



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πλευρική Συμπίεση Ορθογωνικών Μεταλλικών Κελυφών:  
Πειραματική Διερεύνηση**

**ΤΖΟΥΚΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

**Επιβλέπων: Δρ.Μηχ. Πρωτεσίλαος Κ. Κωστάζος (ΕΔΙΠ)**

**ΑΘΗΝΑ 2024**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλο το προσωπικό του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ.Μηχ. Πρωτεσίλαο Κ. Κωστάζο, επιβλέποντα της διπλωματικής, για την καθοδήγηση του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις που αποκόμισα αλλά πάνω απ' όλα για την ειλικρίνεια του και την στήριξη που έλαβα κατά τη συνεργασία μας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους, όσους με στήριξαν και με βοήθησαν, ακαδημαϊκά και όχι μόνο, όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, ευχαριστώ όλα τα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας, τους συναδέλφους φοιτητές, τους καθηγητές και τους εργαζόμενους του ΕΜΠ που έδωσαν και θα συνεχίσουν να δίνουν αγώνες για την υπεράσπιση της δημόσιας εκπαίδευσης.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση - βελτίωση της συμπεριφοράς ορθογωνικών κελυφών σε συνθήκες πλευρικής φόρτισης. Η κλασική - τυπική συμπεριφορά των κελυφών αυτών διέπεται από την κατάρρευση με πλευρική έκταση των κατακόρυφων τοιχωμάτων, με χαμηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, χωρίς ουσιαστικά περαιτέρω σχηματισμό μηχανισμών κατάρρευσης, που θα αύξαναν την απορροφούμενη ενέργεια.

Επιδίωξη αποτελεί η πρόκληση περαιτέρω τοπικών αυξήσεων του φορτίου κατάρρευσης (πέραν της αρχικής που προκαλείται από την κατάρρευση των κατακόρυφων τοιχωμάτων του κελύφους) που θα διατηρήσουν ψηλά την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης, αυξάνοντας την ενέργεια απορρόφησης. Η επιδίωξη αυτή υλοποιείται με τη διαφοροποίηση της διατομής του κελύφους μέσω προσθηκών είτε οριζόντιων ελασμάτων είτε/και κυψελίδων αλουμινίου (honeycomb). Μία επιπλέον παρέμβαση συνιστά ο περιορισμός της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους μέσω άκαμπτων πλευρικών εμποδίων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Αντοχή σε κρούση .....	7
1.1 Εισαγωγή .....	7
1.2 Ατυχήματα.....	7
1.3 Αντοχή σε κρούση (Crashworthiness).....	9
1.4 Δείκτες crashworthiness.....	10
2. Απορροφητές ενέργειας.....	12
2.1 Βασικά χαρακτηριστικά απορροφητών ενέργειας .....	12
2.2 Υλικά κατασκευής λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας.....	12
2.3 Πλευρική Φόρτιση Δοκιμών και Πλευρική κατάρρευση .....	13
2.4 Αξονική καταπόνηση δοκιμών .....	14
2.5 Μορφές κατάρρευσης.....	14
2.5.1 Αξονική κατάρρευση .....	14
2.5.2 Αξονοσυμμετρική κατάρρευση .....	15
2.5.3 Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση.....	15
2.5.4 Κατάρρευσης τύπου Mushrooming .....	15
2.5.5 Πλευρική κατάρρευση.....	16
2.6 Μηχανισμός κατάρρευσης τετραγωνικών κελύφων υπό πλευρική φόρτιση .....	16
2.7 Σχεδιασμός απορροφητών ενέργειας.....	17
2.8 Απορρόφηση Ενέργειας από Λεπτότοιχα Τετραγωνικά Κελύφη από Κράματα Αλουμινίου υπό πλευρική φόρτιση .....	18
2.8.1 Ιδιότητες Αλουμινίου .....	18
2.8.2 Μηχανισμοί Απορρόφησης Ενέργειας.....	19
2.8.3 Πειραματικές Δοκιμές και Προσομοιώσεις.....	19
2.9 Honeycomb .....	20
3. Πειραματική Διαδικασία .....	21
3.1 Εισαγωγή .....	21
3.2 Μηχανική πρέσα - INSTRON 4482.....	21
3.3 Κατασκευή δοκιμών .....	23
3.4 Διαστάσεις δοκιμών .....	24
3.4.1 Δοκίμιο 1 .....	24
3.4.2 Δοκίμιο 2 .....	25
3.4.3 Δοκίμιο 3 .....	25
3.4.4 Δοκίμιο 4 .....	26
3.4.5 Δοκίμιο 5 .....	26

3.4.6 Δοκίμιο 6 .....	27
3.4.7 Δοκίμιο 7 .....	27
3.4.8 Δοκίμιο 8 .....	28
3.4.9 Δοκίμιο 1a.....	28
3.4.10 Δοκίμιο 3a .....	28
3.4.11 Δοκίμιο 5a .....	29
3.4.12 Δοκίμιο 8a .....	29
3.4.13 Δοκίμιο 1b .....	29
3.4.14 Δοκίμιο 3b .....	30
3.4.15 Δοκίμιο 5b .....	30
3.4.16 Δοκίμιο 8b .....	31
3.4.17 Honeycomb .....	31
3.4.18 Δοκίμιο 1c.....	31
3.4.19 Δοκίμιο 3c.....	32
3.4.20 Δοκίμιο 5c.....	32
3.4.21 Δοκίμιο 8c.....	32
3.4.22 Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων δοκιμών .....	33
3.5 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών .....	34
3.5.1 Δοκίμιο 1 .....	34
3.5.2 Δοκίμιο 2 .....	36
3.5.3 Δοκίμιο 3 .....	38
3.5.4 Δοκίμιο 4 .....	40
3.5.5 Δοκίμιο 5 .....	42
3.5.6 Δοκίμιο 6 .....	44
3.5.7 Δοκίμιο 7 .....	46
3.5.8 Δοκίμιο 8 .....	48
3.5.9 Δοκίμιο 1a.....	50
3.5.10 Δοκίμιο 3a .....	52
3.5.11 Δοκίμιο 5a .....	54
3.5.12 Δοκίμιο 8a .....	56
3.5.13 Δοκίμιο 1b .....	58
3.5.14 Δοκίμιο 3b .....	60
3.5.15 Δοκίμιο 5b .....	62
3.5.16 Δοκίμιο 8b .....	64
3.5.17 Δοκίμιο 1c.....	66
3.5.18 Δοκίμιο 3c.....	68

3.5.19 Δοκίμιο 5c.....	70
3.5.20 Δοκίμιο 8c.....	72
4. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων .....	74
4.1 Σύγκριση δοκιμών ίδιων βασικών διαστάσεων (αρχικής γεωμετρίας) .....	74
4.1.1 Δοκίμια 37.80 x 37.80 (1,2,1a,1b,1c) .....	74
4.1.2 Δοκίμια 50.08 x 30.21 (3,4,3a,3b,3c) .....	76
4.1.3 Δοκίμια 60.09 x 30.12 (5,6,7,5a,5b,5c) .....	78
4.1.4 Δοκίμια 39.52 x 30.35 (8,8a,8b,8c) .....	80
4.2 Σύγκριση δοκιμών ανά δομική διάταξη.....	82
4.2.1 Δοκίμια τυπικής διάταξης (1,3,5,8).....	82
4.2.2 Δοκίμια με συγκόλληση (2,4,6,7) .....	84
4.2.3 Δοκίμια με συγκόλληση και προπαραμόρφωση (1a,3a,5a,8a) .....	86
4.2.4 Δοκίμια με Honeycomb (1b,3b,5b,8b) .....	88
4.2.5 Δοκίμια με περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους μέσω άκαμπτων πλευρικών εμποδίων (1c,3c,5c,8c) .....	90
5. Συμπεράσματα .....	92
5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών .....	92
5.2 Συμπεράσματα .....	94
5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	97
6. Βιβλιογραφία.....	99

# 1. Αντοχή σε κρούση

## 1.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει δημιουργήσει την ανάγκη για περισσότερα μεταφορικά μέσα, είτε χερσαία, είτε θαλάσσια, είτε εναέρια. Αυτά τα οχήματα πρέπει να είναι ελαφρύτερα και να μπορούν να διανύουν μεγαλύτερες αποστάσεις με υψηλές ταχύτητες. Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση σύγκρουσης, οι επιπτώσεις θα είναι σοβαρές τόσο για τους ανθρώπους όσο και για το περιβάλλον.

Το ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο για την ασφαλή σχεδίαση συστημάτων που μειώνουν τους ανθρώπινους τραυματισμούς και τους θανάτους, καθώς και τις οικονομικές επιπτώσεις αυτών των ατυχημάτων, είναι διαρκώς αυξανόμενο. Οι συγκρούσεις οχημάτων είναι ένα συχνό και δυστυχώς αναπόφευκτο φαινόμενο, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Με βάση τα παραπάνω, είναι προφανές ότι τα μελλοντικά οχήματα πρέπει να σχεδιάζονται με γνώμονα την προστασία των επιβατών και των μεταφερόμενων εμπορευμάτων κατά τη διάρκεια σύγκρουσης. Σήμερα, υπάρχει τάση για την παραγωγή ελαφρών κατασκευών, γεγονός που θέτει υψηλές απαιτήσεις στη σχεδίαση. [1]

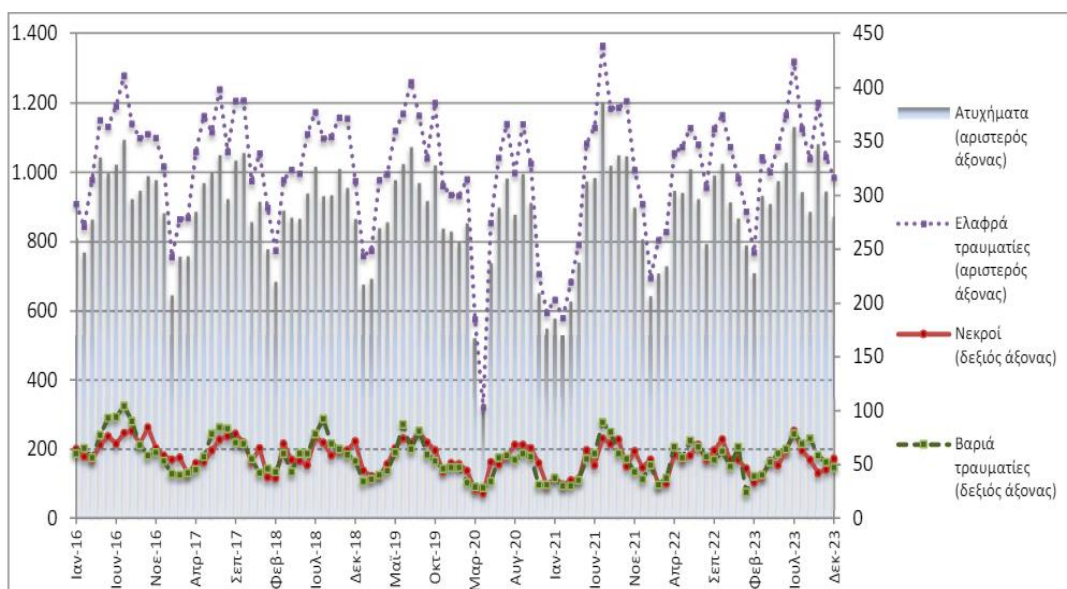
## 1.2 Ατυχήματα

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organization-WHO) σε παγκόσμιο επίπεδο, τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες θανάτου, ειδικά για παιδιά και νεαρούς ενήλικες ηλικίας 5-29 ετών. Κάθε χρόνο, περίπου 1,19 εκατομμύρια άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους σε τροχαία ατυχήματα, ενώ 20-50 εκατομμύρια άνθρωποι τραυματίζονται, με πολλούς από αυτούς να υφίστανται μόνιμη αναπηρία. Οι οικονομικές απώλειες από τα τροχαία ατυχήματα κοστίζουν στις περισσότερες χώρες περίπου το 3% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος τους.

Οι χώρες με χαμηλό και μεσαίο εισόδημα καταγράφουν το 92% των θανάτων από τροχαία ατυχήματα, παρόλο που διαθέτουν μόνο το 60% των οχημάτων παγκοσμίως. Σε αυτές τις χώρες, οι θάνατοι από τροχαία είναι τριπλάσιοι συγκριτικά με τις χώρες υψηλού εισοδήματος. Οι πιο ευάλωτοι χρήστες των δρόμων, όπως οι πεζοί, οι ποδηλάτες και οι μοτοσικλετιστές, αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 50% των θανάτων από τροχαία. [2]

Στην Ελλάδα, οι θάνατοι από τροχαία ατυχήματα παρουσιάζουν μείωση τα τελευταία χρόνια, αλλά παραμένουν ένα σημαντικό πρόβλημα. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat και της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, το 2022 καταγράφηκαν 71 θάνατοι από

τροχαία ατυχήματα ανά εκατομμύριο κατοίκους, τοποθετώντας τη χώρα στην τέταρτη χειρότερη θέση στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο ευρωπαϊκός μέσος όρος για το ίδιο έτος ήταν 46 θάνατοι ανά εκατομμύριο κατοίκους. Αυτή η σημαντική διαφορά υπογραμμίζει τα προβλήματα οδικής ασφάλειας που αντιμετωπίζει η Ελλάδα σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. [3]



**Εικόνα 1: Οδικά τροχαία ατυχήματα και παθόντες, Ιανουάριος 2016 - Δεκέμβριος 2023**

	2021	2022	2023*
	Ιανουάριος - Δεκέμβριος	Ιανουάριος - Δεκέμβριος	Ιανουάριος - Δεκέμβριος
<b>Ατυχήματα</b>	10.454	10.487	11.201
<i>Ετήσια Μεταβολή (%) :</i>		0,3	6,8
<b>Νεκροί</b>	624	654	621
<i>Ετήσια Μεταβολή (%) :</i>		4,8	-5,0
<b>Βαριά τραυματίες</b>	610	664	657
<i>Ετήσια Μεταβολή (%) :</i>		8,9	-1,1
<b>Ελαφρά τραυματίες</b>	11.746	11.961	12.644
<i>Ετήσια Μεταβολή (%) :</i>		1,8	5,7

**Εικόνα 2: Οδικά τροχαία ατυχήματα και παθόντες για τα έτη 2021, 2022, 2023**



### 1.3 Αντοχή σε κρούση (Crashworthiness)

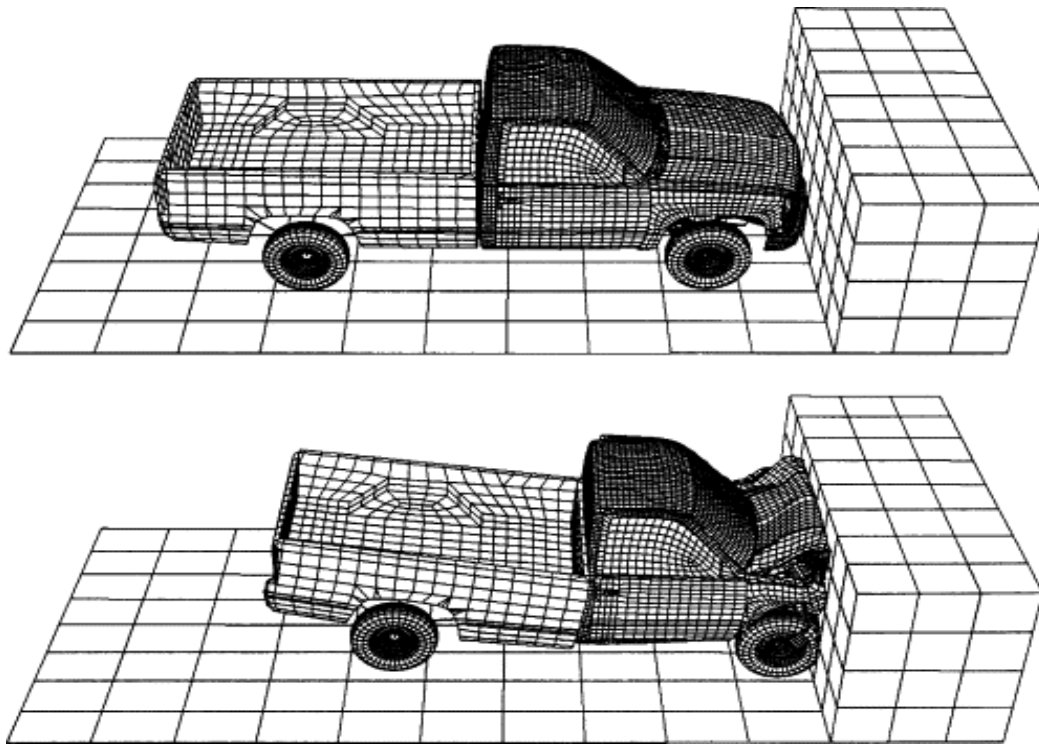
Η crashworthiness, ή αντοχή σε κρούση, αναφέρεται στην ικανότητα μιας δομής, ιδιαίτερα των οχημάτων, να προστατεύει τους επιβάτες κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Η αξιολόγηση της crashworthiness περιλαμβάνει τη μελέτη της απόδοσης των υλικών και των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών που επιτρέπουν στο όχημα να απορροφά και να διαχέει την ενέργεια από μια σύγκρουση, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο σοβαρών τραυματισμών ή θανάτου για τους επιβάτες.

Κατά την αξιολόγηση της ασφάλειας των οχημάτων, η αντοχή σε κρούση (crashworthiness) είναι ένα κρίσιμο μέγεθος. Για κάθε τύπο σύγκρουσης, τα κριτήρια που καθορίζουν την αντοχή της κατασκευής ποικίλουν ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες και απαιτήσεις.

Οι βασικές αρχές του crashworthiness περιλαμβάνουν την απορρόφηση ενέργειας, τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας, τα συστήματα ασφαλείας και την κατανομή των δυνάμεων. Το κύριο μέλημα στη σχεδίαση ενός οχήματος είναι η ικανότητά του να απορροφά την ενέργεια της σύγκρουσης. Η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας εξασφαλίζει ότι η καμπίνα των επιβατών παραμένει άθικτη, προστατεύοντάς τους από την παραμόρφωση ή τη διείσδυση αντικειμένων. Τα συστήματα ασφαλείας, όπως οι ζώνες ασφαλείας και οι αερόσακοι, περιορίζουν την κίνηση των επιβατών και αποτρέπουν την πρόσκρουση τους στο εσωτερικό του οχήματος. Τέλος, η κατανομή των δυνάμεων της σύγκρουσης σε όλο το όχημα μειώνει την ένταση της δύναμης που δέχονται οι επιβάτες, συμβάλλοντας στη μείωση των τραυματισμών.

Οι τεχνολογίες και οι σχεδιαστικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της αντοχής σε κρούση περιλαμβάνουν την εφαρμογή υλικών υψηλής αντοχής, τη χρήση προηγμένων τεχνικών προσομοίωσης και την ενσωμάτωση ζωνών παραμόρφωσης. Τα υλικά υψηλής αντοχής, βελτιώνουν τη δομική ακεραιότητα των οχημάτων. Παράλληλα, οι προηγμένες τεχνικές προσομοίωσης (πχ. LS-DYNA) επιτρέπουν στους μηχανικούς να δοκιμάζουν και να βελτιώνουν τα σχέδια χωρίς φυσικές δοκιμές, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Οι ζώνες παραμόρφωσης είναι περιοχές του οχήματος που σχεδιάζονται για να παραμορφώνονται ελεγχόμενα κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης, απορροφώντας την ενέργεια και προστατεύοντας την καμπίνα των επιβατών.

Η αντοχή σε σύγκρουση καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα μοτίβα κατάρρευσης της δομής, την επιβράδυνση του οχήματος κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, καθώς και την πιθανότητα τραυματισμού των επιβατών κ.α.. Η αντοχή σε κρούση είναι ένα πολυσύνθετο και κρίσιμο πεδίο στη μηχανική των οχημάτων, που στοχεύει στη μείωση των τραυματισμών και των θανάτων σε τροχαία ατυχήματα. Η συνεχής έρευνα και οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα αυτό συμβάλλουν στη δημιουργία ασφαλέστερων οχημάτων και στην προστασία των ανθρώπινων ζωών. [4]



Εικόνα 3: Ανάλυση crashworthiness φορτηγού. [5]

#### 1.4 Δείκτες crashworthiness

Οι δείκτες crashworthiness είναι κρίσιμοι για την αξιολόγηση της ικανότητας των υλικών να απορροφούν ενέργεια μέσω παραμόρφωσης ή θραύσης κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Η αξιολόγηση δεν πρέπει να γίνεται με βάση μόνο έναν από τους δείκτες, αλλά από την συνολική αξιολόγηση όλων των δεικτών crashworthiness. Αυτοί οι δείκτες προσδιορίζονται με βάση την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης που προκύπτει από πειραματικές δοκιμές στα υλικά. Οι βασικοί δείκτες crashworthiness περιλαμβάνουν:

- **Ενέργεια απορρόφησης:** Εκφράζει τη συνολική ενέργεια που απορροφάται από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η τιμή του υπολογίζεται από το εμβαδόν που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης του υλικού.

$$E_{abs} = \int F(x)dx$$

- **Μέσο φορτίο:** Είναι ο λόγος της ενέργειας απορρόφησης προς τη μετατόπιση που υφίσταται το δοκίμιο κατά τη διάρκεια εφαρμογής του φορτίου. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου σημαίνει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση.

$$P_m = \frac{E_{abs}}{S_{max}}$$

- **Μέγιστο φορτίο:** Αναφέρεται στην υψηλότερη τιμή φορτίου που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης:** Ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το υλικό κατά την κατάρρευσή του προς το τμήμα της καταρρέουσας μάζας του υλικού που έχει αστοχήσει.

$$SEA = \frac{E_{abs}}{m_c}$$

- **Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (Crush Force Efficiency, CFE):** Προκύπτει από τον λόγο του μέσου φορτίου προς το μέγιστο φορτίο. Ο στόχος είναι ο δείκτης αυτός να τείνει στη μονάδα, καθώς μια πολύ υψηλή τιμή μεγίστου φορτίου σε σχέση με το μέσο μπορεί να είναι μοιραία για τους επιβάτες σε πραγματικές συνθήκες πρόσκρουσης.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}}$$

Αυτοί οι δείκτες είναι θεμελιώδεις για την ανάλυση και τον σχεδιασμό οχημάτων και άλλων κατασκευών, διασφαλίζοντας την ασφαλέστερη και αποτελεσματικότερη απορρόφηση ενέργειας σε περιπτώσεις σύγκρουσης. [6]

## **2. Απορροφητές ενέργειας**

### **2.1 Βασικά χαρακτηριστικά απορροφητών ενέργειας**

Ένας απορροφητής ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε άλλη μορφή ενέργειας, είτε πλήρως είτε μερικώς. Αυτή η μετατροπή μπορεί να είναι αντιστρεπτή, όπως η ενέργεια πίεσης σε συμπιεστά ρευστά και η ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης σε στερεά, ή μη αντιστρεπτή, όπως η ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης. Κατά το σχεδιασμό ενός απορροφητή ενέργειας, ο στόχος είναι να απορροφάται το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας της σύγκρουσης με μη αντιστρεπτό τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι τραυματισμοί και οι ζημιές.

Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος και η μέθοδος εφαρμογής των φορτίων, οι ρυθμοί μετάδοσης, ο τρόπος παραμόρφωσης και οι ιδιότητες του υλικού. Οι συνιστώσες των απορροφητών ενέργειας περιλαμβάνουν διάφορα αντικείμενα, όπως χαλύβδινα τύμπανα, κυκλικούς σωλήνες, πυραμίδες και πολυστρωματικές πλάκες.

Κάθε σύστημα απορροφητών ενέργειας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και ιδιότητες, τα οποία είναι σημαντικό να κατανοηθούν για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των παλμικών φορτίων στις μεταλλικές δομές. Λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμών κατάρρευσης, ορισμένα χαρακτηριστικά απόδοσης μπορούν να προσδιοριστούν μόνο μέσω πειραματικών διαδικασιών, με τις σχέσεις που προκύπτουν να είναι εμπειρικές και να περιορίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η μελέτη της παραμόρφωσης των απορροφητών ενέργειας εξετάζει τις γεωμετρικές μεταβολές και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων τρόπων παραμόρφωσης, όπως ο αξονοσυμμετρικός τρόπος κατάρρευσης (τύπου ακορντεόν) και ο μη αξονοσυμμετρικός τρόπος (τύπου διαμαντιού) για αξονικά φορτισμένους σωλήνες, καθώς και την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης.

### **2.2 Υλικά κατασκευής λεπτότοιχων απορροφητών ενέργειας**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απορρόφηση ενέργειας των κελυφών περιλαμβάνουν το υλικό του απορροφητή ενέργειας, τη γεωμετρία της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης. Επομένως, η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι ζωτικής σημασίας για τον σχεδιασμό ενός αποδοτικού απορροφητή ενέργειας. Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι ο μαλακός χάλυβας, τα κράματα αλουμινίου και τα σύνθετα υλικά.

Η ενεργειακή διάχυση στα μεταλλικά υλικά διαφέρει από εκείνη στα σύνθετα υλικά. Στα μεταλλικά υλικά, ο μηχανισμός πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται σημαντικά από τον ρυθμό παραμόρφωσης. Αυξημένος ρυθμός παραμόρφωσης συνήθως οδηγεί σε υψηλότερο όριο διαρροής, το οποίο είναι επιθυμητό καθώς ενισχύει την ενεργειακή απορρόφηση υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Η ολκιμότητα του υλικού είναι επίσης σημαντική, διότι επιτρέπει στην κατασκευή να απορροφά μεγάλο πλαστικό έργο. Τα μεταλλικά υλικά έχουν συνήθως υψηλή ολκιμότητα και έχουν σχετικά υψηλό όριο διαρροής, ενώ τα σύνθετα υλικά είναι κυρίως ψαθυρά λόγω του τρόπου που αστοχούν οι ίνες τους.

Τα σύνθετα υλικά έχουν προκαλέσει ενδιαφέρον ως απορροφητές ενέργειας λόγω της δυνατότητάς τους να απορροφούν ενέργεια ελεγχόμενα, του χαμηλού βάρους τους και των καλών μηχανικών ιδιοτήτων τους. Ωστόσο, η ανισότροπη φύση τους απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και η ανακύκλωσή τους δημιουργεί περιβαλλοντικές προκλήσεις.

Σε σύγκριση με τα μεταλλικά υλικά, τα σύνθετα υλικά είναι πιο ακριβά, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές, όπως οι αεροδιαστημικές κατασκευές και τα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών δομών που συνδυάζουν και τους δύο τύπους υλικών, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απορρόφηση ενέργειας. Για παράδειγμα, οι μεταλλικοί σωλήνες με εσωτερικό από σύνθετο υλικό επιτυγχάνουν την επιθυμητή αναλογία αντοχής προς μάζα, την ολκιμότητα των μεταλλικών υλικών και τη σταθερή μορφή κατάρρευσης. [7]

### **2.3 Πλευρική Φόρτιση Δοκιμών και Πλευρική κατάρρευση**

Η πλευρική φόρτιση αναφέρεται στην εφαρμογή δυνάμεων που δρουν οριζόντια ή υπό γωνία σε σχέση με το κύριο κατακόρυφο άξονα μιας δομής. Στην περίπτωση των λεπτότοιχων ορθογωνικών κατασκευών, όπως αυτές που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, η πλευρική φόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε πλευρική κατάρρευση, έναν τρόπο αστοχίας όπου η δομή χάνει την ικανότητά της να αντιστέκεται στις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και υφίσταται σημαντικές παραμορφώσεις ή καταρρεύσεις.

Η πλευρική κατάρρευση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωμετρία της δομής, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, οι συνθήκες στήριξης και η μορφή της εφαρμοζόμενης πλευρικής δύναμης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι πλευρικές δυνάμεις προκαλούν αρχικά ελαστικές παραμορφώσεις στη δομή. Όταν η πλευρική δύναμη υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, η δομή εισέρχεται στη φάση της πλαστικής παραμόρφωσης, οδηγώντας τελικά σε πλήρη αστοχία ή κατάρρευση. Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αξιολόγηση της "crashworthiness" των κατασκευών, δηλαδή της ικανότητάς τους να απορροφούν ενέργεια και να προστατεύουν τους επιβαίνοντες κατά τη διάρκεια συγκρούσεων.

## 2.4 Αξονική καταπόνηση δοκιμίων

Κατά την αξονική καταπόνηση των δοκιμίων, η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο κατά τη διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του υπολογίζεται μέσω της μέτρησης του εμβαδού της περιοχής κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (συμπίεσης δοκιμίου). Κατά την αξονική καταπόνηση, το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνει με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι να φτάσει σε μια μέγιστη τιμή  $P_{max}$ , η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού και τη γεωμετρία του κελύφους. Όταν επιτυγχάνεται αυτή η μέγιστη τιμή, το φορτίο παρουσιάζει απότομη πτώση. Ο τρόπος κατάρρευσης της κατασκευής και οι συνθήκες φόρτισης καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης.

Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς λεπτότοιχων δομών, όπως σωλήνες, πλάκες και άλλες δομές από μεταλλικά ή σύνθετα υλικά, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή και απορρόφηση ενέργειας.

Η πλαστική παραμόρφωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απορρόφηση ενέργειας, καθώς επιτρέπει στο υλικό να διασπείρει την ενέργεια της σύγκρουσης μέσω μόνιμων αλλαγών στη δομή του. Στα μεταλλικά υλικά, η αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης οδηγεί σε αύξηση του ορίου διαρροής, βελτιώνοντας έτσι την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

## 2.5 Μορφές κατάρρευσης

Η κατάρρευση των κελυφών απορροφητών ενέργειας είναι μια κρίσιμη πτυχή στη μελέτη της crashworthiness, καθώς οι μορφές κατάρρευσης καθορίζουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Αυτές οι καταστάσεις σχετίζονται με έναν ή περισσότερους μηχανισμούς παραμόρφωσης, οι οποίοι είναι κρίσιμοι για τη διαδικασία διάχυσης της ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες μορφές κατάρρευσης που παρατηρούνται στα κελύφη απορροφητών ενέργειας, κάθε μία με τα δικά της χαρακτηριστικά και επιπτώσεις στην ενεργειακή απόδοση. Παρακάτω, αναλύονται οι διάφορες μορφές κατάρρευσης, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και τη γεωμετρία των απορροφητών ενέργειας. [8][9]

### 2.5.1 Αξονική κατάρρευση

Η αξονική κατάρρευση είναι μια μορφή παραμόρφωσης που παρατηρείται σε λεπτότοιχα κελύφη και σωλήνες όταν υποβάλλονται σε αξονική θλίψη. Η αξονική κατάρρευση συνήθως χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση του υλικού κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου. Η παραμόρφωση αυτή επιτρέπει την

απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η γεωμετρία της δομής (όπως το πάχος των τοιχωμάτων και η διατομή) και οι ιδιότητες του υλικού (όπως η ολκιμότητα και η αντοχή) επηρεάζουν σημαντικά τη μορφή και την αποτελεσματικότητα της αξονικής κατάρρευσης.

### **2.5.2 Αξονοσυμμετρική κατάρρευση**

Η αξονοσυμμετρική κατάρρευση, γνωστή και ως κατάρρευση τύπου ακορντεόν, είναι μια μορφή παραμόρφωσης στην οποία το κέλυφος διπλώνεται σε τακτά διαστήματα κατά μήκος του άξονά του. Αυτή η μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από την τακτική και συμμετρική πτύχωση του υλικού, η οποία επιτρέπει την ομοιόμορφη απορρόφηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Η αξονοσυμμετρική κατάρρευση είναι επιθυμητή για τις εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας, καθώς προσφέρει υψηλή σταθερότητα και επαναλαμβανόμενη απόδοση. Το έργο που απαιτείται για τη δημιουργία μιας τέτοιας αναδίπλωσης μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη: το πρώτο μέρος αφορά την κάμψη του κελύφους γύρω από τους πλαστικούς αρμούς, ενώ το δεύτερο σχετίζεται με την έκταση του υλικού μεταξύ των αρμών (εκτατός τρόπος κατάρρευσης). Η αξονοσυμμετρική μορφή κατάρρευσης συνήθως εμφανίζεται σε κελύφη κυκλικής γεωμετρίας ενώ ο εκτατός τρόπος κατάρρευσης παρατηρείται επίσης σε κελύφη τετραγωνικής γεωμετρίας μεγάλου πάχους. [10]

### **2.5.3 Μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση**

Η μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση, γνωστή και ως κατάρρευση τύπου διαμαντιού, συμβαίνει όταν το κέλυφος παραμορφώνεται με ανώμαλο και μη συμμετρικό τρόπο, σχηματίζοντας διαγώνιες πτυχώσεις που μοιάζουν με το σχήμα διαμαντιού. Αυτή η μορφή κατάρρευσης είναι λιγότερο σταθερή από την αξονοσυμμετρική και μπορεί να οδηγήσει σε ασυνεχή απορρόφηση ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις, η μη αξονοσυμμετρική κατάρρευση μπορεί να είναι επιθυμητή λόγω της ικανότητάς της να απορροφά υψηλές ποσότητες ενέργειας σε συγκεκριμένα σενάρια φόρτισης. Αυτή η μορφή κατάρρευσης συνήθως παρατηρείται σε λεπτότοιχα κελύφη τετραγωνικής διατομής, μπορεί όμως να παρατηρηθεί και σε κελύφη κυκλικής διατομής. [10]

### **2.5.4 Κατάρρευσης τύπου Mushrooming**

Η κατάρρευση τύπου "mushrooming" είναι μια μορφή παραμόρφωσης που παρατηρείται σε λεπτότοιχα κελύφη και σωλήνες υπό αξονική θλίψη. Ο όρος "mushrooming" αναφέρεται στο σχήμα μανιταριού που αποκτά το κέλυφος καθώς παραμορφώνεται. Αυτή η μορφή κατάρρευσης χαρακτηρίζεται από τη διαστολή της

διατομής του κελύφους κοντά στα άκρα του, ενώ το υπόλοιπο του κελύφους παραμένει σχετικά άθικτο. Αυτή η μορφή κατάρρευσης μπορεί να οδηγήσει σε υψηλή απορρόφηση ενέργειας λόγω της σημαντικής παραμόρφωσης που υφίσταται το υλικό στα άκρα. Η κατάρρευση τύπου mushrooming είναι συνήθως σταθερή και επαναλαμβανόμενη, γεγονός που την καθιστά επιθυμητή σε πολλές εφαρμογές crashworthiness. [11]

### 2.5.5 Πλευρική κατάρρευση

Η πλευρική κατάρρευση είναι ένα φαινόμενο αστοχίας που παρατηρείται όταν μια δομή υπόκειται σε δυνάμεις οι οποίες δρουν οριζόντια ή υπό γωνία ως προς τον κύριο άξονα της. Αυτές οι πλευρικές δυνάμεις μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές παραμορφώσεις και τελικά να οδηγήσουν στην κατάρρευση της δομής. Η κατανόηση και η ανάλυση της πλευρικής κατάρρευσης είναι ουσιώδεις για τη σχεδίαση ασφαλών και ανθεκτικών κατασκευών. [12]

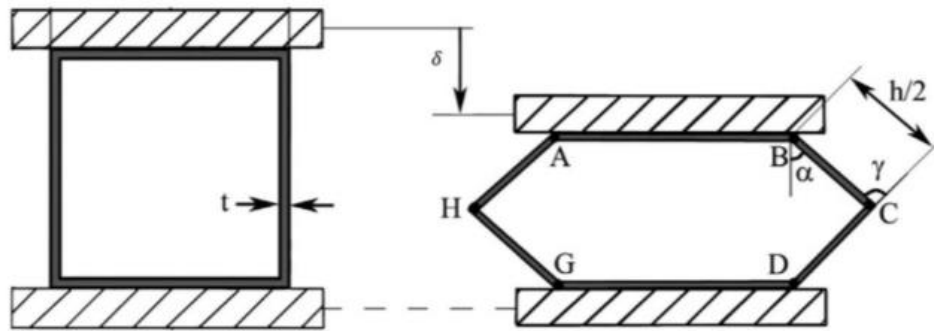
Ο μηχανισμός της πλευρικής κατάρρευσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

1. **Αρχική Ελαστική Φάση:** Όταν η πλευρική δύναμη εφαρμόζεται, η δομή αρχικά αντιστέκεται μέσω ελαστικών παραμορφώσεων. Σε αυτή τη φάση, οι παραμορφώσεις είναι αναστρέψιμες.
2. **Πλαστική Φάση:** Με την αύξηση της πλευρικής δύναμης, η δομή υπερβαίνει το όριο της ελαστικής της ικανότητας και αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Αυτές οι παραμορφώσεις δεν είναι αναστρέψιμες και σηματοδοτούν την έναρξη της ζημιάς στη δομή.
3. **Κρίσιμη Κατάρρευση:** Όταν η πλευρική δύναμη υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, η δομή υφίσταται σοβαρές παραμορφώσεις και χάνει την ικανότητά της να αντέχει περαιτέρω φόρτιση, οδηγώντας σε πλήρη αστοχία ή κατάρρευση.

### 2.6 Μηχανισμός κατάρρευσης τετραγωνικών κελύφων υπό πλευρική φόρτιση

Ο μηχανισμός παραμόρφωσης ενός τετραγωνικού δοκιμίου υπό πλευρική φόρτιση περιλαμβάνει τη δημιουργία τριών ζευγών πλαστικών αρθρώσεων, δύο ζευγάρια σχηματίζονται στα σημεία σύνδεσης των κάθετων και οριζόντιων πλευρών, ενώ το τρίτο ζευγάρι σχηματίζεται στο μέσο ύψος των κάθετων πλευρών του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα. [14]





**Εικόνα 6: Θεωρητικό μοντέλο πλαστικής παραμόρφωσης τετραγωνικού δοκιμίου υπό πλευρική φόρτιση**

Το φορτίο κατάρρευσης ενός τετράγωνου σωλήνα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$F = \frac{2\sigma_o t^2 L \cos^{-1} \left( \frac{b - \delta}{b} \right)}{\delta}$$

Ο τρόπος κατάρρευσης των τετραγωνικών κελυφών υπό πλευρική φόρτιση περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια: αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό. Στο αρχικό στάδιο, οι άνω και κάτω επιφάνειες του κελύφους δέχονται ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο, προκαλώντας κάμψη και απώλεια επαφής των κεντρικών τμημάτων με την πλάκα φόρτισης. Καθώς η συμπίεση συνεχίζεται, οι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στις συνδέσεις των οριζόντιων και κατακόρυφων πλευρών. Στο ενδιάμεσο στάδιο, η παραμόρφωση εντοπίζεται κυρίως στην περιοχή των αρμών, προκαλώντας μείωση της επιφάνειας επαφής και σταδιακή μείωση του φορτίου. Τέλος, στο τελικό στάδιο, η παραμόρφωση προχωρά έως ότου οι άνω και κάτω πλευρές έρθουν σε επαφή, ολοκληρώνοντας τη διαδικασία κατάρρευσης. Οι γεωμετρικές παράμετροι, όπως το πάχος των πλευρών, επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας και τον μηχανισμό κατάρρευσης του κελύφους. [15]

## 2.7 Σχεδιασμός απορροφητών ενέργειας

Η ανάλυση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής υπό καταστροφική καταπόνηση παρέχει πληροφορίες για τον μηχανισμό μέσω του οποίου ένα μέρος της ενέργειας που εφαρμόζεται απορροφάται από την κατασκευή, ενώ το υπόλοιπο μεταφέρεται στον επιβάτη. Είναι σαφές ότι για να έχει η κατασκευή την απαιτούμενη συμπεριφορά, η μελέτη υπό καταστροφική καταπόνηση πρέπει να πραγματοποιείται στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού.

Η τεχνική ανάλυση για τον βέλτιστο σχεδιασμό μιας τέτοιας κατασκευής αρχικά απαιτεί τη συλλογή δεδομένων για το υλικό μέσω δοκιμών ή ανάλυσης. Αν τα δεδομένα για κάποιο συγκεκριμένο στοιχείο δεν είναι διαθέσιμα, το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται και υποβάλλεται σε δοκιμές για να καθοριστεί η συμπεριφορά του. Μετά τον προσδιορισμό των απαραίτητων μη γραμμικών ιδιοτήτων των συνιστωσών, εκτελείται στατική ανάλυση της κατασκευής για να εκτιμηθεί η συνολική της ικανότητα να φέρει φορτίο. Αυτό βασίζεται στις εξής προϋποθέσεις:

- Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα.
- Η διεύθυνση και η φορά των φορτίων στην καταρρέουσα κατασκευή κατά τη δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν.

Στη συνέχεια αξιολογείται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κάθε στοιχείου. Μετά τον προσδιορισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων, υπολογίζονται οι διαστάσεις του στοιχείου που θα αντέξει τα φορτία σε θλίψη ή κάμψη. Αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα και η ταχύτητα κρούσης χαμηλή, χρησιμοποιείται η καμπύλη φορτίου για τον υπολογισμό της ενέργεια απορρόφησης.

Δεδομένου ότι ο βασικός τομέας στον οποίο χρησιμοποιούνται οι απορροφητές ενέργειας είναι το crashworthiness και η ασφάλεια των επιβατών όταν τα οχήματα έρχονται σε σύγκρουση, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η ασφάλεια των επιβατών και η συνολική κατασκευή του οχήματος. [13]

## **2.8 Απορρόφηση Ενέργειας από Λεπτότοιχα Τετραγωνικά Κελύφη από Κράματα Αλουμινίου υπό πλευρική φόρτιση**

Η απορρόφηση ενέργειας από λεπτότοιχα κελύφη είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό ασφαλών και αποτελεσματικών δομών σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική. Τα λεπτότοιχα τετραγωνικά κελύφη από κράματα αλουμινίου υπό πλευρική φόρτιση αποτελούν αντικείμενο εκτενούς έρευνας λόγω της ικανότητάς τους να απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο τραυματισμού των επιβατών και την καταστροφή των δομών. [13]

### **2.8.1 Ιδιότητες Αλουμινίου**

Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι υλικά ευρέως χρησιμοποιούμενα σε δομές που απαιτούν απορρόφηση ενέργειας λόγω των ιδιοτήτων τους. Τα κράματα αλουμινίου προσφέρουν υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει την κατασκευή ελαφρών αλλά ανθεκτικών δομών που μπορούν να αντέξουν σημαντικά φορτία χωρίς να αυξάνεται το συνολικό βάρος της κατασκευής.

Το αλουμίνιο έχει υψηλή ολκιμότητα, επιτρέποντας στο υλικό να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να σπάει. Αυτή η ιδιότητα είναι κρίσιμη για την απορρόφηση ενέργειας μέσω παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης.

Επιπλέον το αλουμίνιο έχει καλή αντοχή στην κόπωση, δηλαδή μπορεί να αντέξει επαναλαμβανόμενα φορτία χωρίς να υποστεί αστοχία. Αυτό είναι σημαντικό για δομές που υφίστανται πολλαπλές καταπονήσεις, όπως σε οχήματα. Το αλουμίνιο έχει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε περιβάλλοντα όπου η έκθεση σε υγρασία και άλλους διαβρωτικούς παράγοντες είναι συχνή. Αυτό διασφαλίζει την μακροχρόνια απόδοση και αντοχή της κατασκευής. Το αλουμίνιο είναι πλήρως ανακυκλώσιμο, διατηρώντας τις ιδιότητές του μετά την ανακύκλωση. Αυτό καθιστά το υλικό βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον, συμβάλλοντας στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα των κατασκευών.

### **2.8.2 Μηχανισμοί Απορρόφησης Ενέργειας**

Όταν ασκείται πλευρική φόρτιση σε λεπτότοιχα τετραγωνικά κελύφη από κράματα αλουμινίου, παρατηρούνται διάφοροι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας. Στα αρχικά στάδια της καταπόνησης, το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά. Η ενέργεια απορροφάται προσωρινά και το κέλυφος έχει την ικανότητα επαναφοράς στην αρχική του μορφή, εφόσον αφαιρεθεί το φορτίο. Με την αύξηση του φορτίου, το κέλυφος εισέρχεται στη φάση της πλαστικής παραμόρφωσης. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, το υλικό υφίσταται μόνιμες αλλαγές στη δομή του, απορροφώντας έτσι σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Η πλαστική παραμόρφωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την απορρόφηση ενέργειας σε κατασκευές *crashworthiness*.

### **2.8.3 Πειραματικές Δοκιμές και Προσομοιώσεις**

Η μελέτη της απορρόφησης ενέργειας από λεπτότοιχα τετραγωνικά κελύφη από κράματα αλουμινίου απαιτεί τη χρήση πειραματικών δοκιμών και προσομοιώσεων με υπολογιστικά μοντέλα. Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από αυτές τις δοκιμές παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την απορρόφηση ενέργειας και την αντοχή των κελυφών. Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις, όπως η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA), επιτρέπουν την ανάλυση της συμπεριφοράς των κελυφών υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και γεωμετρίας. Αυτές οι προσομοιώσεις βοηθούν τους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό των κελυφών για μέγιστη απορρόφηση ενέργειας και ασφάλεια.

## 2.9 Honeycomb

Οι δομές honeycomb είναι ένας τύπος ελαφρού υλικού με μοναδική εξαγωνική γεωμετρία κυψελών, γνωστές για την υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος και τις εξαιρετικές ικανότητες απορρόφησης ενέργειας. Αυτές οι δομές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η κατασκευή, όπου η μείωση του βάρους χωρίς να υπονομεύεται η αντοχή είναι κρίσιμη.

Μια τυπική δομή honeycomb αποτελείται από πολυάριθμες εξαγωνικές κυψέλες, οι οποίες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά όπως αλουμίνιο, χαρτί ή σύνθετα υλικά. Η εξαγωνική διαμόρφωση προσφέρει αποτελεσματική κατανομή του φορτίου και ενισχύει την δομική ακεραιότητα του υλικού. Ένα από τα πιο κοινά υλικά για το honeycomb είναι το αλουμίνιο λόγω των ελαφρών και ανθεκτικών του ιδιοτήτων. Στο πείραμά μας χρησιμοποιήσαμε honeycomb αλουμινίου.

Η απορρόφηση ενέργειας στο honeycomb πραγματοποιείται μέσω ενός συνδυασμού ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης των τοιχωμάτων των κυψελών. Όταν υπόκεινται σε συμπιεστικά φορτία, τα τοιχώματα των κυψελών του κυψελοειδούς πρώτα παραμορφώνονται ελαστικά και στη συνέχεια πλαστικά, απορροφώντας σημαντική ποσότητα ενέργειας στη διαδικασία. Αρχικά, τα τοιχώματα των κυψελών κάμπτονται ελαστικά, απορροφώντας ενέργεια χωρίς μόνιμες παραμορφώσεις. Με την αύξηση του φορτίου, τα τοιχώματα των κυψελών εισέρχονται σε πλαστική παραμόρφωση, όπου η ενέργεια απορροφάται μέσω μόνιμων παραμορφώσεων των τοιχωμάτων. Σε ακόμη υψηλότερα φορτία, τα τοιχώματα των κυψελών καταρρέουν, απορροφώντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας και παρέχοντας υψηλή απορρόφηση ενέργειας κρούσης.

Το honeycomb είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό στην απορρόφηση ενέργειας λόγω της μοναδικής του γεωμετρίας και των μηχανικών του ιδιοτήτων. Αυτή η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, προσφέροντας νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης σε διάφορες βιομηχανίες. [18]

## 3. Πειραματική Διαδικασία

### 3.1 Εισαγωγή

Στο τρέχον κεφάλαιο της εργασίας θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική. Θα παρουσιαστούν η κατασκευή και οι διαστάσεις των δοκιμών, η μηχανή με την οποία υλοποιήθηκαν τα πειράματα και τα χαρακτηριστικά της, καθώς και ανάλυση και μελέτη των πειραματικών δοκιμών και των αποτελεσμάτων τους.

### 3.2 Μηχανική πρέσα - INSTRON 4482

Η μηχανή δοκιμών INSTRON 4482 αποτελεί έναν από τους πιο προηγμένους εξοπλισμούς στον τομέα των μηχανικών δοκιμών, χρησιμοποιούμενη ευρέως σε ερευνητικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα για την αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς υλικών και κατασκευών. Η INSTRON 4482 είναι μια ηλεκτρομηχανική μηχανή δοκιμών υψηλής ακρίβειας, σχεδιασμένη για την εκτέλεση διαφόρων τύπων δοκιμών όπως εφελκυσμού, θλίψης, κάμψης και διατμητικών δοκιμών. Το σύστημα της αποτελείται από:

- **Κύρια Δομή:** Η κύρια κατασκευή της μηχανής είναι από ανθεκτικό χάλυβα, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και αντοχή σε υψηλές φορτίσεις.
- **Κινητήρας και Σύστημα Οδήγησης:** Διαθέτει ηλεκτρομηχανικό σύστημα οδήγησης με ακρίβεια ελέγχου ταχύτητας και θέσης, προσφέροντας σταθερότητα και επαναληψιμότητα στις δοκιμές.
- **Φορτιοκύτταρο:** Το φορτιοκύτταρο της INSTRON 4482 επιτρέπει τη μέτρηση δυνάμεων με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία, καθιστώντας δυνατές δοκιμές σε ευρύ φάσμα φορτίων.
- **Σύστημα Ελέγχου και Λογισμικό:** Διαθέτει προηγμένο λογισμικό ελέγχου και ανάλυσης, που διευκολύνει τη ρύθμιση των παραμέτρων της δοκιμής, τη συλλογή και την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Η INSTRON 4482 προσφέρει μια σειρά από τεχνικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδανική για ποικίλες εφαρμογές:

- **Μέγιστη Δύναμη Δοκιμής:** Διαθέτει μέγιστη δύναμη δοκιμής που φτάνει έως τα 100 kN.
- **Ταχύτητα Δοκιμής:** Η ταχύτητα μπορεί να ρυθμιστεί από 0,001 mm/min έως 500 mm/min, προσφέροντας ευελιξία σε διαφορετικούς τύπους δοκιμών.

- **Ακρίβεια Μέτρησης:** Η ακρίβεια μέτρησης της δύναμης είναι καλύτερη από  $\pm 0,5\%$  της ένδειξης, εξασφαλίζοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ο πίνακας ελέγχου διαθέτει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή, ο οποίος αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών. Ο πίνακας ελέγχου αποτελείται από τέσσερις κύριους τομείς. Τον τομέα των οθονών υγρών κρυστάλλων. Τον τομέα οριοθέτησης. Τον κεντρικό τομέα. Τον τομέα κίνησης της κεφαλής.

Στον κεντρικό τομέα υπάρχει αριθμητικό πληκτρολόγιο και τετραψήφια οθόνη υγρών κρυστάλλων, καθώς και λυχνίες ένδειξης στο αριστερό μέρος, όπου αναγράφεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα μέτρησης (SI, ENGLISH, METRIC). Η επιλογή του συστήματος μέτρησης γίνεται μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πίνακα. Από τον κεντρικό τομέα είναι δυνατές οι εξής ρυθμίσεις:

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

Στον τομέα των οθονών υγρών κρυστάλλων υπάρχουν τρεις τετραψήφιες οθόνες υγρών κρυστάλλων, καθώς και πλήκτρα που επιτρέπουν την επιλογή φορτίου, επιμήκυνσης ή συμπίεσης του δοκιμίου, καθώς και των ακραίων τιμών αυτών. Όλες οι τιμές αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες για επεξεργασία μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση, η επιλεγμένη λειτουργία υποδεικνύεται από την αντίστοιχη λυχνία.

Στον τομέα οριοθέτησης καθορίζονται τα όρια οποιασδήποτε λειτουργίας, τα οποία δεν πρέπει να υπερβεί το σύστημα. Αυτά τα όρια πρέπει να εισάγονται για λόγους ασφαλείας, ειδικά στην περίπτωση καταπόνησης δοκιμίου με κρίσιμο ύψος, για να αποφευχθεί η πιθανότητα επαφής της κινητής και της σταθερής πλάκας λόγω λανθασμένου καλιμπραρίσματος της μέγιστης διαδρομής. Οι καταχωρήσεις γίνονται μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου του πίνακα ελέγχου και οι επιλεγμένες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων του κεντρικού τομέα.

Οι λειτουργίες που μπορούν να εκτελεστούν όταν επιτευχθούν τα όρια για τις τιμές του φορτίου (LOAD), της επιμήκυνσης (EXTENSION), της παραμόρφωσης (STRAIN) και της θραύσης (BREAK) περιλαμβάνουν:

- Σταμάτημα της κεφαλής στη συγκεκριμένη θέση (STOP).

- Επαναφορά της κεφαλής στην αρχική της θέση (RETURN).
- Αλλαγή κατεύθυνσης για επαναλαμβανόμενη κίνηση (CYCLE).
- Διακοπή της κίνησης της κεφαλής (OFF).

Στον τομέα κίνησης της κεφαλής, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πίνακα ελέγχου, υπάρχει δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου της κίνησης της κεφαλής μέσω τεσσάρων πλήκτρων. Σημειώνεται ότι όταν επιλέγεται το κουμπί «επιστροφή», η κεφαλή κινείται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα και σταματά στο σημείο εκκίνησης αντί για την προγραμματισμένη ταχύτητα.

Η μηχανική πρέσα συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με Η/Υ ο οποίος είναι εξοπλισμένος με κατάλληλο λογισμικό (Bluehill) με το οποίο είναι δυνατός ο ορισμός των συνθηκών των δοκιμών, η εκτέλεσή τους και λήψη αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων απαραίτητων για την επεξεργασία των μετρήσεων.

### 3.3 Κατασκευή δοκιμών

Στα πειράματα που υλοποιήσαμε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήσαμε λεπτότοιχα αλουμινένια δοκίμια, στα οποία μετέπειτα εφαρμόσαμε πλευρική φόρτιση.

Τα δοκίμια ήταν τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής και κατασκευάστηκαν από δοκάρια αλουμινίου τα οποία κόπηκαν στο εργαστήριο στις 4 επιθυμητές (βασικές) διαστάσεις:

- 37.80 x 37.80 x 1.22 x 40.60 (Δοκίμιο 1)
- 50.08 x 30.21 x 1.23 x 40.20 (Δοκίμιο 3)
- 60.09 x 30.12 x 1.18 x 40.53 (Δοκίμιο 5)
- 39.52 x 30.35 x 1.15 x 40.30 (Δοκίμιο 8)

Έπειτα προχωρήσαμε στην επεξεργασία των δοκιμών, δημιουργώντας νέες διαφορετικές διατάξεις για την πειραματική διαδικασία. Συνολικά κατασκευάστηκαν είκοσι δοκίμια.

Αρχικά στα τυπικά λεπτότοιχα δοκίμια πραγματοποιήσαμε συγκόλληση λεπτότοιχων οριζόντιων ελασμάτων αλουμινίου στο μέσο, εσωτερικά του δοκιμίου. Στην πρώτη περίπτωση συγκολλήθηκε μία πλάκα αλουμινίου στο μέσο τους, χωρίζοντας τα δοκίμια σε δύο ισοϋψή τμήματα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση συγκολλήθηκαν δύο πλάκες αλουμινίου, χωρίζοντας το δοκίμιο σε τρία ισοϋψή τμήματα.

Για την επόμενη διάταξη εφαρμόσαμε μία μικρή προπαραμόρφωση συμπιέζοντας τις οριζόντιες πλευρές, εκτείνοντας εξωτερικά - ελαφρά - τις κατακόρυφες πλευρές. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε συγκόλληση λεπτότοιχων οριζόντιων ελασμάτων αλουμινίου στο μέσο, εσωτερικά του δοκιμίου, χωρίζοντας τα δοκίμια σε δύο ισοϋψή τμήματα. Στόχος της προπαραμόρφωσης ήταν ο περιορισμός της διατμητικής κατάρρευσης που παρατηρήθηκε σε ορισμένα εκ των τυπικών δοκιμών.

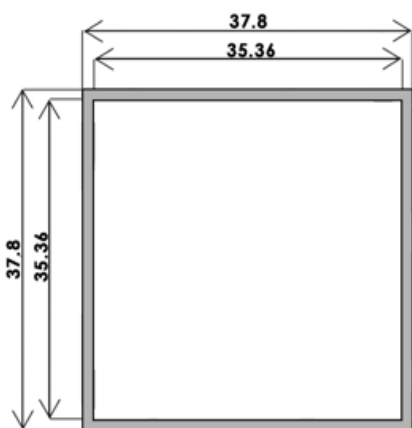
Για την επόμενη διάταξη χρησιμοποιήθηκαν εξαγωνικές κυψελίδες αλουμινίου (honeycomb). Στο εσωτερικό των δοκιμών τοποθετήθηκαν δομές honeycomb. Ενδιάμεσα στα honeycomb τοποθετήθηκαν οριζόντιες πλάκες, χωρίς να συγκολληθούν, ώστε να διαχωρίζουν τις δομές των honeycomb. Για την σταθεροποίηση των δομών honeycomb εντός του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε κόλλα.

Τέλος, για την τελευταία διάταξη χρησιμοποιήθηκαν τα τυπικά δοκίμια χωρίς να υποστούν κάποια παραμόρφωση. Εξωτερικά των δοκιμών, τοποθετήσαμε άκαμπτα πλευρικά εμπόδια, ώστε να περιορίσουμε την πλευρική έκταση των κατακόρυφων τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους.

### 3.4 Διαστάσεις δοκιμών

Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των είκοσι δοκιμών. Η σειρά παρουσίασης προκύπτει από την ονομασία των δοκιμών, η οποία προέκυψε από την σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα, χωριζόμενα σε κατηγορίες ανά διαφορετική δομική διάταξη.

#### 3.4.1 Δοκίμιο 1



$$m1 = 54.5 \text{ gr}$$

$$B1 = 37.8 \text{ mm}$$

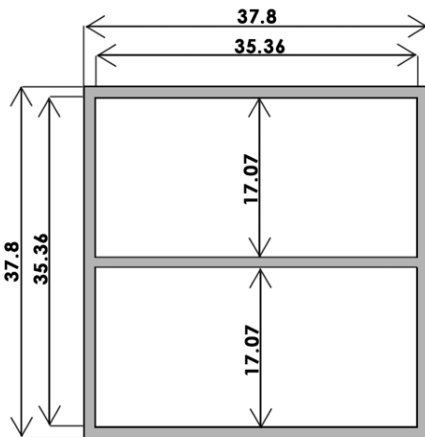
$$H1 = 37.8 \text{ mm}$$

$$t1 = 1.22 \text{ mm}$$

$$L1 = 40.6 \text{ mm}$$



### 3.4.2 Δοκίμο 2



$m_2 = 67.9 \text{ gr}$

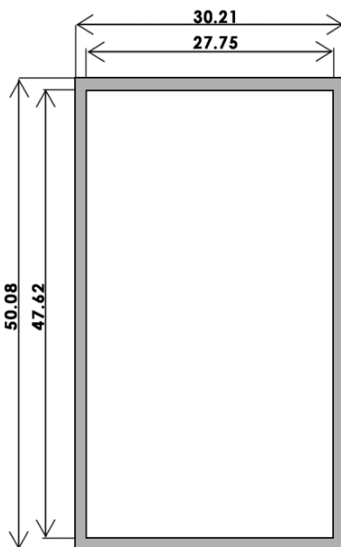
$B_2 = 37.8 \text{ mm}$

$H_2 = 37.8 \text{ mm}$

$t_2 = 1.22 \text{ mm}$

$L_2 = 40.6 \text{ mm}$

### 3.4.3 Δοκίμο 3



$m_3 = 57.8 \text{ gr}$

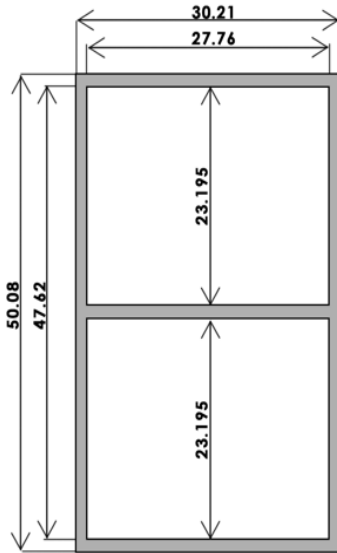
$B_3 = 30.21 \text{ mm}$

$H_3 = 50.08 \text{ mm}$

$t_3 = 1.23 \text{ mm}$

$L_3 = 40.2 \text{ mm}$

### 3.4.4 Δοκίμο 4



$m_4 = 70 \text{ gr}$

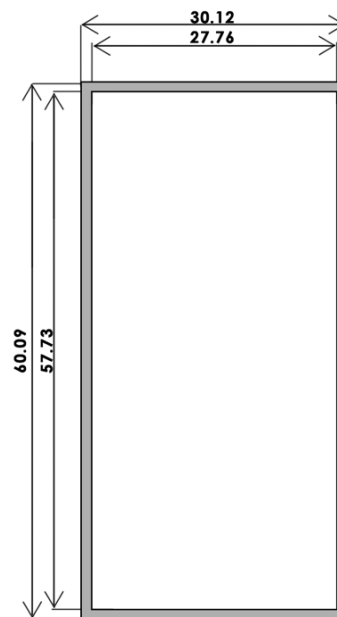
$B_4 = 30.21 \text{ mm}$

$H_4 = 50.08 \text{ mm}$

$t_4 = 1.23 \text{ mm}$

$L_4 = 40.2 \text{ mm}$

### 3.4.5 Δοκίμο 5



$m_5 = 63.3 \text{ gr}$

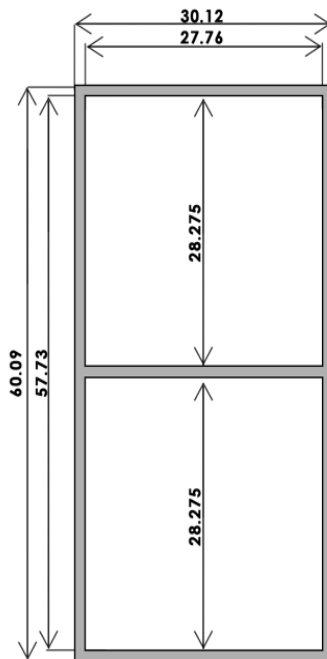
$B_5 = 30.12 \text{ mm}$

$H_5 = 60.09 \text{ mm}$

$t_5 = 1.18 \text{ mm}$

$L_5 = 40.53 \text{ mm}$

### 3.4.6 Δοκίμο 6



$m_6 = 75.6 \text{ gr}$

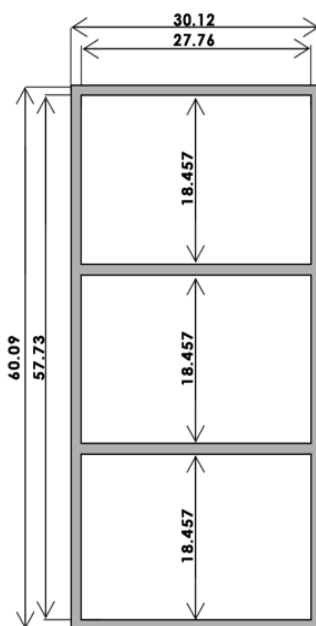
$B_6 = 30.12 \text{ mm}$

$H_6 = 60.09 \text{ mm}$

$t_6 = 1.18 \text{ mm}$

$L_6 = 40.53 \text{ mm}$

### 3.4.7 Δοκίμο 7



$m_7 = 88.8 \text{ gr}$

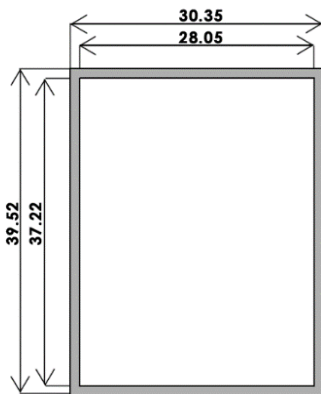
$B_7 = 30.12 \text{ mm}$

$H_7 = 60.09 \text{ mm}$

$t_7 = 1.18 \text{ mm}$

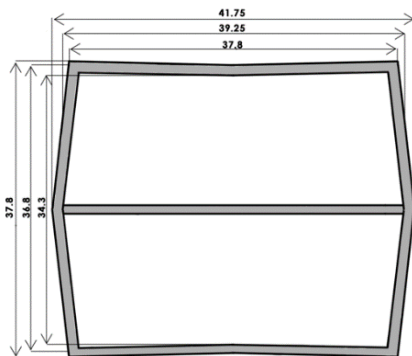
$L_7 = 40.53 \text{ mm}$

### 3.4.8 Δοκίμο 8



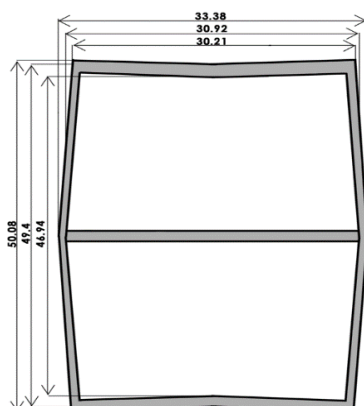
$m8 = 47.8 \text{ gr}$   
 $B8 = 30.35 \text{ mm}$   
 $H8 = 39.52 \text{ mm}$   
 $t8 = 1.15 \text{ mm}$   
 $L8 = 40.3 \text{ mm}$

### 3.4.9 Δοκίμο 1a



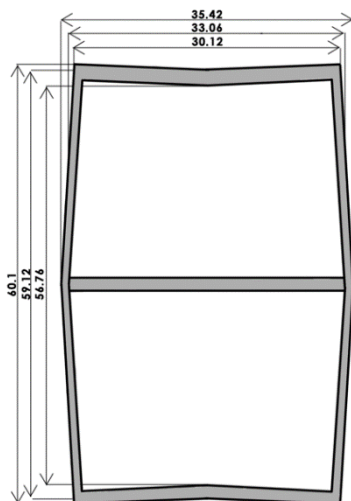
$m1a = 71.9 \text{ gr}$        $H1a,max = 36.8 \text{ mm}$   
 $B1a,o = 37.8 \text{ mm}$        $H1a,min = 34.3 \text{ mm}$   
 $B1a,max = 41.75 \text{ mm}$        $L1a = 40.05 \text{ mm}$   
 $B1a,min = 39.25 \text{ mm}$        $t1a = 1.25 \text{ mm}$   
 $H1a,o = 37.8 \text{ mm}$

### 3.4.10 Δοκίμο 3a



$m3a = 74.2 \text{ gr}$   
 $B3a,o = 30.2 \text{ mm}$   
 $B3a,max = 33.38 \text{ mm}$   
 $B3a,min = 30.92 \text{ mm}$   
 $H3a,o = 50.08 \text{ mm}$   
 $H3a,max = 49.4 \text{ mm}$   
 $H3a,min = 46.94 \text{ mm}$   
 $L3a = 40.10 \text{ mm}$   
 $t3a = 1.23 \text{ mm}$

### 3.4.11 Δοκίμο 5a



$m_{5a} = 78.9 \text{ gr}$

$L_{5a} = 40.20 \text{ mm}$

$B_{5a,o} = 30.12 \text{ mm}$

$t_{5a} = 1.18 \text{ mm}$

$B_{5a,max} = 35.42 \text{ mm}$

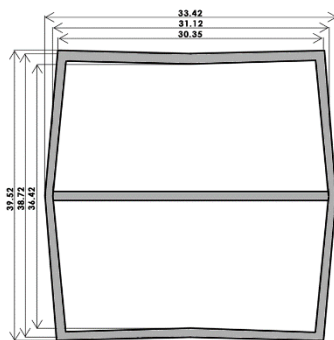
$B_{5a,min} = 33.06 \text{ mm}$

$H_{5a} = 60.1 \text{ mm}$

$H_{5a,max} = 59.12 \text{ mm}$

$H_{5a,min} = 56.76 \text{ mm}$

### 3.4.12 Δοκίμο 8a



$m_{8a} = 63.6 \text{ gr}$

$t_{8a} = 1.15 \text{ mm}$

$B_{8a,max} = 33.42 \text{ mm}$

$L_{8a} = 40.30 \text{ mm}$

$B_{8a,min} = 31.12 \text{ mm}$

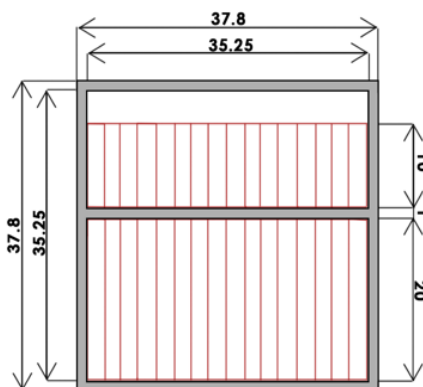
$B_{8a,o} = 30.35 \text{ mm}$

$H_{8a,o} = 39.52 \text{ mm}$

$H_{8a,max} = 38.72 \text{ mm}$

$H_{8a,min} = 36.42 \text{ mm}$

### 3.4.13 Δοκίμο 1b



$m_{1b} = 63.6 \text{ gr}$

$mh_{1,1b} = 2.36 \text{ gr}$

$B_{1b} = 37.8 \text{ mm}$

$mh_{2,1b} = 1.18 \text{ gr}$

$H_{1b} = 37.8 \text{ mm}$

$Hh_{1,1b} = 20 \text{ mm}$

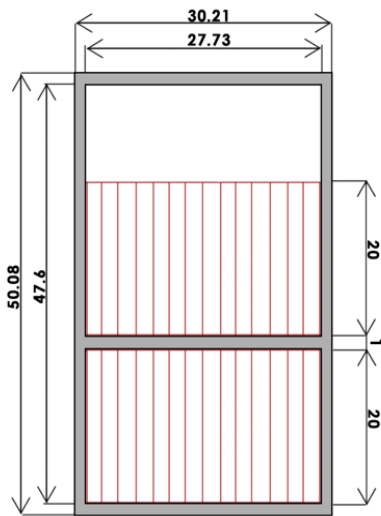
$t_{1b} = 1.275 \text{ mm}$

$Hh_{2,1b} = 10 \text{ mm}$

$L_{1b} = 40.05 \text{ mm}$

$t_{1b} = 1 \text{ mm}$

### 3.4.14 Δοκίμιο 3b



$$m_{3b} = 65.8 \text{ gr}$$

$$m_{h2,3b} = 1.86 \text{ gr}$$

$$B_{3b} = 30.21 \text{ mm}$$

$$H_{h1,3b} = 20 \text{ mm}$$

$$H_{3b} = 50.08 \text{ mm}$$

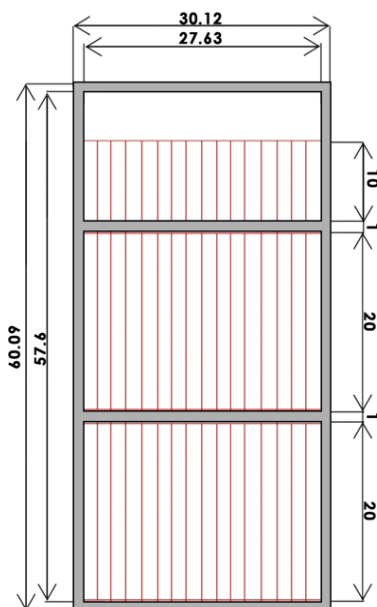
$$H_{h2,3b} = 20 \text{ mm}$$

$$t_{3b} = 1.24 \text{ mm}$$

$$L_{3b} = 40.10 \text{ mm}$$

$$m_{h1,3b} = 1.86 \text{ gr}$$

### 3.4.15 Δοκίμιο 5b



$$m_{5b} = 74.4 \text{ gr}$$

$$H_{h1,5b} = 20 \text{ mm}$$

$$B_{5b} = 30.12 \text{ mm}$$

$$H_{h2,5b} = 20 \text{ mm}$$

$$H_{5b} = 60.09 \text{ mm}$$

$$H_{h3,5b} = 10 \text{ mm}$$

$$t_{5b} = 1.25 \text{ mm}$$

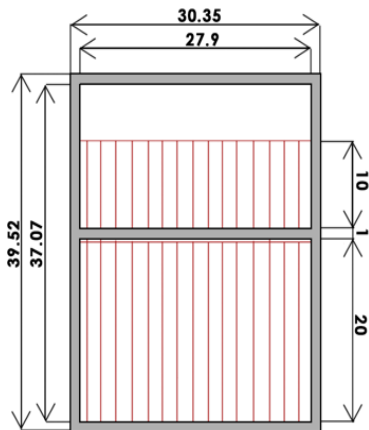
$$L_{5b} = 40.20 \text{ mm}$$

$$m_{h1,5b} = 1.86 \text{ gr}$$

$$m_{h2,5b} = 1.86 \text{ gr}$$

$$m_{h3,5b} = 0.93 \text{ gr}$$

### 3.4.16 Δοκίμιο 8b



$$m_{8b} = 55 \text{ gr}$$

$$B_{8b} = 30.35 \text{ mm}$$

$$H_{8b} = 39.52 \text{ mm}$$

$$t_{8b} = 1.225 \text{ mm}$$

$$L_{8b} = 40.30 \text{ mm}$$

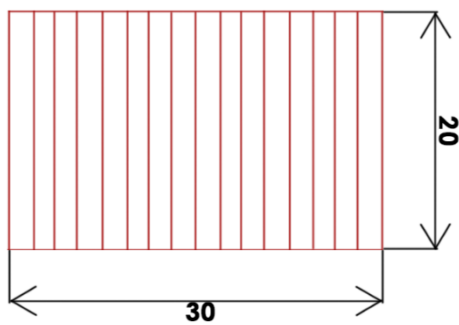
$$mh_{1,8b} = 1.88 \text{ gr}$$

$$mh_{2,8b} = 0.94 \text{ gr}$$

$$Hh_{1,8b} = 20 \text{ mm}$$

$$Hh_{2,8b} = 10 \text{ mm}$$

### 3.4.17 Honeycomb



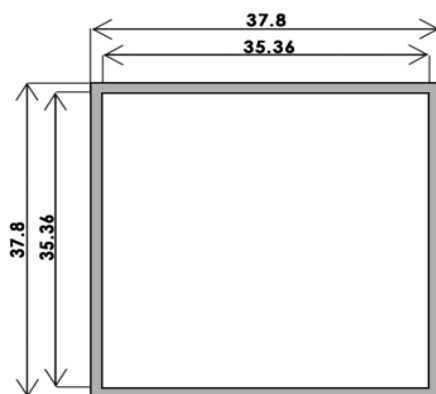
$$mh = 5.8 \text{ gr}$$

$$B_h = 30 \text{ mm}$$

$$H_h = 20 \text{ mm}$$

$$L_h = 40 \text{ mm}$$

### 3.4.18 Δοκίμιο 1c



$$m_1 = 54.5 \text{ gr}$$

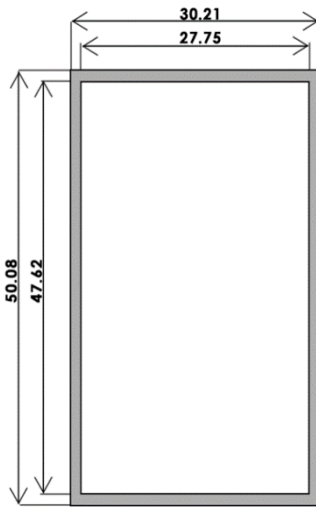
$$B_1 = 37.8 \text{ mm}$$

$$H_1 = 37.8 \text{ mm}$$

$$t_1 = 1.22 \text{ mm}$$

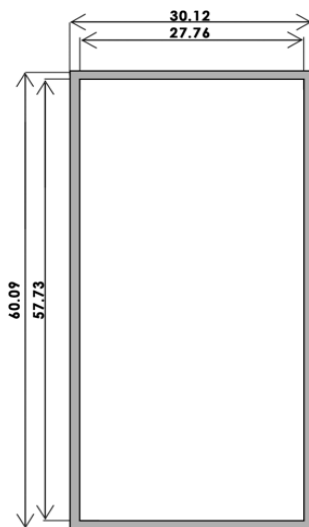
$$L_1 = 40.6 \text{ mm}$$

### 3.4.19 Δοκίμο 3c



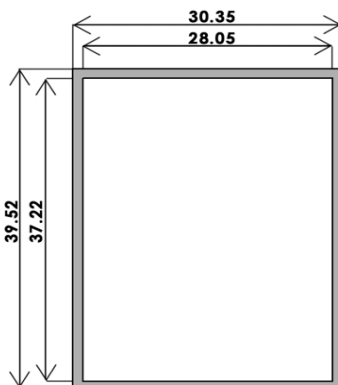
$m_3 = 57.8 \text{ gr}$   
 $B_3 = 30.21 \text{ mm}$   
 $H_3 = 50.08 \text{ mm}$   
 $t_3 = 1.23 \text{ mm}$   
 $L_3 = 40.2 \text{ mm}$

### 3.4.20 Δοκίμο 5c



$m_5 = 63.3 \text{ gr}$   
 $B_5 = 30.12 \text{ mm}$   
 $H_5 = 60.09 \text{ mm}$   
 $t_5 = 1.18 \text{ mm}$   
 $L_5 = 40.53 \text{ mm}$

### 3.4.21 Δοκίμο 8c



$m_8 = 47.8 \text{ gr}$   
 $B_8 = 30.35 \text{ mm}$   
 $H_8 = 39.52 \text{ mm}$   
 $t_8 = 1.15 \text{ mm}$   
 $L_8 = 40.3 \text{ mm}$



### 3.4.22 Συγκεντρωτικός πίνακας διαστάσεων δοκιμών

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας των διαστάσεων όλων των δοκιμών. Τα δοκίμια βρίσκονται σε σειρά με βάση τις διαφορετικές δομικές διατάξεις.

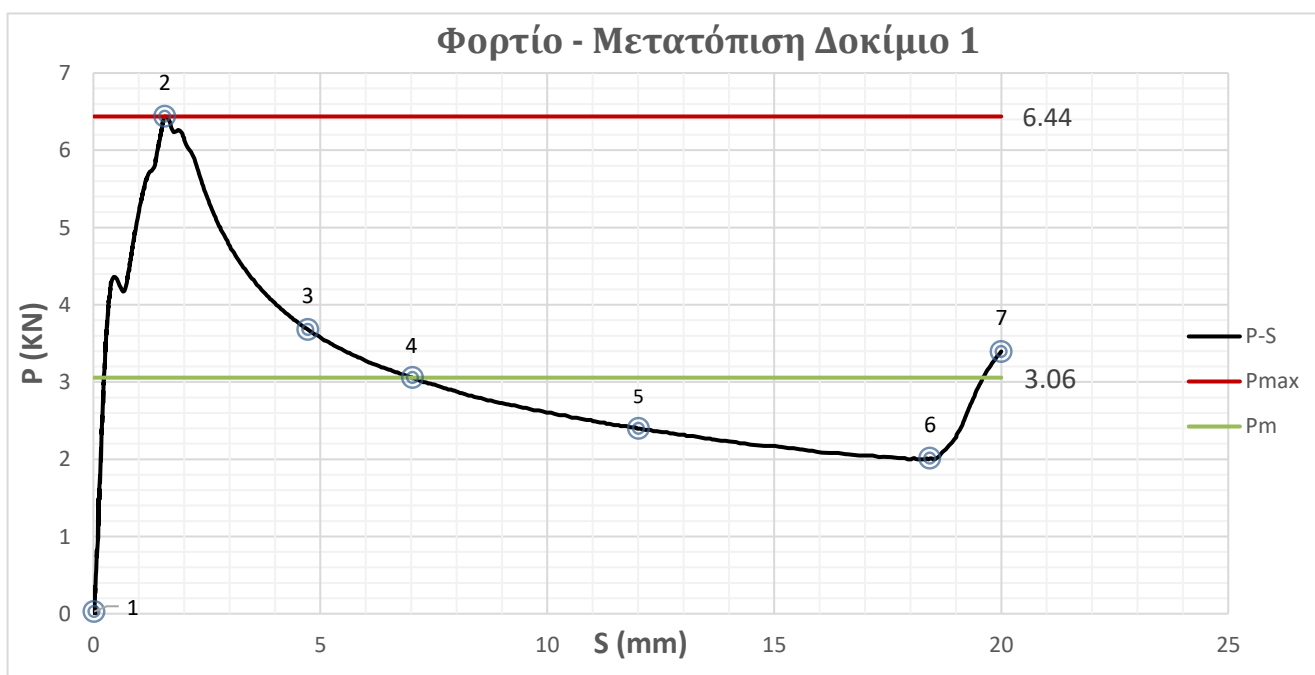
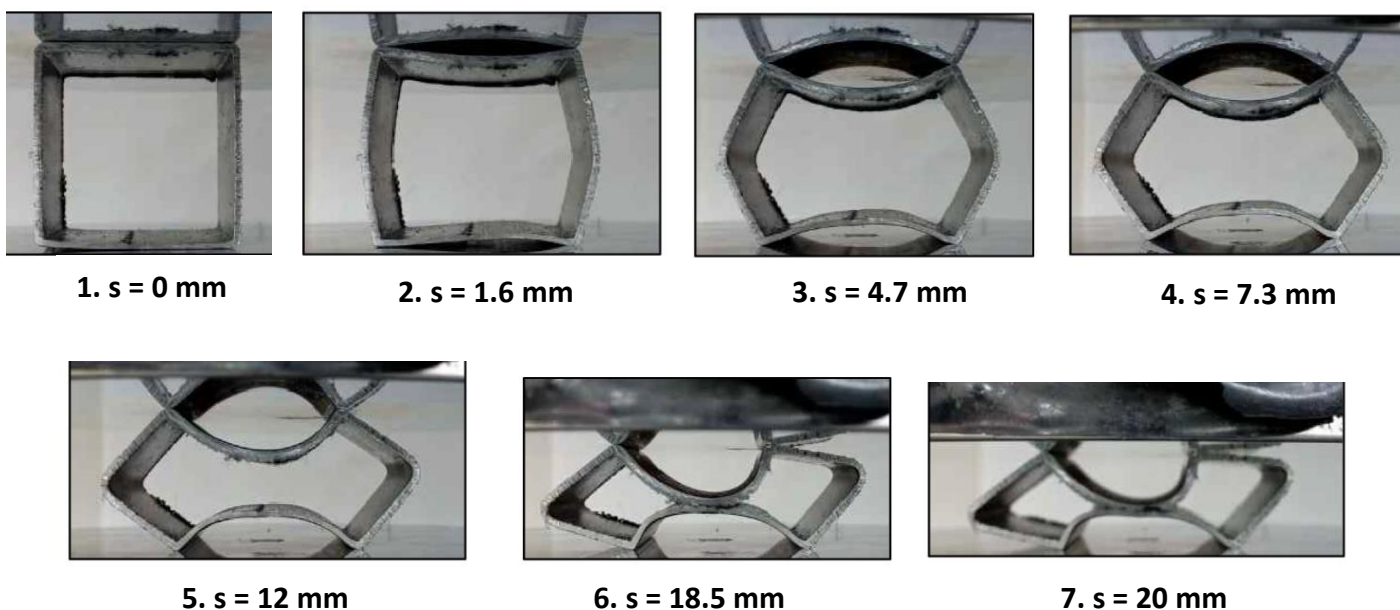
#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Δοκίμιο	Διάταξη	H (mm)	B (mm)	m (gr)	Smax (mm)
1	Τυπική	37,8	37,8	54,50	20
3	Τυπική	50,08	30,21	57,80	35,00
5	Τυπική	60,09	30,12	63,30	40,00
8	Τυπική	39,52	30,35	47,8	22,00
2	Συγκόλληση (1)	37,8	37,8	67,90	20
4	Συγκόλληση (1)	50,08	30,21	70,00	35,00
6	Συγκόλληση (1)	60,09	30,12	75,60	40,00
7	Συγκόλληση (2)	60,09	30,12	88,80	40,00
1a	Συγκόλληση (1) και προπαραμόρφωση	37,8	41,57	71,90	20
3a	Συγκόλληση (1) και προπαραμόρφωση	50,08	33,38	74,20	35,00
5a	Συγκόλληση (1) και προπαραμόρφωση	60,09	35,42	78,90	40,00
8a	Συγκόλληση (1) και προπαραμόρφωση	39,52	33,42	63,6	22,00
1b	Honeycomb	37,8	37,8	63,60	20
3b	Honeycomb	50,08	30,21	65,80	35,00
5b	Honeycomb	60,09	30,12	74,40	40,00
8b	Honeycomb	39,52	30,35	55	22,00
1c	Πλευρικός περιορισμός	37,8	37,8	54,50	20
3c	Πλευρικός περιορισμός	50,08	30,21	57,80	35,00
5c	Πλευρικός περιορισμός	60,09	30,12	63,30	40,00
8c	Πλευρικός περιορισμός	39,52	30,35	47,8	22,00

### 3.5 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, με την εξής μορφή: Αρχικά καταγράφονται οι προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης, με την απεικόνιση συγκεκριμένων στιγμιότυπων και η αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης με τα σημεία των στιγμιότυπων. Έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός των δεικτών crashworthiness και η περιγραφή της κατάρρευσης των δοκιμών.

#### 3.5.1 Δοκίμιο 1



Εικόνα 7: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 1

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 20\text{mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 61.13\text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.06\text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 6.44\text{ kN}$

Μάζα:  $m = 54.5\text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{61.13}{54.5} = 1.12\text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.475$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι συμμετρική, προοδευτική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Οι κατακόρυφες πλευρές λυγίζουν και εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 6.44\text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι κατακόρυφες πλευρές εκτείνονται εξωτερικά ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εσωτερικών τάσεων και της ανακατανομής αυτών των τάσεων κατά μήκος των πλευρών. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα. Κατά την πλευρική φόρτιση του δοκιμίου εμφανίζεται κάμψη προς τα έξω των κατακόρυφων πλευρών.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά μέχρι την ελάχιστη - συνολικά - τιμή  $P_{min} = 2\text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 6”, όπου οι εσωτερικά καμπυλωμένες (παραμορφωμένες) πλέον άνω και κάτω πλευρές έρχονται σε επαφή και με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η ικανότητα παραλαβής του φορτίου και κατ’ επέκταση η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Έπειτα η τιμή του φορτίου αρχίζει να αυξάνεται έως το πέρας της καταπόνησής του.

### 3.5.2 Δοκίμο 2



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 2$  mm



3.  $s = 4.1$  mm



4.  $s = 6.6$  mm



5.  $s = 7.9$  mm



6.  $s = 11.4$  mm



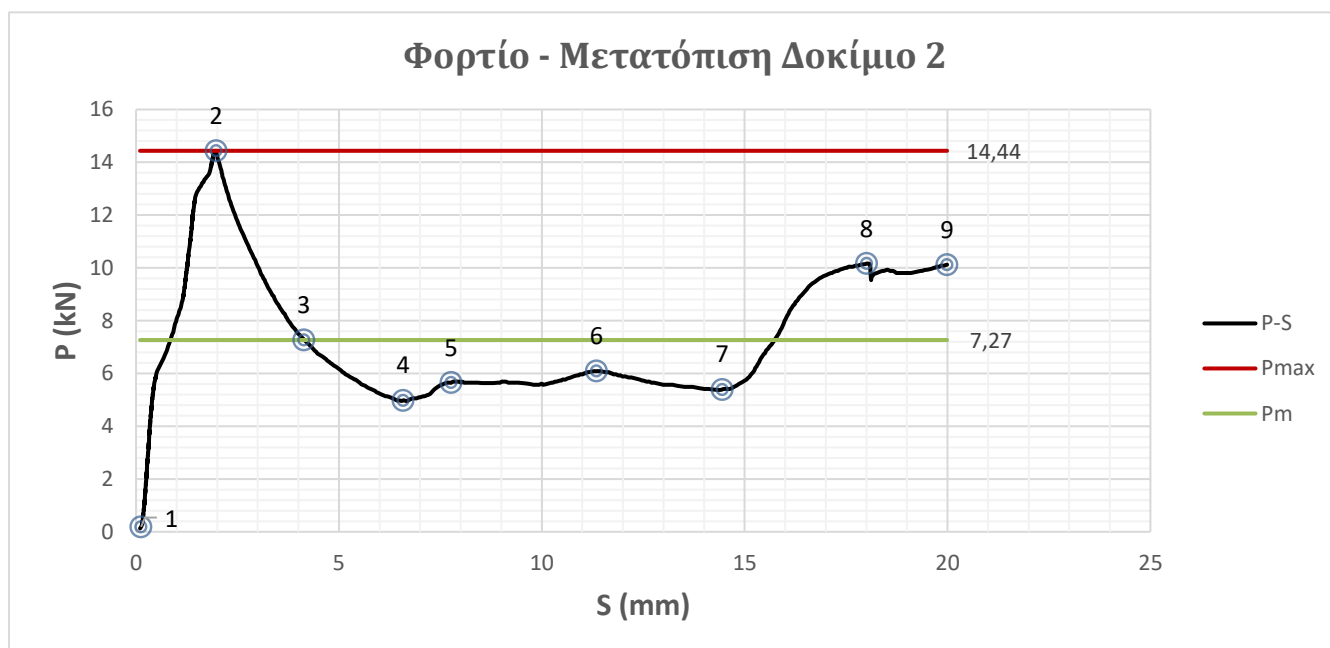
7.  $s = 14.5$  mm



8.  $s = 18$  mm



9.  $s = 20$  mm



Εικόνα 8: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμιου 2

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 20\text{mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 145.34\text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 7.27\text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 14.44\text{ kN}$

Μάζα:  $m = 67.9\text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{145.34}{67.9} = 2.14\text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.503$

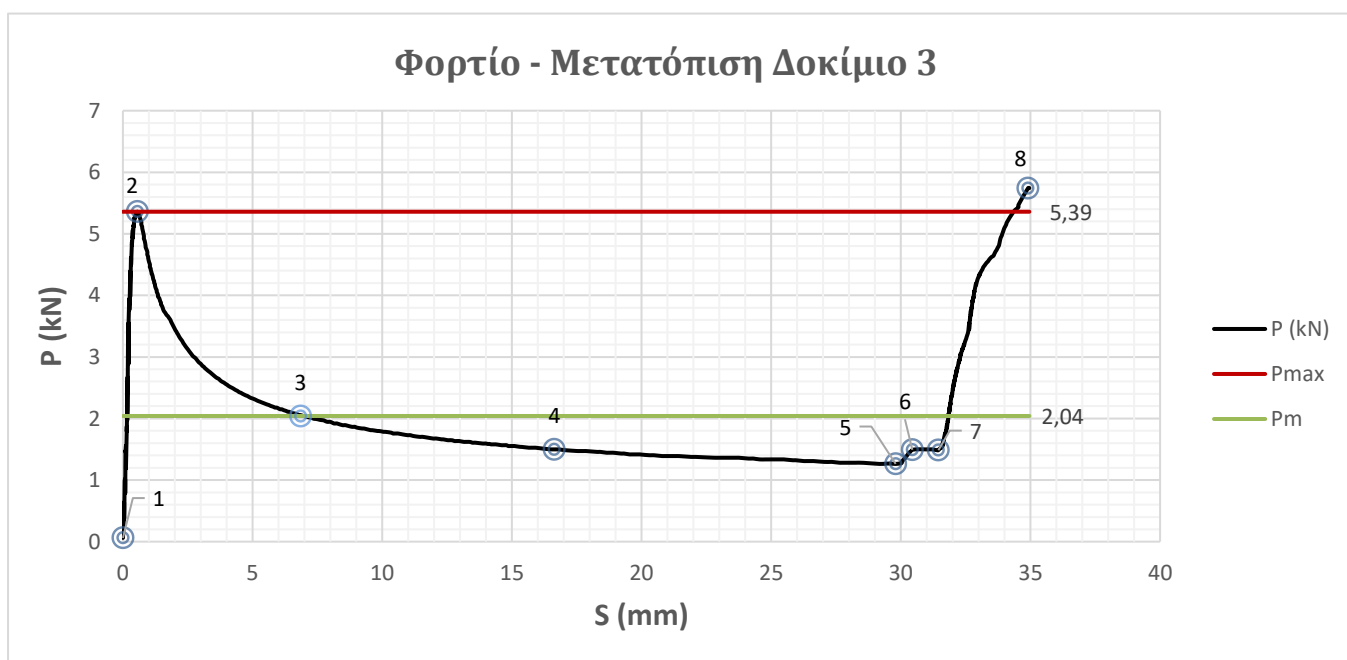
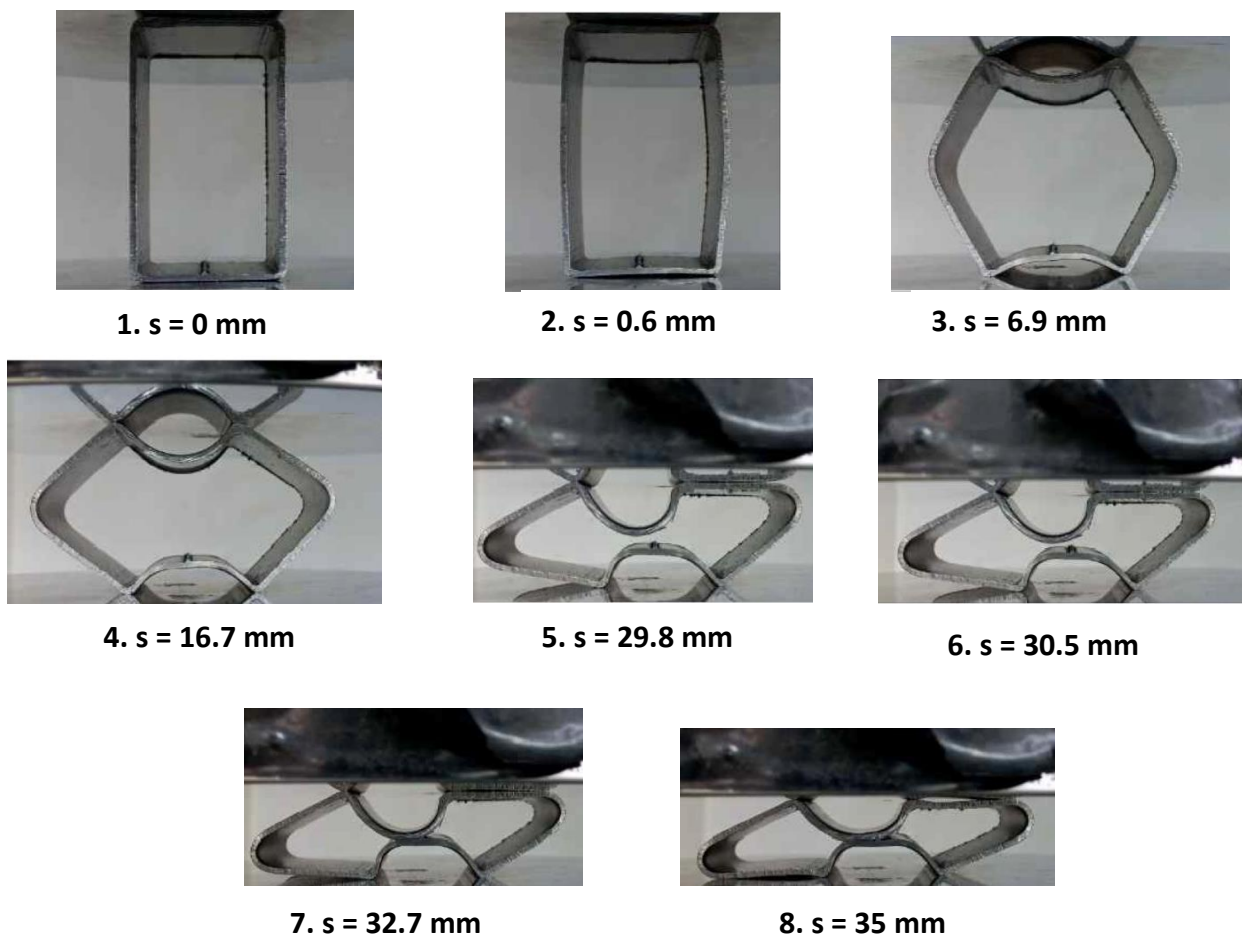
## Περιγραφή

Το συγκολλητό έλασμα στη μέση του δοκιμίου λειτουργεί ως ενισχυτικό στοιχείο, αυξάνοντας την ακαμψία στην περιοχή αυτή. Κατά την αρχική φάση της παραμόρφωσης του δοκιμίου παρατηρούμε ότι η συγκόλληση συγκρατεί τις κατακόρυφες πλευρές. Ο περιορισμός στην πλευρική έκταση του κελύφους οδηγεί στην τοπική παραμόρφωση του άνω τμήματος του, κυρίως, με βράχυνση της άνω πλευράς και καμπύλωση της εσωτερικά. Το έλασμα παίζει καθοριστικό ρόλο στη θέση έναρξης της παραμόρφωσης και στη συνολική συμπεριφορά του δοκιμίου υπό πλευρική φόρτιση.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 14.44\text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο ξεκινάει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την ελάχιστη - συνολικά - τιμή του  $P_{min} = 4.96\text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 4”, έρχεται σε επαφή η άνω πλευρά με το ενδιάμεσο έλασμα. Το φορτίο εμφανίζει μια μικρή ανομοιόμορφη αύξηση έως την τιμή  $P = 6.08\text{ kN}$  (“στιγμιότυπο 6”), και μετά μια ελαφριά πτώση έως την τιμή  $P = 5.39\text{ kN}$ , όπου έρχεται σε επαφή η κάτω πλευρά με το ενδιάμεσο έλασμα. Έπειτα το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται ομοιόμορφα μέχρι το “στιγμιότυπο 8”, όπου αστοχεί ένα μέρος της συγκόλλησης στην αριστερή πλευρά, κάτι το οποίο αποτυπώνεται και στο διάγραμμα με μία απότομη πτώση του φορτίου (με οδοντωτή μορφή). Αυτό δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου, καθώς το φορτίο παραμένει σε υψηλές τιμές έως το πέρας της καταπόνησής του.

### 3.5.3 Δοκίμο 3



Εικόνα 9: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 3

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 35 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 71.43 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 2.04 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 5.36 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 57.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{EA}{m} = \frac{71.43}{57.8} = 1.24 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.381$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική, συμμετρική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Οι κατακόρυφες πλευρές λυγίζουν και εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 5.36 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι πλευρές εκτείνονται εξωτερικά ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εσωτερικών τάσεων και της ανακατανομής αυτών των τάσεων κατά μήκος των πλευρών. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την ελάχιστη - συνολικά - τιμή του,  $P_{min} = 1.26 \text{ kN}$  (“στιγμιότυπο 5”), όπου το άνω τμήμα της δεξιάς καμπυλωμένης πλευράς εφάπτεται με την κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης και ως εκ τούτου το φορτίο εμφανίζει μια μικρή αύξηση. Στο “στιγμιότυπο 7” οι εσωτερικά καμπυλωμένες (παραμορφωμένες) πλέον άνω και κάτω πλευρές έρχονται σε επαφή και το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό. Στο τέλος παρατηρούμε ότι η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου έχει ενισχυθεί πολύ, αφού εφάπτονται μέρος της δεξιά πλευράς με την κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης, μέρος της αριστερής πλευράς με την σταθερή (κάτω) πλάκα συμπίεσης, και η πάνω με την κάτω πλευρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φορτίο να αυξάνεται τόσο ώστε να ξεπερνά και το αρχικό μέγιστο.

### 3.5.4 Δοκίμο 4



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.8$  mm



3.  $s = 9.1$  mm



4.  $s = 20$  mm



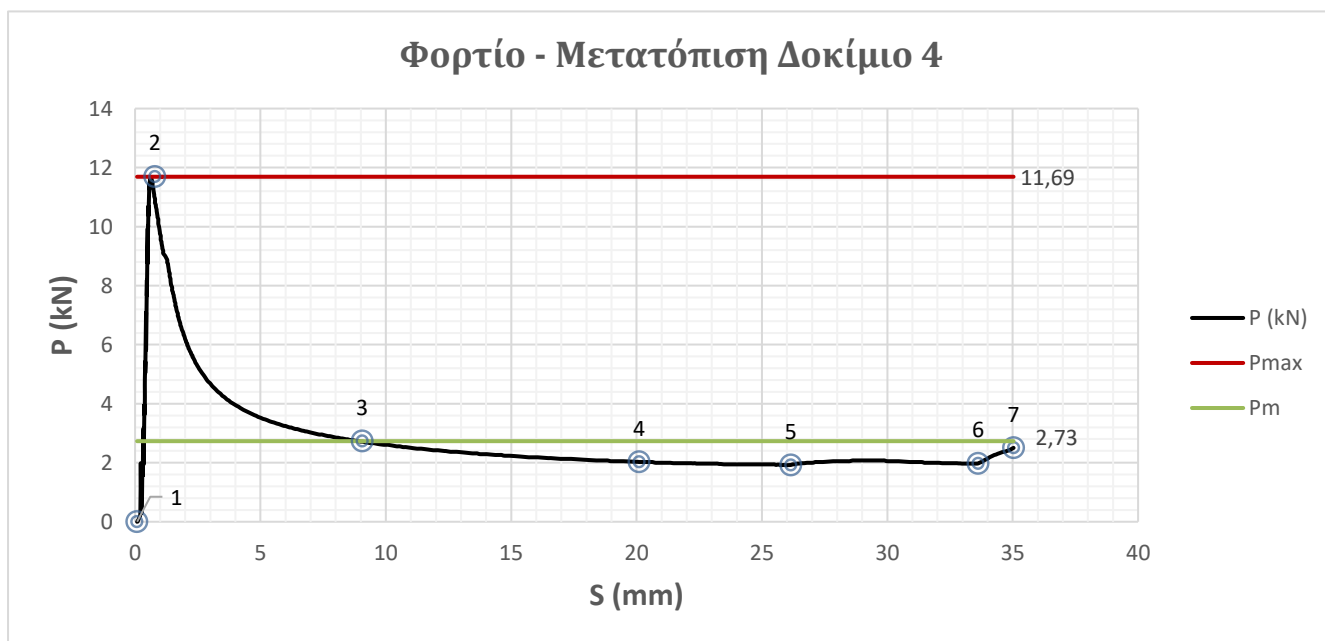
5.  $s = 26.2$  mm



6.  $s = 33.6$  mm



7.  $s = 35$  mm



Εικόνα 10: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 4



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 35 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 95.59 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 2.73 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 11.69 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 70 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{95.59}{70} = 1.37 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.234$

## Περιγραφή

Το δοκίμιο καταρρέει διατμητικά σχηματίζοντας μηχανισμό “πλαisiού”. Η κατάρρευση του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από έντονο λυγισμό, κάτι που οφείλεται κυρίως στην μεγάλη αναλογία ύψους και βάσης του δοκιμίου και δευτερευόντως στο ενδιάμεσο έλασμα το οποίο ωθεί ομόρροπα τις δύο πλαϊνές πλευρές, με αποτέλεσμα να μην εκτείνονται εξωτερικά οι κατακόρυφες πλευρές, αλλά όλο το δοκίμιο να λυγίζει/κάμπτεται προς την ίδια κατεύθυνση, στη συγκεκριμένη περίπτωση προς τα αριστερά. Η κατάρρευση εξελίσσεται ασύμμετρα λόγω της κατασκευής, αφού το δοκίμιο δεν είναι ομοιόμορφο, ομοιογενές και τέλεια γεωμετρικά κατασκευασμένο.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 11.69 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται απότομα αλλά ομαλά, μέχρι το σημείο που υπάρχει μία σχετική σταθεροποίηση (“στιγμιότυπο 5”). Επειδή ο λυγισμός δεν αποτελεί αποδοτικό τρόπο κατάρρευσης ως προς την απορρόφηση ενέργειας εμφανίζεται πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ του  $P_{max}$  και του  $P_m$ . Κατ’ επέκταση ο δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου για το δοκίμιο 4 είναι πολύ χαμηλός.

### 3.5.5 Δοκίμο 5



1.  $s = 0 \text{ mm}$



2.  $s = 0.8 \text{ mm}$



3.  $s = 11.7 \text{ mm}$



4.  $s = 25 \text{ mm}$



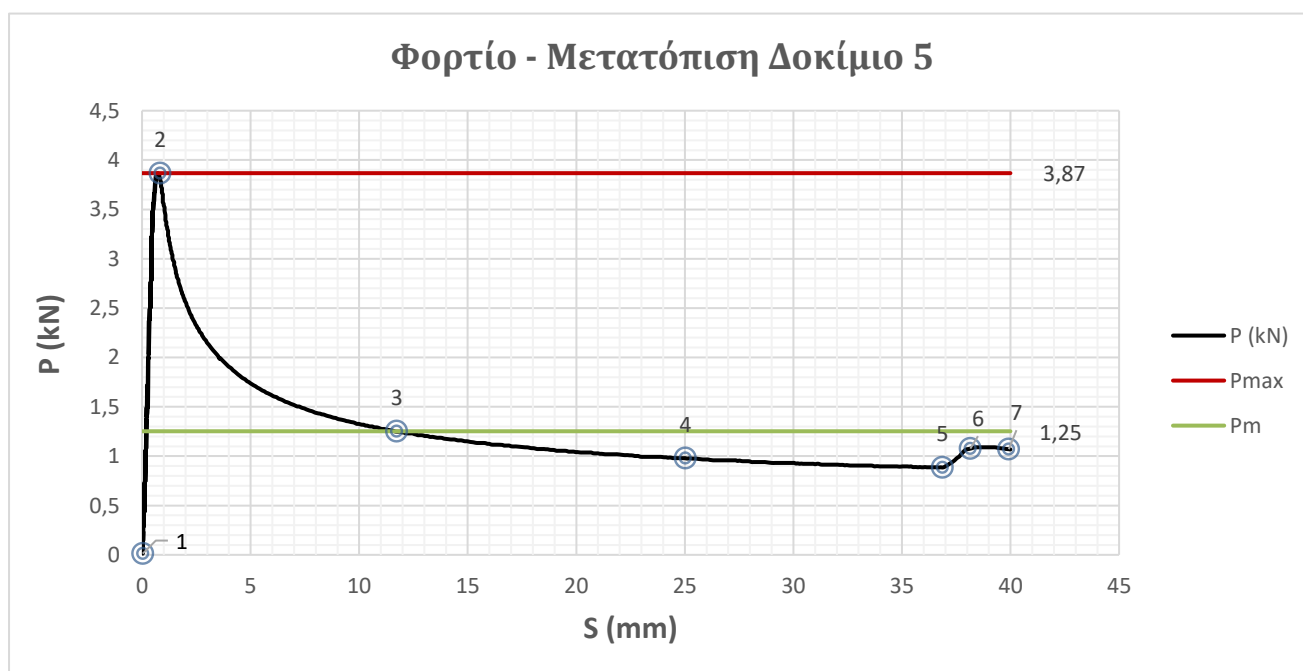
5.  $s = 36.9 \text{ mm}$



6.  $s = 38.2 \text{ mm}$



7.  $s = 40 \text{ mm}$



Εικόνα 11: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 5

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 50.08 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 1.25 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 3.87 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 63.3 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{50.08}{63.3} = 0.79 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.324$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική, συμμετρική και πραγματοποιείται με την ανάπτυξη πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Οι κατακόρυφες πλευρές λυγίζουν και εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό.

Στο “στιγμιότυπο 2”, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 3.87 \text{ kN}$ , το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική. Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι πλευρές εκτείνονται εξωτερικά ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εσωτερικών τάσεων και της ανακατανομής αυτών των τάσεων κατά μήκος των πλευρών. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την ελάχιστη - συνολικά - τιμή του,  $P_{min} = 1.2 \text{ kN}$  (“στιγμιότυπο 5”), όπου η επιφάνεια της καμπυλωμένης αριστερής πλευράς εφάπτεται με την κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης και έπειτα το φορτίο εμφανίζει μια μικρή αύξηση.

### 3.5.6 Δοκίμο 6



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.7$  mm



3.  $s = 10$  mm



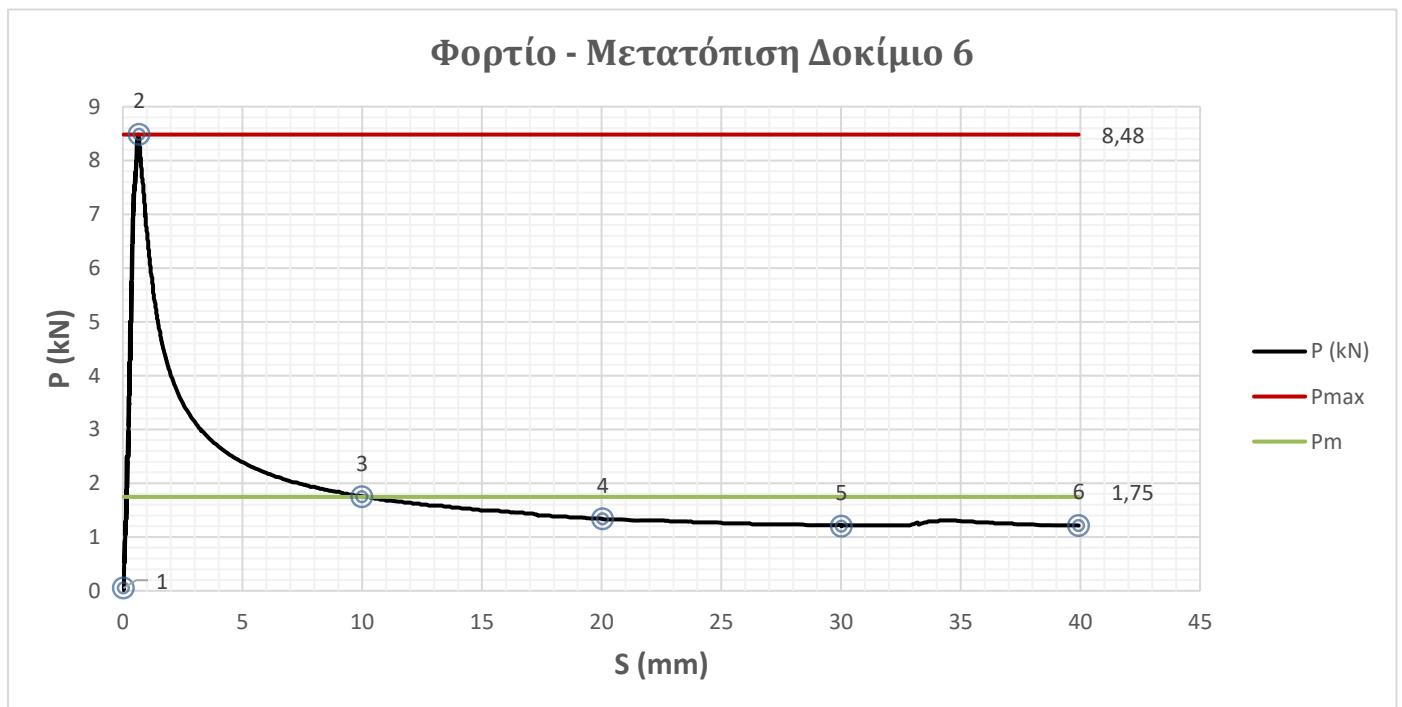
4.  $s = 20$  mm



5.  $s = 30$  mm



6.  $s = 40$  mm



Εικόνα 12: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 6

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 69.82 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 1.75 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 8.48 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 75.6 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{69.82}{75.6} = 0.92 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.206$

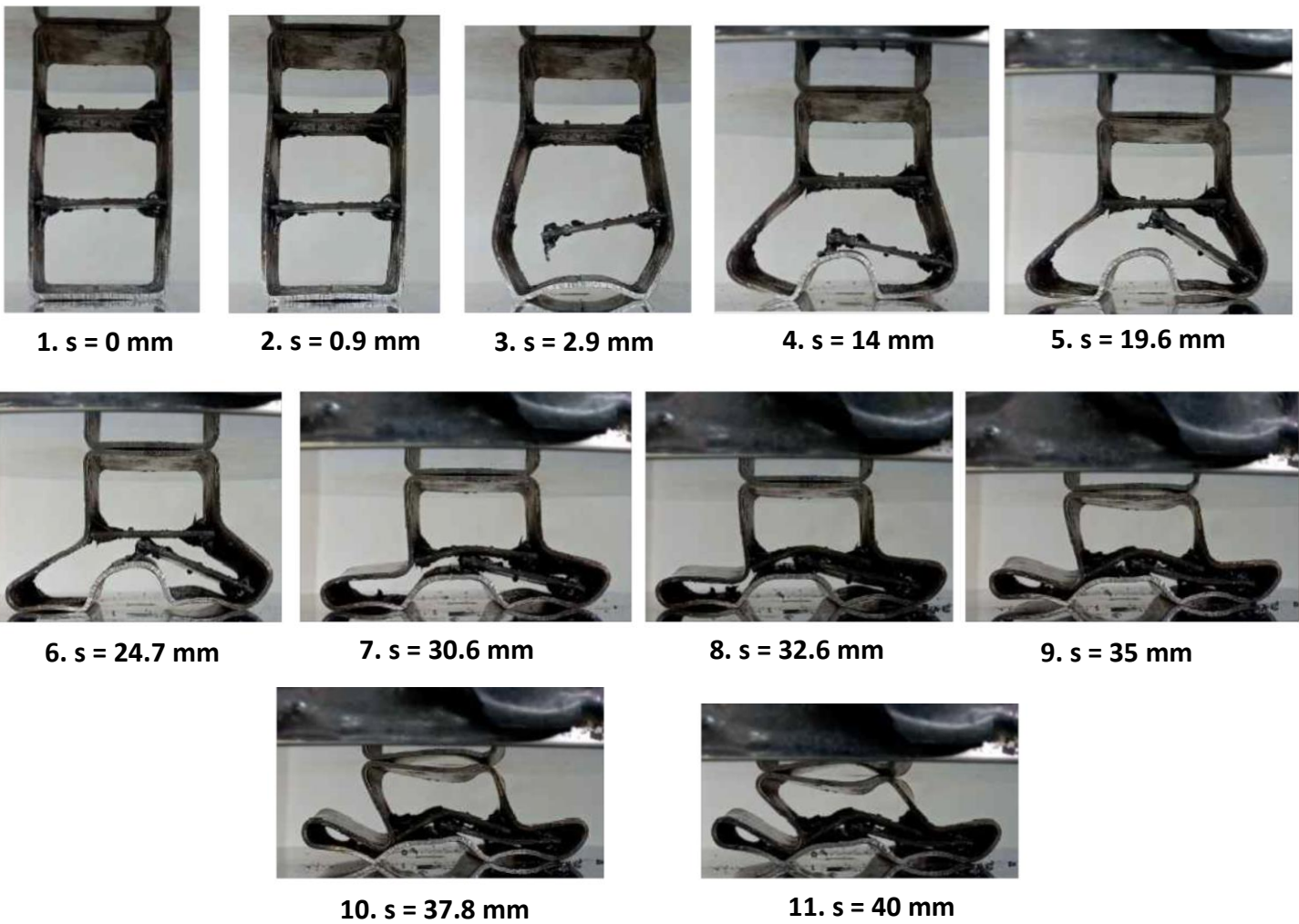
## Περιγραφή

Το δοκίμιο καταρρέει διατμητικά σχηματίζοντας μηχανισμό “πλαisiού”. Η κατάρρευση του δοκιμίου χαρακτηρίζεται από έντονο λυγισμό, κάτι που οφείλεται κυρίως στην μεγάλη αναλογία ύψους και βάσης του δοκιμίου και δευτερευόντως στο ενδιάμεσο έλασμα το οποίο ωθεί ομόρροπα τις δύο κατακόρυφες πλευρές, με αποτέλεσμα να μην εκτείνονται εξωτερικά οι πλαϊνές πλευρές, αλλά όλο το δοκίμιο να λυγίζει/κάμπτεται προς την ίδια κατεύθυνση, στη συγκεκριμένη περίπτωση προς τα αριστερά.

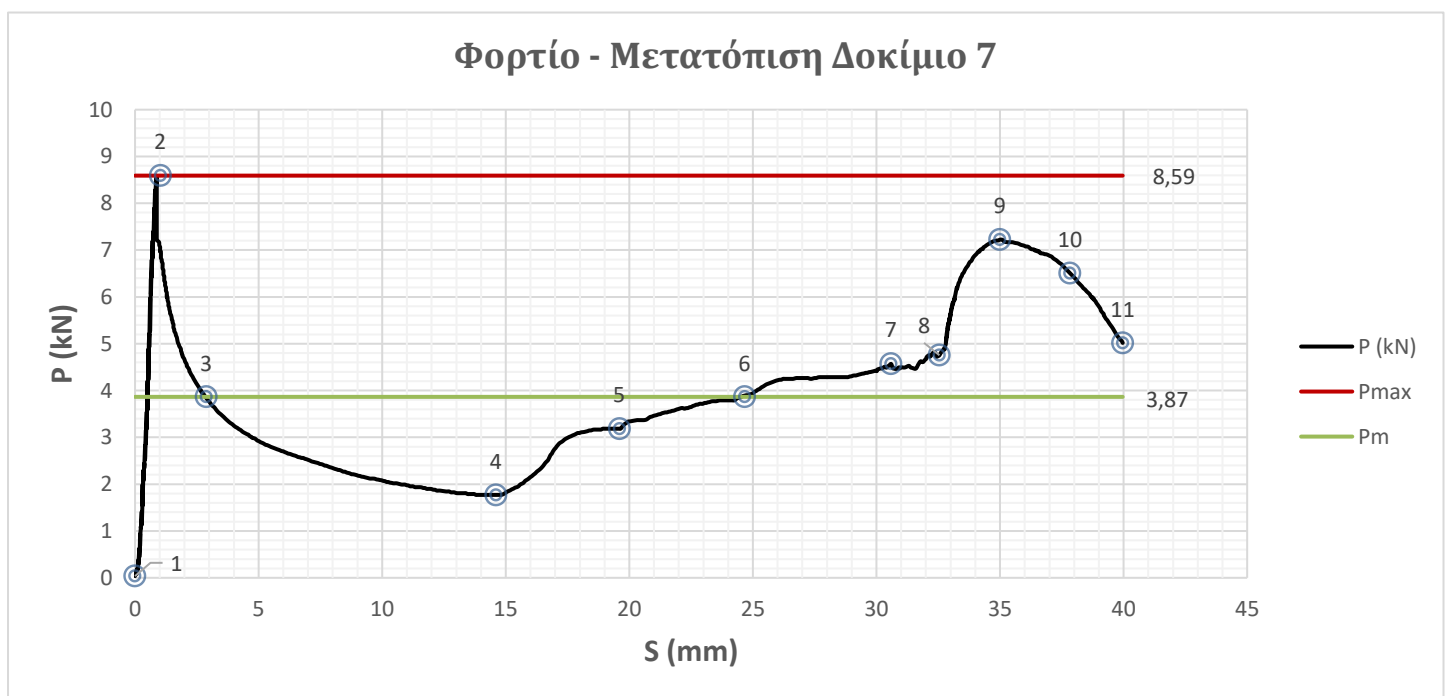
Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 8.48 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται απότομα αλλά ομαλά, μέχρι το σημείο που υπάρχει μία σχετική σταθεροποίηση (“στιγμιότυπο 5”). Επειδή ο λυγισμός δεν αποτελεί αποδοτικό τρόπο κατάρρευσης ως προς την απορρόφηση ενέργειας εμφανίζεται πολύ μεγάλη απόκλιση μεταξύ του  $P_{max}$  και του  $P_m$ . Κατ’ επέκταση ο δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου CFE για το δοκίμιο 6 είναι πολύ χαμηλός.

### 3.5.7 Δοκίμο 7



Φορτίο - Μετατόπιση Δοκίμο 7



Εικόνα 13: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 7

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 154.61 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.87 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 8.59 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 88.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{154.61}{88.8} = 1.74 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.45$

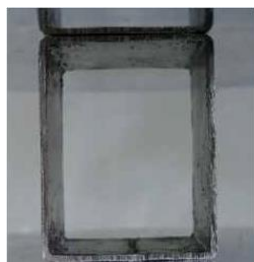
## Περιγραφή

Τα δύο συγκολλητά ελάσματα εσωτερικά του δοκιμίου λειτουργούν ως ενισχυτικά στοιχεία, αυξάνοντας την ακαμψία στην περιοχή αυτή. Κατά την αρχική φάση της παραμόρφωσης του δοκιμίου παρατηρούμε ότι το πάνω έλασμα συγκρατεί τις κατακόρυφες πλευρές, οι οποίες σε εκείνο το ύψος δεν εκτείνονται εξωτερικά, αλλά συγκρατούνται. Για το κάτω έλασμα παρατηρούμε, ότι πολύ γρήγορα η συγκόλληση αστοχεί, με αποτέλεσμα οι κατακόρυφες πλευρές στο ύψος του συγκεκριμένου ελάσματος να λυγίζουν και να εκτείνονται εξωτερικά. Το δοκίμιο αρχικά χωρίζονταν σε 3 ισοϋψή τμήματα, ενώ έπειτα από την αστοχία της κάτω συγκόλλησης, πλέον, χωρίζεται σε δύο τμήματα, όπου το κάτω τμήμα έχει διπλάσιο ύψος από το πάνω. Ως αποτέλεσμα η κατάρρευση οδηγείται κυρίως στο κάτω τμήμα του δοκιμίου, αφού το πάνω τμήμα είναι ενισχυμένο λόγω της συγκόλλησης.

Στο στιγμιότυπο 2 το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 8.59 \text{ kN}$ . Αμέσως μετά σημειώνεται η αστοχία της κάτω συγκόλλησης και το φορτίο μειώνεται απότομα. Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την τιμή  $P = 1.77 \text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 4”. Από αυτή τη φάση κατάρρευσης και έπειτα το φορτίο εμφανίζει ανομοιόμορφη αύξηση, αφού έχει διαμορφωθεί μία τελείως διαφορετική ασύμμετρη γεωμετρία του δοκιμίου, που ερμηνεύει τις αυξομειώσεις του φορτίου που ακολουθούν. Στο στιγμιότυπο 8 οι καμπυλωμένες επιφάνειες του πάνω και του κάτω ελάσματος καθώς και η κάτω και οι πλαϊνές πλευρές έρχονται σε επαφή (συμπίση “συσσωρευμένου” υλικού) με αποτέλεσμα να σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι το “στιγμιότυπο 9”, που εμφανίζεται τοπικό μέγιστο φορτίο. Έπειτα λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου το φορτίο αρχίζει να πέφτει έως το πέρας της συμπίσης.

### 3.5.8 Δοκίμο 8



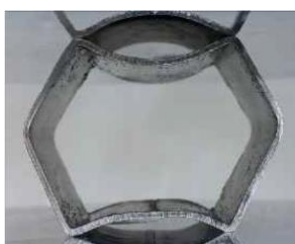
1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.8$  mm



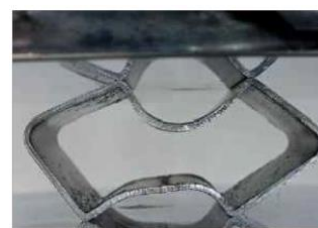
3.  $s = 1.8$  mm



4.  $s = 5$  mm



5.  $s = 10$  mm



6.  $s = 15$  mm

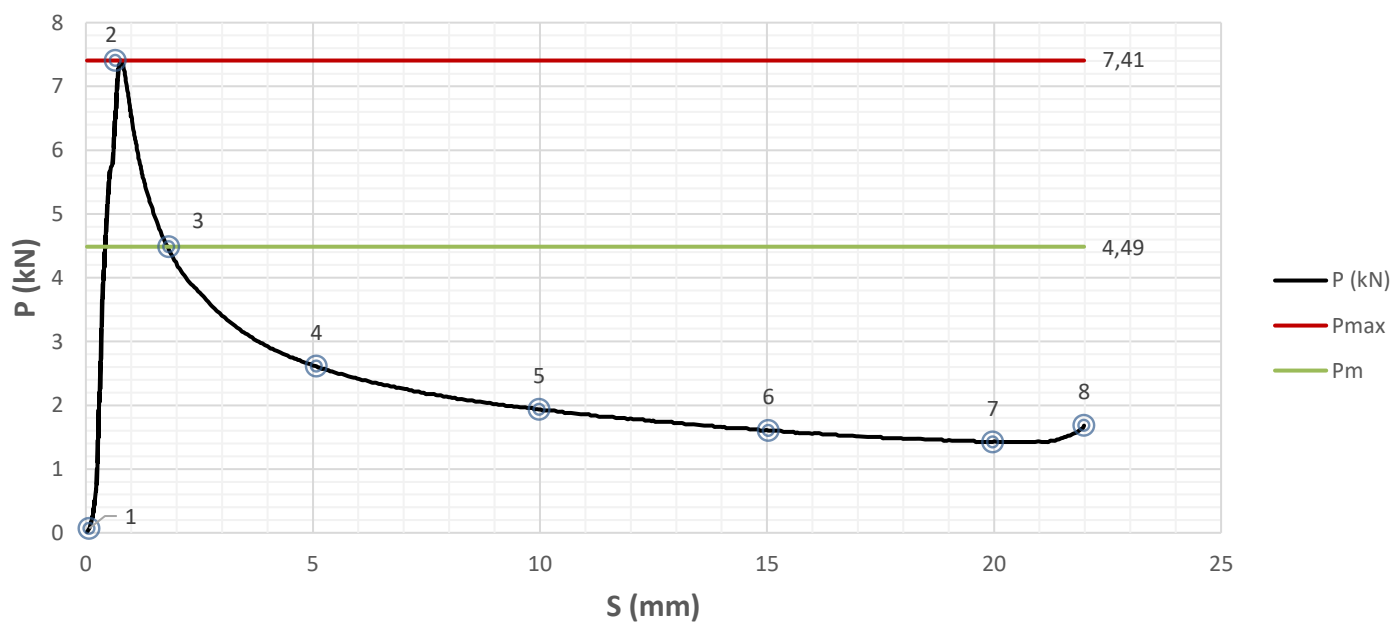


7.  $s = 20$  mm



8.  $s = 22$  mm

### Φορτίο - Μετατόπιση Δοκίμο 8



Εικόνα 14: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 8



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 22 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 49.35 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 2.24 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 7.41 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 47.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{49.35}{47.8} = 1.03 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.3$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Οι κατακόρυφες πλευρές εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 7.41 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι πλευρές εκτείνονται εξωτερικά ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εσωτερικών τάσεων και της ανακατανομής αυτών των τάσεων κατά μήκος των πλευρών. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα. Κατά την πλευρική φόρτιση του δοκιμίου εμφανίζεται κάμψη προς τα έξω των κάθετων πλευρών, καταρρέοντας προοδευτικά.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά μέχρι την τιμή  $P_{min} = 1.42 \text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 7”, όπου παρατηρείται το ελάχιστο - συνολικά - φορτίο, και έπειτα η τιμή του φορτίου αρχίζει να αυξάνεται.

### 3.5.9 Δοκίμιο 1a



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 1.26$  mm



3.  $s = 1.5$  mm



4.  $s = 5.8$  mm



5.  $s = 10$  mm



6.  $s = 15$  mm



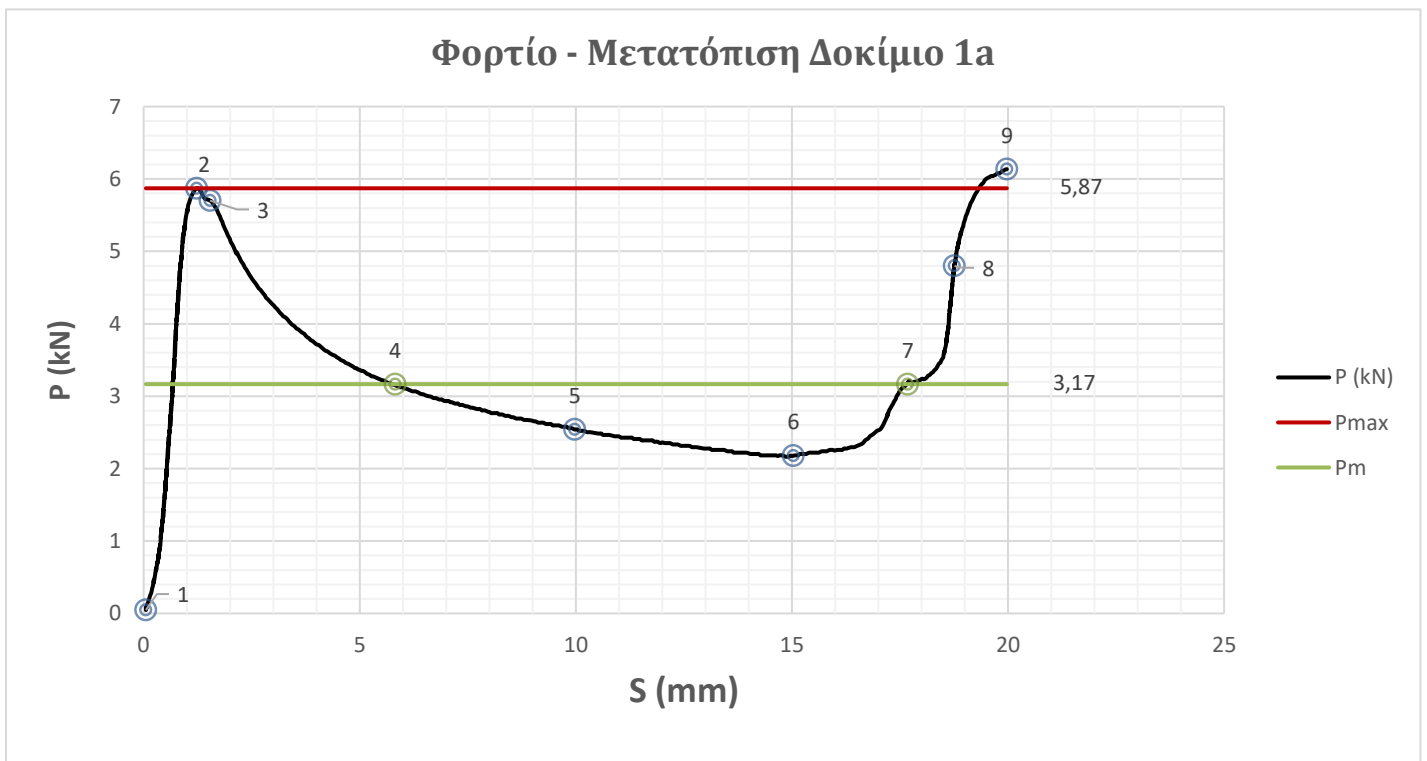
7.  $s = 17.7$  mm



8.  $s = 18.8$  mm



9.  $s = 20$  mm



Εικόνα 15: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 1a

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 20 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 63.33 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.17 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 5.87 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 71.9 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{63.33}{71.9} = 0.88 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.54$

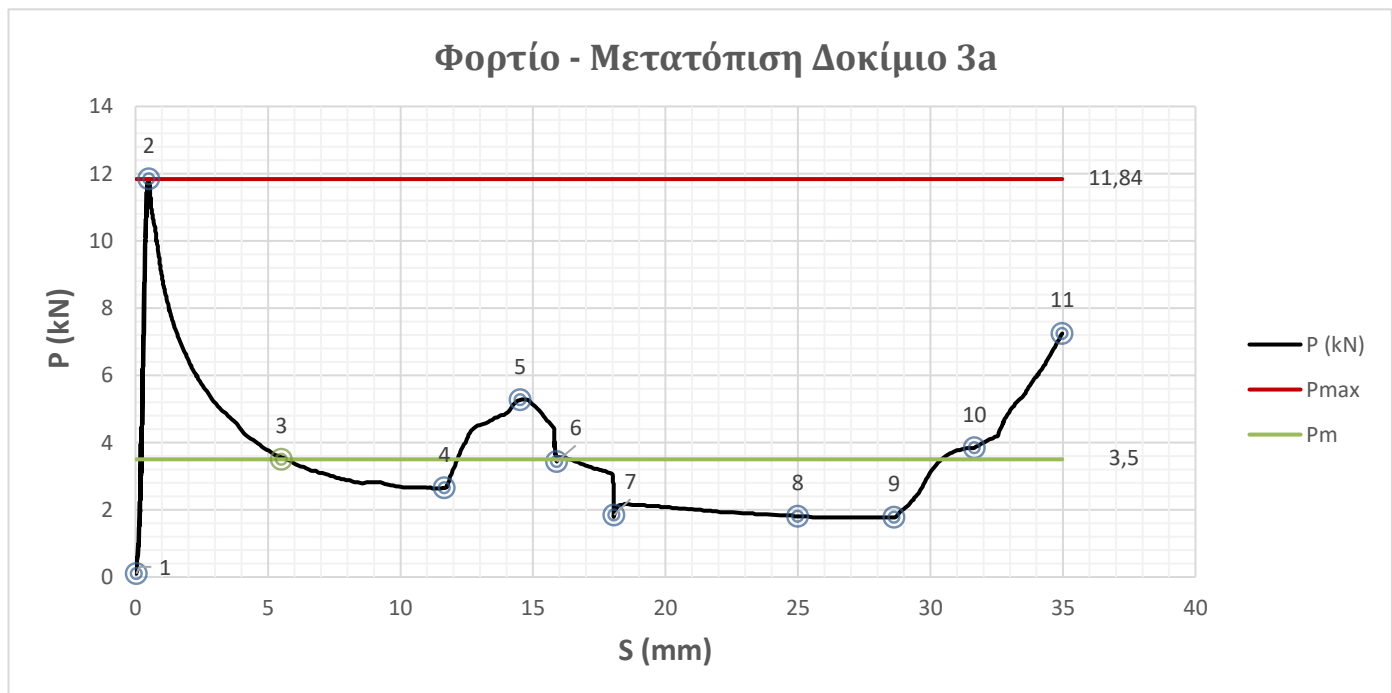
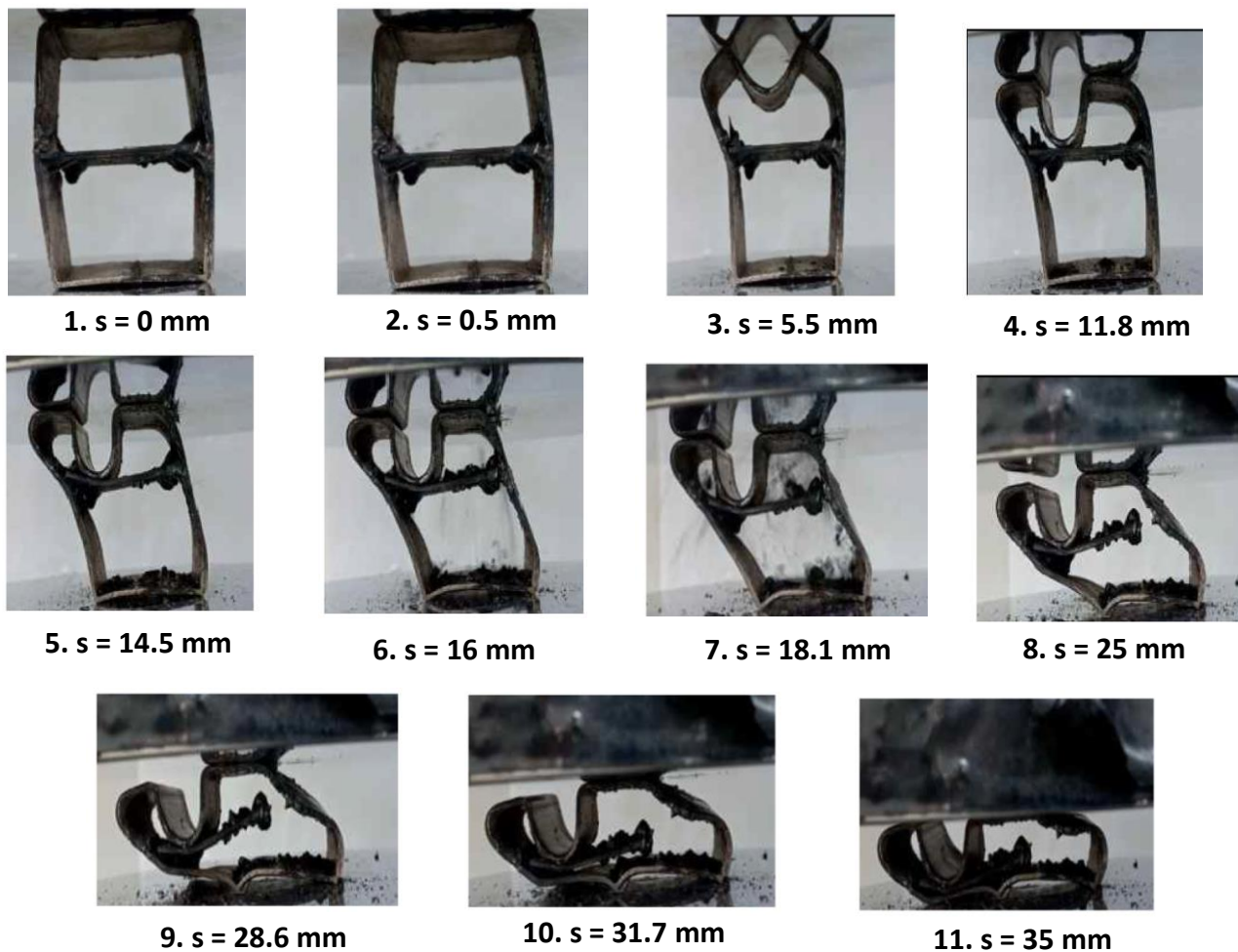
## Περιγραφή

Το δοκίμιο παρουσιάζει μια αρχική (προϋπάρχουσα) παραμόρφωση, που οφείλεται στη συμπίεση που έχει υποστεί κατά την κατασκευή του δοκιμίου. Η συγκόλληση αστοχεί πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα οι κατακόρυφες πλευρές να μη συγκρατούνται αλλά να εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό. Η κατάρρευση του δοκιμίου, που καθοδηγείται από την προπαραμόρφωση, είναι προοδευτική, συμμετρική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 5.87 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Η συγκόλληση και σε αυτή την περίπτωση αστοχεί, με αποτέλεσμα να μην συγκρατούνται οι πλαϊνές πλευρές και να εκτείνονται εξωτερικά, ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων εσωτερικών τάσεων και της ανακατανομής αυτών των τάσεων κατά μήκος των πλευρών.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την ελάχιστη - συνολικά - τιμή  $P_{min} = 2.18 \text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 6”, όπου οι εσωτερικά καμπυλωμένες (παραμορφωμένες) πλέον άνω και κάτω πλευρές και το ενδιάμεσο έλασμα έρχονται σε επαφή και ως εκ τούτου το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται. Στο “στιγμιότυπο 7” η άνω πλευρά, το ενδιάμεσο έλασμα και η κάτω πλευρά πλέον εφάπτονται, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη αντίσταση προς την συμπίεση και το φορτίο να αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό ξεπερνώντας έτσι την τιμή του μέγιστου φορτίου  $P_{max}$ .

### 3.5.10 Δοκίμο 3α



Εικόνα 16: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 3α

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 35 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 122.52 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.5 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 11.84 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 74.2 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{122.52}{74.2} = 1.65 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.3$

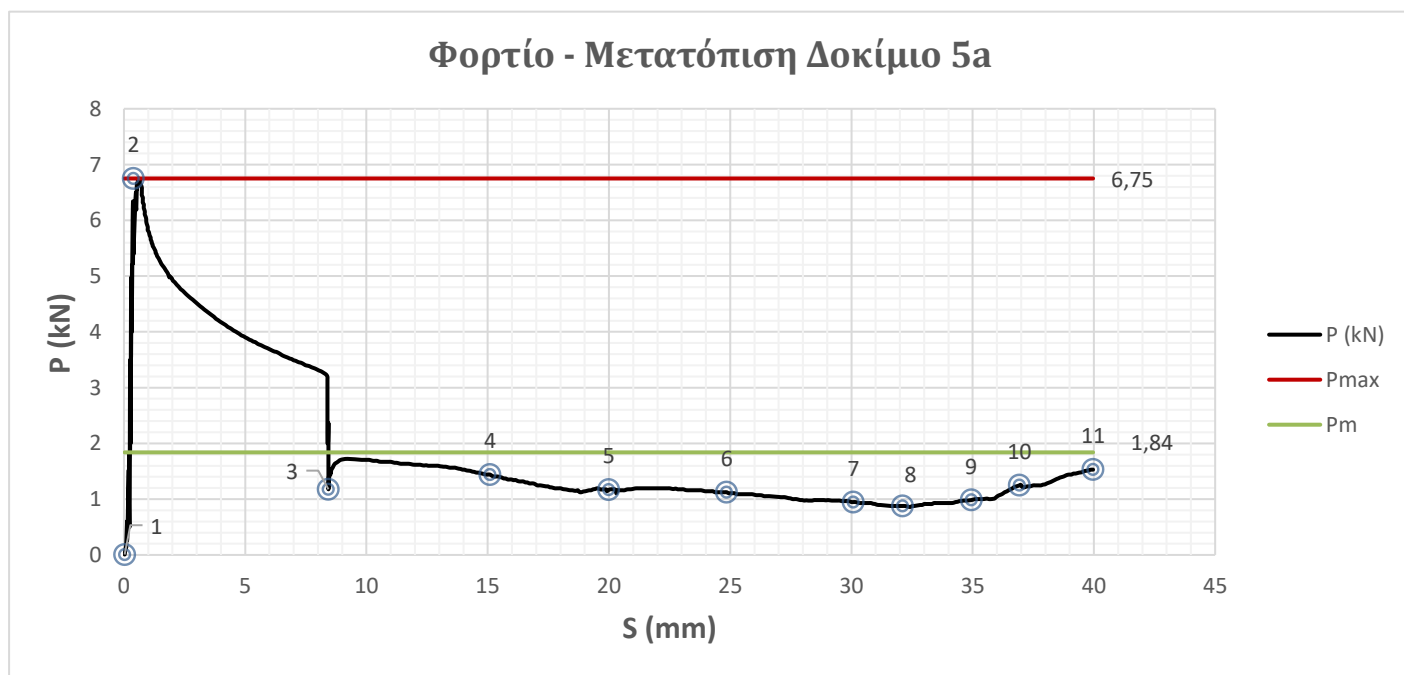
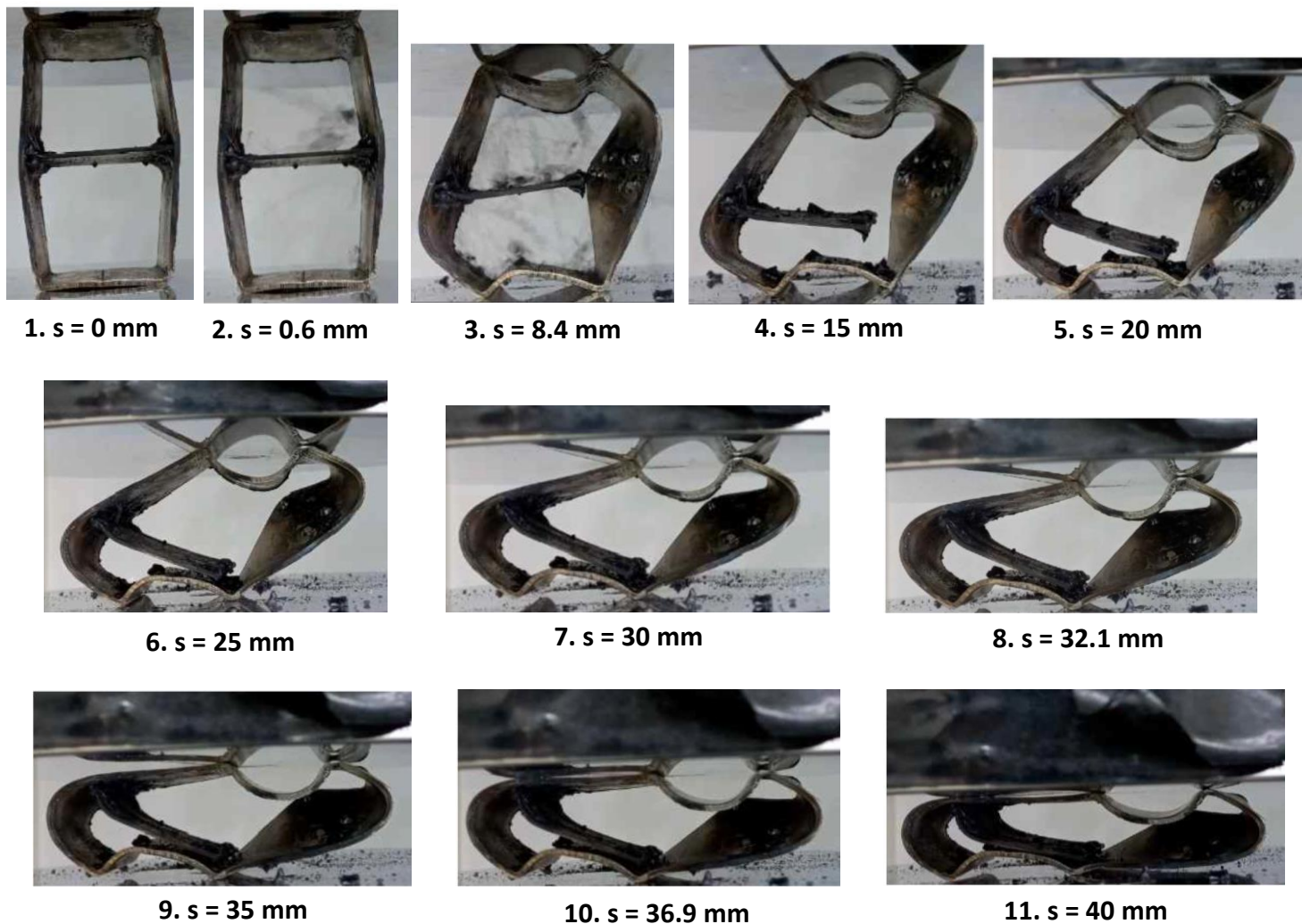
## Περιγραφή

Το δοκίμιο παρουσιάζει μια αρχική (προϋπάρχουσα) παραμόρφωση, που οφείλεται στη συμπίεση που έχει υποστεί κατά την κατασκευή του δοκιμίου. Η συγκόλληση συγκρατεί τις κατακόρυφες πλευρές του δοκιμίου, με αποτέλεσμα οι πλευρές αυτές να μην εκτείνονται εξωτερικά, ενώ η κατάρρευση των δύο τμημάτων που χωρίζονται από το ενδιάμεσο έλασμα γίνεται με διαφορετικό τρόπο. Στο αρχικό στάδιο της παραμόρφωσης παρατηρούμε ότι μόνο το πάνω τμήμα παραμορφώνεται με τη μορφή κυρτότητας, με τις κατακόρυφες πλευρές του πάνω τμήματος να εκτείνονται εξωτερικά και η πάνω πλευρά βραχύνεται λυγίζοντας προς το εσωτερικό. Το κάτω τμήμα για αρκετή ώρα είναι οριακά απαραμόρφωτο, έως ότου η συγκόλληση αστοχεί. Η κατάρρευση εξελίσσεται ασύμμετρα λόγω της κατασκευής, αφού το δοκίμιο δεν είναι ομοιόμορφο, ομοιογενές και τέλεια γεωμετρικά κατασκευασμένο.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 11.84 \text{ kN}$ . Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την τιμή  $P = 2.65 \text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 4”, όπου η πάνω πλευρά έρχεται σε επαφή με το ενδιάμεσο έλασμα και το πιέζει προς τα κάτω. Εδώ παρατηρείται ότι το δοκίμιο αρχίζει πιο έντονα να γέρνει προς τα αριστερά, επιτείνοντας την ασυμμετρία της κατάρρευσης. Το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται έως την τιμή  $P = 5.27 \text{ kN}$  (“στιγμιότυπο 5”), ενώ στη συνέχεια μειώνεται εκ νέου, αφού η γεωμετρία έχει μεταβληθεί σημαντικά και οι επιφάνειες που εφάπτονται στην κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης, ολισθαίνουν προς τα αριστερά. Η κατασκευή καταρρέει διατμητικά σχηματίζοντας μηχανισμό “πλασιού”. Στο “στιγμιότυπο 6” αστοχεί ένα μέρος της συγκόλλησης στην δεξιά πλευρά, ενώ η διάρρηξη της συγκόλλησης ολοκληρώνεται στο “στιγμιότυπο” 7.

Η μείωση του φορτίου συνεχίζεται μέχρι το “στιγμιότυπο 9”, όπου καταγράφεται η ελάχιστη - συνολικά - τιμή του,  $P_{min} = 1.77 \text{ kN}$ . Στη συνέχεια, κατά το τελικό στάδιο της καταπόνησης, το φορτίο αυξάνεται σταδιακά λόγω της μηχανικής αλληλεπίδρασης του άνω και κάτω τμήματός του (συμπίεση “συσσωρευμένου” υλικού), όπως φαίνεται στα “στιγμιότυπα 10,11”.

### 3.5.11 Δοκίμο 5a



Εικόνα 17: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 5a



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 73.56 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 1.84 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 6.75 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 78.9 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{73.56}{78.9} = 0.93 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.27$

## Περιγραφή

Το δοκίμιο παρουσιάζει μια αρχική (προϋπάρχουσα) παραμόρφωση, που οφείλεται στη συμπίεση που έχει υποστεί κατά την κατασκευή του δοκιμίου. Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική και χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη τοπικών καμπυλώσεων. Πολύ γρήγορα αστοχεί ένα μέρος της συγκόλλησης στην δεξιά πλευρά. Δεν πραγματοποιείται ωστόσο πλήρης διάρρηξη της συγκόλλησης, αφού διατηρείται ένα σημείο της συγκόλλησης στο πίσω μέρος, με αποτέλεσμα εκεί να συγκρατείται η δεξιά πλευρά ενώ στο μπροστά μέρος αποκολλάται και εκτείνεται εξωτερικά, ακολουθώντας μία ασύμμετρη κατάρρευση. Όταν ολοκληρώνεται η διάρρηξη της συγκόλλησης, το δοκίμιο συνεχίζει να καταρρέει ασύμμετρα, με τις κατακόρυφες πλευρές να εκτείνονται εξωτερικά. Σχηματίζονται πλαστικοί αρμό στην αριστερή πλευρά, κοντά στο μέσο του κάτω τμήματος και στην δεξιά πλευρά, κοντά στο μέσο του πάνω τμήματος.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 11.84 \text{ kN}$  και έπειτα το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα. Η πρώτη αστοχία της συγκόλλησης γίνεται λίγο πριν το “στιγμιότυπο 2”, ενώ η ολοκληρωτική διάρρηξή της πραγματοποιείται στο “στιγμιότυπο 3”, όπου παρατηρείται απότομη πτώση του φορτίου. Οι επιφάνειες που εφάπτονται στην κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης, ολισθαίνουν προς τα δεξιά. Η κατασκευή καταρρέει διατμητικά σχηματίζοντας μηχανισμό “πλαισίου”. Οι κατακόρυφες πλευρές του εκτείνονται εξωτερικά και οι οριζόντιες πλευρές βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό. Αμέσως μετά γίνεται μία σχετική επαναφορά του φορτίου με μικρή αύξηση της τιμής του και έπειτα συνεχίζεται η πτώση του φορτίου μέχρι την τιμή  $P_{min} = 0.86 \text{ kN}$  (“στιγμιότυπο 8”), όπου οι εσωτερικά καμπυλωμένες (παραμορφωμένες) πλέον άνω και δεξιά πλευρές έρχονται σε επαφή και ως εκ τούτου το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

### 3.5.12 Δοκίμο 8a



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.7$  mm



3.  $s = 0.9$  mm



4.  $s = 4.9$  mm



5.  $s = 10$  mm



6.  $s = 15$  mm



7.  $s = 18.9$  mm



8.  $s = 20$  mm

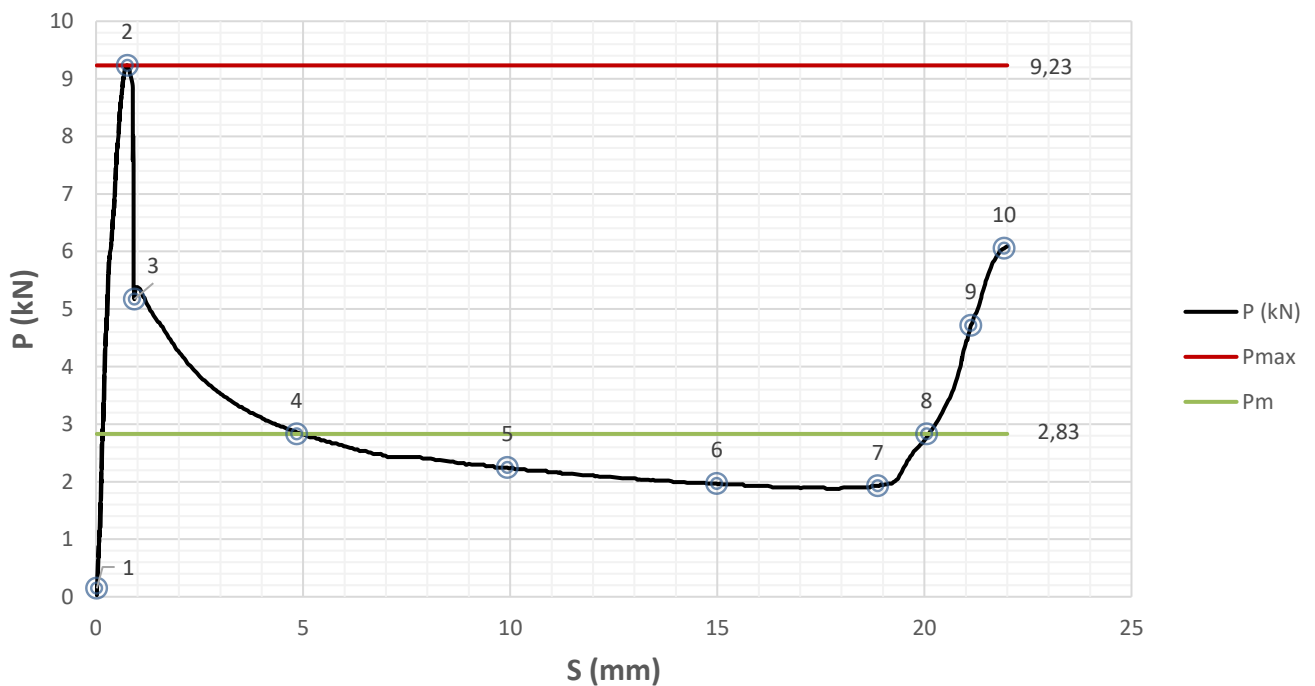


9.  $s = 21.1$  mm



10.  $s = 22$  mm

### Φορτίο - Μετατόπιση Δοκίμο 8a



Εικόνα 18: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 8a



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 22 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 62.26 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 2.83 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 9.23 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 63.6 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{62.26}{63.6} = 0.98 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.31$

## Περιγραφή

Το δοκίμιο παρουσιάζει μια αρχική (προϋπάρχουσα) παραμόρφωση, που οφείλεται στη συμπίεση που έχει υποστεί κατά την κατασκευή του δοκιμίου. Το ενδιάμεσο έλασμα λειτουργεί ως ενίσχυση, αλλά και ως ζώνη συγκέντρωσης τάσεων. Αρχικά βλέπουμε την συγκόλληση να διατηρείται για λίγα δευτερόλεπτα και έπειτα αστοχεί. Η αστοχία της συγκόλλησης σε συνδυασμό με την αρχική παραμόρφωση που έχει υποστεί το δοκίμιο διαμορφώνουν τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου. Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Οι κατακόρυφες πλευρές εκτείνονται εξωτερικά, ενώ οι οριζόντιες βραχύνονται λυγίζοντας προς το εσωτερικό.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 9.23 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα. Κατά την πλευρική φόρτιση του δοκιμίου εμφανίζεται κάμψη των κάθετων πλευρών εξωτερικά.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά, μέχρι την τιμή  $P_{min} = 1.92 \text{ kN}$  στο “στιγμιότυπο 7”, όπου η πάνω πλευρά έρχεται σε επαφή με το ενδιάμεσο έλασμα, το οποίο βρίσκεται ήδη σε επαφή με την κάτω πλάκα. Αυτό επιδρά σημαντικά στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου, καθώς το φορτίο αρχίζει να λαμβάνει υψηλότερες τιμές μέχρι το πέρας της καταπόνησής του.

### 3.5.13 Δοκίμο 1b



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.5$  mm



3.  $s = 1.6$  mm



4.  $s = 2.8$  mm



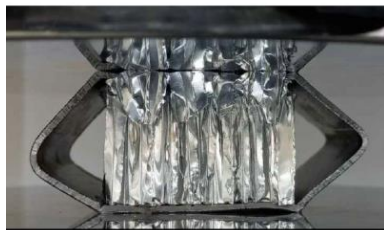
5.  $s = 4.8$  mm



6.  $s = 7$  mm



7.  $s = 10$  mm



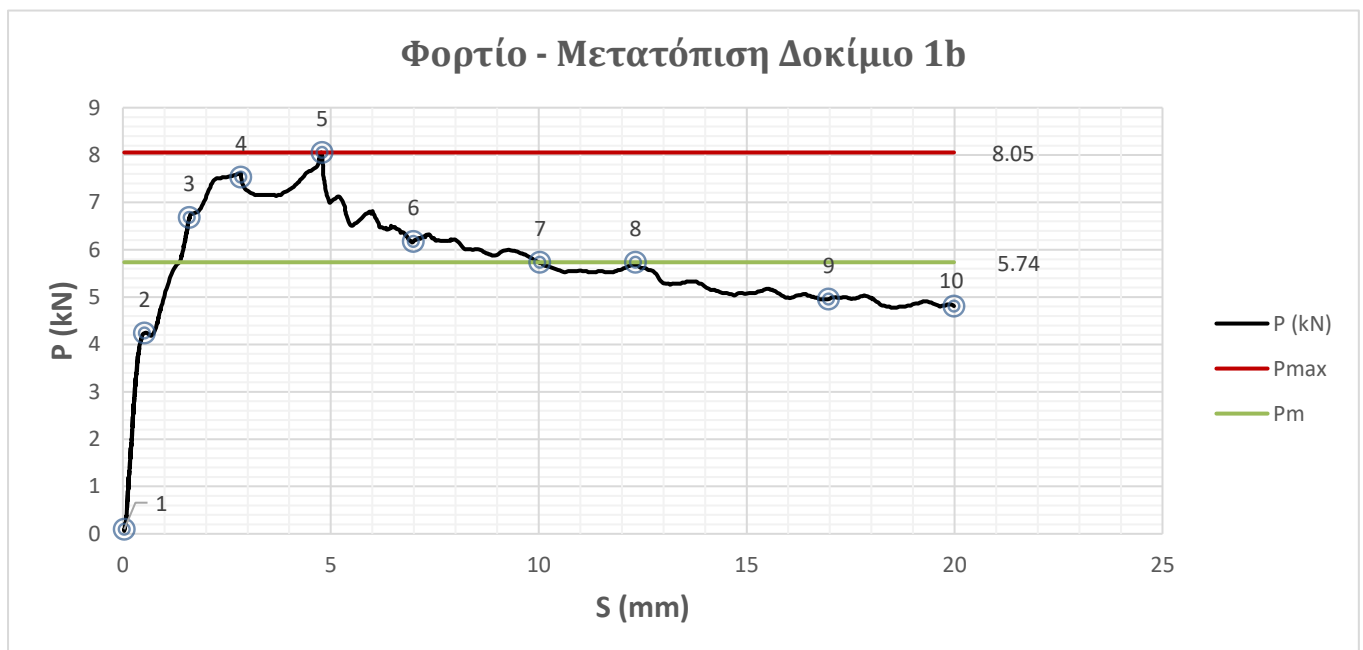
8.  $s = 12.3$  mm



9.  $s = 17$  mm



10.  $s = 20$  mm



Εικόνα 19: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 1b

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 20 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 114.71 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 5.74 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 8.05 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 63.6 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{114.71}{63.6} = 1.8 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.71$

## Περιγραφή

Στην πρώτη φάση της παραμόρφωσης παρατηρείται μια αρχική ελαφριά καμπύλωση στις πλευρές του δοκιμίου, που προκαλείται από την εφαρμογή της πλευρικής φόρτισης. Οι οριζόντιες πλευρές, ενώ στην αρχή υφίστανται μια αρχική καμπύλωση, από τη στιγμή που τα honeycomb έρχονται σε επαφή και εφάπτονται οι επιφάνειες μεταξύ άνω-κάτω πλευρών, honeycomb και ενδιάμεσου τοιχώματος, σταματούν να καμπυλώνουν λόγω της αντίστασης που δέχονται. Μάλιστα το honeycomb συμβάλει στην οριζοντιοποίηση της καμπυλότητας που έχει προηγηθεί. Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου προκύπτει από τον συνδυασμό της κατάρρευσης του honeycomb και της κατάρρευσης του κελύφους. Οι κατακόρυφες πλευρές εκτείνονται εξωτερικά και στο μέσο τους δημιουργούνται πλαστικοί αρμοί. Το honeycomb απορροφά την ενέργεια από την πλευρική φόρτιση, μετατρέποντάς την σε παραμόρφωση. Αυτό φαίνεται από τη σταδιακή αλλαγή στο σχήμα του δοκιμίου. Οι αρχικές φάσεις παραμόρφωσης δείχνουν την ενδογενή αντοχή της honeycomb δομής, η οποία απορροφά σημαντική ποσότητα ενέργειας πριν καταρρεύσει.

Στο “στιγμιότυπο 2” η πάνω πλευρά του δοκιμίου που καμπυλώνει προς τα μέσα ακουμπάει μερικώς το πάνω honeycomb. Η ύπαρξη του honeycomb εμποδίζει έτσι τις οριζόντιες πλευρές να συνεχίσουν την κάμψη τους προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Συνεχίζεται η αύξηση του φορτίου με κάποιες μικρές αυξομειώσεις λόγω μεταβολών της γεωμετρίας του δοκιμίου, μέχρι να αρχίσει το honeycomb να παραλαμβάνει το φορτίο της καταπόνησης. Στο “στιγμιότυπο 5” σημειώνεται το μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 8.05 \text{ kN}$ , αφού πλέον οι πάνω-κάτω πλευρές έχουν σχεδόν οριζοντιοποιηθεί, έχοντας αποκτήσει τη μέγιστη επιφάνεια επαφής με τα honeycomb και ξεκινάει η παραμόρφωση του πάνω honeycomb. Το φορτίο ξεκινάει να πέφτει παρουσιάζοντας διαρκείς αυξομειώσεις (οδοντωτή μορφή διαγράμματος P-S) που οφείλονται στον συνδυασμό της καταπόνησης των δύο δομών (εξωτερικού κελύφους και honeycomb). Η πτώση του φορτίου έχει αργό ρυθμό, αφού το honeycomb είναι αποτελεσματικό ως προς την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, κρατώντας το φορτίο σε υψηλές τιμές, που έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη τιμή  $P_m$ , οδηγώντας έτσι και σε υψηλό CFE.

### 3.5.14 Δοκίμο 3b



1.  $s = 0 \text{ mm}$



2.  $s = 0.6 \text{ mm}$



3.  $s = 2.7 \text{ mm}$



4.  $s = 4.9 \text{ mm}$



5.  $s = 10 \text{ mm}$



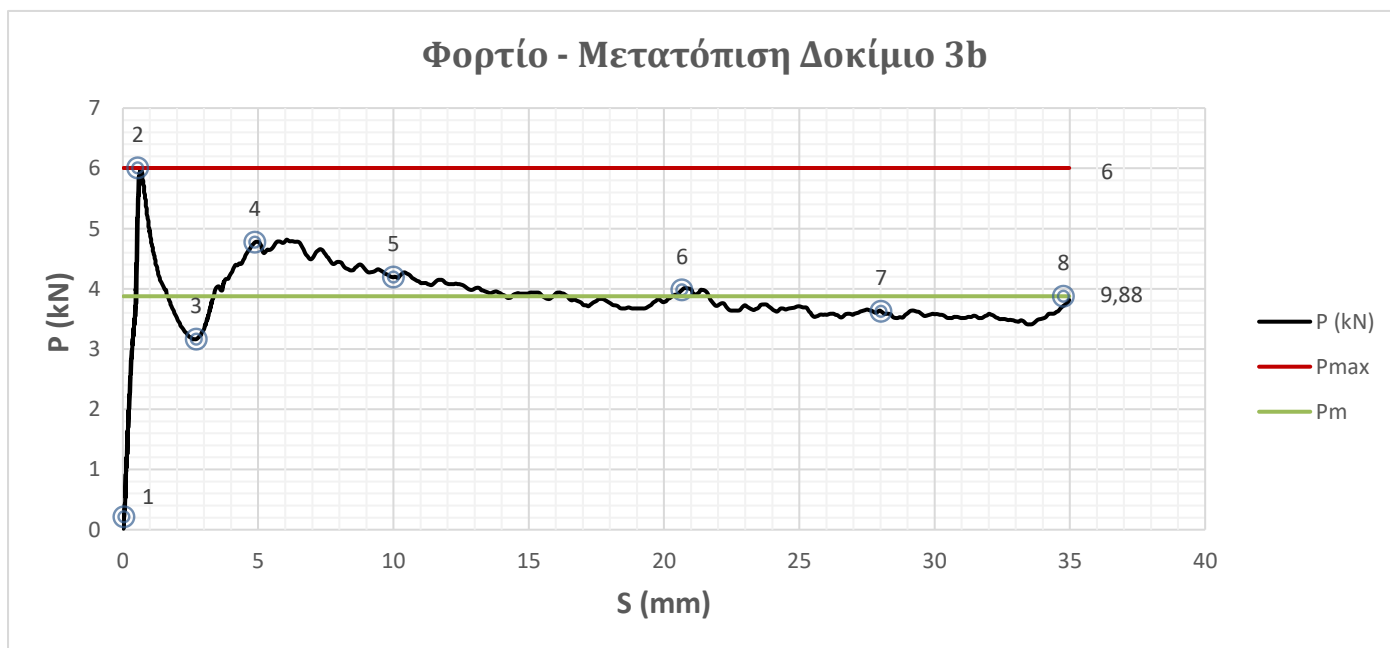
6.  $s = 20.5 \text{ mm}$



7.  $s = 28 \text{ mm}$



8.  $s = 37.4 \text{ mm}$



Εικόνα 20: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμιου 3b

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 35 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 135.65 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.88 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 6.01 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 65.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{135.65}{65.8} = 2.06 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.65$

## Περιγραφή

Κατά την αρχική φάση της παραμόρφωσης αναπτύσσονται καμπυλώσεις στις πλευρές του δοκιμίου, με τις κατακόρυφες πλευρές να εκτείνονται εξωτερικά, σχηματίζοντας πλαστικούς αρμούς στο μέσο των πλευρών. Η κατάρρευση είναι προοδευτική και συμμετρική. Αρχικά, το honeycomb δεν συμβάλει στην απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου, έως τη στιγμή που έρχεται σε επαφή η πάνω πλευρά με το πάνω honeycomb, οι επιφάνειες μεταξύ εξωτερικού κελύφους και honeycomb οριζοντιώνονται και αρχίζει το honeycomb να παραλαμβάνει φορτίο.

Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου προκύπτει από τον συνδυασμό της κατάρρευσης του honeycomb και της κατάρρευσης του κελύφους. Το honeycomb απορροφά την ενέργεια από την πλευρική φόρτιση, μετατρέποντάς την σε παραμόρφωση.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 8.05 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Μέχρι το “στιγμιότυπο 3” με φορτίο  $P_{min} = 3.16 \text{ kN}$ , το honeycomb δεν έχει συμβάλει στην απορρόφηση ενέργειας. Το honeycomb αρχίζει να ασκεί αντίσταση στην παραμόρφωση των οριζόντιων πλευρών, μέχρι το στιγμιότυπο 4, όπου το πάνω honeycomb αρχίζει να καταρρέει, και πλέον η τιμή του φορτίου αρχίζει να μειώνεται. Στο “στιγμιότυπο 6” ξεκινάει η κατάρρευση του κάτω honeycomb, και λόγω αυτού αποτυπώνεται ένα “peak” στο διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης.

Η μείωση του φορτίου έχει αργό ρυθμό, αφού το honeycomb είναι αποτελεσματικό ως προς την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, κρατώντας το φορτίο σε υψηλές τιμές, που έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη τιμή  $P_m$ , οδηγώντας έτσι σε υψηλό CFE.

### 3.5.15 Δοκίμο 5b



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 0.6$  mm



3.  $s = 2.2$  mm



4.  $s = 5.4$  mm



5.  $s = 15.9$  mm



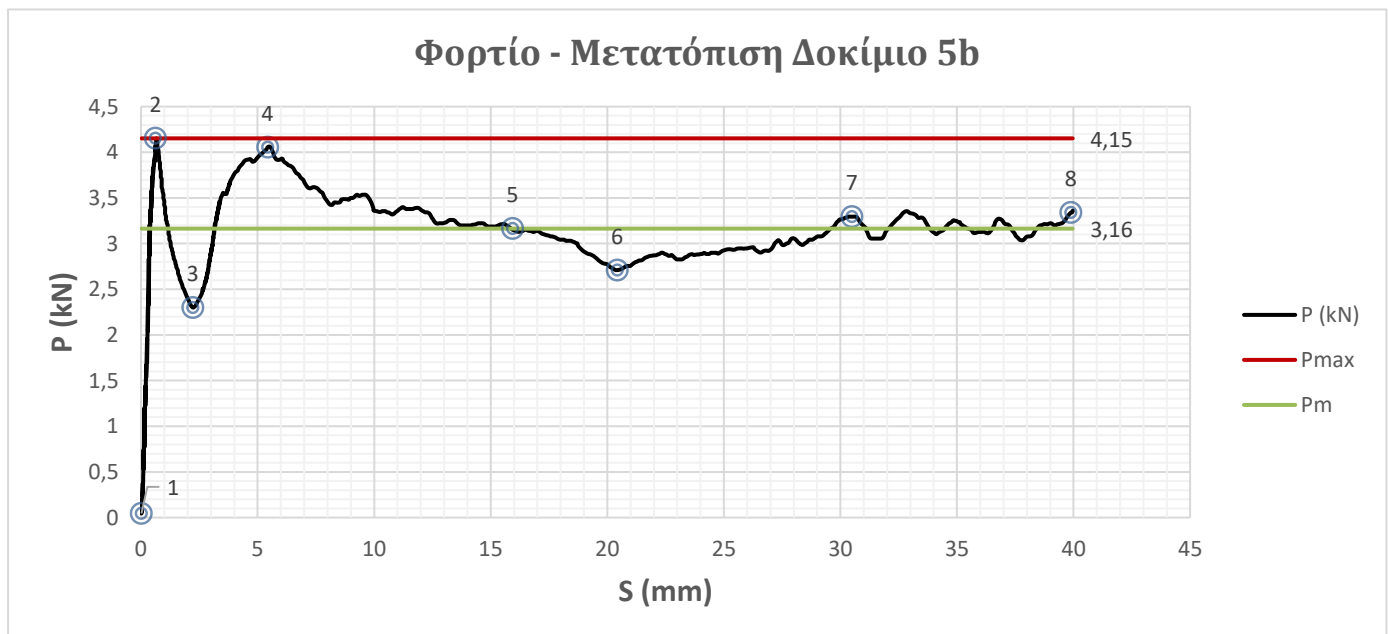
6.  $s = 20.4$  mm



7.  $s = 30.5$  mm



8.  $s = 40$  mm



Εικόνα 21: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 5b



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 126.56 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.16 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 4.15 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 74.4 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{126.56}{74.4} = 1.7 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.76$

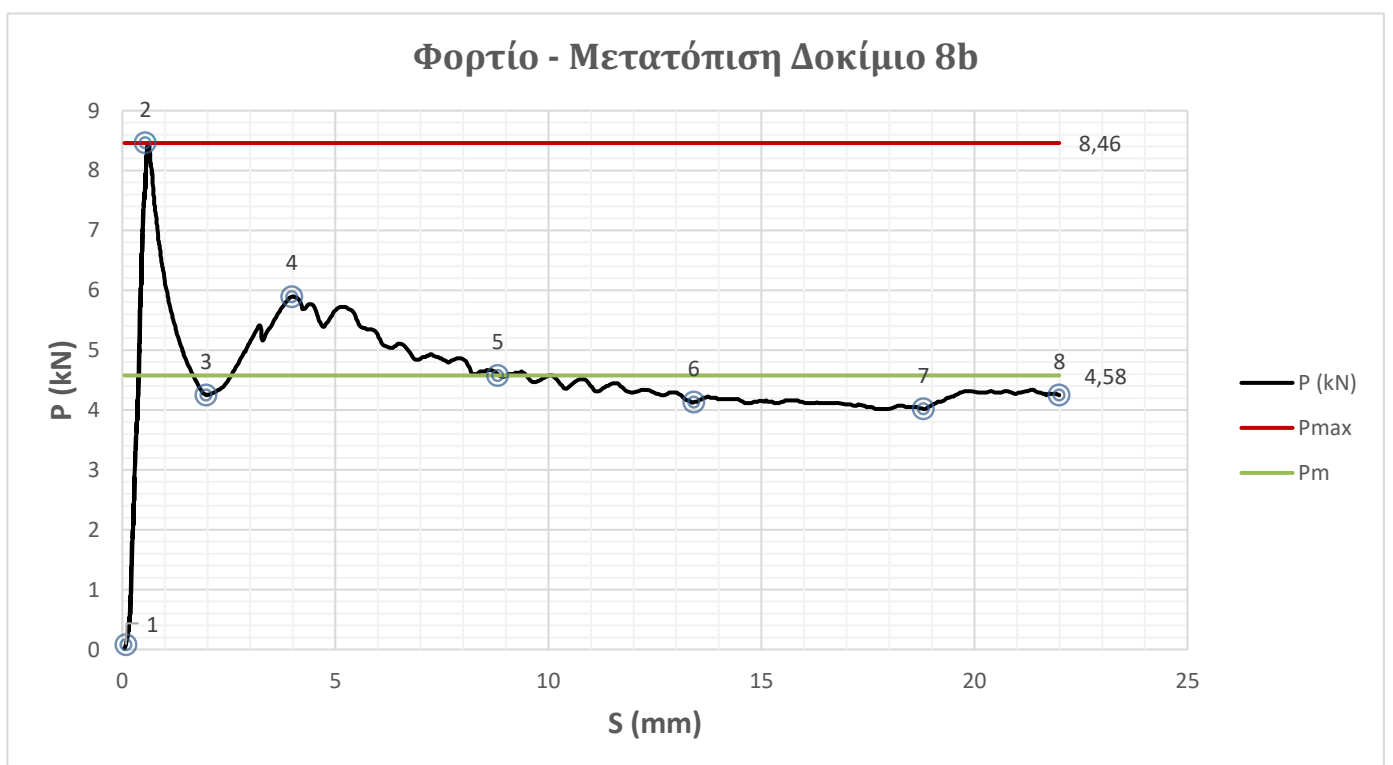
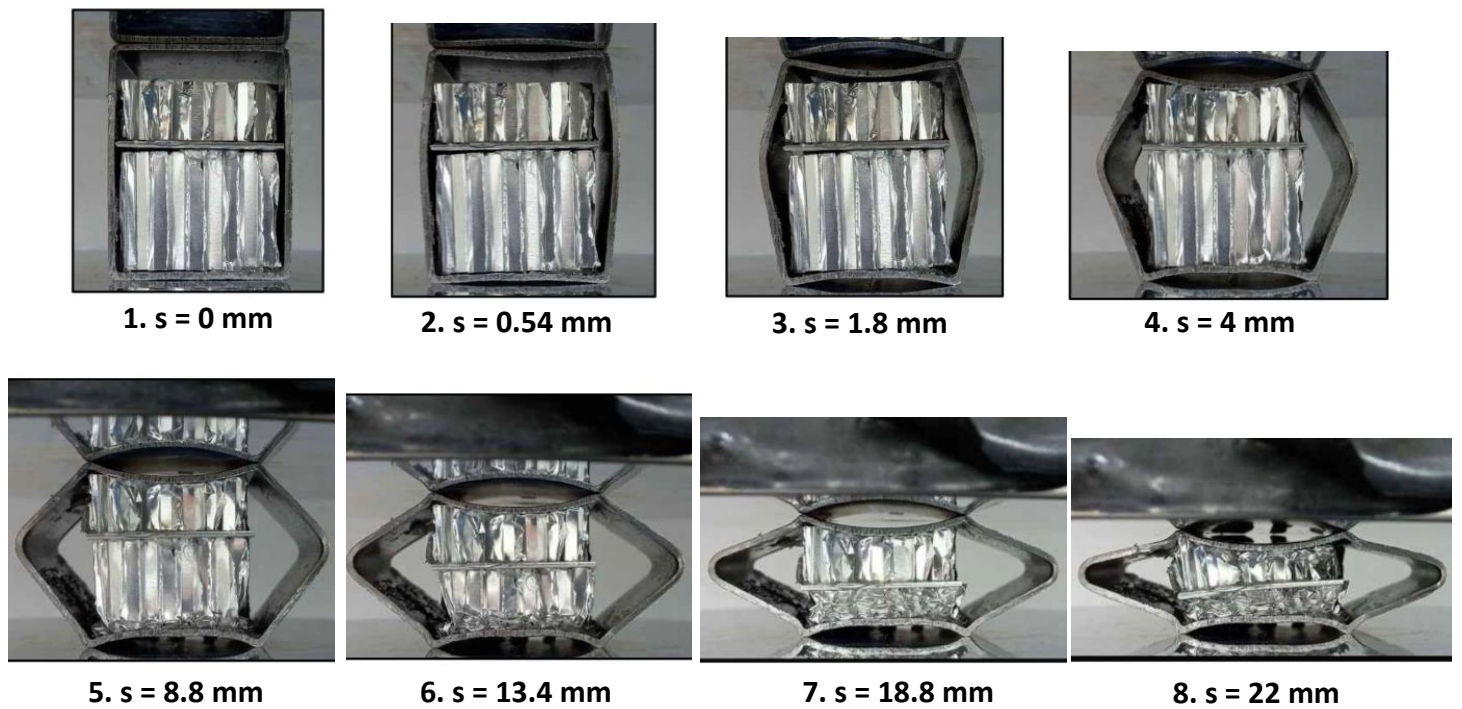
## Περιγραφή

Κατά την αρχική φάση της παραμόρφωσης αναπτύσσονται καμπυλώσεις στις πλευρές του δοκιμίου, με τις κατακόρυφες πλευρές να εκτείνονται εξωτερικά, σχηματίζοντας πλαστικούς αρμούς στο μέσο των πλευρών. Η κατάρρευση είναι προοδευτική και συμμετρική. Οι αρχικές φάσεις παραμόρφωσης δείχνουν την ενδογενή αντοχή της honeycomb δομής, η οποία απορροφά σημαντική ποσότητα ενέργειας πριν καταρρεύσει. Το honeycomb απορροφά την ενέργεια από την πλευρική φόρτιση, μετατρέποντάς την σε παραμόρφωση. Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου προκύπτει από τον συνδυασμό της κατάρρευσης του honeycomb και της κάμψης των κάθετων πλευρών προς τα έξω.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 4.15 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Έως το στιγμιότυπο 3 με φορτίο  $P_{min} = 2.3 \text{ kN}$ , το honeycomb δεν έχει συμβάλει στην απορρόφηση ενέργειας. Το honeycomb αρχίζει να ασκεί αντίσταση στην παραμόρφωση των οριζόντιων πλευρών, μέχρι το “στιγμιότυπο 4”, όπου το honeycomb αρχίζει να καταρρέει, και πλέον η τιμή του φορτίου αρχίζει να μειώνεται. Παρατηρούμε ότι κατάρρευση αρχίζουν σχεδόν μαζί και συνεχίζουν παράλληλα το πάνω και το κάτω honeycomb, ενώ το μεσαίο αρχίζει την κατάρρευση του στο “στιγμιότυπο 7”, αφού τα πάνω και κάτω honeycomb έχουν καταρρεύσει πλήρως.

Η πτώση του φορτίου έχει αργό ρυθμό, αφού το honeycomb είναι αποτελεσματικό ως προς την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, κρατώντας το φορτίο σε υψηλές τιμές, που έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη τιμή  $P_m$ , οδηγώντας έτσι σε υψηλό CFE.

### 3.5.16 Δοκίμο 8b



Εικόνα 22: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 8b



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 22 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 100.69 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 4.58 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 8.46 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 55 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{100.69}{55} = 1.83 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.54$

## Περιγραφή

Κατά την αρχική φάση της παραμόρφωσης αναπτύσσονται καμπυλώσεις στις πλευρές του δοκιμίου, με τις κατακόρυφες πλευρές να εκτείνονται εξωτερικά, σχηματίζοντας πλαστικούς αρμούς στο μέσο των πλευρών. Η κατάρρευση είναι προοδευτική και συμμετρική. Οι αρχικές φάσεις παραμόρφωσης δείχνουν την ενδογενή αντοχή της honeycomb δομής, η οποία απορροφά σημαντική ποσότητα ενέργειας πριν καταρρεύσει. Όταν εφάπτονται οι επιφάνειες μεταξύ άνω-κάτω πλευρών, honeycomb και ενδιάμεσου τοιχώματος, οι οριζόντιες πλευρές σταματούν να καμπυλώνουν λόγω της αντίστασης που δέχονται από το honeycomb. Το honeycomb απορροφά την ενέργεια από την πλευρική φόρτιση, μετατρέποντάς την σε παραμόρφωση. Η απορρόφηση ενέργειας του δοκιμίου προκύπτει από τον συνδυασμό της κατάρρευσης του honeycomb και της κατάρρευσης του κελύφους.

Στο “στιγμιότυπο 2” το δοκίμιο περνάει από την ελαστική φάση παραμόρφωσης στην πλαστική, όπου παρουσιάζεται το  $P_{max} = 8.46 \text{ kN}$ . Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Μέχρι το “στιγμιότυπο 3” με φορτίο (τοπικό ελάχιστο)  $P = 4.25 \text{ kN}$ , το honeycomb δεν έχει συμβάλει στην απορρόφηση ενέργειας. Σε αυτό το σημείο τα honeycomb οριζοντικοποιούνται με το ενδιάμεσο τοίχωμα και τις οριζόντιες πλευρές. Το honeycomb αρχίζει να ασκεί αντίσταση στην παραμόρφωση των πάνω-κάτω πλευρών, έως το “στιγμιότυπο 4”, όπου το honeycomb αρχίζει να καταρρέει, και πλέον το φορτίο αρχίζει να πέφτει.

Η μείωση της τιμής του φορτίου έχει αργό ρυθμό, αφού το honeycomb είναι αποτελεσματικό ως προς την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, κρατώντας το φορτίο σε υψηλές τιμές, που έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη τιμή  $P_m$ , οδηγώντας έτσι σε υψηλό CFE.

### 3.5.17 Δοκίμο 1c



1.  $s = 0 \text{ mm}$



2.  $s = 1.9 \text{ mm}$



3.  $s = 2.3 \text{ mm}$



4.  $s = 4.6 \text{ mm}$



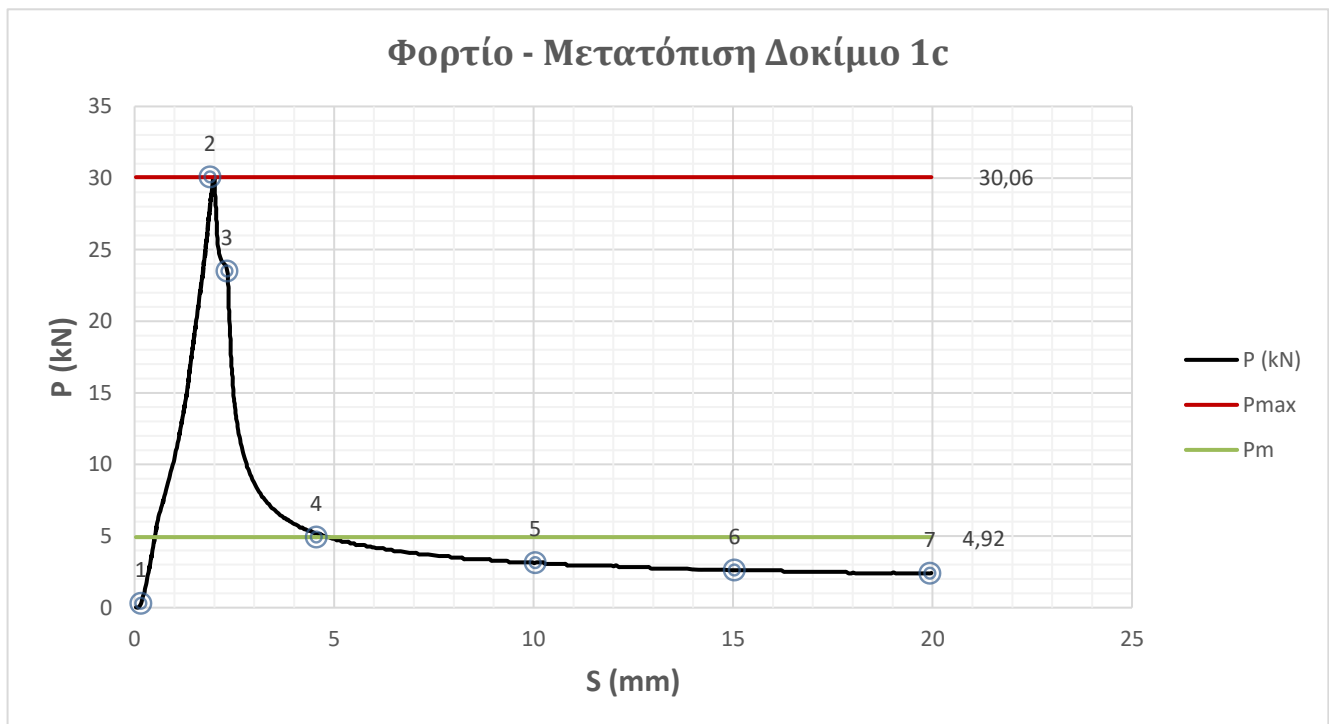
5.  $s = 10 \text{ mm}$



6.  $s = 15 \text{ mm}$



7.  $s = 20 \text{ mm}$



Εικόνα 23: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμου 1c

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 20 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 98.46 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 4.92 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 30.06 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 54.5 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{98.46}{54.5} = 1.81 \text{ J/kg}$

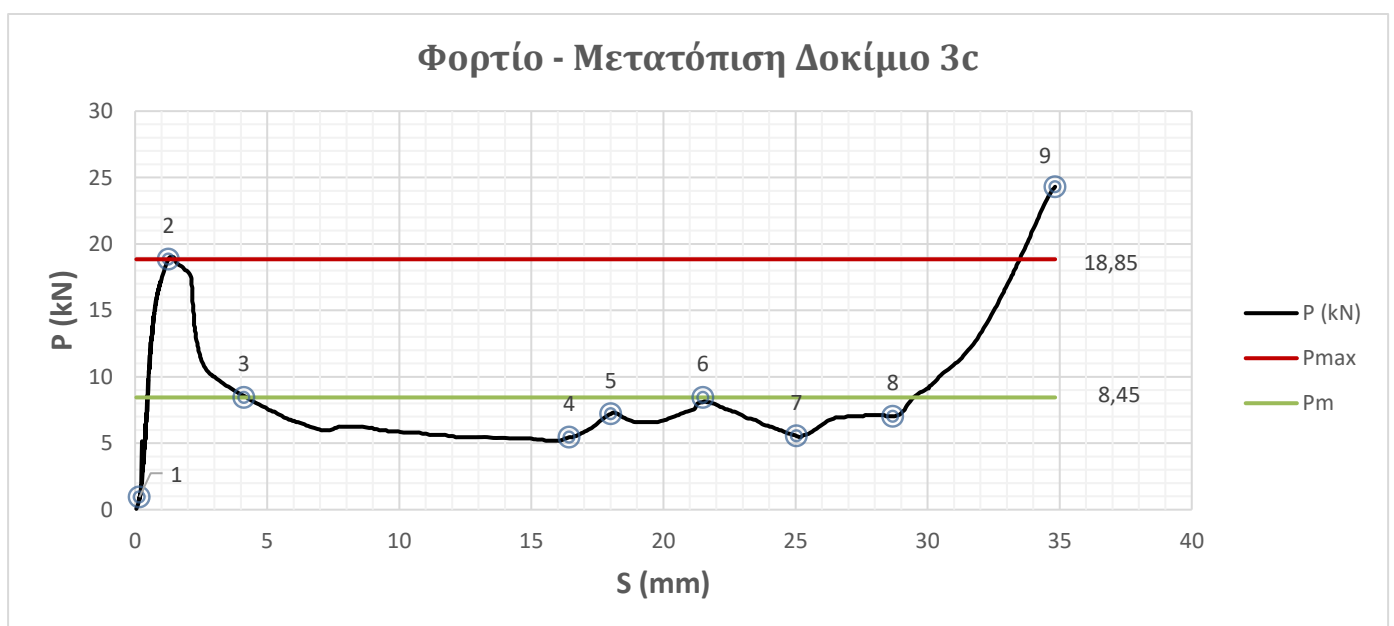
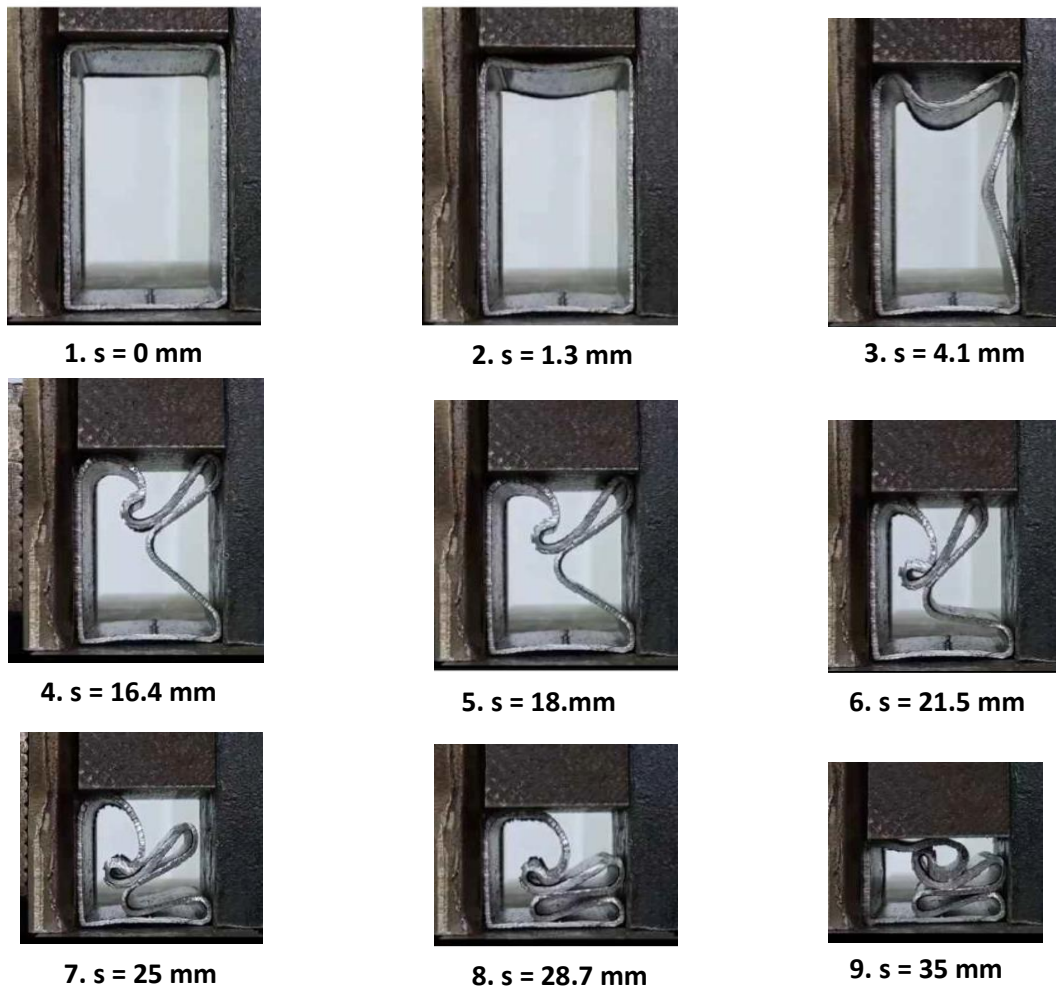
Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.16$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική, συμμετρική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων και την δημιουργία πλαστικών αρμών στο μέσο των πλευρών. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο καταρρέει με σχετικά συμμετρικό τρόπο, πιθανώς λόγω της συμμετρίας της φόρτισης και των περιοριστικών κατασκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Οι περιοριστικές κατασκευές φαίνεται να επιβάλλουν μια συγκεκριμένη μορφή παραμόρφωσης, επιτρέποντας την ανάλυση του τρόπου κατάρρευσης υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Εξαιτίας των πλευρικών εμποδίων, οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου.

Στο “στιγμιότυπο 2” εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 30.06 \text{ kN}$ . Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σημείο το δοκίμιο είναι οριακά απαραμόρφωτο. Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα. Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά μετά τον λυγισμό και της δεξιά πλευράς, όπως φαίνεται στο στιγμιότυπο 3. Παρατηρούμε ότι το φορτίο μειώνεται έως το πέρας της κατάρρευσης, αφού δεν υπάρχει επαφή των πλευρών του δοκιμίου, που θα οδηγούσαν σε εκ νέου αύξηση του φορτίου.

### 3.5.18 Δοκίμιο 3c



Εικόνα 24: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμιου 3c

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 35 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 295.67 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 8.45 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 18.85 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 57.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{295.67}{57.8} = 5.12 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.45$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται μέσω της ανάπτυξης τοπικών καμπυλώσεων προοδευτικά. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο καταρρέει με πλήρως ασύμμετρο τρόπο. Εξαιτίας των πλευρικών εμποδίων, οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου. Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου παρατηρείται η δημιουργία πολλών πλαστικών αρμών, κάτι που οδηγεί στη σημαντική αύξηση του φορτίου.

Στο “στιγμιότυπο 2” εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 18.85 \text{ kN}$ . Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σημείο το δοκίμιο είναι οριακά απαραμόρφωτο. Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι κατακόρυφες πλευρές δεν μπορούν να λυγίσουν προς τα έξω λόγω του φραγμού που συναντούν. Έτσι αρχίζουν να λυγίζουν προς το εσωτερικό η δεξιά και η πάνω πλευρά, οι οποίες στο “στιγμιότυπο 2” έρχονται σε επαφή, σταματώντας έτσι την πτώση του φορτίου. Το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται, μέχρι το “στιγμιότυπο 6”, όπου χάνεται η επαφή του πάνω δεξιά σημείου του δοκιμίου με την κινούμενη (άνω) πλάκα συμπίεσης, λόγω του τρόπου που αναπτύσσεται η γεωμετρία του δοκιμίου. Στο “στιγμιότυπο 7” έρχεται σε επαφή το κάτω μέρος της δεξιά καμπυλωμένης πλευράς με την κάτω πλευρά, και το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται, ενώ στο “στιγμιότυπο 8” ο ρυθμός αύξησης της τιμής του φορτίου μεγαλώνει λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου, όπου το υλικό πλέον έχει γίνει πιο συμπαγές.

### 3.5.19 Δοκίμιο 5c



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 1.7$  mm



3.  $s = 8.4$  mm



4.  $s = 14.9$  mm



5.  $s = 22.8$  mm



6.  $s = 27.7$  mm



7.  $s = 28.8$  mm



8.  $s = 32.3$  mm

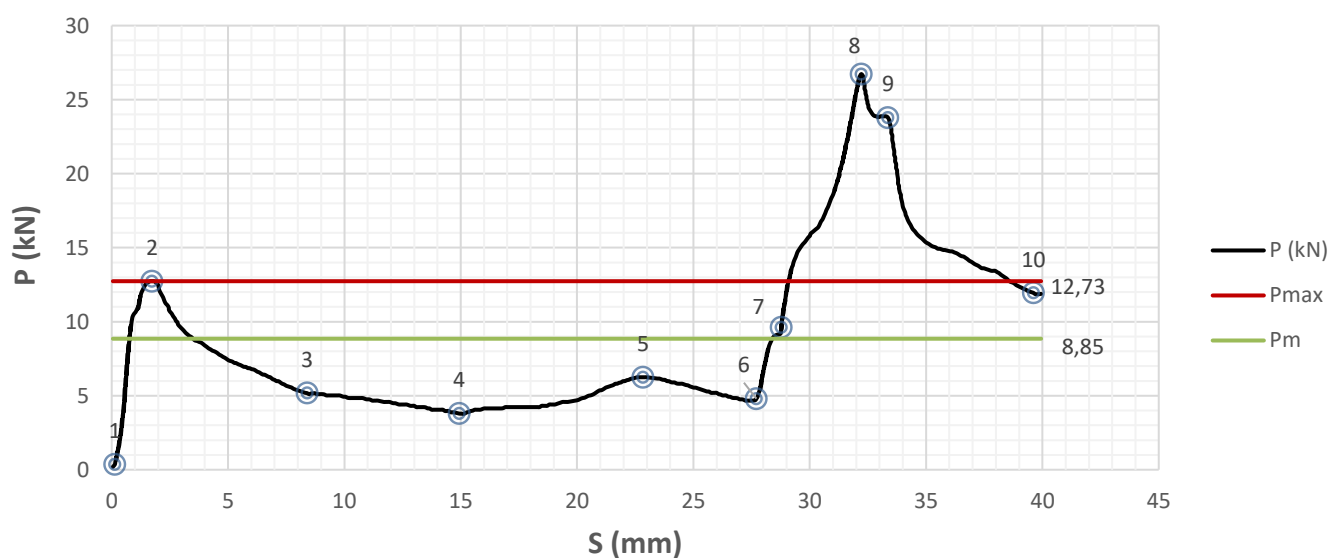


9.  $s = 33.4$  mm



10.  $s = 40$  mm

#### Φορτίο - Μετατόπιση Δοκίμιο 5c



Εικόνα 25: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκίμιου 5c

Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 40 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 353.988 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 8.85 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 12.74 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 63.3 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{353.988}{63.3} = 5.59 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.695$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου γίνεται μέσω της ανάπτυξης τοπικών καμπυλώσεων προοδευτικά. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο καταρρέει με σχετικά συμμετρικό τρόπο, λόγω της συμμετρίας της φόρτισης και των περιοριστικών κατασκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Εξαιτίας των πλευρικών εμποδίων, οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου.

Στο “στιγμιότυπο 2” εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 18.85 \text{ kN}$ . Η πάνω πλευρά έχει αρχίσει να καμπυλώνει προς το εσωτερικό, ενώ τα υπόλοιπα μέρη του κελύφους παραμένουν απαραμόρφωτα. Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται μέχρι το “στιγμιότυπο 4”, όπου τα σημεία που κατά την αρχική γεωμετρία του δοκιμίου ήταν οι γωνίες της πάνω με την αριστερή και την δεξιά πλευρά, και μέχρι τώρα συγκλίνανε προς το κέντρο, έρχονται σε επαφή. Στο “στιγμιότυπο 5” το φορτίο παρουσιάζει μια μικρή πτώση μέχρι το “στιγμιότυπο 6”, όπου η εσωτερικά καμπυλωμένη (παραμορφωμένη) πλέον άνω πλευρά έρχεται σε επαφή και πιέζει την κάτω πλευρά, οπότε το φορτίο αρχίζει να αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό, φτάνοντας σε αρκετά υψηλές τιμές.

Στο “στιγμιότυπο 8” το φορτίο φτάνει στην τιμή του  $P = 26.72 \text{ kN}$ , και αμέσως μετά το φορτίο αρχίζει να πέφτει, αφού αρχίζουν οι κατακόρυφες πλευρές, πρώτα η δεξιά και λίγο μετά και η αριστερή, να λυγίζουν προς το εσωτερικό, ενώ δημιουργούνται πλαστικοί αρμοί στο μέσο των πλευρών, οδηγώντας έτσι στην τελική παραμόρφωση του δοκιμίου όπως αυτή φαίνεται στο “στιγμιότυπο 10”.



### 3.5.20 Δοκίμο 8c



1.  $s = 0$  mm



2.  $s = 1.7$  mm



3.  $s = 2$  mm



4.  $s = 5.2$  mm



5.  $s = 10$  mm



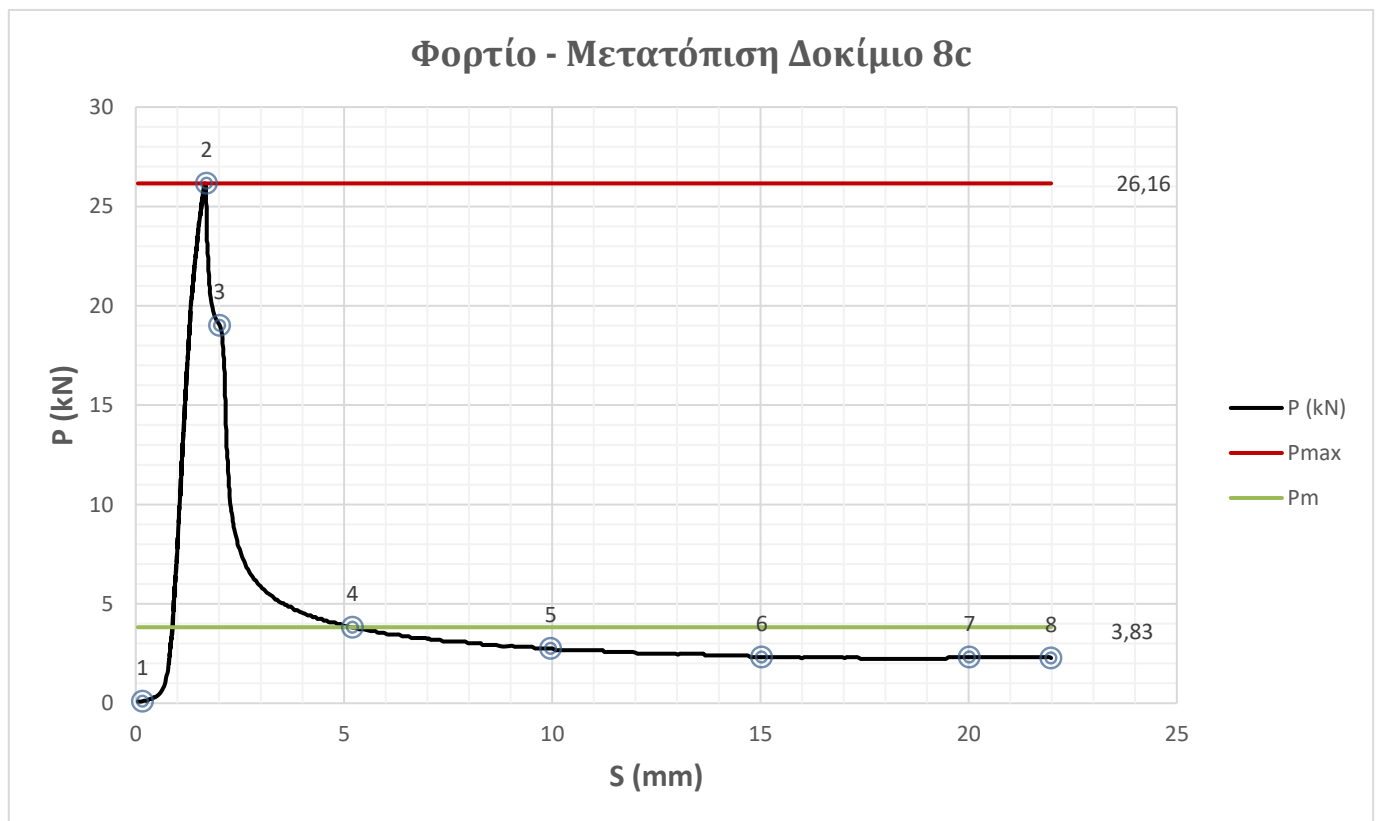
6.  $s = 15$  mm



7.  $s = 19.5$  mm



8.  $s = 22$  mm



Εικόνα 26: Στιγμιότυπα κατάρρευσης και καμπύλη φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 8c



Μέγιστη Βράχυνση:  $S_{max} = 22 \text{ mm}$

Ενέργεια Απορρόφησης:  $E_{abs} = 84.15 \text{ J}$

Μέσο φορτίο:  $P_m = 3.83 \text{ kN}$

Μέγιστο φορτίο:  $P_{max} = 26.16 \text{ kN}$

Μάζα:  $m = 47.8 \text{ kg}$

Ειδική ενέργεια απορρόφησης:  $SEA = \frac{E_{abs}}{m} = \frac{84.15}{47.8} = 1.76 \text{ J/kg}$

Συντελεστής ομοιομορφίας:  $CFE = \frac{P_m}{P_{max}} = 0.15$

## Περιγραφή

Η κατάρρευση του δοκιμίου είναι προοδευτική και γίνεται με την ανάπτυξη καμπυλώσεων στο μέσο των πλευρών. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο καταρρέει με σχετικά συμμετρικό τρόπο, λόγω της συμμετρίας της φόρτισης και των περιοριστικών κατασκευών που χρησιμοποιήθηκαν. Εξαιτίας των πλευρικών εμποδίων, οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου.

Στο “στιγμιότυπο 2” εφαρμόζεται το μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 26.16 \text{ kN}$ . Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σημείο το δοκίμιο είναι σχεδόν απαραμόρφωτο. Όταν η φόρτιση ξεπερνά το όριο ελαστικότητας του υλικού, αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, όπου οι καμπυλώσεις γίνονται μόνιμες. Οι κατακόρυφες πλευρές δεν μπορούν να ανοίξουν προς τα έξω λόγω του φραγμού που συναντούν και οδηγούνται προς το εσωτερικό του δοκιμίου. Το δοκίμιο αρχίζει από αυτό το σημείο να παραμορφώνεται μη αναστρέψιμα.

Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται ομαλά μετά τον λυγισμό αρχικά της δεξιά πλευράς και αμέσως μετά και της αριστερής πλευράς, όπως φαίνεται στο “στιγμιότυπο 3”. Στο “στιγμιότυπο 7” οι δύο καμπυλωμένες πλευρές έρχονται σε επαφή, κάτι που οδηγεί σε μικρή αύξηση του φορτίου.

## 4. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Μετά από την ολοκλήρωση του υπολογισμού των δεικτών crashworthiness για κάθε εξεταζόμενο δοκίμιο, θα προχωρήσουμε στην σύγκριση των αποτελεσμάτων. Θα πραγματοποιηθούν δύο σειρές συγκρίσεων. Στην πρώτη σειρά συγκρίνονται δοκίμια ίδιων βασικών διαστάσεων, ενώ στην δεύτερη συγκρίνονται δοκίμια ανά δομική διάταξη.

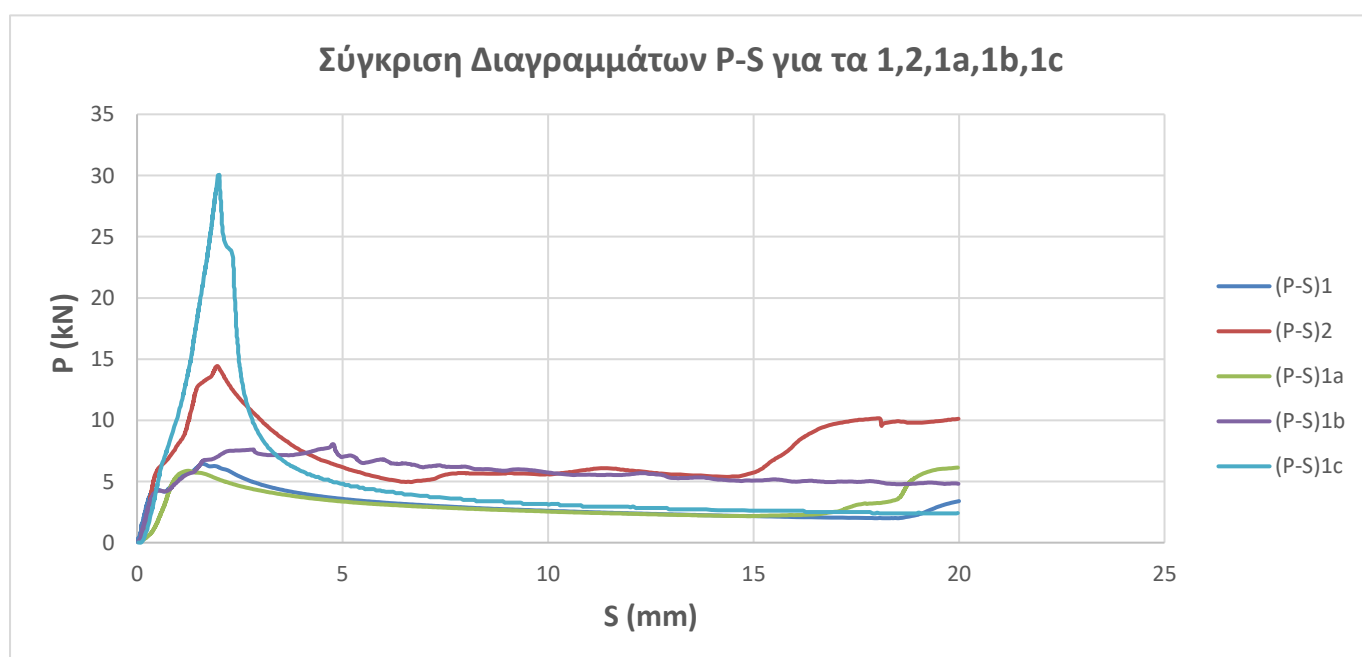
### 4.1 Σύγκριση δοκιμών ίδιων βασικών διαστάσεων (αρχικής γεωμετρίας)

#### 4.1.1 Δοκίμια 37.80 x 37.80 (1,2,1a,1b,1c)

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	Smax (mm)	Eabs (J)	Pm (kN)	Pmax (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>1</b>	37,8	54,50	20	61,13	3,06	6,44	1,12	0,47
<b>2</b>	37,8	67,90	20	<b>145,34</b>	<b>7,27</b>	14,44	<b>2,14</b>	0,50
<b>1a</b>	37,8	71,90	20	63,33	3,17	<b>5,87</b>	0,88	0,54
<b>1b</b>	37,8	63,60	20	114,71	5,74	8,05	1,80	<b>0,71</b>
<b>1c</b>	37,8	54,50	20	98,46	4,92	30,06	1,81	0,16
<b>Μεταβολή 1-2</b>	0%	25%	0%	138%	138%	124%	91%	6%
<b>Μεταβολή 1-1a</b>	0%	32%	0%	4%	4%	-9%	-21%	14%
<b>Μεταβολή 1-1b</b>	0%	17%	0%	88%	88%	25%	61%	50%
<b>Μεταβολή 1-1c</b>	0%	0%	0%	61%	61%	367%	61%	-66%

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Με την προσθήκη συγκολλητού ελάσματος στο μέσο του δοκιμίου επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση (σχεδόν διπλασιασμός) όλων των δεικτών κατάρρευσης εκτός του CFE που παραμένει στα ίδια επίπεδα, παρουσιάζοντας μικρή αύξηση, αφού  $P_m$  και  $P_{max}$  αυξάνονται σχεδόν αντίστοιχα. Με την ενίσχυση με συγκόλληση ελάσματος στο μέσο του δοκιμίου κατά την κατάρρευση δημιουργούνται περισσότερες ζώνες υψηλής παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των τιμών των δεικτών  $E_{abs}$ ,  $P_m$ , SEA. Παράλληλα το ενδιάμεσο συγκολλητό έλασμα ενισχύει την αντίσταση στην παραμόρφωση του δοκιμίου, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$ .

Με την προσθήκη των δομών honeycomb επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση σε όλους τους δείκτες κατάρρευσης. Παρατηρούμε πως η αύξηση του  $P_{max}$ , είναι πολύ μικρή, κάτι που οφείλεται στο ότι το honeycomb επηρεάζει ελάχιστα την αρχική φάση κατάρρευσης. Η μικρή αύξηση του  $P_{max}$  οφείλεται στην προσθήκη των δομών honeycomb και στην σχεδόν πλήρη ή μερική κάλυψη της διατομής από το honeycomb. Η μεγάλη αύξηση του  $P_m$  σε συνδυασμό με την μικρή αύξηση  $P_{max}$  οδηγεί στην σημαντική αύξηση του CFE.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**$E_{abs}$ :** Υψηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος (2). Η χαμηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (1).

**$P_m$ :** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος (2). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (1).

**$P_{max}$ :** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος και την προπαραμόρφωση του δοκιμίου (1a). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (1c).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος (2). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος και προπαραμόρφωση (1a).

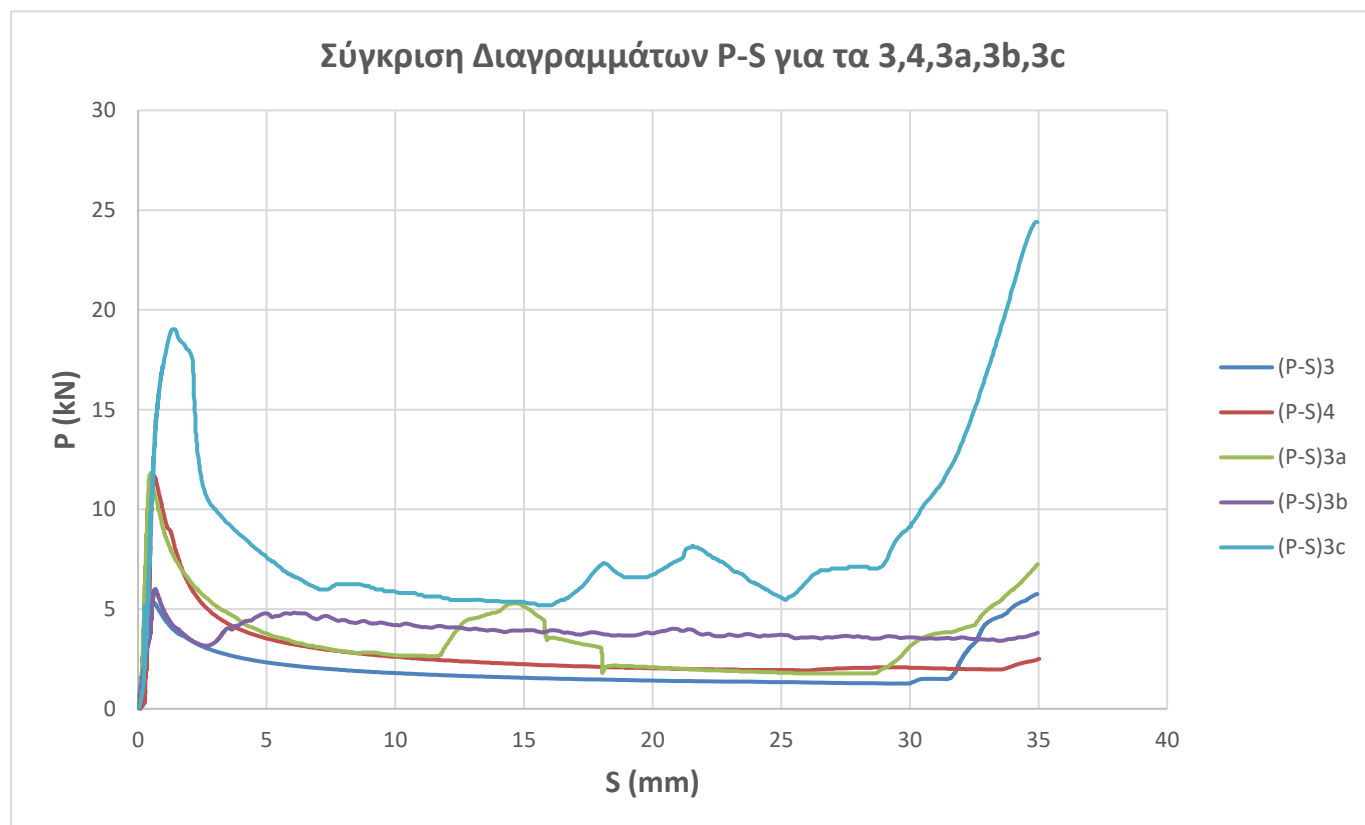
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (1b). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (1c).

#### 4.1.2 Δοκίμια 50.08 x 30.21 (3,4,3a,3b,3c)

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>3</b>	50,08	57,80	35,00	71,43	2,04	<b>5,36</b>	1,24	0,38
<b>4</b>	50,08	70,00	35,00	95,59	2,73	11,69	1,37	0,23
<b>3a</b>	50,08	74,20	35,00	122,52	3,50	11,84	1,65	0,30
<b>3b</b>	50,08	65,80	35,00	135,65	3,88	6,01	2,06	<b>0,65</b>
<b>3c</b>	50,08	57,80	35,00	<b>295,67</b>	<b>8,45</b>	18,85	<b>5,12</b>	0,45
<b>Μεταβολή 3-4</b>	0%	21%	0%	34%	34%	118%	10%	-39%
<b>Μεταβολή 3-3a</b>	0%	28%	0%	72%	72%	121%	34%	-22%
<b>Μεταβολή 3-3b</b>	0%	14%	0%	90%	90%	12%	67%	69%
<b>Μεταβολή 3-3c</b>	0%	0%	0%	314%	314%	252%	314%	18%

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Με τον περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του δοκιμίου επιτυγχάνεται υψηλή αύξηση των δεικτών κατάρρευσης  $E_{abs}$ ,  $P_m$ ,  $P_{max}$ ,  $SEA$ . Με τα πλευρικά εμπόδια οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου. Έτσι το  $P_{max}$  σχεδόν τριπλασιάζεται από την τιμή του τυπικού δοκιμίου. Επίσης κατά την τελική φάση κατάρρευσης παρατηρείται η δημιουργία πολλών πλαστικών αρμών, οδηγώντας σε πολύ υψηλές τιμές φορτίου και άρα στην μεγάλη αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας.

Με την προσθήκη των δομών honeycomb επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση σε όλους τους δείκτες κατάρρευσης. Παρατηρούμε πως η αύξηση του  $P_{max}$ , είναι πολύ μικρή, κάτι που οφείλεται στο ότι το honeycomb δεν επηρεάζει καθόλου την αρχική φάση κατάρρευσης. Η μικρή αύξηση του  $P_{max}$  οφείλεται πιθανόν στην κόλλα που χρησιμοποιήθηκε για την σταθεροποίηση των honeycomb και έχει ένα μικρό, ανεπαίσθητο σχεδόν, αντίκτυπο στο αρχικό φορτίο. Η μεγάλη αύξηση του  $P_m$  σε συνδυασμό με την μικρή αύξηση  $P_{max}$  οδηγεί στην σημαντική αύξηση του CFE.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**E<sub>abs</sub>:** Υψηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (3c). Η χαμηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (3).

**P<sub>m</sub>:** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (3c). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (3).

**P<sub>max</sub>:** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με την περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (3). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (3c).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (3c). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (3).

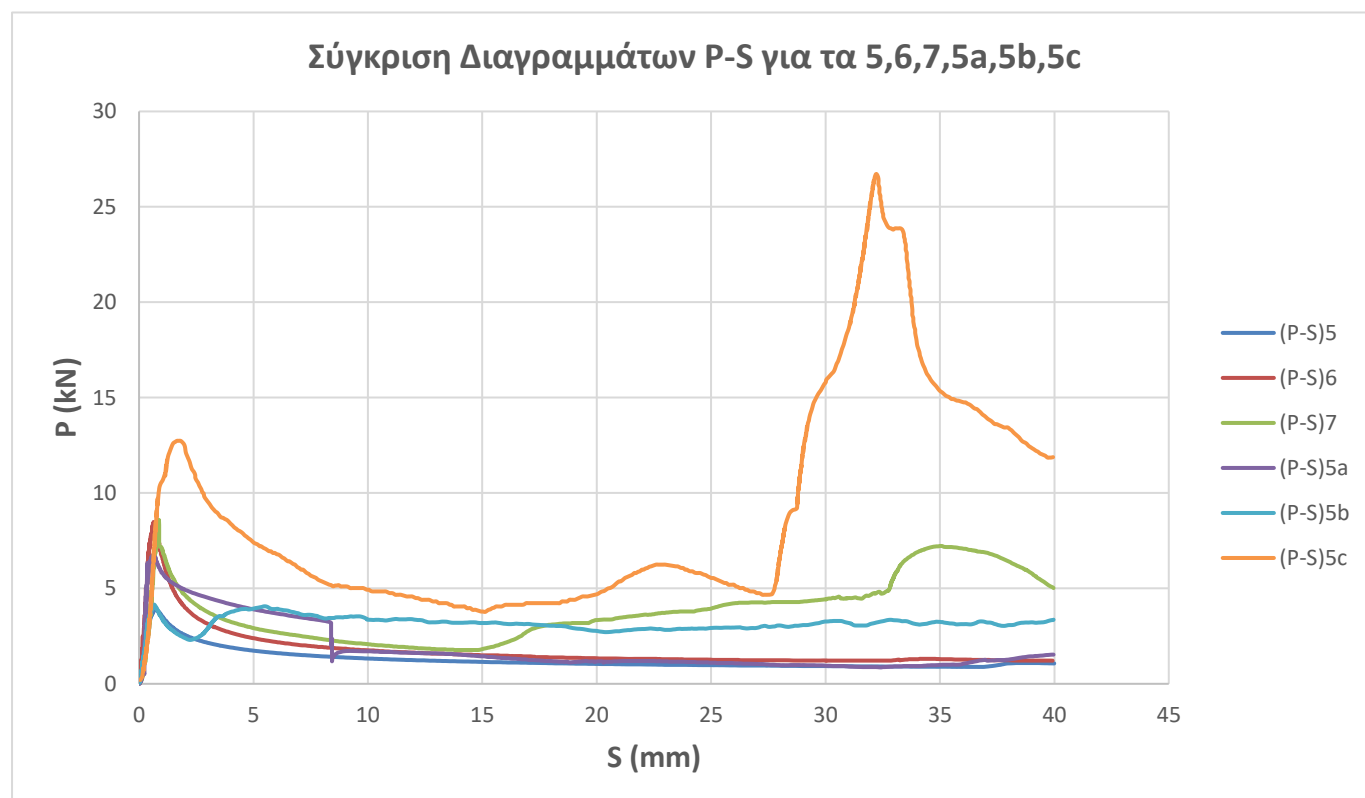
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (3b). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (1c).

### 4.1.3 Δοκίμια 60.09 x 30.12 (5,6,7,5a,5b,5c)

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	Smax (mm)	Eabs (J)	Pm (kN)	Pmax (kN)	SEA(J/gr)	CFE
5	60,09	63,30	40,00	50,08	1,25	<b>3,87</b>	0,79	0,32
6	60,09	75,60	40,00	69,82	1,75	8,48	0,92	0,21
7	60,09	88,80	40,00	154,61	3,87	8,59	1,74	0,45
5a	60,09	78,90	40,00	73,56	1,84	6,75	0,93	0,27
5b	60,09	74,40	40,00	126,56	3,16	4,15	1,70	<b>0,76</b>
5c	60,09	63,30	40,00	<b>353,99</b>	<b>8,85</b>	12,7344	<b>5,59</b>	0,69
Μεταβολή 5-6	0%	19%	0%	39%	39%	119%	17%	-36%
Μεταβολή 5-7	0%	40%	0%	209%	209%	122%	120%	39%
Μεταβολή 5-5a	0%	25%	0%	47%	47%	75%	18%	-16%
Μεταβολή 5-5b	0%	18%	0%	153%	153%	7%	115%	135%
Μεταβολή 5-5c	0%	0%	0%	607%	607%	229%	607%	115%

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Με τον περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του δοκιμίου επιτυγχάνεται υψηλή αύξηση των δεικτών κατάρρευσης  $E_{abs}$ ,  $P_m$ ,  $P_{max}$ ,  $SEA$ . Με τα πλευρικά εμπόδια οι κατακόρυφες πλευρές αναγκάζονται να καμπυλώσουν προς το εσωτερικό του δοκιμίου αντί να εκταθούν εξωτερικά. Με αυτό τον τρόπο στις γωνίες του δοκιμίου το υλικό ανθίσταται περισσότερο, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την κατάρρευση του δοκιμίου. Επίσης κατά την τελική φάση κατάρρευσης παρατηρείται η δημιουργία πολλών πλαστικών αρμών, οδηγώντας σε πολύ υψηλές τιμές φορτίου και άρα στην μεγάλη αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας.

Για την διάταξη με honeycomb παρατηρούμε να επιτυγχάνεται πάρα πολύ ψηλός δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη ποσότητα honeycomb που έχει τοποθετηθεί, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του  $P_m$ , ενώ η τιμή του  $P_{max}$  παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση, όπως αναλύθηκε και στην σύγκριση 4.1.1. Μάλιστα κατά την κατάρρευση του δοκιμίου παρατηρούμε, ότι το πάνω και το κάτω κομμάτι honeycomb παραμορφώνονται ταυτόχρονα, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του φορτίου και άρα και της ενέργειας απορρόφησης.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**$E_{abs}$ :** Υψηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (5c). Η χαμηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (5).

**$P_m$ :** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (5c). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (5).

**$P_{max}$ :** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με την περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (5). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (5c).

**$SEA$ :** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με τον πλευρικό περιορισμό του δοκιμίου (5c). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (5).

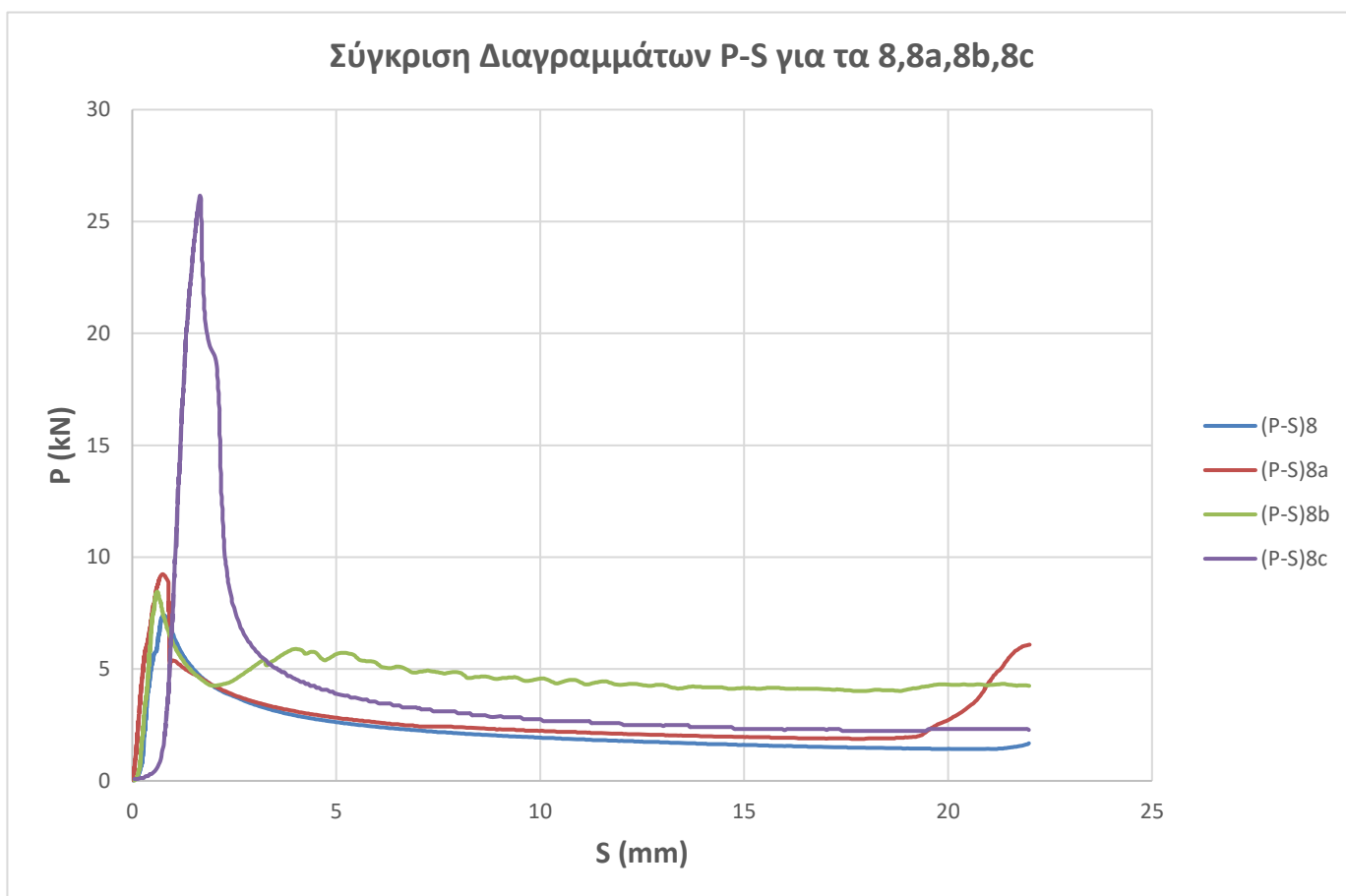
**$CFE$ :** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (5b). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με συγκόλληση (6).

#### 4.1.4 Δοκίμια 39.52 x 30.35 (8,8a,8b,8c)

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>8</b>	39,52	47,8	22,00	49,35	2,24	<b>7,41</b>	1,03	0,30
<b>8a</b>	39,52	63,6	22,00	62,26	2,83	9,23	0,98	0,31
<b>8b</b>	39,52	55	22,00	<b>100,69</b>	<b>4,58</b>	8,46	<b>1,83</b>	<b>0,54</b>
<b>8c</b>	39,52	47,8	22,00	84,15	3,83	26,16	1,76	0,15
<b>Μεταβολή 8-8a</b>	0%	33%	0%	26%	26%	25%	-5%	1%
<b>Μεταβολή 8-8b</b>	0%	15%	0%	104%	104%	14%	77%	79%
<b>Μεταβολή 8-8c</b>	0%	0%	0%	71%	71%	253%	71%	-52%

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ





## Παρατηρήσεις

Με την προσθήκη των δομών honeycomb επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση σε όλους τους δείκτες κατάρρευσης. Παρατηρούμε πως η αύξηση του  $P_{max}$ , είναι πολύ μικρή, κάτι που οφείλεται στο ότι το honeycomb επηρεάζει ελάχιστα την αρχική φάση κατάρρευσης. Η μικρή αύξηση του  $P_{max}$  οφείλεται πιθανόν στην κόλλα που χρησιμοποιήθηκε για την σταθεροποίηση των honeycomb και έχει ένα μικρό, ανεπαίσθητο σχεδόν, αντίκτυπο στο αρχικό φορτίο. Η μεγάλη αύξηση του  $P_m$  σε συνδυασμό με την μικρή αύξηση  $P_{max}$  οδηγεί στην σημαντική αύξηση του CFE.

Για την διάταξη με τον περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του δοκιμίου, παρατηρείται πολύ μεγάλη αύξηση του  $P_{max}$ , όπως ερμηνεύτηκε και στην σύγκριση 4.1.2. Παράλληλα για το μέσο φορτίο και την ενέργεια απορρόφησης παρατηρείται μικρή αύξηση, κάτι που οδηγεί στον χαμηλότερο δείκτη CFE.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**Eabs:** Υψηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (8b). Η χαμηλότερη τιμή ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (8).

**Pm:** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (8b). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (8).

**Pmax:** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με την περίπτωση του τυπικού δοκιμίου (8). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (8c).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (8b). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου με συγκόλληση ελάσματος και προπαραμόρφωση (8a).

**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με την ενίσχυση του δοκιμίου με honeycomb (8b). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση της διάταξης με πλευρικό περιορισμό (8c).

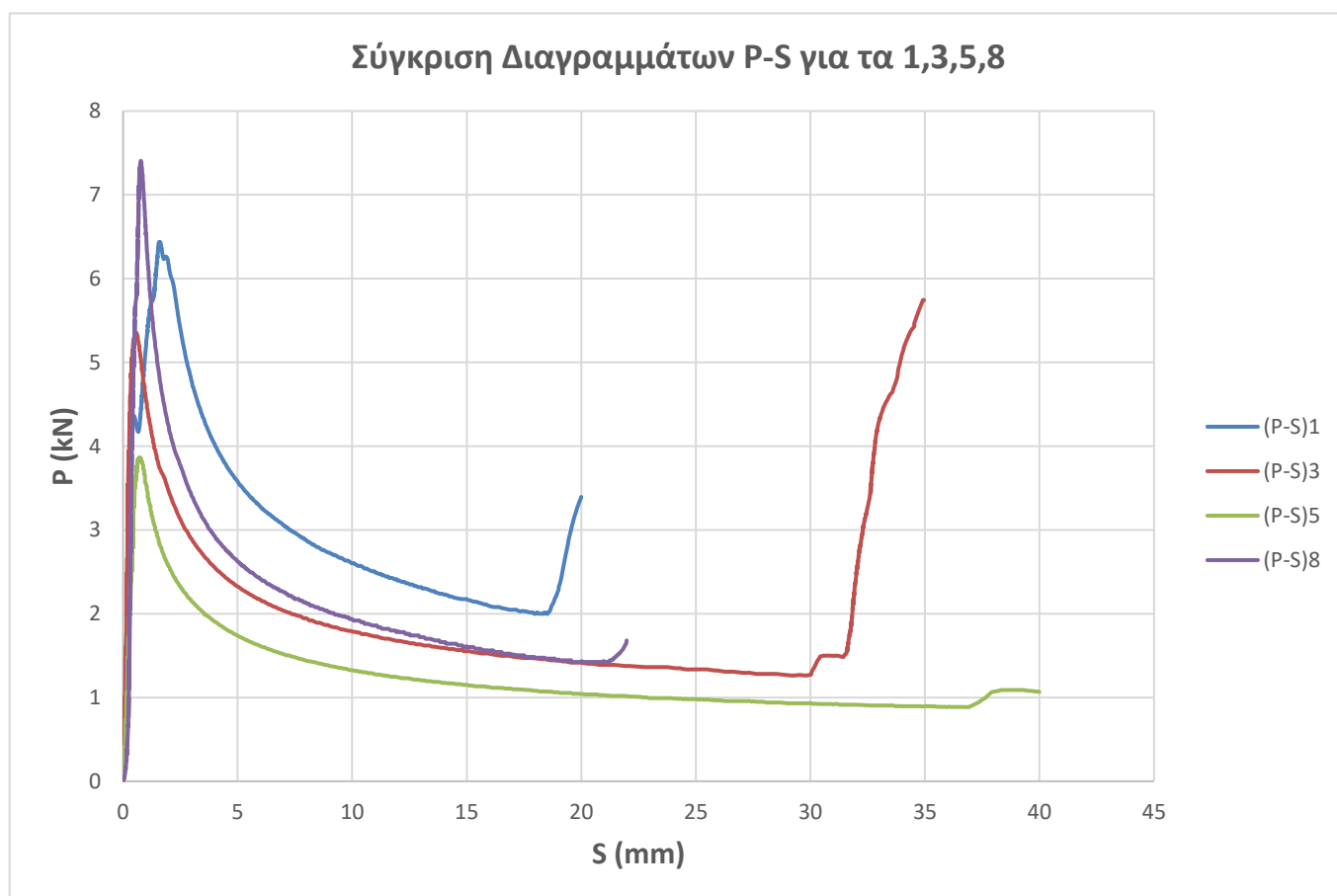
## 4.2 Σύγκριση δοκιμών ανά δομική διάταξη

### 4.2.1 Δοκίμια τυπικής διάταξης (1,3,5,8)

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>1</b>	37,8	54,50	20,00	61,13	<b>3,06</b>	6,44	1,12	<b>0,47</b>
<b>3</b>	50,08	57,80	35,00	<b>71,43</b>	2,04	5,35876	<b>1,24</b>	0,38
<b>5</b>	60,09	63,30	40,00	50,08	1,25	<b>3,87</b>	0,79	0,32
<b>8</b>	39,52	47,80	22,00	49,35	2,24	7,41	1,03	0,30

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Στη σύγκριση με βάση τη δομική διάταξη δεν έχει νόημα η σύγκριση της ενέργειας απορρόφησης (**Eabs**), αφού η μέγιστη βράχυνση του κάθε δοκιμίου με διαφορετική γεωμετρία μεταβάλλεται. Όσο βραχύνεται ένα δοκίμιο, τόσο αυξάνεται η ενέργεια απορρόφησης, οπότε δεν μπορούμε να συγκρίνουμε την ενέργεια απορρόφησης των δοκιμίων, αφού παραμορφώνονται για διαφορετικούς χρόνους. Έτσι δεν έχει νόημα η αξιολόγηση των δοκιμίων με βάση την ενέργεια απορρόφησης, αντ' αυτού θα γίνει σύγκριση με βάση το μέσο φορτίο.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το “υψηλότερο” δοκίμιο (60x30) δεν παρουσιάζει αύξηση των τιμών του φορτίου προς το τελικό στάδιο της κατάρρευσης όπως το (50x30). Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη αναλογία ύψους-βάσης, λόγω της οποίας για την συγκεκριμένη βράχυνση δεν “πρόλαβαν” να έρθουν σε επαφή η άνω με την κάτω πλευρά.

Παρατηρούμε ότι τα “υψηλότερα” δοκίμια (50x30, 60x30) παρουσιάζουν μικρότερες τιμές μέσου φορτίου, καθώς και μέγιστου φορτίου, από τα “χαμηλότερα” δοκίμια (38x38, 40x30), αφού όπως φαίνεται και στο διάγραμμα για ίδια βράχυνση τα “υψηλότερα” δοκίμια έχουν μικρότερες τιμές φορτίου από τα “χαμηλότερα”.

Τέλος, το δοκίμιο 40x30 (8) παρουσιάζει μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο από το 38x38 (1), καθώς οι οριζόντιες πλευρές του έχουν μικρότερο μήκος, καθιστώντας το κέλυφος πιο στιβαρό και ανθεκτικό στην κατάρρευση, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για αυτήν.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**Pm:** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (1). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5).

**Pmax:** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 50x30 (5). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 50x30 (3). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5).

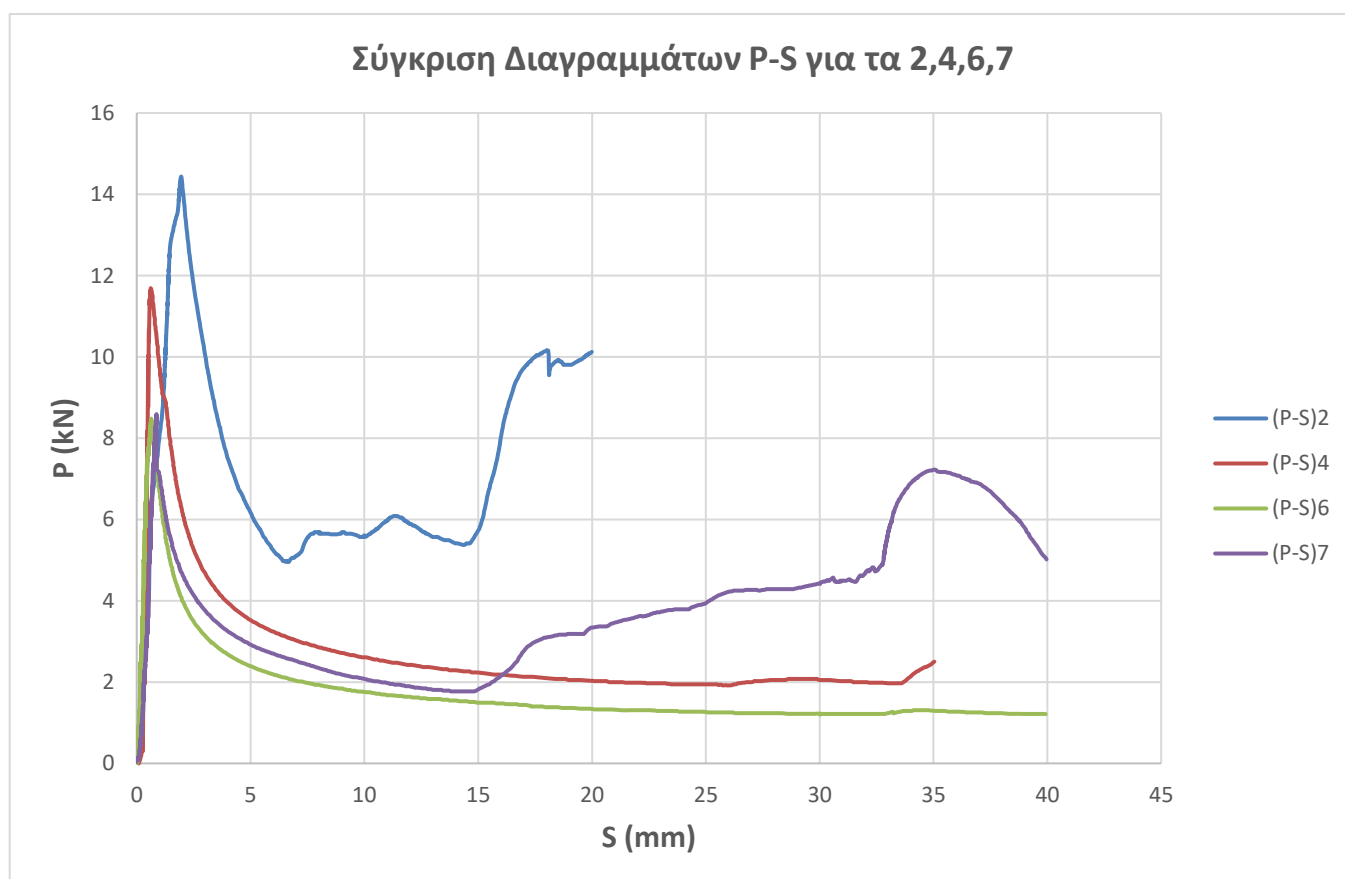
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (1). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8).

## 4.2.2 Δοκίμια με συγκόλληση (2,4,6,7)

### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>2</b>	37,80	67,90	20,00	145,34	<b>7,27</b>	14,44	<b>2,14</b>	<b>0,50</b>
<b>4</b>	50,08	70,00	35,00	95,59	2,73	11,69	1,37	0,23
<b>6</b>	60,09	75,60	40,00	69,82	1,75	<b>8,48</b>	0,92	0,21
<b>7</b>	60,09	88,80	40,00	<b>154,61</b>	3,87	8,59	1,74	0,45

### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Στην σύγκριση αυτή έχουμε δοκίμια με συγκολλήσεις. Στο δοκίμιο 6 (60x30) τοποθετείται ένα ενδιάμεσο έλασμα, χωρίζοντας το δοκίμιο σε δύο ισοϋψή τμήματα, ενώ στο δοκίμιο 7 (60x30) τοποθετούνται δύο ενδιάμεσα ελάσματα, χωρίζοντας το δοκίμιο σε τρία ισοϋψή τμήματα.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι τα δοκίμια 4 (50x30) και 6 (60x30 με δύο ελάσματα) δεν παρουσιάζουν αύξηση των τιμών του φορτίου προς το τελικό στάδιο της κατάρρευσης. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη αναλογία ύψους-βάσης, λόγω της οποίας για την συγκεκριμένη βράχυνση του κάθε δοκιμίου δεν "πρόλαβαν" να έρθουν σε επαφή η άνω με την κάτω πλευρά. Επίσης τα δοκίμια 4,6 λόγω της μεγάλης αναλογίας ύψους-βάσης, πραγματοποιούν διατμητική κατάρρευση, σχηματίζοντας μηχανισμό "πλαισίου", όπως αναλύθηκε στα (3.5.4), (3.5.6). Ως εκ τούτου καταγράφουν τις χαμηλότερες τιμές  $P_m$ , CFE.

Στο δοκίμιο 7 δεν παρατηρείται διατμητική κατάρρευση, όπως αναλύεται στο (3.5.7).

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**P<sub>m</sub>:** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (2). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (6).

**P<sub>max</sub>:** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (6). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 38x38 (2).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (2). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (6).

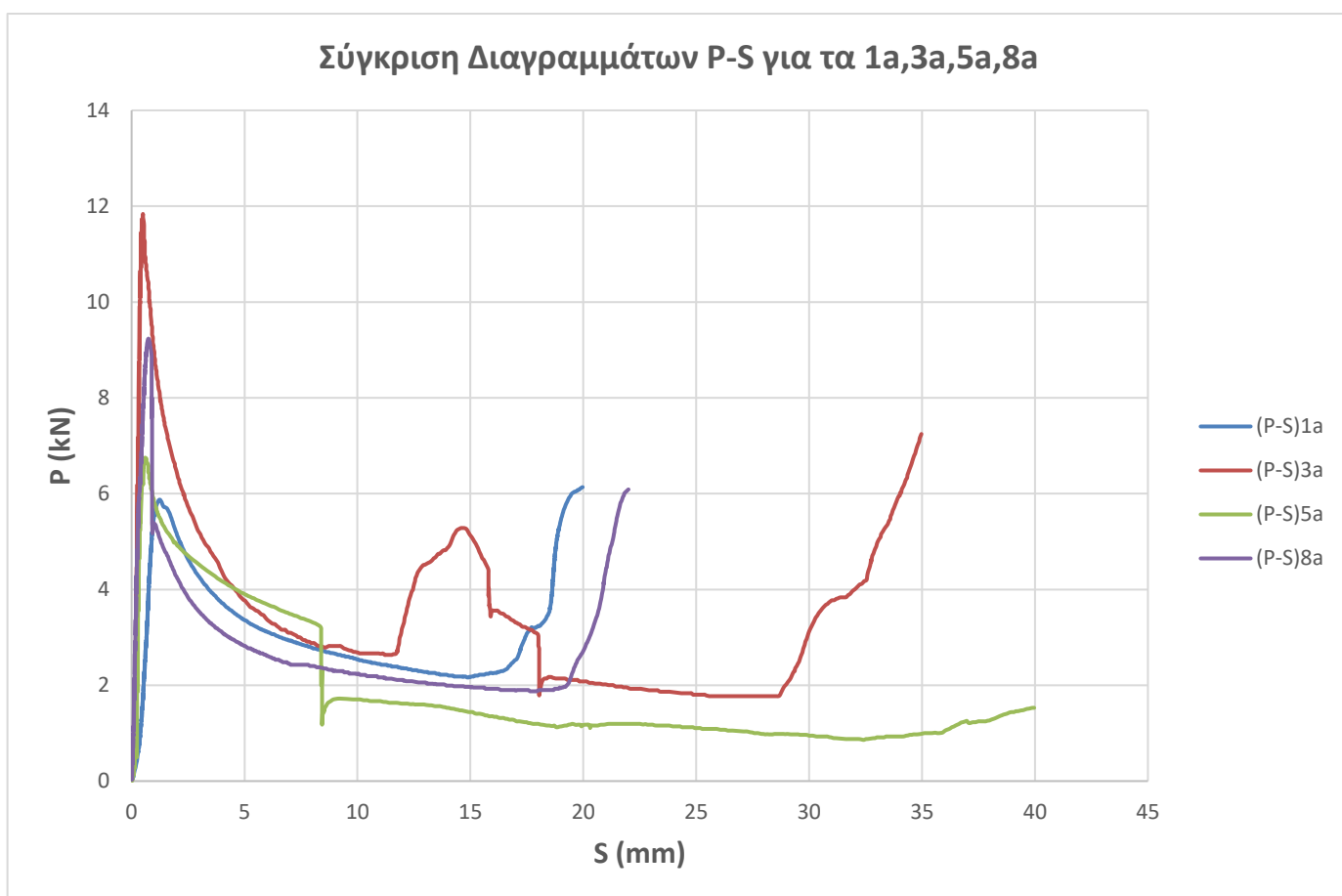
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (2). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (6).

### 4.2.3 Δοκίμια με συγκόλληση και προπαραμόρφωση (1a,3a,5a,8a)

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
1a	37,8	71,90	20	63,33	3,17	<b>5,8713</b>	0,88	<b>0,54</b>
3a	50,08	74,20	35,00	<b>122,52</b>	<b>3,50</b>	11,84	<b>1,65</b>	0,30
5a	60,09	78,90	40,00	73,56	1,84	6,75	0,93	0,27
8a	39,52	63,6	22,00	62,26	2,83	9,23	0,98	0,31

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Στην σύγκριση αυτή έχουμε τα δοκίμια με συγκολλήσεις και προπαραμόρφωση. Ο στόχος της προπαραμόρφωσης ήταν να αποφευχθεί η διατμητική κατάρρευση και ο σχηματισμός μηχανισμού “πλαϊσίου”, που παρατηρήθηκε στα ψηλότερα δοκίμια. Παρατηρούμε ότι ο στόχος δεν επετεύχθη, αφού παρά την αρχική παραμόρφωση που ασκήσαμε στα δοκίμια, η κατάρρευση των “υψηλότερων” δοκιμίων είναι αντίστοιχη των προηγούμενων περιπτώσεων.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το δοκίμιο 5a (60x30) δεν παρουσιάζει αύξηση των τιμών του φορτίου προς το τελικό στάδιο της κατάρρευσης. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη αναλογία ύψους-βάσης, λόγω της οποίας για την συγκεκριμένη βράχυνση του δοκιμίου δεν “πρόλαβαν” να έρθουν σε επαφή η άνω με την κάτω πλευρά. Επίσης το δοκίμιο 5a, λόγω της μεγάλης αναλογίας ύψους-βάσης, πραγματοποιεί διατμητική κατάρρευση, σχηματίζοντας μηχανισμό “πλαϊσίου”, όπως αναλύθηκε στο (3.5.11). Ως εκ τούτου καταγράφει τις χαμηλότερες τιμές  $P_m$ , CFE.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**P<sub>m</sub>:** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 50x30 (3a). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5a).

**P<sub>max</sub>:** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (1a). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 50x30 (3a).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 50x30 (3a). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 38x38 (1a).

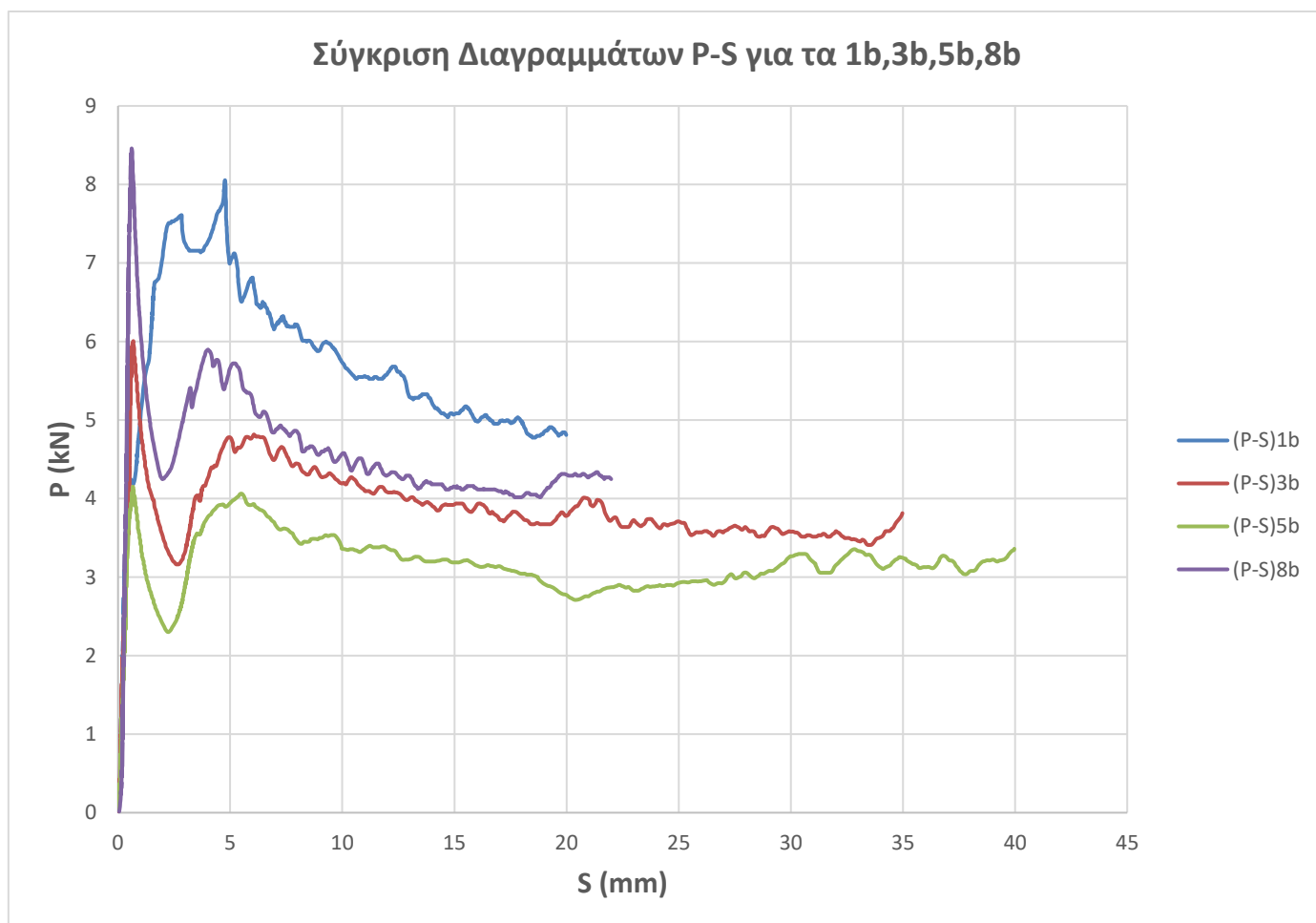
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (1a). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5a).

#### 4.2.4 Δοκίμα με Honeycomb (1b,3b,5b,8b)

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμο	H (mm)	m (gr)	Smax (mm)	Eabs (J)	Pm (kN)	Pmax (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>1b</b>	37,8	63,60	20	114,71	<b>5,74</b>	8,05	1,80	0,71
<b>3b</b>	50,08	65,80	35,00	<b>135,65</b>	3,88	6,01	<b>2,06</b>	0,65
<b>5b</b>	60,09	74,40	40,00	126,56	3,16	<b>4,15</b>	1,70	<b>0,76</b>
<b>8b</b>	39,52	55	22,00	100,69	4,58	8,46	1,83	0,54

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ





## Παρατηρήσεις

Για το δοκίμιο 1b παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι σε σχέση με τις υπόλοιπες καμπύλες καθυστερεί να φτάσει στην τιμή του  $P_{max}$ . Αυτό οφείλεται στη μικρή διαφορά ύψους δοκιμίου με το ύψος των δομών honeycomb, που οδηγεί στην επαφή του honeycomb με την πάνω πλευρά, πριν φτάσει το φορτίο στην τιμή  $P_{max}$ . Έτσι το honeycomb δημιουργεί αντίσταση στον λυγισμό της πάνω πλευράς, καθυστερώντας την πλαστική φάση της κατάρρευσης του κελύφους. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του φορτίου είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα άλλα δοκίμια, κάτι που οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος των οριζόντιων πλευρών του (38mm σε σχέση με τα 30mm των υπόλοιπων δοκιμίων), και αντίστοιχα στο μεγαλύτερο μήκος των δομών honeycomb που τοποθετήθηκαν εντός του δοκιμίου. Έτσι το δοκίμιο 1b έχει honeycomb με μεγαλύτερη επιφάνεια υλικού, που καταρρέει, σε σχέση με τα άλλα δοκίμια, αυξάνοντας σημαντικά το  $P_m$  και αντίστοιχα και το CFE.

Το δοκίμιο 5b έχει την μεγαλύτερη ποσότητα honeycomb συγκριτικά με τα υπόλοιπα δοκίμια, κάτι που οδηγεί στη σημαντική αύξηση  $P_m$ , ενώ το  $P_{max}$  διατηρείται χαμηλό λόγω του μεγάλου ύψους του δοκιμίου και του γεγονότος ότι το honeycomb δεν επηρεάζει σημαντικά το  $P_{max}$ . Έτσι, το δοκίμιο 5b επιτυγχάνει τον υψηλότερο δείκτη CFE.

Τέλος παρατηρούμε ότι λόγω της προσθήκης του honeycomb όλα τα δοκίμια καταρρέουν συμμετρικά, αποφεύγοντας την διατμητική κατάρρευση και τον σχηματισμό μηχανισμού “πλαϊσίου”.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**$P_m$ :** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 38x38 (1b). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5b).

**$P_{max}$ :** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5b). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8b).

**SEA:** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 50x30 (3b). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 60x30 (5b).

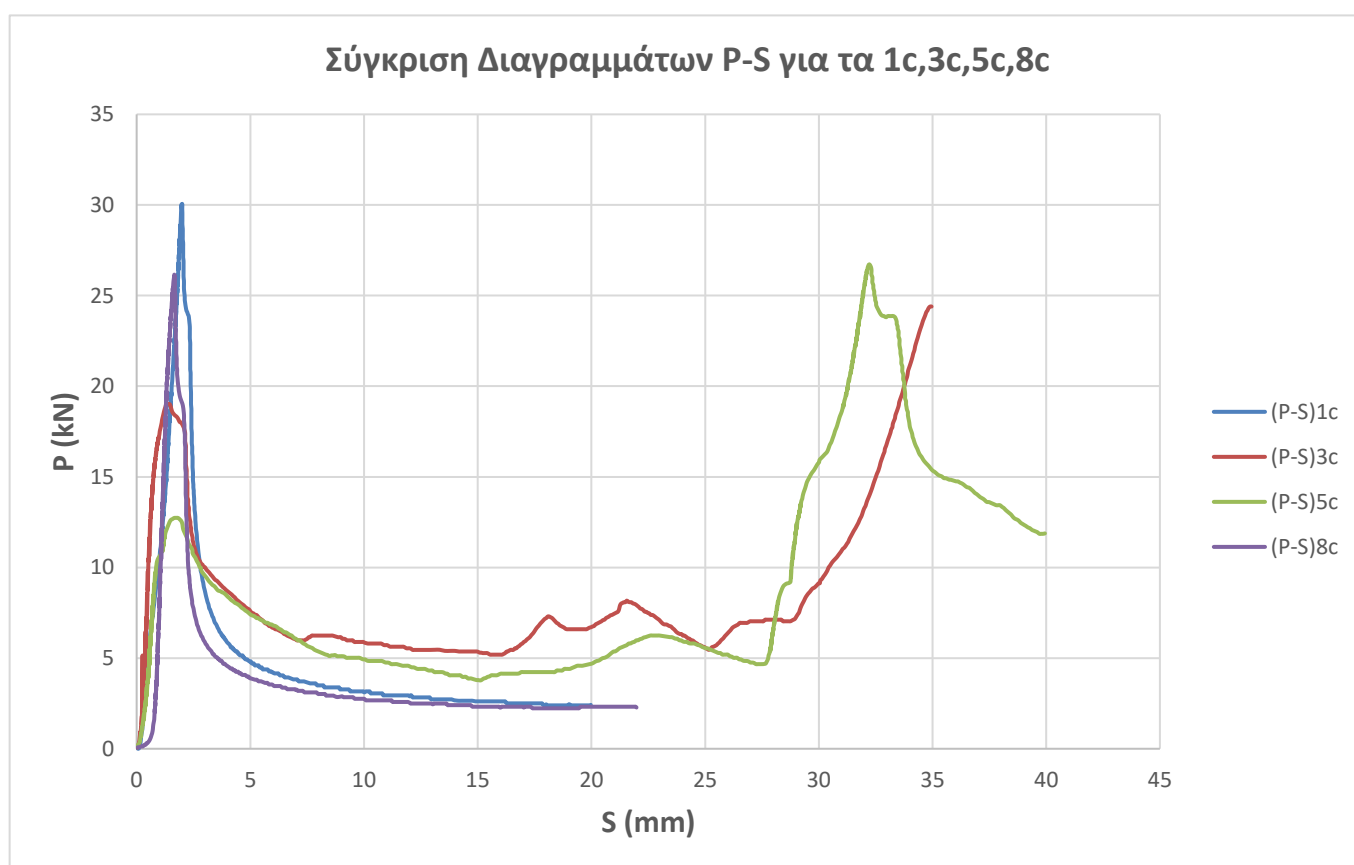
**CFE:** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5b). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8b).

#### 4.2.5 Δοκίμια με περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους μέσω άκαμπτων πλευρικών εμποδίων (1c,3c,5c,8c)

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΓΕΘΩΝ

Δοκίμιο	H (mm)	m (gr)	Smax (mm)	Eabs (J)	Pm (kN)	Pmax (kN)	SEA(J/gr)	CFE
1c	37,8	54,50	20	98,46	4,92	30,06	1,81	0,16
3c	50,08	57,80	35,00	295,67	8,45	18,8487	5,12	0,45
5c	60,09	63,30	40,00	<b>353,99</b>	<b>8,85</b>	<b>12,7344</b>	<b>5,59</b>	<b>0,69</b>
8c	39,52	47,8	22,00	84,15	3,83	26,16	1,76	0,15

##### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ



## Παρατηρήσεις

Στις διατάξεις με τον περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων πλευρών των δοκιμίων, παρατηρούμε σημαντική αύξηση των τιμών του φορτίου και άρα των δεικτών  $P_m$ ,  $E_{abs}$ ,  $P_{max}$ ,  $SEA$ , όπως έχει αναλυθεί στην σύγκριση (4.1.2.).

Όπως έχει αναφερθεί, δεν έχει νόημα η σύγκριση των δοκιμίων με βάση την  $E_{abs}$ . Συγκρίνοντας τα δοκίμια με βάση το  $P_m$  παρατηρούμε σημαντική διαφοροποίηση των “υψηλότερων” δοκιμίων (50x30, 60x30)/(3c,5c), που έχουν υψηλότερες τιμές, έναντι των “χαμηλότερων” δοκιμίων (38x38, 40x30)/(1c,8c). Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι τα δοκίμια 1c, 8c έχουν υφίστανται μικρότερη βράχυνση και κατά τη διάρκεια της οι πλευρές του κελύφους δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους καθόλου (περίπτωση 1c), ή έρχονται οριακά σε επαφή κατά το τέλος της κατάρρευσης (περίπτωση 8c). Αντίθετα στα δοκίμια 3c, 5c δημιουργούνται πολλαπλοί πλαστικοί αρμοί και άρα πολλές ζώνες υψηλής παραμόρφωσης, καθώς επίσης, οι πλευρές που καμπυλώνουν εσωτερικά, έρχονται σε επαφή, με αποτέλεσμα την σημαντική μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ τους (συμπίεση “συσσωρευμένου” υλικού) και την σημαντική αύξηση του φορτίου.

Παράλληλα παρατηρούμε για το  $P_{max}$  ότι οι τιμές των “υψηλότερων” δοκιμίων είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες των “χαμηλότερων” δοκιμίων. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές διαστάσεις των δοκιμίων, με τα δοκίμια 1c, 8c να έχουν μικρότερες διαστάσεις, καθιστώντας τα κελύφη των δοκιμίων πιο στιβαρά και ανθεκτικά στην κατάρρευση, οπότε απαιτείται μεγαλύτερο φορτίο για την παραμόρφωσή τους.

Έτσι ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στη διαφοροποίηση των τιμών του δείκτη CFE. Οι τιμές του CFE των “υψηλότερων” δοκιμίων είναι σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες των “χαμηλότερων” δοκιμίων.

Τέλος, με τον περιορισμό της πλευρικής έκτασης των κατακόρυφων πλευρών, αποφεύγεται η διατμητική κατάρρευση και ο σχηματισμός μηχανισμού “πλαϊσίου”.

Για τους δείκτες κατάρρευσης παρατηρούμε τα εξής:

**$P_m$ :** Υψηλότερη τιμή μέσου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5c). Η χαμηλότερη τιμή μέσου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8c).

**$P_{max}$ :** Χαμηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5c). Η υψηλότερη τιμή μέγιστου φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 38x38 (1c).

**$SEA$ :** Υψηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5c). Η χαμηλότερη τιμή ειδικής ενέργειας απορρόφησης παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8c).

**$CFE$ :** Υψηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου επιτυγχάνεται με το δοκίμιο 60x30 (5c). Η χαμηλότερη τιμή ομοιομορφίας φορτίου παρατηρείται στην περίπτωση του δοκιμίου 40x30 (8c).

## 5. Συμπεράσματα

### 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας μεγεθών

Παρουσιάζεται συγκεντρωτικός πίνακας των μεγεθών και δεικτών crashworthiness για κάθε δοκίμιο, σε δύο εκδοχές. Η πρώτη εκδοχή εμφανίζει τα δοκίμια με την σειρά που πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές (1), ενώ η δεύτερη εκδοχή με σειρά δοκιμών ανά ομάδα δοκιμών ίδιας αρχικής γεωμετρίας (2).

#### ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Δοκίμιο	Διάταξη	H (mm)	m (gr)	S <sub>max</sub> (mm)	E <sub>abs</sub> (J)	P <sub>m</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	SEA(J/gr)	CFE
1	Τυπική	37,8	54,50	20	61,13	3,06	6,44	1,12	0,47
2	Συγκόλληση (1)	37,8	67,90	20	145,34	<b>7,27</b>	14,44	<b>2,14</b>	0,50
3	Τυπική	50,08	57,80	35,00	71,43	2,04	<b>5,36</b>	1,24	0,38
4	Συγκόλληση (1)	50,08	70,00	35,00	95,59	2,73	11,69	1,37	0,23
5	Τυπική	60,09	63,30	40,00	50,08	1,25	<b>3,87</b>	0,79	0,32
6	Συγκόλληση (1)	60,09	75,60	40,00	69,82	1,75	8,48	0,92	0,21
7	Συγκόλληση (2)	60,09	88,80	40,00	<b>154,61</b>	3,87	8,59	1,74	0,45
8	Τυπική	39,52	47,8	22,00	49,35	2,24	7,41	1,03	0,30
1a	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	37,8	71,90	20	63,33	3,17	5,87	0,88	0,54
3a	Συγκόλληση και προπαραμόρφωση	50,08	74,20	35,00	122,52	3,50	11,84	1,65	0,30
5a	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	60,09	78,90	40,00	73,56	1,84	6,75	0,93	0,27
8a	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	39,52	63,6	22,00	62,26	2,83	9,23	0,98	0,31
1b	Honeycomb	37,8	63,60	20	114,71	5,74	8,05	1,80	<b>0,71</b>
3b	Honeycomb	50,08	65,80	35,00	135,65	3,88	6,01	2,06	0,65
5b	Honeycomb	60,09	74,40	40,00	126,56	3,16	<b>4,15</b>	1,70	<b>0,76</b>
8b	Honeycomb	39,52	55	22,00	100,69	4,58	8,46	1,83	0,54
1c	Πλευρικός περιορισμός	37,8	54,50	20	98,46	4,92	30,06	1,81	0,16
3c	Πλευρικός περιορισμός	50,08	57,80	35,00	<b>295,67</b>	<b>8,45</b>	18,85	<b>5,12</b>	0,45
5c	Πλευρικός περιορισμός	60,09	63,30	40,00	<b>353,99</b>	<b>8,85</b>	12,73	<b>5,59</b>	0,69
8c	Πλευρικός περιορισμός	39,52	47,8	22,00	84,15	3,83	26,16	1,76	0,15

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Δοκίμιο	Διάταξη	H (mm)	m (gr)	Smax (mm)	Eabs (J)	Pm (kN)	Pmax (kN)	SEA(J/gr)	CFE
<b>1</b>	Τυπική	<b>37,8</b>	54,50	20	61,13	3,06	6,44	1,12	0,47
<b>2</b>	Συγκόλληση (1)	<b>37,8</b>	67,90	20	145,34	7,27	14,44	2,14	0,50
<b>1a</b>	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	<b>37,8</b>	71,90	20	63,33	3,17	5,8713	0,88	0,54
<b>1b</b>	Honeycomb	<b>37,8</b>	63,60	20	114,71	5,74	8,05	1,80	0,71
<b>1c</b>	Πλευρικός περιορισμός	<b>37,8</b>	54,50	20	98,46	4,92	30,06	1,81	0,16
<b>3</b>	Τυπική	<b>50,08</b>	57,80	35,00	71,43	2,04	5,35876	1,24	0,38
<b>4</b>	Συγκόλληση (1)	<b>50,08</b>	70,00	35,00	95,59	2,73	11,69	1,37	0,23
<b>3a</b>	Συγκόλληση και προπαραμόρφωση	<b>50,08</b>	74,20	35,00	122,52	3,50	11,84	1,65	0,30
<b>3b</b>	Honeycomb	<b>50,08</b>	65,80	35,00	135,65	3,88	6,01	2,06	0,65
<b>3c</b>	Πλευρικός περιορισμός	<b>50,08</b>	57,80	35,00	295,67	8,45	18,8487	5,12	0,45
<b>5</b>	Τυπική	<b>60,09</b>	63,30	40,00	50,08	1,25	3,87	0,79	0,32
<b>6</b>	Συγκόλληση (1)	<b>60,09</b>	75,60	40,00	69,82	1,75	8,48	0,92	0,21
<b>7</b>	Συγκόλληση (2)	<b>60,09</b>	88,80	40,00	154,61	3,87	8,59	1,74	0,45
<b>5a</b>	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	<b>60,09</b>	78,90	40,00	73,56	1,84	6,75	0,93	0,27
<b>5b</b>	Honeycomb	<b>60,09</b>	74,40	40,00	126,56	3,16	4,15	1,70	0,76
<b>5c</b>	Πλευρικός περιορισμός	<b>60,09</b>	63,30	40,00	353,99	8,85	12,7344	5,59	0,69
<b>8</b>	Τυπική	<b>39,52</b>	47,8	22,00	49,35	2,24	7,41	1,03	0,30
<b>8a</b>	Συγκόλληση και Προπαραμόρφωση	<b>39,52</b>	63,6	22,00	62,26	2,83	9,23	0,98	0,31
<b>8b</b>	Honeycomb	<b>39,52</b>	55	22,00	100,69	4,58	8,46	1,83	0,54
<b>8c</b>	Πλευρικός περιορισμός	<b>39,52</b>	47,8	22,00	84,15	3,83	26,16	1,76	0,15

## 5.2 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η μελέτη της πλευρικής κατάρρευσης λεπτότοιχων ορθογωνικών κελυφών από αλουμίνιο, καθώς και η διερεύνηση βελτίωσης της συμπεριφοράς τους σε συνθήκες πλευρικής φόρτισης, μέσω της διεξαγωγής πειραματικών δοκιμών. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν συνολικά είκοσι δοκίμια (τεσσάρων βασικών διαστάσεων σε διαφορετικές διατάξεις).

Η κατάρρευση των τυπικών ορθογωνικών δοκιμών χαρακτηρίζεται από την πλευρική έκταση των κατακόρυφων τοιχωμάτων και τον σχηματισμό πλαστικών αρμών στο μέσω αυτών. Ο μηχανισμός κατάρρευσης αποτυπώνει χαμηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας λόγω του μικρού αριθμού ζωνών χαμηλής παραμόρφωσης, ενώ στα "υψηλότερα" δοκίμια παρατηρήθηκε το φαινόμενο της διατμητικής κατάρρευσης με τον σχηματισμό μηχανισμού "πλαισίου".

Για την βελτίωση της συμπεριφοράς των κελυφών εξετάστηκαν διαφορετικές διατάξεις, με στόχο την βελτίωση του μηχανισμού κατάρρευσης και των περαιτέρω τοπικών αυξήσεων του φορτίου κατάρρευσης, ώστε να αυξηθεί η απορροφούμενη ενέργεια. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν οι παρακάτω διατάξεις:

- Ενίσχυση του κελύφους με την προσθήκη ενδιάμεσων - συγκολλητών ελασμάτων, δημιουργώντας δοκίμια που χωρίζονται σε δύο ή τρία ισοϋψή τμήματα. Επιπροσθέτως, εξετάστηκε η προπαραμόρφωση των δοκιμών, με την συμπίεση των οριζόντων πλευρών και την έκταση εξωτερικά των κατακόρυφων πλευρών και την προσθήκη συγκολλητών ελασμάτων με στόχο την αποφυγή της διατμητικής κατάρρευσης και του μηχανισμού "πλαισίου".
- Ενίσχυση του δοκιμίου με την προσθήκη εξαγωνικών κυψελίδων αλουμινίου (honeycomb). Εξετάστηκε η επίδραση του υλικού honeycomb στην κατάρρευση των δοκιμών, καθώς και τα αποτελέσματα στην μεταβολή των δεικτών crashworthiness.
- Διαφοροποίηση των πλευρικών συνοριακών συνθηκών με την στήριξη με άκαμπτα τοιχώματα. Τα άκαμπτα πλευρικά εμπόδια, περιόρισαν την πλευρική έκταση των κατακόρυφων τοιχωμάτων, μεταβάλλοντας τον τρόπο κατάρρευσης και τους δείκτες crashworthiness.

Η σύγκριση και αξιολόγηση των δοκιμών τους γίνεται με βασικό κριτήριο τα συνολικά αποτελέσματα των δεικτών crashworthiness ( $E_{abs}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_m$ , CFE, SEA). Με βάση τις συγκρίσεις που προηγήθηκαν στο κεφάλαιο 4 καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα για κάθε δείκτη crashworthiness:

- **$E_{abs}$  (ενέργεια απορρόφησης):** Παρατηρούμε ότι σε όλες τις διατάξεις με ενισχυμένη δομή (συγκόλληση, honeycomb, πλευρικός περιορισμός) ο δείκτης της  $E_{abs}$  είναι υψηλότερος από την τυπική διάταξη των δοκιμών. Ως

προς την ενέργεια απορρόφησης, καλύτερη διάταξη αξιολογείται αυτή με τον πλευρικό περιορισμό, ενώ χειρότερη, η τυπική διάταξη.

Για την διάταξη με συγκόλληση, παρατηρούμε ότι για τα δοκίμια με μικρή αναλογία ύψους-βάσης καθώς και μεγαλύτερου αριθμού συγκολλήσεων-ύψους επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση, μεγαλύτερη από αυτή του πλευρικού περιορισμού. Στα υπόλοιπα δοκίμια, ωστόσο παρατηρούνται τιμές με μικρή αύξηση των τυπικών, κάτι που οφείλεται στην πραγματοποίηση διατμητικής κατάρρευσης και τον σχηματισμό μηχανισμού “πλαισίου”. Τέλος η ενίσχυση με honeycomb παρουσιάζει σημαντική αύξηση στην απορροφούμενη ενέργεια.

Επομένως η κατάταξη των δομικών διατάξεων με βάση την ενέργεια απορρόφησης είναι:

#### **Πλευρικός περιορισμός > Honeycomb > Συγκόλληση > Τυπική**

- **Pm (μέσο φορτίο):** Επειδή δεν καταπονήθηκαν όλες οι διατάξεις στο ίδιο μήκος βράχυνσης, όπου θα αρκούσε η σύγκριση/αξιολόγηση μέσω Eabs, είναι αναγκαία η σύγκριση της τιμής του Pm. Για αντίστοιχες διαστάσεις δοκιμίων και μήκος βράχυνσης, εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα με αυτά της ενέργειας απορρόφησης. Υψηλότερες τιμές μέσου φορτίου εμφανίζει η διάταξη με πλευρικό περιορισμό, ακολουθούν οι διατάξεις με honeycomb και συγκόλληση, ενώ τελευταία είναι η τυπική διάταξη.

Επίσης παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με μεγάλη αναλογία ύψους-βάσης εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές σε όλες τις διατάξεις εκτός της διάταξης με πλευρικό περιορισμό, όπου ισχύει το αντίστροφο, όπως έχει αναλυθεί στις συγκρίσεις 4.2.

Επομένως η κατάταξη των δομικών διατάξεων με βάση το μέσο φορτίο είναι:

#### **Πλευρικός περιορισμός > Honeycomb > Συγκόλληση > Τυπική**

- **Pmax (μέγιστο φορτίο):** Για την αξιολόγηση του δείκτη θεωρούμε ότι καλύτερα αποτελέσματα αποτελούν οι χαμηλότερες τιμές μέγιστου φορτίου. Έτσι είναι εμφανές ότι η τυπική διάταξη έχει την καλύτερη αξιολόγηση και ακολουθεί η διάταξη με honeycomb, η οποία παρουσιάζει πολύ μικρή αύξηση μέγιστου φορτίου, όπως αναλύθηκε στη σύγκριση 4.1.1. Αντίθετα οι διατάξεις με συγκόλληση παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, ενώ η διάταξη με πλευρικό περιορισμό εμφανίζει πολύ μεγάλη αύξηση μέγιστου φορτίου, όπως αναλύθηκε στην σύγκριση 4.1.2., ειδικά στα δοκίμια χαμηλής αναλογίας ύψους-βάσης (4-5 φορές αύξηση).

Έτσι η κατάταξη των δομικών διατάξεων με βάση το μέγιστο φορτίο είναι:

#### **Τυπική > Honeycomb > Συγκόλληση > Πλευρικός περιορισμός**

- **SEA (ειδικής ενέργειας απορρόφησης):** Παρατηρούμε πως όλες οι διατάξεις με ενισχυμένη δομή (συγκόλληση, honeycomb, πλευρικός περιορισμός) πετυχαίνουν ψηλότερες τιμές από αυτές της τυπικής διάταξης. Η διάταξη με πλευρικό περιορισμό αξιολογείται ως καλύτερη, κάτι που αναμέναμε αφού σε αυτή τη διάταξη έχουμε την μεγαλύτερη αύξηση στην ενέργεια απορρόφησης, ενώ η μάζα της διάταξης δεν αυξάνεται καθόλου. Βέβαια, η μάζα μένει σταθερή, εφόσον δεν προσμετράμε τα άκαμπτα εμπόδια - πολύ μεγάλου βάρους. Για την διάταξη του honeycomb παρατηρείται σημαντική βελτίωση του δείκτη ειδικής ενέργειας απορρόφησης, αφού με τη συμβολή του honeycomb το φορτίο αυξάνεται, ενώ η μάζα του honeycomb, που προστίθεται στη διάταξη, είναι μικρή.

Έτσι η κατάταξη των δομικών διατάξεων με βάση την ειδική ενέργεια απορρόφησης είναι:

#### **Πλευρικός περιορισμός > Honeycomb > Συγκόλληση > Τυπική**

- **CFE (δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου):** Κατά την αξιολόγηση των μηχανισμών κατάρρευσης, παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου η κατάρρευση εξελίσσεται διατμητικά και δημιουργείται μηχανισμός πλαισίου, παρατηρείται πολύ χαμηλός δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου (CFE). Αυτό οφείλεται στην δημιουργία λιγότερων και μικρότερων ζωνών, χαμηλότερης τιμής, παραμόρφωσης, κάτι που οδηγεί στην χαμηλότερη τιμή  $P_m$ , ενώ το  $P_{max}$  δεν επηρεάζεται. Καλύτερο δείκτη ομοιομορφίας του φορτίου, με σημαντική διαφορά από τις υπόλοιπες διατάξεις, εμφανίζει η διάταξη με honeycomb, όπως έχει αναλυθεί στη σύγκριση 4.1.1. Για τις υπόλοιπες διατάξεις η σύγκριση είναι οριακή, με αυτή που φαίνεται να είναι υποδεέστερη, να είναι η διάταξη με συγκόλληση, αφού δεν καταφέρνει να αποφύγει την διατμητική κατάρρευση και τον σχηματισμό μηχανισμού "πλαισίου". Τέλος η διάταξη με τον πλευρικό περιορισμό παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα CFE για τα "υψηλότερα" δοκίμια, αλλά πολύ αρνητικά αποτελέσματα για τα "χαμηλότερα" δοκίμια.

Έτσι η κατάταξη των δομικών διατάξεων με βάση τον δείκτη ομοιομορφίας του φορτίου είναι:

#### **Honeycomb > Τυπική > Πλευρικός περιορισμός > Συγκόλληση**



**Συνολικά παρατηρούμε ότι:**

**Οι διατάξεις με τα υποδεέστερα χαρακτηριστικά** είναι η τυπική διάταξη και η διάταξη με συγκόλληση. Για την διάταξη με συγκόλληση θα μπορούσαν να είναι βελτιωμένα τα αποτελέσματα, εάν είχαν γίνει καλύτερες ή/και περισσότερες συγκολλήσεις, καθώς και επαναληπτικές δοκιμές για την αποφυγή της αστοχίας των συγκολλήσεων και την επιβεβαίωση των ευρημάτων.

**Οι διατάξεις με τα περισσότερο βελτιωμένα χαρακτηριστικά** για τους δείκτες crashworthiness συνολικά είναι:

- Η διάταξη με **honeycomb**, η οποία αξιολογείται καλύτερη ως προς τον CFE και δεύτερη ως προς όλους τους υπόλοιπους δείκτες (Eabs, Pm, Pmax, SEA)
- Η διάταξη με **πλευρικό περιορισμό** η οποία είναι καλύτερη ως προς τους δείκτες Eabs, Pm, SEA, τρίτη ως προς τον CFE και τελευταία ως προς το Pmax.

### **5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Για να αντληθούν πιο ακέραια και αξιόλογα συμπεράσματα από την παρούσα πειραματική μελέτη προτείνονται τα παρακάτω σημεία για επακόλουθη έρευνα στον τομέα αυτό:

1. Επαναληπτικές δοκιμές για την επιβεβαίωση των ευρημάτων. Κυρίως για την περίπτωση των συγκολλήσεων, όπου παρατηρήθηκε συχνά αστοχία τους, προτείνεται η επανάληψη των πειραματικών δοκιμών, και καλύτερες συγκολλήσεις χωρίς ατέλειες ή πρόωρη αστοχία, ώστε να υπάρχει δικαιότερη αξιολόγηση.
2. Χρήση διαφορετικού τύπου honeycomb, διαφορετικού μεγέθους κελιών ή/και πάχους τοιχώματος.
3. Συνδυασμός των διαφορετικών διατάξεων που δημιουργήθηκαν κατά την παρούσα διπλωματική. Για τις δομές honeycomb προτείνεται η τοποθέτηση τους σε διάταξη με πλευρικό περιορισμό και η διαφορετική διεύθυνση τοποθέτησης του, για την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων.
4. Ισχυρή κόλληση του honeycomb με ρητίνη μέσα στις διατάξεις, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η πλευρική του έκταση, που θα ακολουθεί την έκταση των πλευρικών τοιχωμάτων του κελύφους.

5. Στην διάταξη με πλευρικό περιορισμό προτείνεται η τοποθέτηση δοκιμίων με εγκάρσια συγκολλητά ελάσματα.
6. Ως προς την διάταξη με συγκολλήσεις προτείνονται δοκιμές με μεγαλύτερο αριθμό συγκολλητών ελασμάτων, αύξηση της αναλογίας συγκολλήσεων ως προς το ύψος δοκιμίου.
7. Όσον αφορά την αριθμητική μοντελοποίηση, με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, μετά την πειραματική επαλήθευση αντίστοιχων μοντέλων των εξεταζόμενων διατάξεων, μπορεί να διενεργηθεί εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση με πληθώρα εναλλακτικών διατάξεων για την αξιολόγησή τους.

## 6. Βιβλιογραφία

[1] H. Robertson. Vehicle Crashworthiness and Occupant Protection. Journal of Hazardous Materials. 36 (2) (2002). 207-227

[2] World Health Organization. "Global Status Report on Road Safety". WHO Press. (2018)

[3] [https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-eu-fatalities-below-pre-pandemic-levels-progress-remains-too-slow-2023-02-21\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/road-safety-eu-fatalities-below-pre-pandemic-levels-progress-remains-too-slow-2023-02-21_en)

[4]<http://web.iitd.ac.in/~achawla/PDF%20Files/Human%20Tolerance%20and%20Crashworthiness.pdf>

[5] D. J. Benson, J. Hallquist. Computation for transient and impact dynamics. Encyclopedia of Vibration. (2001). pp. 278-286

[6] H. W. Song, Z. M. Wan, Z. M. Xie, X. W. Du. Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes. Int. Journal of Impact Engineering. 24 (2000). pp. 385-401.

[7] G. C. Jacob, J. F. Fellers, S. Simunovic, J. M. Starbuck. Energy Absorption in Polymer Composite Materials for Automotive Crashworthiness. Journal of Composite Materials. 36 (7) (Apr. 2002). pp. 813-850

[8] S. R. Guillow, G. Lu, R. H. Grzebieta. Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes. International Journal of Mechanical Sciences. 43 (9) (2001). pp. 2103-2123

[9] Y. Y. Jing, D. C. Barton. The response of square cross-section tubes under lateral impact loading. International Journal of Crashworthiness. 3 (4) (1998). pp. 359-378

[10] R. C. Averill, N. Swaminathan. Contribution of Failure Mechanisms to Crush Energy Absorption in a Composite Tube. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 13 (1) (2006). pp. 51-59

[11] B. Wang, G. Lu. Mushrooming of circular tubes under dynamic axial loading. Thin-Walled Structures. 40 (2) (2002). pp 167-182

- [12] R.G. Redwood. Crushing of a Tube Between Rigid Plates. *Journal of Applied Mechanics*. 31 (2) (1964). pp. 357-358
- [13] M. Langseth, O. S. Hopperstad, A. G. Hanssen. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. *Thin-Walled Structures* 32 (1-3) (1998). pp. 127-150
- [14] A. Baroutaji, M. Sajjia, A. G. Olabi. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments. *Thin-Walled Structures*. 118 (May 2017). pp. 137-163
- [15] N. K. Gupta, G. S. Sekhon, P. K. Gupta. A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes. *Thin-Walled Structures*. 39 (9) (2001). pp. 745-772
- [16] A. Niknejad, S. M. Elahi, S. A. Elahi, S. A. Elahi. Theoretical and experimental study on the flattening deformation of the rectangular brazen and aluminum columns. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 13 (4) (2013). pp. 449-464
- [17] T. N. Tran, T. N. T. Ton. Lateral crushing behaviour and theoretical prediction of thin-walled rectangular and square tubes. *Composite Structures*. 154 (2016). pp. 374-384.
- [18] R. D. Hussein, H. T. Naeem, H. Atiyah, D. Ruan. Lateral Crushing of Square Aluminium Tubes Filled with Different Cores. *Materials Research*. 25 (2002). pp. 1-8.
- [19] D. K. Sinha, N. R. Chitkara. Plastic collapse of square rings. *International Journal of Solids and Structures*. 18 (9) (1982). pp. 819-826.
- [20] N. K. Gupta, A. Khullar. Collapse of square and rectangular tubes in transverse loading. *Archive of Applied Mechanics*. 63 (1993). pp. 479-490.