



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):  
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΕΝΑΝΤΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΦΟΡΕΩΝ  
ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ  
ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ  
(ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ, ΠΟΛΥΜΕΡΗ, ΣΥΝΘΕΤΑ)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΛΟΠΙΔΑΣ Ν. ΧΑΡΕΜΗΣ**  
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΗΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ (ΣΝΔ)

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ :**  
**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

**ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016**



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):  
“ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ”

## **ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΦΟΡΕΩΝ ΛΕΠΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ (ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ, ΠΟΛΥΜΕΡΗ, ΣΥΝΘΕΤΑ)**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΛΟΠΙΔΑΣ Ν. ΧΑΡΕΜΗΣ  
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΣΧΟΛΗΣ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ (ΣΝΔ)

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π  
ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ ΚΟΝΤΟΥ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π  
ΑΓΓΕΛΟΣ ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Λέκτορας Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2016

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο του Δ.Π.Μ.Σ “Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών” και σκοπός της είναι η συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς έναντι ψευδο-στατικής (quasi static) και κρουστικής φόρτισης φορέων λεπτού πάχους από μεταλλικά, πολυμερή και σύνθετα (composite) υλικά. Το τελευταίο επιτυγχάνεται μελετώντας τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων μέσω των ληφθέντων φωτογραφιών και των αντίστοιχων διαγραμμάτων μεταβολής φορτίου συμπίεσης – βράχυνσης για τις ημι-στατικές φορτίσεις και διαγραμμάτων της μεταβολής του φορτίου κρούσης – χρόνου για τις κρουστικές φορτίσεις.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή Δημήτριο Ε. Μανωλάκο ο οποίος με τίμησε με την ανάθεση της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε τόσο στο θεωρητικό όσο και στο πειραματικό μέρος και τέλος τον Νικόλαο Μελισσά για την βοήθεια που μου παρείχε στην προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας.

Χαρέμης Ν. Πελοπίδας

Φεβρουάριος, 2016

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη της συμπεριφοράς έναντι ψευδο-στατικής και κρουστικής φόρτισης φορέων λεπτού πάχους από μεταλλικά, πολυμερή και σύνθετα (composite) υλικά.

Αρχικά, παρουσιάζονται οι θεωρητικού τρόποι κατάρρευσης των λεπτότοιχων διατάξεων με τους αντίστοιχους δείκτες αξιολόγησης απορρόφησης ενέργειας κατά την κατάρρευσής τους.

Συγκεκριμένα, επιλέγονται δοκίμια τετραγωνικής και κυκλικής διατομής χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, κράματος αλουμινίου 6063, πολυμερές PVC (κυκλικής διατομής), σύνθετο υλικό πολυεστερικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες γυαλιού (κυκλικής διατομής) και σύνθετο υλικό με βινυλεστερική ρητίνη με ενισχυτικές ίνες γυαλιού. Στη συνέχεια υποβάλλονται σε ημι-στατικές φορτίσεις, σε κατάλληλη διάταξη (μηχανική πρέσα INSTRON 4482) με προεπιλεγμένες δύο διαφορετικές ταχύτητες του εμβόλου της πρέσας, 20mm/min και 500mm/min αντίστοιχα, και μελετάται ο τρόπος κατάρρευσής τους μέσω των ληφθέντων φωτογραφιών και των αντίστοιχων διαγραμμάτων μεταβολής του φορτίου συμπίεσης με την μετατόπιση του εμβόλου.

Στο δεύτερο πειραματικό μέρος, τα δοκίμια υποβάλλονται σε κρουστικές φορτίσεις, στην διάταξη πίπτουσας μάζας από δύο διαφορετικά ύψη, ένα και δύο μέτρα αντίστοιχα, και μελετάται ο τρόπος κατάρρευσής τους μέσω των ληφθέντων φωτογραφιών και των αντίστοιχων διαγραμμάτων της μεταβολής του φορτίου κρούσης σε σχέση με τον χρόνο.

Τέλος, επιχειρείται τυχόν συσχέτιση των αποτελεσμάτων της ημι-στατικής και κρουστικής φόρτισης.

## ABSTRACT

The purpose of the above study is a comparative study of the behavior against quasi static and impactive load of thin walled tubes from metal, polymer and composite materials.

Initially, the theoretical ways of the collapse of thin-walled devices are presented with the corresponding evaluation ratios of the energy absorbers while their collapse.

Specifically selected specimens with square and circular section steel low content in carbon and aluminum alloy 6063, polymer PVC (circular section), composite material polyester matrix with reinforcing glass fibers (circular section), and composite material with vinylester resin with reinforcing glass fibers. Then, they are submitted into quasi-static loads with a suitable machine (mechanical press INSTRON 4482), using two different speed ratios of the press ram, 20mm/min and 500mm/min respectively, and the way of their collapse is studied through the photos taken and corresponding diagrams of alteration of the compression load with the displacement of the piston.

In the second experimental part, the specimens are submitted into impactive loads, in the falling-mass machine from two different heights, one and two meters respectively, and the way of their collapse is studied by means of the photos taken and corresponding diagrams the change of load impact in relation to time.

Finally, the correlation of the results of the quasi-static and impactive load is studied.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| <b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....  | 1  |
| <b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....  | 2  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | 3  |
| <b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....   | 4  |
| <br>   |    |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....                                   | 6  |
| 1.1 Γενικά.....  | 6  |
| 1.2 Υλικά ως απορροφητές ενέργειας.....                              | 6  |
| 1.3 Εφαρμογές.....   | 8  |
| <br>   |    |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ</b> .....                            | 11 |
| 2.1 Τρόποι κατάρρευσης λεπτότοιχων διατάξεων.....                    | 11 |
| 2.1.1 Γενικά.....  | 11 |
| 2.1.2 Μεταλλικών – πολυμερών υλικών.....                             | 11 |
| 2.1.2.1 Κυκλικής διατομής.....                                       | 11 |
| 2.1.2.2 Τετραγωνικής διατομής.....                                   | 16 |
| 2.1.3 Σύνθετων Υλικών.....   | 19 |
| 2.2 Παράμετροι αξιολόγησης διατάξεων απορρόφησης<br>ενέργειας.....   | 23 |
| <br>   |    |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΤΑΤΙΚΗ<br/>ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ</b> ..... | 26 |
| 3.1 Γενικά.....  | 26 |
| 3.2 Δοκίμια.....   | 26 |
| 3.2.1 Δοκίμιο χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.....         | 27 |
| 3.2.2 Δοκίμιο κράματος αλουμινίου 6063-F25.....                      | 28 |
| 3.2.3 Δοκίμιο PVC.....   | 28 |
| 3.2.4 Δοκίμιο σύνθετου υλικού.....                                   | 30 |
| 3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός.....                                    | 31 |
| 3.4 Διεξαγωγή πειραμάτων.....  | 33 |
| 3.4.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....                        | 33 |
| 3.4.2 Συμπύεση δοκιμίων με ταχύτητα 20mm/min.....                    | 33 |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4.2.1 Δοκίμια ST.....  | 34        |
| 3.4.2.2 Δοκίμια AL.....  | 36        |
| 3.4.2.3 Δοκίμια PL.....  | 42        |
| 3.4.2.4 Δοκίμια CO.....  | 44        |
| 3.4.3 Συμπύεση δοκιμίων με ταχύτητα 500mm/min.....               | 50        |
| 3.4.3.1 Δοκίμια ST.....  | 50        |
| 3.4.3.2 Δοκίμια AL.....  | 52        |
| 3.4.3.3 Δοκίμια PL.....  | 56        |
| 3.4.3.4 Δοκίμια CO.....  | 58        |
| <b>3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....</b>            | <b>62</b> |
| <br>   |           |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ - ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ.....</b> | <b>67</b> |
| 4.1 Γενικά.....  | 67        |
| 4.2 Δοκίμια – εργαστηριακός εξοπλισμός.....                      | 67        |
| 4.3 Διεξαγωγή πειραμάτων.....                                    | 69        |
| 4.3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας.....                    | 69        |
| 4.3.2 Δυναμική καταπόνηση δοκιμίων από ύψος 1m.....              | 71        |
| 4.3.3 Δυναμική καταπόνηση δοκιμίων από ύψος 2m.....              | 79        |
| 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα.....                   | 87        |
| <br>   |           |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>                             | <b>90</b> |
| 5.1 Συσχέτιση στατικής – δυναμικής πειραματικής διαδικασίας..... | 90        |
| 5.2 Τελικά συμπεράσματα.....                                     | 93        |
| <br>   |           |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>   | <b>95</b> |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 –ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικά

Οι λεπτότοιχες διατάξεις –κυρίως κελυφών– δύνανται να χρησιμοποιηθούν και ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας (απορροφητές ενέργειας) σε μηχανολογικές κατασκευές κατά τη δυναμική και κρουστική φόρτιση τους με στόχο την προστασία της υπόλοιπης κατασκευής (Crashworthines). Με τον κατάλληλο σχεδιασμό των λεπτότοιχων διατάξεων επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη κατάρρευσή τους και η αρχική κινητική ενέργεια, που σημειώνεται κατά την κρούση, μετατρέπεται σε πλαστικό έργο (με μη αναστρέψιμο τρόπο) με ελεγχόμενο τρόπο, με αποτέλεσμα να προστατεύεται η υπόλοιπη μηχανολογική διάταξη στην οποία εμπεριέχονται.

Η κύρια εφαρμογή των συστημάτων αυτών συναντάται στα μέσα μεταφοράς με σκοπό να μειώσουν τις επιπτώσεις της σύγκρουσης σε ανθρώπους και δομές, στους αυτοκινητόδρομους ως προστατευτικά κιγκλιδώματα, σε βιομηχανικούς χώρους για την ασφάλεια του ανθρώπου ως μέτρα ατομικής προστασίας (π.χ. κράνος) και μηχανολογικών διατάξεων ζωτικής σημασίας. Ενδεικτικές εφαρμογές αναφέρονται στην ενότητα 1.3.

### 1.2 Υλικά ως απορροφητές ενέργειας

Αρχικά τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως απορροφητές ενέργειας ήταν τα μέταλλα, κυρίως κράματα αλουμινίου και χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα λόγω ικανοποιητικής ολκιμότητας και επαρκής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

Επίσης, χρησιμοποιούνται και τα πολυμερή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι διατάξεις συσκευασίας διαφόρων ευπαθών προϊόντων με σκοπό να απορροφήσουν την ενέργεια κρούσης που πιθανώς να αναπτυχθεί κατά την μεταφορά τους, μετά από τυχαίο γεγονός (π.χ. πτώση στο δάπεδο).

Τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται και τα σύνθετα υλικά, κυρίως λόγω του μικρού τους βάρους –απαραίτητη απαίτηση στα μεταφορικά μέσα λόγω μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας– και των εξαιρετικά καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Τέλος, το τελευταίο χρονικό διάστημα, μελέτες αναφέρονται στη χρήση μεταλλικών αφρών και γενικώς υλικών υψηλού



πορώδους με κυψελοειδή μορφή ως απορροφητές ενέργειας. Τυπικές εφαρμογές των δομών αυτών θα αναφερθούν στην επόμενη ενότητα.

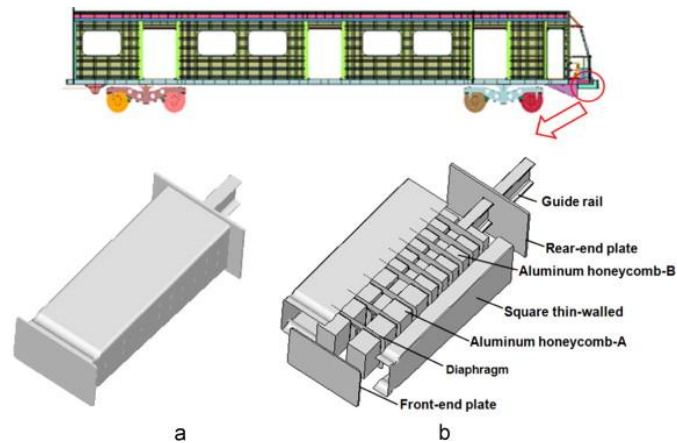
Οι επικρατέστερες γεωμετρίες των λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας είναι ο τετραγωνικός, ο κυκλικός, ο ορθογωνικός, ο κωνικός και ο σωλήνας με σχήμα κόλουρης πυραμίδας (Frusta). Επιπλέον συναντώνται και ειδικές γεωμετρίες με σημαντικότερη τον μηχανισμό triggering (ειδική κατεργασία διαμόρφωσης άκρου) και την εισαγωγή γεωμετρικών ατελειών (π.χ. οπών) με σκοπό την απορρόφηση μεγάλης ποσότητας ενέργειας λόγω ελεγχόμενης και προοδευτικής κατάρρευσης και όσον το δυνατό ομοιόμορφης κατανομής του φορτίου σύγκρουσης.

Άλλη κατηγοριοποίηση των υλικών, ειδικά των σύνθετων, είναι η πλήρωση (κατασκευή sandwich) ή όχι του κελύφους. Το υλικό πλήρωσης –ο πυρήνας- μπορεί να είναι αφρός, όπως π.χ. πολυουρεθάνη PU, PVC κλπ ή ενισχυμένος αφρός (στην περίπτωση αυτή πρόκειται για «υβριδική» σύνθετη sandwich κατασκευή –hybrid composite sandwich structure-) με αποτελεσματικότερη συμπεριφορά έναντι κρούσης.

Στο σημείο αυτό θα γίνει διάκριση ως προς τον τρόπο επιβολής του φορτίου κατά την πειραματική διερεύνηση των διατάξεων αυτών. Κατά την μελέτη της συμπεριφοράς κατάρρευσης των απορροφητών ενέργειας, οι κυριότεροι τρόποι επιβολής του φορτίου που έχουν επικρατήσει, σύμφωνα με αρκετές αναφορές που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία, είναι ο αξονικός, η λοξή φόρτιση και η πλευρική συμπίεση. Επίσης, ο τρόπος κατάρρευσης των διατάξεων αυτών μελετάται κυρίως με επιβολή του φορτίου με σταθερή σχετικά μικρή ταχύτητα και λέγεται ημι-στατικός τρόπος φόρτισης (quasi - static) και η κρουστική φόρτιση (δυναμικός τρόπος κατάρρευσης) όπου η αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης μειώνεται κατά την διάρκεια της κατάρρευσης. Η κρουστική φόρτιση είναι περισσότερο ρεαλιστικός τρόπος προσομοίωσης της συντριβής φορέων λεπτού πάχους και λαμβάνει υπόψη την ευαισθησία των υλικών ως προς το ρυθμό παραμόρφωσης, αλλά είναι δύσκολο να μελετηθούν οι μηχανισμοί κατάρρευσης λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας (είναι της τάξεως των msec).

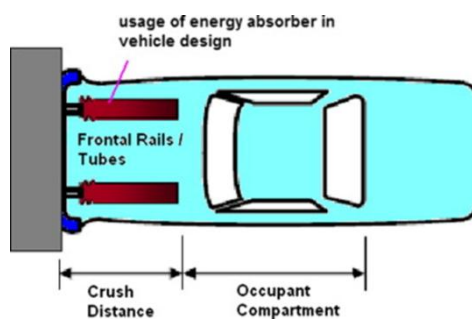
Στην συγκεκριμένη εργασία διερευνάται πειραματικά η συμπεριφορά έναντι αξονικής πρόσκρουσης κελύφων κυκλικής και τετραγωνικής διατομής. Το υλικό κατασκευής των δοκιμίων είναι χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε





**Σχήμα 1.2:** Σύστημα απορρόφησης ενέργειας σε βαγόνι μετρό [1]

Στην αυτοκινητοβιομηχανία τις τελευταίες δεκαετίες συναντώνται διατάξεις απορρόφησης ενέργειας από σύνθετα υλικά. Οι διατάξεις αυτές παρέχουν μια ελεγχόμενη και σταθερή διάχυση της κινητικής ενέργειας, επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό όσον το δυνατό μικρότερη ένταση επιβράδυνσης με απώτερο σκοπό την προστασία της ανθρώπινης ζωής σε περίπτωση σύγκρουσης. (σχήμα 1.3)

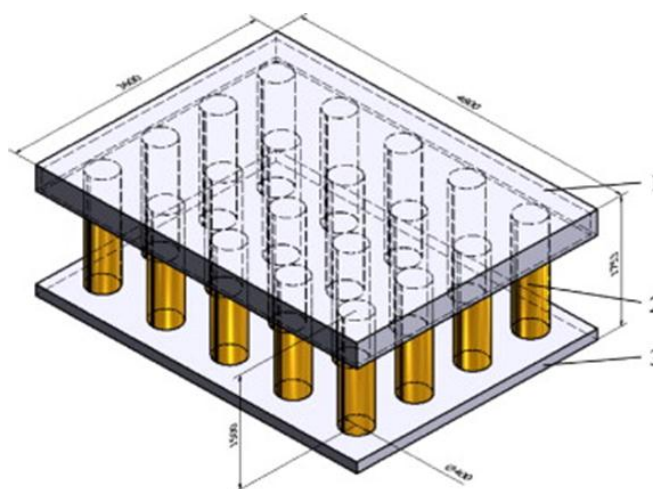


**Σχήμα 1.3:** Διατάξεις απορρόφησης ενέργειας στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Στα αεροσκάφη υφίστανται συστήματα απορρόφησης ενέργειας έτσι ώστε σε περίπτωση προσγείωσης έκτακτης ανάγκης τα δομικά στοιχεία αφενός

να εξασφαλίζουν ζωτικό χώρο και αφετέρου τον περιορισμό των επιταχύνσεων για τους επιβάτες κατά τη διάρκεια σύγκρουσης. Στις περιπτώσεις αυτές τα υλικά που επιλέγονται είναι συνήθως σύνθετα.

Ένας άλλος λόγος που χρησιμοποιούνται διατάξεις απορρόφησης ενέργειας είναι και η προστασία μηχανημάτων, συστημάτων μηχανολογικών εγκαταστάσεων από κρουστικές καταπονήσεις που θα επέφεραν σοβαρές βλάβες με αρνητικές συνέπειες στην εγκατάσταση. Στο σχήμα 1.4 αποτυπώνεται μια τέτοια διάταξη απορρόφησης ενέργειας που είναι τοποθετημένη σε δάπεδο, έτσι ώστε σε περίπτωση πρόσκρουσης του ευπαθούς υλικού σε αυτό, να μεγιστοποιείται η ενέργεια απορρόφησης με σκοπό να προστατεύεται το ευπαθές υλικό. Επίσης, έχει καταγραφεί στην βιβλιογραφία διάταξη αποτελούμενη από κυκλικούς σωλήνες λεπτού πάχους, η οποία χρησιμοποιείται ως θήκη μπαταρίας ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου με σκοπό να μετριασθούν οι συνέπειες σε περίπτωση σύγκρουσης.



**Σχήμα 1.4:** Διάταξη απορρόφησης ενέργειας σε δάπεδο [2]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 –ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Τρόποι κατάρρευσης λεπτότοιχων διατάξεων

#### 2.1.1 Γενικά

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στους τρόπους κατάρρευσης λεπτότοιχων διατάξεων, διαφόρων υλικών και γεωμετριών, υπό την επίδραση αξονικής καταπόνησης όπως προκύπτει από διεθνή βιβλιογραφία.

#### 2.1.2 Μεταλλικών – πολυμερών υλικών κυκλικής και τετραγωνικής διατομής

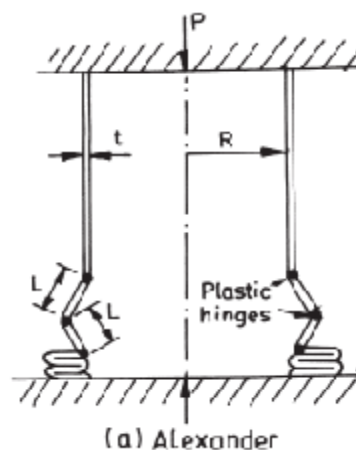
##### 2.1.2.1 Κυκλικής διατομής

Τα τελευταία χρόνια έχουν διατυπωθεί διάφορα θεωρητικά μοντέλα για την περιγραφή της αξονικής κατάρρευσης διατάξεων κυκλικής διατομής, τα οποία συγκρινόμενα με τις πειραματικές μετρήσεις δεν σημειώνεται σημαντική απόκλιση.

Οι τρόποι κατάρρευσης των λεπτότοιχων διατάξεων κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις ως ακολούθως:

**A. Αξονοσυμμετρικός τρόπος ή τύπου δακτυλίου (ή ring-concertina mode όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία):**

Ο πρώτος που μελέτησε τον τρόπο αυτό, εξάγοντας ένα θεωρητικό μοντέλο ήταν ο Alexander (1960), το οποίο αποτυπώνεται στο σχήμα 2.1



**Σχήμα 2.1:** Μοντέλο Alexander (1960).

Ο Alexander θεώρησε ότι το υλικό συμπεριφέρεται ως τέλειο πλαστικό και κατά τη δημιουργία μιας πτύχωσης –αναδίπλωσης- αναπτύσσονται τρεις αρθρώσεις και μετά την ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου υπολογίζεται το μέσο θεωρητικό φορτίο συμπίεσης από την σχέση:

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

όπου Y: Όριο διαρροής, t: πάχος φορέα, R: διάμετρος φορέα.

Αργότερα και άλλοι ερευνητές, όπως οι Abramowicz (1983) και Jones (1972,1984,1986) μελέτησαν τον τρόπο κατάρρευσης κυκλικών φορέων και υπολόγισαν το μέσο θεωρητικό φορτίο από τη σχέση:

$$P_m = Y \cdot t \cdot (6 \cdot (2 \cdot R \cdot t)^{1/2} + 3.44 \cdot t).$$

Ένα τυπικό παράδειγμα της κατάρρευσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.2.



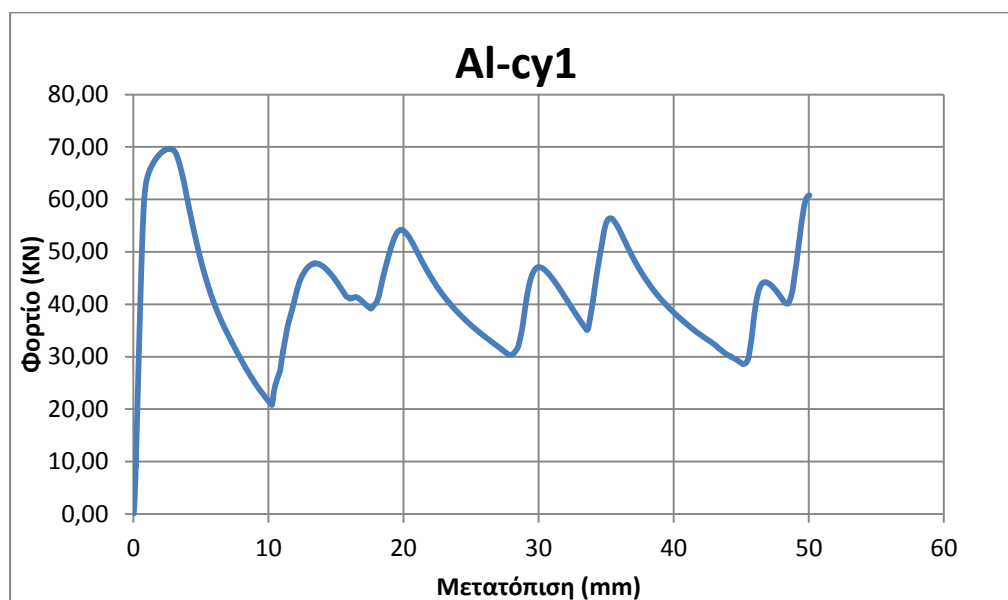
**Σχήμα 2.2:** Αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης.

Ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται και ως εκτατός τρόπος κατάρρευσης λόγω του τρόπου δημιουργίας των λοβών. Συγκεκριμένα η περίμετρος των εγκαρσίων διατομών της διάταξης κατά την δημιουργία των λοβών αυξάνεται. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης είναι επιθυμητός λόγω απορρόφησης μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

Πολλοί ερευνητές, πέρα από την μορφή των λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας, ερεύνησαν και την επίδραση των σχετικών

διαστάσεων μήκος προς πάχος ( $L/t$ ) και διαμέτρου προς πάχος ( $D/t$ ) ως προς τον τρόπο κατάρρευσής τους και διαπιστώθηκε ότι ο τρόπος κατάρρευσης διατάξεων ιδίου υλικού εξαρτάται από τους λόγους αυτούς. [3]

Ένα τυπικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης αξονοσυμμετρικού τρόπου κατάρρευσης αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 2.3)



**Σχήμα 2.3:** Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης

Αρχικά, το δοκίμιο που υφίσταται αξονική συμπίεση παραμορφώνεται ελαστικά με αυξανόμενη επιβαλλόμενη δύναμη συμπίεσης. Στην μέγιστη τιμή αρχίζει η δημιουργία του πρώτου λοβού και μέχρι να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός του λοβού παρατηρείται μείωση του φορτίου. Μετά την σταθεροποίηση – ολοκλήρωση σχηματισμού του πρώτου λοβού παρατηρείται αύξηση του φορτίου και έναρξη σχηματισμού του δεύτερου λοβού κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την ολική κατάρρευση του δοκιμίου.

#### **B. Μη συμμετρικός τρόπος ή τύπου διαμαντιού (diamond-mode):**

Ο μη συμμετρικός τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την μη συμμετρία ως προς τον άξονα συμπίεσης και μη έκταση των σχηματιζόμενων λοβών (μη εκτατός τρόπος κατάρρευσης). Επίσης λόγω της μορφής των δοκιμίων μετά την κατάρρευσή τους ονομάζεται και diamond-mode. Ένα

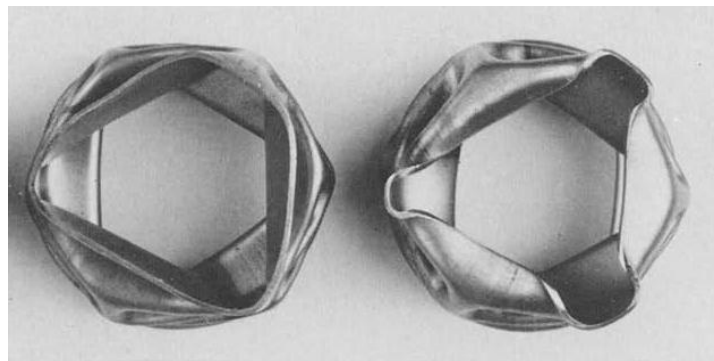
τυπικό παράδειγμα της κατάρρευσης αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.4. Χαρακτηριστικό γνώρισμα του τύπου αυτού είναι ότι κάθε σχηματιζόμενος λοβός δεν συμπίπτει με τον προηγούμενο αλλά είναι περιστρεφόμενος κατά μια συγκεκριμένη γωνία και συνήθως τα ποσά απορροφούμενης ενέργειας είναι χαμηλότερα από το συμμετρικό τρόπο κατάρρευσης.

Από τους πρώτους ερευνητές που μελέτησαν τον τύπο αυτό ήταν οι Rugsley και Macaulay (1960), οι οποίοι μετά το θεωρητικό μοντέλο που ανέπτυξαν, πρότειναν την σχέση:

$$P/(Y*\pi*D*h) = 10*h/D+0.13,$$

για τον υπολογισμό του μέσου φορτίου συμπίεσης.

Στη συνέχεια, πολλοί ερευνητές μελέτησαν τον μη συμμετρικό τρόπο κατάρρευσης εξάγοντας ο καθένας το δικό του θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού του μέσου φορτίου συμπίεσης (Singace 1999, Johnson 1977, Abramowicz, Soden και Al-Hassani κ.α.).



**Σχήμα 2.4:** Μη συμμετρικός τρόπος κατάρρευσης δοκιμίων κυκλικής διατομής (Diamond mode) [4]

### **Γ. Μεικτός τρόπος :**

Εμφανίζονται διαδοχικά οι δύο προηγούμενοι τρόποι. Συνήθως οι διατάξεις με την επιβολή του φορτίου συμπίεσης καταρρέουν αρχικά με συμμετρικό τρόπο (ring-concertina mode) και στη συνέχεια με μη συμμετρικό (diamond-mode). Επίσης, όπως αναφέρθηκε, οι σχετικές διαστάσεις του δοκιμίου (μήκος προς πάχος (L/t) και διαμέτρου προς πάχος (D/t)) καθορίζουν



σημαντικά και τον μεικτό τρόπο κατάρρευσης. Μια τυπική μορφή μικτού τρόπου κατάρρευσης φαίνεται στο σχήμα 2.5.



**Σχήμα 2.5:** Μεικτός τρόπος κατάρρευσης [5]

#### **Δ. Λυγισμός κατά Euler :**

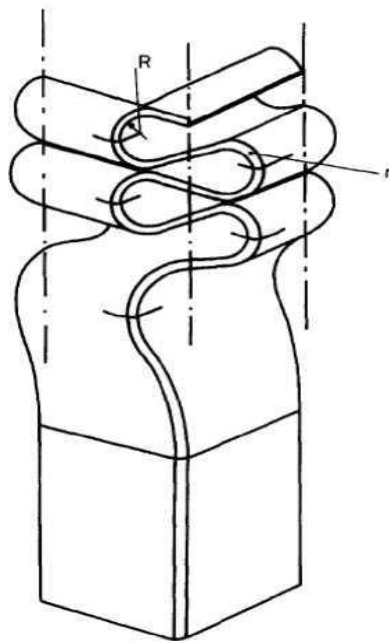
Στην περίπτωση αυτή η διάταξη δεν σχηματίζει λοβούς όπως στους προηγούμενους τρόπους, αλλά αντιθέτως με την επιβολή του αξονικού φορτίου εμφανίζει λυγισμό με συνέπεια την αιφνιδιαστική κατάρρευση της διάταξης, χωρίς να σημειώνεται υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού. Ο τρόπος αυτός κατάρρευσης είναι ανεπιθύμητος κυρίως λόγω της μη περαιτέρω απορρόφησης ενέργειας και αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη επιλογή μήκους σωλήνα προς διατομή (μικρό μέγεθος  $L/D$ ) και δημιουργία γεωμετρικών ατελειών στα άκρα (triggering). Ένα τυπικό παράδειγμα κατάρρευσης με τρόπο λυγισμού κατά Euler αποτυπώνεται στο σχήμα (2.6).



**Σχήμα 2.6:** Δοκίμιο που έχει μεταβεί από προοδευτική κατάρρευση σε λυγισμό [6]

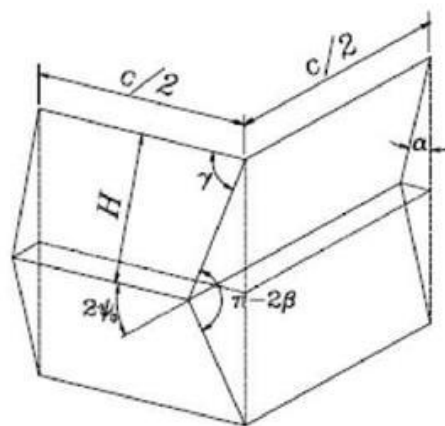
#### 2.1.2.2 Τετραγωνικής διατομής

Ο τρόπος κατάρρευσης των διατομών αυτών είναι διαφορετικός από τις διατάξεις κυκλικής διατομής, χωρίς όμως το αντίστοιχο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνονται η θεωρητική μορφή κατάρρευσης τετραγωνικής διατομής.



**Σχήμα 2.7:** Κατάρρευση δοκιμίου τετραγωνικής διατομής

Τον μηχανισμό κατάρρευσης της διατομής αυτής μελέτησαν οι Wierzbicki και Abramowicz (1983) και απεικονίζεται στο σχήμα 2.8.

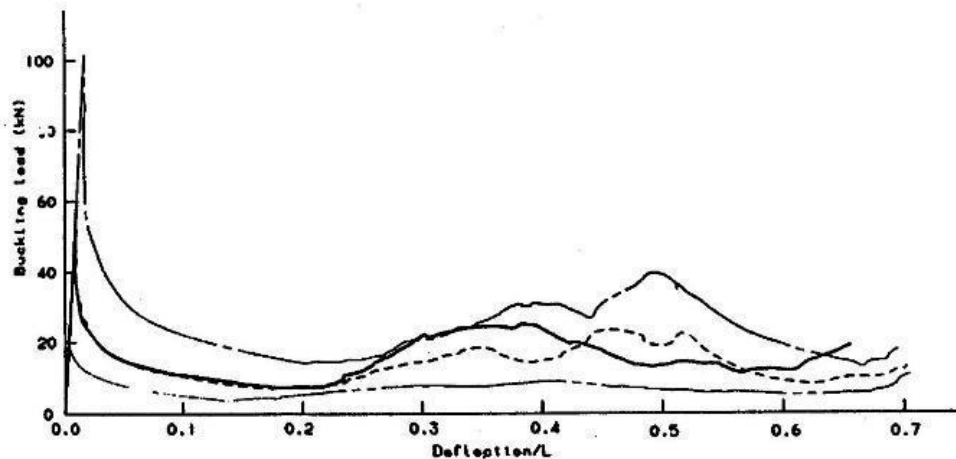


**Σχήμα 2.8:** Δημιουργία λοβού σε δοκίμιο τετραγωνικής διατομής.  
(A quarter of a square section during folding, Wierzbicki and  
Abramowicz, 1983).

ΣΗΜ: 2H Συνολικό ύψος λοβού

Μια τυπική καμπύλη φορτίου αξονικής κατάρρευσης δοκιμίων χάλυβα τετραγωνικής διατομής αποτυπώνεται στο σχήμα (2.9)

Αρχικά το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην αρχική κατάρρευση, και κατόπιν ακολουθείται από μια απότομη πτώση του φορτίου. Οι “κοιλιάδες” και τα “όρη” που αποτυπώνονται στις καμπύλες φορτίου λόγω της διακύμανσης της καμπύλης του φορτίου σχετίζονται άμεσα με τον σχηματισμό των στρεβλώσεων και των αναδιπλώσεων κατά την διαδικασία κατάρρευσης των δοκιμίων.



**Σχήμα 2.9:** Τυπικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης δοκιμίων χάλυβα τετραγωνικής διατομής

Οι λοβοί που σχηματίζονται στην κατάρρευση διάταξης τετραγωνικής διατομής δύναται να είναι :

**A. Εκτατοί λοβοί** με το είδος παραμόρφωσης να χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς τον κάθετο τρόπο συμμετρίας του δοκιμίου.

**B. Μη εκτατοί λοβοί.** Σύμφωνα με αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών: τα σταθερά οριζόντια και τα κεκλιμένα μετατοπισμένα. Οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί στις δυο απέναντι πλευρές στη δημιουργία κάθε λοβού, κινούνται προς τα έξω μειώνοντας το αρχικό τους μήκος, ενώ ταυτόχρονα οι πλαστικοί αρμοί στις άλλες δυο παράπλευρες έδρες κινούνται προς τα μέσα αυξάνοντας το μήκος τους. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου, όμοιοι λοβοί διαμορφώνονται ανά επίπεδο στραμμένοι κατά  $\pi/2$  των προηγούμενων κ.ο.κ. Οι κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί ξεκινούν από τις γωνίες του δοκιμίου και καταλήγουν σε  $\pm 45^\circ$  ως προς τους οριζόντιους πλαστικούς αρμούς. [3]

**Γ. Ανάμικτου τύπου λοβοί** όπου περιλαμβάνονται διαδοχικά και οι δύο προαναφερθέντες τύποι λοβών.

### 2.1.3 Σύνθετων Υλικών

Οι τρόποι κατάρρευσης των σύνθετων λεπτότοιχων διατάξεων κυκλικής και τετραγωνικής διατομής είναι διαφορετικοί από αντίστοιχες γεωμετρικές μεταλλικών και πολυμερών υλικών. Στην περίπτωση των συνθέτων ο βασικός μηχανισμός κατάρρευσης δεν είναι η πλαστική παραμόρφωση αλλά η δημιουργία εκτεταμένων μικρό-ρωγμών, οι οποίες ελέγχονται κυρίως από τις ιδιότητες ρητίνων και ινών καθώς και τον προσανατολισμό τους. [7] Οι τρόποι κατάρρευσης δύνανται να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως:

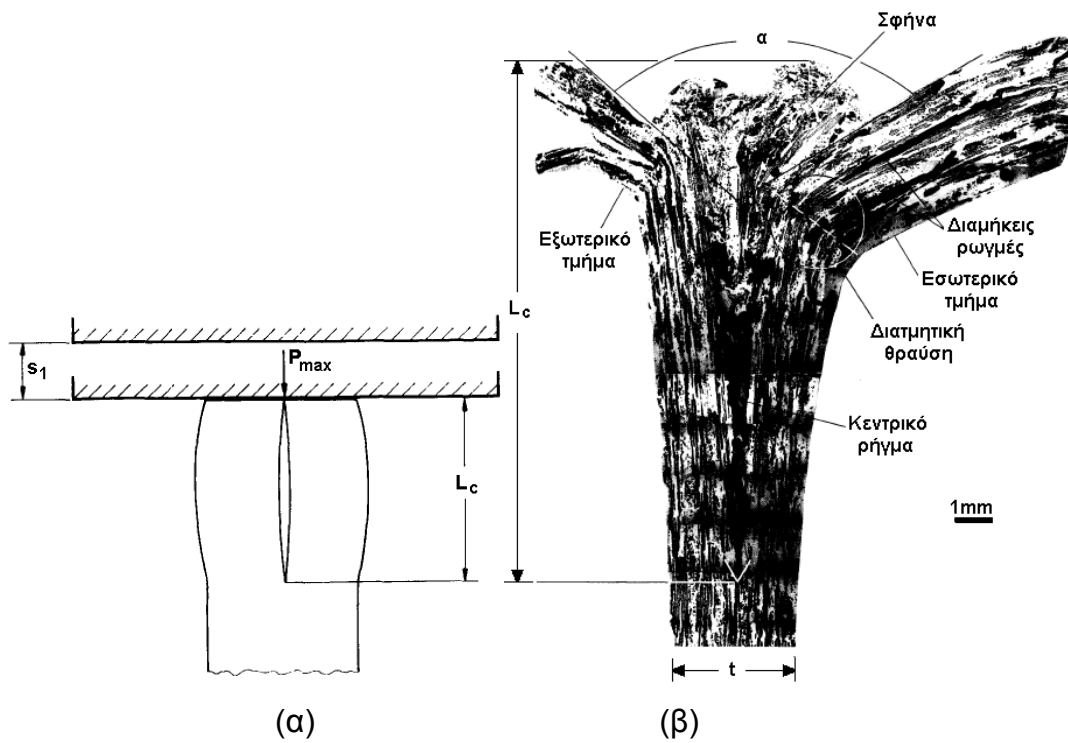
**A. Προοδευτική κατάρρευση** με μικρό-ρωγμές. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης είναι επιθυμητός λόγω της μεγάλης απορροφούμενης ενέργειας. (Mode I).

**B. Ψαθυρή θραύση** του συνθέτου με παράλληλη εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης χαρακτηρίζεται ασταθής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία και με μικρή ενεργειακή απορρόφηση. (Mode II)

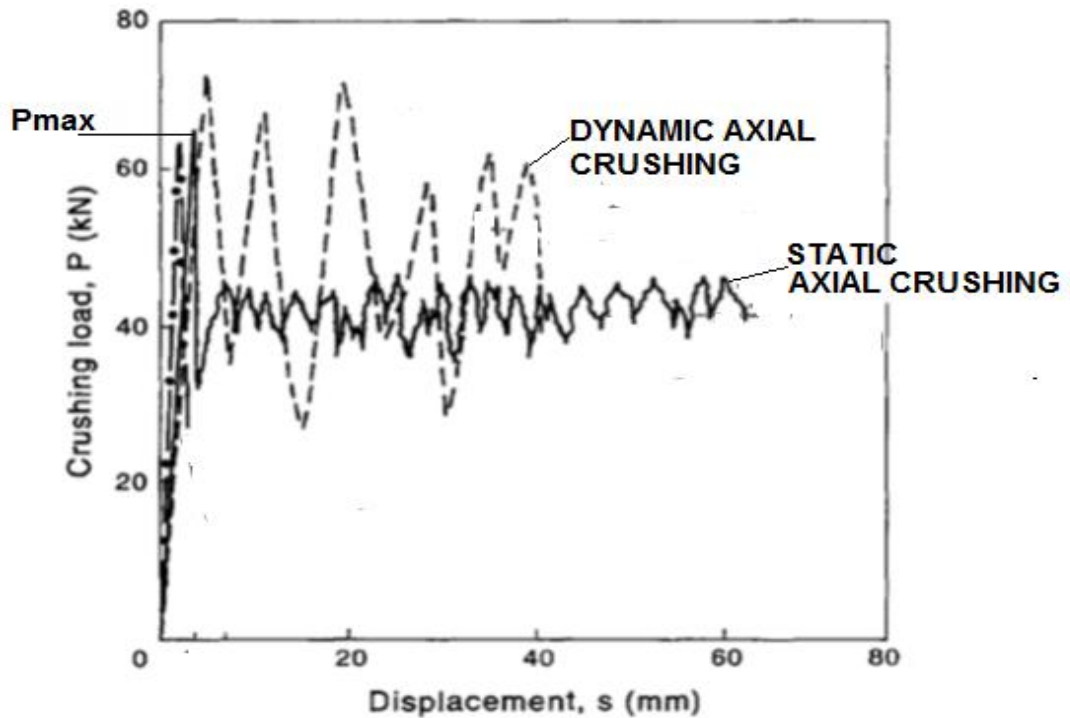
**Γ. Προοδευτικό δίπλωμα** συνήθως στο μέσον της διάταξης. Είναι ασταθής τρόπος κατάρρευσης παρόμοιος με την συμπεριφορά συντριβής λεπτών μεταλλικών και πλαστικών σωλήνων. (Mode III).

Από τους προαναφερθέντες τρόπους πειραματικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο πρώτος, ο οποίος συνιστά τον πιο αποδοτικό τρόπο απορρόφησης ενέργειας. Στο σχήμα 2.9 αποτυπώνεται μια τυπική μορφή αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου με χαρακτηριστικά mode I. Στον τρόπο αυτό, αρχικά σχηματίζεται μια κεντρική ρωγμή (σχήμα 2.9 (α)), η οποία εξελίσσεται με σταθερή ταχύτητα και μέγεθος, στην συνέχεια καθώς προχωρά η κατάρρευση, το θρυμματισμένο υλικό λειτουργεί σαν σφήνα και συμβάλει θετικά στη διάχυση της ενέργειας κρούσης. Παράλληλα το υλικό κάμπτεται είτε προς τα μέσα είτε προς τα έξω και αναπτύσσονται ταυτόχρονα αξονικές ρωγμές (axial splits) λόγω της αναπτυσσόμενης τάσης στην περιφερειακή κατεύθυνση του κελύφους. Το τελευταίο επιφέρει στο δοκίμιο πληθώρα μικρό-θραύσεων και αποκόλληση στρώσεων. Τυπικές καμπύλες φορτίου – μετατόπισης φαίνονται στο σχήμα 2.10. Επιπλέον στο ίδιο διάγραμμα αποτυπώνεται και η μεταβολή κρουστικού φορτίου όπου παρατηρείται το μεγάλο εύρος διακύμανσης του φορτίου και με μικρότερη συχνότητα

μεταβολής σε σχέση με τις στατικές φορτίσεις. Το τελευταίο αποτελεί τη βασικότερη διαφορά των δύο φορτίσεων.



**Σχήμα 2.10:** Μηχανισμός προοδευτικής κατάρρευσης (mode I) (α) έναρξη κατάρρευσης (β) εξέλιξη κατάρρευσης κυλινδρικού δοκιμίου. [8]



**Σχήμα 2.11:**Τυπικό διάγραμμα αξονικής φόρτισης σύνθετου υλικού. [9]

Αρχικά, το δοκίμιο που υφίσταται αξονική συμπίεση παραμορφώνεται ελαστικά με αυξανόμενη επιβαλλόμενη δύναμη συμπίεσης μέχρι μια μέγιστη τιμή  $P_{max}$ , η οποία στη συνέχεια μειώνεται λόγω εμφάνισης της πρώτης ρωγμής. Μετά το σχηματισμό της, εμφανίζεται ο μηχανισμός σφήνας θραυσμάτων (debris wedge), η οποία αποτελείται από κονιορτοποιημένο υλικό λόγω των μικρό-θραύσεων και οι μεταβολές του φορτίου χαρακτηρίζονται από ταλαντώσεις γύρω από ένα μέσον φορτίο. Για το λόγο αυτό η καμπύλη χαρακτηρίζεται πριονωτής μορφής.

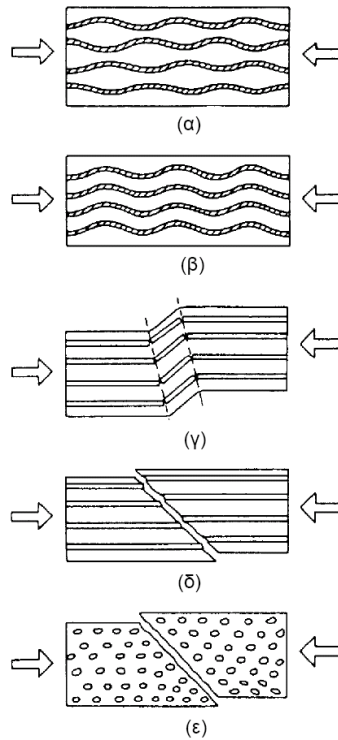
Η αστοχία σε στατική - δυναμική φόρτιση των σύνθετων υλικών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Από την γεωμετρία της διάταξης, ο φορέας κυκλικής διατομής παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης (SEA) από φορέα τετραγωνικής διατομής ίδιου υλικού και το είδος της μήτρας. Άλλοι παράγοντες είναι ο τύπος των ενισχυτικών ινών, το σύνθετο υλικό με ψαθυρές ενισχυτικές ίνες επηρεάζεται ελάχιστα από τον ρυθμό επιβολής του φορτίου, η περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο χωρίς να σημαίνει ότι η αύξηση της περιεκτικότητας συνεπάγεται και αύξηση της ειδικής ενέργειας απορρόφησης (SEA), η διεύθυνση των ινών (κυρίως σε

πολύστρωτα) και από τον ρυθμό φόρτισης. **[10]** Ειδικά για τα πολύστρωτα η αστοχία σε θλίψη επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον ατελή δεσμό ίνας – ρητίνης και τα κενά αέρα (συνήθως εμφανίζονται κατά την κατασκευή) κυρίως όταν εμφανίζονται στην δι-επιφάνεια ρητίνης – ίνας. Η μορφή αστοχίας –ειδικά των πολύστρωτων- εμφανίζεται είτε με την μορφή ρηγματώσεως της ρητίνης ή αποχωρισμού των στρώσεων, είτε με αποκόλληση των ινών από τη ρητίνη και τελικά θραύσης των ινών.

Ένας άλλος παράγοντας είναι και η θερμοκρασία. Ειδικά αναφέρεται ότι για τα σύνθετα πολυεστερικής ή εποξικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες γυαλιού σε χαμηλότερες θερμοκρασίες απορροφούν περισσότερα ποσά ενέργειας με αποτέλεσμα να ανταποκρίνονται καλύτερα σε δυναμικές φορτίσεις. Αντιθέτως τα σύνθετα εποξικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες άνθρακα δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση του τρόπου κατάρρευσης τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά με την μεταβολή της θερμοκρασίας έως 150<sup>0</sup>C. **[3]**

Στο ακόλουθο σχήμα (2.12) φαίνονται τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης.



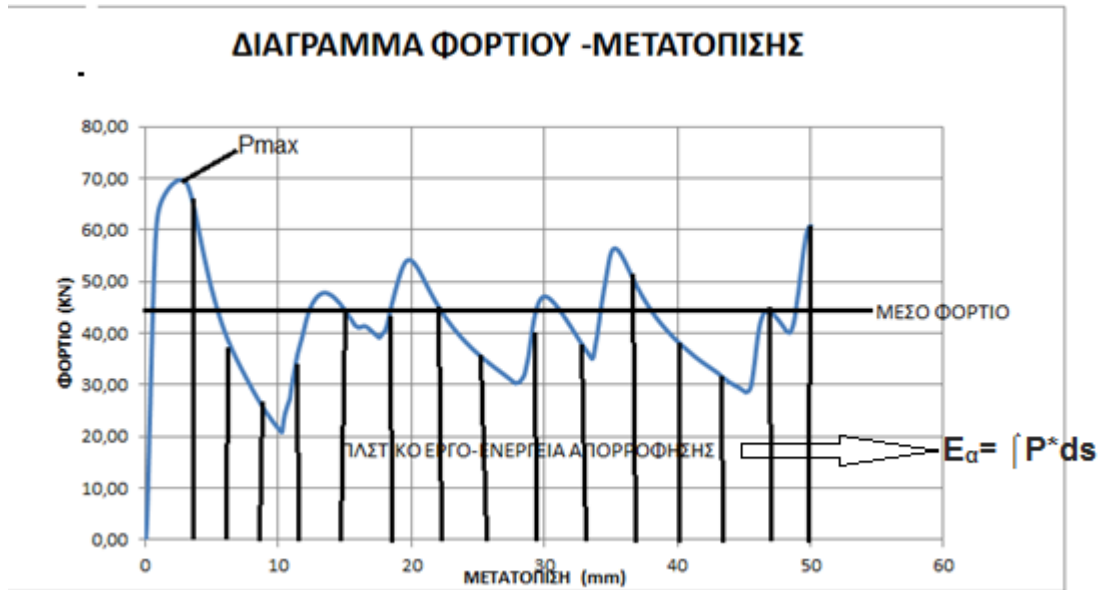


Τρόποι αστοχίας σε θλίψη μιας μονοαξονικής στρώσης: (α) λυγισμός ινών-τύπος «έκτασης», (β) λυγισμός ινών-τύπος «διάτμησης», (γ) δημιουργία έκκεντρης ζώνης, (δ) διατμητική αστοχία σε επίπεδο 45°, (ε) διατμητική αστοχία σε εγκάρσια θλίψη

**Σχήμα 2.12:** Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία και Μηχανική Σύνθετων Υλικών» ΕΜΠ-Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών – Καθηγητής Ν. Τσούβαλης)

## 2.2 Παράμετροι αξιολόγησης διατάξεων απορρόφησης ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν οι παράμετροι – δείκτες αξιολόγησης διατάξεων απορρόφησης ενέργειας, οι οποίοι εξάγονται από το διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου συμπίεσης – μετατόπισης του εμβόλου ή βράχυνσης του δοκιμίου. Ένα τέτοιο τυπικό διάγραμμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.2.13.



**Σχέδιο 2.13:** Τυπικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης

Οι παράμετροι αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

**Α. Μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ )** όπου είναι συνήθως το πρώτο μέγιστο που εμφανίζεται στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης. Στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει η τιμή αυτή να τείνει στην τιμή του μέσου φορτίου ( $P_{mean}$ ), όπως θα αναφερθεί ακολούθως.

**Β. Συνολική απορροφούμενη ενέργεια  $E_a$**  και προκύπτει από το εμβαδό που εμπεριέχεται από την καμπυλη φορτίου – μετατόπισης και είναι το πλαστικό έργο  $W$ . Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E_a = \int P \cdot ds$$

**Γ. Μέσο φορτίο ( $P_{mean}$ )**. Είναι ένα θεωρητικό μέγεθος του φορτίου που για την συγκεκριμένη βράχυνση του δοκιμίου θα επέφερε την ίδια ενέργεια απορρόφησης δηλαδή το ίδιο πλαστικό έργο και δίνεται από την σχέση:

$$P_{MEAN} \cdot S = E_a \quad \text{δηλ.} \quad P_{MEAN} = E_a / S$$

όπου  $S$  η συνολική βράχυνση του δοκιμίου.

Είναι σημαντική παράμετρος γιατί αξιολογεί την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μετά από μια αξονική φόρτιση.

**Δ. Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (Crush Force Efficiency – CFE)** και δίνεται από την σχέση:

$$CFE = P_{MEAN} / P_{MAX}$$

Στην πράξη επιδιώκεται ο δείκτης αυτός να έχει τιμή κοντά στην μονάδα έτσι ώστε να έχουμε μεγάλη ομοιομορφία φορτίου επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου που είναι και το επιθυμητό.

**Ε. Ειδική ενέργεια απορρόφησης  $W_s$  (Specific Energy Absorption – SEA)** και δίνεται από την σχέση:

$$W_s = E_a / m$$

όπου  $E_a$  η συνολική απορροφούμενη ενέργεια και  $m$  η μάζα του δοκιμίου που κατέρρευσε. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική στην προσπάθεια για μείωση του βάρους των κατασκευών που απαιτείται η σύγκριση υλικών έναντι κρούσης με διαφορετικές μάζες.

Συνοψίζοντας, ο μελετητής των διατάξεων απορρόφησης ενέργειας θα πρέπει να επιτυγχάνει μεγάλη απορροφούμενη ενέργεια ( $E_a$ ), με δείκτη ομοιομορφίας φορτίου κοντά στην μονάδα (CFE) και χρησιμοποιώντας υλικά με μεγάλη ενέργεια απορρόφησης  $W_s$ .

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ**

### **3.1 Γενικά**

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή της πειραματικής εργασίας που ακολουθήθηκε για την ημι-στατική καταπόνηση των δοκιμίων. Ειδικά, θα παρουσιασθούν τα δοκίμια, ο μηχανολογικός – εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, η περιγραφή των πειραμάτων και η υποτύπωση - αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### **3.2 Δοκίμια**

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (τετραγωνικής και κυκλικής διατομής), κράμα αλουμίνιο 6063 (τετραγωνικής και κυκλικής διατομής), PVC (plastic) (κυκλικής διατομής) και σύνθετο υλικό ( τετραγωνικής και κυκλικής διατομής).

Το σύνολο των δοκιμίων παρελήφθησαν από το εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Στον πίνακα (1) παρουσιάζονται τα δοκίμια με τις πλήρεις διαστάσεις.

| Όνοματολογία | L(μήκος)mm) | d(πάχος) (mm) | D* ((mm) |
|--------------|-------------|---------------|----------|
| St-cy1       | 80.7        | 2             | 46.9     |
| St-sq1       | 79.3        | 1.2           | 37.7     |
| St-sq4       | 80.2        | 1.2           | 37.7     |
| Al- cy1      | 80.10       | 2             | 50       |
| Al-cy4       | 80          | 2             | 50       |
| Al- sq1      | 79.3        | 2             | 40.10    |
| Al- sq4      | 79.2        | 2             | 40.10    |
| Pl-cy1       | 80.3        | 2.5           | 50       |
| Pl-cy4       | 79.9        | 2.5           | 50       |
| Co-cy1       | 80          | 2.7           | 46       |
| Co-cy4       | 79.8        | 2.7           | 46       |
| Co-sq1       | 81          | 2.5           | 56       |
| Co-sq4       | 79.2        | 2.5           | 56       |

\*Σημ: Cy-κυκλικής διατομής , Sq- τετραγωνικής διατομής, D – εξωτερικό μήκος πλευράς (για δοκίμια sq), ή εξωτερική διάμετρο (για δοκίμια cy).

### Πίνακας (1)

Στις επόμενες υπό-ενότητες περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των υλικών αυτών.

#### 3.2.1 Δοκίμιο χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα

Ο χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (μαλακός χάλυβας – mild steels) ανήκει στην κατηγορία των κοινών ή ανθρακούχων χαλύβων με κύρια συστατικά σίδηρο και άνθρακα (κράματα Fe – C). Επιπλέον περιέχει προσμίξεις φωσφόρου (P), θείου (S) και μαγγανίου (Mn) σε ποσοστό που δεν υπερβαίνει το 0.05% για το καθένα από αυτά.

Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες χαρακτηρίζονται για την υψηλή ολκιμότητα και μειωμένη αντοχή σε σχέση με χάλυβες υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Επίσης χαρακτηρίζονται και για την υψηλή συγκολλησιμότητά τους.

### 3.2.2 Δοκίμιο κράματος αλουμινίου 6063

Το κράμα αλουμινίου 6063 περιέχει κύριες προσμίξεις το μαγνήσιο (Mg) και πυρίτιο (Si) και ανήκει στην κατηγορία ελαφρών μετάλλων (πυκνότητα  $2.7\text{g/cm}^3$ ) σε σχέση με το σίδηρο (Fe) (πυκνότητα  $7.8\text{g/cm}^3$ ). Επίσης εμφανίζει υψηλή αντοχή στη διάβρωση λόγω της αυθόρμητης δημιουργίας επιφανειακού στρώματος ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) που το καθιστά αδιαπέραστο από το οξυγόνο, υψηλή ειδική αντοχή ( $\sigma_u/\beta\text{άρος}$ ), συγκολλείται εύκολα με αρκετά καλή διαμορφωσιμότητα (ειδικά υψηλή διελασιμότητα). Οι εφαρμογές αυτού του κράματος ποικίλουν, ενδεικτικά αναφέρονται: στις θαλάσσιες μεταφορές, στα μέσα μεταφοράς (π.χ. βαγόνια τραίνων), σε αεροπορικές βιομηχανίες κ.α.

### 3.2.3 Δοκίμιο PVC

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια γενικά στοιχεία για τα πολυμερή.

Το πολυμερές υλικό είναι μόριο μεγάλου μεγέθους και αποτελείται από επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες (μονομερές). Ως προς την αρχιτεκτονική ανάπτυξη της πολυμερικής αλυσίδας διακρίνονται σε γραμμικά (απλή αλυσίδα), διακλαδωμένο (μορφή δέντρου) και διασταυρούμενα (αλυσίδες που διασταυρώνονται μεταξύ τους). Ως προς την οργάνωση της κύριας αλυσίδας ταξινομούνται σε ομοπολυμερή, στην περίπτωση που η δομική μονάδα (τα μονομερές) είναι η ίδια και σε συμπολυμερή όταν οι δομικές μονάδες είναι τουλάχιστον δύο διαφορετικά μονομερή.

Άλλη διάκριση είναι ανάλογα με τις θερμό-μηχανικές ιδιότητες και ταξινομούνται σε:

- Θερμοπλαστικά. Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μόρια και μορφοποιούνται με την επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης χωρίς καμία χημική μεταβολή. Επίσης τήκονται και διαλύονται σε κατάλληλους διαλύτες και είναι χαμηλής πυκνότητας αλυσίδα. Παραδείγματα θερμοπλαστικών υλικών είναι το PVC (Πολύχλωριούχο βινύλιο), PE (πολυαιθυλένιο), PAN (πολυακρυλονιτρίλιο) κ.α.

- Θερμοσκληρυνόμενα. Αποτελούνται συνήθως από μη γραμμικά μόρια, είναι άμορφα και άτηκτα. Τυπικά παραδείγματα είναι οι πολυεστέρες, εποξειδικές ρητίνες, φαινολικές, βυνιλεστερικές κ.α.
- Ελαστομερή. Κύριο χαρακτηριστικό η μεγάλη ελαστικότητα που εμφανίζουν κατά τον εφελκυσμό.

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες χαρακτηρίζονται από μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, σχετικά υψηλή αντοχή σε θλίψη και εμφανίζουν έντονα το φαινόμενο του ερπυσμού. Ειδικά στις δυναμικές καταπονήσεις δεν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά, δηλαδή δεν παραμορφώνονται πλαστικά αντιθέτως παρατηρείται ψαθυρή θραύση λόγω έλλειψης χρόνου για να κινηθούν οι μακρό-μοριακές αλυσίδες. [11] Γενικά ο προσανατολισμός της αλυσίδας και ο βαθμός κρυσταλλικότητας δηλαδή ο βαθμός συνύπαρξης της άμορφης και κρυσταλλικής μορφής των δομικών μονάδων του πολυμερούς επηρεάζουν τις ιδιότητες του υλικού.

Τα πολυμερή υλικά ανήκουν στην κατηγορία των ιξωδοελαστικών υλικών, δηλαδή η συμπεριφορά τους υπό την επίδραση μηχανικών φορτίων υπακούει το νόμο του Hooke ( $\sigma = G \cdot \gamma$ ) και το νόμο νευτωνικών ιξωδών ρευστών ( $\sigma = \eta \cdot d\gamma/dt$ ). Αυτό σημαίνει ότι στα πολυμερή ένα μέρος της προσδιδόμενης ενέργειας αποθηκεύεται μηχανικά και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω ιξώδους ροής. Στα τέλεια ελαστικά υλικά, ισχύει ο νόμος του Hooke, και η ενέργεια που προσδίδεται κατά την παραμόρφωση, αποθηκεύεται και αποδίδεται πλήρως με την παύση της επιβολής του εξωτερικού φορτίου και της συνακόλουθης άρσης της παραμορφούμενης κατάστασης. Στα νευτώνεια υγρά όλη η ενέργεια που προσδίδεται, διαχέεται με τη μορφή θερμότητας σε μια μη αντιστρεπτή παραμόρφωση.

Τέλος, χαρακτηριστική παράμετρος των πολυμερών είναι η θερμοκρασία μεταπτώσεως για τα απόλυτα κρυσταλλικά (100% βαθμός κρυσταλλικότητας) όπου κατά την απόψυξη του τήγματος λαμβάνει χώρα η στερεοποίηση του και η θερμοκρασιακή περιοχή γύρω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  (Glass transition temperature) για τα υπόλοιπα πολυμερή.

### **3.2.4 Δοκίμιο σύνθετου υλικού.**

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στην κατηγορία «ινώδη σύνθετα υλικά» (Fiber Reinforced Plastics – FRP). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των συνθέτων είναι το μικρό βάρος, από το οποίο εξάγονται οι υψηλές ειδικές μηχανικές ιδιότητες, η αντοχή στη διάβρωση καθώς και η ευελιξία κατασκευής, δηλαδή η τοποθέτηση των ενισχυτικών ινών στις διευθύνσεις των επιβαλλόμενων φορτίων. Βασικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη ολκιμότητας, δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή (δεν υφίσταται όριο διαρροής) αλλά αντιθέτως η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων είναι περίπου ευθεία γραμμή μέχρι το σημείο θραύσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των συνθέτων που χρησιμοποιήθηκαν:

#### **A. Σύνθετο κυλινδρικής διατομής [8]**

Οι ενισχυτικές ίνες είναι γυαλιού και μορφής «Υαλοπίλημα» (Chopped Strand Mat – CSM). Οι ίνες CSM κατασκευάζονται από νήματα γυαλιού έως 50mm, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ειδικό τρόπο και δημιουργούν ένα ύφασμα με τυχαίο προσανατολισμό ινών.

Η Ρητίνη ανήκει στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων και είναι η πολυεστερική. Το σύνθετο κατασκευάζεται με την μέθοδο περιέλιξης ινών, όπου οι ίνες CSM τυλίγονται πάνω από περιστρεφόμενο αξονικό καλούπι (στη συγκεκριμένη περίπτωση ξύλινο) και εμποτίζονται με την πολυεστερική ρητίνη.

Το τελικό προϊόν έχει πυκνότητα  $1.37\text{g/cm}^3$  και περιεκτικότητα κατά βάρος σε ίνες 72% κ.β.

#### **B. Σύνθετο υλικό τετραγωνικής διατομής [9]**

Το σύνθετο αυτό είναι πολύστρωτο και αποτελείται από εννέα (9) στρώσεις με ενισχυτικές ίνες γυαλιού και βινυλεστερική ρητίνη. Το σύνθετο κατασκευάζεται με την μέθοδο έγχυσης ρητίνης, κατά την οποία αρχικά έχουν τοποθετηθεί οι ίνες στο καλούπι.

Το τελικό προϊόν έχει πυκνότητα  $1.55\text{g/cm}^3$  και περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες 33.9%.

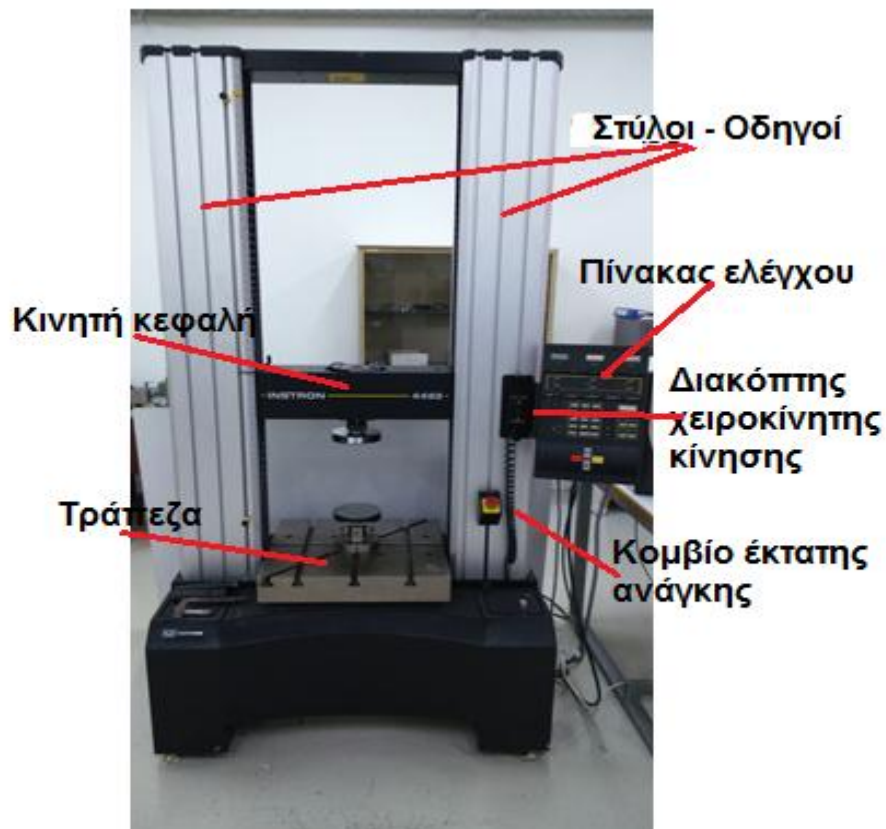


Και στους δυο τύπους δοκιμών το μέσο ενίσχυσης είναι οι ίνες γυαλιού από τα πρώτα ενισχυτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα υλικά. Είναι ο περισσότερος διαδεδομένος τύπος ίνας στα υλικά πολυμερικής μήτρας λόγω κυρίως του χαμηλού κόστους. Επίσης, εκτός από το υαλοπίλημα (CSM) άλλες μορφές ινών γυαλιού που διατίθενται στο εμπόριο είναι οι πλεξίδες νημάτων (Roving) και τα υαλοϋφάσματα (Woven Fabrics), τα υφάσματα πυκνής πλέξης στην περίπτωση που τα υφάσματα έχουν υποστεί περιστροφή και τα μονοαξονικά υφάσματα (Unidirectional Roving-UD) όπου οι ίνες είναι προσανατολισμένες σε μια διεύθυνση.

Όσον αφορά τον τύπο της μήτρας των δοκιμών, η βινυλεστερική ρητίνη σε σχέση με την πολυεστερική παρουσιάζει καλύτερη αντοχή σε κρούση. Εκτός από τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, με κυριότερες τις πολυεστερικές, τις βινυλεστερικές και τις εποξειδικές, στην κατασκευή συνθέτων υλικών με ενίσχυση ινών γυαλιών χρησιμοποιούνται και θερμοπλαστικές.

### **3.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός**

Τα πειράματα έγιναν στη μηχανική πρέσα **INSTRON 4482**, η οποία βρίσκεται στο εργαστήριο Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Η συγκεκριμένη πρέσα έχει μέγιστη θλιπτική ικανότητα 100 kN και διεξάγει μηχανικές δοκιμές εφελκυσμού, θλίψης και κάμψης. Επιπλέον με προσθήκη κατάλληλης διάταξης (μήτρας) δύναται να εκτελέσει και πειράματα διέλασης.



**Σχήμα 3.1:** Συσσκευή INSTRON

Αναλυτικότερα, η διάταξη της πρέσας, αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Το κυρίως σώμα το οποίο περιλαμβάνει την τράπεζα, την κινητή κεφαλή όπου είναι προσαρμοσμένο το δυναμόμετρο και τις κολώνες – οδηγοί της κινητής κεφαλής όπου είναι προσαρμοσμένοι δύο αισθητήρες μετατόπισης (LVDT)
- Τον πίνακα ελέγχου από όπου καθορίζονται οι παράμετροι του πειράματος και διατάξεις ασφαλείας
- Τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με το κατάλληλο λογισμικό όπου λαμβάνονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης.

### **3.4 Διεξαγωγή πειραμάτων**

#### **3.4.1. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας**

Στα δοκίμια επιλέχθηκε να συμπιεστούν κατά 50mm με προεπιλεγμένες δύο διαφορετικές ταχύτητες του εμβόλου της πρέσας. Συγκεκριμένα με ταχύτητες 20mm/min και 50mm/min για τα δοκίμια με δείκτη (1) και (2) αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης λαμβάνονταν φωτογραφίες έτσι ώστε να αποτυπώνονται διαρκώς οι τρόποι κατάρρευσης των δοκιμίων. Επιπλέον η συσκευή Instron παρείχε την δυνατότητα να υποτυπώνει την μεταβολή του στατικού φορτίου κατά την διάρκεια της συμπίεσης – κατάρρευσης και να υπολογίζει με χρήση κατάλληλου λογισμικού το μέγιστο φορτίο ( $P_{max}$ ) και το μέσον φορτίο ( $P_{mean}$ ).

#### **3.4.2. Συμπίεση δοκιμίων με ταχύτητα 20mm/min**

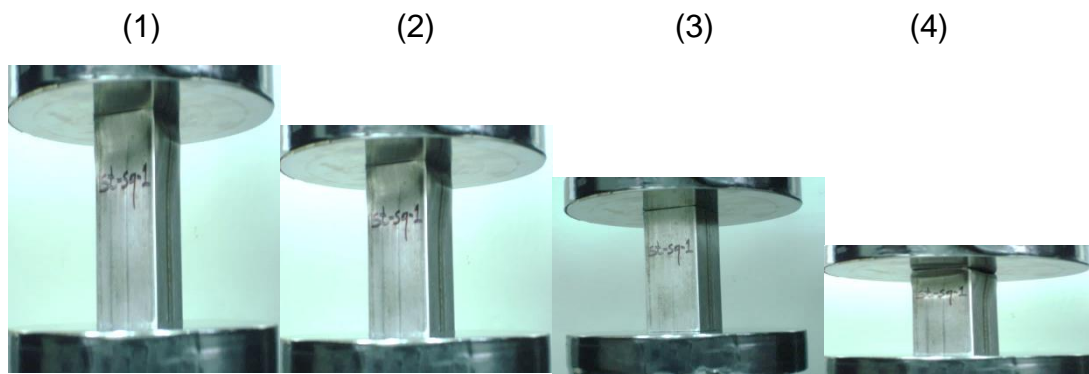
##### **3.4.2.1 ΔΟΚΙΜΙΑ ST**

###### **A. ΔΟΚΙΜΙΟ ST-CY (1)**

Για το δοκίμιο St-cy δεν κατέστη δυνατόν να μελετηθεί ο τρόπος κατάρρευσής του λόγω αυτόματης κράτησης λειτουργίας της συσκευής Instron κατά την διαδικασία της συμπίεσης. Αυτό συνέβη λόγω υπέρβασης της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης που επιτρέπει η διάταξη και είναι τα 100KN.

## Β. ΔΟΚΙΜΙΟ ST-SQ (1)

### Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

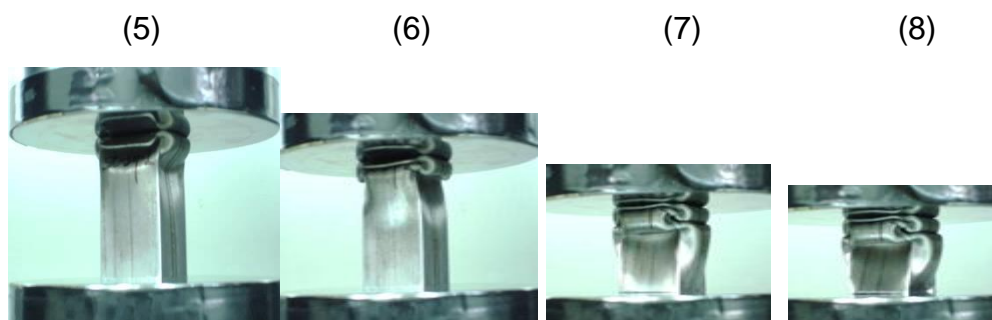


$d = 0\text{mm}$

$d_2 = 2.6\text{mm}$

$d_3 = 6.2\text{mm}$

$d_4 = 10.9\text{mm}$



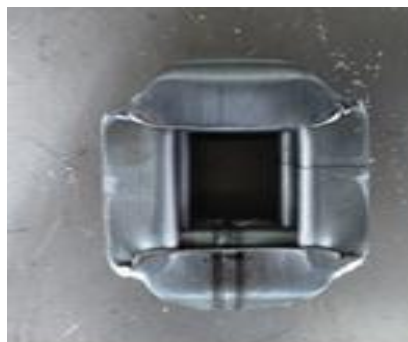
$d_5 = 20.4\text{mm}$

$d_6 = 30.5\text{mm}$

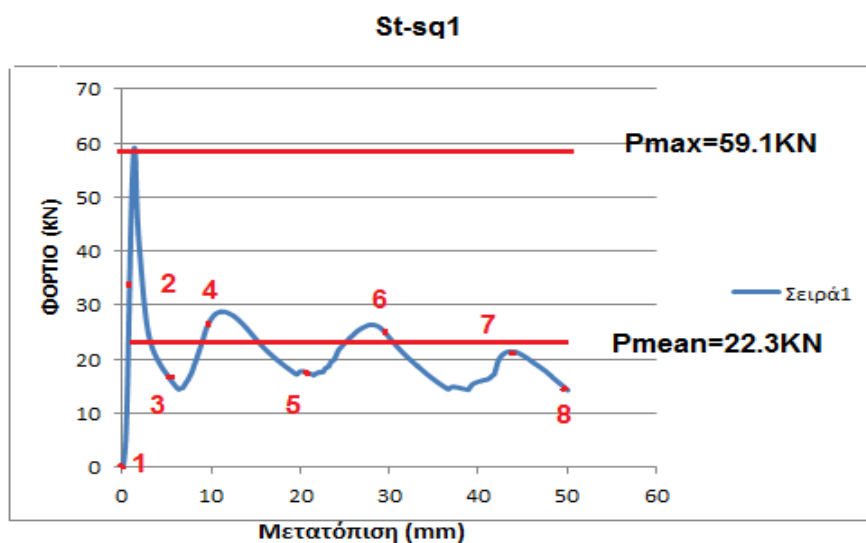
$d_7 = 45.6\text{mm}$

$d_8 = 50\text{mm}$

### Τελικές όψεις



## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



### Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

- (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm
- (2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 59.1\text{KN}$  στα 1.37mm
- (3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=22.9\text{KN}$
- (4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=1045\text{Joule}$
- (5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)=15.1KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.
- (6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=35.3\%$

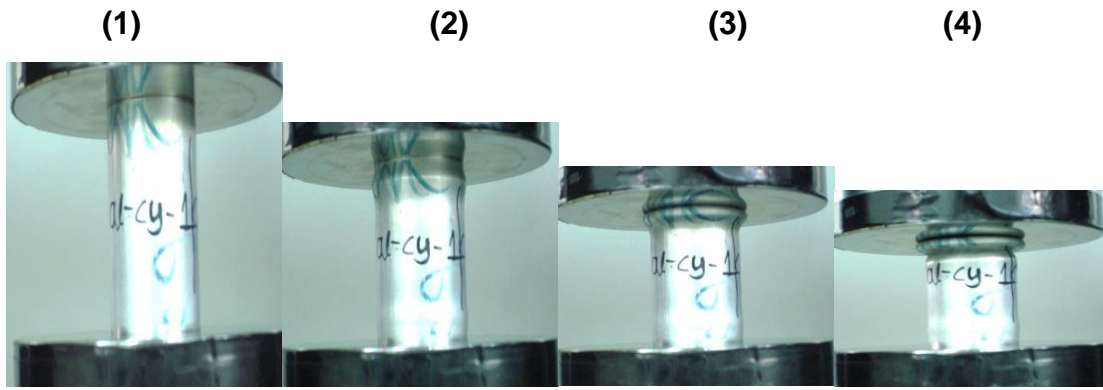
- **Τρόπος κατάρρευσης.**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου st-sq1, όπως προκύπτει από τις φωτογραφίες είναι μη εκτατός με τον σχηματισμό τεσσάρων λοβών και ειδικά διαμορφώνονται δύο λοβοί σε κάθε ζευγάρι αντικριστών πλευρών του δοκιμίου. Επίσης παρατηρείται ότι το μέγιστο στην καμπύλη φορτίου – μετατόπισης ταυτίζεται με την έναρξη σχηματισμού του πρώτου λοβού και αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού.

### 3.4.2.2 ΔΟΚΙΜΙΑ AL

#### A. ΔΟΚΙΜΙΟ AL –CY (1)

Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

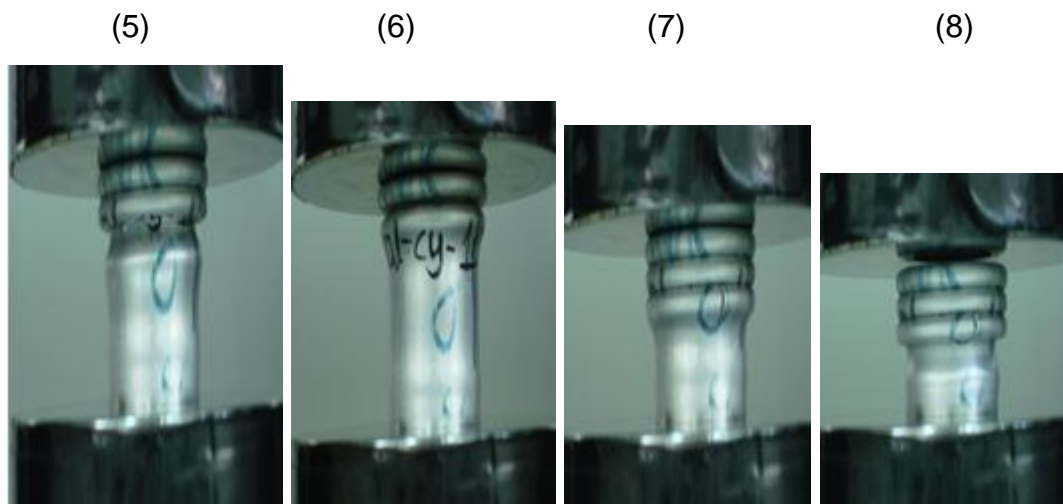


$d_1=0\text{mm}$

$d_2=3.8\text{mm}$

$d_3=12.2\text{mm}$

$d_4=20\text{mm}$



$d_5=25.7\text{mm}$

$d_6=37\text{mm}$

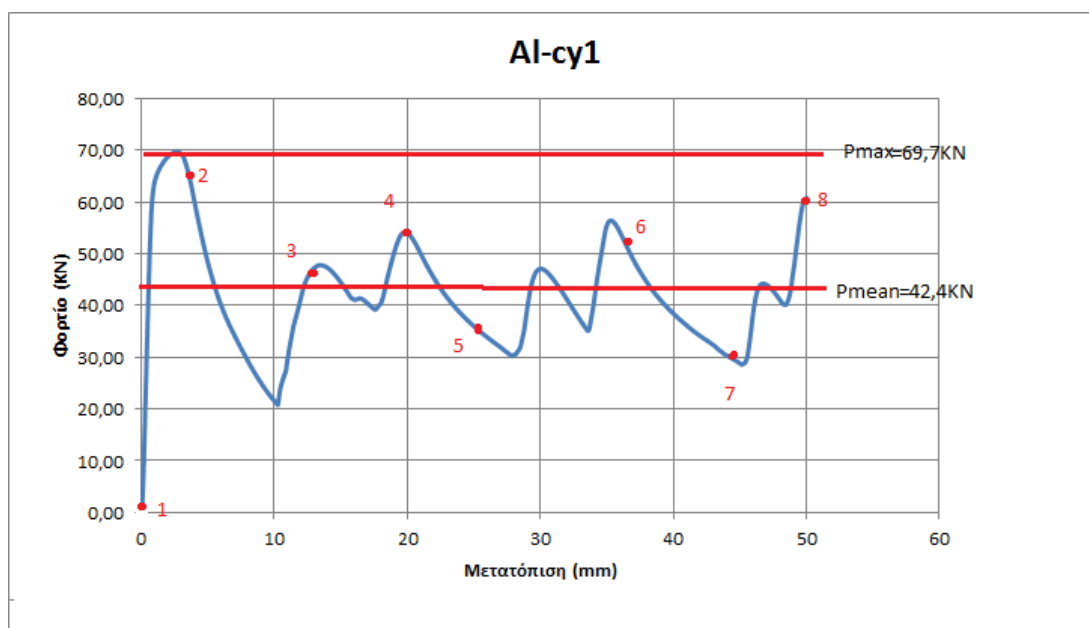
$d_7=45.7\text{mm}$

$d_8=50\text{mm}$

Τελικές όψεις



## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

(1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm

(2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}=69.7\text{KN}$  στα 2.62mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=42.4\text{KN}$

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=2105\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)=46.88KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=60.4\%$

- **Τρόπος κατέρρευσης.**

Ο Τρόπος κατέρρευσης του δοκιμίου Al-cy1 είναι ο εκτατός τρόπος (αξονοσυμμετρικός – τύπος δακτυλίου), είναι ο επιθυμητός τρόπος λόγω μεγάλων ποσών απορρόφησης ενέργειας, με έναρξη μηχανισμού κατέρρευσης από το πάνω μέρος του δοκιμίου. Όπως προκύπτει από τις

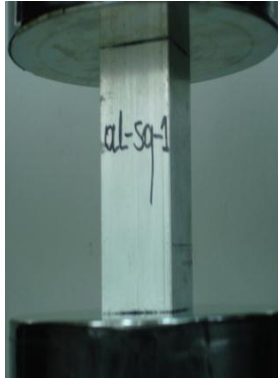
τελικές όψεις του δοκιμίου οι σχηματιζόμενοι λοβοί είναι 3 και παρατηρείται έναρξη σχηματισμού και τέταρτου λοβού. Συσχετίζοντας το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης με τις ληφθέντες φωτογραφίες παρατηρείται ότι κάθε λοβός περιέχει τέσσερα συνεχόμενα τοπικά ακρότατα, εκ των οποίων το τελευταίο είναι κοινό και για τον επόμενο λοβό. Για τη δημιουργία του πρώτου λοβού το επιβαλλόμενο φορτίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή (βρίσκεται στην ελαστική περιοχή), ενώ στη συνέχεια κάθε τοπικό μέγιστο είναι αισθητά μικρότερο γιατί το δοκίμιο είναι ήδη υποβαθμισμένο. Επίσης, όπως προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, καθώς εξελίσσεται η συμπίεση του δοκιμίου τα τοπικά μέγιστα τείνουν να αυξηθούν, λόγω μεγαλύτερης αντίστασης που προβάλλει το συμπιεσμένο υλικό στο περαιτέρω σχηματισμό των λοβών. Τέλος κατά την διαδικασία σχηματισμού του τρίτου λοβού διαπιστώνεται περιφερειακή ρωγμή – αστοχία.



## Β. ΔΟΚΙΜΙΟ AL-SQ (1)

### Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

(1)



$d_1=0\text{mm}$

(2)



$d_2=2.8\text{mm}$

(3)



$d_3=11.4\text{mm}$

(4)



$d_4=20.8\text{mm}$

(5)



$d_5=25.8\text{mm}$

(6)



$d_6=30.4\text{mm}$

(7)



$d_7=35.2\text{mm}$

(8)



$d_8=50\text{mm}$

### Τελικές όψεις

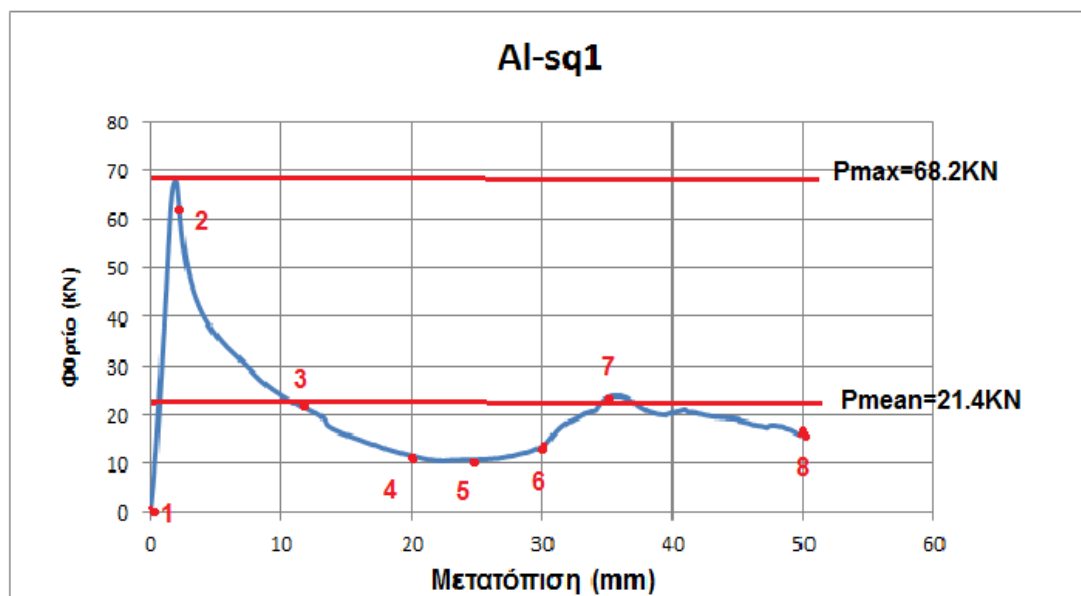


Αστοχία στις ακμές



Αστοχία

## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

- (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm
- (2) Μέγιστο φορτίο P<sub>max</sub>=68.2kN στα 1.96mm
- (3) Μέσο φορτίο P<sub>mean</sub>=21.4kN
- (4) Ενέργεια παραμόρφωσης E<sub>a</sub>=1036.8Joule
- (5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)=24.83kJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

- (6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE=30.3%

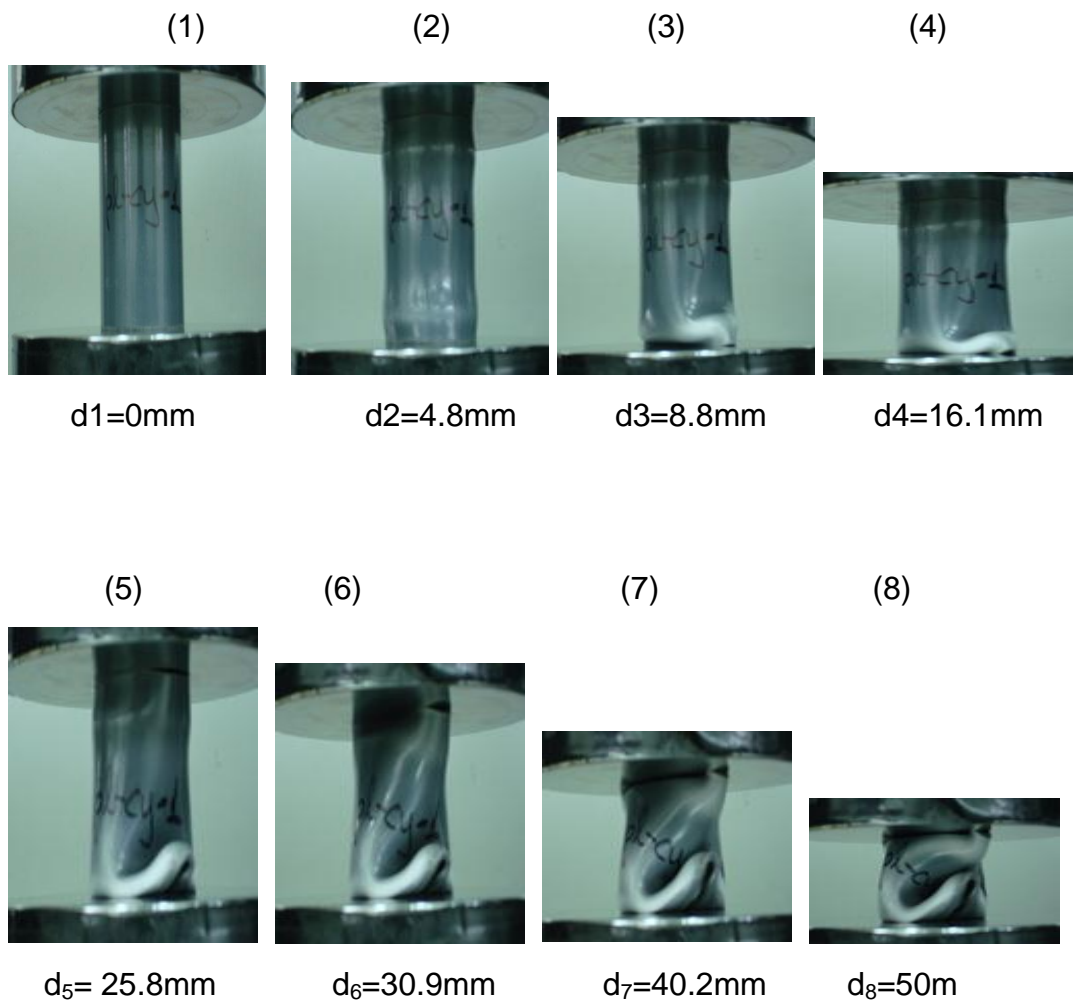
- **Τρόπος κατάρρευσης.**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου al-sq1 όπως προκύπτει από τις ληφθέντες φωτογραφίες δεν είναι ο επιθυμητός. Παρατηρείται, έναρξη σχηματισμού δίπλωσης περί το μέσον του μήκους λόγω πιθανής τοπικής ατέλειας στο σημείο αυτό και εμφάνιση ρωγμής – αστοχίας - στις ακμές πιθανών λόγω ψαθυρότητας του δοκιμίου σε συνδυασμό με πιθανή μη ορθή –

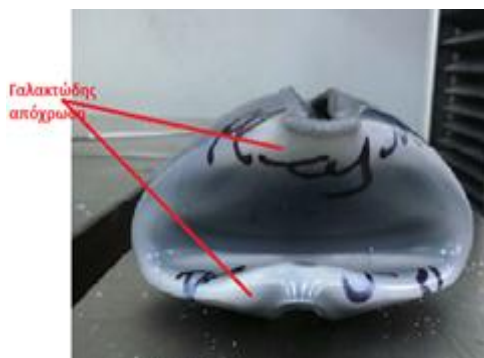
ομοιόμορφη – εφαρμογή των άκρων του δοκιμίου στις βάσεις της διάταξης συμπίεσης. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρά ποσά απορροφούμενης ενέργειας και μη ελεγχόμενου τρόπου κατάρρευσης.

### 3.4.2.3 ΔΟΚΙΜΙΟ PL -CY(1)

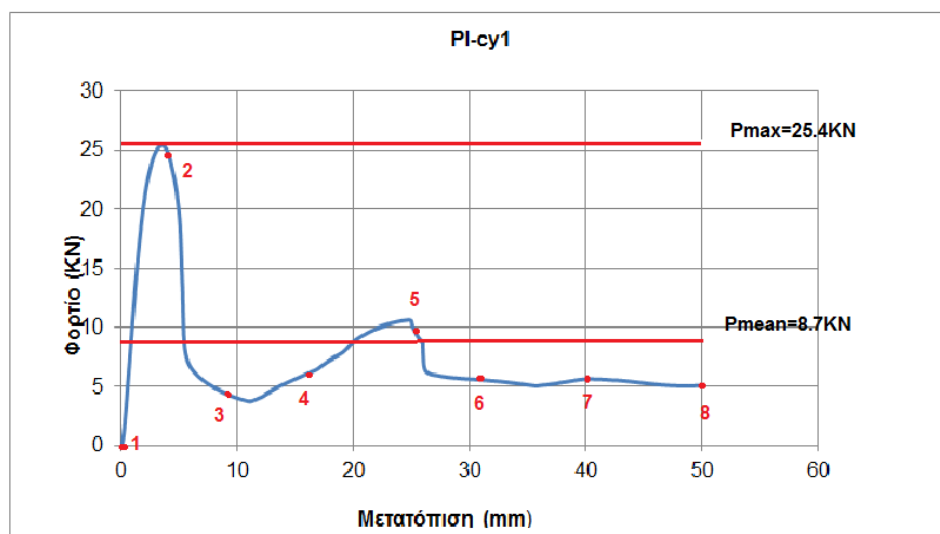
#### Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης



#### Τελικές όψεις



## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



### Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

- (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm
- (2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}=25.4\text{KN}$  στα 3.51mm
- (3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=8.7\text{KN}$
- (4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=369\text{Joule}$
- (5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 13KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.
- (6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=29\%$

- **Τρόπος κατάρρευσης.**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου pl-cy1 είναι μη εκτατός και παρατηρείται η δημιουργία δύο λοβών ελλειπτικού σχήματος που διαφέρουν μεταξύ τους γωνία  $\pi/2$ . Επίσης, ορισμένες περιοχές της επιφάνειας του δοκιμίου αποκτούν μια γαλακτώδη απόχρωση (λευκό χρώμα), λόγω των υψηλών εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται, στις περιοχές αυτές, κατά την διάρκεια της συμπίεσης.

### 3.4.2.4 ΔΟΚΙΜΙΑ CO

#### A. ΔΟΚΙΜΙΟ CO-CY (1)

Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

(1)



$d_1=0\text{mm}$

(2)



$d_2=3.2\text{mm}$

(3)



$d_3=6\text{mm}$

(4)



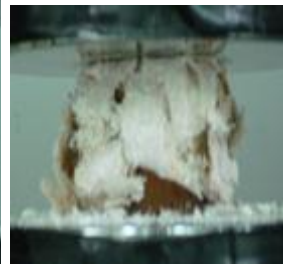
$d_4=20.5\text{mm}$

(5)



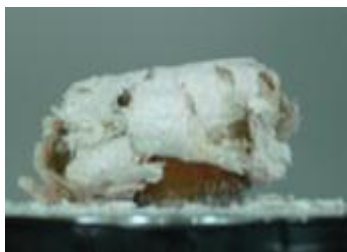
$d_5=30.6\text{mm}$

(6)



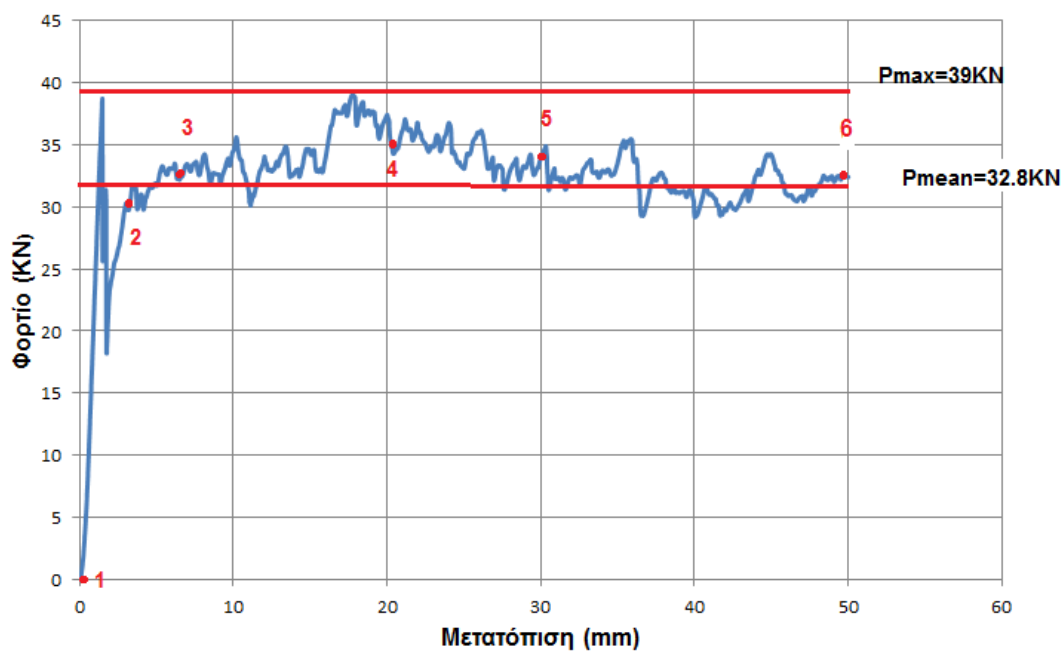
$d_6=50\text{mm}$

## Τελικές όψεις



## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης

Co-cy1



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**
  - (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm
  - (2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 39\text{KN}$  στα 17.77mm
  - (3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=32.8\text{KN}$
  - (4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=1621.5\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 60.5KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπίεστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE=83.15%

- **Τρόπος κατάρρευσης**

Ο Τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου co-cy1, σύμφωνα με το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, χαρακτηρίζεται αποτελεσματικός λόγω των μεγάλων ποσών ενέργειας που απορροφούνται και της ομοιομορφίας του φορτίου. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού. Στη συνέχεια, σημειώνεται δραστική μείωση του φορτίου και έναρξη προοδευτικής κατάρρευσης του υλικού με εμφάνιση μικρορωγμών και με μικρές έντονες διακυμάνσεις του φορτίου συμπίεσης. Λόγω του τελευταίου η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης χαρακτηρίζεται από έντονα πριονωτή μορφή και κυμαίνεται κοντά στην τιμή του μέσου φορτίου. Τέλος κατά την συμπίεση του σύνθετου, οι στρώσεις αποκολλούνται και κάμπτονται άλλες προς τα μέσα και άλλες εξωτερικά.



## B. ΔΟΚΙΜΙΟ CO-SQ (1)

Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

(1)



$d_1=0\text{mm}$

(2)



$d_2=3\text{mm}$

(3)



$d_3=11.5\text{mm}$

(4)



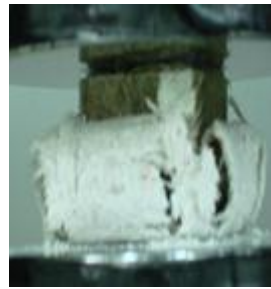
$d_4=21\text{mm}$

(5)



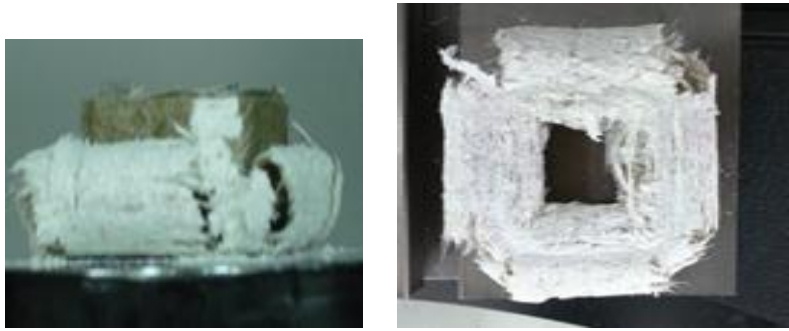
$d_5=30.9\text{mm}$

(6)

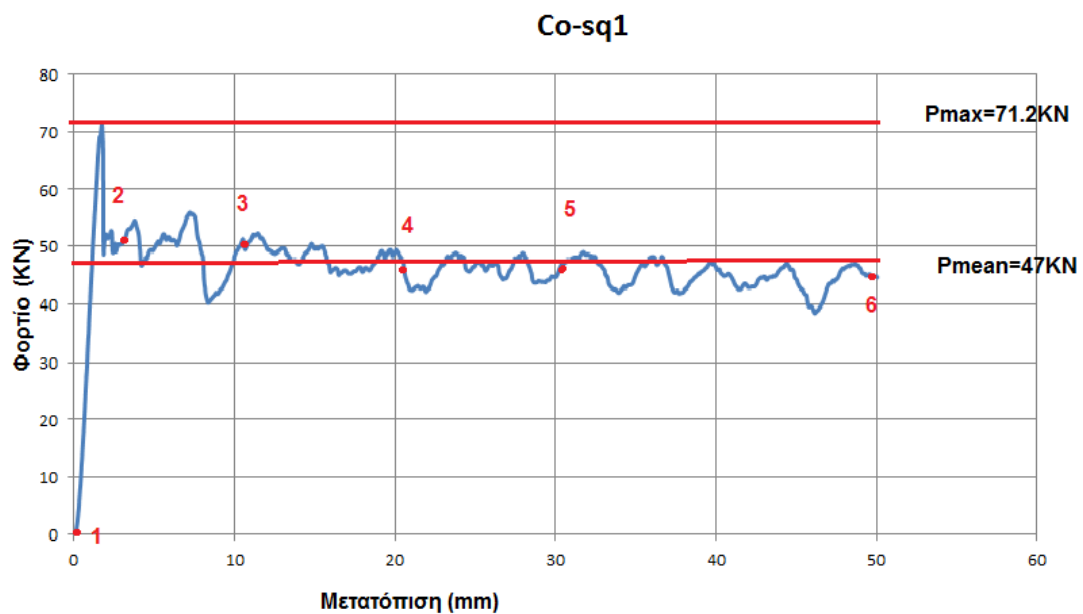


$d_6=50\text{mm}$

## Τελικές όψεις



## Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

### • Αποτελέσματα πειράματος

- (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50mm
- (2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 71.2KN$  στα 1.74mm
- (3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=47KN$
- (4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=2309Joule$

(5) Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης (SEA)= 57.1KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπίεστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE=64.8%

- **Τρόπος κατάρρευσης**

Στην κατάρρευση του δοκιμίου co-sq1, παρατηρείται έναρξη του φαινομένου από την κάτω διατομή λόγω πιθανής μη ομοιόμορφης επαφής της πλάκας συμπίεσης με το δοκίμιο και εμφάνιση ρωγμών στις γωνίες του δοκιμίου λόγω συγκέντρωσης τάσεων. Αρχικά με την επιβολή του φορτίου και μέχρι εμφάνιση ρωγμών στις γωνίες του δοκιμίου, η τιμή της δύναμης αυξάνεται μέχρι την μέγιστη τιμή. Στην συνέχεια με την ανάπτυξη ρωγμών στις γωνίες το φορτίο μειώνεται και εμφανίζει μικρές ταλαντώσεις γύρω από μια σταθερή τιμή. Ο μηχανισμός κατάρρευσης είναι προοδευτικός και συνοδεύεται από μεγάλα ποσά απορρόφησης ενέργειας.

### 3.4.3 Συμπίεση δοκιμών με ταχύτητα 500mm/min

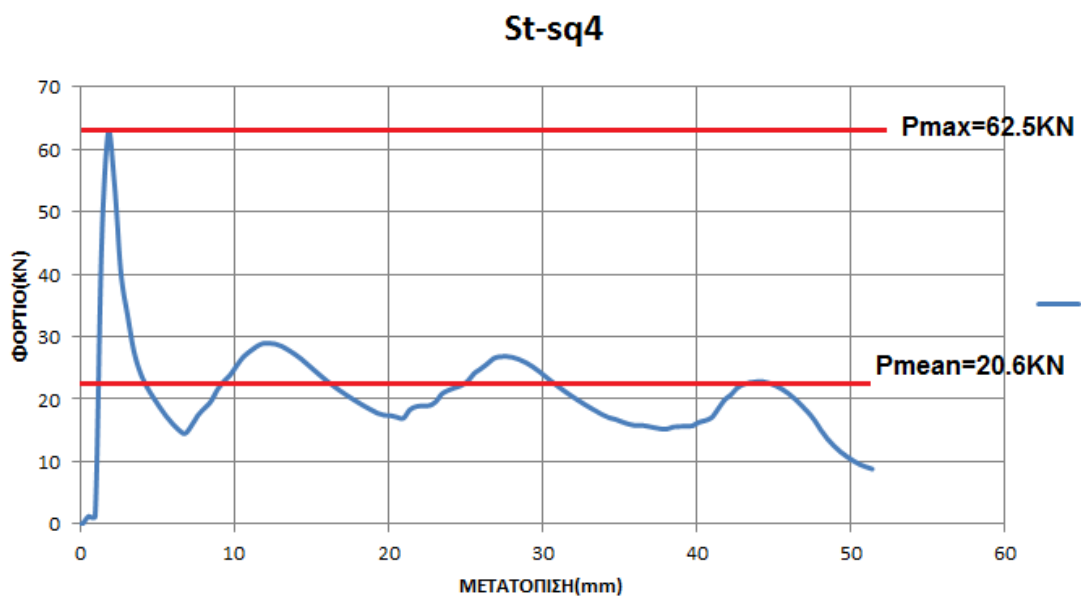
#### 3.4.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ ST-SQ (4)

Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

Τελική όψη



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**
  - (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 51.4mm
  - (2) Μέγιστο φορτίο P<sub>max</sub>= 62.5kN στα 1.8mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=20.6\text{KN}$

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=1058\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)=  $15.2\text{KJ/KG}$  όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπίεστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=32.9\%$

- **Τρόπος κατάρρευσης**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου St-sq4 είναι μη εκτατός με τον σχηματισμό τεσσάρων λοβών. Η έναρξη παραμόρφωσης του δοκιμίου άρχισε από το κάτω άκρο λόγω πιθανών ατελειών της διατομής αυτής. Επίσης συγκρίνοντας τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμίων st-sq4 και st-sq1 από τις ληφθέντες φωτογραφίες και από τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές.

### 3.4.3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ AL

#### A. ΔΟΚΙΜΙΟ AL –CY (4)

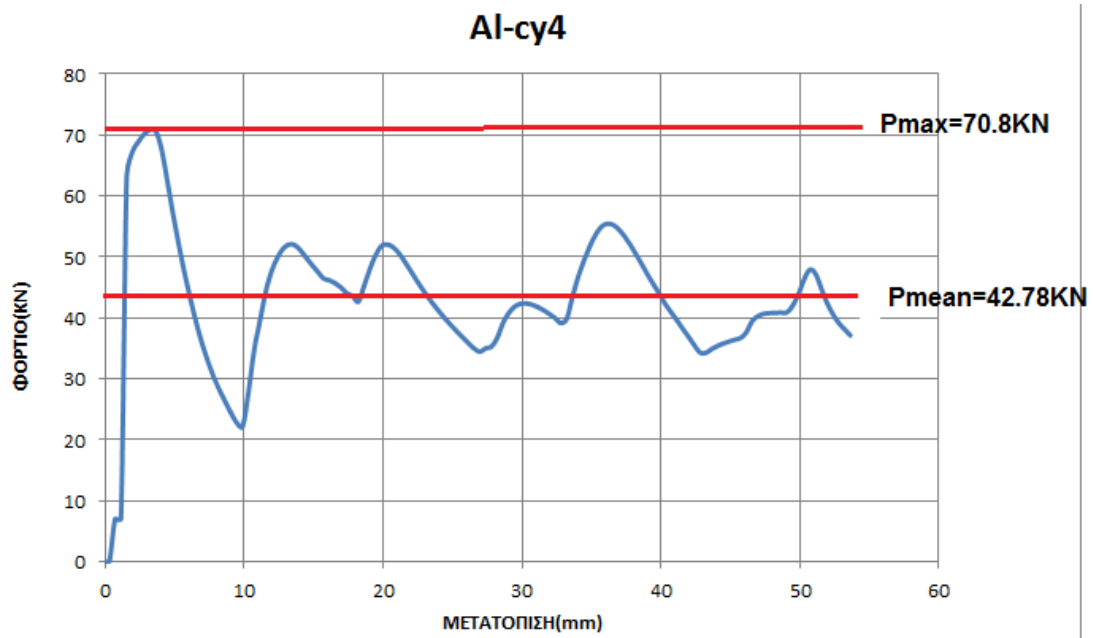
Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης



Τελική όψη



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



### Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

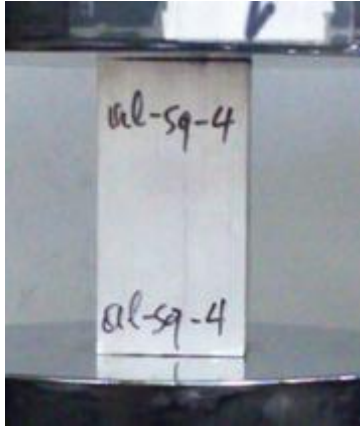
- (1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 53.6mm
- (2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 70.8\text{KN}$  στα 3.2mm
- (3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=42.78\text{KN}$
- (4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=2293\text{Joule}$
- (5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 51KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.
- (6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=60.40\%$

- **Τρόπος κατάρρευσης**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού είναι μεικτός. Στο τέλος της διαδρομής του εμβόλου συμπίεσης παρατηρείται έναρξη σχηματισμού τριγωνικού λοβού χωρίς την ολοκλήρωσή του.

## Β. ΔΟΚΙΜΙΟ AL-SQ (4)

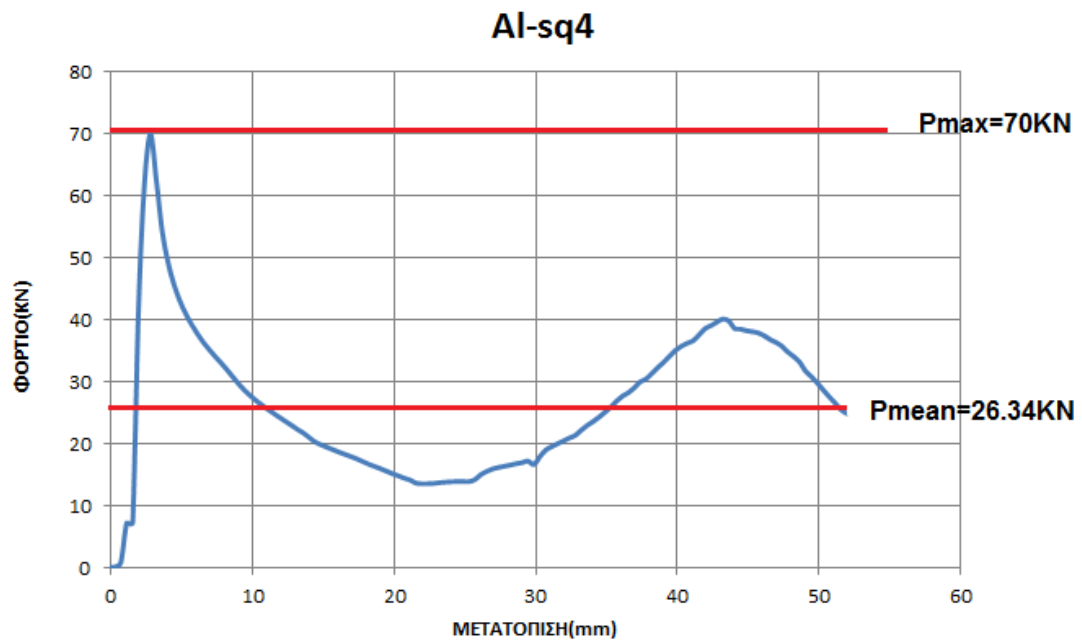
Προδευτικός τρόπος κατάρρευσης



Τελική όψη



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης





## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

(1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 51.9mm

(2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 70\text{KN}$  στα 2.8mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=26.34\text{KN}$

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=1367\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 32.74KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=37.60\%$

- **Τρόπος κατάρρευσης**

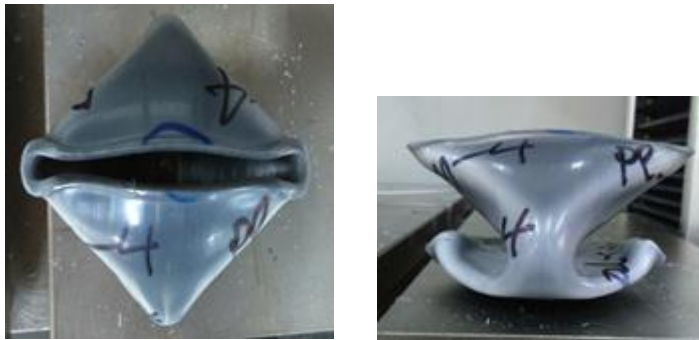
Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου Al-sq4 είναι μη επιθυμητός και όμοιος με τον αντίστοιχο του δοκιμίου Al-sq1. Παρατηρείται κατά την δεύτερη αναδίπλωση –η δεύτερη εμφανιζόμενη κορυφή στο διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης– η επιβαλλόμενη δύναμη είναι μεγαλύτερης έντασης από την αντίστοιχη του διαγράμματος Al-sq1. Αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται στην μη αστοχία των ακμών σε αυτή τη βράχυνση του δοκιμίου.

### 3.4.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ PL -CY(4)

Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης

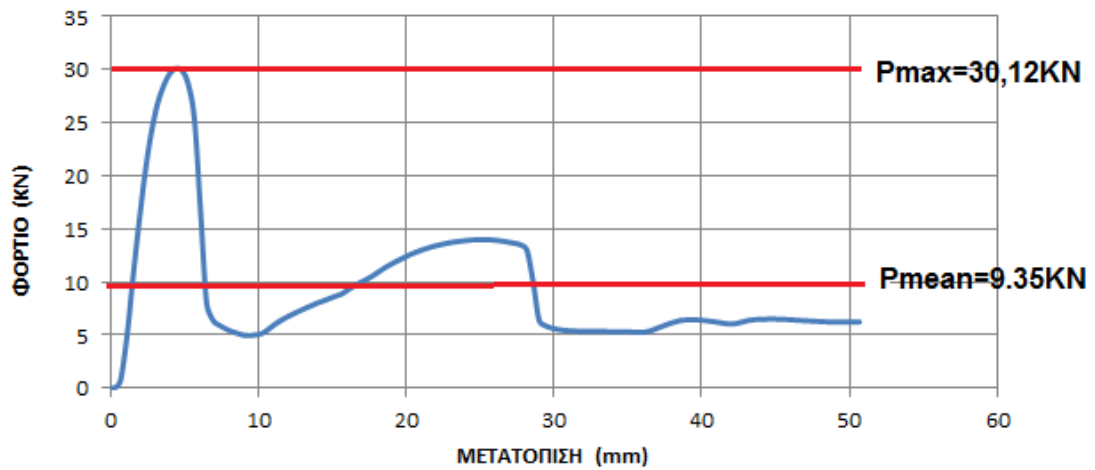


Τελικές όψεις



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης

**Pl-cy4**



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

(1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 50.6mm

(2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 30.12\text{KN}$  στα 4.4mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=9.35\text{KN}$

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=473\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 16.65KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=31\%$

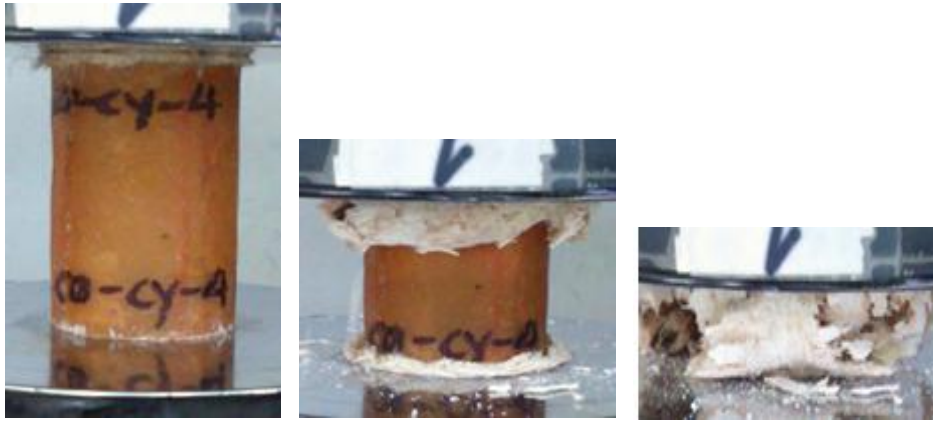
- **Τρόπος κατάρρευσης**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου αυτού είναι όμοιος με τον αντίστοιχο του δοκιμίου PI-cy1. Επίσης συγκρίνοντας τα διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης των δοκιμίων PI-cy1 και PI-cy4, παρατηρείται ότι τα τοπικά μέγιστα εμφανίζονται στην ίδια περίπου βράχυνση αντίστοιχα για τα δύο δοκίμια και επιπλέον για το δοκίμιο PI-cy4 είναι μεγαλύτερα περίπου κατά 5KN. Αυτό εξηγείται στο γεγονός της αύξησης του ορίου διαρροής στον μεγαλύτερο ρυθμό παραμόρφωσης.

### 3.4.3.4 ΔΟΚΙΜΙΑ CO

#### A. ΔΟΚΙΜΙΟ CO-CY (4)

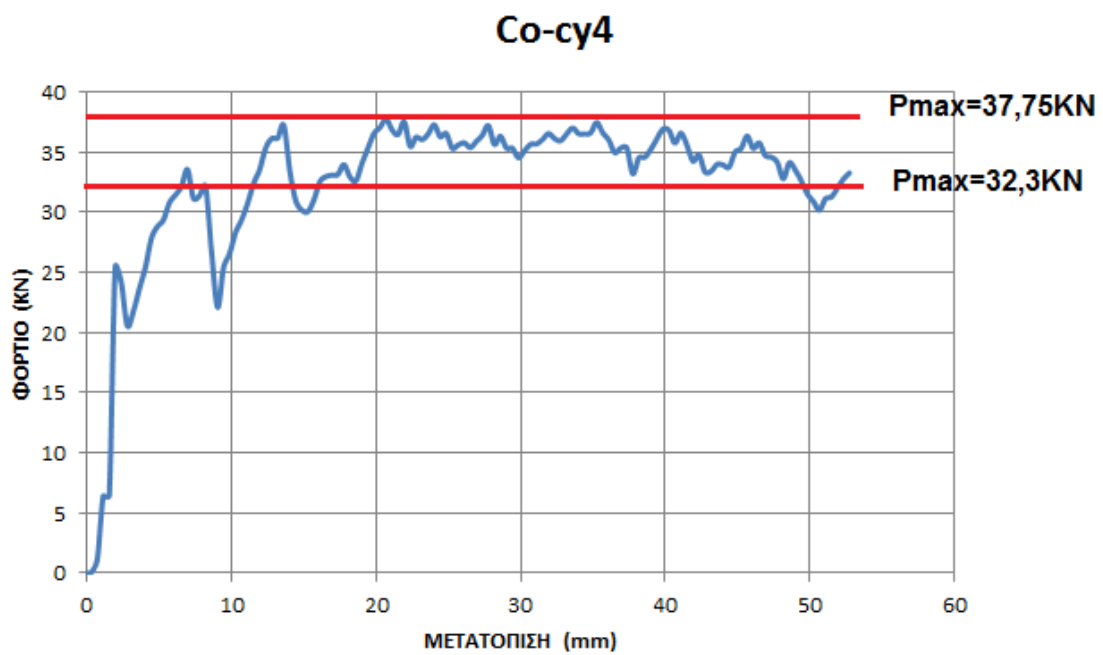
Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης



Τελικές όψεις



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

(1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 52.7mm

(2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}$ = 37.75KN στα 20.6mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}$ =32.3KN

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a$ =1702Joule

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 63.5KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE$ =85%

- **Τρόπος κατάρρευσης**

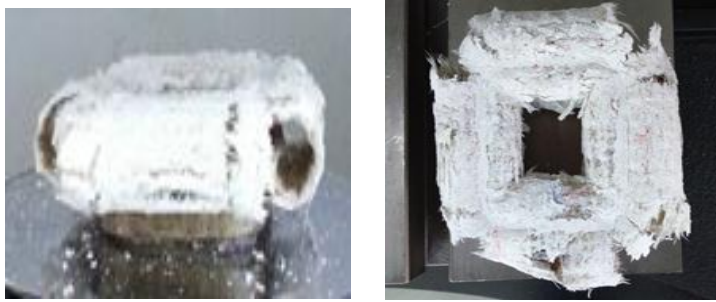
Στην κατάρρευση του δοκιμίου co-cy4 παρατηρείται ότι η συχνότητα διακύμανσης του επιβαλλόμενου φορτίου είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του δοκιμίου co-cy1. Επίσης, το  $P_{max}$  δεν συμπίπτει με το πρώτο φορτίο αιχμής που συναντάται κατά την βράχυνση του δοκιμίου.

## Β. ΔΟΚΙΜΙΟ CO-SQ (4)

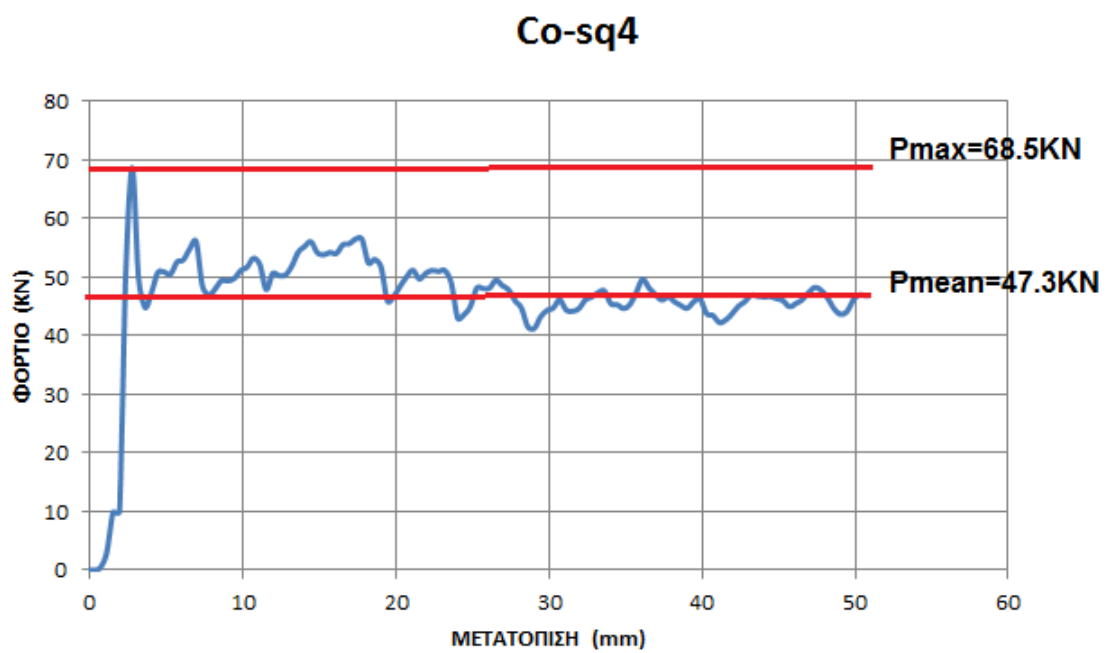
Προοδευτικός τρόπος κατάρρευσης



Τελικές όψεις



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



## Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα πειράματος**

(1) Διαδρομή εμβόλου – βράχυνση δοκιμίου: 51.1mm

(2) Μέγιστο φορτίο  $P_{max}= 68.5\text{KN}$  στα 2.8mm

(3) Μέσο φορτίο  $P_{mean}=47.3\text{KN}$

(4) Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_a=2417\text{Joule}$

(5) Ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA)= 59.78KJ/KG όπου μάζα που κατέρρευσε – παραμορφώθηκε, υπολογίστηκε από το ποσοστό του αρχικού ύψους που συμπιέστηκε πολλαπλασιασμένο με την συνολική μάζα του δοκιμίου.

(6) Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE=69\%$

- **Τρόπος κατάρρευσης**

Ο τρόπος κατάρρευσης του δοκιμίου co-sq4 διαφέρει από του co-sq1 ως προς την συχνότητα ταλάντωσης του επιβαλλόμενου φορτίου και συγκεκριμένα είναι μικρότερης, δηλαδή η μορφή της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης είναι λιγότερο πριονωτή. Από τις ληφθέντες φωτογραφίες προκύπτει ότι και σε αυτό το δοκίμιο, όπως και στο co-sq1, με την έναρξη της συμπίεσης εμφανίζονται ρωγμές στις γωνίες λόγω συγκέντρωσης τάσεων.

### 3.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογούνται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη βοήθεια των κριτηρίων - δεικτών αξιολόγησης που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.1. ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των διάφορων λεπτότοιχων δοκιμίων ως προς την αξονική κατάρρευση.

Αρχικά δίνεται ο πίνακας 2 που περιλαμβάνει όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν σε αξονική στατική συμπίεση και με τις δύο ταχύτητες συμπίεσης, 20mm/min και 500mm/min αντίστοιχα, με τους αντίστοιχους δείκτες αξιολόγησης.

|   |           | <b>St-sq</b> | <b>Al-sq</b> | <b>Al-cy</b> | <b>Pl-cy</b> | <b>Co-sq</b> | <b>Co-cy</b> |
|---|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P<sub>max</sub></b><br><b>(KN)</b>                   | 20mm/min  | 59.1         | 68.2         | 69.7         | 25.4         | 71.2         | 39           |
|   | 500mm/min | 62.5         | 70           | 70.8         | 30.12        | 68.5         | 37.75        |
| <b>P<sub>mean</sub></b><br><b>(KN)</b>                  | 20mm/min  | 20.87        | 20.67        | 42.1         | 7.37         | 46.18        | 32.43        |
|   | 500mm/min | 20.6         | 26.34        | 42.78        | 9.35         | 47.3         | 32.3         |
| <b>E<sub>a</sub></b><br><b>(J)</b>                      | 20mm/min  | 1045         | 1036.8       | 2105         | 369          | 2309         | 1621.5       |
|   | 500mm/min | 1058         | 1367         | 2293         | 473          | 2417         | 1702         |
| <b>SEA</b><br><b>(KJ/KG)</b>                            | 20mm/min  | 15.1         | 24.83        | 46.88        | 13           | 57.1         | 60.5         |
|   | 500mm/min | 15.2         | 32.74        | 51           | 16.65        | 59.78        | 63.5         |
| <b>CFE</b><br><b>(P<sub>mean</sub>/P<sub>max</sub>)</b> | 20mm/min  | 35.3%        | 30.3%        | 60.4%        | 29%          | 64.8%        | 83.15%       |
|   | 500mm/min | 32.9%        | 37.6%        | 60.4%        | 31%          | 69%          | 85%          |

**Πίνακας 2:** Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης δοκιμίων

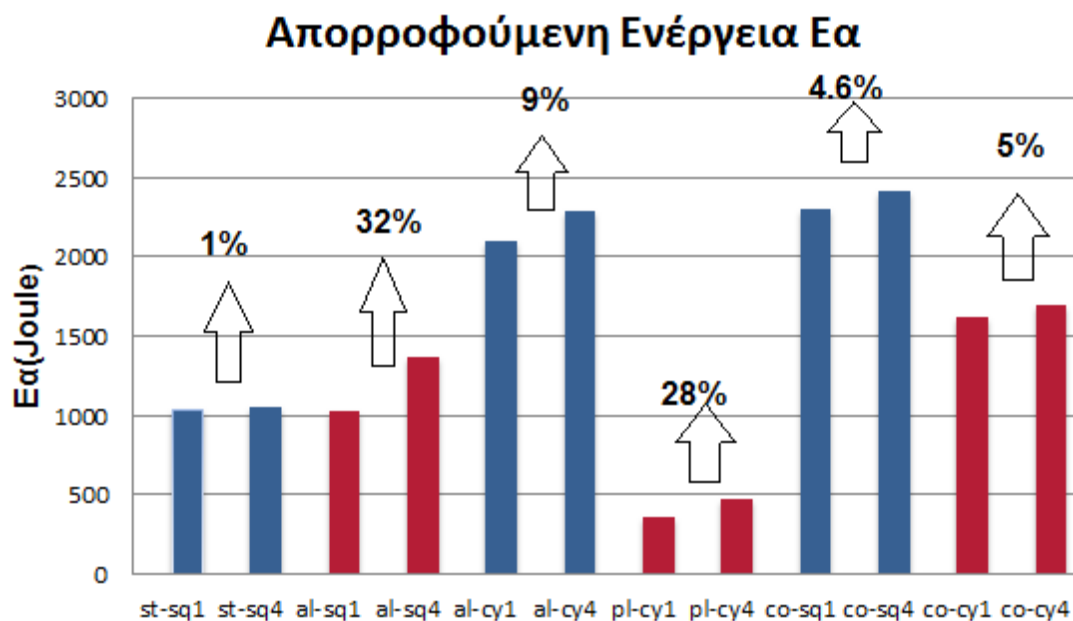
Οι σημαντικότερες διαπιστώσεις που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

- Από τις ληφθέντες φωτογραφίες και τα διαγράμματα μεταβολής φορτίου-μετατόπισης προκύπτει ότι ο τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων St, Pl είναι παρόμοιος και στις δύο ταχύτητες συμπίεσης. Για τα δοκίμια Co προκύπτει ότι στην μεγαλύτερη ταχύτητα συμπίεσης η συχνότητα διακύμανσης του φορτίου συμπίεσης είναι μικρότερη λόγω αδράνειας του υλικού. Το δοκίμιο Al-sq εμφάνισε αστοχία στις ακμές με επακόλουθο τον



μη ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης και στις δύο ταχύτητες επιβολής του φορτίου. Τέλος το δοκίμιο Al-cy εμφανίζει διαφορετικό τρόπο κατάρρευσης στις διαφορετικές ταχύτητες συμπίεσης.

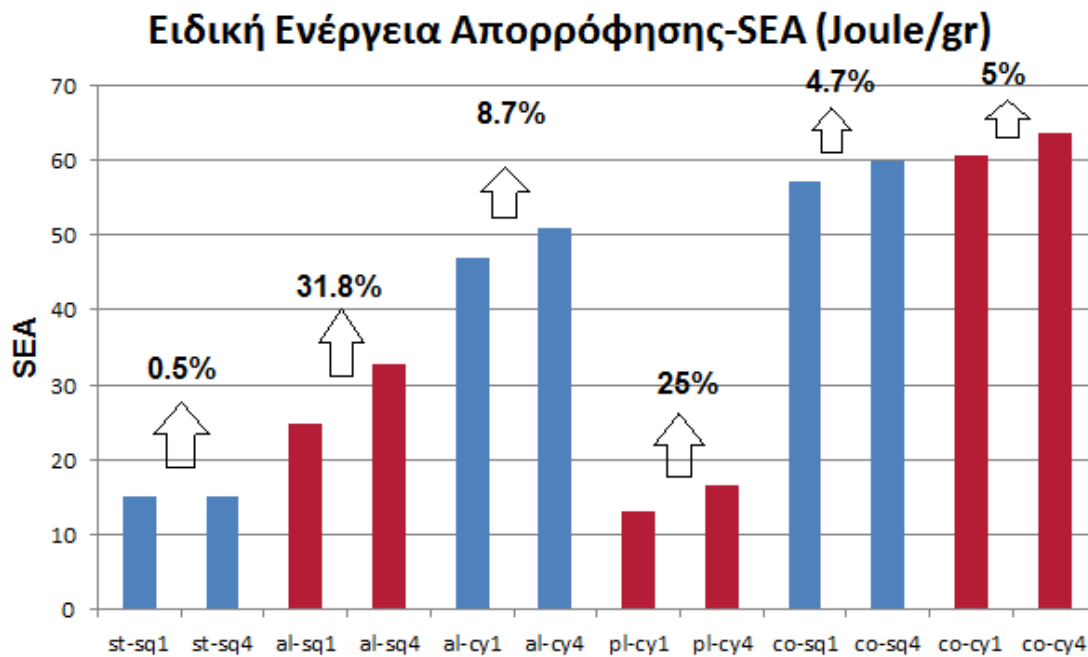
- Τα ποσά της απορροφούμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερα στην υψηλότερη ταχύτητα συμπίεσης από ό,τι στην μικρότερη. Ειδικά, η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας παρατηρείται για το αλουμίνιο τετραγωνικής διατομής (περίπου 32%) και η μικρότερη για το δοκίμιο του χάλυβα (περίπου 1%). Ειδικά για το αλουμίνιο τετραγωνικής διατομής, λαμβάνοντας υπόψη τον μη προοδευτικό τρόπο κατάρρευσης που παρατηρείται κυρίως λόγω της αστοχίας στις ακμές, η προαναφερθείσα παράμετρος (συνολική απορροφούμενη ενέργεια) είναι μη αξιολογήσιμη. Στο διάγραμμα που ακολουθεί αποτυπώνεται αναλυτικά για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά (σχήμα 3.2).



**Σχήμα 3.2:** Διάγραμμα Απορροφούμενης Ενέργειας/Ea –δοκιμίων σε ταχύτητες 20 και 500mm/min

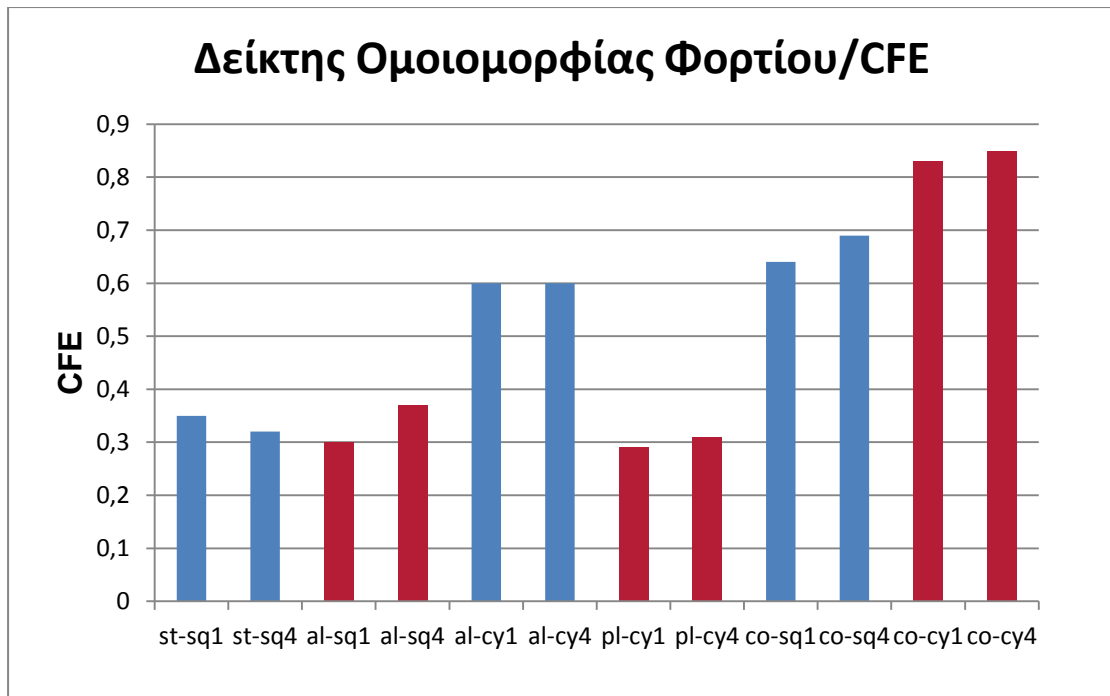
- Η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) αυξάνεται στην μεγαλύτερη ταχύτητα αξονικής συμπίεσης. Ειδικά για το αλουμίνιο τετραγωνικής διατομής παρατηρείται η μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση (σχήμα 3.3),

χωρίς αυτό να αποτελεί γενικευμένο συμπέρασμα για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.



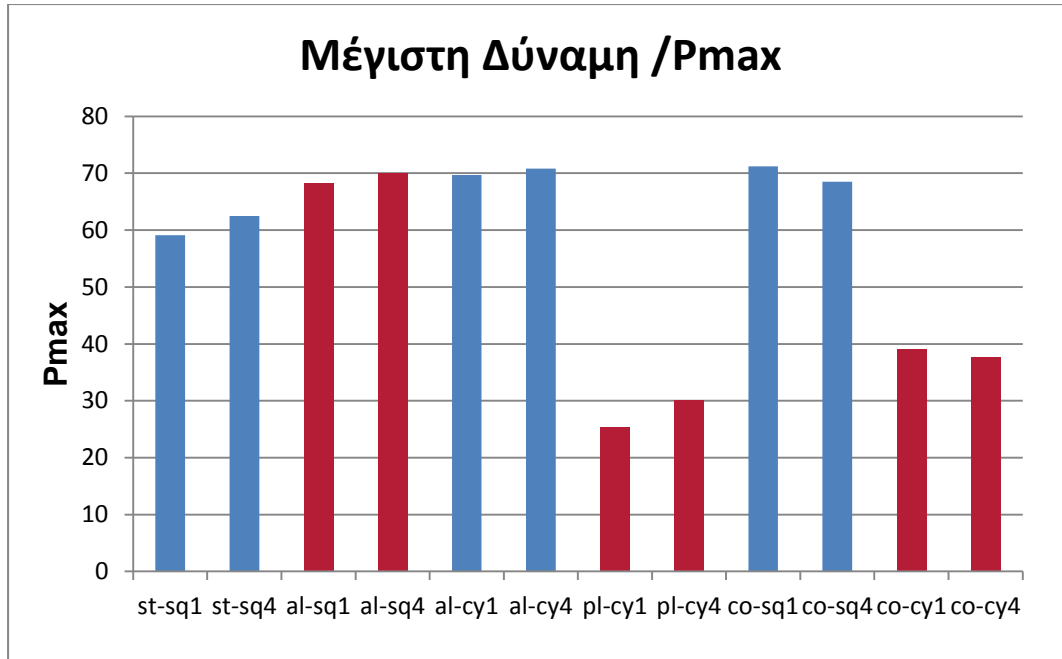
**Σχήμα 3.3:** Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας Απορρόφησης/ SEA –δοκιμίων σε ταχύτητες 20 και 500mm/min

- Η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) είναι μεγαλύτερη για τα δοκίμια σύνθετου υλικού και με μικρότερη τιμή για τα δοκίμια χάλυβα και πλαστικού υλικού (σχήμα 3.3). Ενδεικτικά αναφέρεται για σύνθετο υλικό με μήτρα πολύ-αιθερό κετόνη (PEEK) και ενισχυτικές ίνες άνθρακα έχει ειδική ενέργεια απορρόφησης δέκα φορές μεγαλύτερη από του χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. [3]
- Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) είναι μεγαλύτερος (ιδανικότερος) για τα σύνθετα υλικά και ειδικά στο δοκίμιο κυκλικής διατομής (83.15% για συμπίεση 20mm/min) (σχήμα 3.4). Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται για ένα συγκεκριμένο υλικό με ειδική κατεργασία διαμόρφωσης άκρου (triggering).



**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα Δείκτη Ομοιομορφίας Φορτίου/CFE - δοκιμίων σε ταχύτητες 20 και 500mm/min

- Για τα δοκίμια σύνθετου υλικού η μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη  $P_{max}$  που παρατηρείται, κατά την διάρκεια της συμπίεσης, είναι ελαφρώς χαμηλότερη στην ταχύτητα των 500mm/min (περίπου 3-3.5% σε σχέση με την ταχύτητα των 20mm/min). Αντιθέτως στα υπόλοιπα δοκίμια, στην μεγαλύτερη ταχύτητα εμφανίζεται μεγαλύτερη μέγιστη δύναμη (περίπου 2-5%, εκτός από το δοκίμιο PVC που εμφανίζεται αύξηση κατά 20%) (σχήμα 3.5). Για τα μέταλλα αναμένεται αύξηση της αντοχής με την αύξηση επιβολής φορτίου. Η αναντιστοιχία του τελευταίου για τα δοκίμια st-sq και al-cy εκτιμάται ότι οφείλεται στην μη ομοιόμορφη εφαρμογή της πλάκας συμπίεσης με τα δοκίμια (μη ικανοποιητικές συνοριακές συνθήκες) ή πιθανών ατελειών στα κελύφη.



**Σχήμα 3.5:** Διάγραμμα Μέγιστης Δύναμης /Pmax - δοκιμών σε ταχύτητες 20 και 500mm/min

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

### 4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει περιγραφή της πειραματικής εργασίας που ακολουθήθηκε για την δυναμική καταπόνηση των δοκιμίων. Ειδικά, θα παρουσιασθούν τα δοκίμια, ο μηχανολογικός – εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε, η περιγραφή των πειραμάτων και η αποτύπωση - αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

### 4.2 Δοκίμια – Εργαστηριακός εξοπλισμός

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όμοια με τα αντίστοιχα της ημι-στατικής καταπόνησης. Αναλυτικά οι διαστάσεις και η ονοματολογία αποτυπώνονται στον πίνακα (3)

| Ονοματολογία | L(μήκος) | d (πάχος) | D* ((mm) |
|--------------|----------|-----------|----------|
| St-sq2       | 80       | 1.2       | 37.7     |
| St-sq3       | 80       | 1.2       | 37.7     |
| Al- cy2      | 80       | 2         | 50       |
| Al-cy3       | 80       | 2         | 50       |
| Al- sq2      | 80       | 2         | 40.1     |
| Al- sq3      | 80       | 2         | 40.1     |
| Pl-cy3       | 80       | 2.5       | 50       |
| Co-cy2       | 80       | 2.7       | 46       |
| Co-cy3       | 80       | 2.7       | 46       |
| Co-sq2       | 80       | 2.5       | 56       |
| Co-sq3       | 80       | 2.5       | 56       |

\*Σημ: Cy-κυκλικής διατομής , Sq- τετραγωνικής διατομής, D – εξωτερικό μήκος πλευράς (για δοκίμια sq), ή εξωτερική διάμετρο (για δοκίμια cy).

**Πίνακας (3)**

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν η σφύρα πίπτουσας μάζας. Τα κυριότερα μέρη αναφέρονται ακολούθως:

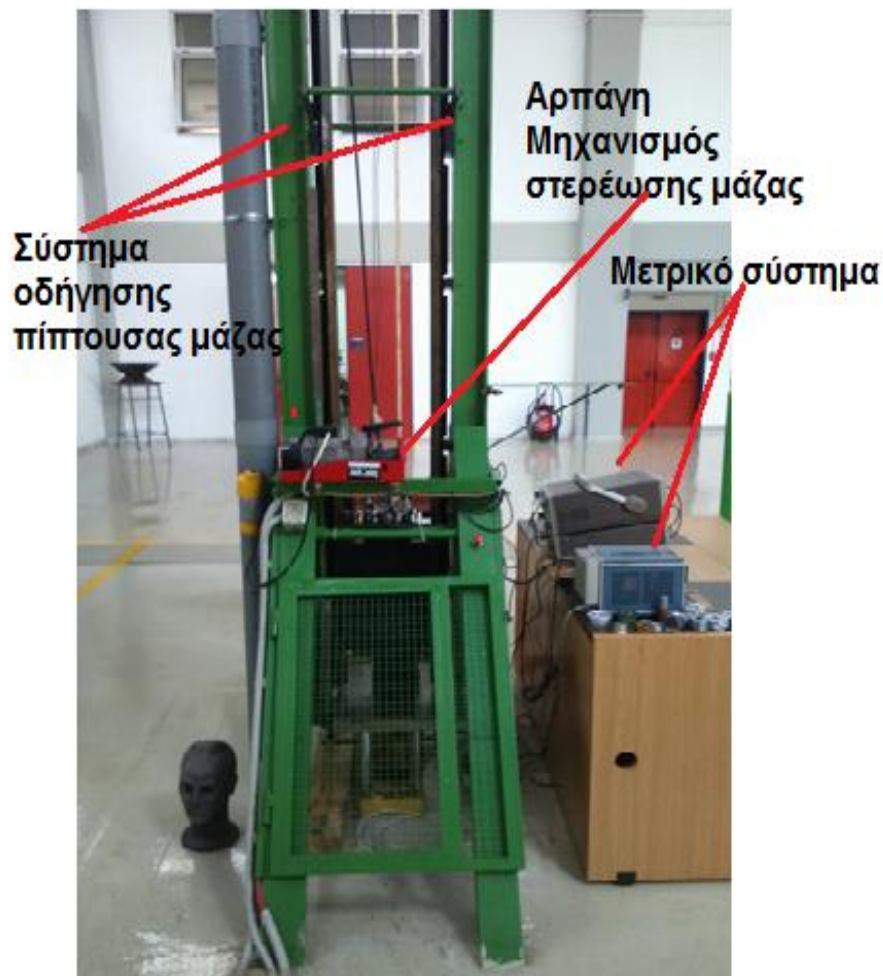
A. Πίπτουσα μάζα –υπό την επίδραση της βαρύτητας– (μάζα=77kgr)

B. Σύστημα οδήγησης της πίπτουσας μάζας, αποτελούμενο από το συρματόσχοινο, σιδηρόδρομο και τον ηλεκτρικό κινητήρα ανυψώσεως της μάζας.

Γ. Αρπάγη μηχανισμός στερέωσης της πίπτουσας μάζας.

Δ. Μετρικό σύστημα, αποτελούμενο από τον παλμογράφο δύο καναλιών Hameg HM205 – 3 και printer Hameg HM 8143, το οποίο καταγράφει την μεταβολή του κρουστικού φορτίου σε σχέση με τον χρόνο.

Ε. Δυναμόμετρο τύπου ηλεκτρομηκυσιόμετρου Kyowa LC-50TE το οποίο ανιχνεύει την κρουστική δύναμη και την μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα και τέλος διάφορες διατάξεις ελέγχου όπως αισθητήρες θέσης πίπτουσας μάζας, κομβίο αναγκαστικής κράτησης πίπτουσας μάζας κλπ.



**Σχήμα 4.1:** Συσκευή πίπτουσας μάζας

### 4.3 Διεξαγωγή πειραμάτων

#### 4.3.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Τα επιλεγμένα δοκίμια (πίνακας (2)) είχαν υποστεί μηχανουργική κατεργασία στα δύο άκρα με σκοπό την εύθυνη – επιπεδοποίηση των δύο ακραίων διατομών. Με αυτήν τη διαδικασία επιτυγχάνεται ομοιομορφία της φόρτισης. Επίσης, τοποθετήθηκαν διαδοχικά στο κέντρο της βάσης της σφύρας, απαραίτητη προϋπόθεση έτσι ώστε να εξασφαλισθεί κατά το δυνατόν αξονό-συμμετρική δυναμική φόρτιση.

Τα ύψη άφεσης τηςπίπτουσας μάζας επιλέχθηκαν το ένα (1) και δύο (2) μέτρα για τα δοκίμια με δείκτη δύο και τρία αντίστοιχα.

**Η ταχύτητα πρόσκρουσης υπολογίζεται από τον τύπο:**

$$u = \sqrt{2 * g * h} \text{ ) όπου}$$

- $u$ , η ταχύτητα πρόσκρουσης τηςπίπτουσας μάζας στο δοκίμιο
- $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας
- $h$ , το επιλεγμένο ύψος που αφήνεται ηπίπτουσα μάζα (απόσταση μεταξύ μάζας και άνω επιφάνειας του δοκιμίου). Στην περίπτωση μας  $h_1=1\text{m}$ ,  $h_2=2\text{m}$ .

Η κινητική ενέργεια τηςπίπτουσας μάζας την χρονική στιγμή της πρόσκρουσης υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τον τύπο:

$$E = \frac{1}{2} * m * u^2$$

Μέρος της ενέργειας αυτής προσδίνεται στο υλικό με την μορφή πλαστικού έργου (απορροφούμενη ενέργεια) κατά την βράχυνση του δοκιμίου και το υπόλοιπο είναι οι διάφορες απώλειες σύμφωνα με τον τύπο:

$$\frac{1}{2} * m * u^2 = s * P_{\text{mean}} + \text{Απώλειες (τριβής, θερμότητας κ.α)}$$

- $s$ , η βράχυνση του δοκιμίου μετά την πρόσκρουση
- $P_{\text{mean}}$ , το μέσον φορτίο κατά την διάρκεια της κρούσης και υπολογίζεται γραφικά από την καμπύλη φορτίου – χρόνου, κατά την πρόσκρουση. (\*Εγινε η θεώρηση ότι ταυτίζεται με το μέσον φορτίο που αναπτύσσεται κατά την βράχυνση  $s$  του δοκιμίου)

Στον πίνακα (4) αποτυπώνονται οι ταχύτητες πρόσκρουσης με τις αντίστοιχες ενέργειες στα σημεία της πρόσκρουσης από τα δύο προαναφερθέντα ύψη άφεσης της μάζας.

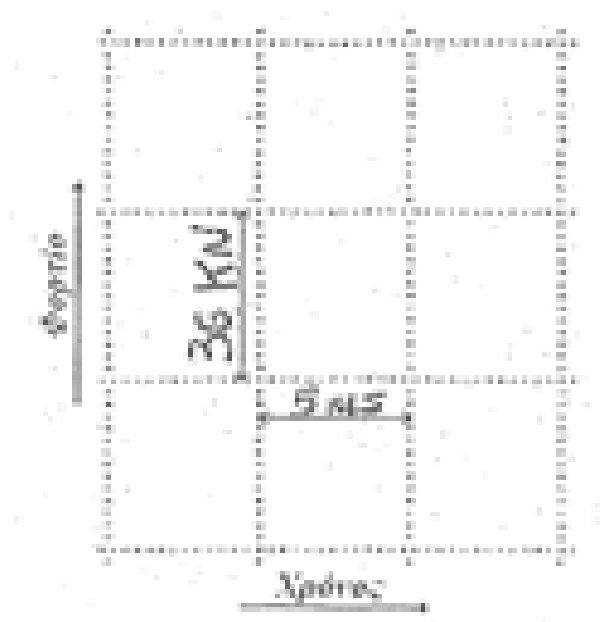
| Ύψος/h | Ταχύτητα/u (m/s) | Ενέργεια(Joule) |
|--------|------------------|-----------------|
| 1m     | 4.43             | 760             |
| 2m     | 6.26             | 1518            |

**Πίνακας (4)**

Η παραμετροποίηση του μετρικού συστήματος έγινε με την ακόλουθη αντιστοιχία:

A. Κατακόρυφος άξονας που υποτυπώνει το μέγεθος της κρουστικής δύναμης κατά την διάρκεια της πρόσκρουσης: 2Volt/1div και 17,878KN/Volt οπότε προκύπτει περίπου **36KN/div**

B. Οριζόντιος άξονας που υποτυπώνει τον χρόνο: **5msec/1div** (σχήμα 4.2)



**Σχήμα 4.2:** Παραμετροποίηση μετρικού συστήματος – κλίμακα μετρήσεων.

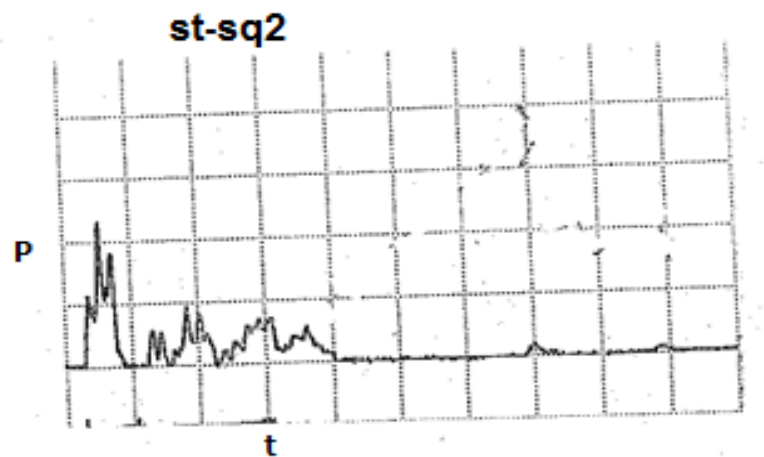


## 4.3.2 Δυναμική καταπόνηση δοκιμίων από ύψος 1m

### 4.3.2.1 ΔΟΚΙΜΙΟ ST

#### A. St-sq2

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.3:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου st-sq2



**Σχήμα 4.4:** Τελική όψη δοκιμίου st-sq2

### Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=19.3\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\max}=84\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}= 11.2\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=36.84\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=309\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=8.38\text{Joule/g}$
- Μήκος σύνθλιψης/βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  $s=27.6\text{mm}$

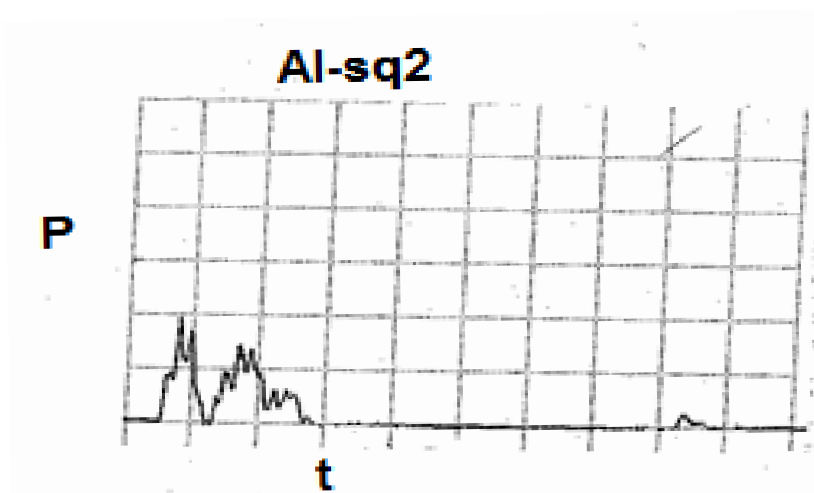
### Παρατηρήσεις

Στην καμπύλη αυτή διακρίνονται τέσσερις χρονικές περιοχές, οι οποίες διαχωρίζονται με όριο σχεδόν αμελητέο φορτίο. Η πρώτη χρονική περίοδος αντιστοιχεί στην άμεση κρούση της μάζας πάνω στο δοκίμιο και εμφανίζει το μέγιστο φορτίο (μέγιστη κορφή στην καμπύλη φορτίου – χρόνου). Στη συνέχεια ακολουθούν δύο αναπηδήσεις και τελικά η οριστική ηρεμία.

#### 4.3.2.2 ΔΟΚΙΜΙΟ AL

##### A. Al-sq2

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.5:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου Al-sq2



**Σχήμα 4.6:** Τελική όψη δοκιμίου Al-sq2

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=12\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=68\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=18\text{KN}$

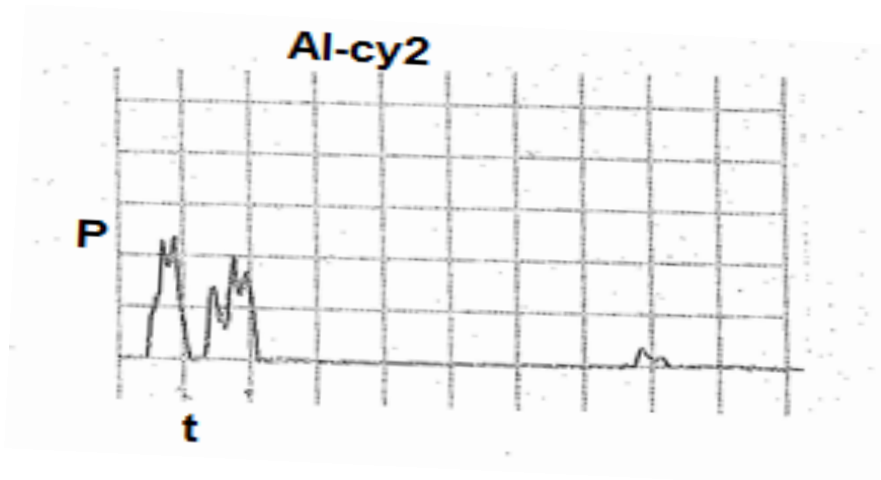
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=15.95$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=360\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=22.5\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  $s=20\text{mm}$

### Παρατηρήσεις

Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται δύο χρονικές περιόδους, όπου και εδώ εμφανίζεται το μέγιστο στην πρώτη περίοδο, στην συνέχεια σημειώνεται αναπήδηση της μάζας (μηδενισμός φορτίου) και δεύτερη κρούση έως ότου επέλθει η ηρεμία του.

### **B. Al-cy2**

#### Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.7:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου al-cy2



**Σχήμα 4.8:** Τελική όψη δοκιμίου al-cy2

#### Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=8.6\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=84\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=31.2\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=10\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=374\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $\text{SEA}=37.4\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  
 $d=12\text{mm}$

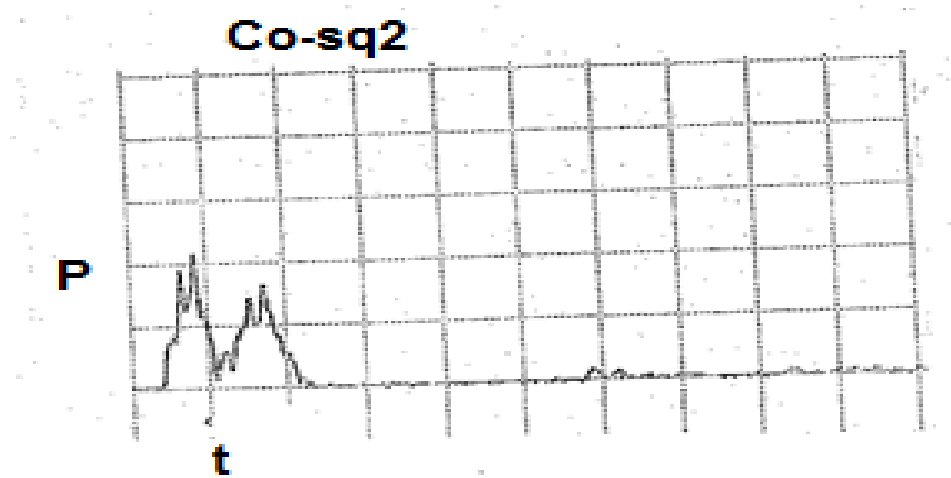
#### Παρατηρήσεις

Στην δοκιμή αυτή η πίπτουσα μάζα προσέκρουσε στο δοκίμιο και αναπήδησε για χρόνο  $1.5\text{msec}$ , όπου σημειώνεται μηδενισμός του φορτίου, και στη συνέχεια προσέκρουσε για δεύτερη φορά έως ότου επέλθει η τελική ηρεμία.

### 4.3.2.3 ΔΟΚΙΜΙΟ CO

#### A. Co-sq2

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα.4.9:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου co-sq2



**Σχήμα 4.10:** Τελική όψη δοκιμίου co-sq2

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=10.6\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=80\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=28\text{KN}$

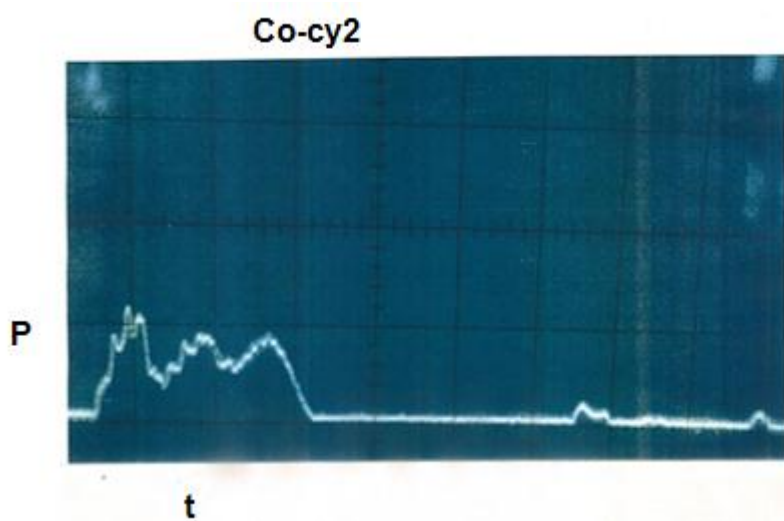
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=9\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=316\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=35.1\text{Joule/g}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  
 $s=11.3\text{mm}$

#### Παρατηρήσεις

Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται δύο χρονικές περιοχές στην καμπύλη φορτίου – χρόνου, με τις κορυφές του φορτίου να είναι υψηλότερες στην πρώτη περιοχή.

#### **B.Co-cy2**

#### Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα.4.11:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου co-cy2



**Σχήμα 4.12:** Τελική όψη δοκιμίου co-cy2

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=14\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\max}=42\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=24\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=11\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=513\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $\text{SEA}=46.6\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  
 $s=21.4\text{mm}$

Παρατηρήσεις

Στην καμπύλη φορτίου – χρόνου της κρουστικής καταπόνησης του δοκιμίου co-cy2 διακρίνονται τρεις χρονικές περιοχές, όπου στα όρια διαχωρισμού δεν σημειώνεται αμελητέα δύναμη, και οι κορυφές του φορτίου κάθε περιοχής κυμαίνονται περίπου στην ίδια τιμή.

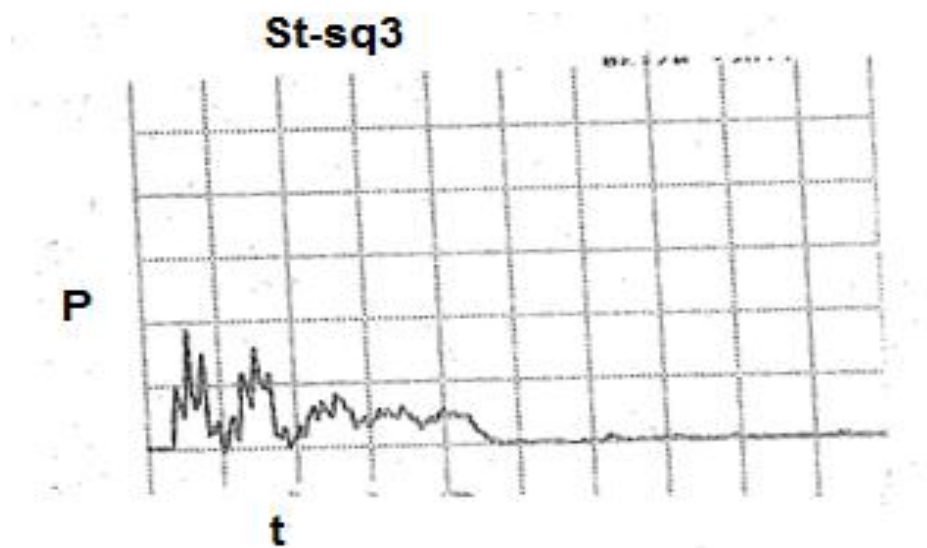


### 4.3.3 Δυναμική καταπόνηση δοκιμίων από ύψος 2 μέτρο

#### 4.3.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ ST

##### A. St-sq3

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.13:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου st-sq3



**Σχήμα 4.14:** Τελική όψη δοκιμίου St-sq3

### Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=21.6\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\max}=60\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=14\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=64\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=677\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=10.5\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  $s=48.4\text{mm}$ .

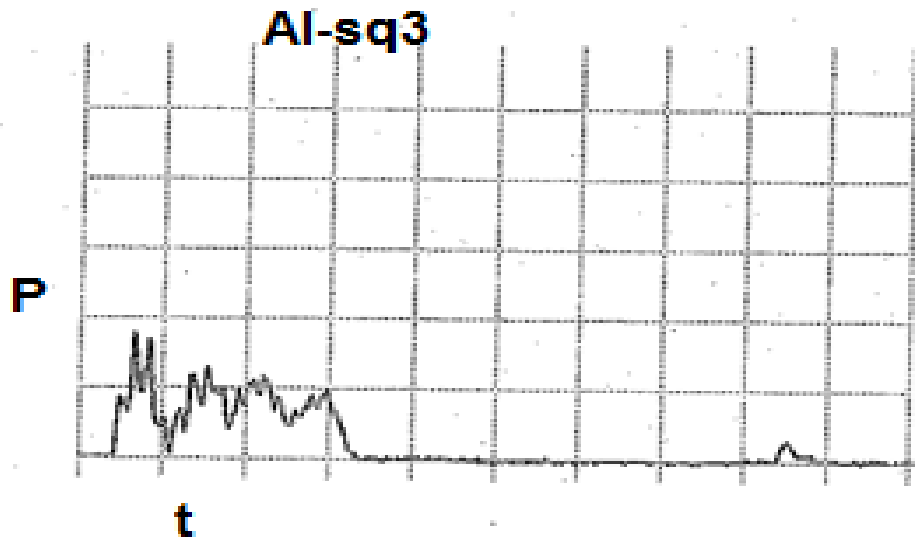
### Παρατηρήσεις

Η παραμόρφωση του δοκιμίου st-sq3, όπως αποτυπώνεται από την τελική όψη (σχ.4.14), αναπτύσσεται σε όλο σχεδόν το μήκος του δοκιμίου. Ο χρόνος επαφής τηςπίπτουσας μάζας με το δοκίμιο και η απόσταση συμπίεσης είναι μεγαλύτεροι σε σχέση με του δοκιμίου st-sq2 (σχ.4.3 και 4.13).

#### 4.3.3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ AL

##### A. Al-sq3

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.15:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου Al-sq3



**Σχήμα 4.15:** Τελική όψη δοκιμίου al-sq3

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=14.5\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=62\text{KN}$

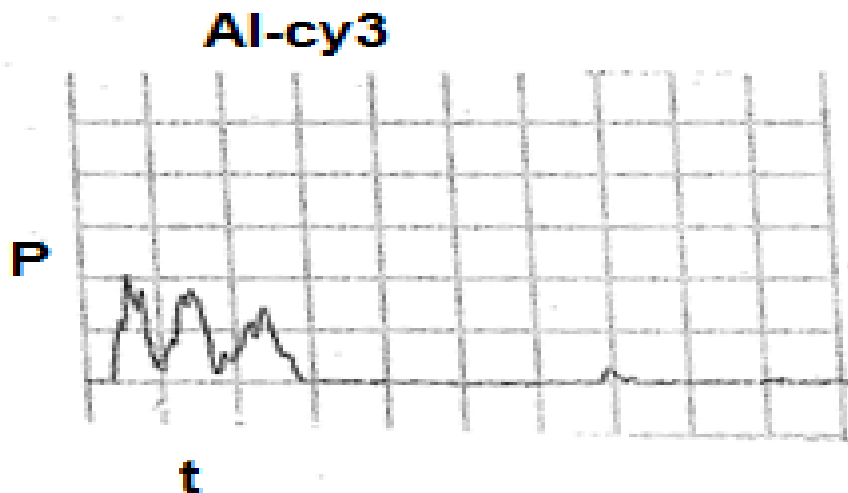
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=22.8\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=29.8\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=852\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $\text{SEA}=28.6\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  $s=37.4\text{mm}$

### Παρατηρήσεις

Ο χρόνος επαφής και η συνολική βράχυνση, όπως προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – χρόνου είναι μεγαλύτερα με τα αντίστοιχα του δοκιμίου al-sq3. Επίσης, παρατηρούνται περισσότερες αιχμές (τοπικά μέγιστα) φορτίου. Το τελευταίο εξηγείται λόγω εμφάνισης περισσότερων τοπικών αστοχιών καθώς επίσης και στον μη ελεγχόμενο τρόπο κατάρρευσης στην υψηλή αρχική ταχύτητα πρόσκρουσης.

### **B. Al-cy3**

#### Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.16:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου Al-cy3



**Σχήμα 4.16:** Τελική όψη δοκιμίου al-cy3

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=12.6\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=70\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}=28\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=24\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a=800\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=33.3\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  $d=28.6\text{mm}$

Παρατηρήσεις

Ο χρόνος επαφής και η συνολική βράχυνση, όπως προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – χρόνου είναι μεγαλύτερα με τα αντίστοιχα του δοκιμίου al-cy3. Επίσης, οι σχηματιζόμενοι λοβοί είναι τρεις (3), ένας επιπλέον του δοκιμίου al-cy2, και ο τρόπος κατάρρευσης είναι αξονοσυμμετρικός με εκατοούς λοβούς. Το τελευταίο αποτυπώνεται στο διάγραμμα φορτίου – χρόνου με την εμφάνιση τριών τοπικών μεγίστων αντί των δύο που εμφανίζονται στο αντίστοιχο δοκίμιο με την μικρότερη ταχύτητα πρόσκρουσης.

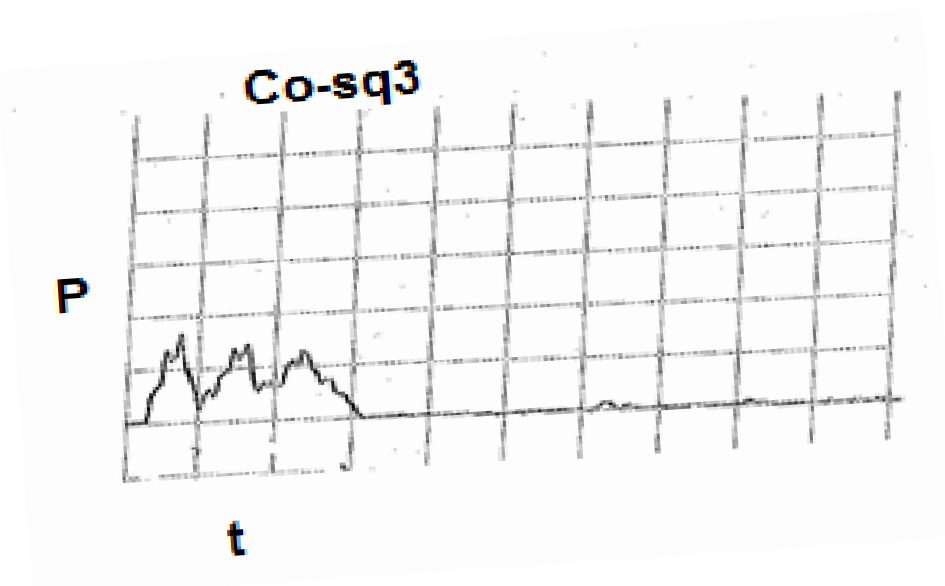
#### 4.3.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ PL

Η δοκιμή κρούσης στο δοκίμιο pl-cy επέφερε ολική καταστροφή στο δοκίμιο, με αποτέλεσμα μετά την αναπήδηση της πίπτουσας μάζας και την εκ νέου πρόσκρουση στο απαξιωμένο δοκίμιο η μάζα να προσκρούσει στην άκαμπτη βάση της σφύρας. Αυτό είχε συνέπεια το μετρούμενο φορτίο να τεθεί εκτός ορίων της μετρητικής διάταξης και να μην καταστεί δυνατόν η λήψη καμπύλης φορτίου – χρόνου.

#### 4.3.3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ CO

##### A. Co-sq3

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



Σχήμα 4.17: Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου co-sq3



**Σχήμα 4.17:** Τελική όψη δοκιμίου co-sq3

Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

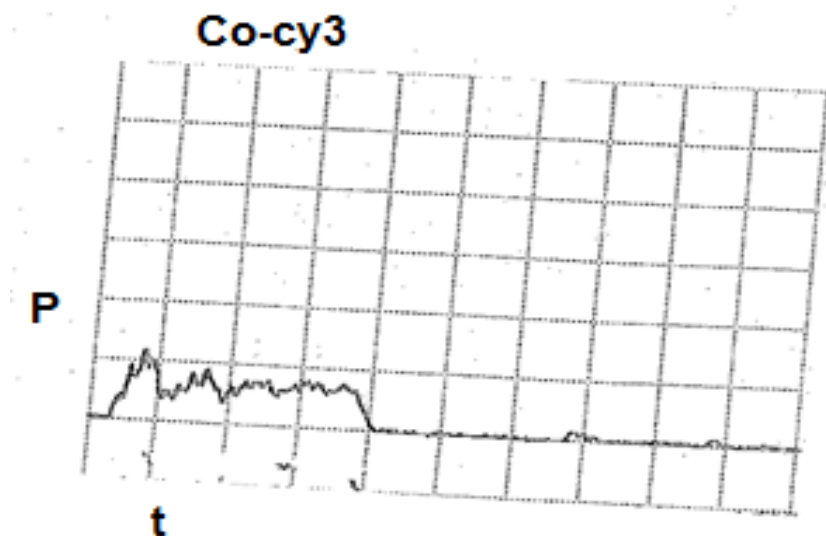
- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t=14\text{msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}}=58\text{KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}}= 24.4\text{KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m=25.3\text{gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a= 771\text{Joule}$
- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=30.47$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  
 $s=31.6\text{mm}$

Παρατηρήσεις

Ο Χρόνος επαφής της πύπτουσας μάζας καθώς και η βράχυνση του δοκιμίου co-sq3, όπως προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – χρόνου, είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του δοκιμίου co-sq2. Επίσης, παρατηρούνται τρία (3) τοπικά μέγιστα (αιχμές φορτίου) έναντι των δύο (2) τοπικών μεγίστων που εμφανίζονται στο δοκίμιο co-sq2 και εκτιμάται ότι οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος συμπίεσης που παρατηρείται στο δοκίμιο co-sq3.

## B.Co-cy3

Καμπύλη φορτίου – χρόνου κατά την κρούση



**Σχήμα 4.18:** Καμπύλη φορτίου – χρόνου (P-t) της δυναμικής καταπόνησης δοκιμίου co-cy3



**Σχήμα 4.19:** Τελική όψη δοκιμίου co-cy3

### Χαρακτηριστικά απορροφούμενης ενέργειας

- Χρονική διάρκεια πρόσκρουσης:  $t = 18 \text{ msec}$
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο:  $P_{\text{max}} = 40 \text{ KN}$
- Μέσο φορτίο:  $P_{\text{mean}} = 20 \text{ KN}$
- Συντεθλιμμένη μάζα:  $m = 23.4 \text{ gr}$
- Συνολική απορροφούμενη ενέργεια:  $E_a = 920 \text{ Joule}$



- Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA=39.3\text{Joule/gr}$
- Μήκος σύνθλιψης/ βράχυνση δοκιμίου μετά πρόσκρουση:  
 $s=46\text{mm}$

### Παρατηρήσεις

Η διακύμανση του φορτίου, όπως προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – χρόνου, είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με την αντίστοιχη διακύμανση του δοκιμίου co-cy2. Επίσης, ο χρόνος επαφής τηςπίπτουσας μάζας καθώς και η βράχυνση του δοκιμίου co-cy3 είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του δοκιμίου co-cy2.

### **4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα**

Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογούνται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη βοήθεια των κριτηρίων - δεικτών αξιολόγησης που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.1. προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των διάφορων φορέων λεπτού πάχους ως προς την δυναμική αξονική καταπόνηση.

Επιπλέον, επιλέχθηκε ο συντελεστής απόδοσης  $n=E_a/E_k$  ( $E_a$ : απορροφούμενη ενέργεια/  $E_k$ : Κινητική ενέργεια την στιγμή της πρόσκρουσης) ως επιπλέον κριτήριο αξιολόγησης και προκύπτει ότι οι απώλειες ενέργειας είναι σημαντικές και οφείλονται κυρίως στο σύστημα οδήγησης τηςπίπτουσας μάζας.

Αρχικά, δίνεται ο πίνακας (5) που περιλαμβάνει όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν σε αξονική δυναμική καταπόνηση με άφεση τηςπίπτουσας μάζας και από τα δύο ύψη.

|  |      | <b>St-sq</b> | <b>Al-sq</b> | <b>Al-cy</b> | <b>Pl-cy</b> | <b>Co-sq</b> | <b>Co-cy</b> |
|--|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>P<sub>max</sub></b><br><b>(KN)</b>                          | h=1m | 84           | 68           | 84           |              | 80           | 42           |
|  | h=2m | 60           | 62           | 70           |              | 58           | 40           |
| <b>t</b><br><b>(msec)</b>                                      | h=1m | 19.3         | 12           | 8.6          |              | 10.6         | 14           |
|  | h=2m | 21.6         | 14.5         | 12.6         |              | 14           | 18           |
| <b>E<sub>α</sub></b><br><b>(J)</b>                             | h=1m | 309          | 360          | 374          |              | 316          | 513          |
|  | h=2m | 677          | 852          | 800          |              | 771          | 920          |
| <b>SEA</b><br><b>(KJ/KGR)</b>                                  | h=1m | 8.38         | 22.5         | 37.4         |              | 35.1         | 46.6         |
|  | h=2m | 10.5         | 28.6         | 33.3         |              | 30.47        | 39.3         |
| <b>n%=</b><br><b>(E<sub>α</sub>/E<sub>κ</sub><sup>*</sup>)</b> | h=1m | 40%          | 47%          | 49%          |              | 41.5%        | 67.5%        |
|  | h=2m | 44.5%        | 56%          | 52.7%        |              | 50.7%        | 60.6%        |

**Πίνακας 5:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμών

\*E<sub>κ</sub>: Έχουν υπολογιστεί στον πίνακα (2)

Οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που προκύπτουν, λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του πίνακα (5) καθώς επίσης και των τρόπων κατάρρευσης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι οι ακόλουθες:

- Στις δυναμικές καταπονήσεις εκτός από την συνολική απορροφούμενη ενέργεια, σημαντική παράμετρος για τον εξεταζόμενο φορέα είναι και ο ρυθμός απορρόφησης. Δηλαδή το υλικό που απορροφά ενέργεια (E<sub>α</sub>) -κατά την κατάρρευσή του- για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε σχέση με κάποιο άλλο υλικό που απορροφά την ίδια ενέργεια (E<sub>α</sub>) σε μικρότερο χρόνο είναι ανθεκτικότερο στην πρόσκρουση (crashworthy). Με αυτό το κριτήριο συγκρίνοντας τα δοκίμια Al-cy3 και Co-cy3 (περίπου ίσα ποσά ενέργειας και αναμενόμενος τρόπος κατάρρευσης) το Co-cy3 είναι ανθεκτικότερο στην κρούση λόγω μεγαλύτερης διάρκειας επαφής της πίπτουσας μάζας με το δοκίμιο (18msec έναντι 12.6msec για το Al-cy3).

- Το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας είναι μεγαλύτερα, περίπου διπλάσια, στην περίπτωση άφησης της μάζας από το μεγαλύτερο ύψος και είναι αναμενόμενο λόγω της μεγαλύτερης (περίπου διπλάσιας) αρχικής κινητικής ενέργειας στην δεύτερη περίπτωση.
- Το μέγιστο φορτίο συμπίεσης ( $P_{max}$ ) στην δεύτερη περίπτωση δυναμικής καταπόνησης για όλα τα δοκίμια είναι μικρότερο. Ειδικά για το δοκίμιο co-sq3 η μείωση είναι αρκετά μεγάλη και εκτιμάται ότι οφείλεται στις συννοριακές συνθήκες μεταξύ της επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με την πίπτουσα μάζα.
- Από τα σύνθετα υλικά το Co-cy εμφανίζει την μεγαλύτερη ειδική απορρόφηση ενέργειας (SEA). Επίσης η ειδική ενέργεια απορρόφησης είναι μικρότερη για τα δοκίμια co-sq3 και co-cy3.
- Από τα μεταλλικά υλικά, το al-cy εμφανίζει τον πιο αποδοτικό τρόπο κατάρρευσης και στις δύο περιπτώσεις, με κριτήριο την ειδική ενέργεια απορρόφησης, ο οποίος αποτυπώνεται και στις τελικές όψεις των δοκιμίων. Το δοκίμιο St-sq3 καταρρέει μη ελεγχόμενα, εκτείνεται σε όλο το ύψος και με μικρή ειδική ενέργεια απορρόφησης σε σχέση με τα άλλα μεταλλικά δοκίμια.
- Σε γενικές γραμμές για τα μεταλλικά υλικά υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του μέσου ρυθμού παραμόρφωσης - επιβολής - (strain rate,  $\dot{\epsilon}$ (1/sec)) του φορτίου και του δυναμικού ορίου διαρροής ( $Y_d$ ) τα οποία καθορίζουν την ευαισθησία του υλικού δηλαδή το πόσο γρήγορα “αντιδρούν” στην εξωτερική επιβολή δυναμικής φόρτισης. Για τα δοκίμια κυκλικής διατομής ο μέσος ρυθμός παραμόρφωσης εκτός από την αρχική ταχύτητα σύγκρουσης εξαρτάται κι από την γεωμετρία του δοκιμίου (συγκεκριμένα από την διάμετρο (D) και την συσχέτιση διαμέτρου (D) – πάχους δοκιμίου (t)) που καθορίζει με την σειρά της, τον τρόπο κατάρρευσης. Η τελική σχέση υπολογισμού του ορίου διαρροής είναι:  $Y_d = Y^* (1 + (\dot{\epsilon}/c)^{1/\rho})$  όπου c και ρ σταθερές που υπολογίζονται πειραματικά και εξαρτώνται από το υλικό. [13]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 –ΣΥΜΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1 Συσχέτιση στατικής – δυναμικής πειραματικής διαδικασίας.

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται τυχόν συσχέτιση του τρόπου κατάρρευσης των δοκιμίων στις στατικές καταπονήσεις με τις δυναμικές με κριτήρια τους δείκτες αξιολόγησης. Στους ακόλουθους πίνακες παρατίθενται συνολικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

- Δοκίμιο χάλυβα st-sq

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) και η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) στις δυναμικές καταπονήσεις είναι μικρότερος και όπως προκύπτει από τις ληφθέντες φωτογραφίες ο τρόπος κατάρρευσης είναι λιγότερο ελεγχόμενος στις δυναμικές καταπονήσεις.

| St-sq              | 20mm/min | 500mm/min | h=1m | h=2m |
|--------------------|----------|-----------|------|------|
| <b>Pmax(KN)</b>    | 59.1     | 62.5      | 84   | 60   |
| <b>Pmean(KN)</b>   | 20.87    | 20.6      | 11.2 | 14   |
| <b>Eα(Joule)</b>   | 1045     | 1058      | 309  | 677  |
| <b>SEA(KJ/KGR)</b> | 15.1     | 15.2      | 8.38 | 10.5 |
| <b>CFE</b>         | 0.35     | 0.32      | 0.13 | 0.23 |

**Πίνακας 6.1:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου st-sq

- Δοκίμια al

Για τα δοκίμια al-sq τα αποτελέσματα δεν είναι αξιολογήσιμα λόγω αστοχίας στις ακμές, όπως αποτυπώνεται στις τελικές όψεις, στο σύνολο των δοκιμίων με αποτέλεσμα να σημειώνεται μη επιθυμητός τρόπος κατάρρευσης.

Ο τρόπος κατάρρευσης των δοκιμίων al-cy σε όλες τις δοκιμές είναι ο αξονοσυμμετρικός εκτός από του al-cy4 που είναι ο μεικτός παρά το γεγονός ότι οι σχετικές διαστάσεις L/d (μήκος/πάχος), D/d (διάμετρο/πάχος) όλων των

δοκιμών είναι όμοιες και λαμβάνοντας υπόψη ότι το κράμα αλουμινίου είναι λιγότερο ευαίσθητο ως προς τον ρυθμό επιβολής του φορτίου [14], χρήζει περαιτέρω διερεύνηση, με την μέθοδο των επαναληπτικών δοκιμών.

Η ειδική ενέργεια απορρόφησης (SEA) και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) κυμαίνεται στα ίδια μεγέθη τόσο στις ημι-στατικές δοκιμές όσο και στις δυναμικές. Το μέσον φορτίο στις δυναμικές φορτίσεις εμφανίζει μειωμένες τιμές σε σχέση με τις ημι-στατικές. Αντιθέτως από βιβλιογραφία προκύπτει ότι για το ίδιο κράμα αλουμινίου με διαφορετικό λόγο D/h (Διάμετρο/πάχος) το μέσον φορτίο στις δυναμικές φορτίσεις εμφανίζει αυξημένες τιμές σε σχέση με τις ημι-στατικές. [15] Στην περίπτωση μας αυτό δεν ισχύει λόγω των απωλειών ενέργειας στο σύστημα οδήγησης της πίπτουσας μάζας και πιθανής μη ικανοποιητικής ομοιόμορφης επαφής της μάζας με το δοκίμιο.

| <b>Al-sq</b> | <b>20mm/min</b> | <b>500mm/min</b> | <b>h=1m</b> | <b>h=2m</b> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| <b>Pmax</b>  | 68.2            | 70               | 68          | 62          |
| <b>Pmean</b> | 20.67           | 26.34            | 18          | 22.8        |
| <b>Ea</b>    | 1036.8          | 1367             | 360         | 852         |
| <b>SEA</b>   | 24.83           | 32.74            | 22.5        | 28.6        |
| <b>CFE</b>   | 0.3             | 0.37             | 0.26        | 0.36        |

**Πίνακας 6.2:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου al-sq

| <b>Al-cy</b> | <b>20mm/min</b> | <b>500mm/min</b> | <b>h=1m</b> | <b>h=2m</b> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| <b>Pmax</b>  | 69.7            | 70.8             | 84          | 70          |
| <b>Pmean</b> | 42.1            | 42.78            | 31.2        | 28          |
| <b>Ea</b>    | 2105            | 2293             | 374         | 800         |
| <b>SEA</b>   | 46.88           | 51               | 37.4        | 33.3        |
| <b>CFE</b>   | 0.6             | 0.6              | 0.37        | 0.4         |

**Πίνακας 6.3:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου al-cy

- Δοκίμιο PI-cy

Διερευνήθηκε μόνο η συμπεριφορά του στις ημι-στατικές καταπονήσεις, λόγω ολοκληρωτικής κατάρρευσης στις δυναμικές, και προκύπτει ο ίδιος τύπος κατάρρευσης και στις δύο περιπτώσεις με αποδοτικότερη συμπεριφορά κατάρρευσης αυτή που αντιστοιχεί στην μεγαλύτερη ταχύτητα συμπίεσης.

| <b>PI-cy</b> | <b>20mm/min</b> | <b>500mm/min</b> | <b>h=1m</b> | <b>h=2m</b> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| <b>Pmax</b>  | 25.4            | 30.12            |             |             |
| <b>Pmean</b> | 7.37            | 9.35             |             |             |
| <b>Ea</b>    | 369             | 473              |             |             |
| <b>SEA</b>   | 13              | 16.65            |             |             |
| <b>CFE</b>   | 0.29            | 0.31             |             |             |

**Πίνακας 6.4:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου pl-cy

- Δοκίμιο co

Για τα δοκίμια σύνθετου υλικού παρατηρείται ότι η ειδική ενέργεια απορρόφησης και ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου στις δυναμικές καταπονήσεις είναι μικρότερης τιμής. Τα δοκίμια κυκλικής διατομής είναι αποδοτικότερα από τα τετραγωνικής διατομής δηλαδή παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσά απορροφούμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας και επιπλέον το επιβαλλόμενο φορτίο εμφανίζει λιγότερες διακυμάνσεις σε σχέση με το τετραγωνικής. Επίσης λαμβάνοντας υπόψη ότι το υλικό της μήτρας του δοκιμίου co-sq είναι βινυλεστερική ρητίνη, θα αναμενόταν καλύτερη συμπεριφορά σε δυναμικές φορτίσεις το οποίο μετριάζεται από την γεωμετρία του.

Τέλος στα δοκίμια co, στις ημι-στατικές και δυναμικές φορτίσεις, παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με εμφάνιση μικρο-ρωγματώσεων και σχηματισμό συνεχών μετώπων.

| <b>Co-sq</b> | <b>20mm/min</b> | <b>500mm/min</b> | <b>h=1m</b> | <b>h=2m</b> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| <b>Pmax</b>  | 71.2            | 68.5             | 80          | 58          |
| <b>Pmean</b> | 46.18           | 47.3             | 28          | 24.4        |
| <b>Ea</b>    | 2309            | 2417             | 316         | 771         |
| <b>SEA</b>   | 57.1            | 59.78            | 35.1        | 30.47       |
| <b>CFE</b>   | 0.65            | 0.69             | 0.35        | 0.42        |

**Πίνακας 6.5:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου co-sq

| <b>Co-cy</b> | <b>20mm/min</b> | <b>500mm/min</b> | <b>h=1m</b> | <b>h=2m</b> |
|--------------|-----------------|------------------|-------------|-------------|
| <b>Pmax</b>  | 39              | 37.75            | 42          | 40          |
| <b>Pmean</b> | 32.43           | 32.3             | 24          | 20          |
| <b>Ea</b>    | 1621            | 1702             | 513         | 920         |
| <b>SEA</b>   | 60.5            | 63.5             | 46.6        | 39.3        |
| <b>CFE</b>   | 0.83            | 0.85             | 0.57        | 0.5         |

**Πίνακας 6.6:** Συγκεντρωτικός πίνακας δοκιμίου co-cy

## 5.2 Τελικά Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια διερευνήθηκε πειραματικά ο τρόπος κατάρρευσης φορέων λεπτού πάχους διαφόρων υλικών υπό ημι – στατικές και κρουστικές φορτίσεις μελετώντας αντίστοιχα τα διαγράμματα μεταβολής του φορτίου σε σχέση με την βράχυνση του δοκιμίου και μεταβολής του φορτίου σε σχέση με τον χρόνο επαφής της πίπτουσας μάζας με το δοκίμιο. Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

- Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν τελείως διαφορετικό τρόπο κατάρρευσης σε σχέση με τα μεταλλικά και πολυμερή και ειδικά αστοχούν φαθυρά με εμφάνιση μικρόρωγμών. Επιπλέον τα σύνθετα υλικά κατέρρευσαν, σε μακροσκοπική κλίμακα, με παρόμοιο τρόπο και στους

δύο τρόπους καταπόνησης. Ειδικά κατέρρευσαν με τον αναμενόμενο τρόπο, δηλαδή προοδευτικά με κύριο χαρακτηριστικό τις μικροθραύσεις.

- Τα μεταλλικά υλικά καθώς επίσης και το υλικό από PVC απορροφούν ενέργεια με τον μηχανισμό δίπλωσης και κάμψης τόσο στις δυναμικές όσο και στις ημι-στατικές φορτίσεις.
- Το δοκίμιο από PVC παρουσίασε χαρακτηριστικά μικρή αντοχή σε κρούση.
- Οι συνοριακές συνθήκες, τυχόν ανομοιομορφία στην επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με το έμβολο συμπίεσης και την πίπτουσα μάζα στις ημι-στατικές και κρουστικές φορτίσεις αντίστοιχα, καθώς επίσης και τυχόν ατέλειες στα κελύφη επηρεάζουν δραστικά τον τρόπο κατάρρευσης και τα ποσά της απορροφούμενης ενέργειας των φορέων απορρόφησης ενέργειας.

Περαιτέρω γενίκευση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων δεν είναι ασφαλή λόγω μη επανάληψης των δοκιμών.



## **BIBΛIOΓPAΦIA**

[1] “Study on the collision performance of a composite energy-absorbing structure for subway vehicles” Yong Peng<sup>a, b</sup>, Wenyuan Deng<sup>a</sup>, Ping Xu<sup>a</sup>, Shuguang Yao<sup>a</sup>, *Thin-Walled Structures*, Volume 94, Pages 663-672, 2015.

[2] “Simulation of a shock absorber with vertical buckling tubes welded in the longitudinal direction”, Romualdas Dundulis, Sigitas Kilikevičius, Povilas Krasauskas, Gintautas Dundulis, Sigitas Rimkevičius *Engineering Failure Analysis*, Volume 47, Pages 102-110 Part A, 2015,

[3] “Energy absorption of structures and materials” Guoxing Lu and Tongxi Yu, First published 2003, Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC © 2003, Woodhead Publishing Limited

[4] “Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes”, Włodzimierz Abramowicz, Norman Jones, 1984

[5] “Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading”, S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad, *Thin-Walled Structures*, 48 (2010), 379-390

[6] “Transition from progressive to global bending of circular shells under axial impact”- Part 1: Experimental and numerical observation, D. Karagiozova, M. Alves, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 41, Issues 5-6, March 2004, 1565-1580)

[7] “Axial collapse of thin-walled fiberglass composite tubular components at elevated strain rates” A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, G. A. Demosthenous and M. B. Ioannidis, 1994

[8] “Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin-walled circular fiberglass composite tubes”, *Thin-Walled Structures*, A.G. Mamalis, D.E. Manolacos, G.A. Demosthenous, M.B. Ioannidis, Vol. 24, 1996, pp. 335-352.

[9] “The static and dynamic axial crumbling of thinwalled fiberglass composite square tubes” A.G. Mamalis, D.E. Manolacos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis, 1996

**[10]** “Energy Absorption in Polymer Composites for Automotive Crashworthiness” GEORGE C. JACOB\* JOHN F. FELLERS, SRDAN SIMUNOVIC, J. MICHAEL STARBUCK, 2001

**[11]** “Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά” Παντελής, εκδόσεις Παπασωτηρίου 1996

**[12]** “Plastic deformation mechanism in axially compressed metal tubes as impact energy absorbers” S, R Reid, 1996

**[13]** “Collapsible impact energy absorber: an overview” AAA Alghamdi, 2000

**[14]** “Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes”, S.S Hsu, Jones, 2010

**[15]** “Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam fille A.G. Hanssen\*, M. Langseth, O.S. Hopperstad, 1999