

.....

*Τόκης Δημήτριος*

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στη σχολή των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον επιβλέποντα για την εργασία καθηγητή κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου τη μελέτη και τη διεκπεραίωση της διπλωματικής αυτής εργασίας αλλά και για τις πολύτιμες και ουσιαστικές συμβουλές του. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την βοήθεια του στην εκτέλεση των πειραμάτων, την καθοδήγησή του και την εποικοδομητική συνεργασία κατά την εκπόνησή της.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

Δημήτριος Τόκης

Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την μελέτη της αξονικής κατάρρευσης σωλήνων τετραγωνικής ή ορθογωνικής διατομής με τοιχώματα λεπτού πάχους και με οπές και σχισμές διαφόρων μεγεθών στο μέσον καθ' ύψος των δοκιμίων. Μελετώνται δηλαδή μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας από τη σκοπιά των ατελειών. Η εργασία αυτή έχει κυρίως πειραματικό και ερευνητικό προσανατολισμό.

Το κείμενο χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, το θεωρητικό και αυτό που έχει να κάνει με την πειραματική διαδικασία και διερεύνηση. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τα κεφάλαια ένα και δύο, ενώ τα κεφάλαια τρία έως έξι αντιστοιχούν στο δεύτερο μέρος.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια γενική αναφορά στις θεωρίες που εφαρμόζονται για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής με λεπτά τοιχώματα σχετικά με την αξονική τους κατάρρευση, καθώς επίσης εξηγούνται και διάφοροι βασικοί όροι. Περιγράφονται οι βασικοί όροι κατάρρευσης και καταγράφονται ορισμένα μαθηματικά μοντέλα που υπάρχουν για τη περιγραφή τους.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** ασχολείται με τις ατέλειες των δοκιμίων. Παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία για τις τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από οπές οι οποίες υπάρχουν σε μια μεταλλική επιφάνεια.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται η πειραματική διαδικασία. Γίνεται παρουσίαση των δοκιμίων, της μορφής που αυτά έχουν, της διαδικασίας κατασκευής τους καθώς και των οπών/σχισμών πάνω σε αυτά. Επιπλέον περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία καθώς και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν τα πειράματα.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), γίνεται αναφορά στη γένεση πλέγματος, και στα είδη ανάλυσης που μπορούν να πραγματοποιηθούν με αυτή τη μέθοδο. Επίσης, περιγράφεται το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν στις προσομοιώσεις.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται η παρουσίαση όλων των προσομοιώσεων. Για κάθε δοκίμιο το οποίο συμπίεστηκε παρουσιάζονται οι φάσεις κατάρρευσης συγκριτικά με τις αντίστοιχες φάσεις των πειραμάτων, το διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης, οι τελικές όψεις του δοκιμίου, και γίνεται μια περιγραφή του μηχανισμού με τον οποίο κατέρρευσαν τα δοκίμια.

Στο **έκτο κεφάλαιο** ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα. Γίνεται γενική σύγκριση, αλλά και σύγκριση με βάση βασικών παραμέτρων που έχουν επιλεγεί.

Μετά τη σύγκριση, στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα και γίνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα που μπορούν να αποτελέσουν θέμα μελέτης του πεδίου των καταστροφικών καταπονήσεων.

Τέλος, ακολουθούν δύο **παραρτήματα**, στο πρώτο παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν και στο δεύτερο η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της εργασίας, αλλά και την κατανόηση του αντικειμένου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>3</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ</b> .....	<b>8</b>
1.1 ΣΩΛΗΝΕΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	8
1.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	9
1.2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥΣ ΑΡΜΟΥΣ .....	11
1.2.2 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥΣ ΑΡΜΟΥΣ .....	12
1.2.3 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΑΤΥΝΣΗ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ .....	12
1.2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΑΡΜΩΝ.....	13
1.2.5 ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	15
1.2.6 ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΒΩΝ .....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΟΠΕΣ .....</b>	<b>35</b>
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	35
2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	36
2.3 ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ ΜΕ ΜΙΑ ΟΠΗ .....	41
2.4 ΠΕΡΙ ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΟΠΕΣ – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ BOEING 737.....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....</b>	<b>46</b>
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	46
3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ.....	46
3.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ.....	46
3.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	47
3.2.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	48
3.2.4 ΟΠΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	49
3.2.5 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	50
3.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	51
3.3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΕΣΑ INSTRON .....	51
3.3.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	54

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....55**

4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	55
4.2	ΟΡΙΣΜΟΣ CAD.....	55
4.3	ΟΡΙΣΜΟΣ CAE.....	56
4.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	57
4.4.1	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	58
4.4.2	ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	62
4.4.3	ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	75
4.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ LS-DYNA.....	77
4.5.1	ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ LS-DYNA.....	77
4.5.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	78
4.5.3	ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	79
4.5.4	ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	82

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ LS-DYNA 3D.....85**

5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	85
5.1.1	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (PEAK CRUSH LOAD).....	85
5.1.2	ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ (MEAN CRUSH LOAD).....	85
5.1.3	ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (CRUSH FORCE EFFICIENCY) 85	
5.1.4	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (TOTAL ENERGY ABSORPTION).....	86
5.1.5	ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (SPECIFIC ENERGY ABSORPTION).....	86
5.2	ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	87
5.2.1	ΔΟΚΙΜΙΟ S0.....	87
5.2.2	ΔΟΚΙΜΙΟ S1.....	90
5.2.3	ΔΟΚΙΜΙΟ S11.....	93
5.2.4	ΔΟΚΙΜΙΟ S12.....	96
5.2.5	ΔΟΚΙΜΙΟ S2.....	99
5.2.6	ΔΟΚΙΜΙΟ S21.....	102
5.2.7	ΔΟΚΙΜΙΟ S22.....	105
5.2.8	ΔΟΚΙΜΙΟ S3.....	108
5.2.9	ΔΟΚΙΜΙΟ S31.....	111
5.2.10	ΔΟΚΙΜΙΟ S32.....	114
5.3	ΔΟΚΙΜΙΑ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	117
5.3.1	ΔΟΚΙΜΙΟ R0.....	117
5.3.2	ΔΟΚΙΜΙΟ R1.....	120
5.3.3	ΔΟΚΙΜΙΟ R11.....	123
5.3.4	ΔΟΚΙΜΙΟ R12.....	126
5.3.5	ΔΟΚΙΜΙΟ R2.....	129
5.3.6	ΔΟΚΙΜΙΟ R21.....	132
5.3.7	ΔΟΚΙΜΙΟ R22.....	135
5.3.8	ΔΟΚΙΜΙΟ R3.....	138
5.3.9	ΔΟΚΙΜΙΟ R31.....	141
5.3.10	ΔΟΚΙΜΙΟ R32.....	144

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>147</b>
6.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	147
6.2 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ .....	147
6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	149
6.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ .....	149
6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	151
6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	153
6.4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	153
6.4.2 ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	155
6.4.3 ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	157
6.4.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	159
6.4.5 ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	161
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>163</b>
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	163
7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	166
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....</b>	<b>168</b>
ΠΑ.1 ΔΟΚΙΜΙΟ S0 .....	168
ΠΑ.2 ΔΟΚΙΜΙΟ S1 .....	169
ΠΑ.3 ΔΟΚΙΜΙΟ S11 .....	170
ΠΑ.4 ΔΟΚΙΜΙΟ S12 .....	171
ΠΑ.5 ΔΟΚΙΜΙΟ S2 .....	172
ΠΑ.6 ΔΟΚΙΜΙΟ S21 .....	173
ΠΑ.7 ΔΟΚΙΜΙΟ S22 .....	174
ΠΑ.8 ΔΟΚΙΜΙΟ S3 .....	175
ΠΑ.9 ΔΟΚΙΜΙΟ S31 .....	176
ΠΑ.10 ΔΟΚΙΜΙΟ S32 .....	177
ΠΑ.11 ΔΟΚΙΜΙΟ R0 .....	178
ΠΑ.12 ΔΟΚΙΜΙΟ R1 .....	179
ΠΑ.13 ΔΟΚΙΜΙΟ R11 .....	180
ΠΑ.14 ΔΟΚΙΜΙΟ R12 .....	181
ΠΑ.15 ΔΟΚΙΜΙΟ R2 .....	182
ΠΑ.16 ΔΟΚΙΜΙΟ R21 .....	183
ΠΑ.17 ΔΟΚΙΜΙΟ R22 .....	184
ΠΑ.18 ΔΟΚΙΜΙΟ R3 .....	185
ΠΑ.19 ΔΟΚΙΜΙΟ R31 .....	186
ΠΑ.20 ΔΟΚΙΜΙΟ R32 .....	187
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>188</b>
ΠΒ.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	188
ΠΒ.2 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	189
ΠΒ.3 ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ .....	190

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

---

### 1.1 ΣΩΛΗΝΕΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

---

Τα ελάσματα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στον τομέα των μεταφορών και συγκοινωνιών, όπως στα μηχανοκίνητα οχήματα, τον ηλεκτρικό, καθώς και τα πλοία, και τα αεροσκάφη, και αποτελούν κατά κύριο βαθμό το κέλυφος του κορμού των μη στρογγυλών σωληνοειδών διατομών. Τα μεταλλικά ελάσματα κατάλληλα διαμορφωμένα σχηματίζουν το σκελετό του μέσου μεταφοράς, ο οποίος δεν αποτελείται μόνο από σωλήνες κυκλικής διατομής. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να εξετάσουμε την συμπεριφορά κελυφών ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής σε μονοαξονική φόρτιση.

Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στη μελέτη των χαρακτηριστικών της επίδρασης του φορτίου, καθώς και της απορρόφησης της ενέργειας, σε μη κυκλικά σχήματα όπως είναι οι σωλήνες τετραγωνικής διατομής λεπτού τοιχώματος (στρατζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης), ίσια, ή κωνικά σε σχήμα κόλουρης πυραμίδας.

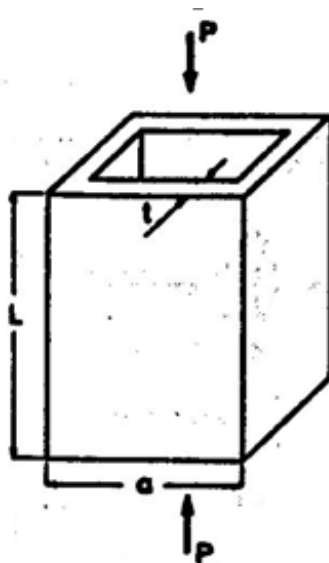
Τα τετραγωνικά κελύφη μπορούν να κατασκευάζονται από μη μεταλλικό υλικό PVC, και από μαλακό χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας % σε C (πχ, St37, π C = 0,15%).

Ο μηχανισμός κατάρρευσης των δοκιμών τετραγωνικής διατομής, που αναπτύσσεται με την εμφάνιση μη εκτατών λοβών, ουσιαστικά στηρίζεται σε σταθερούς και σε κινητούς πλαστικούς αρμούς (plastic hinges).

Αξιοσημείωτο, είναι το γεγονός ότι τα θεωρητικώς αναμενόμενα αποτελέσματα, συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα και βρέθηκαν σε καλή αντιστοιχία μεταξύ τους (βλ. Βιβλιογραφία – Παράρτημα Β).

Η σχηματική απεικόνιση της αξονικής θλίψης ενός σωλήνα τετραγωνικής διατομής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:





**Σχήμα 1.1:** Σχηματική απεικόνιση της αξονικής θλίψης ενός λεπτότοιχου σωλήνα τετραγωνικής διατομής

Στα δοκίμια που μελετώνται στην παρούσα εργασία, οι διαστάσεις τους είναι:

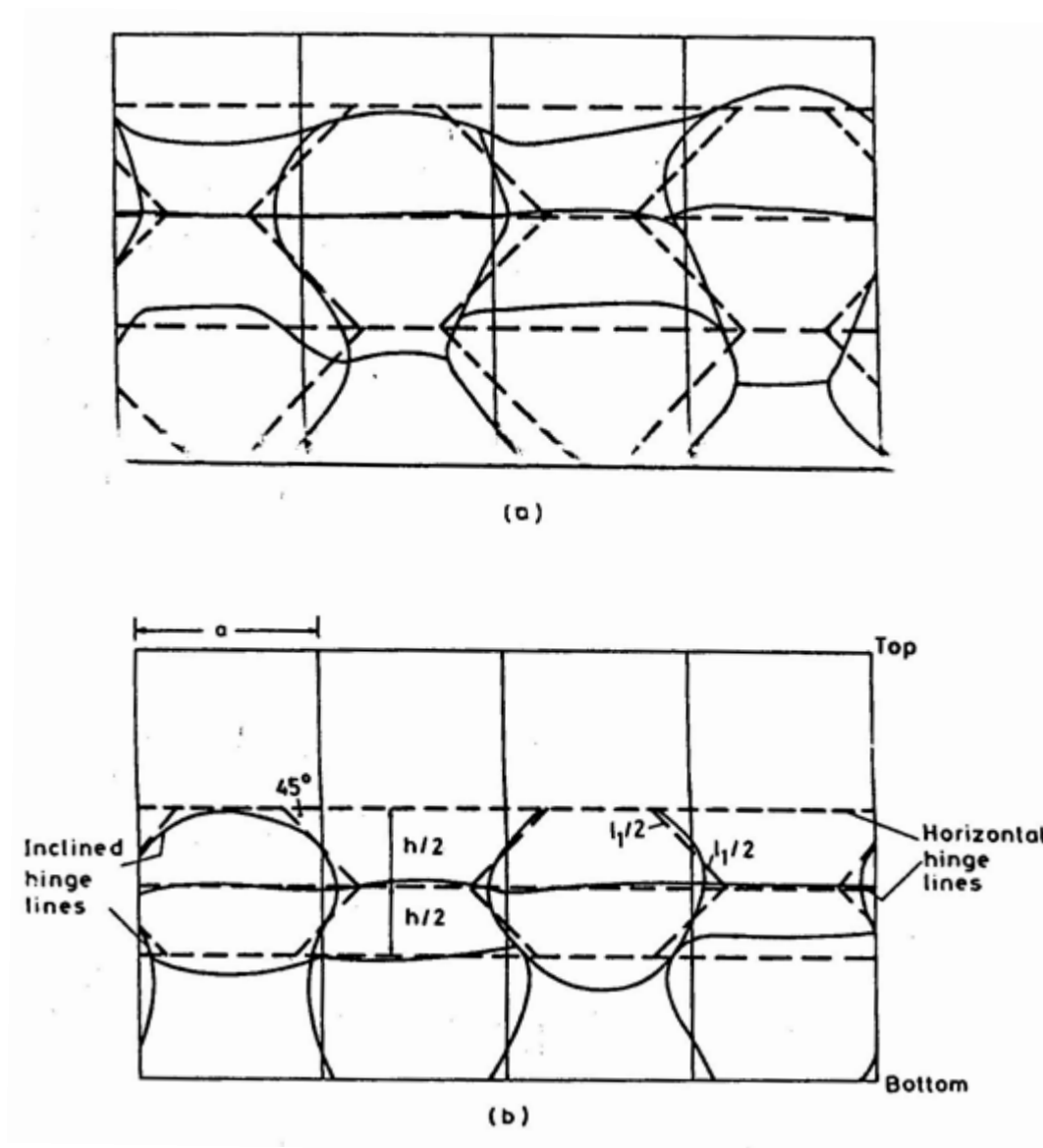
- $a = 30 \text{ mm}$  (εξωτερική διάσταση),
- $b = 30 \text{ mm}$  (τετραγωνικά) ή  $40 \text{ mm}$  (ορθογωνικά)
- $L=240 \text{ mm}$  (ύψος δοκιμίου),
- $t=1.40 \text{ mm}$  (πάχος τοιχώματος δοκιμίου).

Το υλικό τους είναι από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας % σε C, το οποίο ύστερα από δοκιμή εφελκυσμού στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών με χρήση της μηχανής δοκιμών INSTRON 4482, προέκυψε ότι είναι χάλυβας με αρχικό όριο διαρροής τα  $550 \text{ MPa}$ , και όριο αντοχής τα  $635 \text{ MPa}$ . Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιήθηκε παρατίθενται στην παράγραφο 3.2.1 του τρίτου κεφαλαίου.

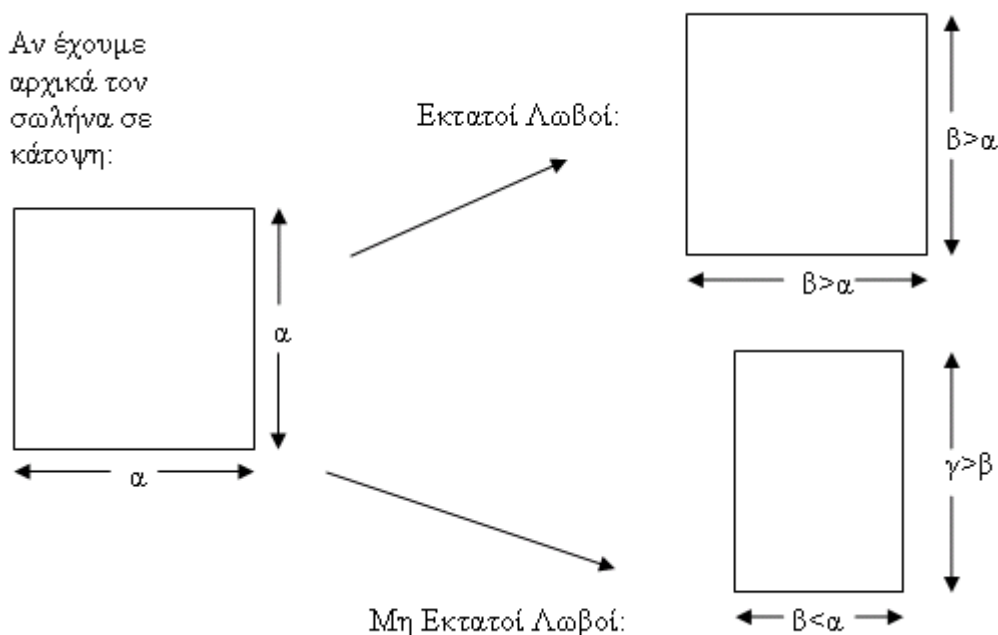
## 1.2 ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΣΩΛΗΝΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η αξονική κατάρρευση ενός PVC τετραγωνικής διατομής σωλήνα, καθώς φαίνονται και οι ιδανικές θέσεις των οριζόντιων πλαστικών αρμών, καθώς και των κεκλιμένων αρμών κατά  $\pm 45^\circ$ , αντίστοιχα. Το πλαστικό έργο και η ενέργεια που δαπανάται στους διάφορους αρμούς μπορεί επιπλέον να προβλεφθεί.

Βλέπουμε την υποτιθέμενη παραμορφωμένη κατάσταση με μη εκτατούς λοβούς για τον σωλήνα τετραγωνικής διατομής, όπου οι παχιές γραμμές δηλώνουν τις πειραματικές θέσεις των σταθερών και των κινητών αρμών κατά την κατάρρευση του δοκιμίου, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι ιδεατές θέσεις για τους αρμούς αυτούς. Οι παράμετροι των σχέσεων που παρατίθενται στη συνέχεια, απεικονίζονται στα συνοδευτικά σχήματα και μπορούν να αναζητηθούν στην αντίστοιχη βιβλιογραφία (Παράρτημα Β) για λεπτομερέστερη παρουσίαση.



Σχήμα 1.2: Αξονική κατάρρευση ενός σωλήνα τετραγωνικής διατομής



Σχήμα 1.3: Σχηματικό μοντέλο δημιουργίας εκτατών και μη εκτατών λοβών.

### 1.2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥΣ ΑΡΜΟΥΣ

Οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί εμφανίζονται και στις δυο ακμές και στο μέσο του ύψους  $h$  του λοβού, όπως φαίνεται στο Σχ.1.3 παραπάνω. Οι άνω και οι κάτω γραμμές περιστρέφονται περί γωνία  $\pi/2$  rad, και η γραμμή του μέσου πλαστικού αρμού, περιστρέφεται περί γωνία  $\pi$  rad. Έτσι, το ολικό πλαστικό έργο κατά την οριζόντια διεύθυνση κατά το σχηματισμό του ενός λοβού είναι:

$$W_1 = 4a M_p \pi/2 + 4a M_p \pi/2 + 4a M_p \pi = 8\pi a M_p$$

Όπου το  $M_p$ , είναι η πλήρης πλαστική καμπτική ροπή ανά μονάδα μήκους, για ένα δεδομένο πάχος τοιχώματος.

### 1.2.2 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥΣ ΑΡΜΟΥΣ

Επειδή είναι  $l_1 = (h/2)\cos(\pi/4) = h/2$ , τότε η συνολική ενέργεια και για τις οκτώ γραμμές αρμών είναι:

$$W_2 = 8(h/\sqrt{2})M_p\pi = 0.5(4\sqrt{2}h\pi)M_p$$

Το συνολικό έργο που παρήγαγε ο μετακινούμενος πλαστικός αρμός είναι:

$$W_p = \int_0^{\pi/2} \frac{b^2 M_p}{2r} \cos \alpha d\alpha = \frac{b^2 M_p}{2r}$$

### 1.2.3 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΑΤΥΝΣΗ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΤΟΥ ΣΩΛΗΝΑ

$$W_3 = 4(h/2)M_p\pi = 2\pi M_p h$$

Ενώ, η εσωτερική ολική ενέργεια είναι:

$$W_i = W_1 + W_2 + W_3 = 2hM_p\pi(5 + 2\sqrt{2})$$

Εάν το ύψος  $h$  του λοβού, θεωρηθεί ότι είναι περίπου ίσο με την πλευρά  $a$ , τότε:

Η εξωτερική ενέργεια είναι:  $W_e = \bar{P} \delta$ , όπου το  $\delta$  είναι η προοδευτική αλλαγή του φορτίου.

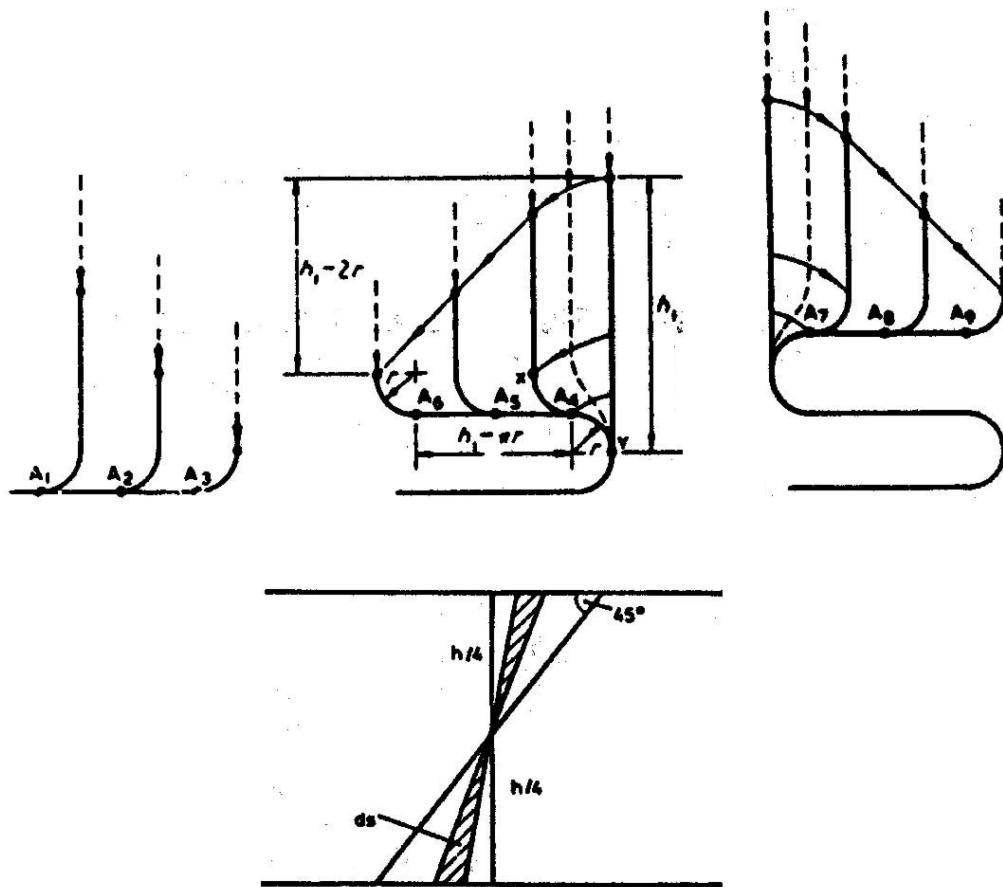
Και εξισώνοντας τα  $W_e$ ,  $W_i$ , έχουμε:  $W_e = W_i \Rightarrow$

$$\bar{P} = (2\pi h / \delta) M_p (5 + 2\sqrt{2})$$

Για τον πρώτο λοβό, ο οποίος δεν παρουσιάζει πλαστικό αρμό στο πάνω άκρο, το δεύτερο σκέλος της εξίσωσης:  $W_1 = 4a M_p \pi/2 + 4a M_p \pi/2 + 4a M_p \pi = 8\pi a M_p$ , γίνεται  $6\pi a M_p$ , οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\bar{P} = (2\pi h / \delta) M_p (4 + 2\sqrt{2})$$

#### 1.2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΑΡΜΩΝ



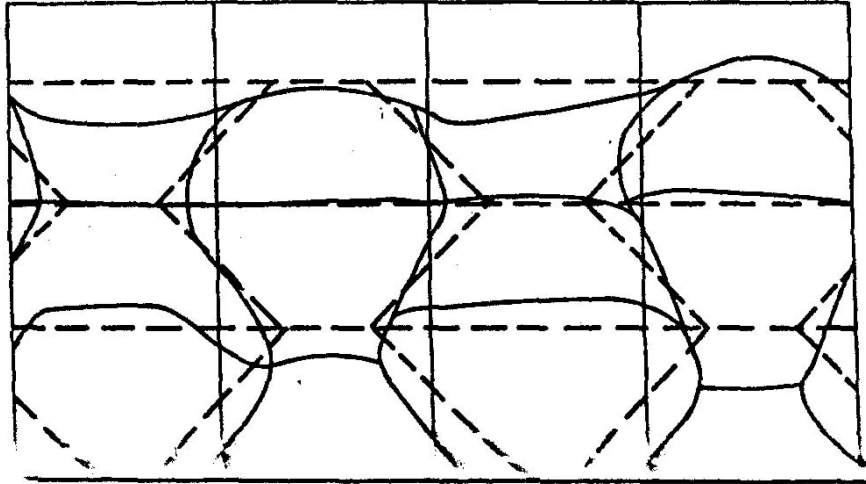
Σχήμα 1.4: Μηχανισμός μετατόπισης των κεκλιμένων αρμών

Χρησιμοποιείται για να προβλέψουμε το μέσο φορτίο θλίψης  $\bar{P}$  του δοκιμίου, ενώ το μέγιστο φορτίο περιορίζεται από την ακτίνα των κεκλιμένων αρμών στην τιμή  $(h-4r)$  για τον πρώτο λοβό. Η ενέργεια που απορροφάται από το μετατοπισμένο αρμό, δίνεται από τον τύπο:

$$dW_4 = (2dS / r) M_p,$$

ή, με ολοκλήρωση σε όλη την επιφάνεια που καλύπτει ο μετατοπισμένος αρμός, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, θα έχουμε ότι:

$$W_4 = (h^2/r) Mp,$$



**Σχήμα 1.5:** Αξονική κατάρρευση ενός τετραγωνικής διατομής σωλήνα και θέση των αρμών κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Έτσι, εξισώνοντας την εσωτερική και την εξωτερική ενέργεια, θα πάρουμε την σχέση:

$$W_e = W_1 + W_3 + W_4$$

Και αντικαθιστώντας από τις εξισώσεις:

$$W_4 = (h^2/r) Mp,$$

$$W_3 = 4(h/2)Mp\pi = 2\pi Mph,$$

$$W_1 = 4a Mp \pi/2 + 4a Mp \pi/2 + 4a Mp \pi = 8\pi a Mp,$$

Θα πάρουμε τελικά ότι η τιμή του μέσου θλιπτικού φορτίου είναι:

$$\bar{P}(h - 4r) = 8\pi h Mp + 2\pi h Mp + \frac{h^2}{r} Mp,$$

ή

$$\bar{P} = \frac{10\pi h}{h - 4r} Mp + \frac{h^2}{r(h - 4r)} Mp$$

Αν χρησιμοποιηθεί συνολικός αριθμός συνδετικών ακμών  $n$ , ( $n=1$  ή  $2$ ), τότε για δοκίμια PVC, θα έχουμε ότι η αντίστοιχη ολική εσωτερική ενέργεια για πλάτος  $b_1$ , και πάχος  $t_1$  της αντίστοιχης συνδετικής ακμής είναι:

$$W_5 = 8\pi b_1 M p_1$$

Οπότε τελικά προκύπτει ότι:

$$\bar{P} = \frac{10\pi h M p + 8\pi b_1 M p_1}{h - 4r} + \frac{h^2 M p}{r(h - 4r)}$$

Όπου η ακτίνα καμπυλότητας είναι:

$$r = \frac{B + \sqrt{B^2 + 2ABh}}{8A},$$

$$\text{όπου } A = 10\pi h M p + 8\pi b_1 M p_1, \text{ και } B = h^2 M p.$$

Η βέλτιστη ακτίνα  $r^*$ , η οποία ελαχιστοποιεί το μέσο φορτίο συμπίεσης  $\bar{P}$ , για τα χαλύβδινα δοκίμια τετραγωνικής διατομής είναι:

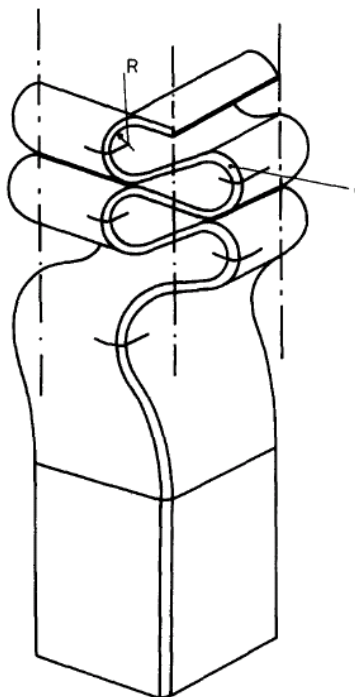
$$r^* = \frac{\left( \sqrt{1 + 2\pi - \frac{2\pi}{m}} - 1 \right) d}{\left( 8 \left( 1 - \frac{1}{m} \right) \right)}$$

Όπου το  $m = \alpha$  αριθμός των ημιλοβών στην αξονική διεύθυνση, και το  $d = 2b$ .

### 1.2.5 ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

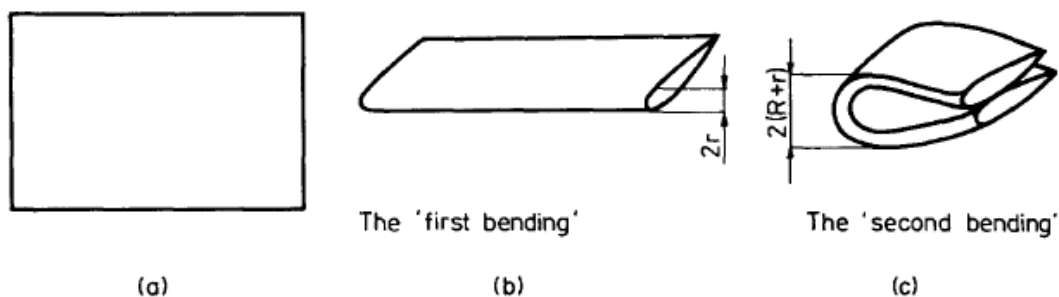
Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου προχωράει πάντα προοδευτικά κατά ένα επαρκές μικρό μήκος. Αφού διαμορφωθεί η πρώτη πτύχωση, τότε είτε από καθαρή πλαστική αναδίπλωση, είτε από διαδικασία πριν την αναδίπλωση, το δοκίμιο συνεχίζει να καταρρέει κατακόρυφα κατά την αξονική διεύθυνση, κατά το ίδιο μήκος επόμενων λοβών (2H). Ο πλαστικός αρμός φαίνεται να παραμένει σε επίπεδο κεκλιμένο κατά  $45^\circ$ , ως προς τα δυο

επίπεδα συμμετρίας της ημιτομής του τετραγωνικού μας δοκιμίου. Η διαδικασία δίπλωσης του κάθε λοβού τερματίζεται όταν έρθουν σε επαφή – όταν συμπίπτουν - οι άνω και κάτω ακμές του λοβού. Στις παρακάτω εικόνες (Σχ.1.6 και Σχ.1.7), φαίνεται καθαρά αυτή η διαδικασία κατάρρευσης ενός δοκιμίου τετραγωνικής διατομής:



**Σχήμα 1.6:** Διαδικασία κατάρρευσης ενός δοκιμίου τετραγωνικής διατομής

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναδίπλωση ενός λεπτού ελάσματος και η δημιουργία λοβού σε αυτό:



**Σχήμα 1.7:** Αναδίπλωση ενός λεπτού ελάσματος και η δημιουργία λοβού

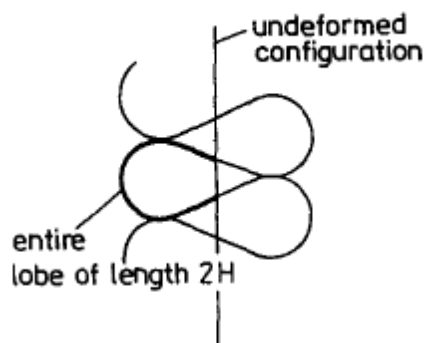
Αξιόλογο είναι ότι ο πλαστικός αρμός διαμορφώνεται ως μια κυψέλη με διπλή καμπύλωση. Η μικρή ακτίνα της καμπύλωσης είναι η  $r$ , όπως φαίνεται παραπάνω, και είναι σταθερή σε όλο τον αρμό, και συνήθως είναι ίσο με το πάχος του τοιχώματος του πλέγματος



(Σχ.1.6). Η δεύτερη ακτίνα της καμπύλωσης  $R$ , είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, ενώ και οι τέσσερις πλευρές του δοκιμίου υπόκεινται σε κυλινδρικού τύπου αναδίπλωση.

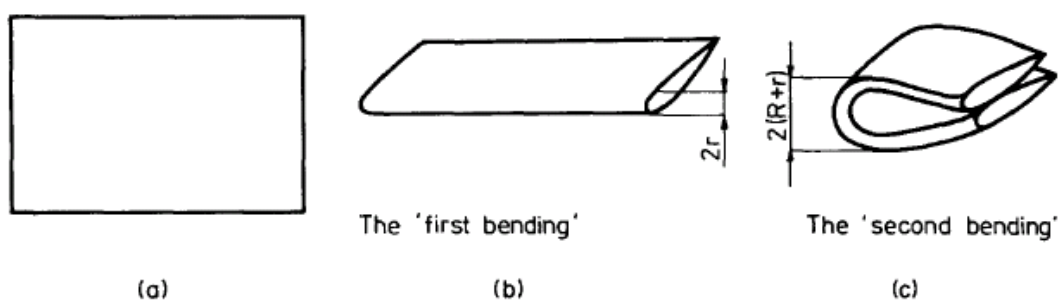
Είναι προφανές ότι η παρουσία αυτών των ακτίνων έχει σημαντική επίδραση στο ενεργό μήκος αναδίπλωσης του δοκιμίου, και συνεπώς στην δύναμη που εμφανίζεται σε όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου.

Η πλειοψηφία των μοντέλων που πραγματευόμαστε θεωρούνται ότι είναι κατασκευασμένα από υλικό πλήρους πλαστικής συμπεριφοράς με μεγάλη ακαμψία. Τέτοιο υλικό παρουσιάζει ασυνέχειες υπό κλίση στους σταθερούς πλαστικούς αρμούς. Θεωρώντας τους πλαστικούς αρμούς φιξαρισμένους με το υλικό, η ακτίνα του αρμού μηδενίζεται και το ενεργό μήκος κατάρρευσης, είναι ίσο με το μήκος της κυματοροής του τύπου αναδίπλωσης  $2H$ .



**Σχήμα 1.8:** Εμφάνιση λοβών και συμμετρία αυτών ως προς θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη).

Η πραγματική αξονική κατάρρευση των δοκιμίων με λεπτά τοιχώματα τετραγωνικής διατομής, είναι πολύ πιο περίπλοκη από ότι φαίνεται στις παραπάνω απλουστευμένες εικόνες. Παρατηρώντας τους πλαστικούς αρμούς, βλέπουμε ότι η τελική θέση του παραμορφωμένου άκρου του δοκιμίου προκύπτει από δυο συνακόλουθα τσακίσματα ενός αρχικά επίπεδου ελάσματος:



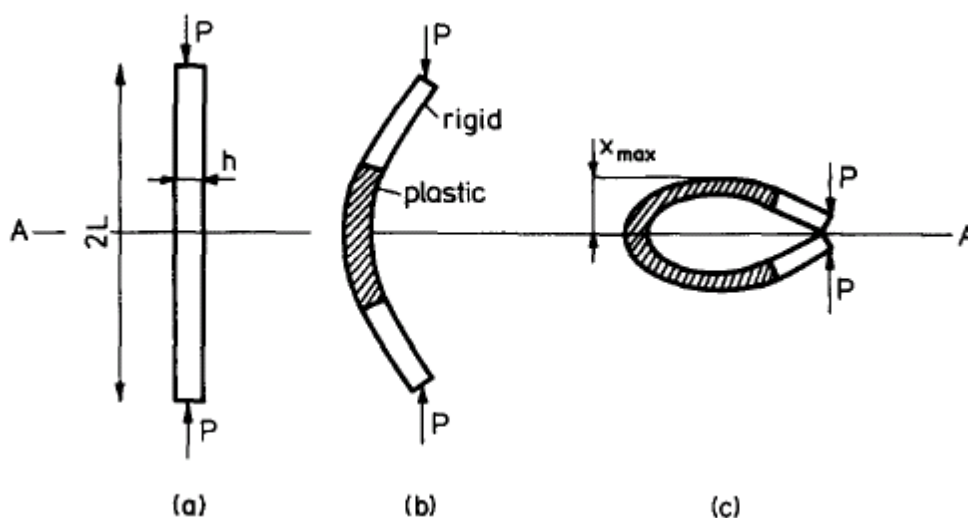
**Σχήμα 1.9:** Αναδίπλωση ενός λεπτού ελάσματος και η δημιουργία λοβού.

Κατά την πρώτη αναδίπλωση, το αρχικά επίπεδο έλασμα διπλώνει κατά μια γωνία ελαφρά μεγαλύτερη και σχηματίζει τη μορφή (b) που φαίνεται παραπάνω, και το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού είναι  $2r$ . Ύστερα, το παραμορφωμένο έλασμα διπλώνεται ξανά σε διεύθυνση κάθετη προς την αρχική αναδίπλωση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *δεύτερη αναδίπλωση*, και απεικονίζεται παραπάνω στο (c). Το μέγιστο καθ' ύψος μήκος αυτού του λοβού είναι  $2r + 2R$ .

Στην πραγματικότητα, στην κατάρρευση του δοκιμίου τα γεγονότα ακολουθούν διαφορετική διαδικασία. Και οι δυο ακτίνες εμφανίζονται από το ξεκίνημα της κατάρρευσης του δοκιμίου, καθώς η τομή της τοροειδούς κυλινδρικής επιφάνειας, μεταφέρεται σε όλο το υλικό. Είναι μάλλον δύσκολο να αναλύσουμε το φαινόμενο αυτό της δεύτερης αναδίπλωσης κοντά στον αρμό. Ωστόσο, κοντά στο κέντρο των πλευρών του δοκιμίου, η δεύτερη αναδίπλωση είναι απλά μια αναδίπλωση ενός επίπεδου μεταλλικού ελάσματος.

Επομένως, θεωρείται ότι η ακτίνα της κυλινδρικής αναδίπλωσης διαμορφώνεται από τις πλαϊνές έδρες του δοκιμίου, αντί από τις γωνιακές ακμές του δοκιμίου. Τότε το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού ελέγχεται και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

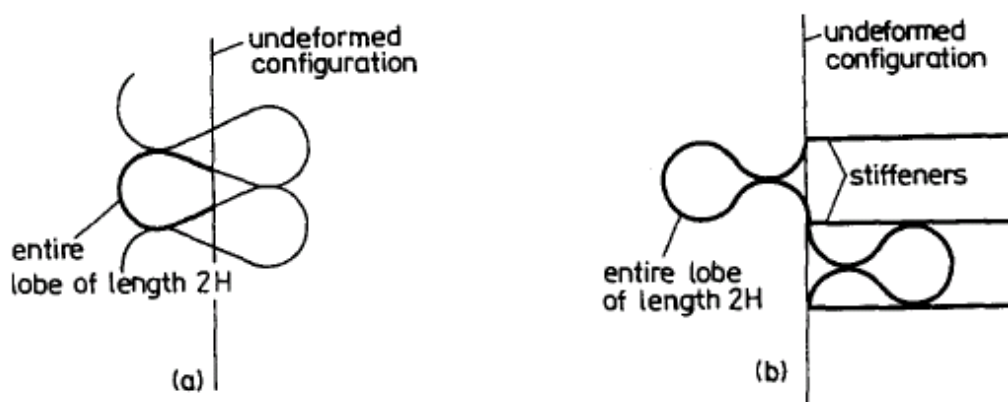
Ακόμα, κατά την δημιουργία ενός λοβού, η πλαστική παραμόρφωση εξαπλώνεται σε όλο το μήκος του λοβού προσδίδοντάς του ένα τελικό σχήμα, το οποίο έχει συμμετρία ως προς επίπεδο A-A, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο αντιστοιχεί σε θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος με τις φάσεις αναδίπλωσης αφού το φορτίο θλίψης πάρει την κρίσιμη τιμή και το έλασμα αρχίσει την αναδίπλωση:



Σχήμα 1.10: Θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος

Ακόμα, τα δοκίμιά μας αναδιπλώνουν κατά τρόπο τέτοιο ώστε πάντα οι επόμενοι σχηματιζόμενοι λοβοί να είναι συμμετρικοί και στις δυο πλευρές τους ως προς την θεωρητική απαραμόρφωτη ακμή του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (α), καθώς και η μετάβαση από τον ένα λοβό προς τον επόμενο γειτονικό του λοβό, να είναι ομαλή.

Αντίθετα, εάν είχαμε δοκίμια με εγκάρσια ενισχυτικά ελάσματα (stiffeners), τα οριζόντια ενισχυτικά ελάσματα εμποδίζουν την περιστροφή των άκρων του κάθε λοβού, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα διαφορετικό τελικό σχήμα στο λοβό, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω (β). Και στις δυο περιπτώσεις **το ολικό μήκος του λοβού είναι  $2H$** , όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.



**Σχήμα 1.11:** Εμφάνιση λοβών και θέση αυτών ως προς τη θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη), (α) για απλά δοκίμια, (β) για δοκίμια με ενισχυτικά ελάσματα.

Ακόμα, ενώ η αρχική αναδίπλωση είναι ανάλογη και προς τα δυο είδη παραμόρφωσης, και το **ισοδύναμο (ενεργό) μήκος  $L$  της κατάρρευσης του ελάσματος** είναι ίσο με:

$$L = \sqrt{2}H$$

κατά την δεύτερη αναδίπλωση, τα ισοδύναμα μήκη είναι:

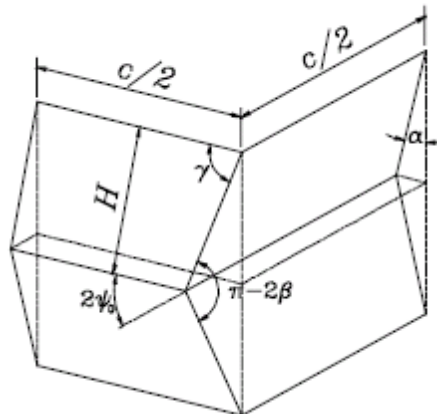
$$L = \sqrt{2}H$$

για τα δοκίμιά μας που δεν έχουν ενισχυτικά ελάσματα, ενώ για τα δοκίμια που έχουν ενισχυτικά ελάσματα, θα είναι:

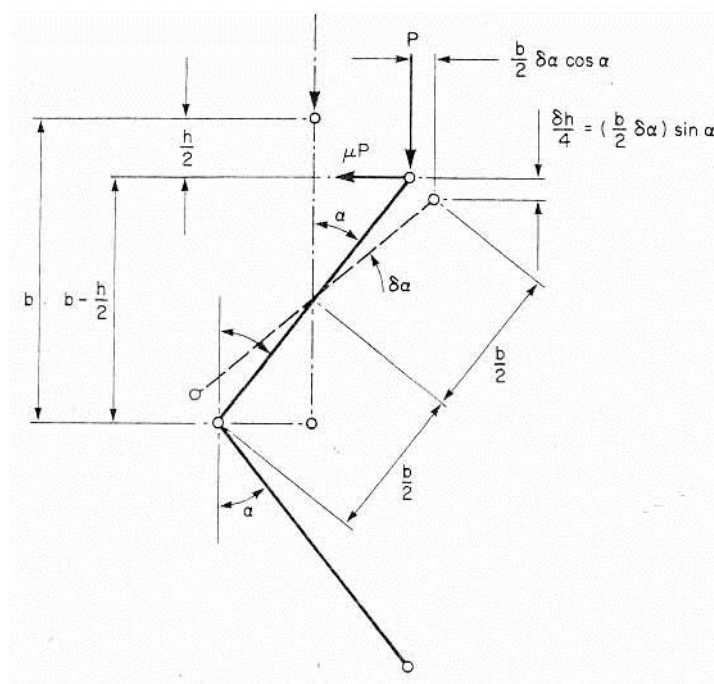
$$L = \frac{1}{2} \sqrt{2}H$$

**Έτσι, το ενεργό μήκος κατάρρευσης των δοκιμών τετραγωνικής διατομής, είναι περίπου 70% του αρχικού ύψους δοκιμίου χωρίς ενισχυτικά ελάσματα, και γύρω στο 60% για δοκίμια με οριζόντια ενισχυτικά ελάσματα.**

Βασικό ρόλο για την πρώτη αναδίπλωση (για εμφάνιση μη εκτατού λοβού), παίζει η τριβή και οι γεωμετρικές ανωμαλίες του δοκιμίου, καθώς και κάποια τυχόν ανομοιογένεια στο υλικό (πχ σπή διαμπερής ή μη στο δοκίμιο). Καθώς συνθλίβεται το δοκίμιο, έχει την τάση να δημιουργήσει λοβό προς τα έξω, εξαιτίας της επίδρασης του λόγου του Poisson, και λόγω της αξονικής σύνθλιψης, όμως η κίνηση προς τα έξω των ακμών του δοκιμίου, εμποδίζεται από τις δυνάμεις λόγω τριβής που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες επαφής, μεταξύ του κινούμενου εμβόλου και των άκρων του δοκιμίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα άκρα του δοκιμίου να υστερούν του υπόλοιπου δοκιμίου, και έτσι δημιουργείται ο πρώτος εξωτερικός λοβός, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου οι δυο απέναντι έδρες του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής μπαίνουν προς τα μέσα με γωνία  $\alpha$ , ενώ οι άλλες δυο απέναντι έδρες βγαίνουν προς τα έξω με γωνία  $(\pi-2\beta)/2$ :



**Σχήμα 1.12:** Δημιουργία μη εκτατού λοβού σε δοκίμιο τετραγωνικής διατομής.



Σχήμα 1.13: Σχηματική μετατόπιση του τοιχώματος του κελύφους που καταρρέει.

### 1.2.6 ΕΙΔΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΛΟΒΩΝ

#### Μη εκτατοί λοβοί

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

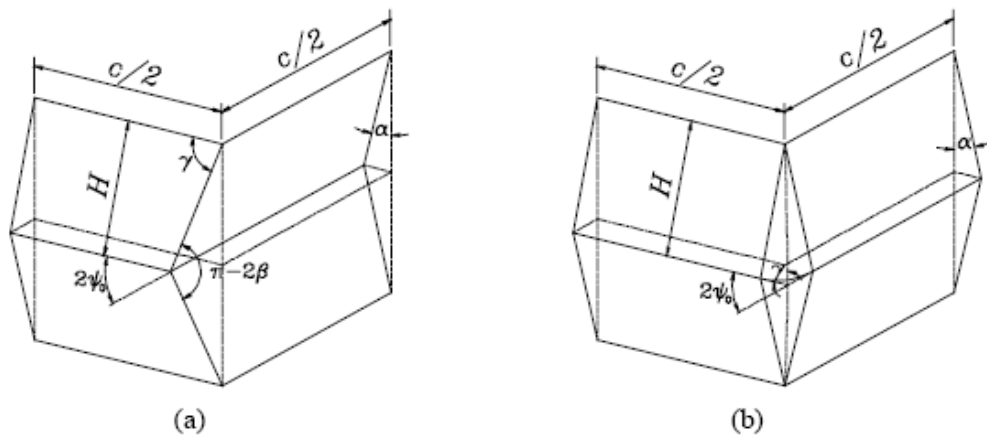
#### Εκτατοί λοβοί

Αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας/περιστροφής του

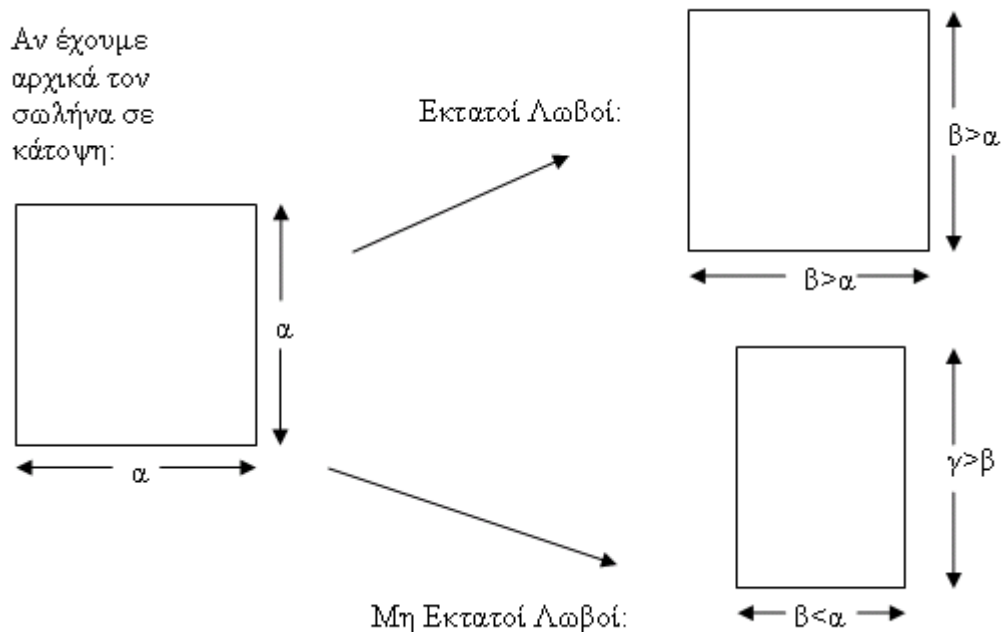
δοκιμίου. Είναι παρόμοιο με τους κυλινδρικούς δακτυλίους που σχηματίζονται κατά την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων.

**Ανάμικτου τύπου λοβοί**

Αυτός ο τύπος κατάρρευσης, αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσοτέρων αρχικά σχηματισμένων εκτατών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Αν συνδυαστούν κατάλληλα οι δυο προηγούμενοι τύποι θα επιφέρουν το αποτέλεσμα των ανάμικτων λοβών. Τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



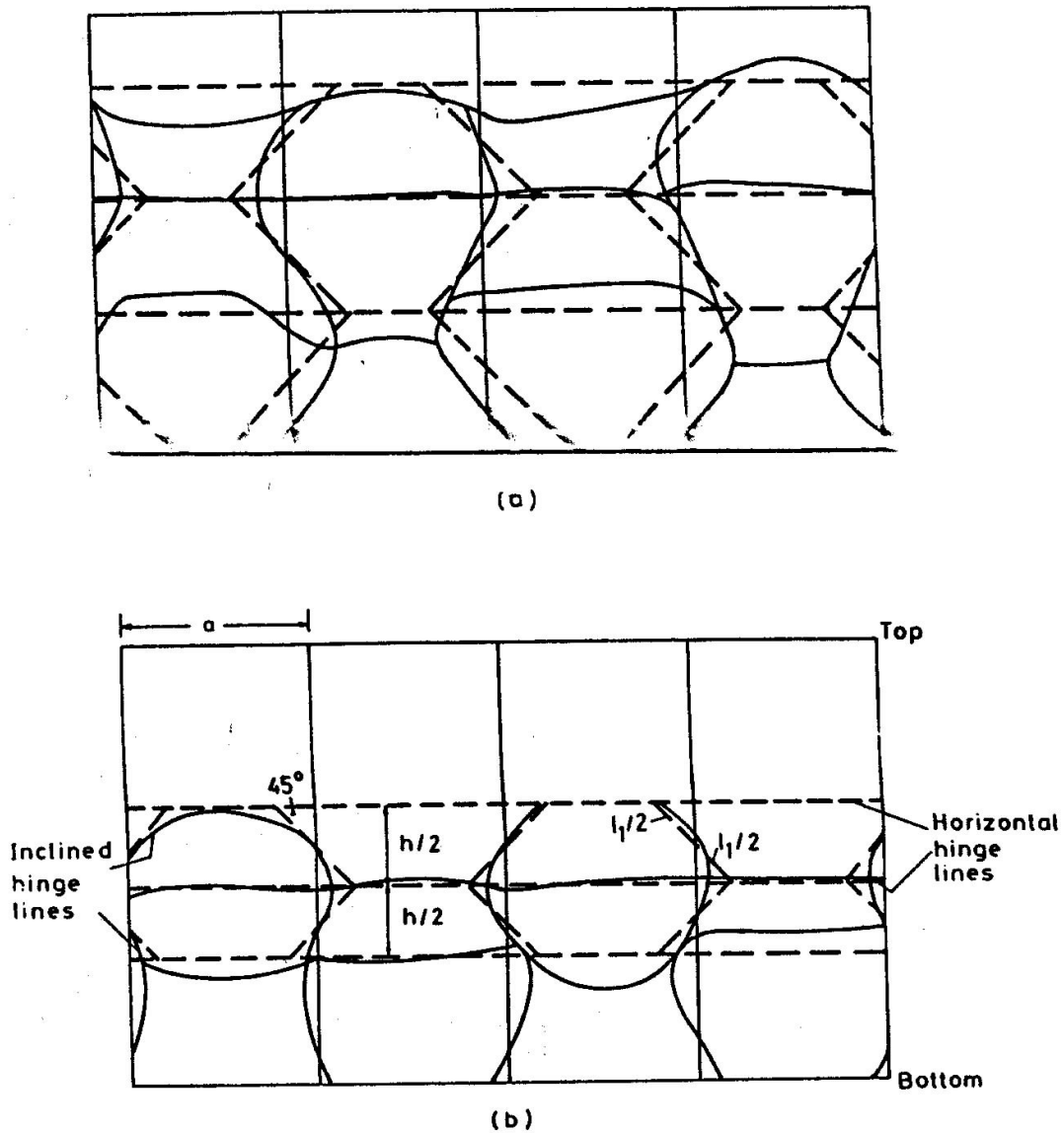
**Σχήμα 1.14:** Απεικόνιση: (a) μη εκτατών λοβών, (b) εκτατών λοβών.



**Σχήμα 1.15:** Σχηματική παράσταση εκτατών και μη εκτατών λοβών.

- Τύποι παραμορφώσεων

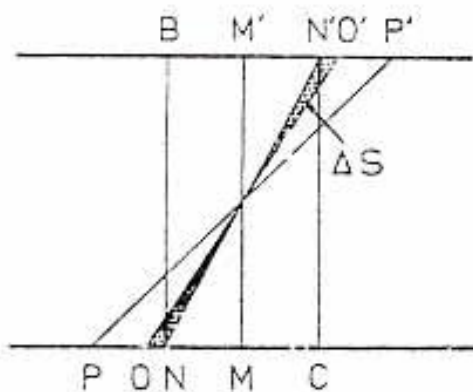
Το είδος κατάρρευσης που παρατηρήθηκε σε όλα τα τέστ ήταν ο τύπος της παραμόρφωσης με εμφάνιση μη εκτατών λοβών, όπου ο σωλήνας αρχίζει να καταρρέει σε κάποια θέση του καθ' ύψος και να εμφανίζει δυο είδη αρμών: το σταθερό οριζόντιο και το κεκλιμένο μετατοπισμένο αρμό:



Σχήμα 1.16: Μηχανισμός μετακίνησης πλαστικών αρμών σε δοκίμιο τετραγωνικής διατομής.

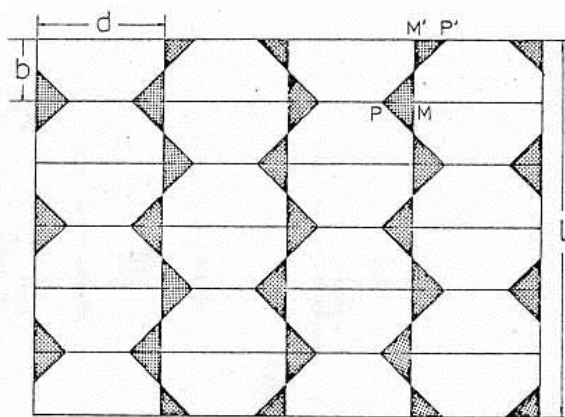
Οι κεκλιμένοι μετακινούμενοι πλαστικοί αρμοί αρχίζουν από τις γωνίες ( $\overline{MM'}$  του παρακάτω Σχ.16), και τελικά φθάνουν στο  $\overline{PP'}$  σχηματίζοντας γωνία  $45^\circ$  με τους οριζόντιους πλαστικούς αρμούς. Η γωνία  $\beta$  μεταξύ των πλακών σε κάθε πλευρά των μετακινούμενων αρμών ελαττώνεται προοδευτικά από το  $\pi/2$  στο μηδέν. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα,

ο μετακινούμενος πλαστικός αρμός ξεκινά από την θέση  $\overline{MM'}$  και περνώντας από τις θέσεις  $\overline{NN'}$  και  $\overline{OO'}$  καταλήγει στην τελική θέση  $\overline{PP'}$ .



Σχήμα 1.17: Μετατοπισμένος πλαστικός αρμός

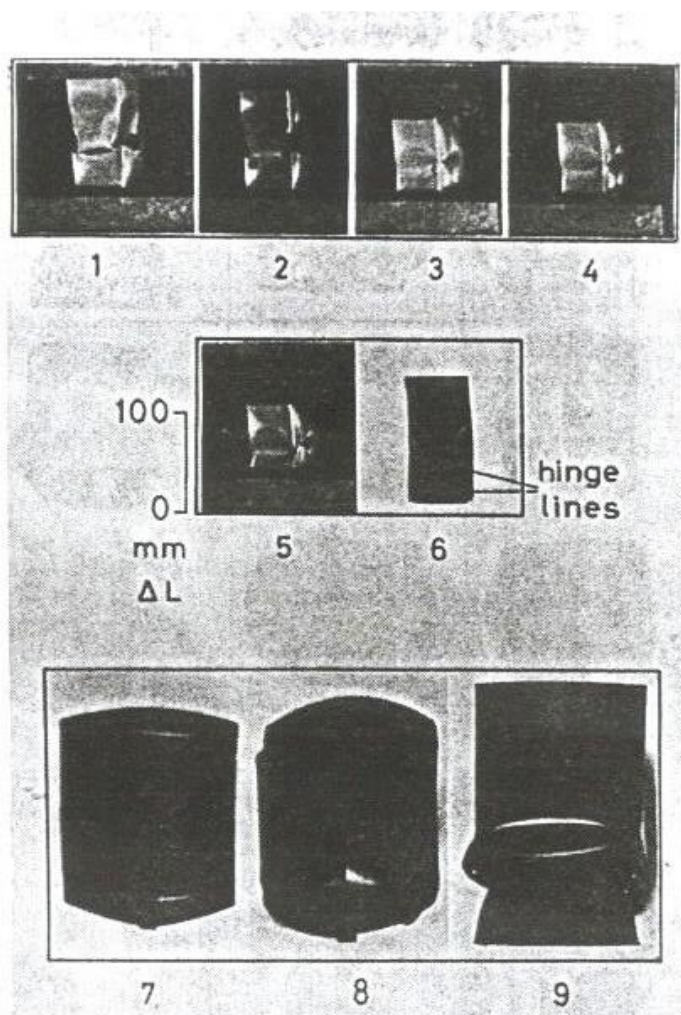
Οι σκιασμένες περιοχές που εμφανίζονται στο επόμενο σχήμα, αποτελούν την επιφάνεια του κελύφους στην οποία κινούνται οι κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί, ώστε κατά την κίνησή τους κάμπτουν την επιφάνεια αυτή και στην συνέχεια την επαναφέρουν στην αρχική επίπεδη μορφή της.



Σχήμα 1.18: Επιφάνειες κίνησης των κεκλιμένων πλαστικών αρμών

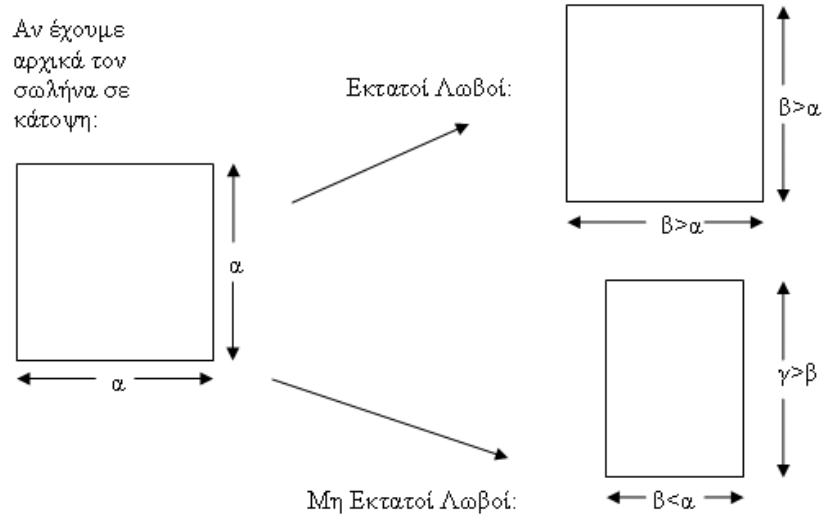
Αναφορικά σημειώνουμε ότι δοκίμια από PVC, ύστερα από πλήρη κατάρρευση, αν τα βυθίσουμε μέσα στο ζεστό νερό, θα ανακτήσουν το αρχικό τους μήκος, και θα εμφανίζουν έντονα τις γραμμές πλαστικών αρμών που δημιουργήθηκαν στις περιοχές έντονης κάμψης της κυψελωτής δομής τους, σε αντίθεση με τα δοκίμιά μας από μαλακό χάλυβα.





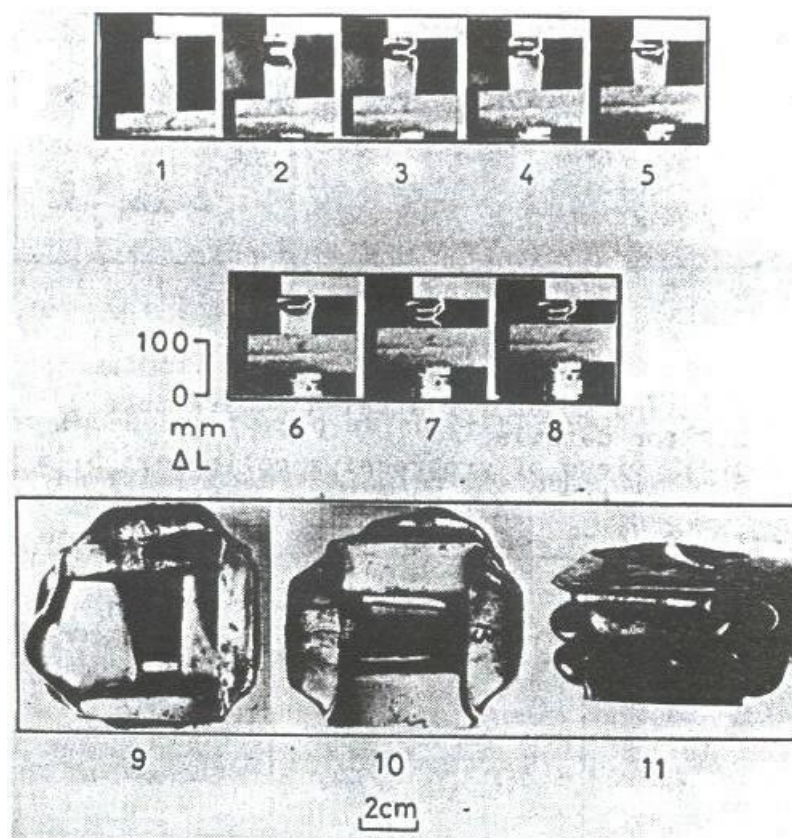
**Σχήμα 1.19:** Στις εικόνες 1 έως 5, φαίνονται τα βήματα για την προοδευτική κατάρρευση δοκιμίου από PVC, στην εικόνα 6, φαίνεται η όψη αυτού αφού έχει επανέλθει πλήρως καθώς βυθίστηκε σε ζεστό νερό, ενώ στην εικόνα 7, έχουμε όψη από πάνω, στην εικόνα 8, έχουμε όψη από κάτω, και στην εικόνα 9, έχουμε όψη από πλάγια μετά την επαναφορά του δοκιμίου.

Κατά την κατάρρευση των δοκιμίων μας από μαλακό χάλυβα, δυο οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί εμφανίζονται στις απέναντι πλευρές κινούμενοι με διεύθυνση προς τα έξω και μειώνοντας το αρχικό τους μήκος, καθώς ταυτόχρονα οι πλαστικοί αρμοί που βρίσκονται στις παρακείμενες πλευρές κινούνται με διεύθυνση προς τα μέσα αυξάνοντας το μήκος τους. Το συνολικό μήκος των οριζόντιων πλαστικών αρμών παραμένει σταθερό, και ίσο με την περιφέρεια του σωλήνα (όταν έχουμε μη εκτατή κατάρρευση).



**Σχήμα 1.20:** Μοντέλο δημιουργίας εκτατών και μη εκτατών λοβών

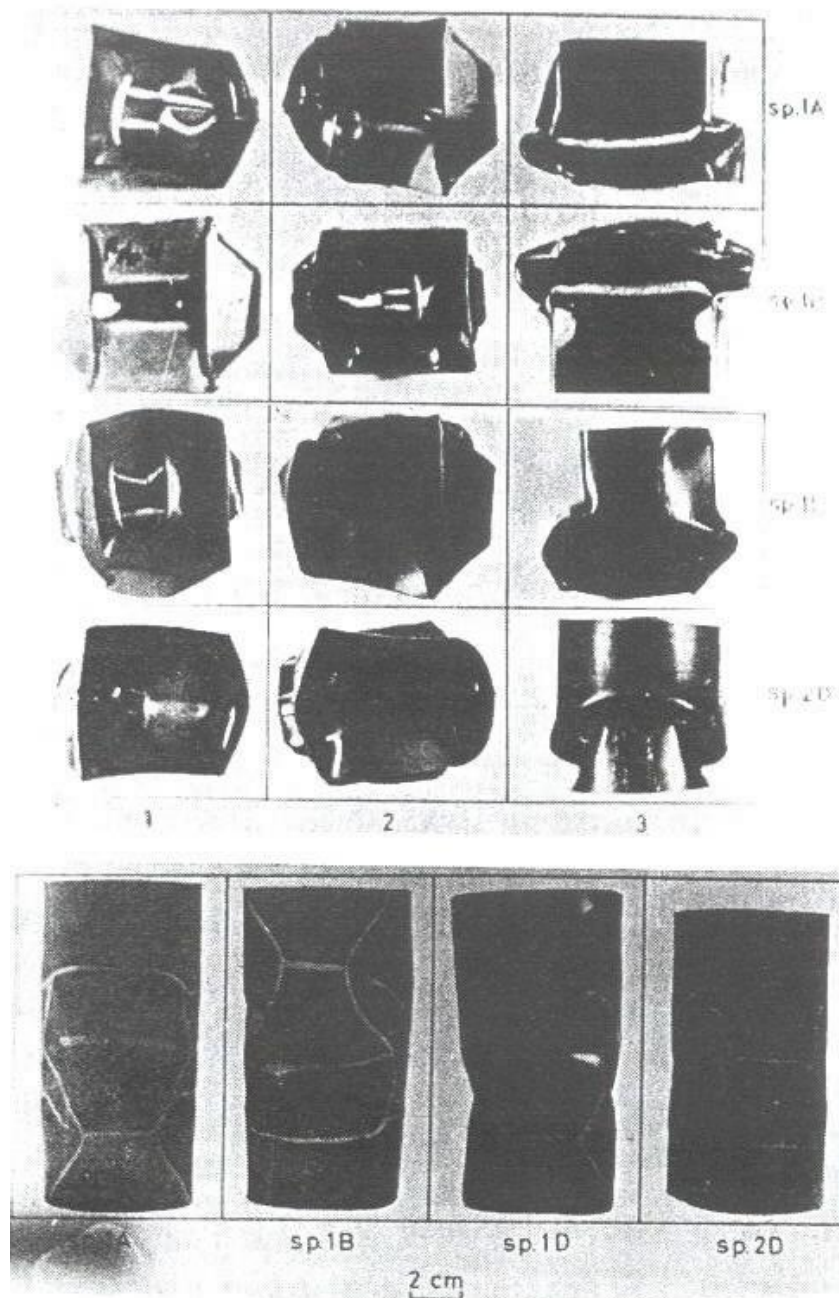
Το ακριβώς επόμενο σετ παρόμοιων λοβών διαμορφώνεται στραμμένο κατά  $\pi/2$  rad, ως προς το προηγούμενο σετ, και ούτω καθ'εξής. Οι κεκλιμένοι κινητοί πλαστικοί αρμοί ξεκινάνε από τις γωνίες του σωλήνα και ακολουθούν τη διαδρομή κατά του αξονικού μήκους και καταλήγουν σε  $\pm 45^\circ$  γωνία στους οριζόντιους πλαστικούς αρμούς. Ο μηχανισμός αυτός γίνεται πιο κατανοητός από την παρακάτω εικόνα των δοκιμών από μαλακό χάλυβα:



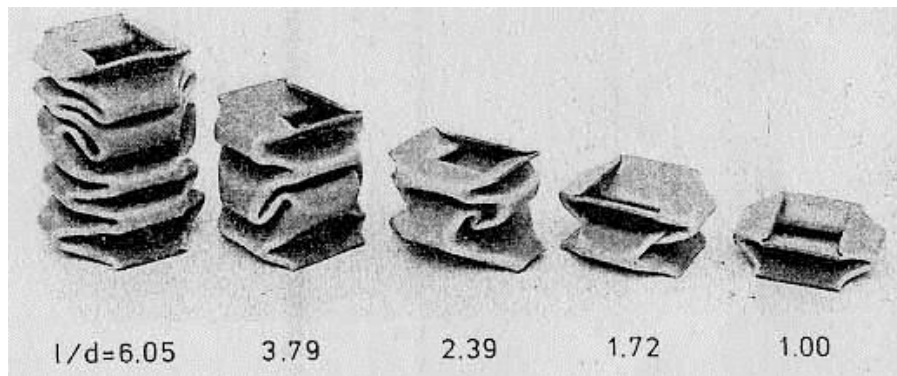
**Σχήμα 1.21:** Στις εικόνες 1 έως 8, φαίνονται τα βήματα για την προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου από χάλυβα, ενώ στην εικόνα 9, έχουμε όψη από πάνω, στην εικόνα 10, έχουμε όψη από κάτω, και στην εικόνα 11, έχουμε όψη από πλάγια μετά την τελική κατάρρευση του δοκιμίου.

Καθώς ξεκινά η κατάρρευση, όλες οι πλευρές του σωλήνα αναδιπλώνουν ελαστικά κατά περίπου ημιτονοειδή συνάρτηση με μικρό εύρος. Καθώς προχωρά η φόρτιση, από την αναδίπλωση αυτή οι πρώτοι λοβοί διαμορφώνονται όπως περιγράψαμε παραπάνω. Η γραμμή των οριζόντιων αρμών, η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο της ημιτονοειδούς καμπύλης, τσακίζει προοδευτικά κατά μια γωνία  $\pi/2$  rad. Οι επόμενοι λοβοί διαμορφώνονται σε μια κάθετη διεύθυνση και στις δυο πλευρές των πρώτων λοβών ακολουθώντας τον ίδιο μηχανισμό. Μετρώντας τις τελικές διαστάσεις τους αποδεικνύεται ότι είναι σχεδόν ίδιες.

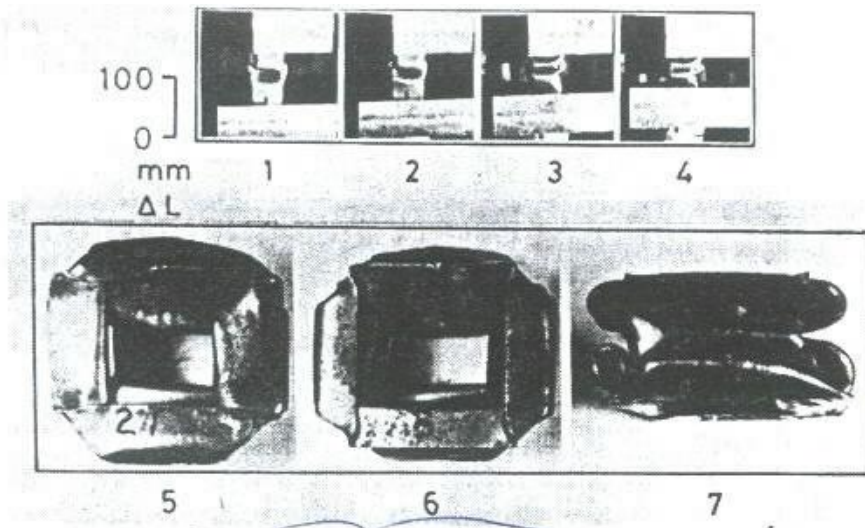
Μια ελαφρά ανύψωση κάποιων πεπλατυσμένων λοβών, και η ένωση αυτών με τους υπερκείμενους λοβούς, είναι εμφανής σε αρκετούς από τους τετραγωνικής διατομής σωλήνες που καταπονήθηκαν.



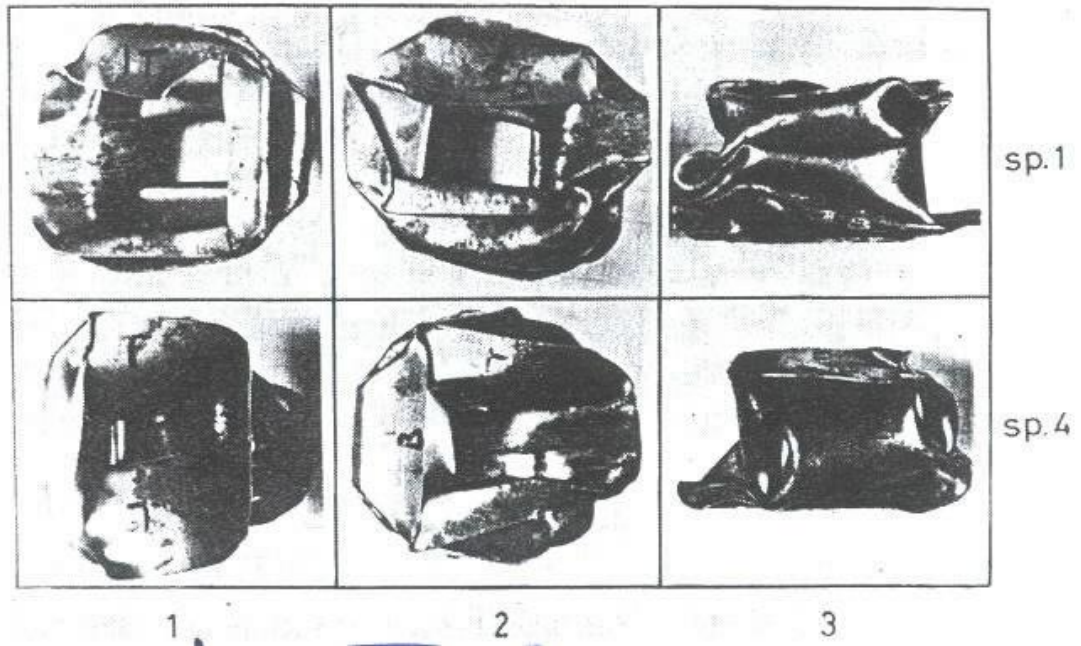
**Σχήμα 1.22:** Στην *εικόνα 1* πρώτη στήλη, έχουμε όψη από πάνω, στην *εικόνα 2* δεύτερη στήλη, έχουμε όψη από κάτω, και στην *εικόνα 3* τρίτη στήλη, έχουμε όψη από πλάγια μετά την τελική κατάρρευση δοκιμίου PVC. Ακριβώς από κάτω οι όψεις: sp.1A, sp.1B, sp.1D, sp.2D, δείχνουν την πλήρη επαναφορά των δοκιμίων PVC (μετά από την βύθισή τους σε ζεστό νερό), καθώς και τις γραμμές των πλαστικών αρμών και τις ζώνες παραμόρφωσης των δοκιμίων.



**Σχήμα 1.23:** Μορφές μεγάλων παραμορφώσεων για τετραγωνικά κελύφη από PVC με διάφορους λόγους  $l/d$ .



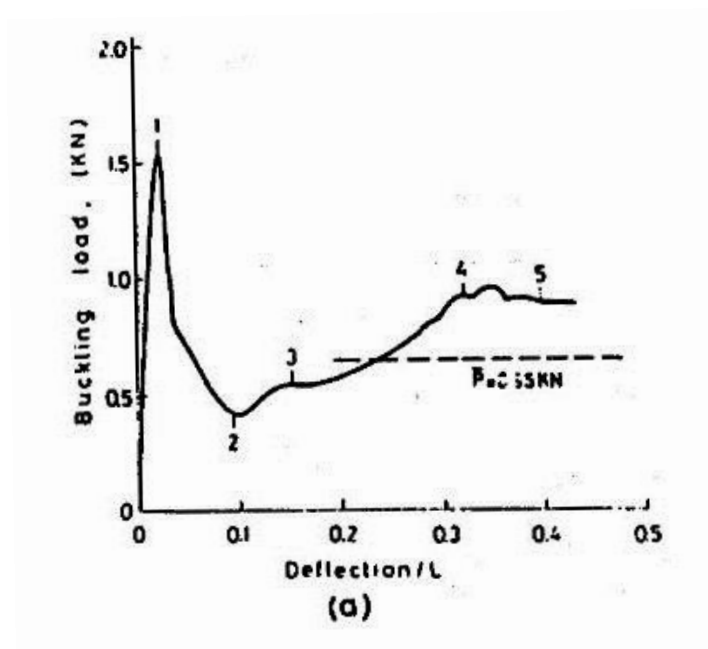
**Σχήμα 1.24:** Στις εικόνες 1 έως 4, φαίνονται τα βήματα για την προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου από χάλυβα, ενώ στην εικόνα 5, έχουμε όψη από πάνω, στην εικόνα 6, έχουμε όψη από κάτω, και στην εικόνα 7, έχουμε όψη από πλάγια μετά την τελική κατάρρευση του δοκιμίου.

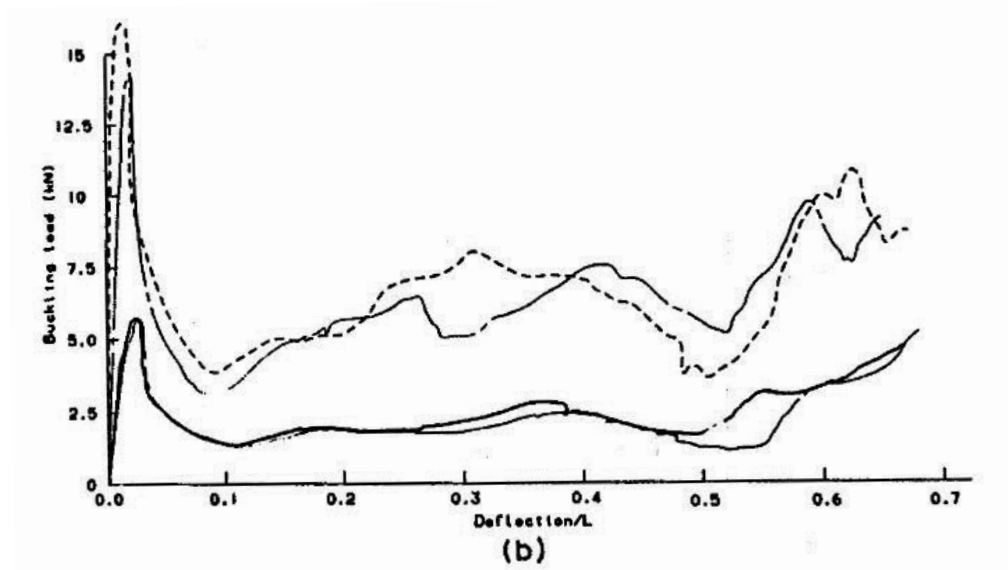


**Σχήμα 1.25:** Στην *εικόνα 1*, έχουμε όψη από πάνω, στην *εικόνα 2*, έχουμε όψη από κάτω, και στην *εικόνα 3*, έχουμε όψη από πλάγια μετά την τελική κατάρρευση του δοκιμίου από χάλυβα. Το sp1, δείχνει *εκτατούς λωβούς*, ενώ το sp4, δείχνει *μη εκτατούς λοβούς*.

- Διάγραμμα φορτίου κατάρρευσης δοκιμίων

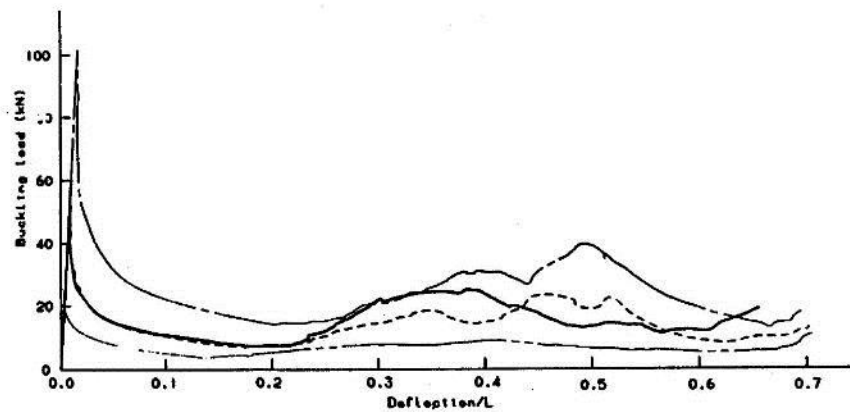
Μια τυπική καμπύλη φορτίου κατάρρευσης – αξονικής κάμψης για PVC, είναι η ακόλουθη:

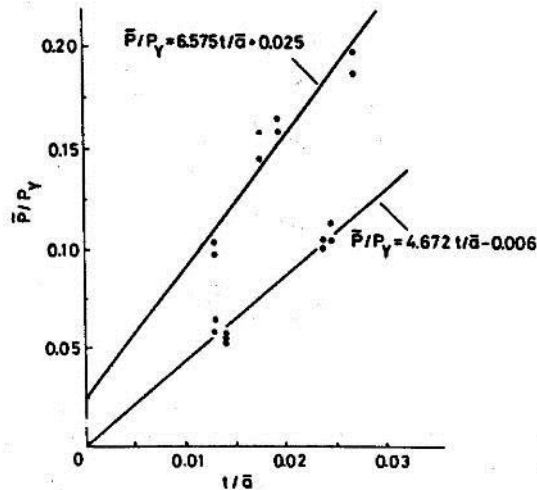




Σχήμα 1.26: Για το διάγραμμα (α): η παχέα γραμμή είναι η πειραματική καμπύλη, η διακεκομμένη γραμμή είναι η θεωρητική καμπύλη για το μέσο φορτίο κατάρρευσης. Για το διάγραμμα (β): παρουσιάζονται οι καμπύλες για το μέσο φορτίο κατάρρευσης για διάφορα δοκίμια PVC με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Μια τυπική καμπύλη φορτίου αξονικής κατάρρευσης δοκιμίων χάλυβα, είναι η εξής:





**Σχήμα 1.27:** Για το διάγραμμα (α): παρουσιάζονται οι καμπύλες για το μέσο φορτίο κατάρρευσης για διάφορα δοκίμια χάλυβα με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

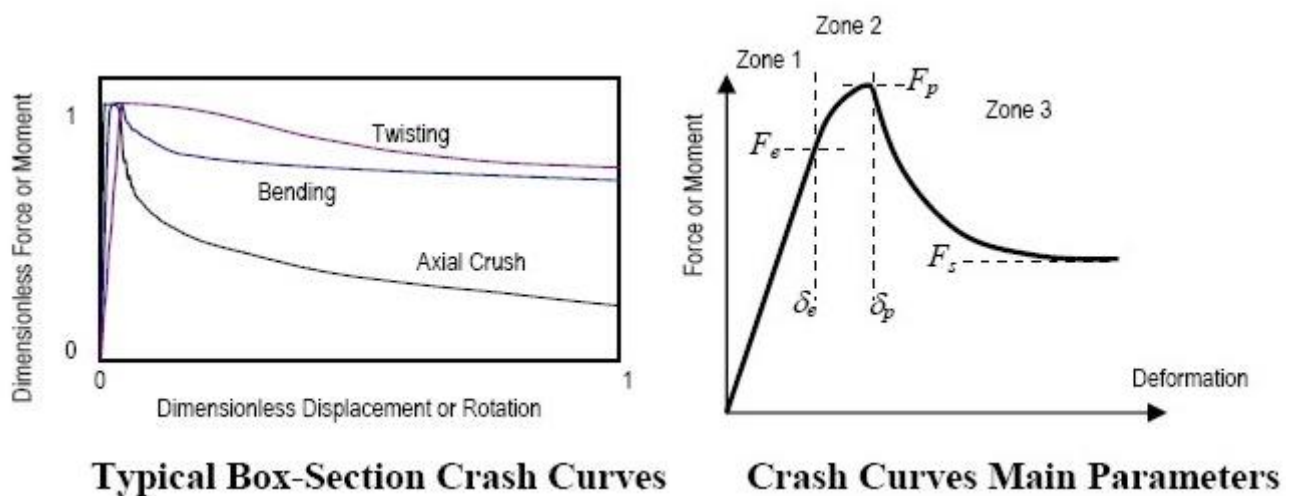
Για το διάγραμμα (β): βλέπουμε τη διακύμανση του λόγου  $\frac{\bar{P}}{P_y}$ , ως προς το λόγο  $t/\bar{a}$ , για τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής από χάλυβα (πρώτη ευθεία), και από PVC (δεύτερη ευθεία).

Ισχύει ότι:

$$\text{για PVC, } \bar{P}/P_y = 4,672(t/\bar{a}) - 0,006$$

$$\text{για χάλυβα, } \bar{P}/P_y = 6,575(t/\bar{a}) + 0,025$$

Ακόμα, σχήματα τυπικών καμπυλών κατάρρευσης δοκιμίων τετραγωνικής διατομής από χάλυβα είναι τα ακόλουθα:



**Σχήμα 1.28:** Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κατάρρευση δοκιμίων τετραγωνικής διατομής



Παρατηρούμε ότι στο πρώτο σχήμα φαίνονται οι καμπύλες κατάρρευσης για ευθύ χαλύβδινο σωλήνα τετραγωνικής διατομής, ο οποίος υπόκειται σε θλίψη (*axial crush*), κάμψη (*bending*), και στρέψη (*twisting*). Η γενική συμπεριφορά του υλικού κατά την κατάρρευση, δείχνει μια αύξηση της δύναμης (ή της ροπής) καθώς και αύξηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο, κατόπιν έχουμε μια απότομη πτώση στην τιμή του φορτίου παρόλο που η παραμόρφωση συνεχίζεται, και τελικά έχουμε σταθεροποίηση με κάποια διακύμανση της δύναμης γύρω από κάποια μέση τιμή.

Ωστόσο, στο δεύτερο σχήμα φαίνονται ακριβώς οι τρεις ζώνες στις οποίες χωρίζεται η καμπύλη φορτίου κατάρρευσης του δοκιμίου από χάλυβα: Στην πρώτη ζώνη, έχουμε καθαρά γραμμική ελαστική συμπεριφορά του υλικού μας, στην δεύτερη ζώνη, η καμπύλη φορτίου ακολουθεί πολυώνυμο δεύτερου βαθμού και καταλήγει σε μια μέγιστη τιμή, ενώ στην τρίτη ζώνη, η καμπύλη ακολουθεί μια φθίνουσα εκθετική συνάρτηση που προσεγγίζει ασυμπτωτικά μια σταθερή τιμή. Για να αποφευχθούν οι τυχόν ασυνέχειες στο γράφημα, ιδιαίτερα στα σημεία σύνδεσης μεταξύ των ζωνών, χρησιμοποιούνται ειδικές λογαριθμικές συναρτήσεις που παρέχουν μια ομαλή μετάβαση από τη μια ζώνη στην άλλη.

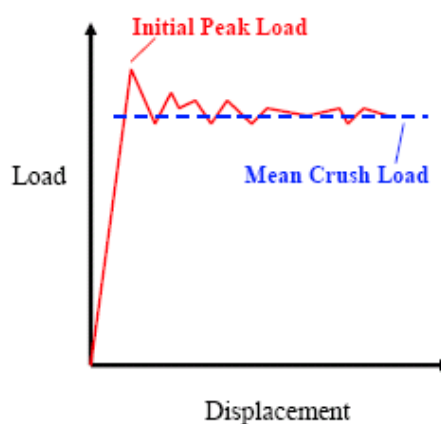
Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο δεύτερο σχήμα είναι:  $F_p$ = το μέγιστο φορτίο,  $F_e$ = μέγιστη ελαστική δύναμη,  $F_s$ = μέσο φορτίο,  $\delta_e$ = εύρος ελαστικής περιοχής,  $\delta_p$  = θέση του μέγιστου φορτίου.

Επομένως, αρχικά το δοκίμιο συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο της πρέσσας αυξάνει με σταθερό ρυθμό. Αυτό δείχνουν και οι παραπάνω καμπύλες με ένα αρχικό *peak* του φορτίου, που αντιστοιχεί στην αρχική κατάρρευση, και κατόπιν ακολουθείται από μια πολύ απότομη μείωση του φορτίου μέχρι κάποια τιμή, από την οποία και μετά η καμπύλη παραμένει σχεδόν παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα των μετατοπίσεων, παρουσιάζοντας πάντα μια σειρά από διακυμάνσεις στην τιμή του φορτίου γύρω από την τιμή του μέσου φορτίου κατάρρευσης του δοκιμίου, η οποία είναι ως σταθερή ευθεία ακριβώς παράλληλη με τον οριζόντιο άξονα των μετατοπίσεων.

Επιπλέον, τα μικρά όρη και οι κοιλάδες που σχηματίζονται από τις διακυμάνσεις της καμπύλης του φορτίου γύρω από την τιμή του μέσου φορτίου κατάρρευσης του δοκιμίου, σχετίζονται άμεσα με το σχηματισμό των στρεβλώσεων και των αναδιπλώσεων στα διάφορα στάδια της κατάρρευσης του δοκιμίου. Τα δευτερεύοντα όρη παρουσιάζονται να είναι σημαντικά μικρότερα σε μέγεθος ως προς τα αρχικά.

Ωστόσο, μπορούμε να πετύχουμε προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου, κάνοντας ένα chamfer στο ένα άκρο του δοκιμίου. Οπότε όταν ένα σημαντικό φορτίο εφαρμοστεί στο άκρο αυτό του δοκιμίου, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στο χείλος του chamfer θα είναι πολύ υψηλές σε σχέση με τις τάσεις που κατανέμονται στο υπόλοιπο δοκίμιο, και εμφανίζονται μικρορωγμές στην περιοχή του chamfer με αποτέλεσμα να έχουμε σταθερή ζώνη κατάρρευσης.

Η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσης του, υπολογίζεται με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου - βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπιση).



**Σχήμα 1.29:** Διάγραμμα δυνάμεων κατά την κατάρρευση δοκιμίων τετραγωνικής διατομής

Για την καταγραφή της ικανότητας της προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης,  $W_s$ . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του  $W$ , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει,  $m_c$ , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο  $V_c$  πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού  $\rho$ .

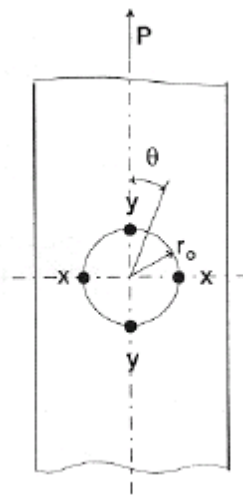
Βασικό χαρακτηριστικό αποτελεί η ποσότητα απορρόφησης της ενέργειας. Όσο πιο αυξημένη είναι η ικανότητα αυτή σε ένα σύστημα (στο δοκίμιο που καταρρέει αξονικά), τόσο πιο αποτελεσματικό γίνεται το σύστημα, και τόσο μεγαλύτερη είναι η προστασία που προσφέρει. Από τις διάφορες έρευνες, προέκυψε ότι ένα επίμηκες κέλυφος μπορεί να απορροφήσει μεγάλα ποσά ενέργειας όταν αυτό συμπιεστεί αξονικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ ΟΠΕΣ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Επειδή σήμερα πρακτικά σε όλες τις μηχανολογικές κατασκευές, και σε καθημερινές εφαρμογές, συναντάμε οπές διαφόρων μεγεθών και πολλών τύπων, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το πως αυτές οι οπές είναι υπεύθυνες για την λειτουργική συμπεριφορά ενός εξαρτήματος, αλλά και για την αστοχία του. Η επίδραση αυτή των οπών προς το υλικό στο οποίο υπάρχουν, είναι ο τομέας της κατανομής των τάσεων στο υλικό σε περιοχή γύρω από τις οπές (βλ. Βιβλιογραφία – Παράρτημα Β).

Μια κυκλική οπή είναι το απλούστερο παράδειγμα τύπων οπών, και αν υπάρχει τέτοια οπή σε ένα έλασμα, και το έλασμα αυτό φορτίζεται μονοαξονικά (εφελκυσμός, ή θλίψη) με ομοιόμορφο φορτίο  $P$ , τότε θα εμφανιστεί συγκέντρωση τάσεων γύρω από την οπή αυτή. Από την εξίσωση ισορροπίας των τάσεων όπως θα δούμε παρακάτω, η κατανομή των τάσεων αυτών εξαρτάται από το λόγο  $(r_0/r)$ , όπου το  $r_0$  (ή  $a$ ) είναι η ακτίνα της οπής, ενώ το  $r$  είναι η απόσταση από το κέντρο της οπής, όπου  $r > r_0$ . Η γωνία  $\theta$ , είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα της φόρτισης και της διεύθυνσης των τάσεων κατά φορά τέτοια όπως δηλώνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.1

Οι τάσεις αποδεικνύεται ότι μειώνονται δραστικά πέρα από την περιφέρεια της οπής, και πιο συγκεκριμένα κατά τη σχέση  $(r_0^2/r^2)$  ή  $(a^2/r^2)$ .

Πολύ σημαντικό είναι για την περιφέρεια της οπής, ότι οι τάσεις εκεί γίνονται μέγιστες με κατανομή:

$$\sigma = \sigma_{\theta\theta} = p(1 - 2\cos 2\theta)$$

Οι τιμές στις οποίες περιορίζονται οι τάσεις γύρω από την οπή είναι:

- $\sigma = 3p$ , για  $\theta = \pi/2$ , και για  $\theta = 3\pi/2$  (σε διεύθυνση κάθετη προς την αξονική διεύθυνση της φόρτισης),
- $\sigma = -p$ , για  $\theta = 0$ , και για  $\theta = \pi$  (κατά τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης).

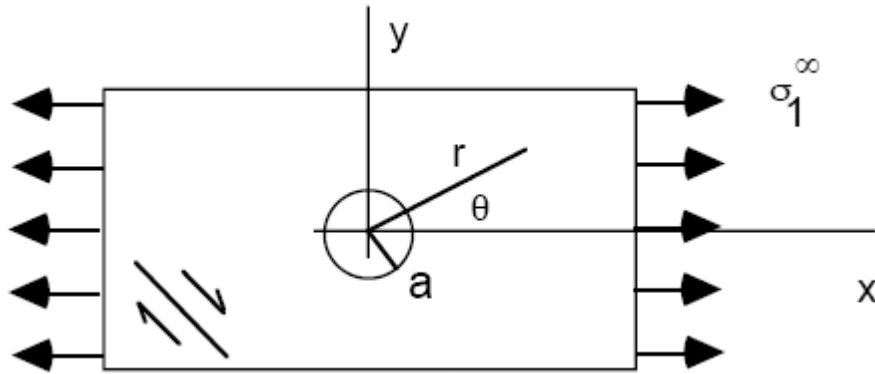
Το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται *συγκέντρωση τάσεων* (ένεκα των ρωγμών που ενδεχομένως θα εμφανιστούν στο δοκίμιο στην περιοχή της οπής), και οι μεγαλύτερες τάσεις σε σχέση με τη μέση τιμή τάσεων  $p$ , είναι αυτές που θα οδηγήσουν το δοκίμιο στην κατάρρευσή του.

Στο σχήμα της προηγούμενης σελίδας, τα σημεία  $X$ ,  $X'$ , στα τεταρτημόρια της οπής είναι τα πλέον ευάλωτα για ρωγμάτωση σε εφελκυσμό του ελάσματος, διότι οι τάσεις που αναπτύσσονται εκεί είναι τρεις φορές μεγαλύτερες από την τιμή της μέσης τάσης  $p$ .

Αντίθετα, αν ο εφελκυσμός του ελάσματος που φέρει την οπή, μετατραπεί σε θλίψη του ελάσματος (όπως και στην περίπτωση των δοκιμίων μας), οπότε η μέση τιμή τάσης είναι  $-p$ , τότε η μέγιστη τάση θα εφαρμοστεί στα σημεία  $X$ ,  $X'$ , τα οποία είναι τα πλέον ευάλωτα για να προκαλέσουν την ρωγμάτωση του ελάσματος.

## 2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Αρχικά θεωρούμε την επίλυση του προβλήματος που περιγράφει μια επιφάνεια η οποία φορτίζεται με μονοαξονικό εφελκυσμό, όπου η επιφάνεια αυτή εμπεριέχει και μια κυκλική οπή ακτίνας  $a$ :



Σχήμα 2.2: Μονοαξονική φόρτιση επίπεδης επιφάνειας που περιέχει κυκλική οπή

**Συνοριακές Συνθήκες φόρτισης**

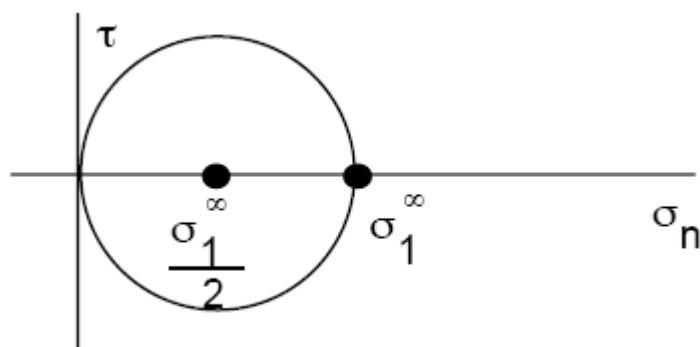
Θεωρώντας σύστημα X και Y, οι θετικές απομακρυσμένες τάσεις είναι:

(a)  $\sigma_{xx}^{\infty} = \sigma_1^{\infty}$                       (b)  $\sigma_{yy}^{\infty} = 0$                       (c)  $\sigma_{xy}^{\infty} = 0$

Και σε πολικές συντεταγμένες θα έχουμε:

(a)  $\sigma_{rr}^{\infty} = \frac{\sigma_1^{\infty}}{2}(1 + \cos 2\theta)$     (b)  $\sigma_{r\theta}^{\infty} = -\frac{\sigma_1^{\infty}}{2}\sin 2\theta$                       (c)  $\sigma_{\theta\theta}^{\infty} = \frac{\sigma_1^{\infty}}{2}(1 - \cos 2\theta)$

Και αν απεικονιστούν σε Κύκλο Mohr οι κύριες τάσεις, η διάμετρος του κύκλου αυτού μας δίνει την τιμή της τάσης  $\sigma_1^{\infty}$ :



Σχήμα 2.3

Οριακές συνθήκες υφίστανται και στην επιφάνεια της οπής ( $r=a$ ):

(a)  $\sigma_{rr}^a = 0$ ,                      (b)  $\sigma_{r\theta}^a = 0$ .

Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει εφελκυσμός στην επιφάνεια της τρύπας.

Η κυρίαρχη εξίσωση επίλυσης είναι:

$$\nabla^4 \phi = \nabla^2 \nabla^2 \phi = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \phi = 0$$

Ενώ, η γενική επίλυση κατά Michel 1899, είναι:

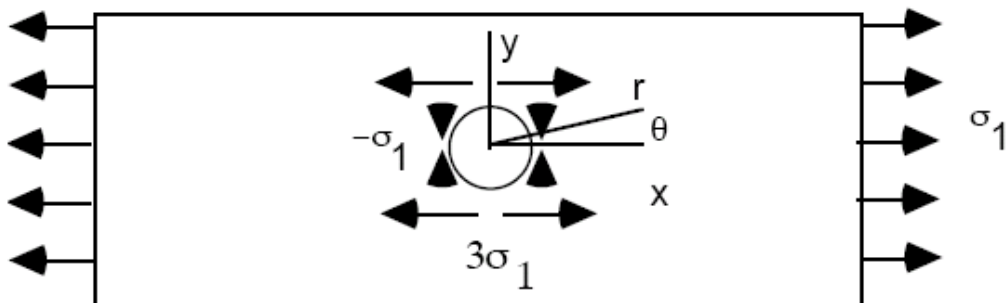
$$\begin{aligned} & A_{01}r^2 + A_{02}r^2 \ln r + A_{03} \ln r + A_{04} \theta \\ & + (A_{11}r^3 + A_{12}r \ln r + A_{14}r^{-1}) \cos \theta + A_{13}r \theta \sin \theta \\ & + (B_{11}r^3 + B_{12}r \ln r + B_{14}r^{-1}) \sin \theta + B_{13}r \theta \cos \theta \\ \phi = & + \sum_{n=2}^{\infty} \left( A_{n1}r^{n+2} + A_{n2}r^{-n+2} + A_{n3}r^n + A_{n4}r^{-n} \right) \cos n\theta \\ & + \sum_{n=2}^{\infty} \left( B_{n1}r^{n+2} + B_{n2}r^{-n+2} + B_{n3}r^n + B_{n4}r^{-n} \right) \sin n\theta \end{aligned}$$

Η οποία παρουσιάζεται με μορφή Σειρών Fourier.

Γίνεται χρήση των εξής εξισώσεων,

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{-1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \end{aligned}$$

Και προχωρώντας στην επίλυση του μοντέλου, τελικά θα πάρουμε ότι:



Σχήμα 2.4

Όπου έχουμε:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{\sigma_1^\infty}{2} \left[ \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left( 1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{-\sigma_1^\infty}{2} \left( 1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_1^\infty}{2} \left[ \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left( 1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]\end{aligned}$$

Παρατηρούμε τα εξής:

1) Η μέση κάθετη δύναμη κατά γωνία  $\theta = \pm 45^\circ$ , εξασθενεί κατά συνάρτηση:

$$a^2/r^2$$

2) Στην περιφέρεια της τρύπας ( $r=a$ ), η περιφερειακή τάση  $\sigma_{\theta\theta}$  είναι ίση προς:

$$\sigma_{\theta\theta}|_{r=a} = \sigma_1^\infty (1 - 2\cos 2\theta).$$

3) Παρόλο που τα τοιχώματα της οπής είναι μη εφελκόμενα, θα αναπτύσσονται όμως τάσεις σε αυτά, σε ακτίνα  $r=a$ , σύμφωνα με την παραπάνω σχέση,

Ενώ θα έχουμε:  $\sigma_{\theta\theta} = 0$ , μόνο όταν  $\cos 2\theta = 0.5$ .

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στην περιφέρεια της οπής κατά γωνία  $\theta = \pm \pi/2$ , έχουν το ίδιο πρόσημο με την  $\sigma_1^\infty$ , αλλά μεγαλύτερο μέγεθος, επομένως η οπή παραλαμβάνει τάσεις:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{max} = 3 \sigma_1^\infty, \text{ σε } \theta = \pm \pi/2,$$

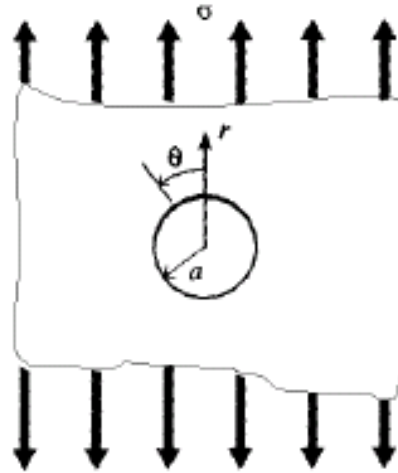
Ενώ, οι τάσεις που αναπτύσσονται στην περιφέρεια της οπής σε γωνία  $\theta = 0$ , και  $\theta = \pi$ , είναι αρνητικές της  $\sigma_1^\infty$ , και τότε έχουμε ότι:

$$(\sigma_{\theta\theta})_{mix} = -\sigma_1^\infty, \text{ σε } \theta = 0, \text{ και } \theta = \pi.$$

Τοπικές τάσεις του όλκιμου υλικού (σε οπές), μπορούν και υφίστανται παρόλο που υπάρχει ένα σημαντικά μεγάλο πεδίο περιβαλλουσών τάσεων σε όλο το υλικό (και αντιστρόφως).

Το μέγεθος των τάσεων γύρω από την περίμετρο της οπής, εξαρτάται και από την ακτίνα της οπής. Επομένως, αρκετά μικρές οπές μπορούν να εμφανίζουν συγκέντρωση τάσεων το ίδιο όπως και οι μεγαλύτερες οπές.

**Συνοπτικά**, μπορούμε να πούμε ότι στο επίπεδο οι κατανομή των τάσεων γύρω από μια κυκλική οπή είναι:



Σχήμα 2.5

Μονοαξονική φόρτιση οπής, όπου οι συνοριακές συνθήκες είναι:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma}{2}(1 + \cos 2\theta) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma}{2}(1 - \cos 2\theta) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma}{2} \sin 2\theta \end{aligned} \right\} r \rightarrow \infty$$

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0, r = 0$$

Θεωρώντας την τασική συνάρτηση Airy,  $\phi = f(r) \cos 2\theta$ ,

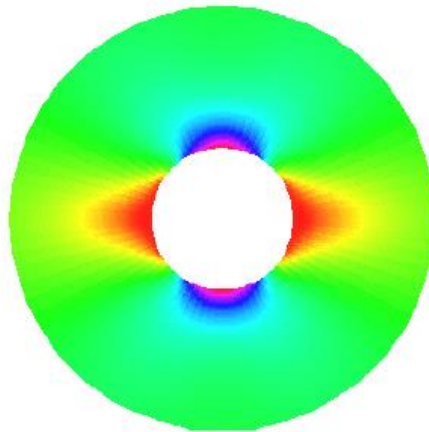
$$\nabla^4 \phi(r, \theta) = 0 \rightarrow f(r) = Ar^2 + Br^4 + C \frac{1}{r^2} + D$$

Οπότε υπολογίζοντας τις σταθερές από τις συνοριακές συνθήκες, καταλήγουμε ότι:

$$\sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} = \frac{\sigma}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta, \max} = 3\sigma \text{ @ } r = a, \theta = \pi/2$$

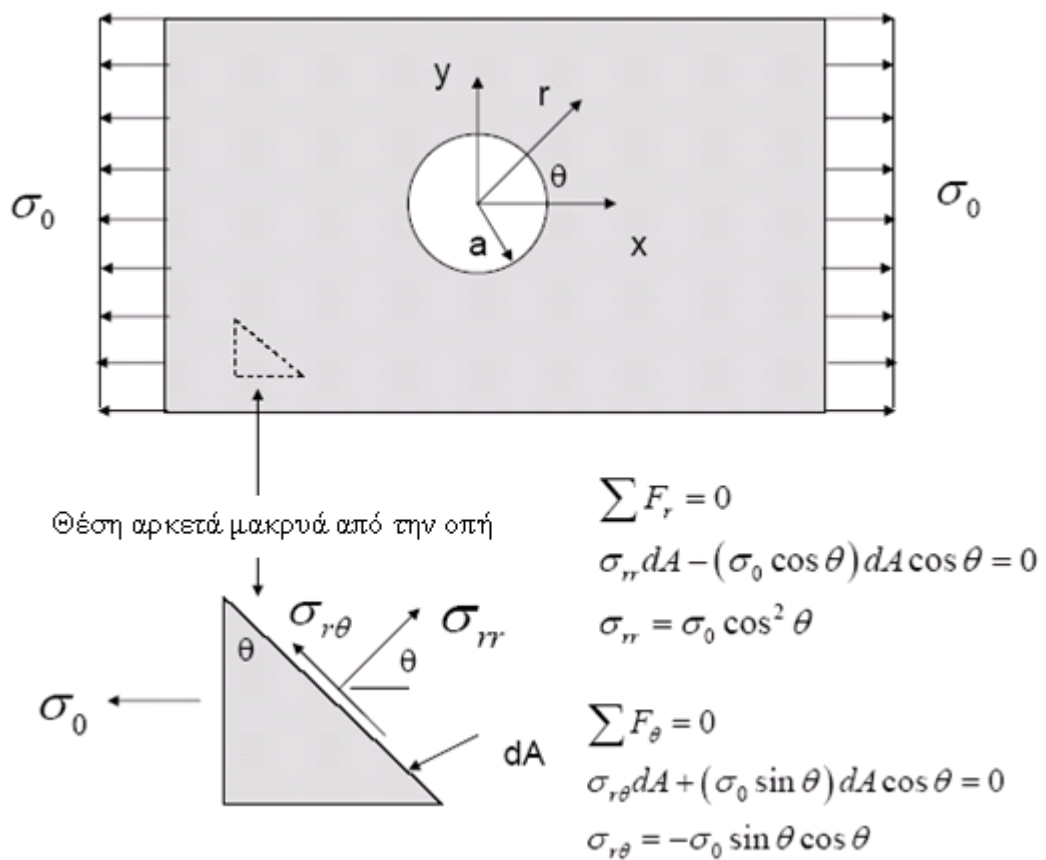




Σχήμα 2.6

### 2.3 ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ ΜΕ ΜΙΑ ΟΠΗ

Παρατηρώντας το ίδιο φαινόμενο σε μια επίπεδη πλάκα στην οποία υπάρχει μια οπή, θα έχουμε τα εξής:



$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \sigma_0 \cos^2 \theta \\ \sigma_{r\theta} &= -\sigma_0 \sin \theta \cos \theta\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta} &= \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \\ &= \sigma_0 + 0\end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_0 (1 - \cos^2 \theta)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} (1 + \cos 2\theta)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} (1 - \cos 2\theta)$$

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{\sigma_0}{2} \sin 2\theta$$

$$\begin{aligned}\phi &= A \ln r + Br^2 + Cr^2 \ln r \\ &+ (a_2 r^2 + b_2 r^4 + c_2 r^{-2} + d_2) \cos 2\theta\end{aligned}$$

Και το  $\mathbf{C} = \mathbf{0}$ , για μετατοπίσεις μιας μεταβλητής και σταθερές τάσεις στο άπειρο, οπότε η τασική συνάρτηση Airy, παράγει τις εξής τάσεις με τιμή  $\mathbf{b}_2 = \mathbf{0}$  για σταθερές τάσεις στο άπειρο:

$$\sigma_{\theta\theta} = -A/r^2 + 2B + (2a_2 + 12b_2 r^2 + 6c_2/r^4) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{r\theta} = 2(a_2 + 3b_2 r^2 - 3c_2/r^4 - d_2/r^2) \sin 2\theta$$

$$\sigma_{rr} = A/r^2 + 2B - (2a_2 + 6c_2/r^4 + 4d_2/r^2) \cos 2\theta$$

$$r \rightarrow \infty$$

$$\sigma_{\theta\theta} : \quad 2B + 2a_2 \cos 2\theta = \sigma_0/2 - (\sigma_0/2) \cos 2\theta$$

$$\Rightarrow \begin{aligned}B &= \sigma_0/4 \\ a_2 &= -\sigma_0/4\end{aligned}$$

$$\sigma_{rr} : \quad 2B - 2a_2 \cos 2\theta = \sigma_0/2 + (\sigma_0/2) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{r\theta} : \quad 2a_2 \sin 2\theta = -(\sigma_0/2) \sin 2\theta$$

Και για  $r \rightarrow a$

$$\sigma_{rr} = (A/a^2 + \sigma_0/2) - (-\sigma_0/2 + 6c_2/a^4 + 4d_2/a^2) \cos 2\theta = 0$$

$$\sigma_{r\theta} = (-\sigma_0/2 - 6c_2/a^4 - 2d_2/a^2) \sin 2\theta = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \quad & A = -\sigma_0 a^2 / 2 \\ & 6c_2/a^4 + 4d_2/a^2 = \sigma_0/2 \\ & -6c_2/a^4 - 2d_2/a^2 = \sigma_0/2 \end{aligned}$$

Επιλύοντας ταυτόχρονα αυτές τις δύο εξισώσεις θα πάρουμε:

$$\begin{aligned} c_2 &= -\sigma_0 a^4 / 4 \\ d_2 &= \sigma_0 a^2 / 2 \end{aligned}$$

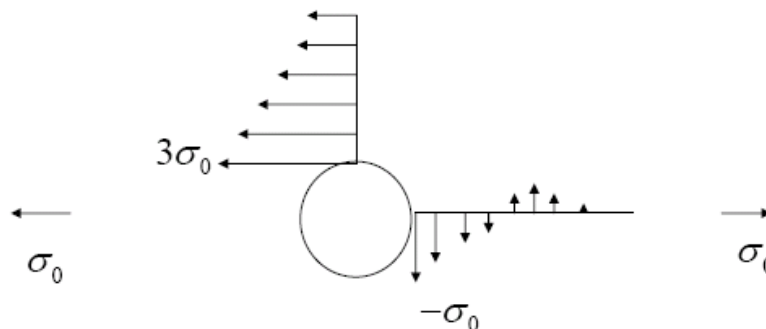
Οπότε οι τάσεις που αναπτύσσονται τελικά θα είναι:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{-\sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_0}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta$$

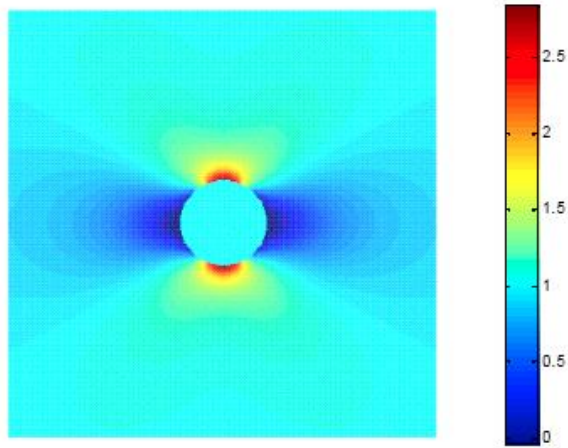
$$r = a: \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_0 (1 - 2 \cos 2\theta) = \begin{cases} 3\sigma_0 & \theta = \pm\pi/2 \\ -\sigma_0 & \theta = 0, \pi \end{cases}$$



Σχήμα 2.7

Και αν θέλουμε να απεικονίσουμε την συγκέντρωση τάσεων γύρω από την οπή θα έχουμε σχηματικά:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{rr} \cos^2 \theta + \sigma_{\theta\theta} \sin^2 \theta - 2\sigma_{r\theta} \sin \theta \cos \theta$$



Σχήμα 2.8

#### 2.4 ΠΕΡΙ ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΜΕ ΟΠΕΣ – ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ BOEING 737.

Η εμφάνιση ρωγμών σε μεταλλικές επιφάνειες αναμφίβολα ξεκινάει από την περιοχή όπου η μεταλλική επιφάνεια παρουσιάζει την μικρότερη αντοχή και το υλικό γίνεται ασθενές. Αν εφαρμοστεί ικανή τάση στην περιοχή αυτή, ακόμα και το ισχυρότερο μέταλλο θα καταρρεύσει. Αυτό το φαινόμενο αυξάνεται έως και δέκα φορές περισσότερο, όταν στην μεταλλική επιφάνεια υπάρχουν μία ή και περισσότερες οπές.

Αν η οπή έχει κατασκευαστεί με κανονικό τρόπο, δεν θα εμφανιστεί κανένα πρόβλημα στην μεταλλική επιφάνεια που την περιέχει, παρά μόνο όταν μια ικανή δύναμη ή τάση εφαρμοστεί στην επιφάνεια αυτή, και αναπτυχθεί συγκέντρωση τάσεων στην περιφέρεια και γύρω από την οπή.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζει και η εταιρεία Boeing για τα αεροσκάφη της τύπου Boeing 737, είναι ότι τα αεροσκάφη της γενικά αποτελούνται από εξαιρετικά μεγάλο αριθμό οπών στα διάφορα μέρη τους, όχι μόνο στα συνδετικά σημεία των διαφορετικών τμημάτων και μερών του αεροσκάφους, αλλά και σε άλλες θέσεις, ώστε να μετατρέπεται το αεροσκάφος σε ελαφρύτερη κατασκευή. Όμως σε ένα τέτοιου τύπου αεροσκάφος που

υπάρχουν σχεδόν περισσότερες από ένα εκατομμύριο οπές, η κάθε μια από αυτές αποτελεί και ένα επικίνδυνο σημείο εμφάνισης ρωγμών στο αεροσκάφος, εάν εφαρμοστούν ικανές τάσεις στην περιφέρειά της.

Αφού, σήμερα τα αεροσκάφη πρέπει να έχουν οπές παντού στα διάφορα μέρη τους, παρόλο που με τον τρόπο αυτό καθιστούν τις μεταλλικές τους επιφάνειες επιρρεπείς σε ρωγματώσεις και ασθενείς σε συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τις οπές, θα πρέπει να επινοηθούν τρόποι ώστε να αυξηθεί η αντοχή του υλικού στα σημεία αυτά.

Μια ενδιαφέρουσα άποψη της εταιρείας είναι η εξής: Όταν δημιουργούμε με κανονικό τρόπο μια οπή συνήθως καθαρίζουμε την επιφάνεια και το εσωτερικό της οπής από τμήματα υλικού που έχουν απομείνει ή που προεξέχουν. Αν όμως επιπλέον δημιουργούσαμε την οπή στην μεταλλική επιφάνεια με τα χείλη προς τα έξω, αυτό που θα πετυχαίναμε είναι ότι θα είχαμε είκοσι φορές μεγαλύτερη αντοχή του υλικού από την κανονική, στην περιοχή της οπής. Έτσι, προδιαμορφώνουμε την δομή της οπής, ώστε τα άτομα που την αποτελούν να πιέζονται διαρκώς κοντά το ένα στο άλλο, και έτσι να ισχυροποιείται η συνοχή του υλικού. Υπάρχει μια μόνιμη τάση που κρατάει τα άτομα σταθερά το ένα κοντά στο άλλο. Έτσι όταν θα εφαρμοστούν εξωτερικά φορτία, αυτά θα προσπαθήσουν να διαχωρίσουν τα άτομα και να δημιουργήσουν ρωγμή στο υλικό, αλλά όμως τώρα θα πρέπει να υπερνικήσουν πρώτα τη σημαντική σε μέγεθος μόνιμη τάση του υλικού στην περιοχή της οπής, πράγμα δύσκολο και δείχνει ότι αυξήθηκε η αντοχή του υλικού στην περιοχή της οπής.

Επίσης, η εταιρεία Boeing θεωρεί ότι έχει αναπτύξει την ιδανικότερη πατέντα για το παραπάνω πρόβλημα, κατά την οποία χρησιμοποιείται ένα ειδικό μεταλλικό χιτώνιο το οποίο τοποθετείται και εφαρμόζει απολύτως εσωτερικά σε κάθε οπή, και την καθιστά απολύτως ασφαλή σε εξωτερικές φορτίσεις.

Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, θα ασχοληθούμε με τις τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τις οπές που έχουμε κάνει στα δοκίμιά μας, και το πως αυτές συντελούν στην εκάστοτε κατάρρευση από αξονική θλίψη για το κάθε δοκίμιο χωριστά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στο κτίριο Ξ της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Εκτενής περιγραφή των πειραμάτων που διεξήχθησαν, καθώς και παρουσίαση όλων των δοκιμών έχει γίνει στην διπλωματική εργασία με τίτλο: **Αξονική κατάρρευση μεταλλικών ορθογωνικών σωλήνων με διαφορετικούς τύπους διαμπερών ασυνεχειών: Πειραματική διερεύνηση** του Μηχανολόγου Μηχανικού **Ράφτη Αλέξανδρου** [7]. Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για λόγους πληρότητας. Συγκεκριμένα, θα γίνει παρουσίαση των δοκιμών, της μηχανής στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα και των συνθηκών κάτω από τις οποίες έγιναν.

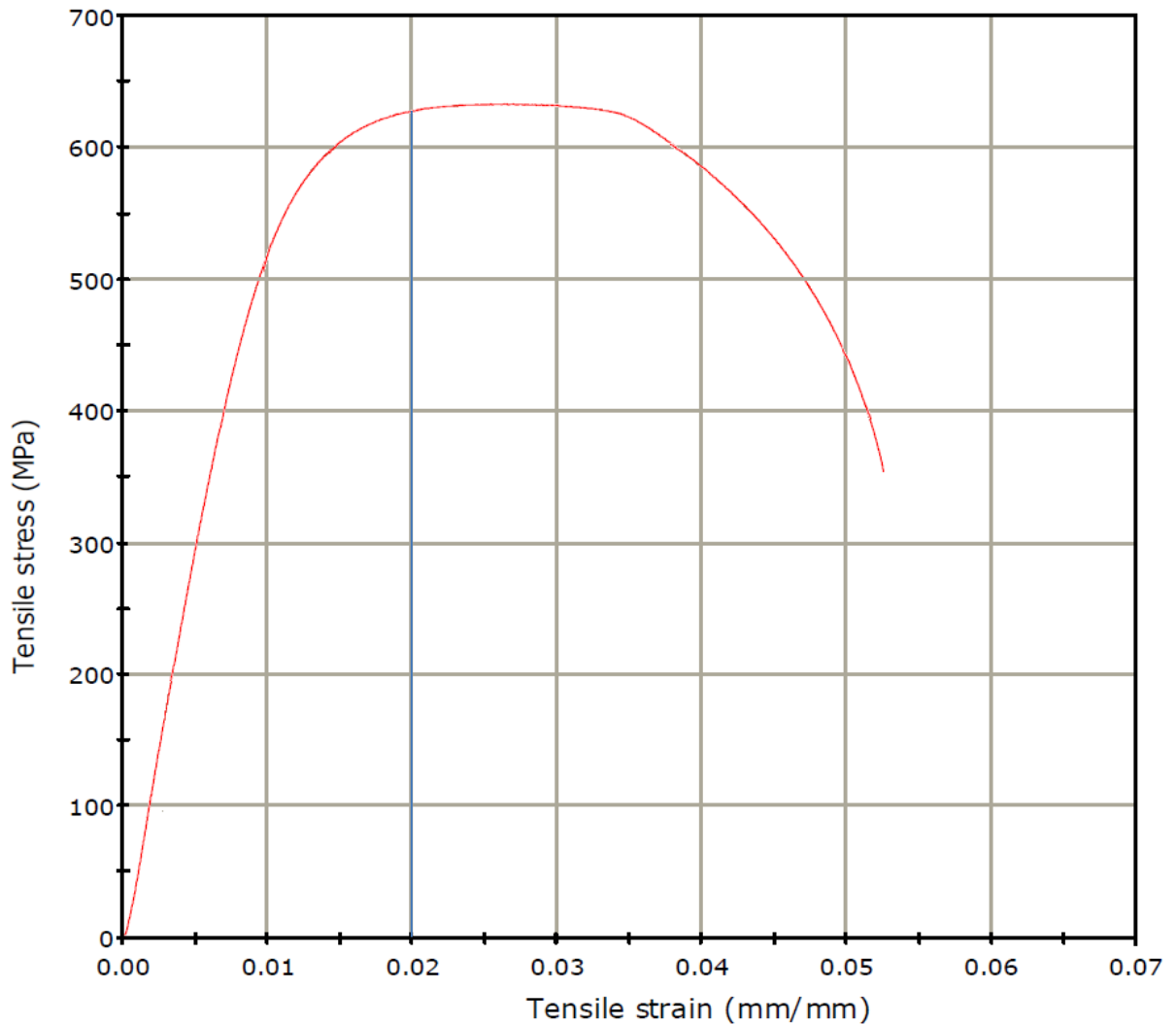
### 3.2 ΔΟΚΙΜΙΑ

#### 3.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΟΥ

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας % σε C. Στην επόμενη σελίδα παρατίθεται η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων του συγκεκριμένου χάλυβα όπως αυτό προέκυψε από δοκιμή εφελκυσμού που έγινε στη μηχανική πρέσα INSTRON, ενώ στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του υλικού μερικά από τα οποία υπολογίστηκαν από τη εν λόγω καμπύλη:

Ιδιότητα	Τιμή
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	210
Λόγος Poisson	0.3
Πυκνότητα (Kg/mm <sup>3</sup> )	$7.80 \cdot 10^{-6}$
Όριο διαρροής (MPa)	500
Μέγιστη τάση (MPa)	635

**Πίνακας 3.1:** Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα



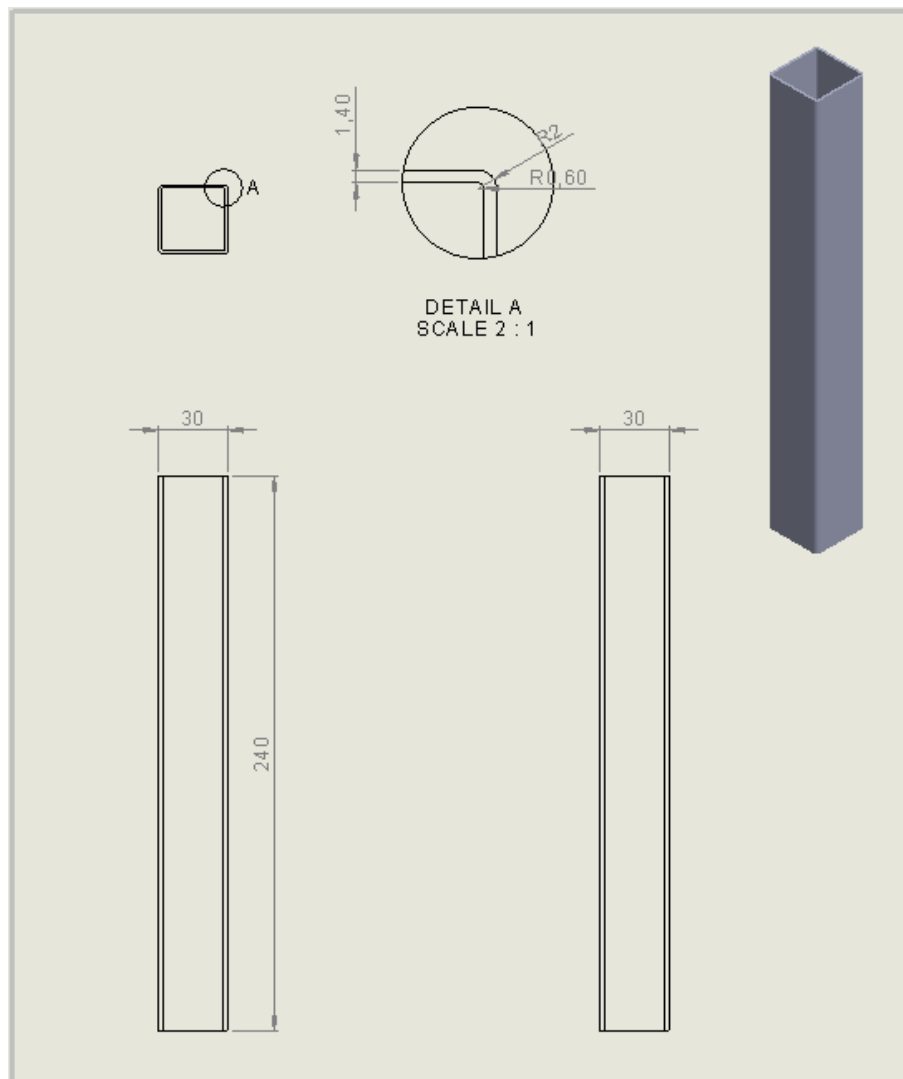
**Σχήμα 3.1:** Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού (χάλυβας) των σωλήνων σε εφελκυσμό

### 3.2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων ήταν με κάμψη (στραντζάρισμα) επίπεδων ελασμάτων ώστε να πάρουμε την επιθυμητή τετραγωνική ή ορθογωνική διατομή με ραφή συγκόλλησης στην ένωσή τους, ενώ η προμήθειά τους έγινε από το εμπόριο. Για τη δημιουργία των οπών και των σχισμών χρησιμοποιήθηκε φρεζοδράπανο δαπέδου και τα αντίστοιχα εργαλεία κοπής. Συνολικά διαμορφώθηκαν 20 δοκίμια, 10 με τετραγωνική διατομή και 10 με ορθογωνική διατομή. Τα 9 δοκίμια από κάθε διατομή είχαν ατέλειες (οπές), ενώ 1 δοκίμιο παρέμεινε χωρίς οπή.

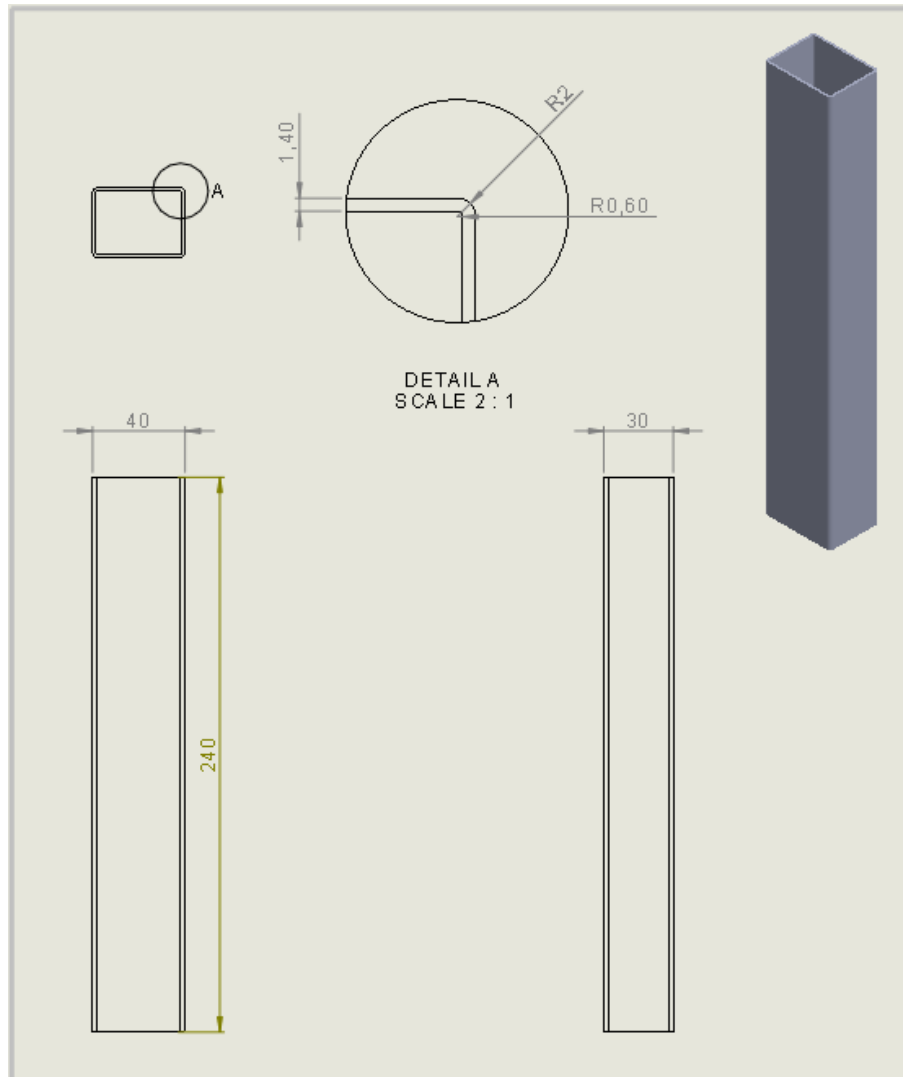
### 3.2.3 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Με βάση τις διαστάσεις της διατομής των δύο τύπων σωλήνων (τετραγωνική – ορθογωνική διατομή) επιλέχθηκε αρχικό ύψος δοκιμίων 240 mm που, με βάση τη μελέτη [13], αναμενόταν καταρχήν καταστροφική κατάρρευση σε αξονική φόρτιση (ολικός λυγισμός – global buckling). Η μελέτη προσανατολίστηκε στην διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών μορφών ασυνέχειας. Αμέσως παρακάτω παρατίθενται τα κατασκευαστικά σχέδια των δύο τύπων σωλήνων



**Σχήμα 3.2:** Κατασκευαστικό σχέδιο σωλήνα τετραγωνικής διατομής





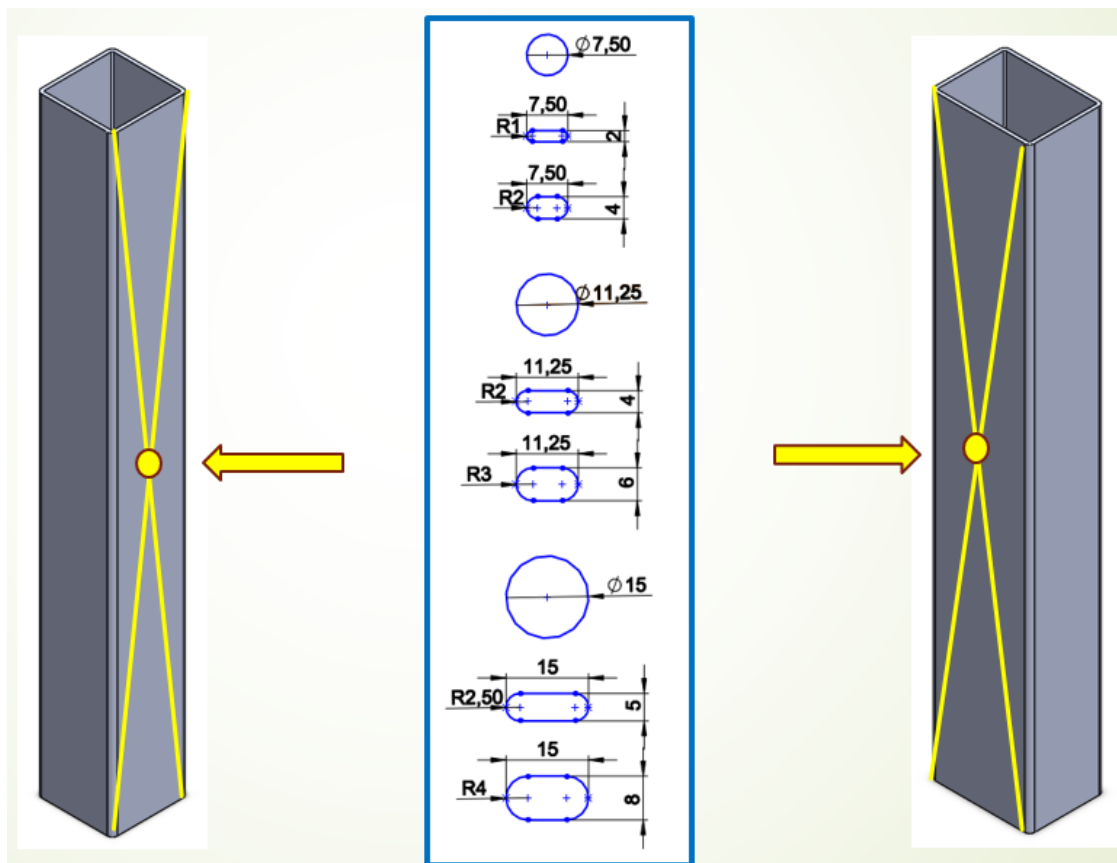
**Σχήμα 3.3:** Κατασκευαστικό σχέδιο σωλήνα ορθογωνικής διατομής

Οι πλήρεις διαστάσεις των δοκιμών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, όπου παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμών.

### 3.2.4 ΟΠΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι διαστάσεις των κυκλικών ασυνεχειών / ατελειών επιλέχθηκαν με διαμέτρους 7.5, 11.25 και 15 mm, ενώ οι διαστάσεις των υπολοίπων ατελειών (σχισμές) επιλέχθηκαν με βάση τις παραπάνω διαμέτρους και λόγους (aspect ratio) μεγάλου άξονα (εγκάρσια στον διαμήκη άξονα των σωλήνων) προς μικρό (παράλληλα στο διαμήκη άξονα των σωλήνων), ίσους με 1 (κυκλική οπή), 2 και 3. Οι τελικές διαστάσεις των σχισμών προέκυψαν με βάση τη διαθεσιμότητα των αντίστοιχων εργαλείων διάνοιξης οπών του εργαστηρίου. Όλες οι οπές

που κατασκευάστηκαν στα δοκίμια είναι διαμπερείς (και στις δύο απέναντι πλευρές των σωλήνων). Το πάχος των δοκιμών επιλέχθηκε 1.40 mm. Αμέσως παρακάτω παρατίθενται συγκεντρωτικά όλες οι ατέλειες με τις διαστάσεις τους και τη θέση τους πάνω στους σωλήνες:



Σχήμα 3.4: Διαστάσεις ατελειών

Οι πλήρεις διαστάσεις των ατελειών των δοκιμών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, όπου παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμών.

### 3.2.5 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για λόγους ευκολίας επιλέχθηκαν δύο κατηγορίες ονοματολογίας για τα δοκίμια. Συγκεκριμένα, για τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής το πρώτο γράμμα ήταν το **S** (Square) ενώ για τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής επιλέχθηκε σαν το πρώτο γράμμα το **R** (Rectangle). Τα δοκίμια χωρίς οπή είχαν σαν δεύτερο γράμμα τον αριθμό **0** ενώ τα δοκίμια με τις οπές είχαν σαν δεύτερο γράμμα τους αριθμούς **1**, **2** και **3** ανάλογα με το μέγεθος της οπής. Τέλος τα δοκίμια με σχισμή είχαν και τρίτο γράμμα, τους αριθμούς **1** και **2** ανάλογα με

το μέγεθος. Περισσότερες πληροφορίες για τους συνδυασμούς ονομάτων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, όπου παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια των δοκιμών με τα ονόματά τους.

### 3.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Όπως η διαμόρφωση των δοκιμών έτσι και όλα τα πειράματα διεξήχθησαν στο κτίριο Ξ της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών. Στο κτίριο αυτό βρίσκονται οι εγκαταστάσεις του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

#### 3.3.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΕΣΑ INSTRON

Τα πειράματα έγιναν στη μηχανική πρέσα **INSTRON 4482** η οποία βρίσκεται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου. Η συγκεκριμένη πρέσα έχει μέγιστη θλιπτική ικανότητα 100 kN και περιλαμβάνει κατάλληλες διατάξεις για να εκτελέσει τις ακόλουθες μηχανικές δοκιμές:

- Εφελκυσμός (Tension)
- Θλίψη (Compression)
- Κάμψη (Bending)

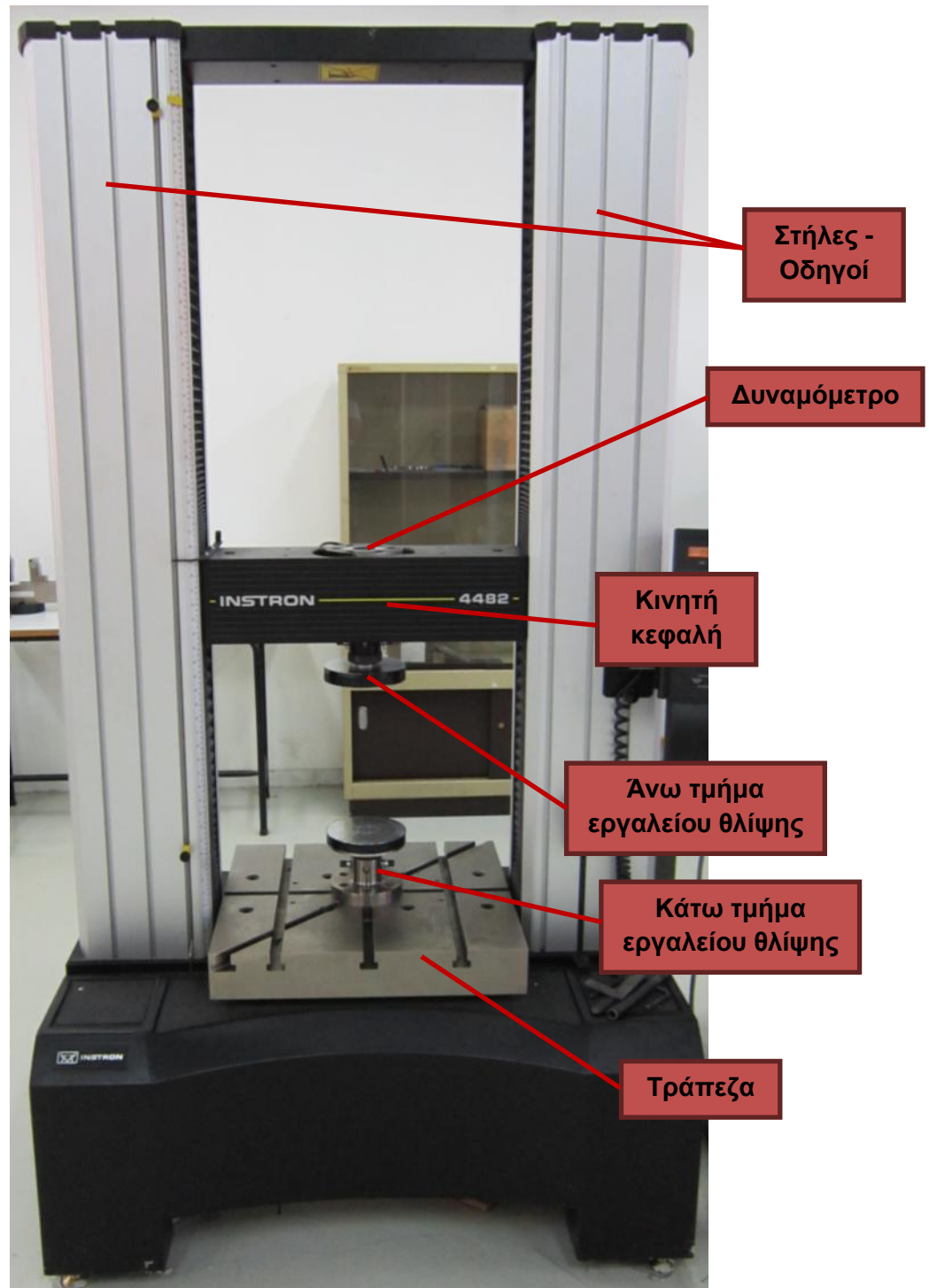
Για την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης, έχει προσαρμοστεί πάνω στη πρέσα το εργαλείο (επίπεδες πλάκες) της θλίψης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.5:** Εργαλείο θλίψης προσαρμοσμένο στη μηχανική πρέσα INSTRON

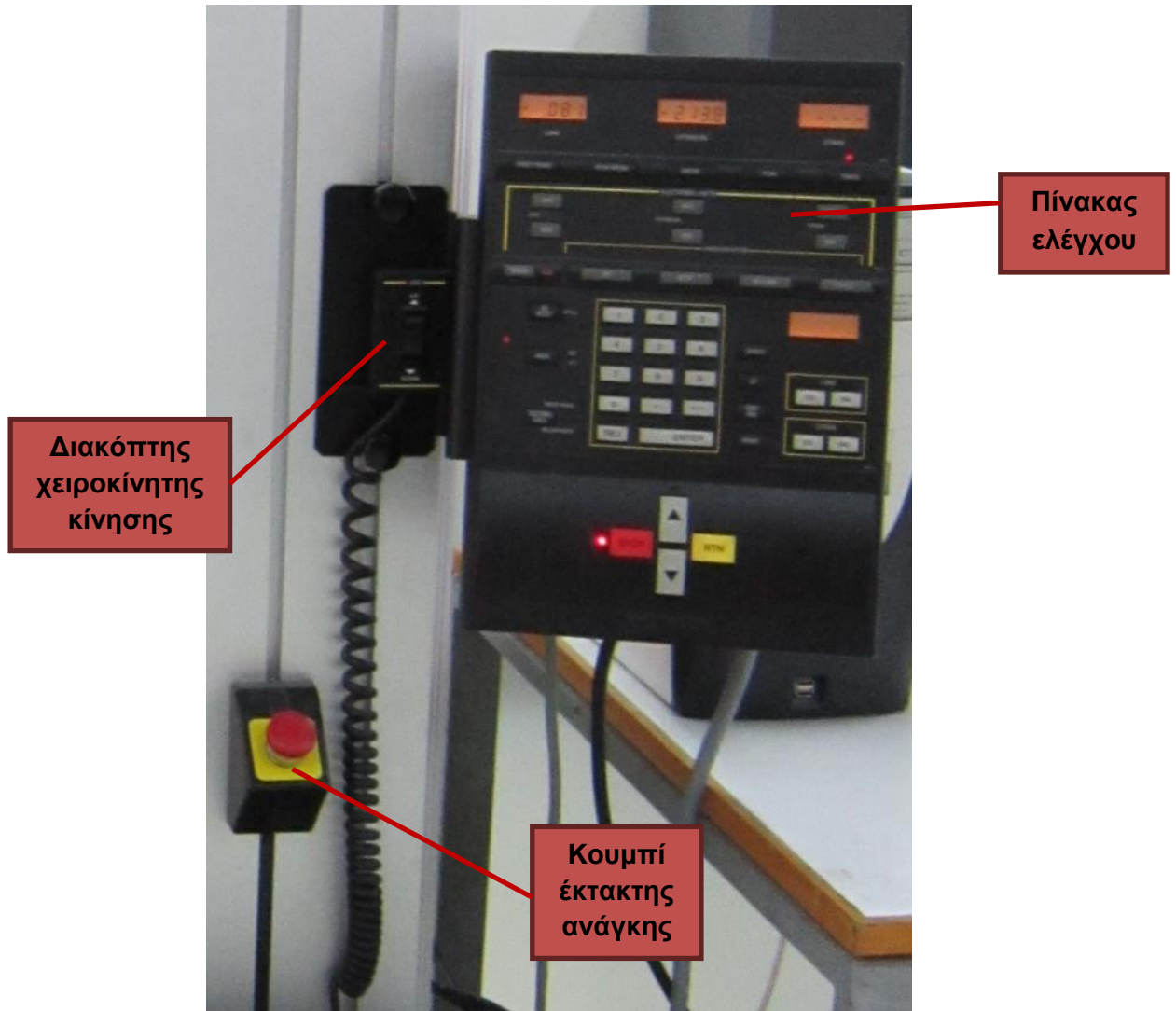
Αναλυτικότερα, η συνολική διάταξη της πρέσας, αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα:

- ✚ Το κυρίως σώμα το οποίο περιλαμβάνει τη τράπεζα, τη κινητή κεφαλή όπου είναι προσαρμοσμένο το δυναμόμετρο και οι κολώνες – οδηγοί της κινητής κεφαλής.



Σχήμα 3.6: Κυρίως σώμα πρέσας INSTRON

- ✚ Τον πίνακα ελέγχου όπου μπορούμε να ορίσουμε τις συνθήκες των δοκιμών που πραγματοποιούμε, τον μετακινούμενο διακόπτη χειροκίνητης κίνησης (πάνω - κάτω) της κινητής κεφαλής και το κουμπί έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 3.7: Επιμέρους τμήματα πρέσας INSTRON

- ✚ Τέλος, η μηχανική πρέσα συνδέεται μέσω σειριακής θύρας με Η/Υ που 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.



**Σχήμα 3.8:** Συνολική διάταξη της μηχανικής πρέσας INSTRON του εργαστηρίου

### 3.3.2 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Τα πειράματα όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω διεξήχθησαν υπό στατικές συνθήκες. Τα δοκίμια επιλέχθηκε να συμπιεστούν κατά **120 mm**, όσο δηλαδή και το μισό μήκος τους. Επίσης επιλέχθηκε το έμβολο της πρέσας να κινείται με ταχύτητα **40 mm/min**, που οιονεί στατική (quasi-static) ταχύτητα καταπόνησης.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

---

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

---

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

- ✚ Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.
- ✚ Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

### 4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

---

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στην γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη

δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων (ένα άκρο), μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση (άλλο άκρο). Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμού προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.

### 4.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προ-επεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο Η/Υ συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο



χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μετα-επεξεργαστές ( post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρώιμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους.

#### **4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

---

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην h version) ή όσο

μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην *p* version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling).

Στην κλασική μέθοδο (στην *h* version) εάν  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι  $2n$  και  $3n$  για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, αντίστοιχα.

### **Σημειώσεις:**

- Στην κλασική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται *h*-version, χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ορισμένου βαθμού οπότε η αύξηση της ακρίβειας επιτυγχάνεται με μείωση της μέσης διάστασης (π.χ. της ακτίνας,  $h$ , του περιγεγραμμένου κύκλου) των στοιχείων, με άλλα λόγια με αύξηση του πλήθους των αυτών (πύκνωση πλέγματος).
- Στην λεγόμενη *p*-version, χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα αλλά επιτρέπεται η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού  $p$  της συνάρτησης μορφής. Στην *p*-version, οι συντελεστές του εν λόγω υψηλού βαθμού πολυωνύμου είναι επίσης άγνωστοι που υπολογίζονται σαν τμήμα της διαδικασίας επίλυσης.

#### **4.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

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

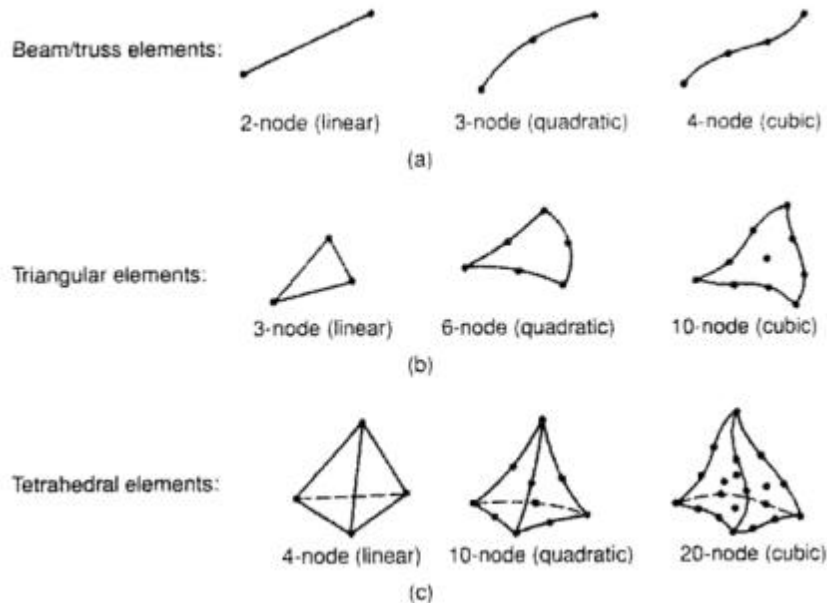
Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε

προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής. Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανακλάται αυτόματα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το σχήμα

4.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



**Σχήμα 4.1:** Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της *p-version* μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου *p-version*. Επιπλέον από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη

παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση

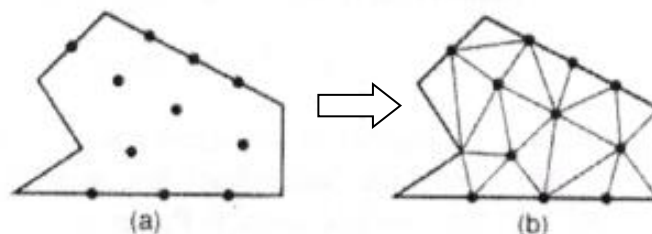
δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσον και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.

#### 4.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους γένεσης πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988).

- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η γένεση κόμβων που δείχνονται στο σχήμα 4.2 (a), και (ii) η γένεση στοιχείων στο σχήμα 4.2 (b).

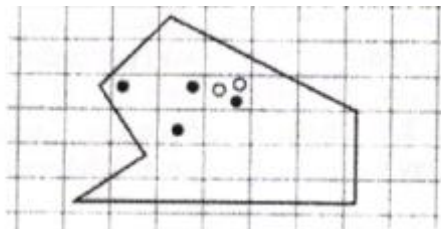


Σχήμα 4.2: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

**Γένεση κόμβων:** Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.

■ **Μέθοδος του Cavendish** (1974). Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη  $i$ , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος  $r(i)$ . Το σχήμα 4.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση  $x$  και μια για την κατεύθυνση  $y$ , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών  $x$  και  $y$ . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από το σύνορο μεγαλύτερη από το  $r(i)$ , αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.

■ **Μέθοδος του Shimada** (1992). Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φουσαλίδες» όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φουσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φουσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.



Σχήμα 4.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

**Γένεση στοιχείων:** Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να

καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.

■ **Μέθοδος Lee** (1983). Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης  $x$ . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη  $x$ , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης  $y$ . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.

■ **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay**. Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα.

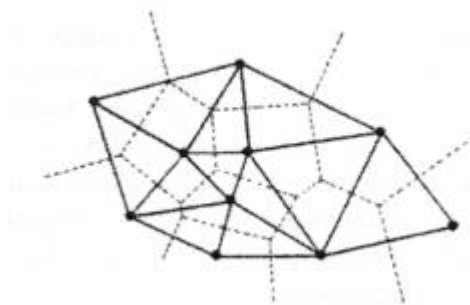
Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου  $N$  σημείων,  $P_i (i=1,2,\dots,N)$ , αποτελείται από  $N$  πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις),  $V_i$  καθένα των οποίων έχει κέντρο το σημείο  $P_i$  έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο  $i$ , να περιλαμβάνονται στον  $V_i$ . Μαθηματικά, το  $V_i$  (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

$$V_i = \{x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i\}$$

όπου  $|\dots|$  συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε  $V_i$ , είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ  $P_i$ , και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου



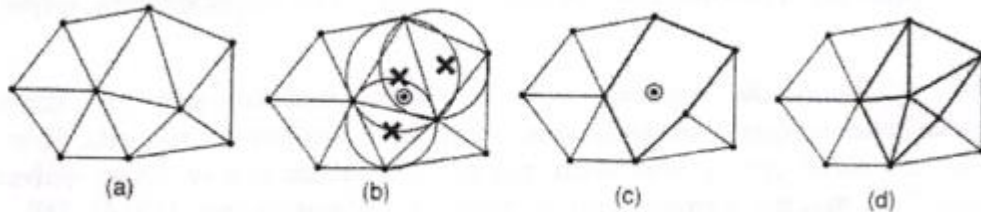
ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο  $V_i$  καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο) Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το σχήμα 4.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.



**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο  $T_0$ , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του  $T_0$ . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο σχήμα 4.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με  $\times$  όταν ένας νέος κόμβος  $\odot$  εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο σχήμα 4.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το σχήμα 4.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το  $T_0$ , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση

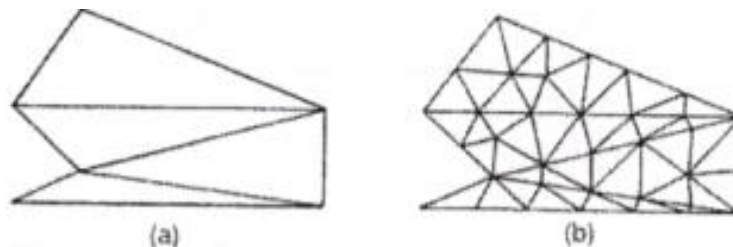
πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.



Σχήμα 4.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

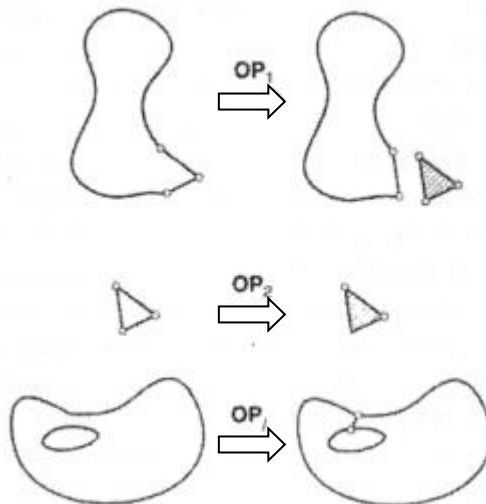
Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6 (a). Κατόπιν, αυτά τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτύνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 4.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, πρώτος

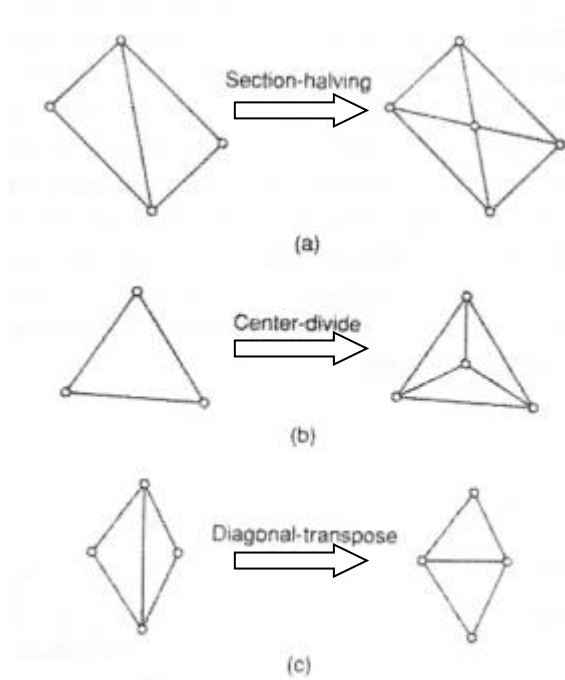
εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984)  $OP_i$  για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή  $OP_1$  μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής  $OP_2$  για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.



**Σχήμα 4.7:** Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλεπτύωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο σχήμα 4.8. Το σχήμα 4.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Στο σχήμα 4.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο σχήμα 4.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία.



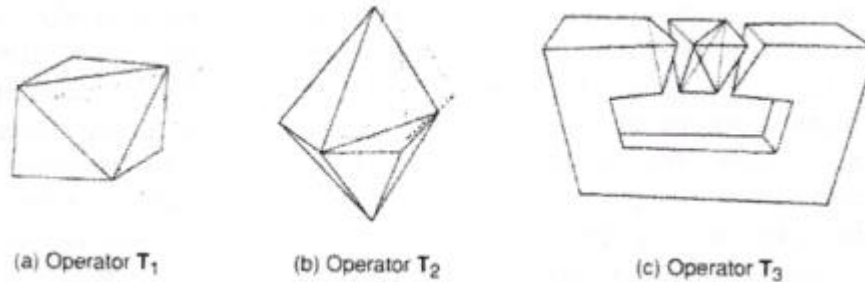
Σχήμα 4.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμενεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomas (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο σχήμα 4.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής  $T_3$  για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμνοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή  $T_1$ , όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής  $T_2$  εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο  $T_1$  εφαρμόζεται ξανά.

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο περιορισθεί σε ένα μονό τετράεδρο.

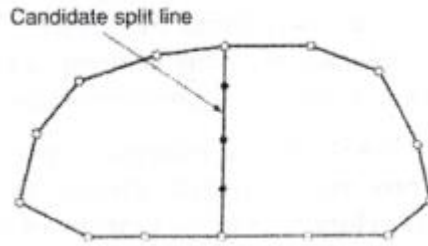


Σχήμα 4.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

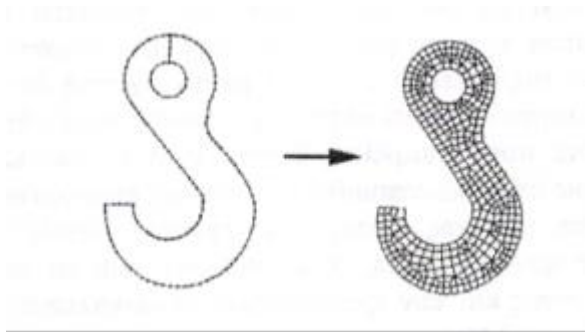
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγούμε μόνο τη μέθοδο αναδρομής καθώς αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος, και τα δύο ήμισυ υποδιαιρούνται επαναληπτικά μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρις ότου μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το σχήμα 4.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



**Σχήμα 4.10:** Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



**Σχήμα 4.11:** Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

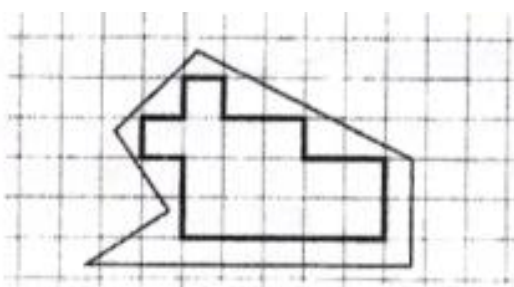
Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό.

- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.

Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός

αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Τα σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δεν μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.

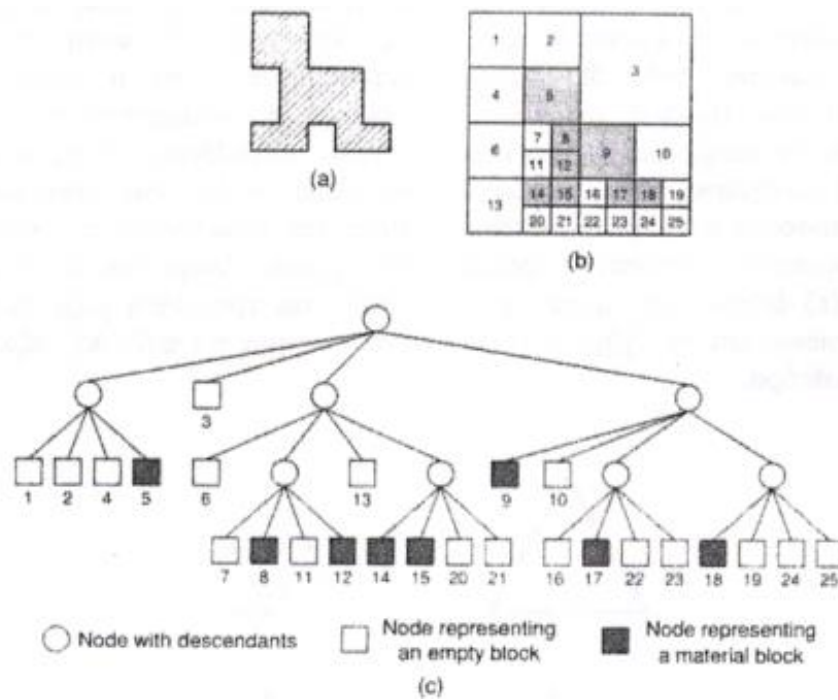


**Σχήμα 4.12:** Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

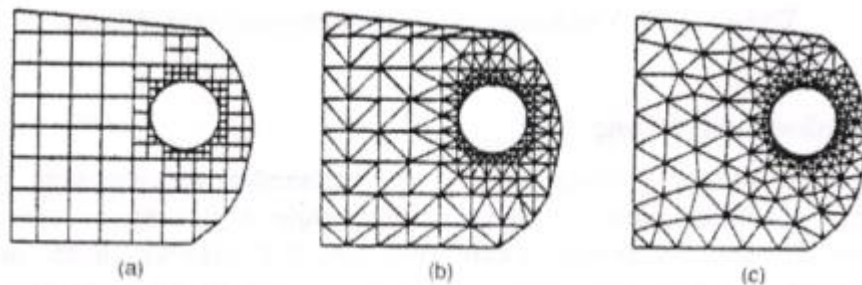
Οι Yerry και Shephard (1983) χρησιμοποίησαν μια δενδρική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που περικλείει το αντικείμενο. Το σχήμα 4.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το σχήμα 4.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

**Βήμα 1:** Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός (“completely inside”) αντικειμένου ή επικαλύπτονται (“overlapping”). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο σχήμα 4.14 (a).

**Βήμα 2:** Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το σχήμα 4.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



Σχήμα 4.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

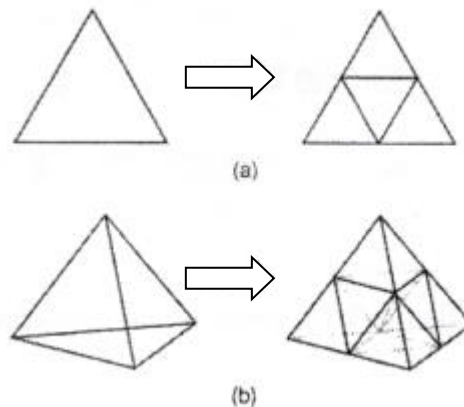


Σχήμα 4.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadree



**Βήμα 3:** Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το σχήμα 4.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάζεται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα.

Οι Jung και Lee (1993) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το σχήμα 4.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάζεται σε τέσσερα τρίγωνα, και το σχήμα 4.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάζεται σε οκτώ τετράεδρα.



**Σχήμα 4.15:** Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές· στις τρεις διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επανααπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε:

- Εάν τα στοιχεία που παράγονται δεν είναι του επιθυμητού τύπου, τότε τα υποδιαιρούμε στον επιθυμητό τύπο.
- Εάν τα στοιχεία δεν έχουν μεγέθη συμβατά με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλέγματος, τότε τα εκλεπτύνουμε.
- Εάν τα στοιχεία δεν είναι καλοσχηματισμένα, τότε εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης (smoothing technique).

### 4.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι δυνατότητες των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα πακέτα υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων άλλων προβλημάτων σε μεγάλο τμήμα των εξισώσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα: θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορεύματα: eddy-current), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “Multi-Physics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιήσουμε τον τρόπο ανάλυσης, στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις.

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κλπ.

Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος σαν:

*Στατικό πρόβλημα* (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή

*Δυναμικό πρόβλημα* (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο. Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ.

Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη-γραμμικό (nonlinear)

*Γραμμικό* λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγούμενα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1<sup>ο</sup> Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2<sup>ο</sup> Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3<sup>ο</sup> Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4<sup>ο</sup> Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.

5<sup>ο</sup> Στάδιο → Ανάγνωση των αποτελεσμάτων και γραφική αναπαράστασή τους.

- **Είδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Τα βασικά πεπερασμένα στοιχεία είναι:

- Ράβδος (2 κόμβοι)
- Σύρμα – σχοινί
- Δοκός (2 κόμβοι)
- Επίπεδη εντατική καταπόνηση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές)

- Πλάκα (3 μέχρι 9 κόμβοι)
- Μembrάνη
- Κέλυφος
- Ορθοτροπικό – πολυστρωματικό υλικό
- Τετράεδρο (3 κόμβοι)
- Πρίσμα (π.χ. 6 κόμβοι)
- Εξάεδρο (8 κόμβοι)

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος, το πλήθος των βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο ποικίλει

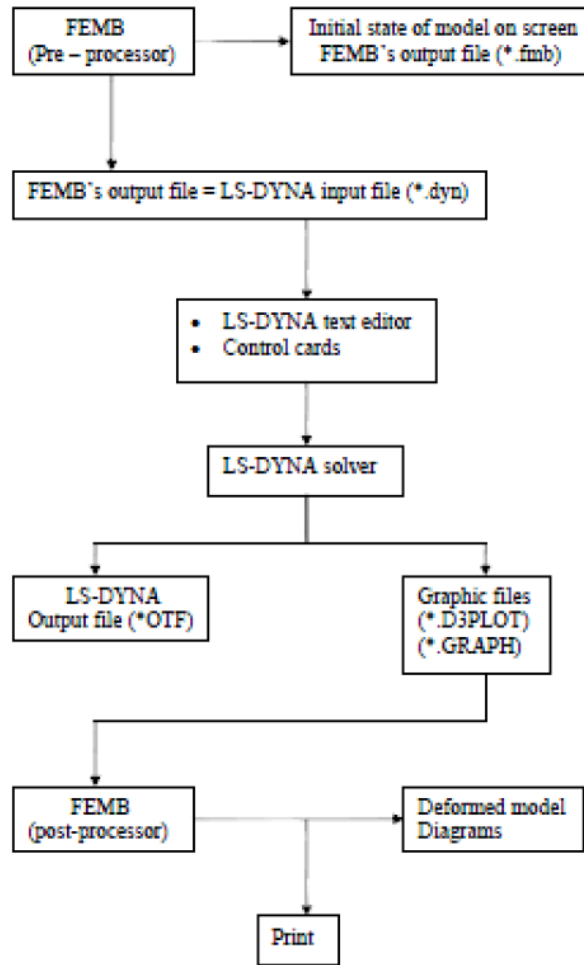
## **4.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΟ LS-DYNA**

---

### **4.5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ LS-DYNA**

---

Ο κώδικας των πεπερασμένων στοιχείων FEM (Finite Element Method) LS-DYNA είναι της εταιρείας Livemore Software Technology Corporation και είναι ένας κώδικας για επίλυση μη γραμμικών συστημάτων σε αναλύσεις τρισδιάστατων μοντέλων. Στα πρώτα χρόνια εξέλιξης του οι επιλογές στη δημιουργία μοντέλων ήταν περιορισμένες. Δεν ήταν δυνατή η χρήση πεπερασμένων στοιχείων με πολλούς κόμβους, ούτε ο ορισμός διεπιφανειών. Επίσης απαιτούνταν χρόνος από τα υπολογιστικά συστήματα για να ολοκληρώσουν την ανάλυση και να καταλήξουν στη λύση. Στις μέρες μας ο κώδικας βρίσκεται στην έκδοση 971, προσφέροντας μεγάλη ποικιλία επιλογών στα υλικά, τη διακριτοποίηση, τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Το γραφικό περιβάλλον, κάνοντας χρήση ισχυρών γραφικών καρτών, διευκολύνει τον χρήστη αρχικά στη δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων και στη συνέχεια στην εξέταση των αποτελεσμάτων μέσω γραφικής απεικόνισης αυτών. Οι ταχύτατοι νέοι υπολογιστές που είναι εξοπλισμένοι με πολλούς επεξεργαστές, σε συνεργασία με το σύγχρονο κώδικα του LS-DYNA, οδηγούν σε γρήγορα και αξιόπιστα αποτελέσματα. Για τη προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα LS-DYNA 3D, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, στο κτίριο Ξ της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πρόκειται για ένα λογισμικό που χρησιμοποιεί Explicit κώδικα και ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης).



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του κώδικα LS-DYNA

#### 4.5.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ο σχεδιασμός των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με το σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks όπου ορίσαμε πλήρως την γεωμετρία του, δίνοντας τις ακριβείς διαστάσεις. Στα μοντέλα της προσομοίωσης ορίστηκε η μέση διάσταση των δοκιμίων. Για τα δοκίμια S ορίστηκαν διαστάσεις 28,6 x 28,6 x 240 (mm x mm x mm) ενώ για τα δοκίμια R ορίστηκαν διαστάσεις 28,6 x 38,6 x 240 (mm x mm x mm) και κατόπιν ορίστηκε κοινό πάχος τοιχώματος 1,4 mm.

Στη συνέχεια τα μοντέλα εξήχθησαν σε μορφή \*.iges και εισήχθησαν στον preprocessor του LS-DYNA 3D για τον ορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων.

### 4.5.3 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

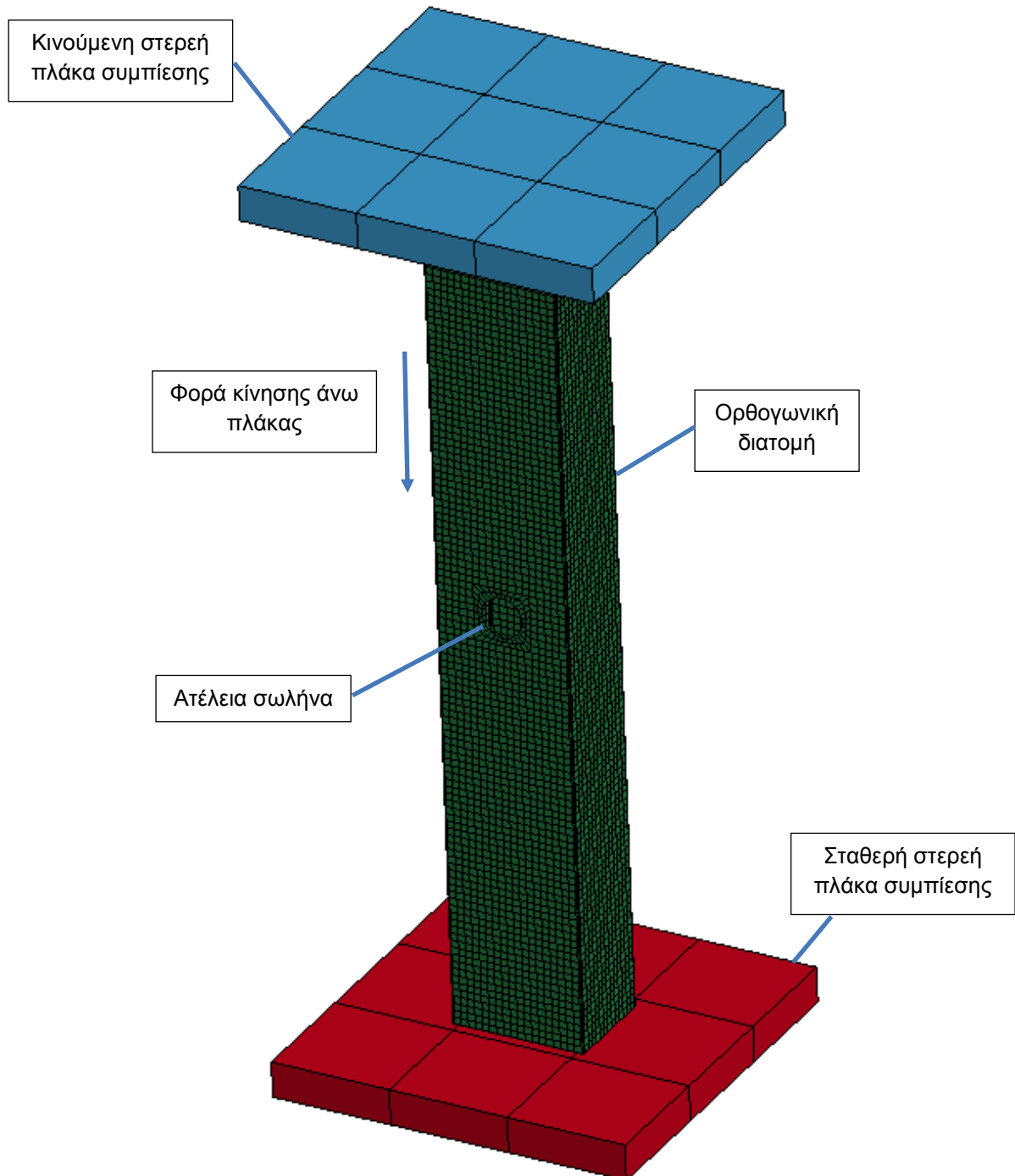
Δύο είναι τα βασικά μέρη του προγράμματος, τα οποία συντελούν στη μοντελοποίηση. Αρχικά χρησιμοποιούμε τον *preprocessor* του προγράμματος ο οποίος προέρχεται από την εταιρεία LSTC, του οποίου η τρέχουσα έκδοση είναι η 4.0, και με το οποίο κατασκευάζουμε το μοντέλο μας. Στη συνέχεια πραγματοποιούμε την επίλυση του μοντέλου με τον *solver* ο οποίος επίσης προέρχεται από την εταιρεία LSTC, του οποίου η τρέχουσα έκδοση είναι η LS-Dyna 971 R7.0.0.

Αφού εισάγουμε τη γεωμετρία που είχε εξαχθεί από το σχεδιαστικό πακέτο SolidWorks σε μορφή \*.iges, έπειτα δηλώνεται το υλικό από το οποίο αποτελείται, καθώς και τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες. Στη συνέχεια διακριτοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία και δηλώνονται οι ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων. Ύστερα ορίζονται οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός του άλλου. Τέλος προσδιορίζονται τα εξωτερικά του φορτία καθώς και οι αρχικές συνθήκες (αρχική ταχύτητα, αρχική επιτάχυνση κ.τ.λ.).

Στα μοντέλα της προσομοίωσης ορίστηκε η μέση διάσταση των δοκιμίων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, και κατόπιν ορίστηκε κοινό πάχος τοιχώματος 1,4 mm, ώστε πλέον χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία: S/R Hughes-Liu, και αποθηκεύτηκαν αποτελέσματα για το κάθε msec έως τα 120 msec σε όλα τα δοκίμια (άρα έως τα 120 mm από την πάνω επιφάνεια του κάθε δοκιμίου την οποία θα πιέζει θλιπτικά το έμβολο της πρέσας). Φυσικά, το πλέγμα που επιλέξαμε για τα δοκίμιά μας αποτελείται από Shell Elements.

Το θέμα της πυκνότητας της διακριτοποίησης είναι σημαντικό για να δίνει σωστά αποτελέσματα το πρόγραμμα αλλά και να μην χρειάζεται μεγάλος χρόνος επίλυσης. Αρχικά δεδομένου του είδους της καταπόνησης και της αναμενόμενης παραμόρφωσης, η οποία είναι αξονική και είναι πιθανό να δημιουργηθούν λοβοί σε όλο το μήκος του δοκιμίου, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί σχετικά πυκνό πλέγμα σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Ακόμη λαμβάνοντας υπ' όψιν το πάχος της διατομής, όσο πιο μικρό το πάχος αυξάνονται οι θέσεις που μπορούν να σχηματιστούν λοβοί και συνεπώς αυξάνεται και ο αριθμός των λοβών που μπορεί να σχηματιστεί. Στην περίπτωση μας επιλέχθηκε μέσο μήκος ακμής πεπερασμένου στοιχείου 2 mm και πραγματοποιήθηκε πύκνωση πλέγματος γύρω από τις οπές και ατέλειες για να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα.

Ακόμα, ορίζουμε το υλικό των δοκιμίων σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 και ορίζουμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου:  $v = -1\text{mm/msec}$ , με φορά προς τα κάτω στα αρνητικά του άξονα Z.



**Σχήμα 4.17:** Απεικόνιση πλέγματος και διεπιφανειών επαφής στο LS-DYNA 3D, για ορθογωνικής διατομής λεπτότοιχο σωλήνα



Ο τύπος του υλικού με το οποίο μοντελοποιήσαμε τον χάλυβα ήταν, MAT PIECEWISE LINEAR PLASTICITY. Η ακίνητη πλάκα καθώς και το κινούμενο έμβολο (σε σχήμα πλάκας) μοντελοποιήθηκαν με απαραμόρφωτο υλικό MAT RIGID, και διακριτοποιήθηκαν σε 9 οχτακομβικά στοιχεία solid element.

Ο συντελεστής δυναμικής τριβής δόθηκε ως  $FD = 0.15$ , ενώ ο συντελεστής στατικής τριβής δόθηκε ως  $FS = 0.2$ .

Για την προσομοίωση του εκάστοτε μοντέλου ορίσαμε τις εξής τρεις διεπιφάνειες μεταξύ των τριών σωμάτων που επρόκειτο να έρθουν σε άμεση επαφή:

- Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της κάτω επιφάνειας της άνω πλάκας και του κελύφους.
- Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της άνω επιφάνειας της κάτω πλάκας και του κελύφους.
- Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κελύφους με το ίδιο το κέλυφος (self contact)

Τα δεδομένα σώζονται από τον preprocessor σε μορφή ψηφιακού αρχείου τύπου \*.fmb στο οποίο βασικά περιέχεται όλο το μοντέλο το οποίο θα επιλυθεί με πεπερασμένα στοιχεία από το LS-DYNA, και ανά πάσα στιγμή μπορούμε να επέμβουμε και να το τροποποιήσουμε εκ νέου στη γεωμετρία και στα υπολογιστικά στοιχεία για τον κώδικα του προγράμματος.

Επίσης εκτός από το αρχείο \*.fmb μπορεί να τα εξάγει και σαν αρχείο κειμένου τύπου \*.dyn. Το αρχείο αυτό μπορεί να ανοιχτεί από οποιονδήποτε editor (π.χ. Notepad), και ως εκ τούτου να τροποποιηθεί από τον χρήστη, και περιέχει σε μορφή ASCII όλα όσα στοιχεία και μόνο αυτά χρειάζεται ο κώδικας του LS-DYNA για να προσομοιώσει την αξονική κατάρρευση του κάθε δοκιμίου. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη γιατί γλιτώνει τον χρήστη από επίπονη διαδικασία όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι σχετικά απλές και μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον editor, δίχως να χρειαστεί να ξαναεργαστεί στο περιβάλλον του pre-processor μέσα από το αντίστοιχο αρχείο \*.fmb.

Το αρχείο \*.dyn είναι αυτό που στην συνέχεια επεξεργάζεται το πρόγραμμα για την επίλυση του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο Solver του LS-DYNA που αποτελεί και τον κυρίως κώδικα του προγράμματος. Όταν η επίλυση ολοκληρωθεί, το πρόγραμμα παρουσιάζει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Τα αρχεία αυτά είναι τύπου \*.d3plot και \*.graph και χρησιμοποιούνται από τον post-processor και graph-processor (εταιρείας LSTC) αντίστοιχα, για να γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στον χρήστη με μορφή

γραφημάτων για τις δυνάμεις και τάσεις κατά την κατάρρευση των δοκιμίων, αλλά και τα ίδια τα animation, για την ακριβή προσομοίωση της θεωρητικής κατάρρευσης των μοντέλων μας.

Όλες οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αντίστοιχα διαγράμματα που λήφθηκαν παρουσιάζονται εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 4.5.4 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

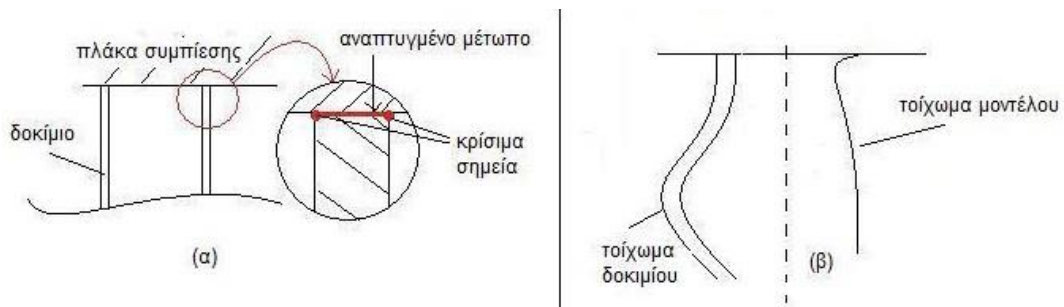
Η προσομοίωση προσεγγίζει την πειραματική διαδικασία αλλά είναι σαφές πως υπάρχουν διαφορές μεταξύ του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και του πραγματικού δοκιμίου. Σε γενικές γραμμές το περιβάλλον των πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδεατό και εξιδανικευμένο, ενώ στην πραγματικότητα υπάρχουν ατέλειες μη μετρήσιμες, ακόμα και μη προβλέψιμες.

Στην πραγματικότητα το δοκίμιο έχει προέλθει από έλασμα άρα είναι ανισότροπο λόγω της έλασης. Στη συνέχεια έχει στρατζαριστεί, συνεπώς είναι προεντεταμένο λόγω της κάμψης του ελάσματος. Ακόμη η κάμψη του ελάσματος δημιουργεί μια πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας που οδηγεί σε τοπική αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων αλλά και του πάχους κατά το μήκος της ακμής. Επίσης η κάμψη του ελάσματος θέτει θέμα παραλληλότητας των τοιχωμάτων. Στη συνέχεια έχει συγκολληθεί. Με αποτέλεσμα να έχει διαφοροποιημένες μηχανικές ιδιότητες και εναπομείνουσες τάσεις στη ραφή συγκόλλησης και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή. Ακόμη τα τοιχώματα έχουν κατά το μήκος της ραφής συγκόλλησης διαφορετικό πάχος και αυτό είναι ακανόνιστο και δεν δύναται να μετρηθεί και να προσομοιωθεί στον υπολογιστή. Στο θεωρητικό μοντέλο το υλικό θεωρείται πως είναι ιδεατό, δηλαδή ομοιογενές και ισότροπο και οι ακμές του δοκιμίου μοντελοποιούνται τέλειες ορθές γωνίες και το πάχος να είναι ίσο με το ονομαστικό σε όλα τα τοιχώματα και τα σημεία του δοκιμίου.

Το επόμενο σημαντικό θέμα αφορά την κατεργασία του υλικού με σκοπό την κατασκευή των πειραματικών δοκιμίων. Προκειμένου να κατασκευαστούν τα δοκίμια ακολουθούνται κατεργασίες κοπής και διάτρησης στο μηχανουργείο διότι στην αγορά οι λεπτότοιχες πωλούνται σε διατομές μήκους 6 μέτρων. Ακολουθούν κατεργασίες κοπής του δοκιμίου σε πριόνι (κορδέλα) και στη συνέχεια διάτρηση σε όποια δοκίμια απαιτείται για την δημιουργία των ατελειών. Συνεπώς υπάρχουν αποκλίσεις, έστω και απειροστές, ως προς τις θέσεις των οπών καθώς και ως προς τις διαστάσεις και την παραλληλότητα του μετώπου. Το μοντέλο προσομοιώνεται με εξιδανικευμένη γεωμετρία δηλαδή οι οπές βρίσκονται ακριβώς στο μέσον των ακμών και τα μέτωπα του δοκιμίου είναι απολύτως παράλληλα.

Ένα ακόμα σημείο που προσεγγίζεται στην μοντελοποίηση είναι οι οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες αφορούν την τριβή μεταξύ των πλακών συμπίεσης και των μετώπων των δοκιμίων αλλά και την τριβή μεταξύ των ίδιων των πλευρών των δοκιμίων κατά τη δημιουργία των λοβών, όταν αυτές έρχονται σε επαφή. Στο πρόγραμμα λαμβάνονται οι συντελεστές τριβής που αντιστοιχούν στις κατεργασμένες επιφάνειες και τα υλικά τους όταν έρχονται σε επαφή, αλλά η παραμόρφωση των δοκιμίων με τη δημιουργία λοβών και η εφαρμογή των φορτίων είναι πιθανό να αλλάζει τους προεπιλεγμένους συντελεστές.

Επόμενο αντικείμενο των οριακών συνθηκών αποτελεί η ίδια η μοντελοποίηση του δοκιμίου με στοιχεία κελύφους. Ενώ στην πραγματικότητα η επαφή των άκρων του δοκιμίου με την πλάκα συμπίεσης είναι ένα μέτωπο, δηλαδή μια επιφάνεια, στην προσομοίωση εμφανίζεται ως γραμμική επαφή, δηλαδή μια γραμμή εξαιτίας των στοιχείων κελύφους. Το παραπάνω έχει ως συνέπεια το πειραματικό δοκίμιο να προτιμά να δημιουργεί λοβό σε περιοχή που δεν έρχεται σε επαφή με την πλάκα συμπίεσης λόγω του μετώπου ενώ ο κώδικας να υπολογίζει ότι ο πρώτος λοβός θα εμφανιστεί στο σημείο επαφής με την πλάκα συμπίεσης καθώς δεν λαμβάνει υπ' όψιν τις υπάρχουσες συνοριακές συνθήκες. Πιο αναλυτικά στο δοκίμιο όπου υπάρχει το ανεπτυγμένο μέτωπο, τα κρίσιμα σημεία πρέπει να παραμορφωθούν προκειμένου να ξεκινήσει ο λοβός στην επιφάνεια επαφής με την πλάκα συμπίεσης. Το Σχήμα 4.18 υποστηρίζει την πιο πάνω πρόταση με ακρίβεια.



**Σχήμα 4.18:** (α) Απεικόνιση ανεπτυγμένου μετώπου στο πειραματικό δοκίμιο και (β) σύγκριση τρόπου παραμόρφωσης πειραματικού δοκιμίου και θεωρητικού μοντέλου.

Τέλος στο θεωρητικό μοντέλο έχει προγραμματιστεί η ταχύτητα καθόδου της πλάκας συμπίεσης 1 mm/msec διότι είναι αποδοτικός ο χρόνος ανάλυσης και σε αυτή την ταχύτητα δεν εισάγονται ανεπιθύμητα αδρανειακά φαινόμενα. Σε περίπτωση που προγραμματιζόταν ο κώδικας με ταχύτητα χαμηλότερη θα αυξανόταν εκθετικά ο χρόνος

επίλυσης του κάθε αρχείου πεπερασμένων στοιχείων. Στο πείραμα η πρέσα έχει ρυθμιστεί με ταχύτητα καθόδου 40 mm/min που είναι μικρότερη από αυτή που έχει οριστεί στην προσομοίωση. Πιο συνοπτικά παρατίθενται όλα στον Πίνακα 4.1.

<b>Προσομοίωση</b>	<b>Πείραμα</b>
<p><b>Ιδεατό υλικό</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ισότροπο</li> <li>- ομοιογενές</li> <li>- δίχως ραφή συγκόλλησης</li> </ul>	<p><b>Υλικό με ατέλειες</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ανισότροπο</li> <li>- με συγκόλληση</li> <li>- δίχως να έχει το ίδιο πάχος σε όλο το μήκος του δοκιμίου</li> </ul>
<p><b>Ιδεατή γεωμετρία</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ακριβείς διαστάσεις</li> <li>- παράλληλα μέτωπα</li> <li>- ακριβής θέση οπών</li> <li>- κάθετα τοιχώματα</li> </ul>	<p><b>Γεωμετρία δοκιμίου, αποκλίσεις</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- στις διαστάσεις</li> <li>- στην παραλληλότητα των μετώπων</li> <li>- στην θέση των οπών</li> <li>- στην καθετότητα των τοιχωμάτων</li> </ul>
<p><b>Ακμές</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- τέλεια ορθή γωνία</li> <li>- ίδιο πάχος σε όλο το μήκος</li> </ul>	<p><b>Ακμές δοκιμίου</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- έστω και μικρή ακτίνα καμπυλότητας</li> <li>- αλλαγή πάχους κατά μήκος των ακμών</li> </ul>
<p><b>Οριακές συνθήκες</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- συντελεστές τριβής σταθεροί</li> <li>- Γραμμική επαφή μοντέλου – πλάκας συμπίεσης</li> <li>- Ταχύτητα πλάκας συμπίεσης 1 mm/msec</li> </ul>	<p><b>Οριακές συνθήκες</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Συντελεστές τριβής πιθανώς μεταβαλλόμενοι</li> <li>- Μέτωπο επαφής δοκιμίου – πλάκας συμπίεσης</li> <li>- Ταχύτητα πλάκας συμπίεσης 40mm/min</li> </ul>

**Πίνακας 4.1:** Σύνοψη διαφορών προσομοίωσης – πειράματος

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ LS-DYNA 3D

---

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

---

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αναλυτικά με στιγμιότυπα των συμπίεσεων συγκριτικά με τα αντίστοιχα στιγμιότυπα από τη πειραματική διαδικασία καθώς και χρήσιμα αποτελέσματα όπως η ενέργεια παραμόρφωσης, το μέγιστο και μέσο φορτίο, ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου και η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης.

#### 5.1.1 ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (PEAK CRUSH LOAD)

---

Το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  υπολογίζεται εύκολα από την μέγιστη τιμή όλων των μετρήσεων που λήφθηκαν μετά το πέρας των πειραμάτων:

$$P_{max} \text{ (kN)} = \text{Max}(P_i \text{ (kN)})$$

#### 5.1.2 ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ (MEAN CRUSH LOAD)

---

Το μέσο φορτίο  $P_m$  υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των φορτίων  $P_i$  που λήφθηκαν από το πείραμα, αν το διαιρέσουμε με το πλήθος των μετρήσεων  $n$ . Στην περίπτωση μας μετά από κάθε δοκιμή είχαμε τη δυνατότητα να παίρνουμε σαν μετρήσεις ανά χρονικό διάστημα 0.05 sec. Έτσι η ζητούμενη εξίσωση είναι:

$$P_m \text{ (kN)} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \text{ (kN)}}{n}$$

#### 5.1.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ (CRUSH FORCE EFFICIENCY)

---

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου φορτίου  $P_m$  με το μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{CFE (\%)} = \frac{P_m \text{ (kN)}}{P_{max} \text{ (kN)}}$$

#### 5.1.4 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (TOTAL ENERGY ABSORPTION)

Η συνολική ενέργεια που απορροφάται από την αξονική κατάρρευση των δοκιμίων υπολογίζεται στο πέρας της δοκιμής από το φορτίο, σύμφωνα με τον τύπο:

$$E_{\text{absorbed}} = \int P \cdot d\delta$$

όπου:

P: το φορτίο συμπίεσης του εμβόλου

δ: η κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου

Στην περίπτωση μας η ενέργεια παραμόρφωσης υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου φορτίου  $P_m$  με την τελική μετατόπιση του εμβόλου  $\delta_t$  από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{\text{absorbed}} \text{ (kJ)} = \frac{P_m \text{ (kN)} \cdot \delta_t \text{ (mm)}}{1000}$$

#### 5.1.5 ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (SPECIFIC ENERGY ABSORPTION)

Τέλος, η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης (SEA) ορίζεται σαν το γινόμενο της ενέργειας παραμόρφωσης/απορρόφησης  $E_{\text{absorbed}}$  με την μάζα του δοκιμίου  $m$  και είναι πολύ χρήσιμη όταν συγκρίνουμε δοκίμια που έχουν διαφορετικές μάζες και γεωμετρίες όπως και στην περίπτωση μας. Η εξίσωση που μας δίνει την ειδική ενέργεια παραμόρφωσης/απορρόφησης δίνεται αμέσως παρακάτω:

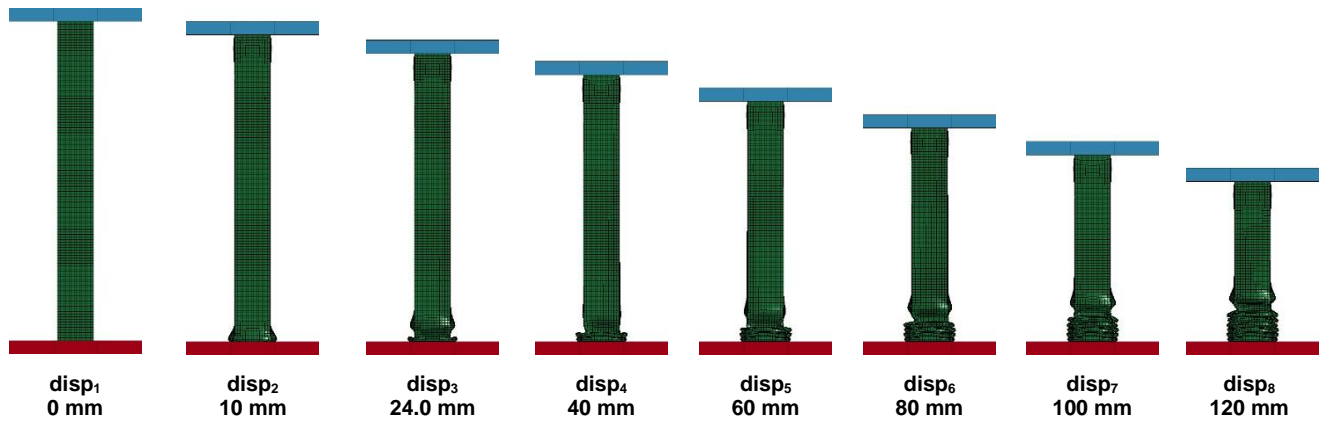
$$SEA = \frac{E_{\text{absorbed}}}{m}$$

## 5.2 ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

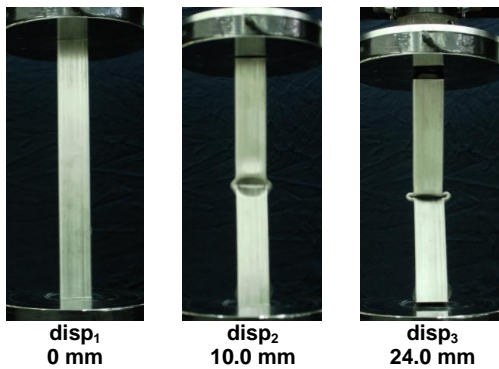
### 5.2.1 ΔΟΚΙΜΙΟ S0

#### Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

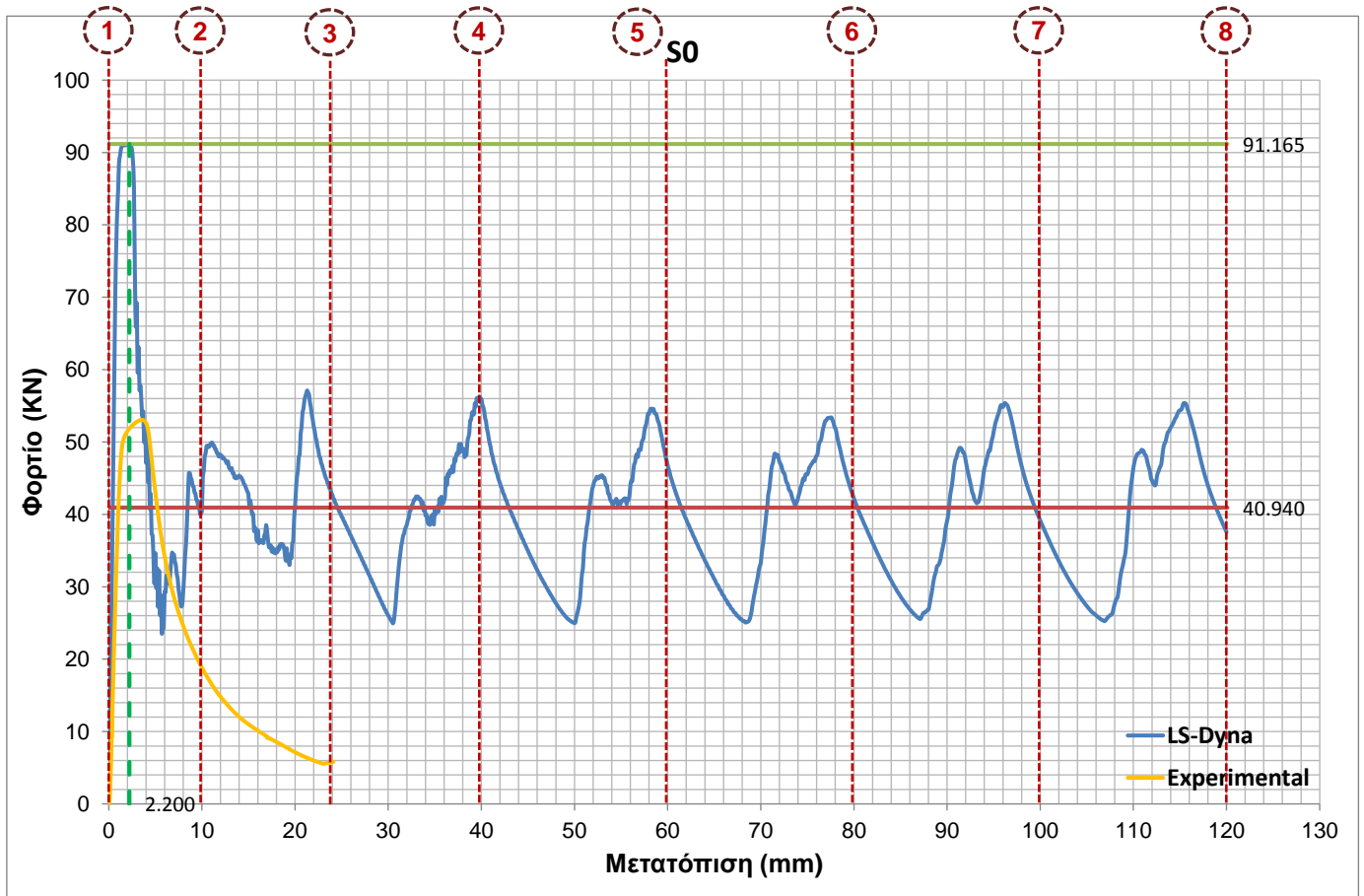


- Πειραματική διαδικασία



#### Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	24.122
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2828	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	4.913	0.500
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	17.372	1.769
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	91.165 στα 2.200 mm	53.046 στα 3.488 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	40.940	20.738
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	44.907	39.094

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Στο πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου παρατηρήθηκε στρεβλή κατάρρευση και για λόγους προστασίας το πείραμα διεκόπη όταν το έμβολο μετατοπίστηκε κατά 24.122 mm. Η μορφή της κατάρρευσης προσεγγίζει τον λυγισμό κατά Euler και όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες του πειράματος παρατηρείται μη εκτατός λοβός στο μέσο του δοκιμίου και η δημιουργία του αρχίζει όταν το έμβολο είναι στη θέση των 3.5 mm. Σε εκείνο το σημείο παρατηρείται και η υψηλότερη τιμή του φορτίου θλίψης. Όσο το έμβολο συνεχίζει να κατεβαίνει έχουμε ολοένα και πιο έντονο το φαινόμενο του λυγισμού, ο λοβός δεν ολοκληρώνεται και μειώνεται δραστικά το φορτίο του εμβόλου μέχρις ότου λόγω την υπερβολικής παραμόρφωσης, διεκόπη το πείραμα. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία δέκα εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου.

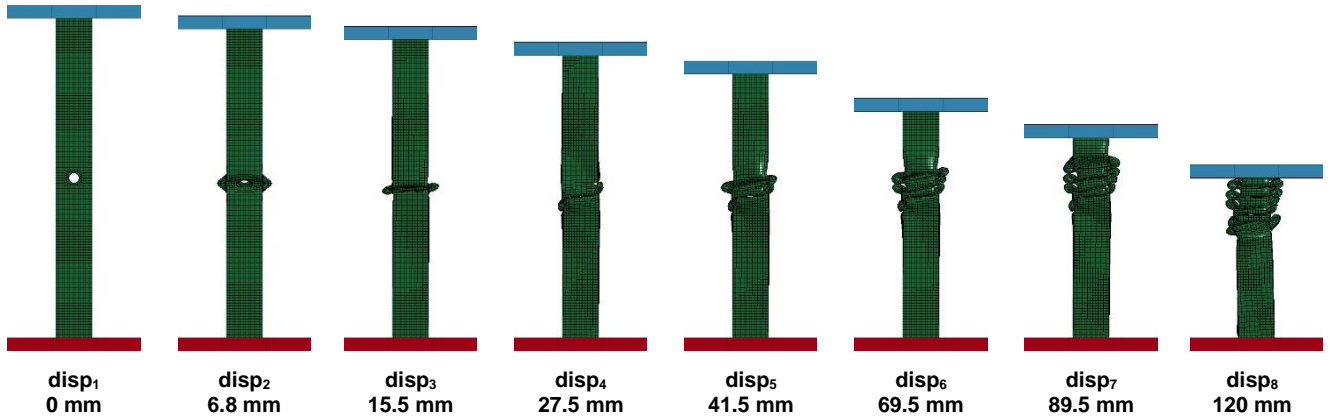


Η κατάρρευση στην αριθμητική προσομοίωση άρχισε από το κάτω μέρος του δοκιμίου, στην επαφή με την πλάκα της πρέσας, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στους υπόλοιπους εννέα λοβούς τα τοπικά ακρότατα των καμπυλών έχουν σχεδόν ίδια τιμή, με αρκετά μεγάλη μείωση σε σχέση με τον πρώτο λοβό. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA. Οι διαφορές (euler buckling στο πείραμα και προοδευτική κατάρρευση στο μοντέλο) οφείλονται στις παραδοχές που έχουν ληφθεί στο μοντέλο, βλ. Παράγραφο. 4.5.4.

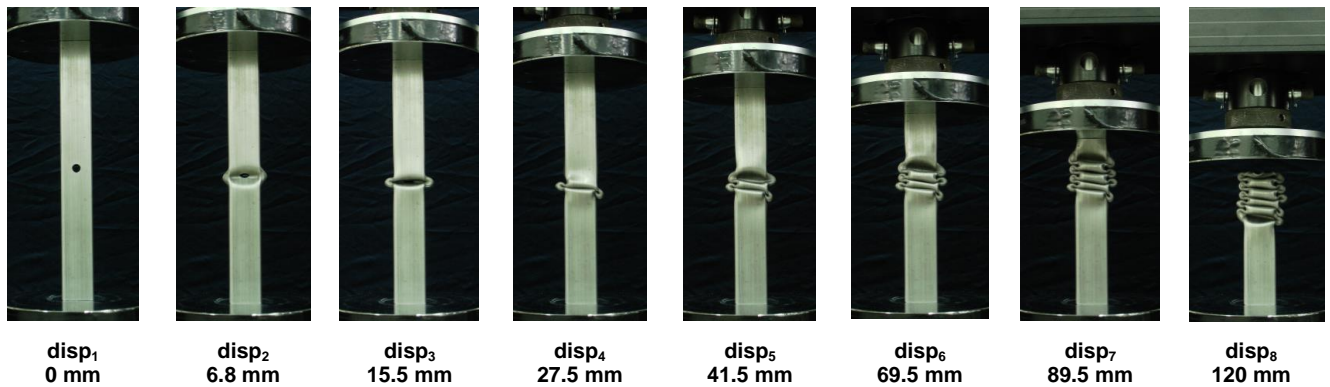
5.2.2 ΔΟΚΙΜΙΟ S1

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

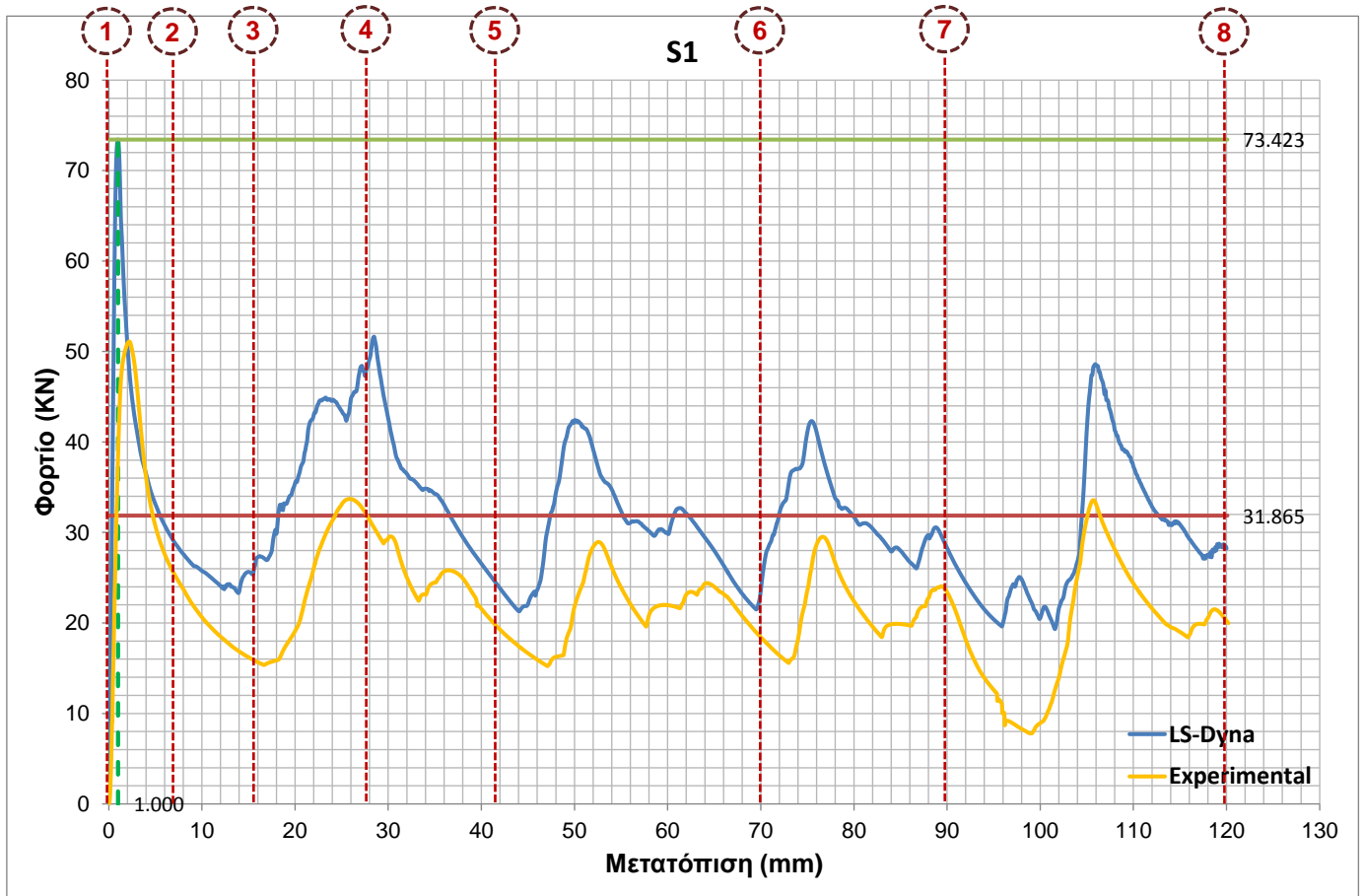


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.192
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2819	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.824	2.675
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.566	9.492
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	73.423 στα 1.000 mm	51.113 στα 2.191 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.865	22.259
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	43.400	43.549

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

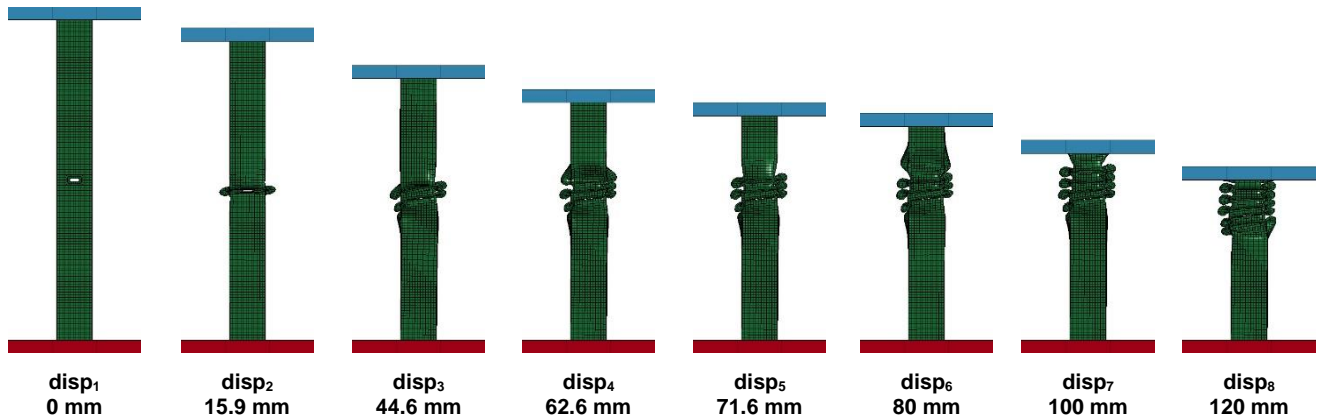
Τόσο στο **πείραμα** όσο και στην **αριθμητική προσομοίωση** παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με αισθητές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Τέλος, αναφερόμενοι στη πειραματική διαδικασία, χαρακτηριστική είναι η αστοχία που παρατηρείται σε διάφορα σημεία της ραφής της συγκόλλησης. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής, όπως παρατηρήθηκε από τα πειράματα, η διαμήκης ραφή συγκόλλησης ήταν ασθενής με αποτέλεσμα την αστοχία της (εκτεταμένη σε κάποιες περιπτώσεις). Έτσι, σε αρκετά δοκίμια οδηγεί σε στρεβλή κατάρρευση (όχι προοδευτική), με εκτεταμένη διάρρηξη των τοιχωμάτων που ξεκινά κυρίως από τις περιοχές των οπών. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται και στις μορφές των καμπυλών φορτίων – μετατόπισης όπως θα παρατηρηθεί και στα επόμενα δοκίμια τετραγωνικής διατομής.

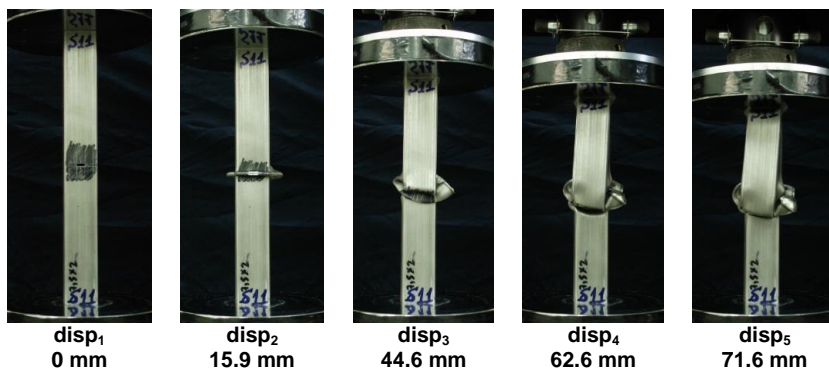
5.2.3 ΔΟΚΙΜΙΟ S11

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



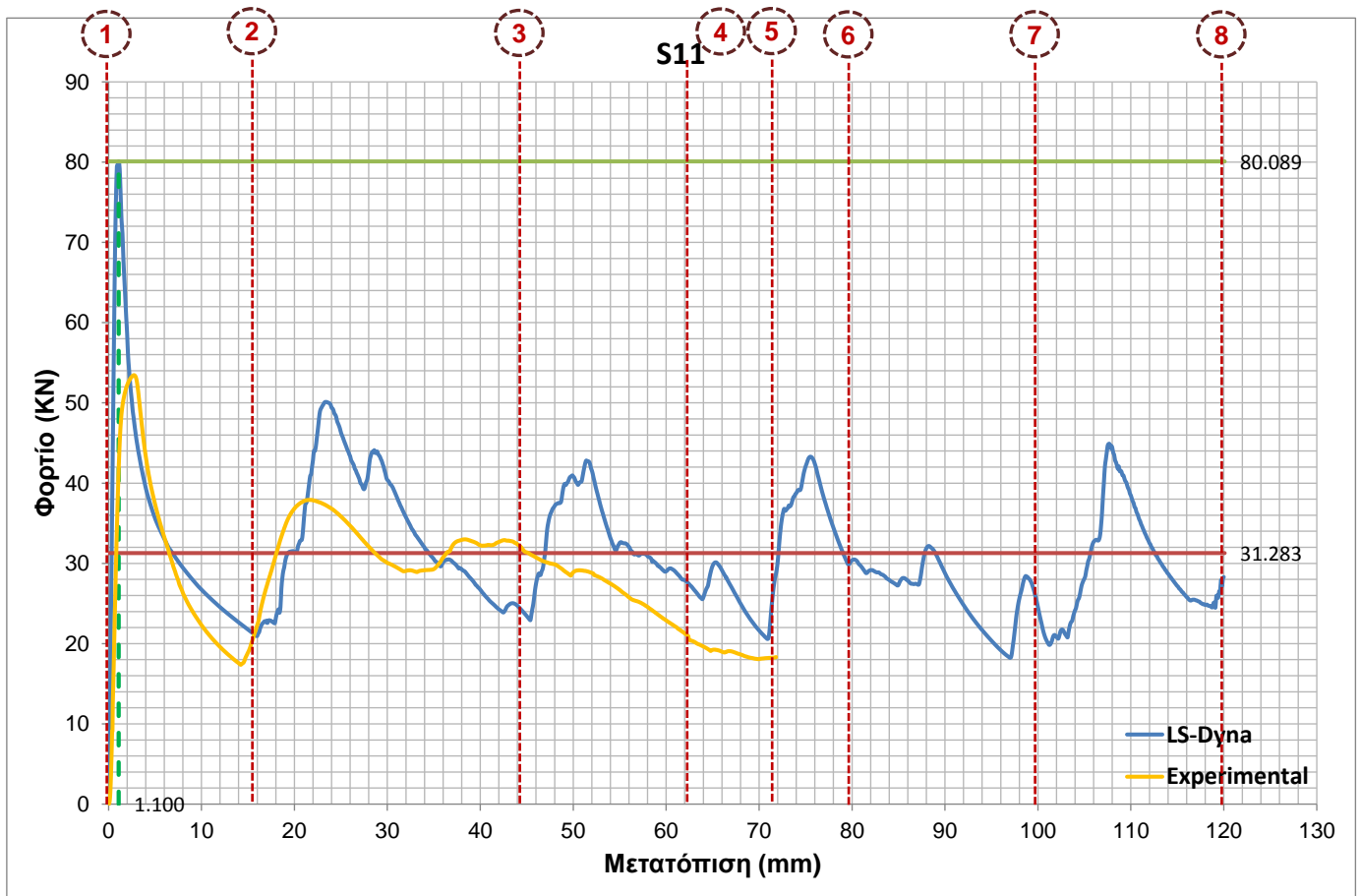
- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	71.825
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2825	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.754	2.052
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.288	7.262
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	80.089 στα 1.100 mm	53.449 στα 2.690 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.283	28.564
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	39.060	53.442

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Τρόπος κατάρρευσης

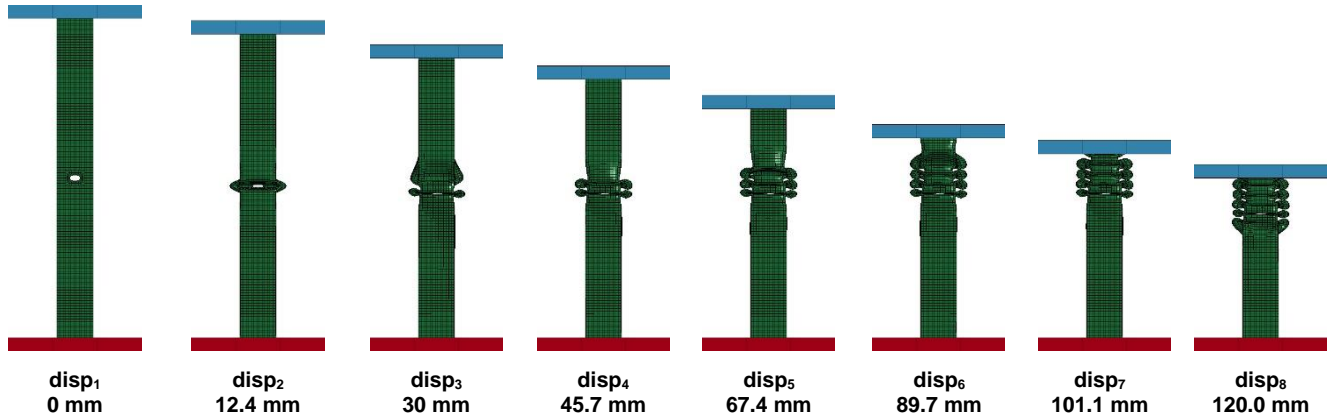
Στο **πείραμα**, στο υπό εξέταση δοκίμιο παρατηρήθηκε μη ιδανικός τρόπος κατάρρευσης της οποίας η μορφή προσεγγίζει λίγο τον λυγισμό κατά Euler. Παράλληλα παρατηρήθηκε ολική ρήξη της ραφής συγκόλλησης που οδήγησε μαζί με την στρεβλή κατάρρευση στον πρόωρο τερματισμό της δοκιμής για λόγους προστασίας όταν το έμβολο μετατοπίστηκε κατά 71.825 mm. Ο πρώτος μη εκτατός λοβός σχηματίστηκε όπως ήταν αναμενόμενο στην οπή του δοκιμίου, όπου έχουμε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αλλά η αστοχία στη ραφή αποδυνάμωσε την αντοχή του δοκιμίου και για αυτό το λόγο παρατηρείται σημαντική πτώση του φορτίου με την μείωση των τιμών των τοπικών ακρότατων των επόμενων λοβών να είναι πολύ μεγάλη. Παρατηρήθηκε η δημιουργία πέντε ατελών μη εκτατών λοβών όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Στην **αριθμητική προσομοίωση**

παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

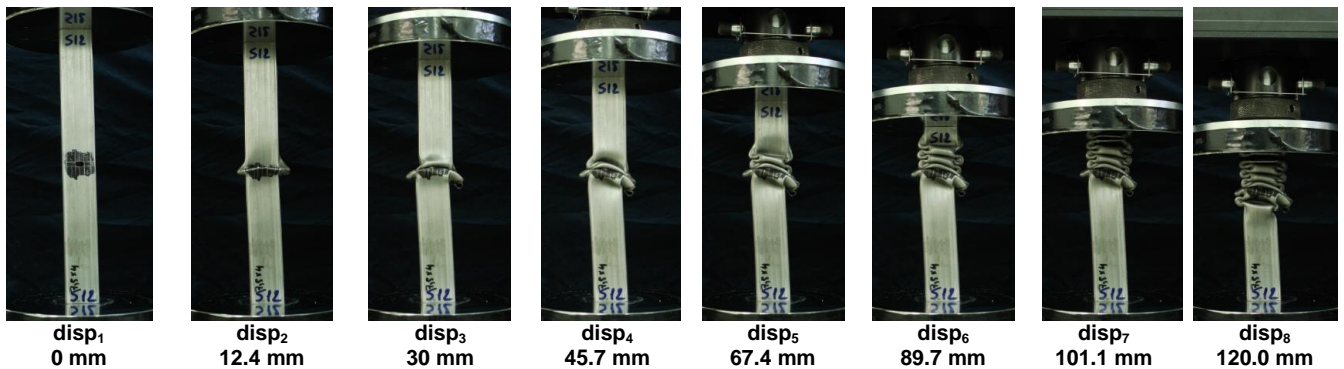
5.2.4 ΔΟΚΙΜΙΟ S12

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



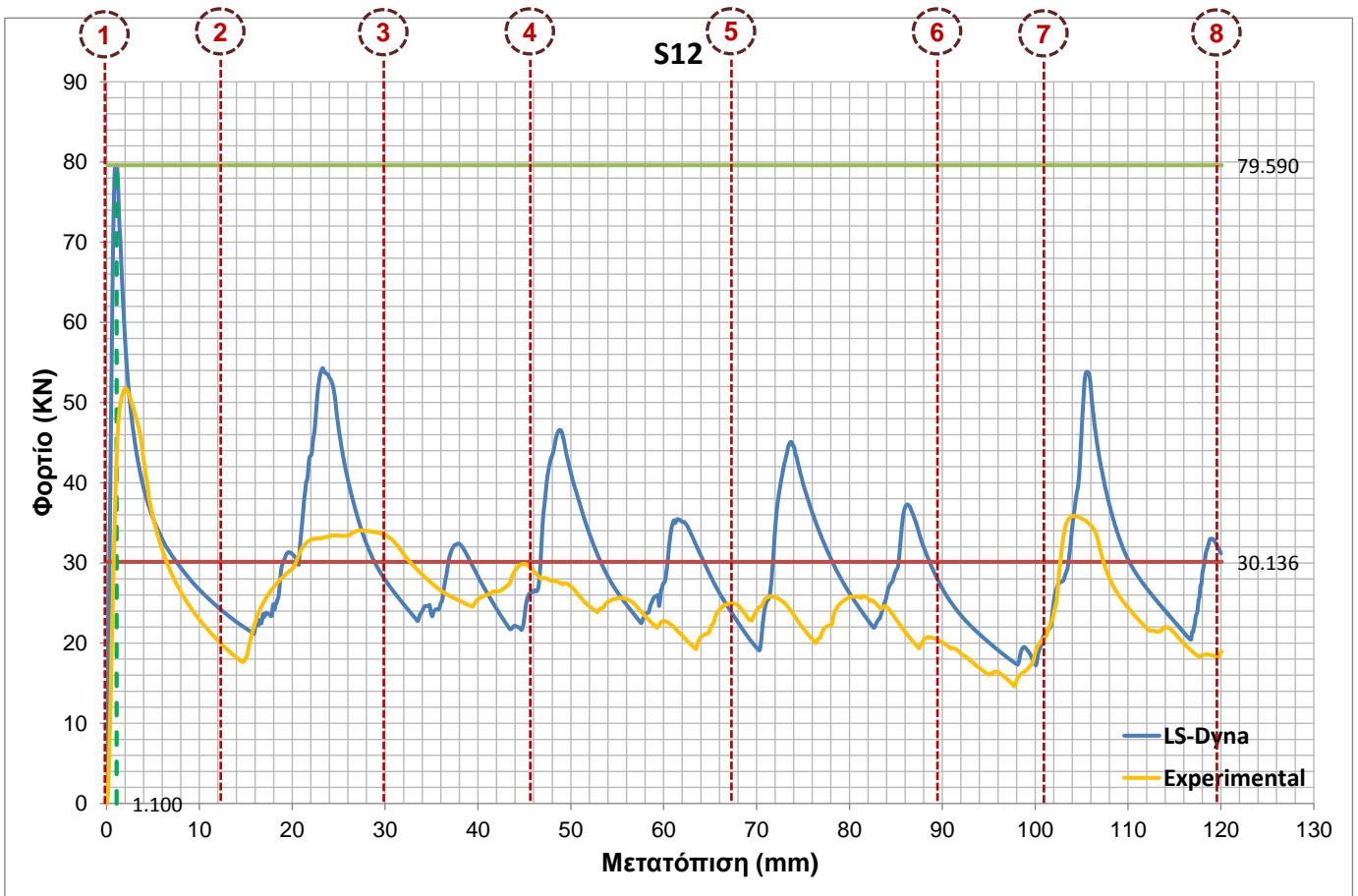
- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.081
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2822	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.616	3.063
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	12.813	10.852
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	79.590 στα 1.100 mm	51.758 στα 2.046 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	30.136	25.506
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	37.864	49.280



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

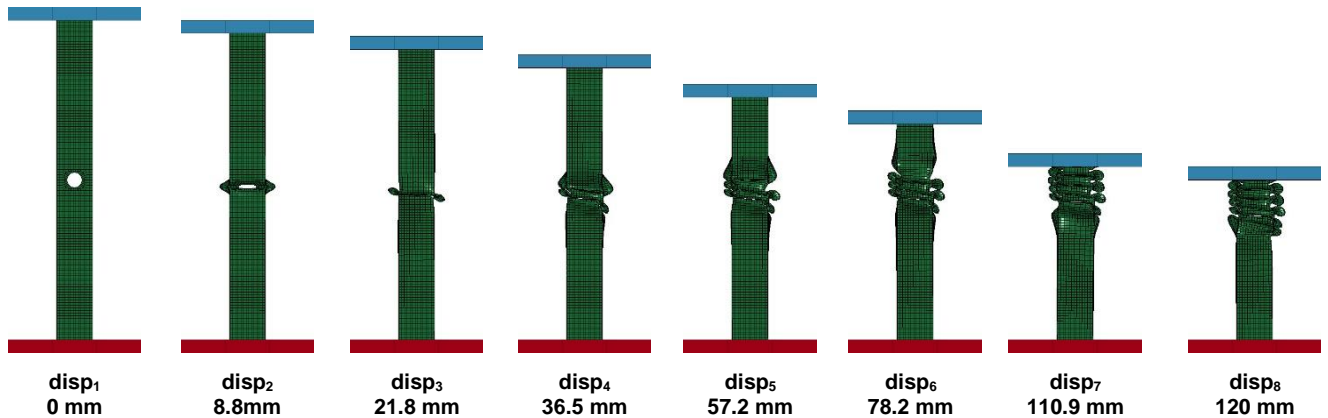
Στο πείραμα παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννιά μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ στον όγδοο και εννιά λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή

του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Τέλος, χαρακτηριστική είναι η αστοχία που παρατηρείται σε διάφορα σημεία της ραφής της συγκόλλησης που μάλιστα είναι αρκετά εκτεταμένη. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ στον όγδοο και ένατο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

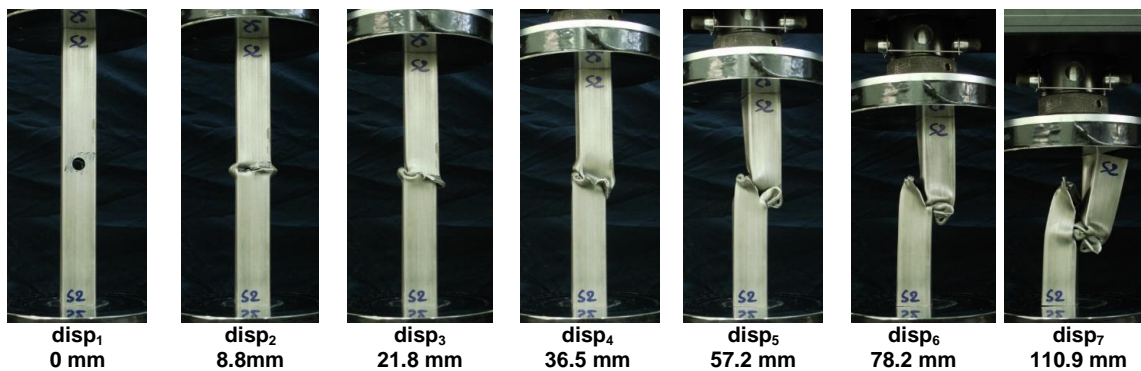
### 5.2.5 ΔΟΚΙΜΙΟ S2

#### Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

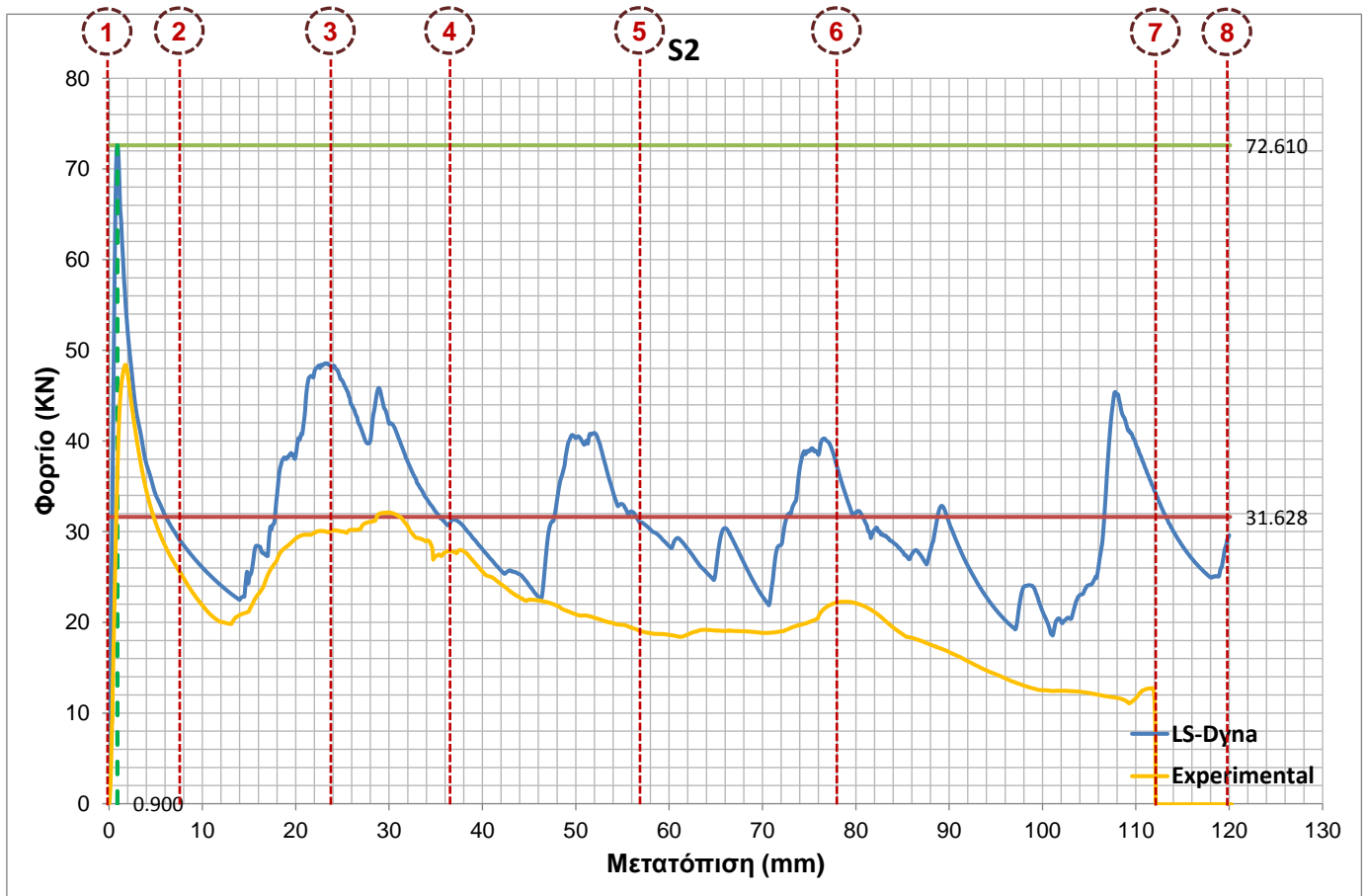


- Πειραματική διαδικασία



#### Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.257
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2807	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.795	2.430
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.520	8.655
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	72.610 στα 0.900 mm	48.402 στα 1.756 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.6284	20.204
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	43.559	41.741

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

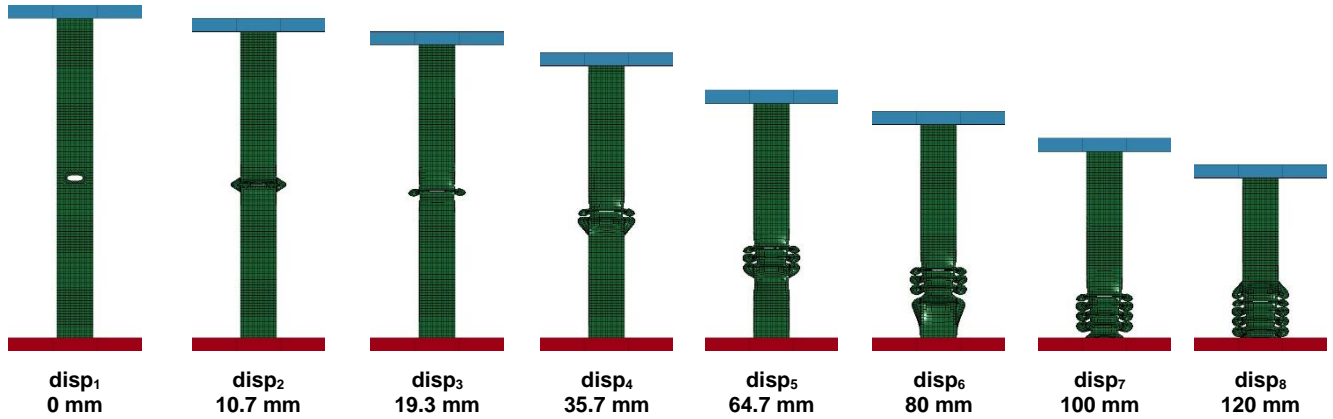
Στο **πείραμα** παρατηρήθηκε το φαινόμενο της θραύσης της οπής (σχίσσιμο), καθώς και ολίσθηση του δοκιμίου από τις πλάκες της πρέσας, πράγμα που οδήγησε σε μηδενισμό του φορτίου όταν το έμβολο μετατοπίστηκε στο διάστημα 112 έως 120 mm. Όπως αναμενόταν στην αρχή παρατηρήθηκε ο πρώτος μη εκτατός λοβός στο σημείο της οπής και συνοδεύτηκε από το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Στη συνέχεια όμως επήλθε θραύσης της οπής με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μη έκτακτη κατάρρευση και διάρρηξη του υλικού από την οπή και καθ' ύψος. Παράλληλα με το σχίσσιμο του δοκιμίου παρουσιάστηκαν άλλοι τρεις ατελείς μη εκτατοί λοβοί των οποίων τα τοπικά ακρότατα είχαν σημαντική μείωση λόγω της αστοχίας του υλικού. Εδώ δεν παρατηρήθηκε καθόλου ρήξη της ραφής μιας και οι τάσεις συγκεντρώθηκαν στην θραύση της οπής. Τέλος, λόγω της μεγάλης πλευρικής δύναμης, παρατηρήθηκε προς το τέλος του πειράματος ολίσθηση του δοκιμίου πάνω στις πλάκες γεγονός που φαίνεται στη καμπύλη φορτίου – μετατόπισης ως μηδενισμός του

φορτίου. Στην **αριθμητική προσομοίωση** παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

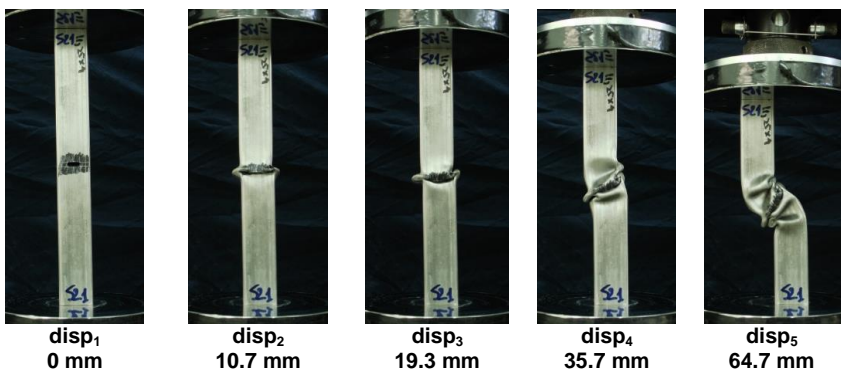
5.2.6 ΔΟΚΙΜΙΟ S21

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



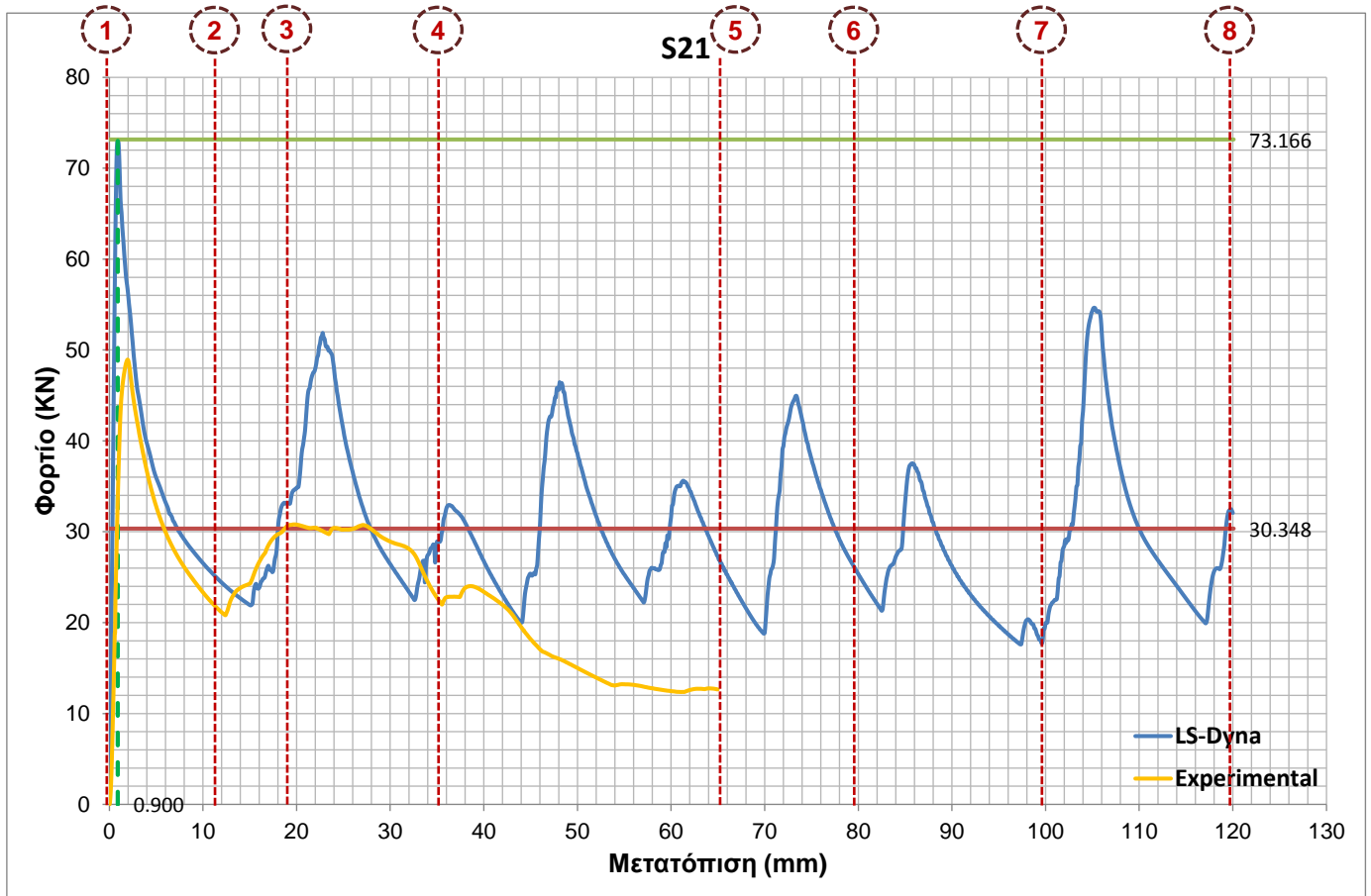
- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	64.983
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2819	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.642	1.508
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	12.917	5.350
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	73.166 στα 0.900 mm	48.939 στα 1.948 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	30.348	23.213
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	41.479	47.432

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Τρόπος κατάρρευσης

Στο πείραμα παρατηρείται μη ιδανική κατάρρευση του δοκιμίου η οποία προσεγγίζει τον λυγισμό κατά Euler. Συγκεκριμένα, ο πρώτος μη εκτατός λοβός παρατηρείται σύμφωνα με το αναμενόμενο στην οπή του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό παρατηρείται και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Όταν όμως το έμβολο μετατοπίστηκε κατά 44.7 mm παρατηρείται στρεβλή παραμόρφωση με το δοκίμιο να γέρνει προς τα πλάγια και με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν άλλοι τέσσερις ατελείς μη εκτατοί λοβοί των οποίων τα τοπικά ακρότατα έχουν μειωθεί δραστικά. Αξίζει να παρατηρηθεί εδώ ότι δεν σημειώθηκαν αστοχίες όπως θραύση οπής ή αστοχία της ραφής συγκόλλησης. Τέλος, λόγω της στρεβλής κατάρρευσης του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε πρόωρος τερματισμός της δοκιμής για λόγους προστασίας στην θέση των 64.983 mm του εμβόλου. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στη

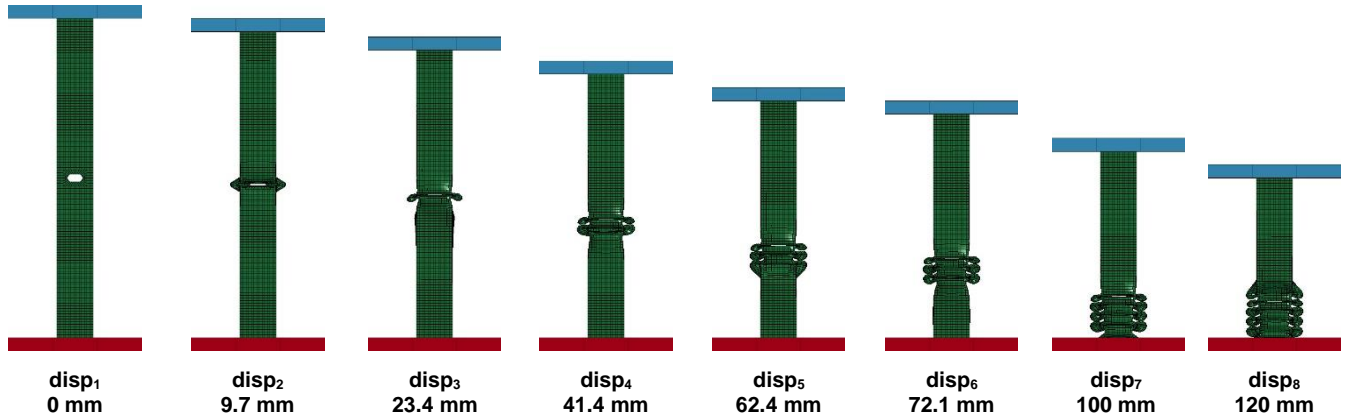
καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ στον όγδοο και ένατο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.



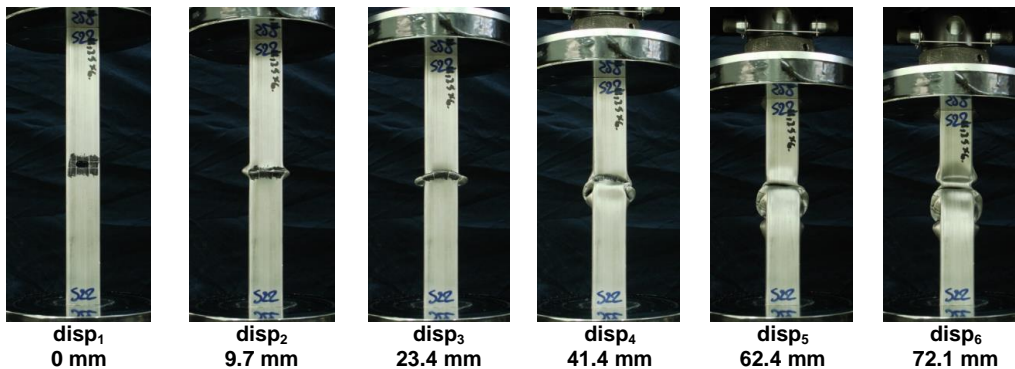
5.2.7 ΔΟΚΙΜΙΟ S22

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

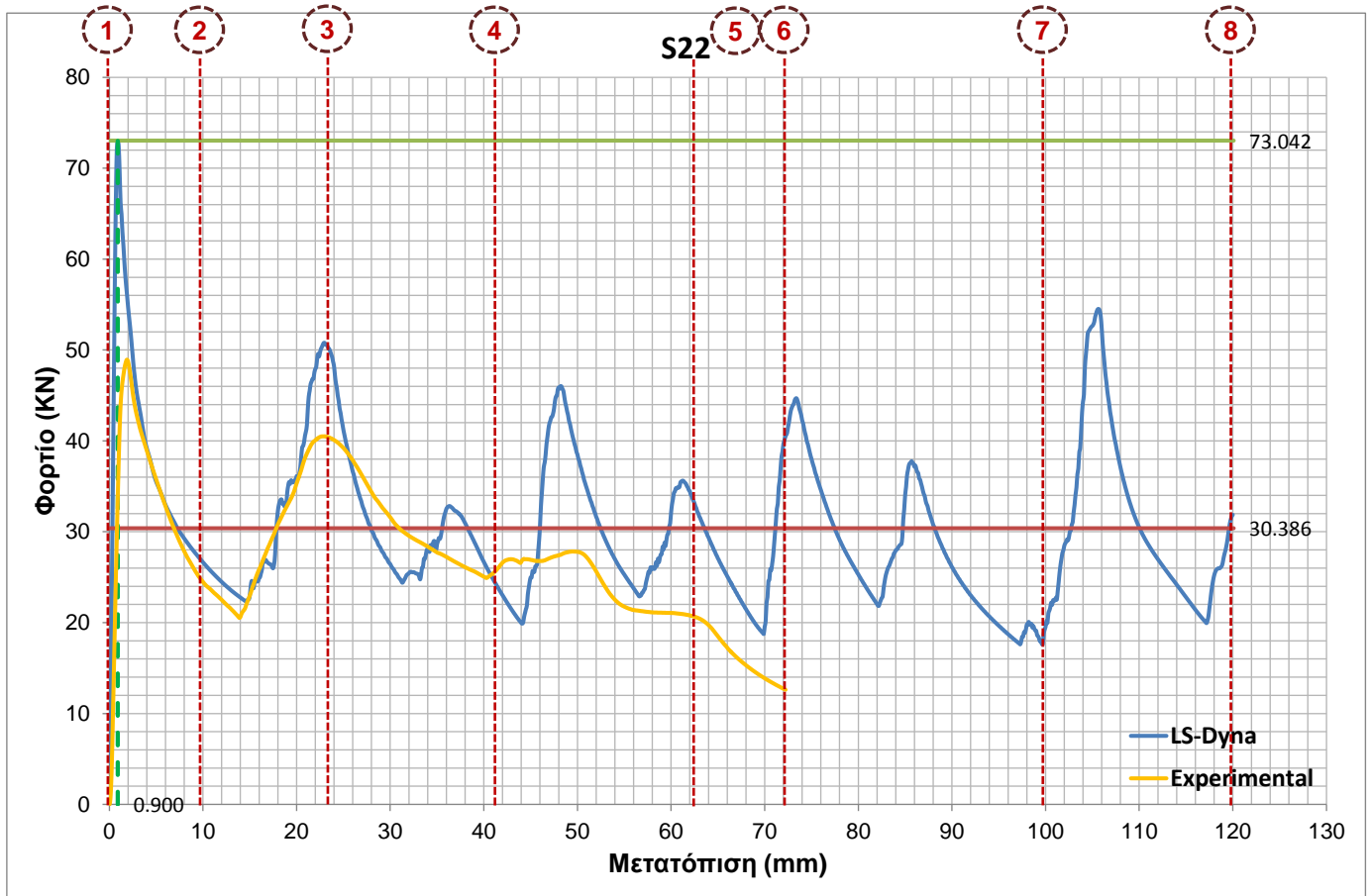


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	72.225
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2815	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.646	1.951
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	12.951	6.931
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	73.042 στα 0.900 mm	48.939 στα 1.890 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	30.386	27.017
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	41.601	55.206

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

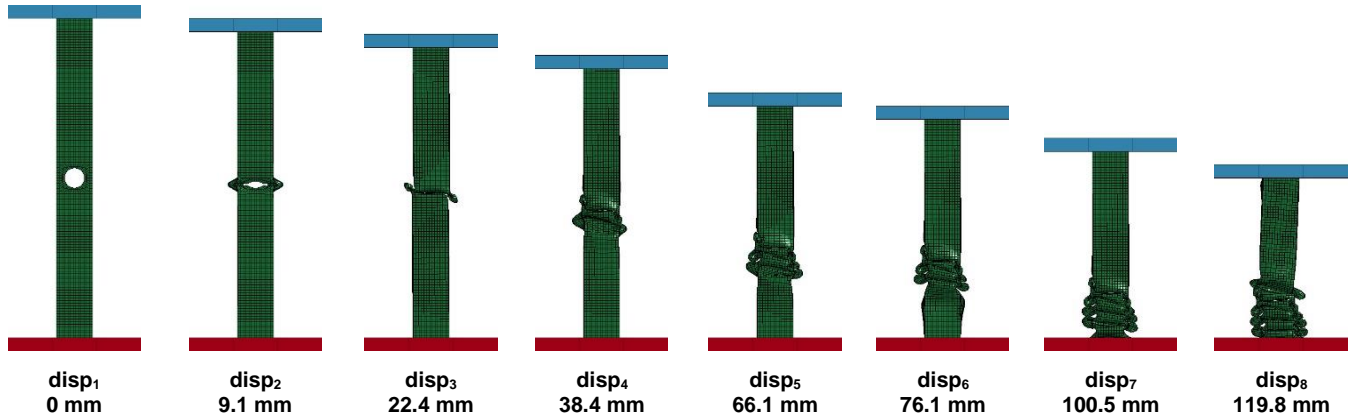
Στο πείραμα παρατηρείται μη ιδανική κατάρρευση του δοκιμίου η οποία προσεγγίζει τον λυγισμό κατά Euler. Συγκεκριμένα, ο πρώτος μη εκτατός λοβός παρατηρείται σύμφωνα με το αναμενόμενο στην οπή του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό παρατηρείται και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Όταν όμως το έμβολο μετατοπίστηκε κατά 44.7 mm παρατηρείται στρεβλή παραμόρφωση με το δοκίμιο να γέρνει προς τα πλάγια και με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν άλλοι πέντε ατελείς μη εκτατοί λοβοί των οποίων τα τοπικά ακρότατα έχουν μειωθεί δραστικά. Αξίζει να παρατηρηθεί εδώ ότι δεν σημειώθηκαν αστοχίες όπως θραύση οπής ή αστοχία της ραφής συγκόλλησης. Τέλος, λόγω της στρεβλής κατάρρευσης του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε πρόωρος τερματισμός της δοκιμής για λόγους προστασίας στην θέση των 72.225 mm του εμβόλου. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στη

καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ στον όγδοο και ένατο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

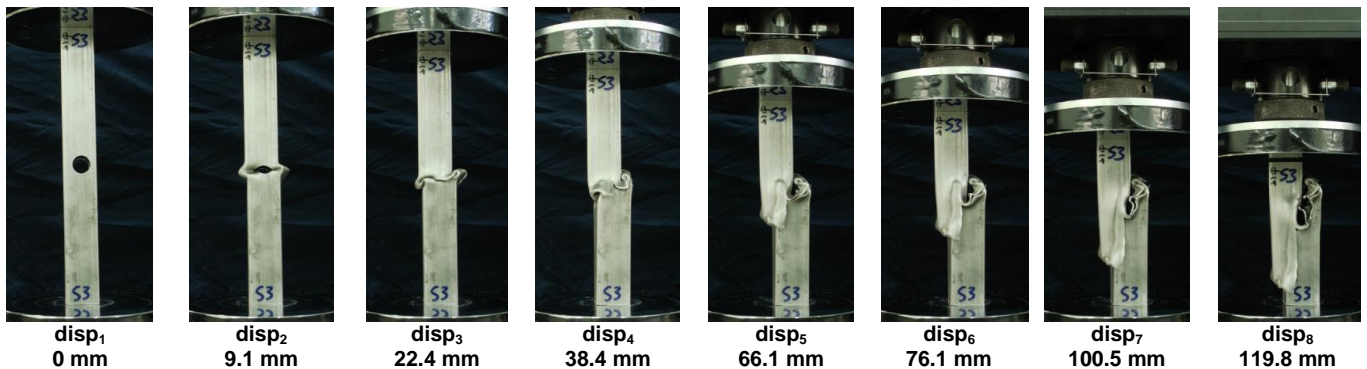
5.2.8 ΔΟΚΙΜΙΟ S3

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

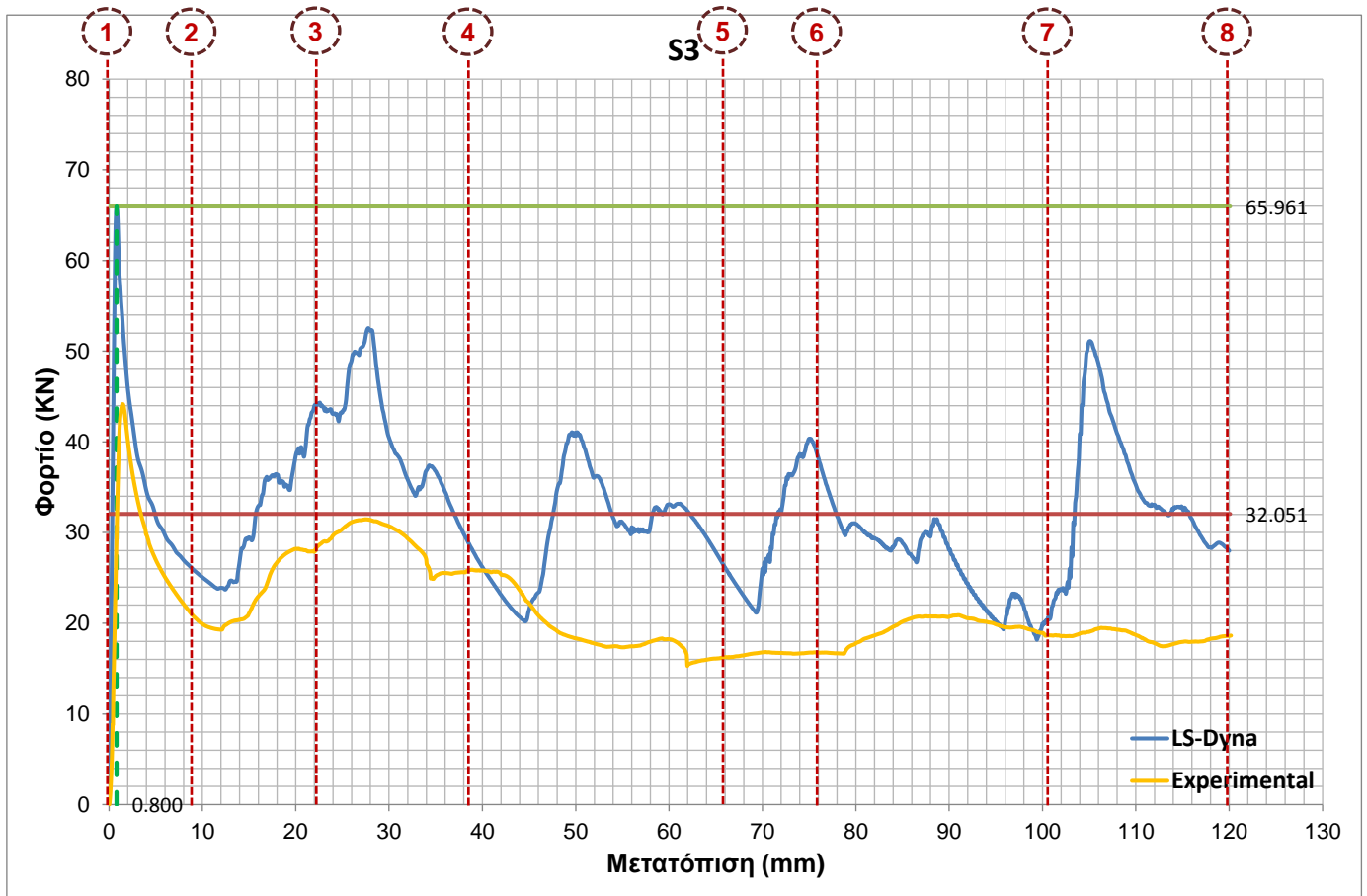


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.190
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου m (Kg)	0.2791	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.846	2.569
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.781	9.207
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	65.961 στα 0.800 mm	44.161 στα 1.455 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.051	21.379
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	48.591	48.411

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

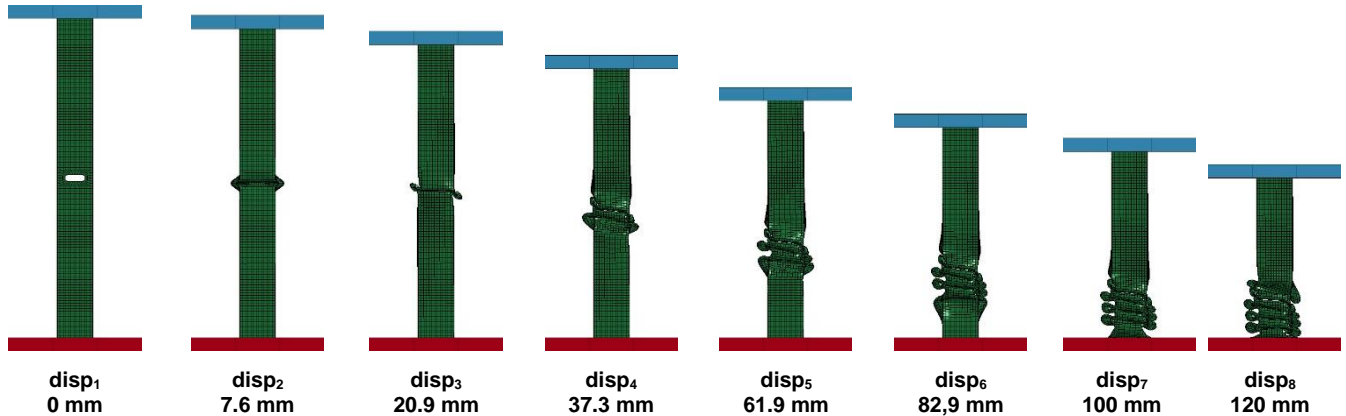
Στο **πείραμα** παρατηρείται μεγάλη ομοιότητα με το δοκίμιο S2. Εμφανίζεται το φαινόμενο της θραύσης της οπής (σχίσσιμο) καθώς και ρήξη της ραφής. Όπως αναμενόταν στην αρχή παρατηρήθηκε ο πρώτος μη εκτατός λοβός στο σημείο της οπής και συνοδεύτηκε από το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης. Στη συνέχεια όμως επήλθε θραύσης της οπής με αποτέλεσμα να παρατηρηθεί μη ιδανική κατάρρευση και διάρρηξη του υλικού από την οπή και καθ' ύψος. Όταν το έμβολο είχε μετατοπιστεί κατά 2.5 mm παρουσιάστηκε και ρήξη της ραφής που συνοδεύτηκε με ηχητικό σήμα. Δεν παρατηρήθηκε δημιουργία άλλων ατελών λοβών. Τέλος, παρατηρήθηκε και μια μικρή μετατόπιση (ολίσθηση) της βάσης του δοκιμίου πάνω στη πλάκα που συνοδεύτηκε επίσης με ηχητικό σήμα. Παρόλη την ιδιόμορφη κατάρρευση, το έμβολο έφτασε την επιθυμητή μετατόπιση των 120 mm. Στην **αριθμητική προσομοίωση** παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις

χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της σπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

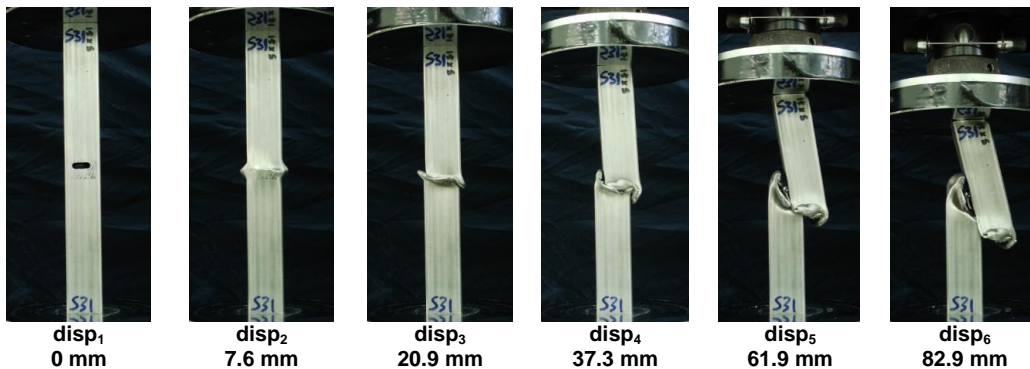
5.2.9 ΔΟΚΙΜΙΟ S31

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

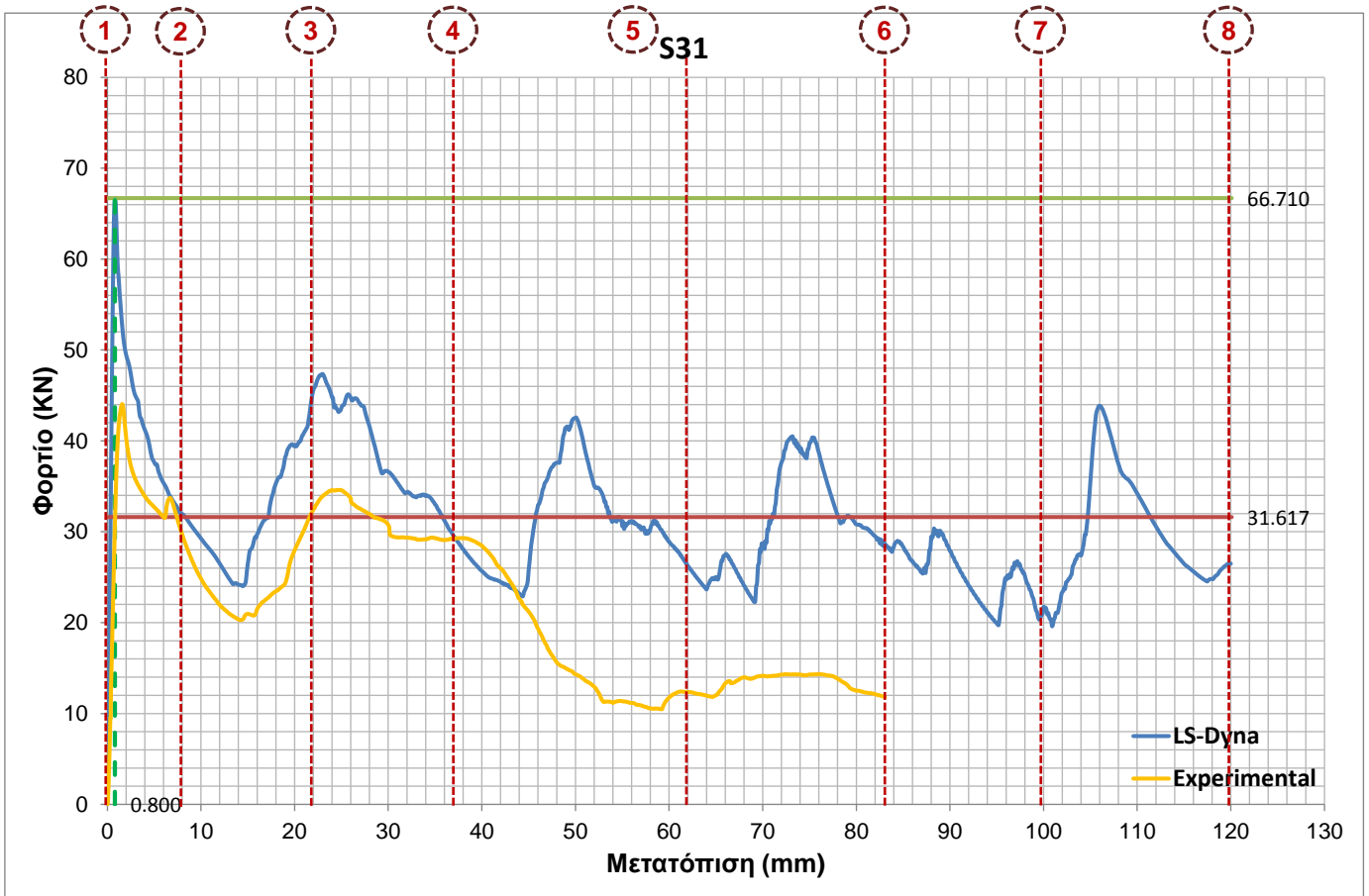


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	83.056
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2813	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.794	1.791
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.486	6.365
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	66.710 στα 0.800 mm	44.053 στα 1.587 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.617	21.561
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	47.395	48.942

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Στο πείραμα έχουμε μη ιδανική στρεβλή κατάρρευση που συνοδεύεται με θραύση της οπής και διάρρηξη του υλικού καθ' ύψος. Στη θέση της οπής παρουσιάστηκε μη εκτατός λοβός. Δεν παρατηρήθηκε δημιουργία άλλων ατελών λοβών. Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε ότι δεν εμφανίστηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης με την μεγάλη συγκέντρωση τάσεων να βρίσκεται στην διάρρηξη του υλικού. Ακόμη, παρατηρήθηκε και μια μικρή μετατόπιση (ολίσθηση) της βάσης του δοκιμίου πάνω στη πλάκα που συνοδεύτηκε με ηχητικό σήμα. Τέλος, λόγω της συγκεκριμένης μορφής κατάρρευσης του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε πρόωρος τερματισμός της δοκιμής για λόγους προστασίας στην θέση των 83.056 mm του εμβόλου. Στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως

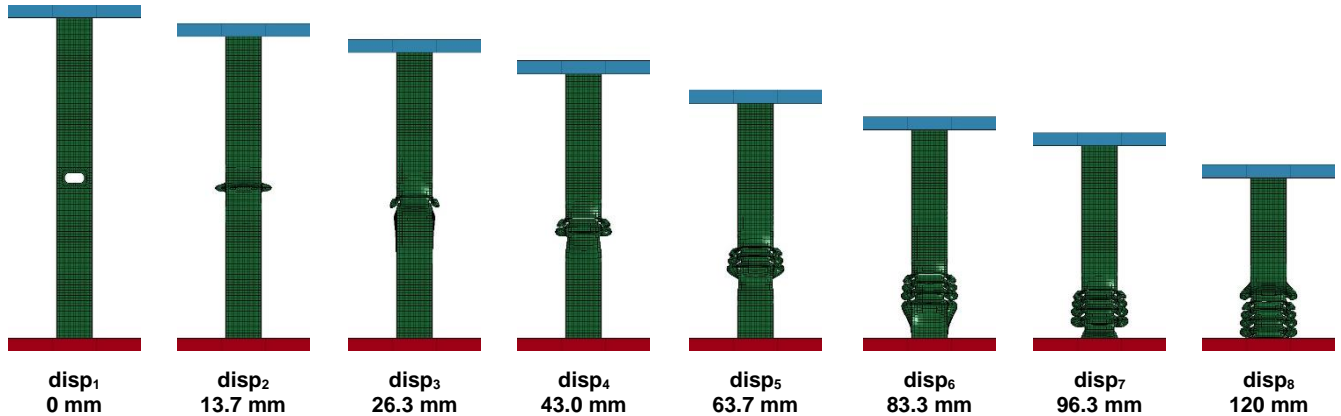


αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της σπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

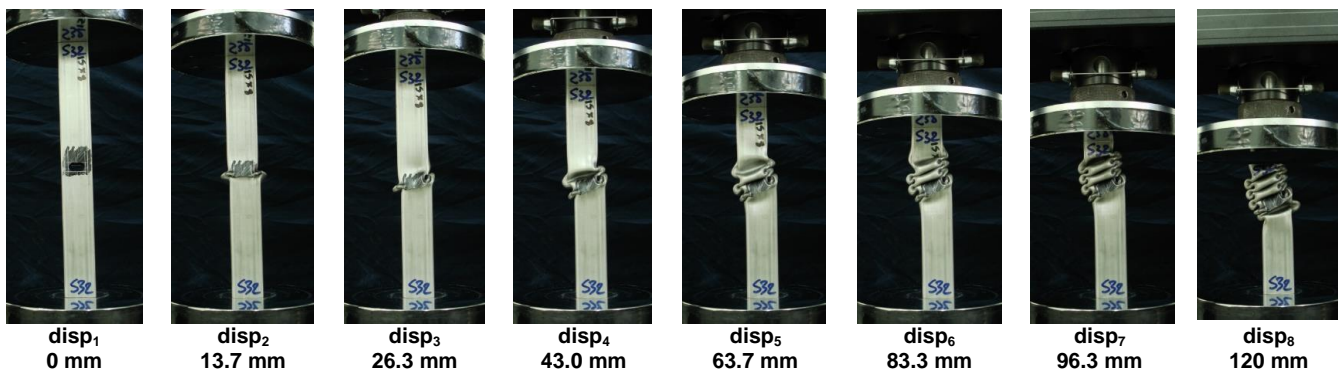
5.2.10 ΔΟΚΙΜΙΟ S32

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

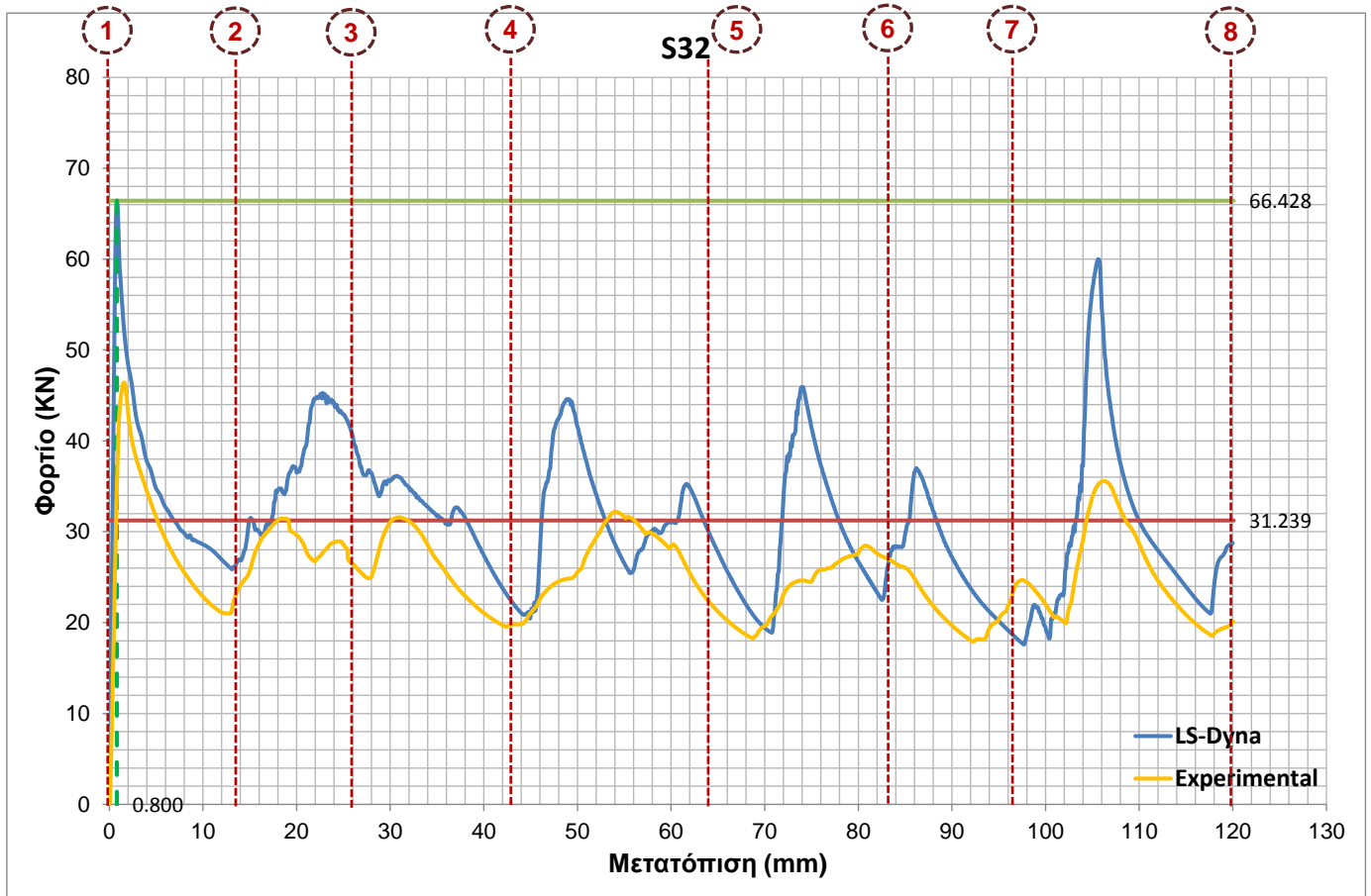


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.058
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	157.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.2806	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.749	3.066
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	13.361	10.928
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	66.428 στα 0.800 mm	46.429 στα 1.556 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.239	25.538
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	47.027	55.005

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Στο πείραμα παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ μη εκατών λοβών με μια μικρή στρέβλωση, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η

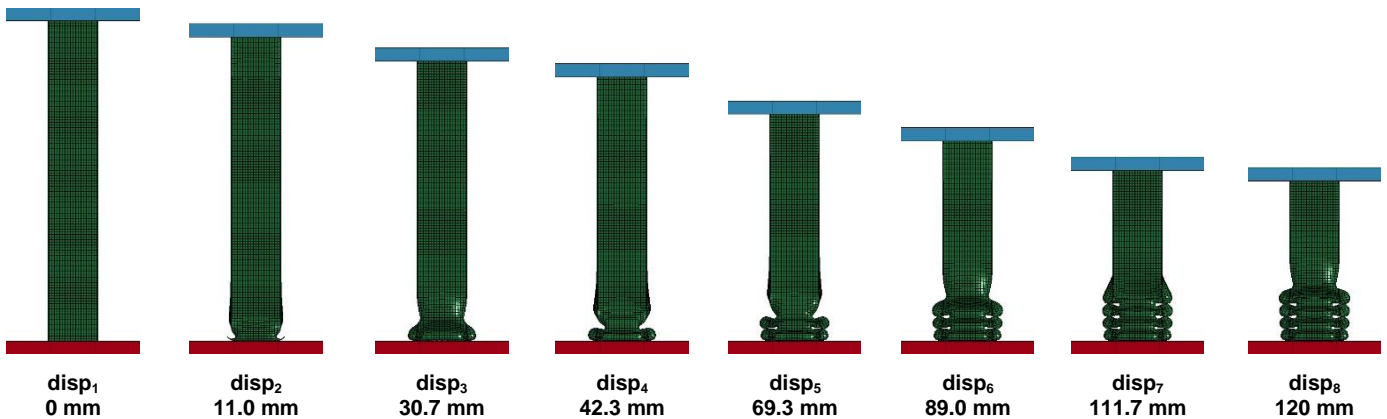
περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Τέλος, χαρακτηριστική είναι η αστοχία που παρατηρείται σε διάφορα σημεία της ραφής της συγκόλλησης. Στην **αριθμητική προσομοίωση** παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ στον όγδοο και ένατο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα LS-DYNA.

### 5.3 ΔΟΚΙΜΙΑ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

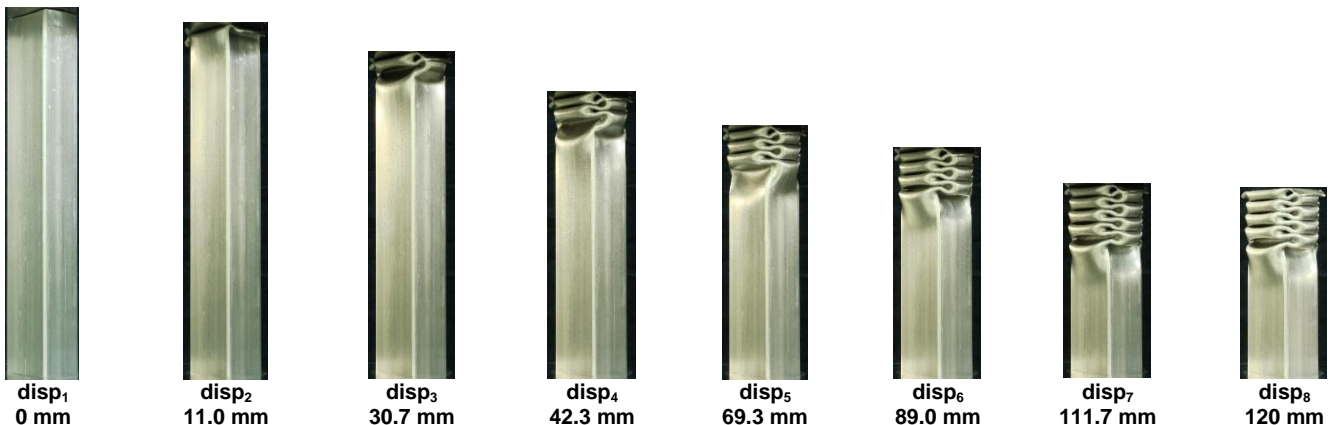
#### 5.3.1 ΔΟΚΙΜΙΟ R0

##### Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



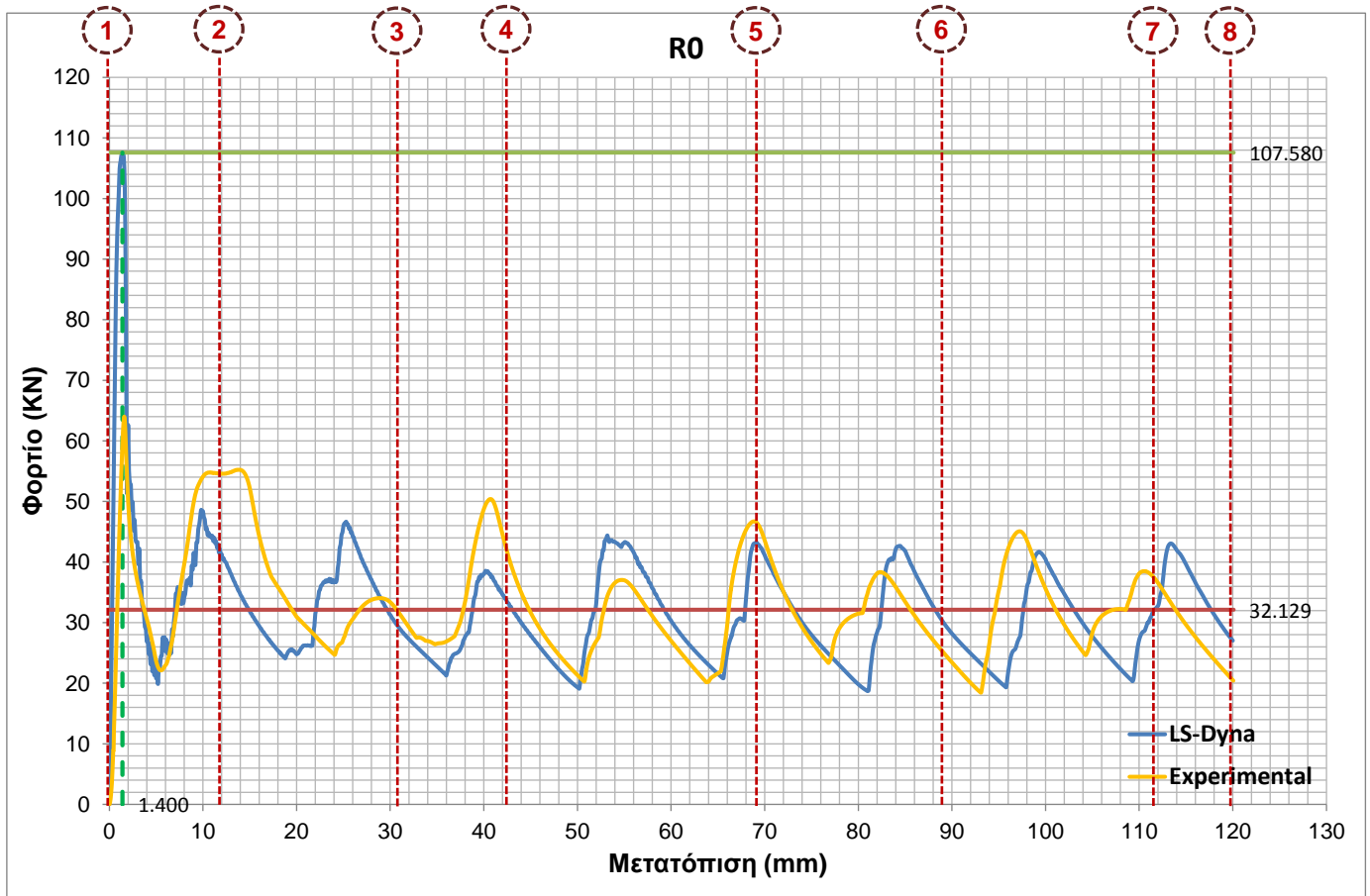
- Πειραματική διαδικασία



##### Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.057
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3332	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.855	3.951
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.570	11.856
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	107.580 στα 1.400 mm	63.999 στα 1.587 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.129	32.907
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	29.865	51.418

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Τρόπος κατάρρευσης

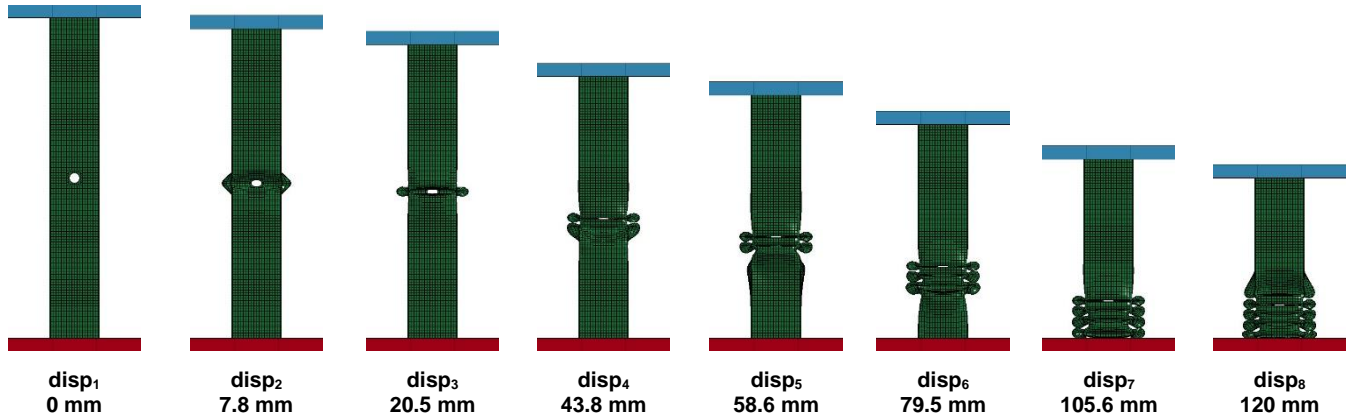
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Η κατάρρευση στο πείραμα άρχισε από το πάνω μέρος του δοκιμίου, στην επαφή με την πλάκα της πρέσας, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στην αριθμητική προσομοίωση η κατάρρευση είναι ακριβώς ίδια με την διαφορά ότι ξεκίνησε από το κάτω μέρος του δοκιμίου. Στους υπόλοιπους επτά λοβούς τα τοπικά ακρότατα των καμπυλών έχουν σχεδόν ίδια τιμή, με αρκετά μεγάλη μείωση σε σχέση με τον

πρώτο λοβό. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Τέλος και πολύ σημαντικό, κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρούμε η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

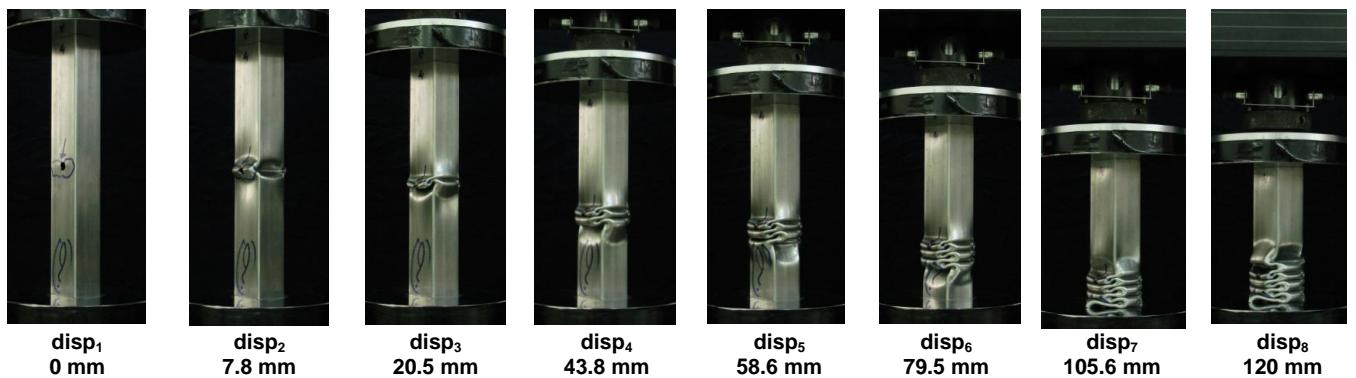
5.3.2 ΔΟΚΙΜΙΟ R1

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



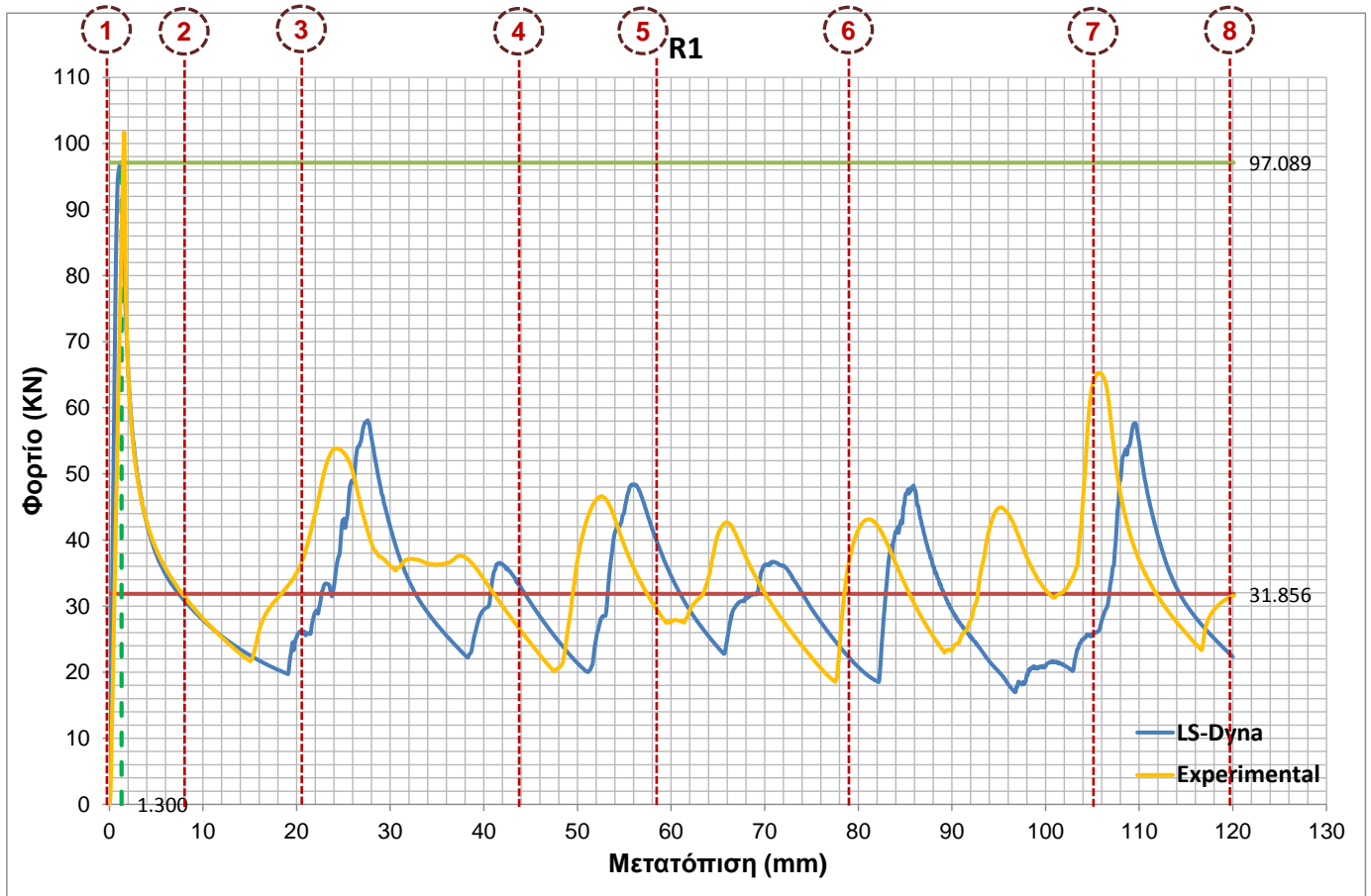
- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.125
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3323	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.823	4.202
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.504	12.644
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	97.089 στα 1.300 mm	101.690 στα 1.589 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.856	34.978
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	32.811	34.396



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

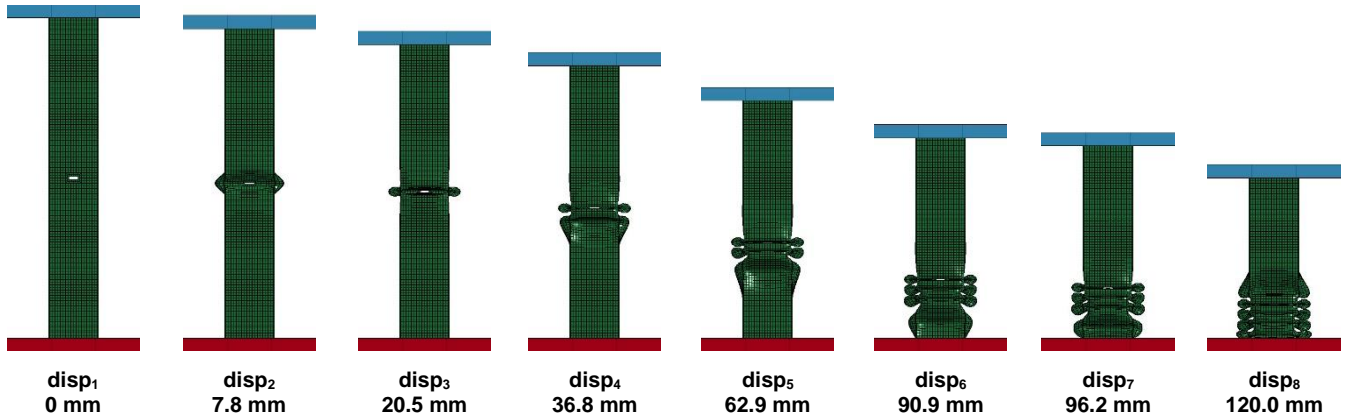
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής, όπως παρατηρήθηκε από τα πειράματα, η ποιότητα της διαμήκου ραφής συγκόλλησης ήταν πολύ υψηλότερη από αυτή των δοκιμίων τετραγωνικής διατομής. Επίσης, στην προοδευτική κατάρρευση (πειραματικά), των δοκιμίων ορθογωνικής διατομής φαίνεται ότι παίζει ρόλο και η καλύτερη επιφάνεια έδρασης των μετώπων. Τα παραπάνω παρατηρούνται και στα υπόλοιπα δοκίμια ορθογωνικής διατομής.

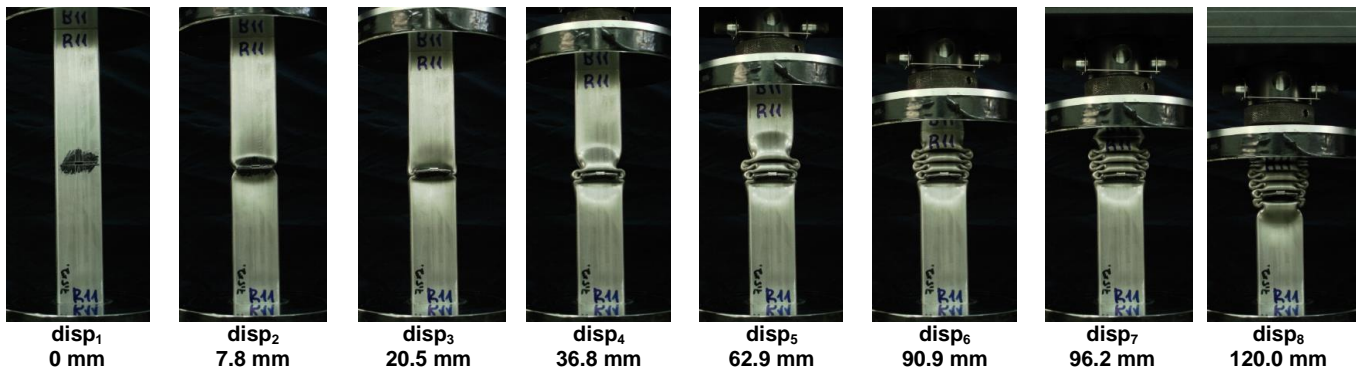
5.3.3 ΔΟΚΙΜΙΟ R11

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

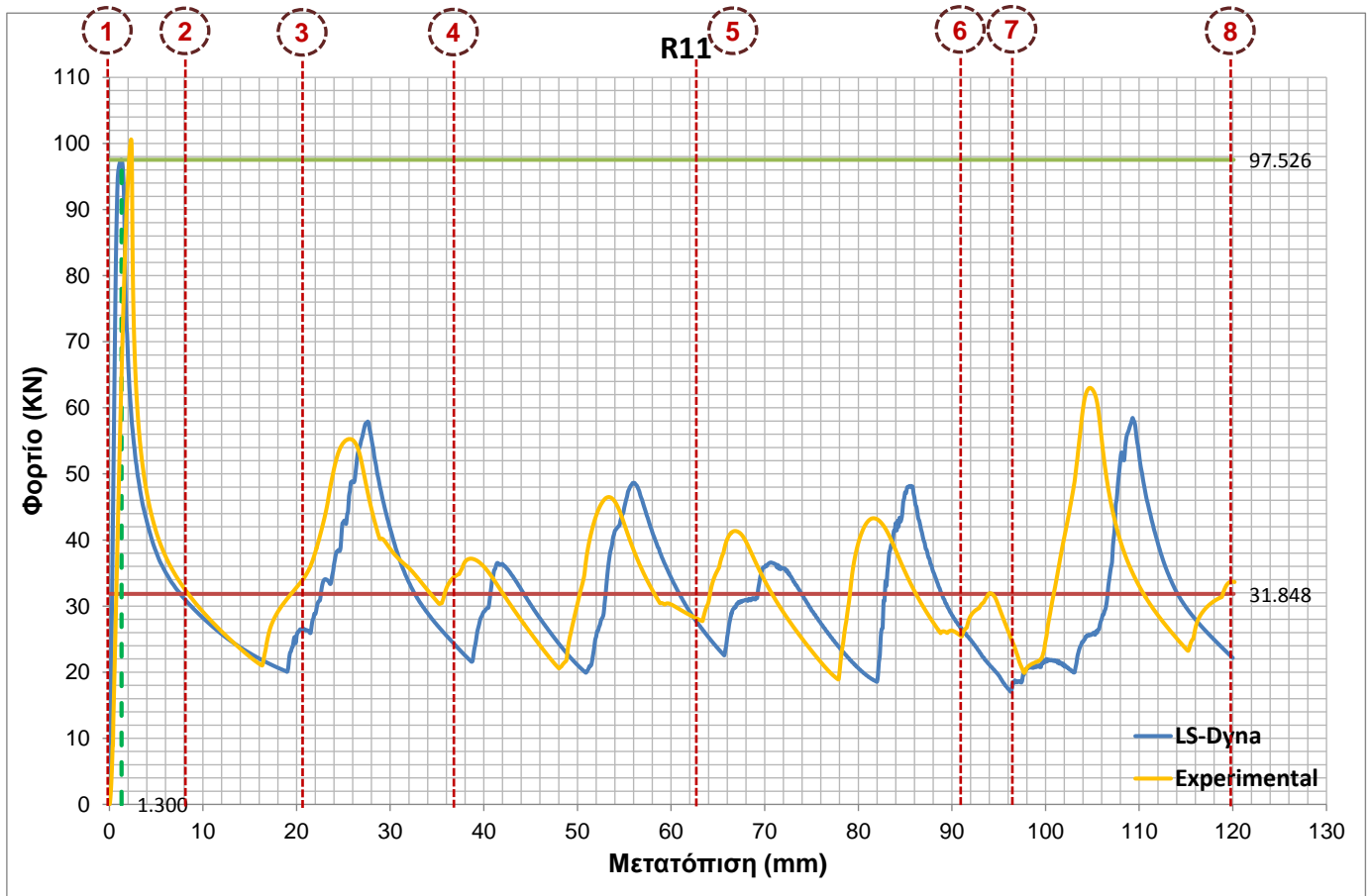


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.257
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3329	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.822	4.121
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.479	12.378
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	97.526 στα 1.300 mm	100.616 στα 2.323 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.828	34.267
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	32.656	34.058

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

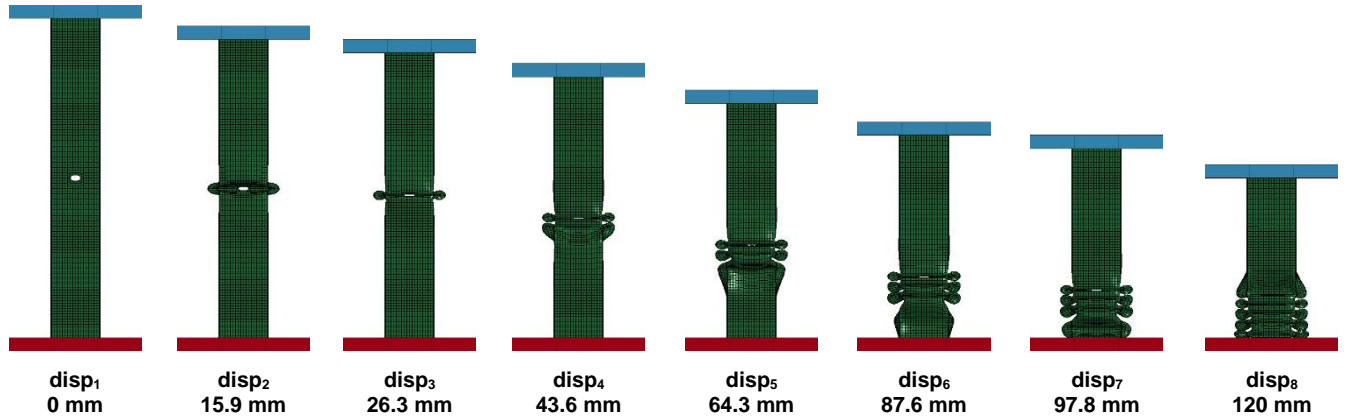
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθησαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

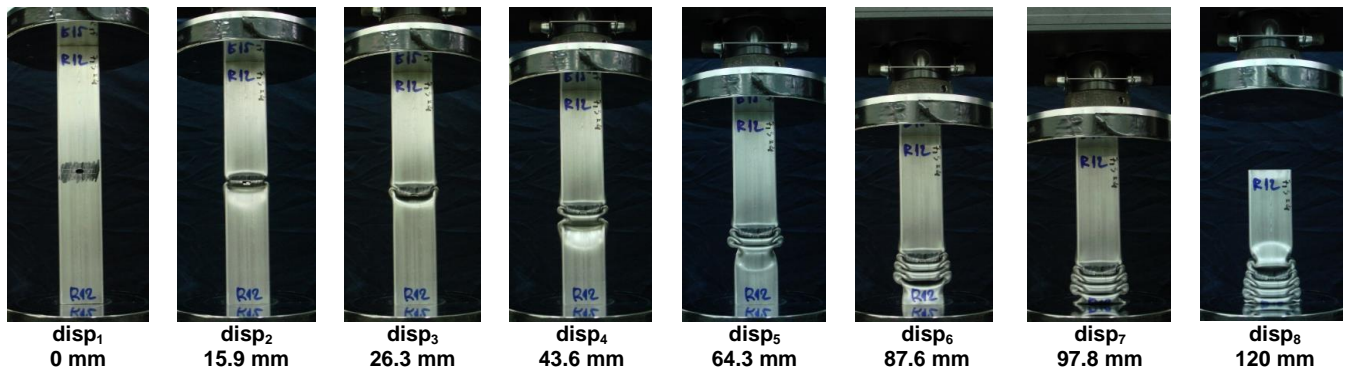
5.3.4 ΔΟΚΙΜΙΟ R12

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

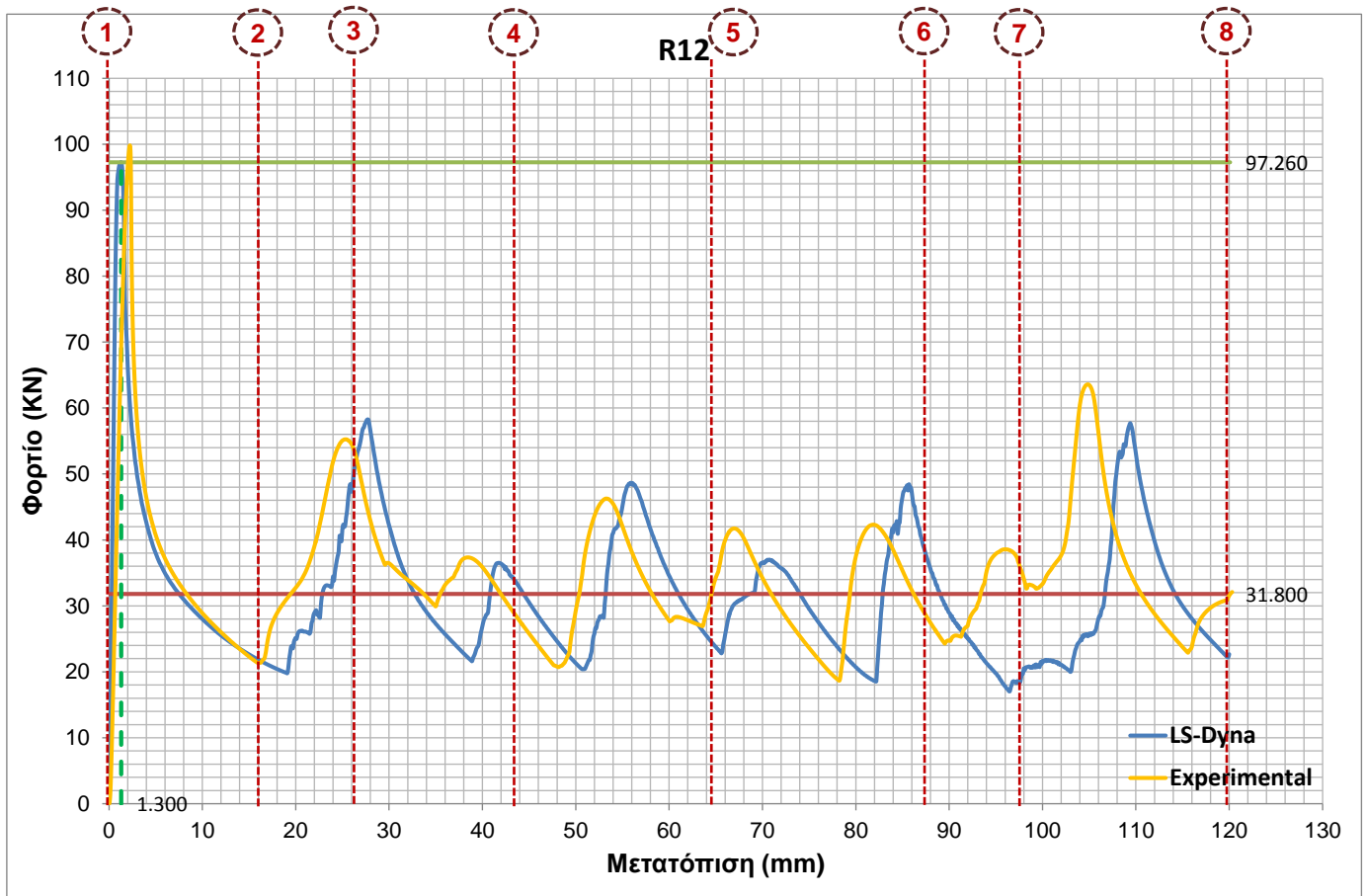


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.321
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3327	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.816	4.155
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.471	12.490
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	97.260 στα 1.300 mm	99.811 στα 2.251 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.800	34.532
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	32.695	34.598

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

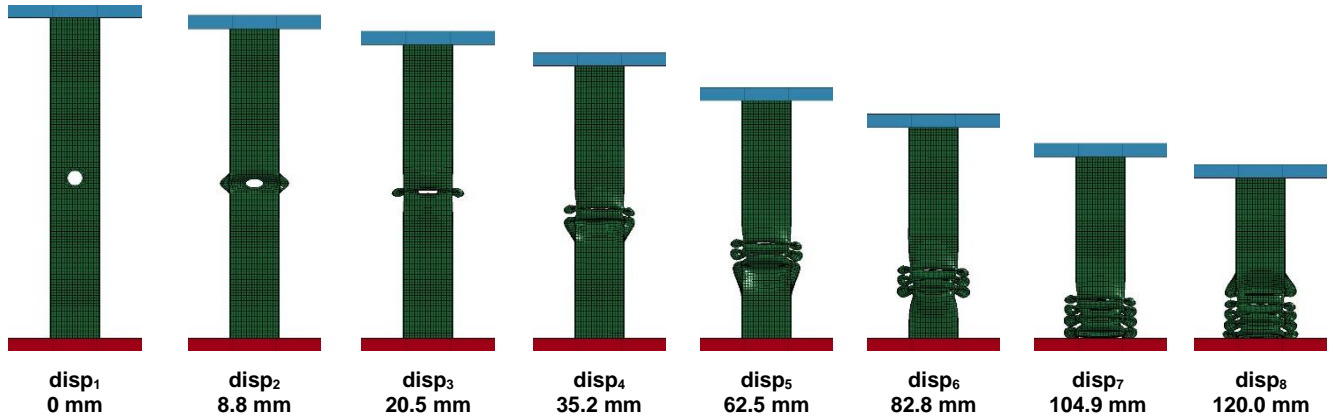
έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.



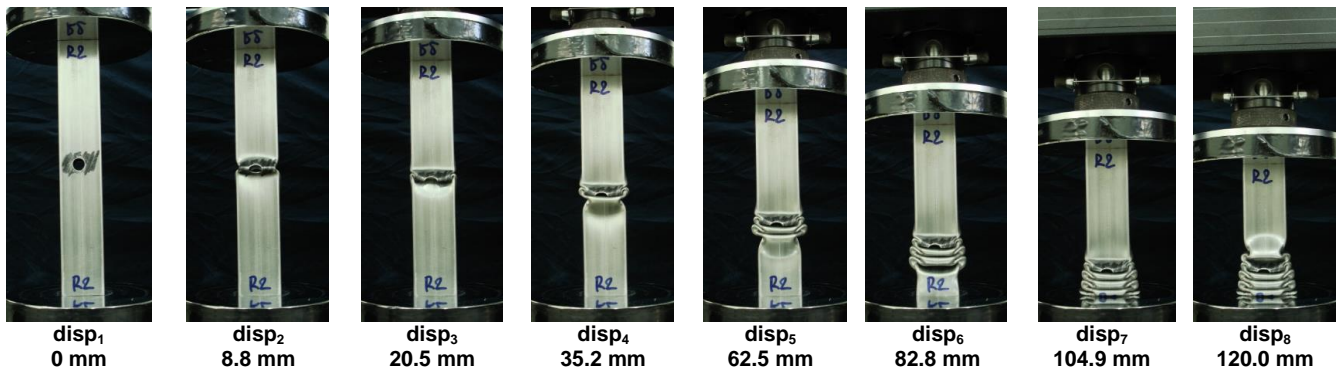
5.3.5 ΔΟΚΙΜΙΟ R2

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

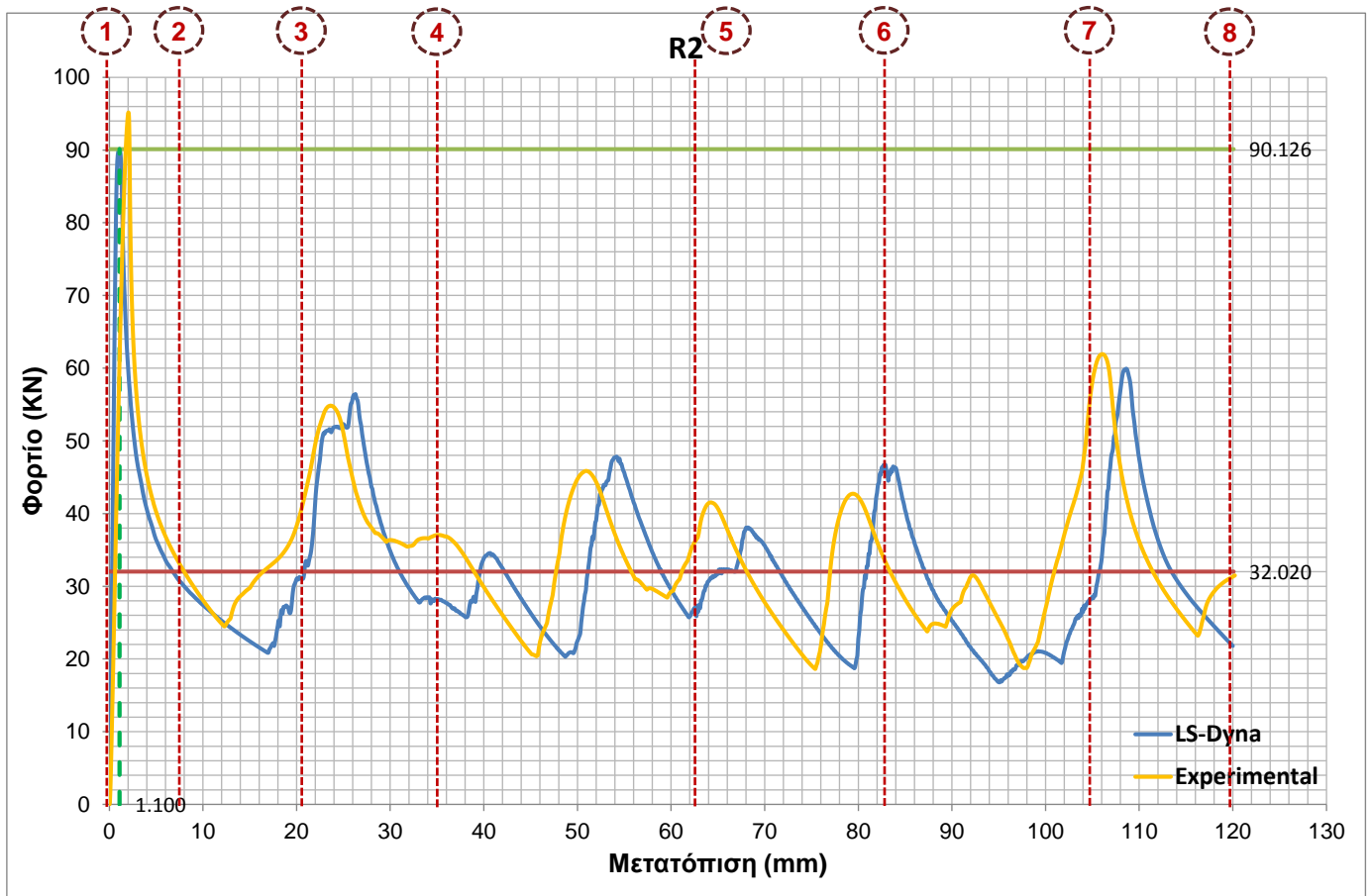


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.223
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3311	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.842	4.115
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.604	12.427
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	90.126 στα 1.100 mm	95.167 στα 2.054 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.020	34.229
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	35.528	35.967

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

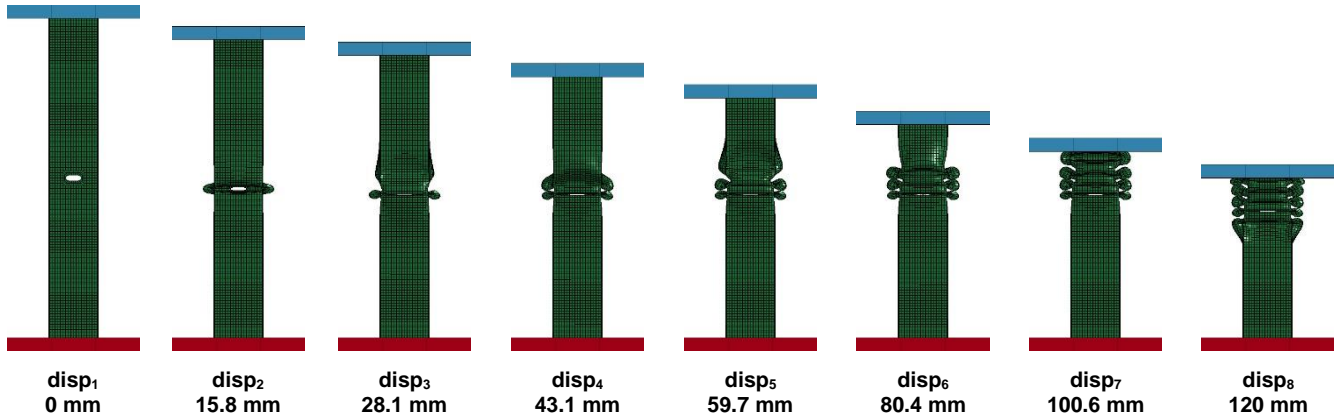
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

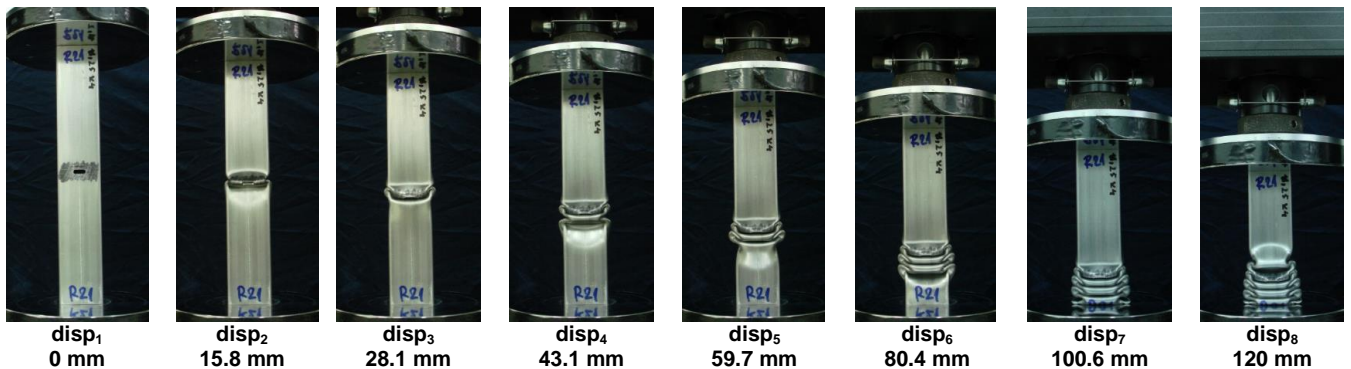
5.3.6 ΔΟΚΙΜΙΟ R21

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

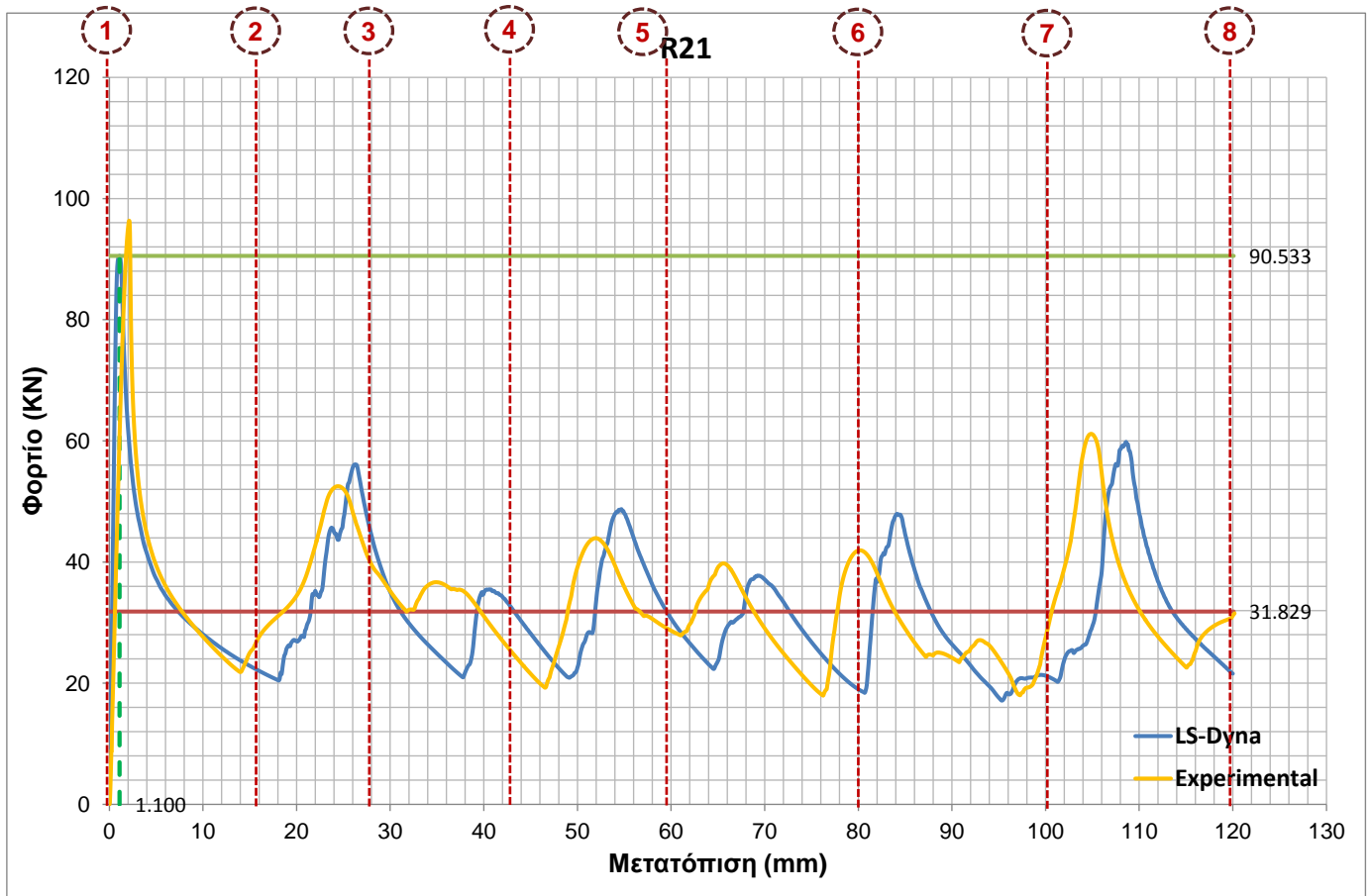


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.189
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3324	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.819	3.976
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.492	11.964
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	90.533 στα 1.100 mm	96.348 στα 2.119 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.829	33.084
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	35.157	34.338

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

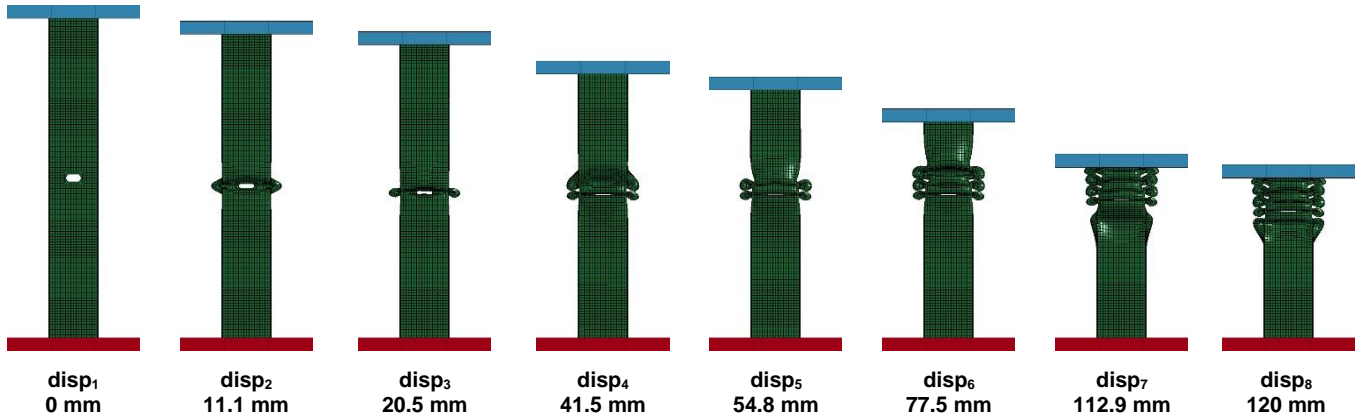
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

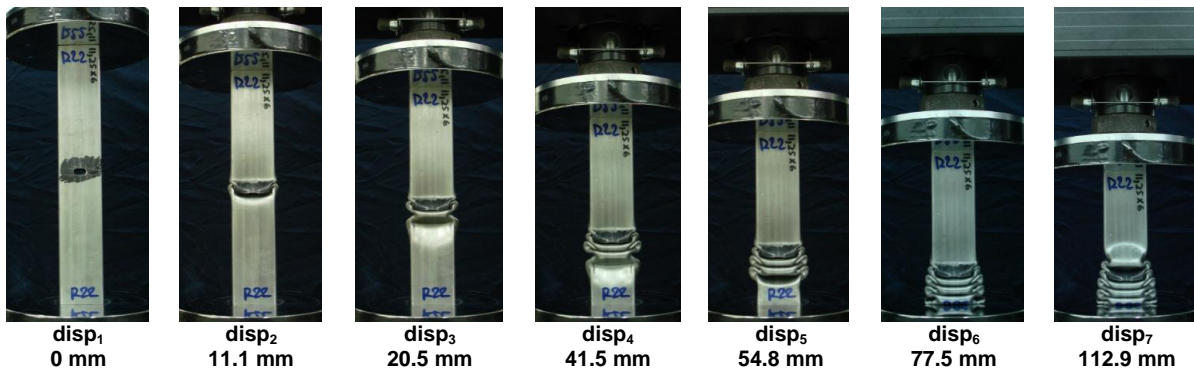
5.3.7 ΔΟΚΙΜΙΟ R22

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

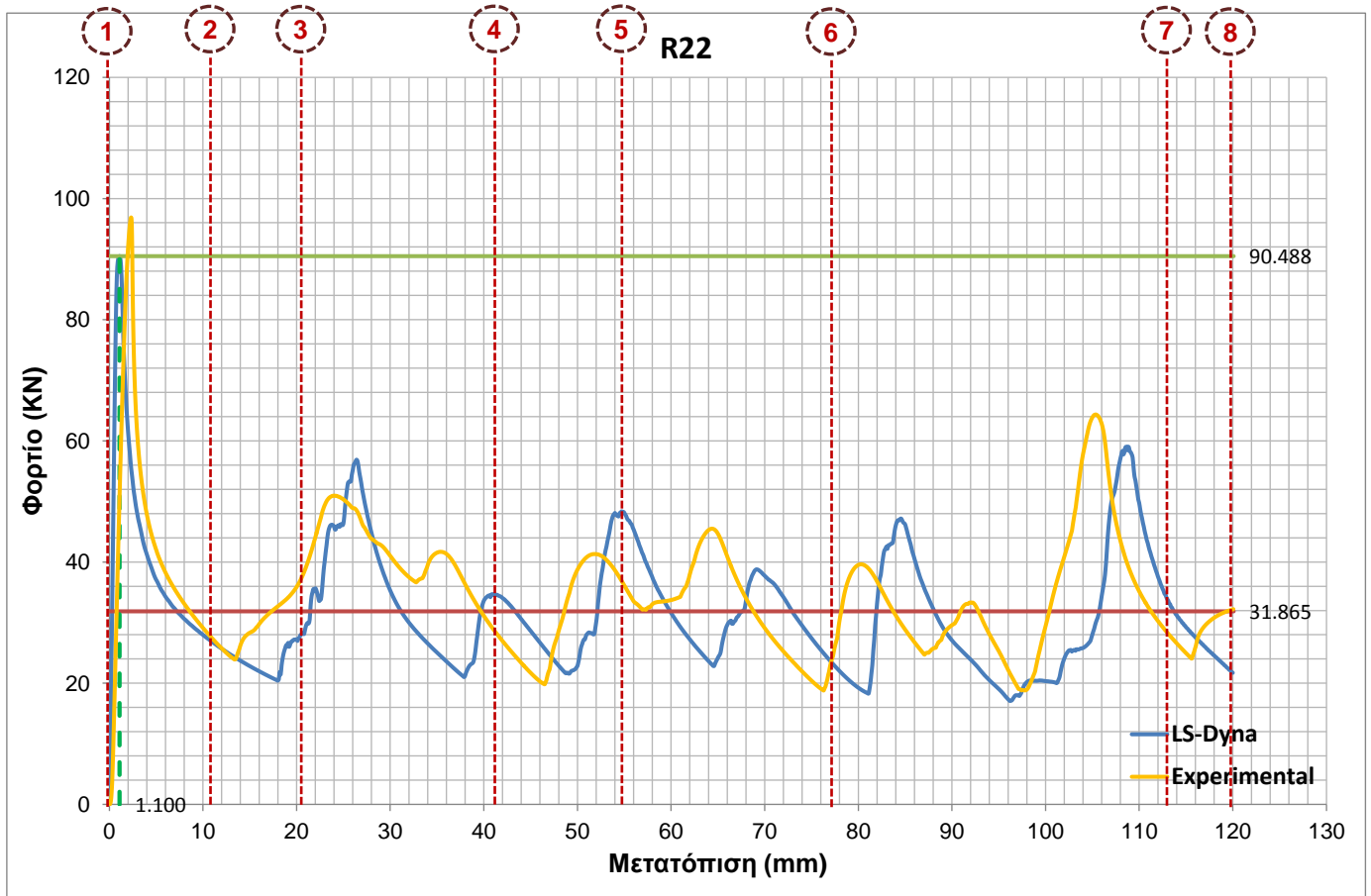


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.058
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3320	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.824	4.184
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.518	12.605
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	90.488 στα 1.100 mm	96.885 στα 2.323 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	31.865	34.852
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	35.214	35.973

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθησαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

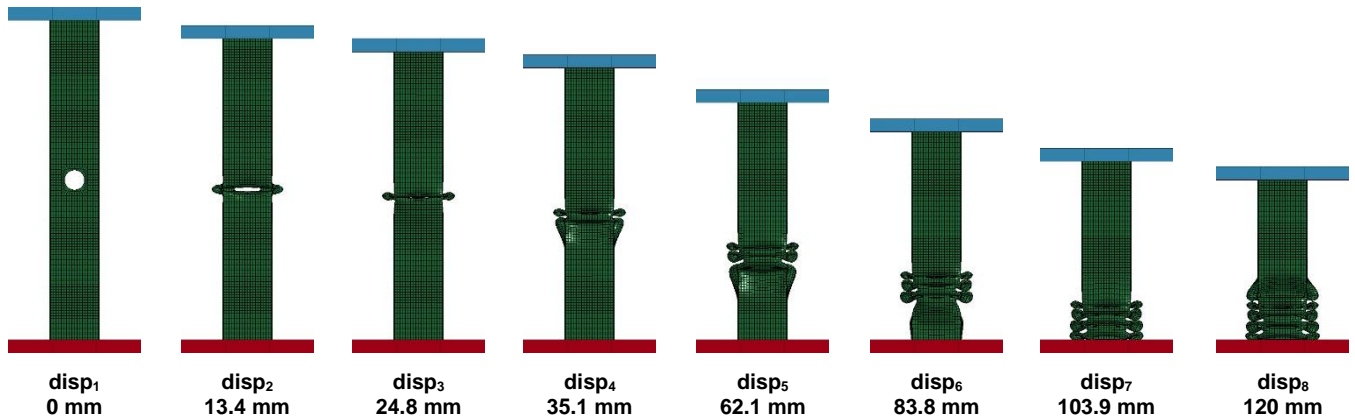


έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

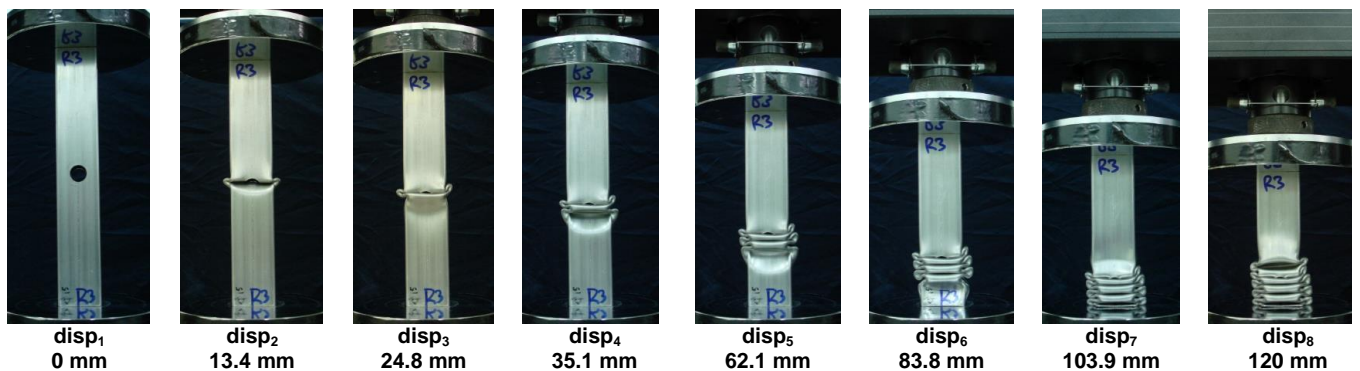
5.3.8 ΔΟΚΙΜΙΟ R3

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

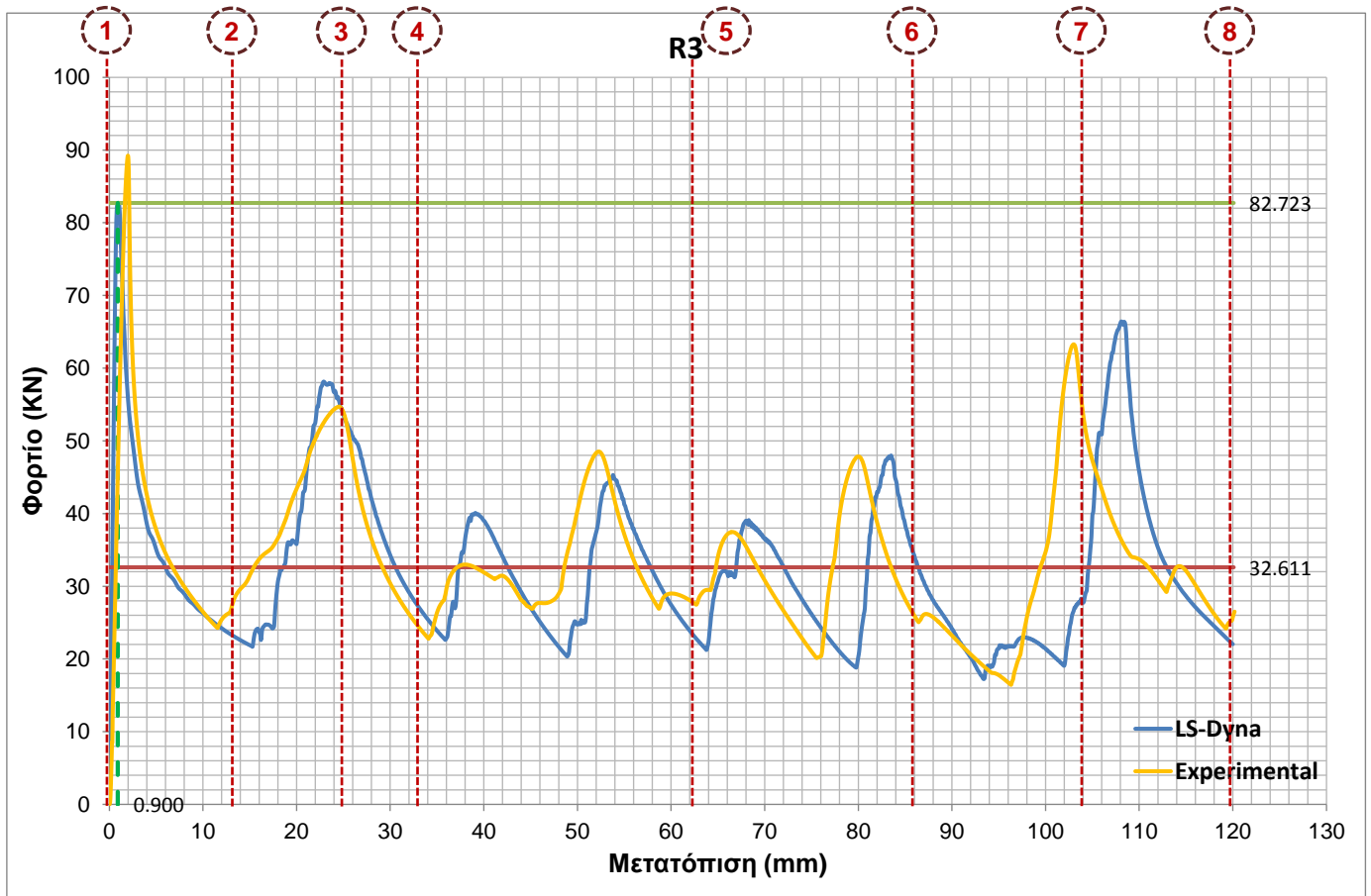


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.190
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3295	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.913	4.115
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.876	12.292
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	82.723 στα 0.900 mm	89.234 στα 1.988 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.611	33.700
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	39.423	37.766

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

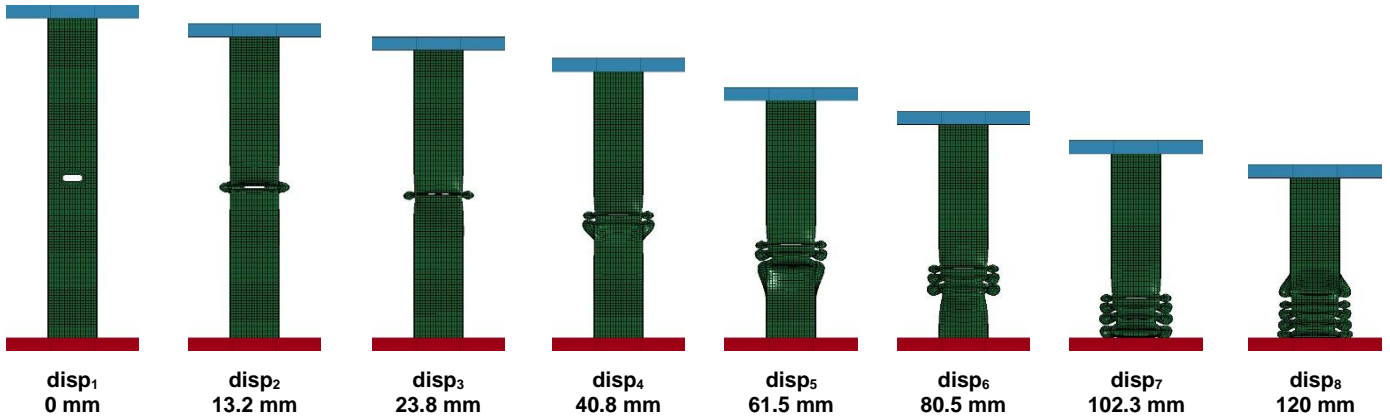
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία εννέα εκατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τέσσερις λοβούς ενώ

στον όγδοο και ένατο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

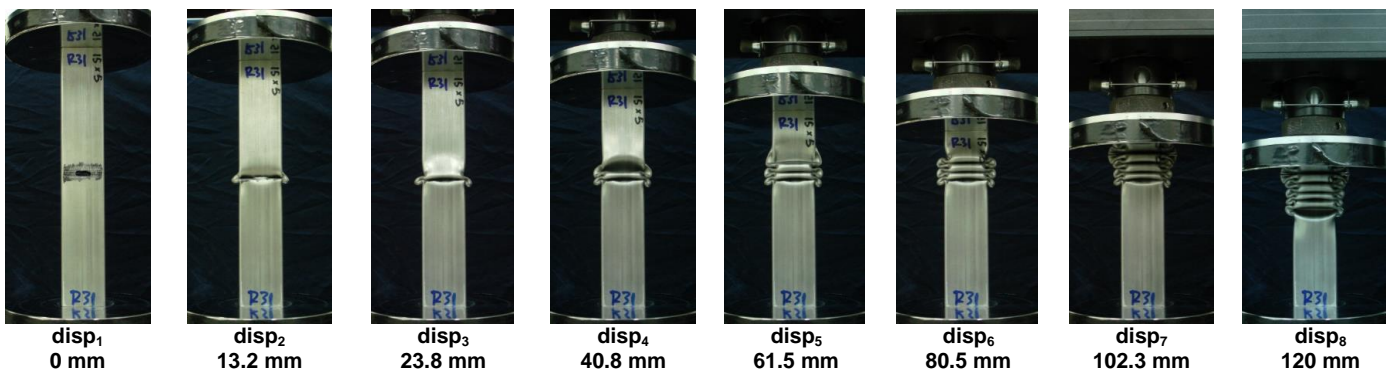
5.3.9 ΔΟΚΙΜΙΟ R31

Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση

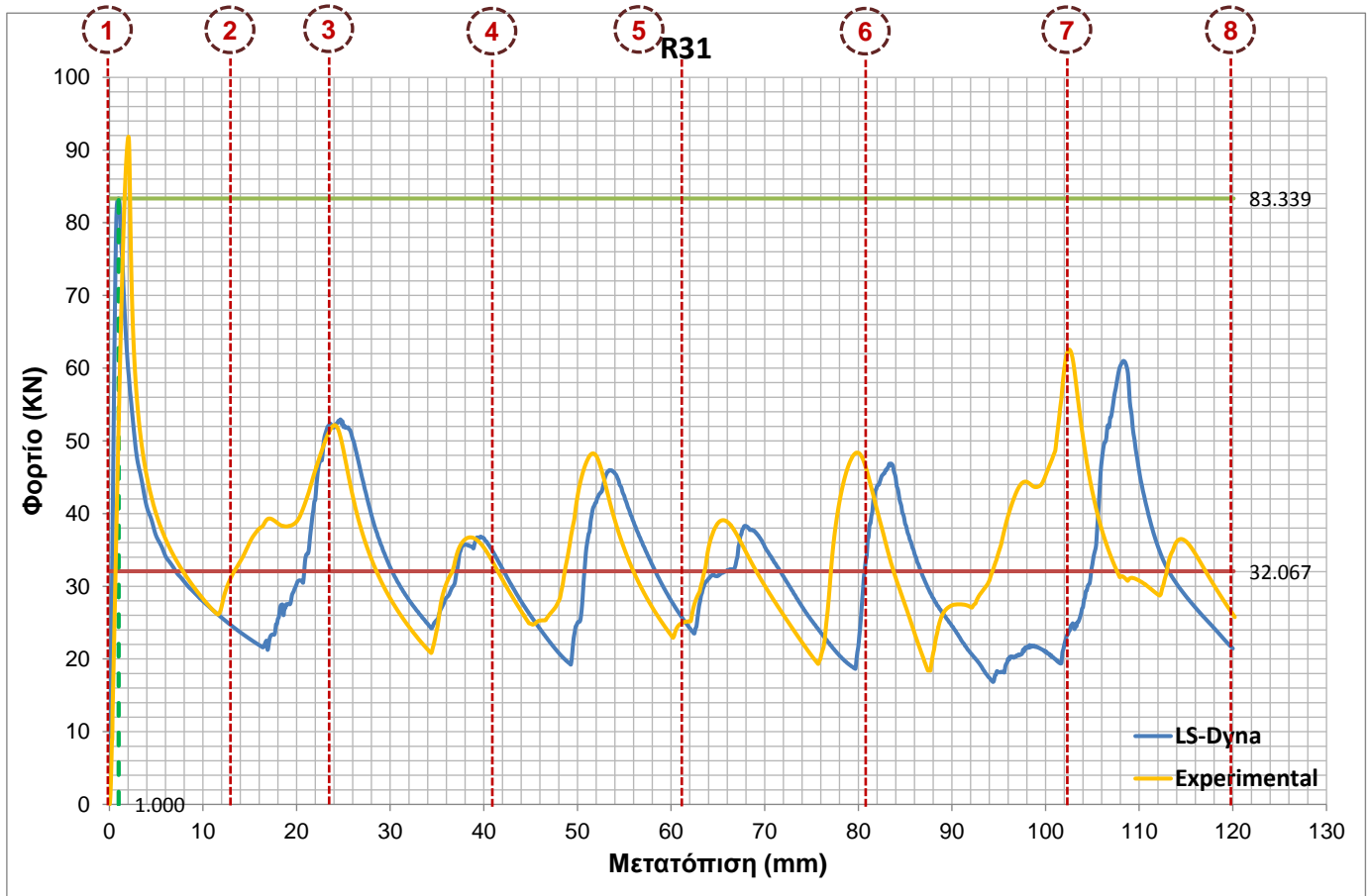


- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.213
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3318	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.848	4.172
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.599	12.577
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	83.339 στα 1.000 mm	91.838 στα 2.046 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.067	34.709
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	38.478	37.794

Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

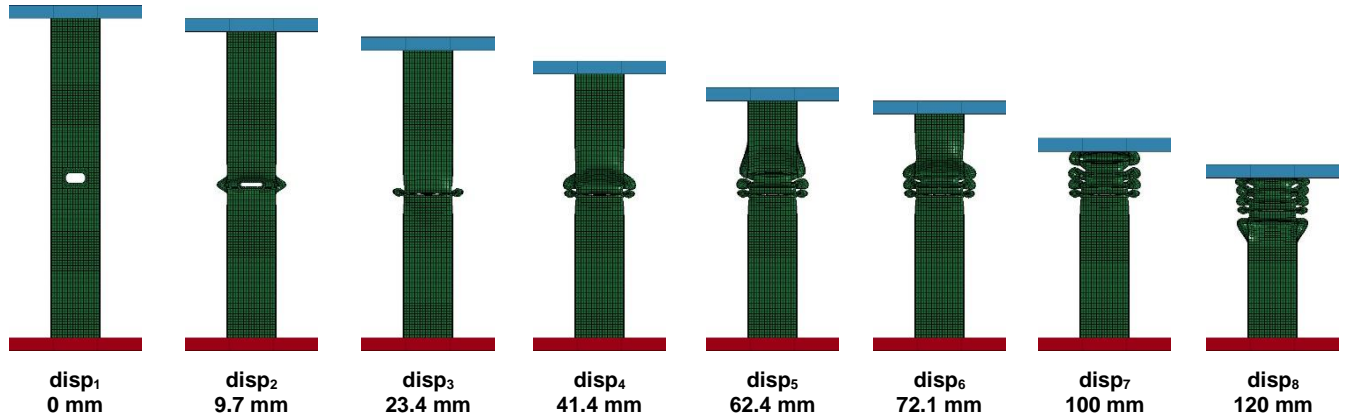
Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία οκτώ εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθησαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

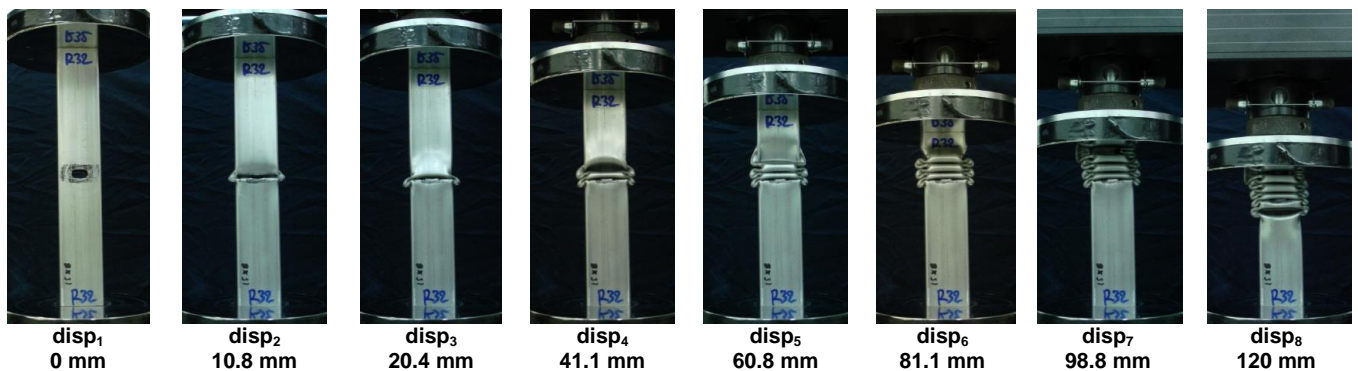
5.3.10 ΔΟΚΙΜΙΟ R32

Προδευτικές φάσεις κατάρρευσης

- Αριθμητική προσομοίωση



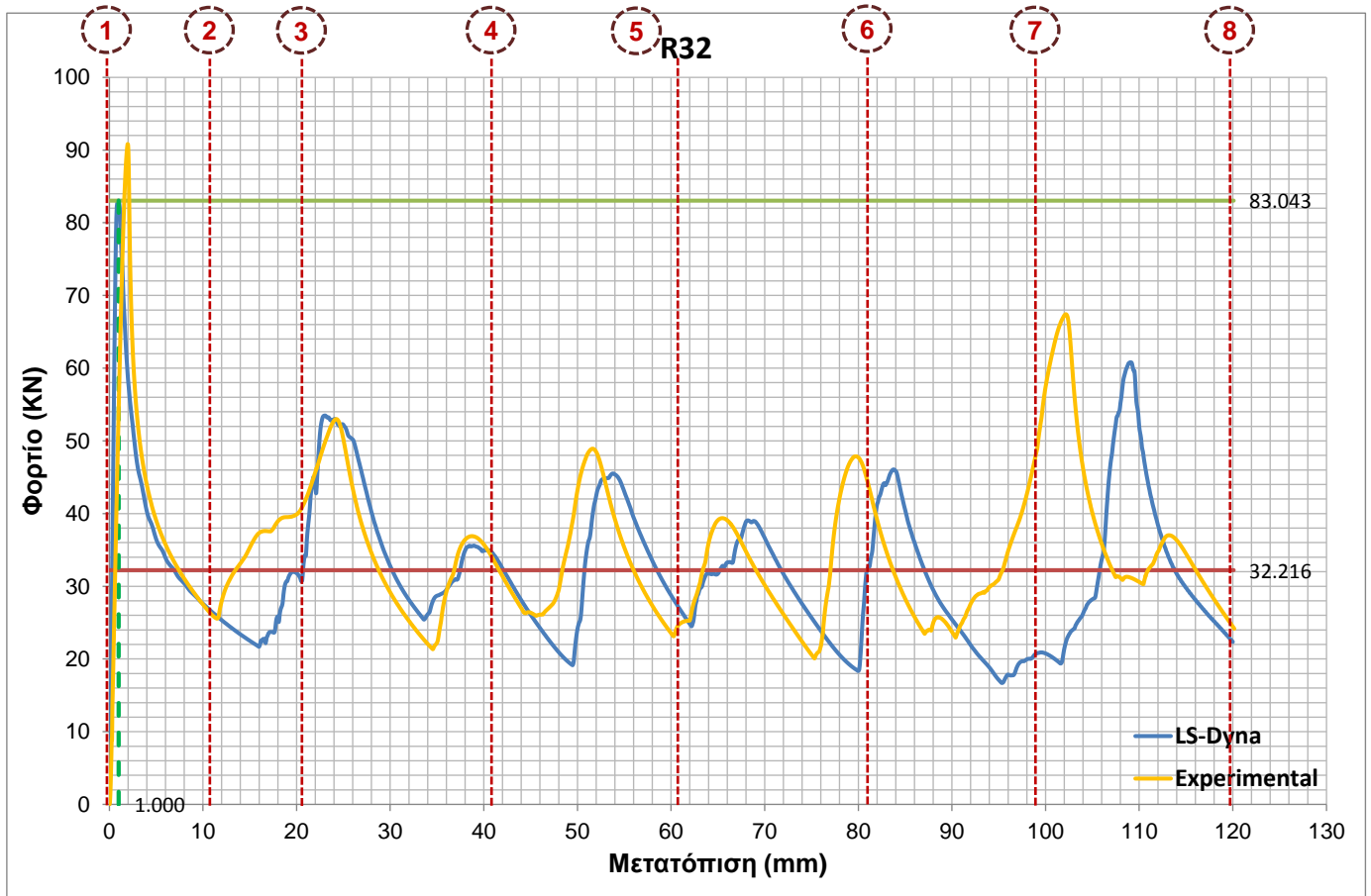
- Πειραματική διαδικασία



Αποτελέσματα

	Προσομοίωση	Πείραμα
Διαδρομή εμβόλου $\delta_t$ (mm)	120	120.156
Ενεργός διατομή $A_{act}$ (mm <sup>2</sup> )	185.035	
Μάζα δοκιμίου $m$ (Kg)	0.3310	
Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{abs}$ (kJ)	3.866	4.201
Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης SEA (kJ/Kg)	11.680	12.693
Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	83.043 στα 1.000 mm	90.818 στα 1.955 mm
Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	32.216	34.966
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	38.794	38.501



Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισηςΤρόπος κατάρρευσης

Τόσο στο πείραμα όσο και στην αριθμητική προσομοίωση παρατηρήθηκε ιδανικός τρόπος κατάρρευσης με τη δημιουργία έξι εκατών λοβών και δύο μη εκατών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης, ενώ αποτυπώνεται ανάγλυφα και στις καμπύλες φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου. Οι καμπύλες ακολουθούν σχεδόν ίδια τροχιά με μικρές αποκλίσεις που είναι λογικό να υπάρχουν λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που λήφθησαν για την αριθμητική προσομοίωση. Όπως αναμενόταν, η πρώτη κατάρρευση έγινε στο σημείο της οπής, όπου και πραγματοποιήθηκε ο πρώτος λοβός στον οποίο παρατηρήθηκε και το ολικό μέγιστο των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, αφού αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή του υλικού. Στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό ακρότατο όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού ακροτάτου. Η μείωση των τοπικών ακροτάτων επαναλαμβάνεται για τους επόμενους τρεις λοβούς ενώ στον

έβδομο και όγδοο λοβό παρατηρείται εκ νέου αύξηση των τοπικών ακροτάτων πράγμα το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφού το δοκίμιο μικραίνει, γίνεται πιο στιβαρό και η περαιτέρω παραμόρφωσή του είναι πιο δύσκολη. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 120 mm όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας. Ομοίως και εδώ, στην πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι η ραφή της συγκόλλησης δεν αστοχεί καθόλου.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

---

### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

---

Στη συνέχεια θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων μεταξύ τους καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα αντίστοιχα της πειραματικής διαδικασίας. Κατ' αρχήν θα σχολιάσουμε τον τρόπο κατάρρευσης για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων εξετάζοντας πέντε παραμέτρους.

1. Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{abs}$  (Total energy absorption)
2. Μέγιστο φορτίο  $P_{max}$  (Peak crush load)
3. Μέσο φορτίο  $P_m$  (Mean crush load)
4. Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου **CFE** (Crush force efficiency)
5. Ειδική ενέργεια παραμόρφωσης **SEA** (Specific energy absorption)

Ο τρόπος υπολογισμού των παραπάνω παραμέτρων παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 4.1 και οι τιμές τους παρατίθενται ξεχωριστά για κάθε δοκίμιο στο τέταρτο κεφάλαιο.

Η σύγκριση / αξιολόγηση μέσω των τεσσάρων πρώτων παραμέτρων θα γίνει μεταξύ των δοκιμών της ίδιας διατομής. Η πέμπτη παράμετρος θα χρησιμοποιηθεί για την εξέταση όλων των δοκιμών μιας και με τη συγκεκριμένη παράμετρο είναι δυνατό να συγκριθούν δοκίμια διαφορετικής διατομής.

### 6.2 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

---







Όσον αφορά τον τρόπο κατάρρευσης των δοκιμών, στο τέταρτο κεφάλαιο σχολιάζεται η κατάρρευση των δοκιμών σύμφωνα με τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων και των προσομοιώσεων καθώς και τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης. Όσον αφορά την πειραματική διαδικασία, από τη σύγκριση των δοκιμών μπορούμε να πούμε ότι ο τρόπος κατάρρευσης των δοκιμών ορθογωνικής διατομής ήταν ιδανικός και για τα εννιά δοκίμια με τις ατέλειες, ενώ για στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής δεν παρατηρήθηκε ιδανική κατάρρευση σχεδόν για όλα τα δοκίμια με τις ατέλειες. Αντίθετα παρατηρήθηκε σε αρκετά δοκίμια στρεβλή κατάρρευση με αποτέλεσμα αρκετές φορές να διακοπεί η πειραματική διαδικασία για λόγους ασφαλείας αφού υπήρχε κίνδυνος εκτόξευσης












των δοκιμίων. Από την άλλη πλευρά, στις αριθμητικές προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ιδανικός ή σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης τόσο στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής όσο και στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής. Συγκεκριμένα στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής S1, S11, S2, S3, S31 παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα δοκίμια είχαμε ιδανικό τρόπο κατάρρευσης.

### 6.3 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αμέσως παρακάτω ακολουθούν συγκεντρωμένα όλα τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις και τα πειράματα για όλα τα δοκίμια. Συγκεκριμένα η πρώτη στήλη περιέχει την ονομασία του δοκιμίου, η δεύτερη το σχήμα της οπής που κατασκευάστηκε (κυκλική οπή ή σχισμή), η τρίτη τη διαδρομή του εμβόλου  $\delta_t$  ή αλλιώς κατά πόσο συμπιέστηκαν τα δοκίμια. Στην τέταρτη στήλη περιλαμβάνεται η μάζα των δοκιμίων  $m$ , ενώ στην πέμπτη η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο κατά τη συμπίεση  $E_{abs}$ . Η έκτη στήλη περιλαμβάνει το μέγιστο φορτίο παραμόρφωσης  $P_{max}$  και η έβδομη το μέσο φορτίο  $P_m$ . Στην όγδοη στήλη αναγράφεται ο δείκτης ομοιομορφίας του φορτίου **CFE** και τέλος στην ένατη στήλη παρουσιάζεται η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης **SEA**. Με πράσινο χρώμα συγκεντρώνονται τα δοκίμια τετραγωνικής διατομής ενώ με πορτοκαλί χρώμα τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής.

#### 6.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ














Δοκίμιο	Σχήμα οπής	$\delta_t$ (mm)	$m$ (Kg)	$E_{abs}$ (kJ)	$P_{max}$ (kN)	$P_m$ (kN)	CFE (%)	SEA (kJ/Kg)
S0		120	0.2828	4.913	91.165	40.940	44.907	17.372
S1*		120	0.2819	3.824	73.423	31.865	43.400	13.566
S11*		120	0.2825	3.754	80.089	31.283	39.060	13.288
S12		120	0.2822	3.616	79.590	30.136	37.864	12.813
S2*		120	0.2807	3.795	72.610	31.628	43.559	13.520
S21		120	0.2819	3.642	73.166	30.348	41.479	12.917
S22		120	0.2815	3.646	73.042	30.386	41.601	12.951
S3*		120	0.2791	3.846	65.961	32.051	48.591	13.781




S31*		120	0.2813	3.794	66.710	31.617	47.395	13.486
S32		120	0.2806	3.749	66.428	31.239	47.027	13.361
R0		120	0.3332	3.855	107.580	32.129	29.865	11.570
R1		120	0.3323	3.823	97.089	31.856	32.811	11.504
R11		120	0.3329	3.822	97.526	31.848	32.656	11.479
R12		120	0.3327	3.816	97.260	31.800	32.695	11.471
R2		120	0.3311	3.842	90.126	32.020	35.528	11.604
R21		120	0.3324	3.819	90.533	31.829	35.157	11.492
R22		120	0.3320	3.824	90.488	31.865	35.214	11.518
R3		120	0.3295	3.913	82.723	32.611	39.423	11.876
R31		120	0.3318	3.848	83.339	32.067	38.478	11.599
R32		120	0.3310	3.866	83.043	32.216	38.794	11.680

**Πίνακας 5.1:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων

Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, τα δοκίμια που έχουν επισημανθεί με ένα αστεράκι (\*) είχαν μη ιδανική κατάρρευση λόγω της δημιουργίας μη εκτατών λοβών, ενώ η διαδρομή του εμβόλου ήταν για όλα τα δοκίμια  $\delta_t = 120$  mm όπως αρχικά είχε οριστεί στο πρόγραμμα LS-DYNA. Όσον αφορά τον σχολιασμό των λοιπών στηλών του πίνακα, έχει αναπτυχθεί αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο, όπου γίνεται η σύγκριση των παραμέτρων.

## 6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Δοκίμιο	Σχήμα οπής	$\delta_t$ (mm)	m (Kg)	$E_{abs}$ (kJ)	$P_{max}$ (kN)	$P_m$ (kN)	CFE (%)	SEA (kJ/Kg)
S0*		24.122	0.2828	0.500	53.046	20.738	39.094	1.769
S1		120.192	0.2819	2.675	51.113	22.259	43.549	9.492
S11*		71.825	0.2825	2.052	53.449	28.564	53.442	7.262
S12		120.081	0.2822	3.063	51.758	25.506	49.280	10.852
S2*		120.257	0.2807	2.430	48.402	20.204	41.741	8.655
S21*		64.983	0.2819	1.508	48.939	23.213	47.432	5.350
S22*		72.225	0.2815	1.951	48.939	27.017	55.206	6.931
S3		120.190	0.2791	2.569	44.161	21.379	48.411	9.207
S31*		83.056	0.2813	1.791	44.053	21.561	48.942	6.365
S32		120.058	0.2806	3.066	46.429	25.538	55.005	10.928
R0		120.057	0.3332	3.951	63.999	32.907	51.418	11.856
R1		120.125	0.3323	4.202	101.690	34.978	34.396	12.644
R11		120.257	0.3329	4.121	100.616	34.267	34.058	12.378
R12		120.321	0.3327	4.155	99.811	34.532	34.598	12.490
R2		120.223	0.3311	4.115	95.167	34.229	35.967	12.427

R21		120.189	0.3324	3.976	96.348	33.084	34.338	11.964
R22		120.058	0.3320	4.184	96.885	34.852	35.973	12.605
R3		120.190	0.3295	4.050	89.234	33.700	37.766	12.292
R31		120.213	0.3318	4.172	91.838	34.709	37.794	12.577
R32		120.156	0.3310	4.201	90.818	34.966	38.501	12.693

**Πίνακας 5.2:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραμάτων

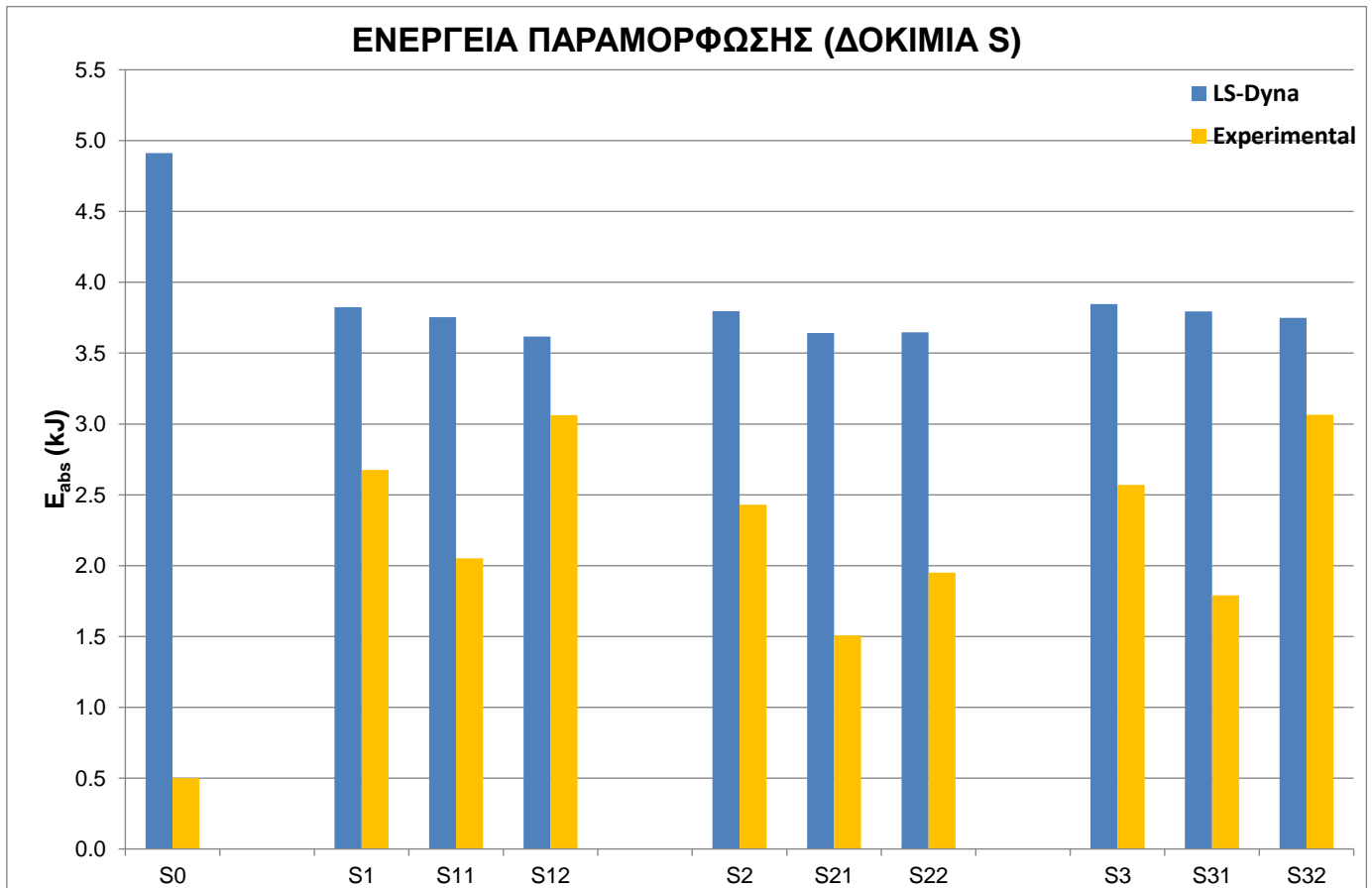
Όπως παρατηρούμε από τον παραπάνω πίνακα, τα δοκίμια που έχουν επισημανθεί με ένα αστεράκι (\*) δεν είχαν ολοκληρωμένη κατάρρευση, δηλαδή διαδρομή εμβόλου  $\delta_i = 120$  mm όπως αρχικά είχε οριστεί στον πειραματικό σχεδιασμό. Η συμπεριφορά τους είναι από καθόλου έως μερικώς αξιολογήσιμη / συγκρίσιμη, καθώς κατέρρευσαν στρεβλά και πάντως όχι ολοκληρωμένα, λόγω της επικείμενης εκτόξευσης από τις πλάκες συμπίεσης. Όπως παρατηρούμε αυτά τα δοκίμια είναι μόνο τετραγωνικής διατομής. Όσον αφορά τον σχολιασμό των λοιπών στηλών του πίνακα, αναπτυχθεί αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο, όπου γίνεται η σύγκριση των παραμέτρων.



## 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

### 6.4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

#### Δοκίμια τετραγωνικής διατομής S

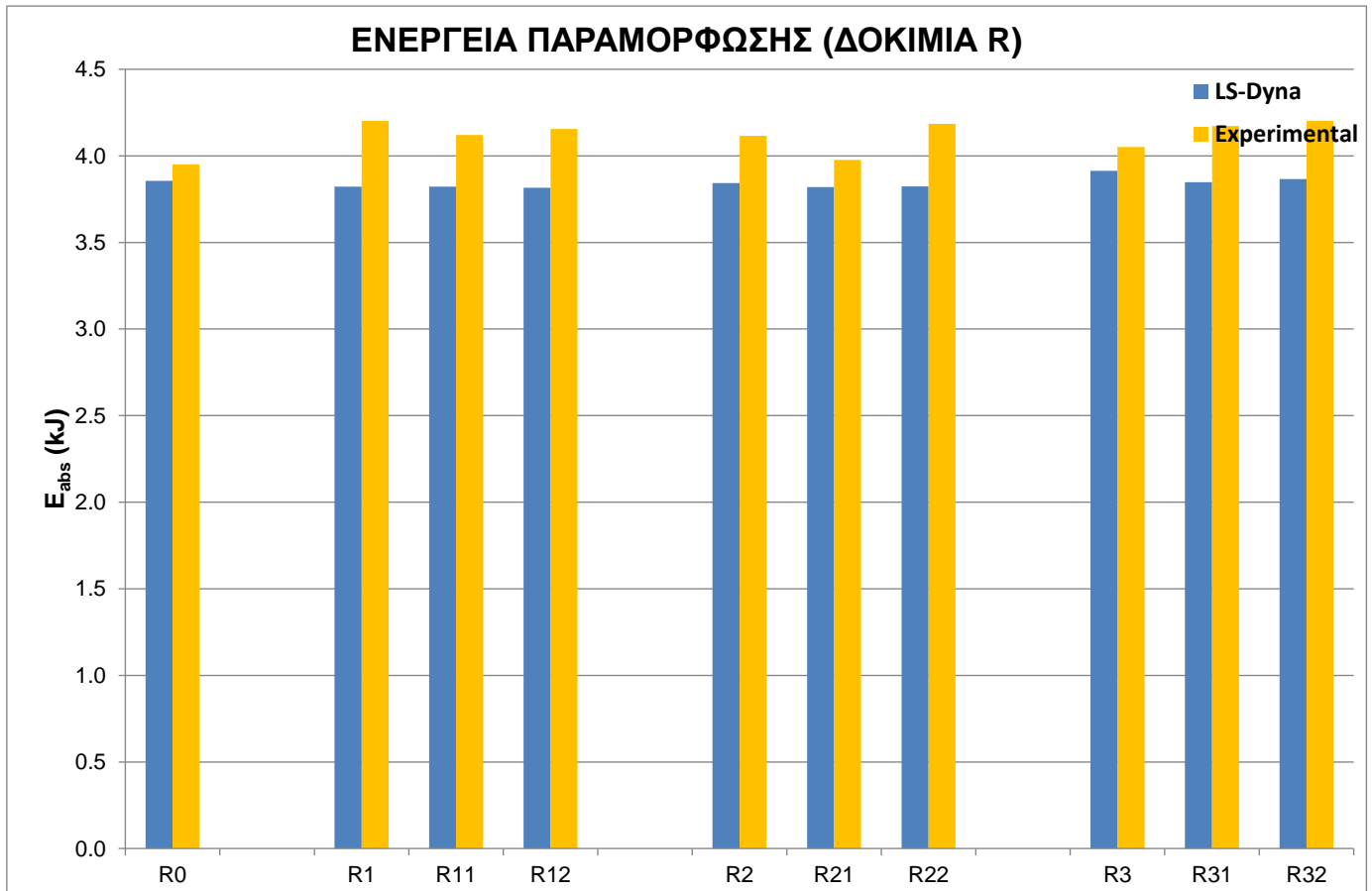


**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης δοκιμίων τετραγωνικής διατομής

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι στην πειραματική διαδικασία λόγω της μη ολοκληρωμένης κατάρρευσης των δοκιμίων S0, S11, S2, S21, S22 και S31 η ενέργεια παραμόρφωσης των δοκιμίων αυτών δεν ξεπερνάει τα 2.4 kJ αναλόγως και τη διαδρομή στην οποία σταμάτησε το έμβολο. Στα υπόλοιπα δοκίμια που ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία, η ενέργεια παραμόρφωσης κυμαίνεται από 2.6 έως 3.1 kJ αναλόγως και τη μορφή που είχε η κατάρρευση. Από την άλλη, στις αριθμητικές προσομοιώσεις, λόγω ιδανικής ή σχεδόν ιδανικής κατάρρευσης σε όλα τα δοκίμια παρατηρούμε ότι η ενέργεια παραμόρφωσης παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή των 4.9 kJ στο δοκίμιο S0 χωρίς οπή όπως

ήταν και αναμενόμενο. Στα υπόλοιπα δοκίμια, η ενέργεια παραμόρφωσης κυμαίνεται από 3.6 έως 3.8 kJ με σταδιακή μείωση όσο μεταβάλλεται η μορφή των ατελειών σε κάθε κατηγορία.

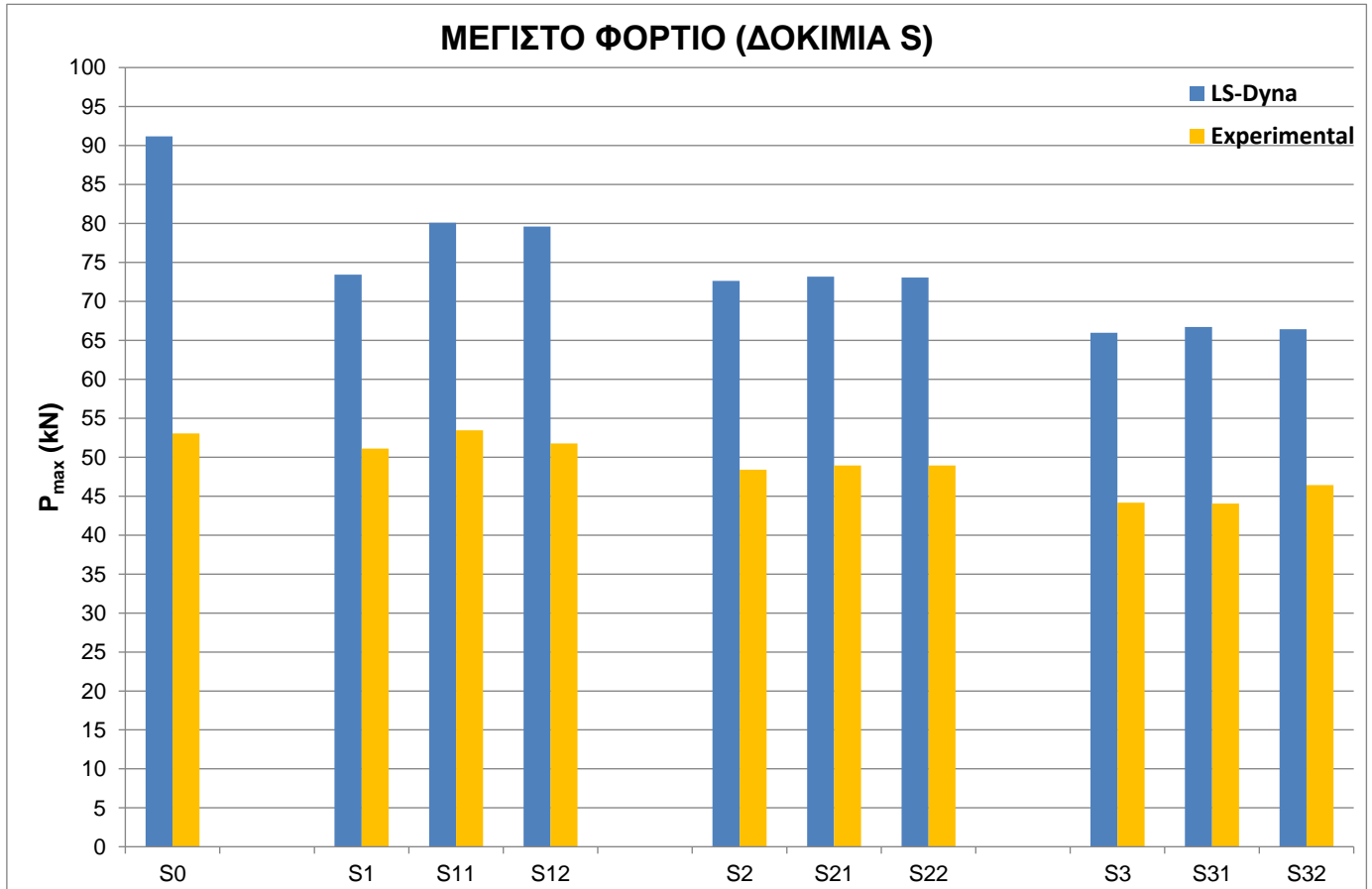
### Δοκίμια ορθογωνικής διατομής R



**Σχήμα 5.2:** Διάγραμμα ενέργειας παραμόρφωσης δοκιμίων ορθογωνικής διατομής

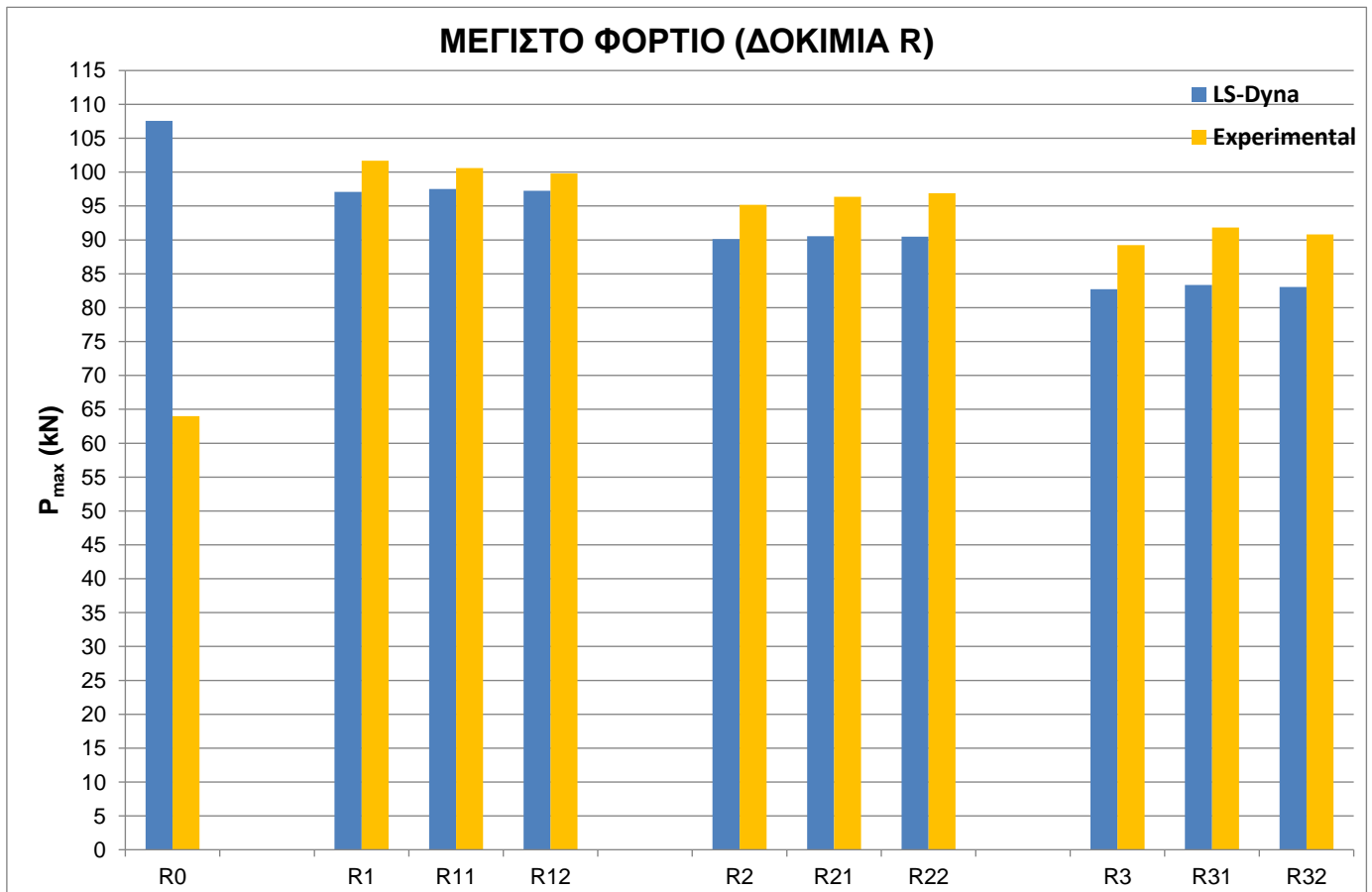
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην πειραματική διαδικασία την ομοιομορφία που είχε η κατάρρευση των δοκιμίων ορθογωνικής διατομής. Παρατηρούμε ότι είχαμε το επιθυμητό αποτέλεσμα με την ενέργεια παραμόρφωσης να κυμαίνεται μεταξύ 4 και 4.4 kJ. Από την άλλη, στις αριθμητικές προσομοιώσεις, παρατηρούμε παρόμοια ομοιομορφία με την ενέργεια παραμόρφωσης να κυμαίνεται μεταξύ 3.7 και 3.9 kJ με τιμές λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες της πειραματικής διαδικασίας.

## 6.4.2 ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

Δοκίμια τετραγωνικής διατομής S

**Σχήμα 5.3:** Διάγραμμα μέγιστου φορτίου δοκιμίων τετραγωνικής διατομής

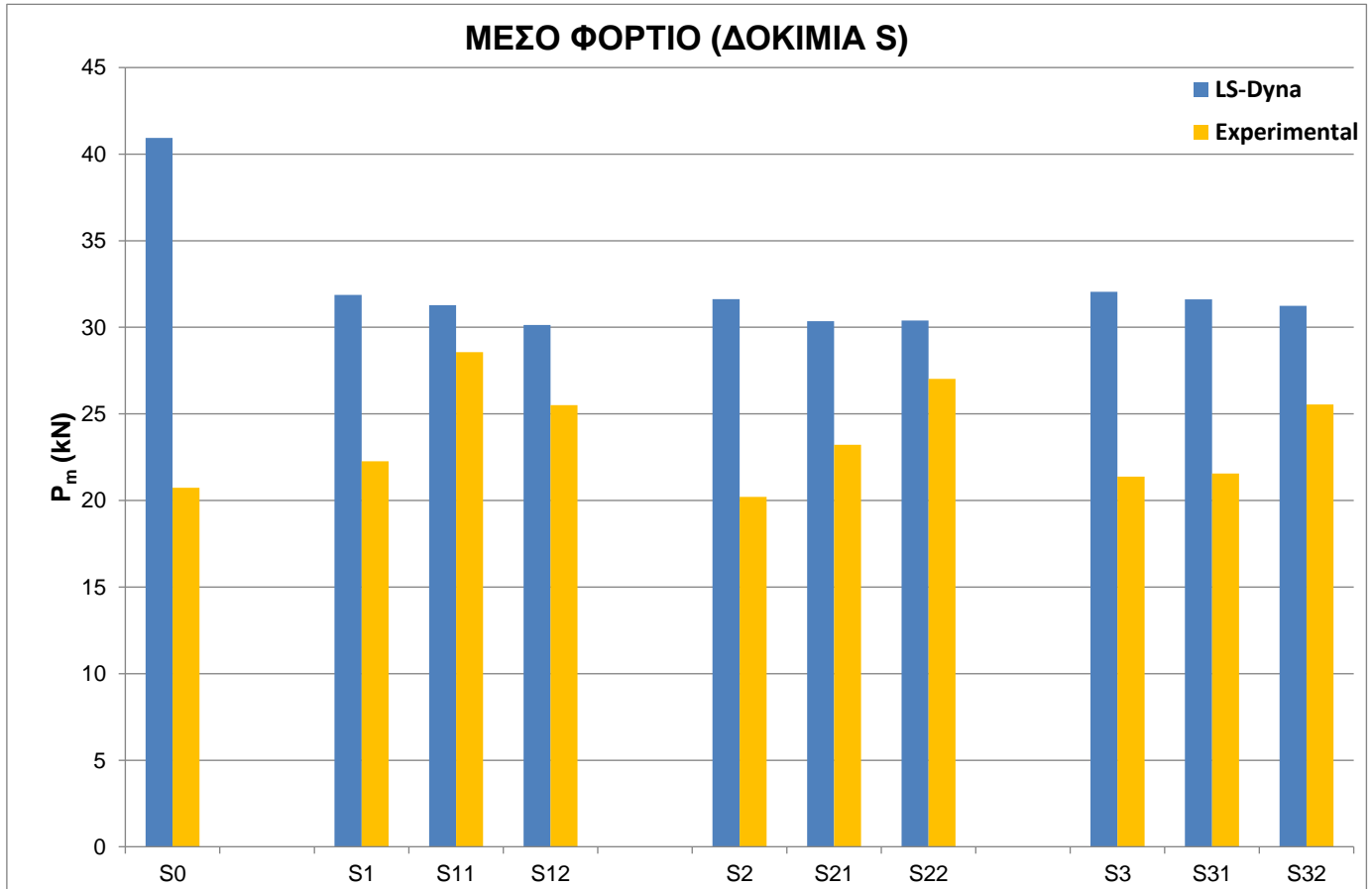
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην πειραματική διαδικασία, όσων αφορά το μέγιστο φορτίο των δοκιμίων τετραγωνικής διατομής ότι έχουμε θετικά αποτελέσματα και αυτό γιατί όσο είχαμε αύξηση του μεγέθους της οπής ή της σχισμής είχαμε μείωση του μέγιστου φορτίου παραμόρφωσης. Στην ουσία με την αύξηση της διάστασης της ατέλειας χρειάστηκε λιγότερη ενέργεια για να απομακρυνθούμε από την ελαστική περιοχή και να δημιουργηθεί ο πρώτος λοβός. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούμε στις αριθμητικές προσομοιώσεις όπου πλέον μπορούμε να λάβουμε υπόψη μας και το δοκίμιο χωρίς οπή το οποίο και παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου φορτίου, ενώ με αύξηση του μεγέθους της οπής ή της σχισμής είχαμε μείωση του μέγιστου φορτίου παραμόρφωσης.

**Δοκίμια ορθογωνικής διατομής R**

**Σχήμα 5.4:** Διάγραμμα μέγιστου φορτίου δοκιμών ορθογωνικής διατομής

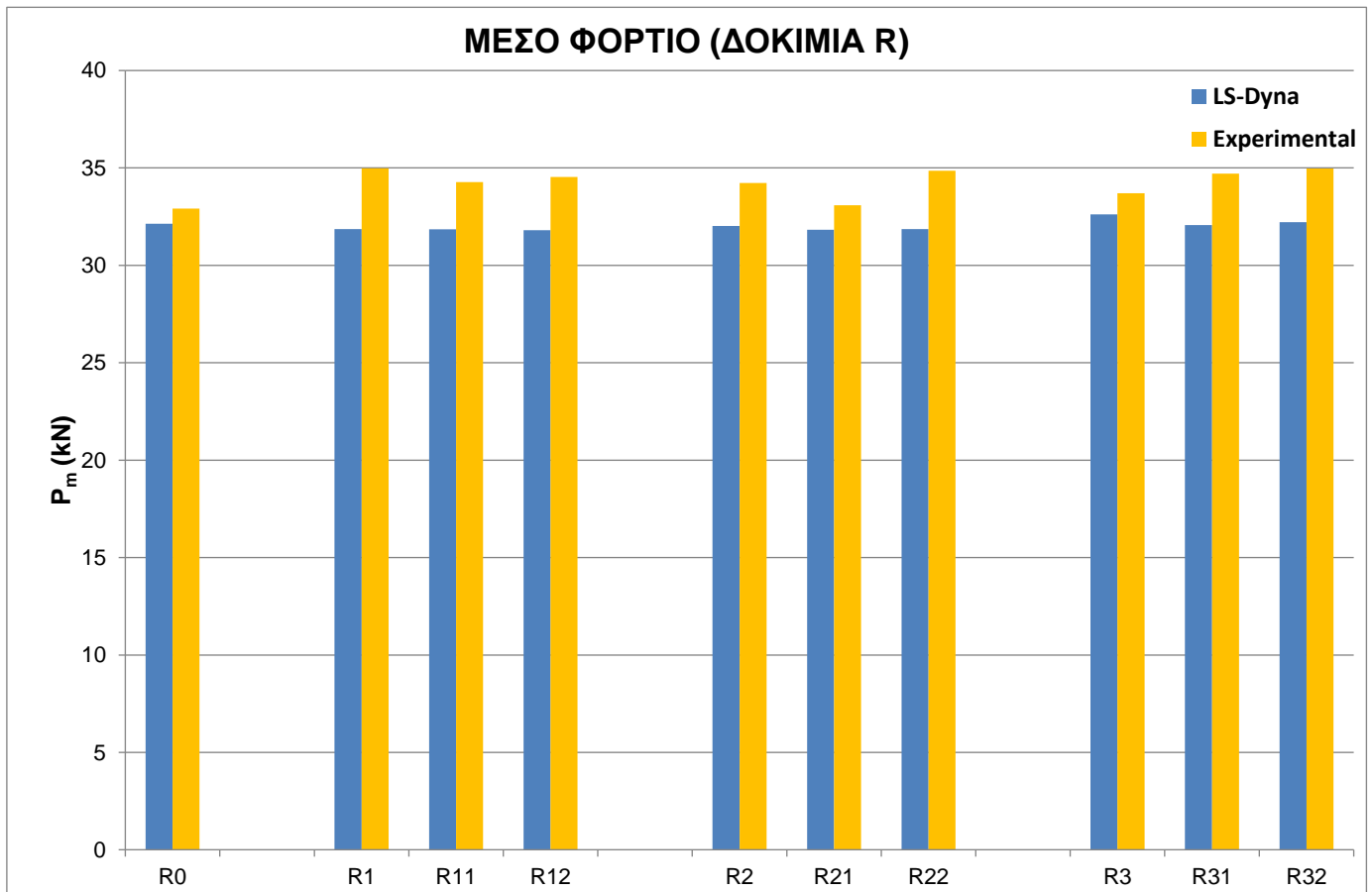
Ομοίως, από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τόσο για τη **πειραματική διαδικασία**, όσο και για τις **αριθμητικές προσομοιώσεις**, όσων αφορά το μέγιστο φορτίο των δοκιμών ορθογωνικής διατομής ότι έχουμε θετικά αποτελέσματα και αυτό γιατί όσο είχαμε αύξηση του μεγέθους της οπής ή της σχισμής είχαμε μείωση του μέγιστου φορτίου παραμόρφωσης. Έτσι και εδώ με την αύξηση της διάστασης της ατέλειας χρειάστηκε λιγότερη ενέργεια για να απομακρυνθούμε από την ελαστική περιοχή και να δημιουργηθεί ο πρώτος λοβός. Αξίζει να παρατηρήσουμε τη διαφορά στη τιμή που έχει το δοκίμιο χωρίς ατέλεια της αριθμητικής προσομοίωσης.

## 6.4.3 ΜΕΣΟ ΦΟΡΤΙΟ

Δοκίμια τετραγωνικής διατομής S

**Σχήμα 5.5:** Διάγραμμα μέσου φορτίου δοκιμίων τετραγωνικής διατομής

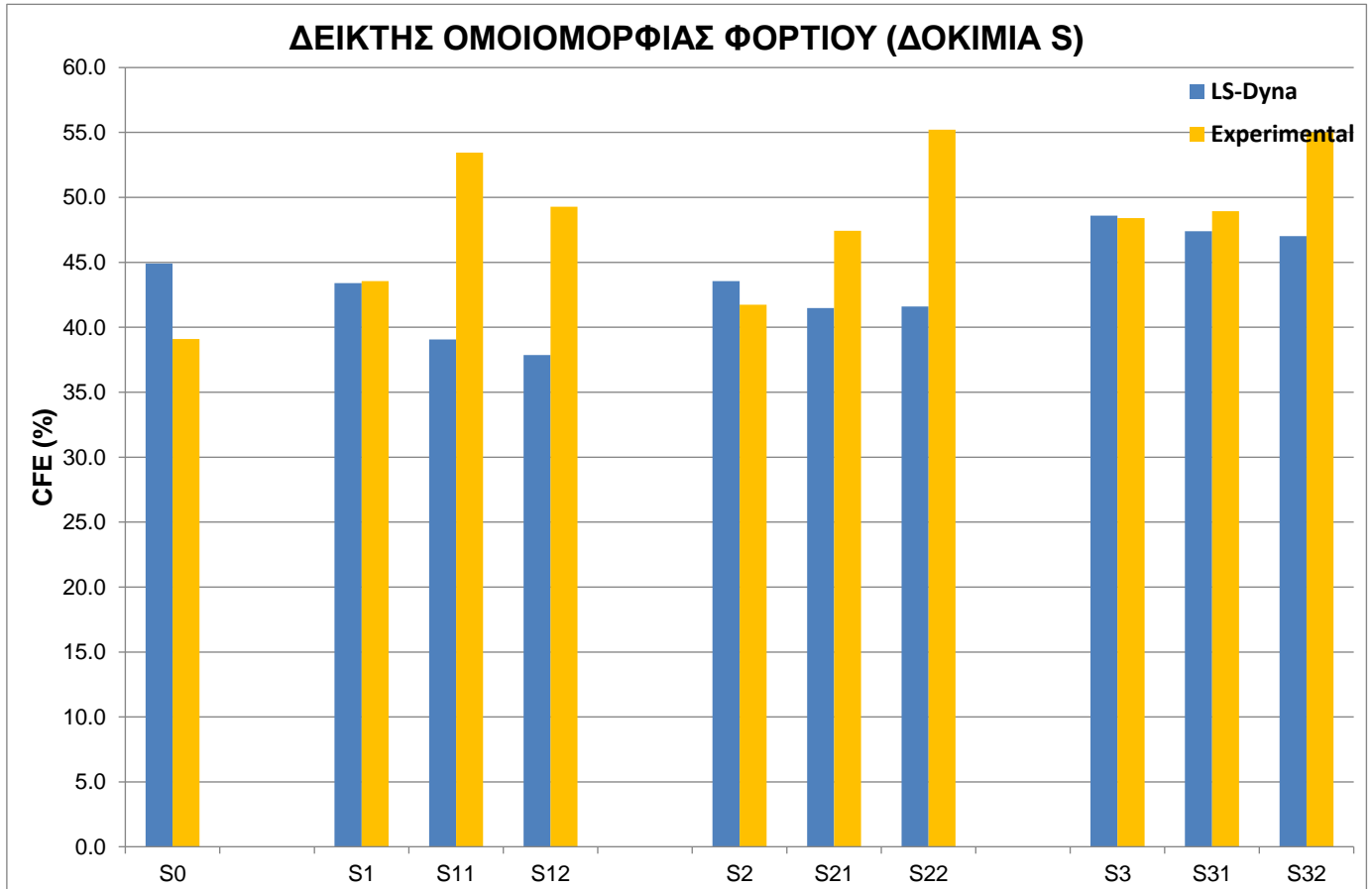
Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην πειραματική διαδικασία, όσον αφορά το μέσο φορτίο παραμόρφωσης στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα γιατί οι καταρρεύσεις των δοκιμίων ποικίλανε. Συγκεκριμένα στα δοκίμια S0, S11, S2, S21, S22 και S31 είχαμε πρόωρη παύση της συμπίεσης οπότε δεν θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το αποτέλεσμα, ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια είχαμε διαφορετική πορεία κατάρρευσης και δεν μπορούμε να τα συγκρίνουμε. Το εύρος των τιμών του μέσου φορτίου κυμαίνεται από 20 έως 28 kN. Από την άλλη, στις αριθμητικές προσομοιώσεις, παρατηρούμε μια ομοιομορφία εύρος των τιμών του μέσου φορτίου των δοκιμίων με ατέλειες που κυμαίνεται από 30 έως 33 kN ενώ η μέγιστη τιμή του μέσου φορτίου παρατηρείται στο δοκίμιο χωρίς ατέλεια όπως ήταν και αναμενόμενο.

**Δοκίμια ορθογωνικής διατομής R**

**Σχήμα 5.6:** Διάγραμμα μέσου φορτίου δοκιμίων ορθογωνικής διατομής

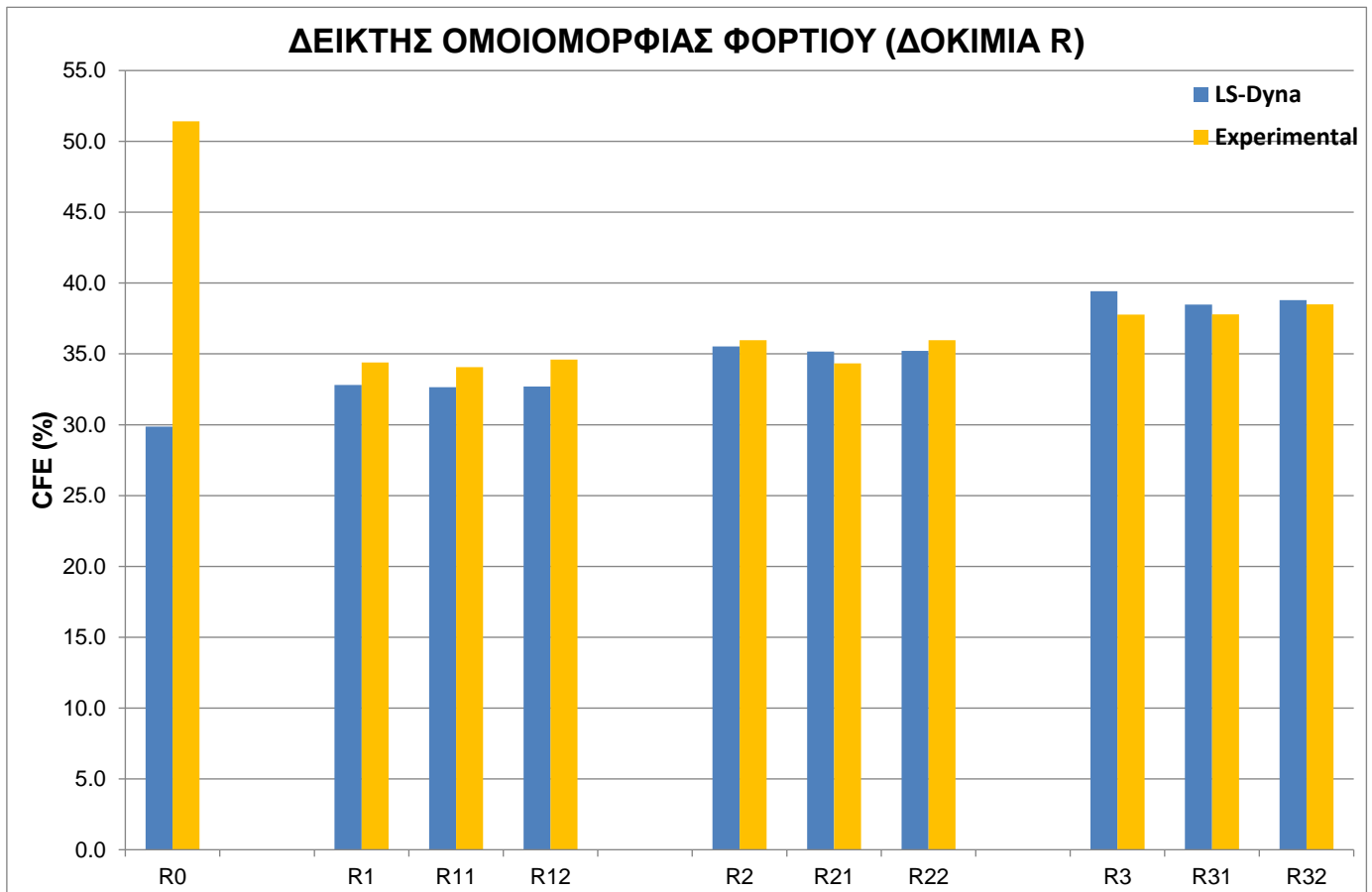
Από το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τόσο για τη **πειραματική διαδικασία**, όσο και για τις **αριθμητικές προσομοιώσεις**, όσον αφορά το μέσο φορτίο παραμόρφωσης ότι παραμένει σχεδόν σταθερό. Συγκεκριμένα, το μέσο φορτίο παραμόρφωσης κυμαίνεται από 33 έως 35 kN στη πειραματική διαδικασία και από 32 έως 33 kN στη πειραματική διαδικασία. Αυτό μαρτυρά και την ομοιότητα που είχαν οι καταρρεύσεις των δοκιμίων.

## 6.4.4 ΔΕΙΚΤΗΣ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Δοκίμια τετραγωνικής διατομής S

**Σχήμα 5.7:** Διάγραμμα δείκτη ομοιομορφίας φορτίου δοκιμίων τετραγωνικής διατομής

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην πειραματική διαδικασία, όπως και με τη μέση ενέργεια παραμόρφωσης έτσι και εδώ δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο ασφαλές συμπέρασμα γιατί οι καταρρεύσεις των δοκιμίων ποικίλαν. Συγκεκριμένα στα δοκίμια S0, S11, S2, S21, S22 και S31 είχαμε πρόωρη παύση της συμπίεσης οπότε δεν θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το αποτέλεσμα, ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια είχαμε διαφορετική πορεία κατάρρευσης και δεν μπορούμε να τα συγκρίνουμε. Έτσι, παρατηρούμε στο διάγραμμα μια μεγάλη διακύμανση των τιμών και συγκεκριμένα από 39 έως 55 %. Από την άλλη, στις αριθμητικές προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα του δείκτη ομοιομορφίας είναι ικανοποιητικά και παρουσιάζουν μια μικρή αύξηση όσο μεγαλώνουν οι ατέλειες των δοκιμίων.

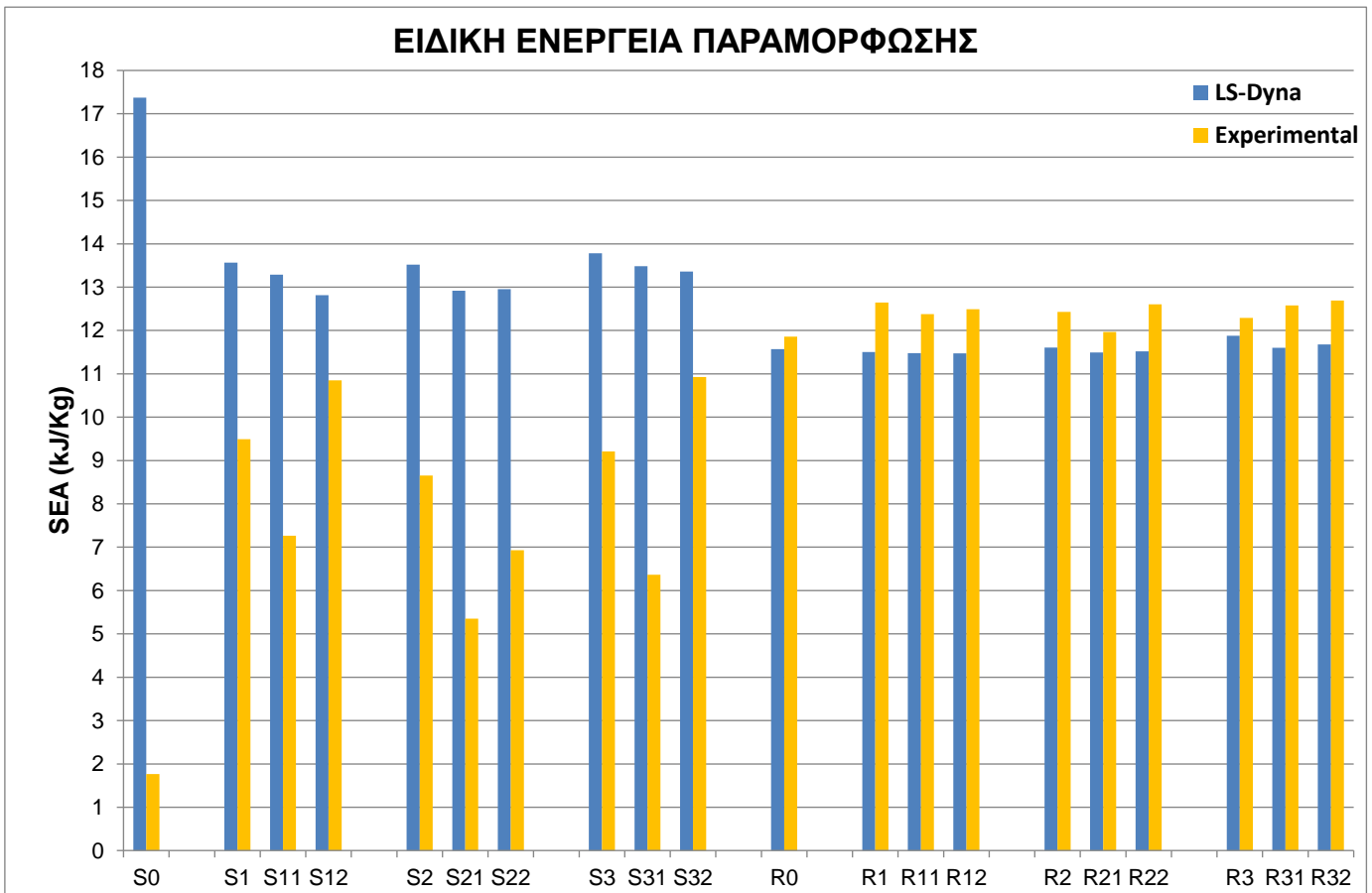
**Δοκίμια ορθογωνικής διατομής R**

**Σχήμα 5.8:** Διάγραμμα δείκτη ομοιομορφίας φορτίου δοκιμών ορθογωνικής διατομής

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην **πειραματική διαδικασία**, όσων αφορά τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής, τα αποτελέσματα του δείκτη ομοιομορφίας είναι ικανοποιητικά. Συγκεκριμένα, στην πρώτη σειρά δοκιμών η τιμή του δείκτη ομοιομορφίας κυμαίνεται από 34 έως 35 %, με μια αύξηση της τάξης του 0.5 με 1.5 % στις επόμενες σειρές. Συγκεκριμένα στα δοκίμια της δεύτερης σειράς ο δείκτης κυμαίνεται από 35 έως 36.5 % ενώ στην τελευταία σειρά κυμαίνεται από 37.5 έως 38.5 %. Ομοίως, στις **αριθμητικές προσομοιώσεις** παρατηρούμε παρόμοια διακύμανση, στην πρώτη σειρά δοκιμών η τιμή του δείκτη ομοιομορφίας κυμαίνεται από 32 έως 34 %, με μια αύξηση της τάξης του 2 με 3 % στις επόμενες σειρές. Συγκεκριμένα στα δοκίμια της δεύτερης σειράς ο δείκτης κυμαίνεται από 34 έως 35 % ενώ στην τελευταία σειρά κυμαίνεται από 37 έως 39 %.



## 6.4.5 ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ/ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ



**Σχήμα 5.9:** Διάγραμμα ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης όλων των δοκιμών

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε στην πειραματική διαδικασία, όσον αφορά τα τετραγωνικά δοκίμια, ότι η ειδική ενέργεια παραμόρφωσης των δοκιμών που δεν είχαν ολοκληρωμένη κατάρρευση (S0, S11, S2, S21, S22 και S31) είναι από πολύ μικρή (0.2 kJ/Kg) έως μέτρια (8.8 kJ/Kg) και δεν θα ληφθεί υπόψη στη σύγκριση. Επίσης, στη σύγκριση δεν θα συμπεριλάβουμε το δοκίμιο R0 λόγω του τρόπου συμπίεσης του. Για τα υπόλοιπα δοκίμια που η κατάρρευσή τους ολοκληρώθηκε, παρατηρούμε ότι στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής υπήρχε μια αστάθεια με την ειδική ενέργεια παραμόρφωσης να κυμαίνεται από 9.2 kJ/Kg έως και 11 kJ/Kg. Αυτό οφείλεται στη μορφή που είχε η κατάρρευση των δοκιμών και σε καμία περίπτωση δεν ήταν ιδανική. Όσον αφορά τις αριθμητικές προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε ομοιομορφία στην ειδική ενέργεια παραμόρφωσης, λόγω την σχεδόν ιδανικής κατάρρευσης που είχαν, με τιμές από 12.8 kJ/Kg έως 13.8 kJ/Kg, ενώ μπορεί πλέον να ληφθεί υπόψη και το αρχικό δοκίμιο χωρίς ατέλεια όπου παρατηρήθηκε ιδανική κατάρρευση. Από την άλλη, στα δοκίμια ορθογωνική διατομής, παρατηρήθηκε ομοιομορφία στην ειδική

ενέργεια παραμόρφωσης, λόγω την σχεδόν ιδανικής κατάρρευσης που είχαν, με τιμές από 12 kJ/Kg έως 12.7 kJ/Kg για τη πειραματική διαδικασία και 11.5 kJ/Kg έως 11.9 kJ/Kg για τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

### 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Αμέσως παρακάτω παραθέτουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη πειραματική διαδικασία και τις αριθμητικές προσομοιώσεις, όσο και την σύγκριση των αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο 5.

Κατ' αρχήν τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι:

- Όσο πιο μεγάλη είναι η οπή/σχισμή τόσο μεγαλύτερη γίνεται η επίδρασή της στον μηχανισμό κατάρρευσης του δοκιμίου.
- Η κατάρρευση ξεκινά πάντα από τη θέση της ατέλειας.
- Η μορφή της διατομής παίζει σημαντικότερο ρόλο στη μορφή της κατάρρευσης.
- Πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής από αυτά των δοκιμίων τετραγωνικής διατομής.

Ειδικότερα, από τη πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκε το γεγονός ότι σε κάποια δοκίμια δεν ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία στα 120 mm, καθώς παρουσίασαν στρεβλή κατάρρευση και υπήρχε κίνδυνος εκτόξευσής του από τη μηχανή δοκιμών. Συγκεκριμένα τα δοκίμια αυτά είναι τα S0 ( $\approx 24$  mm), S11 ( $\approx 72$  mm), S2 (οριακά στα 112 mm αφού γλίστρησε λίγο πριν το τέλος και μηδενίστηκε το φορτίο), S21 ( $\approx 65$  mm), S22 ( $\approx 72$  mm) και S31 ( $\approx 83$  mm). Όπως παρατηρούμε τα δοκίμια αυτά είναι μόνο δοκίμια με τετραγωνική διατομή. Τα μοναδικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής στα οποία ολοκληρώθηκε η πειραματική διαδικασία επιτυχώς ήταν τα S1, S12, S3 και S32. Αν εξαιρέσουμε το δοκίμιο S3 όπου είχαμε ολική διάρρηξη της σχισμής και το αποτέλεσμα δεν ήταν το επιθυμητό, στα υπόλοιπα η κατάρρευση μπορεί να χαρακτηριστεί επιτυχής και σχεδόν ιδανική. Το συμπέρασμα των παραπάνω είναι ότι είχαμε ικανοποιητικότερη κατάρρευση στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής.

Όσον αφορά τις αριθμητικές προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε ιδανική ή σχεδόν ιδανική κατάρρευση σε όλα τα δοκίμια που προσομοιώθηκαν. Συγκεκριμένα στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής S1, S11, S2, S3, S31 παρατηρήθηκε σχεδόν ιδανικός τρόπος κατάρρευσης, ενώ σε όλα τα υπόλοιπα δοκίμια είχαμε ιδανικό τρόπο κατάρρευσης.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στα δοκίμια τετραγωνικής διατομής, όπως παρατηρήθηκε από τα πειράματα, η διαμήκης ραφή συγκόλλησης ήταν ασθενής με

αποτέλεσμα την αστοχία της (εκτεταμένη σε κάποιες περιπτώσεις). Έτσι, σε αρκετά δοκίμια οδηγεί σε στρεβλή κατάρρευση (όχι προοδευτική), με εκτεταμένη διάρρηξη των τοιχωμάτων που ξεκινά κυρίως από τις περιοχές των οπών. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται και στις μορφές των καμπυλών φορτίων – μετατόπισης. Από την άλλη, στα **δοκίμια ορθογωνικής διατομής**, όπως παρατηρήθηκε από τα πειράματα, η ποιότητα της διαμήκου ραφής συγκόλλησης ήταν πολύ υψηλότερη από αυτή των δοκιμών τετραγωνικής διατομής. Επίσης, στην προοδευτική κατάρρευση (πειραματικά), των δοκιμών ορθογωνικής διατομής φαίνεται ότι παίζει ρόλο και η καλύτερη επιφάνεια έδρασης των μετώπων.

Το γεγονός ότι τα δοκίμια ορθογωνικής διατομής είχαν πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα από τα αντίστοιχα δοκίμια τετραγωνικής διατομής, φαίνεται και από τη σύγκριση της ειδικής ενέργειας παραμόρφωσης η οποία ενδείκνυται για σύγκριση δοκιμών διαφορετικής γεωμετρίας. Όπως παρατηρήσαμε στην παράγραφο 5.4.5 η ειδική ενέργεια που απορροφήθηκε ήταν αρκετά μεγαλύτερη στα ορθογωνικά δοκίμια από εκείνη των τετραγωνικών δοκιμών που είχαν ολοκληρωμένη κατάρρευση. Η παράγραφος 4.5.4 όπου αναφέρονται οι παραδοχές που λήφθηκαν στο αριθμητικό μοντέλο σε σχέση με το πραγματικό, ερμηνεύουν εν πολλοίς τις αποκλίσεις μεταξύ τους.

Επίσης, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμών με ατέλειες, η κατάρρευση και η δημιουργία του πρώτου λοβού ξεκινά από την οπή/σχισμή άσχετα με το πώς θα καταλήξει στη συνέχεια η μορφή της κατάρρευσης. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι οι οπές κατασκευάστηκαν στις πλευρές των σωλήνων χωρίς ραφή. Επίσης, οι ραφές στους ορθογωνικούς σωλήνες βρίσκονται στη μία από τις δύο απέναντι μικρές πλευρές.

Ακόμη, σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι τα δύο τοπικά μέγιστα των καμπυλών φορτίου – μετατόπισης παρατηρήθηκαν στο σημείο που ξεκινά ο πρώτος λοβός και πλέον σταματά η ελαστική συμπεριφορά του υλικού (ολικό μέγιστο) και στο σημείο όπου ολοκληρώνεται η δημιουργία των δυνατών λοβών στο μισό του σωλήνα και εκτόνωση παραμόρφωσης του άλλου μισού από την ατέλεια και καθ' ύψος. Η μετατόπιση του εμβόλου σ' αυτή τη περίπτωση είναι στα 105 με 107 mm και παρατηρείται μόνο στα δοκίμια που έχουν ολοκληρωμένη και ιδανική κατάρρευση.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι το ύψος των δοκιμών επιλέχθηκε τέτοιο ώστε, με βάση τις υπόλοιπες διαστάσεις της διατομής και το άρθρο των Abramowicz & Jones [19], να προκύψει ολικός λυγισμός (global buckling) στο δοκίμιο τετραγωνικής διατομής χωρίς οπές, γεγονός που επαληθεύτηκε στη σχετική δοκιμή. Ωστόσο, το ύψος αυτό δεν αποδείχθηκε

επαρκές ώστε να προκύψει και στα δοκίμια ορθογωνικής διατομής χωρίς οπές αντίστοιχος τρόπος παραμόρφωσης (ολικός λυγισμός) τουλάχιστον όσων αφορά τη πειραματική διαδικασία. Στις αριθμητικές προσομοιώσεις όπου έχουμε ιδανικές συνθήκες κατάρρευσης τα παραπάνω επαληθεύτηκαν.

## 7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Αμέσως παρακάτω παρατίθενται κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν σε μια μελλοντική διπλωματική εργασία ή να αποτελέσουν αντικείμενο μελέτης των καταστροφικών καταπονήσεων.

Ο βασικότερος παράγοντας σε τέτοιου είδους μελέτες είναι η **επαναληψιμότητα**. Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας δυστυχώς δεν υπήρχε δυνατότητα να γίνουν πάρα πολλά πειράματα κυρίως για λόγους χρόνου, οικονομικούς και άλλους. Για πιο ασφαλή συμπεράσματα όμως πρέπει να γίνουν περισσότερα πειράματα για κάθε τύπο δοκιμίου. Εκτελώντας μόνο ένα πείραμα ανά μορφή δοκιμίου υπάρχει ο κίνδυνος να προκύψουν αποτελέσματα που δεν ανταποκρίνονται στη πραγματικότητα καθώς υπάρχουν πολλοί τυχαίοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα μιας πειραματικής διαδικασίας.

Άλλες μελέτες που μπορούν να γίνουν με τα συγκεκριμένα δοκίμια, έχουν να κάνουν με τον τρόπο καταπόνησης. Έτσι είναι σημαντικό να γίνει και **δυναμική καταπόνηση** εκτός της στατικής που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Όσον αφορά το αριθμητικό μοντέλο, θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί η **αστοχία της ραφής** με τη χρήση διπλών κόμβων (όχι merged) προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα διαχωρισμού. Επίσης, για τις ζώνες διάρρηξης – αστοχίας μη προδιαγεγραμμένης γεωμετρίας μπορεί να εισαχθεί κάποιο κριτήριο που να οδηγεί σε διαγραφή των αντίστοιχων πεπερασμένων στοιχείων (αναγκαία εδώ η πυκνή διακριτοποίηση) ώστε να προσομοιωθεί η διάρρηξη της ραφής συγκόλλησης. Για ακριβέστερη αποτύπωση της αστοχίας βέβαια – στη συγκεκριμένη περίπτωση – απαραίτητη είναι η ένταξη στη μοντελοποίηση και των αιτιών που οδηγούν σε αυτή (π.χ. ανισοτροπία υλικού, ακριβέστερη απεικόνιση γεωμετρίας, μεταβαλλόμενοι συντελεστές τριβής κ.τ.λ.).

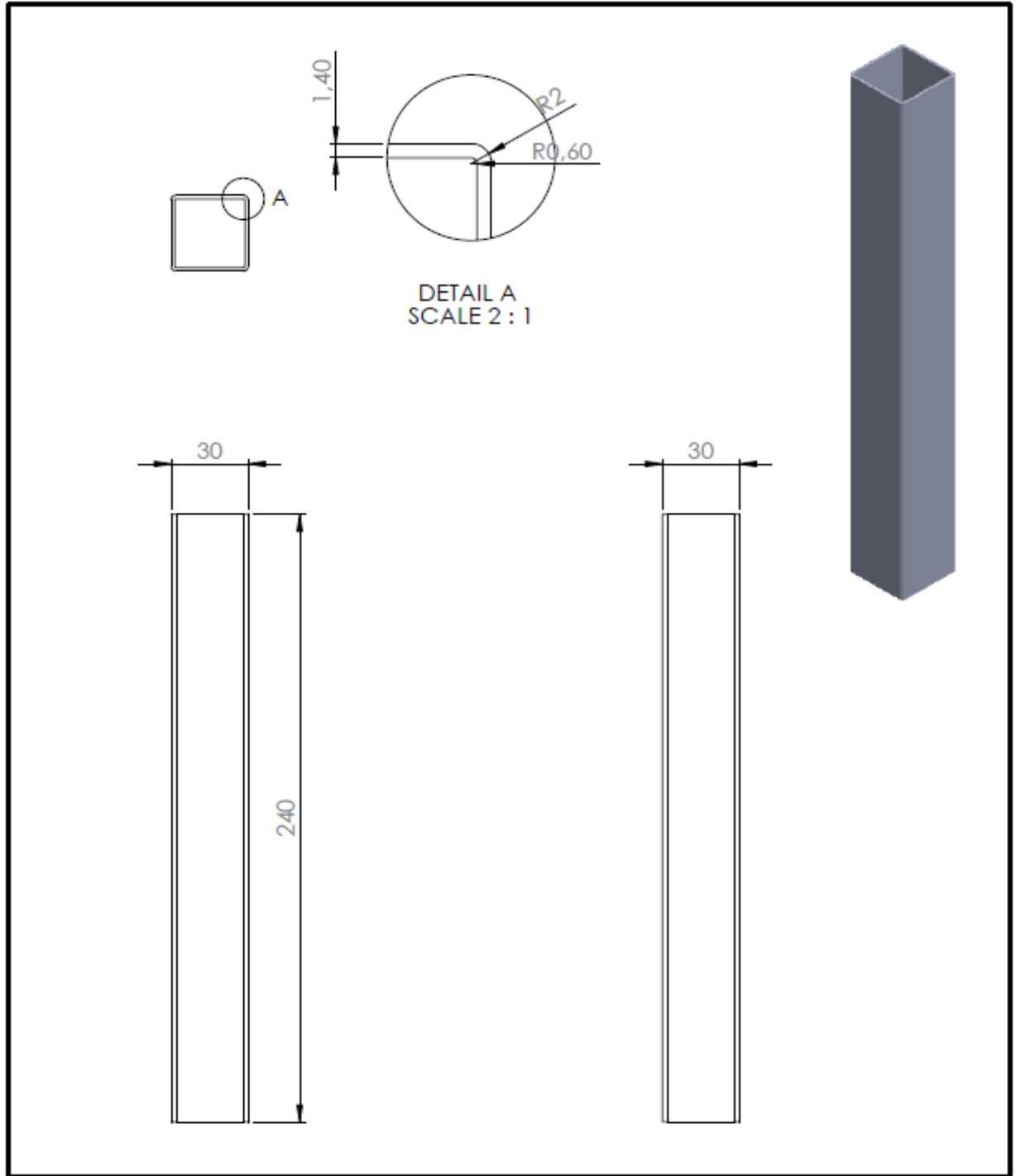
Επιπλέον, μελέτη θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αν τα πειράματα επαναλαμβάνονταν, αλλά να ήταν από διαφορετικό υλικό. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιο **υλικό** που δεν θα έφτανε σε θραύση, όπως είδαμε αρκετές φορές στο συγκεκριμένο πείραμα. Επίσης, αλλαγές θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και στη μορφή και το **μέγεθος της διατομής** αλλά και στη **ραφή της συγκόλλησης** η οποία σε πολλές περιπτώσεις αστοχούσε.

Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε ίσως τον πιο σημαντικό παράγοντα που είναι οι ίδιες οι **ατέλειες** των δοκιμίων. Έτσι, θα μπορούσαμε να αλλάξουμε το **μέγεθος** της οπής, το **είδος** της ατέλειας, τον **αριθμό** των οπών και τη **θέση** τους καθ' ύψος του δοκιμίου.

Οι καταστροφικές καταπονήσεις είναι πολύ σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης επιστήμης, ταχέως αναπτυσσόμενο, οπότε η μελέτη και η έρευνα πάνω σε αυτό είναι απαραίτητη με βάση τις απαιτήσεις της σημερινής κοινωνίας.

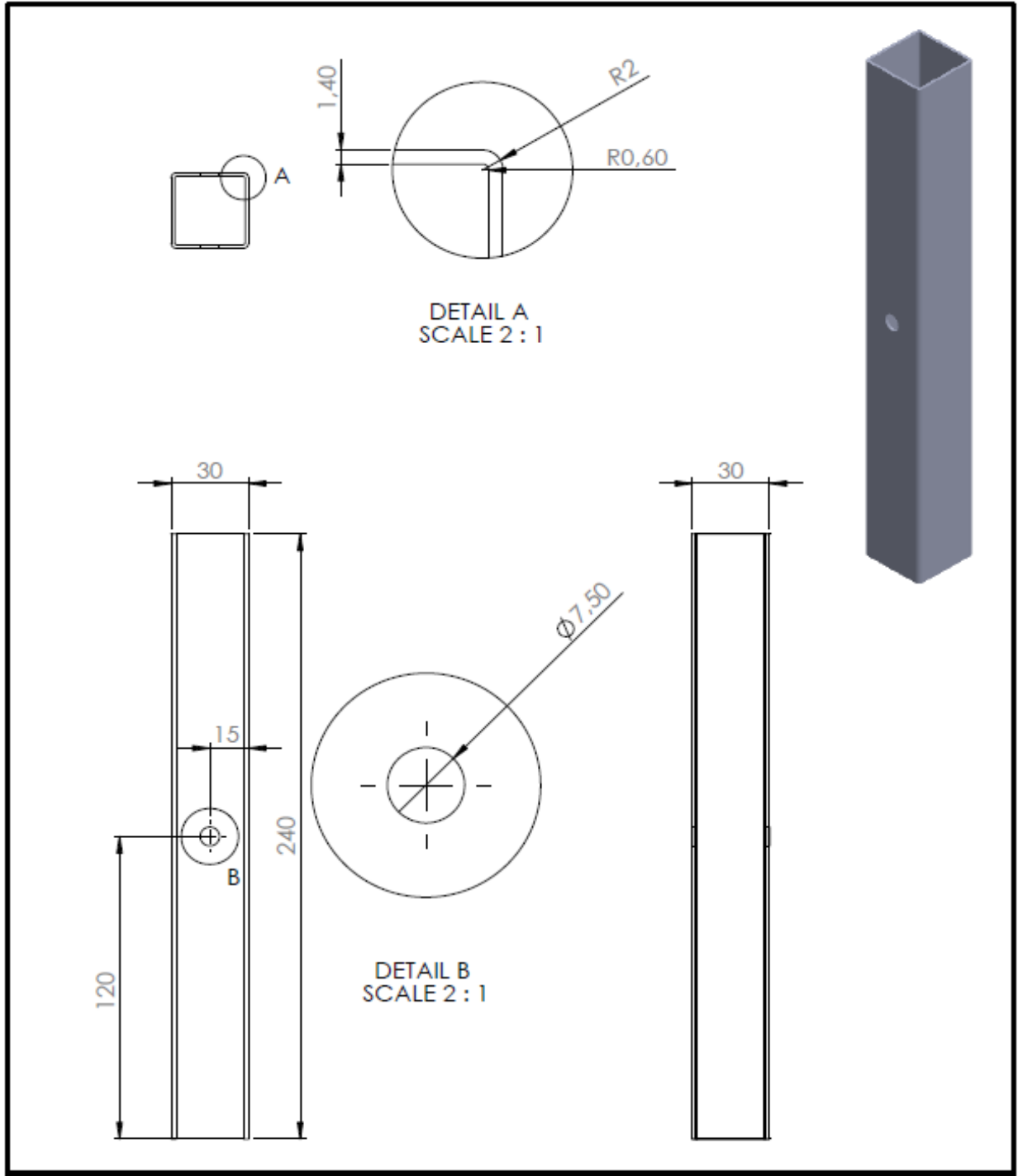
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

ΠΑ.1 ΔΟΚΙΜΙΟ S0

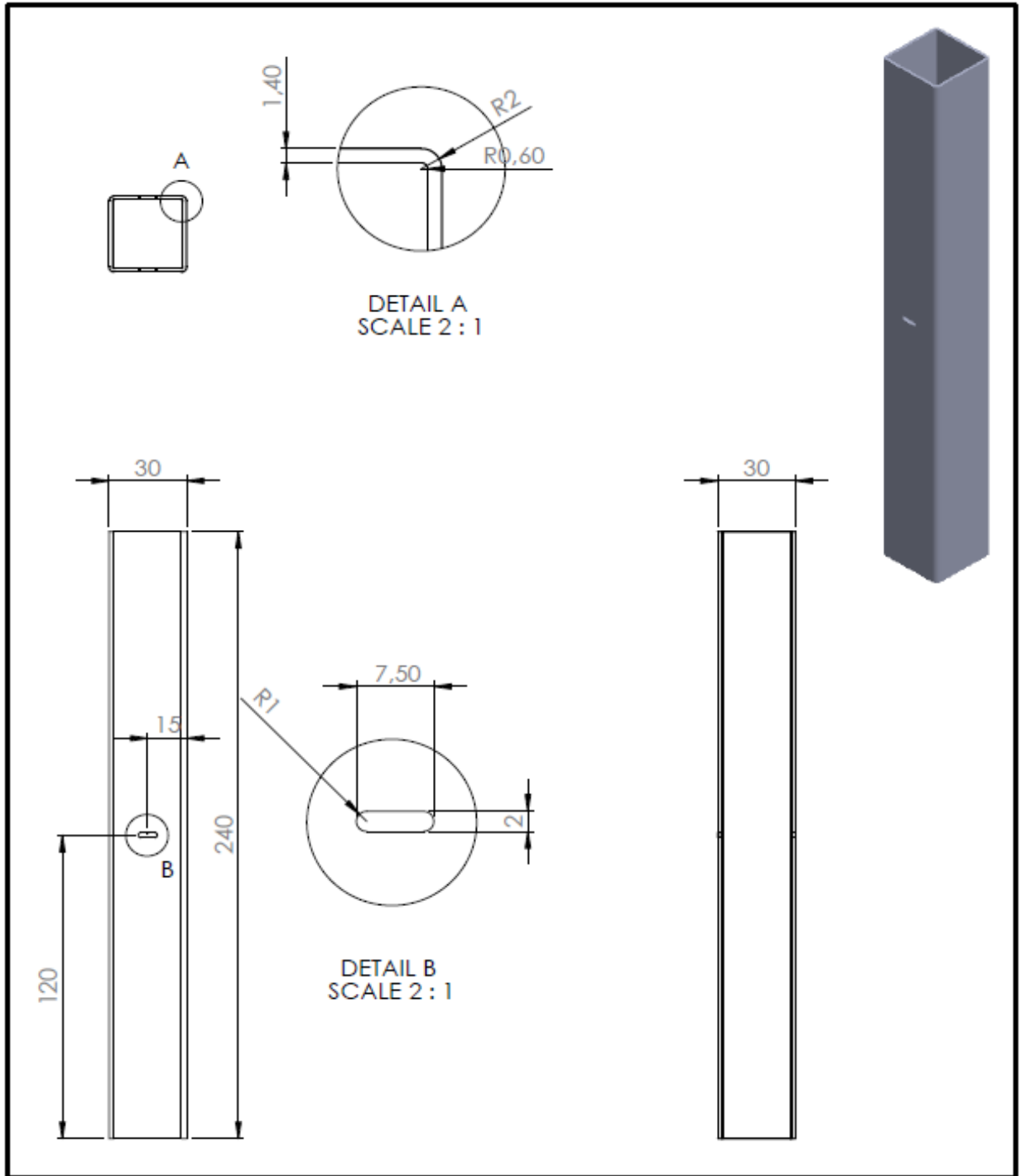




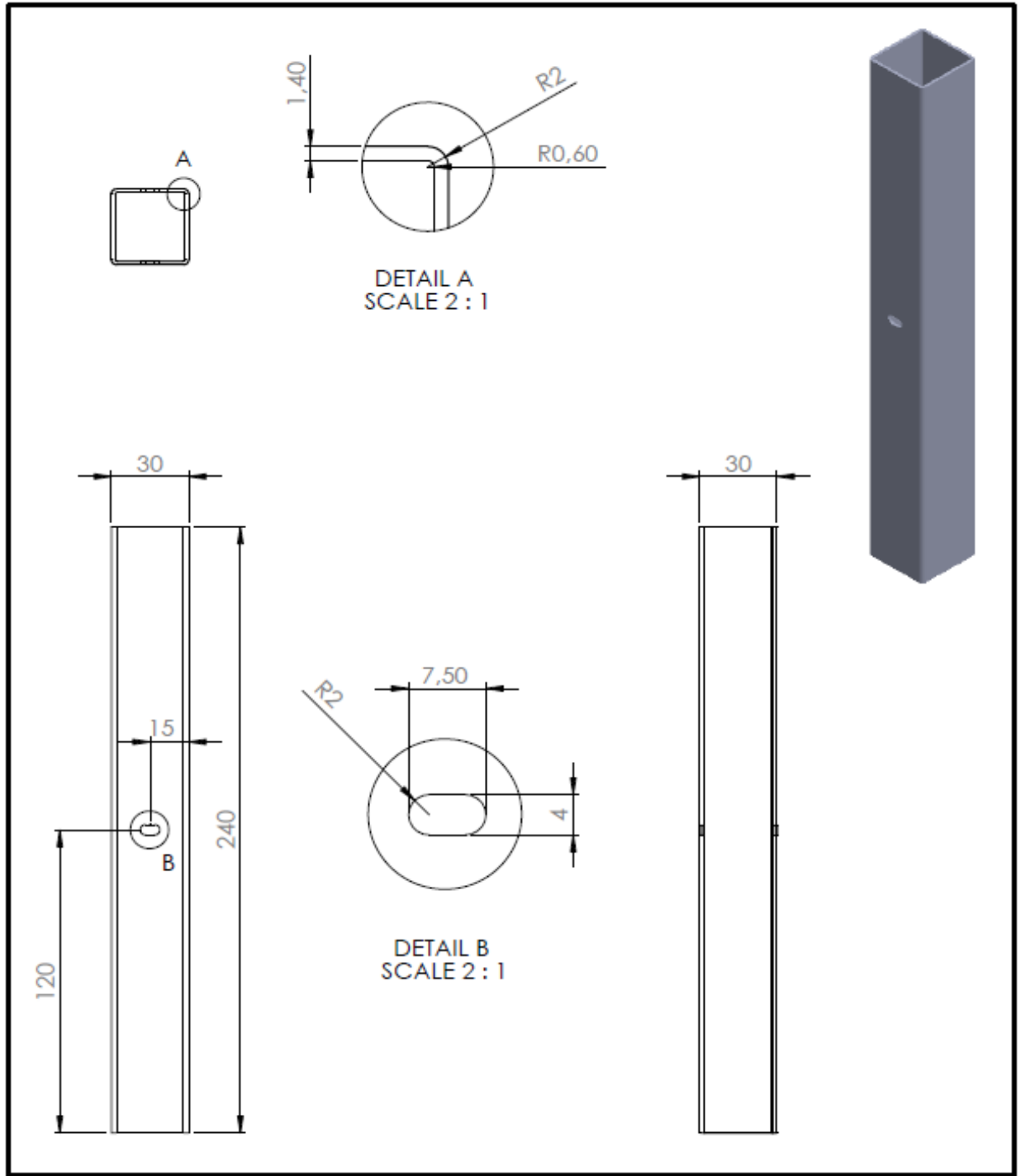
ΠΑ.2 ΔΟΚΙΜΙΟ S1



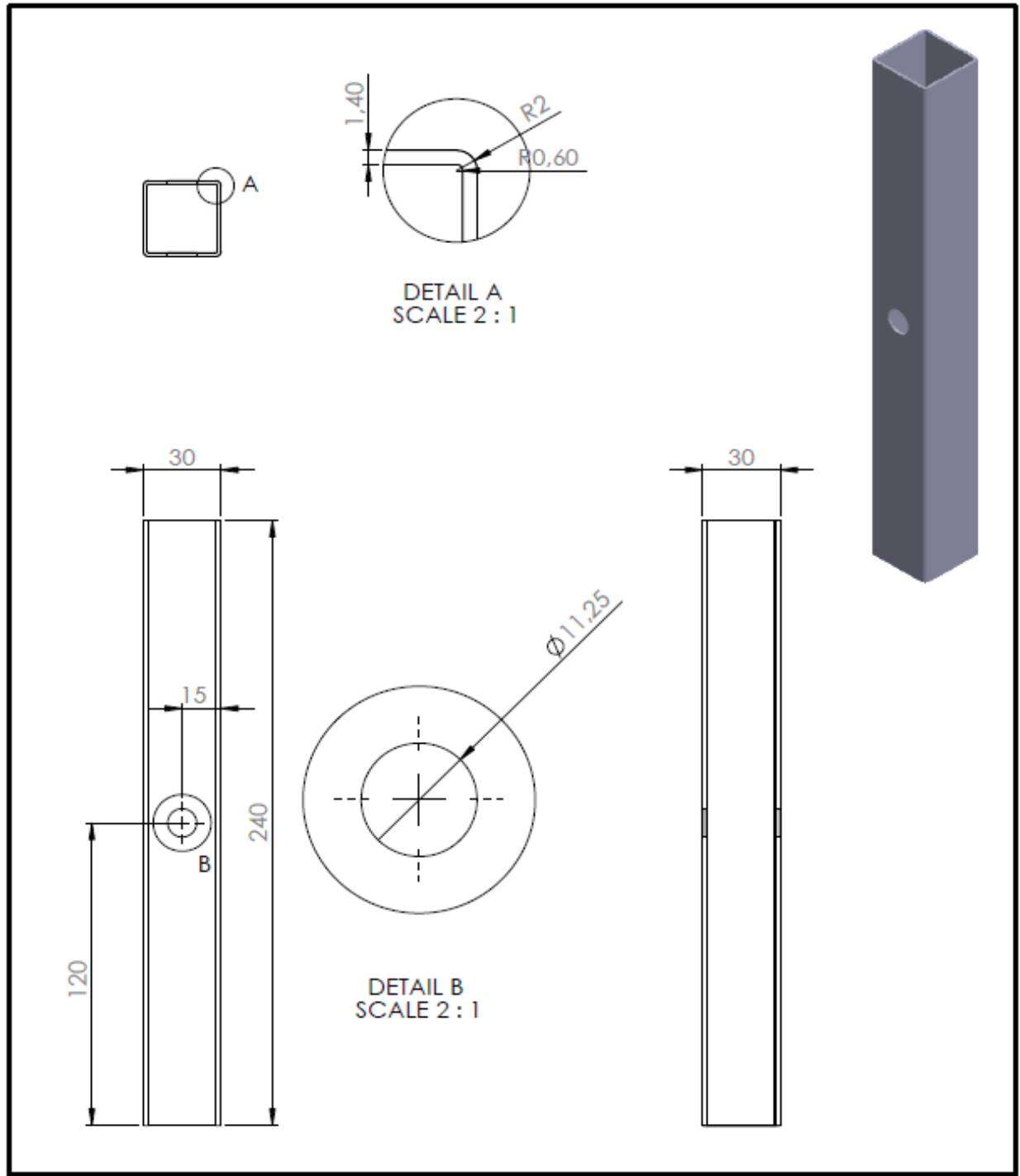
ΠΑ.3 ΔΟΚΙΜΙΟ S11



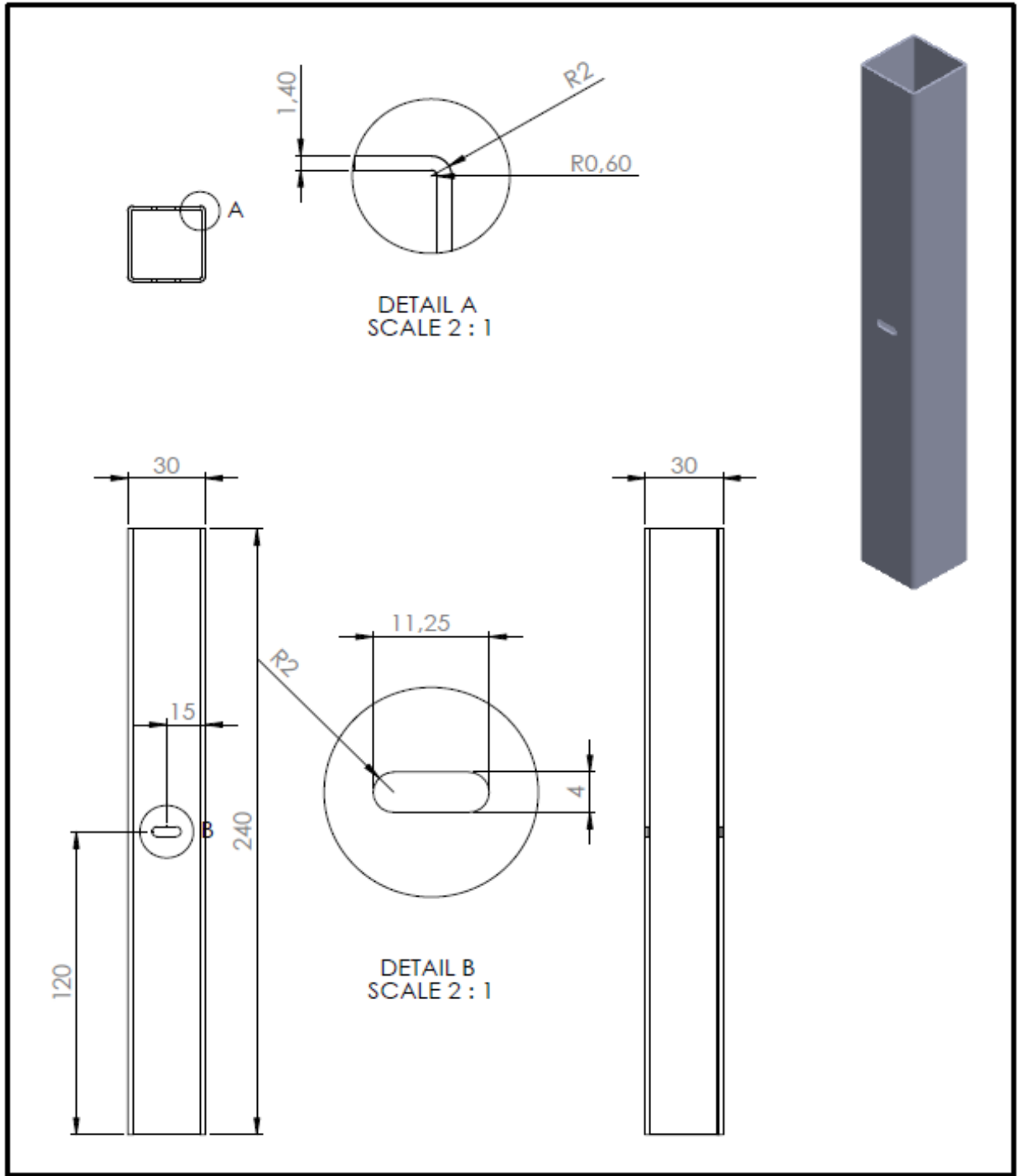
ΠΑ.4 ΔΟΚΙΜΙΟ S12



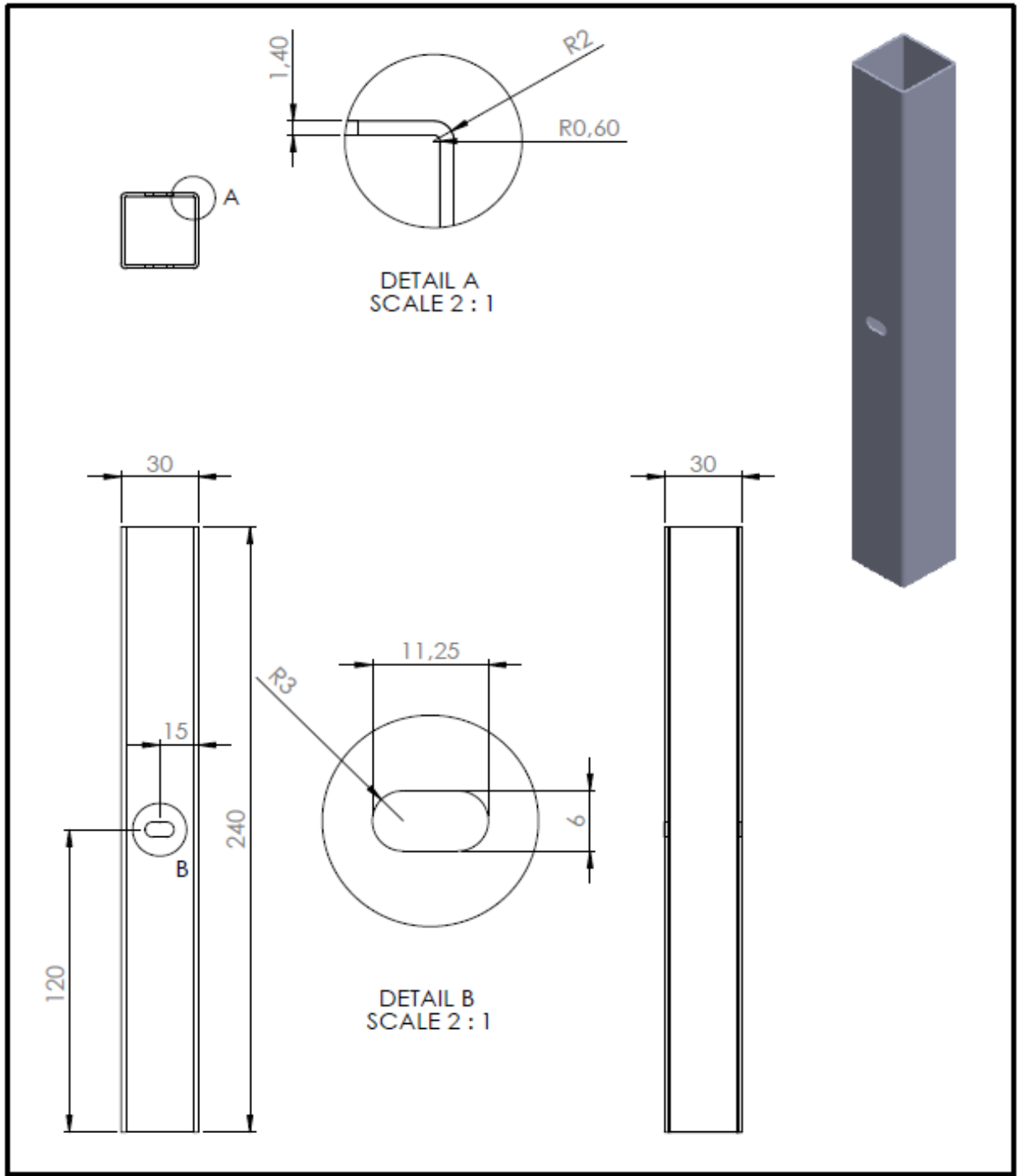
ΠΑ.5 ΔΟΚΙΜΙΟ S2



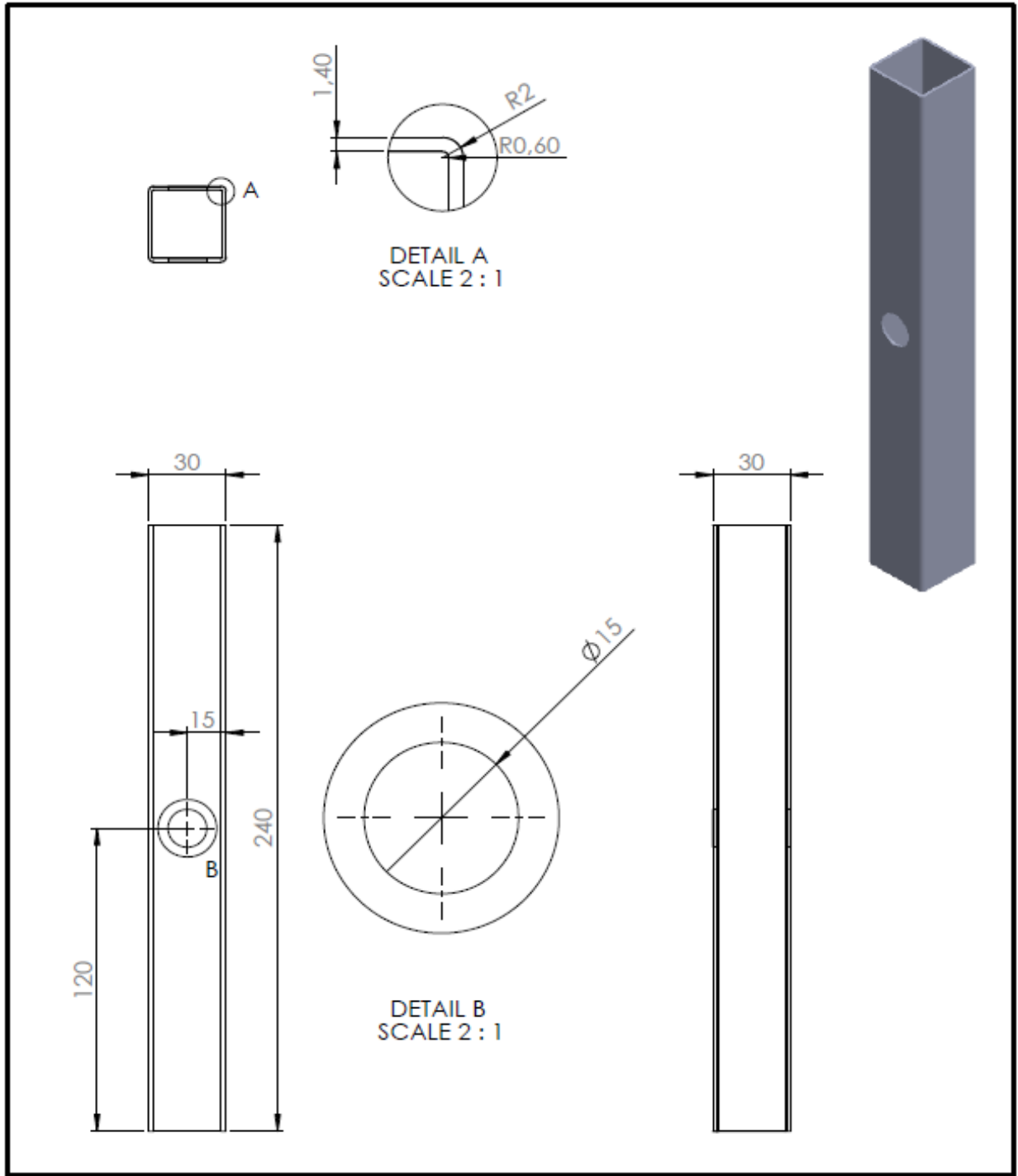
ΠΑ.6 ΔΟΚΙΜΙΟ S21



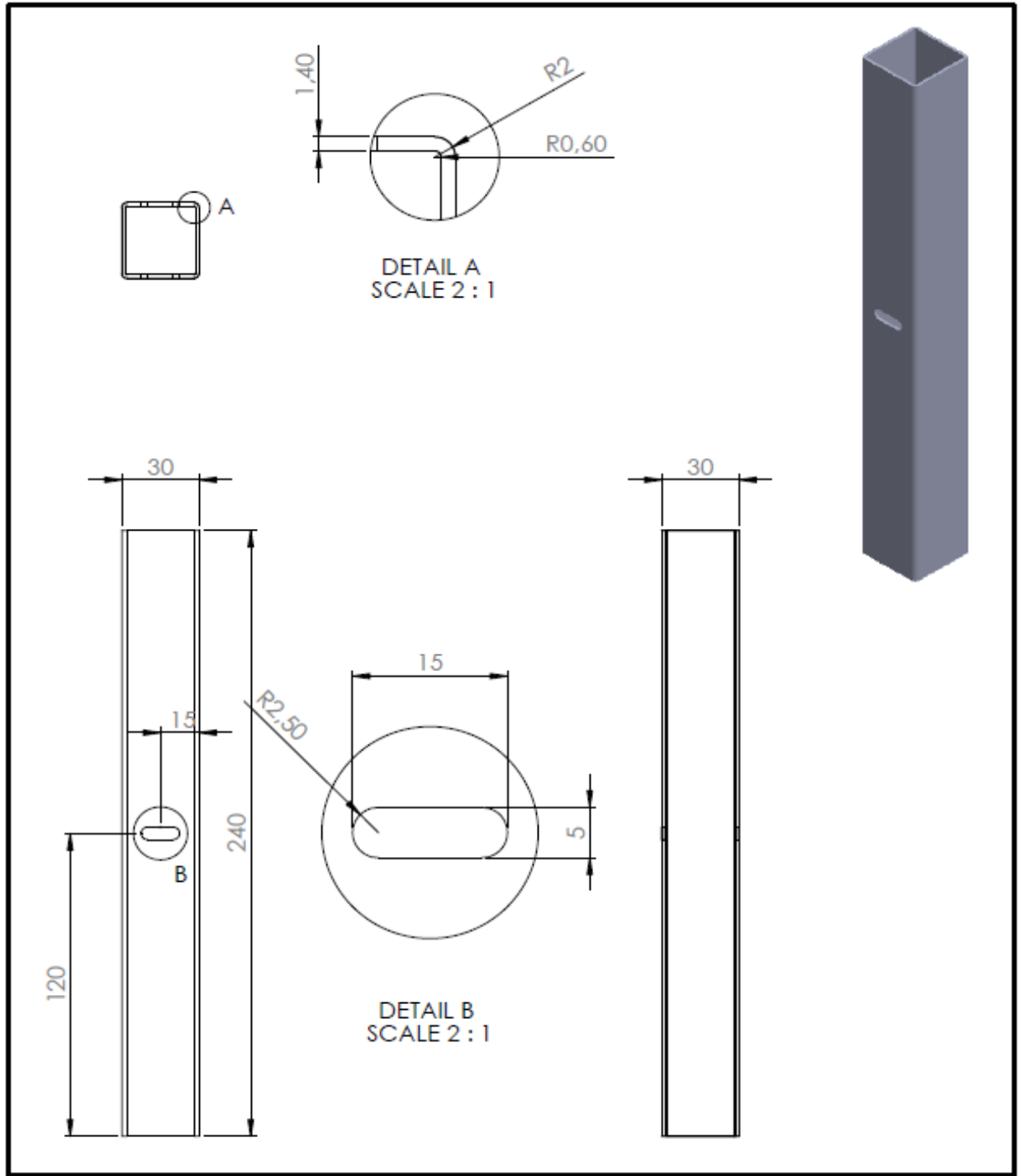
ΠΑ.7 ΔΟΚΙΜΙΟ S22



ΠΑ.8 ΔΟΚΙΜΙΟ S3

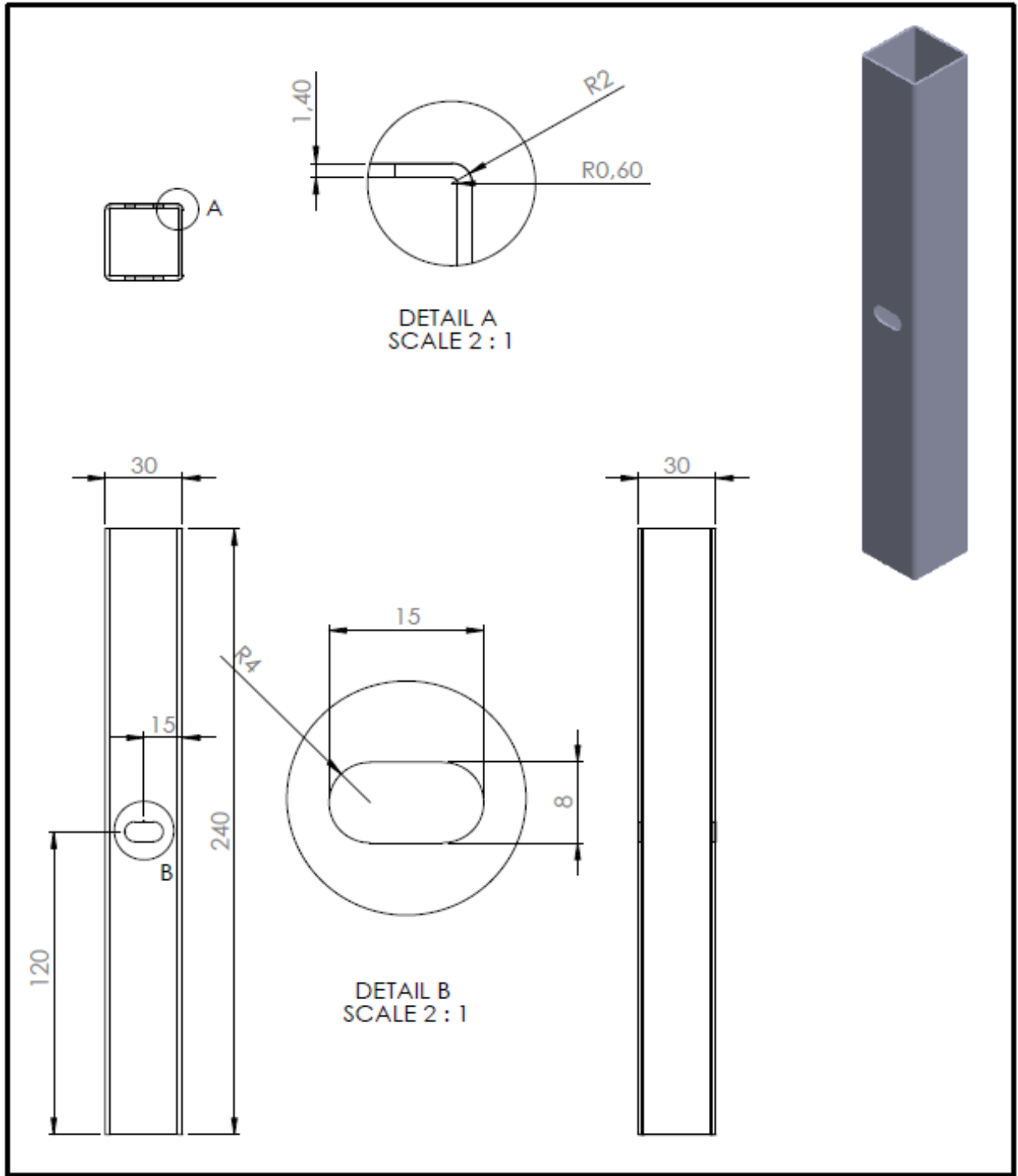


ΠΑ.9 ΔΟΚΙΜΙΟ S31

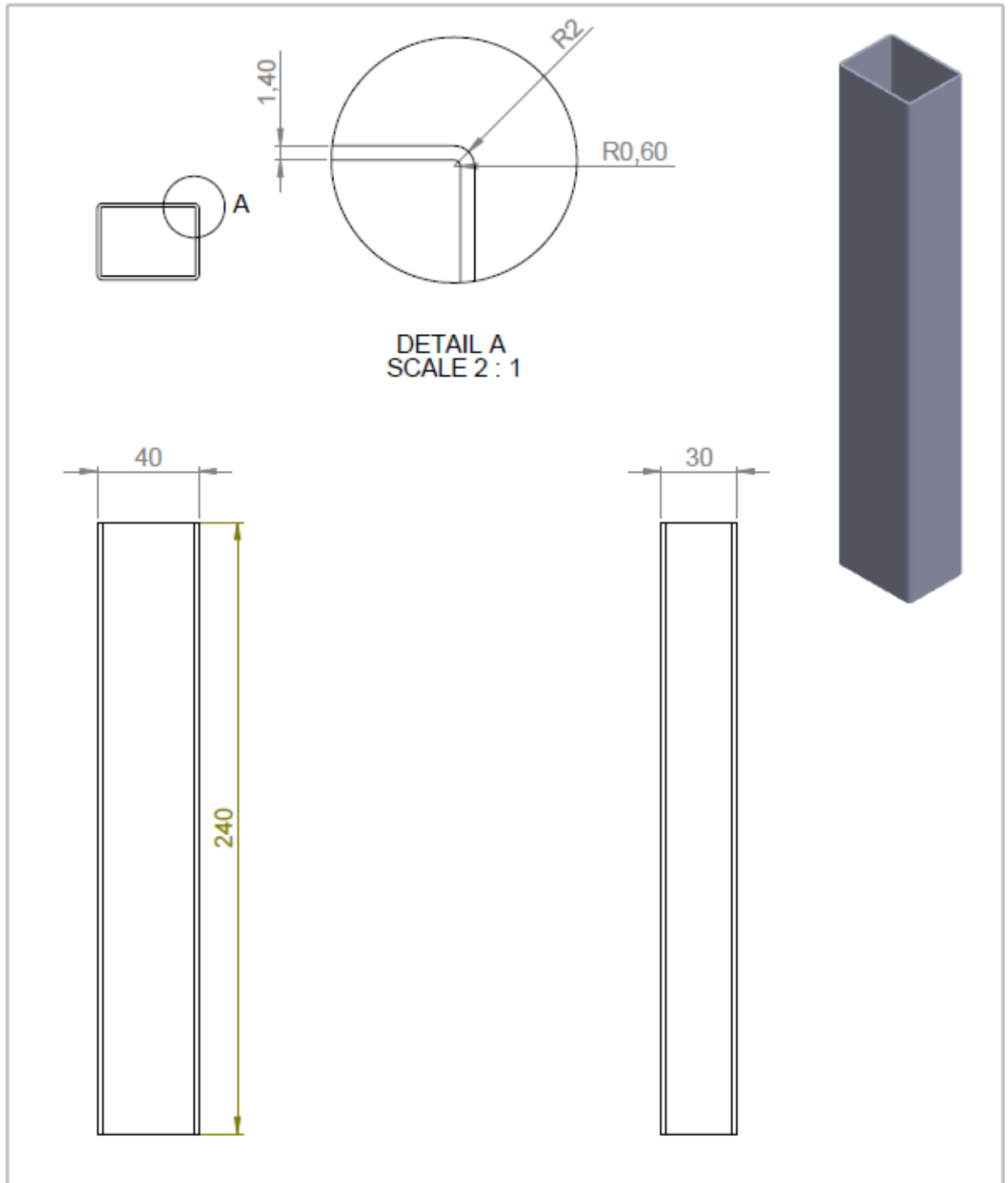




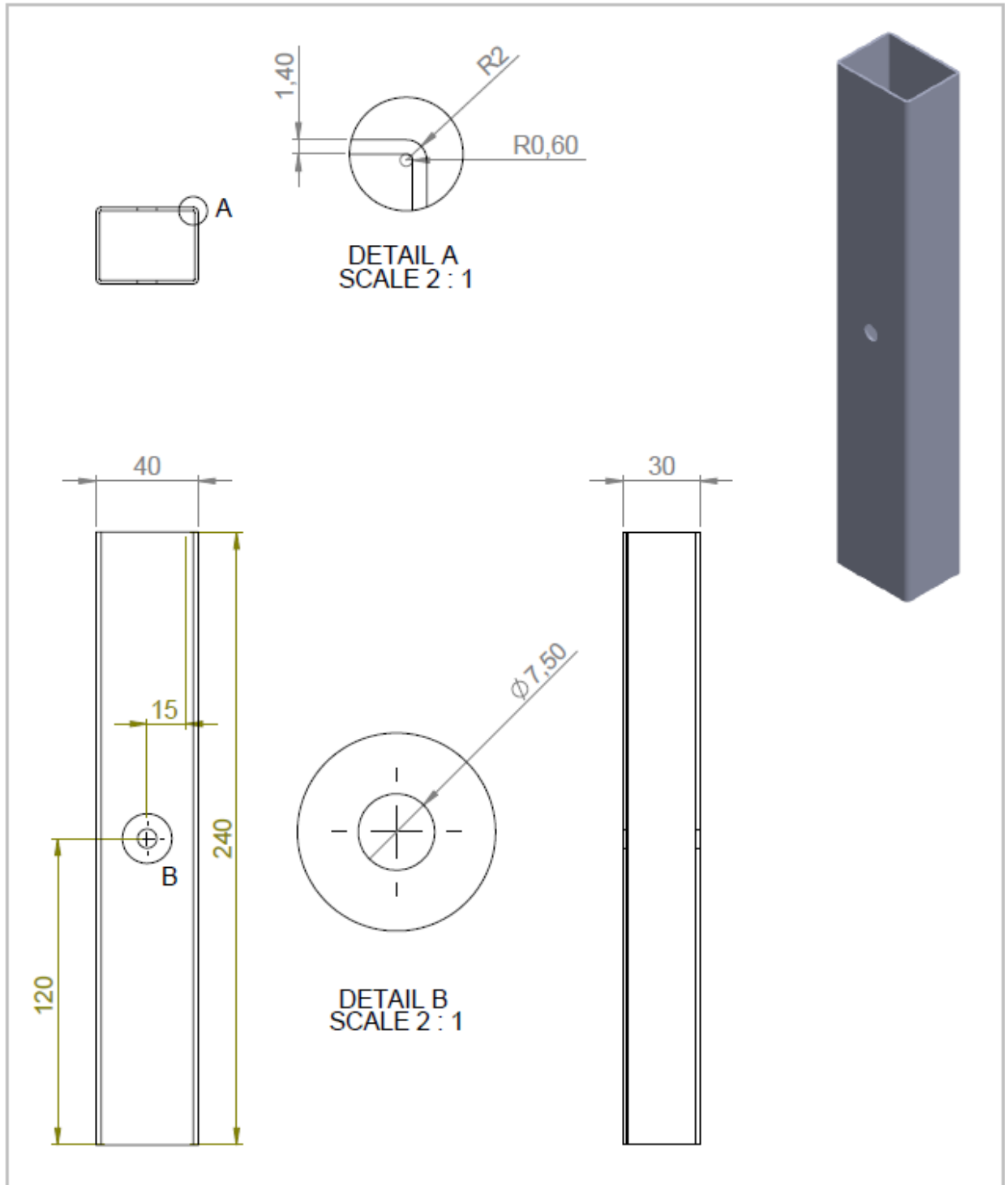
ΠΑ.10 ΔΟΚΙΜΙΟ S32



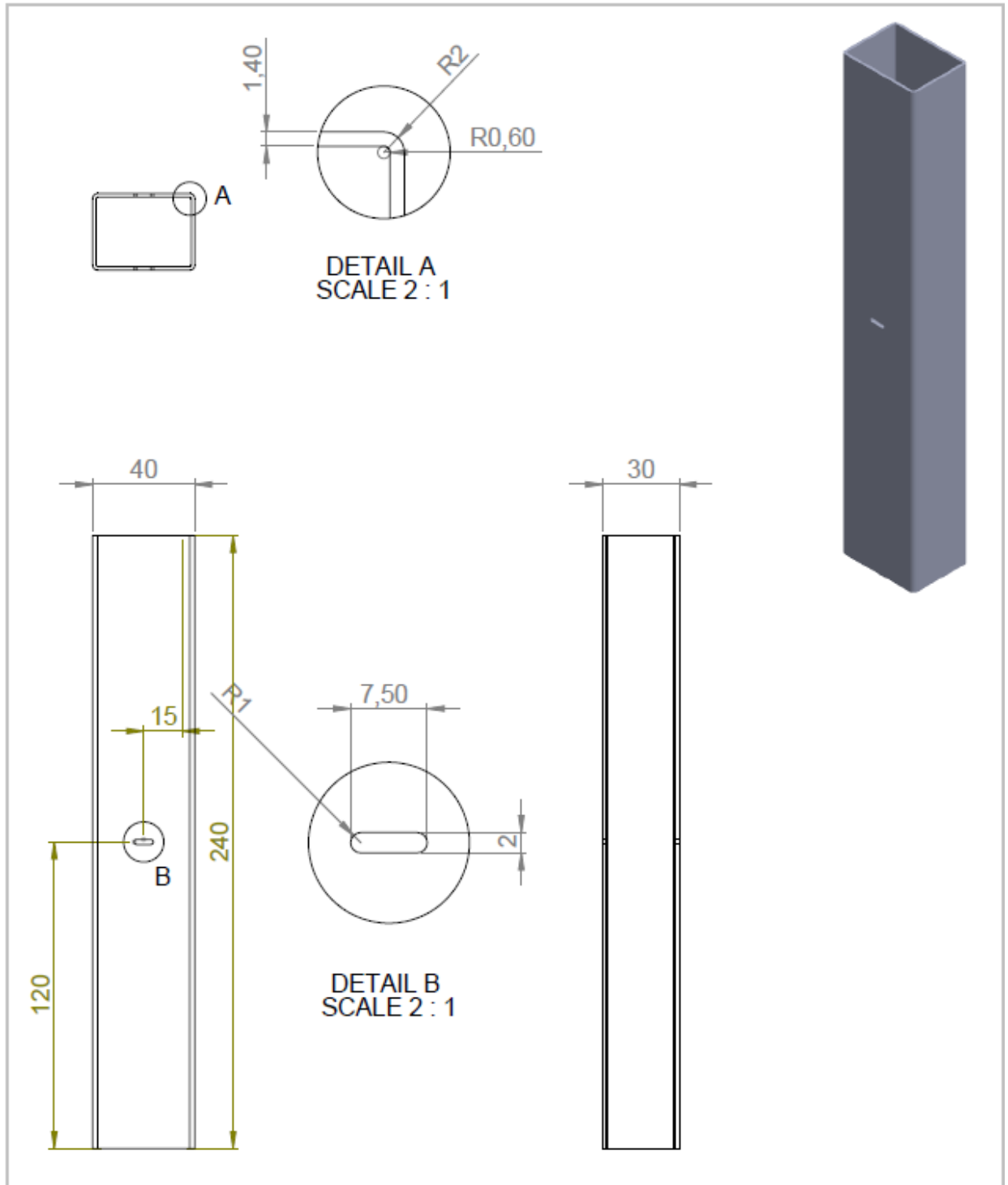
ΠΑ.11 ΔΟΚΙΜΙΟ R0



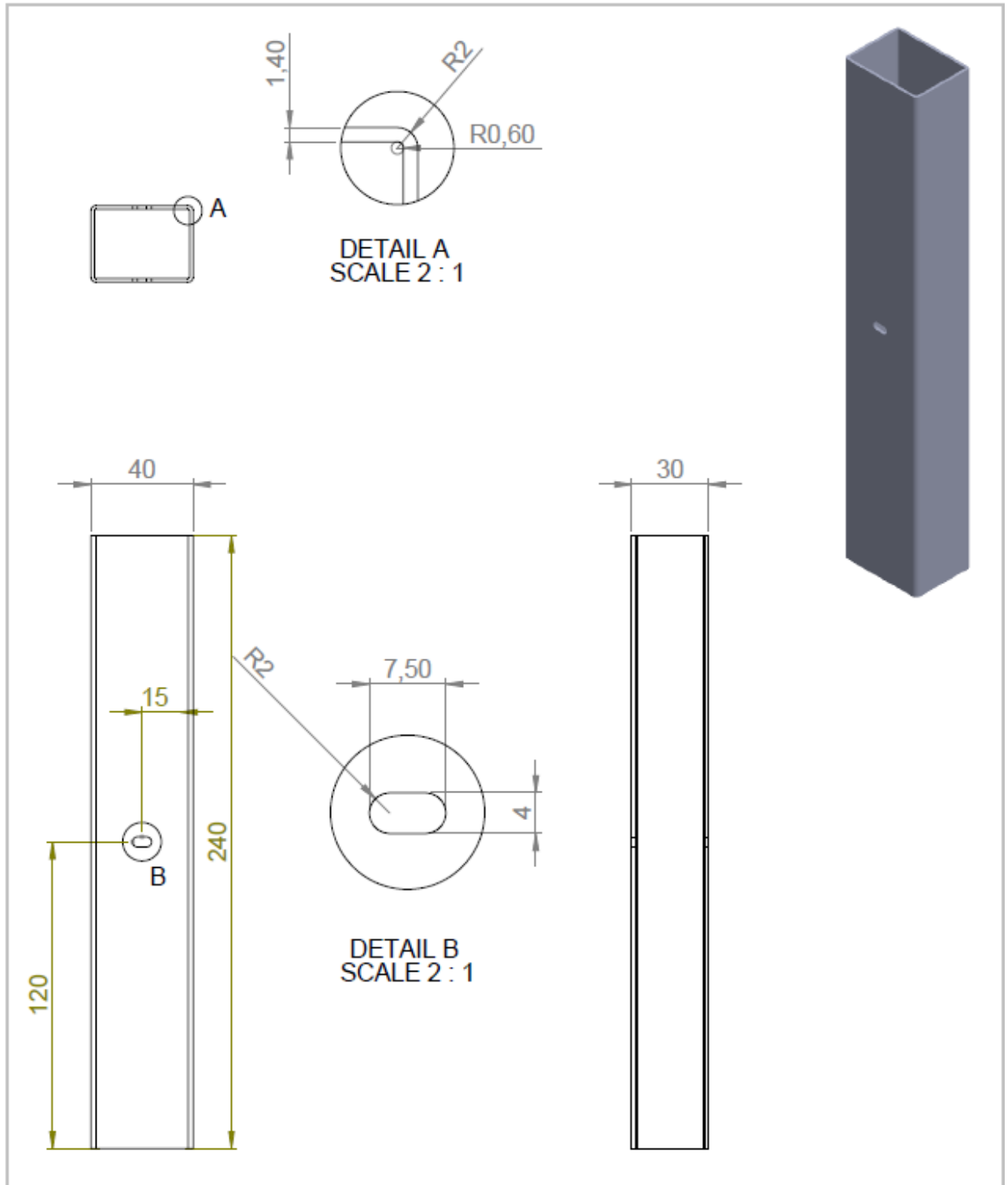
ΠΑ.12 ΔΟΚΙΜΙΟ R1



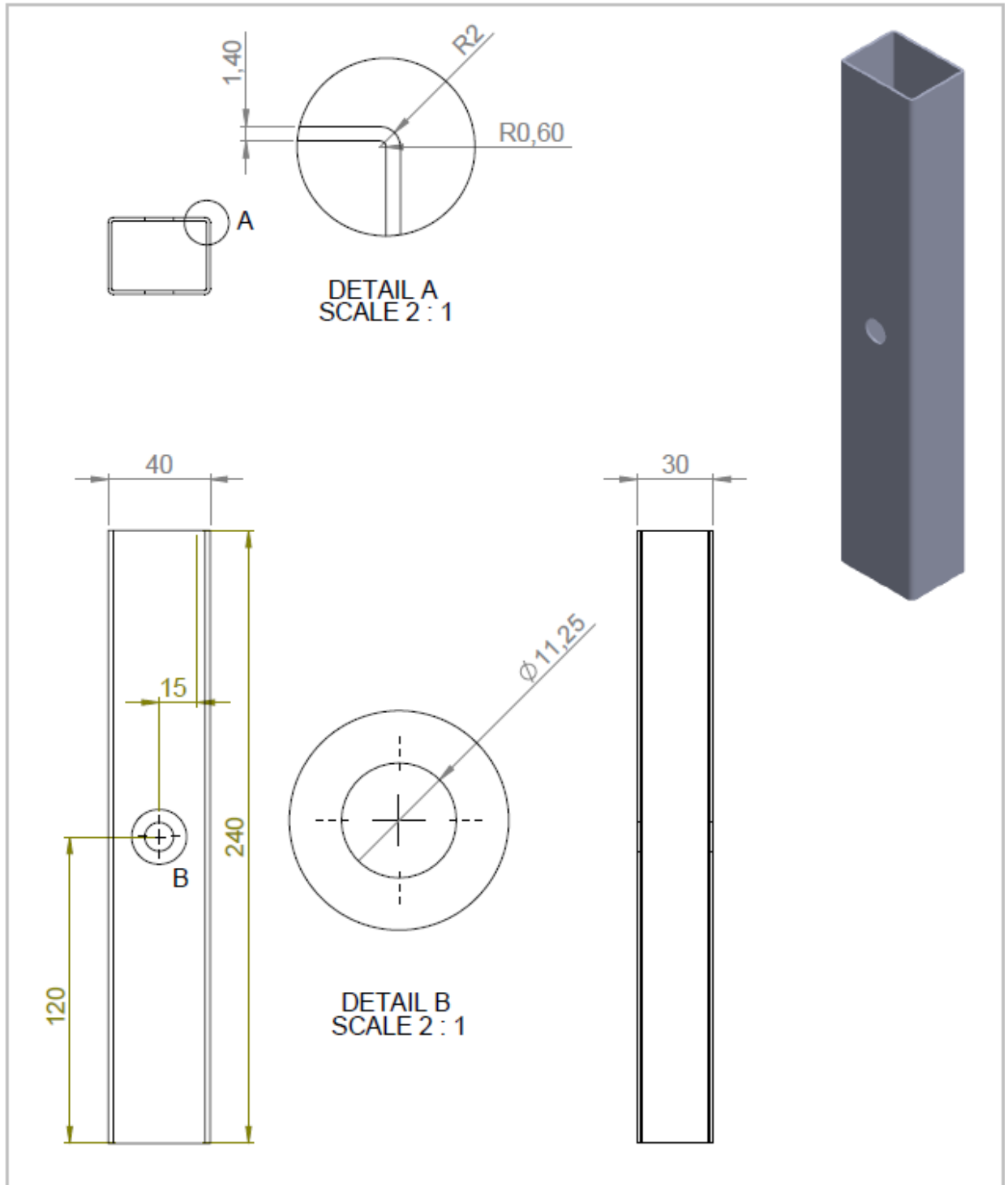
ΠΑ.13 ΔΟΚΙΜΙΟ R11



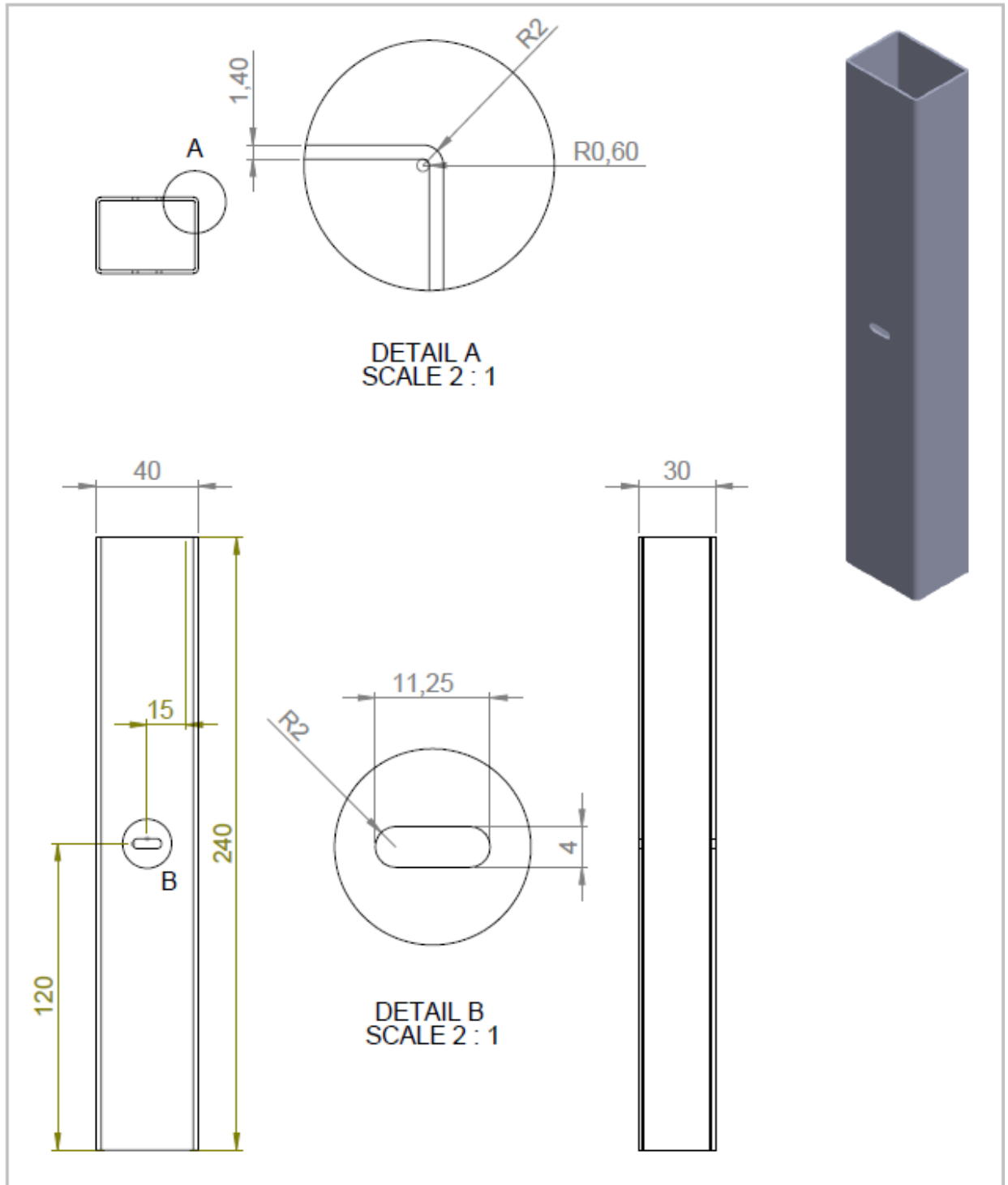
ΠΑ.14 ΔΟΚΙΜΙΟ R12



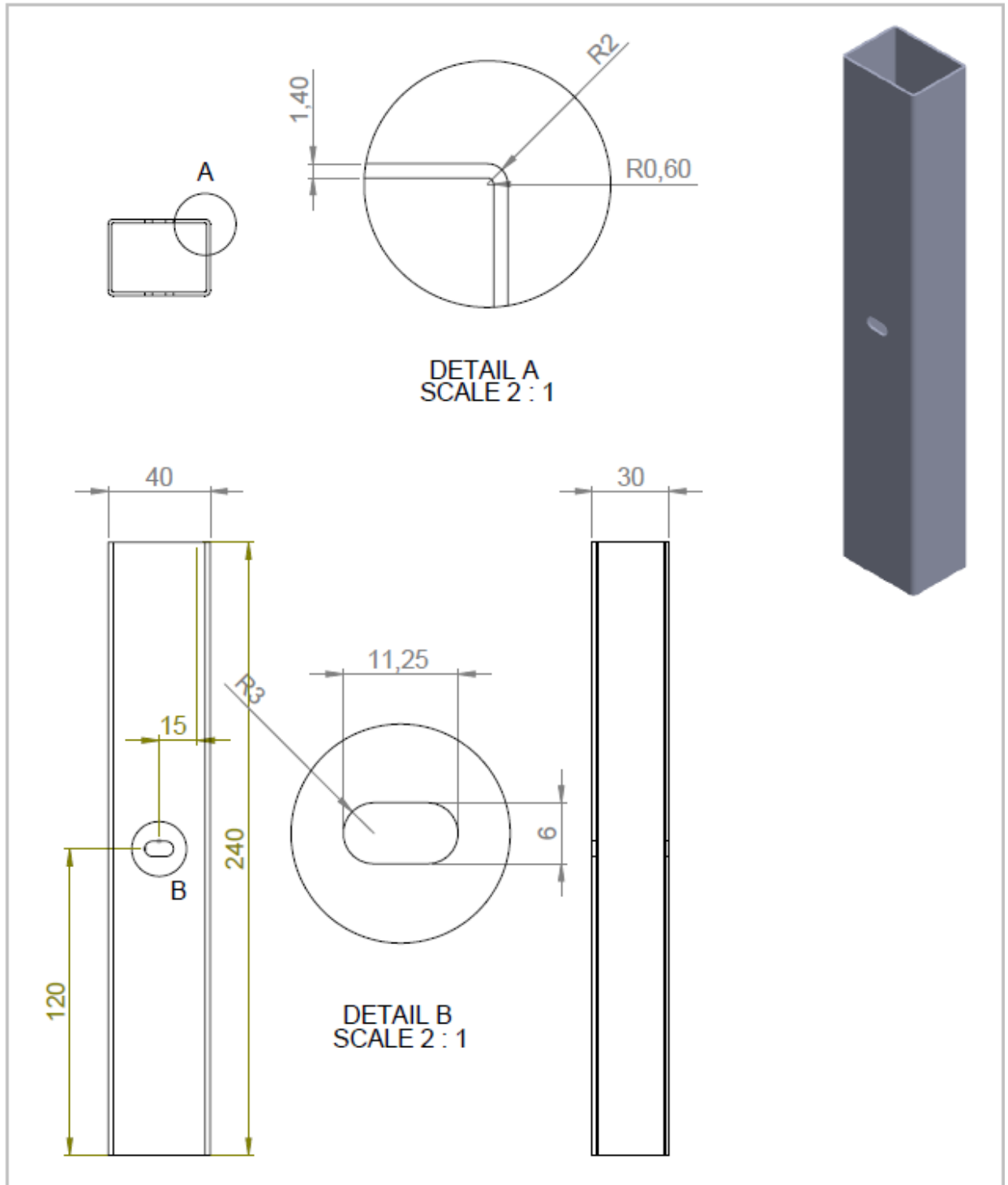
ΠΑ.15 ΔΟΚΙΜΙΟ R2



ΠΑ.16 ΔΟΚΙΜΙΟ R21

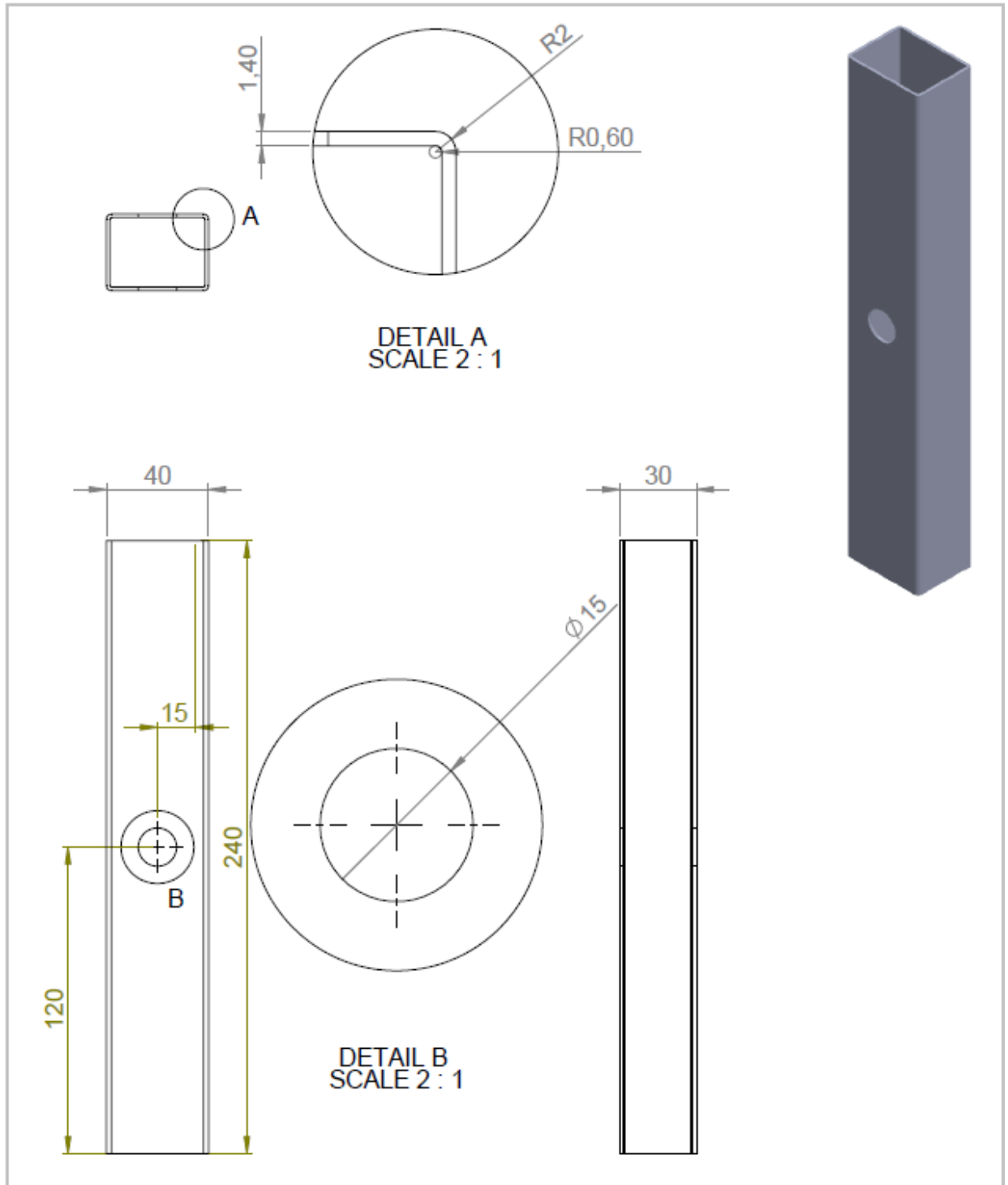


ΠΑ.17 ΔΟΚΙΜΙΟ R22

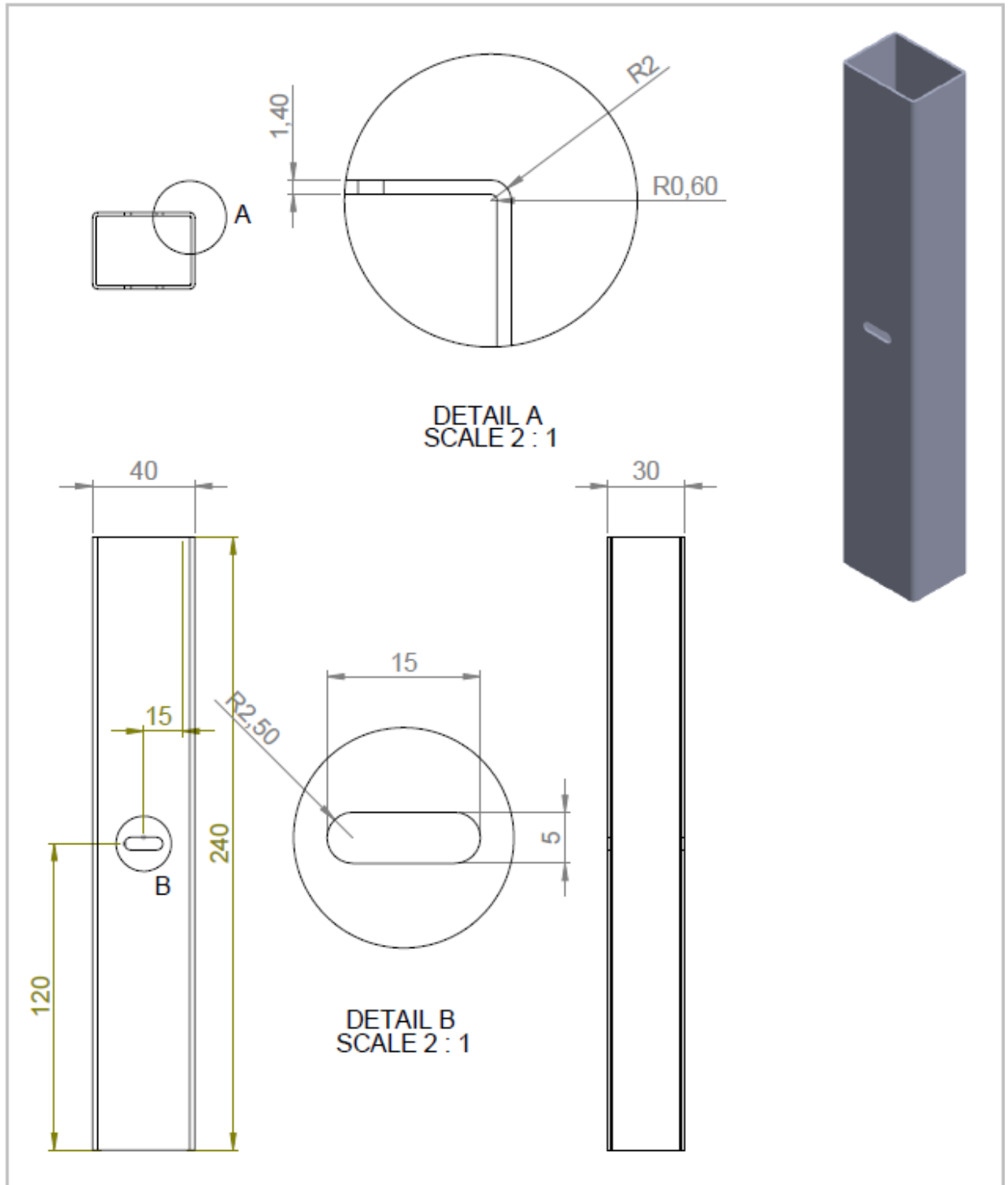




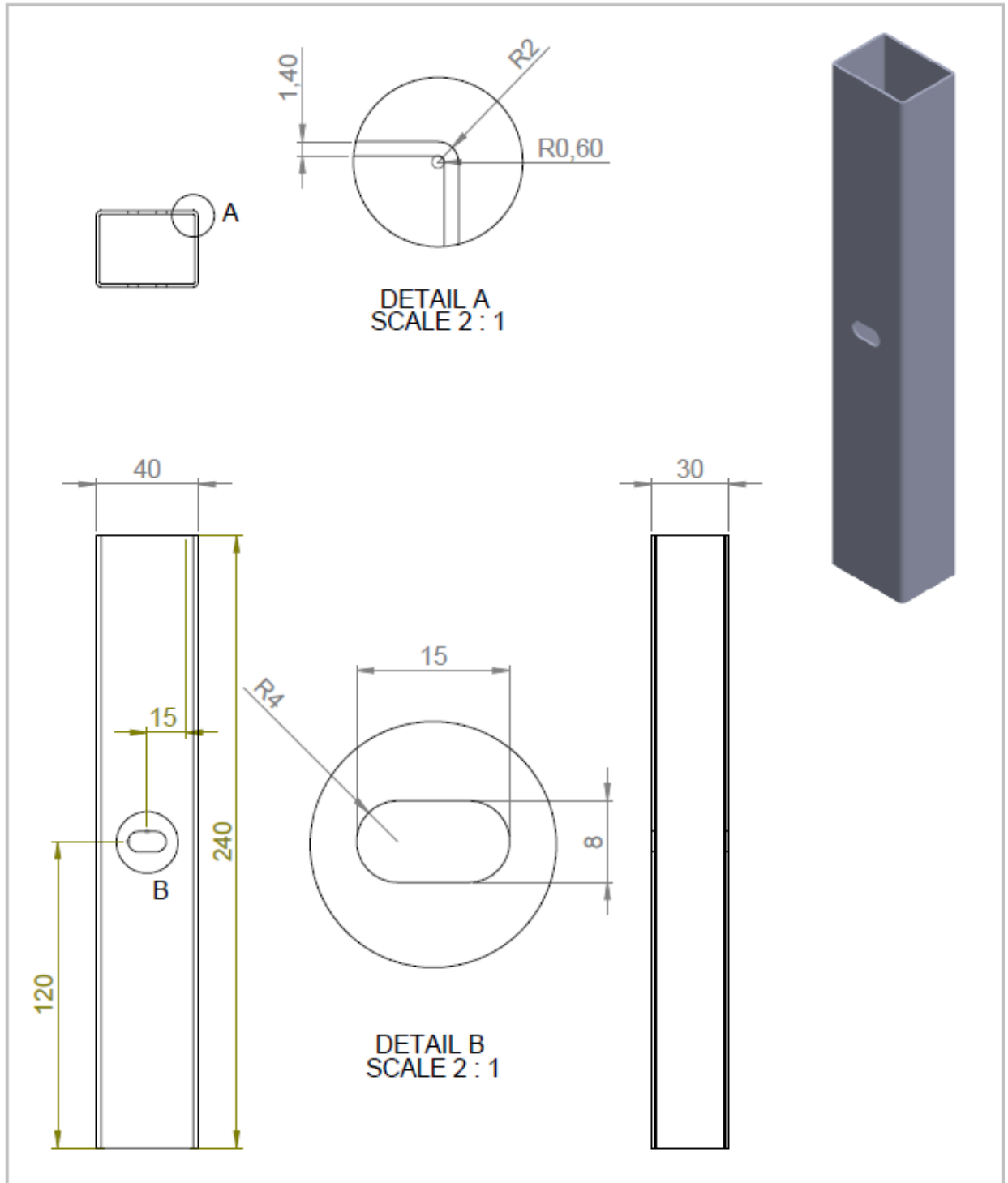
ΠΑ.18 ΔΟΚΙΜΙΟ R3



ΠΑ.19 ΔΟΚΙΜΙΟ R31



ΠΑ.20 ΔΟΚΙΜΙΟ R32



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## ΠΒ.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ. Ε. Μανωλάκος, *Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι*, 5<sup>ου</sup> εξαμήνου Σχολής Μηχαν.Μηχανικών Ε.Μ.Π.
2. Αθαν. Γ. Μάμαλης, *Κατεργασίες των υλικών Ι*, Αθήνα 1998, εκδόσεις ΕΜΠ
3. Γ. Ι. Τσαμασφύρος, *Μηχανική παραμορφώσιμων σωμάτων ΙΙ*, Αθήνα 1991, Εκδόσεις Συμμετρία
4. Στυλιανός Κουτρομπάκης, *Καταστροφική καταπόνηση κελύφων λεπτού πάχους ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων εσωτερικά με αφρό – Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση*, διπλωματική εργασία, Αθήνα 2005
5. Χρήστος Π. Σακκόπουλος, *Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών τετραγωνικής διατομής – μελέτη της επίδρασης ανοιγμάτων στα τοιχώματα του κελύφους: Αριθμητική προσομοίωση*, διπλωματική εργασία, Αθήνα 2006
6. Σωτήριος Γιαννόπουλος, *Επίδραση της ύπαρξης οπών στην αξονική κατάρρευση κυλινδρικών μεταλλικών σωλήνων: Πειραματική διερεύνηση*, διπλωματική εργασία, Αθήνα 2006
7. Αλέξανδρος Ράφτης, *Αξονική κατάρρευση μεταλλικών ορθογωνικών σωλήνων με διαφορετικούς τύπους διαμπερών ασυνεχειών: Πειραματική διερεύνηση*, διπλωματική εργασία, Αθήνα 2013
8. Γεώργιος Παναγιώτου, *Αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών ορθογωνικής διατομής – μελέτη της επίδρασης ανοιγμάτων στα τοιχώματα του κελύφους: Πειραματική μελέτη και αριθμητική προσομοίωση*, διπλωματική εργασία, Αθήνα 2010
9. Προβατίδης Χ., Αντωνιάδης Ι., *Υπολογιστικές Μέθοδοι στις Κατασκευές*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
10. Δημητρίου Β., *Η Μέθοδος Coops στην Κατασκευή Πλεγμάτων*, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού» (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000.
11. Δημητρίου Β., *Προσαρμοστικά Πεπερασμένα Στοιχεία και Συναφή Πλέγματα*, Διδακτορική Διατριβή (επιβλέπων καθ. Α. Κανάραχος), Ε.Μ.Π., Αθήνα, Αύγουστος 2004.

## ΠΒ.2 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

12. Athanasios G. Mamalis, Dimitrios E. Manolakos, Gary L. Viegelaahn, *Deformation characteristics of crashworthy components*, Dussedorf 1989, VDI verlag
13. Athanasios G. Mamalis, Dimitrios E. Manolakos, Gary L. Viegelaahn, N. M. Vaxevanidis & W. Johnson, On the intextensional axial collapse of thin PVC conical shells, *Int. J. Mech. Sci.*, 28, 1986
14. J. M. Alexander, *An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading*, *Q J Mech Appl Math* 13: 10-5, 1960
15. H Habbas, B. L. Tyagi, M. Arif, N.K. Gupta, *Curved fold moden analysis for axisymmetric axial crushing of tubes*, *Thin – Walled Structures* 41, 639-661, December 2002
16. N. K. Gupta, H. Abbas, *Considerations in straight fold analysis of thin tubes under axial compression*, *International Journal of Impact Engineering* 31, 1039-1053, July 2004
17. B. L. Tyagi, H. Abbas, M. Arif, N. K. Gupta, *Change in thickness in curved fold model for axial crushing of tubes*, *International Journal of Solids and Structures* 41, 7129-7153, May 2003
18. Qingwu Cheng, William Altenhof, Li Li, *Experimental investigations on the crush behavior of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities*, *Thin Walled Structures* 22, June 2006
19. W. Abramowicz, N. Jones, *Transition from global bending to progressive buckling of tubes loaded statically and dynamically*, *International Journal of Impact Engineering* 19, December 1996
20. W. Abramowicz, *Simplified crushing analysis of thin-walled columns and beams*, *Eng. Translations*, 29, 5-26, 1981
21. T. Wierzbicki, W. Abramowicz, *On the crushing mechanics of thin-walled structures*, *J. Appl. Mech.*, 50, 1983
22. W. Abramowicz, *The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns*, Institute for Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Poland
23. A. Y. Malkin, *Theory of stresses*, Chapter 2
24. L. Ko William, *Stress concentration around a small circular hole in the HiMAT composite plate*, NASA Technical Memorandum 86038, December 1985

**ΠΒ.3 ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

---

25. <http://en.wikipedia.org/wiki/Crashworthiness>
26. <http://www.matweb.com>
27. <http://www.sciencedirect.com>
28. <https://www.google.com/>
29. <http://www.lstc.com/products/lstc-dyna>