

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ** ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Επιβλέπων : Καθηγητής, Δημήτριος Ε. Μανωλάκος

<u>Διπλωματική εργασία</u>

Μελέτη της αξονικής κατάρρευσης λεπτότοιχων δομικών στοιχείων ανοιχτής διατομής

# ΝΤΙΛΙΟΥ ΚΑΛΛΙΟΠΗ

Αθήνα 2011

# <u>Πίνακας Περιεχομένων</u>

Πρόλογος	1
1 Εισαγωγή- Σχεδιασμός οχημάτων με στόχο ασφαλέστερες κατασκευ	ές3
1.1 Εισαγωγή- crashworthiness	
1.2 Ατυχήματα οχημάτων- Γενικά στοιχεία	
<ol> <li>Συνέπειες ατυχημάτων με οχήματα</li> </ol>	
1.3.1 Γενικά	
1.3.2 Στον άνθρωπο	
2 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης	
2.1 Εισαγωγή	
2.2 Θεωρία	
2.3 Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων ως π απορρόφηση ενέργειας- Κριτήρια	:ρος την 11
2.4 Βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας	
3 Γενικές πληροφορίες για λεπτότοιχες και ανοιχτές διατομές	15
3.1 Λεπτότοιχες διατομές	15
3.2 Ανοιχτές διατομές	
3.3 Ατέλειες/σφάλματα λεπτότοιχων κατασκευών	
4 Πειραματικό μέρος - Εκτέλεση και σχολιασμός	
4.1 Εκλογή μορφολογίας	
4.2 Κατεργασία διαμόρφωσης	
4.3 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις	
4.4 Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού	
4.5 Πειραματικά δοκίμια και διαστάσεις	
4.5.1 Δοκίμια 1 – 4	
4.5.2 Δοκίμια A – D	
5 Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου- αριθμητική προσομοίωση	
5.1 Βασική θεωρία πεπερασμένων στοιχείων	
5.2 Ο κώδικας LS – DYNA	
5.2.1 Γενικά	
5.2.2 Χρήση του προγράμματος	

	5.2.	.3 Διαδικασία μοντελοποίησης	31		
6	Σύγι	κριση πειράματος- προσομοίωσης και περιγραφή της κατάρρευσης	34		
6.	.1	Δοκίμιο 1	35		
6.	.2	Δοκίμιο 2	41		
6.	.3	Δοκίμιο 3	48		
6.	.4	Δοκίμιο 4	55		
6.	.5	Δοκίμιο Α	62		
6.	.6	Δοκίμιο Β	69		
6.	.7	Δοκίμιο C	76		
6.	.8	Δοκίμιο D	83		
6.	.9	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	91		
7	Επιλ	ωγή καταλληλότερου δοκιμίου βάσει των κριτηρίων	92		
7.	.1	Απορροφώμενη ενέργεια Εα	92		
7.	.2	Μέγιστο φορτίο Pmax	93		
7.	.3	Μέσο φορτίο Pmean	95		
7.	.4	Ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα SEA	96		
7.	.5	Ομοιομορφία του φορτίου LU	97		
8	8 Γενικά συμπεράσματα				
9	9 Βιβλιογραφία				

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ την περίοδο Μαρτίου 2011 έως τον Ιούλιο 2011.

Σκοπός της είναι η μελέτη της κατάρρευσης λεπτότοιχων δοκιμίων ανοιχτής διατομής, τα οποία υπόκεινται σε αξονική στατική καταπόνηση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας του πειραματικού και του υπολογιστικού μοντέλου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις εφαρμογές των δοκιμίων που μελετώνται και τους λόγους που έχουν οδηγήσει σε περεταίρω ανάλυση της αξονικής κατάρρευσης δοκιμίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται τα θεωρητικά στοιχεία που εφαρμόζονται στην απορρόφηση ενέργειας από τις κατασκευές και ο βέλτιστος σχεδιασμός τους, καθώς και τα κριτήρια βάσει των οποίον θα γίνει επιλογή του δοκιμίου με την καλύτερη συμπεριφορά στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται γενικά στοιχεία θεωρίας για λεπτότοιχες κλειστές διατομές και στην συνέχεια για λεπτότοιχες ανοιχτές διατομές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το πειραματικό μέρος της εργασίας. Προσδιορίζονται όλα τα δεδομένα του πειράματος και καθορίζεται η γεωμετρία των δοκιμίων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο LS-DYNA και τα δεδομένα για την διεξαγωγή του υπολογιστικού μέρους της εργασίας.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης με την παράθεση του διαγράμματος φορτίου- μετατόπισης και την απεικόνιση των φάσεων της κατάρρευσης. Ακολουθεί σχολιασμός των παραπάνω.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η σύγκριση πειράματος και προσομοίωσης όσον αφορά τα κριτήρια απορρόφησης ενέργειας και η επιλογή του καταλληλότερου.

Στο όγδοο κεφάλαιο διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα από την κατάρρευση των δοκιμίων κατά την πειραματική διαδικασία και το υπολογιστικό μοντέλο, καθώς και τα αίτια των αποκλίσεων των δύο διαδικασιών.

Τέλος παρουσιάζεται η βιβλιογραφία με τις πηγές απ' όπου αντλήθηκαν τα θεωρητικά μέρη της εργασίας, καθώς και το γνωστικό υλικό του αντικειμένου μας για περεταίρω αναζήτηση.

Επιβλέπων αυτής της εργασίας υπήρξε ο καθηγητής κος Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου τόσο για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση την οποία επέδειξε προς το πρόσωπο μου αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και υποστηρικτής σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυψε κατά το χρονικό διάστημα των σπουδών μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς τον υποψήφιο διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου κο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ο οποίος επέδειξε σε όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα την απεριόριστη συμπαράσταση του σε θέματα χρήσης του προγράμματος LS-DYNA και τέλος στους τεχνίτες του εργαστηρίου που βοήθησαν στην διαμόρφωση των δοκιμίων.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Ντίλιου Καλλιόπη

## 1 Εισαγωγή- Σχεδιασμός οχημάτων με στόχο ασφαλέστερες κατασκευές

#### 1.1 Εισαγωγή- crashworthiness

Η μεγάλη αύξηση του αριθμού των μεταφορικών μέσων την εποχή μας έχει οδηγήσει τους σχεδιαστές στην προσπάθεια να εφεύρουν και να ενσωματώσουν σε αυτά νέα συστήματα που αυξάνουν το επίπεδο της παρεχόμενης ασφάλειας, μέσω της βελτίωσης της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων (crashworthiness). Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [9]:

- Αυτά που έχουν στόχο την βελτίωση της ενεργητικής ασφάλειας, δηλαδή την αποφυγή ενός ατυχήματος,
- Αυτά που έχουν ως στόχο την βελτίωση της παθητικής ασφάλειας του οχήματος, η οποία περιορίζει στο ελάχιστο τις συνέπειες ενός ατυχήματος για τους επιβάτες.

Ο όρος 'structural crashworthiness' περιγράφει τις συνέπειες της σύγκρουσης μιας κατασκευής με μια άλλη. Στόχος είναι ο υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την σύγκρουση, ώστε να προβλεφθεί η ζημιά της κατασκευής και η βιωσιμότητα των επιβατών. Ο κλάδος αυτός εξετάζει κυρίως συγκρούσεις οχημάτων, όπως αυτοκίνητα, τρένα, αεροπλάνα, πλοία, πλατφόρμες μεταφοράς και διαστημόπλοια.

Η προστασία από συγκρούσεις μπορεί να επιτευχθεί προσπαθώντας είτε για την ελάχιστη παραμόρφωση της εκτιθέμενης επιφάνειας, όπου το πλαίσιο υποβάλλεται σε υψηλές θλιπτικές δυνάμεις, είτε γι την μέγιστη παραμόρφωση του πλαισίου μέχρι ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, όπου μετατοπίζεται ένα τμήμα του χωρίς να μεταφέρονται μεγάλα φορτία στην καμπίνα του οχήματος και τους επιβάτες. Σκοπός του σχεδιαστή είναι να διοχετευθεί η κινητική ενέργεια σε επιμέρους τμήματα του αμαξώματος, παρά να επικρατήσουν συνθήκες ελαστικής παραμόρφωσης.

## 1.2 Ατυχήματα οχημάτων- Γενικά στοιχεία

Παλαιότερα επικρατούσε η πεποίθηση ότι ασφαλέστερο ήταν το μεγαλύτερο όχημα, γιατί δεν παρουσίαζε τόσο μεγάλη παραμόρφωση όσο το μικρότερο όχημα. Η άποψη αυτή πήγαζε από παρατήρηση πραγματικών

ατυχημάτων. Οι επιβάτες των μεγαλύτερων οχημάτων καταπονούνταν λιγότερο λόγω των μικρότερων επιβραδύνσεων κατά την σύγκρουση, αφού η αυξημένη μάζα του μεγάλου οχήματος ανέπτυσσε λόγω μεγάλης αδράνειας μικρότερη επιβράδυνση απ' ότι ένα μικρότερο όχημα.

Με την πάροδο των χρόνων όμως η ενεργειακή κρίση και οι αυξημένες ανάγκες των ανθρώπων για μετακίνηση οδήγησε στην κατασκευή φτηνών, ελαφρών και μικρών οχημάτων, κάτι που αύξησε και τον αριθμό των τροχαίων ατυχημάτων, με οδυνηρές συνέπειες για τους επιβάτες. Έτσι, δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στον τομέα της ασφάλειας, με αποτέλεσμα να αναθεωρηθεί το εφαρμοσμένης μηχανικής ιστορικό των μελετών της ενεργειακής απορρόφησης των δομών και των υλικών.

Τον τελευταίο αιώνα καταγράφεται κατακόρυφη αύξηση του αριθμού των οχημάτων. Στις ΗΠΑ τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται το φαινόμενο να είναι μεγαλύτερος ο αριθμός οχημάτων από τον αριθμό των οδηγών, κάτι που αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα [10]. Οι ΗΠΑ το 2009 είχαν 246 εκατομμύρια καταχωρημένα οχήματα και 209 εκατομμύρια οδηγούς, δηλαδή σχεδόν 5 οχήματα για 4 οδηγούς. Σύμφωνα με το NCSA υπολογίζεται μια αύξηση 18% στα καταχωρημένα οχήματα από το 1990.



Σχήμα 1.1: Αριθμός οδηγών και οχημάτων στις ΗΠΑ

Επιπλέον, η τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει και σε υψηλότερες ταχύτητες, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι συνέπειες για τους επιβάτες που

λαμβάνουν μέρος σε ένα ατύχημα. Στο σχήμα φαίνεται η συσχέτιση ταχύτητας οχήματος και ατυχημάτων [11].



Σχήμα 1.2: Ποσοστό ατυχημάτων συναρτήσει της ταχύτητας

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η τάση ως προς τους θανάτους σε αυτοκινητόδρομους των ΗΠΑ από το 1985 ως το 2004 (μαύρο χρώμα) και η υποθετική καμπύλη αντίστοιχων θανατηφόρων ατυχημάτων, αν η σχεδίαση των οχημάτων παρέμενε ως είχε το 1985 ως το 200 4(με κόκκινο χρώμα) [12]. Φαίνεται καθαρά ότι η μείωση των θανάτων λόγω τροχαίων ατυχημάτων οφείλεται στην βελτίωση των συστημάτων ασφαλείας στα οχήματα, καθώς και την χρησιμοποίηση υλικών με αυξημένη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά την σύγκρουση και όχι στην αυξημένη προσοχή ή/και ικανότητα των οδηγών.



Σχήμα 1.3:Θάνατοι ανά εκατομ. οχημάτων στις ΗΠΑ

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε μια πτώση του αριθμού θανατηφόρων ατυχημάτων με την πάροδο του χρόνου, κάτι που δείχνει τις θετικές συνέπειες την ανάπτυξης ασφαλέστερων μεταφορικών μέσων.

# Κεφάλαιο Ι



Σχήμα 1.3:Θάνατοι ανά δισεκατομμύρια χιλιόμετρα από το 1970 ως το 2005

Σε ότι αφορά τον ελλαδικό χώρο, οι θάνατοι στην άσφαλτο μειώνονται, όπως δείχνει και το παρακάτω διάγραμμα. Παραμένει όμως η χώρα μας μακριά από τα όρια που έχει θέσει ως στόχο η Ευρωπαϊκή Ένωση.



Σχήμα 1.4: Πίνακας Αριθμού Νεκρών από Οδικά Ατυχήματα στην Ελλάδα σε σύγκριση με το στόχο της Ε.Ε.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τον αριθμό των τροχαίων ατυχημάτων στην χώρα μας ανά έτος και σύμφωνα με την κατάληξη του ως προς τους τραυματισμούς των επιβατών [13].



Σχήμα 1.5: Κατάταξη τροχαίων ατυχημάτων στην Ελλάδα

Εδώ να αναφέρουμε επίσης ότι η χώρα μας παρουσιάζει την μεγαλύτερη αύξηση κατοχής οχημάτων την περίοδο 1997-2007 ανάμεσα στις 15 χώρες τις Ευρωπαϊκής Ένωσης για την περίοδο εκείνη.



EU-15 increase in car fleet 1997-2007



## 1.3 Συνέπειες ατυχημάτων με οχήματα

### 1.3.1 Γενικά

Μια συντριβή οχήματος συμβαίνει σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αρχικά μια μέση δύναμη F που επικρατεί κατά την διάρκεια του χρόνου t και που αναπτύσσεται στις προσκρουόμενες επιφάνειες παράγεται από την ανάγκη για ροή της ορμής (P=mu). Είναι αντιστρόφως ανάλογη με το t, αφού

 $F = \frac{m \cdot u}{t}$  και συνεπώς ο μικρότερος χρόνος προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη.

Αυτή η μεγάλη δύναμη προκαλεί μια τεράστια επιτάχυνση (ή επιβράδυνση) στους επιβαίνοντες του οχήματος, ειδικά για τα κεφάλια, τα οποία δεν συγκρατούνται από τις ζώνες ασφαλείας. Ένας ενδεικτικός χρόνος σύγκρουσης είναι ένας παλμός με τιμή 3 -25 msec.

Τα πιθανά αποτελέσματα μιας συντριβής οχήματος είναι :

- Τραυματισμός ανθρώπων. Ατυχήματα που καταλήγουν στο φυσικό ή/και ψυχολογικό τραυματισμό των επιβαινόντων του οχήματος ή των πεζών. Σε ένα ατύχημα με μεγάλη επιβράδυνση τα κεφάλια των επιβαινόντων προσκρούουν στα μέρη του εσωτερικού του οχήματος. Αυτό αποκαλείται δεύτερη σύγκρουση και είναι επίσης πολύ επικίνδυνη.
- Δομική ζημιά, που αναφέρεται συνήθως στην πλαστική παραμόρφωση και το σπάσιμο της δομής του οχήματος και περιλαμβάνει επίσης τις καταστροφές από ενδεχόμενη πυρκαγιά λόγω της σύγκρουσης.
- Ζημιά στο φορτίο, όπως η ζημιά που προκαλείται με τη μετατόπιση του φορτίου, διαρροές πετρελαίου από μεταφερόμενη δεξαμενή κλπ.
- Ζημιά στο περιβάλλον, όπως η ζημιά στα αντικείμενα στις άκρες του δρόμου.

## 1.3.2 Στον άνθρωπο

Η επίδραση των συγκρούσεων στην υγεία των ανθρώπων αποτελεί πρωταρχικής σημασίας για τους σχεδιαστές, με αποτέλεσμα πολυάριθμες δημοσιεύσεις και έρευνες κάθε χρόνο στον τομέα αυτό. Οι τραυματισμοί στο κεφάλι έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν τον πιο θανατηφόρο τραυματισμό στα ατυχήματα. Ο λόγος είναι ότι δύσκολα θεραπεύονται και σε πολλές περιπτώσεις οδηγούν σε μόνιμες δυσλειτουργίες. Έχει αναπτυχθεί μαθηματική σχέση, σύμφωνα με την οποία μπορεί να καθοριστεί η πιθανότητα να έχει υποστεί ο επιβάτης μικρότερη ή μεγαλύτερη σωματική βλάβη. Η σχέση είναι [14]:

$$HIC = \left\{ \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \right\}_{max}$$

όπου  $t_1$  και  $t_2$  είναι οι αρχικές και οι τελικές τιμές σε δευτερόλεπτα κατά την διάρκεια των οποίων ο HIC λαμβάνει την μέγιστη τιμή του και a είναι η επιτάχυνση μετρούμενη σε μεγέθη g (επιτάχυνση της βαρύτητας) συναρτήσει του χρόνου t.

Επίσης να τονίσουμε ότι το μέγιστο χρονικό διάστημα  $t_2$  -  $t_1$ , έχει άνω όριο μία συγκεκριμένη τιμή, συνήθως 15 ms.

Οι συνέπειες για τους επιβάτες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου αποτυπώνονται οι σωματικές βλάβες που προκαλούνται από το ατύχημα [15].

Head Injury Criteria	AIS Code	Level Of Brain Concussion And Head Injury	
135 – 519	1	Headache or dizziness	
520 - 899	2	Unconscious less than 1 hour – linear fracture	
900 – 1254	3	Unconscious 1 – 6 hours – depressed fracture	
1255 – 1574	4	Unconscious 6 – 24 hours – open fracture	
1575 – 1859	5	Unconscious greater than 25 hours – large haematoma	
> 1860	6	Non survivable	

Σχήμα 1.7: Πίνακας συνεπειών για τον άνθρωπο σύμφωνα με το HIC

## 2 Ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πρόσκρουσης

#### 2.1 Εισαγωγή

Ο μεγάλος κίνδυνος για τραυματισμούς, θανάτους και ζημιές σε περίπτωση σύγκρουσης ή ατυχήματος οδηγεί στην ανάπτυξη νέων σχεδιαστικών πρακτικών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των παραπάνω συνεπειών. Η απεικόνιση των μεγεθών που ενδιαφέρουν τους σχεδιαστές μπορεί να γίνει μέσω ενός διαγράμματος φορτίου- μετατόπισης. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη αναπαριστά την ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από το αμάξωμα, η οποία εξαρτάται από την μέγιστη παραμόρφωση και το φορτίο λυγισμού. Εφόσον υπάρχει ένα μέγιστο όριο στην παραμόρφωση του οχήματος, για να αυξήσουμε το ποσό της ενέργειας που απορροφάται, πρέπει να αυξήσουμε το φορτίο λυγισμού κάνοντας την κατασκευή πιο στιβαρή. Επίσης είναι προφανές ότι η απορροφόμενη ενέργεια κατά την σύγκρουση εξαρτάται από τον τρόπο παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων και το υλικό κατασκευής τους.

#### 2.2 Θεωρία

Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους αποτυπώνεται μέσω της ειδικής ενέργειας απορρόφησης  $W_s$ , η οποία ορίζεται ως ο λόγος της απορροφώμενης από το κέλυφος ενέργειας κατά την κατάρρευση, W, προς την μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει, m<sub>c</sub>, η οποία με την σειρά της υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V<sub>c</sub> πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ. Τα δοκίμια που θα μας απασχολήσουν είναι όλκιμα. Έτσι, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης έχει πολλές βυθίσεις, σε αντίθεση με το αντίστοιχο των ψαθυρών υλικών, που είναι σχεδόν σταθερό λόγω των πολλών μικροθραύσεων κατά την κατάρρευση. Η μορφή της καμπύλης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου και την αλληλεπίδραση των δομικών του μερών.

Για τον υπολογισμό της ενέργειας που απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία κατάρρευσης σε μια δοκιμή αξονικής καταπόνησης μέσω εμβαδομέτρησης του χωρίου κάτω από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, το δοκίμιο παραμορφώνεται αρχικά ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται

σταθερά μέχρι μία μέγιστη τιμή Pmax, η οποία εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Στη συνέχεια το φορτίο εμφανίζει μια απότομη πτώση, ενώ η μορφή της καμπύλης φορτίουμετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου και τις συνθήκες φόρτισης.

#### 2.3 Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων ως προς την απορρόφηση ενέργειας- Κριτήρια

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των δοκιμίων ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας. Ο πρωταρχικός μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για μια δεδομένη μετατόπιση. Όσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση για δεδομένη απορροφώμενη ενέργεια, τόσο μικρότερο είναι το μέσο φορτίο  $P_{mean}$ . Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Με αυτό το σκεπτικό, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μια τετραγωνική επιφάνεια.

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

Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα μελέτη είναι :

 Συνολική απορροφώμενη ενέργεια Ε<sub>α</sub>, η οποία προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης P- s με ολοκλήρωση :

$$\mathbf{E}_{\alpha} = \int P \cdot ds$$

- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο  $P_{max}$  που επιτυγχάνεται κατά την ελαστική παραμόρφωση πριν αρχίσει η κατάρρευση του υλικού.
- Μέσο μεταελαστικό φορτίο  $P_{mean}$ , που δίνεται από την σχέση :

$$\mathbf{P}_{\text{mean}} = \frac{E_a}{S}$$

• Ειδική ενέργεια S.E.A. ανά μάζα, που δίνεται από την σχέση :

$$SEA = \frac{E_a}{m_c}$$

όπου m<sub>c</sub> είναι η μάζα του υλικού του δοκιμίου που έχει διαρρεύσει.

• Ομοιομορφία φορτίου LU, που δίνεται από την σχέση:

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

Οι σημασία του καθενός εκ των κριτηρίων και η αξιολόγηση των δοκιμίων με βάση τα ανωτέρω θα γίνει στο  $8^\circ$  κεφάλαιο.

## 2.4 Βέλτιστος σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Η μελέτη της συμπεριφοράς μιας κατασκευής σε πρόσκρουση καθορίζει τον μηχανισμό, βάσει του οποίου ένα ποσοστό της ενέργειας που προσδίδεται απορροφάται από την κατασκευή, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό μεταβιβάζεται στον επιβάτη. Η διαδικασία αυτή απαιτεί λεπτομερή μελέτη της κατασκευής σε καταστροφική καταπόνηση, η οποία πρέπει να γίνει στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού.

Οι μέθοδοι για την μελέτη της κατασκευής είναι:

- Με δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής, η οποία όμως ανεβάζει πολύ το κόστος.
- Με τη χρήση λεπτομερούς μαθηματικού μοντέλου με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, κάτι που καθίσταται ιδιαιτέρως δύσκολο όταν δεν υπάρχουν λεπτομερή στοιχεία για την κατασκευή και το υλικό της.

Έτσι, πρέπει να αναπτυχθούν εναλλακτικές σχεδιαστικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτούμενες συνθήκες φόρτισης.

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

 Βάση δεδομένων των στοιχείων της κατασκευής : αποτελεί την αρχή του σχεδιασμού. Συλλέγονται στοιχεία για τα υλικά μέσω δοκιμών ή ανάλυσης.

- Απόκτηση στοιχείων μέσω δοκιμής ή ανάλυσης. Αν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων για ένα συγκεκριμένο υλικό, αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές, ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του.
- 3) Συνολική ανάλυση της κατάρρευσης. Αφού προσδιοριστούν όλες οι μη γραμμικές ιδιότητες των συνιστωσών της κατασκευής, εκτελείται στατική ανάλυση της κατασκευής με σκοπό τον προσδιορισμό της συνολικής ικανότητάς της να φέρει φορτίο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με βάση τις ακόλουθες προϋποθέσεις:
  - Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα,
  - Η διεύθυνση και φορά των φορτίων που αναπτύσσονται στην καταρρέουσα κατασκευή κατά την δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν.
- 4) Βελτιστοποίηση της κατασκευής. Μαζί με την ικανότητα της κατασκευής να φέρει φορτία, συνυπολογίζεται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου της. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν τον σχεδιαστή να απομονώσει τα στοιχεία που δεν είναι 'συμβατά' με την κατασκευή. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι αν και κατά πόσο κάθε στοιχείο μπορεί να μεταβιβάσει τα επιβαλλόμενα φορτία μέσω της κατασκευής και ταυτόχρονα να απορροφήσει ένα ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας.
- 5) Βελτιώσεις στην αντοχή και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου. Μόλις προσδιοριστούν τα 'μη συμβατά' στοιχεία, μπορεί να αποφασιστεί το μέγεθος και το είδος της βελτίωσης.
- 6) Υπολογισμός σε κάμψη. Έχοντας υπολογίσει τις απαιτούμενες ιδιότητες (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διαστάσεις του απλοποιημένου στοιχείου που, καταπονούμενου σε θλίψη ή κάμψη, θα φτάσει και θα διατηρήσει το απαιτούμενο εσωτερικό φορτίο.
- 7) Σχεδιασμός του στοιχείου. Παρά το γεγονός ότι το απλοποιημένο στοιχείο που υπολογίστηκε αρκεί για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, αποτελεί μόνο ένα οδηγό για τον υπολογισμό των τελικών διαστάσεων της κατασκευής. Εντούτοις, λόγω ποικίλων άλλων απαιτήσεων, ο υπολογισμός μετατρέπεται σε μια σύνθετη διεργασία, με αφετηρία τις αρχικά υπολογισμένες απλοποιημένες μορφές.
- 8) Δυναμική ανάλυση. Η ανάλυση αυτή γίνεται με βάση δυο κριτήρια. Από τη μια, αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα πρόσκρουσης είναι μικρή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη του φορτίου που

παρέχεται από το 3° στάδιο. Αν όμως η μάζα είναι μεγάλη, γίνεται απευθείας χρήση των αποτελεσμάτων από τα προηγούμενα στάδια.

- 9) Προσομοίωση επιβάτη. Μετά την ολοκλήρωση του 8<sup>ού</sup> σταδίου, όπου η ταχύτητα και η υπό κατάρρευση κατασκευή είναι πια γνωστές, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή και του περιεχομένου της κατασκευής γενικότερα, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για όλα τα επιβατικά οχήματα.
- 10) Δυναμική βελτιστοποίηση. Αν στο 9° στάδιο προκύψουν μη αποδεκτά αποτελέσματα σε ότι αφόρα την ασφάλεια του επιβάτη, χρησιμοποιείται και πάλι όλο το σύστημα ανάλυσης μέχρι την επίτευξη παραδεκτών αποτελεσμάτων, ειδάλλως ο σχεδιασμός της ασφαλούς κατασκευής έχει ολοκληρωθεί.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος απορρόφησης ενέργειας

## 3 Γενικές πληροφορίες για λεπτότοιχες και ανοιχτές διατομές

#### 3.1 Λεπτότοιχες διατομές

Οι κατασκευές λεπτότοιχων διατομών απαντώνται σε ένα ευρύ και συνεχώς αναπτυσσόμενο πεδίο εφαρμογών της μηχανικής, όπου ζητείται βελτιστοποίηση της αναλογίας αντοχής και κόστους μέσω της ελαχιστοποίησης του υλικού. Το αποτέλεσμα είναι μια κατασκευή για την οποία η ανθεκτικότητα των μερών της είναι το πρωταρχικό μέλημα του σχεδιαστή. Οι λεπτότοιχες κατασκευές βρίσκουν εφαρμογή στην πλειοψηφία των οχημάτων αλλά και σε βιομηχανικά και οικιστικά κτίρια, γέφυρες, όπως επίσης και σε αγωγούς και δεξαμενές [17].

Η ανάγκη για ασφαλή οχήματα σε περίπτωση σύγκρουσης έχει οδηγήσει σε αναθεώρηση των δομών που χρησιμοποιούνται ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας στα οχήματα. Πλέον οι λεπτότοιχες κατασκευές σχεδιάζονται ώστε να απορροφούν μεγάλο ποσό της ενέργειας κατά την σύγκρουση μέσω πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού, ακόμα και σε μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, ώστε να προστατευτεί η κατασκευή. Έτσι, μελετώνται λεπτότοιχες κατασκευές διαφόρων διατομών υπό στατικό και δυναμικό φορτίο.

Οι κανονισμοί ασφαλείας επιβάλλουν το όχημα κατά την σύγκρουση να διατηρεί ανέπαφο μέρος του. Για παράδειγμα η καμπίνα των επιβατών πρέπει να αντέχει τα φορτία, ενώ άλλα στοιχεία της κατασκευής πρέπει να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια σε άλλης μορφής ενέργεια, διατηρώντας όμως την παραμόρφωση κάτω από καθορισμένα όρια.

Οι κυριότερες λεπτότοιχες διατομές που χρησιμοποιούνται είναι κλειστής διατομής και έχουν διατομές : κυκλικές, τετραγωνικές, top- hat και double- hat συγκολλητές.

Ένας λεπτότοιχος <u>κυκλικός</u> σωλήνας, όταν φορτιστεί αξονικά με στατικό φορτίο μπορεί να αποκτήσει είτε αξονοσυμμετρικούς λοβούς, είτε μηαξονοσυμμετρικό μοτίβο.

Ντίλιου Καλλιόπη



Σχήμα 3.1: Αξονοσυμμετρικοί λοβοί σε κυκλικό σωλήνα

Ο πρώτος τύπος κατάρρευσης παρατηρείται για λόγο ακτίνας προς πάχος σωλήνα μικρότερο από 45, ενώ για μεγαλύτερες τιμές παρατηρείται ο δεύτερος τύπος παραμόρφωσης [18].



Σχήμα 3.2: Μη-αξονοσυμμετρικό μοτίβο

Η παραμόρφωση μπορεί να αλλάξει μοτίβο, αν τα δοκίμια παραμορφωθούν λόγω δυναμικής φόρτισης μέσω πίπτουσας μάζας.

Η αξονοσυμμετρική κατάρρευση αναλύεται θεωρητικά στο [19] και επαληθεύεται υπολογιστικά και πειραματικά [20, 21].

Η συμπεριφορά δοκιμίων <u>τετραγωνικής</u> διατομής είναι πιο πολύπλοκη και μπορεί να ακολουθήσει συμμετρική [22] και ασύμμετρη κατάρρευση.



Σχήμα 3.3: Αξονική συμπίεση λεπτότοιχου τετραγωνικού σωλήνα

Κατά την κατάρρευση top- hat διατομών, μία σημαντική παράμετρος είναι το πλάτος της φλάντζας, ώστε να διευκολύνεται ο προοδευτικός σχηματισμός λοβών, οι οποίοι μπορούν να εμφανιστούν σε άπειρο συνδυασμό, συμμετρικών και ασύμμετρων, επηρεαζόμενοι και από την συμμετρική ή όχι θέση των σημειακών συγκολλήσεων [23]. Επίσης μπορεί να παρουσιαστεί ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση, κυρίως σε δοκίμια μικρού ύψους.



Σχήμα 3.4: Ακανόνιστη σταδιακή κατάρρευση top- hat διατομών

- 17 -

Σε ότι αφορά την κατάρρευση των <u>double- hat</u> διατομών, παρατηρούνται διάφορες μορφές ,τύπου Ι, ΙΙ και ΙΙΙ [24].



Σχήμα 3.5: Κατάρρευση τύπου I double- hat διατομής

## 3.2 Ανοιχτές διατομές

Οι λεπτότοιχες ανοιχτές διατομές χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεταλλικές κατασκευές χάρη στην αποδοτικότητά τους. Σχήματα διατομών όπως Ι, L, C, και Z απαντώνται συχνά στις μηχανολογικές κατασκευές, μιας και επιτυγχάνουν σημαντική μείωση του βάρους και υψηλή αντοχή. Επίσης χρησιμοποιούνται για την στήριξη ελασμάτων[1].

Το σχήμα τους κάνει τις δομές πολύ ευαίσθητες στη ροπή, τις αστάθειες και τις ατέλειες στο υλικό. Έχει αποδειχτεί ότι οι παραμορφώσεις εξαιτίας λυγισμού παίζουν κυρίαρχο ρόλο στις λεπτότοιχες κατασκευές ανοιχτών διατομών, με χαρακτηριστικά μη-γραμμικής ανάλυσης. Αν θεωρήσουμε το φαινόμενο γραμμικό και ευσταθές, οι παράμετροι αυτοί αγνοούνται. Κατά την μη-γραμμική ανάλυση, απαιτείται ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων βασισμένος στις μεγάλες μετατοπίσεις και στην υψηλή ροπή [2].

Πολλές μελέτες [5,6,7,8] έχουν εκπονηθεί στην ανάλυση των ροπών που αναπτύσσονται στα δοκίμια ανοιχτών διατομών.

#### 3.3 Ατέλειες/σφάλματα λεπτότοιχων κατασκευών

Κατά την διάρκεια του σχεδιασμού της κατασκευής, ο μηχανικός προσεγγίζει την μελέτη με εξιδανίκευση των διαφόρων μερών που αποτελούν την κατασκευή. Ειδικά όταν πρόκειται για λεπτότοιχες κατασκευές τα σφάλματα είναι πιο συχνά, καθώς όλες οι διαδικασίες κατά την επεξεργασία πρέπει να έχουν πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται σε ατέλειες κατά την παραγωγή, σε σφάλματα στην κατασκευή ή σε ελαττώματα του υλικού, ενώ μπορούν να προκληθούν βλάβες κατά την συναρμολόγηση ή επεξεργασία της κατασκευής.

# 4 Πειραματικό μέρος - Εκτέλεση και σχολιασμός

## 4.1 Εκλογή μορφολογίας

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ και εν συνεχεία καταπονήθηκαν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων έχουν μήκος 200 mm και το ύψος τους είναι 198mm, ρεαλιστικές διαστάσεις, με ευρύ πεδίο εφαρμογών. Συνολικά παράχθηκαν 8 δοκίμια. Εκλέχτηκαν να χρησιμοποιηθούν 2 διαφορετικές μορφολογίες, η μια τύπου hat και η δεύτερη τύπου S, οι οποίες έχουν ίσο αριθμό κατακόρυφων ακμών (4) και διαφορετικό μήκος πλευρών, ώστε να ελέγξουμε την αντοχή με παράμετρο το μήκος των πλευρών των δοκιμίων, ενώ η ενεργός διατομή παραμένει σταθερή για όλα τα δοκίμια και των δύο ομάδων.

#### <u>Υλικό δοκιμίων</u>

Τα δοκίμια είναι χαλύβδινα, με

- πυκνότητα: 0,007535 gr/mm<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας: 207000MPa
- λόγος Poisson: 0.28

## 4.2 Κατεργασία διαμόρφωσης

Τα ελάσματα χάλυβα απέκτησαν τις απαιτούμενες διαστάσεις με χρήση μηχανικού ψαλιδιού και στη συνέχεια κάμφθηκαν με χρήση στράτζας, ώστε το μέταλλο να παραμορφωθεί πλαστικά και να αποκτήσει την επιθυμητή γεωμετρία.

## 4.3 Πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις

Τα δοκίμια συμπιέστηκαν μέχρι το 50% του αρχικού ύψους ,δηλαδή  $\delta_f = 50mm$  σε συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκρασίας 18°C και σχετική υγρασία 50%. Η φόρτιση των δοκιμίων θεωρείται στατική καθώς πραγματοποιήθηκε με ταχύτητα κεφαλής u =10mm/min, επομένως συνολικό χρόνο συμπίεσης 300 sec.

### 4.4 Περιγραφή πειραματικού εξοπλισμού

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

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής είναι :

1) Το πλαίσιο μορφής Ο που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και τον μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.

2) Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.

3) Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι :

- Ονομαστική δύναμη 10 kN
- Μεγίστη ταχύτητα κινητής κεφαλής 500 mm/min
- Ταχύτητα περιστροφής της κεφαλής στην αρχική θέση 600 mm/min
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στην μεγίστη ταχύτητα 75 kN
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο 250 mm/min
- Euaisqusía keqalúz présaz 2 mV/V

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει την ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραιτήτων υπολογισμών. Απαρτίζεται από 4 κύριους τομείς :

- Τον κεντρικό τομέα
- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων
- Τον τομέα οριοθέτησης
- Τον τομέα ρύθμισης κεφαλής

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πρέσα είναι :

- Διάγραμμα φορτίου –μετατόπισης
- Απορροφώμενη ενέργεια πρόσκρουσης

- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο
- Τάση διαρροής για παραμόρφωση 0.2 %
- Μέση τάση συμπίεσης

Από το πρόγραμμα Bluehill 2, το οποίο εξάγει και παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, λάβαμε ένα αρχείο \*.raw με περίπου 5000 σημεία μετρήσεων για το κάθε τεμάχιο. Λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων καθίσταται δυνατή η άκρως ικανοποιητική σχεδίαση του διαγράμματος και ο υπολογισμός των υπόλοιπων μεγεθών με την εισαγωγή του αρχείου αυτού σε υπολογιστικό πρόγραμμα.

#### 4.5 Πειραματικά δοκίμια και διαστάσεις

Στη συνέχεια παρατίθενται τα σχήματα και οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου σε κάτοψη, όπως σχεδιάστηκαν στο Solidworks, καθώς επίσης και φωτογραφίες των δοκιμίων πριν το πείραμα.



#### 4.5.1 Δοκίμια 1 – 4





# <u>Δοκίμιο 2</u>





# Δοκίμιο 3





Ντίλιου Καλλιόπη

## <u>Δοκίμιο 4</u>





4.5.2 Δοκίμια A – D



7/2011

• Δοκίμιο Α



• Δοκίμιο Β



# • Δοκίμιο C



Δοκίμιο D



## 5 Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου- αριθμητική προσομοίωση

#### 5.1 Βασική θεωρία πεπερασμένων στοιχείων

Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Όμως, υπήρχε η ανάγκη να λυθούν και πιο σύνθετα προβλήματα και γι' αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Μία τέτοια μέθοδος είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

Αυτή η μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Αυτό όμως το μειονέκτημα ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη στη ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών. Η επιτυχία αυτής της μεθόδου ήταν τόσο μεγάλη, που ακόμα και σήμερα χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην βιομηχανία για τον υπολογισμό και τη μελέτη διάφορων κατασκευών.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διαφόρους σπουδαίους επιστήμονες όπως ο Ιωάννης Αργύρης, ο Clough, ο Ritz και άλλοι.

Οι περισσότερες αναλύσεις κατασκευών που υπόκεινται σε σύγκρουση σχετίζονται με τις βιομηχανίες αεροσκαφών και αυτοκινητοβιομηχανίες, όπου πολύ σημαντικό ρόλο έχουν οι κατασκευές ανοιχτών διατομών, που χρησιμοποιούνται ως συστήματα απορρόφησης της ενέργειας κατά την σύγκρουση.

Η ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και υπολογιστικούς μηχανισμούς σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές έκαναν εφικτή την υπολογιστική ανάλυση των κατασκευών που υπόκεινται σε σύγκρουση, δίνοντας μια εναλλακτική προσέγγιση, εκτός της πειραματικής, παρέχοντας επιτυχή προσομοίωση των κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία. Τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε σχέση με την πειραματική προσέγγιση είναι σημαντικά, με κυριότερο την δυνατότητα τροποποίησης της κατασκευής για την βελτίωση της αντοχής της πριν γίνουν οι πραγματικές δοκιμές, με αποτέλεσμα την μείωση χρόνου και κόστους υλικού. Έτσι, μπορεί να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής πέρα από την αστοχία, κάτι που παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία, καθώς η διαδικασία αστοχίας επηρεάζεται από ατέλειες του σχήματος ή του υλικού και η μοντελοποίηση του υλικού δεν περιγράφει πλήρως τις φυσικές του ιδιότητες.

Η ορθότητα των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης της κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να ενισχυθεί με σωστή και πυκνή πλεγματοποίηση της κατασκευής, κάτι που αυξάνει βέβαια το υπολογιστικό κόστος.

#### 5.2 Ο κώδικας LS – DYNA

#### 5.2.1 Γενικά

Για την πραγματοποίηση της υπολογιστικής προσομοίωσης της μονοαξονικής συμπίεσης των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας LS – DYNA 28.0 version date 2005 της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Ο κώδικας LS – DYNA είναι κώδικας πεπερασμένων στοιχείων, κατάλληλος για μη γραμμική δυναμική ανάλυση κατασκευών σε τρεις διαστάσεις με μεγάλο πλήθος υλικών στη βιβλιοθήκη του. Η κύρια μεθοδολογία λύσης στηρίζεται στην explicite ολοκλήρωση του χρόνου [26].

#### 5.2.2 Χρήση του προγράμματος

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την προσομοίωση στο LS – DYNA χωρίζεται σε δυο μέρη: στην χρήση του pre-processor και στην χρήση του post-processor του προγράμματος, που προέρχονται από την εταιρία ΕΤΑ, τύπου Femb 28.0 built date 2005.

Αρχικά, σχεδιάζουμε το μοντέλο στον pre-processor, με τα αποτελέσματα να αποθηκεύονται σε μορφή \*.fmb, τα οποία εξάγουμε σε αρχείο τύπου \*.dyn. Στην συνέχεια εισάγουμε το αρχείο αυτό στον SOLVER του Manager του LS-DYNA, ώστε να ξεκινήσει το "τρέξιμο" του προγράμματος. Σαν αποτέλεσμα, λαμβάνουμε αρχεία τύπου \*.d3plot, τα οποία ανοίγουμε στον post-processor, όπου παρουσιάζεται η κατάρρευση του μοντέλου μας, όπως επίσης και τα διαγράμματα φορτιού-μετατόπισης κτλ.

#### Pre-processor

Ο pre-processor χρησιμοποιείται για την σχεδίαση του μοντέλου. Παρέχει το πλεονέκτημα της ευκολίας κατά την διακριτοποίηση και την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Εδώ έχουμε την δυνατότητα:

- Να ορίσουμε την γεωμετρία του μοντέλου μας, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις.
- Να καθορίσουμε το υλικό και τις φυσικές ιδιότητες των δοκιμίων και των πλακών που συμμετέχουν στην διαδικασία.
- Να ορίσουμε τις διεπιφάνειες επαφής των σωμάτων, ώστε να αποφευχθεί λανθασμένη εισχώρηση κατά την διάρκεια της διαδικασίας
- Να ορίσουμε τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες του μοντέλου.

Πιο συγκεκριμένα, στο μενού του pre-processor χρησιμοποιούμε τις παρακάτω εντολές;

- FILE, όπου ανοίγουμε, αποθηκεύουμε και εξάγουμε το αρχείο όπου έχουμε σχεδιάσει το μοντέλο μας.
- PART, όπου ορίζουμε τα τμήματα που παίρνουν μέρος στη σχεδίαση.
- LINE, όπου σχεδιάζουμε τα parts, δίνοντας τις διαστάσεις.
- ELEMENT, όπου κατασκευάζουμε το πλέγμα.
- CHECK, όπου ελέγχουμε αν έχουν γίνει λάθη κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου μας σε ασυνέχειες των πεπερασμένων στοιχείων και προσανατολισμό του όγκου των πεπερασμένων στοιχείων.
- PROPERTY, όπου ορίζουμε το πάχος των επιφανειών των τμημάτων του μοντέλου.
- MATERIAL, όπου επιλέγουμε το υλικό του κάθε τμήματος, τις ιδιότητες του, όπως πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson και καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.
- SET, όπου ορίζουμε το είδος των πεπερασμένων στοιχείων του κάθε τμήματος.
- CONTACT, όπου επιλέγουμε τα sets τα οποία αλληλεπιδρούν.
- BC, όπου ορίζουμε τις αρχικές συνθήκες, τα φορτία, την αρχική ταχύτητα, καθώς και το τμήμα το οποίο κινείται..
- DYNAMISC, όπου καθορίζουμε το χρόνο τερματισμού της διαδικασίας, τις καμπύλες που επιθυμούμε να παραχωθούν (συνήθως φορτίου-μετατόπισης), τις οριακές συνθήκες του

προβλήματος και την καμπύλη ταχύτητας – χρόνου για την κίνηση των τμημάτων που επιλέγουμε να κινηθούν.

#### Post-processor

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία τρεξίματος του προγράμματος στον solver, παρουσιάζεται η κατάρρευση του δοκιμίου σε animation σε πραγματικό χρόνο. Επίσης παρουσιάζονται τα ζητούμενα διαγράμματα (d3plot) συναρτήσει του χρόνου. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης της καμπύλης απορροφώμενης ενέργειας με ολοκλήρωση της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης.

Οι μονάδες μέτρησης κατά την σχεδίαση είναι οι εξής :

- Μήκος :mm
- Μάζα : gr
- Χρόνος : msec
- Δύναμη : N
- Τάση :MPa

#### 5.2.3 Διαδικασία μοντελοποίησης

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα δεδομένα που εισάγαμε στον preprocessor κατά την μοντελοποίηση καθενός από τα δοκίμια που καταπονηθήκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Συνολικά, δηλαδή, δημιουργήθηκαν 8 αρχεία pre-processor.

Αρχικά, δημιουργήσαμε και σχεδιάσαμε τρία parts :

- ένα δοκίμιο, το οποίο θα μελετηθεί ως προς τον τρόπο κατάρρευσης
- δυο πλάκες, οι οποίες προσομοιώνουν τις πλάκες του εμβόλου και οι οποίες είναι απαραμόρφωτες σε σχέση με το έλασμα

Ο σχεδιασμός έγινε στο μέσο επίπεδο. Το κάθε δοκίμιο έχει 5 επιφάνειες τις οποίες διακριτοποιούμε σε πεπερασμένα στοιχεία (shell elements) με διαστάσεις 1.25x1.25 mm<sup>2</sup>.

Η κάθε πλάκα αποτελεί ένα πεπερασμένο στοιχείο, αφού θεωρούμε ότι είναι απαραμόρφωτες σε σχέση με το έλασμα. Επιπλέον, το κέλυφος του δοκιμίου έχει πάχος 0.98mm σε κάθε κόμβο.

Στην συνέχεια εισάγουμε τις ιδιότητες του υλικού του κάθε part. Για το δοκίμιο επιλέγουμε MAT 24: PIECEWISE LINEAR PLASTICITY.

Οι ιδιότητες του υλικού που εισάγουμε είναι :

- πυκνότητα: 0,007535 gr/mm<sup>3</sup>
- μέτρο ελαστικότητας: 207000MPa
- λόγος Poisson: 0.28
- καμπύλη σ-ε μετά το όριο διαρροής με τα ακόλουθα ζεύγη τιμών:

α/α	σ	ε
1	225	0
2	290	0,04
3	300	0,05
4	320	0,07
5	340	0,09
6	370	0,15
7	380	0,2
8	390	0,25

Τα παραπάνω ζεύγη τιμών εκλεχτήκαν από το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο του τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Οι πλάκες μοντελοποιηθήκαν με υλικό MAT 20: RIGID BODY και έχουν ίδια πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας και λόγο Poisson με το δοκίμιο.

Ακολουθεί η δημιουργία των sets που θα αλληλεπιδράσουν. Δημιουργήσαμε 3 set από segments (πάνω τμήμα δοκιμίου, κάτω τμήμα δοκιμίου και ολόκληρο το δοκίμιο) και δυο sets από nodes (πάνω πλάκα, κάτω πλάκα). Έτσι, ορίζουμε τις διεπιφάνειες :

- διεπιφάνειες επαφής της κάθε πλάκας με τους κόμβους του αντίστοιχου τμήματος του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή
- διεπιφάνειες των πεπερασμένων στοιχείων του δοκιμίου μεταξύ τους.

Σκοπός είναι να μην εισέρχονται τα πεπερασμένα στοιχεία του ενός set στο άλλο. Ο συντελεστής στατικής τριβής είναι 0,20 και δυναμικής τριβής 0,15.
Ακολουθεί ο ορισμός του χρόνου τερματισμού της κίνησης της πάνω πλάκας ,ο οποίος είναι 50msec , ενώ κατά την πειραματική διαδικασία ήταν 300sec .

Καθορίστηκε η καμπύλη ταχύτητας της πάνω πλάκας συναρτήσει του χρόνου, η οποία είναι σταθερή και ίση με 1mm/msec, ενώ στο πείραμα ήταν 10 mm/min. Επίσης ,καθορίζουμε το βήμα (ανά 0,1s) καταγραφής του φορτίου στην καμπύλη reforce και το βήμα καταγραφής του φαινομένου (d3plot) ίσο με 1s.

### 6 Σύγκριση πειράματος- προσομοίωσης και περιγραφή της κατάρρευσης

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία της κατάρρευσης των δοκιμίων και η σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών του πειράματος και της προσομοίωσης, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το υπολογιστικό μοντέλο ως αξιόπιστη μέθοδος πρόβλεψης της κατάρρευσης των δοκιμίων. Για τον σκοπό αυτό παρατίθενται το διάγραμμα φορτίου- μετατόπισης και συγκριτικός πίνακας των μελετώμενων μεγεθών για το κάθε δοκίμιο.

Επίσης παρατίθενται φωτογραφικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης των δοκιμίων κατά την πειραματική διαδικασία, καθώς και τα αντίστοιχα στιγμιότυπα από την προσομοίωση, ώστε να διευκολυνθεί η διαδικασία της σύγκρισης της κατάρρευσης. Παραλείπονται οι πλάκες για καλύτερη απεικόνιση των παραμορφωμένων δοκιμίων. Ο τίτλος στους πίνακες με τα στιγμιότυπα δείχνει τη συμπίεση του δοκιμίου σε mm.

Τα δοκίμια κατά την πειραματική διαδικασία φωτογραφήθηκαν σε πρόσοψη, σε χρονικές στιγμές επιλεγμένες σύμφωνα με την ιδιαιτερότητα που παρουσίασε η κατάρρευση. Τα δοκίμια κατά την προσομοίωση παρουσιάζονται σε πρόοψη για καλύτερη εποπτεία της συνολικής γεωμετρίας, η οποία είναι αρκετά σύνθετη, κυρίως στα δοκίμια A-C.

Η μάζα που καταρρέει είναι για όλα τα δοκίμια m=72gr, αφού η πυκνότητα και ο όγκος που καταρρέει είναι ο ίδιος.

#### 6.1 Δοκίμιο 1



Από τον πίνακα παρατηρούμε ότι το δοκίμιο στην προσομοίωση απορροφά αρκετά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από το δοκίμιο στο πείραμα, με τις τιμές να είναι 533,51J και 466,25J αντίστοιχα. Το ίδιο συμβαίνει και για το μέγιστο φορτίο, μιας και στην πρώτη περίπτωση το μέσο φορτίο είναι 43,72kN, ενώ στην δεύτερη 38,28kN, Το δοκίμιο κατά την προσομοίωση παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερη ειδική ενέργεια ανά μάζα (S.E.A.), κάτι που δεν ισχύει και για την ομοιομορφία του φορτίου, καθώς είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις.

Dok1	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{a}(J)$	533,51	466,25
P <sub>max</sub> (kN)	43,72	38,28
P <sub>mean</sub> (kN)	10,67	9,33
S.E.A. (J/gr)	7,41	6,48
L.U.	4,10	4,11

Εα	14,4%
P <sub>max</sub>	14,2%
P <sub>mean</sub>	14,4%
S.E.A.	14,4%
L.U.	-0,2%

Μεταρολή (Προσομοιωσή - πειραμί	Μεταβολή	(Προσα	ομοίωση	<b>-</b> πεί	ραμα
---------------------------------	----------	--------	---------	--------------	------

Τα μετρούμενα μεγέθη κατά την προσομοίωση είναι περίπου 14% μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα κατά την πειραματική διαδικασία, ένας αριθμός οριακά ικανοποιητικός ,αν θεωρήσουμε ότι αποκλίσεις ±12% είναι γενικά αποδεκτές. Συνεπώς ως προς τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών το υπολογιστικό μοντέλο αναπαριστά σχετικά αξιόπιστα το πείραμα.







Από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης διακρίνονται οι φάσεις, όπου αρχίζει ο σχηματισμός λοβών στο δοκίμιο, καθώς και η δημιουργία τσακισμάτων στα έδρες του δοκιμίου.

Στο υπολογιστικό μοντέλο παρατηρούμε ότι το δοκίμιο εμφανίζει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση 9 έως 11 mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 15kN περίπου, λόγω τσάκισης των πλαϊνών εδρών. Η τσάκιση αυτή σχηματίζεται υπό γωνία και όχι οριζόντια και είναι πολύ ανοιχτή, όπως φαίνεται και στο στιγμιότυπο 4. Για μετατόπιση 25 με 27 mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 12kN φαίνεται ο σχηματισμός του δεύτερου λοβού στο υπολογιστικό μοντέλο. Τέλος τρίτος μετωπικός λοβός εμφανίζεται για μετατόπιση περίπου 40mm, με το φορτίο να γίνεται 15kN, ο οποίο δεν ολοκληρώνεται. Παρατηρούμε ότι τα τοπικά μέγιστα φορτία διατηρούνται για ένα διάστημα συμπίεσης.

Αντίθετα, κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης ότι η κατάρρευση ακολουθεί μία ομαλή υπερβολική πορεία, όπου δεν απορροφάται σημαντικό ποσό ενέργειας, έως την συμπίεση των 30mm. Τότε εμφανίζεται τοπικό μέγιστο, το οποίο δίνει αναπτυσσόμενο φορτίο περίπου 12 kN, λόγω τσάκισης των πλαϊνών εδρών του δοκιμίου. Η καμπύλη στην συνέχεια εξακολουθεί να ανεβαίνει και στα 34 με 37mm συμπίεσης αναπτύσσεται φορτίο 14 kN. Στην συνέχεια οι καμπύλες και των δύο μεθόδων ανάλυσης της κατάρρευσης ακολουθούν πτωτική πορεία. Κύρια διαφορά στα στάδια της κατάρρευσης στις δύο μεθόδους είναι η δημιουργία ενός λοβού στο πειραματικό δοκίμιο και τριών στο υπολογιστικό μοντέλο.

Η σύγκριση της σταδιακής κατάρρευσης του δοκιμίου 1 στις δύο μεθόδους παρουσιάζει καταρχάς ομοιότητα στο τμήμα του δοκιμίου που καταρρέει αρχικά. Στην συνέχεια όμως η διαδικασία κατάρρευσης διαφέρει. Αυτό οφείλεται στο ότι το πειραματικό δοκίμιο 1 δεν πατάει καλά στα έμβολα της πρέσας, σχηματίζοντας διάκενα ανάμεσα στην αριστερή και δεξιά έδρα και το κάτω έμβολο της πρέσας. Αυτή η ατέλεια κατά την διαδικασία στρατζαρίσματος του αργικού ελάσματος έχει σαν συνέπεια την ανομοιόμορφη κατανομή των θλιπτικών τάσεων στο δοκίμιο, με εμφάνιση ροπών, που αναγκάζουν αυτές τις έδρες του δοκιμίου να καμφθούν στο άνω τμήμα τους και να μετακινηθούν προς τα εμπρός, με αναδίπλωση συνεχώς αυξανόμενης γωνίας. Η αριστερή και η δεξιά έδρα στο κάτω τμήμα του δοκιμίου ανασηκώνονται και μετακινούνται προς τα πίσω με την έναρξη σχεδόν της διαδικασίας συμπίεσης, ενώ γίνονται πιο έντονα από μετατόπιση 17mm, όπου φαίνεται και μη-συμμετρικότητα της αναδίπλωσης, καθώς οι πλαϊνές έδρες του δοκιμίου δεν πατούν τέλεια στα έμβολα της πρέσας, σχηματίζοντας διάκενα. Ο μετωπικός λοβός του πειραματικού δοκιμίου από

τις τελικές φωτογραφίες φαίνεται ότι αναπτύσσεται υπό γωνία 45° και έρχεται σε επαφή με το υπόλοιπο δοκίμιο (σχήμα 6.1), κάτι που δεν συμβαίνει στο υπολογιστικό μοντέλο, όπου οι λοβοί αναπτύσσονται οριζόντια.



Σχήμα 6.1

Οι ασυμμετρίες αυτές δεν παρατηρούνται στο υπολογιστικό μοντέλο, όπου οι παραλληλίες των μετώπων του δοκιμίου είναι δεδομένες και το πάνω έμβολο της πρέσας έρχεται σε επαφή πάντα με το άνω τμήμα του δοκιμίου. Έτσι η διαδικασία της κατάρρευσης είναι συμμετρική, έντονη μόνο στο άνω τμήμα του δοκιμίου, με το κάτω τμήμα να επηρεάζεται ελάχιστα κυρίως στην αριστερή και δεξιά έδρα. Φαίνονται λοιπόν ξεκάθαρα οι συνέπειες των ατελειών κατά τον σχηματισμό του δοκιμίου, οι οποίες επηρεάζουν απόλυτα τις φάσεις της κατάρρευσης των δοκιμίων ανοιχτής διατομής.



Σχήμα 6.2: Πρόσοψη δοκιμίου 1



#### 6.2 Δοκίμιο 2



— Προσομοίωση	——Πείραμα

Dok2	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	562,21	513,90
P <sub>max</sub> (kN)	43,70	43,83
P <sub>mean</sub> (kN)	11,25	10,28
S.E.A. (J/gr)	7,81	7,14
L.U.	3,89	4,26

Στο δεύτερο δοκίμιο παρατηρούμε μεγαλύτερη συνάφεια στην τιμή της απορροφώμενης ενέργειας, με μια διαφορά 50J,μεγαλύτερη κατά την προσομοίωση. Η διαφορά αυτή εξανεμίζεται σε ότι αφορά το μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο, το οποίο είναι περίπου 44 kN και στις δύο μεθόδους κατάρρευσης. Το μέσο φορτίο παρουσιάζεται ελάχιστα μεγαλύτερο κατά την προσομοίωση κατά 1 kN, ενώ η ειδική ενέργεια ανά μάζα κατά την προσομοίωση είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από το πείραμα, με τιμή 7,8 J/gr και 7,1 J/gr αντίστοιχα. Συνεπώς, από τις τιμές των μεγεθών που μελετάμε συμπεραίνουμε ότι το υπολογιστικό μοντέλο για το δεύτερο δοκίμιο αναπαριστά πιο ικανοποιητικά από το πρώτο την διαδικασία της κατάρρευσης.

<u>(</u>	
$\mathbf{E}_{a}$	9,4%
P <sub>max</sub>	-0,3%
P <sub>mean</sub>	9,4%
S.E.A.	9,4%
L.U.	-8,9%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Στο δοκίμιο 2 οι αποκλίσεις στις τιμές της απορροφώμενης ενέργειας, στο μέσο φορτίο και την ειδική ενέργεια ανά μάζα παρουσιάζουν αισθητή μείωση εν συγκρίσει με το δοκίμιο 1, μικρότερες του 10%. Στο μέγιστο φορτίο υπάρχει ταύτιση τιμών. Συνεπώς το υπολογιστικό μοντέλο αναπαριστά με μεγάλη ακρίβεια την πειραματική διαδικασία.







Στο υπολογιστικό μοντέλο παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παρουσιάζει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση 9 έως 11 mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 17kN περίπου, λόγω τσάκισης των πλαϊνών εδρών, όπως επίσης και για μετατόπιση 27 με 28 mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 13kN, με σχεδόν όμοιες τιμές με το δοκίμιο 1. Οι πλαϊνές έδρες σχηματίζουν γωνία με την αρχική τους θέση, αφού έχουν μετακινηθεί προς τα εμπρός. Τέλος για μετατόπιση 42 mm η καμπύλη αποκτά ανοδική πορεία που οφείλεται στον σχηματισμό του δεύτερου μετωπικού λοβού.

Αντίθετα, κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης ότι η κατάρρευση ακολουθεί μία ομαλή υπερβολική πορεία, όπως και στο δοκίμιο 1, όπου δεν απορροφάται σημαντικό ποσό ενέργειας, με την διαφορά της εμφάνισης τοπικού μέγιστου για μετατόπιση 20mm, το οποίο δίνει φορτίο περίπου 8kN. Η καμπύλη στην συνέχεια εξακολουθεί να ανεβαίνει και στα 25 με 27mm συμπίεσης αναπτύσσεται φορτίο 14 kN. Εκεί παρατηρείται ο σχηματισμός δύο πλαϊνών τμημάτων του λοβού στην αριστερή και δεξιά πτύχωση του δοκιμίου (αντί για έναν μετωπικό λοβό) και τσάκιση του μετώπου του δοκιμίου στο ίδιο ύψος. Στην συνέχεια εμφανίζεται το τελευταίο τοπικό μέγιστο στην καμπύλη για μετατόπιση 38mm, όπου το φορτίο που αναπτύσσεται είναι 16kN, το οποίο ακολουθείται από πτώση της ενέργειας μέχρι το τέλος της συμπίεσης.

Σε ότι αφορά την σύγκριση των σταδίων της κατάρρευσης του δοκιμίου 2 στις δύο μεθόδους βλέπουμε ότι παρουσιάζει καταργάς ομοιότητα στο τμήμα του δοκιμίου όπου σχηματίζεται ο πρώτος και κύριος μετωπικός λοβός, ο οποίος όπως αναφέραμε στο πειραματικό δοκίμιο εμφανίζεται με την μορφή δύο πλαϊνών λοβών. Στην συνέχεια η διαδικασία κατάρρευσης διαφέρει μεν, αλλά όχι σε τόσο μεγάλο ποσοστό όσο στην περίπτωση του δοκιμίου 1. Αυτό οφείλεται στο ότι το πειραματικό δοκίμιο 2 πατάει πολύ καλύτερα εν συγκρίσει με το δοκίμιο 1 στα έμβολα της πρέσας, με τα διάκενα να υπάρχουν αλλά να είναι σαφώς μικρότερα από τα αντίστοιχα στο δοκίμιο 1. Φαίνεται από το στιγμιότυπο 3 ότι το πειραματικό δοκίμιο εξαναγκάζεται σε αναδίπλωση της αριστερής και δεξιάς έδρας στο άνω τμήμα τους, ενώ στο κάτω τμήμα τους ανασηκώνονται ελαφρώς και συμμετρικά στην αρχή. Στην συνέχεια η δεξιά έδρα ανασηκώνεται περισσότερο, λόγω του μικρότερου μήκους του κατά 1 mm από την αριστερή. Η ατέλεια αυτή δημιουργήθηκε στο στρατζάρισμα και παρατηρήθηκε με μέτρηση με μικρόμετρο πριν την διαδικασία της αξονικής συμπίεσης στην πρέσα. Από μετατόπιση 40mm μέχρι το τέλος της συμπίεσης παρατηρούμε (στιγμιότυπο 7) ότι στο κάτω τμήμα τους το αριστερό και το δεξί μέτωπο ανασηκώνονται πολύ και απότομα.

Όπως φαίνεται και από τις τελικές φωτογραφίες του δοκιμίου 2 το πλάτος των λοβών της αριστερής και της δεξιάς έδρας είναι ίδιο σε μεγάλο ποσοστό.





Σχήμα 6.4: Αριστερή και δεξιά όψη του δοκιμίου 2

Η πίσω όψης του δοκιμίου 2 δείχνει τους σχηματιζόμενους λοβούς:



Σχήμα 6.5: Πίσω όψη δοκιμίου 2 δοκιμίου 2



Σχήμα 6.6: Σχηματισμός λοβών

Στο υπολογιστικό μοντέλο φαίνονται δύο μετωπικοί λοβοί, με την διαδικασία της κατάρρευσης να είναι συμμετρική, έντονη μόνο στο άνω τμήμα του δοκιμίου, με το κάτω τμήμα να επηρεάζεται ελάχιστα στο αριστερό και δεξιό μέτωπο. Αυτά από το στιγμιότυπο 5 και έπειτα μετακινούνται εμφανώς και σχηματίζουν γωνίας 45° σε σχέση με την αρχική τους θέση. Τα πλαϊνά μέτωπα παραμένουν παράλληλα και κάθετα με το εμπρός μέτωπο, όπως φαίνεται και στην κάτοψη.

Τέλος μπορούμε να πούμε ότι η πειραματική διαδικασία και η υπολογιστική ανάλυση ήρθαν σε ικανοποιητική συμφωνία στην περίπτωση του δοκιμίου 2. Συνεπώς μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα από την παραπάνω ανάλυση και σύγκριση των διαδικασιών.



Σχήμα 6.7: Πρόσοψη δοκιμίου 2



Σχήμα 6.8: Κάτοψη δοκιμίου 2

#### 6.3 Δοκίμιο 3



Dok3	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	552,31	449,30
P <sub>max</sub> (kN)	43,69	45,40
P <sub>mean</sub> (kN)	11,05	8,99
S.E.A. (J/gr)	7,67	6,24
L.U.	3,96	5,05

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι για το τρίτο δοκίμιο η απορροφώμενη ενέργεια κατά την προσομοίωση είναι μεγαλύτερη κατά 100 J περίπου σε σχέση με την αντίστοιχη στο πείραμα. Η απόκλιση αυτή δεν αποτυπώνεται στο μέγιστο απορροφώμενο φορτίο, καθώς η διαφορά των 2 περίπου kN δεν είναι σημαντική, όπως και η διαφορά στην ειδική ενέργεια ανά μάζα (S.E.A.). Αξιοσημείωτη είναι η αρκετά μεγάλη ανομοιομορφία που παρουσιάζει το δοκίμιο 3 κατά την πειραματική διαδικασία, μιας και η τιμή του μέσου φορτίου είναι αρκετά μικρή.

$\mathbf{E}_{\boldsymbol{\alpha}}$	23%
P <sub>max</sub>	-3,8%
P <sub>mean</sub>	22,9%
S.E.A.	22,9%
L.U.	-21,7%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Κατά την διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου 3 η απορροφώμενη ενέργεια, το μέσο φορτίο και η ειδική ενέργεια ανά μάζα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές στην προσομοίωση κατά 23% περίπου. Η απόκλιση αυτή θεωρείται μεγάλη και η προσομοίωση γενικά μη αποδεκτή ως προς τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών.







Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 7mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 16kN περίπου και για μετατόπιση 27mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 11kN, λόγω τσάκισης των πλαϊνών εδρών. Ένα ακόμα τοπικό μέγιστο εμφανίζεται στην καμπύλη για μετατόπιση 36mm, με αναπτυσσόμενο φορτίο 14kN, όπου αρχίζει να σχηματίζεται ο δεύτερος μετωπικός λοβός. Στην συνέχεια η καμπύλη αποκτά καθοδική πορεία.

Αντίθετα, κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης ότι η κατάρρευση ακολουθεί μία ομαλή υπερβολική πορεία, όπως και στα δοκίμια 1 και 2, όπου δεν αναπτύσσεται μεγάλη ενέργεια, έως μετατόπιση 26mm αρχικά και κυρίως 28mm,όπου το φορτίο παίρνει την τιμή των 10 kN περίπου. Αυτό αντιστοιχεί στην τσάκιση της μετωπικής έδρας και τον σχηματισμό των δύο πλαϊνών λοβών στις πτυχώσεις του δοκιμίου στο ίδιο ύψος. Η καμπύλη στην συνέχεια παρουσιάζει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση από 42 έως 48mm, με φορτίο 12kN περίπου, σχηματίζοντας ένα ακόμα τσάκισμα στις πλαϊνές έδρες που αναπτύσσεται συνεχώς. Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου 3 στις δύο μεθόδους βλέπουμε ότι παρουσιάζει καταρχάς ομοιότητα στο τμήμα του δοκιμίου όπου σχηματίζεται ο κύριος μετωπικός λοβός στο υπολογιστικό μοντέλο και οι δύο πλαϊνοί στο πείραμα.. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στο κάτω μέρος του δοκιμίου, σε αντίθεση με τα προηγούμενα δοκίμια.

Το πειραματικό δοκίμιο 3 πατάει αρκετά καλά στα έμβολα της πρέσας, όπως και το δοκίμιο 2, με τα διάκενα να είναι σχετικά μικρά. Φαίνεται από το στιγμιότυπο 3 ότι το πειραματικό δοκίμιο εξαναγκάζεται σε αναδίπλωση της αριστερής και δεξιάς έδρας στο κάτω τμήμα τους, που οδηγεί σε μετακίνηση προς τα εμπρός των εδρών αυτών στο πάνω τμήμα τους. Από το στιγμιότυπο 4 και έπειτα οι πλαϊνές έδρες παύουν να είναι παράλληλες, λόγω του άνισου μήκους τους, με την διαφορά να είναι 3 mm. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ροπής, η οποία στρίβει την αριστερή έδρα του δοκιμίου και ωθεί την αριστερή πλαϊνή έδρα προς το εσωτερικό του δοκιμίου, ενώ η δεξιά έδρα στρίβει προς τα εμπρός σχηματίζοντας μεγάλη γωνία με την αρχική της θέση. Επίσης παρατηρούμε ότι οι πλαϊνά έδρες κατά το βάθος στο τέλος της συμπίεσης πατούν η μία την άλλη, αφού έχουν υποστεί στροφή από την αρχική τους θέση. Στις ελεύθερες έδρες σχηματίζονται τμήματα του λοβού διαφορετικού πλάτους (σχήμα 6.10).



Στο υπολογιστικό μοντέλο η κατάρρευση είναι ομαλή και συμμετρική, με σχηματισμό ενός κύριου λοβού και έναρξη σχηματισμού και δεύτερου. Το πάνω μετωπικό τμήμα του δοκιμίου παραμένει ανέπαφο, κάτι που δεν ισχύει και για τις πλαϊνές έδρες. Οι αναδιπλώσεις στην αριστερή και δεξιά έδρα εμφανίζουν ομοιότητα και συμμετρικότητα.

Στις τελικές φωτογραφίες φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετές διαφορές στον τρόπο κατάρρευσης, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από την ασυμμετρία του πειραματικού δοκιμίου.



Σχήμα 6.9: Πρόσοψη δοκιμίου 3



Σχήμα 6.10: Πίσω όψη δοκιμίου 3



Σχήμα 6.11: Κάτοψη δοκιμίου 3



Σχήμα 6.12: Ανοψη δοκιμίου 3

#### 6.4 Δοκίμιο 4



- 55 -

dok4

Dok4	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	482,08	507,35
P <sub>max</sub> (kN)	44,05	48,62
P <sub>mean</sub> (kN)	9,64	10,15
S.E.A. (J/gr)	6,70	7,05
L.U.	4,57	4,79

Στο τέταρτο δοκίμιο παρατηρούμε ότι κατά την πειραματική διαδικασία απορροφάται μεγαλύτερο ποσό ενέργειας απ' ότι στην προσομοίωση, με το μέγιστο φορτίο είναι επίσης μεγαλύτερο στο πείραμα κατά περίπου 4 kN. Οι αποκλίσεις στο μέσο φορτίο, την ειδική ενέργεια ανά μάζα και την ομοιομορφία του φορτίου είναι μικρές, δίνοντας στην διαδικασία τον χαρακτηρισμό της ικανοποιητικής προσέγγισης του πειράματος από το υπολογιστικό μοντέλο με μια πρώτη ανάγνωση.

$\mathbf{E}_{\boldsymbol{\alpha}}$	-5%
P <sub>max</sub>	-9,4%
P <sub>mean</sub>	-5%
S.E.A.	-5%
L.U.	-4,6%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Στο δοκίμιο 4 εμφανίζονται τιμές μεγαλύτερες στο πείραμα από την προσομοίωση, με αποκλίσεις πολύ μικρής κλίμακας, της τάξης του 5%. Συνεπώς η σύγκριση πειράματος και υπολογιστικού μοντέλου δίνει την δυνατότητα χρησιμοποίησης του δεύτερου ως πολύ ικανοποιητικό εργαλείο για την μελέτη της κατάρρευσης του δοκιμίου.







Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζεται τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 14mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 13kN περίπου, όπως και για μετατόπιση 35mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 18kN. Αυτό οφείλεται στην τσάκιση της αριστερής και δεξιάς πλαϊνής έδρας κατά το βάθος. Στην συνέχεια η καμπύλη βυθίζεται, γιατί οι πλαϊνές έδρες γλιστρούν πάνω στα έμβολα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόστασή τους.

Κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται από την καμπύλη φορτίουμετατόπισης ότι και εδώ δεν σχηματίζεται δεύτερος λοβός στο δοκίμιο 4. Υπάρχει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 14mm, λόγω τσάκισης των πλαϊνών μετώπων, όπως και στο υπολογιστικό μοντέλο, χωρίς να εμφανιστεί άλλο τοπικό μέγιστο. Σχηματίζεται ένας μεγάλος λοβός, που αναπτύσσεται υπό γωνία και όχι οριζόντια και λοβοί στις πτυχώσεις των πλαϊνών εδρών με την δεξιά και αριστερή έδρα.

Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου 4 στις δύο μεθόδους βλέπουμε ότι ο κύριος μετωπικός λοβός σχηματίζεται στο ίδιο ύψος, στο πάνω τμήμα του δοκιμίου.

- 59 -

Το μέτωπο του πειραματικού δοκιμίου 4 δεν πατάει πολύ καλά στα έμβολα της πρέσας, ενώ η αριστερή και δεξιά έδρα πατούν πολύ ικανοποιητικά. Φαίνεται από το στιγμιότυπο 2 ότι το πειραματικό δοκίμιο εξαναγκάζεται σε αναδίπλωση του αριστερού και δεξιού μετώπου στο πάνω τμήμα τους, που οδηγεί σε μετακίνηση προς τα εμπρός των μετώπων αυτών στο κάτω τμήμα τους. Από το στιγμιότυπο 4 και έπειτα η δεξιά έδρα έχει υποστεί στρέβλωση σε τέτοιο βαθμό που δεν είναι πλέον ορατή στην πρόσοψη. Αυτό δεν συμβαίνει και στην αριστερή έδρα, πράγμα που οφείλεται στην διαφορά του πλάτους του δοκιμίου κατά 1 mm. Επιπλέον η αριστερή πλαϊνή έδρα έχει στραφεί κατά γωνία 45° περίπου σε σχέση με την αρχική της θέση. Στις τελικές φωτογραφίες φαίνεται η ασυμμετρία στην κατάρρευση.



Σχήμα 6.13

Οι τσακίσεις που σχηματίζονται στο πάνω τμήμα του δοκιμίου παρουσιάζουν ανομοιομορφία λόγω της ανισοκατανομής των δυνάμεων στα δύο πλαϊνά μέτωπα.



Σχήμα 6.14

Το υπολογιστικό μοντέλο δείχνει μια συμμετρική διαδικασία κατάρρευσης, όπου η αριστερή και δεξιά έδρα αναδιπλώνονται όμοια και συμμετρικά. Ο σχηματισμός του μετωπικού λοβού γίνεται παράλληλα με τα έμβολα και όχι υπό κλίση, όπως στην πειραματική διαδικασία.

Επιπλέον όπως φαίνεται και από την πίσω όψη του δοκιμίου 4 στο τέλος της συμπίεσης, οι πλαϊνές έδρες δεν μετακινούνται προς τα αριστερά και δεξιά αντίστοιχα, όπως στο πείραμα, αλλά παραμένουν σε σχεδόν κατακόρυφη θέση.



Σχήμα 6.15: Πρόσοψη δοκιμίου 4



Σχήμα 6.16: Πίσω όψη δοκιμίου 4



Σχήμα 6.17: Κάτοψη δοκιμίου 4

#### 6.5 Δοκίμιο Α



Πείραμα — Προσομοίωση

DokA	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	573,77	515,80
P <sub>max</sub> (kN)	43,68	42,54
P <sub>mean</sub> (kN)	11,48	10,32
S.E.A. (J/gr)	7,97	7,16
L.U.	3,81	4,12

Μια πρώτη ανάγνωση του παραπάνω πίνακα οδηγεί στο συμπέρασμα της μεγάλης συνάφειας των τιμών κατά την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση. Μοναδική απόκλιση η απορροφώμενη ενέργεια, όπου κατά την προσομοίωση λαμβάνει τιμή 574 J και στο πείραμα 515 J, απόκλιση η οποία δεν μπορεί να χαρακτηριστεί οριακά αποδεκτή.

ι.	(11000000000000000000000000000000000000	(101)
	$\mathbf{E}_{\boldsymbol{\alpha}}$	11,2%
	<b>P</b> <sub>max</sub>	2,7%
	P <sub>mean</sub>	11,2%
	S.E.A.	11,2%
	L.U.	-7,7%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Το δοκίμιο Α παρουσιάζει και αυτό μικρές και αποδεκτές αποκλίσεις στις τιμές των μετρούμενων μεγεθών της τάξης του 11%, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί πετυχημένη και αξιόπιστη η προσομοίωση για την εξαγωγή συμπερασμάτων.







Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζεται τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 9mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 15kN περίπου, όπου έχουμε τον σχηματισμό λοβών στο κάτω τμήμα των μετωπικών εδρών του δοκιμίου. Για μετατόπιση 37mm το φορτίο παίρνει τιμή 18kN, κάτι που οφείλεται στην τσάκιση των πλαϊνών εδρών κατά το βάθος. Στην συνέχεια η καμπύλη βυθίζεται, γιατί οι πλαϊνές έδρες γλιστρούν πάνω στα έμβολα και σχηματίζουν γωνία με την αρχική τους θέση.

Κατά την πειραματική διαδικασία, φαίνεται από την καμπύλη φορτίουμετατόπισης ότι και δεν υπάρχει τοπικό μέγιστο πέρα του αρχικό που δίνει το μέγιστο φορτίο. Σχηματίζονται δύο κύριοι μεγάλοι λοβοί, που αναπτύσσονται υπό γωνία και όχι οριζόντια.

Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου Α στις δύο μεθόδους βλέπουμε ότι οι κύριοι λοβοί σχηματίζονται σε διαφορετικό ύψος. Στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίζονται στο κάτω τμήμα των μετωπικών εδρών και ένας λοβός κατά μήκος της μεσαίας πλαϊνής έδρας που ενώνει της δύο μετωπικές έδρες. Στο πειραματικό μοντέλο ο λοβός αυτός σχηματίζεται διαγώνια υπό κλίση ,όπως φαίνεται και στην πρόσοψη του τελικού δοκιμίου Α. Επίσης στο πείραμα σχηματίζεται ένας λοβός στην πίσω μετωπική έδρα του δοκιμίου και ένα τσάκισμα στην εμπρός μετωπική έδρα (στιγμιότυπο 4). Ο λοβός στην αριστερή μετωπική έδρα στρεβλώνει το δοκίμιο και συγκεκριμένα την αριστερή ελεύθερη έδρα, η οποία τσακίζει και ανασηκώνεται (στιγμιότυπο 7). Επίσης η δεξιά ελεύθερη έδρα έχει στρίψει προς τα μέσα σχηματίζοντας μεγάλη γωνία με την αρχική της θέση.



Σχήμα 6.18: Λοβοί στο δοκίμιο Α

Οι αποκλίσεις στα στάδια της κατάρρευσης των δοκιμίων στις δύο μεθόδους είναι έντονες και ως αιτία μπορεί να αναφερθεί το γεγονός ότι το πειραματικό δοκίμιο πατάει μεν ικανοποιητικά στο έμβολο, όχι όμως τέλεια.

Κυρίως εμφανίζονται διάκενα στην δεξιά ελεύθερη έδρα, οδηγώντας σε ανάπτυξη ροπής που στρεβλώνει το δοκίμιο, κάνοντας ανομοιόμορφη την κατάρρευση.

Οι τελικές φωτογραφίες του δοκιμίου Α παρατίθενται παρακάτω:



Σχήμα 6.19: Πρόσοψη δοκιμίου Α



Σχήμα 6.20: Ανοψη δοκιμίου Α



Σχήμα 6.21: Πίσω όψη δοκιμίου Α



Σχήμα 6.22: Αριστερή πλάγια όψη δοκιμίου Α
#### 6.6 Δοκίμιο Β



Στο δοκίμιο B, η ενέργεια που απορροφήθηκε κατά την προσομοίωση είναι αυξημένη σε σχέση με το πείραμα, καθώς υπάρχει μια απόκλιση 80 J περίπου, διαφορά που αντικατοπτρίζεται και στο μέσο φορτίο, το οποίο στην μεν προσομοίωση είναι 11,2 kN, στο δε πείραμα είναι 9,7 kN. Το μέγιστο φορτίο είναι περίπου 44 kN και στις δύο περιπτώσεις, ενώ παρουσιάζεται απόκλιση και στην ειδική ενέργεια ανά μάζα και την ομοιομορφία του φορτίου.

3,90

L.U.

4,58

	( · · · · )
$\mathbf{E}_{\boldsymbol{\alpha}}$	16%
P <sub>max</sub>	-1,2%
P <sub>mean</sub>	16%
S.E.A.	16%
L.U.	-14,8%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Η προσομοίωση της κατάρρευσης του δοκιμίου Β δίνει τιμές μεγαλύτερες του πειράματος κατά 16 % περίπου, μια απόκλιση σχετικά ικανοποιητική, που όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων ως προς τα ποσά της απορροφώμενης ενέργειας και του μέσου φορτίου.







Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζεται τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 11mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 16kN περίπου, όπου έχουμε τον σχηματισμό λοβών στο πάνω τμήμα των μετωπικών εδρών του δοκιμίου. Για μετατόπιση 26mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 14kN εμφανίζεται τσάκιση στις πλαϊνές ελεύθερες έδρες και ανάπτυξη δεύτερου και μεγαλύτερου λοβού στις μετωπικές έδρες. Στην συνέχεια η καμπύλη βυθίζεται και ανεβαίνει λόγω του μεγάλου τσακίσματος στις ελεύθερες έδρες.

Κατά την πειραματική διαδικασία, η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης ανεβαίνει από μετατόπιση 29 mm, όπου το φορτίο είναι 9 kN, λόγω του σχηματισμού εσωτερικών μετωπικών λοβών και ακολουθεί ανοδική πορεία με μικρή κλίση, αφού οι ελεύθερες έδρες τσακίζουν και στρεβλώνουν.

Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου Α, στις δύο μεθόδους βλέπουμε ότι οι κύριοι λοβοί σχηματίζονται σε διαφορετικό ύψος. Στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίζονται στο πάνω τμήμα των μετωπικών εδρών ένας κύριος λοβός και ένας μικρότερος σε κάθε μετωπική έδρα, οι οποίοι ενώνονται με έναν λοβό στην μεσαία έδρα του δοκιμίου σχεδόν οριζόντιο(στιγμιότυπο 7). Η τσάκιση των ελεύθερων εδρών γίνεται πιο έντονη μετά το στιγμιότυπο 8, όπως και η μετακίνησή τους προς τα μέσα.

Στο πείραμα σχηματίζεται τσάκιση στο άνω τμήμα της εμπρός μετωπικής έδρας και στο μεσαίο σχεδόν τμήμα της πίσω μετωπικής έδρας, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένας μετωπικός λοβός (σχήμα 6.23) πίσω και ένας εγκάρσιος, κεκλιμένος λοβό στη μεσαία πλαϊνή έδρα.





Σχήμα 6.23: λοβοί

Οι ελεύθερες έδρες του δοκιμίου έχουν υποστεί στρέβλωση και κατά την διάρκεια του πειράματος ακουμπούν την μεσαία πλαϊνή έδρα, φαινόμενο που συναντάμε και στις δύο μεθόδους ανάλυσης της κατάρρευσης. Πιο εμφανές

είναι στο πειραματικό μοντέλο, όπου έχει στρίψει και η αριστερή μετωπική έδρα (σχήματα 6.23, 6.24).



Σχήμα 6.24

Συνεχίζοντας την ανάλυση των φάσεων της κατάρρευσης στο πειραματικό μοντέλο παρατηρείται περιστροφή γύρω από την κεντρική έδρα που ενώνει τις δύο μετωπικές έδρες του δοκιμίου. Η έδρα αυτή είναι η πιο σταθερή, αφού πατάει καλύτερα από τις υπόλοιπες στο έμβολο της πρέσας, με αποτέλεσμα στο τέλος της κατάρρευσης αυτή η έδρα να μην έχει υποστεί εκτεταμένο λυγισμό και πολλά τσακίσματα, όπως οι άλλες έδρες.

Οι αποκλίσεις στα στάδια της κατάρρευσης των δοκιμίων στις δύο μεθόδους είναι λιγότερο έντονες από προηγούμενες αντίστοιχες συγκρίσεις, αλλά και πάλι εμφανείς. Το πειραματικό δοκίμιο πατάει μεν ομοιόμορφα στο έμβολο, όχι όμως τέλεια. Κυρίως εμφανίζονται διάκενα στην αριστερή ελεύθερη έδρα, που οδηγεί σε στρέβλωση του δοκιμίου, κάνοντας ανομοιόμορφη και ασύμμετρη την κατάρρευση.



Σχήμα 6.25: Πρόσοψη δοκιμίου Β



Σχήμα 6.26: Δεξιά πλάγια όψη δοκιμίου Β



Σχήμα 6.27: Πίσω όψη δοκιμίου B



Σχήμα 6.28: Κάτοψη δοκιμίου Β

### 6.7 Δοκίμιο C



DokC	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	548,49	560,30
P <sub>max</sub> (kN)	43,73	42,75
P <sub>mean</sub> (kN)	10,97	11,21
S.E.A. (J/gr)	7,62	7,78
L.U.	3,99	3,82

Κατά την πειραματική διαδικασία το δοκίμιο C παρατηρούμε ότι απορρόφησε 560 J ενέργεια, ποσό λίγο μεγαλύτερο από την ενέργεια που απορροφήθηκε κατά την κατάρρευση του δοκιμίου στην προσομοίωση. Η τιμή του μέσου φορτίου, της ειδικής ενέργειας ανά μάζα και της ομοιομορφίας του φορτίου είναι περίπου ίδιες και στους δύο τρόπους ανάλυσης της κατάρρευσης, της τάξης των 11kN, 7,7 J/gr και 3,9 αντίστοιχα. Το μέγιστο φορτίο κατά την προσομοίωση έχει τιμή 44 kN, σχεδόν ίσο με το αντίστοιχο στο πείραμα, το οποίο έχει τιμή λίγο λιγότερο από 43 kN.

Eα	-2,1%
P <sub>max</sub>	2,3%
P <sub>mean</sub>	-2,1%
S.E.A.	-2,1%
L.U.	4,5%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Στην περίπτωση του δοκιμίου C οι αποκλίσεις είναι τόσο μικρές που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το υπολογιστικό μοντέλο αναπαριστά σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τα μετρούμενα μεγέθη που εξάγονται από την πειραματική διαδικασία.



- 77 -



Ντίλιου Καλλιόπη



Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζεται τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 12mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 15kN περίπου, όπου έχουμε τον σχηματισμό λοβού στο κάτω τμήμα της μεσαίας εγκάρσιας έδρας του δοκιμίου. Για μετατόπιση 28mm, όπου το φορτίο παίρνει τιμή 16kN η τσάκιση στις μετωπικές έδρες οδηγεί σε σχηματισμό λοβών στις πτυχώσεις των μετωπικών εδρών με τις ελεύθερες έδρες. Στην συνέχεια η καμπύλη βυθίζεται και ανεβαίνει λόγω του μεγάλου τσακίσματος στις ελεύθερες έδρες.

Κατά την πειραματική διαδικασία, η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης κατεβαίνει έως ότου αρχίσει ανοδική πορεία και σχηματίζει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση 36mm, όπου το φορτίο γίνεται 16 kN. Η κορυφή αυτή αντιστοιχεί στο τσάκιση της αριστερής ελεύθερης έδρας, η οποία προοδευτικά στρεβλώνει το κάτω τμήμα της έδρας αυτής. Για τον λόγο αυτό η καμπύλη τείνει να παρουσιάσει κορυφή και στα 49mm, όπου αναπτύσσεται φορτίο 16 kN.

Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου C, στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίζεται αρχικά ένας λοβός στο κάτω τμήμα της μεσαίας εγκάρσιας έδρας (στιγμιότυπο 4), ενώ ήδη έχει δημιουργηθεί τσάκιση στις ελεύθερες έδρες. Η τσάκιση αυτή προοδευτικά οδηγεί στην δημιουργία λοβών κατά μήκος των ελεύθερων εδρών στις πτυχώσεις του δοκιμίου (στιγμιότυπο 7). Η κεκλιμένη τσάκιση των ελεύθερων εδρών γίνεται πιο έντονη μετά το στιγμιότυπο (8), όπως και η μετακίνησή τους προς τα μέσα. Στο εμπρός και το πίσω μέτωπο έχουν δημιουργηθεί δύο λοβοί (σχήματα 6.30, 6.31). Συνολικά λοιπόν η κατάρρευση του δοκιμίου C οδηγεί στον σχηματισμό πέντε λοβών.

Στο πείραμα σχηματίζεται τσάκιση λίγο πάνω από το μέσο της εμπρός μετωπικής έδρας και λίγο κάτω από το μέσο της πίσω μετωπικής έδρας (στιγμιότυπο 2), που οδηγούν στον σχηματισμό δύο πλαϊνών λοβών στα σημεία αυτά. Πράγματι, εμφανής είναι η δημιουργία ενός κεκλιμένου λοβού στην μεσαία έδρα του δοκιμίου (σχήμα 6.30).

Ντίλιου Καλλιόπη

Οι ελεύθερες έδρες του δοκιμίου έχουν υποστεί στρέβλωση και από πολύ νωρίς σχηματίζεται ένας λοβός σε κάθε μία ελεύθερη έδρα (στιγμιότυπο 2). Στην δεξιά ελεύθερη έδρα ο λοβός έχει μεγαλύτερο πλάτος, ενώ στην αριστερή ο λοβός έχει μικρότερο πλάτος, αφού βρίσκεται στο κάτω τμήμα του δοκιμίου και έρχεται σε επαφή με το κάτω έμβολο κατά την συμπίεση (σχήμα 6.29). Η αριστερή ελεύθερη έδρα έρχεται σε επαφή με την μεσαία εγκάρσια έδρα (στιγμιότυπο 3), ενώ η δεξιά ελεύθερη έδρα φαίνεται ότι γλιστράει στο κάτω έμβολο και έρχεται σε επαφή με αυτό. Στην άνοψη του δοκιμίου φαίνεται ότι η δεξιά ελεύθερη έδρα πατάει την μεσαία εγκάρσια έδρα. Η κάτοψή του δοκιμίου δείχνει ότι η διατομή παραμένει σε μεγάλο ποσοστό ομοιόμορφη στο τέλος της κατάρρευσης γιατί οι αναλογίες των διατομών είναι σχεδόν σταθερές.





Σχήμα 6.29: Αριστερή πλάγια όψη και δεξιά πλάγια όψη δοκιμίου C

Οι αποκλίσεις στα στάδια της κατάρρευσης των δοκιμίων στις δύο μεθόδους είναι εμφανείς, αν και ο αριθμός των σχηματιζόμενων λοβών είναι ίδιος, με τις θέσεις τους να αλλάζουν. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το αρχικό πάτημα του δοκιμίου είναι ικανοποιητικό, αλλά υπάρχει μία διαφορά 1mm στο μήκος των μετωπικών εδρών, με αποτέλεσμα οι αριστερές ακμές να πατάνε καλύτερα.



Σχήμα 6.30: Πρόσοψη δοκιμίου C



Σχήμα 6.31: Πίσω όψη δοκιμίου C



Σχήμα 6.32: Κάτοψη δοκιμίου C



Σχήμα 6.33: Ανοψη δοκιμίου C

- 82 -

Ντίλιου Καλλιόπη

#### 6.8 Δοκίμιο D



DokD	Προσομοίωση	Πείραμα
$E_{\alpha}(J)$	579,00	572,15
P <sub>max</sub> (kN)	43,94	38,04
P <sub>mean</sub> (kN)	11,58	11,44
S.E.A. (J/gr)	8,04	7,95
L.U.	3,79	3,32

Κατά την κατάρρευση του δοκιμίου D η απορροφώμενη ενέργεια στην προσομοίωση παρουσιάζει ελάχιστη αύξηση έναντι της πειραματικής διαδικασίας. Σαφώς μεγαλύτερη είναι η απόκλιση του μέγιστου φορτίου, το οποίο στο πείραμα είναι 38kN, ενώ στην προσομοίωση 44kN. Το μέσο φορτίο, η ειδική ενέργεια ανά μάζα και η ομοιομορφία του φορτίου δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις, με τιμές της τάξης των 11,5 kN, 8J/gr και 3,5 περίπου.

ι.		(
	$\mathbf{E}_{\boldsymbol{\alpha}}$	1,2%
	<b>P</b> <sub>max</sub>	15,5%
	P <sub>mean</sub>	1,2%
	S.E.A.	1,2%
	L.U.	14,1%

Μεταβολή (Προσομοίωση - πείραμα)

Και στο δοκίμιο D βλέπουμε ότι η σύγκριση των μετρούμενων μεγεθών στο πείραμα και την προσομοίωση δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, με μεγάλη συνάφεια των συγκρίσιμων διαδικασιών κατάρρευσης. Όμως το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται αρκετά μεγαλύτερο στην προσομοίωση, κάτι που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη για την εξαγωγή συμπερασμάτων.







Η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης δείχνει ότι στο υπολογιστικό μοντέλο το δοκίμιο εμφανίζεται τοπικό μέγιστο για μετατόπιση περίπου 12mm, οπότε και αυξάνεται το αναπτυσσόμενο φορτίο στα 15kN περίπου, όπου έχουμε τον σχηματισμό ενός λοβού στο άνω τμήμα της μεσαίας εγκάρσιας έδρας του δοκιμίου, καθώς και στο άνω τμήμα της αριστερής και δεξιάς ελεύθερης έδρας. Στην συνέχεια το φορτίο παραμένει σχεδόν σταθερό με μια μικρή αύξηση από μετατόπιση 40 mm, λόγω τσάκισης στις ελεύθερες έδρες.

Κατά την πειραματική διαδικασία, η καμπύλη φορτίου- μετατόπισης κατεβαίνει υπερβολικά έως ότου αρχίσει ανοδική πορεία και σχηματίσει τοπικό μέγιστο για μετατόπιση 28 με mm, όπου το φορτίο γίνεται 16 kN. Η κορυφή αυτή αντιστοιχεί στο σχηματισμό λοβού στην μεσαία εγκάρσια έδρα. Στη συνέχεια η καμπύλη διατηρεί σχεδόν σταθερό φορτίο, καθώς τείνει να σχηματιστεί και δεύτερος λοβός στην δεξιά ελεύθερη έδρα, η οποία όμως προοδευτικά στρεβλώνει και το δοκίμιο γλιστράει στο έμβολο, με την καμπύλη να βυθίζεται και σχεδόν να μηδενίζει το αναπτυσσόμενο φορτίο.

Σε ότι αφορά τα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου D, στο υπολογιστικό μοντέλο σχηματίζεται αρχικά τσάκιση της μεσαίας εγκάρσιας έδρας, που οδηγεί στον σχηματισμό λοβού στο πάνω τμήμα της (στιγμιότυπο 3), ενώ ήδη έχουν δημιουργηθεί λοβοί στο πάνω τμήμα των ελεύθερων εδρών. Αν όμως παρατηρήσουμε προσεκτικά, θα δούμε ότι στη μεσαία έδρα ο λοβός δεν έχει σχηματιστεί ολοκληρωτικά, με αποτέλεσμα να τσακίσει αυτή στο πάνω μέρος της και το έμβολο να πατάει και στις δύο όψεις της, αριστερή και δεξιά. Η κεκλιμένη τσάκιση των ελεύθερων εδρών είναι συμμετρική και γίνεται πιο έντονη μετά το στιγμιότυπο 4. από το στιγμιότυπο 7 είναι εμφανής η έναρξη σχηματισμού κι άλλων λοβών, αυτή τη φορά στο κάτω τμήμα του δοκιμίου, οι οποίοι δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν ολοκληρωτικά, αλλά είναι εμφανείς στις ελεύθερες έδρες (σχήμα 6.34). Συνολικά λοιπόν η κατάρρευση του δοκιμίου C οδηγεί στον σχηματισμό τριών λοβών και άλλων δύο μερικώς σχηματισμένων.



Σχήμα 6.34

Στο πείραμα αρχικά σχηματίζεται τσάκιση λίγο πάνω από το μέσο της εμπρός μετωπικής έδρας που οδηγούν στην έναρξη σχηματισμού δύο λοβών, στην μεσαία έδρα και την δεξιά ελεύθερη έδρα (στιγμιότυπο 3). Όμως στη συνέχεια το δοκίμιο στρεβλώνει λόγω μη συμμετρικότητας (στιγμιότυπο 4), με αποτέλεσμα οριακά να μην προκληθεί καθολικός λυγισμός. Ο κεντρικός λοβός αναπτύσσεται πλήρως (στιγμιότυπο 5), ο οποίος είναι και ο μοναδικός λοβός που δημιουργείται κατά την κατάρρευση του δοκιμίου, κάτι που αποτελεί και την μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στην πειραματική και την υπολογιστική διαδικασία.

Οι ελεύθερες έδρες του δοκιμίου έχουν υποστεί στρέβλωση σε τόσο μεγάλο βαθμό, ώστε η αριστερή ελεύθερη έδρα παίρνει σχεδόν σχήμα Γ (στιγμιότυπο 4) και πάνω σ' αυτή πατάει το έμβολο. Προοδευτικά όμως γλιστράει στο κάτω έμβολο και ανασηκώνεται (στιγμιότυπο 6), καθώς το δοκίμιο λυγίζει και γλιστράει πάνω στο έμβολο της πρέσας (στιγμιότυπο 7). Επίσης από την κάτοψη του δοκιμίου φαίνεται ότι στο πάνω τμήμα της ακουμπάει στο υπόλοιπο δοκίμιο, αλλάζοντας έτσι την ενεργό διατομή του.



Σχήμα 6.35

Η δεξιά ελεύθερη έδρα επηρεάζεται από την έναρξη σχηματισμού του λοβού και έχει τσακίσει σε πολύ μεγάλη γωνία, μεγαλύτερη των  $90^{\circ}$ , όπως φαίνεται στην πίσω όψη του δοκιμίου.



Σχήμα 6.36: Αριστερή και δεξιά πλάγια όψη δοκιμίου D

Οι τελικές όψεις δείχνουν μια διαδικασία κατάρρευσης ανομοιόμορφη και ασύμμετρη σε πολύ μεγάλο βαθμό. Αυτό οφείλετε στις αποκλίσεις των μηκών των ακμών του δοκιμίου. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι το αρχικό πάτημα του δοκιμίου δεν είναι ικανοποιητικό, αφού υπάρχει διαφορά 3mm στο μήκος της εγκάρσιας έδρας με τις δύο ελεύθερες έδρες. Είναι εμφανές ότι το πολύ μικρό μήκος των μετωπικών εδρών έκανε το δοκίμιο ασταθές και με μεγάλη ευκολία και σχεδόν από την αρχή της κατάρρευσης προκλήθηκε λυγισμός και στρέβλωση, με τον σχηματισμό διαφορετικού αριθμού λοβών από το υπολογιστικό μοντέλο, που κάνουν την σύγκριση πειραματικής και υπολογιστικής διαδικασίας κατάρρευσης αδύνατη.



Σχήμα 6.37: Πρόσοψη δοκιμίου D



Σχήμα 6.38: Πίσω όψη δοκιμίου D



Σχήμα 6.39: Κάτοψη δοκιμίου D



Σχήμα 6.40: Ανοψη δοκιμίου D

	<b>Ε</b> α ( <b>J</b> )		Pmax(kN)		Pmean(kN)		S.E.A(J/gr)		LU	
Док	Πείρ	Προσομ	Πειρ	Προσομ	Πείρ	Προ <del>σ</del> ομ	Πείρ	Προσομ	Πείρ	Προ <del>σ</del> ομ
1	466,3	533,5	38,3	43,7	9,3	10,7	6,5	7,4	4,1	4,1
2	513,9	562,2	43,8	43,7	10,3	11,2	7,1	7,8	4,3	3,9
3	449,3	552,3	45,4	43,7	9,0	11,1	6,2	7,7	5,1	4,0
4	507,4	482,1	48,6	44,1	10,2	9,6	7,0	6,7	4,8	4,6
А	515,8	573,8	42,5	43,7	10,3	11,5	7,2	8,0	4,1	3,8
В	482,9	560,0	44,2	43,7	9,7	11,2	6,7	7,8	4,6	3,9
С	560,3	548,5	42,8	43,7	11,2	11,0	7,8	7,6	3,8	4,0
D	572,2	579,0	38,0	43,9	11,4	11,6	8,0	8,0	3,3	3,8

# 6.9 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

### 7 Επιλογή καταλληλότερου δοκιμίου βάσει των κριτηρίων

Η επιλογή του καταλληλότερου δοκιμίου, το οποίο εμφανίζει την καλύτερη συμπεριφορά κατά την αξονική συμπίεση γίνεται μεταξύ των δοκιμίων που έχουν καταπονηθεί στο υπολογιστικό μοντέλο, θεωρώντας ότι μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται πιο σωστή προσέγγιση της ανάλυσης της κατάρρευσης. Θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων και για τα πειραματικά δοκίμια, ώστε να ελεγχθεί η συνάφεια των δύο τρόπων προσέγγισης της κατάρρευσης.

Υπενθυμίζεται ότι κατά τον καθορισμό της γεωμετρίας των δοκιμίων επιλέχθηκε να διατηρηθεί σταθερός ο αριθμός των ακμών, δηλαδή των κατακόρυφων πτυχώσεων των δοκιμίων. Επίσης σταθερή έμεινε και η ενεργός διατομή των δοκιμίων. Οι παραπάνω παράμετροι είναι σημαντικοί για την ανάλυση των μετρούμενων μεγεθών κατά την διεξαγωγή του πειράματος και μπορεί να γίνει πρόβλεψη των αποτελεσμάτων σε κάποιες περιπτώσεις.

### 7.1 Απορροφώμενη ενέργεια Εα

Οι λεπτότοιχες διατομές έχουν μεγάλη ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας πρόσκρουσης, την οποία μετατρέπουν σε πλαστική παραμόρφωση που παραλαμβάνεται από το σώμα. Η απορροφώμενη ενέργεια εξαρτάται κυρίως από την αλληλεπίδραση των επιμέρους τμημάτων των δοκιμίων. Όσο περισσότεροι λοβοί σχηματίζονται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο. Επίσης πρέπει να τονίσουμε ότι μεγαλύτερο ποσό ενέργειας αναμένουμε να απορροφήσουν τα δοκίμια με την μεγαλύτερη ποσότητα περιορισμένου υλικού, οι οποίες συμπεριφέρονται καλύτερα από τις ελεύθερες έδρες ως προς την απορρόφηση ενέργειας.



- Σε ότι αφορά το μοντέλο LS-DYNA, την μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας παρουσιάζει το δοκίμιο D με 579 J περίπου, ακολουθούμενο από το δοκίμιο A με 573J. Από τα δοκίμια 1-4 μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας παρουσιάζει το δοκίμιο 2 με 562 J. Από τα δοκίμια A-D, οι τιμές της απορροφώμενης ενέργειας παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις. Επιπλέον ,την μικρότερη απορρόφηση ενέργειας από όλα τα δοκίμια παρουσιάζει το δοκίμιο 4 με 482J.
- Σε ότι αφορά τα πειραματικά αποτελέσματα, αυτά συμπίπτουν μόνο ως προς το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσό απορροφώμενης ενέργειας συνολικά, το οποίο είναι και εδώ το δοκίμιο D με 572 J περίπου. Από τα δοκίμια 1-4 μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας παρουσιάζει το δοκίμιο 4 με 513 J, ενώ διαφορετικό είναι και το δοκίμιο που εμφανίζει την μικρότερη απορροφώμενη ενέργεια, το οποίο είναι το δοκίμιο 3 με 450J περίπου από τα δοκίμια 1-4 και το δοκίμιο B με 480J περίπου από τα δοκίμια A-D.

### 7.2 Μέγιστο φορτίο Pmax

Κατά την σύγκρουση ενός οχήματος ένα μέρος της ενέργειας διαχέεται από την κατασκευή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης, ενώ το υπόλοιπο παραλαμβάνεται από την γύρω κατασκευή και κατ' επέκταση από τους επιβάτες. Έτσι, θα πρέπει το μέγιστο φορτίο πρόσκρουσης κατά την έναρξη της διαδικασίας να είναι μικρότερο από τα επιτρεπτά όρια, ώστε να μην

- 93 -

προκληθεί θανάσιμος τραυματισμός κατά την αρχική επιβράδυνση. Τα επιτρεπτά όρια καθορίζονται από το κριτήριο τραυματισμού στο κεφάλι HIC.



Pmax(kN)

- Παρατηρούμε ότι στο υπολογιστικό μοντέλο όλα τα δοκίμια έχουν μέγιστο φορτίο που κυμαίνεται από 43,7 kN (δοκίμιο A) μέχρι 44,05 kN (δοκίμιο 4), συνεπώς παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά σε ότι αφορά το κριτήριο μέγιστου φορτίου. Γνωρίζοντας ότι το μέγιστο φορτίο εξαρτάται κυρίως από ην ενεργό διατομή, μπορεί να προβλεφτεί αυτή η ομοιότητα στα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου, καθώς η ενεργός διατομή είναι σταθερή για όλα τα δοκίμια. Έστω και ελάχιστα όμως το δοκίμιο που εμφανίζει το μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, άρα και την μεγαλύτερη αντοχή μέχρι να ξεκινήσει η κατάρρευσή του στο υπολογιστικό μοντέλο είναι το δοκίμιο 4 συνολικά και από τα δοκίμια A-D το δοκίμιο D.
- Οι αποκλίσεις ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και τα αντίστοιχα του υπολογιστικού μοντέλου είναι μεγάλες. Οι διαφοροποιήσεις λόγω αποκλίσεων από την ιδανική γεωμετρία επηρέασαν τις τιμές του μέγιστου φορτίου. Έτσι, ομοιότητα εμφανίζεται μόνο στο δοκίμιο με το μέγιστο συνολικά Pmax που είναι και πάλι το δοκίμιο 4 με περίπου 49kN και από τα δοκίμια A-D μεγαλύτερο Pmax έχει το δοκίμιο B με 44kN. Μικρότερο Pmax έχουν τα δοκίμια 1 και D με 38 kN.

#### 7.3 Μέσο φορτίο Pmean

Ένα ακόμα κριτήριο για την αξιολόγηση της ικανότητας της κατασκευής για χρήση ως σύστημα απορρόφησης ενέργειας είναι το μέσο φορτίο  $P_{mean}$ . Το μέσο φορτίο σχετίζεται με την ικανότητα απορρόφησης πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αξονική κατάρρευση και σε αυτό παίζει ρόλο η αλληλεπίδραση των επιμέρους τμημάτων των δοκιμίων.



#### Pmean(kN)

- Στο υπολογιστικό μοντέλο το μεγαλύτερο μέσο φορτίο παρουσιάζει το δοκίμιο D με 11,6 kN, ακολουθούμενο με ελάχιστη διαφορά από το δοκίμιο A, και από τα δοκίμια 1-4 τα δοκίμια 2 και 3 με 11 kN περίπου. Το μικρότερο μέσο φορτίο έχει το δοκίμιο 4 με 9,6 kN και από τα δοκίμια A-D το δοκίμιο C με 11kN.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν αισθητά σε κάποια δοκίμια. Ομοιότητα και πάλι παρουσιάζεται στο δοκίμιο με το μέγιστο μέσο φορτίο που είναι το δοκίμιο D με 11,4kN και από τα δοκίμια 1-4 το δοκίμιο 2 με 10,3kN. Το μικρότερο μέσο φορτίο παρουσιάζει το δοκίμιο 3 με 9 kN περίπου και από τα δοκίμια A-D το δοκίμιο B με 9,8 kN.

### 7.4 Ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα SEA

Τα συστήματα απορρόφησης ενέργειας που μελετάμε έχουν εφαρμογή κυρίως στα μέσα μεταφοράς, όπου κυρίαρχο ρόλο παίζει το μειωμένο βάρος της κατασκευής. Συνεπώς πρέπει να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση ενέργειας με το ελάχιστο βάρος της κατασκευής. Γι' αυτό τον λόγο μελετήθηκε η ειδική ενέργεια απορρόφησης ανά μάζα, ώστε να επιλεχθεί το κατάλληλο δοκίμιο με βάση το συγκεκριμένο κριτήριο.



- Το δοκίμιο D παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά ως προς την απορροφώμενη ενέργεια ανά μάζα με 8,04 J/gr, σε αντίθεση με το δοκίμιο 4 που παρουσιάζει την χειρότερη συμπεριφορά με 6,7 J/gr.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα γενικά διαφέρουν αισθητά από τα αποτελέσματα του LS-DYNA. Και πάλι μέγιστη ενέργεια ανά μάζα παρουσιάζει το δοκίμιο D με περίπου 8 J/gr και ελάχιστη το δοκίμιο 3 με 6,2 J/gr.

Ντίλιου Καλλιόπη

### 7.5 Ομοιομορφία του φορτίου LU

Το συγκριτικό γράφημα LU για όλα τα δοκίμια είναι το ακόλουθο:



LU

- Μεγαλύτερο λόγο P<sub>max</sub> / P<sub>mean</sub> εμφανίζει το δοκίμιο 4 με 4,6 και μικρότερο το δοκίμιο D με 3,79. Ζητούμενο σε αυτό το κριτήριο είναι ο μικρότερος λόγος, συνεπώς την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει το δοκίμιο D.
- Στα πειραματικά αποτελέσματα είναι ξεκάθαρο ότι μεγαλύτερη ομοιομορφία φορτίου παρουσιάζει και εδώ το δοκίμιο D με 3,3 και χειρότερη συμπεριφορά το δοκίμιο 3 με λόγο P<sub>max</sub> / P<sub>mean</sub> ίσο με 5.

Θεωρώντας πιο αξιόπιστα τα συμπεράσματα από το υπολογιστικό μοντέλο, τα συμπεράσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα με τις συνολικά χαμηλότερες και υψηλότερες τιμές των μετρούμενων μεγεθών:

Κριτήριο	Μέγιστο	Ελάχιστο
$\mathbf{E}_{a}$	Δοκίμιο D (579 J)	Δοκίμιο 4 (482J)
P <sub>max</sub>	Δοκίμιο 4 (44,05 kN)	Δοκίμιο Α (43,7 kN)
P <sub>mean</sub>	Δοκίμιο D (11,6 kN)	Δοκίμιο 4 (9,6 kN)
S.E.A.	Δοκίμιο D (8,04 J/gr)	Δοκίμιο 4 (6,7 J/gr)
L.U.	Δοκίμιο 4 (4,6)	Δοκίμιο D (3,79)

Από τον παραπάνω πίνακα είναι εμφανές ότι το δοκίμιο με την καλύτερη συμπεριφορά είναι το δοκίμιο D, το οποίο εμφανίζει την μέγιστη απορροφώμενη ενέργεια, το μέγιστο μέσο φορτίο, τον μέγιστο λόγο ενέργειας ανά μάζα και την μεγαλύτερη ομοιομορφία φορτίου. Επιπλέον η διαφορά από το μέγιστο  $P_{max}$  είναι πολύ μικρή.

## 8 Γενικά συμπεράσματα

Σε γενικές γραμμές, όπως παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια τα αποτελέσματα, διαπιστώθηκαν διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας και της προσομοίωσης. Κάποια γενικά συμπεράσματα από την σύγκριση της κατάρρευσης κατά την πειραματική διαδικασία και μέσω υπολογιστικού μοντέλου είναι :

- Στα δοκίμια ανοιχτών διατομών δεν περιορίζεται η διεύρυνση των λοβών κατά το πλάτος. Συνέπεια αυτών είναι η καμπύλη φορτίουμετατόπισης να ανεβαίνει και στην συνέχεια να βυθίζεται, δίνοντας μικρότερη ενέργεια απορρόφησης. Αντίθετα, στα δοκίμια κλειστών διατομών θα υπήρχαν περισσότεροι λοβοί, μικρότεροι σε πλάτος.
- Κατά την έναρξη της πλαστικής παραμόρφωσης έχουμε αιχμή της καμπύλης φορτίου- μετατόπισης, όπου και αναπτύσσεται το μέγιστο φορτίο. Η ανάπτυξη του μέγιστου φορτίου κατά την έναρξη της συμπίεσης είναι αναμενόμενη, καθώς το υλικό είναι ακόμα ακέραιο και ανθίσταται στην δύναμη της πρέσας με πολύ μικρή παραμόρφωση.
- Σε όλα τα πειραματικά δοκίμια προκλήθηκε ασύμμετρος λυγισμός λόγω λοξής παραμόρφωσης και ανάπτυξης ροπών γύρω από κάποιον άξονα ο οποίος πιθανόν να συμπίπτει με μια ακμή του δοκιμίου (κυρίως στα δοκίμια A-D, τύπου S). Αυτό το φαινόμενο είναι φυσικό να προκύπτει σε αξονική συμπίεση δοκιμίων ανοιχτής διατομής, καθώς οι έδρες των δοκιμίων είναι ελεύθερες να κινηθούν και δεν συγκρατούνται μεταξύ τους όπως στα δοκίμια κλειστών διατομών.
- Σχετικά με τον μηχανισμό κατάρρευσης παρατηρήθηκε ότι υπάρχει αδυναμία πρόβλεψής της από το υπολογιστικό μοντέλο, καθώς δεν παρουσιάζεται απόλυτη ομοιότητα στα στάδια της κατάρρευσης, αν και η γενική συμπεριφορά είναι η ίδια σε κάποια δοκίμια. Αιτίες αυτής της αδυναμίας αυτής θα αναλυθούν παρακάτω.
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζουν ομαλότητα και συμμετρία σύμφωνα με την θεωρία, παρά τις απλοποιήσεις και τις παραδοχές που έγιναν κατά την κατασκευή του υπολογιστικού μοντέλου.
- Γενικά παρατηρούμε τον σχηματισμό ενός μετωπικού λοβού, μεγάλου σε πλάτος, ο οποίος αναπτύσσεται υπό γωνία προς τα

κάτω στο πείραμα έως ότου έρθει σε επαφή με το υπόλοιπο δοκίμιο. Αντίθετα, στην προσομοίωση ο λοβός αναπτύσσεται κάθετα με το δοκίμιο και δεν έρχεται σε επαφή με το υπόλοιπο τμήμα του δοκιμίου.

- Εναλλακτικά σχηματίζεται τσάκιση στην μετωπική έδρα, με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός κύριου λοβού στην μεσαία έδρα (δοκίμια A-D) ή στις ελεύθερες έδρες του δοκιμίου, ενώ στα δοκίμια 1-4 οι λοβοί σχηματίζονται στις πλαϊνές μη-ελεύθερες έδρες του δοκιμίου.
- Επίσης, στα δοκίμια 1-4 όσο μεγαλώνει το μήκος του εμπρός μετώπου και των πλαϊνών μετώπων του δοκιμίου, τόσο πιο σταθερό γίνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα για πιο ομοιόμορφη κατάρρευση. Πράγματι παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη συνάφεια πειραματικού και υπολογιστικού μοντέλου υπάρχει στο δοκίμιο 4, όπου εμφανίζονται και οι μικρότερες αποκλίσεις στις τιμές της απορροφώμενης ενέργειας και του μέσου φορτίου και υπάρχουν αρκετές ομοιότητες ως προς τα στάδια της κατάρρευσης.
- Αντίθετα στα δοκίμια A-D καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάστηκε στα δοκίμια με μεγαλύτερο βάθος, κυρίως σχετικά με την μεσαία έδρα που συγκρατεί τις δύο μετωπικές έδρες. Μειονέκτημα η απαίτηση για μεγάλη ακρίβεια στην κατασκευή των πραγματικών δοκιμίων, καθώς σε τέτοιες γεωμετρίες έστω και ελάχιστες αποκλίσεις στην παραλληλία των μετώπων οδηγούν σε ανάπτυξη ροπών και καθολικό λυγισμό του δοκιμίου.

Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μπορούν να αποδοθούν στους ακόλουθους παράγοντες:

- Τα δοκίμια που καταπονήθηκαν στην πρέσα δεν είναι ιδανικά κατασκευασμένα, ενώ στον κώδικα εισήχθησαν στις ονομαστικές –ιδανικές διαστάσεις. Πιθανή είναι και η ενδεχόμενη απόκλιση μεταξύ των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού των δοκιμίων των πειραμάτων και των αντίστοιχων μοντέλων του LS-DYNA.
- Βασικό ρόλο παίζει η μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών. Η πειραματική αξονική συμπίεση των δοκιμίων έγινε με ταχύτητα 10mm/min, δηλαδή είχε διάρκεια 30000 m sec, ενώ στον κώδικα του LS-DYNA έγινε η παραδοχή ότι επαρκεί χρόνος 50 msec για

την εξάλειψη των δυναμικών φαινομένων και την θεώρηση στατικού θλιπτικού φορτίου. Σκοπός είναι η μείωση του υπολογιστικού χρόνου με μικρή απώλεια στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

- Οι τιμές που βρέθηκαν στα διαγράμματα φορτίου (μέσο φορτίο, μέγιστο φορτίο) της προσομοίωσης και του πειράματος αποκλίνουν, διότι στο LS-DYNA δεν λαμβάνουμε υπόψη την ύπαρξη ατελειών στην ομοιογένεια του υλικού του δοκιμίου που ενδεχομένως να υπάρχουν στα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας, τα οποία είναι ανισότροπα.
- Σημαντικό ρόλο κατέχει η έστω και μικρή απόκλιση στην παραλληλότητα των μετώπων του δοκιμίου. Ακόμα μπορεί να υπάρχουν διαφορές που οφείλονται στην κατεργασία κατασκευής των δοκιμίων, άρα και στις διαστάσεις και την γεωμετρία τους σε σχέση με τα μοντέλα του LS-DYNA,ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η κινηματική ακρίβεια του πειραματικού εξοπλισμού.
- Επιπλέον, στο LS-DYNA οι ακμές θεωρήθηκαν γωνίες 90° (sharp), ενώ κατά το στρατζάρισμα οι γωνίες αποκτούν μια καμπυλότητα, όσο τέλεια κι αν είναι η διαδικασία.

Το υπολογιστικό μοντέλο θεωρήσαμε ότι δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις παραδοχές που σκοπό έχουν την ελάττωση του υπολογιστικού χρόνου. Γενικά σκοπός του μοντέλου προσομοίωσης είναι η εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα και μικρό κόστος. Έτσι, οι παραδοχές που οδηγούν σε απλοποίηση του μοντέλου είναι 'αναγκαίο κακό' για κάθε μηχανικό που επιθυμεί μια πρώτη πρόβλεψη της γεωμετρίας της κατασκευής μετά την κατάρρευση και τον υπολογισμό μεγεθών σημαντικών για την μελέτη της διαδικασίας απορρόφησης ενέργειας.

Το μεγαλύτερο σφάλμα προέρχεται από τις αποκλίσεις στην κατασκευή των δοκιμίων, όπου ασυμμετρία στο μήκος των εδρών ή ο σχηματισμός μιας γωνίας μικρότερης από μια άλλη κατά ελάχιστες μοίρες μπορεί να οδηγήσει σε τελείως διαφορετική και απρόβλεπτη κατάρρευση ένα δοκίμιο ανοιχτής διατομής

### 9 Βιβλιογραφία

[1]. F. Mohri, Lateral post-buckling analysis of thin-walled open section beams, Université Nancy, 2001.

[2]. F. Mohri, A beam finite element for non-linear analyses of thinwalled elements, Civil Engineering Department Le Montet, 2008.

[3]. Pastor MM and F. Roure, Open cross-section beams under pure bending II. Finite element simulation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2008,

[4]. Pastor MM, Bending collapse mechanisms of thin-walled crosssections, Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003.

[5]. D.B. Moore, A non-linear theory for the behaviour of thinwalled sections subjected to combined bending and torsion. Thin-Walled Structures 4 (1986), pp.449.

[6]. M. Gregory, Elastic torsion of members of thin open cross section, Australian Journal of Applied Science 12 2 (1961), pp. 174–193.

[7]. A.A. Gobarah and W.K. Tso, A non-linear thin-walled beam theory. International Journal of Mechanical Science 13 (1971), pp. 1025–1038.

[8]. M.M. Black, Non-linear behaviour of thin-walled unsymmetric beam sections subject to bending and torsion. Thin-Walled Structures (1967), pp. 87–102.

[9]. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A Demosthenous, M.B. Ioannidis, Crashworthiness of composite thin- walled components, Technonomic Publishing Co., Athens, 1998

[10]. www. alternet.org

[11]. http://www.flaguide.org/tools/math/fault/fault4.php

[12].www.ihs.com

[13]. www.astynomia.gr

[14]. Bryan G. McHenry, Head injuries criterion and the ATB, McHenry Software, Inc, 2004.

[15]. D. Tyrell, K. Severson, B. Marguis, Passenger Train Crashworthiness Studies, US Department of Transportation 1995. [16]. G. Lu, T.X. Yu, Energy absorption of structures and materials, Woodhead Publishing, 2003.

[17]. Schafer, B.W. Local buckling of structural steel shapes, Johns Hopkins University, 2010.

[18]. Jones N. Structural impact, Paperback ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

[19]. Abramowicz W, Jones N., Dynamic axial crushing of circular tubes, Int J of Impact Engineering, 1984.

[20]. Alexander JM, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, Quartely Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960.

[21]. Johnson W, Impact strength of materials, Edward Arnold Publishers, 1972.

[22]. Abramowicz W, Jones N., Dynamic axial crushing of square tubes, Int J of Impact Engineering, 1984.

[23]. Schneider F, Jones N, Observations on the design and modeling of some joined thin-walled structure sections, Thin- walled Structures, 2008.

[24]. White MD, Jones N, Abramowicz W, A theoretical analysis for the quasi- static axial crushing of top- hat and double –hat thin –walled sections, Int Jof Mechanical Science, 1999.

[25]. G. I. Ioannidis, D. J. Polyzois and A. N. Kounadis, Elastic limit state flexural-torsional postbuckling analysis of bars with open thin-walled cross-sections under axial thrust, National Technical University of Athens, 1998.

[26]. LS-DYNA version 970 keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 1998.

[27]. LS-DYNA theory manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2006.

[28]. P.H. Thornton and C.K.H. Dharana, The dynamics of structural collapse, Ford Motor Company, 1974.