικής επιφάνειας, και V_f είναι ο όγκος του στερεού σε μια κυψελική επιφάνεια. Έτσι,

$$\frac{1}{2} \cdot F \cdot \delta = \frac{a \cdot E_s \cdot I \cdot \delta^3}{l^3} + \beta \cdot E_s \cdot \left(\frac{\delta}{l}\right)^2 \cdot l^2 \cdot t_f \quad (3-16)$$

Από τις σχέσεις $I = t_c^4$ και $E^* = (F/l^2)/(\delta/l)$ λαμβάνουμε,

$$\frac{E^*}{E_s} = a' \cdot \frac{t_c^4}{l^4} + \beta' \cdot \frac{t_f}{l} \quad (3-17)$$

Τελικά προκύπτει,

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \phi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + C_1' \cdot (1-\phi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3-18)$$

(κλειστές κυψέλες, με μεμβρανικές τάσεις)

όπου $a, \beta, a', \beta', C_1, C_1'$ είναι σταθερές αναλογίας. Αυτή η εξίσωση περιγράφει το συνδυασμένο αποτέλεσμα της κάμψης της κυψελικής ακμής και της έκτασης της κυψελικής επιφάνειας. Σ' αυτό πρέπει να προστεθεί η συνεισφορά του μεγέθους,

$$\frac{\rho_o \cdot (1-2\nu^*)}{E_s \cdot \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}\right)} \quad (3-19)$$

όταν η συμπίεση του αερίου είναι σημαντική. Απομένει ο καθορισμός των C_1 και C_1' .

Τα όρια για $\phi=1$ και για $\phi=0$ (οπότε αναμένουμε $E^*/E_s = \rho^*/\rho_s$) δίδουν $C_1 \approx C_1' \approx 1$. Τα δεδομένα που εξετάστηκαν προηγουμένως επαληθεύουν τα ανωτέρω. **Το μέτρο διάτμησης G^* , ενός αφρού κλειστών κυψελών, όπως και το μέτρο ελαστικότητας του, επηρεάζονται απ' τον εφελκυσμό των κυψελικών επιφανειών.** Παρόμοια ανάλυση με αυτή που ακολουθήθηκε για το E^* , δίδει,

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \cdot \phi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_2' \cdot (1-\phi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3-20)$$

(κλειστές κυψέλες, με μεμβρανικές τάσεις)

Δεδομένου ότι η καθαρή διάτμηση δε μεταβάλλει τον όγκο, δεν υφίσταται συνεισφορά της πίεσης των εγκλεισμένων στις κυψέλες αερίων στο μέτρο διάτμησης.

Ο λόγος του Poisson για κλειστές κυψέλες, όπως και για τις ανοικτές κυψέλες, είναι ο λόγος δύο παραμορφώσεων κι έτσι **εξαρτάται απ' τις λεπτομέρειες του σχήματος της κυψέλης, αλλά όχι απ' τη σχετική πυκνότητα.**

Αν πάρουμε ομάδες δεδομένων για το μέτρο διάτμησης ξεχωριστά, κάθε μια συμφωνεί με την κατάλληλη εξίσωση για ολόκληρο το φάσμα των πυκνοτήτων, αλλά υπάρχει μερική διαφοροποίηση στο σημείο τομής των αξόνων, C_1 , για $\rho^*/\rho_s=1$. Υπάρχουν πολλές πιθανές ερμηνείες γι' αυτό: το μεταβλητό κλάσμα ϕ του στερεού στις κυψελικές επιφάνειες, μεταβλητή γεωμετρία των αφρών (που καθορίζει τις σταθερές C_1 κλπ) και η αβεβαιότητα για την τιμή του μέτρου ελαστικότητας του στερεού E_s .

Το τελευταίο είναι και το πιο πιθανό: η τιμή του E_s σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια για πολυμερείς αφρούς, γιατί εξαρτάται απ' τον βαθμό της ευθυγράμμισης της πολυμερούς αλυσίδας, από χημικές μεταβολές που προκλήθηκαν από παράγοντες αφροποίησης και απ' τη βαθμιαία γήρανση και οξείδωση του πολυμερούς. Παρ' όλες τις μικροδιακυμάνσεις, όλες οι ενδείξεις δείχνουν ότι τα μέτρα περιγράφονται ικανοποιητικά απ' τις σχέσεις,

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \phi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1-\phi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} + \frac{p_o \cdot (1-2\nu^*)}{E_s \cdot \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)} \quad (3-21)$$

$$\frac{G^*}{E_s} \approx \frac{3}{8} \left\{ \phi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1-\phi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} \right\} \quad \text{και} \quad \nu^* \approx \frac{1}{3} \quad (3-22)$$

3.3 Μεταλλικά αφρώδη υλικά

3.3.1 Εισαγωγικά

Ένας αφρός μετάλλων είναι μια κυψελοειδής δομή [3-5] που **αποτελείται από στερεό μέταλλο** (συντά αλουμίνιο) περιέχοντας ένα **μεγάλο μέρος όγκου γεμισμένο με αέριο**. Οι πόροι που περιέχουν το αέριο μπορούν να **σφραγιστούν (αφρός κλειστών κύψελων)**, ή μπορούν να **διαμορφώσουν ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο (αφρός ανοικτών κύψελων)**. Το χαρακτηριστικό των αφρών μετάλλων είναι το πολύ υψηλό πορώδες καθώς πάνω από 80% του όγκου αποτελείται από τα κενά διαστήματα.



Οι μεταλλικοί αφροί είναι ένα αρκετά **καινοτομικό σύγχρονο προϊόν** (αναπτύχθηκε γύρω στα 1985) που έχει προσφέρει λύσεις στον τεχνολογικό τομέα. Τα **κυριότερα συγκριτικά πλεονεκτήματά τους** σε σχέση με τα συμβατικά υλικά είναι τα εξής:

- Είναι έως και 90% ελαφρύτεροι από τα αντίστοιχα συμπαγή υλικά (π.χ ο αφρός αλουμινίου έχει πυκνότητα έως και $0,25 \text{ gr/cm}^3$)
- Είναι άκαμπτοι. Με αφρό αλουμινίου επιτυγχάνουμε την ίδια ακαμψία με 4πλάσιο πάχος και με μόλις το 1/3 του βάρους μιας αλουμινένιας συμπαγούς πλάκας.
- Έχουν υψηλή δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (μηχανικής και ηχητικής).
- Δύνανται να προσφέρουν ηλεκτρομαγνητική μόνωση
- Έχουν πολύ υψηλό Young's modulus σε σχέση με τους πολυμερείς αφρούς.
- Είναι μη-εκρηκτικά και μη-τοξικά υλικά.

3.3.2 Εφαρμογές

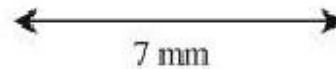
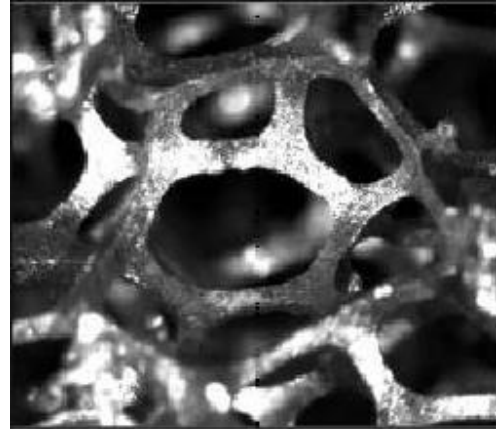
Ο μοναδικός συνδυασμός ταυτοχρόνως τόσων ιδιοτήτων σε ένα ομοιογενές υλικό ανοίγει πόρτες σε ποικίλες πιθανές βιομηχανικές εφαρμογές [3-6]. **Οι κυριότερες εφαρμογές στις οποίες προτιμώνται οι μεταλλικοί αφροί** λόγω των ανώτερων πλεονεκτημάτων τους είναι οι εξής:

- Εφαρμογή σε κατασκευές στις οποίες απαιτείται απορρόφηση ενέργειας σύγκρουσης (χρησιμοποιείται εδώ και 10 περίπου έτη σε ιαπωνικές αμαξοστοιχίες).
- Ως ενισχυτικό σε κατασκευές sandwich όπου προσφέρει μείωση του βάρους και του αριθμού των προς συναρμολόγηση τεμαχίων και αύξηση της αντοχής. (Εφαρμογή εδώ και αρκετά έτη σε αμερικανικά ελικόπτερα).
- Εφαρμογές μόνωσης και απορρόφησης ήχου (γνωστό εδώ και αρκετά έτη και χρησιμοποιούμενο σε συνδυασμό με το ξύλο στα σουηδικά μουσικά studios).
- Επικάλυψη ειδικών επιφανειών και εφαρμογή σε αρχιτεκτονικές κατασκευές είτε λόγω των ιδιοτήτων (άφλεκτο μονωτικό υλικό) είτε λόγω αισθητικής (art-deco).
- Χρησιμοποίηση ως γενικό δομικό υλικό σε υπερελαφρές κατασκευές (βλ. αγώνες αυτοκινήτου και τεχνολογία αεροσκαφών)
- Εφαρμογή σε εναλλάκτες θερμότητας, φίλτρα και καταλύτες.

3.3.3 Μηχανική των μεταλλικών αφρών

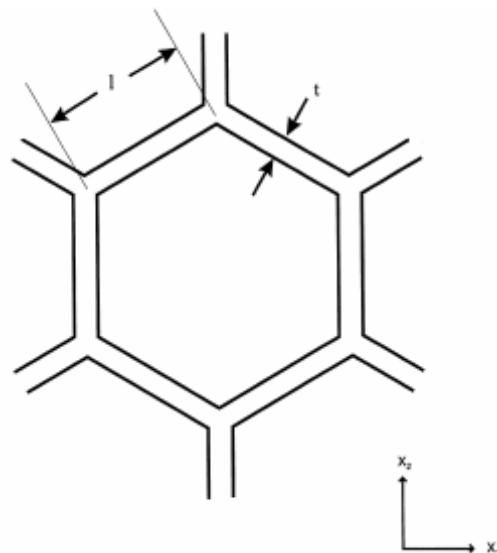
Διάφορες νέες τεχνικές επεξεργασίας έχουν καταστήσει τους μεταλλικούς αφρούς ευρύτερα διαθέσιμους για τη χρήση σε εφαρμογές όπως οι υπερ-ελαφριές δομές [3-7] σάντουιτς και οι συσκευές ενεργειακής απορρόφησης. Οι σάντουιτς δομές με μεταλλικούς πυρήνες αφρού μπορούν να διαμορφωθούν σε εξαιρετικά σύνθετες μορφές.

Οι μεταλλικοί αφροί που χρησιμοποιούνται ως συστατικά στη βιομηχανία οχημάτων στις προστατευτικές συσκευές για να απορροφήσουν την ενέργεια των συγκρούσεων και να μειώσουν τον κλονισμό έχουν επίσης σύνθετες μορφές. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, ο αφρός μπορεί να υπόκειται στα πολυαξονικά φορτία. Στο σχεδιασμό κατασκευών σάντουιτς, το φορτίο της αρχικής αστοχίας είναι κρίσιμο για τους μηχανικούς. Στο σχεδιασμό συσκευών ενεργειακής απορρόφησης, η κατανόηση της συμπεριφοράς μετά τη σύγκρουση είναι επίσης ουσιαστική. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, απαιτείται μια **πληρέστερη καταστατική εξίσωση που να περιγράφει λεπτομερώς τη συμπεριφορά του αφρού.**



Μη πετρελαισμένος πόρος ενός μεταλλικού αφρού ανοικτών κυψελών

Τα κυψελοειδή στερεά μπορούν να αστοχήσουν με διάφορους μηχανισμούς (ελαστικός λυγισμός, πλαστική κάμψη, ή ψαθυρή συντριβή), **ανάλογα με τη φύση και τη σχετική πυκνότητα του στερεού από το οποίο είναι φτιαγμένα.** Οι επιφάνειες αστοχίας που συνδέονται με κάθε έναν από αυτούς τους τρόπους θεωρούνται εξαγωνικές κηρήθρες, ιδανικές, ιστροπικές και ομοιογενείς. Εδώ, ενδιαφερόμαστε για την επιφάνεια λυγισμού. Η μηχανική μπορεί να γίνει κατανοητή με την εξέταση της απόκρισης μιας κανονικής εξαγωνικής κυψέλης (βλ. παράπλευρο σχέδιο).



Στην ομοαξονική φόρτιση, **τα κεκλιμένα μέλη παραμορφώνονται πρώτιστα σε κάμψη** καθώς οι αξονικές και οι διατμητικές πιέσεις είναι μικρές έναντι των καμπτικών

πίεσεων και η πλαστική αντοχή της κυψέλης είναι ανάλογη με την ποσότητα $(\frac{t}{l})^2$. Στην διαξονική φόρτιση, οι καμπτικές πιέσεις καταστέλλονται και τα τοιχώματα αναπτύσσονται ή συσπειρώνονται ομοαξονικά. Η πλαστική αντοχή στην διαξονική φόρτιση είναι ευθέως ανάλογη με την ποσότητα $(\frac{t}{l})$.

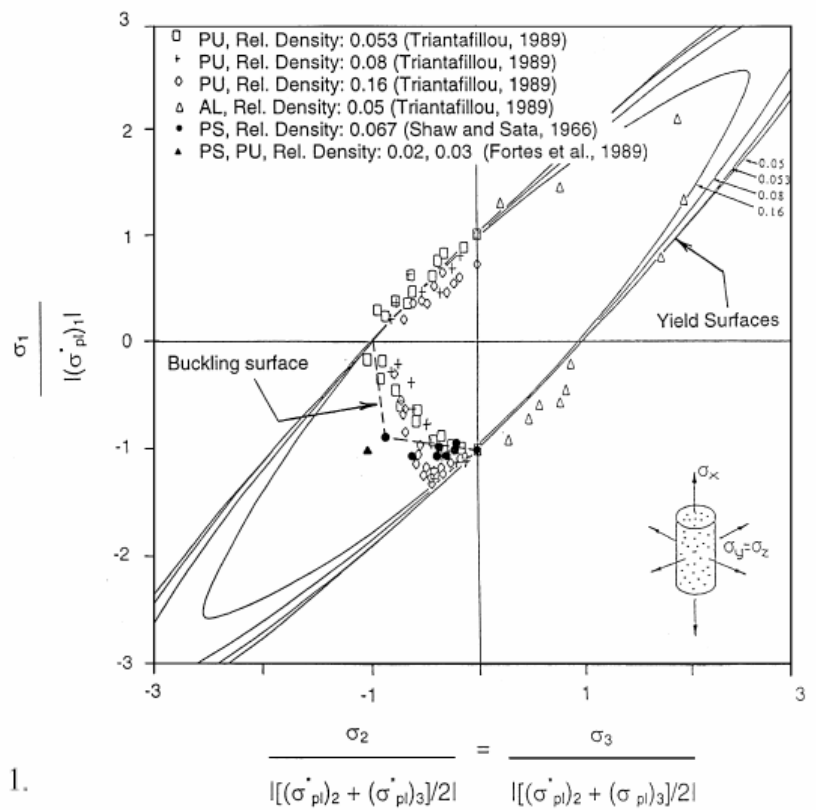
Η προκύπτουσα επιφάνεια υποχώρησης (yield surface) είναι ιδιαίτερα επιμηκυμένη στην κατεύθυνση της διαξονικής πίεσης (βλ. παράπλευρο διάγραμμα) όταν σχεδιάζεται στους άξονες σ_1 και σ_2 . Γενικά, οι καμπτικές πιέσεις ποικίλλουν ως $\sigma_1 - \sigma_2$ ενώ οι αξονικές πιέσεις ως $\sigma_1 + \sigma_2$. Η ανάλυση για τους ιδανικούς, ισοτροπικούς, ομοιογενείς αφρούς ακολουθεί ένα παρόμοια διαδικασία. [3-8] Η ομοαξονική φόρτιση προκαλεί την κάμψη στις άκρες των πόρων ενώ η υδροστατική φόρτιση προκαλεί την ανάπτυξή τους.

Η επιφάνεια υποχώρησης δίνεται από τη σχέση:

$$\pm \frac{\sigma_c}{\sigma_{pl}^*} + 0.81 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{pl}^*} \right)^2 = 1.$$

Όπου σ_c και σ_m είναι η ισοδύναμη και μέση τάση κατά von Mises, ενώ σ_{pl}^* η αντοχή σε αξονική σύνθλιψη.

Μια δεύτερη προσέγγιση για τον ορισμό της επιφάνειας ανάπτυξης είναι η φαινομενολογική. Οι δημοσιεύσεις περιλαμβάνουν το κριτήριο von Mises για τα πυκνά



υλικά και το κριτήριο Drucker-Prager για τα πορώδη υλικά. Ο λυγισμός στα πορώδη υλικά εξαρτάται από το υλικό μέσο και την ισοδύναμη τάση. Το κριτήριο Drucker-Prager επί παραδείγματι είναι μια απλή γραμμική συνάρτηση των 2 παραμέτρων:

$$f = \sigma_e - A\sigma_m - B,$$

Όπου A και B είναι σταθερές. Σε ένα ακόμη παράδειγμα υπολογισμού της επιφάνειας υποχώρησης για σύνθλιψη υλικών συμπαγούς σκόνης (solid powders) η επιφάνεια δίνεται [3-9] ανάλογη με το άθροισμα των τετράγωνων της ισοδύναμης και της μέσης τάσης:

$$\Phi = \left(\frac{\sqrt{5}\sigma_m}{3 p_Y} \right)^2 + \left(\frac{5\sigma_e}{18 p_Y} + \frac{2}{3} \right)^2 - 1, \quad (3-23)$$

όπου p_Y είναι η αντοχή έναντι της κατάρρευσης υπό συνθήκες υδροστατικής πίεσης.

Η πιθανή ανισοτροπία σε αφρώδη υλικά μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν στις άνωθεν αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες εξισώσεις με τη χρήση κανονικοποιημένων μορφών της ισοδύναμης και της μέσης τάσης. Τέτοιες μορφές δίνονται από τις εξισώσεις:

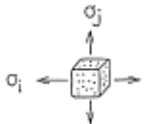
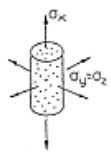
$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{pl}^*} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{pl1}^*} - \frac{\sigma_2}{\sigma_{pl2}^*} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{pl2}^*} - \frac{\sigma_3}{\sigma_{pl3}^*} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{pl3}^*} - \frac{\sigma_1}{\sigma_{pl1}^*} \right)^2 \right]} \quad (3-24)$$

και

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{pl}^*} = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{pl1}^*} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{pl2}^*} + \frac{\sigma_3}{\sigma_{pl3}^*} \right), \quad (3-25)$$

με σ_{pl1}^* , σ_{pl2}^* και σ_{pl3}^* τις αξονικές αντοχές στις κατευθύνσεις X1, X2 και X3.

Στοιχεία για την αστοχία μιας σειράς αφρών (νικέλιο, αργίλιο, αλουμίνιο) κάτω

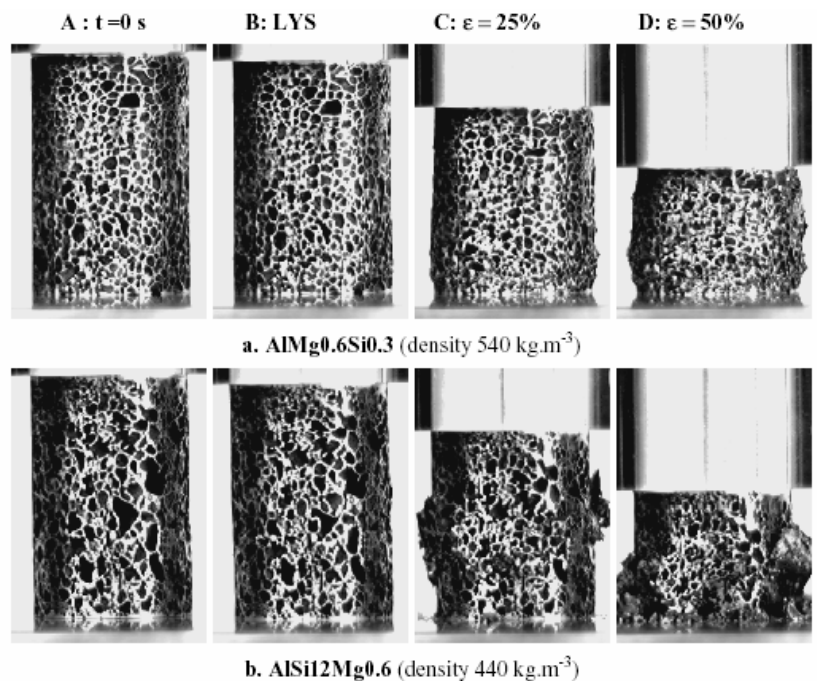
από διαξονική ($\sigma_3=0$, ) και αξονοσυμμετρική ($\sigma_2=\sigma_3$, ) φόρτιση, δείχνουν ότι η μηχανιστική προσέγγιση περιγράφει γενικώς ικανοποιητικά την αστοχία. Δύο σημεία είναι ενδιαφέροντα σχετικά με τα αξονοσυμμετρικά στοιχεία

φόρτισης. Κατ' αρχάς, η επιφάνεια υποχώρησης περικόπτεται στο τεταρτημόριο συμπίεσης-συμπίεσης από τη γραμμή ελαστικής κάμψης. Δεύτερον, στο τεταρτημόριο τάσης-τάσης, η επιφάνεια υποχώρησης υπερσκελίζει διακριτά την αντοχή του αφρού αλουμινίου για την υδροστατική φόρτωση. Αυτή η απόκλιση οφείλεται πιθανώς στις ανομοιογένειες μέσα στον αφρό που προκαλούν καμπτικές πιέσεις στις άκρες των κυψελών.

3.3.4 Καταστροφική θλιπτική καταπόνηση μεταλλικού αφρού

Ο τρόπος παραμόρφωσης και αστοχίας διαφόρων αφρών αλουμινίου κάτω από θλιπτική φόρτιση έχει μελετηθεί και δημοσιευτεί σε αρκετές έρευνες παγκοσμίως.

Παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης που εξαρτώνται από τον τύπο [3-10] του χρησιμοποιημένου κράματος αλουμινίου: Τα χυτά κράματα αλουμινίου δείχνουν να είναι πιο ψαθυρά και παρατηρείται αστοχία των κυψελοειδών τοιχωμάτων σε χαμηλές παραμορφώσεις (βλ. κάτωθεν τμήμα της παράπλευρης εικόνας). Η αστοχία των κυψελοειδών τοιχωμάτων οδηγεί σε

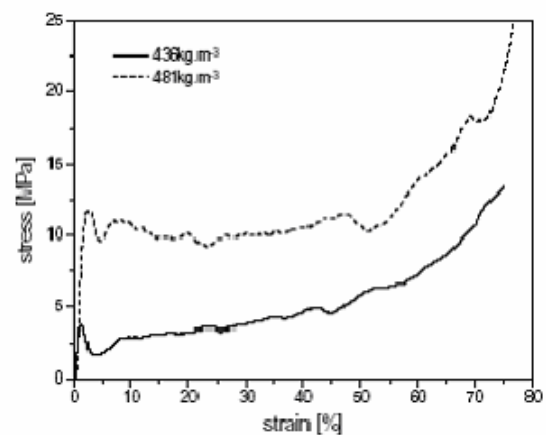


πολλαπλάσιες πτώσεις πίεσης και έτσι στην ανώμαλη καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης. Το μέγεθος της αρχικής πτώσης πίεσης εξαρτάται από το μέσο μέγεθος των πόρων. Τα κυψελοειδή τοιχώματα της επεξεργασμένης παραγωγής αφρών αλουμινίου κάμπτονται πλαστικά (βλ. άνωθεν τμήμα της παράπλευρης εικόνας), γεγονός που οδηγεί σε ομαλή καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης.

Η συμπεριφορά παραμόρφωσης των αφρών αλουμινίου επηρεάζεται κυρίως από τις τοπικές ανομοιογένειες στη δομή. Οι πρώτες ρωγμές και σοβαρές παραμορφώσεις της δομής μπορούν να βρεθούν στις περιοχές με τις χαμηλότερες τοπικές πυκνότητες και την υψηλότερη συγκέντρωση ατελειών. Η περαιτέρω κατάρρευση των χυτών αφρών αλουμινίου πραγματοποιείται στα ελαττωματικά γειτονικά στρώματα ενώ το υπόλοιπο του δείγματος παραμένει σχεδόν μη-παραμορφωμένο. Η κατάρρευση των όλκιμων αφρών είναι πιο ομοιογενής και οδηγεί στη συνεχή αύξηση της πίεσης.

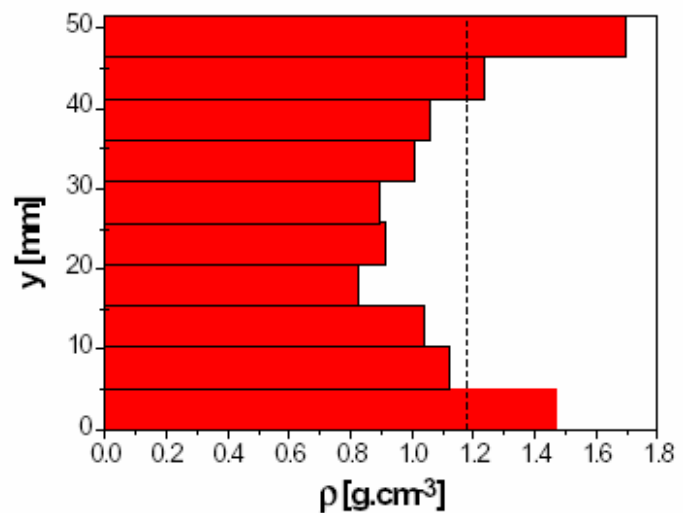
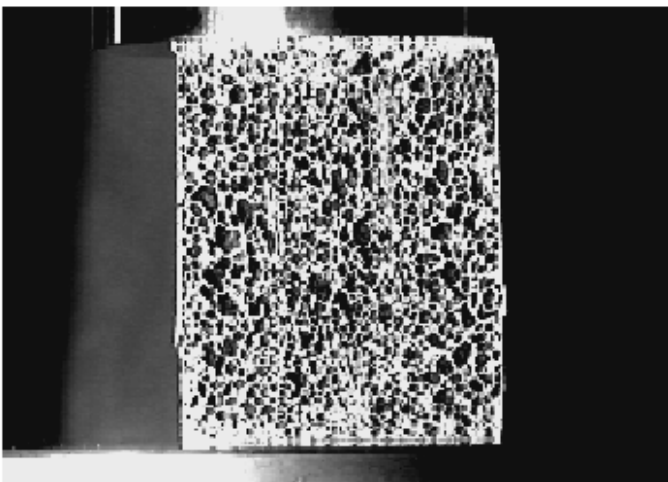
Περαιτέρω αποδείχθηκε ότι η γεωμετρία των δειγμάτων έχει επίδραση στη συμπεριφορά της καμπύλης τάσης/παραμόρφωσης ειδικά στην περίπτωση χυτών αφρών αλουμινίου. Το ύψος της καμπύλης ελαττώνεται και το μήκος της αυξάνεται με την αύξηση του ύψους των δειγμάτων, γεγονός που οφείλεται στην μερική αποσύνθεση του δείγματος και την αλλαγή στο συμπιεσμένο όγκο.

Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης του αφρού αλουμινίου μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη. Στο **πρώτο μέρος η πίεση αυξάνεται** με την αυξανόμενη παραμόρφωση σχεδόν γραμμικά (ελαστική εκτροπή των τοιχωμάτων των πόρων). Κατόπιν, ακολουθεί **παραμόρφωση με σχεδόν σταθερή πίεση** (κάμψη ή θραύση των τοιχωμάτων των πόρων, ενώ η παραμόρφωση δεν απαιτεί αύξηση του φορτίου) και τελικά υπάρχει ένα **μέρος γρήγορα αυξανόμενης φόρτισης** μετά από την σύνθλιψη των κυψελοειδών τοιχωμάτων.



*Καμπύλες παραμόρφωσης αφρού
AlSi12Mg0.6 (436 kg/m³, φ 35 mm x 51
mm και 481 kg/m³, φ 40 mm x 51 mm).*

Οι χυτοί αφροί επιδεικνύουν σημαντική πτώση της πίεσης στο τέλος του πρώτου μέρους της καμπύλης παραμόρφωσης. Αυτή η πτώση ορίζεται συχνά ως μια ανώτατη (Upper Yield Strength) και μια κατώτατη δύναμη κάμψης (Lower Yield Strength). Εντούτοις, η δομική παρατήρηση κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης έχει αποκαλύψει, ότι οι αρχικές αστοχίες στη δομή του αφρού (σπασίματα των πόρων) εμφανίζονται μετά από την πρώτη αιχμή στην καμπύλη τάσης/παραμόρφωσης. Η πτώση πίεσης που ακολουθεί σχετίζεται με τη μετατόπιση του ανωτέρου μέρους του δοκιμίου λόγω της αστοχίας των τοιχωμάτων σε ενός στρώματος των πόρων. Αυτή η μετατόπιση εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων στο σπασμένο στρώμα. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι η **κατανομή της πυκνότητας στο δοκίμιο μετά τη συμπίεση, η οποία φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα.**



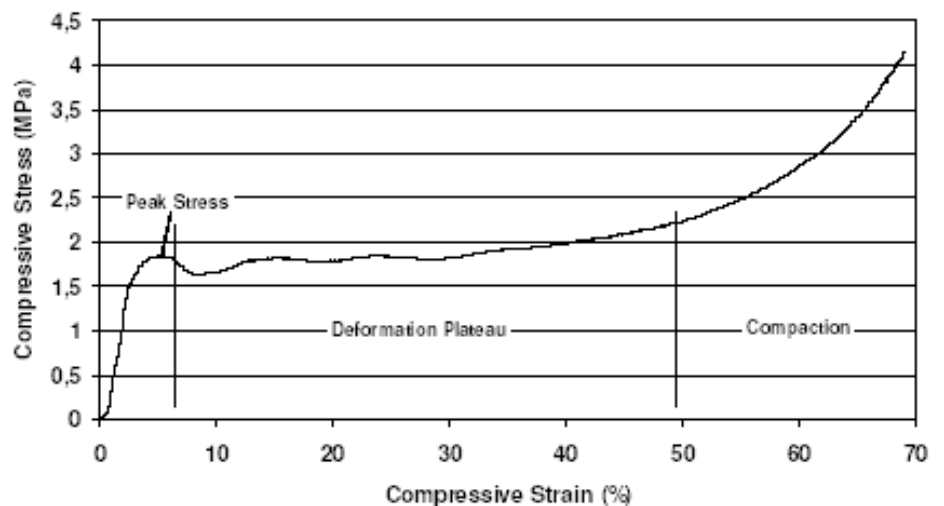
Κατανομή πυκνοτήτων καθ' ύψος του συμπιεσμένου δοκιμίου

Τέλος πληροφοριακά παρατίθενται οι κύριες ιδιότητες του πιο εμπορικού παγκοσμίως αφρού αλουμινίου ALPORAS της γερμανικής εταιρείας Gleich, καθώς και η καμπύλη θλιπτικής τάση/παραμόρφωσης για τον συγκεκριμένο αφρό.

ALPORAS® Aluminium Foam

typ. chem. Composition	Al – 1,5% Ca – 1,5% Ti	
Density	[g/cm ³]	0.23 ±0.02
Young's Modulus	[GPa]	1.1 ±0.1
Shear Modulus	[GPa]	0.33 ±0.02
Shear Strength	[MPa]	1.2 ±0.05
Tensile Strength	[MPa]	1.6 ±0.2
Peak Stress (Compression)	[MPa]	1.9 ±0.3
Yield Strength R _{p0,2} *	[MPa]	1.5 ±0.1
Bending Strength	[MPa]	2.8 ±0.3
Coefficient of Thermal Expansion	[10 ⁻⁶ /K]	23.4
Poisson's Ratio		0.33

* at 0.2% of plastic deformation (compression)



3.4 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[3-1] Daniel Klempner and Kurt C. Frisch *'Handbook of polymeric foams and foam technology'* Munich : Hanser Publishers , c1991

[3-2] <http://science.nasa.gov>

[3-3] K.L. Mittal, P. Kumar, *'Emulsions, Foams, and Thin Films'* , Marcel Dekker Ltd, UK May 2000

[3-4] www.polymers-ppi.org

[3-5] www.wikipedia.org

[3-6] www.gleich.de

[3-7] G. Gioux, T.M. McCormack, L.J. Gibson, *'Failure of aluminum foams under multiaxial loads'* Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology,

[3-8] http://www.ifam.fhg.de/jahresberichte/jb00/d_jb00_delaware.html

[3-9] Fleck N.A, Kuhn L.T, McMeeking R.M., *'Yielding of metal powder bonded by isolated contacts'*. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1992

[3-10] František Šimančík, Jaroslav Kováčik, Natália Mináriková: *'Deformation and Fracture Mechanism of Aluminium Foams'* Slovak Institute of Materials and Machine Mechanics

ΟΙ ΔΟΜΕΣ SANDWICH ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

4.1 Εισαγωγικά – Περιγραφή των δομών sandwich

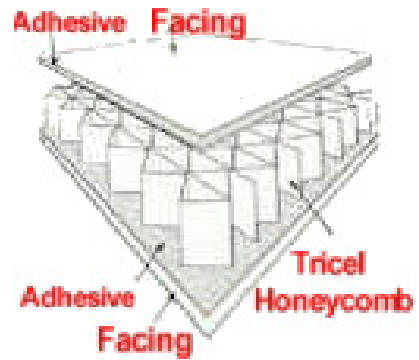
Ο καθένας μας είναι εξοικειωμένος με ένα sandwich, επειδή οι περισσότεροι από μας μεγάλωσαν τρώγοντάς τα και ίσως συνεχίζουν να τα καταναλώνουν. Ένα ‘*Sandwich structured composite*’ είναι μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών που κατασκευάζονται με την ένωση δύο λεπτών αλλά δύσκαμπτων πλακών [4-1] με έναν ελαφρύ αλλά παχύ πυρήνα. Το υλικό των πυρήνων είναι συνήθως αδύναμο υλικό, αλλά το μεγάλο πάχος του, παρέχει στο σύνθετο υλικό υψηλή ακαμψία με γενικά χαμηλή πυκνότητα. Περιστασιακά, κάποιος μπορεί να συναντήσει ένα διπλό sandwich όπως σε πολλά υλικά κιβωτίων που χρησιμοποιούνται για ταχυδρομικές αποστολές.

Τα δομικά sandwich ακολουθούν μια συγκεκριμένη φόρμα, όπως φαίνεται σε κάτωθεν σχήματα. Συνήθως υπάρχουν δύο ‘πρόσωπα’ (άνω και κάτω πλάκα), ίδια στο υλικό και το πάχος, τα οποία αντιστέκονται στα διάφορα (καμπτικά, κρουστικά κ.λ.π) φορτία. Εντούτοις, σε ειδικές περιπτώσεις τα πρόσωπα μπορούν να διαφέρουν είτε στο πάχος είτε το υλικό ή και στα δύο, επειδή ίσως ένα πρόσωπο σχεδιάζεται για να φέρει μεγαλύτερο φορτίο, ή για να θερμαίνεται περισσότερο, ή να αντισταθεί σε περισσότερο διαβρωτικό περιβάλλον κ.λπ. σχηματίζοντας ένα ασυμμετρικό sandwich.

Ο πυρήνας μιας δομής sandwich μπορεί να είναι σχεδόν οποιοδήποτε υλικό και οποιασδήποτε αρχιτεκτονικής, αλλά γενικά, οι πυρήνες περιέρχονται σε τέσσερις τύπους, όπως φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα. Οι εξελίξεις σε νέους πυρήνες συνεχίζουν όμως να παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον.

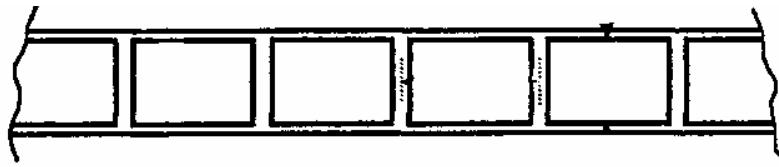
(α) αφρός ή στερεός πυρήνας (foam core sandwich)





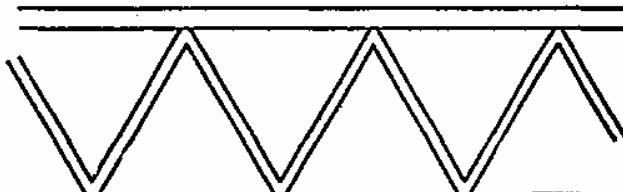
(β) κυψελωτός πυρήνας (honeycomb core),

(γ) πυρήνας ιστού (web core sandwich) και



(c) Web Core Sandwich

(δ) ‘ζαρωμένος’ πυρήνας (truss core sandwich)



Ο αφρός και οι στερεοί πυρήνες είναι σχετικά ανέξοδοι και δύνανται να αποτελούνται από ξύλο, ή από μια τεράστια ποικιλία αφρών και πλαστικών υλικών με πολύ ευρύ πεδίο πυκνοτήτων και συντελεστών μηχανικής συμπεριφοράς.

Από τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο, οι αρχιτεκτονικές κυψελωτών πυρήνων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως. Οι δύο πιο κοινοί τύποι είναι η εξαγωνική διαμορφωμένη δομή κυττάρων (hexcell) και η τετραγωνική διαμορφωμένη δομή κυττάρων (egg-crate). Στις κατασκευές πυρήνα ιστού και ζαρωμένου πυρήνα, το διάστημα στον πυρήνα δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση υγρών ή ως εναλλάκτης θερμότητας.

Σε κάθε περίπτωση η αξονική και καμπτική φόρτιση, φέρεται από τα πρόσωπα, ενώ ο πυρήνας αντιστέκεται στα εγκάρσια διατμητικά φορτία και κρατά τα πρόσωπα σε στην θέση τους. Εντούτοις, στην κατασκευή πυρήνα ιστού και ζαρωμένου (truss core) μια μερίδα των καμπτικών φορτίων φέρονται από τα στοιχεία του πυρήνα

Οι ακόλουθοι πυρήνες αφρού είναι από τους πιο διαδεδομένους:

- (1) πολυουρεθάνη (PUR), ευρέως χρησιμοποιούμενη
- (2) πολυϊσοκυανουράνη (PIR),
- (3) φαινολικός αφρός (PF), όχι ακόμα ευρέως χρησιμοποιούμενος
- (4) πολυστυρόλιο (με expansion, EPS και με extrusion, XPS), ένα θερμοπλαστικό υλικό

Αυτοί οι αφροί μπορούν να συγκριθούν με τον συντελεστή στρεπτικής ακαμψίας G_c ως συνάρτηση της πυκνότητας όπως φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα.

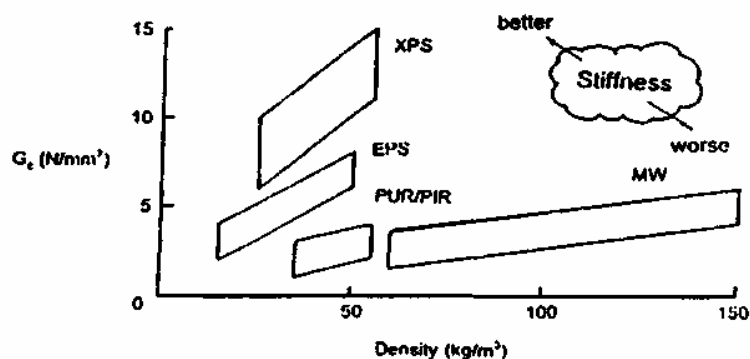


FIGURE 1.2. Shear stiffness of typical core materials as a function of density.

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δομών sandwich

Υπάρχουν αρκετές ευεργετικές επιδράσεις που πηγάζουν από τη χρήση των sandwich δομών τα οποία μάλιστα **δεν περιορίζονται στο οικονομοτεχνικό κομμάτι αλλά αγγίζουν και άλλους τομείς όπως η περιβαλλοντική προστασία**. Τα κυριότερα από τα πλεονεκτήματα αυτά είναι:

- Υψηλή ακαμψία που συνδυάζεται με τον υψηλότερο λόγο αντοχής/βάρους.
- Ομαλότερη (πιο λεία) εξωτερική επιφάνεια
- Υψηλότερη σταθερότητα
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Υψηλότερη αντοχή σε κόπωση και μικρότερη τάση παρουσίασης ρωγμών σε σχέση με τις απλές πλάκες
- Υψηλή θερμική και ακουστική μόνωση
- Υψηλή διαξονική δυνατότητα συμπίεσης
- Μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης (στα οχήματα) λόγω κυρίως του χαμηλότερου βάρους τους.

Γενικά, τα σύνθετα όπως και τα στοιχεία sandwich **μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δομικές και για μη-δομικές εφαρμογές** (π.χ. εσωτερικές επενδύσεις οχημάτων). Σύμφωνα με την [4-4] TIFAC (Technology Information Forecasting and Assessment Council), αποταμίευση βάρους μέχρι και 75% μπορεί να επιτευχθεί σε μη-δομικά στοιχεία και μέχρι 50% στα δομικά συστατικά. Αυτές είναι κάποιες αρκετά αισιόδοξες εκτιμήσεις. Τα ακόλουθα παραδείγματα περιγράφουν δύο εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν ήδη:

Εφαρμογή των σύνθετων σάντουιτς ως δομικά στοιχεία:

Η εταιρεία Hexcel υποστηρίζει ότι οι διαχωριστικές δομικές επενδύσεις πατωμάτων που παράγονται για την Schindler Waggon AG για να χρησιμοποιηθούν στα διώροφα μεταφορικά τρέινα IC2000 (βλ. παράπλευρη εικόνα) είναι κατά 20% ελαφρύτερα από τις συμβατικά συγκολλημένες αλουμιένιες κατασκευές.



Εφαρμογή των σύνθετων σάντουιτς ως μη-δομικά στοιχεία:

Για τα μη-δομικά στοιχεία (όπως οι εσωτερικές επενδύσεις) η επιτεύξιμη αποταμίευση βάρους είναι ακόμα υψηλότερη.

Σύμφωνα με την Schuon το 1998, οι sandwich εσωτερικές επενδύσεις για τα λεωφορεία είναι περίπου **35% ελαφρύτερες από τις συμβατικές** επενδύσεις, γεγονός το οποίο μειώνει το συνολικό βάρος των λεωφορείων κατά περίπου 350 kg.

Γενική επίδραση

Η γενική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται έντονα από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και δεν μπορεί να αξιολογηθεί κατά τρόπο γενικό. Η ακόλουθη κατά προσέγγιση εκτίμηση μπορεί να δώσει μια γενική ιδέα των δυνατοτήτων των υλικών sandwich. Αυτήν την περίοδο, οι εφαρμογές των υλικών sandwich περιορίζονται κυρίως στον εσωτερικό εξοπλισμό (ενισχύσεις πατωμάτων, εσωτερικά τοιχώματα και επενδύσεις στεγών κ.λ.π). **Εκτιμήσεις της TIFAC λένε ότι:**

- ο εσωτερικός εξοπλισμός αποτελεί συνήθως 10 - 20% του συνολικού βάρους των οχημάτων
- υποτίθεται ότι περίπου ένα δευτέρο των αντίστοιχων συστατικών μπορεί να αντικατασταθεί από τμήματα sandwich (πάτωμα κ.λ.π)
- τα σχετικά συστατικά μπορούν να μειωθούν μέχρι και 50 %.

Άρα λοιπόν η μέγιστη μείωση βάρους μέσω των υλικών sandwich θα είναι περίπου 5-15%.

Υπάρχουν όμως και **σημαντικές δυσκολίες** στη διάδοση της χρήσης των υλικών αυτών. Οι σημαντικότερες από τις δυσκολίες αυτές είναι:

- Το κόστος των sandwich υλικών είναι ακόμη αρκετά υψηλό γι' αυτό και βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε περίπλοκες και μεγάλες κατασκευές όπως τα αεροσκάφη. Η διαφορά του κόστους όμως αναμένεται να μειωθεί σε σχέση με τα συμβατικά υλικά τα επόμενα χρόνια.
- Η παραγωγή των sandwich υλικών απαιτεί υψηλής ακρίβειας και κόστους κατεργασίες
- Απαιτείται ειδική εκπαίδευση και εξειδίκευση προκειμένου να οικειοποιηθεί το εργασιακό προσωπικό με τα νέα αυτά υλικά.

4.3 Προέλευση των δομών sandwich

Η κατασκευή sandwich είναι σχετικά νέα, αν και κάποιοι ισχυρίζονται ότι η έννοια της κατασκευής sandwich ξεκίνησε από τον Fairbairn το 1849. Ο K. Feichtinger δηλώνει ότι **κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου, η έννοια της κατασκευής sandwich στις ΗΠΑ υλοποιήθηκε με πρόσωπα από ενισχυμένο πλαστικό και ενός πυρήνα χαμηλής πυκνότητας.** Το 1943, η βάση Πολεμικής Αεροπορίας Wright Patterson σχεδίασε και κατασκεύασε την άτρακτο Vultee BT- 15, χρησιμοποιώντας ως πρόσωπα, πολυεστέρα ενισχυμένο με υαλονήματα, και ως εσωτερική γέμιση κυψελωτές γυάλινες κατασκευές.

Η πρώτη ερευνητική εργασία σχετικά με την κατασκευή sandwich εκπονήθηκε από τον Marguerre, το 1944, και εξέτασε τα αξονικά φορτία συμπίεσης.

Το 1948, ο Hoff εφηύρε τις διαφορικές εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες για την κάμψη και το λυγισμό των πλακών sandwich χρησιμοποιώντας την αρχή των εικονικών μετατοπίσεων, κατάφερε όμως να λύσει μόνο το πρόβλημα λυγισμού των πλακών σε συνθήκες συμπίεσης. Κατά το ίδιο έτος, οι Libove και Batdorf δημοσίευσαν μια γενική θεωρία μικρών παραμορφώσεων για τις πλάκες sandwich.

Το 1949, ο Flugge δημοσίευσε ένα έγγραφο για τη δομική βελτιστοποίηση των πλακών sandwich στην οποία παρουσίασε τα νομογράμματα για τη λύση των ακόλουθων προβλημάτων: (1) Τη γεωμετρική διάσταση και τις ιδιότητες πυρήνων για δεδομένο φορτίο συμπίεσης και ελάχιστο βάρος (2) Τις γεωμετρικές διαστάσεις και τις ιδιότητες πυρήνων για ένα δεδομένο βάρος και ένα μέγιστο φορτίο συμπίεσης και (3) Το UTS ενός δεδομένου sandwich υλικού. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα υλικά ήταν ισότροπα, και οι ακόλουθες περιπτώσεις αποτυχίας εξετάστηκαν: i) ολικός λυγισμός, και ii) κυματοειδές τσαλάκωμα των επιφανειών. Οι μη φορτισμένες άκρες ήταν ελεύθερες ή απλά στηριγμένες. Ο Flugge συνέχισε την εργασία του και δημοσίευσε μια ακόμη εργασία για το ίδιο θέμα το 1952.

Το 1951, ο Bijlaard προσέγγισε το θέμα της βελτιστοποίησης των sandwich υλικών με την εξέταση πλακών με δεδομένο το βάρος ανά επιφάνεια, και τον υπολογισμό της αναλογίας των μέτρων ελαστικότητας του πυρήνα και των προσώπων που οδηγούν σε κάποιο μέγιστο φορτίο λυγισμού. Πραγματοποίησε τη βελτιστοποίηση για μια δεδομένη αναλογία μεταξύ του πάχους πυρήνα και προσώπων, καθώς επίσης και για δεδομένο συνολικό πάχος του υλικού. Να σημειωθεί ότι μόνο ισότροπα υλικά εξετάστηκαν.

Το 1956, ο Gerard συζητά εν συντομία τη βελτιστοποίηση υλικών sandwich σε ένα κεφάλαιο του βιβλίου του, *Minimum Weight Analysis of Compressive Structures* [4-2].

Το 1957, ο Kaechele δημοσίευσε μια έκθεση σχετικά με την ελαχιστοποίηση βάρους των πλακών sandwich. Παρουσίασε μια μέθοδο για τη βέλτιστη διαμόρφωση των επίπεδων, απλά-υποστηριγμένων πλακών sandwich κάτω από ομοαξονική συμπίεση, όταν δίνονται το φορτίο, το πλάτος, και η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για το υλικό των προσώπων. Εφάρμοσε τη μέθοδο σε εξαγωνικούς και τετραγωνικούς διαμορφωμένους πυρήνες, ενώ ερεύνησε τα αποτελέσματα σε ανυψωμένες θερμοκρασίες εν συντομία.

Το 1960, ο Heath δημοσίευσε ένα έγγραφο για το συσχετισμό και την επέκταση της υπάρχουσας θεωρίας των επίπεδων πλακών sandwich, που υποβάλλονται σε διαμήκη συμπίεση. Το δεύτερο μέρος εκείνου του εγγράφου ενδιαφέρεται για το βέλτιστο σχέδιο των επιτροπών επίπεδος-sandwich.

Οι πρώτες θεωρητικές δημοσιεύσεις τον καιρό εκείνο για τη συμπεριφορά των ορθογώνιων panel sandwich που υποβλήθηκαν σε πλευρικά φορτία, περιορίστηκαν σε ομοιόμορφα φορτία και σε απλή υποστήριξη των άκρων.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης μεταπολεμικής περιόδου, το USFPL ήταν η πρωτοπόρος ομάδα στην ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού των δομών sandwich. Το USFPL ηγήθηκε επίσης των προσπαθειών με τη δημοσίευση του MIL-HDBK-23 και τη συνεχή ενημέρωση του εγγράφου αυτού.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '60, οι προσπάθειες στην έρευνα των sandwich είχαν διαδοθεί ευρέως. **Το 1966, ο Plantema δημοσίευσε το πιο διάσημό του, και το πρώτο του, βιβλίο [4-3] *Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells*. Το 1969, αυτό ακολουθήθηκε από το βιβλίο του H.G.Allen *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*. Αυτά τα βιβλία ήταν οι "Βίβλοι" για τις δομές sandwich για πολλά έτη.**

Μέχρι το 1999, έλαβαν χώρα τέσσερις Διεθνείς Διασκέψεις σχετικά με την κατασκευή sandwich δομών: η 1^η στη Στοκχόλμη το 1989, η 2^η στο Gainesville το 1992 η 3^η στο Southampton το 1995 και η 4^η στη Στοκχόλμη το 1998.

Πρόσφατα, το 1995, η μονογραφία του Zenkert [4-5] *An Introduction to Sandwich Construction* συμπληρώνει σε ένα μεγάλο μέρος το υλικό που περιλαμβάνεται στα βιβλία των Plantema και Allen. Επίσης, η αναθεώρηση από τους Noor, Burton, και Bert το 1996 με πάνω από 800 αναφορές που συζητούνται αποτελεί σημαντικό συγγραφικό έργο για τον συγκεκριμένο επιστημονικό τομέα.

4.4 Εφαρμογές των δομών sandwich

Η κατασκευή sandwich έχει χρησιμοποιηθεί πρώτιστα στη βιομηχανία αεροσκαφών από τη δεκαετία του '40, με την ανάπτυξη του βρετανικού βομβαρδιστικού αεροπλάνου Mosquito, και **αργότερα επεκτάθηκε σε δομές βλημάτων και διαστημικών σκαφών.**

TABLE 1.1. Use of Sandwich Construction in Boeing Aircraft.

Boeing Aircraft	Percent of Wetted Surface
707	8
727	18
737	26
747	36
757-767	46

Το 1992, ο T. Bitzer έκανε μια άριστη επισκόπηση των εφαρμογών των κυψελωτών πυρήνων. Επισημαίνει ότι η κατασκευή sandwich με ανάλογο πυρήνα χρησιμοποιείται ευρέως και στα εμπορικά και στα στρατιωτικά αεροσκάφη. Ο Bitzer αναφέρει για εκείνη την εποχή ότι **κάθε αεροσκάφος στη Δύση χρησιμοποιεί κάποιο κυψελωτό sandwich υλικό** ενώ απαριθμεί την ποσότητα της χρησιμοποίησης των κυψελωτών sandwich στα διάφορα αεροσκάφη της εταιρείας Boeing. Στον άνωθεν πίνακα, η "wetted surface" ορίζεται ως η επιφάνεια του αεροπλάνου που θα ερχόταν σε επαφή με το νερό εάν το αεροσκάφος αφηνόταν να πλεύσει στην επιφάνεια της θάλασσας. Στο Boeing 747, το κυλινδρικό κέλυφος της ατράκτου είναι πλούσιο σε Nomex (κυψελωτό sandwich), και τα πατώματα, τα υπερυψωμένα δοχεία, και το ταβάνι είναι επίσης κατασκευής sandwich.

Η Ευρώπη ηγείται στη χρήση των κατασκευών sandwich στις **ελαφριές αυτοκινητάμαξες**, ενώ στις ΗΠΑ πολλές από τις ταχείες αμαξοστοιχίες χρησιμοποιούν sandwich κυψελωτών πυρήνων.

Το **αμερικανικό ναυτικό** χρησιμοποιεί διαφράγματα κυψελωτών sandwich για να μειώσει το βάρος των σκαφών επάνω από την ίσαλη γραμμή. Οι ακριβές βάρκες οι αγωνιστικές λέμβοι, και τα αγωνιστικά αυτοκίνητα, όλα τους χρησιμοποιούν κατασκευές sandwich.

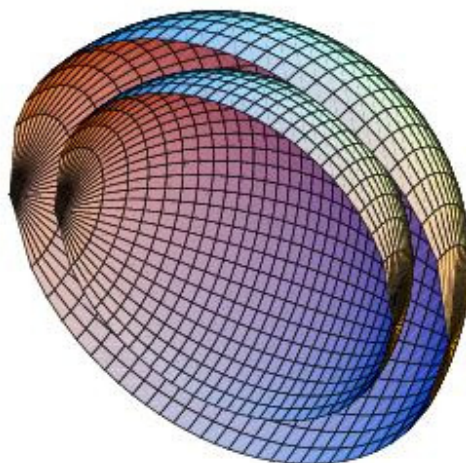
Η κατασκευή sandwich χρησιμοποιείται επίσης στα **χιονοπέδιλα, τα πέδιλα για υδάτινο σκι, τα καγιάκ, τα κανό, τα τραπέζια για μπιλιάρδο, τις ρακέτες του tennis και σε πολλές άλλες κατασκευές.**

Οι κατασκευές sandwich είναι επίσης άριστες στο να **απορροφούν τη μηχανική ενέργεια της κρούσης ενός αντικειμένου η ενός κύματος (συμπεριλαμβανόμενου και του ήχου)**. Έχουν πολύ υψηλή αναλογία ενέργειας συντριβής προς βάρος. Δύνανται επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά θερμότητας (ή και ως εναλλάκτες θερμότητας). Χρησιμοποιώντας ένα μη μεταλλικό πυρήνα με τα κύτταρά του πληρωμένα με μη μεταλλικό αφρό, μπορούμε ακόμη να μονώσουμε θερμικά μια επιφάνεια. Για ένα ηχητικό εμπόδιο, τον κυψελωτό πυρήνα γεμίζουμε με fiberglass, και ένα λεπτό πορώδες film του υλικού Tedlar. Τέτοια υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλους ανεμιστήρες, τις αεροσύρραγες, τα κλιματιστικά μηχανήματα, τις θερμάστρες, τις σχάρες μαγειρικής, κ.λπ....

Πιό πρόσφατα, η κατασκευή sandwich χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στα προγράμματα αποκατάστασης έργων πολιτικού μηχανικού όπως στις γέφυρες. Ο J. Davies αναφέρει ότι πλάκες επένδυσης sandwich που αποτελούνται από δύο μεταλλικά πρόσωπα και έναν ελαφρύ μονωτικό πυρήνα συναντούν συνεχώς αυξανόμενη χρήση ως επένδυση τοίχων και στεγών σε πλήθος κτηρίων. Εδώ, το σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι η εξαιρετική θερμική απόδοσή τους.

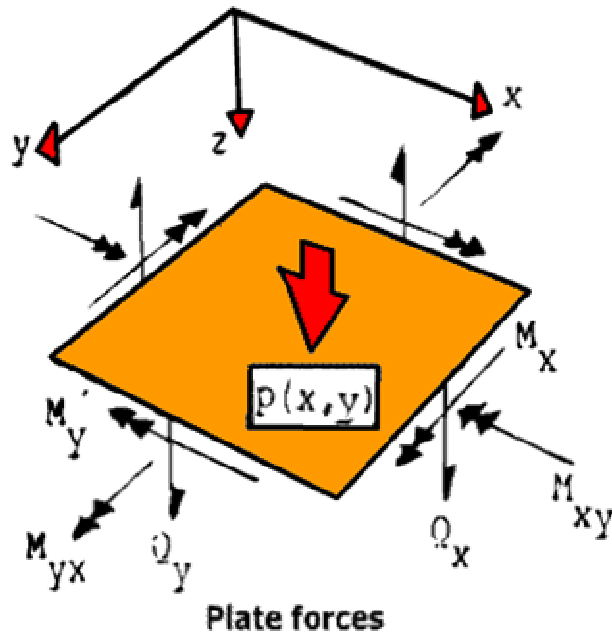
4.4.1 Κελύφη sandwich (Sandwich Shells)

Ένα κέλυφος είναι σώμα με λεπτά τοιχώματα, του οποίου η εσωτερική επιφάνεια είναι κυρτή προς τουλάχιστον μια κατεύθυνση. Παραδείγματος χάριν, ένα κυλινδρικό κέλυφος και ένα κωνικό κέλυφος έχουν μόνο μια κατεύθυνση στην οποία η επιφάνειά τους είναι κυρτή. Αντίστοιχα, σε ένα σφαιρικό κέλυφος υπάρχει κυρτότητα και στις δύο κατευθύνσεις. Τέτοια κοινά στοιχεία όπως ένα έμπροσθεν κιγκλίδωμα ενός αυτοκινήτου ή ένα αυγοκέλυφος (eggshell) είναι παραδείγματα της διπλής κυρτότητας στα των κελυφών. **Κελύφη τα οποία είναι εσωτερικώς πληρωμένα με ενισχυτικά υλικά, (παρόμοια με αυτά που έχουν αναφερθεί άνωθεν), ονομάζονται κελύφη sandwich.**



Οι δομές των κελυφών περιγράφονται από πολύ περίπλοκες, μεγάλες εξισώσεις που επεκτείνονται περαιτέρω όταν το κέλυφος αποτελείται από κάποιο ανισότροπο υλικό όπως οποιοδήποτε ινώδες, σύνθετο υλικό (fiber-reinforced composite material). Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εγκάρσιας παραμόρφωσης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για δομές που αποτελούνται από σύνθετα υλικά στα οποία οι ίνες είναι στο επίπεδο της μεσοεπιφάνειας. Εντούτοις, για την απλούστερη έως την πλέον περίπλοκη μορφή, οι εξισώσεις για τα κελύφη περιλαμβάνουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τις διακρίνουν από τις εξισώσεις και τη συμπεριφορά άλλων δομικών συστατικών. Το κέλυφος οποιουδήποτε είδους θα επιθυμούσε να συμπεριφερθεί ως μεμβράνη, όσον αφορά τη φόρτιση και την παραμόρφωσή του. Οι λύσεις παραμορφωσιακής κατάστασης μεμβρανών είναι οι ιδιαίτερες λύσεις των διαφορικών καταστατικών εξισώσεων και είναι συνήθως εύκολο να λυθούν. Οι φορτίσεις μεμβρανών είναι ομοιόμορφες κατά μήκος του πάχους των τοιχωμάτων, και βρίσκονται συνήθως από τα διαγράμματα ελεύθερων σωμάτων (free-body diagrams).

Εντούτοις, κοντά σε οποιαδήποτε δομική ασυνέχεια, όπως μια απλά υποστηριγμένη, στερεωμένη, ή αλλιώς περιορισμένη άκρη, δίπλα σε μια οπή, ή σε μια απότομη αλλαγή στο πάχος του τοιχώματος ή στο υλικό, υπάρχει ένα οριακό στρώμα κάμψης (bending boundary layer -BBL). Σε αυτό το οριακό στρώμα κάμψης, οι φορτίσεις δύναται να υπερβούν τις φορτίσεις της μεμβράνης κατά τον παράγοντα δύο, τρία, ή και μεγαλύτερο. Κατά συνέπεια, μέσα στο οριακό στρώμα κάμψης, υπάρχουν οι μέγιστες φορτίσεις, οι τομείς ενδιαφέροντος της εφαρμοσμένης μηχανικής, και οι πηγές κακού σχεδίου για τις δομές κελυφών sandwich και για όλα τα κελύφη γενικά.



Ο Love έγραψε το πρώτο πόνημα για τη θεωρία κελυφών το 1888, και το οποίο αποτέλεσε τη Βίβλο για τον συγκεκριμένο τομέα για πολλά έτη. Λίγα έγιναν στην ανάπτυξη της θεωρίας κελυφών, μέχρι την περίοδο του 2^{ου} παγκόσμιου πολέμου, και με την εμφάνιση των βλημάτων και των διαστημικών αποστολών. Πολλοί από τους μεγάλους ερευνητές αυτού του αιώνα συγκέντρωσαν τις προσπάθειές τους στις δομές κελυφών κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, συμπεριλαμβανομένων των Krieger [4-6], Novozhilov, Kraus, και Dym. Στην πραγματικότητα η "χρυσή εποχή" της θεωρίας κελυφών ήταν στη δεκαετία του '40 έως τη δεκαετία του '70 οπότε η μη γραμμική θεωρία κελυφών αναπτύχθηκε από τους Libai και Simmonds και τους Palazotto και Dennis.

4.5 Η μηχανική-δομική συμπεριφορά των sandwich υλικών

4.5.1 Γενικές παρατηρήσεις στη θεωρητική προσέγγιση των sandwich υλικών

Η ανάγκη για αυξημένη δομική απόδοση στην αεροδιαστημική βιομηχανία έχει οδηγήσει στην αύξηση της χρήσης καινοτόμων, ενισχυμένων με ίνες σύνθετων και υλικών σάντουιτς [4-7]. Λόγω των άριστων μηχανικών ιδιοτήτων οι κατασκευές σάντουιτς είναι ιδιαίτερα πολύτιμες στις εφαρμογές αεροσκαφών.

Έως αυτήν την περίοδο, τέτοιες δομές έχουν σχεδιαστεί πρώτιστα για ακουστικές εφαρμογές, όπως η μείωση θορύβου, και εφαρμόστηκαν στη ρωσική αεροδιαστημική βιομηχανία όπως και σε διάφορες βιομηχανίες διανομής πετρελαίου και φυσικού αερίου. Έως σήμερα, λίγες έρευνες έχουν δημοσιευθεί γύρω από τις μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών για δομικές εφαρμογές.

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FE) Ansys που συνδέεται με τον explicit κώδικα LS- Dyna είναι εμπορικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται μέσα σε διάφορες βιομηχανίες εφαρμοσμένης μηχανικής. Η αεροδιαστημική όπως και η αυτοκινητιστική βιομηχανία έχουν δεχτεί την προσομοίωση ως τμήμα της διαδικασίας σχεδιασμού για να ελαχιστοποιήσουν τις δαπάνες σχεδίου και για να δημιουργήσουν περισσότερο αποτελεσματικές δομές. Η διαμόρφωση πρωτοτύπου και η δοκιμή είναι πάντα διενεργηθείσες για να ελεγχθεί το σχέδιο, αλλά η προσομοίωση έχει γίνει τυποποιημένη πρακτική σε όλη τη διαδικασία σχεδιασμού.

Δεδομένου ότι οι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων βελτιώνονται και προηγμένα πρότυπα υλικών διατίθενται, τέτοια εργαλεία προσομοιώσεων βρίσκουν πιο διαδεδομένη εφαρμογή στον αεροδιαστημικό τομέα, παράλληλα με την αυξανόμενη δύναμη υπολογισμού και το μεγαλύτερο ρεαλισμό διαμόρφωσης.

Ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια και το υπολογιστικό κόστος **ένας σημαντικός αριθμός διαφορετικών κατάλληλων πρότυπων [4-8] έχουν επιλεγεί για την ανάλυση των δομών σάντουιτς**, όπως οι equivalent-single-layer θεωρίες (ESL) οι στρωματικές θεωρίες (layer-wise theories) για τα στοιχεία κελυφών, και η παραδοσιακή τρισδιάστατη ελαστική διαμόρφωση για τα τρισδιάστατα στοιχεία.

4.5.2 Θεωρίες ESL για τα στοιχεία κελυφών

Χρησιμοποιώντας τις θεωρίες ESL (equivalent-single-layer) το ετερογενές υλικό, το οποίο διαμορφώνεται με τη συσσώρευση των διαφόρων στρωμάτων **αντιμετωπίζεται ως στατικά ισοδύναμο ομοιογενές υλικό με έναν σύνθετο νόμο**. Το τρισδιάστατο πρόβλημα συνέχειας περιορίζεται σε ένα δισδιάστατο πρόβλημα [4-8] με την διεξαγωγή των κατάλληλων υποθέσεων σχετικά με την κινηματική της παραμόρφωσης. Αυτές οι υποθέσεις περιγράφονται από μαθηματική άποψη από ένα συνεχές ομαλό πολυώνυμο δια μέσω ολόκληρου του πάχους της δομής για κάθε λειτουργικό βαθμό ελευθερίας. Δύο συνήθως χρησιμοποιούμενα παραδείγματα των απλών θεωριών ESL είναι η κλασική φυλλόμορφη θεωρία (Classical Laminate Theory - CLT) και η First-Order Shear Deformation Theory (FSDT). Εντούτοις, καμία από αυτές τις θεωρίες δεν λαμβάνει υπόψη πιθανές ασυνέχειες των παραγώγων μετατοπίσεων στις διεπαφές. Αυτό οδηγεί στην παραβίαση των όρων ισορροπίας για τις εγκάρσιες πιέσεις σε εκείνες τις διεπαφές όπου το υλικό αλλάζει.

4.5.3 Στρωματικές θεωρίες για τα στοιχεία κελυφών

Γενικά, οι στρωματικές θεωρίες (layer-wise theories) [4-8] προβλέπουν πολύ καλύτερα τη διαφορετική συμπεριφορά διατμητικής παραμόρφωσης των φύλλων και του πυρήνα των υλικών sandwich σε σχέση με τις λιγότερο κατάλληλες θεωρίες ESL. Οι μετατοπίσεις προσεγγίζονται από συνεχή πολυώνυμα στην κατεύθυνση του πάχους. Περιοριστικά πρέπει να τηρείται η συμβατότητα στις στρωματικές διεπαφές. Ο αριθμός στρωμάτων περιορίζεται στα τρία, ένα για κάθε φύλλο προσώπου και ένα για τον πυρήνα.

Εντούτοις, οι διατυπώσεις μπορούν να επεκταθούν εύκολα σε περισσότερα από τρία στρώματα. Ο αριθμός λειτουργικών βαθμών ελευθερίας αυξάνεται με τον αριθμό στρωμάτων. Η χρησιμοποίηση όρων ισορροπίας στο κατώτατο σημείο και την κορυφαία επιφάνεια καθώς επίσης και στις στρωματικές διεπαφές επιτρέπει την εξάλειψη μερικών βαθμών ελευθερίας εκ των προτέρων. Ο Di Sciuna παραδείγματος χάριν παρουσίασε ένα ορθογώνιο στοιχείο τεσσάρων-κόμβων με γραμμικά και κυβικά πολυώνυμα Hermite ως συναρτήσεις μορφής. Κατά τον τρόπο αυτό όμως το υπολογιστικό έργο αυξήθηκε δυσανάλογα με την προσφερόμενη ακρίβεια. **Επιπλέον, η ένταξη στα υπάρχοντα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων και η μίξη με τα διαθέσιμα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα.**

4.5.4 Τρισδιάστατη διατύπωση ελαστικότητας για τα τρισδιάστατα στοιχεία

Σαν εναλλακτική λύση της χρησιμοποίησης 2D στοιχείων για την ανάλυση, η δομή μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων βασισμένων στην τρισδιάστατη θεωρία ελαστικότητας [4-8]. Τα λεπτά φύλλα προσώπου, εντούτοις, απαιτούν ιδιαίτερος λεπτή διακριτοποίηση, η οποία οδηγεί σε ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό κόστος. Ως λύση, τα δισδιάστατα στοιχεία που αντιπροσωπεύουν τα φύλλα προσώπου μπορούν να συνδυαστούν με τα τρισδιάστατα στοιχεία για τη διαμόρφωση του πυρήνα.

4.5.5 Διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων υπό τρισδιάστατη καταπόνηση

Αυτή η διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων είναι βασισμένη σε συνθήκες τρισδιάστατης καταπόνησης, το οποίο σημαίνει ότι ο πλήρης τρισδιάστατος καταστατικός νόμος εφαρμόζεται για να υπολογιστούν οι διατμητικές και οι ορθές τάσεις. **Οι τρισδιάστατες διατυπώσεις μπορούν να είναι πολύ ακριβείς, ειδικά για τα παχιά κελύφη, υπό τον όρο ότι τα υψηλόβαθμα πολυώνυμα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις μετατοπίσεις,** αλλά το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται αρκετά σε σύγκριση με την ανάλυση που υποθέτει δισδιάστατη καταπόνηση. Εάν η προσέγγιση μετατοπίσεων γίνεται από τα χαμηλόβαθμα πολυώνυμα ανεπαρκών ακριβείς τιμές λαμβάνονται εάν ο καταστατικός νόμος χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις εγκάρσιες τάσεις.

4.5.6 Κινηματική προσέγγιση

Ένα ισοπαραμετρικό στοιχείο κελύφους οκτώ κόμβων της οικογένειας 'serendipity' με το κωδικό όνομα S815, με 15 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο έχει αναπτυχθεί [4-8]. Οι επίπεδες μετατοπίσεις (u , v) περιγράφονται από μια στρωματική γραμμική προσέγγιση. Επίσης η επέκταση του υλικού στην κατεύθυνση πάχους συμπεριλαμβάνεται στη κινηματική προσέγγιση. Ένα πολυώνυμο 2ου βαθμού επιλέχτηκε για να περιγράψει την παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού, άρα η κινηματική για κάθε ένα από τα τρία στρώματα που παρουσιάζονται στο παράπλευρο σχέδιο περιγράφεται από τη σχέση:

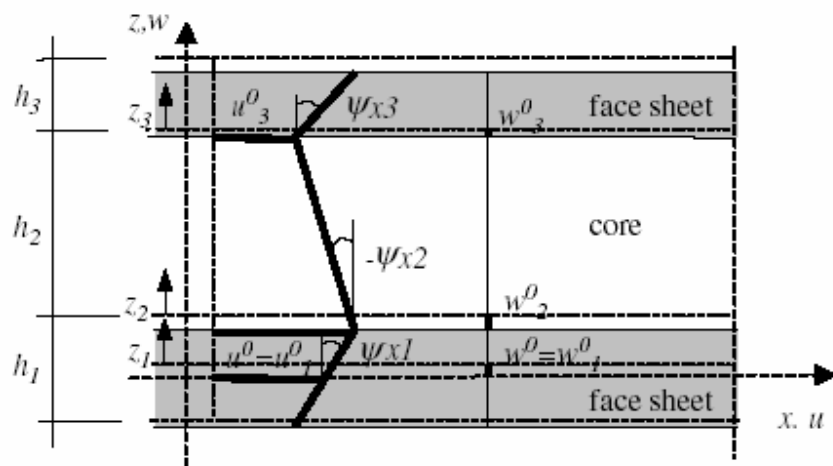


Fig. 2. In-plane displacement u through the thickness and out-of-plane displacement w for the shell element 'S815'.

$$\begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_L^0 \\ v_L^0 \\ w_L^0 \end{bmatrix} + z_L \begin{bmatrix} \psi_{xL} \\ \psi_{yL} \\ \psi_{zL} \end{bmatrix} + z_L^2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi_{zL} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

όπου u_L^0, v_L^0, w_L^0 , είναι οι μετατοπίσεις του στρώματος για $z_L=0$, σε κάθε μια από τις 3 διαστάσεις.

Εισάγοντας τους περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας ψ_{xL}, ψ_{yL} σύμφωνα με τη μέθοδο First-Order Shear Deformation Theory (FSDT), οδηγούμαστε σε μια διατύπωση χωρίς παραγώγους μετατοπίσεων στην κινηματική προσέγγιση. Ως εκ τούτου, μόνο η C^0 -συνέχεια για τις συναρτήσεις μορφής απαιτείται, για να ληφθεί μια προσαρμόσιμη διαμόρφωση πεπερασμένων στοιχείων.

Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων χρησιμοποιείται πλήρως τρισδιάστατο καταστατικό μοντέλο χωρίς μετατροπές, το οποίο εκφράζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \sigma_L &= C_L \varepsilon_L \\ \text{με } \sigma_L^T &= [\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \tau_{yz} \tau_{xz} \tau_{xy}] \\ \text{και } \varepsilon_L^T &= [\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \gamma_{yz} \gamma_{xz} \gamma_{xy}] \end{aligned} \quad (4-2)$$

με το C_L να αντιπροσωπεύει τη στιβαρότητα κάθε στρώματος L . Εάν το υλικό αποτελείται από πολυάριθμες ενισχυμένες με ίνες στρώσεις τότε ο νόμος θα πρέπει να ολοκληρωθεί για κάθε στρώση με διαφορετική γωνία ινών.

Ο τρισδιάστατος καταστατικός νόμος χρησιμοποιείται επίσης στον υπολογισμό των τάσεων μέσω των υπολογισμένων παραμορφώσεων, και προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τα σ_{xx} σ_{yy} τ_{xy} λογικά αποτελέσματα για την τάση σ_{zz} αλλά μη ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις υπόλοιπες διατμητικές τάσεις. Οι τελευταίες δύνανται να προσεγγισθούν μέσω των εξισώσεων εξισορρόπησης:

$$\begin{bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \sigma_{xx} + \tau_{xy} \\ \sigma_{yy} + \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (4-3)$$

4.6 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[4-1] Jack R. Vinson *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials* – 1999

[4-2] Gerard, G., *Minimum Weight Analysis of Compressive Structures*, New York University Press, New York, 1956.

[4-3] Plantema, F. J., *Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells*, John Wiley and Sons, New York, 1966.

[4-4] www.tifac.org.in

[4-5] Zenkert, D., *An Introduction to Sandwich Construction*, EMAS Publications, West Midlands, United Kingdom, 1995.

[4-6] Timoshenko, S. and A. Woinowski-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 2nd Edition, 1959

[4-7] M.Q. Nguyen, S.S. Jacombs, R.S. Thomson, D. Hachenberg, M.L. Scott, *Simulation of impact on sandwich structures*, Australia 2004

[4-8] A. Wetzel, L. Karger, R. Rolfes, K. Rohwer Braunschweig, *Evaluation of two finite element formulations for a rapid 3D stress analysis of sandwich structures* Germany, February 2005

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

5.1 Επιλογή και ετοιμασία των δοκιμίων

5.1.1 Επιλογή των δοκιμίων

Το πρώτο βήμα για την εξέλιξη της πειραματικής διαδικασίας ήταν η επιλογή ενός δοκιμίου από σύνθετο υλικό με **υψηλές μηχανικές σταθερές και ικανότητα καλής συνεργασίας με τους αφρούς** που θα χρησιμοποιηθούν. Πιο κάτω παρατίθενται φωτογραφίες των διαθέσιμων δοκιμίων που υπάρχουν στο χώρο του εργαστηρίου του τομέα κατεργασιών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Κάποια από αυτά τα δοκίμια (πορτοκαλί και κόκκινου χρώματος) έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες (βλ. διπλωματική εργασία Στυλιανού Κουτρομπάκη) ενώ όπως δείχθηκε δεν έχουν ιδιαίτερα υψηλές μηχανικές επιδόσεις. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκε να πραγματοποιήσουμε δόκιμες και μετρήσεις με το δοκίμιο υπό τον κωδικό εργαστηρίου ***SQ104F***, το οποίο εικονίζεται κάτωθεν:



Επίσης για δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν επιλέξαμε να κάνουμε δοκιμές με συνδυασμούς και διατάξεις **με μόνο αυτόν τον τύπο υλικού**. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια θα γίνουν δόκιμες με διάφορους τύπους αφρού και ειδικές διαμορφώσεις για να οδηγηθούμε στη βελτιστοποίηση της κατασκευής.

5.1.2 Ετοιμασία των δοκιμίων

Η προετοιμασία των δοκιμίων προϋπέθεσε αρχικά την **κοπή των μακρών**

λεπτότοιχων σωλήνων και έπειτα την ένταξη του αφρού σε κάποια από τα δοκίμια αυτά.

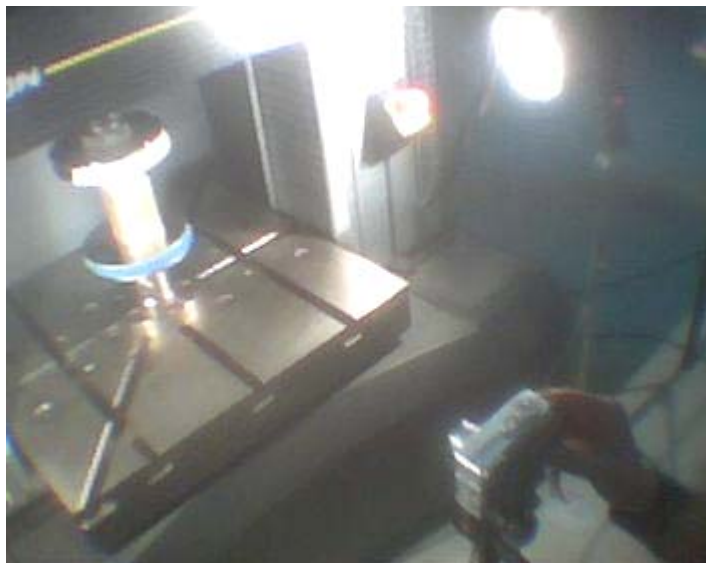
Επίσης σε κάποια δοκίμια χρειάστηκε να γίνει ειδική διαμόρφωση των ακρών (triggering) για να οδηγηθούν εκούσια στον επιθυμητό τρόπο κατάρρευσης. Στις παράπλευρες φωτογραφίες εικονίζεται η διαδικασία κοπής (αριστερά) ενός δοκιμίου από τον ειδικευμένο επιστημονικό



συνεργάτη Πρωτεσίλαο Κωστάζο, αλλά και ένα έτοιμο προς συμπίεση δοκίμιο (δεξιά) γεμισμένο με αφρό τύπου DOW.



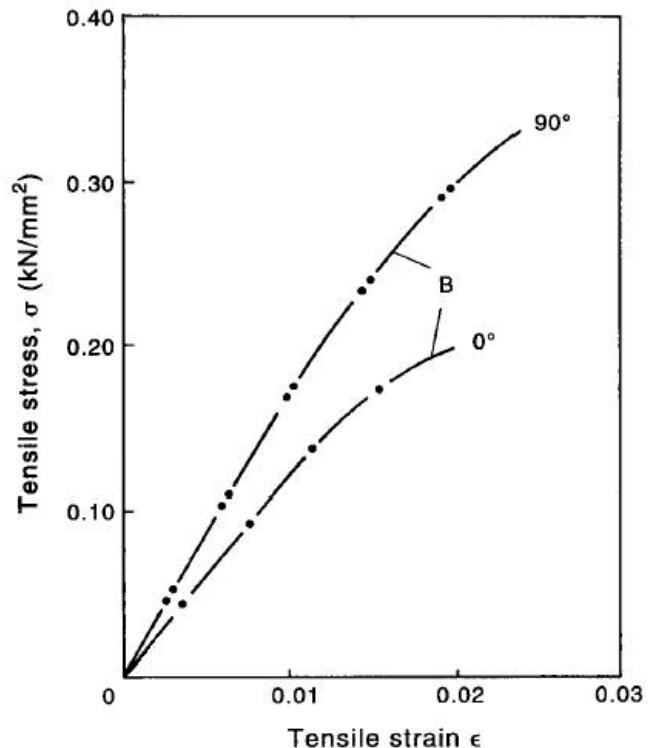
Ακόμη κατά τη διαδικασία του πειράματος χρειάστηκαν **ειδικές φωτιστικές διατάξεις (προβολείς)**, ώστε να αποτυπωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η διαδικασία κατάρρευσης κάθε δοκιμίου. Η προετοιμασία για την φωτογράφιση των φάσεων του πειράματος απεικονίζεται στην κάτωθεν φωτογραφία.



5.2 Χαρακτηριστικά των υλικών

α) Λεπτότοιχος σωλήνας από σύνθετο υλικό

Ο λεπτότοιχος σωλήνας υπό την κωδική ονομασία SQ104F που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία είναι φτιαγμένος από **σύνθετο υλικό 9 στρώσεων** αποτελούμενες από ίνες γυαλιού εμπορικού τύπου και βινιλεστέρα. Οι ίνες σε κάθε μια από τις εννέα στρώσεις (ξεκινώντας από την εξωτερική στρωμάτωση) είναι διατεταγμένες στις εξής γωνίες: [(90/0/2Rc)/(2Rc/0/90)/R_{C.75}], με την κατεύθυνση 0° να συμπίπτει με τον άξονα του σωλήνα. Ο συντελεστής Rc υποδηλώνει τυχαία διατεταγμένες μικρού μήκους ίνες ενώ ο συντελεστής R_{C.75} υποδηλώνει το ίδιο αλλά σε μικρότερο πάχος στρώσεως. Έτσι το τελικό υλικό έχει συνολικό πάχος **2,5mm**, πυκνότητα **1,55gr/cm³**, και αναλογία ινών κατ'όγκο **33,9%**. Σύμφωνα με τα στοιχεία του κατασκευαστή η διαστρωμάτωση του υλικού δημιουργήθηκε με χειρωνακτικό τύλιγμα των ινών γύρω από πυρήνα στιβαρού υλικού. Στο παράπλευρο σχέδιο παρουσιάζεται η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού σε δοκιμή εφελκυσμού.



Όσον αφορά στους συντελεστές μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού, αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Ιδιότητα	Τιμή
E_1 (Gpa)	12,7
E_2 (Gpa)	18,4
G_{12}	4,3
ν_{12}	0,151
ν_{21}	0,140
X_t (Gpa)	0,192
X_c (Gpa)	0,236
Y_t (Gpa)	0,332
Y_c (Gpa)	0.335

Παρατίθεται επίσης το κάτωθεν σχέδιο στο οποίο παρουσιάζονται οι διαστάσεις της κάτοψης του τετραγωνικού σύνθετου υλικού:



Για υπολογιστικούς λόγους που θα φανούν στη συνέχεια θα πρέπει επίσης να υπολογίσουμε τον όγκο του υλικού. Ο όγκος για το συγκεκριμένο υλικό δίνεται από τη σχέση: $V = E * h$ όπου E το εμβαδόν της διατομής του υλικού και h το ύψος του δοκιμίου.

Ο υπολογισμός του εμβαδού της διατομής γίνεται εύκολα σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = 4 * (56 - 18) * 2,5 + 4 * \left(\frac{1}{4}\right) * (\pi * 9^2 - \pi * 6,5^2) = 380 + \pi * 38,75 = 501,7 \text{ mm}^2$$

β) Αφρός πολυουρεθάνης

Στα πειράματά μας χρησιμοποιήσαμε αφρό εξηλασμένης πολυστερίνης με την εμπορική ονομασία STYROFOAM της εταιρείας DOW. Ο συγκεκριμένος αφρός χαρακτηρίζεται από πυκνότητα ίση με $d=0,035 \text{ gr cm}^{-3}$, μέτρο ελαστικότητας $E_f=8 \text{ MPa}$, λόγο Poisson $\nu=0,1$ και όριο διαρροής $\sigma_f=0.178 \text{ MPa}$. Η καμπύλη και τα χαρακτηριστικά της συμπίεσης του αφρού αυτού θα παρουσιαστούν στο πειραματικό μέρος του κεφαλαίου.

γ) Αφρός αλουμινίου Alporas

Στην πειραματική διαδικασία και σε μια προσπάθεια να ενισχύσουμε περαιτέρω το σύνθετο υλικό με ένα ελαφρύ υλικό, ικανό να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την κατάρρευσή του χρησιμοποιήθηκε επίσης ο αφρός αλουμινίου υπό την εμπορική ονομασία Alporas (βλ. παράπλευρη εικόνα) ο οποίος αγοράστηκε από την γερμανική εταιρεία Gleich. Ο μεταλλικός αυτός αφρός



αποτελούνταν από 97%Al, 1,5% Ca και 1,5% Ti είχε πυκνότητα $d=0,23 \text{ gr/cm}^3$, ενώ οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού αυτού αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα:

Ιδιότητα	Τιμή
E (Gpa)	1.1
G (Gpa)	0.33
ν	0.33
χ_t (Mpa)	1,6
γ_t (Mpa)	1.9

Εφ'όσον οι 2 άνωθεν τύποι αφρού θα συναρμοστούν στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού συμπεραίνουμε ότι το εμβαδόν της διατομής τους θα είναι ίδιο και ίσο με:

$$E = 38 * 51 + 38 * 6,5 + \left(\frac{1}{4}\right) * 4 * \pi * 6,5^2 = 1938 + 52 + 132,7 = 2122,7 \text{ mm}^2$$

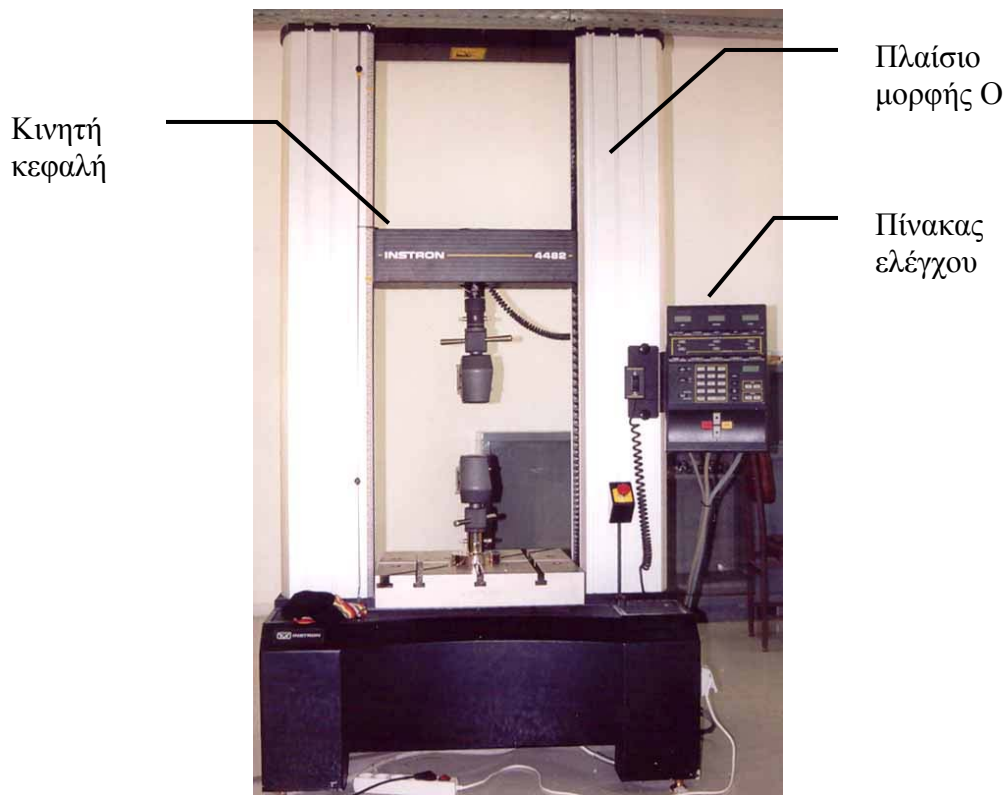
Άρα λοιπόν ο όγκος των αφρών στην πειραματική διαδικασία θα είναι ίσος με:
 $V = 2122,7 * h \text{ mm}^3$, με h το ύψος του δοκιμίου.

5.3 Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η **πρέσα δοκιμών INSTRON 4482** του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10 KNt.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι,

- Το πλαίσιο, μορφής O, που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10 KNt.

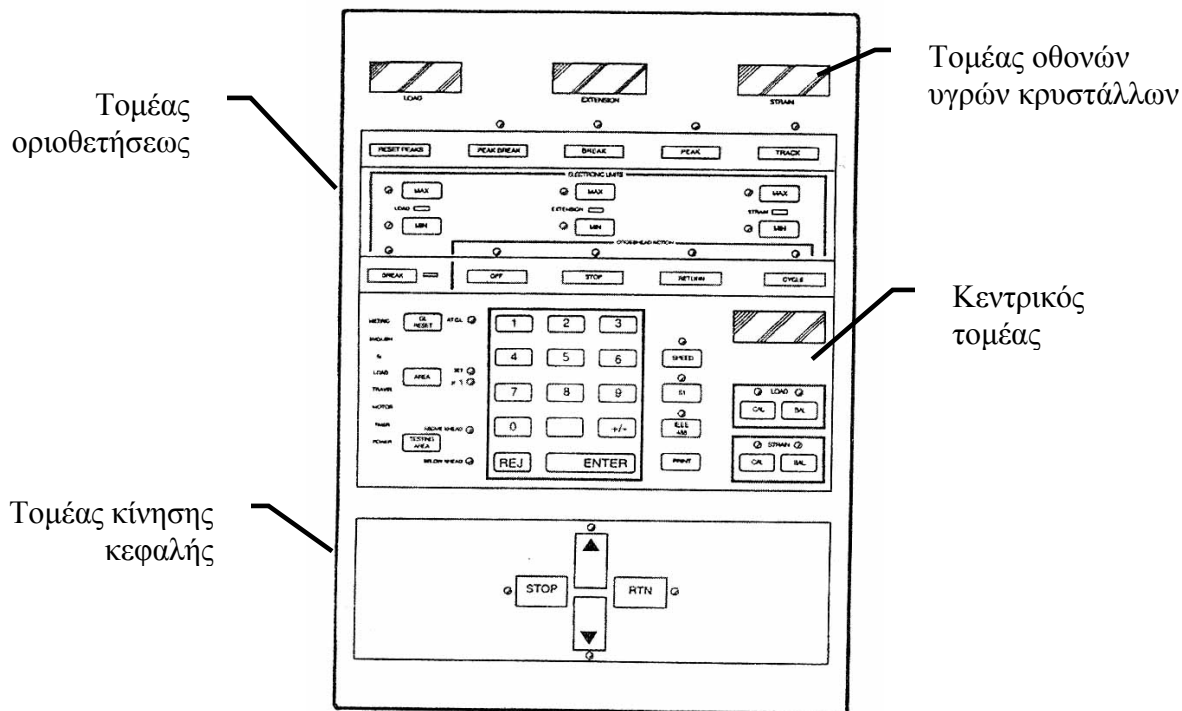
Τα **βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας** είναι,

- Ονομαστική δύναμη: 10 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm min⁻¹.
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm min⁻¹.
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm min⁻¹.
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV V⁻¹.

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών.

Όπως φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα, ο πίνακας ελέγχου απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς,

- Τον κεντρικό τομέα.
- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων.
- Τον τομέα οριοθέτησεως.
- Τον τομέα κίνησης κεφαλής.



Πίνακας ελέγχου.

Στον κεντρικό τομέα υπάρχει αριθμητικό πληκτρολόγιο και οθόνη υγρών κρυστάλλων, τεσσάρων ψηφίων, καθώς και λυχνίες ένδειξης στο αριστερό μέρος, όπου αναγράφεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα μέτρησης (SI, ENGLISH, METRIC). Η επιλογή του συστήματος μέτρησης γίνεται μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πίνακα. **Από τον κεντρικό τομέα υπάρχει η δυνατότητα για τις εξής ρυθμίσεις,**

- Καλιμπράρισμα της μηχανής.
- Επιλογή της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής.
- Οριοθέτηση της διαδρομής κίνησης.
- Καθορισμός του εύρους ενεργούς συμπίεσης του δοκιμίου.
- Έλεγχος της διαδικασίας εκτύπωσης των αποτελεσμάτων.
- Ενεργοποίηση της επικοινωνίας του πίνακα ελέγχου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Λειτουργία ειδικού λογισμικού διάγνωσης όλων των λειτουργιών της πρέσας.
- Καλιμπράρισμα των μετρητικών φορτίου και παραμόρφωσης.

Στον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων περιέχονται **τρεις τετραψήφιες οθόνες** υγρών κρυστάλλων καθώς και πλήκτρα, τα οποία επιτρέπουν την επιλογή φορτίου, επιμήκυνσης ή συμπίεσης δοκιμίου, καθώς επίσης και τα ακρότατα αυτών. Όλες οι τιμές αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες προς επεξεργασία μετά το πέρας της δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση, η επιλεγείσα λειτουργία υποδεικνύεται από αντίστοιχη λυχνία.

Στον τομέα οριοθέτησης δηλώνεται το όριο οποιασδήποτε λειτουργίας, το οποίο δεν πρέπει να υπερβεί το σύστημα. Τα όρια αυτά πρέπει να εισάγονται για λόγους ασφαλείας στην περίπτωση καταπόνησης δοκιμίου με κρίσιμο ύψος, για την αποφυγή ενδεχομένου συναντήσεως κινητής και σταθερής πλάκας από εσφαλμένο καλιμπράρισμα της μέγιστης διαδρομής. Οι καταχωρήσεις εκτελούνται μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου του πίνακα ελέγχου και οι επιλεγείσες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων του κεντρικού τομέα.

Οι λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν, μόλις επιτευχθούν τα όρια στις τιμές του φορτίου (LOAD), της επιμήκυνσης (EXTENSION), της παραμόρφωσης (STRAIN) και της θραύσης (BREAK) είναι οι εξής,

- Στάση της κεφαλής στη συγκεκριμένη θέση (STOP).
- Επιστροφή της κεφαλής στην αρχική θέση (RETURN).
- Αλλαγή της κατεύθυνσης για επαναλαμβανόμενη κίνηση (CYCLE).
- Σταμάτημα της κίνησης της κεφαλής (OFF).

Στον τομέα κίνησης της κεφαλής, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πίνακα ελέγχου, υπάρχει η **δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου της κίνησης της κεφαλής μέσω τεσσάρων πλήκτρων**. Να σημειωθεί ότι με την επιλογή του κομβίου «επιστροφή» η κεφαλή δεν κινείται με την προγραμματισμένη ταχύτητα αλλά με την μέγιστη δυνατή και σταματά στο σημείο εκκίνησης.

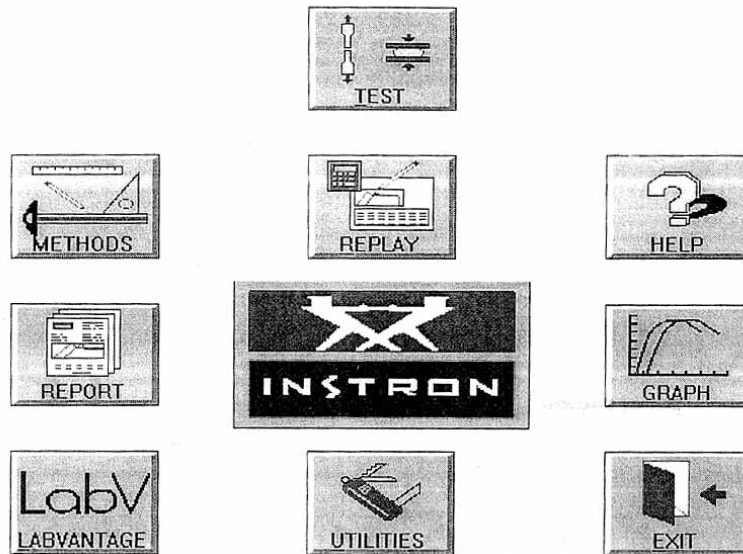
Στον πίνακα ελέγχου είναι επίσης ενσωματωμένα και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που αναλαμβάνουν τον έλεγχο και την επικοινωνία του συστήματος με τα μετρητικά φορτίου και παραμόρφωσης.

Όσον αφορά την ταχύτητα της δοκιμής είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι το υλικό του δοκιμίου, οι αλλαγές που θα υποστεί το δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος και η μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού καταγραφέα-λήπτη που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας. Η ταχύτητα μπορεί να οριστεί με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η **σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας**, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του, και οι δύο πλάκες να παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά την διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα της βάσης.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται από την πρέσα δοκιμών για την επίτευξη της πειραματικής εργασίας είναι το INSTRON Series IX Automated Material Tester Version 7.00, το οποίο έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί τα λαμβανόμενα αρχεία και σε υπολογιστή που δεν είναι συνδεδεμένος στην πρέσα δοκιμών.

Η αρχική οθόνη του προγράμματος αποτελείται από ένα αριθμό επιλογών που δίνουν πρόσβαση σε διάφορες λειτουργίες όπως αυτές φαίνονται στο κάτωθεν σχήμα:



Αρχικές επιλογές του προγράμματος INSTRON Series IX.

Οι διάφορες λειτουργίες που παρέχονται είναι:

- TEST- Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή πειράματος που ήδη έχει προετοιμαστεί.
- METHODS- Σε συνεργασία με το Method Editor, επιτρέπει την εισαγωγή νέων μεθόδων πειραμάτων ή τη μεταβολή των συνθηκών ενός ήδη υπάρχον.
- REPLAY- Δίδει τη δυνατότητα επανάληψης της διαδικασίας ενός πειράματος.
- GRAPH- Εισάγει την διαδικασία δημιουργίας γραφημάτων.
- HELP- Παρέχει βοηθητικές οδηγίες από το Merlin Online Help and Reference στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα.
- EXIT- Έξοδος από το πρόγραμμα.

5.4 Αξιολόγηση συμπεριφοράς των συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας έχει πρωτεύουσα σημασία. Ο πρωταρχικός μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για μία δεδομένη μετατόπιση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η μετατόπιση για δεδομένη απορροφούμενη ενέργεια, τόσο μικρότερο είναι το μέσο φορτίο \bar{P} . Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας **κατά τρόπο μη αντιστρεπτό**. Με αυτό το σκεπτικό, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου - παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μία τετραγωνική επιφάνεια.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την συλλογή δεδομένων για ένα υλικό σχετικά με την ικανότητα του προς απορρόφηση ενέργειας, είναι η **ανάπτυξη κριτηρίων που θα μπορούσαν να ελεγχθούν και να αποτελούν συγκρίσιμα μεγέθη για περαιτέρω επεξεργασία**.

Μερικά από τα βασικότερα κριτήρια που έχουν ήδη αναπτυχθεί είναι τα ακόλουθα:

i) Συνολική απορροφούμενη ενέργεια W , η οποία προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης $P-s$ με ολοκλήρωση

$$W = \int P ds$$

ii) Μέσο μεταελαστικό φορτίο \bar{P} , το οποίο προκύπτει από τη σχέση,

$$\bar{P} = \frac{W}{s}$$

iii) Ειδική ενέργεια απορρόφησης W_s (Specific Energy), η οποία προκύπτει από την σχέση,

$$E_s = \frac{W}{m_c}$$

όπου, m_c η μάζα του υλικού που έχει διαρρεύσει

iv) Ομοιομορφία φορτίου (Load Uniformity)

$$LU = \frac{P_{max}}{P}$$

όπου P_{max} , η μέγιστη τιμή του φορτίου που επιτυγχάνεται κατά την ελαστική του παραμόρφωση πριν κατά παραδοχή, αρχίσει η κατάρρευση του υλικού

v) Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας (Energy Dissipation Density) E_v , η οποία προκύπτει από την σχέση,

$$E_v = \frac{W}{V}$$

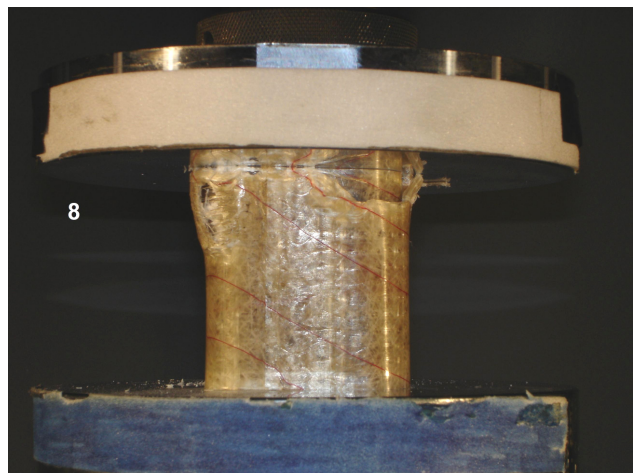
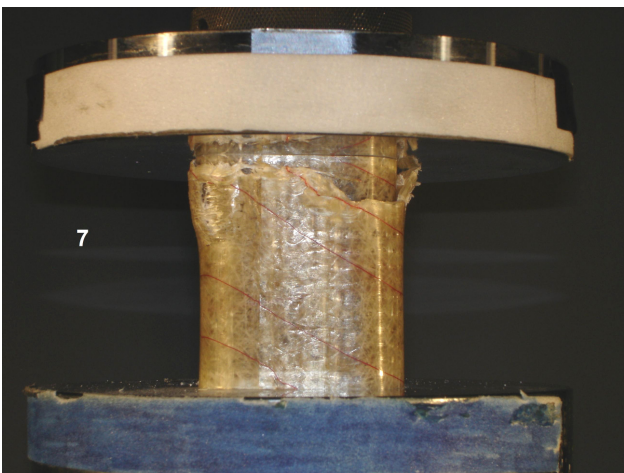
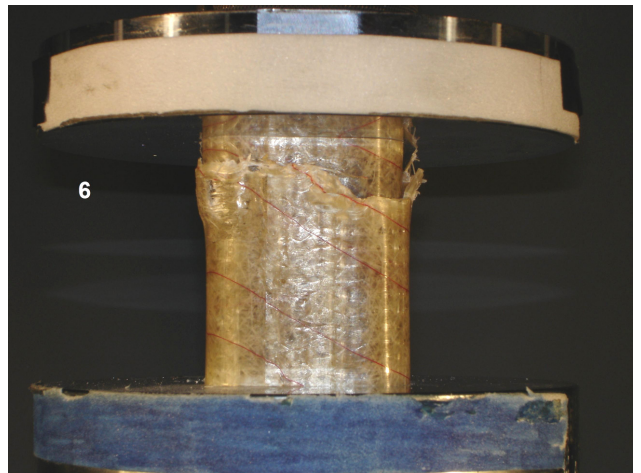
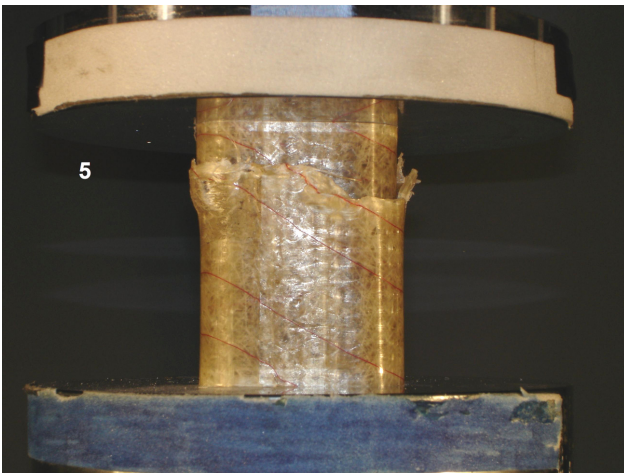
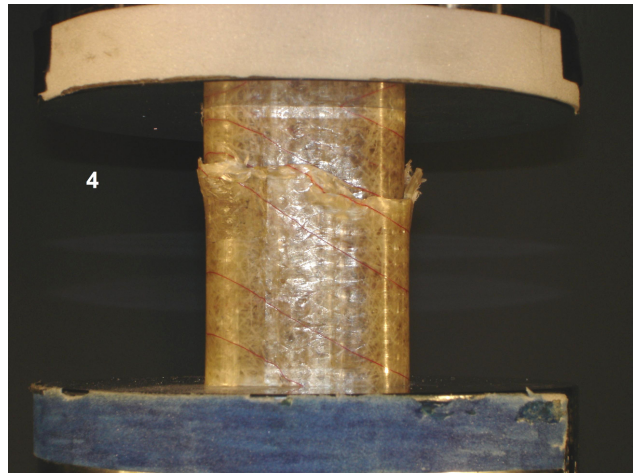
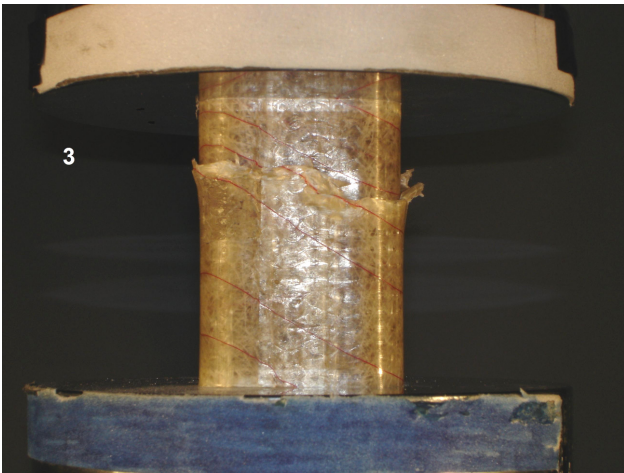
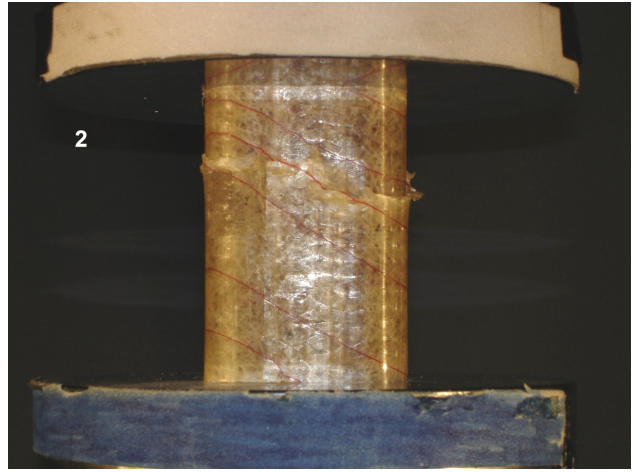
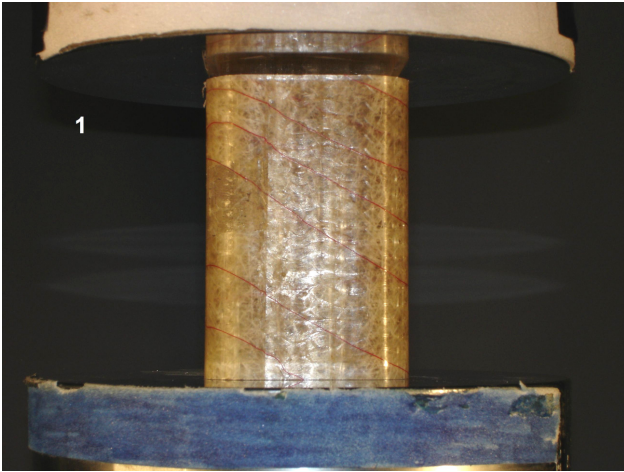
όπου V ο όγκος του κατεστραμμένου υλικού.

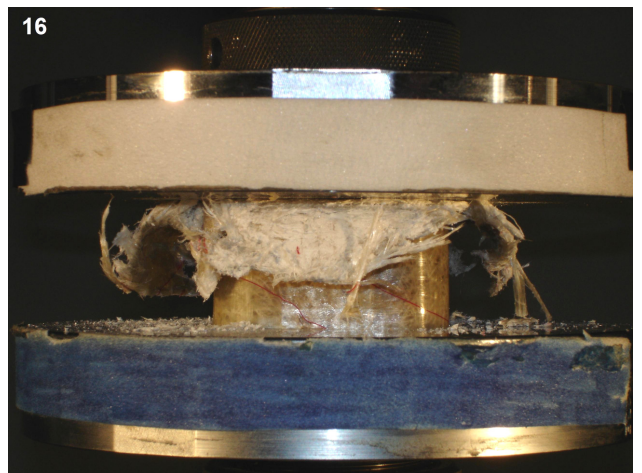
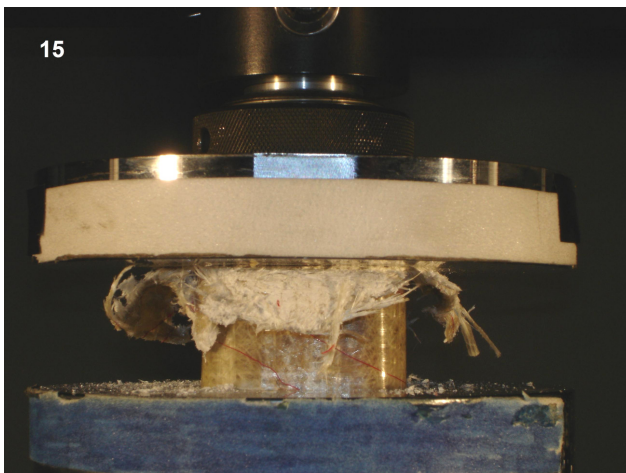
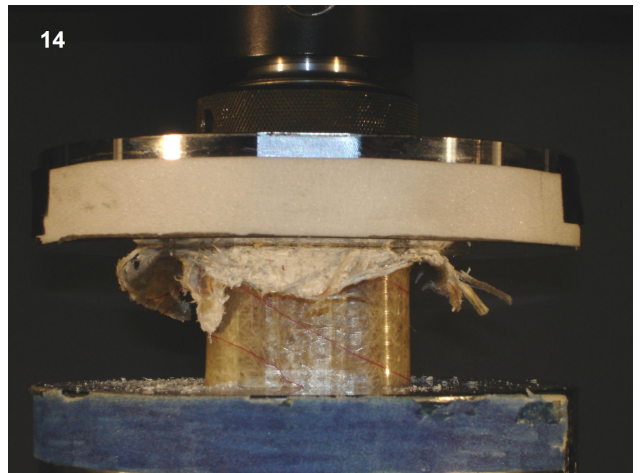
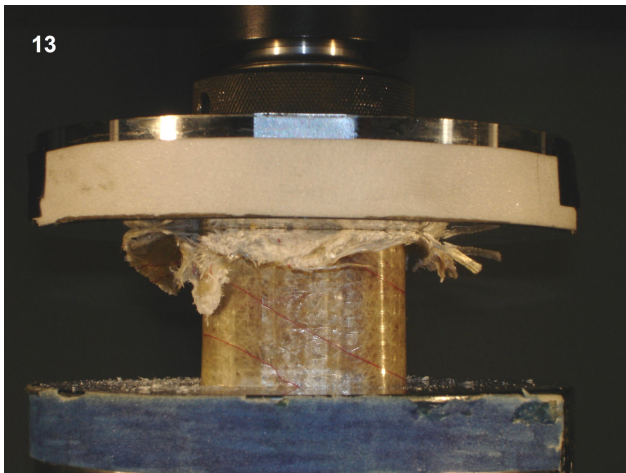
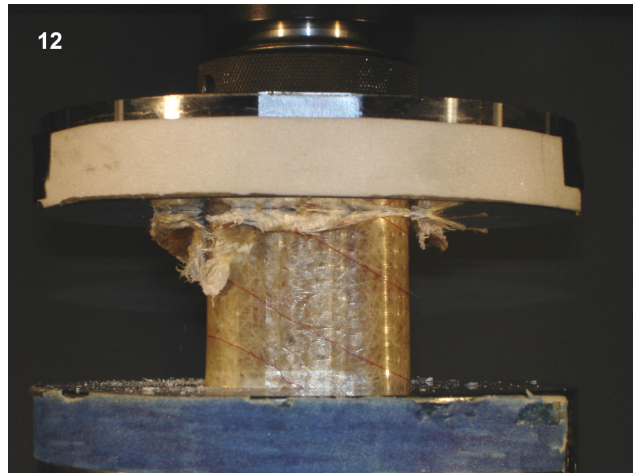
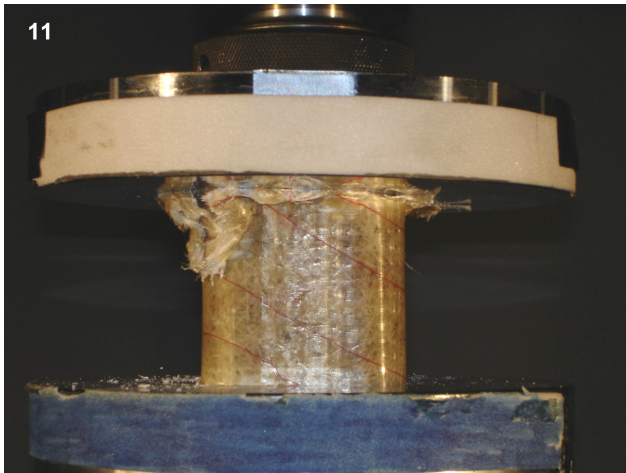
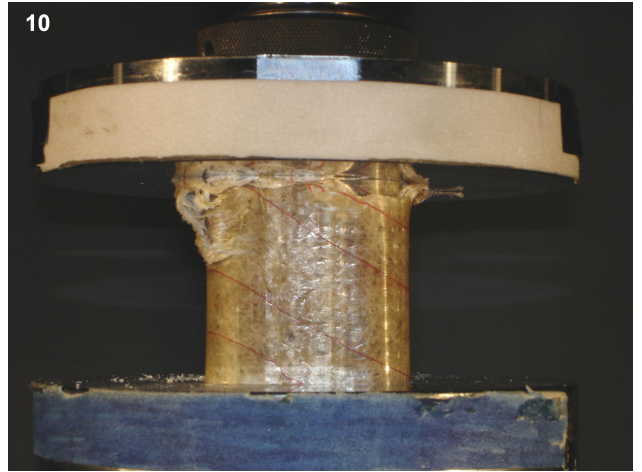
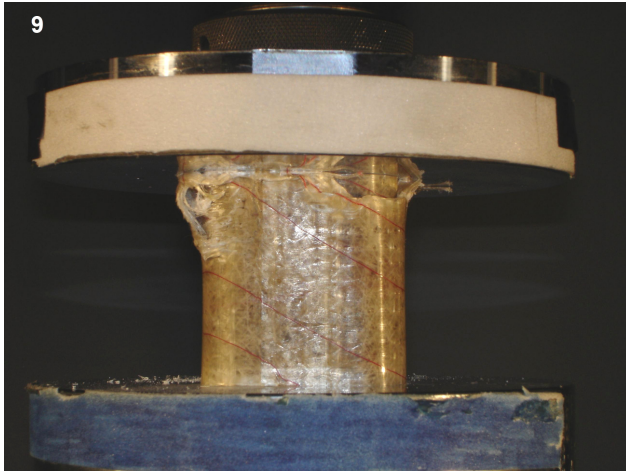
Στη συνέχεια παρατίθεται το κυρίως πειραματικό μέρος με τις δοκιμές και τις μετρήσεις κατάρρευσης για διάφορους συνδυασμούς και διατάξεις δοκιμών.

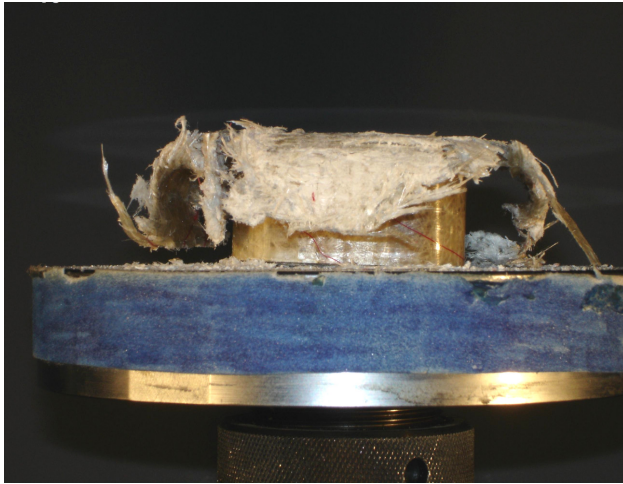
5.5 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

5.5.1 Δοκιμή σύνθετου σωλήνα

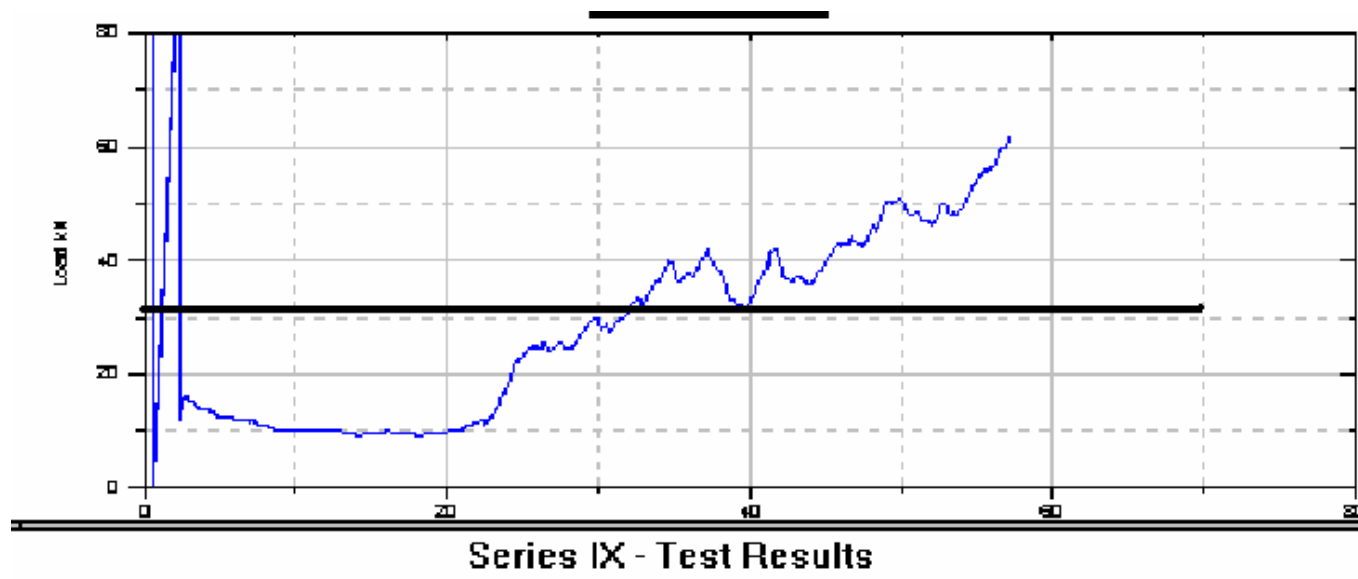
Αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης με το **σύνθετο τετραγωνικό λεπτότοιχο υλικό, χωρίς καμία ενίσχυση**. Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από τη δοκιμή κατάρρευσης του υλικού αυτού:







Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
mm μετατόπισης:	0	2.3	4.8	6.9	10.9	15.1	19.1	22.6	25.1
	10	11	12	13	14	15	16		
	26.9	30.3	35.1	40.3	44.8	49.3	55.7		

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο P_{max}:	86,76 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P:	30,19 kN
Μήκος σύνθλιψης:	57,1 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	1720,6 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	44,4 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	28,647 cm³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	38,75 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	2.87
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	60,1 Joules/cm³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε ενδιαφέροντες επισημάνσεις και στοιχεία που παρατηρήθηκαν προϊούσης της διαδικασίας κατάρρευσης του ανωτέρου δοκιμίου:

- Στο πρώτο στάδιο της συμπίεσης του σύνθετου υλικού παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση.

Στα 2mm παραμόρφωσης λοιπόν επέρχεται **περιφερειακή θραύση του δοκιμίου**. Πολύ ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι η θραύση δεν λαμβάνει μέρος στο μέσο του υλικού αλλά 20mm πιο ψηλά (βλ. *φωτογραφία 2*), προφανώς λόγω ατελειών στη συγκεκριμένη περιφέρεια.

- Ακολουθεί η **εισχώρηση του άνωθεν τμήματος** του θραυσμένου δοκιμίου στο κάτωθεν (*φωτογρ. 3,4,5,6,7*). Η αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια των τμημάτων στο στάδιο αυτό διατηρεί το φορτίο σταθερό στα 10 kN περίπου για τα επόμενα 20mm συμπίεσης.

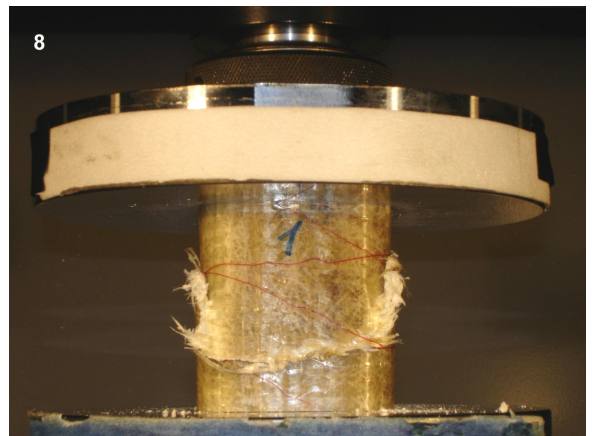
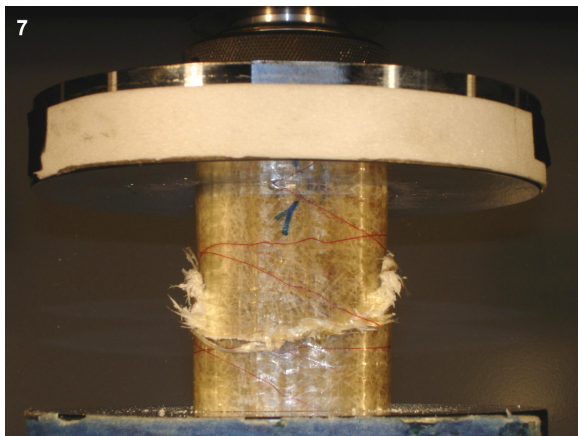
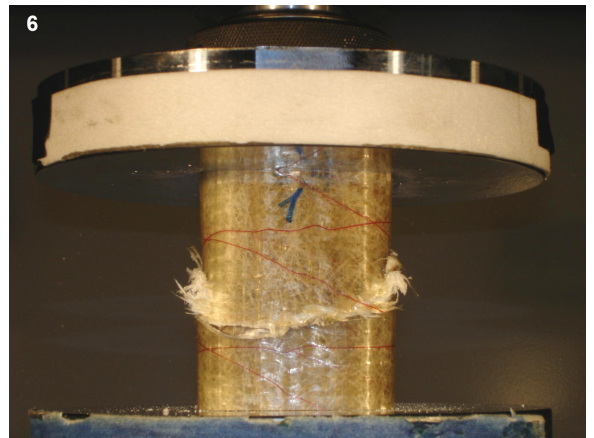
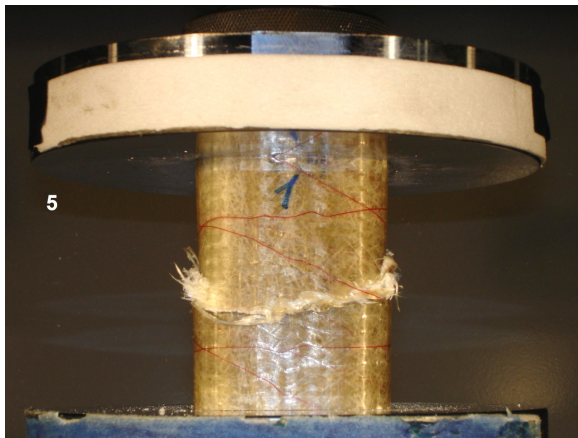
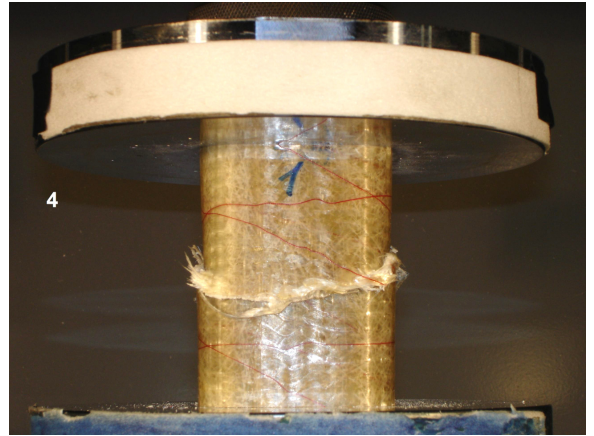
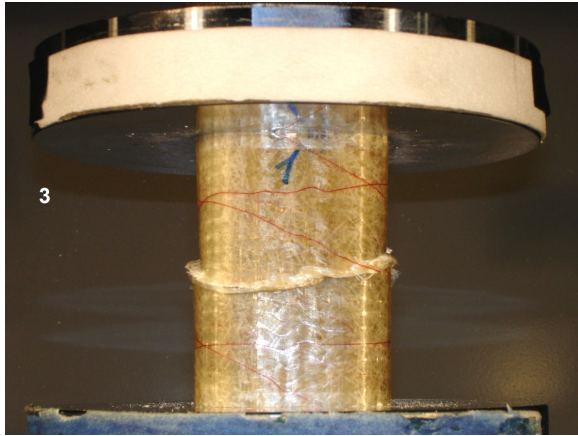
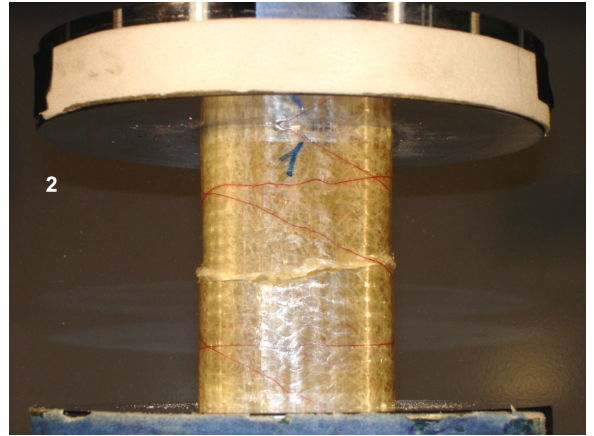
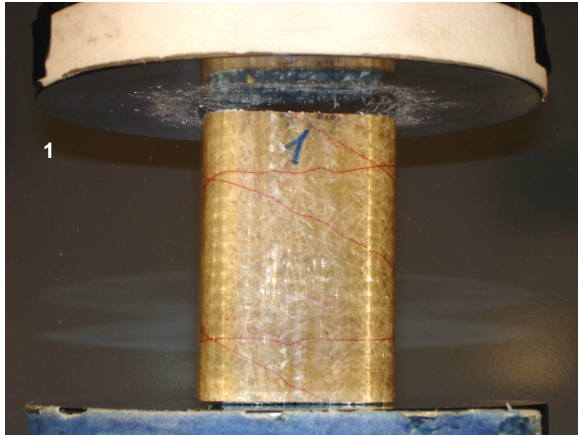
- Εν συνεχεία τα τοιχώματα του δοκιμίου αρχίζουν να αποσχίζονται, λόγω της εισχώρησης του ενός κομματιού στο 2^ο αλλά και λόγω της πίεσης της πρέσας. Έχουμε λοιπόν από το σημείο αυτό και έπειτα (φωτογρ. 8-18) **προοδευτική συντριβή** με μικρορωγμές του σύνθετου υλικού που συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας σύνθλιψης (βλ. κεφ.2).

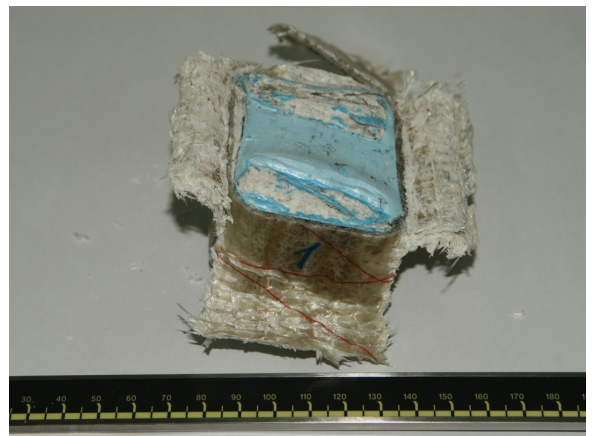
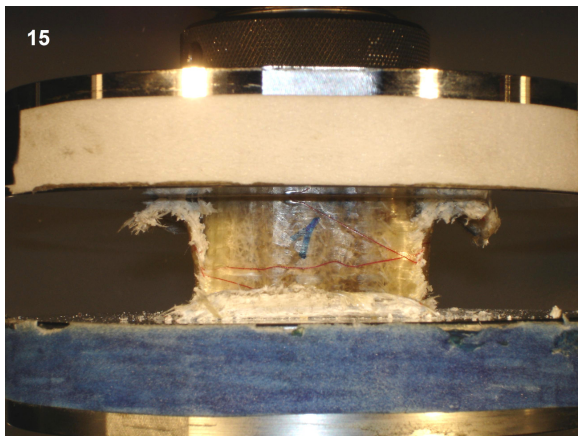
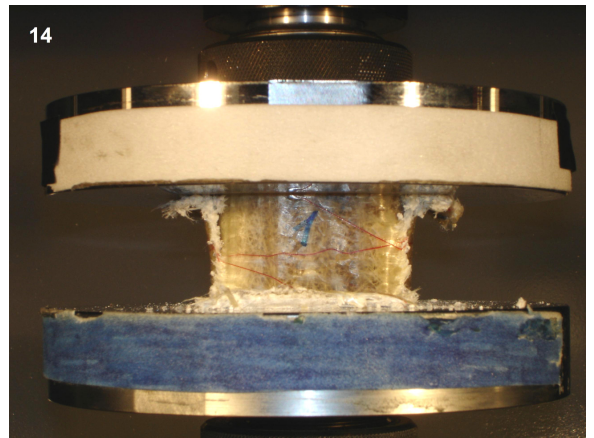
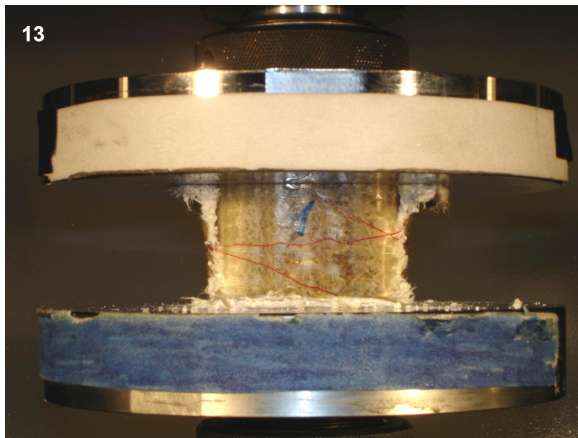
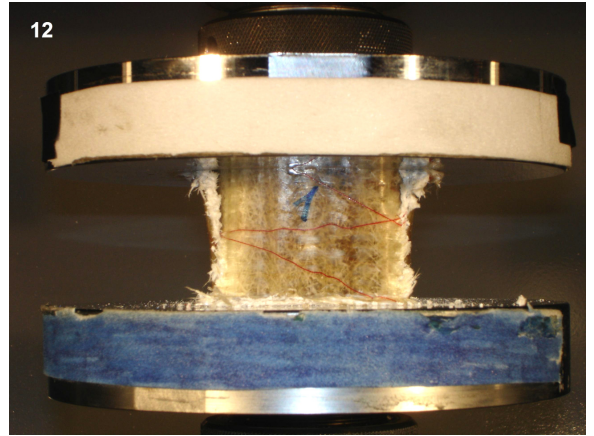
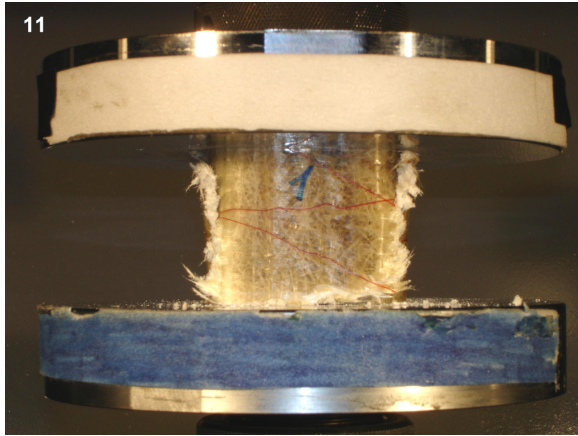
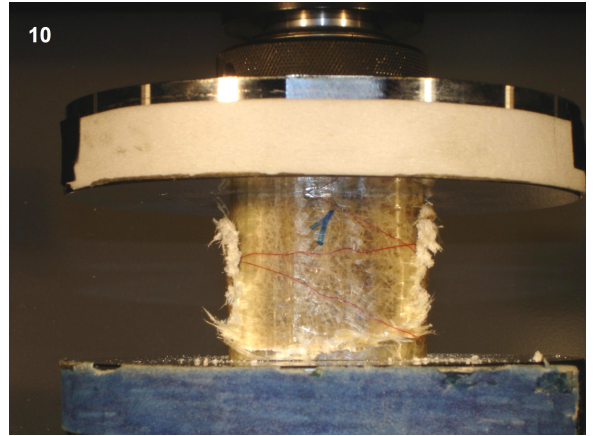
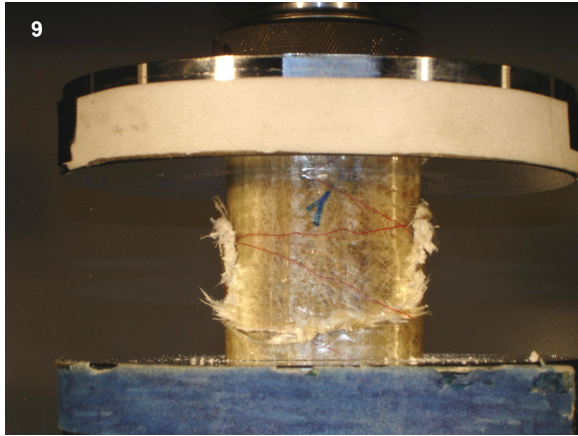
Παράλληλα το τμήμα του υλικού που σε προηγούμενο στάδιο είχε εισχωρήσει στο κάτωθεν μέρος του δοκιμίου συνεχίζει την κάθοδό του. Έτσι **έχουμε 2 μηχανισμούς παραγωγής κατακόρυφης αντίστασης**. Την τριβή στη διεπιφάνεια των τμημάτων που βρίσκονται το ένα μέσα στο άλλο, αλλά και τη δύναμη που απαιτείται για την απόσχιση (delamination) του εξωτερικού τμήματος του υλικού. Το γεγονός αυτό αυξάνει σταδιακά το φορτίο όπως φαίνεται στην καμπύλη που παρατίθεται πιο πάνω από 10kN που είναι η δύναμη τριβής σε 60kN στο τέλος του πειράματος. Στην τελευταία φωτογραφία φαίνεται η τελική κατοπτική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση.

5.5.2 Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με πολυμερή αφρό

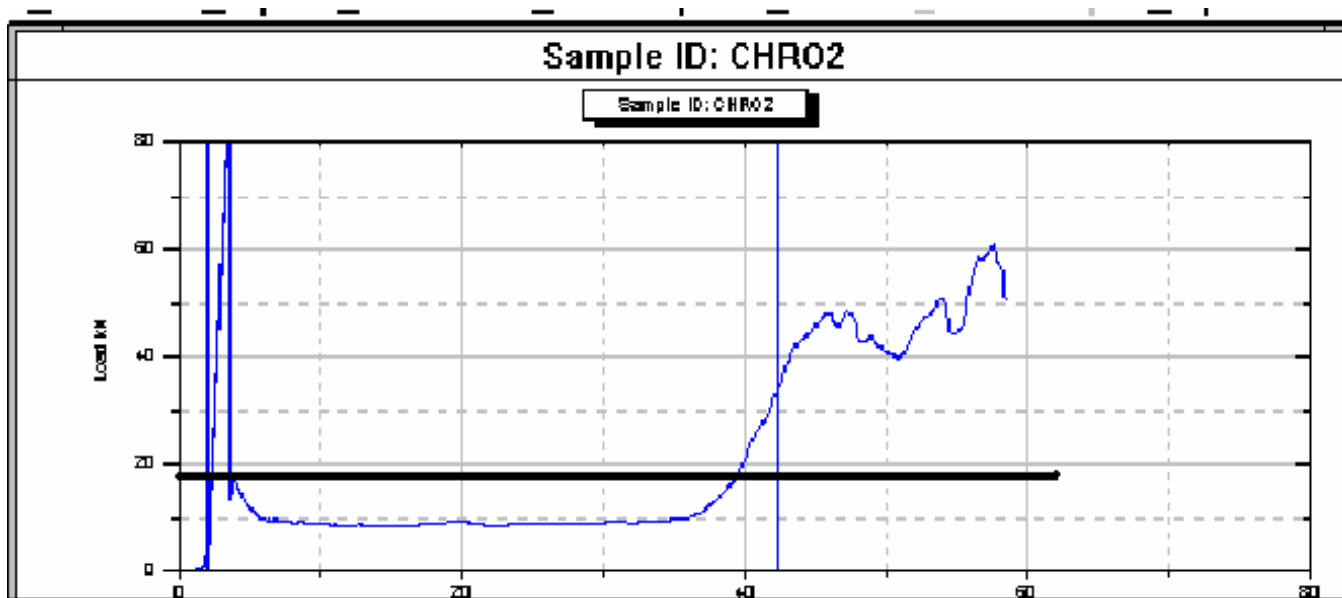
Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε δοκιμή θλίψης με το ίδιο **σύνθετο τετραγωνικό λεπτότοιχο υλικό, εσωτερικά ενισχυμένο με τον πολυμερή αφρό τύπου DOW**.

Κάτωθεν παρουσιάζονται διαδοχικές φωτογραφίες από τη δοκιμή κατάρρευσης του σύνθετου αυτού κελύφους (sandwich shell):





Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8
mm μετατόπισης	0	3.6	6.3	9.6	11	12.3	16.1	19.4
	9	10	11	12	13	14	15	
	24.9	31.1	36.4	39.6	45.4	49.5	55.1	

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο Pmax:	88,64 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P:	17,22 kN
Μήκος σύνθλιψης:	58,5 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	1007,4 Joules
Συνολική ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	53,5 gr
Συνολικός όγκος υλικού που καταστράφηκε:	155,9 cm³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	19,83 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	5,15
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	6,46 Joules/cm³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

Στο σημείο αυτό θα παραθέσουμε ενδιαφέροντες επισημάνσεις και στοιχεία που παρατηρήθηκαν προοίους της διαδικασίας κατάρρευσης του ανωτέρου δοκιμίου:

- Στο πρώτο στάδιο της συμπίεσης του σύνθετου υλικού (για 1mm περίπου) ο αισθητήρας της πρέσας δεν αντιλαμβάνεται την αντίσταση του αφρού ο οποίος εξέχει ελάχιστα του δοκιμίου. Όταν η επιφάνεια της πρέσας έρχεται σε επαφή με το σύνθετο υλικό παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση.

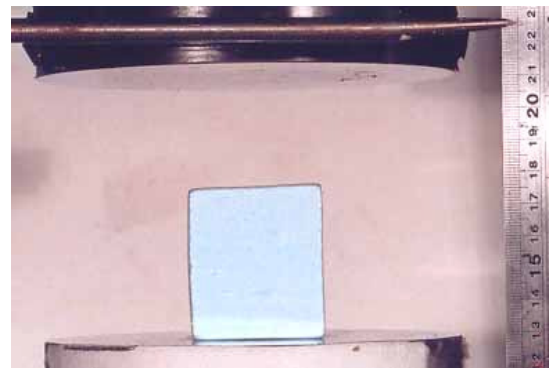
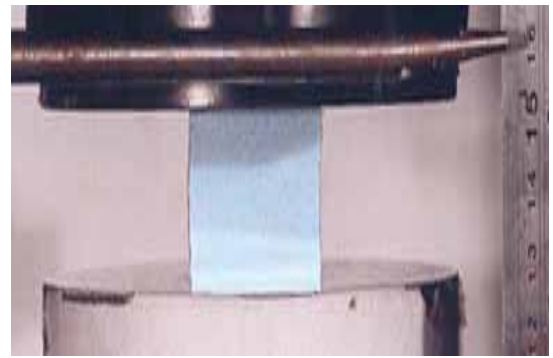
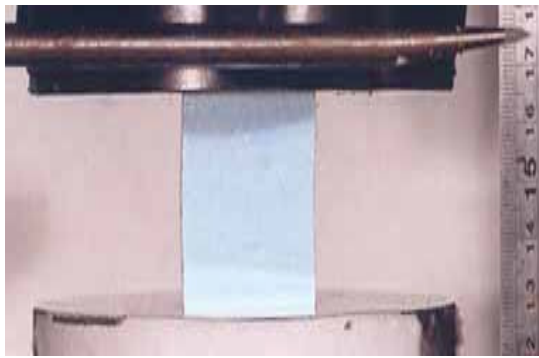
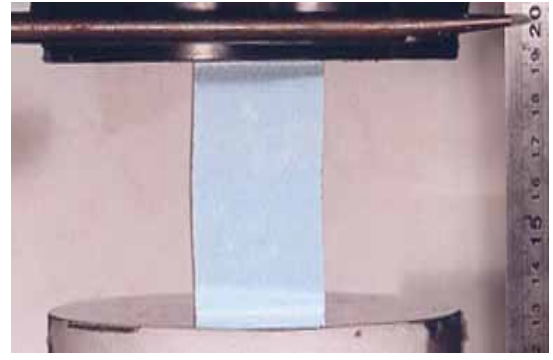
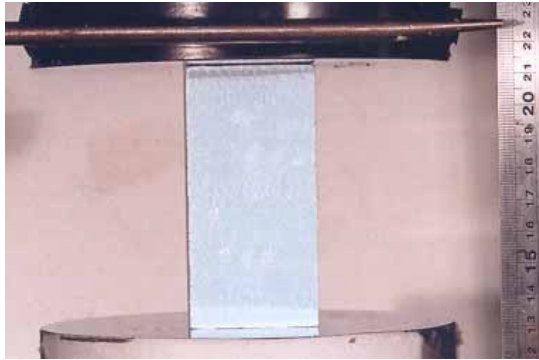
Έπειτα από 2,5mm αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζεται **περιφερειακή ρωγμή στο σύνθετο υλικό στο μέσο του ύψους του**, όπως και αναμενόταν (φωτογρ.2).

- Το κάτωθεν τμήμα του δοκιμίου εισχωρεί στο άνωθεν, με αποτέλεσμα να υπάρχουν 2 μηχανισμοί δημιουργίας αξονικής αντίστασης: i) η τριβή κατά τη διολίσθηση των τοιχωμάτων των τμημάτων και ii) η αντίσταση λόγω της ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης του πολυμερούς αφρού. Το άθροισμα των 2 αυτών δυνάμεων διατηρεί το αξονικό φορτίο στα 10 περίπου σταθερά kN (φωτογρ.3-10).

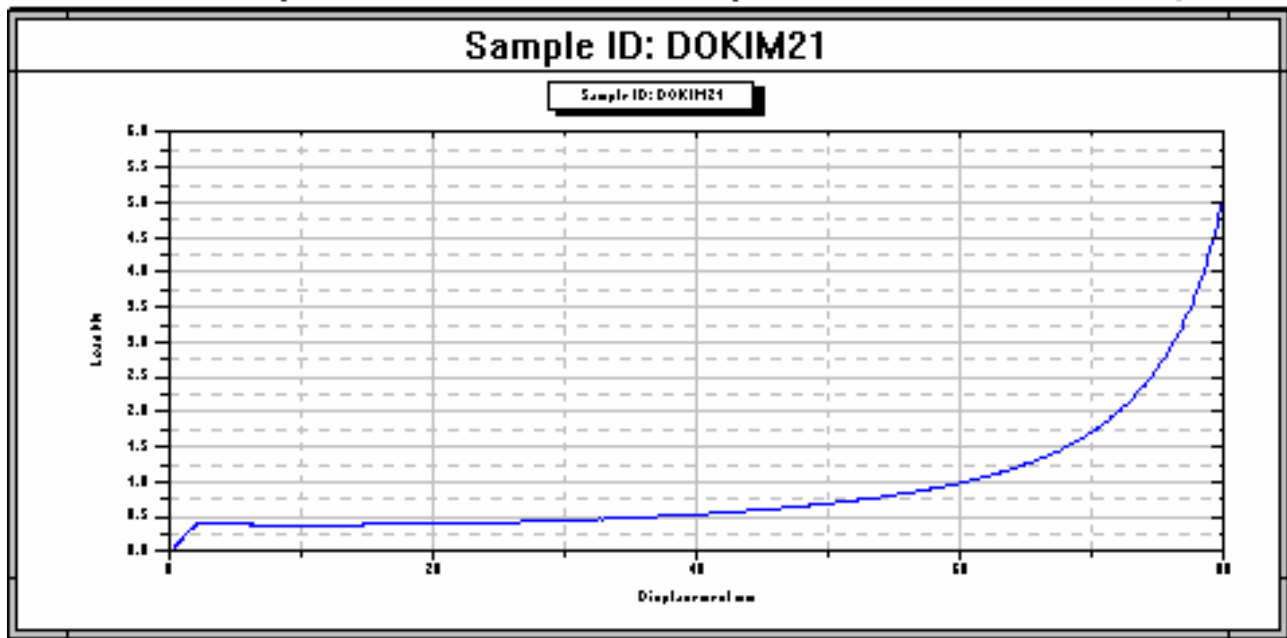
- **Το άνωθεν τμήμα του σύνθετου υλικού συναντά κατά την καθοδική του πορεία τη βάση της πρέσας και αναγκάζεται να διαρρεύσει.** Η διαρροή αυτή ανεβάζει ταχέως την καμπύλη του φορτίου και σε συνδυασμό με την αντίσταση του αφρού επιτυγχάνει φορτία της τάξεως των 50kN. (φωτογρ.10-15). Στην τελευταία εικόνα παρουσιάζεται η τελική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση. Παρατηρούμε ότι ο αφρός έχει παραμορφωθεί εν μέρει ελαστικά, γι'αυτό και επανέρχεται (ξαναφουσκώνει) εν μέρει μετά το τέλος του πειράματος.

5.5.3 Δοκιμή πολυμερούς αφρού

Εν συνεχεία παραθέτουμε τα δεδομένα της δοκιμής θλίψης για τον πολυμερή αφρό (που συναντάται υπό το εμπορικό όνομα DOW) που πραγματοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας του Σ.Κουτρομπάκη.



Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5
mm μετατόπισης:	0	23	42	61	78

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο Pmax:	5.10 kN
Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο P:	0,68 kN
Μήκος σύνθλιψης:	79 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	38,78 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	6,62 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	189,2 cm³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	5,86 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	7,50
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	0,205 Joules/cm³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

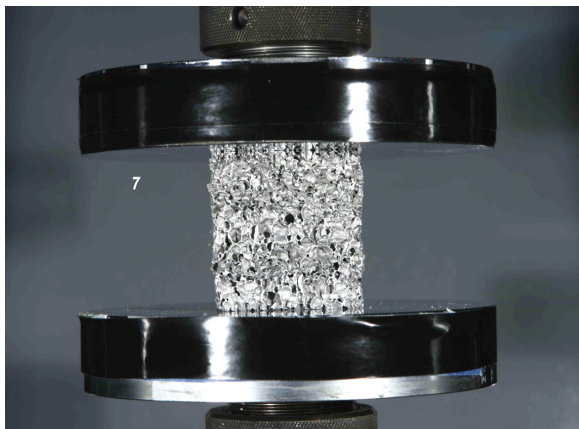
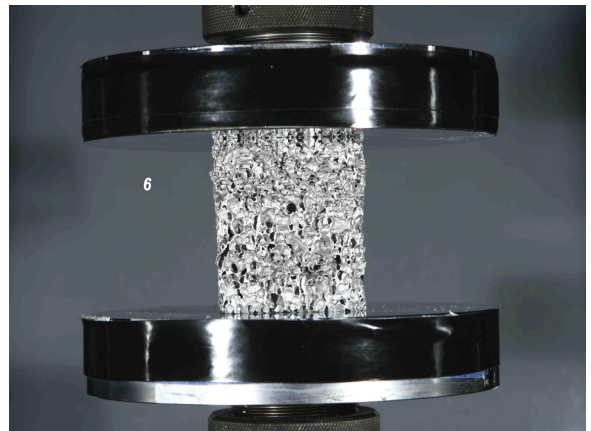
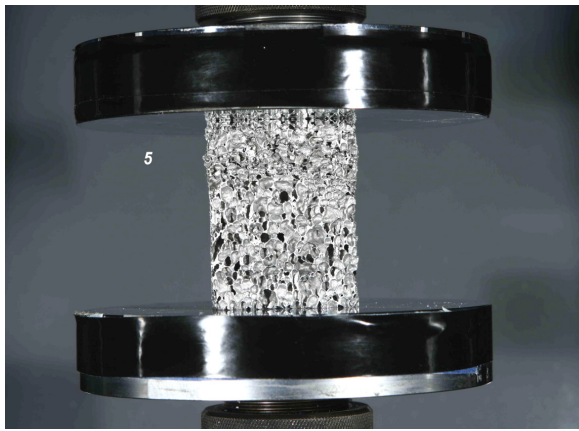
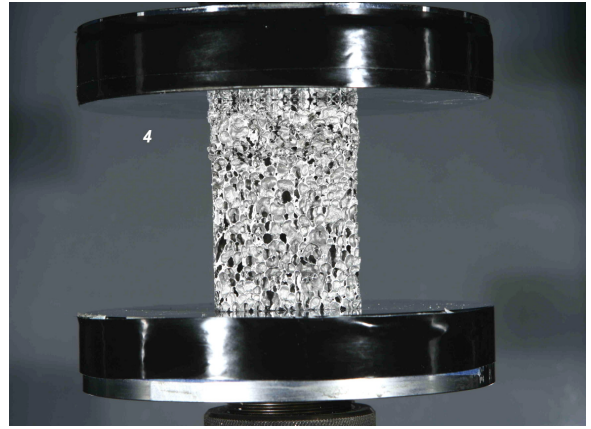
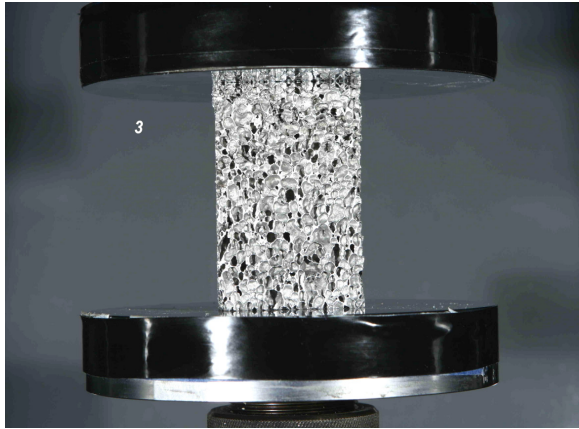
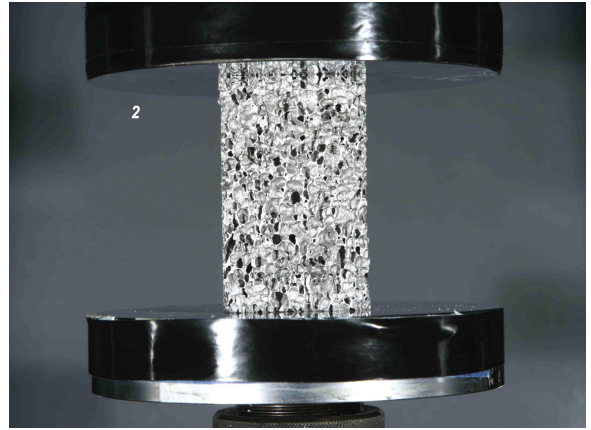
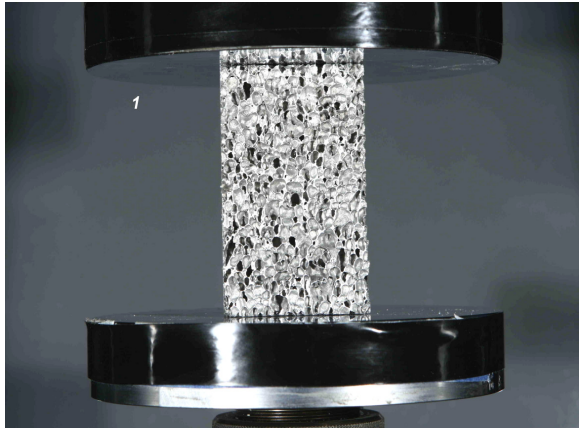
- Ο αφρός (φωτογρ.1) αρχικά παραμορφώνεται συμπεριφερόμενος ως ελατήριο με το φορτίο να ανεβαίνει γραμμικά σε συνάρτηση με τη μετατόπιση της πρέσας.
- Στη συνέχεια και για 35mm περίπου συμπίεσης (φωτογρ.2-3) η αξονική δύναμη παραμένει σταθερή και ίση με 0,5kN. Αυτή είναι η περιοχή plateau όπου πραγματοποιείται πλαστική παραμόρφωση και μη-αναστρέψιμη συμπίεση κάποιων τμημάτων του αφρού.
- Στο τελευταίο τμήμα (φωτογρ.4-5) η αξονική δύναμη αυξάνεται εκθετικά με τη μετατόπιση καθώς έχουμε ήδη φτάσει σε υψηλό βαθμό συμπίεσης και πυκνότητας του πολυμερούς υλικού.

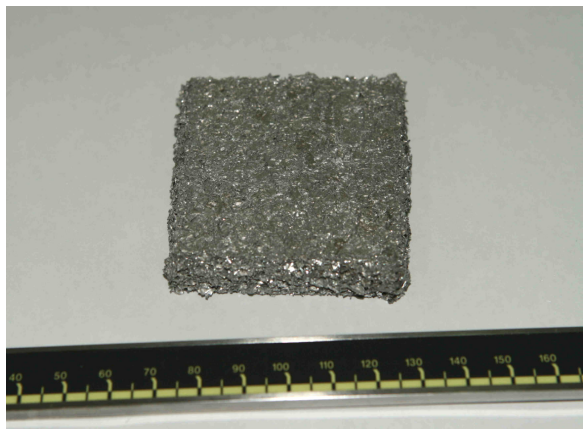
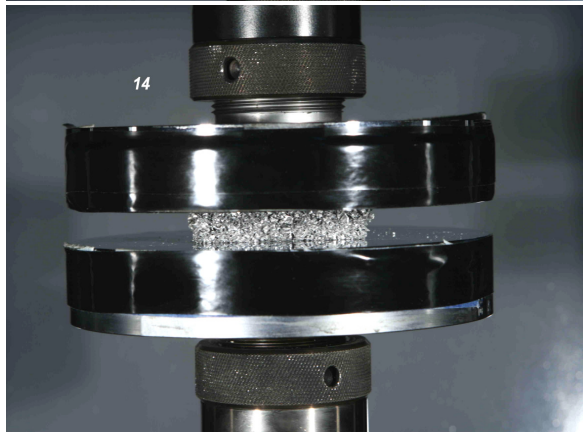
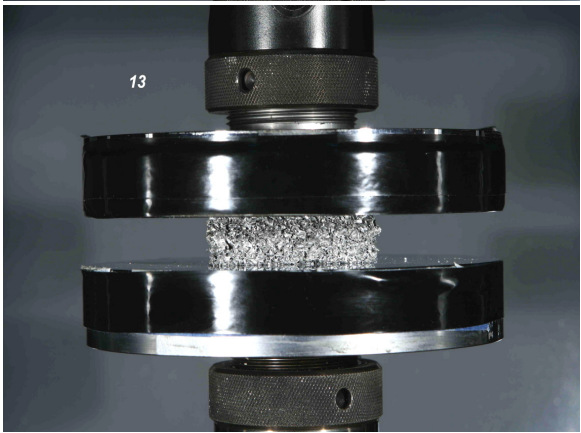
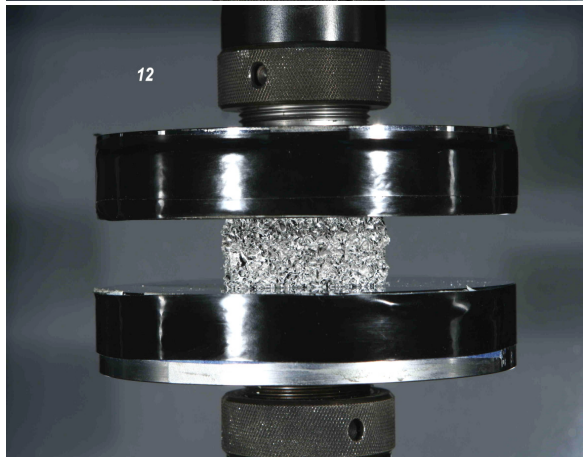
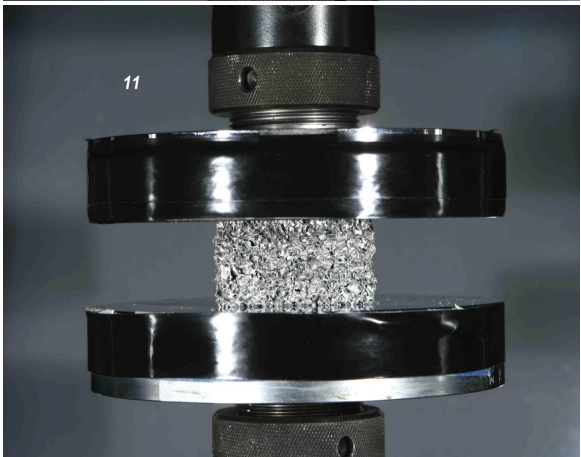
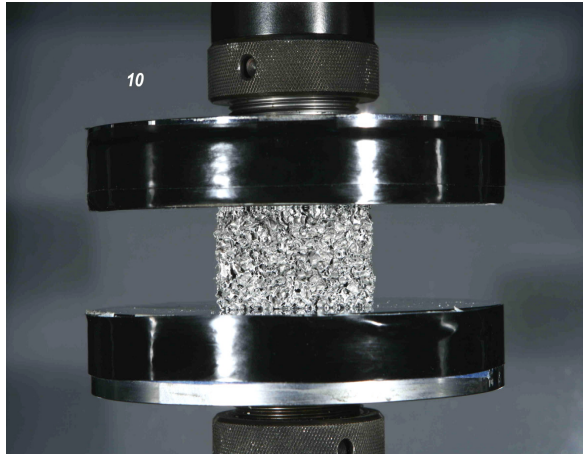
Σημαντική παρατήρηση είναι ότι ο πολυμερής αφρός παραμορφώνεται εν μέρει ελαστικά. Αυτό σημαίνει ότι επανέρχεται μερικώς και **επαναπροσδίδει μέρος της απορροφημένης ενέργειας** μετά το τέλος της συμπίεσης (ή της κρούσης). Αυτό είναι ένα **σαφέστατα μη-επιθυμητό χαρακτηριστικό** στην επιστήμη των ασφαλών συγκρούσεων αφού μια επενδεδυμένη με το συγκεκριμένο υλικό κατασκευή θα αποτινάσσεται προς την αντίθετη κατεύθυνση της αρχικής κίνησης σε περίπτωση συγκρούσεως.

5.5.4 Δοκιμή μεταλλικού αφρού

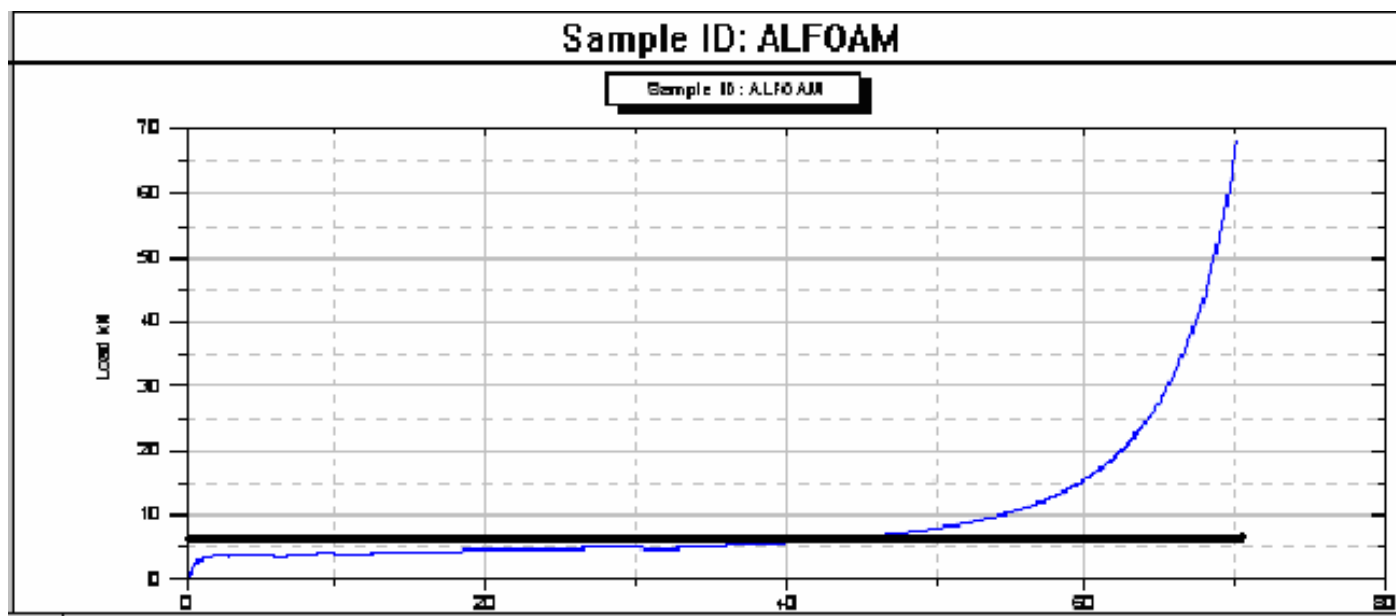
Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της καταστροφικής κατάρρευσης του αλουμινένιου αφρού (συναντόμενου υπό την εμπορική επωνυμία Alporas).

Θα γίνει λοιπόν άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της δόκιμης του μεταλλικού αφρού με τα αντίστοιχα της προαναφερθείσας δοκιμής του πολυμερούς.





Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8
mm μετατόπισης	0	4,8	7,6	12,8	19,6	24,8	29,8	34,8
	9	10	11	12	13	14	15	
	40	50,3	54	58,1	61,4	65,5	69,9	

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο Pmax:	69,10 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P:	5,21 kN
Μήκος σύνθλιψης:	69,9 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	364,2 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	39,1 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	169,8 cm ³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	9,31 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	13.2
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	2,15 Joules/cm ³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

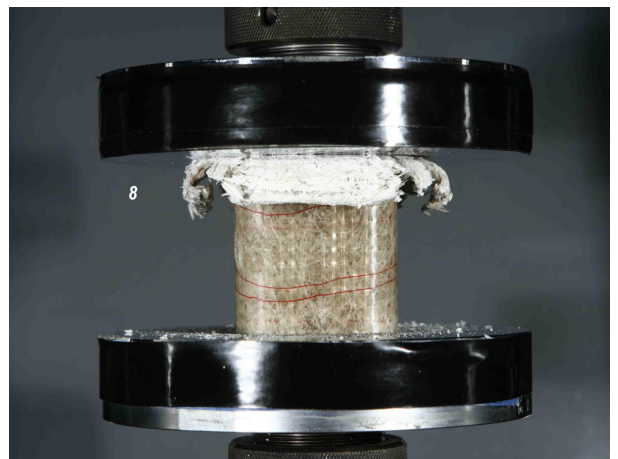
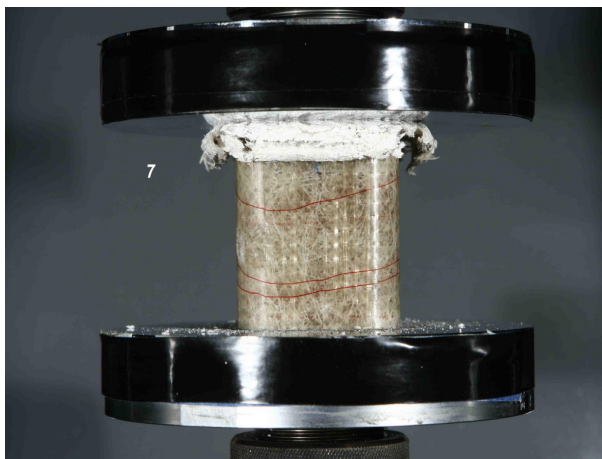
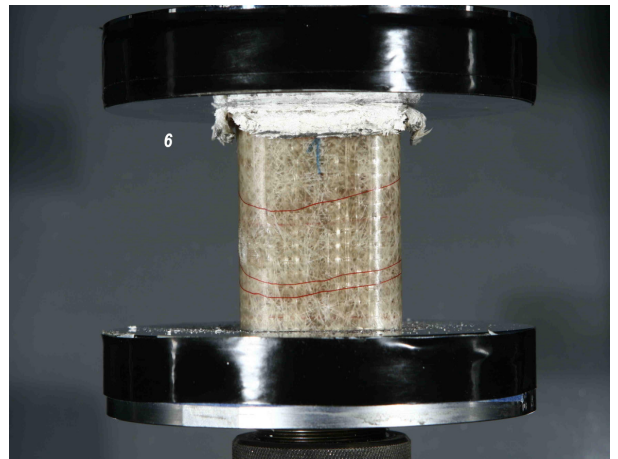
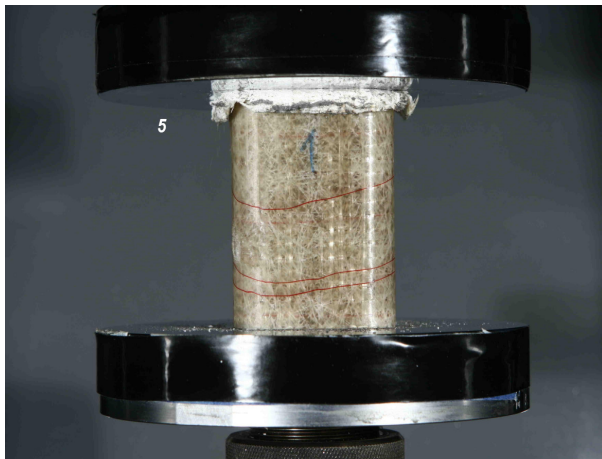
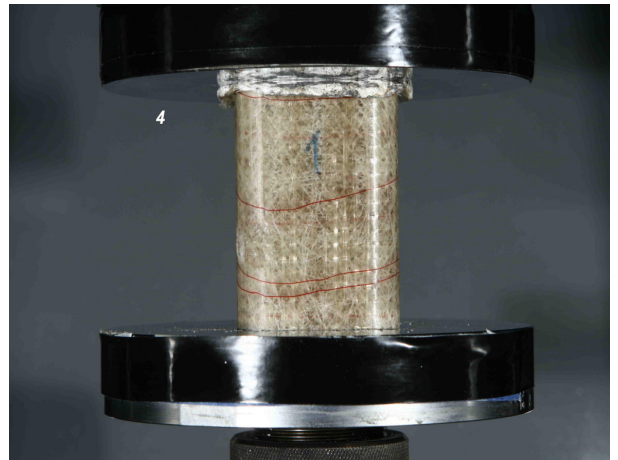
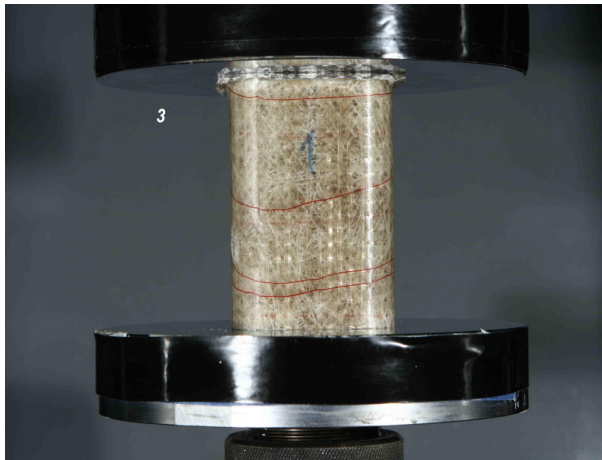
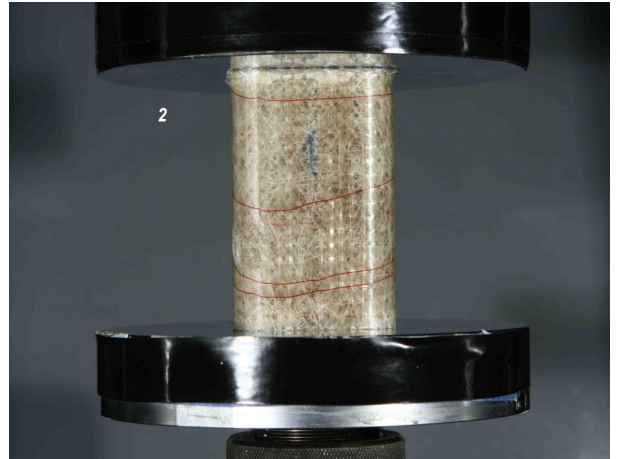
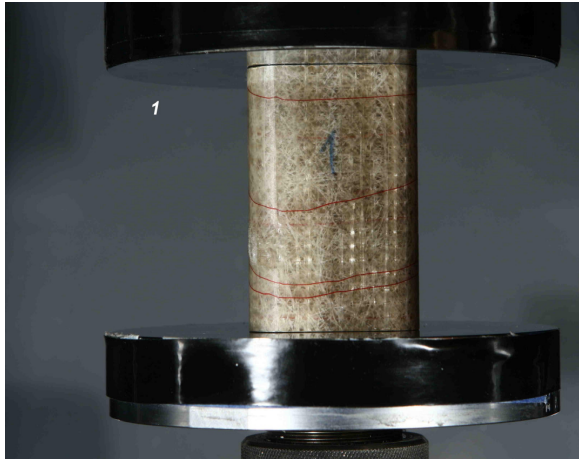
- Στα πρώτα χιλιοστά της συμπίεσής του (φωτογρ.1) ο μεταλλικός αφρός συμπεριφέρεται ελαστικά (όπως και ο πολυμερής).
- Ύστερα από 2,5mm συμπίεσης και για 35mm περίπου **η καμπύλη περνά στην περιοχή plateau** με το φορτίο να παραμένει σταθερό στα 5kN. Κατά τη φάση αυτή (φωτογρ.2-9) εξάγεται ο φυλακισμένος αέρας από τους ανοικτούς πόρους του αφρού και η πυκνότητά του αυξάνεται.
- Στο τελευταίο στάδιο της κατάρρευσης (φωτογρ.10-14) η καμπύλη (όπως και για τον πολυμερή αφρό) **αυξάνεται δραματικά, αφού έχουμε ήδη φθάσει σε υψηλό βαθμό συμπίεσης του αλουμινένιου αφρού**. Η περαιτέρω συμπίεσή του λοιπόν δεν έχει ιδιαίτερο νόημα. Στην τελευταία φωτογραφία φαίνεται η τελική κατοπτική εικόνα του δοκιμίου μετά την κατάρρευση.

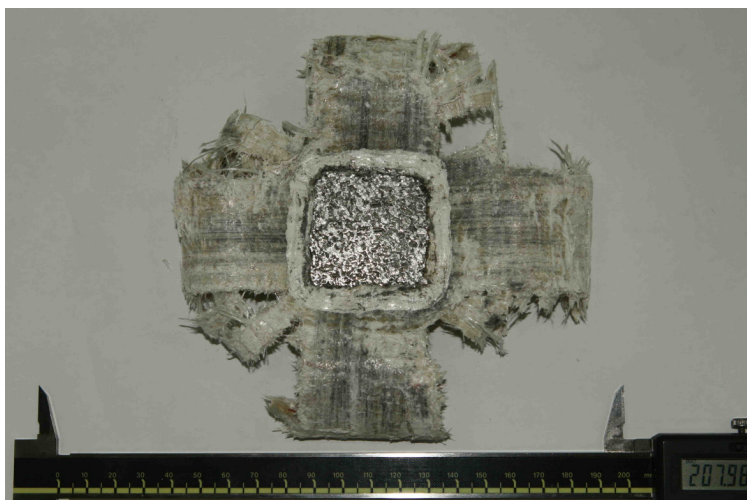
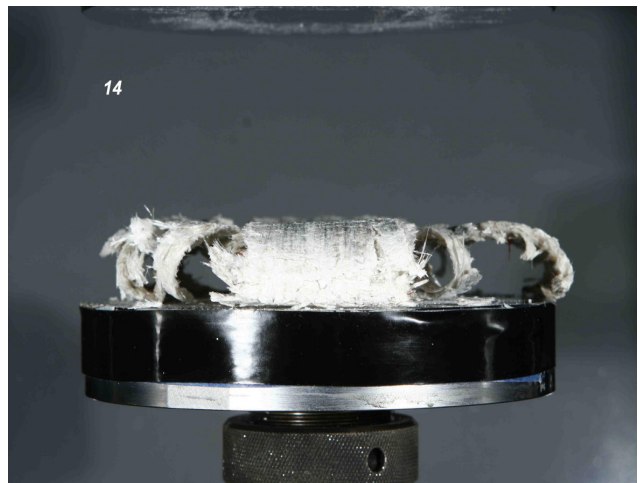
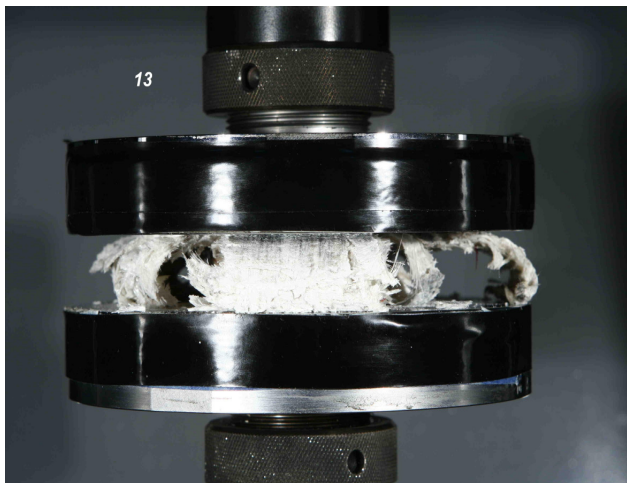
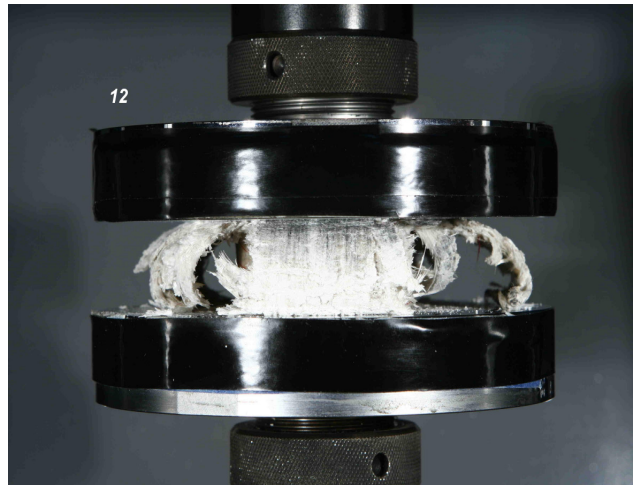
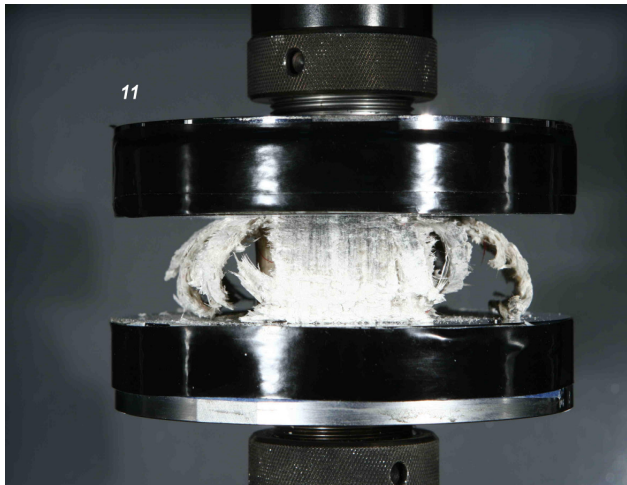
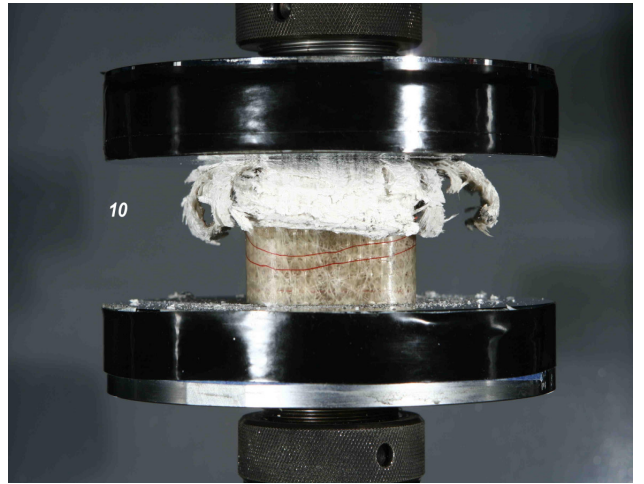
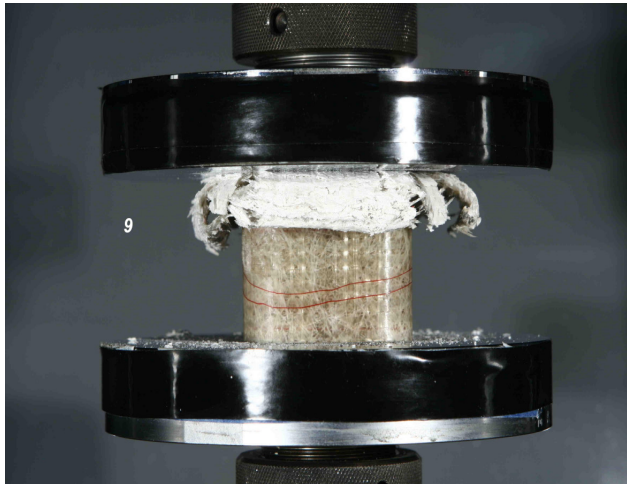
Θετικό και άξιο αναφοράς χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου μεταλλικού αφρού είναι ότι συμπεριφέρεται απολύτως πλαστικά. Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση σύγκρουσης θα απορροφήσει φυλακίζοντας μη-αναστρέψιμο μέρος της κινητικής ενέργειας.

5.5.5 Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με μεταλλικό αφρό

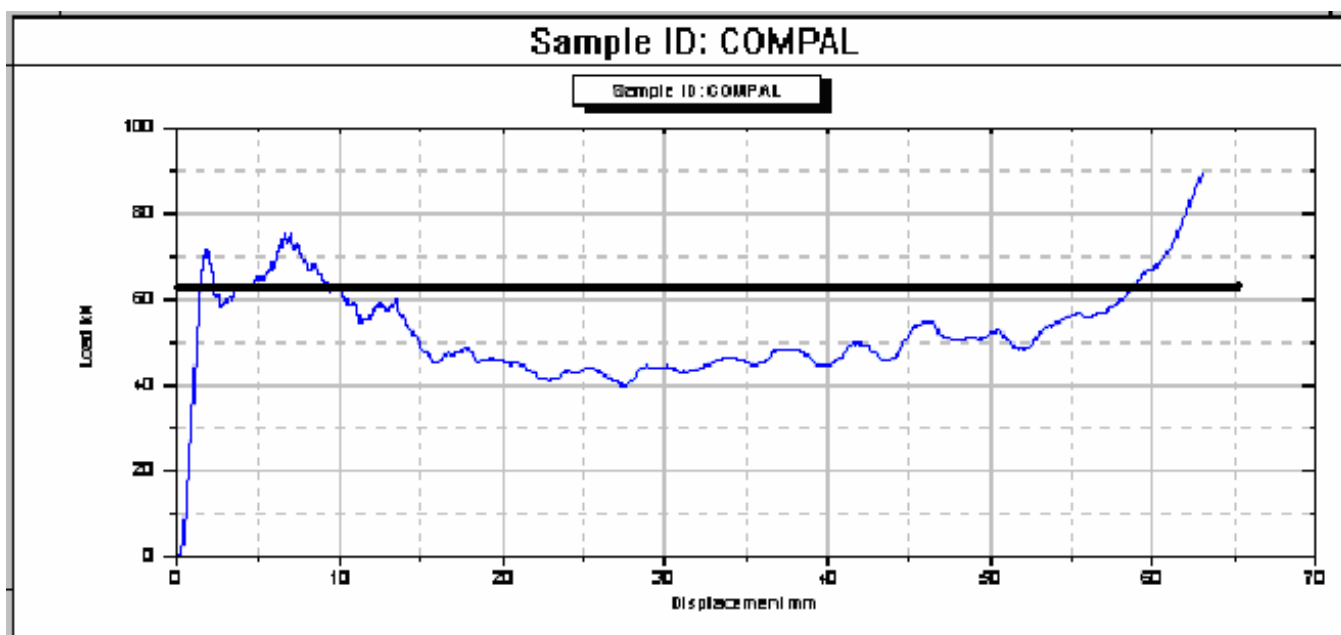
Στη συνέχεια **τοποθετήσαμε τμήμα μεταλλικού αφρού στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού ως ενίσχυση**. Η διάταξη αυτή είναι ιδιαίτερα πρακτική όταν δεν δυνάμεθα να επωφεληθούμε με άλλο τρόπο του κενού χώρου στο εσωτερικό του σύνθετου σωλήνα.

Το βάρος της κατασκευής δεν αυξήθηκε πολύ (83,5gr σε αντίθεση με τα 44,4gr που ζυγίζει σκέτο το σύνθετο υλικό), ενώ τα αποτελέσματα όπως θα δούμε κάτωθεν ήταν ιδιαίτερος θετικά και ενδιαφέροντα:





Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8
mm μετατόπισης	0	2.3	3.9	6	9.1	12.6	17.8	26.6
	9	10	11	12	13	14		
	31.6	38.8	51.4	54.8	59.8	62.8		

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο P_{max} :	90,31 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P :	64,52 kN
Μήκος σύνθλιψης:	62,8 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	4052 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	83,5 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	155,9 cm ³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	48,5 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	1,39
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	26 Joules/cm ³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

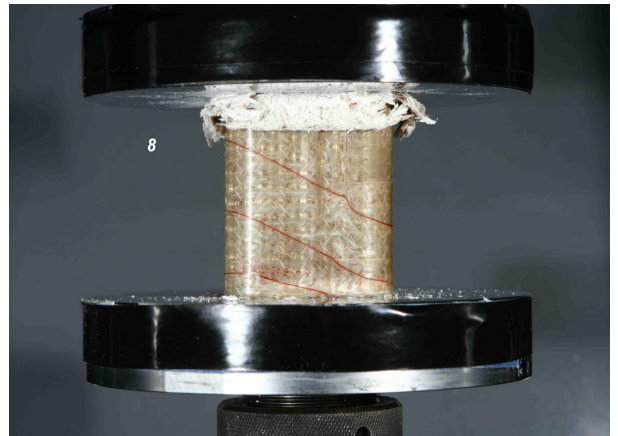
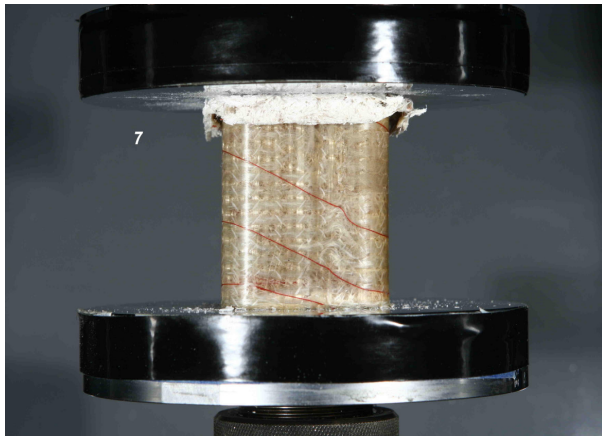
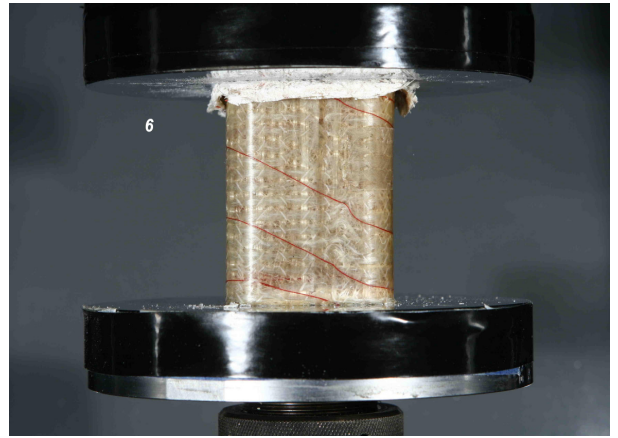
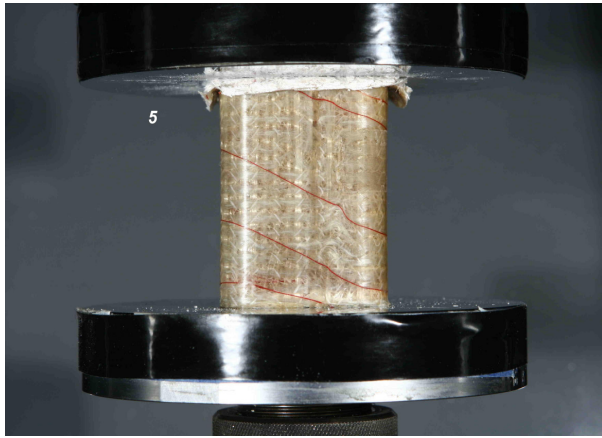
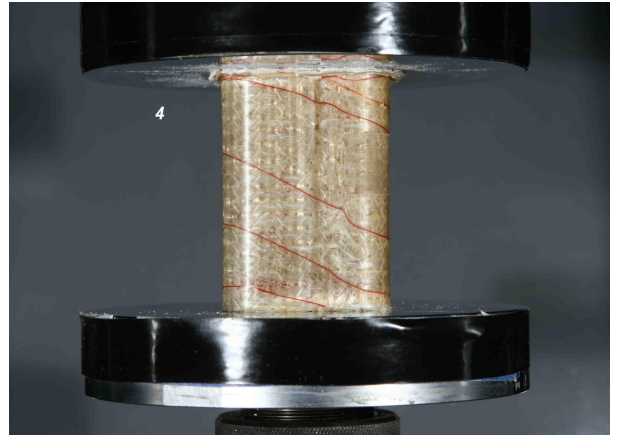
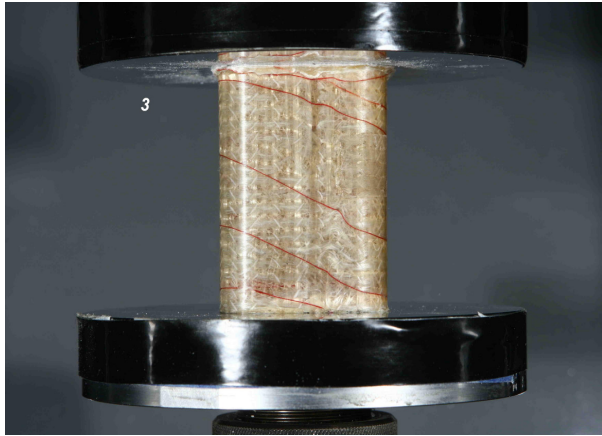
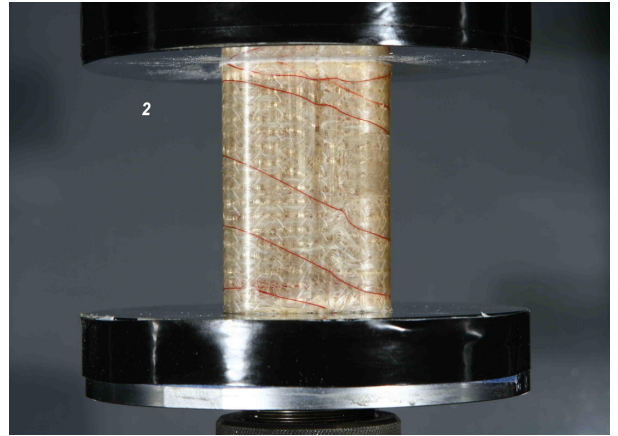
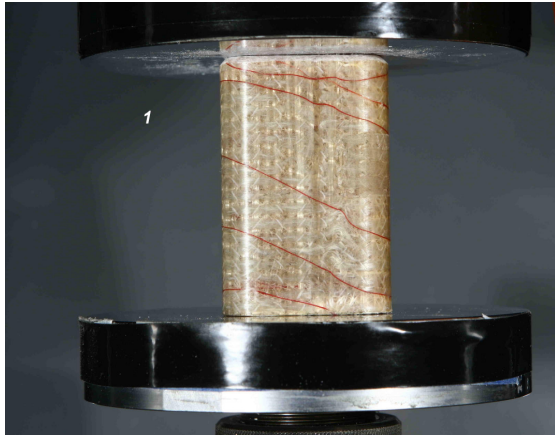
- Όπως και στην περίπτωση του σκέτου δοκιμίου έτσι και εδώ η καμπύλη του φορτίου ανεβαίνει απότομα λόγω της αντίστασης του σύνθετου υλικού στην παραμόρφωση. Θα μας φαινόταν πιο φυσιολογικό να επέλθει περιφερειακή θραύση στο τεμάχιο και έπειτα να εκκινήσει εισχώρηση του ενός τμήματος στο άλλο (όπως συνέβη και στην 1^η δοκιμή). **Αντίθετα όμως με τις προβλέψεις μας το σύνθετο υλικό ακολούθησε προοδευτική κατάρρευση (φωτογρ.1-14).** Οι στρωματώσεις του λοιπόν αποσχίστηκαν (delamination) και οι μισές διέφυγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες συμπίεστηκαν στο εσωτερικό του σωλήνα μαζί με τον μεταλλικό αφρό.
- Ο μεταλλικός αφρός από την πλευρά του **προσφέρει πέρα από το αξονικό φορτίο σύνθλιψης, σταθερότητα και στιβαρότητα στην κατασκευή.** Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σταθερό υψηλό φορτίο σύνθλιψης καθ'όλο το μήκος της καμπύλης και η ειδική απορροφούμενη ενέργεια έχει πολύ υψηλή τιμή.

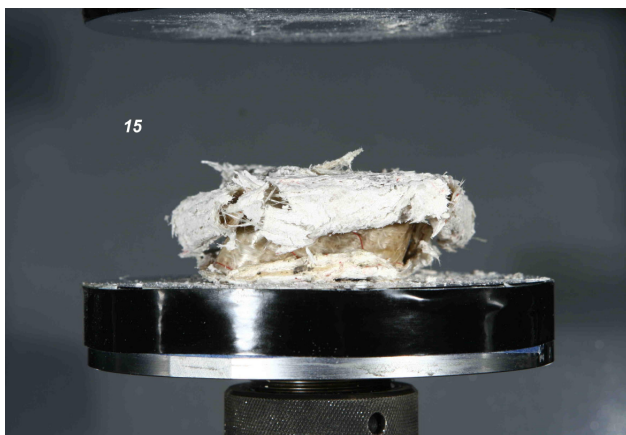
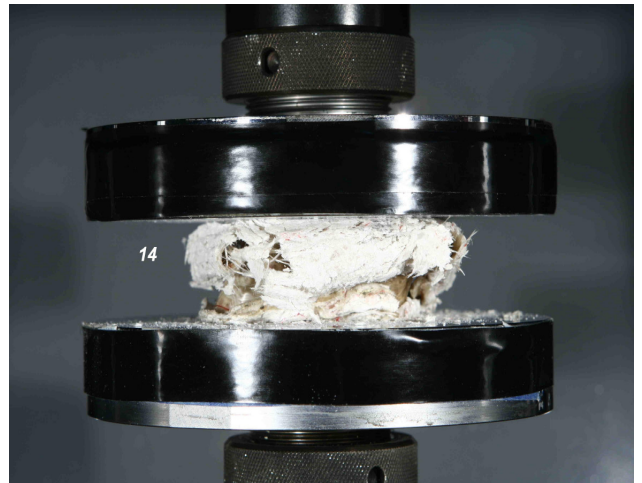
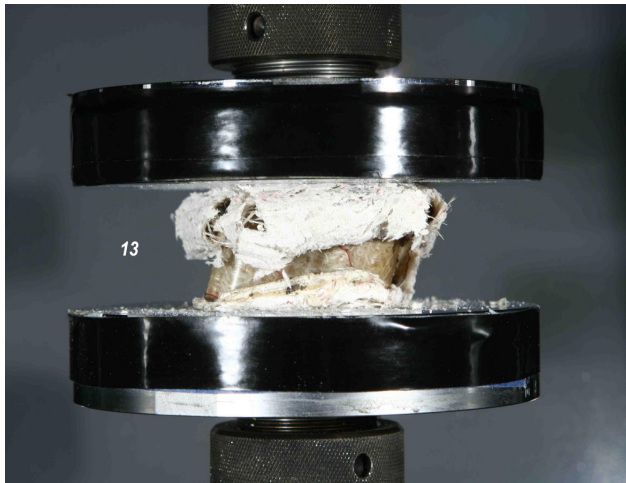
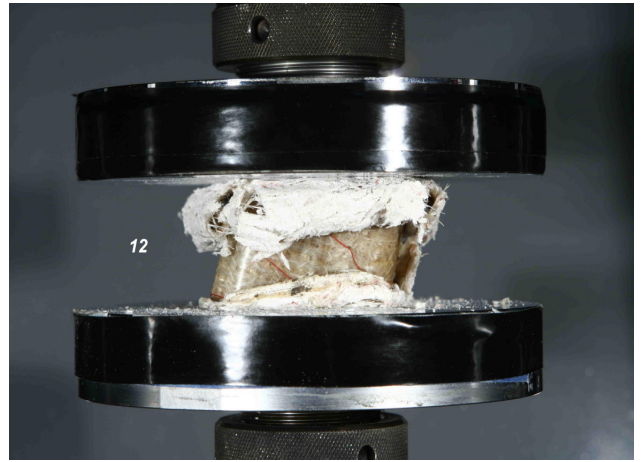
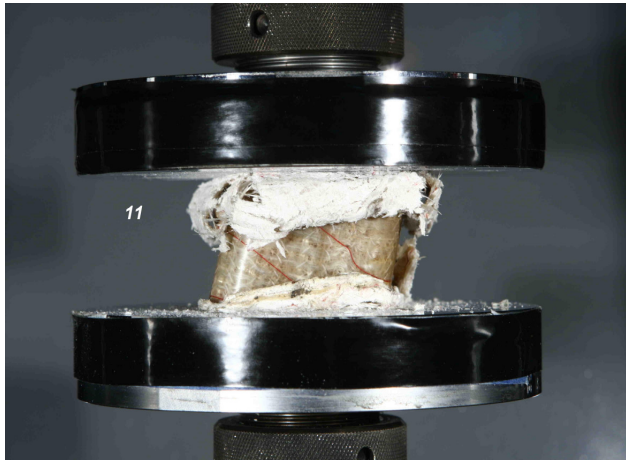
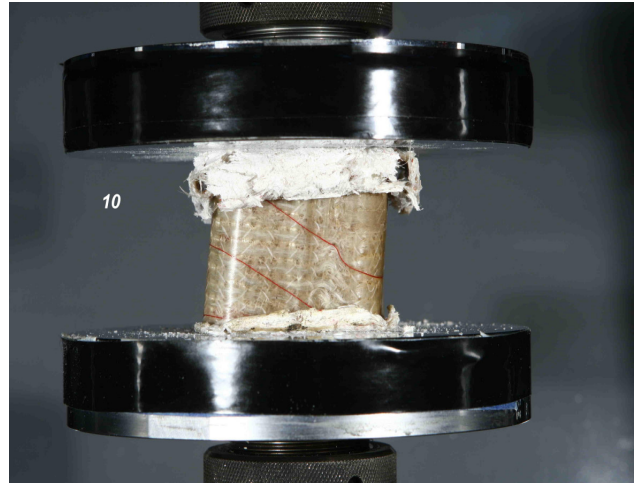
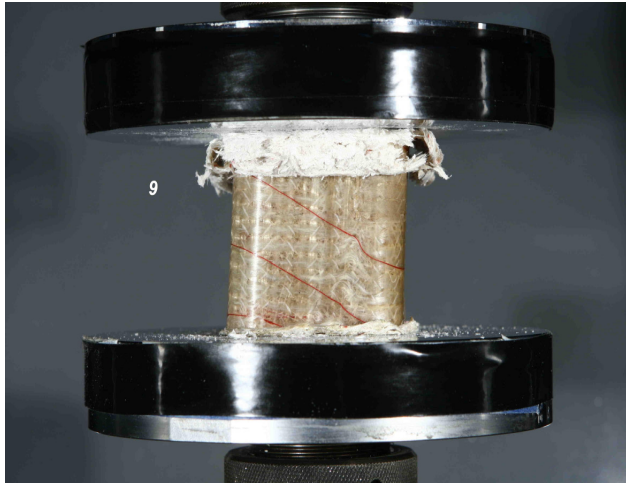
5.5.6 Δοκιμή σύνθετου υλικού με διαμορφωμένο πρόσωπο (triggered)

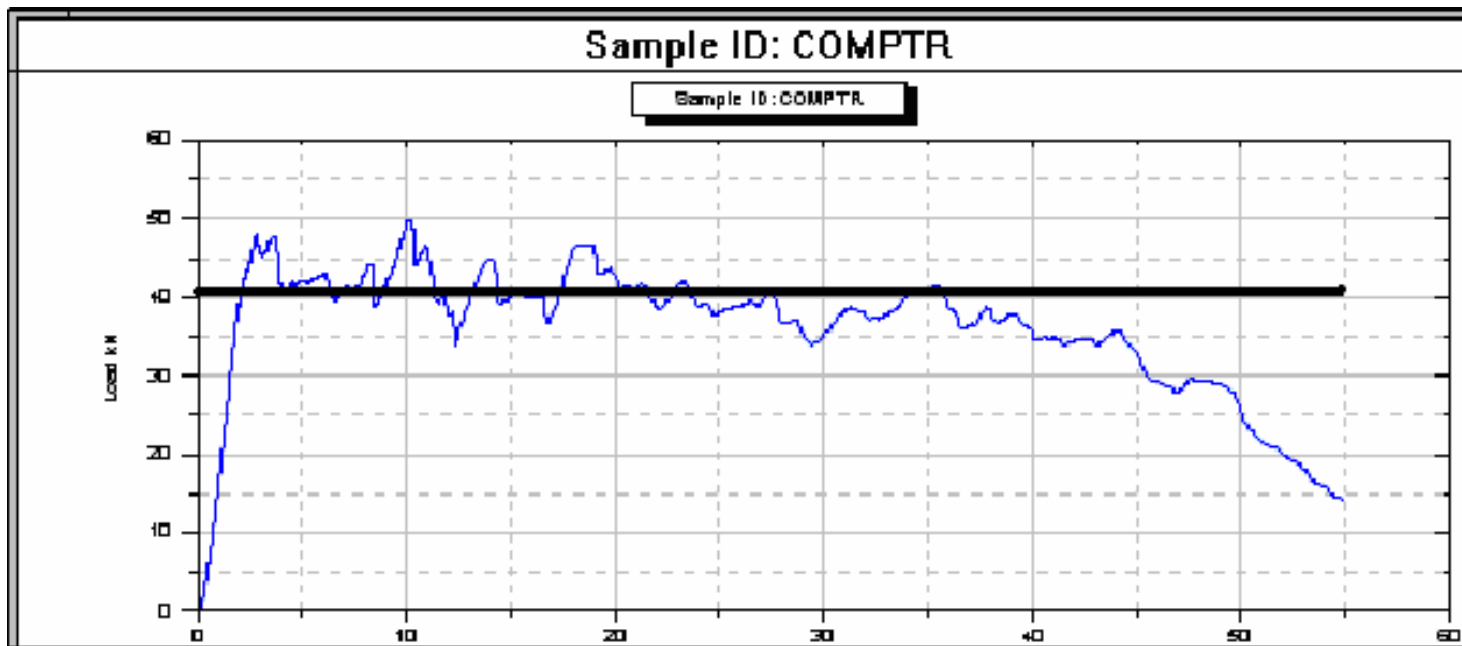
Όπως παρατηρήσαμε κατά την πειραματική δοκιμή του μη ενισχυμένου σύνθετου υλικού, απορροφήθηκε υψηλή ποσότητα ενέργειας λόγω του ότι η περιφερειακή ρωγμή στο δοκίμιο έγινε σε διαφορετικό ύψος από τη μέση του, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερο τμήμα προοδευτικής κατάρρευσης του δοκιμίου.

Προκειμένου να οδηγηθούμε σε απορρόφηση υψηλότερων ποσών ενέργειας, **θα προσπαθήσουμε να εκβιάσουμε την προοδευτική κατάρρευση από την αρχή κιάλας της σύνθλιψης.** Αυτό επιτυγχάνεται με την εκλέπτυνση των άνω άκρων (πρόσωπο) του δοκιμίου, μια ελαφριά κατεργασία που καλείται triggering. Το διαμορφωμένο πρόσωπο του δοκιμίου φαίνεται στην παράπλευρη εικόνα:









αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8
mm μετατόπισης	0	2.9	4.3	6	10	11.6	14.7	17.8
	9	10	11	12	13	14	15	
	23.6	29.5	36.7	42	48.4	58.2	69	

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο Pmax:	49,85 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P:	45,45 kN
Μήκος σύνθλιψης:	69 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	3136 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	44,4 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	28,647 cm³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	70,63 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	1,09
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	109,5 Joules/cm³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

➤ Όπως αναμενόταν το σύνθετο τεμάχιο **ακολουθεί προοδευτική κατάρρευση από την αρχή της σύνθλιψης**. Οι διαστρωματώσεις του άρχισαν να αποσχίζονται και οι μισές διέφευγαν προς το εξωτερικό του υλικού, ενώ οι υπόλοιπες αναδιπλώνονταν στο εσωτερικό του δοκιμίου (φωτογρ1-8).

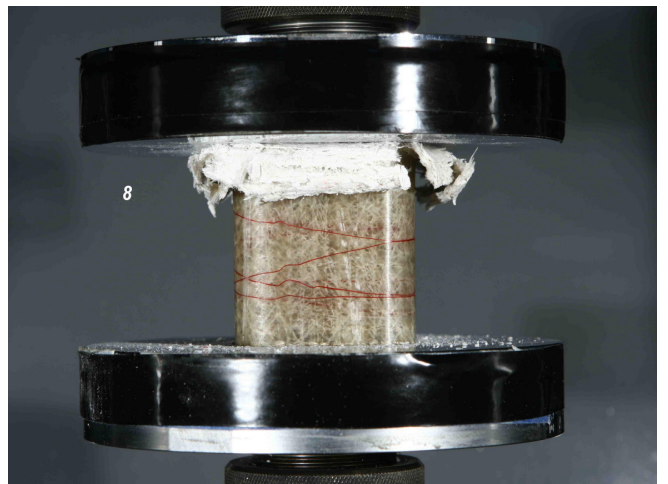
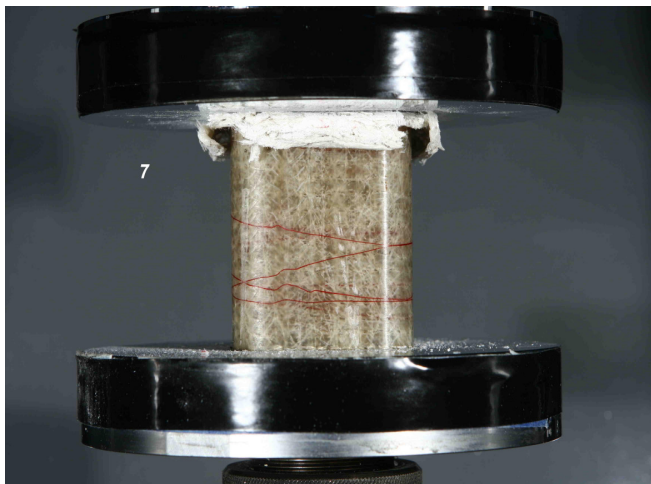
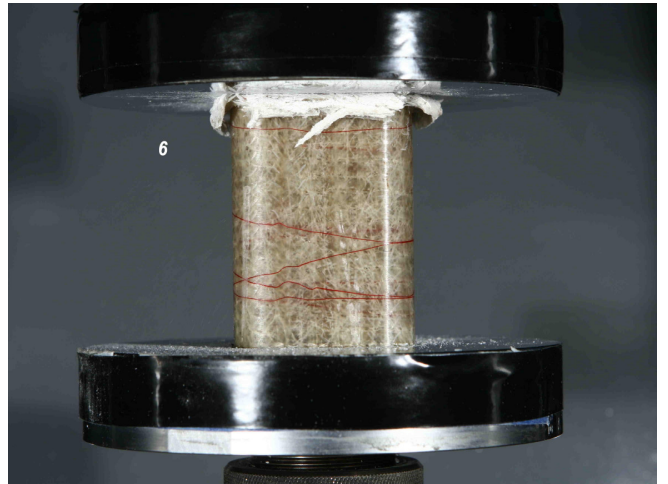
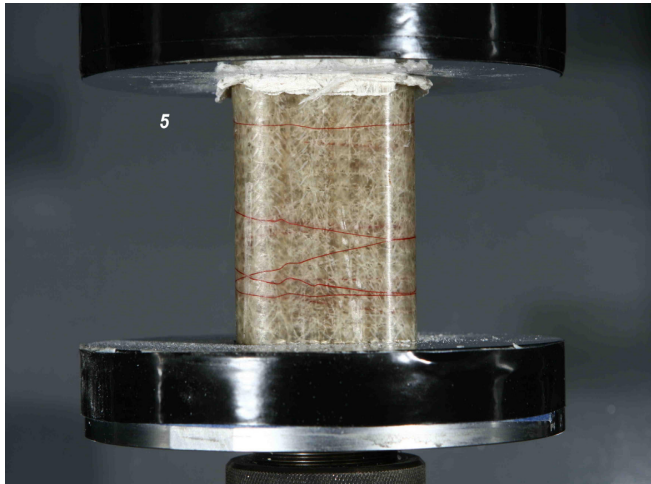
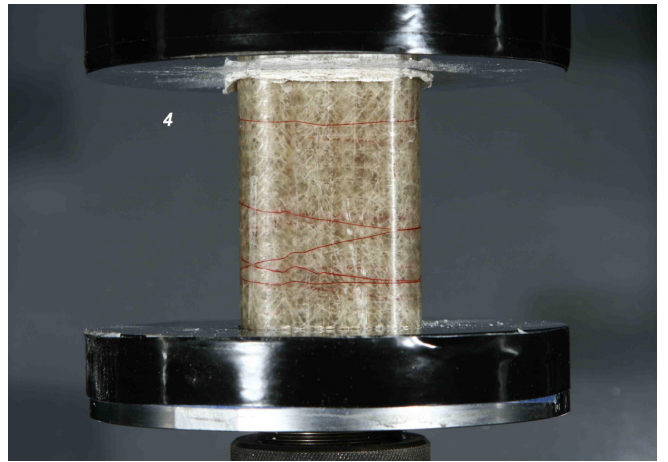
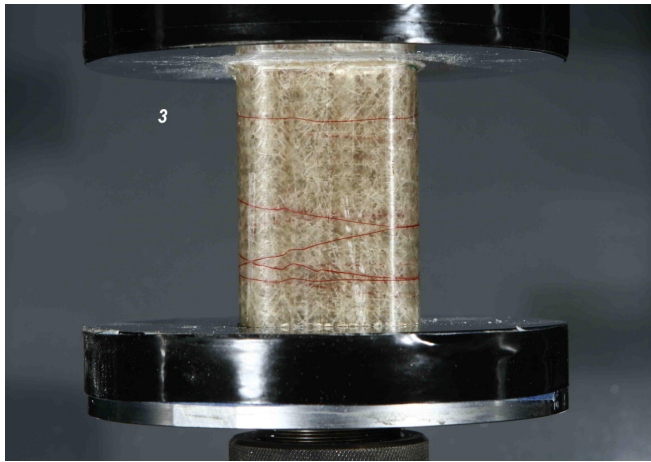
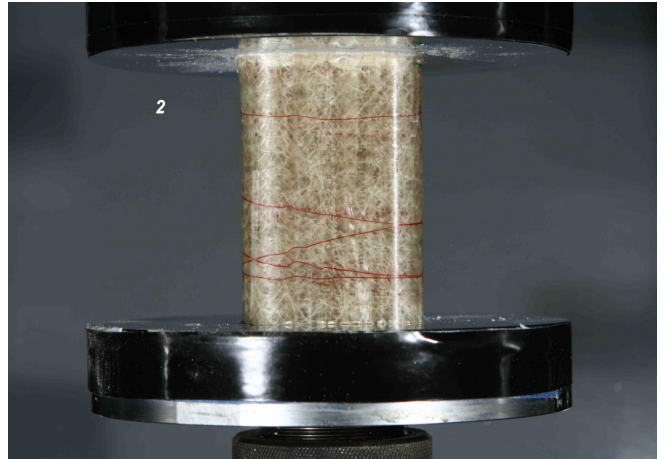
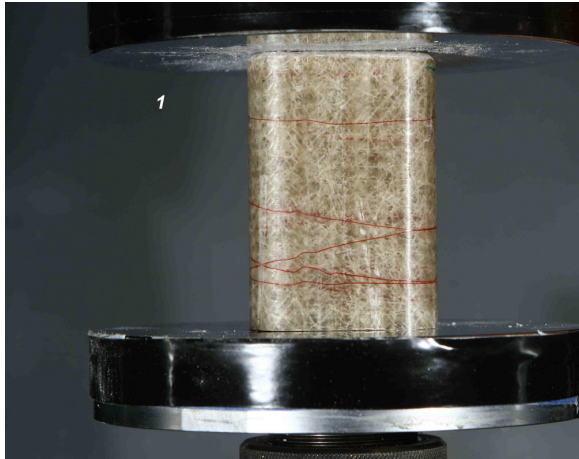
➤ Αίφνης, λόγω ατέλειας του υλικού ή κάποιας ελάχιστης ασυμμετρίας στη στήριξη, το υλικό του δοκιμίου άρχισε να διαρρέει υπό γωνία στο κάτω του μέρος (φωτογρ.9-14). Υπό τον τρόπο αυτό η κατάρρευση συνεχίστηκε ως το τέλος με το υλικό να διαρρέει από αμφότερες τις πλευρές του.

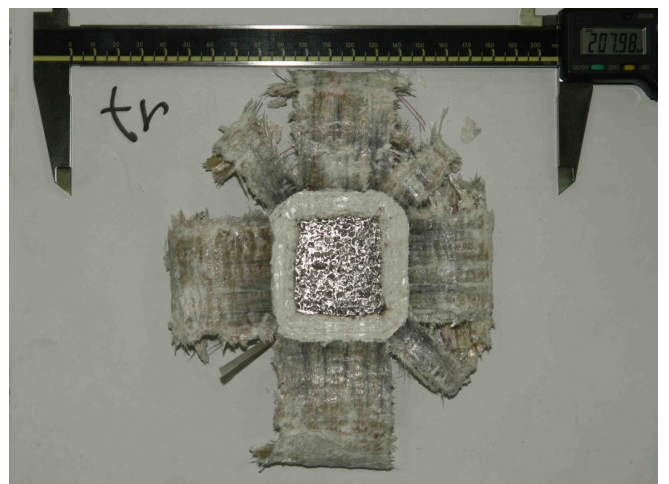
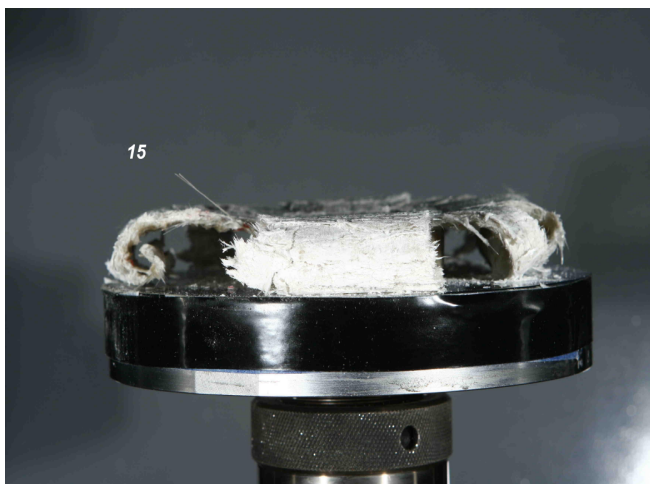
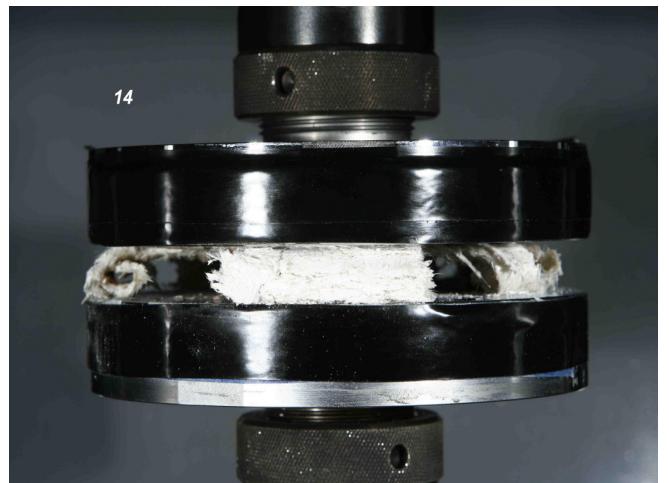
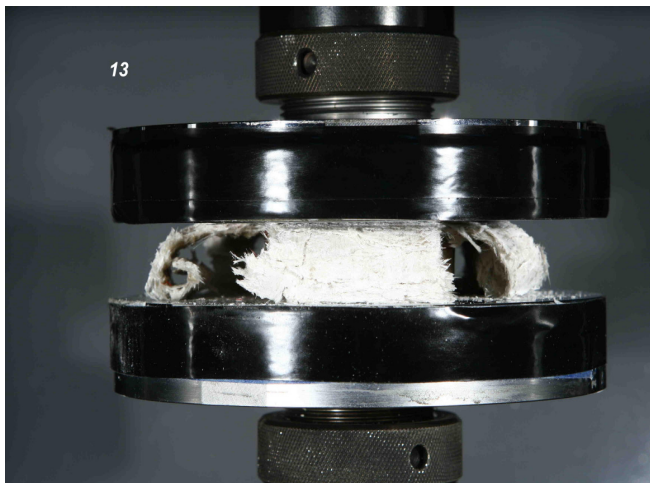
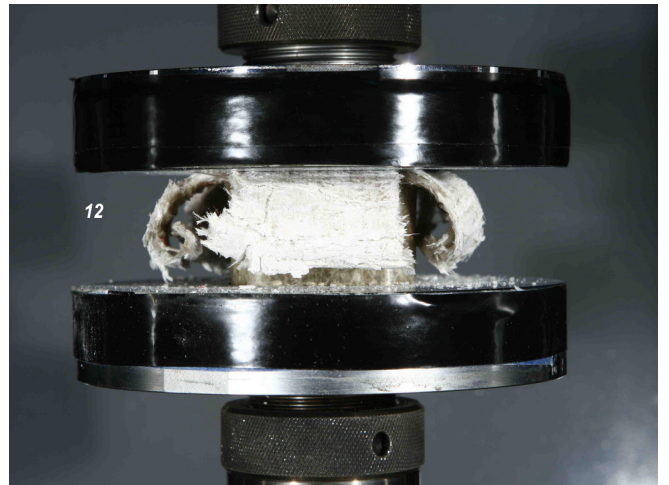
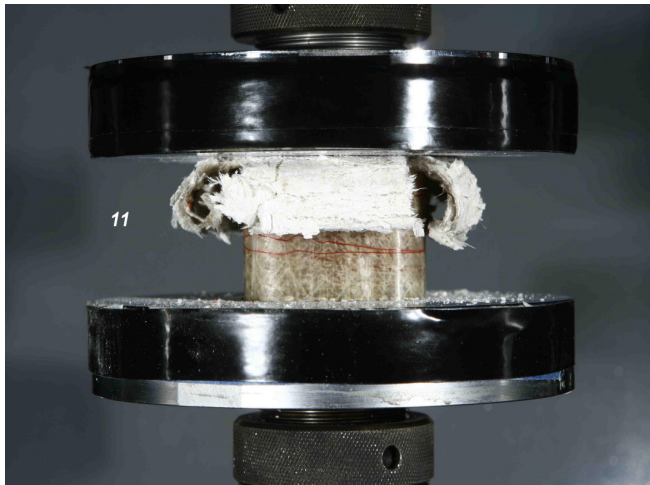
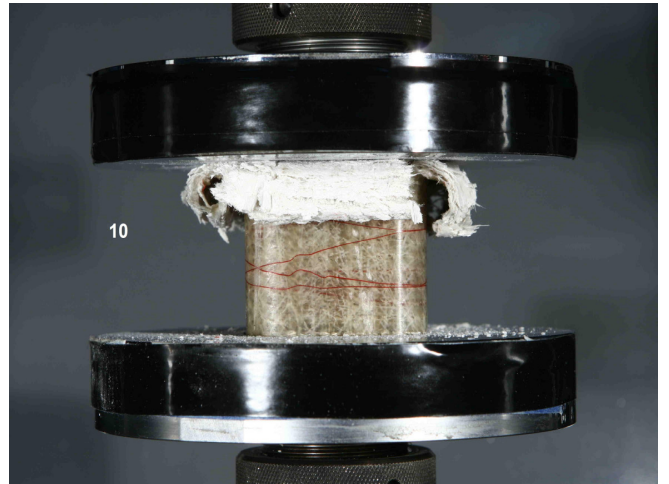
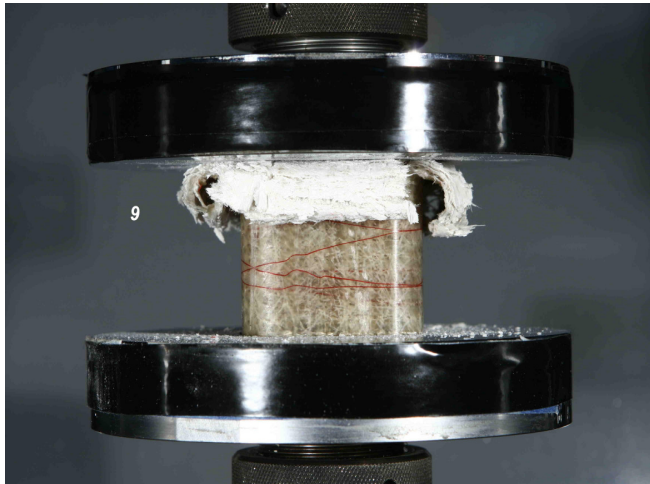
Ως αποτέλεσμα, πήραμε μια αρκετά σταθερή καμπύλη με μικρές και πολλές διακυμάνσεις στο φορτίο, ενώ αποτέλεσμα της γωνιακής διαρροής ήταν η πτώση του φορτίου στο τέλος της δόκιμης αφού στο σημείο εκείνο το δοκίμιο είχε αρχίσει να καταπονείται σε κάμψη, στην οποία και οφειλόταν μερικώς η μείωση του ύψους του.

Συμπερασματικά η ποσότητα απορρόφησης ενέργειας ως αριθμός είναι αρκετά ικανοποιητική, και η κατασκευή αρκετά εργονομική, **ειδικά στην περίπτωση που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τον κενό στο εσωτερικό του σωλήνα χώρο** (να τοποθετήσουμε δηλαδή κάτι μη ζωτικής σημασίας σε περίπτωση σύγκρουσης, π.χ κάποια καλώδια κ.λ.π). Διαπιστώνουμε όμως έλλειψη σταθερότητας και στιβαρότητας στο συγκεκριμένο τεμάχιο. Τις τελευταίες θα μπορούσε να προσθέσει όπως είδαμε πριν κάποιος τύπος πυκνού αφρού.

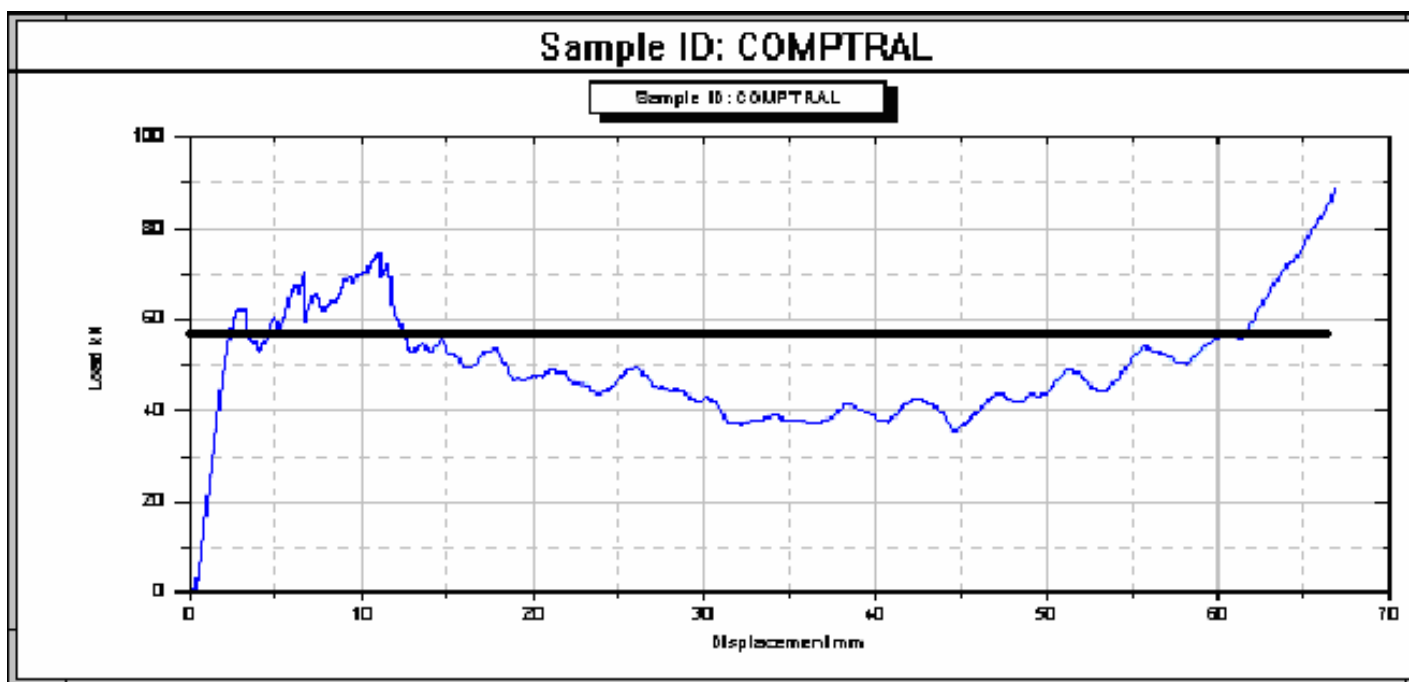
5.5.7 Δοκιμή σύνθετου υλικού ενισχυμένου με μεταλλικό αφρό και διαμορφωμένο πρόσωπο (triggered)

Μετά τη δόκιμη του εσωτερικά ενισχυμένου σύνθετου σωλήνα και του σωλήνα με διαμορφωμένο πρόσωπο, θα πραγματοποιήσουμε δόκιμη με το συνδυασμό των 2 διατάξεων, ώστε να δούμε εάν η μία δύναται να συμπληρώσει τις ατέλειες της άλλης:





Πιο κάτω εικονίζεται το διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης που λάβαμε με τη βοήθεια του ειδικού εξοπλισμού κατά την εκτέλεση του πειράματος της θλίψης, καθώς και τα ύψη κατά τα οποία ελήφθησαν οι αντίστοιχες φωτογραφίες. Ακόμη, στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται όλες οι ποσότητες που απαιτούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συγκεκριμένου δοκιμίου.



αρ. φωτογ:	1	2	3	4	5	6	7	8
mm μετατόπισης	0	3	4.3	6.4	7.7	11.8	16.1	25.6
	9	10	11	12	13	14	15	
	33.1	41.3	49.8	55.2	59.8	64.2	66.6	

Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο Pmax:	90,63 kN
Μέσο μεταελαστικά αναπτυσσόμενο φορτίο P:	58,9 kN
Μήκος σύνθλιψης:	66,6 mm
Ολική απορροφούμενη ενέργεια:	3926 Joules
Ποσότητα μάζας που διέρρευσε:	83,1 gr
Όγκος υλικού που καταστράφηκε:	155,9 cm³
Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	47,24 Joules/gr
Ομοιομορφία φορτίου:	1,54
Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	25,2 Joules/cm³

- Σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης

- Όπως αναμενόταν το δοκίμιο άρχισε να καταρρέει προοδευτικά από την αρχή της δοκιμής. **Η συμπίεση του αφρού και η προοδευτική κατάρρευση του σύνθετου υλικού, κράτησαν το φορτίο της καμπύλης σε αρκετά υψηλά επίπεδα περί το τέλος της σύνθλιψης.** Ως αποτέλεσμα πήραμε πολύ ικανοποιητική ποσότητα απορρόφησης ενέργειας, και μικρή διακύμανση φορτίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι η δοκιμή αυτή ομοιάζει με τη δόκιμη που έγινε με το ενισχυμένο με μεταλλικό αφρό σωλήνα που δεν είχε υποστεί triggering, λόγω του ότι και σε εκείνη την περίπτωση το τεμάχιο είχε ακολουθήσει προοδευτικό τρόπο κατάρρευσης.

Μια ακόμη παρατήρηση είναι η **διόρθωση του προβλήματος της ανισορροπίας** του προηγούμενου μη ενισχυμένου τεμαχίου που είχε και αυτό υποστεί triggering.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

6.1 Εισαγωγικά

Σε περίπτωση ατυχημάτων, οι κατασκευές εκτίθενται σε φορτία που είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που εκτίθενται σε κανονικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η καταστροφή αυτών σε διάστημα δεκάτων του δευτερολέπτου. Οι περισσότερες αναλύσεις κατασκευών που υπόκεινται σε σύγκρουση σχετίζονται με τις βιομηχανίες αεροσκαφών και τις αυτοκινητοβιομηχανίες, όπου **πολύ σημαντικό ρόλο έχουν οι λεπτότοιχες κατασκευές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν συστήματα απορρόφησης της ενέργειας της σύγκρουσης.**

Από πολύ νωρίς για το θέμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν πολλές πειραματικές και/ή αναλυτικές προσεγγίσεις ή ημι-αναλυτικές προσεγγίσεις, που βασίζονται στην επιτυχία άλλων διαθέσιμων επιλογών. Η παράλληλη ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και υπολογιστικών μηχανισμών καθώς και η ανάπτυξη σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών, **έκαναν εφικτή την υπολογιστική ανάλυση των κατασκευών που υπόκεινται σε σύγκρουση.** Παρόλο που πολλά μπορούν να γίνουν σε αυτό τον τομέα, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι σύγχρονες τεχνικές προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή δίνουν μια εναλλακτική προσέγγιση ή τουλάχιστον μια σημαντική συμπληρωματική προσέγγιση εκτός της πειραματικής, με μεγάλη πιθανότητα για την επιτυχή προσομοίωση των κατασκευών που υπόκεινται σε σύγκρουση.

Υπάρχουν πολλά **πλεονεκτήματα της προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε σχέση με την πειραματική προσέγγιση του θέματος.** Κατά την πειραματική προσέγγιση μιας πλήρους κατασκευής ή μέρος αυτής πρέπει να κατασκευαστεί πριν να γίνουν οι δοκιμές. Είναι έτσι αδύνατο να τροποποιήσουμε την κατασκευή για την βελτίωση της αντοχής της κατά την σύγκρουση στο στάδιο της σχεδίασης. Αν κάποιος επιθυμεί να υιοθετήσει μια πειραματική διαδικασία επαναλαμβανόμενων πειραμάτων, ώστε να βελτιώσει την αντοχή σε σύγκρουση της κατασκευής, η κατασκευή πρέπει να σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και δοκιμαστεί πειραματικά πολλές φορές. Αυτό όπως είναι καταφανές είναι δαπανηρό και χρονοβόρο.

6.2 Μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου, είναι η **επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων για τη μοντελοποίηση της προς έλεγχο κατασκευής**. Η επιλογή του μοντέλου είναι συνήθως ζήτημα της εμπειρίας του μελετητή. Επί παραδείγματι:

- Εάν η κατασκευή είναι επιμήκης ή αποτελείται από επιμήκη στοιχεία, έκαστο των οποίων έχει περίπου σταθερή διατομή, τότε μπορεί ενδεχομένως να επιχειρηθεί μια **πρώτης τάξης προσέγγιση με χρήση της θεωρίας ελαστικών φορέων σε εφελκυσμό, κάμψη και στρέψη**. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Εφαρμογή: Γερανογέφυρες, δικτυώματα γερανών, σκελετός εργαλειομηχανής, σκελετός οχήματος, έργα πολιτικού μηχανικού (φέρων οργανισμός κτηρίου, γέφυρες) κλπ.
- Εάν η κατασκευή είναι επίπεδη, και επιπλέον καταπονείται με φορτία επί του ίδιου επιπέδου, τότε μπορεί να μοντελοποιηθεί με χρήση επίπεδων στοιχείων ελαστικότητας.

Στα παραπάνω, μεταξύ των άλλων αναφέρεται η δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση. Οι σχετικές αναλύσεις δεν είναι μονοσήμαντες, αλλά εξαρτώνται από τη μέθοδο που θα εφαρμοσθεί, δηλαδή:

- Πεπερασμένα στοιχεία (FINITE ELEMENT METHOD, FEM)
- Συνοριακά στοιχεία (BOUNDARY ELEMENT METHOD, BEM)
- Πεπερασμένες διαφορές (FINITE DIFFERENCE METHOD, FDM)
- Πεπερασμένοι όγκοι (FINITE VOLUME METHOD, FVM)
- Φασματικές μέθοδοι (SPECTRAL METHODS).
- κ.ά

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. **η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων** (Finite element modeling), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να ελέγξουν και να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία, ακόμη κι αν αυτή προέρχεται από ξένο πρόγραμμα.

Στο επόμενο βήμα, το πλήθος και κυρίως το είδος των στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού.

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (δύο κόμβοι),
- Σύρμα-σχοινί,
- Δοκός (δύο κόμβοι),
- Επίπεδη εντατική κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές),
- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι),
- Μembrάνη,
- Κέλυφος,
- Ορθοτροπικό-πολυστρωματικό υλικό,
- Τετράεδρο (3 κόμβοι),
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι),

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλλει. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός του πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής, τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά από την άλλη τόσο πιο δαπανηρή γίνεται είναι η επίλυση.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. **Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα.** Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling).

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος των στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. **Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων** προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, **το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.** Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται **μετα-επεξεργαστής (post-processor).** Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής.

6.3 Βασική θεωρία πεπερασμένων στοιχείων

6.3.1 Περιγραφή Φυσικών Ιδιοτήτων

Οι φυσικές ιδιότητες ενός τρισδιάστατου συνεχούς μέσου περιγράφονται κατά κανόνα σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z .

Εάν "F" είναι μία συγκεκριμένη ιδιότητα του συνεχούς μέσου (π.χ. μετατόπιση, θερμοκρασία, πίεση, κλπ.), τότε η συνάρτηση **F** είναι βαθμωτή και ίση με

$$F = F(x,y,z)$$

Εάν η ιδιότητα μεταβάλλεται και χρονικά, τότε:

$$F = F(x,y,z,t)$$

όπου t είναι ο χρόνος.

Εάν η φυσική ιδιότητα έχει διανυσματικό χαρακτήρα, π.χ. αντιστοιχεί στις μετατοπίσεις u, v , και w ενός σημείου "p" στις κατευθύνσεις των αξόνων x, y, z του καρτεσιανού συστήματος, τότε ισχύει,

$$\vec{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

όπου \vec{u} είναι το σχετικό διάνυσμα.

Τέλος, εάν οι φυσικές ιδιότητες του σημείου "p" είναι περισσότερες από τον αριθμό των καρτεσιανών συντεταγμένων, όπως π.χ. οι παραμορφώσεις ενός ελαστικού σώματος $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, τότε αυτές περιγράφονται μέσω ενός αντίστοιχου διανύσματος $\vec{\epsilon}$,

$$\bar{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x(x, y, z, t) \\ \varepsilon_y(x, y, z, t) \\ \varepsilon_z(x, y, z, t) \\ \gamma_{xy}(x, y, z, t) \\ \gamma_{yz}(x, y, z, t) \\ \gamma_{zx}(x, y, z, t) \end{Bmatrix}$$

Η περιγραφή του φυσικού φαινομένου γίνεται, για όλα τα προβλήματα συνεχών μέσων με βάση τις ακόλουθες 3 εξισώσεις,

- Εξίσωση Συνέχειας
- Καταστατική Εξίσωση, και
- Εξίσωση Ισορροπίας.

Από την εφαρμογή των ανωτέρω βασικών εξισώσεων προκύπτουν συγκεκριμένες διαφορικές εξισώσεις, όπως οι εξής,

-
- Διαφορική εξίσωση ράβδου σε εφελκυσμό

$$(EA \cdot u') + f_x - \rho A \cdot \ddot{u} = 0$$

+Οριακές συνθήκες

- Διαφορική εξίσωση δοκού σε κάμψη

$$(EI_z \cdot w'') + f_z - \rho A \cdot \ddot{w} = 0$$

+Οριακές συνθήκες

όπου, $\frac{\partial}{\partial x} = ()'$, $\frac{\partial}{\partial t} = ()\dot{}$,

E είναι το μέτρο ελαστικότητας (Nt m^{-2}),

A είναι το εμβαδό της διατομής της ράβδου ή της δοκού (m^2),

I_z είναι η ροπή αδράνειας της διατομής (m^4),

f_x είναι η αξονική δύναμη ανηγμένη στο μήκος της ράβδου (Nt m^{-1}),

f_z είναι η εγκάρσια δύναμη ανηγμένη στο μέτρο μήκος της δοκού (Nt m^{-1}),

ρ είναι η πυκνότητα του υλικού (Kgr m^{-3}),

u είναι η αξονική μετατόπιση (m),

w είναι το βέλος κάμψης (m).

6.3.2 Τυποποίηση Διαφορικών Εξισώσεων

Γενικά, όλες οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τις μηχανολογικές κατασκευές, μπορούν να τυποποιηθούν στην μορφή,

$$D_{xyz} [F(x,y,z,t)] = r_{xyz}, \quad D_{xyz} = {}^{\nu}D_{xyz} + {}^{\mu}D_t$$

Όπου,

- D είναι ο διαφορικός τελεστής της αντίστοιχης εξίσωσης και ίσος με D . Ο ${}^{\nu}D_{xyz}$ και ο ${}^{\mu}D_t$ είναι δύο επιμέρους διαφορικοί τελεστές ν και μ τάξης, από τους οποίους ο πρώτος εξαρτάται από τις χωρικές x, y, z και ο δεύτερος από την χρονική μεταβλητή t , ενώ
- r_{xyz} είναι το δεξιό μέρος της διαφορικής εξίσωσης.

Με τον συμβολισμό αυτό οι άνωθεν εξισώσεις και γράφονται ως εξής,

- Διαφορική εξίσωση ράβδου σε εφελκυσμό

$$(EA \cdot u')' + f_x - \rho A \cdot \ddot{u} = 0$$

$$F(x,y,z) = u(x), \quad r_{xyz} = f_x(x)$$

$${}^2D_{xy} = \{EA \cdot (\dots)'\}, \quad {}^2D_t = -\rho A \cdot (\ddot{\dots})$$

Συνθήκες στο όριο C : u, EAu'

- Διαφορική εξίσωση δοκού σε κάμψη

$$(EI_z \cdot w'')'' + f_z - \rho A \cdot \dot{w} = 0$$

$$F(x,y,z)=w(x), \quad r_{xyz}=-f_z(x)$$

$${}^4D_{xy}=\{EI_z \cdot (\dots)'\}'', \quad {}^2D_t=-\rho A \cdot (\ddot{\cdot})$$

Συνθήκες στο όριο C: $w, w', EI_z w'', (EI_z w'')$

Η τάξη του χωρικού διαφορικού τελεστή ${}^vD_{xyz}$ δηλώνει τη μέγιστη παράγωγο της διαφορικής εξίσωσης και καθορίζει επίσης και τις ιδιότητες των οριακών συνθηκών,

- Οι οριακές συνθήκες που αφορούν την ίδια τη συνάρτηση F και τις παραγώγους της μέχρι και την $\frac{v}{2}-1$ παράγωγο είναι γεωμετρικές οριακές συνθήκες, ενώ
- Οι οριακές συνθήκες που αφορούν παραγώγους ίσες ή μεγαλύτερες της $\frac{v}{2}-1$ είναι δυναμικές οριακές συνθήκες.

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα ο χωρικός διαφορικός τελεστής ${}^vD_{xyz}$ περιέχει όρους δεύτερης και τέταρτης τάξης, π.χ.

$${}^vD_{xyz} \rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(EA \frac{\partial}{\partial x} \right),$$

$${}^vD_{xyz} \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI_z \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right)$$

Οι όροι αυτοί (δεύτερης και τέταρτης τάξης) είναι **χαρακτηριστικοί για τη δομή φυσικών φαινομένων και συνεπώς κατασκευαστικών προβλημάτων.**

Η Γεωμετρική Οριακή Συνθήκη για την περίπτωση της ράβδου σε εφελκυσμό είναι,

στο όριο C_1 έχουμε, $u(x,t)|_{C_1} = \bar{u}$ (Δεδομένη μετατόπιση).

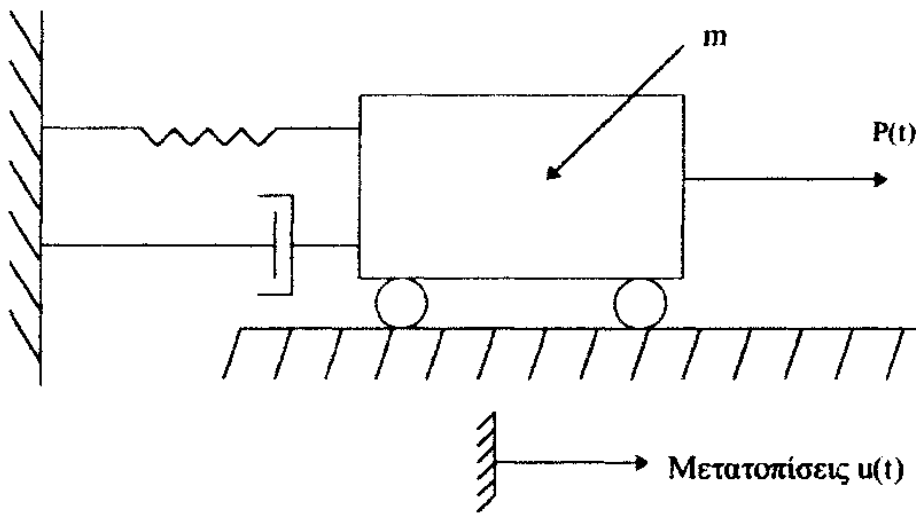
Η Δυναμική Οριακή Συνθήκη για την ίδια περίπτωση είναι, στο όριο C_2 έχουμε,
 $EA \cdot u' \Big|_{C_2} = \overline{N}_x$ (Δεδομένη εφελκυστική δύναμη)

Για την περίπτωση της δοκού σε κάμψη έχουμε,
ΓΟΣ στο όριο C_1 , $w(x,t) \Big|_{C_1} = \overline{w}$ (Δεδομένο βέλος κάμψης)
 $w'(x,t) \Big|_{C_1} = \overline{a}$ (Δεδομένη γωνία απόκλισης)
ΔΟΣ στο όριο C_2 , $-EI_z \cdot w'' \Big|_{C_2} = \overline{M}$ (Δεδομένη ροπή)
 $-(EI_z \cdot w'')' \Big|_{C_2} = \overline{Q}$ (Δεδομένη τέμνουσα)

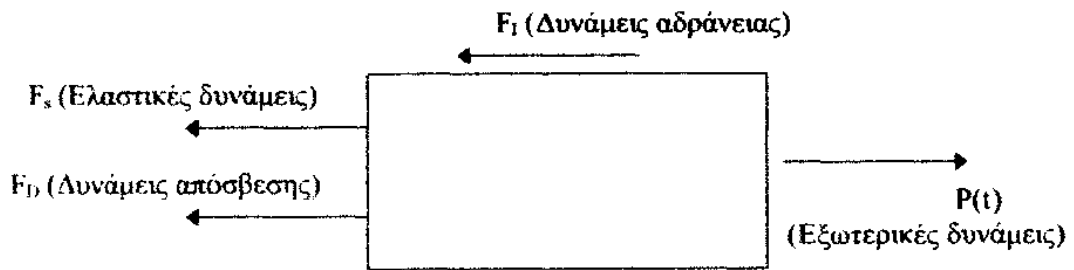
Συνεπώς η μοντελοποίηση των φυσικών φαινομένων εμπεριέχει την διαφορική εξίσωση, τις γεωμετρικές οριακές συνθήκες, και τις δυναμικές οριακές συνθήκες.

6.3.3 Μέθοδος επίλυσης εξισώσεων κινήσεως

Στη παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τις βασικές αρχές ολοκλήρωσης στο χρόνο που χρησιμοποιεί ο κώδικας LS-DYNA κατά την ανάλυση του. Το απλοϊκό μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας φαίνεται στο κάτωθεν σχήμα:



Σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας.



Ασκούμενες δυνάμεις.

Βάση της αρχής D'Alembert, οι εξισώσεις ισορροπίας δίνουν :

$$f_I + f_D + f_S = p(t)$$

$$f_I = m u^{**}, \text{ όπου η επιτάχυνση είναι } u^{**} = \frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$f_D = c u^* \text{ όπου η ταχύτητα είναι } u^* = \frac{du}{dt}$$

$$f_S = k u, \text{ όπου } u \text{ είναι η μετατόπιση}$$

c = συντελεστής απόσβεσης

k = σταθερά ελατηρίου

$p(t)$ = εξωτερικές δυνάμεις

από τις οποίες αντικαθιστώντας τις τιμές των παραπάνω σχέσεων οδηγούμαστε στην συνήθη γραμμική διαφορική εξίσωση:

$$m u^{**} + c u^* + k u = P(t)$$

Η επίλυση μιας τέτοιας εξίσωσης γίνεται με την παραδοχή της αρμονικής εξωτερικής φόρτισης η οποία είναι αποδεκτή αφού σχεδόν όλες οι γνωστές ακόμα και οι τυχαίες φορτίσεις μπορούν να αναχθούν σε αρμονικές :

$$u(t) = u_o \cos(\omega t) + \frac{u_o}{\omega} \sin(\omega t) + \frac{P_o}{k} \frac{1}{1 - \beta^2} [\sin(\omega t) - \beta \cos(\omega t)]$$

όπου οι αρχικές συνθήκες είναι:

$$u_o = \text{αρχική μετατόπιση}$$

$$u_o^* = \text{αρχική ταχύτητα}$$

$$\frac{P_o}{K} = \text{στατική μετατόπιση}$$

Στην περίπτωση μη γραμμικής συμπεριφοράς, οι ελαστικές δυνάμεις δεν εξαρτώνται γραμμικά από τη μετατόπιση, οδηγώντας στην μη γραμμική συνήθη

$$\text{διαφορική εξίσωση: } m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t)$$

Η επίλυση τέτοιων εξισώσεων, γίνεται με την χρησιμοποίηση αριθμητικών μόνο μεθόδων. Ο κώδικας LS-DYNA χρησιμοποιεί τη μέθοδο των κεντρικών διαφορών, που είναι μια επαναληπτική μέθοδος, για να ολοκληρώσει τις εξισώσεις κίνησης στο χρόνο.

Οι ημι-διακριτές εξισώσεις κίνησης σε μητρική μορφή είναι οι εξής:

$$Ma^n = P^n - F^n + H^n \quad \text{όπου}$$

M : το διαγώνιο μητρώο μάζας

Pⁿ : το μητρώο εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων

Fⁿ : το διάνυσμα απόκλισης των τάσεων

Hⁿ : η αντίδραση κλεψύδρας (hourglass resistance)

Για να προχωρήσουμε από το χρονικό βήμα t στο επόμενο χρονικό βήμα t+1, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο ολοκλήρωσης των κεντρικών διαφορών:

$$a^n = M^{-1}(P^n - F^n + H^n)$$

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \Delta t$$

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad \text{όπου:}$$

$$\Delta t^{v+1/2} = \frac{1}{2}(\Delta t^n + \Delta t^{n+1})$$

v = η ταχύτητα των κόμβων στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων

u = το διάνυσμα των μετατοπίσεων

Οι νέες θέσεις των διαφορών σημείων της αρχικής γεωμετρίας (x^{n+1}) βρίσκονται προσθέτοντας σε αυτές τις όποιες μεταβολές των μετατοπίσεων (u^{n+1}):

$$x^{n+1} = x^0 + u^{n+1}$$

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αυτής **έχουν μικρή ευαισθησία στα σφάλματα στρογγυλοποίησης και είναι ανεξάρτητα από πιθανά σφάλματα του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή**. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου, αφού δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιεί ο κώδικας διπλή ακρίβεια.

Το μειονέκτημα της όμως είναι ότι **η μέθοδος αυτή απαιτεί πολύ αποθηκευτικό χώρο** για την αποθήκευση των διανυσμάτων των μετατοπίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η κατανομή του υπολογιστικού χώρου που απαιτείται κατά την επίλυση ενός μοντέλου γίνεται με δυναμικό τρόπο, δηλαδή κατά την εκτέλεση των υπολογισμών, ο κώδικας υπολογίζει αυτόματα τον απαιτούμενο χώρο για την επεξεργασία και την αποθήκευση των ενδιάμεσων σταδίων και των τελικών αποτελεσμάτων. Ο μόνος περιορισμός που τίθεται στις δυνατότητές του, είναι οι υπολογιστικές δυνατότητες του χρησιμοποιούμενου υπολογιστή.

6.4 Ο κώδικας LS-DYNA

6.4.1 Γενικά

Για την επίτευξη της προσομοίωσης της μοναξονικής συμπίεσης των δοκιμίων μας, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας LS-DYNA της εταιρείας Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Ο κώδικας LS-DYNA που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί εξέλιξη του προκατόχου του DYNA3D, ο εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1976. Η βασική χρήση του αφορούσε τη μελέτη συγκρούσεων βαρέων συμπαγών κατασκευών, όπου οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες ήταν μικρές. Ωστόσο, ο χρόνος που απαιτούνταν για να μελετηθεί μια εφαρμογή ήταν αρκετά μεγάλος. Η αρχική αυτή έκδοση έδινε στο χρήστη σχετικά περιορισμένες δυνατότητες, όπως για παράδειγμα τριών ειδών πεπερασμένα στοιχεία (truss, membrane, solid), εκ των οποίων τα συμπαγή πεπερασμένα στοιχεία είχαν από 8 έως 20 κόμβους, όμως κόστιζαν αρκετά σε υπολογιστικό χρόνο κατά την εκτέλεση των μοντέλων.

Ο κώδικας LS-DYNA είναι κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, κατάλληλος για τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών σε τρεις διαστάσεις, συμπεριλαμβανόμενων και κατασκευών με διάφορα υγρά. **Η κύρια μεθοδολογία λύσεως στηρίζεται στην "explicit" ολοκλήρωση του χρόνου.** Ένας αλγόριθμος για την επαφή των σωμάτων σε προβλήματα σύγκρουσης επιτρέπει τον εύκολο χειρισμό του προβλήματος της μετάδοσης της θερμότητας στις διεπιφάνειες επαφής. Για κάθε τύπο πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχει μια ποικιλία μοντελοποίησης αυτών.

Ειδικές δυνατότητες για αερόσακους, αισθητήρια και ζώνες ασφάλειας, κάνουν το LS-DYNA να μπορεί να αναλύει εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η ικανότητα αναπροσαρμογής του πλέγματος στα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, χρησιμοποιείται έντονα στις εφαρμογές σύνθλιψης μεταλλικών και σύνθετων (όπως στη δική μας περίπτωση) ελασμάτων.

6.4.2 Χρήση του προγράμματος

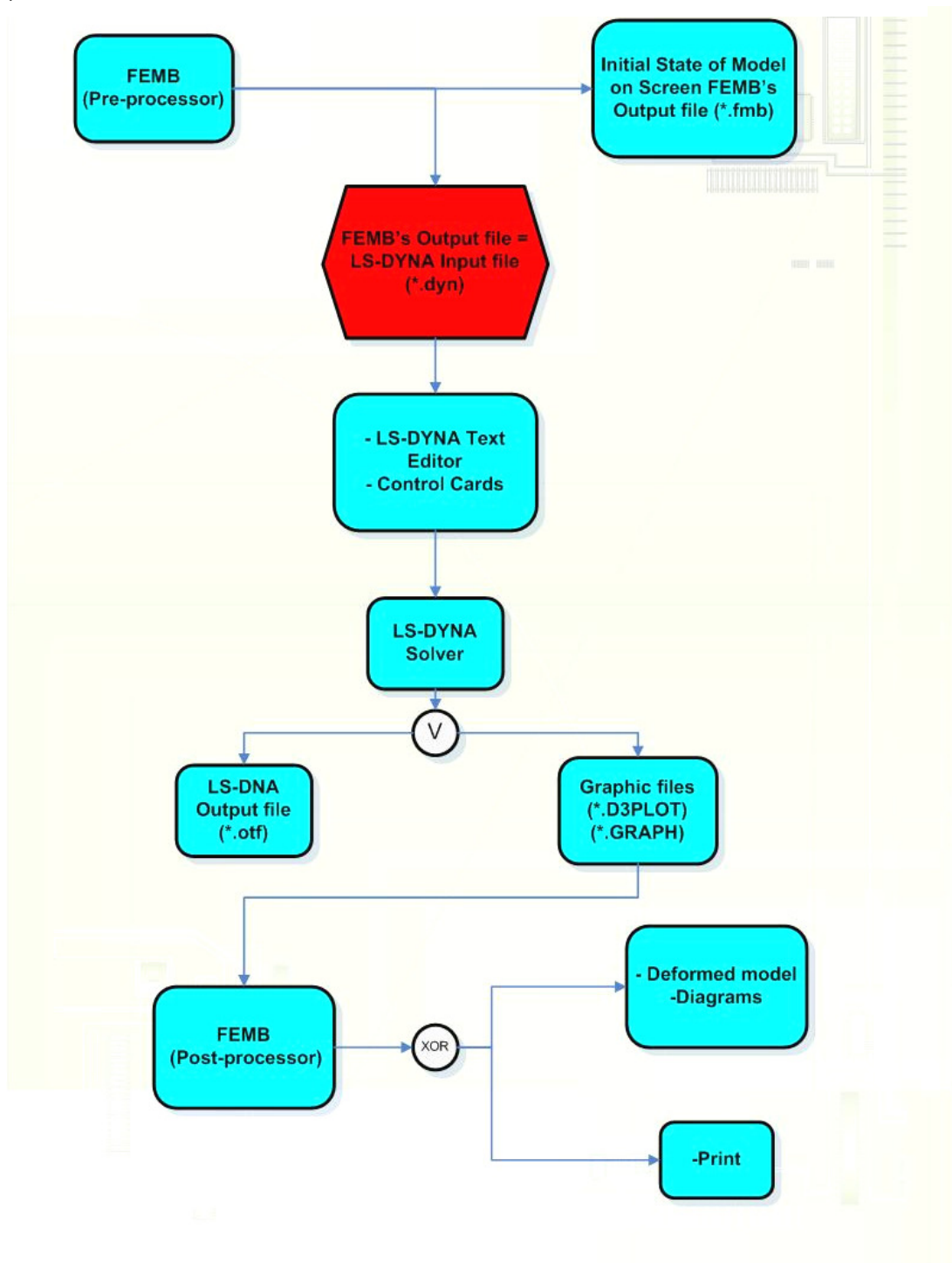
Δύο είναι τα βασικά μέρη του προγράμματος, τα οποία συντελούν στη μοντελοποίηση. **Αρχικά χρησιμοποιούμε τον preprocessor του προγράμματος ο οποίος προέρχεται από την εταιρεία ETA**, και με το οποίο κατασκευάζουμε το μοντέλο μας. Για να είναι πλήρες το μοντέλο μας θα πρέπει να ακολουθήσουμε τα εξής βήματα:

- να ορίσουμε πλήρως την γεωμετρία του, δίνοντας τις ακριβείς του διαστάσεις,
- να δηλώσουμε το υλικό ή τα υλικά από τα οποία αποτελείται καθώς και τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες,
- να το διακριτοποιήσουμε σε πεπερασμένα στοιχεία και να δηλώσουμε τις ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων,
- να ορίσουμε τις διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός ενός άλλου,
- να του προσδιορίσουμε τα εξωτερικά του φορτία καθώς και τις αρχικές συνθήκες (αρχική ταχύτητα, αρχική επιτάχυνση κ.τ.λ.).

Αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται από τον pre-processor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου *.fmb ώστε να είναι δυνατή η φύλαξή τους, η μεταφορά τους και η ανάκτησή τους για τροποποίηση.

Επίσης εκτός από το αρχείο *.fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου *.dyn. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γλιτώνει τον χρήστη από επίπονη δουλειά όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor κειμένου, αλλάζοντας από εκεί τα δεδομένα δίχως να χρειαστεί να εργαστεί στο περιβάλλον του pre-processor.

Το αρχείο *.dyn είναι ζωτικής σημασίας αφού είναι αυτό που στην συνέχεια επεξεργάζεται ο SOLVER του LS DYNA που αποτελεί και τον κυρίως κώδικα του προγράμματος. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί το πρόγραμμα εξάγει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Τα αρχεία αυτά είναι τύπου *.d3plot και χρησιμοποιούνται από τον post-processor για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη. Στο κάτωθεν σχήμα εικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας προσομοίωσης ενός δυναμικού φαινομένου στο λογισμικό LS-DYNA:



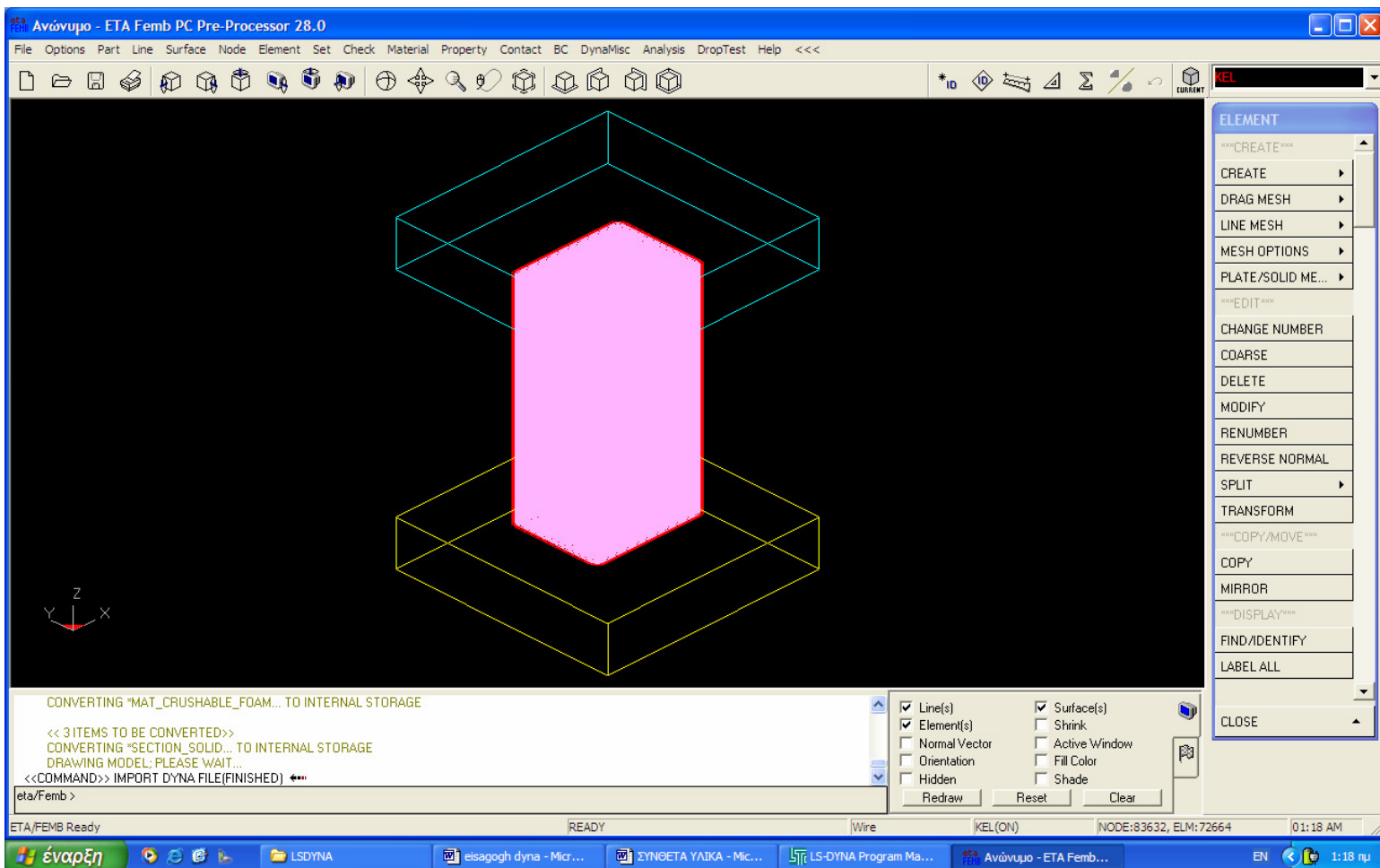
6.5 Οι επεξεργαστές FEMB

Το πρόγραμμα FEMB είναι το βασικό πρόγραμμα του κώδικα LS-DYNA, αφού **σε αυτό σχεδιάζουμε το μοντέλο μας και παίρνουμε τα κυριότερα αποτελέσματα.** Αποτελεί ένα πολύ καλό Προ/Μετά-Επεξεργαστή πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος έχει τη δυνατότητα συνεργασίας τόσο με τον κώδικα LS-DYNA, όσα και με αρκετά προγράμματα σχεδίασης (CAD).

6.5.1 Pre-Processor

Ο Προ-Επεξεργαστής χρησιμοποιείται όπως είπαμε για την σχεδίαση του μοντέλου μας. Έχει τη δυνατότητα να δέχεται δεδομένα μορφής CAD από σχεδόν όλα τα σύγχρονα σχεδιαστικά πακέτα. Από τη στιγμή που θα εισαχθούν τέτοιου είδους δεδομένα, το FEMB μπορεί εύκολα και γρήγορα να χειριστεί οποιαδήποτε γεωμετρική οντότητα όπως γραμμές, καμπύλες, επιφάνειες κ.ά.

Ακόμα και στην περίπτωση όμως που κάποιο σχεδιαστικό πακέτο δεν είναι διαθέσιμο, το FEMB περιλαμβάνει μενού που περιέχουν επιλογές και έτοιμες συναρτήσεις με τις οποίες εύκολα μπορεί κανείς να δημιουργήσει από απλές έως πολύ σύνθετες γεωμετρίες. **Το δυνατότερο ίσως σημείο του προγράμματος είναι η μεγάλη ευκολία που παρέχει στο χρήστη για τη διακριτοποίηση και δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.**



Το περιβάλλον του Pre-Processor του προγράμματος FEMB φαίνεται στο άνωθεν σχήμα.

Τα μενού που υπάρχουν στο κύριο μενού του Pre-Processor είναι:

- FILE: Εδώ υπάρχουν οι βασικές λειτουργίες της διαχείρισης των αρχείων του προγράμματος, όπως η δημιουργία καινούριου αρχείου με την εντολή New, το άνοιγμα κάποιου υπάρχοντος αρχείου με την εντολή Open, η αποθήκευση του τρέχοντος αρχείου κ.λ.π

- GEOM: Στο μενού αυτό σχηματίζουμε την βασική γεωμετρία του μοντέλου ή εξεργαζόμαστε κάποια ήδη υπάρχουσα. Έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε γραμμές, τόξα και κύκλους. Η σχεδίαση των γραμμών γίνεται είτε δίνοντας τις διαστάσεις των ακρών της ευθείας, είτε ενώνοντας καθορισμένα σημεία ή κόμβους που ήδη υπάρχουν.
- ELEM: Με αυτό το μενού κάνουμε την διακριτοποίηση του μοντέλου, δηλαδή χωρίζουμε το μοντέλο μας σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργώντας ένα πλέγμα. Ο κατάλληλος χωρισμός του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία είναι πολύ σημαντικός, αφού αν ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ μικρός υπάρχει ο κίνδυνος να μην παριστάνονται σωστά οι λεπτομέρειες του μοντέλου μας, ενώ αν ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ μεγάλος απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την επεξεργασία των δεδομένων από το πρόγραμμα.
- CHECK: Αυτό το μενού χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε το μοντέλο μας για πιθανά λάθη. Έτσι μπορούμε να ελέγξουμε την συνέχεια των πεπερασμένων στοιχείων και τυχόν λάθη που μπορούν να υπάρχουν στα σύνορα τους. Η αναλογία των διαστάσεων, η παραμόρφωση και οι εσωτερικές γωνίες πρέπει να περνάν τα επιλεγόμενα κριτήρια. Αν κάποια πεπερασμένα στοιχεία δεν τηρούν τα κριτήρια, σημειώνονται και ο χρήστης μπορεί ή να τα διορθώσει ή να τα απομονώσει.
- PART: Με αυτό το μενού ορίζουμε ένα νέο τμήμα (part). Σε κάθε τμήμα δίνουμε ένα διαφορετικό όνομα και για το κάθε τμήμα δημιουργούμε την γεωμετρία του και ορίζουμε τα πεπερασμένα στοιχεία, το υλικό, τις ιδιότητες κτλ.
- MATL: Από το μενού αυτό γίνεται η επιλογή του υλικού του κάθε τμήματος του μοντέλου. Μπορούμε να διαλέξουμε από ένα κατάλογο με 200 περίπου υλικά που έχει ο κώδικας LS-DYNA, όπου το κάθε υλικό από αυτά έχει συγκεκριμένες ιδιότητες. Ο χρήστης αφού επιλέξει το τύπο του υλικού που θέλει καλείται να δηλώσει τις ιδιότητες του υλικού, όπως την πυκνότητα του, το μέτρο ελαστικότητας, το λόγο του Poisson, την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για το υλικό του μοντέλου.

- PROP: Σε αυτό το μενού ορίζουμε τις φυσικές ιδιότητες των τμημάτων του μοντέλου. Έτσι ορίζουμε αν το τμήμα είναι στερεό, επιφάνεια κτλ., το είδος των πεπερασμένων στοιχείων, το πάχος της επιφάνειας του κάθε τμήματος και άλλες ιδιότητες.
- I.F.: Εδώ ορίζονται οι διεπιφάνειες του μοντέλου, δηλαδή οι επιφάνειες επαφής και ολίσθησης μεταξύ των διαφόρων τμημάτων. Πρέπει να ορίσουμε ποιες επιφάνειες ή κόμβοι θα παραμορφωθούν και ποιες θα παραμείνουν απαραμόρφωτες, ώστε να μην έχουμε παραμόρφωση των σταθερών τμημάτων (βάση, σφύρα) και φαινόμενα εισχώρησης επιφανειών σε άλλες επιφάνειες.
- B.C.: Από αυτό το μενού μπορούμε να ορίσουμε και να διαχειριστούμε τις αρχικές συνθήκες. Αυτές μπορούν να είναι φορτία, πιέσεις και αρχικές ταχύτητες κ.ά.. Από το μενού αυτό μπορούμε επίσης να προσδιορίσουμε ή να διαγράψουμε κάποιες ή όλες τις αρχικές συνθήκες.

6.5.2 Post-Processor

Ως Μετά-Επεξεργαστής το FEMB μπορεί να εκμεταλλευτεί τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης παρέχοντας δυνατότητες, όπως **απεικόνιση τάσεων, ενεργειών και παραμορφώσεων σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω animation, είτε μέσω διαγραμμάτων σε συνάρτηση με το χρόνο**. Έτσι αυτό το τμήμα του FEMB απεικονίζει τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Υπάρχει μια ποικιλία εργαλείων που αναλύουν και παρουσιάζουν τα αποτελέσματα με πολλούς τρόπους, κάνοντας την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κατανοητή για τον χρήστη.

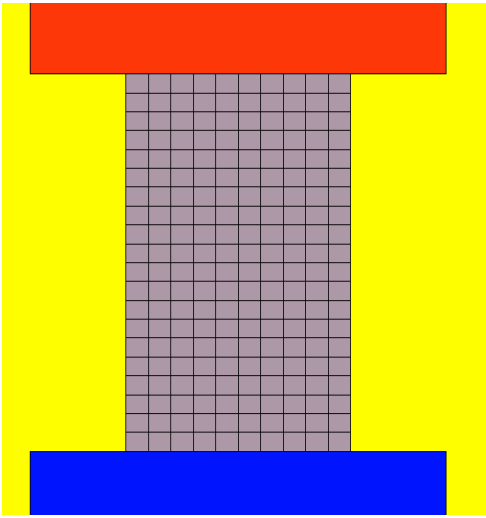
Τα D3PLOT αρχεία που έχει την δυνατότητα να διαβάζει ο Μετα-Επεξεργαστής, περιέχουν όλες τις πληροφορίες (τάση, παραμόρφωση, μεταβολή του χρόνου, τρόπος κατάρρευσης κτλ. από το LS-DYNA3D. Μόλις το μοντέλο διαβαστεί, θα παρουσιαστεί με εύληπτο για το χρήστη τρόπο.

Ο Post-Processor του FEMB έχει εκτός από τα τρία παράθυρα που υπάρχουν και στον Pre-Processor και περιγράφηκαν παραπάνω και ένα ακόμη παράθυρο που βρίσκεται στο δεξιό τμήμα της οθόνης. Σε αυτό υπάρχουν οι εντολές που ρυθμίζουν ποιο στάδιο ή ποια στάδια του φαινομένου θέλουμε να δούμε και επιλογές με τις οποίες έχουμε την δυνατότητα να δούμε τις τάσεις, παραμορφώσεις κτλ. σε όποια χρονική στιγμή της εξέλιξης του φαινομένου και όποιου κόμβου ή πεπερασμένου στοιχείου επιθυμούμε.

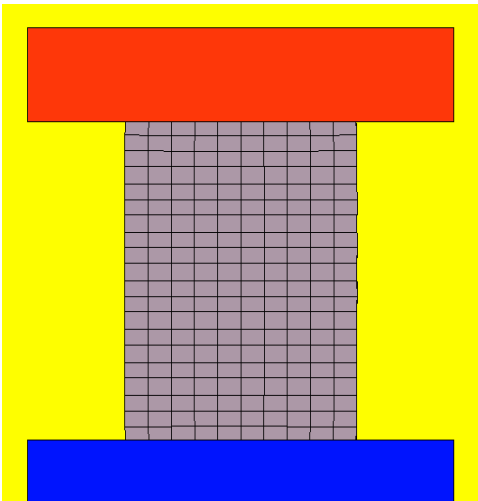
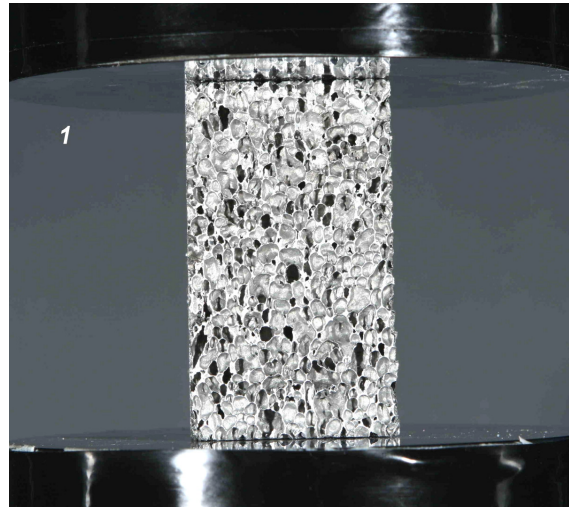
6.6 Προσομοίωση κατάρρευσης μεταλλικού αφρού

Η προσομοίωση της κατάρρευσης του μεταλλικού αφρού Alporas έγινε με στερεά πεπερασμένα στοιχεία (solids). **Η ταχύτητα καθόδου της σφύρας ήταν (όπως και για όλα τα δοκίμια) σταθερή και ίση 1mm/msec.** Ο εξαιρετικά μικρός λόγος Poisson ήταν το κυριότερο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του μεταλλικού αφρού ενώ η προσομοίωσή του έγινε με το υλικό 63 της λίστας του LS-DYNA, Crushable Foam.

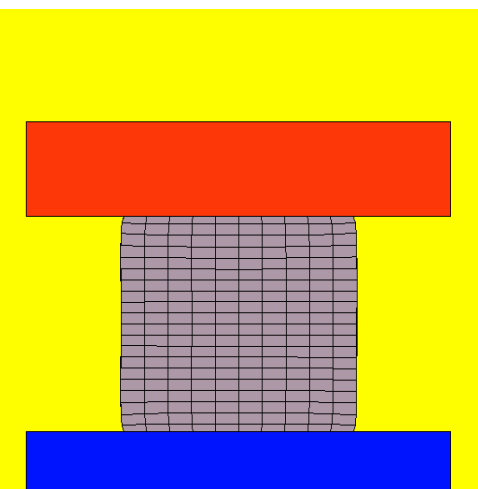
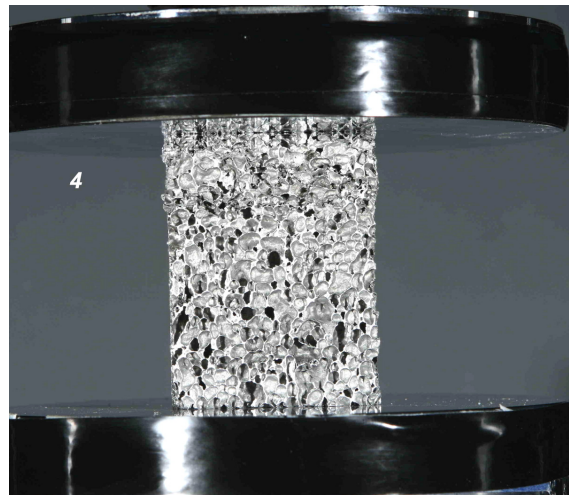
Τις εικόνες της κατάρρευσης διαδέχεται η καμπύλη μετατόπισης φορτίου, που όπως φαίνεται προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πειραματική. **Η συνολική απορροφούμενη ενέργεια κατά την πειραματική διαδικασία ήταν ίση με 364,2 Joules ενώ κατά την υπολογιστική προσομοίωση ήταν ίση με 405,3 Joules.** Συμπεραίνουμε λοιπόν την επιτυχία της προσομοίωσης της κατάρρευσης του μεταλλικού αφρού, τόσο στη μορφή, όσο και στο φορτίο:



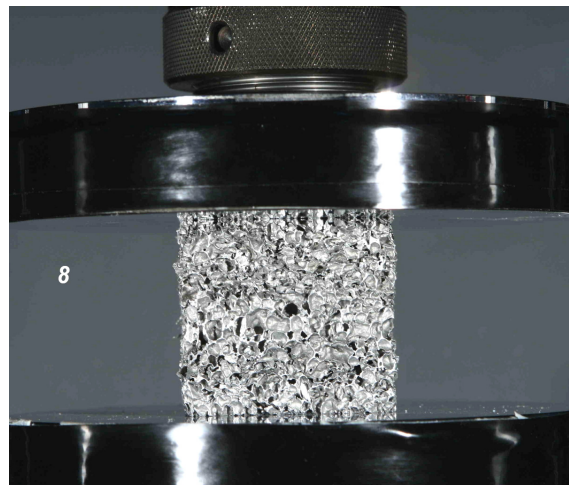
0 mm

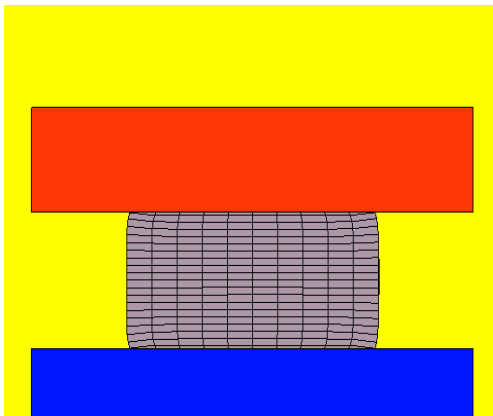


12,8 mm

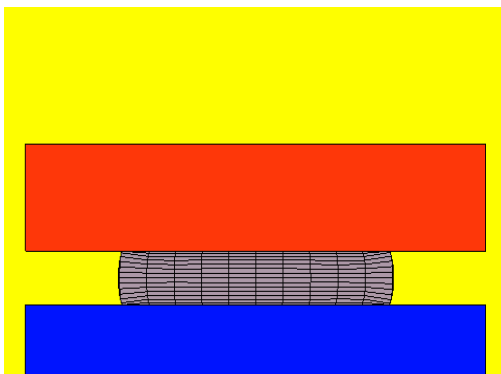
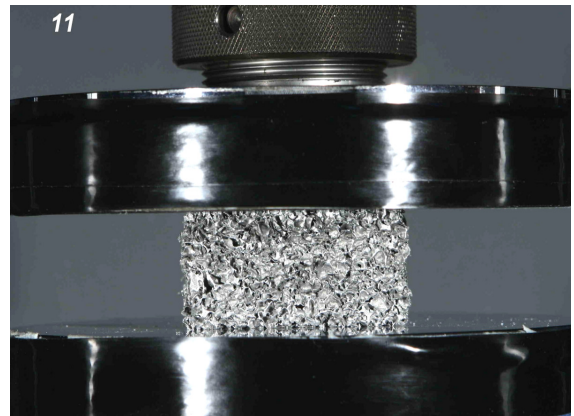


34,8 mm

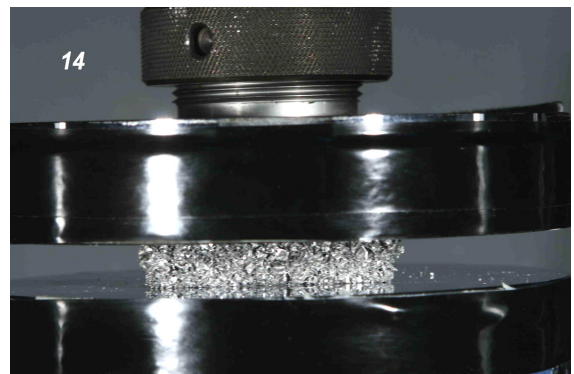




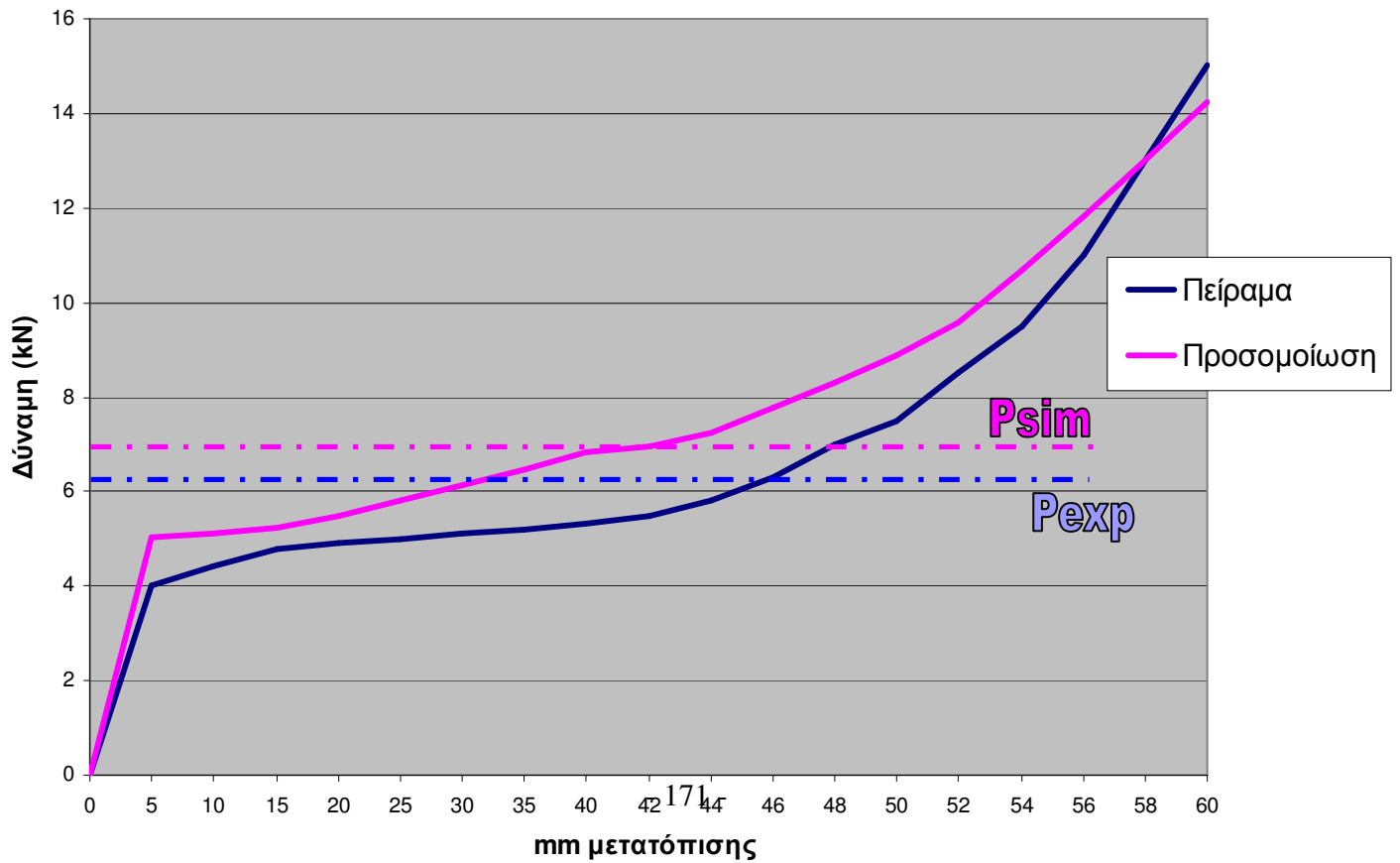
54 mm



65,5mm



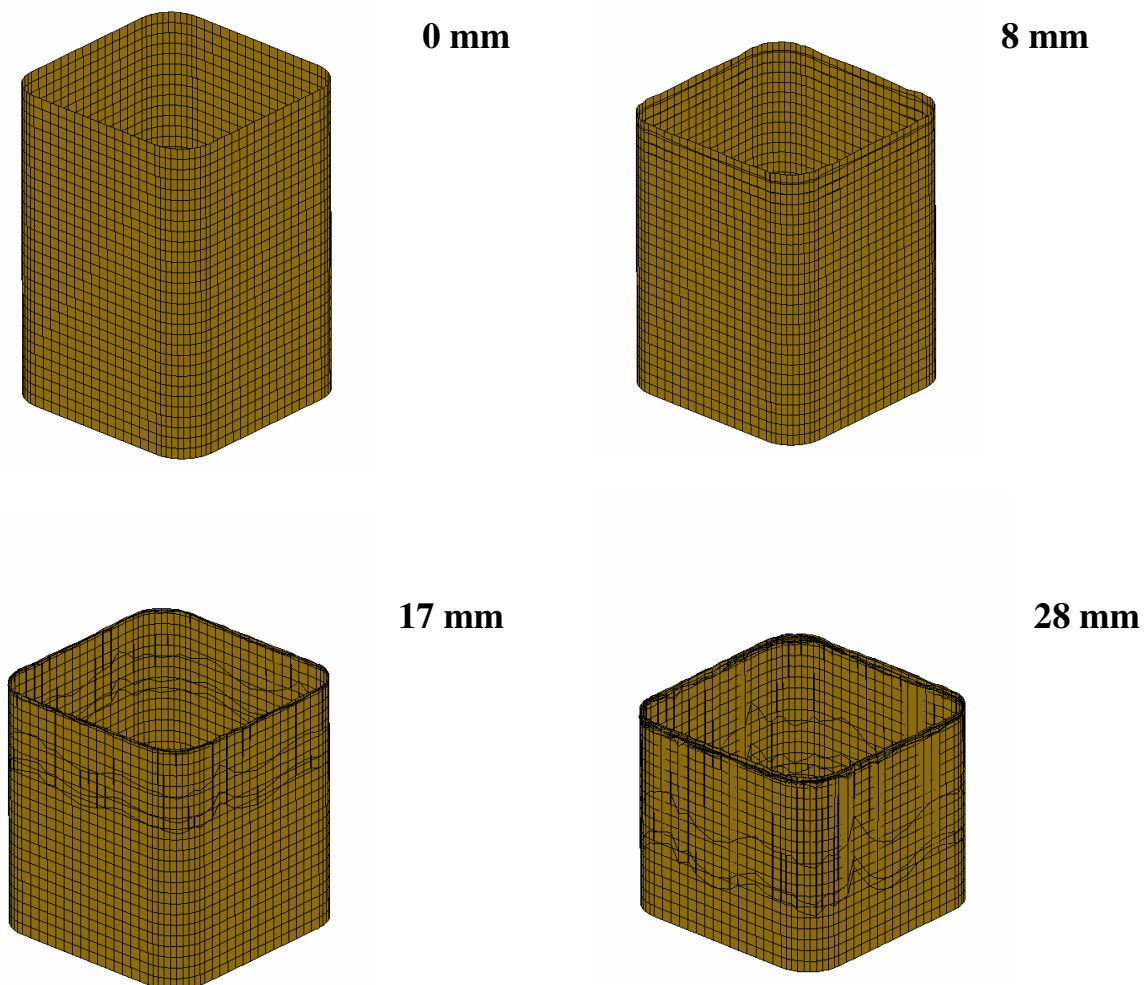
Σύγκριση πειράματος - αριθμητικής προσομοίωσης

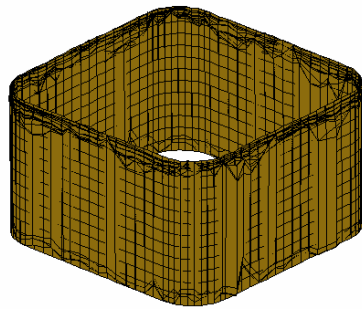


6.7 Προσομοίωση κατάρρευσης σύνθετου κελύφους

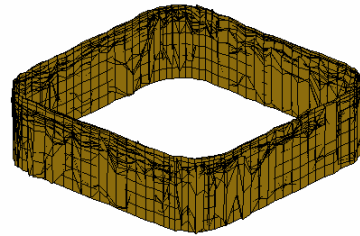
6.7.1 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements)

Μια πρώτη προσέγγιση της κατάρρευσης του σύνθετου κελύφους έγινε με το υλικό 59 της βάσης δεδομένων του LS-DYNA (Composite failure), με shell elements. Η προσομοίωση αυτή αν και στη μορφή κατάρρευσης ήταν επιτυχής (αφού το δοκίμιο παρουσίασε θραύση στο μέσον του), εν τούτοις κρίθηκε ανεπαρκής αφού η καμπύλη φορτίου μετατόπισης παρουσιάζει απότομες μεταβολές, γεγονός που οφείλεται στη σταδιακή κατάρρευση στρωμάτων των shell elements:



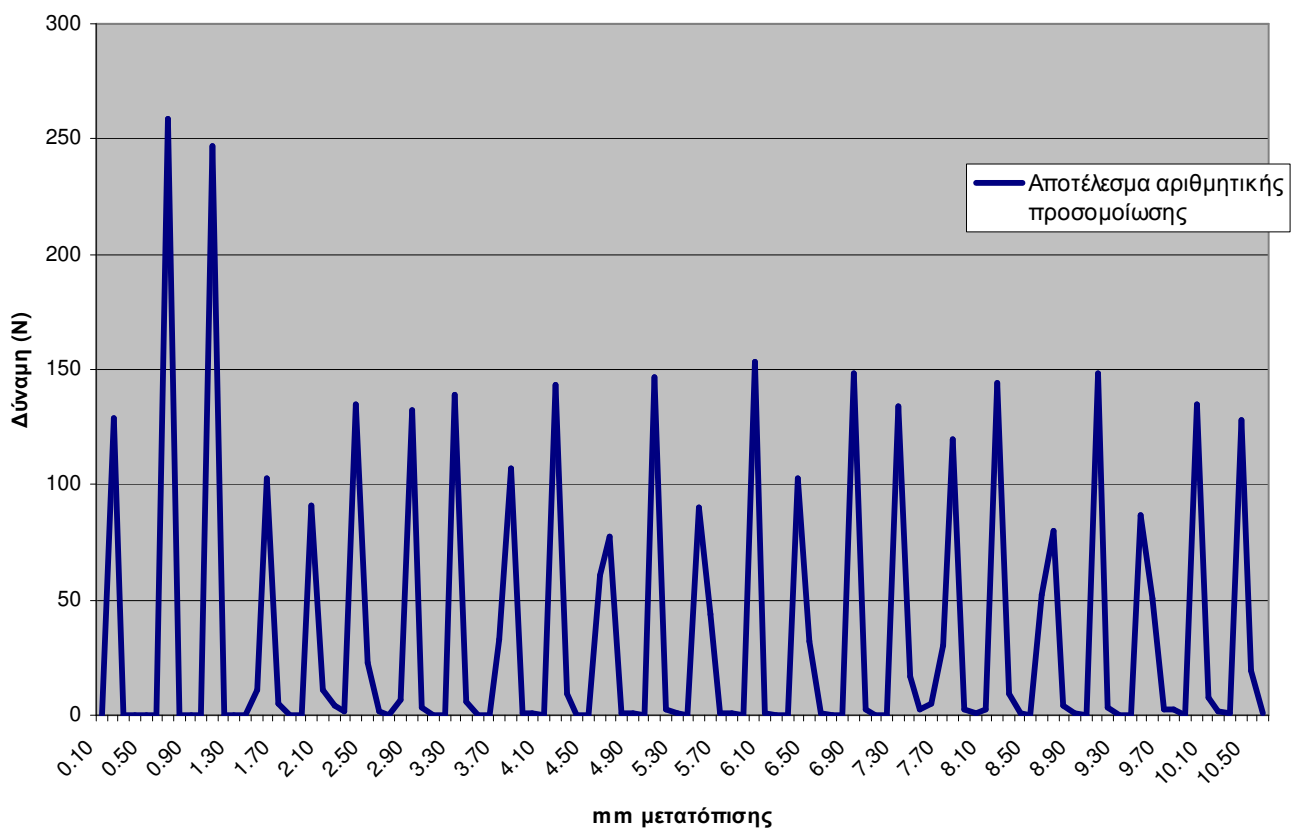


44 mm



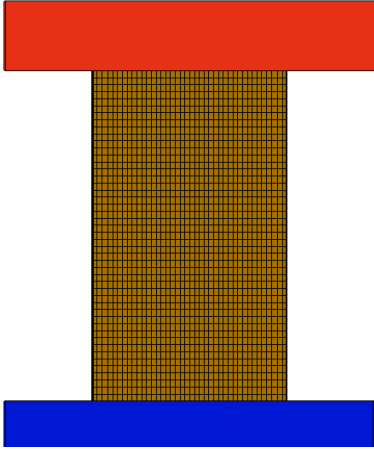
60 mm

Αποτέλεσμα αριθμητικής προσομοίωσης

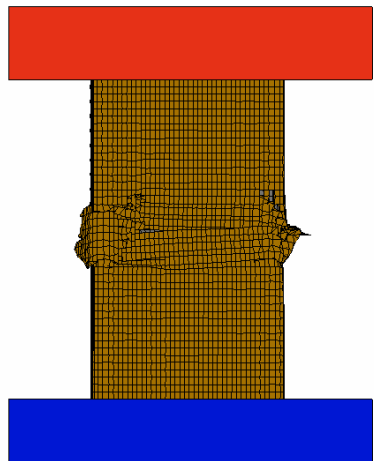
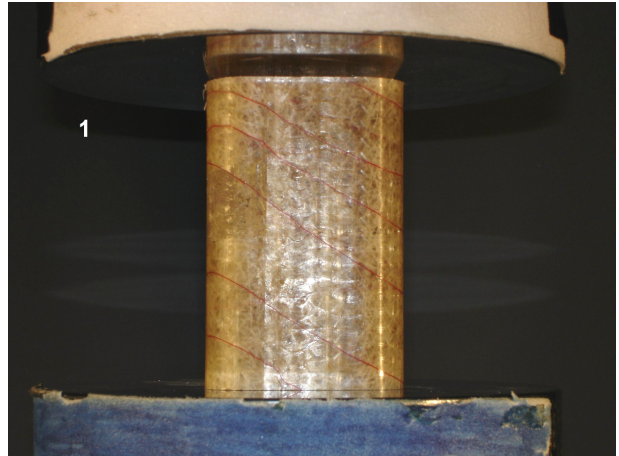


6.7.2 Προσομοίωση με στέρα πεπερασμένα στοιχεία (solid elements)

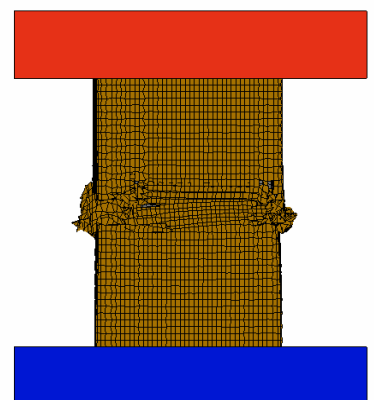
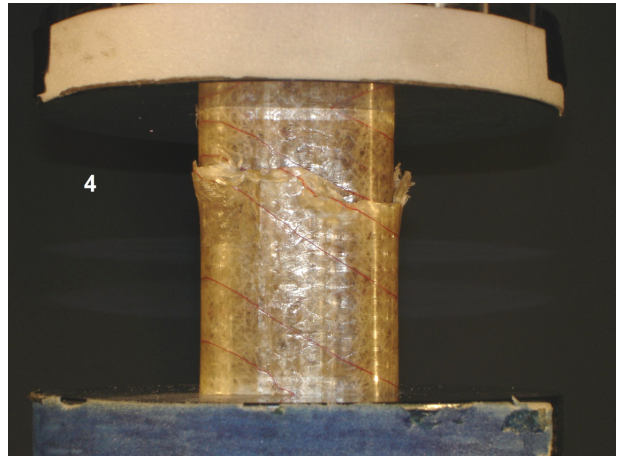
Μία αρκετά πιο επιτυχημένη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με το υλικό 5 της βάσης υλικών του LS-DYNA (plastic-kinematic). Η απορροφούμενη ενέργεια έως τα 29mm της κατάρρευσης ήταν 516 J για την πειραματική διαδικασία και 321 J για την υπολογιστική προσομοίωση:



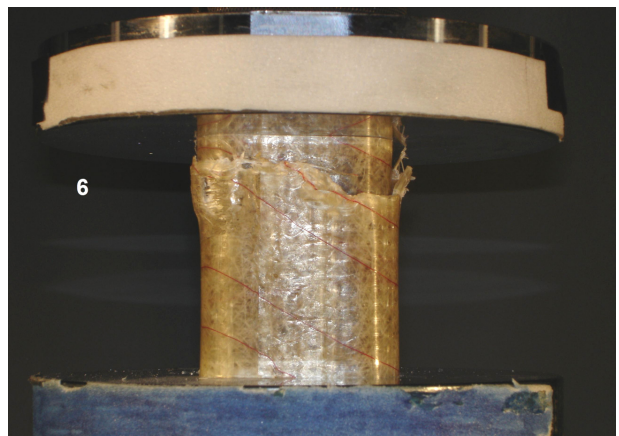
0 mm

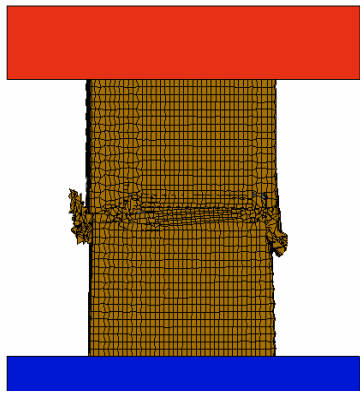


6,9 mm

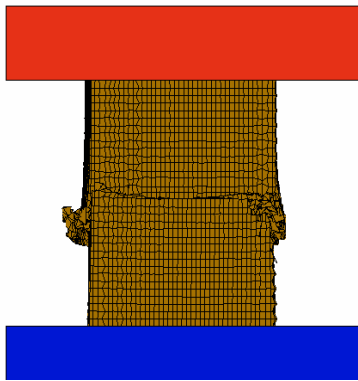
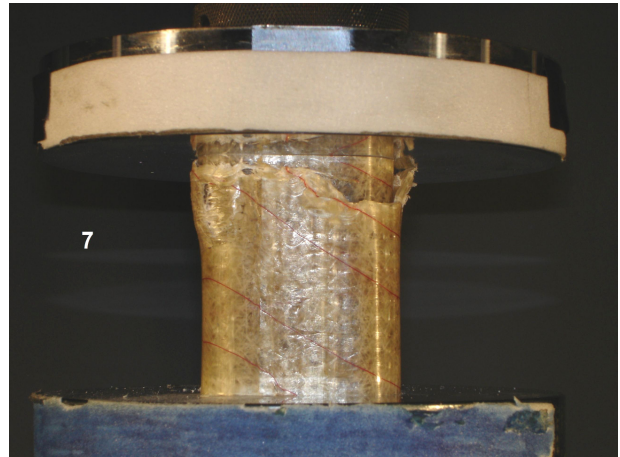


15,1 mm

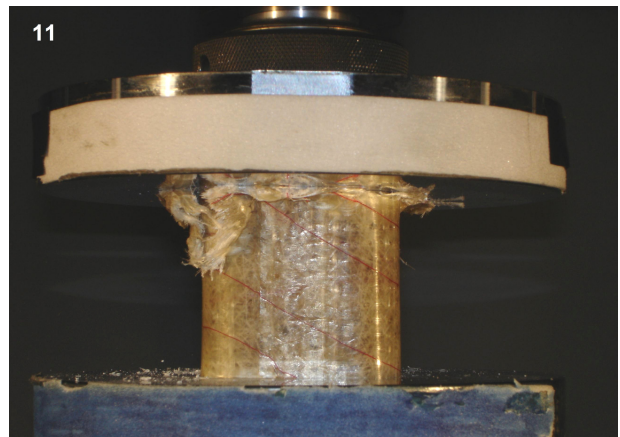




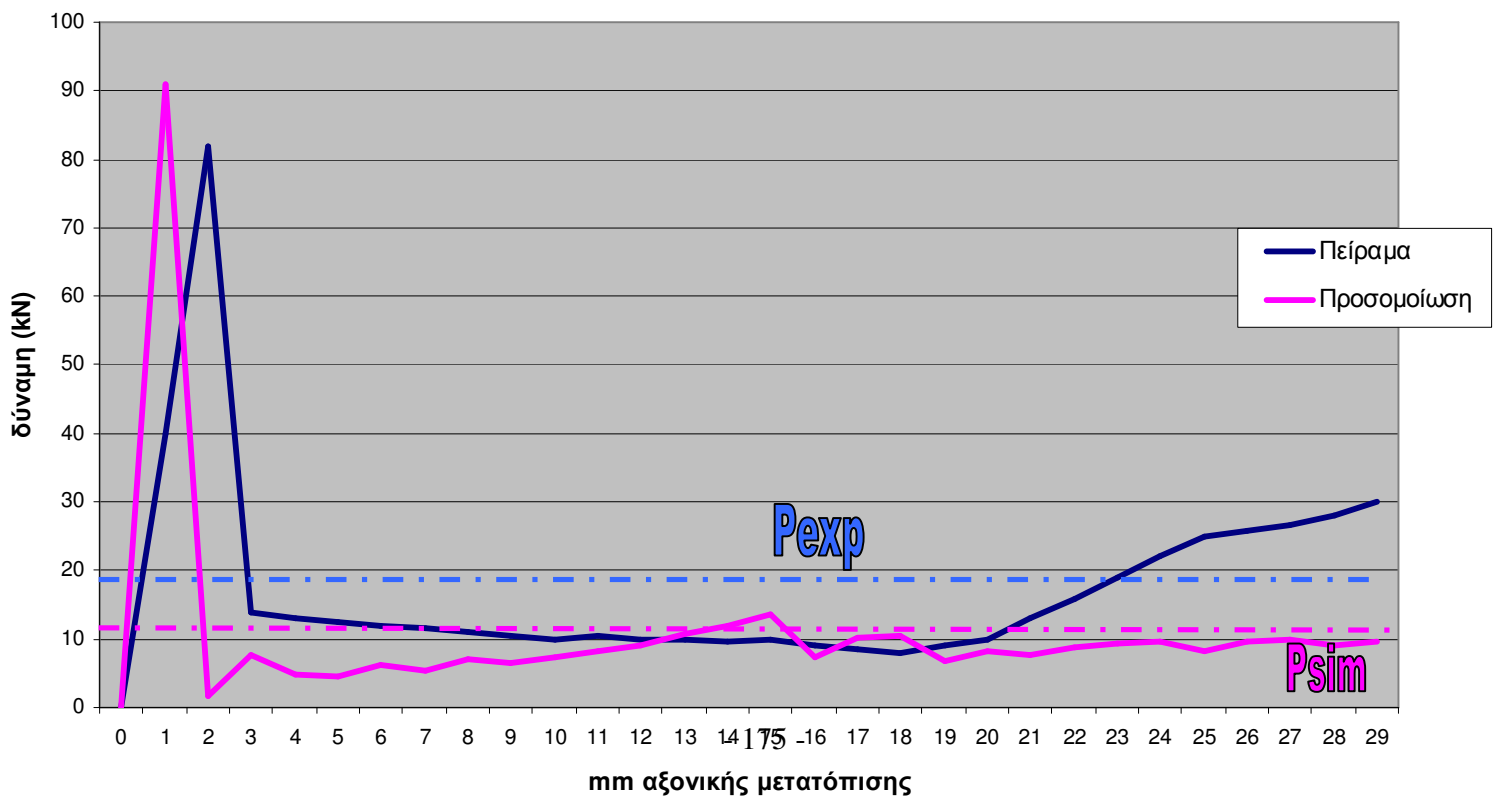
19,1 mm



30,3 mm

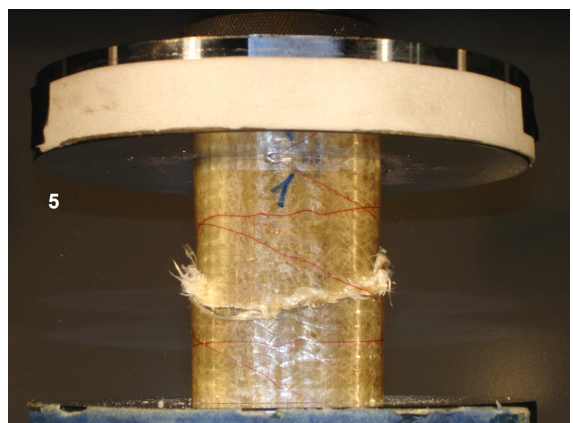
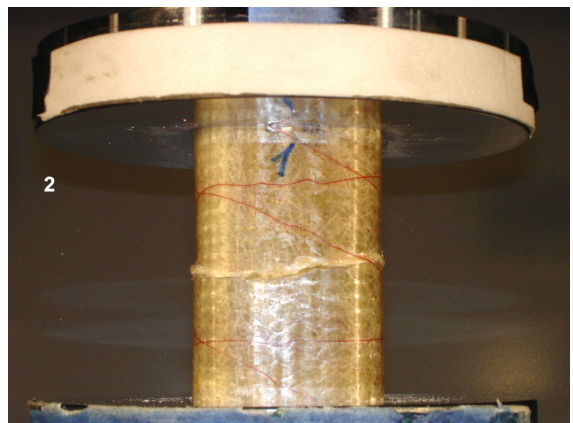
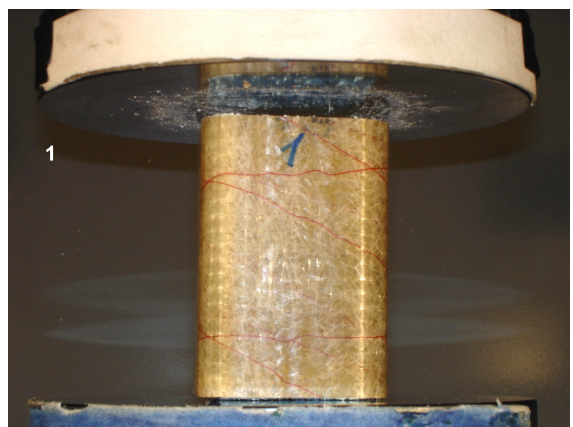
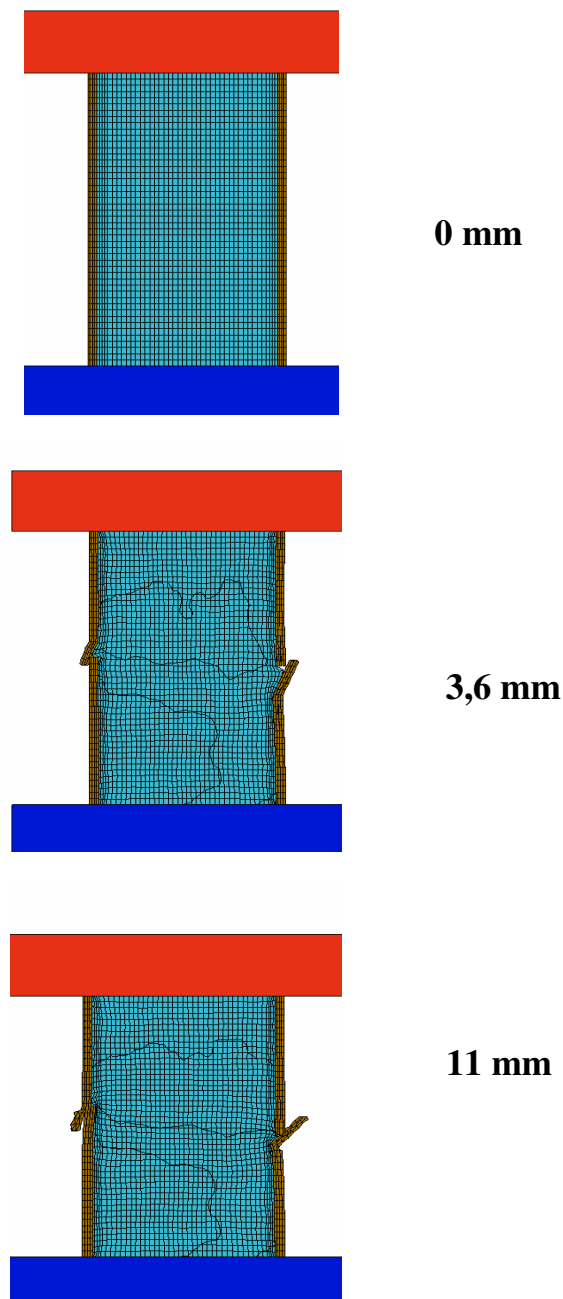


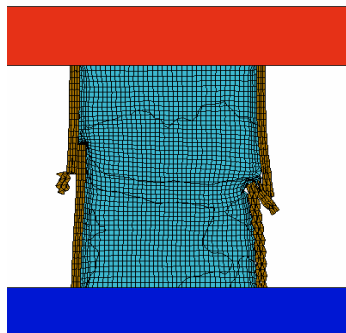
Σύγκριση πειράματος - αριθμητικής προσομοίωσης



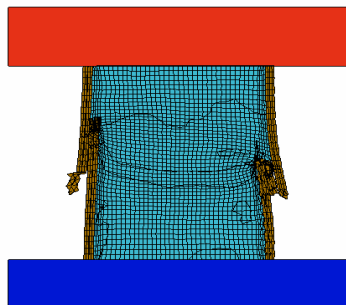
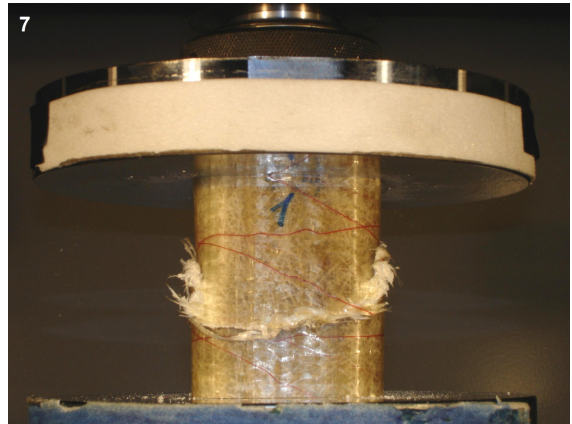
6.8 Προσομοίωση κατάρρευσης σύνθετου κελύφους πληρωμένο με πολυμερή αφρό

Μια επίσης επιτυχημένη προσομοίωση με τα υλικά της βιβλιοθήκης του LS-DYNA που χρησιμοποιήθηκαν και προηγουμένως έγινε για το πληρωμένο με πολυμερή (DOW) αφρό σύνθετο κέλυφος. **Η απορροφούμενη ενέργεια έως το σημείο που ολοκληρώθηκε η ανάλυση ήταν 365 Joules για την πειραματική διαδικασία 406 Joules για την υπολογιστική προσομοίωση.**

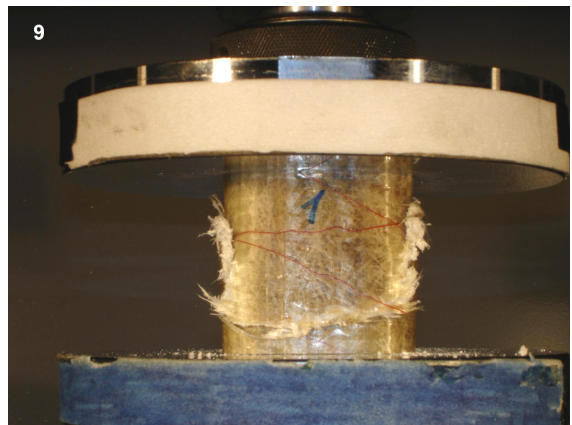




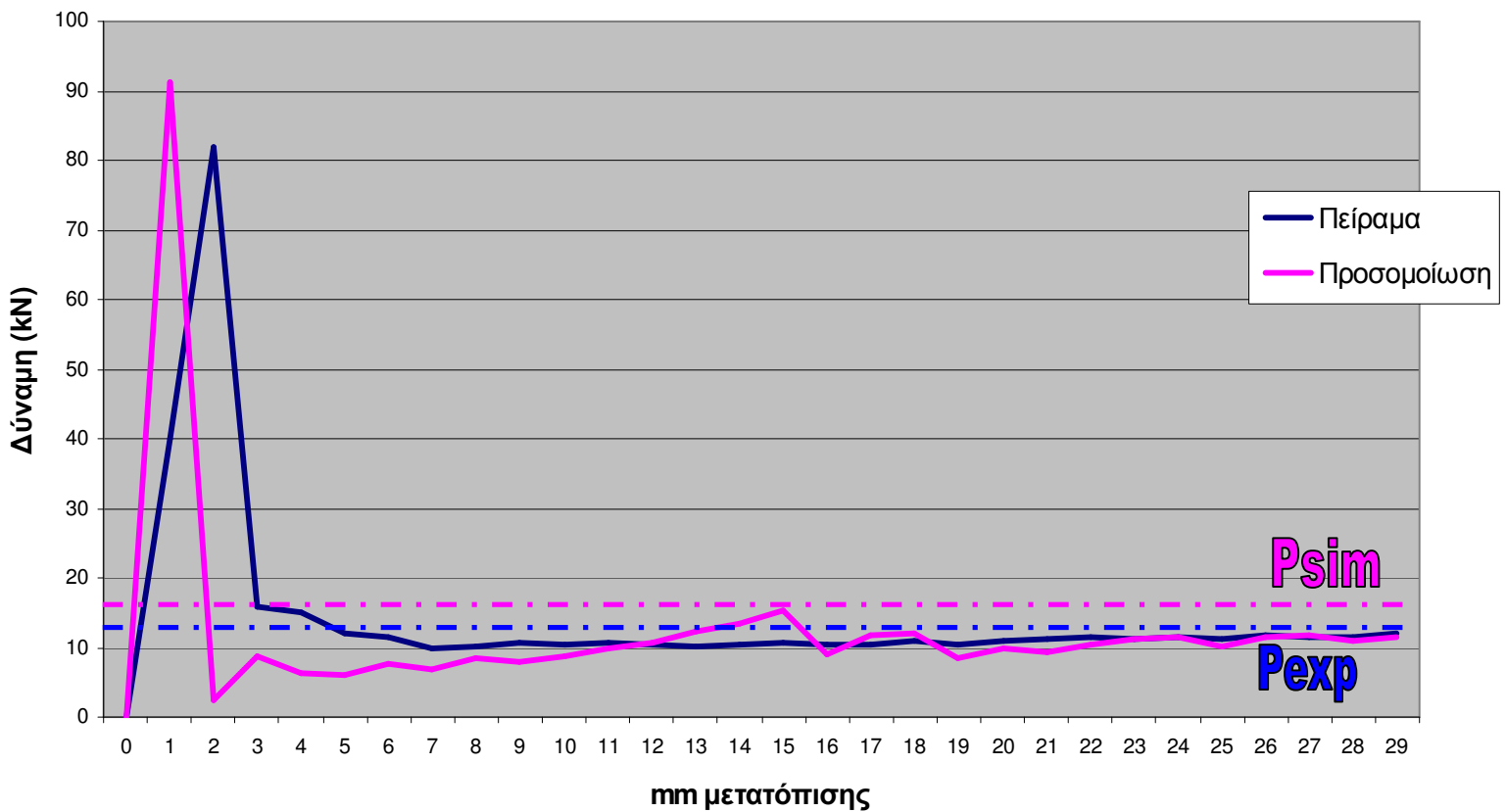
19,4 mm



31,1 mm



Σύγκριση πειράματος - αριθμητικής προσομοίωσης



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα συνοψίσουμε τα συμπεράσματα της εργασίας μας. Ακόμη θα αναλυθούν με συντομία τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και της διαδικασίας αριθμητικής εξομοίωσης. Ο άξονας γύρω από τον οποίο θα κινηθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα είναι οικονομοτεχνικός δηλαδή ως κριτήρια θα λάβουμε υπ' όψιν την λειτουργικότητα, αλλά και την τιμή της κάθε λύσεως.

7.1 Οικονομοτεχνική αξιολόγηση των λύσεων

7.1.1 Αξιολόγηση λειτουργικότητας

Κύριοι δείκτες που έχουν ήδη αναφερθεί για την αξιολόγηση μιας κατασκευής απορρόφησης ενέργειας είναι η **ειδική ενέργεια απορρόφησης** W_s (Specific Energy), η οποία προκύπτει από την σχέση, $E_s = \frac{W}{m_c}$ όπου, m_c η μάζα του υλικού που έχει

διαρρέυσει αλλά και η **πυκνότητα διάχυσης ενέργειας** (Energy Dissipation Density) E_v

η οποία προκύπτει από την σχέση, $E_v = \frac{W}{V}$ όπου V ο όγκος του κατεστραμμένου υλικού.

Ακόμη για τη σφαιρικότερη αξιολόγηση της λειτουργικότητας της κατασκευής θα πρέπει να προσθέσουμε στα κριτήρια (για τα σύνθετα υλικά) το **φορτίο αρχικής διαρροής ή θραύσης** της διάταξης, δηλαδή το φορτίο στο οποίο αρχίζει η θλίψη του υλικού. Εάν το φορτίο αυτό βρίσκεται πολύ ψηλά το δοκίμιο είναι πιθανόν να μην παραμορφωθεί πλαστικά και συνεπώς να μην απορροφήσει κανένα ποσό ενέργειας και συνεπώς θα έχει μηδενική λειτουργικότητα.

Πρέπει επίσης να λάβουμε υπ' όψιν μας την ελαστοπλαστικότητα της παραμόρφωσης δηλαδή το ποσοστό της ενέργειας που επαναπροσδίδει η διάταξη μετά την κατάρρευση της και το ποσοστό ενέργειας που καταστρέφεται.

Τέλος, για να υλικά χωρίς εσωτερική ενίσχυση, κύριο θέμα είναι το εάν ο κενός χώρος που περικλείεται από το υλικό μπορεί να αξιοποιηθεί λειτουργικά με την τοποθέτηση στο εσωτερικό του καλωδίων ή άλλων αντικειμένων. Εάν αυτό δεν είναι δυνατό διαπιστώνουμε ότι ο χώρος αυτός κρίνεται μη εκμεταλλεύσιμος και συνεπώς πρέπει να προσμετρηθεί στο συνολικό όγκο που καταλαμβάνει το υλικό.

Στον επόμενο πίνακα μπορούμε να δούμε τους κύριους συντελεστές που χαρακτηρίζουν την λειτουργικότητα της κατασκευής:

Διάταξη	Ειδική απορροφούμενη ενέργεια:	Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας:	Φορτίο αρχικής διαρροής
Σύνθετος σωλήνας	38,75 Joules/gr	60,1 Joules/cm ³	86,76 kN
Σωλήνας με πολυμερή αφρό	19,83 Joules/gr	6,46 Joules/cm ³	88,64 kN
Πολυμερής αφρός	5,86 Joules/gr	0,205 Joules/cm ³	-
Μεταλλικός αφρός	9,31 Joules/gr	2,15 Joules/cm ³	-
Σωλήνας με μεταλλικό αφρό	48,5 Joules/gr	26 Joules/cm ³	90,31 kN
Σύνθετος σωλήνας (triggered)	70,63 Joules/gr	109,5 Joules/cm ³	49,85 kN
Σωλήνας με μεταλλικό αφρό (triggered)	47,24 Joules/gr	25,2 Joules/cm ³	90,63 kN

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι **οι διατάξεις που ακολουθούν προοδευτική (από την αρχή της διαδικασίας) κατάρρευση έχουν την αποδοτικότερη συμπεριφορά** (βλ. παράπλευρη φωτογραφία). Η αποστρωματοποίηση του σύνθετου υλικού λοιπόν είναι αυτή που οδηγεί σε μεγάλα ποσά απορρόφησης ενέργειας.



Μία ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ο κίνδυνος παρερμηνείας του δείκτη 'πυκνότητα διάχυσης ενέργειας'. Ο δείκτης αυτός για τις διατάξεις χωρίς ενίσχυση αφρού είναι (όπως προαναφέρθηκε) τόσο μεγάλος **μόνο εάν ο χώρος που περικλείει το υλικό είναι λειτουργικά εκμεταλλεύσιμος**.

Συνεπώς με την προϋπόθεση ότι μπορούμε να αξιοποιήσουμε τον εσωτερικό χώρο του σωλήνα, **η διάταξη του απλού σύνθετου σωλήνα που έχει υποστεί triggering παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά**, τη μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας ανά όγκο και ανά μάζα, ενώ έχει και **χαμηλό φορτίο αρχικής διαρροής**.

Το θετικό της χρήσης του αφρού ως ενίσχυση είναι η **ομαλοποίηση του φαινομένου της κατάρρευσης**.

7.1.2 Αξιολόγηση κόστους

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση μιας διάταξης είναι το κόστος της.

Ο μεταλλικός αφρός ήρθε στα χέρια μας με τιμή 7500€/m^3 . Άρα λοιπόν για τον όγκο αφρού αλουμινίου που χρησιμοποιεί μια διάταξη ($2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$), χρειαζόμαστε $1,56\text{€}$. Η τιμή του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού (βινιλεστέρα και ίνες γυαλιού) στην αγορά εκτιμάται (σύμφωνα με sites εταιρειών [7-1]) στα 30€/m . Άρα λοιπόν για το κάθε δοκίμιο που χρησιμοποιήσαμε πληρώσαμε περίπου $2,4\text{€}$. Τέλος για τον πολυμερή αφρό πληρώσαμε περίπου $0,3\text{€}$ για τον όγκο που χρησιμοποιήσαμε (1500€/m^3 σύμφωνα με πληροφορίες που μας δόθηκαν από εταιρεία εμπορίας υλικών).

Στον κάτωθεν πίνακα συνοψίζεται η τιμή του κάθε δοκιμίου. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει ο δείκτης, απορροφούμενη ενέργεια/€, ο οποίος δείχνει την οικονομοτεχνική απόδοση της κάθε διάταξης:

Διάταξη	Τιμή (Ευρώ)	απορροφούμενη ενέργεια/κόστος (Joules/Ευρώ)
Σύνθετος σωλήνας	2.4	717.1
Σωλήνας με πολυμερή αφρό	2.7	373.0
Πολυμερής αφρός	0.3	130.0
Μεταλλικός αφρός	1.6	234.0
Σωλήνας με μεταλλικό αφρό	4.0	1023.2
Σύνθετος σωλήνας (triggered)	2.4	1306.7
Σωλήνας με μεταλλικό αφρό (triggered)	4.0	981.5

Όπως και στην προηγούμενη αξιολόγηση αποδοτικότητας, έτσι και σε αυτή, παρατηρούμε ότι ο σωλήνας που έχει υποστεί triggering είναι ο οικονομότεχνικά πιο αποδοτικός.

7.2 Σύγκριση μεταλλικού και πολυμερούς αφρού

Πολύ σημαντικό στοιχείο της διάταξης απορρόφησης ενέργειας είναι το ενισχυτικό υλικό (core material). Τα ενισχυτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι μεταλλικός (αργλικός) αφρός και πολυμερής (ελαφρούς πολυουρεθάνης) αφρός. Τα κυριότερα συγκριτικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία για τα άνωθεν υλικά είναι τα εξής:

- **Ο μεταλλικός αφρός απορροφά πλαστικά την κινητική ενέργεια του αντικειμένου με το οποίο προσκρούεται.** Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια αυτή καταστρέφεται και αφαιρείται από το σύστημα, συνεπώς δεν μπορεί να εκτοξεύσει το αντικείμενο προς την αντίθετη κατεύθυνση (Έχουμε ήδη δει πως πολλά ατυχήματα έχουν συμβεί λόγω της ελαστικής συμπεριφοράς των προστατευτικών στις άκρες των δρόμων (μπαριέρες) οι οποίες εκτοξεύουν τα προσκρούόμενα αυτοκίνητα στη μέση του δρόμου).

Αντίθετα ο πολυμερής αφρός απορροφά ελαστοπλαστικά την κινητική ενέργεια, χαρακτηριστικό μη επιθυμητό, το οποίο μπορεί δυνητικά να προκαλέσει κινδύνους.

- Η τιμή του πολυμερούς αφρού DOW είναι περίπου ίση με 1500€/m³ ενώ η τιμή του μεταλλικού αφρού είναι ίση με 7500€/m³. Υπάρχει λοιπόν **αισθητή διαφορά κόστους ανάμεσα στα 2 υλικά**.
- Όσον αφορά στην κατεργασιμότητα των 2 υλικών έχουμε να παρατηρήσουμε ότι **και τα 2 υλικά είναι ευκόλως κατεργάσιμα**. Παρ'όλα αυτά υπάρχει αισθητή διαφορά υπέρ του πολυμερούς αφρού ο οποίος μπορεί εύκολα να λάβει ποικιλία γεωμετριών σε σχέση με τον αφρό αλουμινίου που χρειάζεται βαρύτερη κατεργασία. Να σημειωθεί ότι και τα 2 υλικά μπορούν κατεργασία πλάνης, και φρεζαρίσματος σε υψηλές ταχύτητες, χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή στην συγκράτησή τους κατά τη διαδικασία της τórνευσης.

7.3 Συμπεράσματα υπολογιστικής προσομοίωσης

Η προσομοίωση της διαδικασίας κατάρρευσης **μπορεί να διαχωριστεί στην προσομοίωση της μορφής της κατάρρευσης και τον υπολογισμό του φορτίου κατάρρευσης:**

- Όσον αφορά στην **προσομοίωση της μορφής κατάρρευσης** αυτή είναι σημαντική καθώς βοηθά το μηχανικό να υπολογίσει τη γεωμετρική παραμόρφωση της κατασκευής και να βελτιώσει τη χωροδιάταξη του συστήματος προς μια ικανότερη διάταξη.

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν η μορφή της κατάρρευσης σε κάποιες περιπτώσεις δεν συμφώνησε απόλυτα με την αντίστοιχη της πειραματικής διάταξης αφού **ο κώδικας LS-DYNA δεν δύναται να λάβει υπ'όψιν του τυχόν μικροελαττώματα του δοκιμίου** (ασυνέχειες, ελάχιστες ασυμμετρίες κ.λ.π). Στις περιπτώσεις όμως που το δοκίμιο κατά την πειραματική διαδικασία ακολούθησε την αναμενόμενη διαδικασία κατάρρευσης η μορφή της κατάρρευσης συμφώνησε απόλυτα με την μορφή που δόθηκε από την υπολογιστική προσομοίωση.

- Αναφερόμενοι στον αριθμητικό **υπολογισμό των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα καταρρέοντα δοκίμια**, οφείλουμε να παρατηρήσουμε την συμφωνία σε πολύ μεγάλο βαθμό της υπολογιζόμενης με την πραγματική δύναμη. Μικρές αποκλίσεις παρουσιάζονται **κυρίως λόγω των μη υπολογιζόμενων μικροελλατωμάτων** (ασυνέχειες, μικρές αποκλίσεις και ασυμμετρίες κ.λ.π), **των αδυναμιών του κώδικα** αλλά και **λόγω παραδοχών που έγιναν στη διαδικασία σχεδιασμού του μοντέλου** (π.χ ισοτροπικότητα κ.λ.π).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μέσω της υπολογιστικής προσομοίωσης με τον κώδικα LS-DYNA μπορούμε να λάβουμε ικανοποιητική προσέγγιση των δυνάμεων και της εικόνας της διαδικασίας κατάρρευσης. **Όπως όμως ισχύει και σε κάθε άλλη περίπτωση το αν η ακρίβεια της προσομοίωσης είναι αρκετή ή όχι, εξαρτάται από το μέγεθος των αναγκών μας.**

Αναμφίβολα όμως η μέθοδος αυτή δίνει μια ικανοποιητική και κυρίως χαμηλού κόστους πρώτη εικόνα της συμπεριφοράς ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας.

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

[7-1] www.avtcomposites.com/resins.php3