



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ DOUBLE HAT ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ ΜΕ
ΑΦΡΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΓΡΥΜΑΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΕΓΑΣΙΩΝ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ DOUBLE HAT ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΑ
ΜΕ ΑΦΡΟ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ε. ΓΡΥΜΑΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2010



Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κατά το χρονικό διάστημα Νοεμβρίου 2009 έως Ιουνίου 2010, 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 διαμόρφωσης double hat με σκοπό την αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε περίπτωση καταστροφικής καταπόνησης.

Το θέμα εντάσσεται στη ευρύτερη επιστήμη της προστασίας από συγκρούσεις (crashworthiness) και φιλοδοξεί να συμβάλει, έστω και στον ελάχιστο βαθμό, στην ανάπτυξη της.

Επιβλέπων της εργασίας αυτής υπήρξε ο καθηγητής κ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία. Ιδιαίτερω ευχαριστώ και τον υποψήφιο διδάκτορα του τομέα Στυλιανό Κουντρουμπάκη, ο οποίος επέδειξε καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα αμέριστη συμπαράσταση και ανοχή.

Τέλος, οφείλω να εκφράσω τις θερμότερες των ευχαριστιών μου στους γονείς μου για ότι έχουν κάνει για εμένα έως τώρα και για τις θυσίες τους και σε όλους τους καλούς φίλους, τους οποίους απέκτησα κατά την διάρκεια των σπουδών μου στην Αθήνα και με στήριξαν σε αυτά, τα όχι πάντα εύκολα, χρόνια.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Ιωάννης Ε. Γρυμάνης



Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα	ii
Περίληψη	iv
Abstract	v

Κεφάλαιο 1: Ανάγκες για ασφαλέστερα μέσα μεταφοράς

1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Ο σχεδιασμός ασφαλούς αυτοκινήτου - Ιστορική Αναδρομή	3
1.3	Η σύγχρονη φιλοσοφία σχεδιασμού	4
1.4	Στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων	7
1.4.1	Διεθνή στοιχεία	7
1.4.2	Τα τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα	11
1.4.3	Αεροπορικά ατυχήματα	13

Κεφάλαιο 2: Στοιχεία απορρόφησης ενέργειας

2.1	Εισαγωγή	15
2.2	Αποσβεστήρες ενέργειας	16
2.3	Ορισμοί	17
2.4	Βασικά σχήματα στοιχείων απορρόφησης ενέργειας	19
2.4.1	Κώνοι	19
2.4.2	Σωλήνες	20
2.4.3	Top και double hat	21
2.5	Hat sections ενισχυμένες εσωτερικά με αφρό	22
2.5.1	Υλικά Sandwich	23
2.5.2	Παραμόρφωση αφρώδους πυρήνα	25
2.6	Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας	26

Κεφάλαιο 3: Αφρώδη υλικά

3.1	Ορισμοί	27
3.2	Πολυμερείς αφροί	28
3.2.1	Πολυουρεθάνη	29
3.3	Μεταλλικοί αφροί	31
3.4	Μηχανική συμπεριφορά των πολυμερών αφρών	32
3.4.1	Θλιπτική καταπόνηση πολυμερών αφρών ανοικτών κυψελών	34
3.4.2	Θλιπτική καταπόνηση πολυμερών αφρών κλειστών κυψελών	37
3.5	Μηχανική συμπεριφορά των μεταλλικών αφρών	41
3.5.1	Καταστροφική θλιπτική καταπόνηση μεταλλικού αφρού	41

Κεφάλαιο 4: Κατασκευή των δοκιμών

4.1	Εκλογή μορφολογίας	43
4.2	Σχέδια και διαστάσεις	44
4.3	Κατεργασία διαμόρφωσης μεταλλικών κελυφών	47
4.3.1	Ψαλιδισμός	47
4.3.2	Στραντζάρισμα	48
4.3.3	Συγκόλληση	49
4.4	Επιλογή αφρών	51
4.5	Δημιουργία αφρού πολυουρεθάνης	54

**Κεφάλαιο 5: Εκτέλεση και σχολιασμός δοκιμών σύνθλιψης**

5.1	Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού	60
5.2	Δοκιμή σύνθλιψης	63
5.3	Χαρακτηριστικά των δοκιμίων	64
5.4	Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις	65
5.4.1	DH – 4S	66
5.4.2	DH – 4S – GF	69
5.4.3	DH – 4S – GF38	72
5.4.4	DH – 4S – BD100	75
5.4.5	DH – 4S – BOF	78
5.4.6	DH – 6S	81
5.4.7	DH – 6S – GF	84
5.4.8	DH – 6S – GF38	87
5.4.9	DH – 6S – BD100	90
5.4.10	DH – 6S – BOF	93
5.4.11	DH – 8S	96
5.4.12	DH – 8S – GF	99
5.4.13	DH – 8S – GF38	102
5.4.14	DH – 8S – BD100	105
5.4.15	DH – 8S – BOF	108
5.5	Αποτελέσματα συνόλου δοκιμίων	111
5.5.1	Μέσο και μέγιστο φορτίο	111
5.5.2	Απορρόφηση ενέργειας	112
5.6	Σύγκριση δοκιμίων με όμοιο πυρήνα	117
5.6.1	Κενά δοκίμια	117
5.6.2	Δοκίμια με πυρήνα αφρό GF	119
5.6.3	Δοκίμια με πυρήνα αφρό GF-38	121
5.6.4	Δοκίμια με πυρήνα αφρό BD-100	123
5.6.5	Δοκίμια με πυρήνα αφρό BOF	125
5.7	Σύγκριση δοκιμίων με όμοια μορφολογία διατομής	127
5.7.1	Δοκίμια με μορφολογία διατομής 4S	127
5.7.2	Δοκίμια με μορφολογία διατομής 6S	129
5.7.3	Δοκίμια με μορφολογία διατομής 8S	131

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1	Τρόπος κατάρρευσης	133
6.2	Επίδραση μορφολογίας κελύφους στην απορρόφηση ενέργειας	135
6.2.1	Σύνολο δοκιμίων	136
6.2.2	Δοκίμια με όμοιο πυρήνα	136
6.3	Επίδραση αφρώδους πυρήνα στην απορρόφηση ενέργειας	137
6.3.1	Σύνολο δοκιμίων	138
6.3.2	Δοκίμια με όμοια μορφολογία κελύφους	138
6.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	139

Βιβλιογραφία

a



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην διπλωματική αυτή εργασία μελετάται η πειραματική προσομοίωση καταστροφικής καταπόνησης κελυφών από χάλυβα διαμόρφωσης double hat, ενισχυμένα εσωτερικά με πολυμερή αφρό.

Τα κελύφη διαφέρουν ως προς τη μορφολογία της διατομής τους. Συγκεκριμένα μελετώνται τετραγωνικά, εξαγωνικά και οκταγωνικά κελύφη. Για την κατασκευή τους, ελάσματα από χάλυβα ψαλιδίστηκαν, στραντζαρίστηκαν και συγκολλήθηκαν κατάλληλα.

Ένα κέλυφος από κάθε κατηγορία παραμένει κενό ενώ τα υπόλοιπα ενισχύονται με πυρήνα αφρού πολουρεθάνης διαφόρων πυκνοτήτων. Οι αφροί δημιουργήθηκαν στα εργαστήρια του Τομέα Κατεργασιών των Υλικών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με χρήση των προβλεπόμενων μονομερών τα οποία χορηγήθηκαν από την εταιρεία Bayer Hellas.

Μετά το πέρας των κατεργασιών διαμόρφωσης τους τα δοκίμια συνθλίφθηκαν στην μηχανή δοκιμών Instron του εργαστηρίου σε σύνολο διαδρομής παραμόρφωσης 80 mm έκαστο. Η σύνδεση της με ηλεκτρονικό υπολογιστή μας επέτρεψε να λάβουμε τις ακριβείς μετρήσεις κάθε κατάρρευσης, στην προσπάθεια μας για τον υπολογισμό των απαιτούμενων δεδομένων.

Τα μεγέθη στα οποία εστιάστηκε η προσοχή μας ήταν το καθαρό ποσό απορροφούμενης ενέργειας, η ειδική ενέργεια απορρόφησης, η πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας καθώς και η ομοιομορφία του φορτίου.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων συνοδεύεται από φωτογραφικό υλικό της κάθε καταπόνησης, ώστε να αποτυπωθεί η προοδευτική κατάρρευση των δοκιμίων και να επιχειρηθεί τυχόν συσχέτιση με τα καταγεγραμμένα δεδομένα.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα, για κάθε περίπτωση μορφής κελυφους και για κάθε υλικό πυρήνα, σε κοινούς άξονες για ευκολότερη εποπτεία και διεξαγωγή συμπερασμάτων.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, το περιεχόμενο της εργασίας αυτής εντάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία θεμάτων σχετικά με το την αντοχή σε συγκρούσεις και ειδικότερα στα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας που φέρει ένα όχημα, ή γενικότερα μια κατασκευή.



ABSTRACT

This diploma thesis is an experimental study into the energy absorbing characteristics of steel double-hat sections, which are reinforced with polymer foam, subjected to dynamic axial crushing.

The shells vary in the morphology of the intersection. We studied square, hexagonal and octagonal shells. For the construction, steel sheets cut, bended and welded properly.

A shell from each category remained empty while the others supported by polyurethane (PU) foam core. The foams created in the laboratories of the Manufacturing Technology Department, Mechanical Engineering School of NTUA, using the projected monomers that are granted by Bayer Hellas.

After the manufacturing processes, the specimens crushed in the Instron testing machine of the laboratory. Connection with a personal computer allowed us to take precise measurements of each collapse, in our attempt to calculate the required data.

We were focus in the mean characteristics such as absorbed energy, specific energy, energy dissipation density and the uniform load.

The presentation of results accompanied by photographs from each test expressing the progressive collapse of the samples and in order to derive any correlation with the recorded data.

In addition, for each type for shell and core material are presented aggregate results for easier supervision.

As it can be seen from the above, the subject of this study is related to crashworthiness and energy absorbing elements issues.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

ΑΝΑΓΚΕΣ ΓΙΑ ΑΣΦΑΛΕΣΤΕΡΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ



1.1 Εισαγωγή

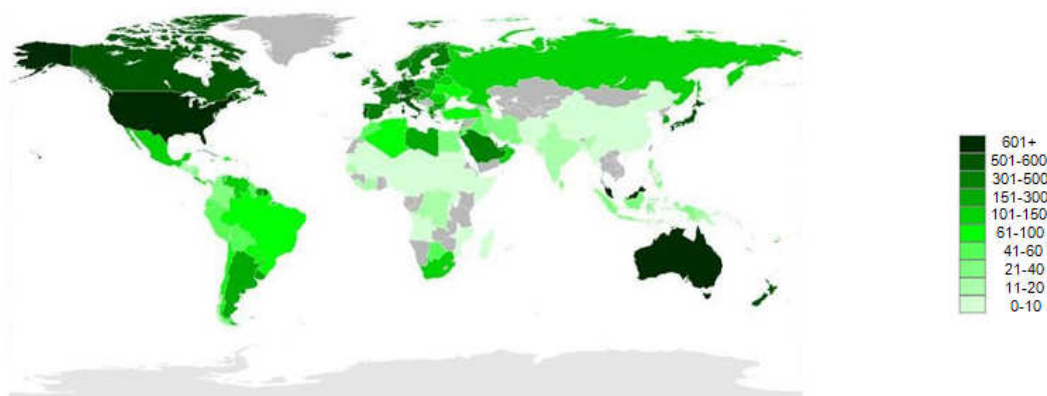
Στην εποχή μας, γίνεται έντονη προσπάθεια για κατασκευή ασφαλέστερων μέσων μεταφοράς, καθώς ο αριθμός των οχημάτων και των χρηστών αυξάνεται χρόνο με το χρόνο. Έτσι, κύριο μέλημα των σχεδιαστών είναι η ενσωμάτωση συστημάτων ασφάλειας με στόχο την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων σε περίπτωση ατυχήματος.

Τα συστήματα ασφαλείας διαχωρίζονται σε ενεργητικής και παθητικής ασφαλείας. Συστήματα ενεργητικής ασφαλείας ονομάζονται αυτά που παρέχουν τη δυνατότητα στον οδηγό του οχήματος να κατευθύνει και να ελέγχει τη πορεία του αποφεύγοντας τις συγκρούσεις, ενώ παθητικής αυτά που σε περίπτωση σύγκρουσης προστατεύουν τον οδηγό και τους υπόλοιπους επιβάτες από τραυματισμούς.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού, όμως, δεν ήταν πάντα αυτή και παρότι έχει περάσει σχεδόν ένας αιώνας από τότε που εντατικοποιήθηκε η χρήση ιδιωτικών οχημάτων για μετακινήσεις μόνο κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες γίνονται ουσιαστικά βήματα στον τομέα της ασφαλείας.












Το 1908 ο Αμερικάνος Χένρυ Φορντ (Henry Ford), φέρνει την επανάσταση στον τομέα των μεταφορών, παράγοντας και διοχετεύοντας στην αγορά ένα αυτοκίνητο σταθμό, το Ford Model-T. Χάρης στην χαμηλή του τιμή (αποτέλεσμα της γραμμικής παραγωγής του και της καθετοποίησης της εταιρίας του Φορντ) έκανε την απόκτηση ιδιόκτητου οχήματος πιο προσιτή και συντέλεσε στη δημιουργία της αγοράς της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Τα χρόνια που ακολούθησαν μετέτρεψαν σταδιακά το αυτοκίνητο σε αγαθό πρώτης ανάγκης, κυρίως για τον δυτικό κόσμο, φτάνοντας στο έτος 2007 να κυκλοφορούν περίπου 806 εκατομμύρια αυτοκίνητα παγκοσμίως, με τον αριθμό αυτό να αυξάνεται ραγδαία λόγω του ανοίγματος της αγοράς σε χώρες όπως η Ινδία και η Κίνα.



Σχήμα 1.1: Αριθμός αυτοκινήτων ανά 1000 κατοίκους (Απρίλιος 2009)



ΘΕΣΗ	ΧΩΡΑ	ΟΧΗΜΑΤΑ ΑΝΑ 1000 ΚΑΤΟΙΚΟΥΣ
1	 Η.Π.Α	765
2	 Λουξεμβούργο	686
3	 Ισλανδία	658
4	 Αυστραλία	619
5	 Μάλτα	607
6	 Ιταλία	566
7	 Καναδάς	563
8	 Νέα Ζηλανδία	560
9	 Αυστρία	558
10	 Γερμανία	546
...
32	 Ελλάδα	329

Πίνακας 1.1: Χώρες με τον μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων ανά 1000 κατοίκους (Απρίλιος 2009)

Στα πλαίσια ελέγχου των νέων οχημάτων, το 1997 ιδρύθηκε η EuroNCAP (European New Car Assessment Programme - Ευρωπαϊκό πρόγραμμα αξιολόγησης νέων αυτοκινήτων), ένα πρόγραμμα που θέτει τα πρότυπα στην ασφάλεια των αυτοκινήτων, καταγράφοντας τη συμπεριφορά τους σε ελεγχόμενες συγκρούσεις.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών των εσκεμμένων συγκρούσεων και η προσπάθεια να διατηρηθεί το κόστος σε χαμηλά επίπεδα, οδηγεί τους μηχανικούς στην επιλογή των δομών και των υλικών κατασκευής των συστημάτων ασφαλείας.

Οι εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας των υλικών αποτελούν σπουδαίο βοήθημα στην κατεύθυνση αυτή. Πλέον, είμαστε σε θέση να έχουμε ισχυρότερα, ελαφρύτερα και περισσότερο ενεργειακά αποδοτικά οχήματα, αυξάνοντας την ασφάλεια στα επιθυμητά επίπεδα και συγκρατώντας και οικονομοτεχνικά μεγέθη.

Στις περισσότερες των συγκρούσεων, η συντριβή του οχήματος συμβαίνει σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Η αρχική ορμή, $P=m \cdot u$, έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας μέσης δύναμης F στις προσκρούμενες επιφάνειες, αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου t που διαρκεί η σύγκρουση. Συνεπώς, ο πιο σύντομος χρόνος t προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη F . Αυτή η μεγάλη δύναμη θα προκαλέσει μια τεράστια επιτάχυνση (επιβράδυνση) στους επιβαίνοντες στο όχημα και ειδικά στα κεφάλια τους τα οποία δεν συγκρατούνται από τις ζώνες ασφαλείας, τα οποία και δύνανται να προσκρούσουν στα μέρη του εσωτερικού του οχήματος (η δεύτερη αυτή σύγκρουση μπορεί να είναι εξίσου επικίνδυνη).

Τα αποτελέσματα μιας συντριβής οχήματος μπορούν να περιλαμβάνουν:

- Φυσικό ή και ψυχολογικό τραυματισμός επιβατών ή πεζών
- Πλαστική παραμόρφωση και σπάσιμο της δομής του οχήματος καθώς και καταστροφές από ενδεχόμενη πυρκαγιά μετά τη συντριβή
- Ζημία στο μεταφερόμενο φορτίο εμπορικών οχημάτων
- Περιβαλλοντικές καταστροφές



1.2 Ο σχεδιασμός ασφαλούς αυτοκινήτου - Ιστορική Αναδρομή

Η οδική ασφάλεια έχει προσδιορισθεί με διαφορετικούς τρόπους μέσα στα χρόνια. Κάθε επόμενη γενιά μηχανικών αντιμετωπίζει το καθήκον να βελτιώνει τις προσπάθειες της προηγούμενης. Στις αρχές της νεώτερης εποχής της αυτοκίνησης, η οδική ασφάλεια εθεωρείτο αποκλειστική ευθύνη του οδηγού. Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων πίστευαν ότι είχαν εφοδιάσει τον οδηγό με όλα τα απαραίτητα όργανα για να οδηγεί με ασφάλεια, δηλαδή αξιόπιστα και ανθεκτικά φρένα, σύστημα διεύθυνσης, φώτα, τροχούς και αναρτήσεις. Ο οδηγός είχε τη δυνατότητα να τα χρησιμοποιήσει με τρόπο που να διασφαλίζεται η οδική ασφάλεια του ίδιου και των επιβατών του δικού του αλλά και των άλλων οχημάτων, πεζών και δικυκλιστών.

Από το 1960, ο σχεδιασμός των αυτοκινήτων επηρεάζεται κατά πολύ από το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ασφάλεια του οδηγού και των επιβατών, καθώς επίσης και για τον περιορισμό της ολοένα αυξανόμενης μόλυνσης του περιβάλλοντος. Γίνεται έτσι επιτακτική η σχεδίαση του πλαισίου και του αμαξώματος με γνώμονα την ασφάλεια.

Η ανάπτυξη της Ιαπωνικής βιομηχανίας στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και ο ανταγωνισμός της με την Ευρωπαϊκή και την Αμερικάνικη επιτάχυναν τις εξελίξεις στο χώρο του αυτοκινήτου. Οι νέες τεχνολογίες, η δημιουργία νέων εργαλειομηχανών και η αυτοματοποίηση της παραγωγής έδωσαν την δυνατότητα για την παραγωγή πολλών και διαφορετικών μοντέλων. Η αυτόματη μετάδοση κινήσεως, τα υδραυλικά φρένα και το υδραυλικό σύστημα διεύθυνσης έγιναν συνηθισμένα συστήματα, ενώ θέρμανση και εξαερισμός περιλαμβάνονταν στον εξοπλισμό ακόμα και των μικρών, φτηνών αυτοκινήτων. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας βελτίωσε το αυτοκίνητο στους τομείς της άνεσης, της ασφαλείας, της οδικής συμπεριφοράς και των επιδόσεων.

Στη δεκαετία του 1980 άρχισε η εφαρμογή και οι συζητήσεις για τα παθητικά συστήματα ασφαλείας. Η χρήση ζωνών ασφαλείας γίνεται υποχρεωτική, εφαρμόζεται ο αερόσακος οδηγού-συνοδηγού, η προένταση των ζωνών ασφαλείας κατά τη σύγκρουση, αντιθαμβωτικό σύστημα πλαϊνών παραθύρων και η εισαγωγή ηλεκτρονικών συστημάτων αποφυγής της ακινητοποίησης των τροχών κατά την πέδηση.

Πιο πρόσφατα, στη δεκαετία του 1990, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην πλευρική προστασία των οχημάτων κατά τη σύγκρουση. Αναπτύχθηκαν συστήματα πλευρικών αερόσακων που φιλοξενούνται στο κάθισμα, το προσκέφαλο ή την οροφή και εισήχθησαν μπάρες ασφαλείας στις θύρες του οχήματος.



1.3 Η σύγχρονη φιλοσοφία σχεδιασμού

Για χρόνια επικρατούσε, λανθασμένα, η αντίληψη πως ένα βαρύτερο και πιο άκαμπτο όχημα προσφέρει μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας στους επιβάτες του. Σήμερα, μέσα από μεγάλα ερευνητικά προγράμματα που έχουν διεξαχθεί, έχει αποδειχθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστική παραμόρφωση του αμαξώματος τόσο μειώνεται το ενδεχόμενο τραυματισμού των επιβαινόντων σε αυτό [Σχήμα 1.2]. Η Saab ήταν μία από τις πρώτες εταιρίες που είχε ασχοληθεί με το συγκεκριμένο ζήτημα και στις αρχές το 1971 είχε παρουσιάσει προφυλακτικές που απορροφούσαν μέρος της ενέργειας πρόσκρουσης και πλευρικές μπάρες προστασίας στις πόρτες.

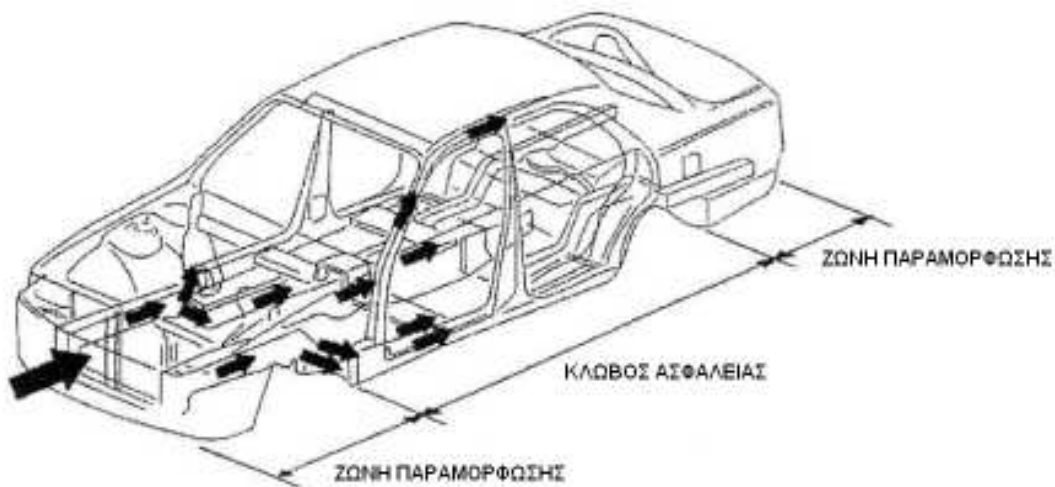


Σχήμα 1.2: Προσομοίωση σύγκρουσης οχήματος κατασκευής 1959 (αριστερά) με όχημα κατασκευής 2009 (δεξιά)



Το ζητούμενο για ένα ασφαλές αυτοκίνητο μετά τη σύγκρουση είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε έργο παραμόρφωσης, με απαραίτητη βέβαια προϋπόθεση ο θάλαμος των επιβατών να παραμείνει άθικτος και οι πόρτες να ανοίγουν ώστε να καθίσταται δυνατή η διαφυγή από το όχημα.

Η φιλοσοφία σχεδιασμού αμαξώματος με τη μέθοδο των δύο ζωνών περιλαμβάνει την δημιουργία ζώνης παραμόρφωσης (εμπρός και οπίσθιας), οι οποίες έχουν ως στόχο να απορροφούν τις δυνάμεις από πιθανή σύγκρουση και να τις "οδηγούν" σε επιλεγμένα μέρη του αμαξώματος, και την ύπαρξη άκαμπτης ζώνης, η οποία σχηματίζει έναν κλωβό ασφαλείας σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης [Σχήμα 1.3]

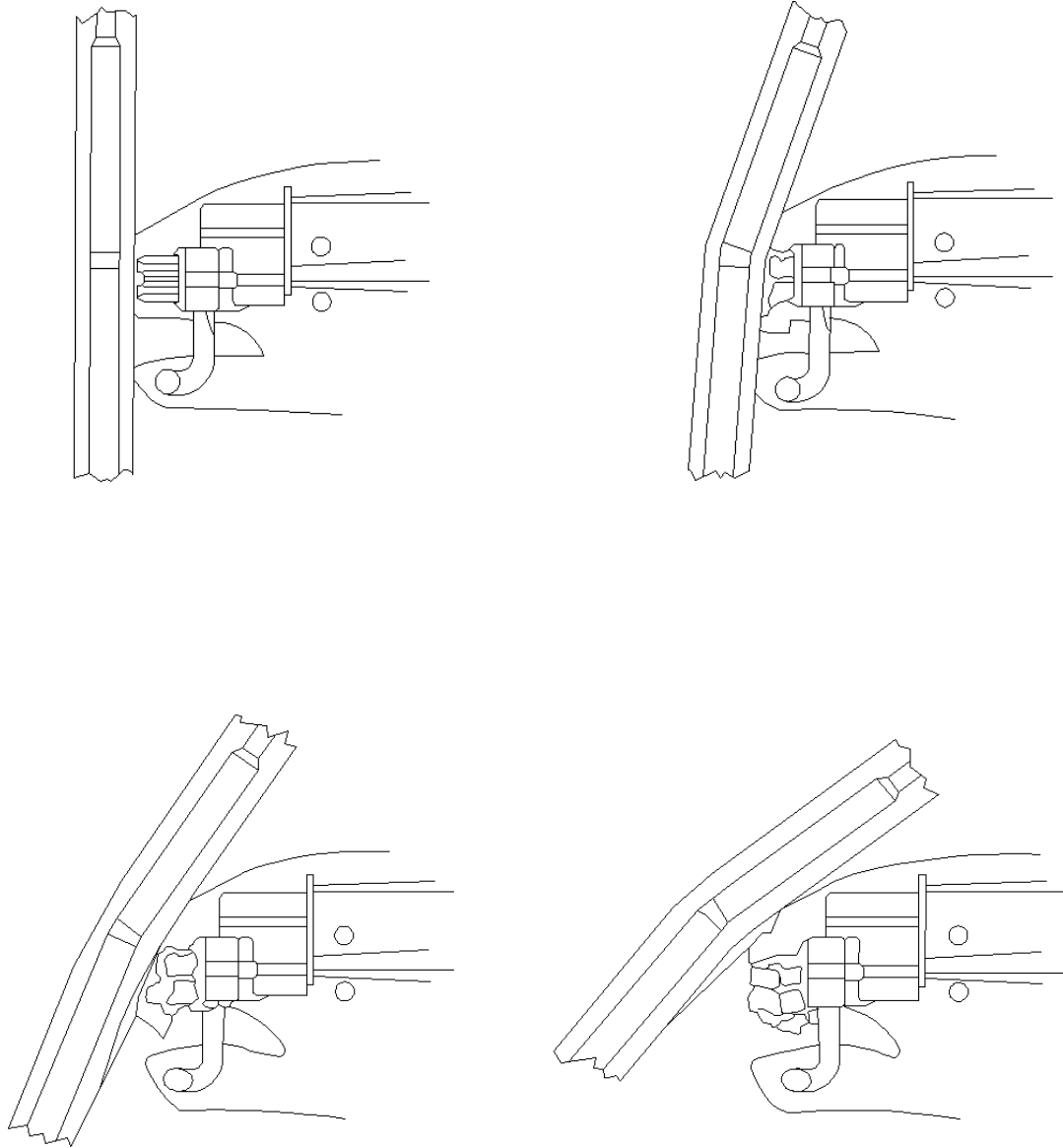


Σχήμα 1.3: Αμάξωμα σχεδιασμένο με τη φιλοσοφία των δύο ζωνών

Υπάρχει, όπως είναι φυσικό ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση του οχήματος, έτσι για να αυξήσουμε το ποσό της ενέργειας που απορροφάται πρέπει να αυξήσουμε το φορτίο του λυγισμού κάνοντας τη δομή στιβαρότερη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με εύστοχα τοποθετημένα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας [Σχήματα 1.4-1.5].



Σχήμα 1.4: Στοιχεία απορρόφησης ενέργειας σε ερασιτεχνικό αγωνιστικό όχημα τύπου kart



Σχήμα 1.5: Συμπεριφορά απορροφητήρα ενέργειας κατά τη μετωπική σύγκρουση του οχήματος



1.4 Στατιστικά στοιχεία ατυχημάτων

Τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν σε όλο τον κόσμο σοβαρότατο πρόβλημα Δημόσιας Υγείας. Στην Ελλάδα, οι θάνατοι από τροχαία ατυχήματα είναι σχεδόν δύο φορές πιο συχνόι από ότι παγκοσμίως. Παρατηρούνται 2.000 θάνατοι, 4.000 βαριά και 30.000 ελαφρά τραυματισμένοι κατά μέσο όρο το χρόνο. Από τους νεκρούς και τους τραυματίες, το 1/3 είναι παιδιά. Το γεγονός αυτό γίνεται ακόμα χειρότερο αν υπολογίσει κανείς ότι, πέρα από τους θανάτους, πολλοί από τους τραυματίες (περίπου 10-12%) μένουν ανάπηροι, και μάλιστα σε μικρή ηλικία.

Τα τροχαία ατυχήματα καταγράφονται ως πρώτη αιτία θανάτου για τα άτομα ηλικίας έως 40 ετών (ακολουθούν τα καρδιαγγειακά προβλήματα και ο καρκίνος). Το 80% νεκρών και τραυματιών από τα τροχαία ατυχήματα ανήκουν στην ηλικιακή ομάδα των 16-44 ετών, με ότι αυτό συνεπάγεται για τις οικογένειες, τη δημογραφική εξέλιξη της χώρας, την κοινωνική συνοχή και την Εθνική Οικονομία.

Το κοινωνικοοικονομικό κόστος των τροχαίων ατυχημάτων, σε ετήσια βάση, υπολογίζεται για την Ελλάδα σε 2.500.000 € (ευρώ) μόνο για την απώλεια ζωής. Ο αριθμός αυτός είναι πλήρως υποεκτιμημένος διότι δεν περιλαμβάνει το κόστος των τραυματιών και του ανθρωπίνου κεφαλαίου (απολεσθέν παραγωγικό έργο, πόνος, οδύνη) καθώς και άλλων παραμέτρων.

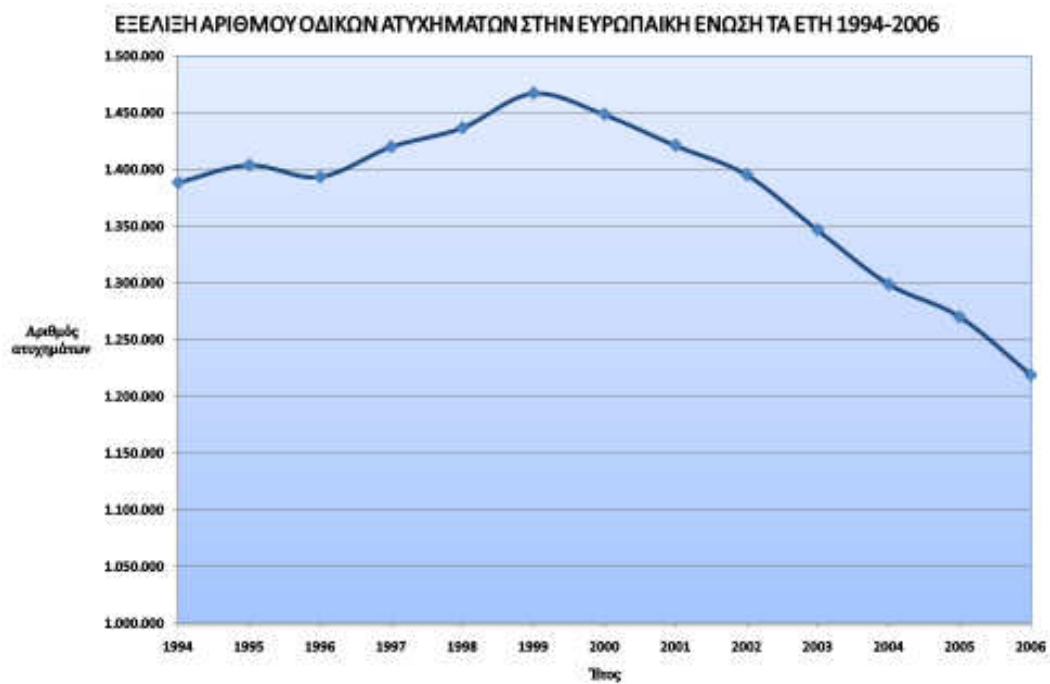
1.4.1 Διεθνή στοιχεία

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε), οι ενέργειες από πλευράς των κατασκευαστών (αύξηση του της ασφαλείας των οχημάτων) και των κυβερνήσεων (κατασκευή νέων αυτοκινητοδρόμων και ενημερωτικές καμπάνιες) είχαν ως αποτέλεσμα την σταδιακή μείωση των σοβαρών ατυχημάτων, τα οποία, όμως, κυμαίνονται ακόμη σε υψηλά επίπεδα [Διάγραμμα 1.1].

Σύμφωνα με τις στατιστικές υπηρεσίες των χωρών, το χρονικό διάστημα μεταξύ των ετών 1994 και 2006 συνολικά 662.538 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους σε οδικά ατυχήματα και περίπου 24.000.000 τραυματίστηκαν, με την πλειονότητα των θυμάτων να είναι άτομα νεαρής και μέσης ηλικίας [Διαγράμματα 1.2-1.3 - Σχήμα 1.6].



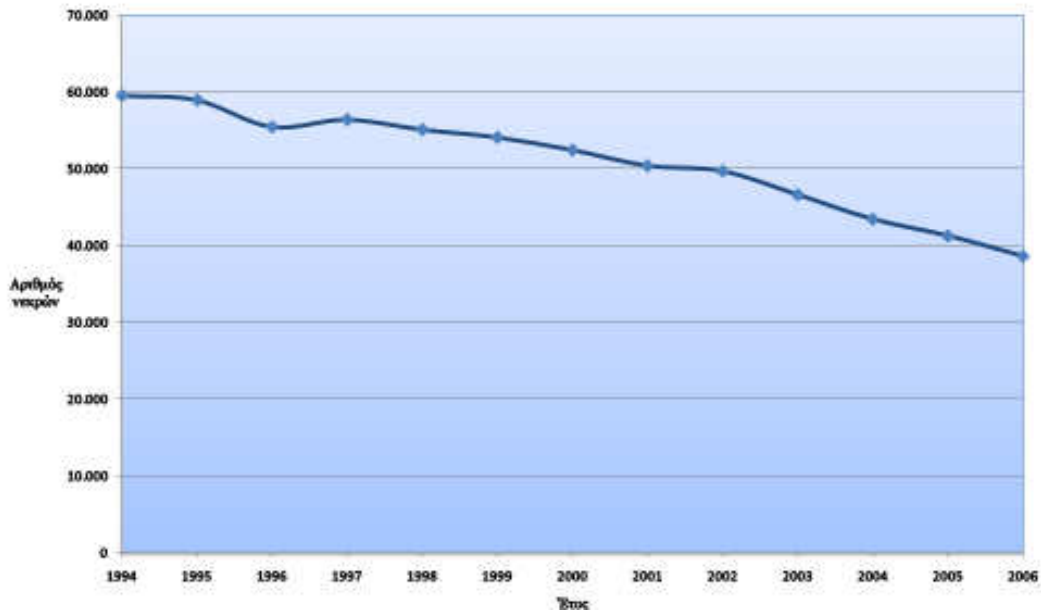
Σχήμα 1.6: Ποσοστό θανάτων ανά ηλικιακή ομάδα στην Ε.Ε. το έτος 2005



Διάγραμμα 1.1

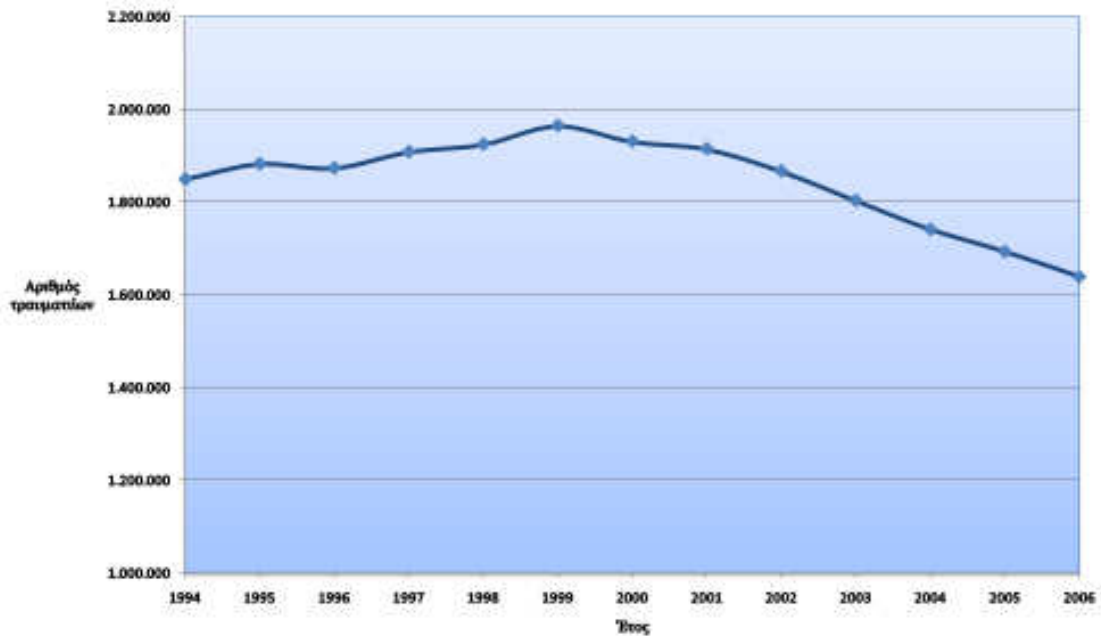


ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΝΕΚΡΩΝ ΣΕ ΟΔΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΤΑ ΕΤΗ 1994-2006



Διάγραμμα 1.2

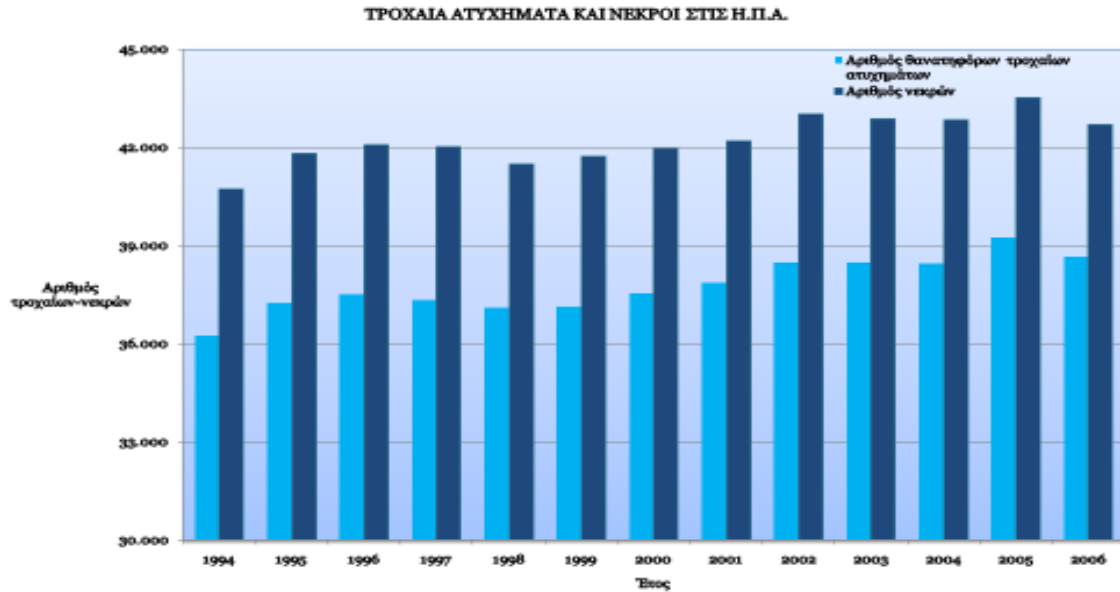
ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΡΑΥΜΑΤΙΩΝ ΣΕ ΟΔΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΤΑ ΕΤΗ 1994-2006



Διάγραμμα 1.3



Τα στατιστικά δεδομένα δείχνουν πως και στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Η.Π.Α.) ο αριθμός των οδικών ατυχημάτων είναι ιδιαίτερα μεγάλος, με πάνω από 6.000.000 συγκρούσεις μέσο όρο κάθε χρόνο. Το 45% αυτών είναι μεταξύ δύο οχημάτων, το οποίο εύλογα μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρούς τραυματισμούς καθώς κατά τη σύγκρουση και τα δύο οχήματα έχουν κινητική ενέργεια, η οποία πρέπει να αποσβεστεί κατά την κατάρρευση των αμαξωμάτων. Αντίθετα με την Ε.Ε., εντύπωση προκαλεί η στασιμότητα που παρουσιάζεται στους αριθμούς των θανατηφόρων τροχαίων ατυχημάτων και των θυμάτων σε αυτά [Διάγραμμα 1.4].



Διάγραμμα 1.4

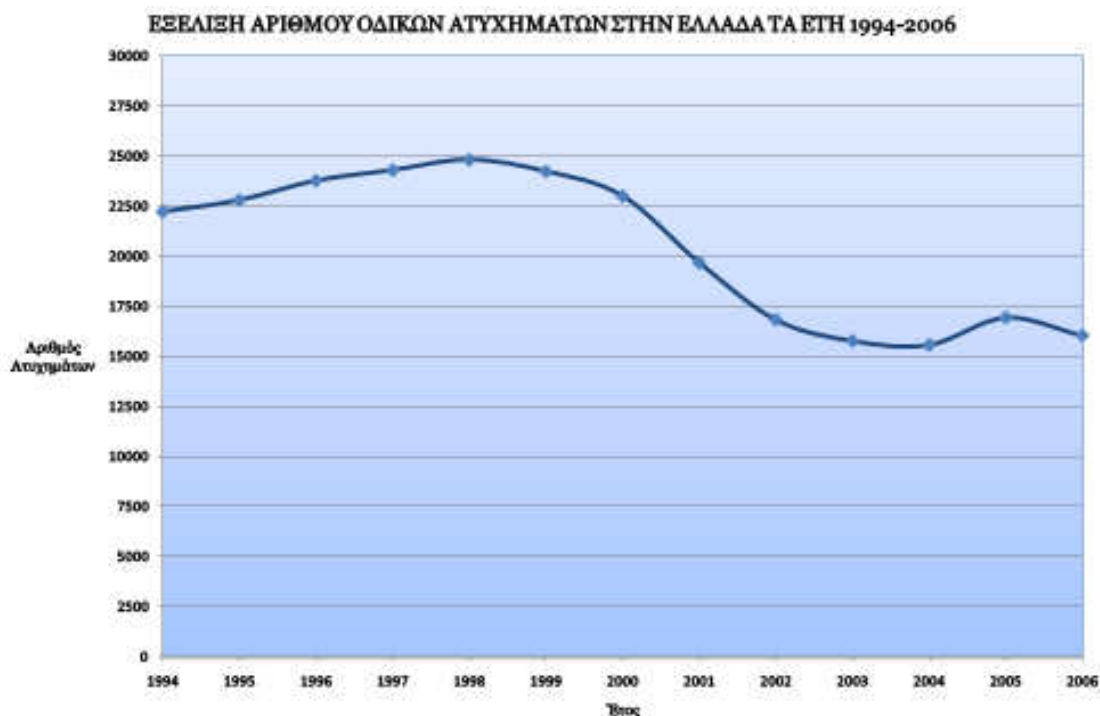


1.4.2 Τα τροχαία ατυχήματα στην Ελλάδα

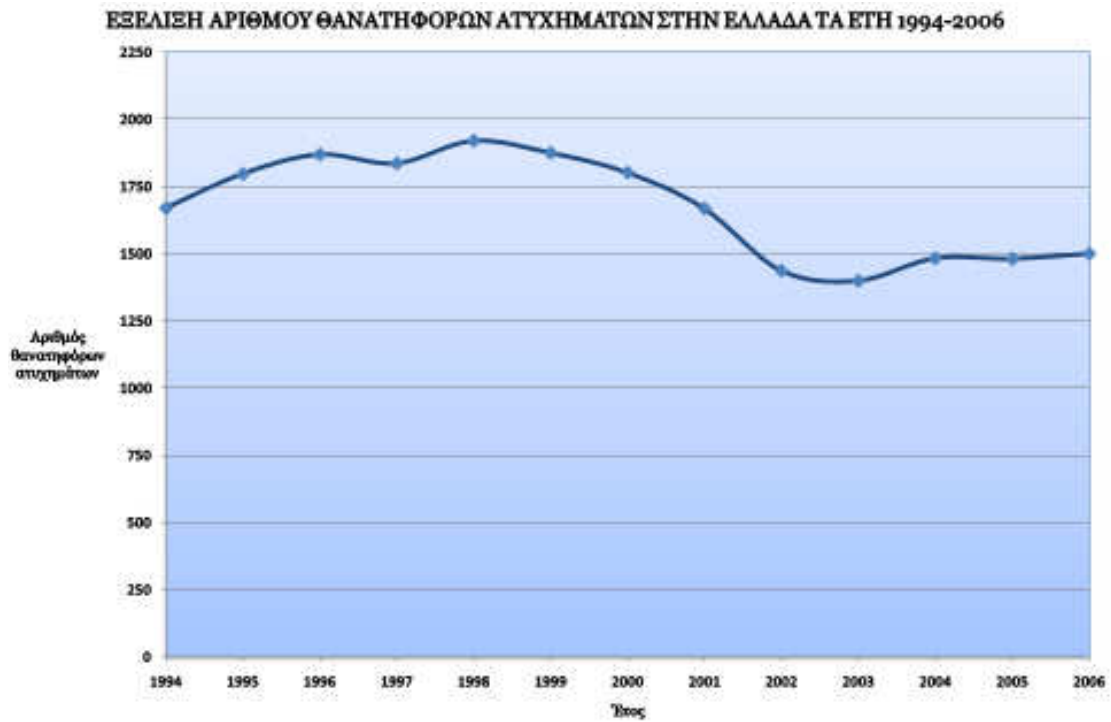
Τα τελευταία χρόνια το επίπεδο της οδικής ασφάλειας στην Ελλάδα παρουσιάζει βελτίωση και οι απόλυτοι αριθμοί ατυχημάτων και νεκρών σημειώνουν μείωση. Εξάιρεση αποτελεί ο αριθμός των νεκρών κατά το έτος 2004, που σημείωσε μικρή αύξηση σε σχέση με το έτος 2003. Κάθε χρόνο χάνονται σε οδικά ατυχήματα στην χώρα μας 2.000 ζωές οδηγών, επιβατών και πεζών και να τραυματίζονται άλλα 20.000 άτομα [Πίνακας 1.2 - Διαγράμματα 1.5-1.6-1.7]. Σε αυτά θα πρέπει να προστεθούν και περίπου 80.000 ατυχήματα με υλικές ζημιές.

ΕΤΟΣ	ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ		ΠΑΘΟΝΤΕΣ			
	ΘΑΝΑΤΗΦΟΡΑ	ΣΥΝΟΛΟ	ΕΛΑΦΡΑ ΤΡΑΥΜΑΤΙΕΣ	ΒΑΡΙΑ ΤΡΑΥΜΑΤΙΕΣ	ΝΕΚΡΟΙ	ΣΥΝΟΛΟ
1994	1.671	22.222	26.925	3.372	1.909	32.206
1995	1.798	22.798	27.705	3.475	2.043	33.223
1996	1.870	23.775	29.428	3.327	2.157	34.912
1997	1.837	24.295	29.176	4.288	2.105	35.569
1998	1.921	24.819	29.001	4.720	2.182	35.903
1999	1.876	24.231	28.148	4.558	2.116	34.822
2000	1.803	23.001	26.563	4.200	2.037	32.800
2001	1.669	19.671	23.098	3.238	1.880	28.216
2002	1.438	16.809	19.851	2.608	1.634	24.093
2003	1.400	15.751	18.389	2.348	1.605	22.342
2004	1.484	15.547	17.784	2.395	1.670	21.849
2005	1.482	16.914	19.778	2.270	1.658	23.706
2006	1.501	16.019	18.654	2.021	1.657	22.332

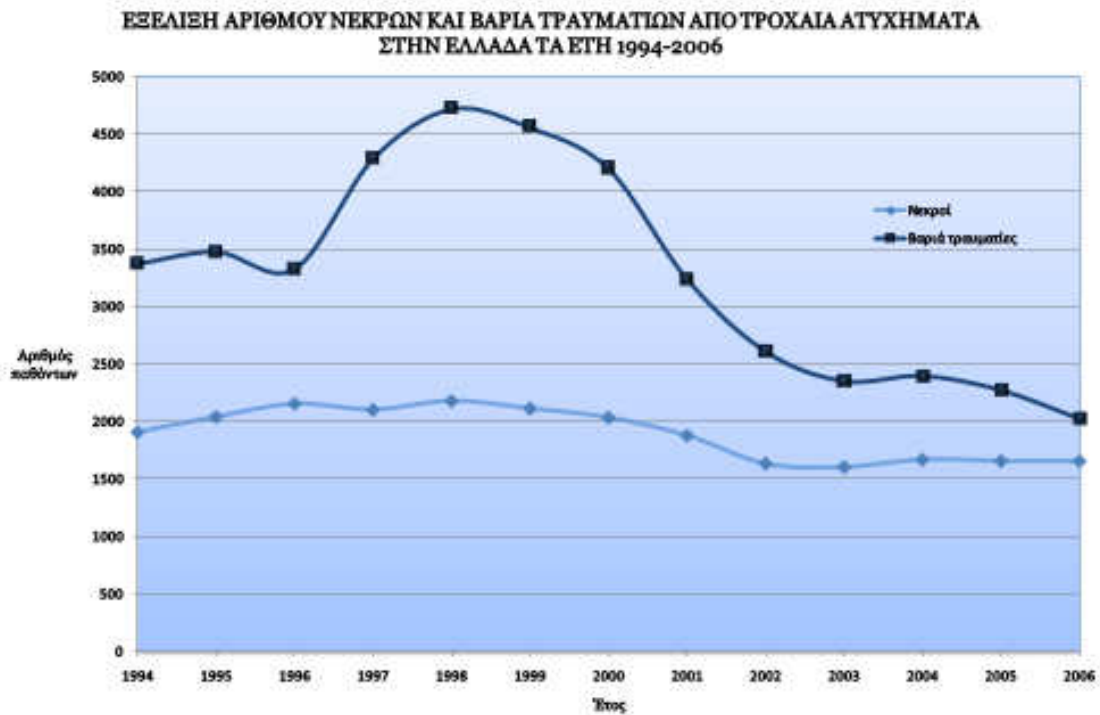
Πίνακας 1.2: Αριθμοί ατυχημάτων και θυμάτων τα έτη 1994-2006



Διάγραμμα 1.5



Διάγραμμα 1.6



Διάγραμμα 1.7



1.4.3 Αεροπορικά ατυχήματα

Τα αεροπορικά δυστυχήματα είναι σαφώς σπανιότερα από τα οδικά, όμως λόγω των μαζικών απωλειών που προκαλούν πρέπει να λαμβάνονται όλες οι δυνατές προφυλάξεις για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ατυχήματος.

Από το 1945 μέχρι σήμερα, έχουν σκοτωθεί 75.094 επιβάτες παγκοσμίως, ενώ άλλοι 1.313 έχασαν τη ζωή τους από την πρόσκρουση του αεροπλάνου στο έδαφος [Πίνακας 1.3]. Οι αριθμοί αυτοί αναφέρονται σε περιπτώσεις όπου υπήρξε αστοχία ή διάλυση της ατράκτου του αεροσκάφους και όχι σε αυτές που οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες.

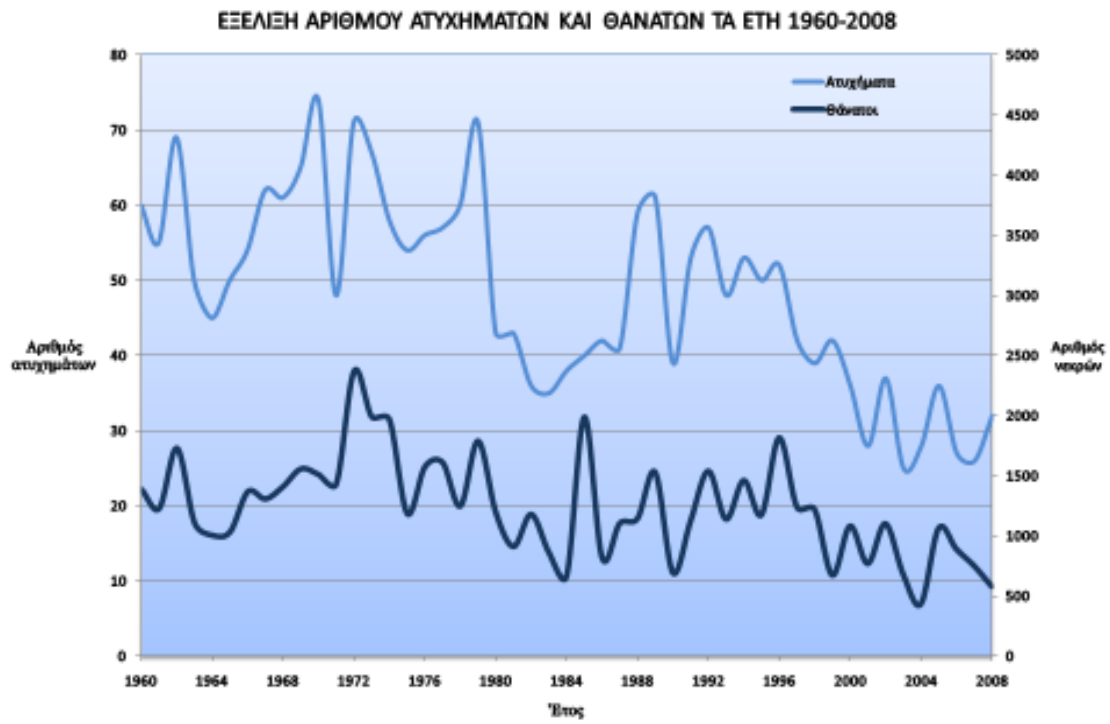
#	ΗΠΕΙΡΟΣ	ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	ΝΕΚΡΟΙ ΕΠΙΒΑΤΕΣ	ΝΕΚΡΟΙ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ
1	Αμερική	1.581	25.241	623
2	Ευρώπη	807	21.240	185
3	Ασία	659	17.552	320
4	Αφρική	348	7.287	184
5	Αυστραλία	108	1.325	1
6	Διεθνή ύδατα	68	2.378	0
7	Βόρειος και Νότιος Πόλος	42	71	0
-	ΣΥΝΟΛΟ:	3.613	75.094	1.313

Πίνακας 1.3: Αριθμοί ατυχημάτων και θυμάτων τα έτη 1945-2008 ανά ήπειρο

Η ασφάλεια των αερομεταφορών έχει διαγράψει μακρά πορεία σε πάνω από εκατό χρόνια εφαρμογής. Μεταξύ του 1960 και του 1980, όταν και εντατικοποιήθηκε η χρήση των αεροπλάνων ως μέσων μαζικής μεταφοράς, κατεγράφησαν πολυάριθμα και πολύνεκρα δυστυχήματα. Η χρονιά με τους περισσότερους θανάτους ήταν το 1972, με 2.374 νεκρούς, ενώ το 2004 αυτή με το χαμηλότερο αριθμό θανάτων από το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με 431 θανάτους.

Στη σύγχρονη εποχή, δύο μεγάλοι κατασκευαστές εξακολουθούν να παράγουν βαριά επιβατικά αεροσκάφη για την αγορά, η Boeing των Η.Π.Α. και η ευρωπαϊκή εταιρεία Airbus, δίνοντας τεράστια έμφαση στη χρήση του εξοπλισμού ασφαλείας των αεροσκαφών τους, καταφέροντας με αυτόν τον τρόπο να μειώσουν δραματικά τον αριθμό τόσο των περιστατικών όσο και των θυμάτων [Διάγραμμα 1.8]

Σημαντικότερη είναι και η μείωση που παρατηρείται και στα ποσοστά θανατηφόρων ατυχημάτων ανά μίλια απόστασης που διανύονται. Ενδεικτικά, το 1929, χρονιά κατά την οποία κατεγράφησαν 61 νεκροί, είναι η χειρότερη σε ποσοστό ατυχημάτων έχοντας 1 : 1.000.000 μίλια. Αυτό θα ισοδυναμούσε με 7.000 θανατηφόρα περιστατικά ανά έτος σήμερα, που το ποσοστό θανατηφόρων περιστατικών κυμαίνεται περίπου στο 1 : 2.000.000.000 μίλια πτήσης.



Διάγραμμα 1.8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

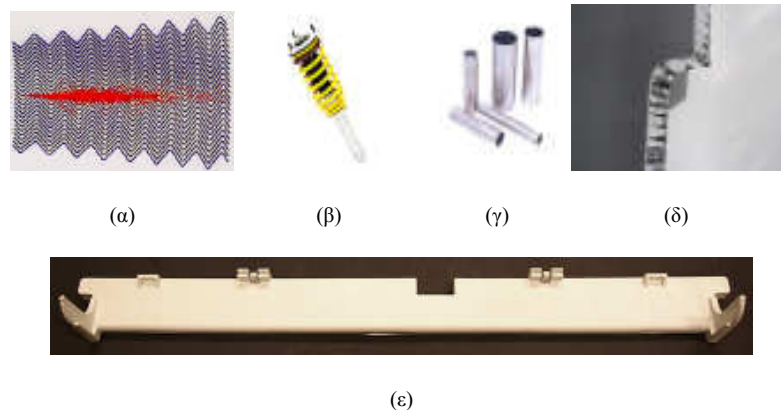


2.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας δίδεται μεγάλη προσοχή στον ασφαλή σχεδιασμό των κατασκευαστικών στοιχείων και συστημάτων των οχημάτων, με στόχο την ελαχιστοποίηση του ανθρώπινου πόνου καθώς και της οικονομικής επιβάρυνσης για την κοινωνία. Φαίνεται να υπάρχει σύμπνοια ότι πολλά μπορούν να γίνουν για να μειωθούν οι πιθανές επιπτώσεις επικίνδυνων ατυχημάτων.

Η κλίμακα της πρόσκρουσης ενός αυτοκίνητου, ενός αεροπλάνου ή ενός πλοίου διαφέρει από αυτές που υπάρχουν στη φύση, όπως σε σεισμούς ή σε κατολισθήσεις, απαιτούν, έτσι, διαφορετική αντιμετώπιση.

Είναι άξιο παρατήρησης ότι μέλη με λεπτά τοιχώματα όπως πλέγματα, κοχλίες, σωλήνες, πάνελ σάντουιτς και ενισχυτές [Σχήμα 2.1] που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις ατράκτους αεροσκαφών και στα πλοία χαρακτηρίζονται όλα από παρόμοιες αναλογίες πάχους-πλάτους.



Σχήμα 2.1: α) πλέγμα β) κοχλίας γ) σωλήνας δ) πάνελ σάντουιτς ε) ενισχυτής

Η σύγκρουση στα μεταφορικά οχήματα είναι ένα ατυχές αλλά συνηθισμένο περιστατικό. Καθίσταται προφανές ότι, στο μέλλον, οι δομές τους θα πρέπει να είναι σχεδιασμένες για να αντέχουν συντριβές. Η τρέχουσα τάση είναι η παραγωγή ελαφρύτερων δομών και θέτει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πολλές κρίσιμες πτυχές του σχεδιασμού όπως τη μείωση του βάρους και την επιλογή των κατάλληλων υλικών με επιθυμητές ιδιότητες όπως κράματα και σύνθετα υλικά.



2.2 Αποσβεστήρες ενέργειας

Κατά το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα, ερευνήθηκε ένας μεγάλος αριθμός περιπτώσεων σύγκρουσης, ιδίως στον τομέα της δυναμικής απόκρισης των δομών στην πλαστική περιοχή. Αυτό συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση των τρόπων αστοχίας και των μοτίβων διάχυσης της ενέργειας κατά την πρόσκρουση. Οι πληροφορίες αυτές είναι σημαντικές, προκειμένου να καταστεί ικανή η οικοδόμηση ασφαλέστερων δομών καθώς επίσης και κατά την αξιολόγηση και βελτίωση των υφιστάμενων, με στόχο τον περιορισμό των απωλειών σε ανθρώπινους και υλικούς πόρους. Η εφαρμογή του εν λόγω τομέα της μηχανικής είναι τώρα διαθέσιμη για χρήση σε μια ευρεία ποικιλία περιπτώσεων όπως η καλύτερη αντίσταση στις συγκρούσεις οχημάτων (αυτοκίνητα, ανελκυστήρες, αεροσκάφη, πλοία κ.α.), στο σχεδιασμό μπαρών ασφαλείας, στην ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων, στις οδογέφυρες, τις θαλάσσιες εξέδρες και τα δεξαμενόπλοια πετρελαίου [Σχήμα 2.2].



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

Σχήμα 2.2 : α) σύγκρουση αεροπλάνου β) σύγκρουση αυτοκινήτου γ) μπάρες ασφαλείας δ) πυρηνικός αντιδραστήρας ε) γέφυρα στ) δεξαμενόπλοιο

2.3 Ορισμοί

Απορροφητήρας ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει, εν όλω ή εν μέρει, κινητική ενέργεια σε άλλη μορφή ενέργειας. Η μετατρεπόμενη ενέργεια είτε είναι αναστρέψιμη, όπως η πίεση συμπιεστού υγρού ή η ενέργεια ελαστικής παραμορφώσεως σε στερεό, ή αμετάκλητη, όπως στην πλαστική παραμόρφωση.

Κατά το σχεδιασμό ενός καταρρεύσιμου απορροφητήρα, στοχεύουμε στην απορρόφηση της πλειοψηφίας της κινητικής ενέργειας από το στοιχείο με αμετάκλητο τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι οι ανθρώπινοι τραυματισμοί καθώς και οι βλάβες του εξοπλισμού θα ελαχιστοποιηθούν. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται, μεταξύ άλλων παραγόντων, από το μέγεθος και τη μέθοδο εφαρμογής των φορτίων, τα ποσοστά μετάδοσης, και τις ιδιότητες των υλικών.

Στα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας περιλαμβάνονται διάφορες δομές, όπως μεταλλικά τύμπανα, σωλήνες κυκλικής διατομής, τετραγωνικοί και κυματοειδείς σωλήνες πολυγωνικές και κωνικές στήλες, κομβοελάσματα, πάνελ σάντουιτς και διαμορφώσεις top και double hat σε πολλές παραλλαγές της γεωμετρίας τους.

Για την ενίσχυση αυτών των στοιχείων χρησιμοποιείται πλήρωση με υγρά, ροκανίδια, άμμο και αφροί πολυμερών ή μετάλλων.



Κάθε σύστημα έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες που επιβάλλει την ξεχωριστή μελέτη της απόκρισης του σε κρουστικά φορτία. Λόγω της υπερβολικής πολυπλοκότητας των μηχανισμών κατάρρευσης, ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά απόδοσης προσδιορίστηκαν μόνο μέσω πειραματικών διαδικασιών. Κατά συνέπεια, οι σχέσεις που προκύπτουν εμπειρικά περιορίζονται σε ορισμένες μόνο εφαρμογές.

Η μελέτη της παραμόρφωσης των απορροφητήρων εστιάζει στις γεωμετρικές αλλαγές και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τρόπων παραμόρφωσης όπως το ακορντεόν (αξονοσυμμετρική) και το διαμάντι (μη-αξονοσυμμετρική) [Σχήμα 2.3], για αξονικά φορτισμένους σωλήνες καθώς και στο ποσοστό παραμόρφωσης.



(α)

(β)

Σχήμα 2.3: α) αξονοσυμμετρική κατάρρευση β) μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση

2.4 Βασικά σχήματα στοιχείων απορρόφησης ενέργειας

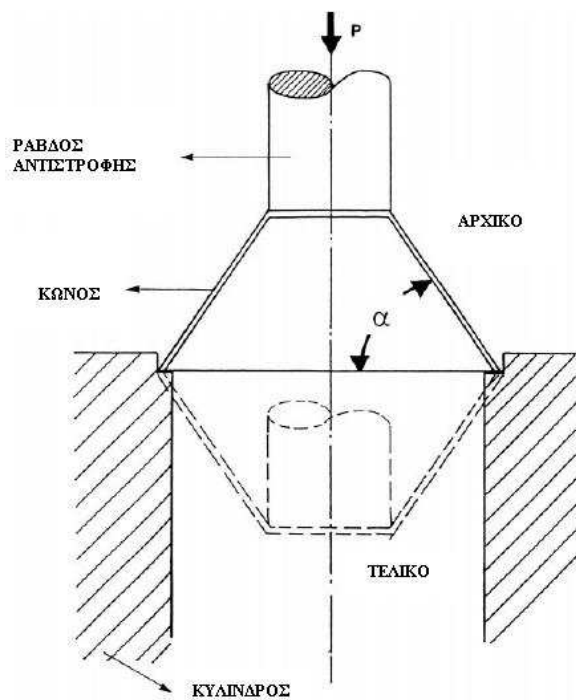
2.4.1 Κώνοι

Έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η εμφάνιση κώνων ως δομικά έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυρίως λόγω της σταθερής συμπεριφοράς όταν συνθλίβονται αξονικά. Η μέση δύναμη σύνθλιψης υπολογίζεται:

$$P_m = 6 \cdot Y \cdot t^{3/2} \cdot \sqrt{d + 2 \cdot x \cdot \sin(\varphi)} + 5,69 \cdot Y \cdot t^2 \cdot \tan(\varphi)$$

όπου Y είναι η τάση διαρροής, t είναι το πάχος, x είναι η παραμόρφωση, d είναι η μικρή διάμετρος και φ είναι η γωνία ημικορυφής [Σχήμα 2.4].

Παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες στο διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης του κώνου είναι πιο ομαλές από εκείνες των κυλίνδρων. Επίσης, το φορτίο μετά το λυγισμό αυξάνει με παραβολικό τρόπο με την αύξηση του πάχους τοιχώματος και, μειώνεται με αύξηση της γωνίας ημικορυφής. Λεπτός κώνος τείνει να παραμορφωθεί σε σχήμα ρόμβου ενώ παχύτερος σε αξονοσυμμετρικά δαχτυλίδια.



Σχήμα 2.4 : Κωνικός απορροφητήρας ενέργειας

2.4.2 Σωλήνες

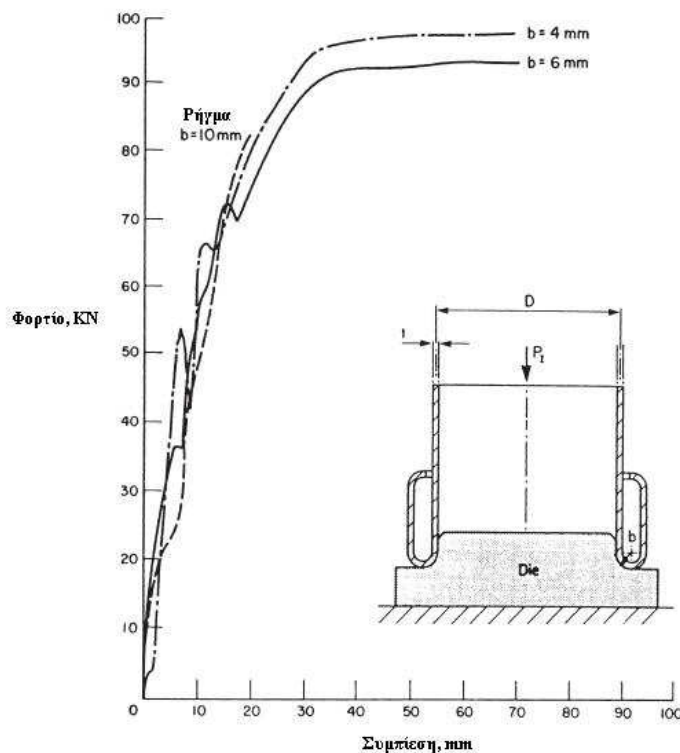
Οι σωλήνες λεπτών τοιχωμάτων αντιπροσωπεύουν την πιο διαδεδομένη μορφή καταρρεύσιμου απορροφητήρα λόγω της υψηλής συχνότητας εμφάνισης τους ως δομικά στοιχεία.

Ένα κλασικό πρόβλημα της μηχανικής είναι ο υπολογισμός του λυγισμού σε ένα κυκλικό κυλινδρικό κέλυφος. Από την άποψη της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας υπό αξονική συμπίεση παρέχει από τις καλύτερες επιδόσεις. Παρέχει μια αρκετά σταθερή δύναμη λειτουργίας η οποία είναι, σε ορισμένες εφαρμογές, το πρωταρχικά επιθυμητό χαρακτηριστικό. Περαιτέρω, έχει υψηλή ικανότητα απορρόφησης ανά μήκος και ανά μονάδα μάζας συγκριτικά με άλλες γεωμετρίες. Σε σύγκριση με την πλευρική συμπίεση, η αξονική έχει ικανότητα απορρόφησης που είναι περίπου 10 φορές μεγαλύτερη. Επιπλέον, ένας σωλήνας σε αξονική φόρτιση μπορεί να εξασφαλίσει ότι όλα τα υλικά που τον αποτελούν συμμετέχουν στην μετατροπή της ενέργειας σε πλαστικού έργο.

Η μέση δύναμη σύνθλιψης υπολογίζεται:

$$P_m = 6 \cdot Y \cdot t \cdot (Dt)^{1/2}$$

όπου D είναι η μέση διάμετρος σωλήνα, t είναι το πάχος του σωλήνα και Y είναι η τάση διαρροής [Σχήμα 2.5].



Σχήμα 2.5: Σωληνοειδής απορροφητήρας



2.4.3 Top και double hat

Κατά την αξονική καταπόνηση, οι διαμορφώσεις top hat και double hat συμπεριφέρονται με τρόπο παρόμοιο με τετραγωνικούς και ορθογώνιους σωλήνες.

Η δομική αποτελεσματικότητα, n , συνδέεται με την διαρθρωτική πυκνότητα φ με την εμπειρική σχέση:

$$n = 0.57\varphi^{0.63}$$

Η μέση δύναμη σύνθλιψης υπολογίζεται:

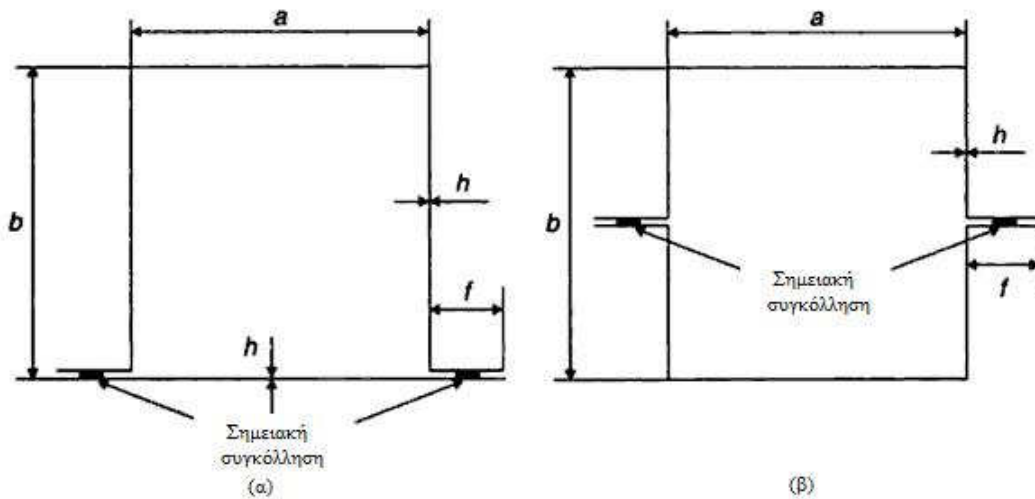
Για top hat έχουμε:

$$P_m = 35.55 \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^{0.29} \cdot M_{\alpha}$$

Για double hat:

$$P_m = 58.15 \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^{0.29} \cdot M_{\alpha}$$

Με $L=2a+2b+4f$ [Σχήμα 2.6] και $M_{\alpha}=\sigma_u t^2/4$

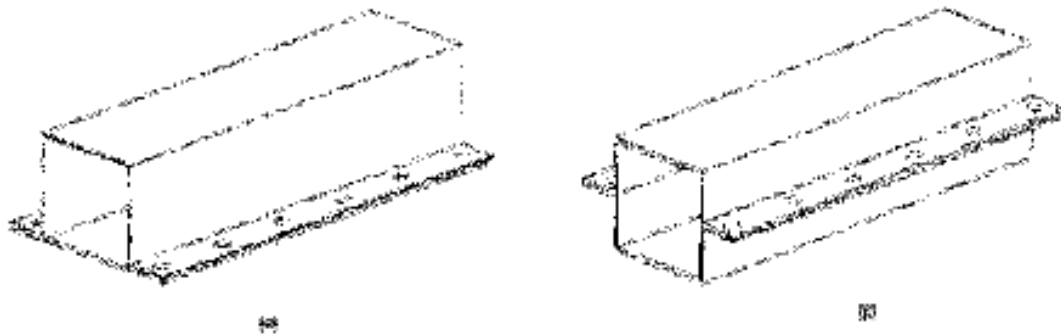


Σχήμα 2.6: α) top hat β) double hat



2.5 Hat sections ενισχυμένες εσωτερικά με αφρό

Οι δομές hat sections [Σχήμα 2.7] χρησιμοποιούνται συχνά ως στοιχεία απορρόφησης ενέργειας στα αυτοκίνητα καθώς οι σχεδιαστές τους επιδιώκουν να βελτιώσουν την ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης χωρίς να αυξηθεί κατά πολύ το βάρος του οχήματος.



Σχήμα 2.7: (α) single (top) hat section (β) double hat section ορθογωνικής διατομής

Η εύστοχη τοποθέτησή τους είναι ιδιαίτερης σημασίας. Η διαδικασία αυτή δεν είναι πάντα εύκολη καθώς υπάρχουν περιορισμοί για την εξωτερική μορφή του οχήματος και για τον χώρο που καταλαμβάνουν άλλα συστήματα, όπως για παράδειγμα ο κινητήρας. Επιπλέον, γεωμετρικές ατέλειες και άκαμπτη φύση θα οδηγούσαν σε λυγισμό και όχι σε αξονική καταπόνηση, με συνέπεια τη μείωση του ποσού της ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί άρα και μείωση της αποδοτικότητας του στοιχείου.

Ένα, επίσης, βασικότατο πρόβλημα είναι η μεταβαλλόμενη (μη σταθερή) συμπεριφορά των μεταλλικών μερών κατά την κατάρρευσή τους λόγω της σύγκρουσης. Τα συνήθη μεταλλικά προφίλ έχουν σημαντική αντοχή στη συμπίεση, αλλά από τη στιγμή της έναρξης της κατάρρευσης και έπειτα, απορροφούν πολύ μικρά ποσά ενέργειας. Τα πολύ ενισχυμένα μεταλλικά προφίλ δεν μπορούν να απορροφήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας στις μικρής και μέσης σφοδρότητας συγκρούσεις, όπου και ουσιαστικά δεν παραμορφώνονται, ενώ τα πολύ αδύναμα μεταλλικά προφίλ επιτρέπουν την διάλυση της ζώνης παραμόρφωσης του οχήματος όταν η σύγκρουση είναι λίγο περισσότερο σφοδρή από το ιδανικό.

Οι αφροί έχουν την ιδιότητα να παραμορφώνονται σταθερά απαιτώντας κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης πολύ μεγάλες πιέσεις. Την ίδια στιγμή το βάρος τους είναι ελάχιστο, μπορούν να δημιουργηθούν πολύ εύκολα και με οποιαδήποτε μορφή ενώ ανάλογα με το πορώδες και τη σύσταση τους μεταβάλλεται και η απαιτούμενη πίεση συμπίεσης.



Σύμφωνα με τα παραπάνω, η χρήση των αφρών ως υλικό πλήρωσης μεταλλικού κελύφους (δημιουργία σύνθετου υλικού τύπου sandwich) θα έδινε τη δυνατότητα στους απορροφητές να καταρρέουν απολύτως προβλέψιμα, να καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο όγκο, να έχουν ελάχιστο βάρος και πολύ μικρό κόστος. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτή η δημιουργία ζωνών παραμόρφωσης που θα ανταποκρίνονται σε διάφορα επίπεδα δυνάμεων σύγκρουσης.

2.5.1 Υλικά Sandwich

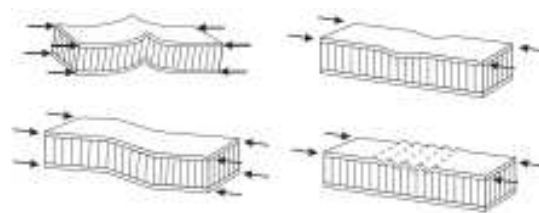
Υλικά Sandwich (Sandwich structured composite) ονομάζονται όσα υλικά ανήκουν στην ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών που κατασκευάζονται με την ένωση δύο δύσκαμπτων λεπτών πλακών με ένα παχύ ελαφρύ πυρήνα. δίνοντας την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι ιδιότητες του κάθε συστατικού ξεχωριστά, με αποτέλεσμα μέγιστα κατασκευαστικά και μηχανικά πλεονεκτήματα.

Η αποδοτικότητα των υλικών καθορίζεται από την ικανότητα μιας δομής να αντέχει φορτία με ελάχιστο βάρος. Αν το γεωμετρικό σχήμα, η φόρτιση και ο τύπος στήριξης δεν αλλάξουν (π.χ. ο συντελεστής των δυναμικών τάσεων είναι σταθερός) η αποδοτικότητα όλης της δομής εξαρτάται μόνο από την αποδοτικότητα των υλικών.

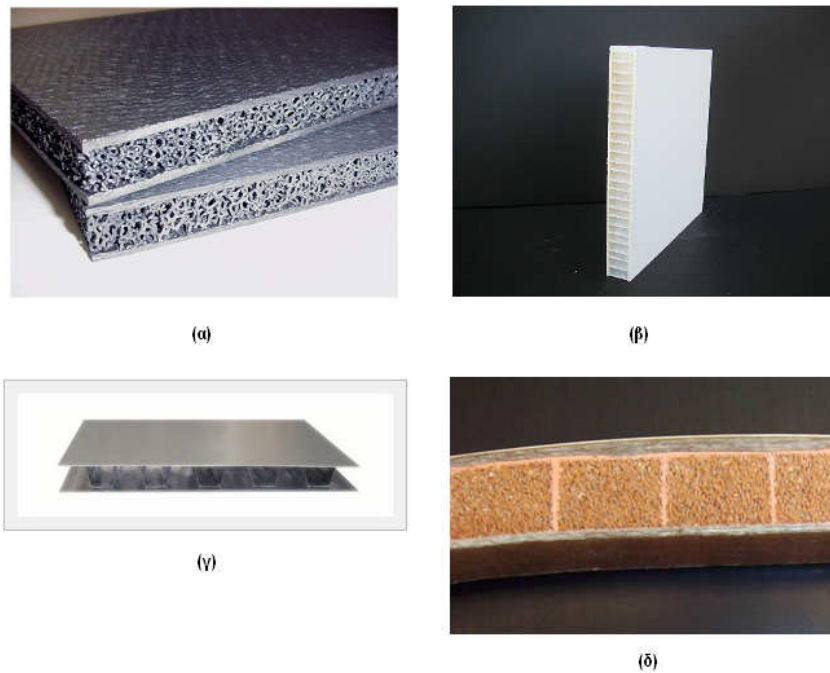
Σχεδόν οποιοδήποτε από τα γνωστά υλικά που διατίθεται σε μορφή λεπτού φύλλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις εξωτερικές επιφάνειες (περίβλημα) ενός σύνθετου υλικού. Οι ιδιότητες πρωταρχικού ενδιαφέροντος που πρέπει να πληρούν οι εξωτερικές επιφάνειες, ανάλογα με την χρήση, είναι:

- Υψηλός βαθμός σκληρότητας που δίνει μεγάλη αντοχή στην κάμψη
- Υψηλή αντίσταση στον εφελκυσμό και αντοχή στην συμπίεση
- Αντοχή σε κρούση
- Επιφανειακό φινίρισμα
- Αντοχή στις περιβαλλοντικές συνθήκες
- Αντίσταση στην φθορά

Το υλικό του πυρήνα πρέπει να επιλέγεται με κριτήριο την ανθεκτικότητα σε εγκάρσια φορτία και το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση να είναι αρκετά υψηλό, ώστε να είναι δύσκολο να υποστεί διάτμηση, καθώς λάθος επιλογή μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρες αστοχίες [Σχήμα 2.8]. Οι συνηθέστεροι τύποι είναι: αφρώδης, κυψελωτός, «ζαρωμένος» και πυρήνας ιστού [Σχήμα 2.9].



Σχήμα 2.8: Μη επιθυμητές παραμορφώσεις εξ αιτίας κακής επιλογής υλικού πυρήνα σε αξονική καταπόνηση



Σχήμα 2.9: (α) αφρώδης, (β) κυψελωτός, (γ) ζαρωμένος και (δ) πυρήνας ιστού

Σε κάθε περίπτωση, η αξονική και καμπτική φόρτιση φέρεται από το περίβλημα ενώ ο πυρήνας αντιστέκεται στα εγκάρσια διατμητικά φορτία και κρατά τα πρόσωπα στις θέσεις τους.

Η σχετικά πρόσφατη ανάπτυξη υψηλής ποιότητας και πυκνότητας κυψελοειδών αφρών όπως επίσης και το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους έχουν σημαντική επίδραση στην αντίληψη κατασκευής και χρήσης των σύνθετων υλικών. Από τους πιο διαδεδομένους είναι οι αφροί πολυουρεθάνης, πολυϊσοκυανουράνης, και πολυστυρόλιου [Σχήμα 2.10].

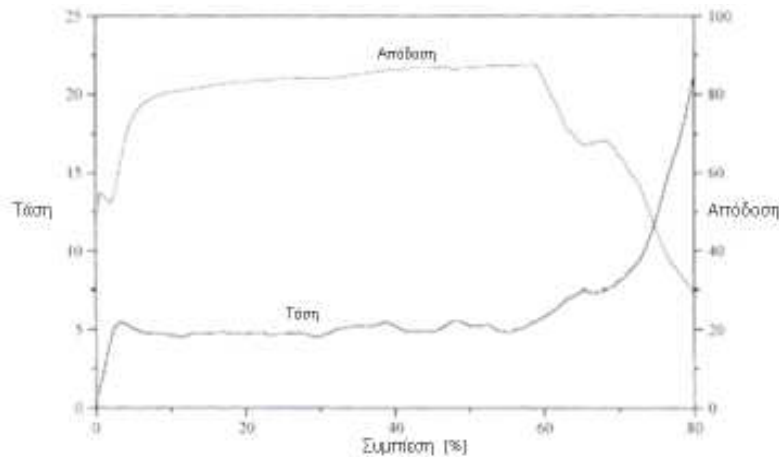


Σχήμα 2.10: Διάφοροι τύποι δοκιμίων με πυρήνα αφρού



2.5.2 Παραμόρφωση αφρώδους πυρήνα

Η γενική συμπεριφορά όλων των αφρών στη συμπίεση [Σχήμα 2.11] είναι παρόμοια για όλα τα υλικά και τις τιμές πορώδους.



Σχήμα 2.11: Συμπίεση αφρού

Τη χρονική στιγμή όπου ξεκινά η εφαρμογή της δύναμης συμπίεσης η παραμόρφωση του αφρού είναι σχεδόν μηδενική έως τη στιγμή που αρχίζει η σταδιακή κατάρρευση του αφρού. Όταν ο αφρός παραμορφωθεί κατά 5% απαιτείται η μέγιστη δύναμη συμπίεσης ενώ από το 5% έως και το 60% περίπου της παραμόρφωσης, η απαιτούμενη δύναμη συμπίεσης είναι λίγο μικρότερη της μέγιστης δύναμης και παραμένει ουσιαστικά σταθερή. Όταν η συμπίεση φτάσει στο 60%, η αρχική μάζα έχει περιοριστεί στο 40% του αρχικού της όγκου, αφού ένα ποσοστό της τάξεως του 60% των φυσαλίδων έχει καταρρεύσει.

Συνεπώς η πυκνότητα πλέον είναι αρκετά μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγαλύτερες δυνάμεις για τη συμπίεση του αφρού. Επιπλέον, όσο προχωρά η συμπίεση και αυξάνεται η πυκνότητα, τόσο περισσότερο ο αφρός αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν συμπαγές υλικό απορροφώντας λιγότερη ενέργεια.

Ως απόδοση του αφρού ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που απορρόφησε ο αφρός προς την ενέργεια που θα απορροφούσε ένας ιδανικός θεωρητικός αποσβεστήρας και δίδεται από τη σχέση:

$$n = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{max}(s) \cdot s}$$

όπου με s συμβολίζεται η παραμόρφωση και $F_{max}(s)$ είναι μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται.



2.6 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς συστημάτων απορρόφησης ενέργειας έχει πρωτεύουσα σημασία. Ο πρωταρχικός μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για 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. Βάσει αυτού, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μια τετραγωνική επιφάνεια.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη 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.

Από τα βασικότερα κριτήρια που έχουν αναπτυχθεί είναι:

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

$$W = \int P ds$$

- Μέσο μετα-ελαστικό φορτίο, \bar{P} , το οποίο δίδεται από τη σχέση:

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

- Ειδική ενέργεια απορρόφησης, W_s , (Specific Energy), η οποία προκύπτει από τη σχέση:

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

όπου m_c η μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει.

- Ομοιομορφία φορτίου (Load Uniformity), η οποία υπολογίζεται:

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

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

- Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας (Energy Dissipation Density), E_v , η οποία είναι:

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

όπου V , ο όγκος του υλικού που καταστράφηκε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ



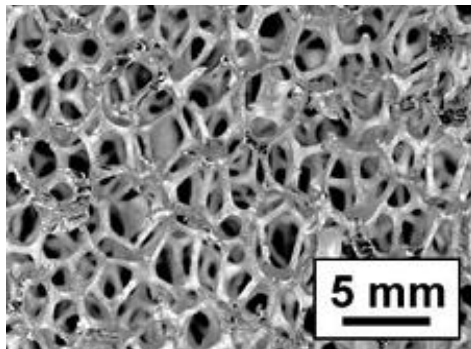
3.1 Ορισμοί

Με τον όρο κυψελοειδή υλικά ή απλά αφροί, εννοούμε τα υλικά εκείνα τα οποία αποτελούνται από δύο, τουλάχιστον, φάσεις. Μια στερεά, πολυμερούς ή μεταλλικής μήτρας, και μια αεριώδη, δημιουργούμενη από φυσητήρα. Η τυπική τους δομή αποτελείται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο στενών ράβδων ή πλακών, οι οποίες και μορφοποιούν τόσο τις άκρες όσο και τις επιφάνειες των κυψελών.

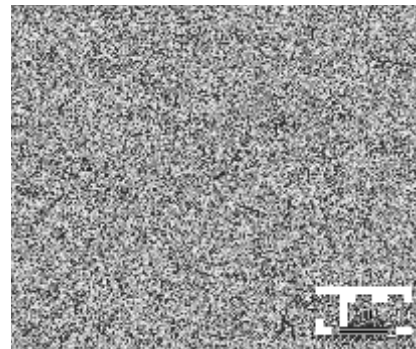
Η μορφή των αφρωδών υλικών ποικίλει. Η απλούστερη είναι μια διδιάστατη διάταξη από πολύγωνα, τα οποία είναι τοποθετημένα με τρόπο τέτοιο ώστε να καλύπτουν επίπεδη επιφάνεια παρόμοιας μορφής με τις κυψέλες των μελισσών (υλικά 'κήθρες').

Εάν το στερεό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός περιέχεται μόνο στις άκρες των κυψελών τότε ο αφρός λέμε ότι είναι ανοικτών κυψελών (open celled) [Σχήμα 3.1]. Αν και οι όψεις των κυψελών είναι στερεές έτσι ώστε η κάθε κυψέλη να μην συνδέεται με τις διπλανές τις, λέμε ότι ο αφρός είναι κλειστών κυψελών (closed celled) [Σχήμα 3.2], οι οποίοι είναι γενικά πιο άκαμπτοι. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο αφρός μπορεί να είναι εν μέρει ανοικτός και εν μέρει κλειστός.

Ιδιαίτερος σημαντικό μέγεθος σε ένα κυψελοειδές υλικό είναι η σχετική του πυκνότητα ρ/ρ_s , δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας του ως προς την πυκνότητα του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών. Αύξηση της τιμής της σχετικής πυκνότητας επιφέρει διόγκωση στα τοιχώματα των κυψελών και συστολή των πόρων.



Σχήμα 3.1: Αφρός ανοικτών κυψελών

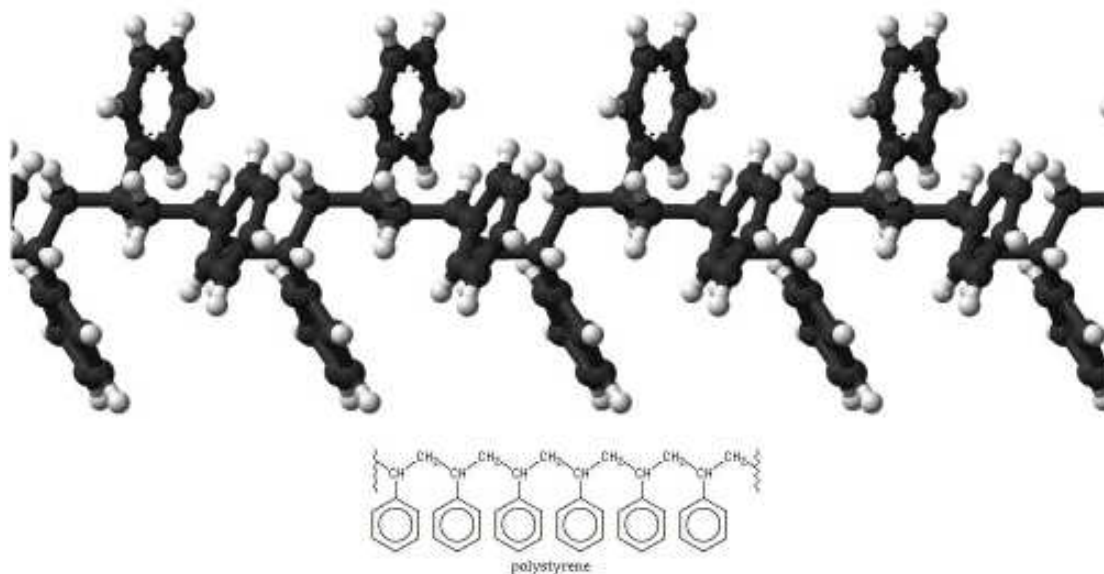


Σχήμα 3.2: Αφρός κλειστών κυψελών



3.2 Πολυμερείς αφροί

Οι πολυμερείς αφροί δημιουργήθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1930 με τον αφρό πολυστευρένιου (πολυφαινυλαιθένιου) να είναι ο πρώτος το 1931 [Σχήμα 3.3]. Ο πιο διαδεδομένος, η πολυουρεθάνη, εφευρέθηκε από το Δρ. Otto Bayer στην έναρξη του δεύτερου παγκόσμιου πολέμου και χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως υποκατάστατο για το λάστιχο καθώς επίσης ως προστατευτικό επίστρωμα για άλλα κοινά υλικά όπως μέταλλα και ξύλο.



Σχήμα 3.3: Πολυστευρένιο $(\text{PhC}_2\text{H}_5)_n$

Η χρήση τους, σήμερα, είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη καθώς παρουσιάζουν δυνατότητες μόνωσης, αυξημένη αντοχή παρά το μικρό τους βάρος και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Οι πυκνότητες των πολυμερών αφρών κυμαίνονται από 6kg/m^3 έως 1200kg/m^3 και μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιοδήποτε επιθυμητό βαθμό σκληρότητας.

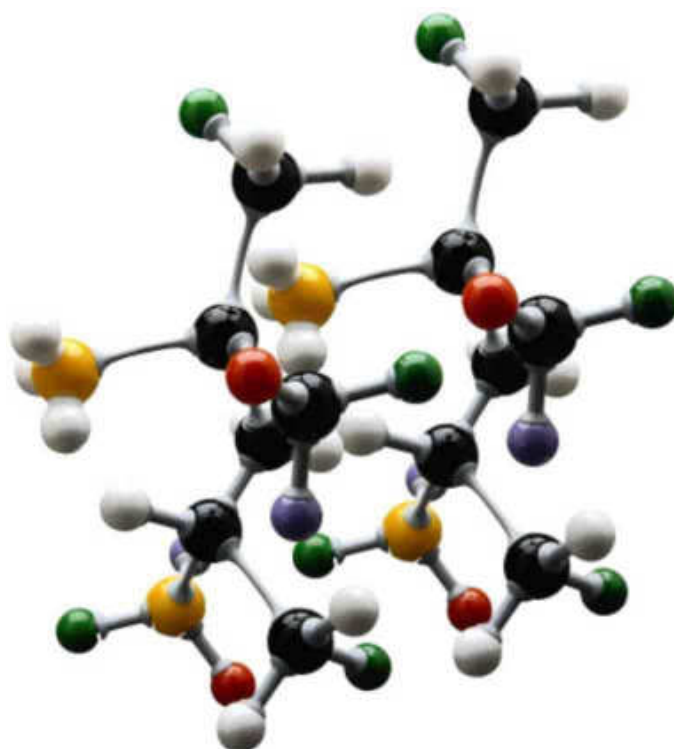
Μπορούν να παρασκευαστούν από, ουσιαστικά, οποιοδήποτε πολυμερές σώμα με την εισαγωγή φυσαλίδων αερίου από μηχανικού αναδευτήρα ή αναμειγνύοντας με κάποιο μέσο που διογκώνεται, βοηθώντας έτσι το πολυμερές να λάβει το απαιτούμενο αέριο-μέρος του όγκου.

Οι περισσότεροι σχηματίζονται με τη διαδικασία της διασποράς, η οποία περιλαμβάνει τρία στάδια, το σχηματισμό των φυσαλίδων, την αύξηση τους και τη σταθεροποίηση.



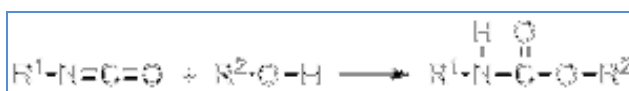
3.2.1 Πολυουρεθάνη

Πολυουρεθάνη (PU) ονομάζεται οποιοσδήποτε τύπος πολυμερούς σώματος που περιέχει έναν σύνδεσμο ουρεθάνης (- NH-OMO-O -). Διαμορφώνεται από ισοκυανικά άλατα αντιδρώντα με ενώσεις που έχουν ένα ενεργό υδρογόνο, όπως διόλες, παρουσία ενός καταλύτη [Σχήμα 3.4]. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλές ενώσεις που περιέχουν ενεργά υδρογόνα και πολλά διαφορετικά δισοκυανικά άλατα, ο αριθμός πολυουρεθανών που μπορεί να συντεθεί είναι επίσης μεγάλος. Οι ιδιότητες της πολυουρεθάνης μπορούν να προσαρμοστούν σε μια συγκεκριμένη ανάγκη με το συνδυασμό των κατάλληλων ενώσεων.



Σχήμα 3.4: Τρισδιάστατο μοντέλο μορίου πολυουρεθάνης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η πολυουρεθάνη γίνεται από την αντίδραση προσθήκης ισοκυανικών και πολυολών [Σχήμα 3.5]. Η μίξη αυτών των δύο μονομερών, μαζί με ένα πυρηνόφιλο, θα διαμορφώσει ένα διμερές, το οποίο με τη σειρά του θα συνεχίσει να αντιδρά με άλλα μονομερή, διμερή και ολιγομερή σχηματίζοντας μακριές αλυσίδες πολυουρεθάνης.



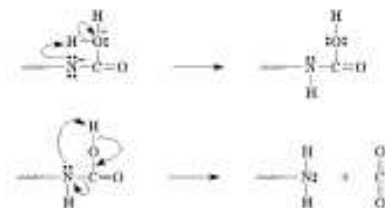
Σχήμα 3.5: Αντίδραση δημιουργίας πολυουρεθάνης



Για την παραγωγή αφρού πολυουρεθάνης [Σχήμα 3.6], ένα αέριο πρέπει να ενσωματωθεί στο τελικό προϊόν. Για να επιτευχθεί αυτό, η ομάδα ισοκυανικού άλατος αντιδρά με ύδωρ διαμορφώνοντας μια αμίνη και αέριο CO₂ [Σχήμα 3.7].



Σχήμα 3.6: Αφρός πολυουρεθάνης



Σχήμα 3.7: Αντίδραση ισοκυανικού άλατος

Οι πολυουρεθάνες μπορούν να υπάρξουν ως άκαμπτοι (rigid) ή ως εύκαμπτοι (flexible) αφροί, και ως επίστρωμα ή ως συγκολλητικό υλικό. Δεδομένου ότι εμφανίζονται με τόσες πολλές μορφές και μπορούν να έχουν μια ευρεία ποικιλία ιδιοτήτων, χρησιμοποιούνται σε πολλές και ποικίλες εφαρμογές [Πίνακας 3.1]. Τις περισσότερες φορές, είναι θερμοσκληρυντική, δηλαδή είναι δύσκολο να λειωθεί και να επανεπεξεργαστεί έχοντας επομένως το μειονέκτημα του ότι δεν μπορεί να ανακυκλωθεί.

Οι άκαμπτοι αφροί πολυουρεθάνης χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές θερμικής μόνωσης όπως στα ψυγεία, στις μονώσεις κτηρίων, στα φορτηγά που φέρνουν ευπαθή προϊόντα, σε θερμοσίφωνες κλπ. Ως εκ τούτου, συμβάλλουν πολύ στην εξοικονόμηση ενέργειας των συσκευών. Όντας ανθεκτικοί στην υγρασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επίσης, για να συμβάλλουν στην πλευστότητα των βαρκών.

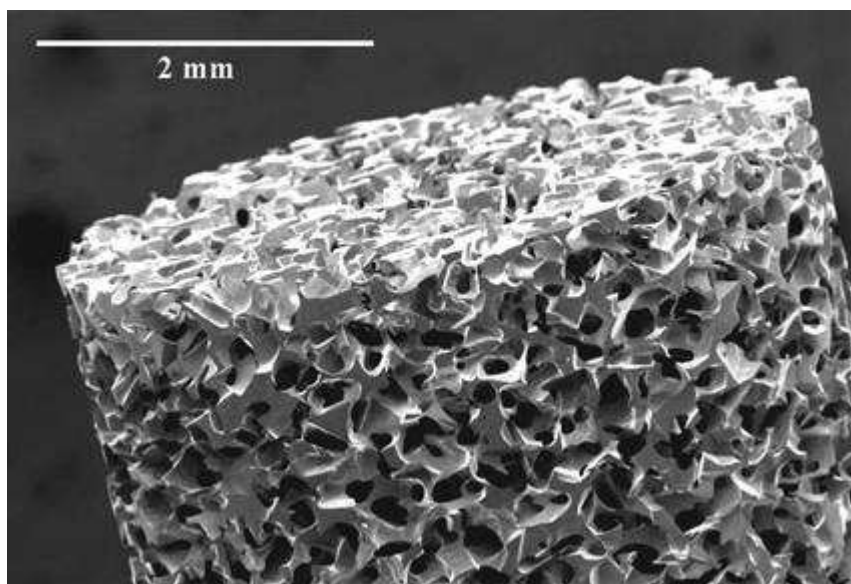
Το μεγαλύτερο μέρος του παραγόμενου εύκαμπτου αφρού πολυουρεθάνης γίνεται για χρήση σε υποστρώματα ταπήτων, σε μαξιλάρια και σε έπιπλα εσωτερικών χώρων. Η βιομηχανία μεταφορών τον χρησιμοποιεί στα μαξιλάρια των θέσεων στα αεροπλάνα, τα τρέινα και τα αυτοκίνητα. Στην αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως για την ηχομόνωση και την απόσβεση ενέργειας και δονήσεων.

ΤΟΜΕΑΣ	ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ PU (σε εκατομμύρια λίβρες)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ
Κτίρια και κατασκευές	1.459	26,80%
Μεταφορές	1.298	23,80%
Έπιπλα	1.127	20,70%
Συσκευές	278	5,10%
Συσκευασία	251	4,60%
Κλωστοϋφαντουργία	181	3,30%
Μηχανήματα	178	3,30%
Ηλεκτρονικά	75	1,40%
Υποδήματα	39	0,70%
Άλλες χρήσεις	558	10,20%
ΣΥΝΟΛΟ:	5.444	100%

Πίνακας 3.1: Χρήση PU στις Η.Π.Α. το 2004

3.3 Μεταλλικοί αφροί

Ένας μεταλλικός αφρός [Σχήμα 3.8] είναι μια κυψελοειδής δομή που αποτελείται από ένα στερεό μέταλλο (συνήθως αλουμίνιο) και περιέχει αέριο σε ένα μεγάλο ποσοστό του όγκου του. Οι πόροι του μπορεί να είναι σφραγισμένοι (αφρός κλειστών κυψελών) ή μπορούν να αποτελούν ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο (αφρός ανοικτών κυψελών). Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι το πολύ υψηλό πορώδες καθώς, συνήθως, το 75-95% του όγκου αποτελείται από κενούς χώρους.



Σχήμα 3.8: Μεταλλικός αφρός

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρουν σε σχέση με τα συμβατικά υλικά είναι:

- Έχουν έως και 90% μικρότερο βάρος από τα αντίστοιχα συμπαγή υλικά
- Παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακαμψία
- Έχουν μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, τόσο μηχανικής όσο και ηχητικής
- Προσφέρουν ηλεκτρομαγνητική μόνωση και
- Παρουσιάζουν μη-τοξικό και μη-εκρηκτικό χαρακτήρα

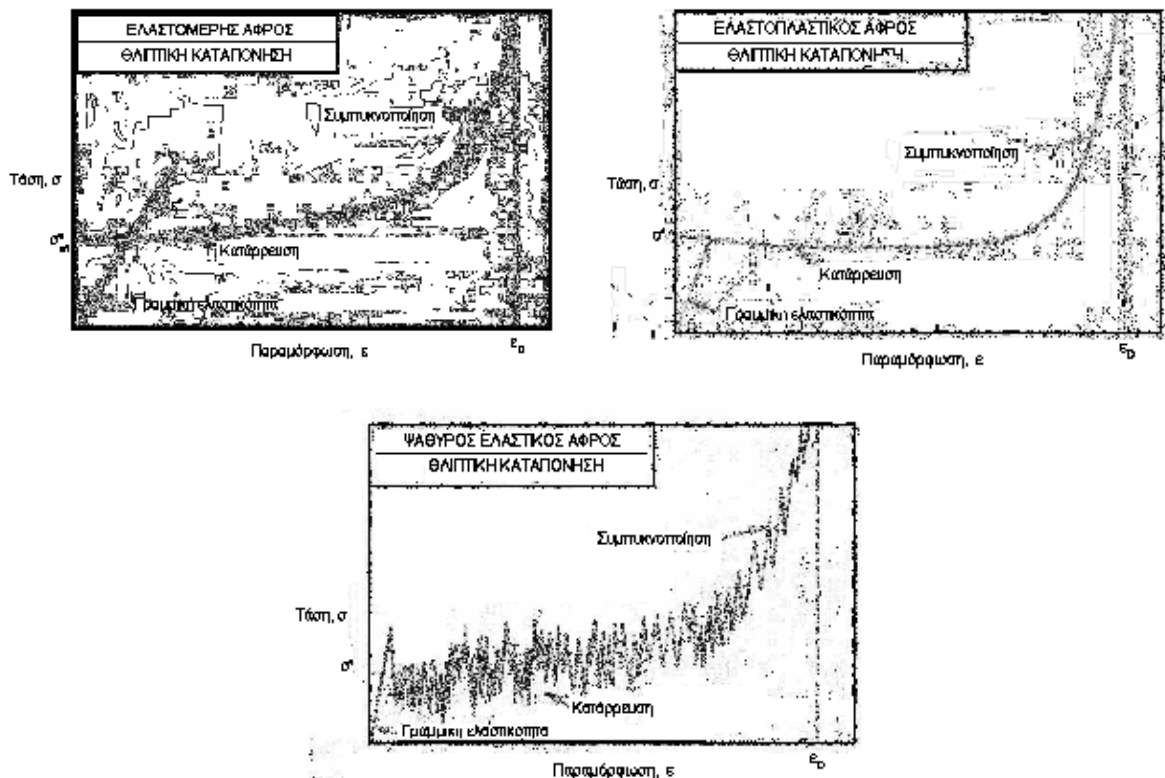
Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών τους, βρίσκουν εφαρμογή σε κατασκευές όπου απαιτείται απορρόφηση ενέργειας (αυτοκίνητα, θωράκιση στρατιωτικών οχημάτων κτλ), σε μονωτικές διατάξεις, σε υπερελαφρές κατασκευές, σε φίλτρα και σε καταλύτες.

3.4 Μηχανική συμπεριφορά των πολυμερών αφρών

Οι βιομηχανικοί αφροί, οι οποίοι είναι οι πιο συνηθισμένοι στην εποχή μας, χρησιμοποιούνται κυρίως για την απορρόφηση ενέργειας σε συγκρούσεις (συσκευασίες προϊόντων) και σε ελαφρές κατασκευές. Για την επιλογή των καταλληλότερων για την εκάστοτε εφαρμογή και την αποτελεσματική χρησιμοποίησή τους, απαιτείται λεπτομερής γνώση της μηχανικής τους συμπεριφοράς.

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} . Παράγοντες όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης, η θερμοκρασία, η ανισοτροπία και η πολυαξονική φόρτιση επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες αυτές.

Στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σε θλιπτική καταπόνηση, παρατηρείται η ύπαρξη γραμμικής περιοχής ελαστικότητας ακολουθούμενη από μια μακριά περιοχή κατάρρευσης, ενώ τελικά η καμπύλη καταλήγει στη περιοχή της λεγόμενης συμπτωτικής συμπεριφοράς, όπου η τάση αυξάνεται [Σχήμα 3.9].

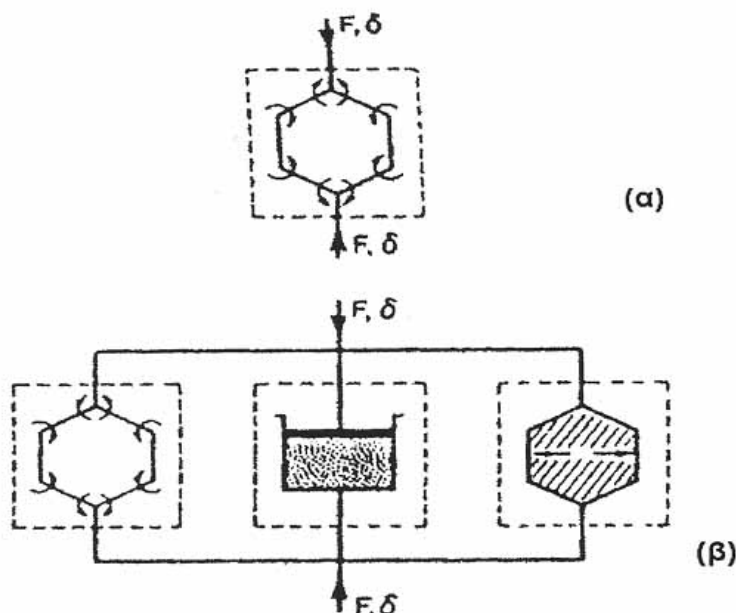


Σχήμα 3.9: Καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης σε θλιπτική καταπόνηση



Για να περιγραφεί ένας ισοτροπικός αφρός χρειάζεται να γνωρίζουμε δύο μέτρα. Συνήθως επιλέγονται δύο απ' τα εξής: το μέτρο ελαστικότητας E^* , το μέτρο διάτμησης G^* και το λόγο του Poisson ν . Στην περίπτωση όπου η δομή του αφρού είναι αξονοσυμμετρική χρειάζονται πέντε και εννέα αν είναι ορθοτροπική. Εδώ θα υπολογίσουμε εκφράσεις για τα E^* , G^* και ν^* για ένα ισότροπο αφρό έχοντας ως αφετηρία το μέτρο ελαστικότητας E_s του στερεού και την σχετική πυκνότητα ρ^*/ρ_s του αφρού.

Ο μηχανισμός γραμμικής ελαστικότητας εξαρτάται από το είδος των κυψελών του αφρού, δηλαδή αν είναι ανοικτές ή κλειστές. 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 [Σχήμα 3.10]



Σχήμα 3.10: (α) αφροί ανοικτών κυψελών - κάμψη τοιχωμάτων κυψέλης, (β) αφροί κλειστών κυψελών - κάμψη τοιχωμάτων κυψέλης + πίεση εγκλεισμένου αερίου + έκταση μεμβράνης.

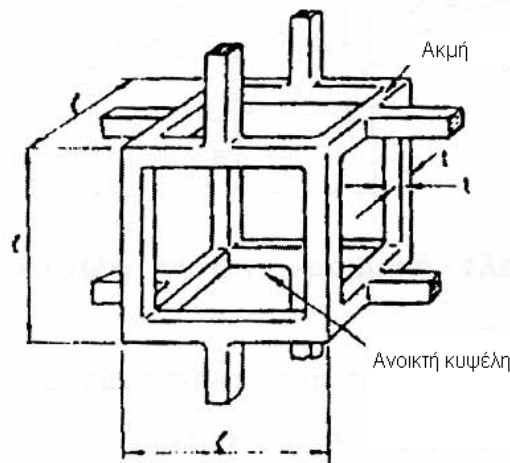
3.4.1 Θλιπτική καταπόνηση πολυμερών αφρών ανοικτών κυψελών

Ένας αφρός ανοικτών κυψελών μπορεί να μοντελοποιηθεί ως κύβος ακμών μήκους l και τετραγωνικής διατομής κορυφών πάχους t [Σχήμα 3.11]. 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,

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right)^2$$

και

$$I \propto t^4$$



Σχήμα 3.11: Κυβικό μοντέλο για έναν αφρό ανοικτών κυψελών

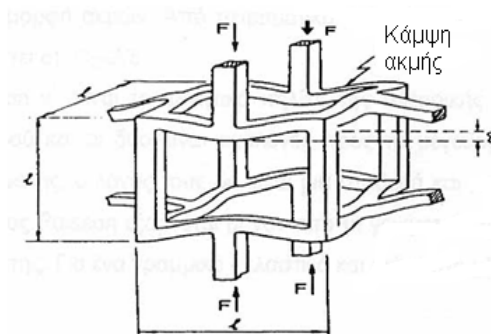
Το μέτρο ελαστικότητας του αφρού υπολογίζεται από τη γραμμική - ελαστική κάμψη μιας δοκού μήκους l η οποία καταπονείται από φορτίο F στο μέσο της. Η προκαλούμενη κάμψη δ θα είναι ανάλογη προς το μέγεθος $F l^3 / E_s I$, όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της δοκού. Όταν εφαρμόζεται μονοαξονική τάση στον αφρό έτσι ώστε κάθε ακμή της κυψέλης να μεταδίδει δύναμη F [Σχήμα 3.12] οι ακμές κάμπτονται, και η γραμμική - ελαστική κάμψη της δομής θεωρούμενης ως σύνολο, είναι ανάλογη προς $F l^3 / E_s I$. Η δύναμη F , συσχετίζεται με τη θλιπτική τάση σ μέσω της αναλογίας $F \propto \sigma \cdot l^2$ ενώ η παραμόρφωση ε συσχετίζεται με τη μετατόπιση δ με την αναλογία $\varepsilon \propto \delta / l$. Από τα προηγούμενα εύκολα προκύπτει ότι το μέτρο ελαστικότητας για τον αφρό δίνεται από τη σχέση:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{C_1 \cdot E_s \cdot l}{l^4}$$

Από την παραπάνω σχέση παίρνουμε:

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

όπου το C_1 εμπεριέχει όλες τις γεωμετρικές σταθερές αναλογίας.



Σχήμα 3.12: Εφαρμογή μονοαξονικής τάσης στον αφρό

Το ανωτέρω είναι το μέτρο ελαστικότητας για μικρές παραμορφώσεις. Όσο η ελαστική παραμόρφωση αυξάνεται, το αξονικό φορτίο (P) πάνω σε μια κυψελική ακμή 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 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 $F l^3 / E_s I$, και η συνολική τάση τ και η παραμόρφωση γ είναι ανάλογες προς F / l^2 και δ / l^2 , αντιστοίχως, θα έχουμε:

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{C_{21} \cdot E_s \cdot I}{l^4}$$

από την οποία:

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

για ισοαξονική μορφή ακμών.



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:

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

Από την παραπάνω σχέση έχουμε:

$$\nu^* = \frac{C_1}{2 \cdot C_2} - 1 = C_3$$

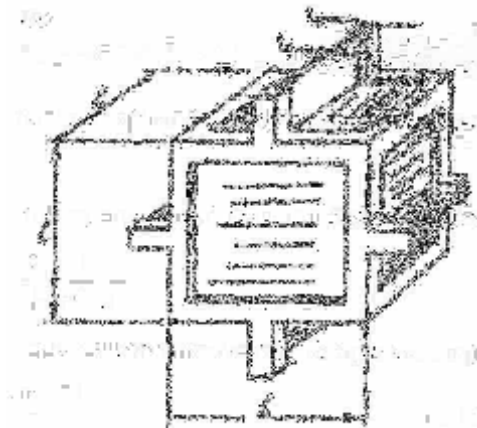
Η ανάλυση για τα E^* , G^* και ν^* που προηγήθηκε, περιέχει κάποιες προσεγγιστικές παραδοχές. Για παράδειγμα, βάσει του τρόπου υπολογισμού της πυκνότητας μετράμε διπλά τις γωνίες μεταξύ των κυψελών. Επίσης οι αξονικές και εγκάρσιες μετατοπίσεις των τοιχωμάτων των κυψελών έχουν αγνοηθεί, γιατί είναι συνήθως μικρές συγκρινόμενες με τις μετατοπίσεις λόγω κάμψης.

3.4.2 Θλιπτική καταπόνηση πολυμερών αφρών κλειστών κυψελών

Οι αφροί με κλειστές κυψέλες είναι πολυπλοκότεροι. Όταν οι αφροί παρασκευάζονται από υγρά συστατικά, η επιφανειακή τάση μπορεί να έλξει 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.

Θεωρούμε 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 [Σχήμα 3.13].



Σχήμα 3.13: Κυβικό μοντέλο για έναν αφρό κλειστών κυψελών

Το μέτρο ελαστικότητας 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 εξίσωση $\frac{E^*}{E_s} = C_1 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$, 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_0 και σχετικής πυκνότητας ρ^*/ρ_s , οι κυψέλες του οποίου περιέχουν ένα αέριο. Αν το δείγμα συμπιέζεται αζονικά με παραμόρφωση ϵ , ο όγκος του μειώνεται από V_0 σε V , όπου:



$$\frac{V}{V_0} = 1 - \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*)$$

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:

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

Η συνεισφορά στο μέτρο υπολογίζεται από το νόμο του Boyle. Αν η αρχική πίεση του αερίου είναι p_0 (συνήθως ατμοσφαιρική) τότε η πίεση p , μετά από παραμόρφωση ε δίνεται από την εξίσωση:

$$p \cdot V_g = p_0 \cdot V_g^0$$

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

$$p' = p - p_0$$

Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη εξίσωση βρίσκουμε:

$$p' = \frac{p_0 \cdot \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*)}{1 - \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*) - \frac{\rho^*}{\rho_s}}$$

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

$$E_g^* = \frac{dp'}{d\varepsilon} = \frac{p_0 \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*)}{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}}$$

Όταν το p_0 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_0 είναι πολύ μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση, ή το ρευστό της κυψέλης είναι υγρό και όχι αέριο η συνεισφορά του ρευστού της κυψέλης δε μπορεί να αγνοηθεί.



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:

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

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

$$\frac{E^*}{E_s} = d \cdot \frac{t_c^4}{l^4} + \beta' \cdot \frac{t_f}{l}$$

Τελικά προκύπτει:

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

όπου α , β , α' , β' , 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. Όταν η συμπίεση του αερίου είναι σημαντική, σε αυτό πρέπει να προστεθεί η συνεισφορά του μεγέθους:

$$\frac{p_0 \cdot (1 - 2 \cdot v^*)}{E_s \cdot \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}\right)}$$

Τα όρια για $\varphi=1$ και για $\varphi=0$ δίδουν $C_1 \approx C_1' \approx 1$.



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:

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

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, η 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:

$$\frac{E^*}{E_s} \approx \varphi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1 - \varphi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} + \frac{p_0 \cdot (1 - 2 \cdot \nu^*)}{E_s \cdot \left(1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}\right)}$$

$$\frac{G^*}{E_s} \approx \frac{3}{8} \cdot \left[\varphi^2 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1 - \varphi) \cdot \frac{\rho^*}{\rho_s} \right]$$

$$\nu^* \approx \frac{1}{3}$$

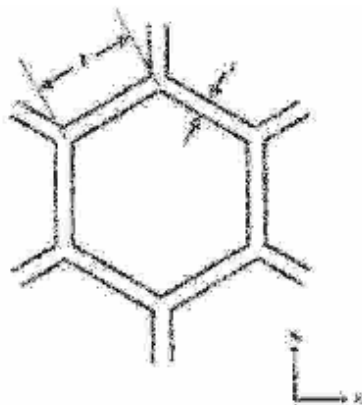
3.5 Μηχανική συμπεριφορά των μεταλλικών αφρών

Οι νέες καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας έχουν καταστήσει τους μεταλλικούς αφρούς ευρύτερα διαθέσιμους για χρήση σε εφαρμογές όπως οι υπέρ-ελαφριές δομές σάντουιτς και οι συσκευές απορρόφησης ενέργειας.

Οι αφροί που χρησιμοποιούνται ως συστατικά στην αυτοκινητοβιομηχανία, για την απορρόφηση της ενέργειας των συγκρούσεων και για να μειώσουν τον κλονισμό, έχουν σύνθετες μορφές καθώς μπορεί να υπόκεινται σε 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 πληρέστατη καταστατική εξίσωση, η οποία να περιγράφει λεπτομερώς την συμπεριφορά του αφρού.

Ανάλογα με τη φύση και τη σχετική πυκνότητα του στερεού από το οποίο είναι φτιαγμένο, ένα κυψελοειδές στερεό μπορεί να αστοχήσει με διάφορους μηχανισμούς (ελαστικός λυγισμός, πλαστική κάμψη, ψαθυρή συντριβή). Οι επιφάνειες αστοχίας που συνδέονται με κάθε έναν από αυτούς τους τρόπους θεωρούνται εξαγωνικές κηρήθρες, ιδανικές, ισοτροπικές και ομοιογενείς. Με την εξέταση μιας τέτοιας κανονικής εξαγωνικής κυψέλης [Σχήμα 3.14] μπορεί να γίνει κατανοητή η μηχανική, για την οποία ενδιαφερόμαστε εδώ.

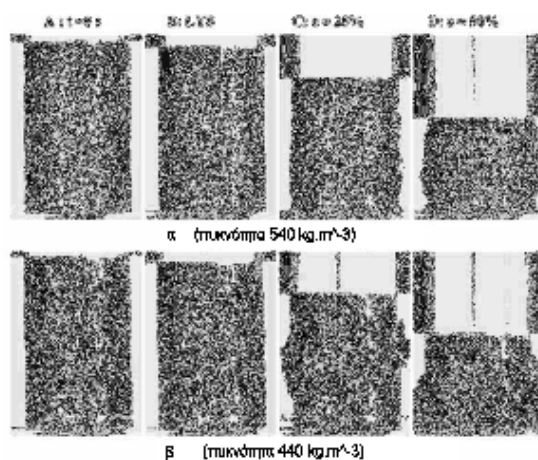


Σχήμα 3.14: Κανονική εξαγωνική κυψέλη

3.5.1 Καταστροφική θλιπτική καταπόνηση μεταλλικού αφρού

Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί παραμόρφωσης, υπό θλιπτική καταπόνηση, οι οποίοι εξαρτώνται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου κράματος μετάλλου. Για παράδειγμα, τα τοιχώματα επεξεργασμένης παραγωγής αφρών αλουμινίου κάμπτονται πλαστικά, γεγονός που οδηγεί σε ομαλή καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης,

ενώ τα χυτά κράματα αλουμινίου δείχνουν να είναι πιο ψαθυρά και παρατηρείται αστοχία των κυψελοειδών τοιχωμάτων σε χαμηλές παραμορφώσεις [Σχήμα 3.15].

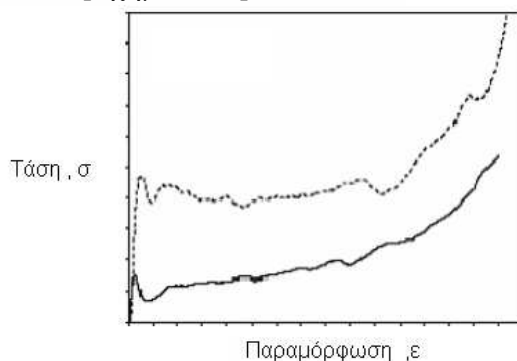


Σχήμα 3.15: α)επεξεργασμένος αφρός αλουμινίου β) χυτός αφρός αλουμινίου

Η συμπεριφορά παραμόρφωσης των αφρών επηρεάζεται κυρίως από τις τοπικές ανομοιογένειες στη δομή. Οι πρώτες ρωγμές και σοβαρές παραμορφώσεις της δομής εντοπίζονται στις περιοχές με τις χαμηλότερες τοπικές πυκνότητες και την υψηλότερη συγκέντρωση ατελειών. Η περαιτέρω κατάρρευση των χυτών αφρών 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.

Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επιδρά στη συμπεριφορά της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, είναι η γεωμετρία των δειγμάτων, ειδικά στην περίπτωση των χυτών αφρών. 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 στον συμπιεσμένο όγκο.

Η καμπύλη μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη. Στο πρώτο η πίεση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά και κατόπιν ακολουθεί παραμόρφωση με σχεδόν σταθερή πίεση. Τέλος, υπάρχει ένα μέρος γρήγορα αυξανόμενης φόρτισης, μετά από τη σύνθλιψη των κυψελοειδών τοιχωμάτων [Σχήμα 3.16].



Σχήμα 3.16: Ποιοτική σχεδίαση καμπύλης Τάσης-Παραμόρφωσης μεταλλικού αφρού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ



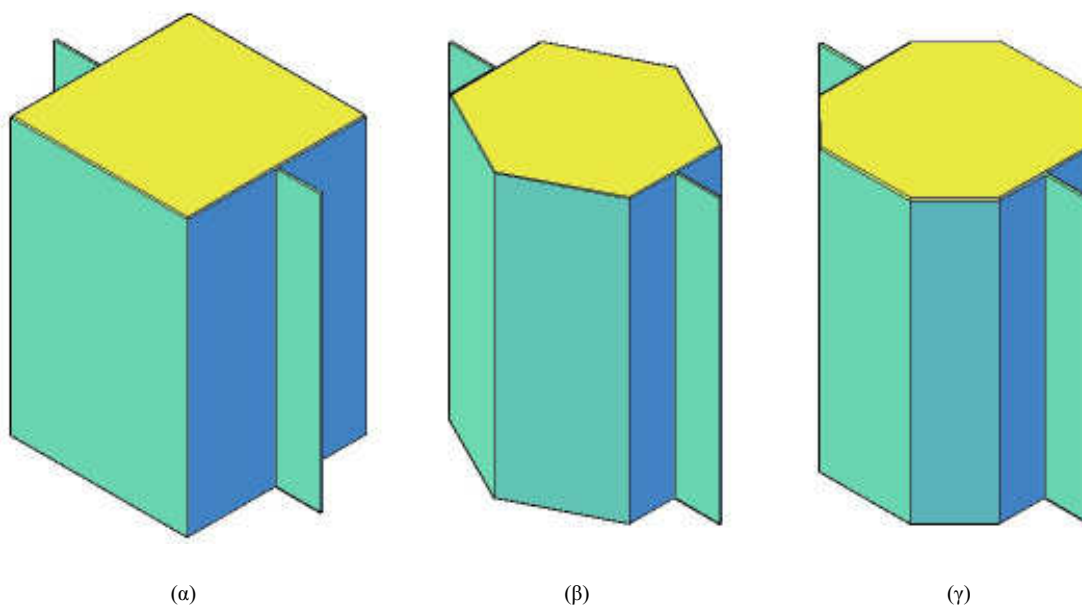
4.1 Εκλογή μορφολογίας

Τα δοκίμια που θα κατασκευαστούν και εν συνεχεία θα καταπονηθούν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων θα ανήκουν στην κατηγορία τεμαχίων διαμόρφωσης double hat.

Το μήκος τους θα ανέρχεται στα 125mm, ένα μέγεθος το οποίο βρίσκεται στα ρεαλιστικά πλαίσια για την χρήση σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών.

Εκλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν τρεις διαφορετικές μορφολογίες, με διαφορετικών αριθμό ακμών (4-6-8) ώστε να δύναται να παρατηρηθεί η επιρροή της συγκέντρωσης των τάσεων σε αυτές στα πειραματικά αποτελέσματα [Σχήμα 4.1].

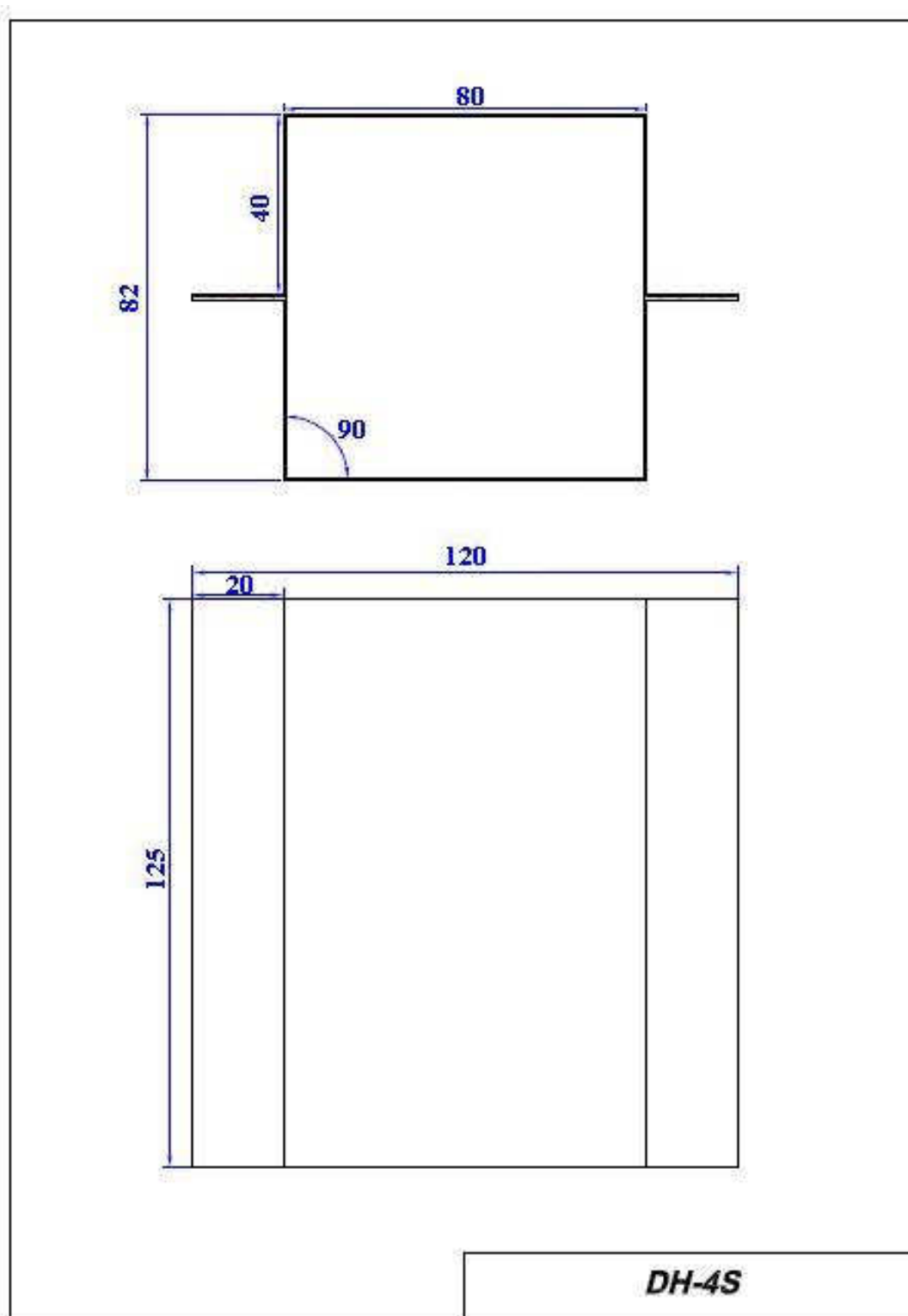
Τα κατεργασμένα τεμάχια θα συγκολληθούν και εν συνεχεία θα γίνει η εισαγωγή του αφρού πολυουρεθάνης στο μέσο τους ώστε να διαμορφωθούν τα τελικά δοκίμια.

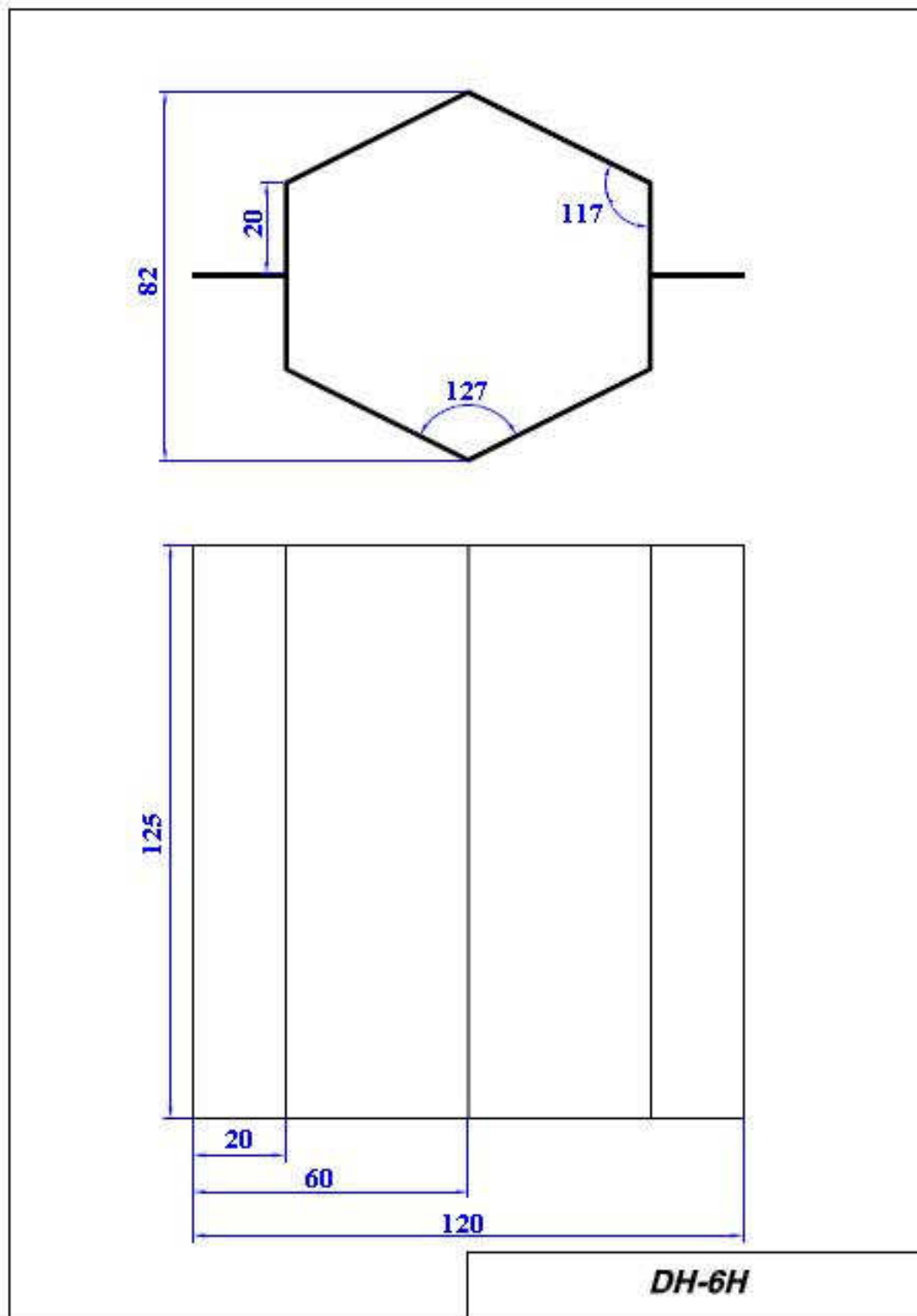


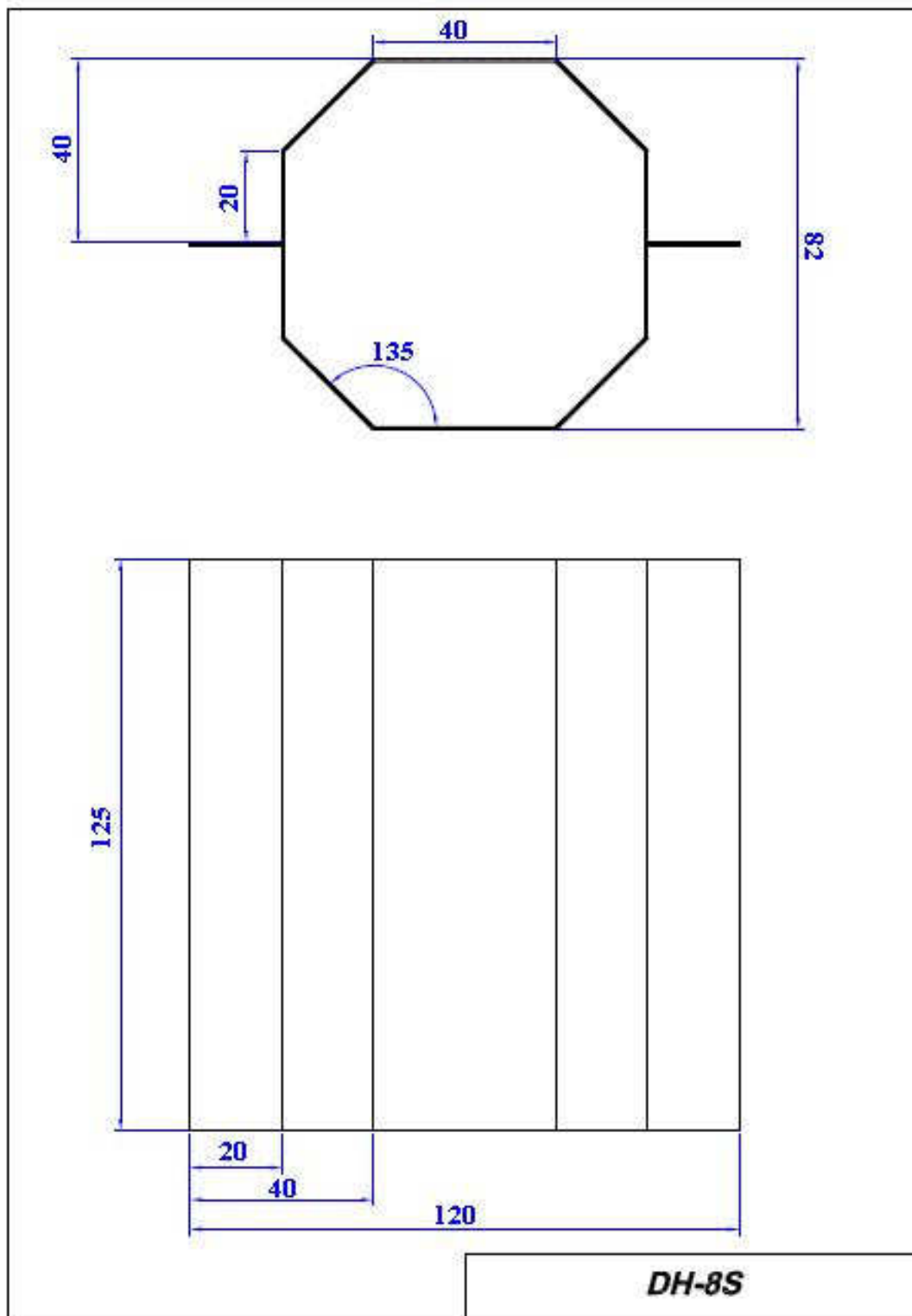
Σχήμα 4.1: (α) μορφή 4S (β) μορφή 6S (γ) μορφή 8S



4.2 Σχέδια και διαστάσεις









4.3 Κατεργασία διαμόρφωσης μεταλλικών κελυφών

Τα ελάσματα χάλυβα, ST-37 πάχους 1 mm, απέκτησαν τις απαιτούμενες διαστάσεις με χρήση μηχανικού ψαλιδιού και εν συνεχεία διαμορφώθηκαν σε στράντζα.

4.3.1 Ψαλιδισμός

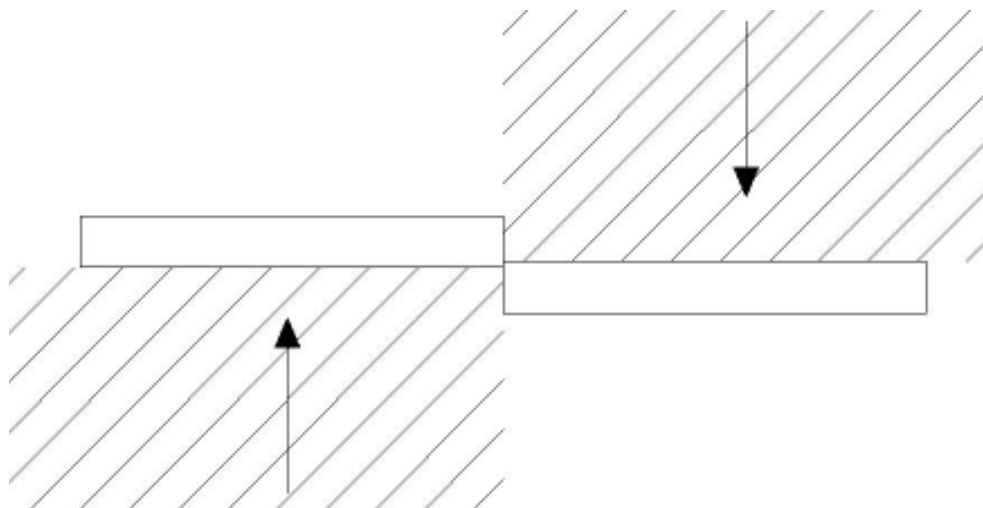
Τα αρχικά ελάσματα επιφάνειας 1m² κόπηκαν σε μεταλλικές λωρίδες στις διαστάσεις του αναπτύγματος ανάλογα με την μορφή του δοκιμίου για το οποίο προοριζόταν [Σχήμα 4.2].

ΜΟΡΦΗ	ΜΗΚΟΣ (mm)	ΠΛΑΤΟΣ (mm)
4S	125	120
6S	170	125
8S	177	125

Πίνακας 4.1



(α)



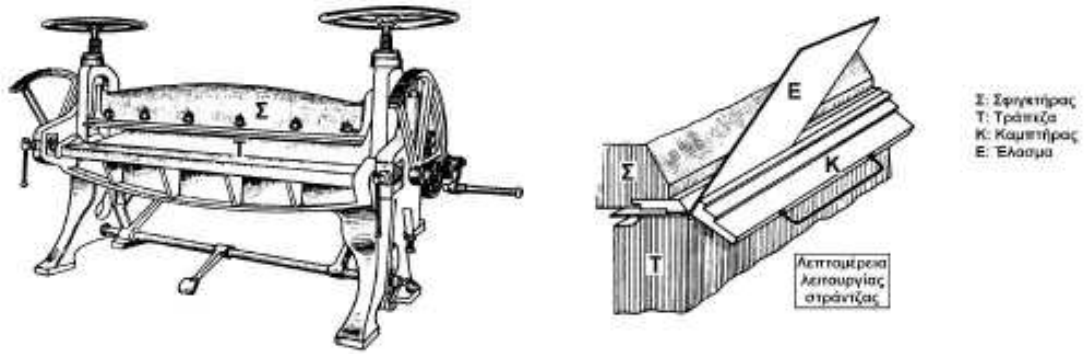
(β)

Σχήμα 4.2: α) ψαλίδι β) κατεργασία ψαλιδισμού

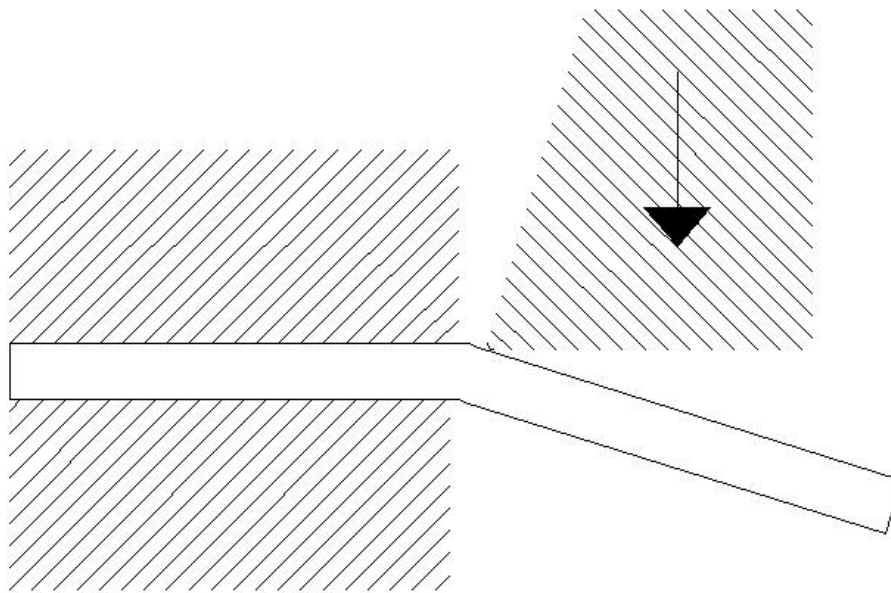


4.3.2 Στραντζάρισμα

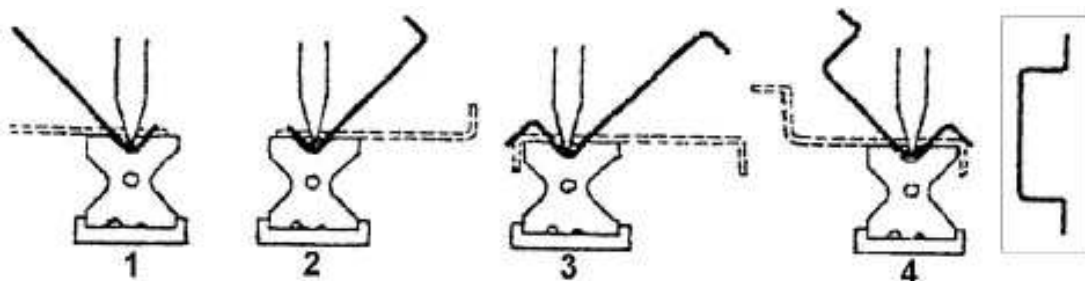
Τα κομμάτια ελάσματος που προέκυψαν από τον ψαλιδισμό κάμφθηκαν με χρήση στράντζας ώστε το μέταλλο να παραμορφωθεί πλαστικά και να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή [Σχήμα 4.3].



(α)



(β)



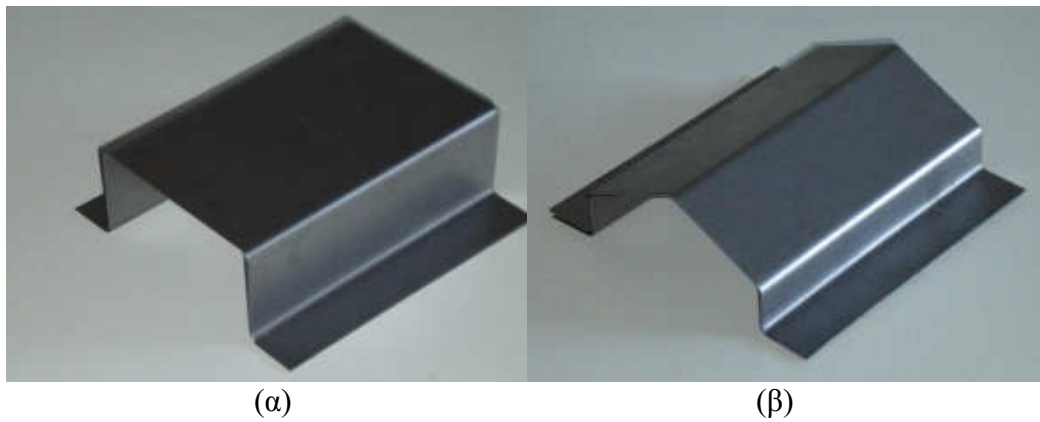
(γ)

Σχήμα 4.3: α) Στράντζα β) κατεργασία στραντζαρίσματος γ) διαμόρφωση για τα τεμάχια τις μορφής DH-4S



4.3.3 Συγκόλληση

Μετά το πέρας της κατεργασίας στραντζαρίσματος, τα τεμάχια [Σχήμα 4.4] έπρεπε να συγκολληθούν ώστε να αποκτήσουν το χαρακτήρα μεταλλικού κελύφους.



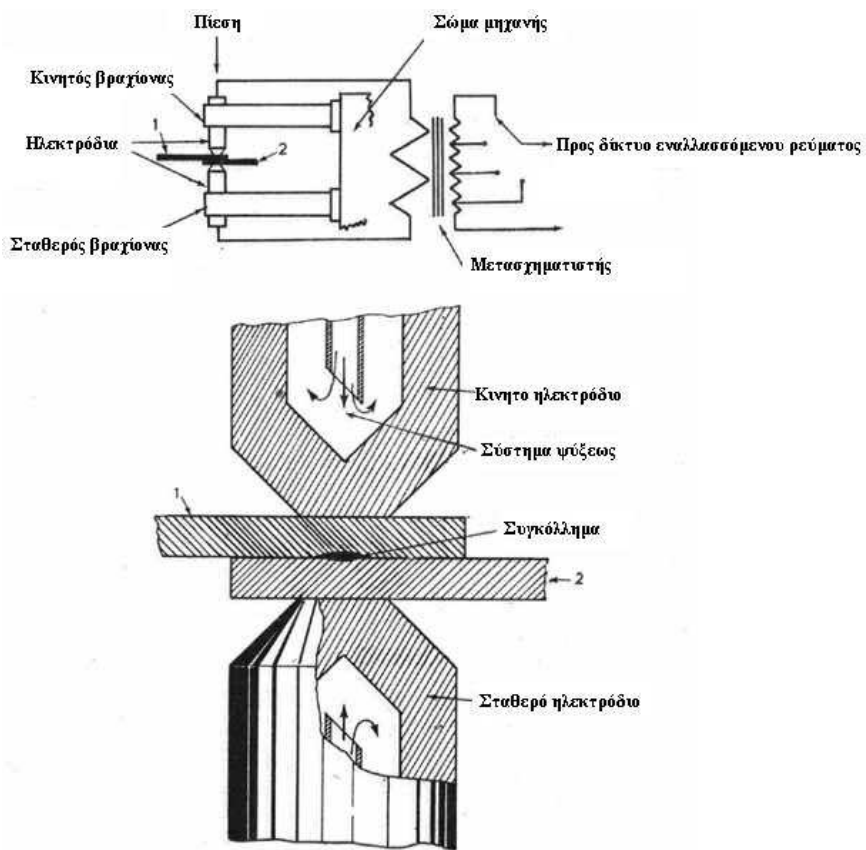
(γ)
Σχήμα 4.4: α) DH-4S β) DH-6S γ) DH-8S

Έγινε σημειακή συγκόλληση με χρήση ηλεκτροπόνας [Σχήμα 4.5]. Σε κάθε ζεύγος έγιναν συνολικά οκτώ συγκολλήσεις.

Η ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση είναι αυτογενής συγκόλληση, η οποία δε χρησιμοποιεί συγκολλητικό υλικό. Τα τεμάχια που πρόκειται να συγκολληθούν θερμαίνονται συμπιεζόμενα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και συγκολλούνται [Σχήμα 4.6]



Σχήμα 4.5: ηλεκτροπόνα εργαστηρίου



Σχήμα 4.6: Ηλεκτροσυγκόλληση με αντίσταση



4.4 Επιλογή αφρών

Ως υλικό πυρήνα για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί διογκούμενος αφρός πολυουρεθάνης διαφόρων πυκνοτήτων.

Μετά από μακράν αναζήτηση επιλέχθηκαν τέσσερις αφροί της εταιρίας Bayern καθώς διέθεταν τα απαιτούμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας. Πρόκειται για τα προϊόντα με εμπορική ονομασία BAYTHERM BD-100, BAYTHERM BOF, BAYTHERM GF-38 και BAYTHERM GF.

Οι αφροί αυτοί διαφέρουν αρκετά τόσο στις τεχνικές προδιαγραφές όσο και στις μηχανικές ιδιότητές τους, ενώ παρουσιάζουν εξαιρετικά καλή πρόσφυση σε μέταλλα.

Τύπος αφρού	Πυκνότητα αφρού (kg/m ³)	Αντοχή συμπίεσης (MPa)
BAYTHERM GF	41	0,2
BAYTHERM GF-38	44	0,3
BAYTHERM BD-100	250	5
BAYTHERM BOF	400	1,5

Πίνακας 4.2

4.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά αφρών

BAYTHERM BD-100

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	100:100 DESMODUR 44 V 20 L (MDI)	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24 °C / 22 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	40 ± 5 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22°C)	Χρόνος κρεμοποίησης:	35 ± 3"
	Χρόνος πήξεως:	105 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας:	135 ± 10"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	100 ± 10 kg/m ³	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	250 ± 20 kg/m ³	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	3 μήνες στους 20 ± 5 °C σε κλειστό δωμάτιο	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Παραγωγή τεχνικών μερών και μερών απομίμησης ξύλου	

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ		
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	250 kg/m ³
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	0,55 %
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΔΑΤΟΣ (20°C , 14 ΗΜΕΡΕΣ)	DIN 53428	0,4 % όγκου
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10% ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	5 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24°C)	DIN 18164	0,057 W/mK
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	DIN 53431	900x10 ⁻⁶ /K
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3

**ΒΑΥTHERM BOF**

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	100:100 DESMODUR 44 V 40L	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	24 °C ± 2 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	40 ± 2 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22°C)	Χρόνος κρεμοποίησης:	43 ± 4"
	Χρόνος πήξεως:	105 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας:	142 ± 10"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	170 ± 10 kg/m ³	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	400 ± 20 kg/m ³	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	3 μήνες στους 20 ± 5 °C σε κλειστό δωμάτιο	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Παραγωγή τεχνικών μερών και μερών απομίμησης ξύλου	

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	400 kg/m ³
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	0,5 %
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10% ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	1,5 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24°C)	DIN 18164	0,040 W/mK
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ	DIN 53431	100x10 ⁻⁶ /K
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3

ΒΑΥTHERM GF-38

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	100:110 DESMODUR 44 V 20 L	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	22 ± 2 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	40 ± 5 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22°C)	Χρόνος κρεμοποίησης:	32 ± 3"
	Χρόνος πήξεως:	105 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας:	210 ± 20"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	41 ± 2 kg/m ³	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	≥ 44kg/m ³	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	3 μήνες στους 20 ± 5 °C σε κλειστό δωμάτιο	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Μόνωση μεταλλικών κατασκευών	

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	44 kg/m ³
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	1 %
ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΥΔΑΤΟΣ (20°C , 14 ΗΜΕΡΕΣ)	DIN 53428	≤ 2% όγκου
ΚΛΕΙΣΤΑ ΚΕΛΙΑ	DIN 53428	≥ 90%
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10% ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	0,30 MPa
ΔΥΝΑΜΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (20 °C)	DIN 53421	0,70 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24°C)	DIN 18164	0,023 W/mK
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (100°C)	DIN 53431	-0,3 %
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (-30°C)	DIN 53431	+0,3 %
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3

**ΒAYTHERM GF**

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ		
ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΜΙΞΗΣ	100:100 DESMODUR 44 V 20 L	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	22 ± 2 °C	
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΦΟΡΜΑΣ	45 ± 5 °C	
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΙ ΧΡΟΝΟΙ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ (22°C)	Χρόνος κρεμοποίησης:	28 ± 2"
	Χρόνος πήξεως:	110 ± 5"
	Χρόνος πλήρους λειτουργικότητας:	230 ± 10"
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ	29 ± 2 kg/m ³	
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	41 ± 2 kg/m ³	
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	3 μήνες στους 20 ± 5 °C σε κλειστό δωμάτιο	
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Μόνωση μεταλλικών κατασκευών	

ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ		
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΦΡΟΥ	DIN 53420	41 kg/m ³
ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	DIN 53464	1 %
ΔΥΝΑΜΗ ΕΚΤΑΣΗΣ	DIN 53430	0,40 MPa
ΕΚΤΡΟΠΗ ΣΤΟ ΣΠΑΣΙΜΟ	DIN 53430	20%
ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ 10% ΣΥΜΠΙΕΣΗ	DIN 53421	0,20 MPa
ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΜΨΗΣ	DIN 53423	0,40 MPa
ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ (24°C)	DIN 52616-77	0,023 W/mK
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (100°C)	DIN 53431	-0,3 %
ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ (-30°C)	DIN 53431	+0,1 %
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ	DIN 4102	B3



4.5 Δημιουργία αφρού πολυουρεθάνης




Η διαδικασία ανάπτυξης των αφρών έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Ε.Μ.Π. Πέρα από τα δοχεία που περιελάμβαναν τις απαιτούμενες πολυόλες και το δοχείο με το ισοκυανικό άλας, το οποίο είναι κοινό και για τους τέσσερις τύπους αφρού, απαιτήθηκε η συγκέντρωση διαφόρων εργαλείων, δοχείων κτλ.

Συγκεντρωτικά χρειάστηκαν:

- Δοχεία πολυολών
- Δοχείο ισοκυανικού άλατος
- Μονωτική ταινία
- Ζυγαριά ακριβείας
- Αναδευτήρας
- Φύλλα τεφλόν (Πολυτετραφθοροαιθυλένιο) και χαρτιού
- Πλαστικά ποτήρια γενικής χρήσης
- Προστατευτικές μάσκες
- Βαρίδια (μαντεμένοι τάκοι)

Επιπλέον, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση των κλιματιστικών μηχανημάτων ώστε η θερμοκρασία του χώρου να βρίσκεται στα επίπεδα των 20-22 °C, όπου υπάρχει άρτια συμπεριφορά των αντιδρώντων.

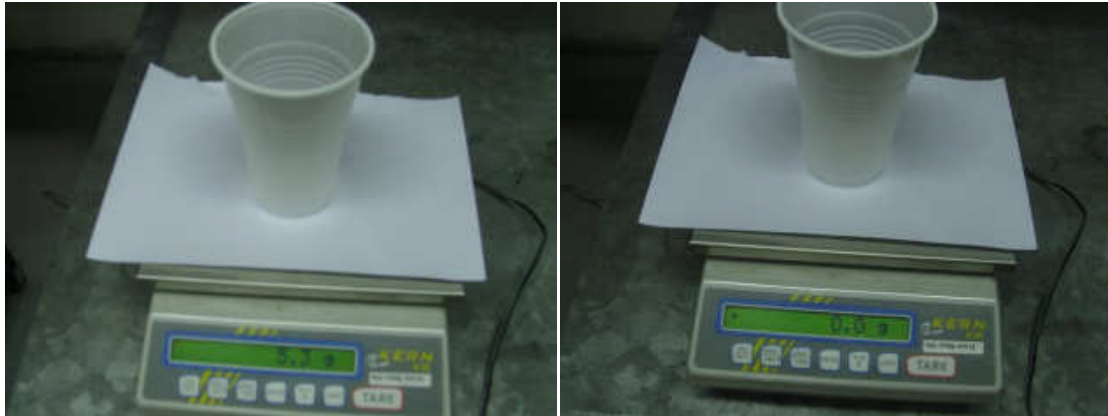
Αρχικά, από την ογκομέτρηση για κάθε δοκίμιο, τις ονομαστικές πυκνότητες και την αναλογία πολυόλης-ισοκυανικού των αφρών, μεγέθη που δίδονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά του καθενός, υπολογίστηκε το βάρος της πολυουρεθάνης που απαιτείται για την πλήρωση των κελυφών.

Μορφολογία δοκιμίου	Όγκος δοκιμίου (m ³)	Τύπος αφρού	Πυκνότητα αφρού (Kgr/m ³)	Αναλογία πολυόλης/ισοκυανικού άλατος	Βάρος πολυόλης (Kgr)	Βάρος ισοκυανικού άλατος(Kgr)	Συνολικό βάρος αφρού (Kgr)
	0,000781	GF	41	100:100	0,01601	0,01601	0,03202
		GF-38	44	100:110	0,016364	0,018	0,03436
		BD-100	250	100:100	0,09763	0,09763	0,19525
		BOF	400	100:100	0,1562	0,1562	0,31240
	0,000584	GF	41	100:100	0,01197	0,01197	0,02394
		GF-38	44	100:110	0,012236	0,01346	0,02570
		BD-100	250	100:100	0,073	0,073	0,14600
		BOF	400	100:100	0,1168	0,1168	0,23360
	0,000683	GF	41	100:100	0,014	0,014	0,02800
		GF-38	44	100:110	0,01431	0,015742	0,03005
		BD-100	250	100:100	0,08538	0,08538	0,17075
		BOF	400	100:100	0,1366	0,1366	0,27320

Πίνακας 4.3



Γνωρίζοντας τις απαιτούμενες ποσότητες, προχωρήσαμε σε μηδενισμό της ζυγαριάς με ένα προστατευτικό φύλλο χαρτιού και ένα άδειο πλαστικό ποτήρι ώστε να έχουμε την ακριβή ένδειξη του βάρους του υλικού, με ακρίβεια δεκάτου του γραμμαρίου [Σχήμα 4.7].



Σχήμα 4.7: Μηδενισμός ζυγαριάς

Τα άδεια κελύφη καλύφθηκαν με μονωτική ταινία στη βάση τους ώστε να αποφευχθεί η εκροή του υλικού κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την έκχυση όπου το μίγμα βρισκόταν σε υγρή κατάσταση [Σχήμα 4.8].



Σχήμα 4.8: Μόνωση τεμαχίων



Εν συνεχεία, τοποθετήθηκε σε ένα άδειο πλαστικό ποτήρι η απαιτούμενη ποσότητα πολυόλης και σε ένα δεύτερο αυτή του ισοκυανικού άλατος κάθε περιπτώσεως [Σχήμα 4.9]. Καθώς οι ποσότητες ήταν αρκετά μικρές, η διαδικασία απαιτούσε ιδιαίτερη προσοχή [Σχήμα 4.10].



Σχήμα 4.9: Πολυόλη και ισοκυανικό άλας



Σχήμα 4.10: Ανάμιξη συστατικών



Μετά την ανάμιξη των δύο υλικών (η οποία πραγματοποιήθηκε με πρόσθεση του ισοκυανικού, το οποίο παρουσίαζε μεγαλύτερη ρευστότητα, στην πολυόλη) το μίγμα αναδεύεται για 10-12'' με ρυθμικές κυκλικές κινήσεις ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή ομοιογένεια [Σχήμα 4.11].



Σχήμα 4.11: Ανάδευση

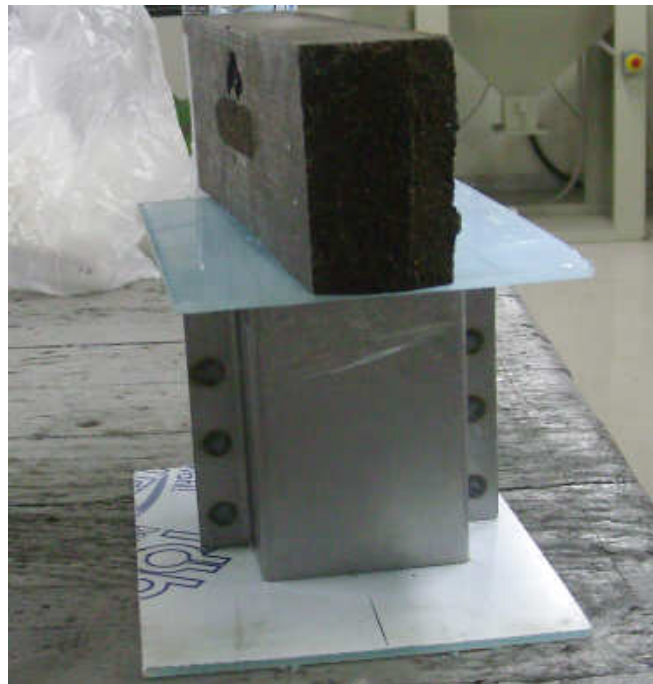
Το μίγμα εκχυνόταν στο κέλυφος άμεσα [Σχήμα 4.12] καθώς ο σχηματισμός του αφρού άρχιζε σχεδόν ακαριαία. Το δοκίμιο δεν καλυπτόταν παρά μόνο όταν η διόγκωση του αφρού έφθανε περί το μέσο του ύψους του δοκιμίου για την αποφυγή ύπαρξης έγκλειστου αέρα. Για την κάλυψη χρησιμοποιήθηκε κομμάτι φύλλου από τεφλόν, το οποίο είναι ένα υλικό με ιδιότητα να μην προσκολλάται στον αφρό πολυουρεθάνης.



Σχήμα 4.12: Έκχυση



Για να συγκρατηθεί η διόγκωση προστέθηκε κατάλληλο για κάθε περίπτωση βάρος. Για τους αφρούς με μικρή πυκνότητα η τοποθέτηση ενός μαντεμένιου τάκου βάρους 10kgr ήταν αρκετή, ενώ για τα άλλα τεμάχια χρησιμοποιήθηκε μέγγενη [Σχήμα 4.13].



Σχήμα 4.13: Συγκράτηση



Τέλος, η συγκράτηση των δοκιμίων αφαιρούταν μετά από 2 λεπτά όταν και ο σχηματισμός του αφρού σταματούσε (ο ακριβής χρόνος πήξεως για όλους τους τύπους αφρού ήταν 110'') [Σχήμα 4.14]. Τα τελικά τεμάχια αποθηκεύτηκαν σε σκιερό μέρος μέχρι την διεξαγωγή των πειραμάτων [Σχήμα 4.15].



Σχήμα 4.14: Αφαίρεση συγκράτησης



Σχήμα 4.15: Τελικά δοκίμια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΥΝΘΑΙΨΗΣ



5.1 Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού

Για την αξονική στατική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 του εργαστηρίου [Σχήμα 5.1]. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 10 KNt.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο, 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.



Σχήμα 5.1: Μηχανή δοκιμών Instron 4482 α) πλαίσιο β) κινητή κεφαλή γ)πίνακας ελέγχου



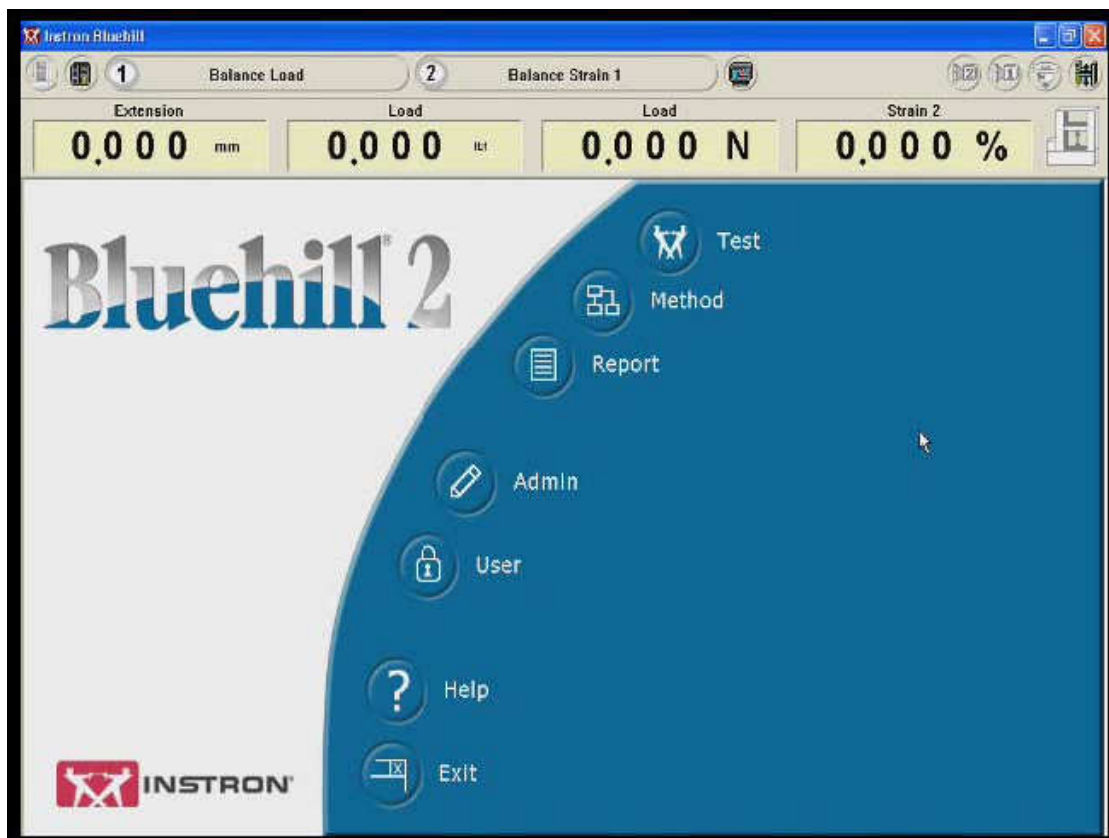
Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- 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. Απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς:

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

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή και την καταγραφή των αποτελεσμάτων είναι το Bluehill 2 [Σχήμα 5.2]. Πρόκειται για ένα πλήρες πακέτο εφαρμογών που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιήσει τυποποιημένες μεθόδους δοκιμών ή να τις τροποποιήσει κατ' επιλογήν. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο. Μετά το πέρας της διαδικασίας υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης αναφοράς με τα ζητούμενα μεγέθη και εξαγωγής αρχείου *.raw με όλα τα αριθμητικά δεδομένα που καταγράφηκαν.



Σχήμα 5.2: Αρχική οθόνη Bluehill 2



Αναλυτικά, οι διάφορες λειτουργίες που παρέχονται από το λογισμικό είναι:

- **TEST**
Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή πειράματος που ήδη έχει προετοιμαστεί. Το λογισμικό Bluehill 2 διαθέτει μια μεγάλη σειρά από τυποποιημένες μεθόδους, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη να μελετηθούν πρότυπα ASTM, ISO, DIN EN, για την ρύθμιση των παραμέτρων της υπό μελέτης δοκιμής. Οι τυποποιημένες μεθόδου καλύπτουν εκατοντάδες εφαρμογές.
- **METHOD**
Επιτρέπει την εισαγωγή νέων μεθόδων πειραμάτων ή τη μεταβολή των συνθηκών ενός ήδη υπάρχοντος όπως για παράδειγμα τη μεταβολή των διαστάσεων και της γεωμετρίας του δοκιμίου καθώς και άλλων παραμέτρων της πρέσας όπως η ταχύτητα του εμβόλου.
- **REPORT**
Εμφανίζει τα αποτελέσματα της δοκιμής και εισάγει την διαδικασία δημιουργίας γραφημάτων χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής του τρόπου εμφάνισης των αποτελεσμάτων στην οθόνη.
- **ADMIN**
Παρέχει πληροφορίες που αφορούν αποκλειστικά τον υπεύθυνο του συστήματος.
- **USER**
Δίνει στον υπεύθυνο του συστήματος την δημιουργία κωδικού πρόσβασης.
- **HELP**
Παρέχει βοηθητικές οδηγίες στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα.
- **EXIT**
Έξοδος από το πρόγραμμα.

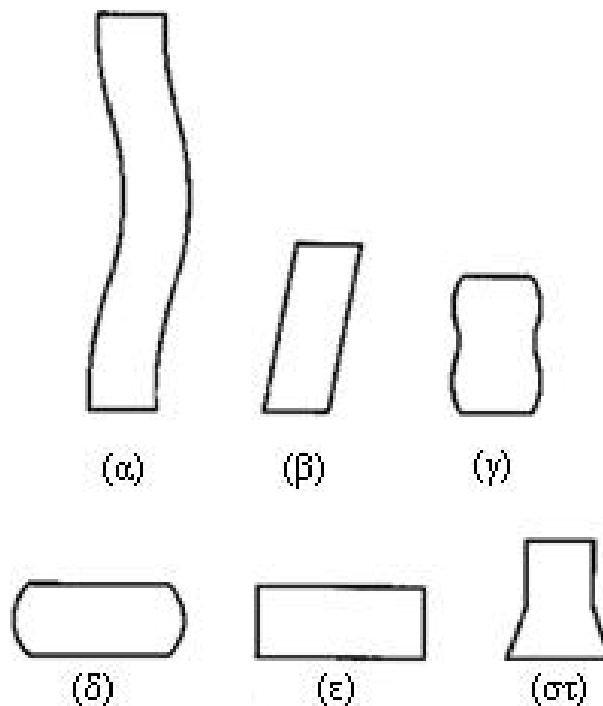


5.2 Δοκιμή σύνθλιψης

Μια αξονική δοκιμή συμπίεσης μελετά τη συμπεριφορά των υλικών υπό φορτία θραύσης. Το δείγμα συμπιέζεται με την παραμόρφωση σε διάφορα φορτία να καταγράφεται. Μπορούν να υπολογισθούν μεγέθη όπως θλιπτική τάση, πίεση, όριο ελαστικότητας, όριο διαρροής κ.α.

Η μέτρηση της πλαστικής συμπεριφοράς απαιτεί ελεγχόμενες συνθήκες δοκιμής, ενώ η μέτρηση των ορίων θραύσης λαμβάνει χώρα εκμεταλλευόμενη το βαρελοειδή σχηματισμό που παρουσιάζεται καθώς και τις ελεγχόμενες συνθήκες τάσης και πίεσης στον ισημερινό αυτού. Επίσης, είναι χρήσιμη για την μέτρηση των ελαστικών και των θλιπτικών ιδιοτήτων εύθραυστων ή χαμηλής ολκιμότητας υλικών.

Σε κάθε περίπτωση, η χρήση των δειγμάτων που έχουν μεγάλο λόγο L / D (ύψος / πλάτος) θα πρέπει να αποφεύγεται για την πρόληψη εμφάνισης του φαινομένου του λυγισμού και της διατμητικής παραμόρφωσης [Σχήμα 5.3].



Σχήμα 5.3:

- α) λυγισμός για $L / D > 5$
- β) διάτμηση για $L / D > 2.5$
- γ) διπλή βαρελοποίηση για $L / D > 2$ και ύπαρξη τριβής στις επιφάνειες επαφής
- δ) βαρελοποίηση για $L / D < 2$ και ύπαρξη τριβής στις επιφάνειες επαφής
- ε) ομοιογενής συμπίεση για $L / D < 2$ χωρίς ύπαρξη δυνάμεων τριβής
- στ) ασταθής θλίψη αποσκληρωμένου υλικού



5.3 Χαρακτηριστικά των δοκιμών

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν. Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Κωδικός δοκιμίου	Τύπος αφρού	Βάρος κελύφους (Kgr)	Βάρος αφρού (Kgr)	Συνολικό βάρος (Kgr)	Όγκος δοκιμίου (m ³)
DH-4S	-	0,28891	-	0,28891	0,00078
DH-4S-GF	BAYTHERM GF	0,28891	0,03202	0,32093	0,00078
DH-4S-GF38	BAYTHERM GF-38	0,28891	0,03436	0,32327	0,00078
DH-4S-BD100	BAYTHERM BD-100	0,28891	0,19525	0,48416	0,00078
DH-4S-BOF	BAYTHERM BOF	0,28891	0,3124	0,60131	0,00078
DH-6S	-	0,24332	-	0,24332	0,00058
DH-6S-GF	BAYTHERM GF	0,24332	0,02394	0,26726	0,00058
DH-6S-GF38	BAYTHERM GF-38	0,24332	0,02570	0,26902	0,00058
DH-6S-BD100	BAYTHERM BD-100	0,24332	0,146	0,38932	0,00058
DH-6S-BOF	BAYTHERM BOF	0,24332	0,2336	0,47692	0,00058
DH-8S	-	0,25555	-	0,25555	0,00068
DH-8S-GF	BAYTHERM GF	0,25555	0,02800	0,28355	0,00068
DH-8S-GF38	BAYTHERM GF-38	0,25555	0,03005	0,2856	0,00068
DH-8S-BD100	BAYTHERM BD-100	0,25555	0,17075	0,4263	0,00068
DH-8S-BOF	BAYTHERM BOF	0,25555	0,2732	0,52875	0,00068

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη των δοκιμών

Όπως γίνεται σαφές από τον παραπάνω πίνακα, η ονομασία (κωδικοποίηση) των δοκιμών περιλαμβάνει τρία πεδία (# - # - #). Στο πρώτο πεδίο υποδηλώνεται η ευρύτερη κατηγορία διαμόρφωσης των δοκιμών, η οποία στις περιπτώσεις τις οποίες πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι πάντοτε διαμόρφωση double hat (DH). Στο δεύτερο πεδίο αναγράφεται η μορφολογία της διατομής του τεμαχίου (4S - 6S - 8S). Τέλος, στο τρίτο πεδίο αναφέρεται ο τύπος του αφρού που χρησιμοποιείται ως υλικό πυρήνα στο εκάστοτε δοκίμιο (GF – GF-38 – BD-100 – BOF) ή παραμένει κενό στις περιπτώσεις των άδειων κελυφών.



5.4 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

Τα τεμάχια καταπονήθηκαν από την μηχανή δοκιμών Instron με ταχύτητα 10mm/min με ελεγχόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος 18-22⁰ C και σχετικής υγρασίας 50%.

Για το κάθε δοκίμιο παρατίθενται, αρχικά, διαδοχικές φωτογραφίες της κατάρρευσης. Στη συνέχεια δίδεται το εκάστοτε διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης και ένας πίνακας με τα ενδιαφέροντα μεγέθη. Από το πρόγραμμα Bluehill 2, λάβαμε ένα αρχείο *.raw με περίπου 5000 σημεία μετρήσεων για το κάθε τεμάχιο. Λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων καθίσταται δυνατή η άκρως ικανοποιητική σχεδίαση του διαγράμματος και ο υπολογισμός των υπολοίπων μεγεθών με την εισαγωγή του αρχείου αυτού σε υπολογιστικό πρόγραμμα [Σχήμα 5.4]. Τέλος, ακολουθεί σχολιασμός της διαδικασίας κατάρρευσης για το κάθε δοκίμιο.

The screenshot shows the 'Import' dialog box in Bluehill 2. The 'Encoding' section is set to 'Unicode (UTF-8)'. Under 'Import as', 'As text' is selected. The 'Other options' section has 'Quoted field as text' checked. The 'Table' section shows a preview of the data table with the following content:

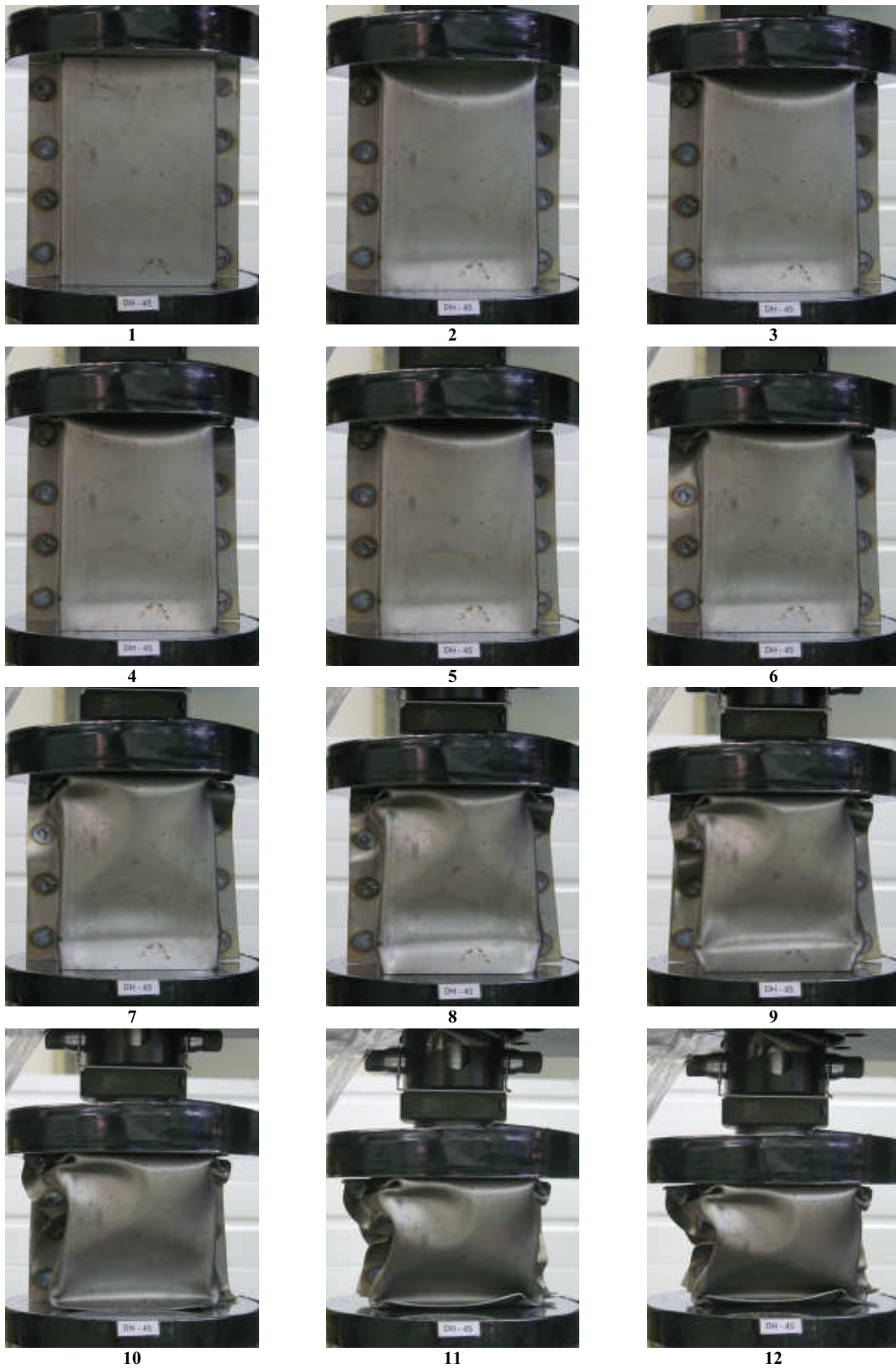
Value	Import	Import	Import	Import
1. Data	PIF Count	Compressive extension	Compressive strain	Comp
2.	1	0	0	0
3.	2	0.014	0.0112	0
4.	3	0.0307	0.02456	13.45
5.	4	0.0473	0.03784	42.96
6.	5	0.064	0.0512	72.45
7.	6	0.0807	0.06456	147.6
8.	7	0.0974	0.07792	271.3
9.	8	0.114	0.0912	394.1

Σχήμα 5.4: Εισαγωγή των δεδομένων σε πρόγραμμα υπολογιστικών φύλλων

Η απορροφημένη ενέργεια υπολογίστηκε από εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος φορτίου – παραμόρφωσης με αριθμητική ολοκλήρωση (μέθοδος του τραπεζίου).



5.4.1 *DH-4S*





13



14

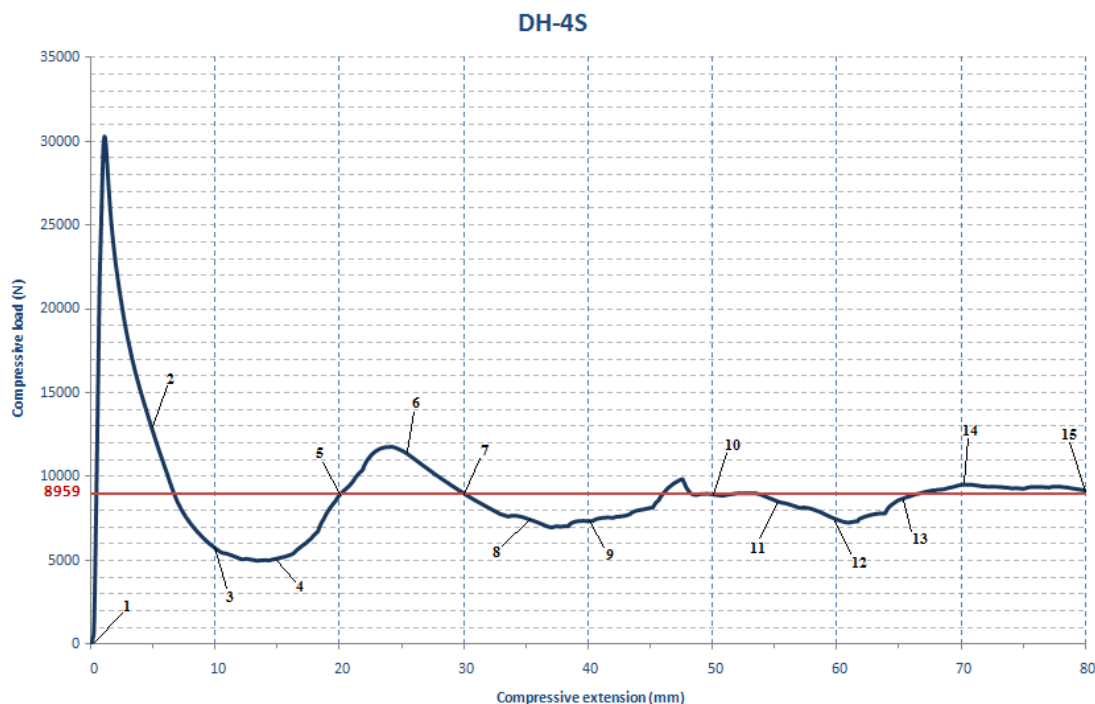


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	50
11	55
12	60
13	65
14	70
15	80



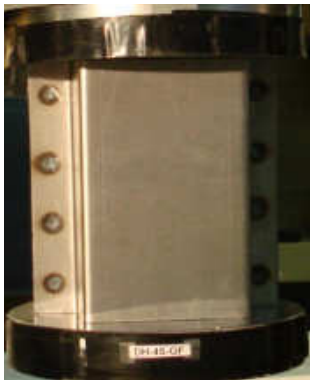
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	30147 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	8959 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	716,84 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	3,36
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	3876,86 J/Kgr
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	1435,98 kJ/m ³

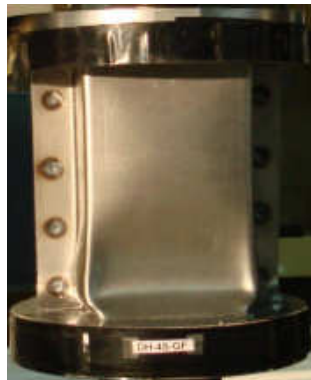
Όπως ήταν αναμενόμενο το δοκίμιο ανθίσταται, αρχικά, στην ασκούμενη από τη μηχανή δύναμη αυξάνοντας τάχιστα το εφαρμοζόμενο φορτίο. Παράλληλα το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει από το άνω μέρος. Στο σημείο όπου η παραμόρφωση βρίσκεται στα 1,16 mm εντοπίζουμε το μέγιστο φορτίο ενώ στη συνέχεια η καμπύλη λαμβάνει φθίνουσα πορεία. Σε συμπίεση περί τα 5 mm αρχίζει και η παραμόρφωση της βάσης του κελύφους επηρεάζοντας σε σημαντικό βαθμό τη στήριξη του. Σε συνδυασμό με την αποτυχία της σημειακής συγκόλλησης που παρατηρείται στα 50 mm, που είχε ως αποτέλεσμα την αποκόλληση μεταξύ των πλευρών του δοκιμίου στη διατομή η οποία έρχεται σε επαφή με την κινητή έδρα της μηχανής, το εφαρμοζόμενο φορτίο δεν επανέρχεται σε υψηλά επίπεδα. Κατά συνέπεια δεν απορροφήθηκε σημαντικό ποσό ενέργειας και παρουσιάστηκε υψηλός λόγος ομοιομορφίας φορτίου.



5.4.2 *DH-4S-GF*



1



2



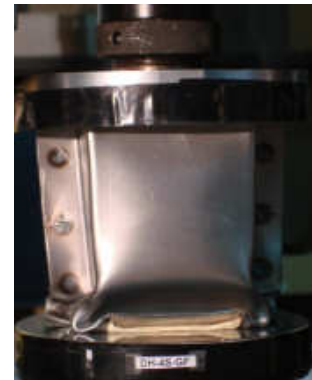
3



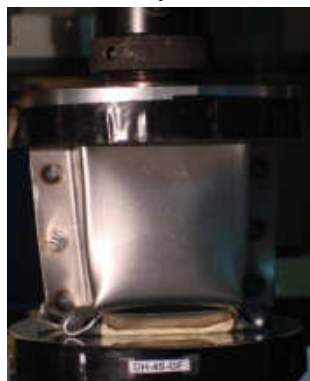
4



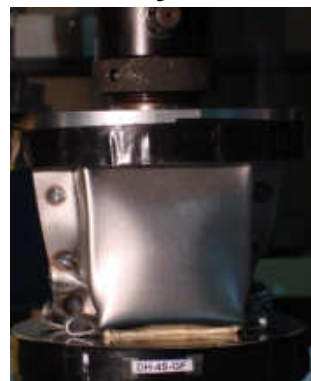
5



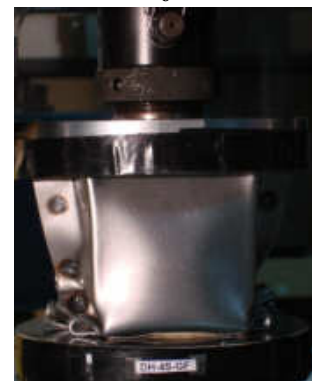
6



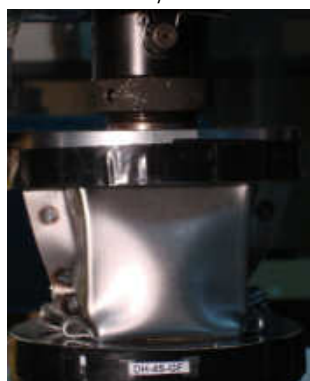
7



8



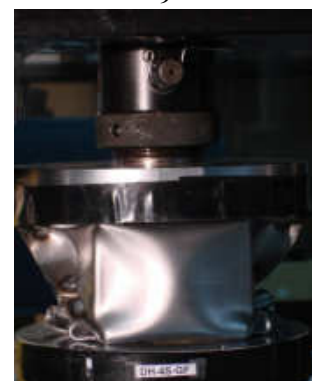
9



10



11



12



13



14

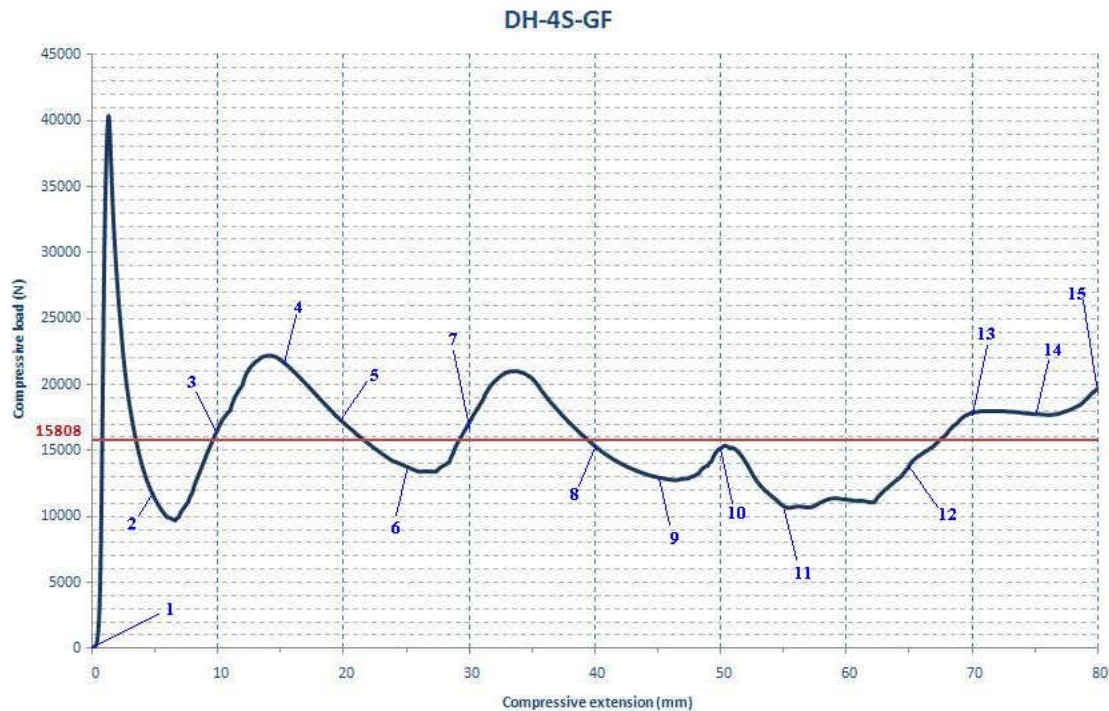


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	40
9	45
10	50
11	55
12	65
13	70
14	75
15	80



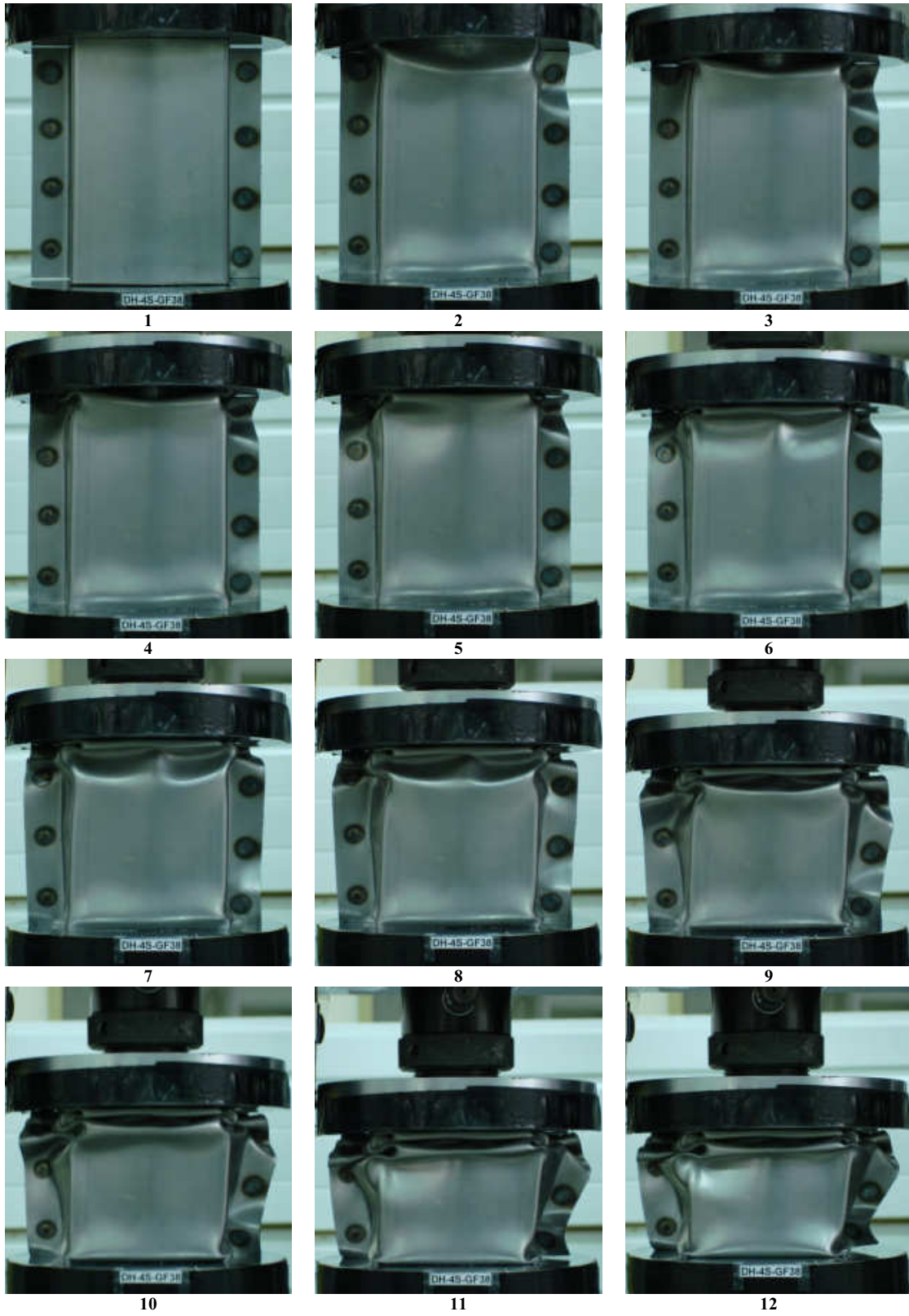
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	40389 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	15808 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1264,74 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,55
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	6157,59 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	2533,53 kJ/m ³

Αρχικά, κατά την χρονική στιγμή όπου η επιφάνεια της πρέσας έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της με πολύ μικρή παραμόρφωση. Το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στα 1,3 mm και εν συνεχεία φθίνει. Παράλληλα, αρχίζει να σχηματίζεται ο πρώτος λοβός σε ύψος περίπου 1,5 mm από την ακίνητη κεφαλή της μηχανής. Μέχρι τα 40 mm συμπίεσης (μέσο διαδρομής), η κατάρρευση συνεχίζεται με την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης να ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή και με την σταδιακή ολοκλήρωση της δημιουργίας του αρχικού λοβού καθώς και την παράλληλη έναρξη δημιουργίας ενός δεύτερου 2 mm υψηλότερα. Το άνω μισό μέσο του δοκιμίου φαίνεται σχεδόν ανεπηρέαστο μέχρι αυτό το σημείο. Αίφνης, λόγω ατελειών της κατασκευής οι οποίες κατέστησαν αδύναμες την άνω και την κάτω πλευρά του δοκιμίου, έχουμε διάχυση του κελύφους προς τα έξω στην πλευρά που βρίσκεται σε επαφή με την κινητή κεφαλή. Η δοκιμή ολοκληρώνεται με το φορτίο να έχει αυξητικές τάσεις και τον αφρό, που έχει παραμορφωθεί εν μέρει ελαστικά, να επανέρχεται, σε κάποιο βαθμό, μετά το τέλος του πειράματος.



5.4.3 *DH-4S-GF38*





13



14

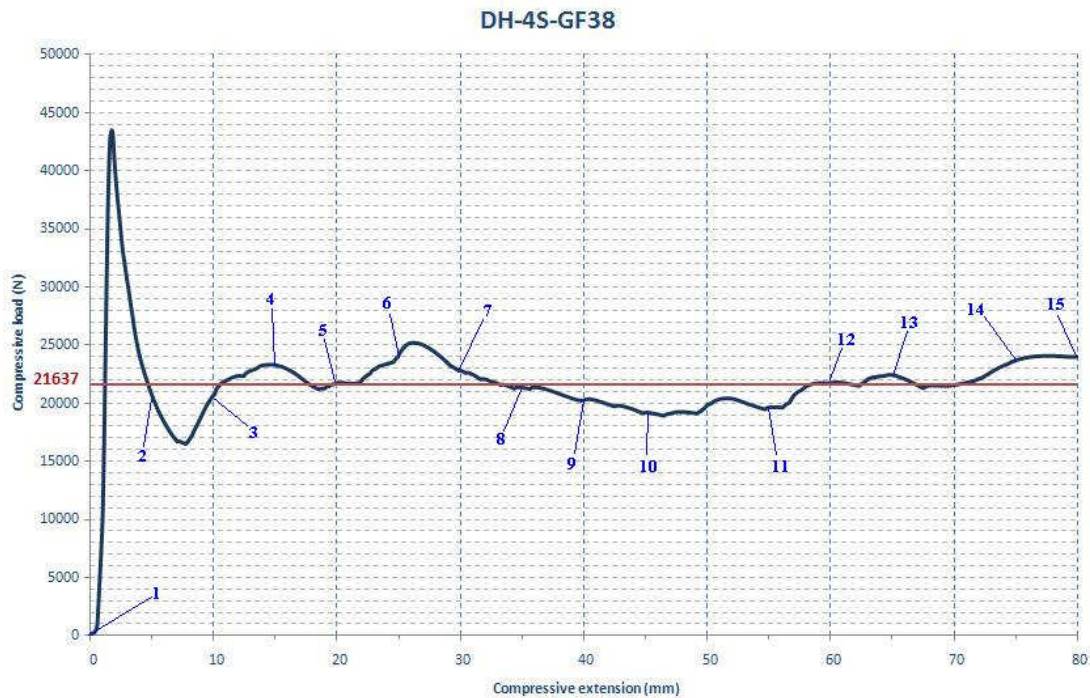


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	55
12	60
13	65
14	75
15	80



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	43516 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	21637 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1731,15 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,01
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	8367,38 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	3467,85 kJ/m ³

Κατά την εκκίνηση της δοκιμής σύνθλιψης παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου καθώς το δοκίμιο είναι ανέπαφο και παραμορφώνεται ελάχιστα. Το φορτίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του στα 1,75 mm και στη συνέχεια κινείται πτωτικά. Παρατηρούμε την ταυτόχρονη δημιουργία λοβών στις πλευρές οι οποίες έρχονται σε επαφή με την πρέσα, άνω και κάτω. Στα 25 mm της διαδρομής της κινητής κεφαλής της μηχανής έχουμε την έναρξη σχηματισμού ενός τρίτου λοβού στο άνω μισό μέρος του δοκιμίου παράλληλα του ήδη υπάρχοντος. Η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης διατηρείται σε σταθερό επίπεδο καθ' όλη την περαιτέρω διαδικασία, γύρω από την τιμή του μέσου φορτίου όπως είναι προφανές. Ως αποτέλεσμα αυτού μπορούμε να διαπιστώσουμε πως η απορροφούμενη ενέργεια είναι σε αρκετά υψηλό επίπεδο



5.4.4 *DH-4S-BD100*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13



14

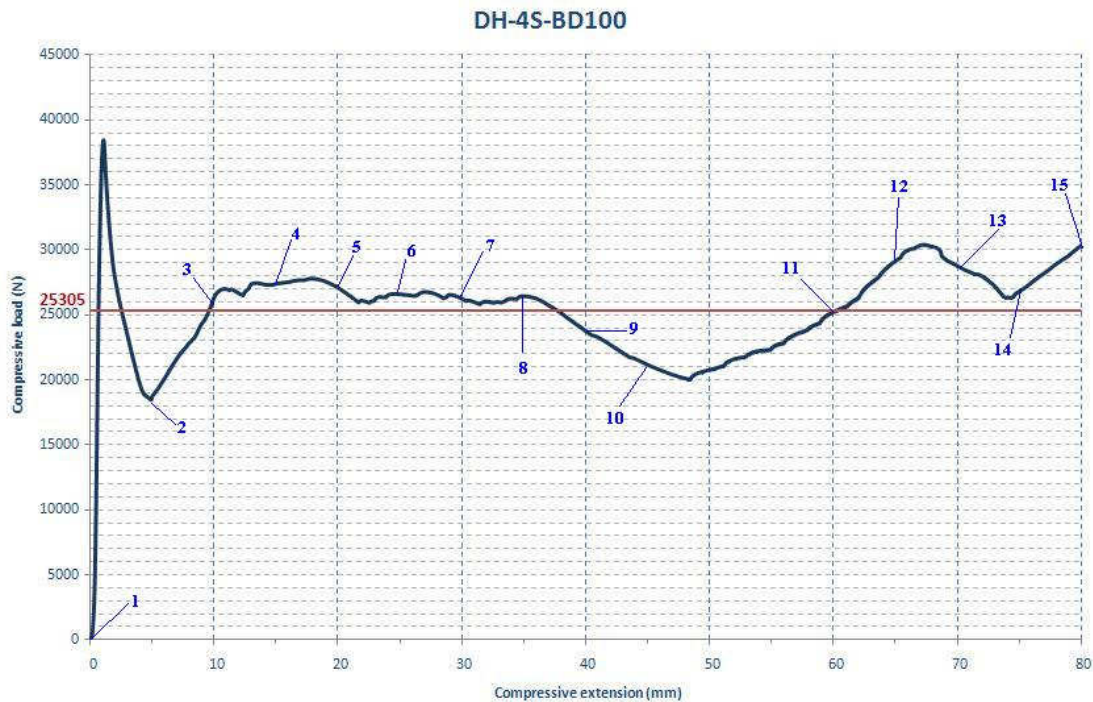


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	60
12	65
13	70
14	75
15	80



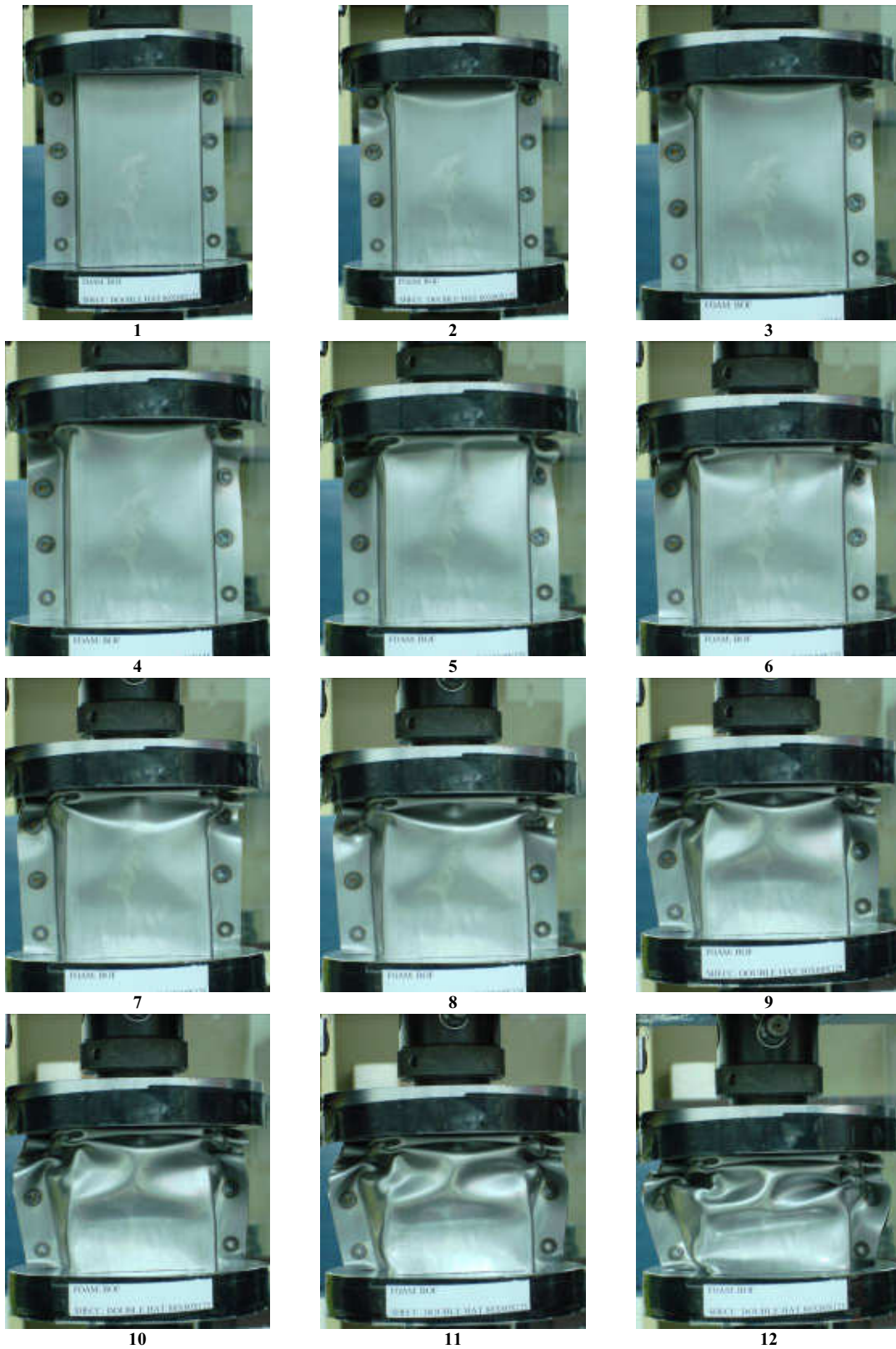
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	38442 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	25305 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	2024,62 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,52
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	6533,93 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	4055,73 kJ/m ³

Αρχικά, την χρονική στιγμή όπου η κινούμενη επιφάνεια της μηχανής έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου όπως αναμενόταν καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της με μικρή παραμόρφωση. Όπως γίνεται εμφανές από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, το τεμάχιο καταρρέει προοδευτικά από την αρχή της σύνθλιψης. Έχουμε την μέγιστη τιμή του φορτίου στα 1,08 mm παραμόρφωσης, σημείο στο οποίο αρχίζει η πτώση του μέχρι τα 5 mm. Το φορτίο διατηρείται σε υψηλά επίπεδα μέχρι τα 35 mm της διαδρομής. Έπειτα παρατηρείται πτώση του κάτω από την τιμή του μέσου φορτίου μέχρι τα 60 mm. Από το σημείο αυτό μέχρι τα 80 mm (τέλος διαδικασίας) η δύναμη της πρέσας κυμαίνεται πάλι σε υψηλά επίπεδα. Είναι εμφανής η επίδραση του αφρού στα αποτελέσματα καθώς πρόσθεσε στιβαρότητα και σταθερότητα στο τεμάχιο με συνέπεια την αύξηση της απορροφούμενης από αυτό ενέργειας.



5.4.5 *DH-4S-BOF*





13



14

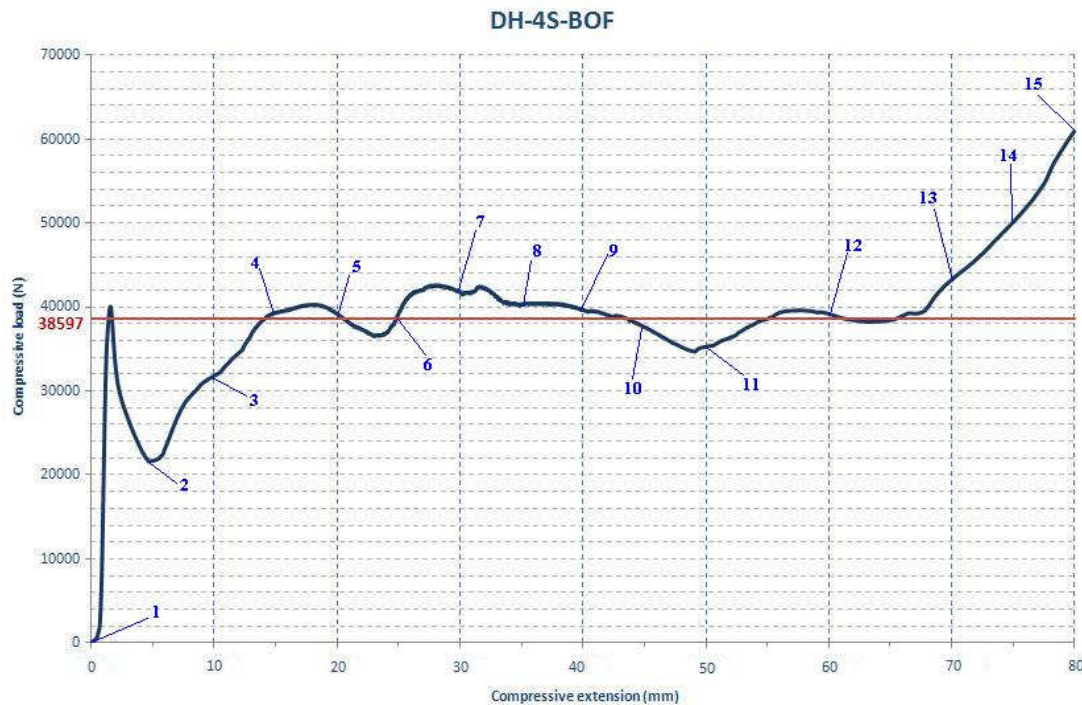


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	60
13	70
14	75
15	80



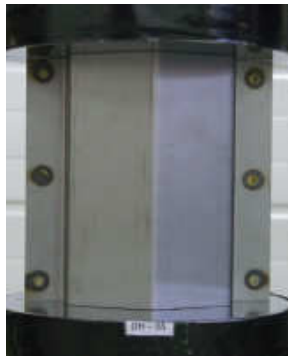
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	60939 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	38597 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	3087,91 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,58
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	8023,91 J/Kgr
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	6185,72 kJ/m ³

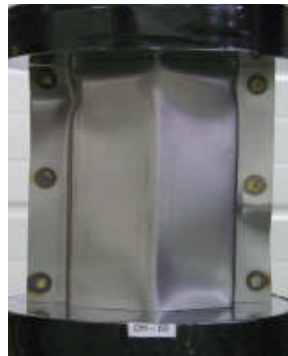
Στην έναρξη της δοκιμής το φορτίο αυξάνει με ταχύ ρυθμό καθώς το δοκίμιο αντιστέκεται στην παραμόρφωση όντας αέριο, φτάνοντας σε τοπικό μέγιστο, σημείο στο οποίο η καμπύλη αρχίζει να παρουσιάζει φθίνουσα πορεία περίπου ως τα 5 mm. Όπως γίνεται εμφανές από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, το τεμάχιο καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος του με την έναρξη της σύνθλιψης. Το φορτίο διατηρείται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα σε όλη τη διαδρομή της πειραματικής δοκιμής. Ειδικότερα, μετά τα 65 mm εμφανίζει αυξητικές τάσεις έτσι ώστε το μέγιστο φορτίο να εντοπίζεται στα 80 mm (πέρας της θλιπτικής καταπόνησης). Είναι εμφανέστατο ότι η παρουσία του αφρού που έχει ιδιαίτερα μεγάλη πυκνότητα αύξησε σημαντικά τα επίπεδα της απορροφούμενης ενέργειας και της αντοχής του δοκιμίου.



5.4.6 *DH-6S*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13



14

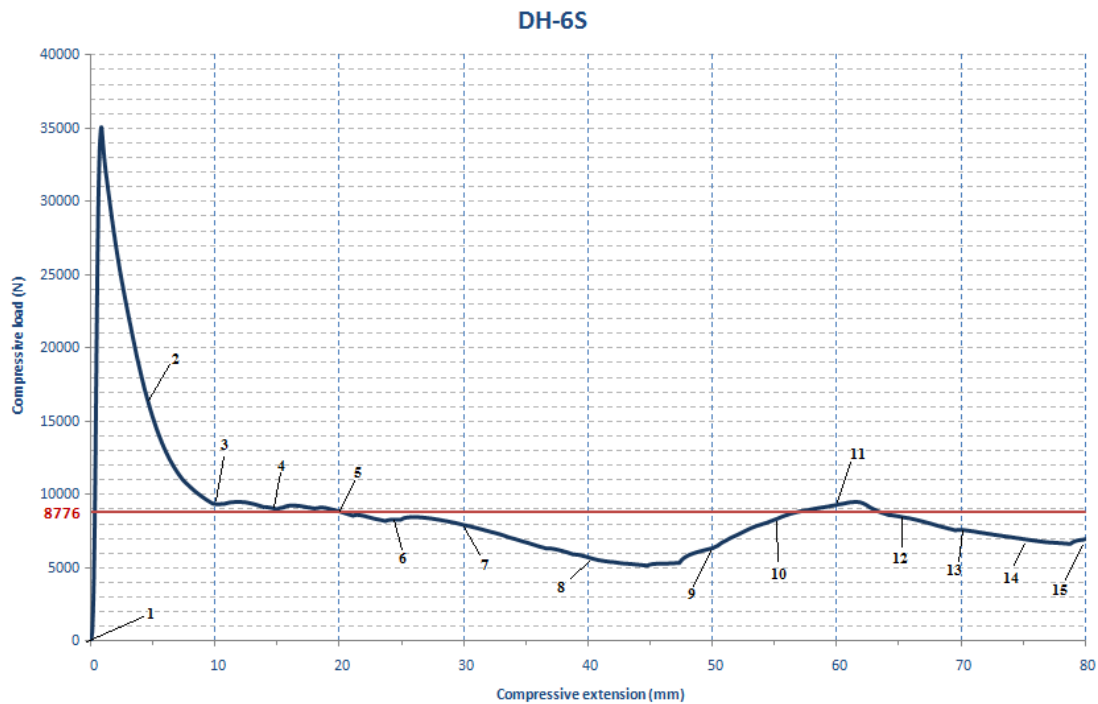


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	40
9	50
10	55
11	60
12	65
13	70
14	75
15	80



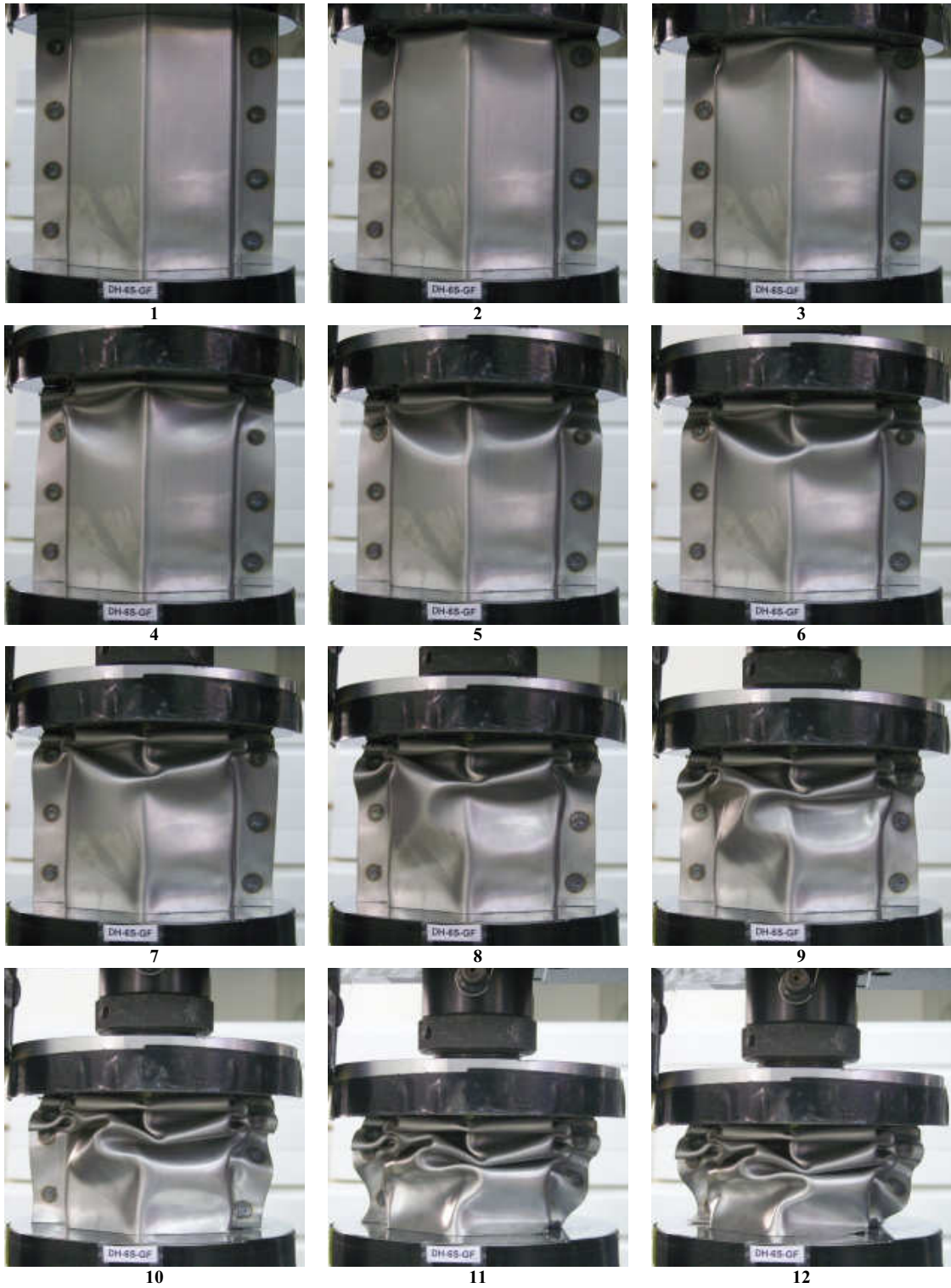
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	35033 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	8776 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	702,20 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	3,99
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	4509,24 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	1891,70 kJ/m ³

Κατά την έναρξη της πειραματικής προσομοίωσης το ασκούμενο φορτίο αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς καθώς το κέλυφος ανθίσταται στην κίνηση της κεφαλής της μηχανής δοκιμών. Η μέγιστη τιμή του φορτίου αυτού εντοπίζεται, μόλις, στα 0,85 mm παραμόρφωσης. Εν συνεχεία φθίνει και κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα μέχρι το πέρας της διαδικασίας. Όπως γίνεται αντιληπτό από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, από την αρχή της συμπίεσης είναι εμφανέστατη η επιρροή του φαινομένου του λυγισμού που δεν επέτρεψε στο τεμάχιο να κινηθεί σε υψηλά επίπεδα ενεργειακής απορρόφησης. Χαρακτηριστικό είναι, επίσης, ότι ο δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου λαμβάνει μακράν την υψηλότερη τιμή του στην περίπτωση αυτή, συνέπεια του ότι το μέσο φορτίο είναι ιδιαίτερος χαμηλό. Τα αίτια εντοπίζονται στην έλλειψη στιβαρότητας της κατασκευής του κελύφους καθώς και στην τυχούσα ελαττωματική τοποθέτηση του στην ακίνητη κεφαλή.



5.4.7 *DH-6S-GF*





13



14

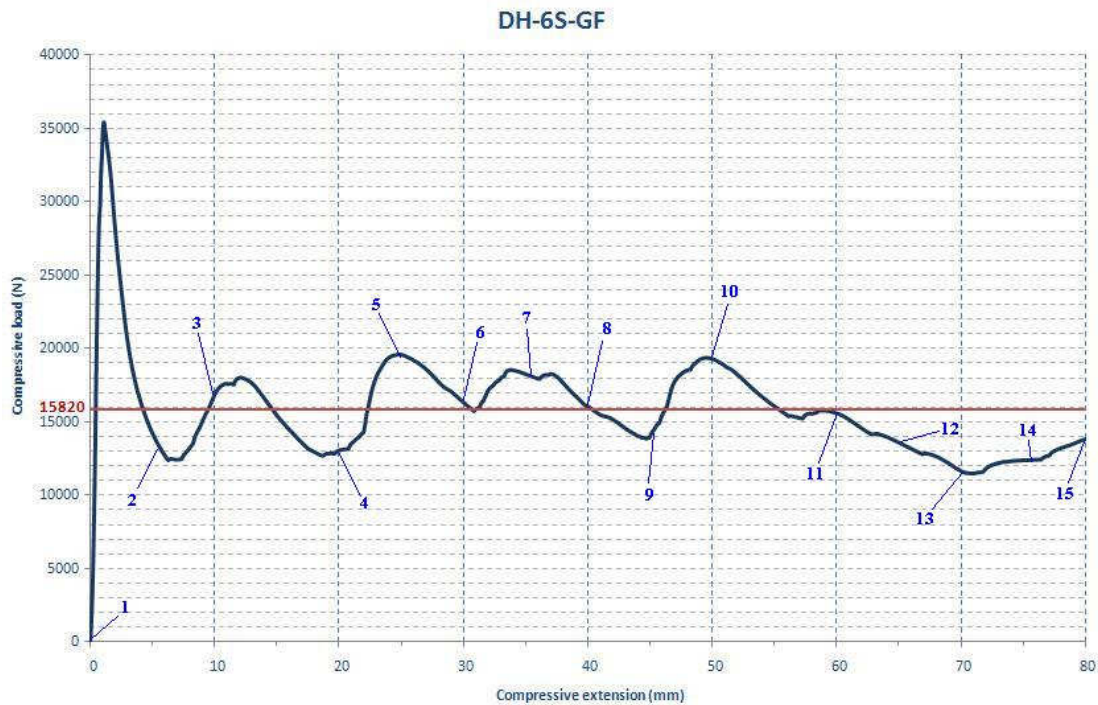


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50
11	60
12	65
13	70
14	75
15	80



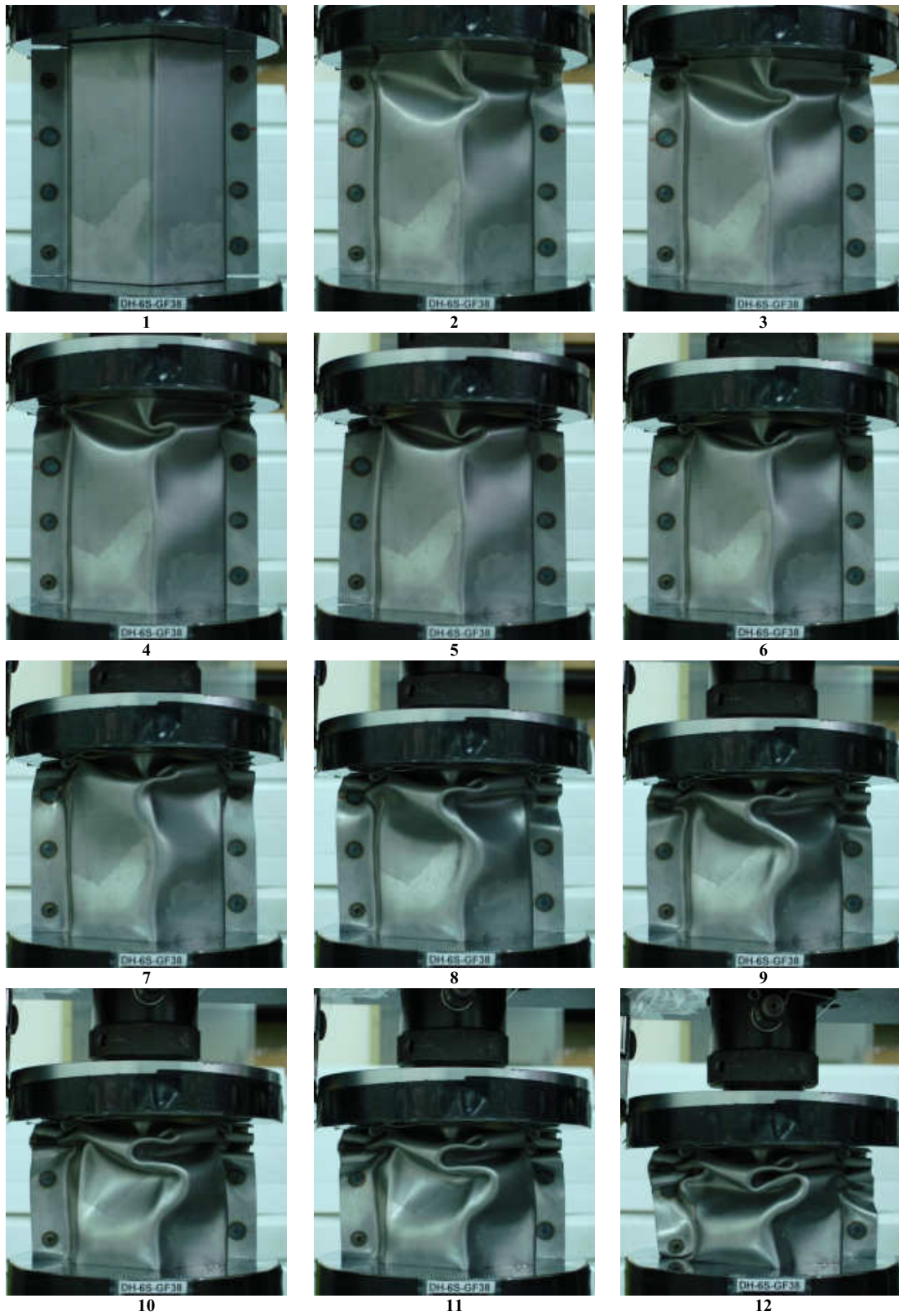
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	35436 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	15820 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1265,72 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,24
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	7399,86 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	3409,81 kJ/m ³

Όπως ήταν αναμενόμενο το δοκίμιο ανθίσταται, αρχικά, στην ασκούμενη από τη μηχανή δύναμη αυξάνοντας τάχιστα το εφαρμοζόμενο φορτίο. Παραλλήλως το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος. Η μέγιστη τιμή του φορτίου εντοπίζεται στα 1,1 mm, σημείο στο οποίο αρχίζει να φθίνει με την καμπύλη να ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή μέχρι τα 60 mm περίπου. Στο σημείο αυτό εντοπίζουμε πτώση του, προφανώς λόγω της σταδιακής παραμόρφωσης της βάσης του δοκιμίου η οποία είχε σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ασυμμετρίας στην στήριξη. Σαν συνέπεια δεν απορροφήθηκε η μέγιστη δυνατή ενέργεια στο διάστημα από τα 60 έως τα 80 mm. Συνολικά η απορροφούμενη ενέργεια δεν κυμάνθηκε σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα ξεπερνώντας, όμως, αυτή του τετραγωνικού δοκιμίου με τον ίδιο αφρό ως απόρροια της ύπαρξης μεγαλύτερου αριθμού ακμών στο κέλυφος.



5.4.8 *DH-6S-GF38*





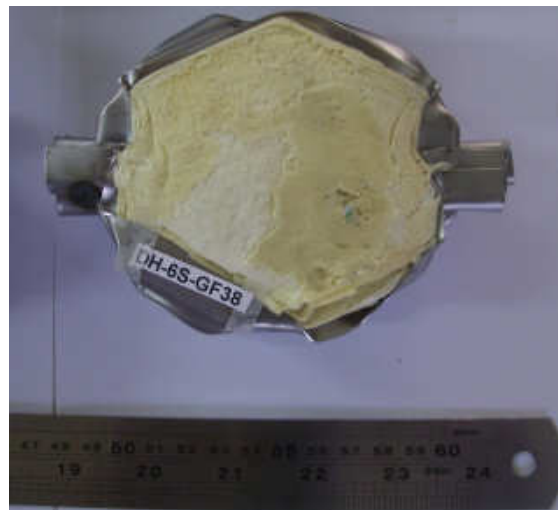
13



14

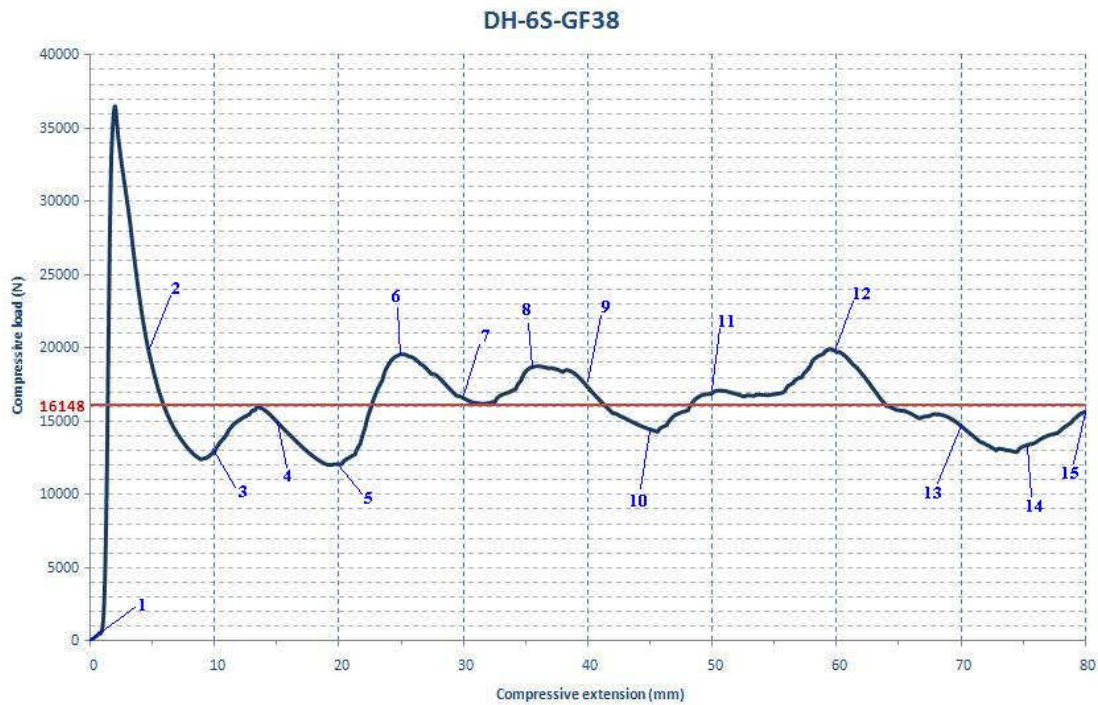


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	60
13	70
14	75
15	80



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	36483 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	16148 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1292,00 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,26
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	7504,09 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	3480,60 kJ/m ³

Κατά την έναρξη της διαδικασίας παρατηρείται ταχεία αύξηση του ασκούμενου φορτίου συνοδευόμενη με πολύ μικρή παραμόρφωση. Το μέγιστο φορτίο εντοπίζεται στα 1,98 mm, ενώ αμέσως μετά η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης αποκτά φθίνουσα πορεία. Το φορτίο, λόγω πιθανών ατελειών της κατασκευής, δεν επανέρχεται σε υψηλά επίπεδα παρά μόνον όταν το πάτημα της κινητής κεφαλής φθάνει τα 20 mm. Εκ τότε, κινείται σε υψηλότερες τιμές μέχρι τα 65 mm όπου μειώνεται ξανά και κυμαίνεται κάτω από το υπολογιζόμενο μέσο φορτίο έως το πέρας του πειράματος. Αναφορικά με τον τρόπο κατάρρευσης, άξιο παρατήρησης είναι ότι δημιουργήθηκαν τέσσερις πτυχώσεις εναλλάξ της κεντρικής ακμής του δοκιμίου, αρχής γενομένης από το άνω μέρος. Η συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε ήταν μικρότερη από το αντίστοιχο τεμάχιο τετραγωνικής διατομής, DH-4S-GF38, δείχνοντας να μην επηρεάζεται από το μεγαλύτερο αριθμό ακμών σε αυτή την περίπτωση.



5.4.9 *DH-6S-BD100*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13



14

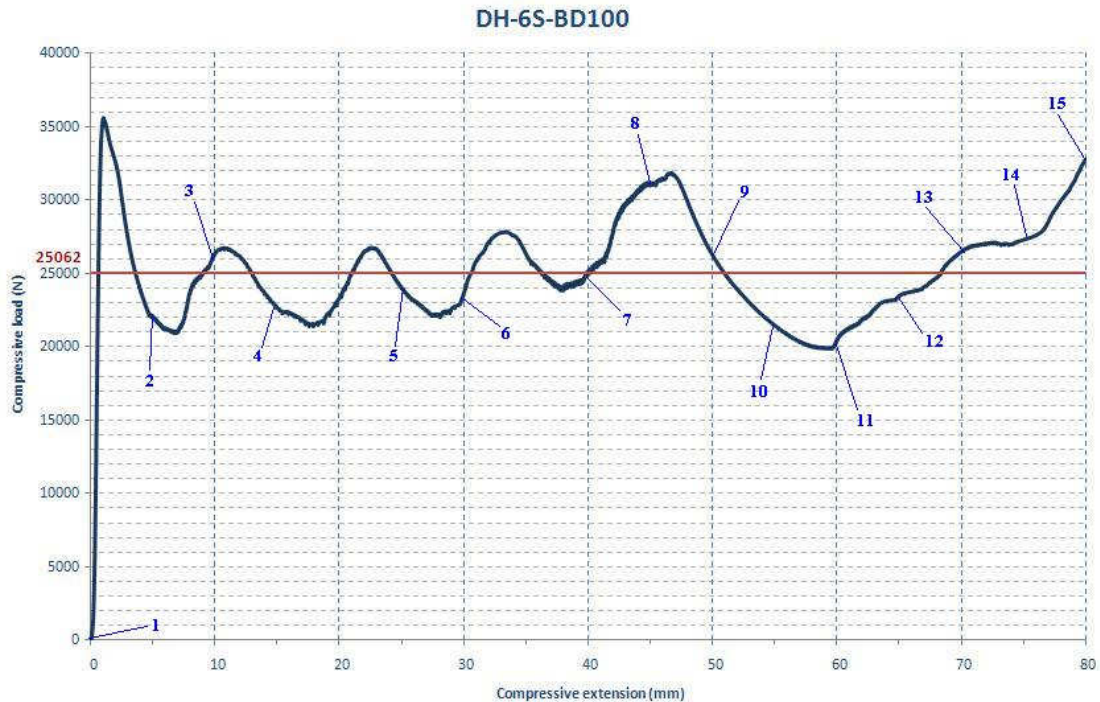


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	25
6	30
7	40
8	45
9	50
10	55
11	60
12	65
13	70
14	75
15	80



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	35597 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	25062 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	2005,13 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,42
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	8047,40 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	5401,75 kJ/m ³

Αρχικά, όπως ήταν αναμενόμενο, το φορτίο αυξάνει μέχρι τη μέγιστη τιμή του, η οποία βρίσκεται μόλις στα 1,03 mm παραμόρφωσης. Ταυτόχρονα, έχουμε τη έναρξη δημιουργίας λοβού στο άνω μέρος, σε απόσταση 10 mm από το σημείο επαφής με την κινητή κεφαλή της μηχανής. Η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης κινείται ημιτονοειδώς έως τα 40 mm, ενώ σχηματίζεται δεύτερος λοβός παράλληλα με τον πρώτο, περί τα 1,5 mm χαμηλότερα. Στο διάστημα 40 – 50 mm η ασκούμενη από τη μηχανή δύναμη αυξάνεται και παρατηρείται η αρχή δημιουργίας και τρίτου λοβού στο κάτω μισό του δοκιμίου, αυτή τη φορά. Μέχρι το πέρας του σχηματισμού του λοβού αυτού, στα 60 mm, έχουμε μείωση του φορτίου, το οποίο εν συνεχεία αυξάνει έως το πέρας της σύνθλιψης. Είναι εμφανής η επίδραση του αφρού στα αποτελέσματα καθώς πρόσθεσε στιβαρότητα και σταθερότητα στο τεμάχιο με συνέπεια την απορρόφηση σημαντικού ποσού ενέργειας, ενώ έχοντας παραμορφωθεί εν μέρει ελαστικά επανέρχεται, σε κάποιο βαθμό, μετά το τέλος του πειράματος.



5.4.10 *DH-6S-BOF*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13



14

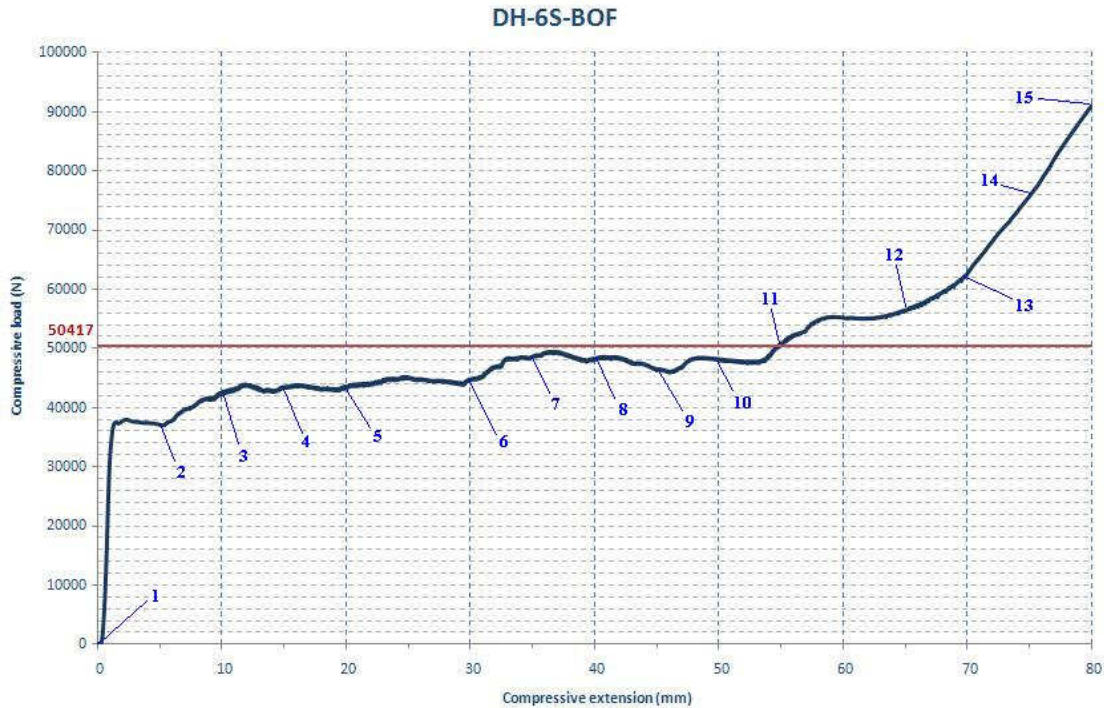


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50
11	55
12	65
13	70
14	75
15	80



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	91059 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	50417 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	4033,50 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,81
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	13214,68 J/Kgr
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	10866,11 kJ/m ³

Στην έναρξη της δοκιμής το φορτίο αυξάνει με ταχύ ρυθμό καθώς το δοκίμιο αντιστέκεται στην παραμόρφωση όντας ακέραιο μέχρι, περίπου, τα 1,3 mm. Το φορτίο συνεχίζει να αυξάνεται σταδιακά με μικρότερο, σχεδόν σταθερό ρυθμό έως τα 55 mm. Από το σημείο αυτό αυξάνει με ταχύτερο ρυθμό φτάνοντας σε μέγιστο στο πέρας της διαδρομής στα 80 mm. Αξίζει να σημειωθεί πως το μέγιστο και το μέσο φορτίο είναι πολύ υψηλά ξεπερνώντας τα 91 και τα 50 kN , αντίστοιχα. Αναφορικά με τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου, έχουμε αρχικά τη δημιουργία δύο παραλλήλων λοβών στο κάτω μισό μέρος και στη συνέχεια ενός τρίτου στο άνω μισό του τεμαχίου. Η παρουσία του αφρού ο οποίος έχει μεγάλη πυκνότητα σε συνδυασμό με τη μορφολογία του κελύφους, το οποίο είχε έξι ακμές, αύξησε σημαντικά τα επίπεδα της απορροφούμενης ενέργειας και της αντοχής του δοκιμίου καθιστώντας το ιδιαίτερα αποδοτικό καθώς απορρόφησε σχεδόν 1 kJ παραπάνω από το δοκίμιο τετραγωνικής διατομής (DH-4S-BOF).



5.4.11 *DH-8S*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13

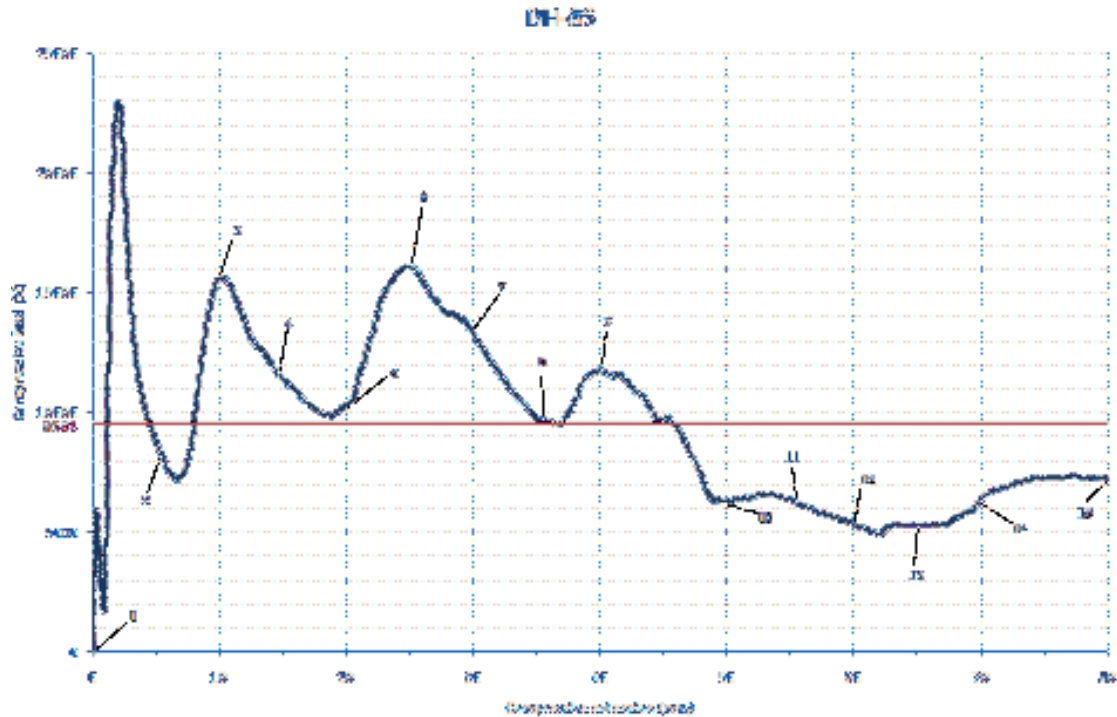


14



15

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	50
11	55
12	60
13	65
14	70
15	80



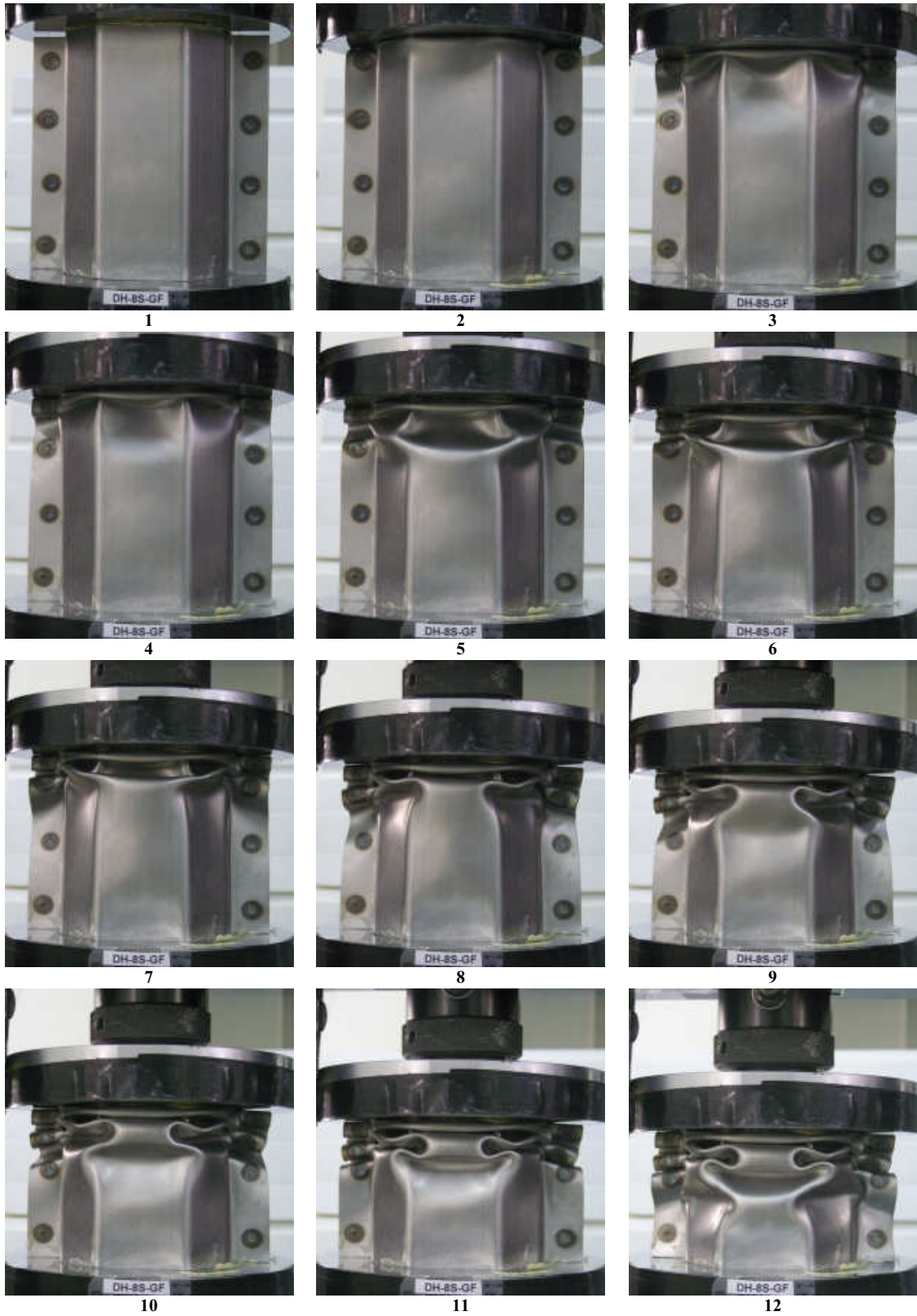
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	22959 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	9544 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	763,62 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,41
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	4668,97 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	1754,64 kJ/m ³

Αρχικά, παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Εντοπίζουμε το μέγιστο φορτίο στο σημείο όπου η παραμόρφωση βρίσκεται στα 2,09 mm. Παρατηρείται η αρχή της δημιουργίας μη εκτατού λοβού 10 mm κάτω από την επιφάνεια επαφής με την άνω έδρα της μηχανής. Ο λοβός ολοκληρώνεται περί τα 30 mm συμπίεσης. Στο σημείο αυτό το ασκούμενο φορτίο ακολουθεί καθοδική πορεία, ειδικότερα μετά τα 38 mm περίπου όπου αρχίζει ο σχηματισμός και δεύτερου μη εκτατού λοβού, παράλληλα με τον προγενέστερο και σε θέση 5 mm χαμηλότερα από αυτόν. Ταυτόχρονα, η βάση του κελύφους αρχίζει να αλλοιώνεται επηρεάζοντας την επαφή του με την κάτω έδρα καθώς αρχίζει να διαρρέει πως τα έξω. Από εκείνο το σημείο και μετά, η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης κινείται κάτω από το επίπεδο του μέσου φορτίου μέχρι το πέρας της πειραματικής διαδικασίας.



5.4.12 *DH-8S-GF*





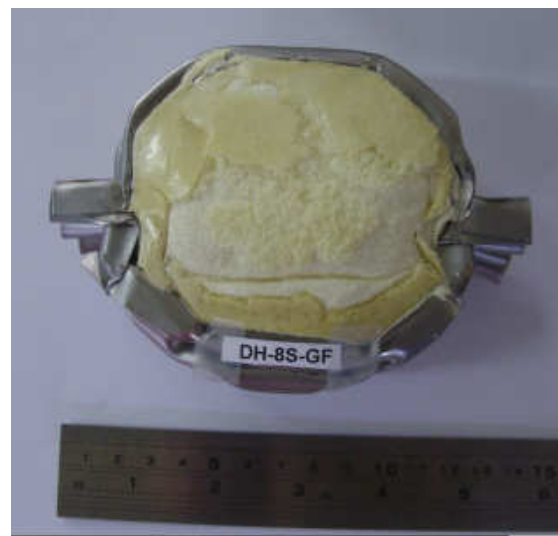
13



14

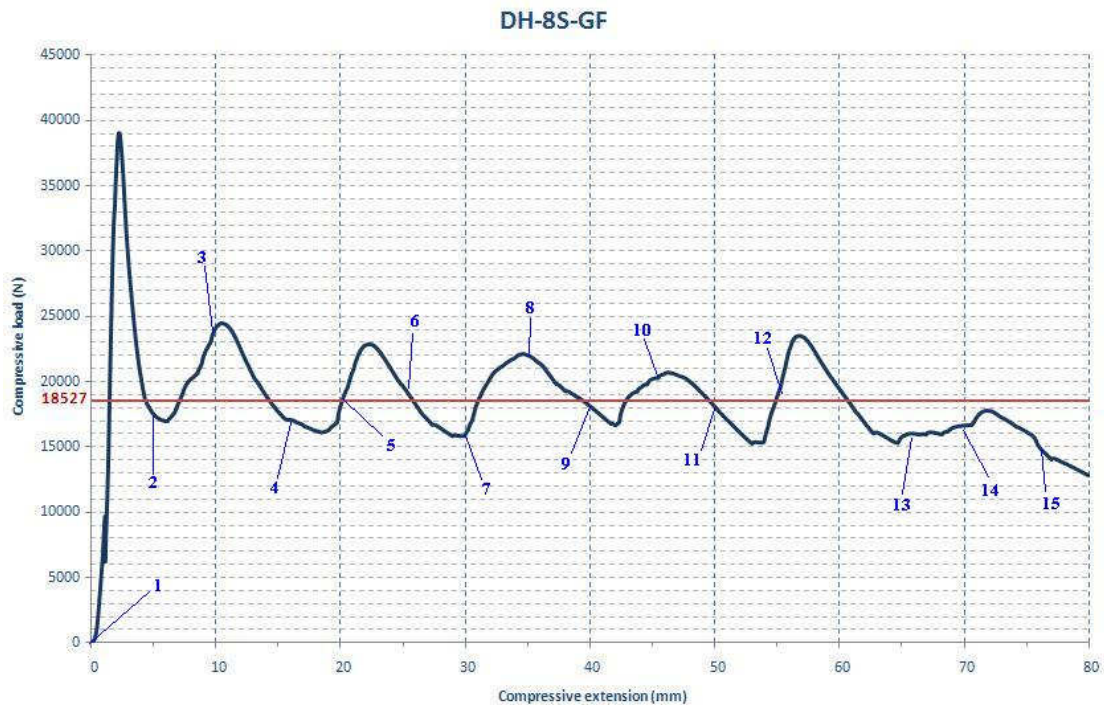


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55
13	65
14	70
15	75



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	39046 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	18527 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1482,37 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,11
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	8174,10 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	3408,48 kJ/m ³

Αρχικά, κατά την χρονική στιγμή όπου η επιφάνεια της πρέσας έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου. Στο σημείο όπου η παραμόρφωση βρίσκεται στα 2,24 mm εντοπίζουμε το μέγιστο φορτίο. Η καμπύλη ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή μέχρι τα 65 mm ενώ στη συνέχεια κινείται κάτω από το μέσο φορτίο έως το τέλος της διαδικασίας σύνθλιψης. Το δοκίμιο καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος με την έναρξη της εφαρμογής, δημιουργώντας τρεις αναδιπλώσεις. Στα 65 mm παραμόρφωσης παρατηρούμε πως η βάση του αρχίζει να διαρρέει προς τα έξω με συνέπεια να μην έχουμε ορθή στήριξη, γεγονός που προκαλεί τη μείωση στο ασκούμενο φορτίο που αναφέρθηκε παραπάνω. Το δοκίμιο απορρόφησε μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από τα αυτά με διαφορετική μορφολογία διατομής που είχαν τον ίδιο αφρό πλήρωσης.



5.4.13 *DH-8S-GF38*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



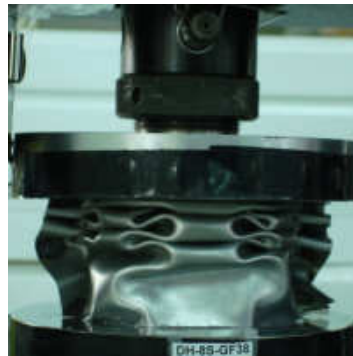
11



12



13



14

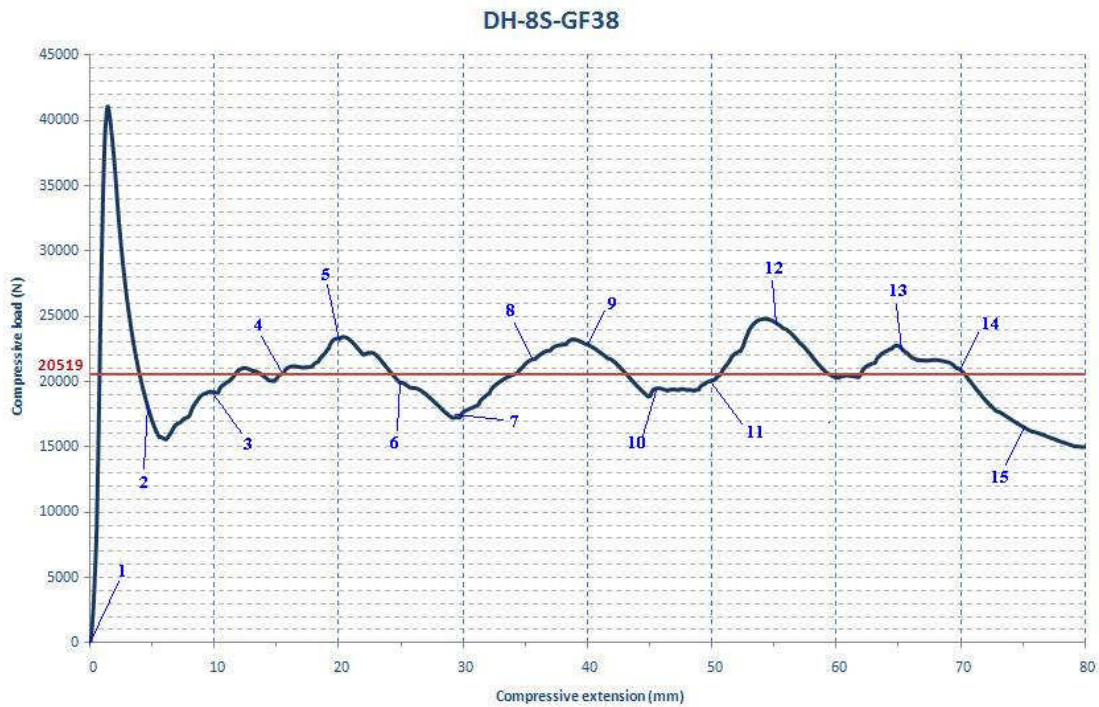


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	15
5	20
6	25
7	30
8	35
9	40
10	45
11	50
12	55
13	65
14	70
15	75



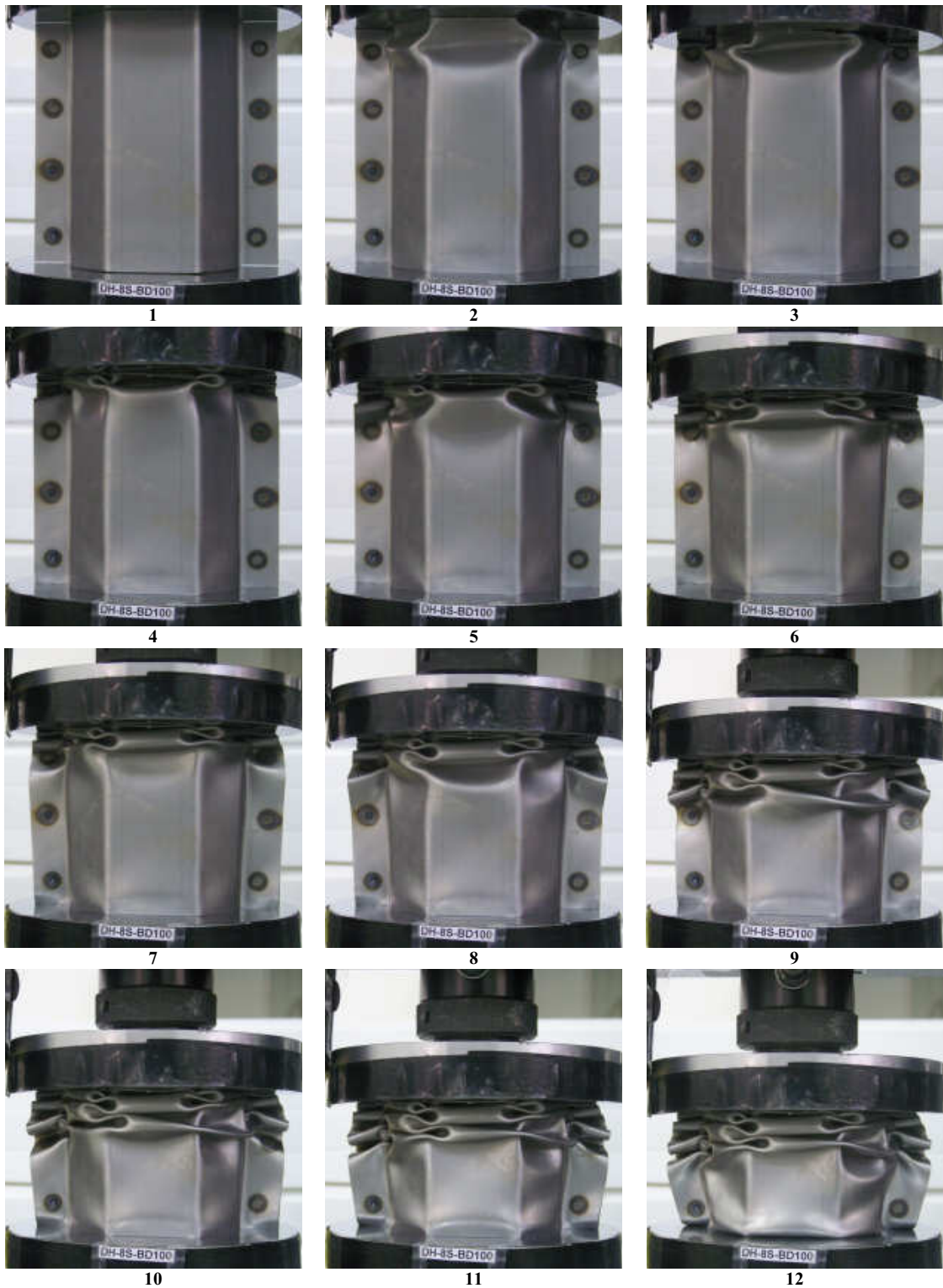
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	41046 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	20519 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	1641,77 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	2,00
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	8982,02 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	3772,45 kJ/m ³

Όπως ήταν αναμενόμενο το δοκίμιο ανθίσταται, αρχικά, στην ασκούμενη από τη μηχανή δύναμη αυξάνοντας τάχιστα το εφαρμοζόμενο φορτίο. Παράλληλα το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος. Η μέγιστη τιμή του φορτίου εντοπίζεται στα 1,43 mm, σημείο στο οποίο αρχίζει να φθίνει με την καμπύλη να ακολουθεί ημιτονοειδή μορφή μέχρι τα 70 mm. Από την τιμή της παραμόρφωσης αυτή η επιφάνεια επαφής με την ακίνητη κεφαλή της μηχανής δοκιμών αρχίζει να διαρρέει, όπως γίνεται εμφανές και από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, με συνέπεια να αποσταθεροποιηθεί το τεμάχιο και να μειώνεται σταδιακά το εφαρμοζόμενο φορτίο. Η συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε ήταν μικρότερη από το αντίστοιχο τεμάχιο τετραγωνικής διατομής, DH-4S-GF38, μεγαλύτερη όμως αυτής του δοκιμίου DH-6S-GF38.



5.4.14 *DH-8S-BD100*





13



14

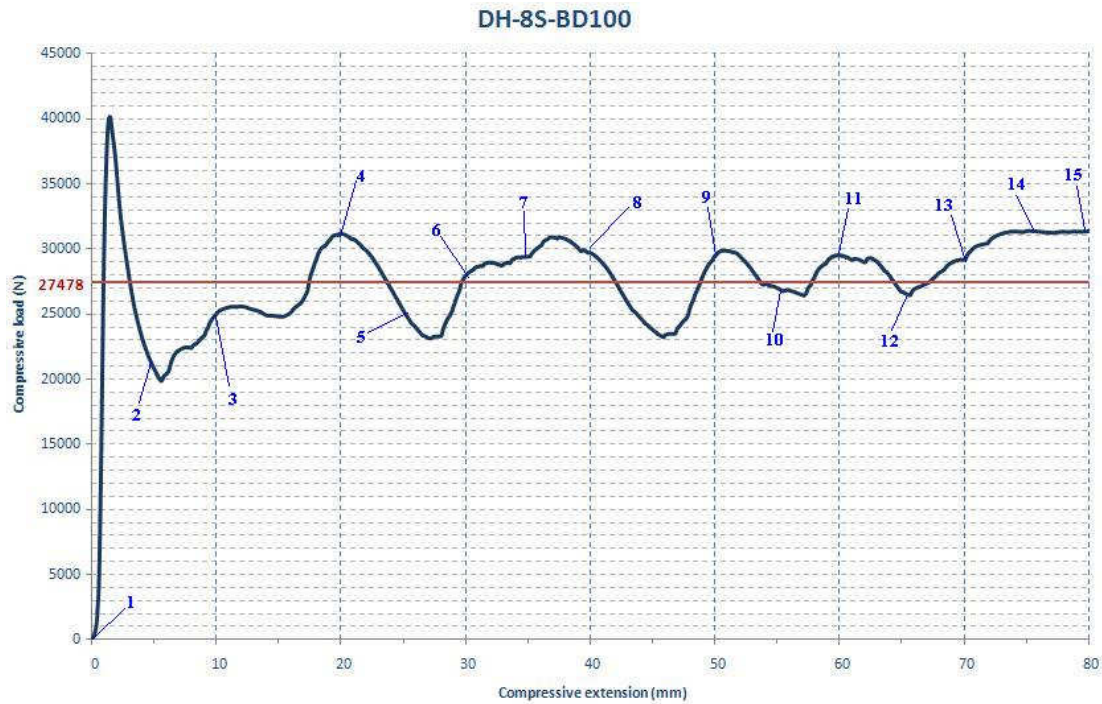


15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	50
10	55
11	60
12	65
13	70
14	75
15	80



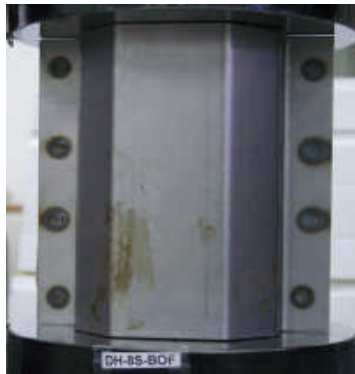
Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	40161 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	27478 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	2198,48 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,46
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_S	8057,99 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_V	5051,65 kJ/m ³

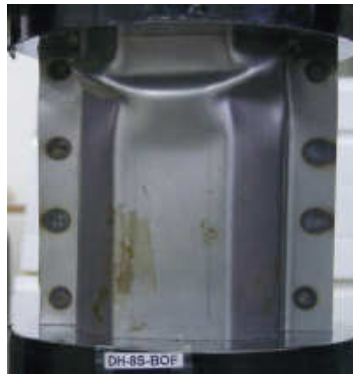
Αρχικά, την χρονική στιγμή όπου η κινούμενη επιφάνεια της μηχανής έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο παρατηρούμε ταχεία αύξηση του φορτίου όπως αναμενόταν καθώς το υλικό είναι ακόμη ακέραιο και ανθίσταται στη δύναμη της με μικρή παραμόρφωση. Όπως γίνεται εμφανές από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, το τεμάχιο καταρρέει προοδευτικά από την αρχή της σύνθλιψης. Έχουμε την μέγιστη τιμή του φορτίου στα 1,45 mm παραμόρφωσης, σημείο στο οποίο αρχίζει η πτώση του μέχρι τα 6 mm. Παραλλήλως το δοκίμιο αρχίζει να καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος. Η καμπύλη του διαγράμματος φορτίου – παραμόρφωσης παρουσιάζει ομαλή συμπεριφορά καθ' όλην τη διαδρομή, κινούμενη εκατέρωθεν του μέσου φορτίου. Το ποσό της ενέργειας που απορροφήθηκε τελικά από το δοκίμιο είναι μεγαλύτερο από τα δοκίμια με ίδια μορφολογία διατομής τα οποία περιείχαν τον ίδιο τύπο αφρού και μεγαλύτερο από τα δοκίμια ταυτόσημης διατομής με αφρούς μικρότερης πυκνότητας.



5.4.15 *DH-8S-BOF*



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



12



13

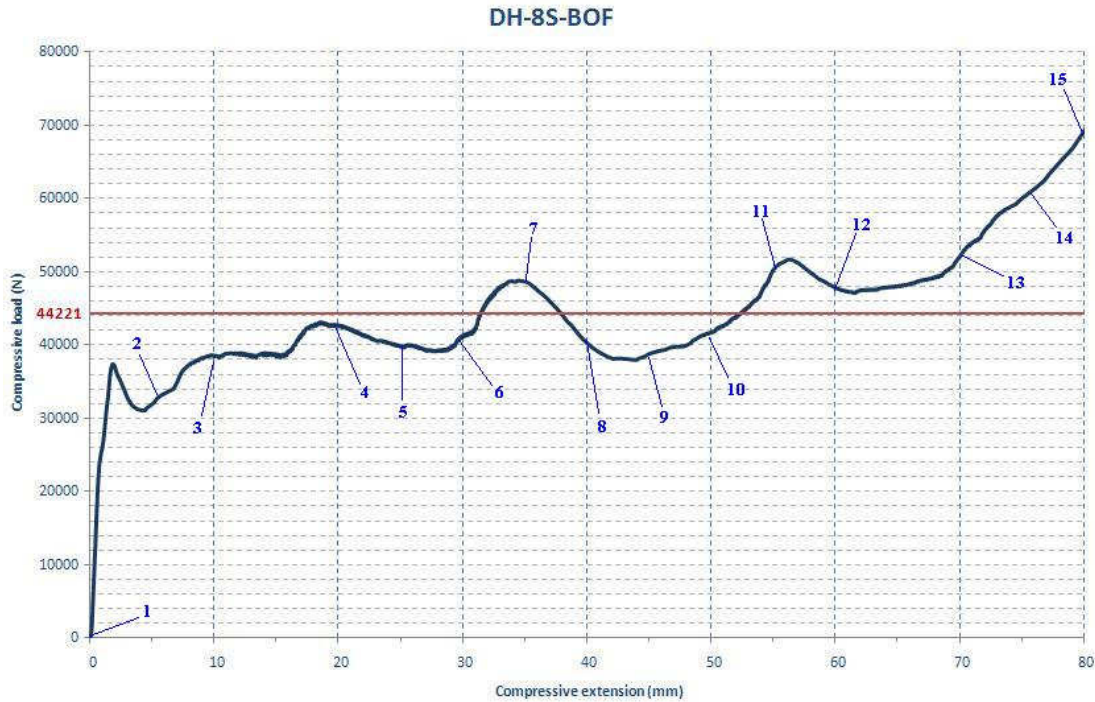
14

15



Πέρασ της διαδικασίας κατάρρευσης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ	ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (mm)
1	0
2	5
3	10
4	20
5	25
6	30
7	35
8	40
9	45
10	50
11	55
12	60
13	70
14	75
15	80



Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης
Οι αριθμοί αντιστοιχούν στις φωτογραφίες της κατάρρευσης του δοκιμίου

ΜΗΚΟΣ ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ, L	80 mm
ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_{max}	69288 N
ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ, P_m	44221 N
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ, W	3537,85 J
ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ, LU	1,57
ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ, W_s	10454,64 J/Kgr
ΠΥΝΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, E_v	8129,25 kJ/m ³

Στην έναρξη της δοκιμής το φορτίο αυξάνει με ταχύ ρυθμό καθώς το δοκίμιο αντιστέκεται στην παραμόρφωση όντας αέριο, φτάνοντας σε τοπικό μέγιστο, στα 1,85 mm. Όπως γίνεται εμφανές από τις φωτογραφίες που παρατίθενται, το τεμάχιο καταρρέει προοδευτικά από το άνω μέρος του με την έναρξη της σύνθλιψης. Το φορτίο διατηρείται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα σε όλη τη διαδρομή της πειραματικής δοκιμής με μικρές διακυμάνσεις. Η πορεία που ακολουθεί η καμπύλη είναι αύξουσα έτσι το μέγιστο φορτίο εντοπίζεται στο τέρμα της διαδρομής, 80 mm. Η ενέργεια που απορροφήθηκε τελικά από το δοκίμιο είναι περισσότερη από αυτό με τετραγωνική διατομή περίπου κατά 0,5 kJ αλλά μικρότερη από αυτή του DH-6S-BOF κατά το ίδιο ποσό. Είναι, ωστόσο, σημαντικά μεγαλύτερη των δοκιμών ίδιας διατομής με αφρούς μικρότερης πυκνότητας.



5.5 Αποτελέσματα συνόλου δοκιμών

5.5.1 Μέσο και μέγιστο φορτίο

Αρχικά παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των μεγεθών όπως αυτά υπολογίσθηκαν κατά την διαδικασία της πειραματικής προσομοίωσης.

Κωδικός δοκιμίου	Μέγιστο φορτίο (kN)	Παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο (mm)	Μέσο φορτίο (kN)	Ομοιομορφία φορτίου
DH-4S	30,147	1,16	8,959	3,36
DH-4S-GF	40,389	1,30	15,808	2,55
DH-4S-GF38	43,516	1,75	21,637	2,01
DH-4S-BD100	38,442	1,08	25,305	1,52
DH-4S-BOF	60,939	80,00	38,597	1,58
DH-6S	35,033	0,85	8,776	3,99
DH-6S-GF	35,436	1,10	15,820	2,24
DH-6S-GF38	36,483	1,98	16,148	2,26
DH-6S-BD100	35,597	1,03	25,062	1,42
DH-6S-BOF	91,059	80,00	50,417	1,81
DH-8S	22,959	2,09	9,544	2,41
DH-8S-GF	39,046	2,24	18,527	2,11
DH-8S-GF38	41,046	1,43	20,519	2,00
DH-8S-BD100	40,161	1,45	27,478	1,46
DH-8S-BOF	69,228	80,00	44,221	1,57

Το μέσο φορτίο, P_m , κυμαίνεται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών. Χαρακτηριστικά, η τιμή στην περίπτωση του τεμαχίου DH-6S-BOF είναι περίπου οκταπλάσια αυτής του DH-4S. Παρατηρούμε μια ομαδοποίηση ανάλογη του υλικού πυρήνα τόσο στα δοκίμια με αφρό όσο και στα κενά κελύφη. Σε κάθε περίπτωση τα δοκίμια με αφρό BOF, ο οποίος είναι αυτός με τη μεγαλύτερη πυκνότητα, απαίτησαν υψηλότερα φορτία και παρουσίασαν αυξητικές τάσεις στο πέρας της θλιπτικής καταπόνησης σαν αποτέλεσμα του φαινομένου της συμπτύκνωσης (κατά το οποίο οι αφροί μετά από μεγάλη παραμόρφωση όταν και μειώνεται μέχρι εξαφανίσεως το κενό μεταξύ των κυψελών συμπεριφέρονται σαν να συμπιέζεται στερεό) το οποίο εμφανίζεται πρόωρα στα δοκίμια αυτά λόγω της υψηλής τιμής της πυκνότητας του αφρού.

Αναφορικά με το μέγιστο φορτίο, P_{max} , αντίθετα, μπορούμε να πούμε ότι, στα τεμάχια που αυτό παρουσιάζεται στα αρχικά στάδια της συμπίεσης, κυμαίνεται στο ίδιο εύρος τιμών, όπως ήταν αναμενόμενο καθώς εξαρτάται κυρίως από το υλικό του κελύφους το οποίο είναι κοινό για όλα τα δοκίμια. Παρά τις ομοιότητες, είναι εμφανές ότι στα 6S είναι ελαφρά χαμηλότερο, ακολουθούμενο από τα 8S και με τα 4S να εμφανίζουν το υψηλότερο. Εξαιρέση αποτελούν τα τεμάχια με BOF, το μέγιστο φορτίο των οποίων εντοπίζεται στο πέρας της δοκιμής όντας σημαντικά μεγαλύτερο από τις άλλες περιπτώσεις και αφήνοντας να διαφανεί, λόγω της ανοδικής πορείας της καμπύλης, την περαιτέρω αύξηση του σε περίπτωση συμπίεσης μεγαλύτερης των 80 mm.



Τέλος, σχετικά με την ομοιομορφία φορτίου, LU, τα δεδομένα δίδουν μία σαφή εικόνα. Στα δοκίμια με αφρό BD-100 παίρνει τιμές κοντά στο 1,5. Ακολουθούν τα δοκίμια με BOF με λόγο κοντά στο 1,75, αποτέλεσμα της διαφορετικής συμπεριφοράς που ανέπτυξαν η οποία και επηρέασε τη σχέση μέσου με μέγιστο φορτίο. Στα δοκίμια με αφρό GF και GF-38, οι οποίοι έχουν παραπλήσια πυκνότητα, οι τιμές κυμάνθηκαν 2 – 2,55. Έπονται τα κενά κελύφη καθώς η ομοιομορφία φορτίου σε αυτά βρίσκεται πάνω από το 2,41 φτάνοντας στην περίπτωση του DH-6S στο 3,99, απόρροια της ασταθούς κατάρρευσης που παρουσίασαν.

5.5.2 Απορρόφηση ενέργειας

Αρχικά παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας των μεγεθών όπως αυτά υπολογίστηκαν κατά την διαδικασία της πειραματικής προσομοίωσης.

Κωδικός δοκιμίου	Απορροφούμενη ενέργεια (J)	Ειδική ενέργεια απορρόφησης (J/Kgr)	Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας (kJ/m ³)
DH-4S	716,84	3876,86	1435,98
DH-4S-GF	1264,74	6157,59	2533,53
DH-4S-GF38	1731,15	8367,38	3467,85
DH-4S-BD100	2024,62	6533,93	4055,73
DH-4S-BOF	3087,91	8023,91	6185,72
DH-6S	702,20	4509,24	1891,70
DH-6S-GF	1265,72	7399,86	3409,81
DH-6S-GF38	1292,00	7504,09	3480,60
DH-6S-BD100	2005,13	8047,40	5401,75
DH-6S-BOF	4033,50	13214,68	10866,11
DH-8S	763,62	4668,97	1754,64
DH-8S-GF	1483,37	8174,10	3408,48
DH-8S-GF38	1641,77	8982,02	3772,45
DH-8S-BD100	2198,48	8058,00	5051,65
DH-8S-BOF	3537,85	10454,64	8129,25

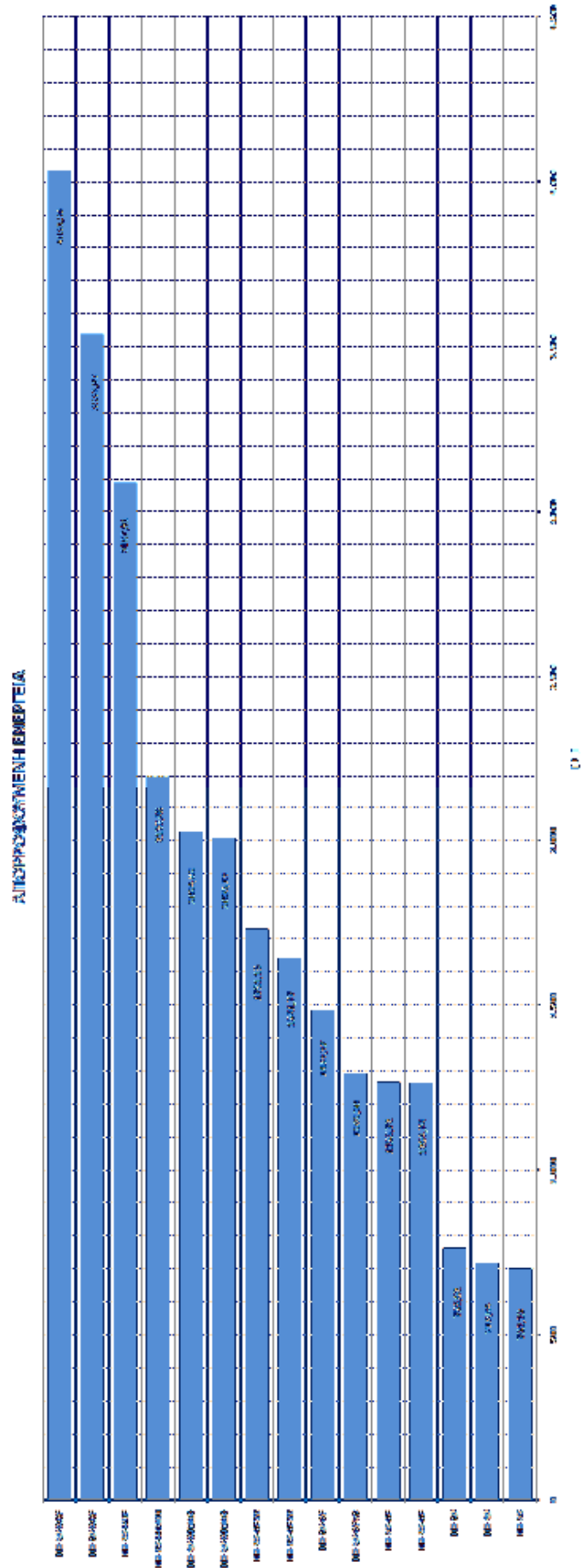
Η απορροφούμενη ενέργεια, W, ακολουθεί, προφανώς, τη συμπεριφορά του μέσου φορτίου. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση το τεμάχιο DH-6S-BOF απορρόφησε το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, περίπου οκταπλάσια αυτής του DH-4S. Παρατηρούμε μια ομαδοποίηση ανάλογη του υλικού πυρήνα στα δοκίμια με αφρό, αντίθετα με τα κενά κελύφη όπου υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ τους. Τα δοκίμια με πυκνότερους αφρούς, BD-100 και BOF, παρουσίασαν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης καθώς αυξανόταν η παραμόρφωση και παρουσίασαν ανοδικές τάσεις στο πέρας της θλιπτικής καταπόνησης τέτοιες ώστε να διαφαίνεται πως θα αποκτούσαν ακόμα μεγαλύτερη διαφορά στην περίπτωση όπου η διαδρομή της κινήτης κεφαλής θα συνεχιζόταν.

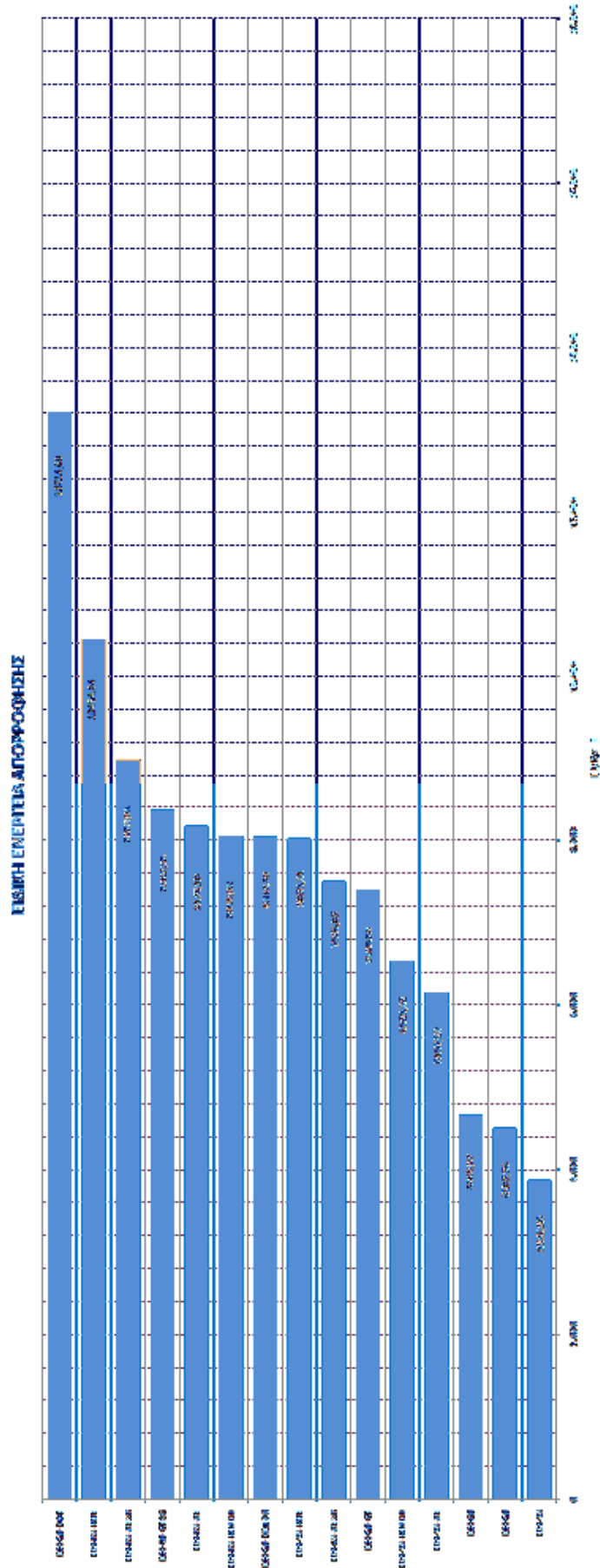


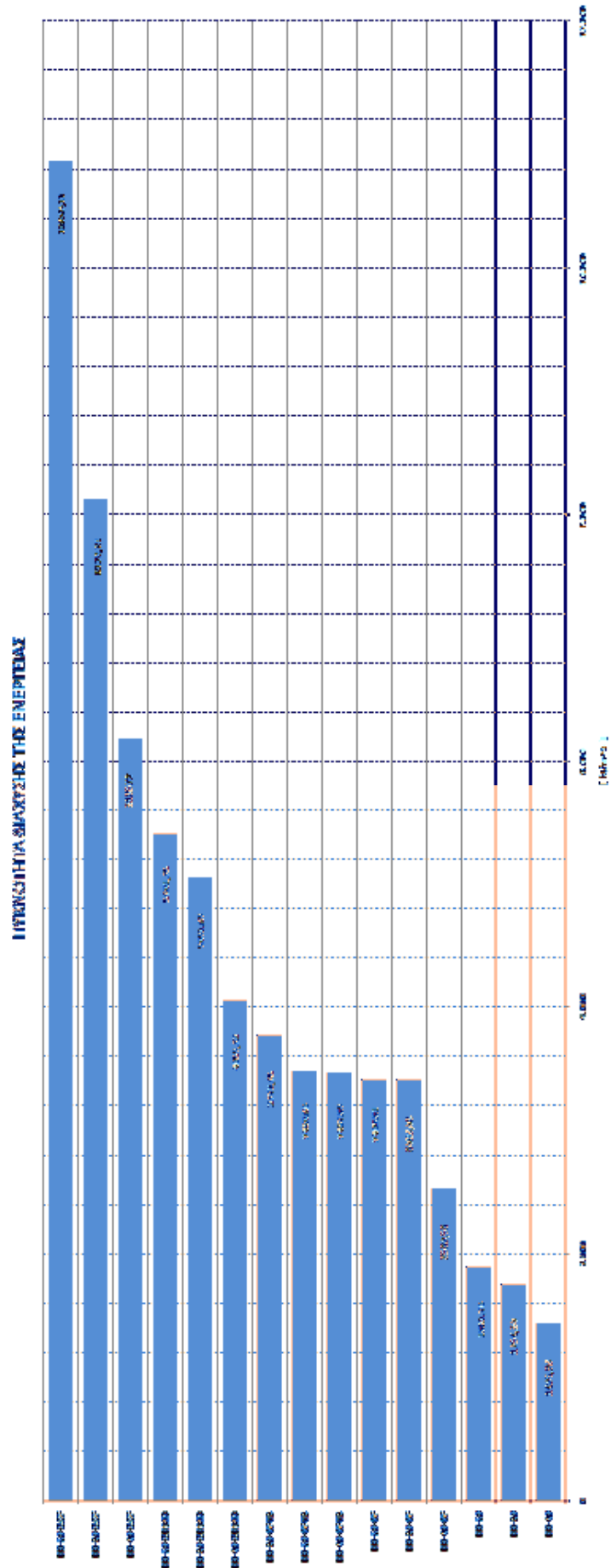
Τα δεδομένα που υπολογίσθηκαν για την Ειδική ενέργεια απορρόφησης, W_s , δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά του καθαρού ποσού ενέργειας που καταγράφηκε. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού το βάρος των αφρών πλήρωσης είναι παραπλήσιο παρά τη διαφορά στην πυκνότητα τους λόγω της μικρής ποσότητας όπου απαιτήθηκε. Η μόνη εξαίρεση εντοπίζεται στα δοκίμια με GF-38 τα οποία παρουσιάζονται περισσότερο ικανοποιητικά συνυπολογίζοντας το μικρό τους βάρος. Αναμενόμενα, επίσης, τα δοκίμια χωρίς πυρήνα εμφανίζονται να συμπεριφέρονται επαρκέστερα σαν αποτέλεσμα του μικρότερου βάρους τους.

Σχετικά με την Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας, E_v , τα δοκίμια με πυκνότερους αφρούς παρουσίασαν αποδοτικότερη συμπεριφορά. Ειδικά αυτά με BOF επέδειξαν μακράν καλύτερη απορροφητικότητα εκμεταλλευόμενα το γεγονός του μεγαλύτερου βάρους σε ισόγκα κελύφη.

Όπως γίνεται εμφανές τόσο από τα παραπάνω όσο και από τα διαγράμματα που ακολουθούν, τα τεμάχια παρά τις ομοιότητες που παρουσιάζουν τόσο στο βάρος όσο και στον όγκο τους διαφέρουν σημαντικά ως προς την απόδοση τους. Δεχόμενοι πως η ποιότητα κατασκευής των μεταλλικών κελυφών καθώς και των συγκολλήσεων ήταν παραπλήσιες για όλα, καταλήγουμε σε μία πρώτη αρχική εκτίμηση ότι οι σημαντικοί παράγοντες για την ενέργεια την οποία απορρόφησε έκαστο είναι το είδος του αφρού πυρήνα και η μορφολογία της διατομής του.





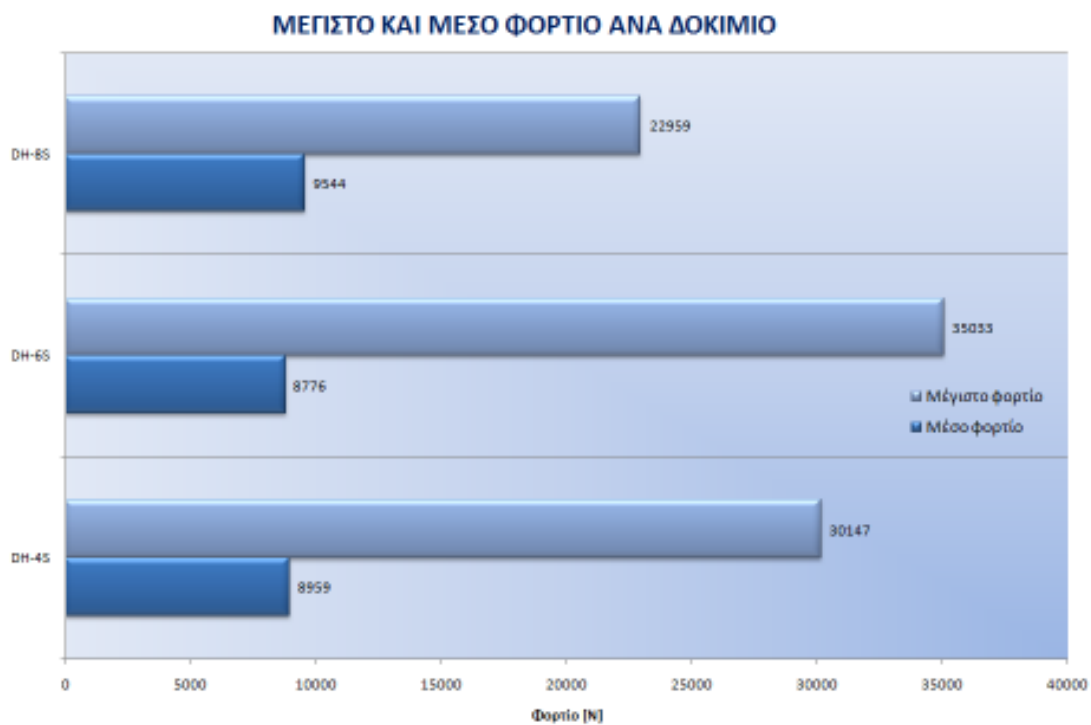
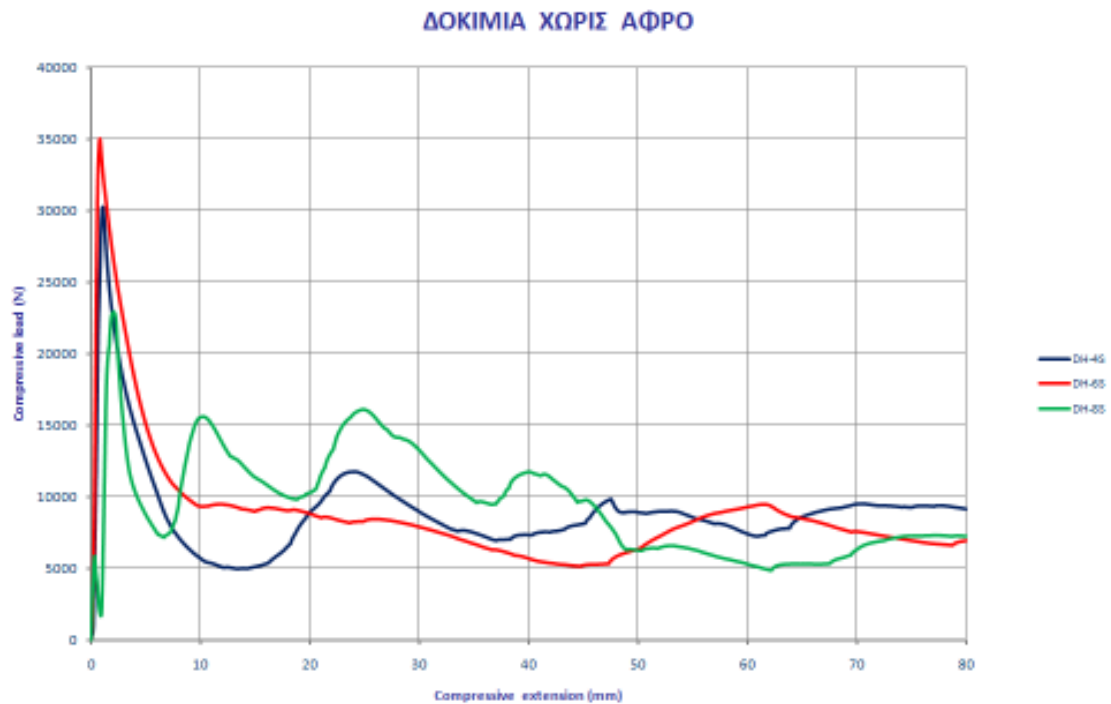




5.6 Σύγκριση δοκιμών με όμοιο πυρήνα

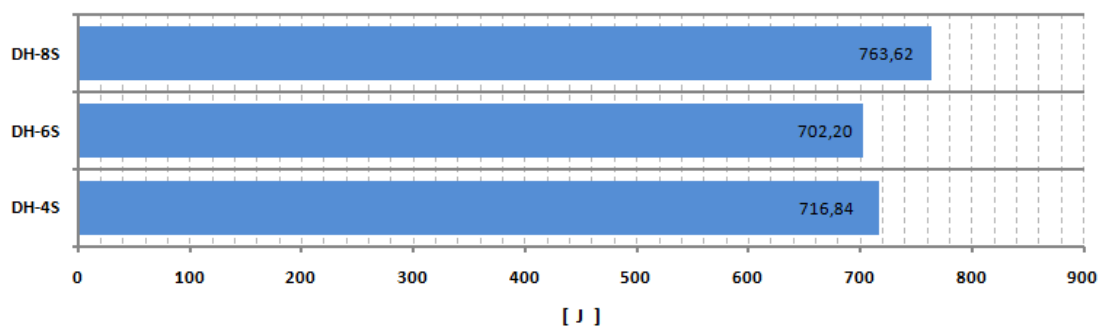
5.6.1 Κενά δοκίμια

Τα κελύφη από χάλυβα φέρουν διαφορετικό αριθμό ακμών στην περιφέρεια τους. Λόγω της συγκέντρωσης των τάσεων που παρατηρείται σε αυτές διαφέρουν ως προς την αντοχή τους. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.

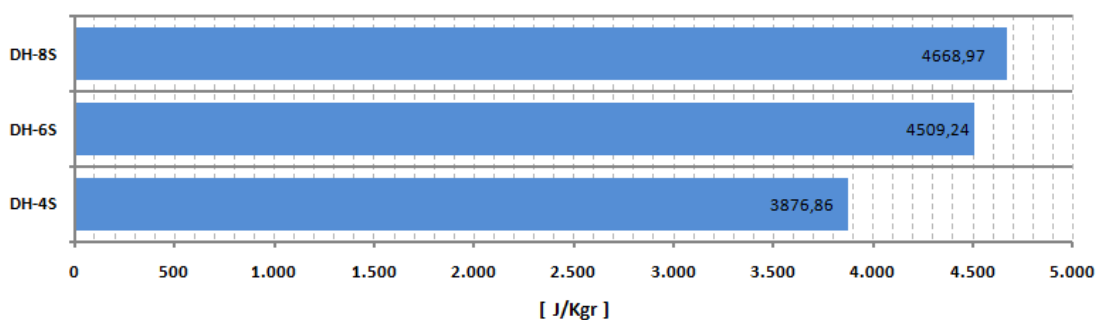




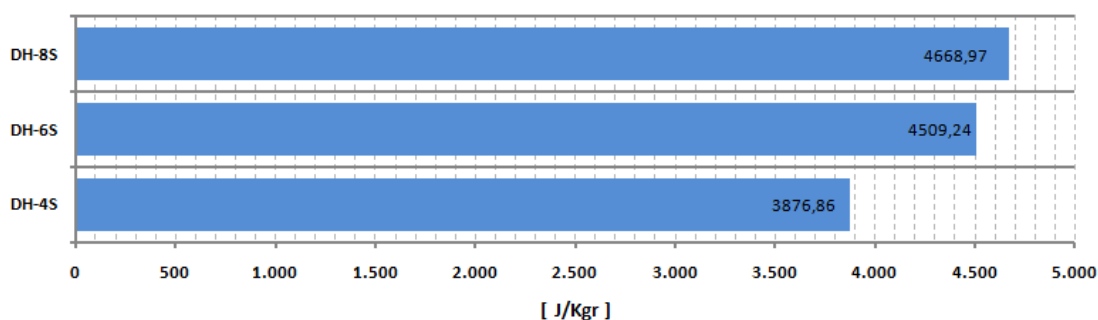
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

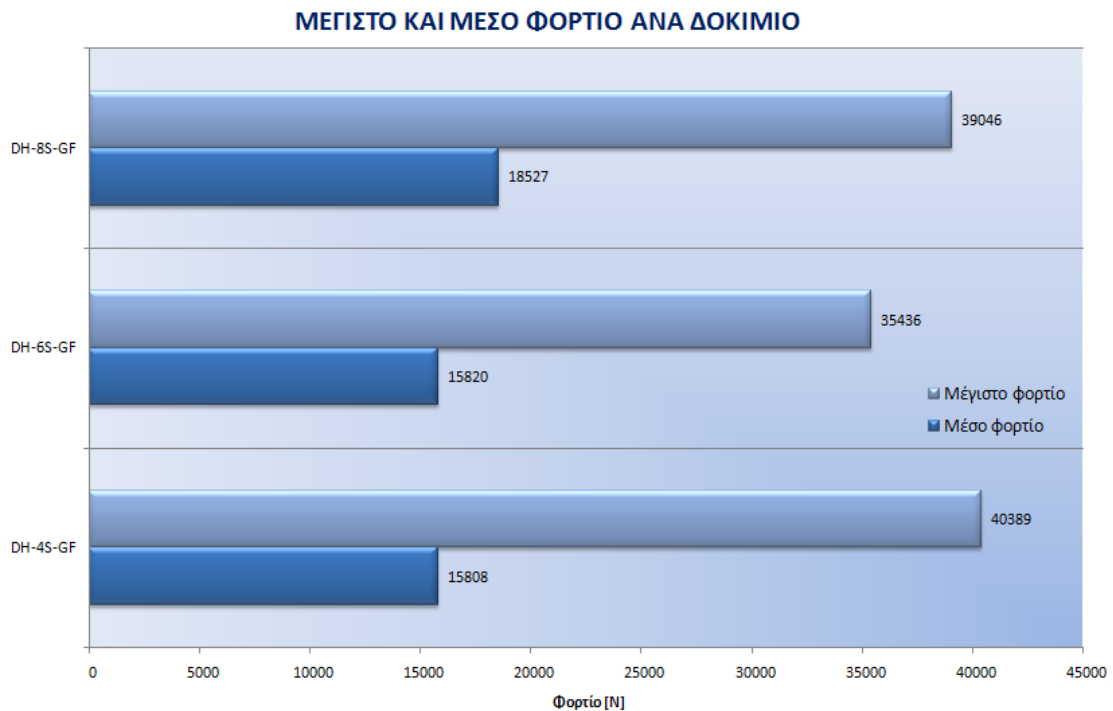
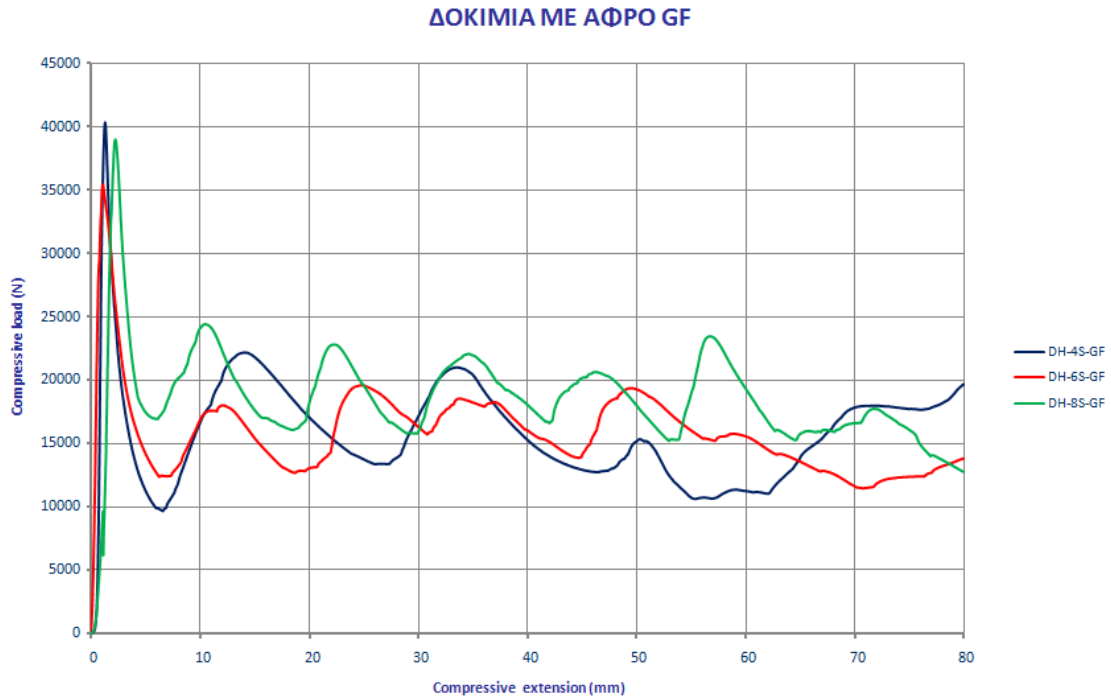


Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, το δοκίμιο μορφολογίας διατομής 8S παρουσιάζει υψηλότερο μέσο φορτίο και κατά συνέπεια απορροφά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, επηρεαζόμενο και από το γεγονός του ότι στο διάστημα 10-30 mm το φορτίο διακυμάνθηκε σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Το μέγιστο φορτίο και στα τρία δοκίμια παρουσιάζεται σε παραπλήσια σημεία στο διάστημα 0,85 – 2,09 mm, με το 6S να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή αυτού. Το DH-6S απορροφά το μικρότερο ποσό ενέργειας καθώς εμφανίστηκε έντονα λυγισμός από την αρχή της πειραματικής προσομοίωσης, ενώ στο δοκίμιο DH-4S αστόχησε η σημειακή συγκόλληση. Είναι εμφανές ότι η έλλειψη υλικού πυρήνα καθιστά ιδιαίτερος δύσκολη την πρόβλεψη της ενεργειακής συμπεριφοράς του δοκιμίου και του τρόπου σύνθλιψης του, καθώς δεν εμφανίζεται σταθερότητα της κατασκευής με αποτέλεσμα τη μη προοδευτική κατάρρευση.



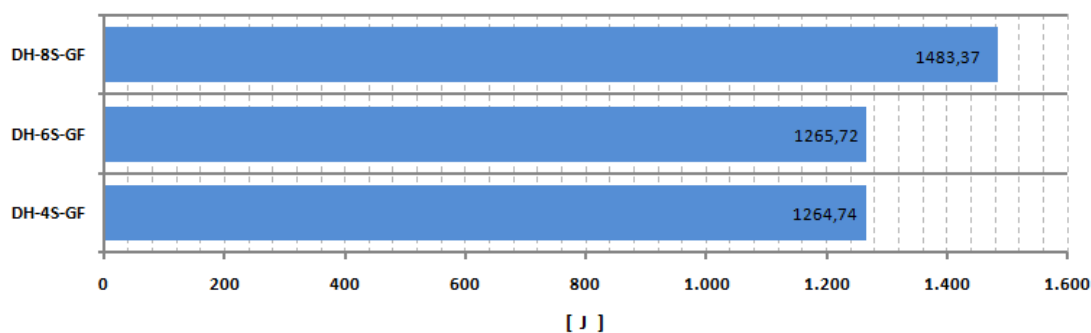
5.6.2 Δοκίμια με πυρήνα αφρό GF

Ο αφρός Baytherm GF είναι αυτός με την μικρότερη πυκνότητα. Πρόκειται για έναν οικονομικό, κοινό αφρό του εμπορίου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.

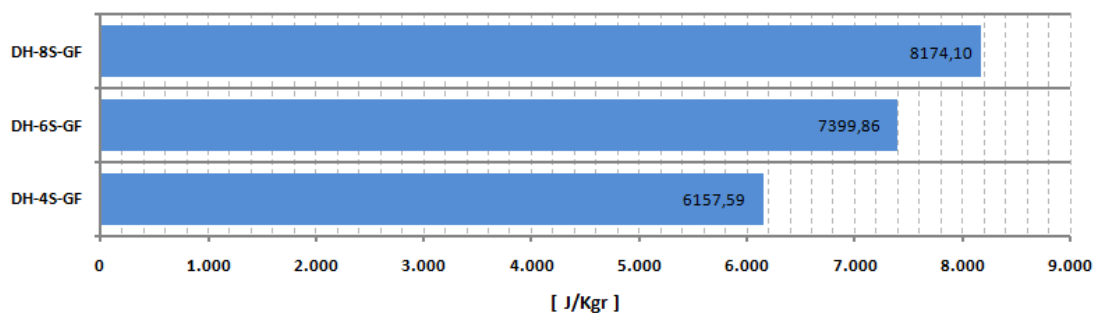




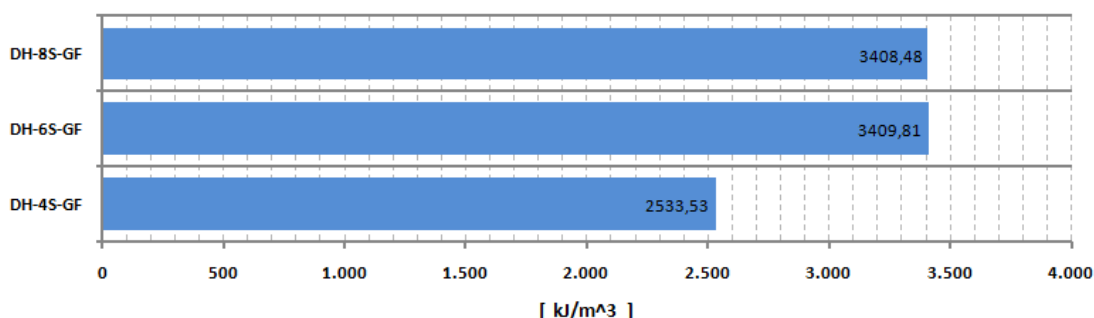
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

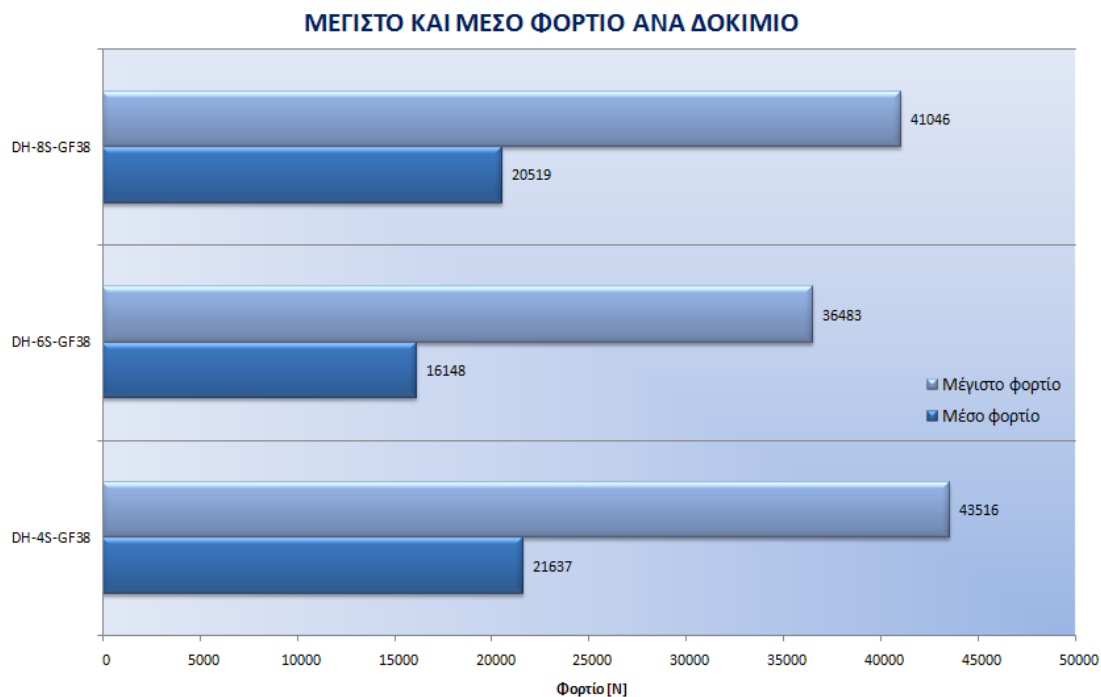
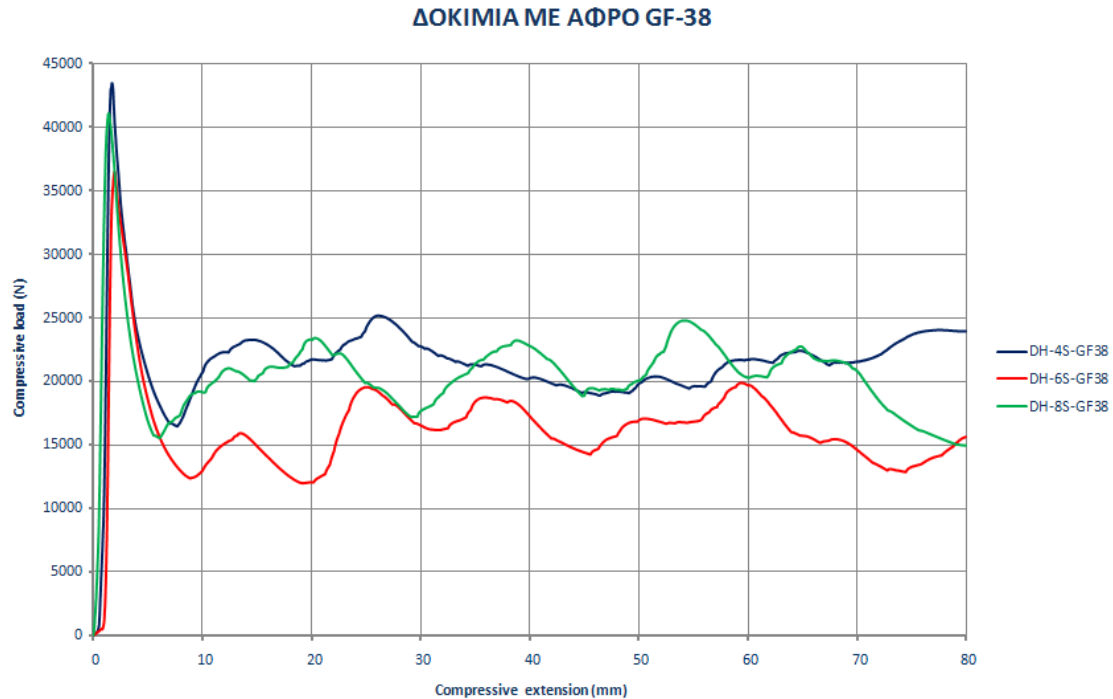


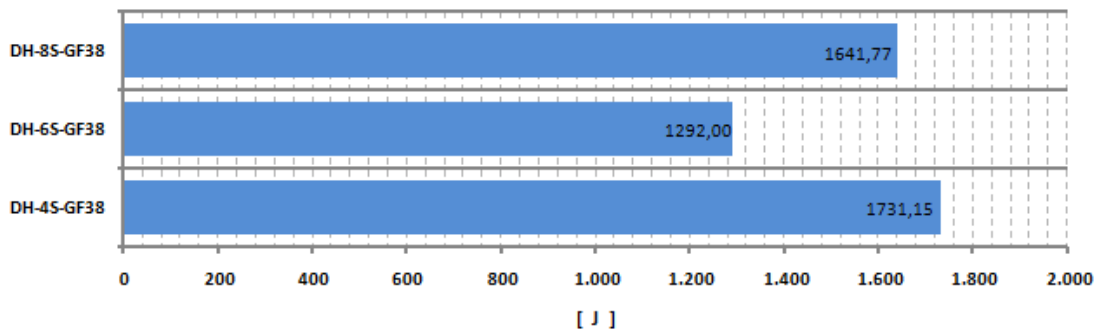
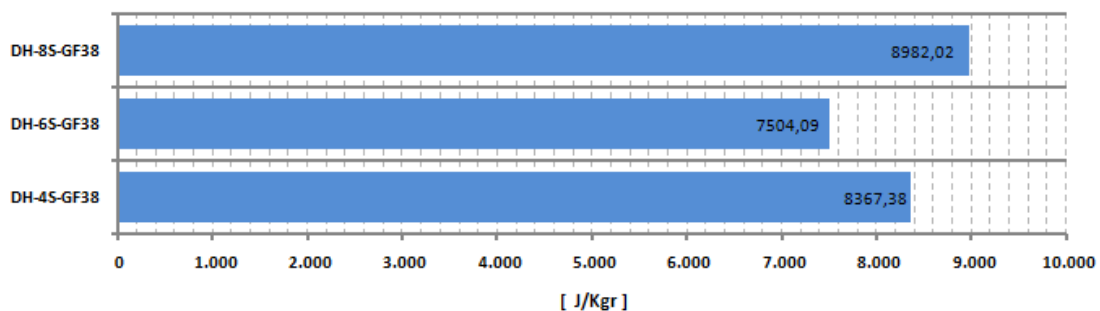
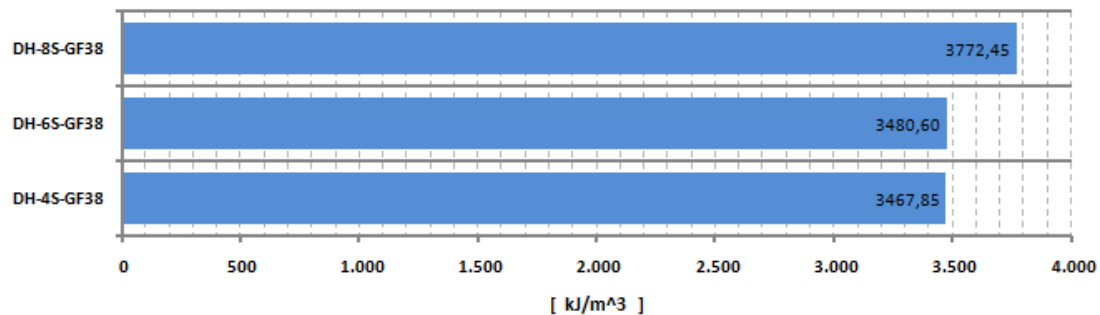
Όπως γίνεται εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα, τα τεμάχια με πυρήνα αφρό GF δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές παρά την διαφορετική μορφολογία των διατομών τους. Η καμπύλη του δοκιμίου μορφής 8S βρίσκεται σταθερά ελαφρώς υψηλότερα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερο μέσο φορτίο και να απορροφά περισσότερη ενέργεια. Τα τρία δοκίμια παρουσιάζουν το μέγιστο φορτίο τους σε παραπλήσια σημεία στο διάστημα 1,1 - 2,24mm, με το 4S να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή αυτού. Εν συνεχεία, όμως, δεν διατηρείται το φορτίο σε υψηλά επίπεδα με συνέπεια, ειδικά στο διάστημα 40-65 mm να απορροφά σημαντικά μικρότερα ποσά ενέργειας. Μετά από το σημείο εκείνο, αντίθετα, παρουσιάζει σταδιακή αύξηση με αποτέλεσμα στο τέλος της διαδρομής της κατάρρευσης να βρίσκεται στην κορυφή, συν το γεγονός πως οι καμπύλες των δοκιμίων 6S και 8S φθίνουν μετά τα 50 και τα 57 mm, αντίστοιχα.



5.6.3 Δοκίμια με πυρήνα αφρό GF-38

Ο αφρός Baytherm GF-38 παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη πυκνότητα από τον GF. Είναι κατάλληλος για πλήθος καθημερινών εφαρμογών όπου απαιτείται αφρός πολουρεθάνης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.



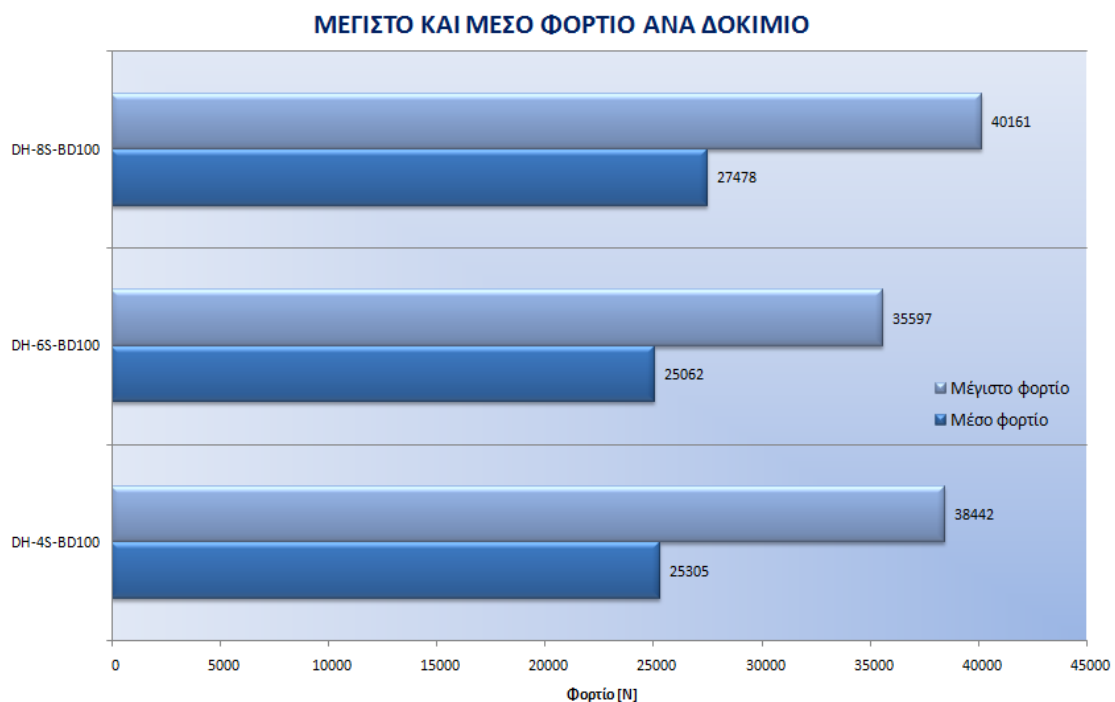
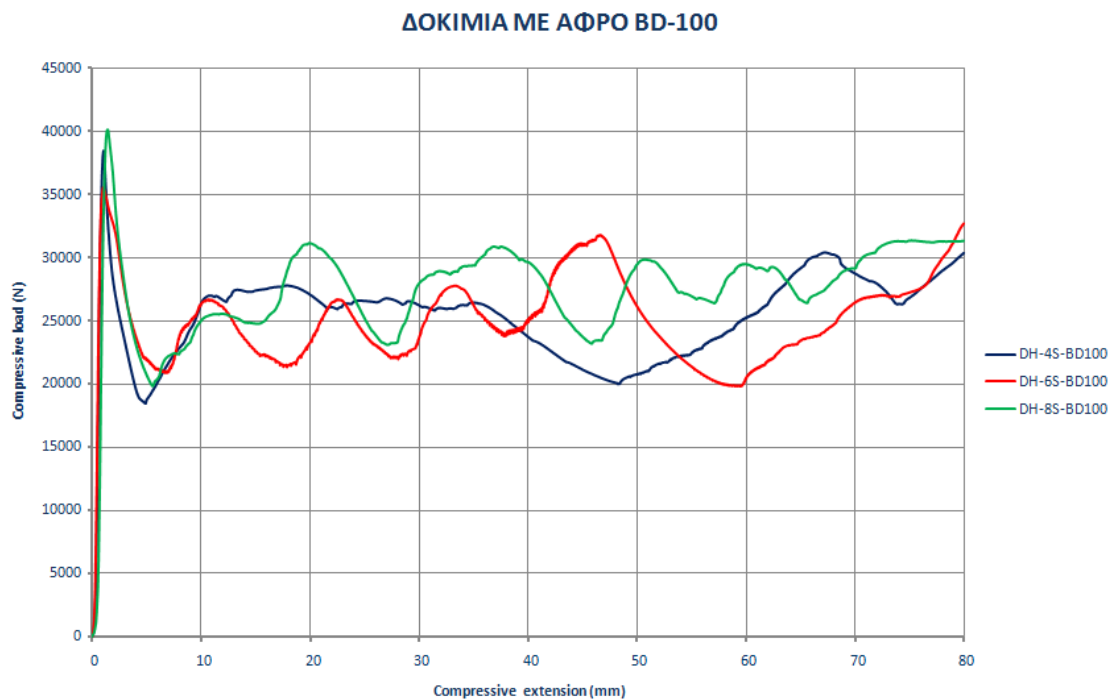
**ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ****ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ****ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

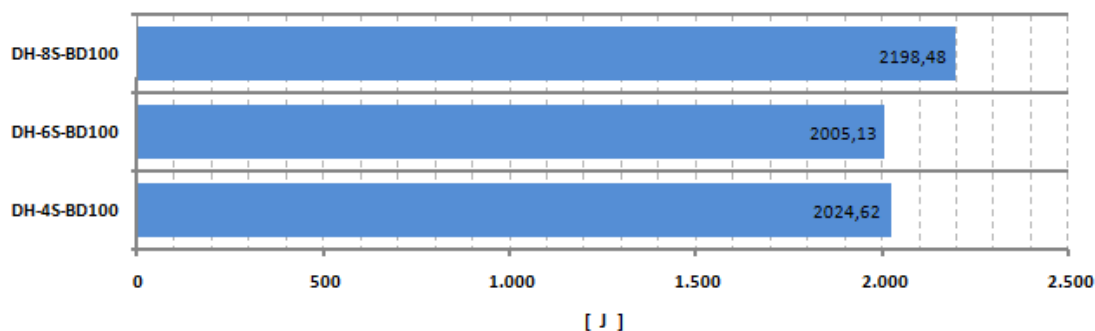
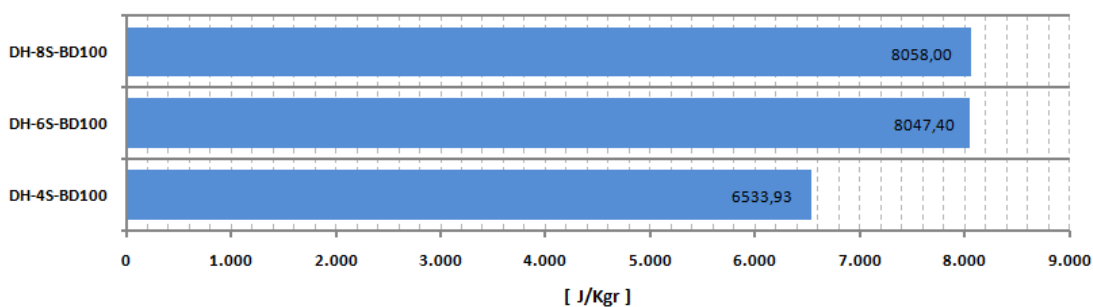
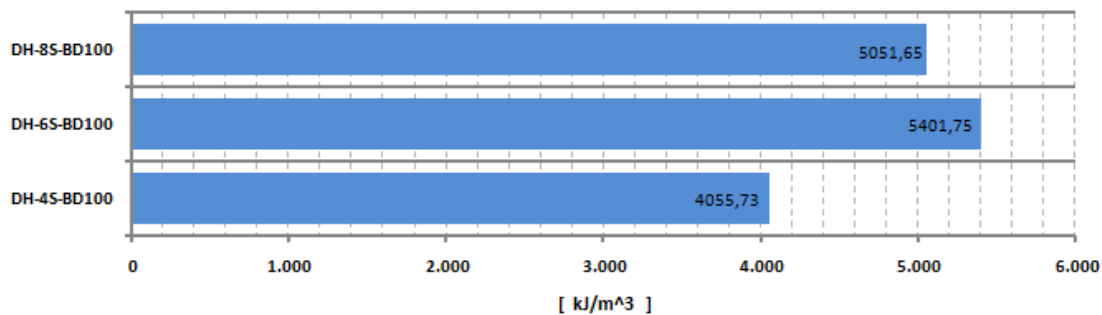
Όπως γίνεται εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα, τα τεμάχια δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές παρά την διαφορετική μορφολογία των διατομών τους. Η καμπύλη του δοκιμίου μορφής 6S βρίσκεται σταθερά ελαφρώς χαμηλότερα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μικρότερο μέσο φορτίο και να απορροφά λιγότερη ενέργεια από τα άλλα δύο. Το μέγιστο φορτίο και στα τρία δοκίμια παρουσιάζεται σε παραπλήσια σημεία στο διάστημα 1,43 - 1,98mm, με το 4S να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή αυτού. Η αυξομείωση του φορτίου είναι αρκετά αρμονική και για τα τρία τεμάχια (ημιτονοειδής μορφή), με εξαίρεση το διάστημα 40 - 50 mm του δοκιμίου 4S όπου εμφανίζεται μια περιοχή plateau.



5.6.4 Δοκίμια με πυρήνα αφρό BD-100

Ο αφρός Baytherm BD-100 παρουσιάζει την μεγαλύτερη ονομαστική αντοχή συμπίεσης από τους αφρούς που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτή του η ιδιότητα τον καθιστά ικανό για χρήσεις σε πολλές εφαρμογές ως υποκατάστατο ξύλου. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.



**ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ****ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ****ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

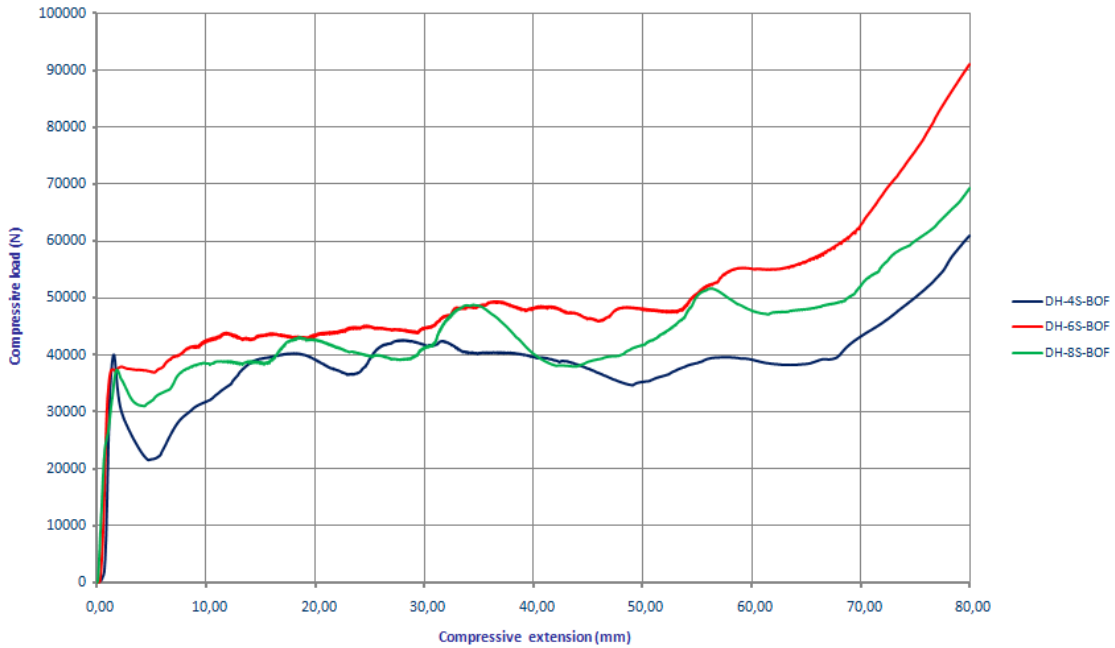
Στα γραφήματα που παρατίθενται γίνεται εμφανές ότι τα τεμάχια δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές παρά την διαφορετική μορφολογία των διατομών τους. Η καμπύλη του δοκιμίου μορφής 8S βρίσκεται σταθερά υψηλότερα, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερο μέσο φορτίο και να απορροφά περισσότερη ενέργεια από τα άλλα δύο. Το μέγιστο φορτίο και στα τρία δοκίμια παρουσιάζεται σε παραπλήσια σημεία στο διάστημα 1,043 - 1,45mm, με το 8S να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή αυτού. Η αυξομείωση του φορτίου είναι αρκετά αρμονική και για τα τρία τεμάχια (ημιτονοειδής μορφή), με εξαίρεση το διάστημα 40 - 50 mm του δοκιμίου 4S, όπου έχουμε εμφάνιση περιοχής plateau όπως συνέβη και στο δοκίμιο με GF-38.



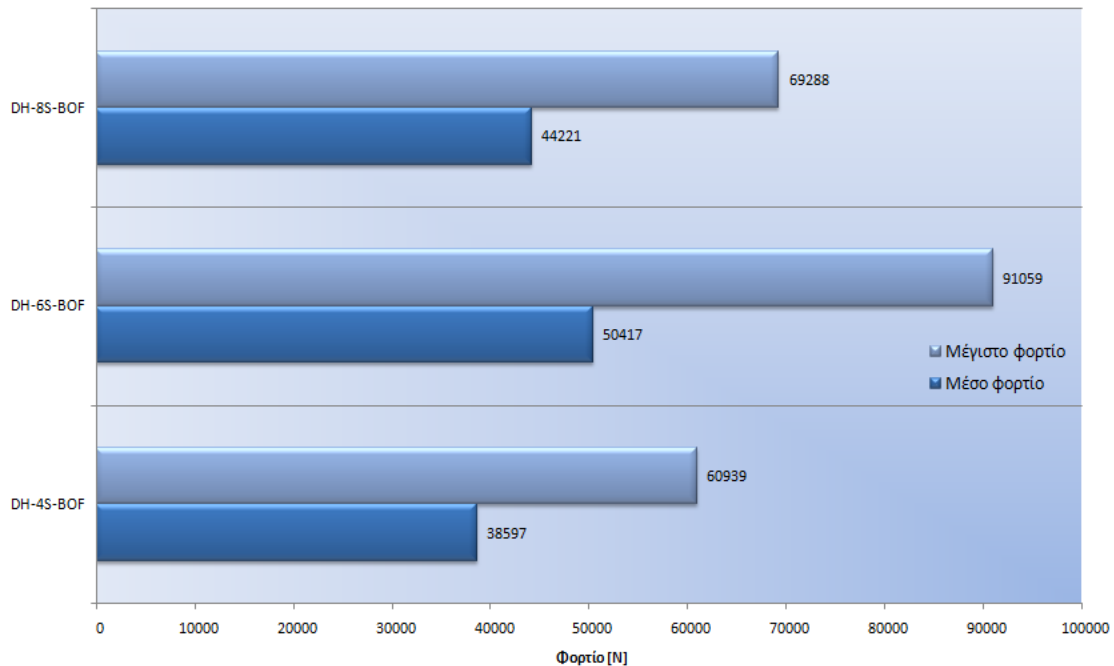
5.6.5 Δοκίμια με πυρήνα αφρό BOF

Ο αφρός Baytherm BOF παρουσιάζει την μεγαλύτερη πυκνότητα, σχεδόν διπλάσια από τον δεύτερο (BD-100) και σχεδόν δεκαπλάσια από τους άλλους. Πρόκειται για έναν βιομηχανικό αφρό, λόγω του σχετικά υψηλού κόστους κτήσης, ο οποίος χρησιμοποιείται σε διάφορους κατασκευαστικούς τομείς. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΦΡΟ BOF

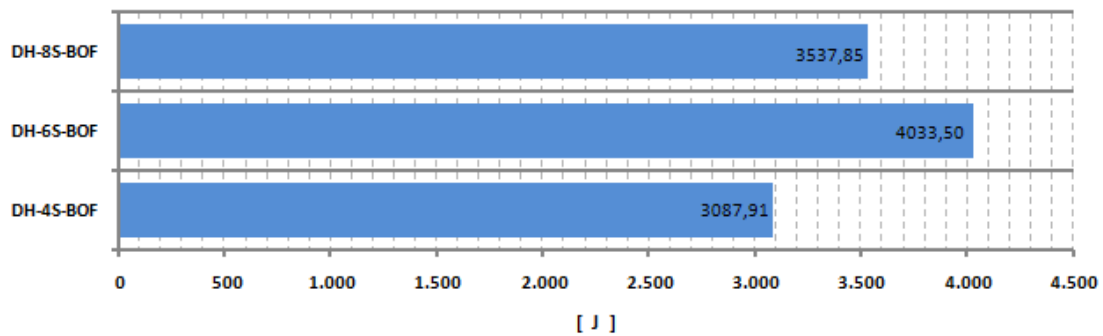


ΜΕΓΙΣΤΟ ΚΑΙ ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΑ ΔΟΚΙΜΙΟ

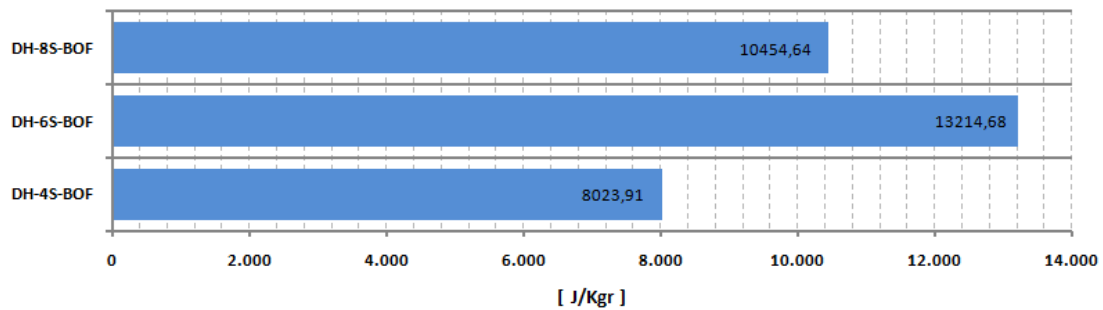




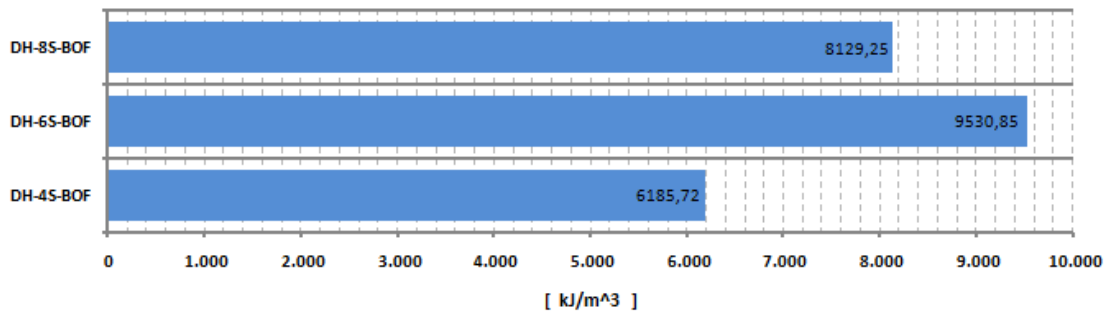
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



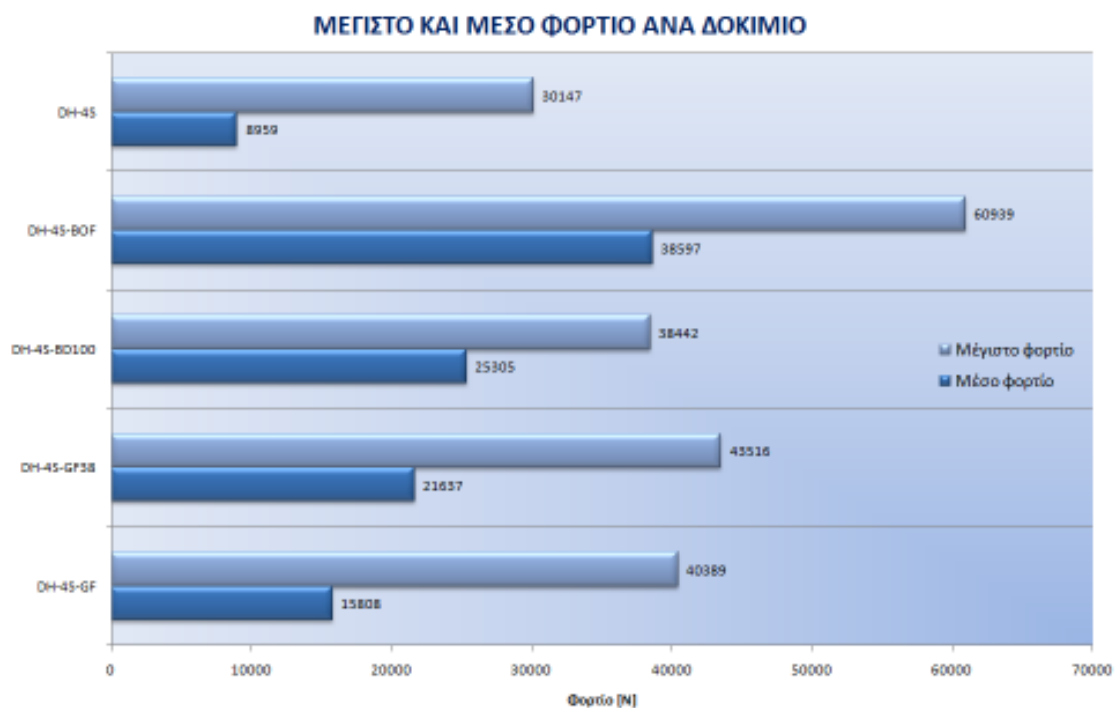
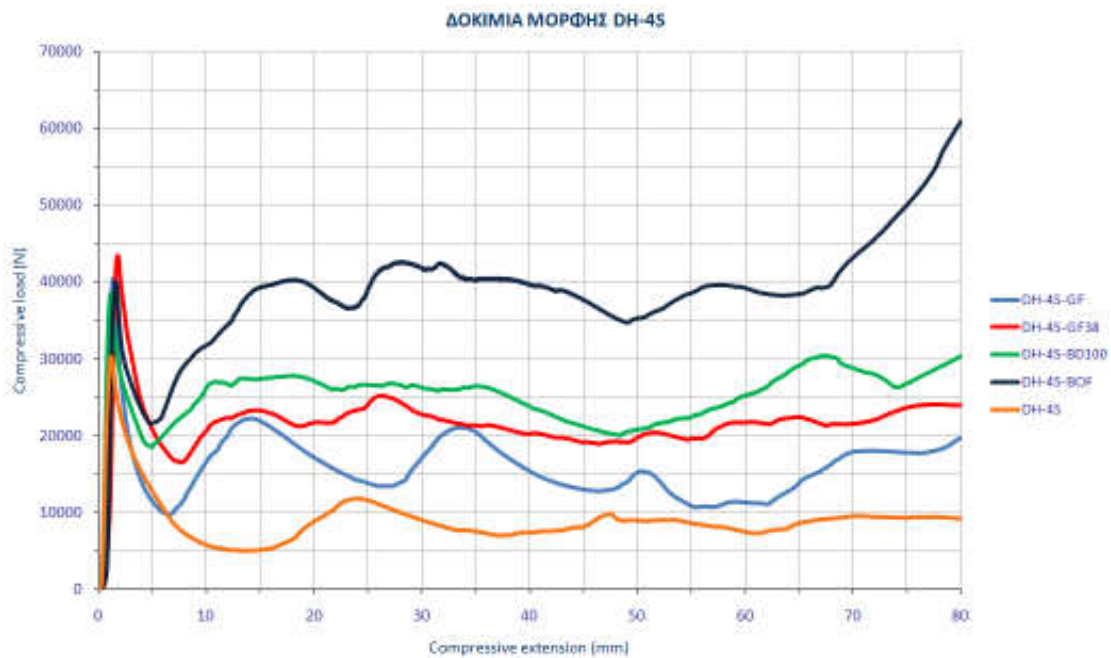
Τα παραπάνω διαγράμματα καθιστούν προφανές ότι το δοκίμιο μορφολογίας διατομής 6S παρουσιάζει υψηλότερο μέσο φορτίο και κατά συνέπεια απορροφά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας κατά την κατάρρευση του. Άξιο παρατήρησης είναι ότι οι καμπύλες στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης είναι παραπλήσιας μορφής και δεν παρουσιάζουν ημιτονοειδή συμπεριφορά. Ειδικότερα, στο διάστημα 70 – 80 mm, αυξάνονται με σταθερό ρυθμό. Ως αποτέλεσμα, τα δοκίμια εμφανίζουν το μέγιστο φορτίο τους στο τέλος της διαδρομής της συμπίεσης, στα 80 mm, με το 6S να παίρνει την μέγιστη τιμή όλων, με αρκετή μάλιστα διαφορά.

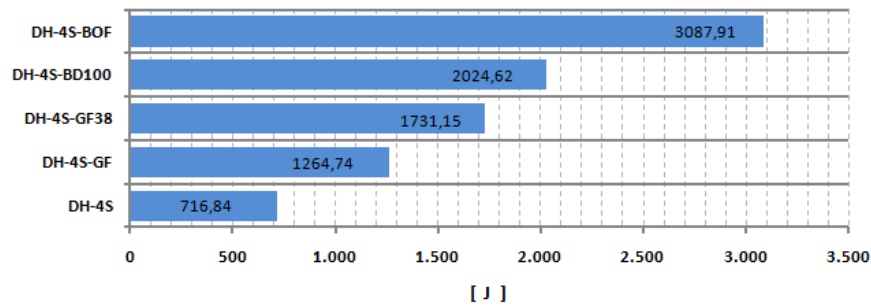
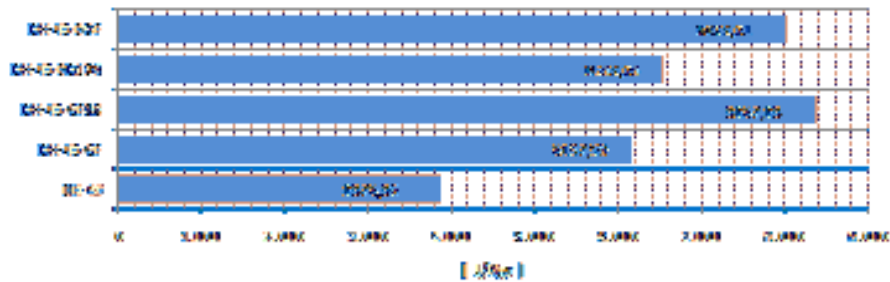
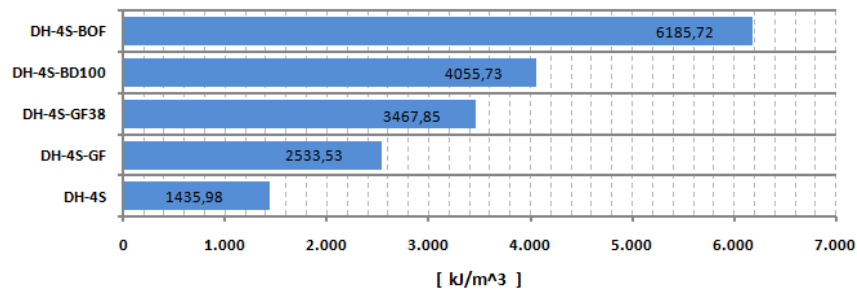


5.7 Σύγκριση δοκιμίων με όμοια μορφολογία διατομής

5.7.1 Δοκίμια με μορφολογία διατομής 4S

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται σε κοινούς άξονες τα σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας μεγέθη για ευκολότερη εποπτεία.



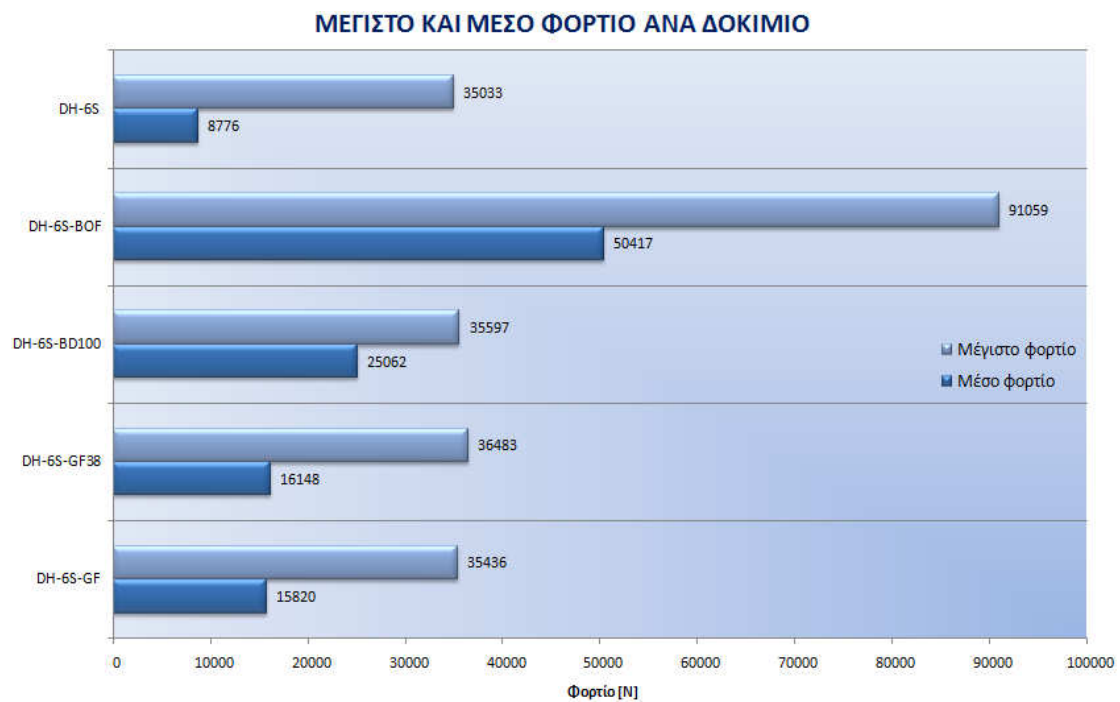
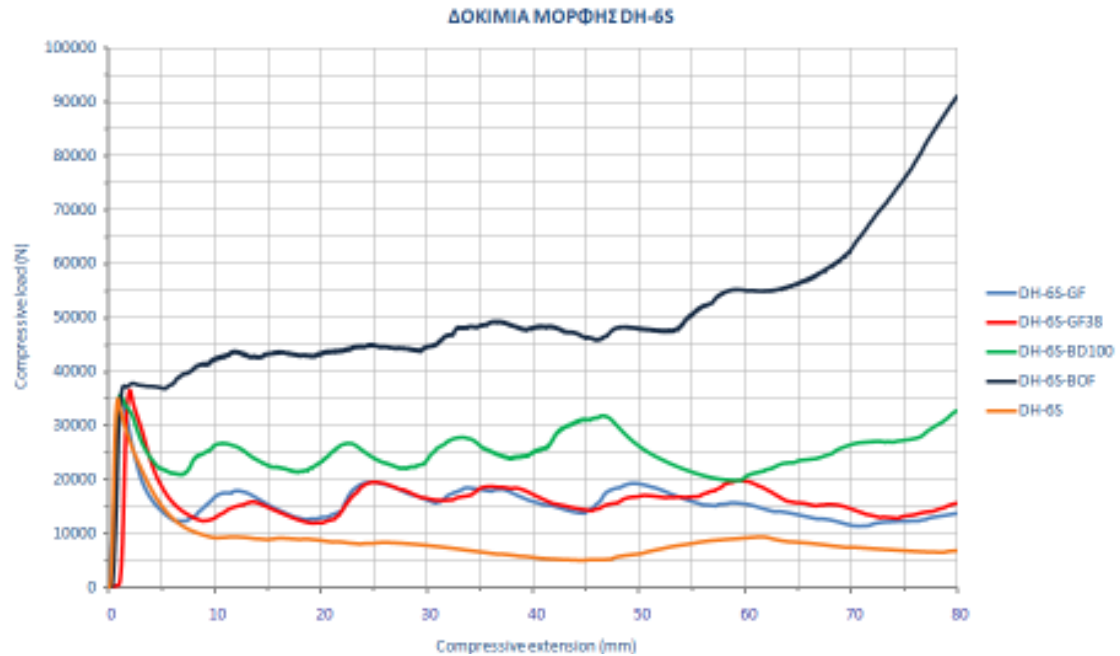
**ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ****ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ****ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, υπάρχει σαφής διαφοροποίηση στα δοκίμια τα οποία είναι ενισχυμένα με αφρό. Η ενέργεια που απορροφήθηκε είναι σε αναλογία με την πυκνότητα αυτού. Η καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης φθάνει σε τοπικό (ή ολικό για άλλα δοκίμια) μέγιστο σε παραπλήσιες τιμές φορτίου και παραμόρφωσης στα πρώτα χιλιοστά της διαδρομής. Με εξαίρεση το DH-4S-BOF, του οποίου το φορτίο αυξάνει κατά τα τελευταία στάδια της δοκιμής, τα υπόλοιπα δοκίμια εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά. Οι τιμές της Πυκνότητας διάχυσης της ενέργειας, προφανώς, αντιστοιχούν σε αυτές του καθαρού ποσού ενέργειας που καταγράφηκε καθώς τα δοκίμια έχουν ίσο όγκο. Αντίθετα, σε ό τι έχει να κάνει με την Ειδική ενέργεια απορρόφησης, το DH-4S-GF38 λόγω του μικρού, σχετικά, βάρους του φέρεται να είναι αποδοτικότερο από το βαρύτερο DH-4S-BD100. Τέλος, το κενό κέλυφος παρουσιάζει εξαιρετικά χαμηλό Μέσο φορτίο, γεγονός που επηρεάζει τα ενεργειακά δεδομένα, στα οποία δεν αποτυπώνεται και η ασταθής, ασύμμετρη κατάρρευση του δοκιμίου που καθιστούν μη προβλέψιμη τη συμπεριφορά του σε θλιπτική καταπόνηση.



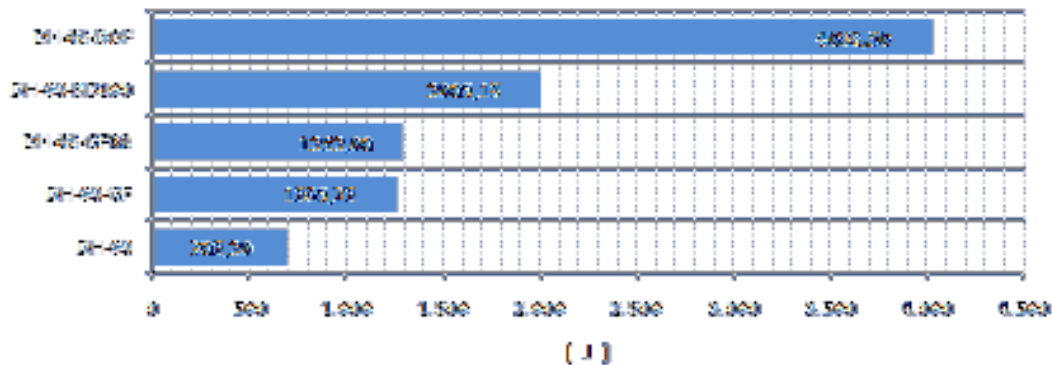
5.7.2 Δοκίμια με μορφολογία διατομής 6S

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κρίσιμα, σχετικά με την αξιολόγηση της απορρόφησης της ενέργειας, μεγέθη.

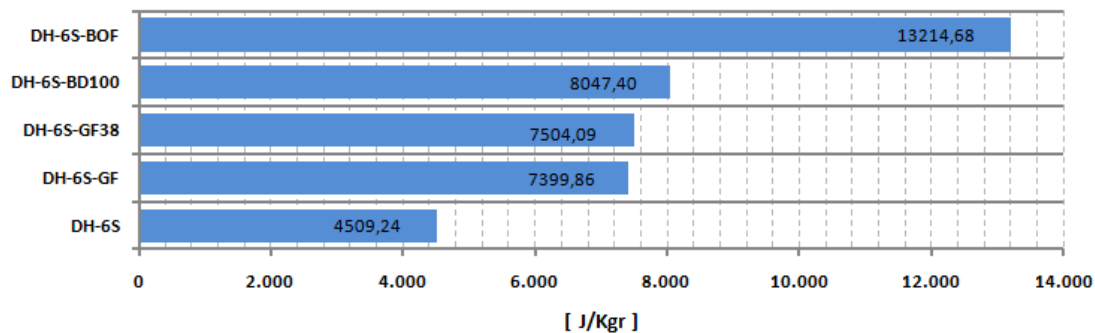




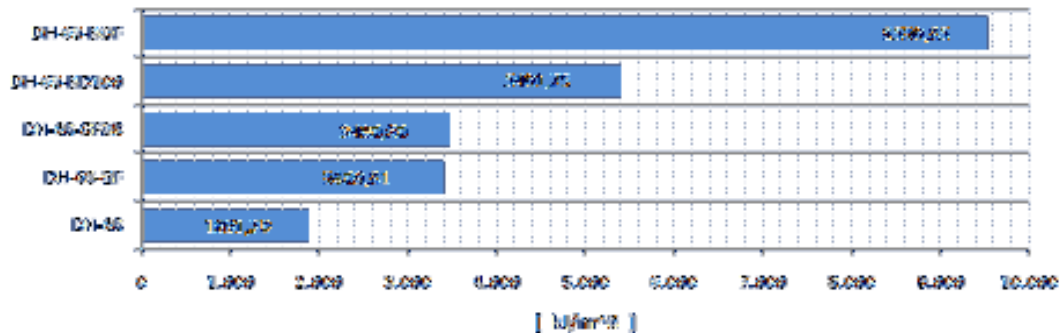
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

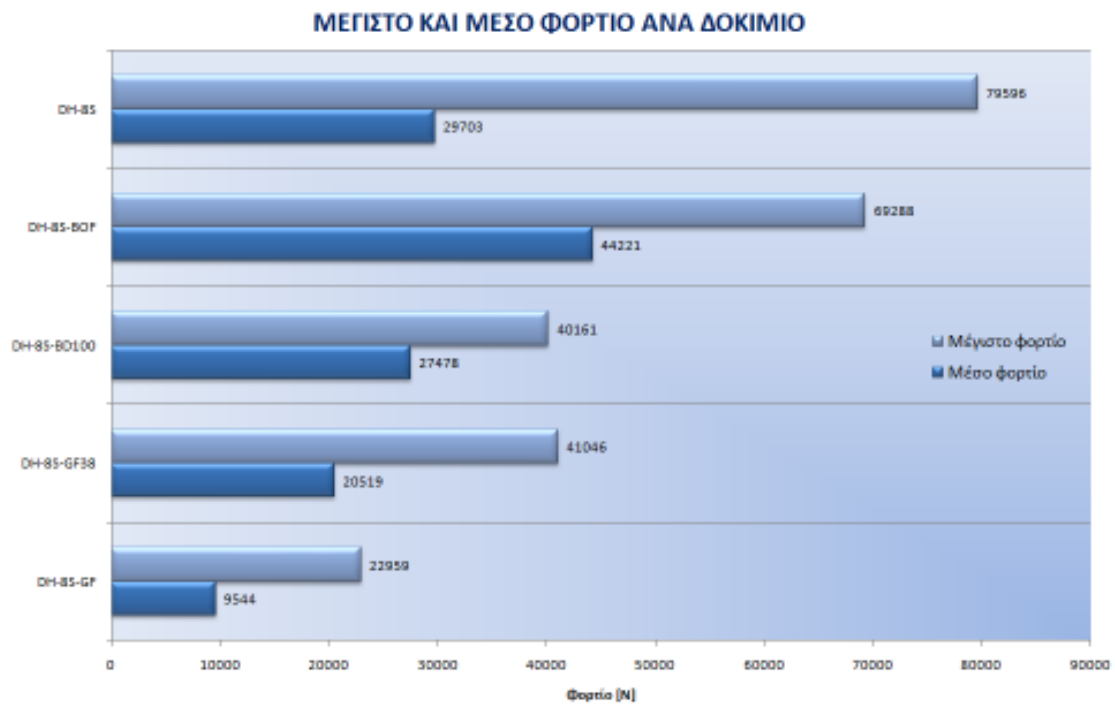
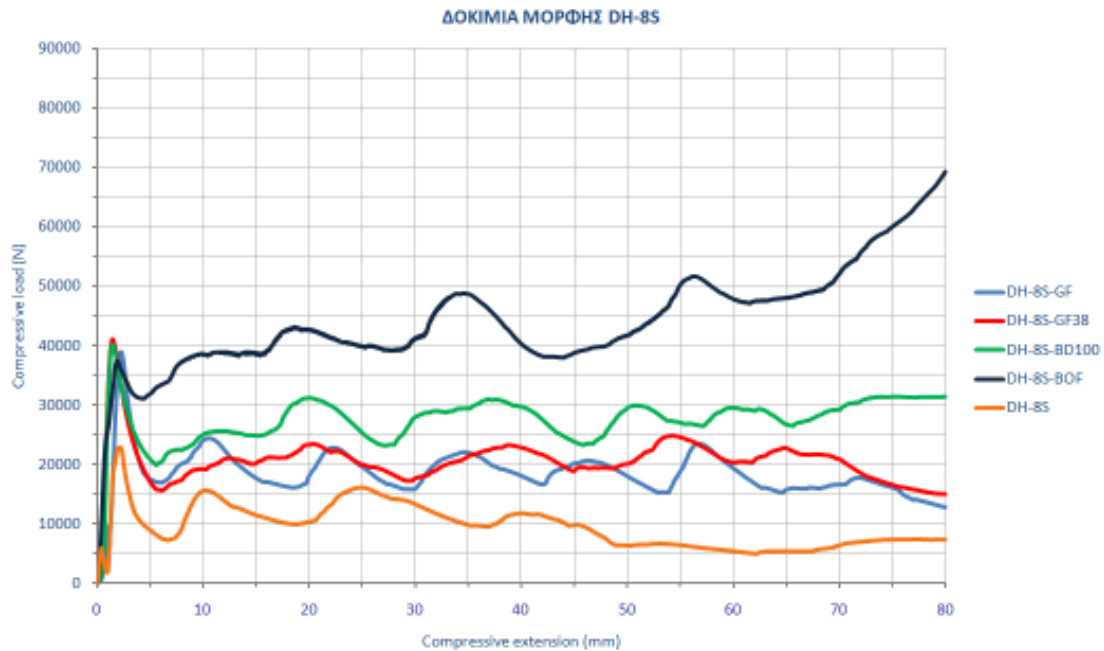


Όπως γίνεται αντιληπτό τα δοκίμια στην περίπτωση αυτή απορρόφησαν ποσά ενέργειας απολύτως ανάλογα με την πυκνότητα του πυρήνα τους. Το αρχικά τάχιστα αυξανόμενο εφαρμοζόμενο φορτίο έφθασε για κάθε δοκίμιο σε παρόμοια τιμή. Στην περίπτωση του DH-6S-BOF συνέχισε την ανοδική του πορεία μέχρι το πέρας της σύνθλιψης. Η καμπύλη των υπολοίπων ακολούθησε ημιτονοειδή μορφή με το DH-6S-BD100 να βρίσκεται διαρκώς ελαφρά υψηλότερα από αυτές των άλλων δοκιμίων με τους αφρούς μικρότερης πυκνότητας. Παρόμοια εμφανίζονται τα δεδομένα τόσο για την Ειδική ενέργεια απορρόφησης όσο και για την Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας. Τέλος, αναφορικά με το κενό κέλυφος, η ενέργεια η οποία απορροφήθηκε ήταν εξαιρετικά χαμηλή καθώς κατά τη σύνθλιψη του παρουσίασε ασταθή συμπεριφορά.



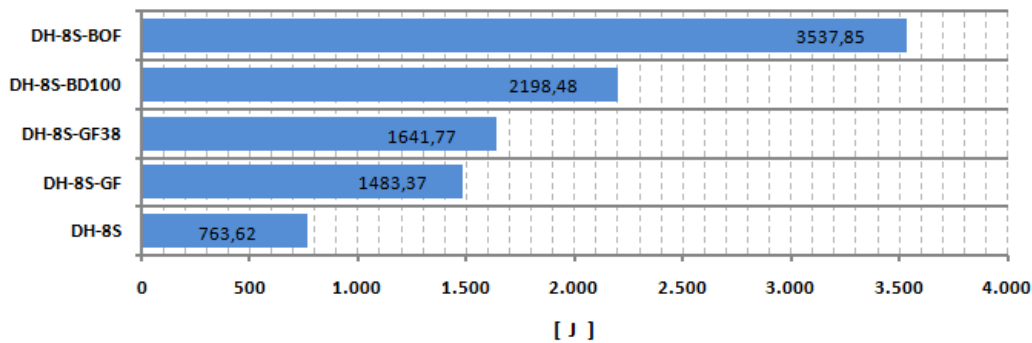
5.7.3 Δοκίμια με μορφολογία διατομής 8S

Εν συνεχεία παρατίθενται τα διαγράμματα των σημαντικότερων μεγεθών σε κοινούς άξονες για ευκολότερη διεξαγωγή συμπερασμάτων.

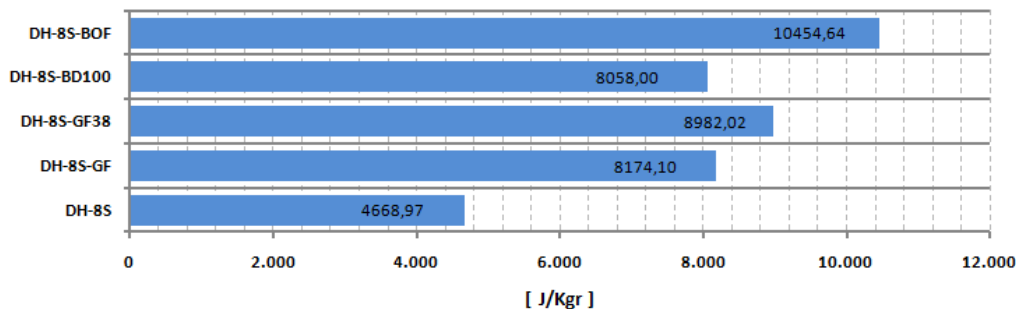




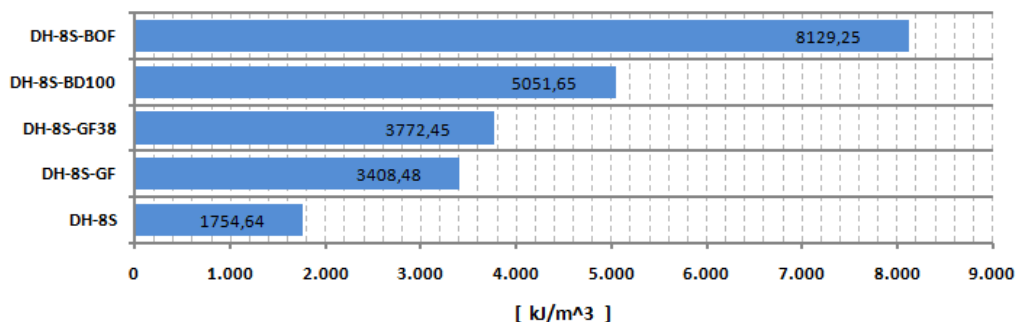
ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



Από τα διαγράμματα που παρατίθενται γίνεται κατανοητό πως τα αποτελέσματα και για τα δοκίμια με τον αφρό πολυουρεθάνης και για το κενό είναι διακριτά μεταξύ τους. Το DH-8S ακολουθεί τον τρόπο κατάρρευσης των άλλων αλλά αναπτύσσει μικρότερο Μέσο και Μέγιστο φορτίο. Παραμένοντας σε υψηλό επίπεδο καθ' όλη την διάρκεια της καταπόνησης το DH-8S-BOF καταφέρνει να απορροφήσει μεγάλο ποσό ενέργειας με την καμπύλη του να έχει ανοδικές τάσεις κατά την αύξηση της παραμόρφωσης. Οι καμπύλες των DH-8S-GF/GF38/BD100 μετά το ολικό μέγιστο που παρουσίασαν στα αρχικά στάδια συμπεριφέρθηκαν αρμονικά. Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα για την E_V , με τα δοκίμια πυρήνα BOF και BD-100 να εμφανίζουν την ικανοποιητικότερη συμπεριφορά. Αντίθετα, τέλος, αναφορικά με την W_S , το DH-8S-BD100 παρουσιάζεται λιγότερο αποδοτικό από αυτά με αφρούς GF και GF-38 καθώς παρά το μεγαλύτερο βάρος του δεν απορρόφησε ανάλογα μεγάλο ποσό ενέργειας.

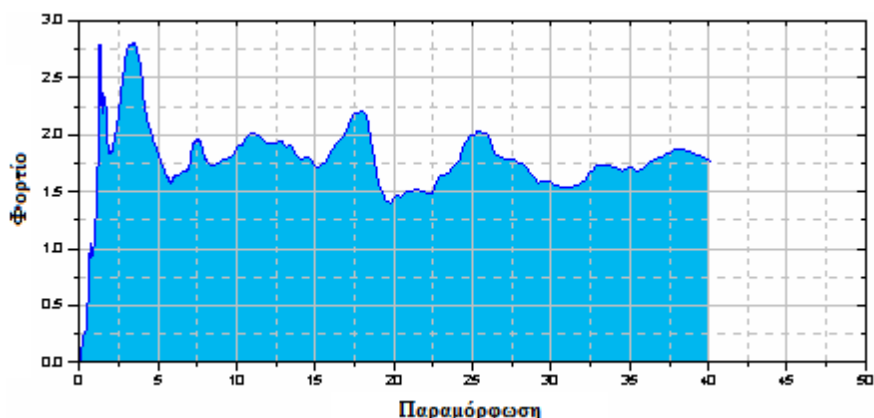
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί η σύνοψη των συμπερασμάτων της πειραματικής προσομοίωσης. Ο κύριος άξονας γύρω από τον οποίο θα κινηθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων είναι η δυνατότητα των δοκιμίων στην απορρόφησης της ενέργειας όπως αυτή υπολογίστηκε στις δοκιμές συμπίεσης.

Υπενθυμίζεται ότι το ποσό της ενέργειας, W , που απορροφάται σε μια δοκιμή αξονικής κατάρρευσης κατά τη διαδικασία αστοχίας υπολογίζεται με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης [Σχήμα 6.1].



Σχήμα 6.1: Εμβαδομέτρηση

Η Ειδική ενέργεια απορρόφησης, W_S , ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφάται κατά τη δοκιμή προς τη μάζα που έχει αστοχήσει, m_C , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο, V_C , πολλαπλασιαζόμενος με την πυκνότητα του υλικού ρ .

Η πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας E_V , τέλος, προκύπτει ως ο λόγος της απορροφούμενης ενέργειας προς τον όγκο που καταστράφηκε, V_C .

6.1 Τρόπος κατάρρευσης

Αρχικά, το δοκίμιο παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά σε πολλές περιπτώσεις, μέχρι μια μέγιστη (τοπικά ή ολικά) τιμή P_{max} . Το μέγεθος της τιμής αυτής εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση (στις περισσότερες των περιπτώσεων). Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου.

Συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση κατά την έναρξη της συμπίεσης καταγράφεται ταχεία αύξηση της εφαρμοζόμενης δύναμης. Στα περισσότερα δοκίμια φθάνει μέχρι



την μέγιστη τιμή που παρουσιάστηκε για το καθένα. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια με αφρό BOF, στα οποία η μέγιστη τιμή εντοπίζεται στο τέλος της διαδρομής.

Τα δοκίμια που ακολούθησαν προοδευτική κατάρρευση εμφανίζουν αρμονική συμπεριφορά στο διάγραμμα. Κατά συνέπεια εμφάνισαν σχετικά υψηλό μέσο μεταελαστικό φορτίο, όπως για παράδειγμα το DH-6S-BD100 [Σχήμα 6.2], και λόγω ομοιομορφίας φορτίου κοντά στη μονάδα, π.χ. DH-8S-BD100 [Σχήμα 6.3].



Σχήμα 6.2: DH-6S-BD100



Σχήμα 6.3: DH-8S-BD100

Αντίθετα, παρατηρήθηκαν μη προβλεπόμενες αυξομειώσεις στην καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης σε όσα δεν παρουσίασαν προοδευτική κατάρρευση. Παρατηρήθηκαν αρκετά αίτια που οδήγησαν σε αυτή την συμπεριφορά :

- Αστοχία συγκόλλησης. Παρουσιάστηκε στο δοκίμιο DH-4S με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό μεταξύ των μερών του κελύφους [Σχήμα 6.4].



Σχήμα 6.4: DH-4S

- Λυγισμός. Έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μη αξονικών φορτίων, επηρεάζοντας τον τρόπο παραμόρφωσης και περιορίζοντας την ενέργεια που απορροφάται. Εμφανίστηκε εντονότερα στο δοκίμιο DH-6S [Σχήμα 6.5] .



Σχήμα 6.5: DH-6S

- Ασυμμετρία στήριξης. Παρατηρήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στα δοκίμια DH-8S, DH-6S-GF και DH-8S-GF, συνέπεια της παραμόρφωσης που υπέστη η πλευρά του δοκιμίου η οποία έρχεται σε επαφή με την κάτω έδρα της μηχανής δοκιμών [Σχήμα 6.6].



Σχήμα 6.6: DH-8S



- Διαγώνιος σχηματισμός λοβού. Στο δοκίμιο DH-8S-BOF εντοπίζεται πτώση του φορτίου κατά το σχηματισμό λοβού σε θέση μη παράλληλη με τις κεφαλές της μηχανής [Σχήμα 6.7].



Σχήμα 6.7: DH-8S-BOF

6.2 Επίδραση μορφολογίας κελύφους στην απορρόφηση ενέργειας

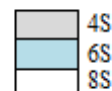
Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια τριών διαφορετικών μορφολογιών κελύφους, τετραγωνικά, εξαγωνικά και οκταγωνικά, με τις κωδικές ονομασίες 4S, 6S και 8S, αντίστοιχα. Στόχος υπήρξε η διάγνωση της επίδρασης της στην απορρόφηση της ενέργειας.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα σχετικά με την ενέργεια μεγέθη που υπολογίστηκαν, σε αύξουσα σειρά.

Κωδικός δοκιμίου	Απορροφούμενη ενέργεια (J)
DH-6S	702,20
DH-4S	716,84
DH-8S	763,62
DH-4S-GF	1264,74
DH-6S-GF	1265,72
DH-6S-GF38	1292,00
DH-8S-GF	1483,37
DH-8S-GF38	1641,77
DH-4S-GF38	1731,15
DH-6S-BD100	2005,13
DH-4S-BD100	2024,62
DH-8S-BD100	2198,48
DH-4S-BOF	3087,91
DH-8S-BOF	3537,85
DH-6S-BOF	4033,50

Κωδικός δοκιμίου	Ειδική ενέργεια απορρόφησης (J/Kgr)
DH-4S	3876,86
DH-6S	4509,24
DH-8S	4668,97
DH-4S-GF	6157,59
DH-4S-BD100	6533,93
DH-6S-GF	7399,86
DH-6S-GF38	7504,09
DH-4S-BOF	8023,91
DH-6S-BD100	8047,40
DH-8S-BD100	8058,00
DH-8S-GF	8174,10
DH-4S-GF38	8367,38
DH-8S-GF38	8982,02
DH-8S-BOF	10454,64
DH-6S-BOF	13214,68

Κωδικός δοκιμίου	Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας (kJ/m ³)
DH-4S	1435,98
DH-8S	1754,64
DH-6S	1891,70
DH-4S-GF	2533,53
DH-8S-GF	3408,48
DH-6S-GF	3409,81
DH-4S-GF38	3467,85
DH-6S-GF38	3480,60
DH-8S-GF38	3772,45
DH-4S-BD100	4055,73
DH-8S-BD100	5051,65
DH-6S-BD100	5401,75
DH-4S-BOF	6185,72
DH-8S-BOF	8129,25
DH-6S-BOF	10866,11





6.2.1 Σύνολο δοκιμίων

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα δεδομένα, για τα μεγέθη του καθαρού ποσού ενέργειας που καταγράφηκε και της Πυκνότητας διάχυσης της ενέργειας, δεν διαφαίνεται σημαντική επίδραση της μορφολογίας του κελύφους στα αποτελέσματα. Χαρακτηριστικό είναι πως το δοκίμιο που απορροφά την μέγιστη ενέργεια, DH-6S-BOF, είναι της ίδιας μορφολογίας με αυτό που απορροφά την μικρότερη, DH-6S. Στην περίπτωση της Ειδικής ενέργειας απορρόφησης, όμως, παρατηρείται αποδοτικότερη συμπεριφορά των πολυγωνικών δοκιμίων και ειδικότερα αυτών μορφής 8S.

6.2.2 Δοκίμια με όμοιο πυρήνα

Στα δοκίμια χωρίς αφρώδες πυρήνα τα δεδομένα έχουν παρεμφερείς τιμές. Το 6S απορρόφησε οριακά το χαμηλότερο ποσό ενέργειας, εκμεταλλευόμενο, όμως το ότι ήταν ελαφρύτερο παρουσίασε σχετικά υψηλή Ειδική ενέργεια. Λόγω του μικρού του όγκου ήταν αυτό που είχε την μεγαλύτερη τιμή Πυκνότητας διάχυσης της ενέργειας. Το 4S αντίθετα, είχε τις μικρότερες τιμές στα μεγέθη αυτά.

Στα δοκίμια με αφρό GF, αν και οι τιμές και πάλι δε διαφέρουν κατά πολύ, παρατηρούμε πως ο αριθμός των ακμών επηρέασε τα αποτελέσματα καθώς έλαβαν την αναμενόμενη σειρά τόσο στην απορροφούμενη όσο και στην Ειδική ενέργεια. Η μόνη εξαίρεση υπήρξε η Πυκνότητα διάχυσης, όπου το 8S φαίνεται να έχει την ίδια απόδοση με το 6S, πρακτικά, απόρροια του μεγαλύτερου όγκου του.

Παρόμοια, στα κελύφη με ενίσχυση αφρού GF-38 τα αποτελέσματα βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών, κυρίως στον δείκτη της Πυκνότητας διάχυσης. Αντίθετα με τις προβλέψεις μας το DH-4S-GF38 απορρόφησε το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας, έστω και οριακά πάνω από το DH-8S-GF38, το οποίο με τη σειρά του ελέω του μικρότερου βάρους του παρουσίασε την υψηλότερη Ειδική ενέργεια.

Στις περιπτώσεις των τεμαχίων με BD-100 οι υπολογισθείσες τιμές ήταν και πάλι παραπλήσιες. Το οκταγωνικό δοκίμιο απορρόφησε ελαφρά περισσότερη ενέργεια και παρουσίασε μεγαλύτερη Ειδική. Αντίθετα, το εξαγωνικό είχε μεγαλύτερη Πυκνότητα διάχυσης της. Το τετραγωνικό δοκίμιο, το οποίο ήταν και βαρύτερο και ογκωδέστερο, παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές στους δείκτες αυτούς, με εξαίρεση το καθαρό ποσό ενέργειας.

Τέλος, σχετικά με τα δοκίμια με αφρώδη πυρήνα τύπου BOF, παρατηρούμε πως το τεμάχιο DH-6S-BOF λαμβάνει τις υψηλότερες και το DH-4S-BOF τις χαμηλότερες τιμές και για τους τρεις δείκτες. Σε αντιδιαστολή με τις άλλες περιπτώσεις, υπάρχει διάκριση μεταξύ τους καθώς υπάρχει αρκετή διαφορά στις τιμές.

Συνοψίζοντας, τα τετραγωνικά δοκίμια παρά το γεγονός ότι απορρόφησαν, συγκριτικά, ικανοποιητικά ποσά ενέργειας φαίνεται πως δεν να συμπεριφέρονται αποδοτικά καθώς στις τιμές των W_S και E_V αποτυπώνεται ότι αυτό οφείλετε ξεκάθαρα στο ότι είναι βαρύτερα και μεγαλύτερου όγκου από αυτά των άλλων δύο μορφολογιών. Δεν μπορεί να υπάρξει διάκριση, όμως, ανάμεσα στα δοκίμια μορφής



6S και 8S, καθώς σε κάποιες περιπτώσεις παρουσιάζονται απορροφητικότερα τα μεν και σε άλλες τα δε. Σε κάθε περίπτωση, μπορούμε να πούμε πως η ύπαρξη περισσοτέρων ακμών επηρέασε, έστω και κατ' ελάχιστο, την απορροφητικότητα των δοκιμίων.

6.3 Επίδραση αφρώδους πυρήνα στην απορρόφηση ενέργειας

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκαν αφροί διαφορετικών πυκνοτήτων. Ο GF ήταν ο ελαφρύτερος, με 41 Kgr/m^3 . Ακολούθησαν ο GF-38 με 44 Kgr/m^3 και ο BD-100 με 250 Kgr/m^3 , αντίστοιχα. Βαρύτερος αφρός ήταν ο BOF με 400 Kgr/m^3 . Στόχος υπήρξε η διάγνωση τις επίδρασης τους στην απορρόφηση της ενέργειας.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα σχετικά με την ενέργεια μεγέθη που υπολογίστηκαν, σε αύξουσα σειρά.

Κωδικός δοκιμίου	Απορροφούμενη ενέργεια (J)
DH-6S	702,20
DH-4S	716,84
DH-8S	763,62
DH-4S-GF	1264,74
DH-6S-GF	1265,72
DH-6S-GF38	1292,00
DH-8S-GF	1483,37
DH-8S-GF38	1641,77
DH-4S-GF38	1731,15
DH-6S-BD100	2005,13
DH-4S-BD100	2024,62
DH-8S-BD100	2198,48
DH-4S-BOF	3087,91
DH-8S-BOF	3537,85
DH-6S-BOF	4033,50

Κωδικός δοκιμίου	Ειδική ενέργεια απορρόφησης (J/Kgr)
DH-4S	3876,86
DH-6S	4509,24
DH-8S	4668,97
DH-4S-GF	6157,59
DH-4S-BD100	6533,93
DH-6S-GF	7399,86
DH-6S-GF38	7504,09
DH-4S-BOF	8023,91
DH-6S-BD100	8047,40
DH-8S-BD100	8058,00
DH-8S-GF	8174,10
DH-4S-GF38	8367,38
DH-8S-GF38	8982,02
DH-8S-BOF	10454,64
DH-6S-BOF	13214,68

Κωδικός δοκιμίου	Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας (kJ/m^3)
DH-4S	1435,98
DH-8S	1754,64
DH-6S	1891,70
DH-4S-GF	2533,53
DH-8S-GF	3408,48
DH-6S-GF	3409,81
DH-4S-GF38	3467,85
DH-6S-GF38	3480,60
DH-8S-GF38	3772,45
DH-4S-BD100	4055,73
DH-8S-BD100	5051,65
DH-6S-BD100	5401,75
DH-4S-BOF	6185,72
DH-8S-BOF	8129,25
DH-6S-BOF	10866,11

	Κενά
	GF
	GF-38
	BD-100
	BOF



6.3.1 Σύνολο δοκιμίων

Όπως φαίνεται από τα δεδομένα υπάρχει έντονη συσχέτιση των αποτελεσμάτων με το είδος του αφρού που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης των κελυφών. Τα κενά δοκίμια απορρόφησαν τη λιγότερη ενέργεια, ακολουθούμενα από εκείνα με τον ελαφρύτερο αφρό, τον GF. Έπονται αυτά με τον GF-38 ενώ στην συνέχεια συναντάμε εκείνα με τον BD-100. Τα μεγαλύτερα ποσά απορροφήθηκαν, όπως ήταν αναμενόμενα, από τα δοκίμια με τον βαρύτερο αφρό, τον BOF. Εξαίρεση αποτελεί το DH-8S-GF που ξεπέρασε το εξαγωνικό δοκίμιο με τον αμέσως πυκνότερο αφρό GF-38.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα για την Ειδική ενέργεια. Αντίθετα όμως με την περίπτωση του καθαρού ποσού που απορροφήθηκε, τα δοκίμια με GF-38 φέρονται να είναι αποδοτικότερα από αυτά με BD-100 καθώς υπάρχει σημαντική διαφορά βάρους.

Τέλος, όσον αφορά την Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας η αύξουσα σειρά ακολουθεί πλήρως την αύξηση της τιμής της πυκνότητας του αφρού χωρίς καμία διαταραχή.

6.3.2 Δοκίμια με όμοια μορφολογία κελύφους

Τα αποτελέσματα των τετραγωνικών δοκιμίων ήταν σε πλήρη αναλογία με την πυκνότητα του περιεχόμενου αφρού σχετικά τόσο με το καθαρό ποσό ενέργειας της διαδικασίας σύνθλιψης όσο και με την Πυκνότητα διάχυσης. Η μόνη μεταβολή στην σχέση αυτή παρατηρείται στην Ειδική ενέργεια όπου το δοκίμιο με GF-38 εμφανίζεται κατάτι αποδοτικότερο από το DH-4S-BD100 και του DH-4S-BOF ελέω του αρκετά μικρότερου βάρους του.

Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για τα δοκίμια μορφής 6S. Η επιρροή του είδους του αφρού που φέρει το κάθε κέλυφος είναι εμφανέστατη καθώς σε όλα τα ενεργειακά μεγέθη η σειρά όπου εμφανίζονται βρίσκεται σε αναλογία με αυτόν. Κατά συνέπεια το άδειο κέλυφος απορρόφησε το μικρότερο ποσό ενώ εκείνο με τον BOF το μεγαλύτερο, περίπου έξι φορές περισσότερο.

Τέλος, τα δοκίμια με οκτώ ακμές ακολούθησαν και αυτά με τη σειρά τους πλήρως την σύνδεση αύξηση πυκνότητας – αύξηση ενέργειας, με μόνη παραφωνία στην Ειδική ενέργεια όπου το βαρύ δοκίμιο με αφρό BD-100 εμφανίζει χαμηλότερη απόδοση από αυτά με GF και GF-38. Με αυτόν τον τρόπο, το κενό κέλυφος φέρεται να δέχθηκε την μισή περίπου ενέργεια από αυτό με τον αφρό GF. Ακολουθεί το DH-8S-GF38 με περίπου 200 J παραπάνω. Εν συνεχεία έπεται το δοκίμιο με τον BD-100 και καταλήγουμε στο DH-8S-BOF σε τιμή περίπου πενταπλάσιας από αυτήν του κελύφους χωρίς ενισχυτικό πυρήνα.

Από τα παραπάνω εξάγεται, πέραν πάσης αμφιβολίας, το γεγονός της άμεσης συσχέτισης που υπάρχει μεταξύ της πυκνότητας του αφρού πολυουρεθάνης, που χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης των χαλύβδινων κελυφών, με την ενέργεια, W,



που απορροφήθηκε κατά την διαδικασία της πειραματικής προσομοίωσης. Λόγω του μικρού του, σε κάθε περίπτωση, ειδικού βάρους και όγκου η Ειδική ενέργεια απορρόφησης, W_S , και η Πυκνότητα διάχυσης της ενέργειας, E_V , ακολούθησαν το ίδιο μοτίβο, επίσης. Η χρήση του, λοιπόν, μας επέτρεψε να δημιουργήσουμε στιβαρότερες δομές, για τον δεδομένο όγκο, χωρίς δραματικής αύξηση του βάρους της κατασκευής, οι οποίες είναι αποδοτικότερες ενεργειακά και καταρρέουν προοδευτικά και προβλέψιμα [Σχήμα 6.8].



Σχήμα 6.8: Επίδραση της πλήρωσης με αφρό στον τρόπο κατάρρευσης. Αριστερά το κενό οκταγωνικό δοκίμιο και δεξιά ίδιας μορφής κελύφος με πυρήνα αφρού.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Καθώς οι εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας των υλικών είναι ραγδαίες τα στοιχεία απορρόφησης ενέργειας αναπτύσσονται και βελτιστοποιούνται συνεχώς.

Σχετικά με το θέμα της παρούσας εργασίας ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της επιρροής που ασκεί το μήκος του ενισχυμένου double hat κελύφους στην απορρόφηση ενέργειας και στον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου.

Μπορεί, επίσης, να διερευνηθεί η επίδραση της μορφής του κελύφους με μεγάλο αριθμό δοκιμών ώστε να δύναται να υπάρξει στατιστική επεξεργασία στις μετρήσεις.

Σημαντική θα ήταν και η μελέτη της επιρροής της ενίσχυσης των κελυφών και με άλλα μέσα, σε συνδυασμό με τους πολυμερής αφρούς, όπως η ενσωμάτωση διαγωνίων ελασμάτων εσωτερικά του κελύφους σε διάφορα σχήματα και τρόπους σύνδεσης.

Τέλος, μπορεί να εξετασθεί ο λόγος που τα τετραγωνικά δοκίμια παρουσιάζουν αυτή την επιπεδοποίηση της καμπύλης φορτίου (περιοχή plateau) και αν αυτή η συμπεριφορά είναι προτιμητέα έναντι της αυξομείωσης του φορτίου.



Βιβλιογραφία

- Αιμ. Γ. Κορωναίος, Γ. Ι. Πουλάκος, *"Τεχνικά υλικά"*, Ε.Μ.Π., 2006
- Γ. Πεγλιβάνογλου, *"Αφρώδη Μέταλλα – Νέα Αφρώδη Υλικά"*, R & D, 2004
- Μ. Νικολαράκης, Κ. Ζοπουνίδης, *"Ανάλυση τροχαίων ατυχημάτων στην Ελλάδα"*, Κλειδάριθμος, 2007
- A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis and P. K. Kostazos, *"Axial collapse of hybrid square sandwich composite tubular components with corrugated core: Experimental"*, IJCrash, 2000
- A. G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, *"Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components"*, CRC Press, 2004.
- A. G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, *"Experimental determination of splitting in axially collapsed thick-walled fibre-reinforced composite frusta"* Thin-Walled Structures, 1997
- A. G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.G. Chronopoulos, P.K. Kostazos, *"On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminium or polymeric foams: Experimental and numerical simulation"*, Composite Structures, 2008
- A. G. Mamalis, M. Robinson, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, J. Carruthers, *"Crashworthy capability of composite material structures"*, Composite Structures, 1997
- A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.P. Papapostolou, *"Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: Experimental"*, Composite Structures, 2004
- A. Tobota, J. Karliński, A. Koczyński, *"Axial crushing of monotubal and bitubal circular foam-filled sections"*, JAMME, 2007
- A.A.A. Alghamdi, *"Collapsible impact energy absorbers: an overview"*, Thin-Walled Structures, 2001
- B. H. Lampinen, R. A. Jeryan, *"Effectiveness of polyurethane foam in energy absorbing structures"*, SAE 820949.
- C. S. Cha, J. O. Chung, *"An Experimental Study on the Axial Collapse Characteristics of Hat and Double Hat Shaped Section Members at Various Velocities"*, KSME International Journal, 2004



- C. S. Cha, J. O. Chung, J. W. Park, Y. N. Kim, I. Y. Yang, "***Collapse Analysis of Spot Welded Thin Section Members in a Vehicle Body Structure at Various Impact Velocities***", KSME International Journal, 2003
- Cs. Kádár, P. Kenesei, J. Lendvai, Zs. Rajkovits, "***Energy absorption properties of metal foams***", Materials World, 2004
- D. Klemperer, K. C. Frisch, "***Handbook of polymeric foams and foam technology***", Hanser Publishers, 1991
- F. J. Plantema, "***Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells***", John Wiley and Sons, 1966.
- F. Schneider, N. Jones, "***Impact of thin-walled high-strength steel structural sections***", Journal of Automobile Engineering, 2004
- F. Schneider, N. Jones, "***Influence of spot-weld failure on crushing of thin-walled structural sections***", International Journal of Mechanics Sciences, , 2003
- G. Lu, T.X. Yu, "***Energy Absorption of Structures and Materials***", Woodhead Publishing, 2003.
- H. Hofmeyer, "***Cross-section crushing behaviour of hat-sections (Part I: Numerical modelling)***", Thin-Walled Structures, 2005
- H. Hofmeyer, "***Cross-section crushing behaviour of hat-sections (Part II: Analytical modelling)***", Thin-Walled Structures, 2005
- H. W. Song, Zi-Jie Fan, G. Yu, Q. C. Wang, A. Tobota "***Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections***", Solids and structures, 2004
- J. F. Shackelford, W. Alexander, "***Materials Science and Engineering Handbook***", CRC Press, 2001
- K.L. Mittal, P. Kumar, "***Emulsions, Foams, and Thin Films***", Marcel Dekker Ltd, 2000
- M. M. Schwartz, "***Composite Materials, Volume I***", Prentice Hall, 1997
- M.D. White, N. Jones, "***Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections***", International Journal of Mechanics Sciences, 1999
- M.D. White, N. Jones, "***Experimental study into the energy absorbing characteristics of top-hat and double-hat sections subjected to dynamic axial crushing***", Journal of Automobile Engineering, 1999



- M.D. White, N. Jones, W. Abramowicz, "*A theoretical analysis for the quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections*", International Journal of Mechanics Sciences, 1999
- M.R. Bambach, G.Tana, R.H. Grzebieta, "*Steel spot-welded hat sections with perforations subjected to large deformation pure bending*", Thin-Walled Structures, 2005
- N. Jones, T. Wierzbicki, "*Structural Crashworthiness and Failure*", Spon Press, 1993
- N.A Fleck, L.T Kuhn, R.M. McMeeking, "*Yielding of metal powder bonded by isolated contacts*", Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1992
- Q. Wang, Z. Fan, H. Song, L. Gui, "*Experimental and numerical analyses of the axial crushing behaviour of hat sections partially filled with aluminium foam*", International Journal of Crashworthiness, 2005
- Q. Wang, Z. Fan, L. Gui, "*A theoretical analysis for the dynamic axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections*", International Journal of Crashworthiness, 2005.
- R. M. Jones, "*Mechanics Of Composite Materials* ", CRC Press, 1998
- T. Wierzbicki, W. Abramowicz, "*On the crushing mechanics of thinwalled structures*", Journal of Applied Mechanics, 1983
- W. Abramowicz, N. Jones, "*Dynamic axial crushing of square tubes*", International Journal of Impact Engineering, 1984
- Yong-Bum Choa, Chul-Ho Baeb, Myung-Won Suhb, Hyo-Chol Sina, "*A vehicle front frame crash design optimization using hole-type and dent-type crush initiator*", International Journal of Crashworthiness, 2006
- Ελληνική στατιστική αρχή - <http://www.statistics.gr>
- Aviation Safety Network - <http://aviation-safety.net>