



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

## Μελέτη της συμπεριφοράς μη κανονικών λεπτότοιχων πυραμίδων σε αξονική καταπόνηση



Επιβλέπων: Μανωλάκος Δημήτριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φοιτητής: Λεωνίδας Ε. Βουρεξάκης

A.M: mc98650

2015



Αθήνα, Μάρτιος 2015



## Περίληψη

Η μελέτη της συμπεριφοράς έναντι κρούσεων ή καταπόνησης διαφορετικών κατασκευών, με εφαρμογή κυρίως στα οχήματα, έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με την προσοχή να στρέφεται στη μείωση των συνεπειών στον άνθρωπο. Σε ερευνητικό επίπεδο γίνεται προσπάθεια καθορισμού θεωρητικών κριτηρίων για το μηχανισμό κατάρρευσης, παρέχοντας στους μηχανικούς την ικανότητα σχεδιασμού κατασκευών ώστε το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας πρόσκρουσης να διαχέεται ή να απορροφάται, ενώ ταυτόχρονα να γίνεται ομοιόμορφη παραμόρφωση του υλικού.

Τα ανωτέρω πρέπει να επιτευχθούν λαμβάνοντας υπόψη ορισμένους περιορισμούς, όπως η μείωση του μέγιστου φορτίου, της μάζας της κατασκευής και η αποφυγή αστοχίας αυτής. Μια υλοποιήσιμη και διαδεδομένη μέθοδος είναι η χρήση λεπτότοιχων στοιχείων που συμπεριφέρονται ως συσκευές απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο, η πρόβλεψη της κατάρρευσης είναι πολύπλοκη διαδικασία, μιας και αλληλεπιδρούν ταυτόχρονα πολλές κατασκευαστικές οντότητες και προκαλούν έντονα μη γραμμικά φαινόμενα, δυσκολεύοντας τη λεπτομερή ανάλυση και μοντελοποίηση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη της αξονικής κατάρρευσης σωλήνων μη κανονικών πυραμίδων με τοιχώματα λεπτού πάχους. Επίσης, έχουμε τρεις ομάδες δοκιμίων με διαφορετική διάσταση άνω τετραγωνικής βάσης (40, 50 και 60 mm), ενώ τα δοκίμια (16 συνολικά) διαφοροποιούνται και ως προς τη θέση του κέντρου της άνω βάσης. Τα σταθερά στοιχεία της κατασκευής των πυραμιδικών δοκιμίων ήταν η διάσταση της κάτω τετραγωνικής βάσης (100 mm) και το πάχος του δοκιμίου (1,5 mm). Μετά την κατασκευή των δοκιμίων στο μηχανουργείο, μελετήθηκαν οι τρόποι κατάρρευσης τους υπό αξονική καταπόνηση σε μηχανική πρέσα INSTRON 4482.

Το κείμενο της διπλωματικής χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη, το θεωρητικό και το πειραματικό, το οποίο περιλαμβάνει την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στην παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, περιλαμβάνονται στοιχεία για τα βασικά μεγέθη της ανάλυσης κάθε δοκιμίου, το διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης, η διαδικασία κατάρρευσης σε βήματα και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση. Ενώ, τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνολικά από το πειραματικό μέρος της διπλωματικής, καθώς και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.

**Λέξεις κλειδιά: Τετραγωνική πυραμίδα, Χάλυβας κατασκευών, Αξονική καταπόνηση, Προοδευτική κατάρρευση, τρόπος κατάρρευσης, μοτίβο κατάρρευσης**

## **Abstract**

The various crashworthiness studies over different structures apply mainly in vehicles, and in recent years are focusing in reducing the consequences to human. In experimental research, scientists are attempting to define a theoretical design on the mechanics of collapse, providing the engineers all the essential information in order to improve the final structure, in which the main part of collision energy is diffused while the structure itself deforms uniformly.

This improvement must be achieved taking into consideration certain constraints, such as reducing maximum load and structure mass, while avoiding its failures. A feasible and widely known method is using thin-walled structures in strategic points over the total structure, which will act as energy absorbers. However, forecasting collisions is a very complicated procedure, where many structural elements interact simultaneously, causing severe nonlinear effects, thus making the detailed analysis and modeling extremely difficult.

This thesis focuses on the study of the behavior of thin-walled square frusta under axial loading. Also, there are three groups of test pieces with different upper base length (40, 50 and 60 mm), while the test pieces (16 in total) vary to the position of the center of the upper base. The stable construction elements of the pyramidal test pieces was the dimension of the lower tetragogikis base (100 mm), as well as the thickness of the test piece (1,5 mm). After the construction of the test pieces in the machine shop, their collapse mode has been studied experimentally in a mechanical press INSTRON 4482.

The thesis is divided into two main parts, the theoretical part and the experimental part the description of the experimental setting and the presentation of results.

The presentation of experimental results, including information on the fundamentals of analysis of each test piece, the load - displacement diagram, the collapse process steps and commentary on the results obtained in each case. Finally, the conclusions over the experimental results are listed, and some proposals for future research of the subject are also included.

**Keywords: Square Frusta, Construction steel, Axial loading, Progressive collapse, collapse model**

# Περιεχόμενα

<u>Περίληψη</u> .....	5
<u>Abstract</u> .....	6
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αξονική Κατάρρευση λεπτότοιχων μεταλλικών πυραμίδων</u> 17	
<u>1.1 Εισαγωγή</u> .....	17
<u>1.2 Μοντελοποίηση της πλαστικής κατάρρευσης</u> .....	18
<u>1.2.1 Μη εκτατή κατάρρευση</u> .....	18
<u>1.2.2 Εκτατή κατάρρευση</u> .....	26
<u>1.3 Πειραματική επιβεβαίωση</u> .....	27
<u>1.4 Αξονική κατάρρευση κόλουρης πυραμίδας</u> .....	32
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση απορροφητών ενέργειας και πρόσφατες εξελίξεις</u> .....	37
<u>2.1 Απορροφητές ενέργειας</u> .....	37
<u>2.2 Ανάλυση απορροφητών ενέργειας</u> .....	38
<u>2.2.1 Απορρόφηση ενέργειας από προφυλακτήρες</u> .....	39
<u>2.2.2 Πρόσφατες εξελίξεις στην κατασκευή στοιχείων απορρόφησης ενέργειας</u> .....	40
<u>2.3 Παρουσίαση προσομοίωσης κατάρρευσης κωνικής λεπτότοιχης τετραγωνικής πυραμίδας</u> .....	41
<u>2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου</u> .....	42
<u>2.3.2 Επίδραση παραμέτρων στο αρχικό φορτίο αιχμής</u> .....	45
<u>2.3.3 Επίδραση παραμέτρων στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (crush force efficiency)</u> .....	47
<u>2.3.4 Επίδραση παραμέτρων στην απορροφούμενη ενέργεια</u> .....	49
<u>2.4 Παρουσίαση σύγκρισης προσομοίωσης και πειράματος κατάρρευσης</u> .....	52
<u>2.4.1 Εισαγωγή</u> .....	52
<u>2.4.2 Πειραματική επικύρωση διαδικασίας</u> .....	53
<u>2.4.3 Τρόποι παραμόρφωσης</u> .....	56
<u>2.4.4 Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας</u> .....	57
<u>2.4.5 Πειραματική επικύρωση προσομοίωση</u> .....	59

<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας</u></b> .....	<b>61</b>
<b><u>3.1 Εισαγωγή</u></b> .....	<b>61</b>
<b><u>3.2 Πειραματική διάταξη</u></b> .....	<b>61</b>
<b><u>3.3 Κατασκευή δοκιμών</u></b> .....	<b>65</b>
<b><u>3.3.1 Δοκίμια 40-100</u></b> .....	<b>66</b>
<b><u>3.3.2 Δοκίμια 50-100</u></b> .....	<b>68</b>
<b><u>3.3.3 Δοκίμια 60-100</u></b> .....	<b>70</b>
<b><u>3.3.4 Ονοματολογία δοκιμών</u></b> .....	<b>72</b>
<b><u>3.4 Υπολογισμός πειραματικών παραμέτρων</u></b> .....	<b>72</b>
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ</u></b> .....	<b>75</b>
<b><u>4.1 Δοκίμια 40-100-1</u></b> .....	<b>75</b>
<b><u>4.1.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></b> .....	<b>75</b>
<b><u>4.1.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></b> .....	<b>76</b>
<b><u>4.1.3 Τελικές όψεις</u></b> .....	<b>77</b>
<b><u>4.1.4 Αποτελέσματα πειράματος</u></b> .....	<b>77</b>
<b><u>4.1.5 Σχολιασμός</u></b> .....	<b>77</b>
<b><u>4.2 Δοκίμιο 40-100-2</u></b> .....	<b>78</b>
<b><u>4.2.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></b> .....	<b>79</b>
<b><u>4.2.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></b> .....	<b>80</b>
<b><u>4.2.3 Τελικές όψεις</u></b> .....	<b>80</b>
<b><u>4.2.4 Αποτελέσματα πειράματος</u></b> .....	<b>80</b>
<b><u>4.2.5 Σχολιασμός</u></b> .....	<b>81</b>
<b><u>4.3 Δοκίμιο 40-100-3</u></b> .....	<b>82</b>
<b><u>4.3.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></b> .....	<b>82</b>
<b><u>4.3.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></b> .....	<b>83</b>
<b><u>4.3.3 Τελικές όψεις</u></b> .....	<b>83</b>
<b><u>4.3.4 Αποτελέσματα πειράματος</u></b> .....	<b>84</b>
<b><u>4.3.5 Σχολιασμός</u></b> .....	<b>84</b>
<b><u>4.4 Δοκίμιο 40-100-4</u></b> .....	<b>85</b>
<b><u>4.4.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></b> .....	<b>85</b>
<b><u>4.4.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></b> .....	<b>86</b>
<b><u>4.4.3 Τελικές όψεις</u></b> .....	<b>87</b>



4.4.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	87
4.4.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	87
4.5	<a href="#"><u>Δοκίμιο 40-100-5</u></a>	<b>88</b>
4.5.1	<a href="#"><u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></a>	89
4.5.2	<a href="#"><u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></a>	90
4.5.3	<a href="#"><u>Τελικές όψεις</u></a>	90
4.5.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	90
4.5.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	91
4.6	<a href="#"><u>Δοκίμιο 40-100-6</u></a>	<b>92</b>
4.6.1	<a href="#"><u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></a>	92
4.6.2	<a href="#"><u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></a>	93
4.6.3	<a href="#"><u>Τελικές όψεις</u></a>	93
4.6.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	94
4.6.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	94
4.7	<a href="#"><u>Δοκίμιο 40-100-7</u></a>	<b>95</b>
4.7.1	<a href="#"><u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></a>	95
4.7.2	<a href="#"><u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></a>	96
4.7.3	<a href="#"><u>Τελικές όψεις</u></a>	97
4.7.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	97
4.7.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	97
4.8	<a href="#"><u>Δοκίμιο 40-100-8</u></a>	<b>98</b>
4.8.1	<a href="#"><u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></a>	99
4.8.2	<a href="#"><u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></a>	100
4.8.3	<a href="#"><u>Τελικές όψεις</u></a>	100
4.8.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	100
4.8.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	101
4.9	<a href="#"><u>Δοκίμιο 40-100-9</u></a>	<b>102</b>
4.9.1	<a href="#"><u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u></a>	102
4.9.2	<a href="#"><u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u></a>	103
4.9.3	<a href="#"><u>Τελικές όψεις</u></a>	103
4.9.4	<a href="#"><u>Αποτελέσματα πειράματος</u></a>	104
4.9.5	<a href="#"><u>Σχολιασμός</u></a>	104

<b><u>4.10</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 40-100-10</u></b>	<b>105</b>
4.10.1	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	105
4.10.2	<u>Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης</u>	106
4.10.3	<u>Τελικές όψεις</u>	107
4.10.4	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	107
4.10.5	<u>Σχολιασμός</u>	107
<b><u>4.11</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 50-100-1</u></b>	<b>108</b>
4.11.1	<u>Προοδευτικές φάσεις</u>	109
4.11.2	<u>Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης</u>	110
4.11.3	<u>Τελικές όψεις</u>	110
4.11.4	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	110
4.11.5	<u>Σχολιασμός</u>	111
<b><u>4.12</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 50-100-2</u></b>	<b>112</b>
4.12.1	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	112
4.12.2	<u>Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης</u>	113
4.12.3	<u>Τελικές όψεις</u>	113
4.12.4	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	114
4.12.5	<u>Σχολιασμός</u>	114
<b><u>4.13</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 50-100-3</u></b>	<b>115</b>
4.13.1	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	115
4.13.2	<u>Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης</u>	116
4.13.3	<u>Τελικές όψεις</u>	117
4.13.4	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	117
4.13.5	<u>Σχολιασμός</u>	117
<b><u>4.14</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 60-100-1</u></b>	<b>118</b>
4.14.1	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	119
4.14.2	<u>Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου</u>	120
4.14.3	<u>Τελικές όψεις</u>	120
4.14.4	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	120
4.14.5	<u>Σχολιασμός</u>	121
<b><u>4.15</u></b>	<b><u>Δοκίμιο 60-100-2</u></b>	<b>122</b>
4.15.1	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	122

<u>4.15.2</u>	<u>Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου</u>	123
<u>4.15.3</u>	<u>Τελικές όψεις</u>	123
<u>4.15.4</u>	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	124
<u>4.15.5</u>	<u>Σχολιασμός</u>	124
<u>4.16</u>	<u>Δοκίμιο 60-100-3</u>	125
<u>4.16.1</u>	<u>Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης</u>	125
<u>4.16.2</u>	<u>Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου</u>	126
<u>4.16.3</u>	<u>Τελικές όψεις</u>	127
<u>4.16.4</u>	<u>Αποτελέσματα πειράματος</u>	127
<u>4.16.5</u>	<u>Σχολιασμός</u>	127
<u>4.17</u>	<u>Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων</u>	129
	<u>Συμπεράσματα</u>	131
	<u>Μελλοντική διερεύνηση</u>	134
	<u>Βιβλιογραφία</u>	135



## Ευρετήριο Εικόνων

<a href="#"><u>Εικόνα 1.1: (α) Σχηματικό διάγραμμα αξονικής φόρτισης σε τετραγωνική πυραμίδα. (b) Η τραπεζοειδής όψη της τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	16
<a href="#"><u>Εικόνα 1.2: Τρόπος παραμόρφωσης για μη εκτατή κατάρρευση λοβού τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	17
<a href="#"><u>Εικόνα 1.3: Απλοποιημένος μετακινούμενος αρμός, που παρουσιάζει τη δημιουργία στατικών οριζόντιων αρμών σε μη εκτατή κατάρρευση τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	21
<a href="#"><u>Εικόνα 1.4: Τρόπος παραμόρφωσης για μη εκτατή κατάρρευση του λοβού σε τετραγωνικό σωλήνα (συμπαγείς γραμμές: πειραματικές, γραμμές με στιγμές: ιδανικές) (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	24
<a href="#"><u>Εικόνα 1.5: Τρόπος παραμόρφωσης τετραγωνικής πυραμίδας για εκτατή κατάρρευση με δημιουργία εξωτερικών συνελίξεων (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	25
<a href="#"><u>Εικόνα 1.6: (α) Κατάρρευση τετραγωνικού σωλήνα από PVC (1-5:προοδευτική κατάρρευση, 6: ανακτημένη πλάγια όψη, 7: κάτοψη, 8: άνοψη, 9: πλάγια όψη) (b) (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	26
<a href="#"><u>Εικόνα 1.7: (α) Τρόπος κατάρρευσης τετραγωνικής πυραμίδας 16° από PVC (1: αρχικά απαραμόρφωτο δοκίμιο, 2-10: προοδευτική κατάρρευση, 11: ανακτημένη πλάγια όψη, 12: κάτοψη, 13: άνοψη, 14: πλάγια όψη) (b) στατικοί και μετακινούμενοι αρμοί (συμπαγείς: πειραματικές, διακεκομμένες: ιδανικές) (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	28
<a href="#"><u>Εικόνα 1.8: Απεικόνιση των ζωνών παραμόρφωσης σε ανακτημένες τετραγωνικές πυραμίδες PVC ύστερα από βύθιση σε βραστό νερό (Mamalis A.G. et al., 1989)</u></a> .....	29
<a href="#"><u>Εικόνα 1.9: Απευθείας αναστροφή προς τα μέσα για κόλουρη πυραμίδα (Alghamdi et al., 1991)</u></a> .....	33
<a href="#"><u>Εικόνα 2.1: Γεωμετρία για ευθείς και κωνικούς ορθογωνικούς σωλήνες (Nagel et al., 2005)</u></a> .....	39
<a href="#"><u>Εικόνα 2.2: Πορεία κατάρρευσης για ευθύ και κωνικό τετραγωνικό σωλήνα υπό ψευδο-στατικό αξονικό φορτίο (Nagel et al., 2005)</u></a> .....	41
<a href="#"><u>Εικόνα 2.3: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στο αρχικό μέγιστο φορτίο (Nagel et al., 2005)</u></a> .....	42
<a href="#"><u>Εικόνα 2.4: Συσχέτιση μέγιστου φορτίου και κωνικότητας (Nagel et al., 2005)</u></a> .....	43

<a href="#"><u>Εικόνα 2.5: Επίδραση του πλήθους των κωνικών πλευρών στο μέσο φορτίο (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	43
<a href="#"><u>Εικόνα 2.6: Επίδραση του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	44
<a href="#"><u>Εικόνα 2.7: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	45
<a href="#"><u>Εικόνα 2.8: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου ως προς την κλίση τοιχωμάτων και το πλήθος των κωνικών πλευρών (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	46
<a href="#"><u>Εικόνα 2.9: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	46
<a href="#"><u>Εικόνα 2.10: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας (Nagel et al.,2005)</u></a> .....	47
<a href="#"><u>Εικόνα 2.11: Πραγματική καμπύλη παραμόρφωσης – καταπόνησης του υπό δοκιμή υλικού (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	51
<a href="#"><u>Εικόνα 2.12: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	51
<a href="#"><u>Εικόνα 2.13: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	52
<a href="#"><u>Εικόνα 2.14: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	52
<a href="#"><u>Εικόνα 2.15: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	53
<a href="#"><u>Εικόνα 2.16: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	55
<a href="#"><u>Εικόνα 2.17: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	55
<a href="#"><u>Εικόνα 2.18: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	56
<a href="#"><u>Εικόνα 2.19: Σύγκριση τελικών όψεων των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και των υπολογιστικών προσομοιώσεων (Mamalis et al. 2001)</u></a> .....	57
<a href="#"><u>Εικόνα 3.1: Εργαλείο θλίψης προσαρμοσμένο στη μηχανική πρέσα INSTRON</u></a> .....	59
<a href="#"><u>Εικόνα 3.2: Κυρίως σώμα πρέσας INSTRON</u></a> .....	60
<a href="#"><u>Εικόνα 3.3: Επιμέρους τμήματα πρέσας INSTRON</u></a> .....	61

<a href="#"><u>Εικόνα 3.4: Συνολική διάταξη της μηχανικής πρέσας INSTRON του εργαστηρίου</u></a> .....	62
<a href="#"><u>Εικόνα 3.5: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 40-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης</u></a> .....	64
<a href="#"><u>Εικόνα 3.6: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 40-100</u></a> .....	65
<a href="#"><u>Εικόνα 3.7: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 50-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης</u></a> .....	66
<a href="#"><u>Εικόνα 3.8: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 50-100</u></a> .....	67
<a href="#"><u>Εικόνα 3.9: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 60-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης</u></a> .....	68
<a href="#"><u>Εικόνα 3.10: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 60-100</u></a> .....	69
<a href="#"><u>Εικόνα 4.1: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-1</u></a> .....	72
<a href="#"><u>Εικόνα 4.2: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 40-100-2</u></a> .....	76
<a href="#"><u>Εικόνα 4.3: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-3</u></a> .....	79
<a href="#"><u>Εικόνα 4.4: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 40-100-4</u></a> .....	82
<a href="#"><u>Εικόνα 4.5: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-5</u></a> .....	86
<a href="#"><u>Εικόνα 4.6: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-6</u></a> .....	89
<a href="#"><u>Εικόνα 4.7: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-7</u></a> .....	92
<a href="#"><u>Εικόνα 4.8: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-8</u></a> .....	96
<a href="#"><u>Εικόνα 4.9: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-9</u></a> .....	99
<a href="#"><u>Εικόνα 4.10: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-10</u></a> .....	102
<a href="#"><u>Εικόνα 4.11: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-1</u></a> .....	106
<a href="#"><u>Εικόνα 4.12: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-2</u></a> .....	109
<a href="#"><u>Εικόνα 4.13: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-3</u></a> .....	112
<a href="#"><u>Εικόνα 4.14: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 60-100-1</u></a> .....	116
<a href="#"><u>Εικόνα 4.15: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 60-100-2</u></a> .....	119
<a href="#"><u>Εικόνα 4.16: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 60-100-3</u></a> .....	122





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Αξονική Κατάρρευση Λεπτότοιχων μεταλλικών πυραμίδων

## 1.1 Εισαγωγή

Τα κελύφη ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής παρουσιάζουν ευρεία εφαρμογή, κυρίως στον τομέα των μεταφορών, καθώς διαμορφώνονται κατάλληλα και χρησιμοποιούνται στο σκελετό των μέσων μεταφοράς. Κατασκευάζονται από διάφορα μη μεταλλικά υλικά, όπως PVC, αλλά και από μαλακό χάλυβα χαμηλής επί τοις εκατό περιεκτικότητας σε άνθρακα. Ο ασφαλής σχεδιασμός τους υπαγορεύει τη μελέτη της καταπόνησης και των μηχανισμών κατάρρευσης τέτοιων δοκιμίων, ώστε να μελετηθούν τα φαινόμενα θραύσης.

Η ανάπτυξη και ο λεπτομερής σχεδιασμός συσκευών για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας με ελεγχόμενο τρόπο είναι εξαιρετικής σημασίας για τους μηχανικούς. Παρόλο που τα συστήματα απορρόφησης κινητικής ενέργειας συνήθως δέχονται δυναμικά φορτία, σε ορισμένες περιπτώσεις, π.χ. όταν οι λεπτότοιχες κατασκευές υπόκεινται σε αξονική κατάρρευση, η παραμόρφωσή τους είναι παρόμοια με εκείνη που απαντάται σε συνθήκες ψευδοστατικής φόρτισης. Συνεπώς, τα θεωρητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για το ψευδοστατικό φορτίο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των φορτίων λυγισμού κατά την κρούση, ενώ οι περισσότεροι ερευνητές διεξάγουν ψευδοστατικά πειράματα, παρέχοντας ένα χρήσιμο σύνδεσμο μεταξύ της απορρόφησης ενέργειας κρούσης και της δομικής συμπεριφοράς των υλικών. (Mamalis A.G. et al., 1989)

Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι όλα τα λεπτότοιχα είδη όπως δίσκοι, κελύφη, σωλήνες και ελάσματα ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται στους σκελετούς των αυτοκινήτων, στις ατράκτους των αεροσκαφών και στα σκαριά των πλοίων χαρακτηρίζονται από παρόμοιο λόγο πάχους προς πλάτος. Οι δομές αυτές υπόκεινται κυρίως σε φορτία συμπίεσης κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, και μπορούν να υποστούν μεγάλες παραμορφώσεις που μπορούν να ξεπεράσουν το πάχος του τοιχώματος κατά δύο τάξεις μεγέθους.

Η συμπεριφορά αξονικής κατάρρευσης των λεπτότοιχων μεταλλικών σωλήνων έχει λάβει σημαντική προσοχή τα τελευταία 25 χρόνια. Τα πρώτα πειράματα έγιναν με σκοπό να γίνει κατανοητή η ικανότητα αντοχής του κελύφους των τρένων σε συνθήκες σύγκρουσης. Έγιναν επίσης πειράματα σε μοντέλα μικρότερης κλίμακας, στα οποία συμπεριλήφθηκαν οι λεπτομέρειες των ανοιγμάτων κλπ. (Mamalis A.G. et al., 1989)

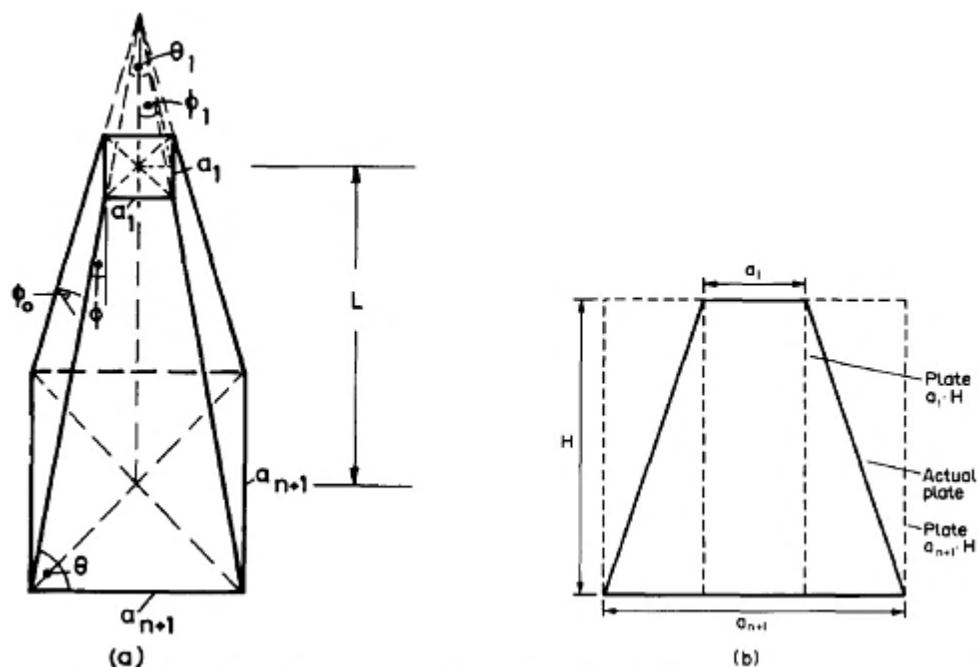
Οι τελευταίες έρευνες διεξήχθησαν με σκοπό την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών φορτίου-συμπίεσης των μεταλλικών σωλήνων διαφόρων διατομών υπό φορτία σύγκρουσης, ώστε να υπολογιστούν οι ενέργειες παραμόρφωσης για χρήση σε ποικιλία εφαρμογών. Έχουν γίνει επίσης προσπάθειες βελτίωσης της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των μεταλλικών σωλήνων που είναι κατασκευασμένοι από ελάσματα με χρήση πληρωτικών υλικών, όπως ο πολυμερικός αφρός.

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση της πλαστικής κατάρρευσης πυραμιδικών δοκιμίων όταν υφίστανται αξονική φόρτιση. (Mamalis A.G. et al., 1989)

## 1.2 Μοντελοποίηση της πλαστικής κατάρρευσης

### 1.2.1 Μη εκτατή κατάρρευση

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας τετραγωνικής πυραμίδας παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.1(α). Θεωρήστε μια κεκλιμένη πλευρά της πυραμίδας ύψους  $H$ , όπως στην Εικόνα 1.1(b), η οποία δέχεται φορτίο σε ένα μόνο επίπεδο και κανένα καμπτικό φορτίο.

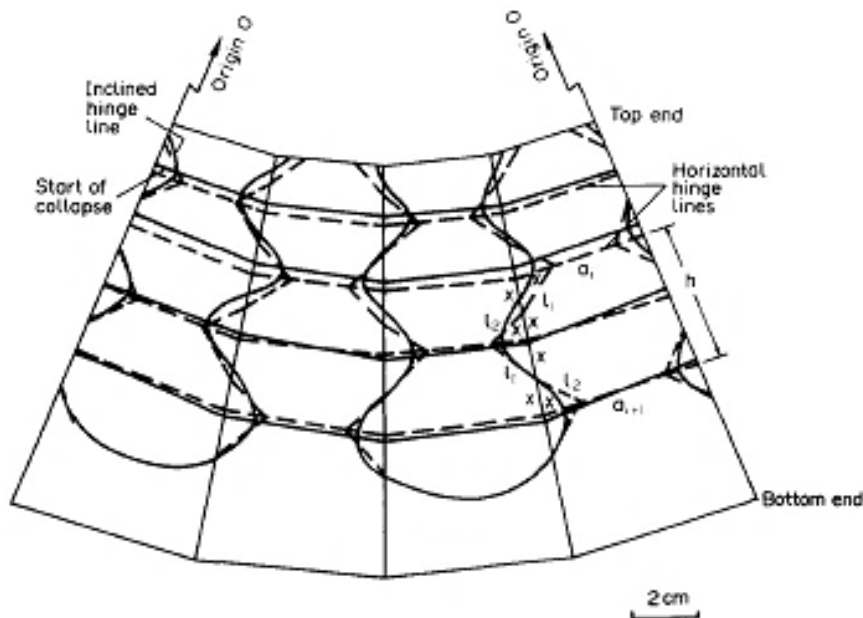


Εικόνα 1.1: (α) Σχηματικό διάγραμμα αξονικής φόρτισης σε τετραγωνική πυραμίδα. (β) Η τραπεζοειδής όψη της τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989)

Η πλάκα μπορεί να λυγίσει σε  $(n+1)$  τμήματα, να οποία ονομάζονται, πλαστικά ημι-μήκη κύματος-οριζόντιοι πλαστικοί λοβοί που δημιουργούνται μεταξύ

γειτονικών ζευγών. Το μήκος κάθε λοβού  $h$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 θεωρείται σταθερό κατά μήκος της πυραμίδας και άρα ισχύει:

$$h = H / m \quad (1.1)$$



Εικόνα 1.2: Τρόπος παραμόρφωσης για μη εκτατή κατάρρευση λοβού τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989 )

Η παραδοχή των ισοϋψών στρωμάτων δικαιολογείται μέσω πειραματικών παρατηρήσεων της αξονικής κατάρρευσης τετραγωνικών πυραμίδων. (Mamalis A.G. et al., 1989)

Αν δύο ιδανικές ορθογωνικές πλάκες με διαστάσεις  $\alpha_1 \times H$  και  $\alpha_{n+1} \times H$ , όπως στην Εικόνα 1.1(b) καταρρέουν πλαστικά υπό ομοεπίπεδη (λοξή) φόρτιση, αναπτύσσουν ένα πλήθος πλαστικών κυμάτων μισού μήκους  $m_1 = H/\alpha_1$  και  $m_n = H/\alpha_{n+1}$ , αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, το πραγματικό πλήθος των ημίσεων μηκών κύματος  $m$  της κωνικής πλευράς, είναι ένας ακέραιος μεταξύ δύο ακραίων τιμών (Mamalis A.G. et al., 1989):

$$m_n < m < m_1 \quad (1.2)$$

Ένα καταρρέον κέλυφος περιέχει δύο ειδών πλαστικούς αρμούς, τους οριζόντιους αρμούς στην επιφάνεια του κελύφους και τους κεκλιμένους αρμούς οι οποίοι ταλαντώνονται ως προς τη ραφή συγκόλλησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.

Ας θεωρήσουμε ότι δημιουργείται ένας λοβός στην επιφάνεια, π.χ. ο  $i$ -οστός λοβός. Οι οριζόντιοι αρμοί σχηματίζονται στο ανώτερο και το κατώτερο άκρο του λοβού, καθώς και στο μέσο της απόστασης. Οι κεκλιμένοι αρμοί μπορούν να έχουν κλίση μέχρι  $\pm 45^\circ$  ως προς τους οριζόντιους τη στιγμή που δημιουργούνται. Καθώς η σύνθλιψη προχωρά, τα επίπεδα στρώματα υλικού πάνω και κάτω από τους οριζόντιους αρμούς διπλώνουν διαδοχικά, ξεκινώντας από την κορυφή. Στα περισσότερα πειράματα, τα κωνικά κελύφη που έχουν εξεταστεί, παραμορφώνονται από το στενότερο άκρο προς το μεγαλύτερο. Δύο οριζόντιοι αρμοί σε αντίθετες πλευρές του λοβού κινούνται προς τα έξω, μειώνοντας το μήκος τους (μέσω ταχείας κάμψης), ενώ οι αρμοί στις γειτονικές πλευρές κινούνται προς τα μέσα, αυξάνοντας το μήκος τους. Το συνολικό μήκος του οριζόντιου αρμού βέβαια παραμένει σταθερό και ίσο με την αρχική περίμετρο του κωνικού κελύφους στο επίπεδο αυτό. Άρα, το ενδιάμεσο επίπεδο παραμένει μη εκτατό, χωρίς να εξαρτάται από την υπάρχουσα εκτροπή. (Mamalis A.G. et al., 1989)

Λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες παραδοχές για την μη εκτατή κατάρρευση, δηλαδή ότι:

- το υλικό είναι άκαμπτο, πλήρως πλαστικό με άπειρη ολκιμότητα,
- οι παραμορφώσεις λόγω ορθών και διατμητικών τάσεων αμελούνται μόνο όταν λαμβάνεται υπόψη η κάθετη συνιστώσα του φορτίου  $P$ ,
- η συμπίεση είναι χωρίς τριβή, έτσι ώστε και τα δύο άκρα του κελύφους να είναι απαραμόρφωτα ή να μεταβάλουν το σχήμα τους σύμφωνα με τον τρόπο παραμόρφωσης,
- το αναπτυσσόμενο θεωρητικό μοντέλο βασίζεται στον τρόπο τελικής κατάρρευσης και όχι στο ιστορικό της πλαστικής εξέλιξης,

το απορροφόμενο πλαστικό έργο στους διάφορους αρμούς μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως. (Johnson W et al., 1978) (Mamalis et al., 1986)

**(i) Στατικοί οριζόντιοι αρμοί**

Στον επάνω οριζόντιο αρμό (Εικόνα 1.2) ένα τμήμα του μήκους του  $2(a_i + 2x)$  είναι κεκλιμένο προς τα μέσα σχηματίζοντας γωνία  $(\pi/2 - \phi)$  rad, και ένα μήκος  $2(a_i - 2x)$  περιστρέφεται προς τα έξω σχηματίζοντας γωνία  $(\pi/2 + \phi)$ . Άρα, το αντίστοιχο πλαστικό έργο είναι:

$$W_{lu} = M_p \left\{ 2(a_i + 2x) \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) + 2(\alpha_i - 2x) \left( \frac{\pi}{2} + \phi \right) \right\} = 2M_p (\pi\alpha_i - 4\phi x) \quad (1.3)$$

όπου  $M_p = Yt^2 / 4$  είναι η πλήρως πλαστική καμπτική ροπή ανά μονάδα μήκος για το δεδομένα πάχος του κελύφους.

Παρομοίως, στον κατώτερο αρμό, ένα τμήμα ίσο με  $2(a_{i+1} + 2x)$  περιστρέφεται προς τα μέσα σχηματίζοντας γωνία  $(\pi/2 + \phi)$  rad και ένα μήκος  $2(\alpha_{i+1} - 2x)$  περιστρέφεται προς τα έξω σχηματίζοντας γωνία  $(\pi/2 - \phi)$  rad. (Johnson W et al., 1978) (Mamalis et al., 1986)

Το έργο που απορροφάται από τον αρμό είναι:

$$W_{ll} = 2M_p (\pi a_{i+1} + 4\phi x) \quad (1.4)$$

Στον αρμό του μεσαίου επιπέδου, κάθε αρμός περιστρέφεται κατά γωνία  $\pi$  rad, απορροφώντας πλαστικό έργο:

$$W_{lm} = 4M_p \pi \left( \frac{\alpha_i + a_{i+1}}{2} \right) = 2M_p \pi (\alpha_i + a_{i+1}) \quad (1.5)$$

Το συνολικό πλαστικό έργο που απορροφάται από τους στατικούς οριζόντιους αρμούς είναι:

$$W_1 = W_{lu} + W_{ll} + W_{lm} = 4\pi (\alpha_1 + \alpha_{i+1}) M_p \quad (1.6)$$

## **(ii) Κεκλιμένοι αρμοί**

Θεωρώντας ότι οκτώ γραμμές αρμών μήκους  $(l_1 + l_2)$  (Εικόνα 1.2) περιστρέφονται σχηματίζοντας γωνία  $\pi$  rad, το αντίστοιχο πλαστικό έργο που απορροφάται είναι (Johnson W et al., 1978) (Mamalis et al., 1986):

$$W_2 = 8\pi (l_1 + l_2) M_p \quad (1.7)$$

όπου  $l_1^2 = 2(1 + \cos \theta) x^2$  και  $l_2^2 = 2(1 - \cos \theta) x^2$

## **(iii) Επιπέδωση των αρχικών γωνιών της πυραμίδας**

Η αρχική διέδρη γωνία της πυραμίδας  $\phi_o$  είναι (Εικόνα 1.1α)

$$\phi_o = \arccos(-\cot^2 \theta)$$

και άρα οι αρχικές γωνίες της πυραμίδας επιπεδοποιήθηκαν πλαστικά καθώς κάμφθηκαν κατά γωνία  $(\pi - \phi_o)$ , απορροφώντας το ακόλουθο ποσό πλαστικού έργου (Johnson W et al., 1978) (Mamalis et al., 1986):

$$W_3 = 4M_p (4x)(\pi - \phi_o) = 16M_p x(\pi - \phi_o) \quad (1.8)$$

Συνεπώς, το συνολικό εσωτερικό έργο που απορροφάται στους στατικού αρμούς όπως περιγράφεται παραπάνω είναι:

$$W_i = W_1 + W_2 + W_3 = 4M_p \left\{ \pi [a_i + a_{i+1} + 2(l_1 + l_2) + 4x] - 4x\phi_o \right\} \quad (1.9)$$

Αν το εξωτερικό έργο είναι  $W_e$  ανά λοβό  $i$  τότε:

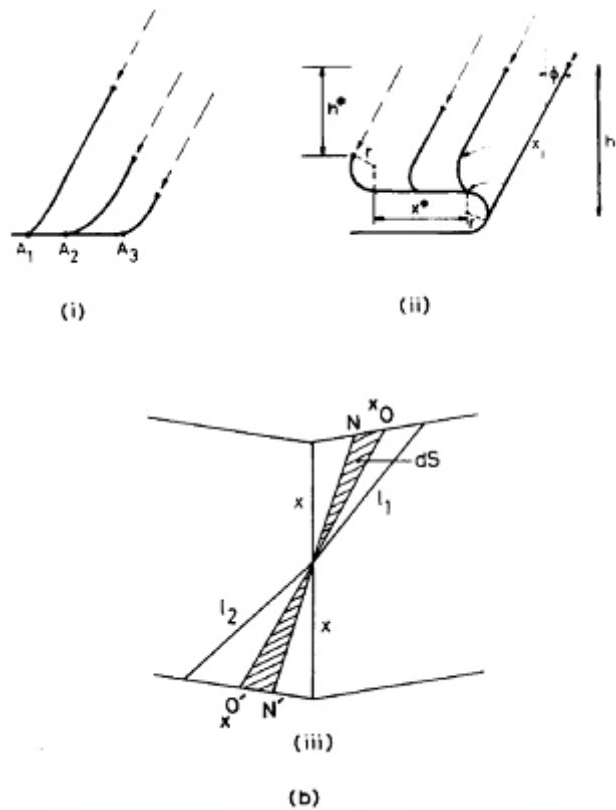
$$W_e = \bar{P}_i \delta \quad (1.10)$$

όπου  $\delta$  είναι η προοδευτική αλλαγή του φορτίου και  $\bar{P}_i$  είναι η δύναμη σύνθλιψης. Οι εξισώσεις (1.9) και (1.10) οδηγούν σε μια εξίσωση για τη μέσω φορτίο μετά το λυγισμό ανά λοβό, όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι πλαστικοί αρμοί (Johnson W et al., 1978) (Mamalis et al., 1986):

$$\bar{P}_i = \frac{4M_p}{\delta} \left\{ \pi [a_i + a_{i+1} + 2(l_1 + l_2) + 4x] - 4x\phi_o \right\} \quad (1.11)$$

#### **(iv) Μετακινούμενοι αρμοί**

Θεωρούμε τώρα το μηχανισμό μετακινούμενου αρμού και της περιοχές μετατόπισης που φαίνονται στην Εικόνα 1.3. Καθώς ο κεκλιμένος πλαστικός αρμός  $\overline{NN'}$  μετακινείται προς τον  $\overline{OO'}$  ύστερα από μια βηματική αύξηση της μετατόπισης φορτίου, αναγκάζει το στοιχείο επιφάνειας  $dS$  του υλικού να κάμφθει σε ακτίνα καμπυλότητας  $r$  και στη συνέχεια να επανέλθει. (Meng Q et al., 1983)



**Εικόνα 1.3: Απλοποιημένος μετακινούμενος αρμός, που παρουσιάζει τη δημιουργία στατικών οριζόντιων αρμών σε μη εκατή κατάρρευση τετραγωνικής πυραμίδας (Mamalis A.G. et al., 1989)**

Το σταδιακά αυξανόμενο πλαστικό έργο στους μετακινούμενους αρμούς, όταν μετατοπιστούν κατά  $dS$  είναι (Meng Q et al., 1983)

:

$$dW_4 = 2 \frac{dS}{r} M_p \quad (1.12)$$

Θεωρώντας ότι η ακτίνα καμπυλότητας  $r$  είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια δημιουργίας του λοβού  $i$  και ολοκληρώνοντας την εξίσωση (1.12) προκύπτει (Meng Q et al., 1983)

:

$$W_4 = 2 \frac{S}{r} M_p \quad (1.13)$$

όπου

$$S = 2 \left( \frac{1}{2} \frac{h}{4} x \right) = hx \quad (1.14)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.13) και (1.14), προκύπτει (Mamalis A.G. et al., 1989):

$$W_4 = 2 \frac{hx}{r} M_p \quad (1.15)$$

Συνεπώς, το συνολικό εσωτερικό πλαστικό έργο λαμβάνοντας υπόψη και την κίνηση των μετακινούμενων αρμών είναι:

$$W_i = W_1 + W_3 + W_4 = 4M_p \pi (a_i + a_{i+1}) + 16M_p x (\pi - \phi_o) + \frac{2hx}{r} M_p \quad (1.16)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον σχηματισμό καμπυλότητας (Saigal S et al., 1986), το εξωτερικό πλαστικό έργο  $W_e$  είναι:

$$W_e = \bar{P}_i \{h_k - 2r(1 + \sin \phi)\} \quad (1.17)$$

όπου  $h_k$  είναι το αξονικό ύψος κάθε λοβού.

Το μέσο αξονικό φορτίο σύνθλιψης για ένα καταρρέον στρώμα προσδιορίζεται τώρα θεωρώντας ότι το έργο του φορτίου απορροφάται στους πλαστικούς αρμούς, δηλ.  $W_e = W_i$  άρα:

$$\bar{P}_i \{h_k - 2r(1 + \sin \phi)\} = 4M_p \pi (a_i + a_{i+1}) + 16M_p x (\pi - \phi_o) + \frac{2hx}{r} M_p$$

ή

$$\bar{P}_i = \frac{4M_p \{\pi (a_i + a_{i+1}) + 4x(\pi - \phi_o)\}}{h_k - 2r(1 + \sin \phi)} + \frac{2M_p hx}{r \{h_k - 2r(1 + \sin \phi)\}} \quad (1.18)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (1.18) ως προς την ακτίνα  $r$ , η ακτίνα  $r^*$  που ελαχιστοποιεί το  $\bar{P}_i$  προκύπτει ως:

$$r^* = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + ABh_k / 2(1 + \sin \phi)}}{A} \quad (1.19)$$

όπου



$$A = 4M_p \{ \pi (a_i + a_{i+1}) + 4x(\pi - \phi_o) \} \quad \text{και} \quad (1.20)$$

$$B = 2M_p hx$$

Λαμβάνοντας υπόψη την κάμψη μιας λωρίδας πάχους  $t_1$  και πλάτους  $b_1$  απαιτείται ένα επιπλέον ποσό πλαστικού έργου για την πλαστική παραμόρφωση της λωρίδας κατά το σχηματισμό του λοβού  $i$ . Το ποσό αυτό είναι (Mamalis A.G. et al., 1989) :

$$W_5 = 2b_1M_{p1}\pi \quad (1.21)$$

Συμπεριλαμβάνοντας αυτό το πλαστικό έργο, οι εξισώσεις (1.11) και (1.12) ανάγονται αντίστοιχα στις:

$$\bar{P}_i = \frac{4M_p}{\delta} \left\{ \pi \left[ a_i + a_{i+1} 2(l_1 + l_2) + 4x + \frac{b_1M_{p1}}{2M_p} \right] - 4x\phi_o \right\} \quad (1.22)$$

και

$$\bar{P}_i = \frac{4M_p \left\{ \pi (a_i + a_{i+1} + b_1M_{p1} / 2M_p) + 4x(\pi - \phi_o) \right\}}{h_k - 2r(1 + \sin \phi)} + \frac{2M_p hx}{r \{ h_k - 2r(1 + \sin \phi) \}} \quad (1.23)$$

μεταβάλλοντας αντίστοιχα το ποσό  $A$  σε

$$A = 4M_p \left\{ \pi (a_i + a_{i+1} + b_1M_{p1} / 2M_p) + 4x(\pi - \phi_o) \right\} \quad (1.24)$$

Για αξονικά συμπίεσμένες λεπτότοιχες πυραμίδες τετραγωνικής διατομής, ακολουθώντας την παραπάνω ανάλυση και αντικαθιστώντας  $\phi = 0^\circ$  για την ημικορυφαία γωνία, καταλήγουμε στη γνωστή έκφραση για το μέσω φορτίο μετά το λυγισμό που απαιτείται για την πλαστική κατάρρευση ενός σωλήνα (Meng Q et al., 1983). Συνεπώς το μέσω φορτίο  $\bar{P}$  μετά το λυγισμό έχουμε:

(i) λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους στατικούς αρμούς

$$\bar{P} = \left\{ 2\pi h M_p (5 + 2\sqrt{2}) + 8\pi b_1 M_{p1} \right\} / \delta \quad (1.25)$$

και

(ii) συμπεριλαμβάνοντας το μηχανισμό μεταφερόμενων αρμών

$$\bar{P} = \frac{10\pi h M_p + 8\pi b_1 M_{p1}}{h - 4r} + \frac{h^2 M_p}{r(h - 4r)} \quad (1.26)$$

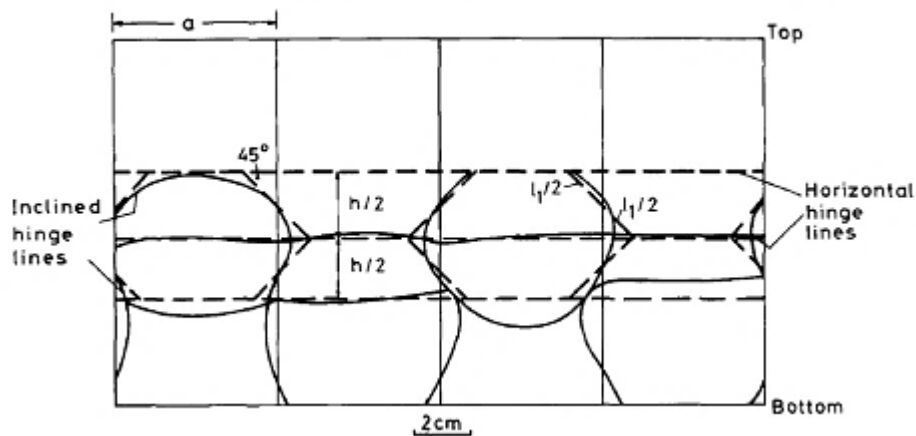
όπου η ακτίνα καμπυλότητας  $r$  δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{B + \sqrt{B^2 + 2ABh}}{8A} \quad (1.27)$$

και

$$A = 10\pi h M_p + 8\pi b_1 M_{p1} \quad \text{και} \quad B = h^2 M_p \quad (1.28)$$

Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών παρατηρήσεων της αξονικής κατάρρευσης τετραγωνικών σωλήνων και συγκρίνονται με το ιδανικό μοτίβο των οριζόντιων αρμών και των κεκλιμένων  $\pm 45^\circ$  αντίστοιχα. (Mamalis A.G. et al., 1989)

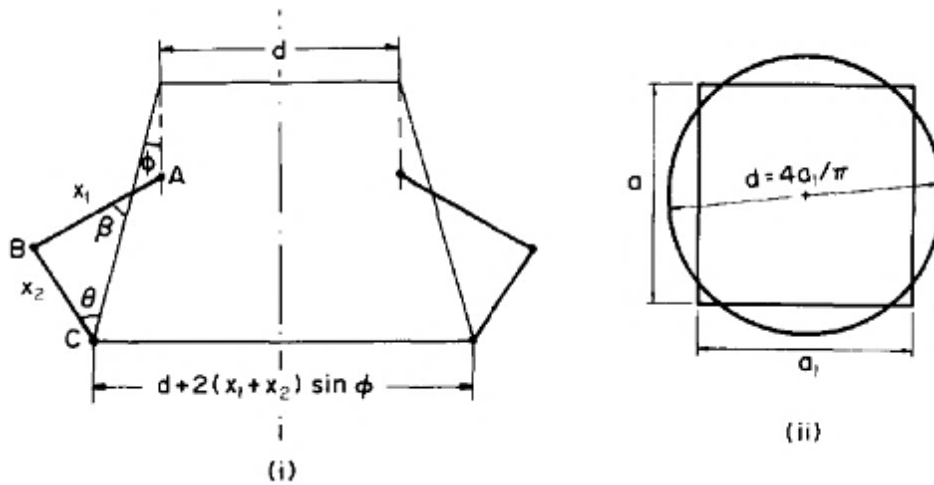


Εικόνα 1.4: Τρόπος παραμόρφωσης για μη εκτατή κατάρρευση του λοβού σε τετραγωνικό σωλήνα (συμπαγείς γραμμές: πειραματικές, γραμμές με στιγμές: ιδανικές) (Mamalis A.G. et al., 1989)

### 1.2.2 Εκτατή κατάρρευση

Κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πρώτου δακτυλίου συνέλιξης κατά την κατάρρευση τετραγωνικών πυραμίδων μεγάλης ημικορυφαίας γωνίας  $\phi$ , και οι τέσσερις πλευρές του λοβού μετακινούνται προς τα έξω, οδηγώντας σε αντίστοιχη αύξηση των αρχικών διαστάσεων. Αυτός ο τύπος παραμόρφωσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως «εκτατός». (Mamalis A.G. et al., 1986).

Αυτός ο τρόπος παραμόρφωσης παρουσιάζεται ξεκάθαρα στην Εικόνα 1.5. Κάθε σχηματιζόμενος λοβός της τετραγωνικής πυραμίδας είναι σχεδόν ισοδύναμος με το λοβό μιας κυκλικής πυραμίδας, θεωρώντας ότι η περιφέρεια της διατομής του λοβού παραμένει ίδια, δηλ.  $\pi d = 4a_1$  (Εικόνα 1.5) όπως και η ημικορυφαία γωνία  $\phi$ . (Mamalis A.G. et al., 1986).



**Εικόνα 1.5: Τρόπος παραμόρφωσης τετραγωνικής πυραμίδας για εκατή κατάρρευση με δημιουργία εξωτερικών συνελίξεων (Mamalis A.G. et al., 1989)**

Από την εξίσωση (1.25) με κατάλληλη τροποποίηση μπορεί να υπολογιστεί το μέσο φορτίο μετά το λυγισμό για τον πρώτο λοβό, όπου δε σχηματίζεται περιφερειακός αρμός στην πάνω μικρή βάση της πυραμίδας. Η τροποποιημένη έκφραση στην περίπτωση αυτή είναι (Mamalis A.G. et al., 1989):

$$\bar{P} = 3.8Yt^{1.5} a_1^{0.5} \left( \frac{3\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)^{0.5} + 5.7Yt^2 \tan \phi \quad (1.29)$$

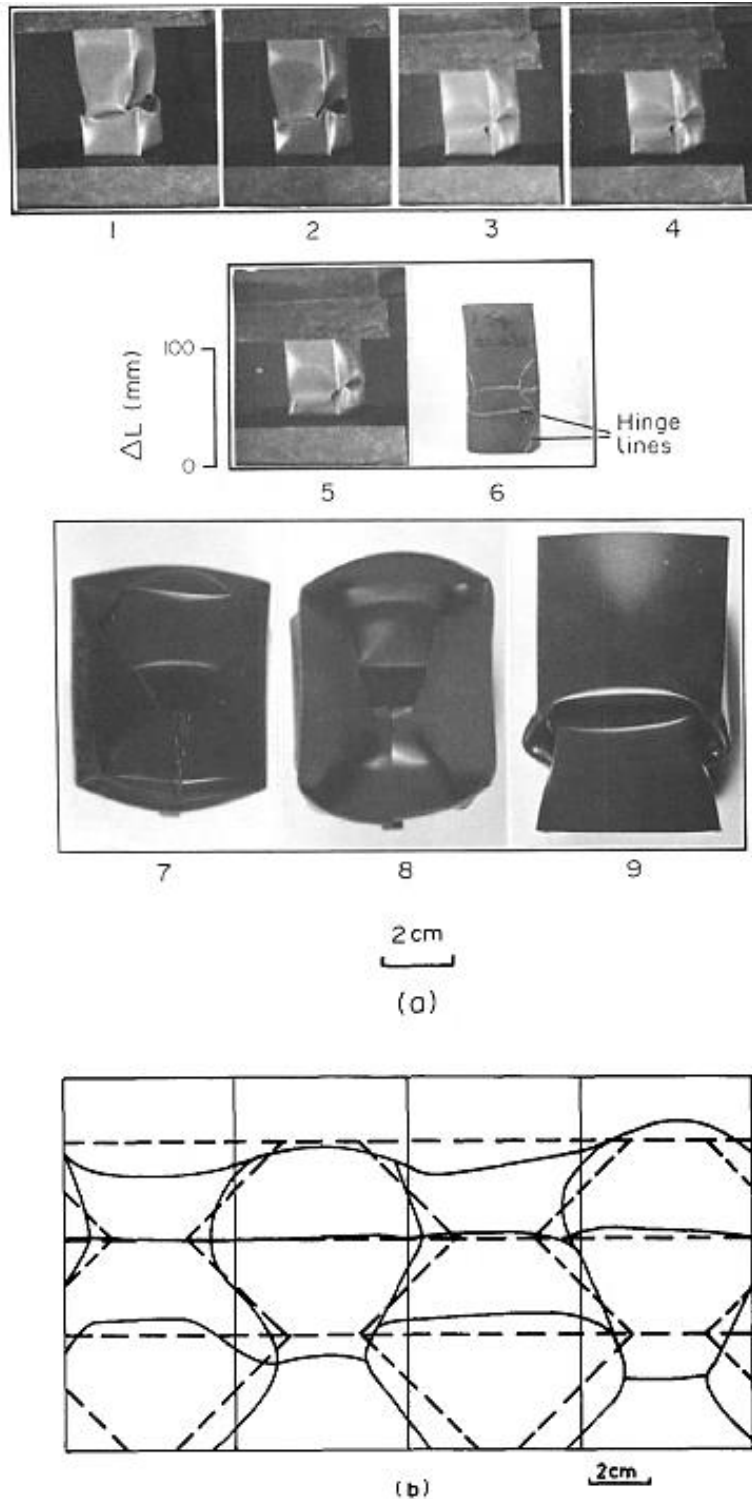
όπου  $d = 4a_1 / \pi$ .

### 1.3 Πειραματική επιβεβαίωση

Τα περισσότερα από τα δοκίμια παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία κατάρρευσης. Ο τρόπος αστοχίας ήταν ο «συμμετρικός». Σύμφωνα με το μηχανισμό αυτό, μια πυραμίδα που καταρρέει διαθέτει δύο ειδών αρμούς, σταθερούς οριζόντιους και κεκλιμένους μετακινούμενους. (Mamalis A.G. et al., 1989)

Δύο οριζόντιοι αρμοί σχηματίζονται στις αντίθετες πλευρές του λοβού και κινούνται προς τα έξω, μειώνοντας το αρχικό τους μήκος. Ταυτόχρονα, οι αρμοί των γειτονικών πλευρών κινούνται προς τα μέσα, αυξάνοντας το αρχικό τους μήκος. Στη συνέχεια, σχηματίζονται ομάδες παρόμοιων λοβών σε απόσταση  $\pi/2$  από τους προηγούμενους. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο ως την πλήρη συμπίεση του κελύφους. Οι κεκλιμένοι μετακινούμενοι

αρμοί εμφανίζονται στη γωνία της πυραμίδας, σαρώνουν το αξονικό μήκος και ολοκληρώνονται σε γωνία  $\pm 45^\circ$  ως προς τους οριζώντιους. Σε πυραμιδικό δοκίμιο, η πρώτη αναδίπλωση παρουσιάζεται πάντα κοντά στη μικρότερη βάση του κελύφους. (Mamalis A.G. et al., 1989)

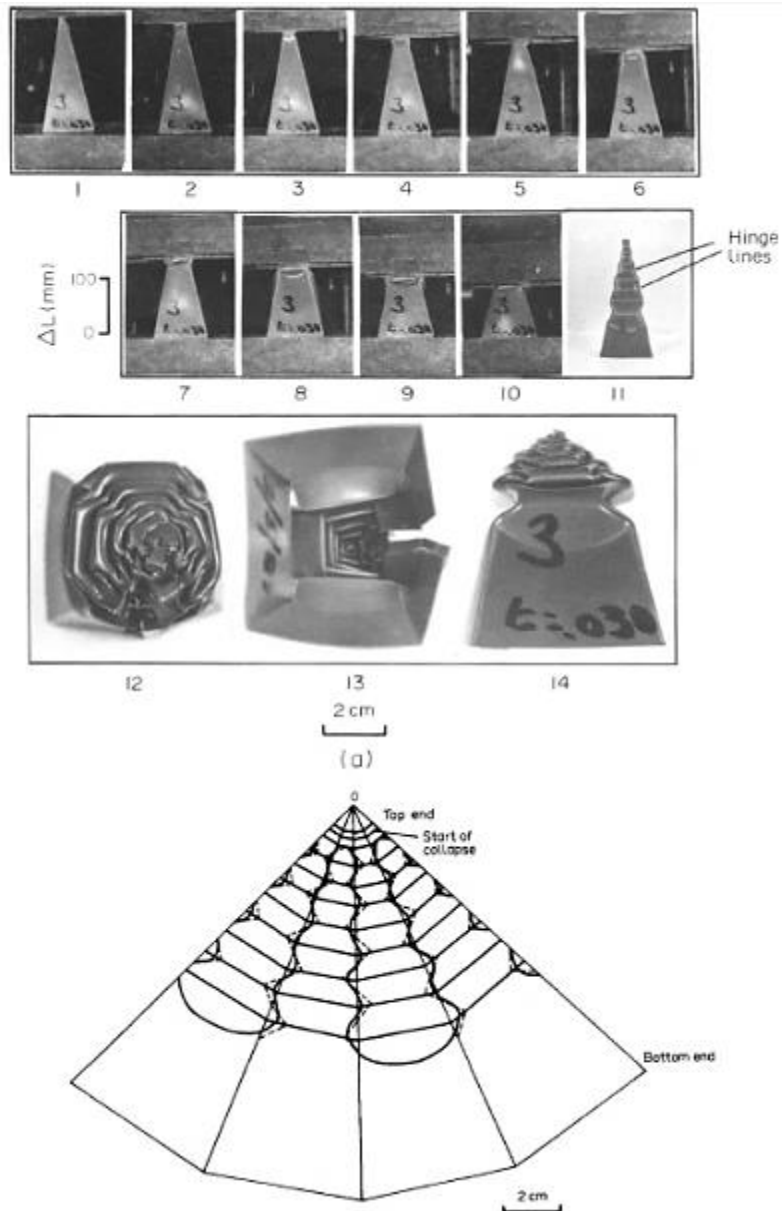


Εικόνα 1.6: (α) Κατάρρευση τετραγωνικού σωλήνα από PVC (1-5:προοδευτική κατάρρευση, 6: ανακτημένη πλάγια όψη, 7: κάτοψη, 8: άνοψη, 9: πλάγια όψη) (b) (Mamalis A.G. et al., 1989)

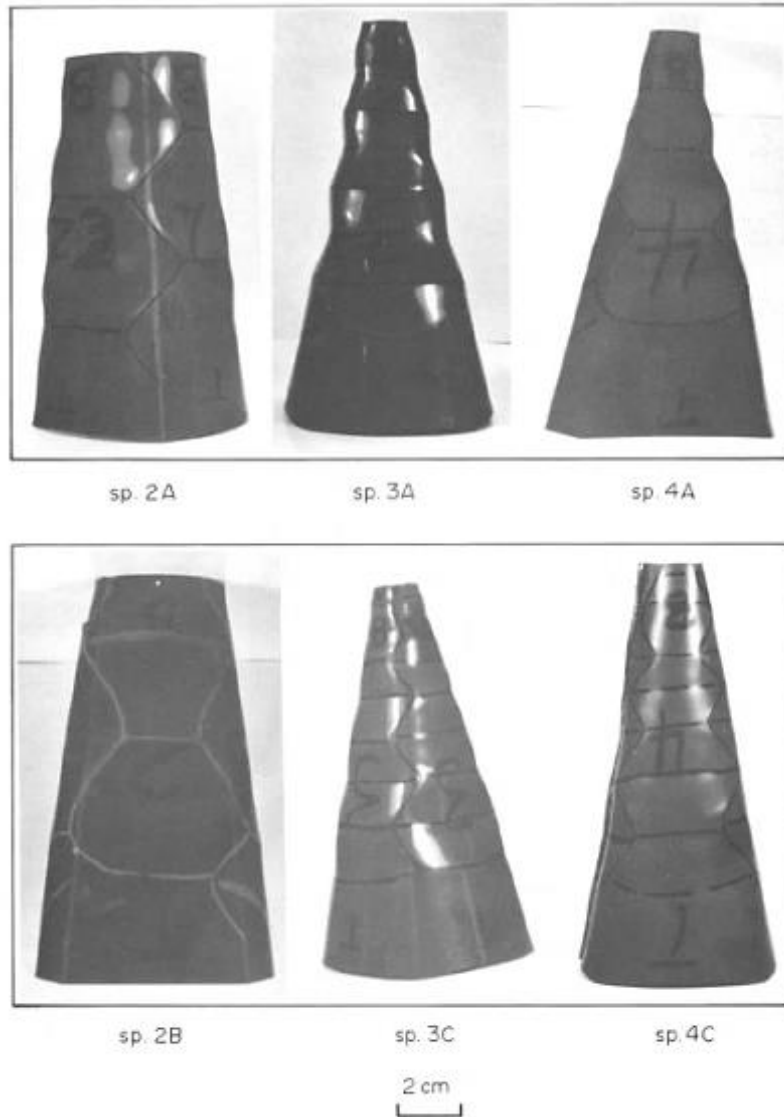
Στον «ασύμμετρο» τρόπο αστοχίας, η πρώτη αναδίπλωση φαίνεται να είναι συνολικού τύπου, δηλ. εμφανίζεται ταυτόχρονα σε διάφορα σημεία. Η διαδικασία λυγισμού επικεντρώνεται σε σημείο που δεν είναι κοντά στη μικρότερη βάση του κελύφους, και έχει τους πρώτους ασύμμετρους λοβούς κεκλιμένους προς διάφορες κατευθύνσεις σε κάθε πλευρά.

Από τις παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν προκύπτει ότι τα κελύφη με μικρή ημίσεια γωνία κορυφής, το μήκος κύματος είναι σχεδόν σταθερό για όλους του λοβούς. Για μεγαλύτερες γωνίες, το μήκος κύματος αυξάνεται από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη βάση του κελύφους. Αυτή η μη-συνέχεια δε φαίνεται ιδιαίτερα σημαντική, και δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη συνδετική λωρίδα. (Mamalis A.G. et al., 1989)

Σε τετραγωνικές πυραμίδες, π.χ.  $\phi = 16^\circ$ , το πρώτο σύνολο λοβών κινούνται προς τα έξω και ακολουθούν τον εκτατό τύπο παραμόρφωσης. Με αύξηση της γωνίας κορυφής  $\phi$ , ορισμένοι από τους φαρδύτερους λοβούς που σχηματίζονται σταδιακά επικαλύπτουν τους μικρότερους. Όλα τα δοκίμια, και ιδιαίτερα όσα έχουν μεγαλύτερες γωνίες κορυφής, παρουσίασαν μεγαλύτερη παραμόρφωση στα σημεία σύνδεσης και εμφάνιση ρωγμών, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ασθενή σύνδεση. (Mamalis A.G. et al., 1989)



Εικόνα 1.7: (α) Τρόπος κατάρρευσης τετραγωνικής πυραμίδας 16° από PVC (1: αρχικά απαραμόρφωτο δοκίμιο, 2-10: προοδευτική κατάρρευση, 11: ανακτημένη πλάγια όψη, 12: κάτοψη, 13: άνοψη, 14: πλάγια όψη) (β) στατικοί και μετακινούμενοι αρμοί (συμπαγείς: πειραματικές, διακεκομμένες: ιδανικές) (Mamalis A.G. et al., 1989)



**Εικόνα 1.8: Απεικόνιση των ζωνών παραμόρφωσης σε ανακτημένες τετραγωνικές πυραμίδες PVC ύστερα από βύθιση σε βραστό νερό (Mamalis A.G. et al., 1989)**

Όσον αφορά το φορτίο λυγισμού, αρχικά το κέλυφος συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο της μηχανής δοκιμής αυξάνεται σε μια σταθερή τιμή, ενώ από την καμπύλη φορτίου-απόκλισης φαίνεται ότι το αρχικό μέγιστο φορτίο ακολουθείται από πολύ απότομη μείωση. Ύστερα από αυτό το τελικό στάδιο, η φάση μετά το λυγισμό αναπτύσσεται με δευτερεύοντα φορτία. Τα δευτερεύοντα μέγιστα φορτία είναι σημαντικά χαμηλότερα σε μέγεθος από τα αρχικά φορτία, ελαφρά μικρότερα για πυραμιδικά δοκίμια και σταθερού μεγέθους για τετραγωνικούς σωλήνες. (Abramowicz W. et al., 1984), (Reid S. R. et al., 1986)

## 1.4 Αξονική κατάρρευση κόλουρης πυραμίδας

Η προστασία των δομών υπό φορτίο πρόσκρουσης συχνά επιτάσσει την εφαρμογή απορροφητών ενέργειας, σχεδιασμένων ώστε να απορροφούν την ενέργεια της πρόσκρουσης με ελεγχόμενο τρόπο και κατά συνέπεια να προστατεύουν την εξεταζόμενη δομή. Οι λεπτότοιχοι σωλήνες, ιδιαίτερα οι σωλήνες τετράγωνης ή κυκλικής διατομής, αποτελούν ένα συνήθη τύπο απορροφητών ενέργειας καθώς είναι σχετικά φθηνοί, εύκαμπτοι και αποδοτικοί στην απορρόφηση ενέργειας. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών φορτίων σύγκρουσης, όπως κελύφη αυτοκινήτων και τρένων και ως αποσβεστήρες στη βάση ανελκυστήρων.

Ένας σχετικά νέος τύπος απορροφητή ενέργειας είναι οι λεπτότοιχοι κωνικοί σωλήνες, δηλαδή πυραμιδικής μορφής, στους οποίους μία ή περισσότερες πλευρές είναι λοξή ως προς τον διαμήκη άξονα. Τέτοιες δομές θεωρούνται προτιμότερες σε σχέση με τις ευθείες (σωλήνες χωρίς κωνικότητα), καθώς είναι πιο πιθανό να παρέχουν επιθυμητή σταθερή μέση απόκριση φορτίου κρούσης-απόκλισης, υπό αξονική φόρτιση. (Reid et al., 1986) Επίσης, οι πυραμιδικές μορφές έχουν τη δυνατότητα να αντέχουν πλάγια φορτία πρόσκρουσης τόσο αποτελεσματικά όσο και τα αξονικά φορτία, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές στις οποίες η κατεύθυνση του φορτίου πρόσκρουσης μεταβάλλεται. Επιπλέον, οι πυραμιδικές δομές είναι λιγότερο πιθανό να υποστούν ολική κατάρρευση, ο οποίος είναι ένας μη επιθυμητός τρόπος παραμόρφωσης καθώς μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. (Reid et al., 1986)

Σε σύγκριση με τους ευθείς σωλήνες, έχουν γίνει πολύ λιγότερες μελέτες για τη συμπεριφορά της απορρόφησης ενέργειας των πυραμιδικών μορφών. Όμως, έχουν διεξαχθεί ορισμένα πειράματα στα οποία συγκρίνεται η απόκριση φορτίου-απόκλισης και τρόπου κατάρρευσης τόσο για ευθείς όσο και για κωνικούς κυκλικούς σωλήνες (κόλουρους κώνους) υπό αξονικό ψευδο-στατικό (αργά εφαρμοζόμενο) φορτίο. (Mamalis et al., 1986) Τέτοιες μελέτες έχουν δείξει ότι η απόκριση φορτίου πρόσκρουσης-απόκλισης των κόλουρων κώνων είναι, γενικά, πιο σταθερή σε σχέση με ευθείς κυλίνδρους. Πιο πρόσφατες μελέτες σε τέτοιους απορροφητές επικεντρώνονται σε διαφορετικούς τρόπους αξονικής παραμόρφωσης, την επίδραση των ακραίων περιορισμών τόσο στον τρόπο παραμόρφωσης όσο και στην απορρόφηση ενέργειας υπό αξονικό φορτίο πρόσκρουσης, καθώς και στη χρήση σύνθετων υλικών (Karbhari et al., 2003) (Mamalis et al., 1997).

Οι μελέτες σε ορθογωνικούς ή τετραγωνικούς κωνικούς σωλήνες είναι περιορισμένες. Όμως, η απόκριση των ευθειών και κωνικών ορθογωνικών σωλήνων υπό αξονική και πλάγια φόρτιση συγκρίνεται στη βιβλιογραφία (Reid et al., 1986), στην οποία αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο, το οποίο



επαληθεύεται με τη χρήση πειραμάτων, για να προβλέψει την απόκριση μέσου φορτίου πρόσκρουσης- απόκρισης για τους σωλήνες αυτούς υπό αξονική ψευδο-στατική και δυναμική φόρτιση. (Reid et al., 1986)

Συνολικά πάντως υπάρχουν λίγες μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά απορρόφησης ενέργειας κωνικών λεπτότοιχων ορθογωνικών σωλήνων. Οι κόλουροι κώνοι ή πυραμίδες έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι κόλουροι κώνοι χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς ως δομικά μέρη, λόγω της σταθερής συμπεριφοράς τους σε αξονική καταπόνηση.

Ο κόλουρος κώνος αρχικά μελετήθηκε από τους Postlewaite και Mills. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν τη μέθοδο της εκτατής ανάλυσης κατάρρευσης για άκαμπτους πλαστικούς κώνους. Έτσι εξήγαγαν την ακόλουθη σχέση για τη μέτρηση της μέσης δύναμης για εξωτερική κατάρρευση:

$$P_{av} = 6Yt^{3/2} \sqrt{d + 2x \sin(\varphi)} + 5.69Yt^2 \tan(\varphi) \quad (1.30)$$

όπου το  $Y$  αφορά το όριο διαρροής,  $t$  είναι το πάχος του κόλουρου κώνου,  $x$  είναι η παραμόρφωση,  $d$  είναι η μικρή διάμετρος του κώνου και  $\varphi$  είναι η ημι-κορυφαία γωνία του κώνου.

Οι Mamalis και Johnson (1983) ερεύνησαν πειραματικά την ψευδο-στατική κατάρρευση σωλήνων και κόλουρων κώνων αλουμινίου υπό ψευδο-στατική συμπίεση. Ο κύριος στόχος τους ήταν ο πειραματικός προσδιορισμός των τρόπων κατάρρευσης του κόλουρου κώνου. Παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες απόκλισης-φορτίου του κώνου είναι πιο κανονικές σε σχέση με αυτές των κυλίνδρων. Επίσης, το φορτίο σε λυγισμό αυξάνεται με παραβολικό τρόπο με αύξηση του πάχους του τοιχώματος, και, όπως αναμενόταν μειώνεται με αύξηση της ημι – κορυφαίας γωνίας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι ο λεπτός κόλουρος κώνος παραμορφώθηκε σε σχήμα διαμαντιού, ενώ ο παχύτερος παραμορφώθηκε σε σχήμα αξονοσυμμετρικών δακτυλίων. Οι ερευνητές εφάρμοσαν εμπειρικές εξισώσεις στα αποτελέσματά τους για τρόπους κατάρρευσης τύπου «ακορντεόν» ή «διαμαντιού».

Οι Mamalis et al. (1984) επανέλαβαν το ίδιο πείραμα χρησιμοποιώντας χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και αυξημένο ρυθμό παραμόρφωσης (25 mm/min). Παρατηρήθηκε ότι οι αρχικές αξονοσυμμετρικές πτυχώσεις μεταβλήθηκαν σε μη συμμετρικές σχήματος «διαμαντιού» και το πλήθος των λοβών του σχήματος διαμαντιού αυξήθηκε με αύξηση του λόγου της μέσης διαμέτρου προς το πάχος.

Οι Mamalis et al. (1986) πρότειναν ένα επεκταμένο θεωρητικό μοντέλο, το οποίο προβλέπει τη διαχεόμενη ενέργεια και το μέσο φορτίο μετά το λυγισμό για αξονική κατάρρευση κυκλικών και κόλουρων κώνων λεπτού τοιχώματος για παραμόρφωση τύπου «ακορντεόν». Το θεωρητικό μοντέλο βασίστηκε στην

υπόθεση ότι το πλαστικό έργο διαχέεται στους πλαστικούς αρμούς και στην κύρτωση του υλικού μεταξύ των αρμών, χωρίς να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδρασή τους. Η εξίσωση του μοντέλου για τον υπολογισμό του φορτίου κατάρρευσης είναι:

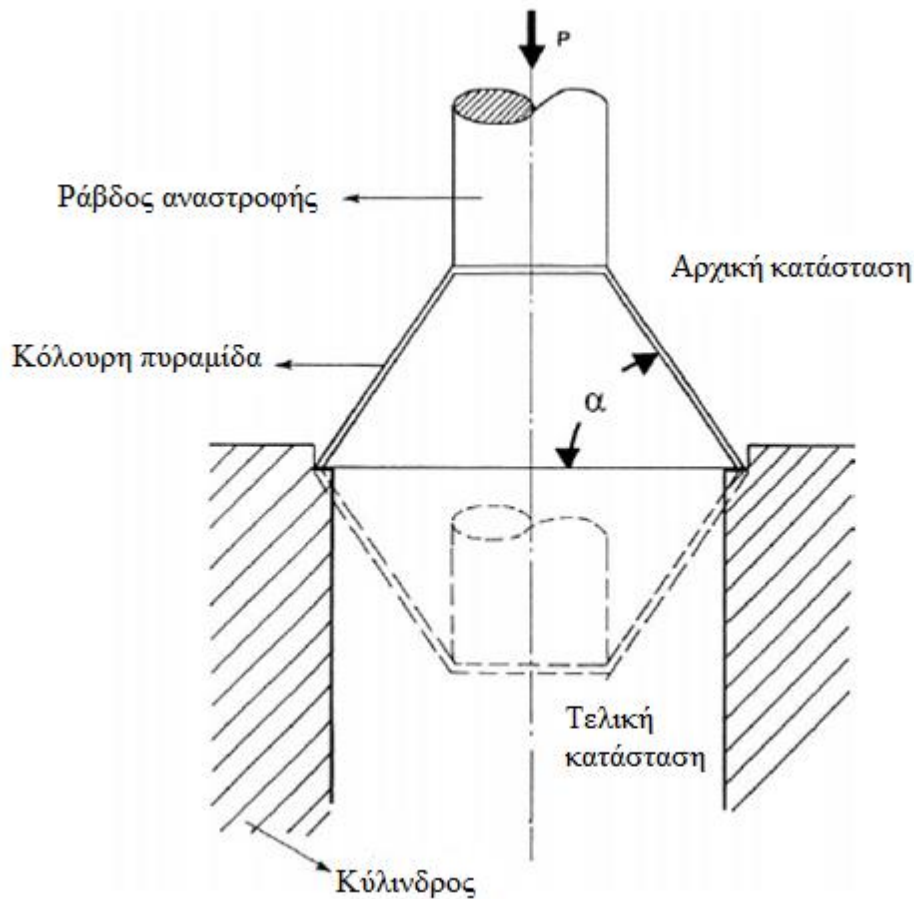
$$P_{av} = 6Yt^{3/2}\sqrt{d} + 0.95\sqrt{t} \tan(\varphi) \quad (1.31)$$

Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε συμφωνία με τους θεωρητικούς υπολογισμούς για το μέσο φορτίο κατάρρευσης.

Οι Mamalis et al. (1986) στη συνέχεια ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης του μέσου φορτίου κατάρρευσης για αξονικά φορτισμένους κυκλικούς και κολουρους κώνους για παραμόρφωση τύπου διαμαντιού. Οι Mamalis et al. (1988) βελτίωσαν το αναλυτικό μοντέλο της παραμόρφωσης τύπου «ακορντεόν», δίνοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης του ιστορικού παραμόρφωσης για λεπτότοιχους σωλήνες και κολουρους κώνους. Έτσι εξήγαγαν μακροσκελείς εξισώσεις για εσωτερικά και εξωτερικά παραμορφωμένες συνελίξεις, οι οποίες συμφωνούσαν πλήρως με τις πειραματικές καμπύλες.

Οι Mamalis et al. (1989) μελέτησαν την αξονική κατάρρευση λεπτών κολουρων κώνων PVC τετραγωνικής διατομής. Έτσι αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο πρόβλεψης της μέσης δύναμης κατάρρευσης με βάση τον μη εκτατό μηχανισμό πτύχωσης της παραμόρφωσης τύπου διαμαντιού. Αποδείχθηκε καλή συσχέτιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.

Οι Alghamdi et al. (1991) εισήγαγαν δυο καινοτόμους τρόπους παραμόρφωσης για τους κολουρους κώνους. Ο πρώτος είναι απευθείας αναστροφή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.9, και ο άλλος είναι προς τα έξω επιπέδωση.



**Εικόνα 1.9: Απευθείας αναστροφή προς τα μέσα για κόλουρη πυραμίδα (Alghamdi et al. ,1991)**

Οι Aljawī και Alghamdi (2001) μοντελοποίησαν την κατάρρευση κόλουρου κώνου όταν αναστρέφεται, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι στη συνέχεια παρουσίασαν τις λεπτομέρειες σχετικά με την κατάρρευση, μεταξύ δυο παράλληλων πλακών, περιστρεφόμενου κόλουρου κώνου, και χώρισαν τους τρόπους παραμόρφωσης σε τρεις κατηγορίες: (1) ισοπέδωση προς τα έξω, (2) αναστροφή προς τα μέσα και ισοπέδωση προς τα έξω, και (3) εκτατή κατάρρευση. Ανέφεραν ότι τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν σε συμφωνία με τις προβλέψεις του προγράμματος ABAQUS. (Alghamdi et al. ,1991)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση απορροφητών ενέργειας και πρόσφατες εξελίξεις

Το ευρύ κοινό αρχίζει να ενημερώνεται σχετικά με τον ασφαλή σχεδιασμό συνιστωσών και συστημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση των ανθρώπινων τραυματισμών καθώς και του οικονομικού κόστους για την κοινωνία. Η σύγκρουση των οχημάτων είναι ένα ατυχές, αλλά συχνό φαινόμενο. Συνεπώς, είναι προφανές ότι, στο μέλλον, τα οχήματα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν τις συγκρούσεις. Η τρέχουσα τάση της παραγωγής ελαφρότερων δομών θέτει υψηλότερες απαιτήσεις στο σχεδιαστή, καθώς οι περισσότερες πλευρές του σχεδιασμού γίνονται κρίσιμες, καθώς το βάρος μειώνεται και οι τάσεις κατά τη λειτουργία φτάνουν κοντά στο όριο θραύσης του υλικού. Αυτό ισχύει κυρίως για τα ελαφρά μεταλλικά κράματα και τα σύνθετα υλικά, των οποίων οι ιδιότητες μεταβάλλονται με την κατεύθυνση. (Wasiowych et al., 1996)

Μια σύντομη ανασκόπηση των διαφόρων περιπτώσεων αξονικής κατάρρευσης κενών μεταλλικών σωλήνων παρέχεται στις έρευνες των Reid et al (1986). Παρατηρήθηκε ότι οι σχετικά λεπτότοιχες πυραμίδες εμφανίζουν μη συμπαγή πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης, π.χ. κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα. Μόλις ολοκληρω το μήκος της πυραμίδας έχει καλυφθεί από τέτοιες μη συμπαγείς αναδιπλώσεις, ολοκληρώνεται η πρώτη φάση. Η δεύτερη φάση ξεκινά, κατά τη διάρκεια της οποίας τα ενδιάμεσα τμήματα καταρρέουν και οι αναδιπλώσεις γίνονται επίπεδες. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης η δύναμη αυξάνεται σημαντικά και η μεταβολή της είναι ανώμαλη.

### 2.1 Απορροφητές ενέργειας

Κατά το δεύτερο μισό του προηγούμενου αιώνα, διερευνήθηκε ένα σημαντικό πλήθος προβλημάτων προσκρούσεων, ειδικά στο πεδίο της δυναμικής απόκρισης των δομών στην πλαστική περιοχή. Αυτό συνέβαλε προς την καλύτερη κατανόηση των τρόπων αστοχίας και των μοτίβων διασποράς ενέργειας κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης σε αυτές τις δομές.

Ένας απορροφητής ενέργειας είναι ένα σύστημα που μετατρέπει, πλήρως ή μερικώς, την κινητική ενέργεια σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Η ενέργεια που μετατρέπεται είτε είναι αντιστρεπτή, όπως η ενέργεια πίεσης σε συμπιεστά ρευστά και η ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης σε στερεά, ή μη αντιστρεπτή, όπως η ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης. (Johnson W et al., 1978) (Mamalis W et al., 1983)

Κατά το σχεδιασμό ενός εύκαμπτου απορροφητή ενέργειας, ο σχεδιαστής στοχεύει στην απορρόφηση του μεγαλύτερου μέρους της κινητικής ενέργειας της σύγκρουσης *εντός της συσκευής* με μη αντιστρεπτό τρόπο, διασφαλίζοντας έτσι ότι οι τραυματισμοί ανθρώπων και η ζημιά του εξοπλισμού είναι ελάχιστη. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται, μεταξύ άλλων παραγόντων, από το μέγεθος και τη μέθοδο εφαρμογής των φορτίων, των ρυθμών μετάδοσης, του τρόπου παραμόρφωσης και μετατόπισης και των ιδιοτήτων του υλικού (Johnson W et al., 1978). Οι συνιστώσες των παραμορφώσιμων απορροφητών ενέργειας περιλαμβάνουν αντικείμενα όπως χαλυβδίνια τύμπανα, κυκλικούς σωλήνες, πυραμίδες, πολυστρωματικές πλάκες κλπ (Mamalis W et al., 1983).

Οι Johnson και Reid (1986) αναγνώρισαν όλους τους κυρίαρχους τρόπους παραμόρφωσης απλών δομικών στοιχείων. Στη συνέχεια, ο Jones (1989) δημοσίευσε μια βιβλιογραφική επισκόπηση στη δυναμική πλαστική συμπεριφορά των δομών με 194 αναφορές. Αργότερα, έγινε μια ανασκόπηση της πλαστικής παραμόρφωσης από την αξονική συμπίεση των απορροφητών ενέργειας. (Reid, 1993)

Κάθε σύστημα απορροφητών ενέργειας έχει δικά του χαρακτηριστικά και ειδικά γνωρίσματα, με τα οποία πρέπει να είναι κανείς εξοικειωμένος για να κατανοήσει τον τρόπο απόκρισης των μεταλλικών δομών σε παλμικά φορτία. Λόγω της εξαιρετικής πολυπλοκότητας των μηχανισμών κατάρρευσης, ορισμένα από αυτά τα χαρακτηριστικά απόδοσης μπορούν να προσδιοριστούν μόνο μέσα από πειραματικές διαδικασίες (Carney et al., 1984) Συνεπώς, οι σχέσεις που προκύπτουν είναι εμπειρικές και περιορίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

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

## **2.2 Ανάλυση απορροφητών ενέργειας**

Η λειτουργία των δομών αυτών είναι η απορρόφηση της κινητικής ενέργειας κατά την πρόσκρουση και η διάχυσή της σε μια άλλη μορφή ενέργειας, όπου ιδανικά θα ήταν υπό μη αντιστρεπτή μορφή. Μη ανακτήσιμη (ανελαστική) ενέργεια μπορεί να υπάρξει σε διάφορες μορφές, όπως είναι η πλαστική παραμόρφωση, η ιξώδης ενέργεια και τριβή ή η ενέργεια θραύσης. Οι κυκλικοί και οι τετραγωνικοί σωλήνες είναι από τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα δομικά στοιχεία λόγω της διαδεδομένης εμφάνισής τους και της ευκολίας κατασκευής τους. Έτσι οι πρακτικές εφαρμογές των απορροφητών ενέργειας μπορεί να

αφορούν αεροσκάφη, αυτοκίνητα, και διαστημόπλοια, πυρηνικά εργοστάσια, καθώς και δεξαμενές για την ασφαλή μεταφορά υγρών και στερεών. (Johnson W et al., 1978) (Mamalis W et al., 1983)

### **2.2.1 Απορρόφηση ενέργειας από προφυλακτήρες**

Οι Johnson et al. (1983) μελέτησαν την περίπτωση της διάχυσης ενέργειας από προφυλακτήρες αυτοκινήτων υπό ψευδο-στατικά πλευρικά φορτία. Υποθέτοντας μια συγκεκριμένη εκτροπή του προφυλακτήρα, οι ερευνητές προσδιόρισαν την ταχύτητα πρόσκρουσης, εξισώνοντας την κινητική ενέργεια με το πλαστικό έργο του προφυλακτήρα. Βρέθηκε ότι οι περισσότεροι προφυλακτήρες αυτοκινήτων δεν προσέφεραν καμία προστασία ως απορροφητές ενέργειας σε μια ισχυρή σύγκρουση. Ακόμη οι ερευνητές, σε μια άλλη μελέτη τους (Johnson et al. 1983), διαπίστωσαν τη σημασία βελτίωσης του σχεδιασμού της εμπρόσθιας δομής του προφυλακτήρα φορτηγών, ώστε να μειώσουν τα θανατηφόρα περιστατικά που προκαλούνταν από συγκρούσεις μεταξύ αυτοκινήτων και τέτοιων φορτηγών. Έτσι θέμα της μελέτης τους ήταν η φύση των συγκρούσεων μεταξύ αυτοκινήτων και φορτηγών. Το συμπέρασμα που εξήχθη ήταν ότι η τοποθέτηση απορροφητών ενέργειας για τη μείωση των επιδράσεων της πρόσκρουσης είχε αρκετά πλεονεκτήματα. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματικότητα της εν λόγω τακτικής εξαρτάται από την ταχύτητα πρόσκρουσης του αυτοκινήτου με το φορτηγό και την αναλογία μάζας τους, μιας και το όχημα με τη μικρότερη μάζα θα δεχθεί μεγαλύτερη μεταβολή ταχύτητας.

Οι Wasiowych et al. (1996) διεξήγαγαν πειραματική μελέτη με αντικείμενο τη μείωση των τραυματισμών που σχετίζονταν με μετωπικές συγκρούσεις μεταξύ αυτοκινήτων και φορτηγών. Έτσι διεξήγαγαν πειράματα πλήρους κλίμακας, χρησιμοποιώντας ένα πρωτότυπο και μια ανθεκτική ράβδο προσκολλημένη στο εμπρός μέρος ενός φορτηγού. Η απορρόφηση ενέργειας επιτυγχανόταν μέσω πλαστικής παραμόρφωσης του λεπτότοιχου χαλύβδινου σωλήνα μέσω κάμψης και αναστροφής του. Ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της συγκεκριμένης διάταξης ήταν η αποτροπή του να περάσει το αυτοκίνητο κάτω από το φορτηγό, και έτσι το βαρύ όχημα έμενε σε ασφαλή απόσταση από την καμπίνα επιβατών του αυτοκινήτου.

### **2.2.2 Πρόσφατες εξελίξεις στην κατασκευή στοιχείων απορρόφησης ενέργειας**

Ο τομέας της βιομηχανίας των μεταφορών προσελκύει μεγάλο ενδιαφέρον αναφορικά με την προσπάθεια μείωσης του βάρους του οχήματος μέσω της χρήσης ελαφρύτερων υλικών, όπως το αλουμίνιο και τα κράματα μαγνησίου, διατηρώντας την απορρόφηση ενέργειας και την ακεραιότητα του οχήματος υπό συνθήκες σύγκρουσης. Τα συγκεκριμένα σχέδια παράγονται από μια συγκεκριμένη κατασκευαστική διαδικασία που ονομάζεται υδροστατική κοίλανση ή υδροχύτευση. Αυτή η μέθοδος έχει γίνει ιδιαίτερος γνωστή και αποδεκτή ως μέθοδος κατασκευής σχημάτων πολύπλοκης δομής και έχει υιοθετηθεί και από αρκετές βιομηχανίες αυτοκινήτων. Η υδρο-κοίλανση σωλήνων πραγματοποιείται, εφαρμόζοντας πίεση εσωτερικά του σωλήνα μέσω ενός ρευστού, με αποτέλεσμα να το παραμορφώσει και να του δώσει το σχήμα του καλουπιού. Το τελικό αντικείμενο έχει ακριβείς διαστάσεις, μικρότερο βάρος και αυξημένη ακαμψία και αντοχή. (Olabi et al., 2007)

Η καινοτόμος αυτή τεχνολογία μειώνει τα συνολικά έξοδα κατασκευής και βελτιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές, όπως η συγκόλληση και σφυρηλάτηση. Συνεπώς, η τεχνική της υδροκοίλανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή απορροφητών ενέργειας με διάφορα σχήματα όπως, κυκλικοί, τετραγωνικοί και πυραμιδοί. Με τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ως εργαλείο προσομοίωσης και σχεδίασης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτιστοποίηση της κατασκευής αμαξωμάτων ή προφυλακτών αυτοκινήτων με τη μέθοδο της υδροκοίλανσης, επιτυγχάνοντας μείωση βάρους, μέγιστη ακαμψία και αντοχή και καλύτερα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας. (Olabi et al., 2007)

Από την άλλη, εξετάζεται και η χρήση νέων υλικών για απορροφητές ενέργειας. Τα υλικά αυτά έχουν μορφή κυψέλης ή αφρολέξ. Τα κυψελωτά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στον πυρήνα της δομής πολυστρωματικών πάνελ και θεωρούνται καλά υλικά απορρόφησης ενέργειας. Τα σχήματα των διατομών τους είναι τριγωνικά, τετραγωνικά, ρόμβοι, κυκλικά και εξαγωνικά. Τα υλικά κυψελωτής μορφής συνήθως είναι πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά αλλά και χαρτί. Το αφρολέξ είναι μια τρισδιάστατη κυψελωτή μορφή και κατηγοριοποιείται σε ανοικτού κελιού (πολυουρεθάνη) ή κλειστού κελιού (πολυαιθυλένιο) αφρολέξ. Προσφάτως, χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό αφρολέξ ως μια νέα πολλά υποσχόμενη κατηγορία. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται είναι αλουμίνιο και νικέλιο. Έχουν μικρή πυκνότητα με καλή αντοχή σε διάτμηση και θραύση και είναι ιδανικά για την κατασκευή πολυστρωματικών πάνελ. Η άριστη ικανότητα απορρόφησης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας υπό σταθερή δύναμη, τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές σε προφυλακτικές αυτοκινήτων, σε κυλιόμενες σκάλες και σε ανελκυστήρες.

Αναφορικά με την αντοχή σε συγκρούσεις και την οδική ασφάλεια, έχουν υιοθετηθεί πανίσχυρες υπολογιστικές τεχνικές, οι οποίες επιτρέπουν την προσομοίωση διαφόρων περιπτώσεων συγκρούσεων και πρόβλεψης της



συμπεριφοράς του οχήματος και των επιβατών του. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι ερευνητές στον εν λόγω χώρο είναι να μετρηθεί ικανοποιητικά η φυσική απόκριση της πρόσκρουσης του οχήματος. Για να επιτευχθεί αυτό και να αποδοθεί ολοκληρωμένα, πρέπει να συμπεριληφθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο τελικά μπορεί να αποτελείται από 1.000.000 στοιχεία. Επίσης πρέπει να περιλαμβάνουν πολύπλοκες μη γραμμικές ιδιότητες υλικών που αφορούν το εξωτερικό περιβάλλον του αυτοκινήτου, όπως τσιμέντο, ξύλο, πολυουρεθάνη, το έδαφος, και άλλα υλικά. Επιπλέον, ο χρόνος προσομοίωσης των εν λόγω συγκρούσεων μπορεί να είναι 500 ms έως 1s. (Olabi et al., 2007)

Η ζήτηση λοιπόν είναι αρκετά αυξημένη σχετικά με τη βελτίωση των συγκεκριμένων θεμάτων στον τομέα των προσομοιώσεων και της πρόβλεψης των χαρακτηριστικών ενδεχόμενης σύγκρουσης. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει βοηθήσει τους μηχανικούς η διαθεσιμότητα υπολογιστών μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, ώστε να τους επιτρέψει με τα κατάλληλα εργαλεία να αναλύσουν και να βελτιστοποιήσουν την αντοχή των οχημάτων σε συγκρούσεις, καθώς και την ασφάλεια των επιβατών. (Olabi et al., 2007)

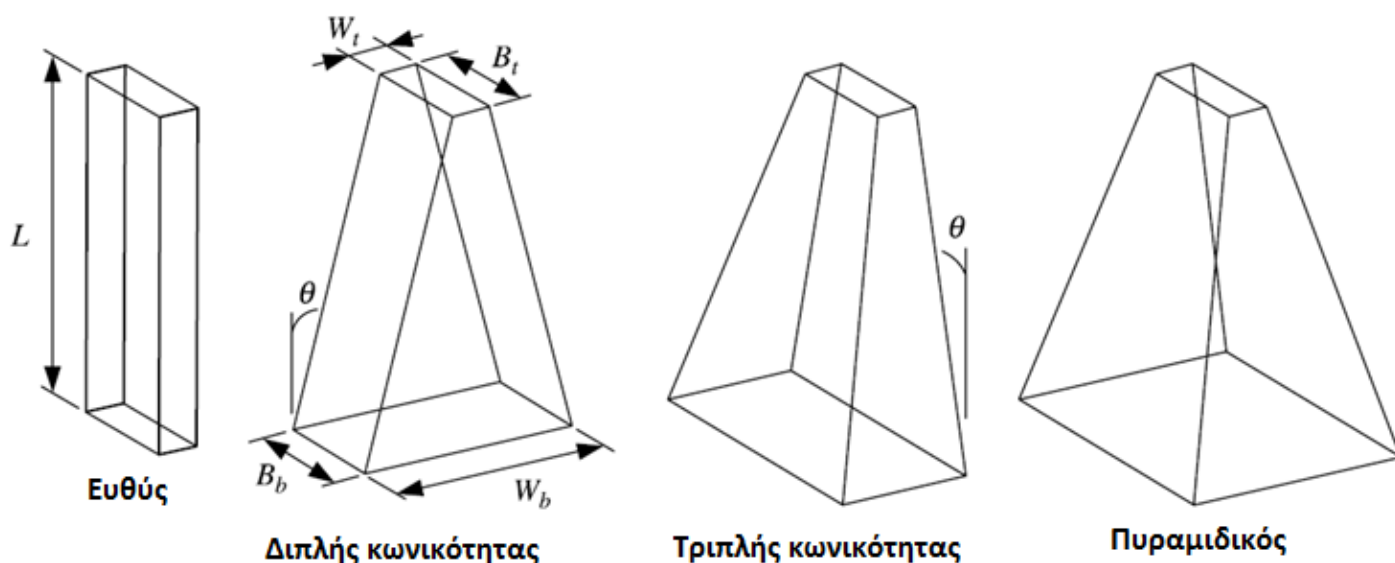
## **2.3 Παρουσίαση προσομοίωσης κατάρρευσης κωνικής λεπτότοιχης τετραγωνικής πυραμίδας**

Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Nagel et al. (2005) είχε στόχο την ποσοτικοποίηση του ψευδο-στατικού φορτίου κατάρρευσης και της απόκρισης της ενέργειας απορρόφησης των κωνικών λεπτότοιχων ορθογωνικών σωλήνων, ώστε να διευκολύνει τις εφαρμογές των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας. Ένα επαληθεύσιμο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE) χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό και για να προσδιορίσει τη σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των πλάγιων πλευρών στην απόκριση. Η απόκριση των κωνικών σωλήνων συγκρίνεται με την απόκριση των ευθειών ορθογωνικών σωλήνων, ώστε να προσδιοριστεί η σχετική συμπεριφορά χρήσης ως απορροφητές ενέργειας πρόσκρουσης. (Nagel et al., 2005)

### **2.3.1 Περιγραφή του μοντέλου**

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στόχευε στη σύγκριση της αξονικής ψευδοστατικής απόκρισης κατάρρευσης σε ευθείς ορθογωνικούς σωλήνες και κωνικούς ορθογωνικούς με δύο (διπλής κωνικότητας), τρεις (τριπλής

κωνικότητας) και τέσσερις κωνικές πλευρές (πυραμιδικά). Οι γεωμετρίες των σωλήνων παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.1. (Nagel et al., 2005)



Εικόνα 2.1: Γεωμετρία για ευθείς και κωνικούς ορθογωνικούς σωλήνες (Nagel et al., 2005)

Για κάθε μία από τις παραπάνω γεωμετρίες δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE) με κώδικα ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί τη μη γραμμικότητα τόσο του υλικού όσο και της γεωμετρίας, και ο οποίος είναι κατάλληλος για την προσομοίωση προβλημάτων μετά την κατάρρευση, όπου λαμβάνουν χώρα πολύπλοκες δυνάμεις αλληλεπίδρασης εντός της δομής, όπως σε λεπτότοιχους σωλήνες αξονικής κατάρρευσης. Το κάθε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τους ευθείς σωλήνες και τους σωλήνες διπλής κωνικότητας επαληθεύτηκε με χρήση ενός υπάρχοντος θεωρητικού μοντέλου, ενώ το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του πυραμιδικού δοκιμίου επαληθεύτηκε με βάση υπάρχον αριθμητικό μοντέλο. (Nagel et al., 2005)

Λόγω συμμετρίας της γεωμετρίας, της φόρτισης και του τρόπου παραμόρφωσης, μοντελοποιείται μόνο το ένα τέταρτο από τον ευθύ σωλήνα, το σωλήνα διπλής κωνικότητας και τον πυραμιδικό σωλήνα, εφαρμόζοντας κατάλληλες οριακές συνθήκες κατά μήκος κάθε αφόρτιστης πλευράς του τετάρτου του μοντέλου. Μια τέτοια τεχνική μοντελοποίησης εξυπηρετεί στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου και έχει χρησιμοποιηθεί και από άλλους ερευνητές σε αξονική φόρτιση λεπτότοιχων τετραγωνικών στηλών (Langseth M et al., 1999) (Karagiozova D, 2004). Η κλίση των τοιχωμάτων των σωλήνων διπλής κωνικότητας προέκυπτε μεταβάλλοντας το πλάτος της βάσης.

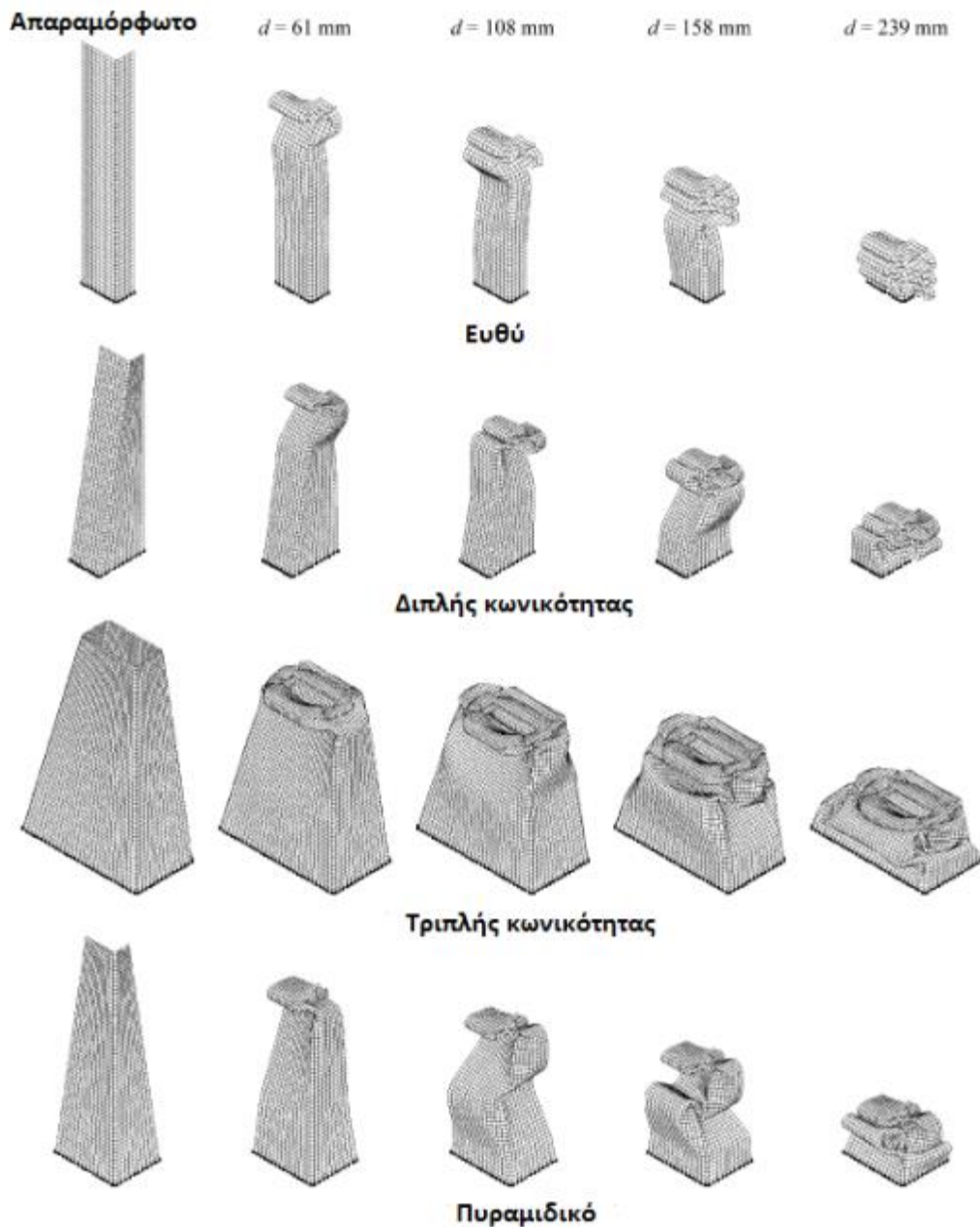
Η βάση κάθε σωλήνα (η μεγάλη πλευρά για κωνικούς σωλήνες) ήταν πλήρως σταθεροποιημένη σε ένα υποστηρικτικό άκαμπτο σώμα με δεσμευμένο

περιορισμό. Το υποστηρικτικό άκαμπτο σώμα περιορίζεται ώστε να μεταφέρεται κάθετα με μια προκαθορισμένη διαδρομή, τέτοια ώστε το ελεύθερο άκρο του σωλήνα να καταρρέει αξονικά σε ένα πλήρως σταθερό άκαμπτο σώμα.

Μοντελοποιήθηκε η επαφή εντός του σωλήνα, κατά την κατάρρευση των τοιχωμάτων υπό την εφαρμογή φορτίου, η οποία θεωρήθηκε χωρίς τριβή, τόσο για τον ευθύ όσο και για τον πυραμιδικό σωλήνα. Το υλικό που θεωρήθηκε για τη μοντελοποίηση και για τα δύο δοκίμια ήταν μαλακός χάλυβας θερμής έλασης με όριο διαρροής  $\sigma_y = 304.6$  MPa, μέτρο ελαστικότητας του Young  $E = 205$  GPa, λόγο Poisson  $\nu = 0,3$  και πυκνότητα  $\rho = 7700$  kg/m<sup>3</sup>. Επιπλέον, ο μαλακός χάλυβας θερμής έλασης βρέθηκε ότι έχει την κατάλληλη ολκιμότητα και αντοχή για την απορρόφηση ενέργειας. Για να προσδιοριστεί με ακρίβεια η απόκριση του υλικού μετά το όριο διαρροής στο μοντέλο FE, πραγματοποιήθηκε μια δοκιμή εφελκυσμού, μέσω της οποίας προσεγγίστηκε η καμπύλη πραγματικής στατικής καταπόνησης-παραμόρφωσης του μαλακού χάλυβα. (Nagel et al., 2005)

Οι ευθείς σωλήνες και οι κωνικοί σωλήνες έχουν μήκος 300 mm, ενώ οι διαστάσεις της διατομής για τον ευθύ σωλήνα και τη μικρή βάση του σωλήνα διπλής κωνικότητας είναι 100×50 mm. Ο πυραμιδικός σωλήνας έχει μήκος 127 mm και γωνίες κωνικότητας 5°, 7,5°, 10° και 14°. Σε όλα τα μοντέλα, ο σωλήνας παραμορφώνεται μέσω ολικής συμμετρικής κατάρρευσης, με την κατάρρευση να ξεκινά από τη φορτισμένη βάση (η μικρή βάση στην περίπτωση των κωνικών σωλήνων).

Ο συμμετρικός τρόπος κατάρρευσης γίνεται αντιληπτός από τη δημιουργία δύο παρόμοιων λοβών στις αντίθετες πλευρές, με το ένα ζεύγος να κινείται προς το μέσα και το άλλο προς τα έξω. Το επόμενο σύνολο λοβών σχηματίζεται σε κατεύθυνση 90° ως προς το αρχικό. Το μήκος του πλαστικού διπλώματος αυξάνεται καθώς κινούμαστε προς τα κάτω στο μήκος του κωνικού σωλήνα, ενώ παραμένει σταθερό για τον ευθύ σωλήνα, πράγμα το οποίο συμφωνεί και με παλαιότερα θεωρητικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η πορεία κατάρρευσης για ευθείς και κωνικούς σωλήνες μήκους 300 mm υπό ψευδο-στατική αξονική φόρτιση. Ο σωλήνας τριπλής κωνικότητας τείνει να ολισθαίνει προς την κάθετη πλευρά καθώς καταρρέει, όπως και να περιστρέφεται ως προς το διαμήκη άξονα του σωλήνα, πράγμα το οποίο μπορεί να οφείλεται στην ασύμμετρη διατομή. (Nagel et al., 2005)



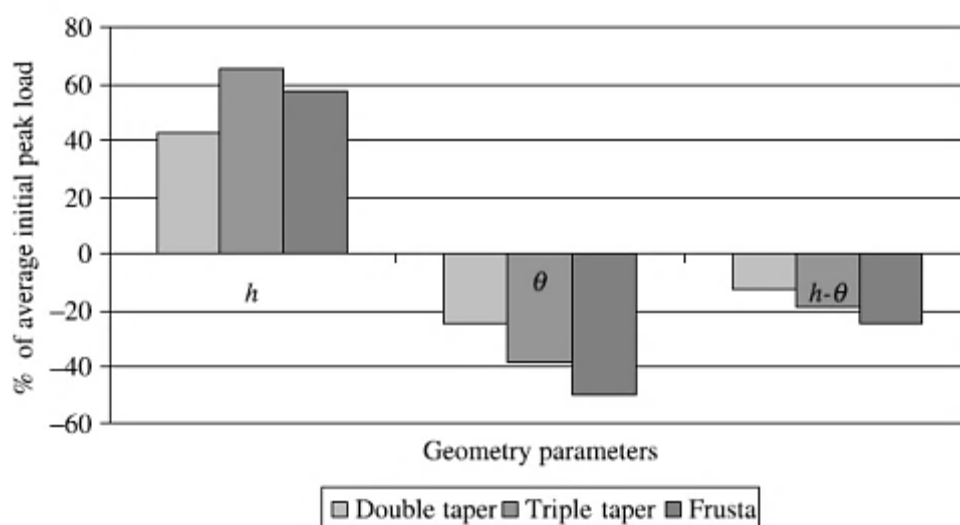
**Εικόνα 2.2: Πορεία κατάρρευσης για ευθύ και κωνικό τετραγωνικό σωλήνα υπό ψευδο-στατικό αξονικό φορτίο (Nagel et al.,2005)**

Ο σκοπός της παραμετρικής μελέτης είναι να προσδιοριστεί η σχετική επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων στο φορτίο που απαιτείται για την κατάρρευση των σωλήνων και την απορρόφηση ενέργειας. Με άλλα λόγια, επιχειρήθηκε να προσδιοριστεί ποιες παράμετροι μπορούν να ελεγχθούν πιο αποτελεσματικά, ώστε να προκύψει το επιθυμητό φορτίο κατάρρευσης ή η επιθυμητή απορροφούμενη ενέργεια. Οι γεωμετρικές παράμετροι περιλαμβάνουν το πάχος του τοιχώματος  $h$ , την κλίση των τοιχωμάτων  $\theta$  και το πλήθος των κωνικών πλευρών  $n$ . Οι παράμετροι αυτές ελέγχονται μέσω του σχεδιασμού και η κλίση των τοιχωμάτων προσαρμόζεται μεταβάλλοντας τις διαστάσεις της

μικρής και της μεγάλης βάσης κάθε κωνικού σωλήνα. Οι παράμετροι απόκρισης είναι το αρχικό μέγιστο φορτίο  $F_{bs}$ , το μέσο φορτίο  $F_{ms}$  και η ενέργεια που απορροφάται μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης  $E_s$  μέχρι μια ορισμένη απόκλιση. (Nagel et al., 2005)

### 2.3.2 Επίδραση παραμέτρων στο αρχικό φορτίο αιχμής

Η επίδραση στο αρχικό φορτίο αιχμής συσχετίζεται με το μέσο φορτίο όλων των συνδυασμών παραμέτρων, και παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3.

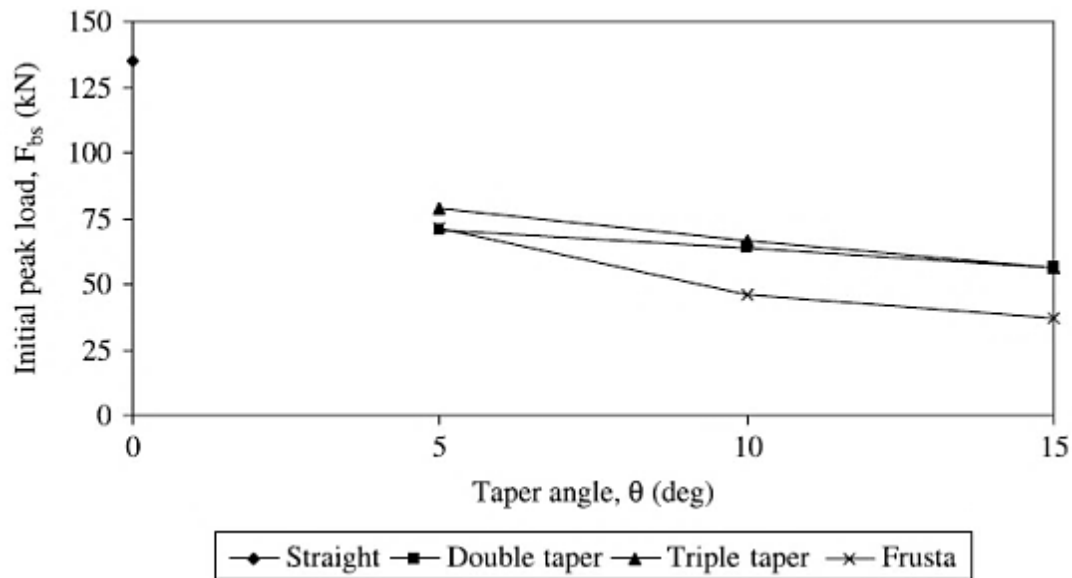


Εικόνα 2.3: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στο αρχικό μέγιστο φορτίο (Nagel et al., 2005)

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το αρχικό φορτίο αιχμής αυξάνεται (θετική επίδραση) με αύξηση του πάχους του τοιχώματος, ενώ μειώνεται (αρνητική επίδραση) με την αύξηση της κλίσης των τοιχωμάτων. Προκύπτει επίσης ότι το μέγιστο αρχικό φορτίο επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του τοιχώματος παρά από την κλίση των τοιχωμάτων. Επιπλέον, τόσο το πάχος του τοιχώματος όσο και η κλίση των τοιχωμάτων έχουν μικρότερη επίδραση στο αρχικό μέγιστο φορτίο για το σωλήνα διπλής κωνικότητας σε σχέση με τους άλλους κωνικούς σωλήνες. Τέλος, η αλληλεπίδραση  $h-\theta$  δείχνει ότι, για κάθε κωνικό σωλήνα, το πάχος του τοιχώματος έχει μικρότερη επίδραση στο μέγιστο αρχικό φορτίο, καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. (Nagel et al., 2005)

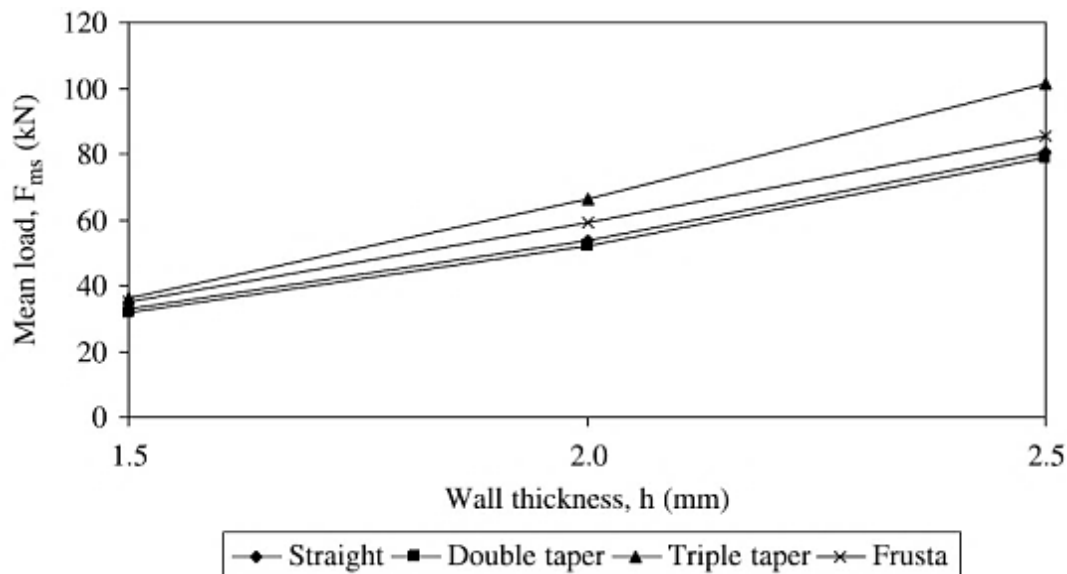
Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται ότι το αρχικό μέγιστο φορτίο μειώνεται με την εισαγωγή κωνικότητας, και καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. Αυτό είναι ωφέλιμο, όταν είναι απαραίτητο να μειωθούν τα μέγιστα φορτία

σύγκρουσης και οι επιβραδύνσεις που μεταδίδονται στη δομή. Οι σωλήνες πυραμιδικής δομής έχουν γενικά το χαμηλότερο αρχικό μέγιστο φορτίο. (Nagel et al., 2005)



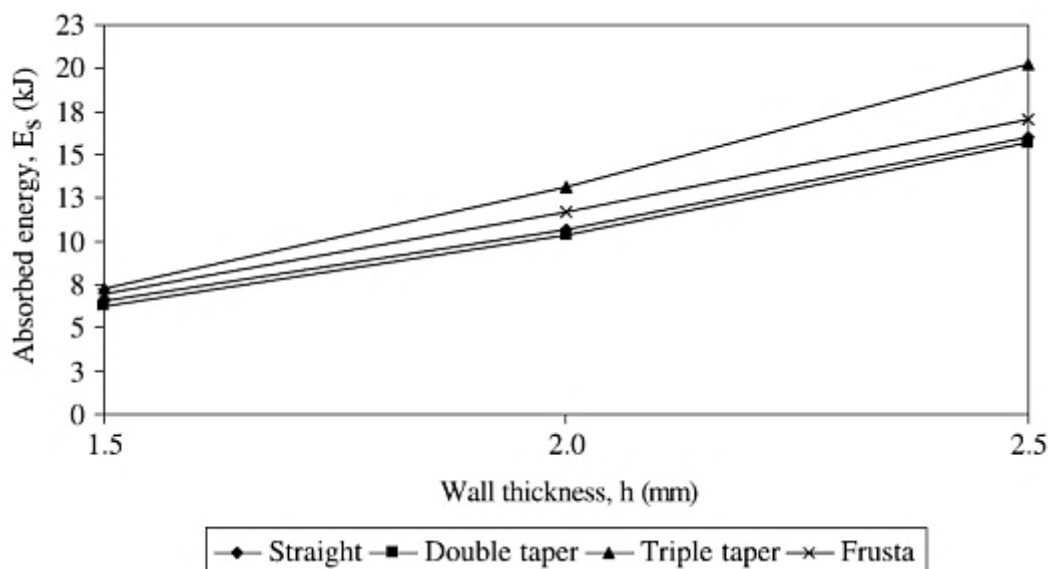
Εικόνα 2.4: Συσχέτιση μέγιστου φορτίου και κωνικότητας (Nagel et al.,2005)

Το μέσο φορτίο επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του τοιχώματος σε σχέση με την κλίση των τοιχωμάτων και το πλήθος των κωνικών πλευρών. Παρόλα αυτά, το πλήθος των κωνικών πλευρών έχει περισσότερη επίδραση στο μέσο φορτίο καθώς το πάχος του τοιχώματος αυξάνεται. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 2.5, όπου το μέσο φορτίο υπολογίζεται για παραμόρφωση μέχρι 200mm. (Nagel et al.,2005).



Εικόνα 2.5: Επίδραση του πλήθους των κωνικών πλευρών στο μέσο φορτίο (Nagel et al.,2005)

Άρα, καθώς το πάχος του τοιχώματος αυξάνεται, ο σωλήνας τριπλής κωνικότητας ο πυραμιδικός σωλήνας έχουν το υψηλότερο μέσο φορτίο και κατά συνέπεια τη μέγιστη ενέργεια απορρόφησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. (Nagel et al., 2005)



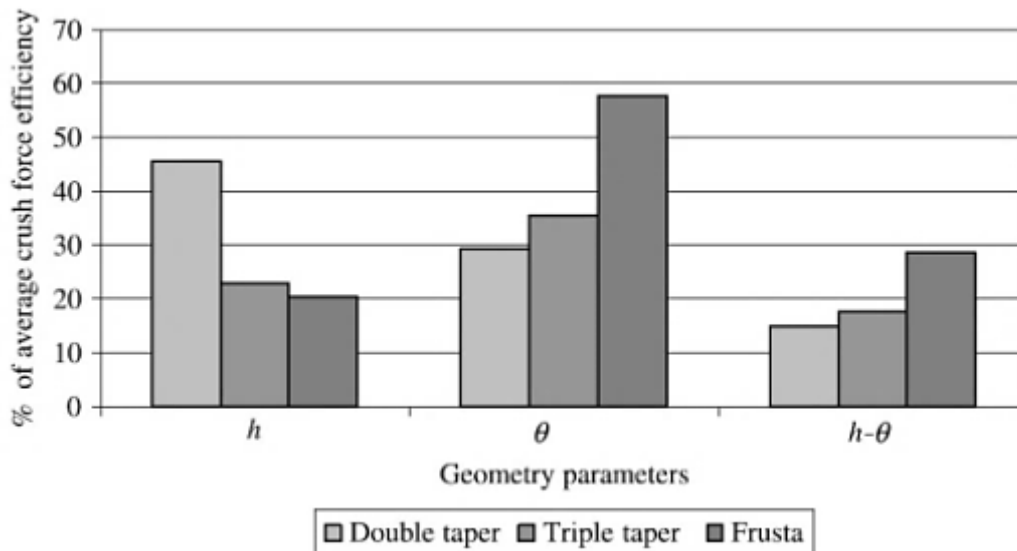
Εικόνα 2.6: Επίδραση του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια (Nagel et al., 2005)

### 2.3.3 Επίδραση παραμέτρων στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (crush force efficiency)

Ο λόγος του μέσου φορτίου προς το αρχικό μέγιστο φορτίο  $F_{ms}/F_{bs}$  αναφέρεται συχνά και ως «παράγοντας μορφής» ή «δείκτης ομοιομορφίας φορτίου». Είναι επιθυμητό να μεγιστοποιείται ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για τους απορροφητές ενέργειας, όπως χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό αντοχής σε σύγκρουση, όπου η ασφάλεια των ανθρώπων είναι προτεραιότητα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ελαχιστοποίησης των μέγιστων δυνάμεων σύγκρουσης και των επιβραδύνσεων που μεταφέρονται μέσω του οχήματος στους επιβάτες. (Nagel et al., 2005)

Στην Εικόνα 2.7 παρουσιάζεται η σχετική επίδραση κάθε γεωμετρικής παραμέτρου στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου. Φαίνεται ότι ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου αυξάνεται, είτε αυξάνοντας το πάχος του τοιχώματος είτε αυξάνοντας την κλίση των τοιχωμάτων. Όμως, φαίνεται επίσης ότι καθώς το πλήθος των κωνικών πλευρών αυξάνεται, η επίδραση του πάχους του τοιχώματος στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου μειώνεται, ενώ η επίδραση της κλίσης των τοιχωμάτων αυξάνεται. Αυτό υπογραμμίζει τη σημαντική επίδραση

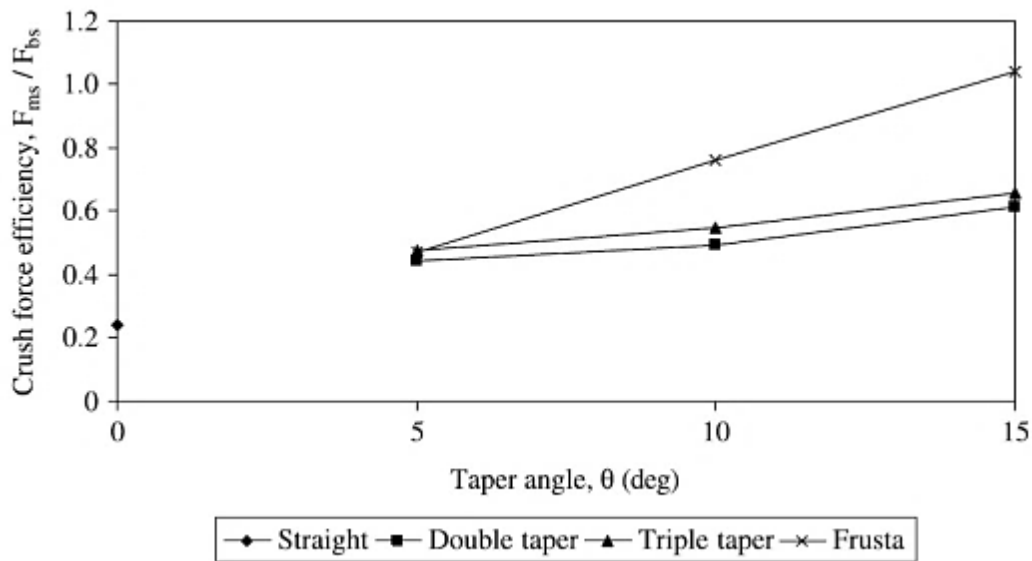
που μπορεί να έχει το πλήθος των κωνικών πλευρών στην απόκριση του συστήματος. Τελικά, η αλληλεπίδραση  $h$ - $\theta$  δείχνει ότι το πάχος του τοιχώματος έχει μεγαλύτερη επίδραση στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. Πρακτικά, λοιπόν, το πάχος του τοιχώματος είναι μια παράμετρος που ελέγχει πιο αποτελεσματικά το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου όταν η κλίση των τοιχωμάτων είναι μεγάλη. (Nagel et al., 2005)



**Εικόνα 2.7:** Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (Nagel et al., 2005)

Στην Εικόνα 2.8 φαίνεται ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου ως συνάρτηση της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών, για πάχος τοιχώματος 1.5 mm. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς ότι ο δείκτης για τους κωνικούς σωλήνες είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τους ευθείς σωλήνες ισοδύναμων διατομών. Αυτό οφείλεται στην παρουσία κωνικότητας, και απεικονίζει το εγγενές πλεονέκτημα των κωνικών σωλήνων για χρήση ως απορροφητές φορτίου. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι σωλήνες τριπλής κωνικότητας και οι πυραμιδικοί σωλήνες έχουν το μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας. (Nagel et al., 2005)

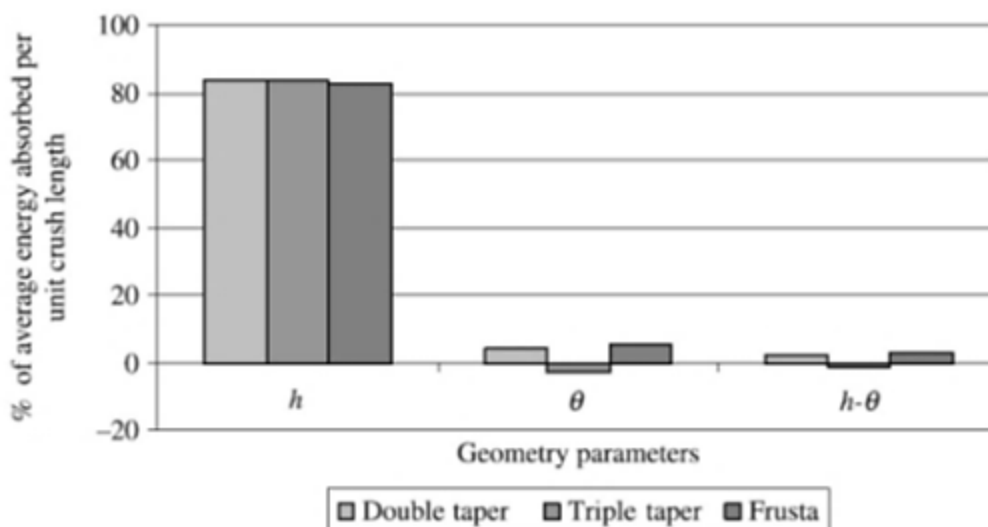




Εικόνα 2.8: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου ως προς την κλίση των τοιχωμάτων και το πλήθος των κωνικών πλευρών (Nagel et al.,2005)

### 2.3.4 Επίδραση παραμέτρων στην απορροφούμενη ενέργεια

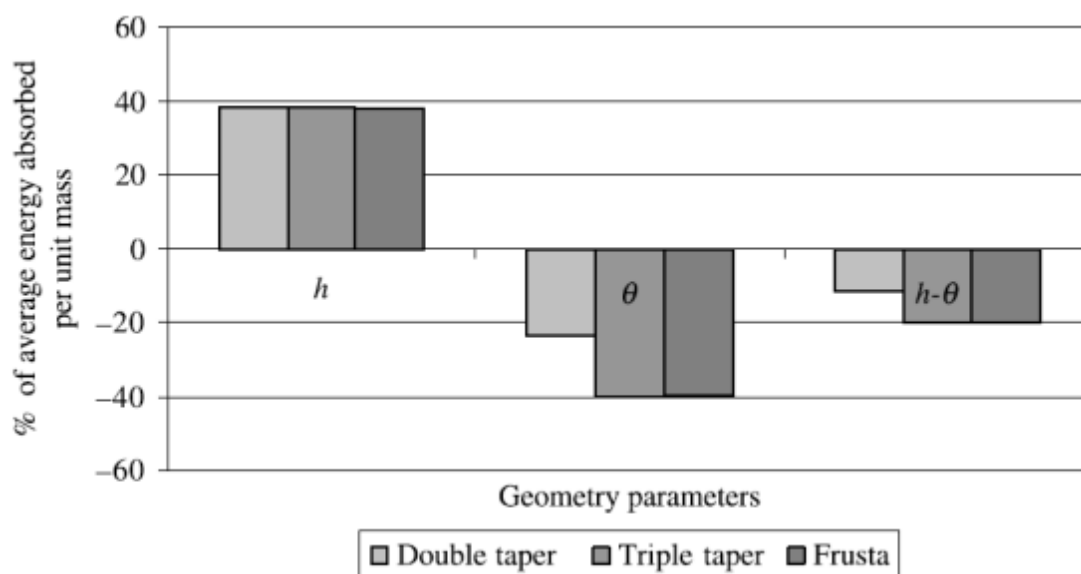
Μια σημαντική παράμετρος από την άποψη του σχεδιασμού είναι η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους, το οποίο αποτελεί κατά βάση ένα μέτρο του ποσού ενέργειας που απορροφάται για μια δεδομένη απόκλιση. Αυτή είναι μια σημαντική παράμετρος όταν η ζώνη σύνθλιψης στην οποία μπορεί να αποθηκευτεί ενέργεια είναι περιορισμένη. Η σχετική επίδραση κάθε γεωμετρικής παραμέτρου στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους φαίνεται στην Εικόνα 2.9. (Nagel et al., 2005)



Εικόνα 2.9: Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μήκους (Nagel et al.,2005)

Είναι ξεκάθαρο ότι το πάχος του τοιχώματος αυξάνει σημαντικά την απορροφούμενη ενέργεια για μια δεδομένη απόκλιση, πράγμα το οποίο προφανώς οφείλεται στην αυξημένη ποσότητα διαθέσιμου υλικού για πλαστική παραμόρφωση και απορρόφηση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η απορρόφηση ενέργειας φαίνεται να μην εξαρτάται από την κλίση των τοιχωμάτων. Τέλος, προέκυψε ότι για κάθε κλίση των τοιχωμάτων και πάχος τοιχώματος ο σωλήνας τριπλής κωνικότητας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας ανά μονάδα μήκους. Ακολουθείται από το σωλήνα πυραμιδικής μορφής, ενώ η απόκλιση που παρουσιάζει ο ευθύς σωλήνας και ο σωλήνας διπλής κωνικότητας είναι πρακτικά όμοιες. (Nagel et al., 2005)

Η τελευταία παράμετρος που διερευνήθηκε είναι η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Η παράμετρος αυτή δίνει μια σύγκριση μεταξύ των διαφόρων γεωμετριών σωλήνων, ώστε να προσδιοριστεί ποια είναι η αποδοτικότερη ως προς το ποσό αποθηκευμένης ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Στην Εικόνα 2.10 παρουσιάζεται η σχετική επίδραση κάθε παραμέτρου στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας. (Nagel et al., 2005)



**Εικόνα 2.10:** Σχετική επίδραση του πάχους του τοιχώματος, της κλίσης των τοιχωμάτων και του πλήθους των κωνικών πλευρών στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας (Nagel et al.,2005)

Με εξαίρεση το σωλήνα διπλής κωνικότητας, τόσο το πάχος του τοιχώματος όσο και η κλίση των τοιχωμάτων έχουν πρακτικά την ίδια επίδραση στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας για δεδομένο πλήθος κωνικών πλευρών. Συνολικά, φαίνεται ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται ανά μονάδα μάζας αυξάνεται με αύξηση του πάχους του τοιχώματος για δεδομένη κωνικότητα και δεδομένο πλήθος κωνικών πλευρών. (Nagel et al., 2005)

Με άλλα λόγια, κάθε σωλήνας μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια για δεδομένη μάζα καθώς το πάχος του τοιχώματος αυξάνεται. Αντιθέτως, αύξηση της κλίσης των τοιχωμάτων οδηγεί σε μείωση της απορροφούμενης ενέργειας ανά μονάδα μάζας, λόγω της επακόλουθης αύξησης της μάζας του σωλήνα. Επιπλέον, για κάθε κωνικό σωλήνα, η αλληλεπίδραση h-θ δείχνει ότι το πάχος του τοιχώματος έχει μικρότερη επίδραση στην απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. Τελικά, για κάθε κλίση των τοιχωμάτων και πάχος τοιχώματος βρέθηκε ότι ο ευθύς σωλήνας απορροφά το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για δεδομένη μάζα απορρόφησης. Ακολουθείται από το σωλήνα τριπλής κωνικότητας, το σωλήνα διπλής κωνικότητας και τελικά την πυραμίδα. Αυτό δείχνει ότι η μάζα του υλικού απορρόφησης αυξάνεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των κωνικών πλευρών, παρά τη σχετική αύξηση στην απορροφούμενη ενέργεια. (Εικόνα 2.10) (Nagel et al., 2005)

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η χρήση πυραμιδικών σωλήνων ορθογωνικής διατομής έχει καλύτερα αποτελέσματα στην απορρόφηση ενέργειας αξονικού φορτίου. Το μέγιστο αρχικό φορτίο μειώνεται με την εισαγωγή κωνικότητας και καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. Αυτό είναι θετικό όταν είναι απαραίτητο να μειωθούν τα μέγιστα φορτία σύγκρουσης και οι επιβραδύνσεις που μεταφέρονται στην κατασκευή.

Η απόκριση μέσου φορτίου και ενέργειας απορρόφησης των κωνικών σωλήνων ορθογωνικής διατομής που υφίστανται αξονικό ψευδο-στατικό φορτίο επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του τοιχώματος σε σύγκριση με την κλίση των τοιχωμάτων και το πλήθος των κωνικών πλευρών. Παρόλα αυτά, ο σωλήνας τριπλής κωνικότητας και η πυραμίδα έχουν το μεγαλύτερο μέσο φορτίο και κατά συνέπεια την μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. (Nagel et al., 2005)

Για κωνικούς σωλήνες ορθογωνικής διατομής, το αρχικό φορτίο αιχμής επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του τοιχώματος σε σύγκριση με την κλίση των τοιχωμάτων. Όμως, η επίδραση του πάχους του τοιχώματος στο αρχικό φορτίο αιχμής μειώνεται καθώς η κλίση των τοιχωμάτων αυξάνεται. Πρακτικά, το πάχος του τοιχώματος είναι αποτελεσματικότερη παράμετρος ελέγχου του αρχικού φορτίου αιχμής, για μικρότερες γωνίες κωνικότητας. Επιπλέον, οι πυραμιδικοί σωλήνες έχουν γενικά το χαμηλότερο αρχικό φορτίο αιχμής.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (ο λόγος του μέσου φορτίου προς το αρχικό μέγιστο φορτίο) αυξάνεται με αύξηση του πάχους του τοιχώματος και της κλίσης των τοιχωμάτων. Επιπλέον, η απόδοση για κωνικούς σωλήνες ορθογωνικής διατομής είναι υψηλότερη από ότι για ευθείς σωλήνες ορθογωνικής διατομής ισοδύναμης διατομής, ενώ οι σωλήνες τριπλής κωνικότητας και οι πυραμίδες έχουν το μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας.

Η απορροφούμενη ενέργεια εντός δεδομένου μήκους για ορθογωνικό σωλήνα μεγιστοποιείται:

- αυξάνοντας το πάχος του τοιχώματος και/ή
- χρησιμοποιώντας σωλήνα τριών ή τεσσάρων κωνικών πλευρών.

Η απορροφούμενη ενέργεια εντός δεδομένης μάζας σωλήνα αυξάνεται (Nagel et al., 2005):

- αυξάνοντας το πάχος του τοιχώματος και/ή
- μειώνοντας την κλίση των τοιχωμάτων και/ή
- χρησιμοποιώντας ευθύ σωλήνα ή σωλήνα με τρεις κωνικές πλευρές.

Κατά την κατάρρευση του σωλήνα τριπλής κωνικότητας, ο σωλήνας τείνει να ολισθαίνει προς την κατακόρυφη πλευρά, καθώς και να περιστρέφεται ως προς το διαμήκη άξονα. Αυτός ο τρόπος παραμόρφωσης δεν είναι πρακτικός από σχεδιαστικής πλευράς, καθώς το υλικό απορρόφησης μπορεί να ολισθήσει έξω από τη διαθέσιμη ζώνη κατάρρευσης, ή η περιστροφική συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ανεπιθύμητων τάσεων στο σύστημα στερέωσης. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να αποφευχθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής του πάχους του τοιχώματος και της κλίσης των τοιχωμάτων.

## **2.4 Παρουσίαση σύγκρισης προσομοίωσης και πειράματος κατάρρευσης**

### **2.4.1 Εισαγωγή**

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι μελέτες αντοχής σε συγκρούσεις είναι υψίστης σημασίας για το σχεδιασμό συστημάτων μεταφοράς. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά τη σύγκρουση οχημάτων είναι μια σημαντική παράμετρος σχετικά με το βαθμό παθητικής ασφάλειας και προστασίας των επιβατών και των μερών του αμαξώματος. Οι προστατευτικές δομές συμβάλλουν σημαντικά σε αυτή την κατεύθυνση, μιας και αποτελούνται από λεπτότοιχα δομικά στοιχεία διαφόρων διατομών και σχημάτων.

Η πλειοψηφία των ερευνητικών προσπαθειών εστιάζει στην εξερεύνηση των μηχανισμών κατάρρευσης σταθερής κατάστασης. Ένα από τα καλύτερα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων στο εμπόριο είναι το LS-DYNA. Ανέπτυξαν και μπόρεσαν να προβλέψουν τη συμπεριφορά των οχημάτων και τα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν, απαιτώντας βέβαια σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, αλλά χωρίς την απαίτηση κατασκευής ακριβών πρωτοτύπων για τη διεξαγωγή δοκιμών.

Οι Mamalis et al. (2001) εφάρμοσαν τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA για την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε συγκρούσεις χαλύβδινων λεπτότοιχων τετραγωνικών κόλουργων κώνων και πυραμίδων, τα οποία υπόκεινται σε αξονική κατάρρευση. Η διαδικασία κατάρρευσης προσομοιώνεται επιτυχώς λαμβάνοντας υπόψη τα δομικά στοιχεία των τμημάτων πρόσκρουσης.

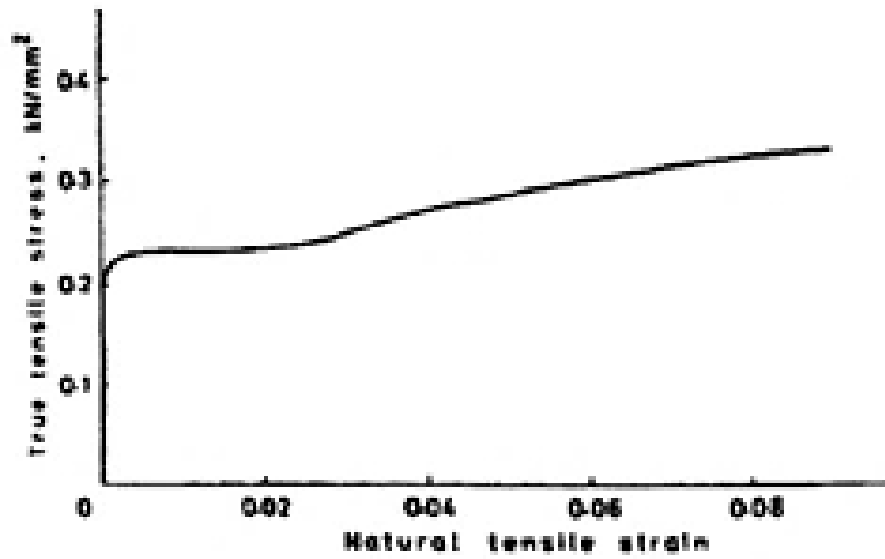
Τα ακόλουθα στοιχεία είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για πιο αποδοτική και ακριβή ανάλυση δοκιμών σύγκρουσης, μέσω του κώδικα LS-DYNA. Το υλικό του περιβλήματος θεωρήθηκε ότι είναι ένα ιστροπικό ελαστοπλαστικό υλικό, το οποίο χαρακτηριζόταν από διγραμμική ελαστοπλαστική συμπεριφορά με σκλήρυνση από ψυχρή κατεργασία.

Η πλάκα βάσης στην οποία ήταν σε ηρεμία το δείγμα καθώς και η κινούμενη μάζα με συγκεκριμένη αρχική ταχύτητα, μοντελοποιήθηκαν ως «άκαμπτα σώματα». Ακόμη λήφθηκε υπόψη το πάχος των τοιχωμάτων της κόλουργης πυραμιδικής δομής. (Mamalis et al. 2001)

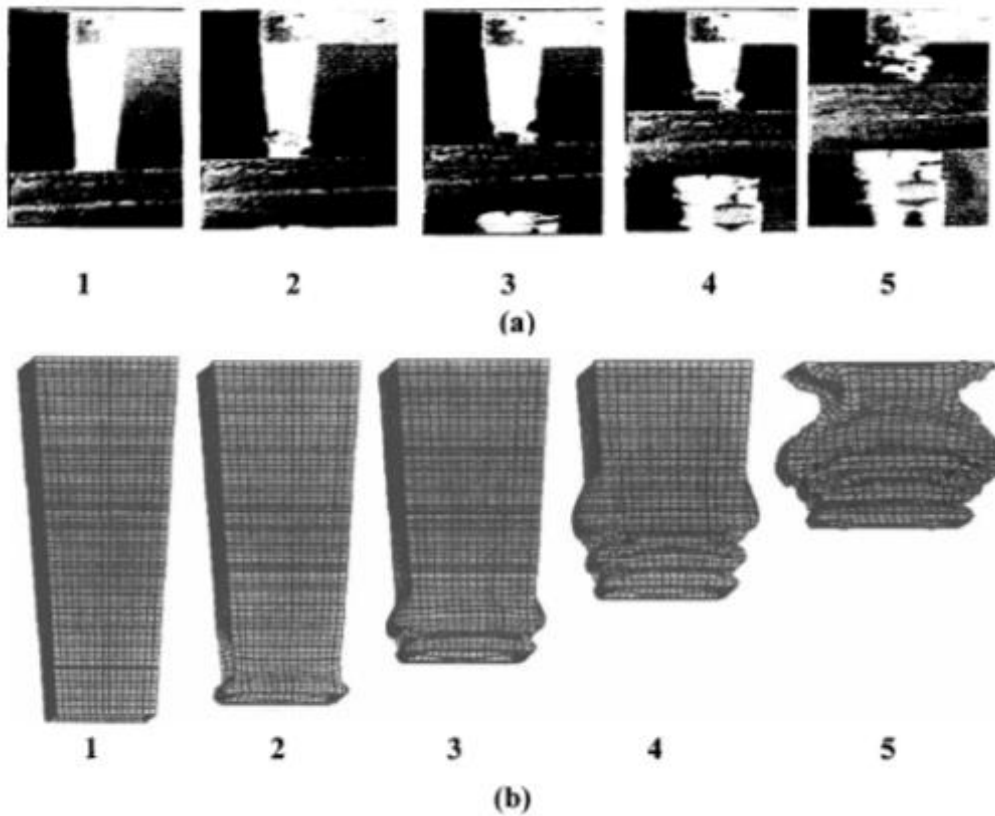
#### **2.4.2 Πειραματική επικύρωση διαδικασίας**

Η αξονική κατάρρευση του χαλύβδινου λεπτότοιχου τετραγωνικής πυραμίδας ερευνήθηκε πειραματικά σε αξονική κατάρρευση μεταξύ δυο παράλληλων χαλύβδινων πλακών στο μηχάνημα δοκιμών MTS. Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν για ταχύτητα κεφαλής 10 mm/min που αντιστοιχεί σε συνολικό ρυθμό παραμόρφωσης ψευδο-στατικής συμπίεσης  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . (Mamalis et al. 2001)

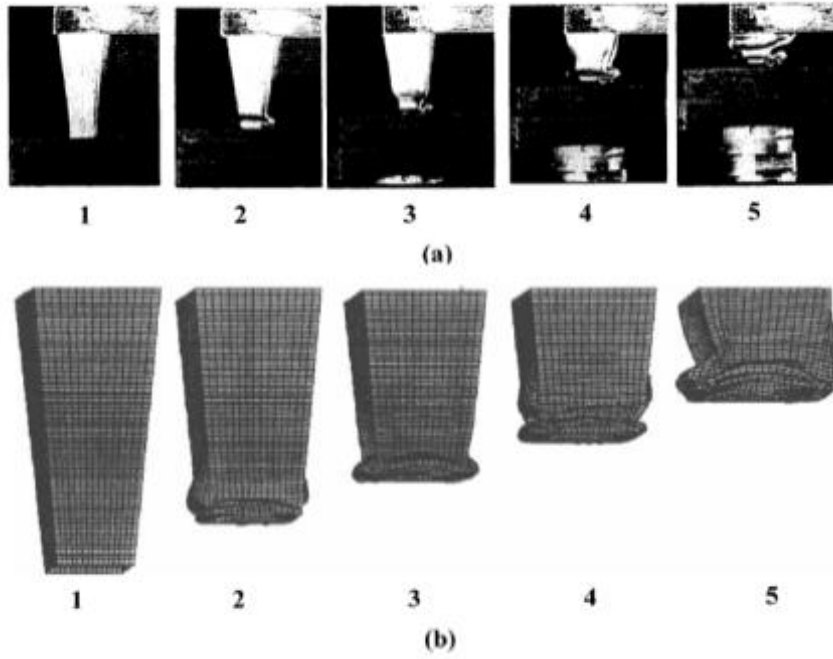
Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν από φύλλα, που κόπηκαν, κάμφθηκαν και στη συνέχεια συγκολλήθηκαν στο μέσο μιας πρόσοψης χρησιμοποιώντας οξυ-ακετυλένιο, ώστε να διαμορφωθεί μια τετραγωνική πυραμίδα με σταθερό αξονικό μήκος και ημι-κορυφαία γωνία να κυμαίνεται μεταξύ 5-14°. Όλα τα δοκίμια συμπίεστηκαν αξονικά υπό ξηρές συνθήκες. Το υλικό του περιβλήματος ήταν χάλυβας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, με καμπύλη παραμόρφωσης – καταπόνησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11, και προέκυψε από δοκιμή ψευδο-στατικής τάσης. (Mamalis et al. 2001)



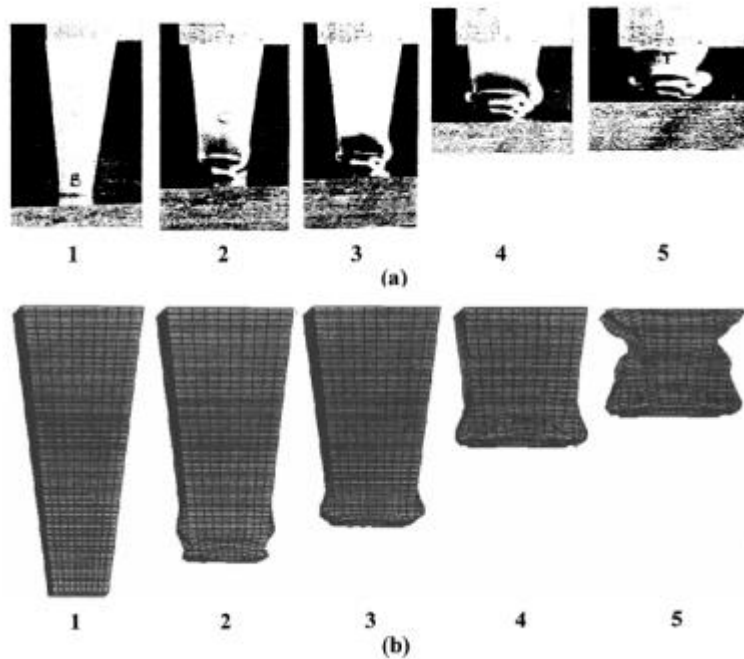
Εικόνα 2.11: Πραγματική καμπύλη παραμόρφωσης – καταπόνησης του υπό δοκιμή υλικού (Mamalis et al. 2001)



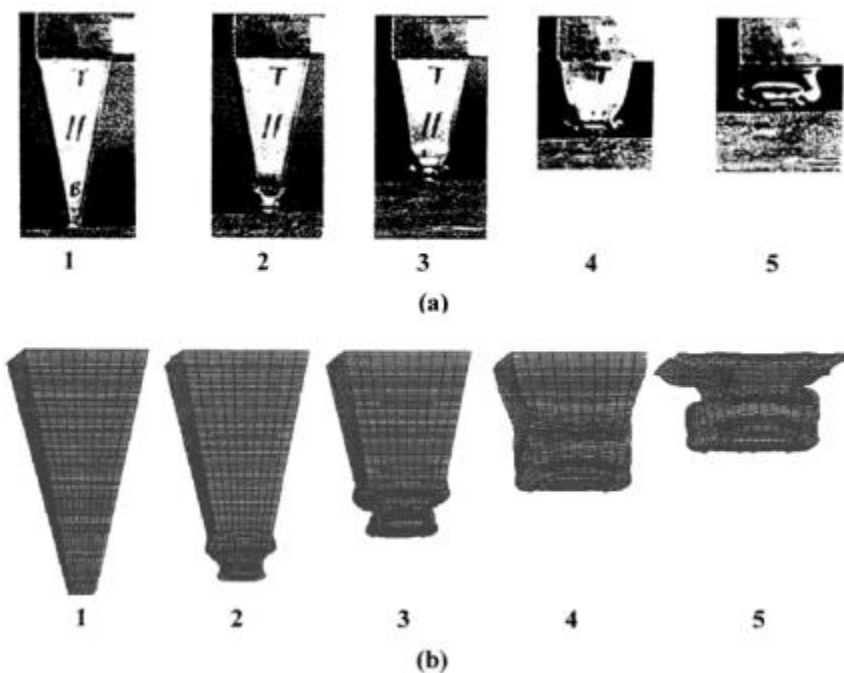
Εικόνα 2.12: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)



Εικόνα 2.13: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)



Εικόνα 2.14: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)



Εικόνα 2.15: Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης: (a) Πειραματική επικύρωση και (b) Υπολογιστική προσομοίωση (Mamalis et al. 2001)

### 2.4.3 Τρόποι παραμόρφωσης

Τα διαδοχικά στάδια της κατάρρευσης υπό αξονική συμπίεση των τετραγωνικών πυραμίδων, φαίνονται παραπάνω για διάφορες ημι-κορυφαίες γωνίες, καθώς και οι αντίστοιχες τελικές όψεις. Ο τύπος κατάρρευσης ήταν συμμετρικός και είχε τα ίδια χαρακτηριστικά παραμόρφωσης κατά τη διαδικασία κατάρρευσης. Ακόμη παρατηρήθηκαν (Mamalis et al. 2001):

- Η κατάρρευση ξεκίνησε κοντά στο στενό άκρο του περιβλήματος με την αναπτυσσόμενη μορφή κατάρρευσης να αποτελείται από σταθερούς οριζόντιους και κεκλιμένους αρμούς.
- Για την πλειοψηφία των πυραμίδων που ελέγχθηκαν, ο πρώτος αξονικός λοβός που αναπτύχθηκε σύμφωνα με τον μη εκτατό τύπο αστοχίας, ο οποίος αποτελείται από δυο πανομοιότυπους λοβούς στις αντίθετες πλευρές, όπου το ένα ζεύγος κινείται προς τα έξω και το άλλο προς τα μέσα.
- Οι τετράγωνες πυραμίδες, δηλαδή ημι-κορυφαία γωνία  $14^\circ$ , διαμόρφωσε πρώτη συνέλιξη σύμφωνα με τον εκτατό τύπο παραμόρφωσης, όπου και οι 4 πλευρές κινήθηκαν προς τα έξω, διαμορφώνοντας ένα



αξονοσυμμετρικό δαχτυλίδι, με αντίστοιχη αύξηση των αρχικών διαστάσεων.

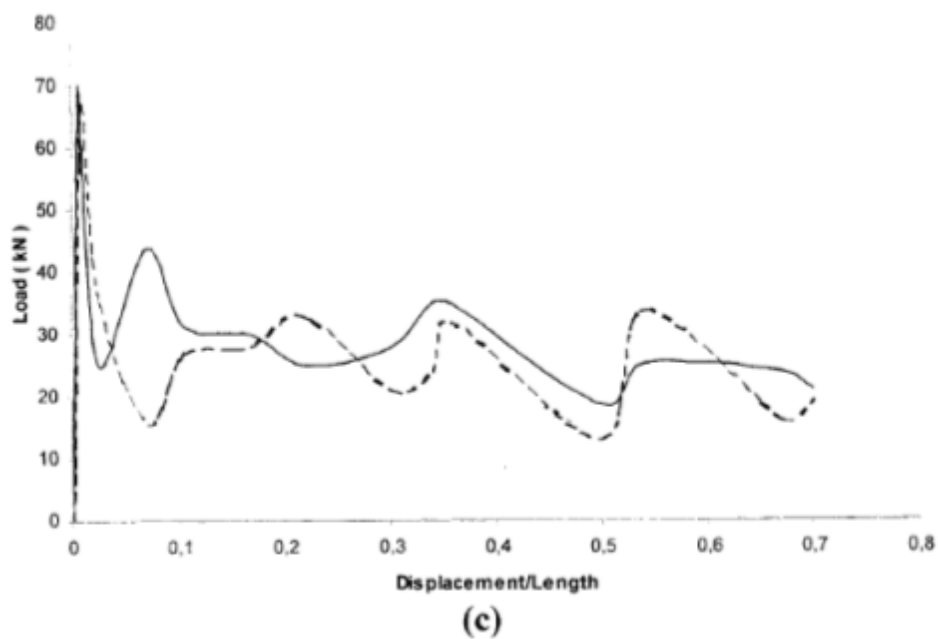
- Όσο αυξάνεται η ημι-κορυφαία γωνία, ορισμένοι από τους πλατύτερους λοβούς που διαμορφώθηκαν, κάλυψαν βαθμιαία τους μικρότερους και τελικά ήρθαν σε επαφή με το χαμηλότερο επίπεδο του μηχανήματος δοκιμών.

Ο παραπάνω μηχανισμός παραμόρφωσης επαληθεύτηκε με καλή ακρίβεια από τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Οι αντίστοιχες μορφές των παραμορφωμένων μοτίβων παρουσιάζονται στις παραπάνω εικόνες. Παρατηρήθηκε ότι και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ήταν σε συμφωνία με τις πειραματικές δοκιμές. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ο πρώτος αξονοσυμμετρικός λοβός είχε προβλεφθεί θεωρητικά στην περίπτωση της ημι-κορυφαίας γωνίας 10°. (Mamalis et al. 2001)

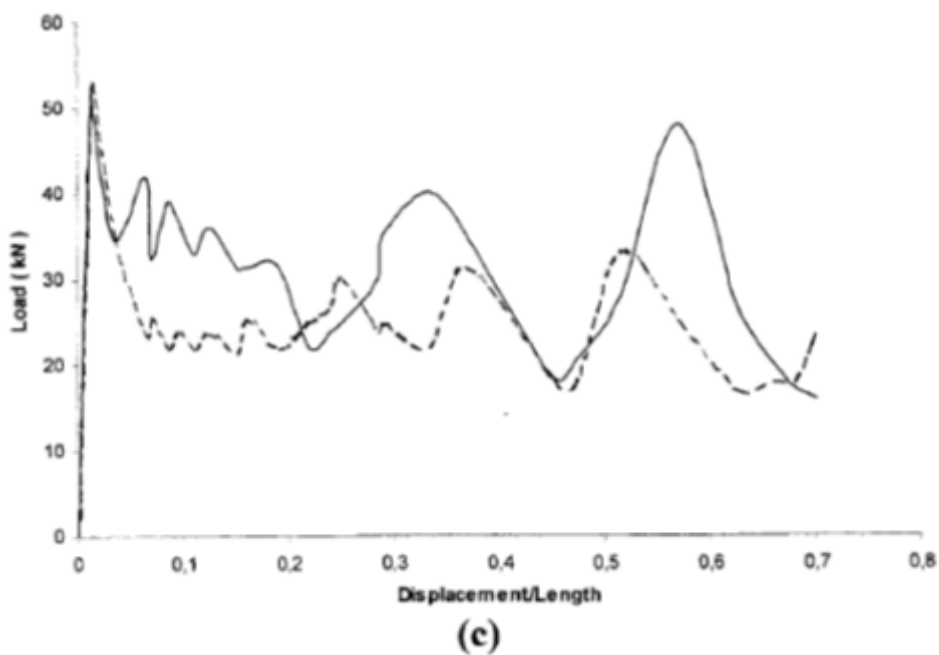
#### **2.4.4 Χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας**

Από τις καμπύλες φορτίου – μετατόπισης στα ακόλουθα σχήματα, παρατηρήθηκε ότι αρχικά το περίβλημα συμπεριφέρεται ελαστικά και το φορτίο αυξάνεται από σταθερή κατάσταση, ενώ οι καμπύλες δείχνουν ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, και τελικά μειώνεται με ταχύ ρυθμό. Κατά συνέπεια, η φάση μετά το λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Τα δευτερεύοντα μέγιστα φορτία είναι σημαντικά μικρότερα σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, αλλά αυξημένου μεγέθους όσο η συμπίεση προχωρά. (Mamalis et al. 2001)

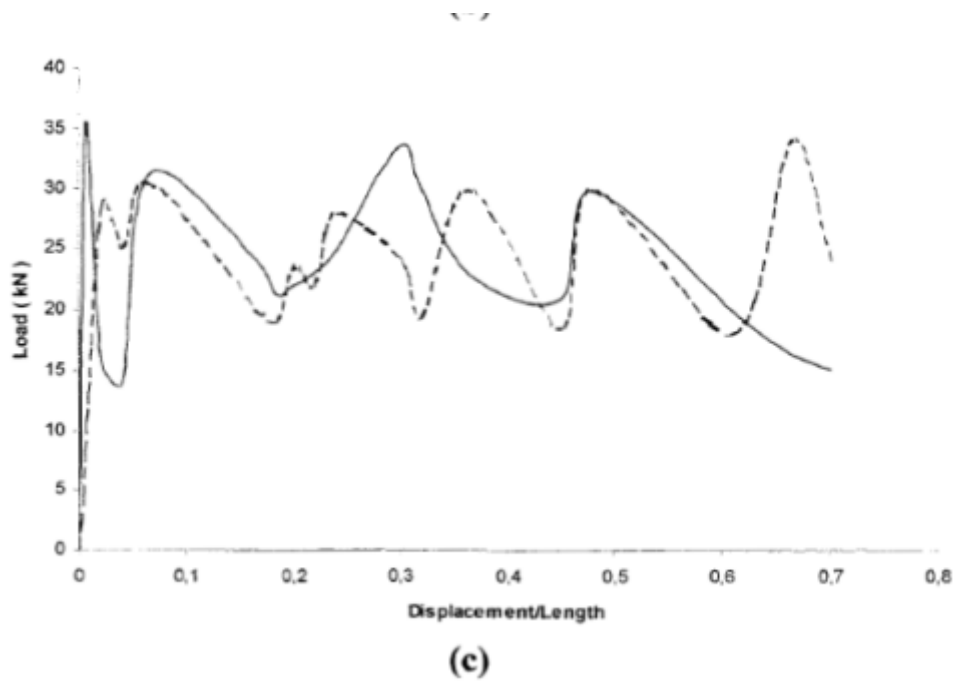
Για την εκτίμηση των θεωρητικών καμπυλών φορτίου – μετατόπισης, το ασκούμενο φορτίο της κινούμενης μάζας εξήχθη από την καμπύλη επιβράδυνσης του όπως προέκυψε από τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Από τα σχήματα (Εικόνα 2.16, Εικόνα 2.17, Εικόνα 2.18) φαίνεται ότι το πρόγραμμα LS-DYNA μπορεί να εκτιμήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τα μέγιστα φορτία. (Mamalis et al. 2001)



Εικόνα 2.16: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)

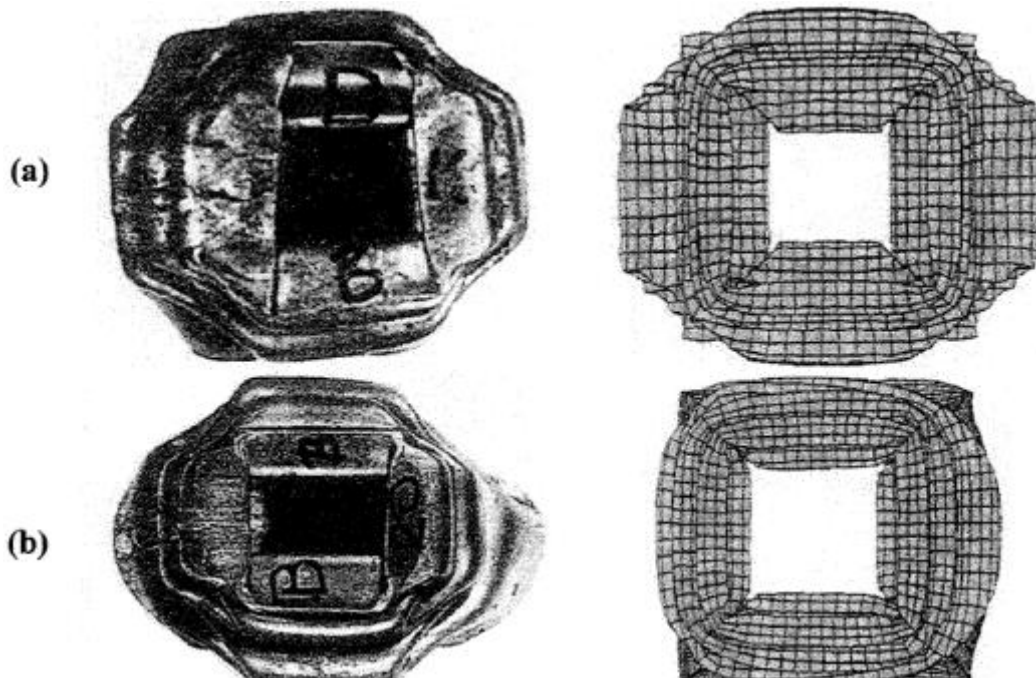


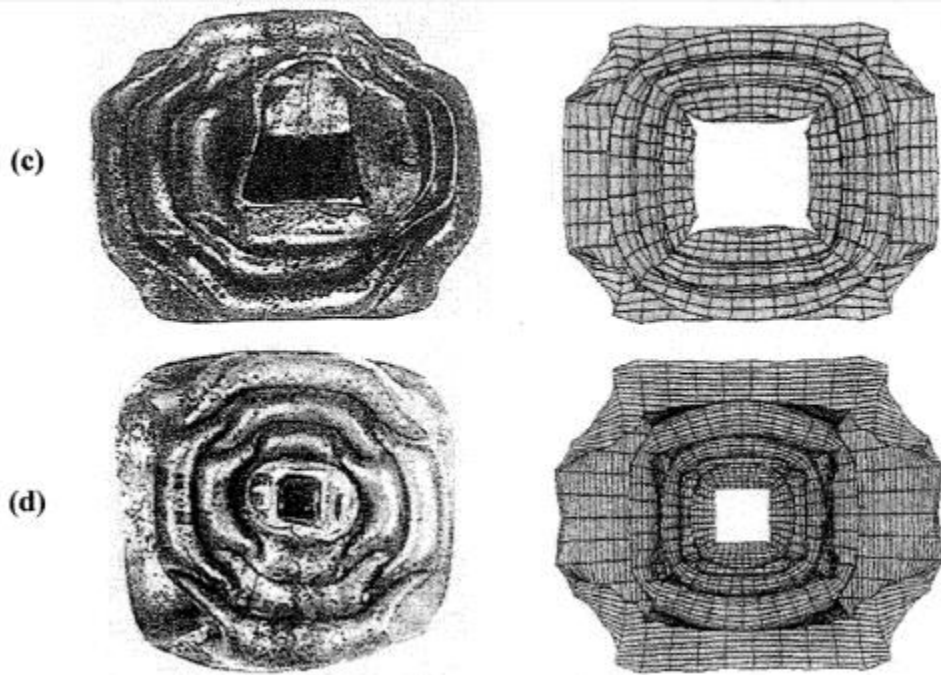
Εικόνα 2.17: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)



Εικόνα 2.18: Καμπύλες φορτίου – μετατόπισης (----- πειραματική και – θεωρητική) (Mamalis et al. 2001)

### 2.4.5 Πειραματική επικύρωση προσομοίωση





**Εικόνα 2.19: Σύγκριση τελικών όψεων των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και των υπολογιστικών προσομοιώσεων (Mamalis et al. 2001)**

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ένας μηχανισμός χαρακτηριστικής συμμετρικής παραμόρφωσης και οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις επιβεβαιώθηκαν και από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

### 3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, θα γίνει παρουσίαση της κατασκευής και των διαστάσεων των δοκιμίων, της μηχανικής πρέσας στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, και των αντίστοιχων συνθηκών. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

### 3.2 Πειραματική διάταξη

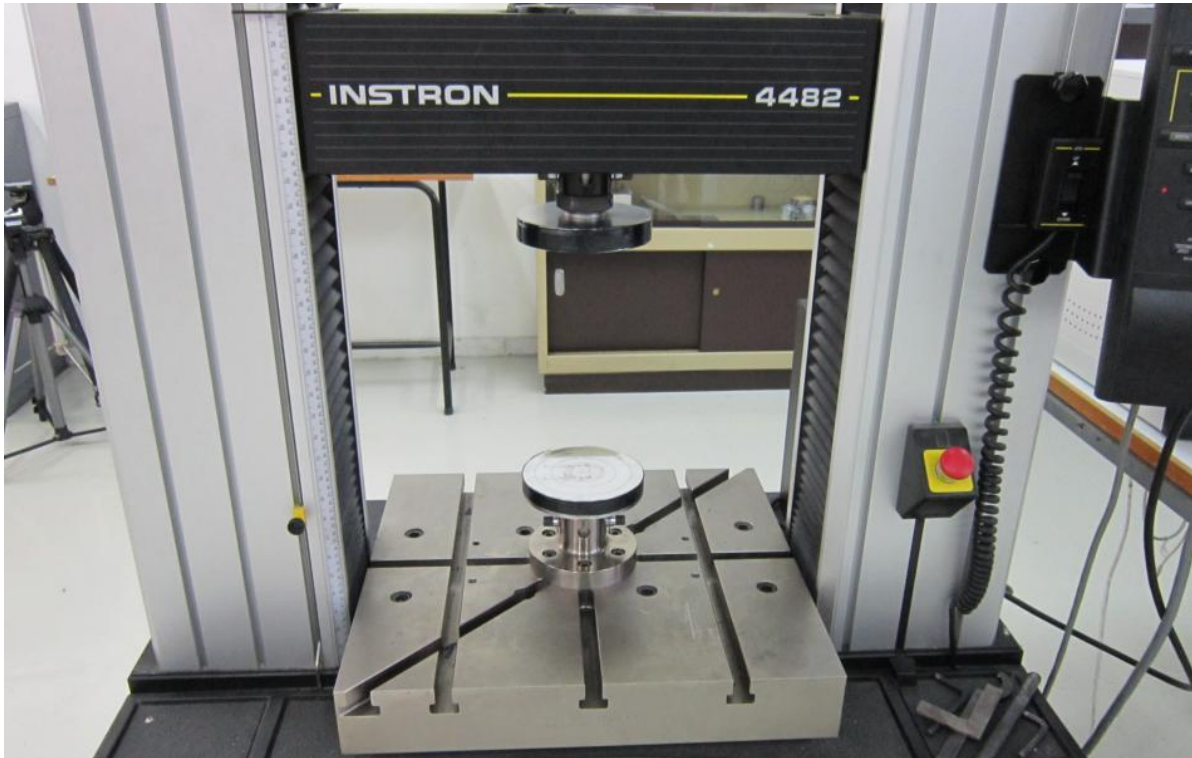
Τα πειράματα συμπίεσης έγιναν στη μηχανική πρέσα **INSTRON 4482** η οποία βρίσκεται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου. Η συγκεκριμένη πρέσα περιλαμβάνει κατάλληλες διατάξεις για να εκτελέσει τις ακόλουθες μηχανικές δοκιμές:

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

Τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής πρέσας δοκιμών είναι τα εξής:

- ονομαστικό φορτίο 10kN
- μηχανισμός κινητής κεφαλής
- μέγιστη ταχύτητα κεφαλής 500 mm/min
- μέγιστο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα, 75kN
- μέγιστη ταχύτητα κεφαλής στο μέγιστο φορτίο, 250 mm/min.

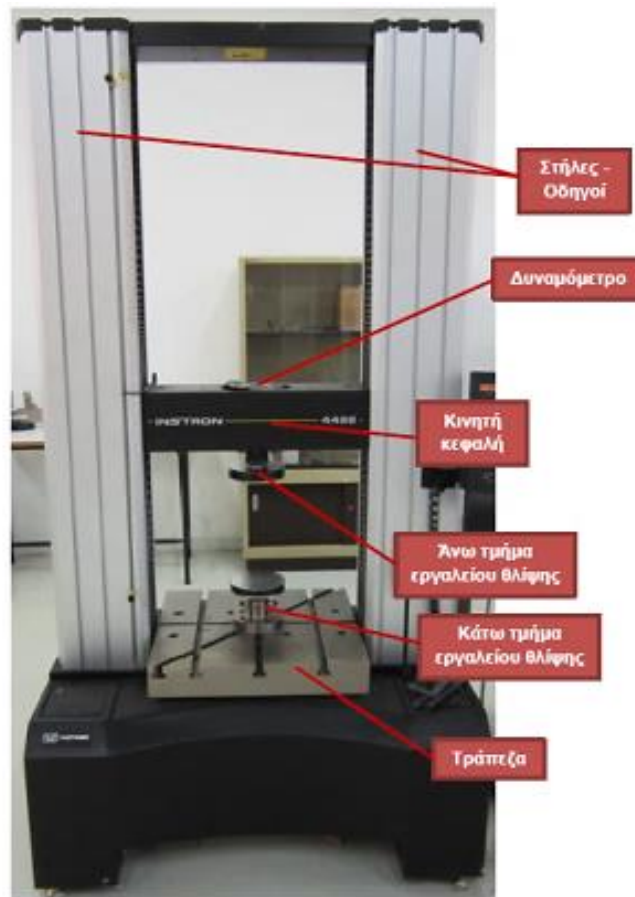
Για την εκτέλεση των δοκιμών θλίψης, έχει προσαρμοστεί πάνω στην πρέσα το εργαλείο θλίψης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



**Εικόνα 3.1: Εργαλείο θλίψης προσαρμοσμένο στη μηχανική πρέσα INSTRON**

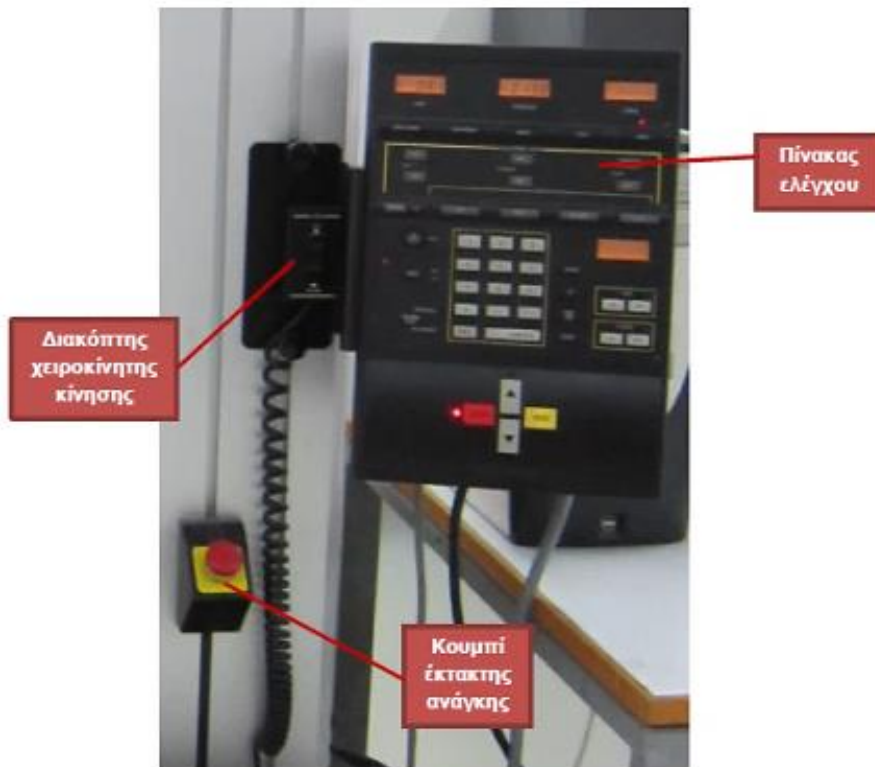
Αναλυτικότερα, η συνολική διάταξη της πρέσας, αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα, όπως περιγράφονται ακολούθως:

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



Εικόνα 3.2: 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.



**Εικόνα 3.3: Επιμέρους τμήματα πρέσας INSTRON**



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



Εικόνα 3.4: Συνολική διάταξη της μηχανικής πρέσας INSTRON του εργαστηρίου

### 3.3 Κατασκευή δοκιμίων

Η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων ήταν με κάμψη (στραντζάρισμα) επίπεδων ελασμάτων ώστε να πάρουμε την επιθυμητή τετραγωνική ή διατομή με ραφή συγκόλλησης στην ένωσή τους, στο πλάι κάθε πυραμίδας. Συνολικά διαμορφώθηκαν 16 δοκίμια, 10 δοκίμια 40-100, 3 δοκίμια 50-100 και 3 δοκίμια 60-100.

Το είδος της ραφής του επιλέχθηκε είναι αυτογενής ηλεκτροσυγκόλληση TIG, ώστε να μην υπάρχει αποσύνδεση κατά την αξονική φόρτιση. Η ηλεκτροσυγκόλληση T.I.G. (Tungsten Inert Gas) είναι μια διεργασία η οποία χρησιμοποιεί ένα μη τηκόμενο (μη καταναλισκόμενο) ηλεκτρόδιο από βολφράμιο και ένα αδρανές αέριο (αργό ή ήλιο ή μείγμα των δύο αερίων) για προστασία. Το αδρανές αέριο προστατεύει την περιοχή συγκόλλησης και το

ηλεκτρόδιο του βολφραμίου. Είναι κατάλληλη για τη συγκόλληση λεπτών κομματιών μετάλλου (όπως και στην περίπτωση αυτή) λόγω της ελάχιστης προσαγόμενης θερμότητας στα συγκολλούμενα τμήματα (χαμηλή ένταση ρεύματος). Επιπλέον, μπορούν να συγκολληθούν μέταλλα χωρίς τη χρήση πρόσθετου υλικού, όπως και στην εν λόγω περίπτωση, όπου ενώθηκαν τα δύο μέτωπα των τμημάτων του υλικού.

### **3.3.1 Δοκίμια 40-100**

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν τετραγωνικές πυραμίδες από χάλυβα (mild steel) με τις ακόλουθες διαστάσεις:

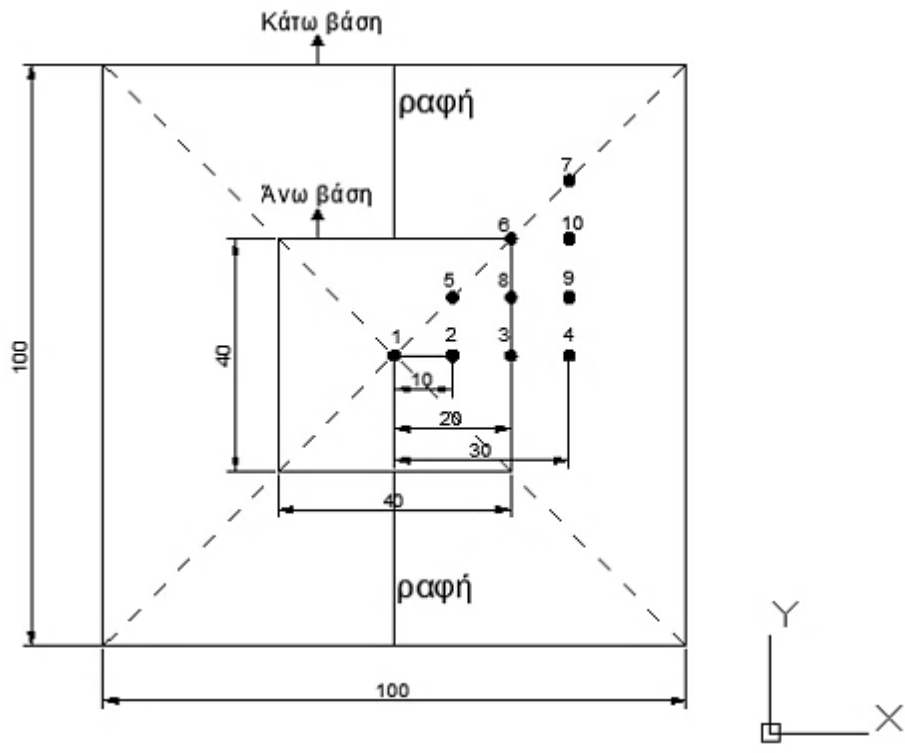
Κάτω βάση: 100×100 mm

Άνω βάση: 40×40 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150 mm

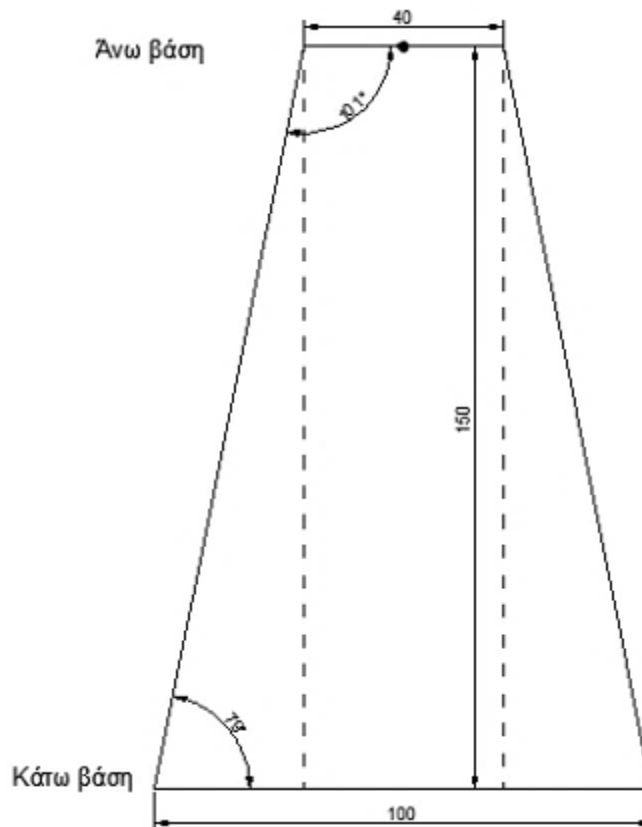
Οι διαστάσεις αυτές παρέμεναν σταθερές. Μια τέτοια τετραγωνική πυραμίδα συμβολίζεται ως (40-100).

Για να προκύψουν τα δοκίμια που θέλουμε να μελετήσουμε, έπρεπε να μεταβάλουμε την εκκεντρότητα της πυραμίδας. Το κέντρο της άνω βάσης της πυραμίδας μετακινούνταν διαδοχικά στα σημεία 1-10, τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά 10 mm είτε στην οριζόντια είτε στην κάθετη κατεύθυνση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν 10 δοκίμια προς μελέτη. Το πάχος του ελάσματος των δοκιμίων δεν έπρεπε να ξεπερνά τα 2 mm. Επιλέχθηκε πάχος 1,5 mm.



**Εικόνα 3.5: Κάτοψη πυραμιδικού δοκίμιου 40-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης**

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζεται ένα από τα πυραμιδικά δοκίμια 40-100 σε πλάγια όψη. Στο δοκίμιο που απεικονίζεται η θέση του κέντρου της άνω βάσης βρίσκεται στο σημείο 1 (όπως ορίστηκε στο παραπάνω σχήμα), γι' αυτό και οι πλευρές της πυραμίδας είναι συμμετρικές.



Εικόνα 3.6: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 40-100

Σε όλα τα κελύφη, η ραφή της συγκόλλησης έγινε στην ίδια πλευρά, ώστε να είναι σωστή η σύγκριση της αντοχής των δοκιμίων. Το είδος της ραφής του επιλέχθηκε είναι αυτογενής ηλεκτροσυγκόλληση TIG, ώστε να μην υπάρχει αποσύνδεση κατά την αξονική φόρτιση.

Κατά το σχεδιασμό και την κατεργασία των δοκιμίων είναι πολύ σημαντικό τα άνω και κάτω μέτωπα να προκύψουν παράλληλα μεταξύ τους.

### 3.3.2 Δοκίμια 50-100

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πυραμιδικά δοκίμια με τις ακόλουθες διαστάσεις:

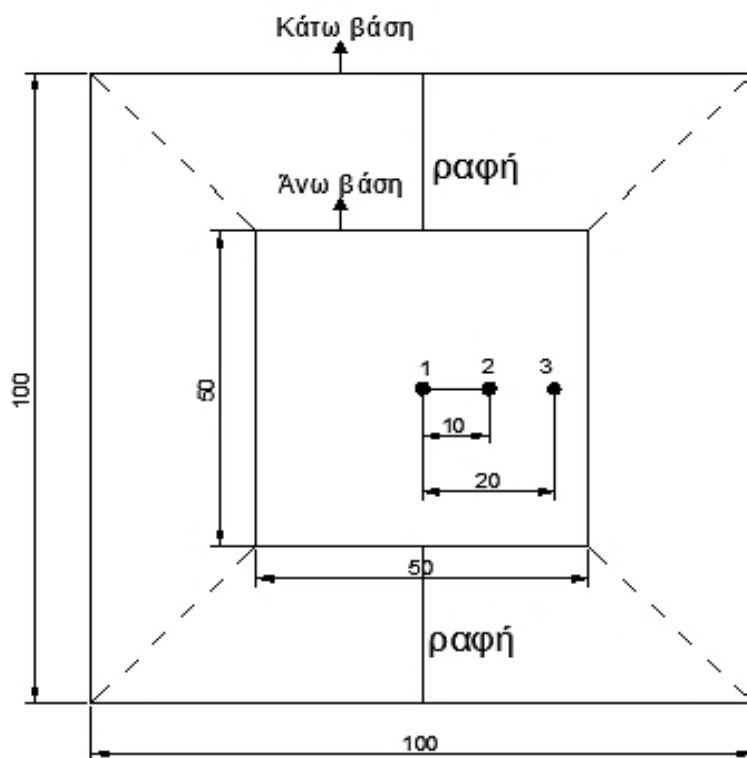
Κάτω βάση: 100×100 mm

Ανω βάση: 50×50 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150 mm

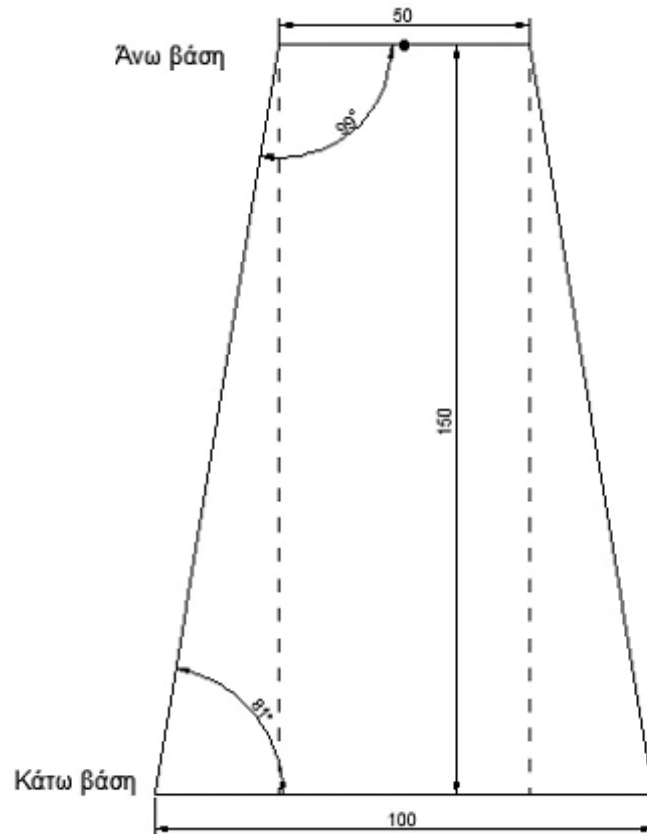
Οι διαστάσεις αυτές παρέμειναν σταθερές. Μια τέτοια τετραγωνική πυραμίδα συμβολίζεται ως (50-100).

Για να προκύψουν τα δοκίμια που θέλουμε να μελετήσουμε, έπρεπε να μεταβάλουμε την εκκεντρότητα της πυραμίδας. Το κέντρο της άνω βάσης της πυραμίδας μετακινούνται διαδοχικά στα σημεία 1-3, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν 3 δοκίμια προς μελέτη. (Εικόνα 3.7). Το πάχος του ελάσματος των δοκιμίων δεν έπρεπε να ξεπερνά τα 2 mm. Επιλέχθηκε πάχος 1,5 mm.



**Εικόνα 3.7: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 50-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης**

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται ένα από τα πυραμιδικά δοκίμια 40-100 σε πλάγια όψη. Στο δοκίμιο που απεικονίζεται η θέση του κέντρου της άνω βάσης βρίσκεται στο σημείο 1 (όπως ορίστηκε στο παραπάνω σχήμα), γι' αυτό και οι πλευρές της πυραμίδας είναι συμμετρικές.



Εικόνα 3.8: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 50-100

### 3.3.3 Δοκίμια 60-100

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν πυραμιδικά δοκίμια με τις ακόλουθες διαστάσεις:

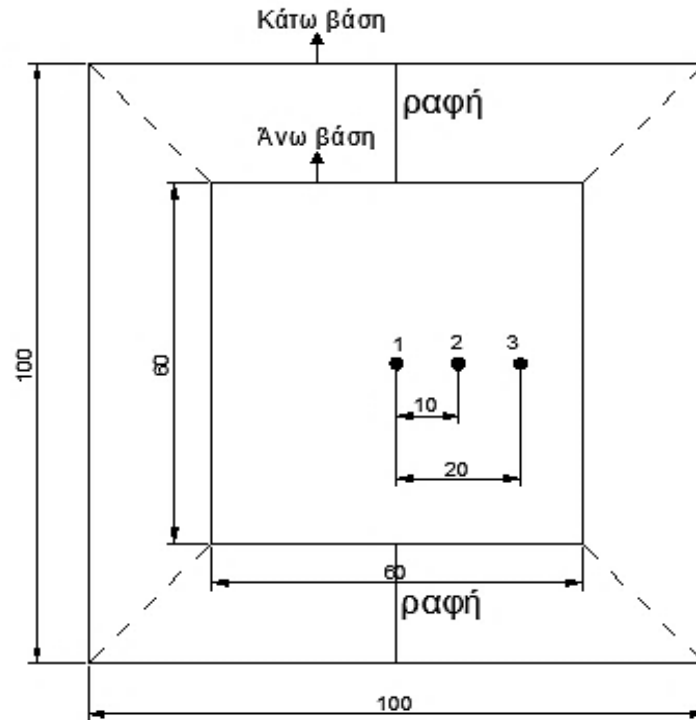
Κάτω βάση: 100×100 mm

Άνω βάση: 60×60 mm

Ύψος πυραμίδας: L=150 mm

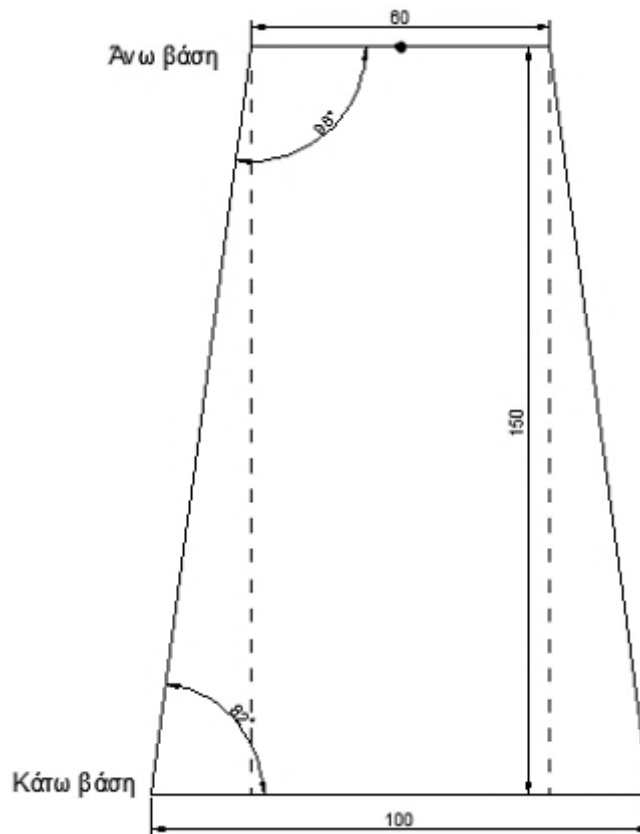
Οι διαστάσεις αυτές παρέμεναν σταθερές. Μια τέτοια τετραγωνική πυραμίδα συμβολίζεται ως (60-100).

Για να προκύψουν τα δοκίμια που θέλουμε να μελετήσουμε, έπρεπε να μεταβάλουμε την εκκεντρότητα της πυραμίδας. Το κέντρο της άνω βάσης της πυραμίδας μετακινούνταν διαδοχικά στα σημεία 1-3, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Εικόνα 3.9). Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν 3 δοκίμια προς μελέτη. Το πάχος του ελάσματος των δοκιμίων δεν έπρεπε να ξεπερνά τα 2 mm. Επιλέχθηκε πάχος 1,5 mm.



**Εικόνα 3.9: Κάτοψη πυραμιδικού δοκιμίου 60-100 με απεικόνιση των θέσεων του κέντρου της άνω βάσης**

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται ένα από τα πυραμιδικά δοκίμια 40-100 σε πλάγια όψη. Στο δοκίμιο που απεικονίζεται η θέση του κέντρου της άνω βάσης βρίσκεται στο σημείο 1 (όπως ορίστηκε στο παραπάνω σχήμα), γι' αυτό και οι πλευρές της πυραμίδας είναι συμμετρικές.



Εικόνα 3.10: Πλάγια όψη του πυραμιδικού δοκιμίου 60-100

### 3.3.4 Ονοματολογία δοκιμίων

Για λόγους ευκολίας αλλά και αποφυγής παρερμηνειών, τα ονόματα των δοκιμίων και των πειραματικών αποτελεσμάτων τους θα χρησιμοποιούν τις κύριες διαστάσεις της άνω και κάτω βάσης, καθώς και τον αριθμό που αντιστοιχεί στη θέση του κέντρου της άνω βάσης, όπως απεικονίζεται και στις προηγούμενες εικόνες. Παραδείγματος χάριν, 40-100-1, 40-100-2...40-100-10, και αντίστοιχα 50-100-1 κ.ο.κ.

## 3.4 Υπολογισμός πειραματικών παραμέτρων

### **Μέγιστο φορτίο (Peak crush load)**

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

$$P_{max} (kN) = \max(P_i(kN)) \quad (3.1)$$



### **Μέσο φορτίο (Mean crush load)**

Το μέσο φορτίο  $P_m$  υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των φορτίων  $P_i$  που λήφθησαν 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:

$$P_m (kN) = \frac{\sum_{i=1}^n P_i (kN)}{n} \quad (3.2)$$

### **Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (Crush force efficiency)**

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

$$CFE(\%) = \frac{P_m (kN)}{P_{max} (kN)} \quad (3.3)$$

### **Ενέργεια παραμόρφωσης (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:

$$E_{absorbed} = \int P \cdot d\delta \quad (3.4)$$

όπου

$P$ : το φορτίο συμπίεσης του εμβόλου

$\delta$ : η κατακόρυφη μετατόπιση του εμβόλου

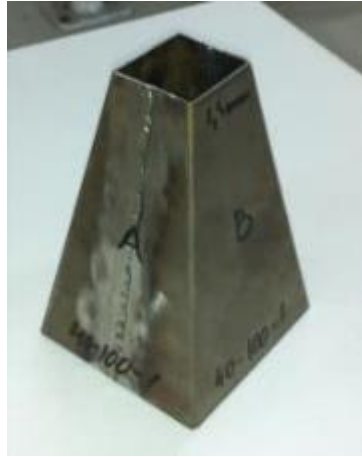
Στην περίπτωση μας η ενέργεια παραμόρφωσης υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου φορτίου  $P_m$  με την τελική μετατόπιση του εμβόλου  $\delta_t$  από την παρακάτω εξίσωση:

$$E_{absorbed} (kJ) = \frac{P_m (kN) \cdot \delta_t (mm)}{1000} \quad (3.5)$$



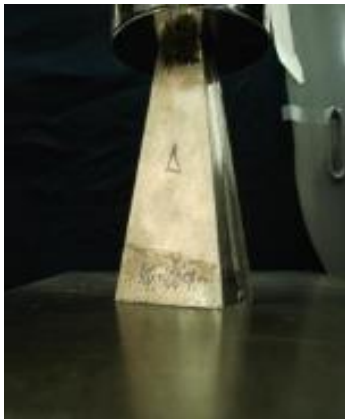
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 4.1 Δοκίμια 40-100-1



Αρχικό δοκίμιο 40-100-1

#### 4.1.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 4.1 \text{ mm}$



$disp_2 = 13.3 \text{ mm}$



$disp_3 = 21.7 \text{ mm}$



$disp_4 = 29.2 \text{ mm}$



disp<sub>5</sub> = 37.9 mm



disp<sub>6</sub> = 46.6 mm



disp<sub>7</sub> = 58.3 mm



disp<sub>8</sub> = 66.7 mm



disp<sub>9</sub> = 83.3 mm

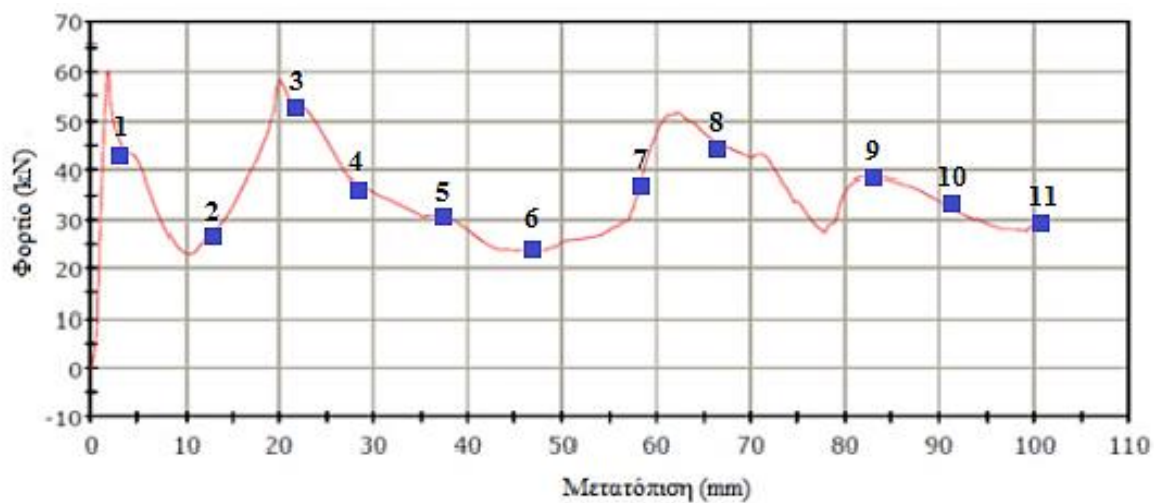


disp<sub>10</sub> = 91.5 mm



disp<sub>11</sub> = 100.4 mm

#### 4.1.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-1

### 4.1.3 Τελικές όψεις



### 4.1.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,4\text{mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 60,5\text{ kN}$  στα  $1,9\text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 35,2\text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $\text{CFE} = 58,2\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 3,5\text{ kJ}$

### 4.1.5 Σχολιασμός

Στο πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-1 υπολογίστηκε ίση με  $3,5\text{ kJ}$ . Δρώντας λοιπόν ως απορροφητής ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ο οποίος είναι ένας μη επιθυμητός τρόπος παραμόρφωσης, καθώς μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-1 υπολογίστηκε ίσος με 58,2%.

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 35,2 kN.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 60,5 kN στα 1,9 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι σε πρώτη φάση ελαφρώς μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 100 mm περίπου όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας.

Τέλος, αναφερόμενοι στη πειραματική διαδικασία, σε όλη τη διάρκεια της αξονικής καταπόνησης, η ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή των δυο ελασμάτων του δοκιμίου παρέμεινε ενωμένη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-1.

#### 4.2 Δοκίμιο 40-100-2



**Αρχικό δοκίμιο 40-100-2**

#### 4.2.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.7 \text{ mm}$



$disp_2 = 17.3 \text{ mm}$



$disp_3 = 25.6 \text{ mm}$



$disp_4 = 33.7 \text{ mm}$



$disp_5 = 41.9 \text{ mm}$



$disp_6 = 50.4 \text{ mm}$



$disp_7 = 59.1 \text{ mm}$



$disp_8 = 67.1 \text{ mm}$



$disp_9 = 75.8 \text{ mm}$



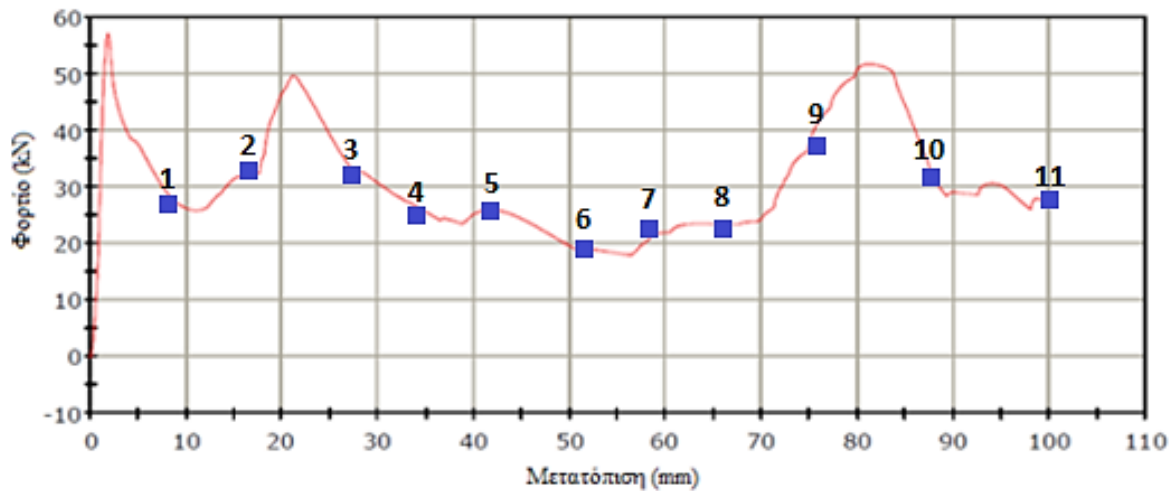
$disp_{10} = 87.7 \text{ mm}$



$disp_{11} = 100.1 \text{ mm}$



#### 4.2.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δοκιμίου 40-100-2

#### 4.2.3 Τελικές όψεις



#### 4.2.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,1 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 57,1 \text{ kN}$  στα  $1,9 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 30,7 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $\text{CFE} = 53,8\%$



Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{absorbed} = 3,1 \text{ kJ}$

#### 4.2.5 Σχολιασμός

Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μιας σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-2 υπολογίστηκε ίση με 3,1 kJ. Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, έτσι δεν μειώθηκε η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-2 υπολογίστηκε ίσος με 53,8%.

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 30,7 kN.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 57,1 kN στα 1,9 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι σε πρώτη φάση ελαφρώς μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο αλλά συγκρίσιμου μεγέθους, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου.

Τέλος, σχετικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-2.

### 4.3 Δοκίμιο 40-100-3



Αρχικό δοκίμιο 40-100-3

#### 4.3.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.4\text{mm}$



$disp_2 = 16.9\text{mm}$



$disp_3 = 25.5\text{mm}$



$disp_4 = 33.7\text{mm}$



$disp_5 = 42.1\text{mm}$



$disp_6 = 50.1\text{mm}$



$disp_7 = 58.7\text{mm}$



$disp_8 = 75.6\text{mm}$



disp<sub>9</sub> = 83.7mm

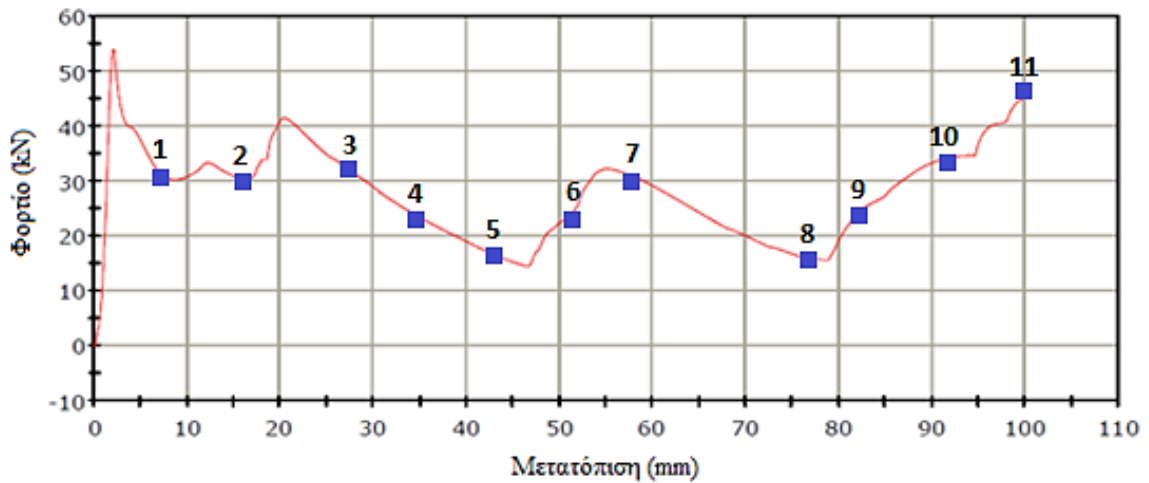


disp<sub>10</sub> = 91.4mm



disp<sub>11</sub> = 100.1mm

### 4.3.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.3: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-3

### 4.3.3 Τελικές όψεις



#### 4.3.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,1 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 54,0 \text{ kN}$  στα  $2,2 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 27,8 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $\text{CFE} = 51,5\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,8 \text{ kJ}$

#### 4.3.5 Σχολιασμός

Το επόμενο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 40-100-3 και εμφάνισε και αυτό προοδευτική κατάρρευση. Επίσης, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-3 υπολογίστηκε ίση με  $2,8 \text{ kJ}$ . Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, αλλά όπως φαίνεται από τις μετρήσεις απορρόφησε μικρότερο ποσό ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-3 υπολογίστηκε ίσος με  $51,5\%$ .

Αντίστοιχα, και το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με  $27,8 \text{ kN}$  ήταν μικρότερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με  $57,1 \text{ kN}$  στα  $2,2 \text{ mm}$ , και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με των προηγούμενων δοκιμών. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκτατού λοβού, ότι το φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλάδα του διαγράμματος, αυξάνεται προοδευτικά μέχρι το πέρας του πειράματος.

Αναφορικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-3.

#### 4.4 Δοκίμιο 40-100-4



Αρχικό δοκίμιο 40-100-4

##### 4.4.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.4\text{mm}$



$disp_2 = 16.7\text{mm}$



$disp_3 = 25.1\text{mm}$



$disp_4 = 33.3\text{mm}$





$disp_5 = 41.7mm$



$disp_6 = 51.1mm$



$disp_7 = 59.1mm$



$disp_8 = 67.4mm$



$disp_9 = 76.1mm$

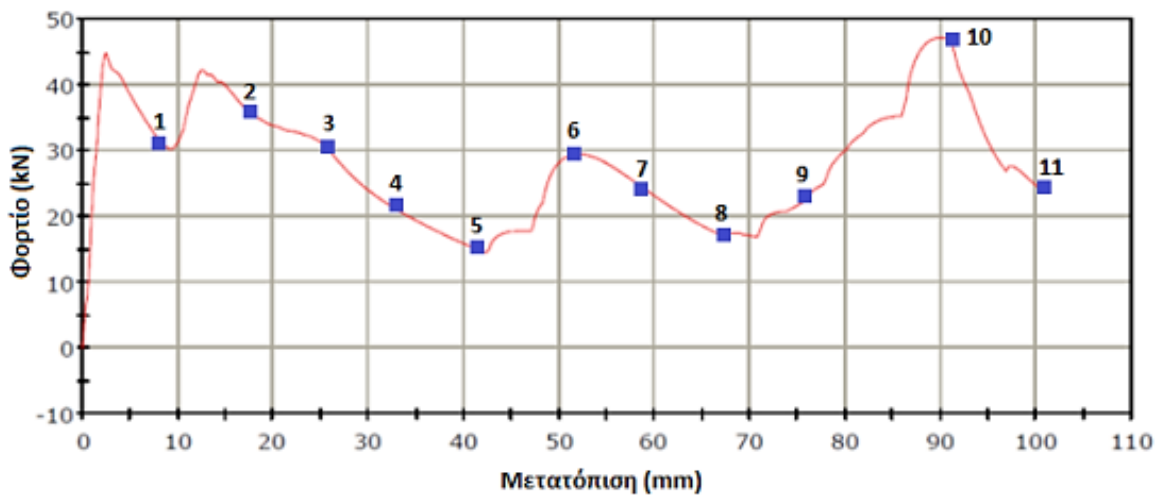


$disp_{10} = 90.8mm$



$disp_{11} = 100.4mm$

#### 4.4.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 40-100-4

### 4.4.3 Τελικές όψεις



### 4.4.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,4 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 47,1 \text{ kN}$  στα  $89,9 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 27,9 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $\text{CFE} = 59,2\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,8 \text{ kJ}$

### 4.4.5 Σχολιασμός

Το επόμενο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 40-100-4, το οποίο είχε το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη μια πλευρά, σχηματίζοντας έτσι μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα.

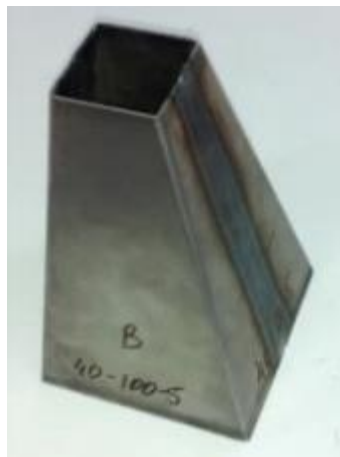
Και αυτό εμφάνισε προοδευτική κατάρρευση, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκαν 3 πλαστικές αναδιπλώσεις που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-4 υπολογίστηκε ίση με  $2,8 \text{ kJ}$ . Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, αλλά όπως φαίνεται από τις μετρήσεις απορρόφησε μικρότερο ποσό ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια, και ίδιο με το δοκίμιο 40-100-3. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-4 υπολογίστηκε ίσος με  $59,2\%$ .

Αντίστοιχα, και το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 27,9 kN ήταν μικρότερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές που είχαν πιο κεντρικά την άνω βάση τους, και ήταν ίδιο με το μέσο φορτίο του 40-100-3. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο, με την εμφάνιση των τοπικών μέγιστων. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο του φορτίου εμφανίζεται ίσο με 47,1 kN στα 89,9 mm, και τελικά στη συνέχεια μειώνεται προοδευτικά μέχρι το πέρας το πειράματος. Το μέγιστο αυτό αποτελεί διαφορετική περίπτωση, μιας και ίσως λόγω της κατακόρυφης πλευράς της πυραμίδας, το φορτίο ήταν αυξηθηκε για να μπορέσει να συμπιέσει το απαραμόρφωτο τμήμα που συνάντησε. Η συμπεριφορά αυτή διαφέρει από τα προηγούμενα δοκίμια. Μιας και στο συγκεκριμένο πείραμα, σε πρώτη φάση ο πλαστικός λυγισμός συνοδεύεται με το τοπικό μέγιστο της καμπύλης φορτίου και συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την άλλη αναδίπλωση που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο δοκίμιο λόγω αυτής της συμπεριφοράς του απορρόφησε και το μικρότερο ποσό ενέργεια μέχρι τώρα.

Σχετικά με τις δυο ραφές, δεν παρατηρήθηκε κάποια ρήξη τους, διατηρώντας ενωμένα τα δυο ελάσματα του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-4.

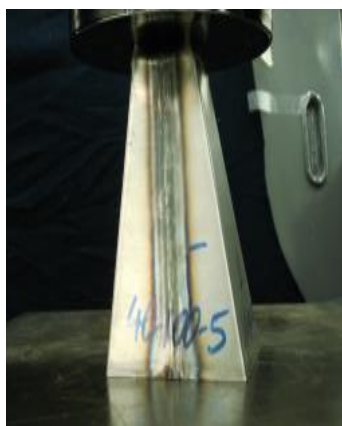
#### 4.5 Δοκίμιο 40-100-5



Αρχικό δοκίμιο 40-100-5

##### 4.5.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης





**disp<sub>1</sub> = 8.4mm**



**disp<sub>2</sub> = 17.5mm**



**disp<sub>3</sub> = 25.6mm**



**disp<sub>4</sub> = 34.8mm**



**disp<sub>5</sub> = 41.8mm**



**disp<sub>6</sub> = 50.7mm**



**disp<sub>7</sub> = 58.7mm**



**disp<sub>8</sub> = 67.5mm**



**disp<sub>9</sub> = 76.1mm**

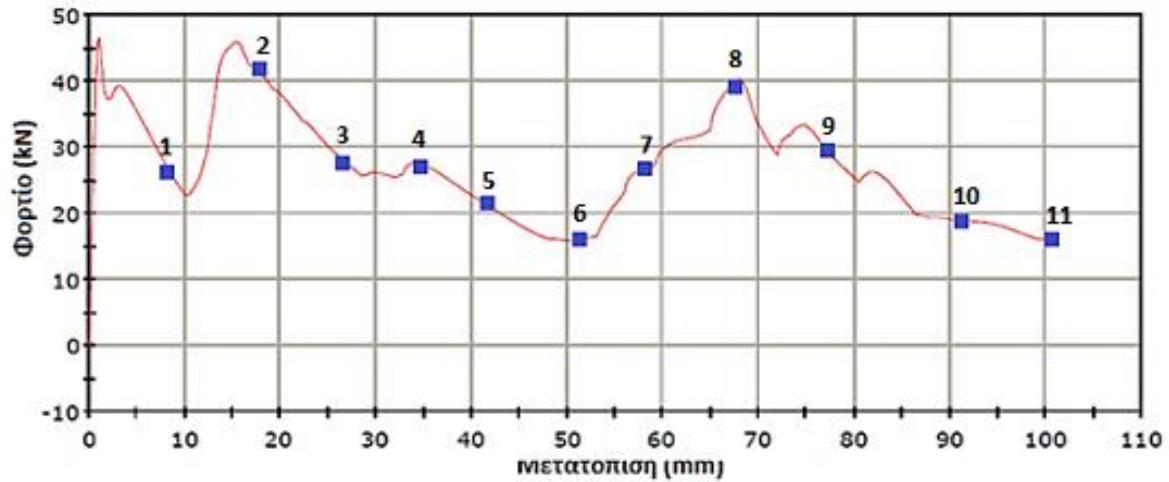


**disp<sub>10</sub> = 91.4mm**



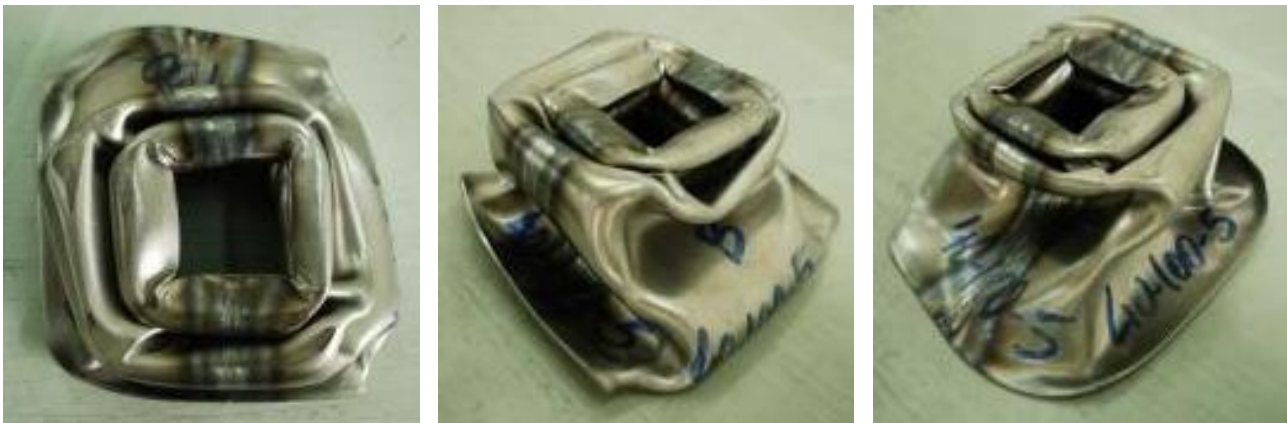
**disp<sub>11</sub> = 100.1mm**

#### 4.5.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-5

### 4.5.3 Τελικές όψεις



### 4.5.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,1 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 47,5 \text{ kN}$  στα  $1,1 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 27,2 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE = 58,5\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,7 \text{ kJ}$

### 4.5.5 Σχολιασμός

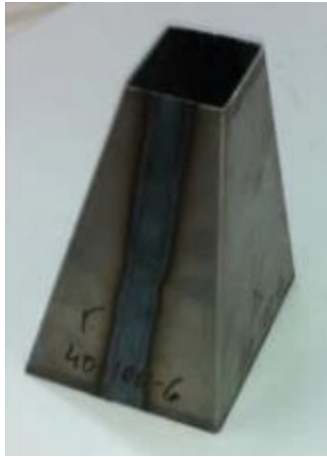
Το 5<sup>ο</sup> πείραμα που έγινε ήταν για το δοκίμιο 40-100-5, το οποίο είχε το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη διαγώνιο. Και αυτό εμφάνισε προοδευτική κατάρρευση, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκαν 3 πλαστικές αναδιπλώσεις που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 27,2 kN που ήταν και το μικρότερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός των νέων λοβών στο δοκίμιο, με την εμφάνιση των τοπικών μέγιστων. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο του φορτίου εμφανίζεται ίσο με 47,5 kN στα 1,1 mm. Το επόμενο τοπικό μέγιστο είχε μια αντίστοιχη κορυφή συγκρίσιμου μεγέθους, κατά το σχηματισμό του μη εκτατού λοβού. Συμπεριφορά παρόμοια με του πρώτου δοκιμίου (40-100-1), που είχε το κέντρο της άνω βάσης ακριβώς στο κέντρο της κάτω βάσης. Στη συνέχεια, το φορτίο μειώνεται μέχρι την εμφάνιση της τρίτης κορυφής που έχει να κάνει με το στάδιο σχηματισμού του τελευταίου εκτατού λοβού, όπου τελικά μειώνεται προοδευτικά μέχρι το πέρας της διαδικασίας αξονικής καταπόνησης. Παρατηρούμε ότι στο τελευταίο στάδιο του πλαστικού λυγισμού, στο σχηματισμό του τελευταίου εκτατού λοβού, η κάτω βάση του δοκιμίου κινείται προς τα έξω, και πιο ειδικά προς τις πλευρές που έχει μεγαλύτερη κωνικότητα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-5 υπολογίστηκε ίση με 2,7 kJ, κατατάσσοντάς στη χαμηλότερη θέση και από πλευράς απορρόφησης ενέργειας, αν και δεν υπέστη ολική κατάρρευση. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-5 υπολογίστηκε ίσος με 58,5%, παρόμοιος με τα δοκίμια που είχαν μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης.

Σχετικά με τις ραφές συγκόλλησης, δεν παρατηρήθηκε κάποια ρήξη τους, έτσι τα δυο ελάσματα του δοκιμίου παρέμειναν ενωμένα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-5.

#### **4.6 Δοκίμιο 40-100-6**



Αρχικό δοκίμιο 40-100-6

#### 4.6.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.3\text{mm}$



$disp_2 = 16.9\text{mm}$



$disp_3 = 25.1\text{mm}$



$disp_4 = 33.3\text{mm}$



$disp_5 = 41.7\text{mm}$



$disp_6 = 50.2\text{mm}$



$disp_7 = 58.5\text{mm}$



$disp_8 = 66.7\text{mm}$





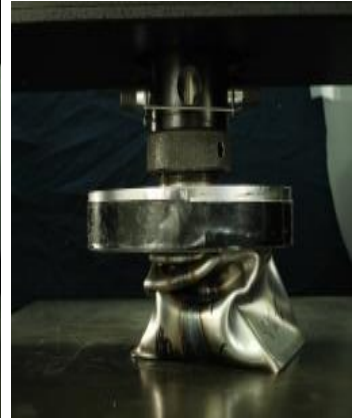
disp<sub>9</sub> = 75.2mm



disp<sub>10</sub> = 83.3mm

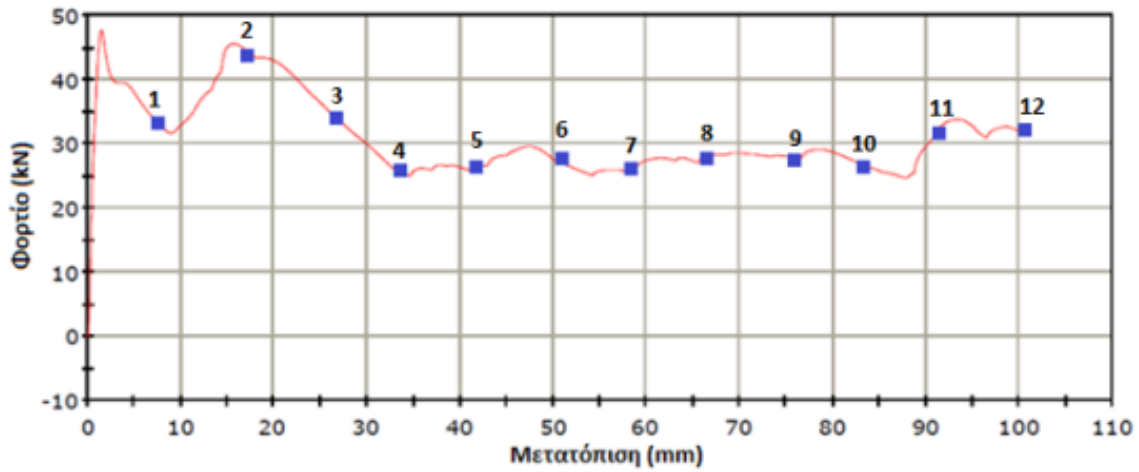


disp<sub>11</sub> = 91.8mm



disp<sub>12</sub> = 100.1mm

### 4.6.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-6

### 4.6.3 Τελικές όψεις



#### 4.6.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,1 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 47,7 \text{ kN}$  στα  $1,6 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 30,9 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE = 64,8\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{absorbed} = 3,1 \text{ kJ}$

#### 4.6.5 Σχολιασμός

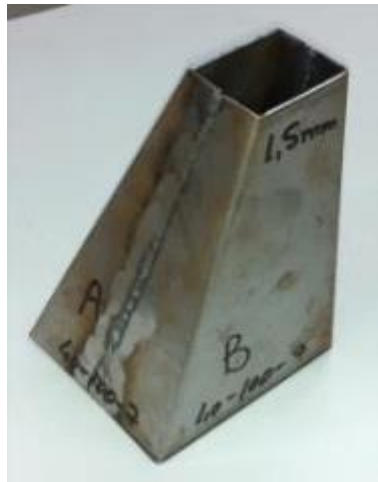
Το 6<sup>ο</sup> πείραμα που έγινε ήταν για το δοκίμιο 40-100-6, όπου και αυτό είχε το κέντρο της άνω βάσης μετατοπισμένο προς τη διαγώνιο. Το εν λόγω δοκίμιο κατέρρευσε προοδευτικά, ενώ κατά τη διάρκεια της αξονικής εμφανίστηκαν 3 πλαστικές αναδιπλώσεις που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με  $30,9 \text{ kN}$  που ήταν μεγαλύτερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός των νέων λοβών στο δοκίμιο, με την εμφάνιση δυο τοπικών μέγιστων κυρίως στα πρώτα στάδια της συμπίεσης. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι το μέγιστο του φορτίου εμφανίζεται ίσο με  $47,7 \text{ kN}$  στα  $1,6 \text{ mm}$ . Το επόμενο τοπικό μέγιστο είχε μια αντίστοιχη κορυφή συγκρίσιμου μεγέθους, κατά το σχηματισμό του μη εκατού λοβού. Συμπεριφορά παρόμοια με του πρώτου δοκιμίου (40-100-1), που είχε το κέντρο της άνω βάσης ακριβώς στο κέντρο της κάτω βάσης. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε, για πρώτη φορά στα πειράματα, ότι το αναπτυσσόμενο φορτίο είχε σχετικά μικρή διακύμανση, με την εμφάνιση μιας πολύ μικρής κορυφής προς το τέλος του πειράματος. Το τελευταίο στάδιο του πλαστικού λυγισμού συνοδεύεται με το σχηματισμό του τελευταίου εκατού λοβού, όπου η κάτω βάση του δοκιμίου κινείται προς τα έξω, και πιο ειδικά προς τις πλευρές που έχει μεγαλύτερη κλίση των τοιχωμάτων.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-6 υπολογίστηκε ίση με  $3,1 \text{ kJ}$ , έχοντας καλύτερη συμπεριφορά από πλευράς απορρόφησης ενέργειας, ενώ δεν υπέστη και ολική κατάρρευση. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-6 υπολογίστηκε ίσος με  $64,8\%$ , ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια που είχαν μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης.

Τέλος, οι ραφές συγκόλλησης δεν υπέστησαν κάποια ρήξη, έτσι τα δυο ελάσματα του δοκιμίου παρέμειναν ενωμένα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-6.

#### 4.7 Δοκίμιο 40-100-7



Αρχικό δοκίμιο 40-100-7

##### 4.7.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.7\text{mm}$



$disp_2 = 16.7\text{mm}$



$disp_3 = 25.2\text{mm}$



$disp_4 = 33.4\text{mm}$



disp<sub>5</sub> = 41.6mm



disp<sub>6</sub> = 49.9mm



disp<sub>7</sub> = 58.6mm



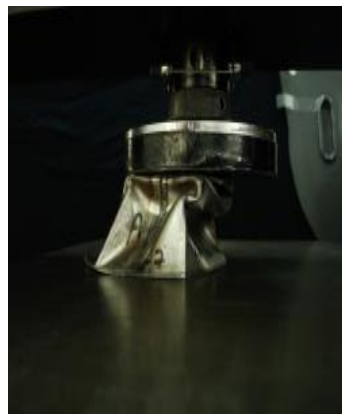
disp<sub>8</sub> = 67.1mm



disp<sub>9</sub> = 75.4mm



disp<sub>10</sub> = 83.4mm

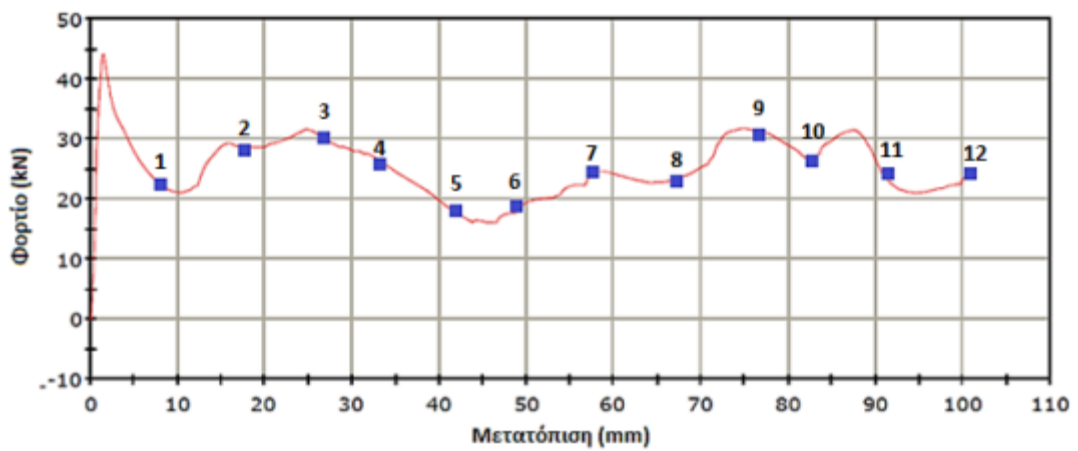


disp<sub>11</sub> = 91.5mm



disp<sub>12</sub> = 100.3mm

### 4.7.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.7: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-7



### 4.7.3 Τελικές όψεις



### 4.7.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,3 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 44,1 \text{ kN}$  στα  $1,5 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 25,2 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE = 57,1\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,5 \text{ kJ}$

### 4.7.5 Σχολιασμός

Το δοκίμιο 40-100-7 είχε το κέντρο της άνω βάσης πλήρως μετατοπισμένο ως προς τη διαγώνιο, δημιουργώντας έτσι δυο κατακόρυφες πλευρές στην πυραμίδα. Το εν λόγω δοκίμιο κατέρρευσε προοδευτικά, ενώ κατά τη διάρκεια της αξονικής εμφανίστηκαν 3 πλαστικές αναδιπλώσεις που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο πείραμα η κάτω βάση δεν είχε καλή επαφή με την πλάκα του μηχανήματος αξονικής σύνθλιψης.

Το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με  $25,2 \text{ kN}$  που ήταν και το μικρότερο που μετρήθηκε σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μέγιστο του φορτίου εμφανίζεται ίσο με  $44,1 \text{ kN}$  στα  $1,5 \text{ mm}$ , η οποία φαίνεται ως μια οξεία κορυφή στο διάγραμμα. Στη συνέχεια, μπορούμε να διακρίνουμε ότι το φορτίο έχει πολύ μικρή διακύμανση, με δυο μικρές κορυφές να σχηματίζονται τις στιγμές δημιουργίας των άλλων λοβών. Κατά το τελευταίο στάδιο του

πλαστικού λυγισμού έχουμε το σχηματισμό του εκτατού λοβού προς το τέλος του πειράματος, όπου η κάτω βάση του δοκιμίου κινείται προς τα έξω, και πιο ειδικά προς τις πλευρές που έχει μεγαλύτερη κλίση των τοιχωμάτων, μιας και οι άλλες ήταν κατακόρυφες.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-7 υπολογίστηκε ίση με 2,5 kJ, έχοντας τη χειρότερη συμπεριφορά από πλευράς απορρόφησης ενέργειας, ενώ δεν υπέστη και ολική κατάρρευση. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-7 υπολογίστηκε ίσος με 57,1%.

Τέλος, για πρώτη φορά οι ραφές συγκόλλησης υπέστησαν ρήξη, το οποίο μπορεί να αποδοθεί είτε στο ιδιαίτερο σχήμα του συγκεκριμένου δοκιμίου, είτε στο γεγονός ότι δεν είχε καλή επαφή η κάτω βάση του με την πλάκα του μηχανήματος

#### 4.8 Δοκίμιο 40-100-8



**Αρχικό δοκίμιο 40-100-8**

#### 4.8.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.4\text{mm}$



$disp_2 = 16.9\text{mm}$



$disp_3 = 25.0\text{mm}$



$disp_4 = 33.6\text{mm}$



$disp_5 = 42.1\text{mm}$



$disp_6 = 50.3\text{mm}$



$disp_7 = 58.4\text{mm}$



$disp_8 = 66.7\text{mm}$



$disp_9 = 75.2\text{mm}$



$disp_{10} = 83.5\text{mm}$

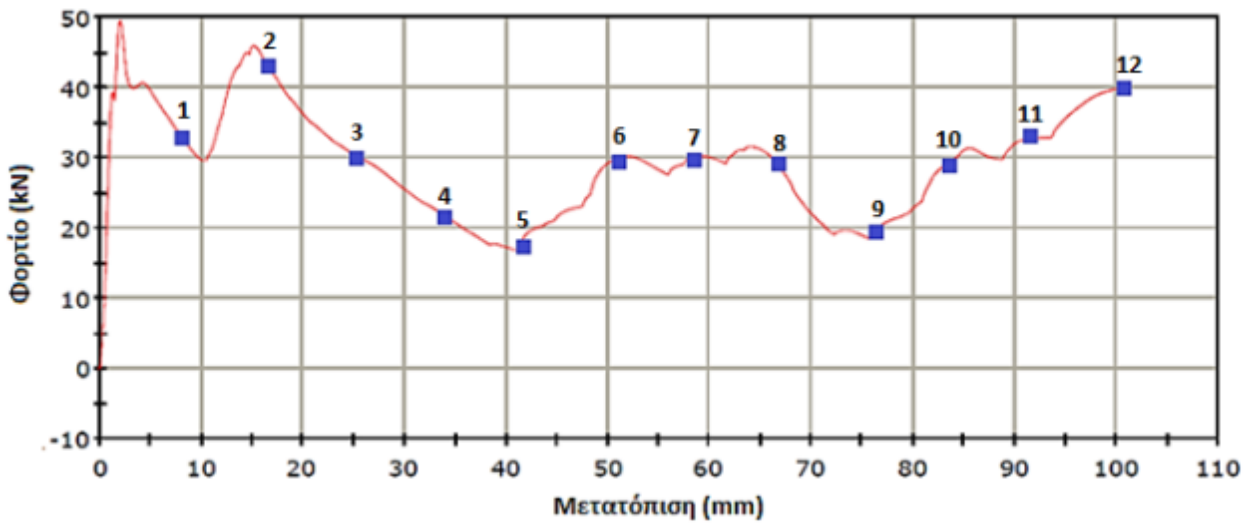


$disp_{11} = 91.7\text{mm}$



$disp_{12} = 100.4\text{mm}$

## 4.8.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.8: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-8

## 4.8.3 Τελικές όψεις



## 4.8.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,4 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 49,6 \text{ kN}$  στα  $2,1 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 29,2 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE = 58,9\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,9 \text{ kJ}$

#### 4.8.5 Σχολιασμός

Το επόμενο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 40-100-8 και είχε μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης και προς τις δυο κάθετες πλευρές της κάτω βάσης.

Επίσης, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-8 υπολογίστηκε ίση με 2,9 kJ. Ως απορροφητής ενέργειας, το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-8 υπολογίστηκε ίσος με 58,9%.

Αντίστοιχα, το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 29,2 kN ήταν ελαφρώς μεγαλύτερο σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 49,6 kN στα 2,1 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται, εμφανίζοντας μικρότερες κορυφές. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με των προηγούμενων δοκιμών. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκατού λοβού, ότι το φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλάδα του διαγράμματος, αυξάνεται προοδευτικά μέχρι το πέρας του πειράματος, όπου παρατηρήθηκε και η κίνηση της κάτω βάσης προς τα έξω για τη δημιουργία του λοβού.

Αναφορικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-8.

#### 4.9 Δοκίμιο 40-100-9





Αρχικό δοκίμιο 40-100-9

#### 4.9.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.8\text{mm}$



$disp_2 = 17.1\text{mm}$



$disp_3 = 25.5\text{mm}$



$disp_4 = 33.5\text{mm}$



$disp_5 = 41.7\text{mm}$



$disp_6 = 50.2\text{mm}$



$disp_7 = 58.4\text{mm}$



$disp_8 = 66.9\text{mm}$



disp<sub>9</sub> = 75.1mm



disp<sub>10</sub> = 83.7mm

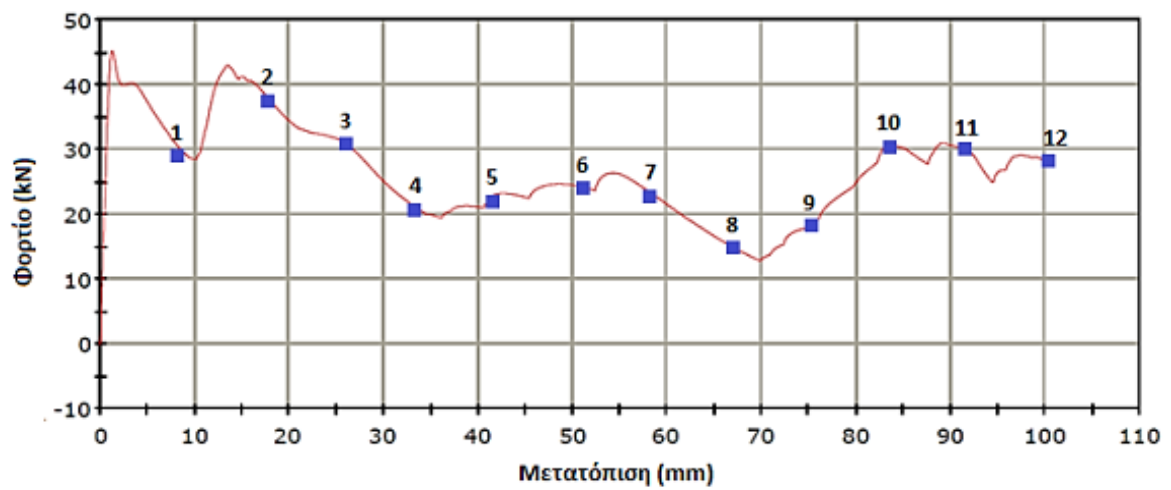


disp<sub>11</sub> = 91.6mm



disp<sub>12</sub> = 100.0mm

#### 4.9.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-9

#### 4.9.3 Τελικές όψεις



#### 4.9.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,0 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 45,3 \text{ kN}$  στα  $1,3 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 26,6 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $CFE = 58,7\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{absorbed} = 2,7 \text{ kJ}$

#### 4.9.5 Σχολιασμός

Το επόμενο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 40-100-9 και είχε μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης ως προς τις κάθετες πλευρές της κάτω βάσης, όπου σχημάτισε και μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα. Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-9 υπολογίστηκε ίση με  $2,7 \text{ kJ}$ . Ως απορροφητής ενέργειας, το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-9 υπολογίστηκε ίσος με  $58,7\%$ , όμοιος με το προηγούμενο δοκίμιο 40 - 100-8.

Αντίστοιχα, το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με  $26,6 \text{ kN}$ . Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με  $45,3 \text{ kN}$  στα  $1,3 \text{ mm}$ , και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται, εμφανίζοντας μικρότερες κορυφές. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με προηγούμενων δοκιμίων. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκατού λοβού, ότι το φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλάδα του διαγράμματος, αυξάνεται προοδευτικά και στη συνέχεια έχει πολύ μικρή διακύμανση μέχρι το πέρας του πειράματος, όπου παρατηρήθηκε και αναδίπλωση της κάτω βάση για τη δημιουργία του λοβού.



Και σε αυτό το πείραμα η ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή δεν υπέστη ρήξη της, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-9.

#### 4.10 Δοκίμιο 40-100-10



Αρχικό δοκίμιο 40-100-10

##### 4.10.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8.7\text{mm}$



$disp_2 = 16.9\text{mm}$



$disp_3 = 25.1\text{mm}$



$disp_4 = 35.2\text{mm}$



disp<sub>5</sub> = 41.9mm

disp<sub>6</sub> = 50.5mm

disp<sub>7</sub> = 59.5mm

disp<sub>8</sub> = 67.9mm



disp<sub>9</sub> = 77.6mm

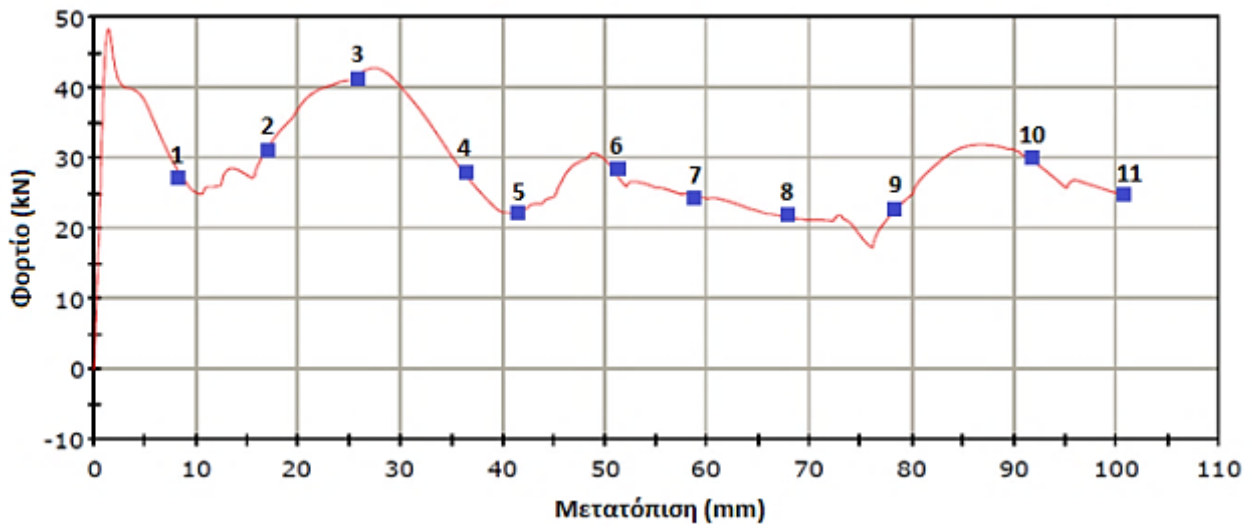


disp<sub>10</sub> = 91.7mm



disp<sub>11</sub> = 100.2mm

#### 4.10.2 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 40-100-10

### 4.10.3 Τελικές όψεις



### 4.10.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta t = 100,2 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 48,3 \text{ kN}$  στα  $1,5 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 28,8 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου  $\text{CFE} = 59,6\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,88 \text{ kJ}$

### 4.10.5 Σχολιασμός

Το τελευταίο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν με διαστάσεις 40-100mm ήταν το 40-100-10 και είχε μετατοπισμένο το κέντρο της άνω βάσης ως προς τις κάθετες πλευρές της κάτω βάσης, όπου σχημάτισε και μια κατακόρυφη πλευρά στην πυραμίδα και ελαφρώς μετατοπισμένη προς την κάθετη γωνία της κάτω βάσης.

Κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

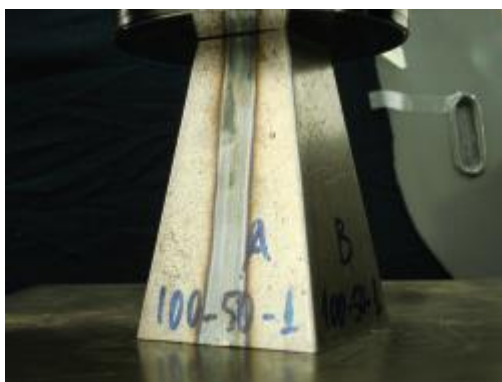
Αντίστοιχα, το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο υπολογίστηκε ίσο με 28,8 kN. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 48,3 kN στα 1,5 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται, εμφανίζοντας μικρότερες κορυφές. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με προηγούμενων δοκιμών και προς το τέλος του πειράματος και μικρότερη διακύμανση. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους προς μια κοιλάδα του διαγράμματος, όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκτατού λοβού, το φορτίο, αυξάνεται ελαφρώς μέχρι το πέρας του πειράματος, όπου παρατηρήθηκε και η κίνηση της κάτω βάση προς τα έξω για τη δημιουργία του λοβού, ειδικά από την πιο κατακόρυφη πλευρά της πυραμίδας.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 40-100-10 υπολογίστηκε ίση με 2,88 kJ. Ως απορροφητής ενέργειας, το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 40-100-10 υπολογίστηκε ίσος με 59,6%, ελαφρώς μεγαλύτερος από τα προηγούμενα δυο δοκίμια (-8, -9).

Και σε αυτό το πείραμα η ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή δεν υπέστη ρήξη της, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 40-100-10.

#### 4.11 Δοκίμιο 50-100-1



Αρχικό δοκίμιο 50-100-1

#### 4.11.1 Προοδευτικές φάσεις



$disp_1 = 8,7 \text{ mm}$



$disp_2 = 17,1 \text{ mm}$



$disp_3 = 25,4 \text{ mm}$



$disp_4 = 33,9 \text{ mm}$



$disp_5 = 42,4 \text{ mm}$



$disp_6 = 50,4 \text{ mm}$

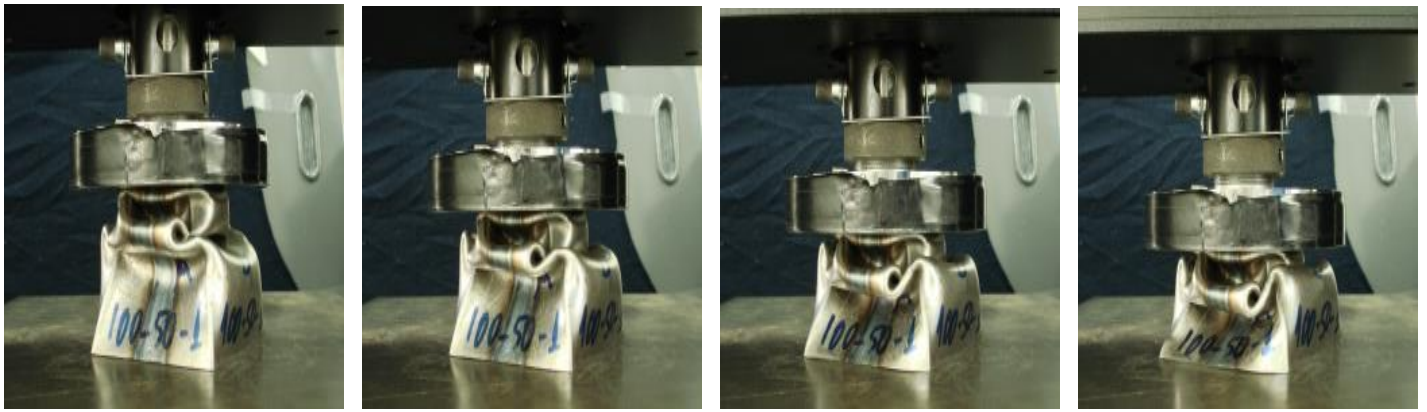


$disp_7 = 59,1 \text{ mm}$



$disp_8 = 66,8 \text{ mm}$





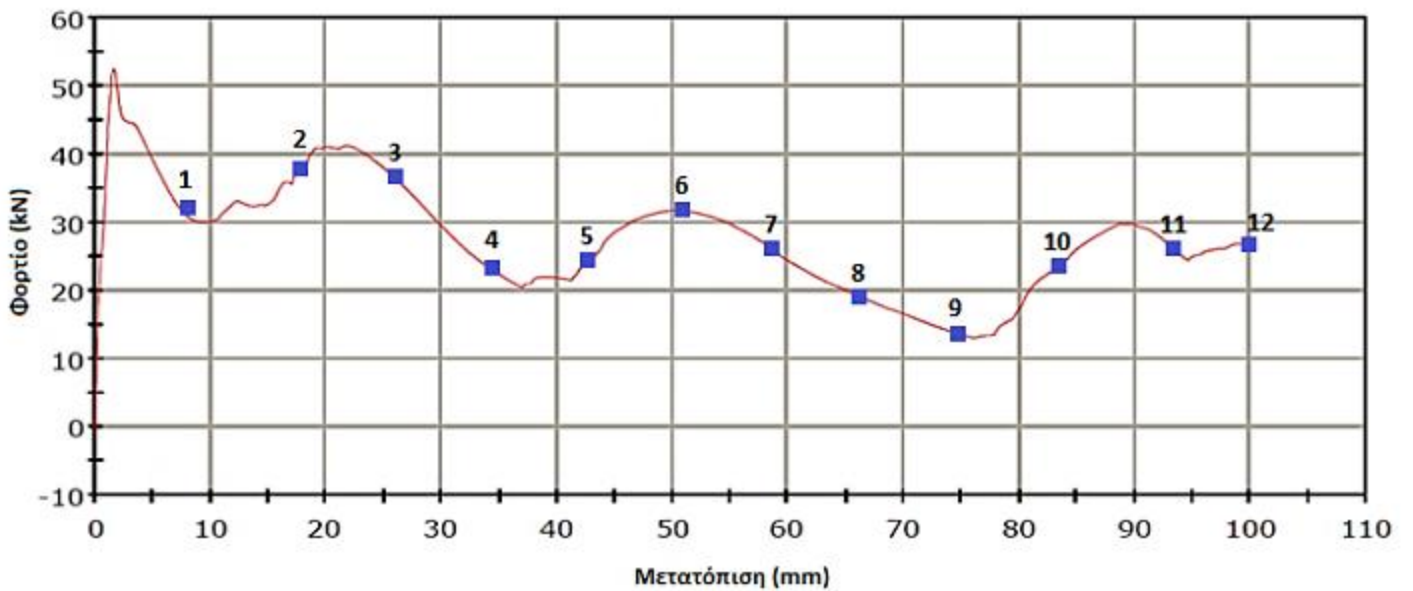
disp<sub>9</sub> = 75,4 mm

disp<sub>10</sub> = 83,8 mm

disp<sub>11</sub> = 92,4 mm

disp<sub>12</sub> = 100,1 mm

#### 4.11.2 Διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης



Εικόνα 4.11: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-1

#### 4.11.3 Τελικές όψεις



#### 4.11.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,1 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 52,5 \text{ kN}$  στα  $1,7 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 27,6 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE)  $= 52,6\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,76 \text{ kJ}$

#### 4.11.5 Σχολιασμός

Στο πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου με διαστάσεις βάσεων  $100 \text{ mm}$  και  $50 \text{ mm}$ , αντίστοιχα, παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μιας σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 50-100-1 υπολογίστηκε ίση με  $2,76 \text{ kJ}$ . Δρώντας λοιπόν ως απορροφητής ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ο οποίος είναι ένας μη επιθυμητός τρόπος παραμόρφωσης, καθώς μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 50-100-1 υπολογίστηκε ίσος με  $52,6\%$ , ο οποίος είναι μικρότερος σε σχέση με το αντίστοιχο δοκίμιο με μικρότερη άνω βάση (40-100-1).

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με  $27,6 \text{ kN}$ .

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με  $52,5 \text{ kN}$  στα  $1,7 \text{ mm}$ , και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το

αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 100 mm περίπου όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας.

Τέλος, αναφερόμενοι στη πειραματική διαδικασία, σε όλη τη διάρκεια της αξονικής καταπόνησης, η ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή των δυο ελασμάτων του δοκιμίου παρέμεινε ενωμένη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 50-100-1.

#### 4.12 Δοκίμιο 50-100-2



Αρχικό δοκίμιο 50-100-2

##### 4.12.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8,5 \text{ mm}$



$disp_2 = 17,1 \text{ mm}$



$disp_3 = 25,8 \text{ mm}$



$disp_4 = 33,6 \text{ mm}$





**disp<sub>5</sub> = 50 mm**



**disp<sub>6</sub> = 58,5 mm**



**disp<sub>7</sub> = 67,1 mm**



**disp<sub>8</sub> = 75,7 mm**



**disp<sub>9</sub> = 83,5 mm**

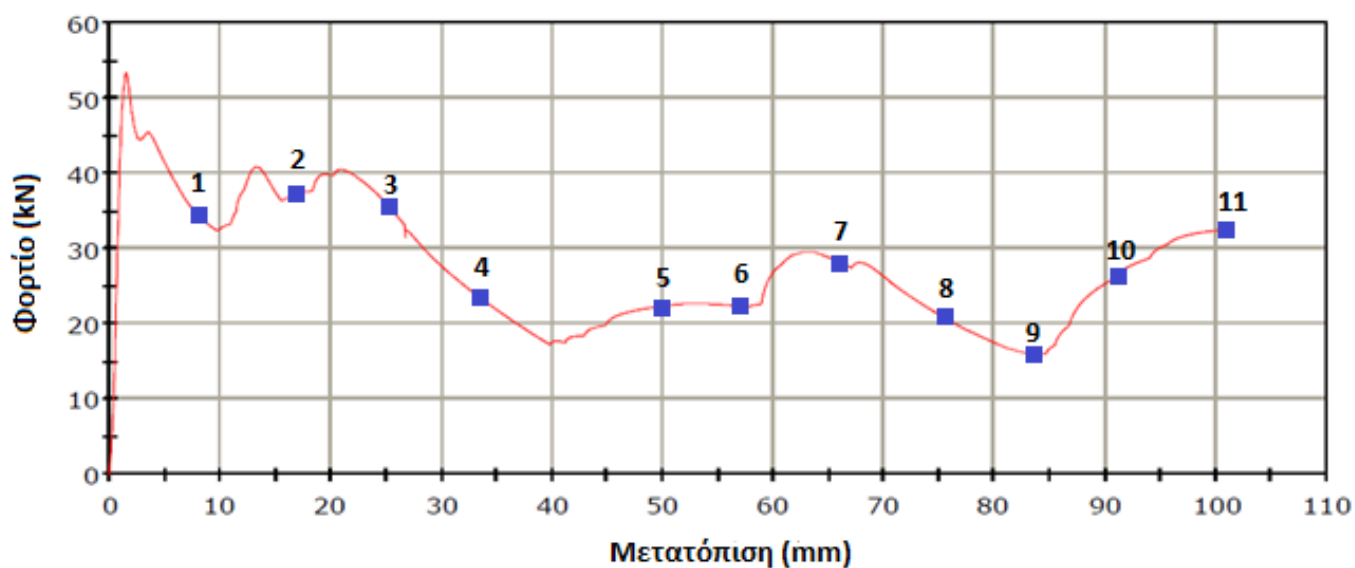


**disp<sub>10</sub> = 91,7 mm**



**disp<sub>11</sub> = 100,2 mm**

#### 4.12.2 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-2

### 4.12.3 Τελικές όψεις



### 4.12.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,2 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 53,4 \text{ kN}$  στα  $1,6 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 27,5 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE)  $= 51,5\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,76 \text{ kJ}$

### 4.12.5 Σχολιασμός

Στο 2<sup>ο</sup> πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μιας σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 50-100-2 υπολογίστηκε ίση με 2,76 kJ. Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, έτσι δεν μειώθηκε η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

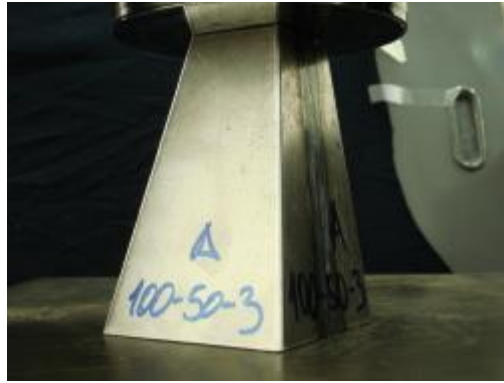
Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 50-100-2 υπολογίστηκε ίσος με 51,5%.

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 27,5 kN.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 53,4 kN στα 1,6 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση και σε αισθητά χαμηλότερα επίπεδα. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αισθητά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και σημαντικά μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται πολύ μικρότερο τοπικό μέγιστο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του τοπικού μεγίστου.

Τέλος, σχετικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 50-100-2.

#### **4.13 Δοκίμιο 50-100-3**



Αρχικό δοκίμιο 50-100-3

#### 4.13.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1 = 8,6 \text{ mm}$



$disp_2 = 17 \text{ mm}$



$disp_3 = 25,7 \text{ mm}$



$disp_4 = 42,1 \text{ mm}$



$disp_5 = 58,9 \text{ mm}$



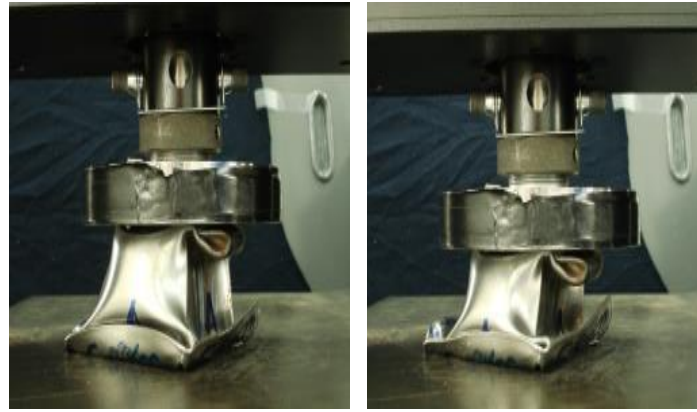
$disp_6 = 67,3 \text{ mm}$



$disp_7 = 75,7 \text{ mm}$



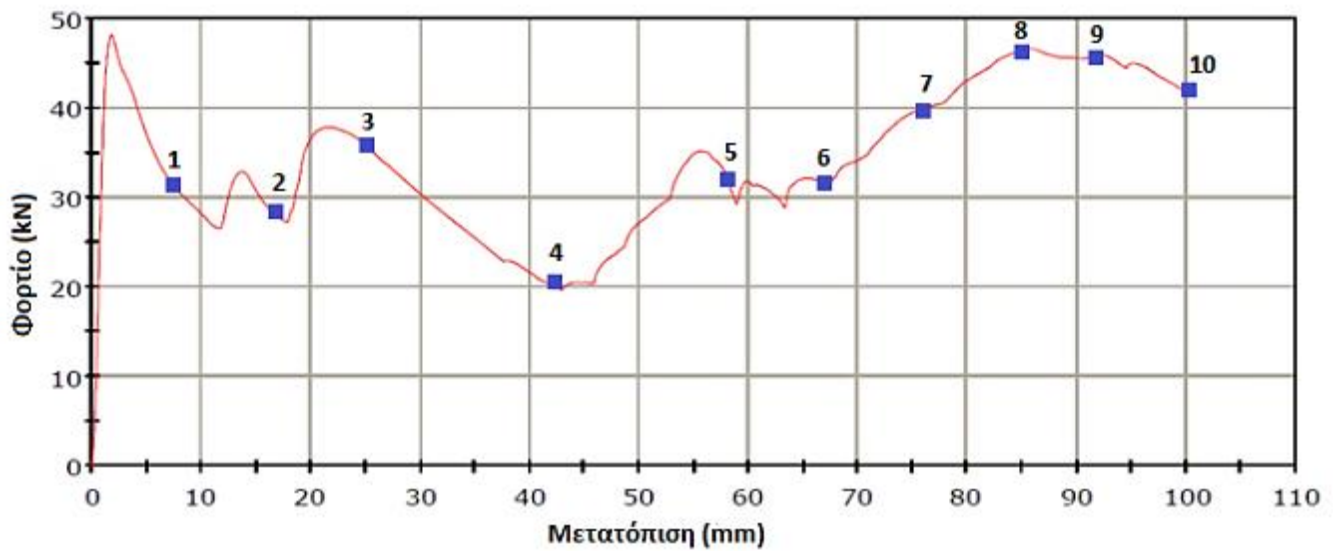
$disp_8 = 84,1 \text{ mm}$



disp<sub>9</sub>=91,9 mm

disp<sub>10</sub>=100,4 mm

### 4.13.2 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης



Εικόνα 4.13: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 50-100-3

### 4.13.3 Τελικές όψεις



#### 4.13.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,4$  mm

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 48,2$  kN στα 1,8 mm

Μέσο φορτίο  $P_m = 34$  kN

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) = 70,5%

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 3,41$  kJ

#### 4.13.5 Σχολιασμός

Το επόμενο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 50-100-3 και εμφάνισε και αυτό προοδευτική κατάρρευση. Επίσης, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα. Στην περίπτωση αυτή, λόγω της μετατόπισης του κέντρου της άνω βάσης οι δύο πλευρές ήταν σχεδόν κατακόρυφες. Παρατηρήθηκε σχίσιμο του υλικού κοντά στην κατακόρυφη πλευρά, λόγω της πολύ υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, καθώς και ενδεχόμενης ατέλειας του υλικού στη θέση του στρατζαρίσματος. Στο σημείο εκείνο, ήταν πιο εύκολο να σχισθεί το υλικό, παρά να καμφθεί.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 50-100-3 υπολογίστηκε ίση με 3,41 kJ. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 50-100-3 υπολογίστηκε ίσος με 70,5%.

Αντίστοιχα, και το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ήταν ίσο με 34 kN. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 48,2 kN στα 1,8 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Η συμπεριφορά αυτή είναι αντίστοιχη με των προηγούμενων δοκιμών. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, αλλά εν συνεχεία αυξανόμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον αύξηση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκτατού λοβού, ότι το φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλάδα του διαγράμματος, αυξάνεται προοδευτικά μέχρι το πέρας του πειράματος.



Αναφορικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 50-100-3.

#### 4.14 Δοκίμιο 60-100-1



Αρχικό δοκίμιο 60-100-1

##### 4.14.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1=8,6$  mm



$disp_2=17,2$  mm



$disp_3=25,2$  mm



$disp_4=33,5$  mm



disp<sub>5</sub>=41,9 mm



disp<sub>6</sub>=50,2 mm



disp<sub>7</sub>=58,4 mm



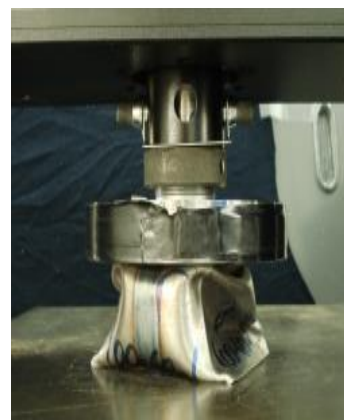
disp<sub>8</sub>=67,1 mm



disp<sub>9</sub>=75,7 mm

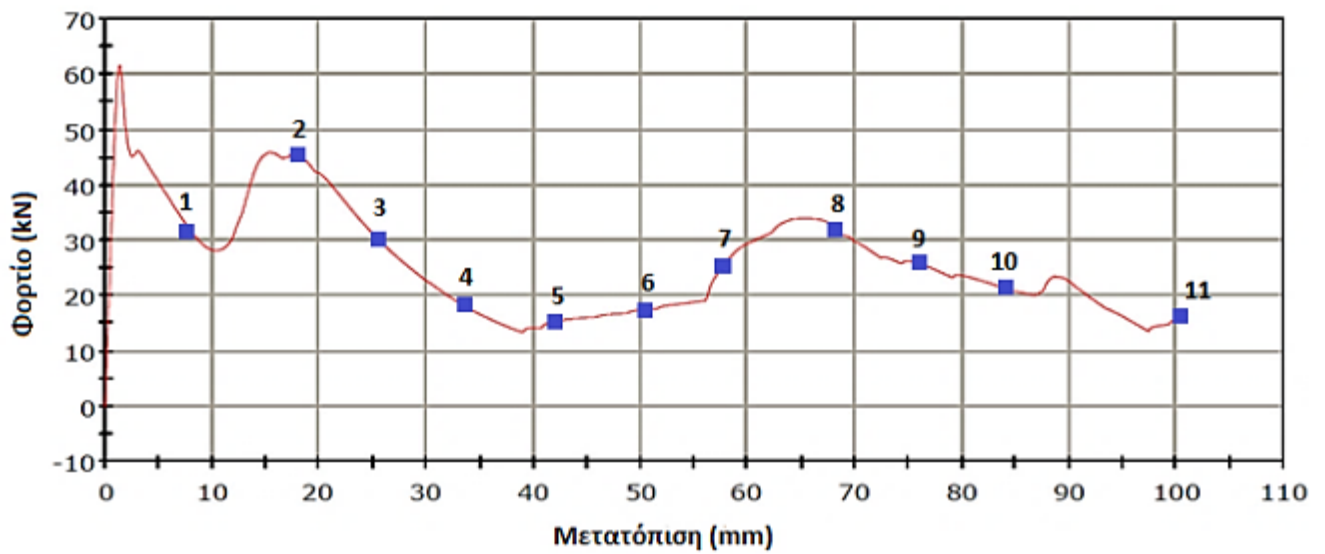


disp<sub>10</sub>=83,9 mm



disp<sub>11</sub>=100,3 mm

#### 4.14.2 Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου





Εικόνα 4.14: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης δοκιμίου 60-100-1

### 4.14.3 Τελικές όψεις



### 4.14.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,3 \text{ mm}$

Μέγιστο φορτίο  $P_{\max} = 61,7 \text{ kN}$  στα  $1,4 \text{ mm}$

Μέσο φορτίο  $P_m = 26,1 \text{ kN}$

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE)  $= 42,3\%$

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{\text{absorbed}} = 2,62 \text{ kJ}$

### 4.14.5 Σχολιασμός

Στο πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου με διαστάσεις βάσεων  $100 \text{ mm}$  και  $60 \text{ mm}$ , αντίστοιχα, παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μια σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 60-100-1 υπολογίστηκε ίση με  $2,62 \text{ kJ}$ . Δρώντας λοιπόν ως απορροφητής ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, ο οποίος είναι ένας μη επιθυμητός τρόπος παραμόρφωσης, καθώς μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 60-100-1 υπολογίστηκε ίσος με 42,3%, ο οποίος είναι μικρότερος σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια με μικρότερη άνω βάση (40-100-1 και 50-100-1).

Η δημιουργία των ατελών μη εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 26,1 kN.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 61,7 kN στα 1,4 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο, όπως ήταν αναμενόμενο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον μείωση του τοπικού μεγίστου. Η συμπίεση ολοκληρώνεται όταν το έμβολο κατέρχεται κατά 100 mm περίπου όπως είχαμε ορίσει στο πρόγραμμα της πρέσας.

Τέλος, αναφερόμενοι στη πειραματική διαδικασία, σε όλη τη διάρκεια της αξονικής καταπόνησης, η ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή των δυο ελασμάτων του δοκιμίου παρέμεινε ενωμένη, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 60-100-1.

#### 4.15 Δοκίμιο 60-100-2



Αρχικό δοκίμιο 60-100-2

#### 4.15.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1=8,7$  mm



$disp_2=17,4$  mm



$disp_3=25,5$  mm



$disp_4=33,9$  mm



$disp_5=42,1$  mm



$disp_6=50,3$  mm



$disp_7=59,1$  mm



$disp_8=67,3$  mm



$disp_9=75,8$  mm

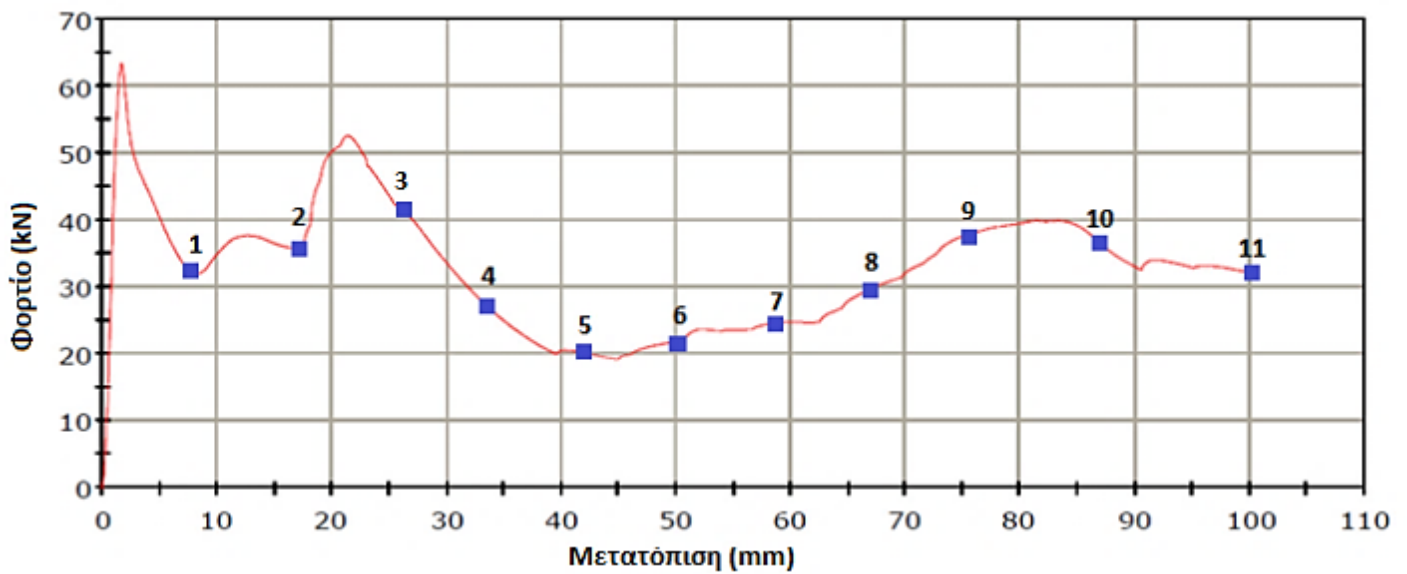


$disp_{10}=87,6$  mm



$disp_{11}=100,1$  mm

### 4.15.2 Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 60-100-2

### 4.15.3 Τελικές όψεις



### 4.15.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,1$  mm

Μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 63,4$  kN στα 1,7 mm

Μέσο φορτίο  $P_m = 32,7$  kN

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) = 51,6%

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{absorbed} = 3,27$  kJ

#### 4.15.5 Σχολιασμός

Στο 2ο πείραμα, κατά τη συμπίεση του δοκιμίου 60-100-2 παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευσή του. Το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο εμφάνισε διαφορετική πλαστική συμπεριφορά κατάρρευσης στα διάφορα τμήματά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της φάσης παραμόρφωσης εμφανίζεται μιας σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα. Στην τελική φάση το υλικό του δοκιμίου είχε «τσαλακώσει» χωρίς όμως να δημιουργηθεί σχίσσιμο, όπως στο δοκίμιο 50 - 100 -3.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 60-100-2 υπολογίστηκε ίση με 3,27 kJ. Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, έτσι δεν μειώθηκε η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 60-100-2 υπολογίστηκε ίσος με 51,6%.

Η δημιουργία των εκτατών λοβών, όπως φαίνεται στα διαδοχικά στιγμιότυπα της κατάρρευσης και τις τελικές όψεις, αποτυπώνεται ανάγλυφα και στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης με τις χαρακτηριστικές διαδοχικές αυξομειώσεις του φορτίου, και μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ίσο με 32,7 kN.

Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 63,4 kN στα 1,7 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με μικρότερη διακύμανση και σε αισθητά χαμηλότερα επίπεδα. Κατά συνέπεια, η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό αναπτύσσεται με τις δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με την αναδίπλωση που υφίσταται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης. Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αισθητά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και σημαντικά μειούμενου μεγέθους όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκτατού λοβού, παρατηρείται πολύ μικρότερο τοπικό μέγιστο, ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε ακόμα μεγαλύτερη μείωση του τοπικού μεγίστου.

Τέλος, σχετικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 60-100-2.

#### 4.16 Δοκίμιο 60-100-3





Αρχικό δοκίμιο 60-100-3

#### 4.16.1 Προοδευτικές φάσεις κατάρρευσης



$disp_1=8,4$  mm



$disp_2=17,1$  mm



$disp_3=25,6$  mm



$disp_4=33,7$  mm



$disp_5=42,3$  mm



$disp_6=50,3$  mm



$disp_7=58,7$  mm



$disp_8=67,3$  mm



disp<sub>9</sub>=75,7 mm

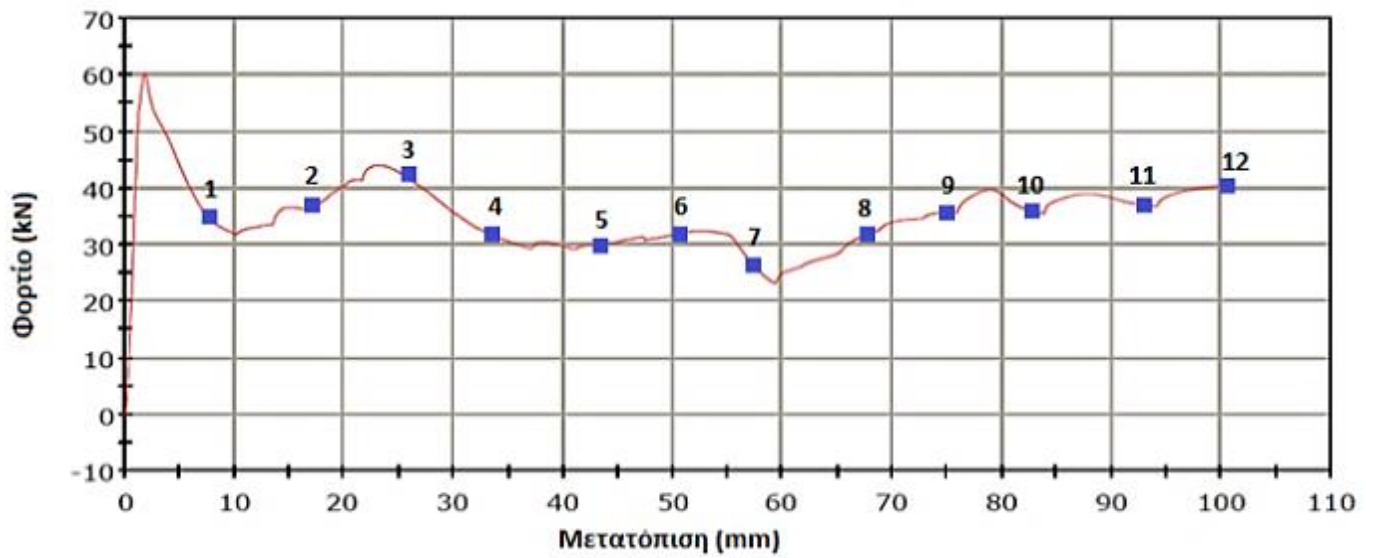


disp<sub>10</sub>=83,8 mm



disp<sub>11</sub>=100,3 mm

#### 4.16.2 Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου



Εικόνα 4.16: Διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου δοκιμίου 60-100-3

#### 4.16.3 Τελικές όψεις



#### 4.16.4 Αποτελέσματα πειράματος

Διαδρομή εμβόλου  $\delta_t = 100,3$  mm

Μέγιστο φορτίο  $P_{max} = 60,3$  kN στα 1,9 mm

Μέσο φορτίο  $P_m = 35,1$  kN

Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου (CFE) = 58,2%

Ενέργεια παραμόρφωσης  $E_{absorbed} = 3,52$  kJ

#### 4.16.5 Σχολιασμός

Το τελευταίο δοκίμιο που εξετάστηκε ήταν το 60-100-3 και εμφάνισε και αυτό προοδευτική κατάρρευση. Επίσης, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης εμφανίστηκε μιας σειρά πλαστικών αναδιπλώσεων που διαχωρίζονται από σχεδόν απαραμόρφωτα τμήματα.

Η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο 60-100-3 υπολογίστηκε ίση με 3,52 kJ. Ως απορροφητής, ενέργειας το λεπτότοιχο πυραμιδικό δοκίμιο δεν υπέστη ολική κατάρρευση, αλλά όπως φαίνεται από τις μετρήσεις απορρόφησε μεγαλύτερο ποσό ενέργειας σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για το δοκίμιο 60-100-3 υπολογίστηκε ίσος με 58,2%.

Αντίστοιχα, και το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο ήταν ίσο με 35,1 kN. Από την καμπύλη φορτίου - μετατόπισης μπορούμε να διακρίνουμε τις φάσεις όπου αρχίζει ο σχηματισμός νέων λοβών στο δοκίμιο. Από την καμπύλη φορτίου – μετατόπισης, παρατηρήθηκε ότι αρχικά εμφανίζεται το μέγιστο του φορτίου, ίσο με 60,3 kN στα 1,9 mm, και τελικά στη συνέχεια αυξομειώνεται με πολύ μικρή διακύμανση, σε σύγκριση με τα προηγούμενα δοκίμια. Η φάση μετά τον πλαστικό λυγισμό συνεχίζεται με δευτερεύουσες κορυφές και κοιλάδες που σχετίζονται άμεσα με τις άλλες αναδιπλώσεις που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία της κατάρρευσης.

Το δευτερεύον μέγιστο φορτίο είναι αρκετά μικρότερο σε μέγεθος σε σχέση με το αρχικό, και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται όσο προχωρά η συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, στη δημιουργία του δεύτερου μη εκατού λοβού, παρατηρείται μικρότερο τοπικό μέγιστο ενώ στον τρίτο λοβό έχουμε επιπλέον αύξηση του τοπικού μεγίστου. Τέλος, παρατηρούμε ότι κατά το σχηματισμό του τελευταίου εκατού λοβού, το φορτίο, ύστερα από την τελευταία κοιλάδα του διαγράμματος, σταθεροποιείται προοδευτικά μέχρι το πέρας του πειράματος.



Αναφορικά με την ηλεκτροσυγκολλημένη ραφή, δεν παρατηρήθηκε ρήξη της ραφής συγκόλλησης των δυο ελασμάτων του δοκιμίου, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στις τελικές όψεις του δοκιμίου 60-100-3.

#### 4.17 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων

Παρακάτω (Πίνακας 4.1) παρουσιάζονται συνολικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα 16 δοκίμια.

Πίνακας 4.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα πειραμάτων αξονικής φόρτισης των δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο $P_{max}$ (kN)	Θέση εμβόλου κατά το $P_{max}$ (mm)	Μέσο φορτίο $P_m$ (kN)	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου CFE (%)	Ενέργεια παραμόρφωσης $E_{absorbed}$ (kJ)
40-100-1	60,5	1,9	35,2	58,2	3,5
40-100-2	57,1	1,9	30,7	53,8	3,1
40-100-3	54	2,2	27,8	51,5	2,8
40-100-4	47,1	89,9	27,9	59,2	2,8
40-100-5	47,5	1,1	27,2	58,5	2,7
40-100-6	47,7	1,6	30,9	64,8	3,1
40-100-7	44,1	1,5	25,2	57,1	2,5
40-100-8	49,6	2,1	29,2	58,9	2,9
40-100-9	45,3	1,3	26,6	58,7	2,7
40-100-10	48,3	1,5	28,8	59,6	2,9
50-100-1	52,5	1,7	27,6	52,6	2,8
50-100-2	53,4	1,6	27,5	51,5	2,76
50-100-3	48,2	1,8	34	70,5	3,41
60-100-1	61,7	1,4	26,1	42,3	2,62
60-100-2	63,4	1,7	32,7	51,6	3,27
60-100-3	60,3	1,9	35,1	58,2	3,52

## Συμπεράσματα

### Συνολικές παρατηρήσεις πάνω στα πειραματικά αποτελέσματα

Από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν φάνηκε ότι τα περισσότερα δοκίμια σχημάτισαν τρεις λοβούς, πράγμα που απεικονιζόταν χαρακτηριστικά και στα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης, ανάλογα με το πλήθος των κορυφών και των κοιλάδων που δημιουργήθηκαν.

Συγκεκριμένα, η εμφάνιση των κορυφών στο διάγραμμα μπορεί να συσχετιστεί και να αποδοθεί στο χρονικό στιγμιότυπο όπου το εργαλείο της πρέσας ασκούσε το μέγιστο φορτίο του στο δοκίμιο, ώστε να το παραμορφώσει και να δημιουργηθεί ο λοβός. Τα πτωτικά τμήματα της κάθε καμπύλης, δηλαδή οι κοιλάδες, μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν το χρονικό διάστημα δημιουργίας του λοβού, όπου το υλικό είναι πιο εύκολο να παραμορφωθεί και άρα, συγκριτικά με την υπόλοιπη διάρκεια καταπόνησης, δεν απαιτείται μεγάλο φορτίο. Αντιθέτως, όταν το εργαλείο συναντούσε απαραμόρφωτο υλικό, παρουσιαζόταν αύξηση του ασκούμενου φορτίου, ώστε να μπορέσει να προκαλέσει τον πλαστικό λυγισμό του υλικού.

Οι δευτερεύουσες κορυφές που εμφανίζονται (τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα της καμπύλης) αντικατοπτρίζουν το αν το υλικό που συναντούσε το εργαλείο ήταν απαραμόρφωτο, οπότε παρουσιάζεται ένα αρκετά μεγάλο τοπικό μέγιστο, συγκρίσιμο με το ολικό μέγιστο, ή αν το υλικό που συναντούσε το εργαλείο ήταν ήδη αρκετά παραμορφωμένο, οπότε το ασκούμενο φορτίο δεν αυξανόταν σημαντικά και άρα το τοπικό μέγιστο ήταν αρκετά μικρότερο από το ολικό μέγιστο.

Δεδομένου ότι σκοπός τέτοιων πειραμάτων είναι η μελέτη δοκιμίων για χρήση τους σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας, η επιθυμητή συμπεριφορά από ένα δοκίμιο είναι οι δευτερεύουσες κορυφές να είναι συγκρίσιμου μεγέθους με την αρχική, καθώς αυτό σημαίνει ότι το υλικό απαιτεί μεγαλύτερο φορτίο για να καμφθεί. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται και με μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης, καθώς και με μεγαλύτερη συντελεστή ομοιομορφίας, αφού το μέσο φορτίο της καταπόνησης είναι πιο κοντά στο μέγιστο. Αντιθέτως, όταν οι δευτερεύουσες κορυφές είναι πολύ χαμηλότερες, σημαίνει ότι το υλικό έχει δεχτεί σημαντική παραμόρφωση και ένα μικρότερο φορτίο είναι ικανό να το κάμψει. Κατ' επέκταση οδηγούμαστε σε χαμηλότερη ενέργεια παραμόρφωσης και σε μικρότερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.

Στα συγκεκριμένα πειράματα το πάχος των δοκιμίων ήταν αμετάβλητο και ίσο με 1,5 mm για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό που μεταβλήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι η γεωμετρία των δοκιμίων. Συγκεκριμένα η κάτω βάση διατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια ίση με 100 mm, ενώ η άνω βάση είχε διαστάσεις 40 mm, 50 mm και 60 mm. Επίσης μεταβλήθηκε και η θέση του κέντρου της

άνω βάσης, δημιουργώντας διαφορετικές κλίσεις τοιχωμάτων σε κάθε περίπτωση, οδηγώντας και στη δημιουργία δοκιμίων με μία ή περισσότερες κατακόρυφες πλευρές.

#### Σύγκριση δοκιμίων της ομάδας δοκιμίων 40-100

Όσον αφορά τη μετατόπιση του κέντρου της άνω βάσης παρατηρήθηκε ότι η κάθετη ευθεία των κέντρων της άνω βάσης που βρισκόταν σε μεγαλύτερη απόσταση από το αρχικό κέντρο της πυραμίδας (40-100-4, 40-100-9, 40-100-10), είχε μικρότερο μέγιστο φορτίο σε σύγκριση με τις εσωτερικές παράλληλες ευθείες (40-100-3, 40-100-8, 40-100-6), δηλαδή όσο πιο έκκεντρο ήταν το δοκίμιο, τόσο μικρότερο φορτίο μπορούσε να απορροφήσει. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου όμως αυξάνεται για τα δοκίμια 40-100-4, 40-100-9, 40-100-10, δηλαδή τα δοκίμια με τη μεγαλύτερη εκκεντρότητα, καθώς το μέσο φορτίο που δέχονται είναι σχεδόν το ίδιο με τα στιγμιαία.

#### Σύγκριση δοκιμίων της ομάδας δοκιμίων 50-100

Στην ομάδα δοκιμίων 50-100, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια 50-100-1 και 50-100-2 είχαν παρόμοιο μέγιστο φορτίο και μέσο φορτίο, καθώς και συντελεστή ομοιομορφίας και ενέργεια παραμόρφωσης, όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς. Από την άλλη, το πιο έκκεντρο δοκίμιο (50-100-3) είχε μικρότερο μέγιστο φορτίο από τα προηγούμενα, αλλά είχε μεγαλύτερο μέσο φορτίο και συντελεστή ομοιομορφίας, άρα και ενέργεια παραμόρφωσης. Η μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης επιβεβαιώνεται από την καμπύλη φορτίου— μετατόπισης, όπου φαίνεται ότι η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αξονική του καταπόνηση παρουσιάζει κορυφές συγκρίσιμου μεγέθους με το μέγιστο φορτίο που δέχτηκε.

#### Σύγκριση δοκιμίων της ομάδας δοκιμίων 60-100

Τα δοκίμια 60-100 με τη μεγαλύτερη άνω βάση, όπως προαναφέρθηκε, εμφάνισαν τα υψηλότερα μέγιστα φορτία, λόγω της μικρότερης κλίσης των τοιχωμάτων. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων αξονικής καταπόνησης, παρατηρήθηκε ότι με αύξηση της εκκεντρότητας των δοκιμίων, παρατηρήθηκε αύξηση του μέσου φορτίου που δέχτηκε το κάθε δοκίμιο, αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας, και κατ' επέκταση αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης που δέχτηκε.

### Σύγκριση των ομάδων δοκιμών 40-100, 50-100, 60-100 μεταξύ τους

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της άνω βάσης, δηλαδή η μείωση της κλίσης των τοιχωμάτων του δοκιμίου, οδηγεί σε αύξηση του μέγιστου φορτίου, αφού φαίνεται χαρακτηριστικά ότι τα δοκίμια 60-100 είχαν μέγιστο φορτίο γύρω στα 60 kN, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια παρουσίαζαν χαμηλότερες τιμές. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε συμφωνία και με τη βιβλιογραφία (Nagel et al., 2005), οι οποίοι μέσω προσομοιώσεων έδειξαν ότι το φορτίο αιχμής αυξάνεται με την μείωση της κλίσης των τοιχωμάτων.

Από τα αποτελέσματα του πειράματος (Πίνακας 4.1) φαίνεται ότι τα δοκίμια με μεγαλύτερη κλίση τοιχωμάτων (δηλαδή τα δοκίμια 40-100) έχουν μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου με μέση τιμή περίπου 58%, ενώ τα δοκίμια με τη μικρότερη κλίση τοιχωμάτων από όλα (60-100) έχουν δείκτη ομοιομορφίας φορτίου περίπου ίση με 50%.

Σχετικά με την ενέργεια παραμόρφωσης, παρατηρούμε ότι τα δοκίμια με άνω βάση 60 mm μπορούν να δεχτούν υψηλότερα μέγιστα φορτία (περίπου 60 kN) σε σύγκριση με τα δοκίμια με μικρότερη άνω βάση, δηλαδή μεγαλύτερης κλίσης τοιχωμάτων. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο 60-100-3 παρουσιάζει και τη μέγιστη ενέργεια παραμόρφωσης.

Η μετατόπιση του κέντρου της άνω βάσης προς τα δεξιά οδηγεί σε μείωση του μέγιστου φορτίου και αύξηση του δείκτη ομοιομορφίας του φορτίου, ενώ το μέσο φορτίο και η ενέργεια παραμόρφωσης δε μεταβάλλονται σημαντικά.

Κατά την κατάρρευση των δοκιμών, παρατηρήθηκε ολίσθηση του υλικού προς την κατακόρυφη ή τις κατακόρυφες πλευρές. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται με τη συγκέντρωση περισσότερων τάσεων στην κατακόρυφη πλευρά, η οποία όπως φάνηκε από τα πειράματα (50-100-3) και (40-100-7) μπορεί να οδηγήσει σε σχίσσιμο του υλικού. Η εξέλιξη αυτή μπορεί να παρουσιαστεί ακόμη ευκολότερα αν συμπέσει με κάποια ατέλεια του υλικού. Μια τέτοια συμπεριφορά μπορεί να αποφευχθεί μέσω κατάλληλης επιλογής του πάχους και της κλίσης τοιχωμάτων του δοκιμίου.

### Σύγκριση των πιο αντιπροσωπευτικών δοκιμών κάθε ομάδας

Από την ομάδα δοκιμών 40-100, τα πιο αντιπροσωπευτικά δοκίμια ήταν τα 40-100-3 και 40-100-6, από την ομάδα 50-100 τα δοκίμια 50-100-2 και 50-100-3, ενώ από την κατηγορία 60-100, επελέγησαν τα δοκίμια 60-100-2 και 60-100-3. Τα προαναφερόμενα δοκίμια είναι τα πιο χαρακτηριστικά των ομάδων τους, καθώς σε όλα παρατηρήθηκε η ίδια συμπεριφορά αναφορικά με την κατάρρευσή τους υπό αξονική φόρτιση. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια που δέχτηκαν αρχικά μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο, παρουσίασαν στη συνέχεια μικρότερο μέσο

φορτίο και μικρότερη ενέργεια παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα όσο μειωνόταν το μέγιστο αρχικό φορτίο, παρουσίασαν στη συνέχεια μεγαλύτερο μέσο φορτίο και μεγαλύτερη ενέργεια παραμόρφωσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί, καθώς το υλικό που είχε δεχτεί μεγάλο αρχικό φορτίο, παραμορφωνόταν εξαρχής αρκετά, ώστε εν συνεχεία να απαιτείται μικρότερο μέσο φορτίο και μικρότερη ενέργεια παραμόρφωσής για την καταπόνησή του.

## Μελλοντική διερεύνηση

Οι καταστροφικές καταπονήσεις είναι πολύ σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογίας, ταχέως αναπτυσσόμενο, οπότε η μελέτη και η έρευνα πάνω σε αυτό είναι απαραίτητη με βάση τις απαιτήσεις της ασφάλειας στις σύγχρονες μετακινήσεις. Ακολούθως 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.

Επιπλέον, μελέτη θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί αν τα πειράματα επαναλαμβάνονταν, αλλά να ήταν από διαφορετικό υλικό. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιο υλικό που θα έφτανε σε κατάρρευση με διαφορετικό τρόπο. Επίσης, αλλαγές θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και στη μορφή και το μέγεθος της διατομής αλλά και στη ραφή της συγκόλλησης η οποία αστόχησε σε μία από τις περιπτώσεις. Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να παραλείψουμε ίσως τον πιο σημαντικό παράγοντα που είναι οι ίδιες οι ατέλειες των δοκιμίων.

## Βιβλιογραφία

- Μάμαλης Γ. Α., Κατεργασίες των υλικών Ι, Αθήνα 1998, εκδόσεις ΕΜΠ.
- Μανωλάκος Δ., Σημειώσεις του μαθήματος: Κατεργασίες Ι, 5ου εξαμήνου Σχολής Μηχαν. Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Abramowicz W., Jones N., Dynamic axial crushing of square tubes., 1984, *Int. J. Impact Engng* 2,263
- Alghamdi A.A.A., Collapsible impact energy absorbers: an overview,2001, *Thin-Walled Structures* 39, 189–213.
- Alghamdi AAA. Design of simple collapsible energy absorber, Master of Science Thesis. Jeddah, Saudi Arabia: College of Engineering, King Abdulaziz University, 1991.
- Carney III JF, Veillette JR. Impact response and energy characteristics of stiffened metallic tubes. In: Davies G, Morton J, editors. Structural impact and crashworthiness. New York: Elsevier, 1984:564–75.
- G.M. Nagel, D.P. Thambiratnam, Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, School of Civil Engineering, Queensland University of Technology, Australia, 2005
- Johnson W, Reid SR. Metallic energy dissipating systems. *Appl Mech Rev* 1978;31(3):277–88.
- Johnson W, Walton A. An experimental investigation of the energy dissipation of a number of car bumpers under quasi-static lateral loads. *Int J Impact Eng* 1983;1(3):301–8.
- Johnson W, Walton A. Protection of car occupants in frontal impacts with heavy lorries: frontal structures. *Int J Impact Eng* 1983;1(2): 111–23.
- Johnson W. και. Mamalis A. G, *Crashworthiness of Vehicles*. Mechanical Engineering Publications, London, 1978
- Jones N. Recent studies in the dynamic plastic behavior of structures. *Appl Mech Rev* 1989;42 (4):95–115.
- Karagiozova D, Jones N. Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact-II: structural response. *Int J Impact Eng* 2004;30(2):167–92.
- Karbhari VM, Chaoling X. Energy absorbing characteristics of circular frustra. *Int J Crash* 2003;8(5):471–9.
- Langseth M, Hopperstad OS. Crashworthiness of aluminium extrusions: validation and numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *Int J Impact Eng* 1999;22(9/10):829–54.

Mamalis A. G., Manolakos D. E., Saigal S., Viegelaahn G. L., Johnson W., 1986, Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers. *Int. J. Mech. Sci.* 28

Mamalis A.G. , Manolakos D.E., Ioannidis M.B., Kostazos P.K. & Hassiotis G., Finite element simulation of the axial collapse of thin-wall square frusta, *International Journal of Crashworthiness, IJ Crash 2001 Vol6 No 2.*

Mamalis AG, Johnson W, Viegelaahn GL. The crumpling of steel thin-walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain-rate: some experimental results. *Int J Mech Sci* 1984;26(11/12):537–47.

Mamalis AG, Johnson W. The quasi-static crumpling of thin-walled circular cylinders and frusta under axial compression. *Int J Mech Sci* 1983;25(9/10):713–32.

Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB. Experimental determination of splitting in axially collapsed thick-walled fibre-reinforced composite frusta. *Thin-Walled Struct* 1997;28(3/4):279–96.

Mamalis AG, Manolakos DE, Saigal S, Viegelaahn G, Johnson W. Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers. *Int J Mech Sci* 1986;28(4):219–29.

Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaahn GL, Johnson W. The modelling of the progressive extensible plastic collapse of thin-wall shells. *Int J Mech Sci* 1988;30(3/4):249–61.

Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaahn GL, Vaxevanidis NM, Johnson W. On the axial collapse of thin-walled PVC conical shells. *Int J Mech Sci* 1986;28(6):323–35.

Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaahn GL. The axial crushing of thin PVC tubes and frusta of square cross-section. *Int J Impact Engng* 1989;8(3):241–64.

Meng Q., Al-Hassani S. T. S, Soden P. S, 1983, Axial crushing of square tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 25

Nagel G.M., Thambiratnam D.P., Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, *Thin-Walled Structures* 43 (2005) 1225–1242.

Olabi A.G., Morris Edmund, Hashmi M.S.J., Metallic tube type energy absorbers: A synopsis, *Thin-Walled Structures* 45 (2007) 706–726.

Reid SR, Reddy TY. Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section. *Int J Mech Sci* 1986;28(9):623–37.

Reid SR. Plastic deformation mechanisms in axially compressed metal tubes used as impact energy absorbers. *Int J Mech Sci* 1993;35(12):1035–52.



S. R. Reid, T. Y. Reddy and M. D. Gray, Static and dynamic axial crushing of foam filled sheet metal tubes. *Int. J. Mech. Sci.* 28, 295-322 (1986).

Saigal S., Johnson W., Mamalis A. G., 1986, The plastic collapse of thin-walled small angle frusta under axial load and energy absorption. Proc. Int. Symp. Intense Dynamic Loading and its Effects, Beijing, China

Wasiowych A, Lozzi A, Griffiths M. Energy absorption for a truckfront bumper bar. *Int J Crashworthiness* 1996;1(3).